

STEPHEN
HAWKING

**STORIA DEL
TEMPO**

INDICE

La nostra immagine dell'universo 4

Spazio e tempo 47

L'universo in espansione 101

LA NOSTRA IMMAGINE DELL'UNIVERSO

Un noto scienziato, alcuni dicono che fu Bertrand Russell, dava una volta una conferenza sull'astronomia. In essa descriveva come la Terra girasse attorno al Sole e come questo, a sua volta, girasse attorno al centro di una vasta collezione di stelle conosciuta come la nostra galassia. Alla fine della chiacchierata, una simpatica signora avanzata in età si alzò e gli disse dal fondo della sala: "Quello che ci ha raccontato lei non è più che

sciocchezze. Il mondo è in realtà una piattaforma piana sostenuta sul guscio di una tartaruga gigante.” Lo scienziato sorrise ampiamente prima di replicargli, “e su che cosa si appoggia la tartaruga?” “Lei è molto intelligente, giovane, molto intelligente - disse la signora -. Ma ci sono infinite tartarughe una sotto all'altra!”

La maggior parte della gente troverebbe abbastanza ridicola l'Immagine del nostro universo come una torre infinita di tartarughe, ma, in che cosa ci basiamo per credere che lo conosciamo meglio? Che cosa sappiamo circa l'universo, e come siamo arrivati a saperlo? Da dove sorse l'universo, ed a dove va? Ebbe l'universo un principio, e, se così fu a cosa lui successe in prece-

denza? Quale è la natura del tempo? Arriverà qualche volta questo ad una fine? Progressi recenti della fisica, possibili in parte grazie a fantastiche nuove tecnologie, suggeriscono risposte ad alcune di queste domande che ci preoccupano da molto tempo. Qualche giorno queste risposte potranno sembrarci tanto ovvie come quello che la Terra giri attorno al Sole, o, magari, tanto ridicole come una torre di tartarughe. Solo il tempo, qualunque sia il suo significato, lo dirà.

Già nell'anno 340 A.C. il filosofo greco Aristotele, nel suo libro *Dei Cieli*, fu capace di stabilire due buoni argomenti per credere che la Terra era una sfera rotonda invece di una piattaforma piana. In primo luogo, si rese conto che le eclissi lunari erano dovute a

che la Terra si situava tra il Sole e la Luna. L'ombra della Terra sulla Luna era sempre circolare. Se la Terra fosse stata un disco piano, la sua ombra sarebbe stato allungata ed ellittica a meno che l'eclissi si verificasse sempre nel momento in cui il Sole stesse direttamente sotto al centro del disco. In secondo luogo, i greci sapevano, a causa dei loro viaggi, che la stella Polare appariva più bassa nel cielo quando si osservava dal sud che quando si faceva da regioni più al nord. Come la stella Polare sta sul polo nord, sembrerebbe essere giusto sopra ad un osservatore situato in detto polo, mentre ferma qualcuno che guardasse dall'equatore sembrerebbe essere giusto nell'orizzonte. A partire dalla differenza nella posizione

apparente della stella Polare tra Egitto e Grecia, perfino Aristotele stimò che la distanza attorno alla Terra era di 400.000 stadi. Non si conosce con esattezza quale valore era un stadio, ma sembra che fosse di circa 200 metri, ciò supporrebbe che la stima di Aristotele era approssimativamente il doppio della lunghezza accettata oggi. I greci avevano perfino un terzo argomento in favore che la Terra doveva essere rotonda, perché, se no, uno vede prima i pennoni di una barca che si avvicina nell'orizzonte, e solo dopo si vede lo scafo? Aristotele credeva che la Terra era ferma e che il Sole, la luna, i pianeti e le stelle si muovevano in orbite circolari attorno a lei. Credeva ciò perché era convinto, per ragioni mistiche, che

la Terra era il centro dell'universo e che il movimento circolare era il più perfetto. Questa idea fu ampliata da Tolomeo nel secolo ii D.C. fino a costituire un modello cosmologico completo. La Terra rimase nel centro, circondata per otto sfere che trasportavano la Luna, il Sole, le stelle ed i cinque pianeti conosciuti in quello tempo, Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno, figura 1. I pianeti si muovevano in circoli più piccoli concatenati nelle sue rispettive sfere affinché così potessero spiegarsi le loro traiettorie celesti relativamente complicate. La sfera più esterna trasportava le stelle chiamate fisse, le quali rimanevano sempre nelle stesse posizioni relative, le une rispetto alle altre, girando unite attraverso il cielo. Quello

che c'era dietro l'ultima sfera non fu mai descritto con chiarezza, ma certamente non era parte dell'universo osservabile per l'uomo.

Il modello di Tolomeo rappresentava un sistema ragionevolmente preciso per predire le posizioni dei corpi celesti nel firmamento. Ma, per potere predire correttamente dette posizioni, Tolomeo doveva supporre che la Luna seguiva un percorso che la situava in alcuni istanti due volte più vicino alla Terra che in altri. E questo significava che la Luna dovrebbe apparire a volte con volume doppio del quale solitamente ha! Tolomeo riconosceva questa inconsistenza, nonostante il quale il suo modello fu ampiamente, benché non universalmente, accettato. Fu adottato

dalla Chiesa cristiana come l'immagine dell'universo che era in accordo con le Scritture, e che, inoltre, presentava il gran vantaggio di lasciare, dietro la sfera delle stelle fisse, un'enorme quantità di spazio per il cielo e l'inferno.

Un modello più semplice, tuttavia, fu proposto, in 1514, per un curato polacco, Nicolás Copérnico. Al principio, magari per paura di essere tacciato di eretico dalla sua propria chiesa, Copernico fece circolare il suo modello di forma anonima. La sua idea era che il Sole era stazionario nel centro e che la Terra ed i pianeti si muovevano in orbite circolari intorno ad esso. Passò quasi un secolo prima che la sua idea fosse presa davvero sul serio. Allora due astronomi, il tede-

sco Johannes Kepler e l'italiano Galileo Galilei, incominciarono ad appoggiare pubblicamente la teoria copernicana, malgrado le orbite che prediceva non si adattassero fedelmente a quelle osservate. Il colpo mortale alla teoria aristotelico/ptolemaica arrivò in 1609. In quell'anno, Galileo cominciò ad osservare il cielo notturno con un telescopio che aveva appena inventato. Quando guardò al pianeta Giove, Galileo trovò che questo era accompagnato per vari piccoli satelliti o lune che giravano intorno a suo. Questo implicava che non tutto girava direttamente attorno alla Terra, come Aristotele e Tolomeo avevano supposto. , Era ancora possibile, naturalmente, credere che le lune di Giove si muovessero in percorsi eccessivamente

complicati attorno alla Terra, benché dessero l'impressione di girare intorno a Giove. Tuttavia, la teoria di Copernico era molto più semplice. Allo stesso tempo, Johannes Kepler aveva modificato la teoria di Copernico, suggerendo che i pianeti non si muovevano in cerchi, bensì in ellissi, un'ellisse è un cerchio allungato. Le predizioni si adattavano ora finalmente alle osservazioni.

Dal punto di vista di Kepler, le orbite ellittiche costituivano meramente un'ipotesi ad hoc, e, in realtà, un'ipotesi abbastanza spiacevole, poiché le ellissi erano chiaramente meno perfette che i cerchi. Kepler, scoprendo quasi per incidente che le orbite ellittiche si adattavano bene alle osservazioni, non poté riconci-

liarli con la sua idea che i pianeti erano concepiti per girare attorno al Sole attratti per forze magnetiche. Una spiegazione coerente fu solo trovata molto più tardi, in 1687, quando sir Isaac Newton pubblicò il suo *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, probabilmente l'opera più importante delle scienze fisiche edita in tutti i tempi. In essa, Newton non presentò solo una teoria su come si muovono i corpi nello spazio e nel tempo, ma sviluppò anche la complicata matematica necessaria per analizzare quelli movimenti. Inoltre, Newton postulò la legge della gravitazione universale, in accordo con la quale ogni corpo nell'universo era attratto da qualunque altro corpo con una forza che era maggiore tanto maggior-

mente massicci fossero i corpi e quanto più vicino fossero l'uno all'altro. Era questa la stessa forza che rendeva possibile che gli oggetti cadessero a terra. La storia che Newton fu ispirato da una mela che cadde sulla sua testa è quasi assicurazione apocrifia. Tutto quello che Newton stesso arrivò a dire fu che l'idea della gravità gli venne quando era seduto "in disposizione contemplativa", dalla quale "unicamente lo distrasse la caduta di una mela". Newton passò dopo a mostrare che, di accordo con la sua legge, la gravità è la causa che la Luna si muova in un'orbita ellittica attorno alla Terra, e che la Terra ed i pianeti seguano percorsi ellittici attorno al Sole. Il modello copernicano si spogliò delle sfere celestiali di Tolo-

meo e, con esse, dell'idea che l'universo abbia una frontiera naturale. Poiché le "stelle fisse" non sembravano cambiare le sue posizioni, a parte una rotazione attraverso il cielo causata per il giro della Terra sul suo asse, arrivò ad essere naturale supporre che le stelle fisse erano oggetti come il nostro Sole, ma molto più lontani.

Newton comprese che, di accordo con la sua teoria della gravità, le stelle dovrebbero muoversi l'un l'altra, in modo che non sembrava possibile che potessero rimanere essenzialmente in riposo. Non arriverebbe un determinato momento nel quale tutte esse si riunirebbero? Nel 1691, in una lettera a Richard Bentley, altro imperturbabile pensatore della sua epoca,

Newton argumentava che veramente questo succederebbe se ci fosse solo un numero finito di stelle distribuite in una regione finita dello spazio. Ma ragionava che se, al contrario, ci fosse un numero infinito di stelle, distribuite più o meno uniformemente su un spazio infinito, ciò non succederebbe, perché non ci sarebbe nessun punto centrale dove agglutinarsi.

Questo argomento è un esempio del tipo di difficoltà che uno può trovare quando si discute circa l'infinito. In un universo infinito, ogni punto può essere considerato come il centro, poiché ogni punto ha un numero infinito di stelle ad ogni lato. L'approccio corretto, che fu solo scoperta molto più tardi, è considerare in primo luogo una

situazione finita, nella quale le stelle tenderebbero ad agglutinarsi, e domandarsi dopo come cambia la situazione quando uno aggiunge più stelle uniformemente distribuite fuori della regione considerata. Di accordo con la legge di Newton, gli stelle extra non produrrebbero, in generale, nessun cambiamento sulle stelle originali che pertanto si continuerebbero agglutinandosi con la stessa rapidità. Possiamo aggiungere tante stelle come vogliamo che nonostante ciò le stelle originali seguiranno unendosi indefinitamente. Questo c'assicura che è impossibile avere un modello statico ed infinito dell'universo, nel quale la gravità sia sempre attrattiva. Un dato interessante sulla corrente generale del pensiero ante-

riore al secolo xx è che nessuno avesse suggerito che l'universo si stesse espandendo o contraendo. Era generalmente accettato che l'universo, oppure era esistito per sempre in un stato immobile, oppure era stato creato, più o meno come l'osserviamo oggi, in un determinato tempo scorso finito. In parte, questo può doversi alla tendenza che abbiamo le persone a credere in verità eterne, tanto quanto alla consolazione che ci proporziona la credenza che, benché possiamo invecchiare e morire, l'universo rimane eterno ed immobile.

Perfino quelli che compresero che la teoria della gravità di Newton mostrava che l'universo non poteva essere statico, non pensarono di suggerire che si

potrebbe stare espandendo. Al contrario, cercarono di modificare la teoria supponendo che la forza gravitazionale fosse repulsiva a distanze molto grandi. Ciò non colpiva significativamente le sue predizioni sul movimento dei pianeti, ma permetteva che una distribuzione infinita di stelle potesse rimanere in equilibrio, con le forze attrattive tra stelle vicine equilibrate per le forze repulsive tra stelle lontane. Tuttavia, oggi giorno crediamo che tale equilibrio sarebbe instabile: se le stelle in alcuna regione si avvicinasse solo leggermente alcune ad altre, le forze attrattive tra esse diventerebbero più forti e dominerebbero sulle forze repulsive, in modo che le stelle, una volta che incominciassero ad agglutinarsi, lo seguirebbero

facendo per sempre. Al contrario, se le stelle incominciassero a separarsi un po' tra sé, le forze repulsive dominerebbero allontanando indefinitamente ad alcune stelle di altre.

Un'altra obiezione ad un universo statico infinito è normalmente attribuita al filosofo tedesco Heinrich Olbers che scrisse su tale modello nel 1823. In realtà, vari contemporanei di Newton avevano considerato già il problema, e l'articolo di Olbers non fu neanche il primo a contenere argomenti plausibili contro il precedente modello. Fu, tuttavia, il primo ad essere ampiamente conosciuto. L'obiezione alla quale ci riferivamo poggia sul fatto che, in un universo statico infinito, praticamente ciascuna linea di

visione finirebbe sulla superficie di una stella. Così, sarebbe da opinare che tutto il cielo fosse, perfino di notte, tanto brillante come il Sole. Il contraargomento di Olbers era che la luce delle stelle lontane sarebbe oscurata per l'assorbimento dovuto alla materia intermedia. Tuttavia, se quello succedesse, la materia intermedia si riscalderebbe, col tempo, fino a che illuminasse di forma tanto brillante come le stelle. L'unica maniera di evitare la conclusione che tutto il cielo notturno debba essere tanto brillante come la superficie del Sole sarebbe supporre che le stelle non stanno illuminando da sempre, ma si accesero in un determinato istante passato finito. In questo caso, la materia assorbente non potrebbe stare scaldi ancora, o

la luce delle stelle distanti non c'avrebbe potuti raggiungere ancora. E questo ci condurrebbe alla questione di che cosa avrebbe potuto causare il fatto che le stelle si fossero accese per la prima volta.

Il principio dell'universo era stato discusso, naturalmente, molto prima di questo. Di accordo con distinte cosmologie primitive e con la tradizione judeo cristiana musulmana- , l'universo cominciò in un certo tempo scorso finito, e non molto lontano. Un argomento in favore di un'origine tale fu la sensazione che era necessario avere una "Causa Prima" per spiegare l'esistenza dell'universo. , Dentro l'universo, uno spiega sempre un avvenimento come causato per qualche altro avvenimento ante-

riore, ma l'esistenza dell'universo in sé, potrebbe essere solo spiegata di questa maniera se avesse un'origine. Un altro argomento lo diede sant' Agostino nel suo libro *La città di Dio*. Segnalava che la civiltà sta progredendo e che possiamo ricordare chi realizzò questa impresa o sviluppò quella tecnica. Così, l'uomo, e pertanto magari anche l'universo, non era potuto esistere dietro da molto tempo. Sant'Agostino, di accordo col libro del *Genesi*, accettava una data di circa 5.000 anni prima di Cristo per la creazione dell'universo. , È interessante comprovare che questa data non sta molto lontano dal fine dell'ultimo periodo glaciale, sul 10.000 A.C. che è quando gli archeologi suppongono che realmente incominciò

la civiltà.

Aristotele, e la maggior parte del resto dei filosofi greci, non era a favore, al contrario, dell'idea della creazione, perché suonava troppo ad intervento divino. Essi credevano, quindi, che la razza umana ed il mondo che la circonda erano esistiti, ed esisterebbero, per sempre. Gli antichi avevano considerato già l'argomento descritto sopra circa il progresso, e l'avevano risolto dicendo che c'erano stati inondazioni periodiche o altri disastri che ripetutamente situavano alla razza umana nel principio della civiltà.

Le questioni di se l'universo ha un principio nel tempo e di se è limitato nello spazio furono posteriormente vagliate di forma estensiva per il filo-

sofo Immanuel Kant nella sua monumentale, e molto oscura, opera, *Critica della ragione pura*, edita in 1781. Egli chiamò queste questioni antinomie, cioè, contraddizioni, della ragione pura, perché gli sembrava che c'erano argomenti altrettanto convincenti per credere tanto nella tesi che l'universo ha un principio, come nell'antitesi che l'universo era esistito sempre. Il suo argomento in favore della tesi era che se l'universo non avesse avuto un principio, ci sarebbe stato un periodo di tempo infinito anteriore a qualunque avvenimento, quello che egli considerava assurdo. L'argomento in pro dell'antitesi era che se l'universo avesse avuto un principio, ci sarebbe stato un periodo di tempo infinito anteriore a lui, ed

in questo modo, perché dovrebbe incominciare in una volta l'universo in questione? In realtà, i suoi ragionamenti in favore della tesi e dell'antitesi sono realmente lo stesso argomento. Ambedue sono basati nella supposizione implicita che il tempo continua all'indietro indefinitamente, tanto se l'universo è esistito da sempre come se no. Come vedremo, il concetto di tempo non ha significato prima del principio dell'universo. Questo era stato già segnalato in primo luogo per sant' Agostino. Quando gli fu domandato: Che cosa faceva Dio prima che creasse l'universo? Sant' Agostino rispose: stava preparando l'inferno per quelli quale domandassero tali questioni. Nel suo posto, disse che il tempo era una

proprietà dell'universo che Dio aveva creato, e che il tempo non esisteva in precedenza all'inizio dell'universo.

Quando la maggior parte della gente credeva in un universo essenzialmente statico ed immobile, la domanda di se questo aveva, o no, un principio era realmente una questione di carattere metafisico o teologico. Potevano spiegarsi altrettanto bene tutte le osservazioni tanto con la teoria che l'universo era esistito sempre, come con la teoria che era stato messo in funzionamento in un determinato tempo finito, di tale forma che sembrasse come se fosse esistito da sempre. Ma, in 1929, Edwin Hubble fece l'osservazione cruciale che, dove voglia che uno guardi, le galassie distanti si

stanno allontanando da noi. O in altre parole, l'universo si sta espandendo. Questo significa che in epoche anteriori gli oggetti sarebbero dovuti essere più insieme tra sé. In realtà, sembra essere che ci fu un tempo, fa circa dieci o venti mille milioni di anni, in cui tutti gli oggetti stavano esattamente nello stesso posto, e nel che, pertanto, la densità dell'universo era infinita. Fu detta scoperta quello che finalmente portò la questione del principio dell'universo ai domini della scienza.

Le osservazioni di Hubble suggerivano che ci fu un tempo, chiamato il big bang [gran esplosione o esplosione primordiale] in cui l'universo era infinitésimamente piccolo ed infinitamente denso. Fissate tali condizioni in quel

momento, tutte le leggi della scienza, e, pertanto, ogni capacità di predizione del futuro, si sgretolerebbero. Se ci fossero stati avvenimenti anteriori a questo non potrebbero infuire in nessun modo su quello che succede al presente. La sua esistenza potrebbe essere ignorata, poiché ciò non provocherebbe conseguenze osservabili. Uno potrebbe dire che il tempo ha la sua origine nel big bang, nel senso che i tempi anteriori semplicemente non sarebbero definiti. È segnalare che questo principio del tempo è radicalmente differente di quelli previamente considerati. In un universo immobile, un principio del tempo è qualcosa che deve essere imposto da un essere esterno all'universo; non esi-

ste la necessità di un principio. Uno può immaginarsi che Dio creó l'universo in, testualmente, qualunque istante di tempo. Al contrario, se l'universo si sta espandendo, possono esistere poderose ragioni fisiche affinché debba c'essere un principio. Uno potrebbe immaginarsi ancora che Dio creó l'universo nell'istante del big bang, ma non avrebbe senso supporre che l'universo fosse stato creato prima del big bang. Universo in espansione non escludi l'esistenza di un creatore, ma sì stabilisci limiti su quando questo aveva potuto portare a termine la sua missione!

Per potere analizzare la natura dell'universo, e potere discutere questioni tali come se c'è stato un principio o se ci sarà un fine,

è necessario avere chiaro quello che è una teoria scientifica. Consideriamo qui un punto di vista ingenuo, nel quale una teoria è semplicemente un modello dell'universo, o di una parte di lui, ed un insieme di regole che riferiscono le grandezze del modello con le osservazioni che realizziamo. Questo esiste solo nelle nostre menti, e non ha nessuna altra realtà, chiunque sia quello che questo possa significare. Una teoria è una buona teoria purché soddisfaccia due requisiti: deve descrivere con precisione un ampio insieme di osservazioni sulla base di un modello che contenga solo pochi parametri arbitrari, e deve essere capace di predire positivamente i risultati di osservazioni future. Per esempio, la teoria di

Aristotele che tutto era costituito per quattro elementi, terra, aria, fuoco ed annacqua, era il sufficientemente semplice come per essere qualificato come tale, ma falliva in che non realizzava nessuna predizione concreta. Al contrario, la teoria della gravità di Newton era basata in un modello perfino più semplice, nel quale i corpi si accattivavano tra sé con una forza proporzionale ad una quantità chiamata massa ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra essi, nonostante il quale era capace di predire il movimento del Sole, la Luna ed i pianeti con un alto grado di precisione. Qualunque teoria fisica è sempre provvisoria, nel senso che è solo un'ipotesi: non può provarsi mai. Malgrado i risultati degli

esperimenti concordino molte volte con la teoria, non potremo mai essere sicuri che la prossima volta il risultato non la contraddica. Tuttavia, può respingersi una teoria non appena si trovi un'unica osservazione che contraddica le sue predizioni. Come ha sottolineato il filosofo della scienza Karl Popper, una buona teoria è caratterizzata per il fatto di predire un gran numero di risultati che possono essere confutati in principio o invalidati per l'osservazione. Ogni volta che si verifica che un nuovo esperimento è di accordo con le predizioni, la teoria sopravvive e la nostra fiducia in lei aumenta. Ma se al contrario si realizza qualche volta una nuova osservazione che contraddica la teoria, dovremo abbandonarla o

modificarla. O almeno questo è quello che si suppone che deve succedere, benché uno possa discutere sempre la competenza della persona che realizzò l'osservazione.

Nella pratica, quello che succede è che si costruisce una nuova teoria che è un'estensione della teoria originale in realtà. Per esempio, osservazioni tremendamente precise del pianeta Mercurio rivelano una piccola differenza tra il suo movimento e le predizioni della teoria della gravità di Newton. La teoria della relatività generale di Einstein prediceva un movimento di Mercurio leggermente distinto di quello della teoria di Newton. Il fatto che le predizioni di Einstein si adattassero alle osservazioni, mentre quelle di Newton non lo

facevano, fu una delle conferme cruciali della nuova teoria. Tuttavia, continuiamo ad usare la teoria Newton per tutti i propositi pratici poiché le differenze tra le sue predizioni e quelle della relatività generale sono molto piccole nelle situazioni che normalmente ci spettano. Anche la teoria di Newton possiede il gran vantaggio di essere molto più semplice e maneggevole di quella di Einstein.

L'obiettivo finale della scienza è il proporzionare un'unica che descriva correttamente tutto l'universo. Tuttavia, il metodo che la maggioranza degli scienziati segue in realtà è quello di separare il problema in due parti. In primo luogo, stanno le leggi che ci dicono come cambia l'universo col tempo. , Se cono-

sciamo come l'universo è in un istante dato, questi lievi fisiche ci diranno come l'universo sarà in qualunque altro posteriore. Secondo, sta la questione dello stato iniziale dell'universo. Alcuni persone credono che la scienza dovrebbe occuparsi unicamente della prima parte: considerano il tema della situazione iniziale dell'universo come oggetto della metafisica o la religione. Essi argomenterebbero che Dio, all'essere onnipotente, avrebbe potuto iniziare l'universo della maniera che più gli sarebbe piaciuto. Può essere che sì, ma in quello caso egli anche c'essere la cosa fatta evolvere di un modo completamente arbitrario. Invece, sembra essere che scegliesse farlo evolvere di una maniera molto regolare

seguendo certe leggi. Risulta, perciò, altrettanto ragionevole supporre che ci sono anche leggi che governano lo stato iniziale. È molto difficile costruire un'unica teoria capace di descrivere tutto l'universo. Invece di ciò, ci vediamo forzati, per il momento, a dividere il problema in varie parti, inventando un certo numero di teorie parziali. Ognuna di queste teorie parziali descrive e predice una certa classe ristretta di osservazioni, disprezzando gli effetti di altre quantità, o rappresentando queste per semplici insiemi di numeri. Può succedere che questo avvicinamento sia completamente erronea. Se tutto nell'universo dipende assolutamente da tutto il resto di lui in una maniera fondamentale,

potrebbe risultare impossibile avvicinarsi ad una soluzione completa investigando parti isolate dal problema. Tuttavia, questo è certamente il modo in cui abbiamo progredito nel passato. L'esempio classico è di nuovo la teoria della gravità di Newton, la quale ci dice che la forza gravitazionale in due corpi dipende unicamente di un numero associato ad ogni corpo, la sua massa, essendo per il resto indipendente del tipo di sostanza che forma il corpo. Così, non si deve avere una teoria della struttura e costituzione del Sole ed i pianeti per potere determinare le sue orbite. Gli scienziati attuali descrivono l'universo attraverso due teorie parziali fondamentali: la teoria della relatività generale e la meccanica quantica. Esse

costituiscono il gran risultato intellettuale della prima metà di questo secolo. La teoria della relatività generale descrive la forza della gravità e la struttura a gran scala dell'universo, cioè, la struttura a scale che vanno solo da pochi chilometri fino ad un miliardo di miliardi, un 1 con ventiquattro zeri dietro, di chilometri, il volume dell'universo osservabile. La meccanica quantica, al contrario, si occupa dei fenomeni a scale eccessivamente piccole, tali come una milionesimo di centimetro. Sfortunatamente, tuttavia, si sa che queste due teorie sono inconsistenti tra sé: entrambe non possono essere corrette contemporaneamente. Uno dei maggiori sforzi della fisica attuale, ed il tema principale di questo libro, è la ricerca

di una nuova teoria che incorpori alle due anteriori: una teoria quantica della gravità. Non si disporsi ancora di tale teoria, e ferma ciò ancora può rimanere una lunga strada da percorrere, ma sì si conoscono molte delle proprietà che deve possedere. In capitoli posteriori vedremo che si sa già relativamente abbastanza circa le predizioni che deve fare una teoria quantica della gravità. Se si ammette allora che l'universo non è arbitrario, ma è governato per certe leggi ben definite, bisognerà combinare alla fine le teorie parziali in una teoria unificatrice completa che descriverà tutti i fenomeni dell'universo. Esiste, nonostante, un paradosso fondamentale nella nostra ricerca di questa teoria unificatrice

completa. Le idee anteriormente profilate sulle teorie scientifiche suppongono che siamo esseri razionali, liberi per osservare l'universo ci piaccia come e per estrarre deduzioni logiche di quello che vediamo. In tale schema sembra ragionevole supporre che potremmo continuare progredendo indefinitamente, avvicinandoci sempre di più alle leggi che governano l'universo. Ma se realmente esistesse una teoria unificatrice completa, anche questa determinerebbe presumibilmente le nostre azioni. Così la teoria stessa determinerei il risultato della nostra ricerca di lei! E perché ragione dovrebbe determinare che giungessimo alle vere conclusioni a partire dall'evidenza che ci presenta? È che non potrebbe determinare

altrettanto bene che estraessimo conclusioni erranee? O perfino che non estraessimo in assoluto nessuna conclusione?

L'unica risposta che posso dare a questo problema si basa sul principio della selezione naturale di Darwin. L'idea poggia in che in qualunque popolazione di organismi autorreproductores, ci saranno variazioni tanto nel materiale genético come in educazione dei differenti individui. Queste differenze supporranno che alcuni individui siano più capaci di altri per estrarre le conclusioni corrette circa il mondo che circonda, e per agire di accordo con esse. Detti individui avranno più possibilità di sopravvivere e riprodursi, in modo che il suo schema mentale e di condotta finirà per

imporsi. Nel passato è stato certo che quello che chiamiamo intelligenza e scoperta scientifica hanno supposto un vantaggio nell'aspetto della sopravvivenza. Non è completamente evidente che questo debba continuare ad essere così: le nostre scoperte scientifiche potrebbero distruggerci a tutti perfettamente, e, perfino se non lo fanno, una teoria unificatrice completa non ha perché supporre nessun cambiamento nella cosa relativa alle nostre possibilità di sopravvivenza. Tuttavia, dato che l'universo ha evoluto di un modo regolare, potremmo sperare che le capacità di ragionamento che la selezione naturale ci ha dato continuino ad essere valide nella nostra ricerca di una teoria unificatrice completa, e non ci con-

ducano a conclusioni erranee. Dato che le teorie che possediamo già sono sufficienti per realizzare predizioni esatte di tutti i fenomeni naturali, eccetto dei più estremi, la nostra ricerca della teoria definitiva dell'universo sembra difficile da giustificare da un punto di vista pratico. È interessante segnalare, tuttavia, che argomenti simili potrebbero aversi usati contro la teoria della relatività e della meccanica quantica, ci sono stati dati l'energia nucleare e la rivoluzione della microelettronica. Perciò, la scoperta di una teoria unificatrice completa non può aiutare alla sopravvivenza della nostra specie. Non può colpire perfino il nostro modo di vita. Ma sempre, dall'origine della civiltà, la gente non si è accontentata con

vedere gli avvenimenti come staccati ed inspiegabili. Ha cercato incessantemente una conoscenza dell'ordine soggiacente del mondo. Oggigiorno, continuiamo ancora ad anelare sapere perché stiamo qui e da dove veniamo. Il profondo desiderio di conoscenza dell'umanità è giustificazione sufficiente per continuare la nostra ricerca. E questa non cesserà fino a che possediamo una descrizione completa dell'universo nel quale viviamo.

SPAZIO E TEMPO

Le nostre idee attuali circa il movimento dei corpi salgono a Galileo e Newton. Prima di essi, si credeva nelle idee di Aristotele chi diceva che lo stato naturale di un corpo era stare in riposo e che questo si muoveva solo se era spinto per una forza o un impulso. Di ciò si deduceva che un corpo pesante doveva cadere più rapido di uno leggero, perché soffriva un'attrazione maggiore verso la Terra.

Anche la tradizione aristote-

lica manteneva che potrebbero dedurrsi tutte le leggi che governano l'universo per mezzo del pensiero puro: non era necessario comprovarli per mezzo dell'osservazione. Così, nessuno prima di Galileo si preoccupò di vedere se i corpi con pesi differenti cadevano con velocità differenti. Si dice che Galileo dimostrò che le anteriori idee di Aristotele erano false lasciando cadere differenti pesi dalla torre inclinata da Pisa. È quasi sicuro che questa storia non è certo, benché quello che si fece Galileo fu qualcosa di equivalente: lasciò cadere palle di distinti pesi durante un piano inclinato. La situazione è molto simile a quella dei corpi pesanti che cadono verticalmente, ma è più facile da osservare perché le velocità sono

minori. Le misurazioni di Galileo indicarono che ogni corpo aumentava la sua velocità allo stesso ritmo, indipendentemente del suo peso. Per esempio, se si scioglie una palla in una pendenza che discende un metro per ogni dieci metri di percorso, la palla cadrà per la pendenza con una velocità da un metro per secondo dopo un secondo, di due metri per secondo dopo due secondi, e così via, senza importare la cosa pesante che sia la palla. Ovviamente che una palla di piombo cadrà più rapida di una piuma, ma ciò si deve unicamente a che la piuma è frenata per la resistenza dell'aria. Se uno sciogliesse due corpi che non presentasse troppa resistenza all'aria, tali come due pesi differenti di piombo, cadrebbero

con la stessa rapidità.

Le misurazioni di Galileo servirono da base a Newton per l'ottenimento delle sue leggi del movimento. Negli esperimenti di Galileo, quando un corpo cadeva ruzzoloni, agiva sempre su lui la stessa forza, il suo peso, e l'effetto che si prodursi consisteva in accelerarlo di forma costante. Questo dimostrava che l'effetto reale di una forza era quello di cambiare la velocità il corpo, invece di semplicemente metterlo in movimento, come si pensava anteriormente. Anche ciò significava che purché su un corpo non agisse nessuna forza, questo si manterrebbe muovendosi in una linea retta con la stessa velocità. Questa idea fu formulata esplicitamente per la prima volta in li Comincia

Mathematica di Newton, editi in 1687, e si conosce come prima legge di Newton. Quello che succede ad un corpo quando su lui agisce una forza è raccolto nella seconda legge di Newton. Questa afferma che il corpo si sbrigherà, o cambierà la sua velocità, ad un ritmo proporzionale alla forza. Per esempio, l'accelerazione si raddoppierà quando la forza applicata sia doppia. Allo stesso tempo, l'accelerazione diminuirà quando aumenti la massa, o la quantità di materia, del corpo. La stessa forza agendo su un corpo di doppia massa che un altro, produrrà la metà di accelerazione nel primo che nel secondo. Un esempio familiare l'abbiamo in un'automobile: quanto più potente sia il suo motore maggiore accelera-

zione possiederà, ma quanto più pesante sia l'automobile minore accelerazione avrà con lo stesso motore.

Oltre alle leggi del movimento, Newton scoprì una legge che descriveva la forza della gravità, una legge che ci dice che ogni corpo attrae a tutti gli altri corpi con una forza proporzionale alla massa di ognuno di essi. Così, la forza corpi si raddoppierà in due se uno di essi, diciamo, il corpo A, piega la sua massa. Questo è quello che potrebbe sperarsi ragionevolmente, poiché uno può supporre al nuovo corpo A formato per due corpi, ognuno di essi con la massa originale. Ognuno di questi corpi attrarrà al corpo B con la forza originale. Pertanto, la forza totale entri A e B sarà giusto il doppio che la

forza originale. E se, per esempio, uno dei corpi avesse una massa doppia dell'originale e l'altro corpo una massa tre volte maggiore che all'inizio, la forza tra essi sarebbe sei volte più intensa dell'originale. Può vedersi ora perché tutti i corpi cadono con la stessa rapidità: un corpo che abbia doppio peso soffrirà una forza gravitazionale doppio, ma contemporaneamente avrà una massa doppia. Di accordo con la seconda legge di Newton, questi due effetti si cancelleranno esattamente e l'accelerazione sarà la stessa in entrambi i casi.

La legge della gravità di Newton ci dice anche che quanto più separati siano i corpi minori sarà la forza gravitazionale tra essi. La legge della gravità di Newton stabilisce che l'attrazione gravi-

tazionale prodotta per una stella ad una certa distanza è esattamente la quarta parte della quale produrrebbe una stella simile alla metà di distanza. Questa legge predice con gran precisione le orbite della Terra, la Luna ed i pianeti. Se la legge fosse che l'attrazione gravitazionale di una stella decadesse più rapidamente con la distanza, le orbite dei pianeti non sarebbero ellittiche, ma questi continuerebbero a cadere in spirale verso il Sole. Se, al contrario, l'attrazione gravitazionale decadesse più lentamente, le forze gravitazionali dovute alle stelle lontane dominerebbero di fronte all'attrazione della Terra. La differenza fondamentale tra le idee di Aristotele e quelle di Galileo e Newton poggia in che Aristotele credeva in un stato

superiore di riposo, nel quale tutte le cose sottostarebbero, a meno che fossero spinte per una forza o impulso. In questione, egli credè che la Terra stava in riposo. Al contrario, delle leggi di Newton si stacca che non esiste un unico standard di riposo. Può supporrsi ugualmente o che il corpo A sta in riposo ed il corpo B si muove a velocità costante con rispetto ad A, o che il B sta in riposo e è il corpo A al quale si muove. Per esempio, se uno si dimentica per il momento della rotazione della Terra e della sua orbita attorno al Sole, si può dire che la Terra sta in riposo e che un treno su lei sta viaggiando verso il nord a cento quaranta chilometri per ora, o si può dire ugualmente che il treno sta in riposo e che

la Terra si muove verso il sud a cento quaranta chilometri per ora. Se si realizzassero esperimenti nel treno con oggetti che si muovessero, proveremmo che tutte le leggi di Newton continuerebbero ad essere valide. Per esempio, giocando a ping-pong nel treno, uno troverebbe che la palla obbedisce alle leggi di Newton esattamente uguale a come lo farebbe in un tavolo situato vicino alla via. Pertanto, non c'è forma di distinguere se è il treno o è la Terra quello che si muove.

La mancanza di un standard assoluto di riposo significava che non poteva determinarsi se due avvenimenti che succedessero in tempi differenti avevano avuto luogo nella stessa posizione spaziale. Per esempio, supponiamo

che nel nostro treno palla di ping-pong sta varando, muovendosi verticalmente verso l'alto e verso il basso e battendo il tavolo due volte nello stesso posto con un intervallo di un secondo. Per un osservatore situato vicino alla via, le due scialuppe sembreranno avere luogo con una separazione di circa quaranta metri, poiché il treno avrà percorso quella distanza tra le due scialuppe. Perciò non l'esistenza di un riposo assoluto significa che non può associarsi una posizione assoluta nello spazio con un evento, come Aristotele aveva creduto. Le posizioni degli eventi e la distanza tra essi saranno differenti per una persona nel treno e per altra che stia di fianco alla via, e non esiste ragione per preferire il punto di vista di una

delle persone di fronte a quello dell'altra.

Newton fu molto preoccupato per questa mancanza di una posizione assoluta, o spazio assoluto, come l'ero chiamato, perché non concordava con la sua idea di un Dio assoluto. In realtà, ricusò accettare la non esistenza di un spazio assoluto, a pesare perfino che era implicata per le sue proprie leggi. Fu duramente criticato da molta gente dovuto a questa credenza irrazionale, sottolineando soprattutto la critica del vescovo Berkeley, un filosofo che credeva che tutti gli oggetti materiali, insieme allo spazio ed il tempo, erano un'illusione. Quando il famoso Dr. Johnson venne a sapere dell'opinione di Berkeley gridò "Il ribatto così!" e battè con la punta del piede una

gran pietra.

Tanto Aristotele come Newton credevano nel tempo assoluto. Cioè, ambedue pensavano che poteva affermarsi inequivocabilmente la possibilità di misurare in due l'intervallo di tempo eventi senza ambiguità, e che detto intervallo sarebbe lo stesso per tutti quelli che lo misurassero, purché usassero un buon orologio. Il tempo era completamente separato ed era indipendente dello spazio. Questo è, in realtà, quello che la maggioranza della gente considererebbe come di buonsenso. Tuttavia, abbiamo dovuto cambiare le nostre idee circa lo spazio e del tempo. Benché le nostre nozioni di quello che sembra essere il buonsenso funzionino bene quando si usano nello studio il movimento

delle cose, tali come mele o pianeti che viaggiano relativamente lente, non funzionano, in assoluto, quando si applicano a cose che si muovono con o vicino alla velocità della luce.

Il fatto che la luce viaggia ad una velocità finita, benché molto elevata, fu scoperto in 1676 per l'astronomo danese Ole Christensen Roemer. Egli osservò che i tempi nei quali le lune di Giove sembravano passare di dietro di questo non stavano regolarmente spaziate, come sarebbe di sperare se le lune girassero attorno a Giove con un ritmo costante. Dato che la Terra e Giove girano attorno al Sole, tra tutti e due la distanza varia. Roemer notò che le eclissi delle lune di Giove sembrano succedere tanto più tardi quanto più distanti di

Giove stiamo. Argomentò che si doveva a che la luce proveniente delle lune tardava più in arrivarci lontano stavamo quanto più di esse. Suoi dosate sulle variazioni delle distanze della Terra a Giove non erano, tuttavia, troppo buone, e così stimò un valore per la velocità della luce di 225.000 chilometri per secondo, comparato col valore moderno di 300.000 chilometri per secondo. Nonostante, non solo il risultato di Roemer di provare che la luce viaggia ad una velocità finita, ma anche di misurare quella velocità, fu notevole, soprattutto tenendo in conto che questo succedeva undici anni prima che Newton pubblicasse i *Comincia Mathematica*.

Una vera teoria della propaga-

zione della luce non sorse fino a 1865 in cui il fisico britannico James Clerk Maxwell riuscì ad unificare con successo le teorie parziali che fino ad allora si erano usati per definire le forze dell'elettricità ed il magnetismo. Le equazioni di Maxwell predicevano che potevano esistere perturbazioni di carattere ondulatorio del campo elettromagnetico combinato, e che queste viaggierebbero a velocità costante, come le onde di una zattera. Se tali onde possiedono una longitudine di onda, la distanza tra una cresta di onda ed il seguente, di un metro o più, costituiscono quello che oggi chiamiamo onde di radio. Quelli con longitudini di onda minori si chiamano microonde, pochi centimetri, o infra-

rosse, più di una diezmilésima di centimetro. La luce visibile ha solo una longitudine di onda di tra quaranta ed ottanta milionesimo di centimetro. Le onde con minori longitudini si conoscono ancora come radiazione ultravioletta, raggi X e raggi gamma. La teoria di Maxwell prediceva che tanto le onde di radio come le luminose dovrebbero viaggiare ad una velocità fissa determinata. La teoria di Newton si era staccata, tuttavia, di un sistema di riferimento assoluto, di tale forma che se si supposeva che la luce viaggiava ad una certa velocità fissa, bisognava specificare rispetto a che sistema di riferimento si misurava detta velocità. Affinché questo avesse senso, si suggerì da tutte le parti

l'esistenza di una sostanza chiamato "etere" che era presente, perfino nello spazio "vuoto." Le onde di luce dovevano viaggiare attraverso l'etere come le onde di suono lo fanno attraverso l'aria, e le sue velocità dovrebbero essere, pertanto, relative all'etere. Differenti osservatori che si muovessero con relazione all'etere, vedrebbero avvicinarsi la luce con velocità distinte, ma la velocità della luce rispetto all'etere rimarrebbe fissa. In questione, dato che la Terra si muoveva attraverso l'etere nella sua orbita attorno al Sole, la velocità della luce dosata nella direzione del movimento della Terra attraverso l'etere, quando ci stessi muovendo verso la fonte luminosa, dovrebbe essere maggiore che la velocità della luce

nella direzione perpendicolare a quello movimento, quando ci non stessimo muovendo verso la fonte. In 1887, Albert Michelson, chi più tardi fu il primo nordamericano che ricevè il premio Nobel di fisica, ed Edward Morley portò a termine un' esperimento molto accurato nella Sposi School of Applied Science, di Cleveland. Essi paragonarono la velocità della luce nella direzione del movimento della Terra, con la velocità della luce nella direzione perpendicolare a detto movimento. Per la sua sorpresa trovarono che entrambe le velocità erano esattamente uguali! Tra 1887 e 1905, ci furono diversi tentativi, i più importanti dovuti al fisico olandese Hendrik Lorentz, di spiegare il risultato dell'esperimento di Michel-

son-Morley in termini di contrazione degli oggetti o di ritardo degli orologi quando questi si muovono attraverso l'etere. Tuttavia, in 1905, in un famoso articolo Albert Einstein, fino ad allora un sconosciuto impiegato dell'ufficio di brevetti della Svizzera, segnalò che l'idea dell'etere era completamente non necessaria, purché si fosse disposto ad abbandonare l'idea di un tempo assoluto. Una proposta simile fu realizzata alcune settimane dopo per un distaccato matematico francese, Henri Poincaré. Gli argomenti di Einstein avevano un carattere più fisico di quelli di Poincaré che aveva studiato il problema da un punto di vista puramente matematico. Ad Einstein lo è riconosciuto come il creatore della nuova teoria, men-

tre a Poincaré gli è ricordato da avere dato il suo nome ad una parte importante della teoria.

Il postulato fondamentale della teoria della relatività, nome di questa nuova teoria, era che le leggi della scienza dovrebbero essere le stesse per tutti gli osservatori in movimento libero, indipendentemente di quale fuori la sua velocità. Questo era già certo per le leggi di Newton, ma ora si estendeva l'idea per includere anche la teoria di Maxwell e la velocità della luce: tutti gli osservatori dovrebbero misurare la stessa velocità della luce senza importare la rapidità con la quale si stessero muovendo. Questa idea tanto semplice ha alcuni conseguenze straordinarie. Magari le più conosciute siano l'equivalenza tra massa ed

energia, riassunta nella famosa equazione di Einstein $E=mc^2$ dove E è l'energia, m , la massa e c , la velocità della luce, e la legge che nessun oggetto può viaggiare ad una velocità maggiore che quella della luce. Dovuto all'equivalenza tra energia e massa, l'energia che un oggetto acquisisce dovuto al suo movimento si aggiungerà alla sua massa, incrementandola. In altre parole, quanto maggiore sia la velocità di un oggetto più difficile sarà aumentare la sua velocità. Questo effetto è solo realmente significativo per oggetti che si muovano a velocità vicine a quella della luce. Per esempio, ad una velocità di un 10 per 100 di quella della luce la massa di un oggetto è solo un 0,5 per 100 maggiore del normale, mentre

ad un 90 per 100 della velocità della luce la massa sarebbe di più del doppio del normale. Quando la velocità di un oggetto si avvicina alla velocità della luce, la sua massa aumenta sempre di più rapidamente, in modo che costa sempre di più e più energia accelerare un po' più l'oggetto. In realtà non può raggiungere mai la velocità della luce, perché allora la sua massa sarebbe arrivata ad essere infinita, e per l'equivalenza tra massa ed energia, sarebbe costata una quantità infinita di energia il mettere all'oggetto in quello stato. Per questa ragione, qualunque oggetto normale è confinato per la relatività a muoversi sempre a velocità minori di quella della luce. Solo la luce, o altre onde che non possiedano massa intrin-

seca, può muoversi alla velocità della luce.

Un'altra conseguenza altrettanto notevole della relatività è il modo in cui ha rivoluzionato le nostre idee circa lo spazio e del tempo. Nella teoria di Newton, se un polso di luce è inviato di un posto ad un altro, osservatori differenti sarebbero di accordo nel tempo che durò il viaggio, poiché il tempo è un concetto assoluto, ma non sarebbero sempre di accordo nella distanza percorsa per la luce, poiché lo spazio non è un concetto assoluto. Dato che la velocità della luce è semplicemente la distanza percorsa divisa per il tempo usato, osservatori differenti misureranno velocità della luce differente. In relatività, al contrario, tutti gli osservatori devono essere di accordo nella

cosa rapida che viaggia la luce. Essi continueranno, nonostante, senza essere di accordo nella distanza percorsa per la luce, per quello che essi dovranno ora anche divergere nel tempo usato. Il tempo usato è, dopo tutto, uguale allo spazio percorso, sul quale gli osservatori non sono di accordo, diviso per la velocità della luce, sul che gli osservatori sé stanno di accordo. In altre parole, la teoria della relatività finì con l'idea di un tempo assoluto! Ogni osservatore deve avere la sua propria misura del tempo che è quella che registrerebbe un orologio che si muove vicino ad egli, ed orologi identici muovendosi con osservatori differenti non dovrebbero coincidere. Ogni osservatore potrebbe usare un radar per così sapere dove

e quando succedè qualunque evento, mediante l'invio di un polso di luce o di onde di radio. Parte del polso si rifletterà di giro nell'evento e l'osservatore misurerà il tempo che trascorre fino a ricevere l'eco. Si dice che il tempo dell'evento è il tempo mezzo tra l'istante di emissione del polso e quello di ricevimento dell'eco. La distanza dell'evento è uguale alla metà del tempo trascorso nel viaggio completo di dà e giro, moltiplicato per la velocità della luce. , Un evento, in questo senso, è qualcosa che ha luogo in un punto specifico dello spazio ed in un determinato istante di tempo. Questa idea si mostra nella figura 2.1 che rappresenta un esempio di un diagramma spazio-tempo. Usando il procedimento ante-

riore, osservatori in movimento relativo tra sé assegneranno tempi e posizioni differenti ad un stesso evento. Nessuna misura di qualunque osservatore particolare è più corretta di quella di qualunque altro osservatore, ma tutte sono equivalenti ed inoltre sono relazionate tra sé. Qualunque osservatore può calcolare di forma precisa la posizione ed il tempo che qualunque altro osservatore assegnerà ad un determinato processo, purché sappia la velocità relativa dell'altro osservatore.

Oggigiorno, si usa questo metodo per misurare distanze con precisione, poiché possiamo misurare con più esattezza tempi che distanzi. In realtà, il metro si definisce come la distanza percorsa per la luce in

0,0000000003335640952 secondi, misurati per un orologio di cesio. , La ragione per la quale si sceglie questo numero in questione è perché corrisponde alla definizione storica del metro, in termini di due marche esistenti in una sbarra di platino concreta che si guarda a Parigi. Ugualmente, possiamo usare una nuova e più conveniente unità di longitudine chiamato secondo-luce. Questa si definisce semplicemente come la distanza che percorre la luce in un secondo. Nella teoria della relatività, si definiscono oggi-giorno le distanze in funzione di tempi e della velocità della luce, in modo che si stacca che qualunque osservatore misurerà la stessa velocità della luce, per definizione, 1 metro per

0,0000000003335640952 secondi. Non c'è necessità di introdurre l'idea di un etere il cui presenza in qualche modo non può essere scoperta, come mostrò l'esperimento di Michelson-Morley. La teoria della relatività ci forza, al contrario, a cambiare i nostri concetti di spazio e tempo. Dobbiamo accettare che il tempo non è completamente separato ed indipendente dello spazio, ma al contrario si accorda con lui per formare un oggetto chiamato spaziotempo.

Per l'esperienza ordinaria sappiamo che può descriversi la posizione di un punto nello spazio per tre numeri o coordinate. Per esempio, uno può dire che un punto dentro una stanza sta a tre metri di una parete, ad un metro dell'altra ed ad un metro e

mezzo sul suolo. o uno potrebbe specificare che un punto sta ad una certa latitudine e longitudine ed ad una certa altezza sul livello del mare. Uno ha libertà per usare qualunque insieme valido di coordinato, benché la sua utilità possa essere molto limitata. Nessuno specificerebbe la posizione della Luna in funzione dei chilometri che distò al nord e l'ovest da Piccadilly Circus e del numero di metri che stia sul livello del mare. Invece di quello, uno potrebbe descrivere la posizione della Luna in funzione della sua distanza rispetto ad al sole, rispetto al piano che trattiene alle orbite dai pianeti ed all'angolo formato tra la linea che unisce alla Luna ed al sole, e la linea che unisce al sole ed ad alcuno stella vicina, come

Alfa Centauro. Neanche queste coordinate sarebbero di gran utilità per descrivere la posizione del Sole nella nostra galassia, o quella della nostra galassia nel gruppo locale di galassie. In realtà, può descriversi l'universo intero in termini di una collezione di pezzi subdoli. In ogni pezzo, può usarsi un insieme differente di tre coordinate per specificare la posizione di qualunque punto.

Un evento è qualcosa che succede in un punto particolare dello spazio ed in un istante specifico di tempo. Per ciò, può descriversi per mezzo di quattro numeri o coordinate. L'elezione del sistema di coordinate è di nuovo arbitraria; uno può usare tre coordinate spaziali chiunque ben definite ed una misura del tempo. In relati-

vità, non esiste una distinzione reale tra le coordinate spaziali ed il temporale, esattamente uguale a come non c'è in due nessuna differenza reale coordinate spaziali chiunque. Potrebbe scegliersi un nuovo insieme di coordinato nel che, diciamo, la prima coordinata spaziale sia una combinazione della prima e le seconde coordinate antiche. Per esempio, invece di misurare la posizione di un punto sulla Terra in chilometri al nord di Piccadilly, e chilometri all'ovest di Piccadilly, potrebbe usare chilometri al nordest Piccadilly e chilometri al nordovest di Piccadilly. Analogamente, in relatività, potrebbe usare si unisca nuova coordinata temporanea che fosse uguale alla coordinata temporanea antica, in secondi,

più la distanza, in seconda luce, al nord di Piccadilly.

Spesso posto vacante utile pensare che le quattro coordinate di un evento specificano la sua posizione in un spazio cuatridimensional chiamato spazio-tempo. È impossibile immaginare un spazio cuatridimensional. Personalmente già incontro sufficientemente difficile visualizzare lo spazio tridimensionale! Tuttavia, posto vacante facile disegnare diagrammi di spazi bidimensionali, tali come la superficie della Terra. , La superficie terrestre è bidimensionale perché la posizione di un punto in lei può essere specificata per mezzo di due coordinate, latitudine e longitudine. Generalmente userò diagrammi nei quali il tempo aumenta verso l'alto ed

una delle dimensioni spaziali si mostra orizzontalmente. Le altre due dimensioni spaziali sono ignorate o, a volte, una di esse si indica in prospettiva. , Questi diagrammi, come quello che appare nella figura 2.1, si chiamano di *espaciotiempo*.- Per esempio, nella figura 2.2 il tempo si misura verso l'alto in anni e la distanza, proiettata, durante la linea che va del Sole ad Alfa Centauro, si misura orizzontalmente in chilometri. Le strade del Sole e di Alfa Centauro, attraverso lo spazio-tempo, si rappresentano per le linee verticali alla sinistra e la destra del diagramma. Un raggio di luce del Sole segue la linea diagonali e tardi quattro anni in andare del Sole ad Alfa Centauro. Come abbiamo visto, le equazioni di Maxwell predi-

cevano che la velocità della luce dovrebbe essere la stessa chiunque che fosse la velocità della fonte, quello che è stato confermato per dosate molto precise. Di ciò si stacca che se un polso di luce è emesso in un istante concreto, in un punto particolare dello spazio, allora, come continua a trascorrere il tempo, si andrà estendendo come una sfera di luce il cui volume e posizione sono indipendenti della velocità della fonte. Dopo una milionesimo di secondo la luce si sarà divertita formando una sfera con un raggio di 300 metri; dopo due milionesimo di secondo il raggio sarà di 600 metri, e così via. Sarà come le onde che si estendono sulla superficie di un stagno quando si lancia una pietra. Le onde si

estendono come cerchi che continuano ad aumentare di volume come uvetta il tempo. Se uno immagina un modello tridimensionale consistente nella superficie bidimensionale dello stagno e la dimensione temporanea, le onde circolari che si espandono segneranno un cono il cui vertice starà nel posto e tempo in cui la pietra battè l'acqua. In maniera simile, la luce, espandendosi da un evento dato, forma un cono tridimensionale nello spazio-tempo cuatridimensionale. Detto cono si conosce come il cono di luce futuro dell'evento. Della stessa forma, possiamo disegnare un altro cono, chiamato il cono di luce passato, il quale è l'insieme di eventi dal quale un polso di luce è capace di raggiungere l'evento dato.

I coni di luce futuro e passato di un evento P divide allo spazio-tempo in tre regioni, figura 2.5. Il futuro assoluto dell'evento è la regione interna del cono di luce futuro di P . È l'insieme di tutti gli eventi che possono in principio essere colpiti per quello che succede in P . Sucesos fosse del cono di luce di P non possono essere raggiunti per segni provenienti di P , perché nessuna di esse può viaggiare più rapido della luce. Questi eventi non possono, pertanto, essere influiti per quello che succede in P . Il passato assoluto di P è la regione interna del cono di luce passato. È l'insieme di tutti gli eventi dai che i segni che viaggiano con velocità uguali o minori di quella della luce, possono raggiungere P . È, quindi, l'insieme di tutti gli

eventi che possono colpire quello che succede in P. in un principio. Se si conosce quello che succede in un istante particolare in tutti i posti della regione dello spazio che cade dentro il cono di luce passato da P, può predirsi quello che succederà in P. Il “resto” è la regione dello spazio-tempo che è fuori dei coni di luce futuri e passato di P. Sucesos del resto non possono né colpire né essere colpiti per eventi in P. per esempio, se il Sole cessasse di illuminare in questo stesso istante, ciò non colpirebbe le cose della Terra nel tempo presente perché starebbe nella regione del resto dell’evento corrispondente a spegnersi il Sole, figura 2.6. Sapremmo solo otto minuti dopo che è il tempo che tarda la luce a raggiungerci dal Sole.

unicamente allora starebbero gli eventi della Terra nel cono di luce futuro dell'evento nel quale il Sole si spense. Di modo simile, non sappiamo che cosa sta succedendo lontano da noi nell'universo, in questo istante: la luce che vediamo delle galassie distanti partì di esse fa milioni di anni, e nel caso degli oggetti più distanti osservati, la luce partì fa circa otto mille milioni di anni. Così, quando guardiamo all'universo, lo vediamo come fu nel passato. Se si ignorano gli effetti gravitazionali, tale è come Einstein e Poincaré fecero in 1905, uno ha quello che si chiama la teoria della relatività speciale. Per ogni evento nello spazio-tempo può costruirsi un cono di luce, l'insieme di tutte le possibili strade luminose nello

spazio-tempo emessi in quell'evento, e dato che la velocità della luce è la stessa per ogni evento ed in ogni direzione, tutti i coni di luce saranno identici e saranno orientati in 1 a stessa direzione. Anche la teoria ci dice che niente può viaggiare più rapido della velocità della luce. Questo significa che quello verso qualunque oggetto attraverso lo spazio e del tempo deve essere rappresentato per una linea che cade dentro il cono da luce di qualunque evento in lei. La teoria della relatività speciale ebbe un gran successo spiegando perché la velocità della luce era la stessa per tutti gli osservatori, tale e come aveva mostrato l'esperimento di Michelson-Morley, e descrivendo adeguatamente quello che succede quando gli

oggetti si muovono con velocità vicine a quella della luce. Tuttavia, la teoria era inconsistente con la teoria della gravitazione di Newton che diceva che gli oggetti si accattivavano mutuamente con una forza dipendente della distanza tra essi. Questo significava che se uno muoveva uno degli oggetti, la forza sull'altro cambierebbe istantaneamente. o in altre parole, gli effetti gravitazionali dovrebbero viaggiare con velocità infinita, invece di con una velocità uguale o minore di quella della luce, come la teoria della relatività speciale richiedeva. Einstein realizzò tra 1908 e 1914 vari tentativi, senza successo, per trovare una teoria della gravità che fosse consistente con la relatività speciale. Finalmente, in 1915, propose quello che oggi-

giorno si conosce come teoria della relatività generale.

Einstein fece il suggerimento rivoluzionario che la gravità non è una forza come le altre, ma è una conseguenza che lo spazio-tempo non sia piano, come previamente si era supposto: lo spazio-tempo è ricurvo, o “deformato”, per la distribuzione di massa ed energia in lui presenti. I corpi come la Terra non stanno forzati a muoversi in orbite curve per una forza chiamata gravità; invece di questo, essi seguono la traiettoria più simile ad una linea retta in un spazio curvo, cioè, quello che si conosce come un geodesico. Un geodesico è la strada più breve, o più molto, in due punti vicini. Per esempio, la superficie della Terra è un spazio curvo bidimen-

sionale. Le geodesiche nella Terra si chiamano circoli massimi, e sono in due la strada più breve punti, figura 2.8. Come la geodesica è in due la strada più breve aeroporti chiunque, il navigatore di linee aeree dirà al pilota che voli durante lei. In relatività generale, i corpi seguono sempre linee rette nello spazio-tempo cuatridimensional; tuttavia, ci sembra che si muovano durante traiettorie ricurve nel nostro spazio tridimensionale. Questo è come vedere ad un aeroplano volando su un terreno montagnoso. Benché segua una linea retta nello spazio tridimensionale, la sua ombra seguirà una strada curva nel suolo bidimensionale. La massa del Sole curva lo spazio-tempo di tale modo che, malgrado la Terra segua una

strada retta nello spazio-tempo cuatridimensional, ci sembra che si muova in un'orbita circolare nello spazio tridimensionale. In realtà, le orbite dei pianeti predichas per la relatività generale sono quasi esattamente le stesse che le predichas per la teoria della gravità newtoniana. Tuttavia, nel caso di Mercurio che all'essere il pianeta più vicino al sole soffre gli effetti gravitazionali più forti e che, inoltre, ha un'orbita abbastanza allungata, la relatività generale predice che l'asse maggiore della sua ellisse dovrebbe ruotare attorno al Sole ad un ritmo di un grado per ogni diecimila anni.

Nonostante la cosa piccola di questo effetto, era stato già osservato prima di 1915 e servì come una delle prime conferme

della teoria di Einstein. Negli ultimi anni, perfino le deviazioni minori delle orbite degli altri pianeti rispetto alle predizioni newtonianas sono state misurate per mezzo del radar, trovandosi che concordano con le predizioni della relatività generale.

Anche i raggi di luce devono seguire geodesici nello spazio-tempo. Di nuovo, il fatto che lo spazio-tempo sia curvo significa che la luce non sembra ormai viaggiare in linee rette nello spazio. Così, la relatività generale predice che la luce dovrebbe essere deviata per i campi gravitazionali. Per esempio, la teoria predice che i coni di luce di punti vicini al sole staranno torti in dentro, dovuto alla presenza della massa del Sole. Questo vuole dire che la luce di una stella

distante che passi vicino al Sole, sarà derivata un piccolo angolo, col quale la stella sembrerà stare, per un osservatore nella Terra, in una posizione differente a quello nel quale sta in realtà, figura 2.9. Naturalmente, se la luce della stella passasse sempre vicino al Sole, non saremmo capaci di distinguere se la luce era deviata sistematicamente, o se, al contrario, la stella stava realmente nella posizione dove la vediamo. Tuttavia, dato che la Terra gira attorno al Sole, differenti stelle sembrano passare di dietro del Sole e la sua luce è derivata. Cambiano, perciò, la sua posizione apparente rispetto ad altre stelle.

Normalmente è molto difficile apprezzare questo effetto, perché la luce del Sole fa impossibile

osservare le stelle che appaiono nel cielo vicine a lui. Tuttavia, è possibile osservarlo per un'eclissi solare, nel quale la Luna si intromette tra la luce del Sole e la Terra. Le predizioni di Einstein sulle deviazioni della luce non poterono essere comprovate immediatamente, in 1915, a causa della prima guerra mondiale, e non fu possibile farlo fino a 1919 in cui una spedizione britannica, osservando un'eclissi dall'Africa orientale, dimostrò che la luce era davvero derivata per il Sole, giostro la teoria come prediceva. Questo accertamento di una teoria tedesca per scienziati britannici fu riconosciuta come un gran atto di riconciliazione tra i due paesi dopo la guerra. Risulta ironico che un esame posteriore delle fotogra-

fiè prese per quella spedizione mostrasse che gli errori commessi erano tanto grandi come l'effetto che si trattava di misurare. Le sue misure erano state o un caso di fortuna, o un caso di conoscenza del risultato che si voleva ottenere, quello che succede con relativa frequenza nella scienza. La deviazione della luce è stata, nonostante, confermata con precisione per numerose osservazioni posteriori.

Un'altra predizione della relatività generale è che il tempo dovrebbe trascorrere più lentamente vicino ad un corpo di gran massa come la Terra. Ciò si deve a che c'è una relazione tra l'energia della luce e la sua frequenza, cioè, il numero di onde di luce per secondo: quanto maggiore è l'energia, maggiore

è la frequenza. Quando la luce viaggia verso l'alto nel campo gravitazionale terrestre, perde energia e, pertanto, la sua frequenza diminuisce. Questo significa che il periodo di tempo tra una cresta dell'onda ed il seguente aumenta. A qualcuno situato sopra gli sembrerebbe che tutto quello che passasse sotto, nella Terra, trascorresse più lentamente. Questa predizione fu comprovata in 1962, usandosi un paio di orologi molto precisi installati nella parte superiore ed inferiore un deposito di acqua. Si trovò che quello di sotto che stava più vicino alla Terra, andava più lento, di accordo esattamente con la relatività generale. La differenza tra orologi a differenti altezze della Terra è, oggi, di considerevole importanza pra-

tica dovuto all'uso di sistemi di navigazione molto precisi, basati in segni provenienti di satelliti. Se Lei ignorassero le predizioni della relatività generale, la posizione che uno calcolerebbe avrei un errore di vari chilometri!

Le leggi di Newton del movimento finirono con l'idea di una posizione assoluta nello spazio. La teoria della relatività elimina il concetto di un tempo assoluto. Consideriamo un paio di gemelli. Supponiamo che uno di essi vive alla cima di una montagna, mentre l'altro rimane al livello del mare. Il primo gemello invecchierà più rapidamente che il secondo. Così, se tornassero a trovarsi, uno sarebbe più vecchio dell'altro. In questo caso, la differenza di età seria molto piccola, ma sarebbe molto mag-

giore se uno dei gemelli facesse un viaggio in un'imbarcazione spaziale ad una velocità vicina a quella della luce. Quando ritornasse, sarebbe molto più giovane di quello che rimase nella Terra. Questo si conosce come il paradosso dei gemelli, ma è solo un paradosso se uno ha sempre messa nella testa l'idea di un tempo assoluto. Nella teoria della relatività non esiste un tempo assoluto unico, ma ogni individuo possiede suo propria dosata personale del tempo, da dove misura che dipende sta e di come si muove.

Prima di 1915, si pensava allo spazio e nel tempo come se si commerciasse di una cornice fissa nella quale gli avvenimenti avevano posto, ma che non stava affettato per quello

che succedesse in lui. Questo era certo incluso nella teoria della relatività speciale. I corpi si muovevano, le forze attraevano e respingevano, ma semplicemente il tempo e lo spazio continuavano, senza essere colpiti per niente. Era naturale pensare che lo spazio ed il tempo erano esistiti da sempre.

La situazione è, tuttavia, completamente differente nella teoria della relatività generale. In ella, lo spazio ed il tempo sono quantità dinamiche: quando un corpo si muove, o una forza agisce, colpisce la curvatura dello spazio e del tempo, e, in contropartita, la struttura dello spazio-tempo colpisce il modo in cui i corpi si muovono e le forze agiscono. Lo spazio ed il tempo non colpiscono solo, ma sono

anche colpiti per tutto quello che succede nell'universo. Così come non si può parlare circa i fenomeni dell'universo senza le nozioni di spazio e tempo, in relatività generale non ha senso parlare dello spazio e del tempo fosse dei limiti dell'universo.

Nelle decadi seguenti alla scoperta della relatività generale, questi nuovi concetti di spazio e tempo andavano a rivoluzionare la nostra immagine dell'universo. La vecchia idea di un universo essenzialmente inalterabile che sarebbe potuto esistere, e che potrebbe continuare esistendo per sempre, fu rimpiazzata per il concetto di un universo dinamico, in espansione, che sembrava avere cominciato fa un certo tempo finito, e che potrebbe finire

in una volta finito nel futuro. Quella rivoluzione è l'oggetto del seguente capitolo. Ed anni dopo avere avuto luogo, sarebbe anche il punto di avviamento del mio lavoro in fisica teorica. Roger Penrose ed io mostriamo come la teoria della relatività generale di Einstein implicava che l'universo doveva avere un principio e, possibilmente, un fine.

L'UNIVERSO IN ESPANSIONE

Se si guarda il cielo in una chiara notte senza luna, gli oggetti più brillanti di uno vedi sono i pianeti Venere, Marte, Giove e Saturno. Si vede anche un gran numero di stelle che sono come il nostro Sole, ma situate a molta più distanza di noi. Alcune di queste stelle chiamate fisse cambiano, in realtà, molto leggermente le sue posizioni rispetto alle altre stelle, quando la Terra gira attorno al Sole: ma non stanno fissi in assoluto! Questo si

deve a che stanno relativamente vicino a noi. Come la Terra gira attorno al Sole, li vediamo da differenti posizioni di fronte al fondo delle stelle più distanti. Si tratta di un fatto fortunato, perché ci permette di misurare la distanza tra queste stelle e noi: quanto più vicino stiano, più sembreranno muoversi.

La stella più vicina, chiamata Prossimo Centauri, si trova a quattro anni luce di noi, la luce proveniente di lei tarda circa quattro anni in arrivare alla Terra, o a circa trenta sette miliardi di chilometri. La maggior parte del resto delle stelle osservabili si trovano a prima vista a pochi cientos di anni luce di noi. Per captare la grandezza di queste distanze, diciamo che il nostro Sole sta solo ad otto

minuto-luce di distanza! Le stelle ci sono apparsi sparse per tutto il cielo notturno, benché appaiano particolarmente concentrate in una banda che chiamiamo la Via lattea. Già in 1750, alcuni astronomi incominciarono a suggerire che l'apparizione della Via lattea potrebbe essere spiegata per il fatto che la maggior parte delle stelle visibili stesse in un'unica configurazione con forma di disco, un esempio di quello che oggi giorno chiamiamo una galassia spirale. Solo alcune decadi dopo, l'astronomo sir William Herschel confermò questa idea attraverso un'ardua catalogazione delle posizioni e le distanze di un gran numero di stelle. Nonostante ciò, l'idea arrivò solo a guadagnare un'accettazione completa agli inizi del

nostro secolo.

L'immagine moderna dell'universo sale solamente a 1924, quando l'astronomo nordamericano Edwin Hubble dimostrò che la nostra galassia non era l'unica. C'erano in realtà molti altre, con ampie regioni di spazio vuoto tra esse. Per potere provare questo, doveva determinare le distanze che c'erano fino a quelle galassie, tanto lontane che, al contrario di quello che succede con le stelle vicine, sembravano essere davvero fisse. Hubble si vide forzato, pertanto, ad usare metodi indiretti per misurare quelle distanze. Risulta che la lucentezza apparente di una stella dipende da due fattori: la quantità di luce che irradia, la sua luminosità, ed egli lontano che sta di noi. Per

le stelle vicine, possiamo misurare le sue lucentezze apparenti e le sue distanze, di tale forma che possiamo calcolare le sue luminosità. Inversamente, se conoscessimo la luminosità delle stelle di altre galassie, potremmo calcolare le sue distanze misurando le sue lucentezze apparenti. Hubble notò che certi tipi di stelle, quando stanno sufficientemente il vicino a noi come affinché possa misurarsi la sua luminosità, hanno sempre la stessa luminosità. Quindi, egli argomentò che se trovassimo tali tipi di stelle in un'altra galassia, potremmo supporre che avrebbero la stessa luminosità e calcolare, di questa maniera, la distanza a quella galassia. Se potessimo fare questo per diverse stelle nella stessa galassia, ed i

nostri calcoli producessero sempre lo stesso risultato, potremmo essere abbastanza sicuri della nostra stima.

Edwin Hubble calcolò le distanze a nove galassie differenti per mezze del metodo anteriore. Attualmente sappiamo che la nostra galassia è solo una di tra i vari cientos di migliaia di milioni di galassie che possono veda coi moderni telescopi, e che ognuna di esse contiene cientos di migliaia di milioni di stelle. La figura 3.1 mostra una fotografia di una galassia spirale. Crediamo che questa immagine è simile a quella della nostra galassia se fosse veda per qualcuno che vivesse in un'altra galassia. Viviamo in una galassia che ha un diametro approssimato di cento mille anni luce, e

che sta girando lentamente. Le stelle nelle braccia della spirale girano attorno al centro con un periodo di vario cientos di milioni di anni.

Il nostro Sole non è più che una stella gialla ordinaria, di volume mezzo, situata vicino al centro di uno delle braccia della spirale. Certamente, abbiamo percorso una lunga strada dai tempi di Aristotele e Tolomeo, quando credevamo che la Terra era il centro dell'universo!

Le stelle stanno tanto lontano dalla Terra che ci sembrano semplici punti luminosi. Non possiamo apprezzare né il suo volume né la sua forma. Come allora possiamo classificare alle stelle in distinti tipi? Dell'immensa maggioranza delle stelle, possiamo misurare solo una

proprietà caratteristica: il colore della sua luce. Newton scoprì che quando la luce attraversa un pezzo di vetro triangolare, quello che si conosce come un prisma, la luce si divide nei diversi colori che la compongono, il suo spettro, come succede con l'arcobaleno. Mettendo a fuoco con un telescopio una stella o galassia particolare, possiamo osservare di modo simile lo spettro della luce proveniente di quella stella o galassia. Stelle differenti possiedono spettri differenti, ma la lucentezza relativa dei distinti colori è sempre esattamente uguale al che si spererebbe di trovare nella luce emessa per un oggetto in rossa incandescenza. , In realtà, la luce emessa per un oggetto opaco incandescente ha un aspetto caratteristico che

dipende solo dalla sua temperatura, quello che si conosce come spettro termico. Questo significa che possiamo verificare la temperatura di una stella a partire dal suo spettro luminoso. Inoltre, si osserva che certi colori molto specifici sono assenti degli spettri delle stelle, e che questi colori assenti possono variare di una stella ad un'altra. Dato che sappiamo che ogni elemento chimico assorbe un insieme caratteristico di colori molto specifici, può determinarsi esattamente che elementi c'è nell'atmosfera di una stella paragonando gli insiemi di colori assente di ogni elemento con lo spettro della stella.

Quando gli astronomi incominciarono a studiare, negli anni venti, gli spettri delle stelle di

altre galassie, trovarono tremendamente un fatto peculiare: queste stelle possedevano gli stessi insiemi caratteristici di colori assente che le stelle della nostra propria galassia, ma spaesati tutti essi nella stessa quantità relativa verso l'estremo dello spettro corrispondente al colore rosso. Per capire le applicazioni di questa scoperta, dobbiamo conoscere in primo luogo l'effetto Doppler. Come abbiamo visto, la luce visibile consiste in fluttuazioni od onde del campo elettromagnetico. La frequenza, o numero di onde per secondo, della luce è eccessivamente alto, scopando da quattrocento fino a settecento milioni di onde per secondo. Le differenti frequenze della luce sono quelle che l'occhio umano vede come differenti colori, cor-

rispondendo le frequenze più basse all'estremo rosso dello spettro e le più alte, all'estremo azzurro. Immaginiamo allora una fonte luminosa, come una stella, ad una distanza fissa di noi che emette onde di luce con una frequenza costante. Ovviamente la frequenza delle onde che riceviamo sarà la stessa che la frequenza con la quale sono emesse, il campo gravitazionale della galassia non sarà il sufficientemente grande come per avere un effetto significativo. Supponiamo ora che la fonte incomincia a muoversi verso noi. Ogni volta che la fonte emetta la seguente cresta di onda, starà più vicino a noi, per quello che il tempo che ogni nuova cresta tardi a raggiungerci sarà minore di quando la stella era stazionaria. Questo

significa che il tempo tra ogni due creste che noi arrivano è più breve che prima e, pertanto, che il numero di onde che riceviamo per secondo, cioè, la frequenza, è maggiore che quando la stella era stazionaria. Ugualmente, se la fonte si allontana da noi, la frequenza delle onde che riceviamo sarà minore di nell'ipotesi stazionaria. Perciò, nel caso della luce, questo significa che le stelle che si stiano allontanando da noi avranno i suoi spettri spaesati verso l'estremo rosso dello spettro, spostamento verso il rosso, e le stelle che si stiano avvicinando avranno spettri con un spostamento verso l'azzurro. Questa relazione tra frequenza e velocità che si conosce come effetto Doppler, è un'esperienza giornaliera. Se ascoltiamo un'au-

tomobile passando per la strada notiamo che, quando c'è avvicinato, il suo motore suona con un tono più acuto della cosa normale, quello che corrisponde ad una frequenza più alta delle onde sonore, mentre quando si allontana produce un suono più grave. Il comportamento della luce o delle onde di radio è simile. In realtà, la polizia fa uso dell'effetto Doppler per misurare la velocità delle automobili a partire dalla frequenza dei polsi di onde di radio riflessi per i veicoli. Negli anni che seguirono alla scoperta dell'esistenza di altre galassie, Hubble dedicò il suo tempo a catalogare le distanze ed ad osservare gli spettri delle galassie. In quell'epoca, la maggior parte della gente pensava che le galassie si muoverebbero

di forma abbastanza aleatorio, per quello che si sperava di trovare tanti spettri con spostamento verso l'azzurro come verso il rosso. Fu una sorpresa assoluta, pertanto, trovare che la maggioranza delle galassie presentavano un spostamento verso il rosso: tutte si stavano allontanando quasi da noi! Perfino più sorprendente fu ancora il ritrovamento che Hubble pubblicò in 1929: neanche lo spostamento delle galassie verso il rosso è aleatorio, ma è direttamente proporzionale alla distanza che ci separa da esse. o, detto con altre parole, quanto più lontano sta' una galassia, a maggiore velocità ti allontani da noi! Questo significa che l'universo non può essere statico, come tutto il mondo aveva creduto prima, ma

in realtà si sta espandendo. La distanza tra le differenti galassie sta aumentando continuamente. La scoperta che l'universo si sta espandendo è stato uno dei grandi rivoluzioni intellettuali del secolo xx. Visto a posteriori, è naturale meravigliarsi che a nessuno gli fosse stato successo questo prima. Newton, e qualche altro scienziato, avrebbe dovuto dare conta che un universo statico incomincerebbe subito a contrarsi sotto l'influenza della gravità. Ma supponiamo che, al contrario, l'universo si espande. Se si stesse espandendo molto lentamente, la forza della gravità frenerebbe finalmente l'espansione e quello comincerebbe allora a contrarsi. Tuttavia, se si espandesse più in fretta che ad un certo valore critico, la gravità

non sarebbe mai la sufficientemente intensa come per fermare l'espansione, e l'universo continuerebbe espandendosi per sempre. La situazione sarebbe simile a quello che succede quando si lancia un razzo verso lo spazio dalla superficie della Terra. Se questo ha una velocità relativamente bassa, la gravità finirà per fermare il razzo che allora cadrà di nuovo alla Terra. Al contrario, se il razzo possiede una velocità maggiore che una certa velocità critica, di circa undici chilometri per secondo, la gravità non sarà la sufficientemente intensa come per farlo ritornare di tale forma che si manterrà allontanandosi dalla Terra per sempre. Questo comportamento dell'universo sarebbe potuto essere predetto a partire dalla teoria della gra-

vità di Newton, nel secolo xix, nel xviii, o perfino alla fine del xvii. La credenza in un universo statico era tanto forte che persistè fino a principi del secolo xx. Perfino Einstein, quando in 1915 formulò la teoria della relatività generale, era tanto sicuro che l'universo doveva essere statico che modificò la teoria per fare che ciò fosse possibile, introducendo nelle sue equazioni la chiamata costante cosmologica. Einstein introdusse una nuova forza "antigravitatoria" che, al contrario che le altre forze, non proveniva da nessuna fonte in questione, ma stava inserisce nella struttura stessa dell'espaciotempo.- Egli sosteneva che lo spazio-tempo aveva una tendenza intrinseca ad espandersi, - e che questa avrebbe un

valore che equilibrerebbe esattamente l'attrazione di tutta la materia nell'universo, in modo che sarebbe possibile l'esistenza di un universo statico. Solo un uomo era disposto, come sembra, ad accettare alla lettera la relatività generale. Così, mentre Einstein ed altri fisici cercavano modi di evitare le predizioni della relatività generale di un universo non statico, il fisico e matematico russo Alexander Friedmann si disporsi, al contrario, a spiegarli.

Friedmann fece due supposizioni molto semplici sull'universo: che l'universo sembra lo stesso da qualunque direzione dalla quale lo sia osservato, e che anche ciò sarebbe certo se lo fossi osservato da qualunque altro posto. A partire da questi due ide

camente, Friedmann dimostrò che non dovrebbe sperarsi che l'universo fosse statico. In realtà, in 1922, vari anni prima della scoperta di Edwin Hubble, Friedmann predisse esattamente quello che Hubble trovò!

La supposizione che l'universo sembra lo stesso in tutte direzioni, non è certo nella realtà. Per esempio, come abbiamo visto, le altre stelle della nostra galassia formano un'inconfondibile banda di luce durante il cielo, chiamata Via lattea. Ma se ci concentriamo sulle galassie lontane, sembra c'essere più o meno lo stesso numero di esse in ogni direzione. Così, l'universo sembra essere approssimativamente lo stesso in qualunque direzione, purché sia analizzato a gran scala, comparata

con la distanza tra galassie, e si ignorino le differenze a piccola scala. Per molto tempo, questa fu giustificazione sufficiente per la supposizione di Friedmann, presa come un avvicinamento grossolano del mondo reale. Ma recentemente, un fortunato incidente rivelò che la supposizione di Friedmann è in realtà una descrizione straordinariamente esatta del nostro universo.

In 1965, due fisici nordamericani dei laboratori della Bell Telephone in Nuovo Jersey, Arno Penzias e Robert Wilson, stavano provando un rivelatore di microonde eccessivamente sensibile, (Le microonde sono uguali alle onde luminose, ma con una frequenza dell'ordine di solo diecimila milioni di onde per secondo. Penzias e Wilson si

sorpresero il trovare che il suo rivelatore captava più rumore del che speravano. Il rumore non sembrava provenire da nessuna direzione in questione. Al principio scoprirono escrementi di uccello nel suo rivelatore, per quello che provarono tutti i possibili difetti di funzionamento, ma pronto li rifiutarono. Essi sapevano che qualunque rumore proveniente di dentro l'atmosfera sarebbe meno intenso quando il rivelatore fosse diretto verso l'alto che quando non lo stesse, poiché i raggi luminosi attrarrebbero molta più atmosfera quando si ricevessero da vicino all'orizzonte che quando si ricevessero direttamente da sopra. Il rumore extra era lo stesso per qualunque direzione dalla quale si osservasse, in

modo che doveva provenire di fosse dell'atmosfera. Il rumore era anche lo stesso durante il giorno, e durante la notte, e durante tutto l'anno, malgrado la Terra girasse sul suo asse ed attorno al Sole. Questo dimostrò che la radiazione doveva provenire di oltre il sistema solare, e perfino da oltre la nostra galassia, perché altrimenti varierebbe quando il movimento della Terra facesse che il rivelatore segnasse in differenti direzioni. In realtà, sappiamo che la radiazione ha dovuto viaggiare fino a noi attraverso la maggior parte dell'universo osservabile, e dato che sembra essere la stessa in tutte le direzioni, l'universo deve essere anche lo stesso in tutte le direzioni, per lo meno a gran scala. Attualmente, sappiamo che in

qualunque direzione che guardiamo, il rumore non varia mai più di una parte in diecimila. Così, Penzias e Wilson si imbattono inconsciamente in una conferma straordinariamente precisa della prima supposizione di Friedmann.

Approssimativamente contemporaneamente, due fisici nordamericani della vicina Università di Princeton, Guidoslitta anche Dicke e Jim Peebles, erano interessati nelle microonde. Studiavano un suggerimento fatto per George Gamow che era stato alunno di Alexander Friedmann, relativa a che l'universo nei suoi primi istanti sarebbe dovuto essere molto caldo e denso, per finire bersaglio incandescente. Dicke e Peebles argomentarono che dovremmo essere ancora

capaci di vedere lo splendore degli inizi dell'universo, perché la luce proveniente di posti molto distanti starebbe raggiungendoci ora. Tuttavia, l'espansione dell'universo implicherebbe che questa luce dovrebbe essere tanto tremendamente spaesata verso il rosso che c'arriverebbe oggi giorno come radiazione di microonde. Quando Dicke e Peebles stavano studiando come cercare questa radiazione, Penzias e Wilson seppero dell'obiettivo di quello lavoro e compresero che essi avevano trovato già detta radiazione. Grazie a questo lavoro, Penzias e Wilson furono premiati col premio Nobel in 1978 (quello che sembra essere abbastanza ingiusto con Dicke e Peebles, per non menzionare a Gamow).

A prima vista, potrebbe sembrare che tutta questa evidenza che l'universo sembra lo stesso in qualunque direzione dalla quale guardiamo suggerirebbe che c'è qualcosa di speciale in quanto alla nostra posizione nell'universo. In questione, si potrebbe pensare che, se osserviamo a tutte le altre galassie allontanarsi da noi, è perché stiamo nel centro dell'universo. È, tuttavia, una spiegazione alternativa: l'universo potrebbe essere anche uguale in tutte le direzioni se l'osservassimo da qualunque altra galassia. Questo, come abbiamo visto, fu la seconda supposizione di Friedmann. Non si tiene evidenza scientifica a favore o contro questa supposizione. Crediamo in lei solo per ragioni di modestia: sarei

straordinariamente curioso che l'universo sembrasse identico in tutte le direzioni ad intorno nostro, e che non fossi così per altri punti dell'universo! Nel modello di Friedmann, tutte le galassie si stanno allontanando tra sé alcune di altre. La situazione è simile ad un globo con un certo numero di punti disegnati in lui, e che si va gonfiando uniformemente. Come il globo si gonfia, la distanza tra ogni due punti aumenta, nonostante il quale non si può dire che esista un punto che sia il centro dell'espansione. Inoltre, quanto più lontano stiano i punti, si separeranno con maggiore velocità. Analogamente, nel modello di Friedmann la velocità col che due galassie chiunque si separano è proporzionale alla distanza tra

esse. In questo modo, prediceva che lo spostamento verso il rosso di una galassia dovrebbe essere direttamente proporzionale alla sua distanza a noi, esattamente quello che Hubble trovò. Nonostante il successo del suo modello e delle sue predizioni delle osservazioni di Hubble, il lavoro di Friedmann continuò ad essere ignorato nel mondo occidentale fino a che in 1935 il fisico nordamericano Howard Robertson ed il matematico britannico Arthur Walker crearono modelli simili in risposta alla scoperta per Hubble dell'espansione uniforme dell'universo. Benché Friedmann trovasse solo uno, esistono in realtà tre tipi di modelli che ubbidiscono alle due supposizioni fondamentali di Friedmann. Nel primo tipo

(quello che trovò Friedmann, l'universo si espande il sufficientemente lento come affinché l'attrazione gravitazionale tra le differenti galassie sia capace di frenare e finalmente fermare l'espansione. Allora le galassie si incominciano ad avvicinare le alcune alle altre e l'universo si contrarsi. La figura 3.2 dimostrazione come cambia, come aumenta in due il tempo, la distanza galassie vicine. Questa incomincia essendo uguale a zero, aumenta fino ad arrivare ad un massimo e dopo diminuisce fino a farsi zero di nuovo. Nel secondo tipo di soluzione, l'universo si espande tanto rapidamente che l'attrazione gravitazionale non può fermarlo, benché sì che lo frena un po'. La figura 3.3 mostra in due la

separazione galassie vicine in questo modello. Incomincia in zero e col tempo continua ad aumentare, perché le galassie continuano separandosi con una velocità stazionaria. Infine, esiste un terzo tipo di soluzione, nel quale l'universo si sta espandendo solo con la velocità giusta per evitare di collassare. La separazione in questo caso, mostrata nella figura 3.4, incomincia anche in zero e continua aumentando sempre. Tuttavia, la velocità con la quale le galassie si stanno separando fa sempre di più piccola, benché non arrivi mai ad essere nulla.

Una caratteristica notevole del primo tipo di modello di Friedmann è che, in lui, l'universo non è infinito nello spazio, benché neanche abbia nessun limite. La

gravità è tanto forte che lo spazio si curva chiudendosi su sé stesso, risultando simile alla superficie della Terra. Se uno si mantiene viaggiando sulla superficie della Terra in una certa direzione, non arriva mai di fronte ad una barriera insormontabile o cade per un precipizio, ma finalmente ritorna al posto di dove partì. Nel primo modello di Friedmann, lo spazio è giusto come questo, ma con tre dimensioni invece di con due, come succede con la superficie terrestre. La quarta dimensione, anche il tempo, ha un'estensione finita, ma è come una linea con due estremi o antistanti, un principio ed un fine. Si vedrà più avanti che quando si accorda la relatività generale col principio di incertezza della meccanica quantica, è possibile

che ambedue, spazio e tempo, siano finiti, senza nessun tipo di bordo o frontiera.

L'idea che potrebbe andare via on-line retta attorno all'universo e finire dove si incominciò è buona per la fantascienza, ma non ha troppa rilevanza pratica, perché può verta che l'universo collasserebbe di nuovo a volume zero prima che potesse completarsi un giro intero. Uno dovrebbe viaggiare più rapido della luce, quello che è impossibile, per potere ritornare al punto di partenza prima che l'universo avesse un fine.

Nel primo tipo di modello di Friedmann, quello che si espande primo e dopo collassa, lo spazio è ricurvo su sé stesso, come la superficie della Terra. È, pertanto, finito in estensione. Nel

secondo tipo di modello, quello che si espande per sempre, lo spazio sta curvato al contrario, cioè, come la superficie di una sella. Così, in questo caso lo spazio è infinito. Finalmente, nel terzo tipo, quello che possiede la velocità critica di espansione, lo spazio non è ricurvo, e, pertanto, è anche infinito.

Ma, quale dei modelli di Friedmann descrive al nostro universo? Cesserà qualche volta l'universo la sua espansione ed incomincerà a contrarsi, o si espanderà per sempre? Per rispondere a queste questioni, dobbiamo conoscere il ritmo attuale di espansione e la densità mezza presente. Se la densità è minore di un certo valore critico, determinato per il ritmo di espansione, l'attrazione gra-

vitazionale sarà troppo debole per potere fermare l'espansione. Se la densità è maggiore che il valore critico, la gravità fermerà l'espansione in qualche tempo futuro e farà che l'universo giri a collassare.

Possiamo determinare il ritmo attuale di espansione, misurando attraverso l'effetto Doppler le velocità alle quali le altre galassie si allontanano da noi. Questo si può impadronire di molta precisione. Tuttavia, le distanze alle altre galassie non si conoscono bene perché possiamo misurarli solo indirettamente. Così, tutto quello che sappiamo è che l'universo si espande tra un cinque ed un dieci per 100 ogni mille milioni di anni. Tuttavia, la nostra incertezza rispetto alla densità mezza attuale dell'uni-

verso è perfino maggiore. Se sommammo le masse di tutte le stelle che possiamo vedere tanto nella nostra galassia come nelle altre galassie, il totale è meno della centesimo parte della quantità necessaria per fermare l'espansione dell'universo, perfino considerando la stima più bassa del ritmo di espansione. La nostra galassia e le altre galassie devono contenere, nonostante, una gran quantità di "materia oscura" che non può vedersi direttamente, ma che sappiamo che deve esistere, dovuto all'influenza della sua attrazione gravitazionale sulle orbite delle stelle nelle galassie. Inoltre, la maggioranza delle galassie si trovano attorniate in grappoli, e possiamo inferire ugualmente la presenza di ancora più mate-

ria oscura negli spazi intergalattici dei grappoli, dovuto al suo effetto sul movimento delle galassie. Quando sommammo tutta questa materia oscura, otteniamo solamente la decima parte, approssimativamente, della quantità richiesta per fermare l'espansione. Nonostante, non possiamo escludere la possibilità che potesse esistere alcuno altra forma di materia, distribuita quasi uniformemente molto alla cosa e largo dell'universo che non abbiamo scoperto ancora e che potrebbe elevare la densità mezza dell'universo al di sopra del valore critico necessario per fermare l'espansione. L'evidenza presente suggerisce, pertanto, che l'universo si espanderà probabilmente per sempre, ma che della cosa unica che possiamo

stare davvero sicuri è che se l'universo andasse a collassare, non lo farebbe come minimo in altri diecimila milioni di anni, poiché stato espandendosi per lo meno quella quantità di tempo. Questo non dovrebbe preoccuparci indebitamente: per allora, almeno che abbiamo colonizzato oltre il sistema solare, l'umanità farà tempo che sarà sparito, estinta insieme al nostro Sole! Tutte le soluzioni di Friedmann condividono il fatto che in qualche tempo scorso, tra dieci e venti mille milioni di anni, la distanza tra galassie vicine è dovuta essere zero. In quell'istante che chiamiamo big bang, la densità dell'universo e la curvatura dello spazio-tempo sarebbero stati infinite. Dato che la matematica non può maneg-

giare realmente numeri infiniti, questo significa che la teoria della relatività generale, nella quale si basano le soluzioni di Friedmann, predice che c'è un punto nell'universo dove la teoria in sé collassa. Tale punto è un esempio di quello che i matematici chiamano una singolarità. In realtà, tutte le nostre teorie scientifiche sono formulate sotto la supposizione che l'espacio-tempo - è uniforme e quasi piano, in modo che esse smettono di essere applicabili nella singolarità del big bang dove la curvatura dello spazio-tempo è infinita. Ciò significa che benché ci fossero avvenimenti anteriori al big bang, non potrebbero utilizzarsi per determinare quello che succederebbe dopo, poiché ogni capacità di predizione

cederebbe nel big bang. Ugualmente, se, come è il caso, sappiamo solo quello che è successo dopo il big bang, non potremo determinare quello che succedè prima. Dal nostro punto di vista, gli eventi anteriori al big bang non possono avere conseguenze, per quello che non dovrebbero fare parte dei modelli scientifici dell'universo. Perciò, dovremmo estrarrli di qualunque modello e dire che il tempo ha il suo principio nel big bang.

A molta gente non gli piace l'idea che il tempo abbia un principio, probabilmente perché suona ad intervento divino. , La Chiesa cattolica, al contrario, si appropriò del modello del big bang ed in 1951 proclamò ufficialmente che era di accordo col Bibbia. Per ciò, ci fu un buon numero di ten-

tativi per evitare la conclusione che c'era stato un big bang. La proposta che ottenne un appoggio più ampio fu la chiamata teoria dello stato stazionario, steady state. Fu suggerita, in 1948, per due rifugiati dell'Austria occupata per i nazisti, Hermann Bond e Thomas Gold, insieme ad un britannico, Fred Hoyle, che aveva lavorato con essi durante la guerra nello sviluppo del radar. L'idea era che conformi le galassie si andavano allontanando alcune di altre, nuove galassie si formavano continuamente nelle regioni intergalattiche, a partire da materia nuova che era creata di forma continua. L'universo sembrerebbe, perciò, approssimativamente lo stesso in ogni tempo ed in ogni punto dello spazio. La teoria dello stato sta-

zionario richiedeva una modificazione della relatività generale per permettere la creazione continua di materia, ma il ritmo di creazione incluso era tanto basso, approssimativamente una particella per chilometro cubo all'anno che non stava in conflitto con gli esperimenti. La teoria era una buona teoria scientifica, nel senso descritto nel capitolo 1: era semplice e realizzava predizioni concrete che potrebbero essere comprovate per l'osservazione. Una di queste predizioni era che il numero di galassie, od oggetti simili in qualunque volume dato dello spazio, dovrebbe essere lo stesso dove voglia e quando voglia che guardassimo nell'universo. Alla fine degli anni cinquanta e principio dei sessanta, un gruppo di astro-

nomi diretto per Martín Ryle chi aveva lavorato anche con Bond, Gold e Hoyle nel radar durante la guerra, realizzò, a Cambridge, un studio su fonti di onde di radio nello spazio esterno. Il gruppo di Cambridge dimostrò che la maggioranza di queste fonti di radio devono risiedere fuori della nostra galassia, molte di esse potevano essere concordi veramente con altre galassie, e, anche, che c'erano molte più fonti deboli che intense. Interpretarono che le fonti deboli erano le più distanti, mentre le intense erano le più vicine. Allora risultava c'essere meno fonti comuni per unità di volume per le fonti vicine che per le lontane. Questo potrebbe significare che stiamo in una regione dell'universo nel quale le fonti sono più scarse

che nel resto. Alternativamente, potrebbe significare che le fonti erano più numerose nel passato, nell'epoca in cui le onde di radio cominciarono il suo viaggio verso noi che ora. Qualunque spiegazione contraddiceva le predizioni della teoria dello stato stazionario. Inoltre, la scoperta della radiazione di microonde per Penzias e Wilson in 1965 indicò anche che l'universo è dovuto essere molto più denso nel passato. La teoria dello stato stazionario aveva, pertanto, che essere abbandonata.

Un altro tentativo di evitare la conclusione che ha dovuto avere un big bang e, pertanto, un principio del tempo, fu realizzato da due scienziati russi, Evgenii Lifshitz ed Isaac Khalatnikov, in 1963. Essi suggerì-

rono che il big bang potrebbe essere, unicamente, una peculiarità dei modelli di Friedmann che non erano dopo tutto più che avvicinamenti all'universo reale. Magari, di tutti i modelli che erano approssimativamente come l'universo reale, quelli di Friedmann contenessero solo una singolarità come quella del big bang. Nei modelli di Friedmann, tutte le galassie si stanno allontanando direttamente alcune di altre, di tale modo che non è sorprendente che in qualche tempo scorso stessero tutte giunte nello stesso posto. Nell'universo reale, tuttavia, le galassie non hanno solo un movimento di separazione di alcune rispetto ad altre, ma hanno anche piccole velocità laterali. Così, in realtà, non hanno mai perché

essere stato esattamente tutte nello stesso posto, bensì semplicemente molto vicino alcune di altre. Magari allora l'universo in espansione attuale non sarebbe derivato da una singolarità come il big bang, bensì di, una fase previa in contrazione. Quando l'universo collassò, le particelle che lo formassero non avrebbero potuto urtare tutte tra sé, ma si sarebbero incrociati e separato dopo, producendo l'espansione attuale dell'universo. Come potremmo distinguere allora se l'universo reale ha cominciato con un big bang o no? Quello che Lifshitz e Khalatnikov fecero fu studiare modelli dell'universo che erano approssimativamente come quelli di Friedmann, ma che avevano in conto le irregolarità e le velocità aleatorie

delle galassie nell'universo reale. Dimostrarono che tali 'Modelli potrebbero cominciare con un big bang, perfino malgrado le galassie si non stessero separando oramai direttamente alcune di altre, ma sostennero che ciò continuava solo ad essere possibile in certi modelli eccezionali nel quale le galassie si muovevano giustamente nella forma adeguata. Argomentarono che, poiché sembra c'essere infinitamente più modelli del tipo Friedmann senza una singolarità come quella del big bang che con una, dovrebbe concludersi che in realtà non è esistito il big bang. Tuttavia, più tardi si resero conto che c'era una classe molto più generale di modelli del tipo Friedmann che sì contenevano singolarità, e nei quali le galassie

non dovevano stare muovendosi di un modo speciale. Perciò, ritirarono la sua affermazione in 1970.

Il lavoro di Lifshitz e Khalatnikov fu molto prezioso perché dimostrò che l'universo avrebbe potuto avere una singolarità, un big bang, se la teoria della relatività generale era corretta. Tuttavia, non risolse la questione fondamentale: predice la teoria della relatività generale che il nostro universo avrebbe dovuto avere un big bang, un principio del tempo? La risposta arrivò attraverso un avvicinamento completamente differente, cominciata per un fisico e matematico britannico, Roger Penrose, in 1965. Usando il modo in cui i coni di luce si comportano nella relatività generale,

insieme al fatto che la gravità è sempre attrattiva, dimostrò che una stella che collassa abbassa la sua propria gravità e acchiappata in una regione il cui superficie si diminuisce col tempo a volume zero. E, se la superficie della regione si diminuisce a zero, la stessa cosa deve succedere col suo volume. Tutta la materia della stella sarà compressa in una regione di volume nullo, di tale forma che la densità di materia e la curvatura dello spazio-tempo diventeranno infinite. In altre parole, si ottiene una singolarità contenuta dentro una regione dello spazio-tempo chiamato buco nero.

A prima vista, il risultato di Penrose si applica solo a stelle. Non ha niente a che vedere con la questione di se l'universo intero

ebbe, nel passato, una singolarità del tipo del big bang. Nonostante, quando Penrose presentò il suo teorema, io ero un studente di ricerca che cercava disperatamente un problema col che completare la tesi dottorale.

Due anni prima, mi era stato diagnosticato la malattia ALS, comunemente conosciuta come malattia di Lou Gehrig o dei neuroni motoscafi, e mi ero fatto capire che mi rimanevano solo uno o due anni di vita. In queste circostanze non sembrava avere troppo senso lavorare nella tesi dottorale, perché non sperava di sopravvivere tanto tempo. Nonostante quello, avevano trascorso due anni e non mi trovavo molto peggio. In realtà, le cose mi andavano abbastanza bene e mi ero promesso con

una ragazza affascinante, Jane Wilde. Ma per potermi sposare, aveva bisogno di un lavoro, e per poterlo ottenere, aveva bisogno del dottorato.

In 1965, lessi circa il teorema di Penrose secondo il quale qualunque corpo che soffrisse un collasso gravitazionale dovrebbe formare finalmente una singolarità. Pronto compresi che se si investisse la direzione del tempo nel teorema di Penrose, in modo che il collasso si trasformasse in un'espansione, le condizioni del teorema continuerebbero a verificarsi, purché l'universo a gran scala fuori, attualmente, approssimativamente come un modello di Friedmann. Il teorema di Penrose aveva dimostrato che qualunque stella che collassi deve finire in una singo-

larità. Lo stesso argomento col tempo invertito dimostrò che qualunque universo in espansione, del tipo di Friedmann, ha dovuto cominciare in una singolarità. Per ragioni tecniche, il teorema di Penrose richiedeva che l'universo fosse infinito spazialmente. Conseguentemente, poteva utilizzarlo solo per provare che dovrebbe avere una singolarità se l'universo si stesse espandendo il sufficientemente rapido come per evitare di collassare di nuovo, poiché solo questi modelli di Friedmann erano infinito spazialmente. Durante - gli anni seguenti, mi dedicai a sviluppare nuove tecniche matematiche per eliminare l'antecedente ed altri differenti requisiti tecnici dei teoremi che provavano che le singolarità

devono esistere. Il risultato finale fu un articolo unito tra Penrose ed io, in 1970, che alla fine provò che ha dovuto avere una singolarità come quella del big bang, con l'unica condizione che la relatività generale sia corretta e che l'universo contenga tanta materia come osserviamo. Ci fu una forte opposizione al nostro lavoro, da parte dei russi, dovuto alla sua credenza marxista nel determinismo scientifico, e da parte della gente che credeva che l'idea in sé delle singolarità era ripugnante e rovinava la bellezza della teoria di Einstein. Nonostante, uno non può discutere contro un teorema matematico. Così, alla fine, il nostro lavoro arrivò ad essere generalmente accettato e, oggi, quasi tutto il mondo suppone che l'u-

niverso cominciò con una singolarità come quella del big bang. Risulta per quel motivo ironico che, avendo cambiato le mie idee, stia tentando ora di convincere gli altri fisici che non ci fu all'inizio in realtà singolarità dell'universo. Come vedremo più avanti, questa può sparire una volta che gli effetti quantici si tengono in conto.

Abbiamo visto in questo capitolo come, in meno di mezzo secolo, la nostra visione dell'universo, formata per millenni, si è trasformato. La scoperta di Hubble che l'universo si sta espandendo, ed il darci conta della piccolezza del nostro pianeta nell'immensità dell'universo, furono solo il punto di partenza. Come l'evidenza sperimentale e teorica si andava accumulando, si chiarifi-

cava sempre di più che l'universo ha dovuto avere un principio nel tempo, fino a che in 1970 questo fu finalmente provato per Penrose e per me, sulla base della teoria della relatività generale di Einstein. Quella prova dimostrò che la relatività generale è solo una teoria incompleta: non può dirci come incominciò l'universo, perché predice che tutte le teorie fisiche, compresa lei stessa, falliscono all'inizio dell'universo. Nonostante, la relatività generale pretende solo di essere una teoria parziale, in modo che quello che il teorema della singolarità realmente dimostrazione è che aveva dovuto avere un tempo, molto all'inizio dell'universo in che questo era tanto piccolo che non possono ignorarsi oramai gli effetti di piccola

scala dell'altra gran teoria parziale del secolo xx, la meccanica quantica. Al principio degli anni settanta, ci vedemmo forzati a girare la nostra ricerca di un intendimento dell'universo, dalla nostra teoria dello straordinariamente immenso, fino alla nostra teoria dello straordinariamente minuto. Questa teoria, la meccanica quantica, si descriverà di seguito, prima di tornare a spiegare gli sforzi realizzati per combinare le due teorie parziali in un'unica teoria quantica della gravità.



Stephen William Hawking
(Oxford, 1942 – Cambridge, 2018) è stato un cosmologo, fisico, matematico, astrofisico, accademico e divulgatore scientifico britannico fra i più autorevoli e conosciuti fisici teorici al mondo, noto soprattutto per i suoi studi sui buchi neri, sulla cosmologia quantistica e sull'origine dell'universo.

Approfondimento

È STATO DIO A CREARE IL MONDO