

SALVO D'AGOSTINO (*)

Da Maxwell a Boltzmann: la costituzione della fisica teorica (**)

Riassunto - La nascita della fisica teorica nella seconda metà del secolo XIX è stata esaminata attraverso i contributi dati da Maxwell, da Hertz e da Boltzmann.

Si considerano le idee di Maxwell relative alla teoria come modello analogico e l'enfasi da lui posta sull'utilità dell'accettazione di una pluralità di teorie; l'originale richiesta di Hertz di porre alcuni vincoli formali sul sistema di concetti e di leggi e la sua insistenza sul valore della previsione di accadimenti; l'affermazione di Boltzmann che soltanto metà della nostra esperienza è propriamente esperienza. Questi sono alcuni dei passi verso la fondazione di quel particolare metodo di studio della natura, fatto con penna e carta, che è stato definito come fisica teorica.

The birth of theoretical physics from Maxwell to Boltzmann.

Summary - The birth of theoretical physics in the second half of the nineteenth century is examined throughout the contributions of Maxwell, Hertz and Boltzmann.

Maxwell's conception of theory as an analogical model and his emphasis on the utility of a provisional acceptance of a plurality of theories, Hertz's original requirement of some formal conditions on the system of concepts and laws and his stress on predictability; Boltzmann's statement that only one-half of our experience is ever experience. These were some of the steps towards the foundation of that peculiar paper-and-pencil type of investigation of nature which was called theoretical physics.

1. *Introduzione: dalla «Meccanica» alla teoria fisica come sistema assiomatico*

Il titolo dell'Opera di Newton «Principia Mathematica Philosophiae Naturalis» è per se stesso significativo: la «Philosophia Naturalis», almeno nel progetto di Newton, se non nella effettiva realizzazione, sull'esempio del sistema di Euclide, si era costituita in «sistema ipotetico-deduttivo», cioè in un assieme, logicamente coerente, di principii, assiomi, corollari, teoremi ed aveva cercato di dedurre i suoi teoremi da alcune proposizioni fondamentali, i «Principi», detti talvolta postulati, o ipotesi fondamentali. Nel corso del settecento questa opera di sistematizzazione era stata rifatta in forme diverse, (nel senso di una diversa scelta delle ipotesi fonda-

(*) Facoltà di Scienze, Università degli Studi «La Sapienza», Piazzale Aldo Moro 5, 00183 Roma.

(**) Lavoro dedicato al Professor G.B. Marini-Bettòlo, Uno dei XL, in occasione del 75° compleanno.

mentali) ma non si era mai stabilizzata in un assetto definitivo (nel senso di accettato per un lungo periodo di tempo, come era stato il caso per i cinque postulati degli Elementi di Euclide). Si potrebbe, ad es., esaminare sotto questo aspetto le diverse sistemazioni della meccanica¹ di Euler, D'Alembert, Lagrange, Laplace, Leonard Euler (1701-1783) aveva formulato per la prima volta in modo esplicito il principio della conservazione del momento della quantità di moto, uno dei due principi fondamentali indipendenti su cui è fondata la sua meccanica (detti anche principi cardinali o equazioni cardinali).² (L. Euler, *Mechanica sive Motus Scientia Analytice Exposita*, 1736). (Una delle conseguenze di questa nuova sistemazione è che l'originale risultato di Huyghens per il centro di oscillazione del pendolo composto, mediante cui veniva definito il pendolo semplice equivalente, diventava un docile corollario dei detti principi). Di tutto questo non vi era traccia nella teoria di Newton.³

La dinamica (1743) di Jean Le Rond D'Alembert (1717-1783) si basava invece su tre principi, il principio d'inerzia, quello del moto composto, ed infine il principio di conservazione della quantità di moto per corpi rigidi. Su di essi lo scienziato francese fondeva una dinamica che comprendeva in se la statica, e si differenziava tanto da Newton da considerare la forza un concetto «metafisico» di cui la sua scienza poteva fare a meno.⁴

Infine la *Mechanique Analytique* (1788) di Louis de Lagrange (1738-1813), trattando separatamente della dinamica e della statica, desumeva quest'ultima dal principio della leva, da quello della composizione delle forze e dal principio delle velocità virtuali.⁵ Le equazioni di Lagrange si presenteranno a metà ottocento, nelle idee innovative di Maxwell, come equazioni di uno speciale tipo di meccanica che permetteva di affrontare la teoria di sistemi la cui natura meccanica non era necessariamente ben definita.

Ancora, nel corso dell'ottocento la sistematizzazione dei principi della meccanica era continuata attraverso le diverse formulazioni di Kelvin, Hamilton, Kirchhoff, per non citare che alcuni nomi.⁶

L'instabilità nella scelta dei principii fondamentali avrebbe fra l'altro contribuito a porre in evidenza come nella scelta stessa vi fosse una certa libertà o un «certo grado» di libertà, e porterà ad una evoluzione delle idee sulla natura della stessa teoria — un processo di maturazione epistemologica che finirà con l'accentuare (come vedremo con Hertz) la natura assiomatica dei postulati stessi, un passo decisivo verso la costituzione della fisica teorica.

All'inizio dell'ottocento si presentano inoltre alla ribalta della scienza nuovi contesti teorici, ottica, termodinamica, elettrodinamica, elettromagnetismo, la cui evo-

¹ RENÉ DUGAS, *Histoire de la Mécanique*, Du Griffon, Neuchâtel, 1950; ERNST MACH, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-critisch dargestellt*, trad. ital., Boringhieri, 1968.

² C. TRUESDELL, *Essays on the History of Mechanics*, Springer, 1968.

³ Ibid.

⁴ T.L. HANKINS, *Jean D'Alembert, Science and the Enlightenment*, Clarendon Press, Oxford, 1970.

⁵ LOUIS DE LAGRANGE, *Mechanique Analytique*, 1778.

⁶ Dugas, cit.

luzione porterà di lì a poco al delinarsi di scienze quasi-meccaniche o estranee alla meccanica, rafforzando così il processo di detronizzazione della meccanica stessa del suo ruolo di scienza unica della natura e quindi vera.

La teoria Elettrodinamica⁷ di Andre Marie Ampère (1826), pur nella sua pretesa di un'ortodossia newtoniana, introduce forze di natura tensoriale (ante literam). Per quanto riguarda la sua metateoria essa si presenta come una scienza senza ipotesi, fondata su una legge elementare di cui è essenziale la forma matematica.

Le teorie di Carnot e di Fourier erano estranee alla meccanica nei loro postulati e leggi fondamentali e diedero luogo ai ben noti sviluppi ottocenteschi. La «*Theorie Analytique de la Chaleur*» (1822) di Fourier, presentava un uso esteso di soluzioni di equazioni differenziali parziali mediante i noti sviluppi in serie, offrendosi come modello di un singolare attacco dei problemi fisici con metodi non meccanici a George Simon Ohm, a Franz Neumann e, in Inghilterra, a William Thomson. Ad indicare questa sua singolare posizione il lavoro di Fourier sarà chiamato, più tardi, la bibbia del fisico-matematico.⁸

La fisica matematica si presentò anche con sviluppi e posizioni autonome nell'opera di Poisson, Cauchy e i fisici matematici francesi. La fisica-matematica fu applicata all'elettrodinamica e alla termodinamica (e all'ottica con Hamilton), con la precisazione essenziale che il cambiamento di oggetto fu determinante nel trasformare, assieme ai suoi metodi, l'immagine e i presupposti della nuova disciplina. Infatti, sino a che l'unica scienza ad alto livello di matematizzazione era la meccanica, la matematizzazione contribuiva a conferirle, con il suo carattere di necessità, un «alone» di scienza unica della realtà fisica, quindi presumibilmente vera.⁹

2. J.C. Maxwell: la teoria fisica come «*analogia*» incompleta e l'eliminazione delle variabili cicliche.

Il tentativo di estendere i metodi della meccanica analitica al nuovo campo dei fenomeni elettromagnetici fu compiuto principalmente da William Thomson (Lord Kelvin) e da James Clark Maxwell. In quest'ultimo esso portò a conseguenze di grandissima importanza, oltre che per le ben note acquisizioni teoriche (una teoria di campo dell'elettromagnetismo e la teoria elettromagnetica della luce) anche per la trasformazione dell'idea di teoria fisica e, quindi, per la costituzione di quella che oggi chiamiamo fisica teorica.

La sua «filosofia dinamica» afferma che *tutti* i fenomeni naturali sono prodotti da materia in movimento. Il metodo d'indagine del fisico è per Maxwell quello del-

⁷ ANDRÉ MARIE AMPÈRE, *Théorie des Phénomènes Electrodynamicis uniquement deduit de l'Espérance*, Paris, 1826.

⁸ H. HERMANN, «Development of mathematical and theoretical Physics in the 19th and 20th Century» in: S. D'Agostino, S. Petruccioli, Edts, *Mathematical Models and Physical Theories, Proceedings of the Fifth Congress of History of Physics*, Accademia Nazionale delle Scienze, Roma, 1984.

⁹ Kant considerava la meccanica come vera scienza appunto perchè matematizzata; v. ad es: G. TARROZZI, M. VAN VIOTEN (Edts), *Radici, Significato, Retaggio dell'Opera Newtoniana*, Società Italiana di fisica, Bologna, 1989.

la ricerca di analogie¹⁰ matematiche e fisiche fra fenomeni di diversa natura, elettrici ed elastici, magnetici ed idrodinamici; che, infatti, se tutto è materia e moto, come egli pensa nella sua «filosofia dinamica», le analogie idrodinamiche o quelle meccaniche non hanno una funzione semplicemente strumentale, ma rispecchiano la natura intima della realtà, quello di essere materia in moto.¹¹ Si noti come rientra in questa concezione la teoria cinetica dei gas (con i suoi caposaldi: temperatura come velocità quadratica media, legge di distribuzione delle velocità e i fenomeni di diffusione etc.), a cui Maxwell diede anche notevoli e ben noti contributi.¹²

Il metodo delle analogie si oppone ai metodi «matematici» dei fisici matematici francesi (Cauchy, Poisson, anche Ampere), ma si oppone anche ai metodi intuitivi, olistici, (Faraday, Brewster, Tyndall), non guidati da questa grande concezione che è quella appunto della filosofia dinamica. Il pensiero di Maxwell, peraltro, è immerso nella cultura scientifica dell'Ottocento inglese il cui leit motive, di derivazione, se non di ortodossia newtoniana, era la prescrizione di non immaginare ipotesi. Su questo motivo Maxwell innesta però una forte variazione che gli consente di fare entrare il metodo di ricerca di Faraday nella scienza ufficiale e nella tradizione accademica. Di questo suo nuovo metodo egli parla nella Prima Memoria «Sulle linee di Forza di Faraday» (1855): lo scienziato deve impossessarsi di un metodo di ricerca che gli impedisca, da una parte, di scambiare le ipotesi per la realtà e dall'altra eviti un procedere puramente matematico; è questo il metodo delle analogie fisiche che, come dice Maxwell, consente di avere idee fisiche senza adottare ipotesi fisiche.

Il metodo viene applicato specialmente nella seconda Memoria, «Sulle linee di forza fisiche», (1862-63) per ricavare una teoria del campo elettromagnetico, considerando tutte quelle analogie fra i fenomeni elettromagnetici ed idrodinamici che vengono presentati da un fluido elastico in moto vorticoso. Il metodo viene qui applicato per così dire «sul filo del rasoio» in quanto rischia spesso di degenerare in un'adozione di ipotesi fisiche;¹³ l'insoddisfazione per questo stato di cose viene espressa anche da Maxwell (nella Memoria «Una teoria dinamica del campo elettromagnetico», 1865). Egli viene così portato a servirsi delle analogie in modo più distaccato, cioè senza ricorrere ad ipotesi sui particolari moti dell'etere e sulla loro trasmissione, ma con precise affermazioni sull'esistenza di moti materiali nello spazio esterno ai corpi elettrizzati: «La teoria da me proposta può quindi chiamarsi una teoria del campo elettromagnetico, perchè essa riguarda lo spazio nella vicinanza dei corpi elettrici e magnetici, e può chiamarsi una teoria dinamica perchè ammette che nello spazio vi è materia in movimento, attraverso cui sono prodotti i fenomeni elettromagnetici osservati».¹⁴

È detto quindi chiaramente da Maxwell che il campo è materia in movimento

¹⁰ C. MAXWELL, «ON PHYSICAL LINES OF FORCE», IN W.D. NIVEN (EDIT) *The Scientific Paper of J.C. Maxwell*, 2 Vols, Dover, N.Y., 1965, Voll. 451-513.

¹¹ MAXWELL, «A DYNAMICAL THEORY OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD» *The Scientific Paper, Cit. Vol. 1*, 527-597.

¹² S. D'AGOSTINO, «La Filosofia di Maxwell» in *Nuova Civiltà delle Macchine*, N 10 1989.

¹³ Ibid.

¹⁴ MAXWELL, «A DYNAMICAL THEORY», CIT. (LA TRADUZIONE QUI E NEL SEGUITO È DEL PRESENTE AUTORE).

e tutto lo sviluppo della teoria nella memoria è coerente a questo. È quindi sul significato di teoria dinamica che va cercata quell'autonomia dalla *meccanica newtoniana*, che è caratteristica della concezione di Maxwell, autonomia che è strettamente collegata all'uso delle equazioni di Lagrange.

Nel «Trattato sull'Elettricità e il Magnetismo» del 1873, la ricerca di analogie viene spostata su un piano più formale, cioè si cercano analogie fra le equazioni dell'elettromagnetismo e le leggi della Meccanica, specie nella loro forma Lagrangiana, più astratte sì, ma riguardanti sempre proprietà dei corpi in movimento.¹⁵

Citerò, fra i tanti, il passo dell'Introduzione al Trattato dove Maxwell dichiara che si sforzerà «di porre nella forma più chiara possibile le relazioni fra la forma matematica di questa teoria (dell'Elettricità e del Magnetismo) e quella della scienza fondamentale della dinamica». La continuità con il metodo dell'analogia presentato nella prima Memoria può essere argomentata dal passo che precede la vera e propria costruzione della teoria del campo: «Ci serviamo quindi del lavoro dei matematici e ritraduciamo i loro risultati dal linguaggio del calcolo in quello della dinamica così che le nostre parole possano richiamare l'immagine mentale non di qualche processo algebrico, ma di qualche proprietà dei corpi in movimento»,¹⁶

L'uso delle equazioni di Lagrange si presenta così come il metodo matematico che consente di mantenere immagini fisiche del sistema elettromagnetico considerato come sistema in movimento. La ragione di questa specificità del sistema di Lagrange, è spiegata da Maxwell stesso con sorprendente chiarezza; Newton aveva teorizzato due metodi per risolvere problemi meccanici mediante l'applicazione della seconda legge: note le forze, ricavare il moto (l'accelerazione) e, viceversa, dedurre le forze dall'accelerazione. Maxwell privilegia nella nuova teoria il secondo metodo che identifica così con il *primo* scopo della dinamica. Si tratta di uno slittamento verso una concezione che potremmo chiamare più «fenomenologica» della meccanica (in linea con gli sviluppi Lagrangiani e ottocenteschi di questa scienza), senza considerare questo in termini riduttivi anzi tenendo presente la grande fecondità e assieme complessità di problemi posti da questo slittamento: «il primo scopo della scienza dinamica è quello di dedurre le forze che agiscono su un sistema quando si conoscono i moti del sistema stesso. Il calcolo del moto, note le forze, anche se più difficile, non è così importante... Le espressioni delle forze che agiscono sul sistema in funzione del moto furono date per primo da Lagrange... Oggi è necessario ai fisici studiare teorie dinamiche della fisica... Io ho applicato questo metodo in modo da eliminare ogni considerazione esplicita di tutte le parti del sistema ad eccezione delle coordinate o variabili da cui dipende il moto del tutto...».¹⁷

Una lettura testuale di un articolo del 1876 e, parallelamente, del Trattato, ci consente di qualificare ulteriormente la originale concezione di Maxwell e dall'altra di illuminare il metodo stesso dell'opera; ecco infatti una chiara enunciazione di programma proprio nella seconda parte del «Trattato» che riguarda la costruzione

¹⁵ MAXWELL, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Unaltered Reprint of 3rd Edition, 1881. Reprint. New York, 1954.

¹⁶ Ibid.

¹⁷ *Scientific Papers*, Cit.

della teoria del campo: «Ciò che mi propongo di fare è di esaminare le conseguenze dell'assunto che i fenomeni della corrente sono quelli di un sistema in movimento, il moto essendo comunicato da una parte all'altra del sistema da forze la cui natura e le cui leggi non tentiamo neppure di precisare, perchè queste possono essere eliminate dalle equazioni del moto secondo il metodo dato da Lagrange per qualsiasi sistema connesso». ¹⁸

Le equazioni di Lagrange sono quindi considerate vantaggiose per il metodo perchè consentono l'eliminazione delle forze «interne» e dei moti interni dell'etere (che in Lagrange si presentano come variabili «cicliche»). Il tema dei moti interni è anche adombrato in un passo dell'articolo del 1876, continuazione del passo sopra citato: «Io ho applicato questo metodo (di Lagrange) in modo da eliminare ogni considerazione esplicita dei moti di tutte le parti del sistema ad eccezione delle coordinate o variabili da cui dipende il moto del tutto».

Un altro passo del 1876 ci chiarisce il significato del passo riportato nel Treatise del 1873: «Certe quantità — che esprimono le reazioni fra le parti del sistema che vengono messe in gioco dalle sue connessioni fisiche — appaiono nelle equazioni del moto delle parti componenti del sistema e la ricerca di Lagrange, vista da un punto di vista matematico, è un metodo per eliminare queste quantità dalle equazioni finali... la difficoltà di questo procedimento è dovuta al fatto che si arriva a risultati, almeno nei primi stadi della ricerca che sono così indeterminati che non si hanno termini sufficientemente generali per esprimerli, *senza introdurre nozioni che non sono strettamente deducibili dalle nostre premesse*» (il corsivo è mio).

Quali sono questi procedimenti indeterminati e di quali nozioni si tratta? Ecco il Trattato a dircelo più chiaramente. Nella costruzione delle equazioni di Lagrange infatti occorre postulare nel campo elettromagnetico qualcosa che possiede energia cinetica, quel qualcosa che Fechner aveva identificato come *corrente* di cariche elettriche. Maxwell infatti prosegue:

«Mi sembra tuttavia che, pur ricavando grandi vantaggi nel riconoscimento delle molte analogie fra la corrente elettrica e la corrente di un fluido, dobbiamo accuratamente evitare qualsiasi supposizione *non garantita dall'evidenza sperimentale* e, per il momento, non vi è alcuna evidenza per mostrare che la corrente elettrica è realmente una corrente di una sostanza materiale o una doppia corrente o se la sua velocità, misurata in piedi al secondo, è più o meno arande. Una conoscenza di queste cose equivarrebbe almeno all'inizio a una teoria dinamica completa dell'elettricità, nella quale non considereremmo l'azione elettrica, come in questo Trattato, un fenomeno dovuto ad una causa ignota, ma come il risultato di moti noti di parti note di materia, in cui non soltanto gli effetti totali ed risultati finali, *ma l'intero meccanismo intermedio ed i dettagli del moto sono considerati oggetto di studio*». (corsivo mio) ¹⁹

Poichè la «causa dell'azione elettrica» rimane ignota, le teorie dinamiche che Maxwell ha presentato nel Treatise sono «incomplete» ed egli si augura che nel futuro la ricerca potrà portare ad una teoria dinamica «completa», in cui «l'azione

¹⁸ MAXWELL, *A Treatise*, Cit.

¹⁹ Ibid., S 574.

elettrica» non sarà considerata, come nel Trattato, «un fenomeno dovuto ad una causa ignota, ma come il risultato di moti noti di parti note di materia».

In termini moderni potremmo dire che Maxwell si augura per il futuro una teoria «completa» in cui non ci siano delle coordinate cicliche, «variabili ignorabili» in cui cioè, i concetti di forze e moti interni, che rappresentano risposte a domande legittime in una spiegazione causale («come si trasmettono i moti dell'etere?»), questi concetti siano presenti nella teoria. Intanto egli accetta di presentare nel Treatise una teoria incompleta, come spiegazione «parziale» dei fenomeni del campo, e quindi in conseguenza di quanto dice sopra, una teoria «temporanea». Ma accantonata l'esigenza di completezza possono coesistere più teorie «temporanee».

Questa, di accettare più teorie «temporanee», è una posizione coerente con *tutta* l'opera dello scienziato scozzese. Non si può fare a meno del riprendere una sua dichiarazione di circa venti anni prima, all'inizio della sua attività scientifica, quando si chiedeva qual'era l'utilità per la ricerca «di immaginare uno stato elettrotonico di cui non abbiamo una concezione fisica distinta, invece di una formula dall'attrazione (quella di Coulomb) che possiamo facilmente comprendere». E rispondeva, allora, che: «È un vantaggio avere due modi diversi di considerare le cose e di ammettere che *vi sono* due modi diversi. Inoltre non credo che abbiamo alcun diritto al momento (di affermare) di comprendere l'azione elettrica, e io sostengo che il merito principale di una *teoria temporanea* è quello di guidare la sperimentazione, senza impedire, quando arriverà, il progresso di una teoria vera».²⁰

La pluralità delle teorie, che sarà teorizzata da Hertz, viene introdotta da Maxwell come un ripiego provvisorio, che, mentre da una parte è consistente con il metodo delle analogie, dall'altra contrasta con quel residuo di «meccanicismo metafisico» che è implicito nella idea di *teoria vera*.

Un esempio veramente impressionante della difficoltà del cambiamento del pensiero fisico ottocentesco verso l'accettazione dell'idea di fisica teorica in senso moderno.

3. Teoria ed osservabili in Hertz

Le idee di Hertz vengono espone nell'ultimo lavoro «Prinzipien der Mechanik...»,²¹ 1894. Esso rappresenta una nuova riformulazione della Meccanica e, con essa, di tutta la fisica, in cui hanno parte principale le idee che Hertz ebbe modo di precisare attraverso la sua opera sperimentale e teorica in elettrodinamica ed anche l'accettazione di alcuni aspetti del metodo di Maxwell.

Hertz afferma che i postulati non debbono avere requisiti di osservabilità (carattere non empirico dei postulati), neppure di rappresentabilità (astrattezza dei postulati). È evidente quindi l'interesse di quest'opera hertziana, anche nei riflessi di

²⁰ MAXWELL, «On Faraday's Lines, cit.

²¹ HEINRICH HERTZ, *Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt*, 1894. Trad. Inglese: H. HERTZ, *The principles of Mechanics presented in a new Form*, 1899; Nuova ediz. New York, 1956; Introduzione, 2-3.

quella teoria della Relatività di Einstein, che apparirà appena dieci anni dopo e che avrà un ben altro successo nella storia della fisica.

L'inizio dell'introduzione ai *Prinzipien* di Hertz, è sorprendente: «Tutti i fisici sono d'accordo che il problema della fisica consiste nel riportare i fenomeni della natura alle semplici leggi della meccanica...».

Il fatto è che Hertz non intende per meccanica la particolare meccanica newtoniana, ma il suo discorso inizia con un più radicale esame del significato di teoria fisica: la conoscenza della natura è per Hertz essenzialmente previsione di accadimenti.²² Questa previsione consiste nel fatto che «le immagini o simboli degli oggetti esterni sono in conformità con le cose sotto *un* solo importante aspetto, cioè nel... (fatto che) le conseguenze necessarie delle immagini nel pensiero sono sempre le immagini delle conseguenze necessarie in natura delle cose rappresentate».

Non altri requisiti, afferma Hertz, è possibile e necessario richiedere dalle immagini che noi ci facciamo degli oggetti, nessuna descrizione fedele o oggettiva, in senso ingenuo, di esse. È proprio questa esigenza ingenua che crea dei vincoli ciechi all'operare del fisico, ad esempio in elettrodinamica, con la pretesa di rappresentarsi che cos'è una carica, qual'è la sua vera «natura», o qual'è la vera natura della forza.

«Orbene come mai la gente non si chiede nello stesso modo, qual'è la vera natura dell'oro, o qual'è la natura della velocità?... Ma attorno ai termini «forza» ed «elettricità» noi abbiamo accumulato più relazioni di quanto non sia possibile (secondo il criterio) della conciliabilità interna (*Zulaessigkeit*)».²³

Hertz passa qui alla critica di quelle che egli chiama le «abituati rappresentazioni» della meccanica. Una è quella in termini di forza, spazio e tempo, l'altra quella che si serve del concetto di energia.

La prima rappresentazione non viene accettata a causa, fra l'altro delle difficoltà a spiegare gli stati di equilibrio dinamico della materia, mediante la concezione delle forze, difficoltà, che sono esemplificate dall'uso ambiguo della cosiddetta forza centrifuga. Afferma Hertz, che essa non è una forza, ma piuttosto il risultato dell'inerzia del corpo stesso (ad es. nel caso di un corpo vincolato da una corda e mosso di moto circolare). Orbene, se la forza centrifuga non è una forza (cioè, causa di accelerazione), com'è possibile che per il terzo principio essa sia uguale ed opposta alla forza centripeta esercitata dalla massa mediante la corda, questa sì, una vera forza, in quanto causa dell'accelerazione? Hertz ritiene che queste difficoltà, che erano state dibattute anche da D'Alembert, sono implicite nell'uso del concetto stesso di forza, uno di quei concetti, secondo Hertz, di cui occorre liberare la fisica in quanto rappresentazione non necessaria alla meccanica, se si vuole avere un sistema di idee semplice, appropriato e consistente.

«Non si può negare che in molti casi le forze che sono introdotte in meccanica nella trattazione di problemi fisici sono soltanto compagni occasionali, che si mettono completamente da parte nella rappresentazione dell'effettiva realtà fisica.

Mentre nelle semplici relazioni che sono all'origine della meccanica il peso di un sasso o la forza muscolare sembrano essere tanto reali e direttamente percepibili

²² Ibid., Introduzione, 2-3.

²³ Ibid., 3-4.

quanto il moto da esse prodotto, diverso è il caso quando ci rivolgiamo al moto delle stelle: qui le forze non sono mai direttamente percepite e tutte le nostre passate osservazioni si riferiscono soltanto all'apparente posizione delle stelle. Né noi ci aspettiamo che in futuro tali forze diventino l'oggetto di osservazione; le future osservazioni che noi prevediamo si riferiscono di nuovo soltanto alla posizione nel cielo di punti luminosi. Le forze gravitazionali entrano come ausilio nei calcoli, nelle deduzioni di future osservazioni e quindi spariscono dalla nostra attenzione. Avviene esattamente la stessa cosa di ogni discussione sulle forze molecolari, delle azioni chimiche, e delle numerose azioni elettriche e magnetiche». ²⁴

Analoghe critiche vengono presentate da Hertz alla rappresentazione della meccanica mediante il concetto di energia. Fra tutte le «rappresentazioni» possibili, viene scelta la più semplice, appropriata e coerente. Essa è, per Hertz, una rappresentazione in termini di massa, spazio e tempo. È evidente che se ci fermiamo ai fenomeni direttamente osservabili, la precedente rappresentazione non è sufficiente per una teoria consistente della meccanica. Per fare un esempio, non possiamo certo spiegarci nei termini predetti il moto della luna attorno alla terra, senza introdurre la forza di gravitazione. Ma se la posizione relativa della Terra e della Luna fosse invariabile, potremmo considerare il moto del sistema Terra-Luna come inerziale intorno al baricentro del sistema. Inoltre possiamo descrivere il moto di un corpo vincolato, ad es., un pendolo rigido, secondo il principio di Gauss del «minimo sforzo» e introducendo uno «spazio di configurazione»; il punto rappresentativo descriverà una «geodetica» in questo spazio. Se un sistema fosse isolato (un pendolo ed il suo supporto) tutti i suoi moti si potrebbero descrivere come moti inerziali del punto rappresentativo del sistema lungo «geodetiche generalizzate», purchè si includa nel «sistema pendolo», la massa del suo supporto. Poichè non è sempre possibile osservare «supporti» in tutti i fenomeni fisici, cioè masse tali che ne permettano la descrizione in termini di moti inerziali, queste «masse» occorre postularle, come nel caso dei fenomeni del magnetismo, in cui l'energia magnetica si manifesta come energia cinetica di «qualcosa» in moto, di una «massa nascosta», cioè non accessibile alla osservazione. Se ciò può sembrare strano, osserva Hertz, occorre pur considerare che la postulazione di queste «entità nascoste» era proprio quello che la meccanica aveva fatto ricorrendo al concetto di forza. Il vantaggio nel postulare, invece di forze, «masse nascoste» è che, così facendo, la teoria non aggiunge altre rappresentazioni oltre quelle di massa, spazio e tempo, a lei necessarie, raggiungendo così una sua semplicità e consistenza interna che prima non aveva.

Questa necessità di postulare entità nascoste è, d'altra parte, secondo Hertz, una caratteristica generale di ogni teorizzazione fisica: «Se cerchiamo di comprendere il moto dei corpi che ci circondano, e riferirlo a regole semplici e chiare, tenendo presente soltanto ciò che è direttamente osservabile, il nostro tentativo sarà molto spesso fallimentare. Ci rendiamo presto conto che la totalità di ciò che è visibile e tangibile non costituisce un universo che si può mettere in accordo con delle leggi, in cui gli stessi risultati seguono sempre dalle stesse condizioni. Ci convinciamo ben presto che la struttura reale dell'universo deve essere più ampia di quella che

²⁴ Ibid., 4.

ci è direttamente rivelata dai sensi. Se vogliamo ottenere un'immagine dell'universo che sia ben fatta, completa ed in accordo con la legge (regolare) dobbiamo presupporre, dietro le cose che vediamo, altre come invisibili — immaginare alleati nascosti —, a causa delle limitazioni dei nostri sensi. Per rappresentarli nel nostro linguaggio sono stati creati i concetti di forza e di energia. Ma un'altra cosa è ancora possibile...» (cioè la rappresentazione in termini di spazio, tempo, massa).²⁵

È interessante qui sottolineare come l'esigenza di assumere come criterio primario per la validità della teoria, quello di una sua logicità intrinseca, una semplicità di organizzazione sistematica dei concetti a partire dagli assunti iniziali, espressa nella richiesta Hertziana di *Zulaessigkeit*, comincia a precisarsi a partire da tutta l'esperienza che Hertz aveva fatto della ricerca fisica, specie nei suoi celebri esperimenti. Gli esperimenti con le onde elettromagnetiche avevano contribuito infatti a prospettargli una nuova concezione dell'osservazione fisica, in cui il concetto di osservazione e la relazione osservabile — termine teorico, era stata profondamente modificata e sconvolta l'accezione ottocentesca di oggetto osservabile (come oggetto che si percepisce o si misura più o meno direttamente) e di teoria (come relazione fra enti osservabili, almeno parzialmente).

Tutto questo è riflesso nello scritto di Hertz e determina l'esigenza di una nuova codificazione del rapporto fra ente teorico e osservabile, cioè una nuova concezione di teoria fisica. Le «masse nascoste» sono, appunto, entità non osservabili, che entrano, così, di diritto in una teoria della cosiddetta «scienza empirica». I principi della teoria sono ora svincolati da un'adesione termine a termine alle entità osservabili, ed essa acquista così «di diritto» una sua libertà rispetto alle osservazioni, che si traduce in una sua maggiore potenza.

Questa libertà si tradurrà di lì a poco, con Poincaré e le correnti del convenzionalismo francese, in libertà di scelta fra formulazioni differenti, fra teorie diverse, (a cui corrispondono cioè differenti scelte di concetti primitivi) la scelta essendo motivata, secondo il convenzionalismo, da motivi di comodità, continuità rispetto alla tradizione etc...

In Hertz, invece, come in Einstein e in Schroedinger la scelta fra le possibili teorie è guidata da criteri autonomi (interni alla teoria e liberi da un'esigenza di stretta correlazione con gli osservabili) di semplicità, consistenza interna, appropriatezza, la cui motivazione è in definitiva da ricondurre alla filosofia neo-kantiana.²⁶

Questa autonomia è possibile dato lo svincolo dalle condizioni di rappresentabilità degli enti della teoria: ricordiamo la frase hertziana: «Le nostre immagini delle cose non devono essere conformi alle cose sotto nessun altro aspetto che non sia quello già menzionato», cioè sotto l'aspetto della prevedibilità.

Questa formulazione esclude che si possa considerare errata una teoria soltanto perchè non è confermata da un particolare esperimento. Ma anche si esclude che essa possa essere respinta su basi puramente «psicologiche», o, se si vuole, di senso comune: è chiaro che mi riferisco al problema della simultaneità e agli «apparenti

²⁵ Ibid., 6.

²⁶ S. D'AGOSTINO, «Boltzmann and Hertz on the Bild-conception of physical Theories», in *History of Science*, 28 (1990) 1-19.

paradossi» della formulazione relativistica, che arriverà da qui a qualche tempo (dieci anni dopo i *Prinzipien*). Einstein leggerà i *Prinzipien* con grande interesse. Questa libertà raggiunta dalla costruzione teorica nei riguardi degli osservabili, sarà proprio quella di cui Einstein saprà approfittare nella formulazione relativistica.

L'affermazione della (parziale) autonomia della teoria nei riguardi dell'esperimento (che non è certamente indipendenza dai risultati sperimentali)²⁷ viene formulata qui in modo esplicito da Planck.²⁸

«Si comprende facilmente che una teoria fisica non può trasformare da se stessa il suo contenuto, che anzi essa si opporrà ad ogni trasformazione con tanta maggior forza, quanta maggiore è la sua completezza e la sua vastità».

Infatti, secondo Planck, «in un sistema di pensiero costruito con coerenza in tutte le sue parti, ogni modificazione in una parte qualsiasi si ripercuote allo stesso tempo in modo scomodo in molte altre parti. Perciò fu necessario l'intervento di forti forze esterne, cioè dei risultati inoppugnabili della ricerca sperimentale, che costrinsero all'abbandono di certi principi teorici, accettati sino ad allora come universalmente validi, e con ciò ad una fondamentale revisione dell'intero edificio della fisica teorica...».²⁹

Planck accenna ad un «mutuo condizionamento» fra teoria ed esperimento, per cui la modifica della teoria «fa sorgere di nuovo per l'esperimento una serie di nuove interrogazioni, la cui risposta fornisce più ampi indizi per la direzione del corso dei pensieri da seguire» (Ibid.).

Secondo Planck, Hertz, pur avendo fatto l'esperimento più sconvolgente per la fisica ottocentesca, quello delle onde elettromagnetiche, si considerava non un innovatore ma un continuatore delle teorie ottocentesche. È strano, in questa osservazione di Planck, come egli non consideri che la filosofia di Hertz sulla teoria fisica sia essenzialmente innovatrice nel metodo rispetto a un Laplace (per fissare le idee). Planck sostiene che lo scopo principale della Meccanica di Hertz, è quello di abolire le distinzioni fra energia cinetica e potenziale e che, a questo scopo, egli aveva eliminato dalla meccanica il concetto di forza.

4. Ludwig Boltzmann: teoria come « modello mentale ». (*Bild*)

Ludwig Boltzmann (1844-1906) rappresenta un testimone di grandi cambiamenti nell'idea di fisica teorica, a cui egli stesso contribuì con consapevolezza dei significati di questa svolta, ma anche con un radicato senso dei limiti in cui questi cambiamenti dovevano essere contenuti. Egli si trovò ad operare fra Maxwell ed Einstein, avendo alle spalle l'epistemologia di Hertz e di fronte Mach, con cui dovette fare i conti, ben consapevole che la fisica teorica doveva ormai inglobare il significato

²⁷ Ibid., Vedi anche: D'AGOSTINO, «Pourquoi Hertz et non pas Maxwell a-t-il découvert les ondes électrique?», *Centaurus*, 32, (1989) 66-76.

²⁸ MAX PLANCK, *Theoretische Physik*, Berlin, 1930 29. Trad. Ital.: M. PLANCK, *Scienza, Filosofia, Religione*, Fabbri, 1973.

²⁹ Ibid., Trad. Ital. 37.

della conquista maxwelliana ed hertziana della pluralità delle teorie e che la fenomenologia di Mach (e principalmente dei machiani) poteva rappresentare un passo indietro, cioè poteva avere delle valenze regressive, assieme alla sua indubbia validità come moderatrice della arditezza delle ipotesi della fisica teorica.³⁰

Secondo Boltzmann, Maxwell «aveva messo in guardia contro l'idea di considerare come l'unica corretta una particolare concezione della natura solo perchè una serie di sue conseguenze fosse stata confermata dall'esperienza», ed aggiunge che Maxwell aveva dato molti esempi di come un gruppo di fenomeni può essere spiegato in due modi completamente diversi, ambedue egualmente adatti a spiegare i fatti... il vantaggio di un metodo (cioè quello che ammette la pluralità delle teorie) sopra l'altro (la teoria unica) si manifesta soltanto attraverso la possibilità di aggiungere (a quelli già noti) fenomeni nuovi e sconosciuti, sebbene (poi) lo stesso metodo debba concepire la possibilità di produrre una terza teoria, dopo la scoperta di ulteriori fatti» (le parentesi sono mie).³¹

Secondo Boltzmann, questa pluralità, e conseguente intrinseca proliferabilità delle teorie, è una conquista recente (rispetto all'idea di teoria vera) e si concilia con la nuova visione della teoria secondo Maxwell:

«... Come una semplice rappresentazione della natura, un'analogia meccanica, secondo il suo dire, che permette provvisoriamente di dare la spiegazione più uniforme e completa della totalità dei fenomeni».³²

Infine aggiunge che «i successi pratici furono quelli che rapidamente condussero alla vittoria queste idee».

A conferma della nuova autonomia della fisica teorica, che si traduce in un diverso rapporto con l'esperimento, Boltzmann sviluppa l'aspetto reciproco della pluralità delle teorie: la conferma sperimentale di una particolare legge di una teoria non può essere considerata una verifica della sua «assoluta giustezza».³³ (Un tema, si direbbe, di anticamera al falsificazionismo di Popper). L'esempio è l'effetto Hall (i magneti agiscono non solo sui poli portatori di corrente, ma sulle stesse correnti) che era stato predetto in base alla «falsa» teoria delle correnti di Wilhelm Weber.

Questo confermerebbe che la predicibilità, pur essendo un criterio necessario per la validità della teoria, non è l'unico, essendo altri criteri interni — quelli enunciati da Hertz — altrettanti requisiti non rinunciabili.

Nel seguito del saggio, Boltzmann sottolinea, da una parte, la ricchezza di nuovi fenomeni che sono stati aperti dall'uso spregiudicato, alla Maxwell, delle nuove teorie, dall'altra, l'intrigo e, a volte, l'oscurità di problemi che sono posti da una riflessione «filosofica» sul significato e sulla coerenza interna delle teorie (a cominciare dalla «vecchia» meccanica in cui il dualismo forza-materia ha sollevato infiniti problemi sulla riducibilità all'uno o all'altro dei due termini).³⁴ Ma, tuttavia, i pro-

³⁰ LUDWIG BOLTZMANN, «Development of Methods of theoretical Physics» (1889), in: L. BOLTZMANN, *Theoretical Physics and philosophical Problems* (R.B. Mc Guinness ed.) Reidel, 1974 - nel seguito indicato con: TP. S. D'AGOSTINO, «Boltzmann and Hertz on the Bild-Conception of physical Theories», cit.

³¹ TP, cit. 83.

³² Ibid., 83.

³³ Ibid., 87.

³⁴ Ibid., 87.

blemi esistono e non si possono esorcizzare ignorandoli o ridicolizzandoli: un avvertimento si direbbe, contro ogni presunta estraneità della filosofia ai problemi della scienza.

Kirchhoff aveva creduto di liberarsi dalla problematica, tacciandola di metafisica ed eliminandola alla base nella sua fenomenologia: egli, secondo Boltzmann³⁵ aveva creduto di esorcizzare il vecchio problema della forza a distanza come causa del moto, ma in realtà, pur discreditandolo anche con la derisione, l'aveva introdotto, senza risolverlo, nella sua idea di ridurre tutto alla forza intesa come «forza vincolare».

«Mentre allora Kirchhoff ridicolizzava il problema della causa dei moti che altri attribuivano alla forza a distanza, Hertz rivendicava (la giustezza del problema di) questi tesi moti, cercando di spiegare le forze per mezzo di vincoli, mentre nell'abituale spiegazione i vincoli erano interpretati come forze».³⁶

Pur ammirando la innovazione apportata da Hertz nei suoi *Prinzipien...* di porre a principio della meccanica solo il concetto di massa, la conseguente idea di introdurre «masse nascoste» per riportare tutti i moti dentro «il principio Gaussiano del vincolo minimo» (minimo sforzo) (Gauss's principle of least constraint) fa sorgere, secondo Boltzmann, alcuni problemi: Boltzmann accenna ad una difficoltà del genere che egli aveva presentato alla Società dei Naturalisti.³⁷

In ogni caso il merito di Hertz e quello di aver reso consapevoli i fisici «di qualcosa, che i filosofi avevano già da tempo accertato, cioè che nessuna teoria può essere oggettiva, (cioè) coincidente in effetti con la natura, ma che invece ciascuna teoria è solo una rappresentazione mentale (Bild) dei fenomeni, che si rapporta ad essi come il segno sta al suo designato».³⁸

Ecco come, pur in una diversa posizione filosofica, Boltzmann riprende la concezione hertziana del Bild. Possiamo quindi riaffermare che tale concezione accompagna la nascita della fisica teorica, oltre a contrassegnare anche i futuri sviluppi. Boltzmann mostra che tanti dei vecchi problemi (ad es. come punti materiali inestesi possono portare all'estensione etc.) scompaiono se si accetta la nuova idea di teoria come Bild. In essa il problema dell'atomismo (delle concezioni microscopiche della natura) viene visto in modo nuovo: «il problema della natura della materia, se è composta da atomi o è continua, si riduce a quello, molto più chiaro, se il continuo può fornirci una migliore rappresentazione dei fenomeni».³⁹

Questa frase è un'interessante chiave di lettura del senso in cui Boltzmann è atomista. È mia convinzione che questa problematica viene posta in una falsa prospettiva se si separa da una presa di atto della profonda consapevolezza epistemologica di Boltzmann.

Boltzmann inizia altrove⁴⁰ una vasta serie di considerazioni sull'atomismo, specie in connessione con lo sviluppo del primo principio e della teoria cinetica. Egli

³⁵ Ibid., 88, 89.

³⁶ Ibid., 89.

³⁷ BOLTZMANN, «Versammlung der Naturforscher...», Dusseldorf, 1898, in: BOLTZMANN, *Wissenschaft. Abhandlungen*, III, 129.

³⁸ TP, cit. 90-91.

³⁹ Ibid., 166.

⁴⁰ Ibid., 91.

mostra che l'atomismo non è sempre stato «ontologicamente» accettato, anche da chi se ne è servito per ottenere fecondi risultati (ad es., Clausius) (In questo senso egli parla di «general thermodynamics» e «special thermodynamics», cioè teoria cinetica).

Anche molti altri fisici, per esempio Ampère, Franz Neumann, Kirchhoff, non fondarono i loro sviluppi (teorici) su idee molecolariste, anche se essi non negarono la struttura atomistica della materia.⁴¹

Sembra che Boltzmann voglia far leva su queste considerazioni storiche, diciamo, sul ruolo dei modelli, per controbattere quello che egli considera una distorta accezione delle esigenze del movimento fenomenologico (ad es. negli epigoni di Ernst Mach). Egli divide la fenomenologia in fenomenologia generale e «fenomenologia matematica».

«(La fenomenologia generale) cerca di descrivere ciascun gruppo di fatti attraverso una classificazione (inglese: enumeration) e una spiegazione della *storia naturale di tutti i fenomeni che appartengono al dato campo* (fenomenico), senza alcun preconcetto a riguardo dei mezzi adoperati, tranne quello di rinunciare ad una concezione uniforme della natura, come una spiegazione meccanica o altro fondamento razionale».⁴²

È interessante questa quasi-identificazione della fenomenologia con la storia naturale, con la rinuncia ad ogni concezione unitaria (cioè con la rinuncia ad es. al riduzionismo). A illustrazione di questo «modo forte» di intendere la fenomenologia, che Boltzmann non accetta, viene citato il detto di Mach: «Elettricità è nient'altro che l'assieme di tutte le esperienze che abbiamo avuto e speriamo di avere in questo campo».⁴³

L'idea della fenomenologia di rappresentare la natura senza andare in qualsiasi modo oltre l'esperienza», è, secondo Boltzmann, un'illusione. Persino se si parla di equazioni (qui e la critica alla fenomenologia matematica), «Nessuna equazione rappresenta qualsiasi processo con precisione assoluta, ma sempre lo idealizza, ponendo in evidenza i tratti comuni e trascurando ciò che è diverso, e, così facendo, va al di là dell'esperienza».⁴⁴

Questo «andare oltre» è condizione indispensabile per la predizione, e ciò «segue dalla stessa natura del processo intellettuale, che infatti consiste nell'aggiungere qualcosa all'esperienza e nel creare una rappresentazione mentale che non è esperienza e che può quindi rappresentare molte esperienze. Solo metà della nostra esperienza è sempre esperienza, come dice Goethe. Più arditamente ci si muove al di là dell'esperienza, più è generale la visione complessiva che si può conquistare e più sorprendenti i fatti che si possono scoprire, ma più facilmente ci si può sbagliare. Quindi la fenomenologia non dovrebbe vantarsi di non andare al di là dell'esperienza, ma solo rendere cauti di non esagerare (nell'andare al di là)».⁴⁵ (Corsivo mio).

⁴¹ Ibid., 94.

⁴² Ibid., 94.

⁴³ Ibid., 95.

⁴⁴ Ibid., 96.

⁴⁵ Ibid., 96.

Questa saggia cautela suggerirà «di non trascurare i fatti perchè resi cieche dalle (loro) rappresentazioni», l'accusa che è stata portata agli atomisti. (Si noti la rassomiglianza ai suggerimenti di cautela di Maxwell di non confondere le ipotesi con la teoria fisica).

Alla fine Boltzmann si pone il problema se questa sequenza di rappresentazioni continuerà all'infinito, oppure se «certe rappresentazioni non possano essere più sostituite da altre più semplici e complete». Il problema se questo progresso verso la semplicità possa essere inceppato dalla necessità di dover rinunciare, non ad una rappresentazione più semplice, ma alla possibilità stessa di una rappresentazione mentale consistente per un intero campo fenomenico (in termini di oggetti classici) non sembra sfiorarlo. Esso verrà posto dopo una ventina d'anni dalle teorie della Meccanica Quantistica, da Bohr e da Heisenberg. Ma il metodo del successo della costruzione di «modelli mentali» della teoria come «modello mentale» di un campo di fenomeni, culminerà subito dopo nella teoria di Einstein.

La costituzione della fisica teorica, un'operazione di enorme portata innovativa, per quanto incredibile ciò possa sembrare, è stata sempre vincolata sino ad Hertz, ad un'idea di meccanica. La filosofia di Boltzmann, con la sua accettazione del principio della pluralità delle teorie, la concezione della teoria quale «rappresentazione mentale» dei fenomeni, è in posizione vantaggiosa, quasi malgrado le riserve del suo stesso autore, per togliere alla meccanica, persino nell'accezione di Hertz, ogni posizione di privilegio fra tutte le possibili «rappresentazioni mentali».