La bilancia di Loránd Eötvös
e il principio di equivalenza

di

Giancarlo Peruzzi

2009

Dai tavolini all'aperto delle poche *kàvehàz* rimaste in Via Kecskeméti, a Budapest, si può ammirare la facciata principale dell'Università Loránd Eötvös. Fondata nel 1635 a Nagyszombat (oggi Tmava, in Slovacchia), fu trasferita a Buda solo nel 1777 e sette anni più tardi a Pest, nella sede attuale. Fu solo nel 1950 che l'università venne intitolata alla memoria del fisico ungherese Loránd Eötvös. Il barone Loránd Eötvös (il cui nome germanizzato, Roland von Eötvös, è altrettanto usato), nato a Buda nel 1848 e morto a Budapest nel 1919, coltivò svariati interessi in diversi campi del sapere ed ebbe un ruolo direttivo importante per il suo Paese. Fu infatti presidente dell'Accademia delle Scienze, fu prima professore di Fisica Teorica e poi rettore dell'Università delle Scienze, fondò la Società di Matematica e Fisica e diresse l'Istituto di Fisica Sperimentale. Egli, però, è noto soprattutto per il suo celebre pendolo (o bilancia) di torsione e le misure sulla proporzionalità tra massa inerziale e massa gravitazionale dei corpi. In questo suo interesse egli fu ispirato dalla bellezza del sistema Newtoniano e ancora oggi alcuni importanti programmi scientifici (ne accenneremo alla fine di queste brevi note) hanno l'obiettivo di perfezionare, sfruttando nuove idee e moderne tecnologie, i risultati che il fisico ungherese ottenne a partire da oltre cent'anni fa. Ricordo, qui, che a detta di alcuni storici della fisica l'esperimento di Eötvös svolge nella relatività generale un ruolo analogo a quello che l'esperimento di Michelson-Morley ha per relatività ristretta.

Voglio però far cominciare la nostra storia nel 1554 quando videro la luce due edizioni di un volumetto di Giovanni Battista Benedetti, grande studioso di meccanica del XVI secolo. Su di esso Benedetti scriveva che "due corpi della stessa forma e della stessa specie tra loro uguali o disuguali, per uguale spazio, nello stesso mezzo, si muovono in egual tempo"[1]. Di questo enunciato egli dà una propria ingegnosa dimostrazione: due sfere, dello stesso materiale, ma una quadrupla dell'altra vengono lasciate cadere dalla medesima altezza; esse toccano terra allo stesso istante, cioè percorrono la stessa distanza nel medesimo tempo in quanto, immaginando di dividere la sfera più grande in quattro sfere più piccole e uguali alla seconda sfera, queste cadranno con la medesima velocità della seconda sfera. Il ragionamento può essere semplificato – e lo fece Benedetti nel 1585, sulla sua opera più importante, *Diversarum speculayionum mathematicarum et physcarum liber* – immaginando una palla che cade divisa in due parti le quali, naturalmente, cadrebbero con la stessa velocità della palla intera. Noi sappiamo che è Galileo Galilei ad essere ricordato come il primo ad asserire che i corpi cadono con la stessa accelerazione e in effetti Benedetti ne giunse vicino ma non individuò la generalizzazione fondamentale: egli considerava solo sfere della "stessa specie", cioè della medesima densità mentre fu Galilei a estendere il principio a corpi di materiale diverso. Degli insegnamenti di Benedetti Galileo se ne giova fin dal *De Motu* (1590), nel quale rifiuta con decisione l'affermazione di Aristotele secondo la quale la velocità di caduta dei corpi è proporzionale al loro peso. Che i celebri esperimenti galileiani *ex alta turri* abbiano effettivamente avuto luogo, come sostiene Vincenzo Viviani quando narra la vita del suo maestro pisano, sarà difficile da appurare ma resta il fatto che a tali esperimenti Galileo accenna nei suoi scritti. Nei *Discorsi intorno a due nuove scienze* (1638), Galilei è però molto esplicito:

> "… ho preso due palle, una di piombo e una di sughero, quella ben più di cento volte più grave di questa, e ciascheduna di loro ho attaccata a due sottili spaghetti 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 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."

Ancora più esplicito è il brano seguente, sempre dal capolavoro del '38:

> "Veduto come la differenza di velocità, ne i mobili di gravità diverse, si trova essere sommamente ne i mezzi più è più resistenti […] dove che tra palle d'oro, di piombo, di rame, di porfido, o di altre materie gravi, quasi del tutto insensibile sarà la disegualità del moto per aria, ché sicuramente una palla d'oro alla fine della scesa di cento braccia non preverrà una di rame di quattro dita; veduto, dico, questo, cascai in opinione che se si levasse totalmente la resistenza del mezzo, tutte le materie descenderebbero con eguali velocità."

Dunque nella mente di Galileo la questione è ben chiara e poco importa se egli sembra esagerare quando afferma di aver verificato l'uguaglianza dei periodi per mille oscillazioni: ben prima l'attrito dell'aria avrebbe frenato inesorabilmente i pendoli. Tra gli studiosi che successivamente si interessano della questione

---

[1] G.B. Benedetti, *Resolutio omnium Euclidis problematum*, (1553) Venezia.

un ruolo di primo piano spetta a Newton il quale, ripetendo l'esperienza del fisico pisano, prestò attenzione al problema dell'attrito dell'aria: non potendolo eliminare cosa escogitò, dunque?

> "La caduta di tutti i gravi sulla Terra (tenuto conto dell'ineguale ritardo che nasce dalla scarsissima resistenza dell'aria) avviene in tempi uguali, come già altri osservarono; ed è possibile notare con grande precisione l'uguaglianza di tali tempi nei pendoli. Ho tentato l'esperimento con pendoli d'oro, d'argento, di piombo, di vetro, di sabbia, di sale, di legno, d'acqua e di frumento. Preparavo due recipienti di legno rotondi ed uguali. Riempivo l'uno di legno, e all'altro centro di oscillazione sospendevo (nella misura del possibile esattamente) un uguale peso d'oro. I recipienti, che pendevano da fili uguali, lunghi undici piedi, costituivano i pendoli, assolutamente uguali quanto al peso, alla figura e alla resistenza dell'aria; ed impresse uguali oscillazioni, una volta posti uno vicino all'altro, andavano e tornavano insieme per lunghissimo tempo. Perciò la quantità di materia nell'oro stava alla quantità di materia nel legno, come l'azione della forza motrice in tutto l'oro alla medesima azione in tutto il legno; ossia, come il peso dell'uno stava al peso dell'altro. E così per i rimanenti. Mediante questi esperimenti potei chiaramente apprendere che la differenza di materia in corpi dello stesso peso è minore della millesima parte di tutta la materia" (*Principia*, 1686)

Adeguatamente attrezzatosi di potenti strumenti matematici, costruendo il maestoso edificio della sua Meccanica, impiegò il suo ingegno non solo per rispondere a domande sul "come" ma anche sul "perché". Egli infatti ben comprende che l'uguaglianza tra le accelerazioni di corpi diversi nel peso e nella "specie", accelerazioni dovute alla forza di gravità, è spiegata dall'uguaglianza tra la massa inerziale m_i (quella che egli chiama *materia*[2] e che determina l'accelerazione a di un corpo soggetto ad una forza F: $a = \frac{F}{m_i}$, seconda legge della dinamica) e la massa gravitazionale m_g (quella che compare nella legge della gravitazione universale: $F = G\frac{m_g \cdot M_g}{r^2}$)

Utilizzando il moderno linguaggio fisico-matematico si ha infatti che l'equazione del moto di un pendolo è:

$$\frac{d^2\vartheta}{dt^2} + \frac{m_g g}{m_i l} sen\vartheta = 0$$

(ϑ è l'angolo che il filo lungo l forma con la verticale. g è l'accelerazione di gravità e m_g e m_i sono le masse rispettivamente inerziale e gravitazionale del pesetto attaccato al filo). Scritta così l'equazione non si risolve analiticamente ma considerando piccole oscillazioni attorno alla verticale senϑ si confonde con ϑ; allora l'equazione si risolve facilmente e ne risulta un periodo di oscillazione:

$T = 2\pi\sqrt{\frac{m_i l}{m_g g}}$. Ecco dunque che usando *pendoli d'oro, di sabbia, di sale*, il periodo T non varia perché, qualunque sia il materiale usato, i rapporti $\frac{m_i}{m_g}$ sono uguali o meglio, dice Newton, sulla base dei suoi esperimenti, differiscono al massimo dell'1 per mille. (Usando opportune unità di misura è possibile avere $\frac{m_i}{m_g}$ = 1 e si ottiene la forma alternativa del *principio di equivalenza di Newton*: la massa inerziale è uguale alla massa gravitazionale, per qualsiasi corpo).

Il risultato di Newton, $\frac{|m_i - m_g|}{m_i} < 10^{-3}$ non fu che il primo di una lunga serie. Esperimenti eseguiti successivamente, nel corso dei secoli, hanno avuto l'unico scopo di migliorare la precisione degli esperimenti di Galileo e di Newton. Usando apparecchiature diverse ma, sostanzialmente, riconducibili o a un pendolo

---

[2] Il 1638 fu l'anno di pubblicazione non solo dei *Discorsi* di Galileo ma anche del *De motu gravium solidorum* di Giovan Battista Baliani. È lui, prima di Newton, a distinguere tra peso e materia, cioè tra masse gravitazionale e inerziale. Nell'opera citata, infatti, si legge: "mentre il peso si comporta come un agente, la materia si comporta invece come un paziente, e quindi i corpi si muovono secondo la proporzione dei loro pesi alla loro materia, onde se cadono senza impedimento verticale, si devono muovere tutti con la stessa velocità, poiché quelli che hanno più peso, hanno più materia". In una nuova edizione dell'opera, nel 1646, si può leggere ancora: "La natura dei corpi è tale che il loro peso sia connesso alla materia e sempre la segua a tale condizione: che quanto è il peso, ossia la sua potenza d'azione, altrettanta sia la materia e perciò la resistenza; dal che infine seguono effetti eguali". È proprio il concetto di massa inerziale, non solo, ma anche della sua proporzionalità con il peso.

o a una bilancia di torsione o a una caduta libera, molti fisici hanno contribuito a rendere la relazione $m_i = m_g$ una delle più sottoposte a verifica sperimentale. Ecco una lista che riporta le principali tappe in questa lunga corsa iniziata con Galilei e ancora lontana dall'essere conclusa:

Sperimentatore	*Anno*	*Metodo*	$\lvert m_i - m_g \rvert / m_i$
Galileo	1610	pendolo	$\approx 10^{-2}$
Newton	1680	pendolo	$< 10^{-3}$
Bessel	1827	pendolo	$< 2\times 10^{-5}$
Eotvos	1890	bilancia di torsione	$< 5\times 10^{-8}$
Eötvös et al.	1905	bilancia di torsione	$< 3\times 10^{-9}$
Southerns	1910	pendolo	$< 5\times 10^{-6}$
Zeeman	1917	bilancia di torsione	$< 3\times 10^{-8}$
Potter	1923	pendolo	$< 5\times 10^{-6}$
Renner	1935	bilancia di torsione	$< 2\times 10^{-10}$
Dicke et al.	1964	bilancia di torsione,Sole	$< 3\times 10^{-11}$
Braginsky et al.	1971	bilancia di torsione,Sole	$< 9\times 10^{-13}$
Koester	1976	caduta libera di neutroni	$< 3\times 10^{-4}$
Shapiro et al.	1976	Lunar Laser Ranging	$< 1\times 10^{-12}$
Keiser et al.	1979	massa fluttuante	$< 4\times 10^{-11}$
Niebauer et al.	1987	caduta libera	$< 5\times 10^{-10}$
Kuroda e Mio	1989	caduta libera	$< 8\times 10^{-10}$
Adelberger et al.	1989	bilancia di torsione	$< 1\times 10^{-13}$
Su et al.	1994	bilancia di torsione	$< 1\times 10^{-13}$
STEP	2010 ?	caduta libera in un satellite	$< 1\times 10^{-18}$

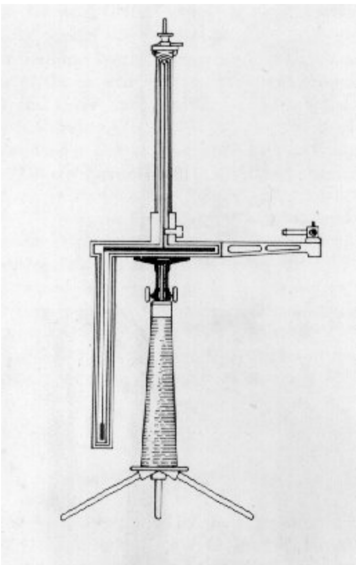

Figura 1

La bilancia asimmetrica di Eötvös

Dopo questa opportuna, a mio avviso, introduzione storica torniamo al fisico ungherese barone Lorand Eötvös, che svolse tra il 1889 e il 1919, anno della sua morte, una lunga attività di sperimentatore con bilance di torsione (che possono ricordare in qualche modo la bilancia di Cavendish) allo scopo di verificare quello che oggi, nell'ambito della Relatività Generale, è chiamato principio di equivalenza debole (cioè il principio di equivalenza di Newton). Inizialmente, per eseguire una misura con la sua bilancia, a Eötvös erano necessarie ben cinque ore ma, in seguito a continue migliorie il tempo di misura si ridusse ad una quarantina di minuti. Per la notevole precisione dei risultati conseguiti con l'utilizzo della bilancia da lui inventata, nel 1906 Eötvös fu premiato dalla Società Reale Scientifica di Gottinga, anche se inizialmente il premio era stato previsto per un lavoro teorico, non sperimentale, sulla gravitazione. La motivazione fu che *un metodo particolarmente sensibile è stato ideato da Eötvös per la comparazione tra inerzia e peso della materia. In considerazione di ciò e dei nuovi sviluppi dell'elettrodinamica come pure delle sostanze radioattive, la legge di Newton sulla proporzionalità tra inerzia e gravità deve essere verificata con la maggiore accuratezza possibile*.

La bilancia è costituita da un braccio orizzontale che porta ai cui estremi due masse, A e B, di materiali diversi, per esempio platino, che Eötvös utilizzò come materiale campione, e rame. La Figura 1, a fianco, rappresenta un disegno della bilancia di torsione. Come si vede la bilancia non è simmetrica perché originariamente era stata progettata per un uso leggermente diverso. Ebbene, se i rapporti $\frac{m_i}{m_g}$ del platino e del rame fossero diversi i bracci subirebbero una torsione che sarebbe stata equilibrata dal momento torcente del filo di sospensione. Ponendoci nel sistema di riferimento della Terra, le masse A e B sono soggette alla forza peso e alla forza centrifuga. Si pensi alla bilancia collocata sulla superficie terrestre ad una latitudine media. L'asse della bilancia (asse z) è orientato verticalmente e il braccio (asse y) in direzione est-ovest. L'asse x è orientato quindi in direzione nord-sud.

La forza centrifuga (v. Figura 2, a pagina seguente) si può scomporre in una componente $m_i a_x$ lungo l'asse x e una componente $m_i a_z$ lungo z. Il momento di torsione attorno all'asse z è:

$$\tau = m_{iA} a_x l_A - m_{iB} a_x l_B \,,$$

dove l_A e l_B sono le distanze delle masse A e B dall'asse z. Il braccio è libero di ruotare anche attorno all'asse x ma, in condizioni di equilibrio, dev'essere:

$$(m_{gA} g - m_{iA} a_x) \cdot l_A = (m_{gB} g - m_{iB} a_x) \cdot l_B \,.$$

Eliminando l_B dalle due equazioni precedenti e dopo alcuni semplici passaggi algebrici si giunge alla seguente espressione del momento di torsione:

$$\tau = m_{iA} a_x l_A \cdot \frac{g \cdot (m_{gB} / m_{iB} - m_{gA} / m_{iA})}{g \cdot m_{gB} / m_{iB} - a_z}$$

Da questa equazione si vede che nell'ipotesi $m_{gB} / m_{iB} \neq m_{gA} / m_{iA}$ ci sarebbe momento torcente e il braccio ruoterebbe fino ad aversi equilibrio tra momento torcente e momento di torsione del filo di sospensione. Allora, in questo caso, se in condizioni di equilibrio il braccio fosse allineato in direzione est-ovest, è facile capire che ruotando l'apparecchio di 180°, il braccio non sarebbe più allineato nella medesima direzione.

Ruotando il braccio di 180°, se i rapporti tra massa gravitazionale e massa inerziale fossero tra loro diversi, il braccio non sarebbe più perfettamente allineato lungo la direzione est-ovest.

I risultati ottenuti da Eötvös e dai suoi collaboratori, Pekár e Fekete, con la bilancia di torsione fecero scalpore in quanto superarono in precisione di gran lunga quelli ottenuti una sessantina d'anni prima da Bessel che, come Galilei e Newton, aveva fatto uso di pendoli. Si passò infatti da una accuratezza di una parte su 60.000 ad una accuratezza di una parte su 20.000.000.

Oggi alcuni storici ritengono che Eötvös sia stato piuttosto ottimista nella valutazione dei risultati ottenuti dato che per giungere ad un tale grado di accuratezza non si potrebbe prescindere dal gradiente del campo gravitazionale dovuto agli stessi sperimentatori.

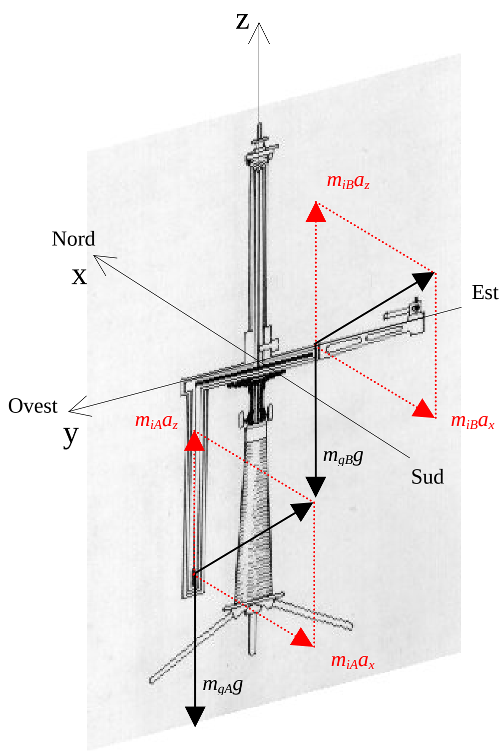

Figura 2

Forze agenti sulla bilancia. Le forze centrifughe e le forze peso nel disegno non sono in scala.

Come già detto, l'idea di Eötvös ebbe una notevole influenza nell'attività dei fisici sperimentali nei decenni successivi. Nel 1964 il gruppo di Robert Dicke a Princeton impiegò una bilancia di torsione simile a quella di Eötvös ma progettata per misurare l'eventuale momento di torsione dovuto alla forza gravitazionale esercitata dal Sole e alla forza centrifuga del moto della terra attorno al Sole. Il braccio della bilancia è fisso rispetto alla terra e ciò che si misura è il momento di torsione necessario a mantenerlo nella sua posizione. Per capire come funziona la bilancia di Dicke si pensi di utilizzare una bilancia di Eötvös, con i due bracci perfettamente uguali ($l_A = l_B = l$) collocata al polo nord terrestre: allora il momento totale rispetto all'asse verticale z risulta:

$$\tau = \left(m_{gA} g - m_{iA} a\right) \cdot l sen\phi - \left(m_{gB} g - m_{iB} a\right) \cdot l sen\phi$$

(g e a sono rispettivamente l'accelerazione gravitazionale dovuta al Sole e l'accelerazione centrifuga nel sistema di riferimento della terra orbitante attorno al Sole mentre ϕ è l'angolo tra il sole e il braccio della bilancia). Perciò, a causa del fattore $sen\phi$, il momento di torsione presenta un periodo di 24 ore. Qualunque altro effetto indesiderato che produca del "rumore" con periodo diverso dalle 24 ore della rotazione terrestre può essere filtrato mediante un'analisi di Fourier. Per eliminare l'influenza dei gradienti del campo gravitazionale dovuto ai corpi vicini alla bilancia, le misurazioni vennero effettuate tramite un controllo automatico a distanza ed inoltre la struttura dell'apparato era diversa da quella usata da Eötvös: il braccio era stato sostituito da un triangolo ai cui vertici erano appese tre masse.

L'esperimento di V. B. Braginsky, del 1971, utilizzava la medesima tecnica ma venne utilizzato un filo di sospensione molto più lungo e un sistema di sospensione con otto masse. Si ottenne allora una accuratezza di una parte su 10^{13}.

Adelberger, a Washington, impiegò a partire dal 1989 una bilancia per misurare il momento di torsione dovuto alla gravitazione terrestre e alla forza centrifuga del movimento attorno alla terra, quindi operando in maniera simile a Eötvös (e infatti l'esperimento è noto come «Eöt-Wash»), ma montando l'apparecchiatura su una piattaforma girevole con periodo di 2 ore poté eliminare mediante analisi di Fourier il "rumore" con periodo diverso e dovuto agli effetti indesiderati. Un risultato con un'accuratezza analoga è stata ottenuta nel 1994 da Y. Su e collaboratori utilizzando una bilancia di ridotte dimensioni con due coppie di masse.

Una conferma della validità del principio di equivalenza con una accuratezza dello stesso ordine di quella di Braginsky, Adelberger e Su, è stata ottenuta senza utilizzare pendoli né bilance di torsione. La base operativa non fu un laboratorio di fisica bensì… un osservatorio astronomico e l'apparecchiatura era costituita nientemeno… che dal nostro pianeta e dal suo satellite: la Terra e la Luna. La tecnica impiegata prende il nome di *Lunar Laser Ranging Test*. Noi sappiamo che il moto della Terra e della Luna attorno al Sole altro non è che una "caduta libera". Ebbene, si tratta di confrontare le accelerazioni della Terra e del suo satellite e valutare in che misura esse si sono uguali. Questo genere di verifica è stata condotta da J. G. Williams e i suoi collaboratori nel 1996 e, cinque anni dopo, sempre da Williams in collaborazione con J. D. Anderson. La difficoltà maggiore nell'utilizzare questo metodo consiste nel calcolare con grande precisione la posizione nel tempo della Luna rispetto alla Terra, onde poter avere tutti i dati necessari per determinare le orbite esatte della Terra e della Luna attorno al Sole. Ciò è reso possibile dal *lunar laser ranging* che consiste nell'inviare delle sequenze di impulsi laser sulla Luna e di misurane il tempo di andata e ritorno. Tra le molte attività scientifiche svolte nel corso delle missioni dell'uomo sulla Luna vi fu quella di posizionare sul suolo lunare dei retro-riflettori, praticamente degli specchi, che permettono ora di determinare la distanza tra la Terra e la Luna con una incertezza di pochi centimetri su un valor medio di 384.401 km. I retro-riflettori furono dislocati durante le missioni di Apollo 11, 14, e 15, tra il 1969 e il 1971 e dal Lunakhod II, franco-russo, nel 1973. Essi hanno una particolarità: sono a forma di *corner-cube*, come tre facce perpendicolari che si intersecano in un vertice di un cubo. In questo modo un impulso laser, da qualunque luogo sulla Terra sia emesso, viene riflesso nella direzione di provenienza (cosa che ovviamente non avviene con un comune specchio piano). Sulla base dei dati raccolti al McDonald Observatory sul Monte Locke, in Texas, e all'Osservatorio della Costa Azzurra a Grasse, in Francia, Williams e Anderson hanno calcolato una corrispondenza tra l'accelerazione della Terra e della Luna entro l'errore di $1.5 \cdot 10^{-13}$.

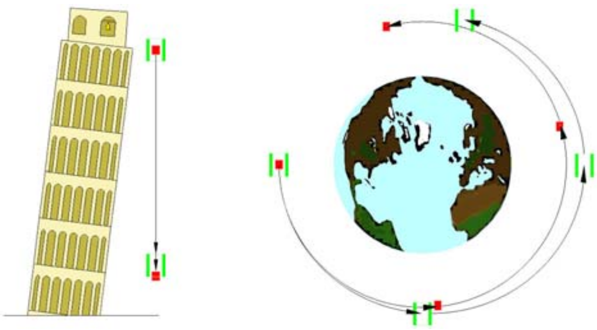

Figura 3

Galileo e STEP messi a confronto

Un'idea sostanzialmente simile ma che utilizza masse contenute in un satellite artificiale orbitante attorno alla Terra è alla base di STEP *(Satellite Test of the Equivalence Principle)*, un programma spaziale in corso di svolgimento che vede la collaborazione tra Stati Uniti ed Europa. Alla base del progetto vi è, per l'appunto, l'idea che, differentemente da una libera caduta lungo la verticale che passa attraverso il centro della terra, la "libera caduta" di un satellite orbitante attorno alla terra continuerebbe indefinitamente. All'interno del satellite verrebbe posto un corpo cavo contenente le masse campione; questa specie di guscio isolerebbe le masse dai venti solari, dall'attrito della sia pur rarefatta atmosfera, dal campo magnetico terrestre, ecc. Le prime ricerche sulle misure dell'accelerazione di corpi liberi di fluttuare all'interno di un satellite in orbita attorno alla Terra iniziarono alla Stanford University nel 1971 e proseguirono negli anni successivi vedendo coinvolte agenzie spaziali quali NASA, ESA, CNES e ASI. Attraverso STEP verranno confrontate le accelerazioni di quattro paia di masse campione in orbita. Le masse campione saranno collocate all'interno di un contenitore criogenico (temperatura di 2 K) con una schermatura superconduttrice e in condizioni di vuoto ultra-spinto ($<<10^{-12}$ torr). Inoltre, per compensare gli effetti dell'attrito dovuto all'atmosfera terrestre, il satellite verrebbe spinto da opportuni razzi propulsori. Per effettuare le misurazioni con la migliore precisione possibile verrebbero utilizzati circuiti particolari, detti SQUID (superconducting circuit using a quantum interference device). L'orbita di STEP dovrebbe essere quasi circolare e attentamente predisposta per minimizzare le variazioni di temperatura. Il satellite dovrebbe orbitare all'altezza di circa 550 km e la missione dovrebbe avere una durata di 6 mesi.

Se le masse in caduta libera all'interno del satellite dovessero violare il principio di equivalenza di Newton e quindi dovessero "cadere" attorno alla terra con accelerazioni diverse, tali circuiti rivelerebbero una differenza di spostamento relativo delle masse pari a 10^{-13} cm (si tenga presente che una violazione del principio di equivalenza di una parte su 10^{18} significherebbe uno spostamento relativo di 10^{-11} m sulla lunghezza di un'orbita.

Il progetto è ambizioso ma il raggiungimento dei risultati che ci si prefigge di ottenere segnerebbe una tappa fondamentale nello sviluppo storico della fisica sperimentale: si passerebbe dall'accuratezza attuale di (circa) una parte su 10^{13} ad una parte su 10^{18}. La conferma del principio di equivalenza ad un tale ordine di precisione o la scoperta della sua violazione avrebbero conseguenze importanti per la fisica delle interazioni fondamentali (che attraverso le loro energie di legame contribuiscono alla massa dei corpi). Nel caso di conferma, il principio assumerebbe un ruolo centrale in eventuali nuove teorie della gravitazione mentre, nel caso di violazione, saremmo di fronte ad una nuova, straordinaria sfida: la ricerca di una quinta forza fondamentale della natura.

Bibliografia:

Una panoramica sui più importanti esperimenti per la verifica del principio di equivalenza si trova in:

H. C. OHANIAN, R. RUFFINI: *"Gravitazione e spazio-tempo"*; (1997) Zanichelli,

T. REGGE – G. PERUZZI: *"Spazio, tempo e universo"*; (2005) UTET.

In J. B. HARTLE: *"Gravity"*; (2003) Addison Wesley viene brevemente trattato il Lunar Laser Ranging Test.

I brani dalle opere di Galileo e di Newton sono tratti da:

G. GALILEI: *"Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze"*, a cura di E. Giusti, (1990) Einaudi, pagg. 93 e 81.

I. NEWTON: *"Principi matematici della filosofia naturale"*, a cura di A. Pala, (1965) UTET, pagg. 625-626.

Le notizie riguardanti Giovanni Battista Benedetti e Giovan Battista Baliani e le loro citazioni sono state reperite nel volume

M. GLIOZZI: *"Storia della fisica"*, (2005) Bollati Boringhieri.

Gli articoli scientifici nei quali si possono trovare le descrizioni degli esperimenti menzionati sono:

EÖTVÖS ET AL. (1922). *"Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität"* Ann. der Phys., 68, 11

WILLIAMS, J.G., NEWHALL, X.X., AND DICKEY, J.O. (1996). *"Relativity Parameters Determined from Lunar Laser Ranging"* Phys. Rev. D, 53, 6730.

ANDERSON, J.D. AND WILLIAMS, J.G. (2001). *"Long Range Tests of the Equivalence Principle"* Class. Quant. Grav., 18, 2447.

Sul web sono stati consultati inoltre i seguenti siti:

http://www.kfki.hu/eotvos/eotvos.html

http://www.kfki.hu/eotvos/onehund.html (un articolo scritto dai fisici L. Bod, E. Fischbach, G. Marx e Maria Náray-Ziegler in occasione del centenario dei primi esperimenti di Eötvös).

http://einstein.stanford.edu/STEP/, sito ufficiale del programma STEP.