7

LA COSMOLOGIA E LA FRECCIA DEL TEMPO

Il flusso del tempo

Nei nostri sentimenti di consapevolezza ha un ruolo centrale la sensazione dello scorrere del tempo. Noi abbiamo *l'impressione* di muoverci sempre in avanti, da un passato ben definito a un futuro incerto. Il passato è sottratto a ogni possibilità di intervento e noi non possiamo più modificarlo. È immutabile e, in un certo senso, è «fuori di noi». La conoscenza che ne abbiamo al presente proviene dalle nostre registrazioni scritte, dalle tracce mnemoniche nel nostro cervello e da ciò che ne deduciamo, ma noi non abbiamo la tendenza a dubitare della *realtà* del passato. Il passato è stato una cosa e (ora) può *essere* solo una cosa. Quel che è stato è stato, e non ci si può più far nulla. Il futuro, invece, sembra ancora indeterminato. Potrebbe essere una cosa oppure un'altra. Forse questa «scelta» è fissata completamente da leggi fisiche, o forse dipende in parte dalle nostre decisioni (o da Dio); ma questa «scelta» *sembra* debba ancora essere fatta. Pare che attualmente ci siano solo *potenzialità* circa quella che sarà la «realtà» del futuro. Mentre noi percepiamo coscientemente il passare del tempo, la parte più immediata di questo futuro vasto e apparentemente indeterminato si realizza continuamente e fa in tal modo il suo ingresso nel passato ormai immodificabile. A volte possiamo avere la sensazione che persino *noi* siamo stati personalmente «responsabili» di qualcosa che ha influito sulla scelta di quel particolare futuro potenziale che si è realizzato, ed è stato reso permanente nella realtà del passato. Più spesso ci sentiamo spettatori impotenti, forse grati di vederci sollevati da ogni responsabilità, quando, inesorabilmente, l'estensione del passato consolidato avanza in un futuro incerto.

La fisica, però, a quanto sappiamo, ci narra una storia diversa. Tutte le equazioni della fisica confermate da successi spesso secolari sono simmetriche rispetto al tempo. Esse, cioè, possono essere usate altrettanto bene in una direzione nel tempo quanto nell'altra. Il futuro e il passato sembrano essere fisicamente su un piede di completa parità. Le leggi di Newton, le equazioni di Hamilton, quelle di Maxwell, la relatività generale di Einstein, l'equazione di Dirac, l'equazione di Schrödinger: tutto questo rimane inalterato se invertiamo la direzione del tempo (se sostituiamo la coordinata t, che rappresenta il tempo, con $-t$). L'intera meccanica classica, assieme alla parte «**U**» della meccanica quantistica, è del tutto reversibile nel tempo. Non sappiamo invece con certezza se la parte «**R**» della meccanica quantistica sia effettivamente reversibile nel tempo o no. Questo problema avrà un'importanza centrale ai fini delle argomentazioni che presenterò nel prossimo capitolo. Per il momento mettiamo però da parte il problema riferendoci a quello che potrebbe essere considerato un «sapere convenzionale» sull'argomento: ossia che, nonostante le prime apparenze, anche il modo di operare di **R** dev'essere considerato in effetti simmetrico nel tempo (cfr. Aharonov, Bergmann e Lebowitz, 1964). Se accettiamo questo fatto, pare che dovremo cercare altrove per trovare dove le nostre leggi fisiche dicano che deve trovarsi la distinzione fra passato e futuro.

Prima di affrontare questo problema, dovremmo considerare un'altra sconcertante discrepanza fra le nostre percezioni del tempo e ciò che la teoria fisica moderna vuole farci credere. Secondo la relatività, non esiste in realtà un «ora» (adesso). La cosa più prossima a un tale concetto che ci sia accessibile è uno «spazio simultaneo» dell'osservatore nello spazio - tempo, qual è raffigurato nella figura 5.21, a p. 262, il quale dipende però dal *moto* dell'osservatore! L'«ora» di un osservatore non concorderebbe con l'«ora» di un altro.[1] In relazione a due eventi spa-zio - temporali A e B, un osservatore **U** potrebbe ritenere che B appartenga al passato ormai fissato e che A sia il futuro incerto, mentre per un secondo osservatore **V** potrebbe essere A ad appartenere al passato già fissato e B al futuro incerto! (Vedi la figura 7.1.) Non possiamo affermare significativamente che uno dei due eventi A e B rimane incerto se l'altro è definito.

Ricordiamo la discussione a p. 263 e la figura 5.22. Due persone passano l'una accanto all'altra in strada; secondo una di esse una flotta spaziale andromedana è già partita per il suo lungo viaggio verso la Terra, mentre per l'altra non è stata ancora presa la decisione se mandare o no una flotta. Come può esserci ancora qualche incertezza sull'esito di tale decisione? Se

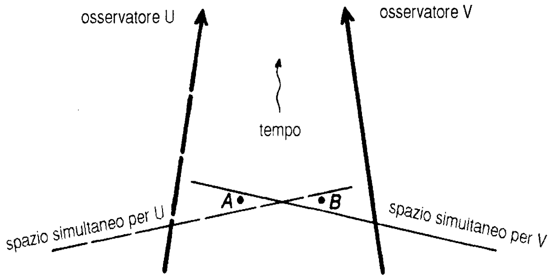

Figura 7.1. Il tempo può realmente «scorrere»? Per l'osservatore **U**, *B* può essere nel passato «già fissato» mentre *A* è ancora nel futuro «incerto». Per l'osservatore **V** sarà vero tutto l'opposto!

per *una delle due* persone la decisione è già stata presa, sicuramente *non può* esserci alcuna incertezza. Il lancio di una flotta spaziale è una inevitabilità. Di fatto nessuna delle due persone può ancora *sapere* della partenza della flotta spaziale. Esse potranno saperlo solo in seguito, quando osservazioni al telescopio dalla Terra riveleranno che la flotta è effettivamente in viaggio. Allora esse potranno tornare nel ricordo[2] al loro incontro casuale e pervenire alla conclusione che a *quel* tempo, secondo una di loro la decisione apparteneva ancora a un futuro incerto, mentre per l'altra apparteneva già al passato certo. C'era, *allora,* una qualche incertezza sul futuro? Oppure il futuro di *entrambe* le persone era già «fissato»?

Comincia a farsi strada la sensazione che, se qualcosa è definito, l'intero spazio-tempo debba essere in effetti definito! Non può esserci un «futuro incerto». L'*intero* spazio-tempo dev'essere fissato, senza alcun margine di incertezza. Questa pare sia stata, in effetti, la conclusione di Einstein (cfr. Pais, 1982, p. 444). Inoltre, non c'è alcuno scorrere del tempo. C'è solo lo «spazio-tempo», senza alcun posto per un futuro il cui ambito viene inesorabilmente violato da un passato determinato! (Il lettore potrebbe chiedersi quale sia in tutto ciò il ruolo delle «incertezze» o «indeterminazioni» della meccanica quantistica. Tornerò su questi interrogativi sollevati dalla meccanica quantistica nel prossimo capitolo. Per il momento sarà preferibile pensare nei termini di un quadro esclusivamente classico).

Mi pare ci siano gravi discrepanze fra ciò che noi pensiamo coscientemente sul flusso del tempo e ciò che le nostre teorie (mirabilmente esatte) affermano sulla realtà del mondo fisico. Queste discrepanze devono dirci senza dubbio qualcosa di profondo sulla fisica che dev'essere presumibilmente alla base delle nostre percezioni coscienti, supponendo, come io credo, che ciò che è alla base di queste percezioni possa essere in effetti inteso in relazione a un qualche tipo di fisica appropriato. Sembra vero quanto meno che, qualunque tipo di fisica stia operando, deve possedere un ingrediente essenzialmente asimmetrico per quanto concerne il tempo, ossia deve fare una distinzione tra passato e futuro.

Se le equazioni della fisica non sembrano fare alcuna distinzione tra futuro e passato — e se l'idea stessa del «presente» si concilia così poco con la relatività — dove dovremo rivolgerci, di grazia, alla ricerca di leggi fisiche in maggiore accordo con ciò che sembriamo percepire del mondo? Le cose non sono in realtà così discrepanti come io posso aver dato l'impressione di sottintendere. La nostra comprensione fisica contiene in realtà ingredienti importanti *diversi* dalle sole equazioni dell'evoluzione temporale, e alcuni di queste implicano in effetti asimmetrie temporali. Il più importante di questi ingredienti è quello che è noto come la *seconda legge della termodinamica.* Cerchiamo ora di farci un'idea del significato di questa legge.

L'inesorabile aumento dell'entropia

Immaginiamo un bicchiere d'acqua in equilibrio sul bordo di un tavolo. Se qualcuno lo colpisce inavvertitamente, è probabile che cada a terra, rompendosi in molti pezzi, e l'acqua si spargerà su un'area considerevole, per essere forse assorbita da un tappeto o per insinuarsi nelle fessure del legno del pavimento. In questo suo comportamento, il nostro bicchiere d'acqua non ha fatto altro che seguire fedelmente le equazioni della fisica. Per spiegare ciò che accade saranno sufficienti le descrizioni di Newton. Gli atomi contenuti nel bicchiere e nell'acqua seguono ciascuno individualmente le leggi di Newton (figura 7.2). Consideriamo ora questo quadro nella direzione temporale inversa. Per la reversibilità temporale di queste leggi, l'acqua potrebbe altrettanto bene uscire dal tappeto e dalle fessure nel pavimento, entrare in un bicchiere che si sta minuziosamente ricostruendo a partire dai suoi numerosi pezzi sparsi sul pavimento, e il tutto potrebbe saltare dal pavimento esattamente all'altezza del tavolo, per andare a fermarsi in equilibrio sul bordo del tavolo stesso. Tutto questo è in accordo con le leggi di Newton, esattamente come la caduta e la rottura del bicchiere!

Il lettore potrebbe forse chiedersi da dove proviene l'energia

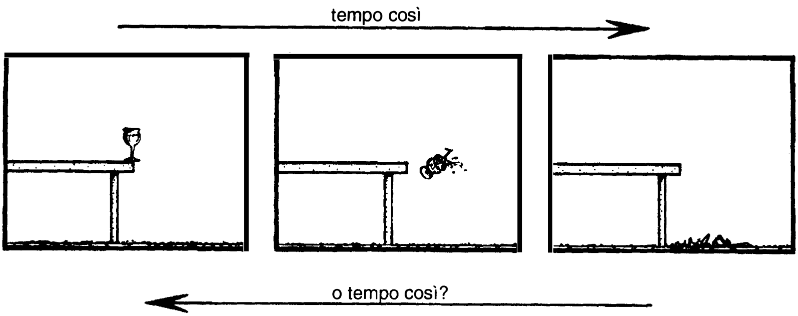

Figura 7.2. Le leggi della meccanica sono reversibili rispetto al tempo; eppure l'ordinamento nel tempo di questa sequenza da destra verso sinistra è una cosa che non si sperimenta mai, mentre quella da sinistra a destra raffigura una scena molto comune.

che solleva il bicchiere dal pavimento al tavolo. *Questo* non è un problema. Non può esserci un problema dell'energia perché, nella situazione in cui il bicchiere *cade* dal tavolo, l'energia che esso guadagna dalla caduta deve *andare* da qualche altra parte. In effetti l'energia del bicchiere che cade si converte in *calore.* Gli atomi nei frammenti di vetro, nell'acqua, nel tappeto e nelle tavole del pavimento saranno solo un po' *più caldi* di quanto erano prima (ignorando la possibile perdita di calore dovuta all'evaporazione; ma anche questo fatto è reversibile in linea di principio). Per la *conservazione dell'energia,* quest'energia termica è esattamente uguale all'energia perduta dal bicchiere d'acqua nel cadere dal tavolo. Quella piccola quantità di energia termica sarebbe dunque esattamente sufficiente a far tornare il bicchiere sul tavolo! È importante rendersi conto che, quando si considera la conservazione dell'energia, si deve sempre includere l'energia termica. La legge della conservazione dell'energia, tenendo conto dell'energia termica, si chiama la *prima legge della termodinamica.* Questa legge, essendo una deduzione dalla meccanica newtoniana, è simmetrica rispetto al tempo. La prima legge *non* vincola il bicchiere e l'acqua in alcun modo che escluda la possibilità che il bicchiere torni intero, si riempia d'acqua e salti miracolosamente alla sua posizione precedente sul tavolo.

La ragione per cui non vediamo mai accadere cose del genere è che il moto «termico» degli atomi nei frammenti di vetro, nell'acqua, nel pavimento e nel tappeto sarà una vera baraonda, cosicché la maggior parte degli atomi si muoveranno in tutte le direzioni sbagliate. Per ricomporre il bicchiere dai suoi frammenti e far tornare in esso tutta l'acqua schizzata via, e per tornare a posarlo delicatamente sul tavolo occorrerebbe una coordinazione innaturalmente precisa dei loro movimenti. È praticamente una certezza che un moto coordinato con tanta perfezione *non* si realizzerà! Una tale coordinazione potrebbe aver luogo solo in virtù del colpo di fortuna più inimmaginabile, di un tipo che, se mai dovesse verificarsi, sarebbe definito «magico»!

Eppure, nell'altra direzione del tempo, un tale moto coordinato si verifica comunemente. In qualche modo, noi non consideriamo un colpo di fortuna se le particelle si muovono in un modo coordinato, purché lo facciano *dopo* che si è verificato un qualche mutamento su vasta scala dello stato fisico (qui la frantumazione del bicchiere e lo spandimento dell'acqua), e non *prima* di tale mutamento. Dopo un tale evento i moti delle particelle devono essere in effetti altamente coordinati; questi moti sono infatti di natura tale che, se noi dovessimo invertire, in modo esatto, il moto di ogni singolo atomo, il comportamento risultante sarebbe esattamente quello richiesto per ricostruire il bicchiere, riempirlo e riportarlo esattamente nella posizione in cui si trovava prima sul bordo del tavolo.

Un movimento altamente coordinato è accettabile e familiare se è considerato un *effetto* di un mutamento su vasta scala e non la *causa* di esso. Le parole «causa» ed «effetto», però, eludono la questione dell'asimmetria temporale. Nel nostro linguaggio comune siamo abituati ad applicare questi termini nel senso che la causa deve precedere l'effetto. Se però cerchiamo di capire la differenza fisica esistente fra passato e futuro, dobbiamo fare molta attenzione a non introdurre inconsapevolmente nella discussione le nostre nozioni quotidiane su passato e futuro. Devo avvertire il lettore che è estremamente difficile evitarlo, ma è imperativo che ci proviamo. Dobbiamo sforzarci di usare le parole in modo tale che esse non pregiudichino il problema della distinzione fisica tra passato e futuro. Perciò, quando le circostanze dovessero sembrare appropriate, dovremmo permettere a noi stessi di accettare la nozione che le cause di certi eventi possano trovarsi nel futuro e gli effetti nel passato! Le equazioni deterministiche della fisica classica (o l'operare di **U** nella fisica quantistica) non hanno alcuna preferenza per evolversi nella direzione del futuro, ma possono essere usate altrettanto bene per evolversi nel passato. Il futuro determina il passato esattamente nello stesso modo in cui il passato determina il futuro. Possiamo specificare un qualche stato di un sistema in un qualche modo arbitrario nel futuro, e poi usare questo stato per calcolare come sarebbe dovuto essere nel passato. Se ci è permesso di considerare il passato come «causa» e il futuro come «effetto» quando sviluppiamo le equazioni per il sistema nella normale direzione del tempo verso il futuro, allora, quando applichiamo il procedimento egualmente valido di sviluppare le equazioni nella direzione del tempo verso il passato dobbiamo evidentemente considerare il futuro come «causa» e il passato come «effetto».

Nel nostro uso dei termini «causa» ed «effetto» è però in gioco qualcos'altro, che non riguarda in realtà quali degli eventi considerati si trovino nel passato e quali nel futuro. Immaginiamo un universo ipotetico in cui si applichino le stesse equazioni classiche simmetriche nel tempo del nostro universo, ma per il quale comportamenti del tipo a noi familiare (come quello di bicchieri che si rompono e dell'acqua che ne schizza fuori tutto attorno) coesistano con eventi come i loro inversi temporali. Supponiamo che, assieme alle nostre esperienze più familiari, si diano a volte comportamenti come quelli di bicchieri d'acqua rotti che si ricostruiscano da sé dai loro frammenti, si riempiano misteriosamente grazie a schizzi d'acqua dal pavimento e dal tappeto e poi saltino sul tavolo; supponiamo anche che, a volte, uova strapazzate si destrapazzino magicamente, ritornino nel loro guscio e che questo si richiuda perfettamente senza alcuna traccia di rottura; che dallo zucchero sciolto nel caffè si formino zollette, le quali saltino poi spontaneamente dalla tazzina nella nostra mano. Se vivessimo in un mondo in cui tali fatti fossero comuni, ne attribuiremmo senza dubbio le «cause» non a coincidenze casuali fantasticamente improbabili concernenti il comportamento correlato dei singoli atomi, bensì a un qualche «effetto teleologico» per cui gli oggetti che si ricompongono tenderebbero a volte a conseguire qualche configurazione macroscopica desiderata. «Toh!», diremmo. «Sta succedendo di nuovo. Quel guazzabuglio si sta ricomponendo in un altro bicchiere d'acqua!» Senza dubbio adotteremmo l'opinione che gli atomi si comportano in un modo così esatto *perché* quello è il modo per produrre il bicchiere d'acqua sul tavolo. Il bicchiere sul tavolo sarebbe la «causa» e la collezione apparentemente casuale di atomi sul pavimento l'«effetto», nonostante il fatto che l'effetto si verifichi ora nel tempo prima della «causa». Similmente, il moto minutamente organizzato degli atomi nell'uovo rotto non è la «causa» del salto del tuorlo e dell'albume all'interno del guscio che sta per ricomporsi, bensì l'«effetto» di questo evento futuro; e la zolletta di zucchero non si ricostituisce e non salta fuori dalla tazzina «perché» gli atomi si muovono con una tale straordinaria precisione, bensì per effetto del fatto che qualcuno — anche se nel futuro — terrà quella zolletta di zucchero in mano!

Ovviamente, nel nostro mondo non vediamo accadere cose del genere, o piuttosto quel che vediamo è la *coesistenza* di tali cose con quelle del nostro tipo normale. Se *tutto* ciò che abbiamo visto fossero stati eventi del tipo «perverso» che ho appena descritto, non avremmo alcun problema. Potremmo limitarci a interscambiare, in tutte le nostre descrizioni, i termini «passato» e «futuro», «prima» e «poi» ecc. Il tempo potrebbe dare l'impressione di scorrere nella direzione inversa rispetto a quella originale, e quel mondo potrebbe essere descritto come esattamente simile al nostro. Io qui però sto considerando una possibilità diversa — altrettanto coerente quanto le equazioni simmetriche rispetto al tempo della fisica — nella quale possano *coesistere* la rottura e la ricomposizione di bicchieri. In un tale mondo, non possiamo ritrovare le nostre descrizioni familiari semplicemente rovesciando le nostre convenzioni sulla direzione del corso del tempo. Ovviamente il nostro mondo non è proprio così, ma perché non lo è? Per cominciare a capire questo fatto, vi ho chiesto di cercare di immaginare un tale mondo e di chiedervi come potremmo descrivere gli eventi che accadono in esso. Sto chiedendovi di accettare che, in un mondo del genere, descriveremmo sicuramente le grandi configurazioni macroscopiche — come bicchieri d'acqua interi, uova non rotte o una zolletta di zucchero tenuta in una mano — come ciò che fornisce le «cause», e i moti dettagliati, e forse finemente correlati, di singoli atomi come «effetti», sia che le «cause» si trovino nel futuro o nel passato degli «effetti».

Ecco perché, nel mondo in cui ci troviamo a vivere, sono le cause a *precedere* gli effetti; o, per esprimerci in un altro modo, perché moti esattamente coordinati di particelle si verificano solo *dopo* qualche mutamento su vasta scala nello stato fisico e non *prima* di esso. Per conseguire una migliore descrizione fisica di cose del genere, avrò bisogno di introdurre il concetto di *entropia*. Per esprimermi in termini non rigorosi, l'entropia di un sistema è una misura del suo *disordine* manifesto. (Sarò un po' più preciso su questa nozione in seguito.) Così, il bicchiere rotto e l'acqua versata sul pavimento si trovano in uno stato di entropia superiore rispetto al bicchiere intero e pieno d'acqua sul tavolo; l'uovo strapazzato ha un'entropia maggiore dell'uovo intero e crudo; il caffè zuccherato ha un'entropia maggiore dello zucchero non sciolto appena immerso nel caffè amaro. Lo stato a bassa entropia sembra possedere, in un qualche modo manifesto, un «ordine speciale», e lo stato ad alta entropia sembra avere un ordine «meno speciale».

È importante rendersi conto che, quando ci riferiamo al carattere «speciale» di uno stato di bassa entropia, stiamo riferendoci in effetti al suo carattere speciale *manifesto*. In un senso più sottile, infatti, lo stato a entropia superiore, in queste situazioni, *ha* un ordine altrettanto «speciale» rispetto allo stato a entropia inferiore, a causa della precisissima coordinazione dei moti delle singole particelle. Per esempio, i moti apparentemente casuali delle molecole d'acqua che si sono insinuate fra le tavole del pavimento dopo la rottura del bicchiere sono infatti molto speciali: i moti sono così precisi che, se venissero tutti esattamente *invertiti*, si ripristinerebbe lo stato originario a bassa entropia in cui il bicchiere si trovava integro e pieno d'acqua sul tavolo. (E così dev'essere senza dubbio, dato che l'inversione di tutti questi moti corrisponderebbe semplicemente all'inversione della direzione del tempo, secondo cui il bicchiere si ricomporrebbe e salterebbe sul tavolo.) Ma un tale moto coordinato di tutte le molecole d'acqua *non* è il tipo di carattere «speciale» che abbiamo indicato come bassa entropia. L'entropia si riferisce al disordine *manifesto*. L'ordine che è presente nella precisa coordinazione dei moti delle particelle non è un ordine manifesto, cosicché non dà alcun contributo all'abbassamento dell'entropia di un sistema. Perciò l'ordine presente nelle molecole dell'acqua versata non conta ai nostri fini, e l'entropia è alta. L'ordine *manifesto* presente nel bicchiere d'acqua *integro* ha invece un basso valore di entropia. Questo è correlato al fatto che un numero relativamente piccolo di disposizioni possibili diverse dei moti delle particelle è compatibile con la configurazione manifesta di un bicchiere intero e pieno d'acqua; mentre esiste un numero enormemente maggiore di moti che sono compatibili con la configurazione manifesta dell'acqua lievemente riscaldata che scorre tra le fessure delle tavole del pavimento.

La *seconda legge della termodinamica* afferma che *l'entropia di un sistema isolato aumenta col tempo (o rimane costante nel caso di un sistema reversibile)*. È giusto che noi non consideriamo i moti coordinati di particelle come bassa entropia, giacché in tal caso l'«entropia» di un sistema, secondo tale definizione, resterebbe sempre costante. Il concetto di entropia deve riferirsi solo al disordine manifesto. Per un sistema isolato dal resto dell'universo l'entropia totale aumenta, cosicché, se il sistema prende l'avvio in uno stato caratterizzato da una qualche sorta di organizzazione manifesta, questa organizzazione verrà erosa nel corso del tempo e questi caratteri speciali manifesti si convertiranno in «inutili» moti coordinati di particelle. La seconda legge può dare l'impressione di esprimere una visione estremamente pessimistica della realtà, asserendo che esiste un principio fisico sempre attivo e universale secondo il quale l'organizzazione va di continuo necessariamente decadendo. Vedremo in seguito che questa visione pessimistica non è del tutto giustificata!

Che cos'è l'entropia?

Ma che cos'*è* esattamente l'entropia di un sistema fisico? Abbiamo visto che è una qualche sorta di misura del disordine manifesto, ma dal mio uso di espressioni così imprecise come «manifesto» e «disordine» si potrebbe ricavare l'impressione che il concetto di entropia non possa essere in realtà una quantità scientifica ben definita. C'è anche un altro aspetto della seconda legge che sembra indicare un elemento di imprecisione nel concetto di entropia: è solo nel caso dei cosiddetti sistemi *irreversibili* che l'entropia effettivamente aumenta, anziché restare semplicemente costante. Che cosa significa «irreversibili»? Se prendiamo in considerazione i moti dettagliati di tutte le particelle, *tutti* i sistemi sono reversibili! *Nella pratica*, dovremmo dire che il bicchiere che cade dal tavolo e si rompe, o le azioni di strapazzare un uovo o di sciogliere lo zucchero nel caffè sono altrettanti eventi irreversibili; mentre i rimbalzi di un piccolo numero di particelle l'una sull'altra dovrebbero essere considerati reversibili, come varie situazioni controllate con precisione in cui non ci sia una dissipazione di energia in calore. Fondamentalmente, il termine «irreversibile» si riferisce solo al fatto che non è stato possibile tenere sotto osservazione, né controllare, tutti i particolari pertinenti delle singole particelle in moto nel sistema. Questi moti incontrollati sono designati come «calore». Pare quindi che l'irreversibilità sia semplicemente qualcosa di carattere «pratico». Non siamo in grado *nella pratica* di «destrapazzare» un uovo strapazzato, anche se questo sarebbe un procedimento perfettamente lecito secondo le leggi della meccanica. Il nostro concetto di entropia dipende dunque da ciò che è pratico e da ciò che non lo è?

Ricordiamo, dal capitolo 5, che il concetto fisico di *energia* come pure quelli di quantità di moto e di momento angolare *possono* ricevere esatte definizioni matematiche nei termini di posizioni, velocità e masse di particelle, nonché di forze. Ma come potremmo dare un'esatta definizione matematica della nozione di «disordine manifesto», necessaria per rendere il concetto di entropia matematicamente preciso? Senza dubbio, ciò che è «manifesto» per un osservatore potrebbe non esserlo per un altro. Questo fatto non potrebbe dipendere dalla precisione con cui ciascun osservatore potrebbe essere in grado di misurare il sistema in esame? Un osservatore che disponesse di strumenti di misurazione migliori potrebbe conseguire informazioni molto più dettagliate sui componenti microscopici di un sistema rispetto a un altro osservatore. L'osservatore meglio equipaggiato potrebbe in tal modo venire a conoscenza di una parte maggiore dell'«ordine nascosto» nel sistema, e perciò troverebbe un livello di entropia minore rispetto all'altro. Pare inoltre che, nella valutazione di ciò che può sembrare «ordine» anziché «disordine», possano aver parte giudizi estetici dei vari osservatori. Un artista potrebbe vedere nei frammenti di vetro del bicchiere rotto un ordine molto più bello che nel brutto bicchiere che in precedenza faceva mostra di sé sull'orlo del tavolo! Nel giudizio di un osservatore dotato di una tale sensibilità artistica l'entropia sarebbe effettivamente diminuita?

Se teniamo presenti questi problemi di soggettività, è degno di nota che il concetto di entropia sia utile in generale in descrizioni scientifiche esatte, come certamente è! La ragione di quest'utilità risiede nel fatto che i cambiamenti dall'ordine al disordine in un sistema, nei termini di posizioni dettagliate di posizioni e velocità di particelle, sono grandissimi e (in quasi tutte le circostanze) tali da cancellare completamente qualsiasi differenza ragionevole di punto di vista circa ciò che è o non è «ordine manifesto» alla scala macroscopica. In particolare, il giudizio dell'artista o dello scienziato sulla questione se si debba ritenere più ordinato il bicchiere integro o il bicchiere rotto non ha quasi nessuna importanza in relazione alla sua misura dell'entropia. Il contributo di gran lunga più importante all'entropia proviene dai moti casuali delle particelle microscopiche che corrispondono al piccolissimo aumento della temperatura, e dalla dispersione dell'acqua quando il bicchiere e l'acqua colpiscono il suolo.

Per poter essere più precisi sul concetto di entropia, torniamo al concetto di *spazio delle fasi*, che abbiamo introdotto nel capitolo 5. Ricordo che lo spazio delle fasi di un sistema è uno spazio, normalmente con un numero enorme di dimensioni, ciascuno dei cui punti rappresenta un intero stato fisico in tutti i suoi particolari minuti. Un *singolo* punto nello spazio delle fasi fornisce tutte le coordinate di posizione e di quantità di moto di tutte le singole particelle che costituiscono il sistema fisico in questione. Ciò di cui abbiamo bisogno, per il concetto di entropia, è un modo di raggruppare assieme tutti gli stati che hanno un aspetto identico dal punto di vista delle loro proprietà *manifeste* (cioè macroscopiche). Dobbiamo quindi dividere il nostro spazio delle fasi in un certo numero di compartimenti (cfr. la figura 7.3), dove i diversi punti appartenenti a ogni particolare compartimento rappresentano sistemi fisici che, pur essendo diversi nei piccoli particolari delle configurazioni e dei moti delle loro particelle, appaiono nondimeno identici per quanto concerne i caratteri osservabili al livello macroscopico. Dal punto di vista di ciò che è manifesto, tutti i punti di un singolo compartimento devono essere considerati rappresentanti *lo stesso* sistema fisico. Una tale divisione dello spazio delle fasi in compartimenti viene chiamata la *grana grossa* di questo spazio delle fasi.

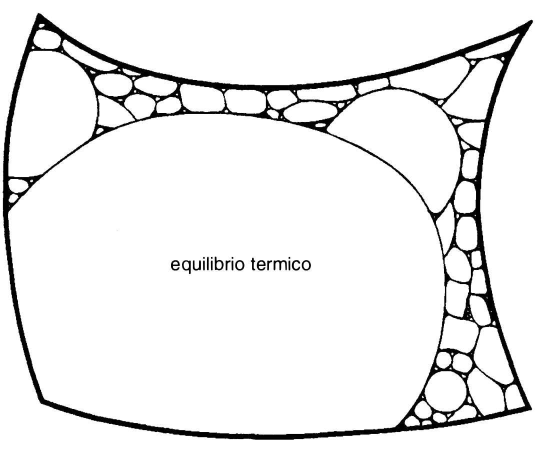

Figura 7.3. Una granulazione grossolana dello spazio delle fasi in regioni corrispondenti a stati macroscopicamente indistinguibili l'uno dall'altro. L'*entropia* è proporzionale al logaritmo del volume dello spazio delle fasi.

Ora, alcuni di questi compartimenti risulteranno essere enormemente maggiori di altri. Per esempio, consideriamo lo spazio delle fasi di un gas in una scatola. La maggior parte dello spazio delle fasi corrisponderà a stati in cui il gas è distribuito nella scatola molto uniformemente, con le particelle in movimento in un modo caratteristico che fornisce temperatura e pressione uniformi. Questo tipo di movimento caratteristico è, in un certo senso, il più «casuale» possibile ed è chiamato *distribuzione maxwelliana*, dal nome di quello stesso James Clerk Maxwell in cui ci siamo già imbattuti. Quando un gas si trova in un tale stato casuale si dice che è in *equilibrio termico*. C'è un volume grandissimo di punti dello spazio delle fasi che corrisponde all'equilibrio termico; i punti di questo volume descrivono tutte le diverse disposizioni dettagliate di posizioni e velocità di singole particelle che sono in accordo con l'equilibrio termico. Questo grande volume è uno dei nostri compartimenti nello spazio delle fasi: esso è di gran lunga il più grande di tutti e occupa quasi l'intero spazio delle fasi! Consideriamo un altro stato possibile del gas, diciamo quello in cui tutto il gas è raccolto in un angolo della scatola. Anche in questo caso ci saranno molti singoli stati dettagliati diversi, i quali descriveranno tutti il gas raccolto nello stesso modo nell'angolo della scatola. Tutti questi stati sono macroscopicamente indistinguibili l'uno dall'altro, e i punti dello spazio delle fasi che li rappresentano costituiscono un altro compartimento in questo spazio delle fasi. Il volume di questo compartimento risulta essere però enormemente minore di quello degli stati che rappresentano l'equilibrio termico: e minore di un fattore di circa $10^{10^{25}}$, se poniamo che la scatola abbia un volume di un metro cubo, contenente, in condizioni di equilibrio, aria a temperatura e pressione atmosferica comuni, e che la regione nell'angolo abbia un volume di un centimetro cubo!

Per cominciare a comprendere questo tipo di discrepanza tra volumi di spazi delle fasi, immaginiamo una situazione semplificata in cui un certo numero di pallini devono essere distribuiti fra varie caselle. Supponiamo che ogni casella o sia vuota o contenga un singolo pallino. I pallini devono rappresentare molecole di gas e le caselle le diverse posizioni nella scatola che le molecole potrebbero occupare. Scegliamo un piccolo sottoinsieme delle caselle come *speciali*; queste caselle devono rappresentare le posizioni delle molecole di gas corrispondenti alla regione nell'angolo della scatola. Supponiamo, per presentare un caso ben definito, che siano speciali esattamente un decimo delle caselle, ossia che ci siano n caselle speciali e $9n$ caselle non speciali (vedi figura 7.4). Noi desideriamo distribuire a caso fra le caselle m pallini e trovare quale sia la probabilità che essi si trovino tutti nelle caselle speciali. Se ci fossero solo un pallino e dieci caselle (in modo da avere una casella speciale) questa probabilità sarebbe chiaramente di un decimo. Lo stesso varrebbe se ci fosse un pallino e un numero qualsiasi di $10n$ caselle (e quindi n caselle speciali). Così, per un «gas» avente *un* solo atomo, lo speciale compartimento corrispondente al gas raccolto nell'angolo, avrebbe un volume di solo un *decimo* dell'intero volume dello «spazio delle fasi». Se però aumentiamo il numero dei pallini, la probabilità che essi vadano a finire tutti nelle caselle speciali diminuirà in modo considerevolissimo. Per *due* pallini, diciamo con venti caselle* (di cui due speciali) ($m = 2$, $n = 2$), la probabilità è di 1/190; con cento caselle (di cui dieci speciali) ($m = 2$, $n = 10$) è di 1/110; con un numero grandissimo di caselle diventa di 1/100. Così, il volume dello speciale compartimento per un «gas» formato da *due* atomi è di solo un *centesimo* dell'intero volume dello «spazio delle fasi». Per *tre* pallini e trenta caselle ($m = 3$, $n = 3$), è di 1/4060; e con un numero molto grande di caselle diventa di 1/1000, cosicché per un «gas» di *tre* atomi il volume dello speciale compartimento è ora di un *millesimo* del volume dello «spazio delle fasi». Per quattro pallini con un numero grandissimo di caselle, la probabilità diventa di 1/10000. Per cinque pallini e un numero grandissimo di caselle, la probabilità diventa di 1/100000, e così via. Per m pallini e un numero grandissimo di caselle, la probabilità diventa di $1/10^m$, cosicché per un «gas» di m atomi il volume della speciale regione è di $1/10^m$ di quello dello «spazio delle fasi». (Questo continua a valere anche se si include la «quantità di moto».)

Possiamo applicare questi risultati alla situazione considerata sopra di un gas reale in una scatola, ma ora la regione speciale, anziché essere solo un decimo del totale, occupa solo un milionesimo (cioè 1/1000000) di questo totale (cioè un centimetro cubo in un metro cubo). Ciò significa che la probabilità, invece di essere di $1/10^m$, è ora di $1/(1000000)^m$, cioè $1/10^{6m}$. Per l'aria comune, ci sarebbero circa 10^{25} molecole nella nostra scatola nella sua totalità, cosicché avremmo $m = 10^{25}$. Lo speciale compartimento dello spazio delle fasi, che rappresenta la situa-

* Per n, m generali, la probabilità è ${}^{10n}C_m : {}^{n}C_m = (10n)!(n-m)!/n!(10n-m)!$

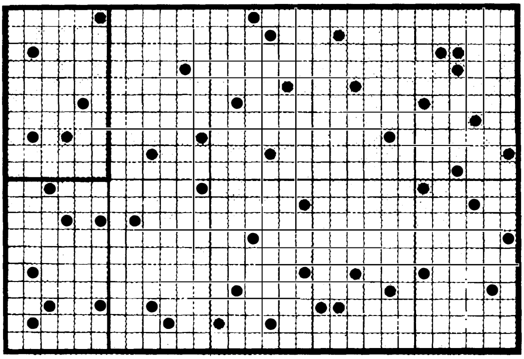

Figura 7.4. Un modello per un gas in una scatola: un certo numero di pallini sono distribuiti su un numero molto maggiore di caselle. Un decimo delle caselle sono identificate come *speciali*: sono quelle racchiuse dentro il rettangolo nell'angolo in alto a sinistra.

zione in cui tutto il gas è raccolto nell'angolo, ha dunque un volume di solo

$$1/10^{60\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000}$$

di quello dell'intero spazio delle fasi!

L'*entropia* di uno stato è una misura del *volume V* del compartimento contenente il punto dello spazio delle fasi che rappresenta lo stato. In considerazione delle discrepanze enormi fra questi volumi, come ho notato sopra, è forse un bene che l'entropia non sia considerata proporzionale a tale volume bensì al suo *logaritmo*:

$$\text{entropia} = k \log V.$$

L'adozione di un logaritmo aiuta a far sembrare questi numeri più ragionevoli. Il logaritmo* di 10 000 000, per esempio, è solo 16 circa. La quantità k è una costante, chiamata *costante di Boltzmann*. Il suo valore è di circa 10^{-23} joule per kelvin. Qui la ragione essenziale per l'uso di un logaritmo è di fare dell'entropia, per sistemi indipendenti una quantità *additiva*. Così, per due

* Il logaritmo usato qui è un logaritmo *naturale*, ossia un logaritmo in base e = 2,7182818285... anziché in base 10, ma questa distinzione è del tutto priva di importanza. Il logaritmo naturale, $x = \log n$, di un numero n, è la potenza a cui dobbiamo elevare e per ottenere n, cioè la soluzione di $e^x = n$ (vedi nota a pag. 126).

sistemi fisici completamente indipendenti, l'entropia totale dei due sistemi combinati sarà la *somma* delle entropie di ciascun sistema considerato separatamente. (Questa è una conseguenza della proprietà algebrica di base della funzione logaritmica: $\log AB = \log A + \log B$. Se i due sistemi appartengono a compartimenti con volumi A e B nei loro rispettivi spazi delle fasi, il volume dello spazio delle fasi di tutt'e due i sistemi considerati assieme sarà il loro prodotto AB, poiché ogni possibilità per un sistema dev'essere contata separatamente rispetto a ogni possibilità per l'altro; perciò l'entropia del sistema combinato sarà in effetti la somma delle due entropie singole.)

Le discrepanze enormi fra le grandezze dei compartimenti nello spazio delle fasi appariranno più ragionevoli se considerate in termini di entropia. L'entropia di una scatola di gas di un metro cubo, qual è stata descritta sopra, risulta essere di solo $1400\,\mathrm{JK}^{-1}$ ($= 14k \times 10^{-25}$) maggiore dell'entropia del gas concentrato nella regione «speciale» di un centimetro cubo di volume [giacché $\log_e (10^{6 \times 10^{25}})$ equivale a circa 14×10^{25}].

Per poter dare i valori di entropia *reali* per questi compartimenti, dovremmo occuparci un po' del problema della scelta opportuna delle unità (metri, joule, chilogrammi, kelvin ecc.). Una tale preoccupazione sarebbe però fuori luogo qui; e del resto non fa essenzialmente alcuna differenza, ai fini dei valori assolutamente prodigiosi dell'entropia che darò fra poco, quali unità vengano di fatto scelte. Per amore della precisione — a uso degli esperti — aggiungo però che adotterò unità *naturali*, come quelle fornite dalle regole della meccanica quantistica, per le quali il valore della costante di Boltzmann risulta essere pari a *uno*:

$$k = 1.$$

La seconda legge in azione

Supponiamo, ora, di cominciare con un sistema in una qualche situazione molto speciale, come quella col gas tutto raccolto in un angolo della scatola. Nel momento successivo il gas si diffonderà e occuperà rapidamente volumi sempre maggiori. Dopo un po' raggiungerà l'equilibrio termico. Qual è la nostra immagine di questa situazione nello spazio delle fasi? In ogni fase lo stato dettagliato completo delle posizioni e dei movimenti di tutte le particelle del gas sarebbe descritto da un singolo punto nello spazio delle fasi. Mentre il gas si evolve, questo punto si sposta nello spazio delle fasi, e il suo percorso descrive l'intera storia di tutte le particelle del gas. Il punto si trova inizialmente in una regione molto piccola: la regione che rappresenta la collezione dei possibili stati iniziali per i quali il gas si trova tutto in un particolare angolo della scatola. Quando il gas comincia a diffondersi, il nostro punto mobile entrerà in un volume dello spazio delle fasi considerevolmente maggiore, corrispondente agli stati in cui il gas è un po' diffuso nella scatola. Il punto dello spazio delle fasi continua a entrare in volumi sempre maggiori man mano che il gas si diffonde ulteriormente, e ogni nuovo volume è considerevolmente maggiore — di un fattore assolutamente sbalorditivo — rispetto a tutti quelli in cui il punto si è trovato in precedenza! (Vedi la figura 7.5.) In ciascun caso, una volta che il punto è entrato nel volume maggiore, non c'è (di fatto) alcuna possibilità che esso possa trovare alcuno dei volumi precedenti più piccoli. Infine, esso si perde nel massimo volume nello spazio delle fasi: quello corrispondente all'equilibrio termico. Questo volume occupa in pratica l'intero spazio delle fasi. Possiamo essere virtualmente certi che il nostro punto dello spazio delle fasi, nei suoi movimenti casuali, non ritroverà in un tempo plausibile nessuno dei volumi minori precedenti. Una volta raggiunto lo stato di equilibrio termico, questo stato rimane stabile per sempre a tutti gli effetti. Vediamo così che l'entropia del sistema, che fornisce semplicemente una misura logaritmica del volume del compartimento appropriato nello spazio delle fasi, avrà questa tendenza inesorabile ad aumentare* col passare del tempo.

Abbiamo dunque trovato, a quanto pare, una *spiegazione* per la seconda legge! Possiamo infatti supporre che il nostro punto nello spazio delle fasi non si muova in alcun modo predeterminato, e se esso prende l'avvio in uno spazio delle fasi minuscolo, corrispondente a una *piccola* entropia, allora, al passare del tempo, sarà in effetti estremamente probabile che esso si sposti in volumi dello spazio delle fasi sempre più grandi,

* Non è vero, ovviamente che il nostro spazio delle fasi *non* ritroverà mai più uno degli scomparti più piccoli. Se siamo disposti ad attendere abbastanza a lungo, lo spazio delle fasi rientrerà in questi volumi relativamente piccoli. (Si parla in proposito di una *ricorrenza di Poincaré.*) Nella maggior parte delle circostanze, però, le scale temporali sarebbero estremamente lunghe, per esempio di circa $10^{10^{26}}$ anni nel caso che tutto il gas si concentrasse in un centimetro cubo nell'angolo della scatola. Questo è un tempo molto, molto più lungo di quello trascorso dall'origine dell'universo! Nella discussione che segue ignorerò questa possibilità, in quanto in realtà non è pertinente al problema in discussione.

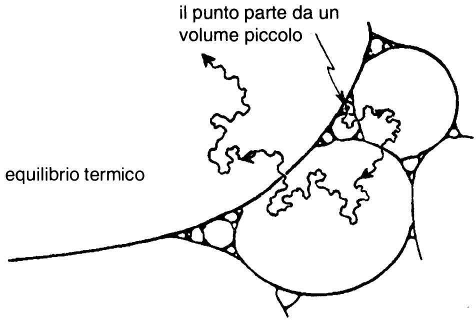

Figura 7.5. La seconda legge della termodinamica in azione: all'evolversi del tempo, il punto dello spazio delle fasi entra in compartimenti di volume sempre maggiore. Di conseguenza l'entropia aumenta di continuo.

corrispondenti a valori di entropia gradualmente crescenti.

In ciò che ci pare aver dedotto da questo ragionamento c'è però qualcosa di un po' strano, ossia una conclusione *asimmetrica in relazione al tempo.* L'entropia *aumenta* nella direzione *positiva* nel tempo, e perciò deve *diminuire* nella direzione del tempo *rovesciata.* Da dove proviene questa asimmetria? Senza dubbio non abbiamo introdotto alcuna legge fisica asimmetrica rispetto al tempo. L'asimmetria in relazione al tempo proviene semplicemente dal fatto che il sistema è stato *avviato* in uno stato molto speciale (ossia a bassa entropia); dopo avere avviato in questo modo il sistema, lo abbiamo osservato evolversi nella direzione del *futuro,* e abbiamo trovato che l'entropia aumenta. Questo aumento dell'entropia è in effetti in accordo col comportamento dei sistemi nel nostro universo reale. Ma avremmo potuto altrettanto bene applicare il nostro ragionamento nella direzione inversa nel tempo. Anche in questo caso avremmo potuto specificare che il sistema si trovava in un tempo dato in un qualche stato a bassa entropia, ma chiederci ora qual era la sequenza più probabile degli stati che *avevano preceduto* lo stato citato.

Proviamo il nostro ragionamento in questo senso inverso. Come in precedenza, supponiamo che lo stato a bassa entropia coincida con tutto il gas raccolto in un angolo della scatola. Il nostro punto nello spazio delle fasi si trova ora nella stessa piccola regione da cui abbiamo preso l'avvio in precedenza. Ora tentiamo però di tracciarne la storia *a ritroso.* Se immaginiamo che il nostro punto nello spazio delle fasi si muova, come in precedenza, in modo piuttosto casuale, nel ricostruirne il moto a ritroso nel tempo ci attendiamo che raggiunga ben presto lo stesso volume, considerevolmente maggiore, dello spazio delle fasi raggiunto nell'esempio esaminato in precedenza, volume corrispondente al gas un po' diffuso nella scatola ma non in equilibrio termico; e che in seguito passi a occupare volumi sempre maggiori, finché, retrocedendo ulteriormente nel tempo, ci attendiamo di trovarlo espanso nel massimo volume possibile, corrispondente all'equilibrio termico. *Ora* pare che abbiamo dedotto che, essendosi trovato il gas, in un tempo dato, tutto raccolto nell'angolo della scatola, il modo più probabile in cui potrebbe esserci arrivato è che abbia preso l'avvio da una condizione di equilibrio termico e abbia poi cominciato a concentrarsi gradualmente a un estremo della scatola, raccogliendosi infine nel piccolo volume specificato nell'angolo. Per tutto il tempo l'entropia sarebbe stata *decrescente*: da un valore iniziale di alto equilibrio, sarebbe gradualmente diminuita fino a raggiungere il valore molto basso corrispondente al gas concentrato nel piccolo angolo della scatola!

Questo non è ovviamente niente di simile a ciò che accade nel nostro universo! Di norma l'entropia non diminuisce in questo modo, bensì *aumenta*. Sapendo che in un tempo dato tutto il gas era raccolto in un angolo della scatola, una situazione *anteriore* molto più probabile potrebbe essere che il gas fosse stato mantenuto nell'angolo da un setto separatore, che fu poi rapidamente eliminato. Oppure il gas vi era stato tenuto in uno stato ghiacciato o liquido e fu poi rapidamente riscaldato per farlo passare allo stato aeriforme. In ognuna di queste possibilità alternative, l'entropia era negli stati precedenti addirittura *più bassa*. In tale situazione esercitò, come sempre, il suo dominio la seconda legge, e l'entropia andò crescendo per tutto il tempo: il che equivale a dire che nella direzione temporale *inversa* andò di fatto *diminuendo*. *Ora* vediamo che il nostro ragionamento ci ha condotti a una conclusione del tutto erronea! Esso ci ha detto che il modo più probabile per far raccogliere il gas nell'angolo della scatola sarebbe stato quello di partire dall'equilibrio termico, dopo di che, con la riduzione costante dell'entropia, il gas si sarebbe raccolto nell'angolo, mentre di fatto, nel nostro mondo reale, questo è un modo di procedere estremamente *improbabile*. Nel nostro mondo il gas prenderebbe l'avvio da uno stato ancor *meno* probabile (ossia da uno stato a entropia inferiore), e l'entropia *aumenterebbe* costantemente, per il gas raccolto nell'angolo, sino al suo valore massimo.

Il nostro ragionamento sembrava buono quando veniva applicato nella direzione del futuro, anche se non altrettanto nella direzione del passato. Per la direzione del *futuro* prevediamo correttamente che, ogni volta che il gas è inizialmente raccolto nell'angolo, la cosa che ha maggiori probabilità di accadere in futuro è che *sarà* raggiunto l'equilibrio termico, e *non* che apparirà improvvisamente un setto separatore, o che il gas improvvisamente gelerà o diventerà liquido. Tali bizzarre possibilità alternative rappresenterebbero proprio il tipo di comportamento capace di far diminuire l'entropia in direzione del futuro che il nostro ragionamento sullo spazio delle fasi sembra correttamente escludere. In direzione del *passato*, invece, tali «bizzarre» possibilità sono quelle più probabili, e non ci sembrano affatto bizzarre. Il nostro ragionamento dello spazio delle fasi, quando abbiamo tentato di applicarlo nella direzione del tempo inversa, ci ha condotti a una soluzione completamente sbagliata!

È chiaro che tutto questo suscita dubbi sul ragionamento originario. *Non* abbiamo dedotto la seconda legge. Ciò che tale ragionamento ci ha mostrato in realtà è che, per un dato stato di bassa entropia (diciamo per un gas raccolto in un angolo di una scatola), *in assenza di ogni altro fattore vincolante* ci si dovrebbe attendere un aumento dell'entropia in *entrambe* le direzioni a partire dallo stato dato (vedi la figura 7.6). Il ragionamento non ha funzionato nella direzione del passato proprio perché *c'erano* fattori del genere. In effetti in passato ci fu qualcosa che esercitò una qualche costrizione sul sistema. Qualcosa, in passato, costrinse l'*entropia* ad avere valori bassi. La tendenza verso un'alta entropia in futuro non è certo una sorpresa. Gli stati ad alta entropia sono, in un certo senso, gli stati «naturali», che non hanno bisogno di ulteriori spiegazioni, mentre gli stati a bassa entropia in passato sono un rompicapo. Che cosa costrinse l'entropia del nostro mondo a essere così bassa in passato? La frequente presenza di stati in cui l'entropia è assurdamente bassa è un fatto sorprendente dell'universo reale in cui viviamo, anche se tali stati sono così comuni e familiari che di solito non tendiamo a considerarli sorprendenti. Noi stessi siamo configurazioni a entropia ridicolmente piccola! Il ragionamento esposto sopra mostra che non dovremmo sorprenderci se, *dato* uno stato a bassa entropia, questa risulta essere cresciuta in un tempo successivo. Quel che *dovrebbe* sorprenderci è il fatto che l'entropia diventa sempre più piccola, scendendo fino a valori assurdamente piccoli, mentre ci spingiamo nel suo esame sino a tempi sempre più remoti nel passato!

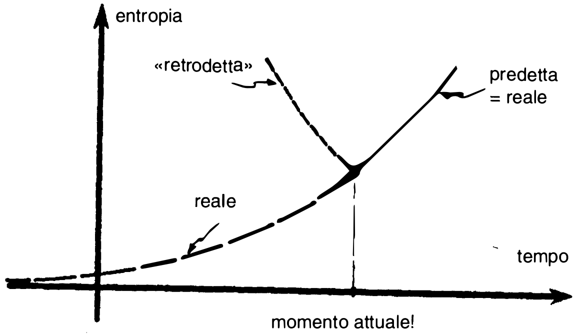

Figura 7.6. Se usiamo il ragionamento illustrato nella figura 7.5 nella direzione temporale inversa, «retrodiciamo» che l'entropia dovrebbe crescere anche nel *passato* rispetto al suo valore attuale. Questa conclusione contraddice però grossolanamente l'osservazione.

L'origine della bassa entropia nell'universo

Cercheremo ora di capire da dove venga questa «sorprendente» bassa entropia nel mondo reale in cui viviamo. Cominciamo da noi stessi. Se riuscissimo a capire da dove è venuta la nostra bassa entropia, dovremmo essere in grado di vedere da dove è venuta la bassa entropia nel gas trattenuto da un setto separatore, o nel bicchiere d'acqua sul tavolo, o nell'uovo tenuto sopra la padella, o nella zolletta di zucchero tenuta sopra la tazzina del caffè. In ciascuno di questi casi ne fu responsabile direttamente o indirettamente una persona, o un gruppo di persone (o forse una gallina!). Nel produrre questi altri stati di bassa entropia fu utilizzata una piccola parte della bassa entropia presente in noi stessi. Potrebbero inoltre essere stati in gioco altri fattori. Per aspirare il gas nell'angolo della scatola dietro il setto separatore potrebbe essere stata usata una pompa da vuoto. Se la pompa non fu fatta funzionare a mano, si bruciò forse qualche «combustibile fossile» (per esempio petrolio) per fornire l'energia a bassa entropia necessaria per il suo funzionamento. Forse la pompa fu azionata elettricamente attingendo, in qualche misura, all'energia a bassa entropia accumulata nell'uranio usato come combustibile in una centrale nucleare. Tornerò in seguito su queste altre sorgenti di bassa entropia, ma prima vorrei considerare la bassa entropia in noi stessi.

Qual è in effetti l'origine della nostra bassa entropia? L'organizzazione nel nostro corpo proviene dal cibo che mangiamo e dall'ossigeno che respiriamo. Spesso si sente dire che noi traiamo *energia* dall'assunzione di cibo e ossigeno, ma c'è un chiaro senso in cui una tale asserzione non è in realtà corretta. È vero che il cibo che consumiamo si combina con l'ossigeno che respiriamo, e che da questa combinazione noi traiamo energia. Per la maggior parte, però, quest'energia esce di nuovo dal nostro corpo, principalmente sotto forma di calore. Poiché l'energia si conserva, e poiché il contenuto reale di energia del nostro corpo rimane più o meno costante per tutta la nostra vita adulta, non c'è semplicemente alcun bisogno di *sommare* l'energia che traiamo dal cibo e dall'ossigeno al contenuto di energia del nostro corpo. Noi non abbiamo *bisogno* di avere in noi stessi più energia di quella che già abbiamo. In realtà noi accresciamo il nostro contenuto di energia quando andiamo sovrappeso, ma questo fatto non è considerato di solito desiderabile! Inoltre, durante la nostra crescita dall'infanzia noi accresciamo considerevolmente il nostro contenuto di energia parallelamente alla costruzione del nostro corpo; ma non è di questo che dobbiamo occuparci qui. Il problema è in che modo ci manteniamo *in vita* per tutta la nostra vita normale (principalmente in età adulta). A questo scopo, *non* abbiamo bisogno di accrescere il nostro contenuto di energia.

Ciò di cui abbiamo bisogno, invece, è di sostituire l'energia che perdiamo di continuo sotto forma di calore. In effetti, quanto più «energici» siamo tanta più energia perdiamo in questo modo. Ora, tutta quest'energia dev'essere reintegrata. Il calore è la forma di energia più *disordinata* che esista; esso è, in altri termini, la forma di energia a entropia massima. Noi assumiamo energia in una forma a *bassa* entropia (cibo e ossigeno) e la espelliamo in una forma ad *alta* entropia (calore, anidride carbonica, escreti). Non abbiamo bisogno di guadagnare energia dal nostro ambiente, giacché l'energia *si conserva*, ma lottiamo di continuo contro la seconda legge della termodinamica. L'entropia *non* si conserva, bensì *aumenta* sempre. Per mantenerci in vita, abbiamo bisogno di diminuire costantemente l'entropia presente in noi stessi. Lo facciamo nutrendoci della combinazione a bassa entropia di cibo e ossigeno atmosferico, che si combinano nel nostro corpo, ed espellendo l'energia che avremmo altrimenti guadagnato in una forma ad alta entropia. In questo modo possiamo evitare che l'entropia nel nostro corpo aumenti, e possiamo mantenere (e addirittura aumentare) la nostra organizzazione interna.
(Vedi Schrödinger, 1967.)

Da dove proviene questa fornitura di bassa entropia? Se il cibo che mangiamo è carne (o funghi!), anch'*esso*, come noi, deve aver attinto a un'altra sorgente esterna di bassa entropia che gli abbia fornito e conservato la sua struttura a bassa entropia. In questo modo il problema dell'origine della bassa entropia esterna viene semplicemente spostato un po' più in là. Supponiamo quindi che noi (o l'animale o il fungo) stiamo consumando una *pianta*. Noi tutti abbiamo un grandissimo debito di gratitudine — diretto o indiretto — verso le piante verdi per la loro capacità di assumere dall'aria l'anidride carbonica, di separare l'ossigeno dal carbonio e di usare quel carbonio per costruire la propria sostanza. Questo procedimento — la *fotosintesi* — determina una grande riduzione dell'entropia. Noi stessi utilizziamo in effetti questa separazione a bassa entropia ricombinando semplicemente l'ossigeno e il carbonio nel nostro corpo. In che modo le piante verdi riescono a realizzare questa operazione magica della riduzione dell'entropia? Esse ci riescono servendosi della *luce solare*. La luce proveniente dal Sole trasporta energia sulla Terra in una forma a entropia relativamente *bassa*, ossia sotto forma di fotoni di luce visibile. La Terra, compresi i suoi abitanti, non *trattiene* questa energia, ma (dopo un po' di tempo) la reirraggia nello spazio. L'energia così dispersa nello spazio è in una forma ad *alta* entropia, quella del cosiddetto «calore radiante», ossia sotto forma di fotoni infrarossi. Contrariamente a una credenza diffusa, la Terra (assieme ai suoi abitanti) *non* guadagna energia dal Sole! Quel che la Terra fa è di prendere energia in una forma a bassa entropia e poi reirraggiarla *tutta* nello spazio, ma in una forma ad alta entropia (figura 7.7). Quel che il Sole fa quindi per noi è di fornirci una sorgente enorme di bassa entropia. Noi (attraverso la capacità delle piante) ci serviamo di una piccola parte di quest'entropia, convertendola in quelle strutture notevoli e organizzate in modo complesso che siamo noi stessi.

Vediamo, da un punto di vista generale in relazione al Sole e alla Terra, che cosa accada all'energia e all'entropia. Il Sole emette energia sotto forma di fotoni di luce visibile. Una parte di questi viene assorbita dalla Terra e la loro energia viene reirraggiata sotto forma di fotoni infrarossi. Ora, la differenza cruciale fra i fotoni della luce visibile e quelli infrarossi è che i primi hanno una frequenza più alta e hanno perciò singolarmente un'energia maggiore dei secondi. (Ricordiamo la formula di Planck $E = h\nu$, data a p. 296, la quale ci dice che, quanto maggiore è la frequenza di un fotone, tanto più grande è la sua

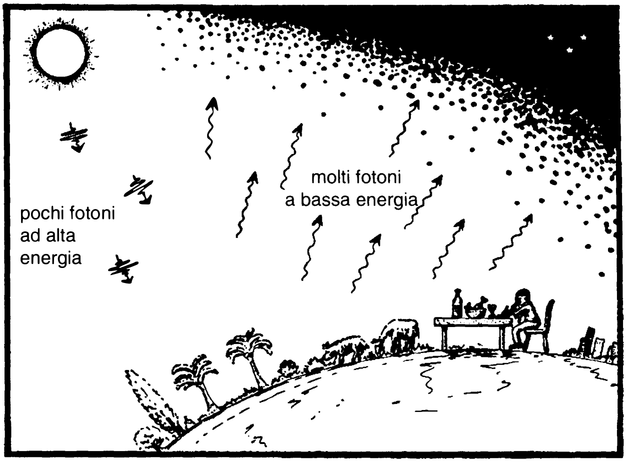

Figura 7. 7. In che modo sfruttiamo il fatto che il Sole è un punto caldo nel buio dello spazio.

energia.) Poiché i fotoni della luce visibile hanno ciascuno un'energia maggiore di ciascuno di quelli della luce infrarossa, i fotoni della luce visibile che raggiungono il nostro pianeta devono essere *in numero minore* rispetto a quelli della luce infrarossa che ne evadono, di modo che l'*energia* che arriva sulla Terra sia in equilibrio con quella che dalla Terra si disperde nello spazio. L'energia che il nostro pianeta rimanda nello spazio è distribuita su molti più gradi di libertà di quella che esso riceve dal Sole. Avendo l'energia reirraggiata nello spazio un numero molto maggiore di gradi di libertà, è corrispondentemente maggiore il volume dello spazio delle fasi, e l'*entropia* è aumentata enormemente. Le piante verdi, che assumono energia in una forma a bassa entropia (un numero relativamente piccolo di fotoni della luce visibile) e la reirraggiano in una forma ad alta entropia (un numero relativamente grande di fotoni *infrarossi*), sono state in grado di nutrirsi di questa bassa entropia e di fornirci di ossigeno e carbonio nella forma separata di cui abbiamo bisogno.

Tutto questo è reso possibile dal fatto che il Sole è una *macchia calda* in cielo! Il cielo è in uno stato di squilibrio termico: una sua piccola regione, ossia quella occupata dal Sole, presenta una temperatura molto più elevata del resto. Grazie a questa situazione disponiamo della potente sorgente di bassa entropia che ci occorre. La Terra riceve energia da quella macchia calda in una forma a bassa entropia (pochi fotoni) e la reirraggia nelle regioni fredde in una forma ad alta entropia (tanti fotoni).

Perché il Sole è una tale macchia calda? Come è riuscito a conseguire un tale squilibrio termico, e quindi a fornire uno stato di bassa entropia? La risposta è che esso si è formato per contrazione gravitazionale da una distribuzione di gas (principalmente idrogeno) in precedenza uniforme. Nel contrarsi, durante le prime fasi della sua formazione, si riscaldò, e continuò a contrarsi e a diventare sempre più caldo fino a quando, raggiunto un certo livello di temperatura e di pressione, trovò un'altra sorgente di energia oltre a quella della contrazione gravitazionale, ossia le *reazioni termonucleari*: la fusione di nuclei di idrogeno in nuclei di elio con liberazione di energia. Senza reazioni termonucleari il Sole sarebbe diventato molto *più caldo* e più piccolo di quanto non sia oggi, e infine si sarebbe estinto. Le reazioni termonucleari hanno in realtà impedito al Sole di diventare *troppo* caldo, arrestandone la contrazione, e lo hanno stabilizzato a una temperatura che è adatta per noi stessi, permettendogli di continuare a risplendere in cielo molto più a lungo di quanto avrebbe potuto altrimenti.

È importante rendersi conto che, benché le reazioni termonucleari abbiano senza dubbio una grande importanza nel determinare la natura e la quantità dell'energia irraggiata dal Sole, l'elemento cruciale è la *gravitazione*. (Di fatto le reazioni termonucleari *danno* un contributo altamente significativo al basso livello di entropia del Sole, ma i problemi posti dall'entropia della fusione nucleare sono delicati, e una discussione esauriente di questo problema condurrebbe solo a complicare l'argomentazione senza incidere sulle conclusioni finali.)[3] In assenza della gravità il Sole non esisterebbe nemmeno! Il Sole risplenderebbe anche senza reazioni nucleari — benché in modo inutile per noi — ma non ci sarebbe nessun sole a risplendere in cielo senza la gravità, che è necessaria per mantenere assieme il suo materiale e per fornire le temperature e pressioni richieste. Senza la gravità, al posto del Sole ci sarebbe un gas freddo e diffuso e *non* ci sarebbe alcuna macchia calda in cielo!

Non mi sono ancora occupato della sorgente della bassa entropia presente nei «combustibili fossili» contenuti nella Terra, ma le considerazioni che si devono fare sono fondamentalmente le stesse. Secondo la teoria convenzionale, tutto il petrolio (e il gas naturale) presenti nella Terra derivano dalla vita di piante preistoriche. Anche in questo caso la sorgente della bassa entropia va vista dunque nella funzione clorofilliana delle piante. Le piante preistoriche ricavarono la loro bassa entropia dalla radiazione solare, cosicché in definitiva risaliamo ancora una volta all'azione gravitazionale che condusse alla formazione del Sole da una nube di gas diffuso. Sull'origine del petrolio contenuto nel sottosuolo terrestre esiste però anche un'interessante teoria alternativa in disaccordo con questa; è la teoria di Thomas Gold, il quale contesta la concezione convenzionale, affermando che nella Terra c'è molto più petrolio di quello che avrebbe potuto essere prodotto da piante preistoriche. Gold ritiene che il petrolio sia rimasto intrappolato nell'interno della Terra quando questa si formò, e che da allora abbia continuato a filtrare lentamente verso l'esterno in sacche sotterranee.[4] Secondo la teoria di Gold, il petrolio sarebbe stato sintetizzato dalla luce del Sole ma nello spazio, prima ancora della formazione della Terra. Di nuovo, la sorgente ultima del petrolio sarebbe stata comunque il Sole, formatosi grazie all'azione della forza gravitazionale.

E che cosa si può dire dell'energia nucleare a bassa entropia contenuta nell'isotopo uranio-235 che è usato nelle centrali nucleari? Quest'energia non provenne in origine dal Sole (anche se potrebbe essere passata benissimo per il Sole in una qualche fase), ma da qualche altra stella, esplosa molti miliardi di anni fa sotto forma di una supernova! Il materiale fu prodotto in realtà da *molte* di tali esplosioni stellari. Il materiale di queste supernove fu espulso nello spazio per opera di immani esplosioni stellari e una parte di esso si raccolse infine (attraverso la mediazione del Sole) per fornire gli elementi pesanti presenti nella Terra, fra cui tutto il suo uranio-235. Ogni nucleo di uranio, col suo accumulo di energia a bassa entropia, ebbe origine nei violenti processi nucleari occorsi in qualche esplosione di supernova. Queste esplosioni si verificano per effetto del collasso[5] di stelle di massa troppo grande perché la pressione termica sia in grado di contrastare efficacemente la contrazione gravitazionale. In conseguenza del collasso e della successiva esplosione rimane un piccolo nucleo, probabilmente nella forma di quella che è nota oggi come una *stella di neutroni* (torneremo più avanti su questo argomento!). Gran parte di questo materiale originario della supernova, formatasi in origine per contrazione gravitazionale da una nube diffusa di gas, e comprendente ora anche l'uranio-235, viene disseminato di nuovo nello spazio dalla violenta esplosione. C'è però un grande guadagno in entropia in conseguenza della contrazione gravitazionale, grazie al nucleo residuo: la stella di neutroni. Anche in questo caso la produzione di bassa entropia è dunque riconducibile alla *gravità*, responsabile questa volta della condensazione (infine violenta) di gas diffuso in una stella di neutroni.

Eccoci dunque pervenuti alla conclusione che il livello notevolmente basso dell'entropia che osserviamo attorno a noi — e che fornisce questo aspetto estremamente sorprendente della seconda legge — dev'essere attribuito alla produzione di grandi quantità di entropia attraverso la contrazione gravitazionale di vaste nubi di gas diffuso a formare stelle. Da dove proviene tuttto questo gas diffuso? È il fatto che questo gas sia inizialmente *diffuso* a fornirci una quantità enorme di bassa entropia. Noi stiamo ancora vivendo su questo accumulo di bassa entropia, e continueremo a farlo ancora per un tempo molto lungo. È il potenziale che questo gas ha di addensarsi e contrarsi per effetto della forza gravitazionale che ci ha dato la seconda legge. Inoltre, questa contrazione gravitazionale non ha prodotto solo la seconda legge, ma qualcosa di molto più preciso e dettagliato della semplice asserzione: «L'entropia del mondo ebbe inizio a un livello molto basso». L'entropia avrebbe potuto esserci data a un livello «basso» in molti altri modi diversi, ossia agli inizi dell'universo avrebbe potuto esserci un grande «ordine manifesto», ma del tutto diverso dall'«ordine» che conosciamo. (Immaginiamo che l'universo fosse in origine un dodecaedro regolare — come sarebbe piaciuto a Platone — o che avesse avuto una qualche altra improbabile forma geometrica. Questo sarebbe stato in effetti un «ordine manifesto», ma non del tipo che ci attenderemmo di trovare alle origini dell'universo *reale*!) Dobbiamo comprendere da dove sia venuto tutto questo gas diffuso, e a questo scopo dovremo volgerci a considerare le nostre teorie cosmologiche.

La cosmologia e il big bang

A quanto possiamo desumere dai dati d'osservazione fornitici dai nostri telescopi più potenti — sia telescopi ottici sia radiotelescopi — l'universo, a una scala molto grande, ci appare piuttosto uniforme; ma, cosa più notevole, è *in espansione*. Quanto più lontano riusciamo a spingere lo sguardo, tanto più rapidamente le galassie distanti (e gli ancora più remoti quasar) sembrano recedere da noi. È come se l'universo stesso fosse stato creato nel corso di una gigantesca esplosione — evento designato con l'espressione di *big bang* — che avrebbe avuto luogo circa dieci miliardi di anni fa.* Una importante conferma alla uniformità, e all'esistenza reale del *big bang*, è stato fornita dalla cosiddetta *radiazione di fondo del corpo nero*. Questa è la radiazione termica — fotoni che si muovono a caso in tutte le direzioni, senza una sorgente discernibile — corrispondente a una temperatura di circa 2,7 gradi assoluti (2,7 K, ossia –270,3 °C). Questa potrebbe sembrare una temperatura *molto* bassa — e in effetti lo è! — ma pare che sia il residuo del lampo del *big bang* stesso! Poiché, a partire dall'epoca del *big bang*, l'universo si è espanso di un fattore enorme, questo globo di fuoco iniziale si è disperso di un fattore assolutamente enorme. Le temperature esistenti all'epoca del *big bang* furono di gran lunga superiori a qualsiasi temperatura possa presentarsi oggi, ma per effetto di questa espansione la temperatura originaria è scesa al minuscolo valore che ha oggi la radiazione di fondo del corpo nero.

La presenza di questa radiazione nelle microonde fu *predetta* nel 1948 dal fisico e astronomo russo-americano George Gamow sulla base del quadro oggi standard del *big bang*. Essa fu osservata per la prima volta (accidentalmente) nel 1965 da Penzias e Wilson.

Dovrei affrontare un problema che spesso incuriosisce la gente. Se le galassie lontane stanno allontanandosi tutte da noi, ciò non significa forse che noi occupiamo una qualche posizione centrale molto speciale? No, non è così! Noi vedremmo la stessa recessione delle galassie lontane *in qualsiasi luogo* ci trovassimo nell'universo. L'espansione è uniforme su vasta scala e non esiste una qualche particolare posizione privilegiata rispetto ad altre. Per dare un'idea di questa situazione si fa spesso ricorso all'esempio di un palloncino che viene gonfiato (figura 7.8). Supponiamo che sul palloncino siano disegnati dei pallini o delle piccole spirali per rappresentare le diverse galassie, e poniamo che la superficie bidimensionale del pallone stesso rappresenti l'intero universo tridimensionale. È chiaro che un ipotetico osservatore che si trovasse su una *qualsiasi* di tali piccole spirali sul palloncino, vedrebbe allontanarsi *tutte* le altre spirali. Nessun punto sulla superficie in espansione del palloncino

* Attualmente è ancora in corso una controversia circa il valore di questo numero, che è compreso fra 6×10^9 e $1,5 \times 10^{10}$ anni. Queste cifre sono considerevolmente maggiori della cifra di 10^9 anni che sembrava appropriata in origine, dopo che le osservazioni iniziali di Edwin Hubble, attorno al 1930, mostrarono che l'universo è in espansione.

offrirebbe un punto di osservazione privilegiato rispetto a qualsiasi altro. Similmente, dal punto di osservazione in ciascuna galassia nell'universo, tutte le altre galassie appaiono recedere egualmente in tutte le direzioni.

Il nostro palloncino in espansione fornisce un'illustrazione molto buona di uno dei tre modelli standard dell'universo di Friedman-Robertson-Walker (FRW), ossia il modello FRW spazialmente chiuso *a curvatura positiva*. Negli altri due modelli di FRW (a curvatura nulla o a curvatura negativa), l'universo si espande nello stesso modo, ma anziché aversi un universo spazialmente finito, come indica la superficie del palloncino, si ha un universo *infinito* con un numero infinito di galassie.

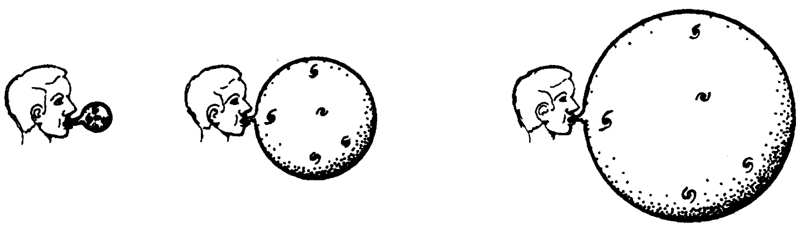

Figura 7.8. L'espansione dell'universo può essere assimilata a quella della superficie di un pallone che viene gonfiato. Tutte le galassie si allontanano l'una dall'altra.

In quello più facilmente comprensibile di questi due modelli infiniti, la geometria spaziale è *euclidea*, ossia ha curvatura *nulla*. Si immagini che l'intero universo spaziale sia rappresentato da un comune piano, dove le galassie vengono rappresentate per mezzo di una distribuzione di punti. All'evolversi dell'universo nel tempo, queste galassie si allontanano l'una dall'altra in modo uniforme. Consideriamo questa recessione in termini *spaziotemporali*. Abbiamo allora un diverso piano euclideo per ogni «momento di tempo», e tutti questi piani sono immaginati come accumulati uno sopra l'altro, cosicché possiamo avere simultaneamente un'immagine dell'intero spazio-tempo (figura 7.9). Le galassie sono rappresentate ora come *curve* — le *linee orarie* delle storie delle galassie — e queste curve si allontanano l'una dall'altra in direzione del futuro. Ancora una volta, non c'è alcuna galassia particolare che abbia una linea oraria privilegiata.

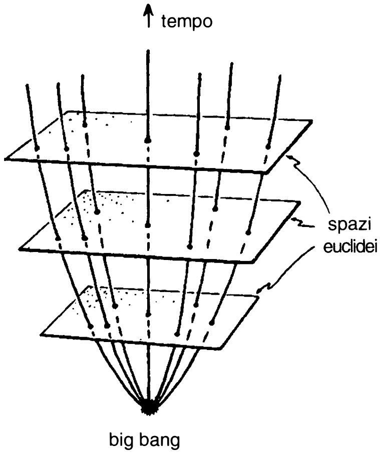

Figura 7.9. Immagine spaziotemporale di un universo in espansione con sezioni spaziali euclidee (sono raffigurate due sole dimensioni spaziali).

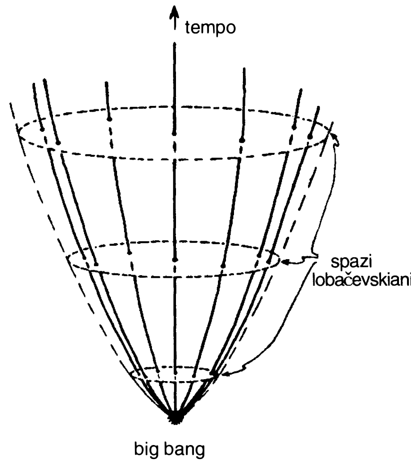

Figura 7.10. Immagine spaziotemporale di un universo in espansione con sezioni spaziali lobačevskiane (sono raffigurate due sole dimensioni spaziali).

Per il modello FRW restante, quello a *curvatura negativa*, la geometria spaziale è la geometria *non* euclidea di Lobačevskij quale fu descritta nel capitolo 5 e illustrata dalla stampa di Escher raffigurata nella figura 5.2 (a p. 208). Per la descrizione dello spazio-tempo abbiamo bisogno solo di uno di questi spazi di Lobačevskij per ogni istante di tempo, e accumuleremo tutte queste immagini istantanee una sopra l'altra per avere una visione complessiva dell'intero spazio-tempo (figura 7.10).[6] Anche in questo caso le linee orarie delle galassie sono curve che si allontanano l'una dall'altra nella direzione del futuro, e nessuna galassia è privilegiata.

Ovviamente, in tutte queste descrizioni abbiamo soppresso una delle tre dimensioni dello spazio (come nel capitolo 5, cfr. p. 254), per dare uno spazio-tempo a tre dimensioni più facilmente visualizzabile di quanto non sarebbe riuscita un'immagine completa dello spazio - tempo quadridimensionale. Anche così riesce difficile visualizzare lo spazio-tempo a curvatura positiva senza eliminare ancora un'altra dimensione spaziale! Facciamolo dunque e rappresentiamo l'universo spaziale chiuso a curvatura positiva per mezzo di una *circonferenza* (unidimensionale), anziché per mezzo della superficie sferica (bidimensionale) del palloncino. All'espandersi dell'universo cresce la grandezza di questa circonferenza, e noi possiamo rappresentare lo spazio-tempo accumulando queste circonferenze (una circonferenza per ogni «istante di tempo») una sopra l'altra, ottenendo una sorta di cono curvo (figura 7.11*a*). Ora, dalle equazioni della relatività generale di Einstein segue che quest'universo a curvatura positiva non può continuare a espandersi per sempre. Dopo avere raggiunto una fase di massima espansione, esso collasserà su se stesso, fino a raggiungere di nuovo dimensioni nulle in una sorta di *big bang* alla rovescia (figura 7.11*b*). Questo rovescio del *big bang* viene chiamato talvolta *big crunch*. I modelli di universo (infinito) FRW a curvatura negativa e a curvatura nulla non invertono in questo modo la loro espansione. Anziché

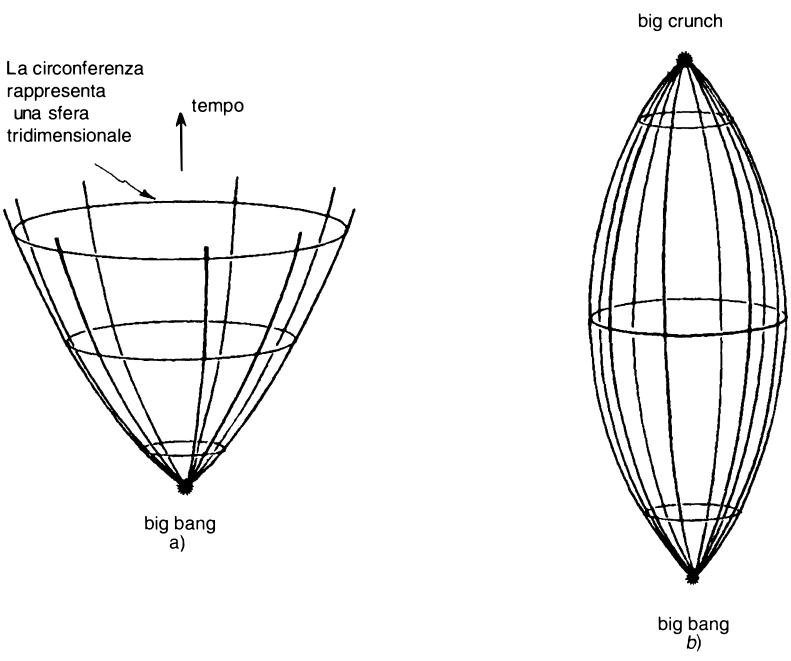

Figura 7.11. a) Immagine spaziotemporale di un universo in espansione con sezioni spaziali sferiche (è raffigurata una sola dimensione spaziale). *b*) Al termine dell'espansione quest'universo inverte il suo movimento, terminando la sua esistenza in un *big crunch* finale.

raggiungere un *big crunch* finale, continuano a espandersi per sempre.

Questo vale almeno per la relatività generale *standard*, in cui la cosiddetta *costante cosmologica* è posta uguale a zero. Con opportuni valori non nulli di questa costante cosmologica, è possibile avere modelli di universo spazialmente infiniti che ricollassano in un *big crunch*, o modelli finiti a curvatura positiva che si espandono indefinitamente. La presenza di una costante cosmologica non nulla complicherebbe leggermente la discussione, ma non in un modo significativo ai nostri fini. Per semplicità, supporrò che la costante cosmologica sia zero.* Mentre scrivo si sa, sulla base di dati di osservazione, che la costante cosmologica è molto piccola, e oggi i dati concordano con l'ipotesi che possa essere nulla. (Per ulteriori informazioni sui modelli cosmologici vedi Rindler, 1977.)

Purtroppo i dati d'osservazione non sono ancora abbastanza precisi per farci propendere decisamente per l'uno o l'altro dei modelli cosmologici proposti (né per determinare se la presenza di una piccola costante cosmologica potrebbe avere o no un effetto complessivo significante). In considerazione di ciò, i dati sembrerebbero indicare che l'universo abbia una curvatura spaziale negativa (con la geometria di Lobačevskji su vasta scala) e che continuerà a espandersi indefinitamente. Questa conclusione si fonda in gran parte su osservazioni della quantità di materia reale che sembra essere presente nell'universo in forma visibile. Potrebbero esserci però grandi quantità di materia invisibile diffuse in tutto lo spazio, nel qual caso l'universo potrebbe avere curvatura positiva, e potrebbe infine ricollassare in un *big crunch*, anche se solo in un intervallo di tempo molto maggiore dei circa 10^{10} anni di esistenza dell'universo. Perché questo collasso sia possibile dovrebbe esistere una quantità di materia oltre trenta volte maggiore di quella osservabile con i telescopi, la quale dovrebbe permeare lo spazio in questa forma invisibile: la cosiddetta «materia oscura». C'è qualche attendibile prova indiretta del fatto che una quantità rilevante di materia oscura esista davvero, ma se essa sia in quantità *sufficiente* per «chiudere l'universo» (o renderlo spazialmente piano) — e farlo ricollassare — è una questione destinata per ora a restare aperta.

* Einstein introdusse la costante cosmologica nel 1917, ma dovette ritrattarla nel 1931, confessando che la sua introduzione era stata un «grandissimo errore»!

Il globo di fuoco primordiale

Torniamo alla nostra ricerca dell'origine della seconda legge della termodinamica. L'abbiamo cercata a ritroso nel tempo sino a ricondurla alla presenza di gas diffuso da cui si sono condensate le stelle. Che cos'è questo gas? Da dove è venuto? Esso è principalmente idrogeno, ma c'è anche un 23 per cento circa (in massa) di elio e piccole quantità di altri materiali. Secondo la teoria standard, questo gas fu prodotto dall'esplosione che creò l'universo: il *big bang*. È però importante che non pensiamo al *big bang* come a una comune esplosione del tipo a noi familiare, in cui viene espulsa della materia da un qualche punto centrale in uno spazio preesistente. Qui lo spazio stesso è *creato* dall'esplosione, e non c'è, o non c'era, alcun punto centrale! La situazione è forse visualizzabile più facilmente nel caso dello spazio a curvatura positiva. Consideriamo di nuovo la figura 7.11 o il palloncino gonfiato della figura 7.8. Non c'è uno «spazio vuoto preesistente» in cui venga proiettato il materiale prodotto dall'esplosione. Lo spazio stesso, ossia la «superficie del palloncino», viene all'essere in conseguenza dell'esplosione. Dobbiamo renderci conto che le nostre immagini, nel caso a curvatura positiva, si sono servite di uno «spazio ambiente» — lo spazio euclideo in cui si trova il palloncino, o lo spazio tridimensionale in cui è raffigurato lo spazio-tempo della figura 7.11 — solo per facilitare la visualizzazione, e che non si devono intendere questi spazi ambienti come dotati di una realtà fisica. Lo spazio all'interno o all'esterno del palloncino deve solo aiutarci a visualizzare la superficie del palloncino stesso. È la *sola* superficie del palloncino a rappresentare lo spazio fisico dell'universo. Ora ci rendiamo conto che non c'è alcun punto centrale da cui emana il materiale proveniente dal *big bang*. Il «punto» che sembra trovarsi al centro del palloncino non fa parte dell'universo, ma è semplicemente un ausilio per la nostra visualizzazione del modello. Il materiale proiettato intorno dal *big bang* è semplicemente diffuso in modo uniforme nell'*intero* universo spaziale!

La situazione è la stessa (anche se forse un po' più difficile da visualizzare) per gli altri due modelli standard. Il materiale non fu mai concentrato in nessun punto nello spazio. Esso riempiva uniformemente *tutto* lo spazio, fin dal primissimo istante!

Questo quadro è alla base della teoria del *big bang caldo*, nota come il *modello standard*. In questa teoria l'universo, qualche istante dopo la sua creazione, era estremamente caldo: il *globo di* *fuoco primordiale.* Sono stati eseguiti calcoli dettagliati sulla natura e le proporzioni dei componenti iniziali di questo globo di fuoco, e su come questi componenti si modificarono all'espandersi e al raffreddarsi del globo di fuoco (che era l'intero universo). Può sembrare strano che si possano eseguire attendibilmente dei calcoli per descrivere uno stato dell'universo così differente dalla nostra epoca attuale. La fisica su cui tali calcoli si fondano non è però oggetto di controversia, purché non vogliamo sapere che cosa sia accaduto *prima* del primo decimillesimo di secondo dopo la creazione! Da quel momento, un decimillesimo di secondo dopo la creazione, fino a tre minuti dopo, il comportamento dell'universo è stato calcolato con grande abbondanza di particolari (cfr. Weinberg, 1977) e, cosa degna di nota, le nostre teorie fisiche ben fondate, derivate dalla conoscenza sperimentale di un universo oggi in uno stato molto diverso, sono del tutto adeguate allo scopo.[7] Le implicazioni finali di questi calcoli sono che nell'universo c'erano allora molti fotoni (cioè luce), elettroni e protoni (i due componenti dell'idrogeno), qualche particella α (nuclei di elio), un numero ancora minore di deutoni (i nuclei del deuterio, un isotopo pesante dell'idrogeno), e tracce di altri tipi di nuclei, con forse anche un gran numero di particelle «invisibili» come i neutrini, di cui sarebbe estremamente difficile rivelare la presenza; tutte queste particelle erano impegnate a diffondersi uniformemente nell'intero universo. I componenti *materiali* (principalmente protoni ed elettroni) dovettero combinarsi a produrre il gas da cui si sono formate le stelle (in gran parte idrogeno) circa 10^8 anni dopo il *big bang.*

Le stelle, però, non si formarono subito. Dopo un ulteriore periodo di espansione e di raffreddamento del gas, occorse la concentrazione del gas stesso in certe regioni perché effetti gravitazionali locali potessero cominciare a contrastare il moto generale di espansione. Qui ci imbattiamo nel problema irrisolto e controverso di come si siano formate le galassie, e di quali irregolarità iniziali debbano essersi verificate perché la formazione delle galassie diventasse possibile. Non voglio però addentrarmi qui in una discussione di questo problema. Limitiamoci ad accettare la presenza di qualche sorta di irregolarità nella distribuzione iniziale del gas, e che in qualche modo abbia avuto inizio il giusto tipo di concentrazioni gravitazionali locali, così che potessero formarsi le galassie, con le centinaia di miliardi di stelle che le compongono!

Abbiamo così identificato la provenienza del gas diffuso.

Esso ebbe origine da quel globo di fuoco primordiale che fu il *big bang* stesso. Il fatto che questo gas si sia distribuito in modo notevolmente uniforme in tutto lo spazio è ciò che ci ha dato la seconda legge — nella forma dettagliata in cui essa ci è pervenuta — una volta resosi disponibile il procedimento della concentrazione gravitazionale che innescò il processo dell'aumento dell'entropia. Quanto uniformemente *è* distribuito il materiale dell'universo attuale? Abbiamo notato che le stelle sono riunite in galassie. Queste sono riunite a loro volta in ammassi di galassie; e gli ammassi nei cosiddetti superammassi. C'è persino qualche prova del fatto che questi superammassi siano raccolti in raggruppamenti ancora maggiori chiamati complessi di superammassi. È però importante notare che tutta questa irregolarità e questi raggruppamenti non sono altro che piccole increspature rispetto all'imponente uniformità della struttura dell'universo nel suo complesso. Quanto più a ritroso nel tempo si riesce a spingere lo sguardo, e quanto maggiore è la parte dell'universo che si riesce a osservare, tanto più l'universo ci appare uniforme. La radiazione di fondo del corpo nero fornisce la prova più impressionante in questo senso. Essa ci dice, in particolare, che quando l'universo aveva solo un milione di anni, e un raggio che era aumentato a circa 10^{23} km — una distanza da noi che oggi abbraccerebbe circa 10^{10} galassie — esso e tutti i suoi materiali erano *uniformi* a meno di una parte su centomila (cfr. Davies et al., 1987). L'universo, nonostante le sue origini violente, fu in effetti molto uniforme ai suoi inizi.

Fu dunque il globo di fuoco primordiale a diffondere questo gas in modo così uniforme in tutto lo spazio. È qui che la nostra ricerca ci ha condotti.

Il big bang spiega la seconda legge?

La nostra ricerca è così giunta al suo termine? Il fatto misterioso che l'entropia nel nostro universo abbia avuto inizio a livelli così bassi — fatto da cui deriva la seconda legge della termodinamica — può essere «spiegato» dalla sola circostanza che l'universo ha avuto inizio con una grande esplosione? Un po' di riflessione suggerisce che in quest'idea si cela un paradosso. Questa non può essere certamente la risposta giusta. Ricordiamo che il globo di fuoco primordiale fu uno stato *termico*: un gas caldissimo in uno stato di equilibrio termico in espansione. Ricordiamo, inoltre, che l'espressione «equibrio termico» si riferisce a uno stato di *massima* entropia. (Con questa stessa espressione descrivemmo lo stato di massima entropia di un gas in una scatola.) La seconda legge richiede però che l'entropia del nostro universo, nel suo stato iniziale, fosse a una sorta di *minimo*, non a un massimo!

Dov'è l'errore? La nostra risposta «standard» sarebbe grosso modo la seguente:

> È vero, all'inizio il globo di fuoco era effettivamente in equilibrio termico, ma l'universo a quell'epoca era molto piccolo. Il globo di fuoco rappresentava lo stato di massima entropia possibile per un universo di dimensioni tanto piccole, ma quell'entropia era piccola rispetto a quella consentita per un universo delle dimensioni attuali. Nel corso dell'espansione, l'entropia massima consentita aumentava con le dimensioni dell'universo, ma l'entropia reale nell'universo rimase molto indietro rispetto al massimo consentito. La seconda legge ha origine in conseguenza del fatto che l'entropia reale tende sempre a raggiungere questo massimo consentito.

Un po' di riflessione ci dice però che questa non può essere la spiegazione giusta. Se così fosse, nel caso di un modello di universo (spazialmente chiuso) che infine invertisse la sua espansione per concludere la sua esistenza in un *big crunch* tornerebbe ad applicarsi in definitiva lo stesso ragionamento, nella direzione del tempo inversa. Una volta che l'universo avesse infine raggiunto dimensioni minuscole, ci sarebbe ancora un livello massimo modesto ai valori possibili dell'entropia. Lo stesso vincolo che servì a darci una piccola entropia nelle primissime fasi dell'universo in espansione dovrebbe applicarsi di nuovo nelle fasi finali dell'universo in contrazione. Fu una condizione vincolata di bassa entropia all'«inizio del tempo» a darci la seconda legge, secondo cui l'entropia dell'universo aumenta col tempo. Se questa stessa condizione di bassa entropia si applicasse anche alla «fine del tempo», dovremmo imbatterci in un grosso conflitto con la seconda legge della termodinamica!

Ovviamente può darsi benissimo che il nostro universo non sia destinato a subire il supremo collasso gravitazionale. Forse noi viviamo in un universo con curvatura spaziale complessiva nulla (caso euclideo) o con curvatura negativa (caso di Lobačevskij). O forse viviamo in un universo (a curvatura positiva) destinato ad annientarsi in un *big crunch*, ma tale collasso finale avverrà in un tempo così lontano che noi, nella nostra epoca, non siamo in grado di discernere alcuna violazione della seconda legge. Anche se, in questa prospettiva, l'*intera* entropia dell'universo dovrebbe infine invertire il suo corso e diminuire sino a un piccolo valore, e la seconda legge, quale la intendiamo oggi, sarebbe infine grossolanamente violata.

Di fatto ci sono ottime ragioni per ritenere dubbio che, in un universo in contrazione, possa mai verificarsi una tale inversione dell'entropia. Alcune fra le più efficaci di queste ragioni hanno a che fare con quegli oggetti misteriosi che sono noti come *buchi neri.* In un buco nero abbiamo un'immagine in miniatura del possibile collasso finale dell'universo; se l'entropia è destinata quindi a invertirsi in un universo in contrazione, dovrebbero verificarsi grossolane violazioni della seconda legge anche in prossimità di un buco nero. Ci sono però buoni motivi per credere che, nel caso dei buchi neri, la seconda legge non venga violata. La teoria dei buchi neri fornirà un contributo importante alla nostra discussione dell'entropia, cosicché sarà necessario per noi considerare questi strani oggetti con una certa precisione.

I buchi neri

Consideriamo innanzitutto quale sarà, secondo la teoria, la sorte finale del nostro Sole. Il Sole esiste da circa 5 miliardi di anni. Fra altri 5-6 miliardi di anni comincerà a espandersi, gonfiandosi inesorabilmente fino a quando la sua superficie raggiungerà press'a poco l'orbita della Terra. Esso sarà diventato allora un tipo di stella noto come *gigante rossa.* Molte giganti rosse sono state osservate in cielo, e due fra quelle più note sono Aldebaran nella costellazione del Toro e Betelgeuse in Orione. Per tutto il tempo che la superficie del Sole andrà espandendosi, nel suo nucleo ci sarà una piccola concentrazione di materia eccezionalmente densa, la quale andrà crescendo costantemente. Questo nucleo denso avrà la natura di una stella *nana bianca* (figura 7.12).

Le nane bianche, quando esistono a sé, sono vere stelle il cui materiale è concentrato sino a raggiungere una densità estremamente elevata, tanto che una pallina da ping-pong riempita del loro materiale peserebbe varie tonnellate! Queste stelle sono state osservate in cielo in numero considerevole: forse il 10 per cento delle stelle luminose nella nostra galassia sono nane bianche. La nana bianca più famosa è la compagna di Sirio, la cui densità paurosamente elevata fornì un grande rompicapo

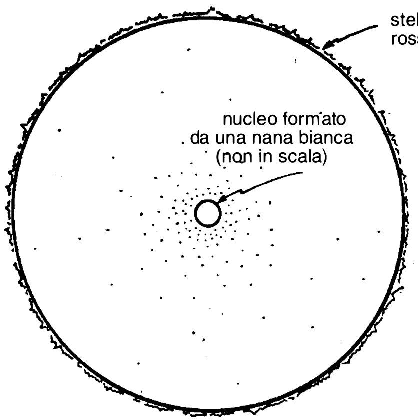

Figura 7.12. Una gigante rossa, il cui nucleo è formato da una nana bianca.

agli astronomi degli inizi del secolo. In seguito, però, questa stessa stella fornì una meravigliosa conferma della teoria fisica (espressa in origine da Fowler, attorno al 1926) secondo cui alcune stelle potrebbero avere effettivamente una densità così grande, e non poter contrarsi ulteriormente grazie alla «pressione di degenerazione degli elettroni»: in altri termini, sarebbe il principio quantomeccanico di esclusione di Pauli (p. 357), applicato agli elettroni, a impedire alla stella un ulteriore collasso gravitazionale.

Ogni gigante rossa avrà nella sua regione centrale una nana bianca, la quale raccoglierà di continuo materiali dal corpo principale della stella. La gigante rossa sarà consumata completamente da questo nucleo parassitico, e resterà infine una vera nana bianca, delle dimensioni approssimative della Terra. Il nostro Sole dovrebbe esistere come una gigante rossa per «solo» qualche miliardo di anni, dopo di che, nella sua ultima forma «visibile», persisterà per qualche altro miliardo di anni come una brace di nana bianca che si va lentamente raffreddando,* diventando infine totalmente invisibile nella forma di una *nana nera*.

Non tutte le stelle condivideranno la sorte del Sole. Il destino di alcune sarà considerevolmente più violento, e la loro sorte

* In realtà, nelle sue fasi finali, la nana finirà col risplendere sempre più debolmente trasformandosi in una stella rossa, ma le cosiddette «nane rosse» sono stelle dalle caratteristiche del tutto diverse!

sarà segnata dal cosiddetto *limite di Chandrasekhar:* il massimo valore possibile per la massa di una nana bianca. Secondo un calcolo eseguito nel 1929 da Subrahmanyan Chandrasekhar, le nane bianche non possono avere una massa di più di 1,2 masse solari. (Quando fece questo calcolo, Chandrasekhar era un ragazzo indiano che, dopo essersi diplomato all'università di Madras, si recava in Inghilterra per conseguirvi il dottorato di ricerca.) Il calcolo fu ripetuto indipendentemente, attorno al 1930, anche dal fisico russo Lev Landau. Il valore moderno, un po' più raffinato, per il limite di Chandrasekhar è di circa

$$1{,}4\ \mathrm{M}_{\odot}$$

dove $M_{\odot}$ è la massa del Sole, cioè $M_{\odot}$ = una *massa solare.*

Si noti che il limite di Chandrasekhar non è molto maggiore della massa del Sole, mentre si conoscono molte stelle comuni la cui massa è considerevolmente maggiore di questo valore. Quale sarebbe la sorte ultima di una stella, per esempio, di massa 2 $M_{\odot}$? Anche in questo caso, secondo la teoria stabilita, la stella dovrebbe gonfiarsi diventando una gigante rossa, e il suo nucleo formato da una nana bianca dovrebbe acquistare lentamente massa, esattamente come prima. In una qualche fase critica, però, il nucleo raggiungerà il limite di Chandrasekhar, e il principio di esclusione di Pauli sarà insufficiente a sostenerlo contro le pressioni enormi indotte dalla gravitazione.[8] A questo punto, o attorno ad esso, il nucleo subirà un collasso catastrofico, che produrrà temperature e pressioni enormemente maggiori. Saranno allora innescate violente reazioni nucleari, e dal nucleo sarà liberata una quantità grandissima di energia sotto forma di neutrini. Questi riscalderanno le regioni esterne della stella che stavano collassando verso l'interno e ne conseguirà un'immensa esplosione. La stella è diventata una supernova!

Qual è la sorte del nucleo, che sta ancora contraendosi? La teoria ci dice che esso raggiungerà densità enormemente maggiori di quelle preoccupanti già conseguite all'interno di una nana bianca. Il nucleo potrà stabilizzarsi nella forma di una *stella di neutroni* (p. 411), dove ora a contrastare un ulteriore collasso è la *pressione di degenerazione dei neutroni,* ossia il principio di esclusione di Pauli applicato ai neutroni. La densità sarebbe ora tale che la nostra pallina da ping-pong contenente materiale di una stella di neutroni peserebbe quanto il pianetino Hermes (o forse quanto il satellite di Marte Deimos). Questo è il tipo di densità che si trova all'interno dello stesso nucleo atomico!

(Una stella di neutroni è come un gigantesco nucleo atomico, del raggio di forse dieci chilometri, una misura estremamente piccola rispetto alle grandezze astronomiche!) Qui troviamo però un *nuovo* limite, analogo a quello di Chandrasekhar, noto come il limite di Landau-Oppenheimer-Volkov, il cui valore moderno (riveduto) è di circa

$$2{,}5\ M_\odot\ ,$$

al di sopra del quale una stella di neutroni non può mantenersi stabile.

Che cosa accade a questo nucleo collassante se la massa della stella originaria è tanto grande da superare persino *questo* limite? Si conoscono molte stelle di massa compresa, per esempio, fra 10 e 100 $M_\odot$. Sembra molto improbabile che esse possano espellere invariabilmente nello spazio tanta massa che il nucleo risultante si trovi necessariamente al di sotto di questo limite delle stelle di neutroni. Ci si attende, allora, che si formi un *buco nero.*

Che cos'è un buco nero? È una regione dello spazio — o dello spazio-tempo — entro la quale il campo gravitazionale è diventato tanto intenso che neppure la luce può sfuggirne. Ricordiamo che è un'implicazione dei princìpi della relatività che la velocità della luce sia la velocità limite: nessun oggetto materiale o nessun segnale può superare la velocità locale della luce (pp. 254, 276). Perciò, se da un buco nero non può evadere la luce, *nulla* può evaderne.

Il lettore ha forse familiarità col concetto di *velocità di fuga.* Questa è la velocità che un oggetto deve raggiungere per sottrarsi all'attrazione gravitazionale di un corpo celeste. Supponiamo che questo corpo fosse la Terra; la velocità di fuga dalla Terra è di circa 40 000 chilometri all'ora. Una pietra scagliata dalla Terra verso l'alto con una velocità superiore a questo valore non ricadrebbe più sulla Terra ma si allontanerebbe nello spazio (supponendo di poter ignorare gli effetti della resistenza dell'aria). Se viene lanciata con una velocità inferiore a questa, ricadrà al suolo. (*Non* è quindi vero che «tutto ciò che sale deve scendere»; un oggetto ritorna sulla Terra solo se viene lanciato a una velocità *inferiore* alla velocità di fuga!) Per Giove la velocità di fuga è di circa 220 000 chilometri all'ora; per il Sole è di circa 2 200 000 km/h. Nell'ipotesi che la massa del Sole fosse concentrata in una sfera di raggio pari a solo *un quarto* del suo raggio presente, otterremmo una velocità di fuga *doppia* rispetto al valore reale; e se il Sole fosse ancora più concentrato, per esempio in una sfera di raggio pari a *un centesimo* del suo raggio presente, la velocità di fuga sarebbe *dieci volte* maggiore di quella reale. Possiamo immaginare che, per un corpo di massa sufficientemente grande e sufficientemente concentrata, la velocità di fuga potrebbe superare persino la velocità della luce! Quando accade ciò, abbiamo un buco nero.[9]

La figura 7.13 presenta un diagramma dello spazio-tempo in cui è illustrato il collasso di un corpo a formare un buco nero (io suppongo qui che il collasso proceda in un modo che conservi ragionevolmente bene la simmetria sferica, e sopprimo una delle dimensioni spaziali). Nella figura sono rappresentati i coni di luce, i quali indicano, come ricordiamo dalla discussione della relatività generale nel capitolo 5 (cfr. p. 272), i limiti assoluti che si pongono al moto di un oggetto materiale o di un segnale. Si noti che, avvicinandosi al centro, i coni cominciano a inclinarsi verso l'interno e che l'inclinazione diventa tanto più pronunciata quanto più centrali sono.

C'è una distanza critica dal centro, nota come *raggio di Schwarzschild*, alla quale i limiti esterni dei coni diventano *verticali* nel diagramma. A questa distanza, la luce (che deve seguire i coni di luce) riesce solo a «librarsi» sopra il corpo collassato, e tutta la sua immensa velocità verso l'esterno è sufficiente solo a controbilanciare l'enorme attrazione gravitazionale. La superficie (tridimensionale) nello spazio-tempo tracciata, in corrispondenza del raggio di Schwarzschild, da questa luce sospesa (ossia l'intera storia della luce) è nota come l'*orizzonte degli eventi (assoluto)* del buco nero. Tutto ciò che si trova all'interno dell'orizzonte degli eventi è nell'impossibilità di evadere dal buco nero e persino di comunicare col mondo esterno. Possiamo rendercene conto dall'inclinazione dei coni di luce, e dal fatto fondamentale che tutti i moti e segnali sono costretti a propagarsi all'interno di questi coni (o sulla loro superficie). Per un buco nero formato dal collasso di una stella di poche masse solari, il raggio dell'orizzonte degli eventi sarebbe di alcuni chilometri. Ci si attende che buchi neri molto maggiori si trovino al centro delle galassie. La nostra galassia della Via Lattea potrebbe benissimo avere al suo centro un buco nero di un milione di masse solari circa, il quale potrebbe avere un raggio di qualche milione di chilometri.

Il corpo materiale che collassa a formare il buco nero finirà col trovarsi totalmente all'interno dell'orizzonte degli eventi, e sarà quindi nell'impossibilità di comunicare con l'esterno. Con-

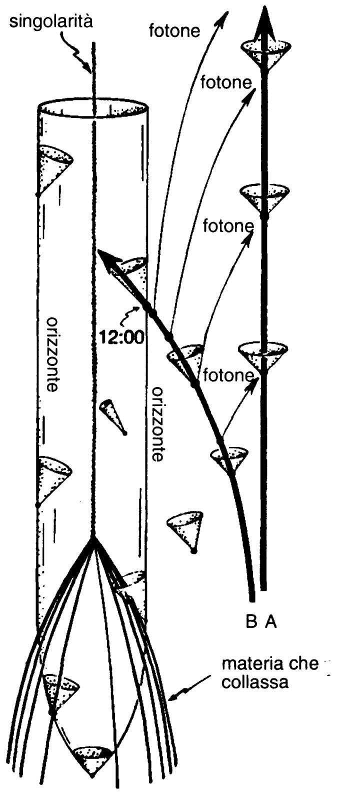

Figura 7.13. Diagramma spaziotemporale del collasso che conduce alla formazione di un buco nero.

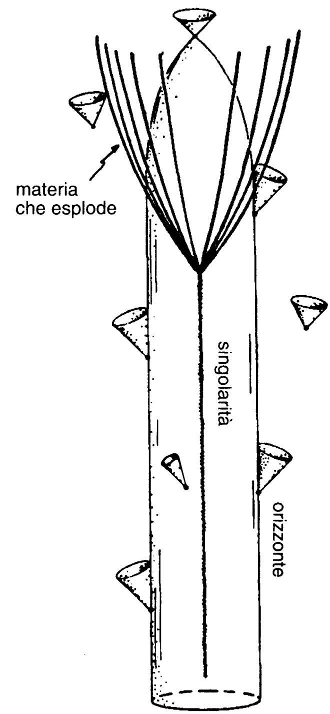

Figura 7.14. Una configurazione spaziotemporale ipotetica: un buco bianco che esplode infine a formare materia (l'inverso temporale del buco nero della figura 7.13).

sidereremo fra breve la sorte probabile di questo corpo. Per il momento ci interessa solo la geometria dello spazio-tempo creata dal suo collasso: una geometria dello spazio-tempo che ha implicazioni profondamente curiose.

Immaginiamo un astronauta coraggioso (o avventato?) **B**, il quale decida di avventurarsi all'interno di un grande buco nero, mentre il suo compagno più timoroso (o prudente?), **A**, rimane al sicuro fuori dell'orizzonte degli eventi. Supponiamo che **A** tenti di mantenere sotto osservazione **B** il più a lungo possibile. Che cosa vede **A**? Dalla figura 7.13 si può stabilire che **A** non potrà mai vedere la parte della storia di **B** (cioè della linea oraria di **B**) che si trova *all'interno* dell'orizzonte degli eventi, mentre la parte *all'esterno* di tale orizzonte gli risulterà infine tutta visibile, anche se egli riuscirà a vedere le azioni di **B** immediatamente precedenti il suo passaggio dell'orizzonte solo dopo periodi di attesa sempre più lunghi. Supponiamo che **B** attraversi l'orizzonte degli eventi quando il suo orologio segna le 12. **A** non potrà mai osservare tale evento, ma riuscirà a vedere successivamente l'orologio di **B** che segna le 11,30, 11,45, 11,52, 11,56, 11,58, 11,59, 11,59 $\frac{1}{2}$, 11,59 $\frac{3}{4}$, 11,59$\frac{7}{8}$ ecc. (a intervalli grosso modo uguali, dal suo punto di vista). In linea di principio, **B** resterà sempre visibile ad **A** e gli apparirà sempre sospeso al di sopra dell'orizzonte, col suo orologio che si avvicinerà sempre più (e sempre più lentamente) all'ora fatale delle 12,00, senza però mai raggiungerla. In realtà però l'immagine di **B** percepita da **A** diventerebbe rapidamente troppo debole per continuare a essere discernibile, in quanto la luce proveniente dalla piccola porzione della linea oraria di **B** appena all'esterno dell'orizzonte degli eventi deve bastare per l'intera parte restante del tempo sperimentato da **A**. In effetti **B** finirà con lo svanire dalla vista di **A**, e lo stesso vale per l'intero corpo originario che collassa trasformandosi in un buco nero. Tutto ciò che **A** riuscirà a vedere sarà in effetti solo un «buco nero»!

Che cosa si può dire sulla sorte del povero **B**? Quale sarà la *sua* esperienza? Innanzitutto va sottolineato che nel momento in cui varcherà l'orizzonte non succederà niente di notevole per lui. **B** osserva il suo orologio e vede che segna successivamente le 11,57, 11,58, 11,59, 12,00, 12,01, 12,02, 12,03... I minuti passano regolarmente e attorno alle 12,00 pare che non ci sia niente di particolarmente strano. Egli guarda verso **A**, e constata che **A** rimane in vista per tutto il tempo. Può osservare anche l'orologio di **A**, e gli pare che segni il tempo in modo regolare. Se **B** non si rendesse conto per mezzo del calcolo che a quest'ora deve avere attraversato l'orizzonte degli eventi, non avrebbe alcun modo per saperlo.[10] L'orizzonte è stato insidioso all'estremo. Una volta che **B** lo ha attraversato, non c'è più scampo per lui. Egli si renderà infine conto che il suo universo locale sta collassando intorno a lui, e anch'egli sarà destinato a subire fra breve il suo «*big crunch*» privato!

O forse non poi tanto privato. Tutta la materia del corpo collassato che forma il buco nero condividerà, in un certo senso, lo «stesso» *crunch* con lui. In effetti, se l'universo *all'esterno* del buco nero è spazialmente chiuso, di modo che anche tutta la materia esterna è in definitiva impegnata in un collasso universale, ci si deve attendere che anche quel collasso finirà per identificarsi col *crunch* «privato» di **B**.*

Nonostante la sorte sgradevole di **B**, non ci attendiamo che la fisica locale che egli sperimenta fino a quel punto debba essere in disaccordo con la fisica che siamo giunti a capire. In particolare, non ci attendiamo che egli sperimenti delle violazioni locali della seconda legge della termodinamica, e tanto meno una completa inversione del comportamento crescente dell'entropia. La seconda legge dominerà tanto all'interno del buco nero quanto altrove. L'entropia in prossimità di **B** sta ancora crescendo, fino al momento del suo *crunch* finale.

Per capire in che modo l'entropia in un «*big crunch*» («privato» o «universale») possa essere enormemente alta, mentre l'entropia nel *big bang* doveva essere molto più bassa, dovremo immergerci un po' più in profondità nella geometria dello spazio-tempo di un buco nero. Prima, però, il lettore dovrebbe dare un'occhiata anche alla figura 7.14, la quale raffigura l'ipotetica inversione temporale di un buco nero, ossia un buco *bianco*. I buchi bianchi probabilmente *non* esistono in natura, ma la loro possibilità teorica avrà un significato considerevole per noi.

La struttura delle singolarità dello spazio-tempo

Ricordiamo dal capitolo 5 (p. 267) che la curvatura dello spazio si manifesta come una sorta di *effetto di marea*. Una superficie sferica composta da particelle in caduta libera nel campo gravitazionale di un qualche corpo di grande massa sarebbe dilatata in una direzione (lungo la verticale diretta verso il corpo gravitante) e compressa nelle direzioni perpendicolari a questa. Questa distorsione di marea aumenta quanto più ci si avvicina al corpo gravitante (figura 7.15), variando in proporzione inversa al cubo della distanza da esso. Un tale effetto di marea crescente sarebbe percepito dall'astronauta **B** nella sua caduta dentro il corpo nero. Per un corpo nero di poche masse solari, questo effetto di marea sarebbe grandissimo: troppo grande

* Facendo quest'osservazione sto adottando due assunti. Il primo è che la possibile sparizione ultima del buco nero — sulla base della sua «evaporazione» (estremamente lenta) per mezzo della radiazione di Hawking, di cui ci occuperemo più avanti (cfr. p. 438) — venga preceduta dal collasso dell'universo; il secondo è un assunto (molto plausibile) noto come «censura cosmica» (p. 281).

perché l'astronauta potesse sopravvivere a un avvicinamento a breve distanza dal buco nero, per non parlare di attraversarne l'orizzonte. Nel caso di buchi neri più grandi, l'entità dell'effetto di marea all'orizzonte degli eventi sarebbe in realtà minore. Per il buco nero di milioni di masse solari che molti astronomi credono possa risiedere al centro della nostra galassia della Via Lattea, l'effetto di marea sarebbe abbastanza piccolo all'attraversamento dell'orizzonte, anche se sarebbe probabilmente abbastanza forte da essere avvertibile come una sensazione di disagio fisico. Questo effetto di marea non rimarrebbe però piccolo per molto tempo durante la caduta dell'astronauta verso l'interno, diventando rapidamente infinito in capo a pochi secondi! Non solo il corpo del povero astronauta sarebbe fatto a pezzi dalla forza di marea rapidamente crescente, ma ciò avverrebbe, in rapida successione, anche per le molecole del suo stesso corpo, per i loro atomi componenti, i loro nuclei e, infine, persino per tutte le particelle subatomiche! È così che il *crunch* opera la suprema distruzione.

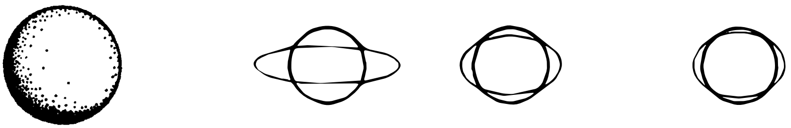

Figura 7.15. L'effetto di marea dovuto a un corpo gravitante di forma sferica è tanto maggiore quanto più il corpo è vicino, in ragione dell'inverso del cubo della distanza dal centro del corpo.

Non solo tutta la materia viene distrutta in questo modo, ma persino lo spazio - tempo trova qui la sua fine! Una tale catastrofe ultima viene designata come una *singolarità spaziotemporale*. Il lettore potrebbe chiedersi come sappiamo che tali catastrofi debbono verificarsi, e in quali circostanze lo spazio-tempo sia destinato a subire questa sorte. Queste sono conclusioni che si deducono dalle equazioni classiche della relatività generale, in ogni circostanza in cui si forma un buco nero. Il modello originario dei buchi neri di Oppenheimer e Snyder (1939) presentava un comportamento di questo genere. Per molti anni, però, gli astrofisici hanno cullato la speranza che questo singolare comportamento fosse una conseguenza accidentale delle speciali simmetrie che si dovevano postulare per tale modello. Forse, in situazioni (asimmetriche) realistiche la materia collassante poteva muoversi in vortici in qualche modo complicati, riuscendo quindi a sfuggire di nuovo verso l'esterno. Queste speranze furono però infrante quando divennero disponibili altri tipi generali di ragionamento matematico, che fornirono i cosiddetti *teoremi della singolarità* (cfr. Penrose, 1965; Hawking e Penrose, 1970). Questi teoremi stabilirono, all'interno della teoria classica della relatività generale, con sorgenti materiali abbastanza grandi, che singolarità spaziotemporali sono *inevitabili* in situazioni di collasso gravitazionale.

Similmente, usando la direzione inversa del tempo, ci appare inevitabile una corrispondente singolarità spaziotemporale *iniziale*, che ora rappresenta il *big bang*, in ogni universo in espansione (in modo appropriato). Qui, anziché rappresentare la *distruzione* ultima di tutta la materia e dello spazio-tempo, la singolarità rappresenta la *creazione* di spazio-tempo e materia. Si potrebbe avere l'impressione che fra questi tipi di singolarità — il tipo *iniziale*, in cui si creano spazio-tempo e materia, e il tipo *finale*, in cui spazio-tempo e materia vengono distrutti — ci sia un'esatta simmetria temporale. Fra queste due situazioni c'è in effetti un'importante analogia, ma quando le esaminiamo nei particolari troviamo che *non* sono esatte inversioni temporali l'una dell'altra. È importante per noi capire le differenze geometriche esistenti fra loro, poiché esse contengono la chiave dell'origine della seconda legge della termodinamica!

Torniamo alle esperienze del nostro astronauta **B** votato al sacrificio di sé. Egli si imbatte in forze di marea che aumentano rapidamente sino ad assumere valori infiniti. Cadendo in uno spazio vuoto, egli sperimenta gli effetti *distorcenti*, pur senza modificazione del volume, prodotti dal tipo di tensore di curvatura dello spazio-tempo noto come tensore di Riemann-Christoffel, che ho denotato con **WEYL** (vedi il capitolo 5, pp. 267, 274). La parte restante del tensore di curvatura dello spazio-tempo, quella che rappresenta una compressione generale ed è nota come tensore di curvatura contratto — da me denotato come **RICCI** — è nulla nello spazio vuoto. Può darsi che in qualche fase **B** si imbatta di fatto in materia, ma anche in questo caso (dopo tutto è costituito lui stesso da materia) noi troviamo in generale che la misura di **WEYL** è molto *maggiore* di quella di **RICCI**. Ci attendiamo di trovare, in effetti, che la curvatura nei pressi di una singolarità *finale* sia dominata completamente dal tensore **WEYL**. Questo tensore, in generale, va all'*infinito*:

$$\mathbf{WEYL} \to \infty,$$

(anche se potrebbe farlo in modo oscillatorio). Pare che questa sia la situazione *generica* nel caso di una singolarità spazio-temporale.[11] Un tale comportamento è associato a una singolarità con *alta entropia.*

La situazione appare del tutto diversa nel caso del *big bang*. I modelli standard del *big bang* sono forniti dai tipi di spazio-tempo altamente simmetrici di Friedmann-Robertson-Walker che abbiamo considerato in precedenza. Ora è del tutto *assente* l'effetto di distorsione di marea fornito dal tensore **WEYL**. C'è invece un'accelerazione simmetrica verso l'interno agente su qualsiasi superficie sferica di particelle test (vedi la figura 5.26). Questo è l'effetto del tensore **RICCI**, piuttosto che del **WEYL**. In qualsiasi modello FRW, vale sempre l'equazione tensoriale

$$\mathbf{WEYL} = 0.$$

Man mano che ci approssimiamo alla singolarità iniziale, troviamo che, anziché **WEYL**, è **RICCI** a diventare infinito, cosicché è **RICCI**, e non **WEYL**, a dominare nei pressi della singolarità iniziale. Abbiamo perciò una singolarità con *bassa entropia.*

Se esaminiamo la singolarità del *big crunch* nei modelli FRW collassanti in modo *esatto*, troviamo ora al *crunch* finale che **WEYL** = 0, mentre **RICCI** va all'infinito. Questa è però una situazione molto speciale e *non* è ciò che ci si attende per un modello pienamente realistico in cui si tenga conto dell'aggregazione gravitazionale. Al passare del tempo il materiale, in origine sotto forma di un gas diffuso, si aggregherà a formare galassie di stelle. A tempo debito un gran numero di queste stelle si contrarrà per effetto della gravitazione in nane bianche, in stelle di neutroni e in buchi neri, e qualche enorme buco nero potrebbe ben essere presente al centro delle galassie. L'ammassamento — specialmente nel caso dei buchi neri — rappresenta un aumento enorme dell'entropia (vedi figura 7.16). Potrebbe essere sconcertante, a tutta prima, che gli stati di aggregazione di materia rappresentino un'*alta* entropia e gli stati di distribuzione uniforme una bassa entropia, se ricordiamo che, nel nostro esempio del gas in una scatola, gli stati di concentrazione (come quando il gas era tutto raccolto in un angolo della scatola) erano stati di *bassa* entropia, mentre lo stato *uniforme* dell'equilibrio termico era uno stato di *alta* entropia. (Quando si tiene conto della gravità si ha un'*inversione* di questo stato di cose, a causa della natura universalmente attrattiva del campo gravitazionale.) La concentrazione diventa sempre più pronunciata col passare del tempo e, alla fine, molti buchi neri si fondono assieme, e le loro singolarità si uniscono nella complicatissima singolarità finale del *big crunch.* La singolarità finale non assomiglia affatto al *big crunch* idealizzato del modello FRW collassante, col suo vincolo **WEYL** = 0. Man mano che si realizzano concentrazioni sempre maggiori, il tensore di Weyl tende a crescere sempre più,[12] e in generale, in ogni singolarità finale, si ha **WEYL** $\rightarrow \infty$. Vedi la figura 7.17 per un'immagine dello spazio-tempo che rappresenta l'intera storia di un universo chiuso in accordo con questa descrizione generale.

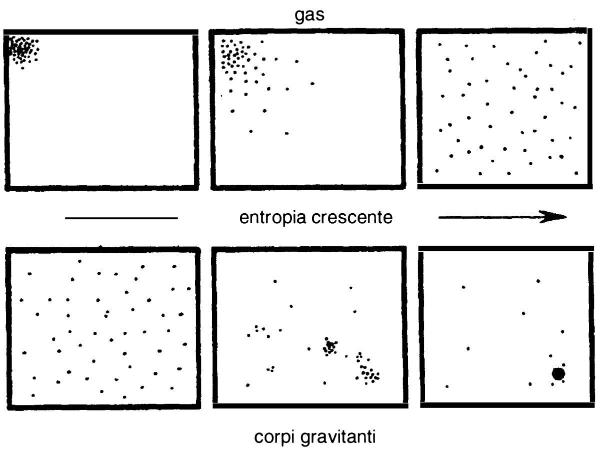

Figura 7.16. Per un gas ordinario l'aumento dell'entropia tende a rendere la distribuzione più uniforme. Per un sistema di corpi gravitanti è vero l'inverso. Un'alta entropia si consegue per mezzo della concentrazione gravitazionale, e, nella misura massima, attraverso il collasso a formare un buco nero.

Ora vediamo come un universo ricollassato possa *non* avere necessariamente una piccola entropia. Il «basso livello» dell'entropia al *big bang* — che ci diede la seconda legge — *non* fu quindi semplicemente una conseguenza delle «piccole dimensioni» dell'universo al tempo del *big bang*! Se dovessimo eseguire un'inversione temporale dell'immagine del *big crunch* che abbiamo ottenuto sopra, otterremmo un *big bang* con un'entropia enormemente *alta*, da cui non potrebbe derivare una seconda legge della termodinamica! Per una qualche ragione, l'universo fu creato in uno stato molto speciale (di

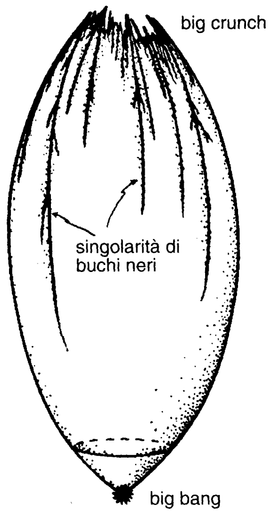

Figura 7.17. L'intera storia di un universo chiuso che comincia la sua esistenza da un *big bang* uniforme a bassa entropia, con **WEYL** = 0, e termina con un *big crunch* ad alta entropia — che rappresenta la fusione di molti buchi neri — con **WEYL** $\to \infty$.

bassa entropia), e gli fu imposto qualcosa di simile al vincolo **WEYL** = 0 dei modelli FRW. Se non fosse stato per un vincolo di questa natura, sarebbe stata «molto più probabile» una situazione in cui *tanto* la singolarità iniziale *quanto* quella finale fossero del tipo ad alta entropia **WEYL** $\to \infty$ (vedi la figura 7.18). In un tale universo «probabile» non ci sarebbe stata, di fatto, una seconda legge della termodinamica!

Quanto fu speciale il big bang?

Cerchiamo di capire quanto sia stata vincolante una condizione come la **WEYL** = 0 al *big bang*. Per semplicità (come nel caso esaminato sopra) supporremo che l'universo sia chiuso. Per poter fare qualche calcolo ben definito supporremo, inoltre, che il numero B dei *barioni* — cioè il numero dei protoni e neutroni presi assieme — nell'universo sia grosso modo

$$B = 10^{80}.$$

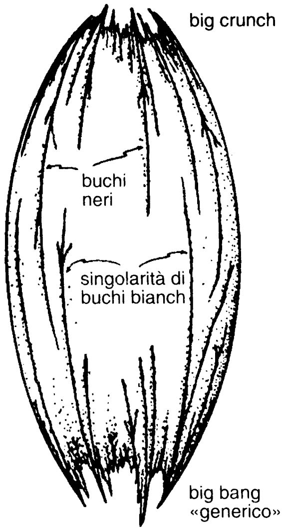

Figura 7.18. Eliminando il vincolo **WEYL** = 0, si potrebbe avere anche un *big bang* ad alta entropia, con **WEYL** → ∞. Un tale universo pullulerebbe di buchi bianchi, e non esisterebbe una seconda legge della termodinamica, in vistosa contraddizione con l'esperienza.

(Non c'è alcuna particolare ragione per adottare questo numero, a parte il fatto che, in base ai dati d'osservazione, B dev'essere *almeno* così grande; una volta Eddington affermò di avere calcolato B esattamente, ottenendo una cifra che era vicina al valore adottato sopra! Oggi nessuno sembra più credere a quel calcolo particolare, ma pare che il valore 10^{80} sia accettato.) Se B fosse *maggiore* di questa cifra (e forse, in realtà, $B = \infty$), otterremmo risultati numerici ancora *più* sorprendenti di quello, straordinario, a cui giungeremo fra un minuto!

Cerchiamo di immaginare lo spazio delle fasi (cfr. pp. 232 sgg.) dell'*intero* universo! Ogni punto in questo spazio delle fasi rappresenta un diverso modo possibile in cui l'universo avrebbe potuto iniziare la sua esistenza. Dobbiamo immaginare il Creatore che, armato di uno «spillo», si accinge a situarlo in qualche punto nello spazio delle fasi (figura 7.19). A ogni diversa posizione dello spillo corrisponde un universo differente. Ora, la precisione che si richiede alla mira del creatore dipende dall'entropia dell'universo che dev'essere creato. Sarebbe relativamente «facile» produrre un universo ad alta entropia, giacché in questo caso ci sarebbe un grande spazio disponibile in cui piantare lo spillo. (Ricordiamo che l'entropia è proporzionale al logaritmo del volume dello spazio delle fasi interessato.) Ma per dare origine all'universo in uno stato di bassa entropia — in modo che possa esistere in effetti una seconda legge della termodinamica — il Creatore deve mirare a un volume dello spazio delle fasi molto più piccolo. Quanto dovrebbe essere piccola questa regione per risultarne un universo molto simile a quello in cui noi ci troviamo a vivere? Per rispondere a questa domanda dobbiamo considerare innanzitutto una formula notevolissima, dovuta a Jacob Bekenstein (1972) e a Stephen Hawking (1975), la quale ci dice quale debba essere l'entropia di un *buco nero.*

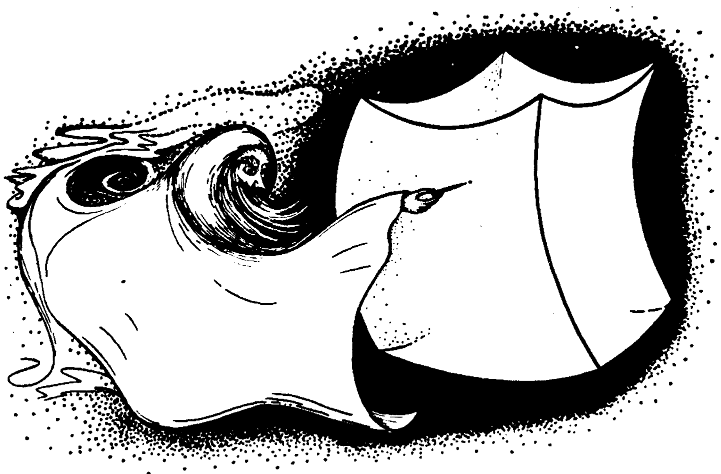

Figura 7.19. Per produrre un universo simile a quello in cui viviamo, il Creatore avrebbe dovuto mirare a un volume assurdamente piccolo dello spazio delle fasi degli universi possibili: circa $1/10^{10^{123}}$ dell'intero volume per la situazione considerata. (Lo spillo, e il punto a cui mira il Creatore, non sono disegnati in scala!)

Consideriamo un buco nero, e supponiamo che la superficie del suo orizzonte degli eventi abbia l'area *A*. La formula di Bekenstein-Hawking per l'entropia del buco nero è allora:

$$S_{bh} = \frac{a}{4} \cdot \left(\frac{kc^3}{G\hbar} \right),$$

dove k è la costante di Boltzmann, c la velocità della luce, G la costante gravitazionale di Newton e $\hbar$ la costante di Planck divisa per 2π. La parte essenziale di questa formula è $A/4$. La parte fra parentesi è formata semplicemente dalle costanti fisiche appropriate. Così l'entropia di un buco nero è proporzionale all'area della sua superficie. Per un buco nero sfericamente simmetrico, l'area della superficie risulta essere proporzionale al quadrato della massa del buco nero:

$$A = m^2 \times 8\pi(G^2/c^4).$$

Combinando questa formula con quella di Bekenstein-Hawking, troviamo che l'entropia di un buco nero è proporzionale al quadrato della sua massa:

$$S_{bh} = m^2 \times 2\pi(kG/\hbar).$$

Così l'*entropia per massa unitaria* (S_{bh}/m) di un buco nero è proporzionale alla sua massa, e cresce quindi sempre più per buchi neri sempre maggiori. Perciò, per una data quantità di massa, o — cosa equivalente, per la formula di Einstein $E = mc^2$ — per una data quantità di *energia*, si consegue la massima entropia quando il materiale è collassato tutto in un buco nero! Inoltre, due buchi neri guadagnano (enormemente) in entropia quando si inghiottono reciprocamente producendo un singolo buco nero! I grandi buchi neri, come quelli che si trovano probabilmente nel centro di galassie, forniranno quantità assolutamente straordinarie di entropia, di gran lunga maggiori rispetto a ogni altro genere di entropia in cui ci si può imbattere in altri tipi di situazione fisica.

In realtà occorre aggiungere una breve precisazione all'affermazione che si consegue la massima entropia quando tutta la massa è concentrata in un buco nero. L'analisi compiuta da Hawking della termodinamica dei buchi neri mostra che a un buco nero dovrebbe essere associata anche una *temperatura* non nulla. Un'implicazione di questo fatto è che non tutta la massa-energia può essere contenuta all'interno del buco nero, nel massimo stato di entropia; l'entropia massima viene infatti conseguita da un buco nero in equilibrio con un «bagno termico di radiazione». La temperatura di questa radiazione è in realtà molto piccola per un buco nero di qualsiasi grandezza ragionevole. Per esempio, per un buco nero di una massa solare, questa temperatura sarebbe di circa 10^{-7} K, la quale è un po' minore della temperatura più bassa che sia stata misurata fino a oggi in qualsiasi laboratorio, e considerevolmente minore della temperatura di 2,7 K dello spazio intergalattico. Per buchi neri più grandi, la temperatura di Hawking è ancora minore!

La temperatura di Hawking diventerebbe significativa per la nostra discussione solo se: *a*) potessero esistere nel nostro universo buchi neri molto più piccoli, chiamati *mini-buchi neri*; o *b*) se l'universo non subisce il collasso gravitazionale prima del *tempo di evaporazione di Hawking*: il tempo in cui il buco nero evaporerebbe completamente. Per quanto concerne *a*), potrebbero prodursi mini-buchi neri solo in un *big bang* opportunamente caotico. Tali mini-buchi neri non possono essere molto numerosi nel nostro universo reale, altrimenti i loro effetti sarebbero già stati osservati; inoltre, secondo il punto di vista che sto esponendo qui, dovrebbero essere del tutto assenti. Quanto a *b*), per un buco nero di massa solare il tempo di evaporazione di Hawking dovrebbe essere circa 10^{54} volte l'età attuale dell'universo, e per buchi neri più grandi dovrebbe essere considerevolmente maggiore. Non pare che questi effetti dovrebbero modificare sostanzialmente le argomentazioni esposte sopra.

Per farsi un'idea dell'immensità dell'entropia di un buco nero, consideriamo ciò che in precedenza si pensava fornisse il massimo contributo all'entropia dell'universo, ossia la radiazione di fondo del corpo nero di 2,7 K. Gli astrofisici erano stati colpiti dalle quantità enormi di entropia contenute in questa radiazione, le quali sono immensamente superiori ai valori di entropia ordinari in cui ci si imbatte in altri processi (per esempio nel Sole). L'entropia della radiazione di fondo è prossima a 10^8 per ogni barione (dove sto scegliendo «unità naturali», in modo che la costante di Boltzmann sia unitaria). (Ciò significa in effetti che nella radiazione di fondo ci sono 10^8 fotoni per ogni barione.) Così, esistendo 10^{80} barioni in tutto, dovremmo avere un'entropia totale di

$$10^{88}$$

per l'entropia nella radiazione di fondo nell'universo.

In effetti, se non fosse per i buchi neri, questo valore rappresenterebbe l'entropia *totale* dell'universo, giacché l'entropia nella radiazione di fondo è così grande da rendere irrilevante quella presente in tutti gli altri processi. L'entropia per barione nel Sole, per esempio, è dell'ordine dell'unità. D'altro canto, al livello dei *buchi neri*, l'entropia della radiazione di fondo è del tutto irrilevante. La formula di Bekenstein-Hawking ci dice infatti che l'entropia per barione, in un buco nero di massa solare, è di circa 10^{20}, in unità naturali, cosicché, se l'universo fosse formato esclusivamente di buchi neri di massa totale, il valore totale dell'entropia sarebbe stato molto maggiore di quello dato sopra, ossia di

$$10^{100}.$$

Ovviamente l'universo non è costruito in questo modo, ma questa cifra comincia a dirci quanto debba essere considerata «piccola» l'entropia nella radiazione di fondo quando si cominciano a prendere in considerazione gli effetti incessanti della gravità.

Tentiamo di essere un po' più realistici. Anziché popolare per intero le nostre galassie di buchi neri, immaginiamo che siano formate principalmente da stelle comuni — circa 10^{11} ciascuna — e che ogni galassia abbia al suo centro un buco nero di un milione (10^6) di masse solari (come potrebbe essere ragionevole per la nostra galassia della Via Lattea). I calcoli dimostrano che l'entropia per barione sarebbe ora effettivamente un po' maggiore del valore precedente, già immenso; ora avremmo cioè 10^{21}, per un valore totale dell'entropia, in unità naturali, di

$$10^{101}.$$

Possiamo prevedere che, dopo un tempo molto lungo, una frazione importante delle galassie sarà stata inghiottita dai buchi neri al loro centro. Quando ciò sarà accaduto, l'entropia per barione sarà di 10^{31}, e avremo un totale mostruoso di

$$10^{111}.$$

Noi stiamo però considerando un universo chiuso, destinato perciò infine a collassare nel *big crunch*; e non è irragionevole stimare l'entropia del *crunch* finale usando la formula di Bekenstein-Hawking, come se l'intero universo avesse formato un buco nero. Otterremmo in questo caso un'entropia per barione di 10^{43}, e il totale assolutamente prodigioso per il *big crunch* totale sarebbe di

$$10^{123}.$$

Questa cifra ci darebbe una stima del volume totale **V** dello spazio delle fasi disponibile al Creatore, giacché quest'entropia rappresenterebbe il logaritmo del volume della parte (di gran lunga) maggiore. Poiché 10^{123} è il *logaritmo* del volume, il volume dev'essere l'*esponenziale* di 10^{123}, ossia

$$\mathbf{V} = 10^{10^{123}},$$

in unità naturali! (Alcuni attenti lettori potrebbero pensare che avrei dovuto usare invece la cifra $e^{10^{123}}$, ma per numeri di questa grandezza la e e il 10 sono sostanzialmente intercambiabili!) Quant'era grande il volume originario dello spazio delle fasi **W** che il Creatore doveva avere in mente per fornire un universo compatibile con la seconda legge della termodinamica e con quello che osserviamo oggi? Non importa molto se scegliamo il valore

$$\mathbf{W} = 10^{10^{101}} \quad \text{o} \quad \mathbf{W} = 10^{10^{88}},$$

dato, rispettivamente, dai buchi neri galattici o dalla radiazione di fondo a microonde, o un valore molto più piccolo (e di fatto più appropriato), che dev'essere stato il valore *reale* al *big bang*. Nell'un modo come nell'altro, il rapporto di **V** a **W** sarà molto prossimo a

$$\mathbf{V}/\mathbf{W} = 10^{10^{123}}.$$

(Prova a verificare: $10^{10^{123}} : 10^{10^{101}} = 10^{(10^{123} - 10^{101})} = 10^{10^{123}}$, ossia una quantità così prossima a $10^{10^{123}}$ da non poterla esprimere con un valore numerico diverso.)

Questo fatto ci dice ora quanto debba essere stato esatto il calcolo del Creatore: un calcolo con una precisione di

$$\text{una parte su } 10^{10^{123}}.$$

È una quantità straordinaria. Non si potrebbe neppure *scrivere il numero* per esteso nella comune notazione decimale: sarebbe infatti un «1» seguito da 10^{123} «0»! Anche se potessimo scrivere uno «0» su ciascun protone e su ciascun neutrone separati nel nostro universo — e per buona misura potremmo prendere anche tutte le altre particelle — resteremmo ben lontani dal potere scrivere la cifra richiesta. La precisione necessaria per mettere l'universo sul suo corso risulta non essere quindi in alcun modo inferiore a tutta la straordinaria precisione a cui siamo già abituati nelle superbe equazioni dinamiche (di Newton, di Maxwell e di Einstein) che governano ogni momento il comportamento di tutte le cose.

Ma *perché* il *big bang* fu organizzato con tanta precisione, mentre ci si deve attendere che il *big crunch* (o le singolarità nei buchi neri) siano totalmente caotici? Pare che questo interrogativo possa essere formulato nei termini del comportamento della parte di **WEYL** della curvatura dello spazio-tempo in singolarità spaziotemporali. Quel che sembra dobbiamo trovare è che in singolarità spaziotemporali *iniziali* — ma non in singolarità finali — c'è un vincolo

$$\mathbf{WEYL} = 0$$

(o qualcosa di molto simile) e questo fatto sembra essere ciò che confina la scelta del Creatore a questa piccolissima regione dello spazio delle fasi. Ho chiamato *ipotesi della curvatura di Weyl* l'assunto che questo vincolo si applichi a ogni singolarità spaziotemporale iniziale (ma non finale). Così, a quanto pare, abbiamo bisogno di capire perché debba applicarsi l'ipotesi di una tale asimmetria temporale per dover comprendere quale sia l'origine della seconda legge.[13]

Come possiamo conseguire una comprensione più avanzata dell'origine della seconda legge? Pare che siamo venuti a trovarci in un vicolo cieco. Abbiamo bisogno di capire perché le *singolarità spaziotemporali* abbiano le strutture che sembrano avere; ma le singolarità spaziotemporali sono regioni in cui la nostra comprensione della fisica ha raggiunto i suoi limiti. L'impasse costituita dall'esistenza di singolarità spaziotemporali viene talvolta paragonata a un'altra impasse: quella in cui si trovarono i fisici dell'inizio del Novecento in relazione alla stabilità degli atomi. In ciascun caso, la teoria classica ben stabilita si era imbattuta nella soluzione «infinito», e si era in tal modo dimostrata inadeguata al suo compito. Il singolare comportamento del collasso elettromagnetico degli atomi fu scongiurato dalla teoria *quantistica*; e similmente dovrebbe essere la teoria quantistica a fornire una teoria finita in luogo delle singolarità spaziotemporali «infinite» della teoria classica nel collasso gravitazionale di stelle. Ma non potrà essere una teoria quantistica ordinaria. Dovrà essere una teoria quantistica della struttura stessa dello spazio-tempo. Una tale teoria, se esistesse, dovrebbe chiamarsi «*gravità quantistica*». L'inesistenza, a tutt'oggi, di una tale teoria non è dovuta all'assenza di sforzi, di perizia o di ingegnosità da parte dei fisici. Molti scienziati di primo rango si sono applicati alla costruzione di una tale teoria, ma senza successo. Questo è il vicolo cieco in cui siamo infine venuti a trovarci nei nostri tentativi di comprendere la direzionalità e il flusso del tempo.

Il lettore potrà chiedersi a questo punto che cosa abbiamo ricavato da questo viaggio. Nel nostro tentativo di capire perché il tempo sembri scorrere solo in una direzione e non nell'altra, abbiamo dovuto viaggiare sino agli estremi stessi del tempo, là dove si sono dissolte persino le nozioni di spazio. Che cosa abbiamo imparato da tutto questo? Abbiamo imparato che le nostre teorie non sono ancora adeguate a fornirci risposte, ma di quale utilità è questa conclusione nei nostri tentativi di capire la mente? Nonostante la mancanza di una teoria adeguata, io credo che ci siano lezioni importanti che possiamo imparare dal nostro viaggio. A questo punto dobbiamo invertire il cammino per tornare a casa. Il nostro viaggio di ritorno sarà più speculativo di quello di andata ma, secondo me, non c'è altra via ragionevole per tornare indietro!