

# LUCI LONTANISSIME

## a favore di Einstein

Il principio di equivalenza è alla base della relatività generale ma la sua verifica sperimentale non è ancora del tutto soddisfacente. La polarizzazione della luce che ci arriva da remote galassie e della radiazione cosmica di fondo permette di migliorarla. Finora queste misure confermano la teoria del fisico tedesco



**Sperello di Serego Alighieri**

Discendente di Dante Alighieri, è astrofisico presso l'Osservatorio di Arcetri. Tra i suoi principali temi di ricerca l'evoluzione delle galassie, il mezzo interstellare, quasar e radiogalassie e la rotazione cosmica della polarizzazione.

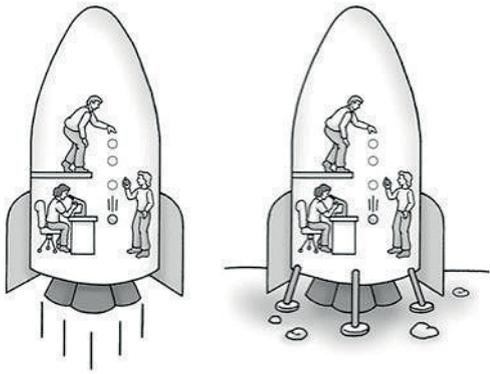
**N**on spaventatevi. Sembrano parole e concetti difficili ma facendo un passo dopo l'altro arriveremo a capire una questione scientifica dal grande fascino: cercherò di spiegarvi cosa c'entri la rotazione cosmica della polarizzazione con il principio di equivalenza di Einstein, cioè il principio su cui si basa la teoria della relatività generale.

Cominciamo dai fotoni, i quanti di luce che ci portano quasi tutta l'informazione che abbiamo sull'universo al di fuori del sistema solare. Questa informazione consiste solamente di tre parametri: la direzione da cui il fotone proviene, la sua energia (o frequenza o lunghezza d'onda) e la direzione della polarizzazione (vedi figura). Praticamente tutto quello che sappiamo sull'universo ci viene da questi tre parametri trasportati dai fotoni. È ovvio che sia di fondamentale importanza capire se e come questi parametri vengano modificati durante il viaggio dei fotoni attraverso il vuoto del cosmo. Sappiamo infatti che un forte campo gravitazionale modifica la direzione dei fotoni e che l'espansione dell'universo ne modifica l'energia. La domanda che ci poniamo è se anche la direzione della polarizzazione venga modificata mentre i fotoni viaggiano nel vuoto del cosmo, cioè se esista una rotazione cosmica della polarizzazione, in breve una RCP. Vi anticipo che tutte le misure fatte mostrano che la direzione della polarizzazione non viene modificata e quindi appare essere la proprietà più costante dei fotoni.

Veniamo ora al principio di equivalenza che postula l'equivalenza fra un sistema uniformemente accelerato e un campo gravitazionale. In pratica supponete di avere due stanze uguali, una situata su un razzo che accelera nello spazio e l'altra ferma in un campo gravitazionale, per esempio sulla Terra, e che l'accelerazione del razzo sia uguale a quella prodotta dal campo gravitazionale. Il principio di equivalenza dice che non potete fare esperimenti nelle due stanze che vi dicano in quale stanza siete. Il primo a rendersi conto di questo è stato Galileo, che ha fatto esperimenti sul rotolamento di pesi diversi su un piano inclinato, sul sincronismo di pendoli con pesi diversi e quello, forse solo pensato, sulla caduta di pesi diversi dalla Torre di Pisa. Questi esperimenti hanno portato Galileo a intuire il principio di equivalenza per quanto riguarda la caduta di gravi e quindi l'equivalenza fra la massa inerziale e quella gravitazionale.

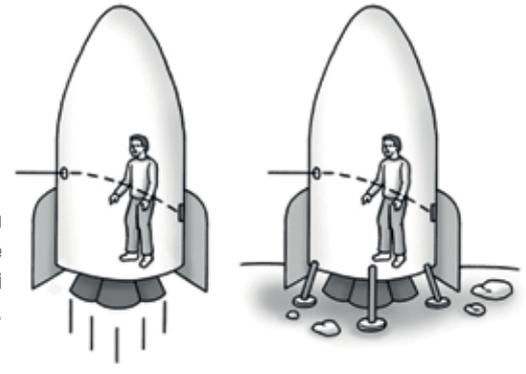
Ma non c'è nulla nelle leggi della fisica che implichi che queste due masse siano uguali. Ci vuole un principio, appunto il principio di equivalenza. Il principio di equivalenza che vale per la caduta di gravi si chiama *principio di equivalenza debole* o di Galileo ed è stato provato con una grande precisione (una parte su  $10^{13}$ , cioè una parte su diecimila miliardi) con esperimenti che utilizzano bilance di torsione.

Più di tre secoli dopo Galileo è entrato in gioco Einstein, che ha avuto un'idea semplice, ma rivoluzionaria: supponiamo che il principio di equivalenza,



A sinistra: Il principio di equivalenza debole che postula l'equivalenza fra un sistema uniformemente accelerato (a sinistra) e un campo gravitazionale (a destra) per esperimenti di caduta di gravi.

A destra: Il principio di equivalenza di Einstein in cui l'equivalenza viene estesa a esperimenti con campi elettromagnetici (fotoni).



invece che valere solo per esperimenti di caduta dei gravi, valga anche per esperimenti con campi elettromagnetici, e quindi anche per i fotoni. Il risultato di questo principio di equivalenza di Einstein (PEE) è semplice. Supponete di far entrare un fotone da un buco sul lato delle due stanze. Nel caso della stanza sul razzo accelerato, data la velocità finita della luce e l'accelerazione trasversale alla direzione del fotone, questo deve avere una traiettoria curva. Bene, l'idea di Einstein è che la stessa traiettoria curva la deve avere anche il fotone nel campo gravitazionale. Quindi il campo gravitazionale deforma lo spazio. Da questa semplice constatazione deriva la relatività generale di Einstein, di cui nel 2016 abbiamo celebrato il centenario.

Ma cosa c'entra il principio di equivalenza di Einstein con la rotazione cosmica della polarizzazione? La connessione deriva da un problema, che è quello di provare il principio di equivalenza di Einstein. Ricordate: un principio non può essere dimostrato come una legge fisica o un teorema matematico, può solo essere provato con esperimenti. Purtroppo il PEE, principio di equivalenza di Einstein, è provato con una precisione molto bassa, solo una parte su  $10^4$ , cioè una parte su diecimila, con esperimenti di redshift gravitazionale (spostamento delle righe spettrali verso il rosso dovuto alla gravitazione). Una precisione così bassa lascia seri dubbi sulla sua validità e questo è chiaramente un problema per la teoria della relatività generale: i fisici lo hanno affronta-

to molte volte negli ultimi cento anni. Per esempio nel 1960 il fisico americano Leonard Schiff ha ipotizzato che qualsiasi teoria della gravità che sia invariante per le trasformazioni di Lorentz e che obbedisca al principio di equivalenza debole obbedirebbe anche al principio di equivalenza di Einstein. Se questa congettura fosse vera, il principio di equivalenza di Einstein sarebbe provato con la stessa precisione del principio debole, aumentando molto la solidità sperimentale della relatività generale.

Ma nel 1977 il fisico cinese Wei-Tou Ni ha trovato un contro-esempio unico alla congettura di Schiff: un campo

pseudoscalare che interagirebbe con il campo elettromagnetico conducendo a una violazione del principio di equivalenza di Einstein, pur obbedendo al principio debole. Inoltre Ni ha mostrato che questo campo pseudoscalare, se esistesse, produrrebbe una rotazione della polarizzazione, la RCP appunto! Ecco quindi la connessione fra PEE e RCP. È chiaro che se dimostrassimo che la rotazione cosmica della polarizzazione non esiste, la congettura di Schiff non sarebbe violata e quindi il principio di equivalenza di Einstein sarebbe provato con la stessa grande precisione del principio di equivalenza debole.

### CHE COS'È LA POLARIZZAZIONE DELLA LUCE

La luce può essere vista come una radiazione elettromagnetica in cui un campo elettrico e un campo magnetico oscillano in piani perpendicolari lungo la direzione di propagazione. Il piano in cui oscilla il campo elettrico definisce una direzione in cielo, quello che si chiama angolo di posizione della polarizzazione o angolo di polarizzazione. Si misura a partire dalla direzione del Nord in senso antiorario guardando verso la sorgente e può andare da 0 a 180 gradi. Quindi ciascun fotone è polarizzato e porta con sé una importante informazione geometrica sul processo di emissione o di ultima interazione con la materia.

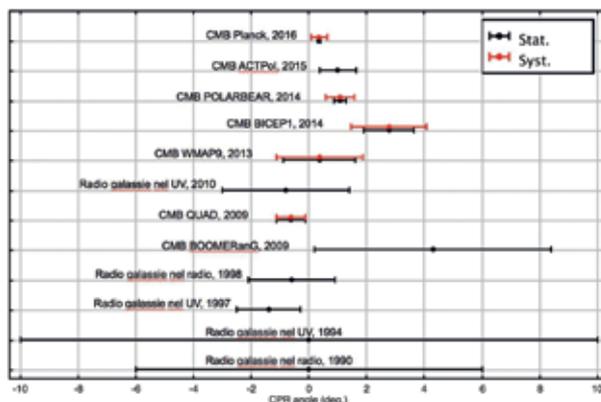
Quello che succede per molte sorgenti di fotoni, per esempio la fotosfera di una stella, è che emettono fotoni polarizzati a caso in tutte le direzioni possibili; la radiazione risultante non ha quindi una direzione di polarizzazione residua, in quanto le polarizzazioni dei fotoni si compensano fra di loro. Esistono però fenomeni che danno una polarizzazione netta risultante; un esempio è la riflessione o diffusione della radiazione: la radiazione riflessa o diffusa è polarizzata in una direzione che è perpendicolare al piano che contiene il raggio incidente e quello riflesso o diffuso. Quindi misurando la polarizzazione di radiazione riflessa o diffusa si hanno informazioni sulla geometria della riflessione o diffusione.

Il fatto che la luce riflessa sia polarizzata è utilizzato ad esempio dagli occhiali Polaroid, che lasciano passare solo la luce polarizzata verticalmente ed eliminano i riflessi, perché questi sono polarizzati orizzontalmente, in quanto nella maggior parte dei casi il raggio incidente e quello riflesso sono in un piano verticale.

Capite quindi perché da più di vent'anni noi scienziati siamo andati a cercare la rotazione cosmica della polarizzazione sia per vedere se la direzione di polarizzazione dei fotoni cambi, sia per aumentare la nostra fiducia nel principio di equivalenza di Einstein e quindi nella relatività generale.

Per farlo serve una sorgente molto distante che emetta radiazione polarizzata, per la quale si possa prevedere con precisione l'orientamento del piano di polarizzazione all'emissione. Quindi, confrontando la direzione di polarizzazione osservata con quella all'emissione, si può misurare una eventuale rotazione cosmica della polarizzazione. Il fenomeno che consente la previsione della direzione all'emissione è quello della riflessione e diffusione della radiazione, che prevede che la radiazione riflessa o diffusa sia polarizzata in direzione esattamente perpendicolare al piano che contiene il raggio incidente e quello riflesso o diffuso (vedi figura).

Per cercare la rotazione cosmica della polarizzazione fin dai primi anni '90 sono state usate radio galassie lontane, sia usando analisi statistiche della loro polarizzazione radio, sia soprattutto usando la loro polarizzazione nell'ultravioletto. Questa è dovuta al fatto che hanno un aspetto allungato perché hanno al loro centro un quasar che emette radiazione molto forte solo in due coni opposti. Noi guardiamo quest'oggetto dal di fuori dei coni, quindi non vediamo il quasar direttamente, ma ne vediamo la radiazione diffusa dal materiale (polvere e gas) che sta attorno. Quindi, come nel caso di un faro che non punta verso di noi, vediamo un oggetto allungato lungo l'asse dei coni. Inoltre la radiazione che vediamo, essendo diffusa, deve essere polarizzata perpendicolarmente all'asse dell'allungamento dell'immagine. Questo è proprio quello che abbiamo osservato. Quindi dalle radio galassie si ottiene che la rotazione cosmica della polarizzazione non esiste a meno di qualche grado.



Le principali misure di rotazione cosmica della polarizzazione (RCP) in ordine cronologico. In nero è mostrata la precisione statistica delle misure, in rosso quella sistematica, cioè quella dovuta alla calibrazione dell'angolo di polarizzazione. Alla misura con ACTPol del 2015 va aggiunto un errore sistematico dovuto alla differenza ignota fra l'angolo di polarizzazione della nebulosa del Granchio a 146 GHz e quello a 90 GHz.

In seguito anche il fondo cosmico a micro-onde (CMB) è stato utilizzato per cercare la rotazione cosmica della polarizzazione. Quando, subito dopo il Big Bang, l'universo era molto denso e caldo, la luce interagiva molto frequentemente con la materia. Tuttavia con l'espansione dell'universo la densità e la temperatura sono diminuite e a circa 380 mila anni dal Big Bang sono scese a valori tali che le interazioni luce-materia sono cessate e la luce ha potuto procedere indisturbata, giungere fino a noi sotto forma di radiazione cosmica di fondo e portarci l'informazione sull'ultima interazione (diffusione) con la materia. La radiazione cosmica di fondo è molto uniforme, ma conserva piccole disuniformità di intensità, legate alle prime disuniformità nella materia in espansione.

Quindi la polarizzazione del CMB, che è radiazione diffusa, è quasi sempre nulla, grazie al sommarsi casuale di raggi diffusi da direzioni diverse, tranne nelle zone in cui c'è un picco di intensità, perché nei suoi dintorni è più probabile che la luce diffusa venga dal picco piuttosto che da altre direzioni. Questo consente di prevedere la direzione di polarizzazione della radiazione cosmica di fondo, legandola alle variazioni di intensità, e quindi di cercare la rotazione cosmica della polarizzazione, che però, anche in questo caso non è stata finora trovata, entro una frazione di grado, come è riuscito a mostrare il satellite europeo "Planck".

In futuro si spera di migliorare ancora le misure di rotazione cosmica di polarizzazione, sia con esperimenti sulle radio galassie, sia soprattutto con esperimenti sulla polarizzazione del fondo di radiazione cosmica. Paradossalmente questi ultimi esperimenti sono attualmente limitati non tanto dalla precisione con cui si riescono a fare le misure, ma dalla precisione con cui si riesce a calibrare il punto zero dell'angolo di polarizzazione dell'esperimento stesso, quello che si chiama errore sistematico. Per esempio con il satellite "Planck" la precisione statistica delle misure dell'angolo di polarizzazione è di un ventesimo di grado, mentre la precisione sistematica della calibrazione è di un terzo di grado e quindi è il fattore limitante della misura. Sono in progetto miglioramenti nella calibrazione dell'angolo, per esempio mettendo una sorgente polarizzata su un satellite che sia osservabile da tutti gli esperimenti sulla radiazione cosmica di fondo CMB.

In conclusione, la rotazione cosmica della polarizzazione non è stata mai rilevata e il limite superiore è di una frazione di grado. Non è detto che in futuro con misure più precise non si riesca a trovare una piccola rotazione cosmica della polarizzazione, ma come ripetuto ai miei giovani colleghi americani, che sperano di misurare una RCP, perché potrebbe far loro vincere il premio Nobel, io preferisco che l'universo sia elegante e che la rotazione cosmica di polarizzazione non ci sia.