

Jornadas de Extensión Académica – San José

Efectos Relativistas en el Sistema Solar

Tabaré Gallardo

Departamento de Astronomía
Instituto de Física
Facultad de Ciencias

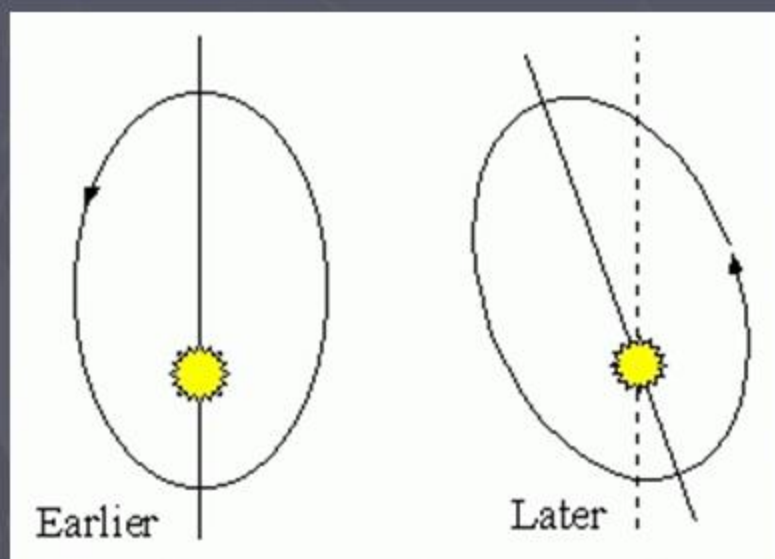
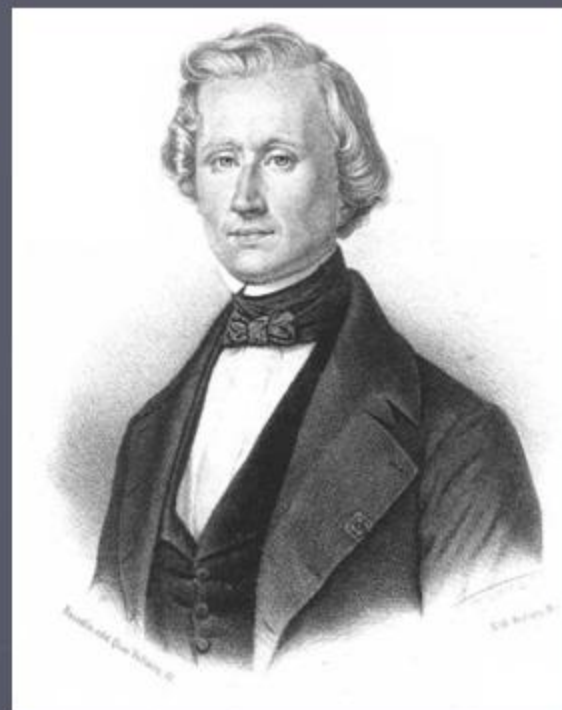
www.astronomia.edu.uy/depto

Efectos

- ▶ 1. Perihelios
- ▶ 2. Desvío gravitacional de la luz
- ▶ 3. Retraso de la luz
- ▶ 4. Enlentecimiento gravitacional de relojes
- ▶ 5. Ondas de gravitación
- ▶ 6. Gravitomagnetismo

1) Perihelio de Mercurio

1859, Leverrier: extraño comportamiento del perihelio de Mercurio. ¿Perturbaciones de otro planeta?



Leverrier: efectos debidos a Vulcano

Los planetas cambian su órbita en
forma natural:

Evolución orbital de Venus, Tierra y
Marte por 5 millones de años.

1915, Einstein: Teoría de la Relatividad General



General relativity near massive objects

Table 3

Test body	$\Delta\phi^{100}$ (seconds of arc)	
	Observation	General relativity
Mercury ♀	43.11 ± 0.45	43.03
Venus ♀	8.4 ± 4.8	8.6
Earth ⊕	5.0 ± 1.2	3.8
Icarus	9.8 ± 0.8	10.3

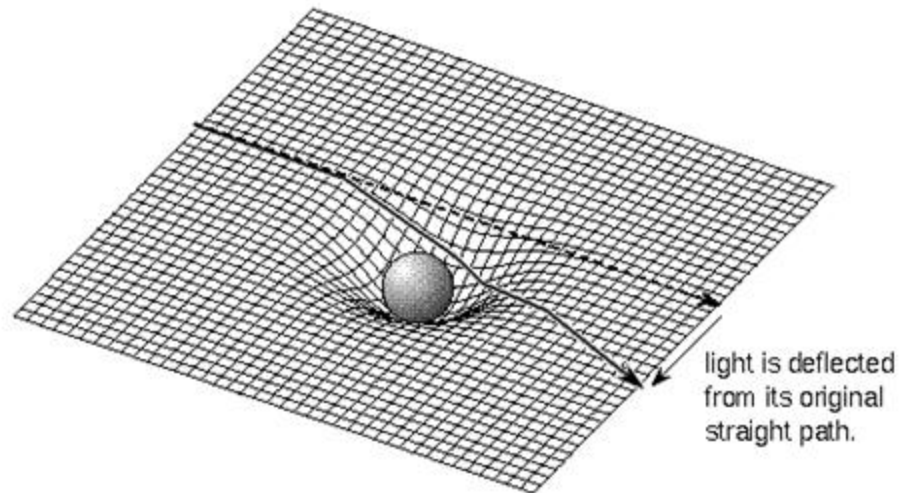
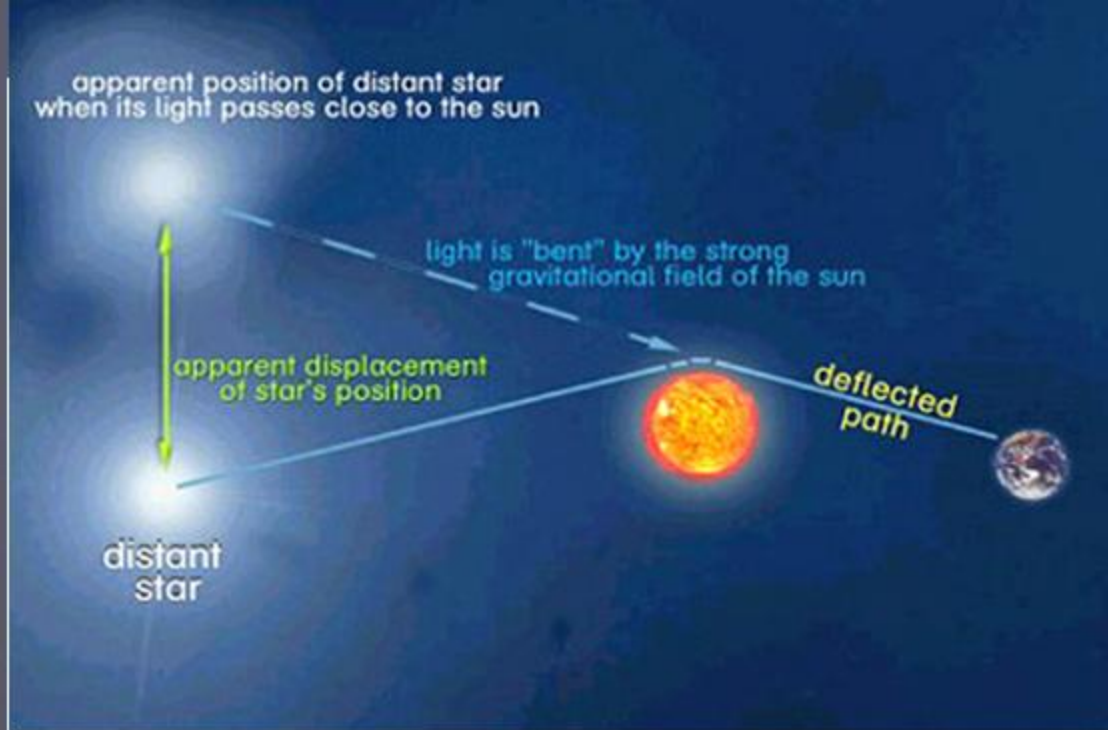
La teoría predice exactamente las discrepancias observadas en Mercurio.

2) Desvío gravitacional de la luz

En el Observatorio de Cambridge, Eddington toma conocimiento de la teoría y cree ver la oportunidad de verificar otra extraña predicción de la Teoría de Einstein durante el eclipse del 29 de mayo de 1919.

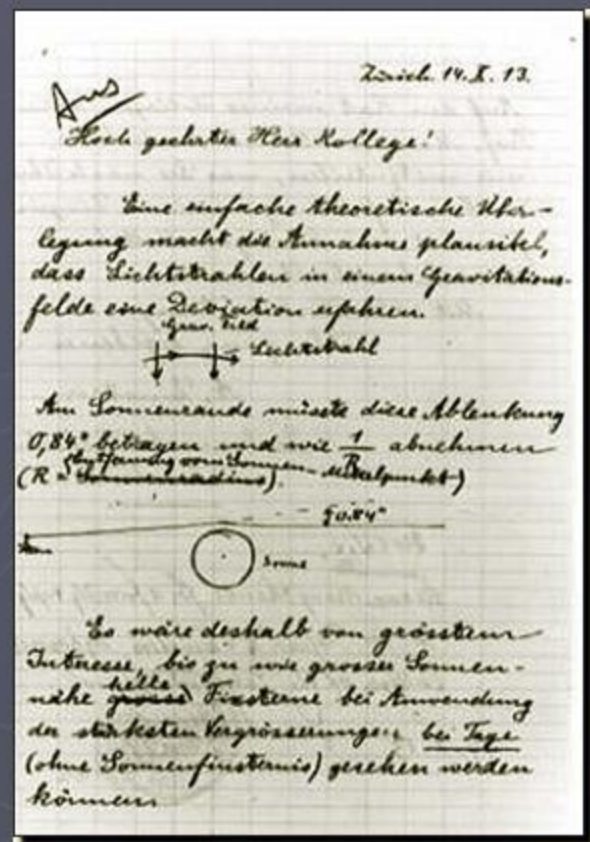


Desvío



General Relativity: Light travels along the curved space taking the shortest path between two points. Therefore, light is deflected toward a massive object! The stronger the local gravity is, the greater the light path is bent.

La Royal Astronomical Society organiza dos expediciones para observar el eclipse, una encabezada por Crommelin a Brasil y otra a cargo de Eddington a la isla Príncipe en el golfo de Guinea



Manuscrito original de Einstein

Total Solar Eclipse of 1919 May 29

Geocentric Conjunction = 13:06:29.6 UT J.D. = 2422108.046176

Greatest Eclipse = 13:08:35.4 UT J.D. = 2422108.047632

Eclipse Magnitude = 1.07186 Gamma = -0.29542

Saros Series = 136 Member = 32 of 71

Sun at Greatest Eclipse
(Geocentric Coordinates)

R.A. = 04h21m07.3s

Dec. = +21°30'16.0"

S.D. = 00°15'46.6"

HP. = 00°00'08.7"

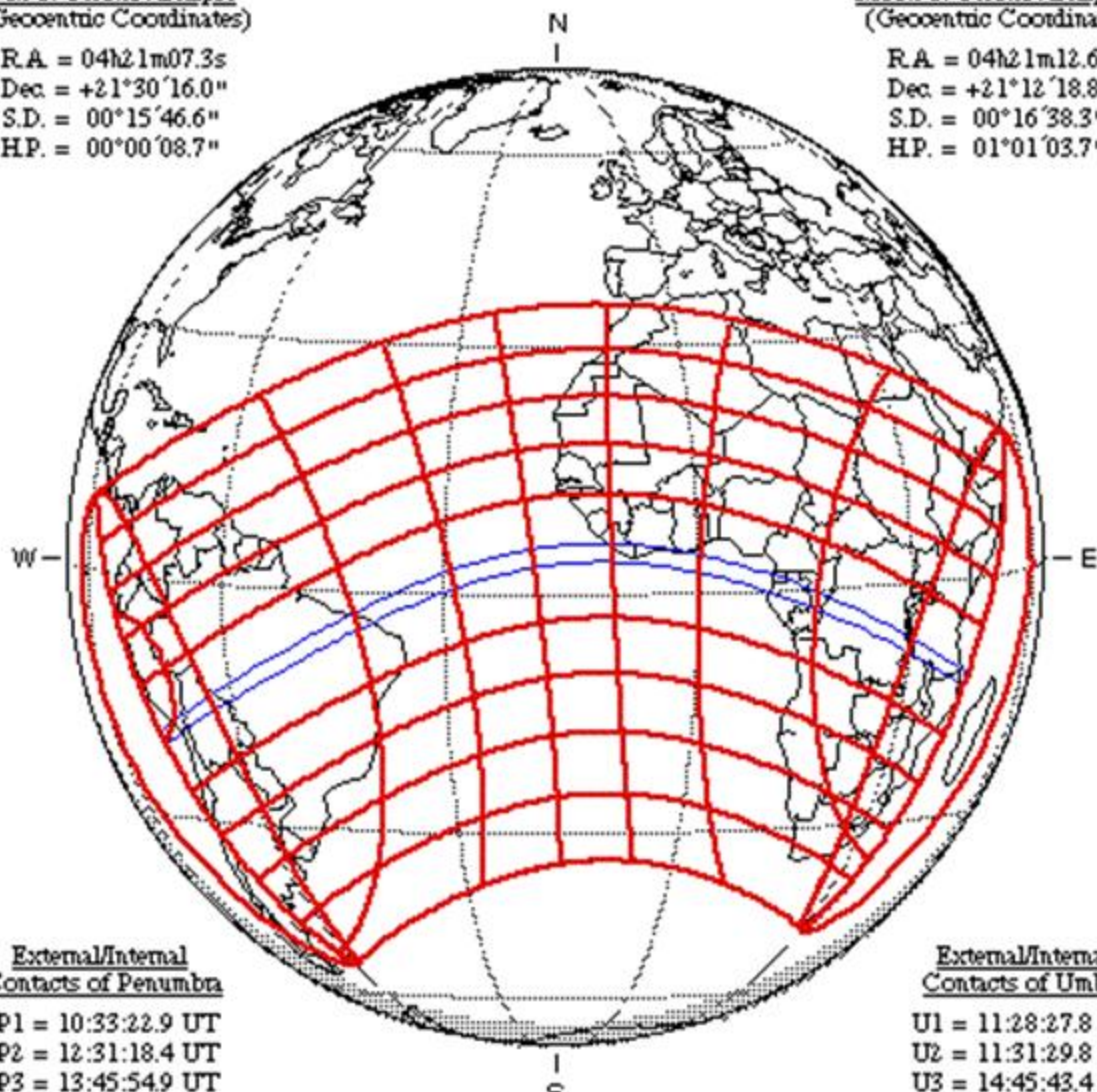
Moon at Greatest Eclipse
(Geocentric Coordinates)

R.A. = 04h21m12.6s

Dec. = +21°12'18.8"

S.D. = 00°16'38.3"

HP. = 01°01'03.7"



External/Internal
Contacts of Penumbra

P1 = 10:33:22.9 UT

P2 = 12:31:18.4 UT

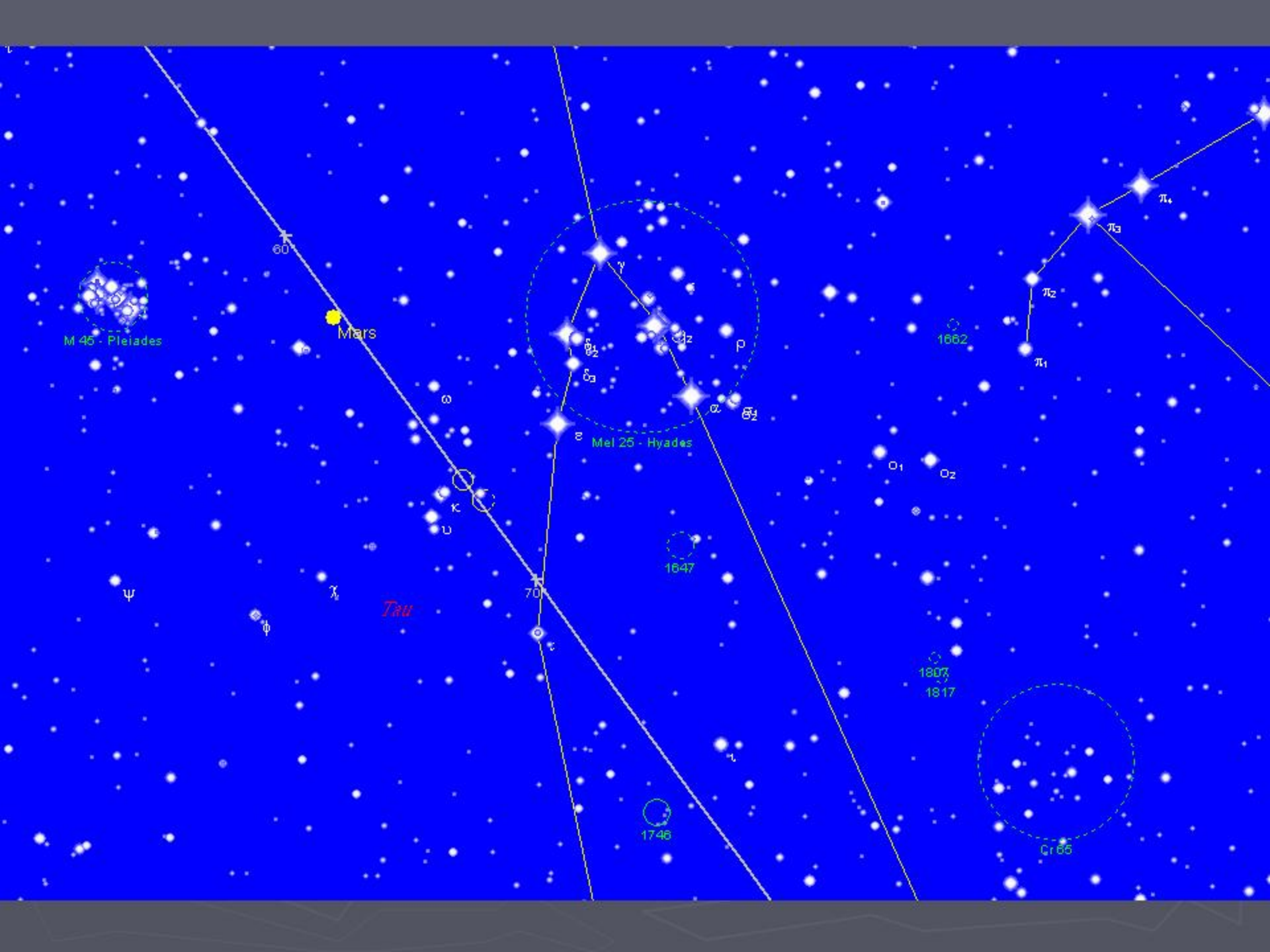
P3 = 13:45:54.9 UT

External/Internal
Contacts of Umbra

U1 = 11:28:27.8 UT

U2 = 11:31:29.8 UT

U3 = 14:45:43.4 UT



M 45 - Pleiades

Mars

Mel 25 - Hyades

Tau

1647

1746

1803

1817

Cr 66

1862

60

70

ψ

ξ

ω

υ

κ

ι

τ

ν

ε

δ₃

δ₂

δ₁

γ

ζ

α

ρ

σ

θ₂

π₁

π₂

π₃

π₄

ο₁

ο₂



29 de Mayo de 1919

"Querida Madre, Hoy, buenas noticias. H.A. Lorentz me ha telegrafiado que las expediciones Británicas acaban de probar la deflexión de la luz cerca del Sol"

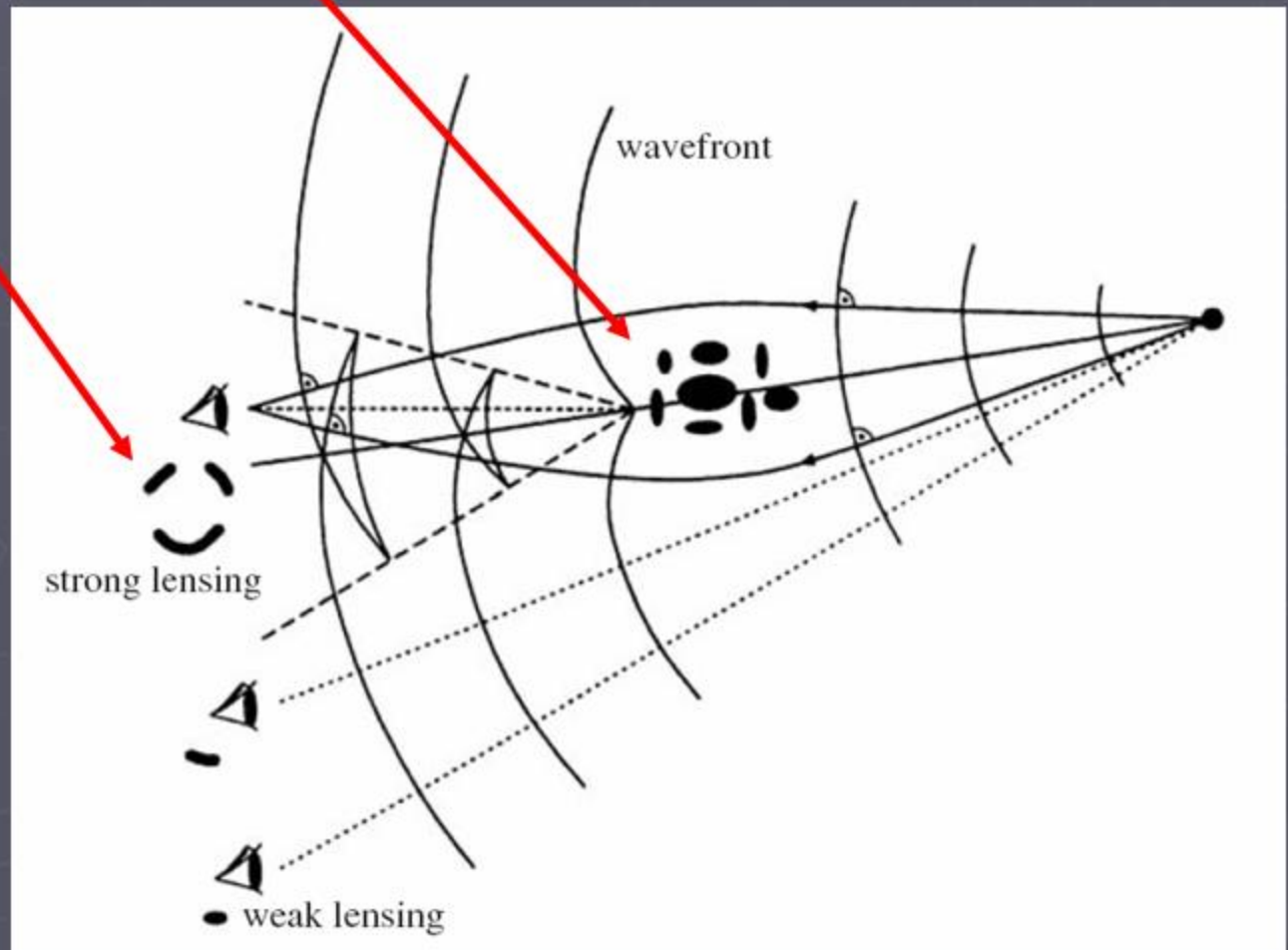
Las medidas fueron plenamente compatibles con las predicciones de Einstein y los resultados fueron expuestos en la Royal Astronomical Society el 6 de Noviembre de 1919. Esta conferencia tuvo gran eco en la prensa comenzando allí la popularidad de Einstein para el mundo.

El pueblo tratando de asimilar el impacto del nuevo concepto de espaciotiempo ...

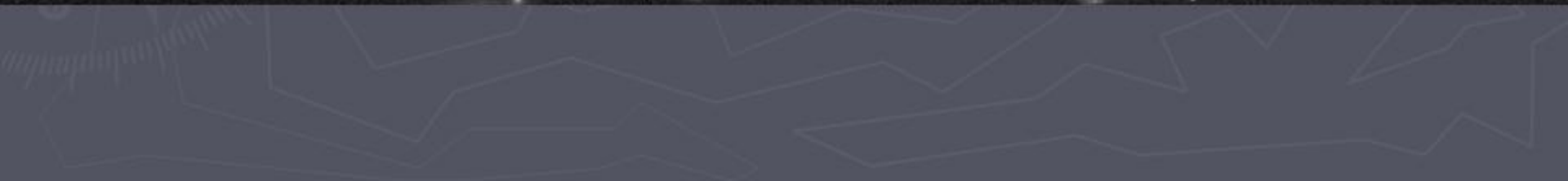


Lentes gravitacionales

Imágenes completamente distorsionadas por el campo gravitacional de cuerpos masivos recién pudieron obtenerse en 1979 con el descubrimiento de **galaxias lentificadas**.

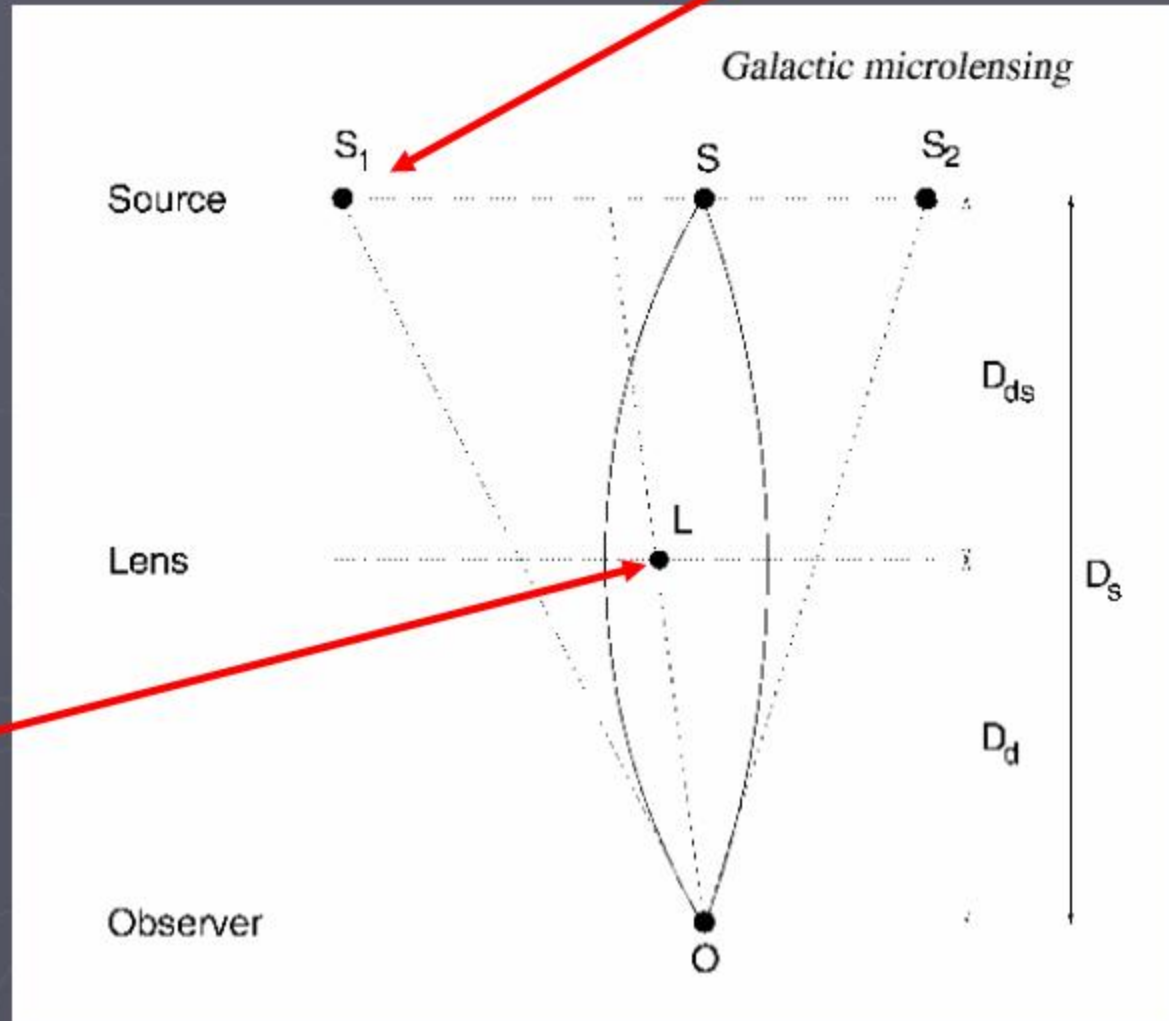


Lentes gravitacionales



Microlentes

Temporal aumento de brillo de objetos lejanos



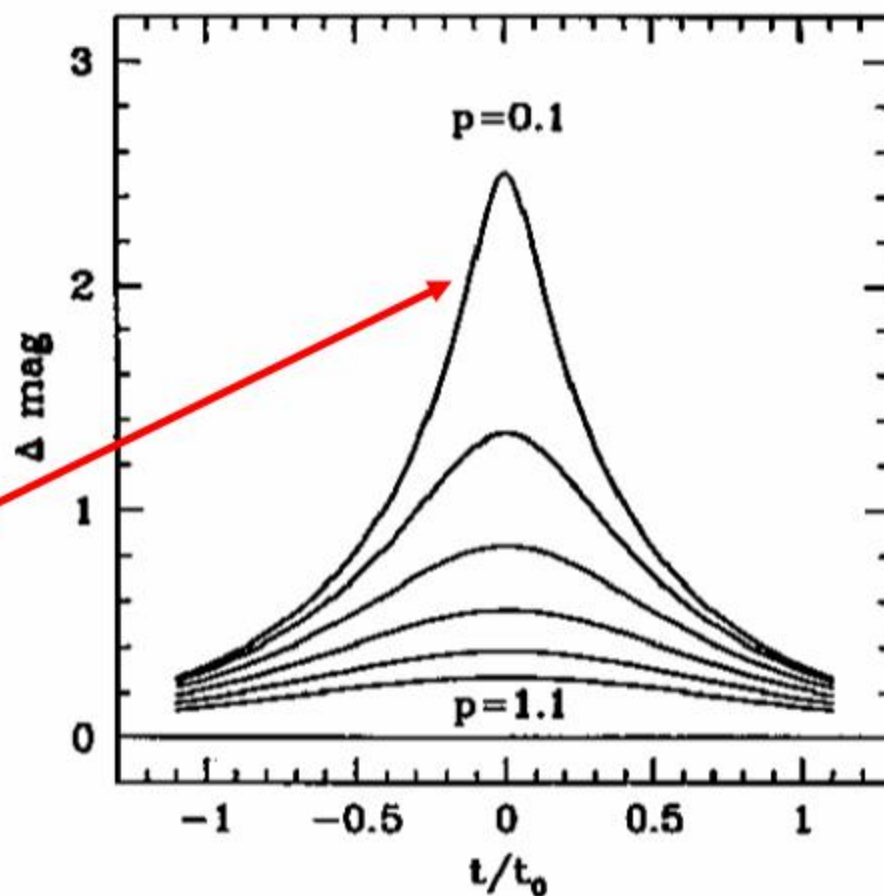
Objeto
masivo
opaco

MACHOs

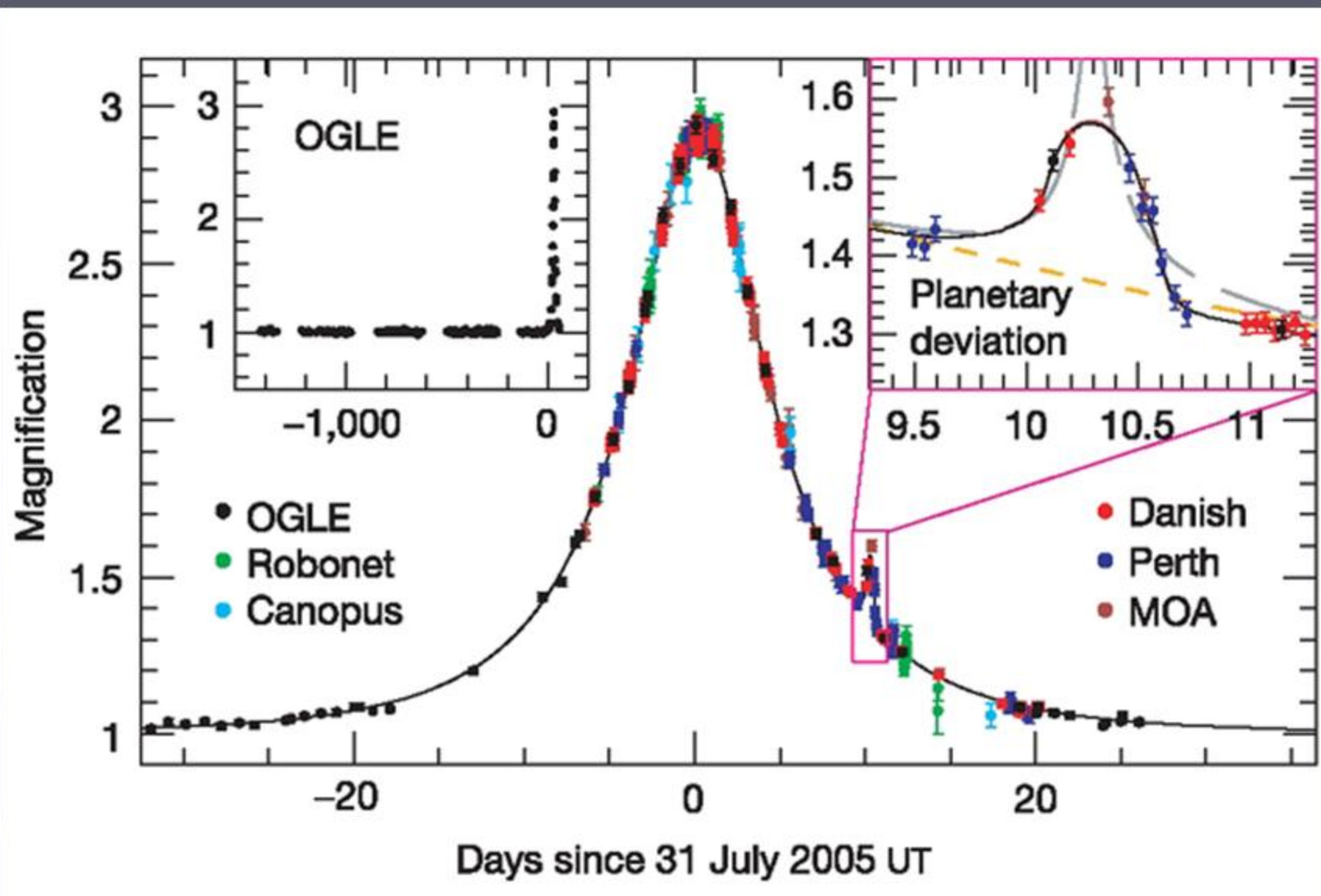
Setiembre de 1993: primera detección de MACHOs monitoreando la Nube Mayor de Magallanes. **Massive Astrophysical Compact Halo Objects.**

Objetos masivos en el halo de nuestra galaxia que **actúan como lentes** de objetos lejanos magnificando su brillo.

Gravitational lensing



... fenómeno que también permite la detección de planetas orbitando a los MACHOs:



3) Retardo de la luz

Concebido por Shapiro en 1964 y verificado por primera vez en 1971 mediante experimento desde Arecibo.

Radar echoes from planets

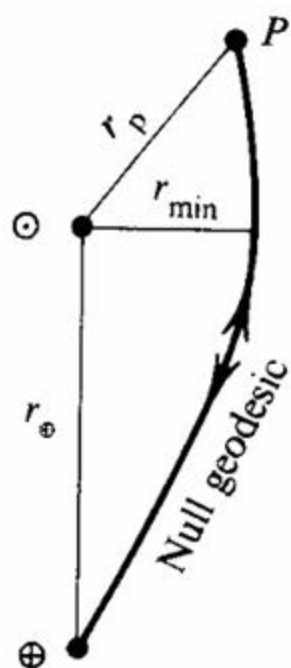


Figure 44. Notation for radar time delay theory.

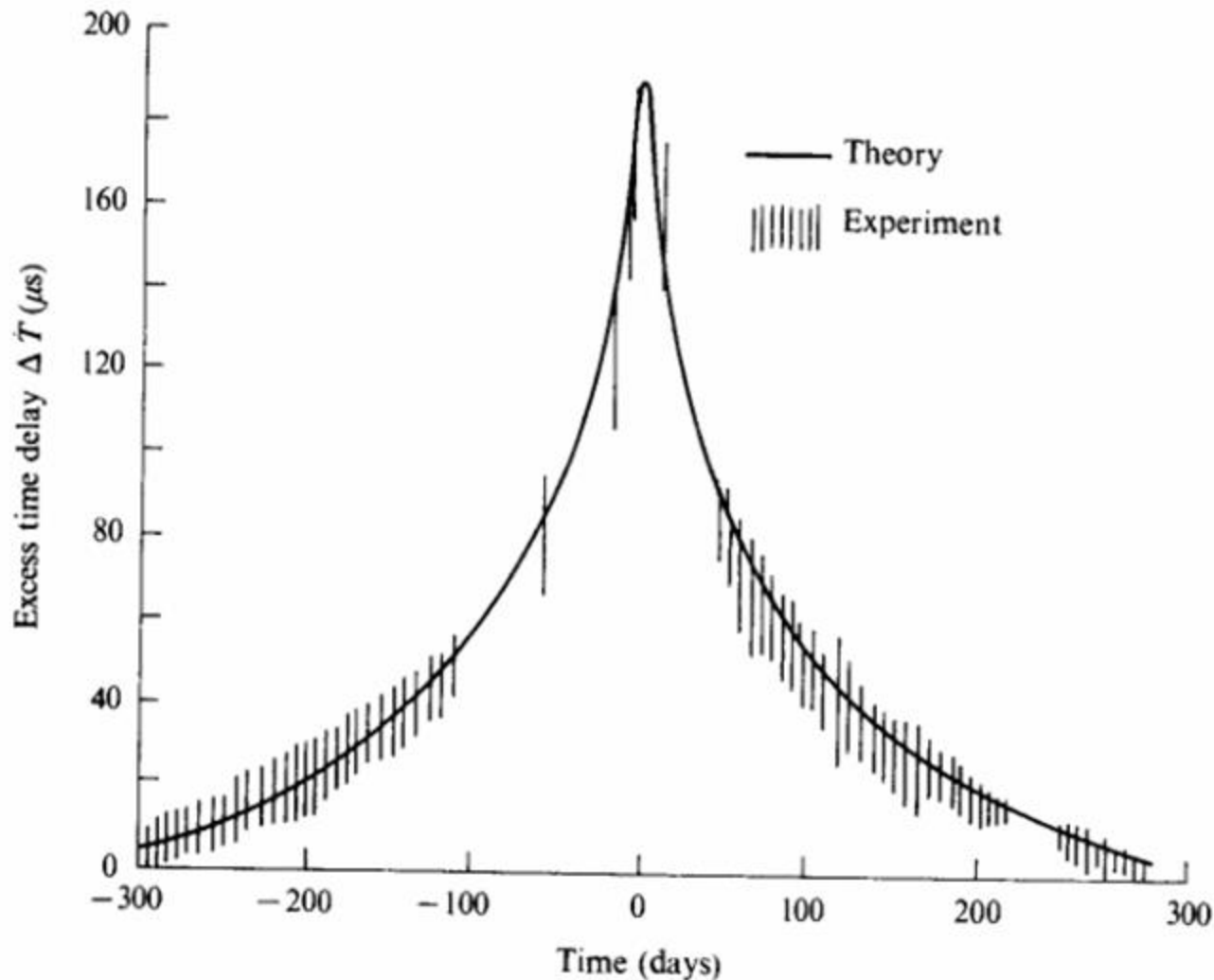
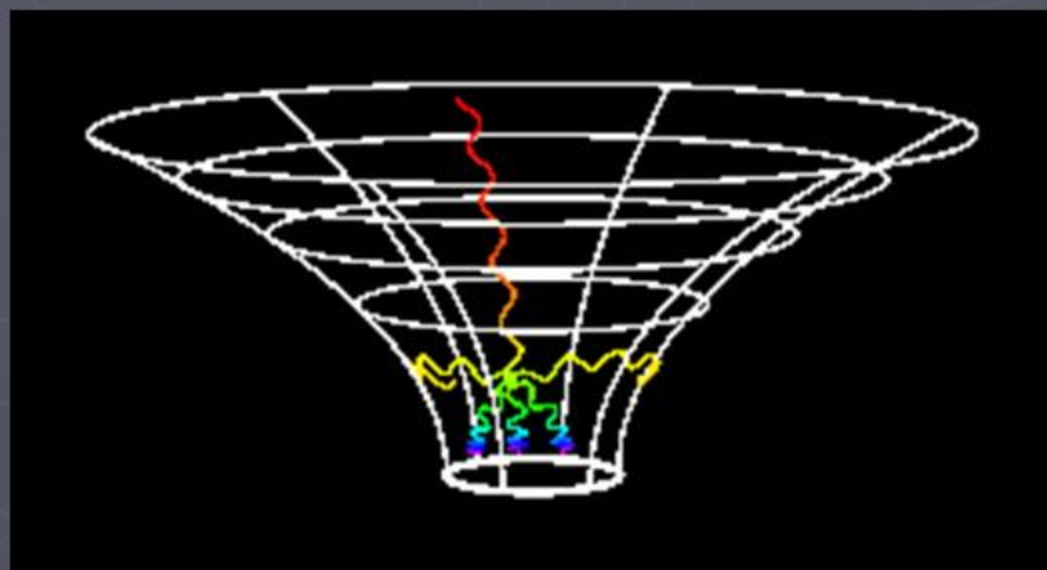


Figure 45. Radar time delay of signals reflected from Venus and passing close to the Sun: comparison of theory (equation (5.5.5)) with experiment. (By kind permission of Professor I. I. Shapiro.)

4) Enrojecimiento gravitacional de la luz y enlentecimiento de relojes

La luz emitida por las estrellas se enrojece debido al campo gravitacional. Fue "observado" por Evershed in 1927 en el espectro solar y luego confirmado en el espectro de enanas blancas. Caso extremo: **Agujeros Negros**.



Efecto asociado: **marcha diferente de relojes inmersos en campos gravitacionales**. Los átomos emiten radiación de determinada frecuencia lo que los convierte en precisos relojes. Como la frecuencia disminuye debido al campo gravitacional, los relojes corren mas lentos.

Relojes en cohetes, aviones y satélites demostraron este fenómeno en numerosas ocasiones. En el sistema GPS son imprescindibles estas correcciones relativistas.

Relojes atómicos



Experimentos con relojes atómicos

Around the world with clocks

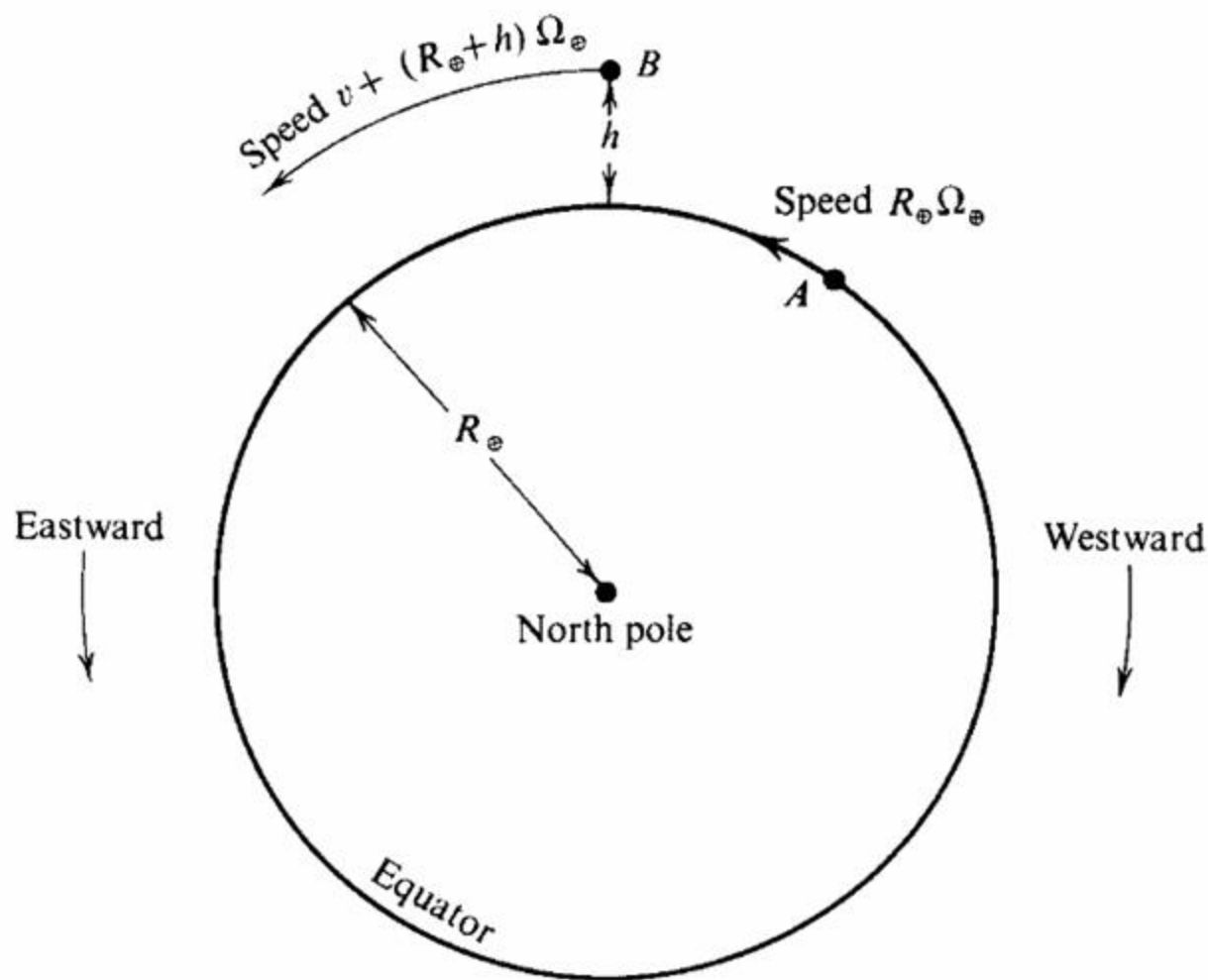


Figure 39. Clocks going round (A) on the ground, (B) in an aircraft.

En 1971 dos científicos hicieron sendos viajes alrededor del mundo, uno viajando hacia el este (Hafele) y otro hacia el oeste (Keating) portando relojes atómicos de altísima precisión (0.00000000000001 seg). Compararon luego con un reloj que había quedado "en reposo" en el United States Naval Observatory.

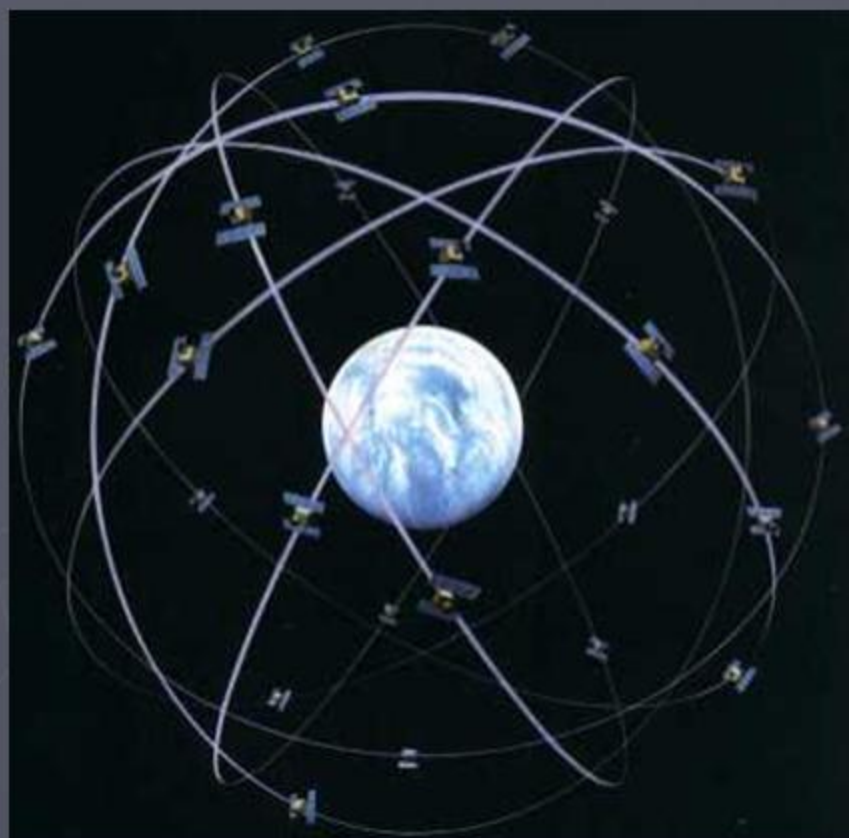
General relativity near massive objects

Table 2

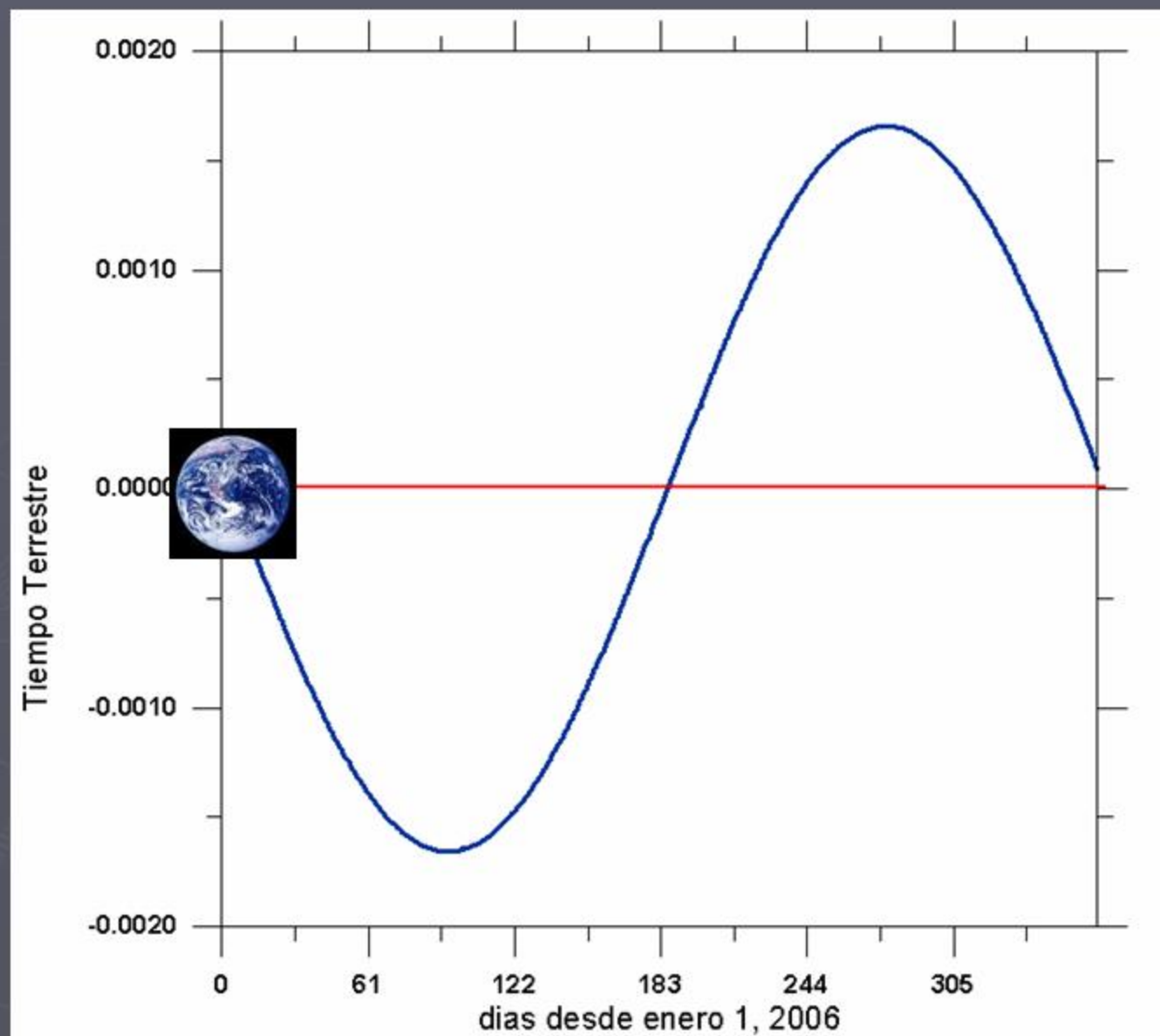
Direction of circumnavigation	$\tau_B - \tau_A$ (nanoseconds)	
	Experiment	Theory
Westward	273 ± 7	275 ± 21
Eastward	-59 ± 10	-40 ± 23

Efecto en GPS

Debido a su alta velocidad los relojes de los GPS se **atrasan 7 microsegundos** por día pero debido a que experimentan un campo gravitacional menor al de la superficie terrestre se adelantan 45 microsegs por día.



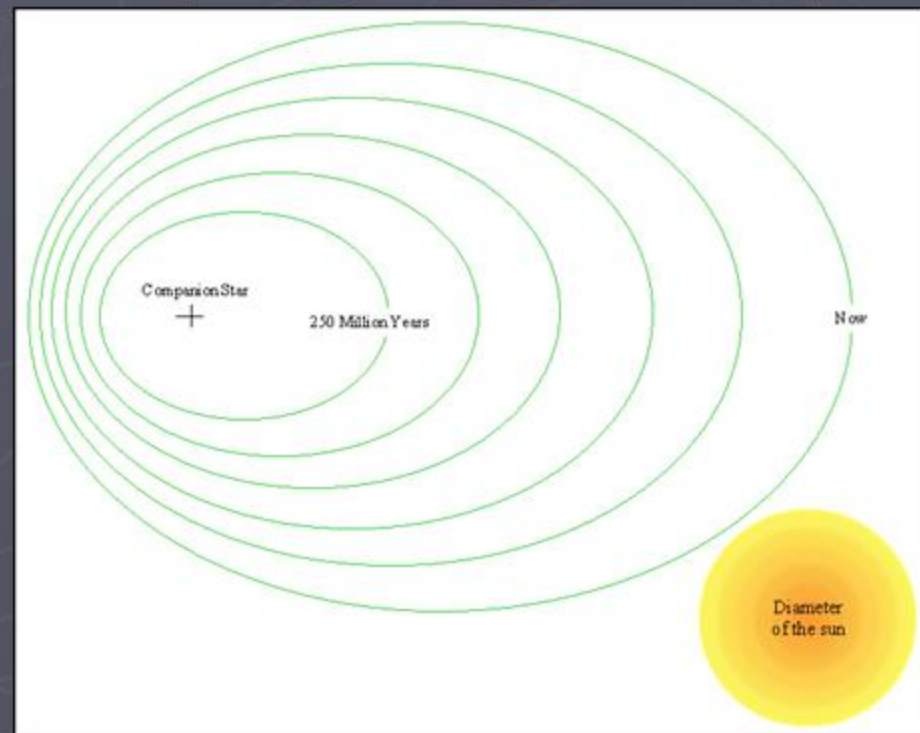
La marcha del Tiempo en la Tierra:



5) Ondas gravitacionales

En 1974 Hulse y Taylor descubren un pulsar binario donde se comprueban todos los efectos predichos para Mercurio pero enormemente magnificados (140000 veces mayor).

Se encuentra además que la energía gravitacional del sistema se pierde: es una prueba de la existencia de la radiación gravitacional, otra predicción de la RG que afirma que la energía se va perdiendo a través de la emisión de ondas gravitacionales (que en el presente intentan detectarse en forma directa).



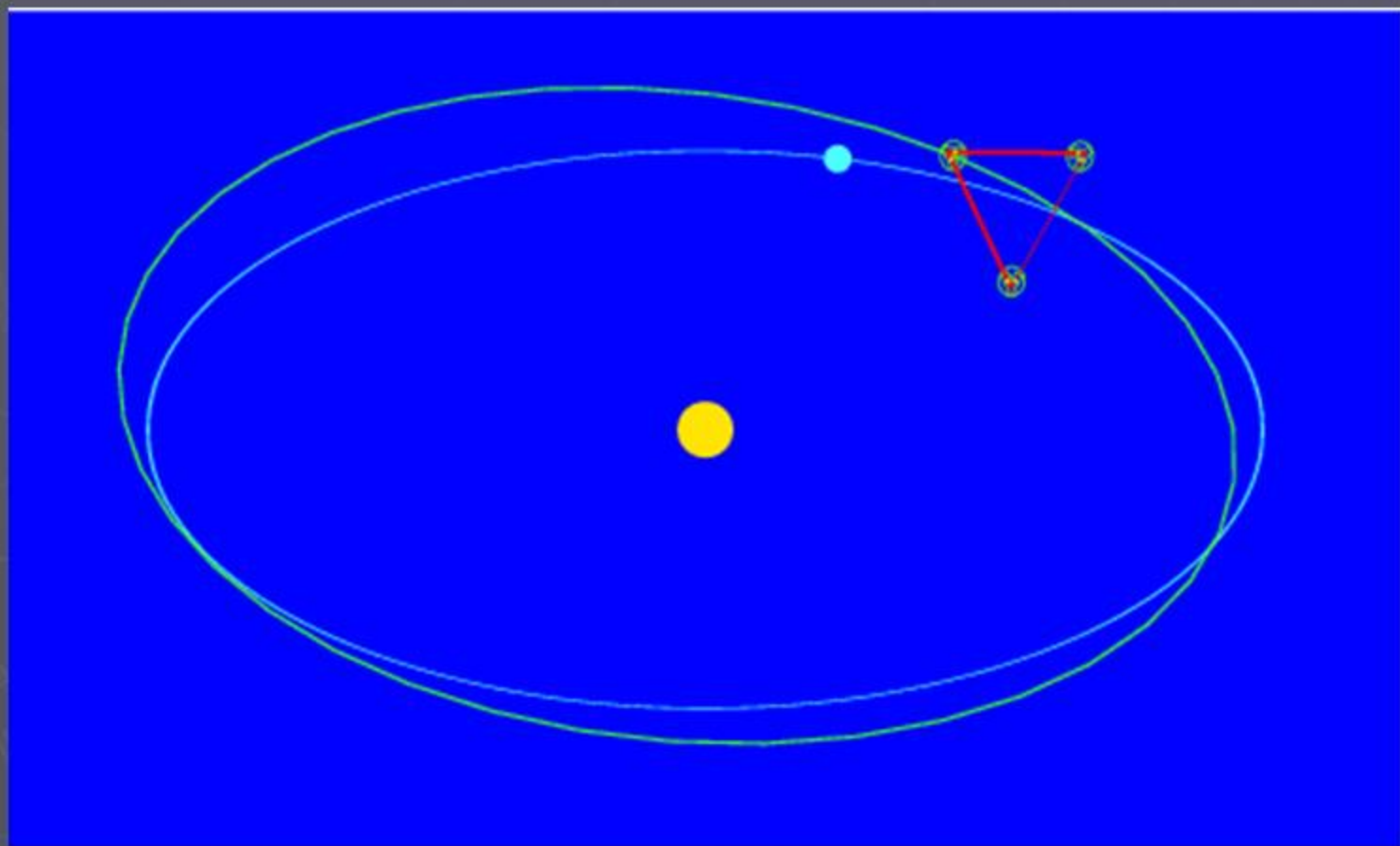
Esperimento LIGO

Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory



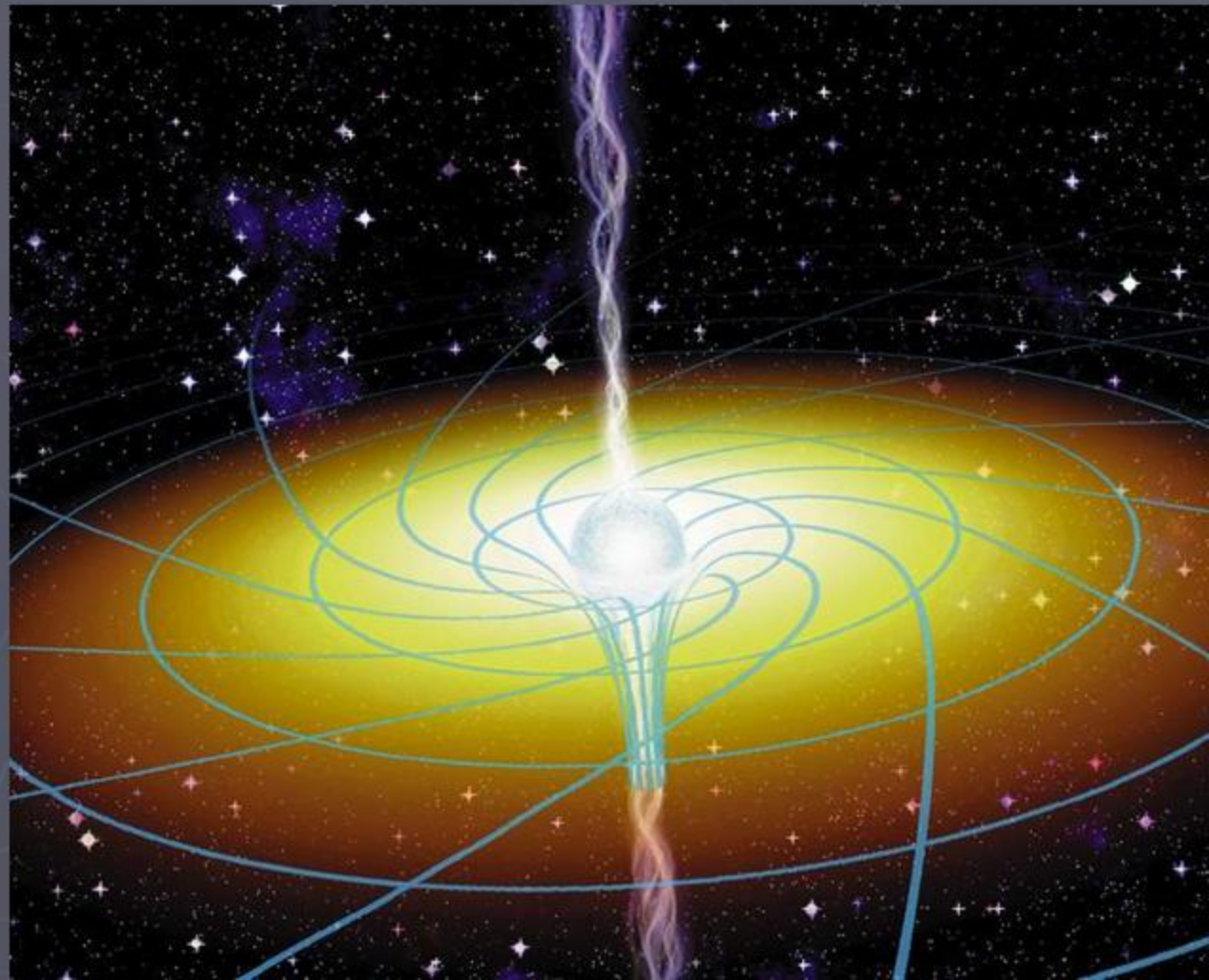
Proyecto LISA

Laser Interferometer Space Antenna



6) Gravitomagnetismo

Ideado en 1918 por Lense y Thirring y actualmente "casi" detectado. Un cuerpo masivo al girar sobre sí mismo arrastra el espaciotiempo circundante.



IM Pegasi



Geodetic effect
6.6 arcsec/yr

X

Frame dragging
0.041 arcsec/yr

Z

Y

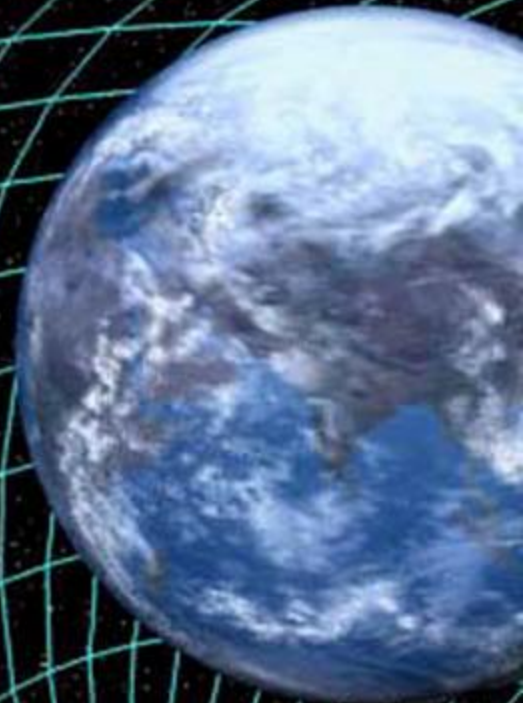
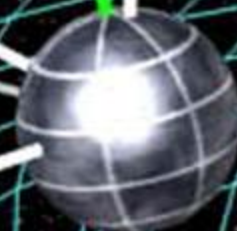


Diagram of the GP-B experiment

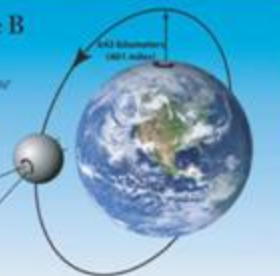
The Gravity Probe B Experiment

...testing Einstein's Universe

Frame-dragging Effect
0.041 arcseconds/year
(0.000011 degrees/year)

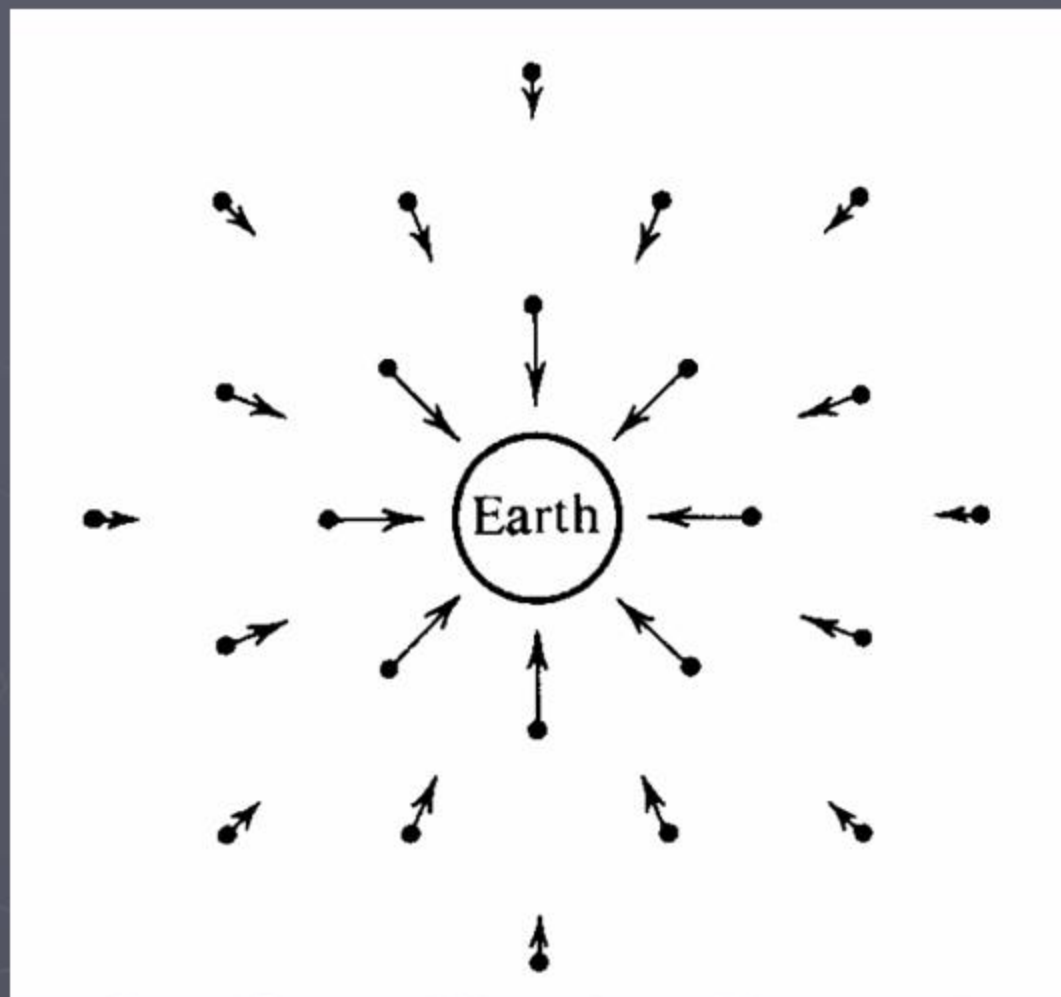
Guide Star
IM Pegasi
(HR 8703)

Geodetic Effect
6.6 arcseconds/year
(0.0018 degrees/year)

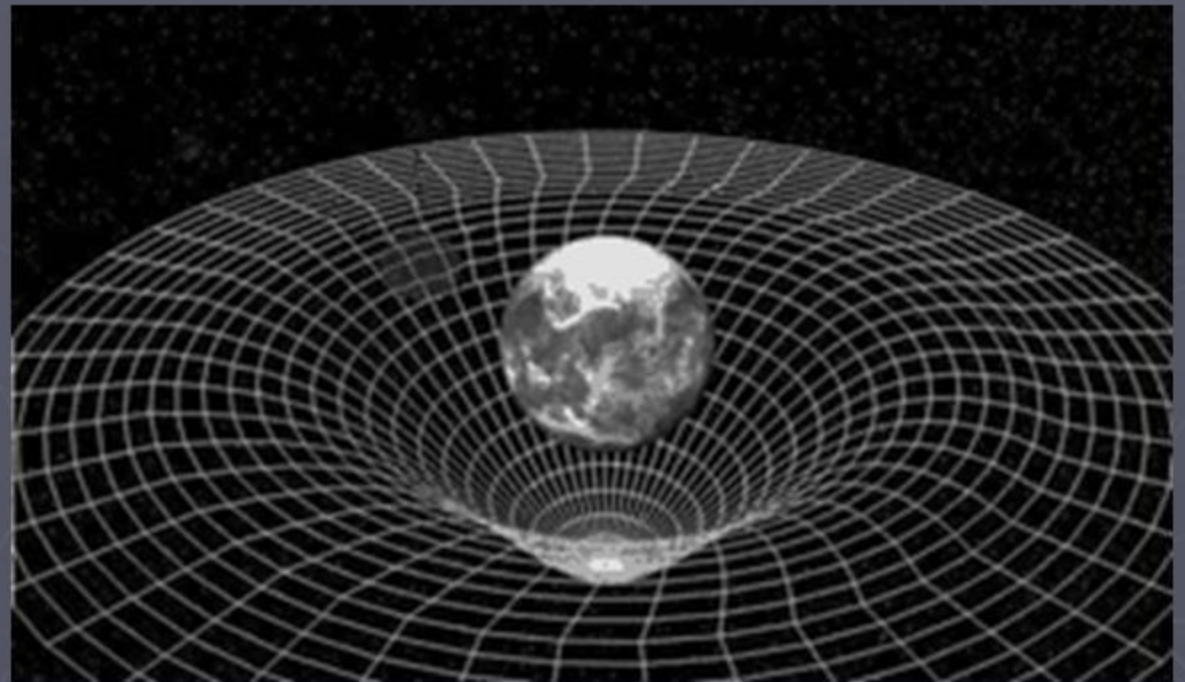


¿Por qué ocurre todo esto?

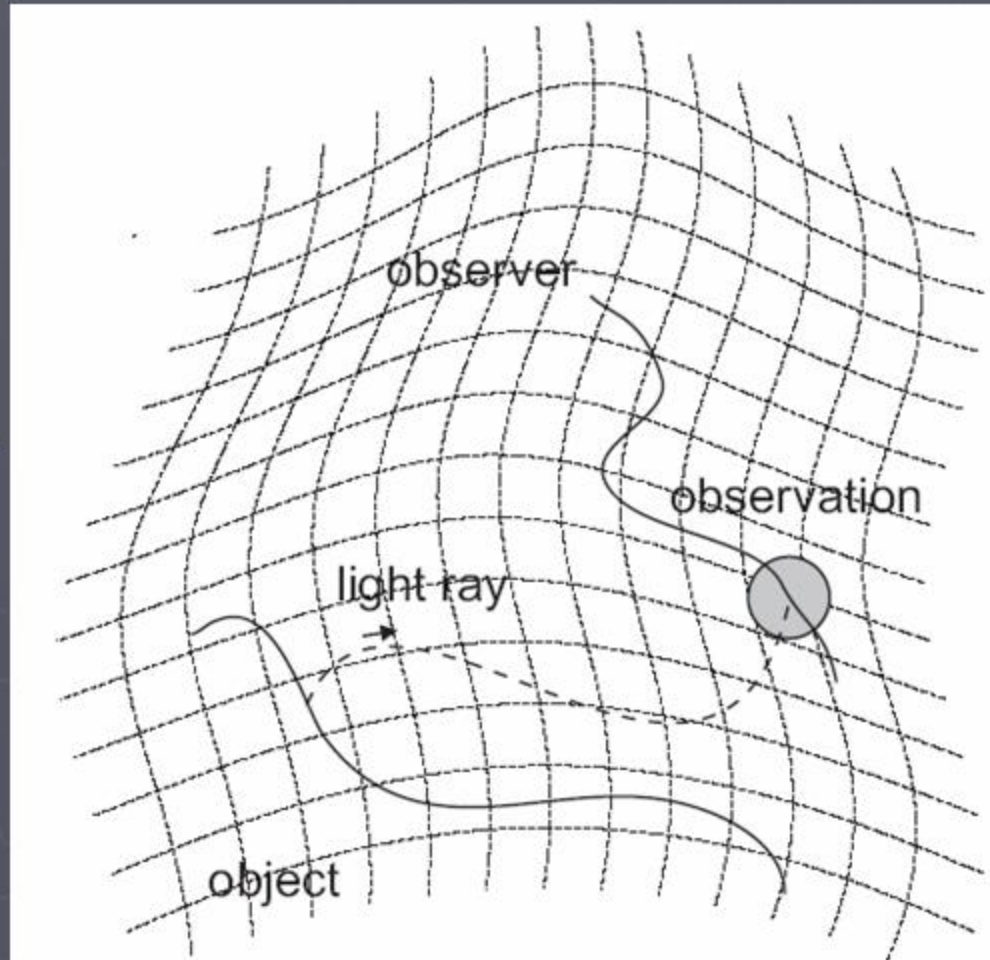
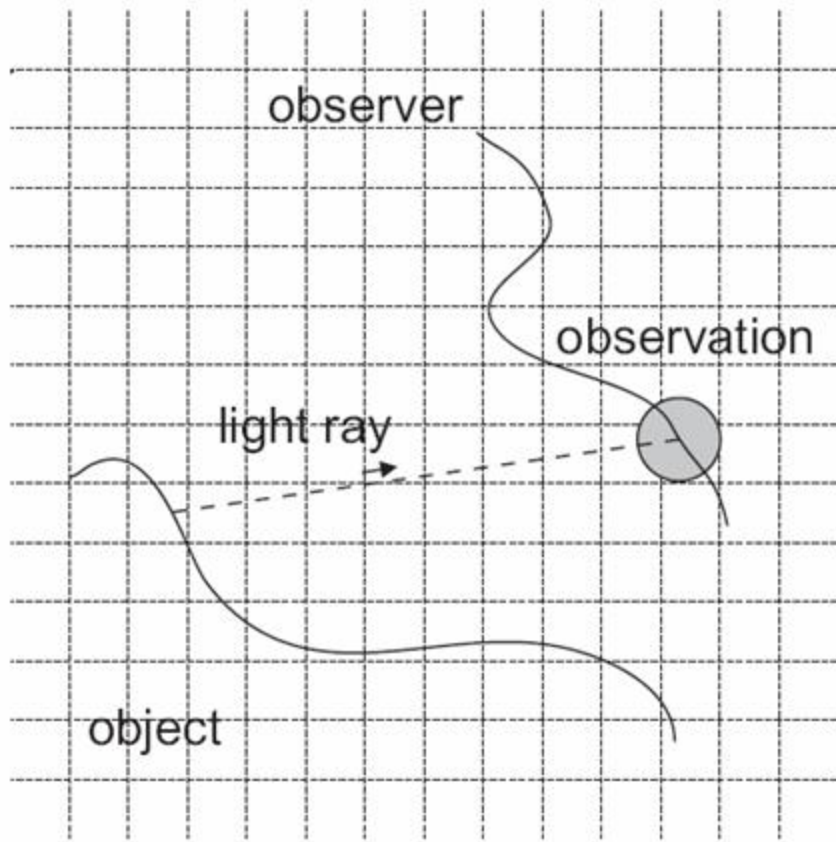
Campo gravitacional de un cuerpo masivo según Newton.



Campo gravitacional de un cuerpo masivo según Einstein.



Newton



Einstein

según Newton:

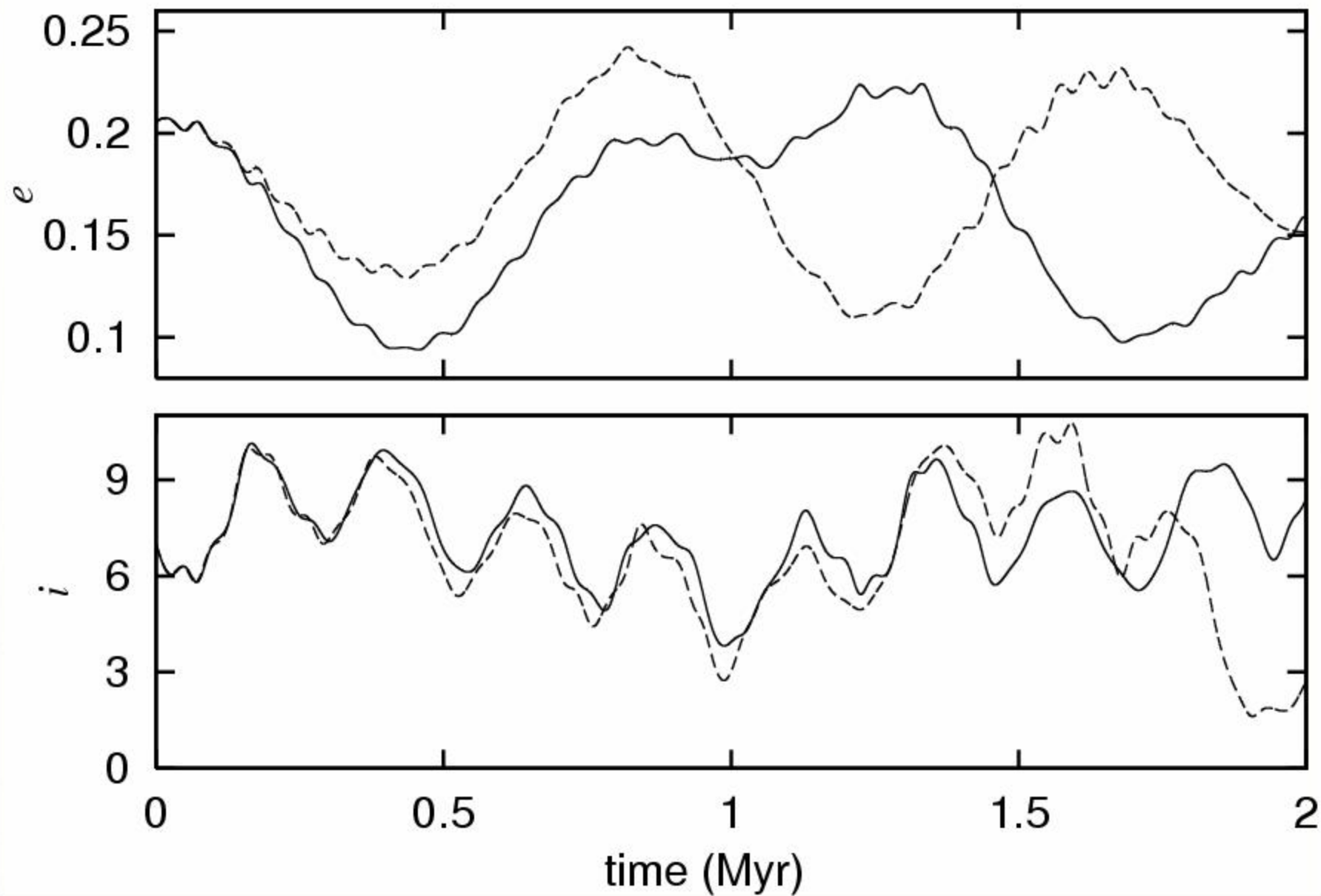
$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{\mu}{r^3} \mathbf{r}$$

... y según Einstein:

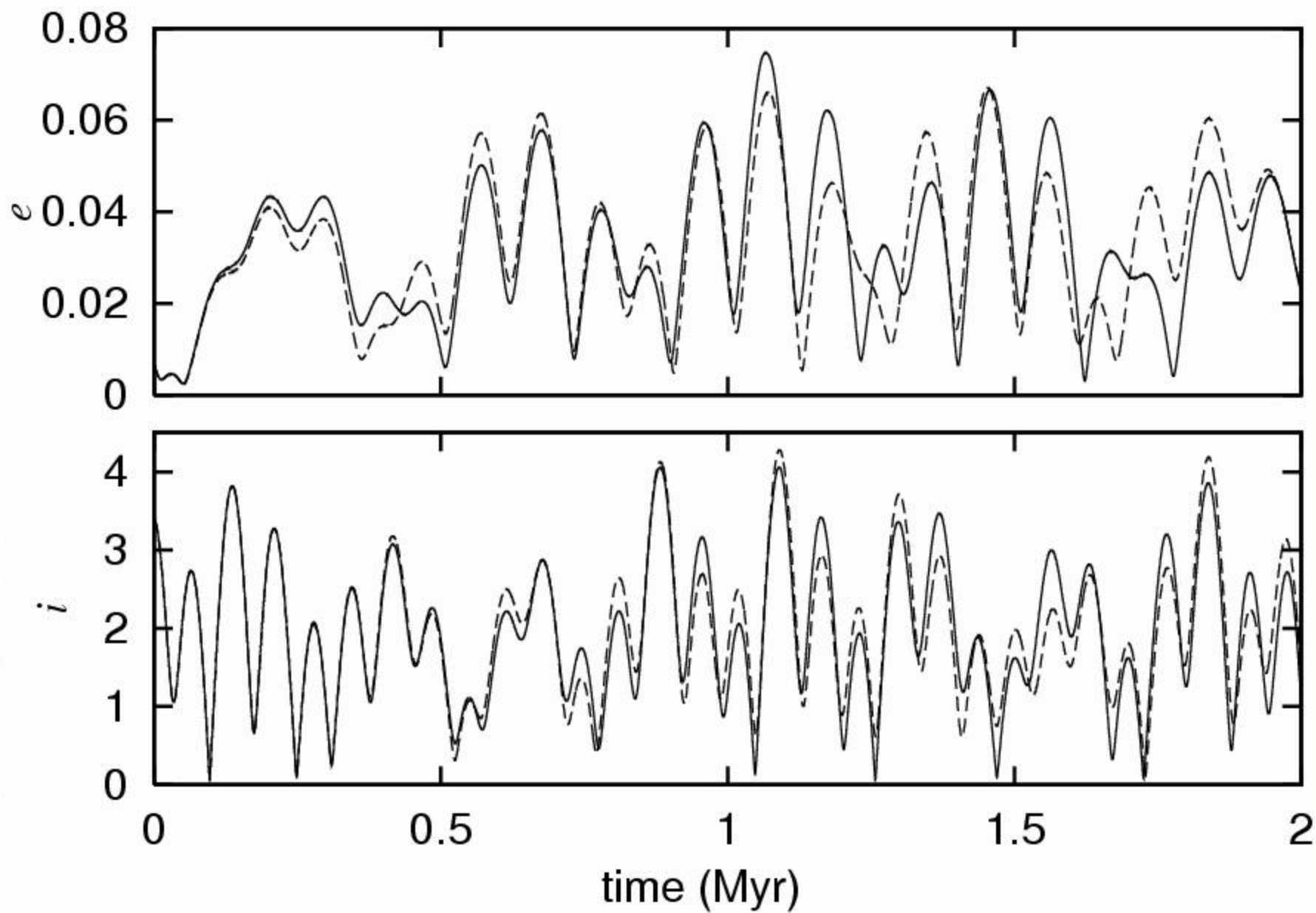
$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{r}}_{\text{point mass}} = & \sum_{j \neq i} \frac{\mu_j (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{r_{ij}^3} \left\{ 1 - \frac{2(\beta + \gamma)}{c^2} \sum_{k \neq i} \frac{\mu_k}{r_{ik}} - \frac{2\beta - 1}{c^2} \sum_{k \neq j} \frac{\mu_k}{r_{jk}} + \gamma \left(\frac{v_i}{c} \right)^2 + (1 + \gamma) \left(\frac{v_j}{c} \right)^2 \right. \\ & - \frac{2(1 + \gamma)}{c^2} \dot{\mathbf{r}}_i \cdot \dot{\mathbf{r}}_j - \frac{3}{2c^2} \left[\frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \cdot \dot{\mathbf{r}}_j}{r_{ij}} \right]^2 + \frac{1}{2c^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot \ddot{\mathbf{r}}_j \left. \right\} + \frac{1}{c^2} \sum_{j \neq i} \frac{\mu_j}{r_{ij}^3} \{ [\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j] \cdot [(2 + 2\gamma)\dot{\mathbf{r}}_i - (1 + 2\gamma)\dot{\mathbf{r}}_j] \} (\dot{\mathbf{r}}_i - \dot{\mathbf{r}}_j) \\ & + \frac{3 + 4\gamma}{2c^2} \sum_{j \neq i} \frac{\mu_j \ddot{\mathbf{r}}_j}{r_{ij}} + \sum_{m=1}^5 \frac{\mu_m (\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_i)}{r_{im}^3}, \end{aligned}$$

Evolución de Mercurio según Newton
y según Einstein (2 Millones de Años).

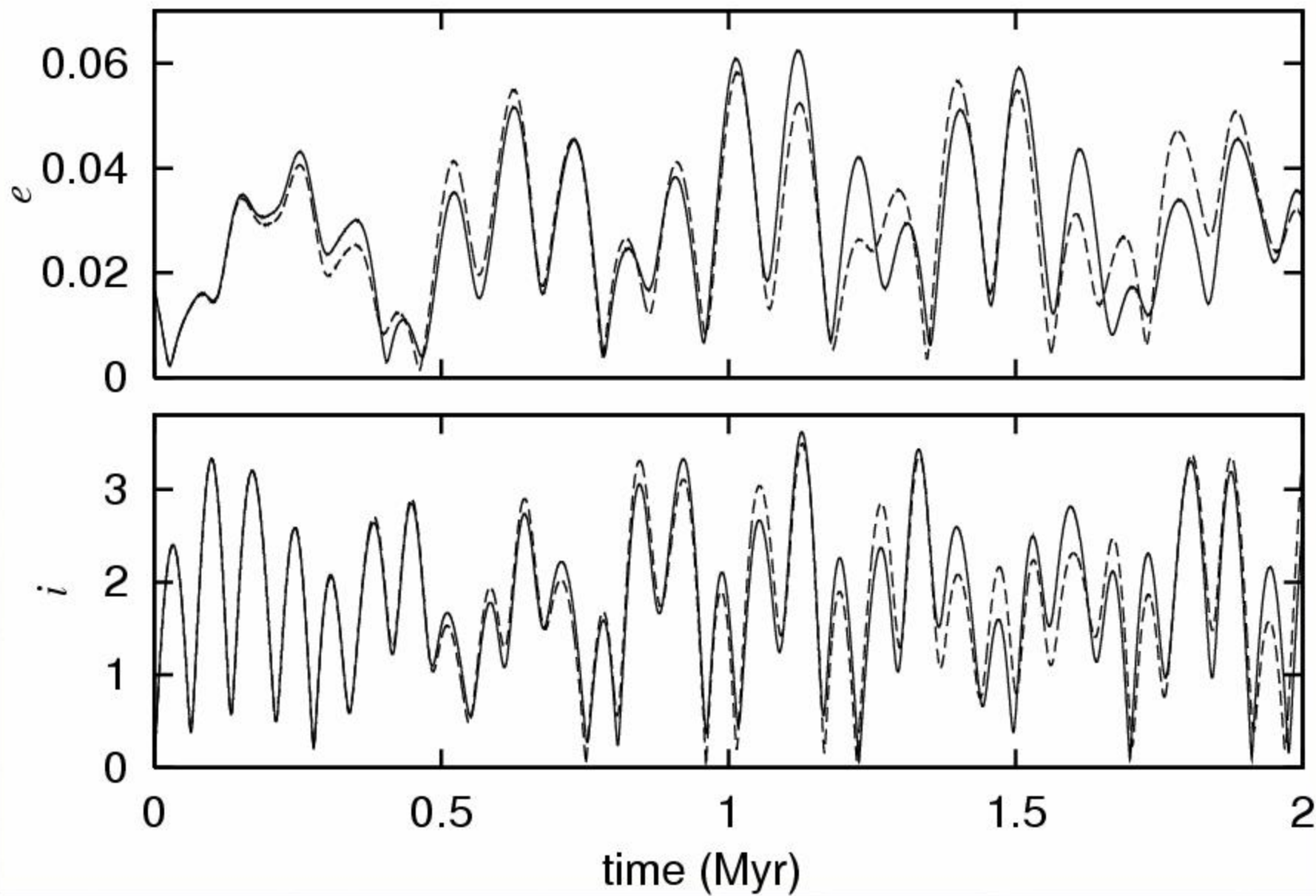
Mercurio



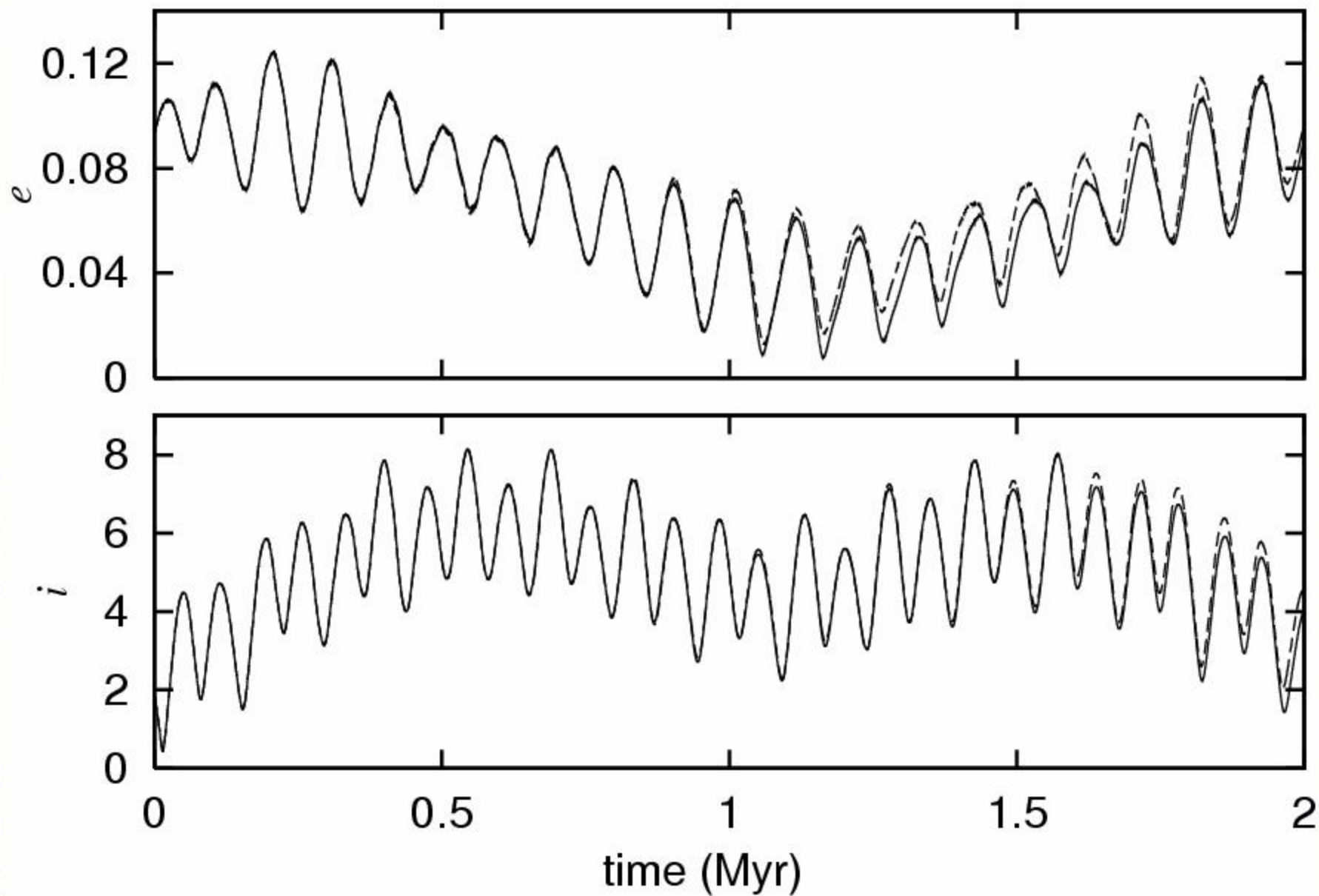
Venus



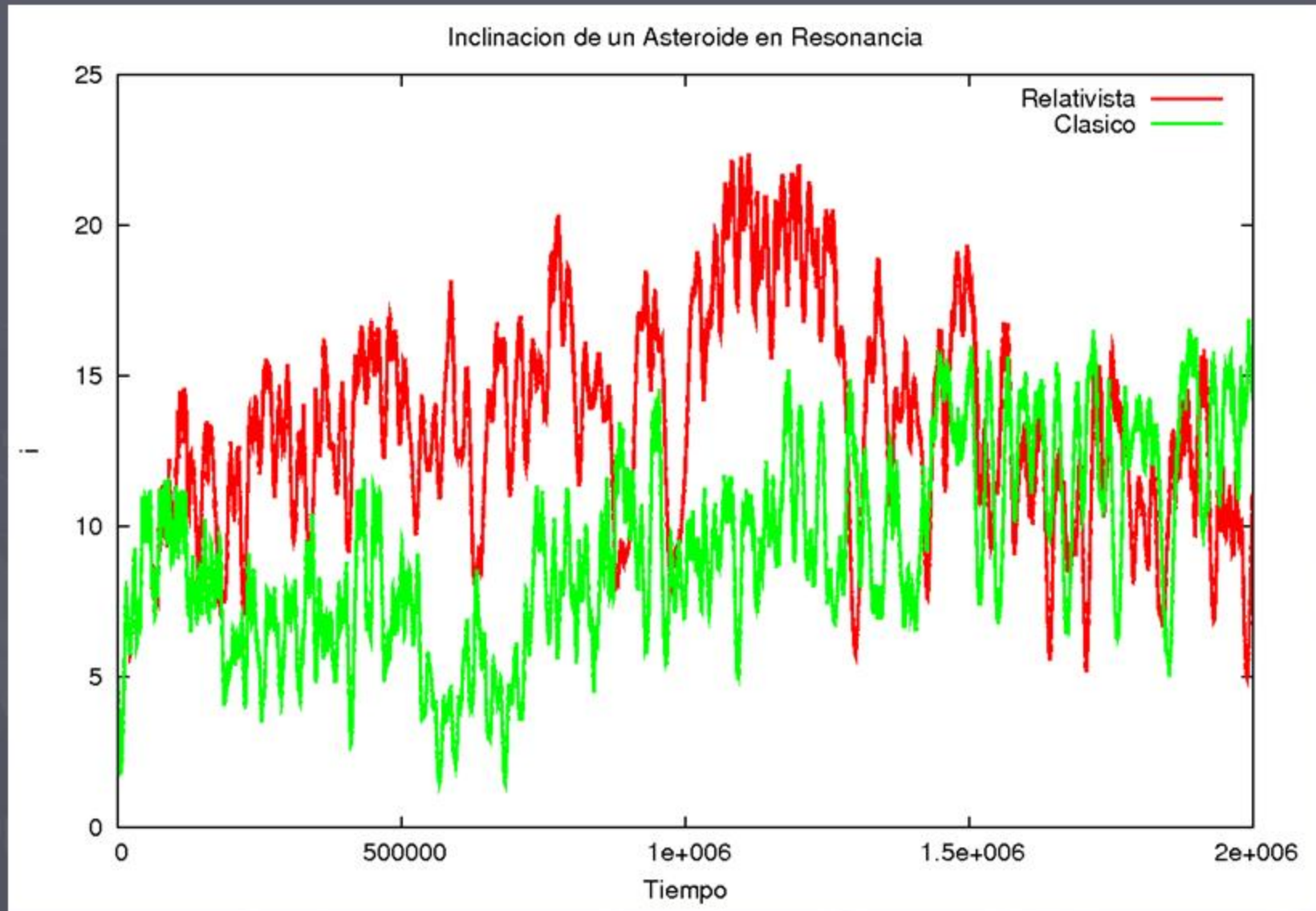
Tierra



Marte



Ejemplo: evolución clásica versus relativista



Sistemas Extrasolares

A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12

A. Wolszczan* & D. A. Frail†

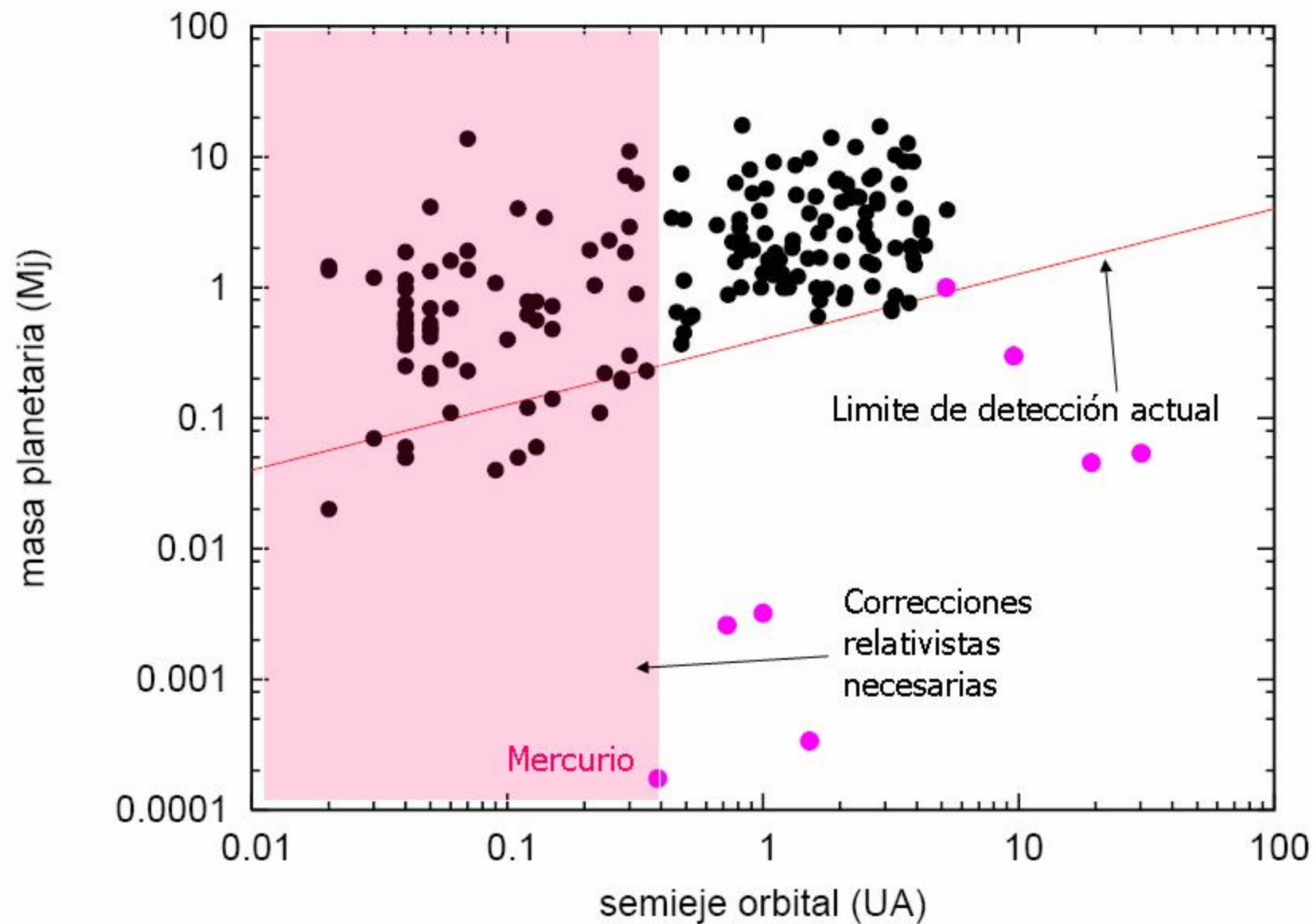
* National Astronomy and Ionosphere Center, Arecibo Observatory, Arecibo, Puerto Rico 00613, USA

† National Radio Astronomy Observatory, Socorro, New Mexico 87801, USA

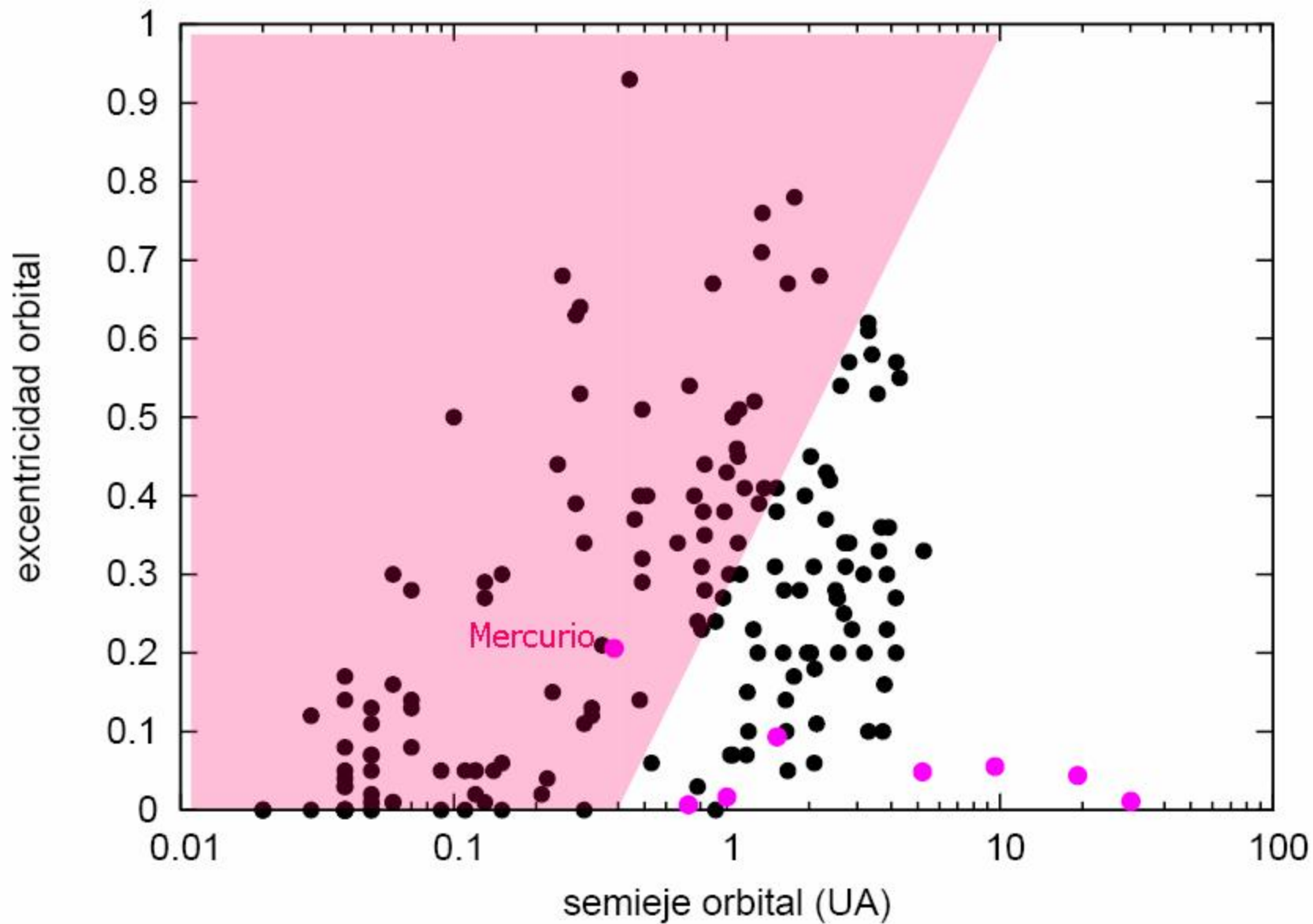
MILLISECOND radio pulsars, which are old ($\sim 10^9$ yr), rapidly rotating neutron stars believed to be spun up by accretion of matter from their stellar companions, are usually found in binary systems with other degenerate stars¹. Using the 305-m Arecibo radiotelescope to make precise timing measurements of pulses from the recently discovered 6.2-ms pulsar PSR1257 + 12 (ref. 2), we demonstrate that, rather than being associated with a stellar object, the pulsar is orbited by two or more planet-sized bodies. The planets detected so far have masses of at least $2.8 M_{\oplus}$ and $3.4 M_{\oplus}$, where M_{\oplus} is the mass of the Earth. Their respective distances from the pulsar are 0.47 AU and 0.36 AU, and they move in almost circular orbits with periods of 98.2 and 66.6 days. Observations indicate that at least one more planet may be present in this system. The detection of a planetary system around a nearby (~ 500 pc), old neutron star, together with the recent report on a planetary companion to the pulsar PSR1829 - 10 (ref. 3) raises the tantalizing possibility that a non-negligible fraction of neutron stars observable as radio pulsars may be orbited by planet-like bodies.

Evolución de algunos sistemas
extrasolares según Newton y según
Einstein (200000 años).

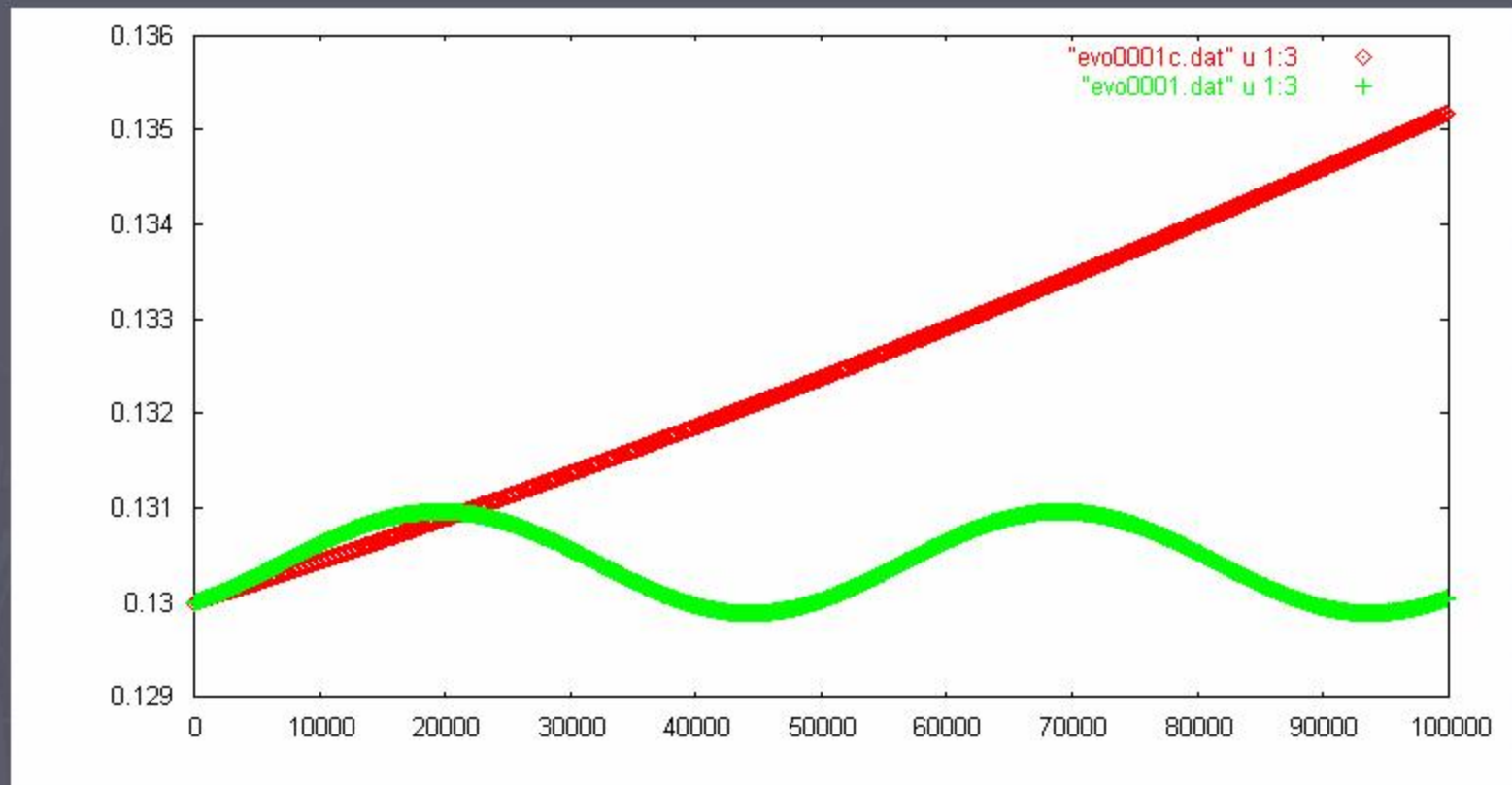
Pequeñas órbitas, grandes masas ...



... y muy excéntricas



Evolución clásica y relativista de un planeta del sistema Upsilon Andromeda



En este caso los efectos relativistas favorecen la estabilidad del sistema planetario.

Resumen

- ▶ 1. Perihelios (corrección a la fuerza de Newton)
- ▶ 2. Desvío gravitacional de la luz
- ▶ 3. Retraso de la luz
- ▶ 4. Enlentecimiento gravitacional de relojes
- ▶ 5. Ondas de gravitación
- ▶ 6. Gravitomagnetismo

“Toda nuestra ciencia, contrastada con la realidad, es primitiva e infantil pero, aun así, es lo máspreciado que poseemos.”



Bibliografía

- ▶ Revista Physics World, enero 2005.
- ▶ An Elementary Introduction to Relativistic Gravitation, Rémi Hakim, CMDA 72.
- ▶ www.fisica.edu.uy/~gallardo