

Campi di luce

La grande unificazione di Maxwell

di Angelo Carbone



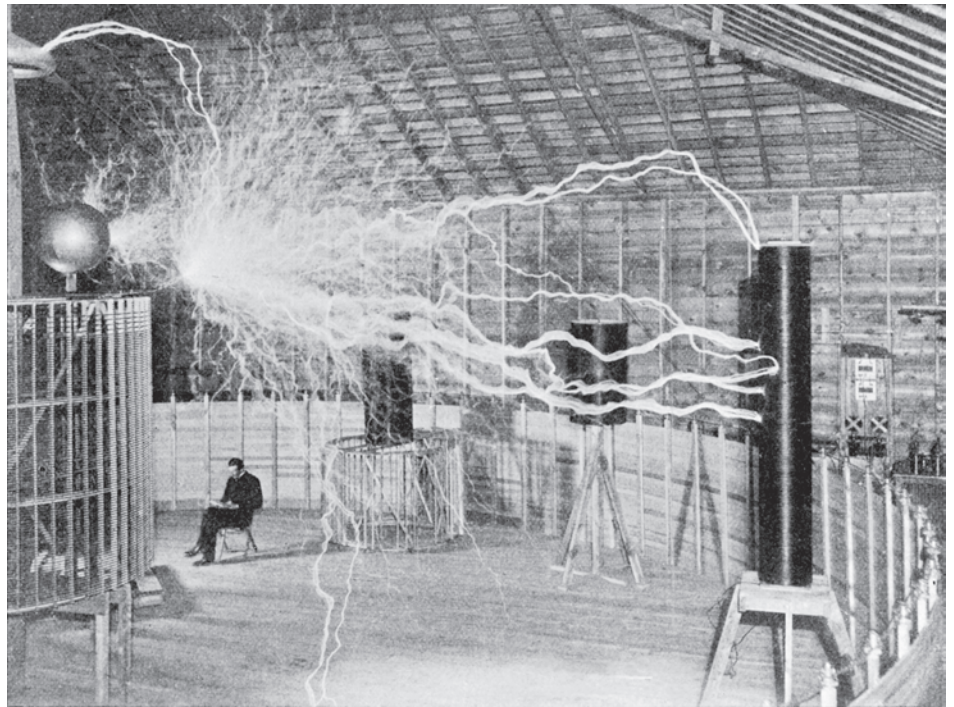
a.
Un arcobaleno alla fine di un temporale o il segnale trasmesso da un'antenna sono solo due delle tante manifestazioni dell'elettromagnetismo.

Grazie alla stretta connessione tra la fisica teorica e la fisica sperimentale nella prima metà dell'800, il grande fisico James Clerk Maxwell (1831-1879) riuscì a riassumere i fenomeni elettrici e magnetici osservati fino a quel momento in quattro equazioni differenziali, note come le equazioni di Maxwell. La teoria dell'elettromagnetismo che ne consegue, oltre a costituire uno dei pilastri della fisica moderna, è il primo esempio di unificazione di fenomeni solo apparentemente diversi, dando luogo a uno dei più importanti risultati scientifici di tutti i tempi: la scoperta delle onde elettromagnetiche. Esse non solo esistono in natura, ma si possono propagare nel vuoto, in mezzi come

l'atmosfera e nelle guide ottiche. Quando l'uomo comprese la possibilità di trasportare energia e quindi "informazione" da un punto all'altro dello spazio, diede origine a una seconda rivoluzione dopo quella industriale, la "rivoluzione tecnologica". Grazie a queste scoperte l'uomo ha potuto inventare oggetti che si basano sulle onde elettromagnetiche e che ormai appartengono alla nostra vita quotidiana, come ad esempio la radio, la televisione, il forno a microonde e i telefoni cellulari. Ma facciamo un salto indietro nel tempo, al periodo precedente ai lavori scientifici di Maxwell. Il primo protagonista a entrare nella nostra storia è Isaac Newton (1642-1727). Per

primo Newton riuscì a spiegare il moto dei pianeti, formulando la legge gravitazionale universale: due corpi si attraggono con una forza, quella gravitazionale, la cui intensità è proporzionale alla quantità di materia contenuta nelle loro masse e inversamente proporzionale alla loro distanza (vd. p. 5, ndr). Ed è proprio sulla base degli studi di Newton che Charles Coulomb (1736-1806), grazie a un dispositivo da lui inventato, scoprì che due corpi carichi esercitano l'uno sull'altro una forza la cui intensità è proporzionale alla carica e inversamente proporzionale al quadrato della distanza, analogamente a quanto succede nel caso della forza gravitazionale. Nel caso

b.
Nikola Tesla, ingegnere elettrico, inventore e fisico serbo naturalizzato statunitense, è conosciuto per i numerosi contributi nel campo dell'elettromagnetismo tra la fine dell'800 e gli inizi del '900. L'unità di misura dell'intensità del campo magnetico porta il suo nome. In questa foto realizzata a scopi pubblicitari, Tesla è ripreso mentre produce "luce" artificiale nel suo laboratorio di Colorado Springs.



gravitazionale, la "carica" (la massa) è solo positiva, mentre nel caso della forza elettrica la "carica" (la carica elettrica) è sia positiva sia negativa. In questo modo, a differenza della forza gravitazionale, che è unicamente attrattiva, la forza elettrica è sia attrattiva sia repulsiva.

L'episodio successivo, che cambiò definitivamente la storia dell'elettromagnetismo, ebbe luogo in un'aula universitaria a Copenaghen, in Danimarca. Il professor Hans Christian Oersted (1777-1851), mentre mostrava ai suoi studenti che la corrente prodotta dalla pila di Volta era in grado di scaldare un filo attraversato da corrente elettrica, si accorse che il flusso stesso delle cariche elettriche (la corrente) causava il movimento degli aghi delle bussole poste in prossimità delle cariche. Egli concluse che la corrente elettrica genera anche un campo magnetico. Fu così che si scoprì che la carica elettrica e il magnetismo, noti a quei tempi come fenomeni indipendenti, in realtà erano strettamente legati fra loro. Successivamente, André-Marie Ampère (1775-1836) completò le ricerche sul magnetismo e lo studiò come

Coulomb fece con l'elettricità, formulando l'equazione matematica che descrive gli effetti magnetici prodotti dalle correnti elettriche.

Mancava solo un'ultima intuizione per completare il quadro sperimentale dell'elettromagnetismo, quella che poi portò alla seconda rivoluzione industriale. Ad averla fu Michael Faraday (1791-1867) che sulla base degli studi di Oersted concluse, verificandolo sperimentalmente, che se l'elettricità può produrre il magnetismo, anche il magnetismo può produrre elettricità. Questa incredibile scoperta, l'induzione elettromagnetica, mise le basi per lo sviluppo di tutte quelle applicazioni che permettono di trasformare energia meccanica in energia elettrica, come avviene per esempio nella dinamo di una bicicletta.

Ma come è possibile che due corpi distanti tra loro, come due cariche elettriche, interagiscano senza toccarsi? A questa domanda oggi i fisici rispondono riferendosi all'esistenza di un *campo gravitazionale*, un *campo elettrico* e dei mediatori delle forze. Fu proprio Faraday che per primo introdusse

il concetto di campo: il Sole influenza il movimento della Terra producendo un campo gravitazionale in ogni punto dello spazio ed è il campo stesso responsabile del movimento della Terra e non il Sole. Analogamente un oggetto carico produce un campo elettrico in ogni punto dello spazio, mediante particelle chiamate mediatori, che propagando le informazioni del campo elettrico nello spazio, interagiscono con le altre cariche elettriche. Nel caso dell'elettromagnetismo i mediatori sono i fotoni.

Sono stati quindi Newton, Coulomb, Oersted, Ampère e Faraday, insieme a tanti altri importanti fisici, a gettare le fondamenta della teoria della forza elettromagnetica, ma Maxwell, uno dei più importanti scienziati mai vissuti, ne fu il vero padre. Utilizzando il potente strumento della matematica, mise insieme tutti i risultati sperimentali ottenuti sotto forma di quattro equazioni differenziali, esprimendo in questo modo tutte le leggi empiriche elaborate nei decenni precedenti e unificando in un'unica teoria l'elettricità e il magnetismo (vd. approfondimento).

Le equazioni di Maxwell in quattro parole



A scrivere per primo le equazioni di Maxwell nella forma in cui le conosciamo oggi fu l'ingegnere e fisico britannico Oliver Heaviside, tra l'800 e il '900 (Maxwell le aveva espresse in modo diverso). I campi elettrico e magnetico sono indicati rispettivamente con \vec{E} e con \vec{B} , e sono vettori a tre componenti (nelle tre direzioni perpendicolari dello spazio). Le altre quantità presenti sono la densità di carica ρ (la carica per unità di volume) e la densità di corrente \vec{j} (la corrente che passa nell'unità di tempo attraverso una superficie unitaria). I coefficienti ϵ e μ compaiono a causa del sistema di unità di misura che è stato scelto (il cosiddetto *Sistema Internazionale*) e, combinati assieme, danno la velocità della luce nel vuoto. Quanto agli strani simboli che compaiono nelle formule, i triangoli capovolti contengono le derivate spaziali, cioè le variazioni istantanee dei campi rispetto alle coordinate x , y , z , mentre il simbolo $\partial/\partial t$ rappresenta la derivata temporale, cioè la variazione istantanea nel tempo.

La prima equazione di Maxwell lega il campo elettrico alle sue sorgenti, le cariche. È l'equazione fondamentale dell'elettrostatica e permette, in linea di principio, di calcolare il campo elettrico a partire da una qualunque distribuzione fissa di carica.

La seconda equazione di Maxwell è simile alla prima, ma con una differenza cruciale: al secondo membro non ci sono le cariche magnetiche. Questa equazione descrive un fatto sperimentale importante, e cioè che in natura non

esistono sorgenti di campo magnetico costituite solo da un polo "nord" o da un polo "sud". I poli magnetici si manifestano sempre insieme. Per esempio, se tagliamo a metà una calamita fatta di polo "nord" e "sud", essa si dividerà in due calamite, ciascuna delle quali avrà sempre un polo nord e un polo sud.

La terza equazione di Maxwell stabilisce che la variazione nel tempo di un campo magnetico induce un campo elettrico e, quindi, in presenza di cariche, una corrente elettrica. È l'equazione che descrive il fenomeno dell'*induzione elettromagnetica* scoperto da Faraday e ha importanti conseguenze applicative: nelle centrali elettriche, per esempio, si trasformano movimenti meccanici (che producono variazioni del flusso del campo magnetico nei circuiti) in elettricità, basandosi proprio su questa legge.

La quarta equazione di Maxwell completa il quadro teorico dell'elettromagnetismo: mostra che un campo magnetico può essere generato da una corrente, ma anche da una variazione del campo elettrico. Il termine contenente la derivata temporale del campo elettrico fu introdotto da Maxwell per poter descrivere i fenomeni variabili nel tempo e garantire la legge di conservazione della carica elettrica che altrimenti sarebbe stata violata. Si noti che questo termine rende anche più simmetrica la presenza del campo elettrico e del campo magnetico nelle quattro equazioni.

Maxwell fornì un inquadramento teorico completo di una grande mole di dati sperimentali. Una valida teoria non solo si adatta bene ai dati sperimentali osservati, ma ha anche il potenziale di poter realizzare grandi scoperte. La teoria dell'elettromagnetismo permise a Maxwell non solo di descrivere in maniera elegante l'elettricità, il magnetismo e la loro relazione, ma anche di predire

l'esistenza delle onde elettromagnetiche. Di queste onde Maxwell riuscì a dedurre per via teorica la velocità e scoprì che era identica alla velocità della luce, da poco misurata con grande precisione. Egli dedusse quindi che la luce è un fenomeno elettromagnetico. Si scoprì poi in seguito che la luce è formata da fotoni, che sono, appunto, i mediatori della forza elettromagnetica.

L'idea di una sostanziale unità delle forze della natura, viva nella discussione filosofica di quel periodo storico, trova quindi una realizzazione nei lavori di Maxwell. Questo percorso da lui intrapreso non si arrestò.

Gli studi successivi più recenti permisero di scoprire due altre forze in aggiunta a quella gravitazionale e a quella elettromagnetica: la forza *debole* e la forza *forte*.

E così, la storia si ripeté e, circa cent'anni dopo il lavoro di Maxwell, i fisici teorici, in particolare Steven Weinberg (1933-), Abdus Salam (1926-1996) e Sheldon Lee Glashow (1932-), elaborarono teorie che permisero di collegare l'elettromagnetismo, presente nella struttura di tutta la materia, con la forza debole, responsabile dei decadimenti radioattivi e normalmente nascosta all'interno di nuclei atomici (vd. p. 26, ndr). Essi teorizzarono che l'elettromagnetismo e la forza debole fossero unificati in un'unica forza, quella *elettrodebole*. La scoperta delle particelle W^\pm e Z^0 (avvenuta al Cern nel 1983 da parte dell'italiano Carlo Rubbia e i suoi colleghi), i mediatori della

forza debole, ne diedero la conferma sperimentale definitiva. Esistono indicazioni sperimentali anche del fatto che la forza forte a scale di energia sempre più elevate si "indebolisce", lasciando presagire la possibile unificazione della forza forte con quella elettrodebole (come teorizzato nella Gut, *grand unified theory*, vd. in Asimmetrie n. 18 p. 7, ndr).

Oggi i fisici di tutto il mondo sono alla ricerca di una prova indiretta della Gut a scale di energia più bassa, per esempio nell'acceleratore Lhc (Large Hadron Collider) del Cern, cercando particelle nuove chiamate *supersimmetriche* (vd. in Asimmetrie n. 18 p. 13, ndr) predette da questi modelli teorici di unificazione delle forze.

Facendo un passo ancora in avanti, i fisici teorici prevedono anche la possibilità di includere la gravità nell'unificazione a una scala di energia ancora più alta. Questa "forza unificata" avrebbe governato i primi istanti dell'universo dopo il Big Bang manifestandosi poi nelle quattro forze durante la fase di raffreddamento.

c.
La scoperta del bosone di Higgs nel 2012, come anche la ricerca di particelle supersimmetriche che i fisici sperano di trovare analizzando i dati raccolti in questi mesi da Lhc, non sarebbe possibile senza il contributo "classico" dell'elettromagnetismo, per esempio quello che descrive la traiettoria curva di una carica che attraversa un dipolo (nella foto è visibile un modello di uno dei 1232 dipoli superconduttori disposti lungo i 27 km di Lhc).



Biografia

Angelo Carbone è ricercatore presso l'Università di Bologna e docente di elettromagnetismo presso il corso di laurea in Ingegneria Energetica. Svolge la sua attività di ricerca in collaborazione con l'Infn presso il Cern, dove si occupa di cercare prove indirette dell'esistenza di particelle supersimmetriche con l'esperimento Lhcb.