

Sperello di Serego Alighieri

# Una nuova prova del principio di equivalenza di Einstein

*A new test of the Einstein equivalence principle*

INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri,

**Sommario.** Tutte le teorie metriche di gravitazione, inclusa la relatività generale, sono basate sul principio di equivalenza di Einstein (EEP). Nonostante la sua grande importanza, l'EEP è provato direttamente solo con una precisione assai scarsa ( $10^{-4}$ ). Tuttavia è possibile provare l'EEP indirettamente, collegandolo con il principio di equivalenza di Galileo, che è provato con grande precisione ( $10^{-13}$ ). Questo collegamento funziona solo purché non ci sia rotazione del piano di polarizzazione lineare della luce su grandi distanze (la cosiddetta CPR). Quindi la ricerca sulla CPR ha assunto grande importanza ed è stata fatta usando la polarizzazione di radio galassie distanti e del fondo cosmico a micro-onde, finora con esito negativo. Recentemente abbiamo proposto un nuovo metodo per cercare la CPR, usando un particolare tipo di polarizzazione del fondo cosmico.

**Parole chiave.** Principio di equivalenza, relatività generale, fondo cosmico a micro-onde

Galileo, che ha vissuto gli ultimi 10 anni della sua vita su questo Colle, è stato fra i primi a capire che la massa di un corpo agisce in due modi diversi: da una parte resiste ad una forza applicata, dall'altra attrae gravitazionalmente un'altra massa. Infatti Galileo ha fatto esperimenti sul rotolamento di sfere di pesi diversi

**Abstract.** All metric theories of gravity, including general relativity, are based on Einstein's equivalence principle (EEP). Despite its great importance, the EEP is tested directly only with a fairly low accuracy ( $10^{-4}$ ). It is nevertheless possible to test the EEP indirectly by connecting it with Galileo's equivalence principle, which is tested with very high precision ( $10^{-13}$ ). This connection functions only as long as there is no rotation of the plane of linear polarisation of the light traveling over great distances (the so-called Cosmic Polarization Rotation, CPR). Consequently the search for the CPR has assumed great importance, and has been carried out using the polarisation of distant radio galaxies and of the cosmic microwave background, to date with negative results. Recently we have proposed a new method for seeking the CPR, using a special type of polarisation of the cosmic background.

**Keywords.** Equivalence principle, general relativity, cosmic microwave background



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, che si basano sull'equivalenza fra la massa inerziale e quella gravitazionale. Non c'è nulla nelle leggi della fisica che implichi che queste due masse siano uguali. Ci vuole un principio: il principio di equivalenza fra un campo gravitazionale e un sistema di riferimento uniformemente accelerato, che è stato formulato in tre forme: 1) quella debole, detta anche di Galileo, in cui l'equivalenza vale per corpi in caduta libera e che implica appunto l'equivalenza fra massa inerziale e massa gravitazionale; 2) quella di Einstein (EEP), in cui l'equivalenza è estesa a tutti gli esperimenti che non includano forze gravitazionali; 3) quella forte, che include anche esperimenti gravitazionali. L'equivalenza debole è stata provata con grande accuratezza ( $10^{-13}$ ) con bilance di torsione. L'EEP invece è stato verificato solo con un'accuratezza di  $10^{-4}$  con esperimenti di redshift gravitazionale. Schiff (1960) ha ipotizzato che qualsiasi teoria della gravità, che sia invariante di Lorentz e che obbedisca al principio debole, debba obbedire anche all'EEP. Se questo fosse vero, l'EEP sarebbe provato con la stessa grande precisione del principio debole, aumentando molto la solidità sperimentale della relatività generale. Ni (1977) ha però trovato un contro-esempio unico alla congettura di Schiff: un particolare campo (pseudoscalare) che interagisce con il campo elettromagnetico conducendo ad una violazione del EEP, pur obbedendo al principio debole. Se esistesse, questo campo produrrebbe una rotazione della polarizzazione, la CPR. Quindi gli scienziati da più di venti anni sono andati a cercare la CPR. Per farlo serve una sorgente molto distante che emetta radiazione polarizzata e per la quale si possa prevedere con

Galileo, who lived the last 10 years of his life on this hill, was one of the first scientists to understand that the mass of a body acts in two different ways: on the one hand resisting to an applied force, and on the other gravitationally attracting another mass. Galileo indeed carried out experiments on the rolling of spheres of different weights along an inclined plane, on the synchronism of pendulums with different weights and – perhaps only theoretically – on different weights falling from the Leaning Tower of Pisa, all of which are based on the equivalence between inertial and gravitational mass. There is nothing in the laws of physics that implies that these two masses are equal. A principle is called for: the principle of equivalence between a gravitational field and a uniformly accelerated frame of reference. This principle has been stated in three forms: 1) the weak one, also known as Galileo's principle, where the equivalence holds for free falling bodies, which implies the equivalence between inertial and gravitational masses; 2) that of Einstein (EEP), in which the equivalence is extended to all experiments that do not include gravitational forces; and 3) the strong one, which also includes gravitational experiments. The weak equivalence has been tested with high accuracy ( $10^{-13}$ ) using torsion balances. The EEP, on the other hand, has been tested only to an accuracy of  $10^{-4}$  using gravitational redshift experiments. Schiff (1960) conjectured that any Lorentz-invariant theory of gravity which obeys the weak principle must also obey the EEP. If this were true, the EEP would be tested with the same high accuracy as the weak principle, greatly increasing the experimental solidity of general relativity. However, Ni (1977) found a unique counter-example to Schiff's conjecture: a particular field (pseudoscalar) that interacts with the electromagnetic field leading to a violation of the EEP

precisione l'orientazione del piano di polarizzazione all'emissione. Il fenomeno che consente questa previsione 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. Questo fenomeno 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. Per cercare la CPR fin dai primi anni '90 sono state usate radio galassie lontane 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 si osserva (p.e. di Serego Alighieri et al. 2010). Quindi la CPR non esiste a meno di qualche grado. In seguito anche il fondo cosmico a micro-onde (CMB) è stato utilizzato per cercare la CPR. 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 380000 anni dal Big Bang sono scesi a valori tali che le interazioni luce-materia sono cessate e la luce ha potuto procedere indisturbata, giungere fino a

while obeying the weak principle. This field, if it existed, would cause a rotation of the polarisation, the CPR. This is why, for over twenty years, scientists have been searching for the CPR. To do this, a very distant source emitting polarised radiation is required, for which it is possible to accurately predict the orientation of the polarisation plane on emission. This prediction is made possible by the phenomenon of reflection and scattering of radiation, whereby the reflected or scattered radiation is polarised in a direction exactly perpendicular to the plane that contains the incident ray and the reflected or scattered one. This phenomenon is exploited, for example, in Polaroid sunglass lenses, which allow only the vertically polarised light to pass through and block the reflections because they are horizontally polarised, since in most cases the incident ray and the reflected ray are on a vertical plane. Since the early 90s, distant radio galaxies have been used in the search for the CPR: these have an elongated appearance because they have a quasar in the centre that emits very strong radiation only in two opposite cones. We look at this object from outside the cones, and so we don't see the quasar directly, but we see the radiation scattered by the material around it (dust and gas). Therefore, as in the case of a beacon not pointing at us, we see an object elongated along the axis of the cones. Moreover because the radiation we see is scattered, it has to be polarised perpendicularly to the axis of the elongation of the image. This can be tested and is precisely what we observe (see di Serego Alighieri et al. 2010). Therefore the CPR does not exist, within a few degrees. Subsequently, the cosmic microwave background (CMB) has also been used to search for the CPR. When, immediately after the Big Bang, the universe was very dense and hot, light interacted very frequently with matter.

noi sotto forma di CMB, e portarci l'informazione sull'ultima interazione (diffusione) con la materia. Il CMB 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 che nelle zone in cui c'è una variazione di intensità, per esempio nei dintorni di un picco di intensità dove è più probabile che la luce diffusa venga dal picco piuttosto che da altre direzioni. Questo consente di prevedere la direzione di polarizzazione del CMB, legandola alle variazioni di intensità, e quindi di cercare la CPR, che però, anche nel caso del CMB, non è stata finora trovata, entro un paio di gradi (p.e. Kaufman et al. 2014).

Inoltre il CMB, oltre alla componente di polarizzazione fin qui descritta, detta E-mode in analogia con il campo elettrico E, ne ha anche un'altra: quella legata alla struttura a vortice della polarizzazione, detta B-mode, in analogia con il campo magnetico B. Recentemente alcuni esperimenti sulla polarizzazione del CMB, SPTpol (Hanson et al. 2013), POLARBEAR (Ade et al. 2014b) e BICEP2 (Ade et al. 2014a), hanno visto la polarizzazione B-mode e l'hanno attribuita a lenti gravitazionali fra il CMB e noi e ad onde gravitazionali che sarebbero generate durante un brevissimo periodo di rapidissima espansione iniziale dell'universo (inflazione). Al di là di quest'ultima interpretazione, che rimane da provare, con Wei-Tou Ni ed un suo studente abbiamo recentemente proposto un nuovo modo di cercare la CPR e quindi di provare l'EEP, utilizzando la polarizzazione B-mode del CMB, grazie all'accoppiamento di questa con la polarizzazione E-mode. Al momento la

However, with the expansion of the universe the density and temperature decreased, and by approximately 380,000 years after the Big Bang they had fallen to such levels that light-matter interactions ceased and light was able to proceed undisturbed, to reach as far as us in the form of CMB and bring us information about the latest interaction (scattering) with matter. The CMB is extremely uniform, but it features small disuniformities of intensity related to the first disuniformities of the expanding matter. Therefore the polarisation of the CMB, which is scattered radiation, is almost always zero, as a result of the random combination of rays scattered from different directions, except in the areas where there is a change of intensity, for example in the vicinity of an intensity peak, where it is more likely that the scattered light comes from the peak than from other directions. This makes it possible to predict the polarisation direction of the CMB, connecting it with the variations of intensity, and therefore to seek the CPR, which, however, even in the case of the CMB, has not yet been found, within a couple of degrees (see Kaufman et al. 2014).

The CMB, moreover, in addition to the polarization component described so far and called E-mode in analogy to the electrical field E, has another kind of polarization, that related to the swirl structure of the polarisation, and called B-mode, in analogy with the magnetic field B. Recently, a number of experiments on the polarisation of the CMB, SPTpol (Hanson et al. 2013), POLARBEAR (Ade et al. 2014b) e BICEP2 (Ade et al. 2014a), have observed the B-mode polarisation and have attributed it to gravitational lensing between the CMB and us, and to gravitational waves generated during a very short period of extremely rapid initial expansion of the universe (inflation). Beyond this latter interpretation, which remains to be proved, with Wei-Tou

qualità dei dati disponibili consente solo di porre un limite sulle variazioni della CPR nella zona di cielo osservata, ma in futuro sarà possibile anche porre limiti, o magari rivelare il valore assoluto della CPR. Chi volesse cimentarsi con i dettagli può leggere il nostro articolo (di Serego Alighieri et al. 2014).

## Bibliografia

- Ade et al. (BICEP2 Collaboration) 2014a, Phys. Rev. Lett. 112, 241101  
 Ade et al. (POLARBEAR Collaboration) 2014b, Phys. Rev. Lett. 113, 021301  
 di Serego Alighieri, S., Finelli, F. & Galaverni, M. 2010, ApJ 715, 33  
 di Serego Alighieri, S., Ni, W.-T. & Pan, W.-P. 2014, ApJ 792, 35  
 Kaufman, J.P., Keating, B.G. & Johnson, B.R. 2014, arXiv:1409.8242  
 Ni, W.-T. 1977, Phys. Rev. Lett., 38, 301  
 Schiff, L.I. 1960, Am. J. Phys. 28, 340

*Sperello di Serego Alighieri* è astronomo associato presso l'Osservatorio Astrofisico di Arcetri. Precedentemente ha lavorato per l'Agenzia Spaziale Europea, sia a Noordwijk in Olanda, che a Monaco di Baviera. I suoi interessi scientifici vanno dalla strumentazione astronomica all'evoluzione delle galassie, dai nuclei galattici attivi al mezzo interstellare delle galassie ellittiche, dai *bursts* di raggi gamma ai principi fondamentali della fisica.

Ni and one of his students we recently proposed a new way of looking for CPR and hence testing the EEP, using the B-mode polarisation of the CMB, which results from its coupling with the E-mode polarisation. At present the quality of the data available makes it possible only to set a limit on the variance of the CPR in the area of sky observed, but in the future it will also be possible to set limits, or possibly detect the absolute value of the CPR. Anyone who wishes to explore the argument in greater detail can read our article (di Serego Alighieri et al. 2014).

## Bibliography

- Ade et al. (BICEP2 Collaboration) 2014a, Phys. Rev. Lett. 112, 241101  
 Ade et al. (POLARBEAR Collaboration) 2014b, Phys. Rev. Lett. 113, 021301  
 di Serego Alighieri, S., Finelli, F. & Galaverni, M. 2010, ApJ 715, 33  
 di Serego Alighieri, S., Ni, W.-T. & Pan, W.-P. 2014, ApJ 792, 35  
 Kaufman, J.P., Keating, B.G. & Johnson, B.R. 2014, arXiv:1409.8242  
 Ni, W.-T. 1977, Phys. Rev. Lett., 38, 301  
 Schiff, L.I. 1960, Am. J. Phys. 28, 340

*Sperello di Serego Alighieri* is an associate astronomer at the Arcetri Astrophysical Observatory. He previously worked for the European Space Agency, both in Noordwijk in Holland and in Munich. His scientific interests include astronomical instruments, the evolution of galaxies, active galactic nuclei, the interstellar medium of elliptical galaxies, and bursts of gamma rays, through to the fundamental principles of physics.

