

## Universo come oggetto fisico\*

### ABSTRACT

Philosophers and scientists of antiquity used to speak of *material things or bodies*, by taking for granted that world was naturally divided into separate *objects*. Probably that notion is due to the fact that we are living in a comparatively *cold* surrounding (the surface of the Earth), where most bodies are in a solid state. Modern physics has profoundly modified our way of conceiving physical bodies. General relativity led us to think of the universe as of a *unique body*, governed by a non euclidean geometry and being today in a rapid expansion. So far we do not know whether that expansion will one day stop and be replaced by a contraction, or will instead go on forever. Moreover, recent studies in quantum mechanics have shown that, strictly speaking, the universe cannot be split into *separate* and *independent* particles. This is still quite a puzzle.

Prima d'impegnarsi a parlare dell'universo come oggetto fisico bisognerebbe sapere bene che cosa è un oggetto fisico. Ma a tutt'oggi è ben difficile – forse impossibile – darne una definizione perfettamente soddisfacente.

La cosa può sorprendere, se si pensa che tutti i giorni parliamo di oggetti fisici, senza sospettare minimamente che sotto quella locuzione si nasconde un buon numero di tranelli. Vero è che i filosofi fino dall'antichità e gli scienziati dell'età moderna si sono bellamente sottratti al dovere di dare definizioni. Perché tentare di definire con precisione quello che tutti sanno bene che cos'è?

I fisici, almeno dai tempi di Galileo, si sono accontentati di studiare e di descrivere in che modo si muovono, si urtano, reagiscono alle sollecitazioni esterne (elastiche, termiche, elettriche e via dicendo) quelli che si accontentavano di chiamare variamente *cose materiali, oggetti fisici, corpi*. Non c'è dubbio che fu già un grande passo avanti arrivare a chiarire con precisione matematica come si comporta un *ente materiale*, anche prima di arrivare a capire bene chi è il *soggetto* di quel verbo *comportarsi!* Di lì, quasi incredibilmente, è nata tutta la scienza moderna.

Dal punto di vista filosofico dobbiamo innanzi tutto fare questa considerazione: è proprio vero che il mondo fisico è diviso in una serie di *oggetti* separati? Si può fortemente dubitarne. Quando volgiamo attorno lo sguardo, siamo colpiti da una numerosa serie di punti variamente luminosi e variamente colorati; ma fra di essi generalmente non ci sono lacune, non ci sono soluzioni di continuità. Chi ci persuade a unire insieme un gruppo di tali punti e a sentenziare che si tratta di una cosa? Da

tempo si è cominciato a sospettare che non il mondo di per sé sia diviso in cose, ma che il modo caratteristico della percezione umana richieda di effettuare quell'operazione. È stata soprattutto la psicologia della forma (*Gestalt*) ad elaborare il concetto. Non è vero – stando a quella teoria – che noi da prima percepiamo una serie di punti giustapposti e solo in seguito li colleghiamo nella costruzione voluta e cosciente di una forma. No, la forma viene subito percepita e sintetizzata tutta intera dalla nostra psiche, in modo assolutamente involontario. È l'evoluzione naturale a dotarci di questa formidabile facoltà, la quale indubbiamente ci aiuta a vivere.

Sia come sia, passando dalla psicologia e dalla filosofia alla fisica, notiamo che il mondo terrestre, nel quale la nostra specie è nata e si è sviluppata, ha una caratteristica particolare molto importante: è un mondo *freddo* – si pensi per confronto alle stelle – cioè relativamente vicino allo zero assoluto. In tale mondo la grandezza  $kT$  (costante di Boltzmann per temperatura assoluta) che caratterizza l'energia dell'agitazione termica ha un valore esiguo, quasi sempre inferiore all'energia dei legami intermolecolari. In tali condizioni una gran parte della materia che ci circonda è allo *stato solido*.

Nessuna meraviglia se Galileo dedicò inizialmente la sua attenzione appunto ai corpi solidi, al modo in cui cadono e in cui si muovono in generale. Niente di strano se studiò le cose che galleggiano sull'acqua e in essa si muovono. Si pensi che bisogna arrivare a Torricelli – scolaro di Galileo – per capire bene che anche l'aria è una cosa materiale e ha un peso. Si pensi anche che perfino lo scienziato filosofo Bertrand Russell all'inizio del nostro secolo, volendo finalmente definire l'oggetto fisico, si riferì all'insieme delle diverse prospettive che presenta un corpo solido, se osservato da diversi punti di vista.

\*Relazione su invito tenuta al XXXIII Congresso A.I.F.

Ma lo stesso Russell arrivò ben presto a convincersi che, poiché quelle diverse prospettive della geometria proiettiva dimostrano che il corpo obbedisce a una precisa legge fisica, conveniva definire le cose come quegli enti che obbediscono alle *leggi fisiche*.

È una pura e semplice tautologia? No. Si può indagare più a fondo ed accorgersi che in realtà qualsiasi legge fisica è l'espressione di una o più *invarianze*. Tanto per fare un esempio, la legge di caduta dei gravi – scoperta da Galileo – può enunciarsi dicendo che: se si divide il doppio della distanza percorsa da un corpo in caduta libera per il quadrato del tempo impiegato, si ottiene una quantità invariante, che chiamiamo accelerazione di *gravità* ( $g = 2h/t^2$ ). La strada è aperta per arrivare a definire un oggetto fisico come un *nodo d'invarianti*. Se questa definizione va già abbastanza bene per i corpi della fisica classica, essa va poi perfettamente per le particelle della microfisica.

A prima vista la definizione può alquanto sorprendere, perché viene ad abolire la dura e corpulenta materialità dei corpi che siamo usi vedere e toccare e la sostituisce con un insieme di enti astratti. Ma si rifletta che questa è anche l'unica maniera che ci consente di superare le ben note aporie a cui dà luogo il *cambiamento* delle cose nel tempo. Una cosa che cambia non è *dopo* quella che era *prima*. Ma allora chi è il soggetto del verbo cambiare: la cosa di prima o la cosa di dopo?

Si ricordi che Eraclito – quello del famoso enunciato “tutto scorre” – aveva osservato che non è possibile bagnarsi due volte nello stesso fiume. Infatti la seconda volta che si scende dalla riva l'acqua non è più la stessa e quindi l'*essenza* materiale del fiume è cambiata. Ma allora si domanda: perché Eraclito parla dello stesso fiume? Non è una contraddizione? No, non è così. Eraclito non l'avrebbe detto con le nostre parole, ma certamente aveva notato che vi erano alcuni *invarianti topologici*, come le due rive, in mezzo alle quali scorre l'acqua, la campagna verde da una parte e dall'altra, e così via. Quegli invarianti, proprio con la loro *permanenza*, autorizzano a parlare dello *stesso oggetto*.

Alla fine del Settecento e all'inizio dell'Ottocento la nascita della fisica matematica moderna permise di passare dalla considerazione dei corpi di cui parlava Galileo a un caso più generale. Si cominciava scegliendo una regione finita  $R$  dello spazio racchiusa da una superficie  $S$ . Fissato un arbitrario istante iniziale  $t = 0$ , supponiamo di conoscere in tale istante i valori di tutte le grandezze fisiche misurabili nei vari punti di  $R$ : queste sono le *condizioni iniziali*. Supponiamo poi di conoscere a  $t = 0$  e ai tempi successivi tutto ciò che è misurabile nei vari punti della superficie  $S$ : queste sono le *condizioni al contorno*. Ebbene, l'applicazione

delle equazioni differenziali della fisica permette allora di calcolare – cioè *predire* – tutto quello che avverrà al di dentro di  $R$ .

Si badi bene che le condizioni al contorno sono *essenziali* e che non è lecito ignorarle, come molti tendono a fare con una certa faciloneria. Tanto per fare un esempio, supponiamo di racchiudere la Terra in un'enorme sfera ideale  $S$  e di conoscere tutte le condizioni iniziali che valgono al di dentro di  $S$ . È possibile allora predire quello che avverrà sul nostro pianeta, ignorando che la superficie  $S$  è costantemente raggiunta e attraversata dalla potente radiazione solare? È semplicemente assurdo.

Tutto sembrava sistemato ed avviato verso una nostra perfetta conoscenza del mondo fisico, quando – come è ben noto – al principio del nostro secolo intervennero due scoperte teoriche di capitale importanza: la *relatività* (speciale e generale) e la *meccanica quantistica*.

Parliamo prima di tutto della meccanica quantistica, che regola il comportamento delle particelle subatomiche, quelle che, in un certo senso, sono i veri e naturali oggetti fisici. Tale comportamento costrinse la scienza a rinunciare alle rigide leggi fisiche *deterministiche*, nelle quali aveva confidato fino allora e a sostituirle con leggi *probabilistiche*. Senza addentrarci ora nei dettagli della teoria, che ci porterebbero troppo lontano, ricordiamo che la fisica deterministica – che vale quasi sempre per i corpi macroscopici – è giustificata dal fatto che nel mondo a misura d'uomo la probabilità che si verifichi un certo fenomeno è vicinissima al valore 1, mentre la probabilità che si verifichi un fenomeno diverso è talmente piccola da risultare assolutamente trascurabile.

E veniamo alla relatività einsteiniana. Prima di tutto essa ci rivelò (*relatività speciale*) che quelli in cui viviamo non sono uno *spazio* e un *tempo* separati, bensì, – come intuì Minkowski – un continuo complessivo a quattro dimensioni, chiamato *spazio-tempo*. In secondo luogo, con la *relatività generale*, Einstein introdusse la concezione arditissima, secondo la quale tutto quello che avviene nell'universo fisico è dovuto semplicemente alla geometria dello spazio-tempo.

Tale geometria, come ormai tutti sanno, non è una geometria euclidea. Le geometrie *non-euclidee* erano state introdotte e studiate a fondo ben prima di Einstein. Il grande matematico Riemann ebbe la profetica intuizione che quello che avviene nel mondo fisico possa essere dovuto alla geometria non-euclidea dello spazio. Ma il tentativo, applicato al semplice spazio tridimensionale, fallì. Il successo venne soltanto quando Einstein ebbe la meravigliosa idea di applicare la geometria non-euclidea allo spazio-tempo quadridimensionale.

La riuscita di Einstein fu molto facilitata – è bene non dimenticarlo – dalle ingegnose elaborazioni matematiche dovute agli italiani Ricci-Cur-

bastro e Levi-Civita, che fecero trovare al padre della relatività una serie di strumenti già perfettamente adeguati allo scopo.

Che dice in sostanza la relatività generale? Essa dice che lo spazio-tempo in assenza di masse materiali è euclideo, come quello della nostra semplicistica intuizione; invece la presenza di una massa materiale – come un pianeta, una stella, una galassia – lo *incurva* attorno a sé. Le linee *geodetiche*, cioè le linee più brevi che uniscono le coppie di punti, non sono più le *rette* della geometria euclidea, bensì linee curve.

Per spiegare come uno spazio possa essere curvo e le sue geodetiche non rette, si ricorre di solito ad un semplice esempio. È assolutamente impossibile a un essere umano avere un'idea intuitiva di uno spazio curvo a tre o quattro dimensioni. Ma in una o due dimensioni invece è possibile. Per esempio, la superficie della Terra è appunto uno spazio curvo a due dimensioni. Supposto per semplicità che si tratti di una sfera perfetta, ci accorgiamo che le sue geodetiche sono i *cerchi massimi*. Chi ha viaggiato in aereo da Roma a New York sa benissimo che la linea più breve fra le due città non è affatto il parallelo, ma una traiettoria che passa più a nord e che è appunto un cerchio massimo.

Nello spazio euclideo intuitivo – che praticamente va benissimo per le piccole distanze – le geodetiche sono rette e sono le linee che i corpi non soggetti a forze seguono naturalmente *per inerzia*. Ebbene Einstein fece l'ipotesi che le traiettorie seguite dai pianeti siano semplicemente le geodetiche dello spazio-tempo incurvato dalla grande massa del Sole. In tal modo sparisce la forza di attrazione newtoniana e il moto dei pianeti diviene semplicemente un moto *per inerzia* lungo le linee geodetiche. Fatti i calcoli, tutto torna perfettamente; anzi va meglio che in passato, dato che ora si rende conto anche della precessione del perielio di Mercurio – già nota, ma non spiegata – della deflessione dei raggi luminosi in prossimità del Sole – successivamente verificata – nonché di una grande quantità di fenomeni osservati in tempi recenti. A tutt'oggi la relatività generale è la migliore teoria che possediamo per le cose a dimensioni cosmiche.

Ma il genio di Einstein non si arrestò a questi trionfi. Non pago di avere spiegato come si comportano gli oggetti fisici nell'universo, concepì l'arditissima idea di considerare l'*universo stesso* nella sua totalità come un oggetto fisico! Tenendo conto della *densità media* della materia nell'universo, quale risulta dall'osservazione, ed applicando le equazioni della relatività generale, si può ricavare la forma e il comportamento dell'universo intero.

Sorvolando qui sulle varie difficoltà iniziali, arriviamo subito a quello che se ne sa oggi. L'universo è *finito* ed è in *espansione*. Tre casi sono possibili:

- 1) l'universo andrà diminuendo la sua velocità di espansione e un bel giorno tornerà indietro *contraendosi*;
- 2) l'universo andrà accelerando l'espansione ed aumenterà fino all'infinito la distanza fra le sue galassie;
- 3) l'universo si trova esattamente al limite fra le due precedenti condizioni e continuerà ad espandersi uniformemente.

Ancora non si sa esattamente quale sia la soluzione giusta, anche se per varie ragioni si propenderebbe a preferire la prima. Ma affinché tale ipotesi fosse nel vero bisognerebbe che la densità media della materia nell'universo fosse maggiore – di circa un ordine di grandezza – di quanto ci è dato osservare (problema della *massa mancante*). Tuttavia questa difficoltà non è ritenuta decisiva. Infatti la materia che osserviamo è quella *visibile*. E ci sono un buon numero d'indicazioni che ci portano a supporre che esista nello spazio anche una grande quantità di materia *oscura*, sulla cui natura si formulano per ora solo ipotesi plausibili.

Quando Hubble ebbe confermato – mediante l'osservato allontanamento delle galassie da noi con velocità proporzionali alle distanze – che l'universo è effettivamente in espansione, tutti plaudirono allo sbalorditivo successo della relatività generale; ma non tutti si accorsero di come stavano cambiando le regole con cui la fisica-matematica veniva applicata agli ordinari oggetti fisici. Prima di tutto era facile concludere che in passato l'universo era più concentrato di come è oggi. Anzi, pur di risalire abbastanza indietro – circa dieci o venti miliardi di anni fa – si arguiva che l'universo doveva trovarsi tutto contenuto in una piccolissima regione dello spazio, magari addirittura in un punto! Nasce così l'idea della grande esplosione, o *big bang*.

Ma allora non si trattava più di partire dalle condizioni iniziali osservate per predire quello che sarebbe avvenuto in seguito. Si trattava di passare niente di meno che a una *retrodizione*! Il cambiamento era essenziale e molto più problematico di quanto potrebbe sembrare.

Prima di tutto ci sono le leggi della meccanica quantistica, delle quali abbiamo già parlato. Esse consentono di calcolare la probabilità dei fenomeni che si verificheranno in *futuro*. Ma sono esse in grado di dirci quali sono le probabilità dei fenomeni del *passato*? Il problema è abbastanza delicato e difficile.

Ma anche se vogliamo fidarci del semplicistico enunciato che la meccanica quantistica riguarda il mondo della microfisica e non quello dei fenomeni a scala enorme, come quelli della cosmologia, non superiamo la difficoltà. Sussiste pur sempre la *seconda legge della termodinamica*, con la sua minacciosa irreversibilità.

Quelle che osserviamo oggi dovrebbero essere solo le *tracce* rimanenti di un mondo più ricco e strutturato, per noi perduto irrimediabilmente. Chi, osservando un bicchiere di acqua nerastra, si sente di concludere con sicurezza che inizialmente c'era un bicchiere di acqua limpida, nel quale qualcuno ha fatto cadere una goccia d'inchiostro? E con quale coraggio potrebbe addirittura indicare il punto preciso in cui è caduta quella goccia? Le relative informazioni sono sparite per sempre e non ci è dato di recuperarle.

No, il procedimento da seguire nel teorizzare l'"origine" dell'universo è ben diverso da quello che impieghiamo nello studio degli ordinari oggetti fisici. Bisogna prima di tutto ricorrere a quel concetto che Leibniz indicava col nome di *mondi possibili*.

Un mondo possibile è rappresentato da una catena di enunciati *non contraddittori*, che descrivono uno stato del mondo. Si tratta allora di sforzare l'immaginazione e di escogitare un mondo possibile – diciamo di una quindicina di miliardi di anni fa – tale che, abbandonato a se stesso e alle leggi fisiche, avrebbe dato oggi un risultato in accordo con tutte le tracce che osserviamo.

Ora è evidente, per quello che abbiamo notato riguardo alle leggi fisiche, che di mondi possibili che soddisfano le richieste non ce ne sarà uno solo, bensì un insieme numerosissimo. Allora arischiemo il seguente enunciato di sconcertante generalità: la "verità" riguardo all'origine dell'universo è rappresentata dall'*insieme* di tutti i mondi possibili iniziali che vanno d'accordo con le tracce osservate.

L'affermazione può apparire sconcertante. Noi vorremmo infatti individuare *un* mondo originario, dal quale è nato il nostro. Ma nessuno è o sarà mai in grado di stabilire esattamente lo stato in cui si trovava ciascuna particella che prese parte al big bang (e del resto la cosa c'interesserebbe ben poco!). No, convinciamoci che quando parliamo di origine del mondo parliamo sempre di un *insieme* di mondi possibili. Le osservazioni sperimentali e le ricerche teoriche che oggi facciamo servono solo a *restringere* sempre più l'insieme dei mondi possibili in questione; ma è difficilmente immaginabile che possano ridurlo a un mondo unico.

A questo punto mi si permetta di ricordare che il sottoscritto ha recentemente proposto una concezione analoga per quanto riguarda il lavoro degli storici veri e propri (quelli che si occupano di narrare i fatti umani). L'enunciato relativo suona pro-

prio così: la "verità storica" è l'insieme dei mondi possibili che vanno d'accordo con le *fonti* storiche, che sono appunto le tracce a disposizione degli studiosi. La scoperta della dimensione storica dell'universo fisico ha notevolmente avvicinato il lavoro del cosmologo a quello dello storico. La cosmologia moderna è in gran parte *cosmogonia*.

Ma ora faremo una curiosa annotazione sullo studio dell'universo come oggetto fisico. Dove sono andate a finire le condizioni al contorno? Sono sparite. Affinché se ne possa parlare bisognerebbe che al di fuori dell'universo ci fosse qualcosa, almeno un ulteriore spazio, nel quale il nostro mondo si trovasse immerso. Ma invece non c'è nulla e non ha senso parlare dello spazio esterno! La cosa è sconcertante, assolutamente non intuitiva; eppure bisogna crederci. L'universo ha in se stesso tutte le sue ragioni.

Infine un'altra difficoltà. Nel lontano 1935 Einstein, scontento della meccanica quantistica ormai imperante, propose (insieme con Podolsky e Rosen) un'esperienza *ideale* sconcertante, che, seguendo le regole della meccanica quantistica, portava a quello che sembrava un *paradosso* (detto paradosso E.P.R). In sostanza risultava che quando due particelle hanno interagito in passato, una misura effettuata sull'una influenza *istantaneamente* la probabilità del risultato della misura da effettuare sull'altra; anche se quest'ultima si trova distanti anni luce dalla prima!

Secondo Einstein nessuno ci poteva credere. Eppure un buon numero di recenti ricerche (fra l'altro dovute a Bell per la teoria e ad Aspect per l'esperienza) hanno dimostrato che è proprio così. Le due particelle non sono *separabili*, cioè non hanno ciascuna un vettore di stato (o funzione d'onda) indipendente dall'altra. Non si può fare a meno di considerare un unico sistema fisico, costituito dalle due particelle insieme. Ne consegue che a *rigore* l'universo non è separabile in singoli oggetti studiabili indipendentemente.

La separazione tuttavia funziona con ottima approssimazione – e guai se non fosse così – nella grande maggioranza dei casi con cui abbiamo a che fare. Ma da un punto di vista filosofico la scoperta appare quasi devastante. L'universo dovrebbe essere concepito come un *unico oggetto* con un suo vettore di stato totale. Ma che senso ha questo, se nessuno può osservarlo dall'esterno? La domanda ci lascia alquanto sbigottiti. Credo che a tutt'oggi nessuno sappia rispondere in modo convincente.