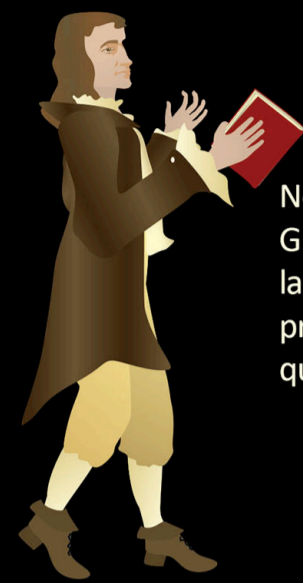


GRAVITATION

Da Newton a Einstein

La Gravita' vista da Newton



Nel 1687, Isaac Newton pubblico' la sua Legge della Gravitazione Universale. In questa formulazione, la forza gravitazionale fra due masse puntiformi e' proporzionale al prodotto delle masse diviso per il quadrato della loro distanza.

$$F = \frac{GM_1M_2}{r^2}$$

In questa equazione i due corpi hanno massa M_1 e M_2 e sono separati da una distanza r . La costante di proporzionalita' G e' chiamata Costante di Gravitazione Universale. Una forza attrattiva tira le masse una verso l'altra, lungo la linea retta che passa attraverso di esse.

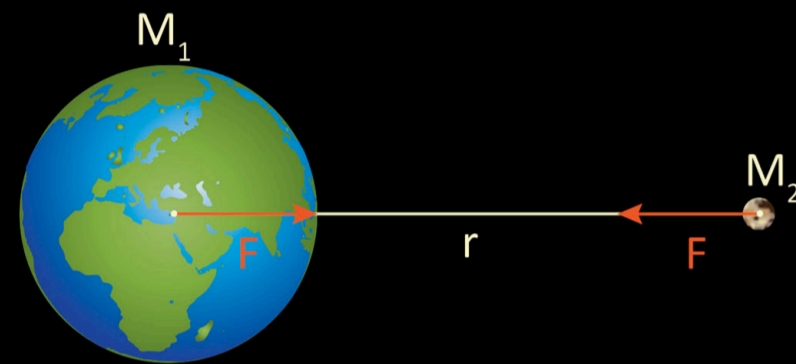


Figura 1: La grande intuizione di Newton fu di capire che lo stesso effetto che fa cadere gli oggetti verso terra mantiene i pianeti e gli altri corpi celesti sulle loro orbite.

Una visione Newtoniana dei Buchi Neri

Nel 1783, il filosofo John Michell per primo propose l'idea che potessero esistere delle "stelle oscure", un'idea che nasce dall'esistenza di una "velocita' di fuga" nella gravita' Newtoniana. La velocita' di fuga e' definita come la minima velocita' che deve avere una particella materiale per sfuggire all'attrazione gravitazionale di un corpo di massa M :

$$v_{fuga} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

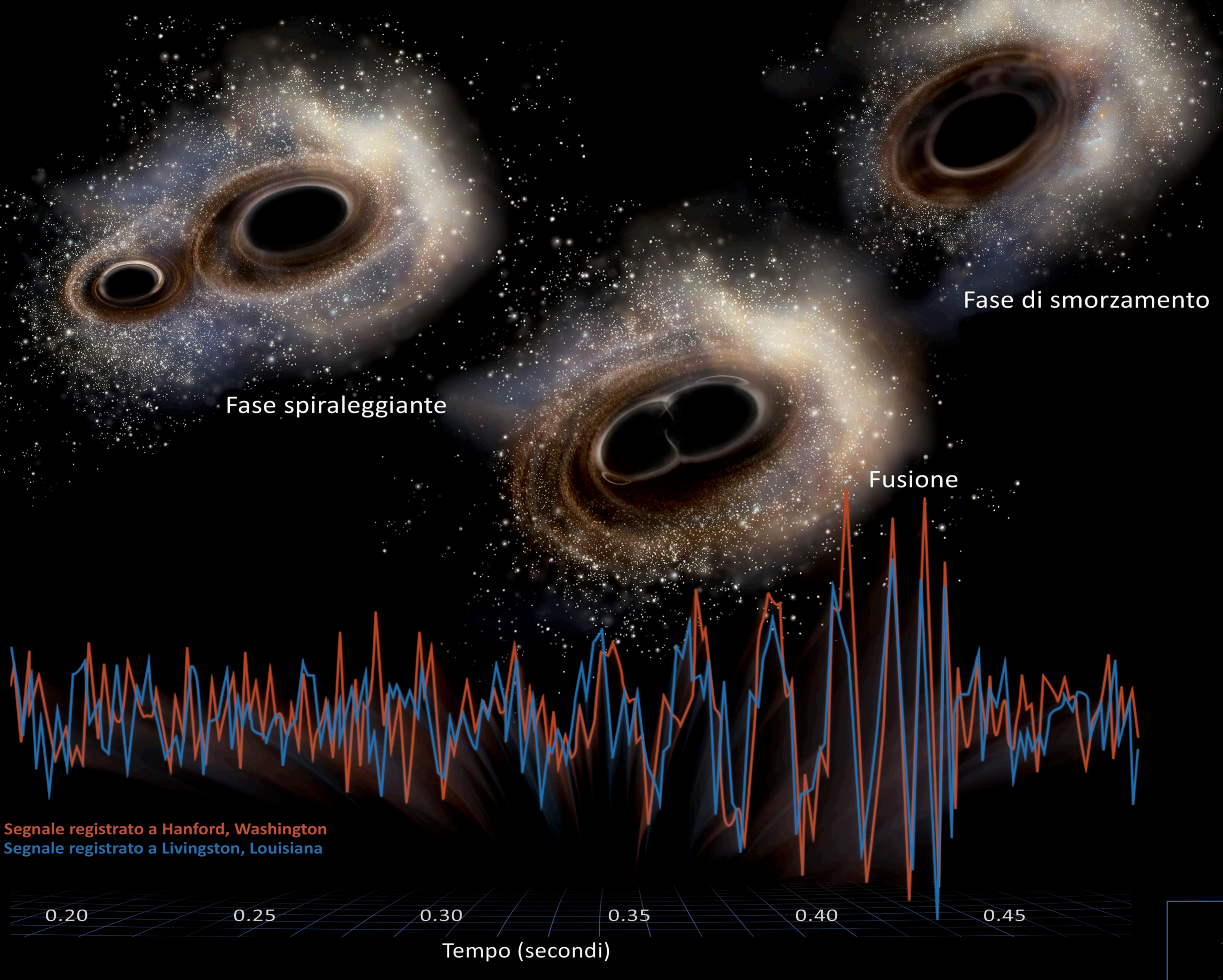
Si vede che la velocita' di fuga aumenta come la radice quadrata della massa M e al decrescere della radice quadrata della distanza r . Avvicinandoci al corpo massiccio, si arriva alla distanza R_{sch} per cui la velocita' di fuga raggiunge il valore c della velocita' della luce che, come e' noto, non puo' essere superata da nulla:

$$R_{sch} = \frac{2GM}{c^2}$$

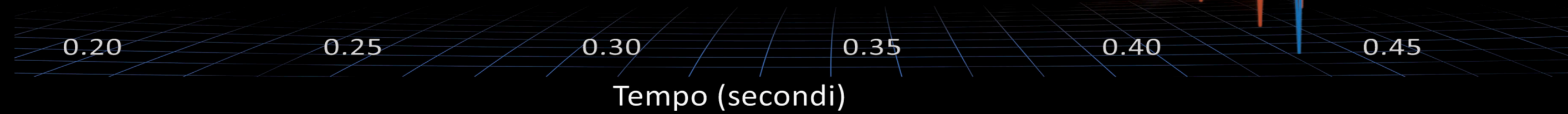
Se il corpo di massa M e' una stella cosi' densa da occupare una sfera con un raggio inferiore a R_{sch} , la sua gravita' sara' cosi' intensa che neanche la sua luce potra' sfuggire e la stella sara' una "stella oscura" o "buco nero".

Con un calcolo molto piu' complesso si puo' ottenere lo stesso risultato dalla Teoria Generale della Relativita' di Einstein.

Karl Schwarzschild ha calcolato per primo in modo relativistico questo raggio di non ritorno che si chiama, in suo onore, "raggio di Schwarzschild", R_{sch} . E' solo una coincidenza che nelle due teorie il valore di questo raggio limite sia lo stesso. In vicinanza di un buco nero la teoria Newtoniana non e' piu' valida e bisogna usare la Relativita' Generale.



Segnale registrato a Hanford, Washington
Segnale registrato a Livingston, Louisiana



Rivelazione diretta delle Onde Gravitazionali

Le onde gravitazionali sono state rivelate direttamente per la prima volta il 14 settembre del 2015 dalla collaborazione LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory), assieme alla collaborazione Virgo. Il grafico rappresenta l'ampiezza dell'onda gravitazionale prodotta dalla coalescenza di due buchi neri, misurata dai due rivelatori gemelli di LIGO, uno (curva blu) a Livingston, in Louisiana, e l'altro (curva rossa) a Hanford, nel Washington. Avendo viaggiato per piu' di un miliardo di anni dopo essere stata generata, l'onda e' arrivata prima a Livingston e, dopo 7 millisecondi, a Hanford.

I due segnali sono molto simili e corrispondono perfettamente al segnale calcolato, per un sistema di due buchi neri, con il modello teorico basato sulla Relativita' Generale. In questo sistema i due buchi neri hanno masse di 36 e 29 masse solari, rispettivamente. A coalescenza avvenuta, l'emissione di onde gravitazionali dovute al moto orbitale cessa e il nuovo buco nero, di 62 masse solari, oscillando rapidamente si assesta nel suo stato di equilibrio.

In tutto il processo il sistema emette circa 3 masse solari in energia trasportata dalle onde gravitazionali. La fase di spiraleggiamento dura milioni o miliardi di anni, mentre nel grafico ne sono mostrati gli ultimi 2 decimi di secondo. Le onde gravitazionali piu' intense sono emesse durante la coalescenza, fra 0.35 e 0.44 secondi, nel grafico; la fase finale di smorzamento produce soltanto l'ultimo centesimo di secondo del segnale.

A causa del piccolissimo valore della Costante di Gravitazione Universale, la gravita' e' considerata la piu' debole delle quattro forze fondamentali della fisica. Comunque, a causa delle enormi masse dei corpi coinvolti, nei fenomeni astrofisici vengono generate quantita' estreme di energia. La potenza irradiata in onde gravitazionali nelle ultime fasi di questa coalescenza era piu' di dieci volte maggiore della potenza irradiata da tutte le stelle dell'universo osservabile.

La teoria della Relativita' Generale di Einstein



Nel 1915, Einstein pubblico' la sua Teoria della Relativita' Generale. In questa teoria la gravitazione non e' una forza, ma una proprieta' dello spazio e del tempo: lo "spazio-tempo", cioe' una unione dello spazio tridimensionale e del tempo, che non possono piu' essere trattati indipendentemente. In presenza di corpi dotati di massa lo spazio-tempo si deforma; spesso diciamo che le masse incurvano lo spazio-tempo vicino a loro. Quello che noi chiamiamo gravita' e' la conseguenza del fatto che i corpi si muovono in uno spazio-tempo curvo.

L'interazione fra masse e spazio-tempo e' descritta da un gruppo di equazioni, chiamate Equazioni di Einstein:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

L'effetto di queste equazioni puo' essere riassunto in una famosa frase di Archibald Wheeler:

"lo spazio-tempo dice alla materia come muoversi e la materia dice allo spazio-tempo come curvarsi."

Nelle equazioni di Einstein, $G_{\mu\nu}$ descrive la curvatura dello spazio-tempo, mentre $T_{\mu\nu}$ descrive la distribuzione e la forma di massa ed energia. Queste due quantita' matematiche quadridimensionali sono messe in relazione da due costanti: la velocita' della luce, c , e la costante di Gravitazione Universale G . Nella maggior parte dei casi le equazioni di Einstein si semplificano nella legge di Newton.

Le Onde Gravitazionali

La Relativita' Generale prevede che un sistema binario formato da due stelle orbitanti una intorno all'altra, generi onde gravitazionali: deformazioni dello spazio-tempo che si propagano alla velocita' della luce. Queste onde trasportano energia, che sottraggono al sistema delle due stelle, che, quindi, si avvicinano con un cammino a spirale, fino a fondersi in un unico corpo. Se una delle due stelle e' una pulsar ed emette regolarmente impulsi radio, l'intervallo fra due impulsi diminuirà, man mano che l'orbita si restringe. Questo fenomeno e' stato osservato per la prima volta in un sistema binario scoperto nel 1974 da Russel Hulse e Joseph Taylor. In questo sistema (noto come la pulsar binaria di Hulse e Taylor, o PSR 1913+16) entrambe le stelle sono oggetti estremamente compatti, chiamati stelle di neutroni. Una di esse e' effettivamente una pulsar ed emette impulsi regolari che vengono usati per misurare la diminuzione del periodo di percorrenza dell'orbita che si stringe. La figura mostra una visione artistica della pulsar binaria nelle ultime fasi, fino al collasso e il grafico presenta la variazione del periodo nel tempo.

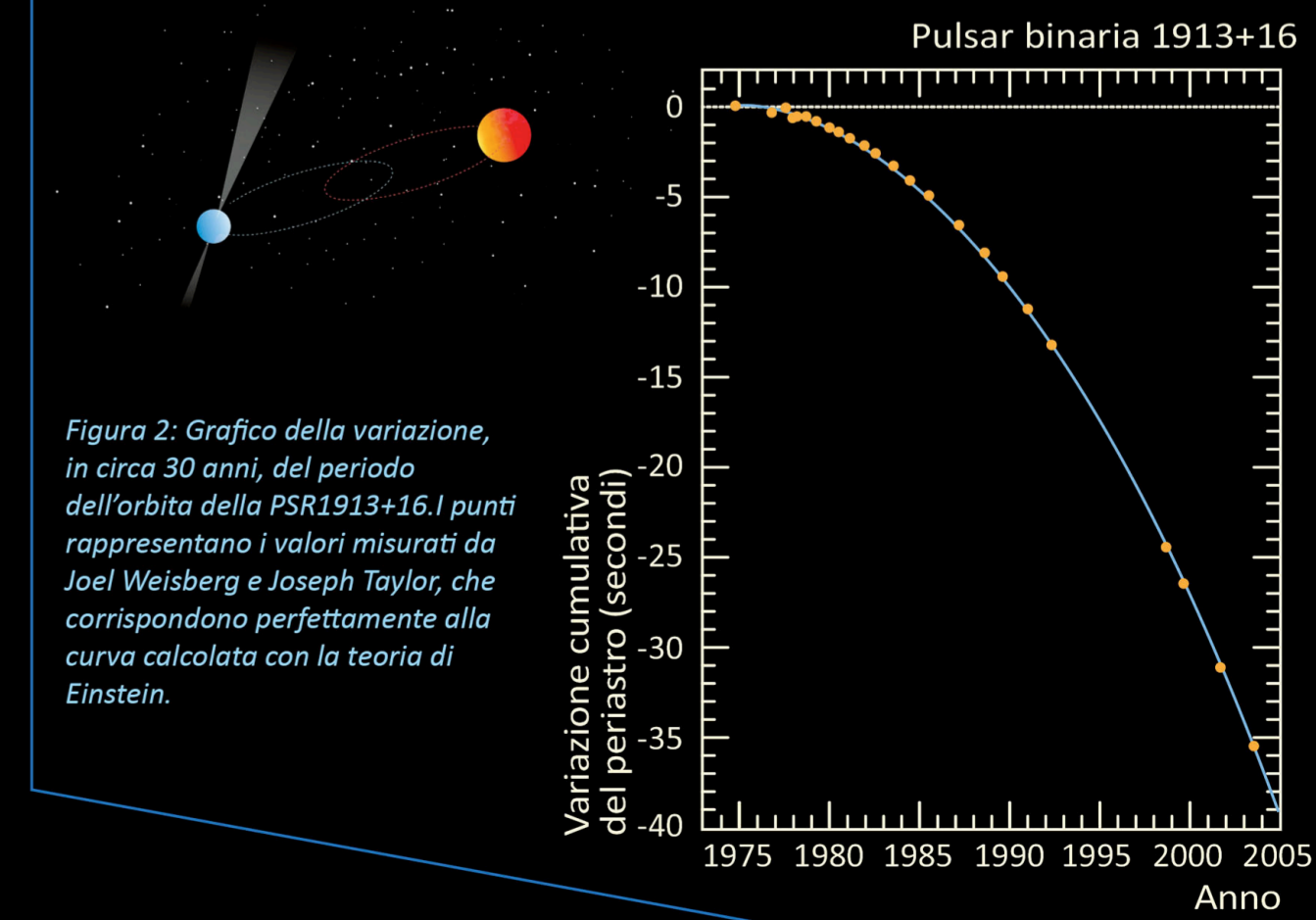


Figura 2: Grafico della variazione, in circa 30 anni, del periodo dell'orbita della PSR1913+16. I punti rappresentano i valori misurati da Joel Weisberg e Joseph Taylor, che corrispondono perfettamente alla curva calcolata con la teoria di Einstein.