

IL PROBLEMA

NELL'INSEGNAMENTO/APPRENDIMENTO DELLA FISICA

di Lorenzo Mazzoni

Nell'insegnamento della fisica ancora oggi non si dà affatto per scontata l'importanza della soluzione dei problemi per un apprendimento realmente consapevole e critico, e quindi creativo. L'autore mostra come il «problema» non sia qualcosa di esterno o accessorio alla scienza fisica, ma è parte essenziale del procedere stesso della conoscenza scientifica, e quindi non può che esserlo anche del suo insegnamento.

Se è vero che l'apprendimento richiede un'esperienza personale intesa come consapevolezza critica di un cammino di crescita, il momento della comprensione e il momento della applicazione non possono ritenersi separati né in senso temporale, né come genesi, ma solo distinti, in quanto richiedono modalità di lavoro diverse.

Questa osservazione non solo indica una metodologia didattica, ma richiama anche una caratteristica fondamentale dello statuto del sapere delle scienze sperimentali. Il continuo intreccio, nella scienza, di ipotesi, esperimenti, situazioni problematiche, modelli talora contrapposti che cercano di interpretarle, costituisce un contesto complesso e avvincente in cui si svolge l'avventura umana dei singoli scienziati, ben lontano da una semplice enunciazione di regole, che ne costituisce un'arbitraria riduzione.

C'è il rischio che questa riduzione sia praticata, più o meno consapevolmente, nella didattica, quando essa sia rivolta quasi esclusivamente a esporre, sia pure in modo rigoroso, l'apparato teorico.

Nella fisica, l'esposizione della teoria, ricalca, talora, un procedere tipico della matematica (ciò non è strano perché il linguaggio della fisica è un linguaggio matematico). Esistono cioè definizioni, principi (analoghi ai postulati), teoremi, dimostrazioni, insomma tutta la logica di un procedere assiomatico e dimostrativo, anche se talora un po' zoppo, perché non sempre è possibile far uso del linguaggio matematico adeguato, in molti casi non ancora noto agli studenti.

La comprensione è poi resa più difficoltosa dal fatto che gli «oggetti» di cui si parla, (per esempio velo-

Laboratori Nazionali del
Gran Sasso (INFN)



cià, lavoro, quantità di moto, energia, calore, eccetera) non hanno una consistenza autosufficiente, come gli oggetti della matematica, ma hanno un riferimento preciso, anche se non sempre immediato, a una realtà esterna di cui costituiscono uno schema ideale semplificato.

Se si perde il contatto con tale realtà l'apprendimento dei contenuti e delle leggi della fisica diventa puro esercizio mnemonico. Il modello in fisica nasce proprio per descrivere e per interpretare un pezzo di realtà, e ha senso solo se vi riesce.

Allora una comprensione della fisica può diventare consapevolezza critica solo se l'apprendimento è intriso di tentativi, sia pur a livello elementare, di usare le categorie della fisica per leggere, descrivere e interpretare comportamenti reali e quindi, in un linguaggio più scolastico, anche per risolvere problemi.

Si tratta di un percorso non facile, perché è richiesta non solo un'agilità di uso del linguaggio matematico, ma comporta l'applicazione a una situazione che richiede un'analisi di tipo fisico, prima che matematico in senso stretto, che parte dalla comprensione del testo e richiede l'individuazione dei parametri essenziali, della o delle leggi che li collegano e così via. L'abitudine a questa analisi non può essere acquisita solo con un addestramento, perché occorre la conquista di un atteggiamento mentale, una crescita insomma. E non c'è crescita senza fatica: anche da ciò deriva la repulsione per l'esercizio o il problema che si riscontra in molti studenti.

È opportuno mostrare che vale la pena di fare questa fatica.

In primo luogo occorre capire che si tratta di una delle chiavi stesse dello sviluppo della scienza, non una sadica tortura imposta al malcapitato studente da un insegnante un po' maniaco.

Questo modo di procedere deve essere incontrato nell'impostazione stessa del corso di fisica, prima ancora che nell'applicazione ai problemi. Ciò significa, per il docente, una modalità di insegnamento tesa a mostrare il cammino della fisica come un intreccio di domande alla realtà, di ipotesi, di problemi, di tentativi di soluzione. La lezione non può essere soltanto l'enunciazione lineare di contenuti (anche se questo passaggio è in alcuni momenti necessario, perché senza una chiarezza di concetti e di definizioni precise non si costruisce nulla), ma deve essere svolta entro un orizzonte sintetico e in modo problematico.

Si penetra e si comprende una teoria scientifica non quando ci si limita a memorizzare i risultati, e a metterli in relazione fra di loro in modo logico, ma quando se ne affronta anche la genesi, attraverso i nodi problematici su cui gli scienziati sono stati chiamati a lavorare.

Un immediato corollario di questa assunzione è l'importanza di una contestualizzazione storico-culturale della problematica scientifica e, in termini didattici, l'importanza della dimensione storica nell'insegnamento della fisica. La genesi di una teoria infatti va collocata in un certo ambiente storico e problematico preciso, non avviene come pura astrazione.



Laboratori Nazionali di Frascati (INFN)

Nodi problematici

Il percorso della fisica è ricco di nodi problematici. A questo proposito può essere utile la rilettura di un vero e proprio classico della letteratura scientifica: *L'evoluzione della fisica* di Albert Einstein e Leopold Infeld, che definisce la scienza fisica «il romanzo giallo perfetto». Secondo l'impostazione degli autori la scienza procede incontrando enigmi (il primo è quello del moto), che via via risolve, ma in modo non definitivo: le stesse soluzioni date al singolo problema fanno incontrare nuove domande.

La genesi del problema è una domanda posta a un aspetto della realtà, o scaturita dall'osservazione di certi fenomeni, e questa domanda viene poi formalizzata nella ricerca di quelle «affezioni quantitative» che, da Galileo in poi, sono le uniche rilevanti dal punto di vista scientifico, e delle relazioni funzionali che le collegano (per esempio la legge oraria di un moto). Il problema può essere affrontato nell'ambito delle teorie correnti, o può richiedere nuove ipotesi e una nuova teorizzazione. Si tratta talora di problemi aperti, nel senso che i dati inizialmente a disposizione possono essere interpretati da più teorie, cioè ci possono essere più soluzioni, che spesso divergono nelle previsioni di nuovi fenomeni. Ciò capita anche in matematica, dove però, per rendere univoca la soluzione basta in generale aggiungere un nuovo dato o un'equazione in più che rende unica la soluzione. Nella fisica il nuovo dato spesso non è una libera scelta, ma va cercato con l'esperimento: quindi il concetto di problema in fisica è un intreccio non solo di teorie e di ipotesi, ma anche di esperimenti: un crocicchio di lavoro teorico e sperimentale in cui anche la ricerca del dato può far parte del metodo di soluzione del problema! Inoltre l'impostazione stessa del problema spesso è frutto di una schematizzazione che limita il campo di applicabilità dei fenomeni: per esempio, i concetti di punto materiale, di conservazione dell'energia meccanica eccetera.

Laboratori del CERN a
Ginevra



Una serie di esempi può chiarire queste osservazioni. Li esamineremo riferendoci a uno schema di classificazione, alquanto arbitrario, ma forse utile per distinguere le diverse situazioni in cui si sono trovati gli scienziati e interessante per l'analogia con la casistica che si può presentare nei problemi svolti dallo studente. Parleremo quindi di problemi con risposta errata, problemi solubili, problemi con più soluzioni, problemi aperti, problemi insolubili, problemi censurati.

Problemi con risposta errata

Il primo problema che si incontra nella fisica è un problema già «risolto», ma in modo errato, l'enigma del moto.

È difficile capire l'importanza dei passi fatti se non ci si pone la domanda elementare: perché un corpo si muove? La risposta aristotelica *omne quod movetur ab alio movetur* (ogni corpo che si muove è mosso dall'azione di un altro corpo), che implica che il corpo si ferma quando l'azione cessa, probabilmente è condivisa dalla maggioranza degli studenti all'inizio del corso di fisica.

Il punto di arrivo per una soluzione corretta del problema è costituito dalle tre leggi della meccanica newtoniana, ma è anche importante il preliminare costituito dall'analisi galileiana che porta al principio di inerzia. Il passaggio dal rapporto forza-velocità a quello forza-accelerazione e il principio di inerzia che ne costituisce la premessa non sono affatto intuitivi.

Si può imparare a memoria una soluzione, per esempio le tre leggi della dinamica, ma non capire il senso del procedimento logico e sperimentale con cui ci si arriva. Questa mancanza di criticità lascia però assolutamente disarmati di fronte a un nuovo problema. È molto importante capire come si sono effettuati i passaggi che non sono solo di tipo matematico, ma implicano ipotesi e modalità che si ritrovano poi in molti altri ambiti.

Così la soluzione al problema se un corpo dotato inizialmente di velocità si fermi oppure no, viene data da Salviati, nel dialogo con Simplicio, con un metodo che si fonda su un'ipotesi, in questo caso il principio di non contraddizione, e deduzioni rigorose.

Questo principio assunto non solo come principio matematico, ma anche come principio fisico, permette di analizzare situazioni difficilmente realizzabili sperimentalmente, quelle dei cosiddetti esperimenti ideali: tutto il discorso di Salviati è basato non



Laboratori del CERN a
Ginevra

su una situazione reale, ma su una «situazione pensata», ossia un esperimento ideale.

La situazione ideale che Salviati propone a Simplicio è quella di un corpo in moto su un piano inclinato; se il piano è inclinato verso il basso, lo stesso Simplicio ammette che esso deve necessariamente aumentare la sua velocità: «continuerebbe a muoversi all'infinito [...] e con movimento accelerato continuamente»; se il piano è inclinato verso l'alto, il mobile deve rallentare: «il moto andrebbe sempre languendo e ritirandosi, per essere contro natura».

Da ciò si può concludere che se un corpo ha ricevuto una certa spinta, se esso non sale, né scende, deve mantenere la velocità acquistata, non essendoci ragion sufficiente né perché acceleri, né perché rallenti.

Un altro caso di risposta errata riguarda il moto relativo e si pone come obiezione al modello copernicano. Espresso in termini di fisica pregalileiana il problema è il seguente: se è vero che la Terra si muove, perché un sasso lanciato da una torre cade in verticale, come se la Terra fosse ferma? La traiettoria dovrebbe essere una parabola; ciò non succede, quindi la Terra è ferma. Anche in questo caso la risposta è errata; il principio di composizione dei movimenti rende conto della traiettoria del sasso, dando una soluzione diversa: la traiettoria osservata è quella prevista anche nel caso di moto della Terra.

Un problema solubile: il moto dei pianeti

Laboratori Nazionali
di Frascati



L'interesse di questo esempio consiste nella possibilità di mostrare come una teorizzazione di carattere generale (in questo caso le tre leggi della dinamica) opportunamente applicata può risolvere un problema particolare, anche se estremamente importante. Si tratta della deduzione della forza di gravitazione universale da parte di Newton, che permette di interpretare esaurientemente il comportamento del sistema solare, in particolare il moto dei pianeti.

Addirittura è possibile far ripercorrere agli studenti, quasi come un esercizio, il procedimento risolutivo. Una volta date le leggi della dinamica la deduzione della forza gravitazionale risulta dalla messa in opera di un apparato teorico in risposta a una situazione sperimentale, con dati noti: il classico «problema». In questo caso i dati sono la forma delle orbite secondo le leggi di Keplero. L'applicazione della legge $F = ma$ (è necessaria una forza dato che la traiettoria non è quella di un moto rettilineo uniforme), mostra, insieme alla terza legge di Keplero, l'esistenza di una forza inversamente proporzionale al quadrato della distanza. L'applicazione del principio di azione e reazione fra il Sole e un pianeta, porta alla formulazione definitiva della legge di gravitazione, con l'introduzione

ne di una costante universale G e quindi a una soluzione completa del problema.

Infine, un riesame del significato delle costanti kepleriane (che risultano proporzionali alla massa del centro attrattore) mostra come la massa del Sole sia enormemente più grande di quella della Terra (circa 10^5 volte), e che quindi l'ipotesi che il baricentro del sistema solare si praticamente coincidente con il Sole è corretta: risolvendo il problema del sistema solare si ha così la vera giustificazione delle teorie copernicane.

Un problema con più soluzioni

È il caso del problema della propagazione della luce. I dati inizialmente a disposizione (legge della riflessione e della rifrazione) trovano spiegazione nell'ambito di due diverse teorie, (quella corpuscolare di Newton e quella ondulatoria di Huygens), ma il risultato è diverso in una previsione relativa al comportamento della luce in rifrazione: il dato da aggiungere, la velocità della luce in un mezzo materiale, non può però immediatamente essere acquisito, perché richiede un esperimento non tecnicamente eseguibile, al momento della formulazione delle teorie. Il dato discriminante fra due teorie è quindi una previsione che rimanda alla realtà fenomenologica; il problema non è solubile con un dibattito teorico.

Nel caso in questione il problema è poi risolto per un'altra via, con il dato fornito dagli esperimenti di Young e Fresnel, che sono interpretabili solo dal modello ondulatorio. Tuttavia questa soluzione apre un nuovo interrogativo, quello dell'etere: il problema rimane quindi in qualche modo aperto.

Un problema aperto

In effetti nella classificazione abbiamo usato il termine problema aperto (che avremmo potuto evitare, poiché ogni problema in fisica non è mai risolto definitivamente, rimane in qualche modo aperto), solo per indicare alcuni punti particolarmente critici del percorso della fisica. Un problema è «chiuso» solo nell'ambito di una ben precisa teorizzazione, e all'interno di una ben precisa selezione di situazioni sperimentali. Anche gli esercizi che proponiamo agli allievi appaiono chiusi solo perché si pongono in genere nei rigidissimi confini alla situazione sperimentale (mancanza di attrito, moto nel vuoto eccetera).

La chiusura di un ciclo problematico con una soluzione vincente (in questo caso la natura ondulatoria della luce) apre in realtà un altro ciclo: in questo caso quello che coinvolge l'elettromagnetismo, la relatività ristretta, l'interpretazione di Einstein dell'effetto fotoelettrico, il dualismo onda corpuscolo.

Un altro esempio di problema «aperto» con più tentativi di soluzione è quello di interpretare l'esperimento di Oersted. Sappiamo che tale esperimento ha innescato un processo di teorizzazione che ha portato all'affermarsi del concetto di campo come uno dei concetti fondamentali della fisica. Ma il percorso non è stato affatto lineare.

Il primo tentativo di risposta è dovuto ad Ampère, per il quale tutto si spiega con l'interazione fra elementi di corrente. Per questo Ampère fece un'ipotesi sulla forza fra due elementi di corrente e inventò una serie di esperimenti a suffragio della sua ipotesi. Per esempio ricavò l'espressione matematica della forza fra due fili paralleli percorsi da corrente e la verificò sperimentalmente.

Inoltre affrontò il problema della riduzione del magnetismo a effetto di correnti, inventando il concetto di corrente microscopica.

Le ipotesi amperiane sono state molto efficaci (in particolare rimane, sia pure evoluta nel contesto della moderna fisica atomica, l'interpretazione del magnetismo in termini di corrente), ma non hanno raggiunto lo scopo primitivo per due motivi: in primo luogo l'espressione della forza agente fra due elementi di filo percorsi da corrente non è di tipo newtoniano, perché non dipende solo dalla distanza, ma anche dall'angolo fra le direzioni dei due fili; in secondo luogo le ipotesi amperiane non sono in grado di spiegare i fenomeni induttivi. L'altra risposta, quella vincente che introduce il concetto di campo, nasce dagli esperimenti di Faraday e trova la sua sistemazione con Maxwell in una teoria fisico-matematica coerente.

Un problema insolubile

Un classico esempio di problema insolubile è l'interpretazione della struttura dell'atomo di idrogeno nella meccanica classica. Una deduzione rigorosa di un modello planetario dell'atomo dalle leggi della fisica classica porta a comportamenti inspiegabili e a insanabili contraddizioni.

Non si ha alcuna chiave di spiegazione del fatto che la materia nello stato aeriforme mostri spettri di emissione e assorbimento discontinui, anche se, per l'atomo di idrogeno, interpretabili con leggi empiriche abbastanza semplici.

La teoria inoltre prevede che gli atomi siano assolutamente instabili, perché gli elettroni in orbita, per le leggi dell'elettromagnetismo, dovrebbero emettere radiazione fino a cadere sul nucleo!

Mentre un problema aperto (come per esempio la natura della luce) può trovare soluzione in una nuova teoria che non contraddice i principi fondamentali acquisiti da teorizzazioni precedenti, in questo caso sono proprio i concetti fondamentali della fisica classica che sono inadeguati per descrivere l'atomo.

Il problema «insolubile» segna quindi un limite a una data forma di teorizzazione: per rendere solubile il problema dell'atomo occorre modificare il concetto stesso di particella, e introdurre tutto un complesso di nuove leggi, quelle della meccanica quantistica, che recuperano, ma in un contesto nuovo, i concetti fondamentali di particella, onda, campo, energia.

Problemi censurati

Rimangono sempre, come si è detto sopra, problemi aperti. Però, mentre taluni di essi sono esplicitamente dichiarati, e costituiscono oggetto di dibattito nella comunità scientifica, altri vengono in qualche modo censurati, nel senso che sono ignorati o si ritengono inessenziali, fino a che non riesplodono, magari provocando profonde modificazioni nelle teorie preesistenti. Facciamo alcuni esempi di problemi che sono rimasti per molto tempo, anche per secoli, in qualche modo ignorati.

L'azione a distanza

È il caso tipico della forza gravitazionale o di quella elettrostatica; nell'azione a distanza non è solo presente il problema del meccanismo di tale azione, che Newton bolla come un problema metafisico, ma anche quello del tempo di interazione: una carica creata in un punto esercita istantaneamente la sua azione fino a distanza infinita?

L'eguaglianza fra massa inerziale e massa gravitazionale

Nella fisica classica questa eguaglianza è un caso fortuito, che non riveste alcuna necessità logica dal punto di vista delle leggi generali della fisica. Possibile che essa non nasconda qualche simmetria più profonda delle leggi fisiche?

L'universo: finito o infinito?

Già Newton aveva fatto l'ipotesi di un universo omogeneo e infinito nello spazio e nel tempo per aggirare il problema dell'instabilità di un sistema finito di masse distribuito nell'universo. Questa ipotesi ha poi costituito per tre secoli una «garanzia» di validità universale per le leggi fisiche. Tuttavia sorge un problema, costituito dal paradosso di Olbers, esposto in un articolo del 1826: un universo omogeneo e infinito dovrebbe avere come conseguenza un cielo infinitamente luminoso, mentre il cielo di notte è buio. Questo problema è stato lungamente ignorato, per oltre cento anni, finché la legge di Hubble ha riproposto all'attenzione degli scienziati, in termini nuovi, il problema della struttura generale dell'universo.

L'instabilità dei sistemi dinamici

Il determinismo della fisica classica, così ben espresso da Laplace, che si basa sulla conoscenza delle condizioni iniziali di un sistema (i dati iniziali) e delle leggi che lo governano, incon-

tra però al suo interno un problema implicito: la conoscenza dei dati iniziali è sempre affetta da un piccolo errore. Il problema è in qualche modo censurato dalla convinzione che un piccolo errore nei dati iniziali porta a un errore piccolo nelle previsioni: ma è sempre così? si pensi per esempio a una pallina che venga fatta scivolare su un sottilissimo crinale; una piccolissima variazione della direzione iniziale porta la pallina a cadere sulla destra o sulla sinistra del crinale in modo assolutamente imprevedibile! Se poi il sistema è molto più complesso del precedente, l'imprevedibilità può diventare drammatica!

Solo nel ventesimo secolo il problema è stato ripreso in esame, con la teoria del «caos deterministico».

Un'ultima osservazione. Abbiamo visto che ogni problema affrontato dalla fisica contiene almeno un aspetto che rimane più o meno esplicitamente aperto, anche dopo l'affermarsi di una teoria che sembra dare una soluzione soddisfacente. Allora anche nella didattica della fisica l'insegnante deve porre in rilievo, come una delle caratteristiche peculiari della scienza, questo aspetto di «non finito» di ogni tentativo di spiegazione della realtà. Questo non per screditare il valore conoscitivo della scienza, ma per sottolineare il carattere «dinamico» della conoscenza scientifica: un cammino che rischia aspetti della realtà, senza eliminare la presenza di un «oltre», che rimane ultimamente inafferrabile nella sua completezza. Come dice Max Planck «L'assoluto è una meta ideale, che abbiamo sempre dinanzi a noi senza poterla mai raggiungere [...]. La nostra condizione è paragonabile a quella di un alpinista che non conosce le montagne per cui cammina e non sa mai se dietro la cima che vede dinanzi a sé e che vuol raggiungere non ne sorga per caso una più alta. A lui come a noi potrà servire di consolazione il sapere che si procede sempre più avanti e sempre più in alto e che non c'è nessun limite che continuare ad avvicinarsi alla meta» (in *La conoscenza del mondo fisico*, pp 173-174).

Questa introduzione alla scienza come un *work in progress*, può suscitare negli allievi il gusto che deriva dall'accorgersi che la scienza è un'avventura umana, che può valere la pena di conoscere e forse di condividere nel proprio futuro.

v

INDICAZIONI BIBLIOGRAFICHE

- M. Planck, *La conoscenza del mondo fisico*, Bollati Boringhieri, Torino 1964.
 A. Einstein e L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*, Bollati Boringhieri, Torino 1965.
 N. Sestini, *Percorsi storici di fisica*, in *Emmeciquadro* n.7, dicembre 1998.
 F. Bonicalzi, Il concetto di modello: aspetti storici e questioni teoriche, in *Emmeciquadro* n.10, dicembre 2000.
 G. M. Prosperi, *Modelli e teoria in fisica*, in *Emmeciquadro* n.10, dicembre 2000.
 C. Marchi Trevisi, *Di fronte al problema*, in *Emmeciquadro* n.14, aprile 2002.
 M. Martini, *La richiesta formativa oggi*, in *Emmeciquadro* n.16, dicembre 2002.