

# La gravità da Newton ai nostri tempi

*dalla Luna alle onde gravitazionali  
e oltre...*

PHILOSOPHIÆ

NATURALIS

PRINCIPIA

MATHEMATICA.

---

Autore *J*S. NEWTON, *Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos*  
*Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.*

---

IMPRIMATUR.

S. P E P Y S, *Reg. Soc. PRÆSES.*

*Julii 5. 1686.*

---

L O N D I N I,

*Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud*  
*plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.*

1687

Newton pubblica in 350 copie i

*Philosophiæ Naturalis*  
*Principia Mathematica*

## Che cosa c'è nei *Principia*

1. Le famose “tre leggi della dinamica”
2. La *legge di gravitazione*:

$$F = G m m' / r^2$$

La gravità è:

- **universale** (agisce fra tutti i corpi)
- proporzionale alle **masse**
- inversamente proporzionale al **quadrato della distanza**.

La gravità è un'azione **istantanea a distanza**.

(Questo a Newton non piaceva, ma era un'ipotesi semplice e funzionava bene...)

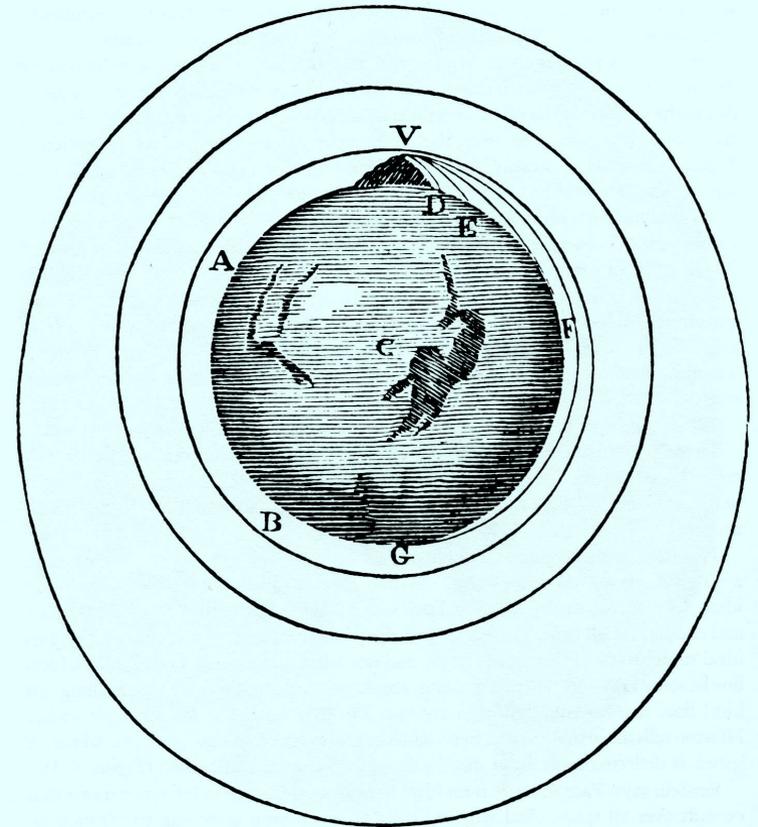
## Le leggi di Newton al lavoro...

Nei *Principia* Newton mette al lavoro le sue leggi:

- a) per spiegare una quantità di fenomeni già conosciuti
- b) per fare previsioni su fatti incerti o del tutto sconosciuti.

Esempi di cose già note di cui dà spiegazione:

- le leggi di Keplero
- le maree
- la precessione degli equinozi
- il moto della Luna.

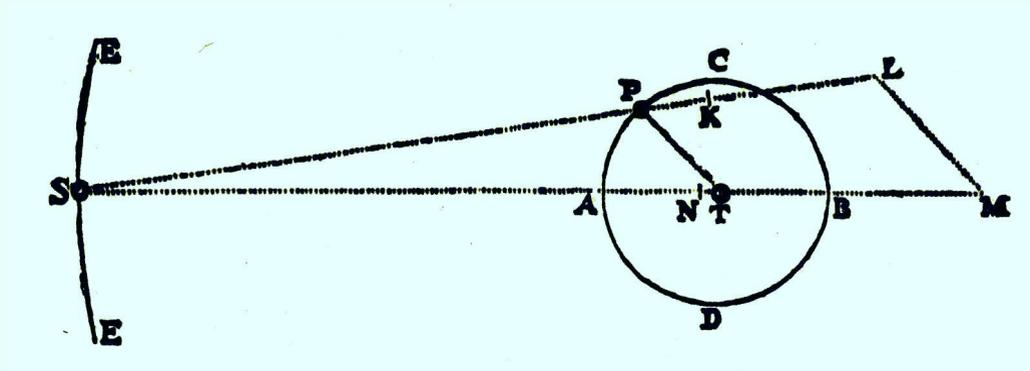


## Il moto della Luna

Il moto della Luna non è semplice come si potrebbe credere; questo era noto da tempo, grazie alle osservazioni.

Soddisfa solo con grossolana approssimazione le leggi di Keplero.

Newton capisce che la “colpa” è del Sole, e ne calcola l'effetto.



## Le comete

Basandosi sui metodi di Newton, Halley studia il moto di varie comete osservate nel passato e ne determina l'orbita.

In particolare scopre che la cometa del 1607 e quella del 1682 hanno la stessa orbita. Ne calcola il periodo.

Nei *Principia* Newton scrive:

*Tutto ciò sarà provato se questa cometa torna lungo questa stessa orbita al termine dei 75 anni.*

Inutile dire che la cometa tornò puntualmente. Anche se Newton era già morto, fu un'appariscente conferma della sua teoria.

Si tratta della famosa **cometa di Halley**, che nel secolo scorso è passata vicino al Sole (e alla Terra) nel 1910 e nel 1986. Tornerà nel 2061.

## Dopo Newton ...

...astronomi, fisici, matematici approfondiscono e perfezionano il suo lavoro, con osservazioni e calcoli.

In particolare, si sviluppano metodi per il calcolo delle **perturbazioni**.

Le leggi di Keplero sono esatte se un pianeta è soggetto soltanto all'attrazione del Sole; ma nella realtà tutti i pianeti si attirano (e quindi si perturbano) l'uno con l'altro.

Nel 1781 Herschel scopre per caso un nuovo pianeta: **Urano**.

La distanza di Urano dal Sole è doppia di Saturno; il suo periodo è 84 anni.

La scoperta casuale di Urano è l'antefatto per un'altra scoperta, assai più importante: quella di **Nettuno**.

## La scoperta di Nettuno

Nei decenni che seguono, le osservazioni mostrano che Urano non si comporta come dovrebbe: il suo moto anticipa fino a circa il 1820, poi ritarda.

Anche tenendo conto di tutte le perturbazioni, i conti non tornano...

Si formano due “partiti”:

c'è chi ritiene che la legge di gravitazione vada modificata, che a così grande distanza dal Sole non valga più esattamente la legge di Newton;

c'è invece chi pensa che la legge sia esatta, ma ci debba essere un altro pianeta sconosciuto che perturba Urano.

Adams e LeVerrier sono del secondo partito: calcolano che posizione e che massa dovrebbe avere il pianeta sconosciuto per spiegare il moto di Urano.

Nel settembre 1846 LeVerrier scrive a Galle, a Berlino, e gli chiede di cercare il pianeta in una certa regione di cielo.

Galle chiede l'autorizzazione al Direttore dell'Osservatorio (Encke); si mette al lavoro, e dopo due giorni telegrafa a LeVerrier:

*Il pianeta di cui ci avete segnalato la posizione esiste realmente.*

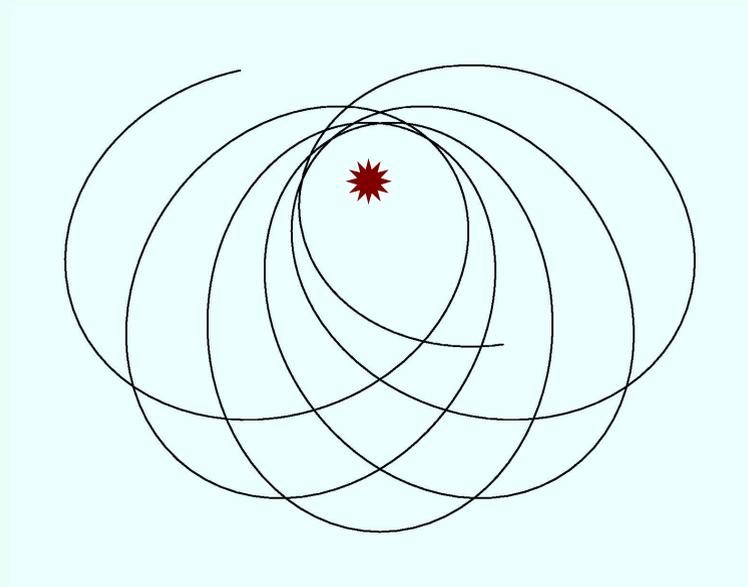
Questa scoperta fu un grande trionfo della gravitazione newtoniana: ne metteva infatti in evidenza il **potere predittivo**.

Ogni buona teoria non deve essere soltanto capace di “spiegare” fatti già noti (“spiegare” significa inquadrarli in uno schema unitario, generale); deve anche **proporre**, **prevedere**, oggetti fatti fenomeni al momento sconosciuti.

## Il problema di Mercurio

Risolto un problema, proprio nello stesso tempo ne nasce un altro...

Ancora LeVerrier si accorge che anche Mercurio non si comporta bene: dopo calcolate tutte le perturbazioni, resta una lenta rotazione dell'ellisse nel suo piano:  $43''$  per secolo (più di 8000 anni per fare un grado).



Naturalmente si pensa subito alla perturbazione di un altro pianeta: gli si dà anche un nome, Vulcano...

Lo cercano, ma nessuno lo trova.

Si tentano altre spiegazioni, ma nessuna funziona.

Alla fine dell'800 il problema è ancora aperto, e nessuno immagina che di lì a poco sarà risolto per una via del tutto nuova...

Non bisogna però dimenticare che nel frattempo la teoria di Newton ha continuato a essere usata in astronomia, con costante successo.

Per esempio, è stata applicata anche alle **stelle binarie**.

È stato scoperto che Sirio è una stella binaria: Sirio B è il primo esempio di **nana bianca**.

## Entra in gioco Einstein

Nel 1905 Einstein ha costruito la cosiddetta “teoria della relatività” che poi verrà chiamata “ristretta” o “speciale” per distinguerla da quella **generale** di cui vogliamo ora parlare.

L'idea centrale della RR è l'equivalenza fisica di tutti i riferimenti **inerziali** (*principio di relatività*).

Subito dopo, Einstein si propone di generalizzare il principio di relatività anche ai riferimenti non inerziali (accelerati).

Ma nel far questo si accorge che gli effetti di un riferimento accelerato equivalgono a quelli della gravità: viene così indotto a modificare il suo obiettivo, che diventa:

*reformulare la gravitazione newtoniana in modo da renderla compatibile con la relatività*

o in breve:

*costruire una teoria relativistica della gravitazione.*

Einstein arriva in fondo nel 1916, dopo 10 anni di lavoro.

Per la prima volta dopo tre secoli, la teoria di Newton è stata rielaborata e trasformata in un'altra, di cui la gravitazione newtoniana è un caso limite.

## Spazio, tempo, gravità

In realtà la modifica è radicale: ci obbliga a ripensare in modo totalmente nuovo le concezioni di spazio, tempo, gravità su cui si basava la fisica fino allora.

Einstein torna alla scoperta di Galileo: se

*tutti i gravi cadono con la stessa accelerazione*

e se, più in generale

*tutti i corpi si muovono allo stesso modo in un campo gravitazionale*

allora è meglio pensare che

*la gravità non è una proprietà dei corpi, bensì la forma in cui si manifesta una **proprietà geometrica** dello spazio in cui si muovono.*

O meglio, dello *spazio-tempo*: quell'entità che già con la RR ha preso il posto dello spazio e del tempo assoluti di Newton.

## Le tre ipotesi base della RG

1. Lo spazio-tempo è **curvo**.
2. I corpi non soggetti a forze (in “caduta libera”) descrivono **geodetiche** dello spazio-tempo.
3. La curvatura dello spazio-tempo è determinata dalla **materia**.

Wheeler dice:

*“lo spazio-tempo dice alla materia come muoversi, la materia dice allo spazio-tempo come incurvarsi.”*

Su questi principi si sviluppa una teoria completa, con

- concetti fisici
- apparato matematico
- collegamento coi fatti sperimentali.

## Le prime previsioni

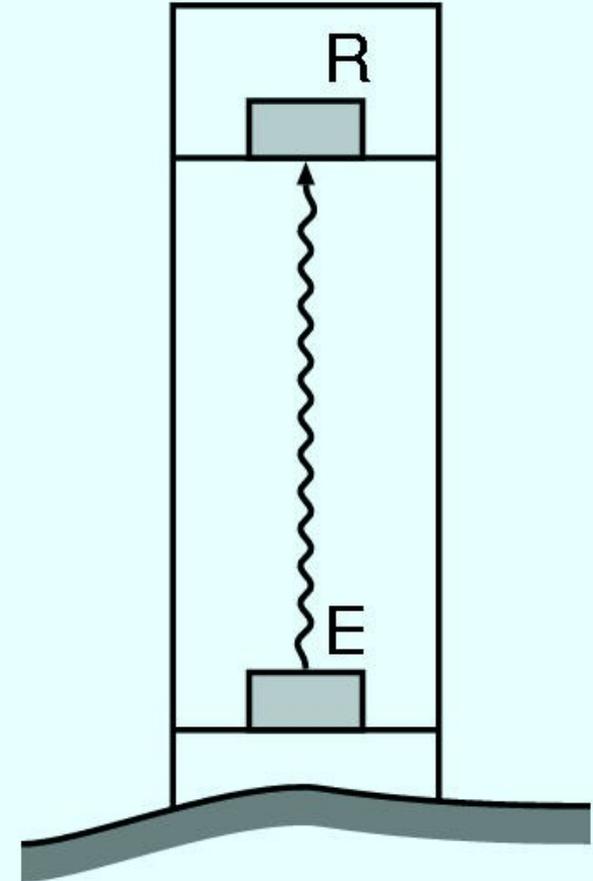
Nel 1911 Einstein prevede il **redshift gravitazionale**:

La luce emessa da E arriva in R con frequenza **minore** (lunghezza d'onda **maggiore**).

La prima verifica sperimentale è del 1960, ed è stata poi confermata con precisione molto maggiore.

Nel 1915 prevede la **deflessione gravitazionale** della luce.

Nel caso del Sole l'angolo è assai piccolo ( $1.75''$ ) ma è stato verificato più volte, con notevole precisione.

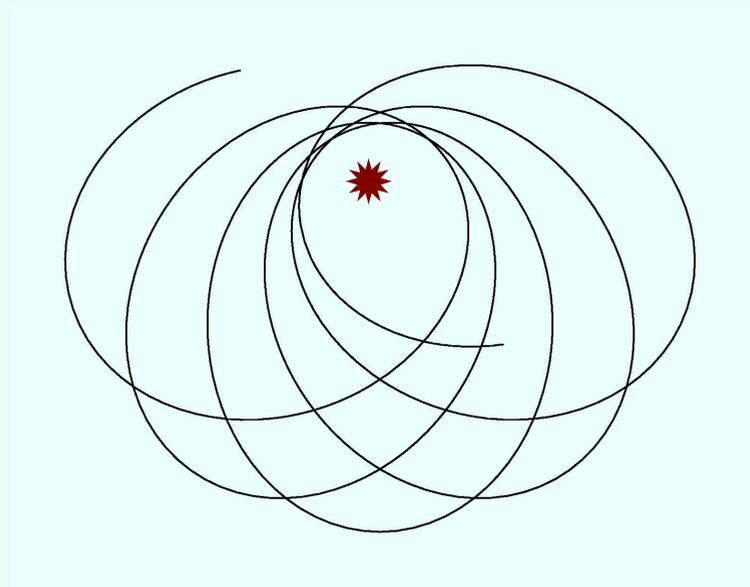


## La soluzione per Mercurio

Alla fine del 1915 Einstein applica le sue equazioni al moto di un pianeta, e trova che esse

“spiegano quantitativamente la rotazione secolare dell'orbita di Mercurio, scoperta da LeVerrier, *senza bisogno di alcuna speciale ipotesi*”

(parole di Einstein).



## Le onde gravitazionali

Nel 1916 Einstein prevede l'esistenza delle **onde gravitazionali** e dà la formula della radiazione gravitazionale emessa da un sistema di masse in moto.

In condizioni ordinarie, l'energia emessa è assolutamente trascurabile; per es. la Terra “spiralizza” verso il Sole, al ritmo di 2 mm in un miliardo di anni...

Può diventare importante solo in casi speciali. Ne riparleremo.

Per parecchio tempo, l'esistenza delle o.g. è stata argomento assai controverso: Eddington diceva ironicamente che esse “si propagano con la velocità del pensiero.”

## La cosmologia

Poco dopo, Einstein affronta un altro grandioso problema: appunto la cosmologia.

Intuisce che la RG può essere applicata **all'intero Universo**: facendo ipotesi ragionevoli sulla costituzione della materia presente, si può capire la struttura geometrica dell'Universo (finito? infinito? euclideo? non euclideo?) e anche la sua evoluzione.

Vediamo però quali erano a quel tempo le conoscenze astronomiche.

## Galassia = Universo?

Si conosceva la Galassia (Via Lattea).

Si aveva una qualche idea della sua forma e dimensioni.

Si conoscevano molte **nebulose**, in particolare quelle “a spirale,” ma prevaleva l'opinione che fossero parte della Galassia.

Si potevano fare solo congetture su che cosa ci fosse “al di là”: il vuoto?

Nessuno aveva concepito l'idea di un Universo in evoluzione.

## Nascita della cosmologia scientifica

La RG ha consentito la nascita di una **cosmologia scientifica**, togliendo il problema cosmologico dal campo della speculazione filosofica.

Al primo **modello cosmologico** di Einstein ne è seguita una serie, tutti di necessità basati sul **principio cosmologico**:

*l'Universo è spazialmente omogeneo e isotropo.*

In termini semplici: ha le stesse proprietà *in tutti i punti e in tutte le direzioni*.

## L'espansione dell'Universo

**1924:** Le osservazioni dimostrano che le nebulose a spirale sono in realtà altrettante **galassie**, di cui si riesce a determinare la distanza.

L'Universo è quindi assai più grande della sola Galassia.

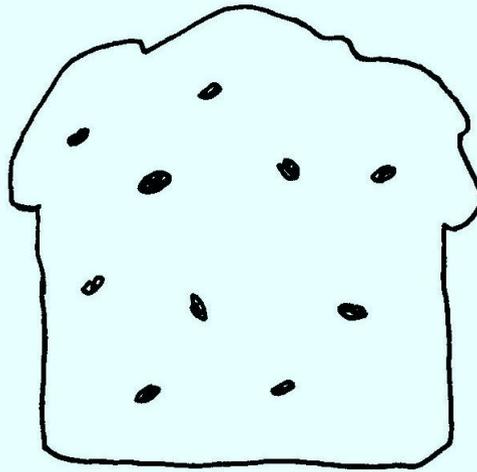
**1929:** Hubble dimostra, grazie al nuovo telescopio di M. Wilson (due metri e mezzo) che la luce delle galassie lontane ci arriva spostata in lunghezza d'onda (“redshift”) e che lo spostamento è **proporzionale alla distanza** della galassia.

Questa è la **legge di Hubble**.

## Come interpretare la legge di Hubble?

Si usa descrivere la legge di Hubble dicendo che le galassie si allontanano, con velocità proporzionale alla distanza.

È un'interpretazione pericolosa, perché suggerisce che l'Universo sia una specie di grande palla che si dilata, avendo attorno uno spazio vuoto.



Invece è lo spazio stesso che si dilata: il panettone è tutto lo spazio, e non c'è niente fuori.

Bisogna però prendere atto che è praticamente impossibile trasmettere e comprendere l'idea con le sole parole...

*“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 conoscere i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, e altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.”*

Questo non vuol dire che occorranò chissà quali astrusi studi; ma occorre impegnarsi: leggere un po' di divulgazione non basta.

## Il big bang

Questo termine (il “grande botto”) fu coniato da Hoyle, che non ci credeva, in senso ironico. Ha avuto invece una fortuna inattesa, e anche eccessiva...

Si riferisce al fatto che tutti i modelli cosmologici prevedono una fase iniziale con grandissime temperature e densità.

In quella fase la materia si trova in condizioni estremamente diverse da quelle che si presentano oggi.

Per questo motivo la cosmologia è entrata in rapporto con la fisica delle **interazioni fondamentali**: la fase iniziale è quella in cui si svolgono processi di creazione e annichilazione di **particelle**, si formano i primi **nuclei** atomici, si producono i primi germi di disomogeneità da cui nasceranno le **galassie**.

## **La radiazione cosmica di fondo**

Nel 1946 Alpher, Bethe e Gamow avanzano la previsione che del “big bang” debba essere rimasto un residuo “fossile”: una radiazione elettromagnetica che riempie tutto l'Universo, e che oggi (causa il redshift) dovrebbe avere una composizione spettrale nel campo millimetrico (microonde).

La radiazione di fondo viene scoperta casualmente nel 1965, da Penzias e Wilson.

Da allora è stata oggetto di continuo studio, e ancora oggi fornisce informazioni importanti sulle fasi iniziali dell'Universo e anche sulla sua costituzione attuale.

## La ricerca delle onde gravitazionali

Il tentativo di rivelare sperimentalmente le onde gravitazionali – previste da Einstein fin dagli inizi della RG – è in corso da quasi 40 anni.

La difficoltà sta nel costruire un rivelatore abbastanza efficiente e sensibile.

Al momento abbiamo una prova indiretta, ma molto solida, che le onde gravitazionali esistono, basata sull'osservazione di **sistemi binari di stelle di neutroni**.

## La scoperta delle pulsar

Nel 1967 Hewish et al. scoprono una radiosorgente che emette impulsi brevissimi ed estremamente regolari: un impulso ogni 1.33728 secondi.

Il nome **pulsar** significa appunto “pulsating radio source.”

In un primo tempo qualcuno pensò a segnali di extraterrestri ... ma poi le pulsar note si moltiplicarono, sempre con periodi di secondi o anche molto meno.

Infine si arrivò alla spiegazione.

## **Pulsar e stelle di neutroni**

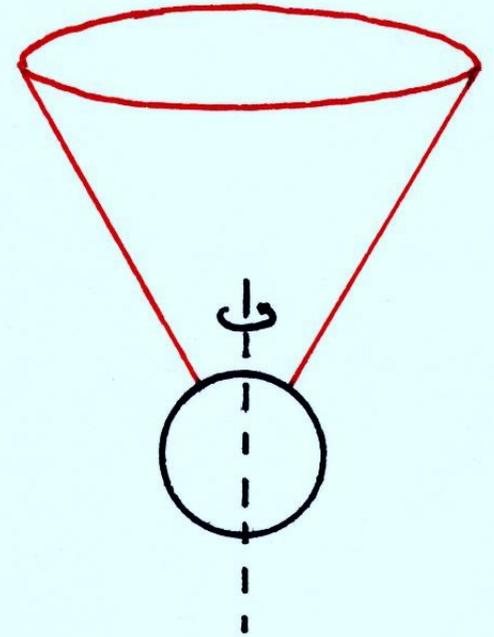
Una stella di neutroni è una delle fasi finali dell'evoluzione stellare: si forma nell'esplosione di una **supernova**, dalla violenta compressione della parte centrale della stella.

Una massa poco maggiore di quella del Sole viene compressa in un diametro di circa 10 km.

Le stelle di neutroni posseggono un intenso campo magnetico, e come per la Terra, i poli magnetici non stanno sull'asse di rotazione.

La rapida rotazione causa l'emissione di radiazione lungo l'asse magnetico, e la radiazione spazza quindi lo spazio in un cono, come un faro.

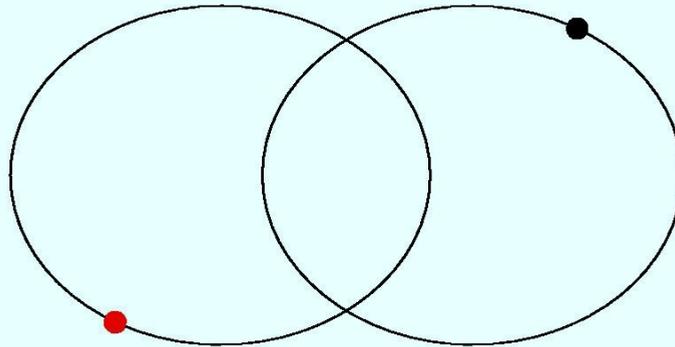
Se siamo fortunati, e ci troviamo su quel cono, a ogni giro riceviamo un impulso di radiazione, e vediamo una pulsar.



## Il sistema binario B1913+16

Nel 1974 Hulse e Taylor scoprono un sistema formato da due stelle di neutroni: solo una delle due è una pulsar.

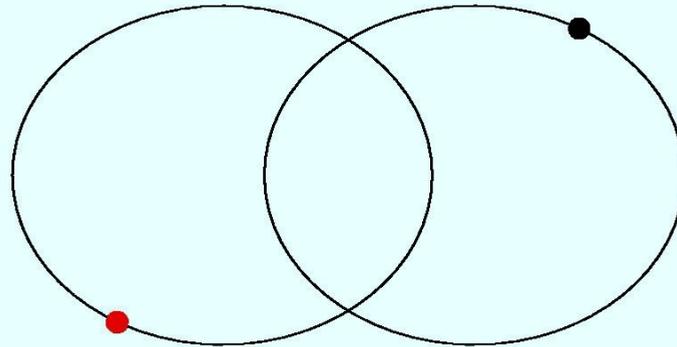
Il periodo orbitale è di circa 8 ore.



Le osservazioni proseguono per molti anni, e mostrano che il periodo sta **lentamente decrescendo**, il che vuol dire che le due stelle si stanno **avvicinando**, e che il sistema **perde energia**.

I calcoli hanno mostrato che la perdita di energia è proprio quella che ci si deve aspettare se il sistema emette **onde gravitazionali**.

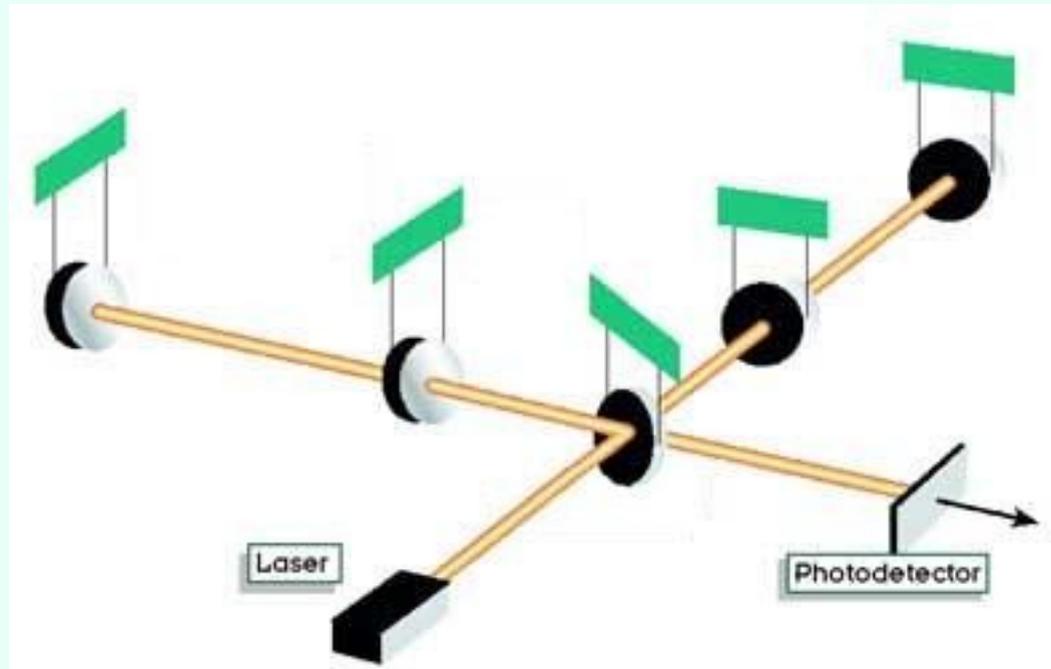
Per questa scoperta Hulse e Taylor hanno ricevuto nel 1993 il **premio Nobel**.



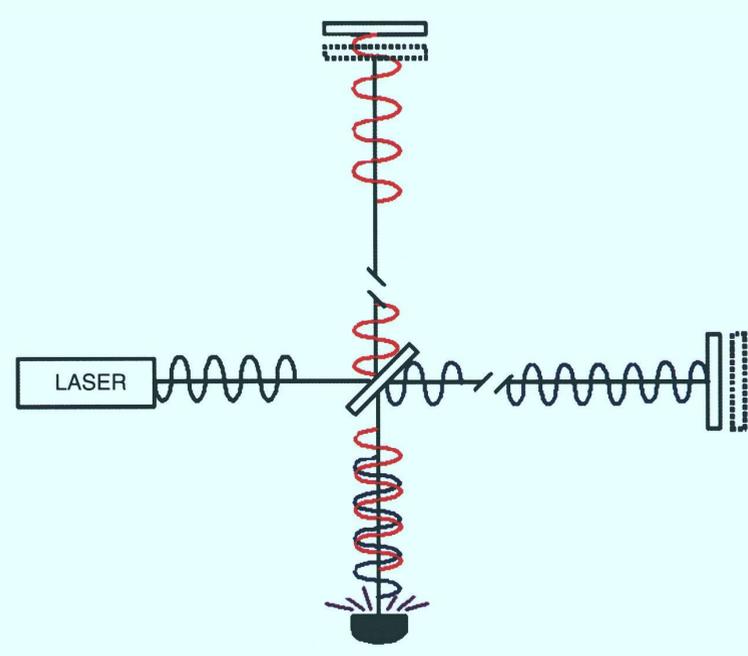
## Gli interferometri

I primi tentativi di rivelare le onde gravitazionali con antenne a barre risonanti (Weber e altri) finora non hanno dato risultati.

Negli ultimi anni sono stati progettati e realizzati sistemi molto più sensibili, basati sullo schema dell'**interferometro**.



Un'onda gravitazionale in arrivo fa oscillare i due specchi **in verso opposto**.  
Questo cambia le condizioni d'interferenza, facendo arrivare un'intensità di luce variabile al rivelatore.  
Le oscillazioni sono però estremamente piccole, e per renderle apprezzabili occorre che i bracci dell'interferometro siano più lunghi possibili.



Nel caso di **VIRGO**, costruito a Cascina (PI), i bracci sono lunghi 3 km.

Anche così, le oscillazioni attese per gli specchi saranno di  $10^{-18}$  m: un millesimo delle dimensioni di un nucleo atomico.



## Quali eventi si possono rivelare?

Ecco un evento tipico: le due componenti di una binaria di neutroni, perdendo energia, si avvicinano sempre più, fino a fondersi in una stella unica (o forse in un buco nero).

In questo evento si produce un flusso relativamente intenso di onde gravitazionali.

Si stima che la binaria B1913+16 farà questa fine fra 300 milioni di anni. Non possiamo aspettare così tanto!

Le binarie di neutroni sono molte, ma sempre poche nella nostra Galassia.

Ecco perché occorre un'antenna molto sensibile: per poter rivelare eventi che avvengono anche in **altre galassie**.

## **I buchi neri**

La prima idea su questi “oggetti misteriosi” è del 1939.

Oppenheimer e Snyder osservano che il collasso gravitazionale di una stella di massa abbastanza grande non potrebbe arrestarsi.

Si formerebbe perciò un oggetto osservabile dall'esterno solo per il suo effetto gravitazionale.

Il nome “buco nero” viene proposto da Wheeler molti anni dopo.

Ma che cos'è esattamente un buco nero?

Impossibile spiegarlo in poche parole...

E bisogna diffidare delle spiegazioni divulgative, che tendono a dare idee profondamente distorte su questi argomenti.

## Si può “vedere” un buco nero?

Indirettamente sì.

1. Si può vedere la radiazione emessa dalla materia che ci **cade dentro**.

Ci sono alcune “sorgenti X” che si ritiene possano essere spiegate solo in questo modo.

2. Si possono osservare oggetti che **orbitano attorno** a un buco nero.

Per es. è molto probabile che al centro della Galassia ci sia un buco nero, di massa pari a 3 milioni di volte quella del Sole.

È stato seguito per alcuni anni il moto di una stella vicinissima al centro, e da quel moto è stata ricavata la massa e le dimensioni in cui è ristretta.

Sembra molto difficile spiegarla altrimenti.

## Problemi aperti

Nonostante i grandi successi della RG, ci sono problemi aperti:

- che cos'è (se esiste) la “**materia oscura**” che si manifesta nei suoi effetti gravitazionali, sia nelle galassie come nell'intero Universo?
- che cosa significa il termine che ora è di moda chiamare “**energia oscura**” (dark energy) necessario nelle equazioni di Einstein per metterle d'accordo con le più recenti osservazioni cosmologiche?

Ma soprattutto:

- come si può conciliare la **RG** con la **meccanica quantistica**?

## “Quantizzare” la gravità

La RG è nata e si è sviluppata contemporaneamente all'altra grande rivoluzione della fisica dello scorso secolo: la **meccanica quantistica**.

La meccanica quantistica ha influito profondamente su tutta la fisica: atomi, nuclei, solidi, particelle, campi elettromagnetici...

Ha rifondato le basi della chimica.

È servita a spiegare la luce e la struttura delle stelle.

Solo la RG è rimasta fuori da questa rivoluzione: a quasi un secolo dalla sua nascita, è ancora una teoria **classica** (non quantistica).

Ciò significa forse che la RG è da considerare superata o sbagliata?

Neanche per sogno!

## Conferme e limiti della RG

Tutte le previsioni della RG sono state confermate, con precisione sempre crescente: la RG **funziona**.

Ci sono allora delle condizioni in cui dobbiamo aspettarci che la RG mostri il suo limite, proprio per non essere una teoria quantistica?

Ce n'è di certo almeno una: il **big bang**.

In vicinanza di quella “singolarità” che chiamiamo “big bang” densità e temperatura dovevano essere così alte che gli effetti quantistici erano sicuramente dominanti.

Perciò la stessa previsione di una singolarità, fatta senza tener conto degli effetti quantistici, è da ritenere poco affidabile.

## Riassumendo

La fisica della gravitazione è nata con Newton oltre **tre secoli fa**.

Ha spiegato numerosi fatti e ha avuto grandiose conferme (Nettuno).

Da meno di un secolo è stata ampliata e corretta da una teoria del tutto nuova: la **relatività generale** di Einstein.

Questa ha previsto fenomeni ancora sconosciuti, ed è stata ampiamente verificata, anche in un campo del tutto nuovo: la **cosmologia**.

I dati più recenti mostrano però dei punti oscuri, che potrebbero essere indizi (come il perielio di Mercurio?) che qualche innovazione sia necessaria.

C'è poi il problema della singolarità iniziale, che sta al di là del campo di possibile validità della RG, e richiede una **teoria quantistica**.

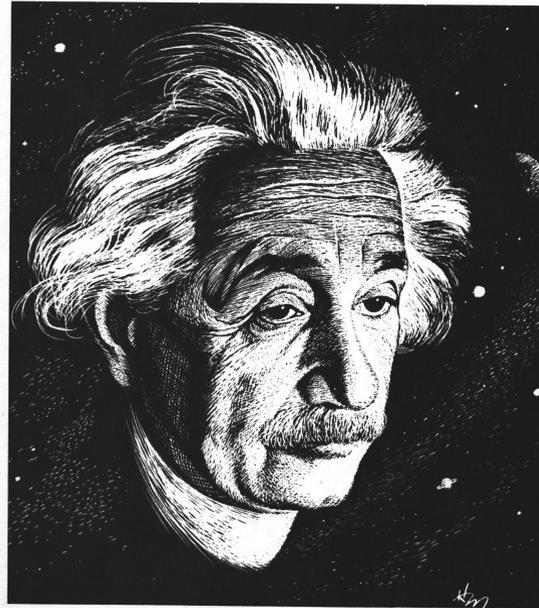
La teoria quantistica della gravità è un campo che impegna numerosi fisici teorici in tutto il mondo.

Vari tentativi sono stati fatti, ci sono proposte di teorie anche assai complesse, ma non si può dire che per ora ci siano risultati tangibili.

Forse la soluzione verrà da una nuova generazione di fisici...



ISAAC NEWTON



ALBERT EINSTEIN

