

fu il suo mentore, il chimico scozzese Humphrey Davy [1778–1829], di cui divenne assistente alla Royal Institution di Londra. Davy fu sostenitore di una teoria atomistica che derivava da Boscovich e da Kant (atomi puntiformi come centri di forza).

Michael Faraday [1791–1867] difese questo punto di vista sia in un suo importante articolo del 1844, *Speculation touching electric induction and the nature of matter*, sia in una nota non pubblicata dello stesso anno:

Quale ragione reale esiste per supporre che in una particella di materia vi sia un qualche nucleo (esteso)? Io credo che un atomo di materia consista in una quantità immutabile di forza (power) [...] e credo che questa forza sia addensata intorno (grouped around) e attaccata ad un centro, così come altri credono che essa sia associata ad un nucleo; ma non posso immaginare a cosa possa servire questo nucleo, o come si riconosca o che cosa vi sia di indipendente dalla forza intorno ad esso.

[...] La materia agisce e subisce azioni (is acted upon) soltanto mediante le sue forze, e gli atomi della materia li immagino come centri di forza. Non so specificare quali tipi di forze, ma la nostra natura di esseri umani ci permette soltanto di riconoscerle e di misurarle mediante i loro effetti.³⁸

Questa citazione serve a comprendere come molti filosofi dinamisti conservino la nozione di atomismo, ma non quella della materialità normalmente associata a questa nozione. Secondo Faraday, come vedremo meglio oltre, possiamo dedurre l'esistenza di forze dai loro effetti empirici sulla materia, ma non esiste alcuna giustificazione empirica per specificare né la natura precisa, né per postulare ipotetiche entità materiali all'origine di tali forze.

1.3 Unificazione, analogia e modelli meccanici per meccanicisti e dinamisti

Finora abbiamo esaminato le differenze tra l'approccio meccanicistico e quello dinamistico sia da un punto di vista filosofico che di metodologia scientifica, tuttavia esistono tre ulteriori aspetti che meritano di essere approfonditi per la comprensione delle epistemologie in-

³⁸ Cit. in T. H. Levere, *Faraday, matter and natural theology – reflection on an unpublished manuscript*, Br. J. Hist. Sc. 4 (1968), 95–107; cit. p. 107.

fluenti nello sviluppo delle teorie elettromagnetiche: a) La ricerca di teorie unificate (principio dell'unità della fisica); b) Il metodo dell'analogia; c) L'uso e la giustificazione di modelli meccanici.

L'ideale dell'unificazione ha sempre svolto un ruolo importante nello sviluppo della scienza, sia per i dinamisti che per i meccanicisti. Nella filosofia meccanicista ciò si traduceva nell'ipotesi che tutti i fenomeni fisici potevano essere ricondotti ad alcune fondamentali ipotesi meccaniche, quali erano per esempio, per i laplaciani, molecole e azione a distanza. Nell'ambito della filosofia dinamistica l'unificazione assume lo status di una vera e propria "necessità epistemologica", cioè gioca un ruolo ben più importante rispetto a quello svolto nella tradizione meccanicista. Come si è visto, una caratteristica della tradizione filosofica dinamistica era, sia in Germania che in Scozia, una accettazione, almeno parziale, della critica di Hume, secondo cui la conoscenza scientifica non poteva essere considerata una conoscenza esclusivamente "oggettiva", ma aveva anche una componente soggettiva ineliminabile. Tuttavia i dinamisti sottolineavano la possibilità di una scienza oggettiva nel ritenere che tutte le leggi scientifiche avevano origine da proprietà comuni a tutte le menti umane. Secondo loro, questa origine unitaria non poteva non riflettersi in un'unità della forma delle leggi stesse.

Gli scienziati della prima metà dell'Ottocento, da Oersted a Faraday, che furono i più accaniti sostenitori dell'unificazione della scienza, si rifanno appunto alla filosofia dinamistica. Entrambi consideravano il concetto di unificazione della scienza inseparabile dal concetto di analogia, peraltro intesa fondamentalmente come analogia fra mente e natura. Come osserva Coleridge³⁹, il fatto stesso che la fisica fosse possibile e che si potessero ricavare leggi come quella di gravitazione, che descriveva perfettamente i fenomeni osservati, era riconducibile esclusivamente al «rimarchevole fatto che si trova che il mondo materiale obbedisce alle stesse leggi che erano state dedotte indipendentemente dalla ragione». Tale analogia fra ragione e natura secondo Coleridge costituisce «un mistero che di per sé sarebbe sufficiente a renderci religiosi».

L'esempio più significativo è fornito, come si vedrà, da Faraday, uno

³⁹ S. T. Coleridge, *op. cit.*, 1818.

scienziato che utilizza l'analogia come guida principale nell'esplorazione di campi e fenomeni sconosciuti. I suoi sforzi di unificare la fisica furono un'ininterrotta ricerca di analogia fra i più disparati fenomeni: luce, calore, elettricità, magnetismo, gravità e fenomeni chimici.

Anche l'analisi lagrangiana, basata sulle proprietà energetiche dei sistemi e non su particolari ipotesi sulla loro struttura interna, svolge una poderosa funzione unificatrice, analoga al ruolo che più tardi sarà svolto dal principio di conservazione dell'energia, come riconoscerà lo stesso Fourier:

[L'analisi lagrangiana] è estensiva ("extensive") come la natura stessa; misura tempi, spazi, temperature [...]. Il suo principale attributo è la chiarezza; non usa parole per esprimere regole confuse. Unifica ("brings together") i fenomeni più differenti e scopre le analogie nascoste che li uniscono.

e più oltre aggiunge:

[L'analisi matematica] sembra che sia una facoltà della mente umana destinata a supplire alla brevità della vita e all'imperfezione dei sensi; ciò che è ancora più notevole è che segue le stesse procedure ("the same course") nello studio di tutti i fenomeni, li interpreta nella stessa lingua, come per attestare l'unità e la semplicità del piano [divino] dell'universo, e per rendere ancora più evidente quell'ordine immutabile che presiede sopra tutte le cause naturali.⁴⁰

L'enfasi data da Fourier all'analisi lagrangiana come mezzo per mettere in luce le analogie tra fenomeni differenti, si riflette nella metodologia utilizzata per questo scopo dal matematico irlandese WILLIAM ROWAN HAMILTON [1805–1865].⁴¹ Ma il lavoro di Hamilton si

⁴⁰ J. Fourier, *The Analytical Theory of Heat*, rist. 1955 dell'ed. 1878; cit. pp. 7–8.

⁴¹ A 3 anni leggeva correntemente in Inglese, a 5 traduceva dal Latino, Greco, Ebraico, e recitava a memoria Omero e Milton. Si interessa di matematica dopo il 1820. Legge Newton e Laplace e trova, a 16 anni, un errore nella *Mécanique Celeste*. Attira l'attenzione di John Bruckley, professore di astronomia al Trinity College: "Questo giovinetto non dico che *sarà*, ma è il primo matematico della sua epoca". A 17 anni scrive una memoria sull'ottica geometrica e nel 1823 entra al Trinity College di Dublino, continuando le sue ricerche in ottica. Ancora prima della laurea viene eletto professore di astronomia e Astronomo Reale d'Irlanda. Partendo dai lavori di Fresnel sulla birifrangenza dei cristalli, calcolò l'effetto della rifrazione conica, effetto che si verifica quando la luce entra in un cristallo sotto un certo angolo in modo che invece di un solo raggio si

spinge ben oltre: l'ottica geometrica e la meccanica si esprimono con lo stesso linguaggio, che egli elabora a partire dalle equazioni di Lagrange da lui riformulate sotto una forma nuova, note appunto come "equazioni di Hamilton".⁴² Si pensi in particolare all'uso fatto da Ha-

ottiene un intero "cono" di raggi "straordinari". Inoltre Hamilton provò che il principio di minima azione e il principio di Fermat arrivano alle stesse conclusioni. I corpuscoli del principio di minima azione e le onde di Huygens-Fresnel si muovono secondo due principii del tutto analoghi. Nel 1843 formulò la teoria dei quaternioni estendendo il concetto di numero complesso allo spazio a quattro dimensioni. Tale spazio è rappresentato da una quaterna di elementi nella forma $q = s + ai + bj + ck$, dove s, a, b e c sono numeri reali, mentre i, j, k , sono unità immaginarie che soddisfano alle relazioni $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$. Sui quaternioni la moltiplicazione non risulta commutativa. Introdotti da Hamilton nel 1853, i quaternioni costituiscono il primo esempio di corpo non commutativo. [*The elements of quaternions*, 1866].

⁴² [W. R. Hamilton, *On a general method in dynamics*, 1835].

Le equazioni di Lagrange erano equazioni differenziali del secondo ordine, piuttosto complicate. Hamilton le trasformò in un insieme di equazioni lineari del primo ordine espresse in termini delle n coordinate di Lagrange $q_1, q_2, \dots, q_n$ e degli n impulsi $p_1, p_2, \dots, p_n$ che individuano lo stato meccanico di un sistema a n gradi di libertà. Se $H = H(q_1, q_2, \dots, q_n; p_1, p_2, \dots, p_n)$ è la cosiddetta funzione hamiltoniana del sistema che ne rappresenta l'energia totale, le equazioni di Hamilton si scrivono:

$$\frac{\partial H}{\partial p_i} = \frac{dq_i}{dt}; \quad \frac{\partial H}{\partial q_i} = - \frac{dp_i}{dt} \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Se H non dipende esplicitamente dal tempo t , l'energia del sistema si conserva durante il moto. Dalle equazioni di Hamilton si deduce inoltre che, se H non dipende da una coordinata q_k il corrispondente impulso p_k è una costante del moto e viceversa. In un campo di forze indipendente dal tempo, la funzione di Hamilton H è data semplicemente dalla somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale del sistema: $H = T + V$. Tuttavia, sebbene le equazioni canoniche abbiano una struttura molto più semplice rispetto alle equazioni originali di Lagrange, non esiste un metodo generale per la loro integrazione. Il problema si riconduce a quello di individuare una opportuna trasformazione "canonica" che semplifica la funzione di Hamilton riducendola ad una forma nella quale le equazioni sono direttamente integrabili. Hamilton trovò che tali trasformazioni sono caratterizzate da una singola funzione, generatrice della trasformazione, la quale è determinata a sua volta da una unica equazione differenziale alle derivate parziali. Risolvere l'intero sistema di equazioni canoniche equivale quindi a risolvere quest'unica equazione, che tuttavia, nella maggior parte dei casi, non semplifica il problema originario che in genere può essere risolto anche per altra via. Per questa ragione i metodi di Hamilton furono a lungo considerati di interesse puramente matematico e di minima importanza pratica. Pochissimi compresero il valore filosofico e la bellezza di questi metodi, tra questi vi fu in particolare il matematico Carl Gustav Jacob Jacobi

milton del principio d'azione, in cui utilizza una funzione H , completamente indipendente dal tipo di fenomeno trattato, enunciando esplicitamente la famosa analogia tra ottica e meccanica.

Lo stesso Hamilton, scrivendo a Whewell, sottolinea l'analogia fra mente e natura che si manifesta nella dinamica:

L'opinione che credo di aver tentato di esprimere quando ho avuto il piacere di parlare con lei di questo problema e su cui da allora non ho riflettuto abbastanza per cambiarla, consiste in sostanza in ciò: esistono, o si possono immaginare, due scienze dinamiche, una soggettiva, a priori, metafisica, deducibile dalla riflessione ("meditation") sulle nostre idee di forza ("power"), spazio e tempo, e l'altra

[1804–1851] il quale riconobbe immediatamente la straordinaria importanza del lavoro di Hamilton e lo perfezionò portando pienamente in luce la chiave del tutto nuova fornita da questa teoria per la comprensione dei problemi più profondi della meccanica. L'equazione differenziale di Hamilton, riformulata poi da Jacobi, possiede in realtà una portata che va molto al di là del problema di integrazione delle equazioni canoniche: la funzione S , generatrice di una particolare trasformazione canonica, costruita come soluzione particolare dell'equazione differenziale attraverso mezzi geometrici, ha in realtà un'interpretazione fisica che mette in luce una delle più sorprendenti scoperte di Hamilton, l'analogia tra i raggi dell'ottica e le traiettorie della meccanica. Le superfici $S=\text{cost.}$ non sono altro che superfici di uguale azione, il cui parallelo ottico sono appunto le superfici che rappresentano il tempo impiegato dalla luce nel passare da un fronte d'onda ad un altro, i fronti d'onda di Huygens. Nell'analogia ottico-meccanica il tempo di propagazione della luce e l'azione sono quantità parallele e quindi i fenomeni meccanici e ottici possono essere descritti entrambi in termini di onde o di particelle. In questo senso le traiettorie ortogonali ai fronti d'onda, interpretabili come raggi o cammini meccanici vengono selezionate tra tutte quelle possibili dai principi variazionali di Fermat e di Hamilton–Jacobi. Partendo dall'interpretazione dei fronti d'onda come superfici sulle quali la fase dell'onda è costante, de Broglie costruì la sua teoria delle onde di materia. La stessa interpretazione delle leggi di natura in termini di teorie meccanico-ondulatorie da parte di Schrödinger, Heisenberg e Dirac avrà origine proprio dai metodi di Hamilton. Le variabili coniugate e le trasformazioni canoniche saranno elementi fondanti della nuova teoria. Le variabili p e q assumeranno una forma matriciale nella teoria di Heisenberg, Born e Jordan, mentre la teoria di Dirac considererà le variabili coniugate come quantità non commutative; lo stesso Schrödinger, partendo dall'analogia ottico-meccanica di Hamilton, introdurrà un punto di vista operativo reinterpretando l'equazione differenziale alle derivate parziali di Hamilton–Jacobi come un'equazione d'onda. Nonostante il radicale allontanamento della meccanica quantistica dalla descrizione del mondo microscopico fornita dalla fisica classica, il carattere lineare, ovvero "autoaggiunto", delle equazioni differenziali della meccanica ondulatoria è un aspetto di base della teoria che implica la derivabilità di tali equazioni a partire da un principio variazionale. [Cfr. C. Lanczos, *op. cit.*]

oggettiva, a posteriori, fisica, scopribile mediante l'osservazione e la generalizzazione di fatti o fenomeni; queste due scienze sono di tipo distinto ("distinct in kind"), ma in definitiva ("ultimately") profondamente e meravigliosamente connesse, a causa dell'unione profonda del soggettivo [ragione] e dell'oggettivo [natura] in Dio, o, per parlare in modo meno tecnico e più religioso, in virtù della manifestazione dell'universo che Egli ci ha concesso di dare all'intelletto dell'uomo; così che le due scienze non sono mai del tutto separate, ma possono e devono procedere insieme, e usare molte espressioni comuni, l'una possedendo un analogo a molti altri, se non a tutti, i risultati e i teoremi dell'altra.⁴³

Va sottolineato come la metafisica religiosa di Hamilton fosse largamente condivisa dalla comunità dei fisici matematici.

Una bizzarra conseguenza, apparentemente contraddittoria, deriva dall'uso dell'analogia nella tradizione dinamistica, uso che aprì la strada all'utilizzazione di modelli meccanici considerati tuttavia non come "vere" rappresentazioni della natura, ma esclusivamente per il loro valore euristico, come utili strumenti di "mediazione" tra la natura e la mente umana. I modelli meccanici utilizzati dagli scienziati della tradizione dinamistica, risultano paradossalmente più rigidi, dovendo strettamente conformarsi a comportamenti possibili da un punto di vista meccanico, ovvero alle leggi della meccanica newtoniana. Gli scienziati che si ispirano alla tradizione dinamistica utilizzarono invece i modelli meccanici come semplici guide alla comprensione e alla rappresentazione dei fenomeni, facendone di fatto un uso più elastico e proficuo da un punto di vista euristico.

2. Approccio meccanicistico e dinamicistico in elettrostatica, galvanismo e magnetismo

2.1 I fenomeni elettrici e magnetici prima di Maxwell

Prima di Oersted e dei suoi famosi esperimenti sulle influenze reciproche fra elettricità e magnetismo, che risalgono al 1820 circa, si erano sviluppate tre scienze separate riguardanti i fenomeni elettrici e magnetici: elettrostatica, magnetismo e galvanismo.

⁴³ T. Hankins, *Sir William Rowan Hamilton*, J. Hopkins Univ. Press, 1980; p. 175.