

Campi, onde e particelle nei manuali di elettromagnetismo: un esempio di stratificazione concettuale e ontologica

Mary Antoniazzi e Giuseppe Giuliani*

*Dipartimento di Fisica ‘Volta’, Pavia

1 Introduzione

Nella evoluzione storica della fisica è possibile individuare un fenomeno che potremmo definire di *radicamento delle teorie*. Esso è il risultato della tendenza a conservare il linguaggio, i contenuti concettuali e i presupposti filosofici della teoria nella fase in cui essa è entrata a far parte della conoscenza acquisita, indipendentemente e nonostante gli sviluppi successivi della disciplina. Il processo di radicamento delle teorie è caratterizzato da:

- la mancata esplicitazione delle assunzioni filosofiche che fanno da sfondo alle teorie e alla loro interpretazione;
- la marginalizzazione delle riflessioni critiche sui fondamenti concettuali;
- l’elaborazione e la sovrapposizione di sequenze di teorie in assenza di una ricomposizione concettuale e filosofica complessiva.

Tale sovrapposizione, nelle sue forme estreme, conduce ad una vera e propria *stratificazione e compartimentazione concettuale* con conseguenze negative sulla coerenza interna della disciplina, sulla visione che ne hanno i fisici, sul modo di praticarla e di insegnarla.

Nell’esaminare l’approccio dei manuali ai concetti di campo, onda e particella abbiamo tenuto conto del fatto che la loro opzione filosofica di fondo è realista. Sebbene posizioni strumentaliste siano diffuse nella comunità scientifica e convivano con scelte di fondo di tipo realista – in quanto soddisfano le esigenze predittive della scienza – una posizione strumentalista ‘pura’ è difficilmente sostenibile nell’ambito della scienza e, di fatto, è estranea alla impostazione generale dei manuali.

I manuali esaminati sono elencati nella bibliografia: tutti i manuali sono stati analizzati per quanto concerne la definizione di campo elettrico; per gli altri concetti, abbiamo sistematicamente utilizzato i manuali per le scuole medie e alcuni di quelli universitari.

2 Il caso dell'elettromagnetismo

La teoria elettromagnetica si è sviluppata in un contesto caratterizzato dal concetto di etere e dalla credenza nella sua esistenza. La situazione era in realtà più complessa a causa della difficoltà di individuare le entità teoriche fondamentali con cui descrivere i fenomeni elettromagnetici. Tale situazione è lucidamente illustrata da Hertz nel saggio introduttivo alla raccolta dei suoi lavori pubblicata sotto il titolo di “Onde elettriche”.¹ Hertz considera inizialmente la descrizione della interazione tra due corpi elettricamente carichi basata sulla *azione a distanza* e mostra come essa assuma le elettricità positiva e negativa quali sorgenti delle forze a distanza e quali cause della polarizzazione dei mezzi interposti. Scrive Hertz:

Dal primo punto di vista, noi guardiamo alla attrazione tra due corpi come ad una specie di affinità spirituale tra di essi. La forza che ciascuno di essi esercita è legata alla presenza dell'altro corpo. Affinché ci sia la forza, ci debbono essere almeno due corpi. In qualche modo un magnete ottiene la sua forza solo quando un altro magnete è posto nelle sue vicinanze. Questa concezione è la concezione della azione - a - distanza pura, la concezione della legge di Coulomb.²

All'estremo opposto sta la concezione secondo cui le entità teoriche fondamentali sono i campi – intesi come perturbazioni (polarizzazioni) che si manifestano in ogni corpo, etere incluso:

Piuttosto, concepiamo ora le polarizzazioni come le sole cose che sono realmente presenti; esse sono la causa dei movimenti dei corpi ponderabili, e di tutti i fenomeni che permettono la nostra percezione dei cambiamenti di questi corpi. La spiegazione della natura delle polarizzazioni, delle loro relazioni e dei loro effetti, noi le attribuiamo a, o cerchiamo di trovarle sulla base di, ipotesi meccaniche; ma ci rifiutiamo di riconoscere nelle elettricità e nelle forze - a - distanza una spiegazione soddisfacente di queste relazioni e di questi effetti. Le espressioni elettricità, magnetismo, ecc., hanno, d'ora innanzi, solo il valore di una abbreviazione.³

Appare evidente che alla base dei diversi ‘punti di vista’ stanno non solo scelte diverse delle entità teoriche fondamentali, ma anche opzioni ontologiche differenti effettuate all'interno di una comune concezione realista di fondo. Il

¹H. Hertz, *Electric Waves*, Dover, (1962), pp. 1 - 28. La prima edizione inglese del libro è del 1893.

²Ivi, p. 22.

³Ivi, p. 25.

rifiuto di Hertz dell'azione a distanza deriva anche dalla difficoltà di darne una interpretazione realista: egli definisce l'azione a distanza come 'una specie di affinità spirituale'. Hertz ritiene invece di poter descrivere in modo realista i campi in quanto riconducibili a deformazioni meccaniche dell'etere.

La rielaborazione dell'elettromagnetismo da parte di Lorentz riassegna senza ambiguità alle cariche il ruolo di entità teoriche fondamentali in quanto *sorgenti* dei campi che, considerati come perturbazioni dell'etere, rimangono comunque suscettibili di una interpretazione realista.

L'avvento della relatività ristretta – con la congiunta proposta di eliminare l'etere dalle teorie (come entità teorica) e dalle immagini del mondo (come entità realmente esistente) – avrebbe dovuto suggerire un abbandono della interpretazione realista del campo elettromagnetico.

3 Campo elettromagnetico e realtà

Va innanzitutto osservato che, considerata una regione dello spazio 'vuota', non è concepibile da un punto di vista realista che essa possa subire – senza essere 'occupata da qualcosa' – modificazione alcuna. Se questo 'qualcosa' fosse il campo elettromagnetico, esso dovrebbe essere *continuo*. La conoscenza acquisita indica tuttavia che la struttura del mondo è discreta; ne consegue che – ragionevolmente – non può esistere alcunché di continuo. La concezione realista del campo elettromagnetico – nonché di tutti gli altri 'campi' della fisica – appare quindi incompatibile con la conoscenza acquisita. Inoltre, l'interpretazione realista del campo elettromagnetico produce anomalie causali. Consideriamo una sorgente puntiforme di onde elettromagnetiche sferiche (per esempio di luce); supponiamo di ridurre la sua intensità in modo tale che la luce venga rivelata 'per punti' su di uno schermo sferico concentrico con la sorgente. Secondo la interpretazione realista delle onde elettromagnetiche, l'energia viene irraggiata uniformemente nello spazio mediante onde sferiche: questa energia dovrebbe quindi 'concentrarsi in punti' mediante un meccanismo non previsto né descrivibile dalla teoria. Un'interruzione della catena causale si ha anche nel fenomeno interferenziale dovuto ad una sorgente la cui luce passa attraverso due fenditure. In questo caso l'interpretazione realista impone che ogni sorgente irradi la propria energia nello spazio indipendentemente dall'altra; di conseguenza l'alternarsi di zone di ombra e di luce sullo schermo rivelatore implica la 'scomparsa' di energia dalle prime e la sua 'ricomparsa' nelle seconde: anche questo ipotetico processo, non previsto né descrivibile dalla teoria, introduce una anomalia causale.

4 Il concetto di campo nei manuali

4.1 Il campo elettrico

L'introduzione del concetto di campo nei manuali è, in generale, caratterizzata dalla sovrapposizione di 'punti di vista' diversi. Questa sovrapposizione rende impossibile una classificazione precisa dei vari approcci. Riteniamo sia comunque utile tentare una classificazione, inevitabilmente schematica, al fine di porre in luce le linee fondamentali seguite dai manuali. E' allora possibile individuare tre tipi di definizione.

La definizione più diffusa è caratterizzata da un approccio operativo e dall'uso della legge di Coulomb e, quindi, dell'azione a distanza. Nella enunciazione della legge di Coulomb si evita, in generale, di specificare come la forza che in essa compare possa essere esercitata da un corpo su di un altro *separato* dal primo. Si eludono così i problemi concettuali, epistemologici e ontologici posti da una formula il cui uso – in assenza di ulteriori specificazioni – presuppone l'idea che due corpi possano agire a distanza. Il campo elettrico viene poi definito come $\vec{E} = \vec{F}/q$ ove \vec{F} è la forza di Coulomb e q la carica su cui essa si esercita (definita usualmente 'carica di prova'). Nella maggior parte dei casi il campo elettrico è considerato come una entità realmente esistente.

Questo modo di procedere si ritrova in molti manuali di scuola secondaria. Per esempio:

Nel paragrafo... è stato definito il campo gravitazionale della Terra come la forza di gravità che la massa della Terra esercita su una massa unitaria. In maniera analoga, definiremo il campo elettrico \vec{E} di un corpo carico come la forza elettrica che esso esercita su una unità di carica positiva. Perciò, la relazione fra il campo elettrico e la forza elettrica agente su una carica q è

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

proprio come la relazione fra la forza di gravità agente su una massa m e il campo gravitazionale è $F = mg$.⁴

Un approccio dello stesso tipo, più problematico, si ritrova nel *Project Physics Course*, dove, dopo la formulazione della legge di Coulomb, si introduce, derivandolo dall'esperienza quotidiana, il concetto di campo. Viene inoltre sottolineato che i fisici usano il termine 'campo' in tre accezioni: valore di una grandezza fisica in un punto dello spazio, l'insieme di tutti i valori di tale grandezza, la regione dello spazio in cui questa grandezza è definita. L'intensità del campo elettrico viene quindi definita così:

⁴PSSC, Comitato per lo Studio della Scienza Fisica, *Fisica*, vol. 2, Bologna (1985), p. 207.

L'intensità di qualsiasi campo di forza può essere definita in modo simile a quanto già visto per il campo gravitazionale. Secondo la legge di Coulomb, la forza elettrica che un corpo carico, relativamente piccolo, esercita su un altro dipende dal prodotto delle *cariche* dei due corpi. La forza \vec{F} che agisce su una carica q posta in un punto qualsiasi del campo elettrico generato da una carica Q , si determina applicando la legge di Coulomb:

$$F = k \frac{Qq}{R^2}$$

oppure

$$F = q \frac{kQ}{R^2}$$

Come nel caso del campo gravitazionale discusso precedentemente, l'espressione della forza è stata divisa in due parti. Il primo termine, q , esprime una proprietà del corpo sul quale agisce il campo; il secondo termine, kQ/R^2 , dipende solo dalla carica Q della sorgente e dalla distanza R da essa, si indica con un vettore \vec{E} che ha la stessa direzione della forza \vec{F} e viene chiamato 'intensità del campo elettrico generato da Q '. La forza elettrica è quindi determinata dal prodotto tra la carica di prova q e l'intensità \vec{E} del campo elettrico:

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

oppure

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Questa espressione *definisce*, per ogni punto dello spazio, l'intensità \vec{E} del campo di forza elettrico come *rappporto* tra la forza elettrica risultante \vec{F} che agisce sulla carica di prova nel punto considerato e la quantità di carica q di quest'ultima.⁵

In questo primo tipo di definizione si ritrovano dunque concetti – azione a distanza e campo – che sono stati storicamente in contrapposizione e che sono ricomponibili in una sintesi unitaria solo rinunciando ad una interpretazione realista del campo (vedi la terza definizione). Inoltre il campo – nonostante l'importanza attribuitagli – appare come un concetto subordinato, perché derivato da quello di forza.

Un secondo approccio si basa sulla asserzione che una carica elettrica modifica le proprietà dello spazio circostante (anche nel vuoto); tale modificazione è

⁵PPC, *Progetto Fisica*, vol. B, Bologna (1986), pp. 12.13 - 12.14.

descritta mediante un campo vettoriale, denominato campo elettrico, considerato come realmente esistente; viene quindi esclusa qualsiasi azione a distanza. Questo approccio non viene, tuttavia, sviluppato con coerenza. La asserita realtà del campo dovrebbe infatti condurre alla introduzione diretta del campo elettrico, evitando il passaggio attraverso la forza di Coulomb. La forza che si esercita su di una carica q posta in un campo elettrico verrebbe allora espressa come $\vec{F} = q\vec{E}$: essa sarebbe pertanto il risultato della azione del campo sulla carica e l'azione a distanza verrebbe esclusa anche formalmente. Salvo rare eccezioni, i manuali introducono dapprima, anche in questo caso, la legge di Coulomb; sviluppano poi il concetto di campo mediante considerazioni di vario tipo, per poi definire di nuovo il campo elettrico come $\vec{E} = \vec{F}/q$, ove \vec{F} è la forza di Coulomb agente sulla carica q . Ritroviamo qui la sovrapposizione dei due 'punti di vista' – azione a distanza e campo – già presente nel primo tipo di definizione. Ci sono, tuttavia, importanti differenze dal punto di vista ontologico: la realtà del campo elettrico è asserita esplicitamente e con convinzione; viene così esclusa la possibilità di azione a distanza. Un esempio significativo si trova nel manuale per l'università di Wolfson e Pasachof.⁶ Dopo aver formulato la legge di Coulomb, e prima di definire il campo elettrico come la 'la forza elettrica riferita all'unità di carica', gli autori scrivono:

Nello studio della forza gravitazionale, non abbiamo usato ampiamente il concetto di campo. E si potrebbe giungere sempre alle stesse conclusioni fisiche. . . usando il concetto di campo o la descrizione basata sull' "azione a distanza". Alla luce della breve introduzione al campo gravitazionale presentata nel capitolo. . . , il lettore è di certo giustificato se considera il campo come una costruzione puramente matematica che si introduce per facilitare i calcoli o per soddisfare qualche antipatia filosofica verso il concetto di azione a distanza; ma, procedendo nello studio dell'elettromagnetismo si convincerà che il concetto di campo è pressoché indispensabile e che i *campi esistono realmente*. Per il fisico, i campi non sono meno reali della materia.⁷

Un altro esempio si trova nel manuale di Borowitz e Beiser:

Oggi noi evitiamo di usare concetti che non possono essere empiricamente verificati, e parliamo invece di deformazioni dello spazio chiamate campi di forza. . . Implicito nel concetto di campo di forza è il presupposto che quando una massa, una carica, o un elemento di corrente esiste in qualche luogo, lo spazio nelle sue vicinanze è

⁶R. Wolfson e J.M. Pasachof, *Fisica*, Bologna (1995).

⁷Ivi, p. 515, corsivi nostri.

cambiato in modo tale che un'altra massa, carica, o elemento di corrente, rispettivamente, sarà sottoposto a una forza quando si trova nelle sue vicinanze.

. . . La primitiva concezione della azione a distanza sosteneva l'opposto punto di vista secondo cui la forza che un corpo esercita su di un altro rappresenta una interazione diretta tra i corpi: lo spazio trasmette in qualche modo la forza tra i corpi ma non è modificato dalla presenza di un singolo corpo. L'azione a distanza non è un concetto così utile come il concetto di campo, in parte perché *la realtà dei campi di forze è stata dimostrata in più modi convincenti*.⁸

Uno dei due autori presenterà, sedici anni dopo, una concezione diversa:

Quando una carica è presente in qualche luogo, *si può considerare* che le proprietà dello spazio nelle sue vicinanze siano modificate in modo tale che un'altra carica posta in questa regione sperimenterà una forza. La “modificazione dello spazio” causata da una carica a riposo è chiamata il suo campo elettrico.

Un campo di forza è un modello ideato al fine di fornire una struttura per capire come le forze siano trasmesse da un oggetto a un altro attraverso lo spazio vuoto. Un modello di successo non solo organizza tutte le informazioni che abbiamo su un certo fenomeno all'interno di una visione unitaria; esso ci permette di predire effetti e relazioni finora insospettati, che devono poi essere ovviamente verificati per mezzo dell'esperimento.⁹

E' interessante rilevare come da una concezione realista del campo si sia passati all'idea del campo elettrico come modello atto a descrivere l'azione a distanza, adottando quello che intendiamo classificare come terzo approccio: esso presuppone che due cariche possano agire a distanza, anche se non viene specificato il meccanismo di tale interazione. Un esempio è fornito dalle ‘Lezioni di fisica’ del Feynman:

Questo è ciò che intendiamo per campo “reale”: un campo reale è una funzione matematica che usiamo per evitare il concetto di azione a distanza. . . Un campo “reale” è un insieme di numeri definito in modo tale che ciò che accade *in un punto* dipende solo dai

⁸S. Borowitz, A. Beiser, *Essentials of Physics*, Reading, Ma (1966), p. 303; corsivi nostri.

⁹A. Beiser, *Physics*, third edition, Menlo Park (1982), pp. 394 - 95; corsivi nostri.

numeri *in quel punto*.¹⁰

Si noti come, in questo contesto, Feynman usi il termine “reale” secondo una accezione *non ontologica*: i suoi campi sono solo, come richiesto dal terzo approccio, un modello matematico usato per descrivere l’azione a distanza.

Le caratteristiche essenziali delle tre definizioni possono essere riassunte in una tabella (tabella 1).

Definizione	Entità teoriche usate	Realtà del campo	Realtà della A - a - D
1	Campo & (A - a - D)	Sí	No
2	Campo & (A - a - D)	Sí	No
3	Campo & (A - a - D)	No	Sí

Tabella 1: le tre definizioni di campo elettrico e le relative scelte ontologiche. ‘A - a - D’ indica l’azione a distanza.

Ripercorrendo l’esposizione che abbiamo fatto, possiamo concludere che:

- il concetto di campo (elettrico, ma non solo) che viene trasmesso dai manuali dipende in modo determinante dalla immagine del mondo condivisa dagli autori; in particolare dalla credenza o meno nella realtà ontologica del campo o della azione a distanza.
- Il primo approccio è caratterizzato dall’essere fortemente ancorato alla legge di Coulomb – e quindi al concetto di azione a distanza – pur in un contesto in cui si desidera dare rilievo fondamentale al campo, cui si riconosce, peraltro, realtà ontologica. Tale approccio si presenta pertanto come un caso esemplare di stratificazione concettuale e ontologica.
- Il secondo approccio afferma con nettezza la realtà ontologica del campo e il suo ruolo di entità teorica fondamentale; tuttavia, il percorso didattico scelto non è coerente con questa impostazione, riservando ancora un ruolo rilevante alla legge di Coulomb e, quindi, all’azione a distanza.
- Il terzo approccio, sebbene il meno diffuso, è coerente e discende da una immagine del mondo in cui i campi sono concepiti come modelli descrittivi.

¹⁰R. Feynman, R. B. Leighton, M. L. Sands, *Lectures on Physics*, vol. 2, Massachusetts (1963), pp. 15 - 17.

4.2 Il campo magnetico

Anche per quanto riguarda il campo magnetico, è possibile ricondurre i vari approcci alle tre tipologie già individuate per il campo elettrico. Tuttavia, all'interno di questa classificazione, è possibile individuare una ulteriore distinzione riguardante il tipo di sorgente utilizzata per la definizione. La definizione più diffusa (almeno nei manuali di scuola superiore) utilizza i magneti permanenti come sorgenti del campo, anche per seguire esplicitamente il percorso storico. Questo approccio conduce ad una definizione operativa attraverso la forza esercitata su un polo magnetico o la coppia esercitata su un ago magnetico. La definizione che si basa sul concetto di polo magnetico non è accurata perché il polo magnetico non viene, in generale, definito con precisione e perché un polo magnetico non può essere isolato. Un testo, che, nell'ambito di questo approccio, emerge per chiarezza espositiva, è quello di Blum e Roller (per l'Università):

Usando una sbarra magnetica molto lunga, tuttavia, si può minimizzare l'interazione tra i poli opposti e ottenere a tutti gli effetti pratici un polo puntiforme isolato. Diventa così possibile definire l'intensità p di un polo magnetico puntiforme, e metterla in rapporto alle forze e alla distanza tra i poli e la relazione che si ottiene è del tutto analoga a quella che esprime la legge di Coulomb per le forze elettrostatiche tra cariche puntiformi. (*Nota: p è una grandezza scalare*).

La forza \vec{F} che agisce su un polo di intensità p' situato in un punto \vec{r} per effetto di un secondo polo di intensità p che per semplicità possiamo supporre nell'origine delle coordinate, nel sistema $mksA$, è data da

$$\vec{F} = \left(\frac{1}{4\pi\mu_0} \right) \frac{pp'}{r^3} \vec{r}$$

dove l'intensità dei poli è misurata in *Weber (Wb)* e la relazione è stata razionalizzata introducendo il fattore geometrico $1/4\pi$. La costante μ_0 rappresenta la *permeabilità magnetica del vuoto*. . . Procedendo in stretta analogia con quanto fatto in elettrostatica definiamo *intensità di campo magnetico* (o *intensità magnetica*) \vec{H} la forza per unità di polo magnetico dovuta al campo magnetico creato dal polo p . Scriviamo cioè:

$$\vec{H} = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{\Delta p} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{p}{r^3} \vec{r}$$

dove il passaggio al limite va inteso nel senso che, volendo definire una forza per unità di polo magnetico, nel campo creato dal polo

p supponiamo di porre un polo di prova Δp la cui intensità viene fatta tendere a zero.¹¹

Nei manuali di scuola media, questo tipo di approccio assume caratteristiche qualitative che conducono, in generale, ad una definizione “in qualche modo non completa del *vettore campo magnetico* \vec{B} ”.¹²

*Il campo magnetico \vec{B} è un vettore la cui direzione e verso in un punto qualunque dello spazio sono quelli nei quali un piccolo polo N isolato inizierebbe a muoversi sotto l'azione della forza magnetica in quel punto e la cui intensità è proporzionale alla forza che agisce su quel polo N .*¹³

La definizione del campo magnetico impostata sulla interazione dei poli magnetici può apparire, a prima vista, come una naturale e conveniente estensione dell'approccio operativo basato, per il campo elettrico, sulla legge di Coulomb. Osserviamo tuttavia che le dimensioni dei poli magnetici così definiti sono quelle di un flusso del campo magnetico: la legge di Coulomb magnetica presuppone quindi una interazione tra flussi magnetici, non utilizzata in alcuna altra parte della teoria; la sua funzione si riduce quindi a quella di una descrizione di un fenomeno particolare. Non è infine da trascurare il fatto che la presupposta interazione tra flussi magnetici, cioè tra entità teoriche di cui non è possibile asserire l'esistenza sulla base della conoscenza acquisita, contrasta con l'impostazione realista dei manuali.

Il campo magnetico generato da correnti viene introdotto solo successivamente facendo riferimento alle osservazioni sperimentali riguardanti le forze esercitate dalle correnti su poli o aghi magnetici e utilizzando, talora, il principio di azione e reazione. Nei testi universitari si procede poi con il campo magnetico prodotto dalla singola carica in moto: questo passaggio finale è, in generale, omesso nei testi di scuola media.

Il problema posto dalla esistenza di due tipi di sorgenti del campo magnetico (magneti e correnti o cariche in moto), quando viene affrontato, viene usualmente ‘risolto’ introducendo le ‘correnti amperiane’. Tuttavia questo procedimento non tiene conto del fatto che il ‘modello amperiano’ ha la sola funzione di permettere l'estensione delle equazioni di Maxwell per il vuoto ai mezzi materiali. Le sorgenti del campo magnetico – magneti e correnti – sono effettivamente distinte perché non è possibile – per esempio – ricondurre i momenti magnetici intrinseci degli elettroni a correnti.

L'altro modo di procedere prende l'avvio dal campo magnetico prodotto dalle correnti o dalle cariche in moto. Questo approccio ha il pregio di condurre

¹¹R. Blum e D. E. Roller, *Fisica*, vol. 2, Bologna, (1985), pp. 232 - 33.

¹²J. F. Mulligan, *Fisica*, vol. 3, Edizioni Cremonese (1993), p. 96; in corsivo nell'originale.

¹³Ivi, in corsivo nell'originale.

ad una definizione radicata nelle equazioni di Maxwell per il vuoto in cui compaiono solo le cariche e le correnti. Per quanto concerne i problemi posti dalla duplice sorgente del campo magnetico, valgono le stesse considerazioni svolte a proposito della definizione precedente. Un esempio di questo approccio è fornito dal manuale di C. Mencuccini e V. Silvestrini:

Nell'introdurre i fenomeni magnetici, noi non seguiremo l'approccio storico (azioni tra corpi magnetizzati); ma partiremo dallo studio delle interazioni fra correnti (o fra cariche in movimento) in assenza di materia, cominciando con l'analizzare il caso stazionario (*magnetostatica nel vuoto*). Le azioni magnetiche fra materiali magnetizzati (o in presenza di materiali) saranno riconducibili ai fenomeni di magnetostatica nel vuoto, tenendo in conto le correnti microscopiche presenti nei materiali. . .¹⁴

5 Onde e particelle

I manuali affrontano le problematiche connesse al cosiddetto “dualismo onda - corpuscolo” partendo, in generale, dalle onde elettromagnetiche, evidenziando poi il comportamento corpuscolare della luce e prendendo infine in considerazione il comportamento ondulatorio delle particelle.

La discussione di queste tematiche rimette in discussione scelte ontologiche fatte – più o meno esplicitamente – in precedenza, come quella della realtà del campo elettromagnetico e delle onde elettromagnetiche. Consideriamo, come primo esempio, il manuale di Blum e Roller:

Il declino della teoria dell'etere segnò anche la fine della supremazia della teoria ondulatoria della luce. Nel 1904 Philipp von Lenard scoprì l'effetto fotoelettrico e l'anno successivo Einstein pubblicò un lavoro (...) nel quale si dimostrava che questo effetto poteva essere interpretato solo sulla base di una teoria corpuscolare. Oggi sappiamo che la meccanica quantistica riconcilia il punto di vista ondulatorio e quello corpuscolare postulando un dualismo della materia e dell'energia, cioè assumendo che al variare delle condizioni fisiche esse possono comportarsi alternativamente come onde o come particelle. Ciò che chiamiamo ‘onde’ o ‘particelle’ in altri termini non sono altro che due diversi modi di presentarsi, o se si vuole due casi limite, di un'unica realtà fisica.

¹⁴C. Mencuccini e V. Silvestrini, *Fisica II, Elettromagnetismo Ottica*, Napoli (1988), p. 190; corsivo nell'originale.

La teoria di Maxwell porta a prevedere l'esistenza di onde elettromagnetiche. . . L'opera di Maxwell rimase pressoché ignorata fino al 1887, quando Heinrich Hertz riuscì a dare una conferma sperimentale dell'esistenza delle onde elettromagnetiche.¹⁵

La posizione di questi autori è interessante per le opzioni ontologiche che la caratterizzano: esistono nel mondo due entità, materia e radiazione, che hanno la caratteristica comune di manifestarsi sotto forma di onda o di particella; entrambe le manifestazioni sono reali. Questa scelta ontologica non è, tuttavia, sostenibile, perché – come abbiamo mostrato sopra – una interpretazione realista delle onde conduce ad anomalie causali. Una posizione simile si ritrova nel testo di Halliday, Resnick e Krane:

In molte delle situazioni precedentemente incontrate si è rimandata la risposta alla domanda su come un elettrone (o un fotone) possa *agire* come un'onda in certe circostanze, e come una particella in altre. Ora si discuterà questo argomento. Per prima cosa, richiameremo nella tabella. . . gli inequivocabili risultati sperimentali che dimostrano come la materia e la radiazione davvero presentino entrambi questa doppia *natura*. Le nostre immagini mentali di “onda” e “particella” sono derivate dalla nostra familiarità con oggetti su grande scala, come le onde del mare e le palle da tennis. In un certo senso, è da considerarsi una fortuita coincidenza che si possa estendere questi concetti al mondo atomico, e applicarli a entità come gli elettroni, che non si possono vedere o toccare. Ma si deve sottolineare subito che nel mondo dei quanti non è possibile nessuna concreta immagine mentale, che combini le caratteristiche di entrambe (onde e particelle). Così Paul Davies, fisico e scrittore scientifico, ha espresso questo limite: “E' impossibile visualizzare un'onda - particella, quindi non ci provate nemmeno.” Come ci si può avvicinare? Neils Bohr, che non solo ebbe un ruolo fondamentale nello sviluppo della meccanica dei quanti, ma ne è stato anche il suo maggiore interprete e filosofo, ci ha indirizzati verso una soluzione con il suo principio di complementarità, che afferma:

Gli aspetti d'onda e di particella di un'entità quantistica sono entrambi necessari per una descrizione completa. Tuttavia, i due aspetti non possono essere rivelati simultaneamente in un singolo esperimento. L'aspetto che si rivela è quello determinato dalla

¹⁵R. Blum e D. E. Roller, *Fisica, Volume Secondo, Eletticità, magnetismo, ottica*, Bologna, 1985, p. 437. Notiamo, per inciso, che l'effetto fotoelettrico fu osservato da Hertz nel 1887, proprio mentre stava effettuando le misure sulle onde elettromagnetiche.

natura dell'esperimento che si conduce.¹⁶

La discussione di questi temi viene quindi risolta sulla base del principio di complementarità di Bohr. Questa scelta è assai discutibile per una serie di motivi: a) esistono diverse interpretazioni del principio di complementarità, dovute anche al fatto che negli scritti di Bohr non è rintracciabile una sua formulazione precisa ed univoca; b) esso risente fortemente del clima intellettuale del periodo storico cui appartiene e sulla sua formulazione hanno certamente influito anche le convinzioni epistemologiche e filosofiche dell'autore; c) nel contesto dell'approccio realista di fondo dei manuali, il suo uso introduce incertezze e ambiguità nella immagine del mondo che ne emerge.

I manuali che hanno considerato le onde come esistenti incontrano poi delle difficoltà nella descrizione dell'emissione e dell'assorbimento della luce da parte di singoli atomi in termini corpuscolari: dovrebbero infatti abbandonare la concezione realista delle onde per adottare quella dei fotoni oppure attribuire ad uno stesso ente un duplice comportamento (di onda e di particella), secondo l'opzione illustrata nelle due precedenti citazioni. Tuttavia, i manuali non scelgono, in generale, alcuna alternativa, lasciando così il lettore attento in una situazione di disagio intellettuale.

6 Conclusioni

La analisi che abbiamo svolto ci permette di concludere che:

1. La posizione filosofica dei manuali è di tipo realista; essa, in quanto opzione di fondo, è sempre implicita, ma emerge sovente in asserzioni riguardanti la realtà dei campi e delle onde.
2. La presentazione dei fenomeni elettromagnetici segue – in generale – un percorso storico: questo approccio è contemporaneamente un effetto e una causa del processo di stratificazione concettuale e filosofica.
3. Tale stratificazione si riscontra nella definizione e nell'approfondimento dei principali concetti dell'elettromagnetismo. Nel caso del campo elettrico, essa emerge dall'intreccio di azione a distanza e campo, nonché dalla concezione realista del campo ereditata dalla immagine del mondo del tardo ottocento. Per quanto riguarda il campo magnetico, l'approccio basato sulla riproduzione del percorso storico e sull'uso della analogia con la definizione del campo elettrico (cariche – poli magnetici) – tipico dei manuali per le scuole secondarie – conduce, generalmente, ad una

¹⁶D. Halliday, R. Resnick, K.S. Krane, *Fisica 2*, Milano (1994), pp. 1149 - 50.

definizione confusa ed incompleta. Nessuno – tra i manuali esaminati – riconosce alla fine che le sorgenti del campo magnetico sono effettivamente due, perché i momenti magnetici intrinseci delle particelle non sono in alcun modo riconducibili al moto di cariche elettriche.

4. Il ‘dualismo onda - particella’ viene per lo più trattato nell’ambito del principio di complementarità di Bohr. I suoi inevitabili riflessi sull’impianto realista di fondo dei manuali e su di una immagine del mondo permeata da elementi ottocenteschi vengono usualmente ignorati dagli autori dei manuali.

Bibliografia

- [1] Amaldi E., Amaldi G., Amaldi U., *Corso di fisica*, per i licei classici e le altre scuole medie, Zanichelli, 1984.
- [2] Bergamaschini M. E., Marazzini P., Mazzoni L., *Fisica*, per i licei scientifici, vol. 3, Carlo Signorelli Editore, I Edizione, 1993.
- [3] Caforio A., Ferilli A., *Physica*, per i licei scientifici, vol. 3, Le Monnier, 1989.
- [4] Caldirola P., Casati G., Tealdi F., *Corso di fisica*, per i licei scientifici, vol. 3, Ghisetti e Corvi Editori, 1986.
- [5] Michetti M., Salvini M., Formaglio M., *Materia e forze*, per i licei scientifici, vol. 3, Canova, I edizione, 1990.
- [6] Mulligan J. F., *Fisica*, vol. 3, Edizioni Cremonese, 1993.
- [7] PPC, *Progetto fisica*, vol. B, Zanichelli, II Edizione, 1986.
- [8] PSSC, Comitato per lo studio della scienza fisica, *Fisica*, vol. 2 - 3, Zanichelli, III Edizione, 1985.
- [9] Tipler P. A., *Invito alla fisica*, vol. 3, Zanichelli, I Edizione, 1991.
- [10] Ageno M., *Elementi di Fisica*, Torino, 1956.
- [11] Amaldi E., Bizzarri R., Pezzella G., *Fisica Generale*, Bologna, 1986.
- [12] Amerio A., *Fisica Sperimentale*, Vol. II, Messina.
- [13] Beiser A., *Physics*, III Ed., Menlo Park, 1982.
- [14] Blum R., Roller D. E., *Fisica*, Vol. II, Bologna, 1985.
- [15] Borowitz S., Beiser A., *Essentials of Physics*, Reading, Ma, 1966.
- [16] Bruhat G., *Cours de physique generale: electricité*, VI Ed., Entièrement remanié par G. Goudet, Paris, 1956.
- [17] Castelfranchi G., *Trattato di Fisica*, Milano, 1941.
- [18] Condon E. U., in *Handbook of Physics*, E. U. Condon H. Odishaw Editors, New York, 1958.

- [19] Feynman R., Leighton R. B., Sands M. L., *The Feynman Lectures on physics*, Vol. II, 1963.
- [20] Fleury P., Mathieu J. P., *Elettrostatica, Corrente Continua, Magnetismo*, Bologna, 1964.
- [21] Franeau J., *Physique*, Paris, 1968.
- [22] Halliday D., Resnick R., *Physics*, II Ed., New York, 1960.
- [23] Halliday D., Resnick R., Krane K.S., *Fisica 2*, Milano, (1994).
- [24] Mencuccini C., Silvestrini V., *Fisica II, Elettromagnetismo Ottica*, Napoli, 1988.
- [25] Perucca E., *Fisica Generale e Sperimentale*, II Ed., Torino, 1937.
- [26] Planck M., *Theory of electricity and magnetism*, London, 1932.
- [27] Pohl R. W., *Trattato di Fisica, Elettrologia*, Verona, 1972.
- [28] Purcell E. M., *La Fisica di Berkeley*, Bologna, 1979.
- [29] Sears F. W., Zemansky M. W., Young H. D., *University Physics*, Menlo Park, 1982.
- [30] Sommerfeld A., *Lectures on Theoretical Physics*, vol. III, (Electrodynamics), 1952.
- [31] Wolfson R., Pasachof J.M., *Fisica*, Bologna (1995)

Indice

1	Introduzione	1
2	Il caso dell'elettromagnetismo	2
3	Campo elettromagnetico e realtà	3
4	Il concetto di campo nei manuali	4
	4.1 Il campo elettrico	4
	4.2 Il campo magnetico	9
5	Onde e particelle	11
6	Conclusioni	13
	Bibliografia	15