

Quanti di peso

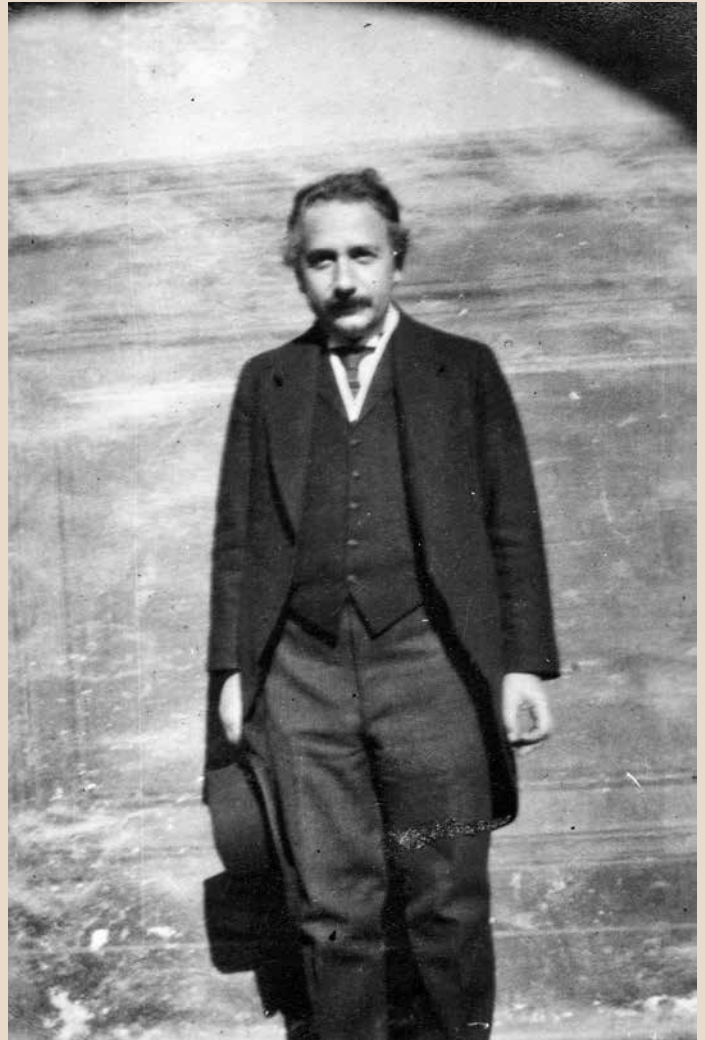
Ipotesi sui gravitoni

di Filippo Vernizzi

L'apparentemente banale ma profonda constatazione che una persona in caduta libera non sente il proprio peso e che l'effetto dell'attrazione gravitazionale è localmente indistinguibile da un moto accelerato permise al giovane Albert Einstein di formulare, in poco meno di un decennio, una nuova teoria della gravitazione universale: la relatività generale. Einstein la battezzò "l'idea più felice della mia vita". Qualche anno prima, nel 1905, aveva unificato lo spazio e il tempo per spiegare i fenomeni ad alte energie e con velocità prossime a quelle della luce. Ora lo spaziotempo diventava deformabile dalla presenza di massa o, più in generale, di ogni forma di energia. Nella relatività generale l'interazione gravitazionale non è una forza, come nella gravità di Newton o nell'elettrostatica di Coulomb, ma è curvatura dello spaziotempo. Il salto concettuale rispetto alla visione "classica" è gigantesco. Eppure, dalla sua formulazione fino ai giorni nostri, la relatività generale non ha smesso di ricevere conferme. L'ultima prova della sua elevata affidabilità ce l'hanno data le recenti osservazioni di onde gravitazionali, soluzioni ondulatorie della geometria spaziotemporale che si propagano alla velocità della luce. Le forme delle onde emesse dalla collisione di buchi neri osservati dagli interferometri Ligo e Virgo corrispondono perfettamente alle predizioni di Einstein (vd. in *Asimmetrie* n. 21 p. 10, ndr).

Le onde gravitazionali sono l'analogo gravitazionale delle ben più comuni onde elettromagnetiche, oscillazioni sincronizzate del campo elettrico e magnetico che, nel vuoto, si propagano alla velocità della luce. La luce, quindi, è un'onda, ma secondo la meccanica quantistica è anche composta di quanti, i fotoni. Quando il numero di fotoni per una data frequenza di luce è molto grande, questi si comportano a tutti gli effetti come un'onda classica. Allora viene naturale chiedersi: esiste l'analogo gravitazionale del fotone, il "gravitone"? Un'onda gravitazionale è fatta di gravitoni? È possibile descrivere la relatività generale, così manifestamente geometrica, in termini di particelle?

Per rispondere a queste domande è utile mantenere l'analogia con il fotone. La teoria che descrive l'interazione

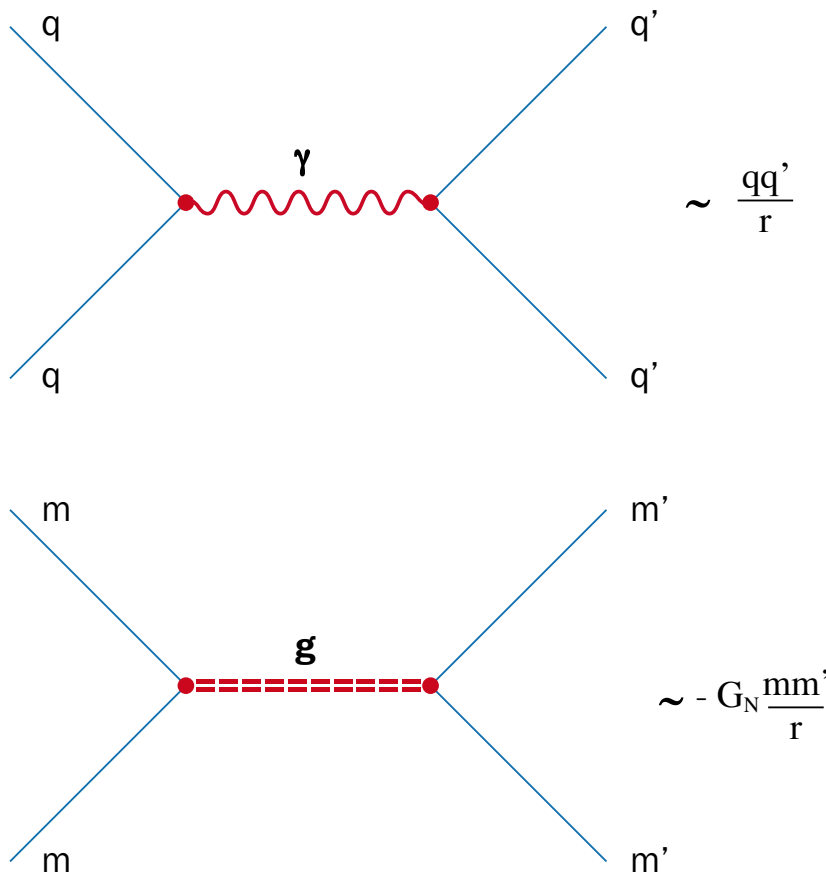


a.
Albert Einstein nel 1921, in una foto scattata a Bologna.

tra luce e materia, che coniuga meccanica quantistica e relatività speciale, si chiama elettrodinamica quantistica o Qed, acronimo inglese per *Quantum Electro-Dynamics*. È stata formalizzata alla fine degli anni '40 da Shin'ichirō Tomonaga, Julian Schwinger e Richard Feynman ed è una delle teorie fisiche meglio verificate sperimentalmente. Nella Qed i fotoni sono eccitazioni quantistiche del campo elettromagnetico. L'interazione tra particelle cariche avviene attraverso lo scambio (emissione e assorbimento) di fotoni virtuali, particelle che non si possono osservare direttamente e la cui esistenza è limitata dal principio di indeterminazione. Il quadro teorico generale che descrive le interazioni tra tutti i tipi di materia e le forze conosciute, di cui la Qed è un particolare esempio, è la teoria quantistica dei campi. I suoi mattoni fondamentali sono i campi quantistici.

Esistono campi di materia, le cui eccitazioni sono fermioni, cioè particelle con spin semi-intero (come gli elettroni, i neutrini e i quark, tutti di spin 1/2). Esistono poi i cosiddetti campi di *gauge*, con o senza massa, le cui eccitazioni sono bosoni, cioè particelle con spin intero. Il fotone è senza massa perché l'interazione elettromagnetica è a lungo raggio e si propaga alla velocità della luce. Ha spin 1, perché può essere scambiato tra particelle che trasportano una carica e una corrente elettrica. Una descrizione della gravità in questo quadro teorico esiste e, ovviamente, prevede che l'interazione gravitazionale avvenga attraverso lo scambio di gravitoni virtuali. Come il fotone, anche il gravitone per propagarsi su grandi distanze deve avere massa nulla. Tuttavia, il suo spin non può essere 1, come quello del fotone perché questo implicherebbe che l'interazione gravitazionale tra due masse sia

repulsiva, così come lo è quella elettromagnetica tra due particelle di carica uguale. Per avere interazione attrattiva potrebbero andare bene sia spin 0 che spin 2. Ma lo spin 0 non è in grado di descrivere correttamente la deflessione gravitazionale della luce. Rimane quindi lo spin 2 (valori di spin più grandi sono esclusi per altre ragioni) che interagisce con il cosiddetto "tensore di energia-impulso", la sorgente di deformazione dello spaziotempo in relatività generale. Nelle sue lezioni sulla teoria della gravitazione, Feynman si era chiesto cosa accadrebbe se un ipotetico fisico teorico di Venere, ignaro della relatività generale formulata sulla vicina Terra, ma esperto di teoria quantistica dei campi, si cimentasse a costruire una teoria con il gravitone. Lavorando a bassa energia e imponendo che questa teoria sia fisicamente consistente, il venusiano si accorgerebbe che la forza scambiata è



b. L'interazione gravitazionale tra due masse m e m' avviene grazie allo scambio di gravitoni (g), così come quella elettromagnetica tra due cariche (q e q') avviene attraverso lo scambio di fotoni (γ). Sia i fotoni che i gravitoni sono particelle di massa nulla, e questo spiega perché entrambi i potenziali (a destra), quello elettrostatico (o di Coulomb) e quello gravitazionale (dove G_N è la costante di Newton), dipendono dall'inverso della distanza. (vd. anche fig. a p. 10, ndr).

universale, riscoprendo l'“idea felice” di Einstein che la massa gravitazionale corrisponde alla massa inerziale. Ne consegue che, diversamente dal fotone che non porta carica elettrica e non contribuisce alla corrente, il gravitone deve interagire anche con se stesso, perché come tutte le particelle porta energia e l'energia gravita. La sua energia gravitazionale cambia la geometria dello spaziotempo, la quale a sua volta cambia l'energia gravitazionale, e così via. Questo processo non-lineare può essere ripetuto all'infinito per piccole perturbazioni, fino a ricostruire la teoria della relatività generale. Tornando alle onde gravitazionali, queste sarebbero dunque composte di gravitoni e, data l'estrema debolezza della gravità, il loro numero deve essere grande, superiore a 10^{12} per centimetro cubo, per renderle osservabili dagli interferometri terrestri. Fintanto che i processi in gioco sono di bassa energia non c'è incompatibilità tra relatività generale e meccanica quantistica. Le incompatibilità emergono quando si cerca di usare la teoria quantistica dei campi per predire processi gravitazionali

a energie sempre più grandi. Vediamo perché questo accade, confrontando nuovamente la formulazione quantistica della gravità con la Qed. Nel caso della Qed, le probabilità dei processi di interazione tra particelle rimangono finite anche ad alte energie (vd. in *Asimmetrie* n. 20 p. 10 e in *Asimmetrie* n. 23 p. 33). Nel caso gravitazionale, invece, queste aumentano con l'energia. Al crescere dell'accuratezza del calcolo, una teoria consistente dovrebbe dare correzioni sempre più piccole. Questo però vale solo per concentrazioni di energia inferiori a un valore chiamato “energia di Planck”. Per valori maggiori, le correzioni diventano invece via via sempre più grandi e le probabilità predette perdono di significato fisico (vd. in *Asimmetrie* n. 20 p. 13, ndr). Tecnicamente, si dice che la gravitazione non è “rinormalizzabile”. Poiché la gravità è molto debole, l'energia di Planck è superiore a quella di qualsiasi processo che conosciamo in natura (più precisamente, equivale a circa 10^{18} volte la massa del protone) e la relatività generale può essere usata con successo. Tuttavia, è da considerare

c.
Richard Feynman, chiamato anche “*the great explainer*”, in azione. Lo stile di presentazione di Feynman era noto per la sua originalità, entusiasmo e acume.





come una teoria efficace (vd. in *Asimmetrie* n. 18 p. 10, ndr) che richiede un cambiamento radicale di descrizione alla scala di Planck, quale l'emergere di nuovi gradi di libertà. La teoria delle stringhe, in grado di mantenere inferiori a uno le ampiezze di probabilità dei processi gravitazionali a grandi energie, è un suo possibile completamento.

Negli ultimi anni, la stessa teoria dei campi combinata con la necessità di spiegare l'origine dell'espansione accelerata dell'universo ha spinto i fisici teorici ad alterare la relatività generale su scale cosmologiche, dove non è stata ancora del tutto verificata. L'estensione più naturale è quella di ipotizzare che il gravitone abbia una piccola massa che indebolisce l'interazione gravitazionale a grandi distanze. Per essere compatibile con le onde gravitazionali osservate da Ligo e Virgo (vd. p. 31, ndr), questa massa deve essere minuscola: 28 ordini di grandezza inferiore a quella dell'elettrone. Benché apparentemente innocua, questa modifica è in realtà carica di conseguenze e per anni ha reso la vita dei fisici teorici che hanno sviluppato la teoria della gravità massiva difficilissima.

La prima proposta del '39 per opera di Markus Fierz e Wolfgang Pauli ha richiesto circa 70 anni per essere messa a punto

coerentemente, preservando le simmetrie dello spaziotempo relativistico. La recente formulazione di Claudia de Rham, Gregory Gabadadze e Andrew Tolley è nota come "gravità massiva invariante di Lorentz".

Come la relatività generale, anche la gravità massiva è una teoria efficace, ma la scala di energia a cui perde validità è più bassa di quella di Planck. Il suo valore è ancora dibattuto, ma sembra essere 40 ordini di grandezza inferiore, invalidando la teoria a lunghezze più piccole del raggio terrestre. Se così fosse, ci sarebbe ancora molto lavoro da fare per trovare un completamento ad alta energia di questa teoria in accordo con le osservazioni. Ma questo esempio e molti altri mostrano quanto sia difficile modificare la relatività generale in modo consistente e in accordo con le osservazioni. Insomma, per ora sembra proprio che nessuno abbia avuto un'idea più felice di quella di Einstein.

d.
Da sinistra, Markus Fierz e Wolfgang Pauli durante la Conferenza di Copenhagen al Bohr Institute del 1934. Sulla loro destra, Hans Jensen.

Biografia

Filippo Vernizzi ha conseguito il dottorato all'Università di Ginevra ed è ricercatore all'Istituto di Fisica Teorica del Cea di Saclay, in Francia. Si occupa principalmente di cosmologia.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.25.4