

Sergio Sartori

---

## STORIA DELLE MISURE

NELLA SOCIETÀ DAL 1875

Successi, insuccessi e... occasioni perdute

a cura di *Franco Docchio, Michele Gasparetto, Luca Mari*



Pavia University Press

Storia delle misure nella società dal 1875 : successi, insuccessi e...  
occasioni perdute / Sergio Sartori ; a cura di Franco Docchio,  
Michele Gasparetto, Luca Mari. - Pavia : Pavia University Press,  
2014. - XVIII, 277 p. : ill. ; 24 cm.

(Storia della tecnologia italiana. Temi, personaggi e opere)

<http://purl.oclc.org/paviauniversitypress/9788896764947>

ISBN 9788896764930 (brossura)

ISBN 9788896764947 (e-book PDF)

© 2014 Pavia University Press

ISBN: 978-88-96764-94-7

Publicato con licenza Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International

In copertina: *Prototipo in platino-iridio del metro*

Fonte: NIST (National Institute of Standards and Technology)

Prima edizione: dicembre 2014

Editore: Pavia University Press – Edizioni dell'Università degli Studi di Pavia

Via Luino, 12 – 27100 Pavia – Italia < <http://www.paviauniversitypress.it> >

«[...] lo Stato ha legislazione esclusiva nelle seguenti materie:  
[...] pesi, misure e determinazione del tempo [...]  
Sono materie di legislazione concorrente quelle relative a: [...]  
ricerca scientifica e tecnologica e sostegno dell'innovazione  
per i settori produttivi [...]»

Costituzione Italiana, articolo 117  
(modificato dalla legge costituzionale n. 3 del 2001)

Il Volume è stato realizzato con la sponsorizzazione della Conferenza per l'Ingegneria (CopI), dell'Associazione Gruppo Misure Elettriche ed Elettroniche (GMEE), della Società Affidabilità & Tecnologie (A&T srl) di Torino.



## INDICE

Premessa.....	IX
La collana Storia della Tecnologia Italiana.....	XI
Prefazione.....	XIII
Presentazione.....	XVII
<b>Introduzione: metodo e scelte.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Genesi e sviluppo della metrologia moderna.....</b>	<b>5</b>
1.1. Definizione di metrologia.....	5
1.2. Gli antefatti e la nascita della metrologia moderna.....	6
1.3. Perché servono due anni di lavoro?.....	9
<i>Le difficoltà della Francia.....</i>	<i>9</i>
<i>I problemi della Gran Bretagna.....</i>	<i>10</i>
<i>Gli USA e la dottrina Monroe.....</i>	<i>11</i>
<i>Crescono Germania e Giappone.....</i>	<i>11</i>
<i>I colossi dai piedi d'argilla.....</i>	<i>12</i>
1.4. Contenuti, peculiarità e contraddizioni della Convenzione del Metro.....	12
<i>I contenuti.....</i>	<i>13</i>
<i>Le peculiarità.....</i>	<i>15</i>
<i>I condizionamenti.....</i>	<i>16</i>
<i>Le contraddizioni.....</i>	<i>18</i>
<i>I problemi.....</i>	<i>21</i>
<i>Le conseguenze.....</i>	<i>24</i>
1.5. La difficile adolescenza.....	27
<i>Il contesto.....</i>	<i>27</i>
<i>Le azioni.....</i>	<i>31</i>
<i>L'unità di tempo.....</i>	<i>36</i>
<i>Le aziende.....</i>	<i>38</i>
1.6. Si afferma un nuovo paradigma.....	40
<i>Da una giustizia perfetta a soluzioni più giuste.....</i>	<i>41</i>
<i>Dall'universalità al consenso; dalla razionalità alla continuità.....</i>	<i>43</i>
<i>I dilemmi della chimica.....</i>	<i>45</i>
<i>Il travaglio degli elettricisti.....</i>	<i>49</i>

<i>Il contestato paradigma della biologia</i> .....	49
<i>Difetti del paradigma del consenso</i> .....	50
<i>L'altra faccia della medaglia: i problemi da risolvere</i> .....	51
<i>La Convenzione risolve i problemi</i> .....	55
<i>La Convenzione nel contesto scientifico</i> .....	55
1.7. Percorsi indipendenti?.....	59
<i>Il percorso della chimica</i> .....	59
<i>Il percorso dell'ingegneria elettrica</i> .....	59
<i>Il percorso degli Istituti Metrologici Nazionali</i> .....	60
<i>Università e industria</i> .....	60
<i>Nascita della fotometria</i> .....	61
<i>Effetti positivi della molteplicità di percorsi</i> .....	61
<b>2. La tormentata giovinezza:</b>	
<b>dall'inizio del XX secolo al 1939</b> .....	63
2.1. Introduzione al nuovo secolo.....	63
<i>Il secolo delle ideologie</i> .....	64
<i>Ideologie, scienza e politica</i> .....	65
2.2. Le relazioni internazionali fino al 1913.....	67
2.3. Le rivoluzioni scientifiche e la metrologia intorno al 1900.....	69
<i>La rivoluzione scientifica</i> .....	69
<i>Metrologia della CGPM contro corrente</i> .....	73
<i>Il pragmatismo metrologico</i> .....	76
<i>Una massa o tante masse?</i> .....	77
<i>Perché la CM è controcorrente?</i> .....	80
<i>La cultura delle misure nelle università e nelle aziende</i> .....	83
2.4. Le difficoltà e i lunghi silenzi della CGPM: dalla IV alla VII CGPM.....	89
<i>La IV CGPM</i> .....	89
<i>Venti di guerra nella V CGPM?</i> .....	89
<i>La VI CGPM nell'immediato dopoguerra</i> .....	96
<i>La VII CGPM abbozza l'inizio di una svolta</i> .....	98
<i>Motivazioni del tentativo di rilancio</i> .....	99
2.5. Nel 1933 la Conferenza Generale tenta il rilancio.....	103
<i>Il quadro internazionale</i> .....	103
<i>Entra la fotometria con i suoi prototipi</i> .....	106
<i>Il problema della misura di eventi sensoriali</i> .....	109
<i>Una prima stabilizzazione delle unità e dei campioni elettromagnetici</i> .....	111
2.6. Nuove strategie?.....	115

2.7. Nuovi istituti metrologici elettrici nazionali.....	117
<i>I modelli adottati per la realizzazione degli IMN nel XX secolo.....</i>	118
2.8. L'inizio dell'egemonia tecnica e scientifica degli USA e il ruolo dell'URSS.....	123
<i>Ritorno sulla scena internazionale degli USA e loro espansione.....</i>	124
<i>Il ruolo dell'URSS nella metrologia.....</i>	126
2.9. È scienza la metrologia della CM prima del 1946?.....	128
<i>Posizione della CGPM nella prima metà del XX secolo.....</i>	130
<i>La strategia del CIPM.....</i>	131
<i>La situazione del BIPM alla vigilia della II guerra mondiale.....</i>	133
<b>3. Maturità, trionfi e lento declino:</b>	
<b>dal 1945 alla nascita degli organismi metrologici regionali.....</b>	139
3.1. Il CIPM nel 1945 e 1946 disegna il nuovo sistema di unità.....	139
3.2. La contestata definizione dell'ampere: cambia il paradigma.....	143
<i>La reazione italiana alla definizione dell'ampere.....</i>	145
3.3. Alternative alla definizione dell'ampere?.....	147
3.4. La nuova definizione della candela: cambia la natura del riferimento.....	148
3.5. La IX CGPM, 1948, tenta di recuperare il tempo perduto.....	150
<i>Guerra e contrasti non evocati.....</i>	151
<i>Le risoluzioni scientifiche.....</i>	153
<i>La riforma nascosta?.....</i>	156
3.6. Il mondo, e la metrologia, dopo le guerre.....	157
<i>Dal 1946 al 1953. La IX CGPM.....</i>	158
<i>I dieci anni di Chruščëv e le CGPM del 1954 e del 1963.....</i>	162
<i>La distensione dal 1964 al 1979.....</i>	169
<i>La seconda guerra fredda dal 1979 al 1985.....</i>	181
<i>La nuova distensione dal 1985 al 1989.....</i>	186
3.7. Il rapporto tra crisi della metrologia e crisi della politica e dell'economia.....	187
<i>Genesi, sviluppo e crisi del sistema di governo della politica e dell'economia mondiale.....</i>	188
<i>Genesi, sviluppo e crisi del microsistema di governo della metrologia mondiale.....</i>	192
3.8. La rivoluzione epistemologica.....	194
<i>Una riforma decisa da pochi?.....</i>	196
3.9. Nascono nuovi Istituti Metrologici Nazionali.....	198
<i>1944: in Argentina l'INTI si fa carico della metrologia industriale.....</i>	201
<i>15 agosto 1947: l'India ottiene l'indipendenza e subito fonda il NPLI.....</i>	203
<i>1950: è la volta di Israele.....</i>	204
<i>1951: il Canada attiva la ricerca in metrologia.....</i>	204
<i>1955: in Cina viene fondato il NIM.....</i>	204

## INDICE

3.10. La frattura: conseguenza della “rivolta” del 1968?	205
<i>I nuovi temi di ricerca metrologica</i>	206
<i>La frattura in Europa</i>	206
<i>La frattura europea contagia il resto del mondo</i>	209
<b>4. La rinascita nel nome della globalizzazione dei mercati</b>	211
4.1. Nuove strategie della Conferenza Generale	211
<i>La Conferenza Generale tra il 1989 e il 1994</i>	211
<i>La svolta “politica” nel 1995</i>	211
<i>L’Operazione MRA</i>	214
<i>Operazione Membri Associati</i>	224
<i>Operazione Joint Committees</i>	225
<i>Operazione Marketing</i>	229
<i>Posizione del CIPM sui campioni cosiddetti intrinseci</i>	234
4.2. La metrologia nei Paesi in via di sviluppo	235
<b>5. Un nuovo futuro o un cambiamento di facciata?</b>	237
5.1. Sulla scelta delle sette grandezze di base e delle loro unità di misura	237
5.2. La nuova proposta in sintesi	240
<i>Vantaggi scientifici della proposta</i>	241
<i>Effetti collaterali</i>	243
5.3. Un problema inquietante	245
5.4. Esistono alternative?	247
<b>6. Considerazioni conclusive</b>	251
6.1. Il tormentato percorso della Convenzione del Metro dalle origini al 2011	251
6.2. Possibili percorsi futuri	255
<i>Internet e la metrologia</i>	255
<i>La medicina e la metrologia</i>	256
<i>La metrologia in biologia</i>	257
<i>Il software metrologico e l’esempio delle macchine di misura a coordinate</i>	260
6.3. In conclusione	262
Appendice: I documenti tecnici di riferimento	263
Sigle utilizzate e loro significato	267
Indice dei nomi	271
I curatori	275
Abstract in English	277

Sergio Sartori è scomparso due anni fa, determinando una grave perdita per la metrologia italiana.

Laureato in Ingegneria elettronica a Torino, è stato Direttore dell'Istituto di Metrologia "Gustavo Colonnetti" dal '95 al '98, Professore di Misure Elettriche al Politecnico di Torino, fondatore e Direttore fino al 2010 della rivista «Tutto\_Misure» e ha seguito attentamente tutte le attività dei metrologi italiani, che, per oltre 30 anni, sono state presentate e discusse nelle "Giornate della Misurazione". Sergio Sartori era uomo colto, mite, sempre disponibile al colloquio e aperto verso nuovi orizzonti. Sono particolarmente lieto che veda la luce quest'opera, che ha trovato in lui l'Autore più congeniale.

La trattazione comincia dal 1875, data di nascita della Metrologia ufficiale internazionale, quando rappresentanti di 17 Paesi firmarono la Convenzione del Metro dopo cinque anni di discussioni preparatorie, durante i quali l'Europa subì traumi politici importanti. È una storia affascinante, che dimostra come la definizione e l'adozione delle Unità, la realizzazione e la custodia dei Campioni fossero strettamente legati alla politica.

Dalla Convenzione nasce il *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) con sede a Parigi, gestito dalla Conferenza Generale dei Pesi e della Misure (CGPM, ne sono state tenute finora 24) e dal Comitato Internazionale dei Pesi e delle Misure (CIPM): una struttura piuttosto complicata alla quale si affiancano ben presto molti Istituti Nazionali di Ricerca Metrologica. Laboriosamente questi organi decidono l'aggiunta al Sistema Internazionale di nuove Grandezze Fondamentali e l'aggiornamento dei Campioni.

È fin troppo ovvio ricordare l'importanza che la metrologia moderna ha avuto nello sviluppo delle tecnologie e dell'industria. La conquista dell'intercambiabilità ha reso possibili le attuali condizioni di vita nei Paesi industrializzati, ma purtroppo anche l'uccisione di milioni di persone nelle grandi e piccole guerre.

Fra le statuizioni degli organi metrologici e la loro effettiva messa in pratica, peraltro, c'è sempre stato un grande divario. Basti pensare ai Paesi che aderiscono alla Conferenza (praticamente tutti), ma non adottano il SI; succede an-

## PREMESSA

che che in ambienti colti e semi-tecnici non siano seguite le regole di scrittura che del Sistema fanno parte, oppure che unità non SI siano “transitoriamente tollerate” in Paesi dove il SI è stato adottato per legge.

Gli argomenti trattati nell’opera sono affrontati da Sergio Sartori con profonda competenza e con grande eleganza. Credo che, nonostante la complessità del tema, la lettura possa essere lieve e agevole, anche per i non totalmente esperti della materia. È un peccato che Sergio Sartori non sia più oggi con noi per poter seguire gli ultimi sviluppi della metrologia e i temi trattati dalle ultime CGPM. Avrebbe continuato a divertirsi molto.

*Presidente della Conferenza per l’Ingegneria (CopI)*  
Fabrizio Micari

La collana *Storia della Tecnologia Italiana* promossa nel 2007 dall'allora Conferenza dei Presidi delle Facoltà di Ingegneria Italiane per la promozione e la diffusione della cultura storico-scientifico-tecnica mira a fornire, a tutti coloro che sono interessati alla tecnologia e alla scienza applicata, una panoramica dell'evoluzione nel campo della ricerca, delle applicazioni, dello sviluppo industriale, dell'insegnamento universitario e dell'impatto sulla società italiana.

Il periodo trattato è quello che va dalla rivoluzione industriale ai nostri giorni. Ovviamente qualche richiamo a precedenti periodi storici può essere incluso, ma l'attenzione è rivolta alla comprensione di quanto sta evolvendo. Quindi la trattazione riguarda il passato e arriva ai nostri giorni; le prospettive future sono prese in considerazione, ma senza l'obiettivo di formulare scenari futuri che risultano quasi sempre smentiti dalla realtà.

L'opera, che copre una tematica molto vasta, è stata concepita rifacendosi a una struttura a due livelli. Accanto alle varie branche nelle quali si è progressivamente articolata l'ingegneria, storicamente inserite nei curricula universitari, si è previsto lo sviluppo di monografie su tematiche più specifiche, per esempio relative a importanti realizzazioni ingegneristiche (quali quelle di Luigi Cosenza, Riccardo Morandi, Pier Luigi Nervi, Giuseppe Nicolosi, ecc. limitandosi al settore civile), oppure dedicate alla figura di eminenti ingegneri o padri dell'ingegneria, che hanno influenzato con la loro "teoria" e la loro "pratica" l'universo del vivere civile, con riferimento alla loro azione nelle scuole di ingegneria (per esempio Francesco Brioschi, fondatore del Politecnico di Milano) o/e alla pratica professionale (per esempio Giuseppe Colombo o Daniele Donghi, rispettivamente autore del primo manuale dell'Ingegnere – 1877-78 – e fautore di quello dell'Architetto – tra il 1906 e il 1925).

Le prime tre opere della collana, tutte del primo livello, sono state dedicate alla "Storia della Tecnica Elettrica" (2009), alla "Storia delle Telecomunicazioni" (2011) e alla "Storia della Meccanica" (2014), corsi di laurea storici delle Facoltà di Ingegneria.

Il primo volume del secondo livello *Temì, Personaggi e Opere* è quello qui presentato: "Storia delle misure nella società dal 1875: successi, insuccessi e... oc-

## PREMESSA

casioni perdute”. È l’opera postuma di uno dei protagonisti di questa materia a livello mondiale dell’ultimo mezzo secolo: Sergio Sartori. L’attività svolta e i successi ottenuti nella metrologia internazionale sono presentati con una naturale facilità ed efficacia comunicativa. È quindi con entusiasmo che abbiamo accolto la proposta di coloro che, allievi e colleghi di Sartori, hanno curato con dedito rigore le bozze di una storia che il maestro aveva preparato.

Siamo grati ai curatori Franco Docchio, Michele Gasparetto e Luca Mari, grazie al cui contributo è stato possibile portare a termine la realizzazione di questa importante testimonianza. Un ringraziamento particolare va ad Alessandra Setti per la impareggiabile e qualificata cura della veste editoriale di questa nuova serie e ad Annalisa Doneda con lo staff della Pavia University Press.

*Presidente della Commissione sulla Storia dell’Ingegneria*  
Virginio Cantoni

## PREFAZIONE

---

Sergio Sartori, durante la sua carriera professionale prima come ricercatore e poi come direttore dell'Istituto metrologico Gustavo Colonnetti, è stato un attivo e brillante studioso della metrologia, come dimostrato dalle sue numerose pubblicazioni scientifiche. Accanto a questa sua capacità ha però sempre sviluppato la ricerca e la divulgazione di argomenti tecnici o di approfondimento che esulavano dallo stretto adempimento del suo compito professionale. In questo era aiutato da una profonda cultura personale e dalla fortuna di aver frequentato già da giovane i fondatori della ricerca, in ambito italiano ma non solo, nell'ingegneria elettrica e nelle misure.

Questo volume descrive la storia della Convenzione del Metro, e quindi del progressivo affermarsi della cultura della standardizzazione metrologica. È un perfetto compendio delle qualità di Sergio: rigoroso e completo dal punto di vista tecnico-scientifico, ma anche con larghe aperture alle condizioni storiche e culturali che hanno indotto studiosi e governi ad affrontare la sfida della Convenzione del Metro e che hanno consentito, sia pure con pause e difficoltà, alla cultura metrologica di penetrare profondamente prima nelle leggi e poi nelle prassi industriali e commerciali di tutte le nazioni.

Purtroppo quest'opera, avviata, come tutti i progetti di Sergio, con passione e tenacia, è stata interrotta dalla sua prematura scomparsa e non ha potuto vedere la luce lui presente. La sua famiglia e i suoi amici, e noi siamo fra quelli, hanno deciso di non lasciare che tale lavoro si disperdesse. Abbiamo ritenuto infatti che le informazioni e gli insegnamenti in esso contenuti potessero essere di grande aiuto non solo ai giovani studiosi delle misure, ma anche a un gran numero di professionisti e di appassionati della nostra storia scientifica. Quindi ci siamo presi l'impegno di portare a pubblicazione il materiale lasciato da Sergio.

La lettura delle bozze, quasi ovunque complete, ha posto a noi curatori un dilemma: rivedere sistematicamente il testo completandolo, o limitarci a intervenire sulle parti ritenute importanti ma delle quali negli appunti erano solo indicati i tratti essenziali. La decisione presa è stata di non intervenire, se non in maniera minimale, sulle parti completate, di completare le parti accennate, di tralasciare la scrittura delle parti per le quali l'inevitabile differenza di stile e la

## PREFAZIONE

non conoscenza di quello che avrebbe voluto scrivere Sergio avrebbero potuto incrinare l'unitarietà di stile del volume.

Siamo convinti che il risultato, dato lo stato di avanzamento dello scritto originario, raggiunga gli obiettivi che l'autore si era proposto, e cioè d'indurre i lettori a svolgere i propri compiti tecnici o scientifici nel campo delle misure perseguendo il rigore ma tenendo sempre presenti anche le ricadute umane ed etiche delle scelte effettuate.

*I curatori del volume*

Franco Docchio, Michele Gasparetto, Luca Mari

## BREVE NOTA BIOGRAFICA DELL'AUTORE

Sergio Sartori si è laureato nel 1961 al Politecnico di Torino in Ingegneria elettronica. Nel 1963 ha iniziato l'attività di ricerca nel Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). Nel 1975, vinto sia il concorso a Cattedra di Misure Elettriche sia il concorso a Dirigente di Ricerca nel CNR, ha preferito rimanere nel CNR, conservando fino al 1986 l'incarico d'insegnamento di Misure Elettriche al Politecnico di Torino.

Dal 1995 al 1998 è stato Direttore dell'Istituto di Metrologia "Gustavo Colonnetti" del CNR e dal 1994 al 1997 rappresentante del MURST nel Consiglio di Amministrazione dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale "Galileo Ferraris".

Dal 1980 al 1985 è stato consulente dell'UNESCO.

Dal 1984 al 1988 è stato esperto consulente dell'Ufficio per la Metrologia Applicata nella CEE.

Dal 1991 al 1998 ha rappresentato il CNR nel Consiglio Generale dell'International Measurement Confederation (IMEKO).

Fondatore del Gruppo Italiano di Studio sulle Macchine di Misura a Coordinate (CMM Club), ne è stato Presidente dal 1994 al 1996.

Dal 1997 è stato membro del Comitato Fondatore dell'European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN), del quale è stato vicepresidente dal 1997 al 1999.

Dal 1999 al 2007 è stato presidente del Comitato Organizzatore del Congresso Biennale "Metrologia & Qualità", da lui fondato.

Dal 1999 al 2009 è stato Direttore Responsabile della Rivista «Tutto\_Misure», da lui fondata.

Dal 2004 è stato socio dell'Associazione Italiana Gruppo Misure Elettriche ed Elettroniche (GMEE).

È stato autore di oltre centoquaranta articoli scientifici e di tre libri (incluso il presente), nei settori delle misure elettriche, termiche e meccaniche, della fisica dello stato solido, dell'interferometria con laser, della modellistica di sistemi meccanici, dell'optoelettronica, dell'informatica, dell'epistemologia, della qualità nei sistemi di produzione.





## PRESENTAZIONE

---

La storia della moderna scienza e tecnica delle misure, a partire dalla data della firma della Convenzione del Metro (1875), è fortemente influenzata dalla storia politica, economica, culturale, scientifica e tecnologica. L'obiettivo di questo libro è di presentare la metrologia di oggi come il risultato di scelte, compromessi, aggiustamenti, conflitti, non autonomi ma sovente condizionati dalle storie che in parallelo si svolgevano, e a loro volta condizionanti tali storie.

Ho avuto il privilegio di vivere in prima persona la storia della metrologia degli ultimi cinquant'anni e di conoscere i protagonisti di almeno trent'anni di storia precedente. Di molti accadimenti sono stato testimone e di alcuni ho contribuito a formulare scelte oggi consolidate. Ho perciò considerato un dovere mettere a disposizione il bagaglio di conoscenze acquisito e le testimonianze che posso fornire. Così è nato un libro che si rivolge a un insieme molto ampio di potenziali lettori. In primo piano sono i tecnici e i ricercatori dei laboratori e dei reparti di controllo di qualità delle aziende che desiderino avere la consapevolezza degli strumenti, concettuali e pratici, che utilizzano quando eseguono o fanno eseguire misure e da queste traggono gli elementi per prendere decisioni, e vogliono anche disporre di informazioni corrette e complete sul linguaggio da adottare nella comunicazione con l'esterno.

Ho avuto molto a cuore il difficile compito degli insegnanti, di ogni ordine di scuola, dalle elementari ai corsi di dottorato di ricerca, oggi pericolosamente maltrattati dai decisori politici. In una società che tende alla specializzazione, che ha grandi difficoltà a collegare tra loro scienze della natura e scienze umane, mi ha affascinato l'idea di un discorso sulla metrologia, scienza per propria natura interdisciplinare per eccellenza, intrecciato a un discorso sulla storia. Se sono riuscito a suggerire spunti di riflessione, a invogliare un tecnico alla lettura di testi storici e di saggi sulle idee e sulle ideologie, lo devo agli ottimi insegnanti che ho avuto lungo tutto il mio percorso scolastico. A essi, e ai loro colleghi di oggi e di domani, desidero dedicare questo libro, convinto che il futuro della nostra società è affidato alla loro dedizione.

I cittadini dei Paesi industrializzati compiono, o fanno compiere da altri per le proprie necessità, in media alcune decine di misure al giorno. Molti possono

pertanto trovare in questo libro spunti utili per meglio integrarsi nella modernità che quotidianamente li costringe ad avvalersi, con poca consapevolezza, di strumenti di misura. Questi numerosi potenziali lettori mi hanno dettato le regole nella scelta del linguaggio: discorsivo, praticamente senza formule e senza il ricorso al gergo degli specialisti. Ciò che non risulta comprensibile può tranquillamente essere saltato, senza per questo perdere il filo del ragionamento.

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno aiutato con suggerimenti, critiche, discussioni, anche al di fuori dello specifico contenuto di questo testo. Mi riferisco in particolare ai protagonisti della Giornata della Misurazione, ideata dal professor Mariano Cunietti del Politecnico di Milano: colleghi ricercatori di tutti i settori, epistemologi, studiosi di storia della scienza, logici, storici, sociologi, e molti altri ancora, si sono alternati nelle discussioni sui fondamenti della misurazione in trent'anni di incontri. Tutti hanno contribuito a formare nei partecipanti una cultura interdisciplinare che questo libro ambisce riflettere, anche se inevitabilmente solo in modo molto parziale.

*L'autore del volume*  
Sergio Sartori

Il tentativo qui proposto è di inquadrare lo sviluppo della metrologia, intesa come scienza e pratica della misurazione, nel contemporaneo contesto storico, economico, culturale e sociale. Questo piano ambizioso, compiuto da un metrologo di professione che si diletta anche di storia, ha ovvie limitazioni e ha imposto alcune scelte. La principale limitazione deriva dalla conoscenza non professionale delle storie (politiche, sociali, economiche e culturali) da parte dell'autore; ciò ha comportato l'utilizzo acritico di testi selezionati; al contrario, per la metrologia le fonti sono quelle ufficiali e alcuni contributi sono da ascrivere a esperienze vissute e a ricerche originali.

Ho scelto, come inizio di questa narrazione, il 1875, anno nel quale, ufficialmente e autonomamente per la prima volta nella storia, molte e importanti nazioni decidono di adottare lo stesso sistema di unità di misura e di istituire infrastrutture, comuni e nazionali, per la realizzazione e la distribuzione dei campioni di misura. La storia della metrologia che precede questa data è anch'essa affascinante, perché è storia di idee, di principi, di meravigliose intuizioni. Molti storici della metrologia, della scienza e della tecnologia hanno ampiamente affrontato la storia delle misure dalle origini delle società organizzate ai tempi moderni; citerò alcuni ottimi testi di riferimento ai quali può facilmente accedere chi desidera conoscere ciò che è accaduto prima.

La ragione principale che mi ha indotto a partire dal 1875 è che l'ultimo quarto del XIX secolo e i pochi anni iniziali del secolo successivo sono cruciali per la storia intera del XX secolo<sup>1</sup> e prolungano la loro influenza anche all'inizio del XXI secolo. Pressappoco tutto fu inventato e definito in quegli anni: il pensiero moderno, le grandi ideologie ancora oggi in permanente confronto tra loro, l'organizzazione politica delle nazioni, la definizione delle classi sociali, le tecnologie che governano la vita di tutti noi. Solo lo sviluppo dell'elettronica, dell'informatica e delle comunicazioni ha successivamente prodotto la terza rivoluzione nella società, dopo quella dell'agricoltura e quella delle due fasi della rivoluzione industriale (si veda la Scheda 1). Una quarta rivoluzione potrebbe essere portata dalla genetica e dalle nanotecnologie: ma questo è il futuro.

---

<sup>1</sup> Questa tesi è sostenuta da molti storici e, in particolare, nell'avvincente analisi di Eric J. Hobsbawm in *L'Età degli imperi, 1875-1914*, Laterza, collana Storia e Società, 1987.

### Scheda 1 - La seconda industrializzazione

Mario Silvestri<sup>(\*)</sup> (1919-1994) pone tra il 1870 e il 1890 l'avvio della seconda industrializzazione che «consiste nel connubio fra scienza e tecnologia, fino allora divise da un compartimento stagno». Egli definisce scienza la ricerca logica per via induttiva delle leggi della natura, condotta in modo tale da ridurre al minimo il numero dei postulati con cui poi spiegare per via deduttiva ciò che cade sotto i nostri sensi. Tecnologia invece è lo studio empirico dei fenomeni che non si riesce ancora a collegare con le leggi universali della scienza. Silvestri sostiene, come generalmente condiviso dagli storici della scienza e della tecnologia, che «l'invenzione delle macchine elettriche e delle radio-trasmissioni non aveva potuto prescindere dalla conoscenza prioritaria delle leggi dell'elettromagnetismo [...]. Il matrimonio tra scienza e tecnologia diede un nuovo impulso, impulso tuttora inarrestabile, allo sviluppo industriale nell'ultimo quarto del XIX secolo».

Gli effetti del "matrimonio" si manifestarono in Gran Bretagna verso il 1890, mentre già nel 1870 si era esaurita la spinta della prima industrializzazione. Si ebbero dunque vent'anni di recessione. Non si ebbe recessione in Germania e in USA perché questi due Paesi erano partiti più tardi e continuarono a beneficiare della prima rivoluzione industriale. La Francia, partita poco dopo la Gran Bretagna nel primo processo di industrializzazione, affrontò con lentezza il processo e nel 1870 non aveva ancora esaurito la spinta allo sviluppo; pertanto risentì meno della recessione. In Italia, Russia e Austro-Ungheria le due rivoluzioni si sovrapposero, anche se l'arretratezza dei tre Paesi impedì il completo assorbimento dei vantaggi. D'altronde in questi Paesi l'industria costituiva una componente modesta del prodotto nazionale. Eppure all'inizio della depressione l'ottimismo regnava sovrano. Il presidente degli USA Ulysses S. Grant, nel messaggio inaugurale al Congresso del 1873, affermava: «Poiché il commercio, l'istruzione e la rapida trasformazione del pensiero e della materia, grazie al telefono e al vapore, hanno cambiato ogni cosa, sono propenso a credere che il grande Artefice stia preparando il mondo a diventare una sola nazione, che parli una sola lingua; un fatto che renderà non più necessari eserciti e flotte».

Beato ottimismo! Eserciti e flotte saranno utilizzati dall'Europa e dagli USA nella spartizione del mondo e nel XX secolo nelle due catastrofiche guerre mondiali.

(\*) Fu professore al Politecnico di Milano e titolare della cattedra di impianti nucleari. Appassionato di storia, tra le sue opere ricordiamo: *La decadenza dell'Europa occidentale* (4 voll., 1977-1982), *Cento anni di storia d'Italia, 1861-1961* (1980), *Caporetto* (1984) e *La vittoria disperata* (1991), tutti pubblicati da Rizzoli. Centrati invece sulla questione energetica e, in particolare, sulla dissenata politica dell'apparato pubblico italiano, sono *Il costo della Menzogna: Italia nucleare 1945-1967* (1968) e *Il futuro dell'energia* (1988). In quest'ultima opera, tuttora di grande attualità, Silvestri invita la classe politica italiana (ma anche gli scienziati, i tecnici e tutte le parti sociali) a effettuare, in tema di energia, scelte che affrontino il problematico futuro «guardando agli interessi della nazione anziché della fazione».

Per essere compreso e utilizzato al meglio nella scienza e nella tecnologia, il presente della metrologia richiede dunque di conoscere le scelte che sono state fatte dal 1875 in poi e le ragioni che le hanno dettate.

Ho suddiviso la storia della metrologia in periodi che spesso non coincidono con le scelte fatte dagli storici. Così ho organizzato i capitoli su cinque periodi: dal 1875 alla fine del XIX secolo; la prima metà del XX secolo; gli anni dal 1950 al 1980; l'ultima parte del XX secolo; i primi anni del XXI secolo. Come potrà constatare il lettore che avrà la perseveranza di arrivare alla fine di questa narrazione, a ciascun periodo scelto è intimamente associata una fisionomia particolare dello sviluppo della metrologia, che determina e condiziona gli sviluppi successivi ma a sua volta è determinata e condizionata dalle storie che in parallelo si compiono.



# 1. Genesi e sviluppo della metrologia moderna

---

## 1.1. Definizione di metrologia

La metrologia moderna è un complesso sistema che collega grandezze, unità di misura e campioni, e che si avvale dell'azione coordinata di una rete di istituti metrologici, laboratori accreditati e organismi di ricerca. Assicura la riferibilità<sup>2</sup> delle misure di caratteristiche e proprietà di prodotti e fenomeni tramite l'articolata complessità dei confronti nazionali e internazionali. Permea di sé ogni attività di produzione e di servizio, in particolare quando risulti necessario prendere decisioni, per esempio di conformità o non conformità a specifiche, sulla base di risultati di misure. È anche un sistema che produce innovazione sia mediante lo sviluppo di nuovi mezzi e metodi per le misure, sia condizionando le scienze con la valutazione dei modelli nel continuo confronto con i risultati degli esperimenti. È inoltre il sistema che garantisce la fede pubblica negli scambi commerciali e, nei suoi più recenti sviluppi, si fa carico della valutazione delle condizioni dell'ambiente, dell'indagine sullo stato di salute degli individui e della collettività degli organismi viventi. Un sistema di tali dimensioni e di tale complessità non nasce da un giorno all'altro: è il risultato di numerosi tasselli, ciascuno dei quali è il frutto dell'ambiente sociale e intellettuale nel quale si sviluppa.

Per capire efficacia e limiti della metrologia moderna, con l'obiettivo di sfruttare al massimo le opportunità che essa offre, è utile ripercorrere criticamente le tappe più recenti della sua evoluzione, anche per acquisire consapevo-

---

<sup>2</sup> Il *Vocabolario Internazionale di Metrologia* (VIM), edizione 2007, così definisce la riferibilità metrologica: «proprietà di un risultato di misura secondo la quale esso è correlato a un riferimento [campione di misura nazionale o internazionale] attraverso una documentata catena ininterrotta di tarature, ciascuna delle quali contribuisce all'incertezza di misura». Si tornerà più avanti su questo delicato argomento. Sempre secondo il VIM, la taratura è «l'operazione, eseguita in condizioni specificate, che, in una prima fase, stabilisce una relazione tra i valori di una grandezza, con le rispettive incertezze di misura, forniti da campioni di misura, e le corrispondenti indicazioni, comprensive delle incertezze di misura associate, e, in una seconda fase, usa queste informazioni per stabilire una relazione che consente di ottenere un risultato di misura a partire da un'indicazione».

lezza di come si è stabilizzata quella unità di linguaggio, di fondamenti e metodi che fa della metrologia la disciplina trasversale alle altre per eccellenza.

## 1.2. Gli antefatti e la nascita della metrologia moderna

Conviene collocare la data di nascita della metrologia moderna al 20 maggio 1875, quando i plenipotenziari di 17 Paesi firmarono la convenzione internazionale nota come Convenzione del Metro (CM). Sono i francesi a prendere l'iniziativa, sollecitati a ciò fin dal 1867 dalla Conferenza Internazionale di Geodesia che, da Berlino ove si riunisce, sottolinea l'importanza di un sistema unificato di pesi e di misure in Europa e propone la costituzione di una commissione internazionale. L'Accademia delle Scienze di Parigi e il *Bureau des longitudes* (tuttora esistente, URL:<<http://www.bureau-de-longitudes.fr>>) attirano l'attenzione del governo francese sull'argomento; danno analogo rilievo al problema l'Accademia di San Pietroburgo e la Commissione inglese dei campioni. Dunque la sollecitazione iniziale alla ricerca di un accordo internazionale viene dall'ambiente scientifico europeo, le cui motivazioni sono, ovviamente, scientifiche: l'unificazione faciliterà gli scambi di informazioni, risolverà i problemi di coesistenza di tante unità di misura, in particolare nei settori di ricerca emergenti, semplificherà i raccordi tra le reti geografiche, consentirà alle scienze di fondare un linguaggio comune nella valutazione sperimentale delle teorie della natura.

Il *Bureau des longitudes* rappresenta, in questo quadro, la continuità con i lavori sui pesi e sulle misure voluti dalla Convenzione Nazionale durante la Rivoluzione Francese. Fu creato con legge del 7 Messidoro Anno III (25 giugno 1795); molti dei dieci soci fondatori (Joseph-Louis Lagrange, Pierre-Simon de Laplace, Jérôme de Lalande, Jean-Baptiste Joseph Delambre, Pierre-François-André Méchain, Jean-Dominique Cassini, Louis-Antoine de Bougainville, Jean-Charles de Borda, Jean-Nicolas Buache, Noël-Simon Caroché)<sup>3</sup> appartengono al gruppo dei mitici personaggi che hanno dato vita al sistema metrico decimale.

---

<sup>3</sup> Per brevi notizie biografiche riguardanti i personaggi citati si veda la Scheda 2. Ampie notizie biografiche sugli scienziati e sulle personalità di alta cultura possono essere trovate nei tre volumi di *Scienziati e tecnologi dalle origini al 1875*, Mondadori, Milano, 1975.

## Scheda 2 - Brevi notizie biografiche sui fondatori del *Bureau des longitudes*

- *Giuseppe Luigi Lagrangia* o *Lagrange* (Torino 1736 - Parigi 1813), presidente del Bureau des Longitudes alla sua fondazione, venne nominato professore di geometria alla Scuola di artiglieria del capoluogo piemontese all'età di appena diciannove anni. Lo stesso anno, in una corrispondenza con Eulero, espose le sue idee sul calcolo delle variazioni. Nel 1758 partecipò alla fondazione di una società scientifica, che si sarebbe poi trasformata nell'Accademia reale delle Scienze di Torino. Nel 1759 fu eletto membro dell'Accademia di Berlino. Nel 1766 venne chiamato da Federico II di Prussia a succedere a Eulero come presidente della classe di scienze dell'Accademia di Berlino. Nel 1786, su invito del re Luigi XVI di Francia, si trasferì a Parigi per entrare a far parte dell'Académie des Sciences. Nel 1792 divenne presidente della commissione cui era stato affidato il compito di fissare un nuovo sistema di pesi e misure, il sistema metrico decimale dal quale avrà origine l'odierno Sistema Internazionale. Dal 1797 insegnò all'École Polytechnique appena fondata. Con l'affermarsi al potere di Napoleone Bonaparte la sua posizione si consolidò: ricevette la Legione d'Onore, venne eletto al Senato di Francia e nominato conte dell'impero.

- *Pierre-Simon marchese di Laplace* (Beaumont-en-Auge 1749 - Parigi 1827), è stato un matematico, fisico e astronomo francese. Fu uno dei principali scienziati nel periodo napoleonico, offrendo fondamentali contributi a vari campi della matematica, dell'astronomia e della teoria della probabilità e uno degli scienziati più influenti al suo tempo, anche per il suo contributo all'affermazione del determinismo. Laplace, infatti, diede la svolta finale all'astronomia matematica riassumendo ed estendendo il lavoro dei suoi predecessori nella sua opera in cinque volumi *Mécanique Céleste* (Meccanica celeste) (1799-1825). Questo capolavoro trasformò lo studio geometrico della meccanica sviluppato da Newton in quello basato sull'analisi matematica. Nel 1799 fu nominato ministro degli interni da Napoleone che nel 1806 gli conferì il titolo di conte dell'Impero. Fu nominato marchese nel 1817, dopo la restaurazione dei Borboni.

- *Joseph-Jérôme Lefrançais de Lalande* (1732-1807) studiò al collegio dei gesuiti di Lione. A Parigi per studiare diritto, conobbe l'astronomo Joseph-Nicolas Delisle (1688-1768) del quale divenne presto allievo e assistente. Nel 1751 si recò a Berlino. Qui, in contemporanea con Nicolas-Louis de Lacaille (1713-1762, astronomo francese noto per il suo catalogo di oltre mille stelle del cielo australe, incaricato dall'Accademia delle Scienze di Parigi di guidare la spedizione al Capo di Buona Speranza per la determinazione della parallasse lunare e solare e per la misura dell'arco di meridiano terrestre africano) nell'opposto emisfero, Lalande misurò la posizione della Luna per determinarne la parallasse e quindi la distanza dalla Terra. Tornato a Parigi nel 1753, divenne membro dell'Académie Royale des Sciences. Applicò metodi numerici di soluzione del "problema dei tre corpi" alla corretta determinazione del ritorno della cometa periodica individuata da Edmond Halley (1656-1742).

## Scheda 2 (continuazione)

Divenne direttore dell'Osservatorio astronomico di Parigi nel 1768. La sua immensa produzione comprende, oltre all'*Astronomie* (Parigi, 1764), più volte ristampata, fortunate opere di divulgazione dell'astronomia.

- *Jean Baptiste Joseph, chevalier Delambre* (1749-1822, matematico e astronomo francese).

A lui e Pierre-François-André Méchain (1744-1804, astronomo e topologo francese) fu affidata la spedizione per misurare la lunghezza dell'arco di meridiano terrestre da Dunkerque a Barcellona, a supporto della definizione del metro come 1/10 000 000 della distanza dal Polo Nord all'Equatore. La spedizione, iniziata nel 1792, si concluse nel 1798 e i risultati furono presentati a una conferenza internazionale a Parigi nel 1799.

- *Jean Dominique Cassini IV* (1748-1845) fu l'ultimo di una famiglia di astronomi, tutti membri dell'*Académie des Sciences*, salvo il capostipite Giovanni Domenico Cassini I, nato a Perinaldo, nella contea di Nizza, nel 1672. Al capostipite, il più famoso della dinastia, è intitolata l'attuale missione Cassini-Huygens per lo studio di Saturno e il sistema delle sue decine di lune.

- *Louis Antoine, comte de Bougainville* (1729-1811), navigatore e botanico francese.

- *Jean-Charles de Borda* (1733-1799), navigatore e astronomo francese, fu tra i sostenitori della decimalizzazione delle unità di misura.

- *Jean-Nicolas Buache* (1741-1825), geografo e cartografo francese.

- *Noël Simon Caroché* (1740 circa-1813), artista e fabbricante di strumenti francese.

Napoleone III approva, con decreto dell'1 settembre 1869, la proposta del Ministro dell'Agricoltura e del Commercio: costituire una commissione scientifica internazionale con gli obiettivi di promuovere la diffusione dell'uso di misure metriche, facilitare gli scambi e i confronti di misure tra gli Stati e procedere alla realizzazione di un "metro internazionale" nel quale gli estremi della lunghezza di riferimento siano individuati da incisioni parallele<sup>4</sup>. Il 16 novembre dello stesso anno il governo francese invita numerosi Stati a nominare propri rappresentanti in tale commissione: rispondono favorevolmente l'Austria-Ungheria, la Baviera, il Belgio, il Cile, la Colombia, l'Ecuador, la Spagna, gli Stati Romani, gli Stati Uniti d'America, la Gran Bretagna, la Grecia, l'Italia, il Nicaragua, i Paesi Bassi, il Perù, il Portogallo, la Prussia e la Confederazione della Germania del Nord, la Russia, il San Salvador, la Svezia e la Norvegia, la

<sup>4</sup> Il metro degli archivi del 1793 era realizzato con una barra di rame: la lunghezza di 1 m era materializzata dalla distanza delle facce alle estremità della barra. Il metro proposto nel 1869 è chiamato metro "a tratti", per distinguere la tecnologia usata da quella seguita per la realizzazione del metro "a facce". Presso l'Accademia delle Scienze di Torino è conservato un interessante campione di lunghezza degli inizi del XIX secolo, contemporaneamente usabile come campione a facce e campione a tratti.

Svizzera, la Turchia, il Venezuela e il Württemberg. L'interesse all'unificazione non è soltanto strettamente europeo: si allarga anche a molti Stati generati dall'espansione europea nel nuovo mondo scoperto da Cristoforo Colombo.

Si noti che, pur continuando a parlare di commissione scientifica, la direzione delle operazioni è assunta dall'agricoltura e dal commercio; coinvolti sono gli Stati, non le Accademie.

La Commissione internazionale del metro<sup>5</sup> si riunisce a Parigi dall'8 al 13 agosto 1870, traccia le linee organizzative e strutturali della convenzione e affida a un Comitato, prevalentemente scientifico, lo studio delle questioni di carattere tecnico. Il Comitato si riunisce a Parigi dal 2 al 14 aprile del 1872; segue immediata una seconda riunione della Commissione, dal 24 settembre al 12 ottobre 1872, con la partecipazione dei rappresentanti di una trentina di Paesi, dieci dei quali provenienti dal continente americano. I lavori della Commissione si concludono in maniera positiva con tre decisioni:

- procedere alla fabbricazione di *nuovi prototipi metrici*;
- avviare le procedure per la firma della *Convenzione del Metro (CM)*;
- avviare le procedure per la creazione del *Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)*.

### 1.3. Perché servono due anni di lavoro?

Cosa accade tra l'8 agosto del 1870 e il 24 settembre del 1872, tra la prima e la seconda riunione della Commissione?

#### *Le difficoltà della Francia*

Il 19 luglio del 1870 Napoleone III, dopo il recente trionfo nel plebiscito dell'8 maggio che gli ha portato il consenso di quasi l'80% dei votanti, accetta inspiegabilmente la provocazione del cancelliere prussiano Bismarck e dichiara guerra alla Prussia. Forse intende affermare il proprio prestigio interno con una guerra vittoriosa. Ma l'1 settembre la Francia, militarmente assai più debole e

<sup>5</sup> L'Italia era rappresentata da due illustri scienziati: il gesuita padre Angelo Secchi (1818-1878), considerato il fondatore della spettroscopia astronomica, autore di opere basilari sul connubio della fisica con l'astronomia e inventore di apparecchi scientifici di grande utilità; il fisico Gilberto Govi (1826-1888). L'omonimo grande attore genovese, che sostenne d'essere stato chiamato Gilberto in onore del suo celebre antenato, così lo descrisse nel suo colorito dialetto: «un illustre professò, Senatore del Regno, famoso fixico, insegnante ae cattedre de Turin, de Firenze, de Napoli e de Romma. O l'ha pubblicou ciù de 300 lavori, e o l'ha faeto costrui 14 istrumenti de so invenziòn.»

impreparata della Prussia, subisce la definitiva sconfitta a Sedan; Napoleone III è imprigionato dal vincitore e il 4 settembre in Francia viene proclamata la repubblica. Il 28 gennaio 1871 Parigi capitola e viene firmato l'armistizio generale. Per l'Europa è una data importante perché si delinea la questione tedesca e l'inizio della supremazia della Germania, fatti che porteranno al drammatico periodo dal 1914 al 1945 con la distruzione dell'Europa. La Francia perde l'Alsazia e la Lorena, due ricche province di confine, e nel 1871 affronta una nuova rivoluzione nella capitale che conduce al primo esperimento socialista nella storia: la Comune di Parigi. La Comune vive per meno di cinque mesi e viene stroncata in un bagno di sangue dallo stesso esercito francese.

La crisi francese ha conseguenze anche fuori dai confini nazionali. La caduta di Napoleone III, difensore del Papa e vincitore di Garibaldi a Mentana il 3 settembre del 1867, induce il Governo italiano a procedere con le armi alla presa di Roma. Il 20 settembre del 1870, solo venti giorni dopo la disfatta francese a Sedan, le truppe italiane occupano la futura capitale e pongono definitivamente fine al potere temporale dei Papi.

La Francia, che aveva preso l'iniziativa per la stipula di un accordo internazionale sui pesi e sulle misure, entra in crisi e il suo prestigio internazionale cala nettamente.

### *I problemi della Gran Bretagna*

Anche la Gran Bretagna, all'epoca la maggiore potenza economica mondiale, è in crisi, ma per ragioni sostanzialmente diverse. Lo slancio della rivoluzione industriale, avviata nel Paese all'inizio del XIX secolo ed esportata, sia pure in misura diversa, in tutti i Paesi dell'Europa occidentale e negli Stati Uniti d'America, va esaurendosi. La scienza aveva dato uno scarso contributo diretto allo sviluppo industriale; l'ingegnosità e l'esperienza pratica degli artigiani tecnologici avevano sostenuto lo sforzo dell'innovazione. Alla fine degli anni Sessanta ingegnosità ed esperienza non erano più sufficienti per far continuare il processo di industrializzazione ai tassi di crescita dei decenni precedenti: il genio empirico inglese non era più in grado di sostenere l'innovazione e la classe imprenditoriale tendeva ad atteggiamenti prudenti e a godere del benessere raggiunto. Gli altri Paesi dell'Europa occidentale, Francia e Prussia in particolare, avevano iniziato il processo più tardi e con ritmi meno sostenuti di quelli inglesi: perciò risentirono meno dell'arresto dovuto alla mancanza di metodo nella costruzione dell'innovazione. Il rilancio della Gran Bretagna avverrà agli inizi dell'ultimo ventennio del secolo, quando comincerà la vertiginosa crescita dell'industria

elettrica, fortemente sostenuta e integrata con lo sviluppo delle teorie scientifiche sulle macchine elettriche e sulle telecomunicazioni. La Gran Bretagna, inoltre, stava affrontando i difficili sviluppi costituzionali delle sue colonie: Canada, Australia, Nuova Zelanda e Colonia del Capo in particolare. Nel 1870 il processo verso la completa autonomia dei *dominions* era avviato e sarebbe giunto a conclusione nel 1931 con lo Statuto di Westminster.

### *Gli USA e la dottrina Monroe*

Anche gli Stati Uniti d'America erano concentrati, nel periodo che stiamo considerando, su altri problemi: si dovevano rimarginare le drammatiche ferite della guerra civile da poco conclusa. Era anche in atto il progetto di controllo da parte degli USA dell'intero continente americano, secondo la "dottrina Monroe" del 1823, con l'acquisizione dell'Alaska (1867) e il completamento della ferrovia Atlantico-Pacifico (1869). Non vanno dimenticate le pressioni degli USA su Napoleone III per il ritiro delle truppe francesi dal Messico, ritiro completato nel 1867 con l'immediata conseguente uccisione di Massimiliano d'Asburgo. Né vanno dimenticati i contrasti con Spagna e Gran Bretagna per le loro politiche in Centro e Sud America. A parte queste iniziative di consolidamento della dottrina Monroe, la nazione si era ripiegata al suo interno, come non di rado avviene nella politica degli USA, con obiettivi primari la ricostruzione del Sud e lo sviluppo dell'Ovest. Le difficoltà degli USA e della Gran Bretagna compensarono in parte la perdita di prestigio della Francia, e forse anche a tali difficoltà dobbiamo il fatto che non fu mai presa in considerazione una "Convenzione del Piede" in luogo di quella del Metro.

### *Crescono Germania e Giappone*

Due sono le potenze nascenti: la Germania e il Giappone.

Il 18 gennaio 1871 nella Galleria degli specchi a Versailles, mentre in Parigi assediata si discutevano le clausole della pace, Guglielmo I viene proclamato imperatore di Germania. La Germania di Clausius, Helmholtz, Liebig e Ludwig<sup>6</sup> a partire da circa il 1830 aveva progressivamente sostituito la Francia di Lavoisier,

---

<sup>6</sup> Rudolf Julius Emanuel Clausius, fisico, 1822-1888; Herman Ludwing Ferdinand von Helmholtz, fisiologo, fisico e matematico, 1821-1894; Justus von Liebig, chimico, 1803-1873; Karl Friedrich Wilhelm Ludwig, fisiologo, 1816-1895.

Laplace e Cuvier<sup>7</sup> nell'egemonia dell'attività scientifica. Le università tedesche erano polo di attrazione per gli scienziati di tutto il mondo. Già nel 1870 la Germania, pur mancando di colonie e di una marina mercantile paragonabile a quella inglese, era diventata uno dei Paesi tecnologicamente più avanzati. I filosofi della natura tedeschi si erano trasformati in scienziati in senso moderno, con vantaggi e svantaggi che tale trasformazione ha comportato.

In Giappone nel 1867 l'ultimo *shōgun* della famiglia Tokugawa lasciò il potere nelle mani del quindicenne imperatore Mutsuhito; l'anno successivo il giovanissimo imperatore assumeva il titolo *Meiji* e avviava la fondamentale restaurazione e la serie di riforme che portano tale nome.

### *I colossi dai piedi d'argilla*

In questo periodo i grandi Stati “non nazionali” sono tutti in difficoltà. L'Impero austro-ungarico, dopo la sconfitta subita nel 1866 nella guerra contro la Prussia, che fu contemporaneamente per la supremazia in Germania e per l'indipendenza in Italia, si trova a dover gestire il difficile equilibrio tra i tedeschi e gli ungheresi.

La Russia, uscita sconfitta dalla guerra di Crimea nel 1856, perde, come l'Austria, prestigio sul piano diplomatico internazionale; i due Paesi sono ormai non più “i gendarmi d'Europa” ma “due colossi dai piedi d'argilla”. Anche l'Impero ottomano, il “grande malato”, è in grave e irreversibile crisi; la morte di Fuad Pascià (1869) e di Ali Pascià (1871) indeboliscono il già lento processo di riforme e portano l'impero sull'orlo del disfacimento. Proprio nel 1875 l'Impero ottomano deve fronteggiare la rivolta in Bosnia e le ferme richieste di riforme, accompagnate da minacce di sanzioni, da parte di Russia e Austria-Ungheria.

È in questo complesso quadro internazionale che la Commissione del Metro completa la stesura del testo della Convenzione Internazionale del Metro e la Francia si avvia a organizzare l'incontro tra Stati per la sua ratifica.

## **1.4. Contenuti, peculiarità e contraddizioni della Convenzione del Metro**

Il testo della CM firmato nel 1875 è ancora valido oggi, con poche modifiche apportate nel 1921: è disponibile nel sito web del BIPM, URL: <<http://www.bipm.org>>. Vale la pena di analizzare brevemente i contenuti

---

<sup>7</sup> Antoine Laurent Lavoisier, chimico, 1743-1794; Georges-Léopold-Christien Cuvier, anatomista e paleontologo, 1769-1832.

dei suoi quattordici articoli, anche per comprendere meglio quanto è accaduto in seguito alla metrologia e quale peso ha ancora oggi la CM.

### *I contenuti*

I primi due articoli impegnano i firmatari alla fondazione e al sostentamento del *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM), organismo scientifico permanente con sede a Parigi, e impegnano il Governo francese a provvedere all'acquisizione o costruzione di adeguata sede, secondo quanto precisato nel regolamento allegato alla Convenzione.

Gli articoli 3, 4 e 5 definiscono gli organismi di gestione del BIPM, ossia la Conferenza Generale dei Pesì e delle Misure (CGPM), organismo decisionale rappresentante gli Stati firmatari, e il Comitato Internazionale dei pesì e delle Misure (CIPM), organismo consultivo di natura scientifica, responsabile della gestione del BIPM.

L'articolo 6 fissa i compiti del BIPM:

1. confronti e verifiche dei nuovi prototipi del metro e del kilogrammo;
2. conservazione dei prototipi internazionali;
3. confronti periodici dei campioni nazionali con i prototipi internazionali e i loro testimoni<sup>8</sup>, nonché dei termometri campione;
4. confronto dei nuovi prototipi con i campioni fondamentali di pesì e misure non metrici usati nei diversi Paesi e nelle scienze;
5. taratura e confronto di nastri geodetici;
6. confronto di campioni e scale di precisione la cui verifica sia richiesta da Governi, associazioni scientifiche, artisti e scienziati.

È molto importante l'articolo 7: esso stabilisce che il BIPM sarà anche responsabile dei campioni della unità elettriche e dei relativi confronti, quando i tempi saranno maturi (ancora non lo erano nel 1921!). Inoltre affida al BIPM la determinazione dei valori delle costanti fisiche la cui migliore conoscenza possa contribuire a migliorare la precisione e l'uniformità dei campioni di lunghezza, massa, temperatura e, in prospettiva, delle grandezze elettriche. Il BIPM coordinerà anche attività analoghe svolte da altri istituti.

L'articolo 8, anch'esso del 1921, stabilisce che i prototipi internazionali sono conservati al BIPM e sono accessibili solo in presenza del CIPM.

---

<sup>8</sup> Il BIPM conserva, a fianco del prototipo, alcune sue copie che servono, periodicamente confrontate con il prototipo, a verificare se si sono manifestate variazioni anomale nei rapporti tra prototipo e copie. Tali copie vengono chiamate, per questa ragione, *testimoni del prototipo*.

Gli articoli 9, 10 e 11 trattano delle spese per la gestione dell'intero sistema. L'argomento è molto delicato: basti pensare che il costo complessivo della gestione della CM (costo del BIPM e degli organismi di controllo) è pari, nel 2009, a circa 11 milioni di euro che saliranno, nel 2012, a circa 11,5 milioni di euro (decisione della XXIII CGPM, 2007): questa cifra deve essere messa a disposizione dai Paesi membri. Ogni aumento della dotazione annuale, anche solo per coprire gli effetti dell'inflazione sui costi, deve essere deciso all'unanimità dalla CGPM (come d'altronde avviene per ogni altra delibera dell'organismo), cioè all'unanimità dai plenipotenziari dei Paesi membri; essi sono al dicembre 2010 ben 54, più 32 Paesi associati, con ovvie difficoltà nel trovare un accordo sull'aumento delle spese. Oggi molti tra i Paesi membri della CM, dotati di un proprio Istituto Metrologico Nazionale<sup>9</sup> di alto profilo, vedono il BIPM come un potenziale concorrente e tendono a comprimerne al minimo le attività più strategiche e innovative. Fin dalle origini molti dei Paesi membri della CM, e fra questi anche l'Italia, hanno assunto un atteggiamento dilazionatorio nel pagamento delle quote loro spettanti, provocando difficoltà di gestione al BIPM. Per giunta, in periodi di crisi economica non pochi Paesi trovano difficoltà a giustificare davanti ai loro cittadini i costi di adesione alla CM.

Nel 1921 all'articolo 11 si è aggiunta una precisazione sulle modalità di accesso di nuovi Paesi alla CM. Gli articoli 12, 13 e 14 riguardano le modalità di modifica, approvazione e cessazione della CM.

I 22 articoli del regolamento stabiliscono la composizione, le modalità operative, le regole di comunicazione e di nomina degli organismi previsti dalla CM. Stabiliscono anche i costi iniziali per l'avviamento del BIPM e come devono essere suddivisi tra i firmatari. Il regolamento è stato frequentemente aggiornato per adeguarlo alle mutate situazioni.

Firmano la CM nel 1875:

1. il Presidente degli Stati Uniti d'America
2. l'Imperatore di Germania
3. l'Imperatore di Austria-Ungheria
4. il Re del Belgio
5. l'Imperatore del Brasile
6. il Presidente della Confederazione Argentina

---

<sup>9</sup> IMN, in inglese NMI, da *National Metrology Institute*,  
URL: <[http://www.bipm.org/en/practical\\_info/useful\\_links/nmi.html](http://www.bipm.org/en/practical_info/useful_links/nmi.html)>.

7. il Re di Danimarca
8. il Re di Spagna
9. il Presidente della Repubblica Francese
10. il Re d'Italia
11. il Presidente della Repubblica del Perù
12. il Re del Portogallo e dell'Algarve
13. l'Imperatore di tutte le Russie
14. il Re di Svezia e Norvegia
15. il Presidente della Confederazione Svizzera
16. l'Imperatore degli Ottomani
17. il Presidente della Repubblica del Venezuela

Chi volesse divertirsi a leggere i roboanti titoli dei plenipotenziari che effettivamente firmarono la CM, può trovarli alla pagina web  
URL: <<http://lamar.colostate.edu/~hillger/laws/metric-convention.html>>.

### *Le peculiarità*

La CM del 1875 è solo meccanica (lunghezza, massa e tempo) e termica; solo nel 1921 si apre uno spiraglio a possibili future aggiunte riguardanti i campioni delle unità elettriche. La CM riconosce la tendenza alla specializzazione delle discipline fisico-chimiche, avviatasi all'inizio del secolo come inevitabile risposta al moltiplicarsi dei dati sperimentali raccolti con sofisticate e sistematiche misure; ma accetta alcune specializzazioni e ignora altre.

Ciò che stupisce maggiormente è l'assenza di qualunque riferimento alla chimica che, nel XIX secolo, fu non soltanto una disciplina scientifica di primo piano<sup>10</sup> ma una forte alleata dell'industria. L'alleanza si strinse non tanto attorno alle teorie chimiche quanto sui metodi della chimica analitica.

Essa si tradusse, in effetti, in un movimento reciproco, in una sorta di mutuo adattamento della ricerca e della produzione che apportò grandi profitti a entrambe le parti<sup>11</sup>.

---

<sup>10</sup> È sufficiente citare personaggi come Jean-Antoine Chaptal (1756-1832), Joseph-Louis Gay-Lussac (1778-1850), Justus von Liebig (1803-1873), Ernest Solvay (1838-1922; il suo processo per la produzione di soda fu introdotto nel 1864). E soprattutto va ricordato il grande Dmitrij Ivanovič Mendeleev (1834-1907), chimico e scienziato russo al quale è ascritta anche l'invenzione della tavola periodica degli elementi (1869); al suo nome è intitolato l'Istituto Metrologico Nazionale russo.

<sup>11</sup> B.B. Vincent: *Conoscenze scientifiche e trasferimento tecnologico*, in: P. Galluzzi (a cura di), *Storia delle Scienze*, Banca Popolare di Milano, 1993, vol. V, p. 196.

Solo nel 1971 la CGPM farà una piccola concessione alla chimica e introdurrà la mole, come unità di quantità di sostanza; ma i chimici dovranno aspettare fino al 1995 per avere un proprio Comitato Consultivo che si occupi di promuovere, coordinare, valutare l'enorme ambito delle misure per la chimica.

Non deve invece stupire l'assenza di riferimenti alla fisiologia, malgrado l'importanza e la notorietà degli studi di Helmholtz sulla fisiologia ottica e acustica. Ancora oggi si considera non soddisfacentemente risolto il problema della misurazione dell'intensità di una sensazione (visiva, acustica, tattile, ecc.), in modo da poterla correlare con lo stimolo fisico che l'ha prodotta. Torneremo in seguito su questo delicato e importante tema.

Altra peculiarità è l'accento posto sui campioni, ai quali si affidano le unità di misura. Sullo sfondo si collocano le grandezze. Siamo molto lontani dal pensiero illuminista e scientifico che dominò le scelte sul sistema metrico ai tempi della rivoluzione francese: allora si ragionò prima sull'unità di misura, universale, disponibile per tutti, definita con riferimento a fenomeni o sistemi naturali; poi ci si preoccupò della realizzazione di campioni che costituissero la "messa in pratica" delle definizioni.

Grandezze, unità e campioni possono essere presentati in molti modi assumendo, come partenza, uno qualunque dei tre elementi e facendone discendere gli altri due in modo consistente. Nella pluri-millennaria storia delle misure sono state compiute scelte di presentazione diverse; oggi si è approdati alla sequenza grandezze → unità → campioni, accettata dalla normativa e dalle leggi. Su tale scelta si basa anche il Sistema Internazionale di unità (SI) che costituisce uno dei temi di questo testo.

### *I condizionamenti*

Le scelte del 1875 furono probabilmente condizionate dal pensiero filosofico dominante: il positivismo. La domanda centrale, o il sogno, del positivismo può essere formulata nel modo seguente: è possibile organizzare filosoficamente la scienza in modo tale che essa possa a sua volta riorganizzare la società? Lo storico Jean-Paul Enthoven arriva a sostenere che il positivismo sta alla rivoluzione francese come la filosofia di Sant'Agostino sta alla caduta dell'impero romano. In altri termini il positivismo sostiene<sup>12</sup> «la necessità

<sup>12</sup> P. Guarnieri, C. Pogliano: *Il positivismo*, in: M.L. Salvadori (a cura di), *La Storia*, Ist. Geogr. De Agostini e UTET, 2007, vol. 11, p. 559.

di una filosofia capace di teorizzare il compimento e di erigere, contro eventuali nuove turbolenze della storia, le mura di una città ideale».

La frattura tra il nuovo ruolo del fattore tecnico nella rivoluzione industriale e la scienza è ben sintetizzato da Roberto Ardigò (1828-1920), considerato fondatore del positivismo italiano<sup>13</sup>. Egli scrive nel 1870:

Il fatto ha una propria realtà per sé. Una realtà inalterabile, che noi siamo costretti ad affermare tale e quale è data e la troviamo: con l'assoluta impossibilità di togliere o di aggiungere nulla. Dunque il fatto è *divino*.

In quanto *manu-fatti* anche i prototipi sono pertanto “divini”.

Certamente qualcosa di “divino” il prototipo del kilogrammo deve possederlo. Da sempre si usano prototipi per le misure di peso; il primo simile all'attuale fu costruito all'epoca della rivoluzione francese, in platino, e rimarrà quasi tale e quale (piccoli cambiamenti nel materiale, nella forma e nelle procedure di conservazione e pulizia) ancora almeno fino al 2015, quando forse la XXV CGPM deciderà di mandarlo in pensione; più di duecento anni di onorato servizio, malgrado gli sforzi di tanti ricercatori per soppiantarlo con un altro campione più universale e almeno altrettanto preciso e comodo.

In modo ben diverso da Ardigò parlano dei fatti gli scienziati di oggi. Per esempio il fisico Sean M. Carroll<sup>14</sup>, del California Institute of Technology, sostiene che

è bello avere un'immagine che combacia con i fatti, ma i cosmologi vogliono qualcosa di più; cerchiamo di capire le leggi della natura e il nostro specifico universo in un modo in cui tutto abbia senso. *Non vogliamo ridurci ad accettare le caratteristiche strane del nostro universo come meri fatti.*

E ben diversa è la ricchezza e la copertura settoriale del Sistema Internazionale di grandezze oggi in vigore. Già gli scienziati della seconda metà del XIX secolo erano su posizioni assai più avanzate dei filosofi e dei divulgatori del positivismo. Si stava all'epoca completando il passaggio dal filosofo della natura, come ancora amavano chiamarsi gli scienziati del periodo illuminista, allo scienziato in senso moderno: le leggi mediante le quali si cerca di spiegare la natura vengono da loro considerate strumenti teorici piuttosto che principi della realtà. Così videro il determinismo Charles Darwin (natu-

<sup>13</sup> M. Quaranta: *Positivismo ed hegelismo in Italia*, in: L. Geymonat (a cura di): *Storia del pensiero filosofico e scientifico*, Garzanti, 1975, vol. V, p. 577.

<sup>14</sup> Sean M. Carroll: *Le origini cosmiche della freccia del tempo*, Le Scienze, 2008, p. 42.

ralista, 1809-1892), William Thomson Kelvin (fisico, 1824-1907), James Clerk Maxwell (matematico e fisico scozzese, 1831-1879), Emil Du Bois-Reymond (fisico e neurofisiologo, 1818-1896), ognuno già avviato su una ben definita specializzazione, ancora oggi moderni nel loro modo di porsi davanti alla ricerca scientifica.

### *Le contraddizioni*

Proposta dagli scienziati, la CM fu invece scritta secondo le esigenze dell'agricoltura e del commercio e sotto l'influenza del pensiero positivista. Inoltre la Francia, forte del suo prestigio come sede originale del sistema metrico decimale, ebbe in casa il BIPM. Ma il BIPM, quello voluto dai Governi a supporto della globalizzazione del commercio e dell'imminente spartizione del mondo fra le grandi potenze europee, si doveva occupare solo di prototipi, tarature e confronti. Con una concessione: poteva far tarature anche a beneficio degli "artisti" (così erano chiamati anche gli artigiani professionali, costruttori di strumenti di misura) e degli scienziati. Di campioni elettrici, cruciali per gli sviluppi tecnologici che stavano per avviarsi, e di ricerca si riparlerà timidamente solo nel 1921.

La CM fu dunque un accordo internazionale di carattere prettamente commerciale, uno dei tanti che furono firmati in quegli anni cruciali (si veda la Scheda 3). Va peraltro sottolineato che l'organo scientifico, il Comitato Internazionale, di supporto alla Conferenza Generale (organo decisionale di carattere politico e ministeriale) non ammise mai, e forse nemmeno percepì, la dipendenza da esigenze fortemente legate al commercio internazionale. La non ammissione può essere colta facilmente leggendo, dai verbali delle riunioni del Comitato e della Conferenza Generale, gli interventi iniziali del Presidente del Comitato: il riferimento è sempre esclusivamente all'attività *scientifica* che prepara le delibere della Conferenza, agli aspetti *scientifici* dei lavori svolti dal BIPM, tra i quali vengono incluse le attività di servizio, quali la taratura periodica dei campioni nazionali degli Stati membri della CM.

### Scheda 3 - Convenzioni e accordi tra Stati alla fine del XIX secolo

Nella prima parte del XIX secolo le grandi potenze di allora cooperarono assiduamente per assicurare stabilità sociale e politica all'Europa e al mondo, in difesa di interessi di parte. Lo scenario muta gradualmente negli ultimi 30-40 anni del secolo: si fa strada il nazionalismo egoistico, il concetto di lotta per la supremazia. I guardiani d'Europa si lanciano nella corsa agli armamenti e si guardano l'un l'altro con sospetto e diffidenza. Forti divengono inoltre le tendenze protezionistiche dell'industria e dell'agricoltura dei singoli Stati.

La Grande Depressione di fine secolo, che fu principalmente dovuta alla caduta dei prezzi per eccesso di offerta in confronto alla domanda di prodotti, impose nuove strategie. Se il nazionalismo allontanava tra loro gli Stati, la rapidità dei nuovi sistemi di comunicazione (ferrovie, navi a vapore e telegrafo in testa) semplificava i rapporti tra loro e creava una sorta di interdipendenza. Gli storici riconoscono che alla fine dell'Ottocento ogni traccia di limitazione alla sovranità nazionale e di solidarietà era scomparsa. Per risolvere i complessi problemi posti dalla recessione e altri specifici problemi furono immaginate nuove forme di cooperazione, tra Stati tutti con pari dignità. Fu un proliferare di convenzioni, accordi, intese tra Stati, per regolamentare questioni amministrative e commerciali di comune interesse. Da 20 nel periodo 1870-1880, essi salirono a 31 nel decennio 1880-1890; a 61 nel 1890-1900; a 108 nel 1900-1904: «Si formò così una rete di organizzazioni e di trattati che al nazionalismo e all'egoismo politico dei singoli Stati contrapponeva un internazionalismo tecnico, giuridico e amministrativo che cercava di estendere a tutta una comunità di nazioni i diritti e le possibilità dei cittadini di ciascuna di esse».

Ricordiamo alcuni di questi trattati e delle organizzazioni che ne derivarono:

1865: Unione Telegrafica Internazionale.

1874: Trattato di Berna sui sistemi postali.

1875: Unione Postale Universale.

1875: Convenzione del metro e creazione degli organismi tecnici (BIPM), scientifici (CIPM) e politici (CGPM) per la sua gestione.

1878: Organizzazione Meteorologica Mondiale.

1886: Convenzione di Berna per la protezione delle opere letterarie e artistiche.

1896: Accordo sul diritto privato internazionale.

Verso la fine del XIX secolo si stipularono anche accordi tra imprese, i così detti cartelli. In questo caso si trattò di unioni contrattuali di imprese che mantenevano la loro identità e indipendenza industriale ma cercavano di regolamentare la concorrenza, senza abolirla almeno nominalmente. Questi accordi portarono alla formazione di colossali consorzi produttivi, in alcuni casi multinazionali.

La non percezione di tale dipendenza può essere desunta da molteplici atteggiamenti tenuti dal Comitato:

- il tempo, enorme ma considerato marginale, dedicato all'analisi e discussione del bilancio del BIPM, senza l'autorità di intervenire sulla voce fondamentale, quella delle entrate, sempre tenute entro limiti strettissimi dalle decisioni dei Governi o, addirittura, da mancati versamenti delle quote spettanti a ciascun Paese;
- i problemi spinosi, che il Comitato è chiamato ad affrontare e risolvere senza domandarsi perché fossero in carico a un organismo scientifico: le tariffe dei servizi del BIPM ai Paesi membri; l'entità dei servizi gratuiti; l'accesso prevalente a tali servizi da parte dei Paesi "piccoli" (mai viene usata la parola "poveri"; anche l'India o la Cina sono considerati Paesi "piccoli", evidentemente in senso metrologico!); il costo sopportato in prevalenza dai Paesi "grandi", i quali inoltre dispongono di propri laboratori metrologici<sup>15</sup>;
- la cautela nell'assumere responsabilità connesse a quella che viene definita dal Comitato "la metrologia pratica", sempre rigorosamente posta in contrapposizione alla "metrologia scientifica".

Il rifiuto di farsi carico anche della "metrologia pratica" fu una decisione strategica che, vista a posteriori, risultò perdente. Infatti a partire dalla fine degli anni Settanta del XX secolo, gli organismi regionali di coordinamento metrologico furono pronti a dedicarsi alla "metrologia pratica", mandando in crisi d'autorità gli organismi della CM, come vedremo più avanti in dettaglio. D'altro canto era ben difficile pretendere dai membri del Comitato, accademici o docenti universitari di chiara fama, una sensibilità riguardo ai problemi della metrologia della produzione e, in particolare all'epoca della firma della CM, a quelli delle misure per l'ambiente, la salute, la sicurezza. Proprio su questi settori si concentrerà l'attenzione degli organismi regionali, immediatamente dopo il loro nascere.

---

<sup>15</sup> Il costo dei servizi del BIPM fu argomento critico soprattutto quando si verificò un allargamento delle competenze e delle attività richieste a tale laboratorio internazionale. Per esempio, durante la riunione del CIPM del 1937, quando al BIPM si chiese di occuparsi anche di misure elettriche e fotometriche e, in prospettiva, anche di misure sulla scala pratica di temperatura, il problema fu sollevato dal Dipartimento della Tesoreria britannica. In quel momento si decise, con otto voti a due, di limitare le prestazioni gratuite del BIPM: la Commissione Amministrativa Permanente del CIPM ebbe l'incarico allora di provvedere all'aggiornamento periodico delle tariffe praticate dal BIPM per i servizi prestati agli Stati membri della Convenzione del Metro.

Si potrebbe sostenere che la CM fu il corollario del trattato di libero scambio del 1860 tra la Francia di Napoleone III e la Gran Bretagna, che inaugurò l'età liberistica in Europa: la CM pose le basi tecniche per l'allargamento del libero scambio a tutto il mondo, facilitato dall'apertura del Canale di Suez nel 1869. Per inciso, il trattato fu fortemente contestato dagli agricoltori e dagli industriali francesi, inclini, soprattutto nel periodo della "grande depressione"<sup>16</sup>, al protezionismo. La CM poteva al più contribuire a ridurre gli ostacoli tecnici; non poteva in alcun modo porre freni alle azioni di protezionismo che la depressione di fine secolo provocò a catena. Poiché però le scelte protezionistiche per alcuni settori di produzione conducono in altri settori a ritorsioni da parte dei Paesi dai quali si pretende di proteggersi, ecco nascere la moltitudine di accordi bilaterali e multilaterali. Da una parte si firma la CM; dall'altra si stipulano accordi bilaterali, riconoscendo privilegi a talune nazioni pur di averne in cambio altri.

### *I problemi*

La CM giunse in un difficile momento di transizione della politica mondiale che, a quei tempi, era sostanzialmente politica europea. I primi importanti segnali di profondo cambiamento risalgono alla Rivoluzione Francese e ai movimenti culturali che la precedettero e la motivarono. Il Congresso di Vienna (1814-1815) ristabilì l'ordine gestito dalle cinque grandi potenze (Inghilterra, Francia, Prussia, Austria-Ungheria, Russia) nel segno di un equilibrio tra loro che evitasse nuove guerre europee. Fu questo il clima culturale che condusse alla firma della CM. Il commercio che si voleva tutelare era sostanzialmente quello delle esportazioni dall'Europa verso i Paesi che iniziavano a essere trasformati in colonie, nel processo di spartizione del mondo che vide impegnate le potenze europee a cavallo tra i due secoli. Ma le guerre napoleoniche avevano portato in giro per l'Europa i germi di nuove idee. Centrale è l'idea di nazione<sup>17</sup> che comincia a circolare in Europa (e non solo), non come proprietà di una dinastia governante ma quale espressione di una cultura, di una lingua o di tradizioni comuni. Ecco, per esempio, la rivolta in Polonia del 1831, soffocata dalla Russia, le guerre di indipendenza italiane, le rivoluzioni che sconvolgono

<sup>16</sup> Così è stato chiamato dagli storici del tempo il periodo che va dal 1880 al 1900 circa.

<sup>17</sup> Il francese P.J.B. Buschez così definisce il termine nazione: «Esso indica non solo la nazione ma anche quel non so che in virtù del quale una nazione continua a esistere anche quando ha perduto la sua indipendenza». *Traité de politique et de science sociale*, Paris, 1866, vol. I p. 75; citato da J.P.T. Bury: *Nazionalità e nazionalismo*, in: *Storia del mondo moderno*, Garzanti, 1970, vol. X, cap. IX.

l'intera Europa nel 1848. La frattura iniziale tra le cinque potenze, che pretendevano di garantire l'equilibrio in Europa grazie alla diplomazia, avvenne con la guerra di Crimea (1854-1856). Le due potenze occidentali (Francia e Inghilterra), con l'appoggio del piccolo Piemonte, intervennero a sostegno della Turchia contro la Russia che si era mossa alla ricerca, forse anche giustificata, di uno sbocco sul mare Mediterraneo. Le due potenze centrali, Prussia e Austria-Ungheria, approvano l'iniziativa di Francia e Inghilterra. Nella Conferenza di Vienna, riunita subito nel 1854, per cercare la soluzione diplomatica, si delineano ben presto tendenze divergenti: un accordo tra Francia e Inghilterra, un riavvicinamento della Prussia alla Russia. La caduta di Sebastopoli nel settembre del 1855, costata oltre duecentomila soldati morti sui due fronti, portò al Congresso di Parigi del febbraio 1856, con la contrastata presenza delle cinque potenze, più la Turchia e il Regno di Sardegna; congresso deludente, in particolare per le ambizioni di Napoleone III. Di fatto l'accordo raggiunto ripristinò il potere di controllo dei cinque grandi, limitando le ambizioni espansionistiche della Russia.

Il successivo momento di frattura è la già ricordata guerra tra Francia e Prussia che condusse alla nascita (1871) dell'Impero di Germania (nell'opzione della "piccola Germania", come sottolinearono i contemporanei e come nel secolo XX non la volle Hitler, fautore della "grande Germania"), sulla base del concetto di stato-nazione<sup>18</sup>. Così la CM, pensata nell'ambito di un equilibrio affidato alle grandi potenze, si trovò a dover operare in un contesto che vede affermarsi le nazioni, i loro interessi commerciali ed espansionistici, forme di autarchia, profonde e diffuse rivalità che condurranno al drammatico periodo 1914-1945, con la distruzione dell'Europa<sup>19</sup>.

È lecito domandarsi per quale motivo venne mantenuto in vigore un accordo internazionale, orientato a favorire il libero scambio, mentre si affermava, con il nazionalismo, il protezionismo dei mercati e l'imperialismo europeo (ma anche degli Stati Uniti e del Giappone), dato che alla fine del secolo tutte le economie, con l'importante eccezione della Gran Bretagna<sup>20</sup>, avevano caratteri-

<sup>18</sup> Wolfgang Reinhard: *Storia del potere politico in Europa*, il Mulino, 2001, pp. 491 sgg.

<sup>19</sup> L'analisi dei fenomeni politici e sociali qui ricordati è svolta in maniera particolarmente efficace da Eric J. Hobsbawm (*Il trionfo della borghesia, 1848-1875*, Editori Laterza, 1976) e da Andreas Hillgruber (*La distruzione dell'Europa – La Germania e l'epoca delle guerre mondiali, 1914-1945*, il Mulino, 1991).

<sup>20</sup> Nel 1880 venne creata in Gran Bretagna la figura dell'addetto commerciale presso le ambasciate.

stiche fortemente nazionaliste. Si possono individuare tre motivazioni. La Convenzione del Metro, con l'unificazione delle unità di misura e il conseguente perfezionamento degli strumenti di misura utilizzati nella produzione di macchinari e negli scambi commerciali, sostenne e facilitò il progresso tecnologico. La nuova tecnologia produsse importanti mutamenti nella struttura della società: trasporti e comunicazioni enormemente accelerati, macchine che generavano prodotti di massa e grandi quantità di energia. Tutto questo richiedeva un forte potere centralizzato nello Stato<sup>21</sup>, capace di gestire le infrastrutture e costruirne nuove (grandi linee di distribuzione dell'energia elettrica, per esempio). Questa vocazione centralizzante ben sosteneva l'idea di nazione che gli Stati utilizzarono per rafforzare nell'opinione pubblica la propria autorità: quindi considerarono utile mantenere vivo l'accordo e orientare l'interesse pubblico verso il commercio estero in chiave competitiva. In secondo luogo, l'appartenenza alla *élite* degli Stati che si incontravano per decidere sulle unità di misura costituiva un tassello «dell'amplissimo ricorso alla sfera simbolica ed estetica» su cui procedettero gli Stati per giustificare il proprio diritto alla gestione del potere attraverso l'affermazione dell'idea di nazione. Infine, tra i tanti accordi multilaterali firmati nel periodo, la CM aveva il pregio di poter essere “raccontata” nei dettagli, senza nascondere clausole segrete<sup>22</sup>, come era d'uso nella diplomazia di allora (e di oggi, come dimostrano le informazioni segrete divulgate da *Wiki-leaks*): un accordo “pulito”, ben usabile a fini propagandistici.

Come conseguenza di quanto detto si afferma una prassi ben documentata. Una “nazione” acquisisce l'indipendenza, divenendo Stato, e in poco tempo entra nella CM: Romania, indipendente nel 1877 e nella CM nel 1884; Bulgaria, indipendente nel 1878 e nella CM nel 1911; Canada, indipendente nel 1882 e nella CM nel 1907. Questa prassi prosegue fino ai giorni nostri, come è dimostrato, per esempio, dalla Slovenia e dalla Croazia, indipendenti nel 1991 e associate alla CM rispettivamente nel 2003<sup>23</sup> e nel 2005.

Un ulteriore aspetto, utile per spiegare l'immobilità sostanziale della CM e dei suoi organismi fino alla rinascita del 1948, è la compresenza, nella gestione dell'accordo, della politica e della competenza tecnico-scientifica. Le decisioni spettano alla componente politica dell'accordo. Il sostanziale disinteresse verso gli aspetti tecnici del processo di globalizzazione da parte della politica, dovuto alla crescita degli interessi nazionali che contrastano con la globalizzazione, ri-

<sup>21</sup> Guido Formigoni: *La politica internazionale nel Novecento*, Il Mulino, 2007, pp. 44 sgg.

<sup>22</sup> Guido Formigoni: op.cit., p. 48.

<sup>23</sup> Dal 2008 la Croazia è membro effettivo della CM.

duce drasticamente gli investimenti sugli organismi internazionali e soffoca le loro iniziative. Non deve dunque stupire se le azioni della CGPM, fino a dopo la seconda guerra mondiale, sono marginali e poco incisive. Fortunatamente la componente scientifica competente continua a operare per la rinascita, principalmente all'interno degli istituti nazionali, e prende il controllo della CM dalla seconda metà del XX secolo.

### *Le conseguenze*

Le conseguenze di queste contraddizioni e di questi problemi scattarono immediatamente. Gli scienziati avrebbero voluto che la CM facilitasse la collaborazione scientifica internazionale nel settore della ricerca per lo sviluppo di nuovi campioni. Non avendo conseguito questo obiettivo, chiesero ai loro governi di creare istituti nazionali di ricerche fisiche e tecniche. Nel 1877 la Germania<sup>24</sup>, nazione con vocazione egemonica almeno nell'Europa centrale, iniziò la corsa agli istituti nazionali di ricerca metrologica, fondando a Berlino, su iniziativa di Ernst Werner von Siemens (1816-1892) e di Hermann von Helmholtz (1821-1894), la *Physikalisch-Technische Reichsanstalt* (PTR, sostituita nel 1950 dal *Physikalisch-Technische Bundesanstalt*, PTB). Seguì la Gran Bretagna con la fondazione nel 1899, vicino a Londra, del *National Physical Laboratory* (NPL); e subito si piantò nel giardino del NPL un melo, discendente del mitologico albero dal quale cadde la mela che suggerì a Isaac Newton (1643-1727)<sup>25</sup> la legge della gravitazione. Gli USA istituirono nel 1901, vicino a Washington, il *National Bureau of Standards* (NBS; con il nuovo nome di *National Institute of Standards and Technology*, NIST, dal 1990), un'agenzia federale che fa parte del Dipartimento del Commercio. Gli statuti di queste nuove istituzioni, come delle tante altre che gli Stati edificarono nel XX secolo, davano la possibilità, assolti i com-

<sup>24</sup> La Germania era in quel momento in pieno sviluppo, grazie anche a un organico sistema bancario e a una classe imprenditoriale pronta a cogliere ogni possibilità di innovazione in vista di futuri guadagni. Aveva inoltre sviluppato un forte e prestigioso complesso di università politecniche e di scuole professionali. Si veda in merito A. Guagnini e R. Fox: *Dalle officine alle università. Le origini ed i percorsi dell'istruzione tecnica superiore in Europa*, in: *Storia delle Scienze*, op.cit., vol. V, p. 114.

<sup>25</sup> Immensa è la bibliografia su Isaac Newton, da tutti riconosciuto scienziato e filosofo di livello altissimo. Suggestivo, anche perché facilmente reperibili: Enrico Bellone: *Isaac Newton*, in: Paolo Rossi (a cura di): *Storia della scienza*, vol. I, *La rivoluzione scientifica: dal Rinascimento a Newton*, pp. 419-447, UTET, 1988; Ludovico Geymonat: *Newton*, e Gianni Micheli: *Il pensiero filosofico da Cartesio a Newton*, in: Ludovico Geymonat: *Storia del pensiero filosofico e scientifico*, Garzanti, 1970, vol. II, rispettivamente pp. 623 e 664.

piti di studio, realizzazione, conservazione e disseminazione dei campioni delle unità di misura, di svolgere anche ricerca fondamentale. E gli istituti la svolsero in maniera egregia, in concorrenza e collaborazione scientifica tra loro e con il BIPM.

Molte altre nazioni, in particolare quelle che firmarono la CM nel 1875, si diedero un'organizzazione per la gestione interna della metrologia. Furono istituite, in forme diverse, autorità nazionali: per l'adozione di un sistema di unità di misura, ormai condiviso a livello internazionale; per la diffusione interna del sistema con la preparazione di tabelle di conversione dalle vecchie unità; per lo sviluppo, conservazione e disseminazione dei campioni nazionali; e, soprattutto, per il funzionamento di un servizio nazionale di metrologia legale atto a supportare le autorità nell'adozione di norme e regolamenti relativi all'esecuzione di misurazioni, in particolare nelle transazioni commerciali. Per esempio, in Russia nel 1893 fu riorganizzato il Dipartimento dei Campioni dei Pesi e delle Misure, istituito già nel 1842, trasformandolo dapprima in Ufficio e nel 1931 in Istituto di Metrologia e dei Campioni dell'Unione; nel 1934 gli fu assegnato il nome di Istituto Mendeleev di Metrologia (VNIIM), nome che conserva ancora oggi.

Anche in Italia, dopo l'unificazione, si fondò l'organizzazione della metrologia legale: nel 1876 venne istituita la Commissione superiore dei pesi e delle misure e del saggio dei metalli. L'Italia fu così in grado di ricevere e disseminare, nel 1889, le sue copie dei prototipi del kilogrammo e del metro e promulgare, il 20 luglio del 1890, la legge quadro sulla metrologia legale e successivamente, nello stesso anno, i regolamenti attuativi. Per approfondire il fondamentale apporto delle strutture ministeriali allo sviluppo della metrologia in Italia si veda la Scheda 4.

Ovviamente gli Stati, che finanziavano le attività dei loro Istituti Metrologici Nazionali (IMN), erano sempre meno propensi a spendere per la crescita del BIPM. Chi più soffrì di questa situazione fu paradossalmente la Francia: avendo in casa il BIPM non investì in un suo IMN, ma si avvalse dell'opera di istituti, anche privati, operanti con obiettivi non solo metrologici. Ancora oggi soffre per questa anomalia.

Ma vi furono anche conseguenze benefiche; tra il 1875 e il 1905 il commercio internazionale raddoppiò in valore aureo e triplicò in volume (a causa della caduta dei prezzi). Soffrirono Gran Bretagna e Francia; crebbero USA e Germania, oltre al Giappone, primo Paese non europeo a sconfiggere in guerra un Paese europeo, la Russia, nel 1905.

#### **Scheda 4 - La nascita della metrologia (legale) in Italia**

Già nel 1861, anno dell'Unità d'Italia, viene istituito l'Ufficio Metrologico temporaneo, che verrà sciolto nel 1864 dopo aver portato a termine il compito di produrre le tavole di "ragguaglio" tra le unità usate nei diversi Stati confluiti nella nuova Nazione. Sempre nel 1861 vengono istituiti gli uffici di verificaione dei campioni e degli strumenti di misura e la Commissione Consultiva dei pesi e delle misure, presieduta da Camillo Ferranti. La Commissione afferisce, ovviamente, al Ministero del commercio e dell'agricoltura. Nel 1876 la Commissione viene trasformata in Commissione Superiore dei pesi e delle misure e del saggio dei metalli preziosi, con competenze ampliate, come ben dice il nuovo nome.

Furono membri della Commissione anche scienziati di primo piano, fra i quali Stanislao Cannizzaro (1826-1910, chimico e politico), Galileo Ferraris (1847-1897, scienziato e ingegnere), Giovanni Battista Donati (1826-1873, matematico e astronomo), Pietro Tacchini (1838-1905, ingegnere e astronomo), Giuseppe Pisati (1842-1891, fisico tecnico, che collabora con il geodeta Enrico Pucci, 1848-1891, nella misura assoluta dell'accelerazione di gravità a Roma dal 1882 al 1883).

Nel 1887 viene pubblicato il testo unico delle disposizioni regolamentari relative all'organizzazione e al funzionamento della Commissione Superiore; in allegato esso riporta la tabella delle industrie soggette a verificaione, da aggiornare da parte del Ministero ogni tre anni. Purtroppo il testo unico non risolve la questione di fondo, l'evasione dei controlli, superiore al 10% con conseguente diversità di tassazione.

Nel 1889 arrivano in Italia i prototipi del metro e del kilogrammo; per la disseminazione i laboratori centrali (poi Ufficio Centrale Metrico) utilizzano, oltre al comparatore Bianchi dell'Officina Galileo, una serie di bilance Rüprecht (portata 20 kg, 10 kg, 1 kg con sensibilità 5 µg).

Il 20 luglio 1890 viene pubblicata la legge metrica e in novembre i suoi regolamenti attuativi. La legge prevede la scadenza biennale della verifica periodica, il ruolo di indirizzo esclusivamente scientifico della Commissione Superiore all'interno del Servizio metrico e nella gestione dei laboratori centrali. La legge metrica viene confermata, praticamente senza sostanziali variazioni, nel 1945 con decreto luogotenenziale. La prima modifica sostanziale si ha nel 2000, con il trasferimento alle Camere di Commercio delle competenze e dotazioni degli Uffici Provinciali Metrici.

Va sottolineata la tempestività e l'efficacia delle azioni del Ministero: quando nel 1889 l'Italia riceve i prototipi, tutto è pronto per disseminare nel Paese le nuove unità di misura. Le tavole di ragguaglio hanno già consentito di uniformare le misure nella Nazione, pur con inevitabili ritardi e difficoltà. La scuola è pronta per educare le nuove generazioni al sistema metrico decimale. All'educazione degli adulti provvedono i parroci, chiamati a cooperare al processo di allineamento del Paese alla rivoluzione dei pesi e delle misure.

### 1.5. La difficile adolescenza

La direzione del BIPM, nel momento cruciale della sua nascita, fu affidata nel 1875 all'italiano Comm. Prof. Gilberto Govi (1826-1888), che la conservò per due anni, cedendola poi allo svizzero J. Pernet<sup>26</sup>, in carica fino al 1879. Dal 1879 al 1889 fu direttore Ole Jacob Broch (1818-1889), matematico, fisico, economista e politico norvegese (Ministro della Marina), al quale succedette il francese J.-R. Benoît<sup>27</sup>, in carica fino al 1915. La presidenza del CIPM fu affidata dal 1875 al 1891 allo spagnolo Carlos Ibañez de Ibero (marchese di Mulhacén, generale e geodeta, 1825-1891) e dal 1891 al 1920 all'astronomo tedesco Wilhelm Julius Foerster<sup>28</sup> (1832-1921). Furono questi i personaggi che si trovarono a guidare la nascita e la crescita degli organismi della Convenzione del Metro nel difficile ultimo quarto del XIX secolo.

#### *Il contesto*

Questo periodo è etichettato dagli storici in molti modi, ognuno capace di descriverlo sinteticamente dalle diverse ottiche mediante le quali è possibile studiarlo. «Gli anni della grande depressione»<sup>29</sup> amano chiamarlo alcuni storici dell'economia, sottolineando però che tutto il XIX secolo, salvo pochi anni centrali, fu caratterizzato da un calo dei prezzi, sostanzialmente dovuto alle nuove tecnologie di produzione introdotte. Ma fu anche caratterizzato da un continuo sviluppo del processo di industrializzazione. Sembra dunque che a parlare di «grande depressione» fossero soprattutto gli imprenditori, primi fra i quali gli inglesi, visto che il tenore di vita medio crebbe lungo tutto il secolo, in particolare nell'ultimo quarto, con qualche dubbio solo sulla qualità della vita delle classi più povere. Altri storici pongono l'accento sul prodigioso aumento demografico<sup>30</sup>: nell'Europa<sup>31</sup> e nelle Americhe si ebbe un incremento imponente-

<sup>26</sup> Estese la scala termometrica oltre il campo da 0 °C a 100 °C, dimostrando l'ottima linearità dei termometri a mercurio in vetro.

<sup>27</sup> Benoît lavorò dal 1882 al 1892 con Albert Abraham Michelson (1852-1931) alla determinazione sperimentale del valore del metro in lunghezze d'onda luminose. Vedi Trav. Mem. BIPM, 11, 1, 1895.

<sup>28</sup> Fu studioso di geomagnetismo e della fisica del sole, in particolare dal 1871 al 1906.

<sup>29</sup> D.S. Landes: *Cambiamenti tecnologici e sviluppo industriale nell'Europa occidentale, 1750-1914*, in: *Enciclopedia Economica*, vol. 6, Einaudi, 1974, p. 296.

<sup>30</sup> D.V. Glass: *La popolazione mondiale dal 1800 al 1950*, in: *Storia Economica*, op.cit., p. 65.

<sup>31</sup> Fa eccezione la Francia per ragioni che ancora non sono del tutto chiare. A titolo di esempio, per la popolazione del bacino del Mediterraneo, zona assai abitata fin dall'antichità, sono disponibili stime attendibili dalla fine del XVI secolo (Fernard Braudel: *La Méditerranée et le*

te della popolazione, dovuto soprattutto alla diminuzione della mortalità infantile, grazie ai progressi della pratica medica. Altri<sup>32</sup> ancora sottolineano l'importanza della lotta di classe, sostenuta dalla nascita e dal riconoscimento delle organizzazioni sindacali. Altri<sup>33</sup> mettono in risalto l'esplosione dell'imperialismo, con la spartizione del mondo da parte dell'Europa e degli Stati Uniti; spiegano in parte questa spinta alla colonizzazione come un tentativo, peraltro mal riuscito, di reazione alla depressione con la ricerca di nuovi mercati, come se Paesi poveri potessero da un giorno all'altro trovare le risorse per acquistare prodotti e macchinari inglesi, belgi, tedeschi, francesi o americani. Così la spartizione imperialista dell'Africa e di parte dell'Asia si concluse con significativi costi per l'Europa e per gli Stati Uniti a causa degli investimenti in infrastrutture e servizi, indispensabili per cercare di creare nuovi mercati.

Gli storici della scienza e della tecnologia chiamano il periodo «L'età dell'acciaio»<sup>34</sup>, sottolineando come i progressi nelle tecniche produttive e il crollo del costo del nuovo materiale, in confronto a quello del ferro, resero possibile la costruzione delle grandi macchine di produzione e l'avvio della meccanica, anche di precisione, moderna. I laminatoi in continua dell'acciaio consentirono il decollo della marina mercantile e militare di grande tonnellaggio, presto convertita all'utilizzo di combustibili meno inquinanti e ingombranti del carbone, grazie anche a motori capaci di resistere, in quanto in acciaio, a sforzi strutturali assai maggiori di quelli della generazione precedente. Si tratta di quegli stessi motori che facilitarono le grandi ulteriori rivoluzioni dei trasporti, in velocità (l'aeroplano) e in autonomia personale (l'automobile). Le grandi traferie dell'acciaio e i laminatoi consentirono anche un nuovo rilancio delle ferrovie, mettendo a disposizione rotaie di durata molto maggiore; esse permisero ai treni di aumentare progressivamente la velocità, consentita dai nuovi motori e dall'elettrificazione delle linee.

---

*Monde méditerranéen à l'époque de Philipp II*, Librairie Armand Colin, 1949, ed.it. Einaudi, 1953, pp. 466 sgg.). La popolazione, stimata in circa sessanta milioni alla fine del 1500, impiegò circa trecentocinquanta anni per aumentare di altri settanta milioni. Dal 1850 al 1930, in soli ottant'anni, crebbe di ben sessantasei milioni.

<sup>32</sup> D. Thomson: *Il pensiero politico e sociale*, in: *Storia del mondo moderno*, vol. XII: *L'espansione coloniale e i problemi sociali 1870-1898*, Garzanti, 1972, p. 114. R. Monteleone: *Il movimento operaio e la seconda internazionale*, in: *La Storia*, op.cit., vol. 12, *L'età dell'imperialismo e la guerra mondiale*, p. 235.

<sup>33</sup> Kavalam M. Paniklar: *Storia della dominazione europea in Asia*, Einaudi, 1958. H Wesseling: *La spartizione dell'Africa, 1880-1914*, Corbaccio, 2001.

<sup>34</sup> J.D. Bernal: *Storia della scienza - La fine del XIX secolo (1870-1895)*, Editori Riuniti, 1965, p. 442.

Per la metrologia, pensare al periodo come all'età dell'acciaio è assai pregnante. Per fare grandi macchine, capaci anche di elevate velocità di movimento, non è sufficiente disporre di adeguati materiali e affrontare in modo sistematico il problema della lubrificazione; bisogna anche saper lavorare bene le superfici di accoppiamento e garantire misurazioni precise. Nell'ultimo quarto del XIX secolo si sviluppano quindi sia le tecniche di rettifica, sia gli strumenti di misura. Ma soprattutto si affermò il concetto, tipicamente metrologico, di intercambiabilità<sup>35</sup>.

È curioso dover riconoscere che l'intercambiabilità a grande diffusione fu richiesta per prima dalle aziende costruttrici di macchine per cucire. Questo attrezzo, che certo fu l'anticipatore della classe degli elettrodomestici, aprì la strada alla liberazione della donna dalla schiavitù del lavoro domestico (anche se, a quel tempo, la schiavitù di molte donne era attribuibile al disumano lavoro in fabbrica o alla produzione domestica di beni da "vendere" alla rete di distribuzione commerciale), iniziando a offrire la possibilità di nuovi sbocchi professionali alla sua creatività e sensibilità. Per garantire la manutenzione distribuita di un prodotto di grande diffusione si dovette puntare sulla totale intercambiabilità delle parti. Purtroppo l'esigenza di intercambiabilità si applicò subito dopo alla produzione di strumenti bellici. E alla fine del XIX secolo si parlava di guerra assai frequentemente: non più guerra per tutelare l'equilibrio raggiunto, ma per affermare il predominio di una nazione sulle altre. Guerra tra nazioni, per i mercati, per la supremazia nei commerci, per il possesso o il controllo di fonti di approvvigionamento di materie prime. Guerra con eserciti nuovi, nei quali l'unità di misura dei soldati coinvolti tendeva verso il milione, non più verso le decine di migliaia come all'inizio del secolo. Per le armi si doveva dunque pensare ad aziende che producessero grandi masse di armi e di pezzi di ricambio, senza alcun vincolo all'assemblaggio delle parti, ovunque queste fossero prodotte. L'intercambiabilità divenne dunque l'imperativo dell'industria militare e i militari investirono nel miglioramento della qualità dei prodotti di loro interesse.

Con l'affermazione del concetto di intercambiabilità si fece strada, tra molte ostilità dei produttori, in particolare inglesi, anche il principio di normalizzazione dei prodotti. Primi furono gli americani che già nel 1880 adottarono forme e dimensioni unificate per alcuni prodotti, imponendole alla clientela industriale e ai consumatori. Li seguirono gli imprenditori tedeschi, sia perché si resero subito conto che la semplificazione era razionale, sia perché la loro ottima or-

<sup>35</sup> Trevor I. Williams: *Scienza e tecnologia*, in: *Storia del mondo moderno*, vol. IX, p. 82.

ganizzazione industriale facilitava l'introduzione e la diffusione di normazione interaziendale. Gli inglesi dovettero arrendersi di fronte al cattivo andamento delle vendite sia in USA e Germania sia in altri Paesi: nel 1901 fu istituito l'*Engineering Standards Committee*. Bastano pochi numeri per capire perché gli imprenditori inglesi dovettero cercare un accordo su una normativa comune: nel 1901 i fabbricanti inglesi producevano centoventidue tipi di profilati a U e a L, contro i trentatré degli USA e i trentaquattro della Germania!

Ci volle qualche anno in più per veder nascere gli organismi di normazione internazionali. La *International Electrotechnical Commission* (IEC) fu fondata a Londra nel 1906 nientemeno che da Lord Kelvin che ne fu il primo presidente. La sede si spostò a Ginevra, dov'è attualmente, nel 1948. Dal 1947 a Ginevra ha anche sede la *International Standard Organisation* (ISO), che si occupa di normazione in tutti i settori esclusi quelli elettrici ed elettronici, riservati all'IEC.

Così la metrologia fu chiamata a uno sforzo importante per assicurare precisione, intercambiabilità e uniformità di ciò che le nuove fresatrici universali e rettifiche per interni ed esterni erano in grado di produrre. Mentre le macchine di produzione venivano messe a punto negli Stati Uniti e poi esportate in Europa (dove, per essere obiettivi, venivano anche perfezionate), la produzione di calibri a tampone e ad anello, di calibri passa e non passa, di micròmetri (accento tonico sulla "o" per distinguere dall'omonimo sottomultiplo del metro), di regoli di precisione fu tipicamente europea. Il micròmetro ad arco, con scala a verniero, inventato nel 1848 dal francese Jean Laurent Palmer e perfezionato nel 1858 dall'imprenditore e ingegnere inglese Sir Joseph Whitworth<sup>36</sup> (1803-1887), viene industrializzato dalla Brown and Sharpe e, successivamente, dalla TESA, divenendo lo strumento principe nel controllo dimensionale di precisione.

Dobbiamo attendere il 1934 per vedere la nascita dell'industria degli strumenti di misura in Paesi diversi da quelli citati: in quell'anno infatti, Yehan Numata, di ritorno da un infelice periodo di studio e lavoro negli Stati Uniti, fondò in Giappone la Mitutoyo, un laboratorio di ricerca per la produzione domestica di micròmetri. Affascinante fu lo spirito che ispirò il fondatore, certamente un precursore dei metodi di produzione etica dei quali oggi tanto si parla: egli intese sia rafforzare la produzione industriale nel suo Paese sia diffondere la Mitutoyo nel mondo, come impresa e come conduttrice del business. Ma,

<sup>36</sup> Fu inventore eclettico, tra l'altro della filettatura per le viti di precisione che ancora oggi porta il suo nome e di vari perfezionamenti per le macchine utensili, nonché della rigatura nelle canne delle armi da fuoco per il tiro di precisione a grande distanza. Fondamentale fu il suo apporto nello studio di sistemi di produzione e di prodotti normalizzati.

memore della sua drammatica esperienza di emigrante, volle che tale diffusione fosse affiancata dalla diffusione di precetti morali, che individuò nella dottrina Buddista, e, sulla base di tali precetti, dalla formazione dei tecnici nel suo e in altri Paesi. Da questo spirito deriva ancora oggi la vocazione della Mitutoyo alla formazione del personale secondo i principi di Numata, ovunque avvii attività imprenditoriali. Questa visione serve a dimostrare che le misure possono e devono contribuire a migliorare il benessere dei popoli. Purtroppo, come abbiamo appena constatato, molto spesso i finanziamenti per il miglioramento delle misure vengono dai militari, casta che non può essere più lontana dal preoccuparsi in modo prioritario del benessere delle popolazioni verso le quali si indirizza<sup>37</sup>.

### *Le azioni*

Torniamo alla metrologia, alla Convenzione del Metro e alla CGPM. La prima riunione della GCPM si tenne nel 1889, quattordici anni dopo la firma della CM, a dimostrazione delle difficoltà incontrate in questa prima fase di sviluppo. Diciassette nazioni sono rappresentate (assente la sola Danimarca), con ventiquattro delegati, quattro soli dei quali sono funzionari ministeriali, dieci sono membri del CIPM (chiamati a esprimersi sulle proposte da loro stessi presentate: conflitto di interessi?) e gli altri provengono da Accademie scientifiche. Dunque, almeno all'apparenza, una conferenza di scienziati. Ma appena si comincia a parlare di soldi, ecco nascere i problemi. La proposta è di elevare la dotazione annuale del BIPM da cinquantamila a settantacinquemila franchi oro, a partire dal 1893: ben cinque delegati su diciassette dichiarano di non potersi pronunciare in modo netto per mancanza di direttive dai loro governi. La decisione resta in sospeso.

Il BIPM ha fatto il suo lavoro: ha confrontato i campioni di lunghezza e massa da distribuire agli Stati membri della CM con i campioni internazionali che sono stati fusi e lavorati in Gran Bretagna. Così la CGPM è in grado di deliberare quanto segue (il testo in lingua originale della delibera è particolarmente suggestivo):

---

<sup>37</sup> Questo vale certamente per l'epoca che stiamo descrivendo. Oggi i politici e chi li sostiene, grandi gruppi finanziari e multinazionali, ricorrono più raramente alla guerra per ottenere profitto: hanno scoperto, almeno quelli lungimiranti, che perseguire il benessere presente e futuro dei popoli può anche essere profittevole.

A. *En ce qui concerne les prototypes internationaux:*

1. Le Prototype du mètre choisi par le Comité international. Ce prototype représentera désormais, à la température de la glace fondante, l'unité métrique de longueur.
2. Le Prototype du kilogramme adopté par le Comité international. Ce prototype sera considéré désormais comme unité de masse.
3. L'échelle thermométrique centigrade à hydrogène par rapport à laquelle les équations des Mètres prototypes ont été établies.

B. *En ce qui concerne les prototypes nationaux:*

1. Les mètres en platine iridié, dont les équations, par rapport au prototype international, sont renfermées dans la limite de 0,01 millimètre, avec une erreur probable ne dépassant pas  $\pm 0,0002$  millimètre. Les kilogrammes en platine iridié, dont les équations sont renfermées dans la limite de 1 milligramme, avec une erreur probable ne dépassant pas  $\pm 0,005$  milligramme.

C. *En ce qui concerne les équations des prototypes nationaux:*

Les équations des prototypes nationaux, telles qu'elles ont été déterminées au Bureau international, sous la direction du Comité international, et inscrites dans le Rapport de ce Comité et sur les certificats accompagnant ces prototypes.

Il prototipo del metro e le sue copie, in lega di 90% platino e 10% iridio, furono fuse nel 1882 dalla ditta Johnson, Matthey & Co. di Londra<sup>38</sup>; i fautori del piede riuscirono dove i fonditori francesi avevano fallito. I francesi si occuparono delle lavorazioni, taglio delle barre (effettuato dai Fratelli Brunner di Parigi) e incisioni sulla barra del metro (ingegner Tresca al *Conservatoire des Arts e Métiers* a Parigi). La struttura del prototipo fu studiata con molta attenzione: la sezione a X è iscritta in un quadrato di 20 mm di lato; i tratti sono incisi sul piano delle fibre neutre (cioè dove sono minime le deformazioni dovute al peso dell'oggetto quando viene appoggiato su due supporti). Dal punto di vista dell'impiego furono privilegiati gli aspetti di stabilità dimensionale (scelta della

---

<sup>38</sup> Nel 1895, all'inaugurazione della II CGPM, Étienne Jules Marey (1830-1904, fisiologo francese), presidente dell'Accademia delle Scienze francese e presidente della Conferenza, ricorda che «Henry Sainte-Claire Deville (1818-1881, chimico francese noto in particolare per le sue ricerche sull'alluminio) non si è tirato indietro di fronte ai pericoli delle manipolazioni chimiche necessarie per produrre la quantità di platino-iridio indispensabile (per la fabbricazione dei prototipi): per fornire alla nazione l'iridio necessario ha sacrificato la sua vita.»

lega) e di condizioni scientifiche (in contrapposizione con pratiche) di definizione ben riproducibili (temperatura del ghiaccio fondente). Nella meccanica pratica tutte le misure e le lavorazioni meccaniche si compiono a temperatura ben diversa da 0 °C; fu peraltro felice, anche sotto questo punto di vista, la scelta della lega platino-iridio, che presenta un coefficiente di dilatazione termica di circa  $8,3 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , non molto diverso da quello dell'acciaio, che è intorno a  $10,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ . Se i due coefficienti di dilatazione termica fossero stati uguali, quando i campioni da confrontare, uno di acciaio e uno di platino-iridio, si fossero trovati alla stessa temperatura, non importa quale, il risultato del confronto sarebbe stato lo stesso che si sarebbe avuto se fossero stati confrontati essendo entrambi a 0 °C. Una differenza di  $2 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  nei coefficienti di dilatazione significa che un regolo di acciaio, confrontato a 20 °C con uno di platino-iridio, supposti i due regoli uguali a 0 °C, risulterebbe più lungo di 2  $\mu\text{m}$ : un'inezia per la meccanica di precisione della fine del XIX secolo!

La discussione scientifica si limitò a decidere se indicare o meno l'errore massimo probabile da attribuire ai prototipi: con dodici voti contro cinque fu respinta la proposta del CIPM (risolvendo il conflitto di interessi), eliminando tale informazione dalla delibera, in quanto gli oppositori sostennero che era inutile un'informazione non supportata da misure definitive. Le copie dei prototipi verranno pertanto distribuite senza garanzie sull'errore massimo probabile ma solo con l'indicazione delle differenze misurate rispetto ai prototipi: mancava l'informazione sull'incertezza di tali differenze. Le copie del prototipo del metro sono distribuite insieme a una coppia di termometri a mercurio in vetro, tarati dal BIPM con riferimento al termometro a gas all'idrogeno. In realtà furono venduti ciascuno al prezzo di diecimilasettecentodieci franchi oro, più cinquecentotrentacinque franchi oro per i termometri e altri accessori. È interessante confrontare questi importi con la dotazione annuale del BIPM.

La definizione del 1889 viene migliorata nel 1927 dalla VII CGPM:

L'unità di lunghezza è il metro, definito dalla distanza, a 0 °C, degli assi dei due tratti mediani tracciati sulla barra di platino-iridio depositata al BIPM e dichiarata Prototipo del metro dalla 1° CGPM, essendo tale regolo sottoposto alla pressione atmosferica normale e supportato da due rulli di almeno un centimetro di diametro, posti simmetricamente su uno stesso piano orizzontale e distanti l'uno dall'altro 571 mm.

Eccezionale è la capacità dimostrata dal BIPM, che riesce a confrontare i regoli a tratti con un errore massimo di 0,2  $\mu\text{m}$  e le masse con un errore massi-

mo di 5  $\mu\text{g}$ . Eccezionale è anche la capacità dimostrata dai costruttori, capaci di garantire possibilità di confronto dei regoli a quei limiti (incidendo, con macchine a dividere di ingegnosa fattura, tratti a bordi nitidi fra loro ben paralleli) e intercambiabilità, entro 10  $\mu\text{m}$  per i regoli ed entro 1 mg per le masse. Per confrontare i regoli vengono costruiti comparatori trasversali (i regoli sono montati sul comparatore uno a fianco dell'altro e portati successivamente sotto una coppia di microscopi che servono a misurare le differenze in lunghezza), nei quali i regoli da confrontare sono immersi in un bagno d'acqua distillata mescolata a ghiaccio fondente. Per confrontare le masse sono rese disponibili bilance a due piatti nelle quali i ridotti attriti tra giogo e altre parti fisse (la colonna) e mobili (i piattelli) consentono di apprezzare sbilanciamenti dall'equilibrio dell'ordine di 5  $\mu\text{g}$ . Per effettuare misure a questo livello di precisione si applicano tutte le tecniche di inversione di posizione tra i due campioni da confrontare e tutte le tecniche di cicli simmetrici di misura per compensare le derive degli strumenti e dell'ambiente. Nelle soffitte del BIPM sono conservati, ancora oggi, alcuni dei quaderni di laboratorio nei quali venivano registrate le misure che si effettuarono allora.

Il BIPM non si limitò al confronto dei prototipi con le loro copie e alla distribuzione delle copie ai Paesi aderenti alla CM; come già abbiamo accennato, due scienziati, J.-R. Benoît e Albert Abraham Michelson (1852-1931)<sup>39</sup>, nel 1882 avviarono la determinazione sperimentale della lunghezza di una copia del prototipo del metro in lunghezze d'onda della riga rossa del cadmio. È una rivincita della scienza sul commercio, un ritorno alle geniali idee dell'illuminismo, divenute ormai "globalizzabili" grazie alla nascita degli Stati moderni: non prototipi che generano una sorta di "trinità" (prototipo, grandezza e unità, intimamente tra loro interconnessi), ma un'unità definita sulla base di un multiplo o un sottomultiplo di una grandezza specifica universale, sia essa una lunghezza d'onda o la lunghezza del meridiano terrestre. I loro studi contribuirono al cambiamento della definizione del metro del 1960 da parte della XI CGPM. Ma assai prima i loro lavori, conclusi nel 1892, consentirono nel 1907 alla *International Solar Union* (dal 1919 *International Astronomical Union*, IAU) di definire l'ångström internazionale (simbolo Å), unità di distanza da usare nelle misure di lunghezza d'onda, ponendo 6438,4696 Å pari alla lunghezza d'onda della

<sup>39</sup> Fisico polacco-americano, premio Nobel per la fisica nel 1907, famoso per le misure della velocità della luce e per l'esperimento condotto nel 1887 negli USA, con cui egli ed Edward Morley (1838-1923, professore di chimica) dimostrarono l'infondatezza dell'ipotesi dell'esistenza dell'etere, aprendo la strada alla teoria della relatività ristretta di Albert Einstein.

riga rossa del cadmio. L'interferometro usato, successivamente modificato e migliorato, era ancora funzionante e in uso al BIPM nel 1970, quando anche personalmente partecipai, in quel prestigioso laboratorio, alle misure di lunghezza d'onda di righe del krypton nell'infrarosso prossimo: uno strumento magnifico, per stabilità meccanica, per modalità di effettuazione di piccole variazioni del cammino ottico (ottenute agendo sull'inclinazione della lamina compensatrice), per modernità dei sistemi di lettura dell'interfrangia (fotomoltiplicatori ad alta sensibilità nel visibile e nell'infrarosso prossimo).

La CGPM si riunisce per la seconda volta nel 1895. Affronta una proposta del BIPM: la definizione di un rapporto fisso tra metro e yarda. La proposta è caldeggiata dalla delegazione inglese; l'Inghilterra infatti è commercialmente la nazione più forte e non intende essere emarginata dal processo di liberalizzazione dei mercati, anche se non aderisce al sistema metrico decimale. Vuole dunque un aggancio ben definito tra i due sistemi (il metrico e l'inglese) e chiede che la yarda sia fissata uguale a  $0,914\,399\,2\text{ m}$  (che porta alla definizione esatta di un pollice uguale a  $2,54\text{ cm}$ ), alla temperatura di  $62\text{ °F}$  (pari a  $16,667\text{ °C}$ ). Si oppone il solo Mendeleev, capo della delegazione russa. Egli sottolinea che in una situazione così delicata, da un punto di vista commerciale, e con risultati sperimentali poco sicuri del rapporto tra le due unità, la decisione sia prematura e convenga attendere ulteriori verifiche. Resta isolato in questa sua posizione: tutte le altre delegazioni votano a favore, dimostrando quanto l'Inghilterra abbia peso nelle decisioni. Ma la CGPM, quasi a farsi perdonare l'incongruenza dell'apertura alla yarda, riceve e appoggia una lettera del 9 settembre di Samuel Montagn, uno dei principali sostenitori in Inghilterra del passaggio al sistema metrico decimale.

Infine la II CGPM recepisce ufficialmente i risultati di Benoît e Michelson sulle misure del metro in termini di lunghezze d'onda, e afferma che siano considerati testimoni naturali del prototipo del metro le sue relazioni con le lunghezze d'onda di radiazioni luminose. È una frattura che si apre nel mondo dei prototipi, verso il concetto di un campione naturale. La rivoluzione francese aveva proposto un campione di lunghezza, naturale e universale, pari a un sottomultiplo della lunghezza di un arco di meridiano terrestre; ora, sulla linea delle misure di Benoît e Michelson, si immagina un nuovo possibile campione del metro, anch'esso naturale e universale: un multiplo della lunghezza d'onda di una radiazione luminosa. Il seme gettato dalla II CGPM germoglierà, tanto per il metro come per altre unità del sistema, dopo un lungo e travagliato processo di contrasti tra il CIPM che spinge e la CGPM che tentenna.

Così, con un colpo al cerchio, la valorizzazione della yarda a favore del pragmatismo, e un colpo alla botte, l'apertura a un campione naturale per il metro a favore della razionalità, si chiude la II CGPM e il secolo XIX.

Non va però dimenticato che la II CGPM stabilisce un precedente importante: accetta il principio che la modifica del testo della Convenzione del Metro non possa essere deliberato da una CGPM, ma debba essere deciso dai governi mediante una Conferenza Diplomatica, espressamente convocata con l'obiettivo di modificare la Convenzione. A questo principio farà spesso riferimento il CIPM per evitare continue discussioni su aspetti marginali del testo della Convenzione.

Nella delegazione italiana alla II CGPM troviamo Galileo Ferraris (1847-1897) che fu membro del CIPM dal 1895 al 1897.

### *L'unità di tempo*

Alla data della firma della Convenzione del Metro l'unità di tempo accettata era il secondo di giorno solare medio (definizione che resterà valida fino al 1956). Per rendere più uniforme la scala di tempo basata sulla rotazione terrestre, si era immaginato un sole fittizio i cui passaggi giornalieri su un meridiano avvenissero a intervalli di tempo regolari della durata di 86 400 secondi suddivisi in ventiquattro ore. Il sole fittizio o medio si doveva muovere sul piano dell'equatore celeste con moto uniforme per tutto l'anno. Così nacque il giorno solare medio, mentre la differenza di tempo tra il passaggio reale del sole e il passaggio del sole fittizio fu chiamata l'equazione del tempo. Il secondo fu dunque definito come la ottantaseimilaquattrocentesima parte del giorno solare medio. Si tratta di una unità ben strana, che resterà strana ancora fino a oggi, dimostrando la capacità della CM di adattare le regole alle usanze consolidate. I suoi multipli, caso unico, non sono decimali: il minuto e l'ora sono multipli basati su sessanta, che è pari a cinque dozzine; il giorno è multiplo dell'ora di ordine ventiquattro, cioè due dozzine. Nei multipli del secondo permane l'antica usanza europea di basare i conteggi prevalentemente sul sistema duodecimale. L'anno conta trecentosessantacinque giorni, salvo gli anni bisestili, per far quadrare i conti con il ritmo della stagioni.

Non si può parlare dell'unità di tempo senza introdurre la discussione sul concetto di tempo che ha coinvolto fisici e filosofi nell'intero arco della storia della scienza e che ancora oggi è ben lungi dall'essere conclusa<sup>40</sup>. Nell'ultimo

---

<sup>40</sup> Craig Callender: *Il tempo è un'illusione?*, Le Scienze, 504, 2010, pp. 57-63.

quarto del XIX secolo il concetto di tempo era deducibile dalle leggi del moto di Isaac Newton: il tempo ordina gli eventi, garantisce la loro continuità, presuppone l'assolutezza della simultaneità, fluisce senza inizio e senza fine, rappresenta la freccia che consente di collocare gli eventi nel passato o nel futuro. La ricerca dell'unità di misura per il tempo così descritto non può prescindere dall'affrontare anche il problema della datazione; in altre parole l'unità di tempo deve consentire la costruzione di una *scala di tempo*<sup>41</sup>. Per costruire una scala di tempo si ricorre a un fenomeno fisico, per esempio la rotazione della terra. Di tale fenomeno siamo in grado di scrivere la legge del moto, secondo la meccanica di Newton: tale legge fornisce direttamente il campione di durata di tempo, cioè l'unità della scala, il secondo appunto. Aggiungiamo un'origine e la scala di tempo è costruita.

Quando, tra il 1935 e il 1943, grazie all'uso di pendoli astronomici e di orologi piezoelettrici, si scoprì che la scala di tempo legata alla rotazione terrestre non era uniforme, si passò a una nuova scala, legata alla rivoluzione della terra intorno al sole. Questo cambiamento (1957, adozione del secondo con riferimento alla scala di tempo delle Effemeridi) non richiese alcuna modifica al concetto di tempo utilizzato nella metrologia, malgrado Boltzmann prima e Einstein successivamente, come vedremo in seguito, avessero assestato colpi gravissimi ai fondamenti della fisica di Newton.

Anche la successiva scala di tempo atomico internazionale (TAI), con origine all'1 gennaio 1958 e unità di scala il secondo (definito però, dal 1967, come multiplo del periodo di una radiazione elettromagnetica), resta una scala assoluta. La nuova definizione del secondo impone che la realizzazione del campione preveda due correzioni relativistiche, le quali in qualche modo suggeriscono un'attenuazione del concetto di tempo assoluto e una *relativizzazione* legata alla velocità di spostamento dell'osservatore.

Ma della scala TAI non sappiamo scrivere alcuna equazione del moto. È uniforme, perenne, universale, affidabile e precisa ma non va d'accordo con l'alternarsi delle stagioni, cioè con la posizione angolare della terra, della quale sappiamo invece scrivere l'equazione del moto. Nascono complicazioni che richiedono compromessi: è l'infinita storia del tempo che farà da filo conduttore anche nella storia della moderna metrologia.

<sup>41</sup> Sigfrido Leschiutta: *Campioni e scale di tempo*, in: E. Arri e S. Sartori (a cura di): *Le misure di grandezze fisiche*, Paravia, 1984, pp. 52-66.

### *Le aziende*

Quali sono le aziende che, da un lato, facilitarono con i loro prodotti questa corsa al miglioramento della precisione meccanica e, dall'altro, utilizzarono i miglioramenti per avanzamenti tecnologici dei loro prodotti? Si tratta di nomi leggendari per tutti coloro che hanno a che fare con la meccanica di precisione.

Ricordiamo Joseph Brown, della Brown and Sharpe (USA)<sup>42</sup>, che nel 1875 ideò la rettificatrice universale. La Brown and Sharpe è stata, ed è ancora, ai vertici mondiali nella metrologia industriale per la misura delle caratteristiche geometriche dei prodotti.

Nel 1862 veniva fondata a Ginevra la *Société Genevoise d'Instruments de Physique* (SIP), eccezionale laboratorio di nuove tecnologie: forni a gas dal 1867, idromotori e perforatrici ad aria compressa dal 1872, macchine del freddo e dinamo dal 1874. Nel 1888 venne installato al BIPM il comparatore geodetico la cui ottica e la cui meccanica di precisione furono fornite dalla SIP. Dopo la prima guerra mondiale la SIP diviene produttrice specializzata di macchine utensili di grande precisione, fino alle macchine di misura e alle macchine a dividere per la produzione di regoli in acciaio e invar<sup>43</sup> e al comparatore longitudinale che servì per i migliori confronti tra lunghezze d'onda e campioni materiali di lunghezza, prodotto in due sole versioni, una per il BIPM e l'altra, nel 1971, per l'Istituto di Metrologia G. Colonnetti del CNR, oggi confluito nell'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM).

Ricordiamo anche le tre generazioni di Ernst Leitz, ottici e imprenditori tedeschi: il capostipite (1843-1920), fondatore dell'azienda *Optisches Institut Belthle und Leitz, Wetzlar, vorm. C. Kellner*, il figlio (1871-1956), creatore del marchio originario Leica, condensato di *Leitz-camera*; e il nipote, continuatore, con i fratelli Ludwing e Günther, dell'opera degli avi. Dal 1883 la Leitz produce utensili per la

---

<sup>42</sup> Oggi il marchio Brown & Sharpe, insieme ad altri prestigiosi marchi come CE Johansson, CimCore, CogniTens, DEA, Leica Geosystems (Metrology Division), Leitz, Romer, Sheffield e TESA, è proprietà di Hexagon Metrology, parte di Hexagon Measurement Technologies, una nuova area produttiva all'interno di Hexagon Group.

<sup>43</sup> L'invar è una lega di ferro (64%) e nichel (36%), con tracce di cromo e carbonio, caratterizzata da un coefficiente di dilatazione termica oltre dieci volte più basso di quello del ferro. Fu scoperta dal fisico svizzero Charles Edouard Guillaume (1861-1938). Egli fu assunto nel BIPM nel 1883 e ne divenne direttore dal 1915 al 1936. Per i suoi studi sul termometro a mercurio e sulle leghe di acciaio e nichel a basso coefficiente di dilatazione termica ottenne nel 1920 il premio Nobel per la fisica.

lavorazione del legno. Oggi il Gruppo Leitz è leader mondiale nella produzione di macchine utensili per la lavorazione di legno, plastica e metallo.

Ricordiamo ancora l'azienda del meccanico Gottlieb Kern, fondata nel 1844, che già ai primordi produsse le bilance più precise della sua epoca. Essa divenne il nucleo dell'industria delle bilance di precisione della Germania meridionale, ottenendo rinomanza internazionale. È il "meccanico universitario" di Goettingen Florenz Sartorius, che nel 1870 fonda l'azienda di macchine di alta precisione denominata *Feinmechanische Werkstatt F. Sartorius* e avvia la produzione di bilance analitiche.

L'elenco potrebbe continuare perché tanti furono, in quegli anni cruciali, i pionieri di aziende ancora oggi in posizione di primo piano. Ricordiamo almeno due nomi italiani. Angelo Salmoiraghi (1848-1939), imprenditore, ottico e ingegnere, produttore di strumenti di alta precisione per l'industria e la geodesia. Si laureò al Politecnico di Milano sotto la guida di Ignazio Porro (1801-1875; ottico e topografo, noto per l'invenzione, nel 1850, del sistema di prismi ancora oggi usato nella costruzione di binocoli). Il Porro fondò nel 1865 la Filotecnica, che si sviluppò sotto la guida del suo allievo Salmoiraghi, diventando Filotecnica-Salmoiraghi, fino ad acquisire un ruolo di primo piano tra i produttori di strumenti ottici e di precisione. L'azienda ha poi continuato la propria attività fondendosi con la Viganò e raggiungendo una posizione ragguardevole nel campo dell'ottica e dell'occhialeria, con il nome di Salmoiraghi & Viganò.

Astronomi e costruttori di strumenti, tra i quali spicca il nome di Giovanni Battista Amici (1786-1863), progettaron nel 1862 la costituzione dell'azienda Officine Galileo. Il progetto fu portato a termine nel 1866 e nel 1873 la produzione si estese, dagli originari strumenti meccanici e ottici di precisione, anche ad apparati elettrici, di illuminazione. Erano, a quell'epoca, impiegati quaranta operai specializzati. Nel 1876 le Officine Galileo costruirono il comparatore longitudinale tipo Bianchi, usato dagli uffici del ministero dell'economia e agricoltura italiano per disseminare il metro a partire dalla copia del prototipo; il bellissimo strumento è ancora oggi disponibile e funzionante presso l'Ufficio Centrale Metrico a Roma. Nel 1896 l'azienda, divenuta di proprietà dell'ing. Giulio Martinez, avviò la produzione di strumenti ottici, in particolare periscopi, per la Marina Militare Italiana. Attualmente le Officine Galileo sono parte di Galileo Avionica, una controllata di SELEX Sensors and Airborne Systems S.p.A., una società di FINMeccanica.

Per quanto riguarda la termometria, il primo termometro a resistenza di platino fu probabilmente costruito, nel 1861, dall'ingegnere tedesco Ernst Werner

von Siemens e da lui presentato nel 1871 in una *lecture* alla Royal Society inglese. Ma l'azienda *Telegraphen-Bauanstalt von Siemens & Halske*, fondata dal padre nel 1847, non considerò di interesse questa invenzione. Nel 1886 il fisico inglese Hugh L. Callendar (1863-1930)<sup>44</sup> propose l'uso di questo termometro come nuovo campione di precisione nelle misure di temperatura<sup>45</sup>.

La scala adottata era quella centigrada dell'idrogeno. Bisogna aspettare il 1911 per la proposta dell'istituto metrologico tedesco, che allora si chiamava PTR, di adozione della scala termodinamica di temperatura, proposta fatta propria dalla VIII CGPM nel 1927. Solo anni dopo iniziò la produzione industriale di questi strumenti e di altri misuratori di temperatura.

## 1.6. Si afferma un nuovo paradigma

Che ne è stato dell'ideale di universalità delle unità di misura e del metodo razionale nella loro scelta, affermato dai padri del sistema metrico decimale all'epoca della rivoluzione francese? Quell'ideale era parte importante del paradigma proposto: universalità delle unità di misura in modo che fossero accessibili a tutti i cittadini del mondo; razionalità nella derivazione delle altre unità<sup>46</sup> e nella costruzione dei multipli e dei sottomultipli.

<sup>44</sup> Alcuni sostengono che a Callendar e ad altri tra il 1885 e il 1900 vada attribuita la messa a punto dei metodi di costruzione del termometro a resistenza di platino. Si trattò comunque sempre solo di produzioni a carattere artigianale. Si veda anche H. L. Callendar: intervento alla British Association for the Advancement of Science 1899 (Phil. Mag., 48, 519-547, 1899).

<sup>45</sup> Nel 1887 il CIPM adotta, come scala termometrica standard per il Servizio Internazionale di Pesi e Misure, la scala centigrada avente come punti fissi la temperatura del ghiaccio fondente puro (0 °C) e quella del vapore di acqua distillata (100 °C) alla pressione atmosferica standard. La pressione atmosferica standard fu allora definita come quella rappresentata dal peso di una colonna di mercurio alta 760 mm, avente una densità di 13,59593 kg/m<sup>3</sup> e sottoposta all'accelerazione di gravità, definita come l'accelerazione dovuta alla gravità al *Pavillon de Breteuil* divisa per 1,0003322 in modo da renderla equivalente all'accelerazione dovuta alla gravità a 45° di latitudine e al livello del mare.

<sup>46</sup> Questa caratteristica del sistema si chiama in gergo *coerenza*: significa che se una grandezza, per esempio l'area di una superficie, è descritta mediante un modello che chiama in causa altre grandezze, nell'esempio il prodotto di due lunghezze, anche la sua unità di misura è derivata, mediante lo stesso modello, dalle unità di misura delle grandezze chiamate in causa. La relazione tra le unità di misura, che generano le unità derivate, non deve introdurre alcun fattore numerico ulteriore.

*Da una giustizia perfetta a soluzioni più giuste*

Gli illuministi, padri fondatori del sistema metrico decimale, posero alla base del loro progetto la constatazione dell'esistenza di una palese ingiustizia nel sistema di misura costituito da una pluralità di campioni fra loro diversi (oltre duecento diversi campioni di massa e ben più numerosi campioni di capacità o volume nella sola Francia), gestiti e posseduti dalla nobiltà e dall'alto clero a svantaggio dei contadini e degli artigiani. Mirarono a costruire un sistema capace di assicurare una "giustizia perfetta" operando lungo una linea che Amartya Sen (premio Nobel per l'economia nel 1998) definisce "istituzionalismo trascendentale"<sup>47</sup>. Istituirono pertanto un sistema basato su due capisaldi. Il primo è il riferimento a fenomeni o proprietà universali e quindi a disposizione di qualunque individuo nel mondo, almeno in teoria, per le definizioni delle unità indipendenti: la lunghezza di un meridiano terrestre, la massa volumica dell'acqua, la durata del giorno solare medio. Il secondo caposaldo è costituito da regole "razionali" per la derivazione di altre unità e per la generazione di multipli e sottomultipli.

Quando però si cercò di passare dalle definizioni universali alle realizzazioni concrete dei campioni si scontrarono con gravi difficoltà. Nell'arco di pochissimi anni alcuni riferimenti naturali vennero accantonati e si tornò ai prototipi, adottando l'orientamento che Sen chiama «comparazione centrata sulle realizzazioni concrete». Non si tratta più di cercare una "giustizia perfetta" ma di procedere per confronti basati appunto su realizzazioni concrete, operando scelte mirate a ottenere soluzioni "più giuste". Sul piano istituzionale i padri fondatori affidarono la gestione dei prototipi a un'autorità emanazione del popolo, nella convinzione che essa potesse gestirli nel modo più giusto possibile sulla base di criteri etici condivisi da una significativa maggioranza di individui "razionalmente operanti". La scelta della taglia dei prototipi non avvenne sulla base di un'indagine di quali fossero le taglie più diffuse (probabilmente avrebbe vinto la yarda e la libbra) ma i legislatori si appoggiarono su quei riferimenti universali che, messi da parte sul piano pratico, restarono pur sempre immaginati come la perfezione verso la quale tendere.

Più difficile è giustificare la maggiore razionalità della scelta, rispetto ad altre possibili, delle regole di coerenza nella generazione delle unità (e grandezze) derivate e della base dieci per la generazione di multipli e sottomultipli delle

<sup>47</sup> Amartya Sen: *L'idea di giustizia*, Penguins Books Ltd, UK 2009, trad. L.Vanni, Arnoldo Mondadori, 2010.

unità. È anche difficile sostenere che le scelte effettuate fossero le più comode: più comode per chi? Può essere comodo per un piastrellista usare i metri quadri per misurare la superficie di una stanza, anche se di rado le piastrelle contenute in una confezione servono a coprire un numero intero di metri quadri. Certamente per un contadino è più comodo misurare la superficie di un'area agricola in giornate di lavoro necessarie per ararla. Si tratta dunque di scelte non più razionali o più comode di altre, ma forse solo più semplici da memorizzare e generalizzare.

La Convenzione del Metro fece proprio il patrimonio, ormai largamente diffuso grazie soprattutto agli eserciti napoleonici, di realizzazioni concrete ottenute applicando il metodo di comparazione su esse basato. Addirittura fece proprio tale metodo, portandolo a estremi con scelte che definiremo pragmatiche o “del doppio binario”. Fino all'entrata nel sistema della definizione dell'ampere, gli organismi della Convenzione rigettarono quella parte dell'illuminismo, facente capo a Thomas Hobbes, Jean-Jacques Rousseau e altri, che aveva promosso il metodo dell'istituzionalismo trascendentale. Rigettarono anche la ricerca preventiva del dibattito allargato, delle scelte effettuate dopo aver indagato ogni tipo di pareri e averli confrontati tra loro, tradizione condivisa dall'intero illuminismo. Ancora oggi le scelte della CM sono basate sulla discussione in un ambito scientifico molto ristretto e marginale della società, come se le misure fossero proprietà di pochi e non la necessità dell'umanità intera.

Va però chiaramente affermato che le scelte della CM, se giudicate sul piano dei risultati, appaiono pienamente corrette. Aderiscono oggi alla CM oltre ottanta nazioni che rappresentano quasi il 99% della popolazione mondiale. Usano il Sistema Internazionale di unità una larghissima maggioranza di individui, anche se in alcune culture (anglosassoni) e in alcuni ambiti (agricoltura) sopravvivono in uso unità fuori dal sistema. Anche la struttura istituzionale costruita per l'applicazione della Convenzione, basata su un livello decisionale politico, un livello tecnico scientifico consultivo ma con forti autonomie decisionali e una struttura operativa permanente a carattere internazionale, appare ben calibrata intorno alle scelte basate sul metodo della «comparazione centrata sulle realizzazioni concrete». Per questo motivo i gestori politici e scientifici della CM si sono opposti nel tempo a ogni proposta di cambiamento sostanziale della Convenzione, consapevoli che l'equilibrata scelta dei contenuti rappresenta un patrimonio che è meglio non modificare senza correre il rischio di mettere in crisi l'intero sistema. Il difficile equilibrio raggiunto che ha retto per ben centotrentacinque anni, caso unico nella storia dell'umanità per un accor-

do internazionale, va tenuto ben presente anche oggi durante la discussione sull'ipotesi di cambiamento dei fondamenti del Sistema: dalle definizioni delle unità alle definizioni di valori immutabili di costanti fondamentali (si vedano le conclusioni finali). Le istituzioni permanenti della CM sono state immaginate per definire le unità di misura, per gestire la generazione dei campioni e per consentirne il confronto internazionale sotto la supervisione di un organismo tecnico-scientifico indipendente. Abbandonare la definizione delle unità tradizionali può condurre rapidamente a una crisi di queste istituzioni.

*Dall'universalità al consenso; dalla razionalità alla continuità*

Con la firma della Convenzione del Metro e con la progressiva affermazione dei suoi organismi si impone un nuovo paradigma: all'universalità si sostituisce il metodo del consenso e alla razionalità si sovrappone un nuovo concetto, la continuità. La continuità è condizione necessaria per il consenso: significa che sono ammessi cambiamenti nelle definizioni delle unità di misura purché questi conducano a nuovi campioni, la *mise en pratique* della definizione, che differiscano dai precedenti entro l'indeterminazione che essi avevano. Si cambia dunque solo per migliorare, lasciando libero chi non sente l'esigenza del miglioramento di continuare a usare i vecchi campioni.

Entro la fine del secolo accettano il nuovo paradigma, diventando membri della CGPM con la firma della CM, altri quattro Stati, portando il totale degli aderenti a ventuno: Romania (1884), Regno Unito di Gran Bretagna e di Irlanda del Nord (1884), Giappone (1885), Messico (1890).

Il nuovo paradigma, basato su consenso, razionalità e continuità, non è libera scelta degli scienziati che concordano su principi e contenuti di una disciplina nuova: è paradigma imposto dai decisori, i rappresentanti degli Stati aderenti alla CM, nell'ottica dell'ottenimento del massimo possibile rendimento di un trattato commerciale. Ma gli scienziati scoprono ben presto che questo paradigma apre affascinanti prospettive di ricerca e trova facili fonti di finanziamento, sia pubbliche sia private. La Convenzione del Metro ha prodotto così una nuova scienza: la scienza delle misure, la metrologia. D'ora innanzi la nuova scienza affronterà compiti di grande importanza per lo sviluppo delle tecnologie e delle altre scienze. Utilizzerà tutto quanto messo a disposizione dalle altre scienze, senza esclusione alcuna purché ciò che da esse si assorbe non contraddica il paradigma di riferimento della metrologia. La scienza delle misure svilupperà nuovi campioni che porteranno a nuove definizioni delle unità di misura; progetterà nuovi metodi e strumenti di misura; compirà esperimenti cruciali

per verificare o falsificare altre scienze; stimolerà le aziende a produrre nuovi strumenti, nuovi campioni, nuove modalità di utilizzo delle informazioni ottenibili dalla misura delle caratteristiche e delle proprietà dei sistemi e dei fenomeni.

È così spiegato perché il risultato ottenuto da Benoît e Michelson nel 1892, menzionato in precedenza, non sortì alcun effetto, malgrado considerare il metro come un multiplo della lunghezza d'onda della riga rossa del cadmio non fosse concettualmente diverso dal considerarlo un sottomultiplo della lunghezza del meridiano terrestre. Ma mancavano il consenso e la garanzia di continuità, che verranno ottenuti solo nel 1960. Infatti quasi nessun Paese membro della CM disponeva di laboratori attrezzati per generare il metro dalla lunghezza d'onda della riga rossa del cadmio; per tale motivo non si potevano verificare i risultati ottenuti al BIPM, né si poteva garantire la continuità del “nuovo” ipotetico metro con il prototipo. Il consenso impone la ridondanza dei risultati sperimentali, ossia che lo stesso esperimento, che conduce a una nuova definizione di un'unità di misura o alla concezione di un nuovo metodo o strumento di misura, possa essere accettato nel paradigma della metrologia solo se a esso pervengono, con risultati tra loro in buon accordo, più scienziati indipendenti tra loro. Si spiega anche la scelta di realizzare istituti nazionali di metrologia (IMN), della quale già parlammo: gli IMN erano essenziali anche per raggiungere il consenso e quindi per operare nella nuova scienza. Generavano inoltre occasioni di ricerca avanzata, anticipando la corsa alla realizzazione di grandi complessi di ricerca che si avvierà durante la seconda guerra mondiale e condurrà gli USA a primeggiare al mondo nella produzione di nuova scienza e nuova tecnologia.

Un'altra conseguenza del paradigma del consenso fu la difficoltà di estenderlo, una volta che fosse stato raggiunto dagli scienziati, ai decisori, cioè ai plenipotenziari che votavano le delibere della CGPM. La nuova scienza aveva contribuito a creare una setta chiusa di scienziati, una nuova specializzazione con il suo gergo e con il suo parlare e scrivere per i colleghi e non per il pubblico, sia pure colto. Le appassionate discussioni, che avevano coinvolto l'intera *élite* culturale europea all'epoca della rivoluzione francese, sulle scelte per il nuovo sistema metrico decimale, ora non erano più possibili. Solo gli specialisti avevano accesso ai sottili concetti e ai meccanismi matematici e sperimentali raffinati che si ponevano alla base delle nuove proposte. I tempi che intercorrono tra la scoperta scientifica e la sua utilizzazione nel sistema di unità si fanno incredibilmente lunghi. Ecco spiegato perché, per esempio, solo nel 1983 l'ipotesi di Einstein, formulata nel 1905, della costanza della velocità della luce

viene utilizzata per cambiare la definizione di una delle unità del sistema, in accordo con una proposta formulata da Planck nel 1899. Paradossalmente è più breve il tempo necessario per la conversione della scoperta in nuova unità o campione di misura quando la scoperta è più complessa, concettualmente e nella formulazione matematica; in questi casi i decisori, che non riescono a capire, sono costretti a fidarsi del consenso degli scienziati. Ecco spiegato perché la quantizzazione<sup>48</sup> della tensione elettrica e della resistenza elettrica (torneremo su questi temi cruciali) entrano rapidamente nella prassi metrologica, nelle raccomandazioni della CGPM e di conseguenza nella produzione industriale. Nei fatti il processo di innovazione si sdoppia, pur rispettando il paradigma: il consenso su un'innovazione è dapprima raggiunto dagli scienziati, nei comitati scientifici; solo allora viene proposto per una delibera alla CGPM. Non di rado, peraltro, il consenso e la decisione, quando non ha effetti, o si vuole che non ne abbia, sugli impegni che gli Stati hanno concordato di assumere a seguito di delibere della CGPM, resta operativo solo in ambito tecnico e scientifico. Vedremo alcuni esempi di questa strada alternativa nel corso degli anni di vita della CM; ciò che risulta è una convenzione internazionale intorno alla quale cresce il consenso e, ancora oggi, rimane immutata rispetto alle origini, fatte salve le modifiche apportate nel 1921 delle quali abbiamo parlato.

Come abbiamo già notato, in questo periodo la chimica, l'elettricità, la biologia e la fisiologia rimasero fuori dai pensieri della CGPM. Per tutte e quattro le scienze mancava anzitutto il consenso. Ma mancava anche un'attrattiva e sistematica formulazione dei fondamenti epistemologici della nuova disciplina: problema questo assai complesso sul quale torneremo al momento delle conclusioni di questo studio.

### *I dilemmi della chimica*

Gli stessi chimici non avevano ancora chiarito e unificato il concetto di quantità di sostanza. I progressi erano stati enormi: la chimica era ormai una disciplina del tutto distinta dall'alchimia e già all'inizio del secolo XIX aveva iniziato il percorso teorico per la definizione del concetto di materia. Il chimico inglese John Dalton (1776-1844)<sup>49</sup> aveva ripreso la teoria atomica, portandola dal piano metafisico al piano scientifico, agganciandola solidamente a esperi-

<sup>48</sup> Quantizzazione in questo contesto si riferisce alla proprietà della tensione e della resistenza elettriche, quando vengono generate nell'ambito di particolari sistemi in regime di superconduttività, di assumere solo valori discontinui proporzionali al valore di rapporti tra costanti fondamentali: costante di Planck e carica elettrica dell'elettrone.

menti e misure. La materia viene proposta da Dalton come costituita da atomi, tra loro diversi (quantomeno in peso) per ciascun elemento chimico. Ne consegue che una sostanza “pura” risulta composta da atomi tra loro tutti uguali e una sostanza “composta” è una ben determinata composizione di atomi delle sostanze “pure” componenti. Il passo successivo è compiuto dal grande italiano Amedeo Avogadro (1776-1856) con l’idea di molecola, particella ultima delle sostanze chimicamente definite, e con l’ipotesi della possibilità della divisione delle molecole gassose complesse al momento della loro combinazione con altri elementi. In una serie di memorie pubblicate dal 1811 al 1814, e purtroppo ignorate per decenni malgrado le conferme argomentate da Ampère, Avogadro concilia la teoria atomica di Dalton con la legge del chimico francese Joseph-Louis Gay-Lussac, rifiutata da Dalton. La legge, inferita da sistematiche ricerche e misure effettuate per produrre industrialmente potassio e sodio, fu così formulata nel 1808:

Le combinazioni delle sostanze gassose, le une con le altre, avvengono sempre nei rapporti più semplici, in modo che indicando uno dei termini mediante l’unità, l’altro è uno o due o al più tre.

In altre parole, in volumi uguali di gas diversi, i numeri delle rispettive particelle gassose sono uguali o semplici multipli interi gli uni degli altri, ovviamente a uguali condizioni di temperatura e pressione. La legge aveva ottimi riscontri sperimentali quando due sostanze monoatomiche reagivano tra loro per dar luogo a una nuova sostanza biatomica; problemi si ponevano nelle reazioni tra sostanze biatomiche e sostanze monoatomiche. Per esempio, volendo usare l’idrogeno come mezzo per la produzione di energia, la reazione tra due volumi (atomi) di idrogeno e un volume (atomo) di ossigeno avrebbe dovuto dar luogo, oltre all’energia richiesta, a un solo volume (atomo) di acqua, mentre la misura dimostrava che si ottenevano due volumi. In sintesi Avogadro sostenne che

Volumi uguali di sostanze gassose, alla medesima pressione e temperatura, rappresentano un numero uguale di molecole; di conseguenza la densità dei vari gas è la misura delle masse molecolari e i rapporti di volumi nelle

---

<sup>49</sup> Dalton operò nel contesto delle istituzioni della città di Manchester, sede di rilevante attività scientifica, espressione di una nuova *élite* economica generata dalla rivoluzione industriale di cui la città fu nucleo attivo. Molti dei manoscritti di Dalton andarono distrutti nel 1940 durante uno dei primi terribili bombardamenti inflitti alla città dall’aviazione tedesca; ciò rende difficile oggi capire a fondo il pensiero di questo grande scienziato.

combinazioni sono soltanto i rapporti tra i numeri delle molecole che si uniscono per formare molecole composte.

La prima determinazione sperimentale della costante di Avogadro, cioè del numero di molecole presenti nell'unità di volume di un gas qualsiasi, fu effettuata nel 1865, partendo dalla teoria cinetica dei gas.

Comincia così a diventare possibile comprendere la distinzione tra sostanza e corpo: la sostanza è l'omogeneo insieme di entità definite, siano esse atomi o molecole o altre entità (oggi si annoverano tra le entità ioni, radicali, elettroni, altre particelle o gruppi specificati di tali particelle). Un corpo può essere invece anche un insieme, omogeneo o non omogeneo, di entità diverse. Le grandezze massa e peso caratterizzano bene sia un corpo sia una sostanza; ma per una sostanza può essere definita una grandezza caratterizzante che non è possibile utilizzare per caratterizzare un corpo: la quantità di sostanza. Parlare della grandezza quantità di sostanza di un corpo significa ipotizzare che il corpo sia omogeneo e costituito da un solo tipo di entità (o di un ben definito agglomerato di entità) e voler conoscere quante sono tali entità costituenti. Definita la grandezza si tratta ora di scegliere la sua unità di misura. Due strade si aprono alla fine del XIX secolo: definire un'unità di misura di nome diverso per ciascuna entità costituente; scegliere un'unità di misura unica, indipendente dall'entità costituente, avvalendosi della legge di Avogadro o di altre leggi chimiche e precisare nel contesto a quale entità ci si riferisce. I chimici di allora scelsero la prima strada, a volte mescolando grandezze quali la massa, il peso e la quantità di sostanza<sup>50</sup>, malgrado sempre della stessa unità si trattasse. Il risultato fu un numero elevato di nomi di unità di quantità di sostanza: il grammo atomo, il grammo molecola, il grammo ione, il grammo equivalente e altre ancora, definite come la massa in grammi della sostanza pari al suo peso atomico, o molecolare, o ionico, o equivalente, o altro ancora.

Al momento della firma della CM la chimica si presentava dunque con queste caratteristiche: era consolidata la teoria atomico-molecolare, grazie principalmente all'opera del palermitano Stanislao Cannizzaro (1826-1910), al quale si deve anche la regola fondamentale per la determinazione dei pesi atomici; era disponibile la tabella periodica degli elementi (Mendeleev, 1869), ordinati

<sup>50</sup> In un testo scientifico pubblicato nel 1971 si legge la seguente definizione: «Per mole o grammomolecola di una sostanza si intende una quantità di essa che pesa tanti grammi quanto è il peso molecolare della sostanza considerata.» Peso, massa (grammi) e quantità di sostanza, circa cento anni dopo la firma della CM, erano ancora aggrovigliati, almeno concettualmente, nella mente di alcuni non adeguatamente documentati.

secondo il loro peso atomico e con riferimento l'ossigeno, al quale era attribuito il peso atomico 16; l'unità di quantità di sostanza era il numero di atomi contenuti in sedici grammi di ossigeno; a volte erano ancora usati altri riferimenti, per esempio il numero di atomi contenuti in un grammo di idrogeno.

Tre motivi tenevano ancora lontane le misure chimiche da una sistematizzazione metrologica. Anzitutto palese era la divisione tra i chimici, emersa prepotente nel loro primo grande congresso internazionale nel 1860 a Karlsruhe, che vide il dissenso tra Cannizzaro e molti dei partecipanti. Il Congresso, anche se fu disertato da chimici di primo piano, servì comunque a diffondere la visione unificante dell'italiano e il suo sostanziale appoggio alle idee di Avogadro. Era iniziato il processo che avrebbe portato alla definitiva unificazione tra chimica e fisica nella descrizione della composizione della materia; ma la chimica era lontana dall'aver trovato quella unità che Newton aveva imposto alle leggi della meccanica. Analogie, regole empiriche o semiempiriche avevano ampio spazio nella chimica della fine del XIX secolo. In secondo luogo la stessa teoria atomico-molecolare presupponeva il vuoto, ipotesi osteggiata dai sostenitori delle teorie ondulatorie della luce. Era in corso il grande dibattito tra visioni diverse; esso avrebbe portato alle rivoluzioni scientifiche dell'inizio del XX secolo. Infine la chimica si trovava coinvolta in numerosi altri settori e discipline: l'elettrochimica, la chimica organica, la chimica degli organismi viventi e i suoi rapporti con la fisiologia. Era difficile, pertanto, trovare il consenso unificante in un settore in piena, geniale evoluzione, nel quale specializzazioni diverse dovevano dialogare tra loro e accordarsi su comuni fondamenti.

È anche importante tener presente che nelle transazioni commerciali di prodotti industriali della ricerca chimica si usavano grandezze quali massa, peso e volume, le cui unità di misura erano già parte del sistema. La grandezza quantità di sostanza era di rilevanza principalmente nella speculazione scientifica, nelle analisi e sintesi di laboratorio; poco interessava ai chimici porre la sua unità di misura sotto l'ombrello della CM. Quando nella CM saranno definiti concetti quali la riferibilità e l'incertezza delle misure<sup>51</sup> e si avvieranno imponenti ricerche per la determinazione della costante di Avogadro, allora i chimici comprenderanno l'importanza di far parte di una comunità che riconosce in tali concetti il fondamento per la comunicazione interpersonale dei risultati delle misure. E pre-

<sup>51</sup> Il VIM3 così definisce l'incertezza di misura: parametro non negativo che caratterizza la dispersione dei valori che sono attribuiti a un misurando, sulla base delle informazioni utilizzate.

meranno per entrare nel sistema con una unità unica e definita, imponendo che nel contesto sia precisata l'entità alla quale ci si riferisce: così fu definita la mole.

### *Il travaglio degli elettricisti*

Gli elettricisti (così si auto-proclamavano gli scienziati che si occupavano di elettricità) erano in disaccordo sulle stesse unità di misura: sistema assoluto di Gauss, proposto nel 1840, o sistema elettromagnetico, proposto da Weber nel 1851? Solo nel 1881, al 1° Congresso Internazionale degli Elettrotecnici a Parigi si avvia la ricerca di un accordo con l'abolizione di una moltitudine di unità empiriche in uso nei diversi ambienti scientifici. Nel 1901 un ingegnere, Giovanni Giorgi<sup>52</sup> (1871-1950), propone un sistema a quattro unità fondamentali che aggiunge alle tre già presenti nel sistema metrico decimale (metro, kilogrammo e secondo) un'unità elettromagnetica. Bisogna attendere fino al 1946 (ma in mezzo ci furono due disastrose guerre mondiali e la crisi economica del 1929) perché il CIPM faccia propria la proposta di Giorgi e inserisca l'ampere come nuova unità del sistema.

Dell'elettricità parleremo diffusamente trattando della giovinezza della CM.

### *Il contestato paradigma della biologia*

Spendiamo qualche parola in più sulla biologia perché ancora oggi non è stato raggiunto il consenso per inserire una sua unità nel sistema.

Il paradigma della biologia, intesa come scienza degli esseri viventi, alla fine del XIX secolo è certamente quello proposto da Charles Darwin con il suo libro *L'origine delle specie* (1859): la teoria dell'evoluzione delle specie animali e vegetali per selezione naturale di mutazioni casuali congenite ereditarie. La teoria pretendeva che i tempi a disposizione dell'evoluzione fossero dell'ordine delle centinaia, o addirittura delle migliaia, di milioni di anni. A una simile datazione dell'età della Terra si opponevano da un lato i risultati derivanti dalla interpretazione rigorosamente letterale della Bibbia e, dall'altro, i calcoli degli scienziati che si appoggiavano addirittura sugli studi carismatici del 1844-1846, perfezionati nel 1861, di William Thompson, alias Lord Kelvin. Solo nel 1895 un allievo di Lord Kelvin, tal John Perry, si azzardò a pubblicare, sulla già allora presti-

<sup>52</sup> A proposito di G. Giorgi ricordiamo, per chi volesse approfondire la conoscenza di questo straordinario ingegnere, l'ottimo libro, curato da Claudio Egidi, dal titolo *Giovanni Giorgi and his contribution to electrical metrology*, atti di un convegno tenutosi a Torino nel settembre del 1988, pubblicati nel 1990 dal Politecnico di Torino.

giosa rivista «Nature», la sua critica al modello adottato dal Maestro: la sua opinione ebbe, nell'immediato, scarso seguito. Per inciso, i calcoli di Lord Kelvin furono comunque assai importanti, anche se basati su un modello sbagliato, perché convinsero i geologi ad abbandonare l'idea che la Terra avesse un'età illimitata: iniziò l'era della datazione dei reperti geologici; ma questa è metrologia del tempo.

In conclusione il paradigma della biologia non disponeva del necessario consenso e ancora oggi, aggravato dalle scoperte della genetica, trova forti opposizioni da parte del fondamentalismo religioso.

### *Difetti del paradigma del consenso*

Il paradigma basato sul consenso ha però due fondamentali difetti. Esso va in crisi quando, intorno al tavolo, si siedono per cercare il consenso personaggi che rappresentano Stati in quel momento in conflitto fra loro, militare, economico o sociale. Questo spiega i lunghi periodi di sonno della CGPM nei primi cinquant'anni del XX secolo. Il paradigma va in crisi anche quando intorno al tavolo del consenso siedono rappresentanti di Stati con livelli di industrializzazione, potere economico, organizzazione sociale, tradizioni culturali molto diverse tra loro. Ciò accade tra il 1957 e il 1982, venticinque anni che vedono il massiccio ingresso di Paesi asiatici nella CM: India (1957), Repubblica di Corea (1959), Indonesia (1960), Pakistan (1973), Repubblica Islamica dell'Iran (1975), Cina (1977), Repubblica Democratica Popolare di Corea (1982).

Periodi di crisi sono dunque connaturati con la nuova scienza delle misure. Essi vengono superati solo grazie a geniali varianti apportate al paradigma, per adattarlo alle mutate esigenze delle società.

Inoltre la rigida gestione del paradigma da parte della CGPM (su precise posizioni assunte dalla componente "competente" non politica, costituita dal CIPM) pone un forte accento sul concetto di riferibilità. Tutte le misure "ammissibili" nel sistema devono poter essere riferite a campioni già definiti come fondamento del sistema. Questa limitazione, certamente giustificata per un sistema basato sulle sette unità di misura di base, contribuisce a tenere fuori ancora oggi dalla metrologia ufficiale discipline di grande rilevanza, come la biologia e la fisiologia.

*L'altra faccia della medaglia: i problemi da risolvere*

La sollecitazione all'unificazione dei sistemi di unità di misura venne dagli ambienti scientifici europei ma l'attuazione fu affidata ai ministeri del commercio e dell'agricoltura. Fin qui abbiamo esaminato i risultati contenuti nella Convenzione del Metro da un punto di vista sostanzialmente scientifico, evidenziando così le difficoltà e le contraddizioni presenti nel testo dell'accordo. Vale la pena di analizzare gli stessi risultati osservandoli con gli occhi dei ministri, cioè dei decisori politici responsabili finali dei contenuti dell'accordo.

Visti nell'ottica di chi ha responsabilità di tutela ed espansione<sup>53</sup> del commercio internazionale, i problemi da risolvere erano i seguenti.

**Il commercio.** Il commercio sempre più esteso di materie prime, in particolare carbone ma anche lana, cotone e legnami, richiedeva, per facilitare controlli e scambi, l'unificazione delle unità di massa e di peso. L'aumentata importanza del commercio internazionale dipese principalmente dal miglioramento dei trasporti, in particolare quelli oceanici. La concorrenza tra vela e vapore, tra navi in legno e in ferro condusse, già nel 1870, a un drastico abbassamento del costo dei noli. La concorrenza tra navi fu vinta dai piroscafi con scafi e caldaie in acciaio a partire dal 1878<sup>54</sup>. La rapidità e la sicurezza dei trasporti, non solo quelli via mare ma, grazie allo sviluppo delle ferrovie transcontinentali, anche di quelli di terra, costituì una svolta epocale nei rapporti tra le nazioni e tra gli uomini. Viaggiavano anche le derrate alimentari, dagli USA verso l'Europa, e ciò provocò la crisi dell'agricoltura europea. Viaggiavano rapidamente, con tempi certi per la prima volta nella storia dell'umanità, non solo le merci ma anche le informazioni diplomatiche, le notizie (anche scientifiche), le lettere di credito e le valute. È un fenomeno, quello dell'accelerazione sia delle innovazioni tecnologiche sia delle comunicazioni, tra loro strettamente collegate, che dura ancora oggi provocando, da una generazione all'altra, modifiche comportamentali e culturali rilevanti e i cui effetti a medio e lungo termine è assai difficile prevedere.

<sup>53</sup> Ricordiamo che negli anni della preparazione e della firma delle CM era in atto una depressione economica, con caduta dei prezzi per sovrapproduzione, alla quale si cercò di porre rimedio facilitando l'espansione del mercato.

<sup>54</sup> A.J. Youngson: *L'apertura di nuovi territori*, in: *Storia Economica*, Einaudi Editore, 1974, vol. 6, pp. 184 sgg.

**Il nuovo mercato.** L'introduzione sul mercato di prodotti dell'industria a grandissima diffusione (macchine da cucire e armi in primo piano, ma anche macchine utensili, turbine a vapore, profilati metallici, biciclette con cuscinetti a sfere e telai in acciaio a sezione cava, prodotti chimici e molto altro ancora), anche con capillare esigenza di disponibilità di pezzi di ricambio, imponeva l'unificazione delle unità per le misure geometriche sulle macchine utensili. Questo nuovo mercato di prodotti a larga diffusione fu la diretta conseguenza dell'aumento dei redditi nazionali dovuto al processo di industrializzazione sempre più diffuso; un processo invero molto squilibrato, sia nello spazio sia nel tempo, come ben si nota dalla tabella seguente:

Distribuzione percentuale della produzione manifatturiera mondiale <sup>55</sup>		
<i>Nazioni</i>	<i>1870</i>	<i>1913</i>
Stati Uniti + Germania	36,5	51,5
Regno Unito + Francia + Belgio	45,0	22,5
Totale delle 5 nazioni	81,5	74,0

Nel 1870 oltre l'80% della produzione manifatturiera mondiale era concentrato in quattro nazioni europee e in una extra-europea. Nel 1913 il peso totale dei cinque scende al di sotto del 75%, ma due nazioni crescono e tre diminuiscono, significativamente. Nel periodo considerato crescono in Europa anche Russia, Italia (pur con forti squilibri tra Nord e Sud), Paesi Scandinavi, mentre fuori Europa crescono Canada, Giappone e India. Già abbiamo accennato ad alcune delle ragioni del calo del Regno Unito; a esse si aggiunge il forte contributo di emigrazione verso il nord America e, soprattutto, verso l'Australia (dal 1860 al 1889 emigrarono verso l'Australia circa settecentotrentatremila inglesi). Ne risulta un considerevole aumento del PIL australiano, pari al 4,9% annuo, misurato a prezzi costanti; secondo solo a quello degli Stati Uniti dove è superiore al 5% annuo. Contemporaneamente la popolazione australiana aumenta di oltre il 3,5% all'anno. In sintesi, alla vigilia della prima guerra mondiale, la quasi totalità della produzione manifatturiera mondiale era concentrata in Europa e nelle sue dirette colonie anglosassoni, con la significativa eccezione del Giappone.

<sup>55</sup> Fonte: *League of Nations: Industrialization and World Trade, 1945*. Citato da W.A. Cole: *La crescita dei redditi nazionali, Storia Economica*, op.cit.

Va peraltro notato ciò che risulta dalle tabelle delle Nazioni Unite per il periodo considerato: l'Argentina, una delle nazioni del Sud America che traevano il grosso della loro popolazione dall'Europa Meridionale (Spagna e Italia in testa; per esempio tra il 1875 e il 1926 il 47,5% degli immigrati in Argentina vennero dall'Italia), aveva all'epoca un reddito medio pro capite, peraltro prevalentemente di natura agricola, superiore a quello dei Paesi d'origine della popolazione.

**Il nuovo modello di attività economica.** È stato osservato<sup>56</sup> che all'aumento del reddito reale pro capite nelle economie in sviluppo si associarono (causa ed effetto) mutamenti nel modello dell'attività economica, nell'organizzazione dei fattori produttivi e nel carattere dei rapporti tra le nazioni. Assistiamo, nel periodo, a processi sia di specializzazione, sia d'integrazione dei mercati: diminuzione degli addetti all'agricoltura, propensione ad adottare innovazioni per accrescere l'efficienza delle aziende, cambiamenti di contenuto del prodotto nazionale.

Per rendersi conto della complessità raggiunta dai processi produttivi basta sfogliare i quattro volumi in tredici parti dell'*Enciclopedia dell'Ingegnere*, tradotta dal tedesco sotto la direzione dell'ing. Leonardo Loria (Società Editrice Libreria, Milano, 1896). La metà dell'opera è dedicata alla progettazione e costruzione delle infrastrutture (strade, ponti, condotte, gallerie); l'altra metà al progetto di macchine per la costruzione, incluse le macchine elettriche.

Un manuale interessante (opera completamente italiana) è *Il costruttore di macchine, trattato completo sulle costruzioni e il disegno degli organi elementari delle macchine*, di Eugenio Garuffa, professore di meccanica industriale presso la Società d'Incoraggiamento d'Arti e Mestieri in Milano (Ulrico Hoepli, editore-libraio della Real Casa, Milano 1889, p. 626+XVI). Per i collegamenti forzati a caldo di organi si prevedono processi di riscaldamento «fino a 600° (rosso scuro) o fino a 1100° (rosso vivo)» a seconda dei materiali impiegati. Nelle condotte si prevede l'inserimento di parti speciali elastiche per assorbire gli effetti delle dilatazioni termiche. Le unità di misura meccaniche e termiche sono ben acquisite, nel sistema metrico decimale, anche se i simboli usati per rappresentarle variano da opera a opera. Il controllo dei processi industriali di produzione richiedeva che fossero unificate anche le unità di misura della temperatura.

Nel complesso si può concludere, entro i limiti dei manuali e dei testi esaminati, che gli ingegneri meccanici non avevano problemi di comunicazione

<sup>56</sup> W.A. Cole: op.cit., pp. 52 sgg.

per quanto attiene all'uso delle unità di misura: la Convenzione del Metro interveniva su un terreno già consolidato, almeno finché si restava al livello dei tecnici specializzati. Peraltro il problema delle misure pratiche di temperatura restava non risolto, malgrado, come vedremo, le frequenti sollecitazioni, soprattutto nel secolo che sta per nascere, alla CGPM perché lo affrontasse: essa troverà la soluzione, definitiva e ufficiale, solo dopo la seconda guerra mondiale.

**L'unificazione dei riferimenti temporali.** L'enorme impulso ai trasporti anche su grandi distanze imponeva l'unificazione delle unità di tempo. Infatti, prima della definizione e adozione del giorno solare medio ogni città regolava i propri orologi secondo la posizione locale del sole, con la conseguenza che città anche tra loro vicine adottavano scale di tempo distanti fra loro alcuni minuti. L'avvento delle ferrovie e delle comunicazioni telegrafiche impose l'adozione di un sistema unificato per i riferimenti temporali, con la divisione del mondo inizialmente in ventiquattro zone, ciascuna compresa entro 15° di longitudine e scalata di un'ora esatta rispetto alle due zone a essa contigue. Per motivi politici ed economici fu successivamente adottata una suddivisione in trentanove fusi orari. L'ora locale dell'Osservatorio di Greenwich fu scelta come riferimento durante la Conferenza Internazionale dei Meridiani, tenutasi a Washington nel 1884, le cui raccomandazioni divennero operative in quasi tutte le nazioni dal 1929.

Orologi di precisione "portatili" erano già apparsi nel XVI secolo. Tuttavia il merito della costruzione dei primi cronometri, capaci di risolvere in modo adeguato il problema della determinazione della longitudine durante navigazioni oceaniche su grandi distanze, è attribuito all'orologiaio inglese John Harrison (1693-1776). Un suo orologio, costruito tra il 1755 e il 1759, con diametro di soli 13 cm e pesante 1,45 kg, nel 1761 compì un viaggio navale di due mesi e dimostrò all'arrivo un errore di soli 5 s rispetto al tempo astronomico. Gli orologi di Harrison risultarono fondamentali per i grandi viaggi compiuti da James Cook alla scoperta di nuovi mondi; essi cambiarono le regole della navigazione e la struttura delle carte nautiche, portandole a riferimenti certi sul valore della longitudine. La Conferenza Generale si limitò pertanto a prendere atto di una situazione scientificamente e tecnicamente stabilizzata e raccomandarne l'adozione universale.

Il breve racconto sulla storia dell'orologio, dalla svolta che la sua "invenzione" provocò nella navigazione e nell'esplorazione del pianeta, e sulla sincronizzazione delle scale di tempo nazionali realizzata dalla CM e imposta dal diffon-

dersi delle reti ferroviarie, prosegue oggi nello spazio. Infatti il satellite GOCE sta compiendo una serie di misure sulla Terra con lo scopo anche di armonizzare sull'intero pianeta il "livello del mare", oggi diverso da regione a regione, con problemi per il traffico aereo nella definizione corretta dell'altitudine con riferimento al livello del mare.

### *La Convenzione risolve i problemi*

Tutto quanto fin qui descritto fu realizzato e risolto, almeno in gran parte, con la firma della Convenzione. Il resto non serviva al rafforzamento del commercio internazionale. La chimica metteva in commercio prodotti a grande diffusione che non richiedevano ricambi ma, al più, costanza delle proprietà; esse potevano essere controllate indipendentemente dall'esistenza di unità di misura unificate, grazie ai processi della chimica analitica. L'energia elettrica non aveva ancora importanza da un punto di vista economico. La biologia era del tutto estranea ai problemi del mercato.

In sintesi, i decisori politici ottennero esattamente quanto volevano, né più né meno<sup>57</sup>. Invasero tutto il campo delle unità di misura e dei rispettivi campioni di loro interesse. E così continueranno a fare, almeno fino al periodo tra le due guerre mondiali, quando le esigenze della scienza diverranno cruciali anche per lo sviluppo sia della potenza militare, sia dell'industria e del commercio. Essi realizzarono, con la CM, il manifesto della borghesia attiva e produttiva della fine del XIX secolo: la classe trionfante, fiduciosa nel futuro, convinta della possibilità di progresso continuo grazie ai continui successi della scienza e alle crescenti capacità creative della tecnologia. Ma già cominciavano a sentirsi i primi segnali della crisi che sarebbe sfociata nei drammi del XX secolo.

### *La Convenzione nel contesto scientifico*

La CM nasce in un momento cruciale per le scienze. Da un lato trionfa il meccanicismo che presuppone la possibilità di determinare la posizione di ogni particella materiale coinvolta in qualsivoglia fenomeno naturale, la sua massa e l'insieme delle forze che agiscono tra le particelle: centrale dunque è la "misura meccanica" di posizione, massa e forza. Solo quando si dispone di tutte le ne-

<sup>57</sup> Paradossalmente la CM fallì in alcuni settori del commercio, in particolare quello dei prodotti agricoli e dei derivati dall'allevamento. In tali settori continuarono a essere utilizzate, in parallelo al sistema decimale, le unità del sistema inglese, provocando intralci al commercio e discussioni accese, come vedremo, in seno alla Conferenza Generale.

cessarie misure è possibile da esse inferire il modello che descrive il fenomeno e quindi la legge che lo governa. Su questa posizione sono allineati gli scienziati dell'epoca. Citiamone tre, che ben rappresentano l'intero corpo delle discipline che allora venivano considerate scientifiche: il fisiologo tedesco Hermann von Helmholtz, l'ingegnere e fisico inglese William Thomson Kelvin, il chimico russo Dmitrij Ivanovič Mendeleev. Contemporaneamente la discussione sui fondamenti stessi del meccanicismo, sul significato del processo di "determinazione", e dunque di misura, avvia il percorso di crisi che avrà pieno compimento all'inizio del XX secolo. La discussione è resa complessa da posizioni critiche, quali quelle di Ernst Mach (matematico, fisico, fisiologo, storico della scienza austriaco, 1838-1916), e da rivoluzionarie scoperte, quali le prime leggi sull'emissione del corpo nero dell'austriaco Joseph Stefan (1835-1893)<sup>58</sup> e i fenomeni di emissione di raggi catodici o di particelle nei tubi ad alto vuoto. Contemporaneamente le "scienze umanistiche" prendono le distanze dal meccanicismo e concorrono a preparare quel solco, ancora oggi non colmato, che divide le scienze in due settori indipendenti. Viene coniato il termine "tecnologia scientifica" e affermata la differenza tra ricerca pura e ricerca applicata. Mentre gli scienziati moltiplicano i laboratori universitari di ricerca e s'incontrano nei primi congressi internazionali per scambiare e discutere le conoscenze acquisite, collaborando a trasformare anche la ricerca in un sistema globale, i politici e gli industriali intervengono sulla ricerca, con finanziamenti mirati, orientandola alle esigenze della produzione e del crescente nazionalismo.

**La centralità della misura nella critica di Mach.** È utile una breve analisi della posizione di Mach nei confronti del meccanicismo per mettere in evidenza il ruolo particolare che egli assegna alla misurazione<sup>59</sup>. La critica di Mach è inizialmente stimolata dai suoi studi sulla fisiologia delle sensazioni. Egli "attacca" il grande Helmholtz per i suoi contributi alla spiegazione fisica dei fenomeni sensitivi. Mach accusa il fisico-fisiologo tedesco

di non limitarsi ad avanzare ipotesi per la spiegazione dei fenomeni ma di voler elevare le teorie scientifiche a criterio supremo per distinguere i fenomeni

<sup>58</sup> La legge di Stefan che stabilisce la proporzionalità tra la radiazione integrale emessa e la quarta potenza della temperatura del corpo nero emettitore, condurrà Max Planck all'ipotesi di discontinuità dell'energia.

<sup>59</sup> Ludovico Geymonat: *Storia del pensiero filosofico e scientifico*, vol. V: *La critica del meccanicismo: Mach*, Garzanti, 1975.

veri da quelli illusori, senza tener conto che esse mutano da un periodo all'altro, onde il presunto criterio risulterebbe sempre qualcosa di provvisorio.

Mach intende invece avvalersi della matematica per “misurare i fenomeni” e per determinare le relazioni che fra essi intercorrono. Rigetta qualunque genere di intuizione sovra sensibile, qualunque ipotesi di esistenza di un “cuore della realtà” ma si sforza di potenziare la nostra osservazione. Mach stesso così sintetizza il suo pensiero: «Nella ricerca scientifica importa solo la conoscenza delle connessioni dei fenomeni». Tali connessioni si ricavano dell'esame dei risultati delle misurazioni. Si nota un primo significativo abbozzo della metodologia moderna che fa precedere al processo di misurazione la definizione di un modello che descriva, in forma matematica, le relazioni esistenti tra le grandezze che influenzano il risultato di tale processo.

Due aspetti del pensiero di Mach saranno importanti per gli sviluppi futuri della metrologia. Da un lato egli avvia il distacco tra fisiologia e metrologia che verrà sancito nel secolo successivo. Dall'altro egli anticipa la crisi di rifiuto della certezza scientifica e del razionalismo che caratterizzerà l'inizio del XX secolo.

**L'industria chiede una nuova scuola.** Un altro aspetto, la scolarizzazione ai diversi livelli, va tenuto presente nel valutare l'azione della CM negli ultimi venti anni del XIX secolo. Il rilancio dei processi di industrializzazione impose l'avvio di una profonda riforma del sistema scolastico e la maggiore ricchezza prodotta dall'industria fornì i mezzi indispensabili per realizzare, almeno in alcuni Paesi, i primi passi di tale riforma. La situazione della scuola si presentava in Europa, all'epoca della firma della CM, con forti differenze tra i diversi Paesi. Si hanno dati<sup>60</sup> di percentuale di analfabeti tra le reclute nel 1876: Russia 80%, Ungheria 57%, Italia 52%, Austria 41%, Belgio 18,4%, Francia 16%, Olanda 12%, Svizzera 4,6%, Impero germanico 2,37%, Svezia 0,9%. La posizione di avanguardia nella lotta all'analfabetismo spettava ai Paesi scandinavi; la Svezia aveva già dal 1734 una legge sull'obbligo della frequenza alla scuola primaria, e in Danimarca nel 1870 il 99,28% dei fanciulli frequentava regolarmente la scuola, laica e pubblica, dell'obbligo. Dai dati disponibili risulta evidentissimo il primato dei popoli di stirpe germanica, anglosassone e scandinava, popoli di religione riformata. Russia a parte, era il sud dell'Europa, in prevalenza

<sup>60</sup> Le informazioni riportate sono tratte da L. Geymonat: op.cit., Renato Tisato: cap. XIV: *L'esigenza di una scuola nuova e la nascita della pedagogia scientifica* e cap. XIX: *Il dibattito sulla scuola in Italia fra la metà dell'Ottocento e gli inizi del Novecento*.

cattolico, il fanalino di coda nel processo di alfabetizzazione di massa. Inoltre persisteva, nei Paesi a più bassa scolarizzazione primaria, una forte differenza tra maschi e femmine nella presenza nelle scuole, a svantaggio delle femmine.

Oltre al problema della diffusione e dell'obbligo di frequenza alla scuola primaria, per imparare a leggere, scrivere e fare di conto, esisteva il problema di cosa insegnare nella scuola secondaria e nelle scuole superiori, università inclusa. La restaurazione, dopo le guerre napoleoniche, aveva riaffermato e imposto la preminenza del latino e del greco quali discipline formative. La scuola secondaria e superiore, riservata alla *élite* nobile o dell'alta e media borghesia, emersa trionfante dalla rivoluzione e successiva restaurazione, era in prevalenza umanistico-letteraria e affidata alle chiese. Nella seconda metà del XIX secolo l'industria cominciò a chiedere, anche per sostenere il progresso del processo di industrializzazione, una preparazione tecnico-professionale in tutte le direzioni e a tutti i livelli.

L'industria non può più accontentarsi delle scuole di arti e mestieri o produttrici di impiegatelli di infima categoria e preme verso l'alto, fino a istituzioni di livello universitario.

Lo scontro tra le due visioni della scuola è accanito; il compromesso, verso il quale si tende, è una tripartizione della scuola secondaria. Da una parte la tradizionale scuola umanistico-letteraria che apre la strada a tutte le facoltà universitarie e alla formazione della classe dirigente; dall'altra la scuola tecnico-scientifica, prodotto della rivoluzione industriale, articolata in due gradi: un curriculum di tre o quattro anni che conduce a un diploma di tecnico subordinato, e un curriculum che porta a istituti di livello universitario e alla formazione di dirigenti dell'industria, del commercio e della ricerca scientifica. Nella realizzazione pratica, le scuole tecnico-scientifiche tendono ad articolarsi in molteplici indirizzi paralleli mentre, al di sotto di queste, tendono ad affermarsi modeste scuole professionali. Parallelamente il problema dell'analfabetismo risulta, allo svoltare del secolo, ben lontano dall'essere risolto nei Paesi latino-cattolici e balcanici.

In questo quadro complesso e articolato, la CM fornisce all'insegnamento tecnico-scientifico il contenuto unificato di un organico sistema di unità di misura; collabora inoltre a risolvere il problema della formazione e della collocazione di giovani con preparazione tecnico-scientifica. Molti furono impegnati nell'effettuare confronti tra vecchi e nuovi campioni e nel gestire la disseminazione e l'utilizzo delle nuove unità di misura. Pochi si proiettarono verso il futuro, come seppero fare Benoît e Michelson; la ricerca si concentrò sia nei settori

ancora non toccati dal mercato sia nello sviluppo di nuovi metodi e strumenti di misura, in prevalenza nelle grandi Università. Il colloquio tra scienziati fu mantenuto vivo grazie ai congressi internazionali e alle associazioni di settore che nacquero numerose in ambiti specializzati per coordinare ciò che la CGPM e il CIPM erano stati costretti a lasciare al proprio destino.

### 1.7. Percorsi indipendenti?

L'analisi fin qui fatta evidenzia che la firma della Convenzione del Metro non costituisce il solo percorso lungo il quale si svilupperà la scienza e la tecnica delle misure. Alla fine del XIX secolo almeno altri cinque percorsi, largamente indipendenti dall'accordo internazionale, sono già delineati e si consolideranno nei primi anni del XX secolo.

#### *Il percorso della chimica*

Lasciati fuori dalla CM, nel 1919 i chimici dell'industria e delle università formalizzarono il loro percorso metrologico indipendente con la costituzione della *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC, URL: <<http://www.iupac.org>>), un'organizzazione non governativa costituita con l'obiettivo di favorire, a livello mondiale, il progresso e la diffusione armonizzata delle scienze chimiche e di contribuire all'applicazione della chimica a servizio dell'umanità. Molto attiva ancora oggi, la IUPAC ha il grande merito di aver accompagnato le scienze chimiche verso il ricongiungimento con gli organismi della CM, garantendo nell'attesa unità di linguaggio, principi e metodi.

#### *Il percorso dell'ingegneria elettrica*

Già nel 1861 la *British Association for Advancement of Science* (BAAS, URL: <<http://www.britishtscienceassociation.org>>) istituisce un comitato di studio con il compito di fissare un gruppo coordinato di unità elettriche. Il 1° Congresso Internazionale degli Elettrotecnici nel 1881 è promosso anche dalla BAAS. Le edizioni successive del Congresso, durante le quali si formalizza la struttura delle grandezze, unità e campioni elettrici e magnetici, verranno sostenuti dall'*American Institute of Electrical Engineers* (AIEE), fondato nel 1884. Nel 1963 l'AIEE si unirà con l'*Institute of Radio Engineers* (IRE), fondato nel 1912, facendo nascere l'*Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE, <<http://www.ieee.org>>), oggi attivissima istituzione per la promozione della ricerca e delle applicazioni nei settori elettrico ed elettronico. Come vedremo, il

percorso delle unità elettriche converge verso la CM e i suoi organismi già nel 1939, con la definizione, da parte del Comitato Consultivo per l'Elettricità del CIPM e da parte dell'IEC, dell'ampere, quarta unità fondamentale del sistema prima basato su metro, kilogrammo e secondo.

### *Il percorso degli Istituti Metrologici Nazionali*

Gli Istituti Metrologici Nazionali (IMN), finanziariamente sostenuti dai rispettivi governi, fin dalle origini privilegiarono scelte e strategie a carattere nazionale. Nel XX secolo l'acuirsi delle tensioni tra le nazioni, sfociate nel drammatico periodo che va dal 1914 al 1945 e poi nella contrapposizione tra due potenze dominanti, provocarono divergenze e contrasti tra gli organi della CM e gli IMN. Il complesso lavoro di reciproco avvicinamento, svolto dai presidenti del CIPM e dai direttori del BIPM, del quale tratteremo nei prossimi capitoli, ha condotto a una situazione di pacifica convivenza, nella quale è difficile dire quale dei due sistemi sia risultato prevalente. Probabilmente oggi si può, con ragione, sostenere che i due sistemi si integrano e completano a vicenda, costituendo di fatto un unico sistema per il governo della metrologia mondiale.

### *Università e industria*

L'integrazione tra CIPM e IMN spiega la divisione tra l'ambito culturale legato alla CM e agli IMN e altri ambiti culturali, coinvolti nelle misure, che di fatto sono stati esclusi<sup>61</sup> dal percorso decisionale degli organi della CGPM. In particolare gli ambienti universitari e gli ambienti industriali hanno seguito per molti decenni un percorso indipendente dalla CM e dagli IMN nello sviluppo della scienza e della tecnica delle misure, trovando coordinamento e supporto sia negli organismi che abbiamo citato (IUPAC e IEEE, ma non solo) sia in altri organismi che nasceranno nel XX secolo come conseguenza dei problemi presenti nella CM fin dalle sue origini e della progressiva identificazione tra gli interessi, non solo scientifici, della CM e degli IMN.

---

<sup>61</sup> In teoria gli IMN dovrebbero portare, negli organismi della CM, tutte le istanze, riguardanti le misure, di carattere culturale e applicativo esistenti nelle rispettive nazioni. Di fatto, come vedremo, gli IMN, per evidenti motivi di aspirazione al monopolio delle risorse, tendono sovente a trascurare questo loro compito di mediazione nell'ambito della CM.

*Nascita della fotometria*

Un altro percorso indipendente è quello che guiderà la fotometria dal 1913, quando fu fondata la *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE, URL: <<http://www.cie.co.at>>), all'origine composta da nove Stati membri (Francia, Germania, Gran Bretagna, Austria-Ungheria, Belgio, Italia, Paesi-Bassi, Svizzera e USA). Oggi la CIE raccoglie trentotto comitati nazionali in rappresentanza dei Paesi membri. Parleremo di questo percorso quando entreremo nel XX secolo, perché solo allora, con il diffondersi dell'illuminazione delle strade e nelle abitazioni, prima a gas e poi elettrica, l'argomento "luce" divenne economicamente importante e quindi richieste che fossero affrontati i numerosi problemi di misura.

*Effetti positivi della molteplicità di percorsi*

Questa molteplicità di percorsi non va intesa in senso negativo. Accademia (nel senso di università e altri centri di ricerca) e industria, non solo nelle misure chimiche, elettriche ed elettroniche ma anche in molti altri ambiti delle misure, hanno spesso anticipato scelte, metodologie, scoperte, tendenze che successivamente diventeranno patrimonio della CM e degli IMN. La CM può muoversi esclusivamente nell'ambito del paradigma del consenso: ciò le impone, inevitabilmente, condizionamenti burocratici che non intervengono nei percorsi dell'accademia e dell'industria. Analogamente gli IMN sono stati ben presto coinvolti nel sistema militare-industriale-scientifico, fondamentale, dalla fine del XIX secolo, per sostenere il progressivo affermarsi del ruolo preponderante delle nazioni. Al contrario, l'ambiente accademico ha potuto godere, in alcuni momenti storici e in alcune nazioni, di maggiore libertà e quindi sviluppare la capacità di privilegiare aspetti e contenuti culturali. L'industria, con il progredire della globalizzazione dei mercati, si è trovata a dover combattere prima per la concorrenza e poi per la pressione della finanza multinazionale, rispondendo con la ricerca spasmodica dell'innovazione. Anche in questo caso ne sono derivati progressi culturali e maggiore attenzione a problemi di qualità dell'offerta di prodotti.



## 2. La tormentata giovinezza: dall'inizio del XX secolo al 1939

---

### 2.1. Introduzione al nuovo secolo

Controversa tra gli storici è l'attribuzione al XX secolo di una definizione che sia utile per identificarne le caratteristiche rilevanti. C'è chi<sup>62</sup> mette in primo piano la straordinaria accelerazione nelle trasformazioni sociali, tecnologiche, culturali, di costume, del quadro politico. Lo storico Andreas Hillgruber<sup>63</sup> titola invece la sua raccolta di saggi sul XX secolo *La distruzione dell'Europa*, con il significativo sottotitolo *La Germania e l'epoca della guerre mondiali (1914-1945)*.

Eric J. Hobsbawm lo chiama «il secolo breve», facendolo iniziare nel 1914, scoppio della prima guerra mondiale, e terminare nel 1991, collasso dell'URSS. Egli, nella prefazione al libro intitolato appunto *Il secolo breve*<sup>64</sup>, precisa che

nessuno (oggi) può scrivere la storia del XX secolo allo stesso modo in cui scriverebbe la storia di qualunque altra epoca, se non altro perché non si può raccontare l'età della propria vita allo stesso modo in cui si può scrivere la storia di periodi conosciuti solo dall'esterno.

Questa osservazione va tenuta presente anche nel leggere quanto ho scritto in questo libro, soprattutto nei capitoli successivi.

La recente enciclopedia *La Storia*, aggiornata al dicembre 2006, realizzata da UTET e dall'Istituto Geografico De Agostini, con la consulenza e il coordinamento scientifico di Massimo L. Salvadori, stampata da Mondadori nel 2007, dedica al XX secolo ben tre volumi, facendolo “iniziare” nel 1870: un secolo lungo, dunque.

Certamente fu il secolo delle guerre, centinaia, molte delle quali ignorate o dimenticate ma tutte devastanti per le popolazioni coinvolte<sup>65</sup>. Questo stato di perenne scontro, con un coinvolgimento di eserciti e di mezzi di distruzione mai visto nei secoli precedenti, va tenuto ben presente per meglio comprendere le difficoltà nelle quali si mossero tutti coloro che agivano per costruire una situazione di “normale” convivenza tra i popoli.

<sup>62</sup> H. Stuart Huges: *Storia dell'Europa contemporanea*, Rizzoli, Milano 1964.

<sup>63</sup> A. Hillgruber: *La distruzione dell'Europa*, Il Mulino, Bologna 1991.

<sup>64</sup> Rizzoli, 2000.

<sup>65</sup> Un'analisi sulle tipologie di guerre del XX secolo e sui loro effetti sociali e individuali si trova nella raccolta di saggi curata da Paolo Sorcinelli: *Identikit del Novecento*, Donzelli, 2004.

*Il secolo delle ideologie*

Molto suggestivo è il modo con il quale Karl Dietrich Bracher identifica il Novecento: *Secolo delle Ideologie*<sup>66</sup>. Per giustificare questa classificazione l'autore mette in evidenza tre aspetti nuovi della politica del XX secolo: bisogno di legittimità, necessità di un sistema di comunicazione, volontà di controllo dell'opinione pubblica. In primo luogo, scrive Bracher,

mai prima d'ora i sistemi politici e le forme di governo, la politica stessa – sia essa democratica o dittatoriale – hanno sviluppato un bisogno così violento di darsi anche una legittimazione spirituale, di dare un fondamento ideale complessivo alla loro sfera di potere cercando nello stesso tempo di ampliarla quanto più possibile.

In secondo luogo

mai prima d'ora vi erano stati a disposizione mezzi tecnici di comunicazione così estesi per fornire quella base di legittimazione.

La politica diventa comunicazione di massa quando e affinché il controllo dei mezzi consente la formazione di una “opinione pubblica”. La comunicazione di massa acquisisce significato strategico. In terzo luogo

emerge in maniera particolarmente evidente l'impotenza di questa opinione pubblica: il potere e il controllo sono nelle mani di regimi forti che si servono ideologicamente delle idee senza alcun riguardo per il problema della verità, e sanno manipolare l'opinione pubblica al punto che essa è piuttosto resa pubblica, oververosia prefabbricata<sup>67</sup>.

Le idee che si sono formate ed evolute nell'intero arco della storia dell'umanità, a cavallo tra il XIX e il XX secolo si trasformano in ideologie legittimanti il potere e, grazie ai mezzi di comunicazione di massa, creano un'opinione pubblica favorevole al potere stesso. Scrive ancora Bracher:

L'ideologizzazione si basa fundamentalmente su un conglomerato di illusioni e di auto illusioni: bisogni pseudoreligiosi, idealismo, integralismo, sono i supporti ultimi dell'autodelega ideologica all'esercizio della violenza.

In aggiunta il XX secolo è riuscito a produrre sia la critica più spietata sia la più alta glorificazione delle ideologie. In un epilogo al suo libro, scritto nel

---

<sup>66</sup> Karl Dietrich Bracher: *Il Novecento. Secolo delle ideologie*, Laterza, 2006.

<sup>67</sup> Si veda anche W. Reinhard: op.cit., pp. 365 sgg.

1999, Bracher sostiene che l'ideologia rimane inevitabile, anche oggi, perché è consustanziale al pensiero politico.

*Ideologie, scienza e politica*

Nello sviluppare la storia della metrologia nel XX secolo cercherò di tenere presente il punto di vista descritto da Bracher per cercare di capire quanto la metrologia, nata come supporto all'ideologia nascente del libero mercato, sia stata influenzata dalle ideologie che hanno dominato il XX secolo e continuano a dominare il nuovo millennio. Alcuni scienziati sono stati individualmente coinvolti e compromessi nelle ideologie dominanti durante la loro vita. La loro presa di posizione a favore dell'ideologia nazionale divenne, nel XX secolo, particolarmente faziosa nei momenti di crisi, ossia durante le guerre. Delle tre ambizioni descritte da Francis Bacon nel 1620 come scelte possibili per gli scienziati (successo personale, «scelta volgare e degenerare»; aumento della potenza della propria patria; ricerca del benessere dell'umanità, «unica scelta sana e nobile»), essi scelsero la seconda. Per esempio, nell'ottobre del 1914<sup>68</sup> novantatré uomini di cultura tedeschi in un documento, che ebbe grande diffusione (fu tradotto in dieci lingue), approvarono l'invasione del Belgio e condannarono gli alleati di «Mongoli e Negri (ossia di Russia e Serbia) contro la razza bianca». Firmarono anche Heinrich Haeckel (biologo e naturalista, 1834-1919), Wilhelm Ostwald (chimico, 1853-1932), Max Planck (proprio il famoso!), Wilhelm Konrad Roentgen (premio Nobel per la fisica nel 1901, 1845-1923), Wilhelm Wien (premio Nobel per la fisica nel 1911, 1864-1928). Tra questi nomi non mancano alcuni insigni metrologi. Philipp Lenard (premio Nobel per la fisica nel 1905, 1862-1947) arrivò a sostenere che la fisica inglese altro non era che un plagio di quella tedesca.

Non furono da meno i francesi, che sostennero la superiorità della fisica francese rispetto a quella tedesca.

Gli scienziati inglesi, contro corrente, inviarono invece una lettera al Times nel 1914, con 150 firme, nella quale esprimevano «un'ammirazione profonda per gli studi e la scienza tedesca» e dichiaravano rispetto e affetto per i colleghi tedeschi. La stessa posizione fu sostenuta in Italia da Benedetto Croce.

Sovente l'atteggiamento ostile degli scienziati verso colleghi di altre nazioni si configura come conseguenza obbligata di pesanti intromissioni e pressioni

<sup>68</sup> Paolo Rossi: *Le istituzioni e le immagini della scienza*, in: *Storia della Scienza*, vol. VI, *Da Freud a Einstein*, De Agostini, 2006, pp. 4-5.

delle autorità politiche sugli sviluppi della scienza<sup>69</sup>. Ciò avvenne in particolare da parte dei regimi totalitari di destra e di sinistra. La politica razziale del fascismo costrinse all'espatrio alcuni tra i migliori scienziati italiani. In Germania quasi il 25% dei professori universitari di fisica perse il posto nel 1933 a causa della politica nazista. Nell'URSS, con il consolidamento della dittatura di Stalin agli inizi degli anni Trenta, l'Accademia delle Scienze russa fu trasformata in un organismo burocratico di controllo, incaricata del sistematico attacco alla "scienza borghese". Peraltro lo stalinismo produsse uno straordinario sviluppo dei settori scientifici indispensabili per la produzione di innovazioni tecnologiche di interesse del regime: tecnologie militari e spaziali in testa.

Un altro aspetto da tenere presente nello studio delle interazioni tra la società da una parte e la scienza in generale e la metrologia in particolare dall'altra è il periodico manifestarsi di ostilità nei riguardi della scienza. Questo fenomeno, complesso e non nuovo del XX secolo, si manifestò in modo particolarmente eclatante nel primo Novecento, come vera e propria "rivolta contro la scienza". Si ripresentò alla fine degli anni Sessanta come antimodernismo. Fu la causa del solco che si determinò tra scienze della natura e scienze dell'uomo.

Parlando di metrologi, bisogna fare una distinzione tra gli specialisti operanti negli IMN e gli scienziati nelle università che coltivano per professione la scienza delle misure. I primi costituirono, nel procedere del secolo, un gruppo isolato e autonomo, forte dell'appoggio di un organismo intergovernativo. Essi in particolare si conformarono al potere economico-politico che si era proposto come committente delle loro ricerche. I secondi non riuscirono a stabilire tra loro rapporti di stretta collaborazione e, quindi, a formare un sistema culturale omogeneo, capace di proporsi come riferimento ai governi nei complessi problemi che coinvolgono in primo piano le misure. Sono stati però in generale più aperti ai bisogni e alle esigenze della società, se non altro per l'ampio spazio da essi dato all'insegnamento<sup>70</sup>.

Una debolezza della metrologia sta nel suo forte coinvolgimento con lo sviluppo industriale e con la produzione. Ma essa non è esente anche da influenze di carattere politico e quindi, secondo Bacher, di natura ideologica. D'altronde anche la metrologia, in quanto scienza, ha bisogno di legittimità, di un sistema di comunicazione, di un'opinione pubblica favorevole: legittimità nel consenso; comunicazione per garantire la diffusione dei risultati conseguiti; favore

<sup>69</sup> Paolo Rossi: op.cit., pp. 21 sgg.

<sup>70</sup> Douglas McKie: *Scienza e tecnologia*, in: *Storia del mondo moderno*, vol. XII, *I grandi conflitti mondiali 1898-1945*, Cambridge University Press, 1968, Garzanti, 1972, pp. 97-123.

dell'opinione pubblica per consentire di tradurre i cambiamenti in nuova cultura generalizzata e per ottenere gli indispensabili finanziamenti.

La legittimità degli atti della CGPM e del CIPM era garantita dal “cappello” fornito dall'accordo internazionale che continuava a progredire attraverso il consenso. La CGPM e i suoi organi tecnici difettarono nell'utilizzare i mezzi di comunicazione: non coinvolsero adeguatamente nel processo di sviluppo del sistema delle unità di misura né l'*élite* culturale, universitaria e imprenditoriale, né il grande pubblico, almeno quello degli insegnanti delle scuole primarie e secondarie. Intorno all'attività della CGPM e del CIPM non si formò un'opinione pubblica partecipe e consapevole dei vantaggi dei cambiamenti promossi. Il contributo rilevante all'innovazione, ma anche al controllo dell'ambiente nella seconda metà del XX secolo, realizzato grazie alle scelte del CIPM e della CGPM, restò un fatto per specialisti, quasi sconosciuto anche alla grande maggioranza dei cittadini dei Paesi industrializzati, quelli che più di altri beneficiarono di tale contributo.

## 2.2. Le relazioni internazionali fino al 1913

L'attività nell'ambito della Convenzione del Metro è inizialmente articolata su due livelli: il livello *decisionale*, la CGPM, con i plenipotenziari degli Stati aderenti; e il livello *scientifico* che prepara le delibere, il CIPM, con 14 membri (18 dal 1921), scienziati nominati dalla CGPM. Dal 1927 viene creata una terza struttura, quella dei Comitati Consultivi (CC), i quali diverranno ben 10 alla fine del XX secolo. Membri dei CC sono quegli Istituti Nazionali di Metrologia (IMN) che abbiamo visto nascere dal 1877; essi rappresentano gli interessi dei singoli Stati e designano, come partecipanti alle riunioni dei CC, i loro specialisti di settore. Il CIPM affianca agli specialisti degli IMN pochi scienziati estranei agli IMN, particolarmente esperti nel singolo settore. I CC hanno il compito di predisporre gli studi tecnico-scientifici da proporre al CIPM per la preparazione delle delibere della CGPM. È pertanto evidente che i luoghi di discussioni “politiche”, sulle quali potranno pesare i sistemi di alleanze internazionali, saranno in prevalenza le riunioni dei CC e quelle della CGPM. Dovendo comprendere gli esiti del percorso decisionale della CGPM nel primo ante-guerra è dunque utile conoscere quali retroscena di relazioni internazionali possono aver condizionato tale percorso verso l'una o l'altra decisione.

La politica dei primi anni del XX secolo è pesantemente condizionata da due nuove situazioni nello scenario mondiale<sup>71</sup>: l'inizio della perdita di centralità dell'Europa nel mondo a causa, anche, della crescente importanza degli USA e del Giappone; lo spostamento dei problemi e delle alleanze dalle nazioni europee agli imperi che sono associati a ogni nazione<sup>72</sup>. USA e Giappone invasero, nel periodo, sfere di tipica influenza europea, dimostrando, in particolare, specifici interessi in Cina e nelle isole dell'Oceano Pacifico. Entrambi i Paesi vivevano un momento di significativa espansione economica, facilitata dall'accelerazione dei sistemi di trasporto e di comunicazione.

Per contrastare l'influenza delle potenze emergenti nell'estremo oriente, Francia, Russia e Germania attuarono un'azione concordata, la "Triplice d'Estremo Oriente", imponendo limitazioni alle mire espansionistiche giapponesi e sostenendo la Cina con prestiti. Le azioni della Triplice d'Estremo Oriente erano però anche orientate contro la Gran Bretagna, opponendosi principalmente alla politica commerciale inglese imposta alla Cina ("la porta aperta", in esclusiva verso il mercato britannico). Già nel 1902 fu firmata un'alleanza anglo-giapponese, per gestire in collaborazione il problema del mercato cinese.

Contemporaneamente in Europa erano in vigore la Duplice Alleanza tra Francia e Russia e la Triplice Alleanza, a carattere difensivo, tra Austria, Germania e Italia. Ciò peraltro non impediva all'Italia di stringere accordi politici con la Francia, giustificati dai comuni interessi nel Nord Africa. Nel 1907 si verificò un riavvicinamento tra Russia e Inghilterra, con accordi sulle sfere d'influenza in Persia, Tibet e Afghanistan. Il destino dei territori islamici è deciso dai diplomatici inglesi e russi.

Questi e molti altri "giri di valzer" avevano una ragione profonda<sup>73</sup>. Gli Stati Nazionali, con forti poteri centralizzati e un avvio di gestione parlamentare anche della politica estera, si dovevano confrontare in termini non più soltanto di equilibri europei ma anche di rilevanza imperiale, ormai consolidata intorno ai grandi Stati. Gli interessi sullo scacchiere mondiale, e le conseguenti alleanze, potevano divergere rispetto a quelli specificatamente europei. Il gioco diplomatico e la politica internazionale si fecero fluidi, mutevoli le alleanze a seconda degli scacchieri coinvolti.

<sup>71</sup> Guido Formigoni: *La politica internazionale nel Novecento*, il Mulino, 2007, pp. 43 sgg.

<sup>72</sup> Una visione brillante del contrasto tra nazionalismo e imperialismo alla fine del XIX secolo si trova in Bertrand Russell: *Storia delle idee del secolo XIX*, Einaudi, 1950, Parte IV: *Nazionalismo e imperialismo*, pp. 395 sgg.

<sup>73</sup> J.P.T. Bury: *La diplomazia dal 1900 al 1912*, in: *Storia del Mondo Moderno*, vol. XII, op.cit., pp. 124-159.

Risultava dunque difficile per un cittadino comune dire chi era alleato con chi, anche perché non di rado gli accordi fra Stati prevedevano clausole rigorosamente tenute segrete e note solo a una ristretta cerchia in ambito governativo. Gli scienziati e i plenipotenziari che partecipavano alle riunioni del CIPM e della CGPM erano assimilabili ai cittadini comuni, per quanto riguardava i problemi complessi della diplomazia internazionale. Risultò pertanto del tutto impossibile, per i partecipanti alle riunioni degli organismi della Convenzione del Metro, stabilire alleanze che rispecchiassero gli interessi degli Stati. Discussioni e decisioni furono pertanto giocate solo sui problemi squisitamente di politica metrologica; la politica dell'imperialismo mercantile e del protezionismo fu accettata come necessità e restò fuori dalle discussioni e dalle decisioni della CGPM, salvo rarissime eccezioni.

### 2.3. Le rivoluzioni scientifiche e la metrologia intorno al 1900

#### *La rivoluzione scientifica*

L'inizio del nuovo secolo è carico di nere nubi di guerra: la guerra anglo-boera (1899-1901), la rivolta dei boxer in Cina (1899-1900), l'occupazione da parte del Brasile di un distretto della Bolivia (1899), l'assassinio di Umberto I di Savoia (1900).

La tecnologia parte verso la conquista dell'atmosfera: nel 1900 il conte Zeppelin effettua il suo primo volo con un dirigibile; nel 1903 i fratelli Wright effettuano il primo volo con un veicolo più pesante dell'aria. Sono peraltro le rivoluzioni scientifiche a dominare la scena. Queste rivoluzioni, incomprensibili per la maggioranza dei cittadini, crearono nella gente comune un senso d'incertezza e di sfiducia nei riguardi della scienza.

**La teoria dei quanta.** Nel 1900 Max Planck<sup>74</sup> propone la legge dell'irraggiamento e ne fornisce una audace giustificazione teorica con l'ipotesi della discontinuità dell'energia emessa o assorbita o scambiata: essa deve risultare mul-

<sup>74</sup> La proposta della teoria dei quanta di Planck è preceduta da una serie impressionante di scoperte, nelle quali esperimenti e misure giocano un ruolo determinante. Limitiamoci a ricordare alcune tra le più significative: 1) 1895: il fisico tedesco Konrad Röntgen (1845-1908) scopre i raggi X; per tale scoperta riceve il premio Nobel nel 1901; 2) 1896: il fisico francese Henry Becquerel (1852-1908) scopre i fenomeni radioattivi nell'uranio. Si apre l'era dell'energia atomica; 3) 1898: la fisica polacca Maria Skłodowska (1867-1934), moglie del fisico francese Pierre Curie (1859-1906) che con lei collabora, dimostra che anche il torio, il polonio e il radio manifestano proprietà analoghe a quelle manifestate dall'uranio.

tiplo intero di un valore elementare. È la teoria dei quanta. Sono i risultati di sofisticate misure compiute da scienziati tedeschi, che contraddicono quanto prevedibile sull'irraggiamento in base alla legge di Wien<sup>75</sup> e di Planck, che inducono lo stesso Planck a rivedere tale legge e formulare la nuova legge di distribuzione dell'energia nel corpo nero e la sua giustificazione mediante la teoria di quantizzazione dell'energia. Lo straordinario obiettivo, dal quale Planck parte, è tutto metrologico: nella seduta dell'Accademia Prussiana delle Scienze del 18 maggio 1899 egli fa osservare che:

attualmente esiste la possibilità di stabilire unità di lunghezza, massa, tempo e temperatura che, indipendentemente da corpi o sostanze particolari, mantengano necessariamente il loro significato per tutti i tempi e per tutte le culture, anche per quelle extraterrestri ed extraumane. Esse possono perciò essere indicate come *unità naturali*. I mezzi per stabilire le quattro unità per la lunghezza, la massa, il tempo e la temperatura sono date dalle due costanti menzionate  $h$  (la costante di Planck) e  $k$  (la costante di Boltzmann<sup>76</sup>) e, inoltre, dal valore della velocità della luce nel vuoto  $c$  e dalla costante di gravità  $f$ .

Straordinaria intuizione, in anticipo però sui tempi e in forte contrasto con il paradigma accettato dai metrologi del momento. Ci vorranno così più di 80 anni perché la metrologia ufficiale avvii il processo di trasformazione del sistema di unità nella direzione suggerita da Planck.

**La rivoluzione della psicologia e della psichiatria.** Nel 1900 Sigmund Freud (1856-1939) pubblica *L'interpretazione dei sogni*, considerata la sua opera più rappresentativa e a più alto contenuto innovativo. Il contenuto latente, celato nel sogno, è posto in relazione con desideri connessi alla sessualità infantile, che tentano di soddisfarsi. A ciò si oppone la censura, funzione psichica che si comporta come un filtro tra il sistema inconscio e il sistema conscio. Le migliaia di pagine scritte a commento degli scritti di Freud, siano esse a favore o

<sup>75</sup> Wilhem Carl Werner Wien (1864-1928), allievo di Helmholtz e professore ad Aachen e a Monaco. Ottiene il premio Nobel nel 1911.

<sup>76</sup> Ludwig Boltzmann (1844-1906), fisico e matematico austriaco, con le sue ricerche in termodinamica e in meccanica statistica contribuì in modo determinante allo sviluppo della scienza del XIX secolo. Nella storia della metrologia del tempo va ricordato per avere per primo osservato come le leggi di Newton hanno valore sia avanti sia indietro nel tempo. Da tale osservazione dedusse che il tempo non ha una freccia predefinita che indichi qual è il futuro e qual è il passato, come invece Newton sostenne.

contro le sue teorie, dimostrano quanto enorme sia stata la rivoluzione che egli ha provocato nella psicologia e nella psichiatria.

**I rivoluzionari articoli di Einstein.** La terza rivoluzione scientifica ha la data del 1905; in quell'anno Albert Einstein (1879-1955, premio Nobel nel 1921) pubblica una serie di articoli che sconvolgono la fisica del suo tempo. Nel primo (*Su un punto di vista euristico a proposito della creazione e della trasformazione della luce*) egli discute sulla distinzione fra i concetti teorici elaborati dai fisici a proposito dei gas, basati sulla conoscenza di posizione e velocità di un numero grande ma finito di particelle, e la teoria di Maxwell dei processi elettromagnetici, che coinvolgeva la conoscenza di un continuo di valori. Per chiarire la situazione Einstein propone l'ipotesi che l'energia della luce sia distribuita nello spazio con discontinuità, ipotesi che era in grado di spiegare non solo la radiazione di corpo nero ma anche la fluorescenza, la produzione di raggi catodici mediante luce ultravioletta e altri fenomeni collegati con l'emissione e la trasformazione della luce.

Nel secondo e terzo articolo (*Sul movimento di piccole particelle sospese in un liquido stazionario, secondo la teoria cinetica molecolare del calore; Sulla teoria del moto browniano*), partendo dalla meccanica statistica, fornisce una splendida spiegazione dei moti browniani, descritti per la prima volta nel 1828 dal botanico Robert Brown (1773-1858) sulla base di osservazioni del movimento irregolare del polline disperso in acqua. Einstein afferma la necessità teorica che si verificano movimenti, osservabili al microscopio, in sistemi formati da corpi molto piccoli sospesi in un fluido, movimenti che probabilmente coincidono con i moti browniani. Nel 1908 la teoria proposta fu confermata da risultati sperimentali.

Infine nell'articolo *Sull'elettrodinamica dei corpi in moto* Einstein fonda la teoria della relatività ristretta. La teoria, inferita tramite esperimenti puramente mentali, assesta un grave colpo alla concezione del tempo, necessaria alla meccanica classica di Isaac Newton: Einstein cancella l'idea di simultaneità assoluta e quindi nega l'esistenza dell'orologio universale e oggettivo immaginato da Newton. Straordinarie sono la chiarezza delle sue argomentazioni, la discussione sul significato di evidenza nella ricerca scientifica, la critica all'interpretazione classica del concetto di simultaneità; straordinaria è la sua capacità di divulgatore. Enorme fu l'impatto del suo pensiero sulla fisica del tempo e su tutto il successivo sviluppo delle scienze. Einstein sconvolge la nozione classica di spazio, tempo, massa e energia fondata sul pensiero di Galileo e Newton. La memoria si conclude con l'equazione che sancisce l'equivalenza tra l'energia  $E$

e la massa inerziale  $m$ :  $E = m \cdot c^2$ , con  $c$  la velocità della luce in vuoto: certamente l'equazione della fisica più conosciuta al mondo anche tra i non specialisti.

**Il modello dell'atomo.** Nel 1913 il fisico danese Niels Bohr (1885-1962), partendo dal modello dell'atomo proposto nel 1904 dal giapponese Hantaro Nagaoka (1865-1950), perfezionato nel 1911 dal fisico inglese Ernest Rutherford (1871-1937), arriva ad affermare che «l'elettrodinamica classica non è applicabile alla descrizione del comportamento dei sistemi atomici». L'elettrone, nel percorrere un'orbita intorno al nucleo dell'atomo, non irradia energia, come prevedrebbe l'elettrodinamica classica: energia viene emessa o assorbita solo quando l'elettrone lascia l'orbita stazionaria e “salta” su un'altra orbita, caratterizzata da energia minore (emissione) o maggiore (assorbimento). È un tentativo di conciliare la meccanica classica di Newton, immaginando l'atomo come un sistema solare in miniatura, con la teoria dei quanta di Planck. Il tentativo susciterà altri problemi che coopereranno a rendere le scienze della natura incomprensibili, e quindi percepite come inaffidabili, per il grande pubblico.

**La discussione epistemologica.** La discussione epistemologica, che accompagna queste profonde trasformazioni nella descrizione della natura, verte sul rapporto tra sperimentazione e teorizzazione e sul ruolo dei modelli nella teoria. Il modello è un'utile simulazione del “vero” modo di operare della realtà che si colloca al di sotto delle apparenze che la sperimentazione ci presenta? E quando la sperimentazione ci suggerisce modelli diversi per lo stesso fenomeno, per esempio per il comportamento ondulatorio o corpuscolare della luce, quale scegliere? Quale criterio adottare per la scelta? O non scegliere? Lo straordinario aspetto di questa discussione risiede nel fatto che essa avviene in ambito scientifico mentre fin dall'antichità della Grecia classica essa aveva sede esclusiva in ambito filosofico. Storia della filosofia e storia della scienza qui si incontrano, dimostrando la sostanziale unità del pensiero umano. Purtroppo la successiva specializzazione esasperata sia della scienza della natura sia della filosofia rompe questa produttiva unità di analisi e rende assai difficile affrontare e risolvere problemi complessi.

Centrale in questo quadro di grande dinamismo intellettuale è il ruolo delle misure. Limitiamoci a ricordare, oltre agli esperimenti e conseguenti scoperte già citate, l'esperimento del 1880 condotto da Albert Abraham Michelson e Edward Williams Morley (1838-1923) per verificare l'esistenza o meno dell'ete-

re. Cadde, a seguito dei risultati di quell'esperimento, il modello o l'ipotesi dell'etere che tanto aveva condizionato l'analisi di molti fenomeni naturali.

### *Metrologia della CGPM contro corrente*

Nel grande dibattito sulla fisica, sulla psichiatria e sulle altre scienze che caratterizza il periodo che precede la prima guerra mondiale, la metrologia si muove contro corrente, restando ancorata al sistema dei prototipi e arrivando addirittura ad ampliarlo. Nel 1901 la III Conferenza Generale definisce una nuova unità di volume, incoerente con il sistema metrico decimale, distinta dal metro cubo: il litro, pari al volume occupato dalla massa di 1 kilogrammo di acqua pura, al suo massimo di densità e sotto la pressione atmosferica normale. Questa anomala decisione può in parte essere giustificata dall'assetto ancora non definitivo nell'organizzazione dei supporti alle decisioni della CGPM. Infatti gli Istituti Metrologici Nazionali (IMN) non sono ancora stati coinvolti nel percorso di analisi dei problemi e di predisposizione delle proposte di deliberazioni della CGPM: lo saranno solo a partire dal 1927, quando verrà costituito il primo Comitato Consultivo, quello per l'elettricità. Dal 1927 in poi, quando si dovrà affrontare un problema connesso a una grandezza e alla sua unità di misura, si affiderà l'istruttoria a un CC, appositamente costituito se ancora non esistente.

Nel 1901 l'istruttoria per le decisioni della CGPM è svolta dal CIPM, i cui membri sono scienziati, spesso con responsabilità manageriali negli IMN, non specialisti del problema specifico, assai più sensibili agli aspetti politici piuttosto che all'esame di tutte le possibilità scientifiche e tecnologiche per la soluzione del problema. E infatti, con la scelta del nuovo campione di volume, privilegiano aspetti politici e commerciali.

**L'acqua nella metrologia.** Il ruolo dell'acqua nella storia dell'uomo ha un'importanza difficilmente valutabile; forse è scritto nel DNA degli esseri viventi che essi dall'acqua provengono e senza acqua non possono vivere. L'acqua occupa circa il 70% della superficie della Terra ed è l'unico materiale che si trovi naturalmente presente, a temperatura ambiente, nei tre stati solido, liquido e gassoso.

Nella metrologia l'acqua ha ancora oggi una posizione di primo piano: il riferimento nella scala termodinamica della temperatura, essenziale per stabilire l'unità della scala, è la temperatura del punto di equilibrio (coesistenza) tra le sue tre fasi, solida, liquida e vapore: il punto triplo dell'acqua. Grazie a questa

scelta e all'attribuzione convenzionale (ma fortemente condizionata dalla continuità con le misure di temperatura svolte nel passato) di una temperatura termodinamica al punto triplo dell'acqua pari a 273,16 K, l'unità di misura sulla scala termodinamica, il kelvin<sup>77</sup> (simbolo K), è uguale all'unità di misura delle scale pratiche di temperatura, il grado Celsius (simbolo °C). All'acqua gli omeopatici attribuiscono addirittura capacità di memoria. E all'acqua si affida la III Conferenza Generale quando le si chiede di consentire l'esecuzione semplice e precisa di misure di volume. L'acqua è assunta alla stregua di un prototipo naturale e al volume occupato dalla massa di 1 kg di acqua si affida la prerogativa di un nuovo prototipo di volume.

Stando agli atti ufficiali questa decisione deriva da due esigenze: quella commerciale, consentendosi così di eseguire misure precise di volume mediante più semplici misure di massa; quella metodologica, che spesso si riproporrà nella storia successiva della metrologia. Il processo metodologico è il seguente: riscontrata un'esigenza (tecnica, scientifica o, assai spesso, commerciale), ci si basa su un'idea brillante o su un principio fisico da poco scoperto per cercare la relativa soluzione. Si innesca così un processo di controlli sperimentali che impegnano rilevanti attività di ricerca e conseguenti costi. Se i risultati ottenuti con misure da diversi laboratori sono concordanti e consentono di dare una risposta concreta e positiva all'esigenza, la CGPM, con una sua delibera, dà evidenza e peso internazionale ai risultati e consente, ai Governi che hanno finanziato le ricerche, di giustificare di fronte allo loro opinione pubblica le spese sostenute. Non di rado questo processo è fortemente sostenuto da un leader scientifico, particolarmente impegnato nel settore: nella storia della metrologia moderna molti sono i casi nei quali il nome di una personalità scientifica si trova associato a una scelta ufficiale della CGPM. Nel caso del nuovo campione di volume, la scelta della CGPM serve a giustificare l'attività pregevole (e i suoi costi) svolta dal BIPM per stabilire sperimentalmente il rapporto, molto vicino a 1, tra il litro e il decimetro cubo. La Conferenza Generale chiede al BIPM di continuare le sue indagini e di pubblicare, il più presto possibile, più precise va-

<sup>77</sup> Il nome dell'unità ricorda Lord Kelvin, che per primo nel 1848 propose la scala termodinamica della temperatura, con lo zero della scala allo zero assoluto e unità di scala quello che allora si chiamava "grado centigrado". La scala centigrada fu proposta nel 1742 da Anders Celsius (1701-1744) che pose lo zero al punto di solidificazione dell'acqua, il 100 al punto di ebollizione dell'acqua e divise l'intervallo in parti uguali. Nel 1948 la IX CGPM cambiò il nome "grado centigrado" in *grado Celsius* in suo onore. Questo cambiamento di nome, avvenuto nel 1948, non ha prodotto rilevanti effetti: televisioni, giornali, libri scolastici continuano a parlare e scrivere "grado centigrado", a dimostrazione del distacco tra le CGPM e il grande pubblico.

lutazioni di tale rapporto. Le indagini riguardano anche cosa debba intendersi per acqua pura, la determinazione della dipendenza della massa volumica dell'acqua da svariate condizioni (temperatura, pressione, provenienza, ossia composizione isotopica, ecc.).

Paul Appell, vice presidente dell'Accademia della Scienze francese, nel 1913 commenterà così la scelta del litro come volume di 1 kg di acqua:

Come matematico, faccio notare che l'unità di volume coerente con l'unità di lunghezza è il metro cubo, non già il decimetro cubo. Volendo dunque creare una nuova unità di volume, vicina al metro cubo, si sarebbe dovuta prendere in considerazione una tonnellata di acqua, non già un kilogrammo!

La risposta all'obiezione è evidente: la tonnellata d'acqua rappresenta una scelta matematicamente corretta ma poco pratica. Prevale dunque il pragmatismo.

**Archimede e l'acqua.** Conviene cercare di comprendere meglio gli obiettivi che la CGPM si pone nel fare la scelta di un campione "pratico" del litro. E per farlo è utile andare indietro nel tempo, addirittura fino ad Archimede di Siracusa (circa 287-212 a.C.), rileggendo, con la terminologia moderna, uno dei celebri aneddoti che ci sono stati tramandati sulle sue scoperte.

Archimede, ormai già anziano (siamo probabilmente prima della seconda guerra punica, cioè intorno al 220 a.C.), sta rientrando stanco nella sua dimora. Un problema lo affligge: il monarca tiranno Gerone II gli ha chiesto di verificare se l'artigiano che ha realizzato la lussuosa corona ha usato oro puro o ha cercato d'ingannarlo usando una lega meno pregiata. Già allora la metrologia era pesantemente condizionata dal potere che le chiedeva di intervenire anche per offrire garanzie alla fiducia del tiranno. Il Nostro ha già in testa il metodo da adottare per risolvere il problema; ha capito che, in un corpo omogeneo, il rapporto tra il peso (massa, oggi diremmo) e il volume del corpo è una caratteristica del materiale del quale il corpo è fatto. Basta dunque confrontare tale rapporto nella corona con quello ottenuto per un pezzetto di oro puro per ottenere la risposta cercata. Archimede sa come misurare le masse; le bilance sono strumenti già adeguatamente raffinati, capaci di fornirgli le informazioni necessarie con la necessaria precisione. Non è un problema misurare il volume del pezzetto di oro puro di riferimento: basta sagomarlo come un cilindretto, misurarne diametro e altezza e applicare una formuletta a lui ben nota (pare sia lui "l'inventore" di  $\pi$ ). Ma come misurare il volume della corona, molto elaborata e ornata da foglie di alloro (ovviamente dichiarate d'oro)? In casa

lo attende la schiava: ha preparato un bagno caldo, con acqua profumata, in una vasca di marmo colma fino all'orlo. Archimede si immerge nella vasca, mentre la schiava si appresta a strofinargli la schiena; l'acqua tracima e si sparge sul pavimento. Il viso del Nostro s'illumina: schizza fuori dall'acqua urlando: Eureka, eureka! ho trovato! Archimede infatti ha scoperto come risolvere il suo problema: il volume di ogni corpo è proporzionale alla massa dell'acqua che fa tracimare immergendolo in un recipiente colmo d'acqua. Basterà dunque confrontare il rapporto tra massa della corona e massa dell'acqua che essa fa tracimare, quando viene immersa in un recipiente colmo d'acqua, con il rapporto tra massa del pezzo d'oro puro e massa dell'acqua che esso fa tracimare nelle medesime condizioni. Archimede contestualmente scopre anche la spinta idrostatica, ma questo al momento ci interessa meno.

Torniamo all'inizio del XX secolo, con un balzo di oltre 2100 anni. Le nazioni battono carta moneta che è garantita, mediante il sistema della parità aurea, dalle riserve di materiali preziosi della banca centrale, oro in testa. Problema centrale è dunque poter controllare la purezza, ossia il valore, dell'oro che si acquista e si vende. È il problema di Archimede. Il BIPM, e la CGPM con la definizione del litro come campione di volume, forniscono il riferimento per affrontare i controlli in maniera precisa e poco costosa<sup>78</sup>. Come conseguenza, si stabiliranno tabelle raffinate di massa volumica, o densità, o peso specifico (bisogna tener presente che la distinzione tra massa e peso era stata definitivamente chiarita dalla stessa III CGPM), riferite al corrispondente valore dell'acqua "pura". Ricordiamo infine che pochi anni prima della delibera della CGPM sul litro, in Italia, ma non solo in Italia, l'Ufficio dei Pesi e delle Misure aveva cambiato nome, aggiungendo «e del saggio dei metalli preziosi».

La delibera della III CGPM riguardante il litro viene abrogata solo nel 1964, dalla XII CGPM, quando risulterà ormai chiaro che non basta fissare temperatura e pressione dell'acqua "pura" per definirne inequivocabilmente la densità.

### *Il pragmatismo metrologico*

In sintesi, la sostanza della decisione della CGPM di stabilire una nuova unità di volume va discussa sotto due aspetti. La soluzione di affiancare un'unità di misura "pratica" (in questo caso il litro) all'unità coerente del sistema (in

<sup>78</sup> Il rapporto tra il kilogrammo prototipo e la massa di un litro d'acqua pura è un numero identico al valore della densità (oggi si deve dire "massa volumica") di quell'acqua, generando così un comodo "campione" naturale di densità utile per le misure di densità mirate alla determinazione della purezza dei metalli preziosi.

questo caso al decimetro cubo), per una data grandezza, diverrà prassi normale nella metrologia, quasi addirittura la regola per molte unità elettromagnetiche. Queste scelte sono sempre suggerite da esigenze di facilità di disseminazione<sup>79</sup> delle unità di misura e dei relativi campioni: scelte dunque pragmatiche. Il pragmatismo diviene una regola della metrologia. Quando le precisioni richieste nelle applicazioni mettono in crisi le capacità di disseminazione e di garanzia della riferibilità delle misure, offerte dagli Istituti Metrologici Nazionali, si concorda di affiancare alle unità del sistema altre unità, che verranno di volta in volta dette *pratiche* o *internazionali*, meglio riproducibili, conservabili, disseminabili. Si abbandona dunque la razionalità del sistema in favore di migliori possibilità di misurazione. Ovviamente si procede sempre entro il vincolo forte del consenso.

### *Una massa o tante masse?*

Il secondo aspetto, che merita di essere sottolineato, riguarda la posizione della grandezza massa nei modelli usati dalla scienza per descrivere la natura e delle unità di misura per questa grandezza. Con Galileo e Newton si precisano due aspetti della massa.

*Aspetto inerziale:* esso fa sì che per modificare lo stato di moto di un corpo dotato di massa sia necessario applicare a esso una forza; questo aspetto è sintetizzato dalla relazione tra forza  $f$ , massa  $m$  e accelerazione  $a$  (lo stato di moto variato del corpo):  $f = m \cdot a$ . Da questa relazione si può inferire<sup>80</sup> che, data la massa del corpo espressa in kilogrammi e la sua accelerazione espressa in metri al secondo quadrato (in simboli  $m/s^2$  oppure  $m \cdot s^{-2}$ ), si ottengono sia l'unità coerente di misura della forza (in simboli  $kg \cdot m \cdot s^{-2}$ , chiamata *newton*), sia il valore della forza stessa.

*Aspetto gravitazionale:* esso fa dipendere la forza  $f$  di attrazione tra due corpi dal prodotto delle loro masse,  $m_1$  e  $m_2$ , e inversamente dal quadrato della loro distanza  $d$ . Ognuno ha potuto constatare gli effetti di questo aspetto guardando la diversa capacità degli astronauti di fare salti ben alti, malgrado la loro in-

<sup>79</sup> Con disseminazione si intende il processo di distribuzione agli utenti delle unità di misura, tramite catene ininterrotte di tarature di campioni e strumenti di misura che creano il collegamento di ogni misura a quella effettuabile con i campioni nazionali. Tale collegamento viene chiamato, con terminologia metrologica, *riferibilità delle misure*.

<sup>80</sup> Nulla vieta di pensare a un sistema di grandezze e unità di misura nel quale si parta da accelerazione e da forza per derivare massa e sua unità di misura; oppure a un altro nel quale si parta da massa e forza per derivare accelerazione e sua unità di misura. La scelta utilizzata nel testo rispetta il principio di continuità.

variata massa complessiva (corpo + tuta + zaino =  $m_2$ ), sulla Luna (corpo di massa  $m_{1L}$  molto più piccola di quella  $m_{1T}$  della Terra) e sulla Terra.

Riconosciuti questi due aspetti si poteva decidere di considerare massa inerziale e massa gravitazionale come due grandezze diverse, attribuendo pertanto a esse due diverse unità di misura. Per ragioni pratiche (consenso e continuità, come già più volte è stato sottolineato, e anche *amore* per la semplicità delle teorie scientifiche) si preferì considerare le due masse come una stessa grandezza e attribuire dunque alle due “manifestazioni” della massa la stessa unità di misura.

Inevitabilmente la legge di gravitazione universale di Newton:

$$f = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

deve contenere una costante di proporzionalità  $G$  che, per far tornare i conti sulle dimensioni già fissate di massa, forza e distanza, dovrà avere le dimensioni di una forza moltiplicata per il quadrato di una lunghezza e diviso per il quadrato di una massa: in simboli  $(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^2) / \text{kg}^2 = \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ .

Vi è anche un terzo aspetto: Einstein, oltre ad affermare l'equivalenza tra massa e energia con la sua celebre equazione già citata, pose alla base della teoria della relatività generale il principio di equivalenza tra massa inerziale e massa gravitazionale.

**Massa e peso.** Una seconda decisione della III CGPM riguarda la distinzione tra il kilogrammo massa e l'usatissimo kilogrammo peso. Nella sostanza la CGPM sottolinea che: il peso è una forza; il peso di un corpo è il prodotto tra la sua massa e l'accelerazione di gravità locale (*de la pesanteur*, nel testo originale); il peso normale di un corpo (meglio sarebbe dire “normalizzato”) è il prodotto tra la sua massa e l'accelerazione normale (normalizzata) *de la pesanteur*; il numero adottato dal Servizio internazionale dei Pesì e Misure per il valore dell'accelerazione normale *de la pesanteur* è  $980,665 \text{ cm/s}^2$ , numero già stabilito in alcune legislazioni. In una nota alla delibera, difficile da interpretare, si afferma che «questo valore di  $g_n$  è il valore convenzionale di riferimento per il calcolo dell'unità kilogrammo-forza attualmente abolita». Poiché ognuno interpreta a suo piacimento questa nota, il kilogrammo-forza, o kilogrammo-peso non abolito, continuerà a vivere per decenni, creando molta confusione ma anche consentendo alla metrologia legale di gestire in modo semplice le bilance e le misure di peso nel commercio. Ancora oggi si compra in peso ciò che di fat-

to si misura e si valuta in massa: con campioni di massa si tarano le bilance; la massa di un alimento è ritenuta proporzionale al suo valore nutrizionale. Ma si parla di pesi di patate e ciliege e di pesate con le bilance.

**E le masse elettriche e magnetiche?** Per comprendere l'importanza della delibera che stabilisce la distinzione tra massa e peso (forza) è utile tenere presente un concetto che permeava la cultura dell'epoca. Precisiamo questo concetto con le parole di Guido Grassi, professore di elettrotecnica e direttore della Scuola "Galileo Ferraris" del Politecnico di Torino. Egli scrive<sup>81</sup>:

in generale nelle scienze fisiche si studiano forze di natura diversa, in quanto che a noi sembrano emanare da diversi *agenti fisici*, ed anche ci sembrano *agire* su elementi diversi. Di qui nasce il concetto di *massa*, che rappresenta la proprietà per cui un corpo, o un determinato agente fisico, risente più o meno l'azione di una forza. Però si avverta che, nel definire la massa di un agente, come, per esempio, dell'elettricità e del magnetismo, si fa una convenzione simile a quella per cui si definisce la massa ponderale, o la massa nel significato ordinario che si dà a questa parola nello studio dei fenomeni meccanici. Se avessimo non il senso del peso, ma soltanto quello dell'attrazione magnetica, ci sembrerebbe naturale definire la massa magnetica prima di quella ponderale.

La conseguenza di questa visione unificante è importante per comprendere le reazioni all'abbandono dei sistemi di misura basati sul centimetro, il grammo e il secondo (CGS). Nella visione del Grassi la forma della legge gravitazionale di Newton vale per qualunque "massa". Per le "masse" elettriche diviene la legge di Coulomb; per le "masse" magnetiche esprime la forza di Ampere tra due conduttori percorsi da correnti elettriche. L'opportuna scelta delle unità di misura delle diverse "masse" può consentire di porre a uno la costante di proporzionalità in ciascuna legge: la scelta del sistema c.g.s. elettrostatico opera in questa direzione nella legge di Coulomb.

Per inciso ancora il Grassi, nel testo *Corso di Elettrotecnica - Volume secondo* (VI ediz., Sten Editrice, Torino 1926), offre, a p. 245, una dimostrazione del percorso, indipendente dalla Convenzione del Metro, seguito a quel tempo dai docenti del settore elettrico: il riferimento per il campione del volt è il valore della forza elettromotrice della pila Weston, pari a 1,0184 V, "accettato" dalla Confe-

<sup>81</sup> Guido Grassi: *Principi Scientifici dell'Elettrotecnica*, p. 17, II ed., Sten Editrice, 1926. I corsivi sono nel testo originale citato.

renza Internazionale per le Unità e i Campioni Elettrici, tenutasi a Londra nell'ottobre del 1908.

*Perché la CM è controcorrente?*

La Convenzione del Metro e i suoi organismi soffrivano, come già è stato osservato, di vincoli burocratici conseguenti al doppio livello decisionale: quello scientifico del CIPM e quello politico della CGPM. Ma il ritardo del sistema di governo della metrologia mondiale, costituito allora da CIPM-CGPM e solo dopo il 1927 anche dagli IMN, nel cogliere le opportunità offerte della rivoluzione scientifica va probabilmente attribuito anche all'inevitabile atteggiamento conservatore di tali organismi. Non fu facile modificare l'abitudine ai campioni conservati dall'autorità che la CM rese unica a livello mondiale, alla disseminazione delle unità mediante copie dei campioni, a un organismo centralizzato con il compito di eseguire periodicamente i confronti delle copie con il prototipo. Per compiere il salto verso campioni realizzabili in ciascun laboratorio in modo autonomo e indipendente bisognava che gli IMN affermassero il metodo dei confronti internazionali tra i campioni realizzati, essenziali non solo per raggiungere l'indispensabile consenso al cambiamento, ma anche per assicurare la reciproca confidenza nelle loro realizzazioni e nel loro impiego per la disseminazione locale. Il processo di avvio della cooperazione tra IMN fu ritardato dalle diffidenze legate al crescente nazionalismo, dalle periodiche crisi economiche, dalle guerre disastrose che sconvolsero l'Europa e gran parte del Mondo nella prima metà del XX secolo.

**La metrologia si adegua ai modelli di Stato.** L'evoluzione dei modelli di Stato è un altro aspetto da tenere presente per comprendere i comportamenti del CIPM e della CGPM nel corso del XX secolo. Nel periodo precedente la prima guerra mondiale due erano i modelli economici e politici prevalenti<sup>82</sup>. Il modello inglese era caratterizzato dall'ideologia del libero scambio, da un solido sistema finanziario in grado di controllare il commercio internazionale, da un conseguente ruolo secondario dello Stato nei confronti dell'industria privata. Il modello tedesco, invece, privilegiava l'integrazione tra finanza e industria, la mobilitazione delle risorse nazionali e una forte correlazione tra scienza e tecnologia. L'ideologia dominante in Germania era quella di una economia regolata dallo Stato attraverso il sostegno degli interessi dell'industria nazionale.

---

<sup>82</sup> Massimo L. Salvadori: *Il Novecento. Un'introduzione*, Laterza, 2004, pp. 27-33.

Entrambi i modelli vedevano con favore il mantenimento di una struttura metrologica ben collaudata da millenni di storia: i prototipi di proprietà di un'autorità centrale, la CGPM; una struttura tecnica per il loro impiego nella disseminazione, il BIPM; una struttura di supporto tecnico-scientifico per la gestione del sistema, il CIPM. Su queste strutture gli Stati conservavano pieno controllo in quanto tenevano nelle loro mani i cordoni della borsa.

La guerra, coinvolgendo l'intera struttura economica, finanziaria e industriale degli Stati belligeranti, modificò profondamente i modelli di Stato. Lo Stato divenne il principale motore dell'economia, anche nel successivo tempo di pace periodicamente sconvolto da inflazioni e recessioni economiche. Si fecero stretti i rapporti tra Stato, finanza e industria, condizionando i processi economici e soprattutto esaltando la ricerca di soluzioni autarchiche. Nell'autarchia ben si inquadra un nuovo sistema metrologico basato su campioni realizzabili nei laboratori dei singoli Stati in maniera autonoma. Si spiega così il lento ma progressivo cambio di indirizzo, prima del CIPM e poi della CGPM: lento perché sempre condizionato dalla necessità della ricerca del consenso e dalla burocrazia conseguente al controllo delle operazioni da parte di una molteplicità di Stati in concorrenza tra loro.

Il nuovo modello di interventismo e dirigismo statale aveva aperto molti diversi modi attuativi. La Germania e altre nazioni seguirono la modalità del capitalismo diretto da parte dello Stato. La rivoluzione bolscevica compì un passo ulteriore: integrò il capitalismo di stato con la proprietà statale dei mezzi di produzione e con la pianificazione economica da parte dello Stato socialista. Entrambe le modalità condussero a diffuse forme di dittatura, di destra e di sinistra. Dalle dittature, ma non dal dirigismo statale, restarono fuori, fra le grandi nazioni, Francia e Inghilterra. Restarono fuori anche gli Stati Uniti, che si opposero al dirigismo statale e rimasero gli unici sostenitori dell'ideologia del libero mercato. È questo lo scenario entro il quale si trovò condizionata l'azione della CGPM fino al 1929, quando il mondo fu sconvolto dalla grande depressione economica.

Cadde ben presto l'illusione dei sistemi comunisti di assistere al crollo del capitalismo. Da un lato gli Stati Uniti reagirono con la politica del *New Deal*. Dall'altro le dittature di destra rafforzarono le loro economie con la politica degli armamenti e con l'accentuazione dell'autarchia. Ciò spinse il CIPM ad accelerare le azioni per il cambiamento di modello e a preparare la svolta che avrà compimento nell'immediato secondo dopoguerra.

Per comprendere a fondo le cause della lentezza della svolta nella metrologia internazionale, dai prototipi ai campioni naturali autonomamente realizzabili, non va sottovalutato il peso del valore economico di certe innovazioni scientifiche e tecnologiche nelle misure. Si pensi per esempio al caso dell'elettricità, ben presto divenuta merce a grande diffusione per impieghi sia domestici sia industriali e sociali (illuminazione stradale, trasporti all'interno delle città...). In una prima fase anche innovazioni nel campo delle nuove misure potevano avere un valore economico e strategico che i governi non intendevano dividere con altri, quindi da tenere fuori dalle decisioni della CGPM. La scienza delle misure si collocava, per i finanziatori, tra le attività applicative ad alto e immediato valore aggiunto. Inoltre i pochi istituti metrologici esistenti si occupavano anche di tecnologie di interesse nazionale, con programmi protetti dal rischio di condivisione con Stati concorrenti. Le idee circolavano nei congressi internazionali, ma le modalità per renderle innovazione, a supporto della produzione e del commercio, venivano protette da coloro stessi che le mettevano a punto, per non rischiare perdite di finanziamenti.

Va inoltre ricordato che molti laboratori metrologici, di carattere quasi esclusivamente meccanico e termico, erano di stretta pertinenza militare; tali rimarranno, in alcuni casi, anche per venti anni dopo la fine della seconda guerra mondiale<sup>83</sup>. I nuovi metodi di misura che venivano messi a punto in tali laboratori, spesso con la collaborazione di aziende che si occupavano della loro successiva produzione, erano rigidamente protetti dal segreto militare e quindi del tutto estranei all'idea di confronti internazionali e di cooperazione tra istituzioni diverse.

Finché la metrologia internazionale resterà solo meccanica e termica, e quindi di stretto interesse della produzione e delle applicazioni militari tradizionali, non ci sarà alcuna spinta, dall'esterno degli organismi della Convenzione del Metro, verso la rivoluzione nella scelta delle unità e nella realizzazione dei campioni. Paradossalmente sarà l'avvento della competizione atomica in campo militare a togliere alla metrologia la limitazione dei prototipi e della loro sola internazionalizzazione. Le applicazioni militari e civili dell'energia atomica richiedono strutture e mezzi di ricerca di ordini di grandezza ben più consistenti di quelli necessari per lo sviluppo delle misure in tutti gli altri settori. Quando nacquero i centri di ricerca nucleare, tutti sotto stretto controllo mili-

<sup>83</sup> Un esempio tipico si verificò in Spagna. Laboratori militari svilupparono, alla fine degli anni '60 del XX secolo, sofisticati metodi automatici di taratura di blocchetti piano paralleli e li utilizzarono per controllare l'uniformità della produzione di armi dell'industria nazionale.

tare e politico, i laboratori metrologici furono più liberi di avviare la cooperazione internazionale e di impostare la nuova metrologia anche sulla base dei confronti. E la metrologia iniziò a essere al passo con l'innovazione scientifica e tecnologica.

Il sostegno teorico alle funzioni economiche dello Stato fu fornito dall'economista inglese John Maynard Keynes (1883-1946) con la sua opera del 1936 *The general theory of employment, interest and money*. In essa Keynes sosteneva anche la necessità di politiche sociali da parte dello Stato, mirate al conseguimento del benessere di tutti i cittadini. Nel 1944 Keynes fu protagonista, purtroppo inascoltato, dell'accordo finanziario di Bretton Woods. Alle avanzate idee di Keynes si opposero, e vinsero, i forti poteri finanziari anglo-americani. Si creò così un sistema finanziario internazionale destinato sia a facilitare la nascita di nuove forme di dittatura basate sul populismo, disposto sovente a inchinarsi di fronte agli interessi degli Stati Uniti (come avvenne in alcuni Paesi dell'America Latina, e ancor oggi in alcuni Paesi europei), sia a emarginare l'azione della classe politica in favore dei poteri economici delle multinazionali e di quelli della finanza che gestisce i fondi di investimento e il commercio delle materie prime. Questa situazione condiziona, con periodiche bolle speculative e con guerre come quelle in Iraq e in Afghanistan, la vita dei popoli e mette a rischio l'esistenza stessa delle democrazie parlamentari. Solo tenendo presenti questi scenari complessi si possono comprendere le difficoltà che dovettero affrontare, anche nel secondo dopoguerra, i Comitati Consultivi, il Comitato Internazionale e la Conferenza Generale nel portare avanti il cambiamento di paradigma della metrologia internazionale.

### *La cultura delle misure nelle università e nelle aziende*

Università e piccole e medie industrie possono muoversi con minori condizionamenti da parte degli Stati e della finanza internazionale, rispetto ai tre livelli di organismi della Convenzione del Metro. Generano pertanto più rapidamente cultura e innovazione. Sono artefici delle rivoluzioni scientifiche e fruitori quasi immediati delle possibilità scientifiche e tecnologiche aperte da tali rivoluzioni. Anche il settore delle misure si muove con una dinamica più attiva di quella consentita alla CGPM: ricerca e insegnamento nelle Università; produzione di strumenti di misura innovativi e loro impiego per il controllo dei processi produttivi nelle aziende.

**Le Università.** Già all'inizio del secolo in molte università di nazioni industrializzate si tengono specifici corsi di misure elettriche. Ecco un breve elenco, certo non esaustivo ma solo esemplificativo, di testi di misure pubblicati in nazioni diverse nel periodo che stiamo esaminando, testi classici che hanno costituito il riferimento per i successivi libri e manuali di misure elettriche.

- 1902: W. Jaeger del PTR;
- 1905: P.B. Arthur Linker (J. Springer, Berlino) pubblica un manuale di oltre 500 pagine, *Elektrotechnische Meßkunde*, diviso in cinque capitoli: metodi elettrici, metodi magnetici, misure in corrente continua, misure in corrente variabile, fotometria.
- 1920: Albert Turpain, docente di Elettrocità Industriale alla facoltà di scienze di Poitiers, pubblica (Dunod, Parigi) un testo sintetico (183 pagine) sulle misure elettrotecniche, suddiviso in cinque parti: tarature fondamentali, misure balistiche, misure fotometriche, misure su macchine elettriche, tecnologie varie.
- 1924: Charles Vickery Drysdale e Alfred Charles Jolley pubblicano (E. Benn, Londra) il testo *Electrical Measuring Instruments*.
- 1931: Georg Keinat inizia a pubblicare, a puntate, un'opera colossale che si concluderà solo negli anni '50: *Archiv für technisches Messen*.
- 1937: Albert Palm pubblica a Berlino (J. Springer) il testo *Elektrische Meßgeräte und Meßeinrichtungen*.
- 1938: Bernard Hague pubblica (Pitman & Sons, London) il testo specialistico *Alternating current bridge methods*.
- 1943: Segismundo Gerszonowicz pubblica a Montevideo (R.O. del Uruguay) il testo *Galvanómetros y oscilógrafos*.

Anche in alcune università italiane si ha notizia di corsi di misure e di testi per tali corsi. Nella Scuola Superiore di Elettrotecnica Galileo Ferraris del Regio Politecnico di Torino si tengono corsi di elettrotecnica, misure elettriche, telegrafia, telefonia, elettrochimica<sup>84</sup>. Si rintracciano appunti di studenti, come quelli sulle lezioni tenute a Torino nel 1921 da G. Lorenzo Ferraris (ed. Lattes), il quale nel 1936, in una conferenza presso la Regia Università e Regia Scuola di Ingegneria di Torino, si dichiara favorevole a un sistema Metro, Se-

---

<sup>84</sup> Si veda in proposito la prefazione al testo di Guido Grassi (direttore della Scuola): *Principi Scientifici dell'Elettrotecnica*, Sten Grafica, 1ª edizione 1915.

condo, Kilogrammo elettromagnetico *non* razionalizzato, con la permeabilità magnetica dell'etere adimensionale e di valore  $10^{-7}$ !

Sempre G. Lorenzo Ferraris pubblica nel 1932 (UTET, Torino) il volume *Misure elettriche: grandezze elettriche/macchinario ed impianti elettrici*, nella collana *Biblioteca dell'Ingegnere*, diretta dal prof. Giuseppe Albenga, direttore della Regia Scuola di Ingegneria di Torino.

Il già ricordato Giovanni Giorgi<sup>85</sup> fu, dal novembre 1934 in poi, titolare del corso di Trasmissioni e Misure Telegrafiche e Telefoniche presso la R. Scuola d'Ingegneria di Roma; cattedra indi convertita col titolo di Comunicazioni Elettriche presso la Facoltà d'Ingegneria della R. Università di Roma. Giorgi vinse il concorso a cattedra nel 1926, battendo un altro celebre concorrente, Enrico Fermi.

I corsi di misure riguardavano dunque quasi esclusivamente le misure nel settore elettrico, in qualche modo a conferma di un dinamico percorso indipendente seguito dagli "elettricisti". Nelle università, però, si insegnavano anche le misure dimensionali e geometriche, le misure meccaniche e quelle termiche, le misure in chimica. Non erano però previsti corsi specifici per tali materie: esse erano "ancelle" di altre discipline. Un quadro complessivo sulle misure veniva fornito nei corsi di fisica sperimentale. Le misure di lunghezze e angoli erano un capitolo importante degli insegnamenti di topografia. Le misure meccaniche e termiche costituivano capitoli specifici in corsi di meccanica e di macchine termiche. Ben poco si parlava di misure nei corsi universitari di chimica.

In generale erano trascurati o ignorati argomenti quali la riferibilità delle misure a campioni ufficialmente riconosciuti, il problema dei controlli metrologici periodici sui campioni di misura, le regole per la gestione della strumentazione nelle aziende. Solo nei corsi di fisica e di topografia si affrontava in maniera sistematica, ma non uniforme, la teoria degli errori di Gauss e il calcolo della precisione delle misure, con un ricorso puntuale alla statistica.

Discuteremo delle ragioni di questa mancata affermazione delle misure come disciplina autonoma e unificata alla fine del capitolo, quando cercheremo di rispondere a una domanda cruciale: può essere considerata "scienza" la metrologia dei primi decenni del XX secolo? La difficoltà di affermare nelle università la metrologia come disciplina autonoma di base per la preparazione di chimici, fisici, ingegneri (ma anche biologi e medici) sussiste ancora oggi. Sa-

<sup>85</sup> Le notizie su Giorgi qui riportate sono tratte da un elegante e interessante studio sullo scienziato svolto da Mario Tschinke, pubblicato sulla rivista «Tutto\_Misure», 3, 2009, p. 251.

rebbe necessario immaginare, per giungere alla coscienza dell'esistenza di una scienza delle misure autonoma e con caratteristiche di cultura di base, l'organizzazione di una serie di Congressi Internazionali "costituenti" sull'argomento, capaci anche di elaborare una teoria della misurazione condivisa nei diversi settori culturali che fanno riferimento alle misure.

**Le aziende.** Molte sono le aziende che dominano la scena della produzione di strumenti di misura dagli inizi del XX secolo ai giorni nostri. Ricordiamone alcune prestigiose, pur essendo difficile, e forse inutile in questo contesto, seguirne i passaggi di ragione sociale e di produzione. È interessante notare come non poche delle aziende che hanno fatto la storia delle misure nella ricerca, nell'insegnamento e nell'industria sono nate da *spin-off* universitari.

La Cambridge Instruments fu fondata da Horace Darwin (1851-1928), figlio del famoso biologo Charles, e da Albert George Dew-Smith (1848-1903). Essi acquistarono una piccola azienda, generata dall'Università di Cambridge nel Massachusetts (USA), specializzandola nella produzione di strumenti scientifici. Dall'azienda uscirono il ponte di Smith e il termometro a resistenza di Callendar (URL: <<http://www.museumoftechnology.com/cic.html>>), in produzione fino agli anni '70. Oggi, con il nome Cambridge Scientific Instruments Ltd, produce principalmente gascromatografi.

La Leeds & Northrup fu fondata nel 1899 con il nome di Leeds & Co. da Morris Evans Leeds (1869-1952, laureato nell'Università di Filadelfia e specializzato nell'Università di Berlino). Dalle origini l'azienda produsse strumenti elettrici. Nel 1903 si unì all'azienda Edwin F. Northrup (1866-1940, professore di fisica alla Princeton University), dando origine alla Leeds & Northrup di Filadelfia, specializzata nella produzione anche di pirometri. Morris guidò l'azienda fino al 1939, portandola a livello di leader mondiale nella produzione di galvanometri, resistenze campione, ponti di Wheatstone, potenziometri, registratori di temperatura, termometri a resistenza, pirometri ottici e termocoppie, apparecchiature elettrochimiche.

Nel 1995 la Leeds & Northrup fu messa in vendita dalla proprietà (General Signal, USA), suddivisa in quattro divisioni. La divisione "Misure e controlli" fu acquistata dalla Honeywell Inc., azienda le cui tracce risalgono al 1885 (URL: <<http://www51.honeywell.com/honeywell/about-us/our-history.html>>). Lo storico nome Leeds & Northrup è ormai perso: resta solo nella memoria dei tanti ricercatori, tecnici e insegnanti che sono cresciuti usando gli ottimi strumenti prodotti da questa leggendaria azienda. Alla progettazione di alcuni

di questi strumenti contribuì Giuseppe Ruffino (1923-1993); egli fu direttore dell'Istituto Termometrico Italiano (ITI) del CNR fino alla confluenza dell'Istituto nell'Istituto di Metrologia G. Colonnetti nel 1970<sup>86</sup>.

Nel 1904 Henry Tinsley inizia a Londra la costruzione di strumenti di precisione tra i quali rinomata è una pila Weston. Fonda in seguito la H. Tinsley & Co., la quale diviene nota produttrice di strumenti di misura di elevata precisione: potenziometri, ponti di Kelvin e di Wheatstone, galvanometri, resistori campione, termometri a resistenza di platino. Tinsley guadagna una notevole reputazione per l'alta qualità dei suoi prodotti. Attualmente la maggioranza dei prodotti citati non è più sul mercato, ma l'azienda esiste ancora oggi, essendo parte di Hartest Group (URL: <<http://www.tinsley.co.uk>>).

Willam Hewlett e David Packard dell'Università di Stanford fondano la HP nel 1939. L'azienda inizia la sua produzione in un garage a Palo Alto (URL: <<http://www.hp.com/hpinfo/abouthp/histnfacts/timeline>>). Nel dopoguerra diviene azienda leader nella produzione di contatori, frequenzimetri, oscilloscopi. Alla HP si deve il primo termometro industriale a quarzo, il primo interferometro a laser applicabile al controllo delle macchine utensili. Oggi l'azienda produce principalmente computer per applicazioni di processo.

Joseph F. Keithley (1913-1997) fondò la Keithley Instruments nel 1946, la prima a produrre e commercializzare microvoltmetri e microamperometri con sensibilità capaci di competere con i più sofisticati galvanometri magnetoelettrici. Questa nuova strumentazione consentì una svolta nella progettazione dei laboratori per misure elettriche e termiche. Prima i laboratori erano posti in oscuri sotterranei, dove era possibile utilizzare i galvanometri ottici, con scale sulle quali ballonzolava e si spostava una vaga macchia prodotta da un raggio di luce riflesso sullo specchietto posto sull'equipaggio mobile dello strumento. Divennero poi luminosi laboratori con rivelatori elettronici ad alta sensibilità dotati di indicatori ben visibili.

A questa svolta è legato un curioso ricordo personale. Siamo nel 1965<sup>87</sup>, durante una bella giornata estiva. Tre giovani ricercatori, Paolo Campanaro, Luigi Crovini e il sottoscritto, sono impegnati nella realizzazione della scala italiana

<sup>86</sup> Il contributo di Giuseppe Ruffino alla metrologia italiana e internazionale è illustrato in un articolo di Ared Cezairliyan e Francesco Righini, interessante anche per i riferimenti alle attività nel campo delle proprietà termofisiche dei materiali (URL: <<http://www.springerlink.com/content/q5x053755w3268g5/fulltext.pdf>>).

<sup>87</sup> P. Campanaro, L. Crovini, S. Sartori: *Realizzazione e mantenimento presso l'ITI del riferimento fondamentale di temperatura al punto triplo dell'acqua*, Ric.Sci., 35, IIA, 1965, pp. 723-735.

di temperatura. In un laboratorio dell'Istituto Termometrico Italiano (ITI) del CNR, attualmente appartenente all'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), eseguono controlli incrociati tra termometri a resistenza di platino, la maggioranza dei quali costruita dal sottoscritto (erano pochi i finanziamenti disponibili e bisognava arrangarsi), e celle in pirex realizzanti il punto triplo dell'acqua, costruite dall'esperto soffiatore di vetro e costruttore di strumenti scientifici Giuseppe Rasetti. Utilizzano un ponte di Smith III, nella versione progettata da tre ricercatori del NPL nel 1950 e costruito dalla H. Tinsley & Co. Usano come rivelatore di zero un nuovissimo microamperometro della Keithley. Improvvisamente vedono il ponte saltare da una posizione di equilibrio a un'altra vicina, come se qualcosa fosse variato nel ponte o nel termometro o nel punto triplo. Mentre controllano tutti i parametri della misura, il ponte ritorna sul precedente equilibrio. Poco dopo lo stesso fenomeno si manifesta una seconda volta. I nostri allargano la sfera dei controlli: il risultato sembra incredibile. Mentre stanno eseguendo le misure, all'esterno un commesso sta pulendo i vetri della grande vetrata che dà luce al laboratorio: quando il commesso sale in cima alla scala, il ponte si sposta in una nuova posizione di equilibrio; se scende, torna alla posizione iniziale. Coinvolgono subito il commesso nell'indagine, facendolo salire e scendere più volte dalla scala: il fenomeno si ripete inesorabilmente. Le misure vengono sospese e i tre si siedono a riflettere. L'unico parametro variato, da commesso sulla scala a commesso giù dalla scala, è l'illuminazione dell'attrezzatura di misura. Come può la luce influenzare le misure di resistenza? Il ponte è schermato da una robusta cassa di legno. Il microamperometro è chiuso in un involucro di alluminio. Il punto triplo è in equilibrio e immerso in un bagno di ghiaccio fondente, contenuto in un termostato. Resta solo il termometro, la cui testa sporge fuori dalla cella e si connette all'elemento sensibile, posto nella cella, tramite un tubo di vetro lungo circa 45 cm. Ecco l'ipotesi di spiegazione. La radiazione solare si intrufola nella parete del tubo del termometro e, riflettendosi sulla superficie esterna e sulla superficie interna della parete, che funge da guida d'onda, arriva fino all'elemento sensibile, riscaldandolo. Il ponte segnala la piccola variazione di temperatura del termometro, dell'ordine di pochi millesimi di grado Celsius. Se l'ipotesi è corretta, basterà smerigliare la parete esterna del tubo per eliminare il fenomeno. Detto fatto, il termometro viene smontato, il tubo smerigliato, in modo da evitare riflessioni della radiazione luminosa. Con l'aiuto del disponibile commesso si ripete l'esperimento: la variazione è scomparsa.

Questo racconto può essere utile per capire come il caso possa essere determinante nello scoprire un fenomeno prima non rilevato (tutte le misure condotte da altri laboratori erano state svolte in condizioni di semioscurità, per poter utilizzare galvanometri ottici): importante è analizzare bene il fenomeno e arrivare alla conclusione che lo spiega, verificata poi sperimentalmente. È anche utile per giustificare perché da allora tutti i termometri hanno l'involucro in vetro smerigliato.

## 2.4. Le difficoltà e i lunghi silenzi della CGPM: dalla IV alla VII CGPM

### *La IV CGPM*

La IV CGPM si riunisce nel 1907. Un grande spazio è dato alle recenti determinazioni del volume di 1 kg di acqua, indispensabili per determinare il rapporto tra litro, unità "pratica" di volume, e decimetro cubo, sottomultiplo dell'unità coerente nel sistema.

Il CIPM presenta i risultati delle misure, effettuate dal BIPM, della lunghezza del prototipo del metro in termini di lunghezze d'onda, già riconosciute dalla CGPM come testimoni importanti del prototipo. Il CIPM svolge una lenta e continua opera di persuasione per convincere i decisori ministeriali sia a spendere per queste misure, sia ad accettare l'idea di una nuova definizione del metro come multiplo di una lunghezza d'onda. I tempi sono però ancora lontani dall'essere maturi: infatti solo il BIPM è in grado di produrre risultati, perché dispone della strumentazione necessaria e da anni ha concentrato alcuni suoi scienziati sul problema. I pochi Istituti Metrologici Nazionali esistenti inizieranno solo dal 1927 a fornire risultati confrontabili o concorrenziali con quelli del BIPM. Il consenso è ancora lontano. E la CGPM si limita a decisioni che cercano di consolidare i risultati raggiunti, senza preoccuparsi di creare per il futuro.

### *Venti di guerra nella V CGPM?*

La V CGPM si riunisce nell'ottobre del 1913. Sono presenti 25 delegazioni, 13 delle quali hanno al loro interno membri del CIPM. In tutta Europa si parla di guerra. Ma nelle discussioni della CGPM non traspaiono accenni a tale prospettiva.

**Gravi preoccupazioni.** Le preoccupazioni degli scienziati, derivanti dalle tensioni internazionali, sono di natura molto particolare. Le precisa W. Foerster, presidente del CIPM, nel suo discorso di apertura della Conferenza:

Le barriere doganali che i popoli elevano tra loro causano negli scienziati gravi preoccupazioni, al pensiero dei pericoli che corrono i delicati strumenti, dai quali aspettiamo preziosi risultati, durante i controlli doganali effettuati da mani poco esperte.

Non ci si deve stupire se durante la Prima Guerra Mondiale i generali mandavano i soldati a morire a centinaia di migliaia senza alcun tipo di scrupolo; nella mentalità del tempo le “gravi preoccupazioni” riguardavano gli strumenti, non gli uomini. Ancora oggi preoccupazioni di questo tipo sono frequenti tra gli scienziati degli IMN che si occupano di confronti internazionali e sono costretti a far viaggiare i loro preziosissimi campioni: preziosi soprattutto per la gran mole di lavoro che è costata realizzarli, studiarne le caratteristiche e conservarli adeguatamente.

**Le reti geodetiche nazionali.** Uno degli argomenti all’ordine del giorno concerne le misure geodetiche, mirate all’armonizzazione delle reti geodetiche nazionali. Il BIPM è assiduamente impegnato nel settore. I risultati ottenuti sono eclatanti: in cinque anni i costi delle misure geodetiche di distanze di 1 km si sono ridotti di 30 volte. L’“approssimazione” delle misure è ormai dell’ordine di una parte su un milione, cioè un millimetro al kilometro. Si sta programmando una circolazione di nastri geodetici per il controllo delle basi geodetiche<sup>88</sup> fisse degli Stati. Per il monitoraggio delle basi cominciano a essere diffusi i fili in invar. Nei 5 anni tra la IV e la V CGPM il BIPM ha tarato 447 nastri geodetici, contro i 296 campioni da 1 m, i 64 campioni di massa, i 169 termometri. La CGPM plaude l’attività svolta in favore dell’armonizzazione.

<sup>88</sup> Una base geodetica è costituita da un banco, in genere lungo 50 m o 100 m, posto in un locale sotterraneo in modo da garantire uniformità e costanza della temperatura, sul quale si confrontano le lunghezze di nastri o fili con la lunghezza di una copia del prototipo del metro e con la lunghezza del banco stesso. Alle estremità del banco e in alcune posizioni intermedie sono montati microscopi per la lettura della posizione delle tacche incise sul banco e sui nastri le quali definiscono, mediante il confronto con la copia del prototipo del metro, le lunghezze da essi materializzate. Questi nastri servono sul campo per misurare la distanza tra le posizioni di due teodoliti. Nota tale distanza e grazie alla misura di angoli compiuta con i teodoliti, si possono “disegnare” sul terreno triangoli successivi, calcolandone la lunghezza dei due lati che partono dai due teodoliti. Successioni di tali triangoli servono a creare la rete che definisce le distanze sulla superficie terrestre.

**Le scale di temperatura.** Si discute anche di temperatura. La scala “centigrada normale”, del termometro a idrogeno a volume costante, non può essere usata per basse temperature (l'idrogeno diventa liquido) né per alte temperature (l'idrogeno diffonde dal contenitore). Si studia un promettente termometro a elio. Assai migliore è la scala “assoluta” o termodinamica, fondata su equazioni teoriche e non vincolata a un particolare gas. La CGPM raccomanda studi, indirizzati in particolare ad applicazioni pratiche. Raccomanda inoltre che il Servizio Internazionale di Pesi e Misure del BIPM si prepari a usare la scala assoluta. Approva infine la definizione della temperatura di alcuni punti di riferimento, transizioni di fase di materiali puri, scelti convenzionalmente come riferimenti pratici, i cui valori devono essere determinati al meglio sulla scala assoluta. È un primo passo verso una scala “pratica” di temperatura.

**I campioni dimensionali per le aziende.** L'argomento principale che il BIPM porta all'esame della CGPM ha grande rilievo per le applicazioni militari. Si tratta degli studi svolti in collaborazione con la Sezione Tecnica di Artiglieria dell'*Armée* francese. L'attenzione generale è molto alta. Il problema è squisitamente pratico e concreto: si tratta di studi su campioni materiali le cui dimensioni sono definite da distanze tra superficie (calibri a facce).

L'intercambiabilità delle parti, richiesta ormai da gran parte dell'industria e non solo da quella che produce armi, ha imposto lo sviluppo di una tecnica di controllo dei pezzi meccanici nota come “sistema americano di produzione”. Si tratta di calibri fissi di svariate forme (a facce piane e contrapposte, ad anello, a cilindro), i quali sono usati sempre a coppie. È la tecnica, ancora oggi usatissima, di verifica di rispetto delle tolleranze di progetto mediante il sistema del “passa-non passa”. Immaginiamo di dover produrre una canna di mitragliatrice, con un diametro interno ben definito e molto preciso (altrimenti la mitragliatrice durante l'uso si incepperebbe). Per controllare i risultati della produzione ricorremo a due tamponi cilindrici, di diametro l'uno pari al diametro minimo l'altro al diametro massimo ammesso per la canna. Il tampone con il diametro minore deve “passare” dentro la canna; quello con il diametro maggiore “non deve passare”. L'applicazione sistematica di questo metodo lungo le linee di produzione pone però diversi problemi. È necessario disporre di un gran numero di calibri, adatti alle diverse dimensioni dei pezzi da produrre. I calibri vanno sovente controllati, per garantirsi da usure e danni accidentali.

Il BIPM si è concentrato sui metodi di controllo, elaborando complessi sistemi per usare come riferimento un metro campione a tratti. Con geniali arti-

fici trasforma i calibri a facce in calibri a tratti, incidendo tratti sulle superfici non di riferimento, in modo da poter poi confrontare i calibri, opportunamente accoppiati tra loro, direttamente con una copia del prototipo. Le precisioni che riesce a raggiungere sono prossime al micrometro (millesimo di millimetro).

La grande novità arriva dalla Svezia. La ditta svedese CE Johansson di Eskilstuna ha fornito in esame al BIPM una serie di 102 “blocchetti piano-paralleli” (bpp), inventati e brevettati nel 1907 da Carl Edward Johansson (1864-1943), detto in patria “l’Edison svedese”. Si tratta di parallelepipedi retti in acciaio: due facce opposte sono lavorate con un accurato livello di planarità e di parallelismo tra loro, da cui il nome bpp. La distanza tra tali due facce costituisce la lunghezza del blocchetto<sup>89</sup>. Una faccia di un blocchetto può essere fatta “aderire” alla faccia di un altro, ottenendo così un blocchetto composto la cui lunghezza è la somma delle lunghezze dei due blocchetti di partenza. Ne conseguono due risultati estremamente importanti: con un numero ridotto di campioni se ne possono costruire moltissimi altri con lunghezza idonea per diverse applicazioni; una volta usati, si “smontano” le pile realizzate e se ne possono costituire altre. Il controllo delle caratteristiche geometriche di questi campioni può essere effettuato, in modo molto preciso, ricorrendo all’interferometria ottica e quindi utilizzando come riferimenti le lunghezze d’onda di appropriate radiazioni ottiche.

Il BIPM si è concentrato su due problemi: la determinazione dello spessore di lubrificante che facilita l’adesione tra due bpp; la determinazione per via interferometrica della lunghezza dei blocchetti che hanno lunghezza nominale inferiore a 10 mm. La discussione è polarizzata invece sui metodi adottati dal BIPM e, in particolare, sulla scelta di effettuare le misure a 0 °C, temperatura stabile e realizzabile in modo ripetibile con un bagno di ghiaccio fondente. La tendenza del BIPM è dunque quella di definire la lunghezza dei campioni a facce a 0 °C, come già avviene per la definizione della lunghezza del prototipo del metro e delle sue copie. Inghilterra e Russia si oppongono decisamente a questa scelta sostenendo, giustamente, che le misure nella aziende si svolgono a temperature ben diverse da 0 °C. Inoltre il calcolo della lunghezza dei calibri alla temperatura di lavoro, essendo nota la lunghezza a 0 °C, è reso complesso dalla diversità degli acciai impiegati per la costruzione dei calibri e quindi dai loro diversi coefficienti di dilatazione termica. Propongono quindi che la lun-

<sup>89</sup> La definizione corretta di cosa debba intendersi per lunghezza di un blocchetto costituì un rompicapo per la metrologia dimensionale, risolto solo alla fine degli anni 70 del XX secolo dall’ISO con una norma su tali importanti campioni.

ghezza dei calibri sia definita a una temperatura prossima a quella alla quale saranno usati nelle aziende, e che i calibri vengano controllati a tale temperatura. A favore della scelta 0 °C si schierano gli scienziati delle delegazioni, argomentando che essa consente una definizione più sicura, armonizzata con quanto deciso per il prototipo, e un ambiente di controllo più facile e meno costoso da realizzare. Non essendo possibile trovare un punto di convergenza tra le due posizioni, e dunque il consenso, la CGPM decide di dare mandato al BIPM di costituire una Commissione di specialisti per analizzare il problema e predisporre una delibera per la prossima CGPM. Tutto verrà rimandato a dopo la guerra.

La CGPM fa ancora in tempo a definire l'accelerazione di gravità normale, pari a  $9,80665 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , mediante la quale si possa ridurre il peso di un oggetto al peso normalizzato, ossia quello che avrebbe a 45° di latitudine e al livello del mare. È un aiuto importante per le attività della metrologia legale e facilita l'adozione generalizzata del sistema metrico.

**Problemi di diffusione del Sistema Metrico.** In questa fase di “gioinezza” della Convenzione del Metro, la CGPM è assillata dal problema della diffusione nel mondo del sistema metrico decimale. È un tema vitale per l'esistenza stessa degli organismi che gestiscono la Convenzione. La preoccupazione è pienamente giustificata: alla fine del XIX secolo la maggioranza dei contadini in Francia, patria del sistema metrico decimale, utilizzava pesi e misure che variavano a livello locale nelle diverse regioni<sup>90</sup>.

È il capo della delegazione italiana, G. Battistella, ispettore del Commercio e dell'Industria al Ministero omonimo, a formulare proposte concrete. Premette che l'Italia, con decreto reale del 6 aprile 1913, ha introdotto per legge (ossia imposto, ndr) il sistema metrico in Tripolitania e in Cirenaica. «Grazie a Italia e Francia» – aggiunge – «tutte le regioni dell'Africa del Nord adottano il sistema metrico». Chiede che un accordo internazionale sancisca il valore legale delle definizioni delle unità di misura. Chiede anche che, per facilitare scambi e esportazioni di strumenti metrici<sup>91</sup>, siano normalizzati i tipi più diffusi di stru-

<sup>90</sup> E.Weber: *Da contadini a francesi: la modernizzazione della Francia rurale, 1870-1914*, il Mulino, 1989.

<sup>91</sup> Si intende con strumenti metrici quell'insieme di strumenti, usati nelle transazioni commerciali, che implementano il sistema metrico decimale e presentano caratteristiche metrologiche verificate da organismi ministeriali ufficiali, riconosciuti anche al di fuori del territorio nazionale nel quale operano.

menti per pesare e per misurare e, di conseguenza, siano unificati i regolamenti tecnici ministeriali. Propone l'adozione della seguente delibera:

La CGPM dà mandato al CIPM di esaminare la relazione del Governo italiano, nell'ottica di provocare, tra gli Stati interessati, un accordo sulla scelta degli strumenti da sottoporre a verifica ufficiale e sulle prescrizioni riguardanti tale verifica, con l'obiettivo di permettere l'esportazione di tali strumenti tra i diversi Paesi.

Forti perplessità vengono espresse a nome del CIPM dal suo presidente. Non ricadono forse nelle responsabilità dei direttori dei servizi di pesi e misure dei diversi Paesi i compiti elencati nella proposta di delibera? Cosa c'entra il CIPM con la metrologia legale? Chi si occuperà dell'indispensabile indagine conoscitiva iniziale? È forse disponibile a occuparsene il Governo italiano? Malgrado queste obiezioni la proposta viene accolta, con una parziale dichiarazione di disponibilità italiana a collaborare all'indagine preliminare. Di fatto il CIPM, anche grazie all'interruzione delle attività, dovuta alla guerra, e alle successive mutate condizioni, lascerà cadere il problema.

La scelta del CIPM, organismo scientifico poco sensibile alle esigenze pratiche, si dimostrò un errore. I Servizi di pesi e misure dei ministeri, non trovando nel CIPM e nella CGPM una risposta adeguata ai loro importanti e concreti problemi, giunsero nel 1955<sup>92</sup> a costituire un nuovo organismo intergovernativo, l'Organizzazione Internazionale di Metrologia Legale (OIML). L'OIML si prodigò per dare risposte concrete ai ministeri del commercio, dell'industria e dell'agricoltura, promuovendo accordi e producendo guide che ebbero grande diffusione. Si creò così un ulteriore percorso metrologico indipendente dalla CGPM che verrà riportato nell'ambito di una forte collaborazione con il BIPM e la CGPM solo alla fine del XX secolo.

Un'altra conseguenza del disinteresse del CIPM per i problemi della metrologia legale fu quella di lasciare liberi i ministeri di perseguire il metodo di approvazione degli strumenti metrici sulla base della loro rispondenza a precise caratteristiche costruttive, oggetto di regolamenti, raccomandazioni e guide. Questo metodo rallentò l'innovazione nella costruzione di nuovi strumenti metrici, in quanto ogni cambiamento di caratteristiche costruttive, anche solo di una vite, rispetto al tipo di strumento approvato, andava sottoposto a burocratiche e complesse verifiche e approvazioni. Per comprendere la dimensione

<sup>92</sup> Non devono stupire i lunghi tempi necessari ad approdare, da parte dei ministeri, a questo nuovo organismo. In mezzo si collocano due guerre mondiali, la grande depressione del 1929, l'era delle dittature in Europa, l'avvio della guerra fredda nel secondo dopoguerra.

del problema si pensi che oggi, in una nazione industrializzata, sono attivi grosso modo tanti strumenti metrici quanti sono gli abitanti: contatori di energia elettrica, di gas e di acqua; bilance commerciali; pompe con misuratori volumetrici per la vendita dei carburanti; tassametri nei taxi; bilance a pesatura continua per i prodotti confezionati venduti a peso; bottiglie e altri contenitori di liquidi venduti a volume; e altro ancora. In Italia si superano i sessanta milioni di strumenti metrici attivi, sottoposti a controlli periodici a salvaguardia della fede pubblica nelle transazioni commerciali.

Il problema fu risolto non già dal CIPM o dalla CGPM ma dalla Commissione Europea, con la delibera del 1985 sul “nuovo approccio” all’armonizzazione tecnica in Europa. Nel campo degli strumenti metrici tale nuovo approccio armonizza esclusivamente le prestazioni degli strumenti, lasciando alle aziende piena libertà di conseguirle con progetti sempre più innovativi.

Val la pena di ricordare che la CGPM si trova a dover affrontare anche problemi conseguenti a contrasti all’interno dei singoli Paesi. È evidentemente mirata a risolvere tale tipo di problemi la proposta di raccomandazione formulata dall’ingegner Ignacio Ramos, delegato del Perù, fatta propria dalla CGPM:

Sia creato un ufficio nazionale destinato a farsi carico dell’applicazione e della diffusione del sistema metrico in ciascuno dei Paesi che ancora non lo hanno costituito.

Ancora, la CGPM dedica ampio spazio all’esame di un disegno di legge francese per l’adozione legale del sistema metrico. Il disegno di legge contiene alcune contraddizioni, quali la convivenza del newton con il kilogrammo forza o peso come unità di forza. Ma presenta anche alcuni anticipi di quello che sarà lo sviluppo futuro del sistema. Per esempio adotta una scala pratica di temperatura per temperature superiori a  $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$  della scala centesimale all’idrogeno a volume costante e a pressione di 1 m di mercurio (aspettando il pascal!). Adotta l’ohm internazionale<sup>93</sup> come sesta unità fondamentale, insieme a metro, kilogrammo, secondo, grado centesimale e candela internazionale, ma definisce il joule come unità di lavoro ed energia e la caloria come unità di quantità di calore.

Un apprezzamento particolare da parte del presidente della Conferenza, P. Appell (vicepresidente dell’Accademia delle Scienze francese) va alla giovane Repubblica della Cina, proclamata nel 1912: ha distaccato al BIPM due fun-

<sup>93</sup> L’ohm internazionale viene definito dalla Conferenza di Londra del 1908. Se ne parlerà a lungo in seguito.

zionari per testimoniare il suo processo di adesione al sistema metrico. In realtà la giovane Repubblica gode di una sorta di sovranità limitata, condizionata dagli interessi dei maggiori Stati europei, nonché di USA e Giappone, che impongono condizioni commerciali privilegiate e la loro sovranità sulle legazioni. La situazione non migliorerà dopo la guerra: le ambiguità contenute nel Trattato di Washington del 1921 ne faranno “una sorta di colonia economica giapponese”<sup>94</sup>. Tale di fatto resterà fino alla disfatta del Giappone nella seconda guerra mondiale e all’ascesa al potere di Mao Tse-Tung nel 1949.

Così il 17 ottobre del 1913 si conclude, con un certo diffuso ottimismo, la V CGPM. Dieci mesi dopo a Sarajevo sarà assassinato l’erede al trono d’Austria, consentendo così all’Austria di scatenare la guerra che tutti in Europa attendevano e dare inizio al massacro di giganteschi eserciti.

#### *La VI CGPM nell’immediato dopoguerra*

La VI CGPM viene convocata nel 1919, circa un anno dopo la fine della guerra. Ma il CIPM non riesce a riunirsi fino al 1920. Così la CGPM è rimandata al 27 settembre del 1921.

Nella seduta inaugurale il presidente del CIPM, Raul Gautier, fa un rapido quadro della difficilissima situazione nella quale si trova il BIPM: le riserve sono esaurite; il personale scientifico è ridotto a cinque unità, incluso il direttore; la dotazione annuale non è sufficiente nemmeno per la sopravvivenza. Inoltre decisioni importanti sono richieste al CIPM e alla CGPM che, se assunte, richiederanno l’estensione dei campi di attività coperti dal BIPM. Gautier affronta anche il difficile problema del rapporto tra il BIPM e le aziende. Alle origini della Convenzione, il BIPM fu pensato al servizio della scienza, con la sola concessione dei servizi agli “artisti” i quali, afferma Gautier, con terminologia moderna possono essere assimilati ai costruttori di strumenti di misura. Questo è il solo spiraglio attraverso il quale i problemi d’ordine industriale possono inserirsi tra i compiti attribuiti al BIPM. È però uno spiraglio solo apparente. Nella pratica i costruttori possono accedere ai servizi del BIPM solo per quei campioni e quegli strumenti di misura impiegati nelle istituzioni scientifiche, perché a essi è orientata in esclusiva l’attrezzatura del BIPM. E non si tratta certo dei campioni e degli strumenti impiegati nella produzione industriale. Oggi, sottolinea Gautier, le necessità dell’industria di precisione coincidono con le esigenze scientifiche. Lo spiraglio deve diventare una grande porta aper-

---

<sup>94</sup> G. Formigoni: op.cit., p. 134.

ta. Il BIPM deve essere messo in grado, con appositi finanziamenti, di affrontare problemi come quelli dei nuovi campioni a facce realizzati dalla Johanson, i quali aprono una nuova strada nelle misure industriali di precisione.

Gli fa eco Louis Dior, ministro francese del commercio e dell'industria, durante il saluto di benvenuto ai membri della CGPM. Egli sollecita anche la soluzione dei problemi posti dalla Conferenza delle unità elettriche (Londra 1908), conclusasi con tre progetti alternativi per un organismo permanente che si occupi della realizzazione e conservazione dei campioni elettrici (agli elettrici non piace parlare di prototipi) e della generazione di campioni a essi conformi. Le alternative sono: appoggiare l'organismo a uno degli uffici nazionali di pesi e misure esistenti; creare un nuovo organismo specializzato nel settore; inserire le attività elettriche tra quelle del BIPM.

Il CIPM è stato posto di fronte a una scelta urgente: se non convince la CGPM al cambiamento del testo di alcuni articoli della Convenzione del Metro, si vede sfuggire dalla sua giurisdizione l'intero settore elettromagnetico. Opta dunque per proporre le già ricordate modifiche degli articoli 7 e 8 della Convenzione, auspicando l'ampliamento delle competenze del BIPM e includendovi non solo le unità elettromagnetiche ma anche il coordinamento delle ricerche sulle costanti fondamentali. Vengono proposte di conseguenza anche una serie di modifiche al regolamento.

Alla VI CGPM, con riunioni fino al 6 ottobre, sono rappresentate ventitre nazioni; i capi delegazione sono divisi circa alla pari tra scienziati (dodici) e funzionari ministeriali (undici). La discussione, accesa, sul cambiamento della Convenzione si concentra ovviamente sul costo dell'aumento delle incombenze attribuite al BIPM. Al termine della discussione la variazione della Convenzione è approvata e la dotazione annuale al BIPM viene elevata, all'unanimità, a duecentocinquantamila franchi oro. La proposta di lasciare al CIPM la decisione circa il momento nel quale attuare un ulteriore incremento di cinquantamila franchi oro viene sospesa, in attesa di decisioni dei governi contrari, per il voto contrario di Danimarca e Gran Bretagna.

Il numero dei membri del CIPM viene alzato da quattordici a diciotto, con rinnovo della metà del Comitato a ogni riunione della CGPM, ma con la possibilità di rieleggere i membri estratti a sorte per essere sostituiti. Il CIPM si riunirà ogni due anni, invece dei quattro attuali.

*La VII CGPM abbozza l'inizio di una svolta*

La VII CGPM<sup>95</sup> nel 1927, tenutasi dal 27 settembre al 6 ottobre, precisa la già riferita definizione del metro. Importante è la costituzione del Comitato Consultivo per l'Elettricità (CCE) incaricato anche di occuparsi di fotometria. La proposta è avanzata dal NBS, viste le difficoltà che il CIPM incontra su decisioni fortemente specialistiche. D'altra parte, allora i metrologi erano pochi nel CIPM: fisici, chimici, geodeti, direttori di laboratori, con ridotte conoscenze dei complessi problemi specialistici, si trovavano in difficoltà quando dovevano predisporre proposte di carattere tecnico-scientifico.

Al CCE è ricordata la raccomandazione già formulata dalla VI CGPM di avviare il processo di acquisizione della unità di misura elettriche e magnetiche in accordo con le decisioni della Conferenza Internazionale di Londra del 1908. È una scelta importante, che coinvolge gli IMN direttamente nel processo decisionale. Il passo viene compiuto perché il problema delle unità elettriche non è più procrastinabile. Nel 1921 era stato deciso di affidare al BIPM anche l'attività di studio, realizzazione e mantenimento delle unità elettromagnetiche; ora gli scienziati e le industrie che operano nel settore chiedono che una decisione sulle unità di misura venga presa, vista anche la rilevanza economica assunta dalle misure di energia elettrica. Non prendere alcuna decisione significa rischiare che le scelte vengano di fatto imposte dagli organismi del percorso indipendente fino ad allora seguito dagli elettricisti, spaccando la scienza delle misure in due riferimenti decisionali indipendenti.

Membri dei Comitati Consultivi sono gli Istituti Metrologici Nazionali: del CCE fanno parte gli istituti della Germania, della Francia, del Regno Unito, del Giappone, degli Stati Uniti e dell'URSS, più alcuni esperti a titolo personale. La CGPM dà inoltre pieni poteri al CIPM, appena avrà ottenuto il parere dell'appena costituito CCE, di passare all'esecuzione di quanto deciso nel 1921 in merito alle unità di misura elettriche e magnetiche.

Un'altra decisione scientifica, che produrrà fondamentali sviluppi ed è assunta dalla CGPM all'unanimità, riguarda l'adozione, a titolo provvisorio, della proposta di scala termometrica internazionale, presentata da Germania, USA e Gran Bretagna con il supporto del Laboratorio per le basse temperature di Leida (Paesi Bassi). La proposta precisa i riferimenti di temperatura, le formule

<sup>95</sup> Al momento della VII CGPM trentuno Stati aderiscono alla Convenzione del Metro, per un totale di 717 milioni di abitanti. Vito Volterra, presidente del CIPM, nella sua comunicazione sulle attività del CIPM, fa notare che ben il 78% dei cittadini dei trentuno Stati adotta il sistema metrico obbligatoriamente in forza di leggi nazionali.

d'interpolazione e i metodi di misura. Ma, come vedremo, tutto resterà "provvisorio" fino al 1937, quando il progetto verrà messo in mano a un nuovo Comitato Consultivo.

Le questioni scientifiche si concludono riprendendo il problema dell'uso delle lunghezze d'onda luminose come testimoni dei prototipi, stabilito dalla II CGPM nel 1895, su proposta di Foerster, allora presidente del CIPM. È Wilhelm Kösters del PTR a chiedere che, oltre alla radiazione rossa del cadmio, sostenuta dal BIPM e dai giapponesi, sia studiata la radiazione giallo-verde del krypton, che sembra offrire significativi vantaggi. Anche in questo settore busano alla porta gli IMN. L'approvazione unanime della CGPM alla richiesta di Kösters apre la strada a un lunghissimo dibattito fra sostenitori di diverse radiazioni luminose come candidati per una nuova definizione del metro che si prolungherà per circa quarant'anni.

La discussione è però polarizzata da problemi non scientifici. La dotazione annuale del BIPM, vista ormai la stabilizzazione dei problemi economici derivanti dalla guerra, è ridotta, ovviamente all'unanimità, a centocinquantamila franchi oro. Molto tempo è dedicato all'analisi delle leggi di diversi Stati (Giappone, Siam, URSS, Marocco, Persia, Afghanistan) che rendono obbligatorio l'uso del sistema metrico.

Ed è sulla diffusione del sistema metrico che scoppia la bomba. La delegazione argentina, fortemente appoggiata da quella messicana, chiede una raccomandazione della CGPM al BIPM affinché esso usi la sua influenza presso i governi inglese e americano per indurli a usare le unità del Sistema Internazionale nelle transazioni commerciali di prodotti dell'agricoltura e dell'allevamento, al fine di facilitare le relazioni commerciali. Dopo una discussione accesa, tutti votano a favore della raccomandazione al BIPM e ai governi, meno George K. Burgess, direttore del NBS, contrario, e J.E. Sears junior, delegato del Canada, astenuto. Manca evidentemente il consenso degli estimatori della libbra!

### *Motivazioni del tentativo di rilancio*

**Gli artefici.** Quando si parla di decisioni di ordinaria amministrazione si intende riferirsi alle decisioni circa il bilancio e i programmi di attività del BIPM, l'approvazione dei certificati di taratura delle copie dei prototipi e dei termometri, rilasciati dal BIPM sia a nuovi istituti metrologici di Paesi che entrano nella CM sia a seguito di confronti tra i prototipi e le loro copie già in uso in altri Paesi. Va tenuto presente che le tre riunioni della CGPM tra le due guerre si

tennero in un periodo storico assai difficile, definito da alcuni studiosi come il periodo della guerra civile in Europa.

Abbiamo visto che alla svolta del secolo era alla guida del BIPM R. Benoît, in carica fino al 1915. Gli succedettero: Charles-Edouard Guillaume (1861-1938, svizzero, premio Nobel per la fisica per i suoi studi sulle leghe metalliche a basso coefficiente di dilatazione termica), dal 1915 al 1936; Albert Pérard, dal 1936 al 1951<sup>96</sup>. Alla presidenza del CIPM nel 1921, al termine della VI CGPM, assurse l'italiano Vito Volterra (1860-1940), matematico e fisico italiano al quale si deve l'analisi funzionale e la teoria della equazioni integrali. Fu fondatore e primo presidente, nel 1923, del Consiglio Nazionale delle Ricerche, nonché uno dei dodici professori universitari italiani che nel 1931 rifiutarono di giurare fedeltà al fascismo. Proseguì la sua importante attività scientifica internazionale grazie a un passaporto del Vaticano, attribuitogli in quanto membro dell'Accademia Pontificia delle Scienze. Egli resterà in carica alla presidenza del CIPM fino al 1940. Gli succederà il norvegese Pieter Zeeman (1865-1943, premio Nobel per la fisica, con Hendrik Antoon Lorentz, nel 1902 per l'effetto che porta il suo nome) per soli tre anni. Tre anni difficili per un ormai vecchio scienziato, chiamato a gestire un organismo nel quale era irraggiungibile qualunque tipo di consenso. La carica resterà vacante fino al 1946 quando verrà assunta dall'inglese John Edward Sears, fino a quell'anno sovrintendente della Divisione di metrologia del National Physical Laboratory. Egli resterà in carica al CIPM fino al 1954.

Insigni scienziati furono membri del CIPM nel periodo. Ricordiamo tra i tanti, oltre ai già menzionati presidenti: Albert Abraham Michelson dal 1897 al 1904, Samuel Wesley Stratton dal 1905 al 1931 (1861-1931, professore universitario di fisica e ingegneria elettrica, fu il primo direttore dell'NBS e, successivamente, presidente del Massachusetts Institute of Technology (MIT)) e Arthur Edwin Kennelly dal 1933 al 1939 (1861-1939, noto per aver proposto l'applicazione della legge di Ohm alle correnti alternate utilizzando i numeri complessi: fu insignito dall'IEEE della medaglia Edison nel 1933) per gli USA; il francese Maurice Paul Auguste Charles Fabry dal 1937 al 1945 (1867-1945, scopritore con il collega Alfred Pérot dell'interferometro che porta i loro nomi); il fisico, astronomo e spettroscopista giapponese Hantaro Nagaoka dal 1931 al 1948 (1865-1950, pioniere della fisica giapponese nel periodo Meiji; al

<sup>96</sup> L'attività scientifica di A. Pérard nel BIPM si concentrò sui difficili problemi delle tecniche interferometriche per le misure di lunghezza in termini di lunghezze d'onda, usando radiazioni "monocromatiche" che, a quei tempi, erano assai poco monocromatiche.

suo nome è intitolato un cratere lunare); il fisico spagnolo Blas Cabrera y Felipe (1878-1945) dal 1931 al 1941; Wilhelm Kösters (1876-1950), fisico tedesco che nel 1917 progettò e realizzò il comparatore interferometrico per misure di lunghezza che porta il suo nome.

**Il mutato clima internazionale.** La VI (1921) e la VII (1927) CGPM si tengono in due momenti storici molti diversi fra loro.

Nel 1921 la crisi post-bellica condiziona ancora in pieno la società, e non solo quella europea. Gli USA non hanno aderito alla Società delle Nazioni, malgrado questa sia stata promossa e sostenuta dal loro Presidente Wilson. Inizia così un nuovo periodo di isolamento degli USA dalla politica mondiale.

La Seconda Internazionale aveva fallito nell'evitare la guerra e aveva visto i socialisti dei singoli Paesi prendere strade separate e appoggiare le politiche dei propri governi. Nel 1919, alla conclusione della guerra, nasce la Terza Internazionale, o Comintern. Nel 1921 essa ha già perso ogni carattere internazionalista e viene percepita dagli USA e dai Paesi dell'Europa occidentale come "il nemico bolscevico".

Le nuove frontiere stabilite dal trattato di Versailles, firmato il 28 giugno 1919 nella Sala degli Specchi della reggia di Luigi XIV<sup>97</sup>, e dai successivi accordi provocarono disastrosi spostamenti di popolazioni dalle zone che vennero assegnate ad altre nazioni. Ma soprattutto crearono in Germania un profondo senso di frustrazione e di rivalsa, a causa del favoloso risarcimento (33 miliardi di dollari del tempo) richiesto dalla Francia per i danni causati dalla guerra, delle perdite territoriali, dell'occupazione militare delle tre città industriali della Ruhr da parte della Francia nel 1923, delle rivolte interne che si susseguirono fino al 1923, del divieto di ricostituzione dell'esercito e della marina. La terribile inflazione, iniziata alla fine della guerra e al culmine nel triennio dal 1921 al 1923, aveva portato la maggioranza dei tedeschi, piccola borghesia inclusa, a condizioni disastrose per tenore di vita e al crollo di una serie di valori come la tradizionale autorità paterna tedesca.

Ancora erano in atto guerre locali, in Polonia, in Turchia e nei Balcani, in riferimento alla questione di Fiume. Un inizio di stabilizzazione si ebbe solo a partire dalla fine del 1923. Cosicché il periodo che va dal 1924 al 1929, durante il quale si svolse la VII CGPM, può essere considerato il migliore per l'Europa

<sup>97</sup> La stessa sala nella quale il 18 gennaio 1871 venne incoronato Guglielmo I imperatore tedesco, dopo la sconfitta della Francia a Sedan nella guerra con la Prussia. È la rivincita della Francia all'umiliazione di 48 anni prima.

e per il mondo in generale nell'intervallo tra le due guerre mondiali. Non va peraltro dimenticato che nel periodo si acuì il problema conseguente alla richiesta di autonomia delle colonie, con il coinvolgimento dell'Inghilterra, della Francia e, marginalmente, della Spagna, e si verificò il consolidamento del fascismo in Italia.

Il trattato di Locarno dell'ottobre del 1925 sancì la stabilizzazione delle frontiere e l'ingresso della Germania nella Società delle Nazioni, con un seggio permanente nel Consiglio. Restarono non completamente definiti soltanto i rapporti tra la Germania da una parte e la Polonia e la Cecoslovacchia, dall'altra, che verranno modificati da Hitler con la forza, provocando lo scoppio della seconda guerra mondiale.

Il rilancio dell'industrializzazione in Germania e la conseguente crescita economica convinsero gli USA a investire in quel Paese, rientrando dal loro isolamento. La Germania poté così far fronte più agevolmente al rimborso dei danni di guerra alla Francia la quale, a sua volta, poté più facilmente procedere al saldo del debito contratto con gli USA durante la guerra. Si stabilì quel circolo perverso che avrebbe facilitato la propagazione rapida della Grande Depressione del 1929 dagli USA all'Europa e al resto del mondo.

### **Tre facilitazioni all'inserimento degli IMN nel processo decisionale.**

La decisione della VII CGPM di coinvolgere nel piano di cambiamento gli IMN e di preparare la svolta del 1933 fu possibile anche per altre tre ragioni. Anzitutto un nuovo clima culturale, più libero, più innovativo, percorreva l'Europa e le nazioni oltre Atlantico. Basta ricordare la fondazione del Circolo di Vienna (1924) da parte di studiosi tedeschi, con caposcuola Rudolf Carnap (1891-1970) e Ludwig Wittgenstein (1889-1951), seguaci della scuola analitica fondata a Cambridge da Bertrand Russell (1872-1970) e Alfred North Whitehead (1861-1947); nacque in tale ambito il positivismo o empirismo logico che darà un contributo fondamentale all'epistemologia moderna; anche se le ambiziose speranze degli studiosi inglesi e tedeschi saranno improvvisamente distrutte dal teorema di incompletezza del venticinquenne Kurt Gödel (1906-1978), che dimostrerà le proprietà che i sistemi logici formali non possono possedere. La Scuola Superiore di Arte Creativa, Bauhaus, fondata già nel 1919 da Walter Gropius (1883-1969), raccolse architetti, come Le Corbusier (Charles-Edouard Jeanneret-Gris, 1887-1965) e Frank Lloyd Wright (1867-1959) fondatori dell'architettura moderna sulle due sponde dell'Atlantico, e pittori, fra i quali Paul Klee (1879-1940) e Vasilij Vasil'evič Kandinskij (1866-1944).

Forse chi meglio seppe incarnare l'ambiguità di quei tempi fu il drammaturgo, poeta e scrittore italiano Luigi Pirandello (1867-1936), premio Nobel per la letteratura nel 1934.

Risultò perciò naturale allargare la base culturale dedicata all'analisi delle possibili evoluzioni del sistema di unità.

In secondo luogo le stragi provocate durante la guerra di trincea tra gli ufficiali, in prevalenza giovani rampolli dell'aristocrazia europea, fu la causa di un generalizzato cambio della diplomazia, affidata ormai alla borghesia. La nuova generazione di diplomatici, che sedette alle riunioni della CGPM, fu più aperta o più ingenua della generazione ante guerra e più disponibile a lasciare maggiore spazio alla componente scientifica del CIPM e quindi anche ai CC.

Infine va riconosciuto il merito di aver voluto e condotto la svolta a due grandi personaggi: Charles-Edouard Guillaume, che diresse il BIPM dal 1915 al 1936, e Vito Volterra, che presiedette il CIPM dal 1921 al 1940. In particolare l'italiano Volterra fu un grande organizzatore, con una visione ampia dei problemi. Seppe strutturare il CIPM con la presenza di personalità di adeguata apertura mentale ed elevato livello scientifico e seppe evitare nel CIPM effetti di rancori accumulati durante e dopo la guerra tra le nazioni rappresentate in quel Comitato. Seppe anche promuovere una maggiore autonomia decisionale del CIPM nei riguardi della CGPM, grazie a deleghe su temi specifici, a un contatto diretto con gli Stati per raccogliere loro proposte e portarle, se necessario, alla CGPM. Entrambi seppero ottenere dalla Fondazione Rockefeller una donazione che rese possibile, nel 1929, ampliare i laboratori del BIPM, consentendo all'Ente di acquisire nuove responsabilità nell'ambito di una metrologia in via di rinnovamento.

## 2.5. Nel 1933 la Conferenza Generale tenta il rilancio

### *Il quadro internazionale*

Quando si riunisce la VIII CGPM nel 1933, la situazione mondiale è profondamente cambiata rispetto alla precedente riunione del 1927<sup>98</sup>. Da un clima di ottimismo, seppure cauto, si è passati a un generale atteggiamento di sfiducia e di pessimismo. Sfiducia nei governi democratici che, soprattutto nell'Europa centrale e meridionale, si stanno dimostrando incapaci di affrontare e fronteg-

<sup>98</sup> Si veda in merito l'acuta e documentata analisi su tale periodo svolta da H. Stuart Hughes: *Storia dell'Europa contemporanea*, Prentice-Hall, 1961, traduzione italiana Rizzoli, 1964.

giare la difficilissima situazione provocata dal dilagare della Grande Depressione. Pessimismo nei riguardi del futuro, per il quale si prevede solo disoccupazione, impoverimento del proletariato urbano e agricolo, recessione economica.

Fanno eccezione due aree nel mondo. Gli USA, dove nel 1932 il partito democratico porta alla presidenza Franklin Delano Roosevelt (1882-1945). Fin dagli inizi del 1933 Roosevelt mise in esecuzione una serie di attivi interventi dello Stato sull'economia, di difesa del sistema produttivo capitalistico, di tutela delle condizioni di vita dei lavoratori, dando il via al progetto di rinnovamento che conquistò i suoi concittadini, destinato a restare nella storia con il nome di *New Deal*. In politica estera Roosevelt promosse collaborazioni e aiuti nei confronti dei Paesi dell'America Latina e accentuò lo stretto isolamento degli USA dal resto del mondo. È l'ampliamento del corollario della dottrina Monroe, sancito dal 1904, il quale affermava il diritto degli USA a una politica internazionale attiva nella zona dei Caraibi. Ora si afferma lo stesso diritto per l'intera America Latina. Roosevelt smantellerà la legislazione neutralista all'inizio della II Guerra Mondiale, schierando l'opinione pubblica americana contro gli imperialismi nazifascisti di tanti Paesi europei e del Giappone.

L'isolazionismo degli USA si traduce, nel resto del mondo, in una reazione alla Grande Depressione che fa leva sul nazionalismo esasperato, sul protezionismo, con dazi e barriere economiche doganali, e sugli investimenti pubblici quasi esclusivamente concentrati su massicci programmi di riarmo.

L'altra isola felice è costituita dai Paesi scandinavi, Svezia, Norvegia e Danimarca: là i governi socialisti, al contrario di quanto avviene nel resto dell'Europa, sono costituiti da politici con ottime conoscenze dei problemi economici e delle possibili soluzioni<sup>99</sup>. Essi lasciano da parte dogmatismi e ideologie: con molto pragmatismo, e facendo leva sulle tradizioni di cooperazione delle popolazioni nordiche, essi ampliano la portata degli interventi governativi sull'economia, cercando di mantenere il potere d'acquisto della popolazione e accollando allo Stato importanti debiti pur di combattere la disoccupazione e il crollo dei prezzi. Inoltre utilizzano la leva fiscale per favorire una migliore distribuzione dei redditi. Agiscono dunque controcorrente rispetto agli altri governi europei, i quali privilegiano, per combattere la recessione, politiche di contenimento della spesa e di deflazione. In Francia in particolare, pur essendo arrivato tardi nel Paese l'effetto depressivo dei crolli dell'economia americana, governi incapaci, socialisti o apparentemente di coalizione nazionale, ancorati alla parità aurea del franco, con le loro azioni prolungano la crisi fino agli inizi del 1937, contri-

<sup>99</sup> H.S. Hughes: op.cit., pp. 297-301.

buendo a creare la sfiducia della popolazione nelle azioni dei governi che tanto peserà sulla politica francese di fronte all'imperialismo della Germania di Hitler.

L'unico aspetto positivo del periodo tra le due Conferenze Generali è la soluzione, con la cancellazione imposta dai fatti, del problema del pagamento dei danni e dei debiti di guerra. Cancellazione di fatto e non di diritto, in quanto ufficialmente non accettata da alcuni governi e da gran parte dell'opinione pubblica.

**Effetti sul CIPM.** Il risultato di questa situazione è il totale fallimento di quella idea di globalizzazione del commercio che aveva ispirato la stipula della Convenzione del Metro nel 1875. Saltano, o sono impediti, le unioni doganali; le barriere al commercio internazionale si trasformano da tecniche (come sono quelle dovute a non uniformità nelle unità di misura) a politiche. Paradossalmente di ciò si avvantaggia l'azione del Comitato Internazionale il quale, sotto l'illuminata guida di Vito Volterra, rivendica sempre maggiore autonomia dalla Conferenza Generale nelle decisioni di natura tecnica e scientifica. I decisori politici, coinvolti in ben più gravi problemi e consapevoli che l'estensione della unificazione delle unità di misura in nuovi domini non è certo una priorità dei loro governi, lasciano al CIPM lo spazio rivendicato e le deleghe necessarie per procedere. Così il CIPM, con gli Istituti Metrologici Nazionali, parte per unificare sotto il proprio governo almeno alcuni dei percorsi alternativi e per impedire che nascano nuovi percorsi di cultura metrologica indipendenti e non armonizzati con le decisioni della CGPM. Il tutto viene attuato con la necessaria cautela, per mantenere comunque salvo il principio fondamentale del consenso. In questo periodo viene così affermata la prassi di relativa autonomia del CIPM che guiderà in futuro le azioni di tale organismo.

L'azione del CIPM è anche favorita da un particolare clima di reazione, da parte della *élite* culturale mondiale, al pessimismo e all'apatia, anche sociale, delle popolazioni europee. Nel decennio dal 1930 al 1940 una imponente massa di intellettuali lasciò, o fu costretta a lasciare, il proprio Paese, specialmente la Germania, l'Italia e l'Unione Sovietica. Inizialmente questa moltitudine di intellettuali, stimata tra cinquecentomila e un milione di persone, si ritrovò in Francia, a Parigi, che divenne il centro culturale europeo. Quando la Francia fu occupata dagli eserciti nazisti, questi intellettuali cercarono rifugio negli USA, portando in quel Paese il meglio della cultura europea e contribuendo in modo sostanziale al primato della grande nazione dall'altro lato dell'Atlantico. Alcuni storici parlano di "ideologia della speranza" per descrivere questo ritorno degli intel-

lettuali a idee di solidarietà e di condotta razionale. Si può ragionevolmente sostenere che fu questa ideologia a guidare gli scienziati che operarono nei Comitati Consultivi e nel Comitato Internazionale in quel decennio. Senza la speranza in un futuro che non costringesse alla fuga le migliori menti dell'epoca, quelle che erano in grado di non farsi incantare dal populismo e dal controllo dei mezzi di comunicazione attuato dalle dittature imperanti in Europa, come si può comprendere il lavoro immane che fu compiuto in quel decennio dagli organismi scientifici della Convenzione del Metro? Mentre Hitler consolidava il suo potere e avviava, con l'occupazione delle città renane nel 1936, il suo folle progetto di germanizzazione dell'Europa, mentre scoppiava la guerra civile spagnola, prova generale dell'imminente guerra mondiale, mentre Mussolini attaccava l'Etiopia, anche con i gas<sup>100</sup>, con la scusa di vendicare la sconfitta subita nel 1896 e di varare l'anacronistico impero coloniale italiano, c'era ancora chi sperava nella fine dell'incubo e lavorava per la rinascita che, puntuale, arrivò a partire dal 1948.

**La rinascita religiosa.** Un altro aspetto caratteristico del decennio che stiamo considerando fu la diffusa rinascita religiosa. Questo fenomeno fu catalizzato dalla pubblicazione nel 1931, da parte di Pio XI, dell'enciclica *Quadragesimo anno*, in occasione del quarantesimo anniversario della promulgazione dell'enciclica *Rerum novarum*. Questo aggiornamento, ai tempi della Grande Depressione, della politica sociale del cattolicesimo produsse, sulla *élite* culturale dei cattolici, lo stesso effetto che provocarono le teorie economiche e politiche di John Maynard Keynes sulle *élites* culturali della sinistra non massimalista. Esse consentirono l'apertura di un intenso dibattito, il riesame da parte degli esponenti della cultura europea e statunitense della loro posizione riguardo ai criteri di gestione della politica e della economia e un nuovo impegno di tali classi. Impegno fatto anche di sacrifici personali estremi da parte dei tanti intellettuali che scelsero la clandestinità per opporsi, anche con le armi, alle dittature in Europa e pagarono con la vita la fedeltà alla speranza e alle idee di libertà e democrazia.

*Entra la fotometria con i suoi prototipi*

In questo quadro complesso e articolato, la VIII CGPM nel 1933, quasi a recuperare il tempo perduto, assume ben 15 decisioni. Le prime 8 sono di ordinaria amministrazione, tra cui anche nuove determinazioni del coefficiente di dilatazione del prototipo del metro e delle copie prodotte in tempi diversi. Il

<sup>100</sup> Giorgio Rochat: *Le guerre italiane 1935-1943*, Einaudi, 2005.

BIPM ha continuato a lavorare in modo egregio, pur in gravi condizioni di difficoltà economica e organizzativa.

Le successive delibere aprono due nuovi importanti settori della metrologia e, per la prima volta, affrontano problemi di natura strategica.

La decisione 9 istituisce il Comitato Consultivo per la Fotometria (CCP; nel 1971 cambierà nome in CC per la fotometria e la radiometria CCPR), composto al massimo da dieci membri (rappresentanti di sei Istituti Metrologici Nazionali designati dal CIPM ed esperti nominati dal CIPM anche su suggerimento della Commissione internazionale di illuminazione, CIE, fondata a Vienna nel 1913 e riferimento per un possibile percorso indipendente della fotometria), con l'obiettivo di fornire pareri al CIPM in merito ai sistemi di misura e ai campioni fotometrici. Al momento era attivo, dal 1927, solo il Comitato Consultivo per l'elettricità (CCE; nel 1997 cambierà nome in CC per l'elettricità e il magnetismo, CCEM) che si occupava anche di fotometria e illuminotecnica. La CGPM, con l'espansione dell'illuminazione delle città, prima a gas e poi elettrica, avverte il problema della misure fotometriche<sup>101</sup>, ormai importanti sul piano industriale e commerciale, per i costi dell'energia e per la concorrenza tra diversi produttori di lampade.

Il CCP inizierà occupandosi di campioni per l'illuminotecnica<sup>102</sup> e solo nella seconda metà del secolo affronterà problemi di radiometria e fotometria in modo sistematico. Infatti la VIII CGPM, con la decisione 11, sostiene che l'unità primaria d'intensità luminosa dovrebbe essere basata sull'intensità del corpo nero<sup>103</sup> ma che sarebbe prematuro stabilire al momento specificazioni su un tale campione; delega pertanto il CIPM a fissare, al momento opportuno e

<sup>101</sup> Si tenga presente, in particolare, l'importanza delle misure di efficienza luminosa delle nuove lampade elettriche, ormai prodotte in enormi quantità.

<sup>102</sup> La creazione presso il BIPM del laboratorio di fotometria viene affidata a Jean Terrien (1907-1992, fisico francese, si specializzò in fotometria ad Amsterdam con Pieter Zeeman; dal 1962 al 1977 fu direttore del BIPM) nel 1937, anno della sua assunzione al BIPM. Terrien si recò al NPL per studiare l'installazione colà esistente. Nel BIPM progettò e realizzò un banco fotometrico di 4,5 m. Questo laboratorio assicurò, fino alla sua definitiva chiusura nel 2004, la taratura dei campioni nazionali di intensità luminosa e di flusso luminoso. Conobbi Jean Terrien nel 1969 ed ebbi l'onore della sua amicizia. Ci avvicinò la passione della signora Terrien per l'opera italiana; ella mi chiese di aiutarla nella traduzione della corrispondenza con cantanti e direttori d'orchestra italiani. Mi fu così possibile trascorrere con Terrien, durante i quattro mesi che dedicai alla ricerca nel BIPM, piacevoli serate, apprezzando la sua grande cultura e la sua profonda sensibilità. Restammo in contatto anche quando, lasciato il BIPM, rimase vedovo e si trasferì in una casa, sognata da tempo e poi progettata da lui in una magnifica posizione. Conservo la fotografia della casa che mi inviò il giorno dell'inaugurazione.

sentito il parere del CCP, quanto necessario per il campione di intensità luminosa e ad assumere le necessarie misure esecutive.

Nel frattempo già dal 1909 si continua ad adottare la candela internazionale, in teoria equivalente a 1/20 della *candela Voille* ma in pratica conservata e disseminata mediante un gruppo di lampade a incandescenza. L'accordo su questo nuovo prototipo è raggiunto inizialmente tra NPL (Regno Unito), NBS (USA) e Laboratoire Central d'Electricité (LCE)<sup>104</sup> (Francia). Nel 1921 la CIE adotta ufficialmente la candela internazionale e a questa decisione si adeguano molti Paesi, salvo la Germania. Già dal 1884 la candela di paraffina, usata fino allora come campione, fu sostituita, almeno in Germania, dalla candela Hefner-Altene, alimentata ad acetato di amile, costruita con un processo normalizzato<sup>105</sup>. Essa restò in uso fino al 1948, per lungo tempo in parallelo alla candela internazionale, dalla quale differiva meno del 10%<sup>106</sup>. Va sottolineato che le candele delle quali qui si è parlato non rappresentavano dei prototipi: infatti, essendo il procedimento di costruzione normalizzato e noto a tutti, ogni laboratorio poteva realizzare in modo indipendente il suo campione ed era autorizzato a usarlo per controllare altri tipi di sorgenti luminose.

Bisogna aspettare fino al 1946, poco dopo la fine della seconda guerra mondiale, quando il CIPM, su delega della CGPM, ratifica che la candela sia definita sulla base della radiazione emessa da un corpo nero posto alla temperatura di solidificazione del platino. Ma la proposta era stata messa a punto fin dal

<sup>103</sup> Il corpo nero è un corpo che assorbe tutta l'energia raggiante che riceve. Esso è ben realizzato mediante un tubo di grafite, chiuso a una estremità e di diametro molto minore della sua lunghezza. Fu Jules Louis Gabriel Violle (1841-1923, fisico e inventore francese) che nel 1880 propose un campione di intensità luminosa, che fu chiamato *candela Violle*, corrispondente alla luce emessa da 1 cm<sup>2</sup> di platino al suo punto di fusione. Si trattò del primo campione indipendente dalle proprietà di una specifica lampada. La candela Violle, usata fino circa il 1889, valeva circa 20 candele internazionali. Fu nel 1896 che Blondel propose il ricorso a un corpo nero riscaldato a temperatura elevata; l'energia raggiante emessa dal corpo nero è indipendente dal materiale con il quale è costruito e dal suo stato superficiale (emissività) ma dipende solo dalla temperatura, seguendo la legge di Planck.

<sup>104</sup> Il Laboratoire Central d'Electricité oggi fa parte del Gruppo francese, e multinazionale, Bureau Veritas, fondato nel 1830. Con il nome di Laboratoire Central des Industries Electriques, LCIE, è un laboratorio per la certificazione di prodotti elettrici ed elettronici in molteplici settori. La privatizzazione del laboratorio nazionale per le unità elettriche, il LCE, avviata nel 1996, provocò uno terremoto nella metrologia francese che si trovò costretta a ripensare e riorganizzare la sua intera struttura di laboratori metrologici primari.

<sup>105</sup> In Inghilterra si usò, almeno fino al 1909, la lampada a pentano per realizzare la candela di Vernon-Harcourt, pari circa a 10 candele internazionali.

<sup>106</sup> Nel settore della fotometria i percento sono sovente già una buona precisione.

1937: la candela è conservata mediante un corpo nero alla temperatura di solidificazione del platino, la cui luminanza vale per definizione (consenso)  $600\,000\text{ cd/m}^2$ . Nel 1948 la IX CGPM elenca la “nuova” candela tra le unità del sistema e nel 1954 la X CGPM introduce la candela come sesta unità fondamentale, avendo già aggiunto, a metro, kilogrammo e secondo, l'ampere per l'intensità di corrente elettrica e il kelvin per la temperatura.

Fino al 1 gennaio 1948, data di applicazione della delibera del CIPM, ratificata dalla CGPM, convivono pertanto: la *candela Hefner-Altene*, usata in Germania e nei Paesi a essa collegati commercialmente, con le sue lampade (prototipi manufatti, ma realizzabili da ciascun laboratorio indipendentemente) ad acetato di amile; la *candela internazionale*, sancita dalla CIE, con le sue lampade a incandescenza (veri prototipi manufatti); la *candela da corpo nero* conservata dal BIPM (di fatto dunque un prototipo!) e adottata dal CIPM. Fortunatamente i tre campioni dai quali discende la fotometria non differiscono tra loro più dell'1%; non ci sono dunque problemi nel 1948 ad allinearsi alla decisione unificante del CIPM. Per un quadro completo sulla fotometria si veda URL: <[http://www.helios32.com/Measuring\\_Light.pdf](http://www.helios32.com/Measuring_Light.pdf)>

### *Il problema della misura di eventi sensoriali*

È importante, a questo punto, introdurre un tema di storia politica delle misure, nel senso di storia che pone in primo piano le decisioni e i loro effetti.

All'inizio degli anni '30 del XX secolo la *British Association for the Advancement of Science* (BAAS) pose una domanda fondamentale a un Comitato appositamente costituito, formato da fisici, fisiologi e psicologi<sup>107</sup>. È possibile la misura di eventi sensoriali, ossia, misurata la grandezza fisica o chimica che funge da stimolo, misurare il risultato fisiologico che tale stimolo produce?<sup>108</sup>

Si trovano di fronte i fisici, forti degli sviluppi della metrologia fisica nella seconda metà dell'Ottocento, e i fisiologi e gli psicologi, con alle spalle risultati molto significativi della psicologia sperimentale. Nel 1879 lo psicologo e fisiologo tedesco Wilhelm Maximilian Wundt (1832-1920), considerato il padre fondatore della moderna psicologia, fonda a Lipsia il primo laboratorio di psicologia sperimentale, per raccogliere i dati empirici delle sue ricerche e analiz-

<sup>107</sup> Il rapporto finale del gruppo di studio è a nome di A. Ferguson, C. S. Myers, R. J. Bartlett: *Qualitative estimates of sensory events*, Final Report, British Association for the Advancement of Science, 1940.

<sup>108</sup> Il tema è stato trattato in un brillante articolo di Giovanni Battista Rossi: *Misure e Percezione*, «Tutto\_Misure», 3, 2009, p. 219.

zarne i risultati secondo i criteri delle scienze naturali. Egli era stato assistente del grande scienziato Von Helmholtz, già ricordato tra i fondatori del PTR, dal quale aveva assorbito i primi fondamenti di epistemologia sperimentale. La metodologia di ricerca utilizzata dallo psicologo tedesco, detta introspezione, è basata sullo studio descrittivo delle sensazioni che il soggetto sperimentale prova durante le fasi dell'esperimento. Il soggetto viene sottoposto a uno stimolo che lo psicologo può controllare e misurare; in seguito il soggetto ha il compito di descrivere i processi sensoriali esperiti con minuziosa cura. È così analizzata la possibilità di misurare l'intensità di una sensazione, uditiva, visiva, tattile... *indirettamente*, mediante la misura dello stimolo fisico che la produce e applicando successivamente una *legge psicofisica*.

L'esigenza di scientificità della psicologia era sentita fortemente dagli studiosi tedeschi. Negli Stati Uniti invece l'orientamento era di tipo pragmatico e funzionale, con particolare rilievo ai settori applicativi della psicologia, quali l'educazione e il lavoro, e con accento al metodo dei *test*. Altre correnti di psicologi enfatizzavano gli aspetti oggettivi e intersoggettivi della psicologia, identificandoli nei riflessi incondizionati e nei comportamenti osservabili<sup>109</sup>.

In questo complesso quadro di correnti e prospettive, i membri del Comitato BAAS discussero a lungo senza trovare un punto di accordo. Gli psicologi sostennero che i risultati di un esperimento psicofisico non possono essere espressi in termini di sole grandezze fisiche, perché esso comprende la valutazione di eguaglianze e disuguaglianze di sensazioni. I fisici ribattevano che la legge psicofisica non poteva essere provata sperimentalmente, perché a tal fine sarebbe stato necessario misurare direttamente le sensazioni, cosa che, a parer loro, era impossibile perché le sensazioni non sono additive.

I fisici e i metrologi di allora sostenevano che fossero misurabili solo grandezze che godessero della proprietà additiva. Tali sono la lunghezza (due regoli da 1 m allineati l'uno in successione all'altro generano un regolo lungo 2 m), la massa, la corrente elettrica e molte altre grandezze. Additiva non è la temperatura della scala internazionale: due mani a 35 °C unite non generano una temperatura di 70 °C! Questa mancanza della proprietà additiva della temperatura sulla scala pratica spiega in parte la diffidenza degli scienziati del CIPM al riguardo di tale scala, tenuta in *stand-by* per lunghi periodi. L'epistemologia delle misure aveva allora limiti molto stretti, dettati principalmente dalle teorie della misura sviluppate dai matematici.

<sup>109</sup> Si veda il saggio di Franca Meotti in: L.Geymonat: op.cit., *La nascita della psicologia scientifica*.

Il rapporto finale del Comitato BAAS sanciva una divisione che avrebbe influenzato i rapporti fra le due discipline negli anni a venire. Tra gli effetti di questa divisione primeggia un contenuto profondamente diverso attribuito nei due campi al “fare misure”; questa differenza, in gran parte dovuta alla mancanza di un colloquio continuo e di un’effettiva volontà di avvicinamento tra le scienze dell’uomo e le scienze della natura, può essere ben colta leggendo il IX volume della *Storia del Pensiero Filosofico e Scientifico* di Ludovico Geymonat, scritto dopo la morte del grande coordinatore: tutti gli scienziati dei due campi sostengono di compiere misure ma fanno riferimento a metodi e principi radicalmente diversi e ricorrono a linguaggi, nei due campi, difficilmente condivisibili, addirittura incomprensibili, da esponenti dell’altro campo.

Va considerata dunque come coraggiosa e ambiziosa la decisione di CIPM-CGPM di integrare, nel sistema scientifico delle unità di misura, la fotometria, intesa come scienza della visione umana. Non sarà questo l’unico caso: decisioni analoghe verranno assunte nel settore dell’acustica, con la controversa introduzione di scale non lineari di attenuazione, e con lo spazio dato agli effetti delle radiazioni ionizzanti sull’uomo.

#### *Una prima stabilizzazione delle unità e dei campioni elettromagnetici*

Le decisioni 10 e 12 riguardano la sostituzione delle unità elettriche internazionali con unità elettriche dette *assolute*. Ma con qualche riserva. Infatti la CGPM, considerando che alcuni istituti nazionali non hanno ancora condotto a termine le misure necessarie per stabilire il legame tra unità internazionali e unità assolute, decide di rinviare al 1935 la definizione del rapporto tra le unità delle due classi, attribuendo al CIPM l’autorità di assumere tale decisione.

Per capire il senso di queste delibere bisogna fare un passo indietro e percorrere, quasi fosse un romanzo, l’avventura dei sistemi CGS e dell’elettromagnetismo. La complessa storia delle unità e dei campioni elettromagnetici è scandita, nel suo esordio, dai cinque Congressi Internazionali degli Elettrotecnici, durante i quali viene trovato il consenso indispensabile per consentire alla CGPM di assumere decisioni.

Nel già ricordato primo Congresso del 1881 si aboliscono le tante unità concrete di corrente, tensione e resistenza. Nel secondo Congresso (1884) si stabiliscono norme per la realizzazione delle *unità legali*, cioè dei campioni materiali o rappresentazioni tangibili delle *unità pratiche* ohm, volt, ampere e altre. Nasce il cosiddetto *sistema pratico* delle unità elettriche, il quale resterà in uso fino al 1946, nella sostanza definita dal quarto (1893) e dal quinto Congresso

(1900). Le unità *pratiche elettriche*, le cui rappresentazioni materiali vengono chiamate unità *legali*, costituiscono il sistema delle unità *internazionali*, basate su campioni facilmente realizzabili: l'ampere internazionale, definito come l'intensità di una corrente che, attraversando un voltmetro a nitrato d'argento, deposita 0,001118 g di argento al secondo; l'ohm internazionale, che è la resistenza elettrica di una colonna di mercurio lunga 106,3 cm e avente sezione di 1 mm<sup>2</sup>, alla temperatura di 0 °C; il volt internazionale, definito come la differenza di potenziale che, applicata a una resistenza di 1 ohm, produce una corrente di 1 ampere. Il volt internazionale è anche definito come una differenza di potenziale pari a circa 0,98106 volte la forza elettromotrice a 20 °C della pila di Weston, assunta come campione, che ha i poli di amalgama di cadmio e solfato mercurioso e utilizza un elettrolita costituito da una soluzione satura (più sensibile alla temperatura di una soluzione insatura ma più stabile nel tempo) di solfato di cadmio. La pila appare in vetro, a forma di H, con gli elettrodi in basso separati dall'elettrolito (che occupa anche la parte orizzontale dell'H) sui due rami verticali mediante cristalli di solfato di cadmio e, dalla sola parte del polo con mercurio, mediante una pasta di solfato mercurioso e solfato di cadmio.

La pila di Weston per la conservazione del volt resterà in uso a lungo, anche dopo le importanti delibere del CIPM del 1946. Le pile, conservate presso gli Istituti Metrologici Nazionali in locali termicamente molto stabili, insieme ai campioni materiali di resistenza elettrica (resistori realizzati con filo di manganina<sup>110</sup> avvolto su un supporto cilindrico e dotati di quattro morsetti, due per terminali), venivano periodicamente confrontate tra loro e con quelle conservate al BIPM; questi ultimi confronti avvenivano generalmente a Parigi. Problematico era il trasporto delle pile; era infatti essenziale assicurarsi che durante il viaggio non fossero state inclinate troppo, perché un'eccessiva inclinazione della pila avrebbe portato il solfato di cadmio tutto dalla stessa parte e modificato la struttura stessa della pila e quindi il valore della tensione generata. Così sull'imballaggio, che conteneva la pila, veniva appoggiato un piatto, con i bordi inclinati dell'angolo di sicurezza. Sopra il piatto era sistemata una pallina da ping-pong; l'insieme veniva posto nel pacco definitivo, lasciando la pallina libera di muoversi, con uno spazio laterale sufficiente perché potesse cadere dal piatto se il pacco veniva inclinato oltre il consentito. Immaginate con quale trepidazione veniva aperto il pacco dopo l'arrivo: se la pallina non era più sul

<sup>110</sup> La manganina è una lega di rame (84%), manganese (12%) e nickel (4%), con un basso coefficiente di variazione della resistività con la temperatura e che è possibile accoppiare al rame senza generazione di significative forze elettromotrici di natura termoelettrica.

piatto, anni di lavoro e di sofisticate misure erano stati buttati al vento e veniva perduto irrimediabilmente un tassello per la conservazione delle unità elettriche, con tutta la storia di misure e confronti che fino allora lo aveva accompagnato. Questo racconto, che fa immaginare momenti di dramma e momenti di gioia, illustra bene quanto sia stato difficile per i metrologi il periodo dei prototipi, costretti a viaggiare per subire gli essenziali controlli e soggetti a rischi di ogni genere a ogni viaggio.

Il terzo Congresso (Parigi, 1889) definisce le unità di potenza e energia e assegna loro i nomi rispettivamente di watt (simbolo W) e joule<sup>111</sup> (simbolo J). Sono certamente gli elettrotecnici ad avere dato il via alla danza dei nomi delle unità di misura di grandezze derivate, con riferimento a nomi di insigni scienziati, che provocherà tante discussioni di natura geopolitica e nazionalista.

Nel 1893, a Chicago, il quarto Congresso, preso atto della situazione assai confusa esistente, conviene sulla necessità di costituire una commissione internazionale per l'unificazione delle unità di misura, con l'obiettivo di porre fine alla separazione in due sistemi CGS. Definisce inoltre l'unità pratica di induttanza, assegnandole il nome henry (simbolo H), altro riferimento a un insigne scienziato. Il quinto Congresso (Parigi, 1900) definisce le unità delle grandezze magnetiche e assegna loro nomi di insigni scienziati; nasce il sistema *pratico delle unità magnetiche*, distinto e non coerente con quello delle unità elettriche.

La svolta, alla quale già abbiamo accennato, avviene l'anno successivo quando Giorgi, nella riunione annuale dell'*Associazione Elettrotecnica Italiana* (AEI, ancora oggi attivissima, dal 2004 con il nuovo nome *Federazione Italiana di Elettrotecnica, Elettronica, Automazione, Informatica e Telecomunicazioni* (AEIT)) propone il sistema delle unità *razionali* dell'elettromagnetismo, finalmente un sistema coerente a quattro unità fondamentali: le tre MKS, metro (e non centimetro del CGS), kilogrammo (e non grammo del CGS) e secondo, più una unità elettromagnetica. Nasce il sistema Giorgi razionalizzato, o sistema pratico assoluto, o sistema degli ingegneri.

Risparmio al lettore le infinite discussioni che quel termine, “razionalizzato”, provocò: si razionalizzavano le grandezze o le loro unità di misura? La discussione coinvolse l'intera comunità scientifica internazionale e si protrasse fino agli anni '60 del XX secolo. Ricordo ancora assolate e caldissime mattine estive nel cortile del Politecnico di Torino mentre attendevo mio padre

<sup>111</sup> Controversa è la pronuncia di “joule”: chi sostiene sia corretto dire *gioul*, chi *giul*.

Rinaldo<sup>112</sup>: la discussione con il collega Eligio Perucca (1890-1965, allora ordinario di fisica sperimentale, esperto e convinto metrologo) e con altri colleghi sulla razionalizzazione di Giorgi era accanita e senza vie di uscita. La rivoluzione introdotta dalla proposta fu infatti enorme: Giorgi, appoggiato dal matematico, fisico e ingegnere britannico Oliver Heaviside (1850-1925), criticò le particolari dimensioni delle grandezze elettriche del sistema CGS a tre unità. Egli sostenne che la permittività e la permeabilità esprimessero le proprietà fisiche del mezzo: ignorare la loro dimensione conduceva a strane situazioni, come una resistenza della stessa dimensione di una velocità o un'induttanza di quella di una lunghezza. Egli suggerì pertanto di riformulare la teoria dei fenomeni elettromagnetici sulla base del nuovo sistema a quattro grandezze, così da razionalizzare le equazioni elettromagnetiche ed evitare l'uso di coefficienti, in particolare di potenze del 10. Tale razionalizzazione era possibile conservando i valori accettati delle unità elettriche, se la permeabilità dello spazio vuoto non fosse stata assunta come un numero puro pari a 1, ma fissata a un valore pari a  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m. In quel  $4\pi$ , che ritroviamo nell'attuale definizione dell'ampere, consiste la famosa razionalizzazione<sup>113</sup>.

La strada è ormai tutta in discesa: ricordiamo brevemente i passi successivi, senza dimenticare che in mezzo si svolsero due guerre mondiali e si verificò la più grave depressione della storia dell'economia mondiale (almeno fino a oggi). Nel 1906, a St. Louis, viene istituita, per la definizione delle unità elettriche, la già menzionata *International Electrotechnical Commission* (IEC), tuttora attiva come ente internazionale di unificazione nel settore elettrico. Nel 1908 a Londra si riunisce la Conferenza Internazionale per le Unità e i Campioni Elettrici e, oltre a sottolineare le contraddizioni tra definizioni teoriche e rappresentazioni materiali nel sistema delle unità internazionali, fissa i valori di tali unità. Nel 1927 la CGPM istituisce il Comitato Consultivo per l'Elettricità (CCE) che si pronuncia già nella prima riunione, l'anno successivo, sull'opportunità del passaggio dai due sistemi *pratico* e delle *unità internazionali* a un unico sistema *pratico assoluto* a quattro unità fondamentali. Come già detto, la VIII CGPM nel 1933

<sup>112</sup> Rinaldo Sartori (1909-1981) fu professore di elettrotecnica, prima all'università di Genova (1950) poi al Politecnico di Torino (1954). Nel 1955 assunse la direzione dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris. Dello stesso istituto fu in seguito vice-presidente e poi presidente. Fu membro dell'Accademia delle Scienze di Torino e dell'Accademia delle Scienze Lombarda. Fu presidente della Commissione Italiana per la Metrologia.

<sup>113</sup> In estrema sintesi, la razionalizzazione impone che i coefficienti numerici che legano tra loro le diverse grandezze e le diverse unità di misura contengano il numero irrazionale  $\pi$  solo in formule relative a configurazioni circolari, sferiche o cilindriche: mai in configurazioni piane.

definisce assolute le unità elettriche del sistema. La CGPM arriva addirittura a dichiarare di

considerare le sue delibere come la naturale prosecuzione delle decisioni della Conferenza di Londra e quindi autorizzata a delegare il CIPM a modificare, se necessario, le istruzioni della suddetta Conferenza.

Nel 1939 il CCE, che ha collaborato con la *International Union of Pure and Applied Physics* (IUPAP), con la IEC e con altri organismi internazionali, raccomanda al CIPM l'adozione del sistema Giorgi razionalizzato, con l'ampere come quarta unità fondamentale, come sistema *pratico assoluto*. Nel 1946, appena usciti dal dramma della guerra, il CIPM, che già nel 1937 aveva deciso l'introduzione del sistema MKS e l'attribuzione alla permeabilità magnetica del vuoto del valore  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m, fa propria la proposta della CCE e avvala ufficialmente le nuove definizioni. Il lungo cammino si consolida nel 1960 quando la CGPM adotta nel Sistema Internazionale di Unità (SI) l'intero corpo di definizioni delle unità di misura del sistema pratico assoluto.

## 2.6. Nuove strategie?

La VIII CGPM (1935), essendo stata informata dal CIPM di difficoltà nella diffusione del sistema metrico, imposta ipotesi di nuove strategie (delibera 13). Anzitutto chiede ai metrologi, agli economisti e alle aziende produttrici di aprire una discussione quanto più possibile allargata per affrontare i problemi connessi alle modalità di introduzione in nuovi ambiti del sistema e i fattori che ne intralciano la diffusione.

L'argomento è spinoso. Infatti due grandi Paesi, Gran Bretagna e USA, pur aderendo alla Convenzione del Metro, non solo continuano a usare nei loro territori e in tutte le attività (commercio, produzione, insegnamento, ricerca) il sistema di unità di misura vincolato al pollice e alla libbra ma lo impongono anche ai Paesi sui quali esercitano dominio di tipo coloniale. Forse la CGPM si sente autorizzata ad affrontare il tema grazie all'attività dell'*U.S. Metric Association* (USMA), fondata nel 1916 presso la Columbia University di New York da un gruppo di industriali, consumatori ed educatori con lo scopo di convertire gli USA al sistema metrico decimale<sup>114</sup>. Durante la prima riunione, portò il

<sup>114</sup> Nel 1790 Thomas Jefferson propose per gli USA un sistema di misure a base decimale. Il successivo voto del Congresso vide vittoriosi i sostenitori del sistema inglese per un solo voto, un voto che peserà fortemente sul futuro delle misure.

messaggio dei Paesi metrici la pedagogista e scienziata italiana Maria Montessori (1870-1952): ella affermò che

il vantaggio del sistema metrico su tutti gli altri sistemi è dimostrato dalla sua semplicità e dalla facilità con la quale esso consente di realizzare ogni attività di ricerca.

Per inciso, la USMA pubblica, dal 1966, una newsletter intitolata *Metric Today*; nel 1975 sostenne e promosse il *Metric Conversion Act*, il primo piano ufficiale USA per il passaggio al sistema metrico. USMA è attiva ancora oggi nell'aiutare le aziende USA alla conversione al sistema metrico.

Già nel 1970 Australia, Nuova Zelanda e Canada avevano avviato un piano decennale di conversione al sistema metrico. E al sistema metrico si convertirono rapidamente tutte le nazioni rese indipendenti dal colonialismo britannico, quasi a sottolineare, con tale atto, l'acquisita libertà.

Massicce erano state le nuove adesioni alla Convenzione del Metro dall'inizio del XX secolo: nel 1907 il Canada; nel 1908 l'Uruguay e il Cile; nel 1911 la Bulgaria; nel 1912 la Thailandia; nel 1922 la Cecoslovacchia; nel 1923 la Finlandia; nel 1925 l'Ungheria, l'Irlanda e la Polonia; nel 1929 i Paesi Bassi. In totale 36 nazioni già aderiscono alla CM.

Con la delibera 15 la CGPM auspica l'organizzazione di una Conferenza dedicata alla metrologia applicata, argomento molto delicato, perché incontra l'opposizione degli IMN. La metrologia applicata ha risvolti di innovazione nei prodotti e viene pertanto condivisa mal volentieri la competenza acquisita dalle singole nazioni. Infatti la sollecitazione della CGPM cadrà nel nulla.

La CGPM non può però ignorare le richieste puntuali avanzate dalla delegazione dell'URSS. Sono esigenze di carattere applicativo, inserite nel contesto della metrologia applicata: confronti internazionali di blocchetti piano-paralleli, di termometri a resistenza di platino, di termocoppie platino-platino rodio, di lampade fotometriche, di campioni di frequenza. La CGPM in parte risponde all'URSS (delibera 14) sostenendo che alcuni di tali confronti sono in fase di organizzazione; in parte sostiene che alcuni argomenti non sono di competenza della CGPM (le misure di frequenza!). Comunque l'invito al CIPM di seguire l'evolversi dei confronti sembra soddisfare i richiedenti. Lo stesso atteggiamento di ricerca di un compromesso è assunto per quanto concerne altre richieste, come la possibilità di esprimere la densità in grammi al centimetro cubo, l'esclusione di scale arbitrarie di densità, l'unificazione delle misure del tasso alcolico, l'adozione di tabelle unificate di soluzioni in acqua: richieste giuste ma

di competenza di una futura Conferenza di metrologia applicata, che non si farà mai.

L'URSS solleva anche un problema spinoso: quello dell'unificazione della temperatura "normale" alla quale devono essere riferite le misure delle diverse grandezze. Va ricordato che la lunghezza del metro è definita a 0 °C, le misure di grandezze geometriche si usa riferirle a 20 °C, quelle elettriche a 23 °C, quelle di lunghezza d'onda a 15 °C, quelle di energia termica (calorie) a varie temperature. Su questi temi la CGPM chiede tempo; e il tempo del quale avrà bisogno è tendente all'infinito, visto che ancora oggi alcuni dei problemi citati sono irrisolti, malgrado i tentativi fatti anche dagli enti internazionali di normazione. Ricordo di aver partecipato a numerose riunioni internazionali durante le quali si tentò di trovare un compromesso e unificare la temperatura di riferimento delle misure nei diversi settori. Le discussioni furono aspre, anche perché l'aspetto sottostante di rilievo era di carattere economico, legato al clima: nei Paesi "caldi" si voleva risparmiare sull'energia necessaria per gli impianti di condizionamento e, quindi, alzare il valore prescritto per la temperatura di riferimento; nei Paesi "freddi" si chiedeva l'opposto. Giorni e giorni di discussioni e di ricerca del compromesso, pagine di documenti e di relazioni non servirono a trovare un accordo.

Sembrerebbero dunque deludenti questi primi tentativi della CGPM di affrontare temi di strategia e di supporto alle applicazioni delle misure. Un giudizio negativo sarebbe però affrettato. Va ricordato il difficile periodo nel quale la CGPM sta operando, il delinarsi di blocchi ideologici profondamente tra loro contrapposti (e l'URSS rappresenta uno di tali blocchi), la grande depressione dalla quale si comincia a uscire solo negli ultimi mesi del 1935. È un inizio di tentativi di indirizzo e di avvicinamento ai problemi applicativi, che però mal sono sopportati dagli IMN.

Comunque con la 15<sup>a</sup> e ultima risoluzione la VIII CGPM accoglie la proposta dell'URSS di costituzione di un comitato consultivo di metrologia applicata e affida al CIPM lo studio di fattibilità. Tale comitato non sarà mai costituito.

## 2.7. Nuovi istituti metrologici elettrici nazionali

Gli Stati che intendono tenersi al passo con i nuovi sviluppi scientifici e tecnologici legati all'elettricità si dotano di istituti di ricerca e prove nel settore. Affidano a essi anche compiti squisitamente metrologici, di realizzazione e conservazione dei campioni della unità elettriche e magnetiche. In sintesi ecco

una breve presentazione dei maggiori istituti metrologici elettrici fondati nella prima metà del XX secolo. Ma prima conviene analizzare quali modelli di sviluppo di nuovi istituti metrologici furono adottati, nella prima come nella seconda parte del secolo.

*I modelli adottati per la realizzazione degli IMN nel XX secolo*

La nascita di nuovi Istituti Metrologici Nazionali coincide in generale con momenti di crescita economica di una nazione. La crescita facilita gli scambi commerciali con altre nazioni, vede crescere l'industria nazionale e di conseguenza si fa pressante la domanda di attività metrologica riconosciuta a livello internazionale. Ma per partire è anche essenziale un'offerta di cultura metrologica. Essa può provenire da due fonti: o l'università, eventualmente con altre istituzioni di ricerca, o una consolidata tradizione di attività di metrologia legale. L'incontro tra domanda e offerta provoca la nascita e la crescita di infrastrutture metrologiche, in generale investite per legge dei compiti di sviluppo, realizzazione, conservazione e disseminazione dei campioni nazionali di misura. Al compito di disseminazione si aggiungono non di rado quelli di promozione della crescita di laboratori di taratura e prova che cooperino nell'attuazione della capillare disseminazione. Promozione significa formazione, consulenza nell'organizzazione, autorizzazione a operare con garanzie di riferibilità dei risultati ai campioni nazionali, controllo sulla correttezza dell'operato. Ne consegue che si determina, in tali forme organizzative centralizzate, una situazione di conflitto d'interessi (chi forma e autorizza è chiamato poi a controllare il risultato del proprio operato), risolta, per ora quasi solo in Europa e in tempi recenti, affidando a organismi autonomi, diversi dalle istituzioni metrologiche nazionali, i compiti di autorizzazione e controllo dei laboratori di taratura e di prova di secondo livello.

La maggioranza delle istituzioni metrologiche nazionali ha la sua matrice culturale nelle università o in altre istituzioni pubbliche di ricerca. L'importante eccezione è l'istituto metrologico brasiliano, Inmetro, *Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia* (URL: <<http://www.inmetro.gov.br>>), fondato nel 1973 dalla radicata cultura, teorica e sperimentale, della metrologia legale nel Paese, nelle vicinanze di Rio de Janeiro, mentre la città con tradizioni di cultura metrologica universitaria era San Paolo. Un altro esempio è dato dalla Svizzera, che colloca nel 1977 la metrologia tecnico-scientifica all'interno del preesistente METAS, *Ufficio Federale di Metrologia*, (URL: <<http://www.metas.ch>>), nato con compiti di metrologia legale.

Molte nazioni seguono il modello degli Istituti Metrologici Nazionali del Regno Unito (NPL) e degli USA (NBS): un IMN unico, pubblico e sorvegliato da un ministero. Tra gli esempi di questo tipo di IMN citiamo i più rilevanti: *National Physical Laboratory of India* (NPLI, 1947), *National Institute of Metrology* della Repubblica Popolare Cinese (NIM, 1955), il *Korea Research Institute for Standards and Science* (KRISS, 1975), *Centro Nacional de Metrología* messicano (CENAM, 1992), *Ulusal Metroloji Enstitüsü* della Turchia (UME, 1992).

Altre nazioni potenziano i laboratori universitari e altri laboratori pubblici o privati, uno per ciascun settore, e li pongono sotto una comune sorveglianza ministeriale. Questo tipo di organizzazione minimizza i costi utilizzando al meglio l'esistente. Esempi sono forniti dalle infrastrutture francesi, da quelle danesi e da quelle croate. In questi casi si assiste a una complessa evoluzione dell'organizzazione, non di rado con momenti di difficoltà connessi con cambiamenti di indirizzo di alcuni organismi, soprattutto quando sono coinvolte strutture private.

Abbastanza diffuso è il modello di IMN situato all'interno di una struttura di ricerca pubblica ad ampio raggio di intervento, come un consiglio nazionale delle ricerche. La struttura metrologica assume nel tempo, per meglio rispondere alle esigenze di carattere internazionale, un alto grado di autonomia all'interno della struttura che l'ha generata. Esempi di applicazione di questo modello li troviamo in Argentina, con la metrologia all'interno dell'*Instituto Nacional de Tecnología Industrial*, in Canada e in Australia, rispettivamente con l'*Institute for National Measurement Standards* (NRC-IMNS) e il *National Metrology Institute of Australia* (CSIRO-NMIA) all'interno del *National Research Council*.

Infine alcune nazioni hanno evoluto la loro metrologia realizzando nuovi istituti pubblici o indirizzando istituti diversi a compiti metrologici. È il caso del Giappone e dell'Italia che analizzeremo con qualche dettaglio in seguito.

Oggi la metrologia ha molto allargato gli ambiti di intervento, includendo, negli accordi internazionali di mutuo riconoscimento dei campioni nazionali di misura, i campioni di nuovi settori come quelli per le misure sull'ambiente, la salute, la sicurezza, la lotta al *doping* e alle frodi alimentari. I Governi hanno ritenuto quasi sempre più razionale ed economico affidare i nuovi compiti metrologici a istituzioni esistenti operanti nei settori.

**1882: in Francia il Laboratoire Central d'Électricité.** Il *Laboratoire Central d'Électricité* (LCE) viene costituito per decreto nel 1882 e inizia la sua attività in Parigi nel 1888: metrologia elettrica, prove, ricerche, formazione. Nel

1900 le ricerche svolte nel LCE permettono la realizzazione dei campioni materiali di resistenza elettrica (resistenza di una colonna di mercurio) e di tensione elettrica (pila campione).

Quando nel 1927 viene costituito dal CIPM il Comitato Consultivo d'Elettricità, alla presidenza viene designato Paul Janet, direttore del LCE.

Nel 1942 un decreto legge assegna al LCE nuovi incarichi e una nuova collocazione, con il nome di *Laboratoire Central des Industries Électriques* (LCIE). L'anno successivo il *Conservatoire National des Arts et Métiers* (CNAM)<sup>115</sup> attribuisce al LCIE le responsabilità di conservazione dei campioni elettrici nazionali. L'attività metrologica del LCIE si sviluppa a partire dagli anni '60 del XX secolo, tanto che nel 1969 il LCIE diviene uno dei cinque laboratori primari di metrologia all'interno del *Bureau National de Métrologie* (BNM), organismo di coordinamento e indirizzo appositamente costituito per la programmazione e la realizzazione della politica metrologica francese.

Nel 1996 il LCIE diviene una società privata.

**1909: in Giappone l'Electrotechnical Laboratory.** Il Ministero delle Comunicazioni giapponese fonda nel 1891 l'*Electrotechnical Laboratory* (ETL), con compiti prevalenti di prove e ricerche nel settore "dell'elettricità e delle comunicazioni elettriche". Solo nel 1909 l'ETL si vede attribuire compiti di ricerca metrologica, mirati alla realizzazione e conservazione dei campioni nazionali delle unità elettriche. Ristrutturato nel 1948, l'ETL perde progressivamente ogni responsabilità in campo metrologico, concentrando le sue attività di ricerca nell'elettronica e nella tecnologia dell'informazione.

Il Giappone seguì un percorso travagliato verso il sistema metrico. Nel 1886 firmò la Convenzione del Metro e nel 1891 iniziò l'uso del sistema metrico in parallelo dell'antico sistema di misura *shaku-kan*, con la pubblicazione di tabelle di conversione. Nel 1893 il parallelismo tra i due sistemi fu confermato con una legge. Nel 1903 fu costituito a Tokyo il *Central Inspection Institute of Weights and Measures*. Cambiò nome nel 1961, generando l'attuale *National Research Laboratory of Metrology* (NRLM). Nel 1980 il NRLM fu trasferito a Tsukuba, la nuova città della scienza, concentrazione di istituzioni di ricerca e di aziende ad alta vocazione innovativa.

---

<sup>115</sup> È un'istituzione di formazione superiore, fondata nel 1794 insieme alla *École polytechnique* e alla *École normale supérieure*.

Nel 1909 il Giappone adottò come legale anche il sistema piede - libbra. Solo nel 1958 fu abrogato per legge l'uso del sistema di misura *skabu-kan* e del sistema piede – libbra.

**1934: in Italia l'Istituto Elettrotecnico Nazionale.**<sup>116</sup> L'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris<sup>117</sup> (IEN) fu fondato a Torino nel 1934<sup>118</sup>, grazie alla solida tradizione torinese nel campo delle discipline elettriche che contò tra i suoi cultori più autorevoli lo scienziato piemontese al quale l'Istituto è intitolato. Fu lo stesso Ferraris a proporre, nel 1882, di costruire a Torino, presso il Regio Museo Industriale (il futuro Politecnico) un Laboratorio Nazionale di Fotometria, che sarebbe stato realizzato però solo 50 anni dopo, con il nome appunto di Istituto Elettrotecnico Nazionale. Erano quelli gli anni durante i quali si avviò il sistema di ricerca pubblica italiana, con la costituzione di una rete di Istituti a carattere nazionale: a Roma l'Istituto d'Ultra-acustica, quello d'Alta Matematica e l'Istituto Superiore di Sanità; a Firenze l'Istituto Nazionale d'Ottica; a Napoli l'Istituto per i Motori. Nel 1923 era stato costituito il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), con presidente Vito Volterra fino al 1927 e Guglielmo Marconi<sup>119</sup> (1874-1937) fino alla sua morte, anno nel quale fu emanata la legge che regolamentava le attività dell'ente, modificata nel 1945.

L'IEN, centro di alti studi nel campo delle discipline elettriche e di quelle a loro affini, si sviluppò rapidamente, grazie a una notevole libertà amministrativa e a una, per i tempi, rilevante larghezza di mezzi, con due milioni di contributo l'anno, equivalente circa a 1,7 milioni di euro attuali. La nascita dell'elettronica e delle sue applicazioni, quali i controlli, il radar, i calcolatori, rese necessaria una definizione e limitazione delle attività. Le attività esistenti sin dalla fondazione, come l'elettromeccanica, la metrologia elettri-

<sup>116</sup> Molte delle informazioni qui riportate sono tratte da un articolo di Sigfrido Leschiutta: *L'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris a Torino*, «Tutto\_Misure», 1, 2000, p. 85.

<sup>117</sup> Thomas Alva Edison, che aveva ospitato Ferraris in America, lo definì «il più grande tra i grandi che al mondo hanno rivelato la bellezza della scienza elettrica». Dalla sua invenzione del 1885 (motore a induzione magnetica, alimentato da correnti alternate) discendono, d'altronde, tutti i motori elettrici a induzione che ancora oggi utilizziamo.

<sup>118</sup> Atto fondativo fu il Regio Decreto Legge del 4 ottobre 1934, n. 1691, convertito nella legge 11 aprile 1935, n. 762.

<sup>119</sup> Guglielmo Marconi ebbe nel 1909 il premio Nobel per la fisica per i suoi fondamentali contributi alla scienza delle telecomunicazioni. Nel 1930 fu nominato presidente dell'Accademia d'Italia.

ca e quella del tempo, le ricerche sui materiali magnetici, dopo la guerra costituirono la prevalente struttura scientifica dell'Ente. Fino alla fine degli anni '60 l'IEN operò in stretta collaborazione con l'Istituto di Elettrotecnica del Politecnico di Torino. Con la realizzazione della nuova sede del Politecnico di Torino (1959), le attività didattiche e quelle di ricerca universitaria abbandonarono progressivamente la vecchia sede dell'IEN di Corso Massimo d'Azeglio e anche i loro stretti legami con l'Istituto. Nel 1984 l'IEN completò il trasferimento nei nuovi edifici di Strada delle Cacce 91, iniziato nel 1975, confinando con l'Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti (IMGC) del CNR.

Dal 1 gennaio 2006 i due istituti IEN e IMGC vengono fusi nell'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM).

Le tappe fondamentali dell'attività metrologica internazionale sono scandite dall'entrata dell'IEN nei Comitati Consultivi di sua competenza. Come si può constatare dalla Scheda 5 la severità della selezione per l'accesso a un CC da parte di un'istituzione di ricerca giustifica il considerare tale traguardo come caratterizzante l'alto livello scientifico e la dimensione nazionale raggiunti dall'istituzione stessa. L'IEN diviene membro del CCDS (per la definizione del secondo) nel 1957, alla prima riunione dopo la costituzione. Diviene membro del CCE (elettricità) nel 1961 e del CCPR (fotometria e radiometria) nel 1982. È membro del CCAUV dal 1999, anno della costituzione del CC.

A partire dal 1935 l'Istituto si è dotato di una biblioteca specializzata in Elettrotecnica, Misure elettriche, Acustica, Informatica, Metrologia. In tale biblioteca è disponibile anche l'intera raccolta dei verbali ufficiali di tutti gli organismi della Convenzione del Metro. L'Istituto conserva inoltre una collezione di strumenti e apparecchi di grande interesse storico. Essa proviene dal regio Museo Industriale Italiano di Torino e, in modo specifico, dalla prima Scuola di Elettrotecnica fondata in Italia da Galileo Ferraris nel 1889. Tale raccolta, comprendente oltre 200 pezzi e a suo tempo ordinata dal prof. Carlo Chiodi<sup>120</sup>, evidenzia l'evoluzione dell'elettrotecnica e delle discipline derivate nel corso del diciannovesimo secolo e delle prime decadi del ventesimo.

---

<sup>120</sup> Carlo Chiodi fu ricercatore all'IEN e docente di misure elettriche presso il Politecnico di Torino fino al 1960. Presso la Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze è disponibile, a cura di Valentino Zerbini il testo delle sue lezioni (Ed. Levrotto e Bella, 1952).

### **Scheda 5 - Criteri per l'ammissione ai Comitati Consultivi (CC) del Comitato Internazionale dei Pesi e delle Misure (CIPM)**

I CC operano sotto l'autorità del CIPM, che nomina il presidente di ciascun CC, usualmente scelto tra i membri del CIPM stesso. Il presidente di un CC presiede le riunioni del CC e presenta un rapporto della riunione al CIPM.

Il CIPM accorda la possibilità di divenire Membro di un CC (quanto segue non si applica al CC per le unità) alle istituzioni degli Stati Membri del BIPM riconosciute come le più competenti nello Stato a livello internazionale nel settore coperto dal CC. Ne consegue che, in principio, tali istituzioni siano dei laboratori a carattere nazionale:

- incaricati di mettere in opera i campioni nazionali nel settore;
- attivi nella ricerca nel settore e che abbiano recentemente pubblicato risultati di tali ricerche su riviste scientifiche di reputazione internazionale;
- la cui competenza nel settore è dimostrata dalla partecipazione a confronti internazionali organizzati dal CC o dal BIPM o da un organismo regionale di metrologia.

I CC possono anche avere come Membri:

- organismi intergovernamentali, organismi internazionali o unioni scientifiche la partecipazione dei quali consenta di far progredire le attività del CC;
- personalità designate nominativamente le cui conoscenze e competenze possano portare al CC un aiuto prezioso, anche se esse provengono da un laboratorio che non risponde ai criteri necessari per essere Membro del CC.

Per ulteriori dettagli, in particolare relativi alla procedura da seguire per essere accolti come Membri o come osservatori nei CC, si veda URL: <[http://www.bipm.org/fr/committees/cc/cc\\_criteria.html](http://www.bipm.org/fr/committees/cc/cc_criteria.html)>. Per la lista dei Membri attuali dei CC si veda URL: <<http://www.bipm.org/utis/fr/pdf/directory.pdf>>.

## **2.8. L'inizio dell'egemonia tecnica e scientifica degli USA e il ruolo dell'URSS**

L'inizio del XX secolo si è aperto con tre Stati in rapida crescita sullo scacchiere mondiale: Germania, Giappone e Stati Uniti d'America. Dopo la prima guerra mondiale a essi si aggiunge l'URSS. La Germania, perdendo la guerra, inizierà il suo drammatico percorso di autodistruzione. Il Giappone, la cui influenza sarà limitata all'Asia orientale, uscirà perdente e sconvolto dalla seconda guerra mondiale. La guerra, con i suoi 9 milioni di morti sui campi di battaglia (solo 200 mila dei quali soldati USA), con costi finanziari totali «stimati pari a 6,5 volte l'intera somma di debiti pubblici accumulati dagli Stati europei nel

lungo Ottocento fino al 1914»<sup>121</sup>, lascerà l'Europa devastata, spezzettata, con conflitti ancora irrisolti.

Saranno così solo USA e URSS a condizionare politica, economia, sviluppo sociale, e anche sviluppo metrologico, in tutto il mondo per quasi 70 anni consecutivi. Tanto che «Wilson e Lenin diventarono nel 1919 i punti di riferimento di ondate di entusiasmo di massa, interpretando due contrapposte ma altrettanto radicali uscite dal passato»<sup>122</sup>.

### *Ritorno sulla scena internazionale degli USA e loro espansione*

La politica espansionistica degli USA, già avviata alla fine del XIX secolo, si manifesta in tutte le sue ambizioni con la vittoria sulla Spagna nella contesa per Cuba (1898), il protettorato su Cuba e l'annessione delle isole Hawaii, di Puerto Rico e delle Filippine (1902). Il Governo USA risolve poi la delicata questione del canale tra i due oceani<sup>123</sup>, favorendo l'indipendenza di Panama dalla Colombia (1903) e ottenendo dal governo della nuova repubblica la sovranità sulla zona destinata alla costruzione del canale, inaugurato nel 1914. Infine gli USA si affacciano in Europa.

Theodore Roosevelt è il presidente, insediato nel 1901, che costruisce una politica estera degli USA. Ed ecco che nel 1906 una delegazione diplomatica americana compare alla conferenza di Algeciras, richiesta dalla Germania per regolare i dissensi con la Francia per i divergenti interessi delle due nazioni in Marocco. È il segno di un nuovo ruolo mondiale degli USA, anche se il primato produttivo statunitense non è ancora affiancato da una dimensione commerciale e finanziaria equivalente<sup>124</sup>.

L'espansionismo americano è sostenuto da un significativo aumento della flotta militare, secondo la teoria avanzata dall'ufficiale di marina Alfred T. Mahan nell'opera *L'influenza del potere marittimo sulla storia, 1660-1783* (1890)<sup>125</sup>. Egli sosteneva che «se gli USA volevano vincere la lotta mondiale per il dominio del commercio» dovevano disporre di una flotta mercantile, di una potente marina militare che la proteggesse e basi navali nelle colonie oltremare, Caraibi e Pacifico. Quanto questa teoria influì sulla politica di Roosevelt può essere

<sup>121</sup> G. Formigoni: op.cit., p. 116.

<sup>122</sup> G. Formigoni: op.cit., p. 120.

<sup>123</sup> Denis Brogan: *Gli Stati Uniti d'America*, in: *Storia del Mondo Moderno*, vol. XII, op.cit., pp. 665-700.

<sup>124</sup> G. Formigoni: op.cit., p. 79.

<sup>125</sup> Maldwyn A. Jones: *Storia degli Stati Uniti*, Fabbri, 1984, pp. 356-358.

ben immaginato ricordando che nel 1897 egli rivestì la carica di sottosegretario alla marina.

Contemporaneamente gli USA abbandonano il loro proverbiale pragmatismo che aveva guidato l'avvio dello straordinario sviluppo tecnologico. Gli eroi della scienza erano stati gli inventori, come Samuel Morse (1791-1872), Graham Bell (1847-1922), Thomas A. Edison (1847-1931)<sup>126</sup>. All'inizio del '900 è avviato un imponente piano di organizzazione scientifica: nascono centri di ricerca presso le industrie, istituti di ricerca e università finanziariamente sostenute da fondazioni e da investimenti pubblici. Gli USA, pur restando un Paese prevalentemente agricolo, si stavano avviando a diventare la maggiore potenza industriale del mondo, patria del capitalismo, avanguardia della tecnologia e dell'imprenditorialità innovativa. Nel 1916 viene fondato il *National Research Council*. Di questo clima di rilancio della ricerca e della scienza beneficia anche il *National Bureau of Standards* (NBS) che diviene rapidamente istituto trainante nelle attività del CIPM e dei CC.

Al termine della prima guerra mondiale le università USA destinavano due terzi delle loro risorse alla ricerca pura e un terzo alla ricerca applicata. Gli effetti furono evidenti: tra il 1932 e il 1938 vennero assegnati agli USA ben otto premi Nobel, contro i quattro assegnati nel periodo dal 1907 al 1931. Già nel 1919 il presidente degli USA Thomas Woodrow Wilson (1856-1924) poteva affermare:

Le nazioni d'Europa si sono ancora una volta gettate le une contro le altre trascinate dai loro interessi conflittuali. Non intendo mancare di rispetto ad alcuno quando dico che l'America costituisce la speranza del mondo.<sup>127</sup>

L'egemonia mondiale nella scienza e nella tecnologia fu definitivamente conquistata dagli USA nel corso della seconda guerra mondiale, grazie anche al significativo apporto dei tanti scienziati europei fuggiti dai regimi dittatoriali. Nel 1960 si calcolarono negli USA 115 000 ricercatori, contro i 4 000 del 1906. Nel 1981 gli USA destinarono alla ricerca il 2,52% del PIL. Tra il 2% e il 2,4% era quanto destinato da Germania, Francia, Regno Unito, mentre l'Italia già si collocava assai distante, all'1% circa.

Il primato tecnologico e scientifico fu sostenuto dal primato commerciale e finanziario, grazie anche a un consolidamento industriale, con fusioni negli anni sessanta specialmente nelle industrie tecnologicamente avanzate che ri-

<sup>126</sup> P. Rossi: op.cit., pp. 6-16.

<sup>127</sup> M.L. Salvadori: op.cit., p. 16.

chiedevano ingenti capitali<sup>128</sup>. Scienza e tecnologia progredirono affiancate anche nel NBS, molto prima che ufficialmente venisse riconosciuto all'istituto, con il cambiamento di nome, il ruolo trainante nazionale non solo metrologico ma anche nelle nuove tecnologie. Alla fine degli anni '70 il NBS fu impegnato, per esempio, nello sviluppo dei sistemi flessibili di produzione. Fu costituita una divisione di imponenti dimensioni per le ricerche sull'integrazione di tali sistemi e sull'apporto in essi delle macchine di misura a coordinate: tale divisione fu considerata *off limits* anche, o forse soprattutto, per i colleghi di altri istituti metrologici.

### *Il ruolo dell'URSS nella metrologia*

Abbiamo fatto notare come l'altro protagonista della vita della Convenzione del Metro nella prima parte del XX secolo fu l'URSS, in particolare nei quindici anni che precedono la seconda guerra mondiale. È il periodo delle grandi trasformazioni dell'URSS, iniziate subito dopo la conclusione della drammatica guerra civile con il susseguirsi dei piani quinquennali di sviluppo. È difficile valutare oggi il contributo dell'URSS allo sviluppo della scienza delle misure perché si è ancora troppo condizionati, nel giudizio storico, dal crollo del sistema sovietico nel 1989. Si rischia di passare da un generico giudizio globale negativo del fenomeno "comunismo" a una visione romantica del fenomeno: speranza, per gli sfruttati e i derelitti del pianeta, in un futuro migliore.

Se fosse possibile chiedere oggi a Nicola II di posizionare la Russia, sulla quale imperava all'inizio del XX secolo, nella storia, avrebbe molto probabilmente risposto: «è l'erede dell'Impero Romano. Dopo più di mille anni guidati da Roma e mille anni ancora gestiti da Bisanzio, dal 1453 Mosca è la capitale dell'Impero, divenuto impero di cristianità». Ma è indiscutibile che alla grandezza immaginata dall'imperatore non corrispondeva in alcun modo una struttura sociale adeguata. Ben poco era stato fatto per consentire ai russi una vita più umana. Sulla carta la servitù della gleba era stata abolita nel 1861, con oltre mezzo secolo di ritardo rispetto agli ultimi Paesi europei; ma l'abolizione aveva reso ancora più poveri e sfruttati i contadini, senza più alcuna tutela giuridica di fronte ai potenti. E la Russia era, agli inizi del '900, quasi esclusivamente una nazione contadina.

Quando, nel marzo del 1921, Vladimir Ilič Uljanov (Lenin, 1870-1924) avvia la nuova politica economica, ha dunque davanti a sé una disperata situazione di arretratezza. La Russia lasciata da Nicola II si presenta con una situazione

<sup>128</sup> Maldwyn A. Jones: op.cit., pp. 526-529.

economica e culturale impressionante. L'analfabetismo e la fame sono le regole di vita. La nazione è stravolta dalla prima fase della guerra mondiale, distrutta dalla guerra civile, che fu guerra impari nella quale le armate bianche avevano l'appoggio di Stati Uniti, Gran Bretagna, Francia, Giappone e Italia. Il salto da compiere è enorme. La campagna vive in una organizzazione da basso medioevo. La microscopica *élite* culturale è proiettata su Vienna e Parigi. Il tentativo di avviare un processo di ammodernamento da parte dello Zar (cioè il *Caesar* dell'Impero) è stato limitato a poche attività e a ridotti territori urbani. Non si tratta di annullare *l'ancien régime*, come fece la Rivoluzione Francese; Lenin prima e Stalin poi tentano di traghettare la Russia dal medioevo all'età moderna. E ci riescono, facendo pagare un prezzo altissimo al popolo, stroncando nel sangue ogni tipo di opposizione. Ma l'URSS alla vigilia della seconda guerra mondiale è completamente diversa dalla Russia del 1921. La devozione che gran parte della popolazione dell'URSS mostra ancora oggi nei riguardi dei due leggendari capi è la testimonianza vivente che i benefici complessivi furono superiori ai sacrifici di vite e di libertà. E se oggi la nuova Russia è in grado di crescere con tassi intorno al 10% annuo, l'origine di tale capacità va cercata in quel lontano marzo del 1921.

Va anche ricordato l'effetto che la rivoluzione russa ebbe sulle nazioni asiatiche<sup>129</sup>: in esse la rivoluzione fu opera soprattutto delle stesse popolazioni indigene. Inoltre essa seguì una ben definita politica delle nazionalità, tanto che esercitò un'attrazione importante su tutti i Paesi coloniali o semi coloniali, non solo in Asia ma anche in Africa e nell'America Latina.

Il contributo dell'URSS allo sviluppo del sistema di unità e, in generale, della metrologia si manifesta su situazioni molto concrete, lontane da ogni ideologia. L'Istituto Mendeleev costituisce, nella prima metà del XX secolo e ancora oggi, una solida struttura di ricerca, all'avanguardia in molti settori. Non è un laboratorio isolato. Dal 1921 le università si sono sviluppate orientandosi in prevalenza alla formazione scientifica e tecnologica. Si stima<sup>130</sup> che alla fine degli anni Trenta in URSS vi fossero circa quattro milioni di laureati, contro le poche decine di migliaia di vent'anni prima. Tutti giovani dunque, entusiasti, fiduciosi nel futuro, anche se inquadrati dal regime e dalla polizia politica. Ma è soprattutto lo spirito pragmatico, che permea la nazione, a manifestarsi negli organismi della Convenzione del Metro. Gli scienziati e i politici dell'URSS inter-

<sup>129</sup> Kavalam M. Panikkar: *Storia della dominazione europea in Asia*, Einaudi, 1958, pp. 260-266.

<sup>130</sup> George Kennan: *L'Unione Sovietica, 1917-1939*, in: *Storia del Mondo Moderno*, vol. XII, op.cit., pp. 519-563.

vengono sulla sostanza dei problemi, sugli aspetti più concreti (metrologia applicata, scala pratica di temperatura, scelta del campione primario di fotometria, confronti internazionali su campioni d'uso comune, eccetera). Sono più interessati di ogni altra delegazione alle conseguenze sulla produzione delle decisioni che escono da tali organismi. Il loro contributo è propulsivo, spesso proiettato verso il futuro; altrettanto spesso inascoltato.

Questa situazione si riproporrà pochi decenni dopo, quando molte nazioni dell'Asia, alcune con regimi comunisti, aderiranno alla Convenzione del Metro. Chiederanno concretezza e scelte in supporto allo sviluppo, all'ambiente, alla salute. Sovente troveranno nell'URSS il loro portavoce naturale. Non ottenendo risposte adeguate dalla CGPM, aderiranno a organismi regionali, capaci di rispondere meglio alle loro esigenze, contribuendo, come già sottolineato, a innescare la crisi del sistema della Convenzione del Metro.

## 2.9. È scienza la metrologia della CM prima del 1946?

Se potessimo porre la domanda a Gaston Bachelard (1884-1962), l'epistemologo francese che pose al centro delle sue analisi sulla conoscenza la realtà concreta della ricerca scientifica, egli risponderebbe probabilmente con un secco *NO*. E giustificerebbe il suo no con dovizia di argomentazioni.

Sosterrebbe<sup>131</sup> che la metrologia del suo tempo si appoggiava su un anomalo miscuglio di filosofie, dall'idealismo, con il disperato inseguimento del valore vero, al positivismo e al neo-positivismo, con la fiducia nel dato e nel prototipo. Avrebbe posto i metrologi assai più vicini all'*homo faber* che all'*homo sapiens*. Lontani dall'*homo mathematicus* che tanto apprezzava. Avrebbe constatato che nella storia della metrologia ufficiale, almeno fino al 1946, mancavano rotture epistemologiche analoghe a quelle che avevano caratterizzato la storia della scienza: dalla geometria euclidea alla geometria non euclidea; dalla chimica di Lavoisier alla chimica non lavoisiana; dalla meccanica newtoniana alla meccanica post-relativista. Avrebbe ancora osservato che la metrologia, per necessità intrinseca conseguente alla molteplicità di utenti, non aveva ancora potuto fare distinzione tra esperienza comune ed esperienza scientifica, tra linguaggio generico e linguaggio specialistico. Egli inoltre, avendo posto l'errore e l'approssimazione al centro della conoscenza, avrebbe certo criticato l'indagine metrologica che mira a ridurre, o addirittura eliminare, errore e approssimazione.

<sup>131</sup> Ludovico Geymonat: *L'epistemologia di Gaston Bachelard*, in: L. Geymonat: *Storia del pensiero filosofico e scientifico*, vol. VII, pp. 9-39.

Ma l'obiezione più forte che Bachelard avrebbe fatto all'idea di metrologia come scienza risiede nella difficoltà della metrologia di riconoscere, e quindi superare, l'ostacolo epistemologico fondamentale. Non quello che dipende dalla complessità della natura, cioè dall'oggetto del misurare, ma da qualcosa che, con linguaggio di oggi, Bachelard avrebbe descritto come radicato nei caratteri genetici umani. Il misurare, avrebbe detto rifacendosi alla psicologia sperimentale e alle conclusioni epistemologiche raggiunte da Jean Piaget (1896-1980), pretende la validità di alcune ipotesi, come l'invarianza spazio-temporale della caratteristiche geometriche degli oggetti, forse scritta nei nostri geni ma respinta dalle teorie post newtoniane.

Alla metrologia della prima metà del secolo XX, o almeno a quella ufficiale che affidava agli organismi della Convenzione del Metro il compito di portavoce, mancò un'approfondita analisi metodologica sul significato del misurare. Mentre le scienze della natura, ormai trasformate da filosofie a scienze in senso bachelardiano, affrontarono laceranti e coraggiose analisi sui metodi, sui modelli e sul loro significato, la metrologia, forte dell'affermazione di Lord Kelvin che le affidava il compito di "misurare per conoscere", si dimenticò che era anche necessario "conoscere per misurare". Ignorò l'epistemologia<sup>132</sup>.

Così la metrologia, proposta dagli scienziati, realizzata dagli economisti ministeriali, guidata nel suo sviluppo ancora dagli scienziati, sempre però condizionati dalla necessità di trovare il consenso, si fece ancella di cento altre scienze, creò nel suo ambito specialisti in ciascuna di esse: il metrologo meccanico, elettrico, radiometrico, termico (a sua volta esperto solo in un ben definito campo di temperatura), chimico, del tempo, della frequenza, delle radiazioni ionizzanti, acustico, vibrazionale (ovviamente distinto dall'acustico), e via di seguito. La tendenza alla specializzazione di nicchia, accentuata dalla nascita dei Comitati Consultivi per settore, nell'ambito del Comitato Internazionale, si propagò negli istituti metrologici, nelle università e negli altri laboratori di ricerca. Negli istituti metrologici si raggiunse l'apice dell'iper-specializzazione: illustri scienziati iniziarono la loro vita scientifica su un ben definito tema (in Italia fu chiamato "filone") e là erano ancora alla loro morte.

<sup>132</sup> È significativo quanto scrisse Albert Einstein in un articolo divulgativo sulla teoria della relatività generale, scritto nella prima metà del XX secolo per la rivista *Scientific American*, ripreso da *Le Scienze* nel 1950: «sorge (nei confronti di una teoria come è quella della relatività generale) un sentimento quasi irresistibile di avversione in coloro che non hanno esperienza nell'analisi epistemologica e che non sono consapevoli della natura precaria del pensiero teorico in quei campi che sono loro familiari».

Con le decisioni del CIPM del 1946 e della CGPM del 1948 qualcosa cominciò a cambiare. Ma il dibattito epistemologico continuò a essere ignorato dalla grande maggioranza degli scienziati che si sentivano cultori della disciplina Misure; la rottura epistemologica è ancora attesa e forse si concretizzerà solo nel futuro. Ma questa è la storia dei prossimi capitoli.

*Posizione della CGPM nella prima metà del XX secolo*

Quale delle ideologie della prima metà del XX secolo influenzò maggiormente l'attività e le decisioni della CGPM e degli altri organismi della CM (CIPM e CC)? Probabilmente si può sostenere che si schierarono in generale per il liberismo e la democrazia e rifiutarono qualunque commistione con i totalitarismi nazionalsocialisti, comunisti e fascisti. Ma è anche inevitabile constatare che gli organismi della CM non furono esenti dagli influssi conseguenti alla penetrazione degli Stati e delle loro legislazioni in settori sempre più ampi della società e dell'economia. A volte la CGPM li appoggiò (o fu costretta a farlo dai decisori plenipotenziari), con scelte anche irrazionali, in nome del progresso e della tecnologia: un binomio che a lungo andare si è dimostrato pericoloso. Peraltro va ancora una volta ricordato che, allora come oggi, gli organismi della CM non possono essere considerati "democratici": la voce della cultura metrologica universitaria e industriale è tenuta ai margini del processo di costruzione delle decisioni negli organismi della CM.

La CGPM, paralizzata dai conflitti e dalla grande crisi economica mondiale, riuscì a concludere assai poco nei primi settant'anni della sua vita. Al contrario il CIPM, assai più libero da vincoli politici, lavorò con grande attenzione a preparare la rinascita del 1946. Pur senza rinnegare il principio del consenso, che ancora oggi resta il caposaldo della metrologia, preferì avviare scelte razionali e scientifiche, confinando il pragmatismo a situazioni molto particolari. Il CIPM cercò di trasformare la metrologia da disciplina di supporto al mercato a scienza. Riuscì solo in parte in questa impresa; fatto inevitabile, visto che i decisori rimasero, e rimangono, gli Stati con i loro ministri economici.

Fu un grave *handicap* per la metrologia non essere solo scienza? Questo è un tema difficile da affrontare, che tocca un punto dolente per tutti gli scienziati che si occupano di misure. Quale alternativa esisteva a quella di affiancare la scienza delle misure al mercato? Probabilmente solo quella di affiancarla alla guerra. E gli scienziati che nel 1943 fecero la scelta di affiancare scienza e guerra misero nella mani dell'umanità, guidata allora e oggi dall'intolleranza, dal nazionalismo e dall'integralismo, i mezzi per auto-distruggersi.

*La strategia del CIPM*

Il CIPM nella riunione del 1937, l'ultima prima della guerra mondiale, consolida le sue scelte strategiche. Abbiamo già visto come la strada di affidare ai Comitati Consultivi di settore la fase preparatoria delle decisioni, in merito all'ampliamento del sistema di unità e all'aggiornamento delle definizioni, si fosse dimostrata molto positiva per due settori: quello della elettricità e quello della fotometria. Ma il CIPM ha sul tappeto da tempo un altro tema importante: quello della definizione di una scala "pratica" della temperatura da affiancare, per scopi appunto pratici, alla scala termodinamica. Il problema era stato sollevato già nel 1913 dalla delegazione russa, la cui proposta di una conferenza internazionale sull'argomento aveva raccolto l'unanimità dei consensi. La conferenza avrebbe dovuto tenersi nel novembre del 1914, ma fu annullata a causa dello scoppio della guerra. La VII CGPM del 1927 aveva sollecitato una conferenza internazionale sull'argomento e intanto aveva accolto uno schema iniziale di scala internazionale di temperatura, proposto dal NBS, con la riserva di modificarlo sulla base dei risultati presentati da altri istituti metrologici. L'VIII CGPM del 1933 aveva nuovamente sollecitato con forza l'organizzazione della conferenza internazionale di termometria, ma senza costrutto. Ora, durante la riunione del CIPM, torna alla carica Wilhelmus Hendrikus Keesom (1876-1956), presidente dell'Istituto Nazionale del Freddo di Leida, con una lettera del gennaio del 1937.

Fino a questo momento il CIPM è parso tergiversare, freddo di fronte al tema della scala pratica di temperatura. Il termine "pratica" probabilmente non piace agli scienziati del CIPM. Ma questa volta l'URSS non solo ripropone la conferenza ma chiede che da essa nasca un nuovo Comitato Consultivo, di termometria e di calorimetria (CCT), incaricato di mettere a punto una proposta per la nuova scala. La conferenza verrà tenuta a New York nel novembre del 1939.

Il Presidente Volterra comprende che non è più possibile rinviare una decisione: propone pertanto di creare seduta stante il nuovo Comitato, rimandando alla riunione del CIPM e della CGPM del 1939 l'approvazione del regolamento, con composizione e scopi. La proposta è accolta all'unanimità: il CCT è dunque costituito con rappresentanti dei 6 soliti grandi laboratori metrologici (Germania, USA, Regno Unito, URSS, Francia e Giappone), più un delegato del Laboratorio di Leida (Keesom, a titolo di esperto personale, non di rappresentante di un laboratorio membro del CCT) e un paio di altri specialisti da defi-

nire. Con grande efficienza il CCT si metterà subito al lavoro e nel 1939, insieme alle proposte del CCE e del CCP, sarà pronto con una sua proposta per una nuova scala di temperatura. Ma nel 1939 le riunioni programmate di CIPM e CGPM non ci saranno e tutto verrà rimandato a dopo la guerra.

La decisione, con la costituzione del terzo Comitato Consultivo, di dare sistematicamente spazio agli istituti metrologici nel processo propositivo e decisionale è di enorme importanza per il futuro della metrologia in senso lato. Le conseguenze della decisione, che forse al momento non erano chiare ma diventeranno evidenti negli anni successivi, sono molteplici. Anzitutto si sposta il processo decisionale e la ricerca del consenso ancora più a valle della Conferenza Generale, a livello dei Comitati Consultivi. A differenza del CIPM, essi sono formati da specialisti di settore, con il vantaggio di offrire al consenso automaticamente una forte autorevolezza scientifica: ma da ciò derivano anche la perdita di una visione generale dei problemi e la carenza di una strategia unificata per lo sviluppo della metrologia. Per ritrovare unità, almeno negli aspetti formali, il CIPM nel 1954 farà una scelta che avrebbe potuto essere di grande rilevanza: fonderà la Commissione per il Sistema di Unità; nella pratica si tratterà di una Commissione, poi Comitato Consultivo<sup>133</sup>, con poco potere e scarsa capacità di formulare strategie ad ampio respiro.

Spostare il momento iniziale decisionale dal CIPM ai CC significa, di fatto, dare massimo rilievo all'opera e alle decisioni dei "grandi" laboratori metrologici. È un vantaggio per tali laboratori, anche sul piano economico, perché consentirà loro di giustificare in modo concreto i costi rilevanti delle loro infrastrutture e della loro ricerca. Essi in futuro verranno identificati con il nome di Istituti Metrologici Nazionali (IMN). Nella pratica però taglia fuori dal percorso decisionale la maggioranza della ricerca e della cultura scientifica internazionale: laboratori come quello di Leida e università. L'effetto si rivelerà drammatico: i tempi per passare dalle delibere del CIPM e della CGPM alla pratica delle attività produttive, commerciali e formative si allungheranno a dismisura. Inoltre, nel quadro storico entro il quale tale scelta viene effettuata, gli IMN vengono messi in concorrenza l'uno con l'altro, sovente con moltiplicazione di apparecchiature d'alto costo, ciascuna scarsamente utilizzata. Si scatena la corsa alla fondazione di nuovi IMN da parte di Paesi emergenti alla metrologia, come unica possibilità concreta di entrare a pieno diritto nel processo decisionale. Questi nuovi IMN saranno costituiti secondo il modello di quelli esistenti, trascurando spesso le esigenze metrologiche della nazione che li fonda e li finan-

<sup>133</sup> Nel 1964 il CIPM sostituirà alla Commissione il Comitato Consultivo delle Unità, CCU.

zia, generando così non di rado solo laboratori di prestigio dotati di scarsa capacità di incidere per la soluzione di problemi nazionali.

Un'altra conseguenza della costituzione dei Comitati Consultivi fu l'indebolimento dei percorsi metrologici alternativi, indipendenti dalla CGPM. Infatti per ciascun settore erano all'epoca ben pochi gli scienziati specialisti disponibili al mondo; essi si ritrovavano in ogni organismo internazionale e nei grandi congressi, si scambiavano informazioni, generavano progetti e proposte, erano l'indispensabile supporto a ogni decisione sulle unità di misura. L'averli coinvolti sistematicamente nel processo decisionale della CM rafforzò gli organismi della Convenzione, perché offriva agli specialisti la possibilità di vedere entrare le loro proposte, una volta approvate dalla CGPM, nelle leggi degli Stati. E indebolì gli organismi alternativi alla CGPM che non offrivano alle proposte scientifiche questa conclusione, importante di fronte all'opinione pubblica e al consenso sui finanziamenti alla ricerca. Il risultato di queste scelte fu che, per la prima volta nella storia della metrologia, con la costituzione del CCT fu promossa un'innovazione autonoma nell'ambito del CIPM e della CGPM: la scala internazionale pratica della temperatura. Infatti le altre due significative innovazioni, quelle in campo elettrico e in campo fotometrico, entrarono nel percorso decisionale della CM perché imposte dall'esterno, da associazioni indipendenti che stentaronò a vedere riconosciuti dalla CGPM i loro accurati lavori di ricerca e di mediazione.

In conclusione, le strategie del CIPM che abbiamo visto definirsi durante i primi settant'anni di vita della Convenzione del Metro contengono in germe tutti gli elementi che porteranno alla crisi degli ultimi trent'anni del XX secolo, con la fondazione degli organismi regionali di coordinamento metrologico in concorrenza con l'azione del CIPM e della CGPM.

### *La situazione del BIPM alla vigilia della II guerra mondiale*

Nella riunione del CIPM del 1937 si forniscono informazioni sul bilancio annuale del BIPM. La dotazione annuale è di centosettantaquattromila franchi oro; il 54% del totale è destinato alle spese per il personale, il 28% alle spese di gestione, il 7,5% è per le spese impreviste e il 9,2% per il fondo di riserva. Resta un magro 8,6% per gli acquisti di strumentazione di ricerca, destinato quasi tutto al ponte di Smith della Cambridge Instruments, controllato e tarato dal NPL, usato per le misure sui termometri a resistenza di platino per gli studi sulla scala pratica di temperatura. È un bilancio quanto mai contenuto, che però, essendo agganciato al franco oro, non soffre dell'inflazione. Il bilancio

resterà invariato fino al 1948, ma di soldi ne arriveranno ben pochi, a causa della guerra in corso. Fortunatamente il governo francese sopperirà anticipando finanziamenti in nome dei membri della CM impossibilitati, per la guerra, a pagare le loro quote, consentendo la sopravvivenza del BIPM.

Non esiste dunque nel BIPM lo spazio per avviare qualsivoglia studio sui problemi della metrologia applicata. L'iniziativa viene pertanto lasciata al Ministero del Commercio francese, che convoca per il mese di luglio del 1939 una Conferenza di Metrologia Pratica, con l'obiettivo di arrivare a costituire un Comitato Consultivo di Metrologia Pratica. Non succederà nulla di quanto previsto. Il BIPM però continua a tenere le fila dei Comitati Consultivi fino al 1939, quando si incontrano, tra giugno e luglio, i tre Comitati Consultivi: per l'elettricità (CEE), per la fotometria (CCP) e per la termometria e la calorimetria (CCI).

Il CCE<sup>134</sup> raccomanda i valori dei rapporti tra ohm, ampere, volt internazionale medio e assoluto:  $1,005 \Omega_I/\Omega_A$ ;  $0,999\ 9 A_I/A_A$ ;  $1000\ 4 V_I/V_A$ . Propone l'abbandono definitivo delle unità internazionali e la loro sostituzione con le unità assolute dal 1 gennaio 1940 (data che non verrà rispettata: la decisione andrà in vigore nel 1948). Approva le definizioni (che precisa essere teoriche<sup>135</sup> e scritte in linguaggio semplice, idoneo per aiutare alla redazione di leggi) delle unità meccaniche di forza (newton), di energia (joule) e di potenza (watt); e delle unità elettriche di corrente (ampere), di tensione (volt) di resistenza (ohm), di carica elettrica (coulomb), di capacità elettrica (farad), di induttanza (henry), di flusso magnetico (weber).

Il CCP<sup>136</sup> ha ora a disposizione i risultati delle misure di tutti i laboratori, non disponibili nel 1937, anno nel quale erano stati concordati i principi da seguire per la definizione dell'unità fondamentale fotometrica: campione primario d'intensità luminosa derivato dalla brillantezza di un radiatore integrale alla temperatura di solidificazione del platino; valori delle grandezze fotometriche di sorgenti luminose aventi un colore diverso da quello del campione primario

<sup>134</sup> Il CCE è all'epoca costituito dai rappresentanti dei sei grandi laboratori metrologici (PTR (Germania), NBS (USA), NPL (Regno Unito), LCE (Francia), LE (Giappone), IM (URSS)) e da un esperto, il prof. L. Lombardi, direttore del Laboratorio di Elettrotecnica dell'Università di Roma.

<sup>135</sup> Le definizioni sono teoriche nel senso che fissano il valore delle unità e non il metodo per la loro realizzazione.

<sup>136</sup> Il CCP è costituito, oltre che dagli esperti in rappresentanza dei sei laboratori già citati per il CCE, da quattro esperti a titolo personale, tra i quali il Prof. V. Bordoni di Roma e il Prof. C. Fabry, presidente della CIE.

determinati per mezzo di un procedimento che tenga conto della curva dei fattori di visibilità dell'occhio umano medio, proposta dalla CIE e adottata dal CIPM. Concorda dunque di attribuire alla brillantezza del corpo nero alla temperatura di solidificazione del platino il valore di 60 candele internazionali al centimetro quadro<sup>137</sup>.

Il CCT, che era stato costituito solo due anni prima, ha il compito di proporre l'adozione nel sistema della Scala Internazionale di Temperatura, già definita e in uso dal 1927 e ridiscussa nel 1933. La riunione si svolge in luglio ed è previsto a novembre un Simposio a New York dal titolo *Temperature, its measurement and control in science and industry*<sup>138</sup>. Non stupisce pertanto che il NBS, relatore della proposta, si limiti a aggiustamenti quasi solo editoriali della scala già in uso, in attesa di disporre delle novità che saranno presentate al simposio di novembre. Il CCT approva dunque un documento intitolato *Scala Internazionale di Temperatura del 1939 (SIT 1939)* che però verrà emendato dopo la guerra, tenendo conto delle novità emerse durante il Simposio del 1939, e approvato solo nel 1948 con titolo *SIT 1948*.

È interessante analizzare l'elenco dei problemi in sospeso che il CCT sottolinea nella sua relazione del 1939 al CIPM:

- la definizione dell'intervallo fondamentale della scala: come armonizzarlo con l'intervallo della scala termodinamica?;
- la sostituzione, tra i punti primari della scala, del punto di fusione del ghiaccio con il punto triplo dell'acqua (proposta del PTR). Lo stato dell'arte, dalle misure di 5 laboratori, attribuisce al punto di fusione del ghiaccio, misurato sulla scala termodinamica, valori compresi tra 273,144 K e 273,17 K; il CCT decide di tenere validi tutti i risultati sperimentali disponibili e quindi di attribuire al punto di fusione del ghiaccio il valore di 273,15 K, con incertezza di  $\pm 0,02$  K;
- la sostituzione delle termocoppie platino-iridio nell'intervallo di temperatura da 630,5 °C (fusione dell'antimonio) a 1063 °C (fusione dell'oro) con il termometro a resistenza di platino. Anche questa proposta è del

<sup>137</sup> I risultati delle misure dei laboratori avrebbero portato a un valore intorno a 59; all'unanimità i componenti del CCP decidono per il valore di 60.

<sup>138</sup> Gli atti del Simposio, organizzato dall'*American Institute of Physics* con la collaborazione del *National Bureau of Standards* (USA) e del *National Research Council* (Canada), sono pubblicati da Reinhold Publishing Corporation, New York 1941. La collezione degli atti di questi simposi internazionali costituisce il riferimento principale per lo studio dei progressi internazionali delle misure di temperatura; la collezione è consultabile presso l'INRIM.

PTR ma i risultati sperimentali sull'uso del termometro a resistenza di platino ad alta temperatura porteranno a bocciare la sostituzione. Il problema è tecnicamente molto rilevante, in quanto in tale intervallo di temperatura si collocano le temperature (di tempera, di solubilizzazione, di ricottura, di rinvenimento, ecc.) alle quali si producono tutti gli acciai; le caratteristiche dei materiali ottenuti sono fortemente dipendenti dalle temperature alle quali avvengono i processi di produzione e quindi richiedono misure di temperatura relativamente precise e frequenti. La pratica nelle acciaierie prevede l'uso di termocoppie a immersione: il segnale utile per la misura della temperatura viene registrato quando la termocoppia perde la continuità elettrica, distruggendosi; quindi una termocoppia può essere usata una sola volta, moltiplicando così i costi. Molteplici sono state le ricerche condotte per individuare metodi alternativi di misura della temperatura negli acciai in fusione: scarsi i risultati ottenuti, sia perché le scorie in superficie impediscono l'uso di sistemi ottici sia perché l'ambiente altamente corrosivo danneggia comunque il termometro usato;

- la revisione del valore della costante  $C_2$  nella formula di Planck usata per le misure di temperatura sopra  $1063\text{ }^\circ\text{C}$  con pirometro ottico. Il valore attribuito a tale costante è al momento  $1,432\text{ cm}\cdot\text{K}$ ; probabilmente meglio sarebbe  $1,436\text{ cm}\cdot\text{K}$ , ma la differenza tra i due valori è ininfluente sulla precisione nelle misure di temperatura al di sopra di  $1063\text{ }^\circ\text{C}$ .

Gli altri problemi in discussione riguardano la scala termodinamica, ancora collegata alla scala centigrada, e l'unità di calore. Su quest'ultimo punto il CCT arriva a conclusioni importanti. Sancisce (in accordo con la IUPAP) che: l'unità di quantità di calore è la quantità di calore equivalente all'unità di energia designata con il nome di joule, uguale a  $10^7$  ergs; la caloria è equivalente a  $3600/860$  joules o a  $1/860$  wattora; i termini precedentemente utilizzati di "caloria-kilogrammo" e "grande caloria" sono rimpiazzati dal termine "kilocaloria", che è pertanto uguale a  $1/860$  kilowattora<sup>139</sup>. Aggiunge tre interessanti commenti: il kilojoule è molto vicino all'unità di calore britannica:  $1\text{ BTC}=1,055$  kilojoule; la caloria è praticamente uguale alla caloria detta "a  $15\text{ }^\circ\text{C}$ "; allo stato attuale della tecnica il modo più preciso di misurare la quantità di calore è di operare per confronto con le quantità equivalenti di energia elettrica.

<sup>139</sup> I plurali delle unità sono nel testo originale. Ancora non erano state definite le regole di scrittura.

Le decisioni e i commenti fanno finalmente chiarezza su un tema discusso da decenni e causa di molte ambiguità. Ma il CC probabilmente non si rende conto che l'eccesso di dettagli e commenti può favorire gravi abusi commerciali; infatti la "piccola" differenza tra kilojoule e BTC è pari al 5,5% il che, quando si parla di misure di energia e si confondono le due unità perché "molto vicine", può condurre a clamorose truffe. I superspecialisti del CCT sottovalutano questi aspetti commerciali. Così non fa la CGPM del 1948, che riassume tutto il discorso del CCT sulla caloria e il joule con una delibera lapidaria: «L'unità di quantità di calore è il joule». Aggiunge anche una raccomandazione al CIPM: predisponga, con il supporto del CCT, tavole di conversione quanto più possibile precise. La frittata è così evitata!

L'ampio spazio dedicato al lavoro svolto dai tre CC nel 1939 è giustificato dalla rapidità delle trasformazioni che esso consentirà nell'immediato dopoguerra. Senza il lavoro preparatorio dei CC, l'ampliamento del sistema di unità e il cambiamento di paradigma che si verificheranno tra il 1945 e il 1948 sarebbe stato impossibile. È però doveroso sottolineare come la guerra impedì l'allargamento all'intera comunità scientifica mondiale della discussione sulle nuove unità e sul nuovo paradigma. Le decisioni, ormai di carattere prevalentemente scientifico, furono prese da un ridottissimo numero di persone. Solo in campo elettrico si era manifestata la possibilità di allargare la discussione alla totalità degli scienziati e dei tecnici coinvolti nel settore, grazie ai Congressi Internazionali; ma da tali congressi erano emerse indicazioni precise sulla necessità di un sistema a quattro unità, sulla razionalizzazione del sistema secondo la proposta di Giorgi (peraltro ancora largamente contestata), sull'abbandono delle unità internazionali in favore di quelle assolute: nulla era stato concordato circa l'unità elettrica fondamentale da inserire nel sistema. Il percorso indipendente degli elettricisti aveva dibattuto il problema senza giungere al consenso. Quest'ultimo fu imposto con la scelta dell'ampere, scelta che suscitò reazioni violente e, se vogliamo, giustificate. In particolare, malgrado il CIPM si preoccupasse di affermare sempre che le definizioni delle unità di misura avevano lo scopo di fissare il loro valore e non quello di indicare metodologie per la loro messa in pratica, ossia per la realizzazione di campioni, la definizione dell'ampere, basata su un esperimento teorico, troppo facilmente suggeriva il modo di derivare l'ampere dalle unità meccaniche: quel modo, come vedremo, era riservato a laboratori con attrezzature molto costose e difficili da impiegare. Giustificate dunque saranno le reazioni negative di chi si sentirà posto di

SERGIO SARTORI

fatto nell'impossibilità di accedere al campione elettrico primario, realizzando la sua unità fondamentale.

Il cambio di paradigma significò l'affermazione di posizioni di privilegio nella metrologia, riservate agli Istituti Metrologici Nazionali.

### 3. Maturità, trionfi e lento declino: dal 1945 alla nascita degli organismi metrologici regionali

---

#### 3.1. Il CIPM nel 1945 e 1946 disegna il nuovo sistema di unità

Il CIPM si riunisce già il 13 e il 15 novembre del 1945. Sono presenti solo quattro dei 16 membri: J.E. Sears, sovrintendente anziano della Sezione di Metrologia dell'NPL (UK) che viene nominato presidente della sessione; M. Dehalu, amministratore e ispettore onorario dell'Università di Liegi; A. Pérard, direttore del BIPM; M. Roš, presidente della direzione del laboratorio federale svizzero di prova dei materiali e istituto di ricerca, che viene nominato segretario della sessione. Presenti anche tre delegati dalle ambasciate di Francia, USA, Svezia in sostituzione di membri malati o morti. È atteso (ma non verrà) M. Chatelain del Politecnico di Leningrado. Sono malati C. Fabry (USA) e E.S. Johansen (Danimarca). Non è stato possibile convocare, per l'evidente effetto della guerra appena conclusa, W. Kösters del PTR (Germania), H. Nagaoka dell'Istituto di ricerche fisiche e chimiche (Giappone) e Z. Rauszer dell'Ufficio Nazionale di Misure (Polonia). Non hanno dato notizie C. Stănescu (Romania) e G. Kagatchin (Jugoslavia). Gli scarni verbali<sup>140</sup> delle due riunioni del 1945 e delle due riunioni dell'ottobre del 1946 non riescono a nascondere il clima drammatico, ma contemporaneamente di entusiasmo per la rinascita programmata dai protagonisti.

L'Europa, il Giappone e molti Paesi del vicino e dell'estremo oriente escono distrutti o gravemente colpiti nelle infrastrutture e nei fondamenti della convivenza. È stata una guerra di ideologie e per l'annientamento del nemico. Ha lasciato profonde lacerazioni. Ricostruire le infrastrutture è ben più semplice del complesso processo di riallacciare i fili del tessuto civile. Alcuni degli strascichi delle lacerazioni di allora si fanno sentire ancora oggi. Sensi di colpa, rigurgiti di razzismo, problemi geopolitici irrisolti, conflitti etnici, nuovi imperialismi, crisi dopo la decolonizzazione. Problemi di ieri ma anche problemi di oggi, che si acuiscono quando si sommano ai nuovi problemi dell'ambiente, delle risorse primarie, del prevalere della finanza sulla politica.

Anche gli organismi della Convenzione del Metro escono dalla guerra profondamente provati. Bisogna ricostruire tutto: il CIPM<sup>141</sup>, i suoi organismi

<sup>140</sup> CIPM, *Procès-Verbaux des Séances*, Deuxième Série, Tome XX, 1945-1946, Gauthier-Villars, 1946.

<sup>141</sup> Nella sessione del 1946 si commemorano i membri morti: Vito Volterra, Arthur Edwin Kennelly, Charles Fabry, Blas Cabrera, Charles Edouard Guillaume, Pieter Zeeman.

(presidenza e segreteria), i Comitati Consultivi. Bisogna esaminare nei dettagli l'attività del BIPM e i suoi bilanci, per il periodo compreso tra l'1 settembre del 1939 e il 31 ottobre del 1945. È necessario rilanciare i finanziamenti al BIPM, approvare i certificati emessi, valutare la ricerca svolta e pianificare quella futura. È urgente esaminare il bilancio di previsione del BIPM per il 1946, risolvere problemi di carattere fiscale, confermare le proposte di promozioni e nuove assunzioni formulate dal direttore del BIPM. È questa impresa che si accingono ad avviare i quattro membri del CIPM che si ritrovano a Parigi.

Si fanno i nomi di nuovi membri del CIPM, tra i quali l'italiano Gino Cassinis del Politecnico di Milano, E.C. Crittenders del NBS (USA), nomi olandesi e spagnoli. Si prendono in esame le proposte formulate dai Comitati Consultivi nel 1939, anno nel quale non fu possibile tenere la prevista riunione del CIPM e della CGPM, in particolare le nuove definizioni della candela e dell'ampere. Si propone, come data di entrata in vigore delle due nuove definizioni, l'1 gennaio 1947.

I presenti convengono di trovarsi nell'impossibilità di assumere delibere. Ci si limiterà pertanto all'esame dei diversi problemi e alla votazione di mozioni che potranno essere trasformate in delibere durante le sessioni del 1946 che, si spera, saranno a ranghi del CIPM completi.

Infatti nelle tre riunioni del 1946 (22, 26 e 29 ottobre) sono presenti 11 membri. Nuovi eletti, tutti presenti, sono M. de Broglie (direttore dell'Accademia di Francia), G. Cassinis, W.J. de Hass (direttore del laboratorio olandese Kamerling-Onnes), E.C. Crittenders. Presidente è eletto J.E. Sears, segretario M. Dehalu, entrambi con 10 voti su 11. E si cominciano i lavori che segnano la svolta della metrologia internazionale. L'UNESCO aiuta con un intervento straordinario a favore del BIPM.

Nella lunga sospensione dal 1933 della CGPM, i Comitati Consultivi e il CIPM hanno continuato a lavorare e a preparare la rinascita della Convenzione del Metro. L'ultima riunione del CIPM risale al 1937. Agli atti è aggiunta la fitta corrispondenza tra il direttore e i Comitati Consultivi (CC), tra membri del CIPM e dei CC, tra gli istituti metrologici, in particolare a proposito dei cambiamenti delle unità. Tre sono in discussione, secondo le proposte formulate dai tre CC nella loro ultima riunione nel 1939: di intensità di corrente elettrica, di intensità luminosa e di temperatura. Nel CC dell'Elettricità nel 1939 non era stato raggiunto un accordo sui valori dei rapporti tra le unità elettriche interna-

zionali e le unità assolute, in particolare per l'ampere, dove si riscontrano le più forti differenze tra i risultati sperimentali ottenuti dagli istituti metrologici.

Disaccordo c'è anche sulle proposte formulate nel 1939 dal CC della Termometria: scala termodinamica delle temperature e scala internazionale pratica delle temperature collegate dallo zero comune, assegnando

al punto di fusione del ghiaccio nella scala Kelvin la temperatura di 273,15 K, con un'incertezza di  $\pm 0,02$  gradi.

È sul tavolo una proposta di W. Kösters di utilizzare come riferimento il valore di 273,17 K assegnato alla temperatura del punto triplo dell'acqua<sup>142</sup>. Sono necessarie ulteriori misure e ogni decisione viene rimandata in attesa di risultati sui quali ci sia il generale consenso. È rimandata anche la decisione sull'abolizione della caloria e l'uso del joule in suo luogo.

Le decisioni vengono invece prese per le unità elettriche e per l'unità fotometrica. Dell'innovazione nella fotometria parleremo al momento della ratifica con delibera della CGPM (1948). Qui invece approfondiremo le decisioni concernenti le unità elettriche, e in particolare la nuova definizione dell'ampere, in quanto le delibere del CIPM in merito non verranno riprese dalla CGPM del 1948.

La decisione della CGPM, di lasciare al CIPM le delibere definitive sulla definizione dell'ampere e delle altre unità elettriche e magnetiche e sui rapporti tra unità elettriche assolute e internazionali, deriva da due ragioni. Una ragione è di natura politica: non si vogliono portare in CGPM delibere in merito ad argomenti sui quali il consenso non è ancora consolidato; infatti vedremo quanto vivaci saranno le discussioni che faranno seguito alla nuova definizione dell'ampere e delle altre unità elettriche. Per questo motivo la CGPM ha attribuito nel 1933 al CIPM pieni poteri per le decisioni in merito alle unità elettriche. La seconda ragione è di natura strategica. Il CIPM, accogliendo in pieno le decisioni della conferenza di Chicago del 1908, si schiera in accordo con il percorso indipendente degli elettricisti, con le decisioni dei sei grandi Istituti Metrologici Nazionali (USA, URSS, Francia, Regno Unito, Germania, Giappone) e con il voto favorevole anche dell'Italia. Fissa all'1 gennaio 1948 l'entrata in vi-

---

<sup>142</sup> Il punto triplo dell'acqua si realizza in una cella di vetro sigillata dalla quale sia stata estratta l'aria, in modo che nella cella sia presente solo acqua e vapore d'acqua. Se si fa solidificare una parte dell'acqua si ottiene nella cella la contemporanea presenza delle tre fasi dell'acqua, solida, liquida e gassosa. La temperatura in questo stato, detto punto triplo, è estremamente stabile e riproducibile entro 0,00005 K.

gore del rapporto 1,000 49 tra ohm internazionale e ohm assoluto, del rapporto 1,000 34 tra volt internazionale e volt assoluto, il definitivo abbandono delle unità internazionali, le definizioni delle unità elettriche e magnetiche ampere, volt, ohm, coulomb, farad, henry, weber. Definisce le unità meccaniche indispensabili per le nuove definizioni delle unità elettriche e magnetiche: unità di forza, per la quale è proposto il nome newton; joule e watt. Le definizioni vengono formulate in modo che possano essere inserite con le medesime parole nelle legislazioni dei singoli Stati. Il sistema così definito viene chiamato MKS.

Il CIPM precisa inoltre che le 10 definizioni di unità elettriche, magnetiche e meccaniche hanno lo scopo di fissare la “taglia” delle unità e non quello di definire metodi per la loro realizzazione: una precisazione che sarà spesso richiamata per giustificare scelte contestate da ambienti estranei al CIPM. Si noti che, con la precisazione del CIPM, per le dieci unità definite, per l’unità di temperatura e per altre unità del sistema si apre un doppio binario per la realizzazione di campioni da utilizzare per la conservazione delle unità e per la loro disseminazione: *quello che discende dalla “messa in pratica” della definizione*, in generale complesso e costoso; *quello pratico*, legato a campioni materiali, a scale che si chiamano “pratiche”, con i quali è più facile il trasporto da un laboratorio all’altro e quindi l’esecuzione dei confronti internazionali. Questo doppio binario ha scarse conseguenze nel caso delle unità elettriche e magnetiche: il binario pratico prevale incontrastato rispetto a quello di “messa in pratica” delle definizioni. Differente è il caso della temperatura: le due scale, termodinamica e internazionale pratica, tendono nel tempo, con l’affinarsi delle capacità di misura, a divergere, costringendo CIPM e CGPM a periodiche correzioni e interventi.

In questa ottica del doppio binario, il CIPM precisa che la definizione dell’ampere serve sostanzialmente a fissare il valore della costante da usare nella formula da utilizzare per la realizzazione dell’unità, ossia il valore della permeabilità magnetica del vuoto. Definisce, oltre alle unità, i campioni materiali, i campioni di riferimento internazionali, i campioni di riferimento nazionali e i legami tra le quattro realizzazione delle unità. Qui si chiude la storica riunione che sancisce la svolta del sistema di unità. Si noti che non si parla di razionalizzazione (argomento troppo difficile per essere portato davanti ai decisori politici) e non si parla di sistema MKSA.

### 3.2. La contestata definizione dell'ampere: cambia il paradigma

La definizione dell'ampere costituisce una svolta epocale nel paradigma della metrologia. Per la prima volta, dopo oltre settant'anni dalla firma della Convenzione del Metro, si abbandonano i prototipi, almeno quelli delle unità elettriche, e si ancora il sistema a una quarta unità fondamentale, di carattere naturale secondo il principio espresso dagli illuministi all'epoca della Rivoluzione francese.

La definizione dell'ampere viene così formulata dal CIPM nel 1946:

Unità di corrente elettrica (nome: ampere - simbolo: A). L'ampere è quella corrente elettrica costante che, se mantenuta in due conduttori paralleli, di lunghezza infinita, di sezione circolare trascurabile e posti nel vuoto alla distanza di un metro l'uno dall'altro, produrrebbe tra i due conduttori la forza di  $2 \cdot 10^{-7}$  newton per ogni metro di lunghezza.<sup>143</sup>

In pratica, la definizione sancisce il valore di  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m per  $\mu_0$ , la permeabilità magnetica del vuoto; andava però formulata iniziando con la faticosa frase «L'ampere è quella corrente elettrica che...», chiara per essere presentata come definizione della quarta unità fondamentale del sistema e per essere inserita nelle leggi degli Stati. La ragione sostanziale di questa definizione, preceduta, come abbiamo già ricordato, dalle indispensabili definizioni meccaniche del newton, del joule e del watt, è quella di annullare per sempre le differenze tra newton, joule e watt meccanici e gli stessi ottenuti per via puramente elettrica. Definire l'ampere, o qualunque altra unità elettrica, in modo indipendente dalle unità meccaniche avrebbe causato il permanere di differenze tra le unità derivate nei due settori e di conseguenza la necessità di correzioni continue alle de-

<sup>143</sup> La successiva IX CGPM del 1948 dà per acquisita la definizione dell'ampere proposta dal CIPM e procede oltre. Con la risoluzione 6 accoglie la richiesta dell'Unione Internazionale di Fisica e del Governo francese di adoperarsi per l'adozione di un sistema pratico internazionale di unità, che si basi sul sistema MKS con l'aggiunta di un'unità elettrica del sistema pratico assoluto. Affida pertanto al CIPM un'inchiesta ufficiale per raccogliere il parere dei migliori scienziati, tecnici e pedagoghi di tutti i Paesi e di predisporre una proposta di delibera alla prossima CGPM per l'adozione di un sistema pratico di unità, sottoscrivibile da tutti i firmatari della Convenzione del Metro. La CGPM si preoccupa anche di precisare che tale percorso non interferirà con l'uso da parte dei fisici del sistema CGS. La X CGPM (1954) adotterà, con la risoluzione 6, il sistema pratico di unità con sei unità "di base": metro, kilogrammo, secondo, ampere, kelvin (nome sancito dalla XIII CGPM, 1967/1968, con la risoluzione 3, in luogo di *grado Kelvin*) e candela.

finizioni (un po' come è accaduto nel caso della scala internazionale di temperatura rapportata alla scala termodinamica).

La definizione è non autocontenuta: richiede cioè la preventiva definizione di ben tre unità, metro, kilogrammo e secondo. Dunque possono esistere infiniti al cubo ampere, uno per ciascuna delle infinite possibili definizioni rispettivamente del metro, del kilogrammo e del secondo. La definizione fissa, per la realizzazione dell'ampere, condizioni necessarie ma non sufficienti: infatti vanno anche definite le condizioni, al momento necessarie e sufficienti, per metro, kilogrammo e secondo. È la prima volta, ma non sarà l'ultima, che nel sistema di unità entra un'unità definita con le citate limitazioni; i sostenitori del sistema dei prototipi, esente da tali limitazioni, accusano i sostenitori della definizione dell'ampere di aver introdotto nel sistema un principio ambiguo e una degenerazione dell'indipendenza reciproca delle definizioni delle unità di base.

È importante analizzare le ragioni che condussero il CIPM a compiere questa scelta. Le unità delle grandezze forza, potenza e energia, grandezze tra loro strettamente collegate e di grande importanza pratica per gli scambi commerciali<sup>144</sup>, possono essere realizzate, come già sottolineato, in maniera del tutto indipendente per due strade: quella puramente meccanica, ricorrendo alle unità di lunghezza, massa e tempo, e quella puramente elettrica. Sperimentalmente si era constatato che le due realizzazioni differivano sistematicamente circa dello 0,2%. Con la definizione dell'ampere decisa dal CIPM, facendo discendere tale unità, e quindi anche tutte le altre unità di grandezze elettriche, dalle unità meccaniche si forzava necessariamente all'uguaglianza le due realizzazioni, meccanica ed elettrica, del newton (forza), del watt (potenza) e del kilowattora (energia).

Naturalmente questa decisione comportava la "schiavizzazione" delle unità elettriche a quelle meccaniche. Ciò che più preoccupava gli elettricisti era la dipendenza dal kilogrammo, prototipo del quale ben si sapeva, grazie ai risultati dei periodici confronti con i suoi testimoni, l'imprecisione dovuta sia a derive nel tempo sia ai procedimenti di pulizia della superficie. Potete immaginare l'infelicità degli elettricisti nel vedere le "loro" unità rese schiave del detersivo impiegato per pulire il kilogrammo prototipo. Era da attendersi una reazione fortemente negativa a tale scelta. E la reazione fu immediata.

---

<sup>144</sup> Si ricordi: il peso è una forza; la potenza descrive la principale caratteristica di qualsiasi motore; l'energia è quella consumata per trasformarla in altra energia e per gli usi finali.

*La reazione italiana alla definizione dell'ampere*

Nel 1950 l'editore Tamburini di Milano pubblica il testo (pronto nella forma definitiva già dal 1945) in due volumi *Misure elettriche* di Angelo Barbagelata (1875-1961), con la collaborazione di Piero Regoliosi. Nella prefazione al libro il Barbagelata ricorda

la dolorosa storia delle unità elettriche, mirabilmente riassunta e illustrata in un articolo del Prof. Ercole Bottani (1897-1978)<sup>145</sup>, pubblicato su *L'Elettrotecnica* del dicembre 1948 (p. 462); articolo occasionato dal Decreto 21 marzo 1948 del Governo Italiano col quale venivano sanzionate in Italia le deliberazioni prese dal Comitato Internazionale dei Pesi e delle Misure.

Il Barbagelata prosegue affermando di avere preso in considerazione tali deliberazioni solo in due paragrafi del II volume, nei quali esprime «la speranza che la deliberazione, sospesa dalla guerra, venga rinviata *sine die*». «A cose fatte» prosegue il Barbagelata,

non posso che associarmi al parere espresso dal Prof. Bottani nell'articolo citato, riaffermando la mia convinzione che le deliberazioni del CIPM saranno forse razionali, ma sono state certamente poco pratiche ed inopportune.

Vale la pena di sottolineare il buon lavoro svolto dagli italiani nel CIPM e nei CC; essi diffondono in tutte le sedi le decisioni del CIPM. Con straordinaria, oggi perduta, efficienza, il Governo italiano accoglie con decreto le risoluzioni appena tre mesi dopo la data fissata dal CIPM per la loro entrata in vigore. È istruttivo ricordare, dall'articolo di Bottani, le ragioni dell'opposizione degli universitari elettrici all'ampere come unità fondamentale. Il CIPM fa la scelta dell'ampere e della razionalizzazione per eliminare la differenza di 0,002 W esistente tra il valore del watt desunto dalle unità meccaniche (metro, kilogrammo massa, secondo) e quello derivato dalle unità elettriche (volt e ampere). Secondo Bottani sarebbe bastato portare da 1,0183 a 1,0184 volt il valore convenzionale della forza elettromotrice della pila Weston, lasciando tutto il resto invariato. La scelta del CIPM di elevare a unità fondamentale l'ampere modifica il valore di tutte le altre unità elettriche e, cosa veramente grave secondo il Bottani,

---

<sup>145</sup> Titolare della cattedra di misure elettriche (1936) e docente di elettrotecnica al Politecnico di Milano, alla fine della II guerra mondiale fu commissario per l'energia elettrica dell'Alta Italia. Nel 1955, assieme al rettore del Politecnico Gino Cassinis, fondò il Centro di calcoli numerici, primo centro di calcolo elettronico in Europa. Negli anni '60 fu fondatore della Metropolitana Milanese.

l'ohm, la sola unità di cui sia relativamente facile procurarsi dei campioni concreti: campioni che, in cinquanta anni di tranquillità "unitaria", si erano venuti perfezionando e stabilizzando nel modo più soddisfacente. Bottani riassume mirabilmente la posizione dei sostenitori dei prototipi, con tutto il peso delle considerazioni di carattere pratico.

Già nel 1957 Ezio Volta, nella raccolta, curata da Gino Bonelli, di *Lezioni di misure elettriche* (Pubblicazioni Scientifiche di Ingegneria, Genova 1957) apre il suo libro con l'analisi delle unità di misura e inquadra l'ampere e la sua definizione come scelta razionale e inevitabile, pur ricordando gli sconvolgimenti che a tale scelta seguirono. Ma nel 1955 Vittorio Modoni e Gian Paolo Dore, con la prima edizione del loro testo (*Misure Elettriche*, Casa Editrice Patron, Bologna, in due volumi, *Strumenti di misure* e *Metodi di misura*) evitano l'argomento unità di misura e si limitano a un capitolo sui campioni, ignorando così l'ampere e la sua definizione di unità elettrica fondamentale. La stessa impostazione resta nella seconda edizione del 1969.

La parola definitiva, nella direzione dell'accettazione del sistema a quattro unità fondamentali, razionalizzato secondo la proposta di Giorgi, la diede Eligio Perucca (1890-1965)<sup>146</sup> nella sua opera *Fisica generale e sperimentale*, pubblicata per la prima volta nel 1937, alla 4° edizione nel 1945, alla 7° edizione completamente revisionata, pubblicata nel 1960 (UTET, Torino), alla 8° nel 1963 ristampata nel 1966: Parte 1, Meccanica-calore (XXVII, 919 p.); Vol. 2, Ottica,

---

<sup>146</sup> Nel 1922 Perucca succedette al professor Quintino Majorana alla cattedra di Fisica Sperimentale del Politecnico di Torino, cattedra che tenne fino al 1960. Fu rettore del Politecnico dal 1947 al 1955. Fu anche presidente dell'Accademia delle Scienze di Torino, vice-presidente dell'Accademia Nazionale dei Lincei, rappresentante per l'Italia nell'Unione di Fisica Pura e Applicata. Al 1930 risale la sua scoperta dell'effetto fotoelettrico di contatto e la costruzione di un nuovo tipo di elettrometro, conosciuto come Elettrometro di Perucca, che riuniva le qualità di alta sensibilità e piccola capacità elettrica. Ricoperse posizioni di rilievo nel Comitato Consultivo per la Definizione del Metro (CCDM); fu relatore al CIPM delle decisioni del CCDM che porteranno, nel 1960, alla nuova definizione del metro. Tra le tante sue opere sulla metrologia ricordiamo *Des origines de la métrologie au Système International (SI)*, UTET, 1966, VIII, 176 p. Fu soprattutto un eccezionale docente, in quella prestigiosa scuola di ingegneria che si formò nei tre decenni successivi alla guerra presso il Politecnico di Torino. Nell'anno accademico 1957/1958, mentre ero allievo interno al collegio Ghislieri di Pavia e frequentavo, in quella deliziosa città universitaria, il biennio di ingegneria, mi spostavo spesso a Torino, per stare in famiglia e per seguire alcune delle splendide lezioni di Perucca. Ogni sua lezione era un capolavoro di giusto e affascinante equilibrio tra teoria ed esperimento: esperimenti condotti davanti a un pubblico di 200 giovani, attenti e ammaliati dalla sua didattica, rigorosa e spettacolare a un tempo.

elettricità e magnetismo. Tomo 1 (XII, 618 p.); Tomo 2 (XI, 1228 p.). Su questa opera furono formate generazioni di ingegneri e di fisici, non solo nel Politecnico di Torino ma anche in molte università, in quanto il testo di Perucca fu il riferimento per molti testi di fisica sperimentale usati nei bienni dei corsi di ingegneria e di fisica. E furono formati con rigorosa aderenza al Sistema Internazionale di unità, con attenzione ai formalismi e ai principi, con la chiara distinzione tra grandezze, unità di misura e campioni.

Tornando alle contestazioni di Bottani e Barbagelata, non sarà l'ultima volta che il mondo universitario italiano negherà il suo consenso alle decisioni internazionali in tema di unità di misura. La pila Weston e i campioni materiali dell'ohm resteranno comunque, ancora per molti decenni, i campioni da usare nei confronti internazionali per l'armonizzazione tra le nazioni e per la disseminazione delle unità di misura elettriche.

### 3.3. Alternative alla definizione dell'ampere?

Intendiamo qui parlare di alternative diverse da quella proposta da Bottani, accettando la quale non si risolveva in modo definitivo la discrepanza tra watt elettrico e watt meccanico; analizziamo cioè solo le alternative che agganciavano le unità elettriche a quelle meccaniche come conseguenza della definizione stessa dell'unità elettrica fondamentale. E, tra le tante che furono proposte e studiate<sup>147</sup> e poi abbandonate perché conducevano a difficoltà non diverse da quelle incontrate nella realizzazione dell'ampere, ci limiteremo a una: il condensatore calcolato. Anche questa proposta fu abbandonata, per le stesse ragioni che condussero all'abbandono delle altre; ma per alcuni anni risultò assai affascinante e su essa si concentrarono molte ricerche nei migliori laboratori del mondo; ricerche che, se anche non condussero a cambiamenti nelle definizioni del SI, furono produttrici di significative innovazioni nell'ambito della sensoristica.

La teoria del condensatore calcolato deriva da un teorema di elettrostatica pubblicato nel 1956 da A.M. Thompson e D.E. Lampard<sup>148</sup>, due ricercatori

<sup>147</sup> Un panorama esauriente dei problemi della metrologia elettrica e delle soluzioni studiate si trova in *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"*, Corso LXVIII, *Metrology and Fundamental Constants*, edito da A. Ferro Milone e P. Giacomo, diretto da S. Leschiutta, B.W. Petley: *Electrical metrology and the fundamental constants*, North-Holland, 1980, pp. 358-463.

<sup>148</sup> A.M. Thompson, D.E. Lampard: *A New Theorem in Electrostatics and its Application to Calculable Standards of Capacitance*, «Nature», 177, 1956, p. 888.

dell'istituto metrologico australiano. Il condensatore, nella realizzazione più diffusa, è costituito da quattro cilindri metallici con gli assi posti lungo gli spigoli verticali di un prisma retto a base quadrata. Se le simmetrie sono ben curate, la capacità elettrica  $C$  tra una coppia di cilindri posti lungo spigoli opposti risulta circa  $C=1,95$  pF/m, e dipende esclusivamente dalla lunghezza dei cilindri e dalla costante dielettrica del mezzo isolante tra loro, per esempio il vuoto ( $\epsilon_0$ ). Quel "circa" è legato alla non perfetta conoscenza di  $\epsilon_0$  che si aveva a quel tempo, conoscenza divenuta perfetta con la definizione dell'ampere, che, come detto prima, fissa il valore di  $\mu_0$ , e la definizione del metro del 1983 (di cui parleremo ampiamente in seguito) che fissa il valore  $c_0$  della velocità della luce nel vuoto. Le tre grandezze  $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$ , e  $c_0$  sono tra loro legate da una relazione ( $\epsilon_0 \cdot \mu_0 = 1/c_0^2$ ) che deriva dalle equazioni di Maxwell: fissate due di loro la terza risulta perfettamente definita. Partire da un campione di capacità elettrica dell'ordine del picofarad poneva però problemi tecnologici enormi; per arrivare all'ohm risultavano necessari comparatori criogenici molto raffinati, senza ottenere alla fine miglioramenti veramente significativi.

Così le unità elettriche continuarono a essere conservate e disseminate mediante i campioni del volt e dell'ohm, come voleva Bottani. Ancora nel 1992<sup>149</sup> T.J. Quinn vedeva come possibili prospettive per una più affidabile realizzazione dell'ampere e attraverso essa una migliore definizione del kilogrammo, solo un nuovo metodo per il confronto tra energia elettrica ed energia meccanica, basato su uno sviluppo della classica bilancia di corrente. Quasi certamente fino al 2015 non verrà assunta alcuna decisione dalla CGPM per cambiare le tanto contestate definizioni del kilogrammo e dell'ampere.

### 3.4. La nuova definizione della candela: cambia la natura del riferimento

Più articolato è il discorso sulla candela. Ricordiamo anzitutto la definizione, nella versione emendata nella forma nel 1967 dalla XIII CGPM (risoluzione 5):

la candela è l'intensità luminosa, nella direzione perpendicolare, di una superficie di 1/600 000 metri quadri di un corpo nero alla temperatura di solidificazione del platino sotto la pressione di 101 325 newton al metro quadro<sup>150</sup>.

<sup>149</sup> T.J. Quinn: *Recent advances in mass standards and weighing and perspectives for a new definition of kilogram*, in: *Rendiconti della scuola internazionale di fisica "Enrico Fermi"*, CX corso, *La metrologia ai confini tra fisica e tecnologia*, editori L. Crovini e T.J. Quinn: Società Italiana di Fisica, 1992, p. 169.

Per comprendere il salto epistemologico costituito da questa definizione della candela e le discussioni che lo accompagnarono, rispetto alla candela Ver-non-Harcourt o a quella Hefner-Altene in uso in precedenza, bisogna tenere presente tre informazioni: la netta opposizione della delegazione russa alla candela come unità fondamentale in luogo del lumen<sup>151</sup>, unità di flusso luminoso (superata con un colpo di mano dalla CGPM, votando per la candela in assenza della delegazione); il fatto che la candela sia in pratica un'unità che si spiega solo avendo chiaro cosa si intenda per flusso luminoso; e infine come il flusso luminoso altro non sia che il flusso energetico filtrato attraverso la curva normalizzata di risposta dell'occhio umano.

Ragioniamo ora in termini di grandezze: dato un corpo nero di superficie fissata<sup>152</sup>, data una sua temperatura "naturale" (nel senso di non arbitraria: la temperatura di solidificazione del platino alla pressione normale), il flusso energetico emesso è definito in modo inequivocabile in base alla legge di Planck. Il suo valore però non ci interessa. Se filtriamo tale flusso energetico con un filtro che riproduce la curva normalizzata di risposta dell'occhio umano, otteniamo un flusso luminoso. Questo è il legame tra la radiometria, che parla di energie propagate, e la fotometria che tratta di "luce" percepita dall'occhio umano (normalizzato). Data una sorgente puntiforme che emette un flusso luminoso, l'intensità di tale sorgente è pari al flusso luminoso per unità di angolo solido. Se l'intensità della sorgente è pari a 1 candela, il flusso luminoso emesso entro l'angolo solido di 1 steradiano è pari a 1 lumen. Complicato, vero? Questo accade perché alle origini la CGPM non ebbe il coraggio di dare retta ai russi e mise "in testa" la candela invece del lumen! La sola giustificazione a tale scelta risiede nel fatto che all'epoca tutte le sorgenti di luce disponibili erano ben assimilabili a sorgenti puntiformi per le quali il legame tra flusso e intensità dipendeva solo dall'angolo solido e non dalla superficie emittente.

<sup>150</sup> Come abbiamo visto, una nuova definizione della candela verrà approvata dalla XVI CGPM nel 1979. La definizione del 1979 costituisce un nuovo salto epistemologico, dettato questa volta non dalla volontà di abbandonare i prototipi ma dalla maggiore affidabilità delle tecniche radiometriche.

<sup>151</sup> Negli anni '70 del XX secolo anche il CCPR e la CIE sollecitarono la CGPM ad adottare il lumen come unità fondamentale del sistema in luogo della candela. Prevalse il principio della continuità dei riferimenti e ancora una volta la proposta fu rigettata.

<sup>152</sup> Si fissa tale superficie in modo da rispettare la continuità della candela ora definita con la precedente definizione della candela internazionale.

Ciò che conta è che questa definizione della candela, già proposta in forma simile da André-Eugène Blondel (1863-1938), non fa ricorso a una sorgente artificiale come la candela Vernon-Harcourt e quella Hefner-Altene e altri campioni a fiamma o a incandescenza, ma a una sorgente naturale, il corpo nero alla temperatura di solidificazione del platino. Mentre l'ampere è agganciato alla permeabilità magnetica del vuoto, una costante del modello mediante il quale la fisica descrive in forma matematica (le leggi) la natura, la candela invece è ancorata alla temperatura di solidificazione del platino, un riferimento naturale, cioè non un prototipo, non dissimile sul piano epistemologico, dal riferimento per la lunghezza costituito dal meridiano terrestre, usato nel 1791 per la definizione del metro. Nella candela il passo in più, ossia parlare di intensità luminosa o di flusso luminoso invece che di energia irradiata e quindi chiamare in causa la curva di risposta dell'occhio, è giustificato dal fatto che ragioni pratiche chiedono che si parli di "luce" percepita dall'occhio: si sconfinava nelle grandezze della percezione, cercando di gettare un ponte tra fisiologia e metrologia. Immediatamente scatta la corsa per la miglior possibile determinazione della temperatura termodinamica del punto di solidificazione del platino.

Naturalmente anche nel caso della candela si accetta la regola del doppio binario: per la disseminazione dell'unità e per i confronti internazionali si useranno lampade a incandescenza, facilmente trasportabili e ben confrontabili con l'intensità luminosa emessa dal corpo nero. Per lungo tempo la corrente elettrica da inviare nella lampada per farle generare un flusso di un lumen verrà decisa dall'occhio dello sperimentatore: il filamento della lampada verrà osservato sullo sfondo del corpo nero alla temperatura di solidificazione del platino e la corrente regolata fino a quando il filamento non "scomparirà", essendo indistinguibile dallo sfondo.

### 3.5. La IX CGPM, 1948, tenta di recuperare il tempo perduto

Alla IX CGPM (dal 12 al 21 ottobre 1948) sono rappresentate 29 nazioni su 33 che hanno firmato la Convenzione del Metro (CM). In realtà le delegazioni sono 30; ma la delegazione della Germania è formata da W. Kösters, presidente del *Physikalisch-Technische Anstalt*, membro di diritto del CIPM ma senza delega del governo tedesco. Sono presenti 15 membri del CIPM ma solo 3 di loro svolgono anche la funzione di capo delegazione. La CGPM è dunque tornata a essere un organismo deliberante ad alto contenuto politico.

Per l'Italia sono presenti G. Cassinis ed E. Perucca, docenti dei due Politecnici di Milano e Torino.

*Guerra e contrasti non evocati*

È la prima CGPM dopo una guerra che ha viste opporsi, fino alla distruzione, ideologie in forte contrasto tra loro. Ne è uscito un mondo con due grandi nuove potenze contrapposte tra loro, con gli imperi coloniali in fase di smantellamento, con le nazioni europee ormai ai margini dei grandi cambiamenti sullo scacchiere mondiale. Quanto incidono sulla CGPM il ricordo della guerra, la nuova contrapposizione ideologica, militare ed economica tra le due superpotenze, le tensioni diplomatiche esistenti?

Dai verbali appare evidente come tutti cerchino di non parlare della guerra da poco conclusa. Essa viene evocata con frasi del tipo «avvenimenti mondiali, che ci hanno sopraffatto come individui, hanno impedito le riunioni periodiche ....». Ma J.E. Sears, presidente del CIPM, dopo aver proposto una sintetica storia delle azioni svolte dalle otto precedenti CGPM, informazione indispensabile per i tanti nuovi delegati, non può esimersi dal narrare dei bombardamenti sugli stabilimenti della Renault, contigui al BIPM. Speciali precauzioni sono state prese per evitare danni ai prototipi, fortunatamente coronate da successo malgrado alcune bombe siano cadute nel terreno del BIPM. Le parole di Sears sui possibili danni irreparabili ai prototipi servono anche a creare un clima favorevole alla riforma verso i campioni naturali.

**L'URSS non dimentica le ideologie.** Ma c'è chi non può dimenticare. A. Konznetsov, presidente del Comitato delle Misure e degli Strumenti di Misura presso il Consiglio dei Ministri dell'URSS, interviene sostenendo che

la presenza di una delegazione spagnola alla CGPM, in rappresentanza del regime fascista di Franco, contravviene alla risoluzione del 12 dicembre 1946 dell'Assemblea Generale delle Nazioni Unite, la quale ha stabilito che *fi tantoché esiste tale regime la Spagna non può essere ammessa all'ONU.*

Pertanto dichiara che la delegazione sovietica si oppone alla partecipazione della Spagna franchista alla IX CGPM. Chiede che la dichiarazione sia acclusa ai verbali della Conferenza. Raccomanda al CIPM di assumere tutte le misure necessarie per l'accoglimento della risoluzione dell'ONU, per estromettere la delegazione spagnola dai lavori "dell'Organizzazione Internazionale dei Pesi e delle Misure", finché in Spagna esisterà il regime di Franco.

La richiesta è formulata con sfumature d'alta diplomazia, non ultima la citazione di una inesistente Organizzazione. Le risposte sono pertanto semplici: la CGPM non è abilitata a decidere in merito. CIPM e BIPM non si occupano di politica, nei riguardi della quale non sono competenti, ma solo di scienza. Non c'è alcuna votazione, peraltro non richiesta, sulla dichiarazione sovietica. La relazione di Sears è approvata all'unanimità, con URSS e Spagna che votano insieme.

L'URSS si propone comunque come protagonista della CGPM: molte le sue proposte, presentate però fuori tempo massimo. Il CIPM fa gli straordinari per esaminarle e per fornire pareri alla CGPM.

Di carattere fortemente politico ed economico sono i commenti dell'URSS sulla diffusione del sistema metrico. Dopo aver evidenziato quanto fatto dal Governo dell'URSS, che ormai da 30 anni ha reso ufficiale e obbligatorio l'uso del sistema, constata che

ancora oggi grandi Paesi, come Inghilterra e Stati Uniti, si ostinano a mantenere in vita i loro sistemi di unità di misura che non si accordano né tra loro né con il sistema metrico.

Il fatto che tali Paesi non abbiano introdotto come unico e obbligatorio il Sistema Metrico «costituisce una situazione non normale e sminuisce la portata della CM».

La delegazione URSS propone pertanto una risoluzione della CGPM, con la constatazione che Inghilterra e Stati Uniti ancora oggi non hanno introdotto come unico e obbligatorio nei loro Paesi il sistema metrico decimale e con la raccomandazione a tutte le nazioni ancora non aderenti alla CM di aderire e a Inghilterra e Stati Uniti e altre nazioni di adottare come unico e obbligatorio il sistema. Su questo punto la discussione è evidentemente accesa. L'attacco è sostanziale, giustificato e diretto. Nessun compromesso è possibile. Il problema viene infine messo in mano al CIPM per un esame approfondito. È la strada dell'insabbiamento: ben sappiamo che nulla di concreto è stato raggiunto ancora oggi.

L'URSS torna alla carica anche sul tema della metrologia pratica, sottolineando ancora una volta l'importanza del settore. Questa volta entra nei dettagli e chiede alla CGPM di raccomandare al CIPM di elaborare un piano di misure pratiche, articolato su 10 punti:

- a) confrontare sistematicamente i campioni nazionali di lunghezza con i campioni internazionali;
- b) realizzare una scala termometrica internazionale che copra tutto il campo di temperature di interesse;

- c) introdurre misure del metro in termini di lunghezze d'onda di radiazioni;
- d) studiare il problema di una nuova tracciatura del metro;
- e) organizzare confronti tra campioni di lunghezza a facce di interesse industriale;
- f) creare campioni di unità magnetiche assolute;
- g) organizzare confronti di campioni nazionali di radioattività con campioni internazionali realizzati e conservati dal BIPM;
- h) elaborare regole unificate per l'impiego e la pulizia dei campioni nazionali di lunghezza e di massa;
- i) realizzare la scala internazionale di durezza;
- j) realizzare la scala unica internazionale di qualità delle superfici.

Propone infine di creare un Comitato Consultivo per la metrologia pratica.

La risposta del CIPM minimizza i problemi, evitando di entrare nel merito. I punti a), b), c), d) e h) hanno già una risposta positiva in quanto il BIPM sta lavorando su tali temi. Per accogliere le altre richieste sarebbe necessario un aumento considerevole del personale del BIPM, attualmente limitato a sei ricercatori scientifici e tre tecnici. Ciò richiederebbe un significativo aumento della dotazione annuale del BIPM, cosa difficile vista la situazione economica generale. La richiesta di nomina di un nuovo Comitato Consultivo va rivolta alla Conferenza di Metrologia Pratica del 1937, alla quale il CIPM aveva delegato l'incombenza.

Ancora una volta il CIPM rifiuta di farsi carico dei principali problemi della metrologia di interesse applicativo. Quando otterrà l'aumento dell'organico del BIPM, aprirà il settore delle misure e dei campioni di radiazioni ionizzanti ma continuerà a ignorare la metrologia pratica e la metrologia legale.

#### *Le risoluzioni scientifiche*

Grazie al lavoro del CIPM e dei CC, già alla prima riunione dopo la fine della guerra la IX CGPM è in grado di avviare altre importanti innovazioni. Ma lo fa con cautela, con dieci risoluzioni, alcune ermetiche per i non addetti ai lavori. La riforma è avviata ma è mascherata dietro l'ordinaria amministrazione. Sembra che il CIPM tema le reazioni dei tanti nuovi delegati, poco esperti sulle sottigliezze diplomatiche alle quali la CGPM è tenuta per ottenere l'indispensabile consenso.

Anzitutto riconosce che gli studi fatti sia sulle radiazioni emesse da alcuni elementi a isotopo unico sia per la produzione di tali isotopi con sufficiente purezza e in quantità apprezzabili, consente di valutare la possibilità di «ritrovare per l'unità di lunghezza una base naturale che abbia un'elevata precisione».

Chiede pertanto al BIPM e ai grandi laboratori di metrologia di formulare proposte per una nuova definizione del metro. È la risoluzione 1, la prima ad aprire verso il ritorno al paradigma dei campioni naturali e a far presagire la morte del prototipo del metro. Dall'epoca delle misure di Benoit e Michelson (1882) altri scienziati si sono cimentati nelle misure della lunghezza del prototipo in termini di lunghezze d'onda di radiazioni nel visibile; hanno lavorato gli spettroscopisti degli IMN nel PTB (Germania, che sostiene le radiazioni dell'isotopo 86 del krypton), nel NBS (USA, che lavora da tempo sulle radiazioni dell'isotopo 198 del mercurio; ha coinvolto anche il NPL, Regno Unito, fornendogli una lampada per valutarla) e nel VNIIM (URSS, che per la prima volta presenta risultati di misure della lunghezza d'onda della riga rossa del cadmio, in accordo con i risultati ottenuti dal BIPM sulla medesima radiazione). Si preannuncia per il CIPM un compito difficile, visto che due dei tre contendenti appartengono ai blocchi di potere contrapposti nella "guerra fredda". Così nella proposta di risoluzione, che la CGPM approva, il CIPM chiarisce i due parametri che utilizzerà per scegliere la radiazione vincente: qualità della radiazione e disponibilità dell'isotopo in quantità adeguata all'uso da parte di tutte le nazioni interessate.

Con la risoluzione 2 la CGPM affronta il problema della precisione della *base gravimetrica* attualmente in uso, vetusta di oltre 50 anni, riferimento essenziale per tutte le misure di gravità relativa. Il problema ha rilevanza economica enorme: infatti le misure gravimetriche servono per l'individuazione di giacimenti di materie prime, in particolare petrolio. La CGPM raccomanda pertanto ai laboratori «che ne hanno la possibilità» di effettuare misure di gravità assoluta e al BIPM di proseguire nel progetto di determinazione della gravità assoluta locale. Il BIPM viene dunque candidato a realizzare la base gravimetrica di riferimento internazionale; riuscirà nell'intento grazie alla partecipazione al progetto di uno scienziato eccezionale: A. Sakuma<sup>153</sup> che

<sup>153</sup> Ho avuto il privilegio e l'onore di lavorare per un paio di mesi con Sakuma. Si trattò di un'esperienza personale importantissima e indimenticabile. Il BIPM aveva messo a disposizione dello scienziato giapponese e della sua famiglia un alloggio situato a pochi passi di distanza dal laboratorio. Ma molte furono le mattine nelle quali, rientrando in laboratorio, potei constatare che Sakuma aveva trascorso la notte lavorando, con qualche ora di riposo su un divano posto in un angolo. Il lavoro consisteva nell'ottenere, mediante meticolose lavorazioni manuali alternate a controlli, superfici di specchi quanto più possibile piane e nel montare gli specchi su tre piani rigorosamente fra loro ortogonali, in modo da generare uno spigolo di cubo "ottico". Questo lavoro manuale, lungo, meticoloso, essenziale per ottenere misure interferometriche precise di accelerazione di gravità (lo spigolo di cubo veniva lasciato cadere liberamente nel vuoto; l'interferometro misurava lo spazio percorso, mentre un orologio misurava il tempo impiegato a percorrerlo; dalle coppie di dati si ricavava l'accelerazione cercata) può sembrare assurdo a giovani ricercatori oggi abituati a simulare le misure con il computer.

realizza al BIPM nel 1963 il suo primo gravimetro assoluto e lo perfeziona nei successivi vent'anni.

Per inciso, il contributo italiano alla gravimetria assoluta è stato di primo piano. L'istituto di Metrologia G. Colonnetti del CNR realizzò nel 1974 il primo gravimetro assoluto trasportabile, capace di una precisione paragonabile a quella delle installazioni fisse. Si veda in merito

URL: <[http://www.ien.it/events/lib/Germak\\_2005.ppt](http://www.ien.it/events/lib/Germak_2005.ppt)>.

La CGPM approva all'unanimità la *Scala Internazionale di Temperatura* proposta dal CCT, con il nome di *SIT 1948*. L'unità di scala è il grado Celsius, in luogo di centigrado o centesimale, accogliendo la proposta di Cassinis. Il sofisticato commento di Franc Avčín, professore dell'Università di Lubiana, che suggerisce di eliminare dal sistema di unità quella di temperatura in quanto, secondo la meccanica statistica, è possibile legarla alle unità di lunghezza, massa e tempo, è ignorata: il sistema non può prescindere dagli usi consolidati. Ma ancora oggi c'è chi vorrebbe, forse giustamente da un punto di vista esclusivamente scientifico, chiudere definitivamente in una bara la grandezza temperatura e la sua unità di misura.

Nella risoluzione 3 sono accolte altre due proposte del CCT: riferire la scala termodinamica della temperatura al punto triplo dell'acqua invece che al punto di solidificazione del ghiaccio; adottare il joule come unità di calore. Di fronte all'ipotesi di mettere in soffitta la caloria, ancora oggi usatissima quando si parla di diete e di caratteristiche nutrizionali degli alimenti, si scatena un'accesa discussione. La CGPM chiede al CIPM di proporre un testo di compromesso. Così alla risoluzione viene aggiunta una nota che precisa che il CCT metterà a disposizione tabelle di conversione dalla caloria al joule da usare per eventualmente convertire i risultati delle misure calorimetriche. La caloria resta. È un altro compromesso per salvare usi consolidati.

La risoluzione 4 autorizza il CIPM a stabilire un *accordo con l'UNESCO* per collaborazioni in settori di comune interesse. Grazie a questo accordo l'UNESCO ricorrerà sovente a esperti degli IMN per programmi di supporto alla realizzazione di infrastrutture tecnologiche, in particolare per la metrologia e il controllo di qualità, in Paesi in via di sviluppo. Il risultato si vedrà negli anni '80, quando nasceranno nuovi istituti metrologici, in molti casi assai costosi, quasi sempre in copia conforme a quelli di antica tradizione e a volte poco giustificabili in contesti industriali ancora arretrati.

Si parla di dotazione annuale del BIPM. La risoluzione 5 la pone a centosettantacinquemila franchi oro annuali. La risoluzione 8 raccomanda ai governi di

provvedere a un finanziamento straordinario al BIPM. Pochi governi daranno seguito alla raccomandazione.

Si riparla anche di guerra. Polonia, Cecoslovacchia e Jugoslavia, Paesi che durante la guerra hanno perso completamente la loro autonomia, sono esentati dal pagamento delle annualità arretrate non versate. Tutti gli altri Paesi devono provvedere a versare gli arretrati, anticipati dal Governo francese per far sopravvivere il BIPM.

L'Unione Internazionale di Fisica e il Governo francese sollecitano l'adozione di un sistema internazionale pratico di unità, suscettibile d'essere adottato da tutti i Paesi firmatari della Convenzione. Con la risoluzione 6 la CGPM affida al CIPM un'indagine conoscitiva, utilizzando come base un documento francese, estesa a scienziati, tecnici e insegnanti di tutti i Paesi, al fine di raccogliere suggerimenti. È un'apertura alla società che però avrà ben poco seguito.

La CGPM fa qualcosa di più: con la risoluzione 7 sancisce le regole di scrittura dei nomi delle unità e dei loro simboli. Questo primo elenco contiene solo alcune unità con nomi speciali. Su questo testo si avvierà l'utile lavoro del BIPM che predisporrà un opuscolo, sistematicamente aggiornato alle risoluzioni delle CGPM, con tutte le regole ortografiche, grammaticali e sintattiche riguardanti le unità di misura ammesse, i loro simboli e i loro multipli e sottomultipli. L'opuscolo può essere scaricato gratuitamente nell'edizione aggiornata, in inglese (URL: <[http://www.bipm.org/en/si/si\\_brochure/general.html](http://www.bipm.org/en/si/si_brochure/general.html)>) o francese (URL: <[http://www.bipm.org/fr/si/si\\_brochure/general.html](http://www.bipm.org/fr/si/si_brochure/general.html)>).

Le due ultime risoluzioni (9 e 10) riguardano proposte di modifiche della Convenzione (avanzate dall'URSS, sempre in primo piano, «per armonizzare il testo alla moderna concezione della metrologia») e del regolamento. L'istruttoria è affidata al CIPM che peraltro non riterrà necessari interventi di alcun genere. Il CIPM si avvale del principio sancito dalla II CGPM per evitare modifiche alla Convenzione, pericolose perché metterebbero in discussione un impianto ormai ben consolidato.

### *La riforma nascosta?*

Se ci si limita a esaminare le risoluzioni della IX CGPM si resta sorpresi dal fatto che esse non contengano alcun riferimento diretto alla profonda riforma del sistema varata dal CIPM nel 1946: le unità elettriche e fotometriche sono transitate da riferimenti a prototipi a riferimenti a costanti naturali (l'ampere) o a caratteristiche di fenomeni naturali (la candela).

Si può comprendere il comportamento prudente del CIPM: ha ottenuto dalla CGPM ampie deleghe per operare, in stretto collegamento con i Comitati Consultivi, sul cambiamento delle unità elettriche e fotometriche e di tale delega si avvale in piena autonomia. È consapevole che un argomento così delicato e innovativo può incontrare ostacoli se discusso durante la CGPM. Basti pensare alla reazione che potrebbero avere tutti i delegati che rappresentano i servizi di metrologia legale ministeriali: la riforma li priva dell'autonoma gestione dei campioni e li pone alla dipendenza degli Istituti Metrologici, i soli attrezzati per la realizzazione delle nuove unità e la conservazione dei campioni che le materializzano. Pertanto il CIPM si limita a chiedere alla CGPM la ratifica della data dell'entrata in vigore della riforma: 1 gennaio 1948. E la CGPM ratifica. Analoga posizione è assunta dal CIPM per la nuova definizione della Scala Internazionale di Temperatura.

Senza conoscere questi retroscena si resterebbe stupefatti nel leggere la risoluzione 7: in essa compaiono per la prima volta le nuove unità ampere, candela e grado Celsius, con alle spalle le loro nuove definizioni. I 15 membri del CIPM presenti alla CGPM fanno opera di *lobby* nelle rispettive delegazioni per evitare che qualche delegato “nuovo” e sprovvisto avanzi troppe domande imbarazzanti. Così la riforma è cosa fatta, senza discussioni.

#### 3.6. Il mondo, e la metrologia, dopo le guerre

Le due guerre mondiali dal 1914 al 1945 (l'intervallo fu solo una pausa per rafforzare ideologie e armamenti) sono classificate dagli studiosi di politica tra le “guerre costituenti”, ossia tra quelle che danno origine a sistemi internazionali con regole ed equilibri nuovi nei rapporti tra le nazioni. Regole ed equilibri vengono decisi a Yalta (4-11 febbraio 1945) nell'incontro tra Churchill, Roosevelt e Stalin. Peraltro zone di influenza e confini nei territori più contesi furono definiti senza dettagli e con alcune scelte di compromesso. Decisioni sfumate e prematura morte di Roosevelt fecero emergere, nella successiva conferenza di Potsdam (luglio 1945), gravi contrasti, in particolare sulla sistemazione territoriale e politica dell'Europa. Potsdam segna l'inizio del periodo della guerra fredda<sup>154</sup>.

---

<sup>154</sup> Secondo lo storico Andreas Hillgruber le basi per la divisione tra le due grandi potenze dell'Europa e del mondo in zone di influenza furono poste già nell'inverno 1942-1943, quando fu chiaro che l'Armata Rossa sarebbe stata una componente militare fondamentale per la vittoria contro la coalizione nazi-fascista. Nel suo documentato saggio *Yalta e la divisione dell'Europa*

Questa contrapposizione armata, ma senza guerra diretta, tra le due grandi potenze uscite vincitrici dalle guerre mondiali accelerò due altri processi: la definitiva fine della centralità europea nelle politiche mondiali e il disfacimento degli imperi coloniali europei, con il conseguente processo di decolonizzazione.

Gli storici dividono il periodo che va dal 1945 al collasso dell'impero sovietico nel triennio 1989-1991 in cinque sottoperiodi<sup>155</sup>. È importante analizzarli brevemente perché l'alternarsi di fasi di crisi e fasi di distensione condizionò l'attività internazionale della metrologia. Per giunta, il centro nevralgico della gestione della Convenzione del Metro restò a Parigi, in quella Europa occidentale che ormai dipendeva fortemente dagli aiuti americani e che, sia pur meno di quanto avvenne nelle nazioni dell'Europa orientale in rapporto con l'URSS, vedeva sostanzialmente limitata la sovranità delle nazioni che la componevano.

*Dal 1946 al 1953. La IX CGPM*

Il primo periodo, quello della massima tensione e della corsa agli armamenti nucleari, è in generale considerato compreso tra il 1946 e il 1953 (anno della conclusione della guerra in Corea e della morte di Stalin). È il periodo della dottrina Truman, del concetto della cortina di ferro e della dottrina sovietica dei due blocchi. I momenti di grave crisi furono il blocco di Berlino (1948-1949), l'avvento al potere di Mao in Cina (1949) e la successiva firma tra URSS e Cina di un trattato di reciproca assistenza (1950), la guerra di Corea (1950-1953). È anche il periodo durante il quale si avvia il processo di decolonizzazione e molti Paesi africani e asiatici ottengono l'indipendenza che si erano conquistata schierandosi in guerra a fianco dei Paesi che ne sarebbero usciti vincitori.

Durante questo processo si incontrano, ma non è la prima volta nella storia, due concezioni della società profondamente diverse: quella occidentale, imperniata sulle grandi costituzioni della fine del XVIII secolo che avevano portato al consolidamento delle nazioni e del potere degli stati, con i diritti dell'individuo posti al centro dell'organizzazione sociale; quella islamica, per la quale lo stato non era potere ma unione di nuclei tribali e familiari in una visione di col-

---

(op.cit., p. 427) lo storico sostiene che la divisione in zone di influenza fu un processo prolungato nel tempo, durante il quale Yalta fu solo un momento di tentativi e compromessi, non il punto di svolta decisivo.

<sup>155</sup> Francesco Tucari: *Un mondo bipolare: il quadro storico*, in: *La Storia*, vol. 14, *Dalla guerra fredda alla dissoluzione dell'URSS*, op.cit., pp. 19-48.

lettività fondata sulle rivelazioni di Maometto<sup>156</sup>. Purtroppo l'area dell'incontro è molto "calda": è ricca di petrolio ed è posizionata al confine tra le zone di espansione britannica e quelle di espansione dell'URSS. Peraltro i Paesi islamici, i cui confini erano stati artificialmente definiti dagli occidentali durante la spartizione dell'Africa e dell'Asia tra la fine del XIX secolo e l'inizio del XX ignorando etnie e religioni radicate, accolsero diffusamente con grande disponibilità la Dichiarazione universale dei diritti umani, la cui stesura era stata guidata dagli USA. Videro gli USA impegnati nel garantire libertà politica e democrazia in tutto il mondo. Così in Iran fu eletto un modernista laico, Mohammad Mossadeq. Lo scontro avvenne sul petrolio: Mossadeq cancellò il contratto con la British Petroleum e annunciò la nazionalizzazione dell'industria petrolifera. Immediata e sanguinosa fu la reazione: nel 1953 una parte dell'esercito iraniano, che si dice fosse finanziata dalla CIA sotto la diretta indicazione del segretario di stato USA John Foster Dulles, costrinse Mossadeq, amatissimo dal popolo, agli arresti domiciliari. Al suo posto la CIA impose Reza Palhavi, erede della dinastia che già aveva governato l'Iran, il quale firmò immediatamente un trattato con gli USA, cedendo la gestione del petrolio iraniano a un consorzio internazionale<sup>157</sup>. È il drammatico campanello di allarme che porterà alle invasioni dell'Afghanistan, ancora oggi in atto, alle guerre del Golfo, agli scontri in Libano, alla ribellione dell'Iran, alla tragedia delle Torri Gemelle.

Durante questo difficile periodo si riunì la IX Conferenza Generale (CGPM 1948), la prima dopo le distruzioni della guerra. Il difficile contesto politico giustifica probabilmente la prudenza con la quale si nascose la svolta epocale nella logica di scelta della unità di misura. La definizione dell'ampere fu assunta nel 1946 dal CIPM, comitato scientifico estraneo alle decisioni governative. Nel 1948 la CGPM non fece propria la decisione del CIPM ma lasciò che l'onere, e l'onore, di recepire tale decisione fosse assunto da organismi non governativi, come l'IEC. Un atteggiamento più audace fu tenuto con la candela, la cui nuova definizione era stata assunta anch'essa dal CIPM nel 1946: la CGPM si limitò a ratificarla, senza inserire la nuova definizione tra le sue delibere. D'altronde sulla definizione dell'ampere vi erano vivaci contrasti, mentre la definizione della candela era ben accettata già dal 1937<sup>158</sup>, in un accordo tra

<sup>156</sup> Tamim Ansary: *Un destino parallelo*, Fazi, 2010.

<sup>157</sup> T. Ansary: op.cit., pp. 466-467.

<sup>158</sup> In realtà durante la VIII CGPM (1935) la delegazione russa si dichiarò contraria alla scelta della candela come unità fondamentale. L'URSS avrebbe preferito come unità fondamentale l'unità di flusso luminoso (lumen), secondo quanto già previsto nella sua legislazione. Propose

CIPM e la CIE<sup>159</sup>. Così l'ampere e la candela appaiono, quasi per magia e nel disinteresse dei decisori politici, in una tabella della risoluzione 7 relativa alle regole di scrittura dei nomi e dei simboli della unità di misura.

In questo periodo il CIPM affronta in modo concreto lo studio di una nuova definizione del metro, adottando un metodo ormai collaudato: fonda (1952) un nuovo Comitato Consultivo, il CCDM, per la Definizione del Metro. C'è però un cambiamento di strategia da parte del CIPM, ben evidente nella scelta del nome del nuovo CC. Il compito è ben individuato e limitato nel tempo: fornire al CIPM consulenza circa la nuova definizione del metro, in termini di multiplo della lunghezza d'onda di una radiazione elettromagnetica. Ma quale? Almeno tre sono le candidate; due di queste hanno sostenitori di grosso calibro: USA e URSS. Una ragione in più per passare la patata bollente nelle mani dei superspecialisti del CCDM. Ma attenzione: come precisa il nome, esaurito il compito risolvendo il problema, tutti a casa; sembra che il CIPM preferisca non avere interferenze da parte dei Comitati Consultivi. La nuova strategia è confermata con le nomine successive: CC per la Definizione del Secondo (CCDS, 1956); CC per i campioni (*Etalon*) di Misura delle Radiazioni Ionizzanti (CCEMRI, 1958). È l'inizio di una incrinatura nei rapporti tra il CIPM e gli Istituti Metrologici Nazionali? Tra le azioni che il CIPM compirà per uscire dalla crisi ci sarà comunque anche il cambiamento di nome dei Comitati Consultivi: non più per una definizione specifica ma per dare consulenza su un settore specifico. A partire dal 1980 il CIPM correggerà la strategia e darà carattere di organismi permanenti ai Comitati Consultivi.

I prodromi della crisi si manifestano proprio in questo periodo, con la fondazione di Organismi non governativi (Ong) con obiettivi dichiarati di attività in settori delle misure e della strumentazione. In prevalenza l'azione dei nuovi Ong si rivolge alla metrologia pratica, legata alla produzione, alle aziende e all'innovazione, quindi anche all'ambiente universitario, proprio agli ambiti culturali messi in disparte dal CIPM e dalla CGPM.

---

per tanto di definire il lumen come il flusso emesso da un radiatore integrale (corpo nero), alla temperatura di solidificazione del platino, avente area pari a  $1/(\pi \cdot 60)$  centimetri quadri. Al momento della votazione finale la delegazione russa risultò assente e quindi fu approvata all'unanimità la proposta USA in favore della candela come unità fondamentale.

<sup>159</sup> L'intervento di Vito Volterra fu fondamentale anche in favore di questo accordo: egli propose di nominare presidente del CCP Charles Fabry, che già era presidente della CIE. Sears, presidente in carica del CCP, si dimise per far posto al più esperto Fabry. E l'accordo fu fatto.

La crisi è anche annunciata dalla fondazione nel 1955 dell'OIML, Organizzazione Internazionale per la Metrologia Legale.

**1951: nasce il CIRP.** Alla fine degli anni '40 divenne evidente il freno allo sviluppo di nuove tecniche di produzione causato dalla mancanza di appropriata analisi scientifica dei metodi adottati. Fu anche chiaro che lo sviluppo di ricerche di base nel settore poteva essere realizzato solo attraverso un'azione di cooperazione internazionale. Da un incontro ristretto tra esperti del settore, tra i quali svolsero un ruolo di primo piano E. Bickel (Svizzera), D.F. Galloway (Regno Unito), P. Nicolau (Francia) e J. Peters<sup>160</sup> (Belgio), nacque il progetto di fondazione del CIRP<sup>161</sup>: il nome originale in francese fu *College International pour la Recherche en Productique*, dal quale l'acronimo. Il nome ufficiale in inglese è **The International Academy for Production Engineering** (URL: <<http://www.cirp.net>>). Il progetto, realizzato nel 1951, mirò a promuovere ricerche scientifiche nel settore dell'ingegneria della produzione, attraverso la cooperazione tra i membri dell'Accademia, e la promozione di applicazioni industriali dei risultati di tali ricerche.

Il CIRP fu organizzato in Comitati Tecnico-Scientifici, due dei quali assunsero subito particolare rilievo in settori metrologici connessi all'ingegneria della produzione.

Il *Comitato di Ingegneria di Precisione e di Metrologia* è coinvolto nello sviluppo e nell'applicazione di tecniche di misura ai processi di controllo di qualità, concentrandosi su misure di dimensioni, forme e posizioni in rapporto alla produzione e all'assemblaggio di componenti meccanici. Negli anni '90 del XX secolo in questo Comitato assunse un rilievo particolare il settore delle misure e della metrologia nelle emergenti nanotecnologie.

---

<sup>160</sup> Ho avuto l'onore e il piacere di conoscere personalmente Jacques Peters, oggi Professore Emerito dell'Università Cattolica di Leuven (Belgio). Nel 1999 collaborò anche con la rivista «Tutto\_Misure», con un rivoluzionario articolo dal titolo *Scienza e società*, nel quale prevede la crisi che investì il mondo intero nel 2009. Suggerì allora provvedimenti correttivi fortemente innovativi, dettati dalla sua profonda cultura e dal suo coraggioso senso dell'etica. Lo considero una delle poche persone in grado di proporre grandi visioni per un profondo mutamento della società, capaci di combinare filosofia e tecnologia in una prospettiva di sviluppo rispettosa dei più profondi valori dell'umanità. Persone di questo livello meriterebbero d'essere ascoltate da politici, sociologi ed economisti, quando queste categorie decidessero di agire per il bene dell'umanità e non per gli interessi di ristrette caste.

<sup>161</sup> Le informazioni sono tratte dal sito ufficiale del CIRP, URL: <<http://www.cirp.net>>.

Il *Comitato delle Superfici* si occupa di ricerche nel settore delle proprietà geometriche, fisiche e chimiche delle superficie di pezzi lavorati, in relazione ai processi di produzione di tali superficie. L'attività del Comitato include la preparazione di norme tecniche sulle misure dei parametri di rugosità e progetti per la misura della durezza superficiale, delle tensioni residue nei componenti e del rilievo dei danni superficiali nei pezzi lavorati.

Questi due Comitati e la loro importante attività di ricerca internazionale furono la risposta degli scienziati al rifiuto del CIPM e della CGPM di occuparsi dei problemi di metrologia applicata. Oggi gli *Annals* del CIRP costituiscono la pubblicazione scientifica più importante nel settore che raccoglie i risultati all'avanguardia della ricerca internazionale nelle misure nell'ambito dell'ingegneria della produzione.

Sono accademici membri del CIRP, nel 2010, 550 scienziati provenienti da università (in prevalenza), istituti di ricerca pubblica e aziende di 40 diverse nazioni. Il numero massimo di membri del CIRP e la loro suddivisione tra le diverse nazioni è stabilito dal regolamento dell'Accademia. Ho l'onore d'essere membro emerito del CIRP.

#### *I dieci anni di Chruščëv e le CGPM del 1954 e del 1963*

Il secondo periodo si prolunga fino al 1963. È il periodo di Chruščëv, della "coesistenza pacifica", delle conferenze di Berlino e Ginevra (1954-1955) sulla questione tedesca e sulla fine dell'impero francese in Indocina. Ma è anche periodo di alcune gravi crisi: la crisi ungherese e quella di Suez nel 1956; la costruzione del muro di Berlino (1958-1961); la gravissima crisi di Cuba (1962).

Nel periodo la CGPM si riunì due volte (1954 e 1960) e giocò a carte scoperte, con importanti decisioni che diedero l'assetto quasi definitivo al sistema di unità (che dal 1969 verrà chiamato Sistema Internazionale, SI) e al nuovo paradigma della metrologia. Probabilmente i decisori politici non si resero conto dell'importanza del cambiamento da loro approvato: troppo tecniche erano le nuove definizioni, troppo sottile la qualità delle scelte. Si accontentarono delle affermazioni relative all'esigenza di nuove unità di misura, capaci di consentire misure più precise, richieste dalla scienza e dal progresso tecnologico. Non si chiesero quali costi avrebbe comportato la realizzazione dei nuovi campioni, messa in pratica delle nuove definizioni, costi impossibili da sostenere per le nazioni in via di sviluppo o addirittura del tutto lontane dallo sviluppo. Gli Istituti metrologici di USA e URSS erano d'accordo? Tutto il resto contava

ben poco. Fu l'inizio di una sorta di neo-colonialismo metrologico il quale, progressivamente, genererà la crisi della Convenzione del Metro.

**1958: la fondazione di IMEKO.** IMEKO (International MEasurement Konfederation)<sup>162</sup> è una federazione non governativa di organizzazioni nazionali che hanno tra i loro obiettivi lo sviluppo della scienza e della tecnologia delle misure. Ciascuna nazione può essere rappresentata in IMEKO da una sola organizzazione. Gli obiettivi primari di IMEKO sono: la promozione dell'interscambio internazionale di informazioni scientifiche e tecniche nel settore delle misure e della strumentazione, e il miglioramento della cooperazione internazionale tra scienziati e tecnologi provenienti dalla ricerca e dall'industria.

Non a caso IMEKO nasce nel 1958 e nasce come organismo non governativo: si tenta così di superare, attraverso gli incontri scientifici e tecnologici organizzati dai Comitati di IMEKO, l'isolamento nel quale sono costretti gli scienziati dell'area geografica di influenza sovietica. L'iniziativa è ungherese, da parte della *Hungarian Society of Measurement and Instrumentation*, subito affiancata dalle analoghe Associazioni della Polonia e dell'URSS. Fu così organizzata nel novembre del 1958 una conferenza internazionale alla quale aderirono esperti provenienti da 18 Paesi. A seguito del successo di tale incontro, altri 9 organismi aderirono all'accordo entrando in IMEKO: oggi gli organismi membri di IMEKO sono 39, a dimostrazione di un significativo consolidamento a livello mondiale di questa confederazione non governativa.

L'IMEKO è finanziata, in particolare per le attività di segreteria, dagli organismi membri tramite una quota annuale di adesione. Tutti i funzionari della struttura di IMEKO (presidenti, coordinatori di settore, segretario generale, tesoriere, rappresentanti degli organismi membri) prestano gratuitamente le loro opera e i costi vivi della loro partecipazione alle riunioni sono sopportati dagli organismi nazionali di appartenenza.

IMEKO opera fondamentalmente attraverso i suoi Comitati Tecnici di settore (attualmente 21) i quali organizzano convegni, seminari, incontri tecnici, a intervalli temporali definiti, e pubblicano gli atti di tali riunioni scientifiche.

Il tentativo di IMEKO di creare un ponte mondiale fra gli scienziati impegnati nella scienza delle misure è peraltro parzialmente fallito. Infatti l'organizzazione non governativa è stata ignorata, fin dalle sue origini, dagli scienziati

---

<sup>162</sup> Le informazioni sono in parte desunte dal sito ufficiale di IMEKO, URL: <<http://www.imeko.org>>.

degli Stati Uniti, privando gli incontri scientifici dell'apporto determinante delle loro competenze. Molte sono le ragioni di questo rifiuto USA all'iniziativa di IMEKO. Anzitutto l'NBS, organismo del governo centrale in un sistema di stati federati, si trovò in difficoltà nel partecipare a un organismo non governativo nel quale membri erano in prevalenza associazioni di categoria. L'opinione pubblica degli scienziati americani classificò IMEKO tra le iniziative del blocco sovietico e quindi non volle spartire con tale blocco le proprie conoscenze scientifiche. L'assenza degli USA dalle attività IMEKO non invogliò le associazioni dei metrologi americani a spendere energie nelle iniziative di IMEKO. Così IMEKO visse con il contributo determinante ma precario (per le difficoltà economiche) dei Paesi dell'est europeo, affiancato in seguito da alcuni Paesi dell'Europa occidentale, primi fra tutti l'Italia, la Germania e l'Austria. Oggi sono attivi in IMEKO Paesi in rapida crescita, come Cina e Brasile.

Le difficoltà che ha incontrato IMEKO nel suo sviluppo sono documentate dalla storia della sua rivista *Measurement*. Il livello scientifico non competitivo con altre riviste del settore, quali *Metrologia*, *Journal of Scientific Instruments*, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* e altre, ritardò l'iscrizione della rivista nell'elenco delle riviste scientifiche di prestigio e quindi tenne lontani da *Measurement* gli articoli, soprattutto di giovani promettenti, alla ricerca anche di visibilità internazionale.

Va però precisato che sono evidenti significative differenze di livello e di impatto scientifico tra i Comitati Tecnici di IMEKO. Alcuni di essi, quali quelli relativi alle misure di temperatura, di flusso e di forza, e più recentemente il Comitato che si occupa delle misure elettromagnetiche, hanno una tradizione scientifica consolidata e attività periodiche che riuniscono ricercatori provenienti da ogni parte del mondo. Altri Comitati languono e si risvegliano solo quando uno scienziato del settore decide di prendere in mano le attività e di tentare il loro rilancio. Questa situazione è, in alcuni settori, la diretta conseguenza di un'iniziativa di tipo "generalista" per lo sviluppo della scienza delle misure in ogni settore, iniziativa che entra in competizione, in alcuni settori, con iniziative specialistiche. È il caso del conflitto tra il Comitato elettromagnetico di IMEKO e l'*Instrumentation and Measurement Technology Conference* dell'IEEE, nata nel 1984 in USA e oggi con caratteristiche internazionali. Analoga competizione si ha tra il Comitato Tecnico IMEKO sulle misure dimensionali e l'attività dei due Comitati del CIRP prima ricordati.

Membro italiano dell'IMEKO è il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). Dal 1991 al 1998 sono stato rappresentante del CNR nel Consiglio

Generale dell'IMEKO e dal 1997 membro del Consiglio di Presidenza. Ho così potuto constatare di persona l'impegno di tanti scienziati per allargare la base della discussione sulle questioni metrologiche e per affrontare collegialmente temi di ricerca e di sviluppo tecnologico essenziali per l'innovazione dei prodotti industriali.

**CIPM e CGPM nel periodo.** La riunione della X CGPM nel 1954 si apre con una discussione delicata: la richiesta di modifica dell'articolo 4 della Convenzione del Metro, nel quale si prevede che la CGPM sia presieduta dal presidente dell'Accademia delle Scienze di Parigi<sup>163</sup>. Si chiede anche di modificare le modalità di calcolo dei contributi degli Stati al funzionamento degli organismi della CM, spostandoli dalla proporzionalità alla popolazione alla proporzionalità al prodotto nazionale, il ben noto PIL. Come accadrà anche in molte altre occasioni, la discussione si concentra sulla possibilità di una CGPM di decidere in merito al cambiamento del testo di un accordo internazionale: chi non vuole cambiamenti sostiene che ogni cambiamento del testo della CM debba essere deciso da un'apposita Commissione Costituente. Grazie al prevalere di tale opinione, nessun cambiamento alla Convenzione viene apportato né in questo caso né in altri casi futuri. La CGPM non può far altro che prendere atto delle difficoltà che il BIPM e il CCDM incontrano nel trovare un accordo per la nuova definizione del metro. Come già ricordato, tre sono i candidati: la lampada al mercurio, isotopo 198, sostenuta dal NBS (USA) e dall'NRC (Canada); la lampada al krypton, isotopo 86, sostenuta dal PTB (Germania); la lampada al cadmio, isotopo 114, sostenuta dall'IMM (Russia) e dal BIPM.

È Eligio Perucca a presentare alla CGPM i risultati delle analisi svolte nell'ambito del CCDM. Egli ripercorre brevemente la travagliata storia del metro. Prima (1791) sottomultiplo di una lunghezza naturale, l'arco di meridiano terrestre; già nel 1793 sostituito da un prototipo, un campione materiale a facce in rame; nel 1799 un nuovo prototipo ancora a facce, una "stecca di platino" nota come il metro degli archivi, probabilmente più corta della frazione della lunghezza dell'arco di meridiano di ben 0,17 mm. Nel 1927 la CGPM definisce il prototipo a tratti, già assunto come prototipo internazionale dalla I CGPM

<sup>163</sup> Maurice de Broglie, presidente della CGPM in quanto presidente dell'Accademia delle Scienze di Parigi, nel suo discorso introduttivo definisce il periodo bellico concluso da nove anni "un periodo perturbato" che ha impedito di rispettare la cadenza di sei anni per le riunioni della CGPM. Questa terminologia molto prudente da un'idea del livello di difficoltà che gli scienziati incontrano quando si trovano a confronto con i decisori politici.

(1889), alla temperatura di 0 °C. Esso è armonizzato con il metro degli archivi entro circa 0,02 mm ma è 100 volte più preciso (se la temperatura è nota entro  $\pm 0,01$  °C), essendo i suoi tratti definiti e riproducibili entro 0,000 1 mm. Il metro ottico, sul quale il CCDM sta discutendo, garantirà una riproducibilità entro  $\pm 0,000 02$  mm e sarà compatibile con il metro a tratti entro 0,000 1 mm.

V.D. Alessine, capo della delegazione URSS, sostenuto anche dalla delegazione giapponese, chiede che prima della definizione del metro ottico si proceda a una nuova tracciatura delle copie del prototipo con riferimento alla loro lunghezza a 20 °C. È l'annoso problema della temperatura di riferimento per le misure di lunghezza; l'appello resterà anche questa volta in parte inascoltato. Per il CIPM si tratta di un problema di metrologia pratica, senza alcuna rilevanza scientifica.

Il delegato russo compie anche un gesto distensivo: pur sostenendo la lampada al cadmio, offre la disponibilità degli scienziati russi all'effettuazione dei confronti tra le varie lampade.

Scoppia anche una piccola "grana", sollevata da M. Jacob del servizio di metrologia belga: la stampa mondiale ha divulgato parte del rapporto del CCDM, dando come assunta la decisione del cambiamento della definizione del metro. Il CCDM decide in luogo della CGPM? Tra le righe si legge una raccomandazione al CIPM perché richiami all'ordine il CCDM ed eviti la fuga di notizie inesatte. È comunque interessante notare che a quei tempi la notizia di una nuova definizione del metro era considerata dalla stampa mondiale di interesse per il grande pubblico.

Risultato: il prototipo non viene per ora abbandonato ma gli si affiancano prototipi tracciati con nuove tecniche che consentono l'uso di microscopi fotoelettrici (semiautomatici, con uscita digitale) per la lettura della posizione dei tratti. E il BIPM fornisce anche la lunghezza dei prototipi a 20 °C.

**La X CGPM vara il sistema pratico di unità.** Nel 1954 la X CGPM definisce (risoluzione 6<sup>a</sup>) il "sistema pratico di unità", con il metro, il kilogrammo, il secondo, l'ampere, il kelvin<sup>164</sup> e la candela. Il significato di sistema "pratico" va collegato sia alla prassi del doppio binario, sia alla annotazione che precede ogni definizione di unità di misura *non* ancorata a un prototipo:

---

<sup>164</sup> In realtà la X CGPM elencò il "grado Kelvin". Nel 1976 la XIII CGPM adottò il nome *kelvin* per l'unità di temperatura termodinamica.

*la definizione è teorica nel senso che fissa il valore della unità e non il metodo per la sua realizzazione.*

Qualunque altro metodo va bene purché rispetti il valore dell'unità, entro i limiti della sua intrinseca imprecisione. Dunque una rivoluzione epistemologica "temperata" dalle esigenze pratiche: i vincoli del consenso impediscono di fare di più.

Si tratta di una Conferenza di transizione che cerca di gettare le basi per il futuro. Così il CIPM può istituire due nuovi Comitati Consultivi: nel 1956 il CCDS, per la definizione del secondo<sup>165</sup>; nel 1958 il CCEMRI, per i campioni di misura delle radiazioni ionizzanti. Si noti che tutti e tre i CC citati in questo paragrafo hanno un nome che definisce i limiti dei compiti loro affidati. Come già è stato sottolineato, il CIPM sembra ribadire, con tali nomi, che i CC, una volta esaurito il compito di definire le nuove unità e i nuovi campioni, cesseranno di esistere, rimettendo nelle mani del CIPM tutti i poteri propositivi e decisionali.

Ma tre decisioni importanti e controverse vengono comunque assunte: la dotazione del BIPM è alzata a trecentomila franchi oro all'anno; è varato il sistema pratico di unità, con sei unità fondamentali: metro, kilogrammo, secondo, ampere, kelvin, candela<sup>166</sup>; il BIPM viene incaricato di procedere con gli studi di gravimetria assoluta, dopo aver presentato risultati preliminari in accordo con le misure del NBS e NPL che denunciavano un errore di circa 24 milligal in eccesso del riferimento della base del sistema di Postdam.

**Una nuova definizione del metro.** Rivoluzionaria è l'XI CGPM del 1960. Il CIPM e i CC, e in particolare i due appena costituiti, CCDM e CCDS, hanno svolto un immane lavoro preparatorio che consente alla Conferenza di approvare ben 16 risoluzioni. Tra queste spiccano: l'estensione delle attività del BIPM al settore dei campioni di misura delle radiazioni ionizzanti; la nuova de-

<sup>165</sup> È l'Unione Astronomica Internazionale che chiede alla CGPM una nuova definizione del secondo, come sottomultiplo della durata dell'anno tropico del 1900. Il riferimento all'anno tropico consente precisioni dell'ordine di  $10^{-9}$ , indispensabili per la moderna astronomia, contro una precisione di solo  $10^{-7}$  del riferimento al giorno solare medio.

<sup>166</sup> Forti sono le opposizioni all'ampere e alla candela. Si passa alle votazioni. L'ampere ottiene 21 SI, 6 NO (USA, Argentina, Canada, Spagna, Polonia, Svizzera; non posizioni politiche ma un malessere diffuso), 1 astenuta (Austria). La candela ottiene 21 SI, 4 NO (Ungheria, Romania, Cecoslovacchia, URSS; un chiaro blocco politico intorno alla ben motivata opposizione dell'URSS), 3 astenuti (Bulgaria, Polonia, Thailandia). La decisione finale è però assunta all'unanimità.

finizione del metro in termini di multiplo della lunghezza d'onda di una radiazione elettromagnetica, transitando, come per la candela, dal riferimento a un prototipo a un riferimento a una caratteristica, la lunghezza d'onda in vuoto, di un fenomeno naturale; la discussione sul sistema gravimetrico di riferimento mondiale detto "di Potsdam"; la nuova definizione del secondo, considerata peraltro come transitoria in vista di una definizione in termini del periodo di una radiazione elettromagnetica; la definizione del Sistema Internazionale di unità, SI. L'XI CGPM dà una spinta determinante alla transizione della metrologia verso il nuovo paradigma scientifico.

La storia del metro tocca, con la definizione del 1960, un record di sfortuna. Mentre si conclude il lungo confronto tra le radiazioni del krypton, del cadmio e del mercurio, con il trionfo della prima, sostenuta dalla Germania del PTB e di E. Engelhard<sup>167</sup>, scienziati della Columbia University, ricercatori dei laboratori Bell, il fisico Theodore Maiman e scienziati sovietici depositano brevetti riguardanti un nuovo rivoluzionario dispositivo: il laser. Subito le radiazioni coerenti e monocromatiche dei laser si candidano come migliori per la definizione del metro. Così il metro, multiplo di una lunghezza d'onda in vuoto del krypton 86, va in crisi ancora prima di nascere!

La XI CGPM si occupa anche di temi politici. URSS e Romania, con l'appoggio di Polonia e Ungheria, propongono una risoluzione che esprime soddisfazione per l'aumento di Paesi dell'Africa e dell'Asia impegnati sulla via di uno sviluppo indipendente; che invita tutti i Paesi non ancora membri della CM a diventarlo, raccomandando a tutti i Paesi già membri della CM di esercitare la loro influenza in questa direzione, attraverso i legami scientifici, tecnologici ed economici. La discussione è accesa sul riferimento ai Paesi dell'Africa e dell'Asia; gli USA propongono un emendamento che elimina il riferimento, e la risoluzione emendata viene approvata all'unanimità (risoluzione 14).

---

<sup>167</sup> Una ragione del successo della radiazione del krypton nella definizione del metro va ascritta a E. Engelhard, ricercatore del PTB al cui nome fu legata la lampada che dal PTB acquistarono tutti coloro che dovettero realizzare il nuovo metro. Engelhard mise a disposizione dei metrologi una lampada funzionante "chiavi in mano", completa di alimentatore, contenitore per il raffreddamento con azoto liquido, supporto registrabile. Collaudammo la prima lampada di Engelhard che entrò in Italia nell'antibagno dell'Istituto Termometrico Italiano, in quanto l'edificio per le misure di lunghezza del futuro Istituto Colonnetti non era ancora agibile.

*La distensione dal 1964 al 1979*

Durante il terzo periodo, che viene fatto concludere nel 1979, si assiste all'avvio di una politica di distensione tra i due blocchi contrapposti. Fatti significativi di tale distensione furono: la politica di apertura verso l'est europeo (*Ostpolitik*, 1970-1972) da parte del Cancelliere tedesco Willy Brandt (1913-1992, premio Nobel per la pace nel 1971); l'accordo SALT I sulla limitazione degli armamenti nucleari (1972), una scelta per altro obbligatoria visti i gravi problemi economici che le due grandi potenze stavano affrontando in quel periodo; la conferenza di Helsinki sulla sicurezza e la cooperazione in Europa (1975). Non mancarono peraltro nel periodo momenti di crisi: l'intervento sovietico in Cecoslovacchia (1968) che stroncò con le armi la "Primavera di Praga", nella quasi totale indifferenza degli studenti rivoluzionari sessantottini e delle nazioni del gruppo occidentale; la guerra del Vietnam, iniziata nel 1964 e conclusa con la clamorosa sconfitta degli USA nel 1975; la rivoluzione khomeinista del 1979 in Iran, con la conseguente ascesa del fondamentalismo islamico.

**Nuovi campanelli di allarme.** In questo periodo suonano nuovi campanelli di allarme per la Convenzione del Metro. Due sono gli avvenimenti che segnano l'inizio della crisi. Il primo è la massiccia adesione alla Convenzione del metro di nuove nazioni, in particolare asiatiche. Questa è la successione delle adesioni dal 1947 al 1982: Australia (1947), Repubblica Dominicana (1954), India (1957), Repubblica di Corea (1959), Indonesia (1960), Egitto (1962), Sud Africa (1964), Cameron (1970), Pakistan (1973), Iran (1975), Cina (1977), Repubblica Democratica Popolare di Corea (1982).

Il secondo avvenimento rilevante viene dai primi segnali della nascita degli organismi regionali di coordinamento delle attività metrologiche al di fuori dell'azione della Convenzione del Metro. Nell'aprile del 1973 si riunisce infatti all'NPL (UK) la prima Conferenza di Metrologia dell'Europa Occidentale (WEMC, *Western European Metrology Conference*), che si trasformerà in breve in un Club dei direttori degli IMN coinvolti e, nel 1987, nascerà EUROMET.

**Ma CIPM e CGPM procedono verso il nuovo assetto del SI.** La CGPM si riunisce ben cinque volte nel periodo (1964-1979) e assume decisioni di grande importanza: la nuova definizione del secondo, della candela e della mole; il nuovo quadro delle unità e dei campioni di radiazioni ionizzanti; una nuova

versione della scala pratica di temperatura e la sua armonizzazione con la scala termodinamica. Promuove inoltre gli studi per l'ennesimo cambiamento della definizione del metro; incoraggia lo sviluppo di campioni elettromagnetici basati sulle recenti scoperte dei fenomeni quantici a bassissime temperature (effetto Josephson); stabilisce il tempo universale coordinato (UTC) e il ruolo del BIPM nella sua gestione.

La distensione nel quadro politico internazionale facilita la traduzione in delibere della CGPM degli accordi raggiunti all'interno dei CC e del CIPM. Mancano però prese di posizione chiare degli organismi della Convenzione del Metro riguardo a due aspetti fondamentali per la nuova metrologia del XX secolo: la metrologia pratica, essenziale per l'innovazione e lo sviluppo della aziende, e una strategia per coinvolgere la metrologia nella soluzione dei problemi ai quali sta andando incontro l'umanità.

È in questo periodo, esattamente nel 1973, che la gravità dei problemi è affermata in modo molto chiaro per la prima volta: viene pubblicato il risultato degli studi del *System Dynamics Group* del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT): *Toward global equilibrium*<sup>168</sup>. Il libro, tradotto in decine di lingue e venduto in centinaia di migliaia di copie, rappresenta il primo testo scientifico che affronta i problemi dell'ambiente e delle limitate risorse disponibili per l'umanità in rapida crescita. È un campanello d'allarme rivolto prima di tutto ai responsabili delle politiche mondiali; ma anche agli scienziati di tutto il mondo perché dibattano, confermino o smentiscano le previsioni e gli scenari descritti nello studio. Purtroppo gli scienziati in generale e fra loro, in particolare, quelli che avevano la responsabilità della metrologia della Convenzione del Metro ignorarono completamente la gravità dei temi sollevati dallo studio del Club di Roma e del MIT. La CGPM sarà portata a occuparsi di metrologia per la chimica, di armonizzazione delle misure per l'ambiente e per la salute soltanto dal 1995. In quello stesso anno la CGPM chiederà al CIPM di avviare lo studio sulle necessità metrologiche del futuro.

Ben poca risonanza verrà data a queste iniziative della CGPM che pertanto resteranno deboli, inascoltate e destinate, con linguaggio burocratico, ai soli specialisti degli istituti metrologici e non formulate come raccomandazioni degli scienziati ai governi. Si trattò di una importante occasione persa dalla scien-

<sup>168</sup> Il testo in italiano è pubblicato nel 1973 nelle Edizioni Scientifiche e Tecniche Mondadori, con il titolo *I limiti dello sviluppo. Verso un equilibrio globale*, a cura e con la collaborazione del Club di Roma.

za di porsi alla guida di un movimento mondiale consapevole dei limiti del pianeta e della follia del modello di crescita indefinita in un sistema finito.

In verità qualche gruppo si mosse. Per esempio il CIRP già negli anni '80 iniziò studi e ricerche sul tema *Design for Recycling*. Ma si trattò di casi sporadici, anche questi lontani dal grande pubblico che fu così mantenuto nell'ignoranza e invogliato a proseguire la corsa frenata verso inutili consumi e spreco delle risorse: in nome e a vantaggio del mercato e del capitalismo sfrenato.

**Le risoluzioni scientifiche della CGPM.** La XII CGPM (1964) finanzia con la terza dotazione straordinaria di ottocentocinquantamila franchi oro le attività del BIPM nel settore delle radiazioni ionizzanti<sup>169</sup>. È un segnale importante di volontà da parte dei governi di trovare almeno una posizione comune sulle misure delle radiazioni ionizzanti, passo essenziale per i reciproci controlli sulle sperimentazioni delle armi nucleari. Nel 1960 la XI CGPM aveva constatato la necessità di avviare l'attività sulle radiazioni ionizzanti nel BIPM per

assicurare l'uniformità dei campioni di misura delle radiazioni ionizzanti, indispensabile per lo sviluppo dell'energia atomica e delle ricerche nucleari.

Era inoltre pervenuta al CIPM una sollecitazione da parte della *International Commission on Radiation Units & Measurements* (ICRU) a farsi carico nel BIPM, autorità incontestata nella conservazione e disseminazione dei campioni di misura, delle azioni per la scelta e il confronto dei campioni di radiazioni ionizzanti, fino al momento svolte dalla ICRU. Il settore che beneficerà di più, con l'andar del tempo, della realizzazione di un sistema unificato di unità e campioni delle grandezze caratterizzanti le radiazioni ionizzanti non sarà la ricerca nucleare per la costruzioni di armi o la produzione di energia ma la diagnostica e la terapia medica.

Sempre la XI CGPM avvia l'uso transitorio, in attesa di una definizione concordata del secondo, di campioni atomici o molecolari di frequenza per le misure di tempo. Abroga, come già ricordato, l'orrenda definizione di litro sancita nel 1909 e assegna la parola "litro" come nome speciale per l'unità decimetro cubo. Ammette l'unità non SI curie (simbolo Ci) per le misure di attività di radionuclidi e assegna a tale unità il valore di  $3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$ . Raccomanda nuovi studi in vista di una urgente revisione della scala internazionale pratica di temperatura del 1948, con particolare riferimento alle misure con termometro a

<sup>169</sup> L'entità della dotazione straordinaria è evidente se si considera che l'intera dotazione annuale del BIPM prevista per l'anno 1965 ammonta a un milione trecentomila franchi oro.

gas, alle misure d'irraggiamento del corpo nero tra 630 °C e 1063 °C (temperatura di fusione dell'oro), all'estensione dell'uso del termometro a resistenza di platino fino a 1063 °C, agli studi delle misure a basse temperature.

Chiede infine ai laboratori di proseguire gli studi per l'esatta determinazione del coefficiente giromagnetico del protone, in vista di una sua possibile applicazione per il miglioramento della definizione dell'ampere. Sono gli elettrici, irriducibilmente infelici d'avere la loro unità fondamentale dipendente dalle unità meccaniche e in particolare dall'ultimo prototipo esistente nel sistema, il chilogrammo, a premere perché si investighino strade alternative; ma questa via non porterà a risultati soddisfacenti. Ancora nel 2011 non si trova l'accordo per una nuova definizione dell'ampere, svincolata dalle unità meccaniche ma capace di garantire l'identità tra i valori di forze meccaniche in equilibrio con forze elettriche. Il problema per gli elettrici è però meno pressante: un percorso parallelo si è ormai affermato per la conservazione e la disseminazione dei campioni delle loro unità di misura.

La XIII CGPM (1967/1968) inaugura le sue 12 risoluzioni con la nuova definizione del secondo:

il secondo è la durata di 9 192 631 770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133.

In parole più semplici, il secondo è il multiplo di ordine 9 192 631 770 del periodo di una ben determinata radiazione elettromagnetica; l'orologio al cesio è dunque un orologio che batte 9 192 631 770 ogni secondo. Il secondo è sempre agganciato alla caratteristica di un fenomeno naturale, non più legato però ai moti della terra ma al periodo di un'onda emessa da un atomo eccitato. Il guadagno di precisione è di almeno tre ordini di grandezza ed è essenziale per le nascenti telecomunicazioni planetarie, per la guida dei missili intercontinentali, per l'aviazione militare e civile, per il prossimo sviluppo dei satelliti civili e militari. Si noti che, stando alla definizione, il secondo non è l'unità di *tempo* ma l'unità della grandezza *durata*, ossia di un intervallo di tempo. La CGPM evita di impegnarsi sull'analisi di cosa sia il tempo, rinuncia all'idea di tempo assoluto e si occupa di durate, ossia di scale temporali.

Come già è stato ricordato, la XIII CGPM precisa il nome, kelvin, e il simbolo, K, dell'unità di temperatura termodinamica. Afferma che l'intervallo di temperatura di 1 K è uguale a 1 °C: le misure di intervalli di temperatura possono dunque essere espresse indifferentemente nelle due unità di misura, quel-

la termodinamica e quella della scala pratica. È un primo passo verso l'integrazione tra le due scale che avverrà nel 1989, quando il CIPM affermerà che la scala internazionale di temperatura è la migliore rappresentazione possibile della scala termodinamica. Definisce in modo esplicito il kelvin come frazione  $1/273,16$  della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua.

Terry Quinn, in una brillante conferenza tenuta a Torino nel 2005<sup>170</sup> in ricordo di Luigi Crovini<sup>171</sup>, fa risalire al 1990, quando entrò in vigore la nuova scala internazionale di temperatura a seguito della citata decisione del CIPM, la conclusione del processo di avvicinamento delle due scale: la scala pratica diviene la *mise en pratique* della scala termodinamica. I due percorsi indipendenti si unificano, accontentando così sia gli scienziati sia chi deve fare le misure sul campo in ambienti lontani dall'essere ideali. Eventuali future divergenze verranno risolte modificando dove necessario la scala internazionale di temperatura.

La XIII CGPM fornisce una definizione della candela con meno ambiguità redazionali<sup>172</sup>. Aggiunge altre unità in uso all'elenco delle unità SI derivate. Abroga i nomi di unità "micron" (divenuto un prefisso per sottomultipli) e "candela nuova". Dà mandato al CIPM di varare la nuova scala internazionale pratica di temperatura, fissandola all'anno 1968. Approva l'estensione delle attività del BIPM alla colorimetria e alla radiometria, per meglio affrontare i problemi della fotometria. Aumenta infine la dotazione del BIPM fino a portarla, nel 1972, a circa tre milioni di franchi oro; contestualmente autorizza le nazioni membri della CM a effettuare parte (circa il 20%) dei pagamenti in moneta nazionale, accordandosi con il BIPM affinché tali somme siano utilizzate anche tenendo conto delle necessità delle nazioni paganti.

#### **La XIV CGPM del 1971 conclude il processo di stabilizzazione del SI.**

Veniamo alla XIV CGPM (1971). Essa chiede al CIPM di mettere a punto una definizione di Tempo Atomico Internazionale (TAI) e di accordarsi con gli or-

<sup>170</sup> T. Quinn: *La definizione dell'unità di temperatura da Hooke a Boltzmann*, seminario su *Status and Trends in Thermal Metrology*, IMGC-CNR Torino, 28 Novembre 2005.

<sup>171</sup> Luigi Crovini (1937-1995), dirigente di ricerca del CNR, fu direttore dell'Istituto di Metrologia G. Colonnetti del CNR dal 1990 e membro del CIPM dal 1992; esercitò tali funzioni fino all'improvvisa morte. Contribuì alla crescita in Italia della metrologia della temperatura; suoi contributi di ricerca importanti riguardarono gli studi per le misure termodinamiche di temperatura mediante misure di rumore termico.

<sup>172</sup> La candela è l'intensità luminosa, in direzione perpendicolare, di una superficie di  $1/600.000$  metri quadrati di un corpo nero alla temperatura di solidificazione del platino sotto la pressione di 101.325 newton al metro quadro.

ganismi internazionali interessati per la realizzazione della scala TAI che soddisfi i bisogni degli utilizzatori.

Con la risoluzione 3, dedicata alla definizione della nuova settima unità di base del SI, la mole, la XIV CGPM sancisce l'ingresso ufficiale della chimica nell'ambito dei settori sui quali opera la CM. Bisognerà però aspettare ancora fino al 1993 per vedere la nascita del Comitato Consultivo per la quantità di sostanza (CCQM) e il 2001 per assistere, finalmente, all'attribuzione a tale Comitato di compiti espliciti per la promozione della metrologia in chimica. La definizione sancisce la scelta di un'unica unità di misura per la grandezza quantità di sostanza, prevedendo però che ogni qual volta si usi l'unità mole si specifichi a quale sistema di entità elementari ci si riferisce.

La mole è la quantità di sostanza di un sistema che contiene tante entità elementari quanti sono gli atomi in 0,012 kg di carbonio 12. Le entità elementari devono essere specificate e possono essere atomi, molecole, ioni, elettroni, ecc., ovvero gruppi specificati di tali particelle.

Le restanti delibere della XIV CGPM sono di ordinaria amministrazione.

Fermiamoci un momento ad analizzare l'assetto del SI dopo le decisioni della CGPM del 1971. Il SI si attesta su sette unità di base, cioè su sette scelte arbitrarie come necessarie e sufficienti per la generazione di tutte le unità di misura di interesse, almeno nei settori dei quali la CGPM ha deciso di farsi carico. Ancora oggi, dopo 40 anni, il SI resta ancorato a sette scelte e nulla sembra far prevedere un aumento dei settori coperti e quindi del numero delle scelte arbitrarie. Queste sette scelte possono essere classificate, da un punto di vista epistemologico, nel 1971 in tre categorie:

1. Una scelta è legata a un prototipo, il kilogrammo. Allora come oggi si vorrebbe abbandonare il prototipo ma non si è in grado di proporre un'alternativa altrettanto precisa.
2. Cinque scelte, per il metro, il secondo, il kelvin, la mole e la candela, sono ancorate a caratteristiche di fenomeni naturali, ritornando all'idea originale di universalità sostenuta dai padri del sistema metrico decimale. Il metro è un multiplo della lunghezza d'onda in vuoto di una radiazione elettromagnetica. Il secondo è un multiplo del periodo di una radiazione elettromagnetica. Il kelvin si ottiene assegnando un valore alla temperatura del punto triplo dell'acqua. La mole fa riferimento al contenuto di atomi in una data massa di carbonio 12. La candela si basa sull'intensità luminosa di un corpo nero portato alla temperatura di solidificazione del platino.

3. Per l'ampere la scelta privilegia l'assegnazione di un valore convenzionale e perfetto a una costante, la permeabilità magnetica del vuoto, usata nelle relazioni matematiche del modello con il quale si descrivono i fenomeni naturali.

Da un punto di vista sostanziale, le cinque scelte del secondo gruppo costituiscono il ritorno al paradigma originale del sistema metrico. Ogni laboratorio, purché dotato di adeguata competenza e di mezzi idonei, è in grado di realizzare le cinque unità di misura, ciascuna indipendente da altre unità. Ci troviamo dunque in una situazione nella quale l'indipendenza delle singole unità è simile a quelle definite mediante prototipi, ma esse sono, almeno in linea di principio, accessibili a chiunque; non serve una istituzione che funga da depositaria dei campioni e che ne distribuisca copie "conformi" agli altri utilizzatori. L'indipendenza è assoluta per il secondo, il metro e il kelvin. In teoria per la mole è necessario disporre del campione di massa e per la candela delle unità di superficie e di pressione.

Come abbiamo già sottolineato, ben diversa è la situazione dell'ampere. Per realizzarlo è indispensabile disporre del campione di forza il quale a sua volta dipende dai campioni del metro, del secondo e del kilogrammo. L'universalità e l'indipendenza dell'ampere è assai più limitata di quelle delle cinque unità del secondo gruppo. La scelta di agganciare la definizione di un'unità a una costante di modello, invece che alla caratteristica di un fenomeno naturale, sembra ridurre la sua indipendenza e la sua universalità.

**La rottura con la tradizione: l'ampere contagia altre unità.** Con l'avvio degli studi per una nuova (la sesta) definizione del metro e con la definizione della candela, la CGPM procede verso il cambio generalizzato di paradigma, attenendosi al principio affermato con la definizione dell'ampere. La candela abbandona il riferimento alla caratteristica di un fenomeno naturale e il metro si avvia sulla stessa strada: le definizioni di entrambe le unità faranno riferimento a valori di costanti di modello.

Così la XV CGPM del 1975 compie un passo nella direzione di una nuova definizione del metro raccomandando l'uso del valore  $299\,792\,458$  m/s per la velocità di propagazione della luce nel vuoto, risultante dalle misure di frequenza e di lunghezza d'onda di radiazione elettromagnetiche.

Avendo constatato che il tempo universale coordinato (UTC) è la base per le misure di tempo secondo la legislazione di molti Paesi, si pronuncia in favore di tale scelta. Approva alcune piccole correzioni alla scala internazionale pra-

tica di temperatura del 1968. Aggiunge qualche importante nome speciale alla tabella delle unità SI derivate (becquerel e gray<sup>173</sup>). Stabilisce nuovi nomi e simboli per prefissi di multipli delle unità SI. Prevede che la dotazione del BIPM, fissata a 5,3 milioni di franchi oro per il 1977, salga a 7,5 milioni nel 1980.

La decisione di rilievo della XVI CGPM (1979) riguarda la nuova definizione della candela. La necessità di una nuova definizione di natura radiometrica, in luogo dell'esistente riferita al corpo nero alla temperatura di solidificazione del platino, è giustificata sia da difficoltà di realizzazione della vecchia definizione, sia dai progressi delle tecniche radiometriche, sia dal generale consenso, confermato da una raccomandazione del CIPM del 1977, sul valore di 683 lumen al watt per l'efficienza luminosa spettrale della radiazione monocromatica di frequenza  $540 \cdot 10^{12}$  Hz. Il consenso su tali valori serve a stabilire la relazione tra le grandezze luminose della fotometria, riferite alla curva di risposta dell'occhio medio, e le grandezze energetiche. Così la candela diviene

l'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza  $540 \cdot 10^{12}$  hertz e la cui intensità energetica in quella direzione è  $1/683$  watt allo steradiante.

La sorgente luminosa che fornisce una candela è definita sulla base della radiazione emessa (monocromatica a  $540 \cdot 10^{12}$  Hz, circa il giallo dello spettro solare sul quale si ha il massimo della risposta dell'occhio) e sulla base della potenza radiante emessa per unità d'angolo solido ( $1/683$  W). È una definizione che fa riferimento a una costante di natura fisiologica, l'efficienza luminosa spettrale posta pari a 683 lm/W per una radiazione a  $540 \cdot 10^{12}$  Hz. Da notare che per definire la candela bisogna far capo al flusso luminoso (unità lumen, simbolo lm), grandezza preferita da molti come di base in luogo dell'intensità luminosa.

L'aspetto più rilevante di questa nuova definizione della candela è che essa determina lo spostamento dell'unità dal secondo al terzo gruppo tra quelli prima esaminati. La candela è vincolata a una costante di modello, un modello valido per un settore molto ristretto, quello della fotometria e della risposta dell'occhio umano alle radiazioni elettromagnetiche. L'aspetto più straordinario risulta essere la dipendenza della candela dal lumen, che è una unità derivata

<sup>173</sup> Del perché questa scelta sia importante parleremo nel prossimo paragrafo. Il becquerel, simbolo Bq, è il nome speciale dell'unità di misura della grandezza attività riferita a una sorgente radioattiva di un dato radionuclide; l'attività ha le dimensioni dell'inverso di un tempo e quindi  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ . Il gray, simbolo Gy, è il nome speciale dell'unità di misura della grandezza dose assorbita anch'essa utilizzata per la misura delle radiazioni ionizzanti; la dose assorbita ha le dimensioni di un'energia divisa per una massa e quindi  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$ .

dalla candela. Si tratta dunque di una definizione circolare, non indipendente (servono il watt, l'hertz e lo steradiante). Cambia ogni volta che cambiano le unità dalle quali dipende.

Si potrebbe sostenere, per giustificare questa scelta, che essa consente un guadagno in precisione. Invece no: la stessa CGPM afferma che il valore dell'efficienza luminosa spettrale «è ritenuto sufficientemente esatto per la fotometria». Non c'è guadagno di precisione. E allora si pone una domanda: perché non lasciare la definizione precedente, legata alla temperatura del corpo nero al punto di solidificazione del platino e alla superficie radiante del corpo nero, e aggiungere eventualmente una nota di questo genere?

Da tale definizione si determina sperimentalmente il valore di 683 lm/W dell'efficienza luminosa spettrale per una radiazione monocromatica a  $540 \cdot 10^{12}$  Hz. Poiché è conveniente fissare una volta per tutte questo valore, consentendo così di meglio agganciare la fotometria alla radiometria, qualora futuri esperimenti pervenissero a un valore diverso e più preciso dell'efficienza luminosa spettrale a  $540 \cdot 10^{12}$  Hz, non si cambierà tale valore ma quello della superficie radiante richiesta al corpo nero nella definizione della candela.

Sono convinto che una soluzione di questo tipo sarebbe piaciuta molto a Ercole Bottani anche per la definizione dell'unità elettrica di base.

Data la peculiarità della posizione della candela nel Sistema Internazionale di unità, unico esempio di unità con forti connotati fisiologici, vale la pena di riassumere le premesse metodologiche e organizzative che hanno condotto alla definizione di una costante fondamentale fotometrica. Troviamo alle origini l'essenziale presenza di un organismo non governativo internazionale che si fa carico di analizzare e sistematizzare i concetti fondamentali della fotometria e dei suoi collegamenti con la radiometria: si tratta della già citata *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE, URL: <<http://www.cie.co.at>>). Per prima cosa la CIE stabilisce le equazioni, fornite sotto forma di curve normalizzate, che legano, al variare del colore (frequenza della radiazione monocromatica), il flusso di energia della radiazione elettromagnetica, espresso in watt e mantenuto costante al variare della frequenza della radiazione, alla percezione visiva, espressa in lumen, unità di flusso luminoso. Le equazioni, ossia le curve di risposta dell'occhio umano, sono due: una per la visione diurna e l'altra per la visione notturna. Quando la CIE deve scegliere il campione fotometrico, prende una decisione che influirà pesantemente sul futuro della fotometria: decide di privilegiare non già il campione di flusso luminoso ma quello di intensità luminosa,

con l'unità candela che è il flusso luminoso totale emesso dalla sorgente diviso l'unità d'angolo solido (steradiano). La scelta, fortemente contestata, come abbiamo visto, è giustificata dal fatto che all'epoca tutte le sorgenti di luce potevano essere considerate puntiformi e quindi il legame tra intensità e flusso era molto stretto e ben definito.

I primi campioni d'intensità luminosa furono, come praticamente in ogni altro settore delle misure, prototipi. La CIE gestì il difficile percorso da una moltitudine di prototipi a un prototipo universalmente accettato: la candela internazionale. Quando la CGPM, su sollecitazione della CIE, prese in mano la situazione e decise di aggiungere la candela all'insieme delle unità fondamentali del SI, fu compiuto il successivo passo: il riferimento per la definizione e per la successiva realizzazione del campione fu spostato dal prototipo a una caratteristica di un fenomeno naturale: l'intensità (o il flusso luminoso emesso) di un corpo nero mantenuto alla temperatura di solidificazione del platino.

E arriviamo al 1979, con la nuova definizione della candela. La scelta effettuata è di straordinaria importanza sul piano epistemologico: viene fissato il valore, da considerare esatto e immutabile, di una costante fisiologica, l'efficienza luminosa spettrale per una radiazione monocromatica a  $540 \cdot 10^{12}$  Hz, posta pari a 683 lm/W. A questo punto tutto sembra congelato; ma così non è. Vedremo, quando parleremo di *soft metrology*, quanti siano i problemi ancora aperti e le conseguenze di questa decisione. Accenniamo ora solo a una conseguenza importante: l'occhio normalizzato, che ha condotto al citato valore per l'efficienza luminosa spettrale, può difficilmente essere riconosciuto come l'occhio umano medio di oggi; quando esso fu definito e furono sperimentalmente ricavate le curve di risposta dell'occhio alle radiazioni luminose, non erano ancora diffuse le sorgenti domestiche di luce e, soprattutto, quelle attuali a basso consumo. Quanto rilevanti sono stati gli adattamenti dell'occhio alla nuova situazione, incluso l'uso per lunghi periodi di schermi televisivi e di PC? E quindi quanto rilevante è stato il mutamento della sua efficienza luminosa spettrale? Forse si è congelato un valore ormai ampiamente superato per colpa di processi evolutivi, dovuti a modifiche sostanziali dell'ambiente.

**Il settore delle radiazioni ionizzanti.** Il problema della misura della radioattività fu sollevato dalla delegazione dell'URSS durante la prima CGPM successiva alla seconda guerra mondiale. La richiesta al BIPM di operare in questo settore fu accantonata, come abbiamo visto, per mancanza di finanziamenti adeguati al tema.

Nel 1958 il CIPM costituisce il Comitato Consultivo per i campioni (*Etalon*) di Misura delle Radiazioni Ionizzanti (CCEMRI). Nel 1960 il BIPM viene attivato, e finanziato, per compiere misure nel settore. Abbiamo già ricordato che fino a quel momento era stata la Commissione Internazionale delle unità e delle misure radiologiche (ICRU<sup>174</sup>) a farsi carico dello studio, conservazione e disseminazione dei campioni di misura, nonché delle azioni di scelta e confronto dei campioni di radiazioni ionizzanti. Il percorso è dunque simile a quello compiuto dalla fotometria: in quel settore l'IEC aveva gestito i vari problemi metrologici fino al momento di lasciarli in carico al BIPM. Ma con una importante differenza: l'ICRU non consegna al BIPM una curva normalizzata che raccordi la risposta dell'organismo umano alle radiazioni ionizzanti, per un certo verso analoga alla curva di risposta dell'occhio umano alle radiazioni luminose che la IEC aveva consegnato al BIPM. Per quale ragione?

L'occhio umano esiste per reagire alla radiazione luminosa e produrre effetti biologici, elettrici e neurologici nell'organismo, in modo che il cervello possa elaborare le informazioni ricevute dalla struttura sensoriale occhio per produrre la visione del mondo esterno. L'organismo umano non è attrezzato per reagire alla radiazione ionizzante e produrre sensazioni in qualche modo a essa correlate. Peraltro le radiazioni ionizzanti hanno effetti biologici sull'uomo: tali effetti sono correlati all'esposizione dell'organismo vivente a esse. Gli effetti biologici delle radiazioni ionizzanti sono nocivi per gli organismi viventi: possono alterare il DNA, uccidere cellule, modificare processi nell'organismo. È quindi non effettuabile una sperimentazione sull'uomo per ricavare la correlazione tra esposizione a radiazione ionizzante ed effetti biologici da essa provocati. Si percorre pertanto una strada diversa<sup>175</sup>.

Si deve premettere che l'energia ceduta dalla radiazione ionizzante a un mezzo di massa e volume noti si ottiene sottraendo all'energia entrante nel volume l'energia che dal volume esce e sommando algebricamente le variazioni di energia che possono aver luogo, all'interno nel volume considerato, a seguito

<sup>174</sup> La *International Commission on Radiation Units & Measurements* (ICRU, URL: <<http://www.icru.org>>) fu costituita nel 1925 con lo scopo di proporre un accordo internazionale sulle unità di misura da adottare per le applicazioni in medicina delle radiazioni. Oggi l'ICRU ha obiettivi preminentemente scientifici e cura l'organizzazione di periodici congressi su temi connessi allo studio delle radiazioni.

<sup>175</sup> F. Laitano: *L'importanza delle misure di dose assorbita in radioprotezione e nelle applicazioni mediche delle radiazioni ionizzanti*, URL: <[http://www.inrim.it/ldm/cd\\_ldm/allegati/SI\\_unitderiv/Dosimetria\\_Laitano.pdf](http://www.inrim.it/ldm/cd_ldm/allegati/SI_unitderiv/Dosimetria_Laitano.pdf)>.

di eventuali reazioni, esoenergetiche o endoenergetiche, che la radiazione può innescare. Il contributo di quest'ultimo tipo di reazioni è nullo per la gran parte delle radiazioni utilizzate in radioterapia (terapia dei tumori) e per la totalità delle radiazioni usate in radiodiagnostica (le radiografie). Tale contributo può non essere invece trascurabile quando la radiazione di interesse è tale da indurre nel mezzo reazioni di tipo nucleare, come nel caso dei neutroni. In pratica, l'energia ceduta dalla radiazione in un mezzo biologico (o di qualsiasi altra natura) si ottiene dalla misura di una grandezza, la dose assorbita, introdotta appositamente a questo scopo. La dose assorbita ha le dimensioni di un'energia diviso una massa e la sua unità di misura è perciò il joule al chilogrammo ( $\text{J kg}^{-1}$ ). Nel Sistema Internazionale, l'unità di misura dell'equivalente di dose ha il nome sievert (simbolo Sv): 1 Sv di equivalente di dose produce gli stessi effetti biologici qualunque sia il tipo di radiazione che investe l'uomo.

A una dose assorbita di 1 Gy possono invece corrispondere effetti biologici di diversa entità a seconda del tipo e dell'energia della radiazione considerata. Ne consegue che la metrologia delle radiazioni ionizzanti è un settore di grande complessità e investito di responsabilità enormi. Le sorgenti di radiazioni ionizzanti usate in radioterapia vanno metrologicamente caratterizzate con grande cura sotto una molteplicità di aspetti: tipi di radiazioni che emettono, energie a ciascuna associate, equivalente di dose a cui danno luogo. Un'errata caratterizzazione metrologica può produrre effetti devastanti, o perché non si ottiene l'equivalente di dose necessario per uccidere le cellule cancerogene, o perché si ottiene un equivalente di dose eccessivo che uccide, oltre alle cellule cancerogene, molte altre cellule sane. In Italia responsabile di questa complessa attività è l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti dell'ENEA (INMRI-ENEA), con sede presso il Centro Ricerche della Casaccia (Roma). L'INMRI-ENEA è responsabile dei campioni nazionali di radiazioni ionizzanti, della loro disseminazione a livello nazionale e della supervisione delle sorgenti di radiazioni ionizzanti utilizzate negli ospedali.

**1978: Pierre Giacomo, neo direttore del BIPM, lancia l'Operazione Incertezza.** Chiunque abbia avuto il piacere di conoscere Pierre Giacomo è certamente rimasto affascinato dalla cordialità del suo sorriso, dalla sua squisita gentilezza, dalla sua vastissima cultura. La sua posizione nella storia dei direttori del BIPM è di grande importanza: fu l'ultimo direttore francese del XX secolo; fu il primo direttore del BIPM nel XX secolo non proveniente dai quadri del BIPM stesso. Credo però che un giusto inquadramento della figura di Pier-

re Giacomo nella storia della metrologia debba partire nel riconoscere in lui il primo direttore che si rese conto dei rischi che stava correndo la Convenzione del Metro, con la tendenza alla “regionalizzazione” della metrologia e con la nascita degli organismi metrologici governativi (OIML, 1955) e non governativi (CIRP, 1951; IMEKO, 1958). Fin dal primo anno del suo mandato, Giacomo avviò l’Operazione Incertezza, L’operazione aveva un chiaro obiettivo: dimostrare la centralità e la necessità del BIPM quando si dovevano risolvere problemi sui quali mancava l’accordo a livello di istituzioni e di culture nazionali. Il problema era quello di individuare un modo condiviso per generare e gestire l’informazione sulla qualità delle misure. Nelle pubblicazioni scientifiche, nei cataloghi delle aziende produttrici di strumenti di misura, nelle norme sulle misure e sugli strumenti, si assisteva a un proliferare di termini e concetti, di metodi e di teorie, usati per fornire informazioni sulla qualità delle misure e degli strumenti. Precisione, accuratezza, incertezza, affidabilità, errore, ripetibilità, riproducibilità, sensibilità, riferibilità, tolleranza, giustezza, risoluzione: questi e altri termini erano usati per trattare della qualità delle misure e degli strumenti, associandoli, a seconda del contesto e dell’ambito culturale, a concetti e definizioni di volta in volta differenti. Giacomo riuscì a condurre a termine in due anni un lavoro difficile, mettendo d’accordo tra loro tanti ricercatori che avevano visioni profondamente diverse su quale compromesso adottare: l’azione del BIPM di promozione, coordinamento e sintesi del lavoro si dimostrò non solo essenziale ma addirittura indispensabile. Come Giacomo voleva dimostrare!

Per assistere a un nuovo tentativo di ristabilire la centralità degli organismi della Convenzione del Metro bisogna attendere fino al 1995. La XX CGPM (1995), con la risoluzione 2, dà il via a una nuova operazione: la stipula di un accordo tra gli Istituti Metrologici Nazionali, allargato ad altri organismi nazionali che si occupano di metrologia e agli organismi regionali di coordinamento metrologico: l’Operazione MRA, di cui parleremo in seguito.

#### *La seconda guerra fredda dal 1979 al 1985*

Nel quarto periodo tornano ad acuirsi le tensioni tra i due blocchi: episodi scatenanti furono l’invasione sovietica dell’Afganistan, nel 1979, una vigorosa ripresa della corsa agli armamenti da parte di entrambi i blocchi, il progetto del presidente degli USA Reagan di realizzare uno scudo spaziale, vissuto dall’URSS come episodio fortemente offensivo negli equilibri precari della spada di Damocle di una guerra nucleare.

In questo quadro di tensioni internazionali, CIPM e CGPM riescono soltanto a portare in porto due progetti a lungo preparati in precedenza: la nuova definizione della candela (1979), della quale già abbiamo parlato, e la rivoluzionaria sesta definizione del metro, agganciato al secondo in funzione della velocità della luce nel vuoto (1983). È già molto, in un momento di drammatica transizione dell'economia mondiale.

In questo stesso periodo nascono nuovi organismi regionali di coordinamento metrologico, nel sud est asiatico, nel continente americano e nel sud dell'Africa. È anche un modo di reagire alle tensioni internazionali, di dimostrare che la collaborazione è possibile in ampie regioni del mondo. La scelta della strada delle cooperazioni metrologiche nazionali accentua la crisi della Convenzione del Metro.

**Il microprocessore rivoluziona le misure.** All'inizio del periodo che stiamo considerando si affaccia sulla scena mondiale un nuovo personaggio che modificherà in modo sostanziale usi e costumi delle società industrializzate: il microprocessore. Oggi ne abbiamo in casa a decine: inseriti nei bancomat e nelle carte di credito, essenziali nei PC come nei forni a microonde, gestiscono dati, prendono decisioni e pilotano sistemi capaci di attuare le loro decisioni. Sono la base della robotica, essenziali per il progresso della genetica, indispensabili per il controllo del traffico aereo e navale. Senza di loro non ci sarebbero le missioni spaziali, i treni ad alta velocità, gli strumenti più avanzati per la diagnostica medica. Senza di loro non esisterebbero i navigatori satellitari, i telefoni cellulari e i mille giochi elettronici che tengono tante persone legate davanti a piccoli schermi. Lo stesso enorme sviluppo di Internet e dei *social network* sarebbe stato impossibile senza i microprocessori. Un'innovazione tecnologica conduce a ogni tipo di effetti, benefici e malefici: non dipende dall'innovazione in sé, ma da come l'umanità decide di applicarla.

Ovviamente con il microprocessore cambia anche il modo di fare misure. Di questo discutono nell'ottobre del 1982 i membri del Gruppo Misure Elettriche ed Elettroniche (GMEE) in un convegno scientifico al Politecnico di Milano<sup>176</sup>. Fu subito intuito e sottolineato che il microprocessore, posto a bordo degli strumenti di misura, avrebbe consentito di studiare e realizzare strumenti intelligenti, in grado di effettuare controlli su se stessi, capaci di riconoscere la

---

<sup>176</sup> Gli atti del convegno sono stati pubblicati dal Dipartimento di Elettrotecnica del Politecnico di Milano. Il convegno fu tenuto in memoria del Professor Piero Regoliosi, fondatore e primo presidente del GMEE.

differente natura dei segnali al loro ingresso e di gestirli in modo corretto. Si riconobbe il ruolo nuovo da assegnare all'analisi dei segnali, alle misure di grandezze tempovarianti; si prevedero innovazioni nella ricerca e nella disponibilità di nuovi strumenti di misura, previsioni che rapidamente si realizzarono, addirittura al di là delle più ottimistiche previsioni.

L'innovazione sul modo di fare le misure grazie all'avvento dei microprocessori fu generata da ricerche universitarie e industriali. Anche il problema di come gestire in modo metrologicamente corretto le misure prodotte da strumenti intelligenti fu affrontato prima nelle università e solo più tardi negli IMN. Non deve stupire questo tipo di processo: i docenti universitari hanno il compito di preparare le generazioni di giovani e devono anticipare nell'insegnamento, e quindi nella ricerca che si colloca come base essenziale dell'insegnamento, le innovazioni che saranno i termini di riferimento delle applicazioni di domani.

**La sesta definizione del metro.** Vissi in prima persona, come esperto invitato alle riunioni del CCDM, la genesi tormentata della sesta definizione del metro. E mi opposi strenuamente al cambiamento. Allora disponevo di poche frecce al mio arco: sostenni l'inutilità (non portava ad alcun miglioramento di precisione), la difficoltà di spiegare la nuova definizione nelle scuole, i costi che avrebbe comportato il cambiamento senza significativi benefici. Questi argomenti non furono ritenuti sufficienti e fui messo in minoranza. E così fu approvata la seguente definizione:

il metro è la lunghezza del tragitto compiuto dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo di  $1/299\,792\,458$  di secondo.

È una definizione che fa dipendere il metro dal secondo; ne consegue che non è il metro a essere costante ma una velocità, la cui unità, metri al secondo, è derivata dal metro. Dunque una nuova definizione circolare e non indipendente. Si poteva fare qualcosa di meglio?

Esaminiamo le scelte possibili nel sistema a due unità di base, metro e secondo, la cinematica. Supponiamo di definire l'unità di tempo, il secondo, e l'unità di lunghezza, il metro, come oggi sono. La definizione del metro in realtà fissa la velocità della luce in vuoto  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s, valore esatto (privo di incertezza) e immutabile<sup>177</sup>. Dalla definizione della velocità  $c_0$  il metro si

<sup>177</sup> C'è però un sottile e complesso problema aggiuntivo connesso alla definizione del metro del 1983 che emerge se la si analizza insieme alla definizione dell'ampere del 1948. L'una fissa  $c_0$ ,

ricava ricordando che una lunghezza percorsa da un ente in movimento (punto, oggetto, onda luminosa, ecc.) è uguale alla velocità (uniforme) dell'ente moltiplicata per il tempo in secondi impiegato a percorrere detta lunghezza. Dalla definizione  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s otteniamo che la luce in 1 s percorre 299 792 458 m; quindi il metro è la frazione  $1/299\,792\,458$  della distanza percorsa dalla luce in vuoto in 1 s, come afferma, con altre parole, la definizione.

Analizziamo il processo storico mediante il quale si giunge alla definizione della velocità  $c_0$  esatta e immutabile. Prima il metro era definito come multiplo, esatto e immutabile, di ordine 1 650 763,73 della lunghezza d'onda in vuoto della radiazione corrispondente alla transizione tra i livelli  $2p_{10}$  e  $5d_5$  dell'atomo di krypton 86. Mediante quel secondo (definito come è ora) e questo vecchio metro venne misurata, tramite numerosi e sofisticati esperimenti, la velocità della luce<sup>178</sup>, trovandola uguale a 299 792 458 m/s, con un'incertezza inferiore a 0,1 m/s. Fu allora deciso (XVII CGPM, 1983) di assumere tale valore come esatto per definizione, immutabile nel tempo, e di dedurre da esso il metro. L'incertezza che c'era nel valore sperimentale della velocità della luce non venne persa: la si trasferì, tale e quale, sulla realizzazione dell'unità metro. Si preferì pertanto lasciar cambiare il metro al migliorare delle tecniche sperimentali e mantenere immutabile la velocità della luce<sup>179</sup>.

Conclusione: definire il metro come multiplo (esatto) di ordine 1 650 763,73 della lunghezza d'onda in vuoto della radiazione corrispondente alla transizione tra i livelli  $2p_{10}$  e  $5d_5$  dell'atomo di krypton 86 o definire la velocità della luce  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s conduce a situazioni perfettamente equivalenti. Al momento in cui si decide di preferire la definizione

---

l'altra fissa  $\mu_0$ . Dalle quattro equazioni di Maxwell si deduce la seguente relazione:  $1/c_0^2 = \varepsilon_0 \mu_0$ , nella quale  $\varepsilon_0$  è la costante dielettrica del vuoto. Anche la costante dielettrica del vuoto ha ora un valore esatto per definizione. Si potrebbe sostenere che "il vuoto" è assunto come materiale di riferimento privilegiato per il SI!

<sup>178</sup> Chi desidera saperne di più sulla storia degli esperimenti per la misura della velocità della luce e sui risultati ottenuti può leggere la breve e chiara sintesi di Giovanni Battista Gualdi: *Misurare la velocità della luce*, URL: <<http://ulisse.sissa.it/chiediAUlisse/domanda/2004/Ucau041206d001>>. Utile per approfondire ulteriormente la nota di Carlotta Forni: *La storia della velocità della luce*. Scritta nel 2005, la nota contiene però un errore che i lettori di questo articolo dovrebbero essere in grado di individuare: URL: <<http://ulisse.sissa.it/chiediAUlisse/domanda/2005/Ucau050127d002>>.

<sup>179</sup> Si pone il problema di come fare a verificare se la velocità della luce cambia, per esempio al cambiare della lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica, visto che le unità di misura sono generate supponendola costante. Ma questo è un problema complesso e forse di scarso interesse pratico, sul quale comunque torneremo nelle conclusioni.

$c_0 = 299\,792\,458$  m/s l'incertezza che si aveva sul valore di  $c_0$  viene annullata, l'esperimento "misura della velocità della luce in vuoto" diviene privo di significato: eseguendolo, in realtà si procede alla realizzazione del metro sulla base della definizione  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s. La novità rilevante è rappresentata da questo cambiamento di significato del medesimo esperimento; siamo però sul piano epistemologico, lontani dal piano scientifico e tecnico.

Il cambio della definizione del metro del 1983 ebbe una serie di conseguenze, positive e negative. Fece felici gli astronomi e i fisici, perché mise fine al mutare del valore della velocità della luce a ogni miglioramento dei metodi per la sua misura. Diede ad alcuni grandi Istituti Metrologici Nazionali, in particolare di USA e Regno Unito, l'opportunità di giustificare davanti all'opinione pubblica e ai finanziatori le ingenti somme spese per effettuare le misure della velocità della luce. «Vedete – dissero – abbiamo speso bene i soldi ricevuti perché abbiamo contribuito in maniera sostanziale a un cambiamento epocale della struttura della definizione del metro, giovando alla scienza come fisici e astronomi possono testimoniare». Rese celebri, nella ristrettissima comunità degli specialisti degli istituti di metrologia, quei personaggi che sostennero il cambiamento. Ma ebbe anche un costo non trascurabile: si dovettero adeguare le norme, i manuali della qualità delle aziende, i libri scolastici. Chi si trovò maggiormente in difficoltà furono gli insegnanti, in particolare quelli delle scuole inferiori, costretti a trovare parole semplici per spiegare una definizione complessa. Ma operativamente per le aziende nulla cambiò: rimasero gli stessi campioni che prima usavano, con gli stessi valori e con le stesse incertezze.

E il metro andò a raggiungere l'ampere e la candela nel gruppo delle unità definite con riferimento a una costante di modello.

Oggi nessun istituto di metrologia realizza il metro come suggerito dalla nuova definizione, ossia partendo dalla velocità della luce. Tutti si rifanno al metro come multiplo di una lunghezza d'onda, scelta tra le tante raccomandate dal CIPM. Per alcuni, pochi, grandi istituti è una scelta di comodità: nel laboratorio accanto sono pronti, anche se coperti di polvere, i banchi di sorgenti elettromagnetiche necessari per realizzare la scala di frequenza indispensabile per passare dalla velocità della luce al metro. Altri istituti di nazioni meno ricche e meno scientificamente avanzate dipendono dalle raccomandazioni del CIPM sulle lunghezze d'onda, le quali possono essere proposte solo da quei pochi ricchi istituti. È una sorta di neocolonialismo metrologico, conseguenza del neocolonialismo scientifico e tecnologico.

Si può ora rispondere alla domanda di partenza: si poteva fare di meglio? Si: sarebbe bastato aggiungere alla vecchia definizione una nota, simile a quella che proposi per la definizione della candela, in cui dire pressappoco questo:

Dall'attuale definizione del metro e del secondo si è ottenuto, misurando con i campioni generati da tali definizioni lunghezza d'onda in vuoto e periodo di una stessa radiazione elettromagnetica, il seguente valore della velocità della luce in vuoto:  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s, con un'incertezza inferiore a 0,1 m/s. Poiché nell'attuale insieme di equazioni che descrivono i fenomeni della natura compare sovente la velocità della luce in vuoto come parametro costante nei modelli utilizzati, è conveniente attribuire a essa un valore univoco, costante e privo di incertezza:  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s. Qualora futuri esperimenti dimostrino che tale valore non è congruente con le definizioni del metro e del secondo, non si cambierà il valore di  $c_0$  ma il valore del multiplo della lunghezza d'onda dal quale viene fatto discendere il metro.

Da notare che ogni due anni il CIPM, su suggerimento del Comitato Consultivo per la Lunghezza, aggiorna le istruzioni per la realizzazione del metro, elencando la radiazioni elettromagnetiche consigliate e il multiplo della loro lunghezza d'onda in vuoto da adottare per generare la lunghezza un metro. Fa cioè esattamente quello che si promette nella nota prima proposta.

#### *La nuova distensione dal 1985 al 1989*

Il quinto periodo, segnato dalla fine delle avventure sovietiche in Afganistan e americane in Vietnam, è dominato dalla figura di Michail Gorbačëv, con l'avvio di profonde riforme in URSS e di un processo di distensione con gli USA. Si conclude con l'inizio dell'imprevisto e rapidissimo dissolvimento dell'URSS, la superpotenza in competizione con gli USA. Gli USA restano la sola grande potenza con ambizioni di gestione della politica e dell'economia mondiale.

In questo periodo si tiene una sola riunione della CGPM, la XVIII nel 1987. Scientificamente è una riunione importante, in quanto affronta a fondo i problemi dell'unità di tempo, confermando tra l'altro la decisione del CIPM di affidare al BIPM la gestione del Tempo Atomico Internazionale. Riaffermare la centralità del BIPM, allargandone i compiti e aumentandone la dotazione annuale, portata fino a oltre venti milioni di franchi oro nel 1992, è la strada scelta per rispondere ai venti di crisi.

La XVIII CGPM prende posizione anche sui possibili nuovi precisi modi di conservare e disseminare l'unità volt, mediante l'effetto Josephson, e l'unità

ohm, mediante l'effetto Hall quantico, raccomandando al CIPM e agli istituti di procedere verso un accordo sui valori da attribuire alle rispettive costanti. Affida anche al CIPM il compito di mettere a punto una nuova scala di temperatura, suggerendo di farla entrare in vigore al 1 gennaio 1990. Ma fino a questo momento la CGPM pare ignorare la perdita di centralità nella gestione della metrologia mondiale.

### 3.7. Il rapporto tra crisi della metrologia e crisi della politica e dell'economia

Immaginiamo di poter entrare nella sala dove si riunisce, a Parigi, la Commissione sulla misurazione della performance economica e del progresso sociale, voluta dal presidente Nicolas Sarkozy. Una ventina di personalità d'alto livello, fra le quali spiccano i premi Nobel per l'economia Joseph Stiglitz, Daniel Kahneman e Amartya Sen, l'economista francese Jean-Paul Fitoussi e il presidente dell'istituto nazionale di statistica italiano Enrico Giovannini, tentano di definire nuovi indicatori misurabili da affiancare al PIL (prodotto interno lordo) per meglio descrivere lo stato di salute di una nazione. Personalità di "destra" e di "sinistra" si confrontano su un tema forse cruciale per il futuro dell'umanità: fornire ai decisori politici indicatori utili per progettare al meglio gli interventi indispensabili per conseguire gli obiettivi che le comunità nazionali ritengono prioritari per il benessere delle presenti e future generazioni. È un tentativo, forse disperato perché tardivo, per riportare la Politica al centro del processo decisionale<sup>180</sup>, riappropriandosi degli spazi occupati dall'economia e dalla finanza.

Le misurazioni delle quali si occupa la Commissione di Sarkozy sono ben altra cosa da quelle gestite dagli organismi della Convenzione del Metro. Esse riguardano il macrosistema di governo mondiale e l'intreccio complesso tra politica, economia, sociologia e finanza. È peraltro indispensabile comprendere perché questa e altre simili commissioni in giro nel mondo stanno lavorando, tutte con obiettivi simili. Come e perché si è giunti alle *depolitizzazione* del governo mondiale? Con quali conseguenze?

Sarebbe limitativo e arbitrario parlare di crisi della struttura di governo della metrologia limitandosi all'esame delle cause interne al sistema. Se solo tali fossero state le cause, sarebbe più corretto parlare non di crisi ma di modifica e adattamento del sistema a nuove esigenze manifestatesi al suo interno. In realtà

<sup>180</sup> Si veda l'articolo di Jon Gertner (The New York Times Magazine, USA) pubblicato in Italiano con il titolo *La ricchezza delle nazioni* su Internazionale, n.850, giugno 2010, pp. 36-43.

la crisi della metrologia sembra rientrare in un quadro più ampio e complesso di crisi globale. È un capitolo difficile da analizzare perché sono limitati gli studi degli effetti dei profondi mutamenti nel macrosistema mondiale su micro sistemi quali la metrologia. La sintesi che cercherò di delineare si basa su un tentativo di analisi del complesso rapporto tra società e metrologia, tra strutture di governo globali e particolari.

*Genesis, sviluppo e crisi del sistema di governo della politica e dell'economia mondiale*

Torniamo indietro nel tempo, al 9 giugno del 1815, giorno di chiusura del Congresso di Vienna, quando le nazioni europee (allora l'Europa coincideva con il mondo, o almeno di questo era convinta) decisero il nuovo assetto dei Governi e degli Stati. Il 18 giugno, con la sconfitta di Waterloo, si chiudeva definitivamente il tentativo francese di stabilire la propria egemonia in Europa<sup>181</sup>. Nasceva allora il *Concerto Europeo*, una sorta di accordo tra le grandi potenze per gestire le possibili future contrapposizioni di interessi tramite il metodo della concertazione, attribuendo alla diplomazia e alla politica il ruolo di gendarme dell'equilibrio restaurato. Alcuni storici paragonano queste periodiche riunioni diplomatiche per discutere i problemi di interesse comune alle attuali periodiche riunioni del G8 e del G20. Le differenze di sostanza sono però profonde, non fosse altro che per la diversa struttura dei governi di allora e di oggi. È forse più corretto paragonare il Concerto delle Nazioni all'attuale Consiglio di Sicurezza dell'ONU, come fa Eric J. Hobsbawm. È un periodo critico: i sudditi, che progressivamente si stanno trasformando in cittadini<sup>182</sup>, affidano ai governi sempre maggiori competenze. La partecipazione significava costituzione e democrazia ma riduceva, al contempo, gli spazi di libertà dall'ingerenza dello Stato.

I primi segnali di crisi del metodo del *governo concertato* si ebbero con la guerra di Crimea (1853-1856). Lo schema andò definitivamente a catafascio nel 1870-1871, con la guerra tra Francia e Prussia. I nuovi Stati Nazionali si stavano trasformando in imperi e gli interessi da difendere non erano più soltanto europei. La Germania avanzava la sua candidatura all'egemonia europea che avrebbe cercato di affermare con le due terrificanti guerre del XX secolo.

Ma gli Stati Nazionali stavano comunque consolidandosi<sup>183</sup>. Poteri centralizzati, condivisi dalla grande maggioranza della popolazione, erano indispensabili

<sup>181</sup> Eric J. Hobsbawm: *L'età delle rivoluzioni, 1788-1848*, Rizzoli, 1999, p. 164 e seg.

<sup>182</sup> W. Reinhard: op.cit., p. 491.

<sup>183</sup> W. Reinhard: op.cit., p. 541.

per procedere nella realizzazione delle grandi infrastrutture quali le ferrovie, le strade, i porti per le grandi navi d'acciaio, la distribuzione capillare dell'illuminazione, prima a gas e poi elettrica. Così i governi degli Stati Nazione iniziarono ad assumersi compiti sempre più gravosi nei riguardi dei cittadini. Il modello di Stato Nazione sviluppato in Europa e nei Paesi dall'Europa generati (USA, Australia, Canada), fu esportato ai Paesi dell'Africa e dell'Asia dove le nazioni europee stavano attuando la spartizione dei territori colonizzati e costruendo i loro imperi. Il medesimo modello fu adottato anche dalle nuove nazioni che si costituivano separandosi, per esempio, dall'impero ottomano: tra il 1830 e il 1913 la Grecia, la Romania, la Serbia, il Montenegro, la Bulgaria e l'Albania.

Alla fine del XIX secolo cominciò a radicalizzarsi l'ideologia del nazionalismo che condusse, nella prima metà del XX secolo, agli scontri delle due guerre mondiali. Le guerre sono condotte dagli Stati divenuti "totali", ossia in grado di limitare le libertà personali e di condizionare ogni scelta dei cittadini<sup>184</sup>.

Siamo ora nel 1945. Convivono due sistemi per governare un mondo che si fa ogni giorno più globale e più globalizzato: il bipolarismo USA-URSS che definisce zone di influenza nelle quali le decisioni sull'assetto politico ed economico degli Stati sono prese da una delle due superpotenze, senza diritto di ingerenza dell'altra; l'ONU e la sua assemblea, nella quale hanno modo di esporre e far valere le proprie esigenze anche gli Stati non allineati ai due blocchi contrapposti. Il metodo per superare le crisi periodiche è quello della consultazione, tra governi per i problemi politici, tra banche centrali per i problemi economici. Nascono organismi come il Fondo Monetario Internazionale, con l'obiettivo di facilitare l'equilibrio economico mondiale, peraltro a favore dei Paesi più avanzati sul piano industriale e degli USA in particolare.

I primi sintomi di crisi si manifestarono negli anni sessanta e settanta del XX secolo. Si diffuse la percezione di eccessivo potere dello Stato, l'opposizione extra parlamentare al governo, i movimenti etnici ispirati anche dai processi di decolonizzazione<sup>185</sup>.

La nuova crisi del governo mondiale ebbe tra le tante cause anche quanto avvenne nell'anno 1971, quando il presidente USA Richard Nixon decise unilateralmente, abbandonando la prassi della concertazione con le banche centrali, di sospendere la convertibilità in oro del dollaro e di lasciarlo svalutare. Nixon

<sup>184</sup> W. Reinhard: op.cit., p. 564.

<sup>185</sup> W. Reinhard: op.cit., pp. 615 sgg.

e il suo consigliere Henry Kissinger introdussero alte tariffe doganali sulle importazioni per riequilibrare i flussi commerciali negli USA<sup>186</sup>.

Nel 1973 al difficile quadro generale si aggiunse la prima crisi petrolifera. I Paesi arabi dell'OPEC (Organizzazione dei Paesi esportatori di petrolio, cartello fondato nel 1960 e nel quale gli arabi detenevano nel 1973 una quota superiore al 40%) decisero di quadruplicare il prezzo del petrolio come reazione alla sconfitta di Egitto e Siria nella guerra del Kippur contro Israele.

Gli effetti sulle economie mondiali furono devastanti. Si affermò un nuovo nazionalismo economico e ogni Stato cercò soluzioni nazionali per salvaguardare la propria economia, senza curarsi degli effetti esterni. La competizione fra Stati si fece feroce. Gli accordi per la liberalizzazione del commercio vennero aggirati sistematicamente con forme di protezionismo mascherato. I governi delle nazioni economicamente più deboli svalutarono la loro moneta per ottenere maggiore competitività. Germania e Giappone, unici Paesi con bilancia commerciale forte, rifiutarono di fungere da traino dell'economia mondiale con adeguamenti valutari e aumento dei consumi interni. Crebbero vertiginosamente i costi delle materie prime.

Ma vi furono anche effetti benefici: venne rallentata la costosissima corsa agli armamenti (accordo SALT I nel 1972 e SALT II nel 1974); gli USA iniziarono il loro disimpegno nel Vietnam e l'avvicinamento alla Cina; nel 1973 le due Germanie furono ammesse all'ONU. Si cercarono anche nuove strade di intesa tra le nazioni, come accadde alla conferenza di Helsinki (1972-1975) per la sicurezza e la cooperazione in Europa: il documento finale, firmato da 33 Paesi europei (URSS inclusa) e dagli USA, parla di confini inviolabili, cooperazione, miglioramento delle condizioni di vita, tutela dei diritti umani.

Nel 1974 scoppia la crisi interna USA, con le dimissioni del presidente Nixon. Si apre un periodo di recessione industriale e di inflazione monetaria (stagflazione). I prezzi aumentano in alcuni Paesi, Regno Unito e Italia in particolare, fino al 20% all'anno. Scoppiano ovunque le rivendicazioni delle classi lavoratrici, particolarmente penalizzate dall'inflazione e dall'aumento della disoccupazione. È messa in discussione la stessa struttura produttiva delle catene di montaggio e della produzione di massa, cioè le dinamiche economiche che avevano consentito il boom nei Paesi occidentali. In Germania e in Italia dilaga il terrorismo. Nel 1979-1980 in Iran si afferma la rivoluzione komeinista e il prezzo del petrolio triplica.

---

<sup>186</sup> G. Formigoni: op.cit. pp. 258 sgg.

Nel 1975 si tiene il primo vertice del G6 (USA, UK, Francia, Germania Federale, Italia, Giappone) che subito diviene G7 con l'aggiunta del Canada.

La svolta si verifica nel 1979. Sono ancora gli USA a prendere una importante decisione unilaterale: alzano i tassi di interesse e allentano i vincoli ai movimenti finanziari internazionali. Gli USA intendono riprendere in mano le redini del governo mondiale non più grazie alla loro capacità produttiva, ormai in declino, ma in forza del proprio sistema finanziario.

L'alto costo dei capitali frena l'inflazione nei Paesi industrializzati ma apre l'epoca dell'economia dominata dalla finanza. Si affermano le tecnologie informatiche, l'elettronica, la robotica. Si assiste al passaggio dalla produzione di massa alla produzione flessibile orientata alla qualità e alla competitività. Si parla di terza rivoluzione industriale<sup>187</sup>: nuova organizzazione del lavoro, con perdita del potere sindacale, crescita vertiginosa dei servizi, aumento del commercio mondiale.

In quegli anni cruciali anche la metrologia degli istituti nazionali venne pesantemente coinvolta. Tipico è l'esempio del NBS, istituto USA: al suo interno fu costituita una divisione per la metrologia nei sistemi flessibili di produzione. Durante una riunione ufficiale a Washington incontrai Robert Hocken, direttore della nuova divisione, oggi professore di metrologia delle nanotecnologie alla Charlotte University e caro amico. Più che un incontro si trattò di uno scontro: Bob allora, ma anche oggi, odiava la burocrazia di quegli incontri tra delegazioni. Chiesi di visitare la sua divisione ma ottenni solo un netto rifiuto: *top secret division!*

In Italia fu la Ferrari a installare per prima i sistemi flessibili di produzione e a cimentarsi con il complesso problema di utilizzare l'enorme quantità di informazioni sul processo produttivo, prodotte dai sistemi automatici di misura, anch'essi flessibili, inseriti nel processo. Ricordo quando alla stazione ferroviaria di Modena fui accolto da una fiammante Testa Rossa, guidata da un collaudatore che mi portò a Maranello, attraverso vie tra i campi percorse come solo un collaudatore con una Ferrari può fare. Ricordo una stanza piena di tabulati prodotti dai calcolatori che gestivano i sistemi flessibili, tra i quali si dovevano selezionare le poche informazioni utili dai tanti numeri disponibili. Fu un'esperienza entusiasmante, sia per la grande competenza degli ingegneri della Ferrari, sia per l'innovazione d'avanguardia che ebbi modo di esplorare, sia per la difficoltà dei problemi che cercammo di risolvere.

---

<sup>187</sup> S. Battilossi: *Le rivoluzioni industriali*, Carocci, 2002, p. 111.

Ma torniamo alla svolta di uscita dalla crisi economica mondiale, ottenuta attraverso la liberalizzazione del mercato e la perdita di potere della politica a vantaggio della finanza internazionale e del sistema economico USA. Ne trassero vantaggio i sistemi imprenditoriali dei Paesi con economia industriale avanzata ma al prezzo del ritorno di incertezze sociali, alti tassi di disoccupazione, disuguaglianze crescenti, riduzione della fiducia nella capacità politica e giuridica di regolare il sistema globale.

Di fronte a questa perdita di prestigio e potere della politica molte nazioni avviarono la ricerca di nuove forme di governo non più mondiali ma a dimensione regionale. Iniziò l'Europa con la Comunità Economica Europea, dei 9 nel 1973 ma già dei 12 nel 1986. Nel 1989 il Giappone e le 4 tigri asiatiche (Hong Kong, Singapore, Corea del Sud, Taiwan) fondarono l'APEC (*Asia-Pacific Economic Cooperation*), organismo composto da economie, non da Stati, con piena autonomia giuridica. Cessata l'era di Mao, anche la Cina entrò nell'APEC. Si moltiplicarono i tavoli di concertazione, all'interno delle regioni e tra regioni diverse.

Questi nuovi centri di governo non riuscirono a riprendere il controllo della finanza internazionale, come ben dimostrò la crisi economica che investì il mondo intero a partire del 2008. Dunque la crisi del macrosistema di governo della politica, dell'economia e della finanza mondiale è ancora lontana dall'essere risolta.

### *Genesis, sviluppo e crisi del microsistema di governo della metrologia mondiale*

Prima di sottolineare lo stretto parallelismo, pur con gli inevitabili ritardi dovuti alle sostanziali differenze delle dinamiche decisionali, tra le due crisi, quella del macrosistema di governo mondiale e quella del microsistema della metrologia, è utile ricordare la complessità del sistema di governo della scienza e tecnica delle misure. In questo ambito si incontrano scienza e politica, tecnologia e mercato. La complessità è tale da rendere inevitabile un forte impatto sul microsistema degli accadimenti che caratterizzano il macrosistema.

Il microsistema della metrologia nasce in concomitanza con la crisi del *Concerto Europeo*. Sceglie di fondarsi su un paradigma che risale addirittura a prima dell'illuminismo: i prototipi affidati a un'autorità internazionale (il BIPM) che li gestisce generando loro copie da distribuire ai governi che hanno aderito alla Convenzione del Metro. Prevede la difficile convivenza nel percorso decisionale di scienziati e politici. Dunque il microsistema nasce già in crisi, pensato per un mercato globale e costretto a confrontarsi con i nascenti nazionalismi.

Quale percezione hanno gli addetti ai lavori circa la natura del microsistema nel quale operano? Moltissime sono le testimonianze che si possono ricavare dagli interventi ufficiali all'apertura delle riunioni della Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure. Prendiamone due particolarmente illuminanti, entrambe relative alla X CGPM del 1954, quando il macrosistema è in equilibrio sulla base del bipolarismo USA-URSS e dell'azione dell'ONU. Il BIPM nel 1949 ha firmato un importante accordo con l'UNESCO, revisionato nel 1952 e sottoposto ad approvazione alla X CGPM. L'accordo prevede che i campioni e gli strumenti di misura che viaggiano per i confronti e i controlli periodici possano utilizzare una speciale targhetta UNESCO che consente l'esecuzione dei controlli doganali presso il laboratorio di destinazione e in presenza di un esperto del laboratorio. È un riconoscimento ufficiale importante per il BIPM e la CGPM.

Roland de Monstier, segretario di stato in rappresentanza del ministro degli esteri francese, paragona la CGPM alla Società delle Nazioni dei Pesi e delle Misure (aspetto politico) e a un Consiglio Superiore dei Pesi e delle Misure (aspetto scientifico). Politica e scienza gestiscono insieme il settore. Paragona il BIPM a un servizio amministrativo internazionale, una *Union Internationale* come altre create nel corso del XIX secolo, con l'obiettivo di unificare le legislazioni e proteggere gli interessi sociali ed economici dell'umanità.

J.E. Sears, presidente del CIPM, osserva che

la II guerra mondiale ha prodotto, come effetto singolare, la distensione delle relazioni tra gli Organismi della Convenzione del Metro e gli Stati a essa aderenti. Tutti i governi si sono dati da fare per regolarizzare le loro situazioni debitorie nei confronti del BIPM. Un ringraziamento speciale va alla Germania e al Giappone per i quali gli effetti del conflitto sono stati particolarmente prolungati.

Ciò ha permesso al BIPM di attrezzarsi per rispondere ai nuovi compiti che la CGPM gli ha attribuito, il cambiamento della definizione del metro in particolare, grazie anche alle donazioni *una tantum*, pari in totale a settantottomila franchi oro, effettuate dalla maggioranza degli Stati.

Gli addetti ai lavori percepiscono dunque gli organismi nei quali operano come un vero e proprio sistema di governo globale, dotato delle necessarie autonomie politiche e dell'indispensabile autorevolezza scientifica. Nei verbali delle riunioni del CIPM e della CGPM si trovano sovente tracce di scontri tra interessi nazionali contrapposti; mai si trovano indicazioni di percezione delle

crisi in atto nel microsistema. Sempre durante la X CGPM si assiste a una accesa discussione sulla definizione del sistema pratico di unità, metro, kilogrammo, secondo, ampere, kelvin e candela. L'URSS ritiene prematura la decisione e si oppone ancora una volta alla scelta della candela come unità fondamentale. Anche la discussione sull'ampere è accesa; il presidente ricorda che ISO, IEC e IUPAP (Unione Internazionale di Fisica Pura e Applicata) hanno già scelto da tempo l'ampere e sollecitano una delibera della CGPM che sancisca la loro scelta. Si va ai voti: per l'ampere 21 SI, 6 NO (USA, Argentina, Canada, Spagna, Polonia, Svizzera) e 1 astenuto (Austria); non si delineano schieramenti politici. Per la candela 21 SI, 4 NO (Ungheria, Romania, Cecoslovacchia, URSS) e 3 astenuti (Bulgaria, Polonia, Thailandia); gli schieramenti emergono in modo evidente. Ma al momento della votazione della risoluzione finale le divergenze si ricompongono e la delibera è approvata all'unanimità.

Al momento del crollo dell'URSS gli organismi della Convenzione del Metro agiscono come se per loro nulla fosse cambiato. Eppure erano ben evidenti centri decisionali alternativi che stavano facendosi carico di affrontare problemi metrologici di grande rilevanza, ignorati dal CIPM e dalla CGPM.

### 3.8. La rivoluzione epistemologica

Sfuggì a molti scienziati del tempo la portata epistemologica delle nuove definizioni dell'ampere, del metro e della candela. Si trattò dell'inizio di una vera e propria rivoluzione. Cerchiamo di approfondire questo importante aspetto.

Come è stato precisato, la nuova definizione dell'ampere di fatto si limita a fissare il valore di  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m per  $\mu_0$ , la permeabilità magnetica del vuoto. Ne consegue che la determinazione del valore dei campioni in uso per le altre unità di misura elettriche divenne dipendente da un esperimento. Per esempio, realizzato l'ampere, il valore in volt fornito da una pila Weston diviene sperimentalmente conoscibile. Si parte da una potenza di 1 W, generabile e misurabile tramite misure solo meccaniche. Si divide tale valore di potenza per 1 A, ottenendo il volt. Infatti, detta  $V$  la tensione,  $I$  la corrente e  $P$  la potenza, vale la relazione  $V \cdot I = P$ , dalla quale  $V = P/I$ . Ottenuto così 1 V, si può agevolmente procedere alla misura di quanti volt mette a disposizione la pila Weston.

Se invece fosse stato seguito il pensiero di Bottani e fosse stato ritoccato e fissato il valore in volt della tensione prodotta dalla pila, il valore della permeabilità magnetica del vuoto sarebbe divenuto oggetto di determinazione sperimentale, modificandosi a ogni miglioramento delle tecniche strumentali.

L'esperimento sarebbe stato circa lo stesso di quello prima descritto ma sarebbe stato rovesciato l'obiettivo.

Sembra oggi ovvio scegliere come riferimento principe il valore di  $\mu_0$ , in quanto i modelli con i quali descriviamo la natura portano ad avvalorare l'ipotesi di costanza di una proprietà del vuoto<sup>188</sup>, assai più della costanza di un prototipo. La pila Weston altro non è che un manufatto, costruito secondo regole ben codificate: un prototipo, come il metro o il kilogrammo. Bottani, nel preferire la costanza della tensione generata dalla pila, privilegia la praticità, la facilità di disseminazione (con la pila per il volt, con i resistori in manganina per l'ohm). Gli scienziati del CIPM preferirono compiere una scelta razionale, che ancora oggi non ha avuto bisogno di ritocchi perché bene si inquadra nelle equazioni di modello con le quali descriviamo la natura. La rivincita di Bottani si può leggere nella storia dei campioni elettrici: pila Weston e resistori in manganina restarono indiscussi protagonisti dei confronti internazionali e nazionali finché furono soppiantati dalle giunzioni Josephson, delle quali parleremo in seguito. Malgrado siano state inventate e realizzate molte "bilance di corrente" per generare l'ampere, mai confronti internazionali sulle unità elettriche si avvalsero di tali complessi strumenti. L'ampere generato da tali bilance si dimostrò meno riproducibile dell'ampere ottenuto utilizzando la pila Weston e il resistore in manganina e applicando la legge di Ohm:  $1 \text{ A} = 1 \text{ V} / 1 \text{ } \Omega$ . Come per la temperatura viene affiancata alla scala termodinamica, scala "nobile", la scala internazionale "pratica", creando un doppio binario per le misure, così in campo elettrico alla generazione "nobile" dell'ampere e di tutte le unità elettriche e magnetiche si affiancano le unità "pratiche", il secondo binario. Questi "secondi binari" divengono una regola in altri settori delle misure.

A titolo di curiosità ricordiamo che, a causa della difficoltà nella misurazione delle forze tra due conduttori, venne proposto il cosiddetto ampere internazionale, o statampere, definito in termini di tasso di deposizione dell'argento, pari a 0,99985 A.

Considerazioni del tutto analoghe valgono per le nuove definizioni del metro, agganciato alla velocità della luce nel vuoto, e della candela, agganciata all'efficienza energetica spettrale.

---

<sup>188</sup> La permeabilità magnetica di un materiale, vuoto incluso, esprime la densità del flusso magnetico che è prodotto nel materiale da un campo magnetico di intensità definita.

*Una riforma decisa da pochi?*

In 25 anni dalla fine della seconda guerra mondiale la CGPM e i suoi organismi scientifici di supporto portano a compimento una vera e propria riforma del sistema metrico decimale. La riforma può essere sintetizzata in due punti chiave. Primo, ad alcuni prototipi si sostituiscono dapprima riferimenti “naturali”, cioè disponibili ovunque in natura, al prezzo di disporre delle attrezzature idonee per poterli utilizzare nella disseminazione delle unità di misura; in tre casi ai riferimenti a caratteristiche di fenomeni naturali si preferiscono riferimenti a costanti di modello. Secondo, il significato di alcuni esperimenti cruciali viene ribaltato. In realtà a questa riforma gli organismi scientifici lavorarono dall’inizio del XX secolo: la lunga e complessa gestazione avvenne però in sordina, discussa da un limitato numero di scienziati, senza il confronto aperto con la società. Eppure la metrologia è un patrimonio di tutta l’umanità. Tutti compiono misure e quindi tutti hanno il diritto di conoscere e dibattere le scelte assunte dal vertice della gestione della metrologia. Soprattutto perché le decisioni prese comportano costi, benefici, cambiamenti profondi di mentalità, e inducono nuove strategie.

Jeffrey D. Sachs<sup>189</sup> sostiene che

per attuare politiche migliori, chi governa dovrebbe iniziare a proporre un’analisi dettagliata con cui giustifica la proposta di un cambiamento importante. Questo libro bianco potrebbe formare la base per sviluppare discussioni e riflessioni pubbliche coerenti, insieme a siti *web* grazie a cui gli esperti condividerebbero le decisioni dei cittadini. A sua volta, l’opinione pubblica verrebbe invitata a discutere del libro bianco sui *blog*. Si potrebbe pubblicare *on line* anche una bozza di legge comprensibile ai profani (insieme ad altri documenti inevitabilmente tecnici) e aperta a commenti di pubblico ed esperti. In questo modo chi governa si affiderebbe di più a comitati di esperti esterni per attingere alle numerose competenze e valutare il punto di vista del mondo degli affari, dell’Accademia e di altri settori della società.

Fin quasi alla fine del XX secolo la CGPM non aveva a disposizione il *web* e i *blog*. La discussione allargata non fu peraltro avviata. Poche migliaia di persone al mondo erano al corrente degli sviluppi in corso di elaborazione e ben

---

<sup>189</sup> È direttore dell’*Earth Institute* della Columbia University e consigliere speciale del Segretario generale delle Nazioni Unite. La citazione è tratta dall’articolo *Il problema delle riforme alla cieca*, pubblicato su *Le Scienze*, n.501, maggio 2010, p. 24.

poche di loro poterono esprimere il loro parere. Eppure si trattava di una svolta epocale nell'architettura del sistema di unità di misura, paragonabile a quella avvenuta alla fine del XVIII secolo, quando le proposte degli illuministi posero fine al millenario capitolo della storia delle misure che privilegiava, nella scelta delle unità e dei campioni, esigenze sociali e geografiche<sup>190</sup>. La Rivoluzione Francese, condizionata dalla necessità di agire, corresse in parte la scelta illuminista, ricorrendo ai prototipi invece che ai campioni naturali, ma mantenendo “dimensioni” umane nella scelta della taglia delle unità. Il metro, in altre parole, non è sostanzialmente diverso dal braccio, dal piede, dal cubito e dalla tesa.

Nella seconda metà del XX secolo il governo mondiale della metrologia cambia il paradigma: abbandona la “dimensione” umana nella scelta delle unità; si schiera decisamente a favore dei campioni naturali; ignora esigenze sociali e geografiche nel formulare le sue scelte.

Come già ho ricordato, mi trovai coinvolto in una situazione analoga quando, a partire dal 1979, partecipai come esperto invitato alle riunioni del Comitato Consultivo per la Definizione del Metro (CCDM). Si discuteva del sesto cambiamento della definizione del metro negli ultimi 180 anni<sup>191</sup>. Due proposte erano sul tavolo: definire il metro come multiplo della lunghezza d'onda di una radiazione, scegliendone una migliore di quella in uso, quella emessa dal gas krypton. Oppure agganciare il metro al secondo tramite la velocità della luce nel vuoto, definita con un valore immutabile. Sostenevano fortemente questa seconda soluzione Jean Terrien, allora direttore onorario del BIPM, e Pierre Giacomo<sup>192</sup>, dal 1978 direttore del BIPM; entrambi volevano che fosse condotto in porto il cambiamento epocale: il metro veniva declassato da unità fondamentale a unità derivata dal secondo e dalla “nuova” unità fondamentale: la velocità della luce nel vuoto.

Non presi posizione per una delle due soluzioni ma chiesi che fosse allargata la discussione, ascoltando in particolare il parere dei membri della CGPM

<sup>190</sup> Witold Kula: *Le misure e gli uomini dall'antichità a oggi*, Laterza, 1987, p. 2.

<sup>191</sup> Sigfrido Leschiutta, in: *L'arte della misura del tempo presso le cortigiane e altre curiose storie sulle misure, le istituzioni e i personaggi che hanno edificato la moderna metrologia, Sei metri, tutti diversi ma tutti uguali*, I Quaderni del GMEE, 4, A&T Editore, 2008, p. 77.

<sup>192</sup> Pierre Giacomo entrò al BIPM nel 1966 come ricercatore. Nel 1968 fu designato vicedirettore del BIPM. Succedette a Jean Terrien come direttore all'inizio del 1978. Restò in carica per 10 anni, durante i quali, con vivace capacità diplomatica e grazie alla sua grande competenza, accompagnata da una squisita cortesia, affrontò la crisi della Convenzione del Metro.

rappresentanti nazioni in via di sviluppo, che meglio di noi potevano valutare i costi conseguenti alla scelta, e degli insegnanti, di ogni ordine di scuola, che avrebbero dovuto illustrare l'unità metro dai bambini di 8 anni fino agli studenti universitari. La mia richiesta fu giudicata non pertinente e si procedette alla scelta senza ulteriori pareri. Il risultato è una definizione non autonoma (prevede che prima sia definito il secondo), che nasconde il fatto più importante: l'assunzione di un valore concordato, fisso, immutabile, arbitrario quanto arbitraria è la lunghezza del metro, armonizzato con i risultati delle misure al livello delle tecnologie del tempo, per la velocità della luce nel vuoto.

Purtroppo Comitati Consultivi, Comitato Internazionale, Conferenza Generale continuano ancora oggi ad adottare il metodo delle riforme decise senza ampie consultazioni. Non può essere considerata ampia palestra di confronto l'indagine con questionari riservata a poche associazioni di categoria o la pubblicazione delle proposte sulla pur prestigiosa rivista *Metrologia*, letta da poche migliaia di scienziati, scritta con il linguaggio ermetico degli specialisti, non accessibile ai commenti dei cittadini pur interessati. Oltre al mondo enorme degli utenti individuali della scienza delle misure, sono tenuti lontani dalle decisioni anche i tecnici che si occupano dell'importante settore della metrologia legale, quella che gestisce gli strumenti usati nelle transazioni commerciali, e della metrologia per la salute, responsabile degli strumenti per la diagnostica medica e ambientale.

Non deve stupire dunque se questo capitolo introduce già nel titolo la crisi del sistema di governo della metrologia internazionale. La crisi, della quale abbiamo qui esaminato le cause più profonde, porterà ad alcuni correttivi nell'organizzazione del sistema: la costituzione di gruppi misti, nei quali saranno rappresentati alcuni dei soggetti prima esclusi dall'analisi del processo decisionale di riforma. Correttivi molto limitati, più che altro formali, che non risolveranno il problema di fondo: continuerà a mancare la discussione ampia, aperta a filosofi, pedagoghi, medici e ad altre categorie, sugli obiettivi, sui fondamenti, sui contenuti della scienza e della tecnica delle misure.

### **3.9. Nascono nuovi Istituti Metrologici Nazionali**

Nel periodo storico che stiamo esaminando si verifica una vera e propria esplosione di nuovi Istituti Metrologici Nazionali (IMN). La Scheda 6 fornisce un panorama probabilmente non esaustivo ma sufficiente per consentire di comprendere quali nuovi problemi si presentarono al CIPM nella gestione

di tanti nuovi aspiranti membri dei nascenti Comitati Consultivi e quante nuove voci e interessi pretesero di farsi ascoltare nella preparazione delle delibere della CGPM.

Parleremo più avanti diffusamente di alcuni dei nuovi IMN citati nella Scheda, scelti per la rilevanza che hanno avuto negli sviluppi della storia della metrologia. È però opportuno anticipare alcune considerazioni di carattere generale utili per comprendere le ragioni di questo improvviso sbocciare di nuove iniziative. Dall'epoca della firma della Convenzione del Metro molte nazioni avviarono il processo legislativo per dotarsi di una legge metrica, fortemente orientata agli aspetti legali della metrologia, ossia alla regolamentazione delle misure coinvolte in scambi commerciali. Tutte queste leggi avevano come obiettivi primari la tutela della fede pubblica nelle misure e la lotta alle frodi mediante contraffazione degli strumenti di misura usati nel commercio. Questo processo legislativo si svolse senza interferenze con le attività degli organismi della CM: le nuove leggi si limitarono a sancire l'adozione delle unità di misura, nomi e simboli inclusi, via via deliberate dalla CGPM. Le infrastrutture create a supporto di tali leggi furono in generale estremamente ridotte, limitandosi a uffici o dipartimenti ministeriali dotati solo dei mezzi indispensabili per l'esecuzione di alcune verifiche sugli strumenti di misura più diffusi.

Al termine della Seconda Guerra Mondiale si verificò un consistente e rapido processo di decolonizzazione. Le nuove nazioni, libere dall'imperialismo formale, si affrettarono a entrare nella comunità metrologica internazionale, sia aderendo alla CM sia dotandosi di nuove infrastrutture mediante le quali fosse loro possibile, almeno in prospettiva, contribuire alle decisioni della CGPM. Contestualmente alcune di loro avviarono un importante progetto di industrializzazione: i nuovi IMN furono tra i protagonisti a supporto di tale progetto.

**Scheda 6 - Nuovi Istituti Metrologici Nazionali dal 1944 al 1989**

Anno	Paese	Acronimo	Nome dell'IMN
1944	Argentina	INTI	<i>Instituto Nacional de Tecnología Industrial</i>
1947	India	NPLI	<i>National Physical Laboratory of India</i>
1950	Israele	INPL	<i>The National Physical Laboratory of Israel</i>
1951	Canada	NRC-IMNS	<i>National Research Council-Institute for National Measurement Standards (IMNS dal 1990)</i>
1951	Romania	IMN	<i>National Institute of Metrology</i>
1955	Cina	NIM	<i>National Institute of Metrology</i>
1956	Italia	IDI-CNR	<i>Istituto Dinamometrico Italiano</i>
1960	Australia	NMIA	<i>National Metrology Institute of Australia</i>
1961	Italia	ITI-CNR	<i>Istituto termometrico Italiano</i>
1963	Egitto	NIS	<i>National Institute for Standards</i>
1965	Uruguay	LATU	<i>Laboratorio Tecnológico del Uruguay</i>
1967	Indonesia	LIPi	<i>Research Center for Calibration, Instrumentation and Metrology</i>
1968	Italia	IMGC-CNR	<i>Istituto di Metrologia "Gustavo Colonnetti" del CNR (IDI+ITI)</i>
1969	Francia	BNM	<i>Bureau National de Metrologie</i>
1973	Brasile	IMNETRO	<i>National Institute of Metrology, Standardization and Industrial Quality</i>
1973	Cile	INN	<i>Instituto Nacional de Normalización</i>
1975	RepCorea	KRISS	<i>Korea Research Institute for Standards and Science</i>
1975	Singapore	NMC	<i>National Metrology Centre</i>
1977	Svizzera	METAS	<i>Ufficio Federale di Metrologia</i>
1980	Svezia	SP	<i>Technical Research Institute of Sweden</i>
1983	Danimarca	DFM	<i>Danish National Metrology Institute (data di inizio della privatizzazione)</i>
1988	Tunisia	LCAE	<i>Laboratoire Central d'Analyses et d'Essais</i>
1989	Paesi Bassi	NMi-VSL	<i>NMi Van Swinden Laboratorium (dal 2009 VSL)</i>

Nota - L'anno si riferisce o all'anno di una legge fondante l'IMN o all'anno di una sua importante ristrutturazione e potenziamento. Le complesse storie di molti degli IMN impediscono di fornire "date di nascita" accurate. Anche il nome è sovente cambiato nel tempo; quello indicato è l'attuale. Su alcuni IMN e sulla loro complessa storia saranno fornite in seguito ulteriori informazioni.

Con il progressivo aumento dell'importanza dei Comitati Consultivi (CC) nel processo di formazione delle raccomandazioni e delibere della CGPM, si accentuò la domanda di partecipazione degli IMN alle riunioni dei CC, o come membri effettivi o come osservatori. Il CIPM fu costretto a stabilire regole per l'affiliazione di IMN ai CC e a prevedere partecipazioni di varia natura alle loro riunioni. I CC divennero così organismi di consultazione e discussione, a carattere permanente, responsabili scientifici di settori definiti della metrologia. Il CIPM tardò a riconoscere che i CC non erano più organismi fatti nascere per scopi definiti (definizione del metro, definizione del secondo e così di seguito) e soppressi non appena lo scopo fosse stato raggiunto; solo negli ultimi anni del XX secolo decise di cambiare nomi e obiettivi ai CC, riconoscendone il ruolo consultivo permanente. Attribuire nuovi e più ampi obiettivi ai CC significò concedere spazi più significativi agli IMN che ne erano membri: così per esempio il CCE (oggi CCEM) che fino al 1939 contava sei IMN membri, ne conta oggi ben 21 più quattro osservatori. Questo è uno dei prezzi pagati dal CIPM per mantenere al suo interno il ruolo di governo della metrologia mondiale: dividere potere e responsabilità con gli IMN e in particolare con i loro direttori/presidenti.

*1944: in Argentina l'INTI si fa carico della metrologia industriale*

La responsabilità della metrologia argentina venne attribuita nel 1944 all'*Instituto Nacional de Tecnología Industrial* (INTI), che nel 2010 ha celebrato i duecento anni dalla fondazione. Difficile è stabilire, nel complesso evolversi della storia dell'Argentina, quando l'INTI iniziò a operare anche come Istituto Metrologico Nazionale. Probabilmente la svolta avvenne tra il 1951 e il 1957.

Nel 1972 il Governo argentino promulgò un decreto applicativo (n. 1157) della legge 19.511, legge quadro sulla metrologia con la quale è adottato ufficialmente il Sistema Internazionale di Unità. Il decreto attribuisce all'INTI la qualifica di *Instituto Nacional de Metrología de la República Argentina*, con la responsabilità di custodia dei campioni nazionali di misura.

L'Argentina vanta peraltro importanti tradizioni metrologiche ben anteriori alle date prima ricordate. Per esempio, nel 1934 Félix Aguilar propone la misura della lunghezza dell'arco di meridiano 46 (4450 km), per studiare forma e dimensioni della terra. L'operazione si svolge con l'intervento sostanziale

dell'*Instituto Geográfico Militar*, del *Servicio Hidrográfico* e delle università di Buenos Aires e de La Plata<sup>193</sup>.

Negli anni '30 e '40 del XX secolo fu attivo in Argentina un *Comité Nacional de Metrología*, del quale fu membro dal 1939 al 1942 Teòfilo Insardi (1880-1966), fisico allievo di Max Planck, specializzatosi poi a Parigi alla Sorbona in spettroscopia e magnetismo.

Visitai la divisione di metrologia dell'INTI per la prima volta nel 1985, provenendo da un congresso internazionale di metrologia, organizzato dall'UNESCO a San Paulõ in Brasile con l'obiettivo di progettare interventi per il potenziamento della cultura metrologica nei Paesi dell'America Latina. La cultura universitaria argentina era rinata dopo la terribile *Noche de los Bastones Largos*, il 29 luglio del 1966, quando la polizia fece irruzione nell'Università di Buenos Aires, arrestando 400 persone tra studenti e docenti, distruggendo laboratori e biblioteche, costringendo in seguito all'emigrazione oltre 300 professori universitari. E l'INTI era diventato nel 1985 uno dei centri della cultura scientifica del Paese.

Fui ricevuto da Rafael Steinberg, responsabile della divisione, persona di grande carisma e maestro di molte generazioni di metrologi argentini, membro del CIPM dal 1978 al 1997. Con lui erano due suoi allievi, Anselmo Manuel Araolaza e Daniel Marques, ai quali ancora oggi sono legato da profonda amicizia. Già la sera del mio arrivo fui vinto dal fascino di Buenos Aires, dalla cordialità dei suoi abitanti, dalla vitalità delle sue strade, dalla bellezza di tanti edifici. La visita all'INTI rappresentò per me un'esperienza memorabile. Ricercatori intelligenti, fortemente motivati, consapevoli dell'importanza del loro lavoro per la crescita del Paese, erano in grado, con mezzi scarsissimi, di produrre risultati di eccellenza internazionale. Avevano la capacità di supplire con l'ingegno alla mancanza di strutture adeguate. Ammirai, per esempio, come sapevano gestire i problemi termici della bilancia usata per confrontare il campione nazionale di massa con i campioni di lavoro; mancando un adeguato sistema di regolazione della temperatura ambientale, quando l'operatore si allontanava dalla bilancia lasciava al proprio posto un rudimentale manichino, costituito da quattro assi inchiodate fra loro con sopra una resistenza elettrica capace di dissipare circa 300 W, la potenza emessa dall'operatore quando era presente. Le

---

<sup>193</sup> Jose Babini: *Historia de la Ciencia Argentina*,

URL: <<http://www.scribd.com/doc/29354248/Babini-Jose-Historia-de-La-Ciencia-Argentina-PDF>>.

misure altamente riproducibili fornite dalla bilancia erano la miglior dimostrazione della validità del sistema artigianale di regolazione della temperatura.

Da quella prima visita nacque un'intensa collaborazione tra la metrologia italiana e quella argentina. Nel 1986, sempre con il patrocinio dell'UNESCO, organizzai, con il collega e amico Teresio Ricolfi, un corso di due settimane sulla metrologia ad Asunción, Paraguay, aperto a giovani provenienti da tutti i Paesi del Sud e del Centro America. Tra lo sbalordimento dei Paesi invitati, abituati a vedere solo docenti dagli USA o dalla Germania, i docenti del corso che ci affiancarono furono tutti da noi scelti tra i ricercatori dei laboratori latino-americani (brasiliani e argentini in particolare): uno di questi era Anselmo Manuel Araolaza, fondatore e direttore dal 2002 del *Centro Nacional de Metrología* di Panamá. Il problema della lingua fu risolto utilizzando tutti, docenti e allievi, un po' di spagnolo, un po' di portoghese e un po' di italiano, una mistura simile al *portunon*, dialetto in uso nella zona di Iguazú, al confine tra Argentina, Brasile e Paraguay, zona ben nota per le sue cascate e per l'imponente centrale idroelettrica di Itaipu.

Daniel Marques trascorse oltre un anno a Torino, coinvolto in un programma di ricerca internazionale del quale parleremo in seguito.

Oggi Joaquín Valdés, gerente della divisione Qualità e Ambiente e direttore del programma di metrologia, qualità e certificazione nell'INTI, è membro del CIPM e presiede il Comitato Consultivo di acustica, ultrasuoni e vibrazioni. L'INTI ha anche un ruolo trainante nel SIM (Sistema Interamericano di Metrologia) e, tra alterne vicende dovute alle periodiche crisi economiche argentine, svolge un'azione di grande importanza per l'innovazione dell'industria nel Paese.

*15 agosto 1947: l'India ottiene l'indipendenza e subito fonda il NPLI*

È Shri Jawaharlal Nehru (1889-1964) a porre la prima pietra del nuovo istituto, il cui principale edificio viene inaugurato nel 1950. La legge metrica del 1956 attribuisce al *National Physical Laboratory of India* (NPLI, URL: <<http://www.nplindia.org/npl-charter>>) l'obbligo di realizzare, mantenere e riprodurre i campioni nazionali di misura e le strutture per la taratura di strumenti e campioni nel Paese.

Oggi il NPLI, con sede in New Delhi, è annoverabile tra i grandi istituti nazionali, membro di molti Comitati Consultivi. Dal 1958 ben sei scienziati indiani, tutti dall'NPLI, sono stati membri del CIPM: cinque di essi furono i direttori del NPLI dal 1947 al 1991.

*1950: è la volta di Israele*

L'IMN israeliano viene realizzato secondo il modello del NPL inglese, subito dopo la nascita della nazione. Dal 1985 il *National Physical Laboratory of Israel* (INPL, URL: <<http://www.moital.gov.il/NR>>) rappresenta Israele negli organismi della Convenzione del Metro. Dal 2004 è membro corrispondente di EUROMET.

L'INPL è una piccola ma efficiente struttura, organizzata su quattro laboratori, con sede nel Campus Edmond Safra dell'Università di Gerusalemme. La collocazione in un complesso scientifico di alto livello consente all'INPL, con uno *staff* tecnico scientifico di solo dieci persone, di soddisfare le esigenze di taratura delle aziende nel Paese.

*1951: il Canada attiva la ricerca in metrologia*

Il *National Research Council* (NRC, URL: <<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/index.html>>) canadese fu fondato nel 1916 per lo sviluppo della ricerca scientifica nel Paese. Nel 1951 il NRC inizia l'attività di ricerca metrologica e nel 1990 costituisce, tra le sue infrastrutture di ricerca, l'*Institute for National Measurement Standards* (IMNS). Oltre alle normali azioni metrologiche di sviluppo e disseminazione dei campioni di misura e di supporto al Sistema Nazionale di Misura canadese, il NRC-IMNS svolge ricerca metrologica ad alto livello ed è tra gli IMN trainanti nelle attività dei Comitati Consultivi del CIPM. Jim W. McLaren, direttore del NRC-IMNS, è oggi uno dei due vicepresidenti del CIPM. Figura di grande prestigio nel CIPM fu H. Preston-Thomas, membro del CIPM dal 1969 al 1991. Direttore della Divisione di Fisica del NRC, presidente del CCT, ebbe la responsabilità di mettere a punto la Scala Internazionale di temperatura del 1990<sup>194</sup>. Dal 1968 al 1991 fu Editor della prestigiosa rivista *Metrologia*.

*1955: in Cina viene fondato il NIM*

L'Istituto Metrologico Nazionale della Repubblica Popolare Cinese (*National Institute of Metrology*, NIM) fa parte del gruppo di IMN che sorgono nell'ambito di un organismo ministeriale con vaste responsabilità nei settori della qualità, delle ispezioni e certificazioni. Il NIM inoltre viene investito,

---

<sup>194</sup> H. Preston-Thomas: *The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)*, *Metrologia*, 27, 1990, 3-10 e 107.

all'atto della sua fondazione, anche dalle responsabilità nel campo della metrologia legale.

È impressionante il lavoro svolto dal NIM in pochi decenni, peraltro essenziale viste le dimensioni e l'altissimo tasso di sviluppo della Cina: 124 campioni primari nazionali e 220 campioni nazionali secondari sono stati realizzati e allineati con i campioni delle altre nazioni aderenti alla Convenzione del Metro in poco più di 50 anni. Oggi il NIM può con ragione essere considerato uno dei grandi IMN, forte della rete di relazioni interne ed esterne che ha saputo costituire. La Cina ha assegnato al NIM oltre 300 premi, riconoscendo così ufficialmente l'alto livello del lavoro svolto in supporto dello sviluppo economico, scientifico e tecnologico del Paese.

Quando visitai il NIM all'inizio degli anni '90 del XX secolo, incontrai alcuni giovani che avevano ricevuto parte della loro formazione metrologica in Italia. Giovani brillanti, molto motivati, capaci di tradurre in realizzazioni concrete le idee che avevamo discusso insieme durante il loro soggiorno nei laboratori italiani. In questa generazione di giovani ricercatori, concreti nel loro lavoro scientifico, capaci di lavorare in gruppi molto affiatati, sta la forza del NIM e di tutti i nuovi IMN nati quasi dal nulla nell'ultima parte del XX secolo.

#### **3.10. La frattura: conseguenza della “rivolta” del 1968?**

È probabile che il clima delle rivolte studentesche e operaie del 1968 abbia contagiato anche i metrologi degli Istituti Metrologici Nazionali. In Italia si moltiplicarono i firmatari delle pubblicazioni: tra essi figurarono anche il personale addetto alle pulizie, alla distribuzione della posta interna, alle segreterie. Certamente i ricercatori degli IMN divennero, dopo il '68, più sensibili ai problemi della metrologia pratica e meno disponibili a essere emarginati al momento delle decisioni. Stanchi d'essere messi da parte, dopo aver lavorato nei Comitati Consultivi per predisporre tutta la parte tecnica e scientifica preparatoria alle delibere della CGPM, cercarono di costituire nuovi ambiti nei quali avere maggiori diritti decisionali.

Contribuì alla “rivolta” dei ricercatori degli IMN anche la nascita, negli anni '50, di organismi non governativi quali il CIRP e IMEKO, dei quali già parlammo. In quegli ambienti si sviluppò il proficuo contatto tra scienziati degli IMN e docenti universitari dei diversi settori delle misure. Nacque una cultura delle misure libera dai vincoli del consenso dei decisori politici, attenta alle esigenze

della produzione, sensibile ai contributi che essa poteva dare alla protezione dell'ambiente e della salute delle popolazioni.

### *I nuovi temi di ricerca metrologica*

Durante tutta la seconda metà del XX secolo si assiste al fiorire di nuove iniziative di ricerca metrologica nei settori disciplinari più diversi. Le ragioni di questa fioritura sono molteplici: dall'aumentata competizione tecnologica internazionale a una maggiore attenzione alla qualità dei prodotti e dei servizi; dalla disponibilità di un maggior numero di ricercatori, grazie all'aumento di laureati soprattutto nei Paesi arrivati più tardi al processo di industrializzazione, a una nuova sensibilità verso la qualità della vita. Molte sono le nazioni che varano progetti nazionali di ricerca, anche specificatamente nel settore delle misure, impegnando in essi gruppi di ricercatori dalle università, dagli enti pubblici di ricerca e dalle aziende.

Particolarmente significativi furono gli anni dal 1950 al 1990, ovviamente con alti e bassi legati alle crisi economiche periodiche che abbiamo già ricordato. La storia, in questo periodo, della ricerca scientifica nelle misure, quella non strettamente collegata ai miglioramenti dei campioni di misura di più alto livello, e dello sviluppo tecnologico conseguente ai progressi delle misure, meriterebbe uno studio ben più approfondito di quanto sia possibile fare in questo testo.

### *La frattura in Europa*

La frattura tra gli organismi della Convenzione del Metro e gli IMN ebbe la sua origine in Europa nell'aprile del 1973, quando si tenne all'NPL (*National Physical Laboratory*, IMN del Regno Unito) in Teddigton, sobborgo di Londra, la prima Conferenza Metrologica dell'Europa Occidentale (WEMC: *Western European Metrology Conference*). Molte furono le motivazioni che indussero gli IMN dell'Europa Occidentale a incontrarsi al di fuori degli usuali canali ufficiali. Alcune motivazioni riguardarono il processo di costituzione dell'Unione Europea: era necessario coinvolgere in tale processo gli IMN perché si adoperassero per sostenere le azioni tecniche necessarie per l'abbattimento delle barriere doganali nel mercato comune. Inoltre sembrò indispensabile un tentativo di cooperazione più stretta tra gli IMN europei, per razionalizzare l'uso delle risorse e ottimizzare i risultati della ricerca metrologica, dispersa tra una moltitudine di piccoli e grandi IMN in Europa. Ma vi erano anche motivazioni di ca-

rattere più generale: era ormai necessario un tavolo d'incontro tra gli IMN per promuovere la ricerca cooperativa su temi applicativi di forte interesse delle industrie regionali, temi trascurati dagli organismi della Convenzione del Metro.

Subito la WEMC si trasformò in Club dei direttori degli IMN dell'Europa Occidentale. Per molti anni l'azione del WEMC (dove "C" sta ora per "Club") si svolse in modo volontario, definendo strategie e costituendo un gruppo di pressione sulla Commissione della Comunità Europea (CCE) perché intervenisse per finanziare anche progetti di metrologia applicata. In particolare sostenne fortemente la costituzione del *Bureau Comunitarie de Reference* (BCR), organismo per la produzione e certificazione dei materiali di riferimento, settore nel quale l'Europa era del tutto carente e debitrice agli USA. Nel settembre del 1987 fu ufficialmente costituita EUROMET, la cooperazione europea sulla metrologia, organismo al quale aderirono i Paesi della UE e i Paesi dell'*European Free Trade Association* (EFTA). Membro di EUROMET divenne anche il *Joint Research Centre* (JRC), il laboratorio della CCE.

Rapidamente EUROMET si diede una solida struttura organizzativa. In essa organismo deliberante fu l'Assemblea Generale, costituita dai delegati degli organismi aderenti. Il Governo di EUROMET fu affidato al *Board of Directors* (BoD), costituito da nove membri, tre di diritto (il presidente in carica, il suo predecessore e il suo successore) e sei eletti dall'Assemblea. Il BoD ebbe i compiti di dare esecuzione alle delibere dell'Assemblea, sviluppare le strategie e curare il bilancio. Seguendo l'esperienza degli organismi della Convenzione del Metro che istituirono i Comitati Consultivi di settore, anche EUROMET si articolò in Comitati Tecnici, privilegiando però gli aspetti metrologici a supporto dell'innovazione tecnologica. Oggi i Comitati sono dieci, più due intersettoriali. I loro compiti sono: favorire la cooperazione nella ricerca; promuovere confronti tra i campioni; assicurare la riferibilità delle misure; facilitare l'accesso alle infrastrutture metrologiche dei diversi organismi membri.

EUROMET pubblicò una serie di guide che servirono a meglio definire le diverse tipologie delle sue attività, le funzioni dei Comitati Tecnici, le modalità per partecipare alle attività e le responsabilità nella copertura dei costi.

La Commissione Europea affidò a EUROMET il compito di preparare i Paesi candidati per divenire membri dell'UE a una corretta organizzazione del loro sistema di misure. Il compito ricevuto dalla CE fu egregiamente svolto da EUROMET che si fece carico di organizzare e condurre a termine confronti internazionali su campioni di misura d'interesse per le aziende e per il commercio, coinvolgendo sempre i Paesi candidati all'ingresso nella UE. In cambio gli

IMN riceverono significativi finanziamenti per la ricerca metrologica, non solo per quella di carattere applicativo ma anche per la ricerca fondamentale per lo sviluppo di nuovi campioni.

Ho vissuto in prima persona, anche come membro del BoD, l'esperienza della nascita e della successiva evoluzione di EUROMET fino al 2000. In piccolo si manifestarono gli stessi problemi che sono all'ordine del giorno nell'Unione Europea: trovare l'equilibrio tra la volontà di autonomia degli Istituti membri e la necessità di scelte strategiche unificate per conseguire risultati utili a tutti. In EUROMET la discussione si concentrò fin dalle origini sul passaggio dalla cooperazione nelle attività al coordinamento dei progetti. Come non è facile, in qualunque sistema che miri ad attuare logiche di governo di tipo federale, vincere le resistenze dei singoli a politiche unificate, così in EUROMET non fu facile ottenere che gli Istituti Metrologici Nazionali, uno per ciascun Paese membro della UE, riconoscessero di essere un lusso economicamente non sopportabile senza un forte coordinamento delle loro attività. Il punto chiave da risolvere fu e resta il libero accesso alle grandi e costosissime infrastrutture metrologiche da parte di istituti che non le posseggono; si tratta di evitare che queste strutture vengano inutilmente moltiplicate, anche perché ai costi di realizzazione e mantenimento si aggiungono i costi dei reciproci controlli, indispensabili per l'armonizzazione delle misure. Il problema è stato risolto, almeno in parte, grazie alla lungimirante azione della Commissione Europea: avendo disponibili i fondi per finanziare le ricerche, ha messo tutti d'accordo costringendoli a progettare le proposte in maniera fortemente coordinata e a realizzare i progetti con strette collaborazioni tra le istituzioni metrologiche dei membri della UE.

Ricordo quante discussioni furono necessarie per raggiungere l'assetto che consentì a EUROMET di diventare il centro della programmazione della politica metrologica europea. Un'accelerazione nel processo di coordinamento si ebbe alla fine del XX secolo, durante la presidenza del BoD da parte del danese Kim Carneiro. La sua capacità di ascoltare i diversi pareri, di formulare una sintesi condivisibile e da questa di definire una strategia comune e di operare per tradurla in azioni concrete, consentirono a EUROMET di divenire protagonista anche nei difficili incontri tra la CCE e gli USA. Si trattava di definire le regole del mercato in settori di enorme rilevanza, come l'aeronautica, la chimica farmaceutica, le nascenti nanotecnologie. In questi incontri bilaterali, con l'Europa che si presentava unita in difesa delle proprie aziende, il ruolo della metrologia e del controllo di qualità dei prodotti era fondamentale.

Diversa era, e resta, la posizione su questi temi sulle due sponde dell'Atlantico. In Europa la struttura dei controlli sulle caratteristiche dei prodotti è fortemente orientata alla difesa del consumatore, in particolare alla sicurezza dei prodotti, garantita dal marchio CE. La rete di laboratori europei destinata ai controlli è rigorosamente coordinata e verificata periodicamente da organismi indipendenti. Ben diversa è la situazione negli USA, dove il liberismo, interpretato all'eccesso, affida alla responsabilità individuale delle aziende ogni forma di garanzia. EUROMET con Kim Carneiro aveva raggiunto una sistemazione organica e una capacità di esprimersi con una sola voce, pur rispettando i diritti degli istituti più piccoli di fronte ai grandi istituti metrologici di Germania e Regno Unito: così fu scelta dalla CCE come consulente metrologico nel confronto con gli USA.

Il carattere fortemente pragmatico di Kim Carneiro e la sua volontà di fare e di costruire gli procurarono non pochi nemici. Al momento della scelta del successore dell'inglese Terry Quinn alla direzione del BIPM, essi posero il veto alla candidatura di Kim Carneiro (selezionato con altri due candidati tra ben sedici domande presentate), preferendogli un altro inglese, l'esperto e diplomatico Andrew Wallard, scienziato e manager formato nell'Istituto Metrologico del Regno Unito. Per la successione di Andrew Wallard, avvenuta nell'ottobre del 2010, è stato scelto Michael Kühne del PTB, selezionato tra nove intervistati su un totale di ben 29 candidature presentate.

Nel luglio del 2007 EUROMET si trasformò in una associazione, EURAMET, con il compito di coordinare la cooperazione tra gli IMN dell'Unione Europea nella ricerca metrologica, nello stabilire la riferibilità delle misure alle unità del SI, nell'intesa di mutuo riconoscimento dei campioni nazionali e delle capacità di misura e taratura tra i suoi membri. EURAMET è responsabile dell'elaborazione e dell'esecuzione del *Programma Europeo di Ricerca Metrologica* (EMRP). Per ulteriori informazioni si vedano URL: <<http://www.euramet.org>> e URL: <<http://www.emrponline.eu>>.

#### *La frattura europea contagia il resto del mondo*

La scelta europea di costituire un organismo regionale per la cooperazione e il coordinamento delle attività metrologiche (*Regional Metrology Organization*, RMO) fu subito copiata in tutto il mondo. Nel 1977 viene costituito il *Asia Pacific Metrology Programme* (APMP, URL: <<http://www.apmpweb.org>>); nel 1979

l'Inter-American Metrology System<sup>195</sup> (SIM, URL: <<http://www.sim-metrologia.org.br>>); nel 1980 il *Southern African Development Community Co-operation in Measurement Traceability* (SADCMET, URL: <<http://www.sadcmnet.org>>); nel 1999 l'*Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions* (COOMET, URL: <<http://www.coomet.org>>); e infine nel 2007 l'*Infra-Africa Metrology System* (AFRIMETS, URL: <<http://www.afrimets.org>>).

Nel 1984 nasce la *Instrumentation and Measurement Technology Conference* (IMTC, URL: <<http://ewh.ieee.org/soc/im/imtc>>) che si autodefinisce il più importante punto mondiale di incontro annuale tra accademia e industria. La conferenza si occupa di tutte le aree, teoriche e applicative, delle misure e della strumentazione. L'IMTC è organizzato e sponsorizzato dalla IEEE *Instrumentation and Measurement Society*.

L'elenco degli obiettivi tipici dei contributi presentati alle varie edizioni dell'IMTC mostra immediatamente il profondo distacco dai temi trattati nella CGPM: strumentazione per l'automotive e per l'avionica, strumentazione nucleare, sistemi wireless e telecomunicazioni, tarature, metrologia (ridotta da scienza e tecnica delle misure a un capitolo dedicato alle scelte affidate alla CGPM), campioni industriali di misura, misure di compatibilità elettromagnetica, analisi dei segnali analogici e digitali, analisi delle forme d'onda, diagnostica, sensoristica, sistemi integrati, strumenti virtuali, tecnologie neurali e fuzzy.

L'iniziativa non resta isolata. Si moltiplicano le conferenze nazionali, regionali e internazionali sul tema delle misure. Tra queste, in Francia, nel 1981, nasce il Congresso biennale *Metrologie*, con ambizioni internazionali. Ne è tra i promotori attuali il *Collège Français de Métrologie*, associazione strutturata nel 2002 (URL: <<http://www.cfmetrologie.com>>). In Italia nel 2001 nasce il Congresso biennale *Metrologia & Qualità* (URL: <<http://www.affidabilita.eu>>). Lo promuove la rivista «Tutto\_Misure», oggi di proprietà dell'Associazione Italiana *Gruppo Misure Elettriche ed Elettroniche* (URL: <<http://www.gmee.org>>), e gli Istituti metrologici Italiani, di concerto con associazioni interessate alle misure.

---

<sup>195</sup> In realtà l'idea del SIM risale al 1972 quando, durante la riunione del *Consejo Interamericano para la Educación, Ciencia y Cultura* (CIECC), fu approvata la costituzione del *Sistema Inter-americano de Metrología y Calidad* (SIMYC).

## 4. La rinascita nel nome della globalizzazione dei mercati

---

### 4.1. Nuove strategie della Conferenza Generale

#### *La Conferenza Generale tra il 1989 e il 1994*

Nel 1991 si svolge la XIX riunione della CGPM. È una riunione che ha ancora carattere tecnico, e dalla quale scaturiscono solo quattro risoluzioni, anche se tre di esse sono di notevole importanza. La prima Risoluzione (“Campioni di tempo e raffronti di tempo”) contiene raccomandazioni alla costruzione di nuovi campioni primari al Cesio, e di migliorare la precisione dei campioni esistenti, studiando le differenze sistematiche di frequenza tra essi. La seconda Risoluzione riguarda ancora, come nella XVIII Riunione, l’effetto Josephson e l’effetto Hall quantistico, con l’invito ai Laboratori nazionali a ridurre l’incertezza sulla conoscenza dei rapporti tra i valori della costante di Josephson  $K_j$  e di quella di von Klitzing  $R_k$  rispetto ai valori proposti (a seguito della raccomandazione della XVIII Conferenza) dal CIPM (rispettivamente  $K_j$ -90 e  $R_k$ -90) nel 1990. Infine la terza Risoluzione esorta i Laboratori nazionali ad adottare la nuova (e attuale) Scala Internazionale di Temperatura ITS-90, introdotta dal CIPM nella sua 8ª sessione del 1989. La quarta Risoluzione adotta i prefissi zetta, zepto, yotta e yocto rispettivamente per i multipli  $10^{21}$ ,  $10^{-21}$ ,  $10^{24}$  e  $10^{-24}$ .

#### *La svolta “politica” nel 1995*

Nel 1995 la XX CGPM promulga le sue prime risoluzioni di carattere fortemente politico. La risoluzione 2 (*Traçabilité des étalons au niveau mondial*) afferma quanto segue:

La XX CGPM, *considerando*

- le crescenti esigenze di riferibilità delle misure a differenti livelli di precisione per le scienze, le tecnologie e il commercio internazionale;
- l’esistenza di gruppi nell’ambito dei quali collaborano laboratori nazionali di metrologia entro le differenti regioni del mondo;
- il bisogno di dimostrare su scala mondiale l’equivalenza o la riferibilità dei campioni tra i laboratori nazionali e i gruppi regionali nell’ambito dei quali collaborano alcuni laboratori nazionali;
- le possibilità di taratura che il BIPM assicura a beneficio dei laboratori nazionali;

- il ruolo del BIPM per il coordinamento e l'esecuzione, su scala mondiale, di confronti dei campioni al più alto livello tra i laboratori nazionali;
- la necessaria partecipazione dei laboratori nazionali ai confronti internazionali;

*accoglie favorevolmente* la tendenza dei laboratori nazionali di metrologia a formare gruppi regionali, in quanto metodo efficace per promuovere la cooperazione e l'esecuzione di regolari confronti di campioni nazionali tra i laboratori, alcuni dei quali non partecipano ai confronti effettuati dal BIPM o dai Comitati Consultivi,

*riconosce* l'interesse rappresentato dai collegamenti tra i confronti organizzati sotto l'egida del BIPM e quelli effettuati nell'ambito di tali gruppi regionali, *raccomanda*

- che i laboratori nazionali di metrologia, in collaborazione con il BIPM, facciano in modo che i necessari confronti di campioni nazionali siano effettuati in numero sufficiente per assicurare l'equivalenza o la riferibilità dei campioni a livello mondiale;
- che siano mantenute adeguate interconnessioni tra i confronti eseguiti sotto l'egida del BIPM e quelli effettuati nell'ambito dei gruppi regionali;
- e che i risultati dei confronti effettuati nell'ambito dei gruppi regionali siano comunicati al BIPM in forma idonea per la pubblicazione da parte del BIPM, affinché essi possano così beneficiare di un riconoscimento a livello internazionale.

Al di là del linguaggio burocratico e di alcune ambiguità conseguenti la necessità di pervenire a un testo capace di raccogliere l'approvazione unanime della CGPM, la risoluzione stabilisce alcuni punti molto importanti. Anzitutto ricorda le origini della CM, un accordo tra nazioni sovrane in funzione anche del commercio internazionale. Riconosce poi l'esistenza e l'utilità degli organismi regionali di coordinamento delle attività metrologiche, soprattutto in quanto coinvolgono nelle attività di confronto tra campioni di misura anche laboratori metrologici di Paesi non aderenti alla CM e quindi esclusi dai confronti organizzati dal BIPM e dai Comitati Consultivi. È un riconoscimento importante che però, come vedremo, non verrà ritenuto sufficiente dalle organizzazioni regionali (RMO).

La risoluzione ritorna più volte sul concetto di "livello mondiale" della metrologia, un livello superiore a quello costituito dall'insieme dei Paesi aderenti alla CM. A tale livello i confronti eseguiti nell'ambito della CM e quelli condot-

ti dalle RMO assumono pari dignità. Contestualmente però la CGPM stabilisce una sorta di gerarchia tra i confronti, ricordando

il ruolo del BIPM per il coordinamento e l'esecuzione, a scala mondiale, di confronti dei campioni *al più alto livello* tra i laboratori nazionali.

La CGPM sottintende che i confronti condotti dalle RMO si collocano a un livello più basso rispetto a quelli gestiti dal BIPM, il livello di quella metrologia pratica tante volte rigettata dalla CGPM e dal CIPM.

Le risoluzioni politiche della XX CGPM rappresentano una svolta importante nel modo di porsi della CGPM, e a monte del CIPM, nei confronti dei governi: da organismo dedicato soprattutto a risoluzione di carattere tecnico scientifico a organismo politico, di stimolo per tutti nel collocare la metrologia in posizione determinante per qualunque settore che si avvalga di misure per assumere decisioni. Dopo il 1995 le risoluzioni della CGPM saranno sempre meno a carattere scientifico e sempre più di contenuto politico e strategico. Il CIPM è consapevole di aver condotto in porto sia il consolidamento del Sistema Internazionale di unità sia la stabilizzazione del ruolo preminente del BIPM nella gestione della metrologia mondiale: si dedica quindi a operazioni di strategia ad ampio respiro e induce la CGPM a prendere sempre più spesso posizioni di forte connotazione politica. Tutto questo però è gestito nell'ottica degli IMN, che ormai detengono la grande maggioranza dei seggi nel CIPM, senza coinvolgere nelle decisioni strategiche altri ambiti scientifici e l'opinione pubblica mondiale.

Il BIPM e il CIPM comprendono immediatamente come la risoluzione 2 della CGPM contenga gli elementi utili per portare la metrologia pratica, saldamente in mano alle RMO, sotto il controllo del BIPM. La strategia complessiva è messa a punto dal CIPM nel settembre del 1996, alla sua 85<sup>a</sup> sessione: maggiore importanza ai confronti; maggiore collaborazione tra BIPM e altre organizzazioni internazionali che operano in settori della metrologia; ampliamento della missione dei CC; avvio di attività di laboratorio del BIPM nella metrologia in chimica; collaborazione del BIPM con organismi esterni, in particolare ILAC ma anche OIML, ISO, IEC. Il documento Blevin (si veda l'Operazione Marketing) viene analizzato per verificare se risponde a questa strategia. E viene messa in campo l'Operazione MRA.

*L'Operazione MRA*

Quando l'operazione fu presentata per la prima volta, nel febbraio del 1997, al primo incontro presso il BIPM dei direttori degli Istituti Metrologici Nazionali (IMN), MRA significava *Mutual Recognition Agreement*, Accordo di Mutuo Riconoscimento. Obiettivo era la firma, da parte dei direttori e sotto il patrocinio del BIPM nell'ambito delle attività previste della Convenzione del Metro, di un *accordo* di mutuo riconoscimento dei campioni nazionali realizzati e conservati dagli IMN: naturalmente a certe condizioni, le quali furono subito oggetto di approfondite discussioni.

La riunione dei direttori degli IMN per proporre l'accordo di mutuo riconoscimento dei campioni nazionali era stata preparata da tempo. Il CIPM aveva affrontato il problema dei confronti tra campioni nazionali già nel 1992, quando aveva raccomandato ai Comitati Consultivi di assicurare la copertura mondiale dei confronti, facendo partecipare a essi uno o più laboratori appartenenti alle diverse Organizzazioni Metrologiche Regionali (RMO). Nel settembre del 1993, durante la 82<sup>a</sup> riunione del CIPM l'argomento viene ripreso dal direttore del BIPM, Terry J. Quinn, fine e lungimirante politico e scienziato proveniente dai quadri scientifici dell'NPL. Egli presenta al CIPM un suo rapporto, già da lui presentato nel gruppo di lavoro creato da EUROMET nel 1992 per definire le strategie dell'organismo. Il gruppo ha presentato un primo rapporto al BoD di EUROMET nella riunione di Torino del 1993, sottolineando le pressioni esercitate su alcuni laboratori metrologici nazionali perché ottengano la certificazione di qualità<sup>196</sup> secondo le norme ISO 9001 o 9002 o l'accreditamento secondo la norma EN 45001 e la Guida ISO 25.

EUROMET ha pertanto definito una strategia globale, che riconosce la tendenza, esistente a livello mondiale, a pretendere la certificazione dei laboratori di taratura e prova. I laboratori nazionali di metrologia "non sono al riparo da questa tendenza". Peraltro essi ammettono l'eventuale certificazione dei loro servizi di taratura ma respingono l'estensione della certificazione alle attività di

---

<sup>196</sup> La certificazione di qualità è un attestato, rilasciato da un organismo autorizzato, che attesta che esiste, nell'organizzazione che ha richiesto la certificazione, la documentazione ritenuta essenziale per garantire, se correttamente applicata, la costanza nel tempo delle caratteristiche dei prodotti o servizi offerti dall'organizzazione. La certificazione non garantisce alcunché sulla "bontà" dei prodotti o servizi offerti. Al contrario l'accreditamento, anch'esso rilasciato da un organismo autorizzato, prevede anche dei controlli sui prodotti e quindi garantisce anche alcune caratteristiche dei prodotti o servizi offerti. L'autorità che rilascia certificazioni o accreditamenti è definita secondo regole accettate a livello mondiale.

ricerca e a quelle di conservazione dei campioni nazionali. La precisione dei campioni nazionali, primari o secondari<sup>197</sup>, deve essere messa in evidenza non da una certificazione ma mediante i confronti internazionali organizzati dal BIPM, o i confronti regionali, o i confronti bilaterali. La strategia implica la regolare pubblicazione sulla rivista *Metrologia* dei risultati di tutti i confronti citati. Si ammette invece che sia a discrezione di ciascun laboratorio nazionale richiedere o meno la certificazione ISO 9001 o 9002, che concerne esclusivamente problemi di gestione interna.

A commento della strategia di EUROMET, Quinn osserva che pochi sono gli Istituti Metrologici Nazionali che hanno i mezzi idonei per realizzare e conservare campioni primari. Quelli che conservano campioni secondari si appoggiano, per la loro taratura, a volte al BIPM, a volte a un altro istituto nazionale. Il possesso di un campione nazionale implica l'esistenza nel laboratorio di competenze commisurate sia al livello al quale è necessario disseminare il campione, sia all'esigenza di partecipazione a confronti internazionali. Pertanto, se in luogo dell'accreditamento si pretende di dimostrare l'esistenza di tali competenze sulla base dei risultati dei confronti internazionali, diviene essenziale affrontare l'organizzazione dei confronti internazionali in maniera più strutturata rispetto a quanto fatto fino a ora. L'organizzazione dei confronti e la scelta dei campioni da confrontare potrebbe essere di competenza dei Comitati Consultivi (CC), in accordo con il BIPM, con periodicità dipendente dalla stabilità dei campioni. Tutto questo comporta un considerevole impegno in tempo ed energie da parte del BIPM e dei laboratori nazionali, compensato da un miglioramento significativo della coerenza e della precisione della metrologia a livello mondiale. Quinn chiede al CIPM di invitare i CC a collaborare con i BIPM nello studio di un'organizzazione strutturata dei confronti internazionali, tenendo anche ben presente la raccomandazione fatta dal CIPM nel 1992 di coinvolgere in questi confronti sempre uno o più laboratori per ciascun RMO.

---

<sup>197</sup> Il *Vocabolario internazionale dei termini fondamentali e generali di metrologia* (VIM), nella seconda edizione in vigore al momento della discussione sulla quale qui si riferisce, definisce *campione primario* un campione progettato o largamente riconosciuto come in grado di presentare la più alta qualità metrologica e il cui valore è definito senza riferimento ad altri campioni della medesima grandezza. Definisce *campione secondario* un campione il cui valore è definito mediante confronto con un campione primario della medesima grandezza. Definisce infine *campione nazionale* un campione riconosciuto in base a una decisione nazionale, in un Paese, per servire come base per l'attribuzione di valori ad altri campioni della medesima grandezza.

Segue una accesa discussione sulla relazione di Quinn, centrata su due problemi: l'accreditamento o la certificazione dei laboratori nazionali e il ruolo del BIPM e delle RMO nei confronti internazionali.

Sul primo problema si delinea una frattura tra coloro che ritengono quanto meno opportuno che i laboratori nazionali si conformino alle raccomandazioni della Guida ISO 25, e quindi si sottopongano a certificazione da parte terza, e coloro che sostengono che un laboratorio nazionale, essendo definiti per legge i suoi compiti, non può riconoscere ad alcun organismo il diritto di esprimere un giudizio di valore sulle sue attività. Il primo gruppo è guidato dai rappresentanti di laboratori che hanno già una lunga tradizione nella gestione in qualità delle loro attività. Il secondo gruppo arriva a sostenere che la pretesa di certificazione dei servizi di taratura dei laboratori nazionali, pur fortemente richiesta da industria e commercio, sia un processo che riguarda gli aspetti di metrologia legale affrontati da alcuni laboratori.

Sul problema del ruolo del BIPM e delle RMO nei confronti internazionali le perplessità di molti sono riassunte da P. Giacomo: il BIPM dovrebbe occuparsi solo dei confronti che hanno l'obiettivo di migliorare le conoscenze sulla messa in pratica delle definizioni delle unità. Siano lasciati alla responsabilità delle RMO i confronti destinati a dimostrare la competenza dei laboratori.

La discussione si chiude con la chiara percezione di difficoltà ad accettare l'idea della certificazione dei laboratori nazionali e di diffidenza nei riguardi del crescente ruolo metrologico delle RMO. Una raccomandazione: non si trascuri l'opportunità di dare visibilità ai risultati dei confronti mediante la loro pubblicazione sulla rivista *Metrologia*. Poiché tale rivista è letta nel mondo da poche centinaia di persone, si raccomanda di riprodurre i risultati dei confronti anche su pubblicazioni a carattere nazionale.

Terry Quinn e il presidente del CIPM, dal 1997 al 2004 l'astrofisico francese Jean Kovalevsky, avviano la stesura del documento che diverrà celebre con la sigla MRA. La prima versione, che ha tenuto conto della revisione effettuata dai direttori degli IMN e dai presidenti delle RMO alla proposta originale elaborata da Quinn, viene approvata dal CIPM nel settembre del 1997 ed è proposta ai direttori degli Istituti Metrologici Nazionali dei Paesi aderenti alla CM nel febbraio del 1998. Il CIPM approva anche la creazione di un Comitato congiunto BIPM-RMO, lasciando in sospeso la definizione dei suoi compiti. È un risultato importante raggiunto dalle RMO, con un riconoscimento ufficiale da parte del CIPM. Quinn incassa anche un altro importante risultato: l'attenzione del CIPM alla posizione degli IMN di Paesi che non aderiscono alla

Convenzione del Metro (CM). Quinn riuscirà in seguito a trovare una soluzione per coinvolgere questi Paesi nel MRA senza dover procedere a modifiche del testo della CM.

**Precedenti MRA.** Non era certo la prima volta che si parlava di accordi di mutuo riconoscimento nel settore delle misure e prove. Primi erano stati, già agli inizi degli anni ottanta, gli organismi nazionali dei Paesi europei con compiti di accreditamento<sup>198</sup> di laboratori di taratura e di prova<sup>199</sup>. Tali organismi, considerati parte terza indipendente nel rapporto tra i laboratori che fornivano i servizi metrologici e i loro clienti, garantiscono la correttezza metrologica delle informazioni riportate sui certificati emessi dai laboratori sulla base di una serie di azioni:

1. Controllo, anche mediante visite di ispezione, sull'organizzazione in qualità e sulla documentazione relativa (manuali, procedure operative, addestramento del personale, definizione delle responsabilità, interventi previsti in caso di mal funzionamento del sistema) del laboratorio richiedente l'accreditamento in uno o più settori di misura.
2. Organizzazione di *audit*, ossia consegna al laboratorio di uno o più strumenti o campioni di misura da tarare o materiali dei quali determinare le caratteristiche mediante prove, scelti tra quelli per i quali il laboratorio ha richiesto l'accreditamento. Il laboratorio deve restituire il certificato di ogni taratura o prova eseguita.
3. Analisi dei certificati relativi agli *audit*, ossia della completezza e chiarezza delle informazioni in essi contenute, della correttezza dei risultati forniti, confrontati alle misure sugli stessi svolte da un laboratorio di riferimento, e sulle incertezze attribuite a tali risultati.
4. In caso di esito positivo delle prime tre azioni, rilascio del documento di accreditamento nel quale, sotto la responsabilità dell'organismo accredi-

---

<sup>198</sup> L'accreditamento è l'attestazione da parte di un organismo nazionale di accreditamento che certifica che un determinato organismo di valutazione della conformità soddisfa i criteri stabiliti da norme armonizzate e, ove appropriato, ogni altro requisito supplementare, compresi quelli definiti nei rilevanti programmi settoriali, per svolgere una specifica attività di valutazione della conformità. REG (CE) N. 765/2008. Si veda URL: <<http://www.accredia.it>>.

<sup>199</sup> La taratura è un processo che fornisce informazioni in grado di stabilire la conformità a specifiche date per campioni e strumenti univocamente identificati. La prova invece determina informazioni, atte sempre a definire la conformità a specifiche date, di caratteristiche di quantitativi di materiali di genere vario (biologici, da costruzione, eccetera) non individualmente identificabili. In generale le prove vengono svolte secondo procedure codificate da norme.

tante, il laboratorio viene autorizzato all'emissione di certificati con il logo dell'organismo accreditante. Nel documento di accreditamento viene precisato, per ciascuna taratura o prova accreditata, il campo di misura consentito e l'entità dell'incertezza minima che il laboratorio è autorizzato ad associare a ciascun valore di taratura o prova prodotto nel campo autorizzato.

5. Controlli periodici al laboratorio, con la ripetizione delle azioni 1, 2, e 3. In base agli esiti di tali controlli, i quali avvengono senza preavviso al laboratorio, l'accreditamento può essere confermato, sospeso o addirittura annullato.

Questo percorso è il risultato di una lunga serie di aggiustamenti e del progressivo consolidamento della cultura della garanzia della qualità, anche e soprattutto nel settore delle misure.

Pionieri indiscussi in questo settore furono i laboratori del Regno Unito. Ricordo il mio stupore e la mia ammirazione quando, all'inizio degli anni sessanta del XX secolo durante tre mesi trascorsi all'NPL in Teddington, nei pressi di Londra, per addestramento alle misure di caratteristiche geometriche dei prodotti, fui messo al corrente dei metodi adottati nell'Istituto. Ogni processo di taratura e misura era codificato mediante procedure scritte, alcune delle quali erano già alla terza versione. Tutte le registrazioni delle attività di misura venivano effettuate su quaderni univocamente identificati, con pagine numerate e intestati a ciascun responsabile dei settori. Era obbligo scrivere su tali quaderni solo con matite copiative a scritta indelebile. Tutti i calcoli sui dati sperimentali, prima di essere trascritti su certificati o articoli, venivano controllati da una persona diversa da chi li aveva eseguiti la prima volta. I quaderni, una volta completati, venivano conservati in un archivio centralizzato, in modo da disporre in ogni momento della documentazione comprovante la storia dettagliata dei prodotti che uscivano dai laboratori. Durante una scuola estiva, organizzata nell'NPL, ebbi modo di conoscere molti giovani ingegneri di industrie del Regno Unito e di scoprire che molte delle aziende adottavano sistemi di registrazione analoghi a quelli che avevo appreso nell'Istituto nazionale. Quando, tornato in Italia, cercai di illustrare questi metodi per convincere i colleghi ad applicarli, fui preso per matto!

Oggi, a percorso concluso e affermata la mentalità della qualità, il *modus operandi* sia dell'organismo di accreditamento sia dei laboratori che richiedono l'accreditamento è sorvegliato da organismi internazionali di coordinamento, quali la *European cooperation for Accreditation* (EA, URL: <<http://www.european->

accreditation.org>) e la *International Laboratory Accreditation Cooperation* (ILAC, URL: <<http://www.ilac.org>>) ed è regolamentato da una serie di norme e direttive internazionali. Ricordiamo qui solo le principali in vigore: per le attività degli organismi di accreditamento la norma UNI CEI EN ISO/IEC 17011, i requisiti di ILAC G21:2002 “*Cross frontier accreditation – Principle for avoid duplication*” e di EA-2/13 “*EA cross frontier policy for cooperation between EA members*”; per le attività dei laboratori accreditati le norme UNI CEI EN ISO/IEC 17025, UNI ISO 15195 (per i laboratori medicali), la Guida ISO 34 (per i produttori di materiali di riferimento).

I primi accordi di mutuo riconoscimento furono firmati in ambito EA, organismo a carattere regionale. L’obiettivo di tali MRA può essere sintetizzato nello slogan: «un prodotto, una prova per la libera circolazione». L’intento di tali accordi, quindi, era ed è quello di contribuire all’abbattimento delle barriere tecniche frapposte alla libera circolazione dei prodotti nella regione. Le caratteristiche, in particolare funzionali e di sicurezza, di un prodotto sono dichiarate conformi a specifiche, emanate a livello regionale (Commissione Europea), da un laboratorio accreditato da un organismo membro di EA e firmatario del MRA. In tal caso il prodotto può liberamente circolare nella regione, accompagnato dal suo certificato di taratura o prova che sarà ritenuto valido all’interno degli spazi geografici presidiati dagli organismi firmatari il MRA.

Oggi l’EA gestisce il *Multilateral Agreement* (MLA), il quale, con lo slogan “*accredited once, accepted anywhere*”, sancisce l’equivalenza delle operazioni dei sistemi di accreditamento amministrati da membri di EA e l’equivalente affidabilità dei certificati e dei rapporti rilasciati da organizzazioni accreditate da membri di EA. L’accordo è dunque orientato a facilitare il libero mercato nell’ambito dello spazio europeo.

L’ILAC gestisce dal novembre del 2000, quindi dopo il consolidamento del MRA voluto dal CIPM, un MRA a livello internazionale tra organismi per l’accreditamento di laboratori. Ma in questo caso “A” non significa più *agreement* ma bensì *arrangement*. Parleremo più avanti dello scontro che portò, in ambito internazionale, alla sostituzione dell’iniziale *agreement* con il più debole *arrangement*. Mi limito qui, per spiegare la differenza tra i due termini, a ricordare la pubblicità di una macchinetta casalinga per fare il caffè. In essa il celebre attore, testimone della suddetta macchinetta, uscendo da un locale, con in mano la scatola contenente la macchinetta, viene schiacciato da un pianoforte caduto dal cielo. Ritrovatosi davanti a San Pietro (almeno così la pubblicità induce a immaginare), l’attore protesta per la sua morte, ritenendola prematura visti gli impegni

dei quali è titolare. San Pietro, guardando il pacco ancora nelle mani dell'attore (evidentemente il pianoforte non lo aveva sfiorato), strizza bonariamente un occhio e dice «Could we make an arrangement?». Nella scena successiva, ad *arrangement* concluso, ritroviamo il nostro attore mentre sta uscendo dal locale, questa volta senza il pacco in mano; si è indotti così a credere che il pacco sia rimasto nelle mani di San Pietro. Accorgendosi della mancanza del pacco il nostro redivivo si precipita indietro, evitando così il pianoforte che si schianta al suolo senza sfiorarlo. Dunque l'*arrangement* è uno scambio di favori ai limiti del lecito, con una connotazione mafiosetta, che lascia la parte più forte, nel caso San Pietro, libera di cambiare idea e di rinnegare l'*arrangement* stipulato.

**La premessa politica della CGPM al MRA.** Dal 1995 cambia dunque l'atteggiamento della CGPM: da organismo dedicato sostanzialmente alla costituzione di un sistema internazionale di unità di misura e impegnato nella generale adozione di tale sistema, la CGPM si trasforma progressivamente in un organismo politico. Diminuiscono, fino a diventare solo relative a dettagli marginali, le raccomandazioni di carattere scientifico e tecnico sulle unità di misura. Crescono invece le raccomandazioni a contenuto politico, rivolte dapprima ai governi degli Stati Membri, poi, in un crescendo degno di una sinfonia di Ludwig van Beethoven, a tutte le Associazioni governative e non governative con le quali sono stati resi ufficiali rapporti di collaborazione (si veda l'Operazione JC), ai governi di tutte le nazioni, a tutte le istituzioni di ricerca nel settore delle misure, e non solo. Questa azione politica della CGPM è sostenuta dall'Operazione Marketing, di cui parleremo tra breve, con la produzione da parte del CIPM di una serie di documenti principalmente indirizzati ai governi e mirati a sostenere la politica della CGPM. Tale politica ha come obiettivo l'affermazione del Sistema Internazionale di unità quale strumento principe per sostenere un corretto commercio mondiale, la definizione di regole condivise per la gestione dell'ambiente e per conoscere cause ed effetti del cambiamento climatico, per la tutela della salute umana, per il progresso di nuovi settori di ricerca e delle conseguenti applicazioni, nanotecnologie, bioingegneria, genetica, e altro.

**I contenuti e le reazioni alla prima versione del MRA.** Febbraio 1997. È la prima volta che tutti i direttori di istituzioni metrologiche a carattere nazionale dei Paesi aderenti alla CM sono convocati al BIPM. Sono tutti presenti: direttori di grandi e piccoli istituti o laboratori metrologici o di dipartimenti ministeriali. Quasi tutti i Paesi dispongono di una sola istituzione con compiti,

per legge, di realizzazione, conservazione e disseminazione dei campioni nazionali di misura. Pochi si presentano con due direttori di istituzioni distinte. Solo l'Italia è presente con ben tre direttori: Sigfrido Leschiutta, presidente dell'IEN; il sottoscritto, direttore dell'IMGC del CNR; Fedele Laitano, direttore dell'IMNRI dell'ENEA. Sono anche presenti, con il ruolo di osservatori, i rappresentanti delle RMO.

Quinn e Kovalevsky illustrano gli scopi del MRA: riconoscere l'equivalenza dei campioni nazionali di misura detenuti dalle istituzioni che aderiscono al MRA stesso e dei certificati da esse emessi. Queste dichiarazioni di equivalenza sono definite, per ciascuna istituzione aderente, in termini di campi di misura e di incertezze di misura, sulla base dei risultati che le istituzioni conseguono partecipando a confronti internazionali chiave (KC, *key comparisons*) stabiliti dal BIPM in accordo con i Comitati Consultivi.

Questi riconoscimenti di equivalenza costituiscono il tassello fondamentale, al momento mancante, per la libera circolazione dei prodotti. Infatti gli accordi di mutuo riconoscimento tra gli organismi di accreditamento di laboratori di taratura e prova sottintendono la correttezza dei campioni usati da tali laboratori, correttezza che può essere garantita solo dall'istituzione metrologica nazionale che ha la responsabilità dei campioni nazionali e della loro disseminazione. L'esistenza di un accordo di equivalenza tra campioni e certificati delle istituzioni nazionali completa il quadro delle equivalenze e realizza, fatte salve truffe o falsificazioni, quel motto «accredited once, accepted anywhere» che descrive il MLA della EA. In un certo senso impegna i Governi ad accettare i risultati dei controlli eseguiti sui prodotti da parte di laboratori accreditati nel Paese d'origine. È così realizzato il presupposto tecnico fondamentale per il mercato globale e la metrologia ne diviene il pilastro portante.

Alle istituzioni aderenti al MRA si chiede però di dimostrare di operare in qualità, preferibilmente ottenendo l'accreditamento da parte terza dei laboratori destinati alla realizzazione, mantenimento e disseminazione dei campioni di misura nazionali.

Alla seconda riunione (febbraio 1998) sono presenti 39 rappresentanti di IMN; 48 sono i Paesi aderenti alla CM all'epoca. Due intere giornate sono dedicate alla discussione del MRA nella versione approvata dal CIPM. Le novità rispetto alla versione originale sono significative. Anzitutto il MRA è diviso in due parti: mutuo riconoscimento dei campioni nazionali, sulla base dei risultati dei confronti internazionali; mutuo riconoscimento dei certificati di taratura rilasciati dagli IMN, sulla base del sistema di qualità instaurato dagli IMN e “va-

lidato” mediante accreditamento di un organismo riconosciuto o mediante *peer examination* (ossia verifiche effettuate da un altro IMN designato dalla RMO interessata). I direttori possono impegnarsi alla firma della sola prima parte o di entrambe. È costituito ufficialmente il JCRB (*Joint Committee of the Regional Metrology Organizations and the BIPM*) e nell’Appendice E all’MRA ne sono fissati i compiti: coordinare le attività atte a rafforzare la confidenza nel mutuo riconoscimento dei certificati di taratura e misura; suggerire al CIPM un metodo per la messa in opera dell’accordo; esaminare le modalità di applicazione del MRA da parte di ciascuna RMO; esaminare e inserire nel *database* delle capacità di taratura e misura le proposte formulate dagli IMN; facilitare confronti supplementari interregionali; redigere un rapporto annuale sulle attività svolte da presentare al CIPM e ai firmatari del MRA.

La discussione sul testo, per il quale si prevede la firma ufficiale in occasione della XXI CGPM prevista per l’ottobre del 1999, è attenta sia sul quadro generale sia sui singoli punti. Intervengo, facendo notare l’esistenza di un conflitto d’interessi o quanto meno di un eccesso di autoreferenzialità: gli IMN, tramite i CC e le RMO dei quali sono membri, scelgono i confronti che risultano significativi ai fini dei mutui riconoscimenti previsti dall’accordo; gli IMN eseguono i confronti; ancora tramite i CC e le RMO, gli IMN valutano i risultati dei confronti; e infine sempre gli IMN decidono quali risultati debbano comparire nel *database* e quali non debbano essere inseriti. La risposta alla mia osservazione è: chi altri potrebbe svolgere tali compiti? Faccio notare che nella fase di scelta andrebbero coinvolti altri cultori delle misure, in particolare i docenti universitari e le aziende; le fasi di valutazione dei risultati e di decisione sul loro inserimento nel *database* dovrebbero essere affidati a esperti estranei al sistema degli IMN, per esempio a una commissione universitaria. Troppo complicato; gli IMN sanno svolgere con competenza e onestà i compiti che vengono loro affidati. E con questo vengo messo a tacere.

Alla fine della discussione scoppia la bomba diplomatica: tutti siglano il testo del MRA, come impegno alla firma in occasione della prossima CGPM, meno il direttore dell’Istituto USA. Egli sostiene che il NIST, in quanto organismo del Governo Federale, non può impegnare il suo Governo in accordi di mutuo riconoscimento senza un’esplicita autorizzazione che al momento manca. Di fronte al coro di proteste per la presa di posizione del NIST, interviene Terry Quinn con l’usuale capacità di mediazione. Chiede a tutti di verificare la posizione dei singoli Governi in modo da arrivare alla CGPM con risolto il problema sollevato dal NIST; egli intanto esaminerà con il NIST eventuali ri-

tocchi al testo del MRA che, senza snaturarlo, lo rendano accettabile da tutte le autorità governative.

E così, all'atto della firma nel 1999, l'*agreement* diviene un *arrangement*, un'intesa amichevole tra i direttori che non obbliga in alcun modo i Governi. Il preambolo del MRA precisa che trattasi di un'intesa tecnica tra i direttori degli IMN degli Stati Membri della CM e non è un trattato diplomatico. I direttori che firmano l'intesa lo fanno con l'approvazione delle appropriate autorità dei loro Paesi, siano esse governative o altre ufficiali.

Il documento firmato può essere scaricato dal sito URL: <<http://www.bipm.org>> ed è pertanto inutile analizzarlo nei dettagli. Chi volesse limitarsi al quadro generale, troverà nel documento una chiara sintesi dei punti principali che consente di cogliere la portata e l'essenza dell'intesa. Nello stesso sito si possono constatare quanto rilevanti siano i risultati raggiunti grazie al MRA, cioè il *database* delle migliori capacità di misura e taratura degli IMN che hanno firmato il documento e ottemperato ai requisiti previsti dal MRA. La *World Trade Organization* (WTO), al quale aderiscono a luglio 2008 centocinquantatré nazioni, trova in quel *database* un supporto tecnico di rilevante importanza per dirimere contrasti nell'ambito del commercio mondiale.

Limitiamoci qui a esaminare le conseguenze dell'intesa.

**Gli effetti del MRA e delle azioni a esso connesse.** Il merito delle principali conseguenze del MRA per la vita del BIPM e della Convenzione del Metro va indubbiamente ascritto a Terry Quinn: egli comprese appieno i pericoli che venivano al BIPM dalla crescita delle RMO, nell'ambito delle quali gli IMN trovavano la risposta alle esigenze di ampliamento degli interventi metrologici nei settori emergenti, dove oltretutto era più facile ottenere finanziamenti per le infrastrutture e per la ricerca. Riuscì a vincere le diffidenze di alcuni membri del CIPM nei riguardi di un forte coinvolgimento delle RMO nelle attività degli organismi della CM; associò le RMO al BIPM e investì gli IMN di responsabilità e di compiti, coordinati congiuntamente dal BIPM e dalle RMO. La sua azione, appoggiata dalla maggioranza del CIPM, trasformò, rivitalizzandola, la portata della Convenzione del Metro, ponendola di fatto nelle mani degli IMN, protagonisti nei Comitati Consultivi, nel CIPM e quindi anche nella CGPM. Tra il 1992 e il 1997 tre Comitati Consultivi cambiarono nome, abbandonando l'indicazione limitativa di un obiettivo (per la definizione del metro, del secondo, dei campioni di misura delle radiazioni ionizzanti) e assumendo un nome che, aggiunto al compito di gestione dei confronti internazionali, li trasformò

in organismi permanenti. Il riconoscimento di questi successi fu affermato il giorno successivo alla conclusione dell'incontro dei direttori degli IMN dal presidente e dal segretario del CIPM in un incontro con il personale del BIPM: essi sottolinearono l'importanza della sigla apposta dai direttori degli IMN alla bozza di MRA sia per la metrologia mondiale sia per il futuro del BIPM.

### *Operazione Membri Associati*

A Terry Quinn va anche un altro merito, oltre a quello di aver rafforzato il BIPM e la CM portandoli fuori dalla crisi nella quale stavano naufragando. Egli informa il CIPM, durante la sua 87<sup>a</sup> riunione nel 1998, di aver discusso a Ginevra con il Segretario del WTO l'effetto del MRA sull'abbattimento delle barriere tecniche al commercio mondiale. Quinn afferma che il Segretario del WTO ritiene che il CIPM debba preoccuparsi dell'estensione del MRA, al momento riservato agli Stati Membri della CM, altrimenti non potrebbe di per sé essere considerato un ausilio all'abbattimento delle barriere tecniche, a causa della sua esclusività. È necessario inoltre che il CIPM si convinca che il costo di *membership* alla CM è tanto alto da costringere nazioni in via di sviluppo a rinunciare a divenire membri, e quindi firmare il MRA, solo per ragioni economiche. Quinn ha dunque elaborato, con l'ufficio del CIPM, la proposta di creare la nuova categoria di Associati alla CGPM, permettendo così agli Stati e alle economie non ancora membri della CM di partecipare al MRA con un costo molto inferiore a quello da affrontare per divenire membri della CM. In sintesi, secondo Quinn uno Stato o un'economia Associato acquisisce il diritto per il suo IMN di partecipare al MRA tramite l'appropriata RMO, di presenziare come osservatore alla CGPM, di ricevere copie delle pubblicazioni del BIPM. Il costo annuale che Quinn suggerisce per "l'Associatura" degli Stati di piccole dimensioni è pari allo 0,05% della dotazione annuale del BIPM, circa un decimo del più basso contributo annuale da versare per essere membri a pieno titolo della CM. Quinn riferisce inoltre di aver illustrato l'ipotesi formulata durante gli incontri delle RMO (APMP, COOMET, EUROMET e SIM) e di aver constatato l'esistenza di un notevole interesse all'Associatura da parte dei piccoli Stati presenti a tali riunioni. Gli Associati non potranno partecipare al CIPM, ai CC e ai confronti chiave del BIPM; non saranno invitati agli incontri dei direttori degli IMN e non avranno tarature gratuite da parte del BIPM. Queste esclusioni eviteranno che attuali membri della CM optino, per ragioni economiche, di dimettersi e divenire associati.

Terry Quinn ha messo il CIPM di fronte a un percorso ormai compiuto e ad aspettative concrete da parte di molti piccoli Paesi che aspirano a divenire Associati. Così il CIPM non può far altro che approvare la proposta. Nel 2011 ai 54 Stati Membri se ne sono aggiunti 28 Associati; grazie a questa estensione hanno firmato, direttamente o per delega, il MRA oltre 200 istituti appartenenti a 75 nazioni: un considerevole risultato.

#### *Operazione Joint Committees*

Risulta vincente anche l'idea di Quinn di costituire il *Joint Committee of the Regional Metrology Organizations and the BIPM* (JCRB) per vincolare le RMO al BIPM e alla CM.

Nel 1997 viene costituito anche il *Joint Committee for Guides in Metrology* (JCGM) con il compito di promuovere l'uso e assicurare la manutenzione della *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) e dell'*International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology* (VIM). Al JCGM partecipano BIPM, IEC, IFCC (*International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*), ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML.

Durante la stessa riunione del CIPM (1998), il presidente del CIPM e il direttore del BIPM propongono di formare un gruppo misto con l'IAU<sup>200</sup> (*International Astronomical Union*) sull'applicazione della relatività generale ai sistemi di riferimento spazio-temporali e alla metrologia. Si suggerisce che il gruppo misto prosegua quanto già fatto dal CCDS sull'argomento e assicuri un buon coordinamento con le attività complementari in corso in UAI, con lo scopo di pervenire a una sola serie di raccomandazioni adottate dal CIPM e dall'IAU. È approvata la costituzione di un Comitato misto BIPM-IAU.

Andrew Wallard<sup>201</sup>, che succede a Quinn come direttore del BIPM nel 2003, rilancia il metodo promuovendo nel 2005 il *Joint Committee for the Coordination of*

<sup>200</sup> La IAU (URL: <<http://www.iau.org>>) fu fondata nel 1919 con l'obiettivo di salvaguardare e promuovere la scienza dell'astronomia attraverso la cooperazione internazionale. La IAU vanta attualmente oltre 10 000 membri individuali (astronomi professionisti, dediti alla ricerca e all'insegnamento) da 90 Nazioni, 70 delle quali sono anche nazioni membri dell'Unione. Il centro focale del coordinamento dell'attività è la Segreteria dell'IAU, ospitata dall'Istituto di Astrofisica di Parigi. L'IAU organizza incontri scientifici, i cui atti riassumono le ricerche in corso nel settore.

<sup>201</sup> Andrew Wallard, direttore del BIPM dal 2003 al 2010, proviene, come Quinn, dal personale scientifico del NPL (UK). Ma nel NPL ha svolto anche importanti compiti di carattere dirigenziale che lo hanno proiettato in campo internazionale come scienziato e manager altamente qualificato.

*Technical Assistance to Developing Countries in Metrology, Accreditation and Standardization* (JCDCMAS) nel quale sono coinvolti BIPM, IAF (*International Accreditation Forum*), IEC, ILAC, ISO, ITC (*International Trade Centre*), ITU (*Information and communication technologies*) e OIML. Sempre nel 2005 vengono gettate le basi per il *Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine* (JCTLM) al quale partecipano il BIPM, l'IFCC e l'ILAC.

Con questi quattro *Joint Committees* il CIPM e il BIPM assumono il controllo scientifico dei confronti internazionali, del MRA, della normativa per la metrologia, dell'assistenza metrologica ai Paesi in via di sviluppo, delle misure nelle telecomunicazioni e, novità importantissima, della metrologia e della riferibilità delle misure effettuate nei laboratori di medicina e di chimica analitica. Grazie ai *Joint Committees* la centralità degli organismi della Convenzione del Metro viene vigorosamente affermata in tutti i settori.

Terry Quinn ha una visione ad ampio raggio delle funzioni del BIPM e della CGPM; ha chiaramente compreso che tanti più saranno gli Stati e gli istituti coinvolti nelle attività gestite dagli organismi della CM, tanto meglio sarà possibile attuare tali funzioni e rafforzare nel mondo il ruolo del BIPM. Si prodiga quindi per convincere i membri del CIPM ad accettare soluzioni di compromesso per gli Stati in arretrato con il pagamento delle quote annuali di partecipazione alla CM e ridurre al minimo gli Stati da escludere dalla CM per prolungata morosità. Quinn chiude la discussione sulle modalità di eventuale rientro alla CM, come membri a pieno titolo o come associati, di Stati esclusi per morosità, affermando che il tema è di competenza della CGPM e non del CIPM.

**I costi del MRA.** Il MRA impegna gli IMN, firmatari (direttamente o per delega) dell'intesa, alla partecipazione ai confronti internazionali e alla messa in qualità delle loro attività. Entrambe le attività hanno un rilevante costo per gli IMN. Supponiamo che un IMN intenda partecipare a quasi tutti i confronti internazionali che hanno efficacia per le informazioni da inserire sul *database* delle capacità di misura e taratura degli IMN. Si troverà a dover intervenire, in fase di avviamento del sistema<sup>202</sup>, a oltre cento confronti all'anno, effettuati al massimo livello delle sue competenze, e, in fase di mantenimento, ad almeno trenta confronti all'anno. Almeno venti IMN si trovano in queste condizioni.

Si può stimare che le azioni da compiere per la partecipazione a un confronto (incluse le riunioni per l'organizzazione e per la valutazione dei risultati,

---

<sup>202</sup> Lo stesso MRA stima un periodo iniziale minimo di quattro anni.

le attività di preparazione e di esecuzione delle misure, l'analisi dei dati, le attività di ricezione e spedizione dei campioni e quelle di stesura dei rapporti intermedi e conclusivi, le azioni di divulgazione all'interno della nazione e a livello internazionale dei risultati) impegnino almeno l'equivalente del lavoro di tre mesi di una persona per ciascun confronto. Risulta che circa 25 persone a tempo pieno dovranno dedicarsi ai confronti negli anni di avviamento del sistema e 7,5 persone a regime. A questi costi vanno aggiunti i costi, umani e monetari, per mettere in qualità tutte le attività di misura e taratura e per mantenerle in stato ottimale di qualità. Si tratta dunque di costi molto alti, soprattutto in periodi di crisi economica, quando i governi chiedono agli IMN di aumentare il livello del loro autofinanziamento. In queste condizioni l'unica via di uscita che si pone agli IMN è quella di aumentare il costo dei servizi di misura e taratura offerti all'esterno: così i costi del MRA vengono suddivisi tra i clienti degli IMN, cioè le aziende di produzione e di servizi.

Un altro costo è quello di partecipazione alle riunioni degli innumerevoli comitati, gruppi di lavoro, commissioni: essere assenti significa non portare in discussione le esigenze delle aziende del Paese che l'IMN rappresenta. La partecipazione e le operazioni "burocratiche" (ma essenziali) a essa associate (organizzazione logistica del viaggio, stesura della relazione di partecipazione, verifica e commento dei verbali, partecipazione all'esecuzione delle attività programmate) costano a un esperto di settore almeno un mese all'anno in media.

Va osservato che questi costi hanno un'incidenza particolarmente rilevante sugli IMN di media dimensione, quelli con oltre 100 e meno di 500 dipendenti. Incidono ovviamente meno sui grandi IMN, quelli con più di 500 dipendenti, che sono al mondo non più di cinque (USA, Regno Unito, Germania, Russia, Cina). Ne consegue che l'impatto del MRA sulla ricerca metrologica è particolarmente pesante per gli IMN di media dimensione e che la ricerca metrologica ad ampio raggio diviene prerogativa quasi esclusiva di pochi IMN. I più piccoli IMN risolvono il problema partecipando solo ai confronti e alle riunioni di diretto interesse del Paese che rappresentano.

Anche il BIPM e il CIPM si trovano a dover affrontare nuovi costi per la gestione del MRA. I costi, molto ingenti, del BIPM sono facilmente intuibili; il *Bureau* ha il compito di coordinamento di tutti i confronti e il compito di gestione del *database* dei risultati.

Per comprendere i costi che gravano sul CIPM bisogna ricordare che il MRA prevede al paragrafo 1.4 che

nel caso di Stati membri della CM che abbiano più di un laboratorio designato<sup>203</sup> come IMN, l'intesa è firmata da un solo IMN anche a nome degli altri, i cui nomi sono tutti elencati nell'allegato al MRA.

Questa clausola ha provocato non pochi contrasti. Molti istituti, inizialmente esclusi dal MRA malgrado ritengano di avere responsabilità di campioni nazionali, fanno pressioni sulle autorità governative per essere segnalati al BIPM come istituti designati in un certo settore. A queste designazioni si oppongono gli IMN già presenti come designati nel MRA. Le ragioni sono ovvie: la posizione di istituti designati fornisce motivazioni per l'accesso a finanziamenti da parte delle autorità ufficiali. La torta è sempre uguale: più sono i designati più piccola è la fetta spettante a ciascuno.

Mi raccontava Sigfrido Leschiutta, quando era presidente dell'IEN e membro del CIPM, che dopo l'entrata in funzione del MRA il tempo delle riunioni e delle accanite discussioni del CIPM era dedicato al 90% a due argomenti. Il primo consisteva nel dirimere i contrasti tra IMN già designati e quelli di nuova designazione che i "vecchi" assicuravano non avere i requisiti per essere inseriti nel MRA, per mancanza di reale disponibilità di campioni nazionali o inconsistenza dei campioni detenuti o carenza di esperienza nei confronti internazionali o altro ancora. Il secondo riguardava i problemi finanziari del BIPM e in particolare la carenza di personale, divenuta preoccupante a causa dei nuovi compiti derivanti dal MRA. Così l'organismo scientifico della CM si ritrovava a dedicare solo il 10% del suo tempo agli aspetti scientifici e politici della gestione del SI!

**Un bilancio complessivo del MRA.** Il MRA ha ridato vita alla Convenzione del Metro e al BIPM. L'operazione ha riportato la CM al suo ruolo iniziale: il supporto del commercio internazionale. Il MRA è stato addirittura aggiustato per rispondere al meglio alle esigenze del WTO, creando le nuove figure di Stato associato alla CM e di istituto designato a partecipare al MRA.

Il MRA è stato inoltre l'occasione per creare una struttura operativa, centrata intorno al BIPM, che coinvolgesse tutti gli istituti designati, molti più degli IMN inizialmente riconosciuti, tutte le RMO, tutte le organizzazioni non governative che si occupano di argomenti correlati con le misure. In questo modo accademie e aziende hanno modo di portare la loro voce nei *Joint Committees*,

---

<sup>203</sup> Il MRA così definisce un laboratorio designato come IMN: «laboratorio nazionale, designato da un'appropriata autorità nazionale dello Stato membro della CM, governativa o altra ufficiale, come avente la responsabilità di campioni nazionali di misura».

utilizzando le loro organizzazioni, delle quali abbiamo parlato come compartecipi nel generare la crisi della CM, ad agire come gruppi di coordinamento e di pressione.

I numeri già ricordati, oltre 80 nazioni partecipanti e oltre 200 istituti designati, danno la chiara immagine del successo del MRA.

Ovviamente tutto questo ha un costo. Ma quale costo avrebbe un eccesso in direzione opposta, ossia un eccesso nella trasformazione della CM in gestione scientifica della scienza delle misure? Questo delicatissimo tema verrà trattato quando tenteremo di proiettarci nel futuro della CM.

### *Operazione Marketing*

L'operazione ha inizio nel 1995 quando la XX CGPM chiese al CIPM di impegnarsi nella preparazione di un documento, rivolto agli Stati Membri, nel quale fossero illustrati

le necessità a lungo termine, sia nazionali sia internazionali, relative alla metrologia, le appropriate collaborazioni internazionali e il ruolo unico del BIPM indispensabili per soddisfare a tali necessità, i finanziamenti e altri impegni che verranno richiesti agli Stati nei prossimi decenni<sup>204</sup>.

La richiesta della CGPM induce il CIPM a produrre tre documenti tra loro complementari che costituiscono quella che qui è chiamata *Operazione marketing*. Esamineremo per sommi capi i contenuti principali di questi documenti e gli obiettivi che si prefiggono. Poiché i documenti sono disponibili sul sito ufficiale del BIPM, sia in inglese sia in francese, chiunque può facilmente prenderne visione. Chi avesse interesse a leggere con attenzione i tre documenti potrà rendersi conto dell'esistenza di un'ambiguità di fondo. Quando nei documenti si affrontano i problemi della metrologia, essa è considerata scienza e tecnica delle misure in senso lato, quindi anche con tutte le connotazioni di carattere pratico. Quando invece si analizzano le necessità del BIPM e degli IMN, infrastrutture e finanziamenti, ecco che l'esame è ristretto alla sola soluzione dei problemi di realizzazione e disseminazione dei campioni delle unità al più alto livello possibile.

Un altro elemento limitante di questi documenti è costituito dalla loro scarsissima diffusione. Pochi gli specialisti che parteciparono alla loro stesura; poche

---

<sup>204</sup> XX CGPM, 1995, risoluzione 11, con riferimento alle risoluzioni 1, 2, 3 della stessa CGPM, URL: <<http://www.bipm.org/jsp/fr/ListCGPMResolution.jsp?CGPM=20>>.

le persone che li hanno letti. Per essere una operazione di marketing mancò totalmente di capacità di comunicazione. Quindi il loro effetto fu quasi nullo.

**Il documento Blevin del 1998.** Il primo documento (URL: <<http://www.bipm.org/utills/fr/pdf/blevin1998-FR.pdf>>) è firmato da William Roderick (Bill) Blevin, segretario del CIPM, scienziato dello CSIRO (IMN dell'Australia), esperto di radiometria. È il risultato di ben tre revisioni, effettuate dopo discussioni nel CIPM, e viene pubblicato nel 1998. Il tema più discusso è sempre quello del rapporto con le RMO: molti lo vedono come pericoloso e chiedono che sia garantita al BIPM una posizione preminente. Robert Kaarls<sup>205</sup> fa notare che già sono stati ampiamente approfonditi tra gli attori (BIPM, IMN, RMO) i contenuti delle relazioni che potranno fra loro stabilirsi. La situazione, egli dice, sta rapidamente evolvendo; le nuove tecnologie hanno già importanti ripercussioni sulle attività del BIPM e degli IMN. In particolare molte verifiche e confronti fra campioni possono già essere eseguite senza spostare i campioni ma mediante strumenti trasportabili.

Il documento Blevin risponde puntualmente alle richieste della CGPM. I destinatari sono i governi dei Paesi membri della CM, o quanto meno i decisori politici nella CGPM. Consapevoli della prevedibile entrata di nuovi Paesi nella CM, conseguenza della creazione dei membri associati, i membri del CIPM danno spazio nel documento all'illustrazione dei compiti della CM e dei suoi organismi. Proiettando tali compiti nel XXI secolo, il documento mette in primo piano i collegamenti che sono stati stabiliti tra il BIPM (e il CIPM) e altri organismi che si occupano di metrologia, dando così rilievo all'operazione *Joint Committees*, in avanzata fase di consolidamento. È evidenziato il ruolo degli IMN, ovviamente limitandosi ad alcuni aspetti squisitamente metrologici: sviluppo dei campioni, partecipazione ai confronti internazionali e disseminazione. Al centro del sistema è collocato il BIPM nella sua doppia funzione di segretario amministrativo e scientifico e di laboratorio scientifico nel quale si integrano le attività di servizio e di ricerca. Il documento si chiude con un'analisi dei costi che i governi dovranno affrontare, delineando alcuni scenari differenti

---

<sup>205</sup> Robert Kaarls è uno scienziato di vastissima cultura. È stato direttore del NMi—VSL (Paesi Bassi), membro del CIPM e autore di due dei tre documenti dell'Operazione Marketing. Esperto di metrologia, chimica, ingegneria elettronica e fisica, è stato tra i fondatori di numerose iniziative: EURACHEM, CITAC, EUROMET, EAL ed EA. Nel 1980 presentò al CIPM i risultati dell'Operazione Incertezza e scrisse la prima versione del documento che diverrà la GUM, guida alla stima dell'incertezza nelle misure.

di funzionamento del BIPM fino al 2008 e di partecipazione degli IMN alle azioni da esso intraprese.

Si tratta dunque di un documento destinato principalmente a non addetti ai lavori, che adotta un linguaggio chiaro e senza eccessivi tecnicismi, e che si propone di convincere i decisori politici sull'importanza di sostenere le azioni del CIPM e del BIPM in favore degli utenti della metrologia. Agli utenti sono in realtà dedicate solo due pagine, elencandoli senza approfondire per ciascuno peculiarità e bisogni particolari, traducibili soprattutto in diverse esigenze di precisione nelle misure, e senza cercare di prevedere quali potranno essere, almeno nei primi anni del nuovo millennio, i nuovi utenti della metrologia e quindi i possibili aumenti degli interventi del BIPM e i relativi costi.

**Il documento Kaarls 1 del 2003.** Diverso è il secondo documento firmato da Kaarls, pubblicato nel 2003 (URL: <<http://www.bipm.org/utls/fr/pdf/kaarls2003-FR.pdf>>). Il punto di partenza è l'adozione, da parte della XXI CGPM del 1999, di tutte le raccomandazioni contenute nel rapporto Blevin del CIPM e, in particolare, di quelle relative all'estensione dei settori di attività sotto la responsabilità della CM a tutti i domini della scienza e, di conseguenza, la corrispondente estensione dei compiti attribuiti ai Comitati Consultivi. Il ritmo di crescita, lento ma continuo, dei primi cento anni di attività della CM diviene ora vertiginoso e si allarga su molteplici nuovi settori. È una nuova visione globale dei compiti della CM.

A supporto di questa visione globale è stato firmato il MRA che, coinvolgendo con responsabilità equivalenti a quelle dei CC e del BIPM anche le RMO, si proietta su Paesi non membri della CM. E ancora la creazione di membri associati facilita la partecipazione di altri Paesi ai confronti internazionali, con costi molto contenuti. Così l'obiettivo della CGPM è di estendere l'utilizzazione delle unità del SI ai programmi di ricerca internazionali, alle misure per la tutela dell'ambiente, della salute umana e della medicina, nonché ad altri settori tecnici.

È da queste premesse che prende corpo il documento CIPM-Kaarls del 2003. Il documento intende anche dare una risposta alla crescente domanda di riferibilità delle misure compiute in chimica e in biologia, all'inquietudine generale sugli effetti delle colture geneticamente modificate, alle recenti direttive della Unione Europea sulla qualità dell'aria e sulla prevenzione e riduzione dell'inquinamento (*Integrated Prevention of Pollution Control Directive*, IPPC). Il documento illustra i bisogni presenti e futuri di metrologia in una serie di settori:

fisica e ingegneria, nanotecnologie, chimica, sanità, sicurezza in campo alimentare, lotta alle frodi e al *doping*, sicurezza, qualità della vita, controllo dell'inquinamento ambientale, controllo dei cambiamenti climatici, biotecnologie e biologia. La metrologia è un po' come il prezzemolo: "aggiunge sapore" a tutto, legittimando le attività a livello mondiale grazie alla riferibilità assicurata alle misure. Ciò comporta sia un nuovo approccio alla soluzione dei problemi metrologici, per esempio ampliando il ruolo dei materiali di riferimento, sia l'estensione della cooperazione internazionale, come testimoniato dall'Operazione *Joint Committees*.

I capitoli più interessanti del documento riguardano: l'impatto economico e sociale della metrologia; il ritorno economico degli investimenti in metrologia; i risultati dello studio sul potenziale impatto economico del MRA, commissionato dal BIPM alla Società di consulenza KPMG.

Merita d'essere citato almeno uno dei risultati di tale studio, riferito a 25 Paesi firmatari del MRA anche membri dell'OCSE (Organizzazione di Cooperazione e Sviluppo Economico). Su un totale di esportazioni all'anno per il 2000 pari a 4.700 miliardi di euro, circa 4.200 sono stati realizzati da quei 25 Paesi. Immaginando un beneficio del solo 0,1% sul commercio dei 25 Paesi esaminati, derivante dalla riduzione di ostacoli tecnici non tariffari al commercio attribuibile al MRA (ma le stime arrivano a benefici fino al 10%), si tratta di ben 4,2 miliardi di euro all'anno di valore aggiunto grazie alla metrologia.

Il documento si conclude con un meticoloso panorama delle attività svolte dal BIPM, confortate dai risultati ottenuti in risposta a due questionari inviati dal CIPM ai direttori degli IMN.

**Il documento Kaarls 2 del 2007.** Il terzo documento (URL: <<http://www.bipm.org/utills/en/pdf/Kaarls2007.pdf>>) è ancora firmato da Kaarls e viene pubblicato nel 2007, due anni dopo la pubblicazione dell'articolo di I.M. Mills, P.J. Mohr, T.J. Quinn, B.N. Taylor, E.R. Williams dal significativo titolo *Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM Recommendation 1 (CI-2005)*, del quale parleremo diffusamente più avanti. L'obiettivo del documento, peraltro non esplicitamente dichiarato, è fornire tutti gli elementi conoscitivi indispensabili per valutare la rivoluzionaria proposta di cambiamento della struttura stessa del SI, contenuta in quel articolo.

R. Kaarls, che dal 2000 è segretario del CIPM, fa innanzitutto il punto della situazione, ricordando tutti i collegamenti stabiliti dal BIPM con organizzazio-

ni intergovernative e non governative che hanno interessi nello sviluppo delle misure. Di questa fitta rete di collaborazioni e di *Joint Groups* abbiamo già diffusamente parlato; è il risultato delle azioni promosse dai due direttori inglesi del BIPM, Terry Quinn e Andrew Wallard, sostenuti dal CIPM, anche se non sempre con entusiasmo da parte di alcuni membri. Il risultato è la centralità del BIPM per la metrologia mondiale e la sua trasformazione da laboratorio prevalentemente scientifico a coordinatore di tutti i problemi di nuove misure che via via sono richieste da nuovi settori commerciali, tecnologici e sociali. È con giustificato orgoglio che il CIPM presenta questa situazione che vede “BIPM-dipendenti” commercio, industria, ambiente, salute, sicurezza ambientale e alimentare, nuove tecnologie, giurisprudenza, informatica, e molto altro ancora, per qualsiasi scelta nel campo delle misure, dei campioni, della riferibilità e della garanzia di continuità a lungo termine dei risultati delle misure.

Due sono le esigenze che emergono da questo articolato quadro: l'ampliamento delle competenze richieste al BIPM; la necessità di ulteriori miglioramenti nella precisione delle misure in ogni settore. Ecco così affacciarsi la proposta di cambiamento della struttura del SI. Il riferimento alla nuova proposta è, nel documento molto sfumato: Kaarls cerca di non fare emergere la contraddizione insita nell'affiancare la proposta di cambiamento al quadro appena delineato. La proposta è essenzialmente solo di interesse scientifico mentre il quadro espone esigenze di carattere socio-economico che prescindono dagli aspetti scientifici del SI. Ben consapevole del contrasto tra necessità e proposta, la XXIII CGPM (2007), con la raccomandazione 12 (sulla possibile nuova definizione di alcune unità di base del SI) pone paletti ben chiari. Raccomanda infatti agli IMN e al BIPM di operare, in accordo con il CIPM, con i CC e con i gruppi di lavoro, per individuare modalità pratiche di realizzazione di ogni nuova definizione basata su valori fissi assegnati a costanti fondamentali, per preparare la *mise en pratique* di ciascuna nuova definizione, considerando anche il modo più appropriato di spiegare le nuove definizioni agli utilizzatori. Raccomanda anche di avviare una campagna di messa in allerta delle comunità di utilizzatori circa la possibilità di nuove definizioni, favorendo una discussione approfondita sulle loro implicazioni tecniche e legislative e sulle loro realizzazioni pratiche.

Il documento, che con le sue circa 75 pagine costituisce il miglior quadro organico oggi disponibile sulle esigenze e le prospettive di misure in nuovi settori, si conclude con raccomandazioni ai Governi di interventi per sostenere le azioni del BIPM e degli IMN. L'insieme BIPM-IMN costituisce il centro mondiale dello sviluppo delle misure anche per i settori emergenti, dalle biotecnolo-

logie alla genetica rigenerativa, dall'utilizzo dello spazio extra-terrestre all'uso di Internet. È una visione metrologico-centrica, ovviamente l'unica che ci si può aspettare da parte di un rapporto del CIPM. Ciò che manca è una sollecitazione circa il passaggio da cooperazione tra organismi a coordinamento e integrazione delle loro azioni. Così l'MRA del CIPM resta completamente disgiunto dal MLA dell'ILAC, mentre un'integrazione tra i due sistemi di confronto tra campioni di misura risulterebbe assai più utile per conseguire la garanzia globale di riferibilità delle misure<sup>206</sup>.

### *Posizione del CIPM sui campioni cosiddetti intrinseci*

Il CIPM rimarca, con inquietudine, una tendenza crescente, in particolare presso i fabbricanti di apparecchiature scientifiche, nel pretendere che alcuni loro prodotti – ai quali danno il nome di “campioni intrinseci” – siano in grado di riprodurre alcune unità SI al più alto livello di precisione. Tali affermazioni sono errate da un punto di vista tecnico, sostiene il CIPM, e quindi è deplorabile tale tendenza. Il CIPM afferma chiaramente che queste pretese non possono essere giustificate senza taratura o confronto mediante un campione nazionale che sia stato sottoposto a studi sistematici e di qualificazione. Il Comitato chiede agli IMN di regolare tale questione con i fabbricanti nei rispettivi Paesi per metter fine a questa pratica.

Se da un punto di vista formale la posizione del CIPM è corretta, da un punto di vista sostanziale pone qualche perplessità. Per chiarire, immaginiamo un'azienda che abbia bisogno di un riferimento di temperatura sicuro entro 0,1 °C per effettuare periodici controlli sui termometri che utilizza nei processi produttivi. L'errore massimo ammesso di  $\pm 0,05$  °C, che immaginiamo sia definito intorno alla temperatura ambiente, è stato calcolato sulla base delle necessità di garanzia della qualità dei prodotti. L'azienda si procura dell'acqua distillata, la pone in un congelatore in modo da ottenere cubetti di ghiaccio, tritura i cubetti, facendo attenzione a non contaminare il ghiaccio, e pone la graniglia in una *glacette* (contenitore che si usa per tenere in fresco il vino, nome tecnico: vaso di *Dewar*) ben pulita, miscelandola con poca acqua distillata. Si ottiene così un ambiente con una temperatura di riferimento di 0 °C, con un'incertezza certamente migliore di  $\pm 0,05$  °C<sup>207</sup>. Non è questo forse un “campione intrinseco”? È dav-

<sup>206</sup> L. Mari, S. Sartori: *Analisi dell'efficienza del sistema di riferibilità*, Atti del XXII Congresso Nazionale GMEE, Palermo, 5-7 settembre 2005, p. 23; L. Mari, S. Sartori: *A relational modeling of measurement and its metrological implication*, Measurement 40, 2007, pp. 233-242.

<sup>207</sup> URL: <<http://www.bipm.org/utils/common/pdf/its-90/TECChapter3.pdf>>, pp. 28-34.

vero indispensabile, prima di usarlo, sottoporlo a taratura o confronto con un campione nazionale? Non vale forse lo stesso ragionamento per un laser stabilizzato da usarsi come campione di lunghezza d'onda in aria con incertezza entro  $1 \mu\text{m}$  su  $1 \text{m}$ ? La maggioranza delle misure compiute al mondo ha esigenze di incertezza meno stringenti di quelle che possono essere risolte con i campioni nazionali: in molti casi campioni ben realizzati e controllati possono ragionevolmente essere considerati campioni intrinseci senza gridare allo scandalo.

## 4.2. La metrologia nei Paesi in via di sviluppo

La natura stessa della metrologia richiede una forte cooperazione internazionale: misurazioni affidabili possono essere garantite solo da raffronti internazionali. I principali Istituti Metrologici Nazionali, con in testa il PTB, si impegnano a collaborare con i Paesi in via di sviluppo (PVS) per creare le proprie strutture metrologiche. Questi sforzi, partiti già negli anni Cinquanta del secolo scorso, sono continuati e si sono organizzati nel quadro di un sempre maggiore supporto e una sempre maggiore collaborazione con i PVS. Si è passati da una mera collaborazione alla messa in opera di strutture metrologiche alla creazione di un'infrastruttura (grazie a un accordo tra il PTB e il Ministero tedesco per lo sviluppo Economico e per la Cooperazione) basata su *metrologia, standardizzazione, testing e assicurazione qualità*. Quest'ultima, in particolare, veniva garantita attraverso accordi internazionali riguardanti i sistemi di accreditamento e certificazione. Uno dei primi Paesi che ha beneficiato di questa nuova infrastruttura è stata l'Argentina, seguita dal Brasile.

Fattore chiave nel successo di questa politica di promozione della metrologia nei PVS è stata la formazione degli esperti di metrologia nell'uso della strumentazione. La scelta del PTB per i percorsi di formazione, data la notevole complessità della strumentazione disponibile presso i suoi laboratori, è stata di creare un sito di formazione *ad hoc*, che accogliesse il personale tecnico dei neonati Istituti Metrologici dei PVS per un periodo di formazione. In seguito data la non sostenibilità a lungo termine di questi programmi di formazione centralizzata, si è reso necessario trasferire i programmi di formazione direttamente *in situ* presso i singoli Istituti Metrologici Nazionali.

Uno dei casi di successo di questo programma di trasferimento tecnologico del PTB nei confronti dei PVS è la Turchia, con la quale si è instaurata una collaborazione di durata ventennale che ha coinvolto i principali enti e associazioni tedeschi e che ha portato a un sistema metrologico efficiente, a un'organizza-

zione di accreditamento membro di EA, e a un istituto per la standardizzazione che rende disponibile standard internazionali ai suoi utenti.

Questa impostazione del trasferimento tecnologico del PTB è stata riconosciuta e convalidata dalla dichiarazione di Lima sullo sviluppo industriale e sulla cooperazione del 1975.

Una grande accelerazione nel trasferimento di competenze e strutture metrologiche verso i PSV è stata fornita dalla World Trade Organization (WTO), a sua volta originata dal General Agreement on Tariffs and Trades (GATT) nel 1995, con la raccomandazione di riconoscimento mutuo dei test per mezzo di accordi internazionali. Gli organismi della Convenzione del Metro si attivarono dunque per adattare il sistema al fine di garantire misure uniformi e risultati affidabili per mezzo di confronti interazionali. Come conseguenza di questo sforzo i neonati Istituti Metrologici dei PVS hanno ricevuto adeguata collaborazione dagli Istituti Metrologici “storici”. Organi nazionali di accreditamento furono creati in quel periodo, per il riconoscimento della competenza dei certificatori. Questo avvenne in un quadro di stretta collaborazione regionale e internazionale.

Il 19 giugno 1998 il PTB, insieme a BIPM, IMEKO e OIML<sup>208</sup>, organizzò presso la sua sede di Braunschweig un seminario intitolato *The role of Metrology in Economic and Social Development*. Per la prima volta, rappresentanti di tutte le istituzioni nazionali si riunivano per scambiarsi idee e informazioni su un tema così importante e delicato. Il seminario fu particolarmente apprezzato in quanto fornì ai non-metrologi le informazioni di base sull'importanza di un sistema metrologico efficiente, e fornendo nello stesso tempo ai metrologi informazioni sulle opportunità e sui rischi della globalizzazione.

---

<sup>208</sup> *The role of metrology in economic and social development*, PTB-Texte Band 9, October 1998.

## 5. Un nuovo futuro o un cambiamento di facciata?

---

### 5.1. Sulla scelta delle sette grandezze di base e delle loro unità di misura

Perché sono solo sette le grandezze di base<sup>209</sup> e perché le rispettive unità di misura devono essere scelte in modo arbitrario? Abbiamo più volte ripetuto i limiti all'arbitrarietà nella scelta delle grandezze di base e delle loro unità di misura: limiti storici, limiti di continuità nel valore delle unità, limiti legati a esigenze pratiche. Ma è indubbio che sette grandezze, scelte arbitrariamente tra le tante entro i vincoli appena elencati, hanno unità di misura arbitrariamente definite, non derivabili da altra strada che non sia la loro definizione.

Ricordiamo che inizialmente, nel 1875, il sistema di grandezze e unità di cui si occupavano gli organismi della Convenzione del Metro (CM) era costituito da tre sole grandezze di base, lunghezza, massa e tempo, con una quarta un po' a margine, la temperatura. A tali grandezze corrispondevano altrettante unità di misura, rispettivamente metro, kilogrammo, secondo e, quasi in sottordine, grado centigrado. Il dominio d'interesse agli albori della CM era la meccanica. Nel 1954, quando la X CGPM definisce il "sistema pratico di unità di misura per i rapporti internazionali" (risoluzione 6), il campo di interesse della CM si estende alla termodinamica (con la grandezza di base temperatura termodinamica e la sua unità grado Kelvin, il cui nome diventerà "kelvin" nel 1976 con la risoluzione 3 della XIII CGPM), all'elettromagnetismo (con la grandezza di base intensità di corrente elettrica e la sua unità "ampere"), alla fotometria (con la grandezza di base intensità luminosa e la sua unità "candela"). Le unità di base a definizione arbitraria aumentano da tre a sei, essendo aumentati i campi di interesse delle attività gestite dalla CM. Arriviamo a sette nel 1971 quando la XIV CGPM aggiunge l'unità mole per la grandezza di base quantità di sostanza, allargando i suoi interessi alla chimica.

Le grandezze in uso coinvolte nell'attuale sistema, costituito da sette grandezze di base e relative sette unità di base, sono più di cento (si veda in Appen-

---

<sup>209</sup> Alle origini della storia qui narrata in luogo di unità *di base* si parlava di unità *fondamentali*. A esse si affiancavano le unità supplementari, angolo piano e angolo solido, e tutte le altre, dette "derivate" dalle precedenti mediante le equazioni tra grandezze di base che generano nuove grandezze. La XI CGPM (1960) con la risoluzione 12 fonda il Sistema Internazionale di unità (SI) su sei unità di base. Le unità supplementari sparirono nel 1995, quando la XX CGPM, con la risoluzione 8, riconobbe che esse sono unità derivate adimensionali con un nome speciale.

dice l'elenco delle norme UNI CEI ISO relative alle serie 80 000). In teoria le unità derivate possono essere in numero infinito elevato alla settima potenza; infatti una qualsiasi unità derivata è espressa mediante la seguente regola di derivazione:

$$\text{unità SI derivata} = m^{\alpha} \cdot \text{kg}^{\beta} \cdot \text{s}^{\delta} \cdot \text{A}^{\gamma} \cdot \text{K}^{\theta} \cdot \text{mol}^{\varphi} \cdot \text{cd}^{\omega}$$

essendo gli esponenti  $\alpha, \beta, \delta, \gamma, \theta, \varphi, \omega$ , numeri interi, positivi o negativi, zero incluso<sup>210</sup>. m, kg, s, A, K, mol, cd sono dunque le sette unità di base. Si noti che la regola di derivazione prevede esplicitamente che il coefficiente numerico che moltiplica le unità di base sia sempre uguale a uno, secondo il principio di *coerenza* del sistema. In pratica gli esponenti delle unità di misura di grandezze derivate in uso sono numeri piccoli, in generale compresi tra  $-4$  e  $+4$ .

Il sistema di equazioni indipendenti che legano fra loro le sette grandezze di base e le  $N$  grandezze derivate in uso è costituito di  $N$  equazioni: dovendo fare misure e disponendo di  $7+N$  unità di misura, risulta indispensabile scegliere sette grandezze di base e per esse adottare sette definizioni arbitrarie delle loro unità di misura. Sono solo sette perché la CGPM ha scelto, almeno per ora, di non occuparsi di molti settori di misura: misure economiche, sociali, della percezione (fotometria a parte), della qualità, eccetera. Analizzando *la sostanza* delle sette definizioni: possiamo classificarle in quattro categorie:

- A. La definizione 1 (kilogrammo) fa riferimento a un prototipo.
- B. Le definizioni 3 (secondo) e 7 (mole) fanno riferimento a caratteristiche o proprietà di materiali o fenomeni alle quali attribuiscono valori fissi “arbitrariamente” scelti. Rispettivamente sono:
  - la frequenza della transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133  $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$  pari a 9 192 631 770 Hz: in sostanza il riferimento è la frequenza espressa in hertz, essendo 1 Hz uguale al sottomultiplo di ordine 9 192 631 770 della frequenza della transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133  $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$ ;

<sup>210</sup> In generale quando un esponente è uguale a zero, il simbolo e il nome della relativa unità di base vengono omissi. Se tutti gli esponenti sono uguali a zero, l'unità è senza dimensioni (adimensionale) nel SI. Esistono unità adimensionali che hanno un nome speciale, come il radiante, simbolo rad, per la grandezza angolo piano e lo steradiano, simbolo sr, per la grandezza angolo solido.

## 5. UN NUOVO FUTURO O UN CAMBIAMENTO DI FACCIATA?

- la massa molare del carbonio 12,  $M(^{12}\text{C})$ , pari a 0,012 kg/mol: in sostanza il riferimento è la massa molare espressa in kilogrammi alla mole, essendo 1 kg/mol il multiplo di ordine 83,3(3) della massa molare  $M(^{12}\text{C})$  del carbonio 12.
- C. Le definizioni 2 (metro), 4 (ampere) e 6 (candela) fanno riferimento a costanti indipendenti da proprietà o caratteristiche di materiali o fenomeni, cioè a costanti usate nelle equazioni di modello che descrivono la natura. Esse sono rispettivamente:
- la velocità della luce in vuoto  $c_0$  pari a 299 792 458 m/s: in sostanza il riferimento è la velocità della luce in vuoto espressa in metri al secondo, essendo 1 m/s il sottomultiplo di ordine 299 792 458 di tale grandezza di base;
  - la permeabilità magnetica del vuoto  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m: in sostanza il riferimento è la permeabilità magnetica del vuoto espressa in henry al metro;
  - l'efficienza luminosa spettrale della radiazione monocromatica di frequenza  $540 \cdot 10^{12}$  Hz, pari a  $K(\lambda_{555})=683$  lm/W: in sostanza il riferimento è l'efficienza luminosa spettrale espressa in lumen al watt<sup>211</sup>, essendo 1 lm/w il sottomultiplo di ordine 683 dell'efficienza luminosa spettrale della radiazione monocromatica di frequenza  $540 \cdot 10^{12}$  Hz.

È uso generale, al quale ci atterremo da qui in poi, identificare questo tipo di costanti di modello con l'appellativo di “costanti fondamentali”, senza peraltro voler dare al termine “fondamentali” alcun significato trascendentale.

D. La definizione 5 (kelvin) è una via di mezzo tra la categoria A (l'acqua funge da prototipo<sup>212</sup>) e la categoria B: alla temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua (proprietà di una sostanza) si attribuisce il valore fisso arbitrario di 273,16 K.

Si noti inoltre che solo le definizioni 1 (kilogrammo), 3 (secondo) e 5 (kelvin) sono autoconsistenti, nel senso che non hanno bisogno di altre definizioni per

---

<sup>211</sup> La sostanza della definizione dà ragione ai russi che sempre sostennero il lumen come unità di base in luogo della candela.

<sup>212</sup> La XXIII CGPM (2007) con la risoluzione 10 sancisce la composizione isotopica dell'acqua da utilizzare per la realizzazione del punto triplo dell'acqua (0,000 155 76 moli di  $2\text{H}$  per mole di  $1\text{H}$ , 0,000 379 9 moli di  $17\text{O}$  per mole di  $16\text{O}$ , 0,002 005 2 moli di  $18\text{O}$  per mole di  $16\text{O}$ ) facendola coincidere con quella del materiale di riferimento (acqua) messo a disposizione dall'*Agence internationale de l'énergie atomique* “Vienna Standard Mean Ocean Water” (VSMOW), raccomandato dalla IUPAC nel documento *Atomic Weights of the Elements: Review 2000*.

essere utilizzate in pratica. Le altre 4 definizioni sono dipendenti dalle prime due definizioni delle tre autoconsistenti, nel senso che sono incomprensibili e non applicabili<sup>213</sup> senza altre definizioni di unità, precedentemente acquisite.

Infine la struttura formale delle sette definizioni è variabile. Nella maggioranza dei casi viene seguita la seguente struttura:

il *unità* è la *grandezza* che...

Ma il kilogrammo è l'unità di massa; il kelvin definisce di fatto una scala mediante due suoi punti: 0 K e 273,16 K; il secondo è l'unità di durata: dei tanti significati del tempo, il SI intende occuparsi solo di intervalli.

## 5.2. La nuova proposta in sintesi

Nel 2006 alcuni scienziati, ben noti nell'ambiente della metrologia scientifica, pubblicano la seguente proposta<sup>214</sup>:

“Il Sistema Internazionale di unità, il SI, è il sistema di unità consistente<sup>215</sup> con le seguenti sette assunzioni:

- 1) la frequenza della transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio  $133 \Delta\nu (^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$  è pari a 9 192 631 770 Hz;
- 2) la velocità della luce in vuoto  $c_0$  è pari a 299 792 458 m/s;
- 3) la costante di Planck  $h$  è pari a  $6,626\ 069\ 3 \times 10^{-34}$  J s;
- 4) la carica elementare  $e$  è pari a  $1,602\ 176\ 53 \times 10^{-19}$  C;
- 5) la costante di Boltzmann  $k$  è pari a  $1,380\ 650\ 5 \times 10^{-23}$  J/K;
- 6) la costante di Avogadro  $N_A$  è pari a  $6,022\ 141\ 5 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>;
- 7) l'efficienza luminosa spettrale della radiazione monocromatica di frequenza  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K(\lambda_{555})$  è pari a 683 lm/W.

<sup>213</sup> Non applicabili perché senza le preventive definizioni del kilogrammo e del secondo definiscono un'infinità di altre unità di misura, una per ciascuna possibile definizione del kilogrammo e del secondo.

<sup>214</sup> I.M. Mills, P.J. Mohr, T.J. Quinn, B.N. Taylor, E.R. Williams: *Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM Recommendation 1 (CI-2005)*, *Metrologia*, 43, 3, 2006, pp. 227-246.

<sup>215</sup> Il testo originale dice: «*The International System of Units, the SI, is the system of units scaled so that the ...*»; seguono le sette attribuzioni di valori definiti, esatti e invariabili per convenzione, alle sette costanti naturali. La traduzione di “scaled” con “consistente” mi è stata suggerita dall'Ing. Saverio D'Emilio dell'INRIM. Una traduzione alternativa potrebbe essere la seguente: «... è il sistema di unità rappresentabili in una scala tale per cui valgono le seguenti sette attribuzioni: ...».

Un elenco delle unità rappresentabili, ciascuna con l'indicazione della grandezza i cui valori possono essere espressi in tali unità, accompagna questa definizione del SI. L'elenco include, ovviamente, le attuali unità di base nonché tutte le 22 unità SI attualmente derivate aventi un nome speciale, come il radiante, il newton, il volt, il lumen e il katal<sup>216</sup> e alcune delle grandezze che ad esse corrispondono.

La realizzazione pratica di ciascuna unità di questa nuova versione del SI, si tratti di una delle attuali unità di base o di unità derivate o altre unità, si attua adottando un metodo (un metodo primario) definito mediante un'appropriata equazione della fisica (*di modello, commento dell'autore*) che leghi l'unità in questione a una o più delle costanti fissate. Per esempio, il volt e l'ohm saranno realizzati mediante l'effetto Josephson e l'effetto quantico di Hall usando i valori esatti di  $h$  e di  $e$ ; il kelvin mediante un termometro primario usando i valori esatti di  $k$  o di  $R^{217}$ , e così via. L'utente è libero di usare qualsiasi equazione della fisica e qualunque metodo considerato il più appropriato.<sup>218</sup>

#### *Vantaggi scientifici della proposta*

Secondo gli autori la proposta ha il pregio di eliminare la distinzione tra unità di base e unità derivate, distinzione arbitraria e che in passato ha generato non poche confusioni e discussioni. Basta ricordare le discussioni riguardanti le unità di misura dell'angolo piano e dell'angolo solido, per le quali, in un certo momento storico, fu inventata la categoria delle unità supplementari, mentre oggi sono classificate tra le unità derivate e considerate adimensionali. Eliminando l'aggancio diretto della definizione di un'unità a una o più costanti e lasciando la scelta del metodo per stabilire l'aggancio più conveniente a chi deve realizzare i campioni primari di misura, si elimina qualsiasi gerarchia tra le grandezze e le unità ad esse associate.

<sup>216</sup> Il katal, simbolo Kat, è il nome speciale per l'unità di attività catalitica (risoluzione 12 della XX1 CGPM, 1999); ha dimensione mole al secondo (1 Kat = 1 mol/s).

<sup>217</sup>  $R$  è il simbolo della costante molare dei gas:  $R = k \cdot N_A$ .

<sup>218</sup> Gli autori formulano anche una proposta alternativa, consistente nel definire le sette unità di base attualmente in uso mediante i valori raccomandati per le sette costanti. Metro, secondo e candela non subirebbero variazioni. Per il kilogrammo esistono almeno tre alternative, una delle quali è la seguente: il kilogrammo è la massa di un corpo la cui energia equivalente è uguale a quella di un numero di fotoni le cui frequenze assommano esattamente a  $299\,792\,458)2/662\,606\,93] \times 1041$  hertz. Altrettanto contorte sono le altre alternative e quelle possibili per definire l'ampere, la mole e il kelvin. A causa di tali formulazioni contorte delle possibili nuove definizioni gli autori sostengono la proposta esposta nel testo.

Gli autori analizzano anche l'impatto che "il nuovo approccio al SI" potrà avere sulla metrologia pratica. Per le quattro unità coinvolte (kilogrammo, ampere, mole e kelvin) sottolineano sia le conseguenze positive sulla metrologia primaria sia l'impulso alla realizzazione e commercializzazione di nuovi strumenti di misura. Ampio spazio dell'articolo è dedicato ai vantaggi che deriverebbero, dalla nuova formulazione del SI, alla conoscenza dei valori di altre costanti di modello, mettendo in evidenza come essi dipendano in moltissimi casi direttamente dalla scelta dei valori effettuati nella proposta.

Si soffermano infine sul complesso problema della messa in pratica delle unità di misura, cioè della realizzazioni di campioni primari che siano in grado di fornire misure riferibili alle sette costanti con valori assunti per definizioni, congruenti con tutti tali valori e tra loro. Questa parte andrebbe letta con particolare attenzione non solo dagli addetti ai lavori negli IMN ma da tutti coloro che per mestiere devono progettare e costruire strumenti, gestire processi di misurazione, gestire in un'organizzazione la strumentazione di misura. Molti infatti sono gli spunti che si possono trarre, dalle osservazioni e dai suggerimenti di quattro tra i migliori esperti mondiali, per meglio organizzare la disseminazione delle unità e la garanzia di riferibilità delle misure.

Particolarmente importante e illuminante è il vantaggio della proposta che gli autori sottolineano nelle conclusioni e che riporto qui integralmente:

L'adozione di questa proposta di nuova impostazione del SI assicura che il SI sarà in grado di soddisfare le future necessità sia della metrologia pratica sia della fisica quantica e quindi potrà continuare a servire come linguaggio comune nelle misure per una comunicazione intelligibile tra queste due importanti comunità.

Infine gli autori si augurano che la loro proposta sia accolta e resa operativa dalla XXIV CGPM nel 2011.

Ai vantaggi sostenuti dagli autori ne aggiungerei altri tre: il giusto riconoscimento all'enorme mole di lavoro scientifico, in particolare sperimentale, che ha consentito di proporre alla comunità internazionale i valori condivisi delle sette costanti; il riconoscimento, agli autori e ad altri scienziati che stanno attivamente collaborando nel mettere a punto la proposta di riordino dei sistemi di grandezze e di unità di misura, dell'idea di un nuovo assetto dei sistemi più razionale e più stabile di quanto oggi si presenti; la ricompensa, con un cambiamento epocale del sistemi di unità, agli ingenti investimenti in scienziati e strutture messo in campo da molti governi per raggiungere l'obiettivo.

*Effetti collaterali*

Come avviene con i buoni farmaci che aiutano a combattere le malattie ma hanno quasi sempre effetti collaterali, anche questa proposta pone una serie di problemi. Li classifico come collaterali in quanto condivido la posizione degli autori circa i vantaggi che l'accettazione della proposta potrebbe arrecare alla metrologia scientifica. Ho solo non poche perplessità circa la speranza, espressa dagli autori, di una migliore accettazione del SI da parte dei fisici quantistici: troppo spesso essi chiedono di adattare le unità di misura all'evoluzione delle teorie e poco sono interessati riguardo all'applicazione del principio di continuità, tanto importante per la metrologia pratica. Molte perplessità suscita poi la proposta di abbandonare le sette grandezze di base della tradizione in favore di sette nuove, con riferimenti alle magnifiche costanti fondamentali. Pare che gli autori abbiano dimenticato l'ostracismo, manifestato in più occasioni, della CGPM alla proposta dell'URSS di cambiare una sola delle grandezze di base, l'intensità luminosa, per sostituirla con la grandezza flusso luminoso. Come possono sperare che non si manifestino forti opposizioni al cambiamento di tutte e sette, alcune delle quali hanno una tradizione consolidata ultra millenaria? Ma vediamo i più concreti effetti collaterali.

*Il primo problema riguarda l'insegnamento del SI.* I miei nipotini ne hanno sentito parlare per la prima volta in terza elementare: guidati da bravi insegnanti, tra prototipi e orologi atomici hanno compreso l'importanza, per fare e comunicare misure, di mettersi d'accordo sulle unità e sui conseguenti campioni. Quando e se il processo di accoglimento della proposta da parte della CGPM sarà prossimo al compimento, sarà essenziale che vengano riuniti intorno a un tavolo insegnanti, esperti di metrologia e divulgatori delle teorie fisiche, editori di libri scolastici, al fine di individuare un metodo, semplice ma corretto, per presentare il nuovo SI ai giovani.

*Il secondo problema riguarda la normativa.* Moltissime saranno le norme da riscrivere, da modificare, da integrare. Si tratterà di un lavoro complesso, costoso, da preparare con attenzione. L'arbitrarietà nella procedura da adottare per la realizzazione dei campioni pone problemi alla normativa sulla qualità, agli accordi multilaterali di mutuo riconoscimento, ai meccanismi stessi di ispezione dei laboratori accreditati e del loro raccordo con campioni riconosciuti.

*Il terzo problema riguarda i concetti stessi della strumentazione.* Ogni nazione dovrà stabilire quali sono le unità SI (e le rispettive grandezze, ricordando che in molti casi a una stessa unità SI fanno riferimento grandezze diverse) i

cui campioni considera campioni nazionali; la scelta potrà essere diversa da nazione a nazione. Lo stesso concetto di riferibilità delle misure andrà riesaminato alla luce della possibilità di generare, a qualunque livello della scala di disseminazione delle unità di misura, un'unità *consistente* con il SI attraverso un metodo primario. La metrologia chimica ha ben metabolizzato questo particolare ruolo dei metodi primari: non altrettanto ha fatto la metrologia tradizionale.

*Il quarto problema riguarda direttamente gli Istituti Metrologici Nazionali (IMN) e, conseguentemente, le scelte politiche ed economiche che sovrintendono alle loro attività. È il problema della realizzazione dei campioni nazionali primari. Tre sono i metodi consolidati oggi adottati per la generazione di un campione nazionale di un'unità di misura: tramite la realizzazione della definizione dell'unità; tramite una riproduzione di tale realizzazione; tramite il riferimento ad altro IMN. Il primo metodo, quello a livello di precisione più alto, consiste nel realizzare direttamente la definizione dell'unità, si tratti sia di una delle sette unità di base sia di una qualsiasi unità da esse derivata. Il secondo metodo consiste nel riprodurre l'unità tramite metodi di riproduzione accettati; per esempio si riproduce il metro utilizzando un laser stabilizzato costruito secondo tecniche codificate la cui frequenza è stata misurata, per confronto con l'orologio atomico campione, da altro IMN. Analogamente si riproduce l'ampere tramite il volt e l'ohm realizzati rispettivamente con l'effetto Josephson e l'effetto Hall quantico, usando per  $e$  ed  $h$  i valori raccomandati dal CODATA nel 1990 e da allora mantenuti fissi, creando un sottosistema convenzionale di unità a lato del SI. Il terzo metodo consiste nell'ottenere, tramite acquisto o taratura, il campione da un altro IMN.*

Gli IMN italiani oggi sono in grado di stabilire i campioni nazionali ricorrendo ai primi due metodi, quindi in quasi totale autonomia da altri IMN. La nuova proposta, come è sempre accaduto nella storia delle proposte di innovazione nel SI, non solo pone le basi per un significativo salto di qualità per la metrologia ma costituisce anche il naturale risultato di grandi investimenti sulla ricerca metrologica e di impegni pluriennali di ricercatori e istituti per l'avanzamento delle conoscenze. Come meglio giustificare investimenti e impegno di risorse umane se non consolidando il tutto in una nuova struttura del SI? Gli IMN italiani, che hanno partecipato, sia pure con limitate risorse, alla ricerca che potrebbe condurre alla profonda innovazione del SI, come si troveranno al momento di realizzare i nuovi campioni nazionali?

A mio avviso ben pochi IMN nel mondo, forse nemmeno cinque, hanno i mezzi e le capacità strumentali per realizzare in modo autonomo un sistema

completo di campioni nazionali congruenti con le sette assegnazioni di valori alle sette costanti della natura. Forse mettendo insieme le forze dei 29 IMN europei, l'Unione Europea potrebbe essere uno dei cinque. Ma il forse è d'obbligo, vista la diffidenza (o paura di perdita di potere) dei singoli governi nei riguardi di qualunque percorso verso gli Stati Uniti d'Europa.

La possibile conseguenza dell'accettazione della proposta da parte della CGPM è la generazione anche di un esteso predominio metrologico da parte di pochissime nazioni che investono sulla ricerca. Non è sufficiente che il SI consenta a chiunque di realizzare la definizione di una qualsivoglia unità di misura, avendo eliminato ogni prototipo e basandosi esclusivamente su valori consensuali di costanti della natura: per realizzare le unità e gli indispensabili campioni ci vogliono risorse, molto ingenti risorse strumentali e, soprattutto, umane. La grande maggioranza delle nazioni nel mondo non dispone di tali risorse: dovrà pertanto ricorrere, in modo assai più generalizzato di quanto oggi debba fare, al terzo metodo per dotarsi degli indispensabili campioni di misura, subendo tutte le conseguenti pressioni politiche ed economiche che questa dipendenza può comportare.

Ancora più forte sarà la pressione, da parte delle nazioni metrologicamente dominanti, sul settore della normativa e della produzione di strumentazione, settori essenziali per sfruttare al meglio i benefici derivanti dalla nuova struttura del SI: in essi il flusso di denaro è abbondante e la difesa degli interessi dei costruttori più forti ha implicazioni economiche enormi.

Non va sottovalutato un altro importante effetto collaterale: l'attuale sistema internazionale di norme si basa sull'ordine grandezze  $\rightarrow$  unità  $\rightarrow$  campioni come organizzazione concettuale della conoscenza metrologica. Quindi la scelta tra *di base* e *derivate* si compie a livello di grandezze, non di unità. Siamo disposti a considerare grandezze di base quelle che utilizzano come riferimenti le sette costanti fondamentali, in luogo di lunghezza, massa, tempo, corrente elettrica, temperatura termodinamica, intensità luminosa e quantità di sostanza, con una rottura da una tradizione millenaria? Si tratta di un problema di natura epistemologica, in quanto coinvolge aspetti di conoscenza sensoriale che fino a oggi hanno guidato le scelte sulle grandezze.

### 5.3. Un problema inquietante

Un ulteriore problema, non discusso, a quanto mi risulta, fino a oggi, riguarda le infrastrutture istituzionali di supporto alla Convenzione del Metro.

Ricordate Amartya Sen, il premio Nobel per l'economia, e la sua analisi sulle istituzioni? Ne parliamo a proposito del cambiamento dal paradigma dell'universalità delle unità di misura in modo che fossero accessibili a tutti i cittadini del mondo, proposto dagli illuministi padri del sistema metrico decimale, al paradigma dei prototipi, confermato dalla Convenzione del Metro. Un sistema capace di assicurare una soluzione perfetta, come è quello che aggancia il SI ai valori delle costanti fondamentali, è da Sen definito *istituzionalismo trascendentale*: è universale e accessibile a tutti i cittadini del mondo. Ma è trascendentale: quando si cerca di passare dalle definizioni universali alle realizzazioni concrete dei campioni si incontrarono gravi difficoltà. La Convenzione del Metro fece scelte pratiche, adottando l'orientamento che sempre Sen chiama *comparazione centrata sulle realizzazioni concrete*. La CGPM non cercò una soluzione perfetta ma procedette per confronti basati su realizzazioni concrete, operando scelte mirate a ottenere soluzioni meno imperfette.

Agganciando il SI alle costanti fondamentali si adotta una soluzione perfetta. I passi successivi sono irrilevanti: sia si definiscano in qualche modo, compatibile con le costanti fondamentali, le "vecchie" unità di base, sia si rinunci a qualsiasi definizione e si affermi soltanto che la realizzazione dei campioni di qualsivoglia unità deve essere congruente con i valori delle sette costanti, la sostanza non muta. Libertà per tutti, almeno per quei pochissimi che possono permetterselo, nella realizzazione dei campioni.

Sorge ora una domanda: le infrastrutture create con la Convenzione del Metro, CGPM e CIPM e CC e BIPM, rispondevano alla volontà di procedere, per governare la metrologia, mediante comparazioni centrate su realizzazioni concrete. Con l'affermazione dell'istituzionalismo trascendentale, ha ancora significato la Convenzione del Metro? La CGPM potrebbe lasciare all'ONU il compito di emettere raccomandazioni sulle strategie nell'uso del SI; il CIPM potrebbe limitarsi a gestire, come collegio dei direttori degli IMN, le proposte di note tecniche esplicative per la realizzazione dei campioni nazionali da sottoporre all'ONU, basandosi sulle indicazioni fornite da CODATA; i Comitati Consultivi potrebbero diventare organi eventuali di consulenza per il collegio dei direttori degli IMN; il BIPM potrebbe essere a carico dell'ONU, limitando la sua attività alla gestione dei confronti internazionali e del conseguente *database* delle capacità di misura e taratura degli IMN. È una strada che potrebbe essere proposta per abbattere i costi e rendere mondiale la gestione della metrologia. Segnerebbe la fine di un'epoca gloriosa per la metrologia: una sorta di suicidio in nome della perfezione. Ne vale la pena?

#### 5.4. Esistono alternative?

Qualunque alternativa all'attuale Sistema Internazionale di unità deve rispondere a tre esigenze, oltre a quella evidente di costituire un miglioramento della razionalità, dell'utilizzabilità e della stabilità del sistema esistente. Anzitutto deve garantire che, se un'energia di origine meccanica viene trasformata, senza perdite, in energia elettrica, le misure delle due energie, l'una con soli strumenti meccanici l'altra con soli strumenti elettrici, risultino uguali. Attualmente questa condizione è soddisfatta dalla definizione dell'ampere che vincola il mondo delle unità elettriche a quello delle unità meccaniche.

La seconda esigenza riguarda la continuità, non solo tra i valori delle unità di misura ma anche delle grandezze che costituiscono la base del sistema di grandezze. La scelta odierna non solo è quella della tradizione, ma sembra essere anche quella che le moderne neuroscienze considerano in qualche modo innata nei meccanismi di funzionamento della mente. Abbiamo anche già ricordato come la psicologia sperimentale di Jean Piaget sia giunta a ipotizzare l'invarianza spazio temporale delle caratteristiche geometriche degli oggetti come innata nella mente umana e non derivata da esperienze. Spazio e tempo hanno dunque un ruolo e una posizione nella teoria della conoscenza che potrebbe porsi al di sopra delle scelte ammissibili.

La terza esigenza è il mantenimento della struttura dei confronti, delle definizioni dei campioni nazionali, dei meccanismi concettuali che consentono di trasferire le definizioni delle unità nelle leggi degli Stati, rendendole peraltro comprensibili a tutti i cittadini dotati di cultura media.

Un'ipotesi di nuova struttura del sistema potrebbe essere impostata mantenendo le attuali grandezze di base, e quindi considerare da esse derivate tutte le altre grandezze, incluse le costanti fondamentali. Si procederebbe poi a nuove definizioni delle unità di base, per esempio secondo lo schema seguente<sup>219</sup>:

L'unità di tempo, il secondo, è la durata di 9 192 631 770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133" (XIII CGPM, 1967)<sup>220</sup>.

<sup>219</sup> Una proposta simile è stata avanzata dai colleghi e amici F. Cabiati e W. Bich in F. Cabiati, W. Bich: *Thoughts on a changing SI*, Metrologia, 46, 2009, pp. 457-466. Bich e Cabiati stanno anche affrontando il problema della scelta delle sette costanti: per almeno quattro di esse esistono alternative che potrebbero rendere meglio comprensibili le definizioni delle unità di base.

<sup>220</sup> Nulla cambierebbe nello schema della proposta se il secondo fosse definito come multiplo di un altro periodo.

L'unità di lunghezza, il metro, è la lunghezza uguale a  $9\,192\,631\,770/299\,792\,458$  lunghezze d'onda nel vuoto della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133.

L'unità di massa, il kilogrammo, è un multiplo della massa relativistica della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133, massa legata alla sua frequenza dalla relazione  $m_{Cs} = 10^{-34} \times (6,626\,068\,96 \times 9\,192\,631\,770)/(299\,792\,458)^2$ .

Sullo stesso schema potrebbero essere definite le altre quattro unità di base. A queste sette definizioni potrebbe seguire la frase:

Le precedenti definizioni sono congruenti, e saranno mantenute congruenti, con le seguenti sette assunzioni:

1. la frequenza della transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133  $\Delta\nu (^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$  è pari a  $9\,192\,631\,770$  Hz;
2. la velocità della luce in vuoto  $c_0$  è pari a  $299\,792\,458$  m/s;
3. la costante di Planck  $h$  è pari a  $6,626\,069\,3 \times 10^{-34}$  J s;
4. la carica elementare  $e$  è pari a  $1,602\,176\,53 \times 10^{-19}$  C;
5. la costante di Boltzmann  $k$  è pari a  $1,380\,650\,5 \times 10^{-23}$  J/K;
6. la costante di Avogadro  $N_A$  è pari a  $6,022\,141\,5 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>;
7. l'efficienza luminosa spettrale della radiazione monocromatica di frequenza  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K(\lambda_{555})$  è pari a  $683$  lm/W.

Qualora progressi scientifici e tecnologici dimostrino l'esistenza di incongruenze tra le definizioni delle sette unità di base e le assunzioni di valori precisi per le sette costanti citate, la CGPM si impegna a modificare i numeri presenti nelle definizioni delle unità e non i valori assunti per le costanti.

La congruenza tra le definizioni delle sette unità di base e le assunzioni di valori esatti e invariabili nel tempo per le sette costanti di modello assicura l'uguaglianza della misura di energie uguali generate per vie diverse.

In conclusione l'alternativa allo stravolgimento della tradizione che sembra possa essere un buon compromesso tra le esigenze degli scienziati e le necessità dei miliardi di utenti delle misure, può essere così sintetizzata:

1. si rinunci alla promozione di sette costanti fondamentali a grandezze di base del sistema e si conservino le sette grandezze di base della tradizione;

2. si lasci invariata la definizione attuale del secondo o la si sostituisca con altra simile nella quale comunque il secondo risulti multiplo del periodo di un ben definito fenomeno naturale<sup>221</sup>;
3. si formulino le definizioni delle altre sei unità di base in maniera del tutto simile a quella che qui proposta per il metro, cioè come multipli o sottomultipli di valori di fenomeni naturali, grandezze della stessa specie di quella che si sta definendo;
4. la CGPM assuma l'impegno a non variare in futuro, salvo che nel caso di stravolgimenti dei modelli della fisica e della chimica, i valori assunti come esatti per le sette costanti selezionate;
5. siano fornite dettagliate istruzioni per la messa in pratica delle definizioni delle unità di base e la realizzazione dei campioni.

Poiché la maggioranza delle norme sulle misure non riporta le definizioni delle unità ma si limita ad affermare che le unità sono definite secondo quanto sancito dalla Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure, non sarebbe necessario modificare i documenti usati per l'organizzazione in qualità degli organismi. Anche le legislazioni degli Stati, la definizione dei campioni nazionali, il sistema di disseminazione e il sistema degli accreditamenti non richiederebbero aggiustamenti di rilievo.

La decisione finale spetta alla CGPM e probabilmente verrà assunta nel 2015, in occasione della sua XXV riunione. Le piccole nazioni, interessate più agli aspetti pratici ed economici che a quelli scientifici del Sistema Internazionale, faranno valere le loro esigenze e chiederanno un compromesso che non comporti costi eccessivi e che non sconvolga tradizioni e metodi di gestione dei campioni e della loro disseminazione.

---

<sup>221</sup> L'alternativa dipende dalla scelta effettuata per le sette costanti che si vuole abbiano valori assegnati immutabili.



### 6.1. Il tormentato percorso della Convenzione del Metro dalle origini al 2011

La Convenzione del Metro (CM) rese operativa un'infrastruttura, costituita dalla CGPM, dal CIPM, dal BIPM e dai CC, alla quale affidò il compito di governare a livello globale l'evoluzione del sistema delle unità di misura. Questo arduo compito ha costretto la struttura ad affrontare dalle origini (1875) a oggi (2012) complessi problemi conseguenti al connubio tra scienza e politica, tecnologia e mercato.

Il percorso per il governo globale delle misure ha fortemente risentito, fino a esserne influenzato e in alcuni casi paralizzato, dell'evoluzione politica, sociale, economica, tecnologica e militare del sistema mondiale delle nazioni. Questo sistema si affermò e consolidò dapprima in Europa, raggiungendo una sorta di equilibrio nel "consesso delle grandi potenze", nato dopo la restaurazione conseguente al fallito tentativo napoleonico di predominanza francese in Europa. Il modello europeo fu poi esportato in tutto il mondo, affermando così ovunque il concetto di Stato-Nazione.

Gli Stati europei, divenuti imperi coloniali, si trovarono da un lato a competere tra loro sullo scenario mondiale, dall'altro a scontrarsi con nuove realtà emergenti, USA e Giappone per prime, anch'esse animate da ambizioni imperialiste. Le competizioni si manifestarono secondo due modelli: quello economico-finanziario-mercantile, nel quale primeggiò la Gran Bretagna; quello tecnologico-militare, che vide in primo piano Germania e Giappone. Lo scontro di questi modelli e delle ideologie che li impregnarono condusse alle due guerre mondiali.

L'infrastruttura della CM, ideata dai fondatori per garantire il miglior possibile equilibrio tra gli elementi caratterizzanti i due modelli dei quali si è detto, impostò alle origini una politica di continuità, definendo un sistema di prototipi affidati a un'autorità sovranazionale, il CIPM con il BIPM, le cui copie venivano consegnate agli Stati per la gestione al loro interno. Questa politica, strettamente conseguente a esigenze connesse al commercio internazionale, andò presto in crisi. Infatti nuovi settori, collegati all'evoluzione scientifica e tecnologica, cominciarono ad affermarsi e costituire collegamenti e coordinamenti estranei alla CM. Così le misure riguardanti l'elettromagnetismo, la chimica, la fisiologia, la biologia, la tecnologia avviarono, in tempi diversi, percorsi di sviluppo e coordinamento autonomi.

Il rischio che questi centri di coordinamento settoriale, ben sostenuti da ambienti scientifici e tecnologici, assumessero caratteristiche di gestione internazionale dei loro settori al di fuori di accordi intergovernativi, indussero dapprima la CGPM ad ampliare i settori coperti dalla Convenzione (1921) e poi il CIPM a modificare la politica di continuità del paradigma dei prototipi e a intraprendere scelte innovative per la definizione delle unità di misura.

Malgrado la volontà di procedere per dare al sistema di unità contenute scientifiche sempre più rispondenti alle esigenze crescenti di precisione delle misure, il CIPM, condizionato anche dai mezzi limitati che la CGPM metteva a disposizione per aumentare i settori coperti dalle attività del BIPM, non riuscì, nella seconda metà del XX secolo, a evitare la nascita di nuovi centri di potere in ampi settori delle misure, taluni a carattere intergovernativo, come lo OIML (risposta dei ministeriali all'eccesso di scientificità delle scelte del CIPM), altri a forte connotazione accademica, come IMEKO, IEEE, CIRP, altri ancora realizzati dagli IMN su base regionale, le RMO. Si trattò di un processo che vide atteggiamenti simili anche nelle scelte politiche ed economiche internazionali: di fronte al bipolarismo USA – URSS, che proponeva un insoddisfacente “equilibrio del terrore”, e al successivo crollo di uno dei due poli, con il conseguente tentativo di governo mondiale da parte del sopravvissuto. Si cercò di realizzare accordi economici e politici a livello di macroregioni, affidando a tali accordi il compito di favorire la cooperazione e uno stadio elementare di integrazione tra le nazioni della regione. L'Europa, che per prima si mosse in questa direzione, arrivò addirittura a trasferire alcune prerogative e responsabilità dei governi nazionali a organismi intergovernativi, la Commissione Europea e il Consiglio Europeo, e a un organismo eletto dai cittadini dell'Unione Europea, un Parlamento.

La crisi degli organismi della CM fu aggravata dalla massiccia adesione alla Convenzione di nuove nazioni, in prevalenza asiatiche, con problemi, strutture economiche e sociali, culture molto diverse da quelle delle nazioni che avevano aderito alla CM nei decenni precedenti. Queste nuove nazioni trovarono nelle RMO le risposte ai problemi e alle necessità che risultarono inascoltate dalla CGPM.

La difficile situazione fu superata grazie a una serie di decisioni prese dal CIPM a seguito di iniziative e proposte formulate principalmente dai direttori del BIPM, i quali si dimostrarono ben consapevoli dei pericoli di emarginazione che stava subendo il laboratorio loro affidato. Infatti le RMO si stavano organizzando con strutture del tutto simili a quelle operative della CM (un Consi-

glio in luogo del CIPM, Gruppi di Lavoro in luogo dei Comitati Consultivi) nelle quali gli IMN erano protagonisti unici e senza controlli. Nell'ambito delle RMO gli IMN promossero cicli di confronti internazionali, attività di ricerca e sviluppo cooperative, regole per facilitare l'accesso alle grandi infrastrutture per misure, tarature e prove, realizzate dai maggiori IMN della regione ma non alla portata degli IMN delle nazioni più piccole. Inoltre le RMO riuscirono ad attivare meccanismi di finanziamento delle attività coordinate da parte di organismi intergovernativi della regione.

I tre direttori del BIPM, in carica nel periodo dal 1978 al 2010 (Pierre Giacomo, Terry Quinn, Andrew Wallard), convinsero il CIPM ad attuare una strategia complessa per ridare al BIPM e al CIPM un ruolo centrale nella gestione globale delle misure. Determinanti risultarono in particolare le iniziative di Terry Quinn, a volte prese con spregiudicata autonomia ma certo sempre con grande lungimiranza. La strategia può essere riassunta attraverso gli obiettivi che si proponevano le diverse azioni:

- dimostrare l'indispensabile centralità del BIPM per la soluzione di problemi di interesse generale (Operazione GUM, Operazione MRA);
- facilitare l'accesso ai benefici della Convenzione del Metro ai piccoli Paesi, in difficoltà ad affrontare i costi di piena adesione (Operazione Membri Associati), coinvolgendo anche il WTO nel nuovo assetto del governo della metrologia;
- associare le RMO al processo decisionale all'interno della CM (Operazione *Joint Committees*);
- stringere legami con organismi intergovernativi o internazionali con interessi metrologici, in modo da stabilire il principio di decisioni esclusivamente comuni negli ambiti di interessi sovrapposti (Operazioni *Joint Committees* con OIML, ILAC, UAI, ecc.). Ovviamente, vista la disponibilità all'interno della CM delle competenze dei massimi specialisti di settore, questo principio si tradusse nella regola non scritta, ma tacitamente accettata, di priorità del parere del BIPM e del CIPM rispetto a ogni altra opinione;
- affermare la responsabilità primaria del BIPM nell'elaborazione di documenti e guide su temi di metrologia generale (Operazione segreteria al BIPM per l'elaborazione di VIM e GUM);
- stabilizzare i Comitati Consultivi (Operazione cambio di nome dei CC) e quindi coinvolgere in modo permanente gli IMN nell'avvio dei processi decisionali;

- affidare il CIPM ai vertici degli IMN, dando quindi a tali istituti un potere determinante nell'ambito della CGPM;
- convincere gli IMN della necessità di organizzarsi in qualità (operazione considerata da molti IMN come pura e inutile burocrazia) per poter fornire all'esterno l'indispensabile confidenza nelle loro attività di misura, taratura e prova (Operazione parte 2 del MRA e Operazione *database* delle CMC);
- coinvolgere nelle attività coordinate da BIPM e CIPM anche istituzioni a carattere nazionale aventi responsabilità metrologiche, senza essere riconosciute da una legge come IMN (Operazione istituti designati nel MRA);
- convincere i Governi dei Paesi membri della CM dell'importanza della metrologia e della necessità di assicurare al BIPM i finanziamenti necessari per svolgere al meglio i compiti derivanti dalla nuova estesa centralità (Operazione *marketing*, con gli studi sul futuro della metrologia svolti dal CIPM).

Questa strategia, una volta attuata, rilanciò il ruolo centrale degli organismi tecnici e scientifici della CM ma ebbe due conseguenze pesanti, peraltro prevedibili. Anzitutto gli IMN si trovarono costretti, per reggere alla concorrenza internazionale dei loro "fratelli", a essere presenti nel *database* delle CMC, dando garanzie quanto più possibile elevate; dovettero così farsi carico sia di un'attività straordinaria di confronti (chiave, secondari, internazionali, regionali) sia di una riorganizzazione interna di tutte le attività che producevano documenti rilevanti per l'esterno, assoggettandosi anche a periodici controlli di parte terza indipendente. Inoltre la rilevante e spesso multidisciplinare cultura metrologica accademica e aziendale si trovò quasi senza alcuna voce in capitolo nei processi decisionali sul sistema di unità di misura e sulla messa in opera dei campioni: lo spazio che la CM aveva assicurato nel CIPM, quanto meno alla cultura accademica, fu di fatto quasi annullato a favore della dirigenza degli IMN.

In conclusione, la Convenzione del Metro e i suoi organismi di gestione, inclusi gli IMN, non hanno oggi, nei settori disciplinari da essi coperti, concorrenti temibili nel processo decisionale collegato alle unità di misura e ai campioni di misura di più alto livello. Per ottenere questa posizione hanno però dovuto collocarsi tra gli organismi internazionali non classificabili nelle categorie degli organismi democraticamente rappresentativi degli utenti dei settori nei quali operano: situazione questa che oggi suscita non poche critiche e proposte di modifica. La nuova struttura proposta per le unità di misura potrebbe favorire, tra le proposte di modifica, quella più distruttiva: abrogare la Convenzione del Metro.

## 6.2. Possibili percorsi futuri

Spetta alla Conferenza Generale dei Pesì e delle Misure decidere quale debba essere il nuovo assetto del Sistema Internazionale di unità, in modo da soddisfare le legittime aspettative sia degli scienziati sia degli utenti quotidiani del sistema. Sistemato questo problema, gli organismi della Convenzione del Metro dovranno prendere in concreta considerazione una serie di percorsi di ampliamento delle attività e dei settori coperti dalla Convenzione. Ne cito qui solo alcuni che, a mio parere, sono stati poco curati negli studi ufficiali sul futuro della metrologia.

### *Internet e la metrologia*

Nel settembre del 2007 si tenne a Torino il XXIV Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana *Gruppo Misure Elettriche ed Elettroniche* (GMEE). Durante una tavola rotonda dedicata alla metrologia legale, Marco Parvis, docente di misure elettriche al Politecnico di Torino, propose una nuova strada per risolvere il problema della gestione controllata della strumentazione di misura nelle aziende. L'alternativa usualmente presa in considerazione era tra la soluzione *in-source* (un laboratorio interno all'azienda per la taratura della strumentazione) e la soluzione *out-source* (affidare a laboratori esterni la gestione in qualità della strumentazione). Parvis assegnò alla nuova strada proposta il nome di *net-source*<sup>222</sup>. Il servizio *net-source* prevede l'invio di un campione viaggiante presso l'azienda e il controllo a distanza, attraverso la rete Internet, dello strumento in taratura e del campione. I vantaggi derivanti da questa soluzione sono: la riduzione del costo della taratura (viaggia solo il campione e non anche il tecnico), la riduzione del tempo di fuori servizio della strumentazione (limitato alla durata della taratura), e una gestione meno onerosa della strumentazione (non è necessario eseguire la verifica dell'effetto del trasporto sullo strumento tarato). L'idea era già stata proposta nel 2003<sup>223</sup> ma solo successivamente il gruppo del Politecnico di Torino sperimentò la soluzione *net-source* in casi concreti: taratura

<sup>222</sup> A. Carullo, M. Parvis: *Campioni viaggiatori per la verifica periodica degli strumenti di pesatura continua per alimenti preconfezionati*, relazione presentata alla Tavola Rotonda sulla Metrologia Legale durante il XXIV Congresso Nazionale GMEE, Torino 5-8 settembre 2007, pubblicata sugli atti del Congresso e sulla rivista «Tutto\_Misure», X, 2, 2008, pp. 123-126.

<sup>223</sup> A. Carullo, F. Ferraris, M. Parvis, A. Vallan: *Internet calibration: an innovative approach for the dissemination of the measurement units*, «Tutto\_Misure», V, 2, 2003, pp. 165-168.

degli strumenti di pesatura continua per alimenti preconfezionati, taratura delle stazioni di misura dell'inquinamento ambientale<sup>224</sup> e altri casi ancora.

Già intorno al 1995 era stata effettuata una sperimentazione di misure a distanza tra il NIST (USA) e il CENAM (Messico). La novità della proposta del gruppo di Torino consiste tuttavia nel particolare campione viaggiatore: esso comunica via Internet con il laboratorio responsabile della taratura, dando così la possibilità di verificare che esso venga correttamente usato e che non abbia subito danni o manomissioni. Anche lo strumento da tarare comunica via Internet con il laboratorio.

Negli ultimi anni il concetto di taratura via Internet si è ulteriormente sviluppato grazie allo sforzo sia di alcuni Istituti Metrologici Nazionali, come l'NPL inglese, sia di produttori di strumentazione (quali Fluke). La taratura via Internet, chiamata *e-calibration* o *iCal*, consiste nel collegamento tra il sistema soggetto a taratura e il provider del servizio di taratura. Una volta connesso, il sistema *iCal* istruisce l'operatore sulle procedure per la taratura e sul loro ordine di esecuzione. Una volta eseguite queste procedure, il sistema fornisce i dati di taratura finali con incertezze derivate dall'informazione di misura e dal *data-base* del sistema e, se necessario, viene fornito un *data-base* di taratura. Uno dei primi esempi di *e-calibration* è la taratura di *vector network analyzers* da parte dell'NPL.

### *La medicina e la metrologia*

La Medicina di Laboratorio ha il compito di fornire informazioni utili per formulare correttamente decisioni cliniche. È quindi ovvia l'importanza della produzione di risultati di elevata accuratezza e compatibilità tra i laboratori, qualunque sia il laboratorio e il metodo analitico utilizzato. Da qui discende il requisito della definizione di un sistema metrologico di riferimento basato sulla riferibilità a materiali di riferimento e a metodi di riferimento a incertezza minore. Come in ogni altro aspetto della metrologia, dunque, anche in medicina è necessaria la costruzione di catene di riferibilità. Le normative di riferimento in questo settore sono la Direttiva UE 98/79 e le due norme ISO 17511:2003 e 18153:2003. A oggi, questi criteri di riferibilità metrologica e la piena rispondenza alle citate norme sono ancora in parte disattesi. La situazione è peraltro complicata dalla natura peculiare delle misure in medicina, dove all'impiego dei

---

<sup>224</sup> A. Carullo e altri: *Sviluppo di campioni viaggiatori per la taratura di sistemi di misurazione distribuiti*, «Tutto\_Misure», X, 3, 2008, pp. 230-233.

sistemi di riferimento è da associare la definizione di “traguardi analitici dell’incertezza”<sup>225</sup>.

Un ruolo primario in questo processo è affidato ai produttori dei sistemi diagnostici, che devono garantire le prestazioni del loro sistema analitico nel loro complesso, e la loro riferibilità a campioni e metodi analitici di livello gerarchico superiore. Tuttavia, anche gli utilizzatori, cioè i laboratori di analisi, e le terze parti hanno un ruolo di responsabilità nel processo, in quanto ogni modifica del procedimento analitico da questi introdotta può significativamente alterare la qualità del sistema.

Studi recenti sulle specifiche metrologiche fornite da produttori di metodi e campioni analitici riportano quanto, ancor oggi, vi sia confusione nel riportare i valori di incertezza, non specificando se essa si tratti di incertezza tipo o estesa, e non combinando l’incertezza del sistema di taratura con quella del materiale di riferimento da questa utilizzato. Inoltre, comparazioni tra i produttori riguardo a metodologie attinenti a uno stesso esame di laboratorio (per esempio per la determinazione della concentrazione di glucosio nel sangue) danno risultati tra loro scarsamente confrontabili. Dal canto loro, anche i laboratori e le Aziende Sanitarie che li gestiscono hanno le loro responsabilità dal punto di vista metrologico-legale. Infatti essi sono tenuti al «controllo e al monitoraggio delle apparecchiature e dei sistemi di prova qualora gli stessi siano utilizzati per l’esercizio dell’attività aziendale» ai sensi della ISO 9001:2001.

Il futuro della metrologia in Medicina di Laboratorio passa dunque attraverso la definizione e l’approvazione di sistemi di riferimento metrologici, il monitoraggio frequente delle prestazioni analitiche e l’abbandono di metodi qualitativamente insoddisfacenti.

### *La metrologia in biologia*<sup>226</sup>

L’allargamento della metrologia ai settori emergenti della chimica e della biologia ha comportato un grande sforzo per omogeneizzare la terminologia e trasferire concetti e metodologie, originariamente sviluppati per le misure di grandezze fisiche, ai nuovi settori applicativi. Soprattutto nella fase iniziale, la metrologia si è fatta strada solo con lentezza in questi nuovi settori, sia a causa

<sup>225</sup> M. Panteghini: *Application of traceability concepts to analytical quality control may reconcile total error with uncertainty of measurement*, Clin. Chem. Lab. Med., 48, 2010, pp. 7-10.

<sup>226</sup> Contributo di Giovanna Zappa, ENEA – UTAGRI.

di difficoltà intrinseche che per una non facile comunicazione legata al diverso approccio concettuale tra il mondo della metrologia e quello delle misure quotidiane.

Nel caso di campioni biologici, e in generale per i campioni di origine naturale, la maggior parte delle tecniche analitiche è di tipo distruttivo e i campioni presentano caratteri di unicità con caratteristiche (biologiche, chimiche e chimico-fisiche) spesso complesse e variabili in maniera imprevedibile, in quanto soggette all'influenza di fattori non sempre conosciuti e/o parametrizzabili. Da ciò conseguono difficoltà nella definizione del misurando, nello sviluppo del modello di misura e delle metodologie analitiche, nell'ottenimento della catena di riferibilità e nell'applicazione delle tecniche di analisi statistica.

D'altro canto, un'adeguata e completa infrastruttura metrologica rappresenta oggi uno degli elementi chiave per lo sviluppo economico e sociale, consentendo i processi di armonizzazione e di globalizzazione, la libera circolazione delle merci e i processi di liberalizzazione e de-centralizzazione. La ricerca metrologica in questi nuovi settori consente oggi di rendere sempre più misurabili i numerosi aspetti della vita quotidiana, permettendo di dimostrare in maniera oggettiva la qualità di prodotti e servizi.

Soltanto attraverso un approccio metrologico è possibile ottenere risultati affidabili, requisito indispensabile quando le misure riguardano la sicurezza e la salute. Un risultato è affidabile quando può essere dimostrata l'assenza di errori sistematici e quando fornisce tutte le informazioni necessarie per un suo corretto utilizzo e in particolare i margini di incertezza opportunamente calcolati.

Il riferimento internazionale per la valutazione dell'incertezza di misura è la già citata *Guida all'espressione dell'incertezza di misura* (GUM). Per trasferire alle misure chimiche e biologiche le metodologie di calcolo originariamente sviluppate per la misura di grandezze fisiche, è stata sviluppata una guida specifica<sup>227</sup> che prende in considerazione anche gli aspetti dovuti all'instabilità e/o variabilità naturale dei campioni, al tipo di variabili (continue o discrete), e ai loro modelli di distribuzione di probabilità (normale, di Poisson, binomiale).

Un altro importante aspetto da considerare sono le proprietà classificatorie, a cui sempre più le misure chimiche e biologiche fanno ricorso (per esempio, sequenze cromatografiche e test genetici). Queste sono per definizione "non misurabili", ma quando entrano in un processo di misura o in qualsivoglia determinazione analitica giocano un ruolo decisivo sia sull'accuratezza che sull'incertezza di misura. In particolare lo sviluppo delle biotecnologie ha aper-

---

<sup>227</sup> QUAM-EURACHEM/CTAC Guide, 2012.

to la via alla realizzazione di nuovi sistemi diagnostici basati sull'analisi, la comparazione e la predizione di sequenze geniche e molecolari, che coinvolgono proprietà classificatorie, come l'identità e la sequenza.

In questi casi il contributo all'incertezza finale dovrebbe essere valutato in termini di probabilità (d'identità, omologia, similarità, ...). In particolare la tecnica RT-PCR, grazie alla facilità di esecuzione, all'apparente semplicità e allo sviluppo di software *user-friendly*, è sempre più diffusa, ed è pertanto indispensabile, per evitare la generazione di dati inaffidabili, impiegare un approccio metrologico anche per questo settore di misura<sup>228</sup>.

Uno degli esempi più eclatanti di implicazioni per la salute derivanti da un uso improprio della tecnologia RT-qPCR è quello relativo alla diffusione di dati che dimostravano la presenza del virus del morbillo in bambini con disturbi dello sviluppo<sup>229</sup>, a sostegno dell'ipotesi di una correlazione diretta tra vaccinazione trivalente, enteropatie e autismo. L'allarmismo che si diffuse tra la popolazione inglese, con i conseguenti disastrosi effetti dovuti alla diminuzione delle vaccinazioni, venne interrotto solo grazie alla dettagliata analisi di Bustin<sup>230</sup>, che dimostrò la presenza di una serie di errori e imprecisioni nel dosaggio, stabilendo successivamente i requisiti minimi per poter pubblicare risultati ottenuti mediante RT-qPCR<sup>231</sup>.

I grandi progressi nei campi delle nanotecnologie e nanomateriali, della microelettronica, dell'elettronica molecolare e dell'ICT e la loro integrazione con le biotecnologie hanno reso possibile lo sviluppo di nuovi sensori e microsistemi da impiegare per le analisi cliniche, la sicurezza alimentare e il monitoraggio ambientale, lanciando nuove sfide in campo metrologico. Negli ultimi anni particolare attenzione è stata rivolta, per esempio, allo sviluppo di metodi rapidi basati sull'impiego di anticorpi (o aptameri), come i test basati sulla polarizzazione di fluorescenza (FPIA) e *lateral flow devices* (LFD) o *dipsticks* da impiegare per la determinazione quantitativa o semi-quantitativa di micotossine o di allergeni in matrici alimentari. Questi test diagnostici "alternativi" offrono considerevoli vantaggi in termini di costi, rapidità di analisi, facilità di utilizzo, ma richiedono un'attenta valutazione dei loro reali limiti di utilizzo e lo sviluppo di idonee procedure di validazione. Il rischio è infatti che l'apparente semplicità e il basso

<sup>228</sup> J. Huggett, S.A. Bustin: *Accred. Qual. Assur.*, 2011.

<sup>229</sup> V. Uhlmann et al.: *Mol. Pathol.*, 55, 2002, pp. 84-90.

<sup>230</sup> S.A. Bustin: *Eur. Pharm. Rev. Dig.*, 1, 2008, pp. 11-16.

<sup>231</sup> S.A. Bustin et al.: *The MIQE Guidelines*, *Clin. Chem.*, 55, 2009, pp. 611-622.

costo porti a un loro impiego per finalità e in condizioni inadeguate, con conseguente inaffidabilità dei risultati.

I materiali di riferimento (RM) rappresentano in molti casi l'unico strumento a disposizione per ottenere l'affidabilità e la comparabilità delle misure chimiche e biologiche. Il concetto di materiale di riferimento ha carattere generale e comprende varie tipologie di materiali che trovano impiego per diversi scopi in diverse fasi del processo di misurazione: taratura e verifica degli strumenti di misurazione, validazione delle procedure, verifica di prestazioni, conferma metrologica, assegnazione di valori a materiali, controllo di qualità, valutazione dell'incertezza di misura. È indispensabile promuovere l'utilizzo di RM e far crescere tra i laboratori una cultura metrologica, così da permettere una corretta scelta di RM, in termini d'idoneità allo specifico scopo, e un loro corretto utilizzo all'interno del processo di misurazione. Occorre inoltre favorire sempre più l'incontro e il dibattito scientifico tra il "mondo metrologico" e il "mondo applicativo delle misure", indirizzando la ricerca metrologica verso le necessità emergenti della società civile e del mondo produttivo.

Accanto alle guide ISO-REMCO su produzione, scelta e utilizzo dei RM<sup>232</sup>, vanno citate per la loro specifica pertinenza le guide del EU-JRC IRMM sull'incertezza di misura specifica per i test OGM<sup>233</sup> e sull'utilizzo di RM nei test genetici<sup>234</sup>.

#### *Il software metrologico e l'esempio delle macchine di misura a coordinate*

Le macchine di misura a coordinate (CMM) sono sistemi meccanici capaci di generare un sistema di riferimento tridimensionale entro il quale misurare le coordinate spaziali di punti di un oggetto. Note le coordinate di numerosi punti, un adeguato software di calcolo è in grado di determinare dimensioni dell'oggetto, angoli tra sue parti, parallelismi di piani, altre caratteristiche geometriche dell'oggetto.

A partire dagli anni '80 del XX secolo le CMM subirono una rivoluzione concettuale che può servire da esempio per altre rivoluzioni che nel XXI secolo potrebbero coinvolgere strumenti e sistemi metrologici. Prima della rivoluzione le parti meccaniche delle CMM erano concepite come riferimenti geometrici di rette tra loro ortogonali con le quali veniva materializzato il sistema tridimen-

<sup>232</sup> ISO-REMCO Guides 30-35.

<sup>233</sup> EUR 22756-2009.

<sup>234</sup> EUR 23256-2008.

sionale di riferimento. Le CMM erano pertanto costituite da guide di carri mobili, lavorate e aggiustate in modo da essere ben rettilinee e ben perpendicolari tra loro. Trionfava, nella loro costruzione, la meccanica di alta precisione. Dopo la rivoluzione la parte più costosa della meccanica di precisione scomparve: le guide divennero assai meno rettilinee, assai meno tra loro ortogonali. Il software sostituì la precisione meccanica della costruzione. Costruita la macchina, ripetibile nei suoi posizionamenti ma assai meno precisa, quindi più economica, una procedura e un software particolari determinavano gli errori di rettilineità e di ortogonalità, oltre ad altri errori come quelli dovuti a deformazioni della struttura della macchina per variazione della distribuzione dei pesi e della temperatura. Questi errori venivano scritti in una base di dati all'interno del computer in dotazione alla CMM. Durante l'uso, acquisite le coordinate di un punto, un software idoneo leggeva gli errori di quel punto sulla base dei dati e correggeva le coordinate lette dalla macchina.

In Italia lavorammo per questa rivoluzione nell'ambito di un Progetto Finalizzato del CNR. Mi trovai a coordinare un affiatato gruppo internazionale costituito da ricercatori italiani dell'Istituto di Metrologia e del Politecnico di Torino, da esperti di ben sei aziende costruttrici di CMM<sup>235</sup> e da quattro ricercatori da istituti di ricerca, università e aziende di Argentina, Bulgaria e Jugoslavia. L'aspetto interessante, non tecnico o scientifico, che subito apparve chiaro nel pianificare il lavoro fu quello della formazione degli utilizzatori delle macchine alla novità: la precisione ottenuta non dalle lavorazioni meccaniche precise dello strumento ma da un software che rilevava gli errori di lavorazione e di comportamento e li correggeva in tempo reale. Si tratta di un problema analogo a quello di fronte al quale si sono trovati i progettisti dei treni per l'alta velocità: il controllo del corretto comportamento delle diverse parti del treno non poteva più essere affidato al personale di stazione che verificava gli assetti delle parti meccaniche colpendole con una mazzetta e ascoltando il suono prodotto. Per l'alta velocità le informazioni andavano raccolte a centinaia sul treno in

---

<sup>235</sup> Senza la collaborazione di queste aziende, che misero a disposizione del progetto loro macchine e loro tecnici per le misure e per i collaudi del software, non sarebbe stato possibile raggiungere i positivi risultati che conseguimmo. È doveroso ricordarle una per una perché seppero mettere da parte rivalità e concorrenza e collaborare a realizzare una vera e propria rivoluzione e prodotti oggi diffusi su tutte le macchine a coordinate. Esse erano, in ordine alfabetico: Carl Zeiss spa, Costruzioni macchine utensili speciali sas (poi divenuta Coord3 spa e oggi Metris Italia spa), DEA spa (oggi Hexagon Metrology spa), Fratelli Rotondi sas, MDM Mecatronics di Giorgi Annamaria (oggi MDM Mecatronics srl), Poli spa (oggi non più in attività).

movimento, facendolo passare sotto appositi portali dai quali decine di sensori misurassero vibrazioni, temperature, assetti, dimensioni. Poi un software avrebbe elaborato tutte queste informazioni e comunicato al manovratore e alla centrale di controllo lo stato di salute del treno, consentendo eventuali interventi anche d'emergenza. Il pubblico dei viaggiatori, abituato a veder effettuare certi controlli manuali, andava informato e formato affinché potesse comprendere e accettare le nuove tecnologie: e soprattutto il ruolo determinante dell'impalpabile software.

Oggi il software riveste un ruolo determinante nelle prestazioni di quasi tutti gli strumenti di misura. A fronte di tale ruolo mancano quasi sempre garanzie adeguate sul suo comportamento, sulle protezioni di fronte a modifiche non autorizzate, sulla sua compatibilità con altri software operanti su strumenti con analoghe funzioni. Al software, divenuto ormai in molti casi "intelligenza artificiale", si arriva a chiedere di formulare ipotesi, di condurre esperimenti e misure per verificarle, di analizzare e valutare i risultati<sup>236</sup>. È forse giunto il momento di applicare al software, usato negli strumenti di misura, concetti e metodi ormai consolidati per l'hardware che lo supporta: riferibilità, incertezza, confronti internazionali, identificazione univoca. È un insieme di esigenze e di conseguenti problemi la cui soluzione la CGPM potrebbe affidare al CIPM e a un Comitato Consultivo appositamente costituito.

### 6.3. In conclusione

Solo l'uomo, tra le specie viventi, ha la coscienza di avere una storia, sia come individuo sia come specie<sup>237</sup>. Pertanto, come secondo la psicologia evolutiva di Jean Piaget il bambino acquista coscienza di sé solo quando acquisisce la coscienza della continuità, ossia della storia, del proprio corpo, così la metrologia, ancor oggi bambina, potrà acquisire coscienza di sé come scienza solo quando saprà riconoscere la propria storia, individuare in essa le contraddizioni, evidenziare in essa continuità e discontinuità di metodi e principi, accettare l'idea di essere una scienza autonoma e non l'ancella di altre scienze per applicazioni che richiedano una buona tecnica delle misure. Il metrologo, nelle università, nelle aziende, negli istituti di ricerca metrologica, si convinca infine che deve conoscere, ossia entrare nell'essenza dei problemi e delle necessità, per misurare bene.

<sup>236</sup> R.D. King et al.: *The automation of science*, Science, 324, aprile 2000.

<sup>237</sup> L. Geymonat: vol. VI, op.cit., p. 550.

## APPENDICE: I DOCUMENTI TECNICI DI RIFERIMENTO

---

I documenti che vengono qui di seguito elencati dovrebbero costituire parte integrante della normativa disponibile in ogni azienda la cui attività preveda qualsivoglia tipo di misure. Fa eccezione la serie di norme 80 000, per le quali è sufficiente disporre delle parti 1, 2, 11 e di quelle di specifico interesse per le attività aziendali.

### *Le pubblicazioni del BIPM*

Il BIPM mette a disposizione sul sito URL: <[http://www.bipm.org/fr/si/si\\_brochure](http://www.bipm.org/fr/si/si_brochure)> gratuitamente un opuscolo di 180 pagine in inglese e francese, periodicamente aggiornato in modo da essere allineato con le delibere della CGPM e del CIPM, dedicato al sistema internazionale di unità SI. Questo testo è allineato all'VIII edizione dell'opuscolo. L'opuscolo ha rilevante importanza dal punto di vista legale in quanto riporta i testi delle delibere della CGPM sulle unità di misura, testi che hanno carattere di legge per tutti i Paesi che aderiscono al trattato internazionale della Convenzione del Metro.

Il BIPM pubblica inoltre i rapporti ufficiali:

- della Conferenza Generale dei pesi e delle Misure:  
*Comptes rendus des séances de la Conférence générale des poids et mesures*
- delle riunioni annuali del CIPM:  
*Procès-verbaux des séances du Comité international des poids et mesures*
- delle riunioni dei Comitati Consultivi:  
*Rapports des Comités consultatifs.*

La raccolta completa è disponibile presso la biblioteca dell'INRIM.

Il BIPM pubblica anche il rapporto annuale del direttore, due guide in metrologia (GUM e VIM), la rivista metrologia disponibile anche sul web (URL: <<http://www.iop.org/EJ/journal/met>>), i rapporti scientifici del BIPM e rapporti scientifici proposti dai comitati consultivi.

*Il corpo di norme ISO/IEC della serie 80 000*

La serie delle norme (guide) internazionali 80 000 ha come titolo generale “Grandezze e Unità” e consiste delle seguenti Parti:

- Parte 1: Generalità
- Parte 2: Segni matematici e simboli da usare nelle scienze naturali e nella tecnologia
- Parte 3: Spazio e tempo
- Parte 4: Meccanica
- Parte 5: Termodinamica
- Parte 6: Elettromagnetismo
- Parte 7: Luce
- Parte 8: Acustica
- Parte 9: Chimica fisica e fisica molecolare
- Parte 10: Fisica atomica e nucleare
- Parte 11: Numeri caratteristici
- Parte 12: Fisica dello stato solido
- Parte 13: Scienza e tecnologia dell’informazione
- Parte 14: Telebiometria relativa alla fisiologia umana

Le Parti 6, 13 e 14 sono di responsabilità dell’IEC; tutte le altre fanno capo all’ISO. In Italia UNI e CEI nel settore della metrologia generale operano congiuntamente tramite la Commissione mista UNI/CEI “Metrologia”. A tale Commissione spetta la competenza sulla serie 80 000. I due Enti hanno deciso di recepire immediatamente le Parti della serie 80 000 in lingua originale (Inglese) non appena approvate a livello internazionale e di procedere rapidamente anche alla loro traduzione in italiano. In Italia le norme della serie 80 000 sono pubblicate tutte come norme congiunte UNI (URL: <<http://www.uni.com>>) e CEI (URL: <<http://www.ceiuni.it>>), indipendentemente dall’organismo internazionale che ha la responsabilità delle varie Parti. Le prime Parti della serie già approvate sono disponibili in italiano a partire dal 2006.

Ciascuna Parte consiste, mediamente, di circa 40 pagine. A una serie di paragrafi di carattere generale, alcuni dei quali si ripetono identici in tutte le parti mentre altri riguardano osservazioni o definizioni specifiche, seguono tabelle con le grandezze di interesse, i loro simboli e definizioni, le loro unità di misura con simboli e definizioni, note particolari ed eventuali fattori di conversione tra

le diverse unità. Seguono appendici in genere riguardanti unità di misura al di fuori del SI, di valore storico o usate in ambiti geografici o disciplinari particolari.

Sono qui di seguito elencate le norme pubblicate in italiano, ricordando peraltro che alcune di esse sono in revisione a causa della revisione dell'originale ISO:

- UNI CEI ISO 80000-1:2010 Grandezze e unità di misura - Parte 1: Generalità
- UNI CEI ISO 80000-2:2010 Grandezze e unità di misura - Parte 2: Segni e simboli matematici da utilizzare nelle scienze naturali e nella tecnica
- UNI CEI ISO 80000-3:2006 Grandezze e unità di misura - Parte 3: Spazio e tempo
- UNI CEI ISO 80000-4:2006 Grandezze e unità di misura - Parte 4: Meccanica
- UNI CEI ISO 80000-5:2009 Grandezze e unità di misura - Parte 5: Termodinamica
- UNI CEI ISO 80000-7:2009 Grandezze e unità di misura - Parte 7: Luce
- UNI CEI EN ISO 80000-8:2007 Grandezze e unità di misura - Parte 8: Acustica
- UNI CEI ISO 80000-9:2010 Grandezze e unità di misura - Parte 9: Chimica fisica e fisica molecolare
- UNI CEI ISO 80000-10:2010 Grandezze e unità di misura - Parte 10: Fisica atomica e nucleare
- UNI CEI ISO 80000-11:2009 Grandezze e unità di misura - Parte 11: Numeri caratteristici
- UNI CEI ISO 80000-12:2010 Grandezze e unità di misura - Parte 12: Fisica dello stato solido
- UNI CEI EN 80000-13:2009 Grandezze e unità di misura - Parte 13: Scienza e tecnologia dell'informazione
- UNI CEI EN 80000-14:2009 Grandezze e unità di misura - Parte 14: Telebiometria relativa alla fisiologia umana

### *Il vocabolario internazionale di metrologia*

Il vocabolario, detto comunemente VIM, è stato pubblicato nel 2007 dall'ISO con la terza edizione, profondamente rivista rispetto alla precedente che risaliva

al 1993. La nuova edizione è condivisa, oltre che dall'ISO, da altre 7 organizzazioni internazionali che hanno contribuito alla sua stesura. Si fornisce l'elenco di tali organizzazioni per sottolineare la vastità del consenso oggi attribuito al documento: IEC, la Federazione Internazionale di Chimica Clinica e Medicina di Laboratorio (IFCC), l'Unione Internazionale di Chimica Pura ed Applicata (IUPAC), l'Unione Internazionale di Fisica Pura ed Applicata (IUPAP) la Organizzazione Internazionale di Metrologia Legale (OIML), la Cooperazione Internazionale per l'Accreditamento dei Laboratori (ILAC) e il Bureau International des Poids et Mesures (BIPM).

UNI e CEI hanno deciso di recepire immediatamente il documento tra le norme italiane, nelle lingue originali (inglese e francese), e di procedere alla sua traduzione in italiano. Tale traduzione contiene anche un glossario in tre lingue (è aggiunto l'italiano alle due originali) dei lemmi definiti dal vocabolario: tale glossario faciliterà enormemente le aziende nella traduzione dei loro cataloghi dall'italiano all'inglese e al francese. La norma in italiano ha il riferimento CEI UNI 70099 – pubblicata nell'aprile del 2010 e il titolo: *Vocabolario Internazionale di Metrologia – Concetti fondamentali e generali e termini correlati (VIM)*. URL: <<http://www.ceiuni.it/struttura/body-np-norme-prodotti.html>>

### *Il vocabolario elettrotecnico internazionale*

Pubblicato come norma IEC 60050, il vocabolario elettrotecnico internazionale è da tempo accessibile anche via web, URL: <<http://www.electropedia.org>>. Al momento contiene le definizioni in inglese e francese di oltre 20 000 concetti relativi al mondo delle elettrotecnologie, con i termini corrispondenti in numerose altre lingue, tra cui l'italiano.

## SIGLE UTILIZZATE E LORO SIGNIFICATO

---

AEI: Associazione Elettrotecnica Italiana.....	113
AEIT: Federazione Italiana di Elettrotecnica, Elettronica, Automazione, Informatica e Telecomunicazioni.....	113
AFRIMETS: Infra-Africa Metrology System.....	210
AIEE: American Institute of Electrical Engineers.....	59
APMP: Asia Pacific Metrology Programme.....	209
BAAS: British Association for Advancement of Science.....	59
BCR: Bureau Communautaire de Référence.....	207
BIPM: Bureau International des Poids et Mesures.....	9
BNM: Bureau National de Métrologie.....	120
BoD: Board of Directors (organismo di EUROMET).....	207
CC: Comitato Consultivo.....	67
CENAM: Centro Nacional de Metrología.....	119
CGPM: Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure.....	13
CGS: sistema di unità basato su centimetro, grammo e secondo.....	79
CIE: Commission Internationale de l'Eclairage.....	61
CIECC: Consejo Interamericano para la Educación, Ciencia y Cultura.....	210
CIPM: Comitato Internazionale dei Pesi e delle Misure.....	13
CIRP: International Academy for Production Engineering.....	161
CM: Convenzione del Metro.....	6
CNAM: Conservatoire National des Arts et Métiers.....	120
CNR: Consiglio Nazionale delle Ricerche.....	121
COOMET: Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions.....	210
CSIRO-NMIA: National Metrology Institute of Australia.....	119
EA: European cooperation for Accreditation.....	218
EFTA: European Free Trade Association.....	207
EMRP: Programma Europeo di Ricerca Metrologica.....	209
ETL: Electrotechnical Laboratory.....	120
GATT: General Agreement on Tariffs and Trades.....	236
GMEE: Gruppo Misure Elettriche ed Elettroniche.....	182
GUM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.....	225
IAF: International Accreditation Forum.....	226
IAU: International Astronomical Union.....	34
ICRU: International Commission on Radiation Units & Measurements.....	171
IEC: International Electrotechnical Commission.....	30
IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.....	59
IEN: Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris.....	121
IFCC: International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine.....	225

ILAC: International Laboratory Accreditation Cooperation.....	219
IMEKO: International Measurement Confederation.....	163
IMGC: Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti.....	122
IMN: Istituto Metrologico Nazionale.....	14
IMNS: Institute for National Measurement Standards (Canada).....	204
IMTC: Instrumentation and Measurement Technology Conference.....	210
INMRI: Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti.....	180
INPL: National Physical Laboratory of Israel.....	204
INRIM: Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica.....	38
INTI: Instituto Nacional de Tecnología Industrial (anche Instituto Nacional de Metrología de la República Argentina).....	201
IPPC: Integrated Prevention of Pollution Control Directive.....	231
IRE: Institute of Radio Engineers.....	59
ISO: International Standard Organisation.....	30
ITC: International Trade Centre.....	226
ITI: Istituto Termometrico Italiano.....	87
ITU: Information and communication technologies.....	226
IUPAC: International Union of Pure and Applied Chemistry.....	59
IUPAP: International Union of Pure and Applied Physics.....	115
JCDCMAS: Joint Committee for the coordination of technical assistance to Developing Countries in Metrology, Accreditation and Standardization.....	225
JCGM: Joint Committee for Guides in Metrology.....	225
JCRB: Joint Committee of the Regional Metrology Organizations and the BIPM.....	222
JCTLM: Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine.....	226
JRC: Joint Research Centre.....	207
KC: key comparisons.....	221
KRISS: Korea Research Institute for Standards and Science.....	119
LCE: Laboratoire Central d'Electricité.....	108
LCIE: Laboratoire Central des Industries Électriques.....	120
MKS: sistema di unità basato su metro, kilogrammo e secondo.....	142
MLA: Multilateral Agreement.....	219
MRA: Mutual Recognition Arrangement.....	214
NBS: National Bureau of Standards.....	24
NIM: National Institute of Metrology (Cina).....	119
NIST: National Institute of Standards and Technology.....	24
NPL: National Physical Laboratory.....	24
NPLI: National Physical Laboratory of India.....	119
NRC-IMNS: Institute for National Measurement Standards.....	119
NRLM: National Research Laboratory of Metrology.....	120
OCSE: Organizzazione di Cooperazione e Sviluppo Economico.....	232

SIGLE UTILIZZATE E LORO SIGNIFICATO

OIML: Organizzazione Internazionale di Metrologia Legale.....	94
PTB: Physikalisch-Technische Bundesanstalt.....	24
PTR: Physikalisch-Technische Reichsanstalt.....	24
RMO: Regional Metrology Organization.....	209
SADCMET: Southern African Development Community Co-operation in Measurement Traceability.....	210
SIM: Inter-American Metrology System.....	210
SIMYC: Sistema Inter-americano de Metrología y Calidad.....	210
TAI: Tempo Atomico Internazionale.....	37
UME: Ulusal Metroloji Enstitüsü.....	119
USMA: U.S. Metric Association.....	115
UTC: Tempo Universale Coordinato.....	170
VIM: International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology.....	225
VNIIM: Istituto Mendeleev di Metrologia.....	25
WEMC: Western European Metrology Conference.....	169
WTO: World Trade Organization.....	223



## INDICE DEI NOMI

---

Aguilar, Félix.....201	Caroché, Noël-Simon.....6
Albenga, Giuseppe.....85	Cassini, Jean-Dominique.....6
Alessine, V.D.....166	Cassinis, Gino.....140, 145, 151, 155
Amici, Giovanni Battista.....39	Celsius, Anders.....74
Appell, Paul.....75, 95	Chaptal, Jean-Antoine.....15
Araolaza, Anselmo Manuel.....202	Chatelain, M.....139
Archimede di Siracusa.....75	Chiodi, Carlo.....122
Ardigò, Roberto.....17	Clausius, Rudolf Julius Emanuel.....11
Avčín, Franc.....155	Crittenders, E.C.....140
Avogadro, Amedeo.....46	Crovini, Luigi.....87, 173
Bachelard, Gaston.....128	Cunietti, Mariano.....XVIII
Barbagelata, Angelo.....145	Curie, Pierre.....69
Battistella, G.....93	Cuvier, Georges-Léopold-Chrétien.....12
Bell, Graham.....125	Dalton, John.....45
Benoît, J.-R.....27, 34, 100	Darwin, Charles.....17, 49
Bequerel, Henry.....69	Darwin, Horace.....86
Bickel, E.....161	Dehalu, M.....139
Blevin, William Roderick.....230	Delambre, Jean-Baptiste Joseph.....6
Blondel, André-Eugène.....150	Dew-Smith, Albert George.....86
Bohr, Niels.....72	Dior, Louis.....97
Boltzmann, Ludwig.....70	Donati, Giovanni Battista.....26
Bonelli, Gino.....146	Dore, Gian Paolo.....146
Borda, Jean-Charles de.....6	Drysdale, Charles Vickery.....84
Bordoni, V.....134	Du Bois-Reymond, Emil.....18
Bottani, Ercole.....145, 177, 194	Edison, Thomas A.....125
Bougainville, Louis-Antoine de.....6	Einstein, Albert.....71
Broch, Ole Jacob.....27	Engelhard, E.....168
Broglie, Maurice de.....140, 165	Fabry, Charles.....134, 139, 160
Brown, Joseph.....38	Fabry, Maurice Paul Auguste Charles....100
Brown, Robert.....71	Ferranti, Camillo.....26
Buache, Jean-Nicolas.....6	Ferraris, G. Lorenzo.....84
Burgess, George K.....99	Ferraris, Galileo.....26, 36, 121
Cabrera y Felipe, Blas.....101, 140	Foerster, Wilhelm Julius.....27, 90, 99
Callendar, Hugh L.....40	Freud, Sigmund.....70
Campanaro, Paolo.....87	Galloway, D.F.....161
Cannizzaro, Stanislao.....26, 47	Garuffa, Eugenio.....53
Carnap, Rudolf.....102	Gautier, Raul.....96
Carneiro, Kim.....208	Gay-Lussac, Joseph-Louis.....15, 46

Gerszonowicz, Segismundo.....	84	Laitano, Fedele.....	221
Giacomo, Pierre.....	180, 197, 216, 253	Lalande, Jérôme de.....	6
Giorgi, Giovanni.....	49, 85, 113	Lampard, D.E.....	147
Gödel, Kurt.....	102	Laplace, Pierre-Simon de.....	6
Govi, Gilberto.....	9, 27	Lavoisier, Antoine Laurent.....	12
Grassi, Guido.....	79	Le Corbusier, Charles-Edouard Jeanneret- Gris.....	102
Gropius, Walter.....	102	Leeds, Morris Evans.....	86
Guillaume, Charles Edouard.....	38, 100, 140	Leitz, Ernst.....	38
Haeckel, Heinrich.....	65	Lenard, Philipp.....	65
Hague, Bernard.....	84	Leschiutta, Sigfrido.....	221, 228
Harrison, John.....	54	Liebig, Justus von.....	11, 15
Hass, W.J. de.....	140	Linker, P.B. Arthur.....	84
Heaviside, Oliver.....	114	Lombardi, L.....	134
Helmholtz, Herman Ludwing Ferdinand von.....	11, 16, 24, 56, 110	Lorentz, Hendrik Antoon.....	100
Hewlett, Willam.....	87	Loria, Leonardo.....	53
Ibero, Carlos Ibañez de.....	27	Ludwing, Karl Friedrich Wilhelm.....	11
Insardi, Teòfilo.....	202	Mach, Ernst.....	56
Jacob, M.....	166	Maiman, Theodore.....	168
Jaeger, W.....	84	Majorana, Quintino.....	146
Johansen, E.S.....	139	Marconi, Guglielmo.....	121
Johansson, Carl Edward.....	92	Marey, Étienne Jules.....	32
Jolley, Alfred Charles.....	84	Marques, Daniel.....	202
Kaarls, Robert.....	230	Martinez, Giulio.....	39
Kandinskij, Vasilij Vasil'evič.....	102	Maxwell, James Clerk.....	18
Kargatchin, G.....	139	McLaren, Jim W.....	204
Keesom, Wilhelmus Hendrikus.....	131	Méchain, Pierre-François-André.....	6
Keinat, Georg.....	84	Mendeleev, Dmitrij Ivanovič.....	15, 56
Keithley, Joseph F.....	87	Michelson, Albert Abraham.....	27, 34, 72, 100
Kelvin, William Thomson.....	18, 30, 49, 56, 74, 129	Modoni, Vittorio.....	146
Kennelly, Arthur Edwin.....	100, 140	Monstier, Roland de.....	193
Kern, Gottlieb.....	39	Montagn, Samuel.....	35
Keynes, John Maynard.....	83, 106	Montessori, Maria.....	116
Klee, Paul.....	102	Morley, Edward Williams.....	34, 72
Kösters, Wilhelm.....	99, 139, 150	Morse, Samuel.....	125
Kovalevsky, Jean.....	216, 221	Nagaoka, Hantaro.....	72, 100, 139
Kühne, Michael.....	209	Newton, Isaac.....	24, 37
Lagrange, Joseph-Louis.....	6	Nicolau, P.....	161
		Northrup, Edwin F.....	86
		Numata, Yehan.....	30

Ostwald, Wilhelm.....	65	Sakuma, A.....	154
Packard, David.....	87	Salmoiraghi, Angelo.....	39
Palm, Albert.....	84	Sartori, Rinaldo.....	114
Palmer, Jean Laurent.....	30	Sartorius, Florenz.....	39
Parvis, Marco.....	255	Sears, John Edward.....	100, 139, 193
Pérard, Albert.....	100, 139	Secchi, Angelo.....	9
Pernet, J.....	27	Siemens, Ernst Werner von.....	24, 39
Pérot, Alfred.....	100	Silvestri, Mario.....	2
Perry, John.....	49	Skłodowska, Maria.....	69
Perucca, Eligio.....	114, 146, 151, 165	Solvay, Ernest.....	15
Peters, Jacques.....	161	Statescu, C.....	139
Piaget, Jean.....	129, 247, 262	Stefan, Joseph.....	56
Pirandello, Luigi.....	103	Steinberg, Rafael.....	202
Pisati, Giuseppe.....	26	Stratton, Samuel Wesley.....	100
Planck, Max.....	65, 69	Tacchini, Pietro.....	26
Porro, Ignazio.....	39	Terrien, Jean.....	107, 197
Preston-Thomas, H.....	204	Thompson, A.M.....	147
Pucci, Enrico.....	26	Tinsley, Henry.....	87
Quinn, Terry J.....	148, 173, 209, 214, 221, 233, 253	Turpain, Albert.....	84
Rasetti, Giuseppe.....	88	Valdés, Joaquín.....	203
Rauszer, Z.....	139	Violle, Jules Louis Gabriel.....	108
Regoliosi, Piero.....	145, 182	Volta, Ezio.....	146
Ricolfi, Teresio.....	203	Volterra, Vito.....	98, 121, 131, 140, 160
Roentgen, Wilhelm Konrad.....	65, 69	Wallard, Andrew.....	209, 225, 233, 253
Roš, M.....	139	Whitehead, Alfred North.....	102
Ruffino, Giuseppe.....	87	Whitwoth, Joseph.....	30
Russell, Bertrand.....	102	Wien, Wilhem Carl Werner.....	65, 70
Rutherford, Ernest.....	72	Wittgenstein, Ludwing.....	102
Sachs, Jeffrey D.....	196	Wright, Frank Lloyd.....	102
Sainte-Claire Deville, Henry.....	32	Wundt, Wilhelm Maximilian.....	109
		Zeeman, Pieter.....	100, 107, 140



## I CURATORI

---

**FRANCO DOCCHIO** è Professore Ordinario di Misure Elettriche ed Elettro-  
niche. Scienziato operante nel campo dell'optoelettronica, delle misure ottiche,  
delle applicazioni dei laser nell'industria e nella medicina, nella metrologia.  
Fondatore di svariate società di start-up accademiche. Socio emerito dell'European  
Optical Society, Socio della Società Italiana di Ottica e Fotonica. Membro  
dell'Ateneo di Scienze, Lettere ed Arti di Brescia. Docente di “Strumentazione  
Elettronica” e “Sensori ed Elettronica Industriale”. Dal 2010 è Direttore della  
Rivista «Tutto\_Misure», fondata dal professor Sergio Sartori.

**MICHELE GASPARETTO** è Professore Ordinario di Misure Meccaniche,  
Termiche e Collaudi dal 1980, afferente al Dipartimento di Meccanica del Po-  
litecnico di Milano, presidente pro-tempore del Gruppo nazionale di Misure  
Meccaniche e Termiche.

**LUCA MARI** è Professore Ordinario di Misure Elettriche ed Elettro-  
niche. Docente in corsi di scienza della misurazione, analisi statistica dei dati, teoria dei  
sistemi, la sua ricerca riguarda principalmente questioni fondamentali di scienza  
della misurazione. È attualmente *chairman* del TC1 (Terminology) e segretario del  
TC25 (Quantities and units) dell'International Electrotechnical Commission (IEC),  
ed esperto per IEC nel WG2 (VIM) del Joint Committee for Guides in Metrology  
(JCGM). È stato *chairman* del TC7 (Measurement science) dell'International  
Measurement Confederation (IMEKO).



# THE HISTORY OF MEASUREMENTS IN THE CONTEXT OF THE SOCIETY FROM 1875

---

The history of modern measurement science and technology, starting from the date of the Convention of the Metre, is strongly influenced by the political, economic, cultural, scientific and technological history. This book aims to introduce today's metrology as the result of choices, compromises, conflicts, often determined by, and sometimes determining, facts in such a broader context.

The author has witnessed the last 50 years of the history of metrology and has personally contributed to some significant achievements in it. With this book he shares his knowledge and experience with readers, such as researchers and quality control engineers, who wish to better understand the complex role of measurement in decision making processes, and secondary school teachers, who are responsible to correctly teach their students the main concepts of measurement.

The book is devoted to those who wish to become familiar with the fascinating world of metrology, the Convention of the Metre, and the historical events that have fostered, and in some case hindered, development of measurement science.

## TABLE OF CONTENTS

---

1. Origin and development of modern metrology
2. From the beginning of the 20th century to 1939
3. From 1945 to the birth of Regional Metrology Institutes
4. The rebirth in name of market globalization
5. A new future or just an outlook change?
6. Final considerations

## EDITORS

---

**FRANCO DOCCHIO** is Full Professor of Electrical and Electronic Measurements. Scientist in the fields of Optoelectronics, optical measurements, laser applications in industry and medicine, metrology. Co-founder of several academic start-up companies. Fellow of the European Optical Society, of the Italian Optical Society, of the Atheneum of Sciences of Brescia. He is lecturer of Electronic Instrumentation and of Optics at the University of Brescia. From 2010 he is the Director of the Italian Journal «Tutto\_Misure», founded by Sergio Sartori.

**MICHELE GASPARETTO** is Full Professor of Mechanical and Thermal Measurements at the Politecnico di Milano, Department of Mechanical Engineering. He is the President of the Italian group of mechanical and thermal measurements.

**LUCA MARI** is Full Professor of Electrical and Electronic Measurements. Lecturer in courses about measurement science, statistical data analysis, systems theory, his research mainly relates to fundamental topics of measurement science. He is currently the chairman of the TC1 (Terminology) and the secretary of the TC25 (Quantities and units) of the International Electrotechnical Commission (IEC), and an IEC expert in the WG2 (VIM) of the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). He has been the chairman of the TC7 (Measurement Science) of the International Measurement Confederation (IMEKO).

## STORIA DELLA TECNOLOGIA ITALIANA

---

### STORIA DELLA TECNICA ELETTRICA

*a cura di* Virginio Cantoni e Andrea Silvestri

472 p., Milano, Cisalpino, 2009

ISBN: 978-88-323-6214-5

### STORIA DELLE TELECOMUNICAZIONI

*a cura di* Virginio Cantoni, Gabriele Falciasecca, Giuseppe Pelosi

2 voll., 1024 p., Firenze, FUP, 2011

ISBN: 978-88-6453-243-1 (brossura) e 978-88-6453-245-5 (e-book PDF)

### STORIA DELLA MECCANICA

*a cura di* Virginio Cantoni, Vittorio Marchis, Edoardo Rovida

2 voll., 848 p., Pavia, Pavia University Press, 2014

ISBN: 978-88-96764-52-7 (brossura) e 978-88-96764-53-4 (e-book PDF)

## TEMI, PERSONAGGI E OPERE

---

Sergio Sartori

STORIA DELLE MISURE NELLA SOCIETÀ DAL 1875:

SUCCESSI, INSUCCESSI E... OCCASIONI PERDUTE

*a cura di* Franco Docchio, Michele Gasparetto, Luca Mari

298 p., Pavia, Pavia University Press, 2014

ISBN: 978-88-96764-93-0 (brossura) e 978-88-96764-94-7 (e-book PDF)