



Guías de ejercicios Astronomía General **2022, 2023, 2024**

Para Licenciatura en Física.

Estudiante de doctorado
Felipe Ávila Vera

A lo largo de este texto se presentan diferentes ejercicios que intentan abordar los temas del curso de pregrado Astronomía General, para la Licenciatura en Física en la Universidad de Valparaíso. Los ejercicios constituyen un recopilatorio de problemas originales o adaptados de los libros de referencia del curso: An Introduction to Stellar Astrophysics, LeBlanc, 2010; Fundamental Astronomy, Karttunen et al., 2017; An introduction to modern astrophysics, Second Edition, Carroll y Ostlie, 2017; y Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction, Schneider, 2015.

Cualquier duda o consulta, contactarse con felipe.avilav@postgrado.uv.cl.

Guía semana 1

El Sistema solar

Felipe Avila-Vera
Curso Astronomía General

3 de agosto de 2025

1. Sabiendo que la tierra demora 3.15×10^7 segundos en girar alrededor del Sol, y que la distancia promedio al Sol es $\sim 1.496 \times 10^{11}$ m, demuestre que la masa del Sol es de 1.99×10^{30} Kg. (Use $G = 6.673 \times 10^{-11}$ Nm²/kg²)
2. Sabiendo que el radio de la Tierra en el Ecuador es de 6378.1 km, calcule la diferencia en la aceleración de gravedad para ambos sitios. (Use $G = 6.673 \times 10^{-11}$ Nm²/kg², $M_{\oplus} = 5.9742 \times 10^{24}$ kg)
3.
 - a) El telescopio espacial Hubble se encuentra en una órbita casi circular, a unos 610 km sobre la superficie de la Tierra. Calcula su periodo orbital.
 - b) Los satélites de comunicaciones y meteorológicos suelen colocarse en órbitas geosíncronas "de estacionamiento". sobre la Tierra. Se trata de órbitas en las que los satélites pueden permanecer fijos sobre un punto concreto de la superficie terrestre. la superficie de la Tierra. ¿A qué altitud deben situarse estos satélites?
 - c) ¿Es posible que un satélite en órbita geosíncrona permanezca "aparcado" sobre cualquier lugar en la superficie de la Tierra? ¿Por qué sí o por qué no? (Use $M_{\oplus} = 5.9742 \times 10^{24}$ kg, $R_{\oplus} = 6,357$ km)
4. Deduzca la relación entre el período sinódico de un planeta y su período sidéreo (Ec. 1.1 Carroll). Considera tanto los planetas inferiores como los superiores.
5.
 - a) Los períodos sinódicos orbitales observados de Venus y Marte son 583.9 días y 779.9 días, respectivamente. Calcula sus períodos sidéreos.
 - b) ¿Cuál de los planetas superiores tiene el período sinódico más corto? ¿Por qué?

Guía semana 2

Sistemas de Coordenadas

Felipe Avila-Vera
Curso Astronomía General

3 de agosto de 2025

1. De los siguientes objetos celestes, ¿cuáles son visibles desde los distintos observatorios en: La Serena, Honolulu, Daejeon y Edimburgo?
 - a) Galaxia Andrómeda RA= 10.684793, Dec= 41.269065
 - b) Omega Centauri RA= 201.691209, Dec= -47.476862
 - c) 47 Tucanae RA= 6.022333, Dec= -72.081444
 - d) M9 RA= 259.799086, Dec= -18.516257
 - e) M15 RA= 322.493238, Dec= 12.166832
 - f) El Joyero RA= 193.404486, Dec= -60.356314
2. Proxima Centauri (α Centauri C) es la estrella más cercana al Sol y es parte de un sistema triple de estrellas. Tiene coordenadas J2000.0 $(\alpha, \delta) = (14^{\text{h}}29^{\text{m}}42,95^{\text{s}}, -62^{\circ}40'46,1'')$. La estrella más brillante, Alpha Centauri (α Centauri A), tiene coordenadas J2000.0 $(\alpha, \delta) = (14^{\text{h}}39^{\text{m}}36,50^{\text{s}}, -60^{\circ}50'02,3'')$.
 - a. Cuál es la separación angular entre Proxima Centauri y Alpha Centauri?
 - b. Si la distancia a Proxima Centauri es $4,0 \times 10^{16}\text{m}$, qué tan lejos está esta estrella de Alpha Centauri?

Guía semana 3

Espectro electromagnético

Felipe Avila-Vera
Curso Astronomía General

3 de agosto de 2025

1. La estrella Alfa Tucanae (Ra=22h18min30.18s, Dec=-60°15'34,2") está a una distancia de 199 años luz de la Tierra. Calcule su paralaje en grados.
2. Una estrella A está a 12 pc de la Tierra y la estrella b a 20 parsecs. ¿Cuál posee la mayor paralaje?
3. El angulo de paralaje de Sirius (Ra=06:45:08.9173, Dec=16:42:58.017) es 0.379 arcsec
 - a) Calcule la distancia a Sirius en (i) parsecs; (ii) Años luz; (iii) UA; (iv) m.
 - b) Determine el módulo de distancia de Sirius.
4. La magnitud absoluta de una estrella es $M = -2$ y su magnitud aparente es $m = 8$. Determine la distancia entre la Tierra y esta estrella.
5. Si la magnitud aparente del Sol es $m_{\odot} = -26.83$. Calcular:
 - a) La magnitud absoluta del Sol (M_{\odot}) y su módulo de distancia.
 - b) La magnitud aparente en la banda V, si su magnitud absoluta en esa banda es $M_v = 4.84$
 - c) Determine las magnitudes M_B , B, M_U , y U del sol. Si U-V = 0.650 y U-B = 0.195.
6. Considere a la estrella Zeta Puppis (ζ Puppis, Ra=08:03:35.1:, Dec=40:00:11.6), suponga que esta estrella emite como un cuerpo negro esférico con una temperatura superficial de 40,000K y un radio de $14R_{\odot}$ y a una distancia de 330 pc de la Tierra. Determine:
 - a) Luminosidad.
 - b) Magnitud bolométrica absoluta.
 - c) Magnitud bolométrica aparente.
 - d) Modulo de distancia.
 - e) Flujo radiante en la superficie de la estrella.
 - f) Flujo radiante en la superficie de la Tierra
 - g) Longitud de onda máxima (λ_{max})

Guía semana 4

Primer Repaso

Felipe Avila-Vera
Curso Astronomía General

3 de agosto de 2025

1. Sabiendo que la fuerza de atracción gravitacional entre dos cuerpos de masa m_1 y m_2 que se encuentran a una distancia d (entre sus centros) es: $F = \frac{Gm_1m_2}{d^2}$, y que la aceleración centrípeta para una órbita circular de radio d a velocidad v es $a_c = \frac{v^2}{d}$:
 - a) Derive la tercera ley de Kepler.
 - b) El telescopio espacial Hubble orbita la Tierra a una altura $h \sim 600$ km sobre la superficie terrestre, en una órbita circular. En base a la respuesta que obtuvo en a) y asumiendo un radio ecuatorial de ~ 6400 km para la Tierra, determine el tiempo que tarda el telescopio en dar una vuelta alrededor de la Tierra.
 - c) ¿A qué altura sobre la superficie terrestre debería ubicarse un satélite para que sea geoestacionario?
2. Preguntas conceptuales:
 - a) Explique qué es el movimiento retrógrado, y cuántas veces podemos observarlo.
 - b) ¿Qué es la velocidad de escape y de qué parámetros depende?
 - c) ¿Qué se entiende por resonancia orbital, y por qué esto causa gaps en las órbitas de los asteroides del sistema solar?
 - d) ¿Cuál es la causa más probable para el origen del ciclo de las manchas solares? (explique).
3.
 - a) En qué dirección geográfica y a qué altitud se encuentra el polo sur celeste visto desde Valparaíso (lat = -33° , long = -72°)?
 - b) ¿Cuál es la máxima y mínima declinación observable desde Valparaíso?
 - c) En qué fechas aproximadamente el Sol se encuentra a su máxima declinación, mínima declinación y declinación = 0° ?
 - d) ¿En qué mes del año conviene más observar un objeto con RA=12:00:00? Por qué?
4. Explique con un diagrama la diferencia entre día sideral y día solar. ¿Cuánto dura cada uno?
5. La estrella Dschubba (delta Scorpio) se puede aproximar por una esfera de temperatura superficial $22,000K$ y un radio de $5e9m$. Considere que está a una distancia de $123pc$ de la Tierra. Determine:
 - a) Su luminosidad bolométrica.
 - b) Magnitud bolométrica absoluta (Pista: compare con los datos del Sol).
 - c) Magnitud bolométrica aparente.
 - d) Su módulo de distancia.
 - e) La longitud de onda donde el espectro emitido alcanza su máximo.
6. Demuestre que el color B-V (con magnitudes aparentes) de un objeto es igual al color $M_B - M_V$ (con magnitudes absolutas) del mismo objeto, aunque no esté a 10 pc.

7. Si la magnitud aparente del Sol es $m_{\odot} = -26.83$. Calcular:
- a) La magnitud absoluta del Sol (M_{\odot}) y su módulo de distancia.
 - b) La magnitud aparente en la banda V, si su magnitud absoluta en esa banda es $M_v = 4.84$
 - c) Determine las magnitudes M_B , B, M_U , y U del sol. Si $U-V = 0.650$ y $U-B = 0.195$.

Guía semana 5

Segundo Repaso

Felipe Avila-Vera
Curso Astronomía General

3 de agosto de 2025

1. El Sol se encuentra a una distancia de unos 8 kpc del centro galáctico y se mueve alrededor de éste en una trayectoria circular con una velocidad de unos 220 km/s. Haz una estimación aproximada de la masa de la Galaxia.
2. La temperatura efectiva del sol, T_{eff} es de 5800 K y su radio es de 7×10^{10} cm. Calcular la luminosidad del sol.
3. Una vela tiene una luminosidad en la banda visual de 3 Watts. Cuando esta vela se coloca a una distancia de 3 km tiene el mismo flujo aparente que una determinada estrella. Supongamos que esta estrella tiene la misma luminosidad que el Sol en la banda visual (aproximadamente 10^{26} Watts). A qué distancia se encuentra la estrella.
4. Dos estrellas tienen la misma temperatura superficial. La estrella 1 tiene un radio 2.5 veces mayor que el de la estrella 2. La estrella 1 está diez veces más lejos que la estrella 2. ¿Cuál es la diferencia de magnitud aparente entre las dos estrellas?
5. Una gigante roja tiene un radio 500 veces mayor que el del Sol y una temperatura 0.5 mayor que la del Sol. Hallar su luminosidad bolométrica (total) en unidades de la luminosidad bolométrica del Sol.
6. Si la magnitud absoluta del Sol es 5, utiliza la luminosidad del Sol para hallar la luminosidad de una estrella de magnitud 0.
7. Si el cúmulo de estrellas está formado por 10^6 estrellas cuya magnitud absoluta es la misma que la del sol, calcule la magnitud combinada del cúmulo si se encuentra a una distancia de 10 pc.

$$\Delta t(\theta; \beta)_{12} = \frac{D_{OL} D_{OS}}{c D_{LS}} (1 + z_L) \Delta \phi(\theta; \beta)_{12} \quad (1)$$

Guía semana 6

Transporte de energía

Felipe Avila-Vera
Curso Astronomía General

3 de agosto de 2025

1. Utilizando la velocidad de la raíz media del cuadrado, v_{rms} , estima el camino libre medio de las moléculas de nitrógeno en tu aula a temperatura ambiente (300 K). ¿Cuál es el tiempo medio entre colisiones? Supongamos que el radio de una molécula de nitrógeno es de 0,1 nm y que la densidad del aire es de 1.2 kg m^{-3} .
2. Según un modelo Solar, la densidad central de este es 1.53 kg m^{-3} y la opacidad media de Rosseland en el centro es de $0.217 \text{ m}^2\text{kg}^{-1}$.
 - a) Calcule el camino libre medio de un fotón en el centro del Sol
 - b) Calcule el tiempo medio que tardaría el fotón en escapar del Sol si este camino libre medio se mantuviera constante durante el viaje del fotón hasta la superficie. (Ignora el hecho de que los fotones identificables se destruyen y crean constantemente a través de la absorción, la dispersión y la emisión)
3. Calcular la energía potencial gravitatoria de una estrella de masa M_* , y radio R_* suponiendo que posee una densidad constante.
4. Con la ayuda del teorema virial, estimar la temperatura media en el interior de una estrella con M_* y radio R_* .
5. Con la ayuda del equilibrio hidrostático, estima la presión central en una estrella con masa M_* y radio R_* .

Guía semana 7

Espectroscopía

Felipe Avila-Vera
Curso Astronomía General

3 de agosto de 2025

1. La estrella de Benard (ra: 17h 57min 48.50s, dec: +04° 41' 36,21", M4.0V), nombrada en honor al astrónomo estadounidense Edward E. Banard (1857-1923), es una estrella anaranjada de la constelación de Ofiuco. Tiene el mayor movimiento propio conocido ($\mu = 10.3577''\text{yr}^{-1}$) y el cuarto mayor ángulo de paralaje ($p = 0.54901''$). Sólo las estrellas del sistema triple α Centauri tienen ángulos de paralaje mayores. En el espectro de la estrella de Barnard, se observa que la línea de absorción del H tiene una longitud de onda de 656.034 nm cuando se mide desde el suelo.
 - a) Determine la velocidad radial de la estrella de Barnard.
 - b) Determine la velocidad transversal de la estrella de Barnard.
 - c) Calcule la velocidad de la estrella de Barnard a través del espacio.
2. Demuestre que $hc \simeq 1240 \text{ eV nm}$.
3. Calcule las energías y las longitudes de onda en el vacío de todos los posibles fotones que se emiten cuando el electrón se desplaza de la órbita $n = 3$ a la $n = 1$ en el átomo de hidrógeno.
4. Encuentre el fotón de menor longitud de onda en el vacío emitido por una transición de electrones hacia abajo en las series de Lyman, Balmer y Paschen. Estas longitudes de onda se conocen como los límites de la serie. En qué regiones del espectro electromagnético se encuentran estas longitudes de onda.
5. Las enanas blancas son estrellas muy densas, con sus iones y electrones empaquetados extremadamente juntos. Se puede considerar que cada electrón se encuentra dentro de una región de tamaño $\Delta x \approx 1.5 \times 10^{-12} \text{ m}$. Utiliza el principio de incertidumbre de Heisenberg, para estimar la velocidad mínima del electrón. ¿Crees que los efectos de la relatividad serán importantes para estas estrellas?
6. Un electrón pasa aproximadamente 10^{-8} s en el primer estado excitado del átomo de hidrógeno antes de hacer una transición descendente espontánea hacia el estado de tierra
 - a) Utilice el principio de incertidumbre de Heisenberg para determinar la incertidumbre δE en la energía del primer estado excitado.

Guía semana 8

Formación estelar

Felipe Avila-Vera
Curso Astronomía General

3 de agosto de 2025

1. Calcule la anchura equivalente de una línea rectangular con una anchura de 4 \AA y con un flujo en su interior que es $2/3$ del de su valor en el continuo.
2. Calcule la masa de Jeans para una nube molecular media. Típicamente, las nubes moleculares tienen masas del orden de $1000 M_{\odot}$ o más, temperaturas del orden de 10 K y densidades numéricas de aproximadamente $1000 \text{ moléculas de H}_2 \text{ por cm}^3$. Discuta los resultados en relación con la formación de estrellas.
3. Calcule el tiempo de caída libre de una nube molecular de una masa solar.
4. Demuestre que para una nube homogénea con temperatura T y densidad ρ , la longitud de Jeans es:

$$R_J = \sqrt{\frac{15kT}{4\pi\rho\mu m_H G}}$$

5. Estima el límite de Eddington para $\eta \text{ Car}$ (ra: $10^h 45^m 03.53^s$, dec: $-59^\circ 41' 04.0515''$) y compara tu respuesta con la luminosidad de esa estrella. ¿Es tu solución consistente con su comportamiento? ¿Por qué o por qué no?

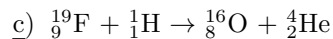
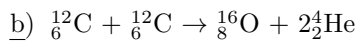
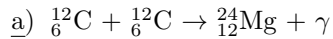
Guía semana 9

Tercer repaso

Felipe Avila-Vera
Curso Astronomía General

3 de agosto de 2025

1. Calcula a qué distancia podrías ver a través de la atmósfera terrestre si ésta tuviera la opacidad de la fotosfera solar. Utilice el valor de la opacidad del Sol de $\kappa_{500} = 0.003 \text{ m}^2/\text{kg}$ y una densidad de la atmosfera terrestre de 1.2 kg/m^{-3} para la densidad de la atmósfera terrestre.
2. Invocando el teorema virial, haz una estimación aproximada de la temperatura "media" del Sol.
3. Calcule el tiempo de vida en la secuencia principal de una estrella de tipo B con una masa de $M_{\star} = 16M_{\odot}$ y luminosidad de $L_{\star} = 8000L_{\odot}$ y de una estrella tipo M con masa $M_{\star} = 0.1M_{\odot}$ y luminosidad $L_{\star} = 8 \times 10^{-4}L_{\odot}$
4. Calcule la cantidad de energía liberada o absorbida en las siguientes reacciones (exprese sus respuestas en MeV)



La masa de ${}_6^{12}\text{C}$ es 12.000 u, por definición, y la masa de ${}_2^4\text{He}$, ${}_8^{16}\text{O}$, ${}_9^{19}\text{F}$, y ${}_{12}^{24}\text{Mg}$ son 4.0026032 u, 15.9949 u, 18.99 u y 23.98504 u, respectivamente. Finalmente decida si estas reacciones son exotérmicas o endotérmicas.

5. Estimar los tiempos de vida de combustión de hidrógeno de las estrellas cercanas a los extremos inferior y superior de la secuencia principal. El extremo inferior de la secuencia principal se produce cerca de $0.072 M_{\odot}$, con $\log_{10} T_e = 3.23$ y $\log_{10}(L/L_{\odot}) = 4.3$. Por otro lado una estrella de $85M_{\odot}$ cerca del limite superior de la secuencia principal posee una temperatura efectiva y una luminosidad de $\log_{10} T_e = 4.705$ y $\log_{10}(L/L_{\odot}) = 6.006$, respectivamente. Asuma que la estrella de $0.072 M_{\odot}$ es totalmente convectiva, por lo que, a través de la mezcla convectiva, todo su hidrógeno, y no sólo el 10 % interior, queda disponible para la combustión.
6. En 1792, el matemático francés Simon-Pierre de Laplace (1749-1827) escribió: “Una hipotética estrella, de la misma densidad que la Tierra, y cuyo diámetro sería doscientas cincuenta veces mayor que el del Sol, no permitiría, como consecuencia de su atracción, que ninguno de sus rayos llegara hasta nosotros.” Utiliza la mecánica newtoniana para calcular la velocidad de escape de la estrella de Laplace y además calcule radio de Schwarzschild de esta.

Guía semana 10

Multiplicidad (binarias, múltiples, cúmulos..)

Felipe Avila-Vera
Curso Astronomía General

3 de agosto de 2025

1. Considere dos estrellas en órbita alrededor de un centro de masa mutuo. Si a_1 es el semieje mayor de la órbita de la estrella de masa m_1 y a_2 es el semieje mayor de la órbita de la estrella de masa m_2 , demuestre que el semieje mayor de la órbita de la masa reducida viene dado por $a = a_1 + a_2$.
2. Supongamos que dos estrellas están en órbitas circulares alrededor de un centro de masa mutuo y están separadas por una distancia a . Supongamos también que el ángulo de inclinación i y sus radios estelares son r_1 y r_2
 - a) Encuentra una expresión para el menor ángulo de inclinación que apenas produzca un eclipse.
 - b) Si $a = 2 \text{ AU}$, $r_1 = 10R_\odot$, y $r_2 = 1R_\odot$, ¿qué valor mínimo de i producirá un eclipse?
3. Sirio es una binaria visual con un período de 49.94 años. Su paralaje trigonométrico medido es de $0.37921 \text{ arcsec} \pm 0.00158 \text{ arcsec}$ y, asumiendo que el plano de la órbita está en el plano del cielo, la verdadera extensión angular del semieje mayor de la masa reducida es de 7.61 arcsec . La relación de las distancias de Sirio A y Sirio B al centro de masa es $a_A/a_B = 0.466$.
 - a) Encuentre la masa de cada miembro del sistema.
 - b) La magnitud bolométrica absoluta de Sirio A es 1.36, y Sirio B tiene una magnitud bolométrica absoluta de 8.79. Determina sus luminosidades. Expresa tus respuestas en términos de la luminosidad del Sol.
 - c) La temperatura efectiva de Sirio B es de aproximadamente $24.790 \text{ K} \pm 100 \text{ K}$. Estime su radio y compare su respuesta con los radios del Sol y de la Tierra.
4. A partir de las curvas de luz y velocidad de un sistema estelar binario eclipsante y espectroscópico, se determina que el periodo orbital es de 6.31 años, y las velocidades radiales máximas de las estrellas A y B son de 5.4 kms^{-1} y 22.4 kms^{-1} , respectivamente. Además, el periodo de tiempo entre el primer contacto y el mínimo de luz ($t_b - t_a$) es de 0.58 días, la duración del mínimo primario ($t_c - t_b$) es de 0.64 días, y las magnitudes bolométricas aparentes del máximo, el mínimo primario y el mínimo secundario son de 5.40 magnitudes, 9.20 magnitudes y 5.44 magnitudes, respectivamente. A partir de esta información, suponiendo órbitas circulares, hallar el:
 - a) Relación de las masas estelares.
 - b) Suma de las masas (suponiendo $i \cong 90^\circ$).
 - c) Masas individuales.
 - d) Radios individuales (suponiendo que las órbitas son circulares).
 - e) Relación de las temperaturas efectivas de las dos estrellas.

Guía semana 11

Via Lactea, Galaxias)

Felipe Avila-Vera
Curso Astronomía General

3 de agosto de 2025

Aproximadamente, ¿cuántas veces ha dado el Sol la vuelta al centro de la Galaxia desde la formación de la estrella?

1. Suponiendo que la ecuación:

$$\rho(r) = \frac{\rho}{1 + (r/a)^2}, \quad (2)$$

es válida para cualquier distancia arbitraria desde el centro de la Galaxia, demuestre que la cantidad de materia oscura interior a un radio r viene dada por la expresión:

$$M_r = 4\pi\rho a^2 \left[r - a \tan^{-1} \frac{r}{a} \right]$$

2. Si $5.4 \times 10^{10} M_\odot$ de materia oscura se encuentran a un radio de 50 kpc del centro galáctico, determina ρ_0 en unidades de $M_\odot \text{pc}^{-3}$. Repita su cálculo si $1.9 \times 10^{12} M_\odot$ se encuentra dentro de un radio de 230 kpc del centro galáctico. Supongamos que $a = 2.8$ kpc
1. Demuestre que la rotación del cuerpo rígido cerca del centro galáctico es consistente con una distribución de masa esféricamente simétrica de densidad constante.
2. ¿Es la distribución de masa en el halo de materia oscura (Eq. 10.8) consistente con la rotación de un cuerpo rígido cerca del centro galáctico? ¿Por qué o por qué no?

Si la tasa de acreción en el centro galáctico es de $10^{-3} M_\odot \text{yr}^{-1}$ y si ha permanecido constante durante los últimos 5.000 millones de años, ¿cuánta masa ha caído en el centro durante ese periodo de tiempo? Compara tu respuesta con la masa estimada de un posible agujero negro supermasivo que resida en el centro de nuestra Galaxia.

Guía semana 11

Escalas de distancia, ley de Hubble y Cosmología)

Felipe Avila-Vera
Curso Astronomía General

3 de agosto de 2025

1. Las tres estrellas rojas más brillantes de la galaxia M101 (la galaxia "Molinete") tienen magnitudes visuales de $V = 20.9$. Suponiendo que hay 0.3 mag de extinción, ¿cuál es la distancia a M101? ¿Cómo se compara esto con la distancia de 7.5 Mpc encontrada usando las cefeidas clásicas?
2. Para la galaxia NGC 5585, la cantidad $2v_r/\sin i = 218 \text{ kms}^{-1}$, y su magnitud H aparente es $H = 9.55$ (ya corregida por la extinción). Utiliza el método de Tully-Fisher para determinar la distancia a esta galaxia (tome $c=3.61$).
3. Derivar la ecuación de aceleración ($\frac{d^2 a}{dt^2}$)
4. Einstein introdujo originalmente la constante cosmológica Λ para estabilizar su modelo de un universo de polvo sin presión contra la expansión o contracción.
 - a) Encontrar una expresión para Λ en términos de la densidad ρ_m de un modelo estático de un universo de polvo sin presión con una constante cosmológica.
 - b) Encuentra una expresión de la curvatura k para este modelo estático. ¿Es este modelo de universo cerrado, abierto o plano?
 - c) Explique por qué el modelo estático de Einstein se encuentra en un equilibrio inestable, por lo que cualquier desviación del equilibrio (expansión o contracción) tenderá a aumentar.

Referencias

- Carroll, Bradley W. y Dale A. Ostlie (2017). An introduction to modern astrophysics, Second Edition.
- Karttunen, Hannu et al. (2017). Fundamental Astronomy. DOI: 10 . 1007 / 978 - 3 - 662 - 53045-0.
- LeBlanc, Francis (2010). An Introduction to Stellar Astrophysics.
- Schneider, Peter (2015). Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction. DOI: 10. 1007/978-3-642-54083-7.