



Ledo Stefanini

La fisica dei tartufi

Riflessioni sull'insegnamento della fisica
nella scuola secondaria italiana

*Biblioteca Delle Scienze
Università degli Studi di Pavia
2010*

La fisica dei tartufi : riflessioni sull'insegnamento della fisica nella scuola secondaria italiana / Ledo Stefanini. - Pavia : Biblioteca Delle Scienze, 2010. - 147 p. ; 24 cm . - (Dispense Online)

Soggetto: Fisica - Insegnamento
Classificazione: 530.07 (ed. 22) - FISICA. Educazione, ricerca, soggetti connessi

© Ledo Stefanini 2010 - Pavia
ISBN: 978-88-903824-8-2

I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica, di riproduzione e di adattamento anche parziale, con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i paesi. La fotocopione per uso personale è consentita nei limiti e con le modalità previste dalla legislazione vigente.

www.paviauniversitypress.it

Publicato da:
Biblioteca Delle Scienze
Pavia University Press
Via Luino, 12
27100 Pavia
www.paviauniversitypress.it

Grafica: PrintService S.r.l., Pavia
Stampato da:
Digitalandcopy S.a.s., Segrate (MI)
Printed in Italy

Sommario

Capitolo 1 – Generalità sulla didattica della fisica

1. Sulla figura del professore.....	9
2. Le verità della fisica	13
3. Eppure si muove! (?).....	22
4. <i>La fisica o le fisiche</i>	24
5. La fisica raccontata.....	29
6. L'ingenuo realismo dei manuali scolastici.....	32
7. Didattica ministeriale	36
8. La parabola della taghenometria.....	37
9. Un esempio di 'tartufismo' scolastico: le unità di misura	39
10. Il caso Karlsruhe, per esempio.....	45
11. Verità e finzione nell'insegnamento della fisica	50
12. La formazione culturale degli insegnanti.....	54

Capitolo 2 – Sul lavoro in classe

1. La cultura fisica ingenua come ricchezza	59
2. L'insegnamento e il dizionario	61
3. Il ragionamento fenomeno-logico.....	63
4. La corrente prassi di laboratorio	67
5. PSSC all'italiana	69
6. Un'errata 'teoria degli errori'	71
7. Epistemologia e tautologie in laboratorio	73
8. Attività di laboratorio per insegnanti	78
9. Semantica delle esperienze.....	80
10. Implantologia scolastica	83
11. <i>Risus abundat in ore sapientium</i>	90

Capitolo 3 – Attività di laboratorio

1. Didattica dogmatica.....	97
2. Il cammino dell'ubriaco	99

3. L'attività di laboratorio come proposizione di problemi.....	102
4. Fisica qualitativa	106
5. L'esperimento di Thomson.....	107
6. Possiamo dirci 'post-aristotelici'?	109
7. Laboratorio qualitativo	113
8. Le cose potrebbero essere diverse?.....	119
9. Esperimenti <i>aut</i>	124
10. Progetti di ricerca	132
11. Le leggi fondamentali.....	138
Appendice	145

1 Generalità sulla didattica della fisica

1. Sulla figura del professore

In anni recenti c'è stato un declino dell'istruzione pubblica nella scienza. Al tempo stesso sono cresciute le attività della superstizione e dell'ignoranza, e sono diventati frequenti i casi di antiscienza e di pseudo-scienza. Si devono perciò adottare con la massima tempestività misure per rafforzare l'istruzione pubblica nella scienza. Il livello della formazione pubblica nella scienza e nella tecnologia è un segno importante del livello scientifico nazionale e un elemento di suprema importanza nello sviluppo economico e nel progresso scientifico e sociale. Dobbiamo approfondire il massimo impegno nel miglioramento di tale istruzione pubblica nel quadro della strategia per modernizzare il nostro Paese socialista e per rendere la nostra nazione potente e prospera. L'ignoranza non è mai socialista, e neppure la povertà.¹

In nessun'altra attività intellettuale vi è, nel nostro Paese, una così netta distinzione tra il Professore Universitario di Fisica e l'insegnante di fisica nella scuola media: il *prof.* Ai primi viene riconosciuto il diritto-dovere di occuparsi di fisica come fatto culturale (e di interrogarsi su di essa); ai secondi la funzione meramente peptonica di rendere più facilmente digeribile agli allievi il contenuto del libro di testo. Non è sempre stato così. È noto che fino ai primi decenni del secolo scorso vi erano intensi processi di scambio (culturale e di persone) tra le due istituzioni a cui era affidato il processo di educazione e acculturazione dei giovani. Oggi appare incredibile che un insegnante di scuola media possa pubblicare articoli sulle più quotate riviste scientifiche. Eppure, questo era normale fino ai primi anni del secolo scorso.² Fu negli anni venti che ebbe inizio la deriva – documentata da una ricerca di Giuseppe Giuliani³ – che ha portato all'emarginazione degli insegnanti dalla comunità dei fisici. Si è affermata l'opinione che tra l'attività di insegnamento e la formazione scientifica non vi sia che una blanda correlazione, sui due versanti della formazione culturale e professionale dell'insegnante. E poiché la realtà sociale finisce sempre per adeguarsi alle idee prevalenti, tale convinzione ha finito col creare proprie valide giustificazioni sperimentali nel quadro delle condizioni – non strettamente attuali – della scuola secondaria italiana. Fino a qualche decennio fa, il professore di scuola media era innanzi tutto un cultore della materia al quale lo Stato passava uno stipendio in cambio di un (modesto) impegno di insegnamento. Il suo *status* era simile a quello che viene attualmente riconosciuto ai docenti delle Accademie e dei Conservatori: era pagato principalmente per coltivare la sua arte, piuttosto che per fare l'insegnante.

¹ Partito Comunista Cinese, 5 dicembre 1994.

² Il mantovano Aurelio Dall'Acqua, ad esempio, non salì mai su una cattedra universitaria e, tuttavia, pubblicò contributi scientifici sui «Rendiconti della regia Accademia dei Lincei», sui «Mathematische Annalen» e sui «Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo», in anni in cui le stesse riviste ospitavano lavori di Poincaré e di Einstein.

³ Giuliani, Giuseppe (1996), *Novant'anni di fisica in Italia*, «Il Nuovo Cimento», Percorsi della Fisica, Università degli Studi di Pavia.

Attualmente le cose sono decisamente diverse. Il *professore* si è trasformato in *insegnante* e per lo Stato esiste solo in quanto prestatore di servizi e questi, come per tutti gli impiegati, vengono valutati in ore, espunto dal novero il parametro *qualità*. Mentre a un insegnante di violino si richiede che, prima di tutto, coltivi l'arte del violino (e non che sia un virtuoso); a un insegnante di fisica non si richiede (e non gli si riconosce) alcun impegno nell'ambito che gli sarebbe proprio: la cultura della fisica. Succede così che l'attrezzatura culturale che dovrebbe costituire la normale dotazione dell'insegnante, si riduce ai due corsi di Fisica Sperimentale seguiti nel primo biennio dell'università. Tuttavia, anche ammesso che i corsi siano stati culturalmente pregevoli (e che sia stata buona la capacità di interiorizzazione degli allievi) ciò che determina il profilo professionale degli insegnanti di fisica non è certo il portato residuale di questi corsi (seguiti, tra l'altro, quando le scelte professionali erano di là da venire e le aspirazioni, probabilmente, di altro segno). La formazione professionale dell'insegnante si realizza in un ambiente nel quale le spinte sono molte, diverse e contrapposte. Tra queste quella culturale è affatto assente. Non vi è, infatti, una domanda in questo senso da parte degli utenti. Ciò che studenti, famiglie e pedagogisti 'organici' chiedono alla scuola occupa uno spettro sterminato (dall'educazione alla salute all'educazione alla pace); ma in questo spettro non vi è una riga occupata dalla crescita culturale e, segnatamente, da quella scientifica. Quindi, il problema che si pone al giovane insegnante è quello di adeguarsi all'esistente (operazione che non richiede molto tempo). Se ciò che è reale è razionale, la razionalità dell'insegnante si forma su una realtà che preesiste alla sua venuta nella scuola e sulla cui natura nessuno sembra porsi domande, quasi fosse un dato assoluto e immutabile, e perciò stesso, non percepibile.

Già per la matematica le cose stanno in maniera diversa. Vi è infatti un canale di comunicazione e confronto tra le diverse scuole e il Ministero: la prova scritta di matematica agli esami di stato. Il testo della prova svolge la funzione che il diapason ha nell'orchestra: comunica una nota alla quale accordarsi. Sappiamo tutti che, nella realtà le cose non stanno esattamente così; che gli estensori dei temi di matematica per gli esami di maturità sembrano illudersi di dirigere un'orchestra nella quale, in realtà, ben pochi tra i docenti e gli studenti, sono in grado di rispondere alle aspettative; tuttavia, la lettura del tema d'esame rappresenta un momento di comune riconoscimento di precise finalità culturali che l'intera comunità scolastica – ipocritamente – dichiara proprie. Nell'insegnamento della fisica manca anche questo momento di confronto e di riflessione.

Dicevamo dunque che, generalmente, l'impegno culturale degli insegnanti risale e si riduce al periodo universitario. Dopo di che, nella latitanza dell'università e del Ministero, l'unico riferimento culturale degli insegnanti è rappresentato dai manuali scolastici che assumono perciò un ruolo determinante nell'attività professionale. Se, infatti, le occasioni e le sollecitazioni culturali di un insegnante di lettere, per fare un esempio, possono essere molto varie e occasionali (produzione letteraria attuale, italiana e straniera, saggi e riviste, pagine culturali dei quotidiani, festival e premi

1. Generalità sulla didattica della fisica

letterari), quelle di un insegnante di fisica, per quanto volenteroso, sono molto esigue. La situazione è ben illustrata dalle terze pagine dei quotidiani: da una parte intere pagine dedicate alla narrativa, alla storia, alla ripubblicazione di saggi letterari noti solo agli specialisti, dall'altra poche righe dedicate agli aspetti più esotici dell'informazione scientifica. E i quotidiani riflettono l'immagine della cultura scientifica del Paese. A questo si aggiunga l'estrema povertà (per necessità di cose) della produzione editoriale scientifica in lingua italiana, anch'essa di natura quasi sempre divulgativa.

Su questa peculiarità dell'editoria italiana è bene riflettere. Cominciamo con l'osservare che la quasi totalità degli insegnanti di fisica non ha accesso ai periodici scientifici generalisti come l'«*American Journal of Physics*» o l'«*European Journal of Physics*» – per non citare che i due più importanti –, pubblicazioni che non hanno lo scopo di trattare argomenti di frontiera o di ricerca specialistica. Il fine di queste è triplice: ampliare il campo fenomenico di applicazione della fisica classica (relatività e quantistica incluse), ripensare le tradizionali interpretazioni dei fenomeni e infine rivisitare l'interpretazione teorica della fisica classica. Per fare degli esempi banali (ma interessanti) vi si trovano contributi sull'interpretazione in termini meccanici delle proprietà della bicicletta o delle palle da tennis; altri che provano come certe classiche applicazioni del teorema di Bernoulli sul moto dei fluidi siano del tutto insostenibili; altri che dimostrano come certe tradizionali estensioni del concetto di lavoro meccanico siano prive di giustificazione teorica. Tutto questo a livello non propriamente specialistico.

Chi abbia la possibilità (e la voglia) di affacciarsi a questa finestra ha della fisica una visione del tutto diversa da chi abbia conosciuto la disciplina solo sui banchi dell'università. Rischia di scoprire che la fisica (quella classica) non è incisa nel marmo o fissata una volta per tutte; ma è materia viva che si evolve continuamente in maniera simile a una lingua. O alla storia, per la quale il revisionismo è talmente essenziale che qualcuno l'ha paragonata a un film nel quale ogni fotogramma conferisce significato all'insieme dei precedenti. Un continuo revisionismo è essenziale a che la fisica rimanga cosa viva, come lo è per la storia. Così come non esiste qualcosa che si possa definire 'lingua italiana', così non esiste una 'fisica classica' definitivamente fissata nei manuali scolastici: esiste un sistema di riflessione su un complesso di fenomeni e di paradigmi interpretativi che la tradizione indica con quella espressione. Ad esempio, la teoria della relatività ristretta – l'esposizione della quale è andata soggetta a un'evoluzione radicale – ha prodotto un nuovo modo di guardare all'elettromagnetismo classico (il che è ovvio) ma anche alla meccanica. L'interpretazione dei principi di conservazione ha subito una profonda trasformazione quando li si è considerati nell'ambito della fisica quantistica. Per non parlare della termodinamica in rapporto alla meccanica statistica.

Tutto questo riguarda la fisica 'alta', ma anche i fenomeni che tradizionalmente vengono interpretati alla luce della fisica elementare. In questo campo gli esempi sono numerosi: si va dal ruolo dell'effetto giroscopico sull'equilibrio della bicicletta, alle

indebite generalizzazioni del teorema del lavoro e dell'energia cinetica, alle improprie interpretazioni dell'entropia come 'disordine', alla spiegazione del funzionamento del generatore di Faraday, anche se la parte del leone compete, di diritto, al teorema di Bernoulli sul moto dei fluidi ideali che consente spiegazioni *prêt a porter* del profilo delle ali degli aerei e del *top spin* nel gioco del tennis: nello stesso tempo elementari e discutibili. Per cui si giunge al risultato assurdo di un corso di fisica di base nel quale l'allievo (al liceo o all'università) incontra un apparato teorico pesantissimo, che produce interpretazioni spesso errate o, per lo meno, non controllabili. I manuali di fisica contengono una quantità di queste 'leggende metropolitane'. Ma su questo aspetto della manualistica e della formazione culturale degli insegnanti torneremo più avanti.

Qui ci preme indicare quello che è – o dovrebbe essere – un aspetto essenziale dell'attività intellettuale. Colui che abbia fatto studi di fisica dovrebbe essere in possesso di strumenti di interpretazione e di sintesi superiori a chi sia portatore solo di fisica intuitiva. Comunque, dovrebbe avere consapevolezza del fatto che ogni fenomeno ammette sempre un'interpretazione più profonda e che anche gli strumenti teorici più consolidati sono oggetti di continuo divenire.

Si osservino le onde che si producono sulla superficie di un lago (o del mare) da una spiaggia. Qualunque sia la direzione del vento da cui sono generate, le onde che raggiungono la riva hanno sempre la sua stessa direzione. Se si osservano le onde generate in una pozzanghera, si nota che, in vicinanza del bordo, piegano e tendono a disporsi parallelamente al confine tra acqua e terra (Figura 1).

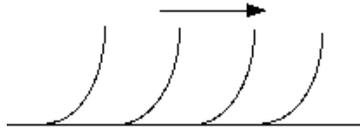


Figura 1. Le onde si piegano in prossimità della riva. La freccia indica la direzione di propagazione lontano dalla riva.

Chi non abbia questa consapevolezza; che non veda la fisica come corpo vivo in evoluzione, che pone sempre nuove domande e che consente di cogliere aspetti della realtà non prima notati – dalle onde in prossimità di un paraflutti, alle luci nell'ombra di un albero, al colore delle crode al tramonto, al rumore emesso da un traliccio – non è un fisico: è un *tartufo*.⁴

Tutto ciò presuppone un modo di vivere la condizione di professore di fisica che attualmente appartiene a una ridottissima minoranza e che, anzi, appare ai più come utopistica e fastidiosa. Abbiamo già rilevato che la formazione di gran parte dei nostri

⁴ Molière, *Il tartufo* [1664]

1. Generalità sulla didattica della fisica

professori di fisica è avvenuta in un paio di corsi all'università e qui si è conclusa. Il resto è apprendimento *sul campo*, cioè adeguamento alla prassi corrente e questo, si sa, avviene allo stadio più basso: quello che fa risparmiare energia agli allievi e agli insegnanti, che non produce fastidi a chi nell'istituzione ha la sua nicchia. Per la verità, non c'è nulla da rimpiangere neppure nel passato: nel paese di Galileo e di Fermi, l'insegnamento della fisica non vanta tradizioni scolastiche. Di nuovo non c'è che l'ondata di 'pedagogismo' che si è abbattuta sulla scuola secondaria che ha finito per conferire dignità a una concezione della cultura di basso livello e consentito di dare una nuova mano di pedagogico belletto alla tradizionale, italica, miseria culturale. Sembrerebbe ovvio che chi insegna fisica sia una persona che professa la fisica cioè la frequenta come un ambiente culturale vivo e vitale, non come un repertorio di formule rituali. Ma così non è. Anzi, sembra che si faccia il possibile per proporre e confermare un'immagine dell'insegnante che non abbia altro accesso alla cultura che non sia quello mediato dal manuale scolastico. Per questo motivo, in Italia più che altrove, il profilo culturale degli insegnanti di fisica non è ricalcato neppure su quello dei manuali per il biennio universitario, ma piuttosto su quello dei libri di testo più diffusi nella scuola media.

2. Le verità della fisica

If a new idea were to be admitted only when it had definitely proved its justification or even if we merely demanded that it must have a clear and definite meaning at the outset, then such a demand might gravely hamper the progress of science. The idea [...] of perpetual motion gave rise to an intelligent comprehension of energy; the idea of the absolute velocity of the earth gave rise to the theory of relativity; and the idea that the electronic movement resembled that of the planets was the origin of atomic physics. These are indisputable facts, and they give rise to thought, for they show clearly that in science or elsewhere fortune favors the brave.⁵

Una delle esperienze didattiche più significative per la crescita culturale di uno studente è l'analisi di un'argomentazione sbagliata, tanto più se avanzata da un grande scienziato quale fu Galilei.

Uno dei temi che ha accompagnato quasi tutta la sua vita scientifica è quello delle maree, a cui dedicò la Giornata quarta del *Dialogo sopra i due massimi sistemi*. L'opera, in origine, fu concepita come un trattato sul fenomeno delle maree, ma nella stesura definitiva, l'argomento fu confinato alla Giornata quarta. Le maree rappresentavano per Galileo la *prova* del moto della terra, perché da questo moto sarebbe scaturita una spiegazione semplice e irrefutabile del fenomeno, che esclude recisamente qualsiasi

⁵ Plank, Max (1949), *Scientific Autobiography and Other Papers*, New York, Philosophical Library.

ruolo della luna. A questo proposito fa dire all'aristotelico Simplicio:

Quelli poi che riferiscono ciò alla Luna, son molti, dicendo che ella ha particolar dominio sopra l'acqua: ed ultimamente certo prelato⁶ ha pubblicato un trattatello, dove dice che la Luna, vagando per il cielo, attrae e solleva verso di sé un cumolo d'acqua, il quale la va continuamente seguitando, sì che il mare alto è sempre in quella parte che soggiace alla Luna; e perché quando essa è sotto l'orizzonte, pur tuttavia ritorna l'alzamento, dice che non si può dir altro, per salvar tal effetto, se non che la Luna non solo ritiene in sé naturalmente questa facultà, ma in questo caso ha possanza di conferirla a quel grado del zodiaco che gli è opposto.⁷

L'ipotesi del prelato non viene neppure presa in considerazione da Galileo. Dice infatti Sagredo:

Di grazia, Sig. Simplicio, non ce ne riferite più, ché non mi pare che metta conto di consumare il tempo nel riferirle, né meno parole per confutarle; e voi, quando al alcune di queste o simili leggerezze prestaste l'assenso, fareste torto al vostro giudizio, che pur lo conosciamo molto purgato.

E si tenga presente che l'ipotesi ha la stessa radice della spiegazione che verrà messa in campo da Newton qualche decennio dopo, cioè dell'attrazione gravitazionale. Ma a Galileo ripugna un'ipotesi che poggia su un'oscura proprietà della materia, quella dell'attrazione gravitazionale, che altri rimprovereranno in seguito a Newton come una *proprietà occulta* e a proposito della quale egli stesso dichiarerà: *Hypotheses non fingo*.

La spiegazione avanzata da Galileo non fa ricorso ad altre ipotesi che non siano quelle dei due moti della terra. L'idea è sostanzialmente la seguente: il moto di un punto della superficie terrestre è il risultato della composizione di due moti, quello del centro della terra sull'orbita intorno al Sole e quello della rotazione intorno all'asse. Se prescindiamo dall'inclinazione dell'asse, ogni punto della superficie terrestre descrive una traiettoria cicloidale.

Se indichiamo con Ω la velocità angolare di rotazione terrestre e con V la velocità della Terra sulla sua orbita, sappiamo che $\Omega = 7,3 \times 10^{-5}$ rad/s e che $V = 3 \times 10^4$ m/s.

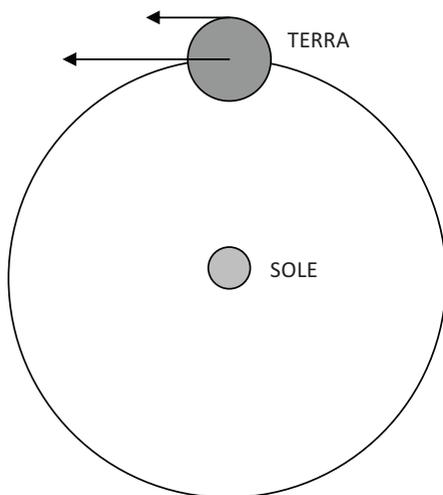
Ora, durante la notte, la velocità ΩR (dove R indica il raggio terrestre) dovuta alla rotazione ha lo stesso verso della velocità di rivoluzione V ; durante il giorno, verso opposto. Ne segue che, nel riferimento del Sole, la velocità di ogni punto dell'equatore passa da $V - \Omega R$ a mezzogiorno a $V + \Omega R$ a mezzanotte, con una variazione di $2\Omega R$ in

⁶ Si tratta di Marcantonio De Dominis, vescovo di Spalato. Nel 1624 pubblicò *Euripus, seu de fluxu et refluxu maris sententia*.

⁷ Galilei, Galileo (1970), *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano* [Giornata Quarta], a cura di L. Sosio, Torino, Einaudi, p. 497.

1. Generalità sulla didattica della fisica

12 ore. Si tratta di una variazione notevole: il suo valore per l'equatore è 930 m/s ogni 12 ore. È in questa accelerazione che Galileo individua la causa delle maree.



L'altra sorta di movimento è quando il vaso si muovesse (senza punto inclinarsi) di moto progressivo, non uniforme, ma che cangiasse velocità, con accelerarsi talvolta ed altra volta ritardarsi: dalla qual difformità seguirebbe che l'acqua, contenuta sì nel vaso, ma non fissamente annessa, come l'altre sue parti solide, anzi, per la sua fluidezza, quasi separata e libera e non obbligata a secondar tutte le mutazioni del suo continente, nel ritardarsi il vaso, ella, ritenendo parte dell'impeto già concepito, scorrerebbe verso la parte precedente, dove di necessità verrebbe ad alzarsi; ed all'incontro, quando sopraggiugnesse al vaso nuova velocità, ella, con ritenere parte della sua tardità,

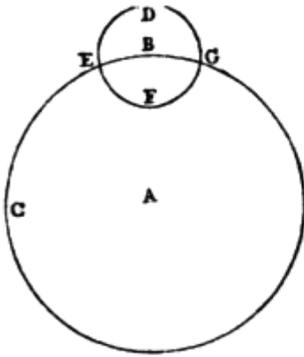
restando alquanto indietro, prima che abituarsi al nuovo impeto resterebbe verso la parte susseguente, dove alquanto verrebbe ad alzarsi: i quali effetti possiamo più apertamente dichiarare e manifestare al senso con l'esempio di una di queste barche le quali continuamente vengono da Lizzafusina, piene d'acqua dolce per uso della città. Figuriamoci dunque una tal barca venirsene con mediocre velocità per la Laguna, portando placidamente l'acqua della quale ella sia piena, ma che poi, o per dare in secco o per altro impedimento che le sia opposto, venga notabilmente ritardata; non perciò l'acqua contenuta perderà, al pari della barca, l'impeto già concepito, ma, conservandoselo, scorrerà avanti verso la prua, dove notabilmente si alzerà, abbassandosi dalla poppa: ma se, per l'opposto, all'istessa barca nel mezo del suo placido corso verrà con notevole aumento aggiunta nuova velocità, l'acqua contenuta, prima di abituarsene, restando nella sua lentezza, rimarrà indietro, cioè verso la poppa, dove in conseguenza si solleverà, abbassandosi dalla prua.⁸

Questa è l'idea di partenza, a cui segue la descrizione della teoria che Galileo fa esporre a Salviati:

Due aviamo detto essere i moti attribuiti al globo terrestre: il primo, annuo, fatto dal suo centro per la circonferenza dell'orbe magno sotto l'ecclittica secondo l'ordine de' segni, cioè da occidente verso oriente; l'altro, fatto dall'istesso globo, rivolgendosi intorno al proprio centro in ventiquattr'ore, e questo parimente da

⁸ *Loc. cit.*

occidente verso oriente, benché circa un asse alquanto inclinato e non equidistante a quello della conversione annua. Dalla composizione di questi due movimenti, ciascheduno per sé stesso uniforme, dico risultare un moto difforme nelle parti della Terra: il che, acciò più facilmente s'intenda, dichiarerò facendone la figura. E prima, intorno al centro A descriverò la circonferenza dell'orbe magno BC, nella quale preso qualsivoglia punto B, circa esso, come centro, descriveremo questo minor cerchio DEFG, rappresentante il globo terrestre; il quale intenderemo discorrer per tutta la circonferenza dell'orbe magno co 'l suo centro B da ponente verso levante, cioè dalla parte B verso C: ed oltre a ciò intenderemo il globo terrestre volgersi intorno al proprio centro B, pur da ponente verso levante, cioè secondo la successione de i punti D, E, F, G, nello spazio di ventiquattr'ore. Ma qui doviamo attentamente notare, come rigirandosi un cerchio intorno al proprio centro, qualsivoglia parte di esso convien muoversi in diversi tempi di moti contrarii: il che è manifesto considerando che mentre le parti della circonferenza intorno al



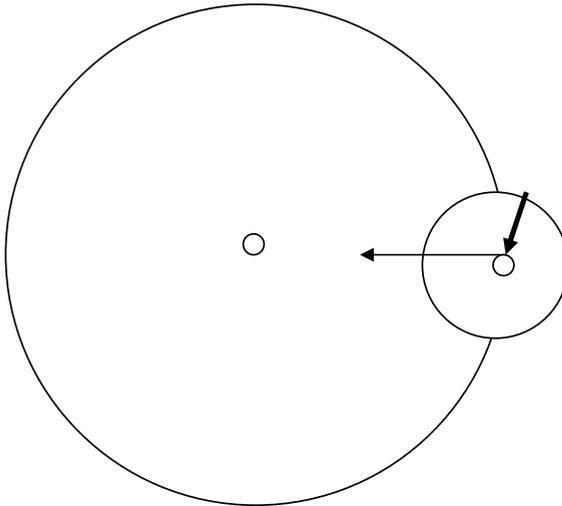
punto D si muovono verso la sinistra, cioè verso E, le opposte, che sono intorno all'F, acquistano verso la destra, cioè verso G, talché quando le parti D saranno in F, il moto loro sarà contrario a quello che era prima, quando era in D; in oltre, nell'istesso tempo che le parti E descendono, per così dire, verso F, le G ascendono verso D. Stante dunque tal contrarietà di moti nelle parti della superficie terrestre, mentre che ella si rigira intorno al proprio centro, è forza che, nell'accoppiar questo moto diurno con l'altro annuo, risulti un moto assoluto per le parti di

essa superficie terrestre ora accelerato assai ed ora altrettanto ritardato: il che è manifesto considerando prima la parte intorno a D, il cui moto assoluto sarà velocissimo, come quello che nasce da due moti fatti verso la medesima banda, cioè verso la sinistra; il primo de' quali è parte del moto annuo, comune a tutte le parti del globo, l'altro è dell'istesso punto D, portato pur verso la sinistra dalla vertigine diurna; talché in questo caso il moto diurno accresce ed accelera il moto annuo; l'opposito di che accade alla parte opposta F, la quale, mentre dal comune moto annuo è portata, insieme con tutto il globo, verso la sinistra, vien dalla conversione diurna portata ancor verso la destra, talché il moto diurno viene a detrarre all'annuo, per lo che il movimento assoluto, risultante dal componimento di amendue, ne riman ritardato assai: intorno poi a i punti E, G il moto assoluto viene a restare come eguale al semplice annuo, avvenga che il diurno niente o poco gli accresce o gli detrae, per non tendere né a sinistra né a destra, ma in giù ed in su. Concludiamo per tanto, che sì come è vero che il moto di tutto il globo e di ciascuna delle sue parti sarebbe equabile ed uniforme quando elle si movessero d'un moto solo, o fusse il semplice annuo o fusse il solo diurno, così è necessario che, mescolandosi tali due moti insieme, ne risultino per le parti di esso globo movi-

1. Generalità sulla didattica della fisica

menti difformi, ora accelerati ed ora ritardati mediante gli additamenti o sottrazioni della conversione diurna alla circolazione annua. Onde se è vero (come è verissimo, e l'esperienza ne dimostra) che l'accelerazione e ritardamento del moto del vaso faccia correre e ricorrere nella sua lunghezza, alzarsi ed abbassarsi nelle sue estremità, l'acqua da esso contenuta, chi vorrà por difficoltà nel concedere che tale effetto possa, anzi pur debba di necessità accadere all'acque marine, contenute dentro a i vasi loro, soggetti a cotali alterazioni, e massime in quelli che per lunghezza si distendono da ponente verso levante, che è il verso per il quale si fa il movimento di essi vasi? Or questa sia la potissima e primaria causa del flusso e refluxo, senza il quale nulla seguirebbe di tale effetto.⁹

In effetti, se il moto della Terra fosse assimilabile a quello di una piattaforma rotante il cui asse gira, a sua volta, su una guida circolare, i corpi che si trovano sul suo bordo subirebbero un'accelerazione variabile.



Infatti, andrebbero soggetti a due accelerazioni centripete costanti (dove ω e Ω indicano le due velocità angolari, e r e R i raggi delle orbite)

$$\omega^2 r \text{ e } \Omega^2 R$$

che si compongono in modo diverso al passare del tempo. A mezzogiorno, le accelerazioni sono dirette in verso opposto e a mezzanotte nello stesso; per cui, nelle 24 ore, l'accelerazione passa da $\omega^2 r + \Omega^2 R$ a $\omega^2 r - \Omega^2 R$.

Delle due accelerazioni la più grande sarebbe quella dovuto alla rotazione terrestre:

$$\omega^2 r = 3,4 \times 10^{-2} \frac{m}{s^2}$$

essendo quella associata al moto di rivoluzione un valore che è circa $1/5$ dell'altro:

⁹ *Ibid.*, pp. 504-507.

$$\Omega^2 R = 6,0 \times 10^{-3} \frac{m}{s^2}$$

Se il modello fosse una giostra appoggiata sul pavimento, e sul bordo della piattaforma fosse posto un vaso pieno d'acqua, la superficie del liquido sarebbe sempre inclinata verso il centro della piattaforma, ma l'inclinazione varierebbe nel tempo di una rotazione, da un massimo (a mezzanotte) a un minimo (a mezzogiorno).

Purtroppo – per Galileo – la Terra non è assimilabile a una giostra del tipo descritto, poiché è in caduta libera verso il Sole. Nel sistema di riferimento della Terra non è rivelabile alcuna accelerazione diretta verso il Sole. Rimane una sola accelerazione, che è quella centripeta, diretta verso il centro della Terra e di intensità costante che, pertanto, non può dare origine ad alcuna variazione nell'arco delle 24 ore.

Naturalmente, nello sviluppare la nostra argomentazione, ci siamo serviti di un concetto – quello di accelerazione centripeta – che venne introdotto da Newton alcuni decenni dopo la morte di Galileo e, dunque a lui del tutto estraneo. L'interpretazione newtoniana del fenomeno delle maree richiede qualche sottigliezza. Le forze di marea, infatti, sono concettualmente diverse dalle forze gravitazionali e ne daremo ora un esempio.

Partiamo da un'esperienza ideale suggerita da Taylor e Wheeler.¹⁰ Si immagini un'asta omogenea, verticale, leggerissima, lunga $2L$, in caduta libera verso la Terra. Alle sue estremità sono fissate due masse m , uguali.

Le due masse non sono soggette alla stessa forza: quella all'estremità inferiore è soggetta a una forza maggiore della superiore, perché più vicina al centro della Terra. Per quella più in basso la forza vale

$$F_{\text{inf}} = g_0 \left(\frac{R}{d-L} \right)^2 m \quad [1]$$

dove g_0 è il campo gravitazionale a livello del mare e d la distanza del centro dell'asta dal centro della Terra. Per l'estremità superiore sarà qualcosa di analogo a:

$$F_{\text{sup}} = g_0 \left(\frac{R}{d+L} \right)^2 m \quad [2]$$

¹⁰ Taylor, Edwin F. – Wheeler, John A. (1992), *Spacetime Physics*, New York, W.H. Freeman & Co.

1. Generalità sulla didattica della fisica

La differenza tra le due vale

$$F_{\text{inf}} - F_{\text{sup}} \cong 2g_0 m \frac{R^2}{d^3} (2L) = 2G \frac{Mm}{d^2} \frac{2L}{d} \quad [3]$$

Questa è una *forza di marea*. Essa è dovuta non al campo gravitazionale, ma al fatto che tale campo ha intensità diverse nei diversi punti dell'asta.

Il modello di Galileo è una sorta di giostra circolare che trasporta una giostra più piccola (la Terra). Un vaso collocato sulla giostra più piccola, descrive una cicloide e quindi è soggetto, secondo il grande scienziato, a un'accelerazione variabile che provoca oscillazioni nell'acqua che vi è contenuta. Nell'ambito della cinematica newtoniana dovremmo parlare della risultante di due accelerazioni centripete, una (quella di rotazione) che è circa sei volte l'altra (quella di rivoluzione). Ma il concetto di accelerazione centripeta era estraneo a Galileo. Comunque sia, una tale giostra darebbe origine a due sole 'maree', una alta e una bassa, al giorno. Quindi, il modello non rende conto del fatto che si verificano due alte e due basse maree al giorno, con un intervallo di 6 ore.

Poiché la massa della Terra è 81 volte quella della Luna, il centro di gravità dei due corpi si trova a circa 4600 km dal centro della Terra. Quindi la Terra è un corpo che orbita, con un periodo di 28 giorni, intorno a questo punto. È anche animata da un moto di rotazione con un periodo di 24 ore.

Se la Terra fosse un punto, non ci sarebbero maree, perché la sola forza agente sarebbe quella dovuta al campo gravitazionale della Luna, all'interno del quale la Terra sarebbe in caduta libera. Ma la Terra ha un'estensione. Il campo gravitazionale nel suo centro è

$$g_{\text{centro}} = G \frac{M_L}{d^2} \left(\cong 0,23 \frac{m}{s^2} \right)$$

dove M_L è la massa della Luna e d la distanza del centro della Terra dal centro di massa.

Se consideriamo due masse uguali, poste alle estremità di un diametro della Terra orientato nella direzione della Luna, su di esse si manifesta una forza di marea il cui valore è dato dalla (3):

$$F_{\text{marea}} \cong 2G \frac{M_L m}{d^2} \frac{2R}{d} = mg_{\text{centro}} \frac{4R}{d} \quad [4]$$

Poiché $d \cong 60R$

$$F_{\text{marea}} \cong \frac{1}{15} mg_{\text{centro}} \quad [5]$$

Nel sistema di riferimento ancorato alla Terra, su ogni corpo agiscono tre forze: l'attrazione gravitazionale terrestre, la forza centrifuga e la forza di marea. La forza di attrazione solare e quella di attrazione della Luna non sono osservabili.

Si osservi che

$$g_{\text{centro}} = \Omega^2 R = 3,4 \times 10^{-3} g$$

$$g_{\text{marea}} = 1,5 \times 10^{-3} g \cong \frac{1}{2} g_{\text{centro}}$$

cioè, la forza di marea è circa la metà della centrifuga.

Si tratta di una storia che dovrebbe interessare i professori di fisica. Prima di tutto perché è pratica salutare tradurre il modello galileiano in termini newtoniani e osservare se, e in quale misura rende conto della realtà osservativa, e poi perché è esercizio quanto mai utile prendere in considerazione gli errori dei grandi. Ma nella storia, per un professore di fisica vi è una morale più profonda, anzi, due.

La prima è che ciò che importa è partecipare al gioco. Galileo è convinto che la terra sia animata dai due moti di rivoluzione e di rotazione e vorrebbe fornire una prova di questi moti. Prende quindi in considerazione un fenomeno – quello delle maree – che non ha, nella fisica aristotelica, una convincente spiegazione e cerca di dimostrare che questa spiegazione si trova nell'ipotesi eliocentrica. È un tentativo fallito – sia per gli aristotelici sia per i newtoniani – ma questo non rende meno apprezzabile l'ipotesi galileiana che rappresenta pur sempre un tentativo di spiegazione scientifica di un fenomeno. Fondamentalmente non diverso da quello di dare una spiegazione, in termini di accelerazione centrifuga, di altri fenomeni, come il verso di rotazione dei cicloni, dei venti alisei e delle correnti oceaniche.

La seconda è che Galileo rifiuta come 'non fisica' la spiegazione dell'attrazione dell'acqua da parte della Luna. L'ipotesi fatta propria dall'arcivescovo De Dominis non coincide, propriamente, con quella di Newton, tuttavia la radice è la stessa: una misteriosa attrazione tra i corpi. Storicamente, l'ipotesi dell'attrazione gravitazionale, è quella vincente (anche se non esclude un ruolo delle accelerazioni centrifughe, cioè

1. Generalità sulla didattica della fisica

qualche elemento del modello galileiano), ma proprio questo pone un grosso problema epistemologico e anche pedagogico. Come mai un'ipotesi – quella dell'attrazione che la Luna eserciterebbe sull'acqua – che il fondatore della fisica moderna elimina come una favola per bambini, sulla quale grandi contemporanei come Leibnitz e Cartesio avevano forti perplessità¹¹ sia diventata *episteme* – ovvero realtà – per i posteri. Lo stesso Newton era meno newtoniano di come viene rappresentato nei manuali di fisica:

Userò le parole attrazione, impulso o propensione di qualcosa verso un centro, indifferentemente e promiscuamente l'una per l'altra; visto che queste forze sono considerate non fisicamente ma matematicamente. Per cui il lettore si guardi dal credere che io con queste parole abbia voluto definire una specie o un modo d'azione o una causa o una ragione fisica, o che io, se per caso parlerò di centri che attirano o di centri muniti di forza, attribuisca le forze, in senso reale e fisico, a centri (che sono soltanto punti matematici).¹²

Che cosa fa allora esattamente un insegnante che parla ai suoi allievi – siano bambini della scuola elementare o studenti universitari, poco importa – della *gravità* come di una *cosa*?

È legittimo interrogarsi sugli effetti ultimi di questo insegnamento. Da una parte la scuola deve pur trasmettere le grandi teorie (la natura ondulatoria della luce, la gravitazione, la sintesi di Maxwell, ecc.), dall'altra, se dà a intendere che ciò che trasmette è la 'verità' ultima e definitiva (stabilita e immutabile come una sorta di edificio d'acciaio) il gioco è finito nel momento stesso in cui comincia. È un'operazione doppiamente sbagliata: sul versante culturale, per evidenti motivi epistemologici, e su quello pedagogico, perché ciò che cerca di trasmettere al ragazzo è un'immagine falsa e scostante della filosofia della natura.

Vero è che sembra destino comune di tutte le nozioni scientifiche assumere la natura di quelle che Lucio Russo chiama «nozioni fossili»: ¹³ quell'insieme di concetti che possono rispondere (anche se non sempre) a criteri di verità o di economia di pensiero, ma di cui è andata perduta la giustificazione razionale e, con essa, la reale e corretta funzione. Questo sembra essere il peccato originale dell'insegnamento delle scienze: quello di trasmettere solamente *nozioni fossili*. Una volta si diceva che la scuola serviva ad 'aprire la testa', cioè a incrementare lo spirito critico, a dilatare la percezione dei problemi, a favorire nell'allievo la crescita del gusto per il cambiamento di prospettiva e per il contributo personale. Se le cose stanno come abbiamo detto, questi fini sono estranei alla didattica della fisica, la quale sembra abbia a che fare, senza rimedio, con 'un mondo di carta'. Sembra infatti che la didattica sia condannata a una sorta di

¹¹ Koyré, Alexandre (1972), *Studi newtoniani*, a cura di P. Galluzzi, Torino, Einaudi.

¹² Newton, Isaac (1989), *Principi matematici di filosofia naturale* [definizione VIII], a cura di Alberto Pala, Torino, UTET.

¹³ Russo, Lucio (2003), *Flussi e riflussi. Indagine sull'origine di una teoria scientifica*, Milano, Feltrinelli.

processo di inversione: mentre la conoscenza procede dalla varietà dei fenomeni verso la sintesi, nella didattica è la sintesi a indicare quali sono i fenomeni significativi e quale ne sia la corretta interpretazione, per cui dà la sensazione che vi sia una relazione (bi)univoca tra teoria e fenomeno, nel senso che nei fenomeni sia già scritta la teoria.

3. Eppure si muove! (?)

Tocca a noi dire, prima di tutto, se (la Terra) è dotata di movimento oppure sta ferma. Perché, come dianzi accennammo, alcuni la fanno uno dei tanti astri; altri invece, collocatala sul centro (dell'universo), sostengono che essa ruota e si muove intorno all'asse centrale. Ma che questa sia una cosa impossibile, apparirebbe evidente a chi movesse da questo principio che, posto che essa si muovesse, tanto stando fuori del centro quanto nel centro stesso, sarebbe necessario che essa compisse questo movimento sotto l'impulso d'una forza estranea, giacché questo movimento non è proprio della Terra: E difatti ogni sua singola particella avrebbe in tal caso questo movimento: là dove ora esse portano tutte al centro in linea retta. Di conseguenza non potrebbe (questo movimento) essere eterno, in quanto precisamente sarebbe violento e contro la sua natura; là dove l'ordine dell'universo è appunto eterno.¹⁴

Il fatto che la Terra sia *in moto* e il Sole *fermo* è una nozione che viene data ai bambini fin dalla scuola elementare. E tutti l'imparano con grande facilità e naturalezza, per la soddisfazione di genitori e maestre. Nessuno sembra meravigliarsi di un aspetto curioso della questione: che un problema – quello del moto della Terra – che ha suscitato tanti dibattiti qualche secolo fa (e che si è protratto fino ai primi decenni del XX) venga risolto con tanta facilità da essere proponibile ai bambini i quali accettano senza batter ciglio la notizia che la Terra fa un giro su se stessa ogni 24 ore e viaggia intorno al Sole alla velocità di 100.000 km/h. La cosa è molto significativa in quanto illuminante sul significato dell'apprendimento scolastico. La notizia viene comunicata come un *fatto*, cioè come si comunicherebbe a chi si sveglia in un vagone ferroviario che il treno è partito. Questa sorta di comunicazione presuppone un codice condiviso. Sulla Terra non vi può essere dubbio su quali oggetti siano fermi e quali in moto. Ma questo non vale per il Sole e i pianeti. Lo spazio in cui si trovano questi corpi non è riempito da una sostanza, come l'aria, che segni la quiete. L'analogia da proporre sarebbe, se mai, quella di treni che si incrociano, di notte, su binari paralleli. In base a quali criteri i passeggeri di un treno possono pretendere di essere in quiete e gli altri in moto? Nei

¹⁴ Aristotele (1962), *Fisica. De Coelo*, Libro II, a cura di O. Longo, Firenze, Sansoni.

1. Generalità sulla didattica della fisica

manuali di geografia fisica vengono diligentemente elencate le *prove* in favore del moto della terra: gli esperimenti di Cremonini, il pendolo di Foucault, la legge di Ferrel.¹⁵

Non si citano mai le prove avanzate dai ‘pitagorici’ contrarie a tale moto. L’assenza di spostamento verso ovest dei gravi in caduta, l’assenza di correnti atmosferiche verso ovest, il fatto che, se la Terra fosse in rotazione, l’elevatissima velocità scaglierebbe via i corpi non ancorati, la mancanza di un motore che mantenga in moto l’enorme mole della terra, ecc. Eppure Galileo si sente in obbligo di prendere in seria considerazione queste obiezioni e ciò lo porta a enunciare qualcosa di molto prossimo a quello che oggi indichiamo come *principio di relatività*. Ma le contro-obiezioni di Galileo – nel *Dialogo* e in altri scritti – sono spesso artificiose ed errate rispetto alla fisica newtoniana. In effetti, le obiezioni al moto della terra avanzate dai suoi avversari sono perfettamente legittime se riferite alla fisica aristotelica. In quest’ambito, i paradossi a cui conduce l’ipotesi del duplice moto della terra rimangono insuperabili. L’unica strada per uscire dai paradossi è costruire una nuova meccanica, all’interno della quale questi cessino di essere tali. Prima di tutto è necessario introdurre l’accelerazione, estranea alla fisica aristotelica, e affermare che solo le accelerazioni hanno effetti osservabili. È ciò che ha fatto Newton. Il suo sistema teorico chiede di ignorare gli effetti di velocità dell’ordine di 100.000 km/h e di andare a cercare gli effetti di accelerazioni di pochi millesimi dell’accelerazione di gravità. Che non è una pretesa da poco! Il dramma di Galileo è il fatto che la fisica adatta al modello eliocentrico è ancora di là da venire e nessun ‘fatto’ osservativo costituisce di per sé, cioè al di fuori di un contesto teorico, una ‘prova’. Quelle che i manuali scolastici definiscono ‘prove del moto di rotazione terrestre’ sono tali solo all’interno della meccanica newtoniana: fuori di questa non hanno alcun senso. Non si può essere nello stesso tempo aristotelici e sostenitori del moto della terra. Qual è quindi il senso di comunicare al bambino che la Terra è in rotazione? La fisica intuitiva che costituisce l’ambiente teorico del bambino (e della maestra, generalmente) è aristotelico e quindi si dovrebbe produrre un insanabile conflitto cognitivo, simile a quello che ebbe origine dalle posizioni assunte da Galileo. Come mai nella testa della maggior parte delle persone riescono a coesistere la fisica aristotelica e la consapevolezza del moto della Terra?

Il motivo è che l’atteggiamento mentale della maggior parte delle persone nei riguardi della realtà fisica è quello della registrazione delle conoscenze, non della loro correlazione. Il grande passo che si richiederebbe al bambino (ma che il bambino non compie) e che darebbe origine al conflitto di cui si diceva è quello di applicare la fisica intuitiva a oggetti grandi come la Terra e lontani come il Sole. Che non appartengono cioè al mondo dell’esperienza comune, ma a una sorta di diversa realtà. Il bambino non ha alcuna difficoltà a conferire realtà fisica a Pollicino, al modello eliocentrico e

¹⁵ Il povero Galileo nel *Dialogo* si sforzò di dimostrare che non vi erano prove contro il moto della Terra, ma avrebbe voluto proporre una in favore. Credette di averla trovata nel moto mareale ma, come sappiamo, sbagliava.

all'elettrone come pallina (purché piccolissima): si tratta sempre di immagini. Il conflitto cognitivo si produce su oggetti e fenomeni che fanno parte dell'esperienza comune: le bolle di sapone, le giostre, l'arcobaleno, la trottola. L'interesse che questi suscitano nasce dalla meraviglia, cioè dal conflitto cognitivo. Il fatto che la neve sia bianca viene vissuto come ovvio e scontato dalla maggior parte delle persone (a parte il fatto che gli esquimesi sono in grado di distinguere una trentina di *bianchi* diversi), mentre è stato un problema affascinante e impegnativo di fisica dello stato solido. Quindi, l'informazione che la Terra è sferica, ruota su se stessa e gira intorno al Sole, non è vera conoscenza. Se la maestra descrivesse l'isola di Brobdingnag, abitata da giganti, otterrebbe un'analogia manifestazione di fiducia. Infatti, solo chi avesse conoscenze abbastanza avanzate di meccanica troverebbe il racconto di Swift in conflitto con la realtà fisica.

È questo che spiega perché gli insegnanti siano inclini a trattare questioni difficili piuttosto che quelle più semplici.

4. La fisica o le fisiche

Dobbiamo tener presenti il momento e le condizioni in cui il nostro pensiero si è formato; in gran parte la sua formazione risale alla nostra infanzia, attraverso il contatto con gli oggetti con cui abbiamo giocato. Impariamo un'enorme quantità di fisica nei primi due o tre anni di vita e in modo più diretto e definitivo di quanto non facciamo negli anni successivi [...] Secondo me, gli aspetti estremamente importanti della fisica che abbiamo scoperto nei primi anni della nostra vita, contengono un numero di informazioni maggiore di quanto comunemente si creda.¹⁶

L'aspetto più grave della condizione degli insegnanti nella scuola italiana – grave perché produce una varietà di conseguenze – è il fatto che credono all'esistenza di una sola fisica, il cui verbo è conservato nel libro di testo. I motivi che sostengono questa fede sono molteplici: alcuni sono di natura culturale in senso lato, altri sono legati al basso livello degli studi universitari, altri ancora al fatto che per quanto riguarda l'istruzione, in questo Paese, non vi è un 'committente': con un Ministero latitante (per gli aspetti culturali), quelle che prevalgono sono le richieste di studenti e famiglie. E queste non sono nel senso di un innalzamento del livello culturale.

In fatto di cultura fisica, la maggior parte degli insegnanti vive una condizione precopernicana. È diffusa cioè la convinzione che i concetti di *massa*, *forza*, *energia*, *calore*, *luce*, *tempo*, *distanza*, ecc. siano *cose*, cioè che abbiano un'esistenza indipendente dalla teoria. Secondo questo pregiudizio, il fisico è simile al naturalista che,

¹⁶ Bondi, Herman (1971), *Miti e ipotesi della teoria fisica*, Bologna, Zanichelli.

1. Generalità sulla didattica della fisica

imbattutosi in un animale sconosciuto, si dedica a osservarlo al fine di scoprirne le caratteristiche. Gli può accadere di scoprire che la massa si trasforma in energia, che l'energia si può trasformare in calore e che non si possono scambiare quantità arbitrariamente piccole: meravigliose – e impensabili – proprietà di una *cosa* ben nota: l'energia. Di questa si parla diffusamente anche nei manuali per la scuola elementare. Nei testi di meccanica per i licei, la pagina in cui si enuncia il principio di conservazione della massa reca sempre una nota in cui si segnala che, tuttavia, la massa si può *trasformare* in energia. A nessuno viene in mente che – a parte la parola *trasformare* che fa venire in mente Mandrake – i concetti di cui si parla siano diversi, anche se indicati con lo stesso nome. In realtà, i concetti di *massa*, *tempo*, *energia*, ecc. ricevono il loro significato solo dall'ambito teorico in cui sono definiti.

La relatività e la meccanica quantistica sono teorie diverse dalla meccanica e dall'elettromagnetismo classici, quindi le grandezze vi hanno significati diversi. Questa è una constatazione ovvia – com'è ovvio, ad esempio, che $\exp(2\pi j)$ non sia il numero naturale 1 – ma non nella scuola italiana. L'insegnante dovrebbe avere consapevolezza che la realtà è davanti a ogni uomo, immutabile, enigmatica e gigantesca come una montagna nascosta dalle nubi. E l'uomo cerca di trovare vie di salita che portino il più in alto possibile. Ci sono vie che si rivelano subito impraticabili, e altre che sembrano portare molto in alto; diverse tra loro, ma tutte degne di considerazione. Tuttavia, il tracciato non è scritto nella montagna, ma nella mente di chi progetta la via: i concetti che caratterizzano una teoria sono definiti dalla teoria stessa e non hanno alcuna esistenza al di fuori di questa. Vi sono quindi fisiche diverse, espresse dalle diverse teorie: la classica, la relativistica, la quantomeccanica.

Tra i matematici è diffusa la lodevole abitudine di occuparsi della struttura concettuale delle proprie discipline e, ogni tanto, di mettervi mano. I fisici sono più restii in quest'opera, anche se le nuove teorie implicano necessariamente sensibili variazioni nel modo di intendere le vecchie. Vi sono molte ragioni per sostenere che l'interpretazione delle teorie classiche – la termodinamica, la meccanica, ecc. – varia col tempo e con le generazioni dei fisici che riflettono su di esse. Tanto per fare un esempio, le trattazioni attuali di relatività speciale hanno ben poco in comune con le esposizioni di Einstein e di Born. Sarebbe auspicabile che i docenti di fisica avessero questa consapevolezza: che i manuali scolastici rappresentano, nei casi migliori, goffi tentativi di esposizione di complessi sistemi di interpretazione della realtà. Tra l'altro, ogni sistema, non prende di petto la 'realtà' in toto, ma la seleziona. Sceglie quali fenomeno sono quelli di sua competenza e in qualche modo costruisce la 'propria' realtà. In altre parole, che cosa determina il fatto che un fenomeno sia riconosciuto come *meccanico* e un altro come *elettromagnetico*? Solo il fatto che le due teorie sono in grado di descriverlo con i termini del proprio dizionario. Se a un determinato fenomeno posso applicare i termini *massa*, *peso*, *durata*, ecc. lo posso classificare come *meccanico* e trascurare tutte le altre informazioni che riguardano colori, suoni, temperatura, carica elettrica, ecc. Fare

fisica significa in sostanza disporre di un certo numero di schemi di interpretazione della realtà e selezionarne le manifestazioni suscettibili di interpretazione. Senza dimenticare, tuttavia, che la montagna è ancora là fuori, bella e terribile come il K2, e che il libro di testo non ne è che un'immagine ingenua e riduttiva.

Ma, oltre alle teorie citate, che si trovano descritte nei libri (il mondo di carta), ve ne sono altre che appartengono al profondo del ragazzo che va scuola (ma anche a chi non ci va). L'attività di teorizzazione, di riduzione della varietà e della complessità alla semplicità (o a ciò che si giudica tale) è connessa alla vita. Per vivere è infatti essenziale poter contare su una realtà dotata di regolarità che ammette quindi delle regole sulla base delle quali fare previsioni sul futuro immediato, ma anche remoto. Riconoscere gli oggetti che, abbandonati dalla mano, cadono; quelli che scottano; quelli che riflettono la luce e quelli che l'assorbono. Che cosa succede soffiando e cosa succhiando; quale forza impiegare a sollevare un bicchiere e quale a sollevare una boccia di ferro; che per stare su in bicicletta bisogna andare a una certa velocità; che se fa freddo è necessario indossare vestiti pesanti, ecc.

Le conoscenze di cui il bambino è portatore sono sterminate. E non sono slegate tra loro come i nomi in un elenco telefonico, ma connesse, ridotte a sintesi, cosicché possiede uno schema interpretativo per tutti i fenomeni che gli si presentano. Anzi, i fenomeni 'inspiegabili' sono causa di divertimento o di paura: gran parte delle attrazioni da luna park sono basate su questo. Senza questa sterminata raccolta di nozioni organizzate non sarebbe possibile alcun insegnamento di fisica. È la fisica ingenua – o primitiva o naïf – il terreno che consente di costruire la fisica razionale. Qualcuno la chiama *fisica qualitativa*, ma sbaglia, perché in questa fisica vi sono anche degli elementi quantitativi. Alcuni li abbiamo già indicati, come la capacità di stimare il peso degli oggetti in base alle loro dimensioni e al materiale di cui sono fatti, la distanza dei corpi in base alla grandezza angolare, il tempo di caduta in base alla lunghezza del salto, il tempo che impiegherà un'auto a percorrere una certa distanza in base alla sua presunta velocità, e così via. La capacità di fare stime quantitative è alla base di molti giochi, come il calcio, il tennis, il biliardo, il tiro con l'arco ecc. Si tratta di una quantità sterminata di nozioni, organizzate in solide strutture che possiamo riconoscere come vere e proprie teorie.

DOMANDA: I ciclisti che praticano la disciplina della velocità su pista sono usi compiere quello che tecnicamente viene indicato come *surplance*, che consiste nel rimanere immobile sulla bicicletta, naturalmente senza appoggio alcuno. In questa manovra, molto faticosa e che può durare alcuni minuti, l'atleta non tiene la ruota anteriore, come dovrebbe essere normalmente, sullo stesso piano del telaio e della posteriore, ma in posizione quasi perpendicolare. Perché in questo modo riesce a restare in equilibrio, pur essendo fermo?

L'insegnante che entra in classe non dovrebbe mai dimenticare che quello di cui si accinge a parlare agli allievi è il *loro* mondo, quello con cui interagiscono

1. Generalità sulla didattica della fisica

continuamente, e con tale abilità che non se ne rendono neppure conto. Naturalmente le conoscenze non sono uguali per tutti gli allievi. Ci sono ragazzi che hanno avuto la fortuna di fare una quantità di esperienze fisiche: giocare con palle di varie dimensioni e pressioni, immergersi nell'acqua, lanciare sassi, creare ombre, accendere e spegnere fuochi, travasare il vino, andare in bicicletta, andare sulle giostre, riflettersi in specchi deformanti, osservare il colore del sole al tramonto, ecc. E altri che alcune di queste esperienze non le hanno mai fatte, o le hanno fatte sotto il controllo di un istruttore che gli spiegava come il tutto andasse interpretato. La cultura fisica dei primi è superiore a quella dei secondi. Anzi, è da rilevare che, a causa dello stile di vita che attualmente conducono i bambini, le opportunità di fare esperienze sono drammaticamente diminuite. I giochi classici, con le palle, le ruote, gli specchi, ecc. richiedevano quasi tutti abilità fisica, e quindi promuovevano conoscenza del mondo fisico; i giochi che attualmente vanno per la maggiore sviluppano abilità di altro tipo e, spesso, solamente la simulazione di abilità.

Comunque, quello della fisica 'ingenua' è il terreno condiviso sul quale l'insegnante dovrebbe impiantare le radici della fisica scolastica. Nella realtà sappiamo come vanno le cose, nei confronti della fisica ingenua l'atteggiamento della scuola è ambiguo: da una parte, le conoscenze non scolastiche sono troppo ovvie per avere un qualche valore; dall'altra – ma accade di rado – l'insegnante è felicissimo quando la sua fisica può interpretare un fenomeno che appartiene alla comune esperienza.¹⁷

Tuttavia, non avviene quasi mai che una nozione di fisica scolastica si sostituisca, nella mente del ragazzo, a una pre-esistente nozione di fisica ingenua. Questo avviene principalmente perché il mondo di cui si occupa la fisica scolastica ha ben poco da spartire con il mondo dell'esperienza ordinaria. Basta leggere i problemi proposti a fine capitolo per rendersene conto. Si spiega così come mai uno studente di liceo sia capace di determinare il campo elettrico al centro di un tetraedro ai vertici del quale sono disposte quattro cariche puntiformi, ma non sappia spiegare perché le prese di casa forniscono corrente alternata. D'altra parte, nessuno può contestare che la cultura fisica ingenua rappresenti il punto di partenza e lo strumento che dovrebbe consentire di affrontare la fisica scolastica. Prima di tutto perché fornisce il panorama fenomenologico a cui tutto si riferisce e poi perché fornisce il *dizionario*.

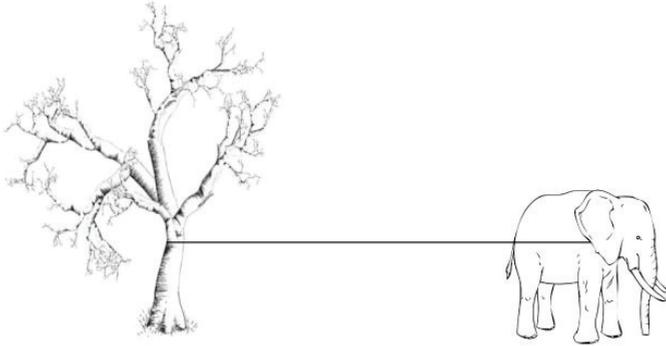
I termini di cui si serve la fisica scolastica – forza, luce, calore, temperatura, accelerazione, energia, ecc. – hanno un significato anche nel linguaggio ordinario e questa identità gioca un ruolo importante nei processi di apprendimento. Non è infatti pensabile che si possa insegnare partendo da strutture rigorosamente assiomatiche. Questo non è possibile neppure per la geometria, figuriamoci per la meccanica o

¹⁷ In realtà questo non avviene quasi mai. I manuali sono ricchi di leggende metropolitane che riguardano il moto di rotazione dell'acqua in uno scarico, la tenda della doccia che viene risucchiata all'interno, il profilo delle ali degli aerei che ne determina la portanza, l'effetto giroscopico che consente di andare in bicicletta. Gli autori trovano anche difficoltà a concordare qual genere di leva sia il remo.

l'ottica. L'apprendimento procede per passi successivi in cui ha una funzione importante il riferimento al già noto, quindi al mondo della fisica ingenua. La riduzione a sistema assiomatico è, se mai, un punto di arrivo e non di partenza. Pertanto è legittimo il ricorso al dizionario della fisica ingenua e anche inevitabile, ma con alcune cautele che si debbono osservare.

È opinione comune che gran parte della fisica classica sia una razionalizzazione della fisica intuitiva. In particolare, si suole dire che la meccanica e la termodinamica sono *antropomorfe*. Questo non significa che il dizionario della fisica ingenua sia trasferibile all'ambito della fisica scolastica. Vi sono casi in cui questa traduzione porta a clamorosi fraintendimenti. Per esempio, si dà per scontato che il termine *forza*, utilizzato nell'ambito della meccanica, coincida con quello della fisica ingenua, ma non è così. Gli studi condotti in materia di fisica intuitiva hanno assodato che il termine *forza* viene sempre associato a ciò che sarebbe più corretto indicare come *sforzo*.

a)



b)



Figura 2. a) L'elefante cerca di rompere la corda che lo lega all'albero. b) Due elefanti cercano di rompere la stessa corda. In quale delle due situazioni è più probabile che la corda si spezzi?

1. Generalità sulla didattica della fisica

Per esempio, di fronte a una situazione fisica come quella rappresentata in Figura 2, la quasi totalità degli studenti fornisce la risposta b), mettendo con ciò in evidenza che il concetto intuitivo di *forza* non è quello della meccanica.

Un altro esempio è fornito dal termine *temperatura*. Un esperimento da fare potrebbe essere quello rappresentato in Figura 3.

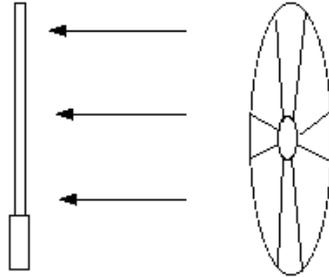


Figura 3. Un termometro raffreddato ad aria.

Sul bancone si dispone un ventilatore e di fronte a questo un termometro (possibilmente al decimo di grado). Dopo aver fatto un'accurata lettura, si fa partire il ventilatore e si attende qualche minuto. È istruttivo chiedere agli studenti che cosa si aspettano per la nuova lettura. Può essere utile ripetere la prova con il bulbo avvolto in carta stagnola. I risultati della prova (non dell'esperimento di fisica, ma della prova didattica) dimostrano che il concetto intuitivo di temperatura è connesso alla rapidità degli scambi termici tra l'epidermide e l'ambiente, più che alla definizione che se ne dà in fisica. Una versione diversa della prova consiste nel mettere in mano a un ragazzo due sbarre, una di legno e una di metallo, estratte dalla stessa cella frigorifera. Interrogato su quale delle due è più fredda, il ragazzo indica l'oggetto di metallo. Con buona ragione, poiché il significato che attribuisce alla *temperatura* è quello che gli deriva dalla sensazione epidermica e questo è ben diverso da ciò che intende l'insegnante.

5. La fisica raccontata

The best advice to anyone who would write a physics textbook, especially an introductory textbook, is to adopt the working hypothesis that everything in previous textbooks is wrong. But that is not what usually is done. Like a medieval monk cloistered in a cell decorating illuminated manuscripts but leaving dogma intact, the writer of textbook N dutifully copies what is in textbook N-1, adding a few arabesques

but blithely transmitting errors unto the Nth generation. This advice may seem extreme so I'll soften it a bit by saying that almost every assertion in textbook in the form of an invariable, unqualified mantra, especially if it asserts supposed limits, is wrong: And the more times the mantra is repeated in print, the more likely it is to be wrong.¹⁸

Nei manuali di fisica dell'ultimo anno di liceo, circa i tre quarti delle pagine sono dedicate alla cosiddetta 'fisica moderna'. Con questo si intendono teoria della relatività speciale, relatività generale, meccanica quantistica, cosmologia, fisica nucleare, particelle elementari. Nella prima parte del corso, quella dedicata alla fisica classica: meccanica, termologia, ottica, ecc., gli autori danno un'idea della difficoltà insita nella definizione dei concetti e nella interpretazione dei fenomeni. Quindi delle necessità di cautela, ripensamento, riformulazione che sono connaturate all'attività scientifica. I manuali presentano, occasionalmente, grossolani errori, legati spesso a codici interpretativi abbandonati da decenni, ma che sopravvivono felicemente nelle acque ferme della scuola italiana. Parlo del significato degli assiomi di Newton, dell'interpretazione di grandezze come *massa*, *calore*, *entropia*, per fare solo qualche esempio. Tutte cose che cadono nel dominio della fisica classica. Ebbene, di queste difficoltà non v'è traccia nella parte di fisica moderna, dove ognuno degli argomenti citati viene esaurito nell'arco di un capitolo. Questo trova riscontro nel tipo di questioni che vengono poste all'esame di stato, dove la relatività e la meccanica quantistica fanno la parte del leone. Spesso sono gli insegnanti stessi a richiedere che nei manuali scolastici siano inseriti questi argomenti e preferiscono parlare dei buchi neri e del Big Bang, piuttosto che delle bolle di sapone. Questo conferisce al loro insegnamento un viraggio di 'modernità' e li colloca su un terreno in cui a tutti è concesso di dire qualsiasi cosa, senza tema di smentita. Chiunque abbia qualche esperienza di conferenze divulgative avrà conosciuto persone che hanno portato all'estremo questo atteggiamento mentale e hanno finito con l'identificare il sapere scientifico con i Fratelli Grimm. È chiaro infatti che chi non abbia saldissime conoscenze di relatività generale può fare qualsiasi discorso a proposito dell'espansione dell'universo in un gioco simile al cinema dinamico.¹⁹

Così, in questa sorta di divulgazione della divulgazione che viene praticata nei manuali scolastici, il messaggio che passa è che chiunque può immaginare qualsiasi cosa. Restando, però saldamente ancorato alla sua fisica aristotelica, e dimenticando che la peculiarità del sapere scientifico è la sua *falsificabilità*. Tutto ciò che viene scritto in questi capitoli non ha, neppure in linea di principio, questa caratteristica. Non è assimilabile al *Somnium* di Keplero²⁰ poiché in quest'opera la favola è pretesto per considerazioni

¹⁸ Boren, Craig F. (2009), *Physics textbook writing. Medieval, monastic mimicry*, «Am J Phy», 77(2).

¹⁹ Divertimento che si trova nei grandi luna park, in cui lo spettatore assiste alla proiezione di un film emozionante (ad esempio, una discesa a rotta di collo su una strada trafficata) seduto su una sedia che si muove in relazione alle scene proiettate, simulando i balzi e gli urti rappresentati sullo schermo.

²⁰ *Somnium, Seu Opus Posthumum de astronomia lunari*, 1634

1. Generalità sulla didattica della fisica

scientifiche. Le favole sui *quark* e sulle *stringhe* non hanno giustificazione diversa da quella di un patto poco nobile tra autori di manuali (*traduttori del traduttore d'Omero*) e insegnanti che, fiaccati da un lavoro difficile e socialmente non riconosciuto, si arrendono ai modelli pedagogici imperanti, corrispondenti al più basso livello energetico. Ciò non toglie che sia doveroso riconoscere che, se per l'insegnamento valesse una sorta di giuramento d'Ippocrate, richiederebbe che per la fisica si tenesse presente una versione scolastica del popperiano criterio di falsificabilità: «tutto ciò che, in relazione alla cultura dell'allievo, è non-falsificabile, allora è cosa diversa dall'educazione scientifica».

Vi è poi un aspetto di questo tipo di insegnamento che lo rende inaccettabile, oltre che sul piano della formazione scientifica, anche su quello pedagogico. Se vi è un carattere che contraddistingue il corretto rapporto tra maestro e allievo è quello dell'egualitarismo nella diversità dei ruoli. Se il rapporto è inquinato dall'autoritarismo, significa che vi è qualcosa che non va all'interno del quadro educativo costituito dal docente, dal discente e dall'ambiente in cui si colloca tale rapporto.

A noi interessa il caso limite, ma molto comune, in cui l'autoritarismo è succedaneo di una formazione culturale per qualche verso carente. La guida alpina che conduce il dilettante nella scalata di una montagna è, per esperienza e capacità, un motivo di sicurezza per il cliente, ma non elimina la fatica e i pericoli che derivano dal muoversi in ambiente alpinistico. La presenza della guida non estingue la necessità che il cliente sia all'altezza dell'impresa, anzi, tra le qualità professionali della guida vi è la capacità di valutare se il cliente sia o meno in grado di affrontare la salita che gli viene proposta. Ma l'impresa non appartiene alla guida. Ogni volta la montagna è là per tutti e due, e ambedue diventano attori dell'impresa, condividendo le scelte e le responsabilità. Sarebbe una pessima guida quella che imponesse al cliente difficoltà che siano superiori alle sue capacità, perché, in tal caso, l'impresa non apparterebbe più al cliente. Ma la montagna è, ogni volta, un mistero per ambedue e, come diceva un grande alpinista «Quando parto il mattino, non voglio sapere esattamente quello che si farà e quello che accadrà».²¹

Tutto ciò vale anche per il *Physikführer*: ciò che deve stare davanti al maestro, come all'allievo, non è il Caforio-Ferilli, ma la realtà fisica, misteriosa e meravigliosa. La pseudo-divulgazione della relatività generale e della meccanica quantistica, non può che essere un'operazione autoritaria dal punto di vista pedagogico, come tutte quelle in cui vi è uno spettatore (l'allievo) e uno stregone (l'insegnante). In qualche modo è un ritorno alla cultura anti-galileiana, basata sull'autorità di un autore e di chi si arroga il diritto di parlare in suo nome. Chi salga sulla cima della Marmolada portato dalla funivia non saprà mai che cosa sia salire la Marmolada, qualunque sia la via scelta, si priva pertanto di un'esperienza fondamentale. «La via che porta alla cima non può essere percorsa che passo dopo passo, con i suggerimenti della guida, ma senza

²¹ Mummery, Albert F. (1895), *My Climbs in the Alps and Caucasus*, London, Nelson, p.360.

dimenticare che lo scopo dell'alpinismo non è la vetta, ma la via stessa» (*Der Weg ist das Ziel*). Così il fine di un corso di fisica non è – non dovrebbe essere – quello di saper risolvere i problemi posti in fondo al manuale, ma l'esperienza che si vive interrogandosi sui fenomeni naturali, insieme al maestro.

6. L'ingenuo realismo dei manuali scolastici

Nell'imparare la meccanica newtoniana, i termini 'massa' e 'forza' devono essere acquisiti insieme, e la seconda legge di Newton deve giocare un ruolo in tale acquisizione. Non si può cioè imparare 'massa' e 'forza' in modo indipendente e poi scoprire empiricamente che la forza è uguale alla massa moltiplicata per l'accelerazione. Né si può imparare prima 'massa' e poi usarla per definire 'forza' con l'aiuto della seconda legge. Invece, tutti e tre i termini devono essere imparati insieme, parti di un modo nuovo (ma non completamente nuovo) di fare meccanica. [...] Sebbene 'forza' possa essere un termine primitivo in alcune particolari formalizzazioni della meccanica, non si può imparare a riconoscere le forze senza imparare nello stesso tempo a individuare le masse e senza ricorrere alla seconda legge. Questa è la ragione per cui la 'forza' e la 'massa' di Newton non sono traducibili nel linguaggio di una teoria fisica (quella aristotelica o quella einsteiniana, per esempio) in cui non si applica la versione di Newton della seconda legge. Per imparare uno di questi tre modi di fare meccanica, i termini interrelati in una parte specifica della rete del linguaggio devono essere imparati o re-imparati insieme, e poi imposti alla natura nel suo complesso.²²

Forse i manuali per la scuola media non possono che essere come sono. Infatti, tra l'uno e l'altro non vi sono differenze di sostanza. Sono tutti ispirati al più forte e ingenuo – e tuttavia non esplicitamente dichiarato – *realismo scientifico*. Si definisce in questo modo l'opinione che il risultato della ricerca scientifica sia la conoscenza di fenomeni ampiamente indipendenti dalla teoria e che tale conoscenza sia possibile anche nel caso in cui non si presentino fenomeni osservabili. Come quel personaggio di Molière che parlava in prosa da cinquant'anni e non lo sapeva, i libri di testo (e quindi gli insegnanti) sono empirico-realisti di stretta osservanza. La convinzione corrente è che il lavoro del fisico sia simile a quello dell'archeologo che scava nella sabbia e ne estrae reperti di valore più o meno grande. Il fisico scava nei fenomeni e, se è fortunato, può trovarne uno che reca il marchio di 'principio' o 'legge fondamentale': per esempio, il principio d'inerzia o quello di conservazione dell'energia.

²² Kuhn, Thomas S. (2000), *Commensurabilità, comparabilità, comunicabilità*, in *Dogma contro Critica. Mondi possibili nella storia della scienza*, Milano, Cortina.

1. Generalità sulla didattica della fisica

Secondo il realista praticante, questi hanno esistenza loro propria, indipendente dal contesto teorico in cui sono collocati. In questo senso ‘esistono’ l’energia e la massa e le cariche elettriche, ‘oggetti’ dotati di proprietà peculiari (in questi casi quella di conservarsi) così come un sasso è dotato di forma, peso, ecc. indipendenti da chi lo osserva. Nella versione più radicale dell’ideologia realista, le leggi e i principi che si ‘scoprono’ scavando nella realtà non hanno eguale importanza e dignità. Per esempio, è diffusa l’opinione che tra i tre principi della dinamica newtoniana, il primo, il principio d’inerzia, sia meno importante degli altri due: qualche autore arriva a segnalare che questo altro non sia che un caso particolare del secondo, indicato talvolta come legge *fondamentale* della dinamica. È alla luce di questa corrente ideologia che si spiega perché nei manuali di laboratorio si proponga, ad esempio, una ‘verifica del secondo principio della meccanica’ come se questo sussistesse indipendentemente dagli altri assiomi della meccanica classica. Qualcuno arriva al punto di riportare risultati (fasulli) di esperimenti, al solo scopo di mostrare che quello proposto ha tutti i titoli per essere dichiarato ‘un principio’.

Ma non mancano le ‘applicazioni dei principi’, ad esempio del principio d’inerzia. Nel caso specifico le ‘applicazioni’ sono costituite da autobus che frenano improvvisamente, ciclisti che inchiodano la ruota anteriore, passeggeri sul sedile posteriore di moto che accelerano improvvisamente, ecc. Fenomeni la cui descrizione vuole giustificare il ricorso all’ambiente teorico della meccanica classica.

Tutto ciò è molto interessante perché rivela l’atteggiamento mentale prevalente nella scuola: che i ‘principi’ siano manifestazioni oggettive della realtà fisica, che siano imposti dalla forza dell’evidenza sperimentale. È in virtù di questo assioma che il fatto che un ciclista continui a viaggiare anche se smette di pedalare diviene epifania del principio d’inerzia.

A questo modo di pensare si associa un’ingenua lezione del pensiero di Galileo, presentato come un convinto empirista in contrapposizione agli aristotelici capaci di negare perfino il dato osservativo in nome del dogma.

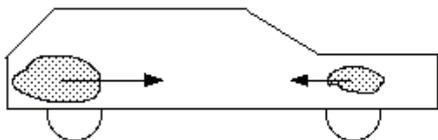
Un mio (per altro, valente ed entusiasta) giovane collega era solito suscitare l’entusiasmo della scolaresca realizzando in classe l’esperimento della tovaglia. Si tratta di stendere una striscia di tessuto sulla tavola e su questa disporre alcuni piatti. L’insegnante deve tirare rapidamente la tovaglia. Se lo strappo è sufficientemente violento, si riesce a toglierla senza trascinare per terra le stoviglie che vi sono appoggiate. Non dirò quale fosse il fine della dimostrazione secondo il mio giovane ex allievo. Propongo al lettore di immaginare che cosa possa provare l’esperimento (nell’ipotesi che riesca). Nel caso che non riesca, il significato della dimostrazione rimane lo stesso oppure cambia?

Il fatto è che nella scuola italiana una delle perdite prodotte dalla ‘new age’ pedagogica è stata la geometria nella formulazione euclidea, quella che, fino a qualche decennio fa costituiva l’asse portante della formazione in matematica e che, nella

tempesta degli anni '70 è stata buttata a mare come inutile zavorra. Ma non solo in questa disciplina, visto che quello euclideo costituiva il modello assiomatico per antonomasia, l'unico che molti studenti avessero l'occasione di conoscere. La geometria, anche nella strutturazione assiomatica più ingenua, rappresenta un modello fisico dello spazio e quindi forniva l'opportunità di conoscere il significato e le forme di una teoria fisica. A nessuno verrebbe in mente di 'verificare' se per un punto passa una e una sola retta parallela a un'altra data. Neppure la negazione del quinto postulato di Euclide ha portato a risultati assurdi secondo l'esperienza. Per contro, nella manualistica italiana vi sono autori che propongono seriamente la 'verifica' del principio di azione e reazione o del fatto che la circuitazione del campo elettrico sia nulla.

L'idea che i principi esistano di per sé, e non in quanto elementi di una rete assiomatica, e come tali siano percepibili ed evidenti è straordinariamente diffusa e pervasiva. Ne fornisce un esempio uno dei manuali che vanno per la maggiore nella scuola italiana, avallato da un autore e da un editore prestigiosi.

Se il terzo principio della dinamica non fosse vero, potremmo far muovere un'automobile senza consumare combustibile. Basterebbe legare nel cofano e nel baule due masse diverse. Dal momento che, secondo la nostra ipotesi, esse si attrarrebbero con forze diverse, ne risulterebbe una forza netta sull'automobile, in grado di farla accelerare.



Ci troviamo di fronte a un caso complementare rispetto a quelli a cui abbiamo fatto cenno. Qui si ipotizza di negare un principio (mantenendo gli altri assiomi) per mostrare che l'operazione condurrebbe a

conseguenze assurde, ovvero non osservate, nell'ambito della stessa teoria. L'autore dimentica che un principio, di per sé, non è né vero né falso in quanto acquista significato solo in relazione agli altri assiomi della teoria. Non è quindi possibile falsificare un principio se non nell'ambito di un contesto teorico. Nel caso in esame, se non valesse il terzo principio, non sarebbe neppure possibile definire le forze e le masse (in senso newtoniano) e qualsiasi affermazione al loro riguardo sarebbe priva di senso. Insomma, questa osservazione fa solo notare che se si nega un assioma della meccanica newtoniana, la meccanica newtoniana diventa falsa. Dal punto di vista didattico la cosa è molto interessante perché concerne direttamente il significato delle osservazioni. Si immagini, ad esempio, di entrare in classe e di appoggiare sulla cattedra un carrello (un *rollerboard*) tra i cui estremi si sia tesa una molla, come in Figura 4. E di chiedere agli studenti quale sia il significato fisico di ciò che osservano. L'esperimento didattico non proverà che questa sia la 'dimostrazione' del terzo principio, ma che i ragazzi sono più intelligenti di quel che possono apparire nell'ordinaria attività scolastica.

1. Generalità sulla didattica della fisica

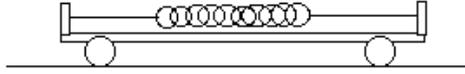


Figura 4. Apparato sperimentale per una dimostrazione pansemantica.

La geometria elementare è (o, meglio, era), come dicevamo, l'unico sistema assiomatico relativo allo spazio che fosse dato di incontrare ai nostri studenti. Vi fu, negli anni '60, un'iniziativa ministeriale che tendeva a proporre lo studio delle geometrie non-euclidee, ma, non adeguatamente sostenuta, fu rapidamente abbandonata. Per contro, nel campo della fisica, abbiamo assistito, negli ultimi anni, a un notevolissimo allargamento degli orizzonti teorici. Sono entrate a far parte dei manuali scolastici la relatività speciale e la meccanica quantistica, ma anche la relatività generale, la fisica del nucleo e la cosmologia, nella convinzione che – mentre da un lato non è possibile raccontare le geometrie non-euclidee – non ci siano difficoltà a parlare di espansione dell'universo e di buchi neri. Tutto ciò è basato su un terribile equivoco. Limitiamoci a parlare della relatività speciale, perché rappresenta il contenuto teorico meno distante dalla cultura di un liceale. Quando si passa dalla fisica classica alla relatività, nessun autore di manuali sente il bisogno di avvertire che le grandezze di cui si parla – lunghezze, tempi, massa, energia, quantità di moto, ecc. – portano gli stessi nomi della fisica classica, ma hanno significati diversi. Gran parte dei 'paradossi' sui quali si diffondono i manuali derivano dal fatto che alle grandezze relativistiche si attribuiscono i significati che hanno nella fisica classica. Qualcosa di analogo a ciò che fanno quegli autori che – *pour épater le bourgeois* – sotto un disegno che rappresenta un uomo sudato che trasporta una pesante valigia, sottolineano che compie 'lavoro nullo'. Analogamente, le lunghezze si contraggono, i tempi si dilatano e gli acceleratori di particelle diventano dei 'massatori'. I più solerti, una volta in possesso delle formule che fa dipendere la massa (relativistica) dalla velocità, si spingono a inserire questa nella classica $F = ma$. Tutto ciò nella convinzione che i concetti di massa, forza, accelerazione siano *oltre* le teorie fisiche, abbiano una loro esistenza autonoma che travalica le teorie e, in effetti, le trattano – se l'ossimoro è ammesso – come *grandezze metafisiche*. Tutto questo, in assenza di filtri culturali, passa immutato nella pratica didattica degli insegnanti.

7. Didattica ministeriale

Il compito di coloro che iniziano una scienza è del tutto diverso da quello dei loro successori. L'opera dei primi è ricercare e constatare i fatti più importanti, e la storia insegna che questa attività richiede più genialità di quanto comunemente si pensi. Una volta scoperti, questi fatti più importanti possono essere ordinati e utilizzati nella fisica matematica, secondo procedimenti logici e deduttivi; allora si vede che nell'assunzione di un solo fatto è contenuta già un'intera serie di altri fatti, che però non sono immediatamente evidenti. Questi due tipi di lavoro sono di uguale importanza, ma non vanno confusi. Non si può provare matematicamente che la natura dev'essere così com'è.²³

La politica scolastica degli ultimi due decenni ha posto l'enfasi unicamente sulla 'didattica'. Il significato del termine non è univoco e si è evoluto fino a indicare un complesso di comportamenti (degli insegnanti) rigorosamente e minuziosamente indicati. A questo proposito nella scuola secondaria si è addirittura diffuso un lessico iniziatico e molti hanno venduto questi mutamenti di superficie come un reale mutamento culturale, che invece è cosa ben diversa dall'assolvimento di una sequenza rituale di azioni 'didattiche'. Quel che è certo è che nessuna delle iniziative 'innovative' che hanno segnato gli interventi ministeriali 'in vivo' ha mai richiamato la necessità di una solida formazione culturale nella disciplina professata. Al contrario, si è esplicitamente affermata la priorità della formazione "didattica" nei confronti di quella culturale. Per dirla più chiaramente, si è, nei fatti, proclamato il principio che chiunque abbia una buona formazione didattica – ammesso che una cosa del genere possa essere – sia in grado di insegnare qualsiasi cosa. Nel caso della fisica questo 'qualsiasi cosa' è visto come una sorta di archivio nei cui cassetti sono conservati gli 'argomenti di fisica'. Lo stesso termine utilizzato per indicarli – i *moduli* – suggerisce l'idea di un prodotto confezionato, qualcosa che esiste di per sé: compito dell'insegnante è di inserire questi *moduli* in caselle preordinate. In relazione a ciò, i manuali scolastici si sono adeguati, impacchettando la materia in *unità* e *moduli*, ciascuno dei quali è indipendente dagli altri, come prodotti esposti sugli scaffali di un supermarket: confezionamento che conferisce ai contenuti culturali un evidente carattere catechistico. D'altra parte, questa potrebbe essere l'impostazione corretta di un corso rapido di formazione aziendale, un corso il cui fine sia l'apprendimento di determinate tecniche elaborate da altri. Ma il rapporto tra maestro e allievo in età evolutiva è – dovrebbe essere – cosa ben più ricca e delicata (per ambedue) che non il semplice addestramento. Nell'insegnamento della fisica questa impostazione si è affermata più saldamente che per altre discipline per una ragione che cercherò di esplicitare.

²³ Mach, Ernst (1968), *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico* [1883], a cura di A. D'Elia, Torino, Paolo Boringhieri, p.155.

1. Generalità sulla didattica della fisica

La fisica è, in qualche modo, una materia strabica. La riflessione sulla realtà fisica significa far incontrare il mondo fenomenico con quello delle idee: incontro che non è mai indolore, anche a livello elementare. Si pensi solo alla enorme difficoltà di far nascere nell'allievo il concetto di *velocità*. Da una parte le misure di posizione e di tempo richiedono eventi ben distinti (distanziati nello spazio e nel tempo); dall'altra si trattano le distanze e i tempi come numeri reali, come se avessero senso distanze come $\sqrt{2}m$ o tempi come 3^π secondi. Si tratta di un problema che incontra anche il professore che insegna a livello elementare. Naturalmente, è sempre possibile far finta di niente: il professore finge di aver capito ciò che insegna e i ragazzi ripeteranno che la velocità istantanea differisce dalla velocità media in quanto «è il limite per Δt tendente a zero ecc.» e amici come prima. Il fatto è che non è facile sbarazzarsi del concetto di *velocità* (istantanea) poiché si ripresenta in una varietà di contesti diversi, per cui continua a perseguitare come una maldestra bugia. Pure, quando si vuole misurare una velocità, tutto questo non c'entra niente, anzi si scopre che pretendere di misurare una velocità istantanea è come chiedere in drogheria $\sqrt{2}$ etti di prosciutto. Insomma la fisica è materia che interagisce inesorabilmente con la realtà e questo mette a disagio l'insegnante. Molto più rassicurante è la matematica nell'ambito della quale non possono nascere dubbi, essendo l'universalità del sapere richiesto tutto incluso nel libro di testo. La fisica pretende invece di occuparsi di *fenomeni* e di elaborare delle sintesi che fungano da strumenti esplicativi. Indica anche in che modo interpretare i fenomeni e a quali prestare attenzione. Questa peculiarità della disciplina pone dei limiti forti all'azione didattica. La tendenza degli insegnanti (della maggior parte) è quella di ritirarsi all'interno del libro di testo e, da questa posizione, trattare la fisica allo stesso modo della matematica.

8. La parabola della taghenometria

C'era una volta in un paese lontano una grande, grande cucina nella quale molti cuochi prestavano la loro opera e nella quale vi era una grande profusione di pentole, pignatte, padelle e paioli, scodelle e bacinelle di ogni dimensione e tipo e forma. Alcuni di questi erano vuoti, mentre altri contenevano uova o riso o spezie e molte altre cose gustose. Ora, i cuochi, quando non erano impegnati ad arrostitire, friggere, lessare e preparare vari tipi di minestre e di intingoli, si divertivano ad applicarsi a speculazioni filosofiche e in conseguenza di ciò raggiunsero una grande abilità nell'arte della *taghenometria* (da *taghnon*, che significa 'padella'). Altre volte la stessa cosa veniva indicata come *panmetria*, l'arte di misurare ogni cosa, ma alcuni sguatterti ignoranti, equivocando sul nome, parlavano anche di *ollametria*, in modo analogo a quel che fanno certi baristi che hanno sostituito gli *hamburger* con i *cheeseburger*.

Ad ogni recipiente la taghenometria assegnava un volume V . Questo veniva espresso in pollici cubi e determinato misurando le dimensioni con grande precisione e applicando quindi le formule della geometria solida o, in caso di forme irregolari, attraverso integrazione numerica su un pallottoliere di fagioli.

Ma ad ogni recipiente veniva anche assegnata una grandezza completamente diversa: lo *spostamento volumico* W . Questo veniva espresso in *galloni* e misurato riempiendo d'acqua il recipiente, determinando il suo peso in *libbre*, apportando la correzione per la temperatura e dividendo per 10. Il rapporto tra lo spostamento volumico e il volume veniva indicato come *costante volumica*:

$$e = W/V$$

Col passare del tempo divenne chiaro che questa costante volumica aveva lo stesso valore per ogni recipiente vuoto; per cui fu indicata come *costante volumica del vuoto* e_0 . Ma per ogni altro recipiente la costante volumica si comportava spesso in modo imprevedibile. Cambiava in conseguenza di un cambiamento di temperatura o semplicemente col passare del tempo dipendeva dalla rapidità della misura. Anche il comportamento dinamico di recipienti non vuoti in movimento pose curiosi problemi. Un giorno fece il suo ingresso nella cucina un uomo illuminato e, dopo aver ascoltato le doglianze dei cuochi, disse: «Sono in grado di risolvere i vostri problemi. In realtà vi è una sola grandezza taghenometrica. Chiamiamola volume e misuriamola in centimetri cubi. Il procedimento di pesatura dell'acqua porterà allo stesso valore a condizione che esprimiate il peso in grammi. In questo modo la vostra costante volumica del vuoto prenderà il valore unitario. Ma in un recipiente non vuoto parte del volume è occupato da patate o pere o prugne; indichiamo con P questo volume. In tal caso, con il metodo della pesata dell'acqua, determinate $V - P$. In molti casi P sarà proporzionale a V , cioè $P = kV$; pertanto lo spostamento volumico risulta

$$W = V - kV = (1 - k)V$$

per cui

$$e = 1 - k$$

Ciò che dovrete veramente studiare è P e la sua dipendenza dalla natura degli alimenti. E invece di studiare la dinamica delle pentole non vuote, dovrete studiare il moto degli oggetti che vi sono contenuti».

I cuochi compresero e apparvero piuttosto scoraggiati. «Che faremo delle nostre bellissime unità?», chiesero. «Che cosa delle nostre libbre e once placcate in oro? Guarda questa bellissima mezza-pertica appoggiata nell'angolo, accuratamente suddivisa in 99 pollici. Sarebbe sconveniente cambiare tutto questo».

Il saggio sorrise. «Non c'è alcuna necessità di cambiare, – disse – potrete continua-

1. Generalità sulla didattica della fisica

re a lavorare nel sistema di unità a cui siete abituati, ma solo alla condizione che non dimentichiate che e_0 è solo un modo per passare da una unità all'altra e che P e k sono le sole grandezze rilevanti».

Passarono gli anni. Il sapiente era ormai morto e nuove generazioni di cuochi lavoravano nella cucina e si mostravano molto restie in fatto di taghenometria. «Che pazzia!» dicevano. «Non è ovvio che V e W siano grandezze diverse se vengono determinate in modi diversi? E perché la costante volumica del vuoto dovrebbe essere unitaria? Una pentola di riso non vale quanto, se non di più, di una pentola vuota?».

Queste proteste finirono col prevalere. Un congresso internazionale decise che anche se il volume e lo spostamento volumico avevano valori uguali, il primo doveva essere misurato in *euclidi* – essendo un euclide uguale a un centimetro cubo – il secondo in *archimedi*. Lo spostamento volumico del vuoto – sebbene uguale all'unità – risultava avere quindi le dimensioni dell'*archimede/euclide*.

Dopo aver messo ordine in questo modo, la nuova generazione ritornò ai pollici e alle libbre e furono marchiati come reazionari tutti coloro che si ispiravano alle illuminate parole del saggio. È in questo modo che i cuochi moderni trascorrono il loro tempo libero, e speriamo che la loro cucina non debba soffrirne.²⁴

9. Un esempio di 'tartufismo' scolastico: le unità di misura

Poiché il magazzino conteneva parecchi lotti di cromato pericolosamente basici, che dovevano pure essere utilizzati perché erano stati accettati al collaudo e non si potevano più restituire al fornitore, il cloruro venne ufficialmente introdotto come preventivo anti-impolmonimento nella formulazione di quella vernice. Poi io diedi le dimissioni, passarono i decenni, finì il dopoguerra, i deleteri cromati troppo basici sparirono dal mercato, e la mia relazione fece la fine di ogni carne: ma le formulazioni sono sacre come le preghiere, i decreti legge e le lingue morte, e non uno iota in esse può venir mutato. Perciò, il mio Cloruro Demonio, gemello di un amore felice e di un libro liberatore, ormai in tutto inutile e probabilmente un po' nocivo, in riva a quel lago viene tuttora religiosamente macinato nell'antiruggine ai cromati, e nessuno sa più perché.²⁵

Questa delle unità di misura e non è una questione di pertinenza dei corsi universitari: si propone ai ragazzi fin dalla scuola media. E, tuttavia, non vi è nell'editoria scolastica nazionale un testo che affronti razionalmente il problema: tutti si affidano alla prestidigitazione basata sull'assonanza tra *metro quadrato* e *metro al quadrato* (o tra *metro*

²⁴ Casimir, H.B.G. (1999), *A Parable of Units*, in *A Random Walk in Science*, ed. by R.L. Weber and E. Mendoza, London, Institute of Physics Publishing.

²⁵ Levi, Primo (2005), *Il sistema periodico* [Cromo], Torino, Einaudi.

cubo e cubo del metro). È un esempio istruttivo perché mette in evidenza una delle caratteristiche (negative) della nostra tradizione nell'insegnamento della fisica: il carattere rituale e impositivo. Qualsiasi studente (almeno fino a qualche anno fa), richiesto del volume della sfera, risponderebbe con la famosa formula. La risposta sarebbe più impacciata se la domanda fosse posta nella forma: «Quanti litri d'acqua per riempire una bottiglia sferica di 20 cm di diametro?». In questo caso, l'unità di raggio e l'unità di volume non sono immediatamente collegabili e troppo spesso si dimentica che l'uso della formula

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3$$

è legittimo solo a condizione che l'unità di volume sia il 'cubo' dell'unità di lunghezza. Per chi misura il raggio in *pollici* e il volume in *pinte*, il volume della sfera è dato da

$$V = 145,18 R^3$$

formula che non sarebbe male proporre a scuola, se non altro per ricordare che i numeri non sono poi così 'fissi' come si crede.

A proposito delle unità di misura (in particolare di quelle di superficie e di volume) la tradizione vuole che ci si comporti come nelle commedie alla Jonescu, dove si parla di cose a cui ognuno attribuisce significati diversi. Così succede che talvolta il *metro cubo* sia un cubo di spigolo lungo 1 m, e tal'altra sia il cubo (in senso algebrico) del *metro*. E i libri di scuola, dopo aver dedicato almeno una pagina e diverse illustrazioni al campione di Sèvres e alla lunghezza d'onda del Krypton, mostrino come il rapporto tra un *metro cubo* e un *metro* sia un *metroquadro*. Senza tradire il minimo imbarazzo.

Del significato di grandezze come il m^3 , delle ragioni che giustificano la possibilità di trattarle come variabili algebriche, del perché esistano grandezze come il m^2 , ma non il 2^m o il m^m o il $\log(m)$; di tutto questo non si parla mai, neppure tra fisici di professione; appartengono alla classe di nozioni che Arnold B. Arons definisce *pedagogically sterile*: quell'insieme di concetti che possono rispondere (anche se non sempre) a criteri di verità o di economia di pensiero, ma di cui è andata perduta la giustificazione razionale e, con essa, la reale e corretta funzione. Anche sul problema (apparentemente) molto modesto delle misure di spazio, si è soliti, nell'attività didattica, glissare con un gioco di destrezza che ricorda quella dei giocatori delle tre carte – cosa non rara nell'insegnamento della fisica – dove il trucco consiste nell'utilizzare uno stesso termine per indicare grandezze diverse.

Quando si scrive che il volume di una cisterna è $9,8 m^3$ l'informazione che si fornisce è duplice, anche se la maggior parte degli studenti ne coglie una sola. La prima è che il simbolo m^3 non ha carattere algebrico e indica una classe di equivalenza di un

1. Generalità sulla didattica della fisica

certo insieme di recipienti. Mettiamo di disporre di una grande quantità di recipienti. Ne riempio uno con dell'acqua e poi travaso la stessa in un altro. Se la stessa acqua riempie perfettamente anche il secondo, affermo che appartiene alla stessa classe dell'altro. Riprovo con un terzo recipiente e così via. Tra questi ce ne può essere uno che ha la forma di un cubo con lo spigolo lungo 1 m. Diremo che il volume 1 m^3 è la proprietà che accomuna tutta la classe dei recipienti. Ed è questa l'etimologia che viene attribuita al simbolo che, in questa accezione, non ha alcun significato algebrico, nel senso che non è per niente un 'cubo'. Certo, vi è un'ipotesi che condiziona la trasmissione dell'informazione, ed è che abbiamo concordato con il ricevitore il significato del simbolo m^3 . Se corrispondiamo con un marziano (o con un americano), questi non saprà che farsene dell'informazione che la nostra auto ha *una cilindrata di 1200 cm^3* . Se, invece, corrispondiamo con un amico terrestre, potrà sempre procurarsi un campione di m^3 e allora potrà costruire una cisterna di capacità uguale alla nostra.

La seconda informazione veicolata dal simbolo è di natura più sottile. Ed è quella che giustifica il fatto che lo stesso simbolo m^3 sia, nello stesso tempo, anche un simbolo algebrico, cioè rappresenti il cubo di un numero reale. Consideriamo due cisterne geometricamente simili.

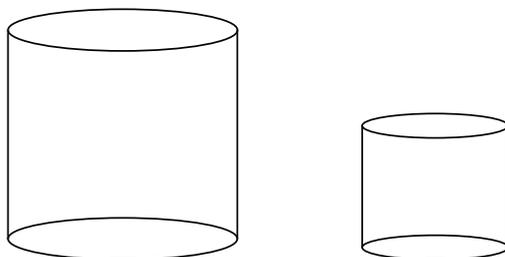


Figura 5. Due cisterne simili.

Un bel teorema di geometria elementare afferma che se il rapporto delle dimensioni lineari è m , allora il rapporto dei volumi è m^3 . Quindi informare il nostro amico americano che il volume della cisterna è $9,8 \text{ m}^3$ significa questo: «So che voi usate misurare le distanze in *piedi*. Io non so quanti piedi ci vogliono per fare 1 m: supponiamo siano p . Allora procurati un recipiente che abbia la capacità di 1 piede³ (ft^3): per riempire la mia cisterna ci vogliono $9,8 \times p^3$ secchi da 1 ft^3 . Se neppure tu sai a quanti piedi equivale 1 m, allora puoi rinunciare a sapere la capacità della mia cisterna».

Pertanto, in un simbolo come $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ e lettere m e s indicano numeri razionali: quelli che richiede il passaggio ad altre unità. Per esempio, se voglio passare dai metri ai pollici, devo moltiplicare per 39,37 e per passare ai decimi di secondo devo dividere per 100:

$$g = 9,8 \frac{39,7}{10^2} \frac{\text{in}}{(\text{ds})^2} = 3,86 \frac{\text{in}}{(\text{ds})^2}$$

Quindi, per passare dai m/s^2 ai $\text{in}/(\text{ds})^2$, basta moltiplicare per 0,394.

Tutto questo ha senso, naturalmente, se le scale di lunghezza (o di tempo, o di massa) sono lineari. Cioè se vi è un rapporto costante tra le due unità in gioco. Se è possibile stabilire, come nel caso delle lunghezze che $1 \text{ m} = 3,28 \text{ ft}$. Tuttavia, posso immaginare, ad esempio, due scale dei tempi: quella delle letture effettuate su un normale cronometro e quella delle letture effettuate su un ‘orologio di Galileo’.

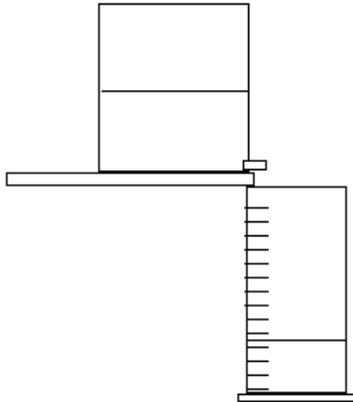


Figura 6. L'orologio di Galileo.

La relazione tra il tempo misurato dal cronometro e quello misurato dal livello del liquido nel recipiente tarato potrebbe essere come in Figura 7.

1. Generalità sulla didattica della fisica

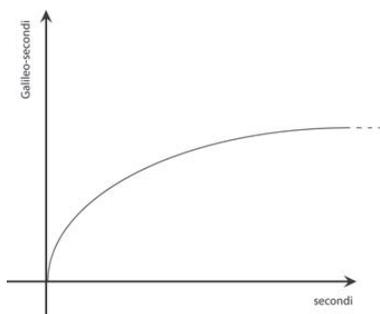


Figura 7. Relazione (non lineare) tra secondi e Galileo-secondi.

Non è possibile passare dai m/s^2 ai $in/(Gs)^2$ semplicemente moltiplicando per un certo fattore di conversione (o per il suo quadrato o il suo cubo) come abbiamo fatto prima.

È un pregiudizio diffuso quello che ritiene le unità di misura indipendenti dalle relazioni tra le grandezze.

La possibilità di trattare le dimensioni fisiche come se fossero numeri reali poggia sui principi della similitudine fisica, quindi, in ultima istanza, sulle magnifiche pagine della Giornata seconda dei galileiani *Discorsi e dimostrazioni intorno a due nuove scienze*, dedicate alla relazione tra resistenza, masse e dimensioni. In quest'opera – e in quelle coeve – tutte le relazioni fisiche sono espresse sotto forma di proporzioni:

Da questo che si è dimostrato possiamo concludere ancora, le resistenze de i prismi e cilindri egualmente lunghi aver sesquilatera proporzione di quella de gli stessi cilindri. Il che è manifesto: perché i prismi e cilindri egualmente alti hanno fra di loro la medesima proporzione che le lor basi, cioè doppia de i lati o diametri di esse basi; ma le resistenze (come si è dimostrato) hanno triplicata proporzione de i medesimi lati o diametri; adunque la proporzione delle resistenze è sesquilatera della proporzione de gli stessi solidi, e in conseguenza de i pesi de i medesimi solidi.²⁶

Con la diffusione dell'algebra, questo linguaggio è andato perduto. Nel caso del brano, più sintetico è scrivere

$$R = kM^{2/3}$$

dove R indica il carico di rottura e M la massa del cilindro. In un moderno manuale, di k si direbbe che «è una costante il cui valore dipende dal materiale di cui è costituito il cilindro e che ha le dimensioni del

²⁶ Galilei, Galileo (1958), *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, a cura di A. Cargo e L. Geymonat, Torino, Paolo Boringhieri.

$$\frac{N}{kg^{3/2}}$$

Questo consente di esprimere il fatto che, a parità di dimensioni, un cilindro d'acciaio è 1000 volte più resistente di un cilindro di rame; ma ha contribuito ad attribuire sostanza ontologica a entità come i kg elevati a $^{3/2}$, essendo andato perduto il significato originario di simboli come quelli che compaiono nell'equazione precedente. Un esempio comune è dato dalla terza legge di Keplero che i manuali di fisica scrivono nella forma

$$d^3 = kT^2$$

con il valore

$$k = 2,64 \times 10^5 \frac{m^3}{s^2}$$

(per il sistema solare).²⁷

Operazione analoga si compie quando dalla constatazione della proporzionalità tra forza e accelerazione, si passa all'equazione $F = ma$. Non tutti hanno consapevolezza che il fattore di proporzionalità è unitario solo perché l'unità di forza è scelta appositamente a questo scopo.

Il fatto che la forza sia esattamente il prodotto della massa per l'accelerazione è guardato spesso dagli studenti come uno dei tanti misteri della fisica. Si tratta di un atteggiamento – simile a quello, à la *Pangloss*, secondo cui hanno volume tutti e solo i corpi per i quali esista 'la formula' – indotto dall'uso del linguaggio delle equazioni, che, a sua volta, è legato al significato che si attribuisce alle unità di misura. Ovviamente, il linguaggio delle equazioni, estremamente sintetico e potente, è uno strumento essenziale per la comprensione di una teoria, ma comporta anche qualche prezzo sul piano concettuale, in quanto può dare origine a gravi equivoci e fare schermo a una comprensione più profonda.

L'uso delle unità di misura è la condizione per poter utilizzare il segno di uguaglianza nell'espressione delle relazioni tra grandezze diverse. E questo ha un'importante risvolto didattico: il fatto che il segno di eguaglianza finisce per essere sostituito, in maniera più o meno consapevole, dal segno di identità.

Anche quando sia esplicitamente richiesto di dire che cosa intenda per 'volume', il ragazzo, che risponde con una serie di formule per il calcolo dei volumi: della sfera, del

²⁷ A questa i testi di astronomia preferiscono la forma $d^3 = T^2$, dove il fattore di proporzionalità, $k = 1 \text{ UA}^3/\text{yr}^2$ apparentemente scomparso, ha preso il valore unitario.

1. Generalità sulla didattica della fisica

cubo, ecc. raramente ha consapevolezza che le formule della geometria per il calcolo delle aree e dei volumi sono valide solo a condizione che le unità di superficie siano ‘i quadrati’ e quelle di volume ‘i cubi’ dell’unità di lunghezza.²⁸

10. Il caso Karlsruhe, per esempio

«Entropia». Roberto Clausius (1822-1888, n. a Koeslin in Pomerania: docente a Berlino e a Zurigo) ha denominato col curioso nome di entropia (= funzione che riappare, che si rivolge, dall’interno de’ calcoli sua) il quoziente dQ/T : differenziale, cioè incremento infinitesimo, della quantità di calore immessa in un ciclo (in un corpo), diviso per la temperatura assoluta (variabile) a cui ell’è via via immessa nel ciclo (nel corpo). L’entropia è la «dimensione estensiva» (KANT, Critica d. R.P., Analitica) del fenomeno termico, di cui la temperatura assoluta è la «dimensione intensiva». La quantità di calore finita è la somma integrale dei prodotti infinitesimi temperature assolute X entropie:²⁹

$$Q = \int_a^b T \frac{dQ}{T}$$

Il *Karlsruher Physikkurs* è un progetto innovativo di insegnamento della fisica che riguarda tutti gli ordini di scuola – dalla elementare all’università – sviluppato presso l’Università di Karlsruhe a partire dagli anno ’80. Il punto di partenza del corso è la constatazione che nelle principali aree della fisica appaiono le stesse strutture concettuali che sarebbe auspicabile imparare una volta sola. D’altra parte, anche il solo fatto di rendersi conto dell’esistenza di queste strutture di fondo, è già di per sé un obiettivo didattico degno di essere perseguito da parte di una scuola che miri a trasmettere cultura e non abilità applicative. In questo quadro gioca un ruolo particolarmente importante una particolare classe di grandezze fisiche: le *grandezze estensive*. Questo è anche un portato della fisica moderna che ha illuminato di nuova luce la fisica classica, ponendo in evidenza strutture concettuali estremamente semplici, ad esempio riducendo i principi di conservazione a semplici simmetrie spaziali e temporali. Per fare un esempio, la meccanica si continua a insegnarla nella forma di Newton, cioè come teoria di azione a distanza. Si usa dire, per esempio, che un corpo A esercita una forza su un corpo B, senza prendere in considerazione il ruolo che il mezzo interposto tra i corpi (un campo o una molla) gioca in questa interazione. Anche l’elettromagnetismo viene

²⁸ La formula del volume della sfera non serve a niente quando si sceglie di misurare il raggio in *metri* e il volume in *pinte*.

²⁹ Gadda, Carlo E. (1974), *Un «concerto» di centoventi professori*, in *L’Adalgisa*, Torino, Einaudi.

presentato come se fosse una teoria delle interazioni elettriche e magnetiche a distanza, dove il concetto di campo appare più come un utile artificio di calcolo che come sistema dotato di esistenza fisica al pari dei corpi cosiddetti *materiali*.

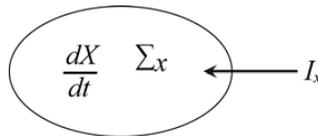
Le *grandezze estensive* sono una classe di grandezze delle quali è particolarmente facile farsi una rappresentazione concettuale. A questa classe appartengono la massa, l'energia, la carica elettrica, la quantità di materia, la quantità di moto, il momento angolare, e altre ancora. Ognuna di questa può essere immaginata come una sorta di sostanza o un fluido, nel senso che è corretto parlarne così come si parla di una sostanza, cioè con lo stesso linguaggio che si usa normalmente per le sostanze come l'aria o l'acqua.

Una delle caratteristiche che permette di riconoscere una grandezza estensiva è se per questa vale, oppure no, un'equazione di bilancio:

$$\frac{dX}{dt} = I_x + \sum x \quad [6]$$

Il significato di questa equazione è particolarmente semplice e intuitivo. Consideriamo una certa regione limitata dello spazio che contiene una certa quantità X della grandezza X. Se la grandezza contenuta in tale regione varia nel tempo ($dX/dt \neq 0$) questo avviene per due motivi: perché vi è una produzione di questa grandezza ($\sum x$) all'interno della regione e/o perché vi è un apporto dall'esterno I_x .

Quindi I_x e $\sum x$ rappresentano la quantità di grandezza X che, nell'unità di tempo, attraversa il confine della regione e che viene prodotta all'interno della regione stessa.



Vi sono grandezze estensive per le quali il termine $\sum x$ è sempre nullo. Se, all'interno di una certa regione, si ha una variazione di questa grandezza, è solo perché vi è un apporto attraverso la superficie che limita la regione. Si chiamano *grandezze conservative* e gli esempi più noti sono la carica elettrica, l'energia, la massa. Quindi le grandezze conservative sono un caso particolare delle grandezze estensive. Il fatto che per le grandezze estensive valga l'equazione di bilancio implica la validità di alcune proprietà:

1. il valore di una grandezza estensiva è sempre riferito a una certa regione dello spazio;
2. a ogni grandezza estensiva è associata un'altra grandezza che possiamo

1. Generalità sulla didattica della fisica

- interpretare come intensità di corrente;
3. le grandezze estensive sono additive: se in un sistema A il valore della grandezza X è X_A e nel sistema B è X_B , nel sistema composto da A e B, la grandezza X ha il valore $X_A + X_B$;
 4. anche le intensità di corrente sono additive.

Sono queste proprietà che rendono così semplice e naturale l'uso delle grandezze estensive e che giustificano la loro assimilazione a una *sostanza* e le rendono tanto efficaci nell'insegnamento.

Nell'insegnamento tradizionale solo la massa e la carica vengono presentate in modo da essere percepite come grandezze estensive. Al contrario, energia e quantità di moto vengono presentate come derivate da altre grandezze, cosicché la loro natura di grandezze estensive viene lasciata in ombra.

Come esempio consideriamo le situazioni fisiche presentate nelle Figure 8 e 9.

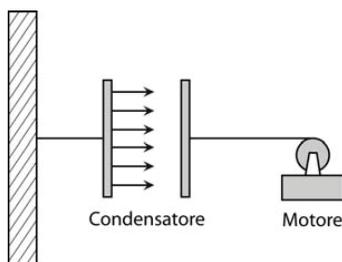


Figura 8. Un'armatura del condensatore è fissata al muro; l'altra è collegata a un motore che la fa spostare verso destra.

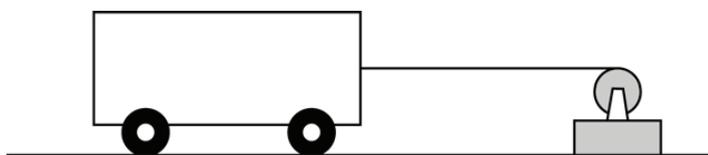


Figura 9. Un carrello viene trainato da un motore attraverso una corda.

La prima situazione (Figura 8), nel linguaggio tradizionale, verrebbe descritta nei termini seguenti: *alla piastra destra del condensatore viene fornito lavoro. In questo modo aumenta l'energia potenziale della piastra nel campo della piastra di sinistra.* Se invece si tiene conto del fatto che l'energia è assimilabile a una sostanza: *nel condensatore*

fluisce energia attraverso la corda e la piastra di destra.

Nel caso della Figura 9 si dice di solito: *il motore esercita una forza sul carrello e la sua quantità di moto aumenta*. Se invece si riconosce il carattere sostanziale della quantità di moto, si può dire: *attraverso la corda, si ha un flusso di quantità di moto dal motore al carrello*.

Mettiamo di voler esprimere l'energia di un condensatore. Dovremmo scrivere

$$E = E_0 + \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} + \frac{p^2}{2m} \quad [7]$$

dove Q = carica, C = capacità, p = quantità di moto, m = massa.

Il primo termine è l'energia termica, il secondo l'energia elettrostatica, il terzo l'energia cinetica. Tradizionalmente, queste vengono chiamate *forme* dell'energia. Quando l'energia di un sistema varia, questa variazione si può esprimere nella forma fondamentale di Gibbs:

$$dE = TdS + VdQ + vdp + \mu dn \quad [8]$$

dove T è la temperatura, S l'entropia, V il potenziale elettrico, Q la carica, v la velocità, p la quantità di moto, m il potenziale chimico e n la quantità di materia.

Si osservi che S , Q e p sono *grandezze estensive*. Quindi l'espressione di Gibbs dice che ogni variazione di energia comporta la variazione di almeno un'altra grandezza estensiva: S , p , Q . Le due variazioni sono collegate da una *grandezza intensiva* (T , V , v , ecc.) che dice quanto la variazione dell'una influisce sulla variazione dell'altra. La grandezza estensiva e la grandezza intensiva che compaiono nello stesso termine della forma fondamentale di Gibbs sono dette *coniugate* o, più precisamente, *coniugate per l'energia*. Ad esempio, la temperatura e l'entropia, il potenziale elettrico e la carica. Tradizionalmente, il termine $T dS$ si chiama *calore scambiato*, il termine $V dQ$ *energia elettrica*, il termine $v dp$ *lavoro*. Se si riferiscono le variazioni all'unità di tempo, dalla [8] si passa alla

$$P = TI_S + VI + vF + \mu I_n \quad [9]$$

dove P è la potenza, I la corrente elettrica, F la forza, I_S la corrente di entropia, I_n la corrente di materia. La [9] mette in evidenza un fatto importante, ma quasi sempre trascurato: che per avere un flusso di energia, bisogna avere il flusso di un'altra grandezza estensiva. In altre parole, non si può avere un flusso di energia e basta. Quindi, quando si dice che vi è un flusso di energia sotto forma di calore, significa che

1. Generalità sulla didattica della fisica

il flusso di energia è accompagnato da un flusso di entropia.

Pertanto, la grandezza estensiva che fluisce con l'energia possiamo chiamarla *portatore di energia*. Quindi l'energia è portata da entropia, carica elettrica, quantità di moto, quantità di materia, ecc. Per quanto riguarda la grandezza intensiva che lega le due correnti, questa misura di quanto il portatore sia carico di energia.

Negli apparecchi che, tradizionalmente, si chiamano trasformatori di energia, l'energia cambia semplicemente portatore: entra nell'apparecchio con un portatore e ne esce con un altro.

Nella didattica della fisica, generalmente, è presente un solo termine al secondo membro della [9] e la cosa è illustrata nella tabella.

	Grandezza estensiva	int. di corrente	Grandezza intensiva
meccanica	quantità di moto	forza	velocità
elettrologia	carica	int. di corrente	potenziale elettrico
termologia	entropia	corr. di entropia	temperatura T
chimica	quantità di materia	flusso di materia	potenziale chimico

Le analogie rappresentate nella tabella sono alla base del *Karlsruher Physikkurs*. In ogni area della fisica due grandezze estensive ricoprono un ruolo importante: da una parte l'energia, dall'altra una grandezza estensiva caratteristica dell'area stessa, indicata nella seconda colonna della tabella. La meccanica è caratterizzata da energia e quantità di moto, l'elettrologia da energia e carica elettrica, la termologia da energia ed entropia, ecc. La fisica di ciascuna di queste aree è impossibile quando si cerchi di fare a meno di una di queste grandezze. Nonostante le due grandezze estensive che caratterizzano la termodinamica, cioè l'energia e l'entropia, siano state introdotte da un secolo e mezzo, nell'insegnamento si cerca di presentare la materia facendo a meno di una delle due. Sarebbe come presentare l'elettromagnetismo senza la carica elettrica e senza la corrente.

Nell'ambito del *Karlsruher Physikkurs* sono stati prodotti libri di testo, guide per gli insegnanti, guide per attività di laboratorio, per i vari livelli di scuola. Il corso già dagli anni '80 viene seguito in diverse centinaia di classi e i materiali tradotti in inglese e in spagnolo: segno della sua diffusione. Ve n'è anche una traduzione di prova in lingua italiana, per la Svizzera.

È possibile pensare a una sua diffusione nelle scuole italiane? Le forme dell'insegnamento della fisica non sono neppure più vissute come tradizione, ma come realtà perenne e immutabile. Per fare dei cambiamenti occorrerebbero insegnanti che si rendano conto che le cose a scuola potrebbero essere diverse e che abbiano maturato l'aspirazione a essere protagonisti di un cambiamento. Ma nella scuola italiana, l'unico momento di dibattito tra insegnanti è quello dell'adozione dei testi: i quali – per carità – devono essere sempre uguali a se stessi e agli altri per quanto riguarda i modi e i contenu-

ti. Le variazioni ammesse riguardano solo lo spessore e il numero dei moduli. Quanti sarebbero gli insegnanti disposti a ripensare i contenuti della propria fisica (a pensare alla forza come a una corrente di quantità di moto, a parlare di entropia con la scioltezza con cui si parla del calore)? In questo sforzo, comunque, non avrebbero nessuno al fianco: non le famiglie degli studenti, e tanto meno l'istituzione scolastica. Il grande movimento che si suole far risalire al '68, la rivoluzione pedagogica degli anni '90, furono in realtà solo fenomeni di superficie. La scuola italiana attuale è un sistema isolato che ha raggiunto l'equilibrio terminale: *mota quietare, quieta non movere*.

11. Verità e finzione nell'insegnamento della fisica

Similar situations prevail in daily life: if, on a French menu, you read «bifteck, pommes frites», it means «beefsteak, French fries» and the «pommes» are not «apples»: an old word, «pommes (de terre)» was used in the 17th century for a new thing, «potatoes». However, and this shows the possibility of misunderstanding, on the same menu, «boudin aux pommes» means «black pudding with mashed apples» and the word here keeps its old meaning: the dish is a very different one!³⁰

Un manuale di fisica è simile a un manuale di astronomia a occhio nudo. Come questo, infatti, presenta una realtà quale appare *hic et nunc*, ma che si è prodotta in tempi molto distanti tra loro e da noi. Una sorta di *storia interna*, in quanto prende in considerazione solo gli eventi strettamente scientifici, e caratterizzata dal fatto di proporre una congerie di informazioni in cui si mescolano elementi interpretativi attuali con frammenti originali, con quadretti nei quali la semplicità è solitamente unita alla falsità. Tutto questo non è privo di giustificazione, poiché il compito – non chiarito e non dichiarato – dell'insegnamento della fisica dovrebbe essere quello di traghettare il ragazzo a un più alto livello di interpretazione dei fenomeni, per esempio, dalla fisica intuitiva alla fisica newtoniana. Quindi l'insegnamento, per necessità di cose, opera in quella terra di nessuno che è quella che separa le due fisiche. La situazione è, in qualche modo, simile a quella di Galileo, che aspira e si adopra per raggiungere una nuova fisica – in mancanza della quale la sua visione del mondo fisico è insostenibile – che non conosce.

In quest'opera di attraversamento del guado, tutti i mezzi sono giustificati, in Galileo, anche gli sbandamenti, anche il ricorso ad argomentazioni che oggi consideriamo erronee. Lo sono anche nell'allievo, anzi una misura dell'efficacia dell'insegnamento potrebbe essere il suscitare nel ragazzo tentativi fantasiosi e personali di uscire dai *conflitti cognitivi*. Ma è raro che l'insegnamento attuale susciti davvero conflitti di questo genere nel ragazzo, perché la fisica scolastica, generalmente, non va oltre la

³⁰ Lévy-Leblond, Jean-Marc (1981), *Classical Apples and quantum Potatoes*, «Eur J Phys», 2, pp. 44-47.

1. Generalità sulla didattica della fisica

memoria labile del patrimonio cognitivo dell'allievo. Questa è forse la caratteristica peculiare dell'apprendimento scolastico: di restare confinato in una sorta di magazzino provvisorio, da dove viene espulso e disperso per far posto ad altre merci in transito. Solo molto di rado viene ammesso a far parte del magazzino delle conoscenze 'vere', quelle che consentono di rapportarsi con la realtà fisica. È quindi un segnale positivo il fatto che nell'allievo si ingenerino i conflitti e le contraddizioni di cui dicevamo e che si produca in tentativi (errati) di risoluzione. La situazione più desolante è quella contraria. Si rifletta infatti sul fatto che l'insegnante di fisica fa, di fronte ai suoi allievi, affermazioni ben lontane dal senso comune, e che dovrebbero provocare rifiuto o, per lo meno, grande meraviglia. Per esempio, che il peso dei corpi si può annullare, o che il colore non è una qualità delle superfici, o che la terra è in moto, o che la luce è un'onda, o che la luce non è un'onda, eccetera. Affermazioni meravigliose nel senso etimologico, ma che, generalmente, vengono immagazzinate provvisoriamente nella più grande indifferenza. L'insegnante, è costretto ad adeguarsi a questa forma di valutazione culturale e finisce col perdere il senso del valore delle conoscenze di cui è – o dovrebbe essere – portatore. Infatti, non è affatto vero, ad esempio, che sia nozione comune che la terra sia in moto. Nessuno è in diritto di fare questa affermazione se non è in grado di rispondere alle obiezioni che 400 anni fa venivano portate contro il moto della terra e questo non lo si può fare se non nell'ambito della fisica newtoniana. E di newtoniani in giro ce ne sono molto pochi: la cultura fisica della quasi totalità delle persone è pre-galileiana. La vera grande meta dell'insegnante sarebbe quella di essere preso sul serio e quindi giudicato pazzo dai suoi allievi, poiché altro non può essere uno che prima sostiene che la luce è un corpuscolo, poi che è un'onda e infine è un non meglio definito *quanto*. Sappiamo che questo non succede mai, lo sconcerto e la meraviglia che dovrebbero accompagnare la riflessione sui fenomeni fisici è sostituito dall'indifferenza. Come se all'affermazione della pluralità dei mondi fosse seguito un annoiato consenso di circostanza: cento volte peggiore del rogo.

Ma torniamo alle conseguenze più negative che derivano, nella tradizione scolastica, dal fatto che l'insegnamento opera nella terra di nessuno di cui parlavamo prima. Il nome di Newton è legato alla prima costruzione della meccanica moderna, ma a nessuno verrebbe in mente di studiare la meccanica sui *Principia*. La cosiddetta *meccanica newtoniana* è tale solo per convenzione, poiché ha subito profonde trasformazioni di formulazione, di linguaggio e di interpretazione. La teoria della relatività speciale e la meccanica quantistica, per esempio, hanno indotto radicali variazioni nella formulazione della meccanica classica. E così è stato, in precedenza, per la termodinamica in relazione alla meccanica statistica. Il modo in cui la meccanica viene presentata è ben lontano dalla formulazione di Newton, tanto che nessuno pretende di dedurre la meccanica dai principi di Newton enunciati nella forma newtoniana. Lo stesso vale per l'elettromagnetismo in cui bisogna riconoscere che è più facile, per ragioni storiche, andare vicino a una formulazione assiomatica moderna. Diversa è la situazione per

quanto riguarda l'esposizione della relatività speciale che ha solo il torto di apparire (ma non di essere) 'facile'. Ciò che viene raccontato con dovizia di particolari è la serie di antinomie che le osservazioni sperimentali introducono nell'ambito classico. La parte del leone è svolta dalla cosiddetta 'Esperienza di Michelson e Morley' che è assunta, contrariamente a ogni evidenza storica, come prova sperimentale del secondo degli assiomi di Einstein. Da questi, in maniera più o meno elaborata (si tratta pur sempre di risolvere un sistema di equazioni lineari, e i compilatori di manuali ci vanno a nozze quando la possono *buttare in matematica*) si ricavano le trasformate di Lorentz. Queste forniscono la base per una serie di problemi che riguardano osservatori (antropomorfi) collocati su treni e razzi, per i quali le durate temporali e le distanze spaziali sono diverse. Bisogna riconoscere che questo riscuote gli allievi dalla tradizionale apatia. Solo che l'operazione nasconde il trucco, come ogni gioco di prestigio. In questo caso la cosa funziona così: si fa mostra di parlare di relatività, ma se ne parla dalla sponda della fisica classica. L'effetto che si produce è analogo a quello dei western classici, dove per gli indiani il treno è il 'bufalo fumante' e il fucile 'il bastone tonante'. Per i paradigmi dell'uomo bianco il treno è tutt'altro che un bufalo e il fucile non è un bastone e non c'è alcuna meraviglia nel fatto che abbiano proprietà del tutto diverse da un bufalo e da un bastone. Potremmo dire con Enrico Bellone³¹ che l'equivoco nasce dall'uso del dizionario sbagliato. Gli equivoci che si generano in questa operazione a proposito del tempo sono stati acutamente indicati da Elio Fabri in un divertente contributo in forma di dialogo galileiano.³²

Ciò che si dimentica è che la relatività si propone di descrivere la realtà fisica in termini di *assoluti* e non vi sono assoluti identificabili con lo spazio e il tempo classici: assoluto è solo lo *spaziotempo*, strumento concettuale che non esiste in fisica classica. Il fatto è che i concetti di spazio e di tempo non hanno alcun carattere ontologico, ma, al di fuori di un appropriato contesto teorico non sono neppure concetti. Scrive Mario Ageno:

Conviene ancora una volta ripetere che le grandezze fisiche non sono altro che costruzioni mentali, cioè dei concetti e che hanno quindi tutta la realtà dei concetti e nell'altro che la realtà dei concetti. Non sono (tanto per usare una frase di Heisenberg) «granuli rigidi di realtà». Noi non abbiamo 'scoperto' la massa, la temperatura, l'energia cinetica, ecc. Abbiamo fabbricato questi concetti, che come tali hanno realtà solo come oggetti e strumenti del nostro pensiero.³³

Qualche compilatore di manuali per i licei si inoltra nella dinamica relativistica giungendo ad affermare che la massa dipenda dalla velocità secondo la relazione

³¹ Bellone, Enrico (1986), *Il mondo di carta*, Milano, Edizioni Scientifiche e Tecniche Mondadori.

³² Fabri Elio (1982), *Dialogo sul tempo relativistico. Prima giornata*, «La Fisica nella Scuola», XV/2.

³³ Ageno, Mario (1970), *La costruzione operativa della fisica*, Torino, Boringhieri, cap. 9.

1. Generalità sulla didattica della fisica

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad [10]$$

dove m_0 è la ‘massa a riposo’. Anche questa formula è occasione di meraviglia (la massa che cresce con la velocità) e di una lunga serie di problemi, come ad esempio: *Un proiettile di ferro fermo ha una massa di 20 g. Viene sparato a una velocità che è $3/4$ di quella della luce. Determinare la sua massa.*

Non si può non restare meravigliati e chiedersi da dove vengano i 5,6 g di aumento di massa. Saranno nuovi atomi di ferro che si sono materializzati oppure saranno gli atomi già presenti che si sono trasformati in atomi di Tecnezio?

Agli autori sfugge il fatto che per poter fare una qualsiasi affermazione circa la massa relativistica è necessario averne prima dato una definizione. Tra l’altro, la [6], anche come definizione di massa, è per lo meno ridondante, com’è stato chiarito da Taylor e Wheeler qualche decennio fa³⁴ per cui è meglio riservare il nome di ‘massa’ a quella che una volta si chiamava ‘massa a riposo’. Qualche autore si spinge ad affermare che la cosiddetta ‘legge fondamentale delle dinamiche’ (l’assioma del moto di Newton) è ancora valida in meccanica relativistica a condizione che si abbia l’avvertenza di sostituire alla massa classica la massa relativistica definita dalla [6]. A dimostrazione del livello di sprovvedutezza a cui può portare l’ingenuo bricolage scientifico. L’obiettivo finale dell’esposizione è, comunque, in ogni caso, la *dimostrazione* dell’equivalenza tra massa ed energia, cioè la celeberrima formula

$$E = mc^2 \quad [11]$$

che è la porta d’ingresso a una ricca raccolta di problemi sulla massa che si trasforma in energia. A questa si associa talvolta l’aggettivo ‘pura’ il che suggerisce l’idea che non tutte le energie lo siano in equal grado.

Il fatto che, a distanza di un secolo dalla pubblicazione della prima memoria di Einstein, circolino per le scuole esposizioni falsamente divulgative come quelle che abbiamo descritto, ha ragioni storiche ben precise, attribuibili principalmente al fatto – scomodo, ma ineludibile – che la teoria della relatività (come tutte le teorie fisiche) richiede un appropriato linguaggio matematico e che qualsivoglia volgarizzazione che implichi cedimenti su questo terreno comporta terribili equivoci di comprensione. Per dirla in termini più crudi, qualunque esposizione che pretenda di fare a meno della rappresentazione quadrivettoriale di Minkowski è fatalmente falsa e si espone a irrimediabili fraintendimenti. Tutto questo è stato chiaramente stabilito da Taylor e

³⁴ Taylor – Wheeler (1966), cit.

Wheeler nella loro bellissima (e semplice) esposizione che abbiamo già citato.

In realtà, nella quasi totalità dei manuali scolastici, nel capitolo dedicato alla relatività – ma si potrebbe dire lo stesso per la meccanica quantistica – non si fa altro che descrivere le difficoltà che s’incontrano quando si vogliono conciliare meccanica ed elettromagnetismo classici. Si pretende di descrivere, cioè, la meccanica relativistica restando sulla sponda classica, quindi attribuendo alle varie grandezze (spazio, tempo, massa, impulso, ecc.) il significato che hanno in meccanica classica. Tutti i paradossi e i ‘miracoli’ della teoria della relatività discendono da ciò. La [11] è un chiaro esempio di questa inclinazione al trucco. Nel caso di due eventi *light-like* la relazione tra separazione spaziale x e temporale t è

$$x = ct \quad [12]$$

analoga alla [11].

Ma in questo caso a nessuno verrebbe in mente di interpretare questa come una trasformazione dello spazio nel tempo o viceversa. Analogamente, la [11] non esprime niente di misterioso riguardo alla trasformazione di materia in energia. Questa interpretazione deriva da due equivoci, l’uno molto più grave dell’altro. Del primo abbiamo parlato: attribuire ai termini ‘massa’ ed ‘energia’ il significato che hanno in fisica classica. Il secondo consiste nell’interpretare la massa come sinonimo di materia (intesa nel senso più ingenuo) e l’energia come una sorta di fluido immateriale. È comprensibile allora che quando si parla di annichilamento descritto dalla [11] insorga un qualche tipo di angoscia.

Tuttavia, sarebbe tempo che gli autori di manuali di fisica ne prendessero atto: la [11] non è una legge fisica. In fisica classica è falsa e in fisica relativistica è solo una relazione di equivalenza tra unità di misura. Memorabile lo scherzoso grido di dolore di Silvio Bergia: «Ma come, la formula più famosa della fisica non sarebbe altro che una tautologia?». ³⁵

12. La formazione culturale degli insegnanti

It is very necessary that those who are trying to learn from books the facts of physical science should be enabled to recognize these facts when they meet with them out-of-doors. Science appears to us with a very different aspect after we have found out [...] that we may find illustrations of the highest doctrines of science in games and gymnastics, in travelling by land and by water, in storms of the air and of the sea. This habit of recognizing principles amid the endless variety of their action

³⁵ Bergia, Silvio – Franco, Alessandro P. (2001), *Le strutture dello spaziotempo*, Bologna, CLUEB.

1. Generalità sulla didattica della fisica

[...] tends to rescue our scientific ideas from that vague condition in which we too often leave them buried among the other products of a lazy credulity.³⁶

Abbiamo già detto della modestia della preparazione culturale dei nostri insegnanti di fisica (parlando, naturalmente, dei grandi numeri). Le cause sono diverse: a) la tradizione; b) la formazione professionale; c) la cosa.

a) *La tradizione*

Non è il caso di distinguere tra il tipo di laurea di partenza; che sia in matematica o in fisica, la formazione è analoga. Ambedue i tipi di laureati hanno sostenuto un paio di esami di fisica ‘sperimentale’ ed è con questo bagaglio che entrano in classe, quando non sia sepolto sotto depositi successivi di contenuti culturali diversi. Tutti estratti dai libri, tutti preconfezionati. Limitiamoci a quelli che sono i capitoli tradizionali della fisica classica: la meccanica, l’ottica, la termologia, l’elettromagnetismo. L’unico tramite tra il laureato al quale si affida l’insegnamento della fisica e il mondo dei fenomeni è stato il libro di testo universitario. Quando l’insegnante racconta che tra due fili percorsi da corrente si producono delle forze dice una cosa vera, ma non ha alcuna idea della misura di verità che vi è nell’affermazione. Egli, infatti, ha solamente visto il disegno della cosa, non ha mai avuto l’occasione di sperimentare l’entità di queste forze. Analogamente, quando pensa a un fenomeno di diffrazione, pensa al disegno sul libro di testo, non a un fenomeno che – è il caso di dirlo – ha sotto gli occhi. I libri di testo scolastici sono la spia di questo tipo di cultura. Vi è infatti una sorta di rapporto dialettico tra le forme adottate dai manuali scolastici e la domanda espressa dagli insegnanti. Per questo i manuali sono il documento più importante per chi voglia studiare quale sia la concezione della fisica che sottostà alla didattica diffusa nelle nostre scuole. L’assioma condiviso dall’autore del manuale e dal fruitore (l’insegnante) è che *La fisica* è ciò che sta nel libro.

b) *La formazione professionale*

Nella scuola italiana il mestiere di insegnante si impara per progressivi adattamenti all’esistente. Si tratta di un processo che si potrebbe definire darwiniano. Il giovane docente si trova a vivere in un ambiente nel quale l’ultima cosa che gli si richiede è la preparazione culturale. Si esige l’adeguamento a una prassi consolidata a livello nazionale e locale, che tende a censurare come fastidiose le novità e le iniziative. Quindi la

³⁶ Maxwell, James C. (1986), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, New York, Dover Phoenix Editions, vol. 2, p. 248.

struttura, nel suo complesso, non chiede all'insegnante spirito critico e iniziativa autonoma, anzi ne paventa le manifestazioni. Tanto meno questi sono richiesti da quelli che dovrebbero essere gli utenti, cioè gli studenti e le famiglie. La situazione è tale che nessuno chiede veramente alla scuola di svolgere il suo ruolo istituzionale di promozione della crescita culturale. In realtà nessuno crede veramente che la formazione culturale dei giovani sia un obiettivo per il quale ci si debba impegnare.

c) *La cosa*

Quella che da qualche anno imperversa nella scuola italiana non ha un nome né una forma precisa. Qualcuno la chiama *didatticismo*, anche se ci sarebbero molti motivi contrari a questa denominazione. Ciò che accade – e che è in gran parte accaduto – è meglio interpretabile come azione politica, come operazione che utilizza un'istituzione (la scuola pubblica) per la creazione di nuovi centri di potere e l'affermazione di una parte degli operatori sugli altri. Una delle caratteristiche che vi si possono riconoscere è la negazione di qualsiasi risalto alla formazione culturale degli insegnanti. Da un lato si guarda alla 'materia' (la fisica nel nostro caso) come a materiale già elaborato in forme definitive, conservate nei manuali. Dall'altra si guarda all'insegnante come colui che ha il compito di prelevare questi contenuti e travasarli negli allievi nel modo più efficace e indolore possibile. D'altra parte sono già pronte anche le tecniche atte a garantire il felice esito dell'operazione di travaso. Quindi all'insegnante non si chiede la competenza culturale (se non quella meramente operativa), ma neppure quella didattica, poiché tutto è ridotto a τεχνη ('technè') già pronta e codificata. L'esempio più probante del processo regressivo che si è avuto negli ultimi decenni è l'affermazione dei *moduli* come modello di insegnamento avanzato. Che la fisica – o la filosofia o la letteratura – sia riducibile a moduli preconfezionati, a sorta di pezzi che si scelgono in una sorta di macelleria culturale è idea che può venire solo a chi abbia una ben scarsa conoscenza del carattere vivo e complesso (anche a livello elementare) della disciplina. Eppure gli insegnanti non hanno potuto opporre che qualche parvenza di resistenza a una trovata che ha suscitato l'adesione entusiastica delle gerarchie locali e ministeriali.

2 Sul lavoro in classe

1. La cultura fisica ingenua come ricchezza

Un francese che capiti a Londra trova che le cose sono molto cambiate nella filosofia come in tutto il resto. Ha lasciato il mondo *pieno* e lo trova *vuoto*. A Parigi l'universo lo si vede composto di vortici di materia sottile; a Londra nulla si vede di tutto questo. [...] Presso i cartesiani tutto avviene per effetto di un impulso incomprendibile; per Newton, invece, in forza di un'attrazione di cui non si conosce meglio la causa.¹

Una delle cose che distinguono l'insegnamento della fisica da quello di altre discipline, anche scientifiche, è che il discente possiede già un vasto bagaglio di conoscenze fenomeniche e teoriche in questo campo. Si tratta di una caratteristica che accomuna la fisica alla filosofia, poiché ambedue le discipline propongono al ragazzo (anche) questioni sulle quali ha riflettuto per conto suo e si è formato delle opinioni proprie sulla base delle esperienze compiute o, semplicemente, ha fatto suoi i concetti e i modi di pensare dell'ambiente culturale in cui vive. Si tratta della cosiddetta 'fisica intuitiva' e noi accetteremo questa denominazione per distinguerla dalla 'fisica razionale' che sarebbe l'oggetto dell'insegnamento, anche se la distinzione tra le due non è così facile come potrebbe apparire. Comunque, la fisica intuitiva è condizione necessaria all'esplicazione dell'azione didattica, poiché fornisce il codice linguistico comune che consente la comunicazione tra l'allievo e il maestro (e viceversa).

Abbiamo già rilevato che nei dizionari della fisica scolastica, di cui dovrebbe essere portatore l'insegnante, e della fisica intuitiva, la cui titolarità è dell'allievo, vi è una quantità di parole comuni: tempo, forza, calore, energia, raggi di luce, ecc. sulle quali si fonda la comunicazione tra i due. I termini sono gli stessi, ma i concetti che indicano poggiano su strutture teoriche diverse. Da qui il paradosso dell'insegnamento: il maestro deve utilizzare gli stessi termini per condurre l'allievo ad attribuire loro una valenza diversa. Obiettivo ambizioso e raramente raggiunto, come dimostrano le innumerevoli ricerche condotte in materia. La fisica intuitiva è costituita da un insieme di esperienze e di costrutti teorici che riguardano la meccanica dei solidi e dei fluidi, la termologia, l'ottica, l'acustica e la struttura della materia. Non si tratta solo della conoscenza dei nomi. Per conoscere il significato di concetti quali velocità, ombra, caldo, fusione, ecc. è necessario possedere un'ampia collezione di ricordi tra loro correlati e sintetizzati in semplici ma solide strutture teoriche. In questo dizionario il *calore* è un fluido imponderabile; il *colore* è una proprietà dei corpi, l'*horror vacui* è una evidenza sperimentale. In particolare, manca qualsiasi distinzione tra concetto e oggetto: la *forza* è quella 'cosa' che fa muovere gli oggetti, la *temperatura* la 'cosa' che rende caldi gli oggetti, la *luce* è la 'cosa' che li illumina. Questo sottintende che il

¹ Voltaire (2007), *Lettres philosophiques, lettre XIV* [1734], ed. italiana a cura di R. Campi, Firenze, Ed. Barbera, p. 70.

ragazzo coltivi l'idea che la sua fisica è oggettiva, ovvero che sia la sola possibile in quanto la *forza*, la *temperatura*, il *colore*, il *caldo* e il *freddo* sono di per sé.

L'antinomia dell'insegnamento di fisica consiste in questo: presuppone che l'allievo sia portatore di una fisica: quella che abbiamo indicato come *intuitiva*. Ne ha bisogno per raggiungere lo scopo di costruire una fisica superiore – quella che abbiamo indicato come *scolastica* – che sostituisca quella ingenua. Per la verità, la gran parte dell'insegnamento non mira a questo scopo. La fisica propedeutica alle materie tecniche, quella per cui lo studio della meccanica è necessario per lo studio delle macchine; l'elettromagnetismo come base per l'elettrotecnica, ecc. non si pone questi problemi. A questo tipo di insegnamento è funzionale la didattica modulistica che imperversa nella scuola secondaria. Il risultato di un insegnamento di questo genere è che l'allievo memorizza un certo numero di nozioni di fisica scolastica che archivia come tali (quando va bene come funzionali a studi tecnici successivi), ma la fisica intuitiva – la sua visione del mondo fisico, i paradigmi concettuali che utilizza per la sua interpretazione –, rimane quella che era prima di iniziare il corso. Ciò non di meno, la fisica intuitiva è una ricchezza culturale che non viene convenientemente valorizzata a livello scolastico e neppure utilizzata ai fini del suo superamento. Ai bambini delle scuole, una volta, era tassativamente vietato l'uso del dialetto anche nella comunicazione verbale. Solo troppo tardi, quando i dialetti si estinsero macinati nell'omogeneizzato linguistico che caratterizza oggi l'Italia, ci si rese conto della gravità della perdita culturale e si cercò di porvi rimedio con ulteriori, inutili, pannicelli caldi scolastici.

Che l'insegnamento della fisica abbia questo fine – di innalzamento del livello di percezione della realtà fisica – sfugge alla gran parte degli insegnanti che considererebbero velleitaria un'affermazione di questo genere. Anche se riempiono diligentemente fogli su fogli in cui distinguono – ipocritamente – il *sapere* dal *saper fare*, magari a proposito delle leggi di Maxwell (è noto, infatti, che «l'asino va legato dove vuole il padrone»).

ESPERIENZA

Ci si procurino due palle di gomma, un più grossa dell'altra, e le si osservino rimbalzare sul pavimento. Si tengano le due palle a una certa altezza, la più piccola sopra la più grande, e le si lascino cadere insieme. Si osserva che la più piccola rimbalza a un'altezza maggiore della quota di rilascio.

Se mai, la scuola primaria dovrebbe impegnarsi a compensare un fenomeno – lo abbiamo già segnalato – emerso negli ultimi decenni e che consiste in una progressiva perdita di cultura fisica intuitiva nei giovani. La cosa si spiega col fatto che quelli che erano bambini alcuni decenni fa avevano molte più opportunità di giocare e fare esperienza. L'uso del corpo nel gioco (e nel lavoro) era molto diffuso: biciclette, palle, carriole, carretti, archi e frecce, fionde elastiche e altro richiedevano e sviluppavano diverse abilità nel bambino e a queste corrispondevano conoscenze e teorizzazioni di

2. Sul lavoro in classe

fenomeni. Chi non ha mai giocato con una palla o provato a ‘fare il morto’ nell’acqua o cercato di accendere un fuoco di legna o osservato una candela consumarsi ha una cultura fisica inferiore rispetto a un altro che abbia fatto queste esperienze. Tutto questo è quasi negato ai bambini attuali che vivono esperienze controllate e preordinate come le merendine di cui si cibano.²

La scuola elementare e la media inferiore potrebbe dare un notevole contributo alla formazione scientifica degli adolescenti, evitando di infilare loro la testa in manuali scolastici in cui si parla di Big Bang e di elettroni (di carica negativa) in orbita intorno al nucleo (di carica positiva), ma fornendo l’opportunità di fare le esperienze di gioco (cioè di conoscenza) che il corrente stile di vita nega loro. C’è più fisica nelle attività che andavano sotto il nome di *giochi* che nei tre volumi (rigorosamente divisi in *moduli*) sotto i quali si seppellisce la gioia di scoprire e di accumulare esperienze.

Nella struttura scolastica attuale vi è stata una sorta di inversione dei ruoli. La scuola primaria ha rinunciato a insegnare l’ortografia e la tavola pitagorica e le ha sostituite con il racconto del Big Bang, della deriva dei continenti e delle centrali nucleari. Sono le università che, con corsi brevi e disperati, cercano di fare dell’alfabetizzazione in lingua italiana e in matematica. Questo si verifica anche nell’insegnamento della fisica: il professore di meccanica dovrà lanciare ruote da bicicletta nella sua aula per mostrare quella che una volta era esperienza comune: che, finché corrono, stanno su.

Ma all’università (e anche alla scuola media superiore) è tardi: il dizionario della fisica intuitiva è da tempo completato (o quasi) e il maestro deve far leva su quello che è stato accumulato per cercare di trasformarlo in conoscenza scientifica.

2. L’insegnamento e il dizionario

Nel dizionario, dunque, accadono cose diverse. Le interazioni tra livelli sono funzioni del tempo; una modificazione che si verifica in una data zona può indurre varianti leggere in un’altra zona o ristrutturazioni radicali in livelli apparentemente lontani; è presumibile, insomma, che i fenomeni osservabili nel dizionario non abbiano andamenti lineari, che non siano spiegabili con strategie per tentativo ed errore e che non siano imputabili a regole ristrette di causalità. Inoltre un dizionario è un processo aperto: esso interagisce con altri dizionari, ne ingloba a volte settori rilevanti e si ristruttura localmente cercando di raggiungere situazioni relativamente stabili.³

² A questa deriva culturale forse non è estranea neppure la tendenza, propugnata dal verbo didatticistico, di operare in modo che tutto ciò che accade a scuola sia previsto, anzi minutamente programmato.

³ Bellone, Enrico (1976), *Ipotesi sul dizionario dello scienziato*, in *Il mondo di carta*, Milano, Edizioni Scientifiche e Tecniche Mondadori, pp. 24.

Che ne sia consapevole o meno, l'insegnante è uno che suscita idee negli allievi. Lo strumento di cui si serve in quest'opera di inseminazione è la parola e le parole, in fisica come in ogni altra attività umana, ricavano il loro significato dal contesto in cui vengono usate. Vi è una immensa varietà di motti di spirito basati sul duplice significato di tante parole. Nel campo della fisica questi si chiamano, talvolta, *paradossi*. Sono basati su una sorta di gioco di destrezza che consiste nell'utilizzare una parola, secondo una data accezione, in un contesto che non le è proprio. Gli esempi più noti vengono dalla 'relatività speciale ad uso delle università popolari' e consistono in gemelli di età diversa, di regoli che si accorciano, di masse che tendono all'infinito, ecc. Ve n'è anche di più ingenui in fisica scolastica – come quello del viaggiatore che, trasportando una pesante valigia, «compie lavoro nullo» – ma, a ben pensarci, la paradossalità è un tratto peculiare (e positivo) della fisica di cui l'insegnante dovrebbe essere consapevole.

Uno dei misteri dell'insegnamento è il seguente: nella maggioranza dei casi, la gran parte delle nozioni trattate nei corsi di fisica elementare va perduto. Vi sono tuttavia *parole* che sopravvivono alla dispersione. Ad esempio, energia, gravità, calore, temperatura. Altri concetti, altrettanto indispensabili per l'interpretazione della realtà (massa, entropia, quantità di moto, differenza di potenziale, intensità del campo elettrico, per citarne alcuni) non entrano a far parte del linguaggio, pur avendo lo stesso rilievo delle prime. Il motivo è che le prime parole trovano un ambiente intellettuale adatto ad accettarle. Per il calore è ovvio: è una parola che appartiene già al lessico comune e fa riferimento a una sorta di fluido (che richiama il *calorico* degli alchimisti) che fluisce dai corpi caldi ai freddi. Pertanto, il termine *calore* è 'riconosciuto' dal ragazzo nel quale, però, evoca un concetto ben diverso da quello che ne ha – o ne dovrebbe avere – l'insegnante. Serve, se mai, a conferire una sorta di riconoscimento scientifico a un concetto naïf. L'analogo vale per la parola *energia*. L'idea comunemente associata a questo concetto è ben diversa da quella descritta con ammirevole chiarezza da Richard Feynmann.⁴ L'*energia* di cui parlano i politici e gli imbonitori televisivi è un *fluido imponderabile* che non si conserva. Può infatti essere emesso a volontà dalle mani dei pranoterapeuti ed essere persino fotografato. È anche caratterizzato dal fatto che si può consumare; tant'è vero che se ne raccomanda il 'risparmio'.⁵ Il fatto è che in nessun contesto come nella fisica le parole diventano pietre:⁶ una volta entrate nell'uso, nessuno si chiede più quale sia il loro reale significato. Non si pensi poi che gli insegnanti siano immuni da questa visione dell'energia: ne costituisce prova ciò che si legge su tanti manuali a proposito dell'equivalenza relativistica tra massa ed

⁴ Feynmann, Richard (1971), *La legge fisica*, Torino, Boringhieri, cap. III, pp. 67-93.

⁵ A una grandezza strettamente legata all'energia (l'entropia) è toccata una sorte ben diversa: vive solo in ambienti intellettuali ristretti. Nella scuola non ha vita facile, tant'è vero che su di essa circolano alcune leggende metropolitane che riguardano raccolte 'ordinate' di libri che avrebbero un'entropia minore dello stesso scaffale con i libri 'in disordine'.

⁶ Levi, Carlo (1955), *Le parole sono pietre*, Torino, Einaudi.

2. Sul lavoro in classe

energia, insomma della famosa equazione $E = mc^2$ e cioè che la massa si trasforma in energia ‘pura’. Ciò rivela che si pensa all’energia come a una sorta di *quid* metafisico, come se l’energia associata a un elettrone in moto o a un piatto di rigatoni o a un’onda elettromagnetica non fosse veramente pura.

Una volta che l’insegnante l’abbia pronunciata, una parola assume la consistenza dell’*esistente*. Si pensi alla *gravità*. Con questo *escamotage* concettuale, Newton riduce a unità il moto dei pianeti e il peso dei corpi. Egli si rende conto del prezzo pesante che rappresenta l’introduzione di questa ‘qualità occulta’ – a proposito della quale si rifiuta di «fingere ipotesi» – ma lo considera equo, in confronto al portato di economia di pensiero che consegue alla sua introduzione. Tuttavia, ciò che per lo stesso Newton altro non era che un’utile ipotesi, presso gli insegnanti e gli studenti diventa un *fatto* forse proprio a causa della contiguità con certe proprietà occulte che attengono alla magia. Per questo, basta pronunciare la parola (*it’s the gravity, stupid*) perché l’uditore ricavi l’impressione di aver capito, né lo sfiora il senso di mistero che la parola stessa dovrebbe evocare.

Agli insegnanti che pensano che la nozione scolastica di temperatura sia superiore a quella comune, proponiamo di assegnare il seguente problema: *un cilindro di volume 24 litri contiene una mole di gas Neon alla pressione di 1 atm. Determinare la temperatura delle molecole (di ciascuna).*

Tutto questo porta ad avanzare l’ipotesi che la fortuna di alcune *parole* della fisica – energia, gravità, temperatura, forza, ecc. – non coincida con la fortuna dei concetti. Quest’ultima è molto limitata presso la maggior parte degli studenti. Questi sono portatori di reti concettuali ingenue – nel senso dell’etimo – a cui corrisponde un determinato dizionario. Può accadere che alcune parole della fisica scolastica coincidano con quelle che fanno parte del dizionario naïf o che un concetto si presti a essere riconosciuto come appartenente alla rete concettuale corrispondente. In tal caso la parola viene senz’altro adottata e acquista un valore diverso: riceve lo *status* di concetto *scientifico*. Non si spiegherebbe altrimenti come tante persone che non hanno idea neppure della sua unità di misura, parlino con sicurezza di produzione di energia, di risparmio energetico, ecc. Per la gran parte dei casi si tratta di millantato credito, gli insegnanti non si facciano illusioni: la gravità, l’inerzia, la forza centrifuga, i campi elettromagnetici, ecc. sono etichette alle quali corrispondono contenuti concettuali pre-galileiani o che attengono più alla magia che alla scienza.

3. Il ragionamento fenomeno-logico

La teoria atomica ha nella fisica una funzione analoga a quella di certe rappresentazioni matematiche ausiliari: è un *modello* matematico per la riproduzione dei fat-

ti [...] Tra le rappresentazioni matematiche ausiliari potranno riuscire utili anche gli spazi a più dimensioni. Non è necessario considerare questi spazi qualcosa di più che degli enti mentali.⁷

Il bypass dei manuali scolastici, ovvero l'attingere direttamente alle fonti della fisica, è esercizio che gli insegnanti dovrebbero praticare – quando possibile – in quanto utile a sgombrare la mente da una quantità di modi di ragionare che, a ben vedere, non sono altro che convenzioni. Un esempio è fornito da Ampère che dedica più di una pagina della “memoria originale”⁸ alla descrizione e alla discussione di un fenomeno che tutti i libri di testo sbrigliano in poche righe: due fili paralleli, percorsi da corrente nello stesso verso, si attraggono. Il fatto che si dedichi uno spazio tanto ridotto a un'osservazione che è alla base di un campo fenomenico immenso qual è l'elettromagnetismo attiene a un fenomeno pedagogico di cui abbiamo parlato più volte, e che potremmo indicare come *processo di sterilizzazione pedagogica*, in base al quale ciò che era un'idea sorprendente e difficile da accettare per le menti più elevate, dopo qualche secolo diventa banale e proponibile ai più bassi livelli scolastici. Ma non perché il livello concettuale dei discenti si sia elevato; ma perché l'idea nuova viene in qualche modo edulcorata, adattata alle forme comuni del pensiero, svuotata del suo potenziale concettuale eversivo, tale da non costituire più alimento e stimolo concettuale. In effetti, Ampère, con la sua comunicazione all'Accademia, deve convincere la comunità scientifica che l'attrazione tra i due fili percorsi da corrente è un fenomeno nuovo, diverso da quello, comune, dell'attrazione elettrostatica. Per questo ha bisogno di precisare che l'attrazione tra i due fili cessa non appena uno dei due viene staccato dal morsetto dell'alimentatore e che l'attrazione si manifesta quando i due fili vengono connessi agli stessi morsetti (se la forza fosse elettrostatica, in questo caso si avrebbe repulsione). Aggiunge che, se liberi di muoversi, i due fili si attaccano l'uno all'altro «come due magneti» e che non si separano dopo che sono venuti a contatto, come accadrebbe se fossero portatori di cariche elettriche di segno opposto (si pensi al 'pendolino' elettrico). Omette di indicare il fatto più significativo: che tre o più fili, percorsi da correnti nello stesso verso, si attraggono, cosa che non potrebbe accadere nel caso fossero elettricamente carichi. Parimenti significativo è un altro fatto, che Ampère non segnala: che, dati due fili che si attraggono, un terzo filo percorso da corrente in senso opposto, viene respinto da ambedue.

La scoperta dell'interazione elettromagnetica mette in evidenza due importanti aspetti del procedere scientifico. Prima di tutto pone la questione di decidere se ci troviamo effettivamente di fronte a un fenomeno nuovo o non piuttosto a una variante

⁷ Mach, Ernst (1968), *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico* [1883], ed. italiana a cura di A. D'Elia, Torino, Paolo Boringhieri Editore, pp. 478.

⁸ Ampère, André-Marie (1820), *De l'action mutuelle de deux courants électriques*, «Ann. Chim. Phys.», Ser. II/15, p. 59.

2. Sul lavoro in classe

di un fenomeno già conosciuto, e poi di riflettere in termini qualitativi sui due fenomeni, al fine di distinguerli operativamente. Cose che non si fanno mai nella didattica dove, troppo spesso, gli aspetti fenomenici vengono nascosti dietro il linguaggio matematico. Nella tradizione scolastica italiana, il linguaggio matematico, che dovrebbe servire a descrivere quantitativamente e qualitativamente i fenomeni, diventa fine a se stesso, pura esercitazione linguistica nella quale l'ultima delle preoccupazioni è il legame con i fenomeni. La procedura analitica nella risoluzione dei problemi di fisica, di prammatica nella scuola italiana, spesso fa da schermo alla comprensione fenomenologica. Consideriamo il classico problema del carrello trascinato da un peso.

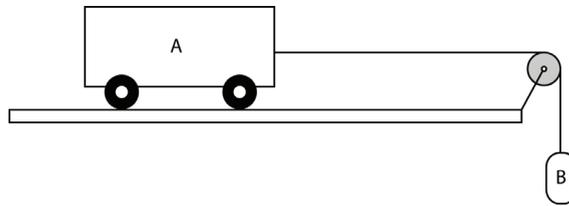


Figura 1. Un carrello su un piano orizzontale, trascinato da un peso.

Tutti gli studenti sanno calcolare la tensione del filo.

$$t = \frac{M}{M + m} mg \quad [1]$$

Tuttavia, molti hanno difficoltà a rispondere alla seguente domanda qualitativa: *La forza applicata al carrello è maggiore, minore o uguale al peso di B?* La risposta più comune è che la forza è uguale. Che è anche l'opinione di molti insegnanti per i quali l'unico criterio di verità è la corrispondenza tra il risultato ottenuto e quello riportato in fondo al testo. Questo esempio dimostra come la capacità di risolvere i problemi numerici non assicuri la reale padronanza dei principi che sostengono l'interpretazione dei fenomeni fisici. La stessa domanda si può rafforzare formulandola nei termini seguenti: *Quanto diventa la tensione nel caso in cui il carrello A pesi molto di più del peso B? e/o: E nel caso che B pesi molto più di A?*

Un altro caso in cui si ottengono risposte sorprendenti a domande qualitative è il seguente.

PROBLEMA: NS è un magnete rettilineo fermo e S una sferetta elettricamente carica (Figura 2).

- a. determinare la direzione verso la quale si sposta la sferetta una volta lasciata libera (ferma);
- b. rispondere alla stessa domanda nel caso che la sferetta sia lanciata perpendicolarmente all'asse del magnete;
- c. rispondere alla stessa domanda nel caso che la sferetta sia lanciata lungo l'asse del magnete.



Figura 2. Un magnete e una carica elettrica.

Un ruolo importante nel travaglio psicologico che dovrebbe essere innescato dallo studio della fisica è rappresentato dai concetti di causa ed effetto. Vi è un fenomeno comune nel quale la fisica naïf e la scolastica indicano cause diverse per uno stesso effetto ed è quello del bere attraverso una cannuccia. Questo viene interpretato come dovuto all'*horror vacui* nella fisica ingenua e alla pressione atmosferica nella scolastica. Questo consente allora di progettare esperimenti che permettano di scegliere tra le due opzioni. Si può proporre ad esempio un problema come il seguente: spiegare il funzionamento della ventosa che si utilizza per liberare uno scarico otturato.

Ma vi sono casi in cui è problematico distinguere la causa dall'effetto. Per esempio, nel caso del moto di un fluido in un condotto, il gradiente di pressione è *causa* del moto del fluido, ma nel caso dell'*effetto Magnus*, il gradiente di pressione è *effetto* del moto del fluido. Cose analoghe valgono per la corrente e la tensione elettrica. Talvolta, si ha uno scambio tra causa ed effetto. Un esempio tra i più comuni è il seguente: si prende come spunto la fotografia di un astronauta che, chiuso nella sua tuta, cammina sulla superficie della luna. Alla domanda «Perché sulla luna il peso è inferiore che sulla terra» la risposta più comune è «Perché manca l'aria». Ciò dimostra che ciò che colpisce i ragazzi è la concomitanza delle due cose, tra le quali vi è, in questo caso, una relazione, ma dove i ruoli di causa ed effetto sono scambiati. Il punto non è quello di fornire la spiegazione corretta, ma di proporre come si potrebbe controllare, in laboratorio, se un peso minore dipenda oppure no dalla mancanza d'aria.

In fondo, le conoscenze di fisica dovrebbero manifestarsi come capacità di prevedere i fenomeni. Un terreno sul quale questa capacità è solo raramente messa alla prova è quella dei circuiti in corrente continua, che pure si prestano a varie attività che coinvolgono gli aspetti fenomenici. Si consideri, ad esempio, il circuito rappresentato in Figura 3 (facilmente realizzabile con piccole lampadine da torcia e fili di rame saldati in modo da formare un tetraedro).

2. Sul lavoro in classe

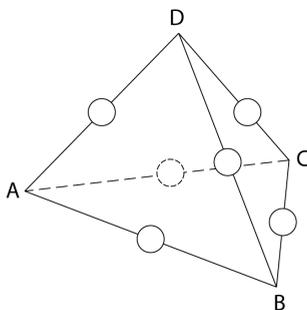


Figura 3. Una struttura elettrica che può mettere alla prova capacità fenomeno-logiche.

Le domande che si possono porre, con risposte immediatamente verificabili, possono essere le seguenti:

- connesso l'alimentatore ai nodi A e B, le lampadine saranno egualmente luminose oppure no?
- che succede se si svita la lampadina CD?
- che succede se si svita la BC?
- che succede se si svita la AB?
- che succede se si cortocircuita la CD?
- che succede se si cortocircuita la BC?
- quali lampade si spengono se si cortocircuita la AD?

4. La corrente prassi di laboratorio

In troppi esperimenti si fanno delle vere truffe ai danni dello studente e troppi esperimenti dimostrano in realtà cose del tutto diverse da ciò che si vorrebbe dimostrare con essi.⁹

Ogni istituto scolastico è dotato di un'aula per dimostrazioni e di una per la sperimentazione diretta degli allievi. La prima è dotata di un pesante bancone (con vecchi, enormi, reostati), un armadio (con un monumentale *rocchetto di Ruhmkorff* e *bottiglie di Leyda* di varie dimensioni) e i banchi disposti a gradinata. Il grosso degli strumenti è conservato in altri armadi che si trovano in un'aula adiacente e da cui vengono prelevati alla bisogna. L'aula per dimostrazioni di fisica è simbolo di una scuola che non esiste più,

⁹ Ageno, Mario (1968), *Alcune considerazioni sull'insegnamento della fisica nelle scuole secondarie*, «Giornale di Fisica», IX, p. 54.

nella quale al centro dell'azione educativa erano il professore e la disciplina di cui egli era il depositario e il solo autorizzato a evocarne le manifestazioni.

All'opposto della *dimostrazione* vi è la *sperimentazione*: la prima celebrata dal solo professore; la seconda condotta dagli allievi singolarmente o in gruppo. A quest'ultima si riserva un'apposita aula, che anche alla vista appare come *democratica*. Non vi è, infatti, una cattedra, ma solo tavoli (tutti uguali tra loro) e numerosi armadi che custodiscono i *kit* degli esperimenti: sei termometri, sei molle tenere e sei dure, sei tester, sei specchi concavi, ecc. Si tratta di un portato del corso PSSC (Physical Science Study Committee), elaborato negli Stati Uniti e diffuso in Italia negli anni '60 e '70. Le due aule sono strumenti antitetici solo per quanto concerne le didattiche, i paradigmi epistemologici che le sottendono sono, infatti, gli stessi.

Che siano diverse le forme dell'approccio è manifesto: da una parte gli studenti sono chiamati ad assistere a un rito celebrato dal solo professore che, quando possibile, si avvale della collaborazione del *tecnico*. Gli strumenti sono progettati all'uopo e le ditte produttrici forniscono guide pratiche all'effettuazione degli esperimenti, con schemi accurati per la disposizione dei vari componenti. Gli esempi di esperienze di questi tipo sono molti: la bomba di Mahler, il tubo di Weinhold, i risuonatori di Helmholtz, il pendolo di Waltenhofen, il tubo di Kundt, ecc. Forse non è privo di significato il fatto che i nomi che ricorrono siano in gran parte tedeschi. Il fatto è che la scuola tedesca ha rappresentato il modello di insegnamento scientifico a cui si è ispirata la scuola europea (e non solo) fino a qualche decennio fa. Ne è testimonianza l'opera veramente magistrale di Robert Wichard Pohl (1884-1976)¹⁰ che ha avuto anche un'edizione italiana. Se questa è l'aula *tedesca*, potremmo qualificare l'altra come *americana*, sono gli stessi studenti a operare. Ciascun gruppo realizza lo stesso circuito elettrico, con il reostato, il tester e i cavetti messi a disposizione allo scopo (di lunghezza opportuna e nel numero necessario): il tutto estratto dall'armadio in cui si 'conserva' la 'Legge di Ohm'. Ogni gruppo provvede a variare la tensione e a leggere la corrente nello stesso modo e riporta i dati in un grafico tensione/corrente. Tutti concordano sul 'fatto' che la tensione è proporzionale all'intensità di corrente e quindi si enuncia la 'Legge di Ohm'. Il tutto entro il tempo stabilito di ore due (anche perché bisogna sgombrare i tavoli per far posto all'esperienza sulla 'Legge di Hooke').

Le differenze tra le due didattiche sono evidenti: nel primo caso il professore è il solo abilitato a porre la domanda alla natura e a interpretarne la risposta; nel secondo è la comunità degli studenti, democraticamente, a fare la stessa cosa, con la guida dell'insegnante, naturalmente.

Già alla fine degli anni '60 Vasco Ronchi e Mario Ageno criticavano aspramente, come velleitaria e mistificatoria questa prassi didattica. Inascoltati, tanto il modello PSSC appariva divertente per i ragazzi e gratificante per gli insegnanti. Infatti, come

¹⁰ Pohl, Robert Wichard (1971), *Trattato di fisica*, Padova, Piccin, vol. I.

2. Sul lavoro in classe

abbiamo detto, fu negli anni '70 che si diffusero nelle scuole le aule per la sperimentazione degli allievi. E, insieme alle aule, la convinzione che questa e solo questa sia l'attività di laboratorio possibile nella scuola. Tant'è vero che anche nei concorsi a cattedra si richiede ai concorrenti di realizzare una di queste esperienze: la 'Legge di Hooke', la 'Seconda legge di Newton', la 'Legge della rifrazione', ecc. Tra l'attività di dimostrazione celebrata dal professore e quella di sperimentazione diretta degli allievi, una differenza sostanziale c'è e consiste nel fatto che le dimostrazioni hanno prevalentemente carattere qualitativo, cioè hanno lo scopo di evidenziare fenomeni di cui l'allievo non ha esperienza: le scariche in una macchina di Wimshurst, i nodi in un tubo di Kundt, gli effetti giroscopici, gli emisferi di Magdeburgo, ecc. Per contro, nel laboratorio di stile americano l'allievo fa qualcosa di diverso: compie misurazioni, raccoglie e correla dati e, infine, li sintetizza in una relazione matematica. Ad esempio, esprime la relazione tra periodo di un pendolo e la sua lunghezza, tra tensione e corrente in un conduttore, tra forza applicata a un carrello e l'accelerazione, ecc. Questa è stata la vera novità introdotta nella scuola italiana dal PSSC.¹¹

Una curiosa analogia: gli anni della diffusione della pedagogia del PSSC nella scuola secondaria italiana sono gli stessi del mutamento della liturgia nella Chiesa cattolica, conseguente al grande Concilio Vaticano. Dal rito officiato dal sacerdote con il viso rivolto all'altare e le spalle ai fedeli, si passa a una nuova liturgia, nella quale sono attori i fedeli stessi, in comunione con il celebrante. Purché il paragone non appaia irrispettoso, nel passaggio dal rito tedesco, vigente nella scuola fino agli anni '60, al rito americano, convogliato dal PSSC, si verifica qualcosa di analogo. Ma solo nelle intenzioni.

5. PSSC all'italiana

Dopo quarant'anni di ricerca sul fenomeno che chiamiamo elettromagnetismo sono ben consapevole di non sapere in quale modo insegnare la mia materia. Tutto ciò che posso fare è impiegare degli esempi specifici e concreti e sperare, mediante la dimostrazione, di illuminare i miei studenti sulla materia, fino al giorno in cui, si spera, succeda il miracolo per ciascuno di loro, come è avvenuto a me (benché ciò possa avvenire molto tempo dopo la laurea, come nel mio caso). Se ciò avverrà, proveranno un entusiasmo nuovo per l'elettromagnetismo, comprenderanno quali potenzialità ancora sconosciute abbia, pur sapendo con certezza che cose quali le linee del campo magnetico, le forze elettromotrici e la corrente stessa sono tutte creazioni della mente.¹²

¹¹ PSSC (1963), *Fisica*, a cura del Comitato per lo Studio della Scienza Fisica, Bologna, Zanichelli.

¹² Laithwaite, Eric (1994), *An Inventor in the Garden of Eden*, Cambridge, Cambridge University Press, (ed. it. *Un inventore nel Giardino dell'Eden*, Bari, Dedalo, 1996).

Il corso PSSC, edito in italiano dalla casa editrice Zanichelli¹³ nonostante il sostegno di illuminati ispettori ministeriali che promossero diversi corsi di preparazione per gli insegnanti, non ebbe grande diffusione come tale. Tuttavia, provocò un profondo mutamento nella struttura dei manuali scolastici e nella prassi didattica. Gli autori di libri di testo cominciarono a introdurre i problemi numerici alla fine dei capitoli e a far precedere l'enunciazione di una legge dalla descrizione di una o più esperienze (quasi sempre simulate) allo scopo di fornire un sostegno sperimentale alla legge stessa. Accanto al testo vero e proprio, negli anni '70 cominciarono ad apparire delle *Guide di laboratorio* che avevano lo scopo di fornire un supporto agli allievi (e agli insegnanti) nell'attività sperimentale. Tutto questo presupponeva, ovviamente, l'esistenza negli istituti scolastici delle aule attrezzate allo scopo, dotate cioè degli strumenti adatti a condurre le prove descritte nelle guide. Si aprì quindi un mercato nuovo per le ditte produttrici di questi strumenti. Tra i più diffusi vi fu la rotaia a cuscinio d'aria, a cui si associarono diversi tipi di cronometro, fino ad arrivare al tipo a traguardi ottici con lettura digitale (naturalmente al millisecondo). Con la diffusione dei calcolatori, le scuole si dotarono di orologi interfacciati direttamente al computer: cosa che consente di ottenere in tempo reale il grafico spazio/tempo o anche velocità/tempo. In modo da costringere gli allievi a convenire che tra le due grandezze vi è, senza dubbio, una relazione di proporzionalità diretta. Si tratta di un PSSC all'italiana. Infatti, gli strumenti proposti per l'attività degli allievi dal corso originale erano, volutamente, straordinariamente semplici. Tali, anzi, da poter essere realizzati o migliorati dagli studenti stessi. Bilance realizzate con una cannuccia da bibita, pistoni costituiti da siringhe per uso medico, pattini a rotelle per eliminare gli attriti, orologi costituiti da campanelli elettrici, stroboscopi realizzati con dischi di cartone girevoli, cannoni elettronici costituiti da 'occhi magici' recuperati da vecchie radio, e così via. Tutto questo per una precisa scelta educativa e cioè per far sì che l'allievo avesse la sensazione di partecipare direttamente alla costruzione delle proprie conoscenze e inoltre che non perdesse la consapevolezza che uno strumento di misura, per quanto complesso, è pur sempre basato su principi semplici. Quando si sostituisce il 'marcatempo a campanello' con un cronometro elettronico e la 'bilancia a cannuccia' con una bilancia digitale si compie un'operazione con una precisa connotazione didattica e anche epistemologica. In altre parole, con un'operazione gattopardesca, si è presa solo la parte superficiale del PSSC e si è mantenuto il vecchio impianto pedagogico. Questa prassi è entrata a far parte integrante delle indicazioni ministeriali che arrivano a stabilire che una fissata percentuale delle ore di insegnamento dev'essere dedicata all'attività di laboratorio, come se questa fosse, di per sé, indicatore attendibile della buona qualità della didattica. La conseguenza è che ogni scuola dispone di un certo numero di esperienze standard in corrispondenza biunivoca con i *kit* di attrezzi all'uopo disposti,

¹³ PSSC (1963), *Fisica*, cit.

2. Sul lavoro in classe

alle quali presiede un tecnico di laboratorio o un insegnante tecnico-pratico che ha il compito di guidare gli allievi all'effettuazione delle esperienze. L'esito finale è la compilazione di una relazione in cui l'allievo (o il gruppo) riporta i risultati delle misure, li mette in relazione in una tabella e poi in un grafico cartesiano e da questo ricava la legge. Molte guide di laboratorio forniscono anche relazioni prestampate, nelle quali gli allievi devono riportare i loro risultati negli spazi allo scopo predisposti. È stata questa pratica didattica che ha dato origine alla 'teoria degli errori'.

6. Un'errata 'teoria degli errori'

Che cosa vuol dire misurare *esattamente* le condizioni iniziali di un sistema? Vuol forse dire che il risultato di ciascuna misura è un *numero reale*, ovvero un numero con infinite cifre decimali? È assurdo. Ogni apparecchio di misura – anche solo pensabile – ha una sua *precisione* finita e il risultato di una misura è sempre tutto un intervallo di numeri reali. [...] Il passaggio al limite in cui la precisione è infinita costituisce un'indebita *estrapolazione* che, quando è stata effettuata con leggerezza, ha generato non pochi equivoci. La misura *esatta* non solo non è ottenibile, ma quando si riflette bene ci si accorge che non ha nemmeno senso.¹⁴

Molti libri di testo di fisica dedicano uno dei primi capitoli alla cosiddetta 'teoria degli errori', fornendo una serie di norme di comportamento a cui attenersi nell'elaborazione dei dati ricavati dalle misure. Sorprendentemente, queste norme trovano largo spazio nell'insegnamento, anche se, nella maggior parte dei casi sono inapplicabili e rendono inutilmente pedante un'attività per la quale non è possibile fornire norme assolute e generali a cui attenersi. È opinione dello scrivente che la popolarità scolastica di queste questioni (distribuzione gaussiana, scarto quadratico medio, propagazione degli errori, ecc.) sia dovuta a due fattori: 1) il fatto che gli insegnanti tendono a 'buttarla in matematica' e 2) il carattere 'catechistico' dell'argomento, ben rilevato da Elio Fabri in un acuto scritto di qualche anno fa.¹⁵

Alla base della trattazione scolastica della 'teoria degli errori' vi è il mito della gaussiana, ovvero l'assunto che la distribuzione degli errori segua la legge di distribuzione 'normale' espressa dall'equazione

$$y = k \exp(-h^2 x^2) \quad [2]$$

¹⁴ Toraldo di Francia, Giuliano (1990), *Un universo troppo semplice*, Milano, Feltrinelli.

¹⁵ Fabri, Elio (1995), *Elaborazione dei dati sperimentali. La cosiddetta "teoria degli errori"*, «La Fisica nella Scuola», xxviii/3, pp. 118-124.

la cui rappresentazione ha l'andamento, che non manca mai nei libri di testo (Figura 4).

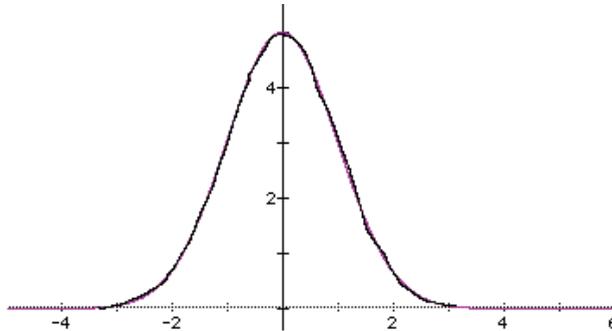


Figura 4. La gaussiana viene sempre assunta come legge di distribuzione degli errori casuali.

Da questa scelta si ricava che il valore più vicino al valore ‘vero’ è la media aritmetica delle misure, alla quale va associata la deviazione standard, ecc. Il guaio è che, implicitamente, si contrabbanda l’idea che tutte le distribuzioni di frequenza siano descritte dalla legge normale, anche se, in effetti non è così.

A questo proposito, proponiamo un solo esempio. Immaginiamo di aver misurato, con un calibro, i diametri di un gran numero di sfere da cuscinetto e di aver trovato che la distribuzione dei valori sia ben descritta dalla legge normale.

Le masse delle sferette vanno con il loro volume, cioè sono proporzionali al cubo del diametro. Ne deriva che la distribuzione delle masse non può essere descritta dalla legge normale. Se avessimo pesato le sferette, invece che misurarle, avremmo trovato una distribuzione che segue una legge diversa.

Il fatto che le distribuzioni non sempre vadano con la legge normale è ben presente ai fisici sperimentali che si attengono sempre a una grande cautela. Un caso ben noto in cui la legge normale non si applica è nelle misure di bassa radioattività.

Nei manuali scolastici, a proposito della dispersione dei dati sperimentali, si parte sempre da un falso, facendo l’esempio di una misura diretta (generalmente di lunghezza) che fornisce una varietà di risultati. Cosa che non si verifica mai nelle misure che si eseguono in un laboratorio scolastico. Accade invece che gruppi diversi di studenti, con strumenti diversi, misurino la stessa grandezza su oggetti diversi. Per esempio, durate di oscillazioni di un pendolo, o la massa di bulloni o l’allungamento di molle o resistenze elettriche. Se due studenti misurano valori diversi per la corrente in una determinata resistenza connessa a una batteria da 4,5 V è perché utilizzano due resistori che solo nominalmente hanno la stessa resistenza e/o due amperometri diversi. Generalmente, le variazioni che si ottengono sulle misure didattiche sono dovute al variare

2. Sul lavoro in classe

dei parametri che determinano l'evoluzione del fenomeno. Ciò è diverso dalla situazione di chi cerca di determinare la lunghezza d'onda di una riga spettrale su un reticolo applicato a un oculare.

Il fatto è che il risultato di una misura ha un significato che dipende dal procedimento seguito per raggiungerlo e questo significato concerne una previsione che ci sentiamo autorizzati a fare sull'esito delle misure che si potranno fare in futuro. Il concetto che dovrebbe stare alla base della riflessione didattica sulla misura è quello di *riproducibilità*. Nei manuali scolastici non manca mai un capitolo dedicato alla 'teoria degli errori' che partorisce alcune norme a cui attenersi quando si debbano combinare misure diverse. Tuttavia, di tratta di regole che servono solo a risolvere i problemi posti alla fine di quel capitolo e che vengono – giustamente – dimenticate nel seguito. Una traccia ne rimane nell'attività di laboratorio, quando si raccomanda all'allievo di riportare sul grafico cartesiano anche le incertezze sui valori ottenuti, in modo che su di essi sia sempre possibile far passare una retta. È infatti molto imbarazzante per l'insegnante la situazione che si produce quando i punti (o i rettangoli) che rappresentano, ad esempio, le coppie di valori corrispondenti di tensione e corrente, si rifiutano di giacere su una stessa retta. Eppure, questo dovrebbe essere il caso più interessante per un buon insegnante: quello che consente di riflettere sulla congruità degli strumenti usati, sull'attendibilità dei risultati ottenuti e sui modi diversi di migliorare la prova. Invece, generalmente, tutto si risolve cambiando il tester.

7. Epistemologia e tautologie in laboratorio

Quando Galilei fece rotolare le sue sfere su un piano inclinato, con un peso scelto da lui stesso, e Torricelli fece sostenere all'aria un peso, che egli stesso sapeva di già uguale a quello noto di una colonna d'acqua, e più tardi Stahl trasformò i metalli in calce, e questa di nuovo in metallo, togliendovi e aggiungendovi qualche cosa, fu una rivelazione luminosa per tutti gli investigatori della natura. Essi compresero che la ragione vede solo ciò che lei stessa produce secondo il proprio disegno, e che, con principi dei suoi giudizi secondo leggi immutabili, deve essa entrare innanzi e costringere la natura a rispondere alle sue domande; e non lasciarsi guidare da lei, per dir così, colle redini; perché altrimenti le nostre osservazioni, fatte a caso e senza un disegno prestabilito, non metterebbero capo alla legge necessaria, che la ragione cerca e di cui ha bisogno. [...] La fisica pertanto è debitrice di così felice rivoluzione, compiutasi nel suo metodo, sola a questa idea, che la ragione deve (senza fantasticare intorno ad essa) cercare nella natura, conformemente a quello che essa stessa vi pone, ciò che deve apprendere, e di cui nulla potrebbe da sé stessa sapere. Così la fisica ha potuto prima d'ogni altra disciplina esser posta sulla via sicura della scienza, laddove da tanti secoli essa non era stata altro che un semplice brancolamento.¹⁶

¹⁶ Kant, Immanuel (2005), *Critica della ragion pura* [1781], Prefazione alla seconda edizione. trad. it. G. Gentile e G. Lombardo Radice, Bari, Laterza, p. 15.

Le case produttrici di materiale didattico hanno in catalogo una quantità di apparecchiature progettate allo scopo di ‘dimostrare i principi’. Mi riferisco alle rotaie a cuscinio d’aria progettate allo scopo di dimostrare il principio d’inerzia o la legge fondamentale della meccanica. Tra questi vi è un complesso apparato che dovrebbe servire a dimostrare che la circuitazione del campo elettrostatico è nulla mentre quella del campo magnetico è proporzionale alla corrente concatenata. Alla base di queste dimostrazioni vi sono solo gravi errori epistemologici e pedagogici.

In primo luogo è da osservare che ‘dimostrare un principio’ è di per sé un ossimoro. Un principio preso da solo è una proposizione che non è né vera né falsa: semplicemente, è priva di senso. Ad esempio l’affermazione che «un corpo permane nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme fino a che...» non ha alcun senso se non nel contesto di una rete di altri assiomi, come abbiamo imparato da Mach.¹⁷

Il fatto che «per due punti passa una e una sola retta» non è un’affermazione apodittica, ma una proposizione che acquista senso nel sistema di tutti gli assiomi della geometria euclidea. Non è quindi possibile, nell’ambito didattico, ‘fare’ una mattina la legge d’inerzia e qualche giorno dopo la seconda legge della meccanica, per il motivo che nella descrizione di una di queste esperienze sono già impliciti gli altri principi di cui ci si riserva la ‘dimostrazione’ in seguito. Di più, i concetti stessi che si utilizzano per descrivere l’esperienza hanno significato solo nell’ambito della teoria che si vorrebbe ‘dimostrare sperimentalmente’. Per questo, tutte le prove sperimentali progettate al fine di dimostrare i principi sono delle tautologie. Per fare un esempio concreto, prendiamo una prova di laboratorio tra le più diffuse nelle scuole: la dimostrazione della legge *fondamentale* della meccanica.

Generalmente le cose si svolgono nel modo seguente. Su una *rotaia a cuscinio d’aria* (Figura 5) è appoggiata una slitta, appesantita con apposite rondelle, collegata, mediante un filo sottile e una carrucola, a un certo numero di altre rondelle.

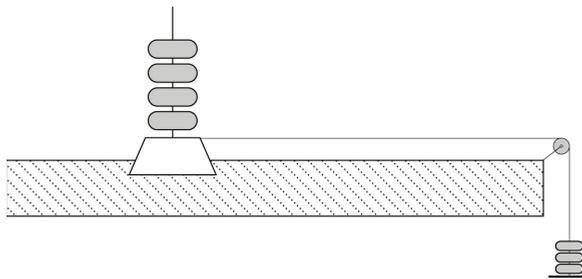


Figura 5. Apparato per la ‘verifica’ della legge ‘fondamentale’ della meccanica.

¹⁷ Mach (1972), *La meccanica...*, Cap. Secondo, cit., pp. 149-290.

2. Sul lavoro in classe

Si dispone inoltre di una *bilancia*, per pesare la slitta e le rondelle, di un *metro* (spesso inciso sulla parete della rotaia) e di un *cronometro*. Lasciato libero il sistema, si osserva che la slitta si sposta verso destra sotto la trazione delle rondelle appese. Che il moto non sia uniforme è evidente, che sia con accelerazione costante un po' meno. Si può avanzare l'ipotesi che sia così, e in tal caso basta misurare la lunghezza del tratto percorso e il tempo impiegato per ricavare il valore dell'accelerazione:

$$a = \frac{2s}{t^2} \quad [3]$$

Qualcuno vuole rendere la cosa più evidente e allora divide il tempo della corsa o la distanza in intervalli, utilizzando traguardi intermedi o facendo una fotografia con una lampada stroboscopica, in modo che si possa vedere che la velocità aumenta linearmente col tempo. I punti importanti sono due: mostrare che a una forza costante corrisponde un'accelerazione costante e che vi è proporzionalità tra la forza applicata alla slitta e l'accelerazione che questa subisce. La meccanica del fenomeno non è propriamente elementare. Se M è la massa della slitta e m quella delle rondelle, sarà

$$\begin{aligned} mg - F &= ma \\ ma &= F \end{aligned} \quad [4]$$

dove F è la tensione del filo e a l'accelerazione (la stessa) della slitta e delle rondelle.

Da qui si ricava

$$\begin{aligned} a &= \frac{m}{m+M}g \\ F &= M \frac{m}{m+M}g \end{aligned} \quad [5]$$

Il problema non è (fino a un certo punto) la misura dell'accelerazione, ma quello della forza applicata alla slitta, cioè della tensione del filo.

Ammessi che l'accelerazione sia costante, il punto difficile è mostrare che la forza applicata sia costante. Nel filmato del PSSC, che propone questa esperienza, la difficoltà viene aggirata inserendo, tra il filo e la slitta un elastico, controllando che la sua deformazione rimanga costante sulla serie di fotografie scattate durante la corsa della slitta. A parte la grossolanità della prova, la stessa cosa non è proponibile in una esperienza scolastica: si dà quindi per accettata. Più difficile ancora sarebbe mostrare che vi è proporzionalità tra la tensione del filo e l'accelerazione. Nello stesso filmato si

applicano due e poi tre elastici che si deformano nello stesso modo (e già questo richiede una notevole faccia di bronzo). Tutto questo, nella dimostrazione che è prassi nelle scuole italiane, si risolve nel seguente modo: il corpo che viene accelerato non è la slitta, come nella dimostrazione proposta dal PSSC, ma la slitta più le rondelle appese. In quest'ottica, la forza applicata al sistema è mg , quindi si tratta di mostrare che l'accelerazione è proporzionale al peso del gruppo delle rondelle appese. Nessuno si chiede come mai quelli del PSSC siano ricorsi a una soluzione così poco convincente dal punto di vista sperimentale (gli elastici egualmente deformati, e il peso traente dietro una tenda) se la soluzione fosse stata così semplice. Il fatto è che le ipotesi che stanno alla base della scelta più diffusa sono numerose e tra queste vi è la distinzione tra forze esterne (il peso mg) e forze interne (la tensione del filo). In altre parole, il sistema slitta-rondelle è un sistema complesso e non certo un 'corpo' in senso newtoniano, la descrizione del quale presuppone di avere a disposizione una meccanica più avanzata. Tra l'altro, anche l'ipotesi che la forza applicata rimanga costante durante l'accelerazione e uguale al peso (statico) delle rondelle è un'ipotesi molto ardita e che, a ben vedere, presuppone lo stesso assioma del moto di Newton.

Il fatto è che l'esperienza non ha significato di per sé. L'acquista infatti nella descrizione che ne fornisce l'insegnante, in quale lo fa in termini di *forza*, *massa*, *accelerazione*. Il che significa che l'interpretazione è già newtoniana. Infatti, tali termini non hanno un significato di per sé, ma in quanto inseriti in una teoria: in questo caso la meccanica classica.

Oltre a queste obiezioni, di carattere epistemologico, se ne possono avanzare altre di carattere didattico. La prima è che la struttura dell'esperienza invia allo studente il seguente (falso) messaggio: «Le leggi *esistono* in natura, sono oggettive. Compito dello scienziato è quello di *scoprirle*, così come l'archeologo scopre una necropoli sotto la sabbia. Per il lavoro scientifico esiste una sorta di mansionario: si tratta di trovare la relazione matematica tra grandezze che esistono al di fuori delle teorie. La fisica non è altro che una collezione di relazioni *vere*». Non per niente, molti manuali scolastici dedicano uno dei primi capitoli all'esposizione del 'metodo scientifico', illustrato da bellissimi diagrammi in cui compaiono i termini 'osservazione', 'modello', 'esperimento' che, alla fine, confluiscono nella 'teoria'. Che vi sia una sorta di procedimento protocollare che conduce alla conoscenza scientifica è suggerito anche dalla struttura rigida dell'esperienza. Questa trasmette all'allievo l'idea che tutto esista e sia già stato fatto indipendentemente da lui. Lo studente non ha alcuna possibilità di intervenire sull'esperienza per apportarvi modifiche o cambiamenti. A questo si aggiunga che spesso viene proposto un modulo standard per la 'relazione di laboratorio' che stabilisce il modo canonico di descrizione e interpretazione dell'esperienza. La valutazione è tanto più positiva quanto più lo studente mostra di aderire alle aspettative dell'insegnante. In alcune scuole si tengono dei pre-corsi per insegnare agli allievi come si stende una relazione di laboratorio.

2. Sul lavoro in classe

Si tratta di una pratica basata sul tacito assunto che le ‘leggi’ della fisica scaturiscano dall’esperienza con una propria forza affermativa, indipendente dal codice interpretativo di colui che progetta l’esperienza. In quest’ottica, le orbite ellittiche dei pianeti sono una *prova dell’esistenza* della forza di gravità, a prescindere dal sistema teorico newtoniano.

Si tratta di un grossolano fraintendimento della natura della fisica, una concezione che trascura gran parte degli sviluppi scientifici che hanno avuto origine già nella seconda metà del XIX secolo e che, sul piano didattico, porta a risultati paradossali. Di più. In una teoria fisica vi sono grandezze, come la massa e il tempo in meccanica, e assiomi di base, come i principi di Newton. La pratica didattica prevalente suggerisce l’idea che la massa e il tempo siano *di per sé*, cioè non grandezze definite nell’ambito della teoria, e che gli assiomi si rivelino come verità assolute. Da queste convinzioni discende la (grottesca) pratica didattica di far ‘ricavare’ le leggi in laboratorio.

Esperienze didattiche come quella ora illustrata sono il risultato di una sorta di miscela tra il portato del corso PSSC e la tradizionale vocazione della scuola italiana al catechismo. L’insegnante si sente infatti molto più sicuro quando qualcuno ha stabilito chiaramente *come si fa*. L’esperienza si può acquistare presso una ditta specializzata, che fornisce anche il libretto di istruzioni per il montaggio e la procedura di effettuazione scandita per passi. L’addetto al laboratorio mette a punto l’apparecchiatura, cosicché gli studenti, quando entrano in aula, trovano tutto pronto e non hanno altro da fare che ricopiare sul quaderno i dati riportati sulla lavagna: il tempo letto sul cronometro – *ça va sans dire* – digitale e il numero dei pesetti appesi all’apposito sostegno. In un’ora tutto è finito e non resta che dare, in classe, la lettura canonica dei dati raccolti. Dopo di che, la seconda legge della dinamica è sistemata.

Un’esperienza interessante per un insegnante di fisica è quella di presentare l’attività agli studenti evitando di usare le parole: *forza, massa, accelerazione*. Si eseguono tutte le misure e poi si chiede agli studenti di interpretare l’esperienza alla luce dei concetti menzionati. Le risposte che si ottengono, circa il significato dell’esperienza, sono tali da mettere in salutare crisi anche il più acritico degli insegnanti.

Nel corso PSSC originale l’esperienza che veniva proposta era la seguente. Su un tavolo lo studente appoggia un pattino a rotelle – magari opportunamente zavorrato – al quale applica un elastico. Posto che l’allungamento dell’elastico sia una misura della forza applicata, lo studente doveva tirare il pattino tramite l’elastico, cercando di mantenerne costante l’allungamento. Mediante una striscia di carta attaccata al pattino e il ‘marcatempo’ si cercava di osservare che il moto fosse uniformemente accelerato e di misurare l’accelerazione. Il ruolo del ragazzo in questa esperienza era importante. Molti scoprivano direttamente che non era possibile mantenere costante l’allungamento dell’elastico senza provocare un’accelerazione del carrello. Ma il fine della prova non era quello di costituire la *dimostrazione* della seconda legge della dinamica. Lo scopo

era quello di illustrare ciò che si intende quando si afferma che la forza è proporzionale all'accelerazione. Il fatto che questo venga assunto come assioma della teoria della meccanica appartiene a un altro ordine di problemi.

Ogni attività di laboratorio didattico viene concepita all'interno di un contesto teorico. Il fatto stesso che si riconosca che si tratta di un esperimento di meccanica o di elettromagnetismo conferma quanto abbiamo detto. E ciò va chiaramente enunciato: i termini che usiamo – forza, tempo, energia, ecc. – ricavano il loro significato dal contesto teorico della meccanica classica (e non da quella relativistica o quantistica, dove sono diversi). Pertanto, se progetto un esperimento didattico, lo faccio entro quel sistema di pensiero e ne conosco già il risultato: la teoria serve appunto a questo. Posso anche ottenere un risultato sorprendente, secondo il senso (fisico) comune: meglio, perché mi costringe a riflettere nell'ambito della teoria per interpretare il risultato.

8. Attività di laboratorio per insegnanti

To come back to generalities, I would reiterate my belief that demonstrations are a vital part of the physics instruction. The most important fruits of a lecture are not facts, they are attitudes and motivations, and a touch of dramatic emphasis via demonstrations does not go amiss. We might do well to remind ourselves that lecture rooms are sometimes called lecture theatres, and should deserve that title. [...] We ought seriously to ask ourselves whether an elementary physics lecture consisting of nothing but chalk and talk is a worthwhile offering to our students. Sometimes, perhaps, it is. But I am certain that the extra effort that goes into high-lighting a topic with an appropriate demonstration is richly rewarded – probably not, alas, in dollars, but at least in the appreciation of the students and in our own sense of having presented some real physics, however modest it may be.¹⁸

Probabilmente è inevitabile che le esperienze didattiche siano, per così dire, cogenti. Sono progettate nell'ambito di una teoria e tendono a presentare un fenomeno interpretabile nell'ambito della teoria stessa. Lo scopo è quindi quello di promuovere quel fenomeno a 'prova' della teoria. Essenziale all'attività di laboratorio è infatti la descrizione che ne dà l'insegnante. Quando il ragazzo si siede al tavolo si trova davanti un certo numero di oggetti che non riconosce, almeno non nel senso che vuole l'insegnante. Gli oggetti diventano masse, regoli, piani orizzontali, ecc. quando l'insegnante descrive l'esperienza e prescrive la natura degli oggetti. Così l'allievo impara che è il bullone che va legato allo spago per fare un pendolo e non il cronometro o il metro flessibile. Impara anche quali sono i fenomeni e le grandezze alle quali

¹⁸ French, Antony P. (1970), *First-Hand Experience Provided*, in *Physics Demonstration Experiments*, ed. by Harry F. Meiners, New York, The Ronald Press Company, p. 8.

2. Sul lavoro in classe

prestare attenzione. Per esempio, che nella misura di un periodo l'origine degli spazi e dei tempi è irrilevante. È questa descrizione che ne dà l'insegnante che colloca l'esperienza in un preciso contesto interpretativo e quindi ne predetermina l'esito. La correlazione tra la descrizione dell'insegnante e i risultati dell'esperienza didattica è così stretta che si può assumere come misura dell'efficacia dell'intervento didattico.

Molto educativo, sia per gli insegnanti sia per gli allievi, è proporre un'esperienza didattica (ad esempio, la caduta di un oggetto o il rotolamento di una ruota da bicicletta sul pavimento o il bere attraverso una cannuccia) senza fornire – a priori – come si fa di solito, i parametri interpretativi. Si può allora scoprire che lo stesso fenomeno può essere assunto a 'prova sperimentale' di un'ampia varietà di leggi fisiche, che sono in relazione all'universo culturale degli allievi. Non è necessario essere popperiani per riconoscere che è palesemente diseducativo dare a intendere che un qualsiasi fatto sperimentale possa essere a fondamento di un principio, se mai, al contrario, è il sistema dei principi che conferisce significato al fenomeno, vale a dire lo colloca come nodo di una rete di fenomeni.

Tutto questo mette in evidenza la necessità di abbandonare la misinterpretazione corrente delle esperienze ispirate al PSSC. Non vi è esperienza che possa essere prova di un principio. Tuttavia, questo non significa che trascinare un carrello su un tavolo tramite un elastico sia didatticamente sbagliato o inutile, tutt'altro. Tuttavia un'attività di questo genere è semplicemente un'illustrazione (parziale) di ciò che si intende quando si enuncia il principio stesso. Certo è che la funzione 'semantica' dell'esperienza è tanto più efficace quanto più l'esperienza è semplice e rapidamente riconducibile all'enunciato stesso. Se «un corpo soggetto a una forza subisce un'accelerazione proporzionale a questa» è necessario che al ragazzo si presenti qualcosa che si possa indicare come 'un corpo' – ad esempio, un carrello – e che abbia l'esperienza di una forza costante applicata e dell'effetto che produce – l'accelerazione. Tutti obiettivi che si raggiungono con l'esperienza – povera e semplice – del PSSC e non con i due corpi uniti da un filo e un cronometro a traguardi ottici. Queste sofisticazioni tecniche caricano l'esperienza di significati che non ha e non può avere, quindi sono mistificatorie, anche se godono del favore degli insegnanti perché danno (ma solo apparentemente) i risultati che si vuole e si possono ridurre a procedimento standard. Per esempio, tornando all'esperienza della slitta trainata dai pesetti sulla rotaia a cuscino d'aria, c'è chi, da un'unica serie di corse ricava che:

- a. l'accelerazione è proporzionale al peso traente;
- b. il fattore di proporzionalità tra forza e accelerazione è la massa del sistema.

E con ciò la legge *fondamentale* della dinamica è sistemata. Se poi l'apparecchiatura è interfacciabile con un calcolatore che mostra la relazione lineare tra forza e accelerazione e calcola direttamente la pendenza della retta, la cosa è ancora più rapida

e sicura, per cui è difficile che gli insegnanti abbandonino una prassi tanto rassicurante, nonostante la sua natura mistificatoria.

Vi è un'esperienza, molto bella e semplice che, tradizionalmente, viene considerata 'prova' del fatto che l'accelerazione di caduta è la stessa per tutti i corpi e che è anche semplice da realizzare.

9. Semantica delle esperienze

Venticinque anni or sono, cercai di far capire questo punto a un gruppo di studenti di fisica, a Vienna, incominciando una lezione con le seguenti istruzioni: «Prendete carta e matita; osservate attentamente e registrate quel che avete osservato!». Essi chiesero, naturalmente, *che cosa* volevo che osservassero. È chiaro che il precetto: «osservate» è assurdo. [...] L'osservazione è sempre selettiva. Essa ha bisogno di un oggetto determinato, di uno scopo preciso, di un punto di vista, di un problema. E la descrizione che ne segue presuppone un linguaggio descrittivo, con termini che designano proprietà; presuppone la similarità e la classificazione, che a loro volta presuppongono interessi, punti di vista e problemi.¹⁹

Una delle 'dimostrazioni' più classiche è *La scimmia e il cacciatore*.

MATERIALE

- un tubo di vetro o di plastica lungo circa un metro;
- pallini d'acciaio di diametro 3-4 mm;
- un elettromagnete;
- un alimentatore in bassa tensione;
- carta stagnola;
- un barattolo di lamiera ferrosa.

Trovare un elettromagnete è facile. Per esempio, si può ricavare da un relé. Questi si trovano nelle lavatrici, lavastoviglie, automobili. I pallini si trovano nei negozi di cuscinetti a sfere. Devono passare appena per il tubo, in modo che questo possa essere usato come una carbotana.

Mediante due morsetti si fissa il tubo di vetro a un tavolo o ad altro robusto sostegno. Alla distanza di qualche metro, e anche più in alto, ad altro sostegno si fissa l'elettromagnete (Figura 6).

¹⁹ Popper, Karl R. (1972), *Congetture e confutazioni*, Bologna, il Mulino, p. 84.

2. Sul lavoro in classe

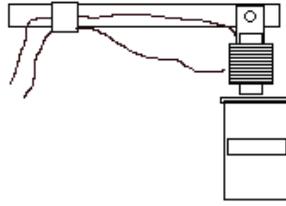


Figura 6. L'elettromagnete, fissato a un sostegno, deve sostenere una lattina vuota.

Si collega l'alimentatore al magnete aggiustando la tensione di alimentazione in modo che questo riesca a sostenere una lattina o un barattolo metallico (vuoti).

Alla bocca della cerbottana si fissa, con del nastro adesivo, una striscia di carta stagnola (Figura 7).

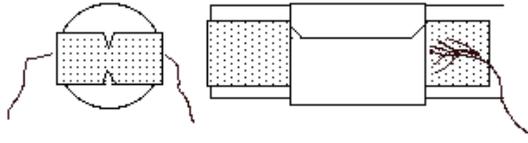


Figura 7. Disposizione dell'interruttore labile alla bocca della cerbottana.

Su questa conviene praticare, con le forbici, due piccole incisioni, per facilitarne la rottura. La striscia di stagnola funge da interruttore.

Si collega il tutto all'alimentatore (massimo 12 V) secondo lo schema di Figura. 8.

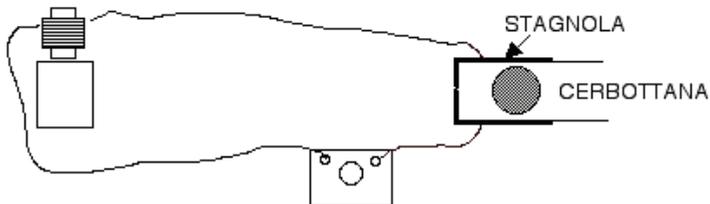


Figura 8. Schema del circuito elettrico che comanda la caduta della lattina.

Nelle condizioni della figura il magnete trattiene la lattina, ma quando la sferetta d'acciaio esce dalla bocca del tubo, rompe la striscia di stagnola e interrompe il circuito. Si realizza così la condizione di far cadere la lattina nel momento in cui il proiettile esce dalla bocca del fucile.

Si dispongono quindi le cose in modo che:

1. si inquadra la lattina guardando attraverso la canna della cerbottana;
2. la lattina resta sospesa al magnete.

A questo punto, l'insegnante, introdotta la biglia nel tubo, soffia e spara. Il risultato è abbastanza spettacolare perché il colpo ammacca in maniera visibile la lattina. Tutto questo senza dire se non lo stretto necessario a descrivere l'attrezzatura. Alla fine si chiede agli studenti di dare un significato a quanto hanno osservato. Ciò fornisce l'opportunità di fare scoperte molto interessanti sul messaggio che l'insegnante crede di avere inviato e ciò che viene effettivamente ricevuto. Perché un esperimento didattico è come una parabola che richiede un dizionario per essere interpretata. Nel caso indicato, ben difficilmente, la dimostrazione verrà interpretata come prova del fatto che l'accelerazione di caduta sia indipendente dalla massa e dallo stato di moto dei corpi. Spetta naturalmente all'insegnante fornire l'interpretazione ortodossa (soprattutto, senza fretta), ma è un esercizio molto stimolante, culturalmente e professionalmente, confrontarsi con le diverse, eretiche, interpretazioni degli studenti.

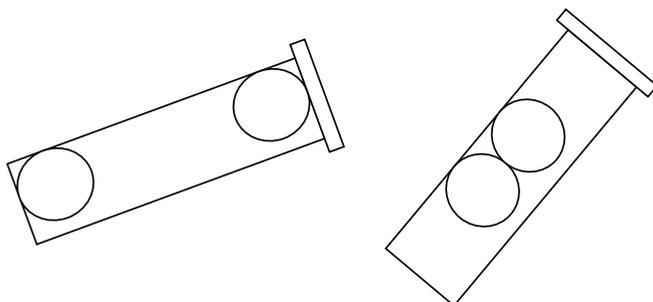
Una 'dimostrazione' più semplice, ma altrettanto provocante è la seguente.

MATERIALE

- due contenitori di plastica trasparente per palline da tennis;
- quattro palline (vecchie) da tennis.

Si introducono due palline in uno dei tubi e lo si tappa. Si fa la stessa cosa con l'altro tubo, ma pieno d'acqua. Per chiuderlo può darsi sia necessario utilizzare del nastro adesivo. Si afferra uno dei tubi per un'estremità e lo si fa volteggiare per aria in modo da riafferrarlo per l'altra estremità – forse è necessario qualche allenamento. Si ripete la prova con il tubo pieno d'acqua (la prova è più difficile). Nel primo caso si osserva che le due palline si dispongono alle estremità del tubo; nel secondo, che si riuniscono al centro.

Naturalmente, l'errore più grande che potrebbe compiere l'insegnante sarebbe quello di fornire la spiegazione prima di due o tre giorni.



10. Implantologia scolastica

Tuttavia sia a me lecito il credere che *con tutta quanta la sua matematica* egli avverrà del sistema del Neutono quello che è avvenuto di tanti altri ne' tempi addietro; e quello che pur veduto abbiamo, si può dire a' di nostri, dei sistemi del Gasendo e del Cartesio. S'essi avessero lunga vita, bene il sapete; non ostante che si predicasse, come si fa ora, aver essi finalmente levato il velo, con che a' guardi de' mortali si nasconde la natura. Le opinioni filosofiche si succedono nel corso del tempo l'una all'altra, come fa onda a onda nell'ampiezza del mare. Appena una ne è insorta ed è fatta un monte, che si spiana ben presto per far luogo a un'altra, che presto si spianerà anch'essa, non lasciando di sé altro vestigio che un po' di schiuma nell'acqua. Così sempre, con buona vostra licenza, *io credei, credo, e creder credo il vero.*²⁰

La didattica dei 'moduli', introdotta a forza nell'ultimo decennio, è basata sull'assunto che i contenuti disciplinari siano un dato definitivo e che l'insegnante non abbia altro compito che quello di prelevarli dalla teca in cui sono conservati – immutabili – e impiantarli sugli allievi. Naturalmente, da buon commesso, dovrà scegliere questi contenuti in relazione alle possibilità e alle esigenze dei 'clienti' (si indicano con questo termine gli allievi). A nessuno dei pedagogisti ministeriali (e dei volontari che *operano sul territorio*) viene il sospetto che il rapporto tra maestro e allievo non possa (non debba) essere ridotto a mansionario, che possa essere qualcosa di diverso da quella sorta di transazione commerciale a cui si tenta di ridurlo, che possa implicare una sorta di destino comune del maestro e dell'allievo. Se, infatti, nella comune navigazione annuale attraverso la materia, l'insegnante non cambia modo di vedere i vecchi concetti (di cui fa professione), se non scopre connessioni mai osservate in precedenza, se non

²⁰ Algarotti, Francesco (1969), *Dialoghi sopra l'ottica newtoniana* [1737], Milano-Napoli, Riccardo Ricciardi, p. 160.

trova nuovi interessi, allora questo non si verifica neppure per l'allievo. Il contratto educativo non dovrebbe essere stipulato tra gli utenti e l'istituto, ma tra gli allievi e il maestro. Se al termine della navigazione (nella quale le nozioni disciplinari sono, nello stesso tempo, mezzo e fine) gli studenti (tutti gli studenti, compreso il maestro) non sbarcano su un terreno concettuale diverso, allora il viaggio è stato inutile.

Si usa dire che l'attività di laboratorio favorisce l'apprendimento dei ragazzi e questo è vero, ma non nel senso che si attribuisce normalmente all'affermazione. Il fatto è che l'attività di laboratorio – che sia costituita dalle dimostrazioni dalla cattedra o dalle esperienze realizzate direttamente dagli allievi – serve soprattutto a far crescere l'insegnante. Serve a ricordargli che è un fisico, cioè un uomo che, per formazione culturale, si interroga sui fenomeni naturali. Mi piace pensare che un cultore di letteratura sia capace di cogliere, nella lettura di un romanzo, qualcosa di più di quanto colga un lettore occasionale. Ebbene, un professore di fisica dovrebbe essere un uomo che conserva la capacità di meravigliarsi e di porsi domande nuove sulla realtà fisica, che non consideri i confini della fisica segnati dal libro di testo scolastico e che abbia almeno la percezione che ciò di cui parla il manuale è una brutta fotografia (spesso deformante) del grande mare della realtà in cui tutti siamo immersi: il professore e gli allievi. Laura Fermi in *Atomi in famiglia* riporta una domanda posta da Edoardo Amaldi all'esame di fisica di quella che sarebbe diventata sua moglie Ginestra: «Come lei sa, il punto di ebollizione dell'olio è più elevato del punto di fusione dello stagno. E allora, com'è che si può friggere in una padella stagnata?». Il punto non è dare una risposta, quanto porre la domanda, cioè correlare due osservazioni da cui scaturisce una sorta di paradosso. Questo è (dovrebbe essere) il ruolo del professore: più che dare risposte, egli dovrebbe provocare il nascere di domande. L'insegnamento corrente e, ancor più quello propugnato dagli alfieri del didatticismo, tende invece a dare risposte a domande che non sono state formulate. Il professore dovrebbe sentirsi marinaio nel grande pelago della realtà fisica, in cui vi sono alcune isole di conoscenza: la fisica intuitiva, la fisica classica, la fisica relativistica, la fisica quantistica che rappresentano non degli approdi definitivi (sorta di coperte ideologiche), ma punti di appoggio e orientamento nella navigazione. Volendo insistere in quest'analogia, uno prende il mare solo se vi è indotto dalla necessità di rispondere a un interrogativo; cioè allo scopo di far quadrare un bilancio di conoscenza in cui c'è qualcosa che non torna. Per esempio, la teoria dell'*horror vacui*, parte integrante della fisica intuitiva, spiega perché sollevando una provetta rovesciata (Figura 9) da un recipiente pieno d'acqua, rimane piena.

2. Sul lavoro in classe

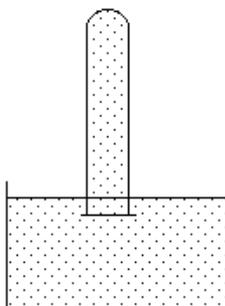


Figura 9. Esperienza di Torricelli con l'acqua.

La cosa funziona anche con una provetta molto più lunga (con un tubo chiuso a un estremo, si potrebbe fare in una piscina).

Un insegnante (un professore!) entusiasta potrebbe realizzare l'esperienza seguente.

MATERIALE

- un tubo di plastica trasparente (del tipo da giardino) lungo 11 m;
- un grosso bidone;
- uno spezzone di corda robusta;
- una finestra a più di 10 m d'altezza.

Si colloca il bidone sulla verticale della finestra, lo si riempie d'acqua e vi si immerge il tubo, avvolto a spire, in modo che si riempia d'acqua. Alla sua estremità superiore si applica un robusto tappo di gomma, quindi dalla finestra si cala la corda che si collega saldamente all'estremità del tubo e si comincia a recuperare (Figura 10).

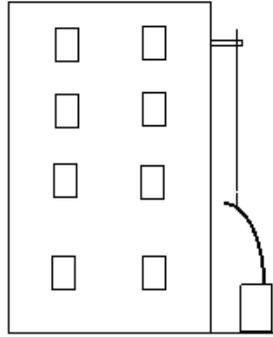


Figura 10. Sollevamento del tubo.

Se l'estremità inferiore del tubo è immersa nell'acqua, il tubo rimane pieno. Ma questo sarà vero per qualsiasi lunghezza del tubo? O non vi sarà una quota oltre la quale non si riesce a portare l'acqua? Questo è ciò che si osserva: quando il tubo raggiunge un'altezza di 10,5 m circa, l'acqua comincia a bollire e, anche se si solleva ulteriormente il tubo, il livello dell'acqua non cresce oltre.

Questa osservazione introduce un problema che la teoria dell'*horror vacui* non può risolvere e crea la necessità di cercare una nuova teoria che non solo spieghi il risultato dell'esperienza di Torricelli, ma suggerisca nuove prove sperimentali non pensate prima: per esempio di rifare la prova con mercurio invece che con acqua o in montagna invece che in pianura.

Un'esperienza dello stesso genere, cioè che impegna ad avanzare una previsione, è quella descritta da Galileo nella Giornata seconda del *Dialogo sopra i massimi sistemi*:

dico che è possibile che uno mosso velocissimamente si lasci uscir una palla di mano la quale, giunta che sia in terra, non solo séguiti il moto di colui, ma lo anticipi ancora, movendosi con velocità maggiore. E per veder un tal effetto, voglio che il corso sia d'una carretta, alla quale per banda di fuori sia fermata una tavola pendente, sì che la parte inferiore resti verso i cavalli e la superiore verso le ruote di dietro. Ora, se nel maggior corso della carretta alcuno, che vi sia dentro, lascerà cadere una palla giù per il pendio di quella tavola, ella, nel venir giù ruzzolando acquisterà vertigine in sé stessa, la quale, aggiunta al moto impresso dalla carretta, porterà la palla per terra assai più velocemente della carretta: e quando si accomodasse un'altra tavola pendente all'opposito, si potrebbe temperare il moto della

2. Sul lavoro in classe

carretta in modo, che la palla scesa giù per la tavola, nell'arrivare in terra, restasse immobile, e anco talvolta corresse al contrario della carretta.²¹

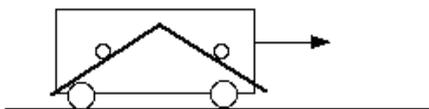


Figura 11. Esperienza suggerita da Galileo: una palla viene lasciata cadere, rotolando, lungo uno scivolo portato da un carrello in moto.

Nelle sue argomentazioni, Einstein ricorre volentieri a *gedanken experimente*, analoghi a questo proposto da Galileo, di grande valore euristico. Sarebbe quindi già un'esperienza intellettuale per il ragazzo essere posto di fronte al problema: sarà vero, come suggerisce Galileo, che la palla, giunta a terra, vada a velocità superiore a quella della 'carretta'? O che la palla che scende in senso opposto, raggiunta la terra, rimanga ferma o si muova in senso opposto? Come si possono spiegare questi fenomeni? Non si può progettare un esperimento vero che permetta di controllare le previsioni avanzate (non solo quelle asserite da Galileo)?

Non esistono esperienze sbagliate, esistono interpretazioni sbagliate. A volte si tratta di veri e propri equivoci di natura disciplinare. Un esempio è rappresentato dalla 'dimostrazione' della legge di Ohm, molto diffusa nelle scuole, perché è facile, costa poco e dà buoni risultati.

In parallelo a un pezzo di filo di costantana si collega un voltmetro e in serie ai due un amperometro. Al tutto si applica un generatore in continua di f.e.m. variabile e si fanno misure di tensione e di corrente (Figura 12).

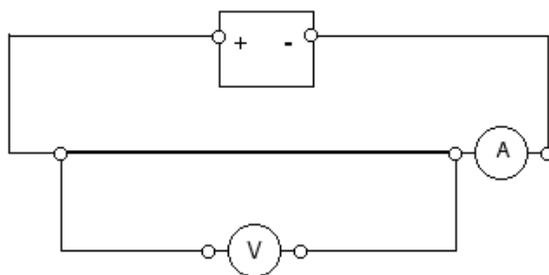


Figura 12. Apparato per la 'verifica' della legge di Ohm.

²¹ Galilei, Galileo (1970), *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano*, a cura di L. Sosio, Torino, Einaudi, p. 408.

Naturalmente si trova che tra le due variabili sussiste una proporzionalità diretta. Tuttavia, poiché i due strumenti sono dei *tester*, e quindi misurano delle correnti, il significato della prova è che nelle bobine dei due passano correnti che sono (entro certi limiti) direttamente proporzionali. La taratura stessa del voltmetro è basata sulla legge di Ohm, per cui l'interpretazione corrente nelle scuole è semplicemente una tautologia. Questo è un esempio di interpretazione errata in senso disciplinare.

Più comuni sono le interpretazioni errate dal punto di vista pedagogico. Come esempio prendiamo, ancora una volta, un'esperienza proposta dal PSSC che è entrata nel gruppo di quelle di *routine* nella scuola italiana. Si tratta della relazione tra lunghezza d'onda e periodo per le onde sulla superficie dell'acqua. In una vasca dal fondo trasparente in cui si è versato acqua per lo spessore di uno o due centimetri, un righello di legno – fatto vibrare da un motorino elettrico – produce onde rettilinee che attraversano la vaschetta. Questa è illuminata da una lampada che si trova sopra la vaschetta. Sul piano del tavolo su cui è appoggiata (Figura 13) si osservano delle strisce luminose egualmente distanziate che si spostano con velocità costante.

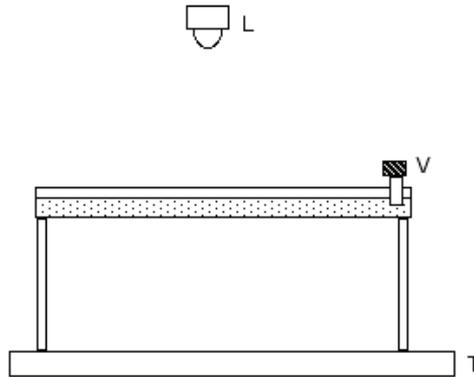


Figura 13. L'ondoscopio: strumento comune nelle scuole. V = vibratore, T = tavolo d'appoggio, L = lampada.

Lo studente ha a disposizione un disco girevole con dei fori intorno, che funge da stroboscopio. Ma nelle versioni più 'avanzate' è la stessa lampada che funge da stroboscopio a frequenza variabile. Si aggiustano le due frequenze (quella del vibratore e quella della lampada) fino a che sono uguali. In queste condizioni le strisce luminose sul tavolo appaiono ferme e se ne può misurare la distanza. Sullo stroboscopio si legge poi il valore della frequenza – ovvero del periodo – corrispondente a quella lunghezza d'onda. La misura si ripete alcune volte, con valori diversi della frequenza. Dal

2. Sul lavoro in classe

confronto tra i valori del periodo e della lunghezza d'onda si ricava che le due grandezze sono direttamente proporzionali e che il fattore di proporzionalità è la velocità di propagazione delle onde; cioè che

$$\lambda = vT \quad [6]$$

Naturalmente, l'esperienza dà soddisfazione perché i dati si distribuiscono in maniera accettabile su una retta e la relazione trovata viene presentata come una legge. Si dimentica che nel corso PSSC l'ottica viene presentata prima della cinematica, per cui si rende necessario introdurre una misura diretta di lunghezza d'onda. La relazione non è una legge, cioè una relazione tra grandezze definite in maniera indipendente, ma semplicemente la definizione di lunghezza d'onda, quindi è ovvio che risulti soddisfatta.

Un altro caso – anche questo molto diffuso – di fraintendimento di un'esperienza è la relazione tra lunghezza di una sbarra metallica e la temperatura.

MATERIALE

- un'asta metallica;
- un recipiente (in cui viene immersa l'asta per aumentarne uniformemente la temperatura);
- una leva (che ha lo scopo di amplificarne le variazioni di lunghezza);
- un termometro a mercurio.

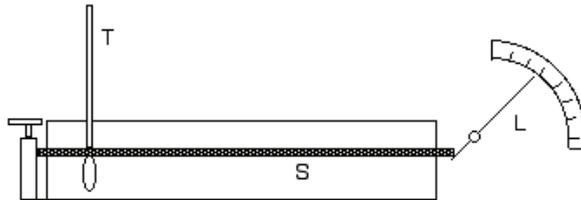


Figura 14. Apparato per lo studio della dilatazione termica. La sbarretta metallica S è bloccata a un estremo e libera all'altro. T indica il termometro e L la leva.

Si blocca mediante un morsetto uno degli estremi della sbarretta metallica, si riempie il recipiente d'acqua (o di olio se si vogliono raggiungere temperature più elevate dei 100°C) e si regola lo zero del congegno di lettura (Figura 14). Riscaldando il liquido mediante un bruciatore, si legge la temperatura sul termometro e l'allungamento sul quadrante della leva (opportunosamente tarata). Alla fine si confrontano i due valori,

dell'allungamento e dell'aumento di temperatura, e si trova che – con una certa buona volontà data la difficoltà della misura dell'allungamento – le due grandezze sono proporzionali per cui si enuncia la 'legge della dilatazione termica':

$$\Delta L = k\Delta t \quad [7]$$

che si elabora rapidamente in modo che alla fine assume la forma

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha t \quad [8]$$

dove L_0 è la lunghezza a 0°C , t è la temperatura centigrada e α il coefficiente di dilatazione termica. Si tratta di una 'legge' che fa la gioia degli insegnanti e dei compilatori di manuali, che le dedicano più pagine (estendendola alle superfici e ai volumi) e qualche decina di problemi, incuranti del fatto che se vi compare la temperatura centigrada la relazione non può avere un gran significato fisico. In effetti, la misura dimostra solo che (per piccole variazioni di temperatura) l'allungamento percentuale del metallo della sbarretta è proporzionale alla dilatazione volumica del mercurio. Equivale a fare la prova contemporaneamente con due sbarrette metalliche (di metalli diversi e di lunghezza diversa): troveremmo che gli allungamenti relativi sono proporzionali. Saremmo pertanto autorizzati a utilizzare una delle sbarre come termometro.

11. *Risus abundat in ore sapientium*

Bisognava concludere. Manifestai alla contessina Delrio ciò che sentivo di non poterle dissimulare più a lungo. Si rassegnasse all'idea: le diagonali del parallelogrammo si secano nel loro punto mediano. E non è tutto: esse ne dividono l'area in quattro triangoli equivalenti. Con il devoto rispetto che può germogliare da un animo profondamente cavalleresco, mi permisi di instare una quinta volta presso di lei, affinché si benignasse di accogliere queste due tesi, per suo graziosissimo *placet*, riconoscendone la validità. Riscuoter esse il plauso plebiscitario delle moltitudini, il favore de' più meticolosi accademici in tutti i paesi adorni di sistema metrico decimale e in altri ancora. La contessina capì che onorandomi d'un suo rapido assentimento, c'era modo ch'io prendessi commiato. Quello sbadiglio che da una novantina di secondi lasciava bighellonare per i fasci mandibolari, senza curarsi di addomesticarlo, si diede perciò a conchiuderlo precipitosamente.²²

²² Gadda, Carlo E. (1955), *La madonna dei filosofi*, Torino, Einaudi, p. 61.

2. Sul lavoro in classe

Il ragazzo che affronta un corso di fisica di livello iniziale non è privo di conoscenze di fisica, ma possiede una personale precisa formazione teorica sui fenomeni, in assenza della quale non sarebbe in grado di condurre una vita normale. Per esempio, è in grado di stimare la massa di un bicchier d'acqua, la velocità di un'auto che arriva, la temperatura di una tazza di tè, o di prevedere la traiettoria di un pallone da calcio, l'effetto di taglio provocato da una racchetta da tennis sulla pallina, di stimare la distanza di una sorgente di luce, di riconoscere la sorgente di un suono, ecc. Tutte cose utilissime, anzi essenziali, per imparare le quali ha impiegato i primi anni della sua vita e che continua ad arricchire di conoscenze che derivano da nuove esperienze: l'andare in bicicletta, sciare, usare un binocolo, accendere il gas, prendere la scossa quando si sfilava un indumento sintetico, ecc. Una mole sterminata di conoscenze semiquantitative organizzate in strutture teoriche non formulate in linguaggio matematico, solitamente indicata come *fisica naïf* o *qualitativa* che è stata oggetto di importanti studi scientifici.²³

Suscita meraviglia il fatto che, all'interno dei pedagogismi che hanno colonizzato la scuola italiana nell'ultimo decennio, non vi sia traccia di questi contenuti psicologici che, pure, sarebbero di primaria importanza per il professore di scuola media. Inutile dire che non fanno parte neppure dei corsi universitari per la formazione degli insegnanti di fisica anche se sarebbero di gran lunga più importanti di altri contenuti disciplinari. Questo background di conoscenze – inteso sia come collezione di esperienze che come raccolta di strutture teoriche – è infatti il terreno sul quale il professore dovrebbe prendere le mosse per la costruzione di teorie che aspirano alla razionalità. Vi è, nell'evoluzione culturale del ragazzo, qualcosa di analogo allo sviluppo storico della scienza.²⁴

Un ampliamento teorico – come quello della relatività speciale rispetto alla meccanica classica – non si compie contro la struttura teorica pregressa, ma come sviluppo di questa, sul significato della quale la nuova più ampia teoria proietta nuovi parametri di interpretazione. Dal punto di vista didattico tale ricco bagaglio di conoscenze organizzate in teorie qualitative dovrebbe rappresentare un aiuto al processo di ampliamento cognitivo ma, nella gran parte dei casi, finisce per costituire una sorta di zavorra psicologica di invincibile inerzia. Infatti, è raro che un corso di fisica abbia il potere di mutare l'ottica con cui lo studente guarda ai fenomeni fisici. Generalmente, la mente del ragazzo archivia la fisica scolastica come uno strumento che non serve ad altro che a se stesso e continua a servirsi della fisica qualitativa per interpretare la realtà fisica. Questa affermazione trova conforto in una amplissima letteratura scientifica che dimostra che gran parte degli studenti usciti dalla scuola media superiore e perfino degli studenti universitari di discipline scientifiche continuano a essere degli aristotelici convinti in fatto di fisica.

La cultura fisica di cui ognuno è, più o meno consapevolmente, depositario, si ma-

²³ Bozzi, Paolo (1990), *Fisica ingenua*, Milano, Garzanti.

²⁴ Di Sessa, Andrea (1982), *Unlearning Aristotelian Physics. A Study of Knowledge-Based Learning*, «Cognitive Science», 6/1, pp. 37-75.

nifesta in molti modi, e uno di questi è la capacità di riconoscere l'assurdo fisico, facoltà a cui è associato il senso del comico. Ogni volta che un uomo si trova di fronte a una manifestazione fisica assurda, secondo il proprio codice interpretativo, allora scatta la risata. Su questa facoltà sono basate molte tecniche tese a suscitare il riso, in particolare la produzione comica filmica e segnatamente quella dei *cartoons*. La capacità di ridere, in questi casi, presuppone la condivisione di un codice fisico. Per maggiore chiarezza, prendiamo in considerazione una tecnica cinematografica comune che riguarda il ritmo della camminata. Se si assimila la gamba di un uomo a un pendolo fisico, l'energia cinetica è proporzionale al quadrato della velocità media, quindi al quadrato della frequenza dei passi. Ne segue che la potenza dissipata è proporzionale al cubo della frequenza. Pertanto, a un piccolo aumento della frequenza dei passi corrisponde un grande aumento della potenza consumata.

Questo è il motivo per cui una camminata caratterizzata da una frequenza maggiore del normale ci appare strana e suscita il riso. La maggior parte delle persone non è in grado di esporre la cosa in termini quantitativi, ma ha la ferma consapevolezza dell'impossibilità di camminare con una frequenza anche di poco superiore al normale e quando si trova di fronte a un'immagine che rappresenta questo fenomeno scoppia a ridere. E ciò spiega una delle tecniche utilizzate per far ridere nelle comiche del muto. Ma anche in film più recenti, come quelli interpretati da Bud Spencer e Terence Hill si utilizza l'accelerazione dei movimenti per provocare il riso. In altri film si utilizzano le comuni nozioni di geometria per tendere inganni sulle distanze o sul moto degli oggetti. Alcuni esempi sono proposti in *Top Secret*, un film americano di vent'anni fa: la macchina da presa mette in primo piano un grande telefono, che appare così vicinissimo, poi si cambia punto di vista e ci si accorge che il telefono è effettivamente enorme, uno scherzo che ne richiama altri dell'architettura giocosa del rinascimento, di cui si ha un esempio in un altro film: il *Don Giovanni* di Joseph Losey.

Nei cartoni animati il ricorso all'assurdo fisico per suscitare il riso è uno degli strumenti più utilizzati. Si pensi a Gatto Silvestro che continua a camminare nel vuoto senza rendersi conto che il ponte è crollato sotto i suoi piedi, o alle incredibili (appunto) accelerazioni di Speedy Gonzales, o ai pugni di enorme potenza di Braccio di Ferro che producono terribili (ma innocue) accelerazioni sul corpo di colui che li prende. Ma anche le cadute a velocità costante di Willy il Coyote, o i suoi viaggi attaccato a un proiettile sono esempi di assurdo fisico che suscitano il riso. La condizione perché funzionino è, come si è detto, l'esistenza di una sintassi fisica condivisa tra gli spettatori e l'autore del film, cioè che gli spettatori colgano la scena come un'infrazione a questa sintassi. Pertanto, la risata rivela l'esistenza, nella mente dello spettatore, di una sorta di codice in base al quale è in grado di distinguere ciò che è fisicamente possibile da ciò che non lo è. La risata è, in una certa misura, la spia del fatto che ciò che viene rappresentato è impossibile. La meccanica in primo luogo, ma anche l'acustica, l'ottica e la termodinamica hanno a che fare con fenomeni che sono colti

2. Sul lavoro in classe

dall'uomo direttamente attraverso *sensate esperienze*, sulle quali quindi, normalmente, il ragazzo ha accumulato una grande varietà di esperienze organizzate in teorie (il fatto che l'aranciata venga 'risucchiata' attraverso la cannuccia è una teoria, come il fatto che sia necessario chiudere la porta per evitare che 'entri il freddo'). È questo che rivela la sua capacità di ridere di fronte a scene che sembrano negare ciò di cui, invece, è perfettamente sicuro. La fisica classica è molto vicina alla fisica ingenua: si occupa di carri, proiettili, specchi, oggetti caldi e freddi e spesso non fa altro che formalizzare ciò che è noto e condiviso da tutti. Mettiamo di riprendere la scena di un uomo che sbuccia una mela e di proiettarla alla rovescia. Quale ragazzo non è in grado di accorgersi che c'è qualcosa che non va? Questo è il secondo principio della termodinamica. O che si riprenda la scena di una donna che si dondola su un'altalena e la si proietti accelerata. Qualsiasi ragazzo si rende conto del trucco: una grande altalena non può oscillare così rapidamente. Significa che la sua distanza dalla legge del periodo del pendolo non è poi così grande.

Certi film comici (o almeno alcune scene) e molti cartoni animati possono rappresentare uno strumento didattico molto più efficace di tante (pseudo) esperienze di laboratorio, in quanto servono a portare a consapevolezza tante conoscenze che ciascun ragazzo possiede ma che non è in grado di riconoscere nella fisica scolastica, a causa del linguaggio diverso e del contesto in cui vengono tradizionalmente collocate. L'insegnante può proiettare un certo film, incaricando uno o due ragazzi di prendere nota delle scene che suscitano l'ilarità più marcata. Se ne può poi discutere insieme, e rivederle, cercando di individuare la caratteristica che le rende comiche. Infine, si può cercare di dare una lettura della scena nell'ambito della fisica scolastica.

Per fare un esempio, si osservi la Figura 15 che riproduce la locandina di un film che ebbe, a suo tempo, un notevole successo tra il pubblico giovanile. La figura suscita il riso (o almeno il sorriso) perché rappresenta una situazione impossibile. E questo è il giudizio del fisico naïf. Chi abbia fatto studi di meccanica, per quanto elementari, dovrebbe essere in grado di riconoscere nel disegno un'infrazione del principio di azione e reazione: non è possibile esercitare una forza su un sistema se non se ne applica una uguale e contraria su un corpo esterno.

In un cartone animato si vede un giocatore di golf particolarmente forzuto che conferisce alla pallina una tale quantità di moto – poniamo verso est – che questa, dopo un po', ritorna da ovest, cioè è stata messa in orbita a livello del terreno. Ora, perché un corpo stesse su un'orbita circolare a livello del terreno dovrebbe avere una velocità tale che

$$\frac{v^2}{R} = g$$

dove g è l'accelerazione di gravità e R il raggio della terra. Ciò dovrebbe essere

$$v = \sqrt{Rg} \cong 8 \times 10^3 \frac{m}{s}$$

La velocità di fuga dalla terra è data da $v_f = \sqrt{2Rg}$; quindi la velocità della pallina dovrebbe essere il 70% della velocità con cui arrivano sulla terra, al limite dell'atmosfera, le meteoriti. Queste s'incendiano e vengono polverizzate dall'attrito con l'aria: lo stesso accadrebbe alla pallina.

Non sempre, tuttavia, la cultura fisica naïf è in grado di riconoscere l'impossibile e allora la risata non scatta. In un film di grande successo (*Mamma, mi si sono ristretti i ragazzi!*) il solito scienziato disneyano riduce le dimensioni dei figli a pochi millimetri e questi continuano a vivere normalmente, affrontando le difficoltà che derivano loro dalle ridotte dimensioni.



Figura 15. Un esempio di assurdo fisico finalizzato a suscitare il riso.[S. Corbucci, *Chi trova un amico trova un tesoro*, Take Production Inc., 1980].

Un film di questo genere offre l'occasione per utili riflessioni sui valori del rapporto superficie/massa che consentono la vita di un animale a sangue caldo. Se le dimensioni di un uomo vengono ridotte di 100 volte, la sua massa viene ridotta di un milione di volte e la sua superficie di diecimila volte, per cui il rapporto superficie/massa viene moltiplicato per 100. Ne segue che la dispersione termica diventa incompatibile con la vita. D'altra parte anche le dimensioni delle corde vocali verrebbero ridotte a un centesimo e le frequenze emesse moltiplicate per cento: i suoni emessi cadrebbero nella banda degli ultrasuoni e non sarebbero percettibili all'orecchio umano. Argomentazioni analoghe si potrebbero avanzare a proposito dei padiglioni auricolari e delle pupille (per cui questi esseri sarebbero anche sordi e ciechi) e delle loro necessità di alimentazione e di movimento: un essere umano così piccolo non riuscirebbe a bere, resterebbe imprigionato in una goccia d'acqua a causa della tensione superficiale.

3 Attività di laboratorio

1. Didattica dogmatica

Amici, evitate la camera oscura, nella quale sezionano la luce e in triste e oscena esposizione aprono e frugano il cuore della natura. Le superstizioni e le confusioni sono con noi dalla notte dei tempi lasciate gli spettri e le delusioni nelle teste delle menti anguste. Quando volgete gli occhi al cielo lo sguardo si distende nell'azzurro, quando al crepuscolo il Sole si immerge in una gloria di fuoco: là, nel nucleo più profondo della Natura con la gioia nel cuore e negli occhi coglierete la grande eterna essenza cromatica della luce.¹

Quando un raggio di luce passa dall'aria a un altro mezzo, valgono le seguenti leggi:

1. *raggio incidente, raggio rifratto e normale nel punto di incidenza giacciono su uno stesso piano;*
2. *vale la relazione*

$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = n$$

dove \hat{i} indica l'angolo di incidenza, \hat{r} l'angolo di rifrazione e n una costante, detta indice di rifrazione del mezzo.

Questo era, pressappoco, il modo in cui venivano presentate le leggi della rifrazione nei vecchi manuali (quelli fino agli anni '60, per intenderci).

Con l'introduzione della fisica PSSC all'italiana, si decise che il modo era inaccettabile in quanto dogmatico, era necessario che l'allievo si persuadesse sperimentalmente che le cose stanno effettivamente così. L'esperienza corrente nelle scuole è quella che descrivo di seguito.

MATERIALE

- un blocco semicilindrico di vetro o una vaschetta di plastica trasparente;
- vari spilli d'acciaio;
- goniometro.

¹ Goethe, Johann Wolfgang (1994), *Zahme Xenien*, in *Opere di Goethe*, tr. it. di M.T. Giannelli, Milano, Mondadori.

Sulla faccia piatta del semicilindro vi è una incisione rettilinea che ne segna l'asse. Su un foglio di disegno si traccia con la matita una coppia di assi ortogonali e su uno di questi si dispone la parte piatta del semicilindro (Figura 1).

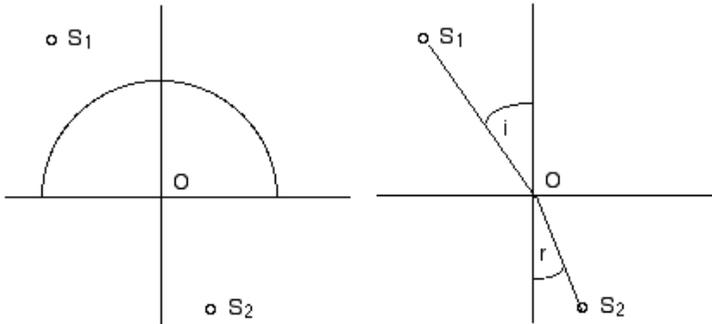


Figura 1. Apparato per lo studio della rifrazione della luce.

Dalla parte del profilo curvo si pianta uno spillo verticale S_1 e lo si riguarda dalla parte del profilo piatto in modo da vederlo allineato con l'incisione centrale O e un secondo spillo S_2 . Si toglie poi il prisma di vetro e si tracciano i segmenti S_1O e S_2O , che rappresentano il percorso del raggio di luce che parte da S_1 e raggiunge S_2 . Con il goniometro si misurano gli angoli i e r . L'operazione si ripete una decina di volte, allontanandosi progressivamente dall'asse trasversale, in modo da ottenere una tabella con i valori corrispondenti dei due angoli. Tuttavia l'incertezza su r aumenta man mano che si avvicina all'angolo limite (perché l'immagine dello spillo diventa sempre più grande) per cui i valori di r superiori a qualche decina di gradi sono inutilizzabili. D'altra parte, un goniometro ordinario è tarato al grado per cui l'incertezza sugli angoli piccoli è molto grande, tale da togliere significato al confronto tra le misure. Si tratta di una situazione simile a quella che si presenta nella misura della dilatazione termica, solo che, in quel caso, se ne estrae una relazione di proporzionalità; in questo, la legge di Snell e cioè che il rapporto dei seni dei due angoli è costante. I libri di testo che riportano i risultati (falsi) di questa esperienza, sono costretti a inventarsi tre o quattro cifre significative perché risulti costante il rapporto dei seni e non quello degli angoli.

Si tratta di un esempio limite della forzatura di significato di un'esperienza che sconfinava in modo evidente nel dogmatismo, perché un ragazzo intelligente non può fare a meno di interrogarsi sulla sensatezza di questo modo di procedere. Per ben che vada, gli resta l'impressione che nel procedere scientifico vi sia qualcosa di esoterico che lo rende simile alla divinazione. Il PSSC prende poi per assodato questo 'risultato

3. Attività di laboratorio

sperimentale' per dimostrare che sia il modello corpuscolare che quello ondulatorio della luce sono compatibili con questa 'evidenza sperimentale'.

L'esperienza è didatticamente utile e accettabile solo a condizione che non se ne stravolga il significato (sia scientifico che didattico): il suo scopo non può che essere quello di mostrare al ragazzo che cosa s'intende per 'rifrazione della luce', non certo quello di ricavare una relazione che ha la sua giustificazione nel modello teorico adottato.

L'esempio mette in evidenza che l'attività sperimentale didattica può essere dogmatica al pari della vecchia didattica cattedratica. Naturalmente, la cosa è manifestamente molto più grave quando, in luogo dell'esperienza realizzata dall'allievo – che ha comunque qualche ricaduta positiva – si mette l'esperienza virtuale, com'è diventato costume diffuso negli ultimi anni. La cosa funziona così. Sullo schermo del computer compare il disegno che rappresenta il prisma semicilindrico di cui abbiamo parlato. Su questo il ragazzo, mediante il mouse, disegna un segmento passante per il centro O e che rappresenta il raggio incidente e poi preme un tasto: sullo schermo, immediatamente, compare il raggio rifratto, di spessore nullo, com'è comodo che sia. L'operazione può essere ripetuta *ad libitum* e alla fine si può chiedere che compaia il grafico (perfettamente lineare) tra il seno dell'angolo di incidenza in relazione a quello dell'angolo di rifrazione. La macchina fornisce, a richiesta, il valore del coefficiente di proporzionalità, ovvero indice di rifrazione. Inutile dire che questo procedimento è da respingere perché non soltanto è mistificatorio, ma anche intollerabilmente dogmatico. Prima di tutto perché impedisce allo studente di vivere l'esperienza (fondamentale per la sua crescita culturale) del rapporto diretto con il fenomeno e l'estrema difficoltà di cogliere le regolarità della natura al di là degli 'accidenti' galileiani (dando quindi una rappresentazione fasulla e caricaturale del processo di formazione della conoscenza) e poi perché impone un paradigma interpretativo a una realtà fittizia creata *ad hoc*. Una procedura di questo genere può trovare giustificazione solo come strumento di illustrazione di relazioni matematiche.

2. Il cammino dell'ubriaco

You know, the most amazing thing happened to me tonight. I was coming here, on the way to the lecture, and I came in through the parking lot. And you won't believe what happened. I saw a car with the license plate ARW 357! Can you imagine? Of all the millions of license plates in the state, what was the chance that I would see that particular one tonight? Amazing!²

² Feynman, Richard, citato da D. L. Goodstein (1989), *Richard Feynman teacher*, «Physics Today», 42, Feb. p. 70.

Per la verità vi è un caso in cui il computer ha un'applicazione didattica 'onesta' ed è come simulatore di eventi casuali.

Vi sono diversi programmi mediante i quali simulare lanci di una moneta, ottenendo, per esempio, una serie di valori casuali di +1 e -1. È poi possibile fare la somma dei primi due valori e poi dei primi tre e così via, e infine, rappresentare graficamente la serie dei risultati ottenuti. Tutto ciò può essere inteso come simulazione del 'cammino a caso', cioè quello di un punto che si muove su una retta, compiendo passi di eguale ampiezza, determinati dal lancio di una moneta: se testa lo spostamento è in un senso, se croce, nel senso opposto. Nelle bellissime *Feynmann Lectures on Physics*³ vi è una elementare deduzione del fatto che la distanza quadratica media, cioè il valore della distanza (senza riguardo al segno) più probabile, è \sqrt{N} , essendo N il numero dei passi compiuti. Si può anche simulare un cammino a caso in due dimensioni e ottenere un grafico dei passi compiuti, come in Figura 2.

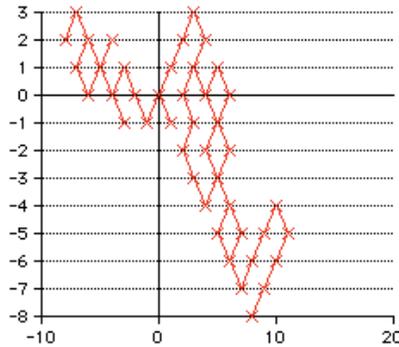


Figura 2. Simulazione al computer di un cammino a caso in due dimensioni.

Si può infine fare un confronto 'sperimentale' tra la distanza quadratica media prevista e quella misurata direttamente sul grafico. Naturalmente, tutto ciò si può realizzare anche facendo lanciare coppie di monete dagli studenti: dato che la raccolta di qualche centinaio di numeri a caso non porta via che qualche decina di minuti, ma il gioco, dopo un poco, viene a noia, mentre con il computer si possono simulare rapidamente migliaia di lanci. Certo che la cosa acquista più senso se associata all'esperimento seguente: *l'imbibizione della carta assorbente*. Si tratta di una versione semplificata degli esperimenti condotti negli anni '20 dall'americano E.W. Washburn.⁴

³ Feynmann, Richard, *Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley Pub. Co., Reading MA, vol. 1, cap. 6.

⁴ Washburn, E.W. (1921), *Dynamics of capillary flow*, «Physics Review», 17, p. 374.

3. Attività di laboratorio

MATERIALE

- un becher;
- strisce di carta assorbente colorata;
- un orologio.

Si prende una striscia (larga un paio di centimetri, lunga una decina) e si traccia su di essa una serie di righe parallele al lato più corto ed egualmente distanziate di circa mezzo centimetro. Si sospende la striscia a un sostegno verticalmente sul becher (Figura 3) nel quale si versa acqua in modo che la prima riga ne sfiori la superficie.

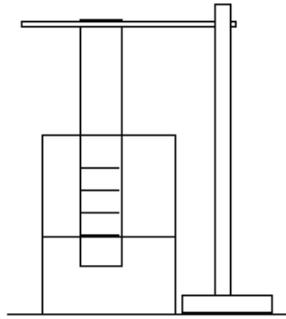


Figura 3. Disposizione della striscia di carta assorbente nella prova di imbibizione.

Si misura il tempo che l'acqua impiega a risalire lungo la striscia e a raggiungere i vari segni tracciati. Si trova che il tempo necessario a raggiungere il secondo segno è, con buona approssimazione, il quadrato del tempo richiesto per raggiungere il primo. Sarebbe bello poter affermare che il tempo necessario a raggiungere il terzo traguardo è nonuplo del primo, ma la misura è troppo incerta per fare un'affermazione di questo genere. L'esperienza serve solo a presentare un fenomeno – l'imbibizione – a spiegare il quale forse può servire il modello del cammino del 'marinaio ubriaco'.

Nel caso proposto il calcolatore offre il vantaggio che consente di simulare prove con un numero alto di passi, ma ciò che si guadagna in ricchezza di dati si perde in efficacia didattica. Niente infatti può essere più coinvolgente per la classe di studenti che partecipare allo sviluppo del cammino casuale, con una (o più) coppie di allievi addetti al lancio di monete.

Questa, di assistere e partecipare alla nascita e alla precisazione di un concetto è un'esperienza importante e feconda ai fini della creazione di un atteggiamento di

apprendimento che si produce tanto più quanto il comportamento dell'insegnante e i modi di presentazione della materia è prossimo all'esperienza diretta del ragazzo.

Vi furono anni in cui si polemizzava (a ragione) con la 'fisica del gesso', intendendo con questo il complesso di nozioni che venivano lasciate cadere sul ragazzo, in maniera apodittica, dall'alto della lavagna. Si metteva a confronto la didattica del *gesso* con la didattica del *laboratorio*, per porre in evidenza quanto quest'ultima fosse più feconda di opportunità di apprendimento. Negli ultimi anni si è favorita la diffusione di una forma di comunicazione tra insegnante e discente basata sul calcolatore che ha manifestato tutto il suo potenziale negativo dal punto di vista pedagogico. Si tratta dell'uso di in software che consente di proiettare diapositive in luogo di scrivere sulla lavagna. A parte il fatto che la necessità di tenere le luci basse nell'aula non favorisce certo il mantenimento dell'attenzione da parte degli allievi, questa prassi va in senso opposto a quanto abbiamo detto. Se l'insegnante scrive con il gesso, lo studente ha l'opportunità di procedere con lo stesso passo, partecipa alla nascita e allo sviluppo dei concetti, viene rassicurato dal fatto stesso che può prendere parte alle difficoltà incontrate dal maestro, talvolta dai suoi stessi errori, che ha la possibilità di segnalare. È una situazione di apprendimento estremamente feconda. Il fatto stesso che le formule siano scritte a mano, utilizzando materiali così semplici come il gesso e l'ardesia ha un ruolo nello stabilire un rapporto di apertura e di fiducia nel ragazzo. Tutto questo non si verifica quando una formula viene proiettata su uno schermo, stampata perfettamente e magari inquadrata da cornicette variamente colorate. Non c'è modo più evidente di 'calarla dall'alto', come una sorta di verità rivelata, che pre-esiste agli allievi e anche all'insegnante. In questo modo non vi è – e non può esserci – alcuna forma di partecipazione e di comunicazione effettiva tra maestro e allievi (e viceversa). La 'fisica di Power Point' è quanto di più dogmatico si possa pensare dal punto di vista didattico e se ne dovrebbe scoraggiare l'utilizzo nelle scuole.

3. L'attività di laboratorio come proposizione di problemi

Abbiamo già posto in evidenza che l'attività di laboratorio come 'guida alla scoperta delle leggi' – per intenderci, quella che propone di accertare la relazione tra forza e accelerazione, ad esempio, o la misura della circuitazione del campo elettrico, *et similia* – è non solo inutile, ma diseducativa, fondata com'è sull'equivoco che le leggi abbiano un'esistenza indipendente dal fisico che progetta e interpreta i dati dell'esperienza. Dal punto di vista puramente pedagogico, tuttavia, l'aspetto più negativo di questa forma di laboratorio è il fatto che fornisce risposte (false) a domande che l'allievo non si è mai posto. Questo è il peccato originale di tutto l'insegnamento della fisica: che fornisce risposte senza (o prima di) suscitare domande. È la domanda – a cui non corrisponda una

3. Attività di laboratorio

risposta banale – che solleva l’attenzione dell’allievo, che lo sollecita a essere protagonista dell’attività sperimentale. Può trattarsi di un problema di misura come i seguenti.

» PROBLEMA 1: *Qual è lo spessore del segno di una penna biro?*

L’errore più grave che possa fare l’insegnante è quello di fornire risposte, sia riguardo al risultato sia alle procedure sperimentali da adottare. Ciò che deve fare è indurre gli studenti a fare delle previsioni e guidarli a trovare una soluzione al problema compatibile con la strumentazione accessibile. Una possibile è la seguente:

MATERIALE

- una penna biro;
- una riga da disegno;
- una striscia di carta millimetrata.

Il volume dell’inchiostro depositato sulla carta sarà data dal prodotto dell’area del segno per il suo spessore, cioè da

$$V = Lls \quad [1]$$

dove l indica la larghezza del segno, L la sua lunghezza e s il suo spessore.

Vi sono quindi tre misure da fare: la larghezza e la lunghezza della traccia e il volume dell’inchiostro. Per la prima possiamo tracciare, con l’aiuto di un righello, un certo numero di tratti adiacenti, fino a coprire uno spessore misurabile con la striscia di carta millimetrata. A questo punto, si segna sul tubicino della penna, l’altezza a cui arriva l’inchiostro e si comincia a tirare righe lunghe 1 m su vecchi fogli di carta. L’operazione prosegue fino a che il livello dell’inchiostro nel tubicino sia calato notevolmente rispetto all’iniziale (tanto da essere misurabile). Resta ora da misurare il diametro interno d del tubicino stesso e questo si può fare facilmente appoggiandolo su una striscia di carta millimetrata. Con questa possiamo misurare anche la variazione di livello dell’inchiostro, e ciò consente di determinare il volume V dell’inchiostro consumato nel tracciare le righe. Il numero di queste è anche la lunghezza L (in metri) del segno tracciato.

A questo punto abbiamo tutti i dati necessari da inserire nella relazione e ricavare il valore dello spessore s del segno. L’unica cosa a cui bisogna prestare attenzione è che le grandezze in gioco siano espresse in unità coerenti.

» PROBLEMA 2: Qual è la lunghezza della traccia in un disco?

MATERIALE

- un disco LP;
- un disco CD.

La prima cosa è fare delle previsioni: qualche decina di metri? Oppure qualche centinaio o qualche chilometro? In che modo (o modi) fare la misura? È necessario distinguere tra il vecchi LP e i moderni CD. Cominciamo dai primi.

Valori tipici del raggio interno e dell'esterno della zona incisa sono 7,5 cm e 15,5 cm. Un valore tipico della durata della registrazione è 20 minuti, che corrispondono a $33,3 \times 20 = 666$ giri del disco, poiché la frequenza di rotazione è 33,3 giri/minuto. Se assimiliamo ognuno di questi a una circonferenza e facciamo la media tra quella più interna e l'esterna, la lunghezza della traccia sarà

$$L = 2\pi \frac{7,5 + 15,5}{2} \times 666m = 480m$$

Generalizzando, la lunghezza della traccia è data da

$$L = 2\pi \frac{r + R}{2} \times 33,3 \times T \quad [2]$$

dove r e R indicano il raggio interno e quello esterno della fascia incisa e T la durata della registrazione in minuti.

Lo stesso metodo vale per i moderni CD, solo che, in questo caso, la frequenza di rotazione è variabile. Il disco gira in modo che il fascio laser percorra la traccia alla velocità costante di 1,2 m/s. Questo richiede che il periodo di rotazione sia proporzionale al raggio della traccia che viene percorsa. Se il raggio interno della zona registrata è 3 cm e quello esterno 6 cm, la frequenza di rotazione alla fine è la metà che all'inizio. La misura della lunghezza della traccia è più facile che nel caso del LP poiché richiede solo la misura della durata T della registrazione. La lunghezza della traccia è data semplicemente da

$$L = VT \quad [3]$$

dove V indica la velocità standard.

3. Attività di laboratorio

» PROBLEMA 3: *Come misurare il periodo di rotazione della Luna?*

L'insegnante non si faccia ingannare dal fatto che tutti sanno che la luna ruota intorno alla terra: quasi nessuno sa che cosa realmente significhi e non saprebbe neppure ricavare il periodo da un calendario che riporti le fasi lunari. Non sa, in particolare, in che misura questo moto sia percepibile all'osservatore terrestre. Molti, infatti, fanno confusione tra il moto di rivoluzione della luna e il moto apparente diurno.

MATERIALE

- un righello.

Il modo più semplice di fare la misura è di misurare la distanza angolare tra la Luna e un pianeta, per esempio Marte o Venere. Bisogna quindi approfittare del periodo in cui la luna è in congiunzione con un pianeta. Il punto di partenza può essere la misura della distanza dall'occhio del righello tenuto trasversalmente, a braccio teso (Figura 4).

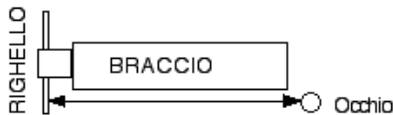


Figura 4. Misura della distanza tra occhio e righello.

Poniamo che la distanza sia 80 cm. Allora un centimetro a quella distanza corrisponde a un angolo di ampiezza

$$\left(\frac{1}{80} \frac{180}{\pi} \right)^\circ = 0,7^\circ$$

Tenendo il righello a braccio teso è facile misurare la distanza angolare tra Marte e la Luna. Si ripete la misura, alla stessa ora, qualche sera dopo e la differenza $\Delta\theta^\circ$ delle due misure fornisce lo spostamento angolare della Luna nel tempo Δt intercorso tra di esse. Il periodo sarà allora dato da

$$T = \frac{\Delta t}{\Delta\theta^\circ} \times 360^\circ \quad [4]$$

Il risultato si può controllare su un calendario che riporta le fasi lunari.

4. Fisica qualitativa

When I heard the learn'd astronomer, when the proofs, the figures, were ranged in columns before me; When I was shown the charts and the diagrams, to add, divide, and measure them, When I, sitting, heard the astronomer, where he lectured with much applause in the lecture-room, How soon, unaccountable, I became tired and sick, Till rising and gliding out, I wander'd off by myself, In the mystical night-air, and from time to time, Look'd up in perfect silence at the stars.⁵

Nella lezione tenuta in occasione del ricevimento della Medaglia Oersted nel febbraio 2003, David Hestenes ha sottolineato le analogie tra i processi di apprendimento del bambino e dello scienziato, insistendo sul carattere creativo dell'apprendimento concettuale, sintetizzato dalla massima di Piaget: «Capire è inventare». Questo significa, per fare un esempio, che per uno studente imparare la fisica newtoniana è un atto creativo simile a quello originale di Newton e Galileo, con la differenza che lo studente viene guidato in questa transizione. Ciò non toglie che il suo passaggio dalla fisica naïf al sistema di pensiero newtoniano sia sintesi di un complesso processo rivolutivo che dovrebbe portare al rinnovamento del codice interpretativo dell'esperienza fisica del ragazzo. Questa – e solo questa constatazione – dovrebbe essere alla base di qualsiasi valutazione dell'efficacia dell'insegnamento della fisica, cioè valutazione della capacità di individuare fenomeni sui quali sia possibile argomentare in termini newtoniani (per restare nell'ambito della meccanica). La cosa è molto meno accademica di quanto possa apparire e può avere sensibili ricadute sul lavoro svolto con gli allievi. Nella ritualità scolastica – resa più pedante e pesante da un *immane pondo* di ipocrisie pseudo-pedagogiche – ci si è dimenticati che *la* fisica non è pianta che possa esistere da sola. Una teoria è una visione (coerente) di una certa classe di fenomeni che è in concorrenza con altre teorie e che si mantiene viva e feconda fino a che si confronta con queste. Il valore di una teoria (ampiezza e fecondità predittiva) si misura per confronto con le teorie concorrenti. Inoltre, più di quanto non si pensi, ci si dimentica che una teoria è costituita da idee e che la matematica è la forma con cui queste idee vengono con fedeltà rappresentate. In realtà, in un corso di fisica, l'interpretazione teorica viene presentata quasi sempre in parallelo ai fenomeni che la teoria pretende di organizzare in una struttura razionale. Vi è una sorta di corrispondenza biunivoca tra i *fenomeni* e le *leggi*, anzi, per descrivere i fenomeni si usa il linguaggio della teoria, per cui quelli diventano una sorta di proiezione di questa. Essenziale al procedimento è il linguaggio matematico, per mostrare che la detta corrispondenza è perfetta. Non si dà mai il caso in cui si propongano interpretazioni alternative di una stessa classe di fenomeni.

⁵ Withman, Walt, *Leaves of Grass*, Barnes & Nobles Classics, New York (2004), p. 423

5. L'esperimento di Thomson

È descritto in tutti i manuali di fisica ed è proposto come l'esperimento che dimostrò l'esistenza degli elettroni. La descrizione comprende l'applicazione dei due campi, elettrico e magnetico, incrociati in modo da produrre deflessione nulla del fascio catodico, e l'eliminazione del parametro *velocità* dall'equazione che consente così la determinazione del rapporto carica/massa. L'aspetto più rilevante viene di solito taciuto: si tratta di corpuscoli o di onde? Ai tempi della ricerca di Joseph John Thomson (1896/1897) vi erano due scuole di pensiero relativamente alla natura dei raggi catodici: la scuola inglese, che sosteneva l'ipotesi corpuscolare di W. Crookes, e la scuola continentale, rappresentata da Ph. Lenard, che sosteneva trattarsi di onde nell'etere.

Le opinioni di Lenard si basavano su numerosi e accurati esperimenti su quelli che, per lungo tempo, furono indicati come *raggi di Lenard*. Uno dei 'fatti' sperimentali in favore della tesi ondulatoria era il seguente: se si collocavano due piastrelle metalliche ai lati del fascio catodico e si applicava tra queste una tensione elettrica, il fascio non subiva alcuna deviazione. Crookes aveva dimostrato che il fascio veniva deviato (nella direzione che era lecito aspettarsi per particelle negative) nel passaggio attraverso un campo magnetico, ma i tentativi di produrre una deviazione con un campo elettrostatico erano falliti, per quanto grande ne fosse l'intensità. A proposito di questa difficoltà, Thomson scrive:

An objection very generally urged against the view that the cathode rays are negatively electrified particles is that hitherto no deflection of the rays has been observed under a small electrostatic force ... Herz made the rays travel between two parallel plates of metal placed inside the discharge tube, but found that they were non deflected when the plates were connected with a battery of storage cells; on repeating this experiment I at first got the same result, but subsequent experiments showed that the absence of deflection is due to the conductivity conferred on the rarefied gas by the cathode rays. On measuring this conductivity it was found that it diminished very rapidly as the exhaustion increased; it seemed then that on trying Hertz's experiment at very high exhaustions there might be a chance of detecting the deflection of the cathode rays by an electrostatic force.

L'idea – suggerita a Thomson dall'esperienza che si era fatto con i suoi studi sull'influenza che i raggi X avevano sui gas – era quindi che i raggi catodici, analogamente ai raggi X, inducessero conducibilità nel gas attraverso il quale si propagavano. Ma la tecnologia del vuoto dei tempi di Thomson consentiva di raggiungere rarefazioni tali da poter controllare una simile ipotesi:

It was only when the vacuum was as good one that the deflection took place, but that the absence of deflection is due to the conductivity of the medium is shown by what takes place when the vacuum has just arrived at the stage at which the deflection

begins. At this stage there is a deflection of the rays when the plates are first connected with the terminal of the battery, but if this connection is maintained the patch of fluorescence gradually creeps back to its undeflected position. This is just what would happen if the space between the plates were a conductor, though a very bad one, for then the positive and negative ions between the plates would slowly diffuse until the positive plate became coated with negative ions, the negative plate with positive ones: thus the electric intensity between the plates would vanish and the cathode rays be free from electrostatic force.

As the cathode rays carry a charge of negative electricity, are deflected by an electrostatic force as if they were negatively electrified, and are acted on by a magnetic force in just the way in which this force would act on a negatively electrified body moving along the path of these rays. I can see no escape from the conclusion that they are charges of electricity carried by particles of matter.

A questo punto Thomson descrive il classico esperimento dei campi incrociati che permette la misura del rapporto e/m per le particelle che ha ipotizzato. Nei manuali si mette in evidenza che l'equilibrio delle due forze, elettrica e magnetica, consente l'eliminazione della velocità nel calcolo di e/m in ragione del fatto che

$$v = \frac{E}{B} \quad [5]$$

Eliminazione dall'equazione non dovrebbe significare eliminazione dall'orizzonte fisico, neppure come ordine di grandezza. E infatti Thomson non lo fa. Egli calcola v e trova che è circa un decimo della velocità della luce. E questo è uno degli argomenti che mette in campo contro l'ipotesi dei raggi catodici come fenomeno ondulatorio. Ma è anche il motivo per cui, nell'analisi dell'esperimento, si possono trascurare gli effetti della gravità e ciò solo raramente viene evidenziato nei libri di testo.

Nelle sue misure del rapporto carica/massa dei raggi catodici, Thomson trova che i valori variano in un intervallo che va da $0,67$ a $0,90 \times 10^{11}$ C/kg. La ricerca della migliore accuratezza è motivata da una ragione precisa: egli deve decidere se, come nel caso dell'elettrolisi, i portatori di carica variano in relazione ai materiali utilizzati, oppure se, come crediamo oggi, si tratti di una sola specie di particelle. E a questo scopo egli utilizza metalli diversi come catodi e anche gas diversi all'interno dell'ampolla del suo apparato. Thomson mette a confronto il rapporto carica/massa che caratterizza di ioni idrogeno nell'elettrolisi

$$\left(\frac{qH}{mH} = 9,6 \times 10^7 \frac{C}{kg} \right)$$

3. Attività di laboratorio

con il valore ottenuto per i raggi catodici, che è mille volte maggiore. A questo proposito osserva:

Thus for the carriers of electricity in the cathode rays e/m is very large compared to its value in electrolysis. The size of e/m may be due to the smallness of m or the largeness of e , or to a combination of these two. That the carriers of the charges in cathode rays are small compared with ordinary molecules is shown, I think, by Lenard's results as to the rate at which the brightness of the fluorescence produced by these rays diminishes with the length of path travelled by ray.⁶

In questo modo Thomson arriva all'idea, rivoluzionaria, che i raggi catodici possano essere costituiti da entità subatomiche universali.

Nella vulgata scolastica di questo travaglio – quantitativo in quanto qualitativo – generato dalla concorrenza tra due modelli alternativi, di questo travaglio, dicevamo, non resta più nulla. Si descrive l'esperienza di Thomson come se la sua interpretazione fosse univoca e il suo scopo fosse solamente la determinazione del rapporto carica/massa dell'elettrone, dimenticando che, alla base di tutto questo vi è la convinzione che esista l'elettrone al singolare.

Vi è un solo caso in cui, tradizionalmente, si fa un confronto qualitativo tra due teorie concorrenti ed è quello delle teorie corpuscolare e ondulatoria della luce. La fisica newtoniana che funge da supporto interpretativo del modello eliocentrico non viene mai posta a confronto (qualitativo) con la fisica aristotelica che rappresenta l'ambito teorico proprio del modello geocentrico.

6. Possiamo dirci 'post-aristotelici'?

Chi non ha imparato a scuola che alternando «sensate esperienze» e «certe dimostrazioni» Galileo ha sgominato il dogmatismo degli aristotelici e aperto la via alla marcia trionfale del progresso scientifico? Come alcune altre cose che si imparano a scuola, anche questa è una bugia. E non è nemmeno raccontata molto bene. Galileo non ha rivelato nessun Metodo Scientifico per il semplice fatto che una cosa del genere non esiste. Come ogni vero scienziato [...] Galileo era pronto a negare l'evidenza se questa contraddiceva le sue convinzioni, e a stracchiarla fino all'illecito se poteva servire a renderle credibili.⁷

L'attività didattica che proponiamo è basata su un testo comparso nel 1611 – l'anno successivo alla pubblicazione del *Sidereus Nuncius* – ad opera di Ludovico delle

⁶ Thomson, J.J., *On cathode rays*, «Philosophical Magazine», XLIV, 1897.

⁷ Cini, Marcello (1990), *Trentatrè variazioni su un tema*, Roma, Editori Riuniti.

Colombe, illustre filosofo, poeta e scienziato fiorentino, che riguarda specificamente il moto di rotazione della Terra. Il testo, naturalmente, riveste interesse per gli storici della scienza, tanto che è stato riportato nell'Edizione Nazionale delle *Opere*⁸ unitamente alle postille apposte dallo stesso Galileo, ma presenta anche aspetti di grande interesse dai punti di vista didattico. Per due motivi: 1) perché mostra come l'osservazione sperimentale non sia oggettiva ma dipenda dal più generale sistema di pensiero (la teoria) e 2) perché offre l'occasione agli studenti (e agli insegnanti) di valutare su se stessi in quale misura sia avvenuto il traghettamento dalla sponda della fisica intuitiva (che identifichiamo con l'*aristotelica*) a quella della fisica *newtoniana*.

Il testo può fornire spunti di riflessione per quegli insegnanti che inclinano a una volgarizzazione scientifica ingannevolmente facile (e facilona). Può infatti ingenerare qualche salutare dubbio sull'opportunità di trasmettere ai bambini il messaggio che la Terra ruota su se stessa o, meglio, sul significato che questa comunicazione assume nel codice interpretativo di un fanciullo (giustamente e pertinacemente aristotelico). L'informazione dovrebbe introdurre una contraddizione insanabile, che il ragazzo supera solo perché la cataloga non come verità (*episteme*) ma come nozione scolastica, il cui significato cognitivo è diverso.

Il testo è il seguente:

1. Primieramente: che mai per lor fé, risponderanno i Copernici, che tengon muoversi la Terra, a questo argomento fondato nell'esperienza? Una artiglieria, volta con la bocca verso oriente, secondo il corso della Terra, dandogli fuoco, manderà la palla poco spazio lontana: poiché, mentre la palla è fuori sospesa nell'aria, la Terra porterà con tanta velocità l'artiglieria dietro ad essa palla, che avanti la sua caduta sarà dall'artiglieria raggiunta. E se l'artiglieria sarà volta con la bocca oppostamente al moto di essa Terra, la distanza della palla dal pezzo della bombarda sarà molto maggiore, atteso che nel tempo che la palla corre inanzi per l'aria spinta dall'impeto della polvere, la Terra col suo movimento velocissimo farà stornare indietro l'artiglieria. Ma questa differenza di tiri non si vede; adunque la Terra non si muove [...]

2. Procediamo nel secondo luogo con una ragione, ché tanto più facile, quanto più viva e sensata. Se la Terra si movesse, chi non vede che a tirare con la balestra, come molti fanno, per farsi tornar la palla a' piedi, ella non vi tornerebbe mai? ma ella vi torna: adunque la terrena machina non si muove ... Ora, poi che ella cade dove è il balestriere, sarà forza confessare che la Terra non si muova; anzi, che se la Terra si girasse, il suo corso sarebbe tanto veloce, per esser più di 1300 in circa miglia per ora, che niuno ferirebbe mai uccelli, né darebbe nel destinato segno, tirando: poi che se la cosa a cui si mira fosse davanti a chi tira, secondo il moto del-

⁸ L. Delle Colombe, *Contro il moto della Terra*, Opere di Galileo Galilei, Edizione Nazionale a cura di Antonio Favaro, Barbera, FI 1968, Vol. 3°, Parte 1°.

3. Attività di laboratorio

la Terra, quando la palla fosse per aria, in cambio di colpire, trapasserebbe di gran lunga più alto, e, per lo contrario, darebbe basso un mondo, chi stesse mirando oppostamente al moto d'essa Terra; per che nel primo caso, il segno che è posato su la Terra abbassera sfuggendo, e nel secondo, comparirebbe alzandosi: e, tirandosi dalla parte destra o sinistra, si darebbe alle bande del bersaglio [...]

3. Venghiamo al terzo argomento per mostrar che la Terra non si muova. Se la Terra si muovesse, noi non avremmo invidia nella velocità degli uccelli: poi che quelli che ci volassero dietro per raggiungerci, non ci arriverebbero mai, se fossimo da lor seguitati secondo il corso della Terra, dal cui movimento saremmo portati con prestezza molto maggiore che non è quella del volo degli uccelli. Per lo contrario poi, saremmo raggiunti in un batter d'occhio, se ci volassero incontro, ben che di molto lontano. Sento che i Copernici, in guisa d'uomo che sogna, prestamente spacciandosene, rispondono, che il primo mobile, volgendo seco in giro col moto del ratto tutto questo universo inferiore a lui, porta seco uniformemente l'aria, la Terra e tutti gli altri elementi, e conseguentemente tutti gli altri corpi che son nell'aria sospesi, come se fossero tutto un corpo, a guisa che fanno i nodi nel legno, al moto del quale si muovono anch'essi; e che perciò la velocità del moto della Terra non toglie che essi uccelli non possano raggiungerci, poi che avanzano col moto proprio noi che scorriamo solo col moto dell'universo, dal quale son portati anche gli uccelli.

Se la lettura di queste proposizioni provoca grandi risate negli studenti, significa che non hanno colto il significato dell'argomentare di messer Lodovico. Dal punto di vista logico, questo è inattaccabile: se la Terra ruotasse, come sostengono i 'copernici', si verificherebbero tutti i fenomeni descritti, che invece non si osservano. *Ergo*, la Terra non si muove.

Il fatto è che un bambino non ha alcuna difficoltà a rappresentarsi la Terra come una boccia in rotazione, ma chi abbia una certa cultura fisica si rende conto che l'ipotesi della Terra in rotazione pone gravi difficoltà di natura fisica. Poiché il raggio della Terra è $6,4 \times 10^3$ km, e si vuole che compia una rotazione in un periodo di 24 ore, la velocità lineare all'equatore sarebbe

$$V = 2\pi \frac{R}{T} = 2\pi \frac{6,4 \times 10^6}{24 \times 3,6 \times 10^3} \frac{m}{s} \cong 465 \frac{m}{s}$$

cioè superiore alla velocità del suono: una velocità enorme per oggetti terrestri. I seguaci di Galileo sostengono che una velocità tale non comporta effetti sensibili, mentre invece dovrebbe dare luogo a fenomeni del tipo di quelli descritti efficacemente dal Delle Colombe: all'interno della fisica aristotelica. Il punto è che quelle indicate dal dotto fiorentino sono evidenze sperimentali dell'immobilità della Terra solo nel sistema

di pensiero della fisica di Aristotele. Quindi la lettura di questo passo mette in evidenza che nessuna osservazione sperimentale è di per sé significativa: il significato l'acquista solo all'interno di un certo sistema di pensiero. Le osservazioni sperimentali indicate da messer Ludovico sono sensate esperienze – che valgono quelle suggerite da Galileo – ma solo nell'ambito della meccanica aristotelica. Ne segue che l'accettazione del modello della Terra in rotazione comporta la necessità di ripudiare la meccanica aristotelica e di costruirne una nuova nell'ambito della quale l'assenza dei fenomeni indicati trovi spiegazione: la meccanica newtoniana, appunto. Gli assiomi sui quali si fonda tolgono qualsiasi rilevanza fisica alle velocità; se vogliamo comprendere il mondo non dobbiamo guardare alle velocità, ma solo alle accelerazioni – concetto affatto estraneo a messer Ludovico.⁹

Certo, le accelerazioni che il newtoniano propone di misurare sono piuttosto piccole. Infatti l'accelerazione centrifuga all'equatore è solo $3,4 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$. Quindi il modello copernico-newtoniano ci chiede di non occuparci degli effetti di velocità superiori a un Mach e di cercare gli effetti di un'accelerazione inferiore a 4 millesimi dell'accelerazione di gravità: cosa non facile da accettare per una persona sensata.

Un altro strumento concettuale che manca a Galileo, per rispondere agli argomenti di Ludovico Delle Colombe, è il concetto newtoniano di gravità come forza di attrazione tra i corpi. Un concetto, anche questo, che Galileo rifiutava come «una favola per bambini» e che i maggiori scienziati dell'epoca di Newton trovavano difficile da accettare. Allora, il fatto che la notizia del moto della Terra, data ai bambini e agli adolescenti, non provochi alcun rifiuto, è da attribuire alle più approfondite e diffuse conoscenze di fisica dei nostri scolari o a qualche altro meccanismo psicologico? Significa forse che, per qualche ragione, i nostri scolari quando vanno a scuola sono già newtoniani praticanti o, come tanti nella scuola, applicano l'arte dell'*honestissima dissimulazione*?

Certo, alla fine di un corso di meccanica newtoniana, un ragazzo dovrebbe possedere gli strumenti concettuali di cui Galileo era privo ed essere in grado di ribattere alle argomentazioni del Delle Colombe.

Dal punto di vista epistemologico, vi è poi un'altra questione di non secondaria importanza. Immaginiamo messer Ludovico che espone le sue (aristoteliche) obiezioni e il liceale che risponde con le 'prove' del moto della Terra che ha diligentemente ricavato dal manuale di geografia fisica (newtoniano). Esiste un criterio che consenta di stabilire quale dei due è nel vero e quale in errore?

⁹ E non del tutto chiaro neppure a Galileo, che si trova nella difficile posizione di dover difendere il modello copernicano senza poterlo appoggiare su una meccanica adeguata. La sua difesa, infatti, si basa su argomentazioni tutt'altro che limpide, come dimostrano le note che pose a margine dello scritto.

7. Laboratorio qualitativo

The most serious criticism which can be urged against modern laboratory work in Physics is that it often degenerates into a servile following of directions, and thus loses all save a purely manipulative value. Important as is dexterity in the handling and adjustment of apparatus, it can not be too strongly emphasized that it is grasp of principles, not skill in manipulation which should be the primary object of General Physics courses.¹⁰

Un aspetto della fisica completamente trascurato nella tradizione scolastica italiana è quello qualitativo e concettuale, polarizzata com'è solo sul versante *lumpen-quantitativ*. Eppure quello delle idee, dei paradigmi sulla base dei quali si interpretano i fenomeni, dovrebbe essere l'aspetto più importante dell'insegnamento. E dovrebbe trovare uno spazio adeguato nell'attività di laboratorio. Proponiamo alcuni esempi.

Esempio 1

MATERIALE

- una bottiglia di plastica da acqua minerale.

Si riempie la bottiglia di acqua calda (non necessariamente bollente), poi la si svuota e la si tappa rapidamente. Dopo qualche minuto si osserva che la bottiglia si accartoccia.

Della dimostrazione si possono dare molte varianti. Una delle più suggestive è la seguente.

MATERIALE

- una bottiglia di vetro pirex;
- un tappo forato adatto alla bottiglia;
- una vaschetta.

Nel foro del tappo si fa passare un tubo di vetro lungo 15-20 cm. Si prepara la vaschetta riempiendola di acqua fresca. Si riempie la bottiglia di acqua molto calda, la si svuota e, rapidamente, vi si applica il tappo, con il tubo inserito. Si immerge il tubo nella vaschetta dell'acqua e si osserva la formazione di una fontana, cioè un passaggio d'acqua dalla vaschetta alla bottiglia (Figura 5).

¹⁰ Millikan, R.A. (1903), *Mechanics, Molecular Physics and Heat*, Boston, Ginn & Co. Publisher.

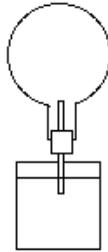


Figura 5. Fontana ad aspirazione.

In questa esperienza non vi è alcuna misura da fare; bisogna cercare una spiegazione a ciò che si osserva.

Esempio 2

MATERIALE

- un vaso di vetro o plastica con coperchio;
- un lumino (o un mozzicone di candela).

Si fissa il lumino sul fondo del vaso (Figura 6) e lo si accende.

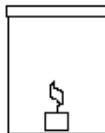


Figura 6. Il lumino acceso dentro al contenitore.

Si chiude il vaso e, rapidamente, lo si lascia cadere, verticalmente, tra le mani di un ricevitore che lo acchiappa al volo. Se la caduta è stata abbastanza lunga (circa un metro), quando il vaso arriva tra le mani del ricevitore, il lumino è spento. Naturalmente, lo spegnimento non può essere dovuto al vento perché il vaso è chiuso. Il problema è quello di trovare una spiegazione al fenomeno.

3. Attività di laboratorio

Esempio 3

MATERIALE

- nessuno.

L'insegnante invita un allievo maschio a compiere un esperimento. Il ragazzo si dispone di fronte a una parete a una distanza esattamente uguale a tre dei suoi piedi e piega il busto fino ad appoggiare la testa contro il muro (più o meno ad angolo retto). Davanti ai piedi del ragazzo viene posta una borsa (o un altro oggetto di qualche chilogrammo) che egli deve afferrare con entrambe le mani e sollevare (Figura 7).

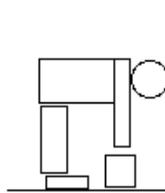


Figura 7. Posizione di partenza dello sperimentatore.

Nonostante gli sforzi, la cosa non riesce. Lo studente chiederà di riprovare prima di rinunciare e altri studenti maschi tenteranno la prova: l'esito sarà lo stesso. A questo punto, si ripeterà la prova con una ragazza e il risultato sarà diverso. Tutte le ragazze superano con facilità la prova che si è rivelata insuperabile per i maschi.

Anche in questo esperimento non c'è alcuna misura da fare: si propone invece di trovare una spiegazione a ciò che si osserva.

Esempio 4

MATERIALE

- un tavolo;
- un pattino;
- un mattone.

Mediante spessori collocati sotto le gambe del tavolo gli si dà un'inclinazione tale che il mattone, appoggiato sulla faccia più piccola, si ribalti (Figura 8a).



Figura 8. (a) Il mattone, appoggiato sul tavolo inclinato, si ribalta. (b) Posto su un carrello che scende liberamente, resta in equilibrio.

Si ripete la prova con il mattone appoggiato sul carrello che scende liberamente lungo il tavolo (si richiede una certa destrezza da parte del ragazzo incaricato di afferrare mattone e carrello al termine della discesa) (Figura 8b).

Anche in questo caso non vi sono misure da fare. Si propone, invece, di trovare una spiegazione al fenomeno.

Esempio 5

MATERIALE

- una tavola quadrata di compensato di 1 m di lato (circa);
- un piccolo altoparlante (circa 3 cm di diametro);
- un generatore di frequenze.

Si tratta di materiali generalmente presenti nei laboratori delle scuole. In assenza di questi, si può usare anche un piccolo altoparlante (magari recuperato da una vecchia radiolina) collegato a un mangianastri.

A centro della tavola di compensato si pratica un foro di diametro appena inferiore a quello dell'altoparlante. Si accende il generatore e si aggiustano la frequenza e l'intensità in modo che il suono sia gradevole ma piuttosto debole. A questo punto, si colloca l'altoparlante davanti al foro (fissandolo con quattro viti) (Figura 9).

3. Attività di laboratorio

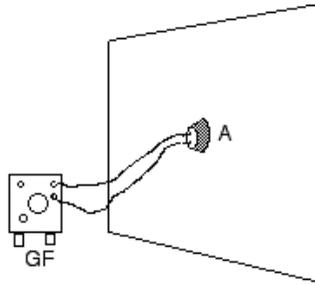


Figura 9. Dispositivo per la dimostrazione. GF = generatore di frequenze; A = altoparlante.

Si osserva che l'intensità del suono aumenta in misura notevole. Se si fa la prova con un altoparlante grande, l'effetto è piuttosto piccolo. Si chiede agli studenti di spiegare il fenomeno.

La spiegazione risiede nel fatto che ogni altoparlante emette simultaneamente due onde: una in avanti (ciò è ovvio) e una all'indietro, sfasata rispetto alla prima di mezzo periodo. A causa della diffrazione le due onde si propagano anche dalla parte opposta del piano dell'altoparlante e interferiscono distruttivamente. Gli effetti diffrattivi sono più marcati per un altoparlante piccolo che per uno grande. Montando l'altoparlante sulla tavola di legno si impedisce che le onde interferiscano e quindi si registra un aumento dell'intensità del suono.

Esempio 6

MATERIALE

- una macchina fotografica classica.

Nelle macchine fotografiche tradizionali, sulla ghiera che regola il diaframma, è riportata la seguente serie di numeri che caratterizzano aperture decrescenti:

2 2,8 4 5,6 8 11 16 22

Si chiede di trovare la chiave di questa successione di numeri. Dire, per esempio, quale numero si dovrebbe mettere dopo il 22 o prima del 2 e fornire una spiegazione del motivo per cui si utilizza una scala non lineare.

Il problema non è semplicissimo ed è necessario dare agli allievi il tempo di fare indagini anche fuori della scuola e raccogliere informazioni.

Se si assimila il diaframma a un cerchio, l'area varia con il quadrato del raggio. Quindi, per raddoppiare l'area bisogna moltiplicare il raggio per $\sqrt{2} \cong 1,4$.

Esempio 7

MATERIALE

- una bobina (qualche centinaio di spire);
- due LED (*Light Emitting Diode*) di colore diverso;
- un magnete.

I LED sono diodi che hanno la proprietà di accendersi anche con correnti molto piccole. Si realizza il circuito di Figura 10.

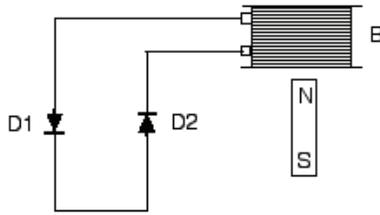


Figura 10. Apparato per la dimostrazione. D1 e D2 = LED; B = bobina; N-S = magnete.

Spenta la luce nella sala, si introduce il magnete nella bobina e si osserva che si accende uno dei LED; quando lo si estrae, si accende l'altro.

L'efficacia didattica di una dimostrazione come questa viene completamente vanificata se l'insegnante fornisce l'interpretazione "autentica": la deve invece utilizzare per scoprire un fenomeno "insieme" ai suoi allievi.

Esempio 8

MATERIALE

- una candela;
- una pallina da albero di Natale;
- un bicchier d'acqua.

3. Attività di laboratorio

Si riveste la pallina di nerofumo tenendola sopra la fiamma di una candela. La si immerge poi parzialmente in acqua e si osserva che la parte immersa appare argentata.

Esempio 9

MATERIALE

- una striscia di carta con due tagli.

Si prende una striscia di carta grande come un biglietto da visita e vi si praticano, con un taglierino o con le forbici, due tagli di uguale lunghezza, paralleli e simmetrici (Figura 11).

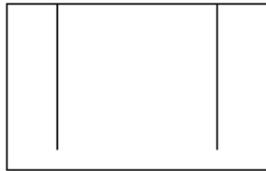


Figura 11. I due tagli nella striscia di carta.

La loro lunghezza dev'essere tale da tagliare quasi la striscia. L'insegnante deve sfidare gli allievi ad afferrare con le dita le due strisce laterali e a tirare (rapidamente o lentamente, a piacere) in modo da staccarle ambedue dalla striscia centrale. I giocatori scoprono che la cosa non riesce mai.

Il problema è dare una spiegazione della cosa e qui l'insegnante deve essere capace di provocare i propri allievi a proporre spiegazioni e saper ascoltare, anche con umiltà. La spiegazione canonica è che non si riesce a tagliare la carta afferrando una sola delle strisce laterali, perché la striscia di carta ha una massa troppo piccola. D'altra parte, anche afferrando ambedue le strisce laterali, una volta che se n'è staccata una ci si trova nella situazione ora detta ed è praticamente impossibile che i due ponti di carta abbiano la stessa resistenza: uno dei due cede prima dell'altro.

8. Le cose potrebbero essere diverse?

Il secondo aspetto del fenomeno che queste ricerche rivelano è la sostanziale inefficacia dell'insegnamento della fisica nelle scuole superiori. I "paradigmi" basati sul senso comune permangono sostanzialmente immutati anche al termine degli studi, magari ecletticamente affiancati a nozioni scientifiche che non vengono uti-

lizzate, però, come strumenti interpretativi della realtà circostante. Da cosa deriva questa “inerzia”? Mi pare chiaro che essa è conseguenza dell’incapacità della scienza di presentarsi come cultura che deve confrontarsi con altre culture. Essa è talmente convinta di insegnare la verità che non si prende la briga di prendere in considerazione l’esistenza di spiegazioni dei fenomeni differenti dalla sua, sia dal punto di vista della storia del pensiero, sia da quello delle conoscenze spontanee. In altre parole ha dimenticato a tal punto le battaglie culturali che ha dovuto sostenere per affermarsi come visione del mondo, da ritenere sufficiente l’insegnamento del catechismo per fare nuovi proseliti. I risultati sono ovviamente gli stessi dell’insegnamento catechistico della religione: quattro formulette che non hanno nulla in comune con la vita quotidiana.¹¹

La fisica è anche l’arte di immaginare mondi diversi o, più modestamente, di chiedersi se gli strumenti che siamo abituati a utilizzare potrebbero essere diversi. Ed è attività oltremodo stimolante per un ragazzo esercitarsi a immaginare versioni diverse di oggetti comuni. Facciamo alcuni esempi.

Esempio 1

Siamo abituati a usare martelli caratterizzati da una pesante massa battente e da un manico leggero. Tuttavia (Figura 12) , sollevare un pesante martello con il peso concentrato all’estremità può essere molto faticoso.



Figura 12. Un martello e una clava di uguale massa e lunghezza.

Certamente meno faticoso sarebbe utilizzare una clava, cioè una sbarra nella quale la massa sia distribuita uniformemente. Si può quindi fare l’esperienza di battere un oggetto con una pesante sbarra metallica. Il ragazzo scopre così che se batte troppo vicino alla mano ha un forte contraccolpo verso l’alto e se batte troppo lontano il contraccolpo è verso il basso. Riesce anche a individuare una zona in cui non si ha contraccolpo. Ed è quella alla distanza di $2/3$ della lunghezza: si tratta del *centro di percussione*. Se si realizza il martello con un manico di massa trascurabile rispetto alla massa battente, l’effetto di contraccolpo è minimo, qualunque sia la lunghezza del manico.

¹¹ Cini (1990), *cit.*

3. Attività di laboratorio

Esempio 2

Una centrifuga per l'insalata è costituita da un cestello che viene messo in rotazione girando una manovella girevole intorno a un asse che non coincide con l'asse di rotazione del cestello (Figura 13a).

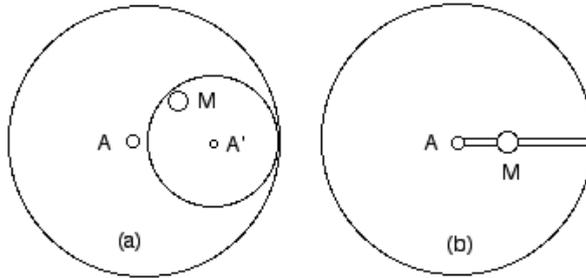


Figura 13. (a) Schema della centrifuga per insalata. M=Manovella; A = asse del cestello; A'= asse della manovella. (b) Progetto alternativo.

Perché non fare una centrifuga con un cestello fatto ruotare direttamente, cioè con la manopola collegata direttamente al cestello come in Figura 13b?

In una centrifuga per l'insalata la moltiplicata ha un rapporto di 1 a 8 e un raggio di circa 15 cm. Se si gira la manopola con un periodo di 1 s, la velocità angolare del cestello è

$$\omega = 8 \frac{2\pi}{T} \cong 50 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

e l'accelerazione centripeta al bordo è

$$a = \omega^2 R \cong 38g$$

Per produrre la stessa accelerazione con l'altra configurazione dovremmo:

- girare la manovella con una frequenza 8 volte superiore alla precedente; oppure
- utilizzare un cestello di raggio otto volte maggiore.

Esempio 3

In una bicicletta la sorgente di energia elettrica è la dinamo. Il rotore di questa è mantenuta in rotazione dalla ruota anteriore, quando la rotella è a contatto con il suo copertone. Non si potrebbero realizzare dinamo da utilizzare come torce elettriche come quella schematizzata in Figura 14?

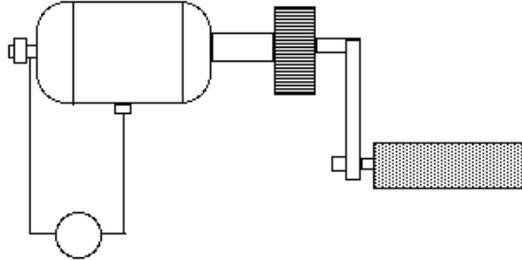


Figura 14. Progetto di dinamo azionata a mano.

La rotella della dinamo da bicicletta ha un raggio di circa 1 cm, mentre il raggio della ruota della bicicletta è circa 35 cm. Se la bicicletta viaggia a 15 km/h, cioè a 4 m/s, la velocità angolare della ruota è

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{4}{0,35} \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 11 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

La velocità angolare della rotella della dinamo è 35 volte maggiore, cioè 365 rad/s, corrispondenti a una frequenza

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = 58 \text{s}^{-1}$$

Si tratta di una frequenza irraggiungibile per la mano di un uomo.

Esempio 4

Le palle da gioco hanno come proprietà precipua quella di rimbalzare. Alcune (per esempio i palloni da spiaggia e da calcio) devono questa proprietà al fatto che contengono aria a una certa pressione. Tuttavia, le loro dimensioni variano in un intervallo abbastanza ristretto: non si costruiscono palle ad aria compressa di dimensioni inferiori

3. Attività di laboratorio

a circa un decimetro. Le palle da tennis, ad esempio, contengono un gas moderatamente compresso, ma non è questo che conferisce loro la proprietà di rimbalzare. Non sarebbe possibile realizzare palle di gomma ad aria compressa di qualche centimetro di diametro?

Consideriamo una sfera di raggio R (Figura 15) da cui tagliamo una calotta di altezza a .

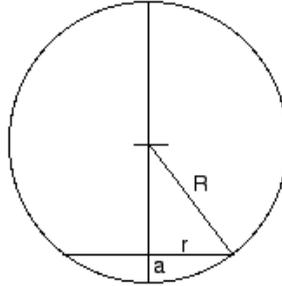


Figura 15. Sfera da cui si ritaglia una calotta di altezza a .

L'area della calotta è data da

$$A = 2\pi Ra \quad [6]$$

Pensiamo ora a una palla sferica gonfiata con aria alla pressione (relativa) P e di schiacciarla per saggiarne la pressione in modo da rendere piatta la calotta sferica. La forza con cui dobbiamo premere è

$$F = PA = P2\pi Ra \quad [7]$$

Mettiamo di disporre di palle di raggio diverso e di comprimerle in modo che la deformazione relativa sia la stessa, cioè che sia

$$a = kR \quad [8]$$

La forza da applicare è allora

$$F = P2\pi kR^2 \quad [9]$$

Questa afferma che per avere una data deformazione relativa con una determinata forza, dev'essere

$$P \propto \frac{1}{R^2} \quad [10]$$

cioè che per un pallone di raggio metà la pressione dev'essere quadrupla. Un pallone da basket ha un diametro di 20 cm e una pallina da ping pong ha un diametro di 4 cm e quindi la pressione al suo interno (se fosse di gomma tenuta gonfia da aria compressa) dovrebbe essere $(20/4)^2 = 25$ volte quella che si usa per gonfiare la prima: una soluzione difficile e costosa al punto da non essere adottabile.

9. Esperimenti *aut*

Per quanto industriosamente le raccogliamo e le scegliamo, da esperienze sensibili non interpretate non potremo mai distillare la scienza. I soli mezzi a nostra disposizione per interpretare la natura sono le idee ardite, le anticipazioni non giustificate e le speculazioni infondate: sono il solo organo, i soli strumenti di cui disponiamo... Quelli tra noi che non espongono volentieri le loro idee al rischio della confutazione non prendono parte al gioco della scienza... Siamo sempre noi a formulare le domande da porre alla natura: siamo noi a tentare di nuovo di porre queste domande in modo da ottenere un “sì” o un “no” ben chiari (perché la natura non ci dà una risposta, se non facciamo pressione per ottenerla). E alla fine siamo ancora noi a dare la risposta... «Una volta per tutte – scrive Weil – desidero proclamare la mia ammirazione illimitata per il lavoro dello sperimentatore, per la sua lotta per strappare *fatti interpretabili* alla natura riluttante, che sa così bene opporre alle nostre teorie in *No deciso* - o un *Si* che nessuno può udire». ¹²

Gran parte delle attività di laboratorio praticate nelle nostre scuole sono – o vengono interpretate come – “verifiche”. Dalle “verifiche” della seconda legge della dinamica, della legge di Ohm, della legge di Boyle, della legge di Hooke, ecc. si è arrivati alla “verifica” delle leggi di Maxwell, in barba al criterio di demarcazione di Popper. Due sono le caratteristiche che connotano queste attività, e per le quali vi sono accurati protocolli relativi sia agli strumenti che alle procedure. Da una parte il fatto che riescono sempre, almeno “nei limiti degli errori sperimentali” (il che potrebbe suggerire che una legge ha una probabilità di essere verificata tanto maggiore quanto più rozza è la procedura); dall'altra, l'atteggiamento di allegro disinteresse manifestato dagli studenti. Vi è infatti qualcosa di misterioso nelle procedure scolastiche: gli studenti, nonostante la crassa ignoranza in fisica, riescono immediatamente, per vie ignote, a

¹² Popper, Karl R. (1970), *Logica della scoperta scientifica*, Torino, Einaudi.

3. Attività di laboratorio

cogliere il carattere mistificatorio, rituale – a volte paradossale – di molte delle attività di laboratorio che la scuola propone. Come quelle cui abbiamo accennato. È più difficile che questo avvenga negli esperimenti simulati al calcolatore – che, per propria natura, riescono sempre – ma non è il caso di farsi illusioni: l'interesse è per lo strumento, non per l'esperienza. L'atteggiamento degli studenti provoca nell'insegnante un comprensibile senso di frustrazione e di rabbia, che è però ingiustificato, poiché, con esperimenti come la citata “verifica della legge di Ohm”, la scuola invia allo studente i due messaggi seguenti:

1. con un voltmetro e un amperometro puoi verificare la legge, cioè che la proporzionalità tra corrente e tensione è *vera*;
2. questa verifica è banale e, infatti, si fa in un paio d'ore.

Il fatto che Ohm abbia incontrato tanta fatica a far accettare all'ambiente accademico quella che oggi indichiamo con il suo nome, dovrebbe indurre a qualche cautela nella sua proposizione didattica e a qualche riflessione sul significato che assume presso gli studenti. Si potrebbe allora scoprire che, nella forma più diffusa, la “verifica della legge di Ohm” è solo una verifica del buon funzionamento degli strumenti che si utilizzano nella prova. Gli esperimenti più significativi, anche scolasticamente, sono quelli che consentono di porre a cimento due codici interpretativi. Uno dei motivi che rendono le esperienze scolastiche scontate e prive di interesse è costituito dal fatto che si sviluppano nel vuoto teorico, cioè in assenza di previsioni diverse suggerite da modelli diversi e concorrenti. Uno di questi, sempre presente, almeno per i fenomeni meccanici, ottici e acustici, è quello che appartiene alla fisica intuitiva, ma non viene mai convenientemente esplicitato e precisato. Va detto che non sempre è possibile, perché la fisica intuitiva non ha qualcosa da dire su tutti i fenomeni di cui si occupa la fisica scolastica. Per esempio, l'elettromagnetismo resta quasi completamente estraneo alla fisica intuitiva. Quasi, perché un bambino che giochi con le barrette magnetiche o osservi i fulmini, elabora qualche sorta di modello anche per questi fenomeni. Per esempio, la “verifica” della legge di Ohm viene proposta in assenza di riferimenti e rimane sospesa in una sorta di limbo teorico, tanto che ai più sfugge anche l'interpretazione che ha nell'ambito del modello più ingenuo di conduzione nei metalli: che la velocità di trascinamento è proporzionale alla forza agente sui portatori di carica. Che cosa rimane allora della “verifica” scolastica della legge di Ohm? Solamente la disposizione e la lettura del voltmetro e dell'amperometro: non è niente; ma ha poco a che fare con la fisica.

Un esperimento scolastico suscita interesse se il risultato non è scontato; o, meglio, se è inspiegabile alla luce del modello adottato. È solo il conflitto cognitivo che può provocare un reale ripensamento delle immagini correnti e quindi la transizione a livelli teorici meno ingenui.

Quello di bere attraverso una cannuccia, ad esempio, è esperienza che appartiene a tutti. Si usa dire (e qui il vocabolario è importante e significativo) che l’acqua “viene succhiata” dalla bocca: spia della condivisione di una delle teorie ingenue più diffuse, quella che si può qualificare come ispirata all’aristotelico *horror vacui*. Secondo questa teoria, l’acqua sale lungo la cannuccia perché, altrimenti, si produrrebbe il vuoto al suo interno, e questo non può accadere. La teoria si ispira a “evidenze sperimentali” come quella di trascinare un corpo nell’acqua: dopo il passaggio, lo spazio vuoto viene immediatamente riempito dall’acqua. Si tratta dell’esperienza che vivono i ciclisti che corrono dietro a un autocarro e sentono quasi di essere “risucchiati” da questo. Con questa teoria si spiegano una quantità di fenomeni: perché un bicchiere estratto dall’acqua “a bocca in giù” rimane pieno, la tecnica per il travaso del vino con la canna, ecc. La fisica scolastica spiega gli stessi fenomeni in altro modo: l’acqua non viene “risucchiata”, ma sale nella canna in quanto spinta dall’aria. Per la teoria ingenua, l’acqua sale per una sua *proprietà* (il rifiuto del vuoto); per la seconda per una proprietà di un secondo corpo: il peso dell’aria. Si tratta di modelli che hanno pari dignità; anzi, la prima è quella generalmente accettata nella vita ordinaria, e non si danno situazioni in cui venga posta in imbarazzo. Nella vita ordinaria un laboratorio – seppur didattico – dovrebbe consentire l’ampliamento delle esperienze e quindi la realizzazione di situazioni fisiche che consentano di mettere a confronto le previsioni di due teorie rivali: l’ingenua e la scolastica.

Esperimento aut 1

MATERIALE

- una bacinella di plastica;
- tubo di vetro lungo almeno un metro e mezzo;
- un tubo trasparente flessibile.

Con un pennarello grasso si traccia sul tubo un segno alla distanza di un metro (circa) dall’estremità e si sfidano gli studenti a riempire d’acqua quel tratto di tubo, aspirando con la bocca. Questi immergeranno il tubo nell’acqua e tenteranno di aspirarla tenendolo verticalmente. Dopo che si saranno convinti dell’impossibilità di fare quanto è richiesto, al professore spetta il compito di mostrare che egli è capace di farlo. Basta che aspiri tenendo il tubo abbastanza inclinato rispetto alla verticale (Figura 16). Si può anche riempire completamente: sul fondo della bacinella si mette un pezzo di gomma e vi si appoggia il tubo. Con un imbuto lo si riempie d’acqua, lo si tappa col dito e lo si solleva (ma in modo che l’apertura inferiore rimanga sott’acqua): il tubo rimane pieno d’acqua.

3. Attività di laboratorio

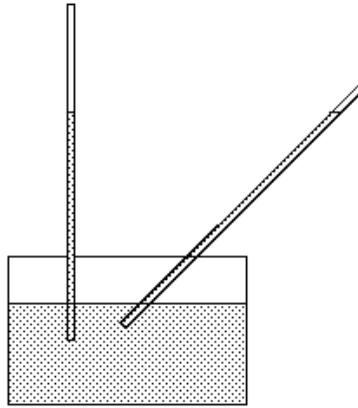


Figura 16. Come riempire d'acqua, aspirando, un tubo comunque lungo.

Abbiamo quindi imparato a riempire d'acqua tubi comunque lunghi con una tecnica che può trovare spiegazione della teoria dell'*horror vacui*. Questo è il momento di lanciare la sfida: la tecnica funzionerà per qualsiasi lunghezza della canna? La risposta la dà un'esperienza che, nella sostanza, abbiamo già descritto, analoga a quella illustrata al cap. 2, par. 10.

MATERIALE

- un bidone di plastica;
- un tubo di plastica semitrasparente lungo almeno 10 m.

Si convince un idraulico di preparare un cappuccio a tenuta per il tubo. Si dispone il bidone sotto una finestra che sia a 11 o 12 m dal recipiente. Si riempie d'acqua il bidone e vi si introduce un colorante qualsiasi, in modo che il liquido sia visibile attraverso la parete del tubo stesso (può bastare del latte). Sul fondo del bidone si dispone un pezzo di gomma e vi si appoggia, verticale, il tubo, fissandolo al balcone. Si riempie poi il tubo con il liquido, fino all'orlo, chiudendone la bocca con il cappuccio preparato in precedenza (può essere necessario utilizzare un mastice). Questo è il momento più importante. Il tubo è completamente pieno d'acqua, non resta che sollevarlo leggermente dal suo appoggio, in modo da liberarne la bocca inferiore: rimarrà completamente pieno? Un buon professore non rovina tutto mostrando di sapere che cosa accadrà, lascia che siano i ragazzi a fare le loro previsioni. Quello che sicuramente non possono prevedere è che l'acqua non rimane oltre i 10 metri e mezzo

(circa) e, soprattutto, che si mette a bollire. Si tratta di due osservazioni irrimediabilmente in conflitto con la teoria ingenua e, a partire da queste, il professore può proporre un'interpretazione diversa.

Una teoria ingenua molto diffusa concerne il significato di “peso” che viene inteso come una proprietà dei corpi. È molto ragionevole che si attribuisca a ciascun oggetto una caratteristica, che si misura mediante la bilancia, e che è un'invariante del corpo stesso. Che questa caratteristica dipenda dallo stato di moto del corpo e dello strumento di cui ci serviamo per misurarla è un colpo alla teoria aristotelica.

Esperimento aut 2

MATERIALE

- una bilancia da laboratorio a display digitale;
- un ascensore.

Si prende un oggetto qualsiasi e lo si pesa con cura in laboratorio. Poi, si trasporta il tutto sull'ascensore della scuola e si cerca di registrare le letture dello strumento nelle varie fasi di funzionamento: alla partenza in salita, durante la salita, in fase di frenata. Si ripetono le osservazioni in discesa: accelerazione iniziale, fase di velocità costante, decelerazione in discesa.

Osservato che, nelle fasi di moto uniforme, la pesata dà lo stesso valore che in quiete; si tratta di spiegare come mai, nelle fasi di accelerazione e decelerazione, il peso varia sensibilmente. Si può anche prospettare una situazione di moto in cui il peso si annulla (oggetto e bilancia in caduta libera).

Anche quello dei fenomeni termici è un terreno sul quale il ragazzo ha già tracciato precise mappe concettuali. Una delle più comuni è l'esistenza di due ipotetici fluidi che vengono identificati con il caldo e con il freddo. Si usa infatti dire che, se si lascia aperta la porta, “entra il freddo” o “entra il caldo”. Secondo questa teoria, se un corpo a temperatura ambiente viene posto a contatto con uno più caldo, allora quest'ultimo cede “calore” al primo. D'altra parte, se un corpo a temperatura ambiente viene immerso in un bagno freddo, allora è il bagno a cedere “freddo” al corpo che, infatti diventa freddo. Si tratta di un modo di vedere i fenomeni termici profondamente radicato e che resiste imperterriti ai corsi di termodinamica. Le ragioni di questo fenomeno culturale – il fatto che la maggior parte degli studenti attraversino i corsi di termodinamica uscendone esattamente come vi sono entrati, in relazione ai fenomeni termici ordinari – sono varie, ma una è certamente prevalente: l'astrattezza delle correnti esposizioni della termodinamica. Il risultato è che all'esame lo studente afferma di guardare al calore come a “energia in transito”, ma poi, quando riempie il thermos di tè caldo, ragiona in termini di *calorico*.

Esperimento aut 3

MATERIALE

- una pompa da bicicletta dotata di treppiede.

Il concetto intuitivo di temperatura ci va bene. Come si possa aumentare la temperatura dell'aria contenuta in una pompa da bicicletta è ovvio: basta immergerla in un bagno caldo e il calore fluirà dall'acqua calda all'aria. Si ha quindi il solito flusso di calore da un corpo caldo a uno freddo. Ma è possibile scaldare l'aria anche senza che questo flusso ci sia. Si fa in modo di tappare saldamente l'ugello di uscita della pompa, con lo stantuffo sollevato. Quindi lo si abbassa premendo fortemente. Se, a pistone abbassato, si va a sentire con la mano la parte inferiore della pompa, si trova che è notevolmente più calda della parte superiore.

Possiamo fare la prova anche al contrario. Dopo aver rovesciato lo stantuffo, si tappa l'ugello con lo stantuffo abbassato e, operando in due che tirano in sensi opposti, lo si solleva. Si può allora avvertire, nella parte inferiore della pompa, un sensibile abbassamento della temperatura.

Si tratta di un fenomeno, in cui la temperatura di un corpo si può far variare senza scambio di "fluido calorico".

La necessità di operare scelte tra modelli diversi si presenta spesso anche all'interno della fisica scolastica. Un bell'esempio è quello affrontato da Galileo nella Giornata Terza dei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, laddove tratta la caduta dei gravi. Assodato che il moto di caduta avviene con velocità crescente, si pone il problema se la velocità cresca proporzionalmente al tempo di caduta o allo spazio percorso. Cioè se

$$v = at \qquad [11]$$

oppure

$$v = kx \qquad [12]$$

Ci proponiamo di risolvere sperimentalmente il problema della scelta tra i due modelli. Cominciamo con l'osservare che non si danno misure (dirette) della velocità istantanea, per cui le ipotesi [11] e [12] non sono direttamente confrontabili. Ciò che siamo capaci di misurare sono distanze e tempi.¹³

¹³ Il fatto che la velocità istantanea sia una grandezza non misurabile non discende da difficoltà tecniche, ma concettuali.

Dalla [12] discende un'affermazione ben precisa: se si prendono due punti a valle di quello di partenza, a distanza x_0 e $2x_0$, rispettivamente, il tempo che la sfera impiega per andare da x_0 a $2x_0$ è indipendente dalla distanza scelta. Dalla [11] discende invece tale tempo dipende dall'intervallo scelto. In particolare che, se si quadruplica l'intervallo, il tempo raddoppia.



Figura 17. Secondo l'ipotesi (2) il tempo che il grave impiega per cadere da x_0 a $2x_0$ è indipendente dalla scelta di x_0 . Secondo l'ipotesi (1), se si quadruplica x_0 , tale tempo raddoppia.

Esperimento aut 4

MATERIALE

- asta metallica a L di un paio di metri di lunghezza (le aste metalliche si trovano nei negozi di bricolage);
- alcune grosse sfere da cuscinetto;
- cronometro.

La misura dei tempi per corpi in caduta libera è piuttosto difficile perché, per distanze di laboratorio, sono dell'ordine del secondo. Seguendo Galileo, faremo allora l'ipotesi che il moto di discesa lungo un piano inclinato non sia di natura diversa da quello della caduta libera, ovvero che la dipendenza dal tempo sia la stessa, pur con velocità più basse, quindi con tempi più lunghi. Faremo quindi rotolare delle sfere lungo la guida di metallo, fissata su un tavolo leggermente inclinato. Segniamo sulla guida due punti, alla distanza di circa 1 m, e il loro punto medio. Facciamo partire la sfera dal primo punto e misuriamo il tempo che impiega a percorrere il tratto tra il punto medio e l'estremo inferiore. Secondo l'ipotesi (2) tale tempo è indipendente dalla distanza su cui è misurato. Segniamo allora un altro punto, alla distanza di 2 m e misuriamo il tempo sulla distanza del metro inferiore. I risultati consentono di scartare l'ipotesi (2).

La tradizione vorrebbe che si "verificasse" l'ipotesi (1), da cui discende che il tempo raddoppia se la distanza viene quadruplicata. Basterà partire dal punto che si trova a 25 cm dalla partenza e misurare il tempo che la sfera impiega per arrivare a mezzo metro. Il risultato sarà tale da confortare la scelta galileiana.

3. Attività di laboratorio

Il contrasto tra il modello corpuscolare della luce e l'ondulatorio è l'unico che trovi qualche spazio nei programmi di fisica per la scuola media. È forse l'esempio più importante – insieme a quello dei massimi sistemi – di due teorie che si contendono uno stesso insieme di fatti osservativi. Nei manuali si legge che, storicamente, la diatriba si è risolta nel 1853 con le misure della velocità della luce in aria e in acqua, compiute da Foucault. Si tratta di misure troppo delicate perché si possano tradurre in versione didattica. D'altra parte, anche le tradizionali esperienze di Young e di Fresnel richiedono una strumentazione piuttosto sofisticata. Questo non significa che non sia possibile proporre un'esperienza del tipo *aut*, relativa a previsioni contrastanti dei due modelli, realizzabile con materiali di fortuna.

Partiamo dalla stessa immagine che viene evocata a proposito della tradizionali esperienze di interferenza: due sorgenti che emettono in fase. Anzi, possiamo immaginare una quantità di sorgenti distribuite su una circonferenza che emettono in fase. Tutti i punti dell'asse della circonferenza sono punti di interferenza positiva. La situazione si può realizzare con una sorgente puntiforme e un disco circolare opaco. Per il principio di Huygens, tutti i punti del bordo diventano sorgenti coerenti e, il centro di uno schermo perpendicolare all'asse sarà punto di interferenza positiva. Quindi, se su uno schermo si proietta l'ombra di un disco opaco, illuminato da una sorgente puntiforme, al suo centro dovrebbe comparire una piccola macchia luminosa. Questa osservazione (la macchia di Poisson) fu avanzata dal matematico Simon Denis Poisson nel 1818, come previsione assurda della teoria ondulatoria sostenuta da Augustin Fresnel. Infatti, secondo il modello corpuscolare newtoniano, l'ombra di un disco dovrebbe essere un cerchio uniformemente oscuro. Si tratta di due previsioni nettamente contrastanti, che ammettono la realizzazione di un *cimento* in senso galileiano.

Esperimento *aut* 5

MATERIALE

- una lampada da auto;
- una scatola di legno o metallo abbastanza grande da contenere la lampada;
- carta stagnola;
- una lente convergente di focale 1 cm;
- uno spillo a testa sferica.

Si apre una finestrella nella scatola e la si tappa con un pezzo di carta stagnola. Al centro si pratica un foro con uno spillo: si realizza così la *sorgente puntiforme*. La si appoggia su un tavolo e, lungo la linea di massima intensità luminosa, a un metro circa di distanza, si colloca la lente. Tra la lente e la scatola, a 15-20 cm da questa, si colloca lo spillo, con la capocchia (un pallino) sull'asse ottico del sistema. Lo studente si

colloca a 15-20 cm dalla lente e guarda verso il foro. Si osservano cerchi colorati all'interno dell'ombra della capocchia e un punto luminoso al centro: la macchia di Poisson.

10. Progetti di ricerca

Dicono quella cognizione esser meccanica la quale è partorita dall'esperienza, e quella esser scientifica che nasce e finisce nella mente, e quella esser semimeccanica che nasce nella scienza e finisce nella operazione manuale. Ma a me pare che quelle scienze sieno vane e piene di errori le quali non sono nate dall'esperienza, madre di ogni certezza, e che non terminano in nota esperienza, cioè che la loro origine, o mezzo, o fine, non passa per nessuno de' cinque sensi.¹⁴

Anche questa è un'attività estranea alla scuola italiana, dove per *ricerca* si intende copiare una pagina dell'enciclopedia o stampare una pagina da internet. Si tratta di attività di laboratorio a risultato aperto, nelle quali cioè non si vuole raggiungere un risultato perfettamente predeterminato come nelle attività convenzionali. In molte scuole europee e americane gli insegnanti hanno abbandonato (almeno parzialmente) le attività da "libro di cucina" che caratterizzano la scuola italiana per impegnarsi in *divergent project* che, se ben condotti, danno allo studente un senso alla sua partecipazione attiva e una più profonda comprensione della fisica che sta sotto ai fenomeni. Volendo indicare un obiettivo per questo tipo di lavoro, potrebbe essere quello di indurre l'allievo a risolvere un problema per via sperimentale.

Questo implica diverse cose:

- che il problema sia esattamente compreso;
- cercare i possibili riferimenti in letteratura e in internet;
- ipotizzare una soluzione;
- ideare una prova sperimentale basata sulla soluzione prevista;
- realizzare l'apparato sperimentale;
- compiere l'osservazione sperimentale;
- valutare i risultati ottenuti;
- ipotizzare miglioramenti o alternative alla prova sperimentale.

Le attività proposte possono avere come scopo quello di fare una misura o semplicemente una determinazione di ordine di grandezza.

¹⁴ Leonardo da Vinci (1966), *Trattato della pittura*, prefazione di M. Tabarrini, Roma, Newton & Compton.

Esempio 1: determinare la velocità angolare di un ventilatore

MATERIALE

- un ventilatore (a quattro pale);
- un oscilloscopio;
- circuito foto-sensibile.

Si consideri il circuito di Figura 18.

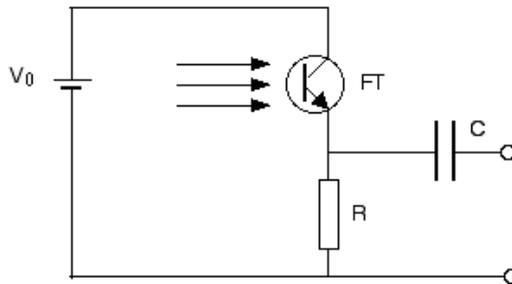


Figura 18. Circuito foto-sensibile. FT = foto-transistor TIL 78; R =resistenza da 1 kW (1/ 4 W); C = condensatore da 1 mF; $V_0 = 9$ V.

Il fototransistor (FT) si comporta come una resistenza il cui valore cala repentinamente quando viene illuminata. La tensione ai capi del resistore R è quindi alta quando FT viene illuminata, bassa quando è oscurata. Basta allora portare la tensione ai capi di R all'ingresso dell'oscilloscopio. Si fissa il transistor a un sostegno orizzontale in modo tale che riceva la luce emessa da un proiettore (alimentato in continua). Tra il proiettore e il fototransistor si colloca il ventilatore (Figura 19).

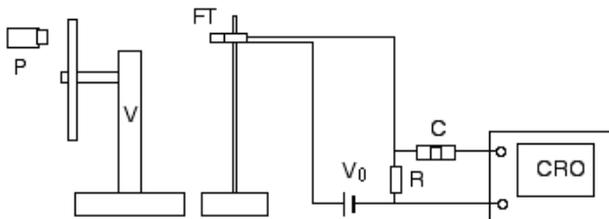


Figura 19. Schema dell'apparato. P = proiettore, V = ventilatore, FT = fototransistor, V_0 = batteria da 9 V, R= resistore, C = condensatore, CRO = oscilloscopio.

Fatto buio nella stanza, e acceso il proiettore, si fanno girare le pale del ventilatore con la mano per verificare il funzionamento del circuito. Messo in moto il ventilatore, sullo schermo dell'oscilloscopio si osserva un segnale simile a quello di Figura 20.

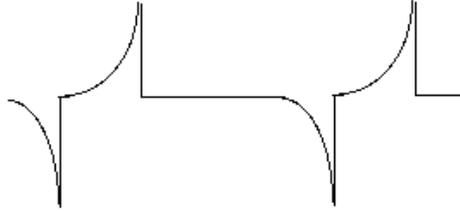


Figura 20. Forma del segnale che si osserva all'oscilloscopio.

Sullo schermo si legge la distanza tra due picchi omologhi e, in base alla taratura dell'asse dei tempi (in ms/div), si passa all'intervallo di tempo (periodo) e da questo alla frequenza di rotazione.

Esempio 2: studio del rendimento di una dinamo da bicicletta

Una dinamo da bicicletta è – come tutte le macchine – un convertitore di energia. Trasforma infatti l'energia meccanica in energia elettrica. Tuttavia, una parte viene dispersa nell'operazione di conversione. Vogliamo avere un'idea della frazione di energia che viene effettivamente prodotta sotto forma di energia elettrica. Un modo di procedere potrebbe essere il seguente.

MATERIALE

- una dinamo da bicicletta;
- una lampadina per detta dinamo;
- una decina di grossi bulloni;
- tester.

La prima cosa da fare è determinare la resistenza interna della lampadina. A questo scopo la si connette a una batteria da 4,5 V (Figura 21) e con un tester predisposto a milliamperometro si misura l'intensità della corrente.

3. Attività di laboratorio

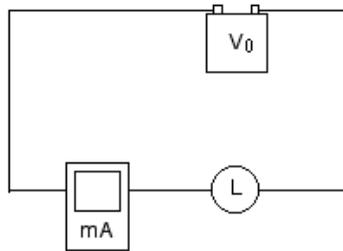


Figura 21. Misura della resistenza della lampadina.

Se i è l'intensità della corrente, la resistenza della lampadina è data da

$$R = \frac{V_0}{i}$$

dove V_0 indica la f.e.m. della batteria. In maniera analoga si può misurare la resistenza elettrica r della dinamo. Queste due grandezze ci consentono di porre un primo limite superiore al valore del rendimento:

$$\eta < \frac{R}{R+r} = \frac{1}{1 + \frac{r}{R}} \quad [13]$$

Tuttavia questa stima tiene conto solo delle perdite per effetto Joule. Una misura diretta è più impegnativa. Si fissa la dinamo a un robusto sostegno a un'altezza di qualche metro, in modo che sia orizzontale. Sulla rotella si avvolge del nastro magnetico ricavato da una vecchia videocassetta e a questa si lega un certo numero di bulloni di ferro, in maniera tale che la discesa avvenga con velocità costante e piuttosto bassa (Figura 22).

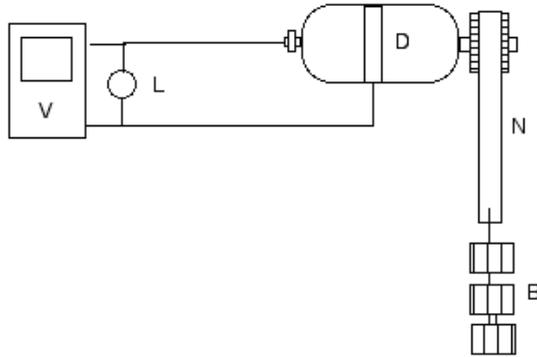


Figura 22. Apparato per la misura del rendimento della dinamo. D = dinamo; B = bulloni; N = nastro magnetico; L = lampadina; V = voltmetro.

Si fanno scendere i bulloni che, tramite il nastro, mettono in rotazione la rotella della dinamo che è collegata a una lampadina in parallelo a un voltmetro. Bisogna misurare la massa M dell'insieme dei bulloni, la lunghezza della discesa H , la sua durata t e la tensione V ai capi della lampadina.

L'energia elettrica prodotta nella discesa dei bulloni è data da

$$E_e = \frac{V^2}{R} t \quad [14]$$

l'energia gravitazionale convertita è

$$E_g = MgH \quad [15]$$

Il rendimento della macchina è quindi

$$\eta = \frac{E_e}{E_g} \quad [16]$$

Per migliorare la misura si può tener conto dell'energia cinetica della massa di bulloni. Comunque sia, il rendimento non supera mai il 30-40%.

3. Attività di laboratorio

Una stima alternativa (più divertente):

MATERIALE

- una bicicletta dotata di tachimetro e di dinamo;
- cronometro;
- cordella metrica.

Un ragazzo, su una pista da atletica o su una strada chiusa al traffico, fa in modo di attraversare lanciato sulla bicicletta un certo traguardo con una data velocità (per es. 20 km/h). Si misura poi la distanza che riesce ancora a percorrere senza più pedalare e la durata della corsa.

Si ripete la prova con la dinamo attaccata e si trova che la lunghezza e la durata della corsa senza pedali diminuiscono. Ciò è dovuto al fatto che una parte dell'energia meccanica va perduta perché convertita in energia elettrica.

Posto che il rallentamento della bicicletta avvenga con decelerazione costante, sarà

$$a = \frac{2s}{t^2} \quad [17]$$

dove s è la distanza percorsa e t il tempo impiegato. Il lavoro compiuto sulla bicicletta dalla forza di frenata è quindi

$$L = ma s = m \frac{2s^2}{t^2} \quad [18]$$

Per la conservazione dell'energia l'energia elettrica prodotta sarà data da

$$E_{el} = \frac{1}{2} mV^2 - 2mv^2 \quad [19]$$

dove m è la massa, V la velocità del veicolo misurata dal tachimetro e v la velocità media nella corsa libera. Il rendimento della dinamo è quindi

$$\eta = \frac{E_{el}}{\frac{1}{2} mV^2} = 1 - \left(2 \frac{v}{V} \right)^2 \quad [20]$$

I risultati ottenuti con questo metodo possono (debbono) essere confrontati con quelli prodotti dal precedente.

11. Le leggi fondamentali

Kant vide con la massima chiarezza che la storia della scienza aveva confutato il mito baconiano secondo cui si deve cominciare dalle osservazioni per derivare da queste le teorie: Kant comprese anche, chiaramente, che dietro questo fatto storico si nascondeva una questione di carattere logico; vi sono cioè delle ragioni logiche per cui non può verificarsi nella storia della scienza un fatto del genere: è logicamente impossibile derivare delle teorie da delle osservazioni.¹⁵

Le grandi teorie fisiche – la meccanica classica, l'elettromagnetismo – sono sistemi assiomatici estremamente complessi e astratti. L'idea che la meccanica sia più facile dell'elettromagnetismo nasce dal fatto che il linguaggio che utilizza comprende parole come *forza*, *massa*, *tempo*, ecc. che hanno un significato anche nel linguaggio ordinario, ma sarebbe un errore ritenere che tale significato si trasferisca inalterato all'interno del sistema assiomatico. Di questo è sintomo il grande imbarazzo che mostrano i testi di scuola quando si impegnano a *definire* le grandezze fondamentali. Di solito ciò che ne esce sono tautologie – la più diffusa è la definizione di *massa* come *quantità di materia* – ma più spesso si preferisce tacere, cioè far passare per acquisite definizioni come quella di tempo o di spazio, spacciando surrettiziamente l'idea che ciò che entra nella teoria sia esattamente il concetto che si utilizza nel linguaggio comune. D'altra parte, Newton fornisce alcuni degli esempi più disarmanti di questa difficoltà:

DEFINIZIONE I

La quantità di materia è la misura della medesima ricavata dal prodotto della sua densità per il volume.

DEFINIZIONE III

*La forza insita della materia è la disposizione a resistere, per effetto della quale ciascun corpo, per quanto sta in esso, persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme.*¹⁶

Questa idea, che vi sia una corrispondenza biunivoca tra nomi e concetti, può portare a risultati farseschi, come quando il professore fa osservare, compiaciuto, che chi porta

¹⁵ Popper, Karl R. (1972), *Lo status della scienza e della metafisica*, trad. it. G. Pancaldi, Bologna, Il Mulino.

¹⁶ Newton, Isaac (1965), *I principi matematici della filosofia naturale*, a cura di A. Pala, Torino, Unione Tipografico-Editrice Torinese.

3. Attività di laboratorio

una valigia *compie lavoro nullo*, ma rappresenta l'assunto su cui si reggono alcuni pseudo-paradossi delle *vulgate* scolastiche della relatività speciale. Che teorie diverse descrivano la realtà in termini e con termini diversi è banale, ma ignorato dai più. Si continua a ritenere che il tempo e lo spazio della meccanica classica siano gli stessi del linguaggio comune e della relatività. Da questo equivoco discendono le grandi meraviglie che si associano alla *dilatazione dei tempi* e alla *contrazione delle lunghezze*. Tuttavia è anche vero che la meccanica (nella versione più ingenua) è la più antropomorfa delle teorie e questo è il motivo per cui è la più adatta come contenuto per i corsi introduttivi, per cui l'insegnante è legittimato a giocare sulla quasi-equivalenza dei due lessici (il comune e quello della teoria), ma con lo scopo di arrivare, con percorso elicoidale, alla consapevolezza della loro distinzione. Il passaggio da un lessico a un'altro comporta sempre risultati paradossali, come si vede quando, ad esempio, si parla di masse o di forze in relatività. Quando questi paradossi non sembrano presentarsi è solo perché non si è capita a fondo l'una o l'altra delle teorie. Questo è il motivo per cui non si danno paradossi altrettanto noti in meccanica quantistica. Quando, per esempio, si descrive il modello atomico di Bohr, con gli elettroni orbitanti, a nessuno viene in mente che una cosa del genere non può esistere in fisica classica. Questo spiega, per esempio, il fatto che molti manuali ricavano la formula dell'effetto Compton trattando l'elettrone e il fotone come se fossero particelle in senso classico. Il che dà l'impressione che la difficoltà principale sia rappresentata dalla procedura matematica e non dal fatto che per descrivere gli enti che indichiamo come *elettrone* e *fotone* occorrono concetti molto lontani dal senso comune, nello specifico che non esistono né le *energie* né le *quantità di moto* in senso classico e neppure le *traiettorie*.

Il sistema assiomatico per antonomasia è quello della geometria euclidea. Il suo studio dovrebbe precedere quello della meccanica poiché ne costituisce un modello. Nella sua versione ingenua il sistema assiomatico di Euclide fa uso di immagini (punto, retta, piano, ecc.) e di postulati che appartengono all'esperienza comune. Per esempio, che gli angoli alla base di un triangolo isoscele siano uguali è oggetto di esperienza intuitiva; che le diagonali di un parallelogrammo si dimezzino, anche. Tutta questa – e molto altro – è conoscenza che si può ottenere con l'aiuto del disegno. Perfino il teorema di Pitagora può essere conoscenza empirica. Quindi la costruzione di un sistema assiomatico che razionalizzi e riduca a unità e coerenza questo insieme di conoscenze costituisce un atto quasi imposto dal fatto che appartiene, più o meno, a tutti gli uomini. D'altra parte, chi abbia confidenza con la geometria elementare, per ricavare una relazione prima di tutto la intuisce e poi si serve dei risultati più prossimi a quello che vuole ottenere. Gli ingredienti che entrano nell'elaborazione sono l'intuizione, le conoscenze già acquisite sull'argomento e le "regole del gioco" che stabiliscono quali passi logici sono legittimi e quali no. Nello studio della meccanica o dell'ottica le condizioni sono analoghe. Vi è una immensa raccolta di conoscenze

empiriche accumulate specialmente (ma non solo) nei primi anni di vita che consentono di interpretare una quantità di fenomeni. Il processo di ricondurre un fenomeno ad altri già archiviati si chiama *comprensione*. Lo studio è fecondo se parte da un *conflitto cognitivo* e il professore di fisica dovrebbe essere in grado di provocarlo per ogni circostanza. La geometria euclidea non può servire a dimostrare che gli angoli alla base di un triangolo isoscele sono uguali: questo lo sanno tutti. La sua superiorità si rivela quando mostra, ad esempio, che un parallelogrammo è equivalente a un rettangolo di egual base e uguale altezza o che il quadrato dell'ipotenusa è uguale alla somma dei quadrati dei cateti. Risultati che non appartengono alla conoscenza ingenua, ma che si conseguono non con un'applicazione pedantesca della deduzione logica, ma attraverso l'applicazione fantasiosa delle *regole dal gioco* a oggetti mentali con cui si è presa confidenza. Nell'insegnamento della meccanica, al contrario, si tenta di costruire i fenomeni in parallelo con l'edificio assiomatico. Per esempio, prima si danno i principi di conservazione e dopo si parla di urti tra bocce. Sarebbe invece necessario che gli allievi avessero un'ampia esperienza di urti tra palle elastiche. Sapessero, per esempio, quali sono i parametri che determinano l'esito di un urto (la velocità, le masse, i raggi, la qualità delle superfici, ecc.). È questa la condizione che consente di interpretare come un modello della realtà quella che viene descritta dal manuale, con i suoi *punti materiali perfettamente elastici*. Solo che questo è sempre meno possibile per il semplice motivo che pochi ragazzi hanno fatto esperienza di giochi di bilie o di bocce o di biliardo. L'insegnamento della meccanica si sforza di costruire un sistema assiomatico su un campo fenomenico inconsistente dal punto di vista empirico.

Esperimento

MATERIALE

- una boccia da biliardo;
- una boccia di ferro (verniciata) pressappoco uguale di diametro;
- una rotaia a V.

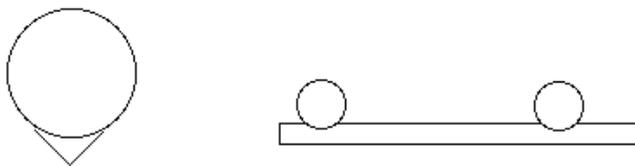


Figura 23. Rotaia per la corsa delle bocce.

3. Attività di laboratorio

Si appoggia una delle bocce sulla rotaia orizzontale e si lancia l'altra. Se la boccia bersaglio era quella di ferro, l'altra ne viene respinta indietro. Si chiede agli allievi di prevedere che cosa accadrà scambiando il ruolo delle bocce. L'insegnante scoprirà allora con sgomento che solo pochi sono in grado di fare una previsione corretta. In qualsiasi campo scientifico vi è un cumulo di conoscenze empiriche che rappresentano il terreno su cui si impianta la sistemazione assiomatica. Questa è legittimata e motivata da quello. Ma di questa elementare considerazione non si tiene conto nella didattica. La tradizione vuole che nello stesso tempo si costruisca l'edificio assiomatico e il campo fenomenico; anzi, che il primo generi il secondo. Quindi, prima viene il principio di conservazione della quantità di moto e dopo l'esame di urti *tra corpi puntiformi*. Questo atteggiamento mentale ha una forte ricaduta su ciò che si intende per laboratorio didattico. L'esistenza stessa di un "laboratorio" caratterizzato da materiali di un certo tipo risente di questa concezione *rovesciata* della fisica nel senso che non sono i modelli a cercare di aderire ai fenomeni, ma, al contrario, si cerca di produrre fenomeni che siano il più possibile somiglianti ai modelli.

Una spiritosa interpretazione di questo atteggiamento culturale, che riportiamo in Appendice, fu proposta da K. Woolner nel 1976.

Appendice

SUPER APRIL SALE!
IDEAL EQUIPMENT
Corp.
 Waterloo, Ontario

If you ever been embarrassed by demonstrations that didn't (or if you've occasionally faked results) then you need **ideal** equipment!!!! We guarantee the textbook results every time!!!! No teacher should be without

an adequate supply of **ideal** equipment!!!! It's easy to use, inexpensive, and it works!!!!

FRICITIONLESS PLANES

Essential equipment for all studies of "motion" and "mechanics". All of Newton's Laws can be correctly and easily demonstrated with the aid of an IEC frictionless plane (together with some or all of the other items shown on this page). Available in any size up to 3x2 m – just send us your specifications!

Bonus

With every order over \$ 35.00 , we will send, **ABSOLUTELY WITHOUT CHARGE**, one cylinder (5 litres at 25 atm.) of **IDEAL** gas. Demonstrating the Gas Laws need never again give you heartburn !! Manufactured exclusively by IEC.

SALE PRICE.....\$ 16.95/m² (Cutting charges extra)

POINT-PARTICLES

Another "must" for proper mechanics demonstrations! IEC point-particles (integral numbers of grammas), are available in all masses from 1 g to 10 kg. Buy by the 10 kg box and SAVE!

SALE PRICE\$ 11.65/10 kg (Your choice of colour)

INERTIALLESS PULLEYS

Everybody said it couldn't be done! We are extremely proud of this new addition to our 1976 catalogue, and we are certain that IEC inertialless pulleys will soon revolutionise the art of physics demonstration. Price proportional to square of radius.

SALE PRICE (1 cm radius).....\$ 7.69 ea

FRICTIONLESS BEARING

For use with inertialless pulleys. Watch them go round for ever !!

SALE PRICE.....\$ 12.45 pr

g-RAY MICROSCOPES

A modern realization of a classic! Heisemberg microscopes, superbly hand-crafted in the workshops of our European subsidiary, Gedanken Wiss.. Just a few left, so order today ! UNCERTANTY GUARANTEED!!

SALE PRICE.....\$ 743.85 ea

INEXTENSIBLE STRING

A popular standby, no laboratory is complete without it ! GUARANTEED to satisfy all textbook specifications for block-and-pulleys problems, this string is completely inextensible, weightless, and perfectly flexible. Buy it by the 200 m reel.

SALE PRICE.....\$ 6.47/rce

RIGID BODIES

Sometimes a demonstration will fail due the non-rigidity of an essential part of your apparatus! This can be both frustrating and embarrassing,—but it is a soluble problem! An IEC rigid body NEVER flexes! We can cut to any desired specification—ask for an estimate!

SALE PRICE.....20% OFF REG. PRICE

HYDRODYNAMICAL FLUID

We are the sole Canadian suppliers of this unique product (made by us under licenses granted by Bernoulli International). Completely without viscosity, totally incompressible, it is otherwise indistinguishable from ordinary water.

SALE PRICE.....\$ 8.50/bbl

Appendice

STANDARD HORSES

These magnificent animals represent the culmination of seventy years of selective breeding experimentation. Each horse is GUARANTEED to work at a rate of 735 W, or your money back!

SALE PRICE.....\$ 1599.95 ea

NEWTONIAN APPLES

Demonstrate a small part of history to complete your core curriculum! These apples can also serve as feed for your Standard Horse. Subject to the strictest standards of quality control, each box contains 4 dozen apples, individually wrapped.

SALE PRICE.....\$ 19.85/box

20% REDUCTION ON ALL CATALOGUE ITEMS!

“If you didn’t get it from us = it’s not **IDEAL**”

[K.A. Woolner, *Phys 13 News*, No. 22, p. 1 (March 1976), published by the Department of Physics, University of Waterloo, Waterloo, Ontario N2L 3G1, Canada]