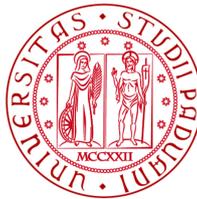


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "GALILEO GALILEI"

LAUREA TRIENNALE IN FISICA

Le origini dell'elettromagnetismo

RELATORE:
PROF. GIULIO PERUZZI

LAUREANDO:
VITTORIO MASIA

ANNO ACCADEMICO 2016/2017

Alla mia famiglia e ai miei amici

Indice

1	Introduzione	5
1.1	Origine del termine: Elettricità	5
1.2	Origine del termine: Magnetismo	5
2	Contesto	7
2.1	Coulomb / Cavendish e l'azione a distanza	7
2.2	L'irresponsabile entusiasmo degli scienziati	8
3	La rivoluzione elettromagnetica	9
3.1	Oersted: La corrente devia la bussola	9
3.2	Ampere: I due fili sembrano magneti	10
3.3	Faraday: Il magnete genera corrente	11
3.4	Thomson: La potenza dell'analogia	13
4	Maxwell: Origine delle equazioni	15
4.1	On Faraday's Lines of Force	16
4.2	On Physical Lines of Force	17
4.3	A Dynamical Theory of Electromagnetic Field	19
5	Uno sguardo al "futuro"	21

Capitolo 1

Introduzione

Questo elaborato si propone di ripercorrere i passaggi essenziali che hanno portato alla nascita dell'elettromagnetismo come lo conosciamo.

Fenomeni elettrici e magnetici sono stati oggetto delle attenzioni dell'uomo molto a lungo prima che se ne iniziasse a sospettare una correlazione a causa di osservazioni che ebbero luogo solo nel diciannovesimo secolo. Prima di allora, venivano chiaramente distinti grazie al contributo di William Gilbert, che nel 1600 notò una sorta di “energia finita” nei fenomeni elettrici (allora chiamata fluido elettrico) per cui la forza di attrazione si esauriva all'esaurirsi di questa energia.

1.1 Origine del termine: Elettricità

Il primo fenomeno elettrico a catturare l'interesse dell'uomo fu probabilmente la carica per strofinio. Già nel 600 a.C., grazie a Talete di Mileto e Teofrasto, l'ambra era nota nell'antica Grecia per poter essere facilmente caricata strofinandola con seta o lana, ed è proprio il suo nome in greco antico (elektron) a dare origine al termine “elettricità”.

1.2 Origine del termine: Magnetismo

Sempre in Grecia era nota la proprietà di alcuni metalli di attrarre e riorientare la limatura di ferro. Secondo Plinio il Vecchio (23-79 d.C.) il termine nasce da un pastore di nome “Magnes” che scoprì le suddette proprietà della magnetite per caso.

Pare inoltre che già Archimede (287-212 a.C.) avesse tentato di magnetizzare delle spade per permettere ai guerrieri di disarmare facilmente i nemici.

Capitolo 2

Contesto

2.1 Coulomb / Cavendish e l'azione a distanza

Nella seconda metà del diciottesimo secolo Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) provò sperimentalmente -tramite una bilancia di torsione- la tesi proposta da Ulrich Theodor Aepinus (1724-1802) nel *Tentamen theoriae electricitatis et magnetismi*, un saggio sulla teoria dell'elettricità e del magnetismo in cui proponeva in via formale il possibile andamento della forza elettrica fra due corpi carichi come inversamente proporzionale al quadrato della distanza. La famosa formula prende dunque il nome da Coulomb, nonostante Henry Cavendish lo avesse in realtà preceduto con una dimostrazione più elegante. In questa come in molte altre occasioni, tuttavia, Cavendish non ebbe interesse a pubblicare per primo i risultati ottenuti.

La descrizione matematica della forza elettrostatica ricadeva così nel concetto di azione a distanza, in analogia con la legge di gravitazione universale. Di lì a breve Faraday, così come Newton prima di lui, avrebbe criticato il concetto di azione a distanza preferendo le linee di forza come interpretazione geometrico-fisica della questione.

L'opinione di Newton in merito è resa chiara in una delle sue lettere a Bentley pubblicate dopo la sua morte.

Che un corpo possa agire su un altro corpo a distanza senza la mediazione di null'altro è per me una così grande assurdità che ritengo che nessuna persona con un minimo di competenza nelle questioni filosofiche vi possa credere.

(Isaac Newton, Four letters from Sir Isaac Newton to Doctor Bentley, containing some arguments in proof of a deity, Londra, R. e J. Dodsley, 1752.)

2.2 L'irresponsabile entusiasmo degli scienziati

La prima morte dovuta ad esperimenti ad alto voltaggio fu quella del professor Georg Wilhelm Richmann (22 luglio 1711 - 6 agosto 1753), mentre tentava di attrarre un fulmine sulla sua casa. Sorte scampata di poco al celebre Benjamin Franklin, al quale si attribuisce la scoperta della natura elettrica dei fulmini. Nonostante prima di allora fosse già noto che piccoli animali potevano essere uccisi da scariche elettriche (Jean Antoine Nollet lo aveva dimostrato nel 1745), chiunque voleva provare l'ebbrezza di subirne una.

Una serie di strumenti creati per accumulare carica venivano usati come passatempi da salotto dai più, e addirittura come forme di intrattenimento di massa. Era il caso del bacio di venere, in cui una giovane e attraente donna veniva caricata elettrostaticamente ed isolata dal terreno, chiamando tra il pubblico un ignaro pretendente che volesse baciarla.

In quel periodo, l'elettricità divenne *“più popolare della quadriglia”*.
(Jean Antoine Nollet, 1700-1770)

Capitolo 3

La rivoluzione elettromagnetica

La pila di Volta (1800, nota allora come “dispositivo galvanico”) diede il via ai primi studi di elettrodinamica, grazie alla nuova possibilità di studiare correnti elettriche che non fossero scariche improvvise di oggetti carichi da ricaricare per strofinio di volta in volta.

3.1 Oersted: La corrente devia la bussola

Fu proprio tramite una pila voltiana che il danese Hans Christian Oersted (1777-1855) poté osservare per primo la produzione di campo magnetico da parte di una corrente. Nel suo esperimento, descritto nel 1820 in una memoria dal titolo “*Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticum*”, un ago magnetico era posto in prossimità di un filo collegato a una pila. Al passaggio della corrente nel filo, la posizione dell’ago magnetico cambiava.

Tre caratteristiche di questa rivoluzionaria osservazione erano considerate fortemente anomale rispetto alle conoscenze dell’epoca.

- Per la prima volta era osservata una correlazione fra i fenomeni elettrici e quelli magnetici, in contrasto con le convinzioni condivise da tutta la comunità dalle scoperte di Coulomb in poi.
- Inoltre non c’era evidenza di interazione fra cariche elettriche *statiche*: al contrario la forza magnetica cessava di agire sull’ago allo spegnimento del circuito.
- Infine, la forza magnetica “generata” da questa corrente agiva lungo una curva (circolare) attorno al filo, e non in linea retta come le classiche attrazioni o repulsioni newtoniane.

L'interpretazione di Oersted di questa scoperta consisteva in un ipotetico "conflitto" elettrico che operava liberamente fuori dal conduttore attraverso qualsiasi materiale non magnetico. Questa visione aveva le sue radici nella naturphilosophie, la cui idea di fondo era che tutte le forze fossero riconducibili a un conflitto di poche forze primordiali, e convertibili le une nelle altre (una suggestione ripresa da Oersted e altri scienziati dell'epoca).

Il resto della comunità scientifica colse immediatamente l'importanza di questa scoperta e si iniziò a lavorare da subito a varie interpretazioni al fine di includere il fenomeno nella teoria, sia nel filone di scienziati legati all'azione a distanza che in quel nascente gruppo di teorici entusiasti delle teorie eteree.

3.2 Ampere: I due fili sembrano magneti

Una settimana dopo essere venuto a conoscenza dell'esperimento di Oersted, André-Marie Ampère (1775-1836) mise in pratica un suo esperimento partendo dall'intuizione che se il filo di Oersted poteva generare un campo magnetico, allora avrebbe dovuto anche subirne l'azione. Collegò dunque due fili conduttori paralleli a due diverse pile, e osservò una forza attrattiva agire tra i fili nel caso i versi delle correnti fossero concordi (viceversa, se la corrente veniva invertita in uno dei due fili, la forza esercitata fra questi diventava repulsiva).

La legge che descrive l'intensità di questa forza porta ad oggi il suo nome ed è rappresentata in linguaggio matematico moderno tramite la formula:

$$\vec{F} = \frac{\mu}{2\pi} \frac{i_1 i_2}{r} l \cdot \hat{\mathbf{u}}_r$$

Ampère era inizialmente convinto della distinzione fra fluidi elettrici e magnetici, ma la scoperta di Oersted e la sua ulteriore osservazione lo portarono a formulare un'interpretazione completamente nuova e matematicamente ambiziosa di questi fenomeni. L'idea di Ampère, emersa in numerosi articoli negli anni successivi all'esperimento e riassunta nel 1825 nella "*Mémoire sur la théorie mathématique de phénomènes électrodynamiques uniquement déuite de l'expérience*", consisteva in una riduzione generale del magnetismo all'elettrodinamica.

I magneti permanenti nella sua interpretazione non erano altro che un sistema di moltissime micro-correnti chiuse attorno alle particelle dei corpi magnetizzati, e questa formulazione generale dell'interazione poteva spiegare tanto l'attrazione e repulsione fra magneti formalizzata da Coulomb quanto quella fra magneti e correnti nell'effetto Oersted (formalizzata nella legge di Biot-Savart).

$$B(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (\text{campo prodotto da un filo infinito percorso da corrente})$$

La comunità scientifica non fu subito entusiasta dei risultati ottenuti da Ampère, sia per la complessità del suo apparato matematico (si aveva infatti un'interazione dipendente non solo dalla distanza fra gli elementi di corrente infinitesimi, ma anche dall'orientamento reciproco di queste: scrivere un po-

tenziale legato a tale azione non era un problema banale) che portava a una difficile applicazione di questo ai fenomeni più particolari, sia per il vasto utilizzo di ipotesi incontrollate e di fatto difficilmente controllabili (come quella sulle correnti interne dei magneti).

Nonostante tutto, l'interpretazione data da Ampère era destinata a segnare un grande passo avanti e un punto di riferimento per gli studi a venire nel campo dei fenomeni elettromagnetici.

3.3 Faraday: Il magnete genera corrente

Conseguentemente alle scoperte di Oersted e Ampère, Michael Faraday (1791-1867) iniziava ad indagare i fenomeni elettromagnetici con un approccio del tutto diverso da quello predominante al tempo. Egli era infatti distante dalla tradizione interpretativa della scuola francese, avendo una formazione da autodidatta nella fisica sperimentale, e questa caratteristica avrebbe contraddistinto enormemente il quadro interpretativo da lui elaborato.

L'idea di partenza di Faraday era di impiegare le classiche linee formate dalla limatura di ferro in presenza di magneti o fili percorsi da corrente come raffigurazione reale delle azioni elettromagnetiche. Un approccio generalmente qualitativo ma, come avrebbe notato Maxwell nella prefazione alla prima edizione del *“Treatise on Electricity and Magnetism”* nel 1873, intriso di una matematica consistente con quella convenzionale.

Quando sono riuscito a tradurre in forma matematica quelle che consideravo fossero le idee di Faraday, ho trovato che in generale i risultati dei due metodi coincidevano, poiché gli stessi fenomeni venivano spiegati e le stesse leggi di azione dedotte da entrambi i metodi, ma che i metodi di Faraday assomigliavano a quelli nei quali si inizia con il tutto e si arriva alle sue parti per via analitica, mentre i metodi matematici usuali erano fondati sul principio di iniziare con le parti e costruire l'intero per via sintetica.

Nel 1821 Faraday manifesta per la prima volta la sua distanza radicale dalla prospettiva vigente all'epoca nel suo *“On Some New Electro-magnetic Motions and on the Theory of Magnetism”*, illustrando esperimenti sul carattere circolare dell'azione magnetica tra ago e filo di Oersted (da lui chiamata “rotazione elettromagnetica”). Come criticò Ampère subito dopo la traduzione in francese del lavoro di Faraday, quest'ultimo non vedeva la *“rotazione mutua del filo conduttore e di un magnete”* come una proprietà emergente dalle azioni di ogni singolo elemento del filo e del magnete, ma come una caratteristica primitiva dei fenomeni elettromagnetici. La risposta di Faraday in una lettera ad Ampère mostra chiaramente il suo carattere empirico.

“Sono per natura scettico nei confronti delle teorie e di conseguenza vi prego di non serbarmi rancore per il fatto che non accetto immediatamente la vostra [...] sfortunatamente privo di conoscenze matematiche [sono] costretto a trovare la mia strada seguendo la stretta concatenazione dei fatti.”

Anche Faraday era un entusiasta sostenitore delle idee espresse nella “Naturphilosophie”, e l’idea di una essenziale unità di tutte le forze della natura spinse lo scienziato a compiere una gran mole di esperimenti nei campi più disparati legati all’elettricità e al magnetismo. I settori di ricerca aperti da Faraday erano talmente inesplorati (dalle proprietà elettriche e magnetiche di una vastità di materiali, all’elettrochimica e all’interazione fra magnetismo e ottica) da richiedere l’uso di neologismi ad oggi ancora in uso, come anodo, catodo, ione, elettrolisi ed elettrodo. È di nuovo Maxwell, nell’ottavo numero di Nature, a trarre conclusioni su questi aspetti della vita di Faraday, scrivendo:

Avendo in tal modo stabilito l’unità della natura di tutte le manifestazioni elettriche, il suo obiettivo successivo era di dar forma a una concezione dell’elettrificazione, o della azione elettrica che potesse ricomprenderle tutte. A questo scopo era necessario che cominciasse dal liberarsi da quelle idee parassite, che sono così inclini ad aderire strettamente a ogni termine scientifico e a rivestirlo di una lussureggiante messe di significati connotativi che fioriscono a spese del significato che la parola era intesa denotare.

Tra i numerosi termini di sua creazione, quelli che probabilmente hanno avuto la maggiore importanza nella creazione del quadro interpretativo di Faraday sono probabilmente dielettrico, diamagnetico e paramagnetico. Il primo passo verso questi concetti fu mosso nel 1845 con l’effetto magneto-ottico (una lastra di vetro -materiale fino ad allora ritenuto “neutro” rispetto alle interazioni magnetiche- posta vicino a un magnete diventava otticamente attiva), e successivi esperimenti dai quali emerse la consapevolezza che ogni materiale risentiva in qualche misura dell’azione magnetica. L’idea di Faraday era la presenza di una sorta di “conduzione” delle linee di forza attraverso i materiali, da qui dunque un’interazione “passo passo” fra particelle contigue: un’azione per contatto e non più a distanza.

Il grande problema dei concetti espressi da Faraday fu dunque il concetto di “continuo” della materia, in evidente contrasto con le osservazioni dell’epoca e con la teoria atomistica che si dimostrava sempre più forte (teoria che Faraday considerava già comunque come un dato nei suoi precedenti contributi alla chimica). Queste difficoltà erano condivise anche con le teorie del calore, le quali ispireranno successivamente William Thomson (Lord Kelvin, 1824-1907) nel suo percorso di analogie con cui rivedrà le stesse teorie di Faraday. Queste problematiche furono affrontate da Faraday con lo stesso approccio che lo aveva

fino ad allora contraddistinto: l'aderenza ai fatti era l'unica cosa che considerava importante, e se i fatti mostravano una conduzione favorita o sfavorita a seconda dei materiali, lo spazio nei materiali "non conduttori" non doveva condurre le linee di forza, viceversa avrebbe dovuto farlo nei materiali conduttori. L'unico modo per uscire dal paradosso di uno spazio dalla duplice natura era abbracciare la proposta di Ruggero Boscovich (1711-1787), secondo la quale lo spazio interposto tra gli atomi e gli atomi stessi non dovevano essere considerati come distinti, e l'unica cosa a dare agli atomi il loro carattere discreto era il loro essere dei "centri di forza" all'interno di una materia continua.

In termini matematici moderni, potremmo dire che Faraday vedesse lo spazio come non semplicemente connesso (anche egli se era ben lontano dal poter pensare formalmente in questi termini).

Nel periodo successivo Faraday maturò la sua interpretazione delle forze in un campo unificato che le racchiudesse tutte, esteso in tutto lo spazio. Questo primitivo concetto di campo mise per la prima volta in discussione l'istantaneità delle interazioni, oltre a non dipendere più da una qualche azione a distanza. L'idea delle linee di forza era capace di spiegare l'ottica come vibrazioni di queste linee, abbandonando i complessi artifici matematici con cui al tempo si stava cercando di spiegare l'etere luminifero. Ma se la radiazione ottica impiegava tempo nel propagarsi, così dovevano fare le linee di forza quando una perturbazione causata da un materiale a un'estremità della linea causava una conseguente perturbazione all'altra estremità. Analogamente, la corrente nei conduttori -allora ipotizzata essere non meno veloce della luce- avrebbe dovuto impiegare tempo, e così l'azione gravitazionale. Tutte queste erano solo congetture elaborate da Faraday, ma avrebbero avuto di lì a breve un grande impatto sul futuro lavoro di Maxwell.

In questa fase, la proto-teoria di campo avviata da Faraday mancava ancora di un analogo alle leggi di Newton per la dinamica, che potesse porre in relazione il campo e il moto degli oggetti da cui questo dipendeva. Questo ruolo sarebbe ben presto stato ricoperto dal concetto di conservazione dell'energia.

3.4 Thomson: La potenza dell'analogia

William Thomson (1824-1907) fu sempre profondamente legato al metodo dell'analogia, fin dall'età di quindici anni infatti abbracciava l'approccio geometrico di Jean-Baptiste-Joseph Fourier (1768-1830) nella sua teoria analitica del calore, e solo un anno più tardi redigeva uno studio sulle analogie fra questa e la teoria elettrostatica basata sulla funzione potenziale, mettendo in luce la sostanziale intercambiabilità fra temperatura e flusso di calore con potenziale elettrico e forza elettrica. Fino ad allora, Thomson non vedeva ancora possibilità di stabilire connessioni con le indagini di Faraday, per le quali non nutriva grande considerazione in generale.

Durante un soggiorno a Parigi, Thomson ebbe una conversazione con Joseph Liouville (1809-1882) circa i recenti lavori di Faraday sull'elettrostatica i quali sembravano contraddire la teoria di Coulomb e Poisson. In seguito cercò di conciliare la visione di Faraday con quella Coulombiana. Nel mettere insieme la teoria del calore con la teoria analitica dell'elettrostatica, e quest'ultima con la teoria di Faraday delle linee di forza, individuò una stretta analogia fra le linee di Fourier del flusso di calore e le linee di forza Faradiane.

Nel suo quadro di analogie fra calore e linee di forza, Thomson riuscì ad escludere tutte le contraddizioni fra l'elettrostatica di Faraday e quella di Coulomb e Poisson, nel limite in cui si considerassero conduttori separati da vuoto o aria: infatti l'analogia fra teoria del calore e idee di Faraday si basava sulla condizione che la conducibilità termica del mezzo interposto fosse sempre unitaria, costringendo dal lato elettrostatico ad astrarsi dall'idea di sostanza elettrica e a basarsi sul comportamento del potenziale elettrico.

Estendere il suo parallelismo matematico alle considerazioni di Faraday sui materiali dielettrici fu un'enorme sfida per Thomson, il quale cercò di spiegare le differenti conducibilità di differenti regioni con le discontinuità dei gradienti di potenziale lungo le superfici che delimitavano queste regioni. In questo modo Thomson mancò di cogliere l'aspetto più caro a Faraday nel suo quadro interpretativo, ovvero l'essenziale capacità dei materiali di "trasportare" più o meno bene le linee di forza al loro interno, ma il suo obiettivo non era tanto quello di cogliere i concetti interpretativi di Faraday, quanto il riuscire a inquadrare le sue tesi sui dielettrici in un quadro interpretativo tradizionale.

Le concezioni di Thomson cambiarono radicalmente però con l'introduzione da parte di Faraday del paramagnetismo e del diamagnetismo, portando il primo a dover estendere il dominio del suo percorso analogico alla magnetostatica. Thomson aveva in precedenza osservato che l'integrale del quadrato della forza in un volume era proporzionale all'integrale del prodotto tra la densità elettrica e il potenziale e Carl Friedrich Gauss aveva dimostrato nel 1845 che questo integrale avrebbe dovuto essere un minimo affinché la condizione di equilibrio elettrostatico fosse ben definita. Da questo, Thomson concluse che la forza meccanica (come quella fra conduttori) poteva essere ricavata analiticamente dall'espressione di questo integrale che rappresentava una sorta di "valore meccanico totale del sistema", dando il via a una imminente meccanica dei corpi basata sul concetto di energia e su una teoria di campo.

Le considerazioni di Thomson dimostravano di fatto che i corpi si muovevano lungo le linee individuate dal gradiente dell'energia del campo, e sarebbero di lì a breve state sviluppate da un altro scozzese, James Clerk Maxwell (1831-1879), verso direzioni che lui stesso non avrebbe accettato.

Capitolo 4

Maxwell: Origine delle equazioni

Ancor più di quanto abbia contraddistinto i lavori di Thomson, l'approccio analogico ha avuto un ruolo di enorme importanza nei lavori di James Clerk Maxwell (1831 Edimburgo - 1879 Cambridge).

Avrebbe poi spiegato la sua idea di "analogia fisica" tramite un brillante esempio nel suo "*An Elementary Treatise on Electricity*" (pubblicato postumo nel 1881 da William Garnett), in cui parla di una persona "lenta in aritmetica" che si trova a dover calcolare il prezzo di 52 iarde di cotone dal prezzo singolo di 7 pence. Questa persona può ricordarsi che un anno è formato da 52 settimane e un giorno, concludendo dunque che il cotone avrà un prezzo di 364 pence. È ovvio che le iarde di cotone non hanno nulla a che fare con le settimane di un anno, ma la somiglianza matematica tra le due situazioni permette di facilitare l'immaginazione in un campo complicato sfruttando immagini di un contesto più comprensibile.

È proprio grazie all'analogia che, osserva Maxwell, è possibile dare il via a una fertilizzazione incrociata delle scienze, nella quale i contributi in un settore di ricerca possono essere utili per indagare altri settori e trarre mutui vantaggi in più settori del sapere. Un esempio lampante di questo potere è dato proprio dai lavori di Thomson che avevano sbloccato l'incomunicabilità fra calore e meccanica delle azioni a distanza, rendendo possibili i successivi lavori sulla teoria cinetica dei gas da un lato e sui potenziali ritardati nei fenomeni elettromagnetici dall'altro.

Nonostante questo, Thomson non aveva sviluppato le analogie trovate fra gli effetti magneto-ottici e gli stati di tensione di un corpo elastico, ignorandone gli aspetti innovativi e probabilmente più potenti. Proprio da questo mancato approfondimento iniziano i principali contributi di Maxwell all'elettromagnetismo, racchiusi prevalentemente in tre articoli pubblicati tra gli anni cinquanta e sessanta del diciannovesimo secolo.

- *On Faraday's Lines of Force*, 1855-1856.

- *On Physical Lines of Force*, 1861-1862.
- *A Dynamical Theory of Electromagnetic Field*, 1865 (1864).

4.1 On Faraday's Lines of Force

Il primo articolo in cui Maxwell inizia a dar forma alla sua teoria è pubblicato in due parti, la prima nel 1855 e la seconda l'anno successivo. In questo lavoro cerca di tenere le scoperte di Thomson quanto più aderenti possibili all'approccio geometrico delle linee di forza di Faraday, aggiungendo un'ulteriore analogia con l'idrodinamica.

Inizialmente Maxwell vede nelle linee di forza il limite di dare solo la direzione delle forze ma non la loro intensità. Nella sua analogia descrive le linee come tubi a portata costante all'interno dei quali scorre un fluido incompressibile, in questa visione inquadra l'intensità delle forze nella velocità con cui scorre il fluido (dipendente dunque dalla larghezza dei tubi). In questa trattazione è bene ricordare che l'approccio analogico non implica assunzioni di fatto sui fenomeni ai quali è applicato: il fluido di cui tratta Maxwell è puramente immaginario e di solo ausilio all'intelletto nel cercare leggi matematiche generali.

Maxwell applica questo modello ai fenomeni elettrici, magnetici e galvanici introducendo due grandezze che chiama "quantità" e "intensità" (successivamente denotati come flussi e forze). Queste grandezze sarebbero in relazione di proporzionalità fra loro, come la forza elettromotrice di un circuito e la corrente lo sono tramite una costante di proporzionalità rappresentata dalla resistenza. Analogamente Maxwell tratta i campi oggi noti come "B" e "H" imponendo fra il primo (quantità o flusso) e il secondo (intensità o forza) la relazione:

$$H = kB$$

In sostanza, la quantità va immaginata come il numero di linee che attraversano una data superficie, mentre l'intensità come la capacità di una linea di superare una data resistenza. In questo senso la quantità è una grandezza che agisce lungo superfici, mentre l'intensità agisce lungo linee.

La seconda parte dell'articolo è dedicata all'induzione elettromagnetica, Maxwell la intitola *On Faraday's "Electro-tonic State"*. In questa fase egli indaga le concezioni di Faraday secondo cui un conduttore in presenza di linee di campo magnetico avesse una sorta di "stato elettrotonico", e al variare delle linee di campo magnetico concatenate con esso lo stato cambiasse producendo una forza elettromotrice. Nel trattare il fenomeno dell'induzione Maxwell però mette da parte l'analogia idrodinamica in quanto non più in grado di accompagnarlo oltre, e utilizza liberamente gli strumenti matematici accumulati nella precedente trattazione per inquadrare il fenomeno nella teoria.

È qui che Maxwell nota l'esistenza di più modelli capaci di inquadrare le stesse leggi, e giustifica il suo lavoro affermando l'aspetto positivo del disporre di due modi indipendenti di guardare alla stessa fenomenologia, avendo ricavato dall'approccio geometrico di Faraday delle equazioni consistenti per descrivere le quattro grandezze I (densità di corrente), F (forza elettromotrice), e i campi magnetici B e H .

4.2 On Physical Lines of Force

Maxwell pubblica il suo secondo lavoro sul campo elettromagnetico inizialmente nel 1861 (prima e seconda parte), completandolo poi nel 1862 con terza e quarta parte.

In questo articolo espone una sua particolare "estensione" dell'interpretazione data da Thomson dei fenomeni magneto-ottici, spiegando:

Ora mi propongo di esaminare i fenomeni magnetici da un punto di vista meccanico, e di determinare quali tensioni in, o moti di, un mezzo siano in grado di produrre i fenomeni meccanici osservati. Se, per mezzo della stessa ipotesi, possiamo collegare i fenomeni dell'attrazione magnetica con i fenomeni elettromagnetici e con quelli delle correnti indotte, avremo trovato una teoria che, anche se non vera, potrà essere dimostrata erronea solo con esperimenti che allarghino grandemente le nostre conoscenze di questa parte della fisica.

Nel *Physical Lines* Maxwell descrive lo spazio come un fluido, nel quale la pressione è di norma uguale in tutte le direzioni, ma che cambia in presenza di vortici a causa della forza centrifuga in questi. I vortici in questione sarebbero disposti attorno alle linee di forza del campo magnetico. Queste concezioni derivano non solo dai lavori di Thomson, ma anche da una teoria proposta da John William Rankine (1820-1872) che si proponeva di spiegare in chiave anti-atomistica le proprietà termodinamiche dei gas introducendo una visione delle molecole come piccole atmosfere eteree rotanti nello spazio.

Può sembrare ironico notare come invece i successivi lavori di Maxwell sulla termodinamica diano importanti contributi alla teoria cinetica dei gas, che superava il modello di Rankine (pur riprendendone alcune suggestioni). Questo mostra ancora di più quanto a Maxwell non interessasse la ricerca di un vero modello che spiegasse le cause dei fenomeni ma piuttosto delle analogie fra differenti modelli capaci di riprodurre le leggi dei fenomeni, per quanto i modelli scelti potessero essere complicati.

Dalla teoria emergente da questo articolo si ricavava una contrazione longitudinale del fluido lungo le linee di campo, e una pressione radiale all'esterno

dei vortici. Questo era in netto accordo con delle ipotesi di Faraday di accorciamenti delle linee di forza e repulsioni laterali fra queste, dando ancora più solidità al lavoro di Maxwell.

Sorgeva tuttavia un apparente problema nel modello: se le linee di forza parallele consistevano in vortici allineati gli uni agli altri, le superfici contigue di questi dovevano muoversi in direzioni opposte. Per questa ragione Maxwell introduceva la sostanza elettrica immaginandola come una sorta di insieme di moltissimi piccoli cuscinetti a sfera che riempiono lo spazio fra i vortici, comunicando tramite la rotazione il movimento da una superficie all'altra. In questa visione la sostanza elettrica si muove solo all'interno dei conduttori, e la funzione elettrotonica ha lo stesso ruolo che per Newton aveva l'impulso: come la forza meccanica è la derivata della quantità di moto nel tempo, così le forze elettromotrici sono le derivate temporali della funzione elettrotonica.

Nella terza parte del lavoro Maxwell aggiunge una ulteriore analogia. Notando che la teoria ondulatoria della luce implicava elasticità del mezzo luminifero (per rendere conto delle vibrazioni trasverse nei fenomeni ottici), si può supporre che tale proprietà sia presente anche nel mezzo magneto-elettrico. Questo accoppiamento di etere luminifero e magneto-ottico ha ancora le sue radici nelle idee di Thomson sull'effetto magneto-ottico.

In questa parte dell'articolo Maxwell inquadra la polarizzazione elettrostatica come un caso particolare di conduzione, descrivendo questi due fenomeni analogamente a una membrana porosa che fa passare il fluido opponendo una certa resistenza (conduzione) e una membrana impermeabile che ne trasmette la pressione da un lato all'altro (polarizzazione).

I risultati ottenuti da questo approccio sono due. Maxwell determina che una corrente variabile nel tempo in un conduttore deve indurre nel mezzo circostante -incluso il vuoto- piccole correnti associate (introducendo così il concetto di corrente di spostamento). Risulta inoltre possibile ricavare, dalle proprietà elastiche del mezzo, la velocità alla quale il disturbo elettromagnetico si propaga.

*La velocità del movimento ondulatorio trasverso nel nostro mezzo ipotetico, calcolata dagli esperimenti elettromagnetici di Kohlrausch e Weber, concorda in modo così perfetto con la velocità della luce calcolata dagli esperimenti ottici di Fizeau, che ci sarebbe difficile non inferire che **la luce consista nei moti ondulatori trasversi dello stesso mezzo che è la causa dei fenomeni elettrici e magnetici.***

Ha così realmente inizio la teoria elettromagnetica della luce, e questo suscita in Maxwell talmente tanto entusiasmo (le righe in grassetto nella citazione sono in corsivo nel testo originale) che egli ne comunica subito i dettagli a Faraday e Thomson in quanto suoi principali ispiratori.

Prima di giungere alla conclusione del percorso che ha portato Maxwell nel suo terzo articolo a formulare le sue equazioni formalizzando i suoi principali contributi all'elettromagnetismo, egli lavorerà a un problema più pratico: insieme a Fleeming Jenkin e Balfour Stewart farà parte di una commissione presieduta da Thomson in persona il cui obbiettivo era stilare in breve tempo un insieme di unità di misura adatte per i fenomeni elettrici a livello internazionale e in particolare la ricerca di un adeguato campione di resistenza.

Il contatto con una serie di strumenti di enorme precisione in questo periodo (dal 1862) porta a Maxwell anche alcuni spunti importanti di carattere teorico.

Nel 63 collabora con Jenkin nella scrittura di *On the Elementary Relations of Electrical Quantities*, lavoro all'interno del quale illustra la notazione dimensionale per le grandezze elettriche e mette in luce la proporzionalità costante fra queste grandezze quando prese da un sistema di unità di misura elettrostatico ed elettromagnetico (due facce del sistema di Gauss).

Mostra inoltre che la costante di proporzionalità fra questi sistemi ha le dimensioni di una velocità il cui modulo è simile all'allora nota velocità della luce, e illustra cinque classi di esperimenti volti a misurare questa velocità. Uno di questi viene messo in pratica da Maxwell stesso e Charles Hockin nel 1868.

4.3 A Dynamical Theory of Electromagnetic Field

Il terzo articolo di Maxwell viene concluso nel 1864 (con la comunicazione dei risultati alla Royal Society) e pubblicato l'anno successivo nelle *Philosophical Transactions* della Royal Society.

Proprio all'inizio dell'articolo si legge:

*La teoria che propongo può quindi essere chiamata una teoria del **campo elettromagnetico**, perché ha a che fare con lo spazio nelle vicinanze dei corpi elettrici o magnetici, e può essere chiamata una teoria **dinamica**, perché assume che in quello spazio vi sia materia in movimento dalla quale vengono prodotti i fenomeni osservati.*

Avendo visto una gran quantità di modelli che si affaccendavano a trattare l'etere luminifero, Maxwell decide di tenersi alla larga dall'utilizzo di un modello in questo lavoro, differentemente dai precedenti articoli si pone dunque l'obbiettivo di esporre alcuni principi fondamentali dai quali dedurre l'analisi di vari dati sperimentali.

Tre punti cardine sorreggono il terzo articolo di Maxwell:

- Una concezione di energia elettrica e magnetica consistente con l'energia meccanica e presente in tutto lo spazio, dalla quale si evince una visione

di un mezzo meccanico diffuso ovunque vi sia energia ma senza tensioni o vibrazioni derivanti da modelli fisici ipotetici.

- La perseveranza nell'utilizzo di concetti e strumenti mutuati dalla geometria, come le linee di forza di Faraday.
- Analogia forte coi sistemi macroscopici, e abbandono dei vortici in favore di metodi lagrangiani che inquadrassero l'induzione come accoppiamento fra sistemi dinamici.

Su questo ultimo punto è bene ricordare un esempio cancellato dal manoscritto di "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field", che sarebbe stato successivamente sviluppato da John William Strutt (Lord Rayleigh, 1842-1919). Il paragone è fra l'induzione e l'azione di due cavalli sul bilancino di una carrozza. Qualora uno dei due cavalli cambiasse la sua velocità, si avrebbe un cambiamento dell'orientazione del bilancino e l'altro cavallo risentirebbe di un impulso opposto all'accelerazione del primo, analogamente si può pensare i cavalli come le correnti nei circuiti e il bilancino come il coefficiente di induzione fra questi.

Da queste premesse, comunque, Maxwell arriva a ricavare le formule di induzione, e imponendo la conservazione dell'energia ricava l'andamento delle forze in gioco, inaugurando un metodo di analisi ben diverso da quello fino ad allora più comune che inevitabilmente cercava nelle forze le cause dell'induzione (e mostrando dunque che nella sua visione erano i campi ad essere le nozioni fisiche di partenza).

I risultati del suo lavoro consistono così in venti equazioni differenziali a determinare venti grandezze fisiche usate per descrivere le azioni del campo elettromagnetico. In futuro sarebbero state riscritte da Heinrich Hertz (1857-1894) e Oliver Heaviside (1850-1925) nella forma sotto la quale oggi conosciamo le "Equazioni di Maxwell".

Infine, nella sesta parte del suo lavoro, intitolata "*Electromagnetic Theory of Light*" ricava dalle precedenti equazioni quelle d'onda che propagano il campo elettromagnetico e la funzione potenziale, e dimostra che la velocità di queste onde equivale a quella della luce.

Capitolo 5

Uno sguardo al “futuro”

Nella quarta parte del suo terzo articolo, Maxwell fa delle osservazioni sul suo approccio che ad oggi mantengono ancora aperto un quesito importante. Mette in mostra infatti che usando gli stessi metodi nel campo dell'etere gravitazionale si ricadeva nell'affermare proprietà difficilmente spiegabili di questo. L'etere gravitazionale avrebbe infatti dovuto implicare che nei punti in cui il campo gravitazionale fosse nullo, l'energia fosse infinita. Mentre laddove un corpo avesse esercitato un'azione gravitazionale, l'energia del mezzo circostante sarebbe dovuta diminuire.

Siccome non sono capace di capire in qual modo un mezzo possa possedere proprietà di questo tipo, non posso proseguire oltre in questa direzione per cercare le cause della gravitazione.

Faraday nel 1846 aveva auspicato la ricerca di una teoria che potesse unificare elettromagnetismo e gravità, ma Maxwell non era riuscito nell'impresa, ancora oggi in parte problematica.

In qualche modo, tuttavia, la sua teoria ha portato a compiere passi avanti nella comprensione della natura dello spazio e (successivamente ed indirettamente) della gravità. Pur essendo legato al concetto di etere, Maxwell aveva messo infatti in piedi una teoria che avrebbe poi portato ad abbandonarlo.

La presenza nelle sue formule di una velocità assoluta era allora spiegabile solo con l'assunzione di un sistema privilegiato (l'etere appunto), ma come ben sappiamo furono proprio fenomeni ottici quale l'interferenza a permettere la messa in piedi dell'esperimento di Michelson che, pur volto inizialmente a cercare una misura della velocità della terra rispetto all'etere, si ritrovò a confutare l'esistenza dello stesso, gettando le basi per i postulati della relatività ristretta di Einstein e cambiando radicalmente ancora una volta il modo in cui la scienza interpreta lo spazio.

In definitiva, il metodo analogico in nome della fertilizzazione incrociata, a partire da Thomson e passando per il gigante che è stato Maxwell, si è rivelato essere una delle più grandi risorse del sapere umano e ha permesso a quest'ultimo di vedere avanti di decenni partendo da presupposti come *un uomo lento in aritmetica che calcola quanto spendere pensando alle settimane contenute in un anno*.

Bibliografia

- [1] G. Peruzzi, *Maxwell*, collana “I grandi della scienza”, Le Scienze, 1998.
- [2] Jed Z. Buchwald, *L'Ottocento: fisica. L'elettromagnetismo e il campo*, Storia della Scienza (2003), ([link al sito](#)), (07/10/2017)
- [3] J. Heilbron, *Electricity in the 17th and 18th Centuries. A Study of Early Modern Physics*, University of California Press, Berkeley 1979 [tr. it., *Alle origini della fisica moderna: Il caso dell'elettricità*, Il Mulino, Bologna 1984]
- [4] D. Bodanis, *L'universo elettrico : l'elettrizzante storia dell'elettricità*, Mondadori, Milano, 2006.
- [5] M. La Forgia, *Elettricità, materia e campo nella fisica dell'Ottocento*, Loescher, Torino, 1982.
- [6] Giovanni Gentile, *Trascinamento dell'etere*, Enciclopedia Italiana (1937), ([link al sito](#)), (20/10/2017)