

Cappio Borlino, Aldo (1982) *Le Maglie scappate: nota su determinismo e indeterminismo nella fisica moderna*. Bollettino della Società sarda di scienze naturali, Vol. 21 (1981), p. 1-32. ISSN 0392-6710.

<http://eprints.uniss.it/3331/>

BOLLETTINO

della

SOCIETA' SARDA
DI SCIENZE NATURALI

La Società Sarda di Scienze Naturali ha lo scopo d'incoraggiare e stimolare l'interesse per gli studi naturalistici, promuovere e sostenere tutte le iniziative atte alla conservazione dell'ambiente e costituire infine un Museo Naturalistico Sardo.

S. S. S. N.
SOCIETÀ SARDA di SCIENZE NATURALI

Via Muroli, 25 - 07100 Sassari.

CONSIGLIO DIRETTIVO (1980-1982)

Presidente : Franca Valsecchi.

Segretario : Giovanni Cordella.

Consiglieri: Bruno Corrias, Franca Dalmaso, Umberto Giordano, Maria Pala, Gavino Vaira.

Collegio Probi Viri: Giovanni Manunta, Vico Mossa, Enzo Sanfilippo.

Consulenti Editoriali per il XXI Volume:

Prof. Pier Virgilio ARRIGONI
Prof. Jaume BAGUNA
Prof. Francesco CARIATI
Prof. Arturo CERUTI
Prof. Clara CIAMPI
Prof. Paolo Roberto FEDERICI
Prof. Giorgio FIORI
Prof. Nullo Glauco LEPORI
Prof. Fiorenzo MANCINI
Prof. Enio NARDI
Prof. Gianpiero PESCARMONA
Prof. Renzo STEFANI
Prof. Livia TONOLLI
Prof. Fosca VERONESI

Direttore Responsabile e Redattore
Prof. FRANCA VALSECCHI

Autorizzazione Tribunale di Sassari n. 70 del 29.V.1968

Le maglie scappate
Nota su Determinismo e Indeterminismo nella Fisica Moderna

ALDO CAPPIO-BORLINO
Istituto di Matematica dell'Università
Via Angioy 4, 07100 Sassari

The dropped stitches. Determinism and indeterminism in the modern Physics.

In the source of the ancient science as well as in the classical physics there is an unexpressed principle, for which the objects of knowledge are required to be completely and invariably determined. Contemporary physics, with quantum theory but especially in the thermodynamics of irreversible processes and dissipative structures, seems to make into account as well vague determinations and weak stability.

KEY WORDS: Physics, Determinis, Indeterminism.

*Cerca una maglia rotta nella rete
che ci stringe, tu balza fuori, fuggi!*

E. MONTALE

1. Alla base dei complessi edifici teorici della nostra scienza sta ben saldo un principio, che forse deve la sua stabilità al fatto che non viene più posto in discussione da moltissimo tempo, almeno non nel suo significato più profondo e nelle sue conseguenze più radicali. Lo possiamo chiamare il *principio della determinazione*. Questa affermazione sembrerebbe smentita dal fatto che la fisica quantistica ha espressamente elevato alla dignità di assioma una tesi opposta di *indeterminazione*. Ma la contraddizione è apparente, o meglio si lascia facilmente ridurre ad una mera questione terminologica. Vedremo, infatti, che quello a cui si riferisce, ne-

gandolo, il principio di Heisenberg è un connotato molto specifico della determinazione, che non tocca il significato generale del principio fondamentale.

Per trovare una definizione esplicita, che sia ancora perspicua, della determinazione in questa accezione dobbiamo tornare indietro fino ad Aristotele. L'attributo di *Realtà* — sostiene Aristotele — lo dobbiamo riservare al *tòde ti horisménon*, letteralmente al « questo-qui definito », cioè ad un ente di cui sia possibile stabilire con precisione il contorno, tracciare il confine, che lo differenzia e lo isola da ogni altro oggetto. Il limite (*péras*), ciò che è definito in modo netto, stabile e permanente, è superiore all'illimito (*àpeiron*), a ciò che è impreciso, instabile e mutevole ⁽¹⁾. Nel libro IV della *Metafisica* Aristotele chiarisce le ragioni che rendono inevitabile la scelta per l'ente definito, ed illustra anche il metodo che si deve concretamente seguire per attingere il livello della determinazione. L'ente determinato è tutto ciò di cui possiamo *parlare*, cioè che possiamo conoscere, nel senso della conoscenza *dianoetica* o discorsiva ⁽²⁾. Il discorso *apofantico*, dichiarativo o scientifico, non può che riferirsi ad un insieme di « cose », cioè di oggetti di cui siano tracciati i contorni, come insegna *ex contrario* Cratilo, il quale, da negatore coerente del principio di determinazione, neppure più parlava e si limitava a fare dei gesti ⁽³⁾. Può anche essere che allo stato informe, dal quale ogni determinazione è assente, spetti una realtà superiore, come vogliono i miti che si richiamano all'indefinito originario, e come ripetono i filosofi che seguono Eraclito. Ma resta il fatto che di questa realtà informe noi non possiamo dire assolutamente nulla: dal punto di vista della conoscenza essa è quanto di più povero si possa immaginare ⁽⁴⁾.

Coloro i quali negano la validità del principio della determinazione d'altra parte, debbono *a fortiori* negare la realtà della *sostanza*, cioè di quel « nocciolo duro » di proprietà necessarie e immutabili che caratterizza l'*essenza* di ciascun ente. Essi sono costretti a ritenere che « tutto è accidentale », effimero, incessantemente ed imprevedibilmente mutevole ⁽⁵⁾. Ora, un livello del rea-

(1) Cfr. G. Calogero, *Storia della Logica antica*, Bari 1967, p. 57.

(2) *Metaph.*, IV, 4, 1008a 32.

(3) *Ibidem.*, IV, 5, 1010a 13.

(4) *Ibid.*, IV, 5, 1009b, 6 sgg.

(5) *Ibid.*, IV, 4, 1007a 19.

le, in cui ogni contorno è destinato a sfumare e ogni oggetto definito si corrompe e si disgrega, senza dubbio esiste, ma si tratta del livello più basso della *materia bruta*, che, se vogliamo essere un poco drammatici ma chiari, dobbiamo far coincidere con lo spazio della *morte*. Il discorso e la scienza, però, non attingono il livello della materia informe, della quale non c'è conoscenza; ma si riferiscono alla dimensione della *forma*. La forma, infatti, è il principio che definisce e determina i diversi enti, che garantisce la realtà della sostanza e fonda la necessità e la permanenza delle proprietà essenziali ⁽⁶⁾.

Ammettere il principio della determinazione significa, allora, riconoscere *la superiorità della forma sulla materia*, cioè ritenere che il potere disgregatore della materia possa essere frenato ed irretito in un sistema di determinazioni stabili, che il « flusso eracleo » possa essere incanalato lungo sentieri sicuri e prevedibili. Negare il principio della determinazione significa, invece, arrendersi all'ineluttabile corrompimento di ogni cosa, alla disgregazione e alla morte.

In concreto, la realizzazione del principio della determinazione richiede una prassi conoscitiva che attribuisca a ciascun ente delle proprietà specifiche, ad esclusione di ogni altra qualità. Per ogni oggetto e per ogni qualità si deve poter stabilire se la proprietà inerisce all'oggetto oppure no. Al livello della logica del giudizio il principio della determinazione si rifrange nella tesi della « contraddizione da evitare » e nel principio del « terzo escluso » ⁽⁷⁾. L'attingimento della sostanza richiede inoltre uno sforzo di *astrazione*, che allontani la conoscenza dal piano della realtà immediatamente esperita dalla sensibilità, che è il luogo delle trasformazioni e dei mutamenti imprevedibili, e la innalzi al livello delle

⁽⁶⁾ E. Cassirer, *Determinismo e Indeterminismo nella Fisica Moderna*, trad. it. Firenze, 1970, pp. 149-150: « Per Aristotele si dice *accidentale* ciò che non consegue dall'essenza di una cosa ma questa essenza è definita dalla *forma*, la *ousia* è definita dall'*eidos*. Una proprietà è accidentale quando non costituisce il soggetto, quando essa può essere presente o mancare senza che per questo sia compromesso l'essere del soggetto. E nel campo dell'accadere dobbiamo considerare accidentale tutto ciò che non riceve la propria determinazione dalla forma ma dalla sola *materia* ».

⁽⁷⁾ *Metaph.*, IV, 3, 1005b, 6 sgg.: « è impossibile che la stessa cosa convenga e insieme non convenga a una stessa cosa e per il medesimo rispetto (...). Questo è di tutti i principi il più saldo ».

determinazioni essenziali, che sono stabili e necessarie ⁽⁸⁾. Infine, la ricerca delle proprietà essenziali, immutabili e necessarie non può prescindere dalla costruzione di un intero *sistema di determinazioni*, cioè dalla tessitura di una « rete degli attributi », che tenga insieme le singole determinazioni con la forza dei suoi nessi interni ⁽⁹⁾.

2. L'autoriflessione scientifica non ha più raggiunto la chiarezza con cui Aristotele ha tracciato la strada che la scienza doveva percorrere fondando la propria prassi sul principio della determinazione, né la coerenza con cui egli ha illustrato le ragioni che fondano tale scelta e le conseguenze che ne derivano. È quindi il caso di fissare bene i punti salienti di questa analisi. 1) Il discorso (specificamente il discorso dichiarativo) e la conoscenza (specificamente la scienza) sviluppano un *progetto originario*, che punta a vincere la dissoluzione (la morte) delle cose; 2) il dominio della morte è lo spazio stesso della materia informe, il luogo delle trasformazioni qualitative e della cancellazione dei confini tra le cose; 3) nel perseguire il suo progetto, la pratica scientifica deve estrarre dal magma della materia dei sistemi di enti, assegnando a ciascuno di essi delle determinazioni precise e stabili; 4) la determinazione della realtà da parte della scienza richiede un lavoro di costruzione di *forme astratte*, che comporta un processo di allontanamento dal piano della materia, cioè una progressiva *dematerializzazione del reale*.

Sentiamo spesso ripetere che la scienza è nata da una *rivoluzione* che ha individuato in Aristotele e nella metodologia dei fisici medievali di formazione aristotelica i principali obiettivi della sua polemica. C'è senz'altro del vero in questa tesi; non c'è

⁽⁸⁾ *Ibid.*, IV, 5, 1009a, 3: « Coloro che, in seguito a dubbi e difficoltà, vennero nell'opinione che le asserzioni contraddittorie e i contrari possono stare insieme mossero dall'osservazione delle cose sensibili, dove una stessa causa produce effetti contrari »; 1010a, 11 sgg. : « A tale opinione essi arrivarono perché cercavano bensì la verità nella realtà, ma reali reputavano soltanto le cose sensibili: ora in queste ha gran parte l'indeterminismo (...), perciò il loro discorso ha somiglianza col vero, ma non è vero ».

⁽⁹⁾ Cfr. M. Vegetti, *Il Coltello e lo Stilo*, Milano 1979, p. 95: « Ciò che davvero conta — per Aristotele — è che il mondo sia ordinato, e che lo siano i corpi, gli animali e gli uomini che lo popolano; ciò che conta, ancora, è che questo ordinato schieramento, questa *taxis*, sia descrivibile nel discorso vero della scienza ».

dubbio che la pratica scientifica istituita da Galileo e da Newton segna una profonda rottura rispetto ai moduli della conoscenza aristotelica. Tuttavia, questa discontinuità non tocca il progetto posto da Aristotele a fondamento della scienza, ma riguarda solamente i modi in cui concretamente gli scienziati aristotelici hanno creduto di poter realizzare il progetto originario, il quale riceve pertanto un'ulteriore e decisiva conferma. Le critiche che Galileo indirizza alla fisica aristotelica e scolastica ruotano tutte attorno all'idea che le determinazioni che quella fisica propone sono insufficienti allo scopo di « fermare » la materia con un sistema di legami stabili; e che tale insufficienza si deve alla loro eccessiva vicinanza alle qualità esperite sensibilmente ⁽¹⁰⁾. Malgrado le sue enunciazioni teoriche, Aristotele *di fatto* getta sulla materia informe una rete dalle maglie troppo larghe. Per renderle più strette è necessario che la rete sia completamente ricostruita con *determinazioni artificiali*. Il *continuum* delle qualità sensibili non può configurare l'universale concreto sul quale ritagliare un sistema di enti precisamente ed immutabilmente differenziati. È necessario che esso sia sostituito dal *continuum* artificiale costruito con le possibili risposte di una *catena di strumenti*, interposti come un *medium* universale tra la materia e il soggetto conoscente ⁽¹¹⁾.

Qualche storico della scienza ha recentemente notato che Galileo nutriva nella validità conoscitiva delle risposte degli strumenti di misura una fiducia che ha talvolta rasentato il cieco fideismo ⁽¹²⁾. Ma la sua era una strada obbligata. La nuova fisica non poteva nascere da una semplice reinterpretazione teorica che lasciasse immutata la vecchia « base osservativa », ma richiedeva la costruzione di una base del tutto nuova, che sostituisse le determinazioni, ritenute fino ad allora sufficienti a differenziare i diversi enti, con un modo nuovo e più sofisticato di diversificare e isolare gli oggetti di conoscenza ⁽¹³⁾. Le nuove proprietà artifi-

⁽¹⁰⁾ P. Feyrabend, *Contro il Metodo*, trad. it. Milano 1979, pp. 58 sgg.

⁽¹¹⁾ *Ibid.*, p. 77: « Questo modo — galileiano — di considerare i fenomeni conduce ad una rivalutazione dell'intera esperienza. Possiamo aggiungere che esso conduce all'invenzione di *un nuovo genere di esperienza*, che non è soltanto più sofisticato, ma anche assai più speculativo di quanto non sia l'esperienza di Aristotele o del senso comune ».

⁽¹²⁾ *Ibid.*, pp. 83-80.

⁽¹³⁾ H. Butterfield, *Le Origini della Scienza Moderna*, trad. it. Bologna 1972, pp. 93-115.

ciali, la cui introduzione configura l'essenza del metodo sperimentale, non solo consentivano una definizione della realtà precisa e facilmente ripetibile, ma erano anche, almeno in tendenza, *illimitatamente segmentabili*, permettevano cioè una differenziazione molto più *raffinata* degli enti rilevanti. La teoria della misura, osserva Weyl, discende dalla posizione del problema di « come sia possibile determinare delle quantità con precisione molto maggiore di quella permessa dalla capacità di differenziazione dei nostri sensi »⁽¹⁴⁾.

Inoltre, le relazioni fra proprietà diverse potevano ora assumere la forma dei legami matematici fra grandezze, che realizzano dei vincoli di reciproca dipendenza assai più stretti dei legami qualitativi caratteristici della logica classificatoria (sillogistica) di matrice aristotelica. L'introduzione del metodo sperimentale appariva così strettamente connessa all'idea che « sia possibile trovare delle correlazioni conoscitive nel mondo reale solo se si riducono le determinazioni qualitative a quelle quantitative »⁽¹⁵⁾.

Il risultato più importante degli sviluppi della fisica moderna, almeno per tutto il secolo diciassettesimo e diciottesimo, è stato la concezione della *materia come sostanza*, cioè l'idea che i corpi debbono contenere un nucleo materiale immutabile che « fa da supporto alle mutevoli qualità sensibili »⁽¹⁶⁾. Si vede bene che la posta di questa idea è quella stessa indicata alla scienza da Aristotele: isolare nel flusso della materia in incessante divenire un sistema di enti dai confini perfettamente definiti e tendenzialmente stabili. Solo che la realizzazione del progetto viene ora fatta consistere nella segmentazione della materia in una infinità di *punti materiali*, differenziati ed isolati sulla base di un sistema di determinazioni introdotte con il tramite di una catena di strumenti e suscettibili di valutazione quantitativa. L'aspetto essenziale di questa concezione consiste nella possibilità di « identificare in linea di principio uno stesso punto materiale in un istante qualsiasi dell'evoluzione di un sistema corporeo »⁽¹⁷⁾. Questa idea

⁽¹⁴⁾ H. Weyl, *Filosofia della Matematica e delle Scienze Naturali*, trad. it. Torino 1967, p. 172.

⁽¹⁵⁾ *Ibid.*, p. 162.

⁽¹⁶⁾ *Ibid.*, p. 202.

⁽¹⁷⁾ *Ibid.*, p. 203.

fa sì che, almeno nella fase iniziale del suo sviluppo, la scienza moderna presenti una strana incongruenza. Da un lato la prassi scientifica trova una strada per dare concretezza al progetto di produzione di un insieme di enti sostanziali. Dall'altro, però, l'autoriflessione della scienza sembra perdere la consapevolezza dei connotati essenziali del progetto originario, che era caratteristica del pensiero aristotelico. La concezione della realtà sostanziale del *punto di massa* è la prova più evidente di questo « scompenso ». Per un verso, infatti, tale concezione comporta la riduzione di tutti i fenomeni al movimento di particelle elementari e rimanda, pertanto, alla conoscenza delle *leggi del moto*, alla cui costanza deve essere affidata la stabilità degli oggetti⁽¹⁸⁾. Per l'altro verso, però, la determinatezza e la stabilità del reale sembrano piuttosto garantite dai caratteri senso-intuitivi della *solidità*, della *compattezza* e della *durezza* assolute degli *atomi*. Tant'è che a Newton sembra probabile che « Dio in principio abbia creato la materia in particelle mobili, solide, pesanti, dure e impenetrabili (...). E perciò, finché durerà la materia, i mutamenti degli oggetti corporei sono dovuti soltanto alle varie separazioni e nuove associazioni e movimenti di queste particelle immutabili »⁽¹⁹⁾.

Ora, mentre la ricerca delle leggi del moto obbedisce evidentemente alla concezione che affida la determinazione del reale alla dimensione della *forma*, la rappresentazione intuitiva dei punti di massa come *corpora individua propter soliditatem*⁽²⁰⁾ è invece una negazione esplicita dell'idea della materia come luogo della dissoluzione e della perdita delle determinazioni.

Questa « falsa coscienza » ha accompagnato gli sviluppi successivi della scienza moderna malgrado l'evidenza contraria del fatto che essi procedevano nel segno della progressiva *dematerializzazione* degli oggetti di conoscenza. I mutamenti del concetto di atomo offrono un esempio essenziale di questo continuo progetto di dematerializzazione della realtà. « Ogni nuovo campo in cui l'atomistica viene a risultare valida fornisce un nuovo insieme

⁽¹⁸⁾ *Ibid.*, p. 205.

⁽¹⁹⁾ Considerazioni finali dell'*Ottica* di I. Newton citate da H. Weyl, in *op. cit.*, p. 205.

⁽²⁰⁾ L'espressione è di Cicerone, *De fin.* I 6, 17, e si riferisce alla concezione atomica democritea: « ille atomos appellat, id est corpora individua propter soliditatem... ».

di equazioni condizionanti, a cui da ora in poi l'atomo deve sottostare. Al crescere del numero di queste equazioni condizionanti l'atomo assume, in un certo senso, una forma sempre più concreta perché unifica in sé un numero sempre maggiore di conoscenze particolari. Ma questo crescere insieme, questo *concreocere* di note determinanti sta in rapporto inverso con ciò che siamo soliti intendere per concrezione intuitiva. Dobbiamo accontentarci per forza della *determinazione mediante leggi e rinunciare alla illustrazione per mezzo di schemi e modelli* » ⁽²⁾.

3. Con la meccanica analitica di Lagrange e di Hamilton la concezione dinamica della realtà fondamentale raggiunge il massimo della perfezione formale. La formulazione hamiltoniana origina da una generalizzazione della nozione ancora intuitiva del cambiamento di coordinate, che era già operante nella meccanica galileiana e newtoniana. Qualsiasi insieme di grandezze atto a determinare in modo univoco lo stato di moto di un sistema di particelle può configurare un insieme di coordinate q e di momenti p coniugati. Le descrizioni del moto ottenute con differenti sistemi di coordinate generalizzate sono *equivalenti*, nel senso che si possono definire delle *trasformazioni canoniche*, che consentono di passare da una descrizione all'altra. Le coordinate e i momenti coniugati consentono di costruire una funzione $H(p,q)$, l'hamiltoniana, la cui conoscenza ci dà direttamente le leggi del moto:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\delta H}{\delta p} \quad \frac{dp}{dt} = - \frac{\delta H}{\delta q}$$

Inoltre, l'evoluzione temporale di una qualunque grandezza G interessante il sistema è retta dall'equazione:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{\delta G}{\delta t} + [G,H]$$

Con la formulazione hamiltoniana la concezione dinamica della realtà consuma ogni residuo legame con la rappresentazione intuitiva di particelle materiali infinitamente rigide che si muo-

⁽²⁾ E. Cassirer, *Determinismo*, op. cit., pp. 211-212.

vono nello spazio ordinario. Ora lo spazio in cui la realtà fisica viene differenziata appare come una costruzione completamente artificiale, « arbitrariamente dimensionato e arbitrariamente parametrizzabile, in forza delle trasformazioni canoniche che coinvolgono tutte le proprietà »⁽²²⁾ necessarie ad isolare un elemento del reale.

Il formalismo hamiltoniano porta così all'evidenza che ciò che veramente conta, nella prassi della fisica moderna, è la costruzione di un sistema di proprietà artificiali, che si combinano tra loro come le maglie di una rete, nei cui nodi vengono a collocarsi gli oggetti perfettamente definiti dell'indagine scientifica. La prassi conoscitiva può allora assumere esplicitamente il compito *costruttivo* di « assegnare agli oggetti delle caratteristiche quantitative tali da rendere il loro comportamento, in circostanze descritte da caratteristiche dello stesso tipo, completamente determinato e prevedibile sulla base di leggi note »⁽²³⁾.

La stabilità e la razionalità del mondo oggettuale così definito non si fondano più sull'indistruttibilità del supporto materiale delle determinazioni, ma sono completamente affidate al mantenimento dei medesimi modi di determinazione e alla costanza delle relazioni che si intrecciano fra le diverse proprietà.

Una caratteristica essenziale delle equazioni hamiltoniane è la loro *simmetria* in rapporto al parametro tempo, simmetria con la quale si esprime che nell'universo della dinamica « non ha luogo alcun fenomeno di cui non si ammetta altrettanto bene e indifferentemente l'inverso »⁽²⁴⁾. In questo modo la descrizione dinamica della realtà esclude esplicitamente dal proprio ambito *le trasformazioni qualitative e i processi*, nel corso dei quali certi tipi di correlazioni possono essere abbandonati ed altri essere assunti. I processi e le trasformazioni qualitative, la perdita delle determinazioni iniziali e l'assunzione di determinazioni nuove e impreviste sono, infatti, fenomeni essenzialmente *irreversibili*, la cui considerazione richiede la rottura della simmetria temporale delle equazioni e l'assegnazione di una *freccia* alla direzione del tempo.

⁽²²⁾ A. Mercier, *Physical and metaphysical time*, in *Epistemologia*, I, 2, 1978, p. 339.

⁽²³⁾ H. Weyl, *Filosofia*, op. cit., p. 180.

⁽²⁴⁾ I. Prigogine, *La Nuova Alleanza*, trad. it. Milano 1979, p. 262.

4. Nell'epoca stessa della massima formalizzazione della descrizione dinamica della realtà fondamentale, la fisica ha sviluppato un modo di determinazione degli oggetti di conoscenza che si serve di proprietà non immediatamente riconducibili alle grandezze relative alle traiettorie di particelle materiali. Per i *corpi macroscopici*, definiti da queste determinazioni *termodinamiche*, si formula un principio, secondo cui, nel caso di un sistema isolato, esiste una funzione *entropia*, che non può che aumentare, finché il sistema non raggiunge uno stato di equilibrio. In tale stato, in cui il sistema permane fintanto che non è perturbato da influenze esterne, si può dire che il sistema *dimentica le condizioni iniziali* nel senso che lo stato di equilibrio dipende dalla situazione iniziale solamente per il tramite di pochi parametri termodinamicamente rilevanti. Un sistema non isolato tende invece ad uno stato *stazionario* che dipende dalle azioni esterne.

Ora, l'evoluzione in direzione dello stato di equilibrio, o dello stato stazionario, è un processo *temporalmente irreversibile*, vale a dire che non si può realizzare una trasformazione il cui verso sia tale che il sistema al tempo $t > t_0$ si trovi in uno stato più lontano dall'equilibrio dello stato al tempo t_0 .

È evidente la rilevanza concettuale di questo principio di crescita dell'entropia. Esso ci dice, infatti, che la realtà fisica può essere determinata in modo che: a) gli enti così definiti sono soggetti ad effettive trasformazioni qualitative, b) se isolati, tendono ad *abbandonare* le determinazioni iniziali passando a stati di minima definizione, c) l'evoluzione nel senso della perdita delle correlazioni iniziali è un processo irreversibile. Tutto il contrario, quindi, di quello che vale per la realtà fondamentale costruita con i moduli della dinamica, dove: a) sono esplicitamente esclusi i processi e le trasformazioni qualitative, b) vale il principio dell'evoluzione dinamica delle determinazioni, in base al quale l'oggetto è in ogni istante definito dalle medesime grandezze con cui è stato delimitato nello stato iniziale, c) l'evoluzione temporale è reversibile.

Sono noti i diversi tentativi che si sono compiuti nella speranza di sanare la contraddizione fra questi due modi di determinazione della realtà fisica. Il problema è ancora aperto. Inizialmente la strada più semplice è parsa quella indicata dall'interpretazione dell'oggetto termodinamico come aggregato di un numero molto grande di costituenti elementari definiti da determinazioni

dinamiche. In tale ipotesi i processi termodinamici retti dal secondo principio debbono poter essere *ridotti* ai comportamenti dinamici delle particelle costituenti il sistema.

Seguendo questa strada Boltzmann ha analizzato le trasformazioni di un gas rarefatto nei termini di una funzione di distribuzione delle posizioni e delle velocità di un insieme di particelle soggette a collisioni binarie. Il risultato è che l'equazione risolvibile il problema contiene una funzione-H, che, indipendentemente dalle condizioni iniziali, *aumenta sempre* in corrispondenza dell'evoluzione temporale del sistema. Da questo *Teorema-H* segue inoltre che la distribuzione delle posizioni e delle velocità tende ad una configurazione di equilibrio. Sembra quindi ovvia la possibilità di associare la funzione-H all'entropia del sistema ⁽²⁵⁾.

L'equazione di Boltzmann, tuttavia, non è una conseguenza delle sole leggi della dinamica, ma richiede un'ipotesi aggiuntiva, con cui si assume che, nell'istante precedente l'urto tra due particelle, non esista correlazione alcuna fra le rispettive posizioni e velocità. Questa assunzione di « caos molecolare », però, è un'ipotesi di natura *statistica*, completamente estranea al quadro della dinamica. Ammetterla equivale a riconoscere che il recupero dei processi irreversibili al quadro della descrizione dinamica è possibile solamente a patto di conferire un carattere stocastico alle leggi di evoluzione: « l'evoluzione irreversibile diventa un comportamento compatibile con le leggi della dinamica in quanto viene caratterizzato come statisticamente il più probabile » ⁽²⁶⁾.

La soluzione di Boltzmann è persa subito piuttosto debole, come mostrano anche alcune sue conseguenze « paradossali » evidenziate da Loschmidt e da Zermelo ⁽²⁷⁾. Tuttavia, il modo in cui Boltzmann realizza la saldatura tra il secondo principio e le leggi dinamiche conserva il merito di segnalare come l'idea della processualità — rientrata prepotentemente nel quadro della fisica in seguito allo sviluppo del modo termodinamico di definizione della realtà — mette in campo la necessità di un *indebolimento* delle determinazioni della dinamica e postula un *allentamento* delle

⁽²⁵⁾ P. Caldirola, E. Recami, *The Concept of Time in Physics*, in *Epistemologia*, I, 2, 1979, p. 271.

⁽²⁶⁾ I. Prigogine, *La Nuova Allenza*, *op. cit.*, p. 263.

⁽²⁷⁾ P. Caldirola, E. Recami, *The Concept*, *op. cit.*, pp. 272-273.

maglie rigide imposte dalle leggi hamiltoniane. In tale ottica il secondo principio della termodinamica assume un particolare rilievo metodologico, nel senso che esso sembra costringere la pratica scientifica a ridefinire i termini del progetto che la origina, o almeno a guardare con più chiara coscienza alle conseguenze a cui può portare la realizzazione estrema di tale progetto. Costruendo un tipo di oggetto che tende ad abbandonare le determinazioni che lo strutturano, la termodinamica ripropone l'idea di uno *scambio continuo fra la dimensione della determinazione e lo spazio dell'infinito*. Vale a dire che la termodinamica fa rientrare la materia informe nel dominio dell'oggettualità fisica, rimettendo così in discussione il senso dell'operazione di dematerializzazione esauritiva della realtà perseguita dai modi della descrizione dinamica. Il progetto originario della prassi scientifica comincia allora a mostrare un aspetto di *impossibilità*. Quella che emerge, però, non è un'impossibilità pratica di sottrarre la realtà ai processi di dissoluzione, quale ci è ricordata dalla cupa saggezza del *memento mori*. Fin dagli inizi dell'epoca moderna la scienza ha mostrato di essere capace di produrre una realtà determinata in modo perfetto, assoluto ed immutabile, e quindi effettivamente sottratta ai processi di decadimento. Questi oggetti non sono certo un parto della fantasia degli scienziati: essi esistono in senso pieno, tanto è vero che possono essere usati, manipolati dalla tecnica, resi docili ai nostri scopi. L'impossibilità del progetto originario non concerne i modi della sua realizzazione, ma l'assurdità delle conseguenze della sua riuscita. Lo comprendiamo se abbiamo presente il fatto che la prassi di dematerializzazione del reale non può consistere che in una *operazione disgiuntiva*, cioè in un lavoro di separazione del dominio delle determinazioni dal loro contenuto materiale, che può così essere isolato e relegato in uno spazio riservato alla materia e alla disgregazione. Il risultato di un'operazione del genere, però, è che ciascuno spazio separato ritrova nel dominio che gli si contrappone ciò che non può comprendere e neppure tematizzare, ma che tuttavia configura il suo completamento necessario. Come nota Baudrillard: « *l'effetto di realtà* » — della realtà perfettamente definita e che non può sottrarsi alla determinazione — « non è dovunque che l'effetto strutturale di disgiunzione tra due termini (...). Ogni termine della disgiunzione esclude l'altro, che diventa però *il suo immaginario*. « Nel senso in cui — ad esempio —

« il prezzo che noi paghiamo per questa vita è il fantasma continuo della morte; per noi vivi, così definiti, la morte è il nostro immaginario »⁽²⁸⁾.

La prassi scientifica pretende di tracciare una barra, con la quale separare nettamente e per sempre la dimensione degli oggetti perfettamente e stabilmente determinati dallo spazio del corrompimento e della perdita di definizione. Ma i due spazi contrapposti sono prodotti nel medesimo atto, onde al crescere del primo cresce proporzionalmente anche il secondo. Il lavoro della scienza non può quindi cancellare la dimensione della materia, ma riesce soltanto a *sospendere lo scambio* continuo fra la realtà fisica e la materia informe, con la conseguenza che l'azione disgregatrice di questa, mentre sussiste in tutta la sua potenza, viene però trasformata in un evento *catastrofico e incomprensibile*.

È questo il modo in cui, necessariamente, i processi irreversibili della termodinamica sono visti dallo spazio delle determinazioni dinamiche: l'oggetto termodinamico appare come il necessario completamento dei modi della descrizione dinamica; eppure la processualità termodinamica risulta irriducibile al quadro della dinamica e in esso incomprensibile, almeno finché le determinazioni dinamiche conservano le loro caratteristiche originarie. È questo il problema che ha presente Boltzmann, quando implicitamente suggerisce che la riduzione del secondo principio al quadro della dinamica postula il contemporaneo *allentamento* delle determinazioni e delle leggi dinamiche. In questo senso Boltzmann sostiene che il carattere probabilistico delle leggi di evoluzione non deve essere ridotto ad « una specie di matematizzazione provvisoria della nostra ignoranza », ma deve fondarsi su una diversa concezione della realtà fondamentale, con cui si riconosca che « il substrato atomico e molecolare è realmente soggetto al caos, al disordine e all'irregolarità »⁽²⁹⁾. Mentre la maggior parte dei fisici del tempo continuano a vedere nella descrizione esatta e completa della dinamica il modello scientifico *par excellence*, e a ritenere che il ricorso ai metodi statistici sia giustificato solamente

⁽²⁸⁾ P. Baudrillard, *Lo scambio Simbolico e la Morte*, trad. it. Milano 1979, pp. 146-147.

⁽²⁹⁾ Cfr. E. Bellone, *I Modelli e la Concezione del Mondo*, Milano 1973, p. 80.

dall'impossibilità pratica di conoscere il movimento di ogni singola molecola in un corpo macroscopico ⁽³⁰⁾.

5. Non si può certo dire che la fisica della fine dell'ottocento, e del novecento fin quasi ai nostri giorni, abbia tenuto in grande conto le intuizioni e i suggerimenti di Boltzmann. La metodologia che ha trionfato non ha affatto perseguito l'indebolimento delle determinazioni perfette e immutabili della dinamica. La scienza ha continuato a cercare il livello fondamentale della realtà, popolato da enti precisamente definiti e dai comportamenti perfettamente prevedibili, associando il carattere stocastico dell'evoluzione termodinamica a nozioni quali il *coarse graining*, e in generale all'impossibilità pratica di dominare con la conoscenza i comportamenti dinamici dei sistemi di molte particelle ⁽³¹⁾.

Parallelamente si è affermata una concezione della prassi scientifica, le cui linee essenziali erano state tracciate da Fourier, in opposizione alla pretesa di ridurre i fenomeni termici al quadro della dinamica. Nella *Teoria analitica del calore*, Fourier scriveva che, « quale che sia l'estensione delle teorie meccaniche, esse non si applicano affatto agli effetti del calore. Questi costituiscono un ordine speciale di fenomeni che non si possono spiegare con i principi del movimento e dell'equilibrio » ⁽³²⁾. Fourier non si limitava, però, a negare l'idea della riducibilità delle dimensioni termodinamiche ai modi della definizione dinamica, ma proponeva una

⁽³⁰⁾ *Ibid.*, p. 82, dove è riportata la posizione « franca ed inequivocabile » sostenuta da Maxwell nella conferenza del 1873: « le equazioni della dinamica esprimono completamente le leggi del metodo storico applicato alla materia; ma l'applicazione di queste equazioni implica la perfetta conoscenza di tutti i dati. Tuttavia, la più piccola porzione di materia sulla quale possiamo eseguire delle esperienze è formata di milioni di molecole, nessuna delle quali è singolarmente avvertibile con i nostri sensi. Non possiamo quindi determinare il moto di una di queste molecole. Per conseguenza siamo costretti ad abbandonare il rigoroso metodo storico e ad adottare quello statistico, che consiste nel trattare grandi numeri di molecole ».

⁽³¹⁾ P. Caldirola, E. Recami, *The concept*, *op. cit.*, p. 272: « On the basis of so-called *Master-equation* formalism, the macroscopic description of large system is performed through suitable macroscopic variables, named *coarse-grained variables*, obtained by averaging — over an infinite number of values — the quantities relative to the system single atoms *taken at different times*; so introduce a time interval which is *long at the microphysical level* ».

⁽³²⁾ Cfr. E. Bellone, *I Modelli*, *op. cit.*, p. 40.

tesi metodologica di portata molto più generale, con la quale, in sostanza, veniva negato il valore conoscitivo di ogni *modello* che pretenda di attingere la struttura elementare dei fenomeni indagati. Secondo questa metodologia una teoria può soltanto fornire quelle che Fourier chiamava le *equazioni del fenomeno*; a tal fine la teoria fisico-matematica « deve unicamente basarsi su fatti empirici e procedere quindi secondo regole di calcolo precise ed autonome da tali fatti »⁽³³⁾

Questa concezione è stata sviluppata e precisata, tra gli altri, da Maxwell, Faraday, Hertz, fino a raggiungere la perfezione con la metodologia di Planck, ed entrare con un peso notevole in importanti settori della meccanica quantistica, per dominare infine nella contemporanea teoria delle particelle elementari⁽³⁴⁾. « La tendenza a distaccare la teoria dai modelli, per formalizzarla in strutture matematiche che vivono poi di vita propria, ha favorito il sorgere di un'epistemologia che non attribuisce più un contenuto di verità alla teoria stessa, talché da allora è diventato patrimonio comune dei fisici che una teoria è vera finché i fatti non l'avranno posta in crisi. Ha preso così l'avvio un lungo processo di rinuncia all'idea di una realtà fisica al di là dell'osservazione, che lega come un filo conduttore il convenzionalismo di Poincaré all'empirio-criticismo di Mach, alla complementarità di Bohr, ai teorici moderni »⁽³⁵⁾

La novità è l'importanza di questa concezione della prassi scientifica risiedono nell'intuizione, che essa in qualche modo realizza, del fatto che la realtà cui la scienza si riferisce non preesiste all'azione effettiva di differenziazione della materia in sistemi di oggetti nettamente separati l'uno dall'altro e precisamente definiti dal processo di specifiche determinazioni. Il potere della determinazione, inoltre, viene correttamente attribuito alla dimensione formale della teoria e sganciato da ogni residuo riferimento all'idea della materia come sostanza. Tuttavia, il lavoro della conoscenza è ancora guardato con gli occhiali che assegnano un valore positivo esclusivamente alla determinazione; e ciò in misura non minore

⁽³³⁾ *Ibid.*, p. 41.

⁽³⁴⁾ A. Baracca, S. Bergia, *La Spirale delle Alte Energie*, Milano 1975, pp. 267-293.

⁽³⁵⁾ *Ibid.*, pp. 271-272.

di quanto faccia la metodologia meccanicista. La superiorità conoscitiva del principio della determinazione non è neppure posta in discussione. Anzi, non solo l'ideale della definizione perfetta, che è all'origine della formulazione dinamica, non viene intaccato, ma lo scioglimento dai vincoli imposti dal rispetto di un particolare modello della realtà sostanziale consente all'attività scientifica di articolarsi liberamente nei diversi settori di indagine, cercando per ciascuno di essi i modi di determinazione più efficaci. La prassi scientifica si segmenta, allora, « in un mosaico di discipline », senza che « la legittimità dei risultati in un certo settore venga turbata da eventuali contraddizioni riguardanti un altro settore »⁽³⁶⁾. E l'interesse della scienza si sposta decisamente « dalla scoperta della *verità* all'elaborazione di *tecniche sempre più raffinate* » di definizione del reale⁽³⁷⁾.

6. Solamente in tempi molto recenti la fisica ha preso in serie considerazione l'eventualità di *un valore positivo dell'indeterminazione*, o almeno della *determinazione debole*, delle correlazioni che si lasciano facilmente abbandonare, così da consentire delle effettive trasformazioni qualitative, cioè dei reali processi, che fanno evolvere l'oggetto indagato da un sistema di determinazioni ad un altro, in modi non precisamente prevedibili e non completamente controllabili.

Lo studio dei fenomeni irreversibili ha recuperato la proposta originaria di Boltzmann, relativa alla necessità di un allentamento delle determinazioni della dinamica, tale da consentire la comprensione, nel suo spazio, anche dei comportamenti termodinamici. L'idea di Prigogine, però, è che lo scopo non si raggiunge, come credeva Boltzmann, semplicemente aggiungendo alle leggi dinamiche un'ipotesi statistica che rimane loro irrimediabilmente estranea. Ciò che si richiede è, invece, una vera e propria rifondazione o *riformulazione* della stessa dinamica, che sostituisca la descrizione dello stato delle particelle di un sistema in termini di coordinate e di momenti con un modo di determinazione che faccia intervenire le relazioni fra le varie particelle, cioè che operi in termini di *correlazioni*. Ora, « la riformulazione della dinamica in

⁽³⁶⁾ *Ibid.*, p. 273.

⁽³⁷⁾ *Ibid.*

termini di una dinamica delle correlazioni, la descrizione dell'evoluzione di un sistema in termini dell'evoluzione delle correlazioni, delle loro trasformazioni da un tipo ad un altro, non costituiscono certamente una nuova dinamica. Tuttavia, la differenza tra i due punti di vista non è insignificante. Un concetto come quello di irreversibilità non ha alcun senso chiaro in termini di traiettorie di particelle. Al contrario, espressa in termini di correlazioni, di meccanismi di collisione tramite i quali le correlazioni evolvono, la nozione di irreversibilità può assumere un senso preciso, quello di « *un processo dinamico nel corso del quale certi tipi di correlazioni sono superati* »⁽³⁸⁾. In effetti Prigogine dimostra che è possibile sviluppare una teoria delle *trasformazioni non canoniche*, che consente di scrivere delle nuove equazioni dinamiche, le quali incorporano la possibilità di una rottura della simmetria temporale. La caratteristica essenziale di queste equazioni è che esse, oltre ad essere formulate in termini di correlazioni tra particelle, contengono un *termine causale*, che consente di rendere esplicita la distinzione tra *un prima e un dopo*, cioè che permette di selezionare delle soluzioni diverse, secondo che esse corrispondono a tempi positivi o negativi. Anzi, nella formulazione causale della dinamica l'evoluzione di un sistema è descritta da *due equazioni differenziali*, che si diversificano secondo che tale evoluzione corrisponde a tempi positivi o negativi. « *La rottura della simmetria temporale è dunque esplicita nei termini del problema*, invece di apparire soltanto nelle soluzioni a seguito dell'introduzione delle condizioni al contorno »⁽³⁹⁾.

L'aspetto più interessante di questa « *dinamica riformulata* » è che, nelle condizioni previste dalla trattazione termodinamica, compare nelle equazioni una sorta di termine di *attrito dinamico* che, mentre conserva l'energia, assicura l'evoluzione verso uno stato di equilibrio. L'evoluzione dei sistemi che interessano il livello della descrizione macroscopica può per tanto essere descritta mediante una funzione dinamica, che si identifica con l'entropia e le cui proprietà sono esattamente coestensive all'entropia postulata fenomenologicamente. Ciò vale a dire che la formulazione causale e l'evoluzione in termini di dinamica delle correlazioni con-

⁽³⁸⁾ I. Prigogine, *La Nuova Alleanza*, op. cit., p. 278.

⁽³⁹⁾ *Ibid.*

sentono di dare un'interpretazione puramente dinamica del secondo principio della termodinamica. Il rapporto tra comportamento stocastico e dinamica risulta, allora, capovolto rispetto alla concezione originaria di Boltzmann: « il secondo principio acquista il valore di un teorema di dinamica, senza un richiamo esplicito al calcolo delle probabilità; è al contrario la dinamica che determina per quali sistemi una descrizione in termini di probabilità possa essere effettuata »⁽⁴⁰⁾.

I lavori del gruppo di Prigogine non si limitano, però, alla trattazione dei processi caratterizzati dalla *perdita delle correlazioni* iniziali e dall'evoluzione verso lo stato di equilibrio. Essi mostrano anche che, allo stesso livello macroscopico, certi sistemi possono subire una rottura supplementare della simmetria in rapporto al tempo, che si verifica ad una certa distanza critica dall'equilibrio, a partire dalla quale una *fluttuazione* casuale, anziché regredire come prevede il secondo principio, può essere amplificata a spese dell'energia esterna, fino a far subire al sistema una trasformazione profonda e a fargli adottare una struttura ed un modo di funzionamento completamente diversi da quelli originari. Il tratto caratteristico di queste *strutture dissipative* è quindi la loro capacità di subire delle trasformazioni che non sono limitate all'abbandono delle correlazioni iniziali, come succede nei processi previsti dal secondo principio, ma fanno seguire la perdita delle proprietà e delle funzioni iniziali dall'assunzione di determinazioni e di funzioni nuove ed irriducibili alle correlazioni originarie.

La dinamica riformulata consente di descrivere i comportamenti di questi nuovi « oggetti » e di prevedere gli stati stabili e riproducibili che possono apparire lontano dall'equilibrio, a seguito dell'amplificazione di una fluttuazione. Ma essa mostra anche che l'evoluzione di un sistema al di là della soglia di instabilità rimane caratterizzata da un *elemento irriducibile di indeterminazione*. Infatti, « non tutto è dato quando sono specificate le condizioni al contorno e la composizione del sistema: i diversi stati possibili sono sicuramente calcolabili, ma bisogna attendere e osservare l'evoluzione del sistema per sapere quale fluttuazione si produrrà e verrà amplificata e verso quale stato stabile il sistema si dirigerà »⁽⁴¹⁾.

⁽⁴⁰⁾ *Ibid.*, p. 281.

⁽⁴¹⁾ *Ibid.*, p. 242.

Lo studio delle strutture dissipative fornisce un'importante conferma dell'esistenza di uno stretto legame fra la capacità di trattare i processi e le trasformazioni qualitative, l'ammissione del carattere stocastico delle leggi di evoluzione, il riconoscimento dell'irreversibilità temporale di tali leggi e la necessità di riconoscere *il valore positivo delle determinazioni deboli*. Come nota Prigogine, lo studio delle strutture dissipative propone alla prassi conoscitiva l'opportunità di sviluppare « una descrizione pluralistica » dei propri oggetti, « che metta in gioco punti di vista e modi di descrizione diversi, e che dunque non susciti più l'illusione che la fisica ricerchi il livello di descrizione ultimo e fondamentale, a partire dal quale tutto sarebbe dato »⁽⁴²⁾.

7. Abbiamo visto che la fisica classica ha inizialmente affidato la stabilità delle proprie determinazioni all'esistenza di particelle materiali non ulteriormente divisibili e infinitamente rigide. Questa concezione della materia come sostanza si è conservata come « falsa coscienza » della prassi scientifica, malgrado che questa avanzasse rapidamente nel senso della progressiva dematerializzazione degli oggetti di conoscenza. Ciò ha parzialmente impedito di comprendere che quanto è in effetti richiesto per la costruzione di un sistema di enti precisamente e stabilmente differenziati è che i diversi valori delle proprietà utilizzate per la loro definizione siano « tenuti insieme » da una *forma*, cioè da una *legge* che ne domina l'evoluzione temporale.

Tuttavia, la concezione che fonda la stabilità delle determinazioni sulla limitata divisibilità del loro supporto materiale fornisce la rappresentazione intuitiva di un requisito che è realmente indispensabile ad ogni modo di definizione della realtà fisica: *i tratti in cui la prassi scientifica suddivide il continuum delle varie proprietà, attribuendo a ciascuno di essi un valore differenziale, non debbono superare un certo limite di finezza*. Una diversificazione raffinata al di là di questo limite porterebbe infatti ad una moltiplicazione e ad una disgregazione tali della realtà fisica, che la situazione complessiva non sarebbe diversa da quella in cui manca ogni struttura ed ogni interna differenziazione; né si troverebbe alcuna legge

⁽⁴²⁾ *Ibid.*

capace di seguire l'evoluzione temporale di un sistema attraverso un simile aggregato di stati rilevanti.

La fisica classica può tranquillamente trascurare la necessità di questo limite e continuare ad ipotizzare la crescita illimitata della precisione delle misure, perché *di fatto* i suoi strumenti non superano un dato livello di finezza nella determinazione delle proprietà essenziali. Ma ciò non è più possibile quando si rende disponibile una strumentazione che è realmente in grado di differenziare i valori delle proprietà rilevanti con una precisione estrema. È quello che succede con la fisica atomica. « L'avvento della meccanica quantistica » — osserva opportunamente Toraldo di Francia — « è dovuto principalmente al fatto che nella fisica microscopica si è arrivati ad una precisione ϵ così spinta, che per alcuni fenomeni non si riesce nemmeno più a trovare una funzione $f(a_n)$ che descriva correttamente i risultati dell'esperienza, cioè tale che, date tutte le a_n meno una, quest'ultima rimane perfettamente determinata (a meno di ϵ) da $f(a_n) = O''$.⁽⁴³⁾

A questo punto la teoria è costretta ad incorporare una forma specifica di autoconsapevolezza del lavoro di determinazione degli oggetti di conoscenza, che non era invece richiesta alla fisica classica. Questa poteva perseguire l'ideale dell'*ens omnimodo determinatum*, dell'ente definito da ogni parte, per il quale cioè *ciascuna* proprietà essenziale assume un valore illimitatamente preciso e *tutte* le proprietà possono essere definite contemporaneamente con la stessa precisione, perché, come si è detto, la precisione che le misure raggiungono di fatto è così limitata da nascondere le conseguenze di un effettivo avvicinamento alla determinazione ideale. Ma quando l'approssimazione alla precisione e alla finezza ideali si fa concreta diventa anche chiaro che il loro perseguimento porta con sé l'impossibilità di isolare degli stati fisici differenziati in modo stabile. La teoria deve allora necessariamente riflettere sulla propria prassi, così da imporle dei limiti che rendano il processo della determinazione compatibile con il requisito della stabilità degli stati fisici differenziati, cioè con la possibilità di controllare la loro evoluzione temporale con una legge di tipo deterministico.

In meccanica quantistica questa possibilità viene salvata ren-

⁽⁴³⁾ G. Toraldo di Francia, *L'indagine del Mondo Fisico*, Torino 1976, pp. 390-391.

dedo la precisione raggiungibile con gli apparati della fisica microscopica *ridondante* rispetto allo scopo di isolare i diversi stati fisici. La ridondanza si ottiene sciogliendo l'equivalenza tra la determinazione di uno stato fisico e l'attribuzione di un valore illimitatamente preciso a tutte le grandezze pertinenti. La teoria quantistica per un verso fissa un limite al numero delle proprietà che possono essere attribuite contemporaneamente con la massima precisione ad uno stato; e per l'altro verso, e conseguentemente, ammette che, *nel medesimo stato*, una o più grandezze rilevanti possano assumere tutto un insieme di valori diversi.

Stando così le cose, è evidente che *l'indeterminazione*, di cui tanto si parla a proposito della meccanica quantistica, non ha niente a che fare con una negazione del *principio della determinazione*, nel significato che gli abbiamo riconosciuto fondamentale per il progetto originario della fisica classica. Il principio della meccanica quantistica, che è tradizionalmente noto come *principio di indeterminazione*, potrebbe altrettanto bene essere chiamato *principio della massima determinazione realizzabile* ⁽⁴⁴⁾. Esso infatti non persegue un allentamento dei modi di definizione della realtà fisica, ma esprime la consapevolezza dei limiti che il progetto della massima determinazione dell'oggetto di conoscenza deve porsi quando diventa concretamente disponibile una catena di strumenti di misura, che superano un certo livello di finezza e di precisione.

Vediamo come questi limiti vengono espressi nel formalismo quantistico. Qui lo stato di un sistema è rappresentato da un vettore $|\Psi\rangle$ dello spazio hilbertiano. Questo vettore di stato esprime la massima definizione dello stato del sistema compatibile con l'esigenza che l'evoluzione temporale sia regolata da una legge di tipo dinamico, cioè tale da consentire, per ogni istante successivo alla definizione iniziale, la previsione di uno stato determinato in modo analogo e con la stessa potenza.

Ad ogni grandezza fisica atta a definire lo stato del sistema si

⁽⁴⁴⁾ E. Cassirer, *Determinismo*, *op. cit.*, p. 281: « la rinuncia alla determinazione assoluta reinstaura il maximum della determinazione relativa di cui sia capace la conoscenza fisica (...). Allora possiamo avanzare il principio che, se si sottopone una struttura fisica ad un'osservazione massimale, il suo stato successivo è pienamente determinato da tale osservazione — e si può usare questo principio come assioma per esprimere che cosa dobbiamo ritenere *stato di un sistema* nel senso della fisica atomica ».

fa corrispondere un operatore hermitiano A . Gli autovalori α_k che soddisfano l'equazione:

$$A|U_k\rangle = \alpha_k|U_k\rangle$$

rappresentano gli unici risultati possibili di una misura di A .

Solamente se il sistema si trova in uno degli stati corrispondenti agli autovettori $|U_k\rangle$ la determinazione massima dello stato richiede un valore della grandezza A differenziato con la massima precisione. Negli altri casi il vettore di stato può essere rappresentato nella base degli autovettori $|U_k\rangle$ secondo l'espressione:

$$|\Psi\rangle = \sum_{k=0}^{k=\infty} C_k|U_k\rangle$$

dove la componente $C_k = \langle U_k|\Psi\rangle$ rappresenta con il quadrato del modulo $|C_k|^2 = P_k$ la probabilità che la misura di A dia come risultato α_k . Ciò equivale a dire che, in questi casi, la definizione dello stato $|\Psi\rangle$ non si realizza con l'attribuzione di un valore preciso della grandezza A , ma con l'assegnazione di una distribuzione di probabilità relativa a tutto un insieme di valori possibili.

Quando due operatori hanno gli stessi autovettori si dicono commutabili, nel senso che vale per essi:

$$AB - BA = 0$$

e le due osservabili corrispondenti sono dette *compatibili*, perché possono essere definite contemporaneamente con la massima precisione. Se, invece, gli operatori non sono commutabili, le grandezze corrispondenti sono *incompatibili*; in questo caso l'aumentata precisione nella definizione dell'una importa la maggiore imprecisione nella determinazione dei valori dell'altra. L'informazione massima su un microsistema si ha evidentemente quando si conoscono i valori del numero massimo di osservabili tra loro compatibili.

Purché la definizione dello stato di un sistema avvenga nel rispetto di queste restrizioni, è ancora possibile trovare un'equazione di tipo dinamico che controlla l'evoluzione temporale del sistema. Finché questo non interagisce con un *apparato di misura*, il suo vettore di stato evolve in modo deterministico secondo la legge:

$$|\Psi(t)\rangle = T(t)|\psi(0)\rangle$$

dove $|\Psi(t)\rangle$ rappresenta lo stato del sistema al tempo t e $|\psi(0)\rangle$ lo stato al tempo $t=0$; e $T(t)$ è un *operatore lineare* che si sa costruire a partire dall'espressione hamiltoniana dell'energia del sistema.

La necessità, peculiare della meccanica quantistica, che la teoria incorpori una forma specifica di consapevolezza delle operazioni di differenziazione degli stati fisici rilevanti, non è stata accolta in modo indolore, ma ha dato luogo ad un complesso dibattito, che si è accentrato soprattutto sulle diverse interpretazioni possibili di tale *autocoscienza della prassi scientifica*, e che ancora oggi è lontano dall'essere concluso. Le difficoltà maggiori sono legate al *problema della misurazione*, dalla cui analisi non pochi fisici traggono delle conseguenze paradossali, che fanno dubitare della fondatezza teorica complessiva della meccanica quantistica. C'è, intanto, il problema ben noto del *collasso della funzione d'onda*. Immaginiamo che un sistema si trovi in uno stato $|\psi\rangle$, rappresentabile nella base degli autovettori $|U_i\rangle$ di un'osservabile A , dalla solita somma

$$|\psi\rangle = \sum_i C_i |U_i\rangle$$

Eseguiamo ora un'operazione di misura di A . Avremo un risultato preciso α_k . Siamo allora costretti a dire, che, in seguito alla misura di A , il sistema passa improvvisamente dallo stato $|\psi\rangle$ allo stato $|U_k\rangle$. Vale a dire che la somma $\sum C_i |U_i\rangle$ si riduce di un colpo alla sola componente $|U_k\rangle$, che inoltre non è neppure prevedibile con precisione prima della misura effettiva.

La situazione è piuttosto strana perché richiede che noi distinguiamo nettamente l'evoluzione del sistema *in assenza di osservazioni*, che procede nel modo deterministico espresso dall'equazione di Schroedinger, dal cambiamento di stato brusco ed imprevedibile, che si verifica nel sistema *in coincidenza di un'operazione di misura*. Schroedinger ha spinto fino al paradosso le conseguenze di questa situazione. Egli descrive un esperimento ideale in cui un atomo eccitato emette un fotone che può colpire con eguale probabilità o una parete fotoelettrica o un assorbitore. Nel primo caso il fotone produce una moltiplicazione di elettroni che determina la rottura di una fiala di gas tossico in un contenitore chiuso in cui è stato messo un gatto. Lo stato del fotone, all'atto della sua emissione, è una sovrapposizione di $|\psi\rangle = \text{fotone verso l'assorbitore}$,

e di $|\psi_m\rangle = \text{fotone verso il metallo fotoelettrico}$. Estendendo il formalismo quantistico al gatto, avremo che il suo stato finale sarà una sovrapposizione di $|\psi_v\rangle = \text{gatto vivo}$ e di $|\psi_m\rangle = \text{gatto morto}$. Il paradosso è evidente: sembra che siamo noi, con una semplice osservazione, ad uccidere o a tenere in vita il gatto ⁽⁴⁵⁾. L'operazione di misura, infatti, consiste qui nell'aprire la scatola e guardare se il gatto è vivo o morto.

D'altra parte, von Neumann ha chiaramente mostrato che quella fra un sistema microscopico e un apparato di misura è *un'interazione specifica*, irriducibile alle interazioni regolari trattate dall'equazione di Schroedinger. La linearità caratteristica dell'evoluzione del vettore di stato, prevista da questa equazione, esclude infatti i processi del tipo della riduzione della funzione d'onda. La conclusione di von Neumann è che il collasso del vettore di stato si può spiegare solamente come un *effetto della coscienza* dell'osservatore, perché solamente a questo livello non fisico si può verificare la violazione della linearità delle equazioni quantistiche ⁽⁴⁶⁾.

Ma il problema della misura quantistica è veramente tanto paradossale? Ed è davvero necessario ricorrere, per comprenderlo, ad entità così misteriose come la coscienza degli sperimentatori? Nel quadro dell'interpretazione che ho cercato di delineare poco sopra il problema della misura trova forse una soluzione più semplice. Abbiamo visto che la meccanica quantistica fissa un limite obiettivo per la precisione e la finezza di cui si può fare uso nel processo di differenziazione degli stati possibili di un sistema fisico determinato con le proprietà introdotte dalla strumentazione microscopica. Questo limite ci è imposto dalla stessa esigenza di dominare l'evoluzione temporale del sistema con una legge deterministica. Ammettiamo ora che la definizione dello stato iniziale abbia richiesto l'attribuzione di valori precisi di alcune grandezze, ad esclusione di altre, fra le quali l'osservabile A, per i cui valori è assegnata una distribuzione di probabilità. Il vettore di stato evolve obbedendo all'equazione di Schroedinger fino ad un certo

⁽⁴⁵⁾ E. Schroedinger, *Die gegenwartige situation in der Quantenmechanik*, *Naturwissenschaften* 23 (1935), p. 807.

Cfr. G. Tarozzi, *Empiricism and Quantum Theory*, in *Epistemologia* 3, 1 (1980), p. 13.

⁽⁴⁶⁾ J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, University Press, Princeton 1955, p. 420.

tempo t . Se, però, a questo punto, eseguiamo una misura A , questa ci dà un valore preciso α_k . Siamo pertanto costretti a far rientrare la grandezza nel novero delle osservabili i cui valori sono definiti con la massima precisione. Tuttavia, non possiamo semplicemente *aggiungere* la nuova grandezza all'insieme precedente delle proprietà i cui valori potevano essere definiti contemporaneamente in modo preciso, perché *non possiamo aumentare la determinazione complessiva del sistema*. Non resta allora altra strada che cambiare *in toto* il modo della differenziazione degli stati del sistema, scegliendo *un nuovo insieme di grandezze* compatibili da definire con la massima precisione, nel quale rientri l'osservabile effettivamente misurata, senza però forzare i limiti della determinazione complessiva. Il collasso della funzione d'onda riflette proprio questo cambiamento della base delle osservabili utilizzate per definire i diversi stati del sistema. Cambiamento che è provocato: a) dalla misura precisa di un'osservabile compresa, fino a quel momento, nel novero delle proprietà la cui definizione non va oltre una distribuzione di probabilità, e b) dall'esigenza metodologica di non superare il livello della determinazione complessiva del sistema, al di là del quale non è più possibile controllarne l'evoluzione temporale con un'equazione deterministica. Non solo, quindi, non vi è contraddizione tra l'evoluzione causale e continua descritta dall'equazione di Schroedinger ed il salto discontinuo ed imprevedibile rappresentato dal collasso della funzione d'onda, ma la rottura della continuità segnata dalla riduzione del vettore di stato è il prezzo che la definizione dello stato di un sistema microscopico deve pagare se vogliamo conservare la stabilità del sistema, cioè la natura causale e la prevedibilità della sua successiva evoluzione temporale.

Seguendo un'interpretazione ormai classica, potremmo ancora dire che le discontinuità introdotte dal formalismo quantistico riflettono le inevitabili, ed insieme imprevedibili, *perturbazioni* che si inducono nel sistema in seguito alla sua interazione con l'apparato di misura ⁽⁴⁷⁾.

⁽⁴⁷⁾ G. Toraldo di Francia, *L'Indagine*, op. cit., p. 376: « nella fisica classica era possibile pensare di osservare un sistema fisico senza perturbarlo (...). Il principio di Heisenberg nega che questo sia possibile nella microfisica. Appena si osserva un sistema lo si perturba in modo non esattamente noto. L'osservatore diventa inesorabilmente uno dei protagonisti del fenomeno ».

Ma non possiamo più intendere questo concetto nel significato troppo concreto di una sorta di « spallata » che lo strumento di misura darebbe materialmente all'oggetto microscopico, facendolo « saltare » da uno stato precedente l'osservazione in uno fra molti stati che si trovano al di là della linea di spinta. L'operazione di misura non perturba materialmente il sistema. Essa si limita a fornirci il valore preciso di una grandezza. E questo fatto *costringe noi* a ridefinire lo stato del sistema in modo da tenere conto della nuova informazione. Ma non è neppure corretto intendere questo intervento soggettivo come un'azione della coscienza del singolo osservatore, secondo quanto sostiene von Neumann. Il soggetto che interviene qui per ridefinire lo stato del sistema su di una nuova base non è infatti riducibile alla coscienza individuale dello sperimentatore; ma è piuttosto un soggetto di natura *trascendentale*, al quale, cioè, spetta la responsabilità, non di una singola operazione di misura, ma della struttura complessiva della prassi e della teoria quantistiche.

Ma, cosa dire, a questo punto, del gatto di Schroedinger? La soluzione del paradosso è che esso deriva dalla pretesa di estendere il formalismo quantistico ad un oggetto come il gatto e ad una proprietà i cui valori, vivo-non vivo, non possono essere attribuiti contemporaneamente, senza con ciò distruggere la determinazione dell'oggetto. L'esperimento ideale di Schroedinger è solamente una dimostrazione di incomprendimento della peculiarità dei modi di definizione degli oggetti trattati dalla teoria quantistica, che non possono essere estesi ad oggetti di altro tipo, per i quali non solo è possibile ma è anche necessario assegnare un valore preciso a tutte le osservabili pertinenti. Così, mentre ha un senso che lo stato di un fotone risulti dalla sovrapposizione di un movimento verso destra e di uno verso sinistra, per un oggetto come il gatto uno stato che sovrappone l'essere vivo e l'essere morto non ha senso alcuno⁽⁴⁸⁾. La medesima incomprendimento si riconosce all'origine di un altro famoso paradosso segnalato da Einstein-Podolsky-Rosen⁽⁴⁹⁾. Solo che nel paradosso E.P.R. la situazione è rovesciata. La specificità della determinazione quantistica

⁽⁴⁸⁾ P. Caldirola, *Dalla microfisica alla macrofisica*, Milano 1974 pp. 193 sgg.

⁽⁴⁹⁾ Cfr. O. Costa de Beauregard, *Le Troisième Orage du 20e siècle: le paradoxe d'Einstein*, in *Epistemologia* 1, 2, 1978, p. 305.

è ora cancellata facendola assorbire dai modi e dalle caratteristiche della definizione classica. Una prova evidente di questa pretesa è lo stesso *criterio di realtà fisica*, che Einstein enuncia nei termini seguenti: « se, senza turbare in alcun modo un sistema, possiamo prevedere con certezza (cioè con probabilità eguale ad uno) il valore di una quantità fisica, allora esiste un elemento della realtà fisica che corrisponde a questa quantità »⁽⁵⁰⁾. La coincidenza di realtà e prevedibilità, infatti, è caratteristica della meccanica classica, ed è solamente nel suo ambito che la determinazione di un oggetto è giudicata esauriente quando consente di operare delle previsioni⁽⁵¹⁾.

8. « Le relazioni quantistiche di indeterminazione » — nota Cassirer — « rinunziano tanto poco ad assumere rigorose leggi di natura, che anzi vogliono dare una direttiva sul come giungere a tali leggi e come formularle per soddisfare le condizioni della nostra conoscenza empirica »⁽⁵²⁾.

Anche quando Heisenberg sostiene che la meccanica quantistica costringe ad ammettere la non-validità della legge causale, la sua argomentazione « si rivolge esclusivamente contro una particolare versione » di questa legge. Ma, se esprimiamo il principio di causalità nella sua forma più generale e più corretta, che lo rende identico ad un « postulato generale di legalità », allora le relazioni heisenbergiane di indeterminazione « non costituiscono un'istanza ad esso contraria »⁽⁵³⁾. Tanto è vero che « l'equazione ondulatoria di Schroedinger, lo schema quadratico di Heisenberg, la meccanica delle matrici di Born e Jordan, i numeri di Dirac sono altrettanti mezzi concettuali con cui rendere possibile un rigoroso coordinamento delle grandezze osservabili »⁽⁵⁴⁾.

Non è quindi corretto sostenere che la meccanica quantistica rinunzia al « *postulato della determinazione come tale* », perché

⁽⁵⁰⁾ A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Can a quantum-mechanical description of Physical reality be considered complete?*, *Physical Review* 47 (1935), p. 777.

⁽⁵¹⁾ S. Tagliagambe, *Introduzione a L'interpretazione materialistica della Meccanica quantistica*, trad. it. Milano 1972, p. 82.

⁽⁵²⁾ S. Cassirer, *Determinismo*, *op. cit.*, p. 180.

⁽⁵³⁾ *Ibid.*, p. 182.

⁽⁵⁴⁾ *Ibid.*, p. 188.

la sua strada è, al contrario, quella di « elaborare nuovi mezzi concettuali per soddisfarlo e per potersi inoltrare felicemente, per mezzo di esso », in un nuovo dominio oggettuale ⁽⁵⁵⁾.

Tuttavia, malgrado questo suo deciso procedere sotto le insegne del principio della massima determinazione, la teoria quantistica è costretta, come abbiamo visto, ad incorporare una forma specifica di consapevolezza della prassi con cui la fisica microscopica perviene alla definizione dei propri oggetti. Dall'acquisizione di questa forma, per quanto ridotta, di coscienza dell'effettivo lavoro di determinazione della realtà fisica, discendono delle conseguenze importanti, che non si esauriscono nella sanzione dei limiti posti con le relazioni di Heisenberg alla completezza, alla precisione e alla finezza realizzabili nella definizione di uno stato di un sistema microscopico. Un altro risultato, non meno essenziale delle relazioni di indeterminazione, è il nuovo modo in cui la teoria quantistica considera il rapporto tra il soggetto conoscente e l'oggetto conosciuto, che appare rovesciato rispetto alla concezione dominante nella fisica classica. « Nella concezione sostanzialistica — caratteristica della fisica classica — si dava un essere rigidamente definito che possedeva certe proprietà ed entrava con un altro essere in determinate relazioni espresse dalle leggi di natura ». La meccanica quantistica adotta invece « una *prospettiva funzionale* », in forza della quale l'oggetto di conoscenza « non costituisce più il punto di partenza per sé evidente, ma il punto di arrivo a cui mira la considerazione: da *terminus a quo* esso è divenuto il *terminus ad quem* » ⁽⁵⁶⁾. Ciò significa che la teoria quantistica assume esplicitamente « la proprietà di lasciarsi determinare empiricamente e teoricamente » come il carattere essenziale dei propri oggetti, il cui concetto si trasforma « da semplice *concetto cosale* in un *concetto relazionale e sistematico* ». Vale a dire che « la nuova fisica preordina il concetto di legge a quello di cosa: che cos'è una cosa si può dunque descrivere solo adducendo le leggi per essa vigenti » ⁽⁵⁷⁾.

Inoltre la teoria quantistica, anche se direttamente non te-

⁽⁵⁵⁾ *Ibid.*

⁽⁵⁶⁾ *Ibid.*, p. 194.

⁽⁵⁷⁾ *Ibid.*, p.196.

matizza (anzi esplicitamente esclude) la considerazione dei processi, nei quali certe correlazioni possono essere superate ed altre determinazioni, imprevedibili ed irriducibili alle prime, possono essere assunte, tuttavia, ci fornisce un'importante conferma indiretta di quanto è richiesto ad una prassi scientifica che intenda trattare i mutamenti e le trasformazioni qualitative, recuperando alla conoscenza, per quanto è possibile, la dimensione della materialità informe, responsabile della cancellazione dei confini e delle determinazioni rigide.

Il collasso della funzione d'onda, che si verifica in coincidenza con la misurazione di un'osservabile, non si può considerare — lo abbiamo visto — alla stregua di un processo del genere, perché, assai più modestamente, esso si limita ad esprimere un cambiamento discontinuo relativo all'insieme delle grandezze a cui la definizione dello stato di un sistema richiede un valore preciso. Possiamo dire, però, che la riduzione del vettore di stato sta ad una reale trasformazione qualitativa come un episodio del « piccolo male » sta ad un vero attacco di epilessia. Vale a dire che la descrizione quantistica di un'operazione di misura mette in luce dei caratteri che sono simili, anche se in scala ridotta, ai tratti specifici della descrizione dei processi e delle reali trasformazioni qualitative. Così, ad esempio, un primo elemento che la teoria quantistica della misura evidenzia è il carattere di *irreversibilità* del cambiamento indotto dall'interazione del sistema con l'apparato di osservazione, interazione che non può più essere interpretata nel modo classico della « finzione di una misura istantanea e reversibile »⁽⁵⁸⁾. Lo strumento di misura, come il lavoro dell'osservatore, implicano essenzialmente *un orientamento nel tempo*⁽⁵⁹⁾. Il risultato dell'operazione, poi, non è esattamente prevedibile prima della misurazione effettiva, quando l'informazione massima si esaurisce nella conoscenza di una distribuzione di probabilità relativa a tutto un insieme di valori possibili. Infine, l'acquisizione del valore preciso di una nuova grandezza sottoposta a misura produce una sorta di *sospensione delle determinazioni precedenti*, anche se si tratta qui, come sappiamo, di una situazione provvisoria e finalizzata all'immediata massima ridefinizione dello stato del sistema.

⁽⁵⁸⁾ I. Prigogine, *La Nuova Alleanza*, op. cit., p. 283.

⁽⁵⁹⁾ *Ibid.*

In sostanza, il punto di vista della teoria quantistica ci fornisce un'importante conferma indiretta del fatto che il carattere essenziale della descrizione di una trasformazione qualitativa consiste in una stretta connessione di *irreversibilità temporale, natura statistica delle previsioni possibili e allentamento delle determinazioni*, che peraltro era già apparsa nella descrizione dinamica dei processi di ritorno all'equilibrio termodinamico, nonché nello studio delle strutture dissipative.

C'è però anche un altro modo in cui la teoria quantistica richiama indirettamente l'importanza, anzi l'urgenza, del recupero alla conoscenza delle determinazioni e dei legami deboli. L'estensione relativistica della meccanica quantistica, che si è resa necessaria per la considerazione dei fenomeni che coinvolgono energie molto elevate, ha prodotto una strana situazione di *impasse*. Le equazioni della teoria, che è nota come teoria dei campi quantizzati, « sono così complesse che non è possibile risolverle in modo esatto. Esiste una tecnica di soluzione che consiste in una approssimazione fondata sul presupposto che l'interazione fra le particelle sia abbastanza debole. Essa risulta applicabile alle interazioni elettromagnetiche, ma nel caso delle *interazioni forti* questa tecnica non è assolutamente applicabile »⁽⁶⁰⁾. Ciò vuol dire che in questo campo di indagine, che è poi il settore della fisica delle particelle elementari, « non si riesce a trarre dalla teoria generale neppure un numero da sottoporre al controllo sperimentale »⁽⁶¹⁾, cioè « non esiste un formalismo matematico che porti a predizioni numeriche delle quantità sperimentali utilizzando procedimenti definiti e consistenti »⁽⁶²⁾. Non solo però non esiste una teoria delle particelle elementari, ma la situazione della ricerca in questo settore è tale che « nessuno cerca più oggi una teoria in senso tradizionale »⁽⁶³⁾. La ricerca teorica si svolge ormai con l'uso di *modelli*. Dove però il termine « modello » assume il significato molto specifico di « tentativo di utilizzare, in base a più o meno grossolani ragionamenti fisici qualitativi, metodi e tecniche classici o semi classici », oppure di « tecnica o espressione approssimata suggerita dalla 'teoria' »

⁽⁶⁰⁾ A. Baracca, S. Bergia, *La Spirale, op. cit.*, p. 170.

⁽⁶¹⁾ *Ibid.*, p. 171.

⁽⁶²⁾ *Ibid.*

⁽⁶³⁾ *Ibid.*, p. 190.

cioè da quegli schemi generali che non si sanno trattare quantitativamente in modo adeguato ». Così concepito, un modello « si riduce ad una *espressione matematica contenente dei parametri* e con un legame molto tenue con l'analogia fisica che lo aveva suggerito »⁽⁶⁴⁾. Il suo uso consiste, allora, « nel determinare quale valore dei parametri adatti meglio l'espressione matematica all'andamento dei dati sperimentali. Si costringe in pratica quell'espressione matematica a riprodurre, nei limiti della sua duttilità, i dati sperimentali »⁽⁶⁵⁾. Si sviluppa così una strana « fisica delle previsioni a posteriori », che « finisce per essere retta, come è stato detto paradossalmente, da un *principio di Multidualità: tutti i risultati sono spiegati da tutte le teorie* »⁽⁶⁶⁾.

Stando così le cose, non pare azzardato il dubbio che la fisica delle particelle elementari sia il prodotto estremo di una prassi scientifica che è prossima a superare, se non li ha già varcati, quei limiti che la vecchia teoria quantistica ancora poneva alla segmentazione fine degli oggetti di conoscenza, limiti al di là dei quali il dominio degli oggetti definiti non si distingue più dallo stato della materia informe, da cui è assente ogni determinazione stabile ed ogni interna struttura. La pretesa di spingere sempre più avanti *l'artificialità, la precisione e la finezza* delle proprietà atte a differenziare e isolare i diversi oggetti di conoscenza ha prodotto, nella fisica delle alte energie, una situazione in cui « si va dal fatto banale, ma non per questo irrilevante, che non si sa *quanti parametri* usare (ad esempio, per isolare le diverse *risonanze*), al fatto più grave che non si sa *quali* parametri usare, che *non si conoscono certi contributi* della cui esistenza si è certi, o addirittura che *non si sa quali contributi vi siano* »⁽⁶⁷⁾.

Le *particelle elementari*, ultimo prodotto di una segmentazione della realtà fisica così raffinata e così astratta che avrebbe dovuto sottrarre questi enti, definitivamente « asciutti », alla palude della materia, sfuggono ad ogni definizione. Neppure il più complesso dei formalismi è capace di trattenerle: la rete teorica più fitta è

⁽⁶⁴⁾ *Ibid.*, p. 191.

⁽⁶⁵⁾ *Ibid.*, p. 195.

⁽⁶⁶⁾ D.R.O. Morrison, Rendiconti della *International Conference on Elementary Particles*, Lund 1969, p. 25.

⁽⁶⁷⁾ A. Baracca, S. Bergia, *La Spirale*, op. cit., p. 198.

destinata a rimanere *vuota*. L'idea del *bootstrap* è la rappresentazione esemplare di questa impotenza. Il *bootstrap* « configura un sistema mostruoso di equazioni accoppiate da risolversi simultaneamente »⁽⁶⁸⁾. Eppure « non sappiamo se esiste una qualche soluzione delle equazioni che non abbiamo finito di scrivere »⁽⁶⁹⁾. Anzi, « non sappiamo in realtà di che cosa stiamo parlando e assumiamo di aver precisato in che consista l'ipotesi del *bootstrap* ». L'unica cosa che sappiamo con certezza è che « la distanza tra le ipotesi del *bootstrap* e i calcoli pratici è così grande che soltanto l'intuizione colma il salto, e diventa in effetti un'assunzione che i calcoli che si fanno abbiano qualcosa a che fare con quelli che il *bootstrap* predirebbe, se sapessimo fare delle previsioni a partire da esso »⁽⁷⁰⁾.

RIASSUNTO

Alcuni settori della fisica contemporanea sembrano riconsiderare il valore conoscitivo delle determinazioni incomplete e della stabilità debole, mettendo così in discussione il principio della massima determinazione, che tacitamente fonda la scienza classica.

⁽⁶⁸⁾ *Ibid.*, p. 184: « Il termine *bootstrap* fu introdotto da Chew e Mandelstam, verosimilmente già con l'idea del sollevarsi tirandosi su per i propri stivali che esso implica nel contesto (...). L'idea di fondo di questa filosofia è che le particelle, come il barone di Münchhausen, non abbiano bisogno di un appoggio esterno, di costituenti ultimi, per emergere dalla palude del nulla e venire all'esistenza. Nessuna particella è elementare, bensì ciascuna è composta, generata da tutte le altre ».

⁽⁶⁹⁾ F. Zachariasen, *What, if anything, is the bootstrap?*, in *High Energy Physics and Elementary Particles*, Trieste 1965.

⁽⁷⁰⁾ *Ibid.*