

# Giovedì **Scienza** 30<sup>a</sup> Edizione

LA SCIENZA IN DIRETTA  
*settimana per settimana*

## GIOVEDÌ 10 DICEMBRE 2015 **UN SECOLO DI RELATIVITÀ**

*La teoria di Einstein tra applicazioni quotidiane e problemi aperti*

### **LEONARDO CASTELLANI**

È professore ordinario di fisica teorica presso l'Università del Piemonte Orientale, dove tiene i corsi di meccanica dei quanti e computazione quantistica. Laureato all'Università di Firenze, ha conseguito il Ph.D presso l'Università di Stony Brook di New York e ha lavorato al Lauritsen Lab di Caltech e al CERN di Ginevra. La sua attività di ricerca riguarda la fisica delle particelle elementari e la gravità. Con Giulia Alice Fornaro è autore del libro divulgativo "Teletrasporto. Dalla fantascienza alla realtà" edito da Springer.

### **PER SAPERNE DI PIÙ**

Leonardo Castellani e Alberto Lerda, "Gravità, Cosmologia e Struttura dello spazio-tempo", Ateneo e Città, n.16 (2005), Università del Piemonte Orientale

Albert Einstein, "Le due relatività", 2015, Bollati Boringhieri

John Gribbin, "Il capolavoro di Einstein", 2015, Bollati Boringhieri

### **WEB**

<http://www.asimmetrie.it/index.php/oltre-la-quarta-dimensione>

Leonardo Castellani, "Oltre la quarta dimensione", Asimmetrie, n.5 (2007), INFN

<http://www.raiscuola.rai.it/articoli/100-anni-di-relativita%C3%A0/30742/>

All'inizio di questo speciale della trasmissione "Nautilus", RAI-Scuola propone "Vita di un Genio" breve sintesi della vita di Einstein, a seguire in studio per capire come avesse ragione e in quali aspetti della vita quotidiana ritroviamo le ricadute delle sue straordinarie scoperte...

### **DA VEDERE A TORINO**

"1915-2015: cento anni di relatività generale"

Accademia delle Scienze di Torino, 16 novembre 2015 - 28 maggio 2016

E' possibile visitare gratuitamente la mostra il lunedì e il venerdì pomeriggio dalla 15 alle 18, oppure su appuntamento scrivendo a: [mostre@accademiadelle scienze.it](mailto:mostre@accademiadelle scienze.it)

# GRAVITÀ, COSMOLOGIA E STRUTTURA DELLO SPAZIO-TEMPO

Delle quattro interazioni fondamentali della fisica, la forza di gravità è certamente quella più familiare: tutti noi la sperimentiamo continuamente perché è la forza che ci tiene legati alla terra e che determina il nostro peso. Paradossalmente però, la forza di gravità è anche una delle più misteriose e meno conosciute a livello fondamentale, tant'è che ancora oggi essa è al centro di numerosi progetti di ricerca da parte di fisici teorici e sperimentali in tutto il mondo.

La gravità è una forza attrattiva che si esercita sempre fra due masse ed è di gran lunga la più debole delle quattro interazioni fondamentali. A piccole distanze (per esempio all'interno degli atomi o delle molecole) essa risulta trascurabile rispetto alle forze nucleari ed elettromagnetiche, ma diventa la forza dominante a grandi distanze. Infatti, è la gravità a mantenere gli oceani e l'atmosfera legati alla superficie terrestre, a determinare la forma e la struttura del nostro sistema solare, della nostra galassia e, più in grande ancora, del nostro universo.

Una prima comprensione scientifica dei fenomeni gravitazionali e delle loro proprietà fondamentali si raggiunse soltanto nella seconda metà del XVII secolo con Isaac Newton che nei suoi *Principia Mathematica* del 1687 formulò la famosa legge della gravitazione universale in base alla quale:

*“Qualsiasi oggetto dell’Universo attrae ogni altro oggetto con una forza diretta lungo la linea che congiunge i centri dei due oggetti, di intensità direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse ed inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza.”*

Questa legge permette di spiegare in modo straordinariamente accurato una grande varietà di fenomeni diversi, sia sulla Terra (per esempio le maree) sia nello spazio (per esempio le orbite della Luna e dei pianeti). Essa è così precisa che nel 1846 l'astronomo francese Urbain Le Verrier, paragonando i dati osservati dell'orbita di Urano con le previsioni della legge di Newton, riuscì a predire l'esistenza di un nuovo pianeta, Nettuno, che solo in seguito venne scoperto con l'osservazione diretta.

Un ulteriore passo in avanti per la comprensione dei fenomeni gravitazionali fu compiuto all'inizio del secolo scorso con la teoria della relatività generale di Albert Einstein. Pubblicata nel 1915, essa rappresenta una generalizzazione della relatività ristretta del 1905, con la quale Einstein aveva profondamente modificato i concetti di spazio e di tempo della fisica newtoniana unificandoli in uno spazio-tempo quadridimensionale in cui la luce viaggia sempre alla stessa velocità rispetto a qualsiasi osservatore. Con la teoria della relatività generale Einstein va oltre e ipotizza che lo spazio-tempo non sia indipendente dalla materia in esso contenuta, ma al contrario questa ne determini la “forma” e le caratteristiche geometriche. In particolare la presenza di una massa incurva lo spazio-tempo causando una specie di avvallamento nel quale altri corpi possono “cadere”. L'attrazione gravitazionale fra due masse può dunque essere spiegata in termini geometrici come effetto della curvatura dello spazio-tempo. Spesso si rappresenta

questa situazione con una pallina che con il suo peso deforma un foglio di gomma. Se poi si introduce una seconda pallina, questa cade nell'avvallamento creato dalla prima e quindi viene attratta da essa. Ovviamente questa descrizione dell'attrazione gravitazionale è una drastica semplificazione, ma è comunque utile per avere un'idea qualitativa del fenomeno.

Oltre che una generalizzazione della relatività ristretta, la relatività generale è anche un'estensione della teoria newtoniana della gravitazione e predice correttamente alcuni fenomeni non spiegati nell'ambito delle leggi di Newton, come ad esempio la precessione del perielio di Mercurio, il ritardo nell'eco dei segnali radar e la deflessione dei raggi luminosi da parte del sole. Fu proprio l'osservazione di quest'ultimo fenomeno durante un'eclissi di sole nel 1919 a fornire la prima clamorosa conferma sperimentale della teoria di Einstein. Infatti, durante l'eclissi del 1919 l'astronomo inglese Arthur Eddington riuscì a vedere vicino al bordo solare alcune stelle che in realtà avrebbero dovuto essere invisibili se i raggi luminosi non fossero stati deviati dal sole. Oggi gli effetti relativistici si manifestano anche in situazioni di vita quotidiana: i navigatori satellitari che sfruttano il GPS (Global Positioning System), sempre più diffusi su automobili e cellulari, possono funzionare correttamente e rilevare la posizione sulla superficie terrestre con un errore di appena qualche metro solo se tengono conto della variazione di frequenza nei segnali emessi e ricevuti dovuta alla dilatazione e alla curvatura dello spazio-tempo previste dalla teoria di Einstein!

Dal punto di vista concettuale, la novità più significativa introdotta dalla relatività generale è il fatto che lo spazio-tempo non è un dato a priori, ma al contrario è determinato e specificato dalla materia e dall'energia in esso contenuta. Questo legame, fra materia ed energia da un lato e geometria dall'altro, si esprime attraverso le famose equazioni di campo di Einstein che, se applicate all'intero spazio-tempo, permettono di ricavare informazioni sul nostro Universo. Con la relatività generale diventa dunque possibile, per la prima volta, affrontare in maniera scientifica e matematica la questione cosmologica, indagare la struttura geometrica dell'Universo e studiarne l'evoluzione. Questi fatti, unitamente alle osservazioni sperimentali dello spostamento verso il rosso dello spettro di emissione delle galassie che nel 1929 portarono l'astrofisico americano Edwin Hubble ad affermare che tutte le galassie si allontanano le une dalle altre con una velocità proporzionale alla loro distanza, sono la base della moderna teoria dell'universo, nota come Modello Standard Cosmologico. Secondo tale modello l'universo attraversa attualmente una fase di espansione ed ha avuto origine circa 15 miliardi di anni fa con una tremenda esplosione, detta "Big Bang". La natura esatta di questo evento primordiale è ancora oggetto di numerose speculazioni. Tuttavia alcuni fatti fondamentali sono noti con certezza. Per esempio sappiamo che negli istanti iniziali l'Universo era incredibilmente più caldo e più denso di quanto non lo sia oggi, e che il Big Bang fu seguito da una fase di rapidissima espansione, detta inflazione. Inoltre il successivo raffreddamento e il conseguente rallentamento dell'espansione determinarono la comparsa di tutto ciò che noi oggi vediamo nel cosmo, cioè essenzialmente radiazione e materia di vario genere. Quest'ultima si manifestò inizialmente nelle forme più fondamentali, cioè elettroni, muoni, neutrini e quarks che, dopo appena un decimillesimo di secondo dal Big Bang, si combinarono in protoni, neutroni ed altri barioni. Nei successivi tre minuti, i protoni e i neutroni si unirono per dare origine ai nuclei atomici, da cui poi si formarono i primi elementi chimici e successivamente tutte le altre strutture complesse.

La relatività generale di Einstein descrive accuratamente tutti i fenomeni gravitazionali noti, da scale cosmiche fino al decimo di millimetro, e si riduce alla teoria di Newton per velocità molto minori di quella della luce. Non ci dice però che cosa succede a scale estremamente piccole, o equivalentemente a energie estremamente alte: per questo è necessaria una teoria quantistica del campo gravitazionale, così come è stata costruita per le altre tre interazioni fondamentali (elettromagnetiche, “deboli” e “forti”) con il cosiddetto “Modello Standard” delle particelle elementari, per il quale l’ultimo tassello, il bosone di Higgs, è stato osservato recentemente al Large Hadron Collider del CERN. Perché ci interessa la gravità a scala ultramicroscopica? Una motivazione sta proprio nel modello cosmologico, che prevede situazioni in cui l’universo stesso è racchiuso in dimensioni microscopiche (subito dopo il Big Bang) con altissima densità di energia: gli effetti di gravità quantistica diventano allora essenziali per spiegare l’evoluzione dell’universo primordiale, di cui possediamo oggi una straordinaria fotografia a circa 400.000 anni dal Big Bang iniziale grazie alla radiazione di fondo cosmico.

Un modello consistente di gravità quantistica è dato dalla “teoria delle stringhe”, in cui tutte le particelle elementari non sono altro che diversi modi di vibrazione di un oggetto unidimensionale, detto appunto stringa. In altre parole, i costituenti ultimi della materia sarebbero delle minuscole cordicelle che, vibrando, assumono le caratteristiche di tutte le varie particelle elementari, elettrone, quark, fotone, gravitone etc, così come le corde di un violino emettono le varie note musicali. In questa teoria, nata alla fine degli anni 60 e intensamente elaborata e sviluppata negli ultimi decenni, la gravità viene unificata con le altre interazioni fondamentali in una teoria quantistica, valida anche a piccolissime scale. Pur mancando ancora verifiche sperimentali dirette di alcune sue previsioni (ed è quindi prematuro decretarne il successo come teoria che descrive la Natura a livello fondamentale), si tratta di una moderna evoluzione della relatività generale di Einstein, che mette in relazione le proprietà globali dell’universo con la struttura microscopica dello spazio-tempo, rivelando ancora una volta come l’infinitamente grande e l’infinitamente piccolo siano strettamente legati fra loro.

liberamente tratto da  
*Gravità, Cosmologia e Struttura dello spazio-tempo*  
Leonardo Castellani e Alberto Lerda  
Ateneo e Città, n.16 (2005), Università del Piemonte Orientale