

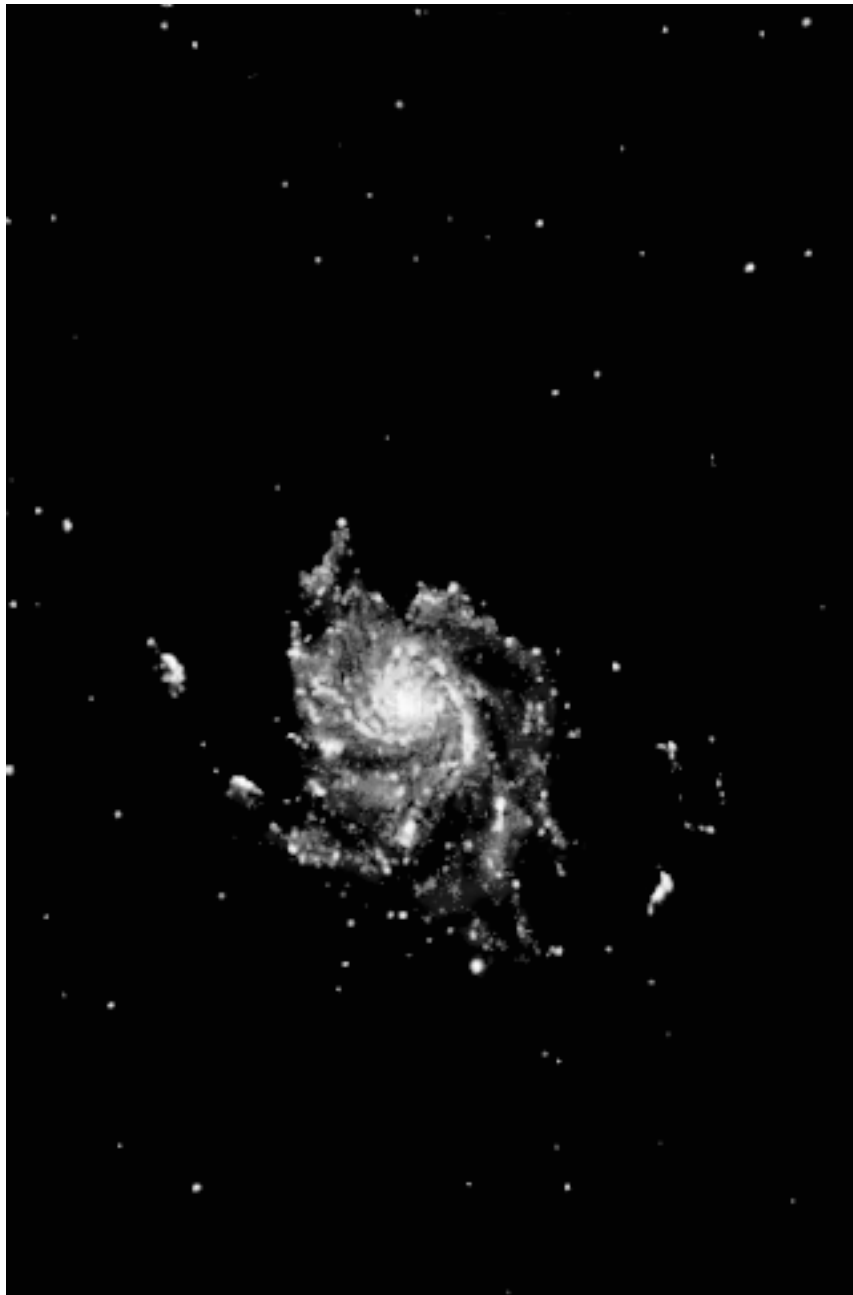
L'UNIVERSO IN ESPANSIONE

Sir Arthur Eddington

M.A., D.Sc., LL.D., F.R.S.

Professore Plumiano di Astronomia - Università di Cambridge

Stampato dall'Università di Cambridge - 1933



Hitchey

Tav.1: Nebulosa a Spirale - Messier 101 nell'Orsa Maggiore.

Velocità di recessione, 300 km/s . Distanza stimata 1300000 anni luce.

PREFAZIONE

Questo libro è una versione ampliata di una conferenza pubblica tenuta al convegno dell'Unione Astronomica Internazionale a Cambridge (Massachusetts) nel settembre del 1932. Costituì inoltre l'argomento di una serie di tre discorsi trasmessi negli Stati Uniti poco dopo.

Mi occupo dell'opinione, ora provvisoriamente sostenuta, secondo cui l'intero universo materiale di stelle e galassie di stelle si sta disperdendo, le galassie si stanno disperdendo fino a occupare un volume sempre maggiore. Ma non la considero un fine in sé. Per usare un'analogia dalla narrativa poliziesca, è l'indizio, non il criminale. La "mano nascosta" nella mia storia è la *costante cosmologica*. Nel capitolo IV vediamo che l'indagine sull'universo in espansione si allinea ad altri metodi di indagine, così che sembriamo avviarci verso la cattura di questa costante della natura più elusiva.

L'argomento è di particolare interesse, poiché si trova al punto d'incontro tra astronomia, relatività e meccanica ondulatoria. Ogni autentico progresso avrà importanti ripercussioni su tutte e tre.

Sto trattando di sviluppi molto recenti; e sono ancora in corso indagini sia teoriche che osservative, che probabilmente ci insegneranno molto di più e potrebbero modificare le nostre opinioni. Si potrebbe sostenere che, a questo punto, un libro sia prematuro, ma mi sono azzardato a supporre che, nelle storie misteriose della scienza, il lettore possa essere interessato tanto a trovare e mettere insieme gli indizi per l'individuazione del criminale quanto alla sua cattura e alla sua esecuzione finale.)

Supponiamo quindi che a metà dell'inseguimento uno degli investigatori maldestri stia riassumendo quanto scoperto e dove risieda il sospetto più forte. Leggete la sua discussione non per essere certi che sia arrivato al punto di identificare il criminale, ma perché si tratta presumibilmente di una fase necessaria per la soluzione del mistero. Nella vita reale (a differenza delle storie) è possibile che il sospetto risieda già sulla persona giusta; comunque sia, vale la pena esporre e analizzare lo stato attuale dell'indagine.

Nella parte astronomica del libro, seguo generalmente la teoria di Lemaître: c'è una differenza nelle nostre concezioni dell'evoluzione, ma dal mio punto di vista si tratta di una divergenza di poco conto. Sono state proposte diverse controterie sull'apparente recessione delle nebulose; presento anche una spiegazione del mio atteggiamento generale nei loro confronti.

Il libro si rivelerà di difficoltà disomogenea; e il lettore che si trovasse fuori dalle sue possibilità nel Capitolo 11 potrebbe scoprire che il percorso diventa più facile proseguendo. Ho cercato di rendere le spiegazioni il più semplici possibile; ma il libro non intende essere solo un'esposizione semi-popolare, e non ho esitato ad addentrarmi in argomenti di estrema difficoltà quando mi è sembrato necessario per un'adeguata discussione del problema.

In ricordo dell'occasione della sua esposizione, aggiungo qui le parole iniziali della conferenza:

Questo è un convegno internazionale e ho scelto un argomento internazionale. Parlerò del lavoro teorico del tedesco Einstein, dell'olandese de Sitter e del belga Lemaitre. Per i dati osservativi mi rivolgo agli americani Slipher, Hubble e Humason, ricordando tuttavia che il dato di vitale importanza della distanza si trova con un metodo che dobbiamo al danese Hertzprung. Poiché non devo annoiarvi con analisi matematiche, devo tralasciare l'italiano Levi-Civita, di cui impieghiamo metodi e idee. Ma devo fare riferimento in particolare al nuovo interesse che nasce per l'argomento grazie al suo legame con la meccanica ondulatoria; come nome rappresentativo della meccanica ondulatoria menziono quello del suo ideatore, il francese de Broglie.

Il mio argomento disperde le galassie, ma unisce la Terra. Che nessuna "repulsione cosmica" intervenga a separarci!

A. S. E.

Cambridge, England - Ottobre 1932

Maestri, devo dirvi cose meravigliose: ma non chiedetemi cosa;
perché se ve lo dicessi, non sarei un vero ateniese.

Vi racconterò tutto, esattamente come è successo.

Sogno di una notte di mezza estate

1 LA RECESSIONE DELLE GALASSIE

Pricked out with less and greater lights, between the poles of the universe, the Milky Way so gleameth white as to set very sages questioning. (Dante, Paradiso)

Il primo accenno a un "universo in espansione" è contenuto in un articolo pubblicato nel novembre del 1917 dal Prof. W. de Sitter. La teoria della relatività generale di Einstein era stata pubblicata due anni prima, ma non aveva ancora raggiunto la notorietà; solo l'eclissi, con le spedizioni del 1919, ottenne la conferma della sua previsione sulla curvatura della luce che suscitò l'interesse del pubblico. Nel frattempo, molti ricercatori avevano esaminato le varie conseguenze della nuova teoria. Tra questi, un personaggio di spicco era de Sitter, interessato soprattutto alle conseguenze astronomiche. Nel corso di una discussione altamente tecnica, scoprì che la teoria della relatività portava ad aspettarsi che *gli oggetti celesti più remoti si allontanassero da noi*, o almeno che ingannassero l'osservatore, inducendolo a credere che si stessero allontanando.

De Sitter era forse più un informatore che un profeta. Non prometteva nulla di certo, ma suggeriva che avremmo dovuto tenere d'occhio la recessione come un fenomeno piuttosto probabile. La teoria era a un bivio e desiderava una guida dall'osservazione su quale delle due possibili strade intraprendere. Se gli astronomi riscontrassero un moto generale di allontanamento degli oggetti visibili più distanti, ciò costituirebbe una forte indicazione che la strada ipotizzata da de Sitter fosse quella da seguire. In caso contrario, l'inferenza sarebbe più dubbia: potrebbe significare che si debba seguire l'altra strada, o potrebbe semplicemente significare che la nostra indagine astronomica non è ancora stata estesa a una distanza sufficiente.

Successive ricerche nel campo aperto dalle ricerche pionieristiche di de Sitter hanno sviluppato e modificato la sua teoria. È stato scoperto un nuovo punto di vista che rende i risultati meno paradossali di quanto apparissero originariamente. Siamo ancora indotti ad aspettarci una recessione degli oggetti remoti, sebbene la recessione ora prevista non sia l'effetto de Sitter originale, che si è rivelato di minore importanza. Varia con la distanza secondo una legge diversa. Inoltre, si tratta di un vero e proprio moto di allontanamento di oggetti remoti, mentre il fenomeno previsto da de Sitter potrebbe essere considerato un'imitazione dell'allontanamento, e generalmente lo fu.

Per il momento, metteremo da parte la teoria e considereremo prima cosa ci dicono le osservazioni astronomiche. Praticamente tutto ciò che ho da raccontare è stato scoperto dopo la previsione di de Sitter, in gran parte negli ultimi quattro anni. Questi risultati osservativi sono per certi versi così inquietanti che è naturale esitare ad accettarli per quello che sono. Ma non ci sono piombati addosso come un fulmine a ciel sereno, poiché negli ultimi quindici anni i teorici si aspettavano che uno studio degli oggetti più remoti dell'universo potesse dare luogo a sviluppi piuttosto sensazionali.

Le nebulose a spirale sono gli oggetti più remoti conosciuti. Sono state effettuate misure approssimative delle loro distanze che le collocano a una distanza compresa tra 1 milione e 150 milioni di anni luce; senza dubbio si estendono ben oltre quest'ultima distanza, ma al momento essa rappresenta il limite della nostra indagine. Il termine "nebulosa" si applica a diverse classi di oggetti astronomici che non hanno nulla in comune se non un aspetto nebuloso. Vi sono *nebulose gassose* che, in base al loro spettro, sono gas estremamente rarefatto, attaccato e controllato da una singola stella oppure diffuso irregolarmente in una regione contenente molte stelle; queste non sono particolarmente remote. Le *nebulose a spirale*, d'altro canto, sono oggetti extragalattici, vale a dire che si trovano oltre i limiti dell'aggregazione di stelle della Via Lattea,

il sistema a cui appartiene il nostro sole, e sono separate da ampi golfi di spazio vuoto. Quando avremo preso insieme il sole, tutte le stelle visibili a occhio nudo e centinaia di milioni di stelle osservate al telescopio, non avremo ancora raggiunto la fine; avremo esplorato solo un'isola, un'oasi nel deserto dello spazio. Altre isole si trovano oltre. A occhio nudo è possibile distinguere una macchia di luce nebulosa nella costellazione di Andromeda, che è una delle altre isole. Un telescopio ne mostra molte altre: un arcipelago di galassie-isola che si estende l'una dietro l'altra fino a perdere la vista. Sono queste galassie-isola che ci appaiono come nebulose a spirale.

Si ritiene che ogni sistema insulare sia un'aggregazione di miliardi di stelle con una somiglianza generale con il nostro sistema della Via Lattea. Come nel nostro sistema, potrebbero esserci, insieme alle stelle, grandi distese di nebulosità, a volte luminose, a volte oscure e oscuranti. Molti dei sistemi più vicini mostrano una splendida forma a doppia spirale (vedi Frontespizio) e si ritiene che le spire della Via Lattea conferirebbero lo stesso aspetto a spirale al nostro sistema se fosse osservato dall'esterno. Il termine "nebulosa a spirale" è, tuttavia, da considerarsi più un nome che una descrizione, poiché è generalmente applicato a tutte le galassie esterne, indipendentemente dal fatto che mostrino o meno tracce di struttura a spirale.

I sistemi insulari sono estremamente numerosi. Dai conteggi dei campioni si stima che più di un milione di essi siano alla portata dei nostri attuali telescopi. Se la teoria trattata in questo libro è attendibile, il loro numero totale dovrebbe essere dell'ordine di 100.000.000.000.

Per fissare nella nostra mente la vastità del sistema che dovremo considerare, vi darò una "tabella di moltiplicazione celestiale". Cominciamo con una stella come unità a noi più familiare, un globo paragonabile al sole. Poi -

Cento miliardi di stelle formano una galassia;

Cento miliardi di galassie formano un universo.

Queste cifre potrebbero non essere molto affidabili, ma credo che diano un'impressione corretta.

La lezione dell'umiltà ci è stata insegnata così spesso in astronomia che adottiamo quasi automaticamente la visione che la nostra galassia non è particolarmente speciale, non è più importante nello schema della natura rispetto a milioni di altre galassie insulari. Ma l'osservazione astronomica sembra difficilmente confermare questa ipotesi. Secondo le misure attuali, le nebulose a spirale, pur presentando una somiglianza generale con il nostro sistema della Via Lattea, sono decisamente più piccole. È stato detto che se le nebulose a spirale sono isole, la nostra galassia è un continente. Suppongo che la mia umiltà si sia trasformata in un orgoglio borghese, perché detesto l'accusa di appartenere all'aristocrazia dell'universo. La Terra è un pianeta di classe media, non un gigante come Giove, né uno dei piccoli parassiti come i pianeti minori. Il Sole è una stella di classe media, non una gigante come Capella, ma ben al di sopra delle classi più basse. Quindi sembra sbagliato che apparteniamo a una galassia del tutto eccezionale. Francamente non ci credo; sarebbe una coincidenza troppo grande. Credo che questa relazione tra la Via Lattea e le altre galassie sia un argomento su cui ulteriori ricerche osservative faranno luce, e che alla fine scopriremo che esistono molte galassie di dimensioni pari o superiori alla nostra. Nel frattempo, la questione non ha grande importanza per la presente discussione. Se ci troviamo in una posizione privilegiata, non possiamo permetterci di darla per scontata.

Ho promesso di lasciare da parte la teoria per il momento, ma devo tornarci sopra per un momento per cercare di focalizzare la nostra concezione di questo supersistema di galassie. È una visione non solo dello spazio, ma anche del tempo. Un debole ammasso di nebulose nei Gemelli, che attualmente segna il limite delle nostre esplorazioni spaziali, ci riporta indietro di 150 milioni di anni, al tempo in cui la luce che ora ci raggiunge iniziò il suo viaggio attraverso l'abisso dello spazio. (Pertanto, difficilmente possiamo isolare il pensiero di una vasta estensione dal pensiero di tempo e cambiamento; e il problema della forma e dell'organizzazione si fonde nel problema dell'origine e dello sviluppo.) Dobbiamo, suppongo, immaginare che le galassie insulari si siano formate tramite la graduale condensazione della materia primordiale. Forse nella prima fase esistevano solo i rudimenti della materia: protoni ed elettroni che attraversavano il

vuoto, e l'evoluzione degli elementi procedeva di pari passo con l'evoluzione dei mondi. Lievi condensazioni che si verificavano qua e là accidentalmente avrebbero attirato a sé, grazie al loro potere gravitazionale, altre particelle. Alcune si sarebbero rapidamente disperse di nuovo, ma altre si sarebbero saldamente stabilizzate.

Venuti in guerra, a parteggiar. L'insegna,
Dietro cui l'irruente immensa turba
Degli atomi più ferve, al punto istesso
S'alza e dispare. Il Caos giudice siede,
Ma crescono più sempre i suoi giudizi
Le furenti discordie ond'ebbe impero.
Dopo lui regna il Caso e tien la possa,
Arbitro sommo, d'ogni cosa.¹

A causa di tale conflitto, la materia dell'universo si sarebbe lentamente accumulata in isole, lasciando spazi relativamente vuoti da cui era stata prosciugata. Pensiamo che una di queste isole originarie sia diventata il nostro sistema della Via Lattea, suddividendosi ripetutamente in milioni di stelle. Allo stesso modo, le altre isole si sono evolute in galassie, che oggi vediamo splendere come nebulose a spirale. È a queste unità primarie di suddivisione dell'universo materiale che si riferirà la nostra discussione.

II

Se una nebulosa a spirale non è troppo debole, è possibile misurarne la velocità radiale lungo la linea visuale determinando lo spostamento delle righe nel suo spettro. Una preziosa serie di prime determinazioni di questo tipo fu effettuata dal Prof. V. M. Slipher al Lowell Observatory.

Più recentemente, le distanze di alcune nebulose a spirale sono state determinate con un metodo piuttosto affidabile. Nelle spirali più vicine è possibile distinguere alcune delle singole stelle; ma solo le stelle più luminose, alcune centinaia o migliaia di volte più luminose del Sole, possono essere viste a una distanza così grande. Fortunatamente, tra le stelle più luminose esiste una classe particolarmente utile chiamata variabili Cefeidi. La loro luminosità varia periodicamente a causa di una pulsazione o di un cambiamento fisico della stella, con un periodo che può variare da poche ore a qualche settimana. Studi osservativi hanno dimostrato che le Cefeidi con lo stesso periodo sono pressoché identiche anche nelle altre proprietà: luminosità, raggio, tipo spettrale, ecc. Il periodo è quindi un segno distintivo, facilmente riconoscibile a distanza, che identifica la stella come dotata di una particolare luminosità. Ad esempio, se si osserva che la stella ha un periodo di 10 giorni, la riconosciamo immediatamente come una stella con una luminosità 950 volte superiore a quella del Sole. Conoscendo quindi la sua reale luminosità, ci chiediamo: a quale distanza deve essere situata per ridursi al debole punto luminoso che vediamo? La risposta fornisce la distanza della stella e della galassia in cui si trova. Questo metodo utilizza le variabili Cefeidi come candele standard. Se vedi una candela standard da qualche parte e noti quanto ti appare luminosa, puoi calcolare quanto è lontana; allo stesso modo un astronomo osserva la sua "candela standard" al centro di una nebulosa, ne nota la luminosità apparente o magnitudine e ne deduce la distanza della nebulosa.

Il Dr. E. P. Hubble dell'Osservatorio di Mount Wilson è riuscito a scoprire variabili Cefeidi in due o tre delle nebulose a spirale più vicine, ottenendo così la prima vera misura delle loro distanze. Sfortunatamente questo metodo non è disponibile per le galassie più distanti, e ha dovuto utilizzare strumenti più indiretti per estendere la ricerca. Penso che, a parte le distanze

¹Paradiso perduto, Libro II. Tratto dall'edizione Tranchida, Milano 1992. Traduzione di Andrea Maffei. (dal sito liberliber.it)

effettivamente determinate dal metodo delle Cefeidi, dobbiamo considerare le distanze assegnate alle nebulose a spirale come stime piuttosto azzardate; ma vi è motivo di credere che non possano essere del tutto fuorvianti e qui le accetteremo provvisoriamente.

Esaminando i dati raccolti sulle velocità radiali e sulle distanze, emerge una caratteristica molto interessante. Le velocità sono elevate, generalmente molto maggiori delle normali velocità stellari. Più le nebulose sono distanti, maggiori sono le velocità; i risultati sembrano concordare molto bene con una legge lineare di incremento, in cui la velocità è semplicemente proporzionale alla distanza. La caratteristica più sorprendente è che le galassie si stanno allontanando da noi quasi unanimemente.

Consideriamo in particolare l'ultimo risultato e analizziamo più dettagliatamente le evidenze osservative. La luce delle nebulose a spirale, essendo composta dalla luce di una grande varietà di stelle, non fornisce uno spettro valido per la misura. Per questa ragione e a causa della loro debolezza, le velocità dedotte sono imprecise secondo gli standard ordinari; ma, fatta eccezione per le nebulose più vicine, le velocità sono di per sé così enormi che l'errore di misura è relativamente irrilevante. Considerando i risultati così come pubblicati, la posizione attuale è che sono state misurate le velocità lungo la linea visuale di circa 90 galassie, e di queste solo cinque si stanno muovendo verso di noi. A prima vista potrebbe sembrare sbagliato ignorare la minoranza come insignificante. Ma le cinque eccezioni sono limitate alle nebulose più vicine, e le loro velocità di avvicinamento non sono elevate. Poiché il fenomeno dipende dalla distanza (l'effetto aumenta con la distanza), è naturale che si debba procedere a una distanza considerevole prima di riscontrarne un'intensità sufficiente a prevalere su tutti gli altri effetti (incluso l'errore di osservazione) e a manifestarsi in modo uniforme. Le cinque velocità in avvicinamento sono almeno in parte attribuibili all'uso di un riferimento standard inappropriato. Le velocità lungo la linea visuale, così come pubblicate, sono riferite al Sole; ma sarebbe più soddisfacente discutere le velocità relative al nostro sistema della Via Lattea nel suo complesso. È stato scoperto che il Sole sta percorrendo un'orbita attorno al centro del sistema della Via Lattea e ha una velocità orbitale compresa tra 200 e 300 chilometri al secondo. Quando correggiamo questo fenomeno in modo da ottenere le velocità riferite alla nostra galassia nel suo complesso, le velocità in avvicinamento si riducono o scompaiono. Credo che alla fine, dopo aver applicato tutte le correzioni, queste nebulose più vicine avranno piccole velocità in allontanamento; infatti, l'esistenza anche di una sola vera eccezione sarebbe difficile da spiegare.

Le velocità delle nebulose si ritengono elevate rispetto a quelle delle stelle ordinarie prese come metro di paragone. Per le stelle a noi vicine, la velocità individuale è in media di 10-50 km al secondo. Se la velocità supera i 100 km al secondo, la stella viene definita "fuggitiva". (Non includiamo qui il moto orbitale sopra menzionato attorno al centro della galassia, che è condiviso da tutte le stelle nelle vicinanze del sole.) La prima determinazione di Slipher delle velocità radiali di 40 nebulose includeva una dozzina con velocità da 800 a 1800 km al sec. Da allora, l'indagine è stata estesa a nebulose più deboli e distanti da M. L. Humason al Mount Wilson Observatory, e sono state rilevate velocità molto più elevate. Il record di velocità viene continuamente superato. L'attuale detentrica del trofeo è una nebulosa che fa parte di un debole ammasso nella costellazione dei Gemelli, che si sta allontanando a una velocità di 25.000 km al secondo (15.000 miglia al secondo). Questa è all'incirca la velocità di una particella alfa. La sua distanza è stimata in 150.000.000 di anni luce. Senza dubbio, una nebulosa più veloce e distante sarà stata annunciata prima che queste parole vengano pubblicate.

La semplice proporzionalità tra velocità e distanza fu scoperta per la prima volta da Hubble nel 1929. Questa legge è prevista anche dalla teoria della relatività. Secondo l'indagine originale di de Sitter, ci si sarebbe aspettata una velocità proporzionale al quadrato della distanza; ma da allora la teoria era stata meglio compresa, ed era già noto (anche se forse solo a pochi²) che la semplice proporzionalità alla distanza era il risultato teorico corretto.

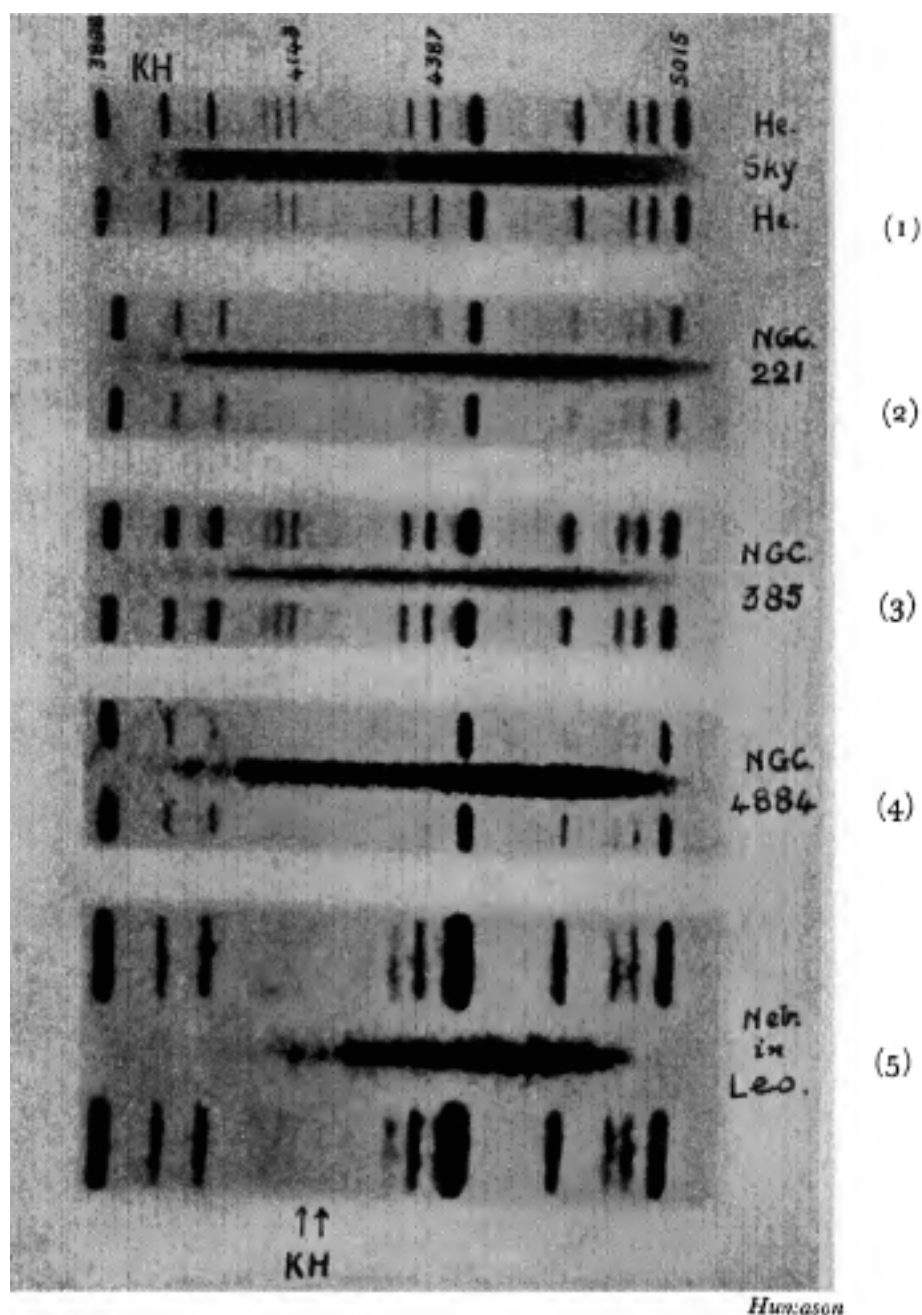
²Io stesso non ne ero a conoscenza nel 1929.

Secondo la più recente determinazione di Hubble, la velocità di recessione ammonta a 550 km al secondo per megaparsec.³ Vale a dire, una nebulosa a 1 megaparsec di distanza dovrebbe avere una velocità di 550 km al secondo a 10 megaparsec di distanza, 5500 km al secondo e così via.

Si sostiene che questa determinazione abbia una precisione del 20%, ma non credo che molti astronomi la pensino in modo così ottimistico. L'incertezza risiede quasi interamente nella scala delle distanze nebulari; ci sono anelli deboli nella lunga catena di collegamento tra queste vaste distanze e il nostro metro standard terrestre. Le correzioni suggerite tendono per lo più ad aumentare il risultato; e forse l'affermazione più corretta è che la velocità di recessione è probabilmente compresa tra 500 e 1000 km al secondo per megaparsec.

Esemplari degli spettri da cui si ricavano queste velocità radiali sono mostrati nella Tavola II. Nelle quattro fotografie inferiori, gli spettri delle nebulose sono le macchie nere a forma di siluro; sopra e sotto sono presenti spettri di confronto terrestri, utilizzati per posizionarli nel corretto allineamento verticale. Praticamente le uniche caratteristiche riconoscibili negli spettri nebulari sono le righe H e K, due interruzioni nella coda del siluro, dove si dissolve. Si noterà che queste interruzioni si spostano verso destra, cioè verso l'estremità rossa dello spettro, man mano che si scende lungo la lastra. È questo spostamento che viene misurato e che fornisce le velocità di allontanamento indicate alla base della lastra.

³1 megaparsec=3.26 milioni di anni luce.



Tav.2: Spettri di Nebulose mostranti righe spostate verso il rosso (a destra), interpretate come velocità di recessione.

(1) Cielo; velocità, nulla. (2) N.G.C. 221; velocità -185 km/sec. (3) N.G.C. 385; velocità + 4900 km/sec. (4) N.G.C. 1884; velocità, +6700 km/sec. (5) Nebulosa nel Leone; velocità. + 19700 km/sec.

III

Possiamo escludere le nebulose a spirale, che sono più o meno esitanti nell'individuare la loro futura fuoriuscita, tracciando una sfera di raggio di poco più di un milione di anni luce attorno alla nostra galassia. *Nella regione più lontana, ne sono state osservate più di 80 in movimento verso l'esterno, e non ne è stata trovata alcuna che prendesse il loro posto.*

La conclusione è che col passare del tempo tutte le nebulose a spirale si ritireranno a una distanza maggiore, abbandonando la parte di spazio che ora osserviamo; purtroppo, saranno fuori dalla portata dei nostri telescopi, a meno che la potenza telescopica non venga aumentata

di conseguenza. Ho scoperto che l'osservatore di nebulose dovrà raddoppiare l'apertura del suo telescopio ogni 1300 milioni di anni solo per tenere il passo con la loro recessione. Se abbiamo pensato che la razza umana ha ancora miliardi di anni davanti a sé per scoprire tutto ciò che può essere scoperto sull'universo, dobbiamo considerare il problema delle nebulose a spirale come urgente. Affrettiamoci a studiarle prima che scompaiano in lontananza!

L'unanimità con cui le galassie stanno fuggendo sembra quasi che nutrano una spiccata avversione nei nostri confronti. Ci chiediamo perché dovremmo essere evitati come se il nostro sistema fosse una piaga nell'universo. Ma questa è una conclusione troppo affrettata, e non c'è davvero motivo di pensare che l'animosità sia rivolta specificamente contro la nostra galassia. Se quest'aula si espandesse fino al doppio delle sue dimensioni attuali, separando tutti i posti in modo proporzionale, notereste che tutti si sono allontanati da te. Il tuo vicino che era a 60 cm di distanza ora si trova a 120 cm; l'uomo laggiù che era a 120 cm ora si trova a 240 cm. Non è te che stanno evitando; tutti stanno vivendo la stessa esperienza. In una dispersione o espansione generale, ogni individuo osserva che tutti gli altri si allontanano da lui. La legge di un'espansione generale uniforme è che ogni individuo si allontana da te a una velocità proporzionale alla sua distanza da te – esattamente la legge che osserviamo nei moti di allontanamento delle nebulose a spirale.⁴

Non considereremo quindi più il fenomeno come un allontanamento dalla nostra galassia. Si tratta piuttosto di una dispersione generale, senza un centro di riferimento specifico.

Non intendo insistere dogmaticamente su questi dati osservativi. È vero che esiste la possibilità di errori e interpretazioni errate. L'indagine è appena iniziata e le cose potrebbero apparire sotto una luce diversa man mano si procede. Ma se chiedete quale sia l'immagine dell'universo oggi nella mente di coloro che sono stati impegnati nell'esplorazione pratica delle sue caratteristiche su larga scala (uomini che difficilmente si lasceranno influenzare dalle idee di curvatura dello spazio o dall'invarianza di gauge del tensore di Riemann-Christoffel), vi ho già dato la loro risposta. La loro immagine è quella di un universo in espansione. Il supersistema delle galassie si disperde come una nuvola di fumo. A volte mi chiedo se non esista una scala di esistenza delle cose più ampia, in cui non sia altro che una nuvola di fumo.

Per il momento non faccio riferimento ad alcuna espansione dello spazio: non sto parlando di nulla di più recondito dell'espansione o della dispersione di un sistema materiale. A parte la vasta scala del fenomeno, l'espansione dell'universo è comune quanto l'espansione di un gas. Ciononostante, offre spunti di riflessione molto seri. Forse è in linea con il cambiamento universale che osserviamo intorno a noi che il tempo stabilisca un termine anche al più grande sistema di tutto; ma ciò che è sorprendente è la velocità con cui si scopre che si sta dissolvendo. Non cerchiamo l'immutabilità, ma ci aspettavamo certamente di trovare una permanenza maggiore di quella delle condizioni terrestri. Ma sembrerebbe quasi che la Terra si modifichi meno rapidamente dei cieli. Le galassie si separano raddoppiando le loro distanze originali in 1300 milioni di anni. Questo è solo nell'ordine del tempo geologico; è approssimativamente l'età attribuita alle rocce più antiche della crosta terrestre. Questo è un brusco risveglio dal nostro sogno di un'evoluzione lenta attraverso miliardi di anni.⁵

Una simile conclusione non va accettata alla leggera e coloro che hanno cercato un'interpretazione alternativa di ciò che sembra essere stato osservato hanno dimostrato solo la dovuta cautela. Se l'apparente recessione delle nebulose a spirale viene trattata come una scoperta isolata, è un filo troppo sottile a cui appendere conclusioni di vasta portata; possiamo solo enunciare i risultati grezzi dell'osservazione, contemplare senza troppa convinzione la sorprendente possibilità che suggeriscono e attendere ulteriori informazioni sull'argomento.

⁴Le nostre osservazioni determinano la velocità relativa di allontanamento di una nebulosa, ovvero la velocità con cui la sua distanza da noi aumenta. Non indicano se la nebulosa si sta allontanando da noi o se siamo noi ad allontanarci da essa.

⁵Vorrei ricordare ai lettori americani che il miliardo inglese equivale a un milione di milioni.

Se questa non è la mia attitudine, è perché il moto delle nebulose remote non mi si presenta come una scoperta isolata. Seguendo de Sitter, attendo da quindici anni questi risultati osservativi per vedere fino a che punto sarebbero stati in linea con la teoria fisica e ne avrebbero contribuito allo sviluppo, la quale, sebbene inizialmente solo suggestiva, è diventata molto più convincente nel corso degli anni. Dopo la famosa estensione della teoria della relatività da parte del Prof. Weyl, mi sono convinto che la scala della struttura di atomi ed elettroni sia determinata dallo stesso agente fisico coinvolto nella previsione di de Sitter. Quindi, la speranza di un progresso di tipo veramente fondamentale nella nostra comprensione di elettroni, protoni e quanti è legata a questa indagine sui moti delle galassie remote. Pertanto, quando il Dr. Hubble mi consegna una chiave che ha raccolto nello spazio intergalattico, non sono tra coloro che la girano e la rigirano senza riuscire a decidere dall'aspetto se sia di metallo buono o di metallo vile. La domanda per me è: aprirà la porta?

Se le velocità radiali osservate vengono accettate come genuine, non si può eludere la conclusione che le nebulose si stanno disperdendo rapidamente. Le velocità sono la prova diretta di un'agitazione che (secondo le idee usuali sul tasso di cambiamento evolutivo) è in contrasto con il carattere del nostro vecchio e compassato universo. Pertanto, l'unico modo per evitare un grande sconvolgimento di idee sarebbe quello di spiegare queste velocità radiali come spurie. Ciò che si osserva in realtà è uno spostamento dello spettro della nebulosa verso il rosso. Tale spostamento è comunemente causato dall'effetto Doppler di una velocità in allontanamento, allo stesso modo in cui il tono di un fischio in allontanamento si abbassa; ma si possono immaginare altre cause. L'arrossamento indica una frequenza inferiore delle onde luminose e (in accordo con la teoria quantistica) un'energia inferiore, cosicché se per qualsiasi causa un quanto di luce perde parte della sua energia nel viaggio per raggiungerci, l'arrossamento può essere spiegato senza presupporre alcuna velocità della sorgente. Ad esempio, la luce che ci giunge da un atomo del sole consuma parte della sua energia per sfuggire all'attrazione gravitazionale del sole e di conseguenza diventa leggermente rossa rispetto alla luce di un atomo terrestre che non subisce questa perdita; questo è il noto spostamento verso il rosso previsto da Einstein.

Per un certo verso, questa ipotesi della perdita di energia della luce nebulare è interessante. Se la perdita si verifica durante il passaggio della luce dalla nebulosa all'osservatore, dovremmo aspettarci che sia proporzionale alla distanza; quindi lo spostamento verso il rosso, erroneamente interpretato come una velocità, dovrebbe essere proporzionale alla distanza, che è la legge effettivamente trovata. Ma d'altra parte non c'è nulla nella teoria attuale della luce (ondulatoria o quantistica) che giustifichi l'ipotesi di una tale perdita. Non possiamo escludere, senza eccessivo dogmatismo, la possibilità di modifiche della teoria attuale. La luce è una cosa strana – più strana di quanto immaginassimo vent'anni fa – ma sarei sorpreso se fosse così strana.

Una teoria avanzata dal Dr. Zwicky, secondo cui la luce, per effetto gravitazionale, cede la sua energia alle particelle materiali sparse nello spazio intergalattico che incontra nel suo percorso, attirò a suo tempo l'attenzione. Ma l'accordo numerico che si supponeva supportasse la sua teoria si rivelò fallace, e l'ipotesi appare decisamente insostenibile.

Penso quindi che non abbiamo scuse per dubitare della genuinità delle velocità osservate, se non nella misura in cui condividono l'incertezza generale che circonda tutti i nostri tentativi di sondare i segreti della natura.

IV

Ora passiamo alla teoria.

Uno scienziato comunemente afferma di basare le proprie convinzioni sulle osservazioni, non sulle teorie. Le teorie, si dice, sono utili per suggerire nuove idee e nuove linee di indagine allo sperimentatore; ma "i fatti concreti" sono l'unica base adeguata per la conclusione. Non ho mai incontrato nessuno che metta in pratica questa professione, e certamente non lo sperimentatore

testardo, che è più influenzato dalle sue teorie perché è meno abituato a esaminarle attentamente. L'osservazione non è sufficiente. Non crediamo ai nostri occhi se non siamo prima convinti che ciò che ci sembra di vedere sia credibile.

È meglio ammettere francamente che la teoria ha, e ha il diritto di avere, un ruolo importante nel determinare la convinzione. Per il lettore deciso a rifuggire la teoria e ad ammettere solo fatti osservativi definiti, tutti i libri di astronomia sono banditi. *Non esistono fatti puramente osservativi sui corpi celesti*. Le misure astronomiche riguardano, senza eccezioni, fenomeni che si verificano in un osservatorio o in una stazione terrestre; è solo attraverso la teoria che si traducono in conoscenza di un universo esterno.

Quando un osservatore riferisce di aver scoperto una nuova stella in una certa posizione, probabilmente non si rende conto di andare oltre i semplici dati di osservazione. Ma non intende che il suo annuncio venga interpretato come una descrizione di certi fenomeni verificatisi nel suo osservatorio: intende dire di aver localizzato un corpo celeste in una direzione precisa nello spazio interstellare. Egli considera la posizione come un fatto osservativo, quindi con un fondamento più solido rispetto alle inferenze teoriche dedotte dalla teoria di Einstein. Dobbiamo fargli presente che il suo presunto "fatto", lungi dall'essere puramente osservativo, è in realtà un'inferenza basata sulla teoria di Einstein, a meno che, in effetti, non l'abbia basata su una teoria precedente, ancora più lontana dai fatti osservativi. L'osservatore ha dato un'interpretazione teorica alle sue misure assumendo, per ragioni teoriche, che la luce viaggi attraverso lo spazio interstellare approssimativamente in linea retta. Forse risponderà che, nell'assumere la propagazione rettilinea della luce, non si basa su alcuna teoria, ma su un fatto accertato dall'esperimento diretto. Ciò solleva la questione di quanto un esperimento condotto in condizioni terrestri possa essere estrapolato per applicarlo allo spazio interstellare. Sicuramente una teoria ragionata è preferibile a un'estrapolazione cieca. Ma in effetti l'osservatore si sbaglia di grosso nel supporre che la propagazione rettilinea dei raggi di luce presupposta in astronomia sia stata verificata da un esperimento terrestre. Se i raggi nello spazio interstellare non fossero più diritti di quelli sulla Terra,⁶ la direzione in cui si osserva una stella non sarebbe indicativa della sua posizione effettiva. La luce, infatti, si avvolgerebbe su se stessa e tornerebbe indietro prima di percorrere la distanza che la separa dalla stella più vicina.

La nostra garanzia per concludere che il corpo celeste si trova pressoché nella direzione in cui viene visto è la teoria di Einstein, che determina la deviazione della luce da una linea retta. Unita ad altre deduzioni teoriche sulla densità della materia nello spazio interstellare, ci permette di concludere che la deviazione in questo caso è irrilevante. Quindi, se siamo disposti a usare sia i fatti che la teoria come base per la nostra convinzione, possiamo accettare l'annuncio dell'osservatore; ma non si tratta di un "fatto concreto di osservazione". Sebbene si tratti di un punto di minore importanza, possiamo anche insistere sul fatto che la teoria in questione sia quella di Einstein. Esisteva una teoria precedente secondo cui la luce nello spazio vuoto viaggia in linea retta in tutte le circostanze; ma poiché questa teoria si è rivelata falsa sperimentalmente, difficilmente può essere la base della conclusione del nostro osservatore. Forse, tuttavia, l'osservatore è uno di quelli che non attribuisce importanza alle osservazioni dell'eclissi come causa della deflessione della luce, o che le ritiene insufficienti per abbandonare la vecchia teoria. Se così fosse, egli illustra la mia affermazione secondo cui, per lo sperimentatore ostinato, la base della convinzione è spesso la teoria piuttosto che l'osservazione.

Il punto è che in astronomia non è questione se dobbiamo basarci sull'osservazione o sulla teoria. I cosiddetti fatti sono in ogni caso interpretazioni teoriche delle osservazioni. L'unica domanda è: per questa interpretazione dovremmo utilizzare tutte le risorse della teoria moderna? Da parte mia, non vedo ragioni più valide per preferire le teorie di cinquant'anni fa di quante ne avrei per preferire i dati osservativi di cinquant'anni fa.

⁶Sono deviati dal campo gravitazionale terrestre.

Passando ora al lato più teorico del problema dell'universo in espansione, non credo che dovremmo avere la sensazione di passare da un terreno solido all'insicurezza. Forse siamo un po' più sicuri, perché non dipendiamo più dall'interpretazione di un solo tipo di osservazione; e la nostra teoria nasce dall'unione di diverse linee di ricerca fisica. Non prometto, tuttavia, la sicurezza. Un esploratore è geloso della propria reputazione di persona prudente, ma non potrà mai aspirare alla quintessenza della cautela dimostrata da chi si trincerava in casa.

V

Nel 1915, con la sua teoria della relatività generale, Einstein aveva riorganizzato gran parte del campo della fisica. La teoria comprendeva la *fisica dei campi*, che includeva la trattazione di materia, elettricità, radiazione, energia, ecc., sulla scala macroscopica ordinaria percepibile dai nostri sensi, ma non i fenomeni derivanti dalla minuta suddivisione in atomi, elettroni e quanti. Per lo studio della struttura microscopica, si stava sviluppando un'altra grande teoria: la teoria quantistica. All'epoca era molto indietro, e anche oggi non ha raggiunto la chiarezza e la perfezione logica della teoria della relatività. È noto che le due teorie si incontreranno e che alla fine dovranno fondersi in un'unica teoria completa. Il primo ponte tra le due fu creato dal Prof. P. A. M. Dirac nel 1928 con la sua equazione d'onda relativistica per un elettrone. Spero di dimostrare nell'ultimo capitolo che la recessione delle nebulose a spirale ci conduce al confine tra le due teorie, dove numerosi problemi interessanti attendono di essere risolti. Al momento, tuttavia, ci occupiamo solo della sua relazione con la teoria della relatività.

Il risultato centrale della teoria di Einstein fu la sua legge di gravitazione universale, generalmente espressa nella forma $G_{\mu\nu} = 0$, che ha il merito della brevità se non della chiarezza. Naturalmente sentiamo parlare soprattutto di quei rari fenomeni in cui la legge di Einstein fornisce risultati sensibilmente diversi dalla legge di Newton; ma è importante ricordare che, per scopi pratici ordinari, le due leggi conducono alla stessa conclusione. Quindi, se prendiamo $G_{\mu\nu} = 0$ come la legge che governa i moti delle nebulose a spirale, è come se esse esercitassero l'una sull'altra la comune attrazione newtoniana, che varia con l'inverso del quadrato della loro distanza. La legge non chiarisce il motivo per cui le nebulose si stiano allontanando da noi e l'una dall'altra. La tendenza sarebbe piuttosto quella di un intero sistema a collassare, sebbene questa tendenza al collasso possa essere contrastata, come avviene, ad esempio, nel sistema solare.

Circa un anno dopo, Einstein apportò una leggera modifica alla sua legge per risolvere alcune difficoltà incontrate nella sua teoria. C'era solo un punto in cui la teoria non sembrava funzionare correttamente, ed era l'infinito. Credo che Einstein abbia dimostrato la sua grandezza nel modo semplice e drastico in cui ha eliminato le difficoltà all'infinito. Ha abolito l'infinito. Modificò leggermente le sue equazioni in modo da far sì che lo spazio a grandi distanze si curvasse fino a chiudersi. Così, se nello spazio di Einstein si continua a procedere in una direzione, non si arriva all'infinito; ci si ritrova di nuovo al punto di partenza. Poiché non c'era più alcun infinito, non potevano esserci difficoltà all'infinito. q.e.d.

Tuttavia, al momento non ci occupiamo di questo nuovo tipo di spazio. Lo menziono qui solo perché voglio parlare della modifica apportata da Einstein alla sua legge di gravitazione. La legge modificata si scrive $G_{\mu\nu} = \lambda g_{\mu\nu}$, e contiene una costante naturale λ , chiamata *costante cosmologica*. Il termine $\lambda g_{\mu\nu}$ è chiamato *termine cosmologico*. La costante è così piccola che nelle normali applicazioni al sistema solare, ecc., la poniamo uguale a zero, tornando così alla legge originale $G_{\mu\nu} = 0$. Ma per quanto piccola possa essere λ , la legge modificata ci presenta il fenomeno della gravitazione sotto una nuova luce e ci ha notevolmente aiutato a comprenderne il reale significato; inoltre, abbiamo ora motivo di pensare che λ non sia così piccola da essere completamente al di là dell'osservazione. La natura dell'alterazione può essere enunciata come segue: la legge iniziale affermava che una certa caratteristica geometrica ($G_{\mu\nu}$)

dello spazio vuoto è sempre zero; la legge rivista afferma che è sempre in rapporto costante con un'altra caratteristica geometrica ($g_{\mu\nu}$). Possiamo dire che la prima forma della legge dissocia completamente le due caratteristiche, rendendone una nulla e quindi indipendente dall'altra; la seconda forma le collega intimamente. I geometri possono inventare spazi che non possiedono nessuna di queste proprietà; ma lo spazio reale, misurato mediante misure fisiche, non è di natura così illimitata.

Abbiamo già detto che il termine iniziale nella legge dà origine a quella che è praticamente l'attrazione newtoniana tra oggetti materiali. Si scopre analogamente che il termine aggiunto $\lambda g_{\mu\nu}$ dà origine a una repulsione direttamente proporzionale alla distanza. Distanza da cosa? Distanza da un qualsiasi punto in particolare, distanza dall'osservatore. È una forza dispersiva come quella che ho immaginato disperdesse il pubblico in aula. Ognuno pensa che sia diretta lontano da sé. Possiamo dire che la repulsione non ha centro, o che ogni punto è un centro di repulsione.

Così, nel modificare la sua legge di gravitazione per soddisfare determinate condizioni ideali, Einstein aggiunse quasi inavvertitamente una forza di diffusione repulsiva all'attrazione newtoniana dei corpi. Chiamiamo questa forza *repulsione cosmologica*, poiché dipende ed è proporzionale alla costante cosmologica. È del tutto impercettibile all'interno del sistema solare o tra il sole e le stelle vicine. Ma poiché aumenta proporzionalmente alla distanza, dobbiamo solo andare abbastanza lontano per trovarla apprezzabile, poi forte e infine travolgente. Nell'osservazione pratica la distanza più lontana che abbiamo finora raggiunto è di 150 milioni di anni luce. Ben entro quella distanza troviamo che gli oggetti celesti si disperdono come sotto una forza dispersiva. Provvisoriamente concludiamo che qui la repulsione cosmica è diventata dominante ed è responsabile della dispersione.

Non abbiamo prove *dirette* di un'accelerazione verso l'esterno delle nebulose, poiché osserviamo solo le velocità. Ma è ragionevole supporre che le nebulose, sia individualmente che collettivamente, seguano la regola secondo cui maggiore è la distanza, più rapida è la recessione. In tal caso, la velocità aumenta con l'allontanamento della nebulosa, determinando un'accelerazione verso l'esterno. Pertanto, dai moti osservati, possiamo procedere a ritroso e calcolare la forza repulsiva, determinando così osservativamente la costante cosmologica λ .

Molto dipende dalla reale giustificazione di Einstein nel modificare la sua legge di gravitazione, introducendo questa repulsione cosmologica. La sua motivazione originale non era molto convincente e per alcuni anni il termine cosmologico fu considerato un'aggiunta fantasiosa piuttosto che parte integrante della teoria. Einstein è stato un critico severo della propria teoria quanto chiunque altro, e non vi ha aderito invariabilmente. Ma la costante cosmologica gode ora di una posizione consolidata grazie a un grande progresso compiuto dal Prof. Weyl, nella cui teoria gioca un ruolo essenziale.⁷ Non solo unifica i campi gravitazionale ed elettromagnetico, ma rende la teoria della gravitazione e la sua relazione con la misura dello spazio-tempo molto più illuminanti, e persino evidenti, al punto che un ritorno alla visione precedente è impensabile. Preferirei tornare alla teoria newtoniana piuttosto che abbandonare la costante cosmologica.

VI.

Rivediamo ora la situazione. Secondo la teoria della relatività, l'intero campo di forza contiene, oltre alla normale attrazione newtoniana, una forza repulsiva (di diffusione) che varia direttamente con la distanza. È noto che la legge di Einstein differisce leggermente da quella di Newton, dando ad esempio un effetto aggiuntivo che è stato rilevato nell'orbita del pianeta Mercurio, in rapido movimento; la repulsione cosmica è un altro punto di differenza tra le due, rilevabile

⁷"Il fattore cosmologico che Einstein aggiunse in seguito alla sua teoria fa parte della nostra fin dall'inizio." *Raum. Zeit. Materie*, p. 297 (edizione inglese).

solo nei moti di oggetti remoti. Da un punto di vista teorico, credo che non ci siano più dubbi sulla repulsione cosmologica di quanti ce ne siano sulla forza che perturba Mercurio; tuttavia, non ammette una verifica osservativa così decisiva. Per quanto riguarda Mercurio, la previsione teorica era quantitativa, ma la teoria della relatività non indica alcuna entità specifica per la repulsione cosmologica. Una verifica meramente qualitativa non è mai molto conclusiva.

Tuttavia, per quanto ne sappiamo, il test è soddisfacente. Dalle osservazioni, riscontriamo una dispersione del sistema di galassie tale da essere causata dalla repulsione prevista. I moti sono estremamente ampi e l'effetto risalta nettamente al di sopra di ogni minima irregolarità. La teoria supera quindi il primo ostacolo con un certo clamore; se vincerà la gara è un'altra questione. Sebbene il test non sia quantitativo, è di portata più ampia di quanto a volte si supponga. Esistono solo due modi per spiegare le grandi velocità di allontanamento delle nebulose, che sono state prodotte: 1) da una forza diretta verso l'esterno, come supponiamo qui, oppure (2) perché velocità elevate o maggiori sono esistite dall'inizio dell'attuale ordine delle cose.⁸ Sono state proposte diverse spiegazioni contrastanti della recessione delle nebulose, che non la accettano come prova di una forza repulsiva. Queste adottano necessariamente la seconda alternativa e postulano che le grandi velocità siano esistite fin dall'inizio. Questo potrebbe essere vero; ma difficilmente può essere considerato una spiegazione delle grandi velocità.

La nostra migliore speranza di ulteriori progressi è scoprire un ulteriore test per la teoria, se possibile un test quantitativo rigoroso. Vogliamo prevedere l'entità effettiva della repulsione cosmologica e verificare se i moti osservati delle nebulose confermano il valore previsto. La teoria della relatività da sola non può farlo, ma quando la relatività si combina con la meccanica ondulatoria, la previsione quantitativa sembra possibile. Questo sviluppo è spiegato nel Capitolo IV.

Finora abbiamo trattato un argomento piuttosto semplice. A parte le vaste dimensioni in gioco, non c'è nulla che metta particolarmente a dura prova l'immaginazione. Nel prossimo capitolo presenterò una visione piuttosto diversa, che coinvolge concetti complessi. Immagino che il lettore dica: "Perché rovinare tutto, proprio quando stavo iniziando a capire di cosa si tratta?"

Se introduco una prospettiva diversa è perché intendo trattare regioni dell'universo che vanno oltre quelle finora considerate. Il presente capitolo si occupa principalmente della regione effettivamente esplorata, fino a 150 milioni di anni luce di distanza. Se le galassie dovessero finire lì, non sarebbe necessario approfondire ulteriormente i punti discussi nel prossimo capitolo; sarebbero scarsamente rilevanti e la sua prospettiva risulterebbe inutilmente pedante. Ma non vi è alcun segno che il sistema delle galassie stia giungendo alla fine, e presumibilmente si estende ben oltre i 150 milioni di anni luce. Potrebbe estendersi, diciamo, fino a cinque volte quella distanza senza alcuna novità significativa; ma se dovessimo andare molto oltre, ci troveremmo in difficoltà. La velocità di recessione appropriata inizierebbe ad avvicinarsi alla velocità della luce, un punto che evidentemente richiede un'analisi approfondita. Abbiamo una forza di repulsione cosmica, che aumenta con la distanza, e che è già piuttosto potente; se ci spostiamo a distanze molto maggiori, alla fine qualcosa cederà; solo Einstein ha preso la precauzione di chiudere l'universo per impedirci di andare troppo lontano.

L'obiettivo dello sviluppo seguente è affrontare le questioni che sorgono riguardo alla possibile estensione del sistema delle galassie oltre la regione attualmente esplorata. Considereremo l'estrapolazione nel tempo e nello spazio e discuteremo la storia dell'evoluzione del sistema.

Qual è lo scopo di compiere queste rischiose estrapolazioni a regioni dello spazio e del tempo remote dalla nostra esperienza pratica? Potrebbe essere una risposta sufficiente dire che siamo

⁸Per completezza, dobbiamo aggiungere la possibile ipotesi che il sistema un tempo si estendesse molto più di ora, che sia collassato e ora sia in fase di rimbalzo. Questo consente che le elevate velocità siano state prodotte da una forza diretta verso l'interno, trasformandosi le velocità interne in velocità esterne attraverso il passaggio attraverso il centro. Per quanto ne so, questa ipotesi non è sostenuta da nessuno. Non sembra in grado di spiegare la distribuzione di velocità che osserviamo.

esploratori. Ma c'è un'altra e più urgente ragione. L'uomo che per la prima volta vede un aereo passare sopra la sua testa si chiede senza dubbio come vada. Non credo che possa essere accusato di eccentricità se si chiede anche *come si fermi*. È vero che non vede alcun segno di arresto; sta mentalmente estrapolando il volo oltre la distanza visibile. Non può essere sicuro della sua estrapolazione; al di fuori del suo campo visivo potrebbero esserci condizioni di cui non è a conoscenza, che fermeranno il volo in un modo diverso da quello da lui ipotizzato. Ma avrà molta più fiducia nelle sue conclusioni sul meccanismo dell'aereo se spiegherà il volo dall'inizio alla fine senza postulare qualche intervento sconosciuto. A prima vista sembra un programma ragionevole per la scienza riordinare la regione dello spazio e del tempo di cui abbiamo una certa esperienza e non teorizzare su ciò che si trova al di là, ma il pericolo di una tale limitazione è che tale riordino potrebbe consistere nel prendere le difficoltà e le inspiegabilità e scaricarle oltre confine invece di risolverle davvero.

Abbiamo visto che esiste una forza di repulsione cosmica che aumenta con l'aumentare della distanza da noi. Alla massima distanza finora esplorata, continua ad aumentare. La teoria precedente spiega come funziona. Ma desideriamo ancora capire come si arresta.

2 SPAZIO SFERICO

Io potrei viver confinato in un guscio di noce, e tuttavia ritenermi re d'uno spazio infinito.

Amleto

I

Quando un fisico fa riferimento alla curvatura dello spazio, cade immediatamente nel sospetto di parlare di metafisica. Eppure lo spazio è una caratteristica importante del mondo fisico; e la misura dello spazio – lunghezze, distanze, volumi – fa parte della normale attività di un fisico. In effetti, è raro trovare un'osservazione fisica quantitativa che non si riduca in ultima analisi alla misura delle distanze. È sorprendente che l'indagine precisa dello spazio fisico abbia portato alla luce una nuova proprietà che la nostra rozza percezione sensoriale dello spazio ha trascurato?

La curvatura dello spazio è una caratteristica puramente fisica che possiamo rilevare in una regione mediante opportuni esperimenti e misurazioni, proprio come possiamo rilevare un campo magnetico. Nello spazio curvo le distanze e gli angoli misurati si combinano in un modo diverso da quello a noi familiare nella geometria dello spazio piatto; ad esempio, la somma dei tre angoli di un triangolo non dà come risultato due angoli retti. Sembra piuttosto impegnativo per il fisico, che misura coscienziosamente i tre angoli di un triangolo, sentirsi dire che se la somma è pari a due angoli retti il suo lavoro è fisica corretta, ma se si discosta anche di poco si sta perdendo nei meandri della metafisica.

Nell'usare il termine "curvatura" per questa caratteristica dello spazio, non vi è alcuna implicazione metafisica. La nomenclatura è quella dei geometri puri che avevano già immaginato e descritto spazi con questa caratteristica prima che se ne sospettasse l'effettiva esistenza fisica.

In primo luogo, quindi, la curvatura deve essere considerata il nome tecnico di una proprietà scoperta con l'osservazione. Ci si potrebbe chiedere: quanto "curvatura", come termine tecnico-scientifico, corrisponde al significato familiare della parola? Credo che la corrispondenza sia tanto stretta quanto quella di altri termini familiari, come Lavoro, Energia, Probabilità, che hanno acquisito un significato specialistico in ambito scientifico.

Abbiamo familiarità con la curvatura delle superfici; è una proprietà che possiamo conferire piegando e deformando una superficie piana. Se immaginiamo che una proprietà analoga venga conferita allo spazio (tridimensionale) piegandolo e deformandolo, dobbiamo immaginare una dimensione o una direzione extra in cui lo spazio viene curvato. Tuttavia, nulla suggerisce che la dimensione extra sia altro che una costruzione fittizia, utile per rappresentare la proprietà in modo pittorico, e quindi mostrare la sua analogia matematica con la proprietà riscontrabile nelle superfici. La relazione tra l'immagine e la realtà può forse essere meglio espressa come segue. In natura incontriamo superfici curve e spazi curvi, ovvero superfici e spazi che presentano la proprietà osservativa che è stata tecnicamente chiamata "curvatura". Nel caso di una superficie, possiamo noi stessi rimuovere questa proprietà piegandola e deformandola; possiamo quindi descrivere convenientemente la proprietà con l'operazione (piegatura o curvatura) che dovremmo eseguire per rimuoverla. Nel caso di uno spazio, non possiamo rimuovere da soli la proprietà; non possiamo alterare artificialmente lo spazio come alteriamo le superfici. Tuttavia, possiamo descrivere convenientemente la proprietà con l'operazione immaginaria di piegare o curvare, che la eliminerebbe se fosse possibile. E per usare questo metodo di descrizione, viene introdotta una dimensione fittizia che renderebbe possibile l'operazione.

Pertanto, se non ci accontentiamo di accettare la curvatura come una caratteristica fisica tecnica, ma chiediamo un'immagine che offra una visione più completa, dobbiamo immaginare più di tre dimensioni. Infatti, è solo in condizioni semplici e simmetriche che una quarta dimensione è sufficiente e l'immagine generale richiede sei dimensioni (o, quando estendiamo le stesse idee dallo spazio allo spazio-tempo, sono necessarie dieci dimensioni). Questo è un grave sforzo per le nostre capacità concettuali. Ma direi al lettore di non preoccuparsi eccessivamente di questa immagine (è un'opzione di riserva per un uso molto occasionale). Normalmente, quando si fa riferimento alla curvatura dello spazio, immaginatela come si immagina un campo magnetico. Probabilmente non vi immaginate un campo magnetico; è qualcosa (riconoscibile da certi test) che usate nella vostra auto o nel vostro apparecchio wireless, e tutto ciò che serve è un nome riconosciuto per definirlo. Allo stesso modo; la curvatura spaziale è qualcosa che si trova in natura e con cui stiamo iniziando ad avere familiarità, riconoscibile da certi test, per la quale di solito non abbiamo bisogno di un'immagine ma di un nome.

A volte si dice che la differenza tra un matematico e un non matematico è che il primo riesce a immaginare le cose in quattro dimensioni. Immagino che ci sia un fondo di verità in questo, perché dopo aver lavorato per un po' di tempo in quattro o più dimensioni, si comincia involontariamente a immaginarle in un certo senso. Ma va aggiunto che, sebbene il matematico visualizzi quattro dimensioni, la sua immagine è errata in dettagli essenziali – almeno la mia lo è. (Vedo il nostro universo sferico come una bolla a quattro dimensioni; lunghezza, larghezza e spessore sono tutti contenuti nell'involucro della bolla). Posso immaginare questa bolla che ruota? Certo che sì. Fisso una direzione nelle quattro dimensioni come asse e vedo le altre tre dimensioni ruotare attorno ad essa. Forse non ne vedo mai più di due alla volta; ma il pensiero vola rapidamente da una coppia all'altra, così che tutte e tre sembrano impegnate a fondo. Riesci a immaginarlo così? Se fallisci, va bene lo stesso. Perché sappiamo per analisi che una bolla in quattro dimensioni non ruota affatto in quel modo. Tre dimensioni non possono ruotare attorno a una quarta. Devono ruotare due attorno a due, ovvero la bolla non ruota attorno a un asse lineare, ma attorno a un piano. So che è vero, ma non riesco a visualizzarlo.

Inutile dire che le nostre conclusioni scientifiche sulla curvatura dello spazio non derivano da una falsa rappresentazione involontaria, ma dall'elaborazione algebrica di formule che, sebbene possano essere in una certa misura illustrate da tali rappresentazioni, sono indipendenti da esse. In effetti, la concezione pittorica della curvatura dello spazio cade tra due sgabelli: è troppo astrusa per fornire molta illuminazione a chi non è un matematico, mentre il matematico praticamente la ignora e si affida a metodi algebrici più affidabili e potenti per indagare questa proprietà dello spazio fisico.

Dopo aver così tanto denigrato l'immagine del nostro spazio tridimensionale distorta dalla curvatura in direzioni fittizie, devo ora menzionare un'applicazione in cui essa è utile. L'analisi ci assicura che sotto un aspetto importante l'immagine non è fuorviante. La curvatura, o curvatura circolare dello spazio, può essere sufficiente a creare uno "spazio chiuso" in cui è impossibile procedere all'infinito allontanandosi sempre di più dal punto di partenza. Lo spazio chiuso differisce da uno spazio aperto infinito nello stesso modo in cui la superficie di una sfera differisce da una superficie piana infinita.

II.

Possiamo dire della superficie di una sfera (1) che è una superficie curva, che è una superficie chiusa. Allo stesso modo (2) dobbiamo contemplare due possibili caratteristiche del nostro spazio tridimensionale attuale: *curvatura* e *chiusura*. Una superficie o uno spazio chiuso deve necessariamente essere curvo, ma una superficie o uno spazio curvo non deve essere necessariamente chiuso. Pertanto, l'idea di chiusura va ben oltre l'idea di curvatura; e, ad esempio, non

fu contemplata nella prima presentazione della teoria della relatività generale di Einstein, che introdusse lo spazio curvo.

Nell'applicazione ordinaria della teoria di Einstein al sistema solare e ad altri sistemi su scala simile, la curvatura è minima e si riduce solo a una leggerissima increspatura o curvatura. La distorsione è locale e non influisce sul carattere generale dello spazio nel suo complesso. Il nostro attuale argomento ci porta molto più lontano e dobbiamo applicare la teoria al grande supersistema delle galassie. Le piccole distorsioni locali hanno ora un effetto cumulativo. Le nuove indagini suggeriscono che la curvatura porti effettivamente a una completa curvatura e chiusura dello spazio, rendendolo un dominio di estensione finita. Si vedrà che questo va oltre la proposta originaria e le prove a suo favore non sono affatto così solide. Ma ogni nuova esplorazione attraversa una fase di insicurezza.

Ai fini della discussione, questo spazio chiuso è generalmente considerato sferico. La presenza di materia causerà irregolarità locali; la scala che stiamo ora contemplando è così vasta che a malapena notiamo le stelle, ma le galassie modificano la curvatura localmente¹ e quindi deformano la sfera. Lo spazio sferico ideale può essere paragonato al geoide utilizzato per rappresentare la figura media della Terra, con le montagne e le coste oceaniche smussate. Potrebbe tuttavia darsi che l'irregolarità sia molto maggiore e che l'universo abbia una forma a pera o a salsiccia; i 150 milioni di anni luce su cui si estende la nostra indagine osservativa rappresentano solo una piccola frazione dell'intera estensione dello spazio, quindi non siamo in grado di formulare ipotesi sulla forma effettiva. Ma possiamo usare il mondo sferico come modello tipico, che illustrerà le peculiarità derivanti dalla chiusura dello spazio.

Nello spazio sferico, se procediamo continuamente nella stessa direzione, alla fine raggiungiamo nuovamente il punto di partenza, avendo "girato il mondo". La stessa cosa accade a un viaggiatore sulla superficie terrestre che procede dritto senza orientarsi né a sinistra né a destra. Pertanto, la chiusura dello spazio può essere considerata analoga alla chiusura di una superficie e, in generale, ha la stessa connessione con la curvatura. L'intera area della superficie terrestre è finita, e così anche l'intero volume dello spazio sferico è finito. È "finito ma illimitato"; non arriviamo mai a un confine, ma a causa della proprietà di rientro non possiamo mai trovarci a più di una distanza limitata dal nostro punto di partenza.

Nella teoria che descriverò, le galassie dovrebbero essere distribuite in uno spazio chiuso di questo tipo. Poiché non esiste alcun confine, né alcun punto in cui possiamo entrare o uscire dallo spazio chiuso, ciò costituisce un universo finito e autosufficiente.

Forse la caratteristica più elementare di un universo sferico è che a grandi distanze da noi non c'è tutto lo spazio che avremmo dovuto prevedere. Sulla superficie terrestre, l'area entro 2 miglia da Charing Cross è quasi 4 volte l'area entro 1 miglio, ma a una distanza di, diciamo, 4000 miglia questa semplice progressione si è interrotta bruscamente. Allo stesso modo, nell'universo il volume, o quantità di spazio, entro 2 anni luce dal sole è quasi 8 volte il volume entro 1 anno luce; ma il volume entro 4 miliardi di anni luce dal sole è considerevolmente inferiore a 8 volte il volume entro 2 miliardi di anni luce. Come avremmo potuto aspettarci di sapere quanto spazio ci sarebbe stato là fuori senza esaminare l'universo per vedere? È un'esperienza abbastanza comune che regole semplici, che valgono abbastanza bene per un numero limitato di prove, falliscano se spinte troppo oltre. Non c'è gioco di parole in queste affermazioni; il significato di distanza e volume nell'osservazione della Terra o del cielo non è ambiguo; e sebbene vi siano difficoltà pratiche nel misurare queste vaste distanze e volumi, non vi è incertezza riguardo all'ideale a cui si mira. Non sostengo che abbiamo verificato con misure dirette la diminuzione

¹La legge di gravitazione di Einstein collega le varie componenti della curvatura dello spazio alla densità, alla quantità di moto e allo stress della materia che lo occupa. Vorrei ricordare ancora una volta al lettore che la curvatura dello spazio è il nome tecnico di una proprietà fisica osservabile, quindi non c'è nulla di metafisico nell'idea che la materia produca curvatura più di quanto non vi sia di metafisico in una calamita che produce un campo magnetico.

di volume a grandi distanze; come molte conclusioni scientifiche, si tratta di un'inferenza molto indiretta. Ma almeno vi si è giunti esaminando l'universo; e, per quanto incerta sia la deduzione, ha più peso di un giudizio formulato senza considerare affatto l'universo.

Molta confusione di pensiero è stata causata dall'affermazione così spesso ripetuta che possiamo usare qualsiasi tipo di spazio desideriamo (euclideo o non euclideo) per rappresentare i fenomeni fisici, tanto che è impossibile confutare lo spazio euclideo osservativamente. Possiamo rappresentare graficamente (o travisare) le cose a nostro piacimento. È possibile rappresentare la superficie curva della Terra in uno spazio piatto, come, ad esempio, nelle mappe basate sulla proiezione di Mercatore; ma ciò non rende privi di significato i lavori dei geodeti sulla vera figura della Terra. Chi *su questa base* difende la credenza in un universo piatto deve anche difendere la credenza in una Terra piatta.

III

C'è un'impressione diffusa, alimentata da alcuni autori scientifici, che la considerazione dello spazio sferico in questo argomento sia una mistificazione inutile e che potremmo dire tutto ciò che vogliamo sul sistema in espansione delle galassie senza usare un'altra concezione se non quella dello spazio infinito euclideo. Si suggerisce che parlare di espansione dello spazio sia mera metafisica e non abbia alcuna reale rilevanza per l'espansione dell'universo materiale in sé, che è comune e facilmente comprensibile. Questa è un'idea errata. Il fenomeno generale dell'espansione, inclusa la spiegazione fornita dalla teoria della relatività, può essere esposto fino a un certo punto senza ricorrere a concezioni oscure dello spazio, come è stato fatto nel Capitolo 1; ma ci sono altre conseguenze della teoria che non possono essere trattate in modo così semplice. Per considerarle dobbiamo cambiare metodo e spostare in parte la nostra attenzione dalle proprietà e dal comportamento del sistema materiale alle proprietà e al comportamento dello spazio che esso occupa. Ciò è necessario perché le proprietà attribuite al sistema materiale dalla teoria sono così insolite che non possono nemmeno essere descritte senza contraddizione se continuiamo a immaginare il sistema in uno spazio piatto (cioè euclideo). Ciò non costituisce un'obiezione alla teoria, poiché non c'è, ovviamente, alcuna ragione per supporre che lo spazio sia piatto a meno che le nostre osservazioni non lo dimostrino; e non c'è motivo per cui dovremmo essere in grado di immaginare o descrivere il sistema in uno spazio piatto se non lo è. Non è un disprezzo per un piolo quadrato dire che non entra in un buco rotondo.

Paragonerò il supersistema di galassie (l'universo) a un piolo che viene inserito in uno spazio vuoto. Nel Capitolo I ci siamo occupati solo di una piccola parte del piolo (i 150 milioni di anni luce esplorati) e la questione dell'adattamento è stata appena sollevata. Quando consideriamo l'intero piolo, scopriamo matematicamente che, a meno che non accada qualcosa di imprevisto oltre la regione esplorata, si tratta (ai fini di questa analogia) di un piolo quadrato. Immediatamente si leva un grido di protesta: "Questo è un tipo di piolo impossibile, non proprio un piolo". La nostra risposta è che è un piolo eccellente, buono come qualsiasi altro sul mercato, a patto che non si voglia inserirlo in un foro rotondo. "Ma i fori sono rotondi". È nella natura dei buchi essere rotondi. Un greco duemila anni fa disse che sono rotondi." E così via. Quindi, che lo voglia o no, la discussione si sposta dal piolo al buco, lo spazio in cui è inserito l'universo materiale. È sul buco che la battaglia è stata combattuta e vinta; penso ora che ogni autorità ammetta, seppur a malincuore, che il buco quadrato – con cui qui simboleggio lo spazio chiuso – sia una possibilità fisica.

La questione che sto affrontando qui non è se la teoria di un universo chiuso in espansione sia giusta o sbagliata, probabile o improbabile, ma se, sostenendo la teoria, lo spazio sferico sia necessario per affermarla. Non sto rispondendo qui a coloro che non credono alla teoria, ma a coloro che pensano che la sua stranezza sia dovuta al linguaggio mistificante dei suoi esponenti. Quanto segue mostrerà forse che non c'è stata alcuna mistificazione gratuita:

Voglio che immaginiate un sistema di, diciamo, un miliardo di stelle distribuite approssimativamente uniformemente in modo che ogni stella abbia delle vicine che la circondano su tutti i lati, e che la distanza di ogni stella dalle sue vicine più prossime sia approssimativamente la stessa ovunque. (Per evitare dubbi sul significato di distanza, la definisco come la distanza calcolata tramite l'osservazione della parallasse, o con qualsiasi altro metodo astronomico accettato come equivalente alla misurazione effettiva della distanza). Riuscite a immaginarvelo?

— Sì. Solo che hai dimenticato di considerare che il sistema avrà un confine; e le stelle sul bordo avranno vicini solo da un lato, quindi devono essere esentate dalla tua condizione di avere vicini su tutti i lati.

— No; intendevo proprio quello che ho detto. Voglio che tutte le stelle abbiano dei vicini che le circondano. Se immagini un luogo in cui i vicini sono solo da un lato, quello che chiami confine, non stai immaginando il sistema che ho in mente. — Ma il tuo sistema è impossibile; deve esserci un confine.

— Perché è impossibile? Potrei disporre un miliardo di persone sulla superficie terrestre (distribuite su tutta la superficie) in modo che ognuna abbia vicini da ogni lato, senza che si ponga il problema di un confine. Voglio solo che tu faccia lo stesso con le stelle.

— Ma questa è una distribuzione su una superficie. Le stelle devono essere distribuite nello spazio tridimensionale, e lo spazio non è così.

— Allora sei d'accordo che se lo spazio potesse essere così, il mio sistema sarebbe del tutto possibile e naturale?

— Suppongo di sì. Ma come può lo spazio essere così?

— Discuteremo dello spazio, se vuoi. Ma proprio ora, quando cercavo di spiegare che secondo la teoria attuale lo spazio si comporta "in quel modo", mi è stato detto che la discussione sullo spazio era una mistificazione inutile e che se mi fossi attenuto a una descrizione del mio sistema materiale, sarebbe stata considerata del tutto normale e comprensibile. Così ho debitamente descritto il mio sistema materiale; dopodiché hai subito sollevato domande sulla natura dello spazio.

Nell'universo sferico, il carattere del sistema materiale è tanto peculiare quanto quello dello spazio. Il sistema materiale, come lo spazio, mostra una *chiusura* tale che nessuna galassia è più centrale di un'altra; e non si può dire che nessuna si trovi all'esterno. Una tale distribuzione è a prima vista inconcepibile, ma questo perché cerchiamo di concepirla in uno spazio piatto. Lo spazio e il sistema materiale devono adattarsi l'uno all'altro. È inutile cercare di immaginare il sistema di galassie contemplato nelle teorie dell'universo di Einstein e Lemaître, se l'unico tipo di spazio nella nostra mente è quello in cui un tale sistema non può esistere.

Nella conversazione precedente ho attribuito al lettore una sensazione che istintivamente rifiuta la possibilità di uno spazio sferico o di una distribuzione chiusa di galassie. Ma lo spazio sferico non contraddice la nostra esperienza dello spazio, così come la sfericità della Terra non contraddice l'esperienza di coloro che non si sono mai spinti abbastanza lontano da notarne la curvatura. A parte la nostra riluttanza ad affrontare una concezione difficile e sconosciuta, l'unica obiezione che si può fare contro lo spazio sferico è che più di venti secoli fa un certo greco pubblicò una serie di assiomi che (inferenzialmente) affermavano che lo spazio sferico è impossibile. Aveva forse più scuse, ma non più ragioni, per la sua affermazione di coloro che la ripetono oggi.

Pochi scienziati al giorno d'oggi rifiuterebbero lo spazio sferico come impossibile, ma molti sostengono che si tratti di un'ipotesi improbabile, da considerare solo come ultima spiaggia. Pertanto, a sostegno di alcune delle spiegazioni proposte per i moti delle nebulose a spirale, si sostiene che esse abbiano il "vantaggio" di non richiedere uno spazio curvo. Ma qual è il presunto svantaggio dello spazio curvo? Non ricordo che ne sia mai stato sottolineato alcuno. D'altra parte, è ben noto che l'ipotesi di uno spazio fisico piatto porta a serie difficoltà teoriche e logiche, come verrà spiegato più avanti.

Un sistema chiuso di galassie richiede uno spazio chiuso. Se un tale sistema si espande, richiede uno spazio in espansione. Questo si può vedere immediatamente dall'analogia che abbiamo già usato, ovvero che gli esseri umani, distribuiti uniformemente sulla superficie terrestre, non possono chiaramente disperdersi l'uno dall'altro a meno che la superficie terrestre non si espanda.

Ciò dovrebbe chiarire come l'attuale teoria dell'universo in espansione si collochi in relazione a (a) l'espansione di un sistema materiale, e (b) l'espansione dello spazio. Il fenomeno osservativo principalmente interessato (la recessione delle nebulose a spirale) è ovviamente l'espansione di un sistema materiale; e l'osservatore è spesso perplesso nel trovare teorici che proclamano la dottrina di uno spazio in espansione. Sospetta che ci sia stata una confusione di pensiero di tipo piuttosto elementare. Perché lo spazio non dovrebbe già esistere, e il sistema materiale non dovrebbe espandersi al suo interno, come fanno di solito i sistemi materiali? Se il sistema di galassie giunge alla fine non molto oltre la massima distanza che abbiamo scandagliato, sono d'accordo che sia quello che succede. Ma il sistema non mostra alcun segno di fine e, se si estende molto più lontano, ne altererà il carattere. Questo cambiamento di carattere è una questione di calcolo matematico che non può essere discussa qui; mi limito a dire che è collegato al fatto che, se la velocità di recessione continua ad aumentare verso l'esterno, si avvicinerà presto alla velocità della luce, quindi qualcosa dovrà necessariamente rompersi. Il risultato è che il sistema diventa un sistema chiuso e abbiamo visto che un tale sistema non può espandersi senza che anche lo spazio si espanda. È qui che entra in gioco l'espansione dello spazio. Oserei dire che (per ragioni storiche) all'espansione dello spazio è stata spesso data troppa importanza nelle esposizioni dell'argomento, e i lettori sono stati indotti a pensare che fosse più direttamente coinvolta nella spiegazione dei moti delle nebulose di quanto non sia in realtà. Ma se vogliamo dare un resoconto completo delle opinioni a cui siamo condotti dalla teoria e dall'osservazione, non dobbiamo omettere di menzionarla.

Quanto ho detto è stato principalmente volto a rimuovere pregiudizi preliminari contro uno spazio chiuso o un sistema chiuso di galassie. Non affermo che le ragioni per adottare lo spazio chiuso siano schiaccianti²; ma anche lievi vantaggi possono avere peso quando non c'è nulla da collocare nella scala opposta. Se adottiamo lo spazio aperto, incontriamo alcune difficoltà (non necessariamente insormontabili) che lo spazio chiuso evita completamente; e non vogliamo deviare l'indagine verso una speculazione sulla soluzione di difficoltà che non si presenteranno mai. Se non vogliamo impegnarci, lavoreremo naturalmente in termini di un universo chiuso di raggio finito R , poiché possiamo in qualsiasi momento tornare a un universo infinito rendendo R infinito.

C'è un altro tipo di critico a cui si potrebbe dire qualcosa. Egli ritiene che lo spazio non sia una questione che riguarda esclusivamente i fisici, e che con le loro definizioni tecniche e astrazioni ne stiano facendo qualcosa di diverso dallo spazio dell'uomo comune. Sarebbe difficile definire con precisione cosa abbia in mente. Forse non sta pensando in particolare allo spazio come una componente misurabile dell'universo fisico, ma sta immaginando un ordine mondiale che trascende le illusioni dei nostri organi sensoriali e i limiti dei nostri micrometri: uno spazio di "cose come sono realmente". Non rientra nel mio attuale argomento discutere la relazione tra il mondo concepito in fisica e un'interpretazione più ampia della nostra esperienza; dirò solo che quella parte della nostra esperienza cosciente rappresentabile da simboli fisici non dovrebbe pretendere di essere la totalità. In quanto essere cosciente, non sei uno dei miei simboli; il tuo dominio non è circoscritto dalle mie misurazioni spaziali. Se, come Amleto, vi considerate re di uno spazio infinito, non metto in discussione la vostra sovranità. Vi invito solo a prestare attenzione ad alcune inquietanti voci che sono emerse sullo stato del guscio di noce di Vostra Maestà.

²Lo spazio curvo è fondamentale nella teoria della relatività e le argomentazioni a favore della sua adozione sono generalmente considerate schiaccianti. È lo spazio chiuso che necessita di ulteriori prove.

IV

Il risultato immediato dell'introduzione del termine cosmologico nella legge di gravitazione fu la comparsa (in teoria) di due universi: l'universo di Einstein e l'universo di De Sitter. Entrambi erano universi sferici chiusi; cosicché un viaggiatore che proseguisse nella stessa direzione si ritroverebbe infine al punto di partenza, dopo aver percorso un circuito dello spazio. Entrambi sostenevano di essere universi statici, destinati a rimanere immutati per un periodo di tempo illimitato; pertanto, fornivano una struttura permanente all'interno della quale i sistemi su piccola scala – galassie e stelle – potevano cambiare ed evolversi. C'erano, tuttavia, alcuni punti di differenza tra loro. Una differenza particolarmente importante, perché avrebbe potuto essere verificata tramite osservazione, era che nell'universo di de Sitter si sarebbe verificata un'apparente recessione degli oggetti remoti, mentre nell'universo di Einstein ciò non si sarebbe verificato. A quel tempo si conoscevano solo tre velocità radiali delle nebulose a spirale, e queste supportavano piuttosto debolmente l'universo di de Sitter con una maggioranza di 2 a 1. La questione rimase in sospeso per un po'. Ma nel 1922 il Prof. V. M. Slipher mi fornì le sue misure (allora inedite) di 40 nebulose a spirale da utilizzare nel mio libro "*Teoria Matematica della Relatività*". Poiché la maggioranza era diventata 36 a 4, la teoria di de Sitter cominciò ad apparire in una luce favorevole.

Gli universi di Einstein e di de Sitter erano due alternative basate sulla stessa base teorica. Per fare un'analogia, supponiamo di essere trasportati su una nuova stella e di notare diversi corpi celesti nelle vicinanze. Dovremmo sapere dalla teoria gravitazionale che le loro orbite devono essere ellittiche o iperboli, ma solo l'osservazione può stabilire quali. Finché non viene effettuata la verifica osservativa, ci sono due alternative: gli oggetti possono avere orbite ellittiche e costituire un sistema permanente come il sistema solare, oppure possono avere orbite iperboliche e costituire un sistema disperdente. In realtà, la questione se l'universo avrebbe seguito il modello di Einstein o quello di de Sitter dipendeva da quanta materia fosse presente nell'universo – una questione che difficilmente poteva essere risolta dalla teoria – e non è affatto facile da risolvere con l'osservazione.

Abbiamo ora capito che l'immutabilità dell'universo di de Sitter era una finzione matematica. Prese alla lettera, le sue formule descrivevano un universo completamente vuoto; ma questo andava interpretato in senso lato, nel senso che la densità media della materia in esso contenuta, sebbene non nulla, era sufficientemente bassa da essere trascurata nel calcolo delle forze che controllavano il sistema. Si è scoperto, tuttavia, che l'immutabilità dipendeva dalla presenza di nessuna materia. In effetti, l'"universo immutabile" era stato inventato con il semplice espediente di omettere di inserirvi qualsiasi cosa potesse mostrare cambiamento. Pertanto, non consideriamo più l'universo di de Sitter un universo statico; e quello di Einstein è l'unica forma di universo materiale autenticamente statico o immobile.

La situazione è stata riassunta nell'affermazione che l'universo di Einstein contiene materia ma non movimento, mentre quello di de Sitter contiene movimento ma non materia. È chiaro che l'universo reale, che contiene sia materia che movimento, non corrisponde esattamente a nessuno di questi due modelli astratti. L'unica domanda è: qual è la scelta migliore per una prima approssimazione? Dovremmo introdurre un po' di movimento nel mondo di materia inerte di Einstein o un po' di materia nel Primo Mobile di de Sitter?

La scelta tra il modello di Einstein e quello di de Sitter non è più urgente perché non siamo più limitati a questi due estremi; abbiamo a disposizione l'intera catena di soluzioni intermedie tra materia immobile e moto senza materia, da cui possiamo individuare la soluzione con la giusta proporzione di materia e moto che corrisponda a ciò che osserviamo. Queste soluzioni non furono cercate prima, perché non se ne comprese l'adeguatezza; si trattava dell'idea preconcepita che una soluzione statica fosse necessaria affinché tutto potesse essere riferito a uno sfondo spaziale immutabile. Abbiamo visto che questo requisito avrebbe dovuto escludere rigorosamente la

soluzione di de Sitter, ma grazie a un fortunato tentativo di intrusione, essa ottenne l'ammissione di essere il precursore delle altre soluzioni non statiche su cui ora si concentra principalmente l'attenzione.

L'indagine deliberata di soluzioni non statiche fu condotta da A. Friedmann nel 1922. Le sue soluzioni furono riscoperte nel 1927 dall'abbé G. Lemaître, che sviluppò brillantemente la teoria astronomica che ne risultò. Il suo lavoro fu pubblicato su una rivista piuttosto inaccessibile e sembra essere rimasto sconosciuto fino al 1930, quando de Sitter e il sottoscritto ne richiamarono l'attenzione. Nel frattempo, le soluzioni erano state scoperte per la terza volta da H. P. Robertson, e grazie a lui il loro interesse stava iniziando a concretizzarsi. Anche l'applicazione astronomica, stimolata dal lavoro osservativo di Hubble e Humason sulle nebulose a spirale, stava venendo riscoperta, ma non era stata portata così lontano come nell'articolo di Lemaître.

Le soluzioni intermedie di Friedmann e Lemaître sono universi in espansione. Sia il sistema materiale che lo spazio chiuso in cui esiste sono in espansione. A un'estremità abbiamo l'universo di Einstein senza moto e quindi in equilibrio. Poi, procedendo lungo la serie, abbiamo modelli di universo che mostrano un'espansione sempre più rapida fino a raggiungere l'universo di de Sitter all'altra estremità della serie. Il tasso di espansione aumenta lungo tutta la serie e la densità diminuisce; l'universo di de Sitter è il limite in cui la densità media della materia celeste si avvicina allo zero. La serie di universi in espansione si arresta quindi, non perché l'espansione diventi troppo rapida, ma perché non c'è più nulla da espandere.

Possiamo comprendere meglio questa serie di modelli partendo dal modello di de Sitter. Come spiegato nel Capitolo 1, sono in gioco due forze: la normale attrazione newtoniana tra le galassie e la repulsione cosmica. Nell'universo di de Sitter la densità della materia è infinitamente piccola, quindi l'attrazione newtoniana è trascurabile. La repulsione cosmica agisce senza controllo e otteniamo la massima velocità di espansione possibile del sistema. Quando si inserisce più materia, la mutua gravitazione tende a tenere insieme la massa e si oppone all'espansione. Più materia viene introdotta, più lenta è l'espansione. Ci sarà una densità particolare alla quale l'attrazione newtoniana tra le galassie sarà appena abbastanza forte da controbilanciare la repulsione cosmica, così che l'espansione sia nulla. Questo è l'universo di Einstein. Se introduciamo ancora più materia, l'attrazione supererà la repulsione e otteniamo un modello di universo in contrazione.

In primo luogo, questa serie di modelli è una serie di alternative, una delle quali deve essere selezionata per rappresentare il nostro universo reale. Ma ha un'applicazione ancora più interessante. Col passare del tempo, l'universo reale si muove lungo la serie di modelli, in modo che l'intera serie fornisca un'immagine della sua storia vitale. Al momento attuale, l'universo corrisponde a un modello particolare; ma poiché si sta espandendo, la sua densità sta diminuendo. Pertanto, tra un milione di anni avremo bisogno di un modello di densità inferiore, ovvero più vicino all'estremità di De Sitter della serie.

Ripercorrendo questa progressione il più indietro possibile, giungiamo alla conclusione che il mondo è iniziato come un universo di Einstein; ha continuato a percorrere la serie di modelli con un'espansione sempre più rapida; e finirà come un universo di De Sitter.

Si è accennato al fatto che la recessione delle galassie nell'attuale teoria dell'universo in espansione non corrisponde esattamente all'effetto previsto da De Sitter. Potrebbe essere utile spiegare le modalità di questa transizione.

Il fenomeno che viene generalmente chiamato "effetto de Sitter" era un rallentamento del tempo piuttosto misterioso a grandi distanze dall'osservatore; le vibrazioni atomiche si sarebbero eseguite più lentamente, cosicché la loro luce si sarebbe spostata verso il rosso e avrebbe imitato l'effetto di una velocità in diminuzione. Oltre a scoprire questo, de Sitter esaminò le equazioni del moto e notò che le velocità reali degli oggetti distanti sarebbero state probabilmente elevate; tuttavia, non se le aspettava; le velocità reali favoriscono l'allontanamento piuttosto che l'avvicinamento. Non sono sicuro di quando si riconobbe per la prima volta che la complicazione nelle equazioni del moto non era né più né meno che una forza repulsiva proporzionale alla

distanza; ma deve essere stato prima del 1922. Riassumendo la teoria a quella data, scrissi: "La teoria di De Sitter fornisce una doppia spiegazione di questo moto di recessione: in primo luogo, c'è la tendenza generale a disperdersi secondo l'equazione d^2r/ds^2 ; in secondo luogo, c'è lo spostamento generale delle linee spettrali verso il rosso negli oggetti distanti dovuto al rallentamento delle vibrazioni atomiche che verrebbe erroneamente interpretato come un moto di recessione.³ Ho anche sottolineato che era una questione di definizione se quest'ultimo effetto dovesse essere considerato una velocità spuria o genuina. Durante il tempo in cui la sua luce viaggia verso di noi, la nebulosa viene accelerata dalla repulsione cosmica e acquisisce una velocità aggiuntiva verso l'esterno superiore a quella in discussione; quindi: la velocità, che era spuria al momento dell'emissione della luce, è diventata genuina al momento del suo arrivo. Inferenzialmente ciò significava che il rallentamento del tempo era diventato un effetto del tutto sussidiario rispetto alla repulsione cosmica; ma questo non era stato compreso con la chiarezza che avrebbe potuto avere. Gli sviluppi successivi di Friedmann e Lemaître erano geometrici e non alludevano a nulla di così rozzo come la "forza"; ma, esaminandoli per vedere cosa è successo, scopriamo che il rallentamento del tempo è stato inghiottito dalla repulsione cosmica; era una piccola parte dell'intero effetto (un termine di secondo ordine) che era stata artificialmente separata dai precedenti metodi di analisi.

V

Un universo di Einstein è in equilibrio, ma il suo equilibrio è instabile. L'attrazione newtoniana e la repulsione cosmica sono in perfetto equilibrio. Supponiamo che una leggera perturbazione alteri momentaneamente l'equilibrio; diciamo che l'attrazione newtoniana si indebolisce leggermente. Allora la repulsione prende il sopravvento e inizia una lenta espansione. L'espansione aumenta la distanza media tra i corpi materiali, riducendo la loro attrazione reciproca. Questo amplia la differenza tra attrazione e repulsione, e l'espansione diventa più rapida. L'equilibrio si altera sempre più, fino a quando l'universo non viene irrevocabilmente lanciato nel suo percorso di espansione. Allo stesso modo, se la prima lieve perturbazione fosse un rafforzamento dell'attrazione newtoniana, ciò causerebbe una piccola contrazione. I sistemi materiali si avvicinerebbero e la loro reciproca attrazione aumenterebbe ulteriormente. La tendenza alla contrazione si rafforzerebbe così sempre di più. L'universo di Einstein è delicatamente bilanciato in modo tale che la minima perturbazione possa farlo precipitare in uno stato di espansione sempre crescente o di contrazione sempre crescente.

L'universo originale instabile di Einstein potrebbe essersi trasformato in un universo in espansione o in un universo in contrazione. A quanto pare, ha scelto l'espansione. La domanda sorge spontanea: possiamo spiegare questa scelta? Non credo che sarebbe un grave discredito se fallissimo, perché non ricordo nessun altro caso in cui la teoria sia riuscita a prevedere in che modo cadrà un corpo instabile. Comunque ci proveremo. Dobbiamo considerare quale tipo di perturbazione spontanea potrebbe verificarsi nella distribuzione primordiale della materia da cui le nostre galassie e stelle si sono evolute; per maggiore precisione la immagino come una nebulosa uniforme e immobile che riempie il mondo sferico. Sono stati ipotizzati due tipi di cambiamento spontaneo:

- (1) La materia formerà condensazioni locali in modo da distribuirsi in modo non uniforme.
- (2) La massa materiale può essere convertita in radiazione, sia nel processo di costruzione di atomi complessi (ad esempio la formazione di elio dall'idrogeno) o in mutue annichilazioni di elettroni e protoni.

Si può dimostrare che la conversione della massa in radiazione darebbe inizio a una contrazione. A parità di massa, la radiazione è più efficace della materia nell'esercitare l'attrazione

³*Mathematical Theory of Relativity*, p. 161.

gravitazionale; quindi la conversione sposta l'ago della bilancia a favore della contrazione. Di conseguenza, le nostre speranze di spiegare la decisione di espandersi devono basarsi sul processo (1). L'indagine è particolarmente difficile, perché risulta che, in prima approssimazione, la ridistribuzione della materia nelle condensazioni non apporta alcuna modifica al bilancio, ed è necessario portare il calcolo a un'elevata approssimazione per ottenere il termine decisivo. Il problema è stato trattato da McVittie, McCrae, Lemaître e Sen, non sempre con risultati concordanti; e dubito di essere qualificato per giudicare una questione così tecnica. Sono propenso a pensare, tuttavia, che la trattazione di Lemaître vada alla radice del problema.⁴ È stato detto che, sebbene spesso consideriamo modelli dell'universo perfettamente sferici, l'universo reale deve essere più irregolare. Un'approssimazione migliore sarebbe quella di una sfera con le bollicine, le quali corrispondono alle galassie, poiché ovunque ci sia materia, la curvatura è localmente maggiore. Sebbene un mondo di Einstein con le sue piccole protuberanze avrebbe approssimativamente le stesse proprietà di un mondo di Einstein ideale, inizialmente si pensava che l'equilibrio esatto fosse possibile solo per la sfera esatta. Si è scoperto, tuttavia, che anche una sfera con le piccole protuberanze può essere in equilibrio esatto e formare un universo statico. Questo è stato sottolineato esplicitamente dal Prof. N. K. Sen, che ha fornito una trattazione semplice ed elegante; ma sembra che fosse implicito nei precedenti lavori di Lemaître.

Supponiamo per un momento che, quando si forma una condensazione, questa si separi completamente dalla materia circostante, lasciando una fessura vuota tutt'intorno. Immaginiamo che una sfera di gas si separi in questo modo e continui a condensarsi sempre di più. Lemaître (estendendo un teorema dovuto a Birkhoff) ha dimostrato che dopo la separazione, la graduale condensazione della materia non può influire in alcun modo sulla forza gravitazionale esercitata dalla sfera sull'ambiente circostante, cosicché, se l'universo al di fuori della condensazione era originariamente in equilibrio, il suo equilibrio rimarrà indisturbato. In queste condizioni, la formazione di condensazioni non darà inizio né alla contrazione né all'espansione dell'universo nel suo complesso.

Le condizioni reali differiscono da quelle precedenti in quanto non si forma alcuna fessura vuota, poiché la condensazione si fonde gradualmente con l'ambiente circostante. La fessura, isolando la condensazione dall'ambiente circostante, avrebbe impedito qualsiasi pressione dell'una sull'altra; in assenza di fessura, si verificherà una pressione (probabilmente estremamente bassa) che varierà con il procedere della condensazione. È questa variazione di pressione, trascurata nel paragrafo precedente, la possibile causa di espansione o contrazione; abbiamo infatti visto che la mera riorganizzazione della materia in una forma più condensata non ha alcun effetto. Lemaître descrive il cambiamento che si verifica come una "stagnazione" di energia. Non è difficile capire che si tratta in realtà del tipo di cambiamento inverso a quello che si verifica quando l'energia di costituzione della materia viene liberata sotto forma di radiazione; l'energia viene sottratta alla forma trasmissibile (pressione) e immobilizzata nella costituzione della condensazione. Il suo effetto è quindi opposto a quello della conversione della massa materiale in radiazione e tende a far espandere l'universo.

La procedura di Sen è diversa. Dopo aver trovato le equazioni per un "mondo di Einstein bitorzolato" in equilibrio statico, calcola la massa totale di tale mondo e scopre che è sempre maggiore di quella di un mondo di Einstein uniforme. Ne consegue che, se la materia del mondo uniforme iniziale di Einstein viene riorganizzata in condensazioni, non c'è abbastanza massa per formare una distribuzione di equilibrio. Se potessimo aggiungere artificialmente un po' di massa a ciascuna condensazione, otterremmo una delle sfere bitorzolute di Sen in equilibrio; l'assenza di questa massa lascia l'attrazione gravitazionale in difetto della quantità necessaria a mantenere l'equilibrio. Di conseguenza, la repulsione cosmica prende il sopravvento e l'universo si espande.

⁴L'articolo di Lemaître (*Monthly Notices*, vol. xci, p. 490) mi sembra molto oscuro, ma ho avuto il vantaggio di avere delle spiegazioni verbali dall'autore.

Sebbene sia Lemaître che Sen concordino sul fatto che ne derivi un'espansione (non una contrazione), esiste una discrepanza tra loro; infatti, Sen la ottiene come risultato diretto della riorganizzazione della materia, mentre Lemaître sostiene che il risultato diretto sia nullo e che l'espansione sia un risultato indiretto, dipendente dall'esistenza di una piccola pressione nella nebulosa primordiale. L'indagine di Lemaître ha il vantaggio di evitare un calcolo molto complicato della massa delle condensazioni e sembra offrire una minore probabilità di errore.

È solo all'inizio che dobbiamo cercare una causa di espansione o contrazione; una volta iniziata, l'espansione o la contrazione continuano e aumentano automaticamente. Se esistessero cause di contrazione e cause di espansione, la vittoria sarebbe andata a quella che si è imposta per prima. Quindi la formazione di condensazioni deve aver dato inizio alla conversione di massa in radiazione, poiché quest'ultima (come abbiamo visto) avrebbe portato a un universo in contrazione. A mio avviso questo suggerisce piuttosto che la materia primordiale fosse composta da idrogeno (o, in modo equivalente, da protoni ed elettroni liberi), poiché in tal caso ci sarebbero state meno possibilità di conversione della massa in radiazione rispetto a quanto sarebbe avvenuto se fossero stati presenti atomi più complessi. Finché non si combinano in nuclei complessi, protoni ed elettroni sono immuni dall'annichilazione. La ragione di questa sicurezza è che il fotone o quanto di radiazione, che risulta dall'annichilazione di un protone e di un elettrone, deve essere dotato di impulso, che deve essere bilanciato da un impulso di rinculo. Ma nell'idrogeno non c'è più nulla che possa rinculare. L'annichilazione di un protone e di un elettrone (se mai dovesse verificarsi) può avvenire solo quando essi fanno parte di un sistema complesso che lascerà un residuo che sopporterà il rinculo.⁵

VI

Siamo stati condotti quasi inevitabilmente a considerare l'inizio dell'universo, o almeno l'inizio dell'attuale ordine delle leggi fisiche. Questo accade sempre quando si tratta di un processo unidirezionale irreversibile e della continua espansione del mondo; solleva lo stesso tipo di questione di un inizio ultimo sollevata dal continuo aumento dell'entropia nel mondo.

Le opinioni sull'origine delle cose vanno quasi oltre l'argomentazione scientifica. Non possiamo fornire ragioni scientifiche per cui il mondo avrebbe dovuto essere creato in un modo piuttosto che in un altro. Ma suppongo che tutti noi abbiamo un senso estetico in materia. Il sistema solare deve aver avuto origine in qualche modo, e non so perché non avrebbe dovuto essere iniziato proiettando nove pianeti in orbite che ruotassero nella stessa direzione attorno al Sole. Ma abbiamo la sensazione che questo non sia il modo in cui ciò avverrebbe naturalmente e preferiamo i tentativi – nessuno dei quali ha avuto troppo successo – di spiegarlo con l'evoluzione da una nebulosa. Allo stesso modo, la teoria recentemente proposta da Einstein e de Sitter, secondo cui in origine tutta la materia creata fu proiettata con un moto radiale tale da disperdersi ancora più velocemente dell'attuale tasso di dispersione delle galassie,⁶ mi lascia indifferente. Non si può negare la possibilità, ma è difficile immaginare quale soddisfazione mentale una simile teoria possa offrire.

Poiché non posso fare a meno di introdurre la questione di un inizio, mi è sembrato che la teoria più soddisfacente fosse quella in grado di rendere l'inizio *non troppo brusco e antiestetico*. Questa condizione può essere soddisfatta solo da un universo di Einstein con tutte le forze principali in equilibrio. Di conseguenza, lo stato primordiale delle cose che descrivo è una distribuzione uniforme di protoni ed elettroni, estremamente diffusa e che riempie tutto lo spazio (sferico), rimanendo pressoché in equilibrio per un tempo estremamente lungo, finché non prevale la sua intrinseca instabilità. Vedremo più avanti che la densità di questa distribuzione

⁵Sono debitore a Sir Alfred Ewiner per avermi segnalato questo.

⁶Non lo esprimono a parole, ma è il significato delle loro formule matematiche.

può essere calcolata: era di circa un protone e un elettrone per litro. Non c'è fretta che qualcosa inizi ad accadere. Ma alla fine si accumulano piccole tendenze irregolari e l'evoluzione prende avvio. La prima fase è la formazione di condensazioni che alla fine daranno origine alle galassie; questo, come abbiamo visto, ha dato inizio a un'espansione, la cui velocità è poi aumentata automaticamente fino a manifestarsi a noi nella recessione delle nebulose a spirale.

Man mano che la materia si addensava nelle condensazioni, i vari processi evolutivi seguirono l'evoluzione delle stelle, l'evoluzione degli elementi più complessi, l'evoluzione dei pianeti e della vita. Senza dubbio, in questa come in altre teorie, sussistono serie difficoltà di temporizzazione, per cui un processo non dovrebbe procedere troppo velocemente rispetto a un altro. Queste difficoltà di scala temporale saranno menzionate più avanti.

Forse si obietterà che, se si guarda abbastanza indietro, questa teoria non fa davvero a meno di un inizio brusco; l'intero universo deve nascere in un solo istante affinché possa iniziare in equilibrio. Io non la vedo così. A mio avviso, *l'identità indifferenziata* e il *nulla* non possono essere distinti filosoficamente. Le realtà della fisica sono disomogeneità, eventi, cambiamento. La nostra ipotesi iniziale di un mezzo statico omogeneo non è altro che una disposizione ordinata delle concezioni da utilizzare nella nostra descrizione analitica degli oggetti e degli eventi distinguibili di cui intendiamo raccontare la storia. Per quanto riguarda queste realtà, la teoria raggiunge il suo obiettivo di fornire un inizio impercettibile e graduale. Quando infine, attraverso la degradazione termodinamica dell'energia, l'universo, con la stessa gradualità, raggiunge di nuovo un'identità indifferenziata, quella è la fine dell'universo fisico. Non immagino un mondo logoro che si avvia sconsolato per il resto dell'eternità. Ciò che rimane sono solo alcune concezioni che abbiamo dimenticato di mettere da parte dopo aver finito di usarle.

Per illustrare l'instabilità dell'universo di Einstein, lo paragonerò a uno spillo che sta sulla sua punta, che può cadere sia a sinistra che a destra in due posizioni orizzontali A o B. La posizione A corrisponde a un universo espanso all'infinito, e la posizione B a un universo contratto in un punto o il più vicino possibile a un punto, come consentito dalle condizioni quantistiche. Come unico modo per evitare un inizio brusco, ho supposto che lo spillo fosse inizialmente verticale. Il suo equilibrio non è quindi così precario come sembra, in balia della minima perturbazione esterna – ma non c'è nulla di particolare. Quindi la caduta deve derivare da un leggero "degrado" del materiale dello spillo. Secondo Lemaître e Sen, il degrado è tale da farlo cadere verso A e ora lo osserviamo a metà della caduta.

Se non ci preoccupa un inizio improvviso, o addirittura violento, sono possibili molti altri esperimenti con lo spillo. Possiamo lasciarlo cadere da una posizione inclinata, oppure, lasciandolo andare, proiettarlo verso l'alto o verso il basso. Partendo dalla posizione orizzontale B, possiamo proiettarlo in modo che si alzi e ricada; oppure, se proiettato con maggiore forza, può passare attraverso la posizione verticale e cadere dall'altro lato in posizione A. Allo stesso modo, se proiettato da A. Il comportamento di un universo è esattamente lo stesso; a ogni avventura dello spillo corrisponde un'avventura simile di un universo e viceversa. Queste avventure sono state trattate ampiamente da alcuni autori, e le formule appropriate sono state calcolate. Sebbene un simile studio matematico sia appropriato nel suo ambito, rischia di dare un'impressione fuorviante della complessità del problema che ci troviamo di fronte. Quando le diverse proiezioni vengono enumerate e presentate come se fossero tutte diverse "teorie" dell'universo, sembra che ci siamo imbattuti in un sconcertante labirinto di possibilità. Ma in realtà si tratta solo del fatto che l'universo è come qualsiasi altro sistema in una posizione di equilibrio instabile.

A prima vista c'è una curiosa differenza tra l'universo e lo spillo. Se l'universo ha una data massa, non possiamo proiettarlo a nostro piacimento; in effetti, sono le circostanze della proiezione a determinarne la massa. Ma questo è spiegabile se ricordiamo che energia e massa sono equivalenti. L'energia totale dello spillo varia a seconda del modo in cui viene proiettato e, a rigor di termini, la sua massa cambia allo stesso modo. La massa dell'universo si comporta in modo analogo. Supporre che la velocità di espansione nella direzione radiale (fittizia) implichi

energia cinetica può sembrare prendere la nostra immagine dello spazio sferico troppo alla lettera; ma l'energia è così reale che contribuisce alla massa dell'universo. In particolare, un universo proiettato da B per raggiungere A ha necessariamente una massa maggiore di uno che ricade senza raggiungere la posizione verticale (Einstein).

Lemaître non condivide la mia idea di un'evoluzione dell'universo dallo stato di Einstein. La sua teoria dell'inizio è una teoria dei fuochi d'artificio, per usare la sua stessa descrizione. Il mondo ha avuto origine con una violenta proiezione dalla posizione B, cioè dallo stato in cui è condensato in un punto o atomo; la proiezione era abbastanza forte da portarlo oltre lo stato di Einstein, così che ora sta precipitando verso A, come richiesto dall'osservazione. Questo rende la massa dell'universo leggermente maggiore rispetto alla mia teoria (come spiegato nell'ultimo paragrafo), ma il cambiamento è poco rilevante allo stadio attuale del nostro progresso. Non posso fare a meno di pensare che la mia "placida teoria" abbia maggiori probabilità di soddisfare il sentimento generale del lettore; ma se egli è propenso a farlo, altrimenti direi: "Fate come volete". E ora, allontaniamoci dalla Creazione e torniamo ai problemi di cui potremmo forse sapere qualcosa.

La configurazione di Einstein era l'unica via di fuga da un universo in espansione o in contrazione; dimostrando che è instabile, dimostriamo che non è altro che una via di fuga temporanea. Che lo stato originale fosse o meno l'equilibrio di Einstein, al momento in cui gli astronomi arrivano sulla scena devono trovarsi di fronte a un universo in espansione o in contrazione. Questo risultato rende la teoria dell'universo in espansione molto più convincente. Nel 1917 la teoria si trovò a un bivio che non è più vero, e con le sue stesse risorse è stata guidata verso un universo non statico. Rendendoci conto che un certo grado di espansione (o contrazione) è inevitabile, siamo molto più propensi ad ammettere la recessione delle nebulose a spirale come un'indicazione della sua grandezza.⁷

VII

Sono state proposte diverse controteorie sulla recessione osservata delle nebulose e vorrei chiarire il mio atteggiamento generale nei confronti di esse. Sono un detective alla ricerca di un criminale, la costante cosmologica. So che esiste, ma non conosco il suo aspetto; per esempio, non so se sia un ometto o un uomo alto. Naturalmente, la prima mossa del mio capo (de Sitter) è stata quella di ordinare la ricerca di impronte sulla scena del crimine. La ricerca ha rivelato impronte, o qualcosa che sembra un'impronta: la recessione delle nebulose a spirale. Naturalmente, sono estremamente interessato a questo possibile indizio sul criminale. Dalla lunghezza del passo calcolo la presunta altezza del criminale (in perfetto stile investigativo). Avendo ottenuto queste importanti informazioni sul suo aspetto, posso ora rivolgermi agli altri indizi che ho trovato nella relatività e nella meccanica ondulatoria – e confrontandoli tra loro, credo di avere ormai prove sufficienti per giustificare un arresto.

Capita che ci siano altre persone interessate alle impronte, che non sono minimamente interessate al mio criminale. Per esempio, c'è un geologo che ipotizza la teoria che appartengano a una creatura preistorica. (Le controteorie proposte da Einstein, de Sitter e Milne presuppongono che le grandi velocità delle nebulose esistano fin dall'inizio.) Un altro pensa che non siano affatto impronte, ma depressioni causate da qualcosa di natura sconosciuta. In che misura ho il dovere di giustificarmi criticando queste opinioni contrarie?

Non credo che mi riguardino affatto da vicino. Naturalmente, fin dall'inizio ero consapevole della possibilità che le impronte non appartenessero al criminale; la questione da decidere non era

⁷Posso dire che la dimostrazione dell'instabilità della configurazione di Einstein è stata il punto di svolta nella mia prospettiva. In precedenza, l'universo in espansione (come appariva nella teoria di de Sitter) mi aveva attirato come una possibilità molto interessante, ma non avevo alcun riferimento specifico a riguardo.

se l'indizio fosse una prova sufficiente per impiccare il criminale, ma se indicasse una direzione d'indagine a cui valesse la pena dedicare le proprie energie. Naturalmente, se il geologo o il depressore affermassero di poter dimostrare che la loro idea sull'origine delle impronte è corretta, presterei molta attenzione; poiché una tale dimostrazione mostrerebbe che ero completamente sulla strada sbagliata nelle mie indagini. Ma non è questa la posizione; nessuno pretende di più per le contro-ipotesi se non che "per quanto ne sappiamo, potrebbe essere così". Questo lascia l'indagine aperta come all'inizio: impronte sono state scoperte sulla scena del crimine; sono possibili tutti i tipi di spiegazioni, e potrebbe rivelarsi di scarsa importanza, ma ci sono buone probabilità che siano state lasciate dal criminale; seguiamo l'indizio e cerchiamo di scoprirlo. Ora sono abbastanza convinto che appartengano al criminale, ma questo perché, seguendo l'indizio, sono venute alla luce ulteriori prove dettagliate nel Capitolo IV.

Ho già commentato la teoria secondo cui la recessione delle nebulose a spirale è un'errata interpretazione dello spostamento verso il rosso della loro luce. Possiamo classificare insieme le restanti teorie che accettano la recessione delle nebulose a spirale come autentica; queste di conseguenza ammettono l'espansione dell'universo (forse solo come fenomeno temporaneo), ma non la collegano alla repulsione cosmica.

Il punto chiave di molte di queste ipotesi sembra essere: qual è la deduzione più generale che si può trarre dalla nostra conoscenza osservativa delle posizioni e dei moti delle galassie? Credo che chi cerca questa generalità estrema stia seguendo un'illusione. I dati osservativi forniscono solo le posizioni e le velocità all'istante presente; quindi è chiaro fin dall'inizio che non si può dedurre nulla di certo sulla legge della forza che governa il moto. Qualsiasi distribuzione *istantanea* di velocità è compatibile con qualsiasi legge della forza. Se dunque qualcuno propone di trattare il problema del sistema di galassie con una generalità più ampia di quella che qui tentiamo – come forse direbbe, senza preconcetti – dobbiamo chiederci: quale problema? I moti in sé non costituiscono un problema. Dobbiamo combinarli con altre idee, che riteniamo giustificate, per creare un problema. Sono i preconcetti – importati da altre branche della scienza – che possono fertilizzare un'indagine altrimenti destinata alla sterilità.

Pertanto trovo difficile discutere la proposta di Einstein e de Sitter, e alcune delle proposte separate di de Sitter, perché non vedo quali siano "le regole del gioco". Queste proposte sono lasciate allo stato di formulazioni matematiche, tutte senza dubbio compatibili con ciò che osserviamo; ma nulla sembra impedire che tali formulazioni vengano moltiplicate all'infinito. De Sitter ha più volte sottolineato la possibilità che la costante cosmologica λ possa essere negativa. Questo dà luogo a un'attrazione cosmica invece che a una repulsione cosmica. Chiaramente la recessione delle nebulose non è una prova a favore dell'attrazione cosmica.

Il massimo che si può dire è che non si tratta necessariamente di una prova fatale contro di essa.

Non bisogna dimenticare che un test osservativo del tutto inadeguato a dimostrare una teoria può tuttavia fornirne una gradita conferma. Supponiamo che, con un ragionamento teorico, abbiamo concluso che la Terra è circondata da un campo di forza che attrae i corpi verso di sé. Per verificarlo, ci è concesso un breve sguardo a ciò che accade vicino alla superficie terrestre. La nostra occhiata potrebbe rivelare una serie di razzi che si librano verso l'alto. Ciò non è incompatibile con la nostra teoria, ma chiaramente non ne è una conferma. D'altra parte, potremmo vedere una pioggia di gocce d'acqua cadere. Nulla può essere dedotto in modo preciso da questa occhiata, ma osservare oggetti che cadono a terra è una conferma accettabile della previsione teorica secondo cui esiste una forza che tende a far muovere gli oggetti in quella direzione.

E. A. Milne⁸ ha sottolineato che se inizialmente le galassie, dotate delle loro velocità attuali, fossero concentrate in un piccolo volume, quelle con la velocità più elevata avrebbero ormai percorso la distanza maggiore. Se le forze gravitazionali e di altro tipo sono trascurabili, otteniamo

⁸*Nature*, 2 luglio 1932.

in questo modo una distribuzione in cui velocità e distanza dal centro sono proporzionali. Pur tenendo conto della dipendenza della velocità dalla distanza, questa ipotesi crea una nuova difficoltà riguardo al verificarsi delle velocità. Per ottenere una distribuzione moderatamente uniforme di nebulose fino a 150 milioni di anni luce di distanza, le velocità elevate devono essere molto più frequenti di quelle basse; questa peculiare distribuzione anti-maxwelliana delle velocità risulta particolarmente sorprendente se si suppone che si sia verificata originariamente in un'aggregazione compatta di galassie.

Potrei discutere questi suggerimenti più approfonditamente se fossero gli ultimi. Ma sembrerebbe che, se non ci atteniamo a uno scopo definito, si apra un campo illimitato di speculazioni; e quando queste osservazioni saranno lette, potrebbe essere in voga qualche altra ipotesi. Definisco il mio scopo come quello di scoprire quale luce (se ce n'è una) la recessione delle nebulose a spirale possa gettare sul problema della costante cosmologica. In considerazione di questo scopo, sembra sufficiente notare che questa non è l'unica direzione in cui potremmo cercare la spiegazione del fenomeno delle nebulose, per poi procedere con il nostro compito.⁹

⁹Ulteriori riferimenti alle teorie rivali sono riportati più avanti.

3 CARATTERISTICHE DELL'UNIVERSO IN ESPANSIONE

Il mondo è una bolla, e la vita dell'uomo
meno di una spanna. Francis Bacon

Un mondo sferico, chiuso ma in continua espansione, è un nuovo terreno di gioco per il pensiero. Giochiamoci un po' per familiarizzarci con esso. In questo capitolo mescolerò risultati che potrebbero rivelarsi di importanza scientifica con risultati che probabilmente non sono altro che curiosità matematiche. L'obiettivo è quello di annotare tutto ciò che sembra degno di nota, anche se non riusciamo a vedere che abbia un'importanza fondamentale in natura.

Per un modello dell'universo, rappresentiamo lo spazio sferico con un palloncino di gomma. Le nostre tre dimensioni di lunghezza, larghezza e spessore dovrebbero essere tutte contenute nel rivestimento del palloncino; ma c'è spazio solo per due, quindi il modello dovrà sacrificarne una. Ciò non ha molta importanza. Immaginiamo le galassie immerse nella gomma. Ora gonfiamo costantemente il palloncino. Questo è l'universo in espansione.

Si suppone che le galassie siano distribuite più o meno uniformemente sulla superficie; tuttavia, la nostra conoscenza osservativa è limitata a una porzione che corrisponde approssimativamente alle dimensioni della Francia su un globo terrestre. Le galassie hanno moti individuali, ovvero moti rispetto al materiale del pallone, ma questi sono relativamente piccoli; in generale, si allontanano l'una dall'altra semplicemente per lo stiramento della gomma. Il palloncino, come l'universo, è soggetto a due forze opposte; quindi possiamo supporre che la pressione interna che tende a gonfiarlo corrisponda alla repulsione cosmica, e la tensione della gomma che cerca di contrarlo corrisponda all'attrazione reciproca delle galassie, sebbene qui l'analogia non sia molto precisa. Inizialmente c'era un equilibrio; ma una perturbazione ha causato una leggera espansione. Ciò assottigliò la gomma e la rese meno in grado di resistere all'espansione. Più si espandeva, minore era la resistenza offerta all'espansione. Il palloncino ora ha probabilmente superato di parecchie volte le sue dimensioni originali e la tensione della gomma è diminuita a tal punto da rallentare poco l'espansione.

È possibile ottenere una certa quantità di dati quantitativi sulle dimensioni, ecc., dell'universo, e li fornisco immediatamente. I dati non sono definitivi, ma ritengo che (a), (b), (c), (d) non siano suscettibili di errori superiori a un fattore 2 e che gli altri due risultati lo siano di un fattore 4:

(a) Velocità di allontanamento degli oggetti distanti (valore pieno se l'attrazione reciproca delle galassie è trascurabile) = 528 km/s chilometri al secondo per distanza in megaparsec.

(b) Raggio iniziale dell'universo prima dell'inizio dell'espansione = $328 \text{ Mpc} = 1068$ milioni di anni luce.

(c) Massa totale dell'universo = $2.14 \cdot 10^{55} g = 1.08 \cdot 10^{22}$ masse solari.

(d) Numero di protoni nell'universo = numero di elettroni = $1.29 \cdot 10^{79}$.

(e) Densità media iniziale della materia nell'universo = $1.05 \cdot 10^{-27} \text{ g/cm}^3 = 1$ atomo di idrogeno ogni 1580 cm^3 .

(f) Costante cosmologica (λ) = $9.8 \cdot 10^{-55} \text{ cm}^{-2}$.

Questi risultati sono correlati: quando uno di essi è noto, gli altri possono essere dedotti con precisione. Pertanto, dipendono tutti dal valore 528 che qui adottiamo come velocità di recessione. Dalle velocità di recessione osservate nelle nebulose a spirale sono stati pubblicati

valori compresi tra 450 e 550. A rigor di termini, la velocità osservata dovrebbe essere aumentata per ottenere il valore completo riferito in (a), perché vogliamo liberare il risultato dall'influenza dell'attrazione gravitazionale; ma facendo la migliore stima possibile delle masse delle nebulose, riteniamo che la loro reciproca attrazione gravitazionale non sia tale da fare una differenza importante. Molti astronomi adotterebbero un valore superiore a 550, ritenendo che la scala di Hubble per le distanze delle nebulose sia sistematicamente troppo grande. Per questo motivo non sarebbe molto sorprendente se il valore reale della costante fosse addirittura di 1000 km/s per mega parsec.

Il valore 528 qui utilizzato è stato adottato per le ragioni teoriche discusse nel Capitolo IV. Dipendeva da uno sviluppo preliminare della teoria e ora posso prevedere che verrà modificato (probabilmente aumentato) nella teoria definitiva. Potrei forse fare un tentativo migliore con questo valore ora; ma non sembra opportuno modificare ulteriormente la teoria finché è ancora incompleta. Pertanto, allo stato attuale, sia i valori osservati che quelli teorici sono soggetti a una certa incertezza. Tuttavia, poiché 528 è quasi il valore più basso suggerito, presumibilmente non esagereremo gli effetti dell'espansione se lo adottiamo.

Il raggio iniziale dell'universo è dato in (b), ma non siamo in grado di calcolare il raggio attuale. È piuttosto allettante non conoscere una quantità così importante; e sfortunatamente non ci sono molte prospettive di conoscerla. Nutro una debole speranza che un giorno ci venga rivelato dai raggi cosmici, se questi sono davvero extraterrestri. Altrimenti l'unico metodo è stimare la densità media della materia nell'universo e confrontarla con la densità iniziale indicata in (e); poiché la massa non può essere cambiata in modo significativo, il confronto fornirà l'espansione del volume e quindi l'espansione del raggio. Per trovare la densità attuale dovremmo contare il numero medio di galassie in un dato volume, calcolare il numero medio di stelle per galassia e la massa media di una stella, e tenere conto anche della materia diffusa all'interno delle galassie e di quella ancora più diffusa tra le galassie. Temo che una tale stima possa difficilmente essere attendibile con un fattore 100. Il risultato, tuttavia, sembra essere ben al di sotto del valore 10^{-27} trovato per la densità iniziale.

C'è una curiosa differenza tra misurare il raggio di curvatura dell'universo in espansione e misurare il raggio della superficie terrestre. Il raggio terrestre non crea problemi, a patto che le misure geodetiche si estendano su un'area sufficientemente ampia. Si potrebbe quindi pensare che la nostra difficoltà nel misurare il raggio attuale dell'universo sia dovuta alla piccolissima area della nostra indagine, e che verrà eliminata quando l'indagine sarà sufficientemente estesa. Ma l'analogia non regge perché, a causa del ritardo dei messaggi luminosi provenienti da parti lontane dell'universo, le informazioni che possono fornirci sono così obsolete che sarebbero inutili come guida per il raggio attuale.

Quando se ne presenterà l'occasione, a titolo di esempio, assumerò che si sia verificata un'espansione di 5 volte il raggio originale; ma questo numero è solo una supposizione.

La massa della nostra galassia è approssimativamente stimata tra 10^{10} e 10^{11} volte la massa del Sole. La galassia media sembra essere più piccola. Dalla massa totale dell'universo indicata in (c) concludiamo che c'è abbastanza materia per almeno centomila milioni di galassie.

Una curiosa difficoltà sorge nello stabilire il numero di elettroni o protoni nell'universo. Anche contandoli uno per uno, non si ottiene un risultato univoco, perché esistono due modi di contarli, e uno ne dà il doppio dell'altro. Non si può dire che uno dei due sia sbagliato. Secondo un modo di vedere, quando abbiamo contato le particelle in un emisfero del mondo sferico abbiamo terminato il conteggio, e l'altro emisfero ci fornisce nuovamente le stesse particelle.¹ Quando adottiamo questa concezione, si dice che utilizziamo uno spazio ellittico (sebbene il termine "ellittico" non sembri molto appropriato). In realtà, non importa quale concezione adottiamo,

¹Si prenda una striscia lunga e stretta di carta assorbente con diverse macchie e disponile a forma di anello con una torsione. Se si contano le macchie in modo continuo lungo la superficie, dopo un po' ci si ritroverà a contarle di nuovo dall'altro lato.

purché aderiamo costantemente ad una. Io adotto sempre l'altra concezione e conto entrambi gli emisferi dello spazio sferico.

Per coloro che desiderano esaminare l'interrelazione di questi risultati, aggiungo le principali formule matematiche con cui vengono derivati. Il volume di uno spazio sferico di raggio R è

$$2\pi^2 R^3$$

Questo è maggiore del volume euclideo ordinario di una sfera. È importante ricordare che lo spazio sferico non è una sfera euclidea, ma la superficie di un'ipersfera quadridimensionale.

Chiamiamo il raggio iniziale (di Einstein) R_e e la massa totale M . Questi sono correlati alla costante cosmica da

$$\lambda = \frac{I}{R_e^2} \quad \frac{GM}{c^2} = \frac{1}{2}\pi R_e$$

essendo G la costante di gravitazione ($6.66 \cdot 10^{-8}$) e c la velocità della luce. Questi risultati furono ottenuti da Einstein nel 1916.

La distanza intorno al mondo è $2\pi R$, come se formasse un circuito di raggio R , sebbene fisicamente la curvatura debba essere considerata una rappresentazione fittizia e otteniamo letteralmente "il giro del mondo" procedendo dritti. È solo in senso medio che R è il raggio di curvatura: se osserviamo l'universo microscopicamente, le regioni vuote hanno meno curvatura e le regioni occupate dalla materia hanno più curvatura. Un'importanza particolare è attribuita al raggio di curvatura dello spazio *vuoto*, R_s . Questo è dato da

$$R_s = R_e \sqrt{3} \quad \lambda = \frac{3}{R_s^2}$$

Il raggio di curvatura delle regioni vuote rimane costante, mentre il raggio medio si espande. Pertanto, la formula precedente per R_s è valida in ogni istante e non solo nella condizione di equilibrio iniziale. Questo in una certa misura compensa la nostra mancanza di conoscenza del raggio attuale dell'universo; conosciamo (approssimativamente) il raggio di curvatura attuale di qualsiasi regione vuota.

La velocità limite di recessione delle nebulose a spirale o di altri oggetti distanti è

$$\frac{c}{R_s} \text{ per unità di distanza}$$

Ciò si ottiene quando l'espansione è proceduta al punto da ridurre a nulla l'attrazione reciproca delle nebulose. Se q è l'espansione, ovvero il rapporto tra il raggio attuale e il raggio originario, la formula che tiene conto della gravitazione reciproca è

$$\frac{c}{R_s} \sqrt{\left(1 - \frac{3}{q^2} + \frac{2}{q^3}\right)}$$

Pertanto quando $q = 2$, la velocità di recessione è 70.7% del valore limite; quando $q = 5$ è il 94,7%. La formula è dovuta a Lemaître.

La definizione precisa di R_s è "il raggio di curvatura sferica di qualsiasi sezione tridimensionale del continuum quadridimensionale dello spazio e del tempo immaginario". Per uno spazio non in espansione, è il raggio di curvatura come viene normalmente rappresentato, ma la geometria dello spazio in espansione è troppo complessa per consentirne un'immagine comprensibile. Si potrebbe pensare che quando l'universo si espande, il suo raggio non possa mai diventare maggiore del raggio di curvatura dello spazio vuoto; ma questo si riferisce a una componente di curvatura diversa da quella misurata da R_s .

II

Una delle differenze inizialmente notate tra l'universo di Einstein e quello di de Sitter era che la luce poteva girare attorno a un universo di Einstein, ma non a un universo di de Sitter. Il nostro universo in espansione è in cammino da una condizione all'altra, e ci chiediamo come si comporterà la luce al suo interno.

Nel corso dell'espansione c'è un momento preciso dopo il quale la circumambulazione cessa di essere possibile. Sembra certo che siamo ben oltre questo momento, quindi un raggio di luce emesso ora non tornerà mai più al suo punto di partenza. D'altra parte, la luce che vediamo ora è stata emessa in passato. Potrebbe quindi esserlo stata prima del momento critico e aver fatto il giro del mondo prima di raggiungerci. Quindi, idealmente, è ancora possibile per noi vedere il mondo; gli eventi così visti devono essere tutti accaduti prima del momento critico.

Ciò può sembrare misterioso, ma il mistero scompare in gran parte se ricordiamo che anche all'inizio, quando la circonferenza era al suo minimo, la luce impiegava 6700 milioni di anni per compiere un giro completo. Grandi cambiamenti stanno avvenendo in quel periodo; l'universo raddoppia il suo raggio ogni 1300 milioni di anni. La luce è come un corridore su una pista in espansione, il cui traguardo si allontana più velocemente di quanto possa correre.

Nei primi giorni, quando l'universo era appena perturbato dall'equilibrio e il tasso di espansione era lento, la luce e le altre radiazioni giravano in tondo intorno all'universo finché non venivano assorbite. Questa giostra durò finché l'universo non si espanse fino a 1.003 volte il suo raggio iniziale. Poi suonò la campana per l'ultimo giro; le onde luminose che si muovevano in quel momento avrebbero compiuto un solo altro giro per il resto dell'eternità; quelle che iniziarono dopo non avrebbero mai completato il giro.

Qualche tempo dopo, quando l'espansione raggiunse 1.073^2 , iniziò l'ultimo mezzo giro. Da quel momento in poi, divenne impossibile per la luce percorrere metà del suo percorso, cosicché, in corrispondenza di qualsiasi stella o sistema, esiste una regione dell'universo che la sua luce non può più raggiungere. E se la luce non può, nessun'altra influenza causale può raggiungerla, poiché nessun tipo di segnale può viaggiare più veloce della luce. A volte ho immaginato lo spazio sferico come una bolla. Il nostro universo in espansione è una bolla in espansione. Sembra corretto affermare che quando l'espansione ha raggiunto 1.073 *la bolla è scoppiata*. Infatti, le regioni tra cui nessuna influenza causale può mai passare sono scollegate come i frammenti di una bolla.

Come ho già detto, è ancora possibile per noi vedere cose dentro o attraverso le regioni che ora sono separate da noi, perché c'è un ritardo nei messaggi luminosi. In tal caso, ciò che vediamo si riferisce a un tempo precedente allo scoppio della bolla; la luce è passata prima che si verificasse la rottura.

Mentre la luce viaggia nell'universo in espansione, si arrossa. Lemaître ha dimostrato che l'arrossamento segue una semplice regola: la lunghezza d'onda aumenta in rapporto al raggio dell'universo al momento dell'osservazione rispetto al raggio al momento dell'emissione della luce. Per una luce che ha percorso metà del giro del mondo o più, questo arrossamento è considerevole. Abbiamo visto che tale luce deve essere stata emessa prima che l'espansione raggiungesse 1.073, quindi il raggio al momento dell'emissione non era molto diverso dal raggio di Einstein. Se l'espansione è ora 5, la lunghezza d'onda aumenterà di 5 volte, il che sposterebbe la maggior parte degli spettri stellari quasi interamente nell'infrarosso. È stato suggerito che una nebulosa vista in una direzione del cielo potrebbe essere il "retro di una nebulosa vista nella direzione opposta". A parte l'improbabilità generale, l'estremo rossore di una o dell'altra immagine vanifica questa interessante congettura.

²I valori critici 1.003 e 1.073 sono stati calcolati da de Sitter. I momenti critici si verificano più avanti nello spazio "ellittico", perché i corridori prendono una scorciatoia tralasciando un emisfero.

Dovrei spiegare che lo spostamento Doppler verso il rosso dovuto alla recessione della sorgente luminosa è lo *stesso* dell'arrossamento qui descritto. Dobbiamo spiegarlo con parole diverse, perché ora stiamo contemplando il passaggio della luce su distanze molto maggiori. Se la Terra dovesse espandersi, il viaggio tra due porti qualsiasi si allungherebbe, e una compagnia transatlantica potrebbe aumentare le tariffe sulla base del fatto che New York si è allontanata da Liverpool; ma per un giro del mondo, l'affermazione che Liverpool si sia allontanata da Liverpool, per quanto giustificabile, sarebbe difficilmente una spiegazione illuminante. L'arrossamento della luce, come l'aumento delle tariffe, è attribuito talvolta alla recessione e talvolta più direttamente all'espansione, a seconda delle circostanze.

Se ti trovi in un universo sferico e guardi in qualsiasi direzione, allora, se non ci sono ostacoli, dovresti vedere la parte posteriore della tua testa. Beh, non esattamente. La luce ha impiegato più di 6 miliardi di anni per compiere un giro completo, e la tua testa non era lì molto tempo fa; ma dovresti vedere cosa c'era nella posizione ora occupata dalla tua testa. Non avrai bisogno di un potente telescopio per osservarlo, perché in realtà hai già il telescopio più potente immaginabile, perfettamente calibrato su di esso, uno strumento con un'apertura di qualche miliardo di anni luce. A questo scopo, lo spazio sferico è uno strumento ottico, né lente né specchio, ma ugualmente efficace nel mettere a fuoco i raggi.

Temo, tuttavia, che non lo vedrete davvero, anche se riuscite a liberarvi di ogni ostacolo. Un grande telescopio non è sempre un buon telescopio; le sue prestazioni dipendono dalla perfetta precisione delle superfici delle lenti o degli specchi. L'universo reale non è stato concepito per uno strumento ottico, e non è una sfera sufficientemente precisa da fornire risultati degni di nota.

Questo ci porta alla "teoria dei fantasmi", un'idea sviluppata più come curiosità matematica che come seria speculazione fisica. In un mondo perfettamente sferico, i raggi di luce emessi in tutte le direzioni da un punto, dopo aver percorso il giro del mondo, convergeranno verso lo stesso punto; si forma così un'immagine reale da cui la luce divergerà nuovamente in tutte le direzioni. Tale immagine potrebbe otticamente essere scambiata per un corpo materiale. A causa del tempo impiegato per circumnavigare il globo, l'immagine non si forma prima di almeno 6 miliardi di anni dopo la sua origine. Altre immagini si formerebbero dopo due, tre, ecc. Possiamo quindi immaginare che lo spazio sia popolato non solo da stelle e galassie reali, ma anche da fantasmi di stelle che esistevano 6 miliardi, 12 miliardi, ecc. di anni fa.

Sarebbe un bello scherzo da parte della natura nei confronti dell'astronomo, ma non credo che si lascerebbe ingannare. I fantasmi, formati da una luce che ha percorso il mondo, sarebbero più rossicci di quelli autentici, e quindi facilmente distinguibili. Inoltre, il trucco potrebbe essere eseguito solo nel mondo sferico ideale del matematico; l'universo reale è troppo irregolare per focalizzare i raggi dopo il loro percorso. Ma l'idea ha un altro tipo di interesse perché solleva un'importante questione sul significato della relatività.

Considerando un mondo trasparente perfettamente sferico, è evidente che il fantasma si forma nel punto occupato dalla stella quando la luce fu emessa, non nel punto ora occupato dalla stella. In effetti, la stella potrebbe essersi da allora distribuita in numerosi frammenti. Pertanto, se osserviamo simultaneamente una stella e il suo fantasma, ci sarà in generale una distanza considerevole tra loro a causa del moto della stella durante il percorso della luce. Una stella che coincide con il suo fantasma non si è mossa. Questo ci fornisce una prova osservativa di "quiete assoluta" che sembra contraddire il principio di relatività. Dobbiamo ammettere che un universo perfettamente sferico fornisce un sistema di riferimento per distinguere quiete e moto, spazio e tempo, che può essere considerato come ultimo e assoluto. Ci si potrebbe chiedere: non è forse proprio questo ciò che gli assolutisti hanno sostenuto? Anche se lo fosse, non credo che otterrebbero un grande successo ammettendo che esisterebbe un sistema di riferimento assoluto se l'universo fosse diverso da quello che è in realtà. Il mondo perfettamente sferico è un'invenzione matematica e qualsiasi piccola deviazione dalla sfera farà sì che il fantasma si

diffonda, cosicché la quiete assoluta torna a essere una concezione indefinita. In un universo perfettamente sferico non accade mai nulla, perché sono le irregolarità a costituire gli eventi. Persino l'espansione del suo raggio (per repulsione cosmica) non significa nulla, perché non esiste un parametro con cui confrontarlo. Quindi, la nostra ammissione che può esistere un tempo assoluto è vincolata alla condizione che in esso non accada mai nulla.

Proprio come un sistema di riferimento spazio e tempo definito con riferimento al sole è appropriato per affrontare problemi relativi al sistema solare, così un sistema di riferimento definito con riferimento alla materia dell'universo nel suo complesso è appropriato per affrontare l'universo nel suo complesso. In un mondo sferico uniforme, il sistema di riferimento appropriato all'universo nel suo complesso è appropriato anche a ogni sua parte; quindi la consueta molteplicità di sistemi di riferimento spazio-tempo viene soppressa. Il principio di relatività è che la struttura di un uomo vale quanto quella di un altro; non viene turbato dall'immaginare un mondo ideale in cui ogni uomo si trovi nella stessa struttura: e immaginare circostanze in cui non ci sarebbe alcuna opportunità di applicare il principio è una cosa molto diversa dal negarne la validità.

In questo libro parlo di spazio e tempo come completamente distinti e tratto la simultaneità come definita in modo univoco; è da intendersi che utilizzo un sistema di riferimento dato dall'universo nel suo complesso, essendo l'universo a questo scopo stato levigato come nella geodesia la Terra lo è nel geoide. Non affermo altro per questo sistema di riferimento se non che sia conveniente; in particolare, la simultaneità (come da esso definita) non ha alcun particolare significato filosofico.

III

Ho parlato della propagazione della luce, poiché è il tipo di radiazione più noto; ma la circumambulazione diventa una possibilità più pratica se consideriamo le radiazioni altamente penetranti, in particolare i raggi cosmici che si ritiene arrivino nella nostra atmosfera dall'esterno. Sono note la densità media della materia nello stato iniziale dell'universo e la lunghezza della circonferenza terrestre; da qui si può facilmente calcolare che la quantità media di ostacolo al passaggio di un raggio cosmico attorno al mondo è equivalente a 7 cm di acqua. È noto che i raggi possono penetrare a profondità molto maggiori, tanto da poter compiere molti giri. Sembrerebbe che i raggi cosmici generati quasi dall'inizio dei tempi stiano ancora viaggiando nello spazio, con solo una perdita relativamente piccola per assorbimento.

Ciò è in linea con la simmetria osservata nella loro distribuzione, che altrimenti sembra inspiegabile. L'interesse astronomico per i raggi cosmici fu suscitato per la prima volta dalle ricerche di Kolhörster; a quel tempo si affermava che provenissero prevalentemente da direzioni nel piano della Via Lattea. Di conseguenza, si supposeva che avessero origine nelle nebulose gassose e nella materia diffusa presenti nella nostra galassia. Il successivo e più accurato lavoro di Millikan ha dimostrato, tuttavia, che non esiste una tale preferenza galattica e che la distribuzione è approssimativamente uniforme in tutte le direzioni. Se quindi avessero un'origine extraterrestre, la sorgente dovrebbe essere distribuita simmetricamente attorno alla Terra. Ma procedendo verso l'esterno, a partire dalla Terra, l'astronomia non rivela nulla con la necessaria simmetria finché non consideriamo l'intero universo. Potremmo forse trovare nei raggi cosmici un argomento a sostegno dello spazio sferico chiuso; in un sistema non chiuso sarebbe una strana coincidenza se la Terra fosse posta in una posizione così centrale da ricevere i raggi in modo uniforme da tutte le direzioni.

Si suppone generalmente che i raggi siano di origine subatomica e si è tentato di dedurre l'origine esatta dalla lunghezza d'onda (che la teoria matematica deduce dal potere di penetrazione). Proprio come l'origine di un raggio luminoso si deduce dalla sua lunghezza d'onda, così si potrebbe dedurre il processo subatomico che ha originato un raggio cosmico. Ma in

questi tentativi si è dato per scontato che la lunghezza d'onda osservata sia la lunghezza d'onda originale dei raggi. Viene in mente l'americano di "*Innocents Abroad*" che si rifiutò di interessarsi a una mummia e volle che gli venisse mostrato un "cadavere fresco e bello". Chi studia i raggi cosmici ha dato per scontato di avere a che fare con un cadavere fresco e bello, e ne ha identificato il corpo basandosi su questo presupposto. Suggestisco che non si tratti di un cadavere fresco, ma di una mummia molto antica. Questo modificherà notevolmente l'identificazione. Se i raggi cosmici risalgono principalmente al periodo relativamente lungo in cui l'universo era vicino al suo stato iniziale di Einstein, la lunghezza d'onda è ora aumentata forse di 5 volte o più.

Se ho ragione, la radiazione cosmica è un museo: una collezione di reperti di un'antichità remota. Questi reperti recano impressa un'iscrizione che indica le dimensioni del mondo nelle sue prime fasi. Chiunque riesca a identificare il processo subatomico che ha dato origine ai raggi sarà in grado di leggere l'iscrizione e dirci di quanto si è espanso l'universo da allora.

Si è scoperto che l'intensità della radiazione cosmica che raggiunge la Terra non è di molto inferiore all'intensità della luce stellare (cioè la radiazione proveniente da tutte le stelle tranne il Sole). La Terra, tuttavia, si trova in una posizione privilegiata rispetto alla luce stellare, trovandosi al centro di una delle galassie, e non ha alcun vantaggio rispetto ai raggi cosmici che si presume si siano diffusi più o meno uniformemente in tutto lo spazio. Pertanto, in una regione più media, la luce stellare è molto meno intensa della radiazione cosmica; e in un'indagine generale sulla radiazione nell'universo è sufficiente considerare solo la radiazione cosmica. Si può verificare che la massa e l'energia della radiazione cosmica in tutto l'universo sono piccole rispetto alla massa della materia, e non influenzano materialmente le formule e i calcoli all'inizio di questo capitolo.

A volte ci si chiede: che fine fa tutta la radiazione che viene continuamente riversata nello spazio? Un'ipotesi diffusa è che in qualche modo venga infine trasformata in materia. Questa ipotesi non mi è mai sembrata molto probabile, ed è smentita da una conclusione recentemente avanzata da de Sitter. La quantità totale di radiazione nell'universo (misurata in massa o in energia) sta effettivamente diminuendo. Tralasciando per il momento i cambiamenti dovuti a emissione e assorbimento, il numero di quanti rimane costante; ma il graduale aumento della lunghezza d'onda già discusso implica che l'energia di ciascun quanto diminuisce; in effetti, l'energia della radiazione diminuisce esattamente nella stessa proporzione con l'espansione del raggio dell'universo. Questo tasso di diminuzione è ormai troppo rapido per essere compensato da nuovi accrescimenti derivanti dalla radiazione emessa dalle stelle e dalla materia nebulosa.

Possiamo qui richiamare un risultato che, sebbene si riferisca a un argomento completamente diverso, è strettamente correlato matematicamente.³ Non ci aspettiamo che la regola secondo cui la velocità di allontanamento di una nebulosa a spirale è proporzionale alla sua distanza venga rispettata da ogni individuo. La regola si riferisce a medie, e le nebulose avranno velocità individuali sovrapposte alla velocità sistematica di allontanamento. A volte si è pensato che fosse sorprendente che le deviazioni individuali non fossero più evidenti. La teoria, tuttavia, mostra che con il passare del tempo la velocità media individuale diminuisce nella stessa proporzione con cui l'universo si espande; ad esempio, se l'espansione è ora di 5 volte, le nebulose hanno in media solo un quinto delle velocità individuali che possedevano originariamente.

IV

Se accettiamo l'universo in espansione, la sua reazione più immediata si colloca sulla scala temporale dell'evoluzione. Tre diverse scale temporali sono state privilegiate in epoche diverse,

³La connessione è che entrambi i risultati affermano la diminuzione di una forma di energia con l'espansione dell'universo. Sono compresi in un teorema generale di Lemaître, secondo cui quando l'universo si espande la pressione varia adiabaticamente. Questo si applica sia alla pressione di radiazione che alla pressione di un gas, il "gas" in questo caso ha galassie come molecole.

che possiamo distinguere come "breve", "intermedia" e "lunga". Nessuno oggi ha una buona parola per la scala temporale breve di Kelvin, che non ammetteva più di 50 milioni di anni per l'intera durata della vita del sole e del sistema solare; e praticamente la nostra scelta sta tra la scala intermedia che attribuisce al sole un'età dell'ordine di 10^{10} anni, e la scala lunga che attribuisce la sua età in modo abbastanza preciso a $5 \cdot 10^{12}$ anni. Naturalmente, la politica dell'evoluzionista è quella di prendersi più tempo possibile per dare ai suoi processi una maggiore opportunità di realizzare qualcosa. Quindi, quando non ci sono prove concrete in un senso o nell'altro, la scala temporale più lunga ottiene la preferenza. Questo, più che un successo eclatante della teoria, spiega la popolarità della scala temporale lunga negli ultimi anni.

A volte si dimentica che delle due ipotesi, "lunga" e "intermedia", la scala temporale lunga è la più antica. È nata dalla teoria di Einstein, che forniva la quantità totale di energia in una data massa di materia. Conoscendo la massa del Sole, sapevamo esattamente quanta energia conteneva e potevamo calcolare per quanto tempo questa avrebbe mantenuto l'attuale tasso di radiazione se venisse rilasciata interamente. Se tutta l'energia di costituzione della materia viene liberata, la materia deve scomparire, quindi è necessario che elettroni e protoni si annichilino a vicenda. All'epoca delle mie prime ricerche sulla costituzione interna delle stelle (1916-1917), l'annichilazione di elettroni e protoni era l'unica fonte di energia conosciuta e adeguata alle esigenze stellari, e fu l'unica che allora discutevo; ma nel 1920 fu riconosciuta una possibile alternativa nell'energia liberata dalla trasmutazione dell'idrogeno in elementi superiori. Ciò libera poco meno dell'1% della quantità totale di energia contenuta nella materia, quindi non fornisce una quantità così abbondante come l'annichilazione totale della materia. Tuttavia, è sufficiente per la scala temporale intermedia, e forse potremmo farcela in caso di necessità.

Non esiste alcuna prova diretta che l'annichilazione di protoni ed elettroni possa verificarsi, a meno che non si consideri l'evidenza dei raggi cosmici, che secondo alcuni esperti contengono una lunghezza d'onda che indica questa origine. Se la lunga scala temporale potesse essere stabilita da ricerche astronomiche, si tratterebbe di una buona prova indiretta, poiché sembra chiaro che non vi sia modo di prevederla senza l'annichilazione della materia. Non sembra necessaria una prova diretta della formazione di elementi complessi a partire dall'idrogeno, poiché gli elementi esistono e presumibilmente esiste un modo per formarli. Tuttavia, si può osservare che la recente scoperta del neutrone rende molto più facile comprendere le fasi di questo processo.

Non credo che sia stato trovato nulla di veramente decisivo a favore o contro nessuna delle due teorie (annichilazione della materia o trasmutazione dell'idrogeno), né a favore o contro una delle due scale temporali (lunga o intermedia). Come altri sostenitori dell'avidità temporale, ho generalmente aderito provvisoriamente alla scala temporale lunga, poiché offre maggiori margini di indagine. Ma due anni fa sono rimasto profondamente scosso da uno studio sulla dinamica del nostro sistema della Via Lattea; la sua forma e la sua struttura sembrano tali da rendere impossibile che abbia potuto resistere per un periodo di tempo così lungo.⁴

In un universo che raddoppia il suo raggio ogni 1300 milioni di anni, è evidente che la lunga scala temporale di miliardi di anni è del tutto incongrua. È vero che la nostra teoria non pone alcun limite definito al tempo passato. Potrebbe esserci stato un lunghissimo periodo di equilibrio approssimativo prima che iniziasse una vera espansione; ma questo non conta molto dal punto di vista dell'evoluzione stellare. Si può dire che la storia astronomica abbia avuto inizio quando le prime condensazioni si formarono completamente e le galassie si separarono l'una dall'altra; ma a quel punto l'espansione doveva essere già in atto. È difficile supporre che tra allora e oggi siano trascorsi più di 10^{10} anni.

Pertanto, gli astronomi, che si sono crogiolati in una scala temporale enormemente lunga, sono minacciati da un taglio drastico. Anche in questi tempi di economia, un taglio di circa il 99% non è da accettare alla leggera dal dipartimento interessato. Confesso di non capire bene

⁴Halley Lecture, *The Rotation of the Galaxy* (Oxford Univ. Press 1930).

come faremo a cavarcela con questa riduzione di indennità; e non sono disposto a biasimare coloro la cui reazione è quella di cercare qualche scappatoia per evitare il taglio.

Se troviamo difficile accettare la velocità con cui l'universo sta cambiando, l'accettazione non è facilitata dalla considerazione di ciò verso cui sta cambiando. I frammenti della bolla scoppiata diventeranno continuamente più numerosi finché ogni galassia non sarà più un frammento separato. Suppongo che la distanza di una galassia dall'altra diventerà alla fine così grande, e la reciproca recessione così rapida, che né la luce né alcun'altra influenza causale potrà passare dall'una all'altra. Ogni connessione tra le galassie sarà interrotta; ciascuna sarà un universo autonomo, non influenzato da nulla al di fuori di esso. Una simile disintegrazione è piuttosto un incubo da concepire; sebbene non minacci alcun disastro particolare per il destino umano.

Ma la difficoltà relativa alla scala temporale non nasce dalle parti più recondite della teoria attuale. Resta da decidere se adottare o meno lo spazio sferico. La situazione diventa più seria se non accettiamo la spiegazione relativistica della recessione. Poiché la velocità di fuga delle nebulose è nota tramite osservazione, calcolare la data in cui si trovavano vicine in una folla congestionata è una questione di semplice aritmetica. Non è stato più di 1900 milioni di anni fa. Questo presuppone che in passato le velocità fossero elevate quanto lo sono ora. La spiegazione della relatività concede una certa tregua, poiché postula che le velocità di fuga siano state gradualmente prodotte dalla repulsione cosmica e che quindi fossero minori in passato. Le spiegazioni rivali, che non ammettono una forza repulsiva, rifiutano questa estensione e di conseguenza accentuano la difficoltà della scala temporale.

Quindi non vedo alcun vantaggio nell'abbandonare la spiegazione della relatività a favore di una delle altre teorie. Su un punto in cui i risultati attuali sembrano presentare qualche difficoltà, le altre teorie amplificano notevolmente la difficoltà. Ho molta più simpatia per quei critici che negano del tutto la recessione nebulare, ritenendo che le velocità radiali osservate siano spurie. Sono sollevati da ogni difficoltà per quanto riguarda la scala temporale.

Parlando della teoria di de Sitter-Lemaître nel settembre del 1931, dissi: "Ma la teoria dell'universo in espansione è per certi aspetti così assurda che naturalmente esitiamo ad accettarla. Contiene elementi apparentemente così incredibili che provo quasi indignazione che qualcuno possa crederci, tranne me". Le ragioni di questa eccezione sono trattate nel capitolo XIV.

V

L'espansione è un termine relativo. Quando affermiamo che l'universo si espande, cosa assumiamo come costante? Questa domanda viene posta spesso, ma la risposta non è un dettaglio. L'espansione è relativa agli standard di lunghezza comunemente accettati, ad esempio il metro lineare. La lunghezza d'onda della luce del cadmio è talvolta adottata come il miglior standard di lunghezza disponibile; espresso in termini di lunghezza d'onda del cadmio, il raggio dell'universo è in continuo aumento.

Con lo stesso criterio, il raggio di curvatura di una regione vuota dello spazio rimane costante. Possiamo facilmente vedere che, mentre una superficie nel suo complesso si gonfia, la curvatura di alcune sue porzioni può rimanere invariata.

Il fatto che l'espansione sia relativa agli standard ordinari è abbastanza chiaro quando adottiamo il punto di vista del Capitolo 1; ma il trattamento più recondito, in cui il fenomeno è presentato come un'espansione uniforme dello spazio sferico, sembra aver confuso non solo il lettore occasionale ma anche alcuni esperti. La loro idea è che, poiché ogni parte dello spazio viene gonfiata in modo uniforme, l'inflazione influenzerà le distanze tra gli elettroni nell'atomo e tra i pianeti del sistema solare tanto quanto le distanze tra le galassie. Ciò significherebbe che gli atomi, gli esseri umani, la Terra, il sistema solare si espandono alla stessa velocità dell'universo; non ci sarebbe alcuna variazione nel raggio dell'universo espresso in metri, poiché la barra del

metro si espande alla stessa velocità. Un'espansione di questo tipo, condivisa da tutto allo stesso modo, sarebbe impercettibile e, di fatto, priva di significato definibile.

L'errore nasce dal dimenticare che l'universo sferico in espansione è un modello molto semplificato. Non possiamo farvi riferimento per decidere come si comportano atomi, regoli e pianeti, perché atomi, regoli e pianeti sono stati spianati in una distribuzione di massa perfettamente continua e uniforme. L'inflazione è uniforme solo se la densità è uniforme. Se consideriamo una sfera ruvida o bitorzoluta, si scopre matematicamente che le parti ruvide non si espandono alla stessa velocità degli intervalli lisci tra di esse.

Lemaître progettò il suo spazio sferico in espansione per trattare fenomeni che interessano l'universo nel suo complesso. La sua approssimazione è grottescamente inadeguata per trattare fenomeni su scala più piccola, come il comportamento dei regoli di misura o la struttura interna di una galassia. All'interno di una galassia, la curvatura media del mondo è alcune migliaia di volte maggiore della media di Lemaître per l'universo nel suo complesso, e le sue formule sono inapplicabili.

Il risultato è che solo le distanze intergalattiche si espandono. Le galassie stesse non ne sono influenzate; e tutti i sistemi minori – ammassi stellari, stelle, osservatori umani e i loro apparati, atomi – sono completamente immuni dall'espansione. Sebbene la repulsione cosmica o tendenza espansiva sia presente in tutti questi sistemi più piccoli, essa è frenata da forze molto più grandi e non si verifica alcuna espansione. Per capire come ciò avvenga, supponiamo che al Sole e ai pianeti vengano fornite cariche elettriche piuttosto elevate dello stesso segno; ciò introdurrebbe una tendenza espansiva nel sistema solare, ma non lo trasformerebbe in un sistema in espansione. Dopo un iniziale riadattamento, i pianeti descriverebbero orbite periodiche come prima nel campo di forza modificato, e il sistema solare non si ingrandirebbe ulteriormente. Questo vale finché la carica sui pianeti non diventa così intensa che la repulsione supera la gravità; a quel punto i pianeti abbandonano l'orbita periodica e si allontanano continuamente. Pertanto, la demarcazione tra sistemi permanenti e disperdenti è piuttosto netta. Corrisponde alla distinzione tra fenomeni periodici e aperiodici.

Sembra quindi che lo "scoppio della bolla" finirà quando ogni galassia sarà un frammento separato. Non continuerà a disgregare le galassie. Queste senza dubbio contengono i loro semi di decadimento, e la repulsione cosmica potrebbe in ultima analisi contribuire a disperderne i frammenti, ma questo riguarda un futuro molto più lontano. Se pensate che la rottura dell'universo-bolla sia una prospettiva tragica, può essere di conforto pensare che quando il peggio sarà accaduto, la nostra galassia di circa centomila milioni di stelle rimarrà intatta. Non è una prospettiva poi così male.

VI

Ogni cambiamento è relativo. L'universo si sta espandendo relativamente ai nostri standard materiali comuni; i nostri standard materiali si stanno restringendo relativamente alle dimensioni dell'universo. La teoria dell'"universo in espansione" potrebbe anche essere chiamata la teoria dell'"atomo che si restringe".

È la nostra visione istintiva che siamo sempre gli stessi; è il nostro ambiente che cambia. Come con — Ricquet, il cane di Anatole France: "Uomini, animali, pietre crescono avvicinandosi e diventano enormi quando sono sopra di me. Non io. Io resto sempre grande ovunque io sia."

L'universo in espansione non è forse un altro esempio di distorsione dovuta alla nostra visione egocentrica? Sicuramente l'universo dovrebbe essere il metro di paragone e dovremmo misurare le nostre vicissitudini con esso. Assistiamo a un cambiamento relativo e gridiamo che l'universo si sta dissolvendo; allo stesso modo, un bambino che cresce, vedendo la casa familiare rimpicciolirsi, potrebbe essere sgomento per la scomparsa di proprietà di case e mobili.

L'argomentazione sembra plausibile, ma non la ritengo vera. Anche se i nostri standard fossero ritenuti responsabili dell'espansione dell'universo, non potrebbero esserlo della sua esplosione. Inoltre, i nostri standard costanti non sono necessariamente insignificanti. Ho menzionato una dimensione cosmica che rimane costante, ovvero il raggio di curvatura R_s delle regioni vuote dell'universo. Poiché ha un rapporto costante con il metro, può essere utilizzato in modo equivalente. Questo è infatti lo standard cosmico ideale, e giudicato in base a esso l'universo cambia mentre noi rimaniamo fedeli alle sue dimensioni.

Sebbene non creda che il suggerimento sia molto profondo o abbia una morale filosofica, lo seguirò per la mia ultima avventura nel nostro nuovo parco giochi. Prendiamo quindi l'intero universo come nostro standard di costanza e adottiamo la visione di un essere cosmico il cui corpo è composto da spazi intergalattici e si espande man mano che questi si espandono. O meglio, dobbiamo dire che ora mantiene le stesse dimensioni, perché non ammetterà che sia lui a essere cambiato. Osservandoci per qualche miliardo di anni, ci vede rimpicciolire; atomi, animali, pianeti, persino le galassie, si rimpiccioliscono tutti allo stesso modo; solo gli spazi intergalattici rimangono gli stessi. La Terra ruota a spirale attorno al Sole in un'orbita sempre più piccola. Sarebbe assurdo trattare la sua mutevole rivoluzione come un'unità di tempo costante. L'essere cosmico metterà naturalmente in relazione le sue unità di lunghezza e di tempo in modo che la velocità della luce rimanga costante. I nostri anni diminuiranno quindi in progressione geometrica nella scala cosmica del tempo. Su quella scala la vita dell'uomo si sta facendo più breve; i suoi settant'anni sono una durata in continua diminuzione. Grazie alla proprietà delle progressioni geometriche, un numero infinito dei nostri anni si sommerà a un tempo cosmico finito, cosicché ciò che dovremmo chiamare la fine dell'eternità è una normale data finita nel calendario cosmico. Ma in quella data l'universo si è espanso all'infinito secondo i nostri calcoli, e noi ci siamo ridotti a nulla secondo i calcoli dell'essere cosmico.

Camminiamo sul palcoscenico della vita, interpreti di un dramma a beneficio dello spettatore cosmico. Man mano che le scene procedono, egli nota che gli attori si fanno sempre più piccoli e l'azione più veloce. Quando si apre l'ultimo atto, il sipario si alza su attori nani che corrono attraverso le loro parti a velocità frenetica. Sempre più piccoli. Sempre più veloci. Un ultimo, microscopico barlume di intensa agitazione. E poi più nulla.

4 L'universo e l'atomo

Guarda il Mistero della Matematica volare - Papa, *Dunciad*

I

Ho spiegato nei capitoli precedenti che la teoria ci ha portato ad aspettarci un moto sistematico di allontanamento degli oggetti remoti, e che l'osservazione astronomica ha dimostrato che gli oggetti più remoti conosciuti si stanno allontanando rapidamente. Il punto debole di questo trionfo è che la teoria non ha fornito alcuna indicazione su quanto grande fosse la velocità di allontanamento attesa. È come se a un esploratore fosse stato dato l'ordine di cercare una creatura con una proboscide; ha portato a casa un elefante, forse un elefante bianco. Le condizioni sarebbero state soddisfatte altrettanto bene da una mosca, con molto meno fastidio per il suo vicino di casa, l'evoluzionista avido di tempo. Quindi c'è molto da discutere al riguardo. Penso che l'unico modo per dissipare la nube di dubbio sia integrare la previsione originale e dimostrare che la teoria fisica richiede non solo una recessione, ma una particolare velocità di recessione. La teoria della relatività da sola non fornirà ulteriori informazioni; ma abbiamo altre risorse. Mi riferisco al secondo grande sviluppo moderno della fisica: la teoria quantistica, o (nella sua forma più recente) meccanica ondulatoria. Combinando le due teorie possiamo ottenere il calcolo teorico desiderato della velocità di recessione.

Questa è una nuova avventura e non intendo insistere sull'accuratezza o sulla definitività del primo tentativo. Non riesco a capire come possa esserci qualcosa di seriamente sbagliato; ma d'altronde non ci si accorge mai di questi difetti finché non si presenta una nuova circostanza o non arriva qualche persona ingegnosa a mostrarci quanto siamo stati ciechi. Ma ci sono due tipi di disavventure scientifiche: potremmo imboccare una pista completamente sbagliata, oppure potremmo commettere errori temporanei nel seguire la vera strada. Mi accontenterò di giustificare in questo capitolo la mia convinzione che, in ogni caso, non stiamo commettendo il primo errore.

Secondo l'argomentazione qui sviluppata, possiamo calcolare per via puramente teorica quale dovrebbe essere la velocità di recessione delle nebulose a spirale. (Questo è soggetto alla riserva che l'effetto frenante della loro reciproca attrazione gravitazionale sia relativamente irrilevante, una condizione che sembra essere soddisfatta nello stato attuale dell'universo). Poiché alcuni piccoli fattori nelle formule sono attualmente lasciati in sospeso, vi è una temporanea indefinitezza; ma possiamo dire provvisoriamente che il risultato è compreso tra 500 e 1000 km al secondo per megaparsec. In questo calcolo non vengono utilizzate osservazioni astronomiche di alcun tipo, poiché tutti i dati provengono da laboratorio. Pertanto, quando puntiamo i nostri telescopi e spettroscopi sulle nebulose distanti e scopriamo che si stanno allontanando a una velocità entro questi limiti, la conferma è sorprendente.

La previsione originale di de Sitter e Lemaître non forniva alcuna indicazione se il fenomeno sarebbe diventato percepibile prima a distanze nebulari o a distanze 10^6 o 10^{60} volte maggiori. Non avevamo la minima idea di quanto sarebbe stato grande l'effetto. Tuttavia, grazie a nuove indagini, la quantità è definita in modo così preciso che non vi possono essere dubbi sulla corrispondenza tra gli effetti teorici e quelli osservati. Il nostro esploratore astronomico non può essere accusato di aver riportato a casa un elefante scambiandolo per una mosca; e (se posso

complicare ulteriormente la metafora zoologica) anche se si trattasse di un elefante bianco, non si tratterebbe di un nido di giumenta.

Ogni passo teorico richiede verifiche nel maggior numero possibile di direzioni. Se le idee teoriche qui impiegate avessero avuto una sola applicazione, ovvero calcolare la recessione delle nebulose, ci sarebbe stato un certo margine per "aggiustamenti". In realtà, il pericolo di aggiustamenti inconsci è ampiamente esagerato: c'è un'arte in queste equazioni fondamentali della fisica con cui non si può scherzare. Ma la nostra fiducia si rafforza naturalmente se lo stesso passo porta anche alla soluzione di un altro problema. Questo accade nel caso in questione, il cui problema associato è la relazione tra protone ed elettrone e in particolare il rapporto tra le loro masse. Qui è possibile una verifica osservativa molto delicata della teoria.

Non si tratta quindi di un problema isolato, ma di una teoria che determina contemporaneamente due delle costanti fondamentali della fisica, vale a dire la *costante cosmologica* e, attraverso essa, la recessione delle nebulose, e il *rapporto tra la massa* del protone e dell'elettrone.

Non posso esporre qui la parte matematica dell'argomentazione. Voglio piuttosto dimostrare che tutte le idee fisiche necessarie si presentano naturalmente e attendono che il matematico le esprima in simboli e ne fornisca la risposta. Con un tentativo preliminare di quest'ultimo compito, otteniamo una discreta garanzia che non sorgerà alcuna seria difficoltà.

II

Abbiamo contemplato il sistema dei fenomeni delle galassie sulla scala più grandiosa mai immaginata. Ora voglio passare all'altro estremo della scala e osservare l'interno di un atomo.

L'anello di congiunzione è la costante cosmologica. Finora l'abbiamo incontrata come fonte di una forza di dispersiva, che dilata l'universo e guida le nebulose in lungo e in largo. Nell'atomo la troveremo in una funzione diversa, regolando la scala di costruzione del sistema di elettroni satelliti. Credo che questo connubio tra grande e piccolo sia la chiave per comprendere il comportamento di elettroni e protoni.

Dalla formula si vede che la costante cosmologica è uguale a $1/R_e^2$ o a $3/R_s^2$, quindi è realmente una misura della curvatura del mondo; e al suo posto possiamo considerare il raggio iniziale dell'universo R_e , o meglio il raggio di curvatura costante dello spazio vuoto R_s . Nel presente capitolo, l'espressione generica "raggio di curvatura" o il simbolo R saranno intesi come riferiti a R_s . Essendo il raggio nel vuoto, ha lo stesso tipo di preminenza nelle equazioni fisiche che ha la velocità della luce nel vuoto. Spiegherò innanzitutto perché si prevede che il raggio di curvatura svolga un ruolo essenziale nella teoria dell'atomo.

La lunghezza è relativa. Questo è uno dei principi della teoria di Einstein, ormai divenuto un luogo comune della fisica. Ma Einstein considerava una relatività tutt'altro che elementare: secondo lui, la lunghezza è relativa a un sistema di riferimento in movimento con l'osservatore, così che, calcolata da un osservatore in movimento con una stella o un pianeta, non è esattamente uguale alla lunghezza calcolata da un osservatore in movimento con un'altra stella. Ma oltre a questo, c'è un modo molto più ovvio in cui la lunghezza è relativa. Il calcolo della lunghezza implica sempre il confronto con uno standard di lunghezza, quindi la lunghezza è relativa a uno standard di confronto. È solo il rapporto tra le estensioni che entra nell'esperienza. Supponiamo che ogni lunghezza nell'universo sia raddoppiata: nulla nella nostra esperienza verrebbe alterato. Non possiamo nemmeno attribuire un significato al presunto cambiamento. È un vuoto di senso, come se una conferenza internazionale dovesse decretare che d'ora in poi la sterlina debba essere valutata come due sterline, il dollaro come due dollari, il marco come due marchi, e così via.

Nei *Viaggi di Gulliver*, i Lillipuziani erano alti circa quindici centimetri, i loro alberi più alti circa due metri e mezzo, il loro bestiame, le loro case e le loro città in proporzioni corrispondenti. A Brobdingnag, la gente appariva alta quanto un normale campanile; il gatto sembrava circa tre volte più grande di un bue e il grano cresceva a dodici metri di altezza. Intrinsecamente,

Lilliput e Brobdingnag erano esattamente la stessa cosa; questo era in effetti il principio su cui Swift aveva elaborato la sua storia. Ci voleva un Gulliver intrusivo, uno standard di lunghezza estraneo, per creare la differenza.

In fisica si afferma comunemente che tutti gli atomi di idrogeno nel loro stato normale hanno le stesse dimensioni, ovvero la stessa distribuzione della carica elettrica. Ma cosa intendiamo con "stesse dimensioni"? O, per porre la domanda al contrario: cosa significherebbe se dicessimo che due atomi di idrogeno normali hanno dimensioni diverse, sono costruiti in modo simile ma su scale diverse? Sarebbe come Lilliput e Brobdingnag; per dare un significato alla differenza abbiamo bisogno di un Gulliver.

Si ritiene generalmente che il Gulliver della fisica sia una certa barra di metallo chiamata Metro Internazionale. Ma non è un gran viaggiatore; non credo che si sia mai allontanato da Parigi. Noi abbiamo, per così dire, il nostro Gulliver, ma abbiamo tralasciato i suoi viaggi; e i viaggi sono, come il Prof. Weyl è stato il primo a dimostrare, una parte essenziale della storia.

È evidente che la barra del metro di Parigi non è il vero Gulliver. È uno di quegli espedienti pratici che servono a uno scopo utile, ma offuscano la chiara luce della comprensione teorica. Il vero Gulliver dev'essere onnipresente. Quindi adottato il principio secondo cui, quando incontriamo il metro (o costanti basate sul metro) nelle attuali equazioni fondamentali della fisica, il nostro obiettivo deve essere quello di eliminarlo e sostituirlo con lo standard naturale onnipresente. Le equazioni, espresse in termini dello standard reale, riveleranno quindi come sono nate.

Non è difficile trovare lo standard onnipresente. In effetti, Einstein ce lo spiegò quando ci fornì la legge di gravitazione universale $G_{\mu\nu} = \lambda g_{\mu\nu}$. Alcuni anni fa ho mostrato che questa legge poteva essere enunciata nella forma: "Ciò che chiamiamo metro in qualsiasi luogo e in qualsiasi direzione è una frazione costante ($\sqrt{\frac{1}{3}}\lambda$) del raggio di curvatura dello spazio-tempo per quel luogo e quella direzione". In altre parole, il metro è semplicemente un sottomultiplo praticamente conveniente del raggio di curvatura nel punto considerato, per cui la misura in termini di metro equivale alla misurazione in termini di raggio di curvatura.

Il raggio di curvatura del mondo è il vero Gulliver. È onnipresente. Ovunque il raggio di curvatura esiste come standard di confronto che indica, se esistono, differenze come quelle che Gulliver trovò tra Lilliput e Brobdingnag. Se vogliamo, possiamo usare il suo sottomultiplo, il metro, ricordando, tuttavia, che il metro è onnipresente solo nella sua funzione di sottomultiplo del raggio. Dovremmo, se possibile, cercare di dimenticare che in certe località abbiamo cristallizzato questo metro in barre metalliche per praticità.

Possiamo ora dare un significato diretto all'affermazione che due atomi di idrogeno normali in qualsiasi parte dell'universo hanno le stesse dimensioni. Intendiamo dire che l'estensione di ciascuno di essi è la stessa frazione del raggio di curvatura dello spazio-tempo nel punto in cui si trova. L'atomo qui ha una certa frazione del raggio di questo posto, e l'atomo su Sirio ha la stessa frazione del raggio di Sirio. Non si pone il problema se la lunghezza del raggio di qui sia assolutamente la stessa di quella del raggio di Sirio; e anzi, credo che un simile paragone sarebbe privo di significato. Diciamo che è sempre lo stesso numero di metri; ma con ciò non intendiamo altro che dire che il metro è sempre lo stesso numero di centimetri.

Sembra quindi che in tutte le nostre misure stiamo realmente confrontando lunghezze e distanze con il raggio di curvatura del mondo in quel punto. A patto che si accetti la legge di gravitazione, questa non è un'ipotesi; è la traduzione della legge dai simboli alle parole. Non è semplicemente un suggerimento per un modo ideale di misurare le lunghezze; rivela le basi del sistema che abbiamo effettivamente adottato e a cui si riferiscono le leggi meccaniche e ottiche assunte nelle misurazioni e nelle triangolazioni pratiche.

Non è difficile capire come il nostro standard pratico (il metro lineare) sia una cristallizzazione dello standard ideale (il raggio di curvatura, o una sua sotto unità). Poiché il raggio di curvatura è l'unità di misura a cui si fa riferimento nelle nostre equazioni fisiche fondamentali, qualsiasi cosa la cui estensione sia determinata da equazioni fisiche costanti avrà una lunghezza costante

in termini di tale unità. Pertanto, la teoria fisica che prevede che l'atomo di idrogeno normale abbia le stesse dimensioni in termini di raggio di curvatura ovunque si trovi, prevederà anche che una barra solida in uno stato specificato abbia le stesse dimensioni in termini di raggio di curvatura ovunque si trovi. Il fatto che l'atomo abbia dimensioni costanti in termini di metro pratico è un caso di "cose che sono in un rapporto costante con la stessa cosa, sono in un rapporto costante tra loro".¹

La semplificazione ottenuta utilizzando il raggio di curvatura effettivo come unità di lunghezza (invece di una sotto unità) è che tutte le lunghezze diventeranno angoli nella nostra visione del mondo. La misura di qualsiasi lunghezza sarà l'"inclinazione dello spazio" nel passaggio da un'estremità all'altra". È vero che questi angoli non si trovano nello spazio reale, ma in dimensioni fittizie aggiunte allo scopo di ottenere un'immagine; ma la giustificazione dell'immagine è che illustra le relazioni analitiche e questi angoli si comporteranno in modo analogo agli angoli spaziali nelle equazioni matematiche.

Per riassumere questa prima fase della nostra indagine: se nelle equazioni più fondamentali della fisica adottiamo il raggio di curvatura R_s come unità invece delle attuali unità arbitrarie, avremo almeno compiuto il primo passo verso la loro riduzione a una forma più semplice. Sappiamo che molte equazioni si semplificano quando le velocità sono espresse in termini della velocità della luce nel vuoto; ci aspettiamo una semplificazione corrispondente; quando le lunghezze sono espresse in termini del raggio di curvatura del vuoto. Quando l'equazione è in questo modo liberata da complicazioni irrilevanti, dovrebbe essere più facile individuarne il vero significato. Non possiamo apportare questo cambiamento di unità finché il rapporto tra R_s e la nostra unità ordinaria è sconosciuto; ma l'osservazione delle nebulose a spirale ci ha fornito quello che provvisoriamente supponiamo essere un valore approssimativo di R_s così che ora è possibile procedere con il nostro piano.

III²

Nella geometria elementare, generalmente pensiamo allo spazio come costituito da infiniti punti. Ci avviciniamo maggiormente al significato fisico dello spazio se lo pensiamo come una rete di distanze. Ma questo non è sufficiente, poiché abbiamo visto che sono solo i rapporti tra le distanze a entrare nell'esperienza fisica. Affinché uno spazio possa corrispondere esattamente alla realtà fisica, deve poter essere costruito in base a rapporti di distanze.

Il matematico puro non è vincolato da tali considerazioni e inventa liberamente spazi costituiti solo da punti senza distanze, o spazi costruiti a partire da distanze assolute. Nell'adattare la sua opera all'applicazione dello spazio nell'universo fisico, dobbiamo selezionare quella parte di essa che sia conforme al requisito di cui sopra. Per questo motivo dobbiamo respingere la sua prima proposta di spazio piatto. Lo spazio piatto non può essere costruito senza lunghezze assolute, o almeno senza una concezione di comparabilità a priori delle lunghezze a una distanza che difficilmente può essere distinta dalla concezione di lunghezza assoluta.³

¹Per una spiegazione più completa, vedere *La natura del mondo fisico*, capitolo VII.

²Questa sezione è principalmente un commento aggiuntivo ai principi esposti nel paragrafo II. Se ritenuto troppo difficile, può essere omissa. L'argomento principale è ripreso nel paragrafo IV.

³Nella teoria pre-relativistica, e nella forma originale della teoria di Einstein, il "confronto di lunghezze e distanza" era considerato assiomatico; vale a dire, esisteva una reale differenza di altezza tra il lillipuziano e il gigantesco, indipendentemente da qualsiasi connessione fisica tra le isole. Il fatto che si trovassero nello stesso universo, fenomeni accessibili alla stessa coscienza, non aveva nulla a che fare con il confronto. Una tale concezione di comparabilità illimitata è difficilmente distinguibile dalla concezione di lunghezza assoluta. In una geometria basata su questo assioma, lo spazio svolge solo metà del suo compito; lo scopo di una rappresentazione di campo delle relazioni tra oggetti viene vanificato se ammettiamo che la relazione spaziale più evidente, il rapporto di grandezza, esista a priori e non sia analizzabile dalla teoria dei campi come lo sono altre relazioni. La teoria di Weyl rifiutava l'assioma di comparabilità a distanza, e inizialmente si pensò

Lo spazio piatto, essendo privo di caratteristiche, non contiene in sé il requisito per calcolare lunghezza e dimensione, ovvero uno standard di confronto onnipresente. Ma a cosa serve uno spazio che non assolve alle funzioni dello spazio, vale a dire costituire uno schema di riferimento per tutte quelle relazioni fisiche – lunghezza, distanza, dimensione – che sono considerate spaziali? Poiché non costituisce un sistema di riferimento per la lunghezza, il termine "spazio" è improprio. Qualunque sia la definizione che il matematico puro può adottare, il fisico deve definire lo spazio come qualcosa caratterizzato in ogni suo punto da una grandezza intrinseca che può essere utilizzata come standard per calcolare le dimensioni degli oggetti in esso collocati.

Non può sorgere alcun dubbio sul fatto che l'unità di confronto per il calcolo di lunghezze e distanze sia una grandezza intrinseca allo spazio, o a qualche altra qualità fisica dell'universo, o sia uno standard assoluto esterno all'universo. Qualunque cosa incarni questa unità di confronto è *ipso facto* lo spazio della fisica. Lo spazio fisico, quindi, non può essere privo di caratteristiche. Dal punto di vista della terminologia geometrica, le caratteristiche dello spazio sono descritte come curvature (incluse le ipercurvature), come già spiegato; non si intende qui implicare alcuna effettiva curvatura in nuove dimensioni. Non abbiamo quindi altra scelta che cercare lo standard naturale di lunghezza tra i raggi di curvatura o ipercurvatura dello spazio-tempo.

Per il matematico puro, il raggio di curvatura è una caratteristica incidentale, come il sorriso del gatto del Cheshire. Per il fisico, invece, è una caratteristica indispensabile. Sarebbe esagerato affermare che per il fisico il gatto sia solo incidentale rispetto al sorriso. La fisica si occupa di interrelazioni, come quella tra gatti e sorrisi. In questo caso il "gatto senza sorriso" e il "sorriso senza gatto" vengono ugualmente accantonati come fantasie puramente matematiche.

Una volta ammesso che ovunque esiste un raggio di curvatura pronto a servire da standard di confronto, e che le distanze spaziali sono espresse direttamente o indirettamente in termini di questo standard, la legge di gravitazione ($G_{\mu\nu} = \lambda g_{\mu\nu}$) ne consegue senza ulteriori presupposti; e di conseguenza è stabilita l'esistenza della costante cosmologica λ con la corrispondente forza di repulsione cosmica. Essendo in questo modo basata su una necessità fondamentale dello spazio fisico,⁴ la posizione della costante cosmologica mi sembra inespugnabile e se mai la teoria della relatività dovesse cadere in discredito, la costante cosmologica sarà l'ultima roccaforte a crollare. *Far cadere la costante cosmologica significherebbe far crollare lo spazio.*

Sarebbe un luogo comune affermare che lo spazio non è un concetto ultimo; poiché nella visione relativistica della fisica ogni concetto è un intermediario tra altri concetti. Come nell'universo chiuso descritto nel Capitolo II, dove le galassie formano un sistema senza centro e nulla all'esterno, così le concezioni della fisica si collegano in un sistema senza confini; il nostro obiettivo non è raggiungere una concezione ultima, ma completare il cerchio della relazione. Abbiamo concluso che lo standard di comparazione onnipresente deve essere una caratteristica dello spazio, perché è funzione dello spazio fornire tale standard; ma possiamo indagare ulteriormente come si originano lo spazio e lo standard in esso contenuto.

Lo spazio in cui l'atomo è raffigurato come avente posizione e dimensione è una concezione intermedia utilizzata per mettere in relazione l'atomo con il "resto dell'universo". Non è quindi contraddizione affermare talvolta che l'estensione dell'atomo è controllata dalla curvatura dello spazio, e talvolta che è controllata da forze di interazione provenienti dal resto dell'universo.

che tale comparabilità non potesse esistere nel suo schema. Ma sia nella teoria di Weyl che nell'estensione dell'autore (teoria dei campi affini) è possibile confrontare lunghezze e distanza, non come una concezione a priori extra-geometrica, ma con l'ausilio del campo che fornisce lo standard onnipresente necessario.

⁴Il requisito è che il parametro di confronto sia una grandezza intrinseca allo spazio, poiché qualunque cosa sia intrinseca allo spazio, quella è *ipso facto* spazio. Lo spazio può avere altre grandezze caratteristiche oltre al raggio di curvatura, ad esempio grandezze che misurano vari tipi di ipercurvatura. Sebbene l'ipotesi sembri inverosimile, suppongo sia concepibile che una di queste possa essere sostituita. Ciò darebbe una legge di gravitazione diversa; ma esiste comunque una costante cosmologica, che dipende dal rapporto tra il metro e il parametro di confronto naturale. Infatti, il termine cosmologico λ rimane invariato; è $G_{\mu\nu}$ che viene modificato.

Dobbiamo ricordare che siamo consapevoli di un atomo o di qualsiasi altro oggetto solo nella misura in cui interagisce con il resto dell'universo, dando origine a fenomeni che alla fine raggiungono i nostri sensi. La posizione e le dimensioni che attribuiamo a un atomo sono simboli associati agli effetti dell'interazione, poiché non ha senso dire che un atomo si trova in A piuttosto che in B, a meno che non faccia qualche differenza per qualcosa il fatto che si trovi in A e non in B. Nel considerare questa interazione non è necessario trattare separatamente ogni particella e ogni elemento di energia nel resto dell'universo; se lo fosse, il progresso in fisica sarebbe impraticabile. Per la maggior parte è sufficiente calcolare delle medie. Le innumerevoli particelle dell'universo ammettono una varietà pressoché innumerevole di cambiamenti di configurazione; nel considerare la loro interazione con l'atomo dobbiamo preservare solo alcuni tipi generali di variazione media. Il "resto dell'universo" viene quindi idealizzato come qualcosa che possiede solo pochi tipi di variazione o gradi di libertà. Questo è illustrato nella teoria elettrica, dove le interazioni di miriadi di particelle elettriche sono sostituite dall'interazione di un campo elettrico specificato in modo univoco da sei numeri. Allo stesso modo, un'altra parte dell'interazione del resto dell'universo sull'atomo viene idealizzata nell'interazione di un campo metrico, o per dargli il suo consueto nome, *spazio*. I pochi tipi generali di variazione che non vengono attenuati dalla media vengono mantenuti nelle curvature dello spazio.

Dobbiamo distinguere nella concezione tra lo spazio che per certi scopi sostituisce il resto dell'universo e lo spazio che è occupato dal resto dell'universo, sebbene i due spazi alla fine diventino identici. La distinzione è più semplice se utilizziamo il termine "campo metrico" invece di "spazio"; infatti (per analogia con i campi elettrici) riconosciamo che un campo ha una duplice relazione con la materia, vale a dire che è prodotto dalla materia e agisce sulla materia.

Il resto del nostro compito è cercare di scoprire i dettagli di questa idealizzazione del "resto dell'universo" in un campo metrico contenente un raggio di curvatura.

IV

Una delle equazioni più fondamentali della fisica è l'equazione d'onda per un atomo di idrogeno, ovvero per un protone e un elettrone. L'equazione determina la dimensione dell'atomo o la distribuzione della sua carica elettrica. Chiaramente, l'onnipresente standard di lunghezza R deve essere incluso in questa equazione.

Ora, R non compare nell'equazione come viene normalmente scritta. Questo perché l'equazione è stata ottenuta sperimentalmente ed è espressa in termini di quantità come la carica di un elettrone, la costante di Planck, la velocità della luce, ecc. Il raggio R , sebbene presente, è mascherato. Dobbiamo cercare di penetrare questo mascheramento.

A prima vista appare un ostacolo formidabile. Il raggio dell'atomo di idrogeno è dell'ordine di 10^{-8} cm, e l'unità naturale R è dell'ordine di 10^{-27} cm; quindi il raggio dell'atomo di idrogeno in termini dell'unità naturale è dell'ordine di 10^{-35} cm. La nostra idea era che introducendo l'unità naturale avremmo ottenuto un'equazione semplificata, ma può essere un'equazione molto semplice se la sua soluzione è 10^{-35} ? Chiaramente deve contenere un coefficiente numerico enorme in uno o più dei suoi termini. Se l'equazione è davvero nella sua forma più elementare, ogni coefficiente dovrebbe avere un significato semplice, una ragione ovviamente appropriata per essere quello che è. Non dovremmo sorprenderci di vedere il tipo di coefficiente 4π , che ha un semplice significato geometrico; o un coefficiente pari al numero di dimensioni o gradi di libertà interessati dal problema, che deriva dalla somma di un certo numero di termini simmetrici. Ma quale significato semplice si può attribuire a un numero enormemente grande come 10^{35} ?

Mi viene in mente un solo numero grande che sia in qualche modo rilevante per il problema, ovvero il numero di particelle (elettroni o protoni) nell'universo. In effetti, non sembra esserci altro modo di inserire un numero grande nella struttura del mondo fisico. Mi riferisco, naturalmente, ai numeri puri, non al tipo di numero che introduciamo arbitrariamente con il nostro sistema di

calcolo centimetro-grammo-secondo. Scopriremo tra poco che ci sono ragioni dirette per supporre che il numero di particelle nell'universo N compaia nei coefficienti dell'equazione d'onda; ma anche senza queste ragioni, l'enorme grandezza dei coefficienti sarebbe un'indicazione sufficiente della presenza di N .

Un altro aspetto dello stesso rapporto elevato emerge quando confrontiamo la forza elettrica tra un protone e un elettrone con la forza gravitazionale tra di essi. Secondo la teoria classica, il rapporto è $2.3 \cdot 10^{39}$. Ho pensato a lungo che questo debba essere correlato al numero di elettroni e protoni nell'universo⁵ e mi aspetto che la stessa opinione sia stata condivisa da altri. Poiché N è circa 10^{79} , il rapporto sopra riportato è dell'ordine di $\sqrt{N}$.

La ragione diretta della comparsa di N è che esso è in realtà un numero effettivo di gradi di libertà dell'universo. Secondo la teoria classica, il numero sarebbe maggiore di N , perché ciascuna delle N particelle avrebbe diversi gradi di libertà; ma esiste un noto principio di esclusione che limita la libertà di una particella impedendole di entrare in un'orbita già occupata da un'altra particella. La meccanica ondulatoria affronta quindi il problema dall'altro lato e definisce il numero di sistemi d'onda indipendenti esistenti nell'universo, e quindi uguale al numero di costituenti separati dell'energia dell'universo. È del tutto possibile che il numero N , a cui ci si avvicina in questo modo, non sia arbitrario, ma abbia un fondamento teorico definito; questa è però una pura congettura e per il momento la consideriamo l'unico elemento arbitrario nella progettazione dell'universo reale.

Il nostro atomo è situato e interagisce con un universo contenente N gradi di libertà. Idealizziamo e semplifichiamo il problema immaginandolo come situato e interagente con uno spazio (o campo metrico) di raggio di curvatura R dotato di un numero relativamente piccolo di gradi di libertà, diciamo n . In questa forma semplificata, "il resto dell'universo" entra nell'equazione dell'atomo di idrogeno attraverso la quantità R . Penso che dobbiamo aspettarci che i numeri N e n compaiano anche nell'equazione, come promemoria della sostituzione di uno spazio con n gradi di libertà per un universo con N gradi di libertà. Per lo spazio-tempo quadridimensionale il numero n risulta essere 10. Lo perderemo di vista per il momento, ma ricomparirà più avanti.

Dopo aver deciso che N e R entreranno nei coefficienti dell'equazione dell'atomo di idrogeno, ci chiediamo in quale tipo di associazione si presenteranno. Il fattore N , ovviamente, deriva dalla somma di contributi uguali da ciascuna delle particelle o sistemi d'onda; la domanda è: qual è la natura dei contributi da sommare e in che modo contengono R ? Non pretendo di aver raggiunto la necessaria intuizione fisica per risolvere la questione. Sarà senza dubbio molto più soddisfacente quando avremo un'immagine in cui potremo, per così dire, vedere queste entità sommarsi, proprio come possiamo vedere cento centimetri sommarsi per formare un metro. Ma quando questo tipo di intuizione viene meno, non siamo senza guida. Così come la condotta può essere guidata dall'etica o dalla "buona forma", così questo tipo di indagine può essere guidato dall'intuizione fisica o dalla forma analitica. Sia la teoria ondulatoria che la teoria della relatività *sono molto rigorose in materia di buona forma*. Solo alcuni tipi di entità possono essere sommate. Aggiungere qualsiasi altra cosa sarebbe un solecismo. "Non si fa".

Nella teoria della relatività, le uniche cose additive sono gli invarianti d'azione.⁶ L'invariante d'azione contenente R è la curvatura gaussiana, che è proporzionale a $1/R^2$. Nella teoria quantistica, le entità che possono essere aggiunte sono i quadrati degli impulsi, o come vengono scritti simbolicamente $\frac{\partial^2}{\partial x^2}$. Per costruire una quantità delle stesse dimensioni a partire da R , dobbiamo prendere $1/R^2$ ⁷. Suppongo quindi che le entità da aggiungere siano, o siano proporzionali a $1/R^2$ in modo che la combinazione richiesta sia N/R^2 .

⁵*Mathematical Theory of Relativity*, p. 167.

⁶Altri tensori possono essere aggiunti solo se si trovano nello stesso punto dello spazio, una condizione che ovviamente non è soddisfatta qui.

⁷La teoria quantistica è meno ovvia di quella della relatività, perché la prima adotta comunemente un sistema misto di unità (dinamiche e geometriche). La teoria della relatività, essendo puramente geometrica, evita questa complicazione.

Questo ci fornisce quello che potremmo definire uno "standard naturale di lunghezza aggiustato", ovvero $\frac{R}{\sqrt{N}}$. Usando $\frac{R}{\sqrt{N}}$ invece di R come unità di misura, assorbiamo il fattore N in modo che non ci dia più problemi. Dai dati, la lunghezza dello standard aggiustato è di circa $3 \cdot 10^{-13}$ cm, quindi non è inadatto per trattare fenomeni che coinvolgono elettroni.

Ora possiamo tornare al nostro problema, che era scoprire come lo standard naturale di lunghezza sia mascherato nella familiare equazione d'onda. Ma questa volta cerchiamo lo standard corretto $\frac{R}{\sqrt{N}}$ invece dello standard originale R .

Penso di aver identificato lo standard corretto nell'equazione d'onda, mascherato dall'espressione e^2/mc^2 . Qui e è la carica di un elettrone o di un protone, m la massa di un elettrone e c la velocità della luce. È noto che questa espressione ha le dimensioni di una lunghezza; infatti $\frac{2}{3} \frac{e^2}{mc^2}$ era detto "raggio di un elettrone" ai tempi in cui l'elettrone era concepito in modo più sostanziale di quanto non lo sia ora. L'identificazione fornisce quindi l'equazione

$$\frac{R}{\sqrt{N}} = \frac{e^2}{mc^2}$$

Non posso entrare qui nella giustificazione di questa identificazione, che ci porterebbe a sprofondare nei principi della teoria quantistica. Posso però dire che l'identificazione è molto semplice. L'espressione e^2/mc^2 , o meglio il suo reciproco, si trova piuttosto sconfortatamente da sola nell'equazione d'onda, formando un termine separato. I ricercatori, impegnati a trasformare, spiegare e teorizzare gli altri termini, la lasciano stare; è stata semplicemente accettata come zavorra. Richiede un'identificazione.

Ci si potrebbe chiedere: un'identificazione diretta non è forse troppo semplice? Ammettendo l'identificazione in linea di principio, non ci sarà un fattore numerico, diciamo $\frac{1}{2}$, o 2π , o forse qualcosa di più complicato, il tipo di fattore che di solito appare quando raggiungiamo la stessa entità attraverso strade diverse? Forse c'è; ma al momento la semplice identificazione mi sembra corretta.⁸ Aggiungerei, tuttavia, che non sono sicuro se in questa formula N debba essere considerato il numero di elettroni o il numero di elettroni e protoni, lasciando quindi in sospeso un fattore $\sqrt{2}$. Per maggiore certezza, qui considero N solo il numero di elettroni; il numero di protoni deve essere approssimativamente, e probabilmente esattamente, lo stesso.

Dalla teoria della relatività dell'universo in espansione abbiamo

$$\frac{N}{R} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \frac{c^2}{Gm_p}$$

dove m_p è la massa di un protone. Ciò segue facilmente dalle formule fornite in precedenza; gli unici punti da notare sono che la notazione R_s è qui cambiata in R , e che la massa totale M dell'universo è approssimativamente Nm_p .

Quindi, per la teoria della relatività, troviamo N/R , e per la meccanica ondulatoria troviamo $\sqrt{N}/R$. Combinando i due risultati troviamo N e R separatamente. Il valore risultante di N è circa 10^{79} . Da R si trova immediatamente la velocità limite di recessione delle galassie c/R . Tutte le costanti coinvolte sono state misurate in laboratorio. L'accordo del risultato ottenuto in questo modo con la recessione osservata delle nebulose è già stato descritto.

Il seguente riassunto della teoria è dovuto al Prof. Dingle:

Pensò di aver visto elettroni muoversi rapidamente

La loro carica e massa si combinano.

⁸Tranne per alcune correzioni che ammontano complessivamente a meno dell'1%, che sono spiegate al punto V. Gli argomenti matematici su cui si basa l'identificazione sono riportati in *Proceedings of the Royal Society*, vol. CXXXIII A, p. 605, e *Monthly Notices of the R.A.S.* vol. XCII, p. 3.

Guardò di nuovo e vide che era

La linea di sondaggio cosmica.

La popolazione allora, disse,

Deve essere 10^{79}

V

Avendo, come pensiamo, individuato lo standard naturale corretto nei termini dell'equazione d'onda, dobbiamo ora chiederci come il nostro risultato influenzi la teoria dei protoni e degli elettroni. Infatti, identificando lo standard con e^2/mc^2 abbiamo compiuto un passo che collega l'universo all'atomo; e dovremmo verificare le conseguenze osservative non solo nell'universo astronomico, ma anche all'interno dell'atomo.

Nella meccanica ondulatoria il momento di una particella è comunemente rappresentato da

$$\frac{ih}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x}$$

Il fattore $h/2\pi$ è una complicazione inutile dovuta alla nostra scelta casuale di unità di lunghezza e massa. Adotteremo invece un'unità di massa naturale, che è correlata all'unità di lunghezza in modo tale che la quantità di moto sia semplicemente $i\partial/\partial x$. Il significato di i (letteralmente la radice quadrata di -1) in un'equazione è che i due membri dell'equazione rappresentano onde che, sebbene di uguale ampiezza, differiscono di fase di un quarto di periodo. Quando la massa di un elettrone è espressa in termini di questa unità naturale che indicheremo con m_e . Cambiando l'unità, la precedente relazione di R/N diviene

$$\frac{hc}{2\pi e^2} m_e = \frac{\sqrt{N}}{R} \quad (A)$$

Abbiamo colto l'occasione per capovolgere entrambi i membri, poiché è così che appaiono effettivamente nell'equazione d'onda.

Il coefficiente $hc/2\pi e^2$, che a volte viene chiamato *costante di struttura fine*, è un numero puro; ed è ben noto che il suo valore è prossimo a 137. Personalmente, ritengo che il suo valore sia esattamente 137, che è il numero di gradi di libertà associati alla funzione d'onda per una coppia di cariche. Si è molto discusso se il valore reale sia 137.0 o 137.3; entrambi i valori affermano di essere derivati dall'osservazione. Quest'ultimo, chiamato "valore spettroscopico", è preferito da molti fisici. È tuttavia fuorviante chiamare queste determinazioni *valori osservativi*, poiché le osservazioni sono solo un substrato; il valore spettroscopico, in particolare, si basa su una teoria piuttosto complessa e non deve certamente essere trattato come un "fatto concreto" dell'osservazione.

Sebbene io creda che $hc/2\pi e^2$ sia 137, considererò il coefficiente effettivo di m_e uguale a 136. Ciò significa che modifico leggermente l'identificazione originale inserendo un fattore 136/137. Il motivo di questa modifica è che uno dei gradi di libertà, ovvero quello corrispondente allo spostamento radiale, si verifica in alcuni problemi ma non in altri, e questo sembra essere un problema in cui non si verificherà. La costante di struttura fine viene introdotta nel problema dell'interazione di due cariche elettriche, dove entrano in gioco tutti i 137 gradi di libertà; una variazione di distanza tra le due cariche è riconoscibile perché uno standard di confronto per le distanze è fornito dal raggio di curvatura R . Ma ora stiamo considerando una formula per la massa di un elettrone, che deriva dalla sua interazione con il "resto dell'universo". Le N particelle dell'universo sono state virtualmente semplificate fino a una sola particella introducendo il fattore

di aggiustamento $\sqrt{N}$, in modo che il problema non sia dissimile da quello di due particelle interagenti; ma non esiste più uno standard di confronto estraneo per la lunghezza. Tracciando l'analogia tra i due problemi, scopriamo che l'analogo della variazione di distanza tra i due elettroni sarebbe la variazione del raggio di curvatura dello spazio. Ma per sua stessa natura R non può variare, essendo l'unità di misura standard della distanza. Non esiste quindi alcun analogo al 137° grado di libertà; e concludiamo che la nostra prima identificazione, che non è entrata in tali minuzie, dovrebbe essere modificata in modo da mostrare il numero corretto di gradi di libertà.

Si potrebbe esitare a introdurre un fattore così strano come 136/137 se non fosse che conosciamo un altro caso in cui il grado di libertà radiale è inibito, e il fattore è stato verificato dall'osservazione. Ciò si verifica quando un protone entra nel nucleo quasi rigido di elio. Si scopre che la sua massa o energia si riduce a un rapporto che è molto vicino a 136/137; questa riduzione è chiamata frazione di impacchettamento. La scomparsa di un grado di libertà è essenzialmente la stessa nel nucleo di elio e nel campo metrico; il primo non può espandersi radialmente perché è rigido, il secondo non può espandersi perché il suo raggio è il campione di lunghezza.

Pertanto al momento il nostro risultato è valido

$$136m_e = \frac{\sqrt{N}}{R} \quad (B)$$

Ma a questo c'è una seria obiezione. Il risultato mostra un'ingiusta discriminazione a favore dell'elettrone, senza menzionare il protone. Il protone è presumibilmente fondamentale quanto l'elettrone. Ma cosa possiamo mettere al posto di $\frac{\sqrt{N}}{R}$ che dia un'equazione altrettanto fondamentale per la massa m_p di un protone?

Con un elettrone e un protone che reclamano parità di trattamento, l'unico modo per soddisfare le loro richieste in modo imparziale è rendere l'equazione fondamentale quadratica, in modo che ci sia una sola radice per ciascuno. Non vogliamo alterare la parte che abbiamo già ottenuto, dopo esserci presi tanta cura di giustificarla pezzo per pezzo; quindi assumiamo che

$$136m - \frac{\sqrt{N}}{R} = 0 \quad (C)$$

fornisce correttamente gli ultimi due termini dell'equazione, ma c'è un termine in m^2 che entra all'inizio.

È noto che possiamo imparare qualcosa sulle radici di un'equazione quadratica, anche se vengono forniti solo gli ultimi due termini. Il rapporto tra gli ultimi due coefficienti è la somma delle radici divisa per il prodotto delle radici. Poiché l'equazione deve avere radici m_e e m_p , dobbiamo avere

$$\frac{m_e + m_p}{m_e m_p} = \frac{136R}{\sqrt{N}}$$

o

$$\frac{136m_e m_p}{m_e + m_p} = \frac{\sqrt{N}}{R} \quad (D)$$

Questa è un'altra modifica nell'equazione di identificazione; ma questa volta si tratta di una variazione numerica molto piccola. Confrontando (D) con (B) vediamo che è stato inserito un fattore $m_p \div (m_p + m_e)$. Sappiamo che m_p è circa 1847 volte m_e , quindi il fattore è 1847/1848 o 0.99946. Numericamente il cambiamento è insignificante, ma il protone non ha più motivo di lamentarsi, perché protone ed elettrone ricevono un trattamento perfettamente imparziale in (D).

Il passo successivo è completare l'equazione quadratica i cui ultimi due termini sono dati in (C). Poiché abbiamo concluso il problema dell'identificazione dello standard corretto (la nostra equazione finale che lo esprime in termini di grandezze sperimentali note è (D)), possiamo ora

adottarlo come unità di lunghezza. Come già spiegato, questa scelta di unità dovrebbe ridurre le equazioni alla loro forma più semplice possibile. Ciò significa che $R/\sqrt{N}$ può ora essere assunto come unità. I due termini dati in (C) sono quindi $136m - 1 = 0$, e la quadratica completata è

$$m^2 - 136m + 1 = 0 \quad (E)$$

Quale numero dobbiamo mettere al posto del punto di domanda? Forse ricorderete che c'era un numero $n = 10$, che avevamo promesso di introdurre nell'equazione d'onda⁹. Questa è la nostra occasione. Supponiamo che l'equazione sia e

$$10m^2 - 136m \frac{\sqrt{N}}{R} + \frac{N}{R^2} = 0 \quad (F)$$

Si vede che il numero $n = 10$ si trova nel primo termine come contrappeso a N nell'ultimo termine, che è evidentemente la loro relazione corretta.

Sebbene non siamo ancora in grado di fornire una teoria chiara di questa equazione, l'argomentazione è più avanzata di quanto possa apparire da questo approccio superficiale. Credo che si concorderà sul fatto che, poiché il coefficiente 136 rappresenta il numero di gradi di libertà, è estremamente probabile che anche il coefficiente rimanente in (E) rappresenti il numero di gradi di libertà. Presumibilmente ogni grado di libertà possiede un'energia nascosta o un momento ciclico simile a quello fornito dall'ignoranza delle coordinate nella dinamica ordinaria. Affrontando il problema da questo punto di vista dinamico si arriva quasi immediatamente al termine $10m^2$, ma è più difficile capire la ragione del termine $136m$.

Quindi, in termini generali, abbiamo due linee di approccio. Non si sono ancora incontrate e fuse, come alla fine dovranno farlo. Ma poiché una linea di approccio fornisce il termine lineare e l'altra il termine quadratico, apparentemente in modo abbastanza certo, il progresso sembra già sufficiente a fornire l'equazione corretta.

Troviamo il rapporto tra le due radici $\frac{m_p}{m_e}$, risolvendo l'equazione (E) o (F). Il risultato è 1847.60.

Il valore osservato¹⁰ del rapporto di massa tra protone ed elettrone è pari a 1847.0, con un errore probabile di mezza unità. Pertanto, l'accordo è completo. La soluzione dell'equazione (F) dà

$$\left. \begin{aligned} 135.8265m_e &= \frac{\sqrt{N}}{R} \\ 0.073569m_p &= \frac{\sqrt{N}}{R} \end{aligned} \right\} \quad (G)$$

Questa è un'altra forma della nostra identificazione finale dello standard corretto $\frac{R}{\sqrt{N}}$. L'identificazione preliminare era $137m_e = \frac{\sqrt{N}}{R}$; quindi non c'è stata alcuna variazione degna di considerazione nella grandezza numerica di $\frac{\sqrt{N}}{R}$, derivata allo scopo di predire la velocità di recessione delle nebulose. Le formule funzioneranno in entrambi i casi. Normalmente li applichiamo per calcolare i risultati astronomici, utilizzando m_e o m_p determinati dai fisici; ma possiamo anche usarli per fornire un metodo astronomico per misurare la massa di un elettrone o di un protone.

Per misurare la massa di un elettrone, una procedura adatta è quella di effettuare osservazioni astronomiche delle distanze e delle velocità delle nebulose a spirale! Il risultato, corretto se necessario per la reciproca attrazione delle galassie, è, diciamo, 600 km al secondo per megaparsec.

⁹L'equazione d'onda si forma sostituendo la massa m con un operatore differenziale.

¹⁰Esiste anche un valore spettroscopico di circa 10 unità inferiore, ottenuto adottando 137.3 invece di 137 per la costante di struttura fine; ma questo è irrilevante. Ci siamo già impegnati a utilizzare il valore 137 in una fase precedente, quindi non vogliamo che il nostro calcolo concordi con un risultato che sarebbe vero solo se il valore non fosse 137. In altre parole, la nostra teoria non può concordare sia con i valori di deflessione che con quelli spettroscopici, poiché questi differiscono; ma dovrebbe concordare in modo coerente con un insieme, e non a volte con l'uno e a volte con l'altro.

Questo è c/R ; e poiché la velocità della luce c è 300.000 km al secondo, abbiamo $R = 500$ megaparsec, che è uguale a $1.54 \cdot 10^{27}$ cm. I passaggi rimanenti, che richiedono una piccola manipolazione algebrica delle equazioni, non necessitano di essere descritti in dettaglio; non appena R è noto, diventano risolvibili e possiamo trovare N , e quindi $\frac{\sqrt{N}}{R}$. Le masse dell'elettrone e del protone sono quindi date dalle equazioni (G). Sono espresse in termini dell'unità naturale di massa; possiamo convertirle in grammi se conosciamo la costante di Planck h . Temo che l'accuratezza ottenibile con questo metodo non soddisferebbe il fisico moderno, ma non ci sbaglieremo più di un fattore 2 o giù di lì.

Forse obietterete che questa non è una vera misura della massa di un elettrone; anche supponendo che sia corretta, si tratta di un'inferenza altamente tortuosa. Ma pensate forse che un fisico metta un elettrone sulla bilancia e lo pesi? Se leggerete un resoconto di come è stato determinato il valore spettroscopico della massa, non troverete il mio metodo eccessivamente complicato. Ma, naturalmente, non lo propongo seriamente per rivalità; voglio solo rendere vivida l'ampia interrelazione delle cose.

Possiamo dimostrare che le due radici dell'equazione quadratica rappresentano cariche elettriche di segno opposto. Per verificarlo, è necessario introdurre un campo elettrico nel problema. Seguendo la teoria di Dirac, ciò si ottiene aggiungendo all'equazione un termine costante (ovvero un termine che non coinvolge l'operatore differenziale $m = i \frac{d}{ds}$) dipendente dal potenziale elettrico. Poiché questo cambia solo il terzo termine della funzione quadratica, la somma delle radici $m_e + m_p$ rimane invariata. In altre parole, la massa o l'energia aggiunta dal campo a m_e è uguale e opposta alla massa o all'energia aggiunta dal campo a m_p . Ma questa è la definizione di cariche uguali e opposte: nello stesso campo elettrico hanno energia potenziale uguale e opposta.

Si supponeva che l'equazione d'onda per due cariche (un protone e un elettrone¹¹) fosse un'equazione lineare proposta per la prima volta da Dirac. Si è scoperto che l'insieme completo di soluzioni rappresenta (approssimativamente, se non esattamente) un atomo di idrogeno nei suoi vari stati possibili. Ma da esperimenti recenti si è scoperto che esiste un altro stato o gruppo di stati in cui il protone e l'elettrone sono molto più vicini tra loro e formano un tipo di atomo molto piccolo. Questo è chiamato neutrone. Chiaramente l'attuale equazione d'onda per un protone e un elettrone non può essere corretta, poiché le sue soluzioni non forniscono gli stati dei neutroni. Proprio come per una carica abbiamo bisogno di un'equazione d'onda quadratica i cui due insiemi di soluzioni corrispondono a elettroni e protoni, così per due cariche abbiamo bisogno di un'equazione d'onda quadratica i cui due insiemi di soluzioni corrispondono ad atomi di idrogeno e neutroni. Mi aspetto che questo continui in sistemi più complessi, con le due soluzioni corrispondenti al legame extranucleare e nucleare delle cariche.

Il supporto alla presente teoria è duplice. In primo luogo, indica che la teoria delle due cariche si allineerà alla nostra teoria della carica singola per quanto riguarda la forma generale dell'equazione. In secondo luogo, poiché i "valori spettroscopici" delle costanti fisiche si basano su una teoria incompleta delle due cariche, non dovremmo attribuire troppa importanza a una lieve discrepanza tra essi e i valori trovati nella nostra teoria.

Forse è ancora più importante riuscire a prevedere altri problemi futuri. Sarà quindi necessario indagare la teoria del termine aggiuntivo nell'equazione per l'atomo di idrogeno e il neutrone e dimostrare che le soluzioni aggiuntive concordano con le proprietà osservate del neutrone. Ciò offrirà ulteriori opportunità di verificare e, se necessario, rivedere le presenti conclusioni.

VI

Per coloro il cui interesse per la scienza moderna è rivolto principalmente alle implicazioni filosofiche, la teoria dell'universo in espansione non apporta, a mio avviso, alcuna rivelazione

¹¹Si noti che la nostra equazione quadratica $\{E\}$ è per un protone o un elettrone, non per due cariche.

particolarmente nuova. A parte un piccolo errore, ho evitato questioni che avessero un sapore filosofico. Ho dato per scontato che l'attenzione del lettore, come la mia, sia rivolta al progresso strettamente scientifico della ricerca e che egli sospenda ogni questione su come il modello fisico, qui sviluppato, possa essere adattato alla visione generale della vita e della coscienza. Sarebbe un peccato pregiudicare la ricerca trascinando prematuramente tali questioni.

Potremmo forse emergere con la spiacevole sensazione di non avere più vasti domini spaziali e vasti periodi di tempo di cui disporre. Ma ci si è spesso lamentati che le misure astronomiche siano troppo vaste per essere concepite e, se non siamo mai stati in grado di concepirle, non influisce minimamente sulla nostra visione generale il fatto di avere effettuato qualche taglio qua e là. In effetti, considero piuttosto avido l'uomo insoddisfatto di un universo contenente dieci miliardi di miliardi di stelle. Cioè, se le desidera solo per una comoda contemplazione filosofica; in relazione alle indagini scientifiche, i tagli possono, naturalmente, essere seri, come abbiamo visto nel caso della scala temporale.

La nuova teoria non contiene alcun indizio evidente che il mondo finirà prima di quanto ci aspettassimo. La dispersione cosmica ignora le aggregazioni su scala più piccola come la nostra galassia. Prevediamo che alla fine l'universo si esaurirà completamente a causa della lenta degradazione dell'energia in forme non disponibili, ma quel giorno lontano non è reso più vicino dall'esistenza della repulsione cosmica.

Sembrerebbe che l'espansione dell'universo sia un altro processo unidirezionale parallelo al declino termodinamico. Non si può fare a meno di pensare che i due processi siano intimamente connessi; ma, se così fosse, la connessione non è ancora stata trovata.

La posizione riguardo all'esaurimento termodinamico dell'universo non è cambiata sostanzialmente da quando ne ho parlato quattro anni fa.¹² Si è diffusa l'impressione che le conclusioni siano state scosse dai recenti lavori sui raggi cosmici. Ciò sarebbe impossibile, per quanto mi riguarda; perché la teoria dei raggi cosmici che viene avanzata in questo contesto è proprio quella che stavo sostenendo al momento in cui scrivo, vale a dire che i raggi cosmici forniscono la prova della formazione di elementi superiori all'idrogeno in regioni distanti occupate da materia diffusa.¹³ Non sono affatto sicuro che le prove più recenti debbano essere interpretate come favorevoli; ma se lo sono, come sostiene il dottor Millikan, ho meno motivi per cambiare idea. L'unione di particelle elettriche per formare un atomo complesso e la conseguente dispersione di parte dell'energia nei raggi cosmici è chiaramente un passo nella stessa direzione di altri processi di dissipazione di energia, ad esempio l'unione di materia nebulosa per formare una stella e la conseguente dispersione di energia sotto forma di calore radiante. È un ulteriore contributo al generale avvicinamento a uno stato finale di equilibrio termodinamico. Millikan ha talvolta definito il processo di formazione degli atomi un "avvolgimento" dell'universo; ma "su" e "giù" sono termini relativi, e potrebbe essere necessaria una trasformazione degli assi per confrontare le sue descrizioni con le mie.

Potrebbe essere opportuno ricordare al lettore filosofico il motivo per cui lo scienziato si abbandona a queste estrapolazioni della nostra attuale conoscenza imperfetta a regioni lontane dalla nostra esperienza – il motivo per cui scrive dell'inizio e della fine del mondo. Sembra quasi un tentativo gratuito disastroso esporre le nostre teorie a condizioni in cui qualsiasi minima debolezza rischia di amplificarsi senza limiti. Ma questo è solo il principio della verifica. "La vera giustificazione per fare tali previsioni non è la probabilità che si realizzino, ma che gettano luce sullo stato della scienza contemporanea e possono indicare dove necessita di essere integrata."¹⁴

La prova dell'estrapolazione al futuro più lontano non rivela, a mio avviso, alcuna debolezza certa nell'attuale sistema scientifico, in particolare nella seconda legge della termodinamica su cui la scienza fisica fa così tanto affidamento. È vero che l'estrapolazione predice che l'universo

¹²*The Nature of the Physical Worlds* Capitolo IV (1928)

¹³*Internal Constitution of the Stars*, p. 317 (1926).

¹⁴Prof. H. T. H. Piaggio.

materiale un giorno raggiungerà uno stato di morte e quindi giungerà virtualmente alla fine; a mio avviso, questo è un modo piuttosto felice di evitare un incubo di eterna ripetizione. È l'estrapolazione opposta, rivolta al passato, che dà motivo di sospettare una debolezza nelle attuali concezioni scientifiche. L'inizio sembra presentare difficoltà insormontabili, a meno che non si accetti di considerarlo apertamente soprannaturale. Forse dovremo lasciar perdere. Ma ho già accennato altrove al pericolo di limitare l'indagine scientifica a un dominio limitato. Invece di affrontare onestamente le complessità del nostro problema, potremmo essere indotti a pensare che le sue difficoltà siano state risolte quando sono state semplicemente spazzate via oltre il confine. Spazzandole via, la pila aumenta fino a formare una barriera invalicabile. Forse è questa barriera che chiamiamo "l'inizio".

VII

Ora vi ho raccontato "tutto esattamente come è successo". Quanto di questa storia dobbiamo credere?

La scienza ha i suoi showroom e i suoi laboratori. Il pubblico oggi, credo a ragione, non si accontenta di girovagare per gli showroom dove vengono esposti i prodotti testati; la richiesta è di vedere cosa succede nei laboratori. Siete i benvenuti, ma non giudicate ciò che vedete in base agli standard dello showroom.

Abbiamo girato un laboratorio nel seminterrato dell'edificio scientifico. La luce è fioca e a volte inciampiamo. Intorno a noi regna la confusione e il disordine che non abbiamo avuto il tempo di spazzare via. Gli operai e le loro macchine sono avvolti nell'oscurità. Ma credo che qui si stia formando qualcosa, forse qualcosa di piuttosto grande. Non so bene cosa sarà quando sarà completato e rifinito per lo showroom. Ma possiamo osservare i progetti attuali e i nuovi strumenti utilizzati nella sua produzione; possiamo anche contemplare i piccoli successi che ci danno speranza.

Un leggero arrossamento della luce di galassie lontane, un'avventura dell'immaginazione matematica nello spazio sferico, riflessioni sui principi fondamentali impliciti in ogni misura, la curiosa scelta della natura di certi numeri come 137 nel suo schema: questi e molti altri frammenti si sono uniti e hanno formato una visione. Come quando il viaggiatore avvista una riva lontana, sforziamo gli occhi per coglierne la visione. Più tardi potremo comprenderne più pienamente il significato. Muta nella nebbia; a volte sembra che ne focalizziamo la sostanza, a volte è piuttosto una visione che si estende all'infinito finché non ci chiediamo se qualcosa possa essere definitivo.

Ancora una volta ricorro a Bottom il tessitore.

Ho avuto una visione molto rara. Ho fatto un sogno, che è al di là dell'intelligenza umana dire di che sogno si trattasse: l'uomo è solo un asino se si mette a spiegare questo sogno. Mi sembrava di essere, e mi sembrava di avere, ma l'uomo è solo un idiota rattoppato se si offre di dire cosa mi sembrava di avere. Sarà chiamato il sogno di Bottom, perché non ha fondo.