

Che cosa è il rigore logico in fisica?

Premessa storica del 2016

L'articolo che qui riproduco apparve su *la Fisica nella Scuola* nel 1977 [1]: com'è detto più avanti, si trattava della rielaborazione di una conferenza tenuta a Milano nel 1968. L'articolo è stato poi ripubblicato in [2]. Solo i soci più anziani possiedono una copia della rivista, e anche il libro, per essendo ancora in catalogo, non so quanto sia oggi diffuso. Infine, in epoca più recente una versione dell'articolo è diventata accessibile in rete [3] per l'impegno di Nino Martino, che ringrazio caldamente.

Le diverse edizioni dell'articolo sembrano indicare che sia stato trovato di una qualche utilità per l'insegnante di fisica, e che forse lo sia ancor oggi. Mi è sembrato quindi opportuno metterlo a disposizione nel mio sito internet, in una versione curata quanto mi è stato possibile, e ho anche pensato di arricchirlo di un'introduzione storica, che ne spiegasse le motivazioni e rivelasse alcuni sottofondi, che potevano essere ovvi al lettore di 40 anni fa, ma lo sono assai meno oggi.

Per prima cosa ho dovuto digitalizzare la versione originale stampata (a quel tempo non esistevano PC ...), riprendere le figure (non certo dei capolavori, ma fatte a mano da chi scrive) e prepararne una versione TeX poi convertita in formato pdf.

Ho riprodotto l'articolo senza nessuna modifica, se non d'impaginazione, lasciando anche invariato un punto che oggi scriverei diversamente (più avanti vi farò solo un brevissimo cenno, solo per dire di che cosa si tratta).

* * *

Come ho detto, l'articolo origina da una conferenza su invito della sez. AIF di Milano, che ebbe luogo in una sede che ancor oggi rimane tradizionale per le attività milanesi in materia di didattica della fisica: il Museo della Scienza e della Tecnica (oggi Tecnologia, chissà perché ...). La data (1968) oggi fa sicuramente pensare a quel movimento, complesso e variamente giudicato, che da quell'anno prende il nome; ma direi che nel nostro ambito allora il '68 non s'era ancora sentito (avrebbe avuto influenze nel decennio successivo, ma a parlarne andremmo fuori tema).

Invece ciò che motivò l'invito e anche il carattere del mio intervento fu un'esperienza che aveva allora inciso profondamente sull'insegnamento della fisica, facendo anche molto discutere: mi riferisco al PSSC. L'inizio della sperimentazione PSSC risale in realtà a sei anni prima: nel 1962 si era tenuta la prima scuola di formazione dei primi insegnanti delle "classi pilota" (una ventina per

l'ordine classico, ^(a) penso circa altrettanti per l'ordine tecnico); nell'anno scolastico '62-'63 avevano avuto inizio le sperimentazioni in classe.

Sebbene in tutto l'articolo il nome PSSC figuri una sola volta, quasi di sfuggita, il senso del mio intervento era di confutare alcune critiche di fondo che a quel progetto erano state fatte, mostrando invece per confronto la debolezza e l'insufficienza proprio sul piano logico (oltre che didattico) di una "tradizione" che il PSSC tendeva a sovvertire. Al tempo stesso, approfittai dell'occasione per combattere alla radice quello che da alcuni autori (e da non pochi insegnanti) era considerato un approccio "rigoroso" alla fisica (da qui il titolo).

* * *

Questa la storia. E ora un brevissimo cenno all'unica correzione che apporterei (ma non l'ho fatto). In diversi punti dell'articolo scrivo che se un corpo è fermo, *per il primo principio* la risultante delle forze deve essere nulla. Oggi la vedo diversamente: non è il primo principio, ma un caso particolare del secondo.

So bene che in molti testi (specialmente di origine USA) viene detto che il primo principio afferma quello, e che esso è un corollario del secondo. Ma a mio parere è un punto di vista sbagliato. Il primo principio è *indipendente* dal secondo, ed è giusto che lo preceda perché ha un'altra funzione (e andrebbe enunciato in altro modo): dà la definizione di *riferimento inerziale*. Non aggiungo altro, perché — come suol dirsi — non è questa la sede.

[1] E. Fabri: *la Fisica nella Scuola* **10** (1977), 24.

[2] A.I.F.: *Guida al laboratorio di fisica* (Zanichelli 1995).

[3] <http://www.lanaturadellecose.it/la-pagina-di-elio-fabri-48>

^(a) A quei tempi esisteva nel Ministero della Pubblica Istruzione una "Direzione Generale per l'Ordine Classico," che aveva competenza sui Licei (classico e scientifico) e sull'istituto magistrale. Gli istituti tecnici facevano capo invece alla "Direzione Generale per l'Ordine Tecnico." Queste Direzioni Generali, oggi soppresse, si muovevano in completa indipendenza tra loro, anche riguardo alla sperimentazione PSSC.

Che cosa è il rigore logico in fisica?

E. Fabri

Istituto di Fisica – Università di Pisa

1. Premessa

Questo articolo riprende un tema trattato in una conferenza da me tenuta, nell'aprile 1968, alla Sezione A.I.F. di Milano, e della quale mi fu gentilmente fornita la trascrizione registrata. Da questa mi ripromettevo di trarre già allora una nota da pubblicare, ma il lavoro rimase interrotto. Recentemente, in vista di una lezione al corso di aggiornamento organizzato dalla Sezione di Pisa, mi è sembrato opportuno riprendere l'idea. Quello che segue è dunque il risultato di due fasi di attività su uno stesso problema, separate da otto anni.

Il problema è questo: la fisica è una scienza sperimentale, e perciò in essa l'esperimento e i procedimenti induttivi entrano in modo determinante. Esiste però nella fisica una parte teorica, con struttura matematico-deduttiva, che non è meno importante, e anzi costituisce il carattere distintivo della fisica dalle altre scienze sperimentali (almeno come le conosciamo oggi). Fin qui tutto bene, e tutto noto. Ma quando si cerca di trasmettere la struttura della fisica nell'insegnamento, specie nella scuola secondaria, accade che ci s'imbatta in certe difficoltà, derivanti dalla complessità del rapporto fra teoria ed esperimento, fra induzione e deduzione. Sono queste difficoltà che cercherò qui d'illustrare.

Darò in primo luogo alcuni esempi di errori e insufficienze logiche piuttosto comuni. Seguirà una breve esposizione di un procedimento logicamente ineccepibile (il cosiddetto metodo assiomatico), con alcune argomentazioni che ne provano la scarsa validità didattica. A questo punto, conclusa la discussione dei vari aspetti del problema che abbiamo di fronte, darò qualche indicazione su come si possa tentare di risolverlo.

Il mio primo timore, nel riprendere il tema dopo otto anni, è stato che questo risultasse invecchiato e superato. In effetti nel 1968 era in pieno svolgimento un dibattito provocato dall'introduzione in Italia del PSSC e dall'istituzione delle classi pilota, che avevano funzionato come elemento di rottura degli schemi tradizionali. Oggi la situazione è certamente diversa; altri temi si presentano con più immediato interesse, o almeno sono più di moda: i rapporti con le altre scienze, la questione della storia, la fisica nel biennio, ecc. Temo però che a questo "invecchiamento" del problema che qui si tratta non sia corrisposto un suo reale superamento, cioè una soluzione chiara e diffusa fra tutti; mi sembra invece che il cambiamento d'interesse da un lato riguardi solo una cerchia relativamente ristretta, dall'altro rifletta stimoli ed esigenze che hanno origine al di fuori dell'ambiente degli insegnanti di fisica. Niente di male in ciò, che anzi testimonia una certa apertura, senz'altro da incoraggiare e coltivare. Tuttavia c'è il rischio che si produca una scissione: da una parte

un'“avanguardia,” che per essere numericamente scarsa e senza reale influenza tende a dare per risolti i problemi quando ne ha discusso a lungo, anche se la discussione non ha inciso sulla realtà concreta dell'insegnamento; dall'altra una “massa,” che assiste a questi certami oratori senza parteciparvi e senza poterne ricavare indicazioni utilizzabili nel lavoro di tutti i giorni. In parole povere: mi sentirei tranquillo se potessi ad esempio dare per certo che il ruolo dell'esperimento nell'insegnamento della fisica è chiaro e definito per la più gran parte degli insegnanti: allora affronterei volentieri un altro tema. Ma se così non è, la discussione anche su un argomento relativamente “scontato” va continuata.

Vorrei aggiungere che il mio punto di vista odierno non coincide completamente con quello del 1968: oggi vedrei importante anteporre al momento della sperimentazione in laboratorio un momento che per brevità vorrei chiamare “naturalistico.” Spero di trovare l'occasione per spiegare distesamente che cosa intendo con questo: per ora non mi è sembrato opportuno alterare la linea generale della discussione che segue, dato che questa nuova concezione si aggiunge alla vecchia, ma non la contraddice.

Buona parte del mio discorso concerne le esposizioni correnti nei libri di testo. Naturalmente negli ultimi anni sono usciti molti libri nuovi, e riedizioni di quelli vecchi: ad es. ora è quasi impossibile trovare un testo che non usi la tecnica della fotografia multiframe per illustrare vari aspetti della meccanica. Corrisponde a questo un qualche reale cambiamento nel carattere dei testi, per quanto concerne quello che dirò nel seguito? Non ho potuto condurre un'indagine sistematica in proposito, ma l'esame di alcuni esempi significativi mi ha convinto di no: perciò anche in questo senso credo che il discorso che verrò svolgendo sia ancora attuale.

2. Difficoltà logiche nell'insegnamento della fisica

Vi sono nell'insegnamento della fisica alcune difficoltà di fondo, con cui è inevitabile scontrarsi, e che non dipendono dal particolare argomento che si affronta: le chiamerò in seguito “difficoltà logiche,” anche se il termine non rende esattamente l'idea. Per chiarire che cosa intendo, la cosa migliore è fare qualche esempio.

- Come si devono presentare i principi fondamentali (ad es. quelli della meccanica)? Ricavandoli dall'esperimento, o introducendoli come postulati non dimostrabili?
- Che posto bisogna dare agli esperimenti? Illustrazione delle leggi fisiche, loro dimostrazione, o verifica?
- Come va descritto il rapporto fra teoria e realtà fisica? La prima è un'approssimazione, o un'idealizzazione, della seconda? o qualcosa di diverso?

Già questi esempi mostrano che si tratta di questioni assai gravi, in quanto investono i fondamenti filosofici della fisica; ma si potrebbe pensare che sia fuori posto sollevarle per un insegnamento elementare, quale è quello secondario. E in effetti non si tratta di farne una discussione esplicita con gli studenti, ma solo di prendere coscienza che — lo si voglia o no — è inevitabile trovarseli di fronte, in un modo o nell'altro, nella pratica quotidiana, anche la più modesta.

Una buona verifica di quanto vado dicendo la si trova se si sfoglia con occhio sufficientemente critico un qualsiasi libro di testo. Non per fare la caccia agli errori (magari ci saranno anche quelli, ma il problema è un altro): solo per seguire attentamente i passaggi logici e osservare se e come è stata data risposta alle domande che abbiamo viste, e ad altre analoghe. Convieni basarsi sui libri di testo, non perché li si debba prendere a modello, ma perché in quanto scritti costituiscono un documento, e poi perché si deve assumere che gli autori nello scriverli abbiano riflettuto sulle scelte che si trovavano a dover fare.

Facendo l'esame che ho proposto, non sarà difficile scoprire perché ho parlato di “difficoltà logiche”: in qualunque libro troveremo discorsi che da un punto di vista strettamente logico sono da considerarsi errati. Di conseguenza, c'è da aspettarsi che lo stesso tipo di “errori” siano comuni nel lavoro didattico di qualunque insegnante. Forse qualcuno penserà di cavarsela obiettando che si tratta solo d'imperfezioni, necessarie per non fare le cose troppo difficili o per risparmiare tempo; ma io credo che questo atteggiamento semplicistico nasconda la vera natura del problema, e quindi sia di ostacolo alla sua soluzione, che è invece possibile, a condizione di affrontarlo con impegno.

Prima di pensare alla soluzione, bisogna però che il problema sia chiaro; e il modo migliore per questo è di dare esempi definiti, anche se particolari. Qui mi occuperò della meccanica, da un lato per contenere il discorso in limiti ragionevoli, dall'altro perché è questo il campo dove è più facile essere abbastanza precisi, e dove le varie posizioni si presentano in maniera più netta.

3. Uno strumento “innocente”: il dinamometro

Per uscire dalle generali, vediamo come viene di solito introdotta la meccanica nei testi più correnti (baserò le mie considerazioni sulla consultazione di oltre una decina di libri fra i più diffusi: pur con le notevoli differenze fra l'uno e l'altro, credo che quello che dirò possa valere per tutti). In primo luogo, sebbene sia noto che sono stati proposti diversi modi per introdurre il concetto di forza, si può vedere che tutti scelgono come più opportuna, almeno per il livello di scuola che ci interessa, la definizione statica. Senza stare a ripetere cose ben note, dirò solo che in genere si parte da considerazioni intuitive sullo sforzo muscolare che occorre per spostare o deformare i corpi; si cerca poi di dare una definizione che generalizzi e precisi quest'idea ancora vaga; si passa infine a dare un procedimento di misura della forza, ricorrendo al solito dinamometro, che viene tarato mediante

l'azione di pesi, cioè ricorrendo a una forza particolare e caratteristica: la forza di gravità. Questo procedimento presenta dei punti deboli, che ora vorrei illustrare.

Incominciamo dal dinamometro. Lo strumento sembra piuttosto innocente, e il suo uso del tutto intuitivo: ho una molla fissata a un sostegno rigido, e osservo che quando la tiro con la mano essa cede, si allunga più o meno a seconda del mio sforzo (fig. 1). Dunque l'allungamento della molla può darmi una misura della forza applicata. Per tararla, ricorro a un peso campione, che appendo alla molla (fig. 2): segno il corrispondente allungamento della molla, ecc. Quando un'altra forza produrrà sulla molla lo stesso allungamento prodotto dal peso campione, potrò evidentemente dire che quella forza è uguale al peso campione. Non mi soffermo ora sul procedimento che mi permette di segnare gli altri punti della scala del dinamometro: per lo scopo che mi propongo quanto ho già detto sarà sufficiente.

La critica che si può fare al procedimento esposto, se ci si pone da un punto di vista rigoroso, è la seguente: la situazione del dinamometro quando lo si tara non è la stessa di quando lo si usa per misurare una forza. Nel primo caso infatti la forza campione (l'attrazione terrestre sul corpo campione) non è applicata al dinamometro, ma appunto al corpo campione; nel secondo caso invece questo intermediario non c'è più. Naturalmente è vero che nel primo caso alla molla è applicata una forza esattamente uguale al peso del corpo campione: ma questo io non posso verificarlo direttamente, senza cadere in un circolo vizioso; posso solo dimostrarlo per via teorica. Anche se non essenziale per il mio tema, esporrò ora la dimostrazione, che ha un certo interesse di per sé.

Dunque: il corpo campione C è fermo, appeso al dinamometro D (fig. 3). So che su C agisce l'attrazione terrestre \vec{P} : ma questa non può essere l'unica forza agente su C, perché altrimenti esso non potrebbe stare in quiete. *In base al primo principio della dinamica*, posso dire che su C agisce un'altra forza \vec{F} , tale che $\vec{F} = -\vec{P}$. È facile identificare l'origine di tale forza: è il dinamometro che sostiene C, e la forza \vec{F} è applicata da D su C nel punto di mutuo contatto. Allora *il terzo principio* mi permette di concludere che C deve applicare su D un'altra forza \vec{F}' , e che $\vec{F}' = -\vec{F}$. Ne segue $\vec{F}' = \vec{P}$, c.v.d.

Dal ragionamento che precede abbiamo visto che l'idea intuitiva, che su D agisce una forza uguale al peso del corpo campione, è esatta; ma *la sua dimostrazione richiede l'uso del primo e del terzo principio della dinamica*. Il guaio è che a questo punto della nostra trattazione non abbiamo ancora introdotto tali principi, e perciò non abbiamo il diritto di farne uso.

4. Il terzo principio

Questo intervento del terzo principio è caratteristico di tutti i casi in cui si fanno "trasmettere" forze da un corpo a un altro, come con i fili, ecc.. (Nel nostro caso è però essenziale anche il primo principio: se C non fosse fermo, niente garantirebbe il risultato cercato $\vec{F}' = \vec{P}$).

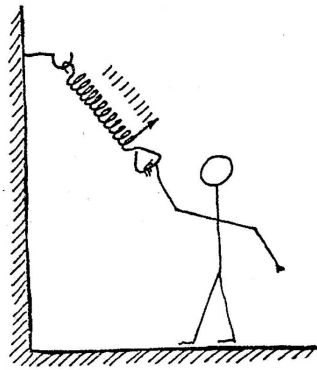


fig. 1

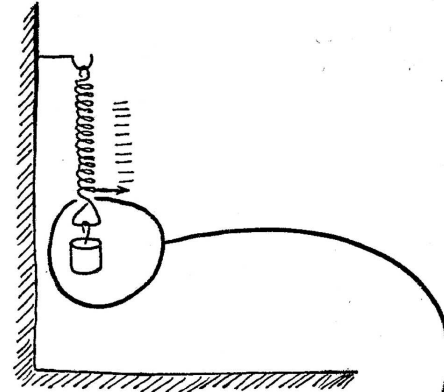


fig. 2

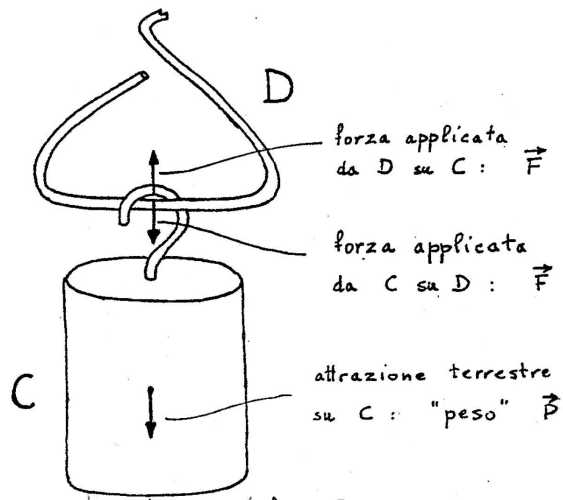
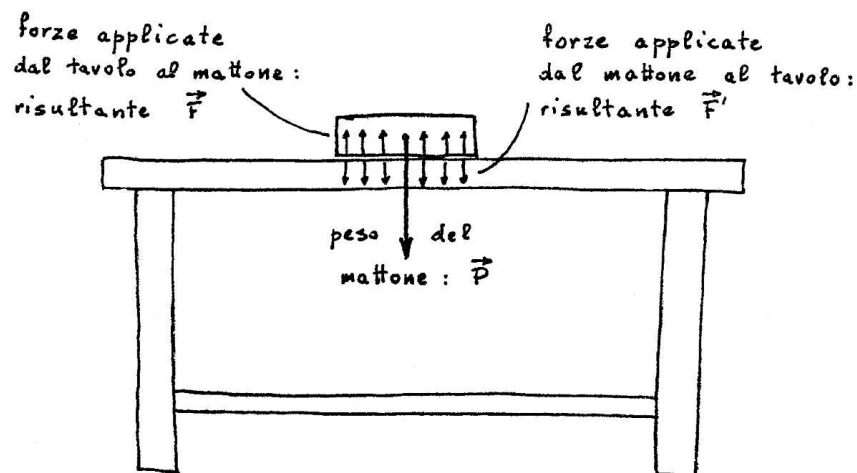


fig. 3

È molto comune trovare un ragionamento simile al precedente, usato alla rovescia, e *in modo errato*, come una prova del terzo principio. Si ragiona così (fig. 4):

“Se un mattone è appoggiato su di un tavolo, esso applica al tavolo una forza uguale al suo peso (!). Ma il mattone è fermo, e questo dimostra che il tavolo reagisce con una forza uguale e contraria, c.d.d.” (!!).



$$\textcircled{1} \quad \vec{F}' = \vec{P} \quad (?)$$

$$\textcircled{2} \quad \vec{F} + \vec{P} = 0 \quad (\text{I principio})$$

da $\textcircled{1}$ e $\textcircled{2}$ segue

$$\textcircled{3} \quad \vec{F}' = -\vec{F} : \text{dimostrazione del III principio (!)}$$

fig. 4

Per mostrare l'errore, poggiamo il mattone su quattro uova, che lo reggeranno benissimo (fig. 5a). Poi solleviamo il mattone di qualche centimetro, e lasciamolo cadere (fig. 5b): la frittata che ne risulta dimostra che solo quando il mattone è in quiete posso dire che esso agisce sulle uova con una forza uguale al suo peso. Dunque la prima affermazione è falsa, e non può servire come premessa al ragionamento che segue. Non per questo il terzo principio cessa di essere valido: anzi può essere usato per provare che durante la rottura delle uova il mattone ha un'accelerazione diretta verso l'alto (il che a prima vista non è affatto ovvio).

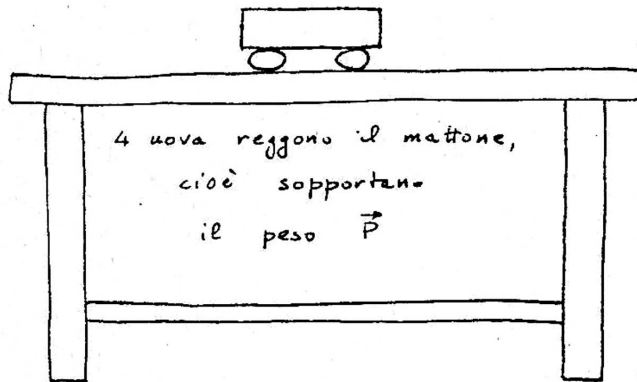
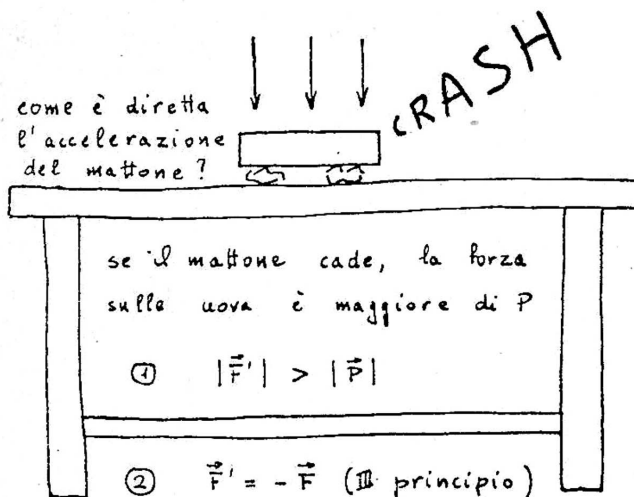


fig. 5a



da ① e ② segue

③ $|\vec{F}| > |\vec{P}|$

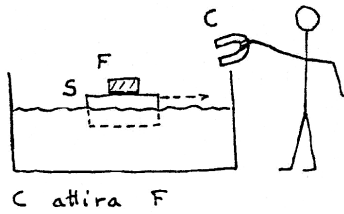
Inoltre

④ $\vec{F} + \vec{P} = M\vec{a}$ (II principio)

da ③ e ④ segue

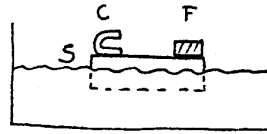
⑤ \vec{a} è diretta verso l'alto

fig. 5b



C attira F

fig. 6a

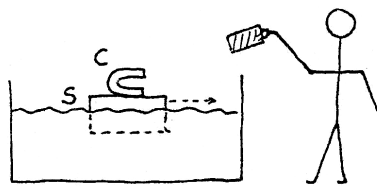


S sta fermo :

dunque azione e reazione
sono uguali e opposte

(dimostrazione del III principio ?)

fig. 6c



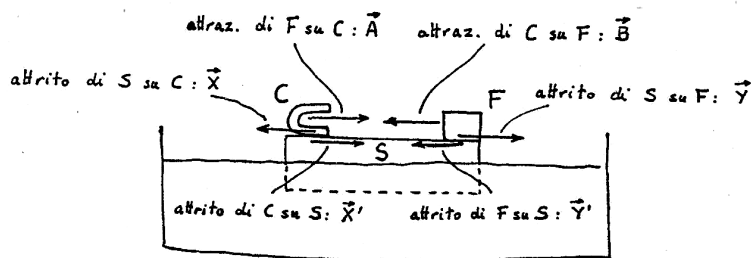
F attira C

fig. 6b

Non è forse inutile illustrare un'altra tipica pseudo-dimostrazione del terzo principio, dove l'errore è analogo, ma più riposto. Si poggia un pezzo di ferro su un sughero che galleggia nell'acqua di una bacinella, e si avvicina una calamita (fig. 6a): il sughero, col ferro sopra, si muove, dimostrando che la calamita attira il ferro. Si mette ora la calamita sul sughero, e si tiene il ferro in mano (fig. 6b): questa volta è la calamita (col sughero) a muoversi, e dunque il ferro attira la calamita. A questo punto, per confrontare le due attrazioni, si posano ferro e calamita sul sughero, e si vede che tutto resta fermo (fig. 6c): applicando il primo principio si conclude che le due forze in questione si fanno equilibrio (!!).

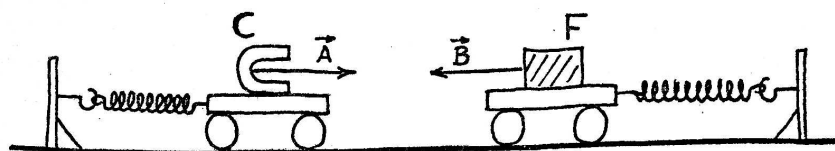
Il ragionamento esatto è mostrato in fig. 7: si vede che occorre tener conto di altre 4 forze, e perciò si hanno in tutto 6 forze incognite. Le condizioni di equilibrio danno 3 equazioni, applicandole rispettivamente al ferro, alla calamita e al sughero: ma le 3 equazioni così ottenute non permettono di dedurre la conclusione voluta (e naturalmente nemmeno le altre due relazioni che si ottengono dal terzo principio nel nostro caso).

Sempre sullo stesso problema, un'altra versione che sembra quasi inattaccabile è mostrata in fig. 8: questa volta uso due dinamometri uguali per misurare le forze, e se le deformazioni sono uguali non c'è dubbio che ho dimostrato il terzo principio (!!). Ormai posso lasciare al lettore il divertimento di scoprire l'errore, e tornare invece al tema principale.



$$\begin{array}{l}
 C \text{ sta fermo} \Rightarrow \vec{A} + \vec{X} = 0 \\
 F \text{ " " } \Rightarrow \vec{B} + \vec{Y} = 0 \\
 S \text{ " " } \Rightarrow \vec{X}' + \vec{Y}' = 0
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l}
 3 \text{ equazioni in} \\
 6 \text{ incognite:} \\
 \text{non posso ricavare}
 \end{array} \right\}
 \begin{array}{l}
 \left(\begin{array}{l}
 \vec{B} = -\vec{A} \\
 \vec{X}' = -\vec{X} \\
 \vec{Y}' = -\vec{Y}
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{applicazioni} \\
 \text{del III principio}
 \end{array}$$

fig. 7



se le due molle uguali hanno uguali deformazioni
ne segue

$$|\vec{A}| = |\vec{B}| \quad (?!)$$

fig. 8

5. Le definizioni

Esaminiamo ora un altro campo particolare dove le difficoltà logiche si manifestano con molta evidenza. Intendo parlare delle "definizioni."

Le virgolette sono *pour cause*: infatti è ben raro che le definizioni che si trovano in un libro di fisica, specialmente nelle prime pagine, meritino davvero tale nome. Direi quasi che non sarebbe un cattivo criterio per un giudicare un testo l'esame del numero di definizioni che impiega: più queste sono abbondanti, più è probabile che l'autore abbia realizzato un'esposizione apparentemente precisa, ma in realtà vuota.

Spero sia chiaro che con questo non intendo mettere al bando l'uso delle definizioni, che — quando sono logicamente corrette — sono senz'altro utili, e praticamente necessarie. Qui per definizioni “logicamente corrette” intendo quelle che si suole chiamare “nominali,” e che non sono altro che abbreviazioni del discorso: ad es. il momento di un vettore, l'energia cinetica, la densità, ecc. Sulle definizioni nominali ritornerò più avanti.

La mia critica si rivolge piuttosto a quelle pseudo-definizioni, che pretendono d'introdurre un termine — o un concetto — una volta per tutte, mentre invece non definiscono a rigore un bel nulla, o perché si appoggiano a termini a loro volta non definiti e privi di significato preciso, o perché incomplete, o confuse, o per altri motivi simili. Lasciando da parte casi famosi, e che vorrei sperare ormai estinti, come la definizione del “fenomeno fisico,” o altri più complessi, come il “punto materiale,” che discuterò in seguito, prendiamo in esame un esempio tipico, che riassume bene quello che voglio dire: la definizione di “forza.” Spesso questa viene data più o meno come segue: “forza è ogni azione che produce deformazioni o movimenti di un corpo” ⁽¹⁾. Le parole possono cambiare, ma non molto: la sostanza è sempre quella.

Ci sono almeno due aspetti per i quali una tale definizione è insoddisfacente. In primo luogo, la definizione sembra correttamente applicabile a situazioni in cui certo nessuno parlerebbe di “forza.” Esempio: se metto una sbarra di ferro su di una fiamma, essa si allunga. Certamente c'è stata un'azione (mettere la sbarra sulla fiamma); c'è stata una deformazione (l'allungamento): è stata forse applicata una forza? Si vede dunque che la definizione richiederebbe delle cautele, delle restrizioni, che non sarebbe facile enunciare completamente, e in ogni caso di solito vengono del tutto taciute. In secondo luogo, la definizione è incompleta perché non fornisce una prescrizione, applicabile in ogni situazione concreta, per attribuire una grandezza numerica all'ente che si definisce; la definizione è cioè solo qualitativa. Naturalmente non si potrebbe dare una definizione completa prima di aver parlato del dinamometro; ma appunto per questo è discutibile l'utilità di dare una pretesa “definizione” quando ciò non è ancora possibile.

Occorre dire che l'esigenza delle definizioni non è campata in aria, ma riflette qualcosa di valido, cioè la necessità che il discorso scientifico sia un discorso preciso, rigoroso. A questo si aggiunge di solito la convinzione che il rigore e la precisione siano necessari e inevitabili fin dal principio, e che il modo per garantirli sia quello di procedere appoggiandosi a tutta una serie di definizioni dei termini che via via s'introducono. Mi riprometto di discutere più avanti

⁽¹⁾ Non mi è possibile passare sotto silenzio la preoccupazione di alcuni autori, i quali stanno attenti a precisare che il corpo in oggetto deve essere “inanimato.” Se con questo intendono “non vivente,” ne concluderemo che ad es. i grilli non sono soggetti alle leggi della meccanica; se invece è proprio l'“anima” quella che conta, allora i libri di fisica dovrebbero essere scritti dai teologi, i soli evidentemente competenti in materia.

quanto tutto ciò sia necessario e possibile; per ora, accettando provvisoriamente l'esigenza del rigore, mi limiterò a osservare che se questo è il punto di vista che si vuole assumere, la cosa migliore da fare è di impiegare sistematicamente e correttamente la tecnica che ormai da tempo è stata sviluppata a questo scopo, e cioè il metodo assiomatico.

In realtà il metodo assiomatico non è che un insieme di procedimenti, di regole di costruzione del discorso scientifico, che ha lo scopo di assicurare la precisione, di evitare fraintendimenti, di dare la certezza delle deduzioni, e così via. Anche se la sua più feconda sfera d'impiego è la matematica, si può certamente pensare di applicarlo in altre scienze, e ciò è del resto stato fatto in numerosi casi particolari. Posso supporre che il lettore sia abbastanza familiare con la struttura del metodo assiomatico quale si presenta in matematica; vi sono però delle differenze essenziali nella sua applicazione a una scienza sperimentale, e per meglio metterle in rilievo ritengo opportuno richiamare brevemente le linee generali del procedimento.

6. Il metodo assiomatico

I passi che caratterizzano un procedimento assiomatico si possono così riassumere:

1) *Introduzione dei termini teorici primitivi*

Come dice il nome, si tratta di termini dei quali non si dà, né si potrebbe dare, alcuna definizione. La loro funzione è quella di costituire il “vocabolario” della teoria; il loro significato risulta chiarito dal resto della costruzione. L'esempio più naturale in matematica sono il punto e la retta della geometria: sebbene il significato intuitivo di tali termini non sia privo d'influenza nella costruzione del discorso teorico, per evitare pericolose confusioni è opportuno dimenticarlo, e adoperare “punto” e “retta” solo secondo quanto consentito e richiesto dalla teoria in oggetto. In fisica la situazione è analoga: termini primitivi potrebbero essere ad es. massa, tempo, punto materiale, e/o altri che si ritengano opportuni; la differenza dalla matematica è che qui è ancor più forte l'influenza d'interpretazioni del senso comune, e perciò più difficile (e più necessario) lo sforzo di liberarsene. Solo un esempio: uno dei motivi che rendono strana, non intuitiva ai non iniziati la teoria della relatività, è l'uso del termine “tempo,” che acquista nella teoria proprietà diverse da quelle attribuitegli dal senso comune.

2) *Introduzione dei termini teorici derivati*

Si tratta di un allargamento del vocabolario, che ha soprattutto motivi pratici, e viene fatto mediante definizioni. Queste sono le definizioni “nominali” di cui si è già detto; sono del tutto precise e rigorose, ma anche prive di contenuto: si pensi ad es. alla definizione di energia cinetica come semiprodotto della massa di un punto materiale per il quadrato della sua velocità. Quando tutti i termini contenuti nella definizione siano primitivi, o siano già stati definiti, la definizione è ineccepibile, ma è anche del tutto inutile dal puro punto

di vista logico: in ogni espressione dove compaia il termine “energia cinetica” lo si potrebbe sempre sostituire con “semiprodotto della massa per il quadrato della velocità,” e si perderebbe solo in concisione. Noterò per inciso che non per questo i termini derivati sono da considerarsi un capriccio inutile: si provi a eliminarli sistematicamente da una teoria appena un po’ elaborata, e si capirà che qualunque ragionamento diverrebbe impossibile. Si tratta però di un aspetto pratico, per quanto importante; non logico.

3) *Enunciazione degli assiomi o postulati*

Per il momento gli assiomi appaiono come delle proposizioni che connettono tra loro i termini teorici. Dagli assiomi non si richiede che una condizione: che non siano contraddittori. Non c’è alcuna necessità logica che gli assiomi siano “naturali” o “evidenti” o qualcosa del genere. La pretesa di un’evidenza degli assiomi ha chiaramente a che fare con l’altra che i termini teorici abbiano un’interpretazione “intuitiva”: su questo torneremo più avanti, a partire dal §8. Ma il metodo assiomatico respinge queste nozioni confuse, e richiede che gli assiomi vengano accettati come regole del gioco, come convenzioni che non ha senso discutere, ma solo applicare correttamente. (La discussione si farà dopo, sulle conseguenze dedotte dagli assiomi). Un esempio frivolo ma chiaro è quello dei giochi di carte. Uno può rifiutarsi di giocare, ma se fa una partita — poniamo — a tressette dovrà accettare la regola che il 3 prende sul 2, e il 2 sull’asso. Nessuno si domanderà perché questo, e perché l’asso poi valga più del 2 e del 3 nel conteggio dei punti: il tressette è fatto così. Se uno preferisse altre regole sarebbe padrone, pur di dichiararle esplicitamente e di trovare dei compagni per giocare: ma si tratterebbe di un altro gioco, e non avrebbe senso discutere di quale sia più “naturale,” o più “giusto,” ecc.

4) *Costruzione della teoria*

Questo passo non richiede molti commenti. Date le carte e le regole del gioco, si tratta di giocare, cioè, fuor di metafora, di trarre dagli assiomi tutte le deduzioni di cui si è capaci e che per un qualche motivo si trovano interessanti. Non ci sono limiti a questo sviluppo, ma neppure ci serve molto seguirlo oltre. Infatti fin qui abbiamo solo una teoria matematica: il punto di differenziazione, quello che deve essere presente in una scienza sperimentale, mentre manca nella matematica, deve ancora venire.

7. Le regole d’interpretazione

È questo un punto fondamentale e alquanto delicato, che perciò dovrò discutere con una certa ampiezza ⁽²⁾. Come si stabilisce il collegamento della nostra teoria con la realtà, con i fatti osservati? Sarebbe ingenuo credere che questo collegamento sia automatico: che a ogni termine e a ogni operazione teorica corrisponda un ben preciso dato di osservazione, una ben precisa operazione fisica. Questa corrispondenza naturalmente esiste, ma solo in forma incompleta e

⁽²⁾ Una trattazione molto chiara si trova in [1].

approssimata. Le regole d'interpretazione hanno appunto lo scopo di precisare i limiti e la portata della corrispondenza; è attraverso queste regole che la teoria diventa un modello della realtà. Ma si badi bene: un modello, non una copia o un'approssimazione o un'idealizzazione (tra poco ritornerò meglio su questo).

Esempi di regole d'interpretazione possono essere:

- a) la procedura sperimentale che associa a un oggetto fisico la sua massa (cioè la “definizione operativa” di massa);
- b) la specificazione delle condizioni in cui un corpo può essere schematizzato come un punto materiale;
- c) la precisazione delle caratteristiche dell'oggetto empirico che nella teoria prende il nome di elettrone...

Si vede già da questi esempi come le regole d'interpretazione possono essere di natura assai diversa tra loro. L'esempio b) mostra bene in che senso ho parlato sopra di corrispondenza “approssimata”; ma lo stesso vale anche per l'esempio c): quelle che oggi si considerano proprietà sufficienti a caratterizzare un elettrone, potrebbero risultare inesatte o incomplete domani.

L'incompletezza delle regole d'interpretazione si coglie meglio in un altro esempio, che sebbene assai elementare, è di solito trascurato. La meccanica classica richiede di considerare le coordinate di un punto materiale come funzioni reali della variabile tempo, derivabili almeno due volte. Una regola d'interpretazione può precisare come si determinano sperimentalmente tali funzioni? Evidentemente no, perché un numero finito di misure di precisione finita non permetteranno mai di determinare una funzione $f(t)$, anzi neppure un solo numero reale. D'altra parte si capisce bene che la teoria non può rinunciare alla $f(t)$ derivabile due volte, senza un radicale sconvolgimento; e in pratica nessuna teoria abbastanza articolata dal punto di vista matematico può fare a meno di costrutti analoghi o ancora più astratti (ho a mente qui lo spazio di Hilbert che fa tanto soffrire chi affronta la meccanica quantistica: e credo che la radice della difficoltà stia proprio nel non aver fatto presente in tempo che quella del costrutto teorico senza diretta interpretazione osservabile non è una peculiarità della meccanica quantistica).

Credo opportuno citare a questo proposito un brano che illustra il nostro punto con grande chiarezza [2]:

Una teoria scientifica è pertanto paragonabile a una complessa rete sovrappesa nello spazio. I suoi termini sono rappresentati dai nodi, mentre i fili collegati a questi corrispondono, in parte, alle definizioni e, in parte, alle ipotesi fondamentali e derivate della teoria. L'intero sistema fluttua, per così dire, sul piano dell'osservazione, cui è ancorato mediante le regole interpretative. Queste possono venir concepite come fili non appartenenti alla rete, ma tali che ne connettono alcuni punti con determinate zone del piano di osservazione. Grazie a siffatte connessioni interpretative, la rete risulta utilizzabile come teoria scientifica:

da certi dati empirici è possibile risalire, mediante un filo interpretativo, a qualche punto della rete teorica, e di qui procedere, attraverso definizioni e ipotesi, ad altri punti, dai quali, per mezzo di un altro filo interpretativo, si può infine ridiscendere al piano dell'osservazione.

Così una teoria interpretata consente d'inferire il verificarsi d'un fenomeno descrivibile in termini osservativi, ed eventualmente appartenente al passato o al futuro, sulla base di altri fenomeni osservabili già accertati. Ma l'apparato teorico che, con l'assicurare un ponte fra i dati di fatto acquisiti e i risultati empirici potenziali, permette di giungere a tali asserzioni su eventi futuri o passati, non è, in genere, formulabile in termini di soli osservabili. L'intera storia della scienza mostra che nel nostro mondo principi ampi, semplici e attendibili per spiegare e prevedere fenomeni osservabili non possono venir stabiliti unicamente ammassando e generalizzando induttivamente i risultati empirici. Occorre una procedura ipotetico-deduttivo-osservativa, la quale, naturalmente, è quella applicata nelle branche più avanzate della scienza empirica. Guidato dalla propria conoscenza dei dati empirici, lo scienziato deve inventare un insieme di concetti, i costrutti teorici, privi di significato empirico diretto, un sistema d'ipotesi formulate in termini di questi, e un'interpretazione per la risultante rete teorica; e tutto ciò in una maniera che consenta di stabilire fra i dati dell'osservazione diretta connessioni feconde ai fini della spiegazione e della previsione.

Posso ora tornare alla teoria come modello della realtà. Qui “modello” è usato nel senso in cui si parla di modello di una nave o di un vestito: schema semplificato, che non pretende di riprodurre tutte le caratteristiche e i dettagli dell'oggetto reale, ma solo quelle che interessano più da vicino. Questo è il prezzo che la teoria deve pagare, per avere in cambio un grande vantaggio: lo schema è interamente sotto il nostro controllo, può essere modificato se occorre; e soprattutto, grazie all'uso del linguaggio e delle tecniche matematiche, è privo di ambiguità e certo nelle conclusioni. Ecco perché non si tratta di una copia, ma nemmeno di un'approssimazione (che dà l'idea di qualcosa d'imperfetto) o di un'idealizzazione (che viceversa fa pensare che in qualche modo la teoria sia “migliore” della realtà).

Per concludere questo paragrafo vorrei fare un'annotazione psicologica. È facile che tutto quanto precede, e in particolare l'esplicita dichiarazione dell'incompletezza e imprecisione insite nella struttura del discorso fisico, lascino un senso d'insoddisfazione, quasi di rimpianto: quanto è più bella la matematica, dove tutto è preciso e ben definito! In parte è solo questione di gusti; ma c'è da osservare due cose. In primo luogo, anche in matematica un sistema assiomatico poggia su elementi non definiti; e questo può essere un motivo di disagio non minore del precedente. Andare a fondo sul problema dell'interpretazione degli enti matematici sarebbe qui fuori luogo: vorrei solo osservare che è proprio a questo disagio che si deve ricondurre il forte fascino delle soluzioni di tipo pla-

tonizzante (gli enti matematici esistono in un mondo iperuranio, inaccessibile, o accessibile al solo pensiero). In secondo luogo, l'incompletezza è appunto ciò che fa della fisica un discorso aperto, capace di evoluzione e di sviluppo a contatto con la realtà. Ma su questo dovremo tornare nel prossimo paragrafo, quando affronteremo gli aspetti didattici del nostro tema.

8. Metodo assiomatico e metodo sperimentale nella pratica didattica

Adesso che abbiamo visto le caratteristiche generali di una presentazione assiomatica della fisica, cioè di quello che potrei chiamare per scherzo “il sogno del fisico teorico,” possiamo domandarci: in che misura, in che modo, questa presentazione può essere utilizzata nell'insegnamento, e in particolare al livello della scuola secondaria? Credo che la mia risposta sia già chiara, ed è sostanzialmente negativa. E non per le generiche difficoltà che ognuno vede, ma per motivi più profondi, che ora vorrei discutere. Lasciamo anche andare la mancanza di un'assiomatizzazione sufficientemente completa, che potrebbe essere un ostacolo contingente: c'è in effetti un motivo pedagogico che mi sembra più importante.

È un fatto che molti termini del discorso teorico della fisica sono anche termini del linguaggio comune. Esempi tipici: forza, velocità, energia, carica, tempo. . . Questo comporta che qualunque ragazzo, anche se del tutto digiuno di fisica, non è mai del tutto *tabula rasa* sull'argomento. Quando noi diciamo “forza” il ragazzo associa necessariamente alla parola una certa interpretazione, derivante dalla sua esperienza del linguaggio, dall'uso che ne fa lui e il suo ambiente. Sia chiaro che non si tratta qui di sapere se l'uso che fa del termine il ragazzo è quello corretto o no. È certo interessante sapere che idea può avere un ragazzo di forza, energia, e simili: per un'analisi, sia pure parziale e incompleta, del problema, rinvio a un'altra sede [3]. Il punto fondamentale è però che non si può pretendere da un ragazzo di 16 anni di capire d'un colpo la regola principale del metodo assiomatico: che i termini non hanno alcun significato se non quello che risulta dall'uso che se ne fa nella teoria. Può anche accadere che in buona fede il ragazzo creda di accettare la regola del gioco: ma si può star certi che sarà continuamente spinto a dimenticarsene. Per di più, forse gli riuscirà addirittura difficile capire perché dovrebbe far finta di non sapere le cose che sa (magari anche giuste: e il guaio è che anche le conoscenze giuste mandano a farsi benedire il rigore assiomatico, perché sono fuori posto). Peggio ancora, di solito accade che l'insegnante trascura questo aspetto del problema, e non dà al ragazzo nessun aiuto per lo sforzo che gli sta chiedendo.

Per inciso, posso ora facilmente esporre qual è secondo me la critica più seria al metodo delle definizioni che citavo all'inizio. A parte il fatto che — come si è visto — un discorso rigoroso non si riduce affatto a definizioni, c'è soprattutto l'illusione che le cose siano a posto solo perché a un certo punto si è scritto **Definizione**; si dimentica d'indagare come la presunta definizione interagisce con le conoscenze del ragazzo, portando magari a risultati del tutto inattesi, a interpretazioni indesiderate.

Ma supponiamo pure che il problema non esista; che si sia riusciti a fare un'impeccabile presentazione assiomatica della fisica: possiamo essere soddisfatti? La mia risposta è no. Se lo scopo dell'insegnamento della fisica fosse quello di dare un quadro il più preciso possibile, di fornire certe nozioni, magari anche di mettere in grado gli allievi di adoperarle correttamente; in una parola se lo scopo dell'insegnamento fosse puramente tecnico, la via assiomatica potrebbe anche essere quella più efficiente. Ma se l'insegnamento della fisica deve avere un valore culturale, allora c'è dell'altro da fare. Bisogna fornire la risposta a domande che un insegnamento assiomatico deve per forza trascurare: come sono nate le teorie? chi ha suggerito quei certi termini primitivi e quei certi assiomi? perché si sono adottate proprio quelle interpretazioni? quanto sono valide e quanto sono stabili le strutture che si sono costruite? quali difficoltà si sono superate, e quali non si sono potute superare? Tutto questo non è meno importante di una formulazione il più rigorosa e precisa possibile; e se lo si vuole ottenere, il metodo d'insegnamento non può essere quello assiomatico.

È a questo punto che si comprende l'importanza e il valore di un metodo sperimentale. Ricordiamo la frase di Hempel prima sottolineata: "Guidato dalla propria conoscenza dei dati empirici lo scienziato deve inventare un insieme di concetti..." Ecco il punto. Per dare un'idea del lavoro che c'è stato dietro la costruzione della fisica come oggi la conosciamo, e del lavoro che ancora oggi si continua a fare per andare avanti, bisogna tentare di mettere gli allievi stessi di fronte allo stesso tipo di problemi: costruirsi dei concetti, vedere se e quanto sono adeguati ai fatti, come si scoprono delle regolarità, come si modificano i concetti e le teorie in base all'esperienza, ecc. Naturalmente questo non significa mettere da parte il discorso teorico; si tratta solo d'introdurlo al posto e al momento giusto.

Tanto per fare un esempio: supponiamo che mediante uno dei tanti dispositivi a carrelli, o simili, si sia arrivati all'idea, alla congettura, che forza e accelerazione sono connesse. A questo punto non si deve lasciar credere che l'esperimento coi carrelli prova, cioè convince in modo definitivo, che $F = ma$. Questo sarebbe sbagliato, e anche disonesto. In realtà l'esperimento di quel tipo può solo dare l'idea, cioè fornire lo spunto per una costruzione teorica. Poi la teoria cammina per conto suo, e porta a conseguenze che possono andare molto più in là del dato di partenza: ad esempio con le leggi di Newton e la gravitazione si costruisce tutta la meccanica celeste. È chiaro che la prova delle leggi di Newton non sta nei carrelli: sta nel fatto che lo schema teorico e le relative regole d'interpretazione hanno dato delle conseguenze verificate positivamente anche nei casi più complessi, anche negli esperimenti più sensibili.

Tuttavia sarebbe un errore credere di poter omettere il momento iniziale, l'esperimento coi carrelli, solo perché grossolano e non decisivo come prova. Il momento iniziale ha il suo posto fondamentale nella genesi della teoria, e non può essere saltato senza falsare la struttura dell'intero discorso.

Un altro esempio: il problema dell'attrito. È facile dire come debbono andare le cose in assenza di attriti; ma se uno fa l'esperimento, l'attrito c'è. Allora non è possibile dare una prova sperimentale della legge d'inerzia? Anche qui quello che conta è far seguire da vicino il procedimento logico: esperimento iniziale – idea teorica – ritorno all'esperimento – eventuale raffinamento della teoria, e così via. Non si può eliminare l'attrito, ma si può ridurlo, e si osservano le conseguenze di questa riduzione. Quello che si vede suggerisce l'estrapolazione al caso di attrito nullo. Di qui nasce la teoria, alla luce della quale poi anche l'attrito acquista delle leggi e diventa comprensibile.

È anche importante che si veda la necessità di mettere sempre in dubbio qualsiasi teoria, di considerarla valida solo fino a prova contraria. In genere sarà la stessa teoria a suggerire gli esperimenti che possono convalidarla o negarla; anche questa funzione critica dell'esperimento deve riuscire ben chiara. Naturalmente a questo punto si deve convenire che non tutti gli esperimenti possono essere fatti: alcuni saranno solo descritti, o presentati magari in un film. Ma c'è una differenza profonda a seconda dell'abito mentale che si è formato nel ragazzo: se gli è stato fatto chiaramente capire, anche in pochi casi, ma veramente a fondo, qual è la funzione di un esperimento vissuto personalmente, potrà senza pericolo accettare che alcuni esperimenti sono difficili, costosi, ecc.; che non importa vedere tutto di persona quando si è comunque in grado di capire quello che altri hanno fatto prima di lui. Allora perfino un esperimento solo descritto in un libro verrà preso con un altro spirito, e potrà contribuire efficacemente al quadro generale. Se invece il discorso iniziale ha avuto un carattere prevalentemente deduttivo, con eccessiva preminenza al momento teorico, c'è il rischio che l'esperimento venga visto come accessorio, quasi inutile, e tutta la materia appaia sganciata dalla realtà concreta. È così che si trovano ragazzi che non sono capaci di ragionare sulle cose elementari e di esperienza comune, e magari poi vorrebbero saltare alla fisica nucleare, ai laser, all'espansione dell'universo, o che so io.

9. Soluzione delle “difficoltà logiche”

Ora possiamo tornare alla discussione iniziale, circa il ruolo che possono avere le considerazioni sulla forza come sforzo muscolare, la misura della forza col dinamometro, ecc. È ormai chiaro che non si può trattare di definizioni, nel senso logico rigoroso: abbiamo visto le difficoltà che vi si oppongono, e gli argomenti didattici contro una tale idea programmatica. Si dovrà invece intenderle come elementi di una fase preparatoria, nella quale si passa dalle idee di senso comune ai termini del vero e proprio discorso scientifico. Un tale passaggio non si può fare di colpo, in poche parole: va motivato e guidato con attenzione.

In questo spirito la critica all'uso del dinamometro, che come abbiamo visto richiede il primo e il terzo principio, non sussiste più. Non si tratta infatti di pretendere fin dall'inizio una trattazione logicamente ineccepibile, ma d'incominciare a far conoscenza con gli strumenti della fisica e a costruire i concetti.

Il dinamometro serve a trasformare in grandezza fisica quantitativa l'idea di forza del senso comune; ad associarla a determinate situazioni sperimentali; a prendere contatto, anche in senso letterale, cioè toccando con mano, con le forze e con la loro misura. Niente di male se a questo punto si fa uso di proprietà del tutto intuitive (un corpo pesante applica al dinamometro una forza uguale al suo peso) che non sarebbe possibile dimostrare, dal momento che la meccanica è ancora da fare. Questa fase costruttiva si concluderà con l'enunciazione dei principi della meccanica, e allora si potrà far vedere che tali principi, oltre a spiegare e prevedere moltissimi altri fenomeni, giustificano a posteriori il punto di partenza adottato. Qualche studente obietterà: “bella scoperta, ritroviamo quello che avevamo messo dentro fin dal principio”? È vero, ma il controllo serve solo a garantire la coerenza logica della costruzione: dal momento in cui sono stati formulati, i principi di Newton diventano le basi portanti su cui tutto deve appoggiarsi. Quello che è veramente essenziale, è che l'intero processo sia ben chiaro al docente, il quale troverà allora il modo di presentarlo correttamente agli allievi, al momento giusto (e cioè durante e dopo lo sviluppo della discussione, e non prima).

La questione ha anche un altro aspetto. Prendiamo $F = ma$: introdotta la forza in uno dei soliti modi, con qualcuno dei soliti esperimenti si può arrivare alla II legge di Newton; ma si è già detto che nessuno deve pensare tale legge definitivamente dimostrata da quei pochi e grossolani esperimenti. Si tratta ovviamente di un momento induttivo: gli esperimenti suggeriscono un certo enunciato teorico generale ($F = ma$); da questo enunciato si sviluppano una serie di conseguenze, le quali da un lato confermano la validità dell'enunciato, e dall'altro precisano il significato dei termini teorici introdotti (forza, massa). Si può ben dire che probabilmente l'unica maniera corretta d'introdurre la forza è la definizione dinamica: $F = ma$ usata come “definizione” di forza. Ma questo non è un giro vizioso? L'equivoco sta nel credere che si tratti di una definizione nominale, come quella di energia cinetica; e che $F = ma$ non possa mai essere usata in altro modo. In realtà il modo corretto di esprimere la situazione è il seguente: $F = ma$ stabilisce la connessione necessaria (nella meccanica newtoniana) fra tre termini teorici, mentre le regole d'interpretazione ci dicono come connettere ciascuno dei termini teorici con l'osservazione. Perciò l'uso della II legge può cambiare a seconda delle circostanze, cioè a seconda di quali termini si suppongono noti, e quali si voglia ricavare dalla teoria (o *prevedere*, se si preferisce). Chiaramente in questo caso le possibilità sono tre, e tutt'e tre trovano applicazione pratica a seconda dei casi.

10. Concludendo

È probabile che questo sommario discorso non riesca a dare un'idea del tutto chiara di come si dovrebbe procedere nell'insegnamento della fisica per realizzare gli obiettivi che sono andato enunciando; si può anche dire che forse l'unico modo per essere chiari sarebbe di rimboccarsi le maniche e dare il buon esempio. Per

ora mi debbo però accontentare di questi pochi cenni, e per concludere vorrei riassumere quelli che mi sembrano i punti essenziali.

a) Gli esperimenti in fisica hanno un duplice ruolo: quello di controllo della validità della teoria che si viene sviluppando, e quello, non meno importante, ma spesso trascurato, di punto di partenza per il momento *induttivo*, per la formazione di concetti e teorie.

b) È importante che il discorso fisico sia rigoroso, ma il criterio del rigore non è quello delle esatte definizioni nel primo capitolo di un libro. Rigore significa chiarezza nel significato dei singoli passi; significa dire esplicitamente che i concetti si precisano man mano che si procede, che la validità di principi e teorie si rafforza quando se ne vede tutta la portata, che non ci sono singole leggi dimostrate da singoli esperimenti, ma che tutta la costruzione si regge nel suo insieme e nel suo insieme trova conferma nei fatti.

c) Ottenere che lo studente capisca e ricordi tutto questo è più importante delle singole nozioni, regole, dati sperimentali. Ciò porta via tempo, ma è tempo ben speso, anche se si deve sacrificare qualche parte delle trattazioni tradizionali. Per convincersene, basta avere l'onestà di chiedersi quanto di quello che si fa in un corso con pretese di completezza viene effettivamente ricordato, anche solo dopo un anno, dallo studente medio: si arriverà necessariamente alla conclusione che la completezza senza chiarezza di comprensione e senza profondità è fatica sprecata.

Questo non vuol dire naturalmente che nozioni, regole, dati sperimentali non debbano essere conosciuti e impiegati: ma che debbono esserlo in vista di uno scopo ben preciso, e non fine a se stessi. In fondo si può dire che il difetto principale di gran parte dell'attuale didattica della fisica sia proprio questo: la mancanza di uno scopo chiaro. Sembra che lo scopo sia stato perso di vista, e che sia rimasta solo una successione di atti e di passaggi obbligati, ai quali non si sa rinunciare. È necessario che chiunque ha la responsabilità d'insegnare riacquisti il coraggio di porsi i suoi scopi, e di studiare i mezzi per raggiungerli: senza ricette prefabbricate, e senza autorità superiori che non siano quelle fondate sulla riconosciuta validità del lavoro fatto e delle idee espresse.

Certo, perché un insegnante possa fare questo, occorre dargli — e chiedergli — molto di più di quanto oggi si fa: ma questo è un altro discorso.

Bibliografia

- [1] R. Carnap: *I fondamenti filosofici della fisica* (Il Saggiatore, Milano, 1971).
- [2] C.G. Hempel: *La formazione dei concetti e delle teorie nella scienza empirica* (Feltrinelli, Milano 1961). La sottolineatura è mia.
- [3] M. Batini, E. Fabri: *Giornale di Fisica*, **7** (1966), 39.