



I. Che cos'è la materia? - II. La materia come concetto filosofico-teologico - III. L'indagine scientifica sulla materia - IV. Tra scienza e filosofia - V. Materia e massa, campo ed energia - VI. Vuoto, materia ed energia - VII. La materia e il problema del tutto e delle parti - VIII. Materia, intelligenza e astrazione.

I. Che cos'è la materia?

Nel linguaggio comune siamo abituati a designare con l'aggettivo "materiale" tutto ciò che può cadere sotto la percezione diretta dei nostri sensi esterni: diciamo materiale quello che si vede, si tocca, si odora, si gusta e di cui si può udire il suono. Al livello macroscopico, cioè quello della nostra scala umana, questa è una definizione operativa adeguata. Nel linguaggio comune chiamiamo, poi, "corpi" gli oggetti (enti) "materiali", specialmente quelli solidi, ma in senso ampio anche i liquidi e aeriformi, così come quelli che si possono osservare indirettamente mediante degli strumenti (cfr. Artigas e Sanguineti, 1989, p. 3). Con il termine «materia» viene indicata indistintamente una sorta di tessuto costitutivo dei corpi, indipendentemente da come esso si differenzia nei diversi tipi di corpo.

La necessità di introdurre una simile terminologia nasce, in prima istanza, dall'esigenza di distinguere ciò che causa un'esperienza sensoriale da ciò che è all'origine di un'esperienza di natura diversa, come quella interiore del pensare, del provare emozioni, del ricordare e del volere, che si presenta come fondamentalmente imponderabile, immateriale.

Le cose si complicano quando si passa ad un'analisi più dettagliata che coinvolge fenomeni come la luce, o ambiti di ricerca come il mondo microscopico, quello biologico, o quello della mente umana. Solo un esame più attento permette, come vedremo, di comprendere meglio le caratteristiche di questi "mondi" e di precisare il significato del termine "materia" anche in rapporto ad essi.

Storicamente si sono venuti a costituire due approcci al problema della materia: un approccio che possiamo chiamare "filosofico-metafisico" e un approccio che oggi qualifichiamo come "scientifico". Ciascuno di questi due modi di accostare il problema, se condotto correttamente, ci offre degli elementi molto significativi per rispondere alla domanda «che cos'è la materia?», che sono tra loro complementari in quanto colgono lo stesso oggetto da punti di vista diversi: quello "quantitativo-relazionale" (scientifico) e quello "entitativo" (filosofico). Vediamo di esaminarli entrambi, per quanto ci è possibile.

II. La materia come concetto filosofico-teologico

In questa sezione cercheremo di prendere in considerazione la diversificazione "qualitativa", diciamo meglio "metafisica", tra diversi modi di accostare l'indagine sulla materia e di indicare anche quegli aspetti che riguardano più direttamente la teologia e vengono trattati con ampiezza in altre voci ad essi dedicati alle quali rinvieremo.

1. *L'approccio fisico.* Nell'antichità classica, quando ancora scienza e filosofia non erano distinte e incominciò a costituirsi il pensiero razionale e dimostrativo (circa attorno al VI secolo a.C.), oltre la cultura del → mito, che si proponeva di comunicare delle verità fondamentali più che di analizzare la struttura del cosmo, i filosofi ioni — come Talete, Anassimene, Anassimandro, ecc. — poi chiamati anche "fisici", in quanto studiosi della → natura (gr. *physis*), si posero il problema di ricercare quali fossero gli "elementi costitutivi" del mondo che cade sotto i nostri sensi (cfr. Daumas, 1969, pp. 42-43, 181-184). L'esigenza della mente umana era, allora come oggi, quella di ricondurre la descrizione del mondo a pochi elementi costitutivi unificanti. Come oggi i fisici ritengono che i *quarks* del "modello *standard*" (cfr. H. Firetzsch, 1983; Cohen-Tannoudji e Spiro, 1988; *Campi, forze, particelle*, 1991) siano i componenti fondamentali — anche se sono pronti a cambiare modello se questo si dimostrasse inadeguato e se ne trovasse uno migliore — questi antichi indagatori del mondo fisico pensarono, più semplicemente, alla terra, all'aria e al fuoco (i "quattro elementi"), in modo da descrivere, con un dosaggio più o meno rarefatto di ciascuno di questi elementi, ogni gradazione possibile di densità e pesantezza sperimentabili, oltre alle differenti proprietà qualitative. Empedocle pensò piuttosto ad una miscela opportunamente dosata di questi stessi elementi. Per quanto oggi questa descrizione suoni ingenua e, comunque troppo "qualitativa",

essa non differisce, nella sostanza, dal punto di vista filosofico e metodologico, dal nostro modo di procedere attuale. Infatti, allora come oggi, si ricercavano degli elementi costitutivi che fossero "omogenei" rispetto a ciò che si doveva descrivere e spiegare. Noi chiamiamo "riduzionistico" questo metodo, che è quello, in fondo, più semplice da adottare. Per spiegare la natura dei diversi corpi li pensiamo come formati a loro volta di corpi più piccoli (microscopici) che si aggregano tra loro e che non sono altro che frazioni minime di elementi che possono essere trovati, in natura, anche in quantità macroscopiche. Per questi antichi studiosi del mondo fisico una particella di "terra" era fatta della stessa "terra" che potevano calpestare, così come, per noi, una particella è "materia" allo stesso modo del tavolo su cui poggiamo un libro da leggere. Nessuno direbbe che un protone o un *quark* non sono materia! Il problema, piuttosto, sarà quello di capire qual è la natura di questa materia che è comune agli oggetti microscopici e a quelli macroscopici, se essa è un costituente primario e irriducibile, o se è, a sua volta, effetto di qualcos'altro.

Non a caso i costituenti elementari vengono detti, talvolta, anche i "mattoni" di cui è fatto l'universo. E i mattoni sono della stessa materia della casa intera. A riprova di questa sostanziale omogeneità di impostazione sta una certa affinità che oggi uno scienziato prova per un pensatore come Democrito (460 ca.-370 a.C.) che ideò la prima teoria atomica della materia.

2. *L'approccio matematico.* La posizione di Pitagora (570-490 ca. a.C.) e dei suoi seguaci è particolarmente interessante, anche dal punto di vista moderno, perché introduce la matematica alla base della spiegazione della natura (cfr. Daumas, 1969, p. 183). In luogo degli "atomi", in questo caso, compaiono i "punti" che ci riportano ad una descrizione geometrica dello spazio fisico. Noi saremmo condotti a pensare ai "punti materiali" della moderna meccanica razionale, ma i pitagorici non avevano la preoccupazione di descrivere l'aspetto ponderabile della natura, quanto quella di coglierne l'ordine e l'armonia, la "musicalità", attraverso i rapporti numerici. In questo senso essi compiono un passaggio da una descrizione "materialista" ad una descrizione "astratta" o "ideale" del cosmo. E, dal momento che i pitagorici conoscevano la corrispondenza tra i punti di una retta e i numeri, la descrizione era nel contempo geometrica e aritmetica, o come si suol dire "aritmo-geometrica". La crisi dei numeri "irrazionali", però, non fu pienamente superata che secoli più tardi e questa impostazione matematizzante, che aveva fondato l'intero sistema di vita e di pensiero dei pitagorici, entrò in crisi e si bloccò per molto tempo.

3. *L'approccio metafisico.* A questo punto era maturo il passaggio dall'approccio fisico e/o matematico all'approccio metafisico. La domanda con cui il problema della comprensione della realtà fu affrontata, adesso, non era più: «Quali sono gli elementi costitutivi?», ma «come è possibile il cambiamento nelle cose?», il divenire. Noi facciamo → esperienza della variabilità delle cose e nel contempo della loro identità. La ricerca sposta il suo obiettivo dall'indagine sui costituenti ("mattoni") dell'universo, ai "principi" che ne spiegano l'esistenza e il mutamento. Questi principi non sono riconducibili a dei componenti corporei, e quindi osservabili, ma sono di natura diversa da quella dei corpi. Eppure vanno ipotizzati per ragioni di ordine logico, per poter spiegare il comportamento delle cose e dei corpi in particolare. Anzi alcuni di essi si presentano come irrinunciabili ai fini della comprensione della realtà, in quanto, provando a prescindere si giunge a delle contraddizioni, o almeno, a non essere in grado di procedere oltre un certo grado di conoscenza (→ METAFISICA, I).

Ogni corpo — e ciò è particolarmente evidente nei viventi — durante la sua esistenza, in parte si trasforma e in parte si mantiene inalterato, e conserva la propria identità. Se vi fosse un solo principio alla base dell'essere, se vi fossero solo i "mattoni" (materia), sostituendo questi con altri mattoni, il corpo non sarebbe più lo stesso. Così non si potrebbe più dire che un uomo, o un vivente, è sempre lo stesso vivente durante la sua vita, dal momento che le particelle che lo costituiscono si ricambiano più volte nel corso della sua esistenza. Allora occorre un altro principio, oltre alla materia, che garantisca l'identità, il permanere al di là del cambiamento dei costituenti materiali. Aristotele (384-322 a.C.) chiamò "forma sostanziale" questo principio, di tipo diverso dalla materia, che fa sì che un ente sia quello che è e rimanga tale per tutta la sua esistenza. Probabilmente il nostro concetto di → informazione è ciò che più si avvicina a quello aristotelico di forma.

Ci troviamo, così di fronte ad una descrizione dei corpi che li vede come la sintesi (sinolo), la risultanza di due principi costitutivi (co-principi, in quanto operanti insieme) che non sono essi stessi corpi, ma sono di altra natura, non sono degli "osservabili", non sono omogenei con i corpi, ma ne rendono possibile l'esistenza e il mutamento: la "materia" che è come la base comune della corporeità e la "forma" che immette nella materia le informazioni necessarie a far sì che essa divenga quel dato corpo, con quelle date proprietà. Ecco la base della teoria "ilemorfica" (per approfondimenti cfr. Artigas e Sanguineti, 1989, cap. 3; Coggi, 1997, cap. 3). A questo punto

occorre una precisazione che è anche linguistica. Finora abbiamo impiegato il termine «materia» per indicare qualcosa che è della stessa natura, della stessa "stoffa" dei corpi, mentre con Aristotele fa la sua comparsa una materia che è un "principio" di natura diversa, una pura potenzialità di ricevere il principio attivo, informativo che è la forma. Allora occorre distinguere tra questi due tipi di materia: bisogna, dunque, parlare di una "materia prima" che è il "principio" (la pura potenzialità di ricevere le forme) e di una "materia seconda" che è quella già attuata dalla forma ed è della stessa natura dei corpi osservabili, ne è il tessuto costitutivo. Questa "materia seconda" non è altro che ciò che noi oggi chiamiamo semplicemente "materia", sia nel linguaggio comune che in quello scientifico: essa è omogenea ai corpi, è una "cosa" (*ens quod*), mentre la "materia prima" (come anche la "forma") non è una "cosa", ma un principio mediante il quale (*ens quo*) le cose sono tali.

Questo tipo di ricerca metafisica dei costituenti del mondo corporeo richiede di concepire l'ente secondo modi differenziati (→ ANALOGIA) come *ens quod* oppure come *ens quo* e non in maniera omogenea (univoca) come l'essere sempre identico a se stesso e privo di mutamento di Parmenide, o il puro divenire di Eraclito, privo di un'identità che permane, ma una gradualità di modi di essere ente che comprende principi "potenziali", come la materia prima, principi "attivi" come la forma e "cose" già attuate in varia misura.

4. *Materia e spirito: aspetti filosofico-teologici.* La filosofia, a differenza della fisica e delle scienze naturali, ha visto comparire nel suo panorama storico, al fianco dello studio dei corpi sensibili, anche l'analisi dell'esperienza interiore dell'uomo, caratterizzata fondamentalmente dalla sua intelligenza e volontà. Quest'analisi ha condotto ad introdurre, oltre al concetto di materia, prima o seconda, anche un principio totalmente immateriale, denominato solitamente → spirito, così come il termine → anima. Aristotele aveva già impiegato il termine "anima" per indicare la forma sostanziale dei viventi distinguendo in essa una facoltà vegetativa, una sensitiva (che l'uomo ha in comune con gli altri esseri viventi) e una razionale propria dell'uomo.

Il termine «spirito», poi, verrà utilizzato prevalentemente in senso generico, mentre il termine «anima», sempre più frequentemente utilizzato per designare l'anima umana, denota il principio spirituale di cui è dotato un individuo di natura razionale, come una persona umana. Ancora, il termine Spirito è impiegato in filosofia e teologia per indicare la natura di esseri superiori all'uomo e totalmente immateriali quali gli → angeli e → Dio. Rinviamo alle voci corrispondenti per una trattazione approfondita di questi argomenti, così come del loro rapporto con la materia.

Nella storia della cultura umana, nei suoi rapporti col pensiero religioso, la materia è stata sovente considerata un elemento legato alla corruzione, al degrado, al male, vista in opposizione allo spirito e alle realtà immateriali in genere. La filosofia di Platone non era estranea a questa visione: il corpo, ad esempio, è visto come "prigione" dell'anima. Uno degli apporti originali del cristianesimo, che riprende in questo l'ebraismo, è considerare la bontà intrinseca della materia. La dialettica fra il bene e il male viene trasferita dal paradigma spirito/materia, in qualche modo estrinseco alla dimensione morale, al cuore dell'uomo, cioè alla sua interiorità. È nota in proposito la riflessione dei → Padri della Chiesa (Ireneo, Tertulliano, Agostino) contro il manicheismo e le dottrine dualiste in genere. La materia e la corporeità sono buone, perché create, come le realtà spirituali, da un unico Dio (→ CREAZIONE, III.1). Il valore "teologico" della materia ed il suo ordinamento a Dio si riflettono poi nella stessa opera di santificazione della Chiesa, che affida alla "materia" dei sacramenti il compito di significare in modo efficace l'ordine della grazia, come ad es. l'acqua nel sacramento del battesimo, o anche di attualizzarlo, come accade nella transustanziazione della materia del pane e del vino nel sacramento dell'→ Eucaristia.

In prospettiva filosofico-teologica, la materia può venire a volte riduttivamente associata all'idea di → materialismo, dalla quale va però opportunamente distinta. L'assorbimento degli attributi dello spirito nella materia o, al contrario, la spiritualizzazione della materia, possono poi condurre a varie forme di → panteismo. Negli insegnamenti del magistero ecclesiastico si incontrerà l'esortazione a non ritenere che tutto nel mondo sia materia, disponendosi a riconoscere anche le opere dello Spirito. Queste ultime, pur realizzandosi attraverso la visibilità e la sensibilità della materia, nella loro origine la trascendono.

III. L'indagine scientifica sulla materia

La scienza moderna, che si fonda sul metodo galileiano, abbandona l'approccio metafisico per riprendere, rifondandoli e in un certo senso unificandoli, sia l'approccio fisico dei filosofi ionici che quello matematico dei pitagorici. Scopo di questa sezione non è tanto riproporre una descrizione completa delle diverse teorie scientifiche della materia, quanto quello di mettere in rilievo i

mutamenti di concezione della materia che i passaggi da un paradigma all'altro hanno comportato (per il concetto, ormai classico, di "paradigma", cfr. Kuhn, 1969).

1. *La teoria atomica della materia.* Il successo della meccanica galileiana e newtoniana sembra suggerire, in maniera naturale, una descrizione di tipo meccanico (meccanicismo) di tutta la natura corporea. In quest'ottica lo schema unificante più semplice, in grado di rendere conto delle diverse densità dei corpi, dai solidi ai liquidi ai gas, era offerto dall'atomismo di Democrito. Dopo che Dalton (1766-1844) fornì la prima prova sperimentale probante della teoria atomica, essa ebbe la dignità scientifica per affiancarsi alla meccanica di Newton già ben affermata. Così, mentre la teoria atomica forniva una descrizione della "struttura della materia", sulla base della quale si sviluppò tutta la chimica, la meccanica newtoniana rappresentava lo strumento per descriverne la "dinamica", l'evoluzione nel tempo; sulla base di quest'ultima si svilupparono la teoria cinetica dei gas e, più in generale, la meccanica statistica, che fornirono il modello meccanico microscopico di quella teoria macroscopica che è la termodinamica. Lo sviluppo della fisica classica può essere dunque esaminato da due diversi punti di vista: quello che riguarda la "struttura" della materia, di cui ci stiamo occupando in questa voce, e quello che riguarda la sua "dinamica" (→ MECCANICA).

2. *Materia e radiazione.* La fisica classica si è trovata, successivamente (a partire dal XIX secolo), di fronte anche ad altri fenomeni da indagare, come la luce, l'elettricità e il magnetismo. Qual è la natura fisica della luce? È essa stessa costituita da corpuscoli di materia, in questo caso di massa estremamente piccola, tanto da apparire pressoché immateriale all'osservatore? La teoria corpuscolare di Newton (1642-1727) proponeva questo modello materiale della luce, ma non si accordava del tutto con l'esperienza (le esperienze di misura della velocità della luce, ad esempio evidenziavano che essa si propaga in un mezzo rifrattivo con velocità c/n , dove $c \cong 3 \cdot 10^8$ m/sec è la sua velocità nel vuoto e n l'indice di rifrazione del mezzo, anziché con velocità $c \cdot n$ come avrebbe richiesto la teoria newtoniana). La teoria ondulatoria della luce di Huygens (1629-1695) proponeva, invece di spiegare il fenomeno luminoso come una vibrazione meccanica, periodica, che si propaga attraverso un "etere" pressoché imponderabile e prevedeva (oltre alla corretta velocità di propagazione nei mezzi rifrattivi) i fenomeni di interferenza poi effettivamente osservati (esperimento di Young, 1810). Le equazioni di → Maxwell (1831-1879), che governano i fenomeni elettrici e magnetici, consentirono di interpretare la natura della luce sì come un fenomeno ondulatorio, ma anziché di tipo meccanico, di tipo elettromagnetico. Ora, se la natura della luce era ricondotta a quella di un'onda elettromagnetica, il problema si spostava dalla meccanica all'indagine sulla natura dell'elettricità e del magnetismo, unificati da Maxwell.

Incomincia a farsi strada, con l'elettromagnetismo, il concetto di «campo», come veicolo che trasporta energia in una forma non riducibile, concettualmente, all'energia cinetica della meccanica delle particelle, anche se convertibile con questa. Il concetto di radiazione viene prima ad affiancarsi e poi a contrapporsi a quello di materia e così pure il concetto di energia, associata alla radiazione, si contrappone a quello di materia. Si incomincia a parlare di energia non più come proprietà "di qualcosa", come un attributo del campo che la trasporta, ma come "qualcosa", come fosse un'entità autonoma quanto lo è la materia e di natura in certo modo diversa da quest'ultima. Questo modo di concepire l'energia è favorito anche dal fatto che essa è soggetta ad una legge di conservazione come la massa: se «nulla si crea e nulla si distrugge», come aveva stabilito Lavoisier (1743-1794) per la massa-materia, ciò era vero anche per l'energia che si conserva pur trasformandosi da una forma all'altra. In che cosa differiscono materia ed energia nella fisica classica dell'Ottocento? Certamente per due caratteristiche facilmente individuabili. La prima di esse è che la materia è dotata di una "massa", mentre l'energia no; anzi è questa proprietà che consente di definire la materia stessa, interpretando la massa come "quantità di materia". La materia è ciò che è dotato di massa, mentre l'energia può sussistere anche autonomamente dalla materia sotto forma di campo elettromagnetico, che non ha una massa, oltre che essere trasportata dalle masse sotto forma di energia cinetica. In secondo luogo, la materia si presenta sotto forma "discreta", come atomi e particelle (ioni, elettroni), mentre l'energia si presenta come un "continuo", sia quando è associata al moto di una particella (energia cinetica) che quando assume la forma della radiazione.

3. *Le teorie della relatività di Einstein.* Con la teoria della «relatività ristretta» (1905) di Albert Einstein (1879-1955) viene stabilita la famosa equivalenza tra massa ed energia (→ RELATIVITÀ, TEORIA DELLA, I), quantificata dalla formula $E = m c^2$ e, così, la prima, delle due proprietà sopra enunciate, che distingueva la materia dall'energia, come veniva intesa allora, viene a cadere. Da un lato la "massa" di una particella in quiete (massa a riposo) viene a presentarsi essa stessa come una forma "concentrata" di energia (energia a riposo), dall'altro lato la stessa energia raggiante dimostra un carattere materiale, dal momento che possiede proprietà inerziali e gravitazionali attraverso la massa E/c^2 ad essa associata. Contemporaneamente, l'abolizione dell'etere di Lorentz

da parte di Einstein, in quanto non osservabile e la sua sostituzione con il "vuoto", fa acquisire all'energia un carattere di autosufficienza ancora più marcato. L'energia della radiazione non ha più bisogno di un supporto, di un veicolo che la trasporta (sostanzializzazione dell'energia).

La teoria della «relatività generale» (1916) compie un altro passo molto interessante ai fini di un discorso sulla materia. Essa associa le proprietà "metriche" (curvatura) dello spazio-tempo — già unificati nella rappresentazione geometrica spazio-temporale della relatività ristretta, operata da Minkowski — alla distribuzione di massa-energia presenti nello spazio-tempo stesso, sotto forma di materia e di campi non gravitazionali (→ RELATIVITÀ, TEORIA DELLA, II). Lo spazio e il tempo assoluti di Newton, intesi come contenitori vuoti e preformati, nei quali viene a collocarsi successivamente la materia, sono sostituiti con uno spazio-tempo le cui proprietà metriche sono definite dalla presenza della materia stessa. Già con la relatività ristretta lo spazio e il tempo non venivano più descritti come due entità indipendenti, ma come un'unica struttura geometrica a quattro dimensioni (di cui tre spaziali e una temporale); con la relatività generale lo spazio-tempo viene "incurvato", in prossimità delle masse, e descritto non più mediante la geometria di Euclide bensì grazie a quella di Riemann (1826-1866), in maniera tale che le traiettorie inerziali (geodetiche) dei corpi celesti, che in esso si collocano, siano le stesse che si avrebbero in uno spazio-tempo privo di curvatura, in cui è presente però la gravità. In tal modo la curvatura viene a sostituire e quindi a descrivere gli stessi effetti della gravità.

4. *La meccanica quantistica.* La → meccanica quantistica — pur portando con sé ancora molti problemi da chiarire, legati ai paradossi che essa suscita (cfr. ad esempio, Selleri, 1987) — compie ulteriori passi di unificazione. Da un lato, già la formulazione non relativistica della meccanica quantistica, con l'equazione proposta nel 1926 da Schrödinger (1887-1961) attribuisce proprietà ondulatorie anche alla materia, seguendo la via aperta nel 1922 da De Broglie (1892-1987); dall'altro, la formulazione relativistica della meccanica quantistica, introduce, con il concetto di «fotone», la discretizzazione dello spettro dell'energia del campo elettromagnetico (elettrodinamica quantistica) — già ipotizzata da Einstein nella sua celebre interpretazione dell'effetto fotoelettrico (1905) che gli valse il premio Nobel — e dei campi in genere (teoria quantistica dei campi).

In questo quadro la materia delle onde-particelle e l'energia delle onde-fotoni, appaiono concettualmente indistinguibili. Ma la meccanica quantistica presenta ora un criterio di distinzione, nuovo, per la sua formulazione matematica, e antico per il suo contenuto filosofico (cfr. Cohen-Tannoudji e Spiro, 1988, pp. 131-132). Dal punto di vista matematico il criterio è fornito dalle diverse statistiche alle quali obbediscono le onde-particelle. Alcune di esse («fermioni», particelle di *spin* semintero), che seguono la statistica di Fermi-Dirac — a differenza delle altre («bosoni», particelle di *spin* intero) che seguono invece la statistica di Bose-Einstein — sono soggette al «principio di esclusione» di Pauli che non permette a due particelle uguali, in uno stesso istante e nella stessa posizione, di avere gli stessi numeri quantici. Questo fatto viene interpretato come l'impossibilità per i fermioni di compenetrarsi ed è riconosciuto, filosoficamente parlando, come una proprietà caratteristica della materia, mentre i bosoni che non sono soggetti a questo vincolo si comportano come la radiazione. Tra i fermioni, infatti, troviamo le tipiche particelle costitutive della materia (protoni, neutroni, elettroni, ecc.), mentre tra i bosoni troviamo le particelle di campo, che trasportano l'energia di interazione (fotoni, gluoni, particelle W e Z⁰, e gravitoni dei quali ancora non si conosce sperimentalmente l'esistenza).

Vale la pena notare che, tra le altre importanti conseguenze della meccanica quantistica relativistica, vi fu la previsione dell'esistenza delle «antiparticelle» — la cosiddetta antimateria — sulla quale a volte si è molto fantasticato. La previsione fu opera di Paul Dirac (1902-1984), che trovò, oltre alla soluzione della sua famosa equazione, corrispondente all'elettrone, sperimentalmente ben nota, anche una soluzione che risultava identica a quella dell'elettrone purché si cambiasse il segno del tempo (stesse proprietà: massa, carica elettrica, *spin*, ecc.). In un primo momento si interpretò questa soluzione come un elettrone che viaggiava all'indietro nel tempo (→ TEMPO, II.3). Quest'interpretazione, tuttavia, si rivelò non fisica; infatti ci si accorse che, in alternativa, si poteva interpretare la stessa soluzione come una particella, identica all'elettrone, che viaggiava correttamente nel tempo ma possedeva una carica elettrica di segno opposto. Questo elettrone positivo, o positrone, fu effettivamente scoperto sperimentalmente. Più tardi si trovarono delle antiparticelle corrispondenti a tutte le particelle conosciute, anche per le particelle elettricamente neutre, che possedevano tuttavia altri numeri quantici di segno opposto ed erano capaci di "annichilarsi" con le rispettive particelle, trasformandosi in energia raggiante. Rimase comunque il problema di comprendere perché il nostro universo fosse costituito quasi esclusivamente di materia piuttosto che di antimateria. Questo problema della "rottura della

simmetria" è forse uno dei problemi più indagati dalla teoria delle particelle e della → cosmologia di questi ultimi decenni.

5. *Organizzazione della materia: informazione e complessità.* Lo studio della materia nei viventi è l'oggetto proprio della → biologia. Tuttavia i raccordi con la → chimica e la fisica sono sempre stati notevoli, per diversi motivi. Anzitutto perché una certa metodologia riduzionista imponeva di ricondurre il più possibile tutte le scienze naturali alla fisica, scienza galileiana per antonomasia (→ RIDUZIONISMO). E a questo scopo l'anello di congiunzione tra biologia e fisica non poteva essere rappresentato che dalla chimica organica. In secondo luogo perché le grandi scoperte sperimentali e teoriche della biologia molecolare, come il codice genetico del DNA ed il modello a doppia elica di Watson e Crick (1953) costituivano una conferma di grande rilievo in tal senso.

Recentemente, cioè da quando i fisici e i matematici hanno ripreso sistematicamente lo studio dei sistemi non lineari — studio iniziato da Poincaré e poi abbandonato per decenni dopo la sua morte (cfr. Cini, 1994, pp. 51-55) — ed è nata la scienza della → complessità, che gradualmente ha coinvolto tutte le scienze con le sue problematiche, il processo riduzionista ha conosciuto una battuta di arresto e il rapporto tra fisica e biologia è cambiato radicalmente. In certo senso oggi è la biologia che incomincia a proporre un modello epistemologico alla fisica e non più viceversa (cfr. Cini, 1994, cap. 3).

Il fatto che in un'equazione differenziale non lineare la somma di due o più soluzioni non sia una generalmente soluzione costituisce la base matematica della crisi del riduzionismo, in quanto proibisce di decomporre una soluzione che descrive una struttura complessa, o il "tutto" in soluzioni più semplici che ne descrivono le "parti" come isolate. Questo primo ed elementare carattere non riduzionistico dei sistemi non lineari della fisica, trova un corrispettivo praticamente in tutte le scienze (vedi *infra*, VII). Altri aspetti della complessità riguardano invece la dinamica dei sistemi che, a causa della non linearità, presentano il carattere della "impredicibilità" e, se sono dissipativi, possono dimostrarsi capaci di "auto-organizzazione", grazie al fatto di essere sistemi aperti interagenti con il mondo esterno con il quale scambiano materia, energia ed entropia (cfr. Nicolis e Prigogine, 1991 e Cini, 1994, pp. 127-139).

Un ruolo decisivo sembra essere giocato dalla → informazione che, inserendosi ai diversi livelli di organizzazione della materia determina, in ciascuno di essi, dei caratteri che si diversificano anche qualitativamente e non solo per aggiunte quantitative, divenendo in questo modo irriducibili l'uno all'altro.

6. *La materia e la mente.* Un altro problema scientifico che coinvolge la materia vivente e che ha conosciuto un grande sviluppo in tempi recenti è quello del rapporto → mente-corpo: si tratta di un'indagine che riguarda direttamente le scienze come la biologia, la fisiologia, la psicologia insieme alla filosofia e la teologia, in un quadro interdisciplinare che va sotto il nome, ormai divenuto d'uso abituale, di «scienze cognitive». Parallelamente al rapporto mente-corpo troviamo anche la problematica della cosiddetta → intelligenza artificiale che coinvolge, in luogo delle scienze della materia vivente, l'informatica e la teoria della informazione.

Le scienze cognitive si occupano di come si forma la conoscenza intelligente nella nostra mente, nel suo rapporto con il cervello e più in generale con il corpo, in vista di una sua almeno parziale riproduzione mediante il *computer*. È evidente come i problemi scientifici legati a queste ricerche pongano in maniera ineludibile delle domande filosofiche, con implicazioni teologiche, di grande importanza. Ne indichiamo due che appaiono essere tra le più rilevanti: a) È possibile che un cervello corporeo (o un computer) possa, con le sole risorse possedute dalla materia, formare concetti universali astratti e quindi pensare come un essere umano? Oppure occorre richiedere l'intervento di una funzione non materiale esercitata da un'anima spirituale? b) È possibile che un cervello corporeo (o un computer) possa con le sole risorse possedute dalla materia, essere consapevole delle attività che sta compiendo e quindi possedere un'autocoscienza come un essere umano? Oppure occorre far intervenire una funzione non materiale esercitata da un'anima spirituale?

Le due domande precedenti, ormai, sono oggetto della discussione scientifica e metascientifica di fisici, matematici, ingegneri, informatici, ma anche di filosofi e teologi. Dal punto di vista di un approccio filosofico esse coinvolgono direttamente i classici problemi dell'"astrazione" e della "riflessione", funzioni che la mente umana esercita abitualmente (vedi *infra*, VIII).

IV. Tra scienza e filosofia

Cerchiamo ora di approfondire alcuni aspetti filosofici, legati alle teorie scientifiche, come sono emersi nella sezione precedente, precisando anche il significato dei termini e mettendo in guardia da frequenti equivoci legati ad un uso improprio delle terminologie che insorgono facilmente quando si passa dall'ambito scientifico a quello filosofico e viceversa.

Una prima osservazione riguarda il metodo delle scienze. Il XX secolo ha visto un passaggio particolarmente significativo per quanto riguarda il metodo scientifico che ha avuto ripercussioni notevoli anche al riguardo del modo di concepire la materia. Si tratta del passaggio da un atteggiamento fondamentalmente positivista ad un atteggiamento di revisione dei fondamenti delle teorie scientifiche. Questo mutamento di posizione, in alcuni casi, è stato una libera scelta, altre volte è stato imposto in qualche modo, dallo stesso evolversi della ricerca scientifica.

Un esempio del primo tipo, in cui il cambiamento di atteggiamento metodologico è stato frutto di una attenta riflessione e di una libera scelta, ci è offerto da → Albert Einstein. L'Einstein della «relatività ristretta» è un "operazionista", nel senso in cui Bridgman ha teorizzato l'operazionismo. Il padre della teoria della relatività introduce le grandezze di cui fa uso definendole mediante le operazioni che consentono di darne la misura sperimentale. Le ipotesi da cui parte per costruire la relatività ristretta non sono altro che codificazioni, in termini di leggi, di ciò che risulta dall'esperienza. L'esperimento di Michelson-Morley (1887) non ha evidenziato alcuna modifica delle leggi dell'elettromagnetismo dovute al moto di traslazione della terra rispetto all'etere, dunque: a) Il principio di relatività galileiano vale non solo per i fenomeni meccanici ma anche per quelli elettromagnetici; b) la velocità della luce è invariante per traslazione uniforme del sistema di riferimento dell'osservatore. Il motivo per cui Lorentz (1853-1928), che pure aveva dedotto le trasformazioni corrette, non era riuscito ad arrivare alla teoria completa della relatività risiede nel fatto che egli aggiunge, inconsapevolmente, ai due principi precedenti, anche altri elementi non derivati dall'esperimento, come la spiegazione meccanica della contrazione dei regoli durante il moto.

La «relatività generale» nasce, invece non da problemi sperimentali impellenti, in quanto la teoria della gravitazione di Newton si accordava bene con l'esperienza (non a caso le verifiche sperimentali della relatività generale richiedono misurazioni estremamente fini), ma da un'esigenza di revisione dei fondamenti della meccanica newtoniana, revisione che non era stata compiuta neppure dalla relatività ristretta. Ciò che appariva insoddisfacente era il fatto che le leggi della meccanica newtoniana non fossero del tutto indipendenti dalla scelta dell'osservatore, come invece accadeva per le leggi dell'elettromagnetismo, ma fossero legate all'inerzialità del sistema di riferimento. In che modo si potevano rendere equivalenti tutti i sistemi di riferimento? Renderli tutti equivalenti avrebbe voluto dire renderli, in un senso opportunamente generalizzato, tutti "inerziali". La soluzione matematica fu trovata nell'idea dell'incurvamento dello spazio-tempo, facendo ricorso alla geometria riemanniana che rendeva possibile un moto per inerzia lungo traiettorie geodetiche che non sono più rette in senso euclideo.

Anche → Werner Heisenberg (1901-1976), all'origine della sua "meccanica delle matrici", adottò il metodo operazionista: nella teoria dovevano comparire solo grandezze osservabili. Un criterio senz'altro sicuro, tuttavia non assolutizzabile, in quanto alcune variabili che non possono essere osservate, a volte sono richieste per la consistenza logica della teoria. E questi, nella meccanica di Heisenberg, sono i vettori della base ortonormale dello spazio funzionale L^2 che corrispondono alle condizioni iniziali delle autofunzioni di Schrödinger. In questo caso, a rinunciare al criterio assoluto dell'esclusione di quantità non osservabili, Heisenberg fu condotto dalla struttura stessa della teoria piuttosto che da una riflessione epistemologica.

Le precedenti considerazioni rimandano in definitiva la tema dei fondamenti metafisici delle teorie scientifiche. Ogni teoria scientifica, con il suo formalismo matematico, stabilisce delle "relazioni" (equazioni, leggi) che legano tra loro delle "quantità" (grandezze): relazioni e quantità non sono altro che "proprietà" degli oggetti fisici che si vogliono descrivere. Il fatto che un oggetto fisico abbia certe proprietà piuttosto che altre è sufficiente ad escludere un determinato modo di concepire l'oggetto stesso nel suo complesso. E questo perché "quantità" e "relazioni" non sono oggetto solo delle scienze, ma anche della → metafisica, che le considera in quanto enti e, in particolare in quanto "proprietà" (accidenti) di altri enti (sostanze). Così possiamo dire che una teoria scientifica può accordarsi, più o meno bene, con una certa "metafisica" ed escluderne altre. Gli elementi della metafisica (metascienza) con cui una teoria scientifica meglio si accorda costituiscono contemporaneamente: a) il quadro dei fondamenti filosofici (logici e ontologici) che essa implicitamente presuppone, b) il quadro filosofico entro il quale si concepisce quella che solitamente viene chiamata l'"interpretazione" della teoria stessa.

Nelle prossime sezioni cercheremo di esaminare alcuni aspetti metafisici presupposti e utili all'interpretazione delle teorie scientifiche della materia, alle quali abbiamo fatto riferimento nella sezione precedente (cfr. Artigas e Sanguineti, 1989, pp. 60-71).

V. Materia e massa, campo ed energia

1. *La tendenza alla sostanzializzazione di massa ed energia nella fisica classica.* L'interpretazione meccanicista della fisica classica vede, da un punto di vista filosofico, una confusione molto frequente fra "sostanza" e "accidente", cioè tra gli oggetti fisici e loro proprietà. Dal punto di vista filosofico, ad esempio, la materia è "sostanza" in quanto capace di sussistere per se stessa. La massa e l'energia, invece non sono delle "cose", non sono esse stesse sostanze, ma proprietà della materia, vale a dire "accidenti". Con l'apparire del concetto di campo e la sua interpretazione come qualcosa di reale e non solo matematico, nella fisica classica, c'è stata la tendenza ad identificare il campo elettromagnetico stesso che si propaga (radiazione) con la sua energia, trattando quest'ultima come se essa fosse il campo stesso, cioè fosse una sostanza e non una semplice proprietà del campo. Ciò può essere anche legittimo, se si vuole, chiamare la radiazione con la denominazione di «energia elettromagnetica», ma bisogna fare attenzione a chiarire quando, con il termine «energia», si intende designare l'energia in quanto "proprietà posseduta dal campo", oppure il campo stesso. Una terminologia equivoca è sempre rischiosa, soprattutto se si vuole fare scienza. Del resto prima ancora della sostanzializzazione del concetto di energia vi era stata, nell'interpretazione della fisica classica, già la sostanzializzazione del concetto di massa che spesso veniva intesa come sinonimo di "quantità di materia". La quantità è ciò che vi è di misurabile nella sostanza, è l'osservabile per eccellenza ed è facile identificarla con l'oggetto, con la sostanza stessa. In questo modo abbiamo la massa-materia, da una parte, e l'energia-radiazione dall'altra. L'energia si viene a trovare con una doppia faccia: è trattata come "accidente" in quanto energia cinetica di cui sono dotate le masse materiali e come "sostanza" quando si trova sotto forma di radiazione. La massa, viceversa esiste solo sotto forma di materia in quanto la radiazione ne è priva.

L'estremizzazione di questi processi di interpretazione ontologizzante, della massa-materia da un lato, e dell'energia-radiazione dall'altro, ha indotto un duplice riduzionismo: verso il materialismo prima, e verso l'energetismo poi. Tutto ciò ha una motivazione storica.

Cominceremo da alcune considerazioni sul → materialismo. Come bene osservava R. Masi, nel suo classico studio sulla struttura della materia (Masi, 1957, cap. 3), «Il concetto di forma che è alla base della dottrina ilemorfica e di tutta la fisica aristotelica era stato frainteso dalla scolastica della decadenza: la forma che nel pensiero genuino di Aristotele e di Tommaso d'Aquino è una realtà incompleta e parziale, un "ens quo", veniva, invece descritta come una sostanza completa, un "ens quod", implicando così una sequela di contraddizioni» (p. 85). Il pensiero nominalista dell'antica scuola di Oxford (sec. XIII) aveva, ormai scalzato completamente la nozione di → analogia, rendendo univoca la ricerca dei principi su cui fondare la comprensione dell'universo. Da questo punto di vista il metodo dell'indagine era stato, di fatto, ricondotto al punto dal quale partirono i filosofi ionici, anche se gli strumenti di osservazione e quelli matematici erano evidentemente ad uno stadio molto più avanzato. Per cui, respinta la nozione univocizzata e non più genuinamente aristotelica di "forma", i nuovi "filosofi della natura", come allora si chiamavano, non ebbero altra alternativa che adottare come principio interpretativo dell'universo fisico la "materia", intesa altrettanto univocamente. Di conseguenza la fisica newtoniana non poteva che nascere "materialista" per quanto riguarda l'aspetto della descrizione strutturale del cosmo, "meccanicista" per quanto riguarda la spiegazione dinamica e causale del suo divenire e, infine, "riduzionista" per il modo di affronto del rapporto tra il tutto e le parti. Il pensiero aristotelico e tomistico, così frainteso, non potevano diventare che il nemico principale da combattere, ai fini di una scienza rigorosa e certa, che non poteva essere che sperimentale e matematizzata. «Di fronte all'oscurità delle forme aristoteliche il meccanicismo rappresentava una chiarezza senza pari: tutti i fenomeni naturali venivano concepiti come combinazione di particelle di materia, collegate tra di loro e in moto reciproco: l'universo diventava una grande macchina, scomponibile in tante piccole macchine» (*ibidem*, p. 86). Con lo svilupparsi della termodinamica il concetto di energia acquistava un rilievo notevole, in parallelo a quello di materia, ma la riconduzione della termodinamica a meccanica, operata dalla teoria cinetica riaffermava il primato della materia e del suo movimento.

La vera alternativa al materialismo della meccanica newtoniana è legata all'elettromagnetismo di Maxwell: «Il concetto di campo viene costruito senza adoperare il concetto di particella; [...] il campo di Maxwell non è fatto di particelle, pur essendo reale» (*ibidem*, p. 91). Il fatto di sostanzializzare l'energia del campo, che darà luogo all'«energetismo», comporta gli equivoci e gli errori di concezione di cui abbiamo parlato sopra, ma non solo: da un certo momento in poi ci sarà

la tendenza, nell'ambito della fisica classica, a ribaltare la direzione del → riduzionismo che mira a spiegare tutto in termini di materia e moto di particelle, verso un nuovo riduzionismo che tende ad assumere, invece, l'energia come principio fondante al quale ricondurre anche la nozione di materia, concepita come una forma condensata di energia. Nasce l'energetismo il cui primo sostenitore fu il chimico W. Ostwald (1895): «Il carattere distintivo dell'energetismo è l'abbandono del dualismo che ha regnato sino ad ora tra materia ed energia. L'energia prende il posto del concetto più generale. Non soltanto la materia deve sopportare il prevalere dell'energia, come si vede nei trattati moderni di scienze naturali, ma le deve cedere il posto senza condizioni» (cit. in Masi, 1957, p. 92).

2. *La relatività ristretta*, con l'equivalenza tra massa ed energia, ristabilisce la simmetria: non solo la materia, ma anche la radiazione (campo elettromagnetico) è dotata di "massa" e questa si manifesta attraverso proprietà inerziali e gravitazionali (si pensi alla deflessione dei raggi luminosi in un campo gravitazionale). Si è sentito parlare più volte di trasformazione di materia in energia, e viceversa, nei processi nucleari. Se si intende, con questo, che una "sostanza" (una frazione o tutta la materia di alcune particelle) si è convertita in un "accidente" (una certa quantità di energia) si fa un uso filosoficamente scorretto della terminologia, in quanto una proprietà (accidente) come l'energia non può esistere se non come proprietà di qualcosa, e la materia (sostanza) può convertirsi in un'altra sostanza (mutazione sostanziale), non in un accidente (una proprietà senza soggetto: un'energia di che cosa?). È corretto, invece, affermare che vi è stata una mutazione in cui alcune particelle hanno ceduto una frazione o tutta la loro "massa a riposo" ai prodotti di reazione (altre particelle e/o radiazione) che si è trasformata in energia cinetica ed energia elettromagnetica.

Gli equivoci sono ingenerati da un duplice errore di concezione: il primo consiste nel concepire il campo elettromagnetico come qualcosa che non è "sostanza materiale"; il secondo consiste nell'attribuire un carattere "sostanziale" all'energia, in luogo della sostanzialità rimossa dal campo.

3. *La meccanica quantistica*. Se la relatività ristretta ha unificato le due proprietà (accidenti) della massa e dell'energia, la meccanica quantistica, nella sua versione relativistica di "teoria quantistica dei campi", tende a comporre l'unità di materia e radiazione, in quanto ci presenta un complesso di onde-particelle in cui la distinzione tra ciò che classicamente si denotava come "materia" e ciò che si denotava come "radiazione", si assottiglia drasticamente. Materia e radiazione (nel senso lato di campo di interazione: gravitazionale, elettromagnetico, forte e debole, di cui si cerca l'unificazione) costituiscono più che due entità contrapposte, due modi di attuarsi, se vogliamo due "specie", di un'unica realtà, dotata di massa-energia, che ne è in certo modo il "genere". Dal punto di vista della tradizione filosofica, sembrerebbe naturale chiamare questo unico genere con il nome di materia, intendendo che esso può attuarsi nelle due specie che obbediscono alle due statistiche quantiche: i fermioni, dotati di *spin* semintero, che rappresentano la materia nel senso classico del termine e i bosoni, di *spin* intero, che costituiscono il campo d'interazione. Dal punto di vista della fisica è più usuale denotare questo "genere" come "campo", che si attua nelle due "specie" dei campi fermionici e dei campi bosonici.

VI. Vuoto, materia ed energia

Compare, inevitabilmente, a questo punto della discussione, anche un altro antico problema: quello del "vuoto" (cfr. A. Strumia, *Il problema della creazione e le cosmologie scientifiche*, 1992). Che cos'è il vuoto? Può esistere? La precisazione nell'uso dei termini può risparmiare molti equivoci che più di una volta hanno tratto in inganno anche personaggi illustri. Dal punto di vista metafisico il vuoto, in senso assoluto, è "vuoto di ente" e come tale si identifica con il "nulla" ("non ente", "ni-ente"), un concetto coniato per identificare ciò che non esiste. Metafisicamente il vuoto non esiste per definizione, perché ciò che esiste, per il fatto che esiste è un ente. Il vuoto, inteso in senso assoluto, è dunque una negazione assoluta, totale dell'ente. Il vuoto in un senso relativo, non come negazione assoluta, ma solo relativa, è la "privazione" di qualcosa in un certo soggetto e non la negazione totale del soggetto. In questo caso il vuoto è, ad esempio, "assenza di materia", ma non di qualcos'altro. Spesso nelle scienze si fa uso del termine "vuoto" in questo senso "privativo": in questo caso, però, non è legittimo il passaggio da questo significato relativo a quello assoluto, per trarre conclusioni di carattere filosofico e teologico che risultano logicamente non conseguenti.

Per la fisica classica il vuoto è, nell'ambito della pura meccanica, una regione dello spazio in cui è assente la materia (vuoto di materia): dove non sono presenti atomi e particelle c'è il vuoto. Il modello planetario dell'atomo di Rutherford conferma il fatto che lo spazio vuoto è prevalente nel mondo fisico. Dove non c'è materia, la fisica classica ammette, comunque, che possa esservi lo spazio, come pura estensione vuota e non, dunque, il nulla. Lo spazio acquista una sua identità, diviene una sorta di sostanza, che può esistere anche senza la presenza di materia, anzi ne è il

contenitore, in qualche modo preesistente. È la concezione newtoniana dello spazio assoluto. L'elettromagnetismo riempie questo spazio vuoto con l'etere che supporta il campo, responsabile delle interazioni elettromagnetiche tra le particelle materiali cariche e veicola l'energia elettromagnetica della radiazione. Il vuoto è, allora, un "vuoto di materia", ma non un vuoto assoluto, in quanto è riempito dall'etere.

La relatività ristretta elimina sia l'etere che lo spazio assoluto di Newton, ristabilendo il vuoto come "qualcosa" che, comunque ha la proprietà di trasmettere la radiazione. Anzi, il vuoto è, in certo senso il miglior "mezzo" in quanto, attraverso di esso, tutti i segnali viaggiano alla massima velocità consentita c , che è appunto la velocità della luce nel vuoto. Il vuoto della relatività ristretta è, dunque, un "vuoto di materia", ma non di "radiazione". È un vuoto che ha almeno una proprietà: quella di trasmettere la radiazione, e come tale, non è il nulla, perché ciò che ha delle proprietà è un ente sostanziale. Esso tuttavia non è l'etere, né lo spazio assoluto, in quanto le misure di spazio e di tempo non sono più assolute come nella fisica non relativistica. È in qualche modo il campo stesso, che non è mai rigorosamente nullo, a causa della presenza dei corpi, tra i quali il vuoto si estende, e che si scambiano continuamente le loro mutue interazioni. E se non esistessero né corpi né campi la relatività ristretta ci permetterebbe di affermare che il vuoto di entrambi è comunque qualcosa di reale? Ricordiamo che la relatività ristretta è una teoria che definisce operazionisticamente i suoi concetti: se non esistessero né corpi né campi non sarebbe possibile definire né l'osservatore, né la misura, perché questi richiedono corpi per identificare gli assi coordinati, regoli per le misure di lunghezza, orologi a luce per le misure di tempo. Il vuoto di materia e di campi non sarebbe osservabile e definibile, sarebbe un ente di ragione.

La relatività generale identifica il campo gravitazionale con le proprietà metriche dello spazio-tempo (tensore metrico) e fa dipendere queste ultime dalla distribuzione della massa-energia, cioè dalla presenza della materia e dei campi non gravitazionali. In tal modo le proprietà geometriche dello spazio-tempo sono determinate dai corpi e dai campi esterni (che significativamente vengono detti cumulativamente "materia") e dal loro moto. Una concezione dello spazio e del tempo molto lontana da quella newtoniana e, come è stato sottolineato da diversi autori, molto più vicina a quella aristotelica. Nella visione aristotelica, infatti, lo spazio è definito mediante la nozione di contatto (oggi parliamo di interazione) tra corpi, che permette di introdurre il concetto di distanza e il tempo è definito come numero che misura il moto. Evidentemente le due concezioni non sono raffrontabili sul piano matematico, ma qualitativo e metafisico. Qualcosa del genere si ritrova in Lobacevskij: «Il "contatto" costituisce l'attributo caratteristico dei corpi; ad esso i corpi debbono il nome di corpi geometrici, non appena noi teniamo fissa l'attenzione su questa proprietà, e non consideriamo invece tutte le altre proprietà, siano esse essenziali o accidentali. [...] In questo modo noi possiamo concepire tutti i corpi della natura come parti di un unico corpo globale, che noi chiamiamo spazio» (Lobacevskij, 1974, p. 73).

La relatività generale non solo non è compatibile con lo spazio e il tempo assoluti di Newton (e con loro trasposizione filosofica operata da Kant), come non lo è la relatività ristretta: in più essa ci dice che lo spazio e il tempo sono determinati dalla presenza della materia, dai corpi e dalle loro mutue interazioni. Che cos'è allora il "vuoto" per la relatività generale? Il vuoto è "vuoto di materia", dove con materia si intendono sia i corpi che i campi non gravitazionali. Il vuoto è il campo gravitazionale libero descritto come uno spazio-tempo riemanniano: di fatto è una pura astrazione perché l'universo è riempito dalla materia-radiazione; tuttavia le equazioni di Einstein della relatività generale possono essere scritte anche eliminando la presenza di materia e di campi esterni, per il campo gravitazionale libero. E ammettono anche la soluzione in cui il campo gravitazionale è nullo, che corrisponde alla metrica dello spazio-tempo della relatività ristretta che, così, si ritrova come caso particolare. Ma in assenza di corpi e di campi, come si è già osservato, non è possibile parlare né di osservatore né di misura e quindi non è possibile parlare di spazio-tempo, per cui il vuoto così inteso appare una pura astrazione, o comunque un concetto limite.

L'elettrodinamica quantistica e la teoria quantistica dei campi sostanzializzano ulteriormente il vuoto, in quanto lo concepiscono come un'entità nella quale sono "virtualmente" presenti coppie di particelle e antiparticelle che possono essere portate allo stato osservabile (reale) a spese di un'opportuna quantità di energia. Il vuoto così inteso non è certo il nulla, ma semplicemente "vuoto di materia osservabile". Grazie al principio di indeterminazione di Heisenberg, tale materia può divenire osservabile a patto che l'energia ΔE richiesta allo scopo, venga estratta dal vuoto stesso in un tempo non superiore a $h/\Delta E$, dove h è la costante di Planck (\rightarrow HEISENBERG, III). Una simile fluttuazione quantistica del vuoto, secondo alcuni autori, sarebbe responsabile della generazione dell'intero universo dal "vuoto quantistico", che ben inteso non è il "nulla", ma è un ente

preesistente, in cui sono virtualmente presenti sia le coppie di particelle-antiparticelle (materia) che l'atto necessario ad estrarle (→ CREAZIONE, III).

Qualcuno ha voluto riconoscere nel vuoto quantistico la "materia prima" di Aristotele, ma non sembra questo il caso, se non altro perché la materia prima, oltre a non avere estensione in quanto non ancora "segnata" dalla quantità, a differenza del vuoto che è comunque una regione spaziotemporale, è pura potenza e richiede una causa adeguata "esterna" ad essa per essere attuata in "materia seconda", mentre il vuoto quantistico sembrerebbe racchiudere in sé anche la capacità di attuare la materia.

VII. La materia e il problema del tutto e delle parti

Dal punto di vista dell'analisi metafisica della struttura della materia le problematiche che sorgono dalla fisica dei sistemi non lineari, e più in generale dalle scienze della complessità, ci riportano direttamente al classico problema del "tutto" e delle "parti" (per approfondimenti cfr. Sanguineti, 1986, parte III, cap. 2; Righetti e Strumia, 1998, pp. 73-76). Gli altri aspetti legati alla complessità, come l'"impredicibilità", il "caos deterministico" e l'"auto-organizzazione" riguardano prevalentemente la "dinamica" evolutiva della materia (→ COMPLESSITÀ, V; DETERMINISMO/INDETERMINISMO, II; UNIVERSO, IV.1).

1. Posizione e problematicità degli approcci. Il problema del "tutto" e delle "parti", così come oggi emerge dalle scienze (nelle quali non di rado compare come problema dell'«olismo») si può formulare in prima istanza nel modo seguente. Consideriamo un dato oggetto (tutto) che chiameremo "complesso" in quanto si presenta a noi molto articolato e difficile da esaminare nel suo insieme; scomponiamo (sulla base di una regola assegnata) l'oggetto di partenza in altri oggetti che chiamiamo "parti", che risultano più semplici da esaminare perché già noti all'indagine scientifica. Si danno due possibilità alternative: a) l'oggetto complesso viene spiegato esaurientemente, almeno entro certi limiti, dall'indagine sulle sue parti prese come se fossero a se stanti; b) l'oggetto complesso presenta proprietà e comportamenti che non si spiegano mediante il solo studio delle sue parti componenti.

Il primo caso costituisce l'assunzione tipica dell'approccio riduzionistico: il tutto viene spiegato completamente attraverso le sue parti componenti. Potremmo anche dire con una formula che scientificamente ha senso solo quando se ne definiscono esattamente i termini, ma che ha comunque una sua forza espressiva, che "il tutto è la somma delle parti". Il secondo caso evidenzia l'insufficienza, o l'impossibilità, dell'approccio riduzionistico rinviando ad un approccio di tipo olistico. Distinguiamo "insufficienza" e "impossibilità" perché possono presentarsi entrambe queste due situazioni.

L'insufficienza compare quando si prende atto che il tutto complesso non risulta spiegabile esaurientemente mediante lo studio delle sue parti componenti in quanto possiede delle proprietà che potremmo chiamare "d'insieme", che sfuggono all'indagine se non si considera il tutto nel suo complesso, perché non sono rinvenibili nelle singole parti separate. Si può dire allora, con una formula schematica, che in questo caso "il tutto è più della somma delle sue parti", ovvero contiene delle informazioni nuove, rispetto a quelle contenute nelle parti, informazioni che lo caratterizzano come "tutto" nel suo insieme. Nello schema aristotelico si direbbe che il tutto possiede una forma che lo rende "uno", con delle proprietà nuove che nelle parti giustapposte non sono presenti: non a caso il termine "forma" sta ricomparendo nel linguaggio dei biologi e dei matematici (cfr. ad es., Thom, 1980), insieme ad un interesse rinascente per gli scritti di Aristotele.

Ci si imbatte nell'impossibilità quando il tutto complesso non è divisibile in parti più semplici, in quanto qualche parte, o addirittura ogni parte, ha proprietà identiche, o comunque, di un grado di complessità confrontabile con quello del "tutto", per cui la suddivisione non comporta nessuna semplificazione. È un po' quanto accade ad una calamita che, divisa in due parti, non risulta semplificata nella sua struttura, ma dà luogo a due nuove calamite simili a quella originaria. Con una formula schematica possiamo dire che, in questo caso, "il tutto è contenuto nelle sue parti", e in un certo senso è "replicato in tutte le sue parti". È interessante notare come queste parti non sono necessariamente identiche, ma possiedono delle somiglianze che consentono di applicare al tutto e alle parti la stessa definizione. In linguaggio filosofico diremmo che le parti hanno la stessa natura del tutto.

Chiaramente queste dichiarazioni di insufficienza dell'approccio riduzionistico non vanno spinte all'esasperazione: c'è sempre una certa legittimità nel riduzionismo, altrimenti sarebbe impossibile all'uomo la conoscenza, perché l'intelligenza umana ha bisogno di dividere e comporre per

conoscere: non è sempre indispensabile studiare tutto l'universo nel suo insieme per fare scienza su una sua parte, anche se in certi casi ciò si rende necessario. Ne offre un esempio la recente tendenza a collaborare della cosmologia con la fisica delle particelle elementari quando l'indagine si spinge verso i cosiddetti "primi istanti" dell'universo (→ COSMOLOGIA, III, VI.1).

2. *Alcuni esempi tratti da diverse scienze.* Data la sua importanza sia per l'analisi interna alle scienze stesse, sia per le loro potenzialità di dialogo con altre forme di sapere, deliniamo brevemente come la tematica del tutto e delle parti viene riconosciuta ed affrontata in alcune delle principali discipline scientifiche.

La → biologia si trova da sempre di fronte al fatto che il vivente mostra delle proprietà che, anche dal punto di vista chimico-fisico, sono nuove rispetto a quelle del non vivente. Il vivente, anche il più semplice, non è descrivibile interamente mediante l'analisi delle sue parti componenti. Un'affermazione del genere, vista nell'ottica riduzionistica era considerata con sospetto e tacciata di vitalismo perché sembrava introdurre un fattore animistico nella vita. Ma non è questo il vero problema: il punto è piuttosto quello di vedere se, nell'organizzazione della materia, una volta raggiunto un certo grado di strutturazione organica (complessità) la materia stessa, se opportunamente sollecitata da una causa esterna adeguata, tenda a manifestare un livello nuovo di ordine non presente, di per sé, nei componenti presi separatamente. A questo livello non basta più l'analisi delle parti componenti — che è stata comunque utile e necessaria fino a questo punto — ma occorre un'indagine del nuovo livello d'insieme, del nuovo "tutto".

Lo studio approfondito della molecola, più o meno complessa, così come quello dei reticoli cristallini nei solidi e dei conduttori elettrici (per citare solo pochi esempi), hanno messo in evidenza come anche nella → chimica del non vivente le proprietà d'insieme di una struttura composta complessa non siano del tutto deducibili dalle proprietà degli atomi componenti. L'esistenza di orbitali molecolari con elettroni completamente condivisi non permette di pensare più ad elettroni che appartengono ad un atomo singolo. In un conduttore elettrico gli elettroni di conduzione vengono condivisi addirittura tra tutti gli atomi. Esistono, dunque, anche a livello chimico delle proprietà d'insieme che il progredire delle ricerche rivela essere sempre più significative.

Nell'ambito della fisica dobbiamo tenere presenti i due classici aspetti che le sono propri: quello inerente lo "strumento matematico" in se stesso e quello relativo alla "spiegazione dell'osservazione". Dal punto di vista matematico, dal momento che la fisica si serve sempre di più della matematica per formulare le sue leggi sotto forma di equazioni, i problemi sono esplosi come conseguenza dei nuovi risultati della matematica che ha dato risposte inaspettate ai quesiti della fisica. Ne parleremo perciò tra poco, trattando della matematica. Dal punto di vista dell'accordo tra ipotesi ed osservazione ci troviamo di fronte contemporaneamente ad una vasta gamma di problemi che da sempre sono stati considerati non risolti, o forse insolubili, nell'ambito della meccanica classica, perché ritenuti troppo complicati. Nell'ambito della meccanica quantistica rimangono poi quei problemi che, pur trovando in essa degli strumenti di calcolo approssimato, che danno risultati attendibili, sono fonte di paradossi nella loro formulazione e comprensione.

Nella meccanica classica basti pensare, ad esempio, alla complessità dei moti turbolenti nei fluidi: il classico modello di Landau (1959) che sovrappone più moti convettivi associati a frequenze sempre maggiori non prevede correttamente la transizione alla turbolenza che si presenta come una proprietà del tutto nuova rispetto alla convezione. Nella meccanica quantistica alcuni eventi si presentano come "non separabili" anche se avvengono a grandi distanze. Sembra trattarsi di uno di quei casi in cui il tutto pare trovarsi in ognuna delle parti.

Nell'ambito della → matematica il problema del tutto e delle parti si presenta con molta chiarezza sotto entrambi gli aspetti prima accennati. Per quanto riguarda l'aspetto dell'insufficienza, i problemi legati alla non riducibilità del tutto alla somma delle parti acquistano una formulazione chiara per il fisico teorico e per il matematico quando osserva che le leggi evolutive che regolano la quasi totalità dei processi della fisica sono formulate in termini di equazioni differenziali non lineari. Ora, per le equazioni "lineari" la somma di due o più soluzioni (chiamiamole "parti") è ancora una soluzione (chiamiamola "tutto") del sistema, e viceversa, una generica soluzione (tutto) si può scrivere come somma di più soluzioni (parti); in fisica questa legge è conosciuta anche come "principio di sovrapposizione", ben noto ad esempio nel caso delle onde che interferiscono sommando le loro oscillazioni. Per le equazioni "non lineari" la precedente affermazione non è in generale più vera, per cui si può dire, nel senso sopra indicato, che il tutto non è ottenibile generalmente come somma di parti. Questo accenno basti a indicare i legami tra tutti i comportamenti inerenti alle teorie non lineari e che costituiscono aspetti diversi di un'unica problematica. Ecco che le considerazioni che stiamo svolgendo ci conducono verso il secondo

aspetto del problema, quello dell'impossibilità di operare una riduzione adeguata o, anche, dell'indistinguibilità delle parti dal tutto: il tutto si ritrova replicato in ogni sua parte. Un esempio tipico di questo secondo aspetto ci è offerto dalla «geometria frattale» (cfr. Peitgen e Richter, 1987). I «frattali», tra le altre proprietà, hanno quella di essere "autosimilari", cioè di riprodurre all'infinito, in ogni loro parte, forme geometriche simili a quella del tutto; per cui non è possibile, suddividendoli in parti sempre più piccole, isolare delle forme che siano strutturalmente meno complesse del tutto. È interessante notare come, in certi, casi come ad esempio nell'insieme di Mandelbrot, la forma delle parti non è esattamente identica, ma è simile a quella del tutto e ne conserva il grado di complessità, che in questo caso, può essere quantificato mediante la cosiddetta "dimensione frattale".

Nella → logica il problema del rapporto tra il tutto e le parti si presenta principalmente nel secondo dei due aspetti già menzionati, quello per cui il tutto è rinvenibile, in qualche modo, come parte di se stesso. Questo discorso ha a che fare con la "logica delle collezioni". La collezione di tutte le collezioni è il tipico esempio di una collezione che contiene se stessa come elemento: in questo caso una parte della collezione coincide con il tutto. In un primo tempo la logica delle classi, sviluppata da → Russell e → Whitehead ha aggirato il problema escludendo dalla definizione di "classe" le collezioni che contengono se stesse come elemento, per evitare le tipiche contraddizioni che possono insorgere dalla loro considerazione. È noto il paradosso di Russell che nasce quando si tenta di definire un oggetto come «il catalogo dei cataloghi che non citano se stessi». Tuttavia non tutte le collezioni che contengono se stesse come elemento sono contraddittorie, come ad esempio «l'insieme di tutti gli insiemi». Sembra dunque possibile costruire una logica delle collezioni che contengono se stesse come elementi. Spetta tuttavia forse all'informatica il merito di aver reso attuali le ormai classiche problematiche di logica matematica, come quelle legate al teorema di Gödel sulla coerenza e la completezza dei sistemi assiomatici (→ GÖDEL, III), così come a rendere rappresentabili sullo schermo di un computer degli insiemi — che fino a quel momento erano sembrati dei veri e propri "mostri" matematici, a causa del loro contorno, infinitamente tortuoso — come gli insiemi di Julia prima che se ne vedesse la → bellezza e l'eleganza su un video a colori. Le indagini sulla cosiddetta → intelligenza artificiale hanno permesso di comprendere che l'informazione si può annidare a vari livelli e che esistono delle gerarchie di informazione: il livello inferiore risiede nella struttura *hardware* della macchina, i livelli superiori nel *software*; il linguaggio di programmazione, a sua volta, contiene informazioni, significative per il programmatore, che ricadono in istruzioni di livello inferiore eseguibili meccanicamente dai circuiti senza percepirle come significative; il programma stesso nel suo insieme contiene un'informazione di livello superiore legata allo scopo per cui è stato scritto, che risiede nella mente del programmatore e in quella dell'utente, e così via.

In tutte le scienze, dunque, sembra comparire una struttura gerarchizzata di informazioni legate al grado di complessità e quindi di unitarietà della struttura chiamata in causa. Nell'ambito della filosofia aristotelico-tomista, come si è già detto, il principio unitario di un ente è la forma, nel senso che è stato precisato. Anche se non è ancora chiaro il percorso che faranno le scienze, sembra abbastanza indicativo lo spostamento dallo schema univocista del riduzionismo verso quello di una nuova visione più soddisfacente. Oggi assistiamo, curiosamente, ad un interessante mutamento, a causa del quale la stessa matematica, e con essa le altre scienze, sembrano mostrare un concreto interesse verso un ampliamento della razionalità che apre loro l'orizzonte, finora disdegnato, della → analogia.

VIII. Materia, intelligenza e astrazione

Le scienze cognitive si occupano di come si forma la conoscenza intelligente nella nostra mente, nel suo rapporto con il cervello e più in generale con il corpo, anche in vista di una sua almeno parziale riproduzione mediante il computer (→ INTELLIGENZA ARTIFICIALE e MENTE-CORPO, RAPPORTO). Osservando, per esempio, la metodologia delle ricerche scientifiche attuali sull'intelligenza artificiale, dal punto di vista filosofico, ci troviamo subito di fronte ad un duplice approccio: schematicamente possiamo parlare di una via "platonica" e una "aristotelica", facendoci perdonare un uso un po' schematico, ma molto significativo di questa terminologia di lavoro. Come ha osservato suggestivamente A. Koyré: «Se tu reclami per la matematica uno stato superiore, se per lo più le attribuisi un valore reale e una posizione dominante nella fisica, sei platonico. Se invece vedi nella matematica una scienza astratta che ha perciò un valore minore di quelle — fisica e metafisica — che trattano dell'essere reale, se in particolare affermi che la fisica non ha bisogno di altra base che l'esperienza e deve essere costruita direttamente sulla percezione, che la matematica deve accontentarsi di una parte secondaria e sussidiaria, sei un aristotelico. In questo dibattito non

si pone in discussione la certezza — neppure gli aristotelici avrebbero dubitato della certezza delle dimostrazioni geometriche — ma l'Essere; e neppure l'uso della matematica nella scienza fisica — nemmeno gli aristotelici avrebbero mai negato il nostro diritto di misurare ciò che è misurabile e contare ciò che è numerabile — bensì la struttura della scienza e quindi la struttura dell'Essere. [...] È evidente che per i discepoli di Galileo, come per i suoi contemporanei e predecessori, matematica significa platonismo» (Koyré, 1973, pp. 160, 163).

Dal punto di vista tecnico saranno i risultati ottenuti a suggerire, in futuro, quale tipo di approccio preferire e come correggerlo per migliorarlo.

a) L'affronto che chiamiamo, in qualche modo, "platonico" è anche riduzionistico: si fonda su una teoria della conoscenza come "anamnesi", ricordo di idee innate che vengono risvegliate dall'impatto con l'esperienza sensibile. In quest'ottica l'intelligenza è ricondotta a quell'operazione che porta in primo piano la "memoria" fino ad una sovrapposizione, almeno approssimata, dell'idea con il dato sensibile dell'esperienza. Dal punto di vista informatico questa concezione suggerisce la tecnica dell'immissione, da parte dell'operatore, di quante più informazioni sia possibile, nell'*hardware* della macchina: queste giocano un ruolo simile a quello di idee innate, o come si preferisce chiamarle, in questo caso, di concetti. Non si può negare che il termine "concetto" è impiegato più di una volta in maniera piuttosto ambiziosa da quanti si occupano di intelligenza artificiale e spesso sta ad indicare semplicemente una qualche codifica immagazzinata nella memoria, che renda possibile il riconoscimento di oggetti non proprio del tutto identici tra loro, ricordando vagamente la nozione di universale. Con questa strategia il sistema funziona bene fino a che non ci si allontana dall'insieme dei dati immagazzinati, ma non sa riconoscere certe somiglianze e non riesce a stabilire analogie. Si ottiene uno scarso livello di universalità dei cosiddetti concetti.

b) Una seconda modalità di approccio si basa su una metodologia capovolta rispetto alla precedente e più simile alla concezione "aristotelica", o almeno a quella empirista, in quanto si fonda sull'ipotesi che la conoscenza non è innata, ma viene appresa dall'esperienza mediante un processo che va dai sensi esterni al cervello e alla mente. Si tratta di una metodologia che tenta di mettere a punto delle tecniche di "apprendimento" di concetti da parte della macchina.

Ma che cos'è un concetto? In entrambi i precedenti approcci c'è la tendenza a far ricorso a due tecniche, quella dell'approssimazione da un lato, e della modellizzazione dall'altro. La "tecnica dell'approssimazione" si ricollega, in qualche modo, alla nozione empiristica del concetto che si ritrova nella filosofia di → David Hume (1711-1776): il concetto sarebbe come una sorta di dato "singolare sfumato" e si cerca di realizzare questa sfumatura del singolare in vista di una sua generalizzazione introducendo un margine di errore permesso, che consente di fare rientrare dentro lo schema rappresentativo più oggetti, anziché uno solo. La "tecnica della modellizzazione" è certamente meno rudimentale di quella dell'approssimazione e si fonda su un processo di vera e propria "astrazione" (compiuta però in precedenza dall'uomo) volto ad identificare gli elementi comuni a più dati singolari.

Sembra utile, oltre che interessante, un confronto con la scienza cognitiva di Tommaso d'Aquino, fondata su quella di Aristotele. Questa identificava, basandosi sull'esperienza comune, tre operazioni proprie dell'intelligenza umana: la prima operazione veniva detta *simplex apprehensio* e potremmo convenire di traslitterare questa dizione in italiano come "semplice apprensione"; la seconda operazione è il "giudizio" (*iudicium*); la terza è il "ragionamento" (*ratiocinium*). Ciascuna di queste operazioni agisce su un materiale di partenza ed elabora un proprio prodotto che è oggetto di studio della logica. La semplice apprensione parte dal dato sensibile fornito dai sensi e dal cervello, diciamo complessivamente dal corpo, e fornisce come risultato finale (o prodotto) il concetto. Il giudizio ha come materiale di partenza il prodotto della prima operazione e opera collegando insieme opportunamente i concetti elaborando una proposizione o enunciazione. Infine il ragionamento collega insieme le enunciazioni elaborate dalla seconda operazione, seguendo delle regole di inferenza che garantiscono la correttezza della deduzione (cfr. ad esempio, *In "Peri hermeneias"*, Proemio, n. 1). La teoria dell'astrazione si colloca al livello della prima operazione, in quanto per "astrazione" si intende quel processo che la mente compie sul dato elaborato dal corpo, partendo da un elemento sensibile singolare estraendone un prodotto informativo universale, quale è, secondo questa teoria, il concetto (cfr. *Summa theologiae*, I, q. 85, a. 1).

Questa operazione di carattere cognitivo, che svincola, in qualche modo, l'informazione dal segnale fisico che la trasporta, dalla rappresentazione fisiologica che si trova nel corpo e nel cervello, dal punto di vista logico ha l'effetto di fornire il dato nella forma di un "universale" (concetto), rimuovendolo dal contesto materiale che lo delimitava e lo rendeva un "singolare" concreto. Ed è proprio questa sua caratteristica di universalità a qualificare il concetto come un

principio di conoscenza, di natura qualitativamente diversa da quella del dato sensibile materiale presente nei sensi, nei nervi, nel cervello, come una polarizzazione elettrica, come un'alterazione chimica, o altro, o in un circuito elettronico come uno stato di un sistema binario. Il concetto si presenta con una natura diversa, non riducibile a dato sensibile materiale: esso è un contenuto informativo caratterizzato dalla sua universalità e non materialità, non riducibile ad uno stato cerebrale, anche se legato a questo. In quest'ottica l'universalità non è ottenibile come genericità, nel senso di indeterminatezza, alla Hume: l'universale non è un singolare approssimato, con un margine di errore nei suoi contorni, ma è qualcosa di qualitativamente diverso, essendo un'informazione non materiale.

Il contenuto dell'informazione non coincide propriamente con il segnale che la trasporta, anche se non può prescindere da un veicolo fisico (di natura elettrica, chimica, o altro). Per essere conosciuta dalla mente umana l'informazione richiede di essere in qualche modo estratta ("astratta") dal suo veicolo per essere posseduta dalla mente in forma immateriale ("intenzionale"). Si pone allora il problema di come debba essere fatta la mente per compiere questa operazione di astrazione di un'informazione non materiale, universale, dal dato sensibile elaborato fino al suo stato cerebrale. La risposta che viene data, nell'ambito di questa teoria, è che per compiere un'operazione di astrazione di un principio non materiale, come l'informazione, occorre una mente non materiale, per ragioni di causalità adeguata. Tutto questo si fonda sulla concezione dell'universale come informazione immateriale, in quanto la materia è per se stessa individualizzante (principio di individuazione). Se questo modo di accostare il problema è corretto non sembra che un computer da solo, in quanto è materiale — o un cervello da solo, in quanto è materiale — possa elaborare un concetto universale e astratto, anche se può gestire delle informazioni ad esso legate, in tanto in quanto viene fatto lavorare da un operatore che è dotato di una mente immateriale. Ciò che la macchina, il corpo-cervello possono al più produrre è una rappresentazione elettromagnetica, o elettrochimica o altro che non contiene certamente la materia dell'oggetto osservato, ma che è comunque ancora legata alla materia-energia di un segnale fisico e come tale non è ancora universale. Nella concezione aristotelico-tomista questa rappresentazione veniva detta *phantasma* e l'astrazione del concetto universale dal *phantasma* particolare non poteva essere compiuta da un organo corporeo, materiale, ma doveva essere opera di un intelletto immateriale, che in quanto compiva tale operazione veniva detto «intelletto agente». La macchina, può comunque manipolare dei simboli (singolari) che per l'operatore hanno un significato universale fornendo elaborazioni di ragionamenti e calcoli, mentre i processi dell'intelligenza dell'uomo paiono non essere riducibili a processi di calcolo (cfr. Penrose, 1996).

Alberto Strumia

Vedi: CHIMICA; COMPLESSITÀ; EPISTEMOLOGIA; MATERIALISMO; MECCANICA; MECCANICA QUANTISTICA; RIDUZIONISMO; SPIRITO.

Bibliografia:

Aspetti scientifici: A. EINSTEIN, L. INFELD, *L'evoluzione della fisica*, Einaudi, Torino 1953 (riedizione 1999); P.A.M. DIRAC, *Principles of quantum physics*, Clarendon Press, Oxford 1958; L. LANDAU E S. LIFSHITZ, *Fluid Mechanics*, Addison-Wesley, Reading (MA) 1959; A. EINSTEIN, *Relatività: esposizione divulgativa*, Boringhieri, Torino 1960; W. PAULI, *Collected Scientific Papers*, Interscience, New York 1964; N.I. LOBACHEVSKIJ, *Nuovi principi della geometria (1835-1838)*, Boringhieri, Torino 1974; R. THOM, *Stabilità strutturale e morfogenesi. Saggio di una teoria generale dei modelli*, Einaudi, Torino 1980; E. NAGEL, J.R. NEWMAN, *La prova di Gödel*, Boringhieri, Torino 1982; H. FIRETZSCH, *Quark. I mattoni del mondo*, Boringhieri, Torino 1983; D.R. HOFSTADTER, *Gödel, Escher e Bach: un'eterna ghirlanda brillante*, Adelphi, Milano 1984; H.O. PEITGEN, P.H. RICHTER, *La bellezza dei frattali*, Bollati Boringhieri, Torino 1987; G. COHEN-TANNOUDJI, M. SPIRO, *La materia-spazio-tempo. La logica delle particelle elementari*, Jaca Book, Milano 1988; S.G. SHANKER, *Il teorema di Gödel. Una messa a fuoco*, Muzzio, Padova 1988; B.B. MANDELBROT, *La geometria della natura. Sulla teoria dei frattali*, Theoria, Roma-Napoli 1989; A. SALAM, *L'unificazione delle forze fondamentali. Lo sviluppo e gli obiettivi della fisica moderna*, Rizzoli, Milano 1990; L. MAIANI (a cura di), *Campi, forze e particelle*, Le Scienze Editore, Milano 1991; L. DE BROGLIE, E. SCHRÖDINGER, W. HEISENBERG, *Onde e particelle in armonia. Alle sorgenti della meccanica quantistica*, a cura di Sigfrido Boffi, Jaca Book, Milano 1991; G. NICOLIS, I. PRIGOGINE, *La complessità. Esplorazioni nei nuovi campi della scienza*, Einaudi, Torino 1991; R.P. FEYNMAN, *QED. La strana teoria della luce e della materia*, Adelphi, Milano

1989; H. POINCARÉ, *Geometria e caso. Scritti di matematica e fisica*, a cura di C. Bartocci, Boringhieri, Torino 1995; M. RIGHETTI e A. STRUMIA, *L'arte del pensare. Appunti di logica*, ESD, Bologna 1998; J. VON NEUMANN, *I fondamenti matematici della meccanica quantistica*, Il Poligrafo, Padova 1999.

Aspetti filosofici ed epistemologici: R. MASI, *Struttura della materia. Essenza metafisica e costituzione fisica*, Morcelliana, Brescia 1957; P.A. SCHILPP (a cura di), *Albert Einstein scienziato e filosofo*, Boringhieri, Torino 1958; P.W. BRIDGMAN, *La logica della fisica moderna*, Boringhieri, Torino 1965; M. JAMMER, *Storia del concetto di spazio*, Feltrinelli, Milano 1966; M. DAUMAS (a cura di), *Storia della Scienza*, Laterza, Bari 1969; T.S. KUHN, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Einaudi, Torino 1969; J. MARITAIN, *La filosofia della natura*, Morcelliana, Brescia 1974; A. KOYRÉ, *Introduzione a Platone*, Vallecchi, Firenze 1973; M. JAMMER, *Storia del concetto di massa*, Feltrinelli, Milano 1980; A. PAIS, "Sottile è il Signore..." *La vita della scienza di Albert Einstein*, Boringhieri, Torino 1986; J.J. SANGUINETI, *La filosofia del cosmo in Tommaso d'Aquino*, Ares, Milano 1986; F. SELLERI, *La casualità impossibile. L'interpretazione realistica della fisica dei quanti*, Jaca Book, Milano 1987; M. ARTIGAS, J.J. SANGUINETI, *Filosofia della natura*, Le Monnier, Firenze 1989; T. e I. ARECCHI, *I simboli e la realtà*, Jaca Book, Milano 1990; G. BASTI, *Il rapporto mente-corpo nella filosofia e nella scienza*, ESD, Bologna 1991; A. STRUMIA, *Introduzione alle filosofia delle scienze*, ESD, Bologna 1992; A. STRUMIA, *Il problema della creazione e le cosmologie scientifiche*, "Divus Thomas" 1 (1992), pp. 82-94; M. CINI, *Un paradiso perduto. Dall'universo delle leggi naturali al mondo dei processi evolutivi*, Feltrinelli, Milano 1994; R. RUSSELL, N. MURPHY, A. PEACOCKE (a cura di), *Caos and Complexity. Scientific Perspectives on Divine Action*, LEV and Center for Theology and The Natural Sciences, Città del Vaticano - Berkeley 1995; G. BASTI e A.L. PERRONE, *Le radici forti del pensiero debole*, Il Poligrafo - Pontificia Università Lateranense, Padova 1996; R. PENROSE, *Ombre della mente. Alla ricerca della coscienza*, Rizzoli, Milano 1996; R. COGGI, *La filosofia della natura? Ciò che la scienza non dice*, ESD, Bologna 1997; F. BERTELÈ, A. OLMI, A. SALUCCI e A. STRUMIA, *Scienza, analogia, astrazione. Tommaso d'Aquino e le scienze della complessità*, Il Poligrafo, Padova 1999.