

accordarsi molto armoniosamente con le indagini matematiche di Massotti e col tentativo di ricondurre i fenomeni elettrici, di coesione, gravitazionali, ecc. a un'unica forza presente nella materia, in accordo col vecchio adagio «la materia non può agire dove non c'è». Non ho comunque intenzione di addentrarmi in discussioni di questo tipo, o di affrontare il problema del rapporto di quest'ipotesi con la teoria della luce o con l'ipotesi dell'etere. Il mio intento era piuttosto quello di stabilire uno stretto rapporto tra alcuni aspetti della conduzione elettrica e della combinazione chimica e le idee correnti sulla natura degli atomi e della materia, contribuendo così a distinguere all'interno della filosofia naturale, quanto può definirsi conoscenza reale, e cioè conoscenza di fatti e di leggi, da quanto può diventare esattamente il contrario, sebbene abbia ancora la forma di conoscenza, per il fatto di accettare in sé così tanti elementi ipotetici.

**Michael Faraday: La realtà fisica delle linee di forza elettriche e magnetiche. Verso una teoria unitaria «di campo» di tutti i fenomeni naturali\***

In una precedente occasione avevo introdotto e descritto certe linee che si dispongono intorno a una sbarra magnetica (sono quelle che divengono visibili quando si cosparge limatura di ferro in prossimità del magnete) e le avevo proposte come espressione appropriata della natura, della direzione e intensità della forza in qualsiasi zona dello spazio, sia all'interno che all'esterno della sbarra. In quell'occasione le linee erano state considerate in astratto. Ora, invece, senza discostarmi da quanto detto o introdurre modificazioni, ho intenzione di indagare sulla possibilità *dell'esistenza fisica* di queste linee. Esistono evidentemente molte forze che agiscono a distanza, la loro natura fisica è per noi incomprensibile tuttavia possiamo ottenere molte informazioni su di esse, per esempio, possiamo sapere qualcosa sulla condizione dello spazio che si trova tra il corpo agente e il corpo che subisce l'azione o tra due corpi agenti mutuamente. Queste forze si manifestano nei fe-

\* M. Faraday, *On the Physical Lines of Magnetic Force*, in *Experimental Researches in Electricity*, III, pp. 438-43.

nomeni di gravità e nei fenomeni luminosi, elettrici, magnetici, ecc. Se si esaminano questi fenomeni separatamente ci si accorge che presentano differenze di rilievo per quanto concerne le caratteristiche delle linee di forza che in essi intervengono; questo fatto ci potrà essere utile in alcuni casi perché ci consentirà di porre in evidenza l'esistenza fisica di queste linee, in particolare per quanto concerne l'interpretazione del magnetismo.

Quando due corpi *a* e *b* gravitano l'uno rispetto all'altro, la loro linea di azione è una retta, ed è quella linea che essi percorrerebbero se fossero liberi di muoversi. La forza di attrazione non viene alterata né in direzione né in intensità dalla presenza di un terzo corpo che agisce per gravità, o altrimenti, su uno dei due corpi o su entrambi. Un cilindro di ottone gravita rispetto alla terra con un peso che è esattamente lo stesso sia che lo si sospenda liberamente come un pendolo, sia che si esercitino su di esso un'attrazione o tensione di intensità anche rilevante. Possiamo far agire su *a* una nuova forza gravitazionale, ma questo non modificherà affatto la quantità di forza che *a* esercita su *b*. Non abbiamo inoltre le prove che il tempo intervenga in qualche modo nello sviluppo di questa forza, qualunque sia la distanza tra i corpi agenti, anche se è dell'ordine di quella che divide il Sole dalla Terra, o una stella dall'altra. Ci è difficile concepire questa forza quando sia presente una sola particella, mentre quando ce ne sono due o più riusciamo a raffigurarcela: tuttavia nell'abbracciare questa concezione non introduciamo alcuna differenza nel carattere della forza che appartiene a diverse particelle; tutte quelle dello stesso tipo sono uguali, reciproche e identiche. Nel caso della gravitazione non esiste alcun effetto che sostenga l'ipotesi di una linea di forza indipendente o fisica, e per quanto ne sappiamo, la linea di gravitazione è più che altro una linea ideale che individua la direzione secondo cui agisce la forza.

Si consideri il Sole in relazione a un'altra forza [oltre a quella gravitazionale] che esso esercita sulla Terra, per esempio, la forza luminosa o quella termica. In questo caso i raggi (che sono linee di forza) attraversano lo spazio; possiamo però modificare successivamente queste linee interponendo sul loro cammino mezzi diversi. Possiamo alterare la loro direzione per riflessione o rifrazione, e possiamo fare in modo che essi seguano percorsi curvilinei o spezzati. Possiamo inoltre intercettarli all'origine prima che abbiano raggiunto il loro o-

biiettivo. Questi raggi si sviluppano *nel tempo* e impiegano 8 minuti per giungere dal Sole sulla Terra: esistono quindi indipendentemente sia dalla sorgente che dal loro obiettivo finale e assumono di fatto un'esistenza fisica chiara e distinta. Da questo punto di vista essi presentano dunque una differenza fondamentale dalle linee di forza gravitazionali, così come sono profondamente distinti da esse per quanto concerne le condizioni che si manifestano nelle zone dove i raggi finiscono. I due corpi ai limiti di un raggio luminoso sono completamente distinti per la loro azione, uno è la sorgente, l'altro l'annichilatore della linea, e la linea stessa ha le caratteristiche di una corrente che scorre in una direzione. Nei due casi della gravità e della radiazione, la differenza tra una linea di forza astratta e una fisica è evidente.

Venendo ora al caso dell'elettricità statica, ritroviamo attrazioni (o altre azioni) che si esercitano a distanza come nei casi precedenti; ma quando confrontiamo l'attrazione elettrostatica con quella di gravità, ci si presentano diversità così macroscopiche da riproporre per intero la questione della natura fisica delle linee di forza. In primo luogo, se si esaminano i corpi che limitano o su cui terminano le linee di attrazione, troviamo, come nei casi precedenti, che essi sono interessati entrambi e con la stessa intensità all'azione, ma non nello stesso modo: al contrario, anche se ognuno di essi ha impresso una forza che, generalmente parlando, è della stessa natura dell'altra, essi si trovano tuttavia in condizioni così diverse che le loro azioni su un terzo corpo che condivide lo stato fisico di uno dei due sono esattamente l'una opposta all'altra, cosicché uno dei corpi la respinge e l'altro l'attrae, e la forza si presenta come una manifestazione di quelle azioni che hanno impresso un carattere insieme duale e antitetico. Ora, ogni volta che si ha a che fare con queste azioni duali, non c'è attrazione finché le due condizioni della forza non siano compresenti e non si trovino l'una di fronte all'altra, collegate dalla linea di forza. Un'altra limitazione essenziale riguarda il fatto che queste due condizioni devono essere perfettamente uguali, non soltanto per poter produrre effetti di attrazione, ma anche in ogni altro fenomeno, in quanto è impossibile disporre le cose in modo tale che sia presente o si sviluppi una maggiore quantità di forza elettrica di un tipo piuttosto che dell'altro. Ancora, queste forze devono essere in relazione fisica l'una con l'altra, e quando due superfici cariche una positivamente e l'altra negativamente sono associa-

te tra loro in questo modo, non possiamo alterare questa relazione a meno di non trasferire su eguali quantità di forza presenti altrove le azioni esercitate su queste superfici. L'azione ha inoltre in questi casi un valore definito. Se una sfera  $a$  ha una carica positiva 10, possiamo porla in relazione con un'altra sfera  $b$  con carica negativa 10, ma se la quantità 5 della sua forza viene assunta da una terza sfera  $c$  carica negativamente allora essa può agire su  $a$  soltanto con una forza 5, e la sfera  $a$  dovrà trovare il modo di sviluppare altrove la quantità 5 di elettricità positiva e questo è abbastanza diverso da quanto avviene nel caso gravitazionale in cui non si hanno forze con caratteristiche duali. Infine, la forza elettrica agisce secondo linee curve. Se una sfera viene elettrificata positivamente e isolata nell'aria e una piastra metallica circolare non isolata viene posta a una distanza di 12 o 15 pollici da  $a$ , in modo tale da essere rivolta con la parte piatta verso la sfera, allora la piastra assumerà, per quanto si è detto sopra, una condizione negativa, ma non si caricherà negativamente soltanto sulla superficie rivolta alla sfera, ma anche sulla superficie opposta, come si può vedere applicandovi una bacchetta a una strisciolina d'oro o d'argento. Ora, la forza che si esercita su questa faccia non può passare attraverso la piastra non isolata, in quanto anche la fogliolina d'ora più sottile è in grado di bloccare l'azione induttiva, ma passerà piuttosto intorno ai bordi della piastra e agirà quindi secondo linee curve. Tutti questi elementi indicano l'esistenza di linee fisiche di forza elettrica: la relazione assolutamente necessaria intercorrente tra superfici positive e negative, la loro mutua dipendenza, che contrasta con la nota mobilità delle forze, non ci consentono di trarre conclusioni alternative. Anche l'azione secondo linee curve dipende dal carattere fisico delle linee di forza e c'è infine una terza proprietà della forza che autorizza a esprimere la stessa conclusione, e cioè il fatto che essa subisce l'azione di mezzi che presentino diverse capacità induttive specifiche.

Quando passiamo all'Elettricità dinamica, l'evidenza a favore delle linee diventa ancora maggiore. Una batteria voltaica con i terminali connessi a un mezzo conduttore possiede ciò che è stato espressivamente definito una corrente di forza che scorre lungo il circuito, ma questa corrente non è che un asse d'azione che presenta forze uguali e contrarie nelle direzioni opposte. Essa consiste di linee di forza che si condensano e si espandono secondo l'azione trasversale del condutto-

re, che cambiano direzione con la forma del conduttore, che sono presenti in ogni parte del conduttore e possono essere spostate utilizzando accorgimenti appropriati, e nessuno dubita che esse siano linee di forza fisiche.

Infine esaminiamo il Magnetismo che è l'oggetto privilegiato della nostra discussione. Un magnete presenta un sistema di forze in sé completo e quindi in grado di esistere autonomamente, grazie alle sue proprietà intrinseche. Possiede il carattere duale o antitetico proprio sia dell'elettricità statica che di quella dinamica, come è evidente se si esaminano le sue polarità, cioè le forze opposte ma della stessa specie, presenti ai suoi estremi. Queste forze sono assolutamente uguali tra loro, non si può modificare l'intensità di una di esse senza con questo produrre un uguale cambiamento nell'altra, e questo vale anche nel caso in cui le opposte polarità di un magnete non interagiscono l'una con l'altra, ma con le polarità di altri magneti. Le polarità, e cioè il nord e il sud di un magnete, non sono soltanto connesse l'una all'altra attraverso o all'interno del magnete stesso, ma devono essere anche collegate all'esterno a polarità opposte (come nel caso dell'induzione elettrica statica) altrimenti non potrebbero sussistere, e questo collegamento comporta necessariamente l'esistenza di una uguale intensità di polarità opposta nei corpi su cui si esercita l'azione del magnete. Così, se la forza di un magnete  $a$  è connessa alla forza di un altro magnete  $b$ , essa non può agire su un terzo magnete  $c$  senza che questa comporti un rilevamento di parte della forza esercitata su  $b$  in proporzione all'azione su  $c$ . Il moto di un filo mette in evidenza l'esistenza di linee di forza all'interno e all'esterno di un magnete: si tratta di linee curve che attraversano il magnete in una parte del loro percorso, e la quantità di linee presenti all'interno del magnete nel suo punto equatoriale è esattamente uguale alla quantità di linee presenti in qualsiasi sezione esterna al magnete che le includa tutte. Sulle linee di forza presenti all'esterno del magnete si può intervenire interponendo mezzi diversi sul loro percorso. Non è possibile trovare un magnete con una sola polarità o che abbia il più piccolo eccesso di magnetismo nord rispetto al sud. Quando le polarità di un magnete non sono in relazione all'esterno con le forze esercitate da altri magneti, esse sono collegate l'una all'altra: cioè il nord e il sud di un magnete isolato sono dipendenti e si sostengono l'uno con l'altro.

Ora, tutti questi fatti e altri ancora provano l'esistenza di linee di forza fisiche sia interne che esterne al magnete. Esse assumono la forma di linee curve o rette; infatti se si considera una sbarra magnetica rettilinea isolata, o più in particolare un disco di acciaio magnetizzato con il diametro come asse magnetico, è evidente che le polarità dovranno essere connesse esternamente tramite linee di forza curve, in quanto una linea retta non potrebbe collegare due punti aventi rispettivamente polarità nord e sud. Il concetto di linea di forza curva può essere consistente, a mio parere, solo con quello di linea di forza fisica.

I fenomeni osservati con il filo conduttore mobile conducono alla stessa conclusione. Non appena il filo attraversa le linee di forza, una corrente elettrica lo percorre o tende a percorrerlo anche se non c'era corrente quando il filo era in quiete. Non c'è dunque corrente in un filo in quiete rispetto alle linee, e quando il filo si muove non è necessario che passi in zone dove la forza magnetica è maggiore o minore, perché si sviluppi una corrente. Può percorrere una traiettoria che non avrebbe assolutamente influenzato un ago magnetico spostato lungo di essa, e cioè una zona di spazio assolutamente indifferente per l'ago, sia che esso si trovi in quiete che in moto; le cose possono addirittura essere disposte in modo tale che il filo, quando è in quiete, ha la stessa forza diamagnetica del mezzo in cui è immerso il magnete, e quindi non può disturbare le linee di forza che passano attraverso entrambi: in tutti questi casi quando il filo si muove si genera in esso una corrente elettrica. Il semplice moto del filo non può aver prodotto questa corrente: deve esserci un particolare stato fisico, alimentato dallo stesso magnete, nello spazio in cui si trova il filo; questo stato è espresso dalle caratteristiche fisiche delle linee di forza magnetiche.

Non siamo ancora in grado di stabilire di che stato si tratti e da cosa dipenda. Potrebbe dipendere dall'etere, come avviene per un raggio luminoso, e del resto si è già dimostrato che esiste una connessione tra luce e magnetismo. Potrebbe dipendere da uno stato di tensione, o di vibrazione, o da qualcosa di analogo alla corrente elettrica, cui le forze magnetiche sono così intimamente connesse. Stabilire se sia necessario o meno ammettere che la materia sorregga questa condizione fisica dello spazio dipenderà da ciò che si intende per materia. Se per materia si intendono le sostanze ponderabili o soggette a gravità, allora la materia non è indispensabile per le linee fisiche di forza magnetica più

di quanto non lo sia per un raggio di luce o per il calore, ma se, ammettendo l'esistenza dell'etere, noi ammettiamo implicitamente che esso sia un particolare tipo di materia allora le linee di forza possono essere una qualche manifestazione o espressione di essa. Quello che osserviamo è che il semplice spazio è magnetico; ma l'idea di spazio può includere l'idea di etere, se si ammette la sua esistenza; se in futuro dovesse venir fuori qualche altra concezione dello stato o della condizione dello spazio, si dovrà attribuire a esso quello che ora, almeno per quanto ci risulta sperimentalmente, è attribuibile alle proprietà dello spazio stesso. D'altra parte ritengo che sia ormai scontato il fatto che la materia ponderabile non è indispensabile all'esistenza di linee fisiche di forza magnetica.

### **Maxwell: il ruolo dell'analogia nella formalizzazione delle idee di Faraday\***

Lo stato attuale della scienza elettrica sembra particolarmente sfavorevole alla speculazione. Le leggi della distribuzione di elettricità sulla superficie dei conduttori sono state dedotte analiticamente dall'esperimento; sono state stabilite alcune parti della teoria matematica del magnetismo, mentre in altre parti i dati sperimentali sono carenti; la teoria della conduzione del galvanismo e quella della mutua attrazione dei conduttori sono state ridotte a formule matematiche, ma non sono entrate in relazione con le altre parti della scienza. Non è possibile oggi proporre alcuna teoria elettrica se non si mostra non solo la connessione tra elettricità in quiete ed elettricità corrente, ma anche la connessione tra le attrazioni e gli effetti induttivi dell'elettricità in entrambi gli stati suddetti. Una simile teoria deve rispettare con esattezza quelle leggi di cui è nota la forma matematica, e deve fornire i mezzi per calcolare gli effetti nei casi limite in cui le formule note so-

\* (J. C. Maxwell, *On Faradays Lines of Force* [1856], in D. Niven [a cura di], *The Scientific Papers of J. C. Maxwell*, I, pp. 155-59)

Per una raccolta di letture arricchita da interessanti commenti e annotazioni si rimanda al volume curato da Mauro La Forgia, *Elettricità materia e campo nella fisica dell'Ottocento* (Loescher, 1982), e all'antologia presente nel testo di Salvo D'Agostino *L'elettromagnetismo classico*, Sansoni, 1975.