

PER SAPERNE DI PIÙ

Campo: dalle azioni a distanza alle linee di forza **Field: from actions at a distance to lines of force**

Clara Frontali (*)

Via del Giuba 10, 00199, Roma, Italia

Riassunto. Viene ricostruito il percorso che —a partire dalle antiche credenze circa le azioni che un corpo può esercitare su corpi distanti, e passando per la rinuncia newtoniana a ipotizzare spiegazioni di natura metafisica— porta al grande successo della meccanica di Newton. Questo stesso successo ha condizionato, nei secoli successivi, l’interpretazione dei fenomeni elettrici e magnetici, riconducendoli ad azioni centrali e istantanee a distanza, alla cui trasmissione il mezzo rimane passivo. È il tenace lavoro sperimentale condotto personalmente da Faraday, poi elaborato in forma matematica da Maxwell, che porta all’introduzione del concetto di “campo”, concetto fisico ancor prima che matematico.

Abstract. We briefly describe the path that —starting from ancient beliefs concerning actions on distant bodies, and going through Newton’s refusal to “feign hypotheses” of metaphysical nature— leads to the great success of Newtonian mechanics. This very success influenced, in the following centuries, the interpretation of electrical and magnetic phenomena, thought to be due to central forces, transmitted instantaneously at a distance through a passive medium. It is Faraday’s experimental work, tenaciously carried out almost in isolation, and mathematically elaborated by Maxwell, that leads to the “field” concept.

1. Introduzione

Come può un corpo agire là dove non è? Come può “sentire” la presenza del corpo su cui esercita un effetto? Per rispondere a queste domande ci si è arrovellati per secoli alla ricerca di spiegazioni con cui poter giustificare il potere attrattivo di un magnete o l’effetto della luna sulle maree. Si avanzarono le ipotesi più varie: tendenze insite nei corpi, effluvi, influssi astrali, passaggio di “sostanze incorporee”.

Il percorso che porterà alla nascita del concetto di campo —che così importanti sviluppi avrà sia nella meccanica quantistica che nella relatività— passa anzitutto per la rinuncia a ipotizzare spiegazioni di natura metafisica, rinuncia che costituisce

(*) Già Dirigente di Ricerca presso Istituto Superiore di Sanità, Roma.
E-mail: clara.frontali@inwind.it

un punto di rottura esplicito in Newton (*“hypotheses non fingo”*), ma è già presente nell’opera di Galileo.

Il grande successo della meccanica newtoniana fa prevalere la visione di un universo retto da leggi generali. Le forze che fanno interagire corpi tra loro distanti hanno origine nei corpi stessi, in virtù della loro massa (Newton) o della loro carica elettrica (Coulomb) considerate concentrate in un punto materiale (centro di massa o centro di carica), e si propagano con velocità infinita attraverso il mezzo interposto, che rimane passivo. L’analogia formale tra la legge di gravitazione newtoniana e la legge di Coulomb conferma e rafforza questa visione.

È solo a partire dal 1820 che l’idea delle azioni centrali a distanza vacilla. La straordinaria idea delle linee di forza, avanzata da Faraday ed elaborata da Maxwell, propone che lo spazio stesso agisca divenendo sede di un “campo” di forze elettriche e magnetiche, che si propagano con velocità finita.

La storia tratteggiata nel presente lavoro (al di là degli aspetti umani, pure coinvolti) è una storia paradigmatica del compiersi di una costruzione scientifica: essa presenta, in tappe distinte, prima l’osservazione sperimentale (l’esperienza di Oersted) che mette in crisi un modello largamente accettato; poi, con Faraday, la sua modellizzazione, e infine con Maxwell l’elaborazione del formalismo matematico che la riassume e la rappresenta compiutamente.

Storicamente, dunque, il termine “campo” è stato introdotto in fisica prima che in matematica. Si può sostenere [1] che la prima formulazione teorica di campo (anche se non introduce il termine in questione) sia quella dovuta a Eulero quando — nel caso del moto di un fluido perfetto — utilizza equazioni alle derivate parziali rispetto alle tre coordinate spaziali ed al tempo per descrivere quello che a tutti gli effetti è un campo vettoriale. Ma è pur vero che senza la tenace insistenza di Faraday nel sostenere l’esistenza fisica, nello spazio, di forme di azione elettrica e magnetica, la nozione di campo sarebbe rimasta un concetto puramente matematico ⁽¹⁾.

2. Un problema antico

Fin dall’antichità, le azioni che si esercitano tra corpi distanti hanno suscitato problemi di interpretazione. Da alcuni venivano invocate forze occulte. Virtù speciali emanate dai corpi celesti erano certo dominio degli astrologi, ma anche i medici (ad esempio Galeno) attribuivano alle fasi lunari l’aggravarsi o meno di una malattia. Anche il fenomeno delle maree veniva da molti attribuito a un influsso delle fasi lunari.

⁽¹⁾ La copertura del termine si è poi estesa: noi parliamo di “campo gravitazionale” intendendo che ad ogni punto dello spazio viene assegnata una determinata capacità di azione, un’azione “potenziale”, che si eserciterà su ogni corpo che andrà a occupare quel punto. In questa accezione il termine copre dunque anche azioni a distanza non mediate da un mezzo materiale, proprio quelle dalle quali — come vedremo — Faraday e Maxwell intendevano distinguere le forze agenti nel campo elettromagnetico (distinzione che cadrà con Poincaré e Einstein).

La tendenza di un corpo ad unirsi ad un corpo a sé simile, già enunciata ⁽²⁾ da Democrito di Abdera (circa 460–370 a.C.) viene invocata a più riprese, come vedremo, fino all’epoca post-rinascimentale. Per altri autori effluvi emessi da un corpo e capaci di diradare l’aria circostante potevano far avvicinare altri corpi per effetto dell’*horror vacui*.

La negazione dell’esistenza del vuoto è un punto essenziale per Aristotele (384–322 a.C.), per il quale inoltre la “causa motrice”, propria di ogni moto, deve essere in continuo contatto con l’oggetto mobile. (Viene dunque esclusa la possibilità di azioni a distanza.) Causa motrice del moto di un proiettile dopo che è stato scagliato è il precipitarsi dell’aria —che è in contatto con il proiettile— a riempire il vuoto lasciato dal suo passaggio. Il moto del proiettile non potrebbe avvenire se lo spazio fosse vuoto [2].

Il caso del moto dei corpi che cadono verso terra è diverso: per Aristotele essi cadono non perché siano attirati da questa, ma perché tendono a tornare verso il loro luogo naturale, così come il fumo tende a salire verso l’alto, luogo naturale dell’aria. La causa del moto, in questi casi, è insita nel mobile.

Per il moto dei pianeti intorno alla terra non è necessario invocare una specifica causa motrice: essi sono inseriti in un sistema di sfere concentriche, il cui moto circolare —il più perfetto tra i tipi di moto in quanto non ha inizio né fine— manterrà indefinitamente la stessa velocità. Il mantenersi del moto circolare dei pianeti senza che su di essi si eserciti un’azione vale anche per il sistema eliocentrico di Aristarco di Samo (circa 310–230 a.C.), ma anche per il sistema copernicano. È solo con le orbite ellittiche di Giovanni Keplero (1571–1630) che si deve rinunciare alla perfezione del moto circolare uniforme e cercare la “causa” di questo tipo di moto.

3. Le azioni a distanza nel XVII secolo

Keplero è quindi portato a postulare l’esistenza di un’azione esercitata dal sole attraverso lo spazio ⁽³⁾. L’immagine immateriale (“*species*”) del sole, che si allarga in un piano con intensità decrescente come $1/r$, al momento in cui incontra un pianeta, gli imprime una spinta tangenziale all’orbita, di intensità variabile lungo il compiersi del ciclo. Sia i pianeti che il sole sarebbero percorsi da fibre magnetiche che —mentre il sole ruota sul proprio asse— eserciterebbero forze periodicamente attrattive o repulsive tali da deformare l’orbita circolare in un’ellisse, e da far variare la velocità del pianeta secondo la nota legge. Il fatto che i pianeti si muovano con velocità tra loro diverse sarebbe dovuto alla diversa resistenza al moto (“*inertia*”) da essi posseduta in ragione della loro diversa quantità di materia [3].

⁽²⁾ Frammento 164: “... i simili hanno la proprietà di riconoscere i simili”.

⁽³⁾ Per Keplero sono attrazioni a distanza anche quella esercitata dalla luna sulle maree, e la gravità. È sì presente una “passione” della pietra che viene attirata, ma l’attrazione non è reciprocamente simmetrica: è “la terra che attira la pietra più di quanto la pietra cerchi la terra”.

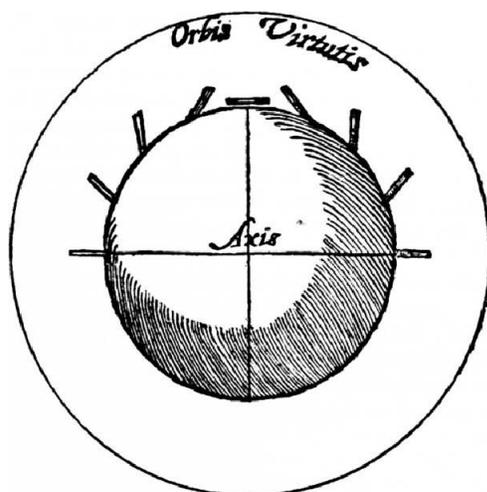


Fig. 1. – Dal *De Magnete*: La *Terrella* di Gilbert.

Che la terra si comporti come una grande calamita, e che l'ago della bussola venga orientato non (come si credeva) dalla stella polare, bensì da poli magnetici coincidenti con i poli geografici della terra, era stato proposto per la prima volta da William Gilbert (1544–1603). Medico di fama (medico personale della regina Elisabetta, e dopo la sua morte, di Giacomo I°) fu più noto in Europa come “filosofo naturale”. Il suo libro *De Magnete Magneticisque Corporibus et de Magno Tellure Physiologia*, pubblicato nel 1600 ⁽⁴⁾ —libro che apre la grande tradizione sperimentale del XVII secolo in Inghilterra— era ben noto sia a Keplero che a Galileo. Quest'ultimo ne parla a più riprese nella sua corrispondenza con Francesco Sagredo (1571–1620). In astronomia Gilbert segue una visione eliocentrica, in cui la terra, come gli altri pianeti, è mantenuta nella sua orbita da una forma di magnetismo, come esposto nel suo *De Mundo Nostro Sublunari Philosophia Nova*, pubblicato postumo nel 1652.

Per Gilbert un magnete genera intorno a sé un'atmosfera verso la quale un pezzo di ferro è attratto, ma non è chiaro se sia il ferro che “desidera” muoversi verso il magnete, o se sia questo a inviare un suo “respiro” per impossessarsi dei corpi a sé simili. Non è chiaro cioè se si tratta di una tendenza interna al ferro o di un'azione esercitata dal magnete, ma in ogni caso deve esservi un contatto tra l'atmosfera che circonda il magnete ed il materiale riconosciuto dal magnete stesso come simile. Nel *De Magnete* sono riportati i suoi esperimenti sul taglio di un magnete, e quelli eseguiti utilizzando un magnete sagomato in forma sferica (la sua “terrella”) ed osservando l'inclinazione degli aghi magnetici a seconda della latitudine (fig. 1).

Cartesio (1596–1650), che apprezza il lavoro sperimentale di Gilbert, dà una sua personale visione della polarità di un magnete: particelle elicoidali destre e sinistre scorrerebbero lungo canali distinti che attraversano il magnete da un polo all'altro.

⁽⁴⁾ È interessante ricordare che nel *De Magnete* compare per la prima volta il termine *Electricus* (da cui più tardi *Electricitas*) per un corpo dotato delle proprietà attrattive dell'ambra.

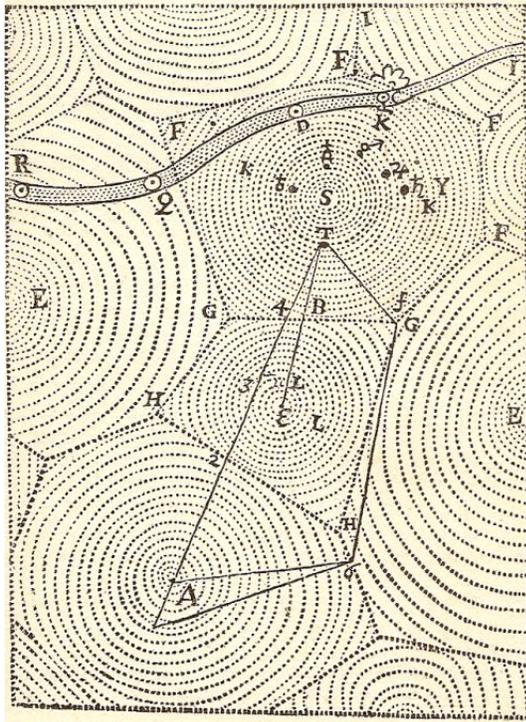


Fig. 2. – I punti S (per il sole), E, A e ϵ sono astri intorno ai quali ruotano altrettanti vortici. Il tracciato FFGGFF racchiude il sistema solare. La linea IKQR è la traiettoria di una cometa, che dovrà poi richiudersi (da [4], pag. 36).

Per Cartesio non esistono azioni a distanza, in quanto lo spazio coincide con la materia. In questo universo completamente pieno, ogni spostamento di elementi materiali deve essere compensato in modo da non lasciare dietro di sé il vuoto. Ne consegue che non è possibile un moto indefinitamente rettilineo; sono possibili solo moti circolari, o combinazioni di tali moti (o anche di moti circolari e tratti rettilinei), risultanti nella formazione di vortici contigui [4], ad esempio intorno ad ogni corpo celeste (fig. 2).

Quasi contemporaneo di Gilbert, Francis Bacon (1561–1626) affronta il problema delle azioni a distanza nel modo sistematico a lui congeniale. Corpuscolarista convinto, tuttavia Bacon ammette che alcuni corpi agiscono “comunicando la propria natura” ad altri corpi. Nel suo testo *Sylva Sylvarum* (pubblicato postumo nel 1627) intraprende una catalogazione dei fenomeni che appaiono implicare azioni a distanza, distinguendole in: azioni sicuramente dovute al moto di corpuscoli, come la diffusione di odori, o la trasmissione di malattie infettive; azioni mediate da una trasmissione che non comporta passaggio di “sostanza corporea”, ma che in qualche modo modifica il mezzo attraversato, dato che è impedita da certi tipi di mezzo. Ne sono esempi il suono, le immagini e il calore radiante (per Bacon il suono, ad esempio, è certamente incorporeo e potrebbe propagarsi come le onde circolari nell’acqua); azioni mediate da emissioni che causano l’attrazione di corpi anche distanti, come quella elettrica (che

è influenzata dal mezzo attraversato, a differenza da quella magnetica, dalla gravità e dal fenomeno delle maree); azioni che si esercitano attraverso qualsiasi mezzo, senza l'intervento di sostanze materiali, e che fanno supporre l'esistenza di "sostanze immateriali", o inducono a pensare a un'attrazione del simile verso il simile. Seguono azioni a distanza verso le quali Bacon esprime il suo scetticismo, quali l'influenza esercitata da certe pietre preziose, la telepatia, e la cura di ferite da taglio eseguita ungendo la lama che le ha provocate.

L'elencazione fatta da Bacon illustra bene il tipo di spiegazioni disponibili per le azioni a distanza nel primo quarto del secolo, ma la situazione non cambia nel prosieguo, almeno fino al momento topico in cui Newton, nell'enunciare la legge di gravitazione universale nei *Principia* [5], dichiara nettamente: "*hypotheses non fingo*".

Vale la pena di leggerne il contesto:

Ho esposto fin qui i fenomeni dei cieli e del nostro mare attraverso la forza della gravità, ma non ho assegnato la causa di questa forza. [...] In verità non ho ancora potuto dedurre dai fenomeni osservati la ragione di queste proprietà della gravità, e non invento ipotesi. Infatti tutto ciò che non si può dedurre dai fenomeni deve essere chiamato ipotesi, e le ipotesi, tanto metafisiche che fisiche, o delle qualità occulte, o meccaniche, non trovano posto nella filosofia sperimentale. In questa filosofia le proposizioni vengono dedotte dai fenomeni, e rese generali mediante l'induzione. [...] Basta che la gravità esista, agisca secondo le leggi che abbiamo esposto, e sia sufficiente a spiegare tutti i movimenti dei corpi celesti e del nostro mare [5].

Siamo qui ad uno snodo fondamentale nella storia del pensiero "fisico", anche se già con Galileo è iniziata quella rivoluzione scientifica volta a una conoscenza della natura attraverso gli aspetti "matematici" dei fenomeni osservati —della caduta dei gravi nella fattispecie galileiana— rinunciando a postulare, "inventandole", spiegazioni metafisiche sulle loro "cause". Con parole taglienti, destinate a suscitare polemiche, il matematico e filosofo francese René Thom (1923–2002) così la descrive [6]:

Alla fine del XVII secolo imperversava la controversia tra i sostenitori di Cartesio e quelli di Newton. Cartesio, con i suoi vortici e i suoi atomi a uncino spiegava tutto e non calcolava niente; Newton, con la sua legge della gravitazione in $1/r^2$, calcolava tutto e non spiegava niente. [...] Per quanto riguarda la gravitazione, non c'è dubbio che abbia prevalso il secondo atteggiamento; perché noi non abbiamo, nel 1968, meno ragioni di Newton di stupirci della caduta di una mela.

È superfluo notare che il termine "spiegare", per Thom, coincide con l'inventare ipotesi, la pratica rifiutata da Newton. Le ipotesi che —secondo Newton— "non trovano posto nella filosofia sperimentale" sono supposizioni non verificabili, invocate come "cause" di fenomeni. (Altro è il formulare ipotesi da saggiare con modelli predittivi, strumento principe della fisica moderna.)

Newton è molto esplicito quando insiste [7] (Def. VIII, pp. 11–12) sul fatto che nella sua trattazione la forza di gravità viene considerata “*non dal punto di vista fisico, bensì matematico*”, e aggiunge: “*il lettore non deve immaginare che io [...] attribuisca, in un senso reale e fisico, le forze a dei centri, che sono solo dei punti matematici*”. Eppure lui stesso ha grande difficoltà a sostenere questa posizione in privato. In una lettera al suo discepolo, Richard Bentley (1662–1742) leggiamo [8]

Che la gravità sia innata, inerente e essenziale alla materia, così che un corpo possa agire su un altro a distanza attraverso il vuoto, senza la mediazione di qualcosa che trasporti la loro azione e forza dall'uno all'altro, è per me una tale assurdità che credo nessuno che sia competente in questioni filosofiche potrà mai accettarlo.

In effetti Newton non rinuncerà a cercare agenti fisici che possano essere responsabili degli effetti della gravità: una “sostanza eterea” di densità crescente con la distanza dai corpi materiali potrebbe comprimerli uno verso l'altro; anche uno “spirito elettrico”, o altri “principi attivi”, così come le vibrazioni dell'etere, sono possibili “cause” che Newton prende in considerazione, per poi scartarle una dopo l'altra.

4. Il lascito newtoniano

Il successo della meccanica Newtoniana ha fortemente condizionato, nel corso del secolo XVIII, gli studi sulle forze di tipo elettrico e magnetico. Si assumeva tacitamente che —come nel caso della gravitazione— si trattasse di azioni a distanza rettilinee, centrali e istantanee tra cariche elettriche o tra poli magnetici.

Il desiderio di ricondursi a una legge in $1/r^2$ appare chiaramente nel *Treatise on Artificial Magnets* ⁽⁵⁾ [9], pubblicato nel 1751 da John Michell (1724–1793), dove si afferma (pur con riserva):

L'attrazione e la repulsione dei magneti diminuisce con l'aumentare del quadrato delle distanze dai rispettivi poli. Questa proprietà appare molto probabile sulla base di alcuni esperimenti da me stesso compiuti, e di quelli che ho visto compiuti da altri, ma non pretendo di affermarla con certezza, non avendo ancora fatto abbastanza esperimenti da determinarla con sufficiente esattezza.

Più interessante, perché ben argomentata, è la posizione di Joseph Priestley (1733–1804) nel caso dell'elettrostatica. Priestley è uno degli animatori della Lunar Society, il gruppo di scienziati, ingegneri, industriali, medici e altro ancora, che si riunisce mensilmente a Birmingham. Il gruppo era frequentato anche da Benjamin Franklin

⁽⁵⁾ Magnet artificiali di notevole forza attrattiva erano ottenuti magnetizzando barrette di acciaio temperato per strofinio con magneti naturali. A Michell si deve anche l'idea e la costruzione, nei primi anni '80 del 1700, del prototipo di bilancia a torsione, poi passato a Cavendish.

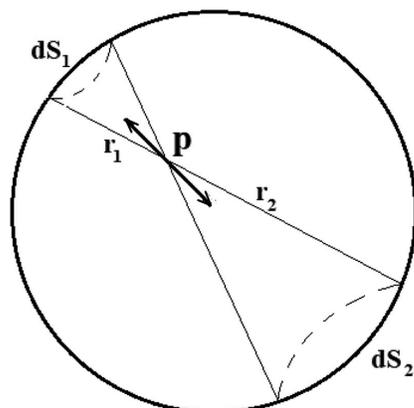


Fig. 3. – Il punto P rimarrà in equilibrio se e solo se la forza di attrazione esercitata dalle porzioni dS_1 e dS_2 del guscio sferico di densità uniforme varia con $1/r^2$.

(1706–1790) nei suoi soggiorni in Inghilterra. Nel suo *The History and present State of Electricity* (1767) [10], Priestley racconta come Franklin gli avesse chiesto di ripetere, per conferma, un esperimento il cui risultato lo aveva sorpreso. Aveva osservato che due palline di sughero, poste all'interno di un contenitore metallico carico, erano del tutto insensibili agli effetti dell'elettricità. Confermando questo risultato Priestley lo spiega come segue, rifacendosi alla dimostrazione data da Newton [7] (Theor. XXX, p. 193) per asserire che un guscio sferico di densità uniforme non esercita alcuna attrazione sui corpi posti al suo interno (fig. 3):

Non possiamo noi dedurre da questo esperimento che l'attrazione elettrica è soggetta alle stesse leggi della gravitazione, e dipende quindi dal quadrato delle distanze, dato che si dimostra facilmente che, se la terra fosse un guscio sferico, un corpo al suo interno non sarebbe attratto da una parte più che dall'altra?

L'esperimento con la sfera cava fu ripetuto da Henry Cavendish (1731–1810) nel 1773, con la conclusione che l'esponente non poteva differire da 2 più di $1/50$, ma le sue ricerche sull'elettricità all'epoca non furono pubblicate. Un secolo più tardi Maxwell, che aveva avuto accesso ai manoscritti di Cavendish, afferma [11] che, nel determinare la dipendenza quadratica dalla distanza, il metodo “di zero”, basato sull'assenza di effetto elettrostatico all'interno di un recipiente chiuso, permette una precisione assai superiore ⁽⁶⁾ a quella ottenuta nel 1785 da Charles-Augustin de Coulomb (1736–1806) con la sua misura diretta [12] della forza esercitata tra cariche poste a diverse distanze. L'intensità della forza elettrostatica, com'è noto, risultava essere direttamente proporzionale al prodotto delle cariche e inversamente proporzionale al

⁽⁶⁾ Insieme al suo studente Donald MacAlister, Maxwell raffinò la misura fino a una sensibilità di $1/21600$.

quadrato della distanza, come espresso nella legge che da Coulomb prende il nome. Anche se non particolarmente precisi, i suoi risultati indicavano un'identità formale tra forza elettrostatica e forza di gravità. Una legge formalmente identica fu proposta da Coulomb anche per la forza esercitata tra due poli magnetici, pur se riteneva che fenomeni elettrici e magnetici fossero dovuti a “fluidi” diversi.

Nel tentativo di generalizzare questo schema, Pierre-Simon de Laplace (1749–1824) e la sua scuola ritenevano che anche tra le molecole materiali si esercitasse, a distanza microscopica, una forza centrale, questa volta repulsiva, di intensità direttamente proporzionale al prodotto delle quantità di fluido calorico ad esse associato, ed inversamente proporzionale a una funzione (imprecisata) della distanza.

5. La nascita dell'elettromagnetismo

Nei primi decenni dell'Ottocento appariva dunque possibile estendere anche ad altri fenomeni interpretazioni basate su azioni a distanza di tipo newtoniano, come era stato definitivamente accertato per la gravitazione e per l'elettrostatica. A sconvolgere questa rassicurante uniformità formale, sopravvenne, nel 1820, la notizia del risultato di un'esperienza semplice e facilmente riproducibile. Si tratta della famosa esperienza —proposta dal fisico danese Hans Christian Oersted (1777–1851)— della deflessione dell'ago magnetico di una bussola quando viene posto nelle vicinanze un filo percorso da corrente. L'opuscolo [13] che la descriveva ebbe un'immediata e larghissima diffusione.

Va ricordato che una reazione alla visione newtoniana di un universo composto da particelle tra le quali si esercitano azioni a distanza attraverso uno spazio inerte, è già presente in Kant (1724–1804), col suo rifiuto dell'elemento “matematico” implicito nella meccanica newtoniana, ed il suo accento sull'elemento “dinamico”. È da qui che nasce e si diffonde, soprattutto in Germania ad opera di Friedrich Schelling (1775–1854), il movimento filosofico detto *Naturphilosophie*. L'elemento dinamico di Kant si traduceva qui nell'idea di una forza primigenia (*Urkraft*) da cui si originano coppie di forze (attrattiva e repulsiva) in conflitto tra loro. Tutto lo spazio è percorso da una rete di “forze” (sono “forze” la luce, il calore, la gravità, l'elettricità e il magnetismo) che si possono convertire l'una nell'altra a seconda delle condizioni locali.

Sull'onda dell'idea del “conflitto di forze”, Oersted ⁽⁷⁾ si era interessato all'interazione tra magnetismo e “galvanismo” (come era detto allora il complesso degli effetti della corrente elettrica, distinti da quelli elettrostatici). Era già noto che un filo metallico percorso da corrente poteva emettere “forze” quali luce e calore. Secondo Oersted, una “forza elettrica” fuoriuscita dal filo, convertendosi in una “forza magnetica”, agiva sull'ago di una bussola posta nelle vicinanze.

(7) Per l'influenza esercitata su Oersted da Kant e dalla *Naturphilosophie* si veda il saggio di T. Shanahan [14].

Com'è noto, se disposto in direzione ortogonale al filo, l'ago non subisce alcun effetto; se disposto parallelamente al filo, esso ruota fino a disporsi in direzione ad esso ortogonale (o quasi, se è sensibile l'effetto del magnetismo terrestre). Il verso della rotazione si inverte invertendo il verso della corrente. Si inverte anche se l'ago, inizialmente posto sotto il filo, viene portata al di sopra di esso. Per Oersted, quest'ultimo risultato forniva una conferma delle sue teorie: la corrente elettrica stabiliva un "conflitto" che non era confinato nel conduttore, ma era disperso all'intorno. Questo agiva circolarmente intorno al filo e dava origine a una forza quando incontrava un materiale magnetico, in quanto le "particelle magnetiche" che lo costituivano "opponivano resistenza" al suo passaggio.

Il risultato dell'esperienza, secondo Oersted, confermava l'idea di una profonda unità di tutte le forze: galvanismo, elettricità statica e magnetismo erano manifestazioni interconvertibili di un'entità distribuita nello spazio. Il risultato spazzava invece i sostenitori del quadro di riferimento newtoniano (e laplaciano), all'epoca imperante. Tentativi di ricondurre il fenomeno osservato ad un'azione rettilinea a distanza impegnarono diversi scienziati del fronte meccanicista, in particolare in Francia.

Già nei primi mesi dalla divulgazione del lavoro di Oersted, André-Marie Ampère (1775–1836) effettuò una serie di esperimenti mirati a questo scopo, e suggeriti dalla sua immediata conclusione che ogni effetto magnetico doveva esser prodotto da correnti elettriche. Dimostrò sperimentalmente che due fili paralleli percorsi da corrente si attirano o si respingono — a seconda se le due correnti siano nello stesso verso o in verso opposto — con una forza che dipende direttamente dal prodotto delle intensità delle due correnti, e inversamente dalla distanza tra i due fili. Il risultato sperimentale era poi giustificato, tramite un elaborato procedimento matematico, a partire dall'ipotesi che la forza che si esercita tra due segmenti elementari (comunque orientati) dei due fili fosse di tipo newtoniano: un'azione a distanza istantanea, diretta lungo la congiungente i due segmenti.

Secondo Ampère [15], un magnete permanente doveva le sue proprietà all'allineamento concorde di minuscoli magneti: minute particelle percorse da correnti avvolte attorno ad ogni particella. Nel caso di un magnete cilindrico l'effetto totale dell'allineamento di queste correnti interne sarebbe stato eguale all'effetto di una singola corrente circolante elicoidalmente sulla superficie del cilindro. La previsione fu facilmente verificata facendo passare corrente in un filo avvolto a spirale cilindrica: il primo solenoide. Esso si comportava esattamente come un magnete permanente, e — se sospeso — si allineava col campo magnetico terrestre. Il legame tra elettricità e magnetismo era così dimostrato in modo incontrovertibile.

6. Michael Faraday (1791–1867)

La tradizione empirista inglese fece sì che l'accoglienza dell'esperimento di Oersted in Gran Bretagna fosse ben diversa, a cominciare dal nome dato alla nuova fenomenologia: "elettromagnetismo" (in Francia si parlava di "elettrodinamica"). Già nel

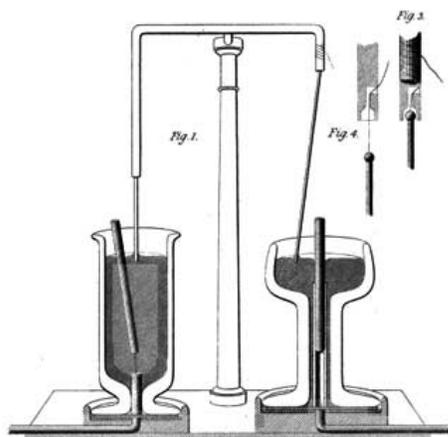


Fig. 4. – Il motore elettrico di Faraday. I due contatti in basso fanno parte di un circuito alimentato da una batteria. I due recipienti contengono mercurio. Quando nel circuito passa corrente, l’asta magnetica incernierata sul fondo del primo recipiente ruota intorno al conduttore elettrico fisso, mentre nel secondo l’astina metallica che fa parte del circuito elettrico ruota intorno al magnete fisso.

1821 il direttore degli *Annals of Philosophy* affidò il compito di stendere una rassegna di tutti gli esperimenti e ipotesi sull’argomento al giovane Michael Faraday [16].

È probabile che la mancanza di una formazione scientifica tradizionale abbia giocato un ruolo nel permettere a Faraday di distaccarsi da schemi mentali e modelli precostituiti. Nato in una famiglia disagiata, a 13 anni Michael era stato mandato a lavorare presso un libraio, prima come fattorino, poi come apprendista rilegatore. Aveva avuto così modo di leggere, in particolare testi scientifici, appassionandosi alla chimica e all’elettricità. All’età di vent’anni prese l’iniziativa di contattare il celebre chimico Sir Humphry Davy (1778–1829), allora professore di chimica presso la Royal Institution ⁽⁸⁾, che lo assunse come assistente. Nel periodo di collaborazione con Davy, Faraday portò avanti molteplici attività (soprattutto in campo chimico, occupandosi in particolare di elettrolisi), dimostrando nella sperimentazione grande immaginazione, unita a grande rigore.

Scettico di fronte ai tentativi di interpretare il risultato dell’esperienza di Oersted sulla base di azioni di tipo newtoniano, Faraday mise a punto un apparato (fig. 4) che metteva in evidenza la circolarità del moto di un magnete mobile attorno ad un filo conduttore fisso, e contemporaneamente dimostrava l’effetto, per così dire, reciproco,

⁽⁸⁾ Fondata nel 1799 su proposta dello scienziato/inventore Benjamin Thompson (alias Count Rumford) come centro di ricerca “per le arti pratiche”, la *Royal Institution* si proponeva di “diffondere la conoscenza e facilitare l’introduzione generale di utili invenzioni meccaniche e miglioramenti, e di insegnare, tramite corsi di letture filosofiche ed esperimenti, l’applicazione della scienza alla vita comune”. Tuttavia, grazie alla brillante oratoria di Davy, quest’attività, piuttosto che tendere all’educazione delle masse, divenne un intrattenimento per persone colte, mentre l’attività di ricerca si rivolse sempre più alla scienza pura.

della rotazione di un filo percorso da corrente intorno a un magnete fisso. (L'apparato originale è tuttora conservato al Museo Faraday presso la Royal Institution).

Non dimentichiamo che siamo in un'epoca in cui si riconosce l'impossibilità del moto perpetuo, anche se si è ancora lontani dal concetto unificante di "energia" ⁽⁹⁾, e non esiste proprio l'idea di energia chimica, che Faraday stesso contribuirà a chiarire. La tempestiva pubblicazione sul *Quarterly Journal of Science* [18] della sua realizzazione (la produzione di movimento, *vis viva*, con l'elettricità "gratuita" di una pila) suscitò grande interesse e dibattito anche all'estero, ma provocò un raffreddamento nei suoi rapporti con Davy. Questi tuttavia non si oppose alla successiva elezione di Faraday, nel 1823, a presidente della *Royal Institution*. Nel 1824 Faraday divenne Membro della *Royal Society*, mentre continuava la sua apprezzata attività didattica, accanto a quella sperimentale, presso la *Royal Institution*.

Impegnato in molteplici attività, ebbe modo di riprendere i suoi studi sull'elettromagnetismo solo dal 1830. La sua amichevole corrispondenza con Ampère, continuata per anni, dimostra come —pur nel sostanziale disaccordo sulla natura dei fenomeni elettromagnetici— i due si stimassero. Cosciente del fatto che la sua impreparazione non gli permetteva di apprezzare le sottigliezze dei passaggi matematici di Ampère, Faraday dichiarava tuttavia —sempre con rispetto— il suo disaccordo circa l'ipotesi di partenza, quella che permetteva ad Ampère di ridurre i fenomeni elettromagnetici ad azioni a distanza: in assenza di una prova diretta della loro esistenza, Faraday non poteva ammettere che vi fossero correnti elettriche circolanti all'interno di un magnete. Per lui l'azione magnetica che si manifestava circolarmente attorno a un filo percorso da corrente non era l'effetto —derivato matematicamente— di azioni rettilinee tra elementi di corrente, ma una realtà nuova, presente nello spazio.

Alla ricerca di conferme eseguì diversi ingegnosi esperimenti, tra cui il seguente: immerse parzialmente in acqua un filo avvolto a spirale intorno a un tubo di vetro, e mise a galleggiare nello stessa bacinella un ago magnetico, sostenuto al centro da un anello di sughero. Quando passava corrente nel filo, l'ago si avvicinava col suo polo nord al polo sud dell'avvolgimento, come previsto, ma inaspettatamente continuava poi a spostarsi all'interno del tubo, fino a fermarsi col polo nord vicino al polo nord del solenoide. La forza magnetica quindi non si diramava indefinitamente a partire dai poli magnetici, ma si piegava in una curva chiusa. Ciò non era in alcun modo riconducibile ad azioni newtoniane.

Peraltro era noto che un pezzo di ferro si magnetizzava rapidamente se posto all'interno di una bobina percorsa da corrente. Ma se l'elettricità poteva generare il magnetismo, secondo Faraday doveva essere possibile anche l'inverso: generare elettricità dal magnetismo. Realizzò diversi dispositivi intesi a questo scopo (ad esempio utilizzando due circuiti indipendenti avvolti, in porzioni distinte, attorno allo stesso anello di ferro: l'uno, il primario, alimentato da una batteria e dotato di interruttore, serviva a magnetizzare l'anello; l'altro, il secondario, era chiuso su un galvanometro).

⁽⁹⁾ Sulla genesi, a partire dagli anni '50 del 1800, del concetto di energia come quantità conservata si veda [17].

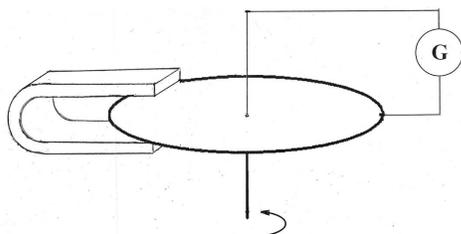


Fig. 5. – La dinamo di Faraday. Quando il disco di rame ruota, “tagliando” le linee di forza del magnete, l’ago del galvanometro G , inserito tra il centro e la periferia del disco, viene deflesso stabilmente.

Riuscì così a evidenziare la comparsa di correnti istantanee in corrispondenza dell’apertura e della chiusura del circuito primario, ma non durante il passaggio stabile di corrente. Anche inserendo o estraendo un magnete dall’interno di una bobina si potevano rivelare impulsi di corrente “indotti” dagli spostamenti del magnete. Per ottenere che in un circuito circolasse una corrente continua generata dall’induzione elettromagnetica —così si sarebbe chiamato il fenomeno da lui scoperto— occorreva dunque mantenere in moto relativo il magnete ed il circuito. Ci riuscì mantenendo in rotazione un disco di rame il cui bordo passava tra i poli di un potente magnete, e disponendo il galvanometro tra il bordo ed il centro del disco (fig. 5).

La realizzazione, già nei primi anni ‘20, del primo motore elettrico, e —a dieci anni di distanza— di questa primitiva dinamo, era sì il frutto dell’abilità sperimentale e della libertà di immaginazione di Faraday, ma lui stesso si rendeva conto che richiedeva una spiegazione dei rapporti tra elettricità e magnetismo. Le sue idee in merito, frutto delle sue osservazioni dirette, senza ricorso a passaggi matematici o a teorie esistenti (il che le rendeva del tutto estranee all’ortodossia scientifica), erano consistenti con la presenza nello spazio di linee di forza “fisicamente reali” [19], evidenziate anche da come si distribuiva la limatura di ferro nella vicinanze di un magnete ⁽¹⁰⁾.

È questo il passaggio fondamentale che consentirà lo sviluppo del concetto di “campo”, termine che comparirà nei suoi lavori qualche anno più tardi. L’evidenza sperimentale mostrava che si generava una corrente in un circuito ogniqualvolta esso veniva a “tagliare” linee di forza magnetiche: così avveniva infatti quando un magnete, circondato dalle sue linee di forza, passava attraverso una bobina, o quando il disco di rame rotante, scorrendo tra i poli del magnete, ne attraversava le linee di forza.

Consapevole dello scandalo che avrebbero destato certe sue idee, nate più da una fervida immaginazione che da un’adeguata base sperimentale, anziché pubblicarle, le espresse in una nota che depositò, nel 1832, presso la segreteria della *Royal Society*:

Alcuni risultati [...] mi hanno portato a credere che l’azione magnetica [...] proceda gradualmente dai corpi magnetici e richieda del tempo per la sua tra-

⁽¹⁰⁾ La dizione “linee di forza” compare per la prima volta nei suoi appunti del 1831. Nel caso di un magnete sono quelle “che potrebbero venir tracciate dalla limatura di ferro, ossia quelle a cui risulterebbe tangente un ago magnetico”.

smissione, tempo che probabilmente risulterà sensibile. [...] Ritengo che anche l'induzione elettrica avvenga similmente in un tempo progressivo. [...]

Tendo a paragonare la diffusione delle forze magnetiche [...] alle vibrazioni sulla superficie di acqua disturbata o a quelle dell'aria nel fenomeno del suono; tendo cioè a pensare che la teoria ondulatoria si applicherà a questi fenomeni, come al suono e molto probabilmente alla luce.

Domandandosi se le correnti elettriche generate per induzione erano della stessa natura di quelle generate da pile voltaiche, ne prese in esame diversi effetti, dal riscaldamento di un filo alla capacità di produrre forze magnetiche e agli effetti elettrochimici, concludendo che non si osservavano differenze. Ritornando con idee nuove agli studi sull'elettrolisi di cui si era occupato ai tempi della sua collaborazione con Davy, oltre ad enunciarne le leggi, ne trasse due importanti osservazioni. Anzitutto i due “poli”, negativo e positivo, risultavano coperti uniformemente —per la parte immersa nella vasca elettrolitica— dalle sostanze scisse durante l'elettrolisi, mentre se tra di essi si fossero esercitate azioni rettilinee ci si doveva attendere che la deposizione avvenisse solo sul lato della loro congiungente. In secondo luogo, osservò che non si poteva pensare che tra i due poli scorresse una corrente elettrica assimilabile a un fluido. Bisognava pensare ad una catena di scambi chimici tra i frammenti carichi (positivamente e negativamente) di ogni particella del composto di partenza, con una serie di dissociazioni e associazioni che rendevano l'azione progressiva, come quella di una fila di persone che si passano un carico dall'una all'altra. Significava anche che l'elettricità era la forza che teneva uniti i diversi elementi in un composto (anche se Faraday, seguendo Davy, non aveva mai simpatizzato con la teoria atomica di Dalton) ed era quindi una proprietà intrinseca della materia piuttosto che un “fluido imponderabile”.

Il ruolo dei cosiddetti “poli” non era dunque, come si credeva, quello di esercitare una forza attrattiva di tipo newtoniano, ma quello di stabilire la continuità nel circuito con la raccolta dei gruppi chimici elettricamente carichi presenti nella soluzione. Nell'esposizione di queste idee trovò necessario utilizzare una terminologia adeguata, che non portasse con sé idee preconcepite. Insieme all'amico William Whewell (1794–1866), erudito, filosofo, e storico della scienza, dotato di una cultura classica certamente mancante a Faraday, elaborò termini a noi oggi familiari come “elettrodi”, “anodo” e “catodo”, in luogo di “poli”, “elettrolita” per la sostanza che veniva dissociata, “ioni” per i frammenti carichi migranti nella soluzione, distinti in “anioni” e “cationi”. L'autorità di Whewell bastò a superare le resistenze opposte da chi non riconosceva in Faraday (un chimico autodidatta!) alcuna competenza teorica.

La dissociazione elettrolitica di un soluto doveva essere preceduta, secondo Faraday, da uno stato temporaneo di polarizzazione in cui le particelle del soluto erano sottoposte a una “tensione”, con le loro porzioni negativa e positiva orientate in direzione opposta. In questo stato si sarebbero disposte a formare catene con cariche positive e negative alternate. La tensione si sarebbe rilasciata poi con la dissociazione. Nella mente di Faraday questo stato di tensione, e la progressività nell'azione aveva analogie con quanto accadeva negli stati iniziali dell'induzione elettromagnetica, e forse anche nel caso dell'induzione elettrostatica. Nel caso di un materiale isolante

interposto tra due corpi —di cui uno carico ad esempio positivamente— anche in esso forse si sarebbero formate catene di particelle polarizzate con la porzione negativa orientata verso il corpo carico. La carica positiva all'altro estremo della catena avrebbe attirato cariche negative sulla superficie dell'altro corpo. Negli esperimenti condotti con diversi isolanti potè dimostrare che l'induzione elettrostatica non è un processo istantaneo, ma richiede un tempo che dipende dal tipo di isolante.

Un materiale conduttore invece doveva essere un materiale incapace di sostenere lo stato di tensione responsabile dell'induzione, un materiale al cui interno le cariche potevano fluire liberamente, fermandosi solo alle estremità delle linee di induzione, cioè sulla superficie. Di qui la spettacolare dimostrazione della gabbia di Faraday, da lui condotta pubblicamente in una delle sue lezioni alla *Royal Institution*.

Nei 1845, a una riunione della *British Association for the Advancement of Science*, l'ormai maturo Faraday incontrò il ventunenne William Thomson. Il futuro Lord Kelvin (1824–1907) era stato un ragazzo prodigio con la passione della matematica, che era per lui il linguaggio indispensabile per la scienza. Già tre anni prima, in un lavoro pubblicato con una sigla al posto del suo nome [20], aveva dimostrato come le linee di forza di Faraday potessero essere rappresentate con le stesse equazioni che Joseph Fourier (1768–1830) aveva sviluppato per il flusso di calore in una sbarra metallica. Come nel caso del flusso di calore, l'induzione elettrica richiedeva tempo. Tale analogia cominciava a rendere plausibile l'idea che le linee di forza avessero una realtà fisica —cosa al tempo da tutti rifiutata se non derisa— e che fossero la manifestazione di una qualche forma di tensione nel mezzo interposto tra oggetti carichi. Forse questo stato di tensione poteva essere rivelato osservando se aveva un effetto sul piano di polarizzazione di un raggio di luce polarizzata, così come avveniva nel caso di una sostanza trasparente sottoposta a *stress* meccanico?

Il suggerimento di Thomson fu colto al volo: piuttosto che sperimentare con forze elettriche, il cui effetto era troppo debole, Faraday pensò di esaminare un vetro sottoposto all'azione di un elettromagnete di grande potenza, riuscendo a dimostrare la rotazione del piano della luce polarizzata, effetto che a noi è noto come effetto Faraday. Dunque anche una sostanza di per sé non magnetica poteva subire l'effetto di un magnete. Sperimentò con le più varie sostanze, e osservò che sbarrette di ferro, cobalto, o nichel, poste in prossimità dei poli di un magnete tendevano ad allinearsi parallelamente alle linee di forza, mentre altre, ricavate da diversi metalli, da cristallo o da legno e altro, si disponevano perpendicolarmente. Sempre con l'aiuto di Whewell scelse il termine “paramagnetiche” per le prime, “diamagnetiche” per le seconde ⁽¹¹⁾. Faraday espone con vivacità queste osservazioni [21]:

Se un uomo potesse essere sospeso con sufficiente delicatezza [...] e posto in un campo magnetico, si disporrebbe in direzione equatoriale, dato che tutte le sostanze che lo compongono possiedono questa proprietà.

⁽¹¹⁾ Il termine “ferromagnetismo”, per indicare il comportamento delle sostanze paramagnetiche che mantengono un momento magnetico dopo essere state esposte a un campo magnetico, fu introdotto più tardi

È questa la prima menzione della parola “campo” in una sua pubblicazione, ma il termine compare nei suoi appunti già qualche tempo prima. Forse Faraday non prevedeva che, già entro un cinquantennio, realizzazioni pratiche come il trasformatore, i motori elettrici, la dinamo, avrebbero modificato profondamente il modo di vivere quotidiano, ma certo non sarebbe stato in grado neppure di immaginare gli sviluppi teorici che sarebbero nati a partire dal concetto di campo di forze.

7. James Clerk Maxwell (1831–1879)

Mentre il lavoro sperimentale di Faraday poteva essere apprezzato, le sue eterodosse proposte di interpretazione apparivano solo vaghe supposizioni, portate avanti da un *parvenu* che non aveva alcuna preparazione matematica. Come abbiamo visto, solo una mente come quella di William Thomson le aveva considerate degne di attenzione, tanto da adottare, già nel 1851, i termini “campo magnetico” e “linee di forza”, definendoli rispettivamente come “*uno spazio in ogni punto del quale vi è una forza magnetica finita*” e “*una linea tracciata attraverso un campo magnetico [...] tangente in ogni suo punto alla direzione della forza magnetica*” [22].

Ma un altro merito va ascritto a Thomson: quello di aver consigliato, nel 1854, ad un giovane che voleva dedicarsi a studi sull’elettricità (si trattava di un neolaureato all’Università di Cambridge, incontrato in casa di amici) di leggere i lavori di Faraday, pubblicati su varie riviste (*Philosophical Transactions*, *Quarterly Journal of Science*, *Philosophical Magazine*) tra il 1832 e il 1855, ed integralmente raccolti nei tre volumi delle *Experimental Researches in Electricity* [23–25].

Maxwell li studiò attentamente e, convincendosi della solidità dell’evidenza sperimentale, tentò di trovare il modo di esprimere le idee di Faraday —in particolare l’idea delle linee di forza— in un linguaggio matematico. Se Thomson aveva utilizzato l’analogia con il flusso di calore, Maxwell —proseguendo il metodo delle analogie introdotto da Thomson— assunse come modello quello delle linee di flusso nel caso di un fluido in movimento. Ciò gli permetteva di utilizzare il formalismo (equazioni differenziali alle derivate parziali) sviluppato a suo tempo da Leonhard Euler (1707–1783) nel trattare l’idrodinamica dei fluidi perfetti [26]. Ne risultò il lavoro intitolato *On Faraday’s Lines of Force* [27], che fu letto alla *Cambridge Philosophical Society* nel dicembre 1855. Presentandosi come un novizio nel campo dell’elettromagnetismo, il ventiseienne Maxwell ne inviò il testo a Faraday nel Febbraio 1857. Fu questo l’inizio di un rapporto duraturo e —a dir poco— eccezionalmente creativo.

L’argomento della realtà fisica delle linee di forza fu ripreso da Maxwell nei primi anni ‘60 del 1800 [28] utilizzando un modello diverso (per la verità piuttosto macchinoso) come punto di partenza di un processo di matematizzazione, sempre mettendo in guardia il lettore dal considerarlo come una rappresentazione reale e causale dei fenomeni studiati. Introdotto già nel lavoro precedente, qui è esplicitato e ampiamente usato il concetto di “campo di forze”, sede di uno “stato di tensione”. Per supportare questa tensione Maxwell ipotizza l’esistenza di un mezzo, un etere pervasivo di ridotta —ma reale— densità, e dotato di elasticità. Come tale, il mezzo è capace di ricevere e immagazzinare energia, sia “attuale” (per noi cinetica) che potenziale.

Le perturbazioni del campo elettromagnetico —dovute ad esempio allo spostamento di un magnete— si propagano nel mezzo elastico con “ondulazioni trasversali”, la cui velocità

... si accorda in modo tanto esatto con la velocità della luce calcolata a partire dagli esperimenti di Fizeau, che noi non possiamo fare a meno di concludere che la luce consiste nella ondulazioni trasversali del medesimo mezzo che è causa dei fenomeni elettrici e magnetici. [28] (p. 500).

Di qui parte, dunque, la rivoluzionaria ipotesi della natura elettromagnetica delle onde luminose.

Del 1864 è la sua terza memoria sul campo elettromagnetico, *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* [29], “dinamica perché suppone che nello spazio vi sia materia in moto nella quale vengono prodotti i fenomeni elettromagnetici”, dichiara Maxwell nell’introduzione. Si tratta della prima formulazione completa —dal punto di vista analitico— della teoria del campo elettromagnetico, ricavata a partire dalle leggi della dinamica applicate non ai corpi materiali, ma al campo che li contiene e li circonda. A differenza dai lavori precedenti, qui non viene proposta un’analogia con particolari modelli meccanici. Il sistema viene considerato come una scatola nera che agisce sulle proprietà del campo. Questo, pervaso dal mezzo etereo (che permea anche i corpi), viene trattato con la formulazione Lagrangiana delle leggi della dinamica per dedurre il comportamento in presenza di forze elettriche e magnetiche. Da queste il mezzo può essere messo in moto, moto che può trasmettersi da un punto a un altro con velocità, come abbiamo visto, elevatissima, ma non infinita. L’energia meccanica associata a questi moti è localizzata in tutto lo spazio, sotto forma di energia potenziale accumulata, o di energia cinetica.

Il campo dunque non è un’entità matematica astratta, ma il luogo dove si esercitano forze meccaniche di attrazione e di repulsione. Queste possono produrre una “distorsione” nel mezzo (una variazione nella forza elettrica provoca una distorsione che genera una forza magnetica, e viceversa, ed è questa continua trasformazione dell’una nell’altra che dà luogo alle onde elettromagnetiche). Non ci stupiranno, a questo punto, le parole di Einstein, quando afferma di “sentirsi sulle spalle di Maxwell”, piuttosto che su quelle di Newton.

Se la trattazione maxwelliana, (esposta in modo completo nel suo *Treatise on Electricity and Magnetism* [11]), appariva poco digeribile al tempo in cui fu proposta, le cose non cambiarono molto neanche dopo la prematura scomparsa del suo autore (aveva 48 anni). Si aggiunga che il formalismo usato da Maxwell faceva ricorso ai “quaternioni” di Hamilton e che, delle otto equazioni ottenute da Maxwell, sei erano triplette nelle tre coordinate, per un totale di 20 equazioni. La formulazione nelle quattro equazioni a noi note è dovuta a Oliver Heaviside (1850–1925) [30], matematico autodidatta, seguace di Maxwell, che le espresse in forma vettoriale ⁽¹²⁾ nel 1892.

⁽¹²⁾ L’analisi vettoriale fu introdotta contemporaneamente e indipendentemente da Heaviside e da Josiah Willard Gibbs (1839–1903).

Solo verso la fine del secolo prevalse l'idea che le leggi di Maxwell riassumessero compiutamente i fenomeni dell'elettromagnetismo anche senza implicare l'esistenza di un etere dalle proprietà non rivelabili né tantomeno misurabili. Nel suo libro sulle onde elettromagnetiche previste da Maxwell, Heinrich Hertz (1857–1894) scrive [31]:

Alla domanda su cosa sia la teoria di Maxwell, io non conosco risposta più concisa o più chiara di questa: la teoria di Maxwell è il sistema di equazioni di Maxwell.

Bibliografia

- [1] HESSE M. B., *Forces and Fields* (Dover, New York) 1962.
- [2] ARISTOTELE, *Fisica*, IV, capp. 7-8, citato in: *Storia delle Scienze*, a cura di ABBAGNANO N., Vol. 2 (UTET, Torino) 1962.
- [3] STEPHENSON B., *Kepler's Physical Astronomy* (Princeton University Press, Princeton N.J.) 1994.
- [4] DESCARTES R., *The World and other Writings*, trad. Gaukroger (Cambridge University Press, Cambridge) 1998.
- [5] NEWTON I., *Philosophiae naturalis principia mathematica*, Vol. III, Parte I (Barrillot & Filii, Geneva) 1742, p. 676, <https://books.google.it/books?hl=it&id=0IJYAAAAcAAJ&q>.
- [6] THOM R., *Stabilità strutturale e morfogenesi. Saggio di una teoria generale dei modelli* (Einaudi, Torino) 1980.
- [7] NEWTON I., *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Vol. I (Typis Josephi Streater, Londini) 1687, <https://archive.org/details/philosophinatur03newtgoog/page/n11>.
- [8] Newton a Bentley, 25 Febbraio 1692, in COHEN I. B. (Editor), *Isaac Newton's Papers and Letters in Natural Philosophy* (Harvard University Press, Cambridge, MA) 1958, pp. 302–303.
- [9] MICHELL J., *A Treatise of Artificial Magnets* (J. Bentham, Cambridge) 1751.
- [10] PRIESTLEY J., *The History and Present State of Electricity With Original Experiments* (Dodsley et al., Londra) 1767.
- [11] MAXWELL J. C., *Treatise on Electricity and Magnetism* (Clarendon Press, Oxford) 1873.
- [12] COULOMB CH.-A., “Second mémoire sur l'électricité et le magnétisme”, *Histoire de l'Académie Royale des Sciences* (1785) pp. 578–611.
- [13] OERSTED H. CH., *Experimta circa effectum conflictus elettrici in acum magneticum*, Copenhagen, Luglio 1820. Tradotto in “Experiments on the Effect of a Current of Electricity on the Magnetic Needle”, *Ann. Philos.*, **16** (1820) 273.
- [14] SHANAHAN T., “Kant, *Naturphilosophie*, and Oersted's discovery of electromagnetism”, *Stud. Hist. Philos. Sci.*, **20** (1989) 287.
- [15] AMPÈRE A.-M., “Théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience”, *Mémoires de l'Institut de France*, **6** (1823) 175. *Idem* (Blancherd, Paris) 1958.
- [16] FARADAY M., “Historical Sketch of Electro-Magnetism”, *Ann. Philos.*, **2** (1821) 195, 274; **3** (1822) 107.
- [17] FRONTALI C., “Le parole della Fisica: Energia”, *G. Fis.*, **59** (2018) 77.
- [18] FARADAY M., “On some new electro-magnetical Motions and on the Theory of Magnetism”, *Q. J. Sci., Lit. Arts*, **12** (1821) 74.
- [19] FARADAY M., “On the physical character of the lines of magnetic force”, *Philos. Mag.*, **3** (1852) 401.
- [20] P.Q.R., “On the uniform motion of heat in homogeneous solid bodies and its connection with the mathematical theory of electricity”, *Cambr. Mathe. J.*, **3** (1842) 71.
- [21] FARADAY M., “On new magnetic actions and on the magnetic condition of all matter”, *Philos. Trans.*, **136** (1846) 41.
- [22] THOMSON W., “On the Theory of Magnetic Induction in crystalline and non-crystalline Substances”, *Philos. Mag.*, **1** (1851) 177.

- [23] FARADAY M., *Experimental Researches in Electricity*, Vol. **I** (R. & J.E. Taylor, London) 1839, serie 1–14, 1832–39.
- [24] FARADAY M., *Experimental Researches in Electricity*, Vol. **II** (R. & J. E. Taylor, London) 1844, serie 15–18, 1840–44.
- [25] FARADAY M., *Experimental Researches in Electricity*, Vol. **III** (R. Taylor & W. Francis, London) 1855, serie 19–29, 1845–55.
- [26] EULER L., “Principia motus fluidorum”, *Novi commentarii academiae scientiarum Petropolitanae*, **6** (1756/7) 1761, 24; 271; in: *Opera omnia*, Series II, Vol. **12**, pp. 133–168, disponibile online presso EulerArchive.org`Euler`.
- [27] MAXWELL J. C., “On Faraday’s Lines of Force”, *Trans. Cambridge Philos. Soc.*, **X**, Part 1 (1864) 27.
- [28] MAXWELL J. C., “On Physical Lines of Force”, *Philos. Mag.*, **21** (1861) 161; 281; 338; **23** (1862) 12; 85; in: *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, edited by NIVEN W. D. (Cambridge University Press, Cambridge) 1890.
- [29] MAXWELL J. C., “A Dynamical Theory of Electromagnetic Field”, *Philos. Trans.*, **155** (1865) 459; in: *A Dynamical Theory of Electromagnetic Field*, edited by TORRANCE TH. F. (Wipf & Stock Publ., Eugene, Oregon) 1996.
- [30] HEAVISIDE O., “On the forces, stresses, and fluxes of energy in the electromagnetic field”, *Philos. Trans. R. Soc. London A*, **183** (1892) 423.
- [31] HERTZ H., *Electromagnetic Waves*, trad. D. E. Jones (MacMillan & Co., London) 1893 (Dover Publ. Inc., New York) 1962.