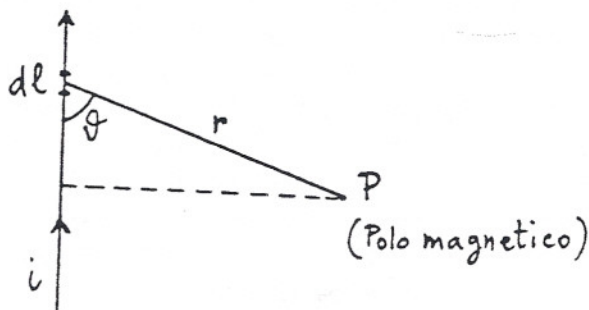


rente elettrica che scorre in un elemento infinitesimo del conduttore è direttamente proporzionale all'intensità della corrente ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza del punto dal filo⁶⁸:

$$dB \propto \frac{idl \sin \theta}{r^2}$$



2.3 Il contributo di Ampère

I contributi più significativi allo sviluppo dell'elettromagnetismo in Francia non vennero dai fisici laplaciani, ma da ANDRÉ-MARIE AMPÈRE [1775–1836], che diede un'interpretazione degli esperimenti di Oersted in netto contrasto con la teoria magnetico-meccanicistica di Biot, e più vicina allo spirito dinamistico di Oersted.

Ampère era un "enfant prodige": a 12 anni dominava tutta la matematica conosciuta ai suoi tempi. Nel 1801, a 26 anni, diventa professore di fisica e di chimica a Bourg e nel 1809 professore di matematica all'École Polytechnique a Parigi. Successivamente i suoi interessi si allargano dalla fisica alla botanica, alla chimica, alla matematica, alla

⁶⁸ Tale legge, caposaldo dell'odierna teoria elettromagnetica, è l'equivalente magnetico della legge di Coulomb che esprime l'intensità del campo elettrico prodotto da un elemento infinitesimo di carica in un punto generico dello spazio circostante, a distanza r dalla carica stessa: $dE \propto \frac{dq}{r^2}$.

psicologia e alla filosofia; si sposta inoltre su posizioni dinamistiche e legge Kant, sposandone la teoria dell'atomo puntiforme come centro di forza. Entra in contatto con Davy, Faraday e Oersted durante i loro soggiorni a Parigi, rimanendo molto impressionato dal loro approccio dinamistico alla scienza. Definisce la metafisica come "l'unica scienza realmente importante". Dopo la morte di Lagrange si dedica all'approccio matematico, ma continua a seguire gli sviluppi della fisica e a "sognare alternativamente di chimica e di psicologia". Alla fine degli anni '10, convinto dalla teoria ondulatoria di Fresnel e dalla sua concezione di etere luminifero, abbandona la teoria emissiva della luce, associandosi a questo punto con Arago e lo stesso Fresnel, nella loro opposizione a Biot e alla scuola laplaciana. Ampère focalizzò la sua opposizione all'approccio meccanicista nella critica all'"abuso di ipotesi" dei laplaciani. Secondo il suo punto di vista il corretto approccio alla fisica non consisteva nell'"imporre ipotesi alla natura", ma

nell'osservare prima i fatti, variando le condizioni per quanto possibile [cioè i parametri considerati significativi per un dato esperimento], e accompagnare ciò con precise misure, in modo da dedurre leggi generali basate esclusivamente sull'esperienza, e successivamente ricavare, indipendentemente da qualsiasi ipotesi riguardante la natura delle forze che producono i fenomeni, il valore matematico delle forze stesse, cioè derivare la formula che li rappresenta.

Dopo l'annuncio dato da Oersted dell'azione di una corrente su un magnete, Ampère, il quale aveva assistito alle sedute del 4 e 11 settembre durante le quali Arago aveva riprodotto a Parigi tali esperimenti, si lancia a capofitto sul problema e, appena sette giorni dopo, presenta una prima relazione all'Académie des Sciences nella quale stabilisce una precisa distinzione fra corrente elettrica e differenza di potenziale, concetti non ancora ben definiti a quell'epoca. Infatti non era affatto chiara la differenza tra filo conduttore, conduttore elettrostatico e pila voltaica, né era stato ancora definito il concetto di circuito elettrico chiuso, e lo stesso galvanismo era considerato dai più come una debole forma di elettricità statica. Ampère esegue una serie di esperimenti per chiarire la distinzione tra ciò che definisce "tensione elettrica", intesa come differenza di potenziale tra due conduttori o due poli di una batteria, e la corrente, che interpreta convenzionalmente, "à la Laplace", come composta di due fluidi che scorrono in direzioni opposte. Dimostra inoltre che

soltanto le correnti, e non la tensione elettrica, sono in grado di produrre una deviazione dell'ago magnetico. Utilizzando l'ampiezza di tale deviazione come una misura dell'intensità delle correnti stesse, costruisce un dispositivo da lui stesso denominato "galvanoscopio", il moderno galvanometro ad ago mobile.

Nella seconda memoria [ottobre 1820], elabora ulteriormente la distinzione tra fenomeni elettrostatici, o "tensionali", ed elettrodinamici, o "galvanici", mostrando che conduttori statici si respingono, se di carica uguale, e si attraggono se di carica opposta, mentre, al contrario, correnti concordi si attraggono e correnti discordi si respingono.

La terza memoria risale al dicembre 1820 e contiene la prima enunciazione della formula che esprime la forza che agisce tra due elementi infinitesimi di filo percorso da corrente. Su suggerimento di Laplace effettua esperimenti che mostrano la presenza di una corrente di uguale intensità lungo tutto il filo conduttore, anche in zone distanti dai poli della batteria, tali esperienze lo portano ad elaborare il concetto di circuito elettrico chiuso, concetto che verrà ulteriormente chiarito dallo scienziato tedesco Georg Simon Ohm, nel 1826. Con la memoria del gennaio dell'anno successivo si conclude questo periodo di lavoro intensivo i cui risultati saranno riassunti nel lavoro *De l'action exercée sur un courant électrique par un autre courant, le globe terrestre ou un aimant*⁶⁹.

Nel 1822 Ampère elabora una teoria secondo la quale i due fluidi elettrici costituivano nel loro insieme l'etere luminoso "in cui essi si saturano reciprocamente l'uno con l'altro". In base a questa immagine la trasmissione di una corrente elettrica doveva consistere in un processo di successiva composizione e decomposizione dell'etere lungo il circuito, da cui risultava il fluire delle due elettricità lungo il circuito stesso, insieme ad una trasmissione di vibrazioni attraverso l'etere, le quali a loro volta determinavano il fenomeno di attrazione e repulsione fra correnti⁷⁰. Tale spiegazione costituiva, in un certo senso, un su-

⁶⁹ Ann. de Chim. e de Phys., 2a serie, vol. XV,

⁷⁰ A. M. Ampère, *Résumé d'Observations Électro-dynamiques*, Paris, 1922. Questa spiegazione, che comportava per la corrente un continuo processo di dissociazione e ricomposizione di fluidi e non una sequenza di cariche statiche, contrastava e confutava la prevalente concezione elettrostatica della pila, in particolare quella di Biot, il quale la considerava come un particolare tipo di macchina elettrica, una sorta di potente bottiglia di Leida che si caricava e si scaricava continuamente attra-

peramento dell'azione a distanza di tipo laplaciano. Inoltre, dato che comportava per la corrente un continuo processo di dissociazione e ricomposizione di fluidi e non una sequenza di cariche statiche, contrastava e confutava la concezione elettrostatica della pila dei laplaciani, in particolare quella di Biot, il quale la considerava come una sorta di potente bottiglia di Leida che si caricava e si scaricava continuamente attraverso le coppie bimetalliche.

L'approccio di Ampère si può collocare a metà tra quello di tipo dinamistico e quello tipicamente meccanicistico alla Biot e Poisson, nel senso che, mentre inizialmente tenta di incorporare i fenomeni elettrici e magnetici nell'ambito di una teoria meccanica dei fluidi elettrici, successivamente si allontana dalla filosofia meccanicistica rifiutandone due veri e propri capisaldi: l'ipotesi dell'azione a distanza, a cui veniva attribuito un ruolo centrale nella teoria di Coulomb e dei laplaciani, e l'ipotesi dei due fluidi elettrici, avanzata dallo stesso Coulomb.

Nonostante i lavori di Ampère avessero raggiunto lo scopo di chiarire la distinzione tra elettricità statica e galvanica, la relazione tra corrente e differenza di potenziale rimarrà ancora confusa, a volte anche per lo stesso Ampère, fino a quando, nel 1827, il fisico tedesco Georg Simon Ohm [1787–1854] non darà una definizione esatta dei concetti di carica elettrica, forza elettromotrice e intensità di corrente, formulando la legge che porta il suo nome⁷¹. Molto più successo avrà invece

verso le coppie bimetalliche.

⁷¹ Dopo l'introduzione da parte di Ampère di una categoria del tutto nuova come la corrente elettrica il galvanometro divenne il dispositivo per misurare delle forze che sembravano non avere nulla a che fare con le forze elettriche misurate con dispositivi elettrostatici come gli elettroscopi. Nel 1827, quando il fisico tedesco Georg Simon Ohm [1787–1854] affermò l'esistenza di una stretta correlazione tra effetti statici (differenza di potenziale riscontrabile con un dispositivo elettroscopico) e effetti di corrente (la cui intensità è misurabile da un galvanometro), la sua tesi non venne accettata immediatamente proprio perché sembrava appunto violare i confini tra concetti elettrici statici e di corrente, collegando fra loro categorie che prima di Ampère erano state così nettamente distinte. Nella sua opera *Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet* (Berlin 1827) Ohm presenta la sua teoria dell'elettricità pienamente sviluppata, strutturandola sulla falsariga della teoria del calore di Fourier, proponendo un'analogia tra flusso elettrico e flusso termico, anche se lui stesso non faceva una vera e propria distinzione tra la "sostanza elettrica" e quella che lui chiamava "forza elettroscopica" (forza elettrica rivelabi-

l'analisi di Ampère sulle interazioni tra correnti e magneti, e in particolare la sua interpretazione dei fenomeni magnetici come dovuti alle correnti elettriche (principio di equivalenza). Per i laplaciani questa concezione rappresentava un'ipotesi del tutto ingiustificata, ipotesi che peraltro lo stesso Ampère considerava più che altro un'analogia, in linea con l'importanza che la tradizione dinamistica attribuiva al metodo analogico.

Il confronto tra l'effetto prodotto su un ago magnetico da parte di un filo percorso da corrente e dal campo magnetico terrestre costituì il punto di partenza di tutta una serie di esperimenti. Infatti Ampère non era soddisfatto delle interpretazioni "à la Biot" in termini di magnetismo temporaneo indotto nel filo; di conseguenza ipotizzò che anche la forza magnetica esercitata dalla terra potesse essere descrivibile mediante correnti elettriche dirette secondo i paralleli terrestri. Ampère estese quindi l'analogia ad ogni altro magnete, avanzando l'ipotesi che non soltanto l'effetto scoperto da Oersted, ma tutti gli effetti derivanti da interazioni magnete-magnete, magnete-corrente, corrente-magnete, corrente-corrente, potessero essere riconducibili ad interazioni fra correnti. Allo scopo di dimostrare tutto ciò eseguì, insieme a Fresnel, una serie di esperimenti sulle interazioni tra spirali e bobine, e in particolare sull'equivalenza tra solenoide⁷² e sbarretta magnetizzata.

le per mezzo di un elettroscopio), la cui differenza tra due punti del conduttore produceva la corrente, e che riteneva fosse distribuita all'interno del conduttore, un'idea difficile da conciliare con il fatto che l'elettricità risiede sulla superficie del conduttore. La legge di Ohm stabilisce appunto una relazione di proporzionalità diretta, in un circuito elettrico, tra la differenza di potenziale V agli estremi di un conduttore e l'intensità I della corrente: $V=RI$, dove R rappresenta la resistenza, se nel circuito scorre una corrente continua. Sebbene il lavoro di Ohm non fosse universalmente accettato in Germania, tuttavia già a partire dal 1830 la sua legge cominciò ad essere usata, in particolare da Lenz nel suo primo lavoro sull'induzione elettromagnetica (1832) e da Weber e Gauss in connessione con la costruzione di strumenti di precisione (1832-33).

⁷² Filo conduttore avvolto a spire elicoidali su un supporto in genere cilindrico, rettilineo o chiuso ad anello (toro), di lunghezza rilevante rispetto al raggio della sua sezione. Il termine fu coniato dallo stesso Ampère, il quale si ispirò alla parola greca $\sigma\omega\lambda\eta\nu\omicron\epsilon\iota\delta\eta\zeta$, il cui significato esprime ciò che ha la forma di un canale.

Né la teoria di Oersted, né la teoria magnetica di Biot, erano in grado di spiegare i risultati di tali esperimenti, i quali costituirono quindi una forte evidenza empirica a supporto della sua idea di unificazione tra fenomeni galvanici e magnetici, ma non riuscirono a persuadere la stragrande maggioranza dei fisici laplaciani, per i quali era semplicemente inconcepibile che si potesse ridurre il magnetismo ad un effetto elettrico. D'altra parte lo stesso Ampère non riuscì a provare quello che rappresentava un pilastro centrale della sua teoria, secondo il quale tutti gli effetti elettrici e magnetici potevano essere ricondotti agli effetti della forza che si instaura tra correnti parallele.

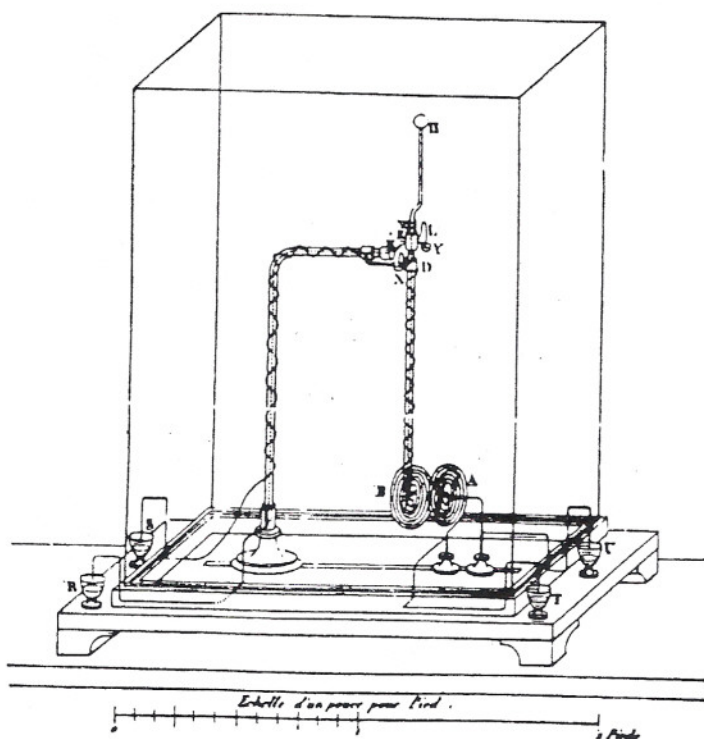
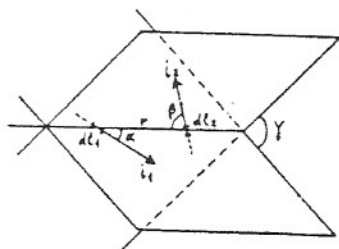


Figura 1. Esperimento di Ampère sulle forze tra due spirali percorse da corrente. Disegno originale, dagli *Ann. Chim. Phys.* (1822).

Tra il 1821 e il 1826 Ampère continuò ad elaborare la sua teoria proponendo varie formule per le forze agenti lungo la linea congiungente i punti centrali di due elementi di filo, dl_1 e dl_2 , percorsi da correnti i_1 e i_2 , posti a distanza r , l'ultima⁷³ delle quali è

$$F \propto \frac{i_1 i_2 dl_1 dl_2}{r^2} (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \frac{1}{2} \cos \alpha \cos \beta)$$



Nel 1822, presentando i suoi risultati preliminari in una sessione dell'Accademia delle Scienze, sottolinea l'esistenza di due tipi di ipotesi possibili. Una prima categoria è quella delle ipotesi "ad hoc", introdotte di volta in volta per spiegare un dato fenomeno specifico, come nel caso dell'ipotesi magnetica di Biot, le quali devono spesso venire abbandonate con l'accumularsi di nuove evidenze empiriche contrarie. Ma esistevano anche ipotesi di natura assai diversa come le sue rappresentazioni dei fenomeni magnetici in termini di correnti elettriche che Ampère considerava "espressioni delle vere relazioni tra i fatti che esse spiegano" e che quindi erano in generale corroborate dalle successive scoperte.⁷⁴

Nel considerare la corrente elettrica come il fenomeno primario in termini del quale si potevano spiegare tutti i fenomeni di azione reciproca tra fili conduttori di corrente, Ampère inizialmente attribuì il magnetismo a correnti macroscopiche coassiali in piani perpendicolari rispetto alla congiungente i poli dei magneti. Successivamente, accogliendo un suggerimento di Fresnel,

⁷³ Dove α e β sono angoli costruiti con la linea perpendicolare che congiunge i centri degli elementi e gli elementi presi nella direzione del flusso della corrente, mentre γ è l'angolo formato dai piani passanti attraverso ciascuna di queste direzioni.

⁷⁴ Cfr. C. Blondel, *Ampère et la Création de l'Électrodynamique*, Paris, Bibliothèque Nationale, 1982.

secondo cui le proprietà dei magneti si potevano derivare da correnti microscopiche di dimensioni molecolari, inizia ad elaborare una teoria elettrodinamica della materia, in base alla quale le molecole si comportavano come

una piccola pila voltaica in cui le correnti entrando da un'estremità della molecola e uscendo dalla parte opposta, si raggruppano nello spazio intorno alla prima di queste due estremità, formando in questo modo un solenoide chiuso che [...] non può esercitare nessuna forza perché tutte queste correnti sono equidistanti e della stessa intensità prima che le molecole siano magnetizzate.⁷⁵

La magnetizzazione quindi si verificava in tutti quei materiali (ferromagneti) in cui le correnti molecolari erano libere di riorientarsi allineandosi tra loro. Tra il 1826 e il 1827 Ampère presenta la sua teoria completa nel suo trattato più importante, *Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques, uniquement deduite de l'expérience*, nel quale enuncia la sua epistemologia influente, paragonando i suoi risultati e il suo metodo a quelli del Newton della gravitazione e a quelli della teoria del calore di Fourier:

L'espressione della attrazione universale, che è alla base delle leggi di Keplero, è del tutto indipendente dalle ipotesi che alcuni autori hanno avanzato per dare una giustificazione alla causa meccanica a cui essi la ascrivono. La teoria del calore [di Fourier] è fondata su fatti generali che vengono ottenuti direttamente dall'osservazione; le equazioni dedotte dai fatti, essendo confermate dall'accordo tra i risultati dei calcoli e degli esperimenti, devono essere accettate come rappresentative delle vere leggi della propagazione del calore, sia da coloro che la attribuiscono all'irraggiamento di molecole calorifiche, sia da coloro che esprimono il punto di vista secondo cui il fenomeno è causato dalle vibrazioni di un fluido diffuso nello spazio [...]. Lo stesso è vero per la formula con cui io ho rappresentato l'azione elettrodinamica. Qualsiasi sia la causa fisica a cui i fenomeni prodotti da questa azione potrebbero essere attribuiti, la formula che io ho ottenuto rimarrà sempre come la vera rappresentazione dei fatti.⁷⁶

I risultati delle ricerche Ampère, un'ammirevole combinazione tra esperimenti e teoria, sulla base dei quali arriva alla formulazione di una teoria "completa" delle correnti stazionarie, costituiscono un'altra

⁷⁵ Cit. in L. P. Williams, *Michael Faraday: A Biography*, Londra, Chapman and Hall, 1965. Cfr. *What were Ampère's earliest discoveries in Electrodynamics?*, Isis, 74 (1983), pp. 492-508.

⁷⁶ Cit. in R.A.R. Tricker, *Early Electrodynamics: the first law of circulation*, Oxford, Pergamon Press, 1965, pp. 157-158.

dimostrazione della fertilità dell'approccio dinamistico, caratterizzato tipicamente dall'uso di analogie a scopo euristico, unito al rifiuto di dettagliate ipotesi meccanicistiche:

Per stabilire le leggi di questi fenomeni ho considerato unicamente l'esperienza e ne ho dedotto la sola formula che può rappresentare le forze alle quali sono dovuti; non ho fatto alcun ricorso alle cause a cui attribuire tali forze, persuaso che ogni ricorso di questo genere debba essere preceduto dalle considerazioni puramente sperimentali delle leggi e dalla determinazione, dedotta unicamente da queste leggi, del valore delle forze elementari, la cui direzione è necessariamente quella della retta congiungente i punti materiali fra i quali esse si esercitano. Perciò ho evitato di parlare delle idee che potevo eventualmente avere sulla natura delle cause delle forze che emanano dai conduttori voltaici [...].

Anche per spiegare la natura dei magneti, ricorre esplicitamente a fenomeni elettrodinamici, pur attribuendo a queste ipotesi lo status di strumenti di lavoro, da cui la deduzione della sua formula fondamentale è del tutto indipendente:

Tutti i fenomeni che la mutua azione di una corrente elettrica e di un magnete presenta [...] rientrano nella legge di attrazione e repulsione di due correnti elettriche, [...] ammettendo che un magnete non sia altro che un sistema di correnti elettriche prodotte da una azione delle particelle dell'acciaio le une sulle altre analogamente a quella degli elementi di una pila voltaica e che si manifestano in piani perpendicolari alla linea che congiunge i due poli del magnete.

In questa stessa memoria Ampère dimostra l'equivalenza di una spira percorsa da corrente con una lamina magnetica⁷⁷, così come l'equivalenza di un solenoide con un magnete.⁷⁸

⁷⁷ Lamina ideale sulle cui facce si distribuiscono, con densità uniforme e perpendicolarmente alla superficie, dei dipoli magnetici tutti ugualmente orientati. (Un dipolo, in quanto sistema costituito da due cariche elettriche, o da due masse magnetiche puntiformi dello stesso valore e di segno contrario, come nell'ago di una bussola, è completamente caratterizzato dal suo momento dipolare, definito come un vettore diretto lungo il segmento che unisce le due cariche e di modulo uguale al prodotto del loro comune valore per la distanza che le separa. Un dipolo tende a disporsi nella direzione del campo in cui si trova). In questa forma il principio è l'estensione ai circuiti finiti dell'equivalenza tra un circuito infinitesimo percorso da corrente e un dipolo magnetico di momento proporzionale alla superficie del circuito e all'intensità di corrente e normale al piano del circuito.

⁷⁸ Nel corso della prima dimostrazione risolve un difficile problema di analisi trasformando un integrale doppio esteso ad una superficie curva in un integrale semplice esteso al contorno della stessa superficie, utilizzando un procedimento che sarà

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 adottati 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.