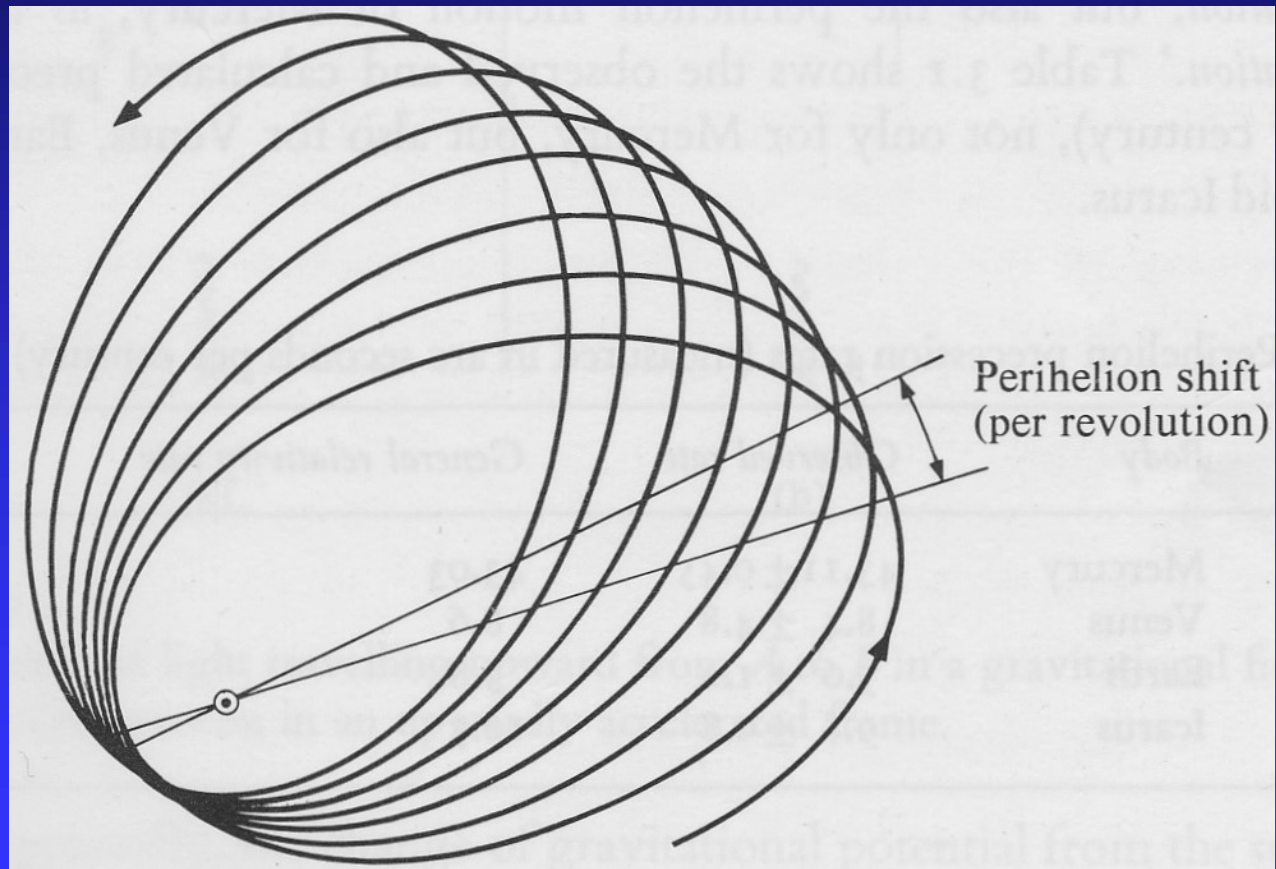
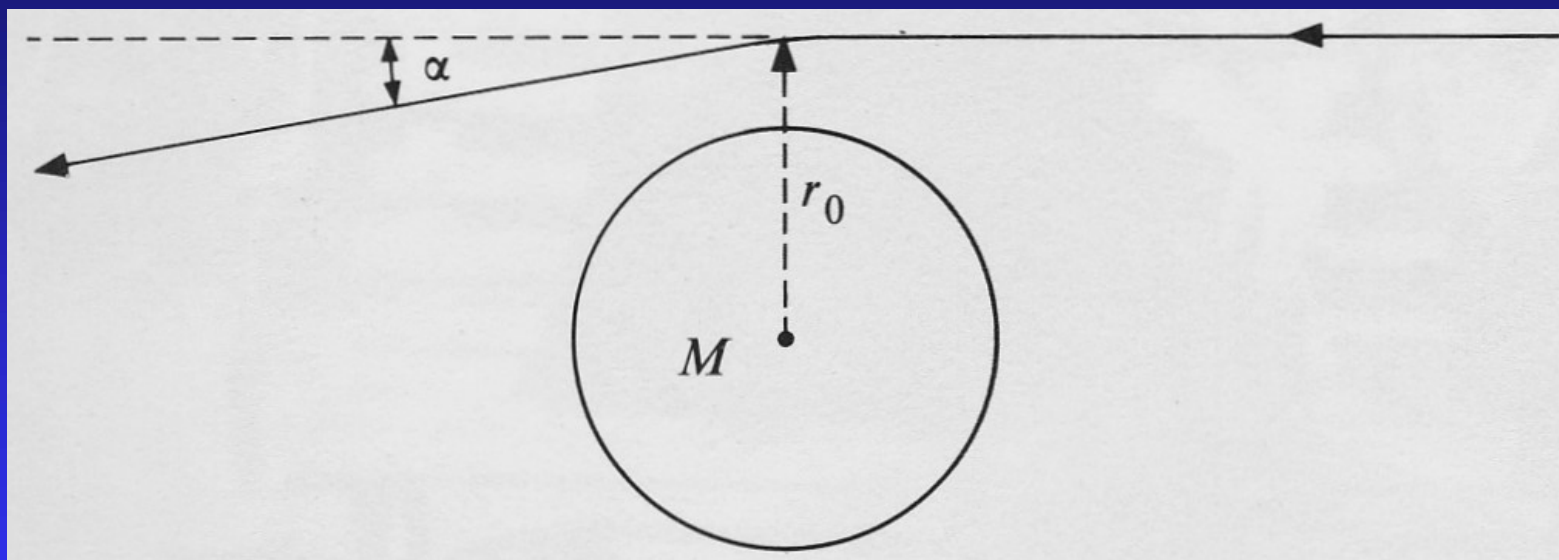


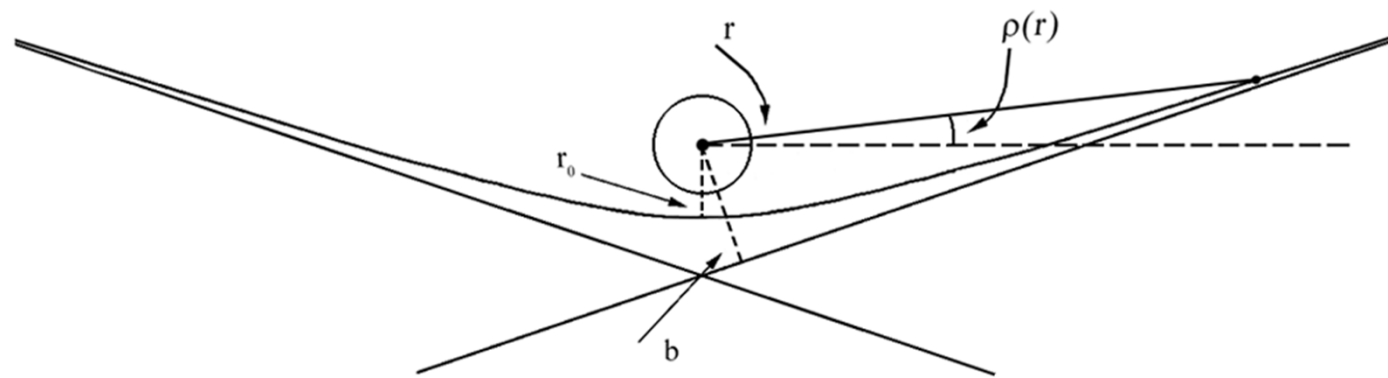
La teoria einsteiniana della
gravitazione a novant'anni dalla
sua formulazione

Precessione del perielio



Deviazione di un raggio luminoso da parte di una grande massa:

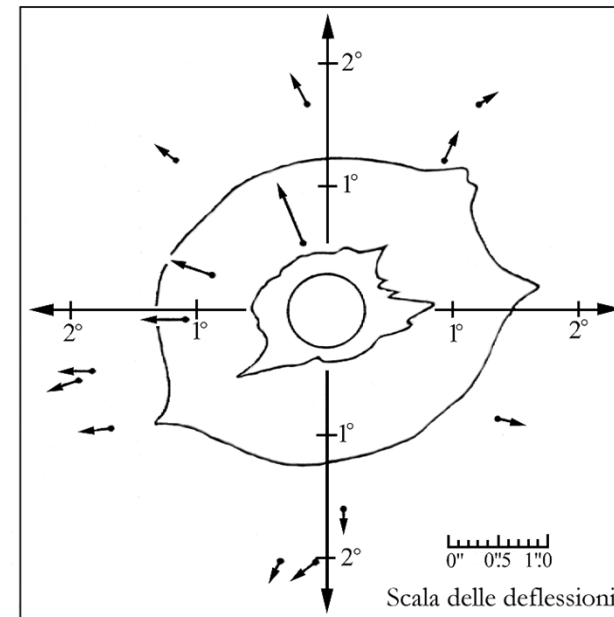
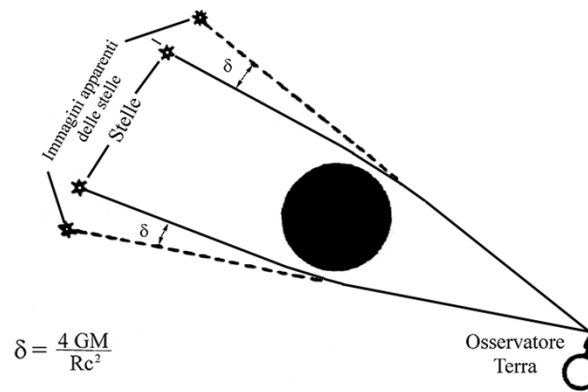


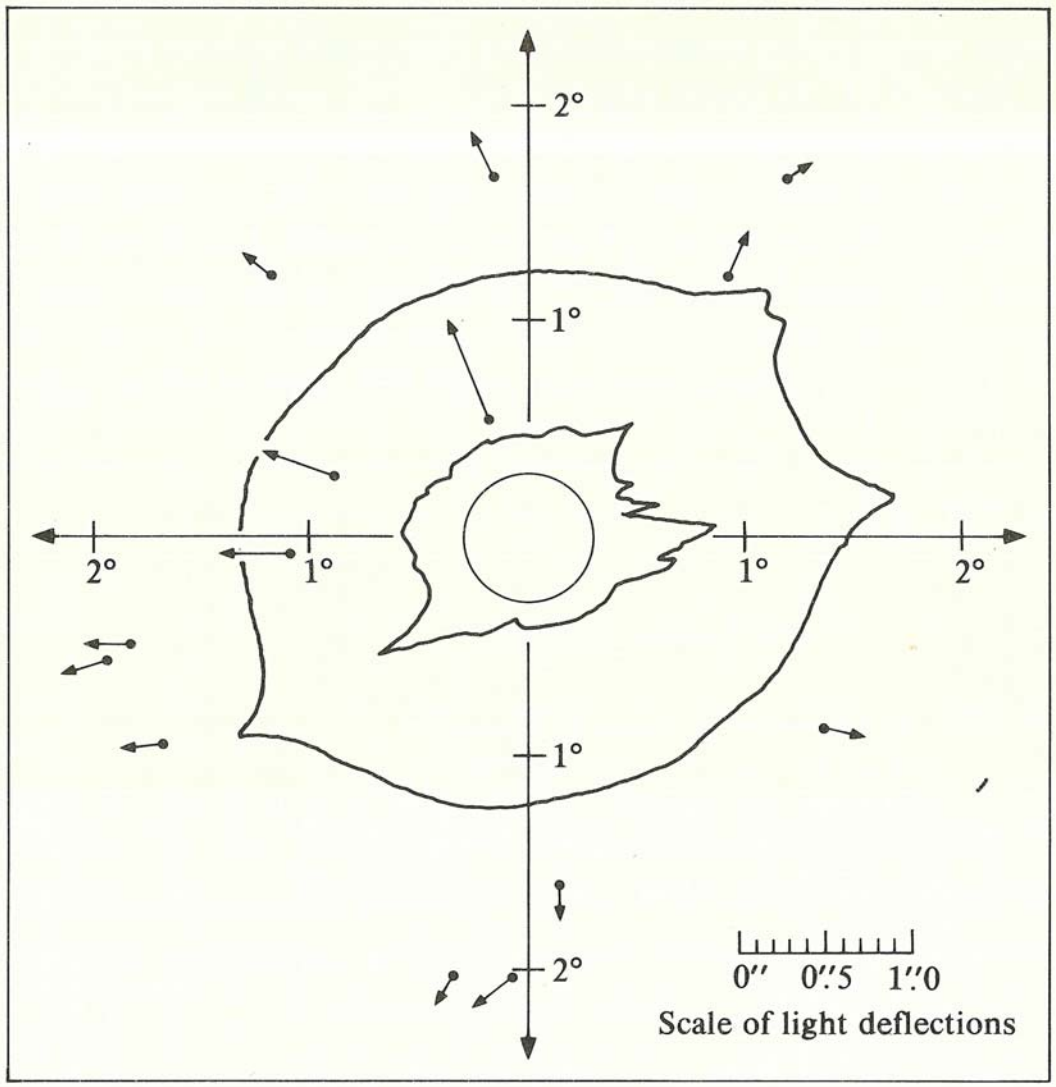


Quali raggi luminosi? Quelli provenienti da una stella.

Arthur Eddington, 1919.

William W. Campbell, 1922.

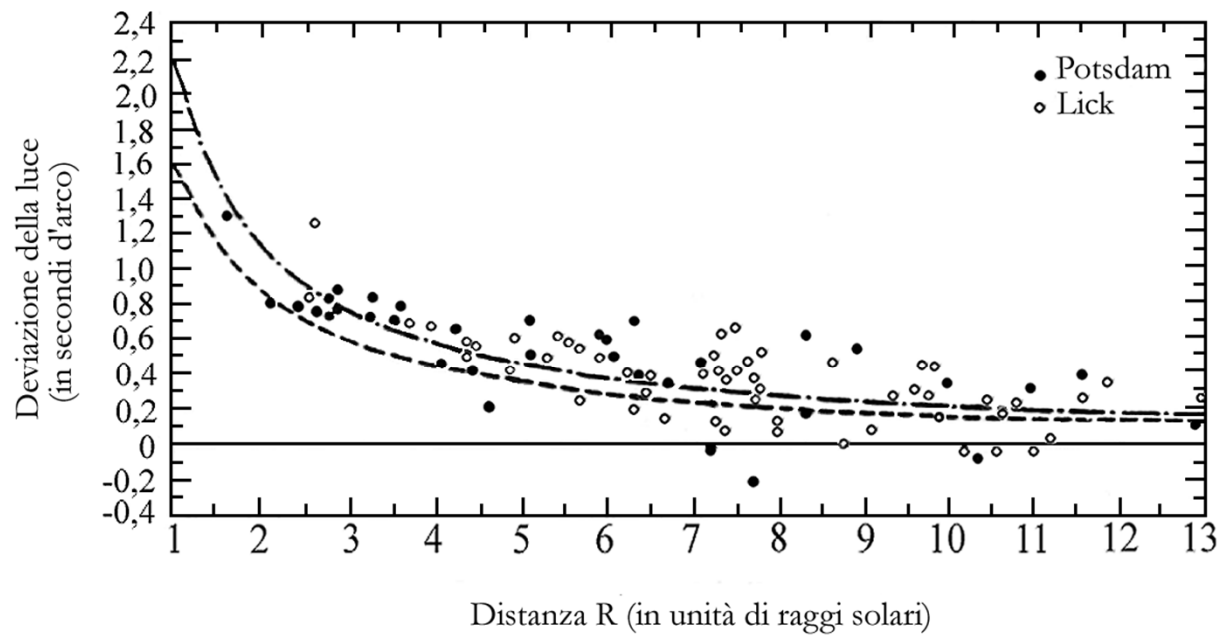




La formula:

$$\delta = \frac{4GM_{\oplus}}{R_{\oplus}c^2} \cdot \frac{R_{\oplus}}{r_0} \cdot \frac{1+\gamma}{2}$$

$$\frac{4GM_{\oplus}}{R_{\oplus}c^2} = 1,75''$$



Dennis Sciama (1952): “È difficile valutare il loro significato, perché altri astronomi hanno dedotto da una riddiscussione del medesimo materiale risultati differenti. Inoltre si può a buon diritto sospettare che se gli osservatori non avessero saputo prima quale valore ‘dovevano’ ottenere, i risultati da loro pubblicati avrebbero un campo di variabilità molto più vasto”.

Sensazioni sulla relatività generale:

M. Born: “Esercitava su di me l’appello di una grande opera d’arte, da gustarsi ed ammirarsi a distanza.”

E. Rutherford: “La teoria di Einstein, a parte ogni considerazione sulla sua validità, non può che essere considerata una magnifica opera d’arte.”

NN: “Le predizioni di Einstein riguardano scostamenti così piccoli dalla teoria newtoniana che non vedo su che cosa si faccia tanto chiasso.”

CHANDRASEKHAR, Subrahmanyan. (1979). “Einstein and General Relativity: Historical Perspectives.” *American Journal of Physics* **47**:

“...oblio benevolo al quale questa teoria fu consegnata dalla comunità scientifica professionistica per una cinquantina d’anni.”

EISENSTAEDT, Jean. (1986a). “La Relativité générale à l’étiage: 1925-1955.” *Archive for the History of Exact Sciences* **35**: 115-185. (1986b).

Avvento della radioastronomia:

localizzazione di quasar in radio anziché in ottico.

Confronto a più voci teoria-esperimento. In particolare, teoria di Brans-Dicke (Robert H. Dicke, Carl Brans – 1961):

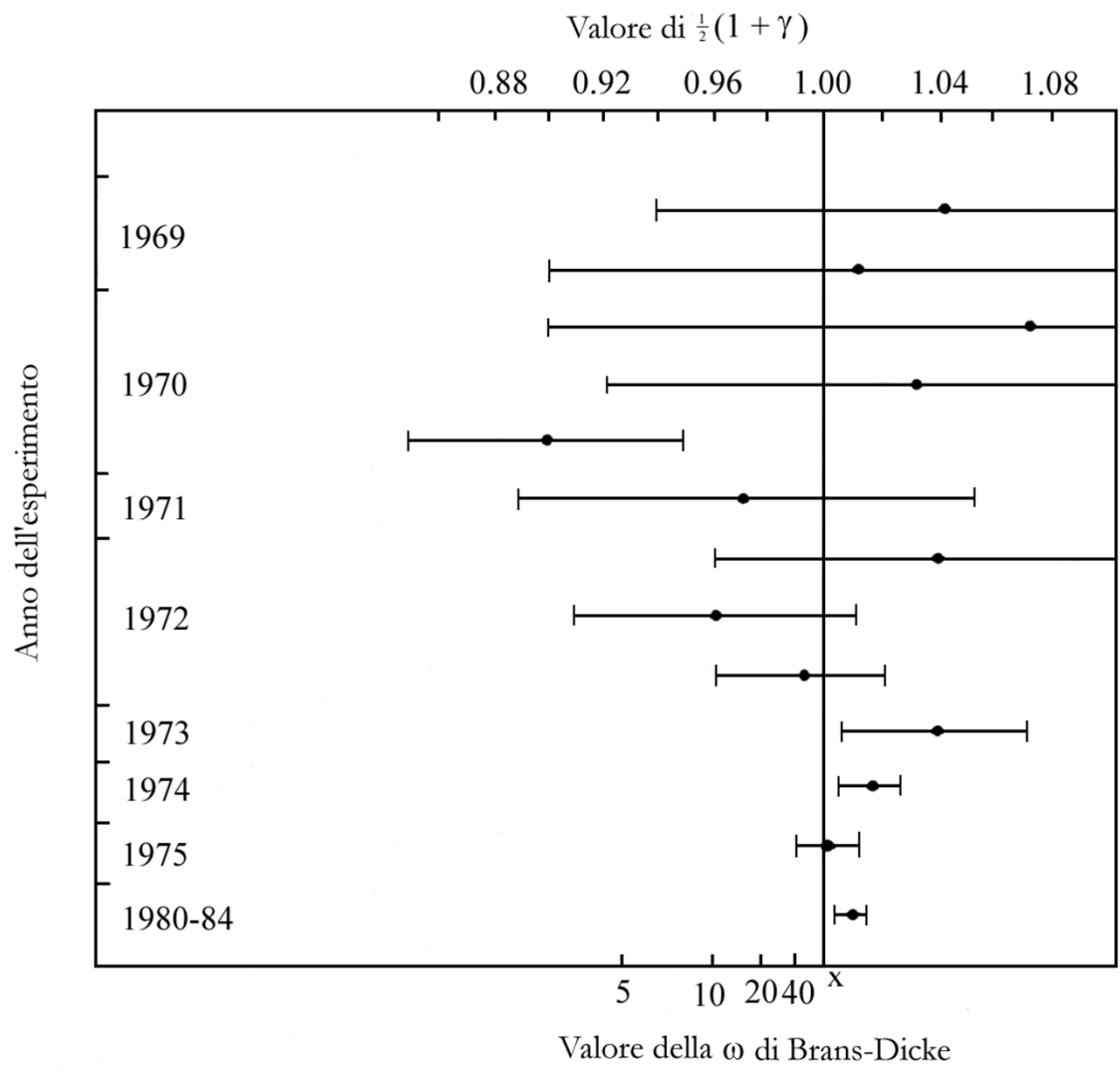
$$\gamma = \frac{\omega + 1}{\omega + 2}$$

$$\omega \gg 1:$$

teoria di E.

$$\omega \ll 1, \gamma = \frac{1}{2}$$

“campo scalare”



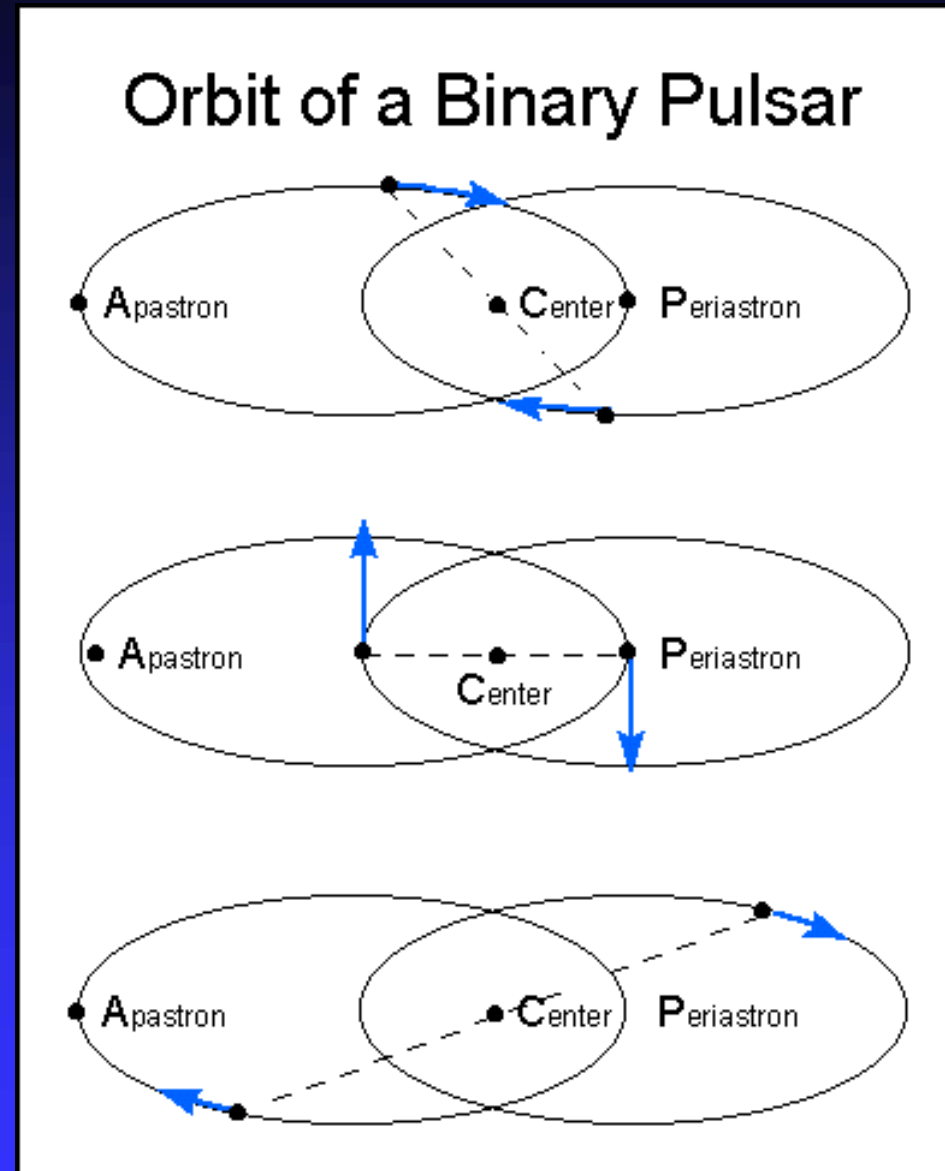
La pulsar binaria di Hulse e Taylor (dal 1974).

Russell Hulse, Joseph H. Taylor, premi Nobel per la fisica nel 1993.

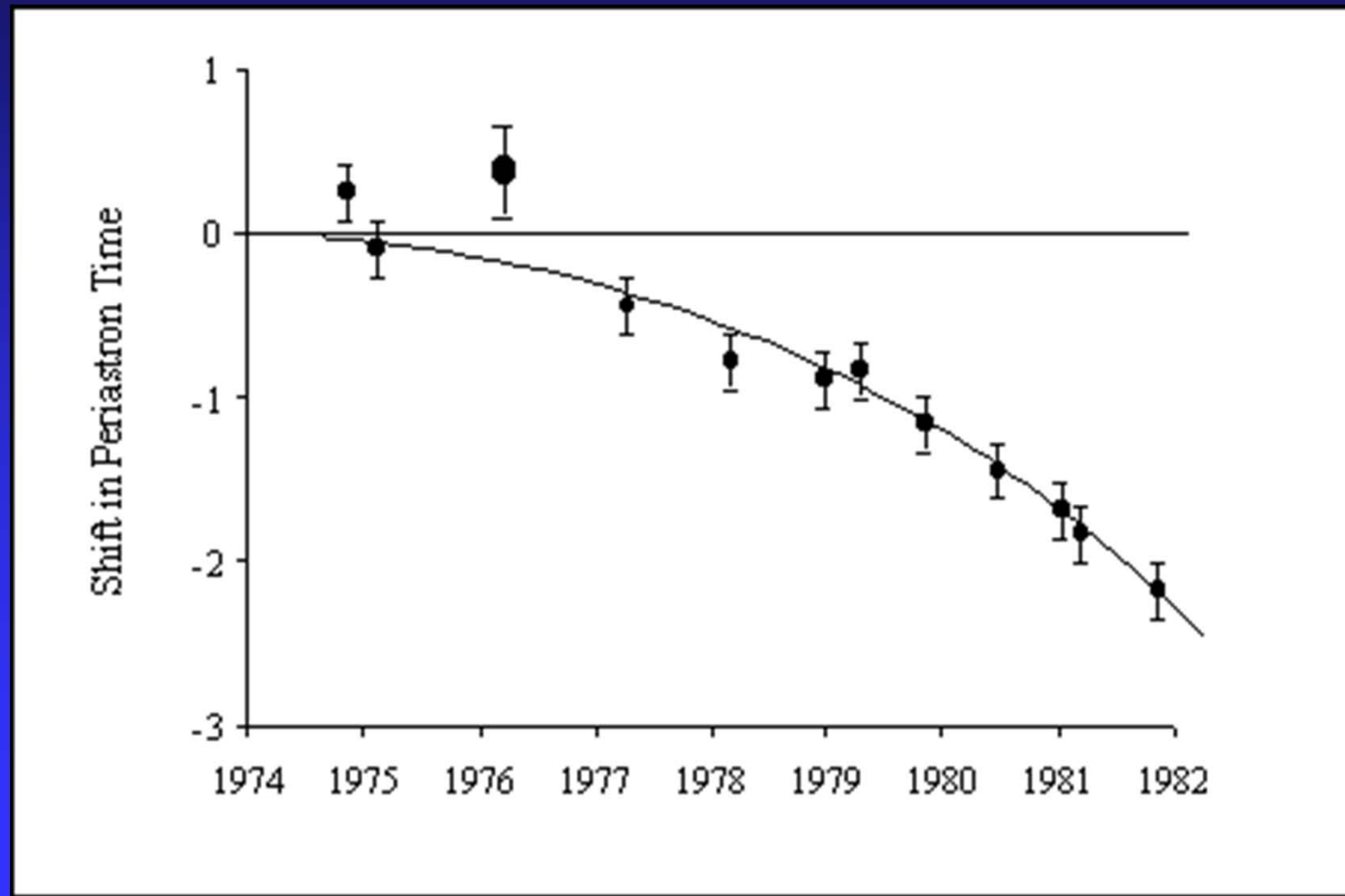
La distanza al periastro è dell'ordine di un raggio solare!

Precessione annua del periastro:

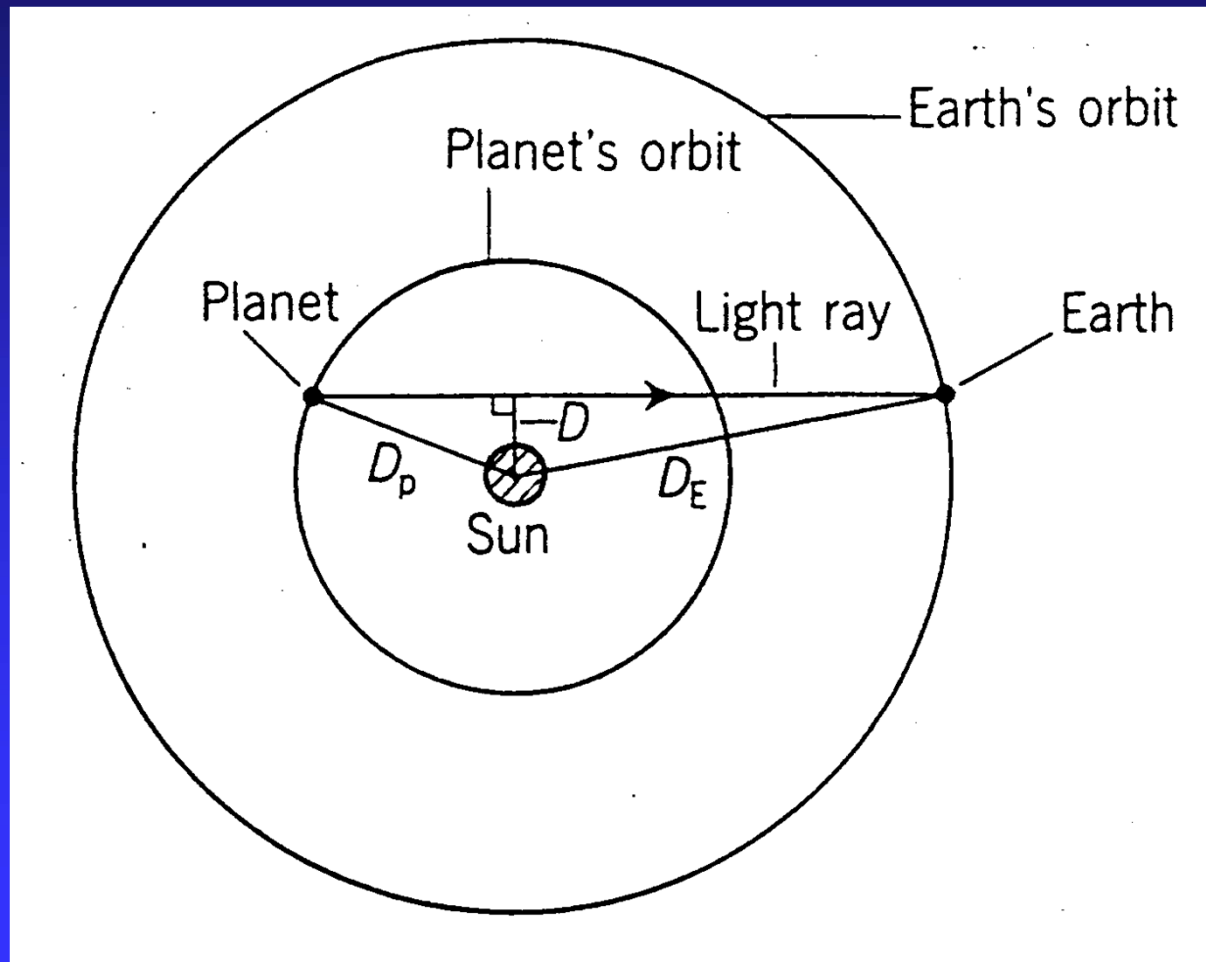
$$(4,2263 \pm 0,0003)^{\circ}$$

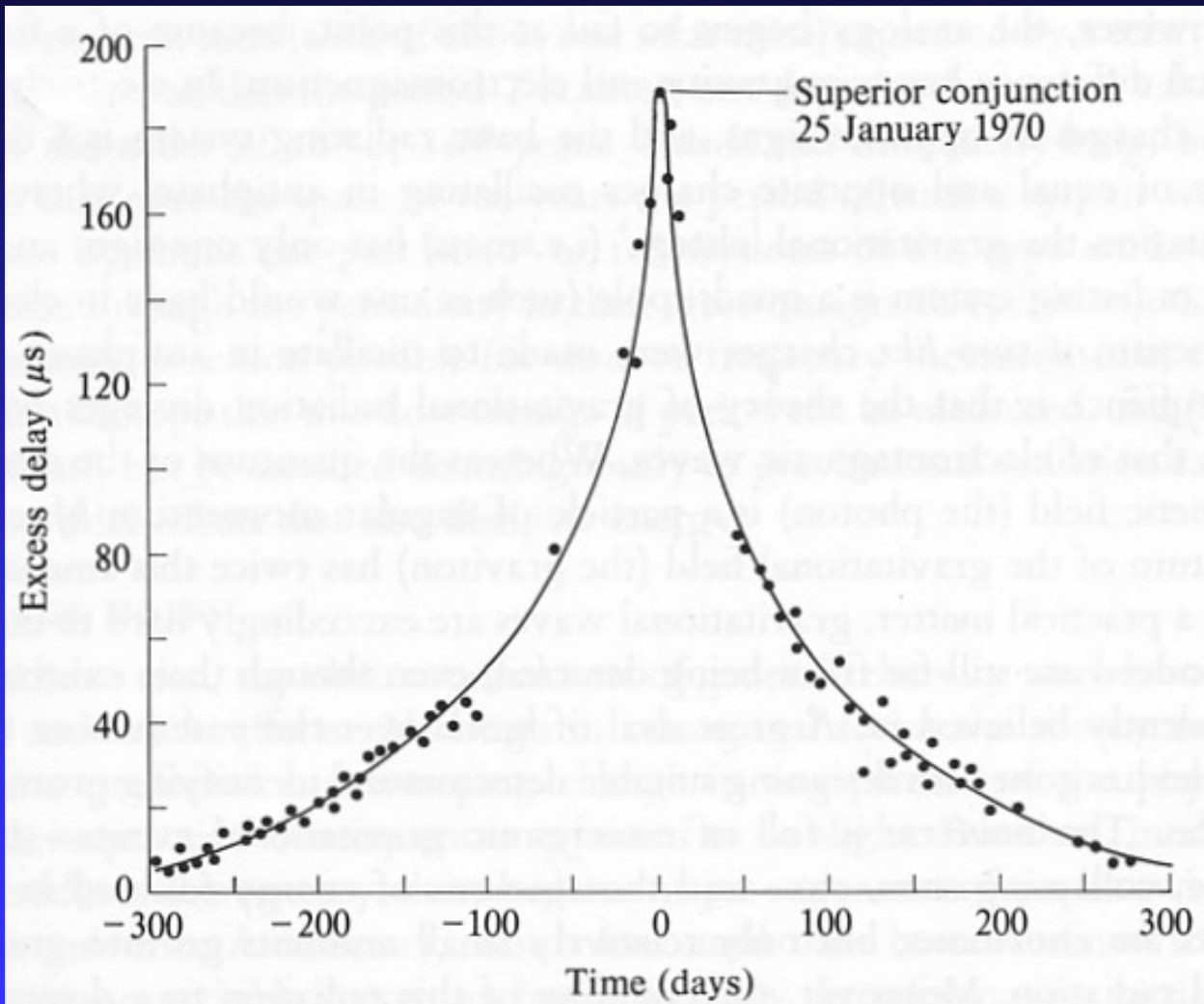


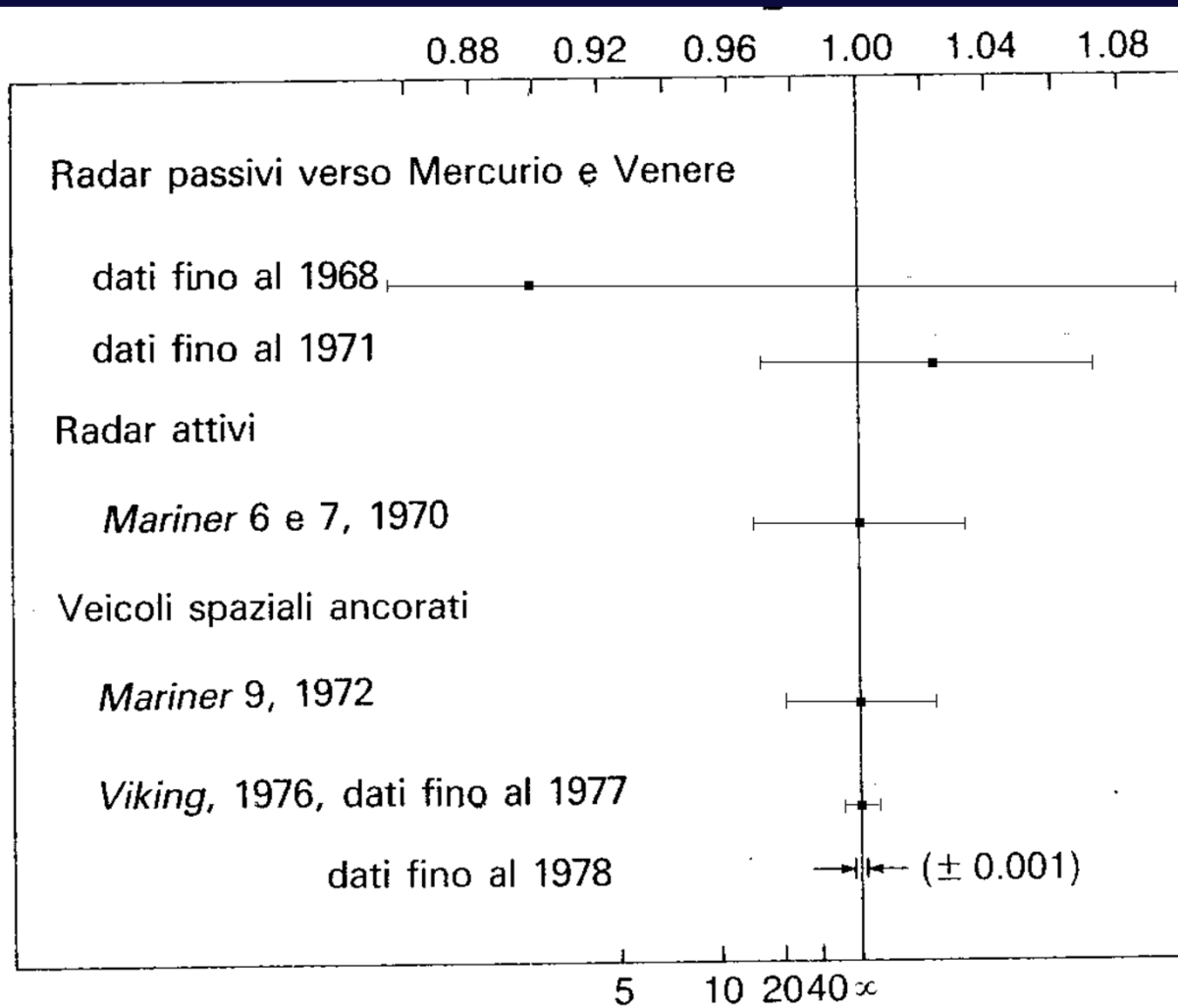
Il sistema deve perdere energia per emissione di onde gravitazionali, di conseguenza deve diminuire il periodo orbitale, e quindi l'intervallo fra i tempi di raggiungimento del periastro:



Onde elettromagnetiche che passano in prossimità del Sole devono subire un ritardo, che sussisterebbe anche in assenza di deviazione (Irwin Shapiro e collaboratori, a partire dal 1970).





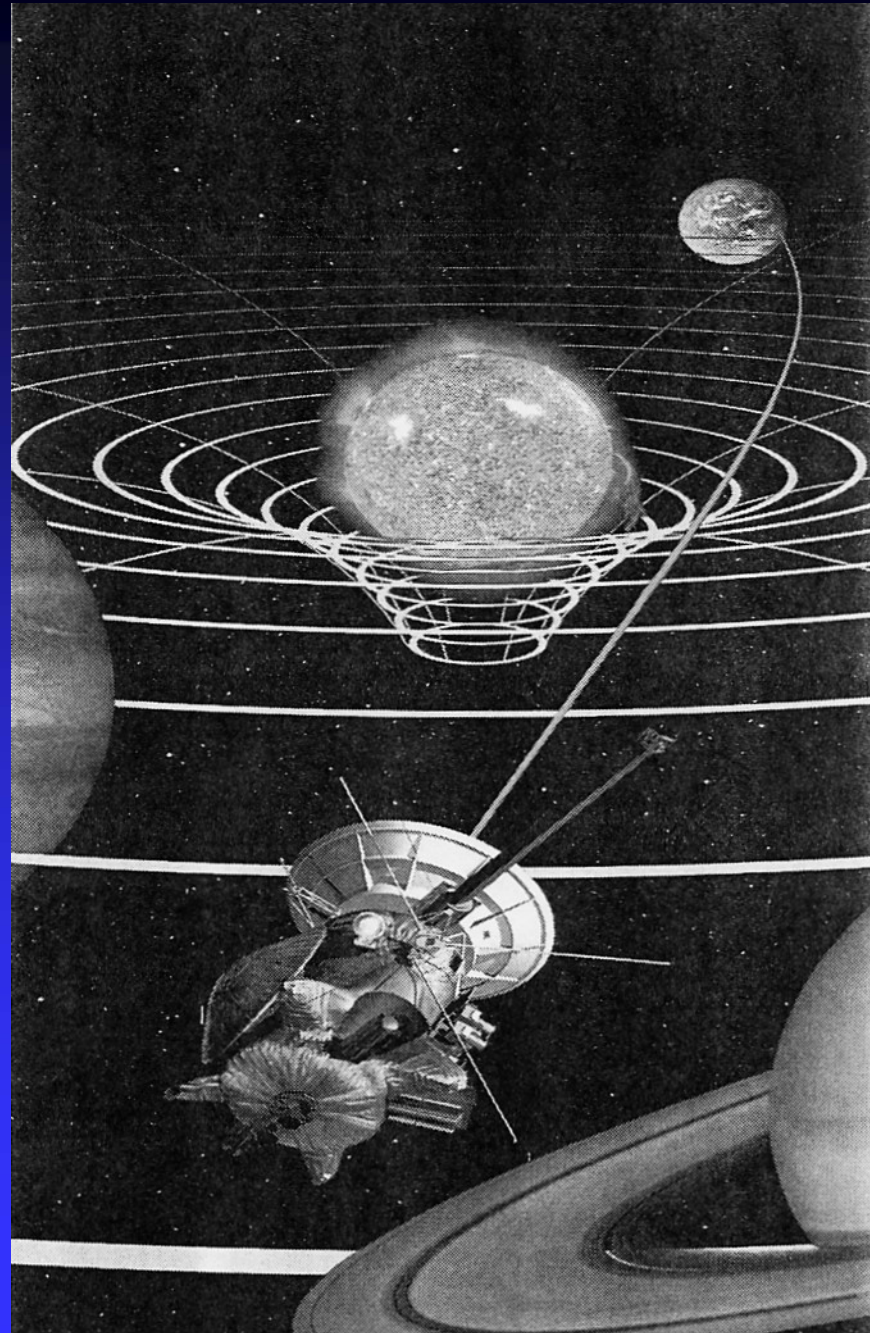


Valore della costante ω di Brans e Dicke

Il più recente esperimento ha utilizzato la sonda Cassini:

B. Bertotti, L. Iess, P. Tortora,
“A test of general relativity using radio links with the Cassini spacecraft”, *Nature*,
425, 25 Sept. 2003, p. 374.

$$\gamma = 1 + (2,1 \pm 2,3) \cdot 10^{-5}$$

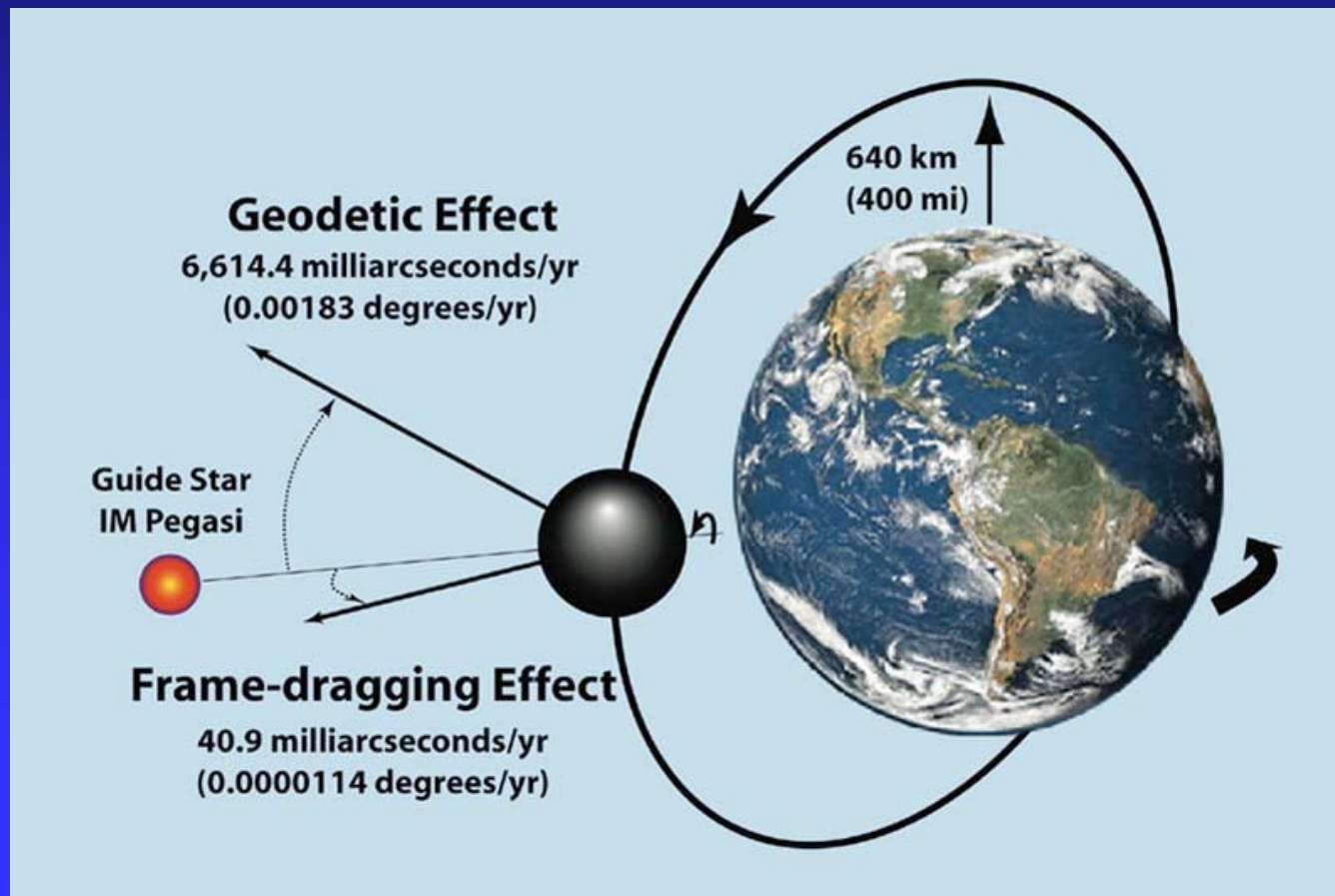


Un altro effetto: l'effetto Lense-Thirring (H. Thirring, J. Lense, 1918)

Nella teoria einsteiniana, come conseguenza della rotazione della Terra, l'asse dell'orbita di un satellite artificiale (alternativamente l'asse di rotazione di un giroscopio trasportato da un satellite artificiale) deve precessere.

La precessione di Lense-Thirring è analoga alla precessione dello spin di una particella carica che orbita attorno a un'altra particella carica che abbia un momento magnetico. Il campo gravitazionale della teoria einsteiniana – a parte ogni altra considerazione – ha, nei confronti di quello newtoniano, una componente ulteriore, che ha un po', rispetto a quello, un ruolo simile a quello che ha il campo magnetico rispetto a quello elettrico (campo gravitomagnetico o gravimagnetico).

L'idea base per un esperimento del secondo tipo era stata avanzata da L.I. Schiff già nel 1960. Il lancio di un satellite dedicato, *Gravity Probe B*, era previsto per il 1999. È stato effettuato nell'aprile 2004. In realtà è previsto misurare due effetti, il più consistente essendo quello noto come precessione di de Sitter.



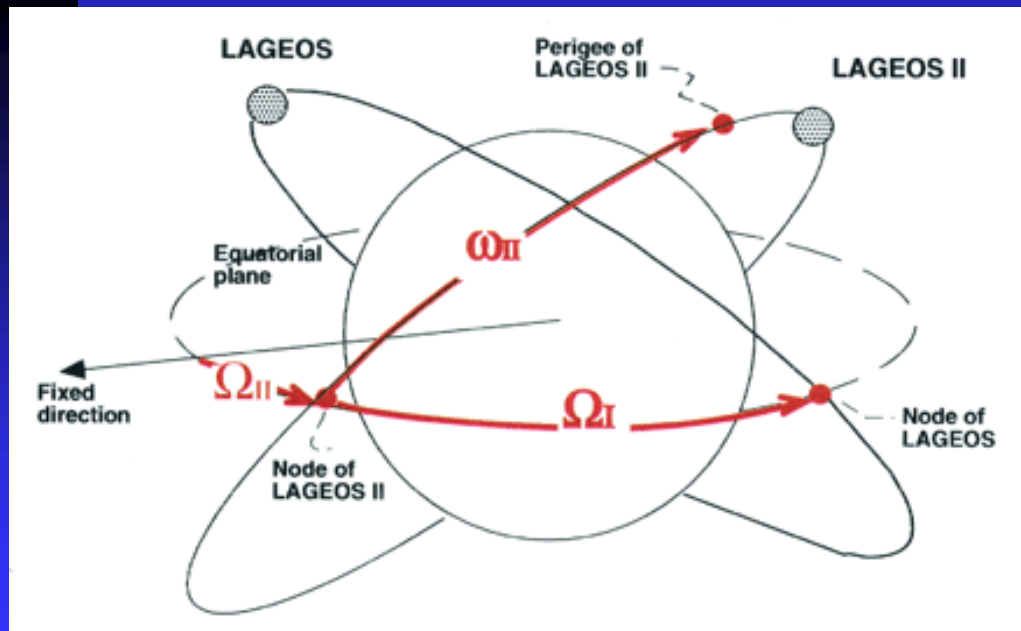
La precessione di de Sitter, detta anche precessione geodetica, – altro effetto della teoria einsteiniana della gravitazione – non dipende dalla rotazione della Terra, ma dal fatto che, se lo spazio-tempo è curvo, facendo percorrere a un vettore un percorso chiuso costituito da segmenti di retta della geometria modificata lasciandolo parallelo ad essi, la direzione finale non coincide con quella iniziale. Una misura della precessione di de Sitter è dunque anche una misura della curvatura dello spazio-tempo in prossimità della Terra.

Un metodo per misurare la precessione di Lense-Thirring con un esperimento del primo tipo fu proposto da Van Patten e Everitt nel 1976.

Le orbite dei satelliti sono soggette a precessioni molto maggiori di quella cercata per effetto dell'oblatezza della Terra, oltre che di ulteriori irregolarità del campo gravitazionale terrestre.

Il primo effetto è nullo se l'orbita è *esattamente* polare. Dato l'avverbio, occorrerebbero però due satelliti in orbite quasi polari, con i piani delle due orbite inclinati in senso opposto rispetto all'asse polare. L'effetto dell'oblatezza allora si cancellerebbe. Per la misura dell'effetto cercato occorrerebbe una misura estremamente precisa dell'angolo fra i due piani orbitali.

Un metodo alternativo fu proposto da Ciufolini nel 1989. Era già in orbita un satellite LAGEOS (Laser GEOdynamics Satellite). LAGEOS doveva compiere essenzialmente rilevamenti di carattere geofisico. Esso prevedeva di far uso di un solo ulteriore satellite, l'orbita del quale fosse inclinata di un angolo esattamente opposto rispetto all'asse terrestre, ciò che permette l'esatta cancellazione dell'effetto dovuto all'oblatezza.



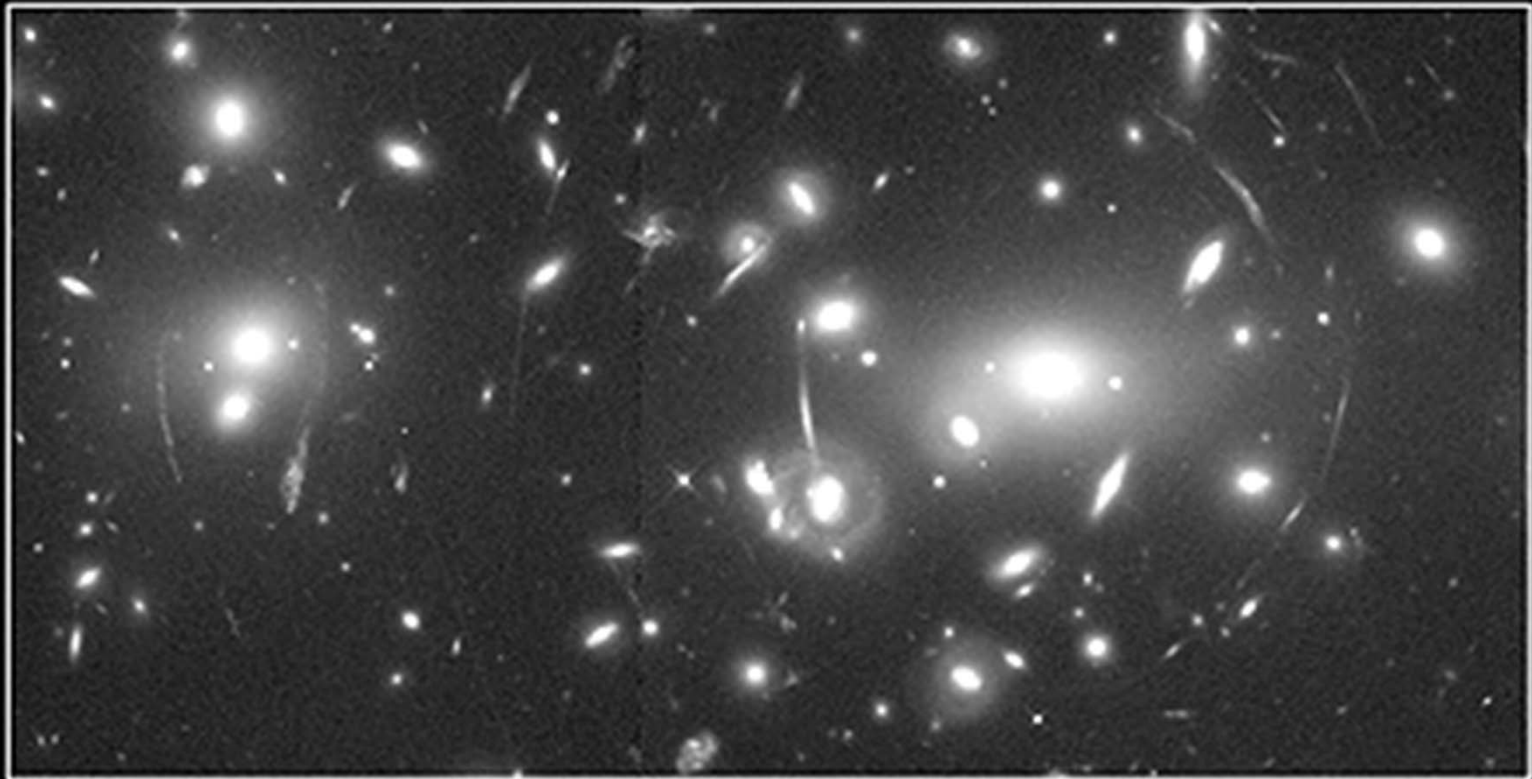
LAGEOS2
(NASA- ASI)
ha fatto al caso.

I.Ciufolini, E.C. Pavlis, “A confirmation of the general relativistic prediction of the Lense Thirring effect”,
Nature, **431**, 21 Oct. 2004, p. 958.

L'effetto previsto è di circa 0,05 secondi d'arco
(sta 36.000 nel diametro della Luna) all'anno.
Si è misurato l'effetto cumulativo su 11 anni.

Confermato al $(99 \pm 5)\%$

Lenti gravitazionali



Gravitational Lens in Abell 2218

HST · WFPC2

Rivelatori di onde gravitazionali: esperimenti di seconda generazione.

The Virgo detector for gravitational waves consists mainly in a Michelson laser interferometer made of two orthogonal arms being each 3 kilometers long. Multiple reflections between mirrors located at the extremities of each arm extend the effective optical length of each arm up to 120 kilometers. Virgo is located within the site of EGO, European Gravitational Observatory, based at Cascina, near Pisa on the river Arno plain.



The frequency range of Virgo extends from 10 to 6,000 Hz. This range as well as the very high sensitivity should allow detection of gravitational radiation produced by supernovae and coalescence of binary systems in the milky way and in outer galaxies, for instance from the Virgo cluster.

In order to reach the extreme sensitivity required, the whole interferometer attains optical perfection and is extremely well isolated from the rest of the world in order to be only sensitive to the gravitational waves. To achieve it, Italian and French scientists involved in the project, have developed most advanced techniques in the field of high power ultrastable lasers, high reflectivity mirrors, seismic isolation and position and alignment control.