

Dinámica orbital de las estrellas internas tipo S del centro Galáctico

Jhon Alexander Flórez Leitón

Director: Ph.D. Luis Leonardo Chaves Velasquez

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Física

Universidad de Nariño

10 de junio de 2026



Contenido

Introducción

Marco teórico

Desarrollo

- Resultados generales

- Estrella S2

- Estrella S38

- Estrella S55

- Estrella S62

- Estrella S4711

- Estrella S4714

- Estrella S4715

Conclusiones



Escanea el código para acceder al material complementario.



Introducción

Marco teórico

Desarrollo

Conclusiones

Planteamiento del problema

Motivación

Planteamiento del problema

Motivación

- Verificación de la precesión del argumento sobre el pericentro debido a la relatividad general $\Delta\omega_p(\text{RG})$ para la estrella S2 luego de su último paso por el pericentro [1].

Planteamiento del problema

Motivación

- Verificación de la precesión del argumento sobre el pericentro debido a la relatividad general $\Delta\omega_p(\text{RG})$ para la estrella S2 luego de su último paso por el pericentro [1].
- Proximidad de las estrellas tipo S al agujero negro supermasivo (SMBH) Sagittarius A* (Sgr A*).

Planteamiento del problema

Motivación

- Verificación de la precesión del argumento sobre el pericentro debido a la relatividad general $\Delta\omega_p(\text{RG})$ para la estrella S2 luego de su último paso por el pericentro [1].
- Proximidad de las estrellas tipo S al agujero negro supermasivo (SMBH) Sagittarius A* (Sgr A*).

Objetivos

Planteamiento del problema

Motivación

- Verificación de la precesión del argumento sobre el pericentro debido a la relatividad general $\Delta\omega_p(\text{RG})$ para la estrella S2 luego de su último paso por el pericentro [1].
- Proximidad de las estrellas tipo S al agujero negro supermasivo (SMBH) Sagittarius A* (Sgr A*).

Objetivos

Objetivo general: Analizar la dinámica orbital newtoniana del sistema de 7 estrellas tipo S de corto período que rodean al SMBH Sgr A* mediante una simulación de N cuerpos, los cuales están constituidos por una muestra total de 44 de ellos utilizando el software REBOUND [2, 3].

Objetivos específicos:



Figura 1: Vista frontal de la Vía Láctea. Tomada por NASA

A detailed illustration of a spiral galaxy, showing a bright yellowish-white central bulge and a dense, swirling disk of blue and white stars and dust, set against a black background.

- ▶ Masa Sgr A*: $(4.30 \pm 0.01) \times 10^6 M_{\odot}$. [4].
- ▶ radio de Schwarzschild de Sgr A*: 0.08 UA.
- ▶ Distancia del sol a Sgr A*: (8.18 ± 0.01) kpc [5, 6, 7].
- ▶ Visible en: radio, infrarrojo (IR), rayos X.

7



5

Introducción

Marco teórico

Desarrollo

Conclusiones

11

El problema de N cuerpos

La dinámica de un sistema compuesto por N cuerpos que interactúan gravitacionalmente, vista desde el formalismo newtoniano, se explica mediante la segunda ley de Newton y la Ley de la gravitación universal.

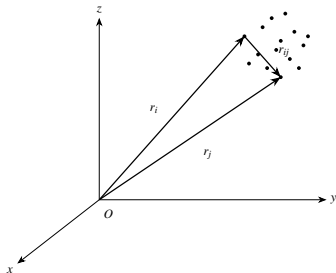


Figura 5: Representación gráfica del problema de N cuerpos.

Problema de N cuerpos - Formalismo newtoniano

$$\frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = G \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N \frac{m_j}{r_{ij}^3} (\vec{r}_j - \vec{r}_i). \quad (1)$$

11

Constantes de integración

Al trabajar con sistemas cerrados, se obtienen constantes o integrales de movimiento independientes.

Problema de N cuerpos - constantes de movimiento

Constantes de integración

Al trabajar con sistemas cerrados, se obtienen constantes o integrales de movimiento independientes.

Problema de N cuerpos - constantes de movimiento

► **Conservación del momento lineal:**

$$\vec{r}_{cm} = \vec{c}_1 t + \vec{c}_2. \quad (2)$$

$$\vec{v}_{cm} = v_{x_{cm}}\hat{i} + v_{y_{cm}}\hat{j} + v_{z_{cm}}\hat{k} = \vec{c}_2; \quad \vec{c}_1, \vec{c}_2 = \overrightarrow{\text{constant}}. \quad (3)$$

Constantes de integración

Al trabajar con sistemas cerrados, se obtienen constantes o integrales de movimiento independientes.

Problema de N cuerpos - constantes de movimiento

► **Conservación del momento lineal:**

$$\vec{r}_{cm} = \vec{c}_1 t + \vec{c}_2. \quad (2)$$

$$\vec{v}_{cm} = v_{x_{cm}}\hat{i} + v_{y_{cm}}\hat{j} + v_{z_{cm}}\hat{k} = \vec{c}_2; \quad \vec{c}_1, \vec{c}_2 = \overrightarrow{\text{constante}}. \quad (3)$$

► **Conservación del momento angular específico:**

$$\vec{h} = h_x \hat{i} + h_y \hat{j} + h_z \hat{k} = \vec{c}_3; \quad \vec{c}_3 = \overrightarrow{\text{constante}}. \quad (4)$$

13

13



El problema de 2 cuerpos - elementos orbitales

vector excentricidad

$$\vec{e} = \frac{\vec{v} \times \vec{h}}{\mu} - \frac{\vec{r}}{r} \quad (8)$$

- ▶ La magnitud de $\vec{e}$ se denomina **excentricidad** y define la forma de la órbita.
- ▶ El vector excentricidad apunta siempre hacia **el pericentro**.
- ▶ El ángulo formado por el vector excentricidad y el radio vector se denomina **Anomalía verdadera (f)**.

15

15

17

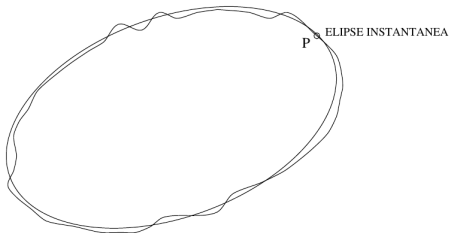


Figura 8: Determinación de una órbita osculante (elipse instantánea) en el punto P a partir de la órbita real en un instante dado de tiempo.

Perturbación de parámetros orbitales

$$\begin{aligned} a &\rightarrow \Delta a(\mathbf{N}), e \rightarrow \Delta e(\mathbf{N}), i \rightarrow \Delta i(\mathbf{N}) \\ \omega &\rightarrow \Delta \omega(\mathbf{N}) \rightarrow \Delta \omega_p(\mathbf{N}), \Omega \rightarrow \Delta \Omega(\mathbf{N}) \end{aligned} \quad (21)$$

17

Teoría de la relatividad general

Solución de Schwarzschild

$$g_{\mu\nu} = \text{diag} \left(- \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2, \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right)^{-1}, r^2, r^2 \sin^2 \theta \right) \quad (24)$$

Teoría de la relatividad general

Solución de Schwarzschild

$$g_{\mu\nu} = \text{diag} \left(- \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2, \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right)^{-1}, r^2, r^2 \sin^2 \theta \right) \quad (24)$$

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}. \quad (25)$$

Teoría de la relatividad general

Solución de Schwarzschild

$$g_{\mu\nu} = \text{diag} \left(- \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2, \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right)^{-1}, r^2, r^2 \sin^2 \theta \right) \quad (24)$$

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}. \quad (25)$$

$$\Delta\omega_p(RG) = \frac{6\pi GM}{a(1-e^2)c^2}. \quad (26)$$

Teoría de la relatividad general

Solución de Schwarzschild

$$g_{\mu\nu} = \text{diag} \left(- \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2, \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right)^{-1}, r^2, r^2 \sin^2 \theta \right) \quad (24)$$

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}. \quad (25)$$

$$\Delta\omega_p(RG) = \frac{6\pi GM}{a(1 - e^2)c^2}. \quad (26)$$

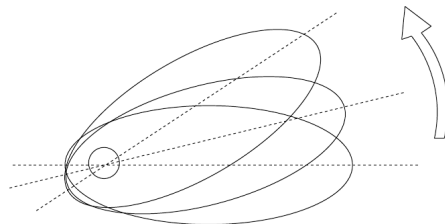


Figura 9: Precesión relativista del pericentro (precesión prógrada).

Introducción

Marco teórico

Desarrollo

- Resultados generales

- Estrella S2

- Estrella S38

- Estrella S55

- Estrella S62

- Estrella S4711

- Estrella S4714

- Estrella S4715

Conclusiones

20

21

Precesión del parámetro orbital ω predicho por la teoría de la relatividad general ($\Delta\omega_p(\text{RG})$)

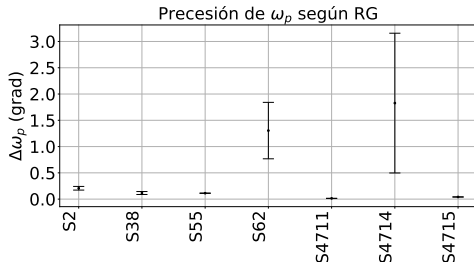


Figura 13: Gráfico de dispersión del argumento del pericentro para cada estrella de corto período.

Estrella	$\Delta\omega_p(\text{RG})$ (grad)	σ (grad)
S2	0.207	0.035
S38	0.116	0.028
S55	0.1125	0.0037
S62	1.30	0.54
S4711	0.014	0.021
S4714	1.8	1.3
S4715	0.0411	0.0032

Cuadro 5: Desviación del argumento del pericentro para estrellas internas (el valor reportado para S2 fue el medido por [1]).



Contribución de $\Delta\omega_p(N)$ a $\Delta\omega_p(RG)$

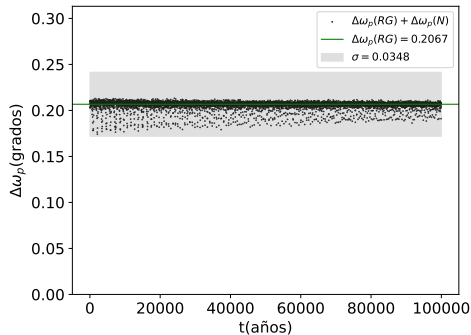


Figura 15: Contribución total a la medición de la desviación del argumento sobre el pericentro $\Delta\omega_p(RG)$ de la estrella S2.

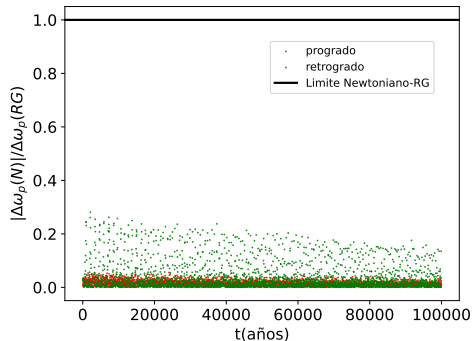


Figura 16: Comparación entre $\Delta\omega_p(RG)$ y $\Delta\omega_p(N)$ para la estrella S2.

Rapidez y distancia de la estrella S2

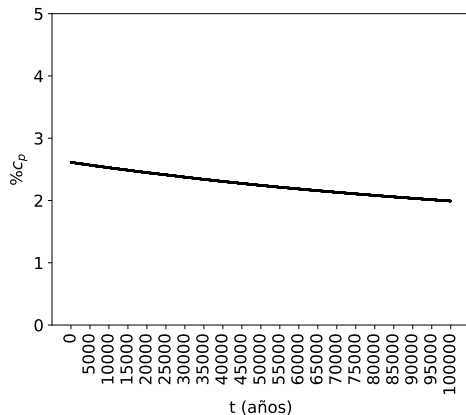


Figura 17: Rapidez de la estrella S2 en términos de porcentaje de la rapidez de la luz en el vacío (c) durante cada paso por el pericentro.

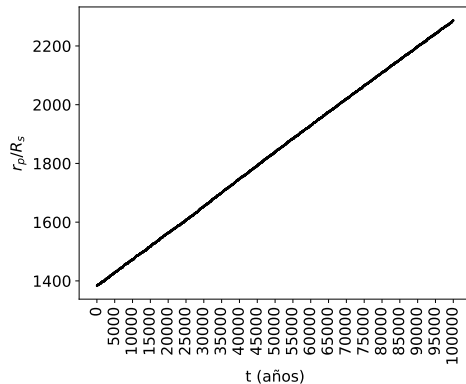


Figura 18: Comparación entre el radio de precesión de la estrella S2 con el radio de Schwarzschild de Sgr A*.

Perturbación de los parámetros orbitales

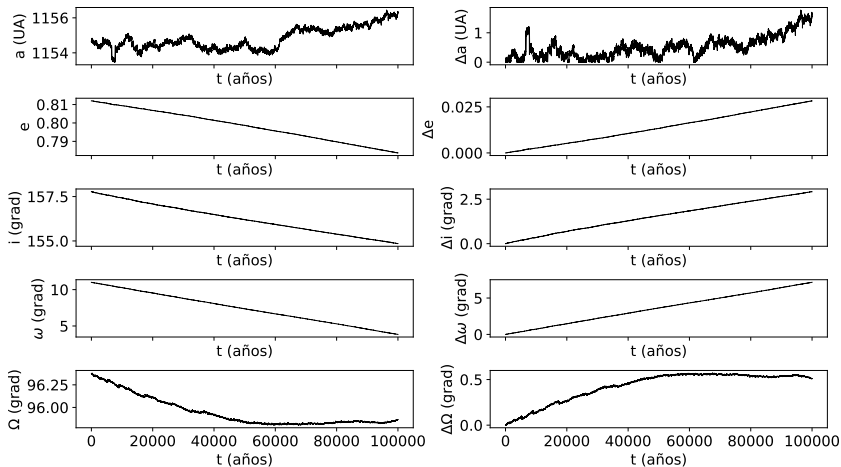


Figura 19: Evolución temporal de los elementos orbitales de la estrella S38.

Contribución de $\Delta\omega_p(N)$ a $\Delta\omega_p(RG)$

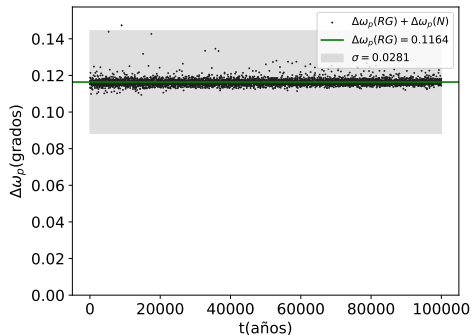


Figura 20: Contribución total a la medición de la desviación del argumento sobre el pericentro $\Delta\omega_p(RG)$ de la estrella S38.

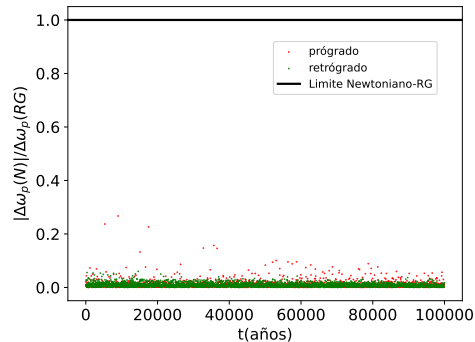


Figura 21: Comparación entre el radio de precesión de la estrella S38 con el radio de Schwarzschild de Sgr A*

Rapidez y distancia de la estrella S38

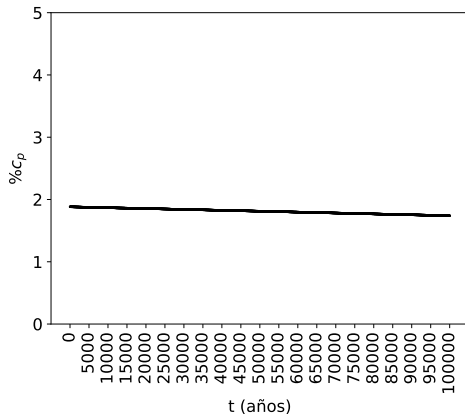


Figura 22: Rapidez de la estrella S38 en términos de porcentaje de la rapidez de la luz en el vacío c durante cada paso por el pericentro.

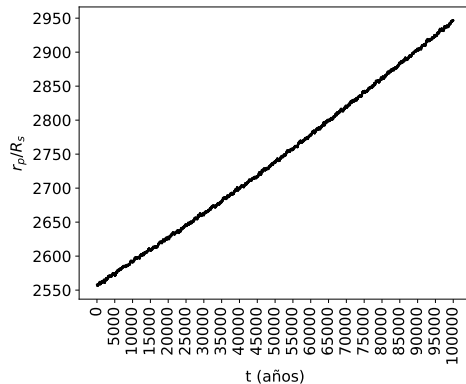


Figura 23: Comparación entre el radio de precesión de la estrella S38 con el radio de Schwarzschild de Sgr A*.

Perturbación de los parámetros orbitales

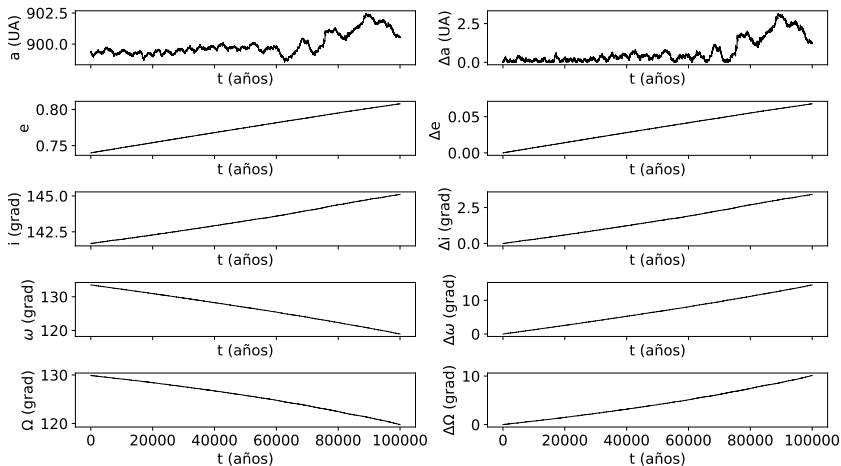


Figura 24: Evolución temporal de los elementos orbitales de la estrella S55.

Contribución de $\Delta\omega_p(N)$ a $\Delta\omega_p(RG)$

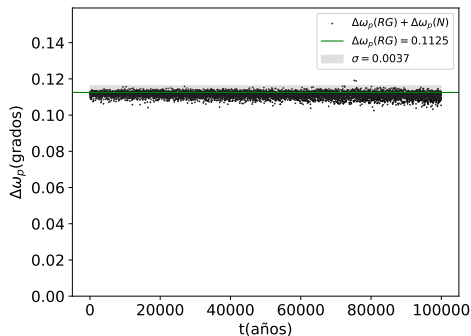


Figura 25: Contribución total a la medición de la desviación del argumento sobre el pericentro $\Delta\omega_p(RG)$ de la estrella S55.

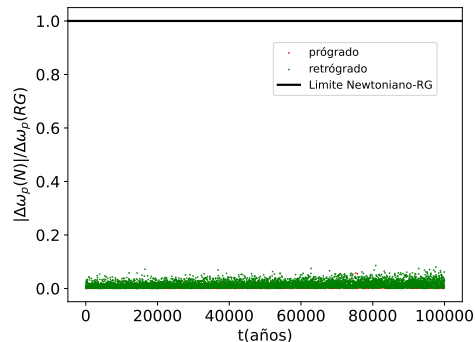


Figura 26: Comparación entre el radio de precesión de la estrella S55 con el radio de Schwarzschild de Sgr A*.

Rapidez y distancia de la estrella S55

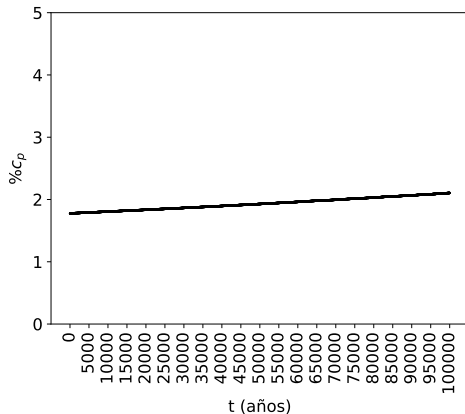


Figura 27: Rapidez de la estrella S55 en términos de porcentaje de la rapidez de la luz en el vacío c durante cada paso por el pericentro.

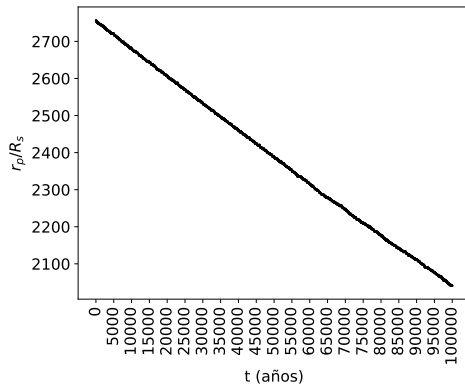


Figura 28: Comparación entre el radio de precesión de la estrella S55 con el radio de Schwarzschild de Sgr A*.

Perturbación de los parámetros orbitales

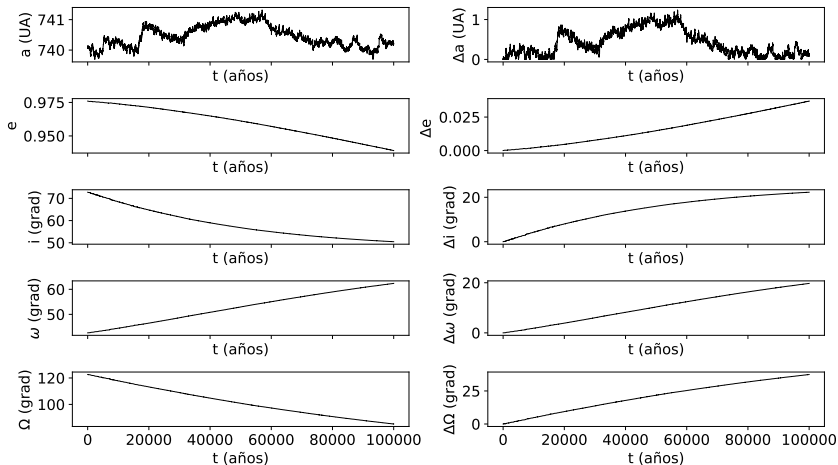


Figura 29: Evolución temporal de los elementos orbitales de la estrella S62.

Contribución de $\Delta\omega_p(N)$ a $\Delta\omega_p(RG)$

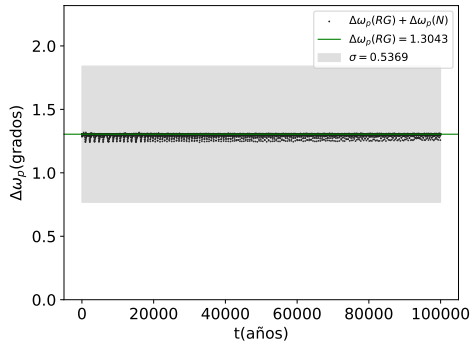


Figura 30: Contribución total a la medición de la desviación del argumento sobre el pericentro $\Delta\omega_p(RG)$ de la estrella S62.

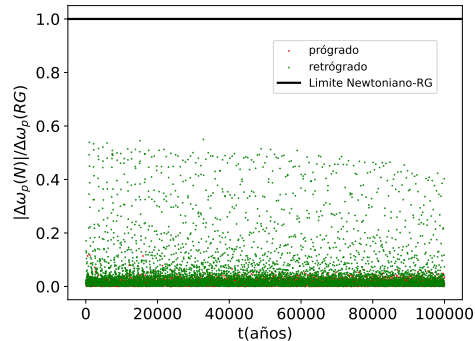


Figura 31: Comparación entre el radio de precesión de la estrella S62 con el radio de Schwarzschild de Sgr A*.

Rapidez y distancia de la estrella S62

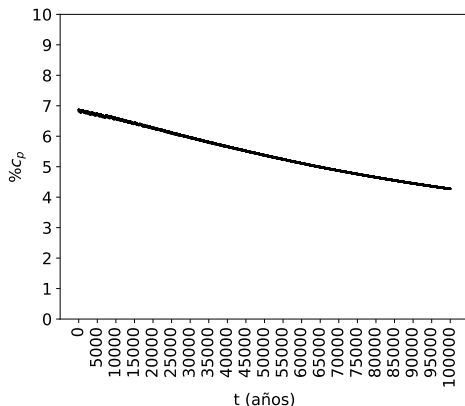


Figura 32: Rapidez de la estrella S62 en términos de porcentaje de la rapidez de la luz en el vacío c durante cada paso por el pericentro.

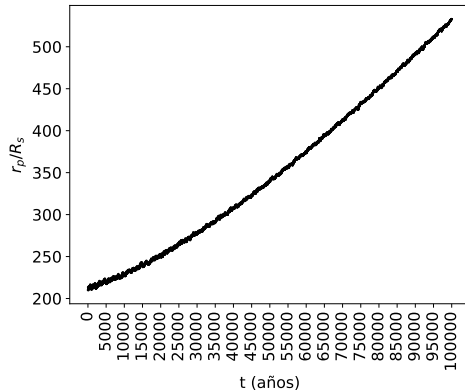


Figura 33: Comparación entre el radio de precesión de la estrella S62 con el radio de Schwarzschild de Sgr A*.

Perturbación de los parámetros orbitales

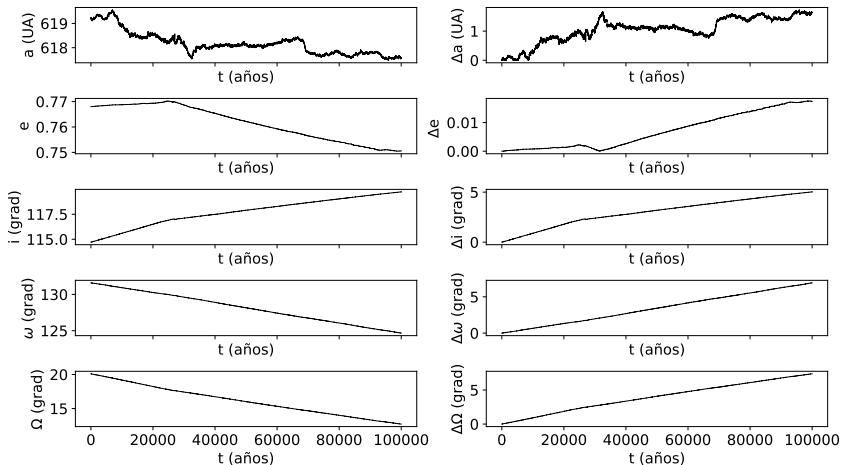


Figura 34: Evolución temporal de los elementos orbitales de la estrella S4711.

Contribución de $\Delta\omega_p(N)$ a $\Delta\omega_p(RG)$

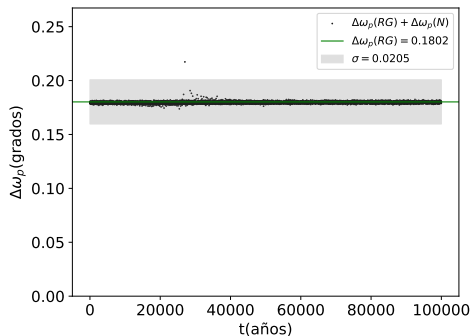


Figura 35: Contribución total a la medición de la desviación del argumento sobre el pericentro $\Delta\omega_p(RG)$ de la estrella S4711.

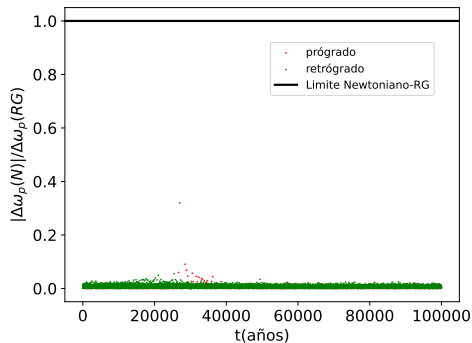


Figura 36: Comparación entre el radio de precesión de la estrella S4711 con el radio de Schwarzschild de Sgr A*.

Rapidez y distancia de la estrella S4711

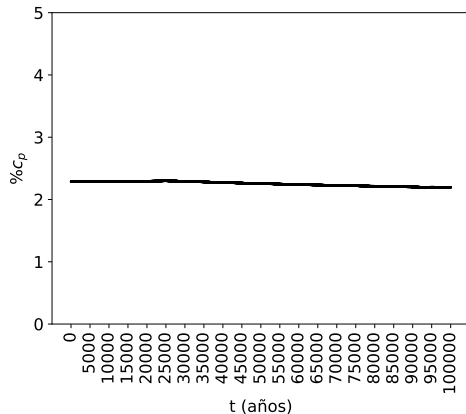


Figura 37: Rapidez de la estrella S4711 en términos de porcentaje de la rapidez de la luz en el vacío c durante cada paso por el pericentro.

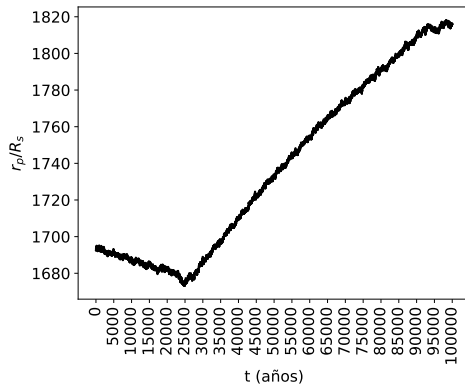


Figura 38: Comparación entre el radio de precesión de la estrella S4711 con el radio de Schwarzschild de Sgr A*.

Perturbación de los parámetros orbitales

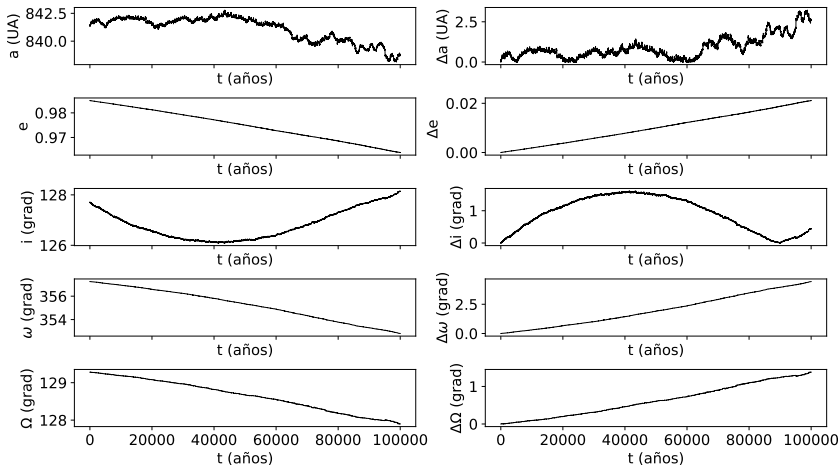


Figura 39: Evolución temporal de los elementos orbitales de la estrella S4714.

Contribución de $\Delta\omega_p(N)$ a $\Delta\omega_p(RG)$

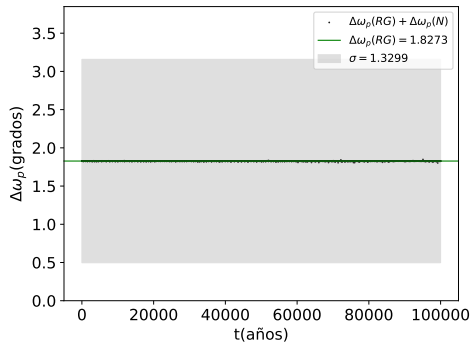


Figura 40: Contribución total a la medición de la desviación del argumento sobre el pericentro $\Delta\omega_p(RG)$ de la estrella S4714.

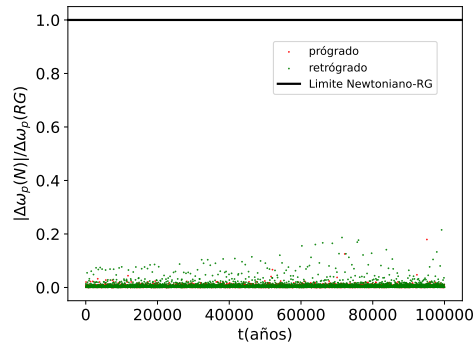


Figura 41: Comparación entre el radio de precesión de la estrella S4714 con el radio de Schwarzschild de Sgr A*.

Rapidez y distancia de la estrella S4714

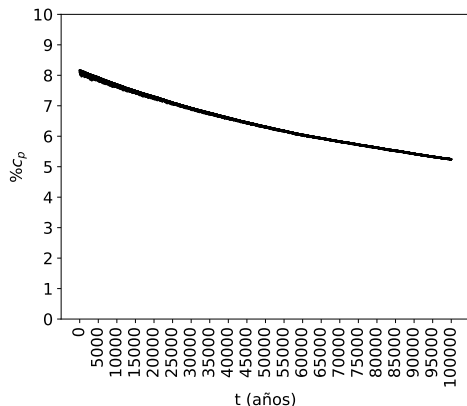


Figura 42: Rapidez de la estrella S4714 en términos de porcentaje de la rapidez de la luz en el vacío c durante cada paso por el pericentro.

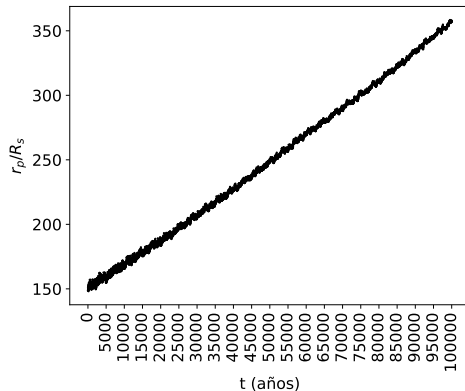


Figura 43: Comparación entre el radio de precesión de la estrella S4714 con el radio de Schwarzschild de Sgr A*.

Perturbación de los parámetros orbitales

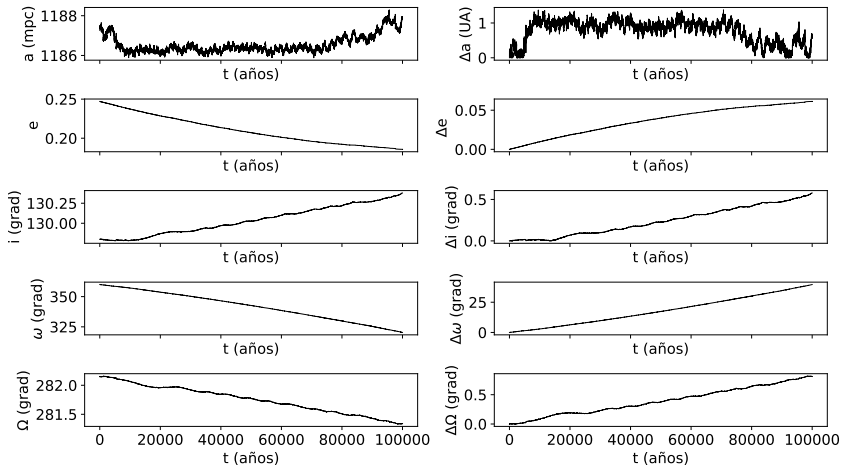


Figura 44: Evolución temporal de los elementos orbitales de la estrella S4715.

Contribución de $\Delta\omega_p(N)$ a $\Delta\omega_p(RG)$

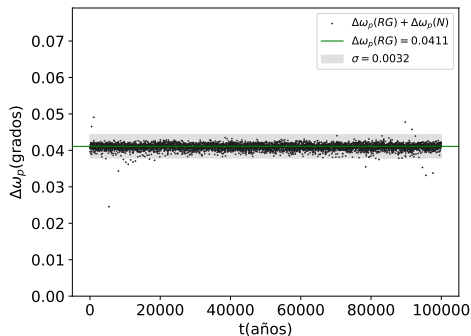


Figura 45: Contribución total a la medición de la desviación del argumento sobre el pericentro $\Delta\omega_p(RG)$ de la estrella S4715.

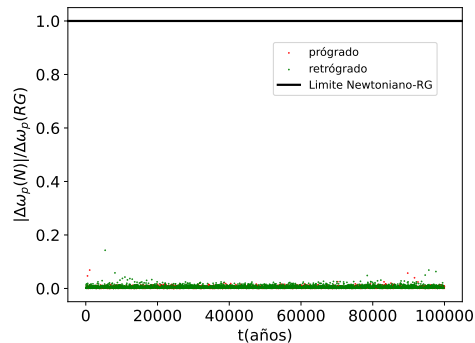


Figura 46: Comparación entre el radio de precesión de la estrella S4715 con el radio de Schwarzschild de Sgr A*.

Rapidez y distancia de la estrella S4715

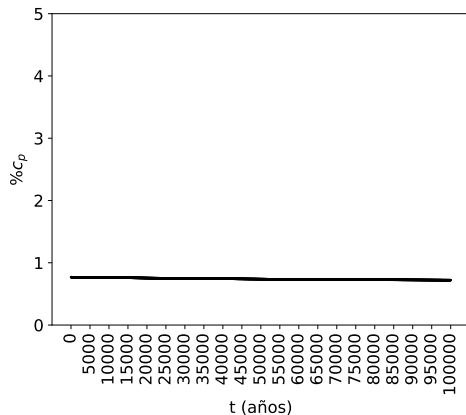


Figura 47: Rapidez de la estrella S4715 en términos de porcentaje de la rapidez de la luz en el vacío c durante cada paso por el pericentro.

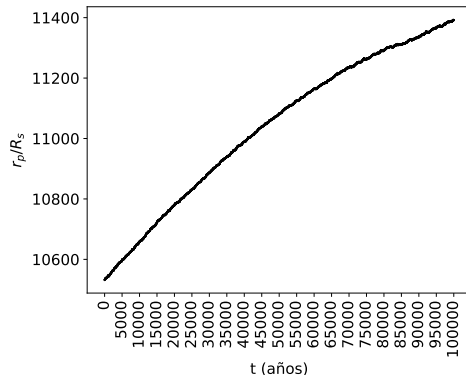


Figura 48: Comparación entre el radio de precesión de la estrella S4715 con el radio de Schwarzschild de Sgr A*.

Introducción

Marco teórico

Desarrollo

Conclusiones



- 46



- 46



- 46



Gracias por su atención.



Astronomy and Astrophysics, 636, 4 2020.



Kinematic structure of the galactic center s cluster.

The Astrophysical Journal, 896:100, 6 2020.



S62 and s4711: Indications of a population of faint fast moving stars inside the s2 orbit – s4711 on a 7.6 year orbit around sgr a*.

8 2020.





A. Drescher, F. Eisenhauer, N. M. Förster Schreiber, A. Foschi, P. Garcia, F. Gao, E. Gendron, R. Genzel, S. Gillessen, M. Habibi, X. Haubois, G. Heiße, T. Henning, S. Hippler, M. Horrobin, L. Jochum, L. Jocu, A. Kaufer, P. Kervella, S. Lacour, V. Lapeyrère, J. B. Le Bouquin, P. Léna, D. Lutz, T. Ott, T. Paumard, K. Perraut, G. Perrin, O. Pfuhl, S. Rabien, J. Shanguan, T. Shimizu, S. Scheithauer, J. Stadler, A. W. Stephens, O. Straub, C. Straubmeier, E. Sturm, L. J. Tacconi, K. R. W. Tristram, F. Vincent, S. von Fellenberg, F. Widmann, E. Wiegrecht, E. Wozorrek, J. Woillez, S. Yazici, A. Young, and G. Zins.
The mass distribution in the galactic centre from interferometric astrometry of multiple stellar orbits.
12 2021.



F. Eisenhauer, R. Genzel, T. Alexander, R. Abuter, T. Paumard, T. Ott, A. Gilbert, S. Gillessen, M. Horrobin, S. Trippe, H. Bonnet, C. Dumas, N. Hubin, A. Kaufer, M. Kissler-Patig, G. Monnet, S. Strobele, T. Szeifert, A. Eckart, R. Schodel, and S. Zucker.

Sinfoni in the galactic center: Young stars and infrared flares in the central light-month.
The Astrophysical Journal, 628:246–259, 7 2005.



Richard de Grijs and Giuseppe Bono.

Clustering of local group distances: publication bias or correlated measurements? iv. the galactic center.
10 2016.



S. Gillessen, F. Eisenhauer, S. Trippe, T. Alexander, R. Genzel, F. Martins, and T. Ott.
Monitoring stellar orbits around the massive black hole in the galactic center.
10 2008.



Preguntas

- ▶ ¿Las estrellas tipo S van a evolucionar en Supernovas o serán destruidas antes?
- ▶ ¿Trabajo en reducción de datos o descripción del proceso?
- ▶ ¿Los efectos de la gravitación considerando N cuerpos es bien menor que los efectos relativistas?
- ▶ Los picos en los gráficos de conservación de las cantidades de movimiento.
- ▶ Escritura de los programas