

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.

no inapplicabili. Al fine di apprezzare dunque i requisiti della scienza, lo studioso deve acquisire una certa familiarità con una mole ragguardevole di matematica intricatissima, e il solo fatto di trattenere quest'ultima in memoria costituisce di per sé un ostacolo a un ulteriore progresso. Il primo processo, quindi, nello studio efficace della scienza deve consistere nella riduzione e semplificazione dei risultati dell'indagine precedente in una forma tale da poter essere facilmente tenuta a mente. I risultati di questa semplificazione possono prendere la forma di una formula puramente matematica o di un'ipotesi fisica. Nel primo caso perdiamo completamente la visione dei fenomeni che devono essere spiegati; e sebbene possiamo delineare le conseguenze di leggi date, non possiamo mai ottenere visioni più estese delle relazioni dell'argomento in esame. Se d'altronde adottiamo un'ipotesi fisica, vediamo i fenomeni solo attraverso un tramite, e siamo soggetti a quella cecità rispetto ai fatti e a quella avventatezza nelle supposizioni che una spiegazione parziale incoraggia. Dobbiamo quindi scoprire un metodo di indagine che permetta alla mente di disporre a ogni passo di una concezione fisica chiara, e di non venir attirata da qualche teoria che sia fondata sulla scienza fisica dalla quale la concezione è tratta, in modo tale che essa non sia fuorviata dall'oggetto in esame nella ricerca di sottigliezze analitiche, né sia trascinata al di là del vero da un'ipotesi favorita.

Per avere una concezione fisica senza adottare una teoria fisica, dobbiamo acquistare familiarità con l'esistenza di analogie fisiche. Per analogia fisica intendo quella parziale somiglianza fra le leggi di una scienza e quelle di un'altra, che fa sì che l'una illustri l'altra. Così tutte le scienze matematiche sono basate su rapporti tra leggi fisiche e leggi numeriche, di modo che lo scopo della scienza esatta è di ridurre i problemi della natura alla determinazione di grandezze per mezzo di operazioni numeriche. Passando dalla più universale di tutte le analogie a una molto particolare, una somiglianza dello stesso tipo la si riscontra nella forma matematica di due fenomeni diversi che danno origine a una teoria fisica della luce.

Il cambiamento di direzione che la luce subisce nel passaggio da un mezzo a un altro è identico alla deviazione della traiettoria di una particella che passa attraverso una zona molto limitata di spazio in cui agiscono intense forze. Questa analogia, che vale solo per la direzione e

non per la velocità del moto, fu a lungo ritenuta la spiegazione vera della rifrazione della luce; e la troviamo ancora utile nella soluzione di taluni problemi in cui l'adoperiamo senza rischi come metodo artificiale.

L'altra analogia, quella tra la luce e le vibrazioni di un mezzo elastico, è molto più estesa, ma, sebbene non sia possibile apprezzare pienamente la sua importanza e la sua fecondità, dobbiamo tener presente che è fondata solo su una somiglianza nella forma tra le leggi della luce e dette vibrazioni. Spogliandola del vestito fisico e riducendola a una teoria delle «oscillazioni trasversali», potremmo ottenere un sistema di verità rigorosamente fondato sull'osservazione, ma presumibilmente carente nella chiarezza delle concezioni e nella fertilità del metodo. Quanto ho detto sulle dibattute questioni dell'Ottica costituisce una premessa per la discussione della quasi universalmente accettata teoria dell'attrazione a distanza.

Siamo tutti in possesso della concezione matematica di queste attrazioni. Possiamo ragionare su di esse e determinare le loro forme o formule appropriate. Queste formule hanno un significato matematico distinto, e i loro risultati si sono dimostrati in accordo con i fenomeni naturali. Non vi è formula nella matematica applicata più in accordo con la natura che la formula delle attrazioni, e non vi è teoria meglio stabilita nella mente degli uomini che quella dell'azione di un corpo sull'altro a distanza. Le leggi della conduzione del calore nei mezzi uniformi appaiono a prima vista tra le più differenti nelle loro relazioni fisiche da quelle che si riferiscano ad attrazioni. Le grandezze che intervengono in esse sono temperatura, flusso di calore, conduttività. La parola forza è estranea all'oggetto in esame. Tuttavia troviamo che le leggi matematiche del moto uniforme del calore nei mezzi omogenei hanno una forma identica a quelle delle attrazioni che variano con l'inverso del quadrato della distanza.

Dobbiamo solo sostituire *sorgente di calore* con *centro di attrazione*, *flusso di calore* con *effetto accelerante dell'attrazione* in ogni punto, e *temperatura* con *potenziale*, e la soluzione di un problema nel campo delle attrazioni si trasforma in quella di un problema termico.

Ora, la conduzione del calore si suppone prodotta da una azione tra le parti contigue di un mezzo, mentre la forza di attrazione è una relazione tra corpi distanti, e tuttavia, se non sapessimo niente di più di quanto è espresso nelle formule matematiche, nulla distinguerebbe un

insieme di fenomeni dall'altro.

È vero che se introduciamo altre considerazioni e osserviamo fatti ulteriori i due argomenti assumono aspetti molto diversi, ma la somiglianza matematica di alcune leggi rimarrebbe e potrebbe essere ancora utile per stimolare idee matematiche appropriate.

È utilizzando analogie di questo tipo che ho tentato di immaginare, in una forma conveniente e maneggevole, quelle idee matematiche che sono necessarie per lo studio dei fenomeni dell'elettricità. I metodi sono generalmente quelli suggeriti dai procedimenti razionali che si trovano nelle ricerche di Faraday, e che, sebbene siano stati interpretati matematicamente da Thomson e da altri, sono generalmente ritenuti di carattere indefinito e amatematico rispetto a quelli impiegati da matematici professionisti. Adottando questo metodo, spero di rendere evidente che non sto cercando di stabilire una teoria fisica di una scienza nella quale ho a malapena eseguito un solo esperimento e che il limite del mio progetto è quello di mostrare come, mediante una rigorosa applicazione delle idee e dei metodi di Faraday, la connessione di ordini di fenomeni molto differenti che egli ha scoperto può essere posta con chiarezza di fronte a una mente matematica. Eviterò per quanto mi è possibile di introdurre tutto ciò che non serve a una illustrazione diretta dei metodi di Faraday, o delle deduzioni matematiche che se ne possono trarre. Nella trattazione delle parti più semplici dell'argomento farò uso dei metodi matematici e delle idee di Faraday. Quando la complessità dell'argomento lo richiede, userò notazioni analitiche, limitandomi comunque alla elaborazione delle idee concepite dallo stesso filosofo.

Devo in primo luogo spiegare e illustrare l'idea delle «linee di forza».

Quando un corpo viene elettrificato in qualche modo, un piccolo corpo carico di elettricità positiva; posto in una data posizione, subirà una forza che lo spinge in una certa direzione. Se il piccolo corpo viene elettrizzato negativamente, sarà spinto da una forza eguale nella direzione esattamente opposta.

Le stesse relazioni valgono fra un corpo magnetico e il polo nord o sud di un piccolo magnete. Se il polo nord è spinto in una direzione, il polo sud è spinto nella direzione opposta.

In questo modo possiamo trovare una linea che passa in ogni punto dello spazio e tale che rappresenti la direzione della forza agente su

una particella carica positivamente, o su un polo nord elementare, e la direzione inversa della forza su una particella carica negativamente o su un polo sud elementare. Dal momento che tale direzione può essere riscontrata in ogni punto dello spazio, cominciando da un punto qualsiasi possiamo tracciare una linea tale che, muovendoci lungo essa, la sua direzione in ogni punto coincide sempre con la forza risultante in quel punto: tale curva indicherà la direzione di quella forza per ogni punto per cui passa e potrà pertanto essere chiamata *linea di forza*. Possiamo nello stesso modo tracciare altre linee di forza, fino a riempire tutto lo spazio di curve che indicano con la loro direzione quella della forza in ogni punto dato.

Otterremmo in tal modo un modello geometrico del fenomeno fisico, che ci indicherebbe la *direzione* della forza, ma avremmo l'esigenza di un metodo per indicare l'intensità della forza in ogni punto. Se consideriamo queste curve non come semplici linee, ma come tubi sottili di sezione variabile in cui scorre un fluido incompressibile, allora, poiché la velocità del fluido è inversamente proporzionale alla sezione del tubo, possiamo far variare la velocità secondo una legge qualsiasi regolando la sezione del tubo e, in questo modo, possiamo rappresentare l'intensità della forza così come la sua direzione per mezzo del moto del fluido in questi tubi. Questo metodo di rappresentare l'intensità di una forza con la velocità di un fluido immaginario in un tubo è applicabile a ogni sistema di forze concepibile, ma può essere molto semplificata nel caso in cui le forze siano tali da poter essere spiegate dall'ipotesi delle attrazioni che variano con l'inverso del quadrato della distanza, come quelle osservate nei fenomeni elettrici o magnetici. Nel caso di un sistema di forze perfettamente arbitrario, esisteranno comunicazioni fra i singoli tubi; nel caso delle forze elettriche e magnetiche è possibile disporre i tubi in modo da non avere intercomunicazioni. I tubi saranno quindi delle semplici superfici che dirigono il moto di un fluido che riempie tutto lo spazio. Di solito l'indagine sulle leggi delle forze in questione inizia supponendo subito che i fenomeni sono dovuti a forze attrattive e repulsive agenti tra punti determinati. Potremmo tuttavia ottenere una diversa visione dell'argomento, più adatta alle nostre più difficili ricerche, adottando per la definizione delle forze di cui ci occupiamo l'ipotesi che esse possano essere rappresentate in grandezza e direzione dal

moto uniforme di un fluido incompressibile.

Propongo, quindi, di descrivere dapprima un metodo mediante il quale il moto di un tale fluido possa essere chiaramente concepito; in secondo luogo, di dedurre le conseguenze di talune condizioni del moto ipotizzate e di indicare l'applicazione del metodo ad alcuni dei meno complessi fenomeni dell'elettricità, del magnetismo, e del galvanismo; infine, di mostrare come, con un'estensione di questi metodi e l'introduzione di un'altra idea dovuta a Faraday, possono essere chiaramente concepite le leggi delle attrazioni e delle azioni induttive di magneti e correnti, senza fare alcuna ipotesi sulla natura fisica dell'elettricità, o aggiungere alcunché a quello che è stato già provato dall'esperimento.

Riconducendo ogni cosa all'idea puramente geometrica del moto di un fluido immaginario, spero di ottenere generalità e precisione e di evitare i pericoli che sorgono da una teoria prematura che pretenda di spiegare le cause dei fenomeni. Se i risultati che ho raccolto dalla mia speculazione si dimostreranno utili ai filosofi sperimentali nell'organizzare e interpretare i loro risultati, essi avranno ottenuto il loro scopo, e una teoria matura, in cui fatti fisici saranno spiegati fisicamente, sarà formulata da coloro i quali interrogando la Natura in sé possono ottenere la sola vera soluzione dei problemi che la teoria matematica suggerisce.