

# Attrazione fatale

## La costante di Newton

di Paolo Pani



a.

La statua di Sir Isaac Newton con una mela ai suoi piedi, nel Museo di Scienze Naturali dell'Università di Oxford.

Tutto gravita. Ogni forma di materia, energia, particella o corpo celeste... perfino lo stesso campo gravitazionale! Fra le quattro interazioni fondamentali, solo quella gravitazionale ha questa natura universale.

Isaac Newton fu il primo a comprendere questa proprietà, quando nel 1687 scoprì che esiste una singola legge fisica che descrive sia l'attrazione dei corpi verso il centro della Terra che il moto dei pianeti nel sistema solare. La sua "legge di gravitazione universale" implica che l'attrazione gravitazionale fra due masse qualsiasi è proporzionale al prodotto delle masse e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. La costante di proporzionalità nella legge di Newton viene comunemente indicata con  $G$  e prende il nome di "costante di gravitazione universale", o "costante di Newton". Nonostante prenda il suo nome, Newton non fu in grado di misurare il valore di  $G$ , che fu invece misurato per la prima volta da Henry Cavendish nel 1798, con il famoso esperimento della bilancia di torsione. L'apparato di Cavendish era costituito da una barra orizzontale sospesa a un filo e dotata di due sfere di piombo alle estremità. Avvicinando altre due sfere di massa nota alle prime, Cavendish riuscì a osservare una minuscola torsione del filo causata dalla forza gravitazionale tra le sfere, permettendo di misurare  $G$ .

La difficoltà di tale misura sta nel fatto che il valore numerico di  $G$  è estremamente piccolo rispetto ad altre costanti fondamentali. Nel sistema internazionale,  $G$  è approssimativamente  $6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$ . Facendo un confronto improprio (dal momento che si tratta di grandezze con unità differenti), la costante elettrostatica legata alla legge di Coulomb (analogo della legge di Newton per la forza tra cariche elettriche) è circa 20 ordini di grandezza più grande. Questa stima fornisce un'idea del perché l'interazione gravitazionale sia completamente trascurabile nel mondo microscopico.

Come mai, allora, la costante  $G$  gioca un ruolo così importante nella fisica? Il motivo è che, oltre a essere universale, l'interazione gravitazionale ha un'altra proprietà peculiare: è sempre attrattiva. Per i singoli protoni ed elettroni l'attrazione gravitazionale è trascurabile, ma quando queste particelle con carica positiva e negativa si combinano in gran numero a formare oggetti macroscopici, la loro carica globale è neutralizzata, mentre la massa totale cresce, e con essa il campo gravitazionale attrattivo che questa massa genera. È questo il motivo per cui l'interazione fra la Terra e la Luna è



b.

Nel 2014 l'esperimento MAGIA dell'INFN ha effettuato una misura di precisione di  $G$ , sfruttando un interferometro quantistico (in foto), in cui gli atomi vengono intrappolati dalla luce laser a una temperatura vicina allo zero assoluto. Questo risultato è stato incluso tra quelli utilizzati dal Committee on Data for Science and Technology (CODATA) per definire il valore della costante gravitazionale  $G$  e ha stimolato altri esperimenti basati su sensori quantistici atomici: l'esperimento MEGANTE dell'INFN, uno in costruzione in Cina, uno negli USA e altri in fase di proposta.

sostanzialmente gravitazionale, e per cui la costante  $G$ , infima nel mondo microscopico, governa invece l'universo su scala astronomica e cosmologica.

Tutte le leggi che regolano la struttura delle stelle, delle galassie, le orbite dei pianeti e dei satelliti, e perfino l'evoluzione dell'universo nel suo complesso, dipendono direttamente da  $G$ .

Con l'avvento della relatività generale di Albert Einstein nel 1915, la comprensione della gravità si è ulteriormente arricchita. Einstein descrisse la gravità non come una forza, ma come la curvatura dello spaziotempo generata dalla massa e dall'energia. Anche in questo caso  $G$  mantiene un ruolo cruciale, poiché appare nelle equazioni di campo di Einstein, che governano la dinamica dello spaziotempo:  $G$  stabilisce l'intensità della curvatura generata da una determinata massa. Il valore di  $G$  ha implicazioni profonde. Un valore di  $G$  più grande implicherebbe una forza gravitazionale più forte, con conseguenze sulla formazione delle stelle, delle galassie e persino sulla possibilità della vita. Viceversa, un  $G$  più piccolo porterebbe a un universo più espanso, in cui gli oggetti celesti (galassie, stelle, buchi neri) si formerebbero con più difficoltà e avrebbero proprietà diverse da quelle che conosciamo.

Misurare  $G$  con precisione è una sfida notevole per la fisica sperimentale, a causa della debolezza della forza gravitazionale. Esperimenti moderni utilizzano bilance di torsione sofisticate, interferometria laser per misurare minime variazioni di posizione fra masse, misurazioni di masse in caduta libera, interferometria atomica per misurare l'accelerazione gravitazionale generata da una massa nota (come nell'esperimento MAGIA, vd. fig. b) e in generale tecniche avanzate per ridurre al minimo le influenze esterne. Alcuni errori sistematici sono ineliminabili, come ad esempio le forze di marea della Luna e del Sole. Nonostante secoli di miglioramenti tecnologici,  $G$  è ancora una delle costanti fondamentali della fisica note con minor precisione.

Inoltre, la difficoltà nel misurare  $G$  con precisione suscita interrogativi sulla sua natura: potrebbe il valore di  $G$  variare nello spazio e nel tempo, come suggerito da alcune teorie cosmologiche alternative? Questi quesiti spingono i fisici a esplorare nuove tecniche di misurazione e a sviluppare teorie che potrebbero ridefinire la nostra comprensione della gravitazione.

La costante di gravitazione universale  $G$  gioca un ruolo importante in alcuni dei problemi aperti della fisica teorica. Il principale è la mancata unificazione della gravità con le altre forze fondamentali, come l'elettromagnetismo e le forze nucleari, in una teoria quantistica della gravità. Un altro è il paradosso della perdita di informazione durante l'evaporazione dei buchi neri, uno dei pochi ambiti in cui  $G$  interagisce con altre costanti fondamentali, come la costante di Planck e quella di Boltzmann. In generale,  $G$  è essenziale per le equazioni che governano il comportamento dei buchi neri, l'espansione dell'universo e altri fenomeni cosmologici della fisica contemporanea. Per questo motivo, nonostante sia in giro da oltre tre secoli, rimane un pilastro fondamentale nella fisica e una frontiera aperta per la scoperta scientifica.

#### Biografia

**Paolo Pani** è professore di fisica teorica all'Università Sapienza di Roma e presso la sezione INFN di Roma1. È co-autore dei libri "General Relativity and its Applications" e "Superradiance: New frontiers in black-hole physics", oltre che di numerose pubblicazioni scientifiche sulla teoria della gravitazione, buchi neri, stelle di neutroni, onde gravitazionali e le loro implicazioni per la fisica fondamentale.