

## La concezione dello spazio da Newton a Einstein

Isaac Newton (nato nel 1642 nel Lincolnshire, in Inghilterra) cambiò per sempre il modo di fare scienza introducendovi una massiccia dose di matematica, al servizio della ricerca fisica. L'ingegno di Newton era straordinario: quando si accorse che la matematica di cui aveva bisogno per certe sue ricerche non esisteva ancora, se la inventò da solo. Per trovare un altro genio del suo calibro sarebbero dovuti passare quasi tre secoli. Tra tutte le grandi intuizioni di Newton ci concentreremo qui sulla sua teoria della gravitazione universale.

La forza di gravità pervade il nostro mondo quotidiano. Ci tiene ancorati alla superficie terrestre, impedisce che l'aria che respiriamo si perda nello spazio, tiene la Luna in orbita attorno alla Terra e la Terra attorno al Sole. La gravità dà il ritmo alla danza cosmica che milioni e milioni di corpi, dagli asteroidi alle galassie, eseguono senza posa. Ormai diamo per scontato che la gravità sia la sola responsabile di un gran numero di eventi terrestri ed extraterrestri. Ma prima delle scoperte di Newton nessuno immaginava che la forza che fa cadere una mela a terra fosse la stessa che tiene i pianeti in orbita attorno al Sole. Con un'audacia senza pari, Newton riunì la fisica terrestre e quella celeste, proclamando che la forza di gravità era la sola e unica mano invisibile al lavoro nei due regni.

La visione classica della gravità è una grande livellatrice: per Newton *tutto* esercita un'attrazione gravitazionale su *tutto quanto*. Indipendentemente dalla composizione fisica, ogni corpo esercita la forza di gravità e ne è a sua volta soggetto. Newton, studiando attentamente le ricerche di Keplero sui moti planetari, si accorse che la forza di attrazione tra due corpi dipendeva *esattamente* da due fattori: la quantità di materia che li componeva e la loro distanza. La «quantità di materia», che comprende protoni, elettroni e così via, si traduce nel concetto di *massa*. Secondo la teoria della gravitazione newtoniana la forza attrattiva tra due corpi è proporzionale alle loro masse, e decresce al crescere della loro distanza.

Questa affermazione fu precisata quantitativamente da Newton tramite una celebre equazione. Detta a parole, la forza gravitazionale è direttamente proporzionale al prodotto delle masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza (si intende di due corpi). Da questa legge di gravità si possono dedurre i moti dei pianeti e delle comete attorno al Sole, della Luna attorno alla Terra e dei razzi interplanetari, così come le traiettorie di una palla lanciata in aria o di un atleta che si tuffa dal trampolino. L'accordo tra le previsioni della teoria e i dati sperimentali è straordinario, il che ha fatto trionfare la teoria newtoniana per secoli, fino agli inizi del Novecento. La scoperta della relatività ristretta, però, innalzò ostacoli che la vecchia teoria non sarebbe stata in grado di superare.

*La gravità newtoniana non si accorda con la relatività ristretta.*

L'esistenza del limite posto dalla velocità della luce è una caratteristica fondamentale della relatività ristretta. E' importante ricordare che questa limitazione vale non solo per gli oggetti materiali, ma anche per segnali e influssi di varia natura: non c'è modo di comunicare informazioni o perturbazioni da un punto a un altro a velocità superiori a quella della luce.

Naturalmente, abbondano casi di trasmissioni più *lente* della luce: il suono, ad esempio, viaggia nell'aria secca a 331 m/sec, cioè circa 1190 km/h, assai meno dei 300000 della luce. Questa differenza si può apprezzare durante i temporali: lampi e tuoni si producono simultaneamente, ma il segnale luminoso arriva prima di quello sonoro - diretta conseguenza della discrepanza di velocità. La relatività ristretta ci dice che l'inverso non è possibile: non vedremo mai un segnale giungerci prima della luce che emette. Nessuno batte i fotoni in corsa.

Ecco il problema. Nella teoria newtoniana, la forza gravitazionale esercitata da un corpo su un altro dipende solo dalle masse e dalla distanza, e non ha nulla a che fare con il tempo per cui i due oggetti sono stati in presenza l'uno dell'altro. Questo significa che se cambiasse qualcosa nelle masse o nella distanza, i corpi sentirebbero *istantaneamente* un mutamento della forza gravitazionale. Ad esempio, se il Sole esplodesse improvvisamente, la Terra - situata a circa 144 milioni di chilometri - sarebbe immediatamente scaraventata via dalla sua orbita ellittica. Anche se la luce prodotta

dall'esplosione impiegherebbe 8 minuti per giungere a noi, nella teoria newtoniana si sostiene che la «conoscenza» dell'evento si trasmetterebbe istantaneamente alla Terra, tramite un cambiamento nella forza gravitazionale.

Questo è incompatibile con la relatività ristretta, che sostiene invece che nessun tipo di informazione può viaggiare più veloce della luce: la contemporaneità newtoniana è una drastica violazione di questo principio.

Agli albori del Novecento, Einstein si rese conto, dunque, che la sua teoria non si accordava con la riverita e sperimentalmente solida gravitazione newtoniana. Sicuro della verità delle sue scoperte, si mise alla ricerca di una nuova teoria della gravità che fosse compatibile con la relatività ristretta. Questo lo portò a inventare la relatività generale, che portò ad altri straordinari cambiamenti nel modo di intendere spazio e tempo.

### *L'idea più felice di Einstein.*

Anche prima dell'arrivo della relatività ristretta, la teoria di Newton presentava una falla importante. Anche se può essere usata per prevedere in modo assai accurato i moti dei corpi sotto l'influsso della gravità, non ci dice nulla sulla *natura* di questa forza. Come è possibile che due oggetti separati da milioni di chilometri sentano comunque la presenza l'uno dell'altro? Come fa la gravità a portare a termine questo compito? Newton stesso era consapevole del problema:

È inconcepibile che la materia bruta e inanimata possa (senza la mediazione di qualcosa di immateriale) agire e influire su altra materia senza reciproco contatto. [...] Che la gravità sia qualcosa di innato, di inerente ed essenziale alla materia, sì che un corpo possa agire a distanza su di un altro attraverso il vuoto, senza la mediazione di qualche altra cosa in virtù della quale, e per mezzo della quale, l'azione a distanza o la forza possa essere trasportata da un corpo all'altro, è per me un'assurdità così grande da farmi credere che nessun uomo il quale abbia una reale consapevolezza nelle materie filosofiche possa mai farla propria. La gravità deve necessariamente essere causata da un agente il quale agisca in modo costante secondo certe leggi; ma se questo agente sia materiale o immateriale è questione che lascio decidere ai lettori.

Newton quindi, accettata l'esistenza della gravità, si mise a scrivere le equazioni che ne descrivono accuratamente gli effetti, ma non si prese mai la briga di spiegare il suo effettivo funzionamento. Il suo non era che un «manuale di istruzioni» per l'uso della gravità - un manuale che fisici, astronomi e ingegneri hanno comunque utilizzato con successo per spedire razzi sulla Luna, su Marte e vicino agli altri pianeti, per prevedere le eclissi, per calcolare i moti delle comete e così via. Ma la gravità stessa era una «scatola nera», il cui meccanismo interno rimaneva un mistero. Certo, fino a quando siamo in grado di utilizzare uno strumento non dobbiamo preoccuparci di sapere come funziona; ma se il nostro lettore di CD o il nostro computer si rompono, allora diventa fondamentale sapere cosa c'è dentro per poterlo riparare. Einstein scoprì grazie alla relatività ristretta che la gravitazione newtoniana, nonostante molti secoli di conferme sperimentali, era «rotta» in modo molto subdolo, e che per ripararla bisognava affrontare la questione della vera natura della gravità.

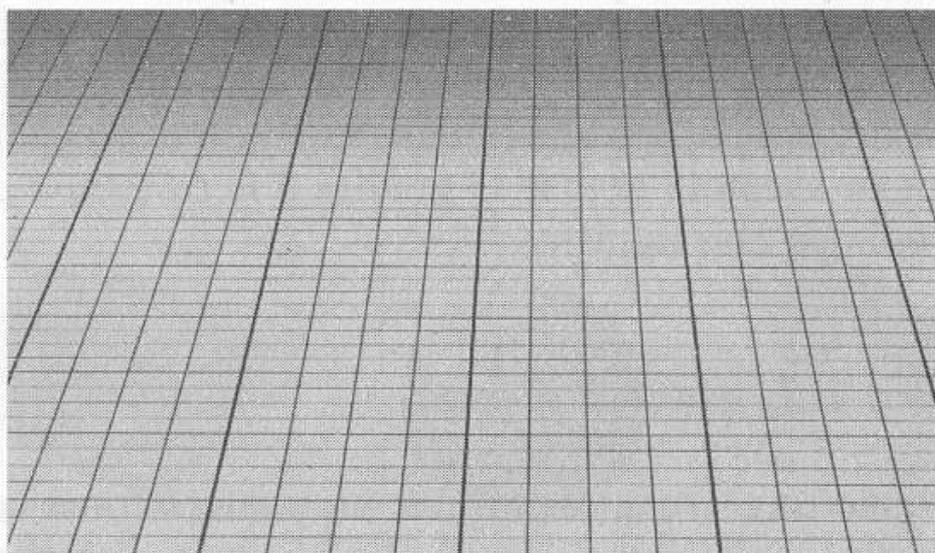
Nel 1907, mentre rimuginava su questi problemi all'ufficio brevetti di Berna, Einstein ebbe un'intuizione fondamentale, che tra alti e bassi l'avrebbe condotto a una nuova teoria: una teoria che non solo avrebbe colmato i buchi di quella newtoniana, ma anche riformulato l'idea stessa di gravità, in modo perfettamente compatibile con la relatività ristretta. [...]

### *I fondamenti della relatività generale.*

Consideriamo una situazione tipica: un pianeta come la Terra in orbita attorno a una stella come il Sole. Per Newton, la stella tiene il pianeta in orbita grazie a un non ben identificato «guinzaglio» gravitazionale, che istantaneamente si propaga a grandi distanze e afferra il pianeta (e viceversa per il laccio che dal pianeta afferra la stella). Secondo Einstein le cose sono diverse. Ci aiuterà a capire la sua teoria un modello visivo e concreto dello spaziotempo che andremo a deformare. Facciamo due semplificazioni: ignoriamo per il momento il tempo e immaginiamo che le dimensioni spaziali siano due e non tre (per semplificare i disegni). Questo è un efficace artificio pedagogico, perché gran parte di ciò che diremo riguardo a questo modello semplificato è applicabile direttamente all'universo reale.

Nella figura 3.3 facciamo tesoro di queste semplificazioni, e rappresentiamo una porzione bidimensionale dell'universo. La griglia che vi abbiamo disegnato è un modo efficace per specificare le posizioni degli oggetti, come la rete stradale in una città come New York. Certo, nel mondo reale, oltre a dire all'incrocio di quali vie ci troviamo dovremmo anche specificare il piano, cioè la dimensione verticale; ma qui, ripetiamo, non ne teniamo conto.

In assenza di materia ed energia, lo spazio per Einstein è *piatto*. Nel nostro caso, questo è proprio quanto accade nella figura 3.3. Per millenni l'uomo si è raffigurato l'universo in questo modo. Ma che accade in presenza di un oggetto massiccio come il Sole? Prima di Einstein la risposta era semplice: non succede niente, perché lo spazio (e il tempo) non sono che il palcoscenico inerte su cui gli eventi accadono. Quanto abbiamo visto fin qui, seguendo il ragionamento di Einstein, ci porta a conclusioni diverse.

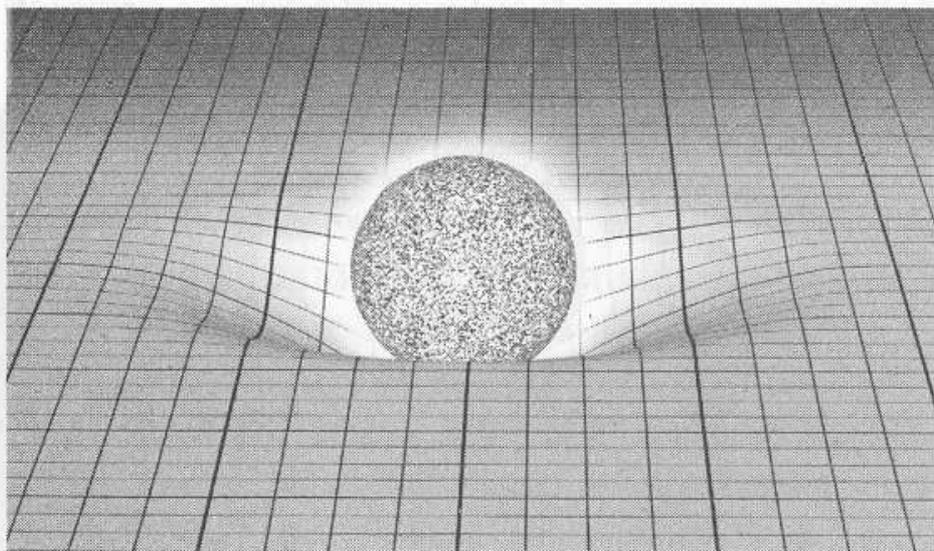


*Fig. 3.3 Rappresentazione schematica dello spazio piatto*

Ogni corpo esercita un'attrazione gravitazionale sugli altri. [...] possiamo ipotizzare con Einstein che la presenza di un oggetto massiccio come il Sole *deforma* la struttura dello spazio circostante, come è chiaro nella figura 3.4; secondo un'analogia utile (e assai sfruttata), lo spazio è come una membrana di gomma su cui venga posata una palla pesante. Questa proposta rivoluzionaria ci dice che lo spazio non è una scenografia passiva nell'universo, ma che esso si modifica a seconda della

presenza degli oggetti sulla scena.

Questo incurvamento produce un effetto sugli oggetti che si trovano nelle vicinanze del corpo massiccio, visto che ora devono percorrere uno spazio modificato. Tornando all'idea della membrana di gomma, se prendiamo una palla più piccola e la lasciamo andare con una certa velocità iniziale, il percorso che questa seguirà dipende dalla presenza o meno della palla grossa al centro. Se non c'è e lo spazio è piatto, la pallina seguirà una linea retta; se c'è e lo spazio è incurvato, seguirà una traiettoria curvilinea. Ignorando l'attrito, se diamo alla pallina la velocità iniziale e la direzione opportuna, questa continuerà a muoversi lungo una curva chiusa attorno alla palla, cioè «entrerà in orbita». Già prevediamo cosa accade se abbandoniamo la gomma e torniamo nello spazio.



*Fig. 3.4 un corpo massiccio come il sole incurva la trama dello spazio, agendo quasi come una palla pesante posta su un pezzo di gomma.*

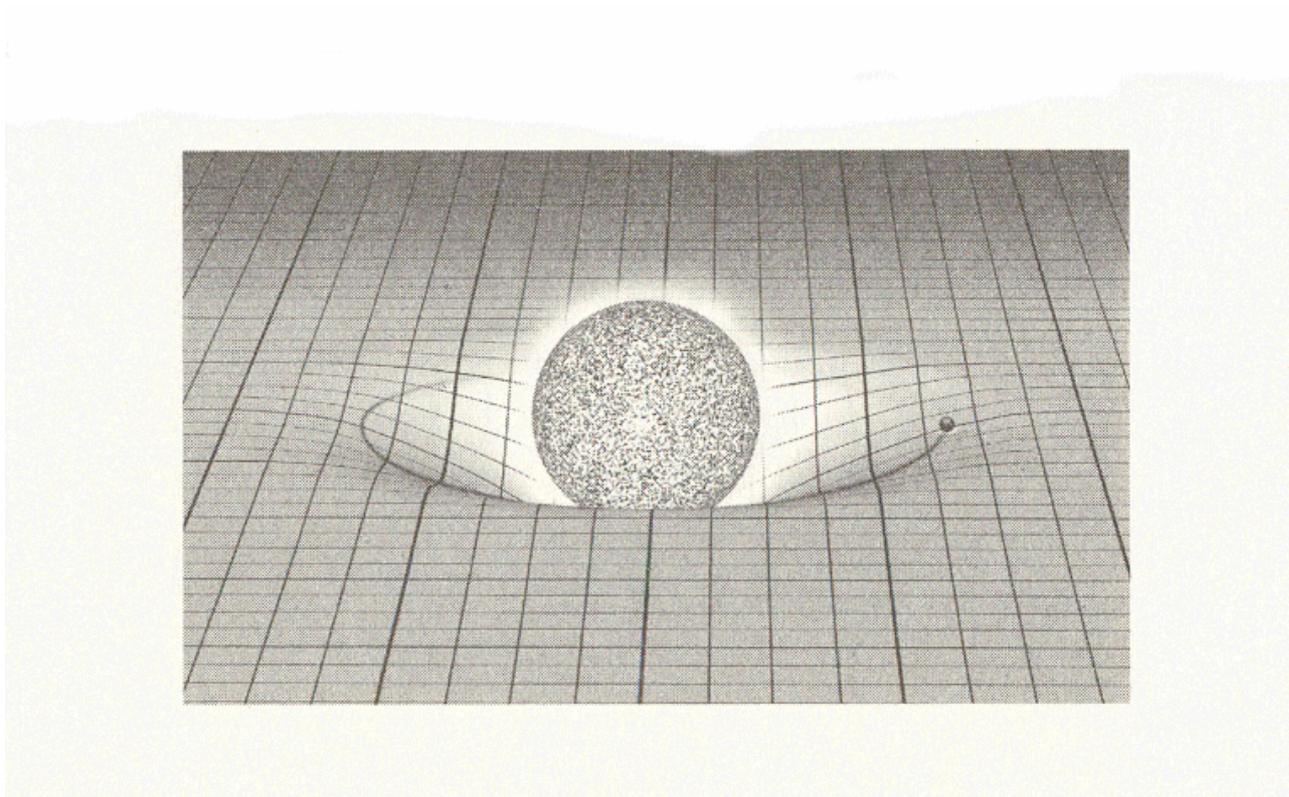
Il Sole, come la palla grande, curva la struttura spaziale della regione che lo circonda, e il moto della Terra, come quello della pallina, è determinato dal tipo di curvatura. Se la velocità e la posizione sono opportune, il pianeta orbiterà attorno alla stella. Questo risultato, descritto nella figura 3.5, non è che il consueto effetto dell'attrazione del Sole sulla Terra. Ma, al contrario di Newton, Einstein è riuscito a mostrare il *meccanismo* grazie al quale la gravità si trasmette: la curvatura dello spazio. Il guinzaglio gravitazionale che lega la stella e il pianeta non è dovuto a una qualche misteriosa azione a distanza, ma alle modifiche nella trama dello spazio dovute alla presenza della stella.

Questo quadro concettuale getta nuova luce sulle due proprietà caratteristiche della gravità. In primo luogo, più il corpo è pesante, maggiore sarà la distorsione spaziale da lui causata; e questo è in accordo con la legge di gravità, secondo cui la forza è direttamente proporzionale alla massa. Secondariamente, la distorsione diminuisce se ci allontaniamo dal corpo che l'ha causata; di nuovo, c'è accordo con la legge secondo cui la forza è inversamente proporzionale alla distanza.

È importante notare che anche il corpo più piccolo nei sistemi che abbiamo visto (Sole-Terra) deforma lo spazio, anche se molto meno di quello più massiccio. Ecco come, ad esempio, la Terra mantiene la Luna in orbita, e come ci mantiene ben saldi sulla sua superficie. Un paracadutista in caduta libera sta in realtà «scivolando» all'interno di una depressione dello spazio causata dalla massa del pianeta. Anche

noi, a nostra volta - come tutti i corpi dotati di massa - incurviamo lo spazio intorno a noi, ma la nostra azione è quasi impercettibile.

Concludendo, Einstein era perfettamente d'accordo con Newton sul fatto che «la gravità deve necessariamente essere causata da un agente», e accettò la sfida lanciata da quest'ultimo a proposito della natura sua «materiale o immateriale». L'agente della gravità, per Einstein, è la trama stessa del cosmo.



*Fig. 3.5 La Terra orbita attorno al Sole “rotolando” in un avvallamento dello spazio causato da quest’ultimo. Più precisamente, il nostro pianeta segue una traiettoria di “minima energia” nella regione di distorsione intorno al sole.*

#### *Qualche avvertenza per l'uso.*

L'analogia con la membrana di gomma è utile perché ci fornisce un'immagine visiva e tangibile di ciò che si intende per una curva, una increspatura nella trama spaziale dell'universo. Gli scienziati fanno spesso uso di questi artifici per guidare la loro intuizione riguardo ai concetti di gravità e curvatura. Ciò nonostante, l'analogia non è perfetta, ed è bene soffermarsi su qualche suo difetto.

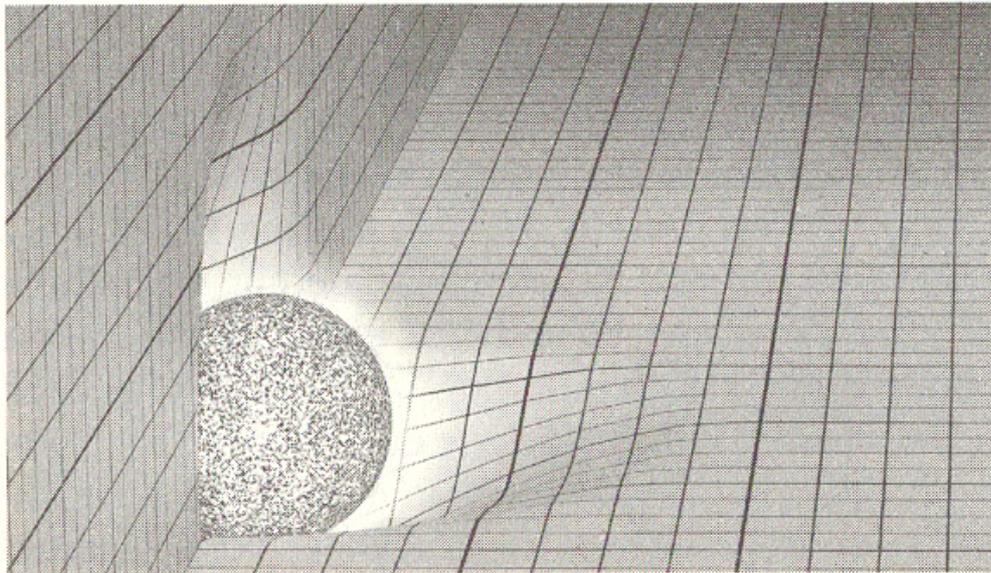
Innanzitutto, quando il Sole incurva lo spazio attorno a sé non è «tirato in basso» dalla gravità come la palla sulla membrana; nello spazio non c'è nulla che possa «tirare». Ciò che Einstein ci ha insegnato è che questa curvatura non è *causata* dalla gravità, ma è la gravità. Similmente, la Terra non resta in orbita perché una qualche spinta gravitazionale esterna la guida lungo gli avvallamenti dello spazio. La sua traiettoria, invece, è determinata da questo: Einstein ha mostrato che i corpi si muovono nello spaziotempo lungo i percorsi «più facili possibili», cioè quelli che rendono minima l'energia spesa. In uno spazio curvo, anche le traiettorie minimali sono incurvate. Quindi, la membrana di gomma ci fornisce una buona rappresentazione visiva di cosa succede quando lo spazio è distorto da una massa, ma è fuorviante per quel che riguarda i meccanismi fisici di queste distorsioni. Il modello ci spinge a considerazioni newtoniane tradizionali (la gravità che «tira»), mentre nella realtà dobbiamo riformulare la gravità in termini nuovi, di curvatura dello spazio.

La membrana, poi, è bidimensionale. Anche se è difficile immaginarselo, nella realtà i corpi massicci incurvano tutto lo spazio tridimensionale attorno a loro. Nella figura 3.6 tentiamo di mostrare questo fatto in modo approssimato: in realtà *tutto* lo spazio attorno al Sole è deformato, e la figura non ne mostra

che una piccola parte. Un corpo come la Terra viaggia *nello* spazio tridimensionale curvato dal Sole. Questo può sembrarvi strano: come fa la Terra a non sbattere contro il muro «verticale» della figura? Abbandoniamo l'idea della membrana: lo spazio non è una barriera solida. Le griglie disegnate in figura non sono che due fette sottili dello spazio in cui tutto è immerso ed è libero di muoversi. Forse questa risposta non vi fa sentire meglio: perché non riusciamo a *sentire* lo spazio? Ma in realtà lo sentiamo: ci accorgiamo della gravità, e lo spazio è il mezzo che trasmette la forza gravitazionale. Come ama ripetere il grande fisico John Wheeler, «la massa tiene in pugno lo spazio dicendogli come curvarsi, lo spazio tiene in pugno la massa dicendole come muoversi»<sup>8</sup>.

Un'altra debolezza dell'analogia è la soppressione del tempo. L'abbiamo fatto per amore di chiarezza, perché nonostante quello che ci dice la relatività ristretta sull'equivalenza tra le dimensioni spaziali e quella temporale, il tempo è molto più difficile da «vedere». Ma [...] l'accelerazione - e dunque la gravità - curva sia lo spazio sia il tempo. (Anzi, le equazioni della relatività generale mostrano che nel caso di corpi relativamente lenti, come la Terra in orbita attorno al Sole, la curvatura temporale è molto più importante di quella spaziale). [...]

Con queste tre avvertenze assai importanti, che è bene tenere a mente, possiamo comunque tranquillamente pensare al modello della membrana di gomma come a un'accettabile rappresentazione intuitiva della teoria di Einstein.



*Figura 3.6 Un campione dello spazio tridimensionale intorno al sole.*

*Il conflitto è risolto.*

Einstein riuscì dunque a spiegare come funziona la gravità. Ci poniamo ora una domanda fondamentale: la riformulazione einsteiniana risolve le incompatibilità con la relatività ristretta che affliggono la teoria newtoniana? La risposta è affermativa. Ritorniamo al nostro modello della membrana di gomma. Immaginiamo di avere una pallina che rotola in linea retta sulla superficie, in assenza di altre palle. Nel momento in cui mettiamo la palla, questa azione influenza sì il moto della pallina, ma non *istantaneamente*: se filmassimo la sequenza degli eventi per rivedere il tutto al rallentatore ci accorgeremmo che la perturbazione provocata dalla massa grande si propaga come le

increspature sulla superficie di un lago, per poi raggiungere la pallina dopo un certo tempo. Dopo qualche istante le oscillazioni transitorie legate a questa perturbazione cessano, e la membrana rimane incurvata e statica.

Lo stesso accade nel cosmo. In assenza di masse lo spazio è piatto e un corpo di piccola massa può starsene felicemente fermo o viaggiare a velocità costante. Se un oggetto massiccio irrompe sulla scena lo spazio si altera, ma, come nel caso della membrana, la distorsione non è istantanea: si propagherà a partire dal nuovo corpo fino a stabilizzarsi in una curvatura spaziale che trasmette l'attrazione gravitazionale. Nel nostro modellino le increspature viaggiano a una certa velocità che dipende dal materiale di cui è fatta la membrana; nel caso generale, Einstein riuscì a calcolare che le perturbazioni si propagano *esattamente alla velocità della luce*. Quindi, ad esempio, nel caso dell'esplosione del Sole esaminato prima avremo che la Terra non si accorgerà istantaneamente del cambiamento. Invece, quando un corpo cambia posizione (o scompare) esso causa una distorsione dello spaziotempo che si propaga alla velocità della luce, non violando così il principio della massima velocità possibile: la Terra, dunque, sentirà la mancanza del Sole nel momento stesso in cui ne vedrà la prova della distruzione (circa otto minuti dopo l'esplosione). La formulazione di Einstein risolve il conflitto tra gravità e relatività ristretta: l'influsso gravitazionale sta al passo dei fotoni, ma non li supera.

[...]

### *Le prove sperimentali della relatività generale.*

Chi si accosta allo studio della relatività generale è soprattutto colpito dalla sua eleganza. Rimpiazzando la fredda e statica visione newtoniana con una descrizione geometrica e dinamica dello spaziotempo, Einstein è riuscito a rendere la gravità parte della trama dell'universo. La gravità, cioè, non viene imposta dall'alto come una sovrastruttura, ma è parte della struttura intima del cosmo. Insufflando la vita nello spaziotempo, rendendolo libero di piegarsi e incurvarsi, otteniamo quel fenomeno che chiamiamo comunemente gravità.

Considerazioni estetiche a parte, una teoria fisica deve essere in grado di fare previsioni e di spiegare con precisione i fenomeni a cui si riferisce. La teoria newtoniana ha passato l'esame a pieni voti fino all'inizio del Novecento. Che la si applichi a mele cadute, palle lanciate da torri pendenti, comete orbitanti attorno al Sole o orbite planetarie, la gravitazione classica fornisce spiegazioni assai precise dei fenomeni e fa previsioni che sono state verificate innumerevoli volte in svariate situazioni. Se Einstein osò mettere in discussione questi trionfi sperimentali — l'abbiamo già detto più volte — fu per colpa dell'idea di trasmissione istantanea della forza, che cozzava contro la relatività ristretta.

Così come gli effetti relativistici, seppur importantissimi per la nostra concezione del mondo, sono quasi inesistenti nella vita di tutti i giorni, lo stesso accade per le deviazioni tra la teoria einsteiniana e quella newtoniana. Questa è una buona e una cattiva notizia. È buona perché se una teoria ha l'ambizione di soppiantarne un'altra ben verificata sperimentalmente, è meglio che le si avvicini molto in tutte le situazioni in cui la vecchia ha già trionfato. Ma è anche cattiva, perché rende più difficile decidere sperimentalmente quale delle due sia giusta. Distinguere le previsioni di Newton da quelle di Einstein richiede misure estremamente precise ed esperimenti molto sensibili alle possibili discrepanze. Se calcoliamo la traiettoria di una pallina da tennis secondo le due teorie, i risultati saranno diversi, ma in modo così marginale che è impossibile verificare sperimentalmente chi ha ragione. Bisogna escogitare esperimenti più ingegnosi; Einstein ne propose uno.

Le stelle si vedono solo di notte, ma ovviamente sono lì in cielo anche di giorno; non le distinguiamo solo perché la loro luce fioca e distante è travolta dalla potenza della radiazione solare. Durante un'eclisse di Sole, però, la Luna oscura temporaneamente la luce solare, e le stelle diventano visibili. La presenza della nostra stella ha comunque un effetto. La luce proveniente dalle stelle lontane deve passare vicino al Sole per raggiungerci; secondo la relatività generale la massa solare incurva lo spazio circostante, e questa distorsione avrà *effetto sulla traiettoria della luce stellare*. Dopo tutto, i fotoni viaggiano nello spaziotempo: se questo è curvato, il loro moto ne subirà

le conseguenze come quello di un altro oggetto. La deviazione dei raggi stellari è apprezzabile nei casi in cui questi passano molto vicini al Sole nel loro cammino; un'eclisse ci rende in grado di osservare questi segnali luminosi senza che siano oscurati dalla luce diurna.

L'angolo di deviazione della luce stellare si può misurare in questo modo. La deviazione provoca uno spostamento nella posizione *apparente* della stella; questa può essere confrontata con quella *reale*, determinata con osservazioni notturne (senza l'ingombrante presenza del Sole) fatte quando la Terra è in una certa posizione - circa sei mesi prima o dopo l'eclisse. Nel novembre 1915, Einstein utilizzò le equazioni della sua teoria per calcolare che l'angolo avrebbe dovuto essere di circa 0,00049 gradi (precisamente 1,75 arcosecondi, dove un arcosecondo è 1/3600 di grado). È un angolo molto piccolo, uguale a quello sotto cui vedremmo una moneta da cinquanta lire a tre chilometri di distanza. Ma la sua misurazione era comunque alla portata della tecnologia di allora. Sotto la spinta di Sir Frank Dyson, direttore dell'osservatorio di Greenwich, il noto astronomo Sir Arthur Eddington, segretario della Royal Astronomical Society, organizzò una spedizione sull'isola di Principe, al largo dell'Africa occidentale, per verificare la previsione di Einstein durante l'eclisse del 29 maggio 1919.

Il 6 novembre dello stesso anno, dopo cinque mesi di analisi delle fotografie scattate a Principe durante l'eclisse (e di altre ottenute da un'altra spedizione inglese a Sobral, in Brasile, guidata da Charles Davidson e Andrew Crommelin), fu annunciato in una seduta congiunta della Royal Society e della Royal Astronomical Society che le previsioni di Einstein basate sulla relatività generale erano state confermate. La notizia di questo successo - che comportava una totale rivoluzione nella concezione di spazio e tempo - si sparse rapidamente ben oltre i confini della comunità scientifica. Il 7 novembre 1919 il «Times» di Londra titolò a tutta pagina: «Rivoluzione nella scienza - Una nuova teoria dell'universo - Rovesciate le idee di Newton»<sup>11</sup>. Einstein divenne una celebrità.

Negli anni seguenti, l'operato di Eddington fu passato al setaccio. Molti tecnicismi e sofisticazioni rendevano l'esperimento difficile da replicare, e questo fece nascere qualche dubbio sull'affidabilità della misura. Comunque, negli ultimi quarant'anni ci si è potuti avvantaggiare dei miglioramenti tecnologici per confermare molti aspetti della relatività generale con grande precisione. L'idea einsteiniana di gravità è a giudizio universale compatibile con la relatività ristretta, e sappiamo che fornisce previsioni migliori di alcuni risultati sperimentali rispetto a quella newtoniana.

Testo tratto da:

B. Greene, *L'universo elegante*, Einaudi, Torino, 1999.