

LE FORME DEL LABORATORIO DI FISICA

Ledo Stefanini

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.

(Mario Ageno)

1. Considerazioni generali

Negli ultimi decenni si è alzata una cortina, non esplicita, ma tacitamente assunta per scontata, tra coloro che fanno professione di fisico e coloro che la insegnano nella scuola media. 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. Esito finale di un processo storico che ha avuto inizio negli anni '20 e che ha visto la progressiva emarginazione degli insegnanti dalla comunità dei fisici, documentata dalla ricerca di Giuseppe Giuliani [1], tanto che si potrebbero usare le parole di O.M. Corbino (1911) per descrivere le attuali condizioni di lavoro degli insegnanti di fisica:

Ma purtroppo chi va oggi nelle Scuole Medie è quasi sempre perduto per la scienza attiva [...] oggi invece quelle scuole tendono a inaridire negli insegnanti, come per lento veleno, ogni attività produttiva, malgrado il loro iniziale entusiasmo e le più belle attitudini.

Si è affermata l'opinione, che tra l'attività di insegnamento e la formazione scientifica non vi sia che una blanda relazione. Aporia che trova valide giustificazioni sperimentali quando si voglia tracciare un rapido ritratto della situazione attuale della scuola secondaria italiana, ma che non ne ha alcuna quando intenda porsi alla base di un progetto di politica scolastica. Nessuno può negare che, nell'assenza dell'università e del Ministero, l'unico riferimento culturale degli insegnanti sono i manuali scolastici. Questo aiuta a capire il ruolo determinante che il libro di testo viene ad assumere nell'insegnamento della fisica. (Almeno per gli insegnanti più responsabili, che si rifiutano di profittare delle condizioni reali della scuola per rinunciare *tout court* all'insegnamento della fisica: è più frequente di quanto si creda.)

Un aspetto di questo distacco tra professione insegnante ed elaborazione culturale è la predilezione per la fisica moderna, incoraggiata da recenti interventi ministeriali in favore di uno spostamento dell'asse culturale verso contenuti propri del secolo appena trascorso. La risposta all'aumento della frazione di '900 presente nei libri di storia, è stato un cospicuo incremento, nei testi di fisica, del tasso di «fisica moderna», non esclusa la cosmologia, la relatività generale e la teoria delle stringhe. Si tratta di un fenomeno di inversione del quale sono evidenze sperimentali i temi scientifici assegnati all'esame di maturità. La scuola italiana ha una spiccata predilezione per gli argomenti difficili. Sarà più facile trovare studenti che agli esami «portano» tesine sul big-bang che sull'effetto Doppler. Sintomo di questo progressivo distacco dell'insegnante dall'impegno culturale, di questa transizione da operatore culturale a operatore sociale è la deriva verso gli argomenti «difficili», cosa che, nella scuola, significa transizione dall'educazione alla divulgazione. (In questo non si può non riconoscere il portato dei modi televisivi di approccio alla scienza. La scienza è caratterizzata dal «fare» più che dal pensare; dev'essere immediatamente fruibile da tutti; ciò che importa sono i «risultati», meglio se tali da strabiliare.) Altra manifestazione dello stesso processo è il progressivo distacco dell'insegnamento dagli aspetti più legati all'e-

sperienza immediata. I manuali scolastici sono sempre più pieni di cariche puntiformi, di fili flessibili e inestendibili, di punti materiali disposti alla distanza di $\sqrt{3}$ m, ecc. e sempre meno di leve, carrucole, sifoni, motori elettrici, ecc. che costituivano invece il punto di forza dei vecchi manuali. Si rende cioè manifesta una tendenza dell'insegnamento della fisica verso un forma di catechismo; che rimane fine a se stesso, in quanto appare affatto avulso dalla realtà fisica in cui affonda l'esperienza dello studente. Questi – e spesso anche l'insegnante – non riesce a cogliere quale relazione ci sia tra la meccanica scolastica e la meccanica della bicicletta o tra la circuitazione del campo elettrico e l'accendigas che ha in cucina. Ne risulta che l'insegnante di fisica si trincerava sempre più all'interno del proprio manuale fortificato, senza rendersi conto che la fisica ne rimane, irrimediabilmente, fuori. I nostri studenti si mostrano sempre meno interessati a quanto offre la scuola. Un atteggiamento determinato in larga misura dai radicali mutamenti sociali avvenuti negli ultimi decenni; ma al quale la scuola – nel nostro caso l'insegnamento della fisica – non ha saputo rispondere se non con un ampliamento smisurato dei territori di competenza, a cui corrisponde un estremo assottigliamento dello spessore della trama culturale che ne costituisce (o dovrebbe costituirne) il contenuto. Ma favorito anche da uno stile di insegnamento che emargina di fatto lo studente, nello stesso momento in cui, formalmente, lo chiama alla partecipazione. Vi è, in effetti, uno specifico della fisica come via educativa che la distingue da altre discipline scolastiche e ne rende più affascinante l'insegnamento e più difficile. Dico del fatto che il ragazzo che affronta il suo primo corso di fisica non è *tabula rasa*. Possiede le precise e solide teorie fisiche che ogni uomo elabora, attraverso tentativi ed errori, prevalentemente nei primi anni della sua vita e che serve a muoversi nel mondo, cioè a bere un bicchier d'acqua, andare in bicicletta, giocare a calcio, interpretare i fenomeni ottici, acustici, idraulici, ecc. Tutto ciò non sarebbe possibile senza fondate teorie dei fenomeni fisici delle quali tutti siamo portatori. La nostra stessa possibilità di comunicare dipende dall'esistenza di queste teorie *naïf* presso ogni-

no di noi e dalla loro condivisione. È questa infatti la ragione di fondo per cui quando l'insegnante pronuncia la parola «forza» tutti credono di aver capito. Queste teorie ingenue (ma fondamentali) sono basate sull'esperienza diretta di una varietà di fenomeni che riconosciamo come comuni: il fatto che gli oggetti cadano, che il suono emesso da un coperchio sia diverso da quello emesso da una pentola, che si veda attraverso un vetro, ecc.¹.

Tuttavia, nella fisica scolastica sembra non ci sia posto per questo immenso archivio di conoscenze che funzionano benissimo per vivere. La fisica scolastica si occupa di un mondo virtuale, in cui le interpretazioni fanno aggio sulle osservazioni, in cui, cioè, si danno risposte a domande che non sono state poste. È infatti molto più facile trovare uno studente che definisca in maniera impeccabile le linee del campo elettrico piuttosto che uno che sappia a che serve un condensatore. È questo il motivo profondo e ragionevole per cui la fisica scolastica viene collocata in un archivio diverso da quello – personale e prezioso – utile per vivere. Questo stato di cose non è una peculiarità solo del nostro sistema scolastico; ma in altri contesti vi è chi lo denuncia e vi si oppone, come si vede dall'aneddoto seguente, narrato da un insegnante di fisica americano, e che fu pubblicato sul «Saturday Review» nel '68:

Angels on a Pin

A Modern Parable, by Alexander Calandra

Un po' di tempo fa mi capitò di ricevere una telefonata da un collega che mi chiedeva se potevo fare da giudice per quanto riguardava una domanda d'esame. Il problema consisteva nel fatto che il mio collega era intenzionato a dare zero ad uno studente per una sua risposta ad una domanda di fisica, mentre lo studente reclamava di meritare un

¹ Purtroppo, è in atto un fenomeno sociale che non sembra abbia ancora attirato l'attenzione degli psicologi: si tratta dell'impovertimento delle esperienze. I bambini odierni vivono in un ambiente che riduce le occasioni di utilizzare giocattoli meccanici, di andare in bicicletta liberamente, di giocare con l'acqua, con calamite, con le fiamme. Una riduzione delle occasioni di esperienza fisica comporta un impoverimento dell'archivio delle conoscenze che rende ancora più difficile l'insegnamento della fisica elementare.

alto punteggio. Il docente e l'allievo decisero di sottomettere la questione ad un arbitro imparziale e scelsero proprio me.

Mi recai nello studio del collega e lessi la domanda d'esame: «Descrivere come sia possibile misurare l'altezza di un alto edificio mediante un barometro».

La risposta dello studente era stata la seguente: «Si va con il barometro sulla cima dell'edificio, lo si lega all'estremità di un lungo spago e poi lo si cala fino al marciapiede, misurando la lunghezza dello spago. Questa è uguale all'altezza dell'edificio».

Osservai che lo studente aveva indubbiamente un motivo ragionevole per avere un buon voto, poiché aveva risposto alla domanda in modo corretto e completo. D'altra parte, un risultato positivo avrebbe determinato una buona valutazione finale nel corso di fisica. E una buona valutazione certifica un'apprezzabile competenza in questa disciplina, cosa che non era confermata dalla risposta che aveva dato. Avanzai allora il suggerimento di fornire allo studente la possibilità di dare altre risposte alla domanda e non fui sorpreso che il mio collega acconsentisse, ma la sorpresa venne dalla risposta dello studente. Gli concessi sei minuti per fornire la risposta con l'avvertimento che questa avrebbe dovuto mettere in evidenza una qualche conoscenza di fisica. Poiché, passati cinque minuti non aveva ancora scritto niente, gli domandai se intendeva rinunciare, ma lo studente rispose di no. Che aveva diverse risposte al problema e che stava solo pensando a quale fosse tra queste la migliore. Mi scusai per averlo interrotto e lo invitai a proseguire. Nel minuto seguente egli redasse la sua risposta e me la porse perché la leggessi:

«Vado col barometro sul tetto dell'edificio e lo lascio cadere, misurando il tempo di caduta con un cronometro. Poi, mediante la formula

$$s = \frac{1}{2} at^2, \text{ ricavo l'altezza dell'edificio}».$$

A questo punto chiesi al mio collega se trovava la risposta accettabile. La risposta fu affermativa e quindi attribuii allo studente un giudizio positivo. Uscendo dall'ufficio del collega mi ricordai che lo studente aveva detto che aveva molte altre risposte al problema, cosicché gli chiesi quali fossero. «Oh sì – rispose – vi sono molti modi di determinare l'altezza dell'edificio mediante un barometro. Per esempio, in una giornata di sole potrei disporre verticalmente il barometro, misurare la

lunghezza dello strumento, della sua ombra e dell'ombra dell'edificio. Mediante una semplice proporzione, si ottiene l'altezza dell'edificio.»

«Molto bene – dissi – E gli altri?» Rispose: «Vi è un metodo diretto di misura che le piacerà. Si prende il barometro e si comincia a salire per le scale. Man mano che si sale si riporta sul muro la lunghezza del barometro mediante una matita. Alla fine si contano i segni sul muro e si ottiene l'altezza dell'edificio. Un metodo molto diretto.»

«Naturalmente, se si vuole un metodo più raffinato, si può legare il barometro ad un pezzo di spago e farlo oscillare come un pendolo. Con questo possiamo determinare il valore di g in cima all'edificio e al livello della strada. Dalla differenza tra i due valori di g si può risalire all'altezza dell'edificio».

«Infine – concluse – vi sono molti altri modi di risolvere il problema. Probabilmente, il migliore è di suonare alla porta del custode con il barometro in mano. Quando il custode apre, potrei fargli pressappoco il discorso seguente:

“Signor Custode, ho qui un bellissimo barometro. Glielo regalo se mi dice quant'è alto questo edificio”».

A questo punto chiesi allo studente se conosceva realmente la risposta convenzionale al quesito. Ammise che la conosceva, ma che ne aveva piene le scatole degli insegnanti che volevano insegnargli come pensare, usando il metodo scientifico e ad esplorare la logica interna di una questione in modo pedante, come si fa spesso nella nuova matematica scolastica, invece di porlo direttamente davanti ai problemi. Con questo in mente aveva deciso di prendere in giro i suoi insegnanti.

L'attività di laboratorio che accompagna solitamente i corsi di fisica elementare è funzionale a questa pratica di insegnamento. E uso questo termine – pratica – per porre l'enfasi sul fatto che la maggior parte degli insegnanti adotta questi comportamenti didattici per imitazione, come se non avessero alternative, senza interrogarsi sulle scelte epistemologiche e pedagogiche – legittime, ma discutibili – sulle quali si reggono. Né vengono mai incoraggiati a dare un'interpretazione alla loro azione, men che meno a tentare altri percorsi.

Il fatto è che la fisica non è mai elementare: anche trattando gli argomenti più frusti, se si segue un filo ci si trova in breve di fron-

te a questioni che elementari non sono. Non per le difficoltà matematiche o tecniche; ma perché ne coinvolgono i fondamenti. A ciò si deve sostanzialmente la predilezione che gli insegnanti hanno per la matematica nei confronti della fisica: la prima è tradizionalmente formulata in modo da non dare sorprese. E anche i «problemi di fisica» proposti dai manuali scolastici sono spesso delle pure esercitazioni algebriche sulle formule.

Il fatto che i problemi «grossi» incombano anche sulla fisica elementare risulta ancora più evidente dalle caratteristiche che spesso connotano, nella scuola italiana, le cosiddette «attività di laboratorio». È battendo questa bandiera che si gabellano molte patacche pedagogiche, la più grave delle quali è che il laboratorio sia qualcosa di oggettivo, nel senso che, attraverso di esso, lo sperimentatore costringa la natura a mostrarsi *qual è*. È difficile farsi un'idea di che cosa sia l'insegnamento della fisica nella scuola secondaria senza visitarne i laboratori. Forniscono infatti una rappresentazione fedele e concreta di quale sia il sistema assiomatico assunto a fondamento dell'attività didattica. Gli armadi distribuiti intorno alle pareti, nell'immaginario popolare, contengono RISPOSTE. E l'arte dello studente consiste nell'imparare le domande che quelle risposte presuppongono: null'altro. Quando gli insegnanti lamentano la carenza di attrezzature si riferiscono a *quelle* attrezzature di laboratorio. Nonostante lo studente e l'insegnante abbiano davanti «*questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo)*».

2. Vari tipi di laboratorio

Normalmente, tra i servizi che una scuola secondaria pone a disposizione vi sono due «aule di fisica»: la *tradizionale* e quella per la *sperimentazione dei ragazzi*. La prima è dotata di un pesante bancone (con vecchi, enormi reostati), un armadio (con un rocchetto di Ruhmkorff e bottiglie di Leyda) e i banchi disposti a gradinata. Icona di una scuola che non esiste più, nella quale al cen-

tro dell'opera educativa erano il professore e la disciplina. La disposizione dei mobili, la sobrietà dell'arredamento creavano un'atmosfera che proiettava sull'agire dell'insegnante un significato quasi sacrale. Non per niente il rito provocava la Natura a *dimostrarsi*: infatti, l'aula era detta «gabinetto per le dimostrazioni di fisica».

All'opposto è l'aula per la «sperimentazione di fisica». Anche alla vista si presenta come *democratica*: non c'è il bancone centrale, vi sono molti tavoli tutti uguali tra loro e molti armadi. Che contengono i *kit*, cioè sei termometri, sei molle tenere e sei molle dure, sei tester, sei forbici, ecc. Questo laboratorio è un portato del corso P.S.S.C., diffuso nella scuola italiana prevalentemente negli anni '70.

Le due aule sono strumenti di didattiche che proclamano la loro antipodia. In realtà, la loro diversità è solo di superficie; i paradigmi scientifici e pedagogici su cui poggiano (e anche i risultati) sono gli stessi.

Che siano diversi i modi dell'approccio è evidente. Da una parte gli studenti sono solo tenuti a presenziare ad un rito che è celebrato dal solo professore che, al massimo, si avvale della collaborazione dell'assistente. Gli strumenti sono progettati all'uopo e le ditte forniscono guide precise all'effettuazione degli esperimenti, con schemi accurati per la disposizione dei vari componenti. Gli esempi di esperienze di questo tipo sono molti: la bomba di Mahler, il tubo di Weinhold, i risonatori di Helmholtz, il pendolo di Waltenhofen, ecc. Potremmo qualificare questo tipo di laboratorio come tedesco, perché ha trovato nella scuola germanica la migliore espressione – come sta a testimoniare l'opera veramente magistrale di Pohl [2] [3] [4] – ma che si rifà alla grande tradizione inglese di Faraday e della *Royal Institution*.

Nell'altro laboratorio, che potremmo qualificare come *americano*, sono gli stessi studenti a operare – in gruppo, naturalmente. Ciascuno dei gruppi realizza lo stesso circuito elettrico, con i cavetti messi a disposizione allo scopo ed estratti dall'armadio che reca la scritta: «Legge di Ohm». Ogni gruppo varia la tensione e

legge 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 si arriva in questo modo alla legge di Ohm. Entro il tempo stabilito di ore due. Anche perché bisogna sgombrare i tavoli e prepararli per la verifica della legge di Hooke.

Le differenze tra i due modi didattici sono di per sé evidenti. Nel primo caso la legge di Ohm discende dall'operare del solo insegnante; solo a lui sono dati gli strumenti per interrogare la natura; nel secondo, sono gli studenti stessi, come comunità, a porre queste domande. Nel primo caso è il professore il solo abilitato ad interpretare la risposta della natura; nel secondo l'interpretazione è affidata, democraticamente, all'intera classe. Con la guida dell'insegnante, naturalmente.

Già alla fine degli anni '60 Vasco Ronchi [5] e Mario Ageno [6] criticavano aspramente come velleitaria e mistificatoria questa prassi didattica. Inascoltati; tanto il modello P.S.S.C. appariva attraente per gli insegnanti e divertente per gli allievi. Infatti, come abbiamo detto, fu proprio negli anni '70 che si diffusero in tutte le scuole le aule per la sperimentazione di questo tipo. E insieme alle aule la convinzione, tra gli insegnanti, che questa e solo questa sia l'attività di laboratorio possibile nella scuola. Tant'è vero che anche nei concorsi a cattedre si chiede ai concorrenti di fare una di queste «esperienze»: legge di Hooke, seconda legge di Newton, legge della rifrazione, ecc.

Per la verità, tra l'attività dimostrativa praticata nei gabinetti di fisica e le attività di laboratorio eseguite direttamente dagli allievi una differenza c'è. Consiste nel fatto che le dimostrazioni hanno prevalentemente carattere qualitativo. Hanno cioè lo scopo di evidenziare fenomeni che altrimenti l'allievo non avrebbe mai visto: le scariche da una macchina di Wimshurst, i nodi in un tubo di Kundt, le fiamme cantanti, ecc. Nel laboratorio P.S.S.C. l'allievo fa qualcosa di diverso: compie misure, raccoglie e correla dati e, infine, li sintetizza in una relazione matematica, la relazione tra periodo e lunghezza del pendolo, tra tensione e corrente in un

pezzo di conduttore, tra forza ed accelerazione, ecc. E questa è una differenza essenziale. È stato proprio per la diffusione di questo tipo di attività di laboratorio che nei manuali è comparso una capitolo ignoto ai vecchi testi. Il titolo è: *elaborazione dei dati sperimentali*. Presenta la media, la gaussiana, il metodo dei minimi quadrati, la standard deviation, ecc.: tutti metodi che si ritengono necessari ai fini della determinazione della legge. Negli ultimi anni questo filone ha trovato alimento e sostegno nell'uso del *computer*.

Vi sono due modi in cui il calcolatore viene utilizzato nel laboratorio didattico. Il primo è in connessione con uno strumento tradizionale, serve per la raccolta dei dati e la loro elaborazione ai fini della *deduzione della legge*.

Lo strumento viene opportunamente *interfacciato*, raccoglie in un tempo incredibilmente breve una quantità di dati, provvede ad elaborarli, li presenta in un grafico cartesiano e determina il *best fit*. Vi sono in commercio strumenti quasi istantanei per la legge di caduta dei gravi, la scarica del condensatore, la legge di Faraday-Neumann, ecc. Nel primo caso il moto è uniformemente accelerato, nel secondo la corrente ha un andamento esponenziale, nel terzo la corrente indotta va come la derivata temporale del campo magnetico. E ciò ha di molto semplificato la vita degli insegnanti tecnico-pratici rispetto al tempo in cui era piuttosto arduo riconoscere queste relazioni nei risultati sperimentali.

Il secondo modo di utilizzo del calcolatore si spinge ancora più avanti, prescinde addirittura da un esperimento vero e proprio: ne fa una simulazione. Questo offre diversi vantaggi: l'esperimento si può fare dovunque ci sia una presa; si possono variare i parametri a piacere; la *legge* ne risulta sempre confermata. Negli esperimenti al computer, i proiettili colpiscono sempre le scimmie, le onde sono sinusoidi, i razzi si contraggono sempre secondo il fattore γ , ecc.

Il favore degli utenti (insegnanti e studenti) si distribuisce secondo l'ordine inverso a quello che abbiamo adottato in questa elencazione delle forme del laboratorio.

3. Il «metodo scientifico»

Nei manuali scolastici vi è anche un altro capitolo che invano cercheremmo nei vecchi e gloriosi di Amaldi o Castelfranchi: quello dedicato al «metodo scientifico». È corredato solitamente da un'immagine di Galileo e da una che rappresenta un moderno laboratorio (non importa di che tipo: l'importante è che vi appaiano strumenti molto complessi) e, quel che più importa, è illustrato da un diagramma di flusso che illustra il «metodo scientifico». Parte dall'*osservazione*, prosegue con l'*ipotesi* alla quale segue l'*esperimento* e termina con la *legge*. A questo proposito, nel contributo [6] già citato, Ageno scrive:

[...] Il fisico che scopre un nuovo fenomeno o una nuova legge giunge molto spesso al risultato seguendo vie assai poco ortodosse dal punto di vista logico e spesso molto confuse. La ricerca scientifica non è affatto quella attività nitida, pulita, schematica che molti amano credere: è qualcosa di molto diverso dalla fisica sistemata che si insegna nelle scuole. [...] Il fatto è che questo mestiere è una continua *avventura intellettuale* e richiede immaginazione a fianco della logica. Si potrebbe dire, paradossalmente, che lo studio scolastico della fisica, benché indispensabile premessa alla ricerca, è in fondo quanto di peggio si possa immaginare per prepararsi.

Quindi i manuali scolastici parlano di un «metodo scientifico» che esiste solo a scuola. Come sta a dimostrare l'intera storia della scienza, se un tale metodo esistesse, avrebbe almeno una precisa conseguenza:

La fisica consisterebbe in una collezione di singole proposizioni che avrebbero validità propria e assoluta e il lavoro dell'uomo di scienza consisterebbe nell'accrescimento di questo patrimonio di *verità*.

Sappiamo che non è così. Ogni proposizione scientifica ha significato solo nell'ambito della teoria in cui è collocata. Così la proposizione $\vec{F} = m\vec{a}$ ha significato solo nell'ambito della meccanica classica, cioè non è, di per sé, né vera né falsa e acquista valore semantico solo in connessione con gli altri principi della meccanica.

Nessuno si sognerebbe di verificare sperimentalmente se «per due punti passa una sola retta»; invece nella fisica scolastica si fanno cose di questo genere. Il dimenticare questo elementare principio (questo sì, del corretto ragionare scientifico) può portare a conseguenze imbarazzanti.

In un manuale scolastico tra i più diffusi fino a qualche anno fa, a proposito del principio di azione e reazione, si dice:

Se le forze con cui due oggetti interagiscono avessero intensità diverse, arriveremmo a conclusioni insostenibili. Immaginiamo, per esempio, che la forza causata da una massa più grande sia maggiore di quella dovuta ad una massa più piccola. Allora, se prendiamo due sassi A e B di masse diverse (m_A maggiore di m_B), la forza di A su B dovrebbe essere maggiore di quella di B su A. Leghiamo questi due sassi a un'automobile, uno sul cofano e l'altro sul baule. Poiché le due forze, per ipotesi, sono diverse, la loro somma è diversa da zero. L'automobile accelererebbe così in direzione di A senza consumare combustibile e senza dover premere l'acceleratore. È evidente allora che per evitare questo assurdo, le forze tra le due masse devono avere la stessa intensità.

Ad un aporema come questo Galileo avrebbe risposto: «Voi supponete quello che si cerca». Nel caso specifico l'autore descrive una situazione fisica in termini di meccanica classica – usa, per esempio, i concetti di forza e di massa, che non sono definibili se non all'interno dei principi della meccanica newtoniana e, nel contempo, li nega. Infatti come sarebbe possibile misurare le forze se non valesse il principio di azione e reazione? Abbiamo proposto l'esempio, che troviamo molto istruttivo, solo per sottolineare il fatto che l'interpretazione e la descrizione della realtà fisica non sono oggettive; ma dipendono sempre da uno schema teorico che non è smontabile in pezzi staccati.

Ogni affermazione scientifica ha significato solo nell'ambito della rete concettuale alla quale si riferisce e quindi, isolata, non ha alcuna valenza di verità o falsità, così come un teorema di geometria euclidea ha significato esclusivamente in quell'ambito.

Alla luce di ciò che abbiamo osservato, possiamo enunciare un

Primo principio del laboratorio didattico

Il linguaggio con cui si descrivono le esperienze e le osservazioni che spesso nei manuali sono proposte come sostegno sperimentale dei principi della meccanica o dell'elettromagnetismo è già basato sull'assunzione dei principi stessi.

Dal punto di vista operativo significa che cercare la prova sperimentale di una delle leggi di Maxwell non ha maggior senso che cercare di controllare sperimentalmente il quinto postulato di Euclide.

Questo per quanto riguarda i principi cioè gli assiomi. Vi sono tuttavia delle relazioni tra grandezze, che chiamiamo ancora *leggi*, che sono deducibili dai principi. Per esempio la relazione tra capacità di un condensatore e area delle armature, o la legge di Bernoulli o il principio di Archimede. In tal caso, le prove sperimentali acquistano significato, ma non per sé solo, ma nell'ambito del contesto concettuale in cui sono ambientate².

Pertanto, una legge non può sostenersi unicamente sull'elaborazione delle osservazioni, ma da queste e dalla loro congruità alla rete concettuale dalla quale tali osservazioni traggono significato.

² Un esempio banale: Qualsiasi manuale di geografia astronomica, a proposito del sistema planetario, riporta le leggi di Keplero e la legge di Titius e Bode. Questa è una relazione empirica (come quelle di Keplero) tra numeri interi e raggi delle orbite planetarie:

$$R(n) = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$$

dove $R(n)$ è il raggio dell'orbita, in Unità Astronomiche, ed n un numero intero che caratterizza il pianeta: Venere è associata allo zero, la Terra all'uno, Marte al due, gli asteroidi al tre, Giove al quattro, Saturno al cinque. Mercurio è abbinato a $-\infty$. Tuttavia, mentre le leggi di Keplero sono riportate nei manuali di fisica, invano si cercherebbe in questi la legge di Titius e Bode.

Perché le leggi di Keplero sono **leggi**, e la «legge di Titius e Bode» no?

Dal punto di vista osservativo sono ambedue vere (o false, a seconda di che cosa s'intenda con questi due termini); ma nelle leggi di Keplero abbiamo tale fiducia che le usiamo per determinare distanze e dimensioni di pianeti e galassie, mentre Titius e Bode trovano spazio solo in vecchi manuali di geografia astronomica. Il motivo è che le leggi di Keplero sono deducibili, com'è noto, dai principi di Newton e dall'ipotesi della gravitazione; la legge di Titius e Bode – nonostante siano state fatte molte ricerche in tal senso – no.

Siamo quindi abilitati ad enunciare il

Secondo principio del laboratorio didattico

Non esiste alcuna relazione matematica tra due grandezze fisiche che si imponga unicamente in forza dell'evidenza di laboratorio.

Vi sono infine leggi che, pur indispensabili alla fecondità della teoria, non sono deducibili dal sistema assiomatico su cui si regge. Esempi importanti di questo tipo di leggi sono la legge di gravitazione universale per la meccanica e la legge di Ohm per l'elettromagnetismo. La prima non è deducibile dai principi della meccanica classica, la seconda dalle leggi di Maxwell. Tuttavia, senza di esse le teorie non avrebbero le immense capacità descrittive e predittive che le caratterizzano.

La dignità di legge di una relazione come quella di Ohm non poggia sull'evidenza sperimentale immediata, ma sul fatto che la generalizzazione di questa ipotesi è feconda di previsioni che trovano riscontri sperimentali e consente di interpretare un'ampia varietà di fenomeni.

Pure, appartengono alla tradizione scolastica meno remota esperienze che danno particolare soddisfazione all'insegnante e agli allievi in quanto portano, se opportunamente condotte, a collezioni di punti, sul piano cartesiano, che indicano in maniera inequivocabile una proporzionalità diretta tra le grandezze in gioco, e la legge di Ohm è una di queste. Quando questo accade, generalmente significa che c'è qualcosa che non va.

4. Ermeneutica delle esperienze e realismo fisico

La ricerca di legami funzionali tra grandezze fisiche non è attività priva di pericoli – di natura interpretativa – anche quando ha carattere didattico. Pericoli tanto meno avvertibili in quanto celati da spessi strati di tradizione che si è trasformata in conformismo interpretativo.

Un'esperienza molto diffusa e apprezzata dagli insegnanti, per la semplicità operativa e per la bontà dei risultati è quella che va sotto il nome di «Verifica della legge di Hooke». Si tratta di fissare una molla ad un sostegno, appendere alla molla un certo numero di pesetti e misurarne, ogni volta, l'allungamento rispetto alla lunghezza a riposo.

Si verifica che, entro i limiti di elasticità della molla, vi è proporzionalità tra il peso e l'allungamento. E da qui si ricava la legge di Hooke.

Tuttavia, di quale strumento mi debbo servire per misurare i pesi, se non di un dinamometro, cioè di una molla?

Se si tiene conto di questa osservazione, il significato dell'esperienza è:

Se collego due molle in serie e le stiro, l'allungamento dell'una è proporzionale all'allungamento dell'altra.

Un altro esempio, meno diffuso del primo come esperienza eseguita dagli allievi, ma che era, in passato, eseguita spesso dalla cattedra. Si tratta della dilatazione termica. Un'asta metallica, fissata ad un estremo, poggia l'altro contro un indice che ne mette in evidenza le piccole variazioni di lunghezza. Si immerge l'asta in un liquido caldo, di cui si misura con un termometro a mercurio la temperatura, e se ne rileva l'allungamento. Si ripete la prova per temperature diverse e si mettono in relazione allungamento e aumento di temperatura per corroborare l'ipotesi di una proporzionalità diretta tra le due grandezze. Si dimentica però che una variazione di temperatura indicata da un termometro a mercurio è basata sull'ipotesi di una proporzionalità diretta tra la temperatura e la lunghezza della colonnina. Il significato della prova è quindi il seguente:

L'allungamento dell'asta metallica e quello della colonna di mercurio sono proporzionali.

Un terzo esempio è fornito dalla «verifica» della legge di Ohm. Ogni gruppo di studenti ha a disposizione un alimentatore in conti-

nua di f.e.m. variabile, un pezzo di filo ad alta resistività e due *tester*, utilizzati uno come voltmetro e l'altro come amperometro. Per ogni valore della f.e.m. dell'alimentatore, il ragazzo legge l'intensità di corrente sull'amperometro e la tensione sul voltmetro. I due valori risultano – come si dice – «nei limiti degli errori sperimentali», proporzionali. Ma il voltmetro e l'amperometro sono strumenti che presuppongono la legge di Ohm; quindi sarebbe chiedere troppo pretendere che attraverso di essi si arrivi ad una falsificazione della legge di Ohm. Il significato dell'esperienza è il seguente:

I momenti delle coppie che agiscono sugli equipaggi dei due strumenti sono proporzionali.

Alla luce delle osservazioni che abbiamo fatto, possiamo enunciare il seguente

Terzo principio del laboratorio didattico

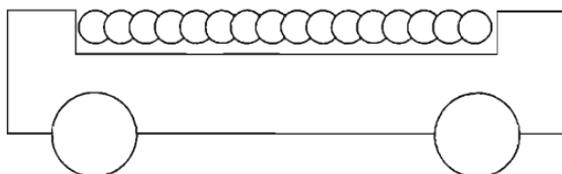
Il significato fisico di un'esperienza non è assoluto; dipende dagli strumenti che si utilizzano e dal contesto teorico.

Tutto ciò è stato posto in chiara evidenza da uno dei massimi esperti di storia della fisica e di didattica, Gerald R. Holton, in un contributo che comparve ai primi degli anni '70 [7].

Un modo per giudicare della valenza didattica di un'esperienza di laboratorio, o anche di un *gedanken experimente* è quello di procedere *contro-mano*: cioè di mettersi nei panni di chi vi assiste e chiedergli quale ne sia, a suo parere, il significato. Non bisogna infatti dimenticare che ogni esperienza didattica (ma non solo) è accompagnata da chiare ed inequivocabili dichiarazioni d'intenti: con questa esperienza vogliamo dimostrare che l'accelerazione ha la direzione della forza o che la spinta di Archimede è proporzionale al volume del liquido spostato, ecc. Si provi a presentare l'esperienza senza il codice interpretativo connesso; anzi, si chieda di risalire al codice a partire dall'esperienza. I risultati possono essere molto interessanti dal punto di vista didattico ed istruttivi per il docente. Proponiamo un

ESEMPIO

Su un carrello (quasi privo di attrito con il pavimento) sistema una molla compressa, come in figura.



OSSERVAZIONE. Il carrello non si muove: è una misura di zero, quindi molto precisa.

DOMANDA. Si tratta di una verifica (a) del principio d'inerzia, o (b) della seconda legge o (c) del principio di azione e reazione o (d) del fatto che una molla trasmette inalterata la forza applicata?

Una forma leggermente diversa di approccio al problema della semantica delle esperienze didattiche è quella di proporre un fenomeno all'osservazione – ad esempio, un pendolo oscillante – e di non assegnare parametri di indagine o quesiti che richiedano chiavi interpretative prestabilite; ma, al contrario, di limitarsi a chiedere agli studenti quali domande sia lecito porsi a proposito del fenomeno stesso. In questo approccio didattico, l'insegnante dovrebbe esercitare quell'arte che, insieme alla dottrina, fa il buon insegnante: la capacità di tacere ed ascoltare.

Abbiamo indicato le differenze tra l'atmosfera didattica che si respira nell'aula per dimostrazioni (imperativa e centralistica) e nell'aula per le attività degli allievi (che conducono da sé le proprie esperienze). Ma si tratta di differenze, per così dire, di superficie. Ad un livello più profondo, le ispirazioni didattiche ed epistemologiche sono le stesse.

Ambedue sono basate sull'assioma che esista una sola fisica e che il lavoro del fisico consista nel cavare dalla natura, come l'ar-

cheologo dalla sabbia, i concetti come *grani duri di realtà* (Heisenberg) che hanno esistenza oggettiva, indipendente dalla rete concettuale dello scienziato. Questo atteggiamento, largamente diffuso nella scuola e che si potrebbe chiamare *realismo fisico ingenuo*, è testimoniato anche dallo sconcerto dei giovani insegnanti quando si accorgono quanto arduo sia il passaggio dalle cariche puntiformi disegnate sul testo alle bocce metalliche conservate nell'armadio.

Il sistema filosofico che viene assunto come base delle esperienze didattiche simulate al calcolatore è appunto realismo fisico nella forma più mistificatoria, in quanto trasmette allo studente il messaggio che fisica coincida con *l'επιστημη*, cioè che sia una ed una sola e che le sue leggi siano scritte nella natura stessa.

5. Sensate (e modeste) esperienze

Nonostante i pericoli e le mistificazioni che abbiamo segnalato, l'attività di laboratorio può avere un ruolo importante nella didattica della fisica. A condizione che abbandoni le diseducative pretese di fornire *prove o controlli o corroborazioni* di leggi e principi e ritorni alle funzioni che le erano attribuite nei tradizionali «gabinetti». Alcune finalità didattiche si possono riconoscere come proprie delle vecchie «dimostrazioni»; altre attengono ad attività di laboratorio che sono quasi sconosciute nella nostra scuola e che andrebbero promosse e diffuse.

5.1 *Mostrare i fenomeni*

Abbiamo osservato che il ragazzo che affronta il corso di fisica è portatore di un insieme di teorie fisiche che condivide con gli altri individui della sua stessa cultura. Queste teorie ingenuie (ma fondamentali) sono basate sull'esperienza diretta di una varietà di fenomeni che riconosciamo come comuni. Un archivio immenso, che ci permette di distinguere i suoni, stimare i pesi, prevedere

traiettorie, ecc. Tuttavia la fisica come scienza fa riferimento spesso a fenomeni che sono sconosciuti ai più. Esempi:

- Non è possibile bere attraverso una cannuccia da un metro.
- Una ruota da bicicletta sta su anche se appoggiata da una sola parte del mozzo, purché sia in rotazione.
- La luce bianca si può disperdere in luce colorata.
- È possibile accendere una lampada al neon facendo scoccare una scintilla tra due corpi distanti.
- Al centro dell'ombra di un capello vi è una riga luminosa.
- Ecc.

In questo l'attività dimostrativa è insostituibile e fondamentale. L'attività didattica dev'essere finalizzata all'allargamento delle conoscenze fenomenologiche del ragazzo. Pertanto, non è possibile parlare di diffrazione della luce senza mostrare che cosa s'intende con questo termine, di accelerazione senza mostrare la differenza tra un moto uniforme e un moto accelerato, di campo elettrico senza mostrare che cosa succede ad una piccola lampada al neon se la si avvicina ad un corpo carico, ecc.

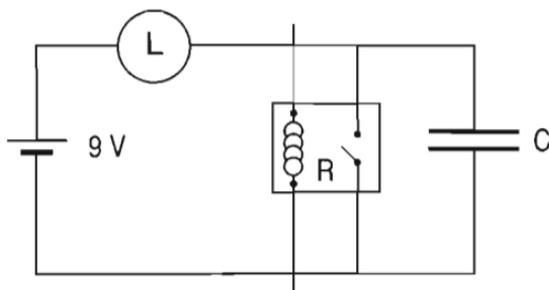
5.2 Mostrare che i fenomeni si possono interpretare in modi diversi

Un esempio. La teoria ingenua che spiega perché si può bere attraverso una cannuccia (che poi è quella dell'*horror vacui*) non è meno degna di rispetto di quella, scolastica, della pressione atmosferica; tuttavia si può mostrare che la teoria ingenua non riesce a spiegare diversi fenomeni: per esempio, il fatto che neppure con una pompa si riesce a sollevare acqua in un tubo per più di 10 m. In questo caso l'attività di laboratorio serve a mettere in crisi le teorie ingenua e a porre in evidenza la necessità di elaborare teorie più raffinate.

5.3 Mostrare come determinati fenomeni o costruzioni concettuali permettono la costruzione di strumenti funzionanti

Ad esempio, la rappresentazione concettuale che abbiamo della corrente elettrica ci consente di realizzare, ad esempio, un triplo

comando per una lampadina. Il fatto che il campo magnetico dipenda dall'intensità di corrente permette di realizzare interruttori elettromagnetici. Il fatto che riconosciamo il suono come fenomeno ondulatorio ci permette di analizzare le voci. Oppure, possiamo mettere gli studenti davanti ad uno strumento come quello illustrato in figura:



Si tratta di un relé collegato, nel modo indicato, ad un condensatore da $2200 \mu\text{F}$ e ad una lampadina da 6 V. Il circuito produce impulsi di corrente con un periodo che dipende dalla capacità del condensatore. Si può chiedere di prevedere il comportamento del circuito; oppure di spiegarne il funzionamento *a posteriori*, oppure di prevedere che cosa succede variando la capacità del condensatore.

Le esperienze che abbiamo sommariamente descritto devono essere preparate ed eseguite dall'insegnante: si tratta di «dimostrazioni». La loro caratteristica è la modestia: nessuna di questa ambisce a «dimostrare» o «verificare» alcunché, ma, semplicemente, a «mostrare». In questo filone di esperienze si possono inserire attività di ricerca didattica che non sono propriamente delle «dimostrazioni». Con questo intendiamo l'esecuzione di misure o la realizzazione di strumenti non-standard. Anche qui è necessario ricorrere ad esempi.

Si può proporre come progetto la misura:

- della potenza di una lampadina
- della velocità di un pallone in un rigore
- del tempo di apertura dell'otturatore di una macchina fotografica

- della luminosità del sole
- della pressione in una gomma da bicicletta
- della frequenza di una lampada.

Oppure la costruzione (parola che non suona mai nelle aule di fisica) di:

- una bilancia
- un congegno per comandare una lampada da due punti diversi
- una radio a galena
- un interruttore a luce
- una bicicletta a trazione anteriore
- ecc.

Oppure lo studio di strumenti di uso comune, come:

- un antifurto per auto
- un comando a distanza per televisore
- una pentola a pressione
- un condizionatore
- un indicatore di direzione per auto
- una bicicletta
- ecc.

Si tratta di attività che non si trovano descritte nei manuali scolastici e in relazione alle quali, nonostante l'estrema modestia (o forse proprio per questa), l'insegnante si mette in gioco come animatore e propositore nei confronti degli allievi.

Nessuna di queste, tuttavia, ha la pretesa di fondare la meccanica o l'elettromagnetismo; se mai di mostrare che le conoscenze di fisica consentono di comprendere la realtà fisica – a cui appartiene anche il funzionamento di uno spruzzatore di profumo o di una tromba per auto – ad un livello più profondo.

Si suole dire che le attività di laboratorio servono allo studente. Il che può essere vero; ma non nel senso comunemente inteso. In ogni agire didattico vi è un messaggio in chiaro ed uno in codice. Il primo è la comunicazione di una capacità: ad esempio, come si costruisce una radio a cristallo, con quattro o cinque componenti comuni. Il secondo (il messaggio in codice) è che le conoscenze di fisi-

ca conferiscono una reale superiorità nel muoversi nel mondo, che può essere gratificante occuparsi di fisica, che la fisica esiste anche fuori dalla scuola. Tutto ciò porta all'enunciazione del

Quarto principio del laboratorio didattico

«Vi sono in cielo e in terra, Orazio, assai più cose di quante ne sogna la tua filosofia», ovvero: il manuale è il mezzo, non il fine.

6. Gli esperimenti

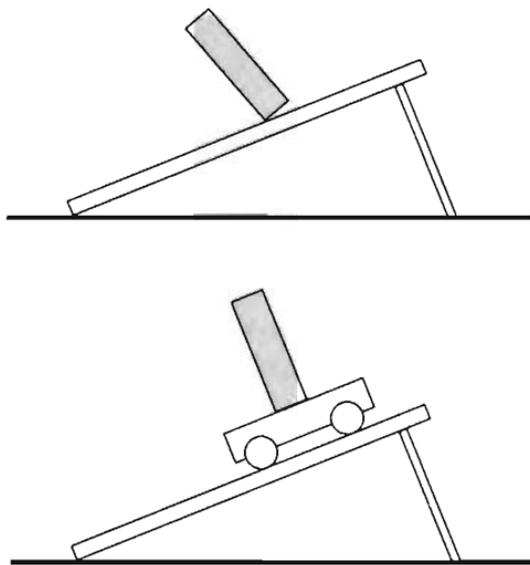
Abbiamo lasciato per ultimo questo argomento perché è il più difficile sotto il profilo didattico. Cominciamo con l'osservare che non esistono ad esempio i fenomeni meccanici senza la meccanica. Il moto dei pianeti non era un problema di meccanica prima di Newton. È quindi la teoria a stabilire quali sono i fenomeni che cadono nel suo dominio; o, meglio, quali aspetti dei fenomeni le competano. Gli esperimenti riguardano sempre un fenomeno che rientra nel dominio di due teorie rivali; un fenomeno che si colloca nell'intersezione tra due teorie: la meccanica galileiana o l'aristotelica; l'ottica newtoniana o quella di Huygens, ecc. Solo in presenza di due interpretazioni e previsioni diverse ha senso il *cimento* galileiano. Poiché il modello corpuscolare prevede che la velocità della luce nell'acqua sia maggiore che nell'aria e il modello ondulatorio il contrario, una misura di questo genere ha valore tale che può decidere del valore di adeguatezza di una delle due teorie. Questo per la grande scienza; ma vale anche per la didattica. Il grande difetto dell'insegnamento della fisica è che fornisce delle risposte a domande che gli studenti non si sono mai posti. Invece il compito principale dell'insegnamento dovrebbe essere quello di suscitare domande, e le domande che pone la riflessione sulla natura sono tali che nessuno si sottrae al loro fascino. Per fare un esempio galileiano:

Che la velocità di un corpo che cade vada aumentando è un'osservazione comune; ma la velocità sarà proporzionale al tempo o alla lunghezza del tratto percorso?

Solamente di fronte ad una domanda, ha senso progettare un esperimento. Questo servirà, appunto a porre, per così dire, la natura di fronte ad un bivio, e obbligarla a scegliere. Questo è – dovrebbe essere – l'atteggiamento del galileiano e dell'insegnante. Non per niente il «Dialogo sopra i due massimi sistemi» è un dibattito, come un dibattito sono state la nascita dell'ottica, dell'elettromagnetismo, ecc. In assenza di una domanda alla quale sono ammesse risposte diverse, ciò che si fa in laboratorio può essere molte cose con positive ricadute didattiche; ma non è un esperimento e, soprattutto, non è fecondo di interessi e riflessioni.

Quindi alla base di un esperimento vi è una previsione sull'esito del cimento. Previsione che ognuno è libero di elaborare sulla base di conoscenze e pregiudizi propri. L'efficacia didattica dipende proprio dall'incertezza sull'esito.

Facciamo, *more solito*, un esempio:



Appoggio sul piano di un tavolo inclinato un mattone e osservo che questo non rimane in equilibrio, ma si ribalta.

Se appoggio il mattone su un carrello che lascio scendere liberamente, il mattone si ribalterà?

Gli studenti dovranno fare previsioni su ciò che avverrà, mentre l'insegnante deve osservare la sola consegna del silenzio, didatticamente fecondissimo. Solo dopo di questo si passerà al cimento sperimentale.

Osservare ciò che accade non basta: è necessario fornire una spiegazione, cioè cercare di ridurre ciò che si osserva ai principi della meccanica.

Le considerazioni che abbiamo sviluppato ci conducono ad enunciare il

Quinto principio del laboratorio didattico

Un esperimento è tale se può aiutare a scegliere tra possibili risposte ad una domanda. Sia la domanda che le risposte devono essere chiaramente formulate prima della prova. Se l'insegnante fornisce la risposta prima, ne invalida l'efficacia didattica.

7. Conclusioni

Quella dell'utilizzo del laboratorio a fini didattici è un'arte difficile, come tutto ciò che attiene l'educazione, che richiede molti anni di vigile apprendistato. Non è neutra ed oggettiva, in quanto il messaggio che trasmette dipende dalla rete teorica in cui si colloca l'esperienza, dalla rete teorica dell'allievo e dalla capacità dell'insegnante di intersecare le due reti.

Tuttavia, nella scuola molte cose si fanno solo perché si è sempre fatto così, oppure perché in laboratorio ci sono quegli strumenti e non altri o perché, per disposizione ministeriale, il trenta per cento delle ore dev'essere dedicato alla «sperimentazione diretta degli allievi». (L'ultima motivazione è la più grave.)

C'è anche chi tenta di sostituirla con surrogati elettronici, che presentano il vantaggio di essere utilizzabili da tutti e «riescono» sempre; tuttavia rimangono, dal punto di vista didattico, colpevoli surrogati che favoriscono l'allontanamento del ragazzo dall'impegno di riflessione sulla natura cioè da un atteggiamento mentalmente attivo.

Al contrario, sarebbe auspicabile non abbandonare lo straordinario strumento educativo rappresentato dal laboratorio, poiché nulla è così didatticamente efficace e nello stesso tempo così poco autoritario quanto l'osservazione del fenomeno: di fronte ad esso lo studente e l'insegnante sono alla pari. Forse per questo le attività di laboratorio sono così poco diffuse e male utilizzate nella scuola italiana. Né basteranno i decreti ministeriali a sanare la situazione. E men che meno i «fondi stanziati per dotare ogni scuola di un laboratorio». In realtà, un insegnante – meglio sarebbe tornare a dire *professore* – dotato di passione e inventiva non ha propriamente bisogno di un laboratorio scolastico così come lo si intende oggi. Ha bisogno di alcuni strumenti, ma soprattutto di tempo da dedicare all'arte propria e di qualche riconoscimento del suo impegno.

Infatti, nella didattica sono sempre preferibili le esperienze che non richiedano apparecchiature troppo sofisticate o realizzate ad hoc. Inoltre, nel villaggio tecnologico nel quale viviamo non manca certo un consistente *fall out* di strumenti e congegni che si possono utilizzare nell'insegnamento. Cronometri, CD, *computer*, chitarre elettriche, occhiali polaroid, ecc. solo pochi anni fa erano strumenti da laboratorio scientifico; oggi si trovano in ogni casa. L'aula di fisica dovrebbe servire ai seguenti scopi:

- a) mostrare che l'insegnante è un fisico;
- b) mostrare che è sorprendentemente bello occuparsi di fisica;
- c) fissare i concetti a precise immagini: quant'è grande un termometro, che dall'acqua si possono ottenere due gas, che non esiste la quiete assoluta, ecc.;
- d) che il funzionamento di molti strumenti si può ridurre a pochi concetti fondamentali;
- e) che vi sono fenomeni che non appartengono all'esperienza comune.

La maggior critica che si portava alla scuola tradizionale era che era centrata sulle discipline e non sul ragazzo. Il che è indubbiamente vero; ma non basta (non è bastato) il laboratorio per le

esperienze degli studenti a spostare l'asse dell'azione pedagogica. Il fatto è che la fisica nell'immaginario scolastico si è andata sempre più identificando con il libro di testo e le esperienze in kit o, peggio ancora, simulate al *computer*. Il grande salto di qualità, che è sfuggito ai pedagogisti di vocazione ministeriale, sarebbe stato ricondurre i libri e le esperienze simulate a ciò che sono: puri ausili didattici, per indicare agli insegnanti e agli studenti il *grande libro della natura* che si trovano davanti. Purtroppo, come testimonia l'evidenza sperimentale, tutto si è risolto in un nuovo catechismo didattico e in nuovi kit: dopo il *metodo scientifico*, abbiamo il *metodo pedagogico*.

8. Nota bibliografica

- [1] Giuseppe Giuliani, *Il Nuovo Cimento, Novant'anni di fisica in Italia*, Percorsi della Fisica, Università degli Studi di Pavia, 1996.
- [2] Pohl, R.W., *Mechanik, Akustik, und Warmlehre*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1964, 16^a edizione.
- [3] Pohl, R.W., *Electrizitatelehre*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1967, 20^a edizione.
- [4] Pohl, R.W., *Optik und Atomphysik*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1967, 12^a edizione.
- [5] V. Ronchi, *Sui fondamenti dell'acustica e dell'ottica*, Firenze, Leo S. Olschki Editore, 1967.
- [6] M. Ageno, *Alcune considerazioni sull'insegnamento della fisica nelle scuole secondarie*, «Giornale di Fisica», vol. IX, n. 1, gennaio-marzo 1968.
- [7] Gerald R. Holton, *What Is Conveyed by Demonstrations, in Physics Demonstration Experiments*, a cura di H.F. Meiners, The Ronald Press Company, 1970.