

# Legge di Galilei nello spazio

✍ A. Bettini 📅 31-10-2022 🔗 <http://www.primapagina.sif.it/article/1598>

L'universalità del moto di un corpo su cui agisce la sola gravità è stata testata con alta precisione nello spazio dalla missione MICROSCOPE (Micro-Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence), che ha ora pubblicato i risultati finali. L'esperimento ha operato in un satellite del Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) con due coppie di masse. Ciascuna coppia consiste in due cilindri uno dentro l'altro. In una, di riferimento, le masse sono entrambe di platino-rodio, nell'altra, in cui si cerca il segnale, una massa è di platino-rodio, l'altra è di titanio. Si cerca una possibile differenza nell'accelerazione di masse di diversa composizione chimica nello stesso campo gravitazionale, misurando la deviazione delle forze elettrostatiche necessaria per mantenere le due masse sulla stessa traiettoria. Il risultato nullo porta al miglior limite sulla differenza tra i rapporti di massa inerziale e gravitazionale di due corpi diversi A e B,  $\eta = (m_i/m_g)_A - (m_i/m_g)_B$ , pari a  $|\eta| < 10^{-15}$ .

La scoperta della legge, ora chiamata Principio di Equivalenza, è, come noto, di Galilei. Narra Vincenzo Viviani nel *"Racconto storico della vita del Sig. Galileo Galilei"* come, ancora giovane professore a Pisa, Galilei mostrasse che due *"mobili della stessa materia disegualmente gravi"* lasciati cadere dalla Torre si muovono *"con la stessa velocità"*, in contraddizione da quanto voluto da Aristotele. Se mai fu fatta, questa fu solo una (spettacolare) dimostrazione. Come Galilei stesso osserverà infatti ne *"Le due nuove scienze"*, il moto di caduta libera è troppo veloce per una misura precisa, e bisogna rallentarlo. Lo fece a Padova andando a confrontare i periodi di pendoli della stessa lunghezza, ma di materiali diversi. *"Ho preso due palle, una di piombo ed una di sughero, quella ben più di cento volte più grave di questa, e ciascheduna di loro ho attaccata a due sottili spagheti eguali, lunghi quattro o cinque braccia, legati ad alto; allontanata poi l'una e l'altra palla dallo stato perpendicolare, gli ho dato l'andare nell'istesso momento, ed esse, scendendo per le circonferenze de' cerchi descritti da gli spaghi eguali, lor semidiametri, passate oltre al perpendicolo, son poi per le medesime strade ritornate indietro; e reiterando ben cento volte per lor medesime le andate e le tornate hanno sensatamente mostrato, come la grave va talmente sotto il tempo della leggiera, che né in ben cento vibrazioni, né in mille, anticipa il tempo d'un minimo momento, ma camminano con passo egualissimo."* La precisione con cui fu determinato un limite superiore, con parole moderne, del parametro  $\eta$  fu di qualche per mille.

Isaac Newton ripeterà gli esperimenti con pendoli di diversi materiali (oro, argento, piombo, vetro, sabbia, lana, acqua e farina), perfezionandoli con il controllo dello smorzamento dell'aria (come descritto nei *"Principia, III, Prop. VI"*) e concludendo che in corpi dello stesso peso (stessa massa gravitazionale) avrebbe potuto osservare, se ci fosse stata, una differenza di materia (cioè di massa inerziale) minore del per mille, cioè  $|\eta| < 10^{-3}$ . Il balzo in avanti di Newton però fu di provare che la legge vale anche nello spazio. In questo caso i due corpi sono Giove, che "cade" verso il Sole, e uno qualunque dei suoi satelliti, che "cade" sia verso Giove sia, con questo, verso il Sole. Scrive: *"Se, a distanze uguali dal Sole, qualsiasi satellite gravitasse verso il Sole in proporzione alla sua quantità di materia con una forza maggiore di Giove in proporzione alla sua, ..., allora la distanza tra i centri del Sole e dell'orbita del satellite sarebbe sempre maggiore della distanza tra i centri del Sole e di Giove quasi esattamente come la radice quadrata di quella proporzione: come con qualche calcolo ho trovato."* Come a volte fa, Newton lascia come esercizio al lettore il "qualche calcolo" (traccia: considerare il "satellite medio", cioè posto nella posizione mediata su un periodo, durante il quale Giove praticamente non si muove, le distanze dal Sole variano come la radice della forza, approssimare al prim'ordine) e conclude *"le orbite dei satelliti sono concentriche a Giove, e quindi le accelerazioni di gravità di Giove, e di tutti i suoi satelliti verso il Sole, sono tra loro uguali"*. Quantitativamente trova  $|\eta| < 10^{-3}$ .

Il test di Newton, praticamente nella stessa forma, fu riproposto, senza citarlo, nel 1968 da Kenneth Nordtvedt per il sistema Terra-Luna. Già i primi uomini sulla Luna, Aldrin e Armstrong, nel 1969 deposero sulla superficie un retro-riflettore che permise di misurare negli anni successivi con grande accuratezza ( $< 15$  cm) l'orbita della Luna, dal tempo di andata e ritorno di impulsi laser, e di stabilire il limite  $|\eta| < 7 \times 10^{-14}$ .

La missione MICROSCOPE iniziò con il lancio da Kourou il 25 aprile 2016 per concludersi il 18 ottobre 2018. Il satellite può ruotare attorno all'asse normale al piano orbitale, in direzione opposta al moto orbitale. Nel riferimento del satellite, il campo gravitazionale della Terra ruota a una frequenza che è somma di quella orbitale e quella di spin. Una violazione del WEP (Weak Equivalence Principle) dà segnale, ancora una volta periodico, a questa frequenza. Il risultato fornisce un test della Relatività Generale, e permette di porre limiti a modifiche sia di questa sia del Modello Standard della fisica subnucleare. La discussione finale mostra come siano possibili miglioramenti tali da permettere una sensibilità sul

parametro  $\eta$  di  $10^{-17}$ .

Scopri di più

## Galilei's law in space

The universality of the motion of a body under the action of gravity only has been tested with high precision in space by the MICROSCOPE (Micro-Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence) mission, which has now published their final result. The experiment operated on board of a satellite of the Centre National d'Études Spatiales (CNES) with two pairs of masses. Each pair consists of two cylinders, one inside the other. The masses of one of the pairs, the reference one (SUREF), are both of platinum-rhodium, those of the other (SUEP), where the signal is searched, are one of platinum-rhodium, the other of titanium. A possible difference in the acceleration of masses of different chemical composition in the same gravitational field, is searched measuring the deviation of electrostatic forces necessary to maintain the two masses on the same trajectory. The result provides the best limit on the difference between the ratios of inertial and gravitational mass of two different bodies A and B,  $\eta = (m_i/m_g)_A - (m_i/m_g)_B$ , as  $|\eta| < 10^{-15}$ .

As it is well known, the discovery of the law, now called Equivalence Principle, is of Galileo Galilei. Vincenzo Viviani in the *"Historical narration of the life of Mr. Galileo Galilei"*, writes how he, then a young professor at Pisa, showed that two *"bodies of the same matter of different weights"*, when dropped from the top of the Tower, move *"with the same velocity"*, in contradiction to the Aristotle's physics. However, this, if really happened, was just a (spectacular) demonstration. Indeed, as Galilei himself will state in *"The two new sciences"*, the free fall motion is too fast for allowing a precise measurement, and it must be slowed down. He did that in Padua when comparing the periods of two pendulums of the same length but of different materials. *"I took two balls, one of lead and one of cork, the former more than one hundred times heavier than the latter, and suspended them high, with two equal thin threads, each four or five cubits long. Pulling one and the other ball out of the perpendicular, I let them go at the same instant, and they, falling along the circumferences of circles having the equal strings for semi-diameters, passed beyond the perpendicular, returned back along the same paths. And, repeating one hundred times by themselves the forward and backward motions have sensibly shown that the heavy body maintains so nearly the time of the light one that neither in a hundred vibrations nor even in a thousand will the former anticipate the latter by a minimum moment, so perfectly do they keep step"*. The upper limit, in modern words, of the parameter  $\eta$  was of a few permille.

Isaac Newton will repeat the Galilei's experiments with pendulums of different materials (gold, silver, lead, glass, sand, common salt, wood, water, and wheat), improving them with the control of the air damping (as described in *"Principia, III, Prop. VI"*) and concluding that in bodies of the same weight (gravitational mass) he would be able to observe, if existed, a difference of matter (*i.e.*, inertial mass) less than one part in a thousand, namely  $|\eta| < 10^{-3}$ . But the forward jump of Newton was proving that the law is valid also in space. In this case the two bodies are Jupiter, which "falls" towards the Sun, and any of its satellites, which "falls" both toward Jupiter and, with the latter, toward the Sun. He writes: *"If, at equal distances from the Sun, any satellite, in proportion to the quantity of its matter, did gravitate towards the Sun with a force greater than Jupiter in proportion to his, according to any given proportion ..; then the distance between the centres of the Sun and of the satellite's orbit would be always greater than the distance between the centres of the Sun and of Jupiter nearly as the square root of that proportion: as by some computations I have found"*. As he sometimes does, Newton leaves the "some computations" as an exercise for the reader (hint: consider a "mean satellite", namely the satellite in its position mediated on its period, during which Jupiter practically does not move, the distances from the Sun vary as the square root of the force, approximate to the first order) and concludes: *"the orbits of the satellites are concentric to Jupiter, and therefore the accelerative gravities of Jupiter, and of all its satellites towards the Sun, are equal among themselves"*. Quantitatively, he states  $|\eta| < 10^{-3}$ .

Newton's test was proposed again, practically in an identical form, without quoting him, in 1968 by Kenneth Nordtvedt, for the Earth-Moon system. Already the first men on the Moon, Aldrin and Armstrong, deployed in 1969 on the surface a retro-reflector that allowed measuring in the following years the orbit of the Moon with extreme accuracy (15 cm), from the round time of Laser pulses. The upper limit is  $|\eta| < 7 \times 10^{-14}$ .

The MICROSCOPE mission began with its launch from Kourou on 25 April 2016 and was completed on 18 October 2018. The satellite can be spun around an axis normal to the orbital plane and oppositely to the orbital motion. In the satellite frame, the Earth's gravity field rotates at the sum of the orbital and spin frequencies. A WEP (Weak Equivalence Principle) violation would give a signal, periodic once more, at this frequency. The result provides a test of General Relativity and allows, as well, to put limits of modifications both of this theory and of the Standard Model of subnuclear

physics. A final discussion shows how improvements to the technique will allow to reach the sensitivity  $\eta$  of  $10^{-17}$ .

Learn more about



**Alessandro Bettini** - Professore emerito presso l'Università di Padova, fisico sperimentale di particelle elementari, ha condotto e diretto esperimenti al CERN e LNGS. È autore di più di 200 pubblicazioni scientifiche e di volumi di fisica generale e particelle elementari e per il pubblico. È socio dell'Accademia Galileiana di Scienze Lettere e Arti, della SIF, di cui è stato vicepresidente, e fellow dell'EPS.

*Professor emeritus at Padua University and experimental physicist in elementary particle physics, he has performed and led experiments at CERN and LNGS. He is the author of more than 200 scientific publications and of volumes in General Physics and Elementary*

*Particles for the general public. He is a member of the Accademia Galileiana di Scienze Lettere e Arti, of the SIF, of which he has been the vice-president, and fellow of the EPS.*