

ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI

ATTI DEI CONVEGNI LINCEI

314

Convegno

FRONTIERE

(Roma, 29-30 gennaio 2015)

ESTRATTO



ROMA 2017

BARDI EDIZIONI
EDITORE COMMERCIALE

GUGLIELMO M. TINO*

ESPERIMENTI SULLA GRAVITÀ: DA GALILEO GALILEI AI SENSORI QUANTISTICI CON ATOMI ULTRAFREDDI

RIASSUNTO. – A 450 anni dalla nascita di Galileo Galilei, gli esperimenti sulla gravità da lui eseguiti, o immaginati come esperimenti concettuali, vengono realizzati con sensori quantistici, interferometri atomici e orologi atomici, basati su atomi portati a temperature vicine allo zero assoluto utilizzando la luce laser.

1. INTRODUZIONE

Gli esperimenti sulla gravità eseguiti, o immaginati come esperimenti concettuali, circa quattro secoli fa da Galileo Galilei (fig. 1), vengono oggi condotti con sistemi quantistici basati su atomi portati a temperature vicine allo zero assoluto utilizzando la luce laser. Facendo cadere gli atomi nel vuoto e utilizzando un effetto quantistico detto di interferenza atomica, si riesce a misurare la gravità con estrema precisione e a mettere alla prova la teoria della relatività generale di Einstein. Gli orologi atomici ottici, che usano come pendolo l'oscillazione a frequenza altissima del campo della luce, permettono di misurare il passare del tempo con precisioni inimmaginabili fino a qualche anno fa e di rivelare l'effetto della gravità sul tempo.

Il contributo di Galileo in questo ambito non è stato solo di natura sperimentale ma, più in generale, nel metodo proposto e da lui seguito per studiare i fenomeni fisici. In un famoso passo de *Il Saggiatore*, Galileo afferma: «*La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto*» [G. Galilei, *Il Saggiatore*, 1623]. Un esempio mirabile di questa "lingua" è la teoria della Relatività Generale, ossia la teoria della gravitazione proposta da Albert Einstein 100 anni fa,

*Dipartimento di Fisica e Astronomia e LENS - Università di Firenze - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Sezione di Firenze - Via Sansone, 1 - SESTO FIORENTINO.



Fig. 1. – *Ritratto di Galileo Galilei*. Olio su tela di Justus Suttermans, 1636. Galleria degli Uffizi, Firenze (su concessione del Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo. Divieto di ulteriori riproduzioni o duplicazioni con qualsiasi mezzo).

che è proprio una descrizione matematica dell'effetto della gravità sullo spazio-tempo in termini geometrici: l'effetto di una massa è di modificare la geometria dello spazio-tempo. Si ha così che le forme geometriche vengono deformate e, per esempio, la somma degli angoli interni di un triangolo non è necessariamente uguale a 180 gradi; per questo la geometria che si utilizza è detta non euclidea.

Interessante è anche osservare le analogie tra il modo di procedere di Galileo, che si basava anche su esperimenti concettuali per individuare gli aspetti essenziali di un fenomeno fisico e formulare i principi di base che ne permettevano la descrizione, e quello di Einstein. Per esempio, Einstein raccontava così come fosse arrivato all'idea della teoria della relatività generale: «*I was sitting on a chair in my patent office in Bern. Suddenly, a thought struck me: If a man falls freely, he would not feel his weight. I was taken aback. This simple thought experiment made a deep impression on me. This led to the theory of gravity*»¹ [A. Einstein, *How I created the theory of relativity*, trad.: Ono Y.A., *Physics Today*, 35, 45 (1982)]. Evidente è l'analogia con la descrizione fatta da Galileo di quella che sarebbe stata chiamata la relatività galileiana: «*Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animalletti volanti; ... fate muover la nave*

¹Trad.: «*Ero seduto su una sedia nel mio ufficio brevetti a Berna. All'improvviso un pensiero mi colpì: se un uomo cade in caduta libera non sentirà il suo peso. Fui molto sorpreso. Questo semplice esperimento concettuale ebbe un profondo effetto su di me. Questo portò alla teoria della gravità* ».

con quanta si voglia velocità; ché (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina o pure sta ferma: ...» [G. Galilei, Giornata Seconda del Dialogo sui Massimi Sistemi del Mondo, 1623].

E infine, ovviamente, nel metodo galileiano l'importanza fondamentale dell'osservazione sperimentale. Esempi sono i suoi studi mediante il piano inclinato della caduta dei corpi per effetto della gravità e l'uso del pendolo per la misura del tempo. Nel seguito descriverò come questi esperimenti vengano effettuati attualmente osservando la caduta degli atomi nel vuoto e come si realizzino orologi estremamente precisi in cui la funzione del pendolo è svolta dall'oscillazione del campo della luce emessa da un laser la cui frequenza è riferita ad una transizione atomica.

2. MECCANICA QUANTISTICA E RELATIVITÀ GENERALE

La fisica attuale è fondata su due teorie proposte e sviluppate all'inizio del '900: una è la meccanica quantistica, che descrive bene la struttura e il comportamento di sistemi molto piccoli quali gli atomi con una natura duale, ossia come particelle e come onde. L'altra è la relatività generale che descrive l'interazione gravitazionale in termini geometrici come deformazione dello spazio-tempo, permettendoci di comprendere il funzionamento dell'universo e di prevedere effetti poi osservati sperimentalmente come per la recente rivelazione delle onde gravitazionali [7].

Non si è riusciti però ancora a trovare una teoria unica in grado di descrivere i due ambiti, ossia una teoria quantistica della gravità. Inoltre la presenza ipotizzata di materia oscura e di energia oscura può anche essere un'indicazione del fatto che l'attuale descrizione dell'interazione gravitazionale sia incompleta. Per questo sono essenziali le informazioni fornite dagli esperimenti. D'altra parte, l'interazione gravitazionale è estremamente debole e non può essere schermata; per queste ragioni, gli esperimenti sulla gravità sono molto difficili.

Gli esperimenti qui descritti, effettuati con nuovi sensori basati su atomi a una temperatura vicina allo zero assoluto, sono perciò importanti non solo per l'estrema precisione con cui si riescono a misurare questi effetti molto piccoli, ma anche per il fatto che si studia la gravità con strumenti quantistici avvicinando così, in un certo senso, l'infinitamente grande e l'infinitamente piccolo.

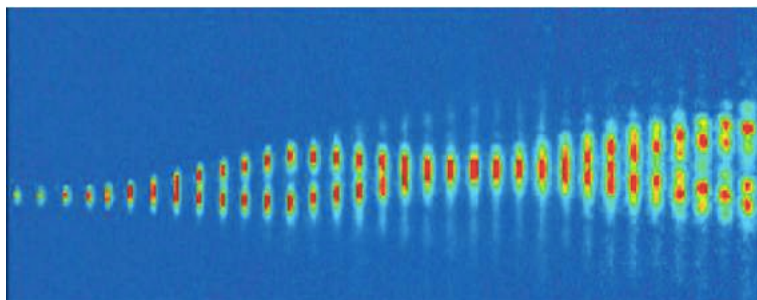


Fig. 2. – Interferenza atomica: l'onda associata agli atomi viene separata in due parti che si propagano lungo cammini diversi e poi vengono fatte di nuovo sovrapporre. Rivelando gli atomi all'uscita dell'interferometro, si osserva una figura di interferenza che viene influenzata dalla presenza della gravità (su concessione di E.M. Rasel, Università di Hannover).

3. DUALISMO ONDA-PARTICELLA E INTERFERENZA ATOMICA

Come detto sopra, i sistemi estremamente piccoli, quali sono gli atomi, e i processi che li coinvolgono sono descritti dalla meccanica quantistica con una doppia natura, corpuscolare e ondulatoria. Le diverse proprietà corpuscolari o ondulatorie si evidenziano a seconda del tipo di fenomeno che si osserva. Alcune conseguenze possono apparirci un po' paradossali in quanto i fenomeni sono diversi da quelli a cui siamo abituati nel nostro mondo macroscopico; per esempio, se si ha una particella e uno schermo con due fori separati, si possono osservare effetti comprensibili solo assumendo che la particella sia passata in tutti e due i fori o, meglio, che abbia attraversato lo schermo esplorando i due possibili percorsi e non ci è dato sapere in quale sia effettivamente passata. Questo effetto, sorprendente se consideriamo gli atomi come particelle, lo è meno se li consideriamo come onde perché siamo abituati a vedere le onde che in presenza di ostacoli danno origine ad altre onde che si propagano in direzioni diverse. Sappiamo anche che se onde diverse si sovrappongono, si possono osservare fenomeni di interferenza.

L'idea che gli atomi possano comportarsi come onde e che quindi si possano avere effetti di interferenza è alla base dei nuovi strumenti che abbiamo sviluppato per studiare la gravità, ossia gli interferometri atomici [13].

La lunghezza d'onda associata a una particella di massa M che si muo-

ve con velocità v è detta lunghezza d'onda di de Broglie ed è data da

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{Mv}$$

dove h è una costante, detta costante di Planck, che compare in meccanica quantistica mentre non è presente nella fisica classica che descrive gli oggetti macroscopici.

Come si vede, quanto minore è la massa e la velocità di una particella, tanto maggiore è la lunghezza d'onda di de Broglie ad essa associata. Per esempio, per un uomo che cammina, la lunghezza d'onda di de Broglie è così piccola da non poter essere osservata; anche per particelle leggere quali gli atomi o le molecole dell'aria in un gas a temperatura ambiente in cui si muovono in maniera disordinata con velocità dell'ordine del chilometro al secondo, la lunghezza d'onda di de Broglie è confrontabile con le dimensioni di un atomo, dunque ancora molto piccola e con valori diversi per particelle con velocità diverse. Se però gli atomi vengono rallentati e portati a una velocità di qualche millimetro al secondo, allora la lunghezza d'onda diventa dell'ordine di qualche frazione di millimetro e quindi gli effetti ondulatori possono essere osservati. Questo si può realizzare utilizzando la luce laser.

In un interferometro atomico, l'onda associata agli atomi viene separata in due parti che si propagano lungo cammini diversi e poi vengono fatte di nuovo sovrapporre; si osserva così un effetto di interferenza (fig. 2). In presenza della gravità, se i due cammini sono in potenziali gravitazionali diversi, la figura di interferenza all'uscita dell'interferometro viene modificata. Misurando questa variazione si può determinare con grande precisione l'effetto della gravità.

4. ATOMI RAFFREDDATI CON LA LUCE LASER E GAS QUANTISTICI DI BOSE E DI FERMI

Negli esperimenti qui descritti e in molti altri è necessario che gli atomi abbiano velocità molto basse ed elevate densità senza che questo causi una variazione delle proprietà intrinseche degli atomi investigati.

In un gas, gli atomi si muovono in tutte le direzioni con velocità che dipendono dalla temperatura. A temperatura ambiente, la velocità degli atomi è dell'ordine di 100 - 1000 m/s, a seconda della massa atomica. Il metodo di raffreddamento basato sulle collisioni degli atomi con le pareti di un contenitore freddo è limitato a temperature al di sopra di quella di condensazione del gas.

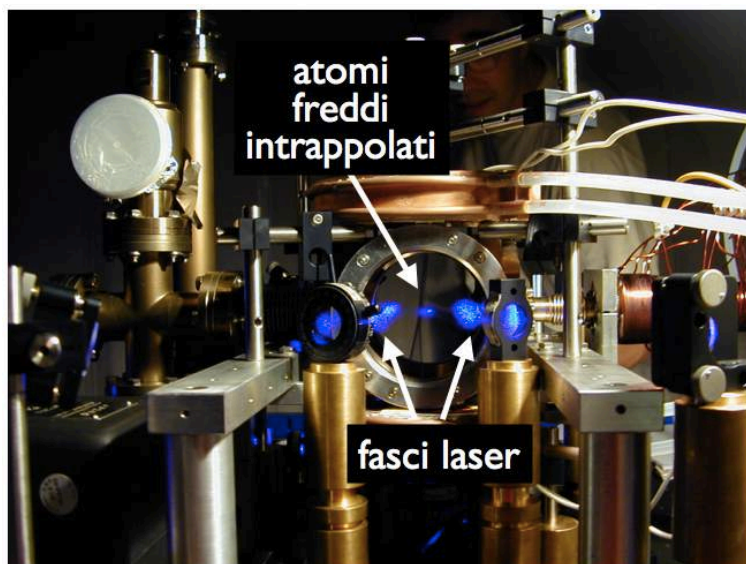


Fig. 3. – Raffreddamento e intrappolamento di un gas atomico mediante luce laser. La foto, realizzata presso il laboratorio LENS di Firenze, mostra la luce emessa da atomi di stronzio intrappolati all'intersezione dei fasci laser. L'effetto combinato della luce laser e di un campo magnetico realizza un sistema detto trappola magneto-ottica: gli atomi sono intrappolati in uno spazio di pochi millimetri a una temperatura di alcuni microkelvin in una camera da vuoto che è a temperatura ambiente.

Si possono invece raggiungere temperature estremamente basse, fino quasi allo zero assoluto, facendo interagire gli atomi con la radiazione emessa da un laser. L'idea alla base del raffreddamento laser è di dissipare l'energia cinetica degli atomi trasferendo energia al campo elettromagnetico. Gli atomi raffreddati possono inoltre essere confinati in “trappole” delimitate non da pareti materiali ma da campi elettromagnetici. Si possono così ottenere velocità molto basse e elevate densità in assenza di collisioni con le pareti del contenitore (fig. 3). Si ha quindi un campione ideale per misure di alta precisione.

Lo studio del raffreddamento e confinamento di atomi ha costituito uno dei campi più attivi della ricerca in fisica a partire dai primi anni '90. Nel 1997, il premio Nobel per la fisica è stato assegnato a C. Cohen-Tannoudji, S. Chu e W.D. Phillips per lo sviluppo e la comprensione dei metodi di raffreddamento laser [2]. Nel 2001, E.A. Cornell, W. Ketterle e C.E. Wieman hanno ricevuto il premio per le prime osservazioni dirette del fenomeno della condensazione di Bose-Einstein in un gas di atomi raffreddati [3].

4.1. *Raffreddamento degli atomi con la luce laser.*

Quando un atomo assorbe o emette un fotone, così come negli urti tra biglie o per un cannone che spara un proiettile, per il principio di conservazione della quantità di moto la sua velocità deve variare di una quantità detta velocità di rinculo; poiché la quantità di moto associata a un fotone è uguale a h/λ , dove h è la costante di Planck e λ è la lunghezza d'onda della luce, la velocità di rinculo per un atomo di massa M è data da $v_r = h/\lambda M$ ed è tipicamente di qualche millimetro o centimetro al secondo. Seppur piccola, questa variazione di velocità non è trascurabile se si tiene conto del fatto che il processo può essere ripetuto molto velocemente; infatti, un ciclo di assorbimento e di emissione di un fotone avviene in un tempo dell'ordine della vita media dello stato eccitato dell'atomo che, nei casi considerati, è di pochi nanosecondi.

Se si considera un fascio termico di atomi con una velocità iniziale di 1000 m/s e un fascio laser che si propaga in verso opposto, la forza esercitata dalla luce, analoga alla pressione di radiazione del sole che devia la coda delle comete, permette di fermare gli atomi in pochi millisecondi e in uno spazio minore di un metro.

4.2. *Spin e statistica: condensazione di Bose-Einstein e gas di Fermi.*

Nella fisica quantistica esistono due tipi di particelle, i fermioni e i bosoni: le particelle descritte da una funzione d'onda che cambia segno per lo scambio di due di esse sono dette fermioni in quanto E. Fermi fu il primo, nel 1926 quando era professore a Firenze, a studiarne teoricamente il comportamento statistico in un gas a bassa temperatura e alta densità [4]. I fermioni obbediscono al principio di esclusione di Pauli per cui due particelle non possono trovarsi nello stesso stato. I componenti degli atomi, elettroni, protoni e neutroni sono fermioni. Invece, le particelle descritte da una funzione d'onda che non cambia segno per lo scambio di due di esse sono dette bosoni e in un gas seguono la statistica di Bose-Einstein.

Sperimentalmente si osserva che le particelle che hanno uno spin di valore intero sono bosoni mentre le particelle che hanno un valore semi-intero dello spin sono fermioni. Si tratta della cosiddetta connessione spin-statistica di cui non sono mai state trovate violazioni ma la cui origine probabilmente non è stata ancora compresa fino in fondo ed è ancora oggetto di studio [6].

Le particelle composte da un numero pari di fermioni sono bosoni perché con un duplice cambio di segno si ottiene nuovamente il segno iniziale. Le particelle composte da un numero dispari di fermioni sono invece fer-

mioni. Quindi gli atomi sono bosoni o fermioni a seconda del numero di costituenti e in particolare, dato che negli atomi neutri il numero di elettroni e protoni è uguale, a seconda del numero pari o dispari di neutroni nel nucleo. Lo studio di isotopi diversi dello stesso atomo ha permesso quindi di evidenziare sperimentalmente il comportamento completamente diverso dei bosoni e dei fermioni a temperature molto basse.

La condensazione di Bose-Einstein è un fenomeno puramente quantistico, predetto da A. Einstein nel 1924, per cui un gas di bosoni dovrebbe subire una transizione di fase quando la temperatura è così bassa che la lunghezza d'onda di de Broglie delle particelle del gas diventa confrontabile con la distanza tra le particelle stesse, ossia quando

$$n\lambda_{dB}^3 \approx 1$$

dove n è la densità delle particelle.

In queste condizioni, le onde che descrivono le diverse particelle si sovrappongono a formare un'unica onda e ci si attende che le particelle si accumulino nel livello fondamentale del sistema evidenziando aspetti di comportamento collettivo (fig. 4). La condensazione di Bose-Einstein è stata osservata per la prima volta nel 1995 da E.A. Cornell e collaboratori, del laboratorio JILA, con atomi di rubidio e subito dopo dal gruppo di W. Ketterle del MIT, con atomi di sodio.

Le ragioni di tanta attesa tra previsione teorica e osservazione sperimentale sono da ricercarsi nel fatto che per raggiungere la condensazione di Bose-Einstein è stato necessario raggiungere alte densità atomiche a temperature bassissime. Nel caso dell'atomo di rubidio, un gas di atomi con densità di $\sim 10^{13}/\text{cm}^3$ è stato raffreddato ad una temperatura di circa 150 nanokelvin. Per questo non possono essere utilizzati metodi convenzionali di refrigerazione anche perché bisogna evitare che col diminuire della temperatura il gas prima si liquefi e poi solidifichi. Gli esperimenti sono stati quindi condotti sotto alto vuoto e hanno utilizzato l'interazione degli atomi con la radiazione laser per il raggiungimento di temperature dell'ordine del microkelvin. Queste temperature non sono ancora sufficientemente basse per la transizione di fase, ma consentono di catturare gli atomi in trappole magnetiche e di raffreddarli ulteriormente mediante un processo di evaporazione.

Nei gas di atomi fermionici, invece, a basse temperature non si ha la condensazione di Bose-Einstein ma, in accordo con la statistica di Fermi e con il principio di esclusione di Pauli, gli atomi si distribuiscono nei diversi stati possibili alle energie più basse. Gli esperimenti, e tra i primi quelli condotti a Firenze su isotopi bosonici e fermionici dell'atomo

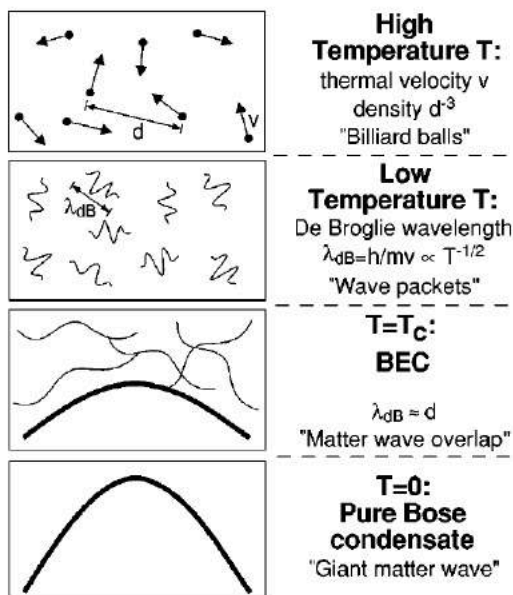


Fig. 4. – Rappresentazione grafica dell'effetto di condensazione di Bose-Einstein: ad alta temperatura gli atomi in un gas possono essere considerati come "palline" che collidono; quando la temperatura è così bassa che la lunghezza d'onda di de Broglie λ_{dB} è confrontabile con la distanza d tra gli atomi, le diverse onde si sovrappongono a formare un'onda macroscopica (dalla lezione Nobel di W. Ketterle [3]).

di potassio [11], hanno confermato questo comportamento completamente diverso dovuto alla differenza di un solo neutrone nel nucleo (che non cambia nessuna delle proprietà chimiche dell'atomo) ed è interessante notare come una proprietà di simmetria fondamentale abbia effetti macroscopici tanto evidenti. Un altro effetto del principio di esclusione di Pauli è che a temperature molto basse gli atomi fermionici, non potendo avvicinarsi, non collidono tra di loro. In esperimenti in cui è necessario che gli atomi siano imperturbati, come negli orologi atomici di cui si parla nel seguito, vengono utilizzati per questa ragione atomi fermionici.

5. DALL'ESPERIMENTO DELLA TORRE DI PISA ALLE FONTANE ATOMICHE: TEST DEL PRINCIPIO DI EQUIVALENZA DELLA RELATIVITÀ GENERALE

Come già detto, Einstein elaborò la teoria della relatività generale partendo dall'esperimento concettuale di una persona in caduta libera che non sente l'effetto della gravità. La formalizzazione di questo concetto portò

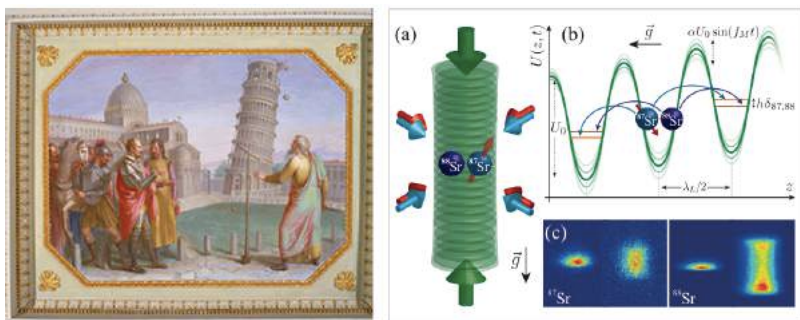


Fig. 5. – Esperimenti sulla caduta dei gravi. A sinistra: *Alla presenza del Granduca, Galileo effettua l'esperimento della caduta dei gravi dalla Torre di Pisa*. Tempera su muro di Luigi Catani, 1816. Firenze, Palazzo Pitti, Galleria d'Arte Moderna (su concessione del Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo. Divieto di ulteriori riproduzioni o duplicazioni con qualsiasi mezzo). A destra: Esperimento sulla caduta nel vuoto di isotopi diversi dell'atomo di stronzio [10].

alla formulazione del principio di equivalenza ossia che tutti i corpi cadono allo stesso modo per effetto della gravità o all'equivalenza della massa inerziale e di quella gravitazionale.

Numerosi esperimenti hanno confermato con precisione la validità di questo principio. L'idea di questi esperimenti è fondamentalmente analoga a quella dell'esperimento che Galileo avrebbe effettuato dalla torre di Pisa facendo cadere oggetti diversi per dimostrare che arrivavano a terra nello stesso tempo (fig. 5). Indipendentemente dalla veridicità storica di questo episodio raccontato dal suo allievo Viviani, ciò che colpisce è la capacità di Galileo di concepire tale esperimento individuando nella resistenza dell'aria una perturbazione da eliminare, per superare l'affermazione aristotelica e la comune esperienza secondo cui oggetti più leggeri cadono più lentamente, e poter studiare così il fenomeno essenziale: «*cascai in opinione, che se si levasse totalmente la resistenza del mezzo, tutte le materie discenderebbero con eguali velocità*» [Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, 1638].

Nel nostro laboratorio a Firenze, abbiamo fatto cadere in una cella sotto vuoto isotopi diversi dell'atomo di stronzio che differiscono solo per un neutrone nel nucleo (fig. 5); utilizzando l'interferometria atomica, abbiamo misurato per i due isotopi l'accelerazione dovuta alla gravità terrestre [10]. Lo schema utilizzato era basato sul fenomeno delle cosiddette oscillazioni di Bloch, fenomeno previsto dalla meccanica quantistica per particelle in un potenziale periodico in presenza di una forza esterna. La frequenza di queste oscillazioni risulta proporzionale alla forza. Nel nostro esperimento

gli atomi, confinati nel potenziale periodico prodotto da un fascio laser verticale, risentivano della forza di gravità. Misurando la frequenza delle oscillazioni di Bloch, e quindi la forza di gravità, per i due diversi isotopi abbiamo realizzato il primo test del principio di equivalenza della relatività generale per atomi con spin e senza spin e con caratteristiche diverse, ossia bosoni e fermioni, dimostrando che cadono allo stesso modo in presenza della gravità. Questo risultato sperimentale pone dei limiti a modelli teorici che prevedono un accoppiamento tra lo spin e la gravità.

Per le sue caratteristiche di elevata sensibilità e di ridotte dimensioni, l'interferometro atomico con atomi di stronzio da noi sviluppato potrà permettere anche lo studio del campo gravitazionale generato da una massa sorgente microscopica. Sarà così possibile studiare la forza di gravità a una distanza di pochi micrometri e verificare l'esistenza e l'estensione di possibili dimensioni supplementari nel nostro universo oltre alle 3+1 dimensioni, spaziali e temporali, che conosciamo [5].

6. LA MISURA DELLA COSTANTE DI GRAVITAZIONE UNIVERSALE

Recentemente abbiamo pubblicato il risultato dell'esperimento MAGIA, condotto presso il dipartimento di Fisica e INFN di Firenze e durato più di dieci anni, in cui per la prima volta si è misurato il valore della costante gravitazionale G utilizzando un interferometro atomico come sonda [9].

La costante G compare nella legge di Newton per la forza di attrazione gravitazionale tra due corpi con massa M_1 e M_2 e distanti d l'uno dall'altro:

$$F = G \frac{M_1 M_2}{d^2}$$

La misura di G è ancora oggi, dopo più di duecento anni dal primo esperimento di Cavendish nel 1798 [1], una sfida per la fisica sperimentale. Circa 300 esperimenti hanno cercato di determinarne con precisione il valore ma i risultati di diversi esperimenti sono inconsistenti tra di loro, così che la costante gravitazionale è, tra tutte le costanti fondamentali della fisica, quella il cui valore è di gran lunga il più incerto. Molteplici sono le ipotesi che sono state proposte per spiegare questa situazione piuttosto rara nella fisica attuale la quale è basata sull'idea che i risultati degli esperimenti debbano essere riproducibili; è comunque una dimostrazione della difficoltà, già citata, degli esperimenti sulla gravità.

La maggior parte degli esperimenti effettuati finora per la misura di G erano basati sulla bilancia di torsione, come nell'esperimento di Cavendish (fig. 6), e in tutti i casi erano stati utilizzati sensori e masse macroscopici.

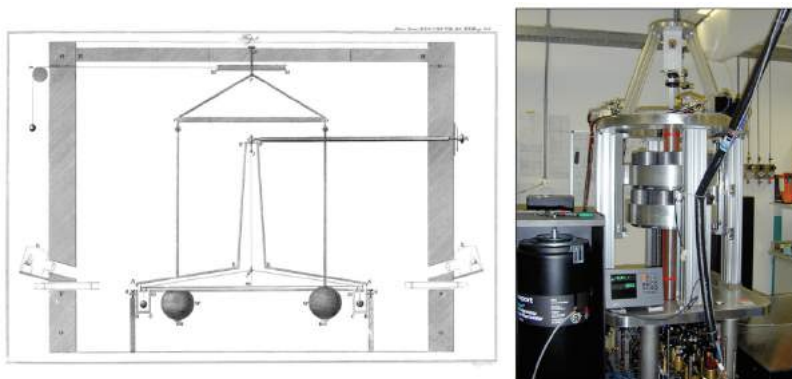


Fig. 6. – La misura della costante gravitazionale G . A sinistra: schema dell'apparato sperimentale utilizzato da Cavendish nel 1798 per la misura dell'attrazione gravitazionale tra sfere di metallo con una bilancia di torsione [1]. A destra: l'apparato dell'esperimento MAGIA per la misura di G con un interferometro atomico [9].

Nell'esperimento MAGIA abbiamo invece utilizzato per la prima volta una sonda microscopica costituita da atomi di rubidio raffreddati mediante luce laser e lanciati verticalmente in un sistema sotto vuoto realizzando così una *fontana atomica*. Una massa di 500 kg di tungsteno, posta a una distanza di alcuni centimetri dagli atomi, generava una variazione della accelerazione degli atomi circa dieci milioni di volte più piccola della accelerazione di gravità terrestre g . Nonostante questo effetto fosse minimo, esso è stato misurato con elevata precisione mediante uno schema di interferometria atomica. Da questa misura si è potuto determinare il valore di $G = 6.67191(99) \times 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ con un'incertezza relativa di 150 parti per milione. Il valore ottenuto differisce di circa 1.5 deviazioni standard dal valore ricavato dalle misurazioni precedenti.

Altri laboratori stanno ora cercando di ripetere il nostro esperimento e sarà interessante verificare se il nuovo metodo basato sui sensori atomici produrrà risultati consistenti in diversi esperimenti risolvendo così questo mistero della fisica che dura ormai da più di due secoli.

7. TEMPO E GRAVITÀ: GLI OROLOGI ATOMICI OTTICI

Gli atomi raffreddati e intrappolati con luce laser costituiscono anche il riferimento per i nuovi orologi atomici ottici che, usando come pendolo l'oscillazione del campo della luce, permettono di misurare il passare del tempo con una precisione tale che effetti di relatività generale quali il red

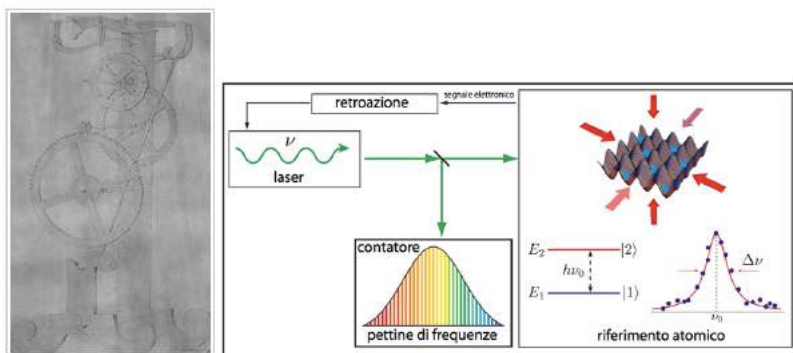


Fig. 7. – La misura del tempo. *A sinistra*: schema dell’orologio basato sulle oscillazioni di un pendolo inventato da Galileo e da lui proposto per la determinazione della longitudine per la navigazione; la frequenza di oscillazione del pendolo dipende dalla sua lunghezza ed è di circa un hertz, ossia un’oscillazione al secondo (copia del disegno eseguito da Vincenzo Viviani e da Vincenzo Galilei, figlio di Galileo. Museo Galileo, Firenze - Archivio Fotografico). *A destra*: schema di un orologio atomico ottico; il ruolo del pendolo in questo caso è svolto dalle oscillazioni del campo elettromagnetico del laser. La frequenza ν delle oscillazioni, dell’ordine di 10^{15} hertz, viene stabilizzata con un’incertezza $\Delta\nu$ estremamente piccola misurando la frequenza ν_0 di una transizione di atomi freddi intrappolati [8].

shift gravitazionale sono osservabili in laboratorio [8]. Gli orologi atomici ottici porteranno anche a una nuova definizione del secondo.

Un orologio moderno è in generale basato su un effetto fisico periodico e un contatore dei suoi cicli. Galileo inventò l’orologio basato sul pendolo e sull’effetto, da lui osservato, dell’isocronismo delle sue oscillazioni. In un orologio atomico ottico, il tic-tac dell’orologio è costituito dall’oscillazione del campo di un’onda laser, che avviene un milione di miliardi di volte al secondo, la cui frequenza viene riferita al valore per cui essa induce la transizione tra stati interni diversi di un atomo (fig. 7).

Fin dalla sua invenzione, il laser è noto per avere un’elevata “purezza spettrale”. Come per uno strumento musicale, questo termine indica quanto è pura la “nota” emessa, ossia quanto è ben determinata la sua frequenza. Nel caso del laser si tratta della frequenza con cui oscilla il campo elettromagnetico dell’onda luminosa.

Analogamente a quanto detto sopra per gli atomi, la luce può essere considerata come un’onda elettromagnetica ma anche come fatta di particelle dette fotoni. Come proposto da Bohr nel 1913, un fotone può indurre in un atomo la transizione tra due livelli di energia E_1 e E_2 se è verificata la condizione $E_2 - E_1 = h\nu$ in cui h è la costante di Planck e ν è la frequenza

dell'onda elettromagnetica. Se si sceglie un'opportuna transizione atomica, la frequenza del laser può essere riferita a questa in modo da emettere una "nota perfetta". Per avere una frequenza così stabile, l'atomo di riferimento non deve muoversi perché altrimenti l'effetto Doppler porterebbe a una variazione della frequenza. Di nuovo il laser ci viene in aiuto: come già detto, utilizzando la luce laser si riesce a raffreddare un gas di atomi quasi allo zero assoluto e a intrappolarli in modo che siano praticamente fermi. La camera in cui gli atomi sono intrappolati è tenuta sotto vuoto e in genere si scelgono atomi fermionici che non collidono tra di loro per effetto del principio di esclusione di Pauli; in questo modo la frequenza atomica di riferimento non è influenzata da perturbazioni esterne.

Al LENS a Firenze, partendo da esperimenti che avevamo iniziato venti anni fa presso il Dipartimento di Fisica di Napoli, abbiamo recentemente realizzato uno dei primi orologi atomici ottici con atomi di stronzio raffreddati e intrappolati con luce laser. Con un sistema di fibre ottiche l'orologio può essere collegato ad altri creando così una rete di orologi di altissima precisione sincronizzati tra di loro.

Per avere un'idea di cosa si riesca a ottenere oggi nei laboratori, un orologio ottico sbaglierebbe di meno di un secondo su un tempo dell'ordine dell'età dell'universo; questo è 100-1000 volte meglio dei migliori orologi finora realizzati. Gli orologi atomici ottici stanno già aprendo prospettive finora impensabili quale lo studio in laboratorio della relatività generale che prevede che lo spazio-tempo sia influenzato dalla gravità. In prossimità di una massa ci si attende che il tempo scorra più lentamente e che quindi la frequenza di oscillazione di un pendolo cambi; in particolare, a una distanza d da una massa M la variazione prevista $\delta\nu$ della frequenza di oscillazione ν è data da:

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \frac{GM}{c^2d}$$

Si tratta di un effetto estremamente piccolo; sulla Terra corrisponde a una variazione percentuale di $10^{-16}/m$ ossia di una variazione nel tempo misurato di una parte su 10 milioni di miliardi se si sposta l'orologio di un metro in verticale. L'eccezionale precisione dei nuovi orologi atomici ottici ha permesso di rivelare questo effetto in laboratorio spostando in altezza di soli 33 cm un orologio ottico basato su ioni intrappolati (fig. 8) [15].

Si può prevedere che gli orologi atomici ottici porteranno a nuovi test di fisica fondamentale sempre più accurati in esperimenti terrestri e nello spazio. Inoltre, la misura accurata del tempo ha giocato un ruolo molto

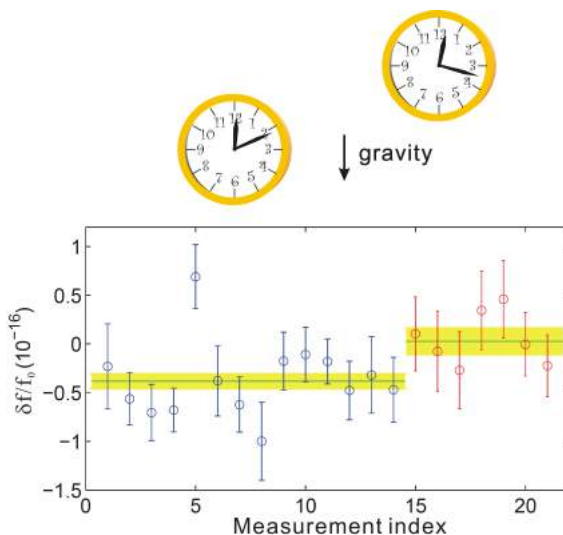


Fig. 8. – Effetto della gravità sullo scorrere del tempo. In un esperimento condotto nel 2010 dal gruppo di D. Wineland al NIST di Boulder, è stata osservata la piccola variazione nella frequenza di oscillazione di un orologio ottico per uno spostamento di 33 cm in altezza [15] (su concessione di D. Wineland e C.W. Chou, NIST).

importante per diverse applicazioni e in particolare nella navigazione. Come già avviene per il sistema di posizionamento e navigazione satellitare GPS, e per il futuro sistema europeo GALILEO, orologi molto più precisi saranno importanti per la futura navigazione anche nello spazio e per misure precise della gravità in geodesia.

8. CONCLUSIONI

A partire da Galileo Galilei, lo studio sperimentale e teorico della gravità ha guidato lo sviluppo della fisica moderna. Strumenti nuovi e sempre più avanzati hanno permesso di effettuare misure sempre più precise e di rivelare nuovi effetti fino a quelli previsti dalla teoria della relatività generale di Einstein. Ancora molteplici sono gli aspetti misteriosi: il valore di G , i limiti di validità del principio di equivalenza, l'esistenza e la natura della materia oscura e dell'energia oscura, la relazione tra l'interazione gravitazionale e le altre interazioni e con la meccanica quantistica.

Come il telescopio sviluppato da Galileo e puntato verso il cielo, i nuovi sensori quantistici renderanno possibili nuove osservazioni e scoperte permettendo di studiare la gravità con estrema precisione e la realizzazione di test accurati della relatività generale sulla Terra e nello spazio [12], la

rivelazione delle onde gravitazionali [14] a frequenze non raggiunte dagli interferometri ottici, la misura della gravità a piccole distanze, lo studio della natura della materia oscura e dell'energia oscura. Potranno inoltre essere utilizzati per applicazioni nella navigazione terrestre e spaziale, in geofisica e geodesia, per la ricerca di giacimenti sotterranei, la previsione delle eruzioni vulcaniche e dei terremoti.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] H. CAVENDISH, *Experiments to determine the density of the Earth*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 88, 1798, 469-526.
- [2] S. CHU, C. COHEN-TANNOUJDI, W.D. PHILLIPS, *Nobel Lectures in Physics 1997*. Reviews of Modern Physics, 70, 1998, 685-741.
- [3] E.A. CORNELL, C.E. WIEMAN, W. KETTERLE, *Nobel Lectures in Physics 2001*. Reviews of Modern Physics, 74, 2002, 875-893, 1131-1151.
- [4] E. FERMI, *Sulla quantizzazione del gas perfetto monoatomico*. Rendiconti Lincei, 3, 1926, 145-149.
- [5] G. FERRARI, N. POLI, F. SORRENTINO, G.M. TINO, *Long-lived Bloch oscillations with bosonic Sr atoms and application to gravity measurement at the micrometer scale*. Physical Review Letters, 97, 2006, 060402 (4 pp.).
- [6] R.C. HILBORN, G.M. TINO (a cura di), *Spin-statistics connection and commutation relations: Experimental tests and theoretical implications*. American Institute of Physics, 2000.
- [7] LIGO AND VIRGO COLLABORATIONS, *Observation of gravitational waves from a binary black hole merger*. Physical Review Letters, 116, 2016, 061102 (16 pp.).
- [8] N. POLI, C.W. OATES, P. GILL, G.M. TINO, *Optical atomic clocks*. Rivista del Nuovo Cimento, 36, 2013, 555-624.
- [9] G. ROSI, F. SORRENTINO, L. CACCIAPUOTI, M. PREVEDELLI, G.M. TINO, *Precision measurement of the Newtonian gravitational constant using cold atoms*. Nature, 510, 2014, 518-521.

- [10] M.G. TARALLO, T. MAZZONI, N. POLI, D.V. SUTYRIN, X. ZHANG, G.M. TINO, *Test of Einstein equivalence principle for 0-spin and half-integer-spin atoms: Search for spin-gravity coupling effects*. Physical Review Letters, 113, 2014, 023005 (4 pp.).
- [11] G.M. TINO, F.S. CATALIOTTI, E.A. CORNELL, C. FORT, M. INGUSCIO, M. PREVEDELLI, *Towards quantum degeneracy of bosonic and fermionic potassium atoms*. In: M. INGUSCIO, S. STRINGARI, C.E. WIEMAN (a cura di), *Bose-Einstein condensation in atomic gases. Proceedings of the International School of Physics “Enrico Fermi” (Varenna, 1998)*. Società Italiana di Fisica e IOS Press, 1999, 521-535.
- [12] G.M. TINO, L. CACCIAPUOTI, K. BONGS, CH.J. BORDÉ, P. BOUYER, H. DITTUS, W. ERTMER, A. GOERLITZ, M. INGUSCIO, A. LANDRAGIN, P. LEMONDE, C. LAEMMERZAHN, A. PETERS, E. RASEL, J. REICHEL, C. SALOMON, S. SCHILLER, W. SCHLEICH, K. SENGSTOCK, U. STERR, M. WILKENS, *Atom interferometers and optical atomic clocks: New quantum sensors for fundamental physics experiments in space*. Nuclear Physics B (Proceedings Supplement), 166, 2007, 159-165.
- [13] G.M. TINO, M.A. KASEVICH (a cura di), *Atom Interferometry: Proceedings of the International School of Physics “Enrico Fermi”*, Varenna, 2013. Società Italiana di Fisica e IOS Press, 2014.
- [14] G.M. TINO, F. VETRANO, *Is it possible to detect gravitational waves with atom interferometers?* Classical and Quantum Gravity, 24, 2007, 2167-2178.
- [15] D. WINELAND, *Nobel lecture: Superposition, entanglement, and raising Schrödinger’s cat*. Reviews of Modern Physics, 85, 2013, 1103-1114.