

Il dibattito sui fondamenti :

L'emergere della fisica teorica

Nel 1887 la fisica presentava, soprattutto in Germania, aspetti di grande novità ed interesse, maturati alla metà del secolo. A partire infatti dal 1847 e cioè dall'opera di Helmholtz *Ueber die Erhaltung der Kraft* si assiste all'emergere della Fisica Teorica, ovvero di un modo di fare fisica consapevolmente diverso dalla fisica sperimentale e da quella matematica. Caratteristica di questo nuovo approccio è il riferimento dei modelli, delle leggi e delle teorie non solo e non tanto ai risultati sperimentali, quanto a principi di carattere generale, regolativi, utili sia a fini giustificativi che euristici. L'uso della matematica veniva visto come uno strumento utile alla chiarificazione ed esplicitazione dei concetti teorici, ma non come lo strumento fondamentale d'indagine. I concetti teorici stessi venivano raggiunti con una riflessione più legata alla filosofia che alla matematica. Dopo un periodo di incertezze, abbastanza breve per la verità, questo nuovo modo di fare fisica ottiene un indiscutibile accordo nella comunità scientifica: si sviluppano le formulazioni delle varie teorie in accordo a principi generali e a partire dagli anni settanta si aprono anche prospettive istituzionali con le prime cattedre di fisica teorica. Si assiste in particolare a tre processi tra loro interconnessi: a) al tentativo di formulare le singole teorie sulla base di, o almeno in accordo a, un principio di carattere generale; b) al dibattito tra teorie che nello stesso ambito di fenomeni competevano per la supremazia non più solo sulla base dell'esperienza ma anche e soprattutto su quella della specifica formulazione dei principi; c) al dibattito sui fondamenti della fisica, in cui vi è il tentativo di alcuni programmi di ricerca affermatasi in un particolare settore di offrire canoni e modelli interpretativi ad altri domini di fenomeni.

La consapevolezza metodologica di questi nuovi aspetti della ricerca in fisica si può osservare in maniera esemplare nelle opere di Helmholtz, che coprono tutta la seconda metà del secolo: dalla parte introduttiva dell'*Erhaltung* (1847) all'*Introduzione alle Lezioni di Fisica Teorica* del 1894.

A) Il dibattito modelli principi all'interno di un programma di ricerca

Alcuni esempi possono chiarire la portata delle innovazioni in oggetto: per quel che riguarda il primo caso, cioè la ristrutturazione delle teorie sulla base dei principi, nella meccanica vediamo che i principi (in generale conservazione dell'energia e minima azione, con un ruolo alterno dell'azione e reazione e quasi nullo fino a fine secolo della relatività) assumono un ruolo fondamentale: nella stessa memoria di Helmholtz del 1847, nelle opere di Rankine a partire dal 1853, nel trattato di Clausius sul potenziale del 1859, negli sviluppi della teoria cinetica in Maxwell nel 1859 e 1866, nel famoso *Treatise* di Thomson e Tait del 1867, negli sviluppi della teoria cinetica in Clausius, nei lavori di J.J. Thomson, nel trattato sul principio di minima azione di Helmholtz del 1886. Qui è da notare che negli anni 80 in relazione ai problemi posti dai potenziali cinetici, oramai ineludibili almeno in elettromagnetismo, l'accento comincia a spostarsi dal principio di conservazione a quello di minima azione come strumento fondamentale di indagine. Il titolo stesso dei famosi *Principi della Meccanica* di Hertz del 1894 testimonia in favore della

nostra tesi, come pure la formulazione della teoria dei gas di Boltzmann del 1896-8 e i suoi *Principi della Meccanica* del 1897-1904; anche Boltzmann come Helmholtz individua nel principio di azione il principio fondamentale di tutta la scienza della natura¹.

Nell'elettromagnetismo anche le teorie si ristrutturano dopo la metà dell'Ottocento per confrontarsi con il principio di conservazione e con quello di minima azione: Weber che già nel 1848 mostra l'esistenza di un potenziale per la propria legge elementare, nel 1870 e 1878 dedica due lunghi lavori ad una riformulazione del principio di conservazione ed a mostrare l'accordo del principio con la propria impostazione; Maxwell stesso, sia nella memoria del 1865 che nel *Treatise* del 1873, attribuisce un ruolo determinante ai due principi in questione; in particolare è sulla base dell'equivalenza dei valori dell'energia elettrostatica nelle formulazioni basate sull'azione a distanza e sull'azione a contatto che Maxwell trova un ponte per trasformare i risultati della scuola continentale in quelli delle teorie di Faraday; anche Clausius a partire dai primi lavori di elettromagnetismo del 1852 e fino alla formulazione della propria legge nel 1875-6 utilizza pienamente i due principi; Helmholtz ovviamente utilizza la propria formulazione del principio di conservazione nei lavori di elettrodinamica degli anni 70 e nella polemica con Weber e Clausius (Helmholtz è tra i pochi a ribadire l'importanza del principio di azione e reazione nell'elettromagnetismo) e negli anni 80 prende spunto proprio dall'elettromagnetismo per tentare di generalizzare il principio di minima azione a tutta la fisica; mentre è famosa la riformulazione di Poynting del principio di conservazione, pensato adesso come conservazione locale e non più globale, del 1884-5, è notevole, anche per mostrare la rilevanza che in pochi decenni aveva conquistato il nuovo modo di fare fisica, il *Report* di J.J.Thomson del 1885: tutte le maggiori teorie elettriche venivano confrontate sulla base del loro accordo con il principio di conservazione: il rapporto teoria-esperimento, pur rilevante, gioca un ruolo assolutamente secondario. Anche Boltzmann dedica due corposi volumi ai problemi elettromagnetici ed in particolare alla teoria di Maxwell nel 1891-3: anche qui domina un approccio basato sulla derivazione lagrangiana². Anche Lorentz tenterà nei suoi primi lavori degli anni 90 di derivare le equazioni di Maxwell da una formulazione lagrangiana e infine considererà essenziale per l'accettazione della propagazione continua il teorema di Poynting. Poincaré infine che condurrà negli anni 90 una costante opera di discussione critica degli sviluppi dell'elettromagnetismo finirà per decretare la superiorità della teoria di Maxwell su quella di Weber proprio sulla base della formulazione del principio di conservazione dell'energia di quest'ultimo (e non su quello di Poynting).

Nello studio dei fenomeni termici la rilevanza assunta dai principi regolativi dopo la metà dell'Ottocento è forse ancora più evidente: la termodinamica nasce infatti sulla base dei due principi, a partire dalle iniziali espressioni del primo principio di Mayer e Joule degli anni 40 per passare poi all'espressione dei due principi di Clausius e Thomson degli anni 50, ai contributi di Maxwell nella sua *Theory of Heat* e a quelli dell'interpretazione probabilistica di Boltzmann. Quest'ultimo compie le sue prime

¹ Phil probl p.255-6

² McC 154-5

ricerche sulle linee della teoria cinetica dei gas di Maxwell (ed in particolare sulla legge di distribuzione delle velocità delle molecole in equilibrio termico) tra il 68 e 71 per dimostrare la validità della seconda legge; nel 72 perviene all'estensione di questa ai processi irreversibili e al famoso teorema H, nel 1877 all'identificazione di entropia e probabilità, nel 1884 deriva dalla pressione di radiazione (Maxwell+Bartoli) e dal secondo principio la legge empirica di Stefan sulla proporzionalità della densità del calore radiante di un corpo nero e la quarta potenza della temperatura assoluta³. L'opera di Planck, come vedremo in seguito più dettagliatamente, si basa su un'attenta analisi dei due principi, e così pure i contributi alla termodinamica di Poincaré. Interamente basata sui principi è l'elettrodinamica di Duhem.

L'energetica infine nasce già nella prospettiva della fisica teorica nelle opere di Ostwald, Helm (sia in quella dell'87 che in quella più ampia del 1898) e Duhem. Anzi essa forse ne rappresenta un indirizzo in parte involutivo, perché il tentativo di derivare tutta la fisica (compresa la termochimica) sulla base di un solo principio (la conservazione dell'energia) e senza un'attenzione sufficiente ai modelli comporterà dei risultati poco fertili.

Già da questi esempi risulta a mio avviso innegabile la grande trasformazione della fisica e il profondo sviluppo scientifico della fisica teorica, secondo le linee previste dalla mirabile *Erhaltung* di Helmholtz del 1847, sviluppo che rapidamente otterrà un riconoscimento istituzionale con l'attribuzione delle prime cattedre di fisica teorica negli anni 70 e con la generalizzazione negli anni 90 (almeno in Germania) di questo insegnamento.

B) Il dibattito modelli-principi tra programmi in alternativa

Questa trasformazione della struttura stessa delle teorie fisiche ci porta al secondo problema prima delineato: da una parte la maggior parte dei contributi innovativi tiene conto ed anzi spesso si basa sui nuovi principi, dall'altra i contributi specifici, all'interno dello stesso dominio di fenomeni, sono spesso in contrasto: ma oramai il contrasto non è più risolvibile unicamente sul piano sperimentale, anzi la maggior parte degli esperimenti vengono interpretati in teorie differenti, e il piano dei principi diventa un terreno di dibattito e di chiarificazione. I principi infatti per essere specificamente formulati hanno bisogno di modelli concettuali ed i modelli concettuali in gioco sono spesso differenti e talvolta contrapposti.

Nella meccanica la posizione di Helmholtz sulla necessità di assumere solo forze centrali di tipo newtoniano si scontra con quella di Clausius, portato ad ammettere qualunque tipo di forza il cui lavoro sia un differenziale esatto. Mentre differenze notevoli sussistono tra un approccio macroscopico basato sui potenziali ed uno microscopico sulla teoria cinetico-molecolare, interessanti ma diversi rispetto al credo meccanicistico maxwelliano di *Matter and Motion* sono i tentativi negli anni 80 di Helmholtz di introdurre i sistemi monociclici, di J.J. Thomson di riportare l'energia potenziale ad energia cinetica, di Hertz di negare il concetto di forza. Infine determinanti per gli sviluppi della fisica saranno le critiche espresse da Mach nella sua *Meccanica*. I dibattiti interni ad uno specifico paradigma vengono affrontati sulla

³ McC 58-71

base dell'espressione del principio di conservazione o di minima azione ottenuta sulla base dei modelli adottati.

Ancora più evidente la situazione in elettrodinamica, ove il dibattito tra le teorie dell'azione a distanza, azione a distanza ritardata, azione a distanza attraverso un dielettrico, azione a contatto nell'etere, azione a contatto nel vuoto sono legate in primo luogo al confronto tra le varie espressioni del principio di conservazione dell'energia: all'espressione del principio di Helmholtz si contrappongono quella di Clausius e quella di Weber, un primo tentativo di localizzazione dell'energia di Maxwell (ancora basato sulla distinzione Helmholtziana tra energia cinetica e potenziale) ed un secondo molto più radicale di Poynting, un ritorno alla formulazione maxwelliana nella formulazione di Poincaré.

In termodinamica il confronto è essenzialmente tra principi legati alla teoria cinetica e principi che se ne staccano: contrasto già presente nell'interpretazione meccanicista di Joule e in quella decisamente non meccanicista di Mayer. Lo sviluppo del dibattito vede Planck (e ancor di più Zermelo) in posizione autonoma negli anni 90 rispetto alle interpretazioni probabilistico-cinetiche di Boltzmann, ed anche rispetto alle interpretazioni energetiste. Rilevanti come sempre le analisi critiche di Mach e Poincaré. Mach in particolare sia nella sua opera del 1872 sulla conservazione del "lavoro", sia nella successiva *Theory of Heat* tenderà a rigettare tutti i tentativi di interpretazione meccanicista.

Infine tra le posizioni energetiste è da rilevare un dibattito tra la posizione sostanzialista di Ostwald e quella più inclinata in senso relazionale di Helm.

C) Il dibattito modelli principi tra paradigmi alternativi

Ma il dibattito sui fondamenti non si esaurisce qui: uno dei suoi aspetti più rilevanti è infatti il tentativo effettuato dai vari programmi di ricerca (interni ad uno specifico dominio di fenomeni) di proporsi come paradigma anche per gli altri domini.

Assistiamo così ad un tentativo di basare un' elettrodinamica ed una termodinamica sulla meccanica, ad un tentativo invece di basare una meccanica ed una termodinamica sull'elettromagnetismo, ad un tentativo di unificazione di tutti i fenomeni portato avanti con forza, seppur brevemente, dall'energetica.

a) **Meccanica**: Facciamo qualche esempio: ancora una volta va citata l'opera archetipica di Helmholtz del '47 come un tentativo di estendere il dominio della meccanica su tutta la fisica, ma notevoli da questo punto di vista sono anche i trattati sulla teoria meccanica del calore di Clausius del 1865, e soprattutto la seconda edizione del '76-79 (e la terza dell'87). Il secondo volume della seconda edizione è completamente dedicato all'elettromagnetismo che viene sviluppato sulla base della teoria del potenziale, con scarsissimi riferimenti all'opera di Maxwell. Ancora su questa linea meccanicista è lo stesso *Treatise* di Maxwell, come pure la sua *Theory of Heat*: Nel primo Maxwell, pur ipotizzando un'espressione della conservazione dell'energia legata ad un'equazione di continuità, considera sempre un principio di conservazione di tipo meccanico, con energia cinetica e potenziale rigidamente separate e identificate con energia elettrostatica e magnetica, e reputa necessario tentare una derivazione lagrangiana delle equazioni, perchè pur non riuscendo a dare un modello meccanico reputa così di poter offrire almeno una spiegazione

meccanica. Queste considerazioni di tipo meccanicista inducono Poincaré a preferire, oramai negli anni 90, la teoria di Maxwell; ancor più legata modelli meccanici è l'opera di Boltzmann sulla teoria di Maxwell. Il tentativo infine di Helmholtz del 1886 di utilizzare il principio di minima azione come base per l'interpretazione di tutta la fisica va visto di nuovo come una riaffermazione della concezione meccanicista.⁴

b) **Elettromagnetismo**: Dall'altra parte i sostenitori dell'elettromagnetismo non avevano minori pretese, anche se partivano in ritardo. Weber tenta già di introdurre una modifica del potenziale gravitazionale di Newton riconducendolo ad un'espressione simile a quella della propria elettrodinamica, ed addirittura si dedica a calcolare, con discreta approssimazione, lo spostamento del perielio di Mercurio, la famosa anomalia della meccanica newtoniana. In seguito Planck stesso si esprimerà, soprattutto negli anni 80 e 90, con cautela sull'interpretazione meccanicista e con un certo ottimismo sulla possibilità dell'elettromagnetismo di offrire una base alla termodinamica. In effetti negli anni 90 Planck studiò i fondamenti dei processi irreversibili della radiazione con le equazioni dell'elettromagnetismo e non con quelle della meccanica. Hertz tendeva nei primi anni 90 ad emancipare l'elettromagnetismo dalle spiegazioni meccaniche, mentre con la nuova concezione dell'energia di Poynting, concezione presto assunta da Lodge, si riducevano le differenze tra energia e materia, le idee iniziali di J.J.Thomson sulla variabilità della massa dell'elettrone con la velocità venivano generalizzate da Lorentz, Wien e Abraham e si arrivava ad una concezione dell'inerzia elettromagnetica che era la base per una reinterpretazione della meccanica sulla base dell'elettrodinamica. Föppl e Drude nei loro testi basavano le equazioni di Maxwell su fatti sperimentali e non tentavano più derivazioni meccaniche, mentre lo stesso Boltzmann agli inizi del nuovo secolo reputava possibile che la meccanica venisse reinterpretata sulla base della teoria degli elettroni⁵. Contribuirono a quest'approccio Wiechert, Kaufmann, Witte.

c) Storicamente importante in questa discussione sui fondamenti ed in questo scontro tra paradigmi il dibattito del 1895 a Lubeca tra meccanicisti costruttivi ed energetisti: Boltzmann da una parte e Helm e Ostwald dall'altra. Obiettivo di questi ultimi era la rifondazione della fisica sulla base della nuova concezione energetica che svalutava il ruolo del secondo principio e del concetto di irreversibilità. Planck, che non era schierato in nessuno dei due campi prenderà posizione durissima contro l'energetica nel 1896.

⁴ Vedi anche i testi di Wüllner, Mueller -Pouillet, Pfaundler, Kundt, Warburg; le opere di F. Neumann, Volkmann, Kirchhoff, H. Weber, Boltzmann citate da Mc Cormack pp.212-3 vol.2. V. anche le interpretazioni meccaniche dell'elettrodinamica di Korn, Ebert, Helm, Voigt, R.Reiff, Sommerfeld, ibidem p.227.

⁵ Ibidem p.191