

Per cominciare

Questo libro è nato per gli studenti o per i loro insegnanti? Non saprei dirlo con certezza: gli uni e gli altri possono usarlo, ma è comunque agli studenti — quelli degli ultimi anni delle scuole medie superiori — che il libro vuole esser utile, direttamente o per mediazione di chi a loro insegna.

Di certo tutto è cominciato con gli studenti: gruppi di loro, all'ultimo anno dei licei di Sarzana, presero a chiedermi di fare — come usava dire — ripetizioni di fisica in preparazione alle prove di maturità, quando questo esame ancora induceva a prepararsi coloro che dovevano sostenerlo. Così ci incontravamo di sabato, all'incirca da gennaio sino alla vigilia dell'esame, ogni volta per almeno due ore filate; ci ospitava la parrocchia della cattedrale di Sarzana, spesso nelle aule destinate alle lezioni di catechismo con i piccoli banchi misurati per i bimbi della scuola elementare. Questa serie di incontri si è ripetuta, anno dopo anno, per almeno un decennio; ogni anno un buon gruppo di giovani arrivava sino in fondo.

Che una simile esperienza — esigente e impegnativa pur se del tutto informale — non si dissolvesse dopo le prime battute è un fatto che mi pareva ogni anno un miracolo. Se il miracolo si ripeteva c'era forse, in quell'esperienza, del metodo? Di nuovo non saprei dire. Così è nato questo libro, che ripercorre nei temi e nei criteri quel che veniva fatto in quegli incontri ormai lontani: forse, usato in mani opportune — di uno studente, di un professore — il miracolo tornerà a manifestarsi.

Di cosa si parlava in quegli incontri? Elettricità, magnetismo, e loro connessioni, sono temi classici dell'ultimo anno delle scuole superiori in Italia; il tutto senza mai far cenno alle trasformazioni della relatività ristretta¹: così gli argomenti delle nostre

¹Non c'era tempo e i ragazzi non lo avevano in programma: così, per necessità e per opportunità, ho mantenuto il silenzio su relatività ristretta, trasformazioni di Lorentz, invarianza relativistica dell'elettromagnetismo: mi è sempre costato, perché avvertivo in questa omissione una qualche slealtà verso chi ascoltava. Parlare di elettricità e di magnetismo, e fermarsi ai pur straordinari risultati di Maxwell significa chiudere al 1864 un argomento che di certo non si era concluso a quella data. Infatti — come si usa far notare — nell'anno in cui Maxwell moriva, a Ulm nasceva chi doveva porre in luce la mirabile struttura della teoria di Maxwell, nata relativisticamente invariante quarant'anni prima della relatività. Perché tralasciare ogni cenno a questi temi quando — come è ben noto — introdurre le trasformazioni di Lorentz richiede sforzo concettuale, ma non presenta difficoltà formali e potrebbe esser fatto in ogni scuola media superiore? Resto convinto che per presentare elettricità e magnetismo, ma soprattutto la loro connessione, non si dovrebbe fare a meno della relatività ristretta; mi richiamo alle lezioni di Purcell raccolte come secondo volume della fisica di Berkeley, o anche — per citare una autorevole voce di casa — alle lezioni pisane di Luigi Picasso.

conversazioni — ed i limiti entro cui impostarli — erano di necessità definiti. Come se ne parlava? Riprendo qui quegli argomenti, dando rilievo al punto di vista con cui li presentavo a chi mi ascoltava: è qui — se c'è — la ragione di questo libro.

Contenuti

Emerge subito la necessità di usare il concetto di campo, e in particolare di campo vettoriale, per descrivere fatti della natura, e si riconoscono delle operazioni proprie di questo nuovo strumento. Tutto viene utile per parlare dei fenomeni elettrici, delle sorgenti del campo elettrico — quella particolare qualità della natura che chiamiamo carica — e delle due leggi che lo determinano, quando il tempo non entra in gioco. Seguono poi i fenomeni magnetici, il campo che consente di descriverli e le due leggi che — sempre quando il tempo non entra in gioco — determinano questo nuovo campo e lo legano alle sue sorgenti; con la circostanza, a prima vista bizzarra, che le sorgenti del campo introdotto per descrivere i fenomeni magnetici sono le stesse sorgenti del campo elettrico — le cariche — ma ora devono essere in movimento².

Lo studente che ha seguito fino a questo punto ha imparato che se vuole descrivere nuovi fenomeni — quelli elettrici e poi quelli magnetici — deve ampliare gli strumenti matematici di cui dispone: deve cioè capire cosa è un campo vettoriale e deve rendersi conto che per usare questo nuovo strumento matematico sono richieste operazioni specifiche. Usando queste, in particolare il *flusso* e la *circuitazione*, scrive le equazioni — poche, due per campo — che definiscono il campo elettrico e il campo di induzione magnetica. Un ampio uso della simmetria propria di vari problemi concreti, nonché la scoperta della linearità delle equazioni che esprimono le leggi dei campi consentono di risolvere tali equazioni per varie semplici distribuzioni di sorgenti.

Lo studente è poi sollecitato a domandarsi come possa descrivere i fenomeni elettrici, o magnetici, quando la distribuzione delle sorgenti diventa microscopica, come accade in presenza di mezzi materiali in qualunque stato di aggregazione. È un ottimo spunto per presentare — magari per la prima volta per qualche giovane — l'importante distinzione tra la descrizione macroscopica ed una descrizione microscopica che dovrebbe tenere conto, per essere esatta, della distribuzione di carica, o di corrente, per i singoli atomi o addirittura per la singola particella portatrice di carica. Che esista una struttura della materia fatta con atomi e molecole, nuclei ed elettroni, è informazione data per nota, ed è di fatto fornita nei corsi di scienze, se non dai giornali o dalla televisione. Ma l'insegnamento nuovo nasce quando viene compresa la necessità di collegare le descrizioni microscopica e macroscopica, e ciò si ottiene attraverso processi di media, che forniscono descrizioni efficaci con strumenti estremamente semplici, come la costante dielettrica o la permeabilità magnetica: segno di un fatto generale, che la descrizione di un sistema complicato — ma vorrei poter dire: complesso — diventa semplice quando varia il punto di vista da cui lo si osserva, e i processi di media sono lasciati liberi di fare il loro corso.

²E ovviamente — perché il tempo continui a non entrare in gioco — il movimento delle cariche deve essere stazionario: deve cioè avvenire con velocità che non varia nel tempo...

Se tutto fosse finito qua, lo studente dovrebbe uscirne convinto che nella natura esistono due interazioni fondamentali, quella elettrica e quella magnetica, descritte dai relativi campi e prodotte dalle rispettive sorgenti. Due interazioni fondamentali da collocare accanto a quella gravitazionale, di cui ogni studente dovrebbe avere già sentito parlare, e che comunque va illustrata come descritta da un campo e dalle sue sorgenti, in questo caso quella qualità della natura che chiamiamo massa. E anche da collocare accanto ad altre interazioni fondamentali, in particolare a quella che tiene insieme i nuclei vincendo la interazione elettrica che li farebbe esplodere, ma che non si avverte lontano dai nuclei medesimi; e all'interazione debole, che si può soltanto citare, indicando magari qualche conseguenza più comprensibile. In ogni caso, una cosa dovrebbe cominciare ad emergere: e cioè che la natura è semplice e che, andando a cercare al fondo delle cose, solo pochi processi — fondamentali, appunto — descrivono tutto; che la natura si presenti come complicata è in qualche modo solo un'apparenza.

E ancora: perché mai devono esserci più interazioni fondamentali distinte? Non ci si può attendere che in qualche modo esse si rivelino espressioni diverse di un solo principio? In altre parole, cosa può voler dire unificare campi diversi? Simili questioni, nei termini in cui oggi sono discusse dai fisici, possono soltanto essere velocemente evocate. Eppure, cosa significhi unificare dei campi è sotto gli occhi di ogni studente di liceo, e vale la pena che sia fatto notare con il rilievo che merita: infatti la condizione che si è sinora accennata, con campi elettrici e campi di induzione magnetica descritti senza che il tempo intervenga, ha portato a un corpo di equazioni separate per l'uno e per l'altro campo, cioè — come sopra si diceva — a due distinte interazioni fondamentali. Ma, come ognuno sa, questo era al più ciò che poteva essere creduto da un fisico del terzo decennio del XIX secolo. L'apparizione di Faraday sconvolge tutto; conseguenza di questo sconvolgimento è la riunificazione dei due distinti campi: non più campo elettrico e campo di induzione magnetica, ma un solo campo elettromagnetico.

Ci sono due lezioni fornite da questo svolgimento. La prima è la concreta illustrazione di cosa significhi unificare due campi prima distinti: le equazioni che prima della unificazione li regolavano separatamente, dopo li contengono entrambi nella stessa equazione; il che, in pratica, significa che ciò che accade a un campo concorre a determinare il comportamento dell'altro, come hanno indicato le esperienze di Faraday.

C'è poi un altro insegnamento, ed è di metodo. Avevamo affermato che i fenomeni elettrici, e quelli magnetici, erano descritti separatamente dalle coppie di leggi stabilite per l'uno o per l'altro campo. Questa affermazione aveva ricevuto conferme, aveva superato con successo verifiche sperimentali; ma si rivela falsa. È uno splendido esempio di falsificazione, e di falsificazione di una teoria consolidata e di successo. Si impara che ciò avviene quando le affermazioni falsificande erano state pensate e messe alla prova in condizioni in qualche modo limitate. Estenderne l'ambito — nel caso specifico pensare a fenomeni che richiedono il tempo per essere descritti compiutamente — falsifica ciò che avevamo in precedenza creduto valido senza però che esso perda valore nell'ambito più limitato in cui tutto era stato originariamente formulato. È così che ha proceduto in passato, e procede tuttora, la nostra capacità di descrivere la natura.

Dopo questo, compare sulla lavagna il campo elettromagnetico, e si determinano le equazioni che lo regolano: sono quattro, quelle dei due campi elettrico e di induzione

magnetica, che vengono corrette con i nuovi termini dove compare il tempo. Sono le equazioni di Maxwell. Con esse si rappresentano correttamente i fenomeni rivelati dalle esperienze di Faraday: corrente — e tensione — indotta; e poi la applicazione di cui ogni studente è testimone nella vita quotidiana: la corrente alternata.

E a questo punto c'è il gran finale: perché basta mettersi in regioni dello spazio dove non ci sono sorgenti, né cariche né correnti, e scoprire che ora i termini dove compare esplicitamente il tempo bastano a sostenere il campo elettromagnetico. Poi si considerano gli unici parametri che compaiono nelle equazioni del vuoto — la permittività del vuoto ϵ_0 e la permeabilità magnetica del vuoto μ_0 — e si vede che con essi si può formare una quantità con le dimensioni di una velocità; la si calcola con i valori che — nelle unità di misura scelte — in linea di principio possono essere già noti, e si scopre che quella velocità vale quanto le stime già ottenute con classici esperimenti per la velocità della luce.

Nel mentre che quella velocità vien ricavata sulla lavagna, ogni studente che assiste dovrebbe sentire suonare a distesa le campane, perché sta crollando anche per lui il mistero della natura della luce, che gli uomini avevano invano tentato di scalfire per secoli. Sia gloria a Maxwell!

Criteria

Questo è dunque, all'incirca, il filo seguito in quegli incontri del sabato di tanti anni fa. Devo aggiungere che in nessun anno ho presentato tutti gli argomenti che ho raccolto in questo libro; però tutti — salvo alcuni pochi punti che ho completato stendendo queste pagine — sono stati in qualche anno esposti a voce a un gruppo effettivo di ascoltatori: quindi sono stati sottoposti alla prova di un uditorio reale e generalmente, per quanto rammento, reattivo.

Il filo che ho esposto ha dietro una scelta di principio, che forse il lettore ha già colto ma che comunque occorre dichiarare, anche perché a me è molto cara. Riguarda il rapporto tra esperimento e teoria. È ovvio che tutto parte dagli esperimenti; ma non sono questi che mi interessano in modo primario. Intanto perché gli esperimenti determinanti, in una procedura didattica seria, si fanno in laboratorio e non alla lavagna; quelli realmente discriminanti sono pochi e, per gli argomenti che stiamo trattando, fortunatamente anche non troppo difficili da realizzare.

Ma soprattutto io sono convinto che il primo significato della fisica consista nel trovare ed esporre modi di rappresentare la natura, e cioè identificare le grandezze rilevanti per ciò che si vuol descrivere, affermare le relazioni che le determinano, e dedurne previsioni; poi magari andare in laboratorio. In questo modo sto proclamando la priorità logica della fisica teorica. Attenzione: priorità logica non significa che lo spunto che porta alle scoperte non sia il più delle volte sperimentale; significa che, una volta che le scoperte sono state fatte, quel che è successo riguarda solo gli storici della scienza. Tutti gli altri, dopo che quel passo iniziale è stato ormai digerito, non sono più contemporanei degli scopritori; restano invece perennemente contemporanei del corpo di affermazioni

che, dopo lo spunto iniziale, hanno consentito di rappresentare coerentemente la natura — almeno finché qualche nuovo fatto non le renda in qualche misura false.

Rappresentare è la parola chiave. Perché il cuore della natura nessuno in realtà lo raggiunge, eppure pagine del libro della natura da secoli vengono lette, e i primi passi in questa lettura sono stati mossi lungo le rive dell'Arno e quelle del Bacchiglione. Lì è l'inizio della fisica moderna, e il suo manifesto è la frase famosa di Galileo, che il gran libro della natura — quello che noi leggiamo — è scritto in figure geometriche. Occorreva poi l'immenso genio di Newton per dirci che era anche scritto con derivate e equazioni differenziali. Per dirla in modo secco, noi leggiamo il libro della natura perché riusciamo a rappresentarla con gli strumenti con cui si esprime nella maniera più netta la logica che è in noi, cioè con la matematica. Ma la matematica è scienza deduttiva; e così tutto sta nell'identificare pochi principi di partenza — i postulati di una teoria — e da quelle leggi fondamentali leggere la natura, finché non sia necessario abbandonarle, o — come più frequentemente accade — integrarle per descrivere nuovi fatti che esse non riuscivano più a rappresentare correttamente.

Si può intendere così perché mi sia preoccupato tanto, in queste conversazioni del sabato, di chiarire subito gli strumenti matematici che occorreva usare per procedere a rappresentare i fenomeni che ci interessavano. E anche si può intendere perché, una volta precisati questi strumenti, abbia sempre iniziato determinando le leggi fondamentali che avrebbero dovuto contenere tutto il resto. Così facendo, tra l'altro, c'è modo di proclamare, e di render poi manifesto nei fatti, che rappresentare la natura è operazione che deve obbedire a un principio di massima economia: e cioè le leggi fondamentali — i postulati della teoria — sono in numero minore possibile, ed in genere sono semplici. Questa è la loro utilità, questa la loro eccellenza intellettuale. Tutto il resto si deduce, e non va ricordato a memoria. Posso garantire — per averlo constatato effettivamente in chi mi ascoltava — che una simile impostazione suscita negli studenti prima stupore e poi entusiasmo.

Così tutto sta nel rappresentare la natura con gli strumenti della matematica, ed è, questa, una operazione che dai primi passi sulle rive dell'Arno ha funzionato mirabilmente, consentendo, rappresentata la natura, di intervenire su di essa: risparmio gli esempi. Si sta rivelando, quindi, una coincidenza tra il modo in cui è di fatto organizzata la natura e il modo con cui la nostra ragione la rappresenta con la matematica, che è lo strumento più razionale — o, meglio, più totalmente razionale — di cui disponiamo. Questa coincidenza è stata sempre per me sorgente di profonda meraviglia, e la avverto come il vero, grande e permanente mistero della natura.

Per tale mistero è possibile cercare spiegazioni, ma credo fuori dalle risposte che possono fornire le scienze naturali. Ricordo ancora Galileo quando — cito a senso — afferma che l'uomo, nello studiare la natura, ritrova quella logica che le ha assegnato il Creatore, ma mentre Egli comprende la sua creazione in modo immediato e completo, l'uomo deve faticare per ricostruire i fili di quell'originaria ragione. Mi sono spesso chiesto se mai il grande pisano avesse espresso esplicitamente ciò che questa idea suggerisce, e cioè che nella pur faticosa capacità dell'uomo di leggere nella natura la ragione che le ha impresso la Sapienza creatrice si manifesti l'effetto della frase della Genesi: "facciamo l'uomo a immagine e somiglianza". C'è, comunque, all'origine della fisica moderna

questa quasi necessaria fiducia nella comune razionalità dell'universo e dell'uomo, quasi segno di un'unica logica creatrice; e con commozione ho ritrovato spunti che mi confermano in questa idea in una affascinante lezione di chi era stato — quando ero giovane — un riferimento intellettuale, ed è poi divenuto padre e pastore universale³.

Di tutto questo ho sempre fatto cenno — con prudenza — ai ragazzi che mi ascoltavano. In fondo sono questioni, e problemi, che li riguardano come uomini e non sarebbe male che li affrontassero, in un modo o nell'altro, al centro o al margine del loro processo di formazione intellettuale.

Ho elencato sommariamente i temi trattati in quegli incontri del sabato e ho dichiarato il punto di vista con cui li ho affrontati. Usando quale matematica? È noto che gli studenti del liceo classico ignorano nei loro programmi l'analisi. Così, per potermi rivolgere a tutti, ho eliminato dal mio linguaggio derivate, differenziali, e integrali. Con questo vincolo le leggi dei campi elettrico e di induzione magnetica si possono esprimere solo nella cosiddetta forma integrale: le operazioni proprie dei campi vettoriali che possono essere illustrate agli studenti in forma intuitiva — ma sostanzialmente precisa — sono quindi il *flusso* del campo vettoriale su superficie con bordo o chiusa, e l'*integrale di linea* su una curva con estremi o chiusa (*circuitazione*)⁴. Fortunatamente — come già si è accennato — le equazioni che coinvolgono queste operazioni sui campi sono risolvibili in casi semplici con l'uso di simmetria o linearità delle equazioni.

Ovviamente ogni variazione infinitesima viene espressa come incremento finito, con la ripetuta affermazione che tale incremento può essere preso piccolo quanto ci fa comodo per i fini per cui lo usiamo. E anche qualche integrale viene calcolato di fatto senza dichiararlo, con procedimenti non proprio — diciamo così — ortodossi. Sono stati invece dati per conosciuti gli elementi del calcolo con i vettori, e le relative operazioni; se così non fosse, qualche informazione su questi e altri argomenti è data nella parte che conclude il libro.

Riconoscimenti

È buon costume che l'autore ringrazi chi ha contribuito a rendere il suo libro quello che è diventato. Per questo vanno ringraziati i ragazzi che in molti anni hanno seguito con determinazione e — perché no — con coraggio gli incontri del sabato. Loro mi hanno convinto che per essere presi sul serio dai giovani, a quell'età, bisogna prima prender loro sul serio, e che una maniera per prenderli sul serio è considerarli capaci di capire e di seguire ragionamenti senza concessioni ad approssimazioni subdole. Oggi quei ragazzi sono professionisti, insegnanti, padri e madri di famiglia; mi auguro che quegli incontri siano loro serviti in qualche modo, e comunque grazie ad ognuno di loro. E grazie anche

³Benedetto XVI, *Incontro con i rappresentanti della scienza nell'aula magna dell'Università di Ratisbona*, 12 settembre 2006; nel sito www.vatican.va.

⁴Per come è presentato agli studenti, *integrale* di linea è soltanto un nome — da usare per rispetto all'uso — senza riferimento a un capitolo della teoria dell'integrazione: anche il *flusso* o la *circuitazione* sono tipi particolari di integrali, ma per queste operazioni — fortunatamente — il nome non richiama concetti che si è scelto di evitare!

a don Piero, che tutto questo ha voluto, ospitandolo nella parrocchia della cattedrale di Sarzana e dandomi fiducia con antica amicizia.

Per realizzare questo libro sono stati preziosi l'aiuto, l'incoraggiamento, le correzioni di Alberto, Andrea, Antonio, Giovanni, Liana, Marco, Matteo, Pino, Vittorio, e in particolare di Giuseppe che è riuscito a leggere e commentare l'intero manoscritto: li ricordo così perché ognuno di loro — riconoscendosi — sappia che gli sono grato; ma anche perché nessun altro — riconoscendoli — estenda a loro i rimproveri che questo libro possa meritare.

È anche uso che un libro venga dedicato, magari a chi in qualche modo lo ha ispirato. Un giorno qualcuno dei ragazzi riferì alla propria insegnante quel che era stato detto in qualche nostro incontro, e il commento che ne uscì mi fu riportato il sabato seguente: “che cose strane dice quel signore!” A quella innominata professoressa è dedicato questo libro.

*Pisa e Sarzana,
autunno 2012.*