

SOLAR SYSTEM TESTS OF GENERAL RELATIVITY

Antonio Fernández Caballero
Gravitación y Astrofísica. Curso 2009-2010

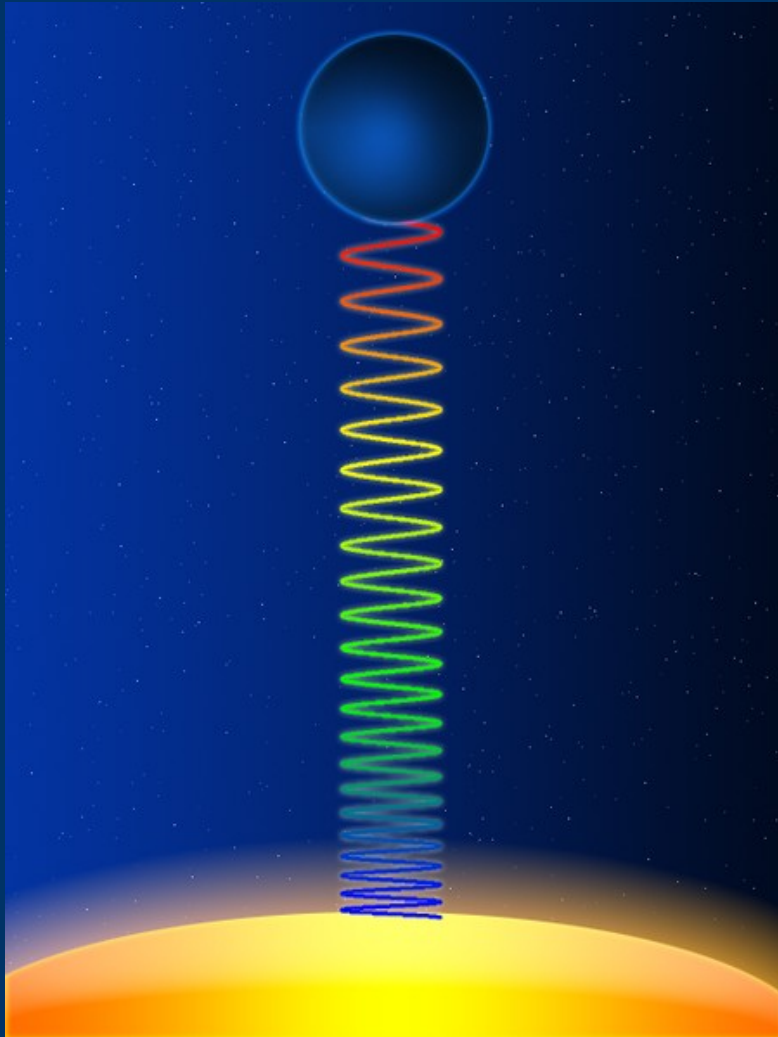
SOLAR SYSTEM TESTS OF GENERAL RELATIVITY

ÍNDICE

- 1) **'Redshift' Gravitatorio:** Corrimiento hacia el rojo de la frecuencia de las señales EM

 - 2) **Parámetros PPN (Parametrized-Post-Newtonian):** Parámetros que son útiles para hacer pruebas de modelos teóricos diferentes de un modo sistemático.
 - 2,1) **Deflección de la luz:** Curvatura en la trayectoria de la luz.
 - 2,2) **Retraso en la luz:** Retraso temporal en las señales EM.
 - 2,3) **Precesión perihelio:** Rotación de la línea que une los apsides de la órbita.
-
-

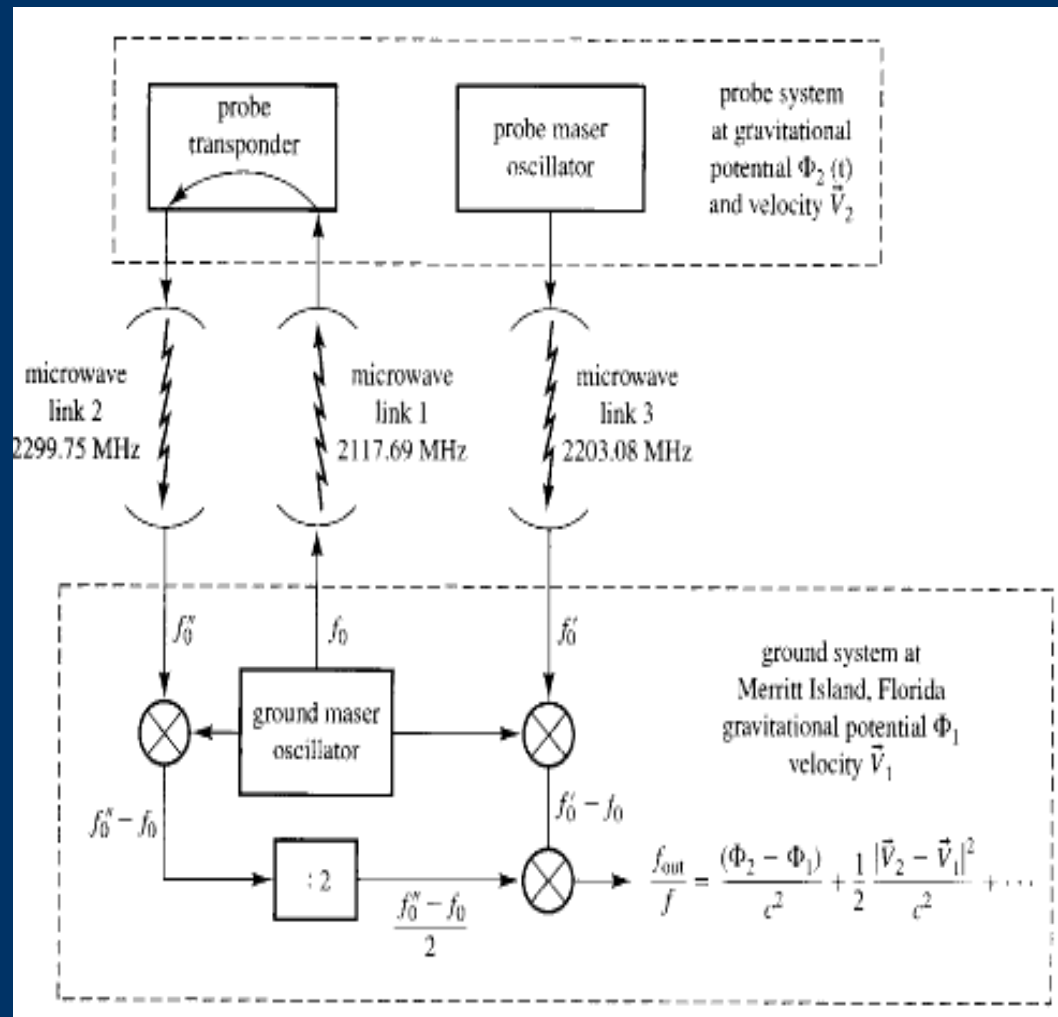
Redshift gravitatorio



-Enrojecimiento de las señales EM debido al efecto de la gravedad.

-Efecto observado en:
Sol, enanas blancas.

Experimento Vessot y Levine (1976)



- Cohete(arriba) y sistema tierra(abajo)
- La señal sufre el efecto de relatividad especial + gravitatorio. Usamos un sistema para medir solamente el redshift gravitatorio.

Experimento Vessot y Levine(1979)

- Efecto Doppler:

$$\frac{\Delta f_{\text{Doppler}}}{f_*} \approx \frac{V}{c} \sim \left(\frac{gh}{c^2}\right)^{1/2} \sim 10^{-5},$$

- Efecto gravitatorio:

$$\frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f_*} \approx \frac{gh}{c^2} \sim 10^{-10}.$$

- El efecto gravitatorio es 5 órdenes de magnitud menor!

- Resultados:

$$\left| \frac{(\Delta f_{\text{grav}}/f_*)_{\text{obs}} - (\Delta f_{\text{grav}}/f_*)_{\text{pred}}}{(\Delta f_{\text{grav}}/f_*)_{\text{pred}}} \right| \leq 2 \times 10^{-4}.$$

Parámetros PPN

- A lo largo de la historia se han propuesto varias teorías de relatividad. Para comprobar su validez experimental es útil introducir estos parámetros. ().
- Métrica de Schwarzschild en estos términos:

$$ds^2 = -A(r) (c dt)^2 + B(r) dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2).$$

$$A(r) = 1 - \frac{2GM}{c^2 r} + 2(\beta - \gamma) \left(\frac{GM}{c^2 r} \right)^2 + \dots,$$

$$B(r) = 1 + 2\gamma \left(\frac{GM}{c^2 r} \right) + \dots$$

Deflección de la luz

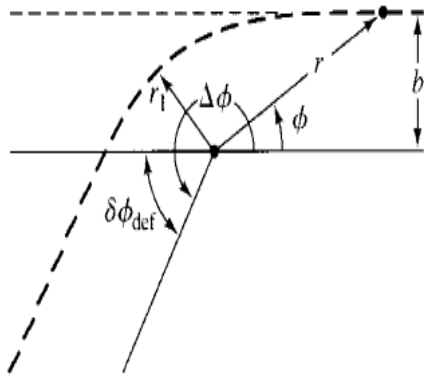


FIGURE 9.10 Quantities needed for calculating the deflection of light $\delta\phi_{\text{def}}$ by a spherical star. In this schematic diagram a light ray enters at right with an impact parameter b corresponding to a scattering orbit as in the second pass of plots in Figure 9.8. It approaches the center of attraction until the turning point at $r = r_1$, after which it moves out to infinity emerging deflected by an angle $\delta\phi_{\text{def}}$. That deflection angle is the total angle swept out in the orbit $\Delta\phi$ less π .

- La luz se curva en presencia de cuerpos masivos.

- Angulo de deflección:

$$\delta\phi_{\text{def}} = \frac{4GM}{c^2 b}$$

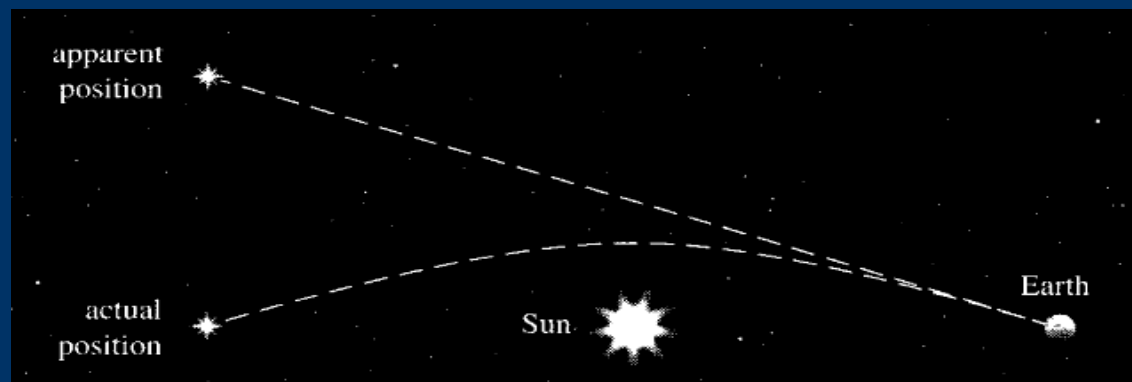
$$\delta\phi_{\text{def}} = \left(\frac{1+\gamma}{2}\right) \left(\frac{4GM}{c^2 b}\right).$$

$$\Delta\phi = 2 \int_{r_1}^{\infty} \frac{dr}{r^2} \left[\frac{1}{b^2} - \frac{1}{r^2} \left(1 - \frac{2M}{r} \right) \right]^{-1/2}$$

$$\delta\phi_{\text{def}} = \Delta\phi - \pi.$$

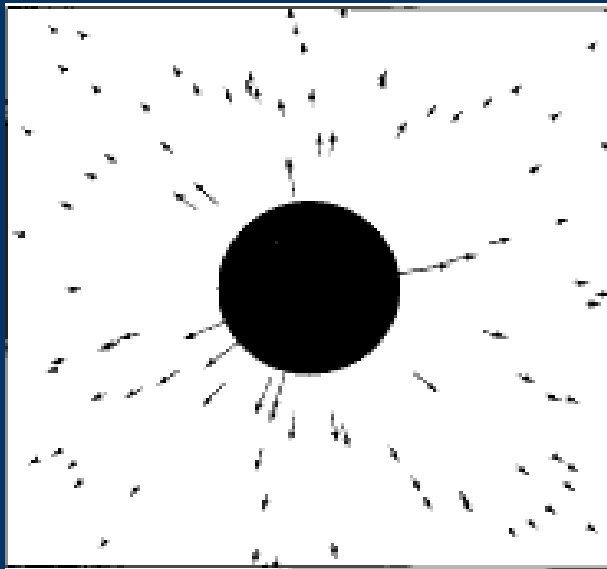
Deflección de la luz por el Sol

- Predicción relativista para un rayo de luz que pasa por el borde del sol: $[\delta\phi_{\text{def}}]_{\text{predicted}} = 1.75''$.
- El ángulo de deflección es mayor para estrellas cercanas al sol (parámetro de impacto), pero el sol es tan brillante que las tapa, cuando están en su campo de visión. Tenemos que medir durante un eclipse solar.



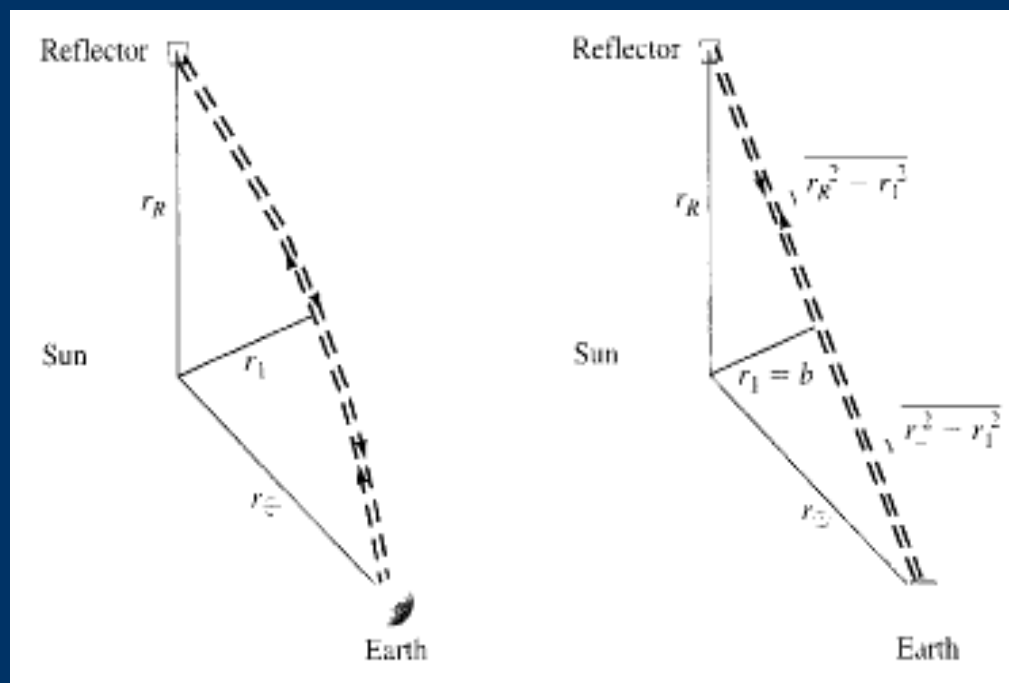
Deflección de la luz

- Método de fotografías (Eddington 1919)
 - $\gamma=1$ precisión del 5
- Defectos: atmósfera, eclipses
- El sol no es tan brillante en la banda de radio. (no es necesario el eclipse): Radio telescopios

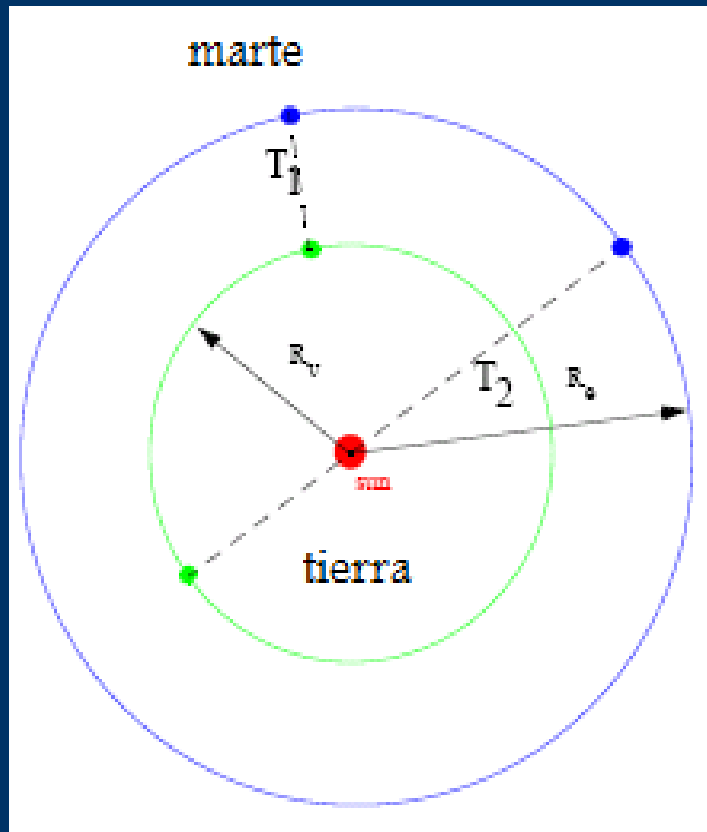


Retraso en la luz

- Efecto descubierto por profesor Irwin. I. Shapiro (1964). Efecto conocido también como 'Shapiro time delay effect'.
- Imaginemos que desde la tierra emitimos una onda EM apuntando hacia un reflector distante, de forma que el rayo pase cerca del sol. Se comprueba que existe un retardo entre el tiempo de emisión y de recepción, diferente de si la luz viajara en línea recta en el espacio-tiempo plano

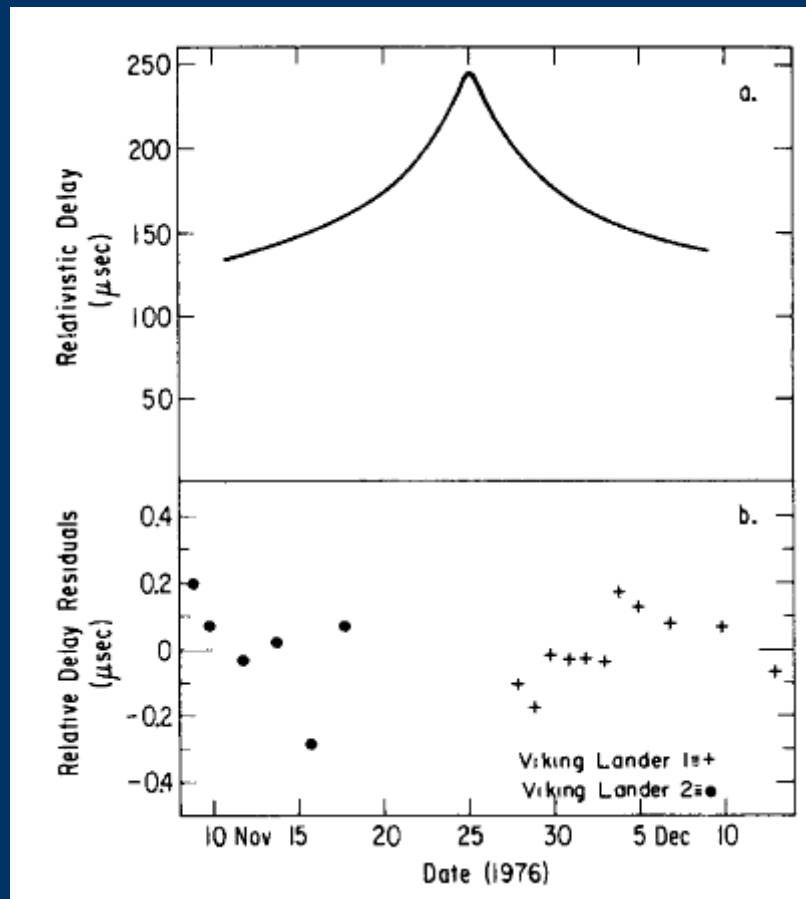


Misión Viking (1976)



- Medición: Misión 'Viking' a Marte (1976): Un total de 4 vehículos (2 sobre tierra marciana y 2 orbitando) se utilizan para retransmitir señales radar enviadas desde la tierra.
- Se recogen datos durante distintos días. Dependiendo del día, la distancia de máximo acercamiento al sol provocará retrasos mayores o menores en el tiempo de viaje.

Retraso en la luz



- Exceso de tiempo según la relatividad:

$$\Delta t_{\text{excess}} = \left(\frac{1 + \gamma}{2} \right) \frac{4GM}{c^3} \left[\log \left(\frac{4r_{\oplus} r_R}{r_1^2} \right) + 1 \right].$$

- Tiempos extremadamente pequeños, medibles gracias a relojes atómicos.

- Resultados:

$$\gamma = 1.000 \pm 0.002.$$

Retraso en la luz

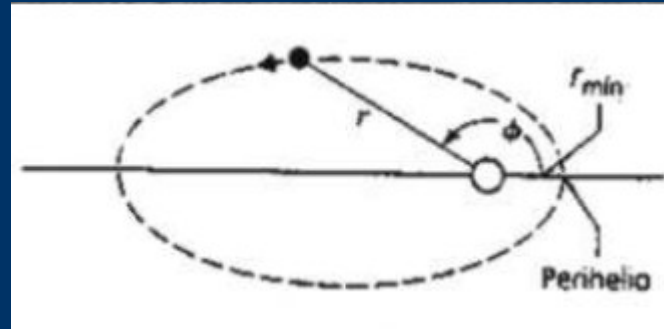
"..... according to the general theory of relativity, the law of the constancy of the velocity of light in vacuo, which constitutes one of the two fundamental assumptions in the special theory of relativity..... We can only conclude that the special theory of relativity cannot claim an unlimited domain of validity " – Albert Einstein (The General Theory of Relativity: Chapter 22 – A Few Inferences from the General Principle of Relativity)



Precesión perihelio de Mercurio

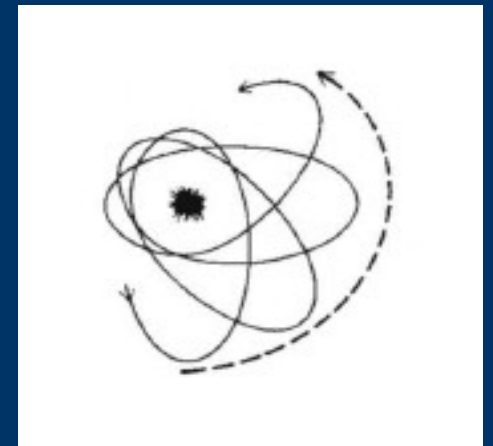
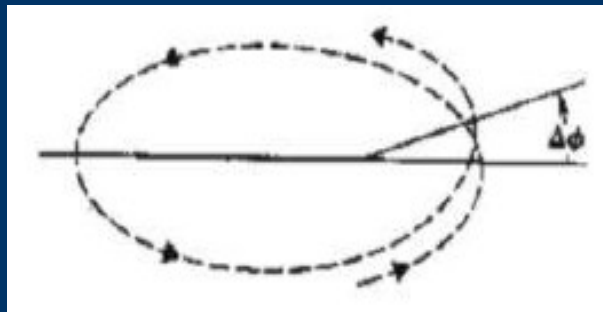
-Perihelio: condición $r=r_{\min}$ (ver dibujo).

$$r = r_{\min} \frac{1+e}{1+\cos\phi}$$



-Según la relatividad general, las órbitas no son cerradas. El efecto del espacio curvo del Sol causa que la dirección del perihelio preceda. Después de una vuelta r_{\min} ha girado. Es un efecto acumulativo.

$$r = r_{\min} \frac{1+e}{1+e \cos(\phi - \Delta\phi)}$$



Precesión perihelio Mercurio

- Predicción con la relatividad:

$$\delta\varphi \approx \frac{6\pi GM}{c^2 A (1 - e^2)}$$

$$\delta\phi_{\text{prec}} = \frac{1}{3}(2 + 2\gamma - \beta) \frac{6\pi GM}{c^2 a(1 - e^2)}$$

$$\delta\phi_{\text{prec}} = 42.98''/\text{century.}$$

- Perihelo medido desde la tierra:

$$\delta\phi = 5599.74'' \pm 0.41''/\text{century.}$$

Para medir la posición de los astros se usan: Radar ranging. Necesario medir para excentricidades grandes(no circunferencias).

Precesión perihelio de Mercurio

Sources of precession of the planet Mercury as observed at the Earth
G.M. Clemence Rev Mod Phys 19 361 1947

source	magnitude seconds arc/century
Total observed precession	5599.74 ±0.41
General precession of the equinoxes	5025.645 ±0.50
Venus	277.856 ±0.68
Earth	90.038 ±0.08
Mars	2.536 ±0.00
Jupiter	153.584 ±0.01
Saturn	7.302 ±0.01
Uranus	0.141 ±0.00
Neptune	0.042 ±0.00
Solar Oblateness (1930 German #)	0.010 ±0.02
Sum of known terms	5557.18 ±0.85
Residual	42.56 ±0.94

- Debemos hacer correcciones sobre la precesión obtenida experimentalmente:
 - Precesión de los equinoccios (polo norte terrestre recorre un círculo en torno al polo norte de la eclíptica cada 26000 años)
 - Perturbaciones de los demás planetas del sistema solar.

$$\beta = 1.000 \pm 0.003.$$