

INTRODUZIONE STORICA ALL'ELETTROMAGNETISMO

Marco Panareo

SECONDA PARTE

Riepilogo

- Il XIX secolo si apriva con due importanti risultati per la scienza dell'elettricità:
 - La scoperta delle leggi di forza coulombiane
 - L'invenzione della pila elettrica
- L'analogia formale delle leggi di Coulomb con la legge di gravitazione permise di adattare alle grandezze elettriche e magnetiche i modelli matematici già ampiamente sperimentati sui corpi materiali
- Le componenti che rendevano efficace l'analogia erano le *cariche magnetiche* e le *masse magnetiche* che nella teoria formulata da Coulomb diventano quantità materiali definibili sperimentalmente attraverso numeri
- L'invenzione della pila e la conseguente disponibilità di intense correnti elettriche aprirono nuove opportunità nello studio dei fenomeni elettrici



Effetti magnetici della corrente

- I filosofi del XVIII secolo avevano sospettato che esistesse una relazione di qualche tipo tra elettricità e magnetismo. Il sospetto si basava in parte su alcuni curiosi effetti prodotti dai fulmini, di un tipo che può essere illustrato da un articolo pubblicato nei *Philosophical Transactions* nel 1735.
 - Un commerciante di Wakefield, ci viene detto, dopo aver messo un gran numero di coltelli e forchette in una grande scatola, e dopo aver posizionato la scatola nell'angolo di una grande stanza, accadde nel luglio del 1731 un improvviso temporale di tuoni, fulmini, ecc., per cui l'angolo della stanza è stato danneggiato, la scatola si è spaccata e un buon numero di coltelli e forchette si sono fusi, i foderi non sono stati toccati Il proprietario che svuota la scatola su un bancone dove giacevano alcuni chiodi, il Le persone che presero i coltelli, che giacevano sui Chiodi, osservarono che i coltelli prendevano i Chiodi.*
- Al fulmine venne così attribuito il potere di magnetizzare l'acciaio; e fu senza dubbio questo che indusse Franklin nel 1751 a tentare di magnetizzare un ago da cucito mediante la scarica di una batteria di bottiglie di Leida.
- Il tentativo ebbe davvero successo; ma, come dimostrò in seguito Martin Van Marum, era dubbio che il magnetismo fosse dovuto direttamente alla corrente.

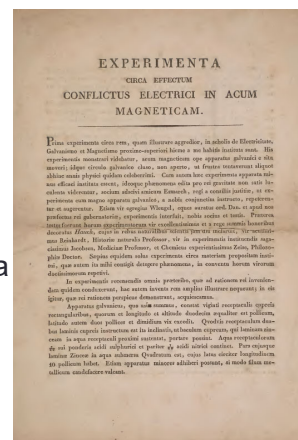
VIII. *An Account of an extraordinary Effect of Lightning in communicating Magnetism. Communicated by Pierce Dod, M. D. F. R. S. from Dr. Cookson of Wakefield in Yorkshire.*

A Tradesman in this Place having put up a great Number of Knives and Forks in a large Box, some in Cases or Sheaths, and others not, of different Sizes, and of different Persons making, in order to be sent beyond Sea; and having placed the Box in the Corner of a large Room, there happen'd a sudden Storm of Thunder, Lightning, &c. by which the Corner of the Room was damaged, the Box split, and a good many Knives and Forks melted, the Sheaths being untouch'd. The Owner emptying the Box upon a Counter where some Nails lay, the Persons who took up the Knives, that lay upon the Nails, observed that the Knives took up the Nails. Upon this the whole Numbers was try'd, and found to do the same, nay, to take a degree as to take up large Nails, Packing-Needles, and other Iron Things of considerable Weight. Needles or other Things placed upon a Pewter-Dish, would follow the Knife or Fork, though held under the Dish, and would move along as the Knife or Fork was moved; with several other odd Appearances, which I won't now trouble you with, only this, that though you heat the Knives red-hot, yet their Power is still the same when cold.

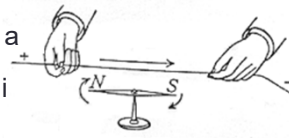
You may be assur'd of the Truth of this, having myself made a good many Trials of the Knives and the Forks: How they came by this magnetick Power, or how Lightning should be capable of communicating such a Power, is the *Quæstio*.

Decem. 6th, 1735.

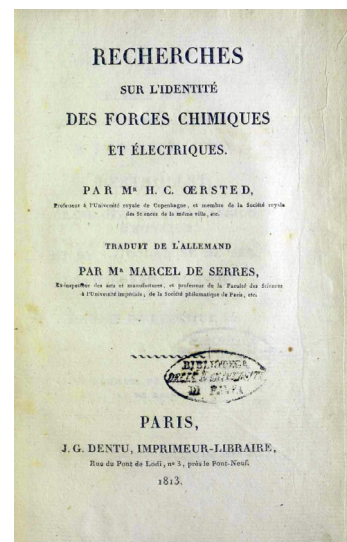
- Il 21 Luglio 1820 nella breve memoria *Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam*, Hans Christian Ørsted annunciava il risultato di un esperimento da lui condotto, attraverso il quale aveva avuto modo di verificare che una corrente rettilinea devia un ago magnetico.
- L'esperienza descritta generò un notevole clamore nella comunità dei ricercatori, non tanto per aver scoperto finalmente una connessione tra due forze fino ad allora ritenute distinte, quanto nel fatto che l'esperimento rivelava per la prima volta una forza di tipo non newtoniano
- Infatti appariva chiaramente come l'azione tra un polo magnetico e un elemento di corrente non si esplica lungo la retta che li congiunge ma normalmente a questa retta



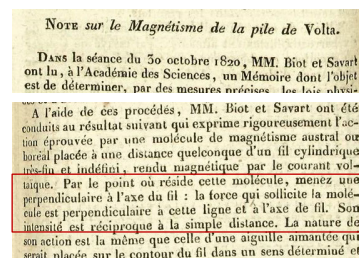
- Ørsted non provò a stabilire le leggi quantitative di questa azione, ma si accontentò di una esposizione dell'effetto qualitativo e di alcune osservazioni sulla sua probabile causa, che richiamano le speculazioni magnetiche di Decartes:
 - *All'effetto che ha luogo nel conduttore e nello spazio circostante, daremo il nome di conflitto elettrico. [...] Il conflitto elettrico agisce solo sulle particelle magnetiche della materia. Tutti i corpi non magnetici appaiono penetrabili dal conflitto elettrico, mentre i corpi magnetici, o meglio le loro particelle magnetiche, resistono al passaggio di questo conflitto. Quindi possono essere mossi dall'impeto delle potenze antagoniste. [...] È sufficientemente evidente dai fatti precedenti che il conflitto elettrico non è confinato al conduttore, ma si disperde abbastanza ampiamente nello spazio limitrofo. [...] Dai fatti precedenti possiamo parimenti dedurre che questo conflitto compie dei cerchi; poiché senza questa condizione, sembra impossibile che l'una parte del filo, quando posta sotto il polo magnetico, lo spinga verso oriente, e quando posta sopra di esso verso occidente; poiché è natura di un cerchio che i moti nelle parti opposte abbiano una direzione opposta*
- L'interpretazione di queste affermazioni risultò piuttosto oscura ma nella sostanza Ørsted provò a spiegare il fenomeno riconducendolo a due moti elicoidali in senso inverso attorno al conduttore di una qualche forma di materia elettrica, positiva e negativa



- Ørsted inquadrava la sua scoperta nell'ambito delle proposte filosofiche che si diffondevano all'inizio del XIX secolo e che facevano riferimento alla *Naturalphilosophie* introdotta da Friedrich Wilhelm Joseph von Schelling
- L'idea di Ørsted e di altri ricercatori dell'epoca era che le forze potessero essere convertite le une nelle altre in conseguenza della comune origine e che i fenomeni fisici erano la manifestazione di *conflitti* tra forze primarie tra loro opposte
- Questa idea di unitarietà di Ørsted si concretizzava in una concezione dinamica della natura, intesa come un processo di continuo mutamento da quale emergono fenomeni che, sebbene qualitativamente differenti, presentano una comune origine riconducibile alle azioni reciproche delle stesse forze primordiali
- Infatti Ørsted aveva ipotizzato l'iterazione tra elettricità e magnetismo in un suo precedente lavoro, del 1813, nel quale analizzava la proposta di Davy di ricercare una natura elettrica nelle forze chimiche

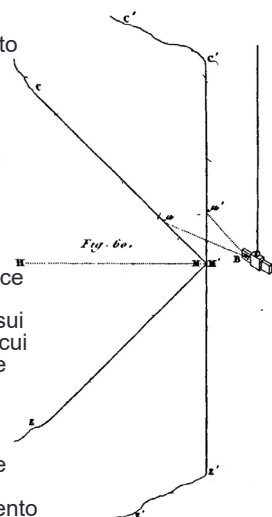


- La scoperta di Ørsted fu presentata nella riunione dell'*Académie des sciences* il 4 e l'11 settembre 1820 da François Jean Dominique Arago appena tornato da Ginevra, dove aveva assistito a questo esperimento ripetuto da Auguste Arthur de La Rive.
- Il 30 ottobre dello stesso anno, Jean-Baptiste Biot lesse una memoria all'*Académie* in cui venivano descritti i risultati di una ricerca sperimentale condotta insieme a Félix Savart. Nella memoria Biot affermò che l'azione subita da un polo di magnetismo australe o boreale, quando posto a qualsiasi distanza da un filo rettilineo che trasporta una corrente voltaica, si può così esprimere:
 - Si tracci dal polo una perpendicolare al filo; la forza sul polo è ad angolo retto rispetto a questa linea e al filo, e la sua intensità è proporzionale al reciproco della distanza dal polo
- Nell'enunciato non si fa riferimento all'intensità della corrente siccome non c'era ancora la possibilità tecnica di confrontare le correnti



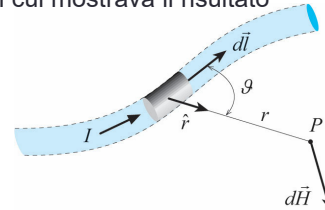
- Secondo i loro scopritori, la determinazione sperimentale corrispondeva ad affermare $df \propto i/r$ intesa come espressione della forza agente su una massa magnetica m situata in un punto P , così come era stata definita da Coulomb, ovvero la quantità di magnetismo contenuta in un polo magnetico posto nel punto considerato
- In realtà Biot e Savart avevano stabilito l'intensità dH del campo dH in tale punto dovuto alla corrente i .
- Tale grandezza tuttavia sarà introdotta da Thomson solo nel 1849 in *A Mathematical Theory of Magnetism*, pertanto la determinazione sperimentale aveva condotto a stabilire il rapporto tra la forza e la massa magnetica m contenuta nell'ago, i/r .
- Qualche giorno dopo la presentazione di tale formula, Laplace notò come l'azione della corrente del filo potesse essere riguardata come la risultante delle azioni parziali esercitate sui poli di un ago magnetico dagli infiniti elementi infinitesimi in cui poteva ritenersi scomponibile la corrente e ne dedusse che ogni elemento di corrente esercita su ogni polo una forza inversamente proporzionale al quadrato della distanza dell'elemento dal polo.
- Laplace inoltre suggerì che l'espressione della forza potesse generalizzarsi, contenendo una funzione K dell'angolo compreso tra l'elemento di corrente e la direzione del segmento che collega il punto medio di tale elemento con il punto P :

$$df = \frac{K}{r^2} idl$$



- Dopo aver comunicato tale risultato a Biot, questi da solo verificò sperimentalmente che la forza è proporzionale al seno dell'angolo formato dalla direzione dell'elemento di corrente con la congiungente il punto medio di tale elemento col punto considerato
- Il 18 dicembre 1820 Biot presentò alla *Académie des sciences* la breve memoria dal titolo *Sur l'action des fils obliques* in cui mostrava il risultato conseguito. Così la formula generale diventava

$$df = \frac{\sin \vartheta}{r^2} idl$$



- In cui f è da interpretarsi ancora come spiegato
- Biot valutò anche la forza che il polo magnetico P esercita sull'elemento di corrente idl situato a distanza r da P trovando la formula che, espressa in termini del campo magnetico $\vec{B}$ si scrive ora come

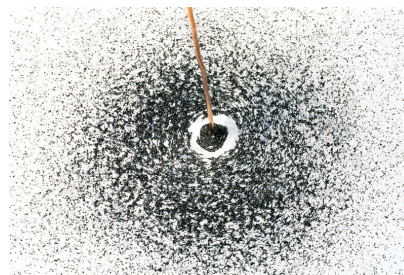
$$dF = B idl \sin \omega$$

- verificando inoltre che qualora l'angolo formato tra $\vec{B}$ e $d\vec{l}$ è pari a 90° risulta

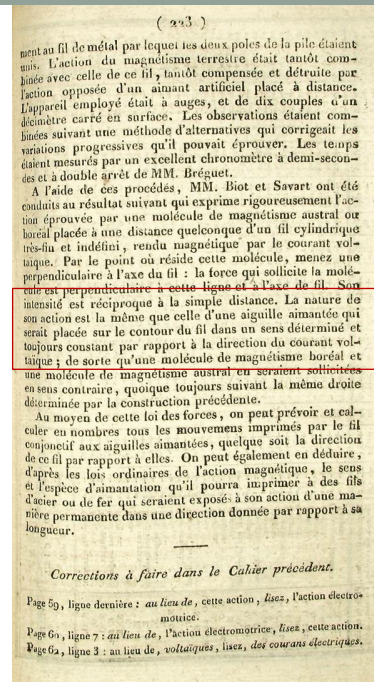
$$dF = B idl$$

Elettrodinamica

- Nella replica dell'esperimento di Ørsted, Arago realizzò un dispositivo in cui una corrente verticale attraversava un cartoncino cosparso di limatura di ferro
- Arago non vide la formazione di particolari forme geometriche nella limatura di ferro ma, analogamente a quanto osservò Davy un mese dopo, vide che il conduttore
 - ... si carica di limatura di ferro come farebbe un magnete.
- deducendo che evidentemente
 - ... esso sviluppa un magnetismo nel ferro che non è stato soggetto ad una preventiva magnetizzazione.



- Biot fece sua questa interpretazione del fenomeno ritenendo che quando una corrente rettilinea agisce su una molecola magnetica
 - *La natura della sua azione è la stessa di un ago magnetizzato posto sul contorno del filo in un senso sempre determinato e sempre costante rispetto alla direzione della corrente voltaica*
- come riporta nella memoria presentata il 30 ottobre del 1820 all'*Académie*
- Quindi Biot riconduceva le azioni elettrodinamiche all'azione mutua dei magneti elementari suscitati dalla corrente in ogni conduttore
- Cioè secondo Biot ogni conduttore percorso da corrente diventa una sorta di tubo magnetico



- L'11 settembre 1820, alla presentazione del fenomeno scoperto da Ørsted era presente André-Marie Ampère che fino ad allora non si era occupato specificatamente di elettrologia.
- In una settimana Ampère riuscì a formulare una teoria quantitativa completa delle osservazioni di Ørsted ed a porre le basi della teoria matematica dell'elettromagnetismo e il 18 settembre dello stesso anno annunciò alla *Académie des sciences* la scoperta sperimentale delle forze agenti tra correnti che egli definì *azioni elettrodinamiche*.
- Le sue riflessioni partono da due fatti notevoli:
 - La direzione assunta da un ago magnetico in prossimità di una corrente
 - La direzione che assume l'ago per effetto del magnetismo terrestre
- Quindi, ipotizzò Ampère, se la corrente elettrica mostra proprietà magnetiche, allora potrebbe essere possibile incorporare in una unica teoria gli effetti della corrente e il geomagnetismo



- Nelle relazioni presentate da Ampère tra il 18 e il 30 ottobre 1820 sono raccolte in successione le conclusioni cui pervenne. In particolare il suo approccio unitario è così descritto:

L'azione mutua fra un conduttore percorso da corrente elettrica ed un magnete, scoperta da Ørsted, mi ha fatto comprendere quella che si genera tra due correnti, fra il globo terrestre ed una corrente, nonché la maniera in cui l'elettricità produce i fenomeni dovuti ai magneti

- Le riflessioni di Ampère, come da lui riportato, derivano da due osservazioni:

- Un ago magnetico disposto sopra o sotto un conduttore situato orizzontalmente nella direzione del meridiano magnetico, una volta che il conduttore è percorso da corrente, abbandona la condizione di equilibrio nord-sud disponendosi perpendicolarmente alla corrente
- È possibile comprendere tale fatto a condizione che il globo terrestre sia riguardabile come una grande pila voltaica che alimenta un circuito chiuso

§ III. De l'Action mutuelle entre un conducteur électrique et un aimant.

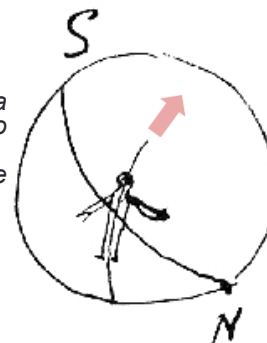
C'est cette action découverte par M. Ørsted, qui m'a conduit à reconnaître celle de deux courans électriques l'un sur l'autre, celle du globe terrestre sur un courant, et la manière dont l'électricité produisait tous les phénomènes que présentent les aimans, par une distribution semblable à celle qui a lieu dans le conducteur d'un courant électrique, suivant des courbes fermées perpendiculaires à l'axe de chaque aimant. Ces vues, dont la plus grande partie n'a été que plus tard confirmée par l'expérience, furent communiquées à l'Académie royale des Sciences, dans sa séance du 18 septembre 1820; je vais transcrire ce que j'en ai dit dans cette séance, sans autres changemens que la suppression des passages qui ne seraient qu'une répétition de ce que je viens de dire, et en

- Da queste riflessioni Ampère origina una interpretazione innovativa dell'esperienza di Ørsted e la descrive nella maniera:

... l'idea più semplice e quella che si presenterebbe subito a chi volesse spiegare questa direzione costante dell'ago, non sarebbe quella di ammettere nella Terra una corrente elettrica, in una direzione tale che il Nord si trovasse alla sinistra di un uomo che, sdraiato sulla sua superficie in modo da avere il viso rivolto verso il lato dell'ago, riceverebbe questa corrente nella direzione dai suoi piedi alla sua testa, e concludere che si dispone da Est ad Ovest, in direzione perpendicolare al meridiano magnetico?

- Pertanto Ampère conclude:

La corrente terrestre, qualora esista, ritornando su se stessa formerà come una cintura continua intorno alla Terra e dirige ovunque l'ago magnetico perpendicolarmente alla sua propria direzione. Questa direzione indica sulla Terra una linea che procede in maniera che il polo dell'ago, a sinistra della corrente, si trovi costantemente orientato verso il Nord e diretto quindi lungo il meridiano magnetico



- A questo punto Ampère supera il riferimento al geomagnetismo e generalizza le sue conclusioni:
 - *Se le correnti elettriche sono la causa dell'azione direttrice della Terra, le correnti elettriche saranno la causa dell'azione di un magnete su un altro; da cui segue che un magnete deve essere guardato come un assemblaggio di correnti elettriche che hanno luogo in piani perpendicolari al suo asse ...*
- Cioè, secondo questa ipotesi, non è il conduttore percorso da corrente che diventa un magnete, ma il magnete è un complesso di correnti
- Infatti, se in un magnete esiste tale insieme di correnti circolari giacenti in piani perpendicolari all'asse, tutte dirette nello stesso senso, su un'eventuale corrente non disposta parallelamente alle altre agiscono delle azioni elettrodinamiche che tendono a rendere questa corrente parallela alle altre

ÉLECTROMAGNÉTISME ET ÉLECTRODYNAMIQUE. 63

Maintenant, si des courants électriques sont la cause de l'action directrice de la Terre, des courants électriques seront aussi la cause de celle d'un aimant sur un autre aimant; d'où il suit qu'un aimant doit être considéré comme un assemblage de courants électriques qui ont lieu dans des plans perpendiculaires à son axe, dirigés de manière que le pôle austral de l'aimant, qui se porte du côté du Nord, se trouve à droite de ces courants, puisqu'il est toujours à gauche d'un courant placé hors de l'aimant, et qui lui fait face dans une direction parallèle, ou plutôt ces courants s'établissent d'abord dans l'aimant suivant les courbes fermées les plus courtes, soit de gauche à droite, soit de droite à gauche, et alors la ligne perpendiculaire aux plans de ces courants devient l'axe de l'aimant, et ses extrémités en deviennent les pôles. Ainsi, à chacun des pôles d'un aimant, les courants électriques dont il se compose sont dirigés suivant des courbes fermées concentriques; j'ai imité cette disposition autant qu'il était possible avec un courant électrique, en en pliant le fil conducteur en spirale; cette spirale était formée avec un fil de laiton et terminée par deux portions rectilignes de ce même fil, qui étaient renfermées dans deux tubes de verre (1), afin qu'elles ne communiquassent pas entre elles et pussent être attachées aux deux extrémités de la pile.

Suivant le sens dans lequel on fait passer le courant dans une telle spirale, elle est en effet fortement attirée ou repoussée par le pôle d'un aimant qu'on lui présente

(1) J'ai depuis changé cette disposition, comme je le dirai ci-après.

- Per provare che una corrente disposta lungo un percorso circolare agisce come un magnete, nella stessa comunicazione all'Académie, Ampère annunciò di voler costruire *delle eliche di filo d'ottone per imitare gli effetti dei magneti*. Quindi riferì alla Académie le sue conclusioni:
 - *In ogni polo di un magnete circolano correnti elettriche chiuse e concentriche; per imitarle ho piegato un filo di ottone a spira le cui estremità venivano collegate alla pila [...]. Secondo il verso di circolazione della corrente nella spira, essa viene fortemente attratta o respinta da un magnete avente il proprio asse perpendicolare al piano della spira, quando la corrente che la percorre e quella del polo magnetico abbiano lo stesso senso o quello opposto. Se in luogo del magnete si pone un'altra spira, si verificano le stesse attrazioni e repulsioni [...]; così ho scoperto che due correnti elettriche si attirano quando hanno lo stesso verso mentre si respingono nel caso contrario*

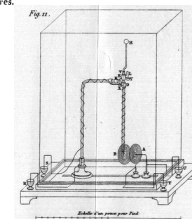
(60)

les plus courtes, soit de gauche à droite, soit de droite à gauche, et alors la ligne perpendiculaire aux plans de ces courants devient l'axe de l'aimant, et ses extrémités en deviennent les pôles. Ainsi, à chacun des pôles d'un aimant, les courants électriques dont il se compose sont dirigés suivant des courbes fermées concentriques; j'ai imité cette disposition autant qu'il était possible avec un courant électrique, en en pliant le fil conducteur en spirale; cette spirale était formée avec un fil de laiton et terminée par deux portions rectilignes de ce même fil, qui étaient renfermées dans deux tubes de verre (1), afin qu'elles ne communiquassent pas entre elles, et pussent être attachées aux deux extrémités de la pile.

Suivant le sens dans lequel on fait passer le courant dans une telle spirale, elle est en effet fortement attirée ou repoussée par le pôle d'un aimant qu'on lui présente de manière que la direction de son axe soit perpendiculaire au plan de la spirale, selon que les courants électriques de la spirale et du pôle de l'aimant sont dans le même sens ou en sens contraire. En remplaçant l'aimant par une autre spirale dont le courant soit dans le même sens que le sien, on a les mêmes attractions et repulsions; c'est ainsi que j'ai découvert que deux courants électriques s'attirent quand ils ont lieu dans le même sens, et se repoussent dans le cas contraire.

En remplaçant ensuite, dans l'expérience de l'action mutuelle d'un des pôles d'un aimant et d'un courant dans un fil métallique plié en spirale, cette spirale

(1) J'ai depuis changé cette disposition, comme je le dirai ci-après.

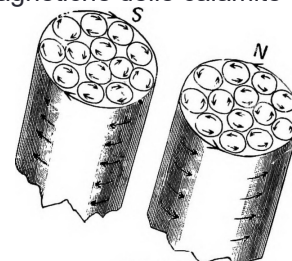


- A dispetto dei tentativi, in parte anche maldestri, di persuadere l'ambiente scientifico della *Académie* a ricondurre i fenomeni magnetici a quelli dell'elettricità, le ipotesi di Ampère continuavano ad essere considerate con estrema diffidenza se non con ostilità
- Ampère provò a convincere i suoi colleghi replicando le esperienze il 18 settembre 1820 davanti a Augustin-Jean Fresnel e a Cesar Mansuète Deprez, il 22 a casa di Poisson, quattro giorni dopo davanti a Friedrich Heinrich Alexander Freiherr von Humboldt; il successivo 27 fu Laplace a seguirle in silenzio
- Lo sforzo però fu inutile, Arago, Biot, Laplace ed altri fisici francesi si posero su posizioni diverse, sostenendo che la forza agente nell'esperienza di Ørsted era una forza magnetica, ovvero una azione destinata a svilupparsi solo tra corpi magnetizzati



Le correnti microscopiche

- Interpretare il magnetismo in termini di corrente elettrica comportava concepire le azioni magnetiche o elettromagnetiche come azioni tra correnti
- Tuttavia era difficile comprendere la natura delle correnti anulari attorno all'asse dei magneti e tale ipotesi suscitava dubbi ben più grandi nell'ambito dell'*Académie*
- Nel gennaio 1821 Fresnel suggerì ad Ampère l'idea di correnti circolanti attorno a ciascuna molecola; secondo Fresnel questa soluzione rendeva conto in modo più conveniente delle proprietà magnetiche delle calamite
- Ampère accettò la proposta di Fresnel dopo che fu presentata il 15 gennaio 1821 e da quel momento la considerò un punto fermo del modello elettrico in cui aveva inserito il magnetismo, siccome permetteva di ridurre ad un medesimo schema microscopico l'elettricità e la costituzione corpuscolare della materia



- In una successiva nota del 5 giugno 1821, Fresnel tornò sulla questione chiedendosi come mai, oltre a produrre le proprietà magnetiche delle calamite, le correnti che secondo Ampère percorrono la massa dei magneti, non produrrebbero alcun riscaldamento
- Tuttavia lo stesso Fresnel nella nota osservò che l'assenza di calore nel magnete non costituisce una difficoltà una volta introdotta l'ipotesi delle correnti molecolari, poiché non era in base alle scarse conoscenze del momento sulla costituzione della materia e sull'effetto termico prodotto dal passaggio della corrente, che l'elettricità sviluppi calore quando circola attorno alle molecole
- Ampère non entrò nel merito di questa questione essendo consapevole di non disporre della possibilità di accedere sperimentalmente a tali correnti e di non avere adeguati strumenti matematici che ne corroborassero l'ipotesi

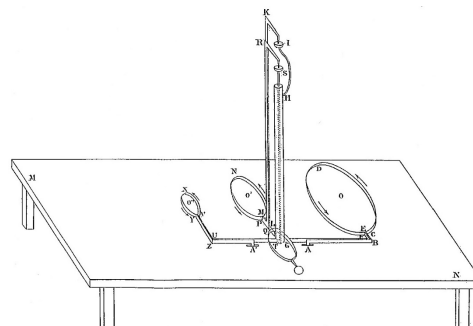
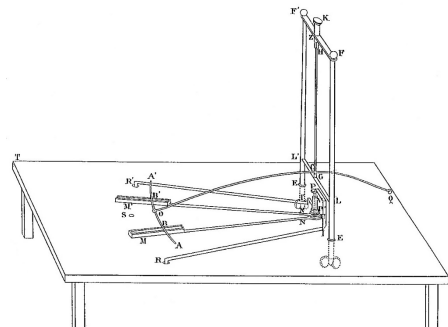
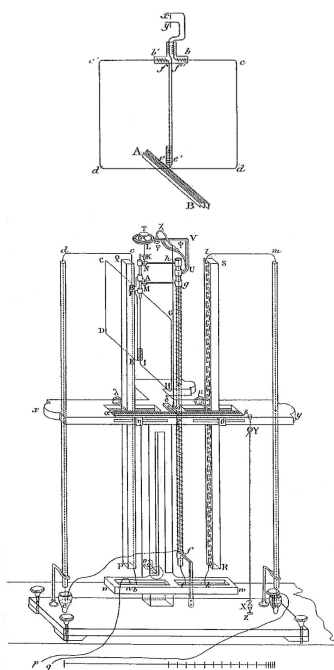
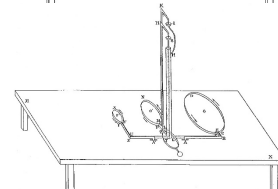
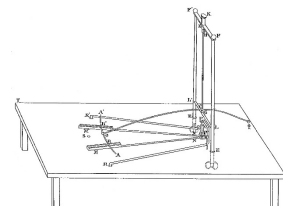
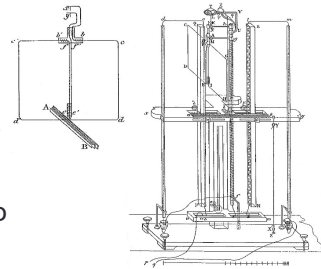
La forza elettrodinamica

- Subito dopo i primi esperimenti elettrodinamici, Ampère si propose di esprimere attraverso una formula il valore della forza che si esercita tra due elementi di corrente, in modo da poterne dedurre la forza che si manifesta tra due parti di conduttori, una volta specificate forma e dimensioni
- Il concetto di elemento di corrente idl applicato all'elemento di conduttore dl fu adoperato da Ampère fin dal 9 ottobre 1820. Si tratta di un utile strumento che, partendo dal valore dell'azione elementare, consente di stabilire *la forza nei casi più complessi*
- Nonostante le critiche che si attirarono gli elementi di forza, conduttori e correnti, vennero successivamente ampiamente impiegati con profitto nell'elettromagnetismo. Tra gli altri, Laplace ne fece un uso esteso

- Naturalmente Ampère non poteva sperimentare su elementi di corrente, per cui, dopo aver tentato di dedurre il risultato attraverso misure fatte correnti finite di forma e dimensioni diverse, optò per un più accessibile metodo di sua concezione detto *di equilibrio* o *di riduzione a zero*

- Ampère pose le basi della sua teoria attraverso quattro esperimenti dimostranti che:

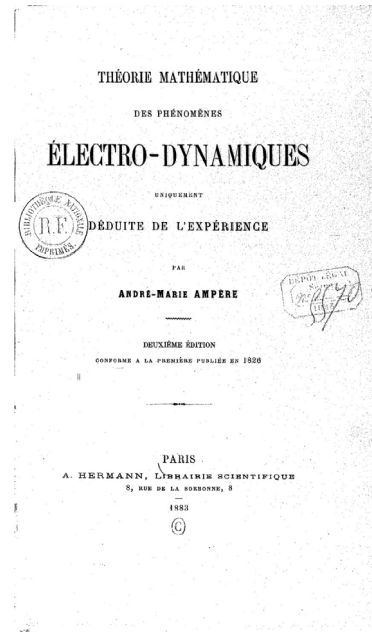
- Due correnti uguali di direzioni opposte vicine non esercitano alcuna azione di un ago magnetico
- Non si ottiene alcuna azione anche se uno dei fili metallici del primo esperimento è piegato e curvato in piccole sinuosità
- Un conduttore in grado di muoversi solo nella direzione della sua lunghezza e percorso da una corrente che entra ed esce in punti fissi dello spazio, non è sensibile a qualsiasi corrente chiusa posta in prossimità
- Si considerino 3 correnti circolari complanari con raggi R' , R'' , R''' , con i centri O' , O'' , O''' disposti su una stessa retta, e con $R'/R'' = R''/R''' = O'O''/O''O'''$. Allora, sia che la stessa corrente percorra in senso orario tutti e tre gli anelli, sia che la stessa corrente percorra in senso orario gli anelli esterni e antiorario quello interno, l'anello centrale resta in equilibrio se gli anelli esterni sono in quiete



- La formula dedotta per la forza f tra due elementi di corrente è

$$f = \frac{idl i' dl'}{r^2} \left(\cos \vartheta - \frac{3}{2} \cos \delta \cos \delta' \right)$$

- in cui i e i' sono le intensità delle correnti negli elementi infinitesimi dl e dl' , ϑ è l'angolo formato tra i due elementi infinitesimi, δ e δ' gli angoli formati rispettivamente da dl e dl' con la congiungente i loro punti medi
- Da tale relazione Ampère ricavò agevolmente le relazioni trovate sperimentalmente da Biot e Savart ed inoltre dedusse le legge di Coulomb per le azioni magnetostatiche tra magneti, considerati come due complessi di correnti

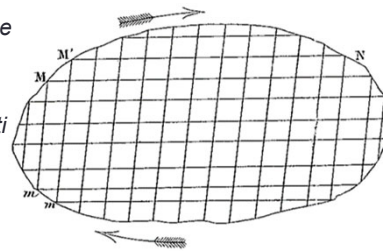


Il teorema di equivalenza

- Nelle memorie presentate a settembre 1820 all'*Académie* Ampère aveva descritto i poli di un magnete come costituiti da correnti elettriche chiuse concentriche all'asse del magnete, aggiungendo:
 - Questa disposizione l'ho imitata piegando a spirale un filo conduttore di ottone le cui estremità rettilinee vengono collegate ad una pila voltaica*
- Inoltre la bobina così formata era
 - fortemente attratta o respinta dal polo di un magnete secondo il senso in cui la percorreva la corrente. La forza risulta attrattiva se le correnti dell'elica hanno lo stesso senso delle correnti del polo, e repulsiva quando le correnti sono di senso contrario. Sostituendo il magnete con un altro avvolgimento si hanno le stesse attrazioni e repulsioni*
- La scoperta di Ampère si può quindi sintetizzare affermando che le estremità di due bobine si riscontrano gli stessi fenomeni di attrazione e repulsione che hanno luogo tra le estremità di due magneti. Cioè la bobina agisce come un magnete temporaneo



- Queste valutazioni portarono al principio di identità tra un circuito piano percorso da correnti e uno strato di materiale magnetico, oggetto di una comunicazione all'*Académie* del 28 novembre 1825
- Consideriamo un sottile strato di materiale magnetico di superficie S , sul quale siano distribuiti fluidi magnetici, australe su una faccia e boreale sull'altra. Se ad ogni molecola magnetica si immagina di sostituire un piccolissimo circuito che occupi un'area infinitesima, si costituiranno altrettanti *piccoli circuiti in piani paralleli equidistanti*.
- Ampère nella corrispondente memoria scrive:
 - *Suddividiamo la superficie S di un circuito piano qualsiasi MNm in elementi infinitamente piccoli con rette tagliare da un secondo sistema di parallele ad angoli retti con le prime ed immaginiamo che intorno a ciascuna di queste aree infinitamente piccole circolino delle correnti dirette nello stesso verso della corrente MNm . Tutte le parti di queste correnti che si troveranno lungo le linee rette si elideranno; perché ve ne saranno due di segno contrario che percorreranno la stessa retta; resteranno in definitiva, solo le parti curvilinee di queste correnti, es. MM' , mm' , le quali formeranno il circuito totale MNm .*



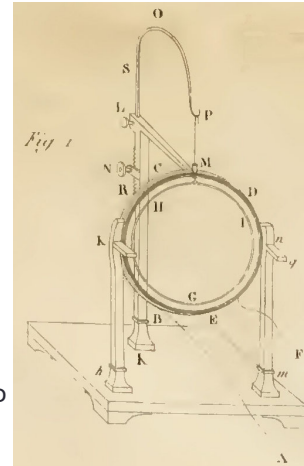
- Pertanto, conclude Ampère, la superficie S una volta rivestita di molecole del *cosiddetto* fluido magnetico è del tutto equivalente ad un'altra ricoperta da correnti elettriche



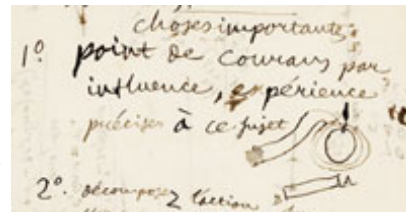
- Questa proprietà conduce a riconoscere che l'azione di un magnete può essere sostituita da quella di un circuito che abbia lo stesso contorno del magnete permanente e sia percorso dalla corrente in senso orario, rispetto all'osservatore che guarda lo strato magnetico dal lato sud
- Il principio di equivalenza appena descritto continua ad essere presente sia perché risulta legittimato da successive prove sperimentali, sia perché James Clerk Maxwell lo trasformò nella prima legge della circuitazione, detta anche, *legge di Ampère*

La ricerca della simmetria

- La scoperta di Ørsted della produzione di una azione magnetica da parte di un filo percorso da corrente indusse i ricercatori, sulla base di un principio di simmetria, a cercare il fenomeno opposto, ovvero la generazione di una corrente attraverso il magnetismo. Molti si erano avvicinati alla soluzione di questo problema più o meno consapevolmente.
- Con l'obiettivo di identificare questo fenomeno, Ampère nel luglio 1821 costruì una coppia di bobine isolate avvolte in aria poste una vicina all'altra, ma non in contatto elettrico, una mobile e chiusa, l'altra fissa ed alimentata da una batteria.
- Ampère si aspettava che la corrente del circuito fisso eccitasse per induzione una corrente in quello mobile, per cui, accostandovi una calamita, si sarebbe dovuto muovere.
- L'esperimento fallì come riportò all'*Académie* il 16 settembre 1822 Ampère *probabilmente a causa del magnete troppo debole*



- L'anno successivo Ampère ripeté l'esperimento con un apparato simile ma impiegando un potente magnete a ferro di cavallo fornitogli dal museo di Ginevra
- In questa circostanza il circuito mobile sottoposto all'influenza della corrente nel circuito fisso venne *attratto e respinto alternativamente dal magnete*, al momento della chiusura e dell'apertura del circuito fisso. L'esperienza metteva in luce in maniera inequivocabile l'effetto induttivo, tuttavia Ampère valutò il risultato con estrema prudenza:

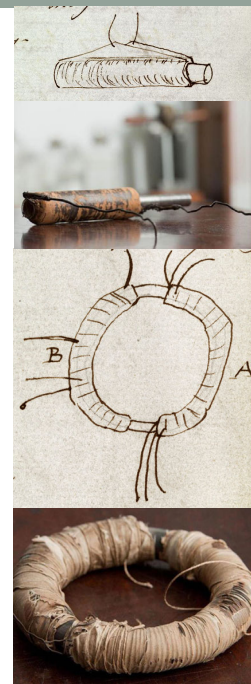


- L'esperienza [...] non lascerebbe dubbi sulla produzione di correnti elettriche per influenza se non ci fosse il sospetto che il filo di rame del circuito mobile potesse contenere un po' di ferro. Non si è osservato tuttavia alcuna azione fra questo circuito e il magnete prima che la corrente percorresse l'avvolgimento [...] ecco perché io penso che questa esperienza sia sufficiente per provare la produzione di elettricità per influenza; per prevenire ogni obiezione mi propongo di ripeterla con un circuito formato da un metallo non magnetico purissimo [...]
- Da tale dichiarazione emergono le perplessità di Ampère, nonostante l'evidenza del fenomeno induttivo. Non fece altri tentativi oltre questi.

- Michel Faraday, assunto come assistente di Davy presso la *Royal Society* nel 1812, e successivamente divenuto *Fuller Professor* presso tale istituzione londinese, probabilmente ignorando i risultati di Ampère, aveva svolto esperimenti ricercando l'effetto induttivo nel 1822 e li aveva ripetuti senza successo, nel 1825.
- In sostanza Faraday pensava che come, una corrente modifica lo stato magnetico di una calamita, così una calamita deve modificare lo stato di una corrente
- Ovvero si aspettava un fenomeno statico, pertanto gli sfuggì il fenomeno istantaneo in due esperimenti eseguiti nel 1825, nel primo faceva scorrere un magnete entro un solenoide collegato ad un rudimentale galvanometro, nella seconda, faceva passare una corrente in una spira prossima ad un'altra collegata al galvanometro

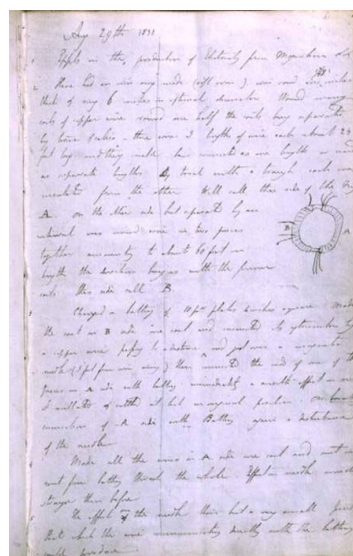


- Nel 1831 Faraday riprese gli esperimenti ma, a differenza dei primi tentativi in cui operava con un conduttore sotto l'effetto di un magnete, Faraday sviluppò un progetto fondato sulla ricerca di un effetto induttivo tra correnti elettriche
- Per questo realizzò un dispositivo statico costituito da due bobine isolate avvolte inizialmente attorno ad un pezzo di legno, una bobina era collegata ad una batteria e l'altra ad un rudimentale galvanometro. Alla chiusura del primo circuito l'ago del galvanometro deviava lievemente e poi tornava nella posizione di equilibrio; all'apertura il fenomeno si ripeté con l'ago che defletteva nella direzione opposta
- L'effetto oscillante dell'ago del galvanometro lo lasciò perplesso, inoltre l'uso del supporto in legno mostra come Faraday all'inizio sottovalutasse la funzione del ferro come elemento magnetico
- Alla luce del risultato controverso ma comunque incoraggiante, Faraday sostituì il supporto in legno con un anello di ferro dolce e il 29 agosto 1831 alla chiusura ed apertura del circuito primario alimentato da una batteria di pile, l'effetto ottenuto nel secondario collegato al galvanometro fu decisamente più sensibile sebbene ancora transitorio

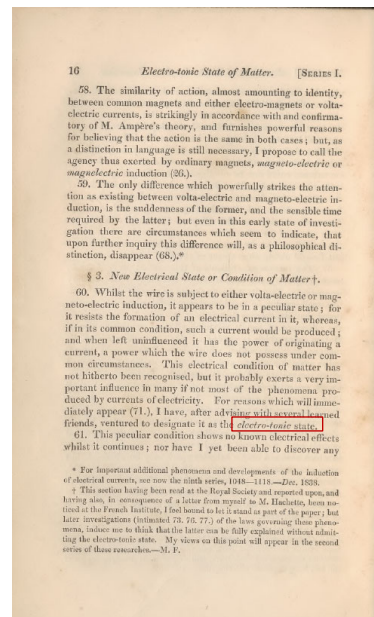




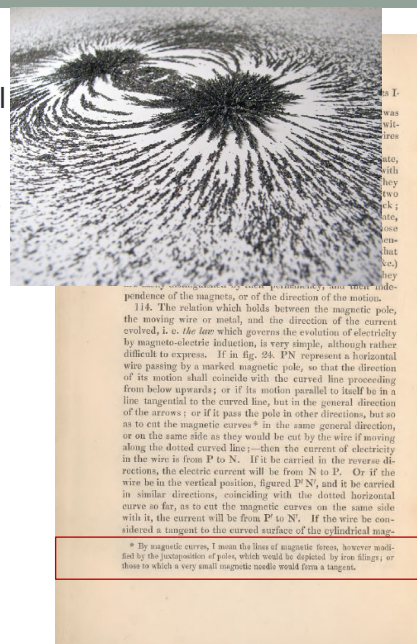
1. Esperimenti sulla produzione di Elettricità da Magnetismo, ecc. ecc.
2. Fatto realizzare un anello di ferro (ferro dolce), di sezione rotonda spessa 7/8 pollici e di 6 pollici di diametro esterno. Avvolte molte spire di filo di rame intorno a una metà, le spire essendo separate da spago e calico: c'erano 3 lunghezze di filo ciascuna lunga circa 24 piedi e potevano essere collegate come un'unica lunghezza o utilizzate come lunghezze separate. Per prova con un trogolo ciascuno è stato isolato dall'altro. Chiamerò questo lato dell'anello A. Dall'altro lato, ma separato da un intervallo, era avvolto del filo in due pezzi insieme per una lunghezza di circa 60 piedi, la direzione essendo come con le spire precedenti; chiameremo B questo lato.
3. Caricata una batteria di 10 pr. piatti di 4 pollici quadrati. Fatta un'unica bobina sul lato B e collegate le sue estremità con un filo di rame che passa a distanza (3 piedi dall'anello di ferro) e poco sopra un ago magnetico. Quindi collegate le estremità di uno degli avvolgimenti sul lato A con la batteria; immediatamente un effetto sensibile sull'ago. Oscillò e alla fine si stabilì nella posizione originaria. All'interruzione del collegamento del lato A con la batteria di nuovo un disturbo dell'ago.
4. Fatta un'unica bobina con i fili del lato A e inviata corrente dalla batteria attraverso il tutto. L'effetto sull'ago è molto più forte di prima.
5. L'effetto sull'ago quindi è solo una piccolissima parte di quello che potrebbe produrre il filo se fosse direttamente collegato con la batteria.



- In una memoria presentata il 24 Novembre 1831 Faraday provò a dare una prima spiegazione del fenomeno induttivo osservato, introducendo un nuovo stato della materia, definito *stato elettrotonico*, che secondo lui si originava in questi processi
- Faraday ipotizzò che, al passaggio della corrente nel circuito induttore, si instaurasse nel filo del circuito indotto questo particolare stato che si contrapponeva al flusso della corrente di induzione, interrompendola rapidamente. Non appena si apriva il circuito induttore, lo stato elettrotonico cessava e si generava la corrente inversa osservata. A dispetto di tutti i suoi sforzi, comunque, Faraday non riuscì a ottenere una caratterizzazione fisica più specifica di tale stato.
- Il concetto di stato elettrotonico si consolidò nell'elettromagnetismo del XIX secolo e lo stesso Maxwell ritenne opportuno formalizzare tale concetto

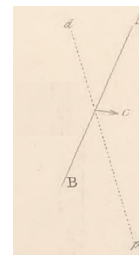
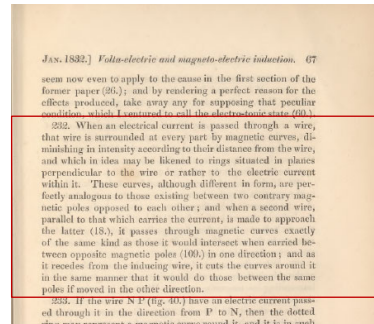


- Nei due mesi successivi Faraday continuò a fare ipotesi sull'origine dell'induzione e in una memoria del 12 gennaio 1833 introdusse il concetto di *linea di forza*
- Faraday, attraverso la tecnica della limatura di ferro, osservava che le linee si dispongono secondo percorsi circolari su un piano normale ad filo percorso da corrente, deducendo che la corrente esercita nel suo intorno forze tangenziali anziché forze agenti lungo linee rette
- Faraday definisce le linee di forza:
 - *Per curve magnetiche intendo le linee di forze magnetiche, comunque modificate dalla giustapposizione di poli, che potrebbero essere rappresentate da limatura di ferro; o quelli a cui un ago magnetico molto piccolo formerebbe una tangente*

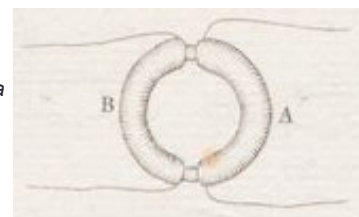
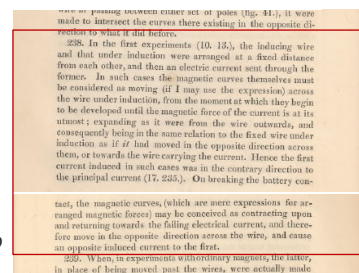


- Fino a questo punto le linee assumono solo un carattere geometrico, rappresentando le linee lungo le quali si esplica la forza magnetica
- Successivamente Faraday abbandonò il confuso concetto di stato elettrotonico attribuendo una valenza dinamica alle linee di forza, ritenute elemento necessario e sufficiente a descrivere il processo induttivo

- Quando una corrente elettrica viene fatta passare attraverso un filo, quel filo è circondato in ogni sua parte da curve magnetiche, di intensità decrescente secondo la loro distanza dal filo, e che in teoria possono essere paragonate ad anelli posti in piani perpendicolari al filo o meglio alla corrente elettrica al suo interno. Queste curve, sebbene di forma diversa, sono perfettamente analoghe a quelle esistenti tra due poli magnetici contrari tra loro opposti; e quando un secondo filo, parallelo a quello che porta la corrente, viene fatto avvicinare a quest'ultimo, passa per curve magnetiche esattamente dello stesso tipo di quelle che intersecherebbe se portato tra poli magnetici opposti in una direzione; e siccome si allontana dal filo induttore, taglia le curve intorno ad esso nello stesso modo in cui farebbe quelle tra gli stessi poli se spostato nell'altra direzione



- Questa spiegazione giustificava qualitativamente la formazione di correnti indotte nei casi in cui vi era un moto relativo tra conduttori e magneti.
- In assenza di tale moto, come nell'esperienza fatta a fine agosto 1831, Faraday forniva la spiegazione seguente
- Nei primi esperimenti, il filo induttore e quello sotto induzione erano situati a una distanza fissa l'uno dall'altro, e una corrente elettrica era inviata attraverso il primo. In tali casi le curve magnetiche stesse devono essere considerate come se fossero in movimento (se posso usare l'espressione) attraverso il filo per induzione, dal momento in cui iniziano a svilupparsi fino a quando la forza magnetica della corrente è massima; espandendosi per così dire dal filo verso l'esterno, e di conseguenza trovandosi nella stessa relazione con il filo fisso sotto induzione come se si fosse spostato nella direzione opposta attraverso di essi, o verso il filo che porta la corrente. Quindi la prima corrente indotta in tali casi era in direzione contraria alla corrente principale. Interrompendo il contatto della batteria, le curve magnetiche (che sono semplici espressioni per descrivere le forze magnetiche) possono essere concepite come se si contraessero, perciò si muovono nella direzione opposta intorno al filo inducente e causano una corrente indotta opposta alla prima.



- Nel 1851, Faraday rilevò che le linee di forza prodotte da un magnete permanente sono chiuse e inoltre verificò che una spira che collega un polo di un magnete col punto medio tra i due poli, quando compie un giro completo attorno al magnete, taglia una sola volta tutte le linee di forza di questo e, indipendentemente dalla grandezza e forma della spira, tale rotazione determina il passaggio in essa della stessa quantità di elettricità
- Pertanto Faraday propose che le linee di forza potessero costituire, al di là di una rappresentazione grafica, uno strumento di misura dell'intensità della forza *attraverso l'addensarsi e il diradarsi delle linee di forza, cioè mediante il loro numero nello spazio*

Oct. 1851.] *their definite character.* 349

half of the poles of the bar-magnets, prepared to rotate with the attached wires (3092), as before described, still, upon their revolution, not the slightest action at the galvanometer was perceived; the forces within the magnet and those without perfectly compensating each other.

3121. The definite character of the forces of an invariable magnet, at whatever distance they are observed from the magnet, has been already insisted upon (3109). How much more strikingly does that point come forth now, that, being able to observe within the magnet, we find the same definite character there; every section of the forces, whether within or without the magnet, being exactly of the same amount! The power of a magnet may therefore be easily represented by the effects of any section of its lines of force; and as the currents induced by two different magnets may easily be conducted through one wire, or be, in other ways, compared to each other, so facilities may thus arise for the establishment of a standard amongst magnets.

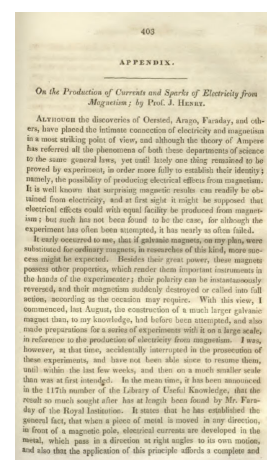
3122. On the other hand, the use of the idea of *lines of force*, which I recommend, to represent the true and real magnetic forces, makes it very desirable that we should find a unit of such force, if it can be attainable, by any experimental arrangement, just as one desires to have a unit for rays of light or heat. It does not seem to me improbable that further research will supply the means of establishing a standard of this kind. In the mean time, for the enlargement of the utility of the idea in relation to the magnetic force, and to indicate its conditions graphically, lines may be employed as representing these units in any given case. I have so employed them in former series of these Researches (2867, 2981, 2984, 2984, &c.), where the direction of the *line of force* is shown at once, and the relative amount of force, or of lines of force in a given space, indicated by their concentration or separation, *i. e.* by their number in that space.

Such a use of unit lines involves, I believe, no error either in the direction of the polarity or in the amount of force indicated at any given spot included in the diagrams.

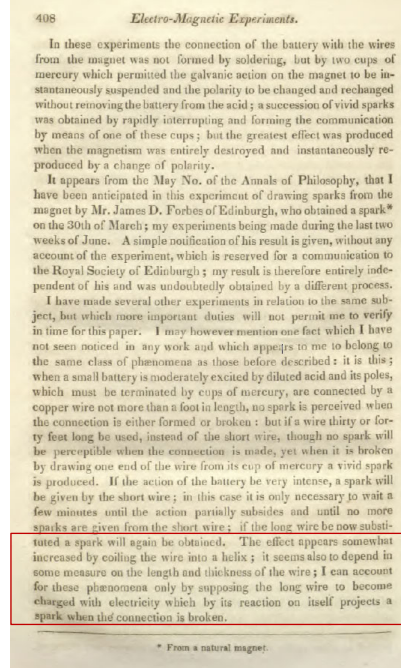
3123. The currents produced in wires, when they cross lines of magnetic force, are so feeble in intensity (though abundant enough in quantity, as many results show), that a fine wire galvanometer must of necessity offer great obstruction to their passage. Therefore, before entering upon further experimental

L'autoinduzione

- Nel luglio 1832 l'americano Joseph Henry pubblicò un resoconto di alcune esperienze elettriche e magnetiche
- Nella memoria Henry affermava di aver osservato correnti elettriche indotte già dall'agosto del 1830, proclamando la priorità su Faraday della scoperta del fenomeno
- Al di là delle polemiche, la pubblicazione descriveva un interessante risultato:
 - ... quando i poli di una batteria venivano connessi attraverso un filo conduttore isolato di circa 1ft, all'apertura del circuito non si osservavano effetti significativi tuttavia, adoperando un conduttore lungo circa 30ft, all'apertura tra estremi dei conduttori si osservava la formazione di una scintilla lunga e luminosa ...



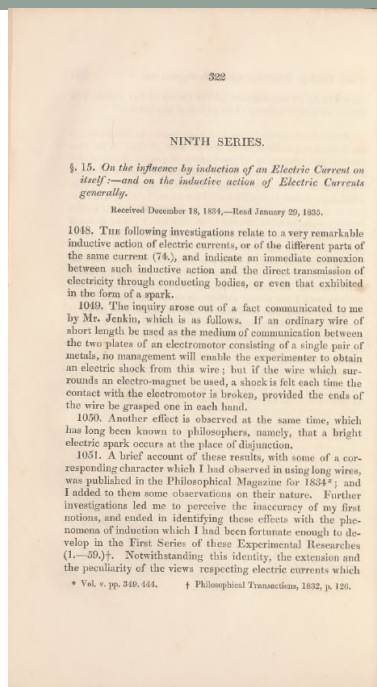
- Henry comprese che si trattava di un fenomeno di natura induttiva, riconducibile alla corrente che agiva su se stessa e pertanto lo chiamo *self-induction electric*.
- Inoltre osservò:
 - *L'effetto pare aumentare avvolgendo il filo come un'elica; inoltre sembra dipendere in qualche misura dalla lunghezza e dallo spessore del filo. Posso spiegare questi fenomeni supponendo che il filo lungo si carichi di elettricità, che reagendo su sé stessa, proietta una scintilla quando il collegamento viene interrotto.*



- In effetti il fenomeno dell'autoinduzione era già stato osservato, ma non compreso, quaranta anni prima di Henry, ma partendo da un ambito di studio completamente differente
- Il medico torinese Eusebio Valli, inserendosi nella polemica tra Galvani e Volta, riferì nel 1792 che dopo aver trasferito una piccola carica elettrica attraverso una catena metallica ad una rana preparata al solito modo, la rana aveva manifestato le contrazioni note che però si riprodussero anche all'interruzione del contatto
- Pure lo stesso Galvani nel 1794 notò il medesimo fenomeno attribuendolo a *un regresso dell'elettricità pel nervo al muscolo onde parti*
- Volta nel novembre 1801 riferì che la contrazione della rana si verifica *talvolta anche al momento che rompendosi il circolo conduttore si arresta la corrente ad un tratto*
- Infine nel novembre 1827 Stefano Marianini presentò all'Accademia Roveretana la *Memoria sopra la scossa che provano gli animali nel momento che cessano di fare arco di comunicazione fra i poli d'un elettromagnete e sopra qualche altro fenomeno fisiologico dell'Elettricità* in cui nega che possa verificarsi una *retroceSSIONE di elettricità nel momento in cui viene interrotta la circolazione*, fornendo tuttavia spiegazioni del fenomeno poco consistenti e non riconducibili ad effetti elettromagnetici

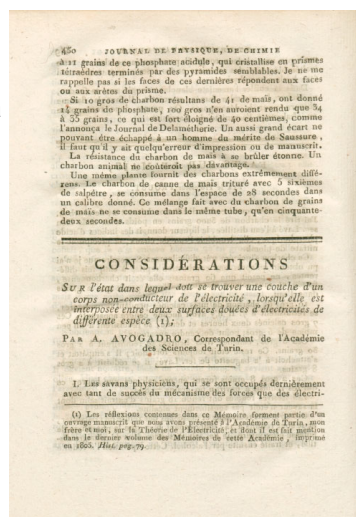


- Senza conoscere le osservazioni di Henry, Faraday riscoprì lo stesso fenomeno nel 1832. Era stato un suo assistente, William Jenkins a riferirgli che avvertiva una intensa scossa quando apriva o chiudeva con le proprie mani un circuito che collegava una pila con una bobina avvolta su un nucleo di ferro
- Faraday approfondì lo studio ed osservò che il filo produceva effetti diversi se era avvolto attorno al nucleo di ferro, o quando era avvolto in aria oppure era semplicemente disteso
- I risultati della ricerca furono riportati nella memoria *On the influence of an Electric Current itself: — and on the inductive action of Electric Currents generally* presentata alla Royal Society il 18 dicembre 1834

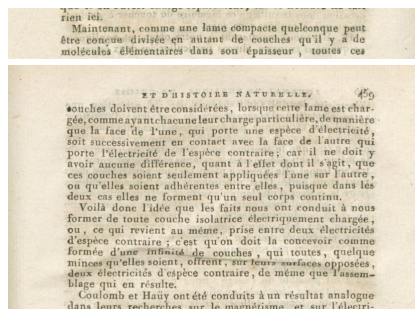


Interazione di contatto

- Agli inizi del XIX secolo, i chimici Amedeo Avogadro e Davy riproposero il meccanismo dell'interazione a contatto, sostituita da quella a distanza a partire dalle ipotesi di Aepinus del 1756 e largamente accettata da ricercatori quali ad esempio Cavendish, Coulomb ed Ampère
- Prima di aver introdotto la distinzione tra atomi e molecole, Avogadro ebbe l'intuizione di un collegamento tra la forza elettrica negli isolanti e l'elettrizzazione molecolare
- Nella memoria del 1806 intitolata *Considérations sur l'état dans lequel doit se trouver une couche d'un corps non-conducteur de l'électricité, lorsqu'elle est interposée entre deux surfaces douées d'électricité de différente espèce*, sono descritti il processo della polarizzazione molecolare e il concetto di azione attraverso un mezzo, in un isolante disposto tra le armature di una bottiglia di Leida



- [...] come lo spessore di una lamina compatta qualsiasi [isolante] può essere concepito diviso in tanti strati in cui vi sono delle molecole elementare [atomi], tutti questi strati devono essere considerati, allorché questa lamina è caricata, come aventi ciascuno una carica particolare, in maniera che la faccia dell'uno, che porta una specie di elettricità, sia successivamente in contatto con la faccia dell'altro che porta l'elettricità della specie contraria [...] Ecco dunque l'idea che i fatti ci hanno condotto a formarci di ogni strato isolante elettricamente carico, o che è lo stesso, di ogni strato preso fra due elettricità di specie contraria; una lamina isolante si deve concepire perciò come formata da un'infinità di strati che, per quanto sottili possano essere, offrono sulle loro superfici opposte, due elettricità di specie contraria [...]



- Tali considerazioni su come agiscono gli isolanti carichi portarono a concepire una azione per il tramite di un mezzo

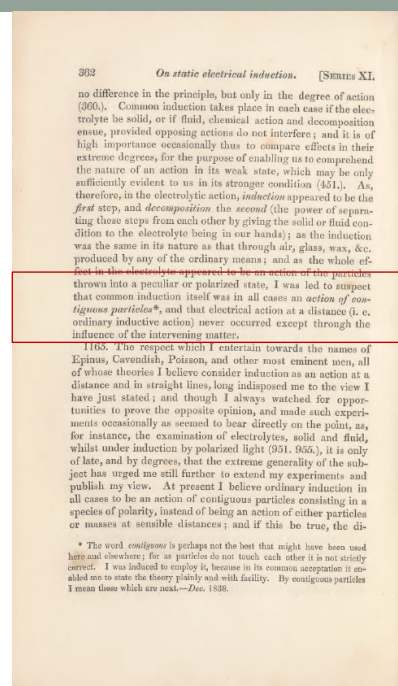
- Alcuni anni dopo, nel 1836, l'italiano Ottaviano Fabrizio Mossotti pubblicò il saggio *Sur les forces qui régissent la constitution intérieure des corps. Aperçu pour servir à la détermination de la cause et des lois de l'action moléculaire*, in cui viene definita la relazione tra elettricità e forze molecolari



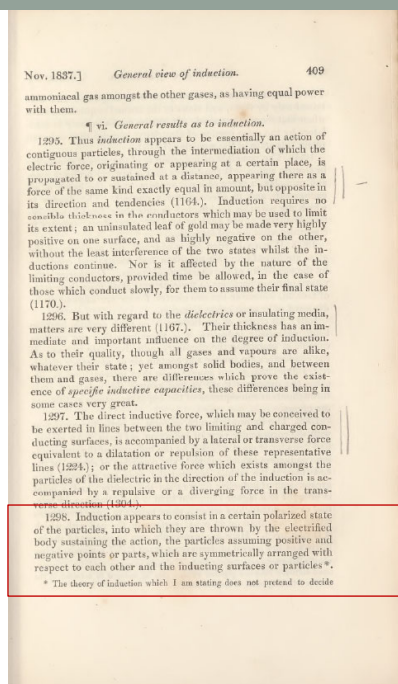
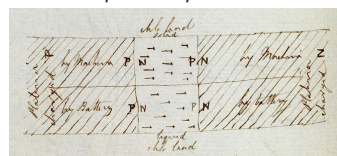
- Per Mossotti le molecole vestendosi ciascuna di un'atmosfera di etere, vengono ad esercitare tra loro delle azioni repulsive a piccolissime distanze ed attrattive a distanze maggiori, come richiedono i fenomeni molecolari
- Fu Faraday a comunicare questo saggio alla Royal Society



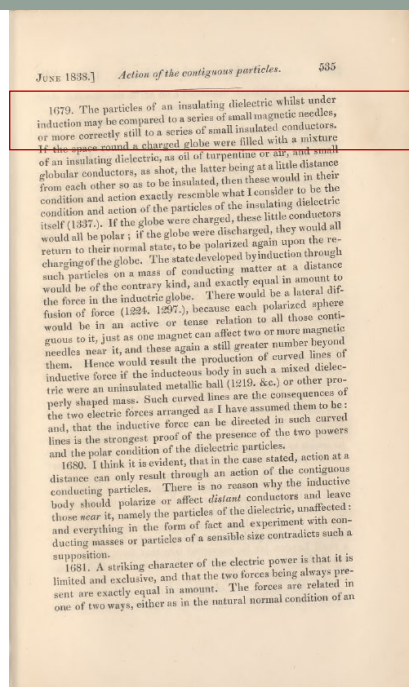
- Faraday non conosceva i lavori di Avogadro ma influenzato dalle proposte di Davy e Mossotti fu condotto a rivedere il concetto di induzione, sospettando che *fosse in tutti i casi un'azione di particelle contigue e che l'azione elettrica a distanza (cioè l'ordinaria azione induttiva) non si ha se non attraverso l'influenza della materia interposta*
- Qui Faraday per *ordinaria azione induttiva* si riferisce all'induzione tra i corpi immersi in un mezzo materiale
- Nella memoria del 1837 *On Induction*, Faraday partì dalla considerazione che la materia conduttiva come quella isolante non può essere elettrizzata per induzione con una carica elettrica di un segno *astraendosi da quella opposta* siccome in ogni fenomeno induttivo si separano cariche uguali ma di segno opposto. Cioè le due elettricità si mostrano sempre associate nei corpi materiali



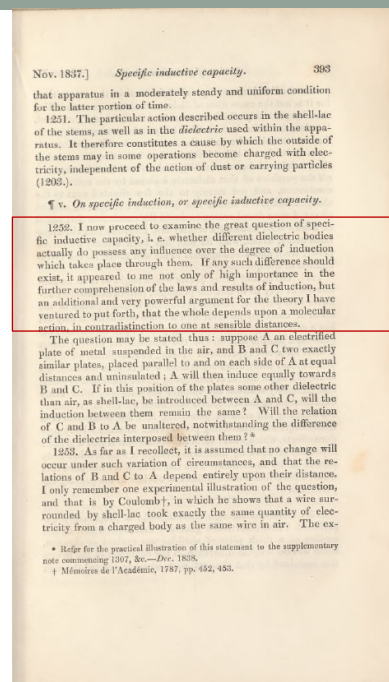
- Questa osservazione, già fatta da Franklin nel 1749, lo indusse a rivedere la materia elettrizzata come costituita da particelle materiali contigue nelle quali sono presenti entrambe le elettricità nella stessa misura, quella positiva da una parte e quella negativa dall'altra
- Pertanto le particelle materiali soggette all'induzione formano dei dipoli elettrici, per cui definì *dielettrici* gli isolanti.
- Infatti successivamente Faraday ritenne opportuno precisare questo concetto:
 - *L'induzione sembra consistere in un certo stato polarizzato delle particelle in cui esse si trovano per la presenza del corpo elettrizzato che sostiene l'induzione; le particelle assumono parti positive e negative, che sono simmetricamente poste l'una rispetto all'altra e rispetto alle superfici o particelle inducenti ...*



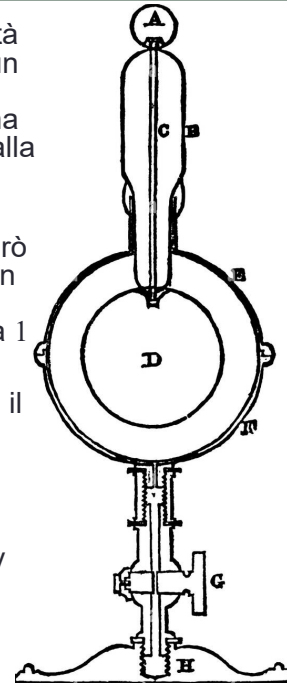
- Il collegamento tra induzione e polarizzazione del mezzo costituiva per Faraday una implicita rappresentazione delle linee di forza elettriche disposte nella regione compresa tra due corpi elettrizzati
- Infatti le molecole polarizzate disposte lungo la direzione dell'azione induttiva portavano a immaginare un insieme di linee di forza elettriche
- Questa visione gli permise di costruire una rappresentazione di tali linee di forza in maniera analoga a quanto fatto nel caso magnetico:
 - *Le particelle di un dielettrico isolante sotto induzione possono essere paragonate ad una serie di piccoli aghi magnetici, o più correttamente ancora ad una serie di piccoli conduttori isolati*
- A questo punto Faraday volle dare forza a questa ipotesi dimostrando sperimentalmente che un'azione induttiva attraverso linee curve avrebbe potuto contrapporsi all'azione a distanza lungo una linea retta, sebbene fosse privo di fondamento il giudizio che conciliava le linee curve con l'azione a contatto



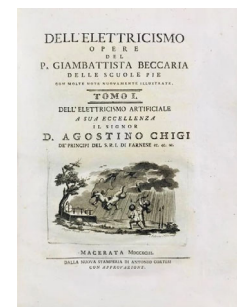
- Lo studio dei fenomeni di polarizzazione dielettrica portò Faraday a studiare in che misura questa coinvolge, in particolare, le particelle dei dielettrici compresi tra le armature dei condensatori
- A tale scopo avviò una ricerca volta a comprendere
 - *se diversi corpi dielettrici possedano effettivamente una qualche influenza sul grado di induzione che avviene attraverso di essi. Se dovesse esistere una tale differenza, mi è sembrato non solo di grande importanza nell'ulteriore comprensione delle leggi e dei risultati dell'induzione, ma un argomento aggiuntivo e molto potente per la teoria che mi sono avventurato a presentare, che il tutto dipende da un'azione molecolare, in contrasto con quella a distanze sensibili.*



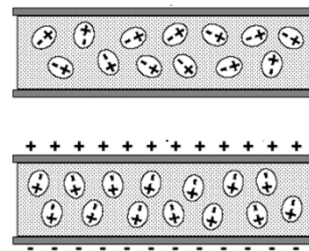
- Faraday osservò che effettivamente la quantità di elettricità immagazzinata per induzione in un condensatore sferico con armature concentriche caricato tramite la corrente di una pila dipende, a parità di tensione applicata, dalla natura degli isolanti usati per separare le armature
- Nel procedimento sperimentale Faraday misurò per prima la quantità di carica q_0 accumulata in un condensatore con dielettrico l'aria, cui corrispondeva una capacità C_0 posta uguale a 1
- Quindi misurava la carica $q_1, q_2, \dots, q_N$ accumulata nel medesimo dispositivo quando il dielettrico era fatto di diverse sostanze, come gommalacca o zolfo, ottenendo che le corrispondenti capacità $C_1, C_2, \dots, C_N$ erano maggiori dell'unità
- Questi valori esprimevano quello che Faraday denominò *capacità induttiva specifica* delle diverse sostanze e che Ludwig Boltzmann ridefinì *costante dielettrica relativa*



- L'influenza della natura dei dielettrici sulla capacità dei condensatori era in effetti già stata oggetto di sperimentazioni nel 1753 da Beccaria che, in una pubblicazione del 1758, riporta l'osservazione dei diversi gradi di accumulazione delle cariche elettriche quando si impiegavano quali isolanti nei quadri di Franklin, differenti materiali quali zolfo, ceralacca, ecc.
- Analoghe indagini furono svolte da Cavendish tra il 1771 e il 1775 che arrivò a valutare la capacità induttiva specifica di alcuni isolanti. I risultati di tali ricerche vennero pubblicate solo nel 1879 ad opera di Maxwell
- Comunque, fino alle ipotesi formulate da Faraday gli effetti elettrici, quali ad esempio la forza tra due corpi magnetizzati, venivano trattati in relazione alla posizione dei corpi, la loro dimensione e la loro carica, senza considerare il mezzo in cui erano immersi, in accordo alla tradizione newtoniana dell'azione a distanza



- La proposte di Faraday destarono molteplici riserve nel mondo scientifico a causa dell'introduzione di concetti poco comprensibili perché privi di una specifica identità quali, ad esempio le linee di forza magnetiche ed elettriche e l'azione di contatto
- Tale problematica era oltremodo accentuata dalle difficoltà incontrate da Thomson nella matematizzazione delle linee di forza
- Le posizioni critiche si accentuarono a partire dal 1839 a seguito dell'interpretazione di Faraday dell'azione induttiva attraverso le particelle del mezzo dielettrico
- Faraday rappresentava i dielettrici come un insieme di particelle conduttrici immerse nel mezzo isolante che, se il materiale è compreso tra le armature di un condensatore carico, si dispongono ordinatamente lungo le linee di forza
- Pertanto l'azione induttiva non si trasmette direttamente da una armatura all'altra ma da una particella a quella contigua del mezzo isolante



- Per contigua Faraday intendeva vicina, siccome era consapevole che un contatto diretto tra le particelle poteva configurare uno stato di conduzione
- Pertanto, consapevole che l'interazione di contatto ipotizzata, fosse difficilmente inquadrabile in un piano razionale, ritenne opportuno precisare:
 - *Supponiamo che sia possibile per una particella elettrizzata [...] trovarsi al centro di un vuoto avente il diametro di un pollice, niente a mio avviso, impedisce che essa agisca alla distanza di mezzo pollice su tutte le particelle che delimitano la superficie interna della sfera, e con una forza data dalla ben nota legge del quadrato della distanza*
- L'approccio ambiguo di Faraday che non ripudiava l'azione a piccola distanza e non negava l'azione di contatto determinò notevoli diffidenze circa questa impostazione

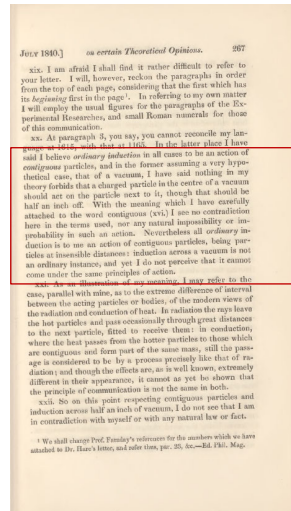
514 *Electrical conditions of a vacuum.* [SERIES XIII.]

n, fig. 143. Such mirrors, when electrified, as by connexion with a Leyden jar, and examined by a carrier ball, readily gave electricity at the lowest part of their convexity if in a room; but I was in hopes of finding that, circumstanced as before stated, they would give little or none at the same spot, if the atmosphere above really terminated in a vacuum. I was disappointed in the conclusion, for I obtained as much electricity there as before; but on discovering the action of induction in curved lines (1831), found a full and satisfactory explanation of the result.

1615. My theory, as far as I have ventured it, does not pretend to decide upon the consequences of a vacuum. It is not at present limited sufficiently, or rendered precise enough, either by experiments relating to spaces void of matter, or those of other kinds, to indicate what would happen in the vacuum cases. I have only so yet endeavoured to establish, what all the facts seem to prove, that when electrical phenomena, as those of induction, conduction, insulation and discharge occur, they depend on, and are produced by the action of *contiguous* particles of matter, the next existing particle being considered as the contiguous one; and I have further assumed, that these particles are polarized; that each exhibits the two forces, or the force in two directions (1295, 1298.); and that they act at a distance, only by acting on the *contiguous* and intermediate particles.

1616. But assuming that a perfect vacuum were to intervene in the course of the lines of inductive action (1304.), it does not follow from this theory, that the particles on opposite sides of such a vacuum could not act on each other. Suppose it possible for a positively electrified particle to be in the centre of a vacuum an inch in diameter, nothing in my present views forbids that the particle should act at the distance of half an inch on all the particles forming the inner superficies of the bounding sphere, and with a force consistent with the well-known law of the squares of the distance. But suppose the sphere of an inch were full of insulating matter, the electrified particle would not then, according to my notion, act directly on the distant particles, but on those in immediate association with it, employing *all* its power in polarizing them; producing in them negative force equal in amount to its own positive force and directed to-

- Nel gennaio 1839 il chimico americano Robert Hare chiese esplicitamente a Faraday di precisare il significato di tali affermazioni che riconoscevano un'azione a piccole distanze sebbene le precedenti riflessioni sembravano legate ad una azione di contatto
- Sebbene consapevole della difficoltà interpretativa del passaggio precedente, nella risposta ad Hare del 18 gennaio 1840 Faraday confermò sostanzialmente la sua ipotesi



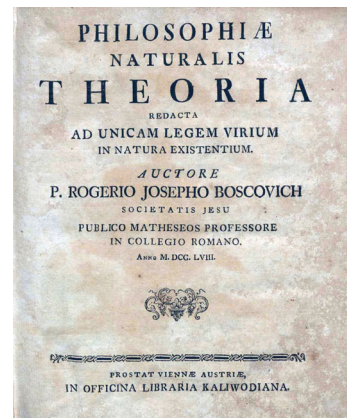
- *Io penso che l'ordinaria induzione in tutte le sue manifestazioni sia un'azione di particelle contigue e, [...] considerando in caso molto ipotetico, quello di un vuoto, non ho detto nulla nella mia teoria che vieti ad una particella carica nel centro di un vuoto di agire sulle particelle vicine ad essa, sebbene lontana mezzo pollice. Col significato che ho accuratamente attribuito alla parola "contigue", non vedo contraddizione nei termini usati, né naturale impossibilità, o improbabilità di tale azione. Nondimeno ogni ordinaria induzione è per me un'azione di particelle contigue, cioè di particelle a piccolissima distanza; e tuttavia non vedo come ciò non possa rientrare nel medesimo principio*

- In pratica, confermando le incertezze di Faraday, tale risposta costituisce un compromesso tra la tesi dell'azione di contatto e quella dell'azione a distanza, esprimendo un effettivo orientamento verso l'azione a distanza senza però negare la partecipazione attiva del mezzo nei fenomeni di elettrizzazione

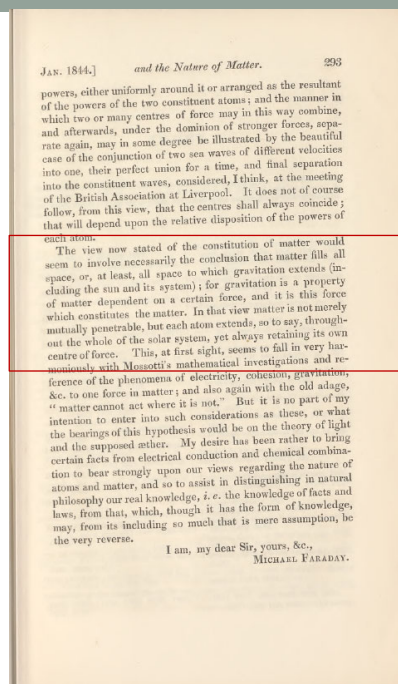
- Una parte del mondo scientifico guardò con interesse queste valutazioni e, ad esempio, Gauss sostenne lo stesso approccio interpretativo, liberandosi di fatto sia dell'azione a distanza che di quella di contatto, ammettendo che le forze elettriche non si propagano istantaneamente ma con velocità finita



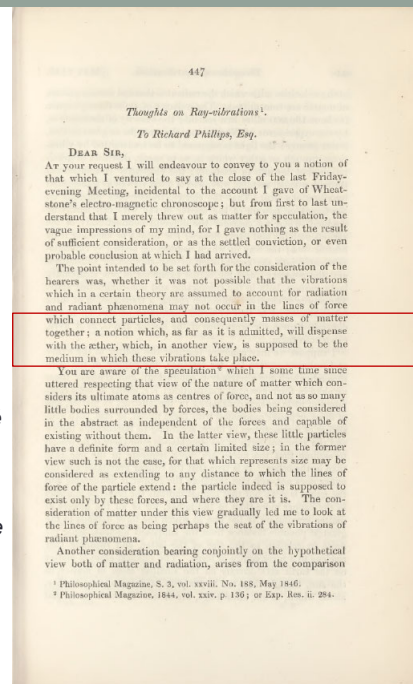
- Faraday tuttavia era consapevole del fatto che la questione non si potesse ritenere risolta siccome comprendeva come per molti ricercatori, come Hare, l'interpretazione dell'induzione elettrostatica negli spazi vuoti fra le particelle fosse inadeguata
- Per sedare definitivamente la polemica con Hare, nel 1844 Faraday prese in analisi le idee allora all'avanguardia circa la costituzione della materia
- In particolare fu attratto dalla teoria proposta nel 1758 dal fisico dalmata Ruđer Josip Bošković che descriveva gli atomi come puri centri di forza sparsi con continuità nel vuoto, ritenendo che tale concezione potesse dare sostegno alla sua concezione dell'azione induttiva a contatto



- Il 26 gennaio 1844 in una lettera indirizzata a Richard Taylor scrive:
 - *Non ignoro che la mente sia più capace di capire i fenomeni di cristallizzazione, la chimica e la fisica, piuttosto di comprendere i centri di forza. Mi sento costretto ad ammettere al presente che non posso farne a meno. [...] Ciò che realmente conta nell'ipotesi di Boscovich è che la materia [...] sarà continua. [...] Le forze che hanno origine nei centri danno a questi centri la proprietà degli atomi di materia*
- Cioè in Faraday si faceva strada l'idea di una materia continua che ammetteva l'esistenza di atomi estesi senza interruzione e non corpuscoli di materia isolati in uno spazio continuo. Inoltre aggiunge:
 - *Il punto di vista ora espresso sulla costituzione della materia sembrerebbe implicare necessariamente la conclusione che la materia riempia tutto lo spazio, o, almeno, tutto lo spazio in cui si estende la gravitazione (incluso il sole e il suo sistema); poiché la gravitazione è una proprietà della materia dipendente da una certa forza, ed è questa forza che costituisce la materia. Da questo punto di vista la materia non è semplicemente reciprocamente penetrabile, ma ogni atomo si estende, per così dire, attraverso l'intero sistema solare, pur conservando sempre il proprio centro di forza.*
- In pratica Faraday portando all'estremo l'ipotesi di Bošković introduce il concetto di *campo*:
 - Mentre lo spazio inteso da Newton è un contenitore inattivo per i corpi e le cariche elettriche, secondo questa concezione diviene parte attiva nei fenomeni essendone addirittura la sede



- Questo approccio trova la sua applicazione più ardita in una lettera inviata a Richard Phillips nel 1846 nella quale ipotizza che le vibrazioni della luce siano riconducibili ad oscillazioni delle linee di forza:
 - *una nozione che, per quanto è ammesso, eliminerà l'etere, che in un altro punto di vista dovrebbe essere il mezzo in cui hanno luogo queste vibrazioni*
- Tuttavia, consapevole di essersi lasciato trasportare in misura eccessiva dalle speculazioni, conclude
 - *Penso sia probabile di aver commesso molti errori nelle pagine precedenti, perché anche a me stesso le mie idee su questo punto appaiono solo come l'ombra di una speculazione, o come una di quelle impressioni nella mente che sono ammissibili per un certo tempo come guide al pensiero e alla ricerca. Chi lavora in ricerche sperimentali sa quanto queste siano numerose, e quanto spesso la loro apparente forma fisica e bellezza svaniscano prima del progresso e dello sviluppo della vera verità naturale.*



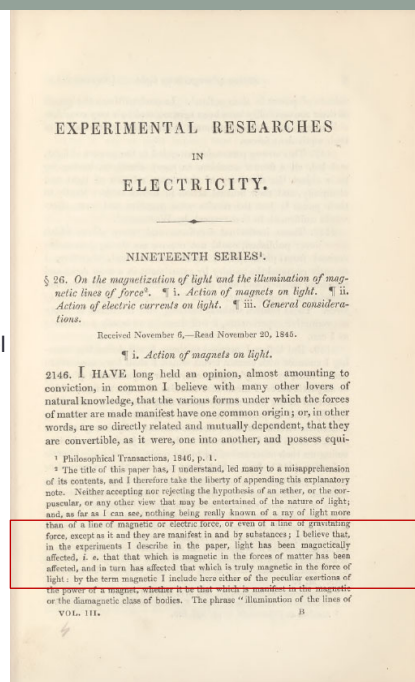
Magneto-ottica

- Nel 1845 Faraday ebbe modo di incontrare Thomson che gli riferì i suoi tentativi di formalizzare matematicamente il concetto di linee di forza e, con l'occasione, gli chiese se erano stati svolti esperimenti circa *l'azione dei corpi elettrizzati sui dielettrici [...] e l'azione di un dielettrico trasparente sulla luce polarizzata*
- In pratica Thomson gli chiedeva di effettuare verifiche sul rapporto tra la luce e l'elettricità
- Prescindendo dalle considerazioni analitiche di Thomson, Faraday sottopose ad una differenza di potenziale un pezzo di vetro al piombo, poi un vetro pesante, un cristallo di rocca ed altri materiali trasparente, senza però osservare alcun effetto

- Abbandonati questi tentativi, nel 1845 ripeté gli esperimenti, ponendo un pezzo di vetro al piombo tra le espansioni polari di una elettrocalamita.
- In questo caso osservò un nuovo fenomeno, quando il vetro era attraversato da un raggio di luce polarizzata, parallelamente alle linee di forza dell'elettrocalamita si osservava, all'eccitazione dell'elettrocalamita, una debole rotazione del piano di polarizzazione
- Faraday pubblicò il risultato nel novembre 1845 nella memoria dal titolo aspramente criticato *Sulla magnetizzazione della luce e l'illuminazione di linee di forza magnetiche*



- Perciò all'atto della stampa ritenne opportuno aggiungere una nota:
 - *Io credo che nelle esperienze descritte in questa memoria la luce soffra un'alterazione dal magnetismo, vale a dire che ciò che è magnetico nelle forze della materia viene modificato e modifica ciò che è magnetico nelle forze della luce*
- In sostanza Faraday, con estrema circospezione, ipotizzava che nella luce ci deve essere qualcosa di magnetico
- Una volta accertato il fenomeno, Faraday ne studiò le diverse modalità. In particolare sostituendo all'elettromagnete una bobina percorsa da corrente, osservò la rotazione del piano di polarizzazione della luce nel verso della corrente cogliendo la distinzione tra il potere rotatorio naturale e il potere rotatorio della corrente: la simmetria del primo è elicoidale mentre per il secondo è cilindrica
- A partire da tale distinzione, Faraday provò che la rotazione del piano di polarizzazione dipende dalla natura del corpo attraversato dalla luce, è proporzionale allo spessore ed all'intensità del campo magnetico, risultando massima quando la direzione del campo è parallela alla direzione del raggio di luce e nulla quando le due direzioni risultano mutuamente perpendicolari



Sul carattere fisico delle linee di forza

- Nel giugno 1852 Faraday presentò la memoria *On the physical character of the lines of force*, in cui, senza chiarirne esattamente la natura, veniva attribuito un carattere fisico reale alla linee di forza elettriche e magnetiche
- L'ipotesi presentata nella memoria è che le linee di forza non rappresentino linee di particelle polarizzate, sia nel caso elettrico che magnetico, bensì uno stato fisico, sebbene non chiarisse la natura di tale stato

*On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force*¹.

NOTE.—The following paper contains so much of a speculative and hypothetical nature, that I have thought it more fitted for the pages of the Philosophical Magazine than those of the Philosophical Transactions. Still it is so connected with, and dependent upon former researches, that I have continued the system and series of paragraph numbers from them to it. I beg, therefore, to inform the reader, that those in the body of the text refer chiefly to papers already published, or ordered for publication, in the Philosophical Transactions; and that they are not quite essential to him in the reading of the present paper, unless he is led to a serious consideration of its contents. The paper, as is evident, follows Series xxviii. and xxix., now printing in the Philosophical Transactions, and depends much for its experimental support upon the more strict results and conclusions contained in them.

3243. I have recently been engaged in describing and defining the lines of magnetic force (3070.), i.e. those lines which are indicated in a general manner by the disposition of iron filings or small magnetic needles, around or between magnets; and I have shown, I hope satisfactorily, how these lines may be taken as exact representatives of the magnetic power, both as to disposition and amount; also how they may be recognized by a moving wire in a manner altogether different in principle from the indications given by a magnetic needle, and in numerous cases with great and peculiar advantages. The definition then given had no reference to the physical nature of the force at the place of action, and will apply with equal accuracy whatever that may be; and this being very thoroughly understood, I am now about to leave the strict line of reasoning for a time, and enter upon a few speculations respecting the physical character of the lines of force, and the manner in which they may be supposed to be continued through space. We are obliged to enter into such speculations with regard to numerous natural powers, and, in-

¹ Philosophical Magazine for June 1852.

- Nella memoria, alle linee di forza così concretizzate viene attribuito una valenza dinamica e si ipotizza di fatto l'esistenza di una entità mediatrice del fenomeno induttivo che possiamo ora ricondurre al concetto moderno di campo
- [...] quando il filo si muove, in esso verrà generata una corrente di elettricità. Il semplice fatto del moto non può aver prodotto questa corrente: ci deve essere uno stato o condizione intorno al magnete, sostenuto dallo stesso magnete, entro l'intervallo di cui era posto il filo; e questo stato mostra la costituzione fisica delle linee di forza magnetica. Che cosa sia questo stato o da cosa dipenda non può essere ancora chiarito. Potrebbe dipendere dall'etere, come avviene per un raggio di luce, ed è già stata mostrata una connessione tra la luce ed il magnetismo. Potrebbe dipendere da uno stato di tensione, o da uno stato di vibrazione, o forse da qualche altro stato analogo alla corrente elettrica, a cui le forze magnetiche appaiono così intimamente correlate. Stabilire se sia necessario o meno ammettere che la materia sostenga questa condizione fisica dello spazio dipenderà da ciò che si intende con il termine materia. Se per materia si intendono le sostanze ponderabili o soggette alla gravità, allora la materia non è essenziale alle linee fisiche della forza magnetica non più di quanto non lo sia per un raggio di luce o per il calore; ma se, ammettendo l'esistenza dell'etere, ammettiamo implicitamente che esso sia un particolare tipo di materia, allora le linee di forza possono essere una qualche manifestazione o espressione di esso. Sperimentalmente si osserva che il mero spazio è magnetico; ma l'idea di spazio può includere l'idea di etere, quando si accetta la sua esistenza; se in futuro emergerà un'altra concezione della condizione dello spazio, si dovrà attribuire ad esso quello che ora, almeno per quanto ci risulti sperimentalmente, è attribuibile alle proprietà dello spazio stesso. D'altra parte ritengo un fatto accertato che la materia ponderabile non è essenziale per l'esistenza di linee fisiche di forza magnetica

- Sull'approccio ai fenomeni elettrici seguito da Faraday è eloquente quanto scrive Maxwell nella prefazione dell'opera *A Treatise on Electricity and Magnetism* nel 1873:

- *La complessità generale del trattato differisce notevolmente da quella di diversi eccellenti lavori di elettricità, pubblicati, la maggior parte, in Germania, e può sembrare che poca giustizia sia resa alle speculazioni di diversi eminenti elettricisti e matematici. Uno dei motivi è che prima di iniziare lo studio dell'elettricità decisi di non leggere alcuna trattazione matematica sull'argomento fino a quando non avessi letto le "Ricerche sperimentali" sull'elettricità di Faraday. Sapevo che doveva esserci una differenza tra il modo di concepire i fenomeni di Faraday e quello dei matematici di professione, cosicché né lui né loro erano soddisfatti del linguaggio dell'altro. Avevo anche la convinzione che questa discrepanza non derivasse dal fatto che nessuna delle due parti avesse torto. Ne sono stato convinto per la prima volta da Sir William Thomson, ai cui consigli e assistenza, così come ai suoi articoli pubblicati, devo la maggior parte di ciò che ho imparato sull'argomento.*
- *Man mano che procedevo nello studio di Faraday, percepii che anche il suo metodo di concepire i fenomeni era matematico, sebbene non esibito nella forma convenzionale dei simboli matematici. Ho anche scoperto che questi metodi potevano essere espressi nelle forme matematiche ordinarie, e quindi confrontati con quelli dei matematici professi.*
- *Ad esempio, Faraday, con gli occhi della sua mente, vide linee di forza che attraversavano tutto lo spazio dove i matematici vedevano centri di forza che si attraevano a distanza: Faraday vedeva un mezzo dove quelli non vedevano altro che distanza: Faraday cercava la sede dei fenomeni nelle azioni reali proseguendo nel mezzo, mentre quelli si accontentavano di averla trovata in un potere di azione a distanza impressa sui fluidi elettrici.*
- *Quando ebbi tradotto in forma matematica quelle che consideravo le idee di Faraday, trovai che in generale i risultati dei due metodi coincidevano, cosicché con entrambi si potevano spiegare gli stessi fenomeni e le stesse leggi di azione, mentre però i metodi di Faraday somigliavano a quelli in cui si comincia con il tutto per arrivare alle parti per via analitica, gli ordinari metodi matematici erano fondati sul principio di iniziare con le parti e costruire il tutto per via di sintesi.*
- *Ho anche scoperto che molti dei più fertili metodi di ricerca scoperti dai matematici potevano essere espressi in termini delle idee derivate da Faraday, molto meglio che nella loro forma originale.*



Formalizzazione dell'induzione

- La formalizzazione matematica del fenomeno dell'induzione procedette in maniera sostanzialmente contemporanea alle ricerche di Faraday
- Nella seduta del 29 Novembre del 1833 dell'*Российская академия наук – Rossijskaja akademija nauk* (Accademia delle Scienze) di S. Pietroburgo il fisico russo Emil Khristianovich Lenz presentò la memoria *Ueber die Bestimmung der Richtung der durch elektrodynamische Vertheilung erregten galvanischen Ströme* (Sulla determinazione della direzione delle correnti galvaniche eccitate dalla distribuzione elettrodinamica) in cui veniva spiegato che il verso della corrente indotta è nella direzione da opporsi alla causa che la determina
- A questa conclusione arrivò analizzando le esperienze di Faraday e gli studi di Ampère.
- Solo nel 1847, quando Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz, presentando la memoria *Über die Erhaltung der Kraft* (Sulla conservazione della forza), enunciò il principio di conservazione dell'energia, si comprese che la regola stabilita da Lenz è una conseguenza diretta di tale principio



LXX. *Ueber die Bestimmung der Richtung der durch elektrodynamische Vertheilung erregten galvanischen Ströme; von E. Lenz* ¹⁾.
(Gelesen in der K. Academie der Wissenschaften zu St. Petersburg den 29. November 1833.)

In seinen «Experimentaluntersuchungen über die Elektricität,» welche die Entdeckung der sogenannten elektrodynamischen Vertheilung enthalten, bestimmt Faraday die Richtung der durch dieselbe hervorgerufenen galvanischen Ströme in der Art, daß 1) ein galvanischer Strom in einem ihm parallel genäherten Drahte, einen ihm entgegengesetzten hervorruft, in einem von ihm entfernten aber, einen in gleicher Richtung laufenden, und 2) daß ein Magnet in einem sich in seiner Nähe bewegenden Leiter einen Strom veranlaßt, der von der Richtung abhängt, in welcher der Leiter bei seiner Bewegung die magnetischen Curven durchschneidet (Poggend. Ann. 1832, No. 5 §. 114 und 116 der Arbeit von Faraday). Allein abgesehen davon, daß hier zwei ganz verschiedene Regeln für ein und dasselbe Phänomen gegeben werden (denn der Magnet läßt sich ja, nach Ampères schöner Theorie, als ein System von circularen galvanischen Strömen betrachten), so ist die Regel nicht einmal, wenigstens unmittelbar, ausreichend, indem sie manche Fälle gar nicht in sich schließt, z. B. den, wenn ein, gegen einen Strom senkrecht gerichteter, Leiter längs diesem hinbe-

¹⁾ Einen früheren Aufsatz des geachteten Hrn. Verfassers: «Ueber die Wirkungen, nach welchen der Magnet f eine Spirale einwirkt, wenn er ihr parallel genähert oder von ihr entfernt wird, und über die vortheilhafte Construction der Spiralen zu magnetoelektrischen Behufen — hoffen wir den Lesern in einiger Zeit vorlegen zu können. P.

- Faraday aveva esaminato il fenomeno induttivo limitatamente alla produzione di correnti, non mettendo in luce la formazione della forza elettromotrice indotta e mantenendo tale punto di vista anche quando era stato ampiamente chiarito il concetto di tensione elettrica
- Seguendo la logica dell'azione a distanza, nel 1845 il fisico tedesco Franz Ernst Neumann presentò alla *Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften* (Accademia delle Scienze di Berlino) la memoria *Allgemeine Gesetze der inducirten elektrischen Ströme* (Leggi generali delle correnti elettriche indotte)
- Combinando i risultati di Faraday con la legge per la forza elettromagnetica di Ampère e il principio di Lenz, riuscì a formulare la legge generale per la determinazione della forza elettromotrice indotta ed a dimostrare la validità della legge di Ohm anche per le correnti variabili

II. Allgemeine Gesetze der inducirten elektrischen Ströme; von F. E. Neumann.

(Auszug aus einer der K. Acad. zu Berlin übersandten und nichtstens in deren Denkschriften erscheinenden Abhandlung)

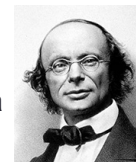
Wenn der Werth der magnetischen oder elektrodynamischen Resultante, bezogen auf ein Element eines Leiters eine Veränderung erleidet, so wird in diesem Element eine elektromotorische Kraft erregt, die, wenn ihr ein in sich geschlossener leitender Weg dargeboten wird, einen elektrischen Strom hervorbringt, welcher der Inductionstrom genannt wird. Die folgenden Untersuchungen über diesen Strom setzen voraus, daß die inducirende Ursache, d. i. die Veränderung der magnetischen oder elektrodynamischen Resultante mit einer Geschwindigkeit eintrete, welche als klein in Beziehung auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elektricität angesehen werden kann. Ohne diese Voraussetzung kann man nicht die elektrischen Ströme als im stationären Zustand befindlich ansehen und die Ohm'schen Gesetze darauf anwenden. Ausgeschlossen aus den hier folgenden Betrachtungen sind also z. B. die durch elektrische Entladungen inducirten Ströme.



- Neumann, che non accettava il concetto proposto da Faraday delle linee di forza magnetiche e per tale motivo trasformò il concetto di variazione di flusso magnetico in quello di variazione del potenziale
- In sostanza nella determinazione di Neumann viene ad identificarsi la corrispondenza formale tra il potenziale ed il flusso magnetico Φ , rimanendo sempre nell'ambito del concetto di azione a distanza
- A partire da tale considerazione Neumann arrivò ad esprimere la forza elettromotrice indotta come la derivata temporale, cambiata di segno, del potenziale, che nel 1865 Maxwell reinterpretò nell'ambito di una azione attraverso il mezzo e alla variazione dell'induzione magnetica, nella formula

$$V = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

- Mentre Neumann si sforzava di comprendere le leggi delle correnti indotte attraverso la teoria di Ampère, Wilhelm Eduard Weber stava tentando un progetto ancora più ambizioso: unire l'elettrodinamica in un insieme coerente con l'elettrostatica
- Nel 1845 Gustav Theodor Fechner aveva fatto l'ipotesi che ogni corrente elettrica consistesse di un flusso di cariche, positive e negative uguali tra loro in grandezza e numero, che viaggiano nella direzione opposta con uguale velocità. Supponendo che cariche simili si attraggano quando si muovono parallelamente nella stessa direzione, mentre cariche diverse si attraggono quando si muovono in direzioni opposte, Fechner era riuscito a collegare gli effetti di induzione di Faraday alle leggi dell'elettrodinamica di Ampère
- L'anno successivo Weber, basandosi su questa ipotesi e su un lavoro di Gauss del 1835, fornì una relazione che generalizzava la legge di Coulomb nel caso in cui le cariche elettriche fossero in movimento, formulando la prima teoria dei fenomeni elettrici e magnetici basata sulla nozione di carica elettrica discreta e di corrente elettrica quale moto di cariche



- In questa relazione la forza di interazione tra due particelle di cariche q_1 e q_2 , separate dalla distanza r , in generale dipendente dal tempo per effetto del moto delle cariche, si esplica a distanza lungo la congiungente le due particelle cariche ed ha intensità:

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2} \left[1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{2}{c^2} r \frac{d^2 r}{dt^2} \right]$$

- Il primo termine della somma rappresenta la forza di Coulomb mentre gli altri due, che dipendono dalla velocità e dall'accelerazione relativa delle due particelle, sono in grado di descrivere gli effetti elettrodinamici e l'induzione elettromagnetica; c è una costante che ha le dimensioni di una velocità e serve a garantire la coerenza del risultato dal punto di vista dimensionale

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2} \left[1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{2}{c^2} r \frac{d^2 r}{dt^2} \right]$$

- C'erano due aspetti che rendevano singolare tale relazione:
 - Contenendo i termini di velocità e accelerazione si consegue un moto differente da quello determinato dalle forze newtoniane, caratteristica questa che la fece accogliere con diffidenza tra i ricercatori dell'epoca, fino al 1847 quando von Helmholtz, non ne confermò definitivamente la validità
 - Attraverso misure svolte sia da Weber che da Rudolph Kohlraush nel 1856 si era constatato che il valore della costante c è dello stesso ordine di grandezza della velocità della luce nel vuoto.
- Quest'ultima caratteristica accentuava il sospetto di una connessione tra la costante c e la velocità massima di propagazione dell'interazione, portando ad ipotizzare che le azioni elettromagnetiche non si propagassero istantaneamente ma in un tempo finito.
- Tale congettura era stata proposta da Gauss a Weber nel 1845 e successive ricerche sia di Bernhard Riemann e che Neumann l'avevano definitivamente confermata
- Weber non fu in grado di identificare questa costante con la velocità della luce e quindi di anticipare l'unificazione fra ottica, elettricità e magnetismo che verrà realizzata qualche anno dopo da Maxwell