

Davide Valentinis

Il cosmo e lo spazio – tempo

Le nuove conferme astronomiche della teoria della Relatività

“Una stella sul diploma” 2006, Ingegneria – Fisica, Politecnico di Milano

Abstract

The theory of Relativity was originally formulated by the German physicist Albert Einstein, in the first decades of the twentieth century.

Although more than eighty years passed since its development, Einstein's conception still represents a fundamental progress in the comprehension of the laws of Nature. Special Relativity provides a theoretical framework for the analysis of objects that move at high velocities, close to that of light; a consequence of the model is that space and time are concepts always relative to the observer of a physical event, and can be unified by the notion of spacetime. Moreover, General Relativity offers a suitable mathematical structure for the description of gravity, explaining the dynamics of space and time in geometrical terms; spacetime curves in the presence of masses, thus determining the exact trajectories of celestial objects and even the evolution of the entire Universe.

In the past few years, new and precise evidence was found in agreement with the prediction of Einstein's model: the phenomenon of Einstein's rings, that depends on light bending near heavy stars and galaxies, and the precession of the orbit of a binary system of pulsars, by which the two objects are either influenced by the other's gravitational field, and describe a trajectory similar to that of a top in space.

Lo spazio e il tempo della Relatività

L'indagine scientifica del mondo fisico ha attraversato innumerevoli rivoluzioni ed evoluzioni nel corso del ventesimo secolo; tali mutamenti hanno condotto alla formulazione di sistemi concettuali in grado di considerare fenomeni estranei alle percezioni della comune esperienza umana, estendendo le analisi teoriche e le applicazioni tecnologiche verso le scale microscopiche e quelle macroscopiche, infinitamente estese, dell'Universo. Niente male, per esseri sperduti in un angolo del cosmo.

Un contributo fondamentale lungo tale percorso è stato fornito dall'elaborazione della teoria della Relatività da parte del fisico tedesco Albert Einstein: le conseguenze della concezione relativistica, infatti, consentono di esaminare da una prospettiva originale ed innovativa i concetti di spazio e tempo, fino ad una

generalizzazione delle leggi gravitazionali di Newton ed alla considerazione della dinamica evolutiva dell'intero cosmo visibile [1].

Luce sui sistemi di coordinate

Einstein era solito affermare che l'attività scientifica preserva in ogni individuo la curiosità e la meraviglia per le realtà naturali proprie di un bambino: lo scienziato si deve essere divertito molto allora, nel redigere gli articoli pubblicati nel 1905, quando lavorava presso l'ufficio brevetti di Berna e contemporaneamente rifletteva sulle proprietà della luce, sulla teoria elettromagnetica sviluppata da alcuni decenni e sulle conseguenze che quest'ultima implicava nei confronti dei sistemi di coordinate, o SC, utilizzati per descrivere gli eventi fisici [2]. Il primo articolo era denominato *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, ossia “Sull'Elettrodinamica dei corpi in moto”; esso esponeva la sezione iniziale della Relatività, quella denominata ristretta o speciale [2]. A partire dall'ipotesi che la luce abbia una velocità c costante in qualunque sistema di riferimento e che le osservazioni effettuate in sistemi di coordinate *inerziali*, in moto uniforme uno rispetto all'altro, siano completamente equivalenti, venne rivisitata la visione newtoniana dello spazio – tempo [3].

Isaac Newton, il fisico inglese fondatore della teoria gravitazionale classica e del calcolo differenziale in Matematica, aveva ipotizzato precedentemente che i concetti di spazio e di tempo fossero assoluti, sempre immutabili e simili ad un palcoscenico inerte sul quale si svolgono gli eventi naturali [2]. Un esempio tangibile a supporto di questa affermazione è la sensazione che percepiamo quando acceleriamo da zero a cento a bordo della nostra Ferrari. Infatti, aumentando la velocità della vettura, mutiamo in modo consapevole il nostro stato di moto; secondo la visione newtoniana, la presenza di un'accelerazione implica l'esistenza di un'entità fisica rispetto alla quale stiamo aumentando la velocità e tale oggetto viene identificato nello spazio assoluto.

Al contrario, il fisico e filosofo Leibniz, coevo di Newton, criticava l'affermazione di quest'ultimo riguardante l'esistenza indipendente della nozione di spazio: secondo la visione oggettistica, infatti, l'estensione spaziale costituisce una proprietà naturale delle entità fisiche e si risolve nella contiguità fra le

posizioni degli oggetti; in altre parole, sono i corpi stessi a formare lo spazio e a “riempire” la realtà, la quale non esisterebbe in assenza di entità fisiche e dunque non avrebbe alcun significato nemmeno la nozione di estensione spaziale [4]. In effetti, anche questa argomentazione è plausibile. Immaginiamo di voler misurare il volume del nostro garage utilizzando un comune metro, per verificare se la nostra Ferrari può esserne contenuta all’interno; tuttavia, per complicarci la vita, supponiamo di effettuare l’esperimento bendati: in questo modo, escludendo percezioni ultrasensoriali alla “Star Wars”, non saremo in grado di riferirci a nessun oggetto concreto per stabilire una misura di distanza, dato che siamo incapaci di utilizzare la vista, dunque risulterà impossibile ricavare un qualunque valore di posizione spaziale. In conclusione, notiamo che effettivamente lo spazio è in intima relazione con le proprietà dei corpi fisici.

Einstein nelle sue opere riprese ed elaborò le posizioni seicentesche di Leibniz e quelle ottocentesche dell’austriaco Ernst Mach, il quale aveva criticato in modo simile le concezioni newtoniane [2]. Secondo Mach, le misure di lunghezze spaziali vengono effettuate in rapporto ad altri corpi osservabili, in assenza dei quali una qualunque nozione di posizione non avrebbe alcun significato [2]. Dunque, lo spazio non è un’entità concreta, non esiste nella realtà naturale; quando sperimentiamo un’accelerazione, quest’ultima è tale soltanto in relazione agli altri oggetti fisici che ci circondano e che non partecipano del nostro moto. Se non esistesse la materia, ossia se ci trovassimo in uno spazio completamente vuoto, non sussisterebbe alcun modo di identificare un moto accelerato [2].

Per comprendere le innovazioni einsteiniane, occorre dare uno sguardo alla nozione di sistema di riferimento, essenziale nella teoria fisica. Dunque, rechiamoci brevemente nella palestra offertaci dalla geometria, per allenarci in vista del percorso che ci attende. Dal punto di vista matematico, un sistema di coordinate ad N dimensioni è costituito da un’origine di riferimento O e da un insieme di N versori, ossia vettori di modulo unitario, rappresentativi degli assi; in base a tali strutture descriviamo degli eventi in uno spazio N – dimensionale [4]. Gli assi possono essere assimilati a direzioni preferenziali, quindi di riferimento, alle quali riferirsi per analizzare geometricamente il particolare spazio in esame. Traducendo la definizione nell’esperienza fisica dello spazio ordinario, notiamo che quest’ultimo presenta tre dimensioni, identificabili intuitivamente nell’esperienza comune con i concetti di “lunghezza”, “larghezza” e “profondità” di un oggetto visibile. In questo modo, un SC costituisce una mappa di punti materiali in cui suddividiamo una regione spaziale; ognuno di tali punti è identificato in maniera definita ed univoca da un insieme di coordinate, ossia valori numerici, complessivamente pari alle dimensioni dello spazio [5]. Di conseguenza, un sistema di coordinate costituisce un metodo efficace per

uniformare e rendere omogenee le analisi di un evento fisico specifico, indipendentemente dalla posizione dell’osservatore rispetto all’evento stesso [5].

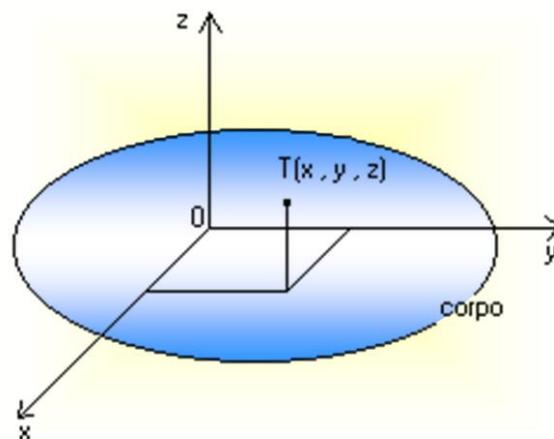


Figura 1. Dato un corpo situato nello spazio fisico, è sempre possibile definire un punto dello spazio, detto origine, in relazione al quale vengono identificati tutti i punti materiali appartenenti al corpo in esame. Per stabilire tali correlazioni, vengono utilizzati tre assi coordinati preferenziali, aventi in comune il punto origine prescelto; ognuno degli assi è generato in modo da essere perpendicolare agli altri, in quanto qualunque movimento nello spazio ordinario può essere scomposto nella somma di tre spostamenti x , y e z lungo altrettante direzioni, mutuamente perpendicolari fra loro. In questo modo, siamo in grado di definire in modo univoco la posizione di ogni punto materiale appartenente ad un oggetto nello spazio; ai punti considerati sarà possibile associare una grandezza fisica, per esempio la temperatura T , al fine di analizzare l’andamento dei valori assunti da tale grandezza in ogni area del corpo considerato. Il procedimento è generalizzabile a spazi dotati di un numero di dimensioni N maggiori rispetto allo spazio fisico, ossia con $N > 3$.

Einstein, ispirato dalle concezioni di Mach, giunse ad elaborare matematicamente le conseguenze delle ipotesi di relatività dello spazio. Il fisico tedesco notò che le equazioni fondamentali dei fenomeni elettromagnetici, ossia le equazioni di Maxwell, possono rimanere invariate nel passaggio da un sistema di coordinate inerziale ad un altro, soltanto se le regole di trasformazione necessarie per legare le coordinate del primo SC a quelle del secondo coincidono con le cosiddette trasformazioni di Lorentz [2]. Tali regole di conversione descrivono il modo in cui varia la posizione di un corpo fisico nello spazio e nel tempo, qualora venga mutato il sistema di riferimento inerziale in rapporto al quale si sta considerando il corpo stesso. La situazione è simile a quella che si presenta allo stadio, quando si sta osservando un’azione di gioco da differenti angolazioni: uno spettatore situato in alto sul terzo anello valuterà le distanze e le prospettive fra i giocatori in modo diverso, rispetto al guardalinee a bordo del campo. In ogni caso, in generale non serve

spiegare all'arbitro che il fuorigioco era dovuto ad un effetto relativistico.

Le trasformazioni di Lorentz, nelle ipotesi che il sistema di riferimento in esame si stia muovendo lungo l'asse x , sono espresse dalle equivalenze seguenti [2]:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1)$$

$$y' = y \quad (2)$$

$$z' = z \quad (3)$$

$$t' = \frac{t - \frac{xv}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4)$$

La necessità di utilizzare le trasformazioni da (1) a (4) per mutare sistema di riferimento ha effetti rivoluzionari rispetto alle concezioni di Newton. Una conseguenza fondamentale della Relatività speciale è la constatazione che due osservatori posti in SC differenti possano rilevare misure di distanze ed intervalli di tempo diverse relativamente allo stesso fenomeno fisico [7]. Nello stesso modo, eventi simultanei in un sistema di coordinate possono non avvenire contemporaneamente, se analizzati dal punto di vista di un altro SC; tale constatazione è denominata *relatività della simultaneità* [7].

Come evidenziato dalle trasformazioni di Lorentz, mutando sistema di coordinate vengono sempre alterate insieme le misure di lunghezze, nel senso del moto, ed intervalli di tempo. L'osservazione precedente equivale ad affermare l'unità dello spazio e del tempo: quest'ultimo rappresenta una dimensione lungo la quale accadono i fenomeni, nello stesso modo di lunghezza, larghezza e profondità delle tre dimensioni dello spazio [3]. L'unica differenza è che la nostra coscienza segue la scansione temporale durante le giornate; a volte più lentamente, per esempio durante l'attesa interminabile di un autobus in ritardo, a volte più velocemente, per esempio durante la vacanza sempre breve di uno studente. Ogni riferimento è puramente casuale. Si tratta allora del cosiddetto *continuum spaziotemporale*, ossia dell'insieme di spazio e tempo, relativamente al quale è necessario descrivere gli eventi [2].

L'unità dello spazio e del tempo: il continuum a quattro dimensioni

Il concetto di continuum dello spazio – tempo è molto più intuitivo e concreto di quanto possa apparire ad un primo sguardo. Immaginiamo di voler programmare una partita di tennis con un'altra persona; certamente occorrerà comunicarle il luogo di ritrovo, per esempio il famoso *Relativity Sport Village* di Plutone, all'incrocio fra la quinta e la sesta strada – direzioni x ed y – sulla collina dalla quale si può scorgere il Sole – direzione z . Tuttavia, se non vogliamo presentarci sul campo da soli, occorrerà accordarsi anche sull'ora della partita, ossia è necessario specificare una quarta coordinata di tipo tempo. Dunque comprendiamo che, per descrivere completamente un evento naturale, sono richieste in totale quattro coordinate, date dalle tre spaziali più il tempo.

In questo modo, siamo in grado di comprendere la definizione fornita precedentemente di continuum quadridimensionale: il gruppo spazio – temporale è un continuo, dato che le coordinate dello spazio e del tempo possono assumere virtualmente ogni valore con continuità lungo i rispettivi assi, ed è complessivamente a quattro dimensioni [2].

La struttura formale della teoria di Einstein è descritta dalla cosiddetta metrica di Hermann Minkowski, compatibile con il carattere relativo delle lunghezze e degli intervalli di tempo in un particolare SC [7]. Lo spazio – tempo di Minkowski si costruisce aggiungendo alle usuali tre coordinate spaziali una quarta coordinata, detta tempo immaginario ed espressa dalla quantità

$$x_4 = ict \quad (5)$$

In questo modo, il quadrato di tale grandezza diviene

$$x_4^2 = -(ct)^2 \quad (6),$$

ossia il quadrato della distanza percorsa dalla luce nel tempo t , cambiato di segno [2].

La Relatività, sebbene provochi un terremoto notevole nei confronti dei fondamenti della Fisica, non genera il crollo dell'intero edificio scientifico: infatti, è ancora possibile individuare un rapporto di causa ed effetto fra i fenomeni fisici, che non viene alterato dalle nuove concezioni einsteiniane [3]. Tale constatazione è formulata matematicamente affermando che qualunque evento fisico, che avviene in un universo relativistico, soddisfa un'equazione invariante per qualunque coppia di sistemi di coordinate inerziali, data da

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 - x_4^2 = (x_1')^2 + (x_2')^2 + (x_3')^2 - (x_4')^2 \quad (7)$$

La formula può essere interpretata anche quale distanza ds , o metrica, fra due punti in un universo descritto dalla teoria della Relatività speciale [2]. Sottraendo i due membri dell'equazione precedente, otteniamo

$$(dx_1)^2 + (dx_2)^2 + (dx_3)^2 - (dx_4)^2 \equiv ds^2 \quad (8)$$

Notiamo che, se concentriamo la nostra attenzione sulle prime tre coordinate spaziali x_1, x_2, x_3 , la formula dell'invariante relativistico coincide con il teorema di Pitagora nello spazio, ossia la somma dei quadrati delle lunghezze lungo i tre assi di riferimento è pari alla distanza del punto considerato dall'origine dell'SC [2].

In altri termini, nello spazio – tempo di Minkowski vale la geometria di Euclide, per intenderci quella insegnata comunemente fin dalle classi della scuola elementare [2]. Una tale architettura matematica si fonda su postulati, ipotesi cardinali dalle quali trarre ogni altra deduzione presente nella teoria; in particolare, uno degli assiomi afferma che, dati un punto ed una retta passante per quel punto, esiste una ed una sola retta parallela a quella data. Dato che questo genere di geometria descrive uno spazio piatto o a curvatura nulla, consegue che l'Universo della Relatività speciale è piano, euclideo [2].



Figura 2. Rappresentazione artistica della “corsa” di Einstein con la luce; il postulato fondamentale della costanza della velocità della luce, infatti, rappresenta la premessa indispensabile che ha consentito al fisico tedesco di elaborare la Relatività speciale.

Crediti: Davide Valentini

Acceleriamo verso la comprensione generale: L'ascensore e la Terra

Il principio di relatività venne esteso da Einstein nella teoria generalizzata della gravitazione, pubblicata nel 1916 [1]. L'assunto logico fondamentale dal quale si mosse il fisico tedesco fu la richiesta che le leggi generali della natura fossero equivalenti per qualunque sistema di coordinate, anche quelli non inerziali nel senso della Relatività speciale [2]. La supposizione equivale ad affermare che i fenomeni naturali debbano corrispondere a descrizioni equivalenti anche per SC in moto accelerato [1]. Ora, come dimostrato da Einstein attraverso il celebre *esperimento concettuale*, o *gedankenexperiment*, dell'ascensore nello spazio vuoto, la presenza di un'accelerazione dovuta ad una forza esterna è completamente indistinguibile da un SC privo di accelerazione, ma in cui agisca un campo gravitazionale [2].

Supponiamo di trovarci a bordo di un ascensore in quiete nello spazio interstellare. In assenza di gravità, il vostro corpo fluttua a metà altezza fra il pavimento e il soffitto. Probabilmente vi state chiedendo se per caso avete sbagliato piano, ma ad un tratto il cavo agganciato alla sommità della cabina torna in tensione, trascinandovi con l'ascensore nella direzione della forza applicata, parallela alle pareti laterali. Colti da ulteriore sgomento, notate che durante la salita voi stessi sperimentate una forza che vi preme contro il pavimento della cabina: infatti, mentre l'ascensore viaggia, trascina con sé ogni oggetto al suo interno, compresi i passeggeri; fisicamente questa constatazione si traduce nell'inerzia al moto del vostro corpo, ossia nella resistenza al mutamento del vostro stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, in risposta all'applicazione di una forza esterna. Rimpiangendo i bei giorni in cui vi trovavate sulla Terra, realizzate improvvisamente che l'effetto della forza che percepite è lo stesso di un campo gravitazionale, ossia della forza di gravità, diretto dal soffitto verso il pavimento dell'ascensore. Infatti, se ponessimo la cabina in quiete, ma poggiata sulla superficie terrestre, l'effetto sarebbe qualitativamente identico: il vostro corpo sarebbe soggetto all'attrazione da parte della massa del nostro pianeta; il risultato sarebbe un'accelerazione diretta verso il centro della Terra, perpendicolarmente al pavimento dell'ascensore, quindi l'esito finale sarebbe di nuovo una forza in grado di mantenervi appoggiati al fondo della cabina. Nello stesso modo, un ascensore che precipita in un campo gravitazionale terrestre equivarrebbe alla situazione iniziale di assenza di gravità, qualora l'accelerazione limite dovuta alla caduta libera equilibrasse esattamente quella gravitazionale terrestre g [3]. Infatti, un procedimento simile è effettivamente realizzato a bordo di speciali aeromobili, per allenare il fisico degli astronauti alla microgravità durante la loro preparazione al volo con lo Shuttle.

Da questa trattazione intuitiva, consegue che la teoria generalizzata della relatività dei sistemi di riferimento accelerati coincide praticamente con una teoria generalizzata della gravitazione [1]. Un concetto fondamentale derivante dalle argomentazioni che abbiamo sviluppato è l'equivalenza della massa inerte e della massa pesante, ossia delle misure di massa realizzate in modo cinetico, valutando la resistenza al moto di un corpo, ed in modo gravitazionale, analizzando la risposta di un sistema all'azione di un centro di gravità [6].



Figura 3. Un ascensore a riposo nel campo gravitazionale terrestre è fisicamente equivalente ad un ascensore in moto accelerato, con direzione e verso di accelerazione dati dalla normale dal pavimento al soffitto della cabina, nello spazio vuoto. Il ragionamento costituisce il fondamento dell'uguaglianza fra la massa inerte e la massa pesante e classifica la Relatività generale quale una teoria del campo di gravitazione.

La curvatura dello spazio – tempo: la metrica di Riemann

Matematicamente, la proposta del fisico tedesco dell'equivalenza di ogni sistema di coordinate significa che le equazioni della teoria generalizzata debbano risultare invarianti per *qualunque trasformazione continua* delle coordinate [8].

L'attuazione di un tale proposito era tutt'altro che semplice al tempo della sua formulazione. Un'ispirazione fu suggerita ad Einstein dalle opere precedenti dei matematici Gauss e Georg Friedrich Bernhard Riemann (1826 – 1866) ; quest'ultimo aveva elaborato nel 1854 uno schema matematico in grado di descrivere la *topologia* di una superficie, ossia la mappatura dei punti elementari di tale spazio, indipendentemente dalla forma geometrica locale, o curvatura, dello spazio stesso [9].

Notiamo allora che la richiesta di un'invarianza delle leggi naturali per qualunque sistema di coordinate conduce alla constatazione che lo spazio descritto da tali leggi possa presentare una forma geometrica qualunque, ossia una curvatura arbitraria [1]. Nel

nostro viaggio, siamo costretti ad ampliare la gamma di possibili strutture geometriche dell'Universo, da una metrica piana euclidea ad uno spazio – tempo in generale *curvo* [1]. Risulta possibile catalogare i generi di spazio in base alla loro curvatura, distinguendo tre classi principali: lo spazio piano euclideo con curvatura nulla, $\gamma=0$; quello iperbolico con curvatura negativa, $\gamma<0$; quello sferico dotato di curvatura positiva, $\gamma>0$ [10]. Localmente, una porzione arbitrariamente ridotta di spazio presenterà una curvatura trascurabile, nello stesso modo in cui l'orizzonte terrestre sembra piatto agli occhi di un osservatore sulla superficie del pianeta; dunque, in tali condizioni varranno ancora le leggi della Relatività speciale descritte dalla metrica di Minkowski [1]. Tuttavia, se la curvatura su scala complessiva dello spazio – tempo non è piana, occorrerà trovare una definizione differente di *distanza* fra due punti, quindi sarà necessario utilizzare la metrica intrinseca di Riemann [2]. Questa geometria viene descritta impiegando tensori, i quali sono una generalizzazione del concetto di vettore, espressa da matrici; queste ultime sono essenzialmente gruppi di numeri ordinati in righe e colonne e dotate di specifiche regole di calcolo [10].

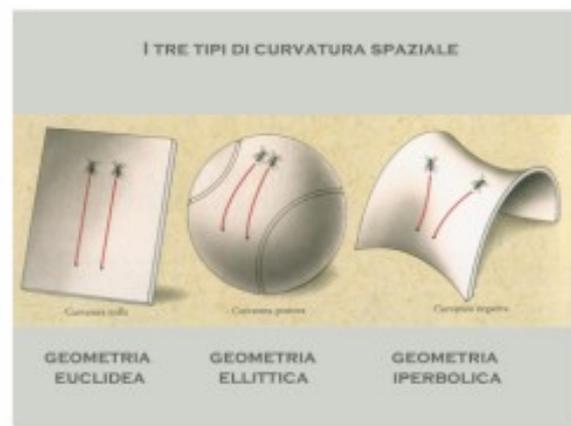


Figura 4. La figura illustra le tre classi essenziali di curvatura dello spazio e le proprietà di ognuna di esse relativamente al postulato delle rette parallele: consideriamo due formiche in moto su una superficie, con direzioni di movimento inizialmente parallele e concordi l'una all'altra. Nella geometria piana euclidea la curvatura è nulla e, proseguendo nel loro moto, le due formiche seguono traiettorie sempre parallele fra loro, dunque gli insetti non si incontrano mai fino all'infinito; nella geometria sferica, con curvatura positiva, le due formiche, proseguendo il loro moto, si incontrano prima o poi in un punto, a causa delle caratteristiche della superficie sulla quale si trovano gli insetti; nella geometria iperbolica la curvatura è negativa, ed accade che i percorsi delle due formiche, inizialmente paralleli per ipotesi, divergono l'uno dall'altro progressivamente. Notiamo in modo intuitivo che le tre classi di curvatura implicano qualità molto differenti degli spazi che caratterizzano.

In questo modo, la formula per la distanza nella metrica di Riemann risulta

$$g_{ik} dx_i dx_k \equiv ds^2 \quad (9),$$

dove la somma al secondo membro è estesa a tutte le combinazioni 11, 12, 13... fino a 44 degli indici i e k, quindi i e k possono variare da 1 a 4 [8].

Einstein stesso espone la propria intuizione affermando che in una teoria generalizzata dei sistemi accelerati non risulta possibile utilizzare regoli di riferimento rigidi e orologi a scatti costanti per la misura di lunghezze spaziali ed intervalli temporali [2]. Il sistema di coordinate risulterà un qualunque SC di coordinate gaussiane: possiamo visualizzare tale struttura immaginando che gli assi di riferimento non risultino indeformabili, bensì siano flessibili, mentre la quarta coordinata di tipo tempo sarà specificata da orologi che presentino qualunque andamento irregolare delle loro lancette. In luogo di un sistema di coordinate inerziale, siamo condotti ad adottare uno qualsiasi fra infiniti SC equivalenti flessibili, definiti argutamente da Einstein “molluschi di riferimento”, in modo tale che le equazioni che descrivono i fenomeni fisici debbano essere invarianti per ognuno di tali SC [2]. Si può dire che la Natura non faccia distinzione fra i frutti di mare quando si tratta di spaghettoni generali.

La traiettoria di una particella in uno spazio dotato di curvatura non nulla sarà descritta da una *geodetica*, una linea di minima distanza fra due punti arbitrari, che localmente è retta, ma che segue la curvatura dello spazio – tempo su scala globale [11]. Le proprietà delle geodetiche consentono di interpretare fenomeni osservati su scala astronomica e riconducibili ad effetti relativistici [11].



Figura 5. Illustrazione artistica della dinamicità dello spazio – tempo secondo la Relatività generale.

Crediti: D. Valentinis

Effetti astronomici della Relatività: la lente e la trottola

Gli effetti della Relatività generale sui sistemi di riferimento sono correlati alla proprietà essenziale dello spazio – tempo di essere dinamico, ossia di interagire reciprocamente con la materia e l’energia in esso presenti [3]. In particolare, ogni porzione di spazio – tempo presenta una specifica curvatura, ossia risulta incurvato e plasmato dalle masse e dall’energia contenute nello spazio stesso [1]. La curvatura spazio – temporale si può immaginare in modo efficace pensando ad un tappeto elastico, in grado di flettersi in misura virtualmente illimitata. Dunque, ogni massa collocata sulla superficie elastica deforma la superficie stessa per effetto del suo peso e altera il moto di altri corpi presenti nelle regioni limitrofe del tappeto. Infatti, tali oggetti saranno influenzati certamente dal mutamento nella curvatura del piano d’appoggio presente sotto di essi. Per esempio, un corpo di massa molto ridotta in moto rettilineo uniforme sul tappeto percepisce uno spazio approssimativamente piatto, o euclideo; dopo l’inserimento di un’ulteriore massa nel sistema, il tappeto si incurverà in misura più o meno apprezzabile, ed indurrà il primo corpo a modificare la propria traiettoria in risposta all’avvallamento creato lungo la superficie elastica. Il principio sul quale si fonda questa visualizzazione approssimata è il medesimo di cui ci si serve per calcolare le traiettorie relativistiche del moto dei satelliti e di qualunque corpo orbitante [12].

Due dei fenomeni relativistici, teorizzati ormai da quasi un secolo, sono stati confermati recentemente da misurazioni notevolmente accurate, consentite dagli strumenti tecnologici di osservazione odierni.

Deflessione della luce

Il primo effetto è costituito dalla deflessione o curvatura dei raggi luminosi a causa del campo gravitazionale di una massa molto estesa. Come anticipato, l’effetto è rilevabile principalmente su scala astronomica, data la presenza dell’enorme massa delle galassie osservabili, in grado di produrre deviazioni consistenti della radiazione proveniente da oggetti celesti ancora più lontani [1]. Le conseguenze della deflessione possono risultare talmente accentuate da produrre agli occhi dell’osservatore terrestre immagini distorte o multiple dello stesso corpo irradiante [13].

La luce, secondo la teoria relativistica speciale, può essere intesa quale una particella con massa nulla, detta fotone. Nello stesso modo di qualunque altro corpo, il transito di raggi luminosi in prossimità di un oggetto massiccio genera una deviazione dei fotoni dalla traiettoria rettilinea, a causa dell’attrazione gravitazionale operata dal corpo di massa maggiore sul fascio di luce. A merito di Newton va riconosciuto che questa conseguenza era stata ipotizzata precedentemente anche dal fisico inglese, sebbene

l'interpretazione fornita dalla Relatività generale sia radicalmente differente [1].

In realtà, la deviazione dei raggi luminosi può essere osservata dalla prospettiva di uno spazio – tempo dinamico, in grado di curvarsi [1]. Ricordiamo allora l'analogia del tappeto elastico: non è la luce stessa a mutare la propria traiettoria, ma è lo spazio che, curvandosi in prossimità della massa attrattiva, induce i fotoni a seguire anch'essi un percorso incurvato. L'effetto è stato storicamente la prima conferma alla teoria relativistica di Einstein, ed ha contribuito a rendere il fisico tedesco una celebrità anche fra il pubblico non specialistico. L'esperimento ha sfruttato l'eclissi di Sole del 29 maggio 1919, osservata da una duplice spedizione astronomica: la prima a Sobral, nel nord del Brasile, guidata da Andrew C. D. Crommelin del Greenwich Observatory; la seconda all'isola di Principe, vicino alla costa africana, guidata da Arthur Eddington del Cambridge Observatory [10]. La posizione delle stelle vicine al disco solare durante l'eclissi è risultata variata rispetto alle condizioni ordinarie nella volta celeste, a causa dell'attrazione gravitazionale del Sole [10].

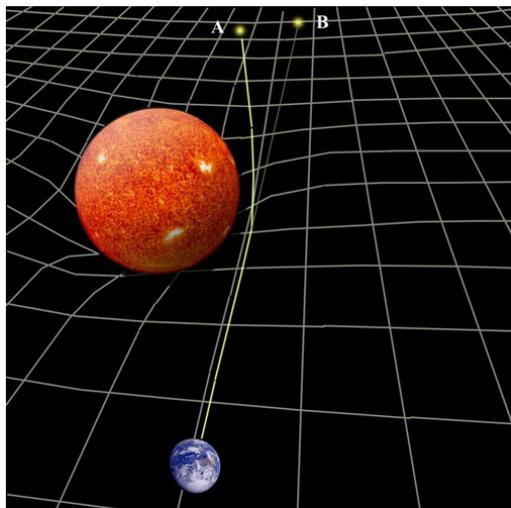


Figura 6. A causa del fenomeno della deflessione della luce, la radiazione proveniente da una stella lontana, nel transitare in prossimità del disco solare, subisce una deviazione curvilinea, corrispondente alla curvatura dello spazio – tempo causata dalla presenza della massa del Sole: in questo modo, la posizione apparente della stella nella volta celeste non sarà A in figura, ma B; in tale condizione, un osservatore terrestre noterà uno spostamento della stella lontana, rispetto alla configurazione in cui non agisce l'influenza della massa solare sulla luce in viaggio verso la Terra.

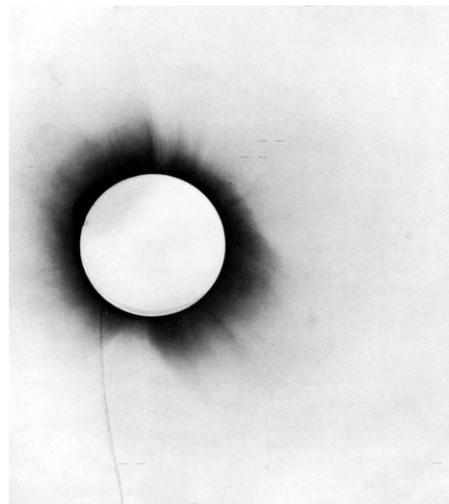


Figura 7. Lastra fotografica dell'eclissi di sole del 1919, utilizzata quale conferma sperimentale della deflessione relativistica dei raggi luminosi.

Nella teoria relativistica, le equazioni gravitazionali sono 10, di cui 6 risultano indipendenti fra loro, invece 4 si riducono alle altre attraverso equivalenze dette identità di Bianchi [8]. Fisicamente, questo significa che le equazioni non indipendenti non aggiungono alcuna informazione relativa al sistema in analisi. Partendo da tali equazioni, risulta possibile ricercare soluzioni che descrivono interi Universi in cui agisce uno specifico campo gravitazionale e che saranno caratterizzati in generale da una curvatura complessiva dello spazio – tempo differente [14].

Per esaminare il fenomeno della deflessione della luce, analizziamo la traiettoria di un raggio luminoso nel campo gravitazionale statico, ossia privo di fluttuazioni nel tempo.

Ricordiamo che le funzioni matematiche che recano l'informazione dell'effetto del campo gravitazionale sono le g_{ik} nella formula (9) della distanza nella metrica di Riemann [1]. Dunque, siamo in grado di generalizzare la definizione della velocità della luce nella Relatività speciale, che è data da

$$\begin{aligned} (dx_1)^2 + (dx_2)^2 + (dx_3)^2 - (dx_4)^2 &= 0 \\ ds^2 &= 0 \quad (10) \end{aligned}$$

ossia occorre porre a zero la relazione della distanza quadridimensionale nella metrica di Minkowski [1].

Notiamo, infatti, che questa espressione è scrivibile nella forma

$$(cdt)^2 = (dx_1)^2 + (dx_2)^2 + (dx_3)^2 \quad (11),$$

$$c = \sqrt{\left(\frac{dx_1}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dx_2}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dx_3}{dt}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{ds_{spazio}}{dt}\right)^2} = \frac{ds_{spazio}}{dt} \quad (12)$$

L'ultima relazione non è altro che la definizione di velocità, ossia spazio percorso in un intervallo di tempo infinitesimo, nelle tre coordinate cartesiane dello spazio [1].

Corrispondentemente, nella Relatività generale troveremo la velocità della luce annullando la nozione di distanza nella metrica di Riemann

$$g_{ik} dx_i dx_k \equiv ds^2 = 0 \quad (13).$$

Conoscendo le direzioni del raggio luminoso lungo gli assi di riferimento, ossia i rapporti dx_1, dx_2, dx_3 , siamo in grado di calcolare le derivate di tali entità rispetto alla coordinata temporale [1], ossia x_4

$$\frac{dx^1}{dx^4}, \frac{dx^2}{dx^4}, \frac{dx^3}{dx^4} \quad (14).$$

Allora la velocità, intesa nel senso della geometria euclidea, vale

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{dx^1}{dx^4}\right)^2 + \left(\frac{dx^2}{dx^4}\right)^2 + \left(\frac{dx^3}{dx^4}\right)^2} \quad (15).$$

Si constata che, se le componenti del campo gravitazionale g_{ik} non sono costanti, i raggi luminosi risultano curvati rispetto al sistema di coordinate in esame [1]. Definiamo n una direzione perpendicolare alla direzione di propagazione della luce; supponiamo inoltre che il raggio si propaghi nel piano definito da g e n . Ora, il principio di sovrapposizione di Huygens, fondamento della teoria ondulatoria della radiazione elettromagnetica, mostra che un raggio luminoso generato da una sorgente puntiforme può essere inteso quale una successione di fronti d'onda sferici, o superfici sferiche concentriche, con centro corrispondente al punto sorgente [15]; il raggio luminoso è definito quale traiettoria ortogonale ai fronti dell'onda elettromagnetica, dunque nel caso dell'onda sferica i raggi sono le direzioni radiali uscenti dalla sorgente puntiforme irradiante [15].

La componente Θ della velocità del raggio luminoso nella direzione ortogonale a quella di propagazione

fornirà in ogni istante la deviazione del raggio stesso dalla traiettoria rettilinea [1]. Questa condizione equivale alla presenza del corpo attrattivo di massa M all'origine del sistema di coordinate [1]. Infatti, la luce potrà subire uno spostamento dalla traiettoria rettilinea soltanto se possiede una componente della velocità non parallela alla direzione rettilinea della propagazione, secondo la relazione di proporzionalità diretta fra spostamento e velocità di un corpo fisico; se la velocità non parallela alla propagazione è nulla, anche la deflessione del raggio luminoso sarà pari a zero. In formule

$$\Theta = -\frac{\partial\gamma}{\partial n} \quad (16).$$

Esaminiamo la curvatura di un raggio luminoso che transita alla distanza Δ da una massa M . Scegliendo il sistema di riferimento avente la coordinata x_2 parallela alla direzione di propagazione della luce, l'altra coordinata sarà ortogonale alla luce, ossia $x_1=n$. In questa situazione siamo in grado di calcolare con buona approssimazione la curvatura totale del raggio luminoso; tale curvatura sarà positiva se il raggio è concavo verso l'origine, ossia se "si piega" nel verso negativo dell'asse x_1 [1].

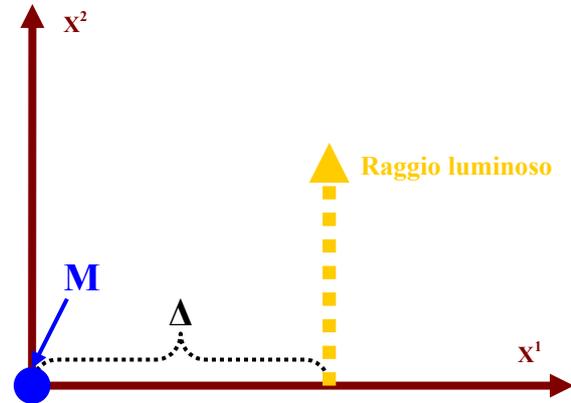


Figura 8. Sistema di riferimento per l'analisi quantitativa del fenomeno relativistico di deflessione gravitazionale della luce.

Il valore della curvatura totale è la somma dei contributi elementari di deflessione lungo l'asse x_1 , che si verificano per ogni valore della coordinata x_2 , ossia durante l'intera propagazione del raggio lungo l'asse x_1 , poiché soltanto in questo caso il raggio stesso potrà percorrere una distanza lungo l'asse x_1 e mutare la propria distanza Δ dall'asse x_2 , ovvero essere incurvato.

$$C = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial\gamma}{\partial x^1} dx^2 \quad (17)$$

Ora è necessario inserire nella condizione (13) l'espressione per un campo gravitazionale a simmetria radiale, ossia che dipende soltanto dalla distanza r dall'origine degli assi, con la massa attrattiva M posizionata nell'origine stessa [1]. La velocità della luce in un tale sistema diventa

$$\gamma = \sqrt{\frac{g_{44}}{g_{22}}} = 1 + \frac{a}{2r} \left(1 + \frac{(x^2)^2}{r^2} \right) \quad (18),$$

dove a rappresenta una quantità esprimibile in termini della massa del centro di gravità M , della costante di gravitazione universale G di Newton e della velocità della luce c [1], secondo

$$a = \frac{2GM}{c^2} \quad (19).$$

Calcolando l'integrale (17), otteniamo il risultato

$$C = \frac{2a}{\Delta} = \frac{4GM}{\Delta c^2} \quad (20).$$

In base alla (20), un raggio di luce che transita in prossimità del Sole subirà una deflessione di circa $1' 7''$, invece se la massa attrattiva è Giove la curvatura sarà $0' 2''$ [1]. Tali valori sono stati confermati da molteplici misurazioni astronomiche [16].

Se la massa che genera il campo gravitazionale è molto maggiore di quella dei corpi celesti nel sistema solare, si potranno produrre deviazioni ancora maggiori della luce dalla traiettoria rettilinea. In determinate circostanze di allineamento, la radiazione luminosa proveniente da un oggetto cosmico estremamente lontano può essere deviata da una massa enorme, quale una galassia, interposta fra la sorgente di radiazione e la Terra. Il fenomeno, denominato *gravitational lensing* o lente gravitazionale, è in grado di generare figure multiple del medesimo corpo celeste irradiante, oppure deformazioni dell'immagine ottica secondo strutture ad anello note quali *anelli di Einstein* [10].

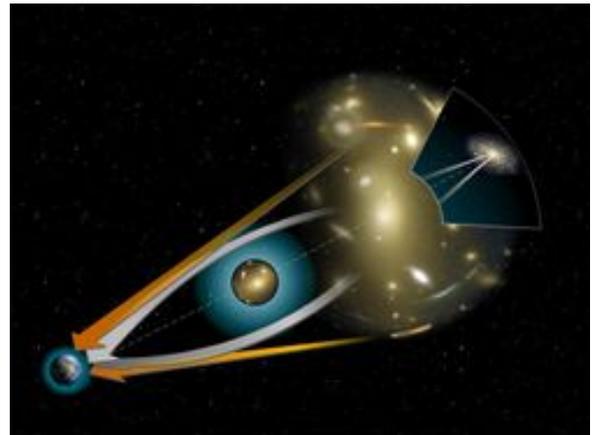


Figura9. Deflessioni ripetute della luce proveniente da un corpo celeste remoto, durante il percorso dei raggi luminosi verso la Terra, generano fenomeni ottici quali la moltiplicazione dell'immagine dello stesso oggetto nella volta celeste, oppure la formazione di anelli concentrici, dovuta all'interferenza fra le onde di luce raccolte dai telescopi terrestri.

Precessione geodetica

Un secondo effetto, previsto dalla Relatività generale e correlato alla curvatura dello spazio, è la precessione del moto dei pianeti [1]. Il moto di precessione può essere inteso quale rotazione dell'ellisse descritta dalla traiettoria del pianeta nella sua rivoluzione attorno alla stella centrale; nel caso del sistema solare, il centro di gravità coincide con il Sole. Di conseguenza il perielio, ossia il punto di massima distanza del pianeta dal Sole, si sposta nel corso delle rivoluzioni successive del pianeta stesso [1].

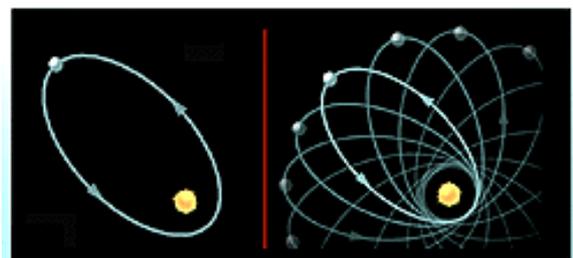


Figura10. Rappresentazione del moto di precessione geodetica, denominato anche moto "a trottola" o "a rosetta". L'asse maggiore dell'ellisse, descritta dal pianeta nella sua rivoluzione attorno alla stella gialla, subisce uno spostamento angolare progressivo nel corso del tempo.

Graficamente, osserviamo che l'orbita ellittica di un pianeta in realtà non è chiusa, ma sembra formare una

serie di petali molto stretti attorno al Sole, detti *moto a rosetta o a trottola*. Un evento simile è stato rilevato già secoli prima dell'intervento di Einstein nel caso del pianeta Mercurio. Prima della Relatività, si era ipotizzato che il fenomeno fosse dovuto all'influenza della gravità degli altri pianeti, ma i calcoli secondo la teoria di Newton non corrispondevano agli spostamenti osservati. Le Verrier, scopritore del pianeta Nettuno e primo osservatore del moto a rosetta, ipotizzò addirittura che esistesse un altro pianeta orbitante fra Mercurio e il Sole, battezzato Vulcano, ma in realtà inesistente [17]. La Relatività generale riesce a predire e spiegare il fenomeno in modo completo, considerando la curvatura dello spazio – tempo attorno alla massa in rivoluzione [1]: in una singola rotazione dovuta alla precessione, il corpo in moto subisce uno spostamento angolare ε secondo la formula

$$\varepsilon = 24\pi^3 \frac{a^2}{T^2 c^2 (1 - e^2)} \quad (21).$$

Nell'espressione, a rappresenta il semiasse maggiore dell'ellisse descritta dal pianeta, T è il periodo di rivoluzione del corpo, espresso in secondi, c è la velocità della luce nel vuoto ed e costituisce l'eccentricità dell'orbita ellittica classica del pianeta; quest'ultimo parametro identifica il rapporto delle misure degli assi maggiore e minore dell'ellisse, che determina l'entità dello scostamento della forma dell'ellisse stessa rispetto ad una perfetta circonferenza [1]. Attualmente, l'effetto di precessione è stato misurato per numerosi pianeti del sistema solare con ottimo accordo fra teoria ed esperimenti, ma un laboratorio naturale in cui gli effetti precessionali sono notevolmente accentuati è costituito dai sistemi binari di pulsar [16]. Queste coppie sono costituite da pulsar, o stelle di neutroni, ognuna delle quali risulta in orbita attorno all'altra. Il procedimento di misura del moto a trottola è agevolato dal fatto che tali stelle, durante la loro rotazione su se stesse, emettono onde radio lungo una precisa direzione spaziale, nello stesso modo di un radiofaro cosmico [16]. Anche in questa circostanza, le previsioni teoriche della Relatività hanno ricevuto una conferma essenziale alla distanza temporale di oltre novanta anni dalla loro formulazione.

Hubble osserva un doppio anello di Einstein

Il telescopio spaziale Hubble, frutto della cooperazione internazionale fra le agenzie spaziali NASA ed ESA, ha rilevato un allineamento ottico mai osservato precedentemente nello spazio: una coppia di anelli splendidi, uno incastonato all'interno dell'altro in una forma simile a quella dell'occhio di bue [18]. La struttura a doppio anello è causata dalla deflessione

della luce proveniente da due galassie distanti, le quali sono localizzate entrambe dietro ad una galassia maggiormente massiva in primo piano [18].

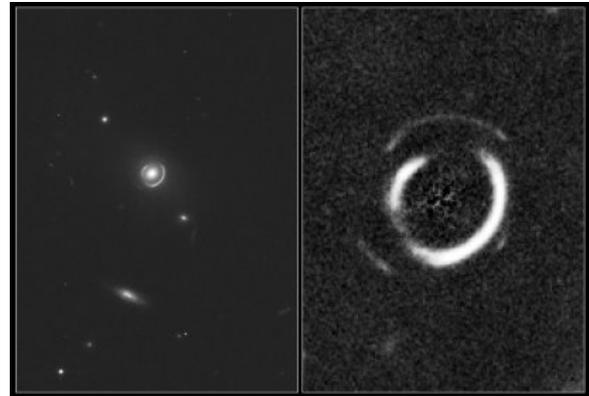


Figura 11. Immagine ACS di Hubble del fenomeno di lente gravitazionale nel sistema SDSSJ0946+1006; a sinistra si nota il doppio anello di Einstein, invece a destra è mostrato un ingrandimento che evidenzia la deflessione della luce; alla fotografia è stata eliminata l'immagine della galassia centrale in primo piano.

Crediti: NASA, ESA, R. Gavazzi and T. Treu dell'Università della California, Santa Barbara, ed il team SLACS

I signori degli anelli

Il raro fenomeno individuato dal Telescopio Spaziale Hubble rappresenta molto più di una semplice novità: infatti, l'evento astronomico è in grado di rivelare concezioni innovative per quanto riguarda l'energia oscura, la materia oscura, la natura delle galassie remote e persino la curvatura dell'intero Universo [14]. Il doppio anello di Einstein è stato identificato da un team internazionale di astronomi guidato da Raphael Gavazzi e Tommaso Treu dell'Università della California a Santa Barbara [18]. L'osservazione è parte del programma della Fotocamera Avanzata per le Panoramiche a Lenti Sloan, o *Sloan Lens Advanced Camera for Surveys* – SLACS – attualmente in corso, ad opera del telescopio Hubble [18]. Gli scienziati riferiranno i risultati ottenuti al prossimo 211 – esimo meeting della Società Astronomica Americana ad Austin, in Texas, negli Stati Uniti. Un saggio riguardante il medesimo evento celeste è stato sottoposto all'*Astrophysical Journal* [18].

Il fenomeno della lente gravitazionale avviene quando una galassia, dotata di una massa notevole e situata in primo piano rispetto all'osservatore, devia i raggi luminosi provenienti da un sistema galattico maggiormente distante e posizionato dietro la galassia che funge da attrattore gravitazionale; l'evento è simile all'effetto provocato sull'immagine degli oggetti quando si utilizza una lente di ingrandimento [14].

Qualora la coppia di galassie risulti allineata esattamente rispetto alla direzione di osservazione, la luce forma una circonferenza, denominata anello di Einstein, attorno al sistema galattico in primo piano. Inoltre, se un'ulteriore galassia si trova precisamente sulla medesima linea di visuale, appare anche un secondo anello di diametro maggiore [18]. La probabilità di assistere ad una simile corrispondenza sono così ridotte che Tommaso Treu afferma di aver "vinto il jackpot" con questa scoperta [18].

"Queste sorprendenti coincidenze rivelano una quantità enorme di informazioni riguardanti la Natura. La materia oscura non è immune alle lenti gravitazionali", ha aggiunto Leonidas Moustakas del Laboratorio per la Propulsione Jet a Pasadena, in California, negli Stati Uniti. "Il valore dell'efficacia della lente gravitazionale è sorpassato soltanto dal numero di segreti della Natura svelati da questo metodo di indagine" [18].

La galassia massiccia in primo piano è allineata in modo quasi perfetto nel cielo con due sistemi galattici situato sullo sfondo a differenti distanze. La galassia più vicina alla Terra dista dal nostro pianeta 3 miliardi di anni luce. L'anello interno e quello esterno sono composti da immagini multiple di due sistemi galattici localizzati rispettivamente a 6 miliardi ed 11 miliardi di anni luce dalla Terra [18].

Il componente del team SLAC Adam Bolton, proveniente dall'Istituto per l'Astronomia dell'Università delle Hawaii a Honolulu, ha identificato per primo le lenti gravitazionali nella Panoramica del Cielo Digitale Sloan, o *Sloan Digital Sky Survey*, SDSS. "Il segnale originale che ci ha condotto alla scoperta era formato da 500 fotoni inclusi fra i circa 500000 nello spettro SDSS della galassia in primo piano", ha commentato Bolton [18].

"Gli anelli gemelli erano visibili chiaramente nelle immagini di Hubble", ha aggiunto Treu, "Quando ho visto l'evento per la prima volta, ho esclamato 'wow, questo è folle!' Non riuscivo a credere a quello che osservavo!" [18]

La distribuzione della materia oscura nelle galassie in primo piano può essere mappata in modo accurato, utilizzando le lenti gravitazionali provocate dalla presenza della materia oscura stessa: infatti, la massa invisibile esercita una forza gravitazionale, rappresentata fisicamente dalla curvatura dello spazio – tempo attorno alla materia oscura, secondo l'interpretazione della Relatività generale di Albert Einstein [14]. I raggi luminosi, quando viaggiano attraverso lo spazio – tempo, non possono che seguirne la forma, nello stesso modo in cui l'acqua che fluisce all'interno di una tubatura chiusa è guidata dal percorso definito dal condotto. In questo modo, se lo spazio risulta incurvato, la luce sarà costretta ad adeguarsi a tale curvatura nella trama del cosmo, ed apparirà ad un osservatore esterno incurvata o deflessa [1].

Inoltre, la geometria dei due anelli di Einstein ha consentito alla squadra di astronomi di misurare con notevole accuratezza la massa della galassia situata a distanza intermedia: il valore ottenuto è pari ad un miliardo di masse solari [18]. Il team ha riferito che questa rappresenta la prima misurazione della massa di una galassia nana a distanza cosmologica, dotata di un redshift pari a $z=0,6$ [18]. Il redshift misura la deviazione dello spettro di radiazione proveniente da un oggetto cosmico rispetto ai valori reali di emissione; tale discrepanza è dovuta al moto di recessione o separazione del corpo celeste dagli altri oggetti nell'Universo e tale allontanamento progressivo corrisponde all'espansione dell'intero cosmo [14].

Una serie di alcune dozzine di anelli simili a quello analizzato offrirebbe un metodo di misurazione della curvatura dello spazio ad opera della gravità in modo indipendente dagli altri procedimenti adottati finora per una valutazione di questo genere [18]. Il confronto fra i diversi risultati aiuterebbe gli esperti a determinare il contenuto di materia presente nell'Universo e le proprietà dell'energia oscura, ossia la forza di natura incognita che sta causando l'accelerazione dell'espansione dello spazio – tempo [18].

Le osservazioni della radiazione cosmica di fondo a microonde, un relitto dell'immane esplosione iniziale del Big Bang, favoriscono l'ipotesi che la curvatura dello spazio – tempo sia nulla, ossia che il cosmo risulti effettivamente piatto su scala complessiva [14]. Le ragioni di tale considerazione si fondano sul contenuto totale di materia presente nell'Universo e sulla sua distribuzione, assunta quale omogenea ed uniforme a dimensioni cosmologiche totali [12]. Una collezione di 50 doppi anelli di Einstein idonei sarebbe sufficiente per valutare il contenuto di materia oscura del cosmo con un errore massimo del 10% [18]. La misurazione sarebbe utile anche per calcolare l'equazione di stato dell'energia oscura. Questa formula matematica, dedotta dal modello fisico della Relatività generale di Albert Einstein, esprime la pressione esercitata dalla materia oscura sullo spazio – tempo, nello stesso modo in cui un gas iniettato in un pallone elastico preme contro le pareti del recipiente e ne genera l'espansione; questa pressione è negativa, nel senso che agisce in senso contrario all'attrazione gravitazionale delle masse, la quale tenderebbe ad avvicinare fra loro le particelle di materia presenti nell'Universo [10].

Altri doppi anelli di Einstein potrebbero essere trovati attraverso le panoramiche celesti dei telescopi spaziali a grandangolo, le quali sono state proposte per la Missione di Collaborazione per l'Energia Oscura, o *Joint Dark Energy Mission*, JDEM; le medesime osservazioni sono state raccomandate recentemente per il futuro dal Consiglio Nazionale per le Ricerche [18].

La precessione delle pulsar binarie

Potremmo battezzarlo «moto a trottola relativistico», ed era stato previsto da Einstein [1]. Ora, grazie alla straordinaria «pulsar doppia» scoperta dagli astronomi dell'Istituto Nazionale di Astrofisica nel 2003 e al paziente lavoro di un team internazionale di astronomi, tra i quali Andrea Possenti, uno degli autori della scoperta originaria, è arrivata una precisa conferma che Einstein aveva ragione anche in merito a questo fenomeno [19]. L'eccezionale risultato è stato pubblicato il 4 luglio 2008 su *Science* [19].

Il giro del cosmo in ottanta trottole

Come abbiamo osservato, il termine tecnico per designare il fenomeno osservato nelle pulsar doppie è *precessione geodetica*, ma potremmo raffigurarcelo più semplicemente come un «moto a trottola relativistico». Anche le leggi che lo descrivono sono note, essendo una diretta conseguenza della teoria della Relatività generale di Albert Einstein [1]. Recentemente, si era riscontrato l'effetto in trottole speciali, note come *giroscopi*, poste in orbita attorno alla Terra [19]. Ora un'equipe internazionale di scienziati, tra i quali i radioastronomi del Gruppo Pulsar dell'INAF – Osservatorio di Cagliari, ha osservato il fenomeno in un oggetto cosmico identificato con la sigla J0737-3039; esso si trova a circa 1800 anni luce da noi, ed è universalmente conosciuto quale “pulsar doppia” [19]. A causa dell'enorme massa contenuta nelle stelle di neutroni, in questo sistema l'effetto è circa 2800 volte più ampio di quello misurato vicino al nostro pianeta. Questa è la prima conferma sperimentale che il moto relativistico «a trottola» si manifestam esattamente al ritmo previsto da Einstein, anche in vicinanza di corpi celesti molto massicci: infatti, la pulsar A e la pulsar B del sistema binario raggiungono, sommate fra loro, una massa pari a circa 900000 volte quella del nostro pianeta [19].

La straordinaria scoperta, pubblicata sul numero di *Science* del 4 luglio, ha richiesto quattro anni di osservazioni presso il radiotelescopio di Green Bank situato nel West Virginia, USA; Green Bank è il secondo più grande strumento di osservazione cosmica a onde radio del mondo dopo quello di Arecibo [19].

“Questo moto”, spiega Andrea Possenti, dell'INAF – Osservatorio di Cagliari, unico italiano fra gli autori dell'articolo, “è una conseguenza del fatto che lo spazio – tempo non è piatto, bensì viene curvato dalla massa dei corpi celesti [19]. Così l'asse di rotazione della pulsar B, mentre ruota attorno alla sua compagna, la pulsar A, subisce un leggero e ciclico cambiamento d'inclinazione, con un periodo di circa una settantina d'anni”. L'oscillazione «a trottola» che ne deriva è simile in apparenza a quella che compie la Terra per il fenomeno astronomico della precessione degli equinozi [19]. Ma la causa è completamente diversa: se per la Terra, così come per una trottola che corra su un tavolo, l'effetto si può spiegare attraverso la Fisica

classica di Newton, nel caso della pulsar B l'origine è la curvatura dello spazio – tempo [19].

Fin dalla sua scoperta, avvenuta nel 2003 a opera di un'equipe internazionale guidata da Nichi D'Amico con i suoi giovani collaboratori, Marta Burgay e Andrea Possenti dell'INAF – Osservatorio di Cagliari, la «pulsar doppia» è uno degli oggetti celesti più studiati. È l'unico sistema binario noto composto da due *pulsar*, stelle di neutroni rotanti che emettono onde radio in stretti fasci conici, come potentissimi radiofari galattici. A ogni rotazione delle due stelle, i radiotelescopi percepiscono un impulso [16]. Periodicamente si verifica la scomparsa dell'impulso della pulsar A, eclissata dal rivestimento di natura magnetica, o magnetosfera, della compagna: in questo modo, gli astrofisici hanno potuto misurare il moto a trottola della pulsar B [19]. “Continuano a confermarsi tutte le previsioni che avevamo formulato sin dal 2003. La pulsar doppia”, conclude Possenti, “è il miglior laboratorio che esista per mettere alla prova la teoria della Relatività” [19].

Bibliografia

- [1] Einstein A., *Come io vedo il mondo – La teoria della relatività*, Newton Compton editori, Roma, 2006
- [2] Einstein A., *Relatività: esposizione divulgativa*, Bollati Boringhieri, Torino, 1967
- [3] Einstein A., *Il significato della relatività*, Newton Compton editori, Roma, 2004
- [4] Reale G., Antiseri D., *Il pensiero occidentale dalle origini ad oggi*, vol. 3, La Scuola, Brescia, 1994
- [5] Keith Nicholson W., *Algebra lineare*, Mc Graw – Hill, Milano, 2002
- [6] Einstein A., Infeld L., *L'evoluzione della fisica*, Bollati Boringhieri, Torino, 1965
- [7] Eisberg R., Resnik R., *Quantum Physics*, John Wiley and Sons, USA, 1985
- [8] Einstein A., “Sulla teoria generalizzata della gravitazione”, *Le Scienze*, n. 129, maggio, 1979
- [9] Tazzioli R., “La matematica relativistica della seconda metà dell'Ottocento”, *Le Scienze*, n. 338, ottobre, 1996
- [10] Aczel A. D., *L'equazione di Dio*, NET, Milano, 2006
- [11] Penrose R., Hawking S., *La natura dello spazio e del tempo*, BUR scienza, Milano, 2000
- [12] Hawking S., *Dal Big Bang ai buchi neri*, BUR scienza, Milano, 2000
- [13] Hawking S., *Buchi neri e universi neonati*, BUR scienza, Milano, 2000
- [14] Penrose R., *La strada che porta alla realtà – Le leggi fondamentali dell'universo*, BUR scienza, Milano, 2005
- [15] Goodman J. W., *Introduction to Fourier Optics*, McGraw – Hill, USA, 1996
- [16] Piran T., “Stelle di neutroni binarie”, *Le Scienze*, n. 323, luglio, 1995
- [17] Romano G., *La complessità dell'Universo*, Gremese, Roma, 2007

[18] Traduzione riveduta ed ampliata dell'articolo
"Hubble finds double Einstein ring", reperibile sul sito
dell'ESA nella sezione *Space Science*

[19] Versione riveduta ed ampliata dell'articolo "la
trottola di Einstein", di Andrea Possenti, comunicato
stampa dell'INAF , Istituto Nazionale di Astrofisica,
del 3 luglio 2008