

Tuttavia la teoria elettrodinamica dei fenomeni magnetici di Ampère si fondava su basi empiriche tutt'altro che solide, anche secondo l'opinione di Faraday espressa in una lettera a de La Rive, nel settembre 1821: «la teoria [di Ampère] in moltissimi punti non è sostenuta da esperimenti quando questi avrebbero dovuto essere addotti come prove»⁷⁹.

Anche la sua teoria molecolare del magnetismo, le cui basi empiriche erano pressoché inesistenti, venne considerata con sospetto più che giustificato da molti fisici contemporanei, e soprattutto dai laplaciani, ma trovò un entusiastico sostenitore in William Whewell. Il filosofo dinamistico scriverà nella sua opera *Philosophy of the Inductive Sciences* [1837], tutta dedicata al concetto di polarità:

Ampère, formulando le sue ipotesi sull'azione di correnti voltaiche e sulla costituzione del magnetismo ha ricondotto tutte le regole tecniche a rigorose deduzioni da un unico principio generale. E così la persuasione vaga e oscura che ci dovesse essere una qualche connessione fra elettricità e magnetismo, rimasta così a lungo un'oziosa e sterile congettura, è stata sviluppata da Ampère in una teoria completa, secondo la quale le azioni magnetiche ed elettromotrici non sono altro che differenti manifestazioni delle stesse forze; e tutte le complesse relazioni sopracitate [relative a due polarità], si riconducono ad una singola polarità, quella della corrente elettrodinamica.

2.4 Faraday e lo sviluppo dell'elettromagnetismo classico

Michael Faraday [1791–1867] fu lo scienziato che diede i contributi più importanti allo sviluppo dell'elettromagnetismo classico prima di Maxwell. Fu fortemente influenzato dalle idee della filosofia dinamistica. In particolare, l'idea di polarità assume un ruolo assolutamente fondamentale in tutte le sue ricerche; sviluppa una teoria dinamistica della materia nell'ambito della quale critica costantemente l'uso di ipotesi meccaniche ritenendo che le “cause prime” invocate dai laplaciani a livello microscopico siano in realtà inconoscibili. Alcuni elementi dinamistici, come l'utilizzazione del metodo dell'analogia e la ricerca di un'unificazione tra le forze e i vari campi della fisica, sono centrali nell'opera di Faraday, il quale tuttavia non è classificabile come un vero e proprio filosofo dinami-

poi generalizzato da Stokes nel teorema omonimo.

⁷⁹ Faraday a de La Rive, 12 sett. 1821, in L. P. Williams (a cura di), *Selected Correspondence*, vol. 1°, pp. 122–125.

sta, nel senso che le sue simpatie dinamistiche derivano dalla sua adesione ad una forma, a volte ingenua, di empirismo, piuttosto che da una concezione sofisticata di filosofia della scienza, come quelle di Whewell o di Ampère. Dalla sua corrispondenza con Ampère appare evidente il loro accordo sull'opposizione alle teorie meccanicistiche, sull'importanza del concetto di polarità e su un programma di unificazione delle forze. Ma insieme ad una certa difficoltà di intendersi, a volte, emerge anche la notevole differenza di prospettiva nell'affrontare i vari problemi: tipicamente Faraday dà sempre una maggiore importanza agli esperimenti.

Faraday ha un'infanzia poverissima: il padre era un fabbro e la sua famiglia era seguace della setta cristiana dei Sandemaniani, da bambino impara a leggere, scrivere e fare di conto alla scuola domenicale di una chiesa. Lavorando come venditore e rilegatore di libri, coglie l'opportunità di fare una serie di letture rimanendo particolarmente impressionato dalla voce "Elettricità" sull'*Enciclopedia Britannica*. Utilizzando pezzi di legno e vecchie bottiglie costruisce un primitivo generatore elettrostatico; riesce anche a fabbricare una debole pila voltaica con cui effettua esperimenti di elettrochimica. Frequenta le lezioni di chimica di Davy e a 21 anni, nel 1812, diventa suo assistente e lo accompagna nel suo giro in Europa. Davy in quegli anni stava rivoluzionando la chimica: influenzato dalla teoria degli "atomi-forza" di Kant e di Boscovich, riteneva che le molecole fossero composte da atomi puntiformi collegati da forze repulsive e attrattive; in tal modo gli atomi, in quanto costituenti delle molecole, dovevano essere soggetti a tensioni e deformazioni prima che i "legami" che li tenevano uniti potessero spezzarsi⁸⁰. Questa concezione delle "forze di legame interatomiche" influenzerà molto il giovane Faraday e giocherà un ruolo importante nell'evoluzione delle sue idee sull'elettricità.

Inizialmente Faraday diventa famoso come chimico-analitico: nel 1820 produce i primi composti di Carbonio e Cloro (C_2C_{16} e C_2C_{14}), nel 1823 riesce a produrre la prima liquefazione di un gas, il Cloro e nel

⁸⁰ Lavoisier riteneva che l'ossigeno fosse un elemento costitutivo di tutti gli acidi, ma Davy, che aveva già scoperto per via elettrolitica il sodio e il potassio, effettua, per questa stessa via, la separazione dell'acido cloridrico (HCl), ottenendo H^+ insieme ad un gas verde che in acqua si ricombinava per produrre un acido. Davy conclude che si trattava di un vero e proprio elemento, il cloro, e che quindi l'ossigeno non poteva ritenersi affatto un elemento sempre presente nella composizione degli acidi.

1825, nel corso delle sue ricerche sul gas illuminante, isola e descrive il benzene (C_6H_6). Negli anni '20, ponendo le basi della moderna metallurgia scientifica, effettua anche ricerche sulle leghe di acciaio oltre che sui vetri ottici, migliorando la qualità di quelli usati per i telescopi e producendo un vetro di indice di rifrazione molto elevato che utilizzerà nel 1845 per studiare le proprietà delle sostanze diamagnetiche.

Il 1820 è l'anno della scoperta di Oersted dell'effetto di rotazione provocato da una corrente su un ago magnetico e dei primi esperimenti di Ampère sull'interazione fra correnti e fra magneti e correnti: Faraday sarà il primo ad afferrare il significato del fenomeno secondo il quale un "cilindro di magnetismo" viene generato da un filo rettilineo percorso da corrente.

Nell'estate del 1821, gli era stato richiesto di scrivere un articolo di rassegna sugli esperimenti di Oersted e di Ampère per gli "Annals of Philosophy". Faraday inizia a fare ricerche su questi fenomeni. Molto colpito dalla teoria di Ampère, viene inizialmente confuso dalla sua terminologia meccanicistica convenzionale e non afferra il carattere puramente euristico dell'ipotesi dei fluidi elettrici come componenti dell'etere luminifero fatta da Ampère, interpretandola come un'ipotesi meccanica vera e propria. Dopo poche settimane dall'inizio dei suoi esperimenti, Faraday fa la sua prima scoperta nel campo dell'elettromagnetismo individuando il cosiddetto "effetto di rotazione continua" di un filo conduttore in presenza di un campo magnetico, a proposito del quale scrive:

L'effetto sul filo è quello di muoversi perpendicolarmente (at right angle) rispetto al polo; cioè in effetti di muoversi in un circolo intorno ad esso.⁸¹

Faraday osserva infatti che un filo percorso da corrente, sospeso sopra un magnete disposto verticalmente e con l'estremità inferiore immersa in una vaschetta contenente mercurio, tendeva a ruotare intorno al polo del magnete; in un esperimento analogo riesce anche a far ruotare un magnete intorno ad un conduttore percorso da corrente.

⁸¹ T. Martin (a cura di), *Faradays Diary, being the Various Philosophical Notes of Experimental Investigations Made by Michael Faraday*, 8 voll., London, G. Bell, 1932-1936, cit. vol. 1, p. 50.

Questo risultato fu molto importante per Faraday, soprattutto per due motivi: a) costituiva una dimostrazione della convertibilità di elettricità in lavoro meccanico (è questo infatti il principio di funzionamento del motore elettrico) e da ciò poté trarre una conferma empirica della sua “fede” nell’unità di tutte le forze della natura; b) fece emergere il contrasto fra lui e Ampère; infatti la teoria elettrodinamica di Ampère era basata su forze centrali attrattive e repulsive tra elementi di corrente, ben diverse dalla forza “trasversale” osservata da Faraday che faceva ruotare il filo (o il magnete).⁸²

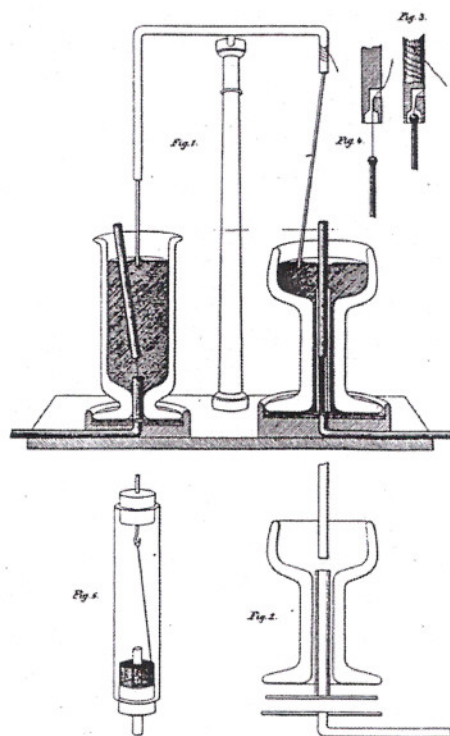


Figura 2. La forza elettromagnetica esercitata su un filo conduttore tende a farlo ruotare intorno a ciascun polo del magnete. Un esperimento analogo mostra la rotazione di un magnete intorno a un conduttore percorso da corrente

⁸² La forza infinitesima, $d\mathbf{F}$, che istante per istante produce l'effetto di rotazione, si osserva infatti in direzione trasversale sia rispetto alla direzione dell'elemento infinitesimo, $d\mathbf{l}$, di un conduttore percorso da una corrente i , che alla direzione del campo magnetico $\mathbf{B}$. Tale forza si esprime a livello analitico attraverso il prodotto vettoriale: $d\mathbf{F} = i d\mathbf{l} \times \mathbf{B}$, ovvero un tipo di prodotto tra due vettori che fornisce un vettore ortogonale ad entrambi.

Attribuendo un'importanza primaria all'aspetto "circolare" della forza prodotta da un magnete o da una corrente, Faraday cercò di provare attraverso nuovi esperimenti con circuiti circolari, a spirale o ad elica (solenoidi), che le forze centrali di attrazione e repulsione non erano che una conseguenza di tali forze "circolari", dovuta alle varie configurazioni e ai vincoli dei circuiti. Ampère attribuiva un ruolo principale al carattere centrale delle forze elettriche tra elementi infinitesimi di corrente, all'effetto lineare, per le quali aveva sviluppato una rigorosa trattazione matematica. Faraday, al contrario, considerava questo effetto come derivato rispetto a quello circolare, più semplice in quanto rivelabile a livello macroscopico attraverso l'esperimento.

I due si scrivono regolarmente e manifestano amichevolmente i reciproci dissensi, come quando Faraday si mostra d'accordo con Ampère sulla somiglianza, ma non sull'identità fra solenoide e magnete.

Facendo un confronto sperimentale tra solenoidi e sbarrette magnetizzate Faraday introduce per la prima volta l'immagine di "linee di azione magnetica".

Il passo successivo nello sviluppo dell'elettromagnetismo è costituito dall'esperimento di Arago del 1825: un disco di rame ruotando liberamente intorno al suo asse faceva ruotare un ago magnetico sospeso al di sopra di esso.

Arago interpreta l'esperimento come una prova del magnetismo indotto nei metalli per effetto della rotazione; il laplaciano Biot lo interpreta invece in termini della separazione dei due fluidi magnetici a causa della forza centrifuga, cioè come una prova dell'erroneità della teoria di Ampère sull'origine elettrodinamica del magnetismo.

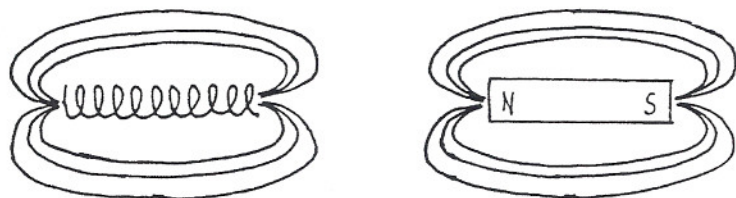


Figura 3

In Inghilterra John Herschel e Charles Babbage studiano quest'effetto, cercandone invano un'interpretazione attraverso la teoria di Ampère. Sperimentalmente trovano che anche un magnete posto in rotazione induceva la rotazione del disco; ripetono l'esperimento con diversi metalli che ordinano sulla base della loro apparente "susceptibilità magnetica".⁸³ In particolare trovarono che l'effetto di rotazione scompariva se nel disco veniva praticata una fenditura. Lo stesso Faraday, lavorando sul problema per verificare l'equivalenza fra elettricità e magnetismo, ricerca effetti simili indotti da correnti elettriche, ma senza successo, perché ciò che cercava era un effetto di tipo stazionario, cioè costante nel tempo. Se avesse cercato effetti "transitori" e non stazionari sarebbe riuscito a scoprire l'induzione elettromagnetica già a questo stadio; la scoprirà invece nel 1831, quando riprenderà i suoi esperimenti elettromagnetici.

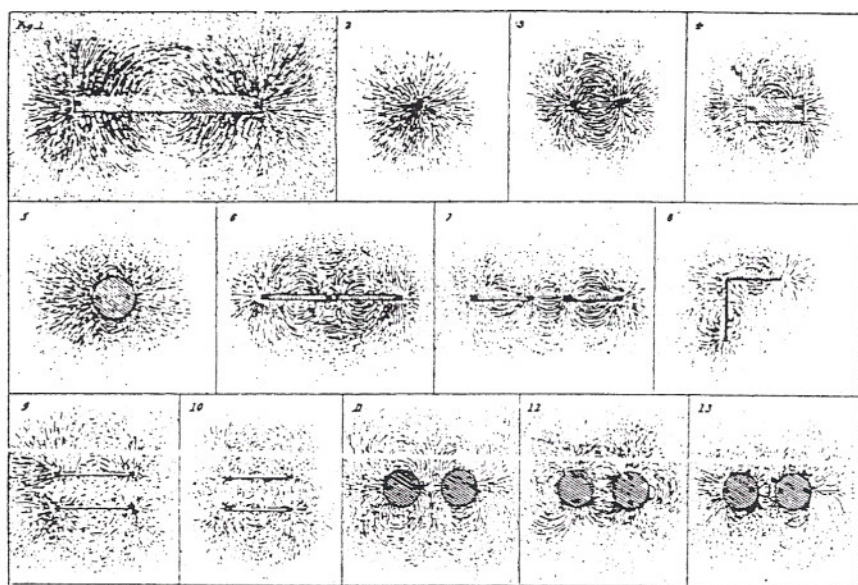


Figura 4

⁸³ C. Babbage, J.F.W Herschel, *Account of the repetition of M. Arago's experiments on the magnetism manifested by various substances during the act of rotation*, *Pil. Trans. Roy. Soc.*, 115 (1825), pp. 467-496.

Alla fine degli anni '20 Faraday inizia a effettuare ricerche sulla natura della luce. Studia in particolare i lavori di Fresnel sulla natura ondulatoria della luce da poco pubblicati in inglese e l'opera di Herschel *Preliminary Discourse on the Study of Natural Philosophy*⁸⁴ dove si sottolineava l'analogia fra suono e luce, entrambi caratterizzati da un moto ondulatorio. Faraday è molto colpito dalla possibilità offerta dal moto ondulatorio per l'unificazione delle forze, un'idea al centro delle sue aspettative e ricerche (epistemologia influente). Così, nel 1831, inizia a fare esperimenti di "induzione acustica" assieme a Sir Charles Wheatstone e, studiando sperimentalmente gli effetti generati dal passaggio di un'onda sonora attraverso mezzi differenti, scopre effetti di induzione acustica: una polvere leggera su un piatto di ferro fatto vibrare con un archetto di violino generava le "figure di Chladni". Questo fenomeno impressionò molto Faraday, il quale lo considerava un effetto statico prodotto da una causa dinamica. Un'uguale impressione produssero in lui le stesse figure indotte su un piatto ottenute facendo vibrare un piatto vicino. Queste osservazioni sono tra i motivi che lo spingono ad effettuare il famoso esperimento con il quale scopre il fenomeno dell'induzione elettromagnetica, nell'agosto 1831, perché è convinto che qualcosa di simile debba accadere per un filo percorso da corrente. Riprendendo le sue ricerche sull'elettro-magnetismo, è quindi molto propenso a trattare le forze elettriche e magnetiche in termini di moti ondulatori e a cercare la possibile esistenza e gli effetti di questi moti. Utilizzando degli elettromagneti, indaga non soltanto sugli effetti stazionari, ma anche su quelli transitori, quali per esempio quelli generati mediante l'inversione della corrente ottenuta invertendo le polarità della pila.

Faraday fa il seguente ragionamento: se la bobina è arrotolata intorno ad un nucleo di ferro dolce, accendendo la pila, la magnetizzazione del ferro dovrebbe essere caratterizzata da un moto ondulatorio. Se il nucleo ha una forma ad anello e dalla parte opposta si trova un'altra bobina connessa ad un galvanometro, il moto ondulatorio associato alla magnetizzazione del ferro potrebbe essere rivelato da questa seconda bobina. In effetti, sottoponendo al vaglio sperimentale queste sue ipotesi Faraday rileva una corrente impulsiva indotta nella seconda bobina. Successivamente, nell'ottobre 1831, trova che in una bobina fluisce cor-

⁸⁴ *Cabinet Cyclopedia*, London 1831, Vol. 1.

rente indotta anche quando le si avvicina o si allontana un magnete, e che lo stesso accade se si muove la bobina rispetto al magnete. Ripete l'esperimento facendo ruotare la spira, o viceversa, e scopre quindi una corrente alternata [$I = I_0 \sin \omega t$]. In questo modo riesce anche ad interpretare l'apparente magnetismo indotto nella ruota metallica di Arago in termini di correnti indotte dalla rotazione del disco nel campo magnetico dell'ago. Incoraggiato dai risultati di questi esperimenti di induzione, Faraday comincia a elaborare una sua idea a proposito del cosiddetto "stato elettrotonico" di un conduttore, un'idea alquanto vaga riconducibile ad un cambiamento di stato di tensione di un conduttore sotto l'"influenza" di un magnete, o di una corrente:

Quando il filo è soggetto a induzione o volta-elettrica o magneto-elettrica, appare essere in uno stato peculiare, perché resiste alla formazione di una corrente al suo interno, mentre, se fosse nella sua condizione normale questa corrente verrebbe prodotta⁸⁵.

Nel passare dagli esperimenti con le due bobine avvolte intorno all'anello di ferro dolce, a quelli di induzione elettromagnetica prodotta dal moto di magneti, Faraday inizia a concepire e soprattutto a visualizzare la corrente indotta come un processo rapido di crescita o di distruzione dello "stato elettrotonico" del filo conduttore o, in conformità con le sue idee sul moto ondulatorio, come un'onda di "strain" (tensione o deformazione) che si propaga nel filo. I suoi esperimenti sull'induzione magneto-elettrica lo portano a supporre che la forza magnetica che induce la modificazione dello "stato elettrotonico" di un conduttore, si debba estendere allo spazio circostante il magnete e ciò lo riporta a soffermarsi sull'importanza delle "linee di forza magnetiche".

Inizialmente Faraday interpreta i risultati dei suoi esperimenti, anche quantitativamente, in termini di "linee di forza magnetiche" utilizzando questo concetto come strumento euristico e di misura (cioè il verso e l'intensità della corrente indotta erano misurabili mediante la direzione e la velocità con cui il circuito indotto attraversava le linee di forza magnetica).

Secondo Faraday i magneti generano forze nello spazio circostante,

⁸⁵ M. Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, 2 voll., N.Y.: Dover, 1965, vol. 1, p.60.

forze che riesce a “visualizzare” con il semplice espediente di spargere limatura di ferro su una carta posta in vicinanza del magnete stesso. Le linee di forza così rivelate vengono da lui interpretate come linee di tensione del mezzo circostante (aria) e scopre che l'intensità della corrente prodotta dipendeva dal numero di linee di forza tagliate dal conduttore nell'unità di tempo.

A partire dal 1832 Faraday si sforza di dimostrare sperimentalmente ciò che sia lui che Ampère avevano supposto: tutte le forme di elettricità, come quella prodotta da generatori elettrostatici e da pile voltaiche, o come le correnti indotte da elettromagneti, non erano “fluidi”, come sostenevano i laplaciani, ma niente altro che forme e manifestazioni della stessa forza che provocava quindi gli stessi effetti.

Inizialmente l'effetto che prende in esame è quello della decomposizione elettrochimica (elettrolisi). Faraday scopre che, contrariamente a quanto credevano i laplaciani, la separazione e l'accumulo di ioni sugli elettrodi non è provocata da una forza elettrica che agisce a distanza, bensì dal passaggio dell'elettricità attraverso un mezzo liquido conduttore.

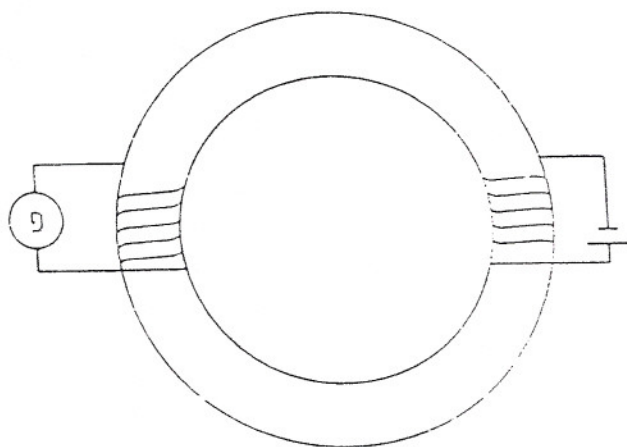


Figura 5. Esperimento di Faraday sull'induzione elettromagnetica.

Questa scoperta spinge Faraday ad elaborare una nuova teoria elettrochimica: la forza elettrica induceva nelle molecole in soluzione uno “stato di tensione” o “stato elettrotonico”; quando la forza era sufficientemente intensa da “distorcere” i campi di forza che tenevano insieme le molecole, si determinava la loro dissociazione e l'effetto si propagava alle molecole vicine; la tensione o “stato elettrotonico” si allentava attraverso lo spostamento o la migrazione di queste particelle lungo le linee di tensione, con differenti specie di atomi che si muovevano — a seconda delle affinità chimiche delle sostanze in soluzione — in direzione opposta. I risultati di questi esperimenti portano Faraday a formulare le due leggi dell'elettrolisi:

- 1) la quantità di sostanza che si deposita su ciascun elettrodo di una cella elettrolitica è direttamente proporzionale alla quantità di carica elettrica che attraversa la cella.
- 2) al passaggio della stessa carica, in una serie di celle elettrolitiche contenenti diverse soluzioni, le masse dei diversi elementi depositate ai rispettivi elettrodi sono proporzionali ai rispettivi pesi equivalenti.⁸⁶

Le sue ricerche in elettrochimica gli forniscono una chiave e uno stimolo per le sue ricerche successive sull'induzione elettrostatica. Il collegamento da lui scoperto tra la quantità di elettricità che passa in una cella elettrolitica e la quantità di materiale che si deposita agli elettrodi, che a sua volta dipende dalla natura di quest'ultimo, spinge Faraday a investigare se la quantità di elettricità indotta nei vari tipi di isolante non potesse dipendere dalla natura di ciascun isolante, che poteva essere quindi dotato di una “capacità induttiva” specifica.

Nella seconda metà degli anni trenta Faraday intraprende quindi una serie di esperimenti di induzione elettrostatica con lo scopo di misurare quantitativamente la “capacità induttiva” specifica k_d (cioè la capacità di trasmettere l'induzione elettrostatica) di differenti dielettrici interposti tra due conduttori, e trova che, ponendo uguale all'unità

⁸⁶ Rapporto tra il peso atomico di un elemento o il peso molecolare di un composto e il numero che rappresenta il suo stato di ossidazione (valenza). 1 Faraday è la quantità di carica elettrica necessaria a liberare per elettrolisi un grammo-equivalente di sostanza, cioè una unità di peso equivalente corrispondente a $9.64853 \cdot 10^4$ C. Il Cloruro di Magnesio (MgCl_2) ad esempio si dissocia in $\text{Mg}^{++} + 2 \text{Cl}^-$ e quindi il passaggio di 1 F. di elettricità causa il depositarsi al catodo di $(24,312/2)$ g. di Mg, e di 35,453 g. di Cl^- .

la capacità induttiva specifica dell'aria ($k_a = 1$), la capacità induttiva specifica per tutti i dielettrici solidi, k_d , risultava > 1 . Ma il suo scopo principale era quello di dimostrare che l'elettricità consiste in una propagazione ondulatoria di forze (power) contro la teoria ortodossa laplaciana dei due fluidi.

Con un altro esperimento Faraday riuscì a dimostrare che l'induzione elettrostatica si propaga per linee curve.

Faraday pone un elettrometro nello spazio compreso nella "zona d'ombra" di una sfera metallica posta su una colonna di gommalacca (isolante) carica negativamente con cui misura la "forza elettrica". Egli ragionava infatti nel seguente modo: se l'azione induttiva si fosse propagata secondo linee rette, come sostenevano i laplaciani, la sfera avrebbe dovuto funzionare da schermo creando una zona d'"ombra" che oscurava gli effetti dovuti all'induzione.

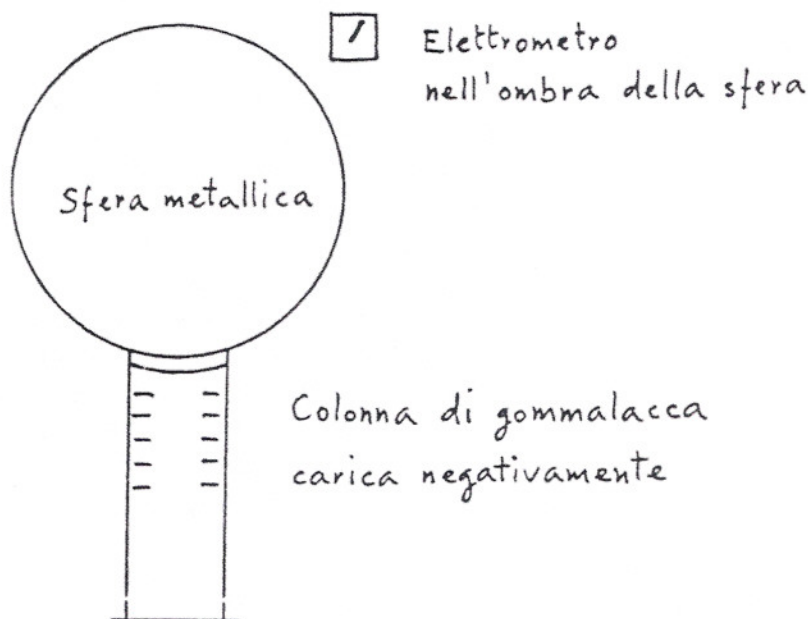


Figura 6. Esperimento di Faraday che mostra la propagazione secondo linee curve dell'induzione elettrostatica

Invece Faraday misura con il suo elettrometro valori della forza elettrica diversi da zero in questa zona e illustra i suoi risultati in termini di “linee di forza induttiva”, che definisce “un modo convenzionale e temporaneo di esprimere la direzione della forza (power) in casi di induzione” e sottolinea che queste linee di forza sono curve. La dimostrazione che l'induzione elettrostatica “si propaga” secondo linee curve fu per Faraday una scoperta estremamente importante perché per lui l'induzione costituiva “il principio essenziale della produzione di elettricità”.⁸⁷

Così, nel giugno 1838, Faraday avanza una sua teoria dell'induzione nella quale fa uso di alcune specifiche ipotesi, in particolare ipotesi atomistiche:

[...] tutte le particelle, sia nella materia isolante che conduttrice sono nella loro totalità dei conduttori [as wholes conductors]. Non essendo polarizzate nel loro stato normale, lo possono diventare sotto l'influenza delle particelle cariche loro vicine; e lo stato di polarizzazione si sviluppa istantaneamente esattamente come in una massa conduttrice isolata formata da molte particelle. Le particelle quando sono polarizzate sono in uno stato forzato e tendono a ritornare nella loro condizione normale o naturale. Essendo queste particelle dei conduttori nella loro totalità, possono essere facilmente caricate “bodily” [nel loro insieme, cioè anche al loro interno con una carica di volume di un dato segno] o “polarly” [cioè con cariche di segno opposto]. Particelle che, essendo contigue, sono anche nella linea dell'azione induttiva, possono comunicare o trasferire le loro forze polari l'una all'altra più o meno rapidamente [readily] [sia i conduttori che gli isolanti]. Quelle che fanno ciò meno prontamente [gli isolanti] richiedono che le forze polari siano accresciute a un livello più elevato prima che questo trasferimento o comunicazione abbia luogo.⁸⁸

Questa sua teoria non era centrata su un'unica idea, ma piuttosto su un miscuglio di idee che derivavano sia dai risultati dei suoi esperimenti che dall'uso di analogie con altre forze, i cui punti chiave erano:

- a) l'elettricità è uno stato di deformazione all'interno della materia dovuta a forze o sollecitazioni (strain), in particolare è uno stato di polarità piuttosto che un fluido; infatti l'esistenza di differenti capacità induttive per i vari dielettrici indicava che l'induzione elettrostatica era una proprietà che variava con continuità e ciò faceva supporre che l'elettricità fosse uno stato di deformazione di qualche tipo, piuttosto che una sostanza o un fluido;
- b) l'induzione elettrostatica consiste nel comunicare questa polarità

⁸⁷ T. Martin (a cura di), *Faradays Diary...*, cit., vol. 2, §2768.

⁸⁸ M. Faraday, *op. cit.*, vol. 1, § 1669–1678.

attraverso un'azione "contigua" fra molecole vicine piuttosto che attraverso un'azione a distanza;

- c) l'ipotesi di una propagazione ondulatoria rendeva inoltre possibile la convertibilità della forza elettrica in altre forze.

Questa sua teoria in qualche modo era collegata alle "ipotesi di lavoro" utilizzate negli anni precedenti, come lo "stato elettrotonico", che rifletteva la sua immagine di elettricità come uno stato di deformazione o di tensione, e come le "linee di forza", che visualizzavano il modo con cui queste deformazioni polari si trasmettevano.

La concezione di Faraday di "azione contigua" è stata a volte interpretata come azione a distanza, sia pure a livello microscopico (lui stesso parla a volte di distanze di 1/2 pollice). In effetti Faraday è il primo a considerare l'azione a distanza come una spiegazione inadeguata per le forze elettriche e magnetiche. Studiando il fenomeno dell'induzione elettrostatica arriva infatti alle seguenti conclusioni a favore dell'esistenza di un mezzo portatore dell'azione elettrica:

- 1) l'induzione elettrica fra conduttori dipende dalla natura dell'isolante interposto;
- 2) se l'isolante viene tagliato longitudinalmente, compaiono cariche opposte sulle superfici delle parti che vengono separate;
- 3) le linee di induzione sono linee curve.

Faraday conclude quindi che l'induzione elettrica si propaga attraverso il mezzo isolante per mezzo delle singole particelle, ciascuna delle quali si polarizza come un conduttore, essendo appunto "un'azione contigua fra particelle contigue che agiscono l'una sull'altra e non un'azione a distanza". E un anno dopo, nel 1839, specifica:

La parola contigue non è forse la migliore che si possa usare qui e altrove, poiché, visto che le particelle non si toccano fra loro, essa non è a rigore corretta. [...] Per particelle contigue intendo quelle più vicine.⁸⁹

Faraday conserva in realtà una sorta di azione a distanza su scala ato-

⁸⁹ Ivi, § 1164.

mica: ogni particella del mezzo isolante interposto è per lui un conduttore e le proprietà dei mezzi isolanti derivano dall'ipotesi che le particelle conduttrici non siano in contatto fra di loro. L'unica nozione ipotetica da lui utilizzata è quella di "polarità microscopica", ma d'altra parte il concetto di polarità macroscopica, un caposaldo della tradizione dinamistica, corrispondeva, secondo lui, ai fenomeni osservati:

[...] l'elettricità appare esistere soltanto sotto forma di polarità nell'aria, nel vetro, negli elettroliti, ecc.⁹⁰

Faraday considerava infatti le osservazioni macroscopiche (dati sperimentali) come le uniche fonti legittime delle sue ipotesi teoriche e, per analogia, estendeva queste proprietà a livello microscopico. D'altra parte era sempre più convinto che la polarità fosse un fenomeno costitutivo non soltanto dei fenomeni elettrici e magnetici, ma anche di quelli luminosi e chimici: la polarità, secondo lui, possedeva «in realtà il carattere di un principio primo, essenziale e fondamentale».⁹¹

Nell'opera di Faraday emerge una straordinaria eterogeneità di spunti teorici, i quali a volte appaiono favorevoli alla teoria elettrodinamica di Ampère e a volte si basano su ipotesi nuove. Tuttavia dal quadro complessivo risulta evidente la sua netta opposizione ad ogni ipotesi meccanicistica e il suo considerare in ogni caso i dati sperimentali come prerequisiti fondamentali per ogni congettura teorica. In tutta la sua attività scientifica Faraday dà sempre la priorità ai fenomeni osservati, in sintonia con la tradizione dinamistica, e non alle "cause prime", le quali non sono osservabili. Così in elettricità dà rilievo alla polarità e non ai fluidi; in magnetismo distingue sempre gli effetti osservati, esprimibili mediante linee di forza magnetiche, rispetto alle ipotesi microscopiche sulla natura dei magneti. Un altro elemento sempre presente nelle speculazioni teoriche di Faraday, è il principio dell'unità e della convertibilità delle forze, come quando, ad esempio, stabilisce una analogia tra luce e suono e i fenomeni elettrostatici ed elettromagnetici per spiegare questi ultimi in termini di azioni che si propagano ondulatoriamente. Inoltre Faraday propende sem-

⁹⁰ Ivi, § 2768.

⁹¹ Ivi, § 1162.

pre per una concezione dinamistica della materia: così nel suo famoso saggio, *Speculation touching Electric Conduction and the Nature of Matter*,⁹² enuncia esplicitamente la propria concezione secondo cui la materia doveva essere considerata come un “plenum” di forze che riempiono lo spazio piuttosto che come un insieme discreto di atomi.⁹³

In quest’opera Faraday attacca alla radice la teoria, allora in auge, della costituzione atomica della materia criticandone la concezione secondo cui un atomo è “un piccolo pezzo di materia immutabile e impenetrabile”, difendendo la concezione di Boscovich secondo la quale, invece, un atomo è un punto con “un’atmosfera di forza raccolta intorno ad esso”.⁹⁴ La forza è la base costitutiva della materia che è ovunque continua, e costituita da atomi in grado di compenetrarsi a vicenda e di “toccarsi”. In questo saggio Faraday passa dalla concezione delle forze elettriche, intese come propagazione di un’azione di tipo attrattivo o repulsivo tra atomi polarizzati a distanza, alla concezione di un’azione continua intesa in termini di forze che riempiono tutto lo spazio.

Anche per la gravità, la cui spiegazione ortodossa era in termini di azione a distanza, Faraday introduce la concezione di una forza “fisicamente reale” che pervade tutto lo spazio:

La materia riempie tutto lo spazio, o almeno tutto lo spazio a cui si estende la gravitazione [...] poiché la gravitazione è una proprietà della materia dipendente da una certa forza ed è questa forza a costituire la materia.⁹⁵

Così Maxwell, trent’anni dopo, interpreterà la sostituzione operata da Faraday del concetto di azione a distanza con un’azione continua:

Faraday concepiva linee di forza che attraversano tutto lo spazio, mentre i matematici vedevano centri di forza che attraevano a distanza: Faraday vedeva un mezzo dove essi non vedevano altro che distanza; Faraday ricercava la sede dei fenomeni in azioni reali che si propagavano nel mezzo mentre essi erano soddisfatti di averla trovata in un potere di agire a distanza impresso nei fluidi elettrici.⁹⁶

⁹² Phil. Mag., 1844.

⁹³ M. Faraday, *Experimental Researches* cit., vol. 1, § 284 e seg.

⁹⁴ M. Faraday, *Speculation touching* cit., p. 290.

⁹⁵ *Ibid.*, p. 293.

⁹⁶ J. C. Maxwell, *Treatise on electricity and magnetism*, Oxford, 1873, vol. 1, p. X.

E in un altro lavoro ecco cosa scrive Maxwell a proposito delle linee di forza di Faraday:

Questa concezione è un modo del tutto nuovo di concepire l'azione a distanza, riducendolo a un fenomeno dello stesso tipo dell'azione a distanza che viene esercitata per mezzo della tensione di funi.⁹⁷

L'operazione di Faraday consiste nel tentativo di sostituire il dualismo tra "materia" e "forze" con la concezione di un *plenum* di forze che pervadono tutto lo spazio.

Dopo le ricerche in elettrostatica, l'obiettivo successivo di Faraday è quello di ricondurre il magnetismo nell'ambito dei fenomeni elettrici, coerentemente con il suo procedimento di cercare, attraverso l'analogia, di unificare domini osservativi differenti. Già in precedenza aveva sostenuto che l'elettricità e il magnetismo costituivano aspetti differenti di un'unica "power", ma i suoi primi tentativi rimangono infruttuosi. Il punto di svolta è rappresentato da una lettera indirizzatagli dal giovane William Thomson nel 1845.⁹⁸ Quest'ultimo aveva cercato di matematizzare la teoria elettrostatica di Faraday ricavando una serie di previsioni teoriche per le quali gli suggerisce di fare degli studi sperimentali, in particolare di studiare "l'azione di un dielettrico trasparente sulla luce polarizzata"⁹⁹.

Stimolato dalla sua convinzione dell'esistenza di una connessione fra elettricità, magnetismo e luce, Faraday, dopo una serie di tentativi falliti, scopre il cosiddetto effetto "magnetooptico". Utilizzando un potente elettromagnete e un pezzo di vetro ottico con un alto indice di

⁹⁷ J. C. Maxwell, *Action at a distance* in *Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, vol. 2, p. 320.

⁹⁸ W. Thomson a Faraday, 6 agosto 1845, in *M. Faraday, Selected Correspondence* cit., vol. 1, pp. 458–460.

⁹⁹ William Thomson (Lord Kelvin) [1824–1907], pubblicò i suoi primi lavori nel 1841, quando aveva solo 17 anni. Difendendo la metodologia di Fourier estese i fenomeni relativi al calore a quelli elettrici. Negli anni successivi Thomson estenderà il suo approccio dinamistico ad una serie di fenomeni precedentemente trattati in termini meccanicistici (ipotesi molecolari e azione a distanza). Perfettamente consapevole del valore euristico dei modelli meccanici, cosa che non implica un "valore di verità" delle teorie meccaniche, Thomson elabora strutture e teorie matematiche indipendentemente dal contesto fisico e solo successivamente prende in considerazione il problema dell'interpretazione fisica.

rifrazione, fa passare un fascio di luce polarizzata attraverso il vetro, parallelamente alla linea della forza magnetica, e in questo modo ottiene una rotazione del piano di polarizzazione della luce.¹⁰⁰ Faraday scopre che l'angolo di rotazione risulta proporzionale alla distanza percorsa dalla luce nel mezzo e all'intensità della forza magnetica e successivamente individua l'effetto magnetooptico in altri mezzi trasparenti.¹⁰¹

La scoperta di questo fenomeno fornì a Faraday un'ulteriore prova della convertibilità delle forze e soprattutto costituì la prima prova dell'esistenza di un analogo magnetico dei dielettrici. L'effetto magnetooptico compariva in presenza di molte sostanze sia solide che liquide in cui non si era trovato magnetismo né permanente né indotto. Restavano quindi da scoprire le proprietà delle sostanze "diamagnetiche", come Faraday chiamò inizialmente le sostanze in cui si osservava l'effetto magnetooptico¹⁰² e sulle quali iniziò ad effettuare esperimenti per scoprire la natura della loro interazione con i magneti.

Nel novembre del 1845 Faraday riesce a dimostrare che una sbarretta di vetro collocata in posizione diagonale fra le espansioni polari di un potente elettromagnete, si disponeva perpendicolarmente alle linee di forza.

Faraday cerca di interpretare questo risultato ipotizzando una minore tendenza del vetro alla "polarizzazione magnetica" rispetto all'aria circostante. Tale differenza di "suscettività magnetica" faceva sì che la sbarretta venisse spinta via dalla posizione per la quale risultava allineata con le linee di forza magnetiche, come avveniva invece nel caso di una sbarretta magnetizzata.

¹⁰⁰ *Faradays Diary* cit., § 7498 e seg. e M. Faraday, *Experimental Researches...*, cit., vol. 3, §2151 e seg.

¹⁰¹ *Experimental Researches* cit., vol. 3, §§ 2146–2242 e M. Faraday, *On the magnetization of light and the illumination of magnetic lines of force*, Phil. Trans. Roy. Soc., 136, 1846, pp. 1–20.

¹⁰² La distinzione tra sostanze diamagnetiche, paramagnetiche e ferromagnetiche fu proposta successivamente da Whewell.

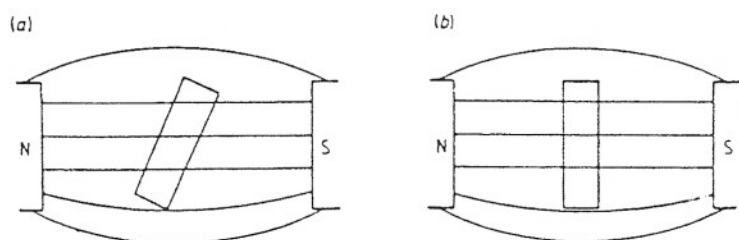


Figura 7. Una sbarretta diamagnetica posta trasversalmente alle linee di forza si dispone perpendicolarmente alle linee di forza

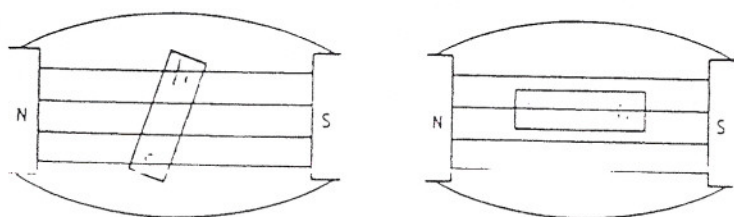


Figura 8. Una sbarretta magnetica posta trasversalmente alle linee di forza si dispone parallelamente alle linee di forza

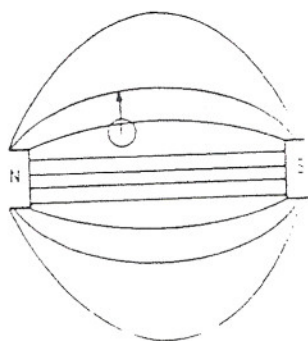


Figura 9. Esperimento di Faraday sul moto di corpi diamagnetici. Una sbarretta di bismuto sospesa in un campo magnetico viene respinta dalla zona dove il campo è più intenso verso zone dove il campo è più debole

Proseguendo con gli esperimenti Faraday trovò effetti non prevedibili sulla base della spiegazione precedente: sospendendo una sbarretta di bismuto nella regione di spazio dove agiva la forza magnetica ovvero in quello che, da allora in poi, Faraday comincia a denominare “campo magnetico”, la sbarretta tendeva ad essere sospinta fuori dall’asse che congiungeva i poli dell’elettromagnete, non appena quest’ultimo veniva fatto funzionare.

Interrompendo la corrente nell’elettromagnete il bismuto tendeva a riassumere la posizione precedente; in sostanza le sostanze diamagnetiche tendevano ad essere allontanate dalla zona dove la forza magnetica era più intensa. Tuttavia non riuscì ad individuare nessun effetto di polarità magnetica nei materiali diamagnetici, un risultato che generò in lui la convinzione che la polarità magnetica dovesse essere essenzialmente una proprietà delle linee di forza piuttosto che dei materiali attraversati da queste. Tale convinzione fu rinforzata quando riuscì a provare che la forza magnetica si propagava nel vuoto, facendolo ulteriormente propendere verso il “primato” delle linee di forza, rispetto alla “materia”.

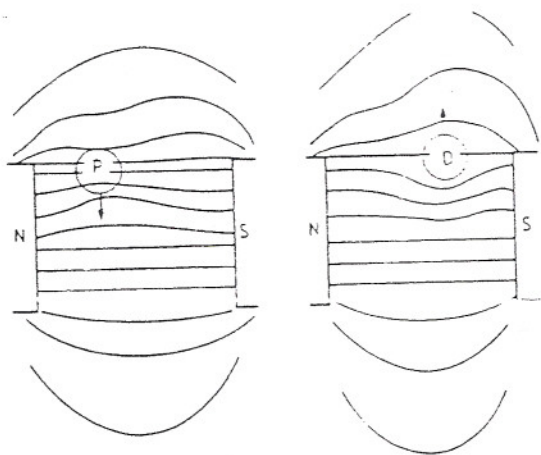


Figura 10. Esperimento di Faraday sul moto di corpi diamagnetici e paramagnetici

Nel suo famoso articolo, *Thoughts on ray vibrations*¹⁰³, Faraday, partendo dall'interazione tra luce e magnetismo, da lui individuata nell'effetto magnetooptico, avanza l'ipotesi che magnetismo e luce siano due aspetti diversi, ma convertibili l'uno nell'altro, della stessa "forza" fondamentale e che le onde di luce che si propagano nel vuoto non siano altro che vibrazioni lungo le linee di forza magnetiche. Questa ipotesi era coerente con il modo di pensare di Faraday, per il quale l'esistenza di linee di forza magnetiche era l'unica proprietà associabile allo spazio vuoto attraverso il quale si propagava la luce. La crescente importanza fisica attribuita da Faraday alle linee di forza, a cui in precedenza assegnava un valore euristico e un significato puramente direzionale, risulta evidente dalla spiegazione da lui data, tra il 1846 e il 1847, dell'"effetto bismuto":

[...] tutti i fenomeni si risolvono in ciò, che una porzione di materia [diamagnetica] quando è sotto l'azione magnetica, tende a muoversi da luoghi o punti di forza più intensi a quelli più deboli. Quando la sostanza è circondata da linee di forza magnetiche di uguale intensità da tutti i lati, non tende a muoversi.¹⁰⁴

In altre parole si assiste all'evoluzione delle idee teoriche di Faraday verso una concezione "fisica" di "campo magnetico".

Nel 1850 Faraday espone la sua teoria del magnetismo, secondo la quale il diverso comportamento delle sostanze diamagnetiche e di quelle paramagnetiche in un campo magnetico dipendeva dai diversi effetti di disturbo creati nelle linee di forza, causati a loro volta dalle diverse conducibilità magnetiche di queste sostanze. I diamagneti, in quanto cattivi conduttori dell'azione magnetica, facevano divergere le linee di forza magnetica, che passavano appunto attraverso di essi in un numero minore rispetto all'aria circostante. Invece le sostanze paramagnetiche, essendo buoni conduttori dell'azione magnetica, facevano convergere le linee di forza. I gas avevano una conducibilità magnetica che si collocava in una posizione intermedia tra quella delle sostanze diamagnetiche e quella delle sostanze paramagnetiche, mentre il vuoto risultava "neutro", cioè non aveva alcuna influenza sulle linee di forza.

Faraday spiegava i diversi effetti dinamici indotti da un magnete sulle varie sostanze in questi termini: una sostanza diamagnetica, agendo in

¹⁰³ Phil. Mag. 28, 1846, pp. 45–350.

¹⁰⁴ M. Faraday, *Experimental Researches* cit., vol. 3, §2418.

modo da causare il minimo “disturbo” alle linee di forza, tendeva ad allontanarsi verso la zona in cui queste divergevano maggiormente, mentre una sostanza paramagnetica che tendeva a far convergere le linee di forza, si spostava verso la zona dove queste erano più concentrate.¹⁰⁵

In un saggio successivo dal titolo *On the physical character of the lines of magnetic force* Faraday sviluppa il concetto di “linee di forza fisiche” (physical lines of force) intese come “un modo fisico di trasmissione della forza”¹⁰⁶.

L’interpretazione fisica data da Faraday delle linee di forza magnetiche costituisce lo sviluppo naturale della sua concezione dinamistica di forza come entità primaria che si propaga con moto ondulatorio. Si può affermare che la concezione fisica delle linee di forza che servivano a questa descrizione, avente lo scopo di specificare l’intensità e la direzione della forza magnetica in tutti i punti dello spazio che circonda il magnete, costituisce ormai una vera e propria teoria di campo.

¹⁰⁵ M. Faraday, *Experimental Researches* cit., vol. 3, pp. 169–268 e in particolare §§ 2718–2796. Cfr. M. Faraday, *On the magnetic and diamagnetic conditions of bodies*, Phil. Trans. Roy. Soc. 141, 1851, pp. 7–28.

¹⁰⁶ M. Faraday, *On the physical character of the lines of magnetic force*, 1852, in *Experimental Researches* cit., vol. 3, §§ 3243–3299.

Bibliografia

Per una storia dell'emergere della concezione del mondo cosiddetta "meccanicistica" si rimanda al classico testo di E. J. Dijksterhuis, *The Mechanization of the World Picture*, trad. it. *Il meccanicismo e l'immagine del mondo, dai Presocratici a Newton*. Feltrinelli, 1971. M. Boas (1952), *The establishment of the mechanical philosophy*, *Osiris*, 10, pp. 412-541.

Tra le opere che seguono in generale gli sviluppi del concetto di campo elettromagnetico da Faraday in poi va menzionato il libro di M. Berkson, *Fields of Force*, London, Routledge & Kegan Paul, 1974 e il notevole saggio di B. Giusti Doran, *Origins and Consolidation of Field Theory in Nineteenth Century Britain: From the Mechanical to the Electromagnetic View of Nature*, in «Historical Studies in the Physical Sciences», VI, 1975, pp. 133-260. Un resoconto degli sviluppi della teoria del campo elettromagnetico prima di Maxwell e della tradizione filosofica rilevante per il suo lavoro si trova nel volume di J. Hendry, *James Clerk Maxwell and the Theory of the Electromagnetic Field*, Adam Hilger Ltd., Bristol and Boston, 1986. Si veda anche di M. La Forgia, *Teoria ed epistemologia del campo elettromagnetico: il ruolo della matematica nello sviluppo della teoria fisica secondo Faraday, Maxwell e Lorentz*, in *Scienza e storia. Analisi critica e problemi attuali*, Roma, Editori Riuniti, 1980, pp. 259-78; un'analisi più estesa nel tempo del confronto tra teorie dell'azione a distanza e teorie dell'azione per contatto (dalla fisica greca a quella contemporanea) è svolta nel libro di M. B. Hesse, *Forze e campi*, Milano, Feltrinelli, 1974 (1961). Ricordiamo ancora la parte II: *I campi*, del libro di E. Bellone, *I modelli e la concezione del mondo da Laplace a Bohr*, Milano, Feltrinelli, 1973, e l'introduzione di S. D'Agostino all'antologia intitolata *L'elettromagnetismo classico* (a cura dello stesso D'Agostino), Firenze, Sansoni, 1975.

Sulle origini del concetto di campo nella tradizione scientifico-filosofica inglese del Settecento cfr. P. M. Heimann - J. E. McGuire, *Newtonian Forces and Lockean Powers: Concepts of Matter in Ei-*

ghteenth Century Thought, in «Historical Studies in the Physical Sciences», 111, 1971, pp. 233–346, oltre a J. E. McGuire, *Forces, Powers, Aethers, and Fields*, in *Methodological and Historical Essays in the Natural and Social Sciences*, Dordrecht, Reidel, 1971; alcune indicazioni su quest'argomento possono ancora essere tratte dal libro di R. Olson, *Scottish Philosophy and British Physics (1710–1880)*, Princeton, Princeton University Press, 1975. Per una trattazione generale sui caratteri della *Dynamical Philosophy* inglese si veda C. Smith, *Mechanical Philosophy and the Emergence of Physics in Britain: 1800–1850*, in «Annals of Science», XXXIII, 1976, pp. 3–39.

Su Oersted e la *Naturphilosophie* si vedano i due saggi di R. C. Stauffer, *Persistent Errors Regarding Oersted's Discovery of Electromagnetism*, in «Isis», XLIV, 1953, pp. 307–10 e *Speculation and Experiment in the Background of Oersted's Discovery of Electromagnetism*, in «Isis», XLVIII, 1958, pp. 33–50; ancora, il libro di B. Dibner, *Oersted and the Discovery of Electromagnetism*, New York, Blaisdell, 1962 e quello di R. A. R. Triker, *Early Electrodynamics*, Birmingham, Pergamon, 1965, entrambi corredati di una parte antologica.

Un'analisi del contesto socio-culturale nel quale si innesta la scienza laplaciana si trova nel libro di M. Crosland, *The Society of Arcueil*, London, Heinemann, 1967. Il rapporto tra programmi di ricerca, istituzioni scientifiche e didattiche, e potere politico nel periodo laplaciano e postlaplaciano è studiato nel saggio di R. Fox, *The Rise and Fall of Laplacian Physics*, in «Historical Studies in the Physical Sciences», IV, 1972, pp. 88–136 e, anche, nel saggio di E. Frankel, *J. B. Biot and the Mathematization of Experimental Physics in Napoleonic France*, in «Historical Studies in the Physical Sciences», VIII, 1977, pp. 33–73.

La vita e il contributo scientifico di Ampère sono esaminati nella biografia di I. R. Hoimann, *André-Marie Ampère. Enlightenment and Electrodynamics*, Cambridge University Press, 1995. Sui rapporti tra Ampère e l'elettrologia francese si vedano: L. Peirce Williams, *Ampère Electrodynamical Molecular Model*, in «Contemporary Physics», I, 1960, pp. 113–23; T. M. Brown, *The Electric Current in Early Nineteenth-Century Physics*, in «Historical Studies in the Physical Sciences», I, 1969, pp. 61–103; M. La Forgia, *L'esperienza di Oersted e la sua interpretazione nelle teorie di Ampère e di Faraday*, in «Giornale di fisica», XXI, 1980, n. 2, pp. 159–78; K. L. Caneva, *Ampère*,

the Aetherians and the Oersted Connexion, in «The British Journal for the History of Science», III, 1980, pp. 121–38; sui rapporti tra la fisica francese e quella inglese, K. R. e D. L. Gardiner, *André Marie Ampère and his English Acquaintances*, in «The British Journal for the History of Science», II, 1965, pp. 235–45; J. Herivel, *The Influence of Fourier on British Mathematics*, in «Centaurus», XVII, 1972, pp. 51–52, e M. Crosland – C. Smith, *The Transmission of Physics from France to Britain: 1800–1840*, in «Historical Studies in Physical Sciences», IX, 1978, pp. 1–61.

Il volume di L. Peirce Williams, *Michael Faraday*, London, Chapman & Hall, 1965, è una ricostruzione compiuta sui diari di laboratorio, le memorie scientifiche, le lettere, ecc. dell'intera attività di ricerca dello scienziato inglese. Su posizioni spesso diverse si colloca J. Agassi col suo *Faraday as a Natural Philosopher*, Chicago, University of Chicago Press, 1971. Riguardo il dibattito storiografico sulle origini del pensiero faradaiano si possono consultare: J. Brookes Spencer, *Boscovich's Theory and its Relation to Faradays Researches: an Analytic Approach*, in «Archive of History of Exact Sciences», IV, 1967, pp. 184–202; T. H. Levere, *Faraday, Patter, and Natural Theology: Reflections on an Unpublished Manuscript*, in «The British Journal for the History of Science», IV, 1968, pp. 95–107; P. M. Heimann, *Faraday's Theories of Matter and Electricity*, in «The British Journal for the History of Science», V, 1971, pp. 235–57; A. Rossi, *Boscovich e Faraday*, in «Physis» XVIII, 1976, n. 3–4, pp. 287–96. Una lucida analisi delle convinzioni metodologiche ed epistemologiche di Faraday è svolta nel saggio di L. Peirce Williams, *Epistemology and Experiment: The Case of Michael Faraday*, in «Proceedings of International Colloquium of Philosophy of Science», Dordrecht, Reidel, 1968, pp. 231–39; si veda anche M. La Forgia, *Michael Faraday e i suoi biografi*, in «Physis», XX, 1978, pp. 123–46.

- D. H. Arnold (1983), *The Mécanique Physique of Siméon Denis Poisson: the evolution and Isolation in France of his Approach to Physical Theory (1800–1840)*, *Archive for Hist. of Exact Sc.*, 28, pp. 243–367; 29, pp. 37–51; e (1984), 29, pp. 184–94.
- S. Devons (1978), *The Search for Electromagnetic Induction*, *Physics Teacher*, 16, pp. 625–31.
- J. Hofmann (1987a), *Ampère. Electrodynamics and Experimental Evidence*, *Osiris*, 3, pp. 45–76.
- E. Mendoza (1985), *Ampère's Experimental Proof of his Law of Induction*, *European Journal of Physics*, 6, pp. 281–6.
- L. P. Williams (1983), *What Were Ampère's Earliest Discoveries in Electrodynamics?*, *Isis*, 74, pp. 492–508.
- L. P. Williams, *Why Ampère did not Discover Electromagnetic Induction*, *American Journal of Physics*, 54, pp. 306–11.
- T. Brown (1969), *The Electric Current in Early Nineteenth-Century French Physics*, *Hist. Stud. Phys. Sci.*, I, pp. 61–103.
- D. Gooding (1978), *Conceptual and Experimental bases of Faradays Denial of Electrostatic Action at a Distance*, *Stud. Hist. Phil. Sci.*, 9, pp. 117–49.
- P. M. Heimann (1971a), *Faraday's Theories of Matter and Electricity*, *Br. J. Hist. Sc.*, 5, pp. 235–57.