

Un itinerario storicistico- didattico per l'introduzione del concetto di campo in fisica

Luca Nicotra*

* Ingegnere e giornalista pubblicitista. Membro onorario APAV e AFSU, Presidente dell'A.P.S. "Arte e Scienza", Direttore responsabile di «Arte-Scienza», «Bollettino dell'Accademia di Filosofia delle Scienze Umane», «Periodico di Matematica». Direttore editoriale di UniversItalia;

luca.nicotra1949@gmail.com.



DOI : 10.53159 /PdM(IV).v5n4.127

Sunto: *In questo articolo si delinea un percorso storicistico-didattico che, partendo da una facile analogia con il gioco degli scacchi, approda al concetto di campo nella fisica classica, oggetto di studio nelle scuole secondarie superiori. In questa trattazione si è deciso di non utilizzare la matematica: né le definizioni delle grandezze fisiche coinvolte né le relative formule, rimanendo unicamente nei confini di una esposizione concettuale, secondo lo stile di Michael Faraday.*

Parole Chiave: *scacchi, campo, induzione elettromagnetica, Michel Faraday, azione a distanza.*

Abstract: *This article outlines an educational path which, starting from an easy analogy with the game of chess, arrives at the concept of field in classical physics, an object of study in upper secondary schools. In this discussion it was decided not to use mathematics: neither the definitions of the physical quantities*

involved nor the related formulas, remaining solely within the confines of a conceptual exposition, according to Michael Faraday's style.

Keywords: *chess, field, electromagnetic induction, Michel Faraday, remote action.*

Come insegnante Fermi era noto per la sua grande abilità nel far sembrare meravigliosamente semplici, in modo chiaro e diretto, con poca matematica e molto contenuto fisico, gli argomenti più difficili.

Jay Orear

Professore di fisica alla Cornell University

1 - Il concetto di campo in fisica: dal gioco degli scacchi alla realtà fisica

Il concetto di campo ha fatto la sua apparizione in fisica, ma poi si è esteso anche alla matematica. Albert Einstein lo considerava il «maggior successo dell'uomo nella scienza». In questo articolo si delinea un percorso storicistico-didattico che, partendo da una facile analogia con il gioco degli scacchi, approda al concetto di campo nella fisica classica, oggetto di studio nelle scuole secondarie superiori.

In questa trattazione si è deciso di non utilizzare la matematica: né le definizioni delle grandezze fisiche coinvolte né le relative formule, rimanendo unicamente nei confini di una esposizione concettuale, secondo lo stile di Michael Faraday.

2 - Le "mosse" dei pezzi degli scacchi

Si dice spesso che il modo migliore per apprendere qualcosa di nuovo, specialmente in campo scientifico, è un approccio ludico. Il concetto di campo nella fisica classica non è di immediata comprensione e la sua accettazione presenta difficoltà soprattutto di ordine psicologico. Il gioco degli scacchi offre una inaspettata opportunità di rendere più familiare la sua comprensione, tramite l'analogia con il campo d'azione delle mosse dei suoi pezzi nella scacchiera.

Consideriamo le possibili posizioni raggiungibili dai pezzi degli scacchi. Escluso il caso del pedone, per tutti gli altri pezzi le posizioni raggiungibili sulla scacchiera sono anche quelle in cui è possibile "mangiare" il pezzo dell'avversario. Il pedone, invece, si può muovere di una casella in avanti (oppure di due caselle partendo dalla fila iniziale) ma può "mangiare" soltanto diagonalmente in avanti spostandosi di una casella. Osservando le figure 1-6, si può affermare che ogni pezzo degli scacchi crea sulla scacchiera una zona di "influenza" (le caselle con croce verde) disponibile per il suo movimento e per l'eliminazione dei pezzi dell'avversario.

Poiché la scacchiera è lo "spazio" del gioco degli scacchi, viene in mente, per analogia, un concetto fondamentale che riguarda invece lo "spazio fisico" entro cui si svolgono fenomeni che si manifestano con le cosiddette "forze a distanza", come la forza di gravità, le interazioni elettriche e magnetiche: il campo di forze della fisica classica. In tale analogia al campo di forze corrisponde la "zona di influenza" di un pezzo degli scacchi sulla scacchiera.

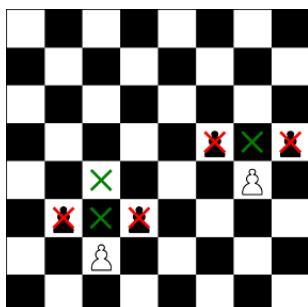


Fig. 1 - Le possibili posizioni raggiungibili dal pedone.

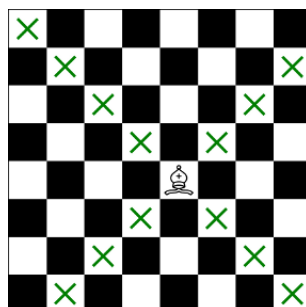


Fig. 2 - Le possibili posizioni raggiungibili dall'alfiere.

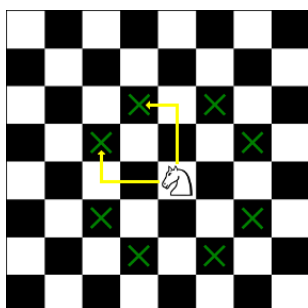


Fig. 3 - Le possibili posizioni raggiungibili dal cavallo.

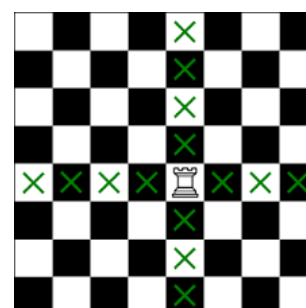


Fig. 4 - Le possibili posizioni raggiungibili dalla torre.

La scacchiera, con le sue regole di movimento degli scacchi, offre dunque un ottimo punto di partenza per un viaggio di esplorazione del concetto di campo in fisica.

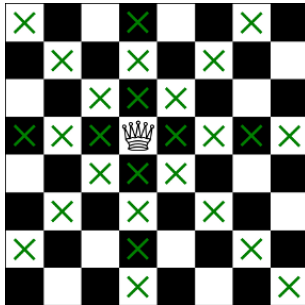


Fig. 5 - Le possibili posizioni raggiungibili dalla regina.

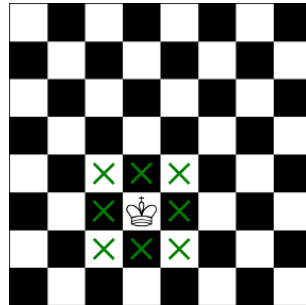


Fig. 6 - Le possibili posizioni raggiungibili dal re.

3 - Un problema controverso della fisica: le azioni a distanza

Nella fisica classica, le forze vengono distinte in due grandi categorie: le forze a contatto e le forze a distanza. Le prime sono dovute al contatto fisico fra due corpi, mentre le seconde sono attribuite all'azione esercitata da un corpo su un altro distante dal primo. Esempi di forze a contatto sono le reazioni vincolari (per es. la reazione al peso di un oggetto esercitata dal piano di un tavolo sul quale l'oggetto poggia), le forze di attrito, le forze risultanti dalla pressione esercitata da un fluido su un corpo in esso immerso, ecc. Forze a distanza sono, invece, la gravità terrestre, la forza di gravitazione universale, le forze elettriche e magnetiche.

Tuttavia l'idea di "azione a distanza" non risulta accettabile intuitivamente e psicologicamente, in quanto è radicata nelle comuni esperienze quotidiane l'idea che l'azione esercitata da un corpo su un altro debba avvenire tramite un contatto fisico.

In altri termini, l'azione a distanza ha qualcosa di "magico" e ripugna allo spirito umano l'idea che un oggetto possa influenzare lo stato di un altro oggetto senza che vi sia un contatto fisico. Spesso si considera Isaac Newton (1642-1726) il "padre" del concetto di azione a distanza, in quanto scopritore della legge di gravitazione universale che postula un tale tipo di azione e "newtonesimo" è stato chiamato questo indirizzo di pensiero. In realtà, invece, nessuno più di Newton stesso è stato un anti-newtoniano, in questo senso. Infatti, Newton, dopo aver formulato nel 1687 la legge della gravitazione universale, espresse i suoi dubbi sulla reale esistenza di azioni a distanza¹ nella celebre terza lettera inviata al filologo Richard Bentley tra dicembre del 1692 e febbraio del 1693:

Che la gravità possa essere innata, inerente ed essenziale alla materia, cosicché un corpo possa agire su un altro a distanza e attraverso un vuoto, senza la mediazione di qualcosa grazie a cui e attraverso cui l'azione e la forza possano essere trasportate dall'uno all'altro, ebbene, tutto ciò è per me una assurdità così grande, che io non credo che un uomo il quale abbia in materia filosofica una capacità di pensare in modo reale, possa mai cadere in essa. La gravità deve essere causata da un agente che agisca sempre secondo certe leggi; e ho lasciato alla considerazione dei miei lettori il problema se quell'agente è materiale o immateriale. (Cohen, 1978)²

Dunque lo stesso Newton pensava che la "forza a distanza" della gravità dovesse, in realtà, essere trasmessa da un corpo a un altro distante dal primo per mezzo di un «agente che agisca sempre secondo certe leggi». La geniale intuizione di

¹ Dubbi condivisi pure da Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646-1716), René Descartes (1596-1650), Christiaan Huygens (1629-1695).

² Brano riportato in italiano da (Bellone, 2006a, pp. 438-439).

Newton avrà un seguito nel concetto di campo di forza, introdotto definitivamente in fisica, con successo, da Michael Faraday (1791-1867), considerato uno dei più grandi fisici sperimentali di tutti i tempi.³

Fu infatti Faraday a dare una prima risposta convincente alle riflessioni scettiche di Newton sulla reale possibilità di azioni a distanza. Studiando l'interazione fra fenomeni magnetici ed elettrici per primo formulò l'idea di "campo di forza" come oggetto fisico reale in grado di riportare l'idea di azione a distanza a quella di azione a contatto. In breve, si trattava di dare una risposta alla domanda: come è possibile pensare che una azione fisica possa trasmettersi da un corpo a un altro distante, se accettiamo l'idea che ogni azione possa svilupparsi unicamente per contatto?

Nel paragrafo successivo ripercorreremo il percorso storico che portò Faraday a concepire l'idea di campo di forza.

Il concetto di "campo", come vedremo oltre, ha un vasto dominio di applicazione nella fisica attuale, ma può essere introdotto più intuitivamente considerando i fenomeni elettrici. Il concetto di campo si estrinseca nel fatto che una carica elettrica (più in generale una distribuzione di cariche elettriche), con la sua presenza, modifica lo stato "fisico" dello spazio circostante, in maniera tale che se un'altra carica elettrica viene posta in un suo punto, essa subisce una forza elettrica (forza

³ Antesignani del concetto di campo sono da considerarsi il matematico, astronomo e fisico olandese Christiaan Huygens (1629-1695) e l'ingegnere e fisico francese Augustin-Jean Fresnel (1788 -1827) padri della teoria ondulatoria della luce. Tale teoria, infatti, contrapponeva all'idea dello spazio vuoto della meccanica newtoniana l'idea di uno spazio avente una consistenza fisica reale, tale da permettere l'esistenza di perturbazioni in grado di spiegare la propagazione della luce.

di Coulomb) "da parte di tale spazio", che assume, così modificato, il nome di "campo elettrico". È importante notare che, secondo questa impostazione, la seconda carica subisce una forza elettrica non direttamente dalla prima carica da essa distante (in tal caso si rimarrebbe nella concezione della azioni a distanza) ma dal campo elettrico da quella creato. In altri termini è il campo elettrico il "mediatore" o "messaggero" dell'azione elettrica che la prima carica esercita sulla seconda. Il campo di forze concepito da Faraday ha dunque un'interpretazione fisica reale, tant'è che esso può trasportare energia da un punto all'altro, come Faraday dimostrò nel 1859.

Il concetto di campo introdotto per le forze elettriche può essere esteso a qualunque altra forza a distanza. Esso consente di suddividere il problema della determinazione delle azioni a distanza in due fasi: nella prima la determinazione del valore del campo in ogni punto dello spazio e nella seconda la determinazione della forza esercitata dal campo su un corpo che si trovi in un punto del campo e che abbia la stessa natura del campo, in modo che possa subirne l'azione. Quest'ultima osservazione significa che, per esempio, l'azione di un campo gravitazionale può essere subita soltanto da un corpo dotato di massa, essendo soltanto una massa in grado di subirla. Analogamente, l'azione di un campo elettrico può essere subita soltanto da un corpo elettricamente carico mentre non lo è da un corpo elettricamente neutro o scarico. È importante porre in evidenza che la carica elettrica utilizzata per rilevare il campo elettrico (carica esplorante) deve essere "molto piccola" in confronto alla carica o alle cariche che generano il campo, affinché non alteri quest'ultimo con la sua presenza. Infatti essa stessa, in realtà, genera un campo elettrico che si compone

con quello creato dalle altre cariche. Nel caso in cui la carica elettrica unitaria non modifichi in maniera non trascurabile il campo elettrico creato dalle cariche generatrici, si può definire intensità del campo elettrico in un punto dello spazio la forza esercitata sulla carica unitaria. Analoghe osservazioni possono essere ripetute per altri tipi di campi.

Le stesse considerazioni fatte per il campo creato da una o

Oggi, la meccanica quantistica ha eliminato radicalmente l'idea delle azioni a distanza dimostrando l'esistenza di particolari tipi di particelle elementari, dette "messaggeri", alle quali è dovuta la trasmissione di quelle che nella fisica classica erano dette interazioni a distanza. In altri termini queste ultime sono "mediate" da questi particolari tipi di particelle elementari, riducendo quindi le "azioni a distanza" della fisica classica ad azioni a contatto:

il **fotone** è la particella portatrice o messaggera della forza elettromagnetica;

il **gluone** è la particella messaggera della forza nucleare forte (quella che tiene assieme protoni e neutroni nel nucleo dell'atomo);

i **bosoni W e Z** sono le particelle messaggere della forza nucleare debole (quella che permette le reazioni chimiche)

il **gravitone** (finora soltanto postulato ma non ancora scoperto sperimentalmente) è la particella messaggera della forza di gravità.

più cariche elettriche possono essere ripetute nel caso di un magnete, che anch'esso modifica lo stato dello spazio circostante creando un "campo magnetico", che si manifesta non appena un altro magnete viene posto in un suo punto, subendo una forza magnetica "da parte del campo magnetico" e non direttamente dal magnete creatore del campo.

4 - La genesi del concetto di campo

L'idea di campo di forza fu utilizzata da Michael Faraday per spiegare il meccanismo dell'induzione elettromagnetica, che è un fenomeno di interazione tra fenomeni elettrici e magnetici.

Faraday considerò l'idea di campo di forza non soltanto uno strumento concettuale utile per spiegare i diversi casi di induzione elettromagnetica ma anche avente una esistenza fisica reale. Il dottor Bence Jones, segretario della Royal Society e autore della corposa biografia di Faraday in due volumi *The life and letters of Michael Faraday* (Jones, 1870, vol. II, p. 5) così scrive, descrivendo le prime esperienze sull'induzione fatte da Faraday nel 1831:

In his paper, when describing the experiment, he speaks of the metal cutting the magnetic curves, and in a note to his paper he says: «By magnetic curves I mean lines of magnetic forces which would be depicted by iron filings».

This is the germ of those ' lines of force ' which rose up in the mind of Faraday into ' physical ' and almost tangible matter.

Dunque alla mente di Faraday le linee di forza si palesarono fin dall'inizio in una forma fisica reale e tangibile (*rose up in the mind of Faraday into ' physical ' and almost tangible matter*) e non come semplice espediente per spiegare l'induzione elettromagnetica, come talvolta si legge. Tuttavia, la realtà fisica delle linee di forza non era condivisa da tutti e certamente è vero che Faraday negli anni Cinquanta del XIX secolo ne ribadì con forza l'esistenza, dimostrando che esse (quindi il campo magnetico) sono in grado di trasportare energia da un punto all'altro dello spazio.

Alla base degli studi che furono sviluppati da Faraday (e poi anche da Simone Lenz e Franz Ernst Neumann) sui legami tra fenomeni elettrici e magnetici occorre richiamare alcune fondamentali scoperte fatte rispettivamente dal fisico danese Hans Christian Oersted (1777-1851) nel 1820.

Oersted fece il seguente esperimento. Costruì un semplice circuito elettrico con un filo metallico rettilineo alimentato da una batteria elettrica e pose una bussola accanto al circuito. A interruttore aperto non fluisce corrente elettrica e l'ago della bussola si orienta puntando verso il Nord geografico sotto l'azione del campo magnetico terrestre. Chiudendo l'interruttore, invece, comincia a scorrere nel circuito una corrente elettrica e l'ago della bussola ruota dalla posizione originaria disponendosi perpendicolarmente al filo elettrico, come se subisse l'azione di un campo magnetico diverso da quello terrestre, che non può essere creato che dalla corrente elettrica. Oersted aveva dimostrato che una corrente elettrica, ovvero un flusso di cariche elettriche, genera un campo magnetico che non è creato invece da cariche elettriche ferme.

Faraday allora, seguendo un principio di simmetria, si pose il problema se potesse essere vero pure il caso inverso: un campo magnetico (stazionario) può creare una corrente elettrica? Questo non accade, salvo aggiungere alcune precisazioni. Infatti, Faraday nel 1831 dimostrò, con alcuni esperimenti, che un campo magnetico "variabile" genera una corrente elettrica: è il fenomeno dell'induzione elettromagnetica.⁴ In realtà sarebbe meglio precisare che tale affermazione è vera se la variabilità del campo magnetico interessa l'area occupata dal circuito indotto. Dalle considerazioni che seguono risulta chiaro che un campo magnetico anche stazionario (cioè costante nel tempo), ma non uniforme (cioè variabile nello spazio), genera una corrente elettrica in un circuito non collegato ad alcuna sorgente di elettricità, nel caso di moto relativo fra la sorgente del campo magnetico e tale circuito.

Il 24 novembre 1831 Faraday presentò alla Royal Society di Londra una memoria scientifica, intitolata *Experimental Researches in Electricity -First Series*, nella quale sono contenute le descrizioni dei suoi esperimenti fondamentali che lo condussero alla scoperta dell'induzione elettromagnetica. Faraday, negli anni 1831-1838, proseguì a compiere molte altre esperienze, di cui redasse particolareggiati resoconti in successive note scientifiche sempre intitolate *Experimental Researches in Electricity* per un totale di quattordici serie, poi da lui stesse raccolte in un volume nel 1839.

⁴ Nello stesso periodo ma indipendentemente, lo stesso fenomeno fu scoperto dal fisico statunitense Joseph Henry (1797-1878). Ma le sue ricerche non furono pubblicate, per cui ufficialmente la scoperta viene riconosciuta soltanto a Faraday.

Le esperienze che dimostrano l'esistenza dell'induzione elettromagnetica sono riconducibili essenzialmente a quattro schemi.

Caso 1

In un primo tipo di esperimenti (fig. 7), si considerino due circuiti elettrici affiancati: nel primo circuito (inducente) sono inseriti una batteria elettrica e un reostato, mentre nel secondo circuito (indotto) è inserito soltanto un galvanometro, in grado di rilevare la presenza di una corrente elettrica.

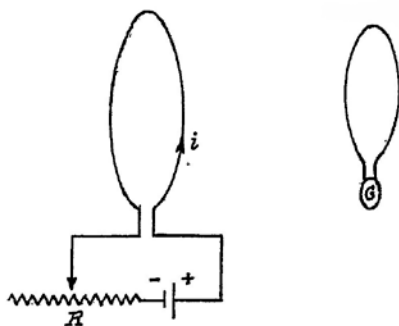


Fig. 7 - Induzione elettromagnetica (caso 1).

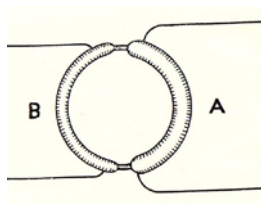
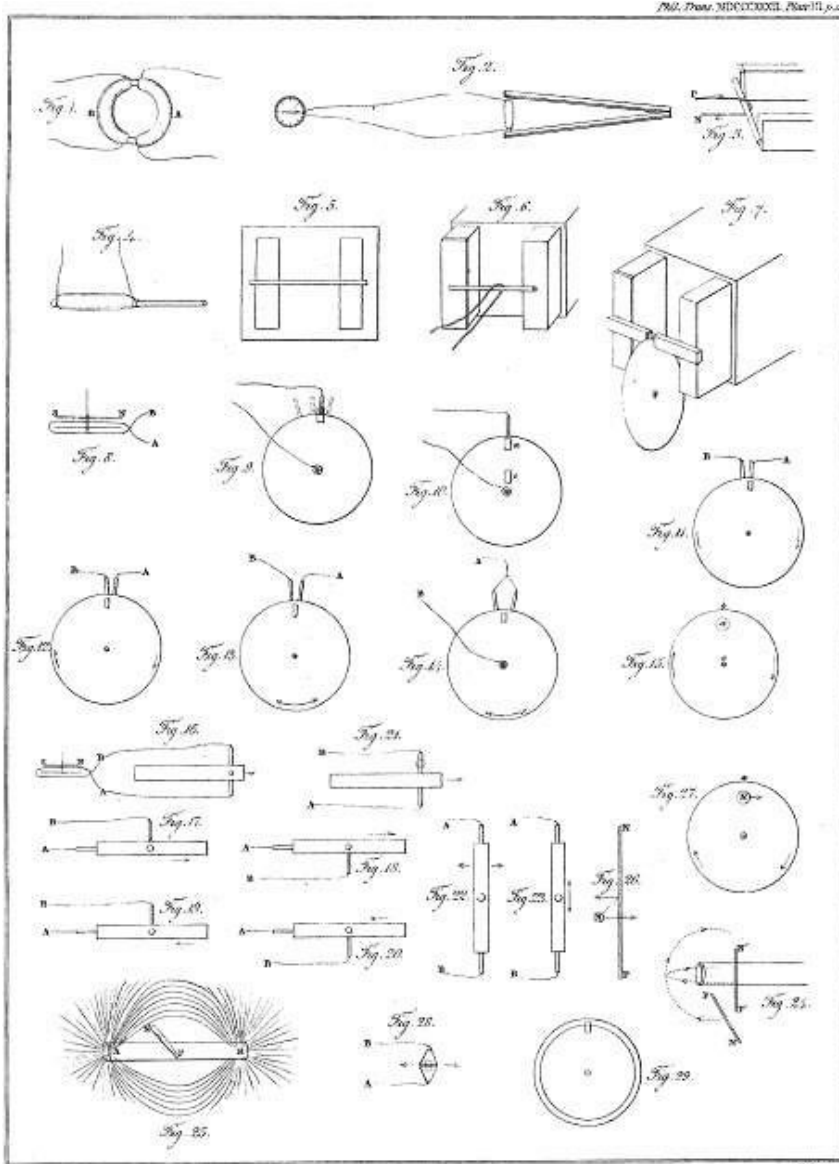


Fig. 8 - Induzione elettromagnetica (caso 1). Disegno di Faraday tratto da *Experimental Researches in Electricity*. Il filo di rame isolato A è collegato a una batteria di dieci elementi; il filo di rame isolato B è collegato a un galvanometro.

Quando l'interruttore del circuito inducente viene chiuso, l'ago magnetico del galvanometro registra una corrente elettrica nel circuito indotto, ma soltanto durante la chiusura dell'interruttore, ovvero durante il tempo (transiente) impiegato dalla corrente per raggiungere da zero il suo valore di regime costante. Una volta raggiunto questo, la corrente scompare. Lo stesso fenomeno accade quando l'interruttore del circuito inducente si apre e la corrente dal valore di regime diminuisce fino a diventare zero. La corrente indotta in questo secondo caso ha il verso opposto a quello del caso precedente. In entrambi i casi transienti il campo magnetico, creato dalla corrente inducente, varia da zero fino al valore raggiunto a corrente stazionaria e da questo fino a zero, rispettivamente quando l'interruttore del circuito inducente viene chiuso e aperto. Una corrente indotta si rileva anche quando la corrente del circuito inducente viene variata con il reostato. Anche in questo caso il campo magnetico creato dal circuito inducente varia nel tempo. Faraday denominò "elettrovoltaica" tale tipo di induzione.

In figura 8 è rappresentato lo schema dell'esperimento originale eseguito da Faraday (tratto dagli *Experimental Researches in Electricity-First Series*) per dimostrare più chiaramente l'effetto di induzione elettrovoltaica, aggiungendo nell'apparato sperimentale di figura 7 l'uso di un nucleo di ferro dolce, con la funzione di aumentare l'intensità del campo magnetico creato dalla corrente. I due circuiti, inducente e indotto, sono due fili di rame isolato avvolti attorno a un anello di ferro dolce. Sia alla chiusura sia all'apertura del circuito inducente l'ago del galvanometro collegato al circuito indotto

oscilla, come nell'esperimento già descritto di figura 7, ma con maggiore violenza.



Disegni di Michael Faraday sugli esperimenti del 1831 sull'induzione elettromagnetica (da *Experimental Researches in Electricity. First Series-1831*).

Caso 2

In un secondo tipo di esperimenti (fig. 9), si considerino un magnete oppure un circuito elettrico (inducente), nel quale scorra una corrente elettrica stazionaria, e lo stesso circuito indotto del primo esperimento.

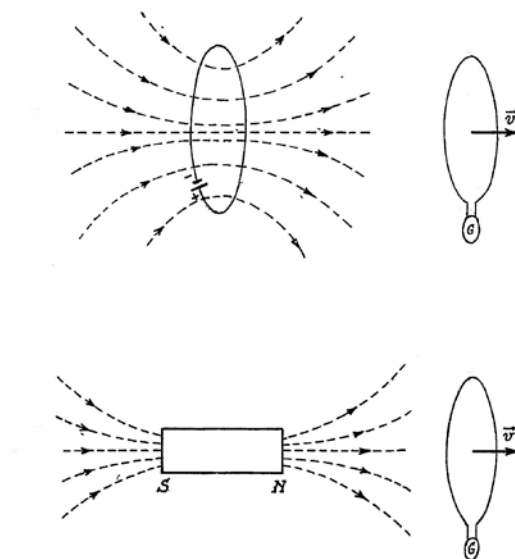


Fig. 9 - Induzione elettromagnetica (caso 2).

Dalle esperienze di Oersted, che dimostrano che una corrente elettrica genera un campo magnetico, discende che una spira elettrica è equivalente a una lamina magnetica con il polo nord rivolto dalla parte dalla quale si vede circolare la corrente in verso antiorario. Pertanto l'uso della spira percorsa da una corrente elettrica stazionaria e l'uso del magnete sono equivalenti come sorgenti di un campo magnetico. È fondamentale osservare che nell'uno e nell'altro caso il campo magnetico stazionario è non uniforme.

Se il magnete (o il circuito inducente) è fermo rispetto al circuito indotto nessuna corrente circola in questo. Se, invece, il magnete (o il circuito inducente) si muove rispetto al circuito indotto, una corrente elettrica fluisce in quest'ultimo fin tanto che dura il moto.

Il verso della corrente indotta cambia a seconda che il magnete (o il circuito inducente) si avvicini o si allontani rispetto al circuito indotto: è tale da contrastare l'avvicinamento o l'allontanamento del magnete (o del circuito inducente), esercitando rispettivamente un'azione repulsiva o attrattiva.⁵

In figura 10 è riportato il disegno originale dell'esperimento di Faraday equivalente a quello di figura 9b in cui il magnete si muove rispetto al circuito indotto.

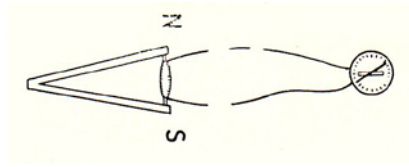


Fig. 10- Induzione elettromagnetica (caso 2).
Disegno di Faraday tratto da *Experimental Researches in Electricity- First Series* (1831).

Attorno a un cilindro di ferro dolce è avvolto il circuito indotto collegato a un galvanometro. Il cilindro è posto fra i due poli di un magnete, costituito da due barre magnetizzate.

⁵ Si tenga presente quanto già detto: una spira elettrica è equivalente a una lamina magnetica con il polo nord rivolto dalla parte dalla quale si vede circolare la corrente in verso antiorario. Di conseguenza il verso della corrente nel circuito indotto sarà tale che la lamina magnetica ad esso equivalente presenterà verso il magnete o il circuito inducente una polarità tale da provocare repulsione, in caso di avvicinamento, o attrazione, in caso di allontanamento.

Scrive Faraday: «Ogni volta che il contatto magnetico nei punti N e S era stabilito o interrotto, avveniva un movimento nel galvanometro, e l'effetto non era permanente, ma semplicemente momentaneo. Vi era, in ogni modo, trasformazione evidente di magnetismo in elettricità».

Caso 3

Il terzo esperimento (fig. 11), è identico al precedente salvo il fatto che questa volta il magnete (o il circuito inducente) è fermo e invece il circuito indotto si muove. Anche in questo caso una corrente elettrica fluisce in quest'ultimo in versi tali da contrastare l'avvicinamento o l'allontanamento rispetto al

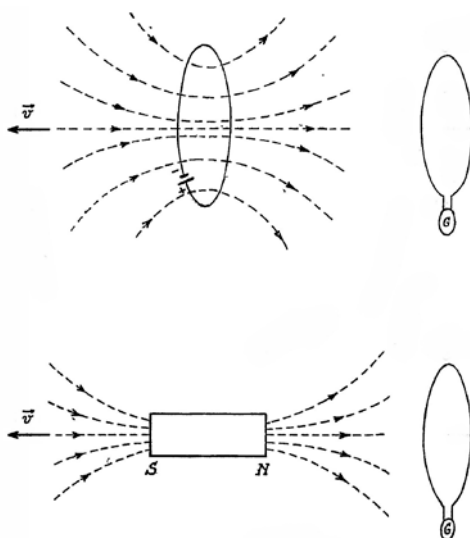


Fig. 11- Induzione elettromagnetica (caso 3).

magnete o al circuito inducente. In entrambi i casi, dunque, la corrente indotta ha un carattere reattivo nei confronti del magnete o del circuito elettrico.

Caso 4

Il quarto esperimento consiste nel disporre il circuito indotto costituito da una spira rettangolare C girevole all'interno dello spazio (molto ridotto) compreso fra i due poli Nord e Sud di un magnete (figura 12). Il campo magnetico nello spazio fra i due poli può essere considerato uniforme.

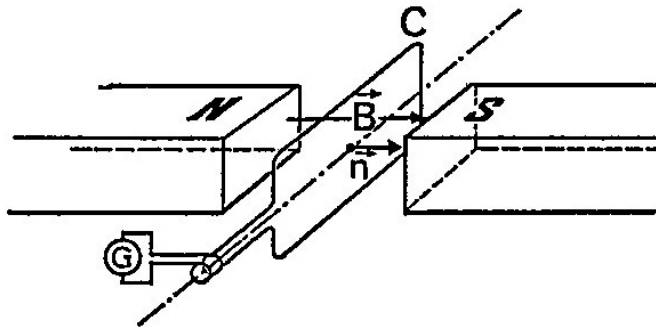


Fig. 12- Induzione elettromagnetica (caso 4).

Durante il moto rotatorio della spira attorno al suo asse longitudinale il galvanometro rileva la presenza di una corrente elettrica indotta fin tanto che dura il moto.

Dalle esperienze fatte, in un primo tempo, Faraday si trovò costretto a considerare due differenti tipi di induzione elettromagnetica: quella prodotta da una corrente elettrica, che chiamò *induzione elettrovoltaica*, e quella prodotta da un magnete, che chiamò *induzione magnetoeltrica*.

Per essere più certo della generazione di una corrente elettrica nel circuito indotto per effetto di un'altra corrente elettrica, Faraday ideò questo esperimento, basato sulla osservazione che se veramente esiste la corrente indotta questa dovrebbe

generare un campo magnetico, in grado quindi di magnetizzare un ago metallico. Si trattava di una più scrupolosa verifica dell'esistenza della corrente indotta, che negli esperimenti precedenti era affidata soltanto alla constatazione della brevissima temporanea deviazione dell'ago magnetico del galvanometro. Faraday sostituì quindi il galvanometro con un piccolo avvolgimento attorno a un tubetto di vetro al cui interno si trovava un ago di acciaio. Una volta chiuso l'interruttore del circuito inducente, estraeva l'ago dal tubetto prima di aprire successivamente l'interruttore. L'ago risultava magnetizzato, provando così, con un sistema più sicuro, la creazione di corrente indotta nell'avvolgimento attorno al tubetto di vetro.

5 - Uno spazio fatto di linee di forza

Faraday era convinto che tutti fenomeni fisici dipendano da un'unica causa che può assumere forme diverse.

«Ma ciò che veramente contava, per Faraday, era la visione generale d'un universo completamente denso d'una materia concettualmente ridisegnata su trame alternative a quelle atomiche, e governato da una sola legge unificante che riconduceva tutti i fenomeni alle forze dell'elettricità» (Bellone, 2006b, p. 104). Tutte le forze della Natura, per Faraday, erano connesse e dovevano avere una origine comune.

Le riflessioni sull'elettrolisi (di cui Faraday enunciò le leggi) e sull'induzione elettromagnetica fecero allontanare definitivamente Faraday dall'idea dell'azione a distanza e abbracciare una nuova concezione dello spazio. Prendendo spunto dall'effetto elettrolitico, causato dalla polarizzazione delle particelle dell'elettrolita per effetto della corrente elettrica, pensò

che anche l'induzione elettromagnetica fosse riconducibile ad «un'azione di particelle contigue consistente di una specie di polarità, e non un'azione a distanze sensibili tra particelle o masse». Lo stesso spazio vuoto della meccanica newtoniana, concepito come puro contenitore della materia dotato soltanto di proprietà geometriche, nel quale si trasmettevano istantaneamente (quindi con velocità infinita) le azioni a distanza in linea retta fra i due corpi interagenti, veniva sostituito da Faraday con uno spazio non soltanto geometrico ma anche "fisico", dove la «materia è presente ovunque e non c'è spazio senza materia».

Faraday criticava l'idea di uno spazio vuoto ponendo in evidenza alcuni paradossi di uno spazio concepito soltanto come un continuo geometrico nel quale è immersa la materia in volumi finiti separati da spazi vuoti intermedi:

Un corpo non conduttore doveva essere formato da particelle non conduttrici, e queste ultime dovevano essere immerse in uno spazio che necessariamente aveva la proprietà d'essere non conduttore: se lo spazio non godeva di tale proprietà, allora il corpo, macroscopicamente esaminato, non poteva essere non conduttore. Un corpo conduttore come il platino era invece formato particelle conduttrici, Ma come doveva essere lo spazio in questo secondo caso? Affinchè il platino fosse effettivamente un conduttore, le sue particelle dovevano essere disposte in uno spazio conduttore: delle particelle conduttrici di platino dislocate in uno spazio non conduttore avrebbero formato infatti un corpo macroscopicamente non conduttore (Bellone, 2006, p.102).

Ci sono alcune affermazioni di Faraday sulla natura dello spazio che sembrano preludere alla gravità einsteniana: «una causa della gravità che non risieda semplicemente nelle parti-

celle materiali, ma che si trovi, congiuntamente, in esse e in tutto lo spazio» (Bellone, 2006, p. 109).

Nel 1844 Faraday non compie esperimenti importanti, ma si dedica invece a riflessioni sulla natura della materia, che invia a Richard Phillipps e poi nel 1846 alla rivista «*Philosophical Magazine*» e che saranno pubblicate nel 1859 con il titolo *Thoughts on Ray-Vibrations negli Experimental Researches in Chemistry and Physics* (Faraday, 1859).

A proposito dei vari modelli di etere dell'epoca, Faraday si chiede se è possibile farne a meno:

The point intended to be set forth for the consideration of the hearers was, whether it was not possible that the vibrations which in a certain theory are assumed to account for radiation and radiant phenomena may not occur in the lines of force which connect particles and consequently masses of matter together; a notion which, as far as it is admitted, will dispense with the ether which, in another view, is supposed to be the medium in which these vibrations take place. (Faraday, 1859, p.367).

Faraday giunge a una conclusione rivoluzionaria. Concepisce l'atomo non tanto come un corpuscolo materiale ma piuttosto come un *centro di forza* da cui si irradia la sua azione lungo le *linee di forza*. Gli atomi non hanno un'esistenza indipendente dalle forze che esercitano, essi esistono soltanto tramite tali forze. Le dimensioni considerate finite dell'atomo per Faraday, invece, si estendono ovunque arrivano le linee di forza, perché essi esistono soltanto tramite le forze che esercitano e dove ci sono queste ci sono pure loro:

You are aware of the speculation which I some time since uttered respecting that view of the nature of matter*

which considers its ultimate atoms as centres of force, and not as so many little bodies surrounded by forces, the bodies being considered in the abstract as independent of the forces and capable of existing without them. In the latter view, these little particles have a definite form and a certain limited size; in the former view such is not the case, for that which represents size may be considered as extending to any distance to which the lines of force of the particle extend: the particle indeed is supposed to exist only by these forces, and where they are it is. The consideration of matter under this view gradually led me to look at the lines of force as being perhaps the seat of the vibrations of radiant phenomena (Ivi).

Successivamente tenne una lezione alla Royal Society nella quale ribadì i concetti espressi nella lettera a Phillipps:

Final brooding impression, that particles are only centres of force ; that the force or forces constitute the matter; that therefore there is no space between the particles distinct from the particles of matter; that they touch each other just as much in gases as in liquids or solids ; and that they are materially penetrable, probably even to their very centres. (Jones, 1870, vol.II, p. 175)

Faraday considerò in tutti i casi delle sue esperienze delle curve in ogni punto delle quali la tangente fornisce la forza magnetica esercitata sul circuito indotto. Introdusse in tal modo l'idea di linea di forza del campo magnetico, inizialmente chiamata curva magnetica, aventi le seguenti proprietà:

a) per ogni punto dello spazio nel quale non sia concentrata una sorgente di forze magnetiche passa una e una sola linea di forza;

- b) la tangente in ogni suo punto fornisce la direzione della forza magnetica in quel punto e con il suo orientamento definisce anche il verso della forza;
- c) la densità delle linee di forza è correlata all'intensità del campo magnetico: il campo magnetico risulta più intenso là dove sono più fitte le curve magnetiche e viceversa.



Studio di Michael Faraday alla Royal Society di Londra.

Faraday introdusse la convenzione seguente nella rappresentazione del campo magnetico tramite le linee di forza o curve magnetiche: il numero di linee di forza che passano attraverso una superficie unitaria è proporzionale all'intensità del campo magnetico in quell'area della superficie. Ovviamente è soltanto una convenzione per la rappresentazione del campo, in quanto le linee di forza sono di numero infinito.

Dunque le linee di forza sono la prova della modificazione dello stato dello spazio prodotta da cariche elettriche in moto (correnti elettriche) o da magneti, ovvero dell'esistenza del campo di forza magnetico. La prova tangibile della loro realtà era fornita da Faraday con la loro visualizzazione tramite la limatura di ferro: ogni minuscolo pezzetto di ferro si comporta come l'ago di una bussola orientandosi nella direzione della

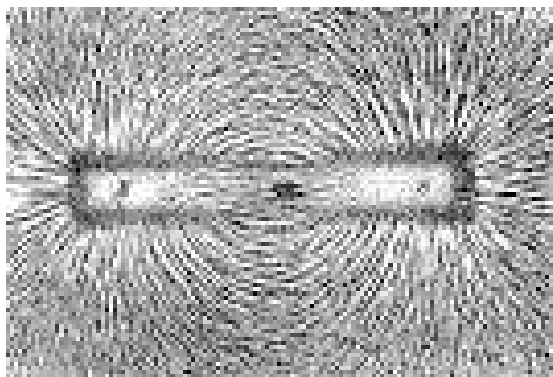


Fig. 13 - Visualizzazione delle linee di forza del campo magnetico creato da un magnete. Sono visibili i poli nord, sud alle estremità del magnete.

forza magnetica (figura 13) ovvero si orienta nella direzione della tangente alla linea di forza del campo magnetico. Pertanto ogni curva di involuzione dei pezzettini di ferro costituisce una curva magnetica o linea di forza.

La scoperta dell'induzione elettromagnetica avvenne con un esperimento il 29 agosto 1831, ma Faraday si prese diversi mesi prima di pubblicarne nell'aprile del 1832 una interpretazione, ovvero la legge che la governa. Nella citata nota del 24 novembre 1831, letta alla Royal Society con il titolo *Experimental Researches in Electricity-First Series* Faraday descrisse gli e-

sperimenti con i quali scoprì l'induzione elettromagnetica, ma senza una loro interpretazione che sarà fornita invece nell'aprile dell'anno dopo.

Nei sette mesi che seguirono all'agosto del 1831 si dedicò a una intensa attività di analisi critica e revisione dei suoi risultati sperimentali, costellata di nuovi esperimenti, nuove ipotesi, pause e rettifiche.⁶ Un esempio significativo di quanto laborioso e tormentato sia il raggiungimento di un nuovo risultato scientifico importante.

Per spiegare i risultati dei suoi esperimenti sull'induzione elettromagnetica, in un primo momento Faraday ricorse a due differenti schemi concettuali: lo *stato elettro-tonico* per l'induzione elettrovoltaica e le *curve magnetiche* per l'induzione magnetoelettrica:

Whilst the wire is subject to either volta-electric or magneto-electric induction, it appears to be in a peculiar state; for it resists the formation of an electrical current in it, whereas, if in its common condition, such a current would be produced; and when left uninfluenced it has the power of originating a current, a power which the wire does not possess under common circumstances. This electrical condition of matter has not hitherto been recognised, but it probably exerts a very important influence in many if not most of the

⁶ Il 23 settembre 1831 Faraday scriveva in una sua lettera a Richard Phillipps: «*I am busy just now again on electro-magnetism, and think I have got hold of a good thing, but can't say. It may be a weed instead of a fish that, after all my labour, I may at last pull up*». (Sono nuovamente occupato intorno all'elettromagnetismo e credo di aver scoperto qualche cosa di importante; ma non posso dirlo. Può darsi che dopo tutto il mio lavoro tiri su un'erbaccia invece di un pesce). (Jones, 1870, p.3). Le opere di Faraday sono state digitalizzate in <https://archive.org/search?query=Michael+Faraday>.

phenomena produced by currents of electricity. For reasons which will immediately appear (71.), I have, after advising with several learned friends, ventured to designate it as the electro-tonic state (Faraday, 1831, 3. New Electrical State or Condition of Matter).

Questa doppia spiegazione dell'induzione elettromagnetica non fu però "pubblicata" perché la nota del 24 novembre 1831 fu "soltanto letta" alla Royal Society. Lo stesso Faraday, nella nota 6 al paragrafo 3. *New Electrical State or Condition of Matter* delle edizioni "pubblicate" degli *Experimental Researches in Electricity-First Series*, avverte il lettore che da studi successivi agli esperimenti dell'agosto 1831 si era convinto che la legge dell'induzione elettromagnetica poteva essere spiegata senza ricorrere allo stato elettrotonico:

This section having been read at the Royal Society and reported upon, and having also, in consequence of a letter from myself to M. Hachette, been noticed at the French Institute, I feel bound to let it stand as part of the paper; but later investigations (intimated 73. 76. 77.) of the laws governing those phenomena, induce me to think that the latter can be fully explained without admitting the electro-tonic state. My views on this point will appear in the second series of these researches. – M.F.

Le curve magnetiche furono subito definite in maniera corretta come linee di forza, mentre mancava una vera definizione dello stato elettrotonico, che rimaneva qualcosa di molto vago e oscuro. Tuttavia è chiaro cosa volesse intendere Faraday con esso: una modificazione delle proprietà "fisiche" dello spazio che permettesse la creazione delle correnti indotte. In sostanza si possono ravvisare nello stato elettrotonico le caratteristiche del concetto di campo di forza: uno spazio non sol-

tanto geometrico ma “fisico” in grado di fare da mediatore fra il circuito inducente e quello indotto.

Il ritardo nella pubblicazione della legge sull'induzione elettromagnetica fu provvidenziale, perché soltanto un mese prima della sua pubblicazione, nel marzo 1832, Faraday ebbe l'intuizione di un unico schema concettuale in grado di spiegare i due tipi di induzione elettromagnetica (elettrovoltaica e magnetoelettrica) utilizzando soltanto le curve magnetiche.⁷ Egli notò che esse, in tutte le esperienze eseguite, erano “tagliate” dal circuito indotto (Jones, 1870, vol.II, p.5), e questo accade se si ammette che le curve attorno ad esso siano libere di muoversi, come effettivamente lo sono al momento della chiusura o dell'apertura del circuito nell'induzione elettrovoltaica e durante il moto relativo fra sistema inducente e sistema indotto. Questa conclusione deriva proprio dalla distribuzione delle curve magnetiche nello spazio: esse cambiano sia nell'induzione elettrovoltaica sia nell'induzione magnetoelettrica, sia nel caso di moto relativo fra sistema inducente e sistema indotto, sia nel caso in cui tale moto sia assente e vi sia invece soltanto variazione della corrente elettrica nel sistema inducente. Faraday aveva saputo vedere con gli occhi della mente come veniva alterato lo stato dello spazio per effetto

⁷ Il primo acceno alle curve magnetiche risale al 4 novembre 1831. Nella descrizione dell'esperimento fatto in quel giorno parla di curve magnetiche tagliate dal filo: «*In his paper, when describing the experiment, he speaks of the metal cutting the magnetic curves, and in a note to his paper he says, 'By magnetic curves I mean lines of magnetic forces which would be depicted by iron filings'*» (Jones, 1870, vol.II, p.5). Poi anche: «*By magnetic curves, I mean the lines of magnetic forces, however modified by the juxtaposition of poles, which would be depicted by iron filings; or those to which a very small magnetic needle would form a tangent*» (Faraday, 1831, nota 13) .

delle azioni magnetiche esercitate dal magnete o dal circuito inducente. La distribuzione spaziale delle curve magnetiche non è altro che una rappresentazione di ciò che chiamiamo *campo magnetico*. Concluse che tutti i casi avevano in comune il fatto che varia il campo magnetico (costituito dalle curve magnetiche) nella regione di spazio occupata dall'anello del circuito indotto. Questa variazione si può "vedere" intuitivamente immaginando le curve magnetiche che si concatenano con il circuito indotto (figura 14). È una conclusione qualitativa fondata sull'osservazione che essendo il campo magnetico

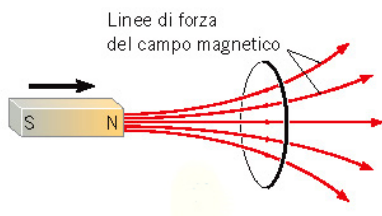


Fig. 14 – Linee di forza del campo magnetico concatenate con il circuito indotto.

più intenso là dove sono più fitte le curve magnetiche e viceversa, nel moto relativo fra sistema inducente e sistema indotto quest'ultimo, per la divergenza delle curve magnetiche generate dal sistema inducente, si trova ad essere "attraversato" da curve magnetiche più fitte o più rade, a seconda che vi sia avvicinamento o allontanamento reciproco (figura 14).

Anche nel caso 4, in cui il circuito indotto è collocato all'interno di un campo magnetico uniforme, rappresentato quindi da linee di forza parallele ed equidistanti, le linee di forza concatenate con il circuito variano in conseguenza della rotazione di questo. Dunque, una variazione del campo

magnetico concatenato con il circuito si verifica pure quando, per ragioni varie, si modifica l'area "efficace" racchiusa dal circuito indotto attraversata dalle linee di forza, che è in generale la proiezione ortogonale alle linee di forza dell'area racchiusa dal circuito indotto. Dunque, in tutti casi in cui si verifica l'induzione elettromagnetica, il campo magnetico nella regione occupata dal circuito indotto varia nel tempo. Più precisamente varia nel tempo il flusso del vettore induzione magnetica \underline{B} concatenato con il circuito.

Faraday concluse dunque che un *campo magnetico variabile genera un campo elettrico (non conservativo)*, al quale è dovuta la corrente elettrica nel circuito indotto.⁸

Saranno il fisico e matematico tedesco Franz Ernst Neumann (1798 -1895) e il fisico russo Simone Lenz (1804-1865) a completare in forma quantitativa la legge dell'induzione elettromagnetica di Faraday, stabilendo che:

la forza elettromotrice indotta f_i è uguale alla derivata rispetto al tempo, cambiata di segno, del flusso del vettore induzione magnetica

\underline{B} concatenato con il circuito indotto: $f_i = - \frac{d\Phi(\underline{B})}{dt}$.

Il segno meno fu introdotto da Lenz per indicare che la corrente indotta è di verso tale da opporsi alla variazione del flusso del vettore induzione magnetica concatenato con il circuito indotto.

⁸ Più in generale si dovrebbe parlare di f.e.m. indotta nel caso in cui il circuito indotto sia aperto.

Nel 1865 il grande fisico teorico scozzese James Clerk Maxwell (1831-1879) riprese e formalizzò matematicamente l'idea di campo di Faraday,⁹ scoprendo teoricamente un fenomeno non ancora sperimentalmente dimostrato, ma che lo sarà più tardi: un campo elettrico variabile genera un campo magnetico così come un campo magnetico variabile genera un campo elettrico, come aveva dimostrato sperimentalmente Faraday con la sua legge dell'induzione elettromagnetica, ristabilendo quindi un principio di simmetria fra i due fenomeni: le due leggi di Faraday e di Maxwell sono l'una duale dell'altra.

Nelle sue celebri quattro equazioni che regolano tutti i fenomeni elettrici e magnetici, Maxwell legò fra loro, in una interazione reciproca, il campo elettrico e il campo magnetico unificati in un unico "campo elettromagnetico":

La teoria da me proposta può pertanto essere definita come una teoria del campo elettromagnetico, in quanto essa prende in considerazione lo spazio nei pressi dei corpi elettrici e magnetici, e può essere definita come una teoria dinamica in quanto assume che in quello spazio esista una materia in moto grazie alla quale si producono i fenomeni elettromagnetici osservati (Maxwell, 1865, p. 461) .

La «materia in moto grazie alla quale si producono i fenomeni elettromagnetici» era, secondo Maxwell, l'etere, uno strano "materiale" che permea tutti i corpi e dotato di proprietà particolari: invisibile, imponderabile, impalpabile, totalmente rigido (in contrasto con l'esperienza fisica che mostra non esservi nessun corpo totalmente rigido).

⁹ È curioso notare la coincidenza della data di nascita di Maxwell con l'anno della scoperta dell'induzione elettromagnetica di Faraday: 1831.

Oggi sappiamo che la teoria della relatività di Albert Einstein e un famoso esperimento eseguito nel 1881 dal fisico statunitense Albert Michelson hanno dimostrato la non esistenza dell'etere. Ma al tempo di Maxwell la tecnologia per la produzione del vuoto non era così perfezionata come lo è oggi e lasciava sempre, in realtà, tracce non trascurabili di materia. Per tale motivo Maxwell parlava di «cosiddetti vacua», per porre in evidenza che non era possibile realizzare totalmente il vuoto. Questa osservazione forniva, ai suoi tempi, un sostegno all'esistenza dell'etere (Bellone, 2006c,p. 308).

Vediamo ora cosa intendeva Maxwell per interazione fra campo elettrico e campo magnetico.

Un campo elettrico variabile genera un campo magnetico che, però, prima non esisteva e quindi anch'esso risulta variabile e quindi, secondo Faraday, deve generare un altro campo elettrico che, essendo anch'esso generato da una situazione in cui non esisteva, è anch'esso variabile e quindi genera un altro campo magnetico anch'esso variabile e così via. Siamo in presenza di una specie di "reazione a catena", o meglio di un fenomeno autosostenentesi: un campo elettrico variabile genera un campo magnetico variabile, che a sua volta genera un campo elettrico variabile, che a sua volta genera un nuovo campo magnetico variabile, che a sua volta genera un nuovo campo elettrico variabile ecc.. Questa combinazione di campi elettrici e magnetici variabili in grado di autosostenersi costituisce una perturbazione del campo elettromagnetico che non si propaga istantaneamente da un punto all'altro, ma con un certo ritardo con le modalità tipiche della propagazione per onde. Le perturbazioni dei due campi elettrico e magnetico si propagano come un'onda da un punto all'altro dello spazio: le

increspature del campo elettromagnetico provocate dalle variazioni dei due campi componenti si propagano "per onde" nello spazio con le stesse modalità con cui la perturbazione di una superficie liquida, a seguito della caduta di un sasso, si propaga in tutto il liquido.

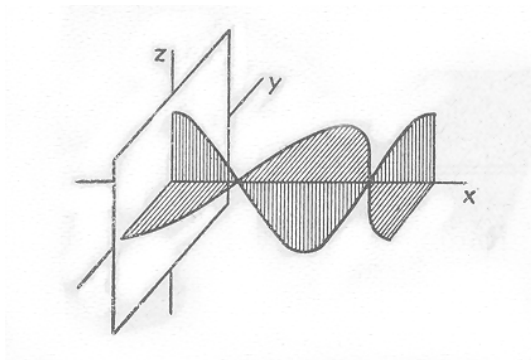


Fig. 15 - Onda elettromagnetica. I due campi elettrico e magnetico oscillano in piani fra loro perpendicolari.

Tutta la moderna tecnologia delle telecomunicazioni (radio, televisione, cellulari, ecc.) è basata su tale fenomeno: le onde elettromagnetiche (fig. 15).

5 - Il più generale concetto di "campo" in fisica

Il concetto di campo, nato in magnetismo e in elettricità, si riferisce a grandezze vettoriali aventi il significato di forze "a distanza", e sostituisce l'incomprensibile concetto di azione a distanza con quello di azione "mediata" da esso.

Una immediata estensione del concetto di campo riguarda pertanto anche la forza di gravità, che condivide con le forze magnetiche ed elettriche il carattere di azione a distanza.

Una ulteriore estensione del concetto di campo riguarda tutte quelle situazioni nelle quali, per fenomeni di natura diversa, si ha una distribuzione spaziale punto per punto di valori di grandezze vettoriali o scalari o tensoriali.

Così si parla di campo delle velocità nella meccanica dei fluidi, intendendosi una regione dello spazio in ogni punto del quale risulta definito un valore di velocità delle particelle fluide.

Nel caso della terminologia si ha un classico esempio di campo scalare: un campo termico è l'insieme dei valori che la temperatura assume in ogni punto dello spazio occupato da un corpo "caldo" e in ogni punto dello spazio ad esso circostante, poiché per la trasmissione del calore anche in tali punti la temperatura viene modificata dalla presenza del corpo in questione.

Lo stesso concetto è stato esteso al caso di grandezze tensoriali, per cui si parla di campo delle tensioni e di campo delle deformazioni all'interno di un corpo deformabile.

Dunque, un "campo" in fisica può essere più semplicemente definito come l'insieme dei valori che una data grandezza fisica (scalare, vettoriale o tensoriale) assume nello spazio, in conseguenza di fenomeni fisici di varia natura. È sottinteso che tale proprietà implica una modificazione dello stato dello spazio tale da consentire l'assunzione di quei valori della grandezza fisica in oggetto soltanto da parte di corpi per i quali ha senso l'attribuzione di quella particolare grandezza fisica. Questa definizione di campo sottintende ciò che Farady

aveva intuito: lo spazio non è soltanto geometrico ma anche fisico, perché manifesta proprietà fisiche non appena lo andiamo ad esplorare con opportuni mezzi.

Alla fine di questo itinerario didattico sul concetto di campo, viene spontaneo chiedersi la ragione di questo termine: campo. La risposta è semplicissima: l'analogia con un campo fiorito, in ogni punto del quale c'è un fiore. Al posto del fiore pensiamo di volta in volta il valore di una grandezza scalare (la temperatura per esempio) o di una grandezza vettoriale (forza, velocità, ecc.) o di una grandezza tensoriale (tensione, deformazione, ecc.). Il mondo della scienza sa essere anche poetico.

Bibliografia

AMALDI Edoardo (1955). *Fisica Sperimentale*. Università di Roma. Litografia Marves S.r.l.

BELLONE Enrico (2006a). "Isaac Newton". In *Storia della scienza* (P. Rossi cur.), vol. 1. *La rivoluzione scientifica: dal Rinascimento a Newton*, pp. 419-447. Roma: Gruppo Editoriale l'Espresso.

BELLONE Enrico (2006b). "Michael Faraday". In *Storia della scienza* (P. Rossi cur.), vol. 4. *La scienza classica: da Faraday a Darwin*, pp. 93-110. Roma: Gruppo Editoriale l'Espresso.

BELLONE Enrico (2006c). "James Clerk Maxwell". In *Storia della scienza* (P. Rossi cur.), vol. 4. *La scienza classica: da Faraday a Darwin*, pp. 301-318. Roma: Gruppo Editoriale l'Espresso.

COHEN I. B. (1978). *Isaac Newton's papers and letters on natural philosophy and related documents*. Cambridge Mass.: Harvard University Press, pp. 271-312.

COSCIONE Ester, MALERBA Antonia, VERRONE Maria Giuseppa (n.d.). *Particelle e campi di forze*. Università degli studi di Napoli "Federico II", Fac. di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali.

CUTNELL J.D., JOHNSON K.W. (2010). *Elementi di fisica*. Bologna: Zanichelli.

FARADAY Michael (1831). *Experimental Researches in Electricity-First Series*. London: Royal Institution. <https://archive.org>.

FARADAY Michael (1859). "Thoughts on Ray-Vibrations". In *Experimental Researches in Chemistry and Physics*. London: Richard Taylor and William Francis, 1859. <https://archive.org/>.

FERMI Enrico (1944). *Fisica ad uso dei licei*. Vol. 2. Bologna: Zanichelli.

JONES Bence (1870). "The life and letters of Michael Faraday", Voll. I, II. Second Edition revised. London: Longmans, Green & Co.

MAXWELL J. C. (1865). "A dynamical theory of the electromagnetic field". In «*Philosophical Transactions*», CLV.

OREAR Jay (1960). *Fisica generale*. Bologna: Zanichelli.

PASTORI Maria (1963). "Campi. Teoria classica". In *Enciclopedia della Scienza e della Tecnica Mondadori*. 2° vol. Milano: Mondadori.

SETTE Daniele (1969). *Lezioni di fisica*. Vol. III. *Elettromagnetismo*. Università degli Studi "La Sapienza" - Roma: Veschi.

STEINLE Friedrich (2003). "Faraday e la genesi del concetto di campo". In *Storia della Scienza*. Treccani. https://www.treccani.it/enciclopedia/1-ottocento-fisica-faraday-e-la-genesi-del-concetto-di-campo_%28Storia-della-Scienza%29/.