



Desafío Científico CESAR

El Universo Oculto

Aprendiendo sobre lentes gravitacionales y materia oscura en el Universo con las misiones científicas de la ESA/NASA

Guía del estudiante





Tabla de contenidos

Tu reto científico	4
Fase 0	6
Fase 1	8
Actividad 1. Refrescando conceptos	9
Actividad 2. Gravedad y teorías relacionadas	10
Actividad 2.1. La teoría de Newton.....	13
Actividad 2.2. Teoría de la Relatividad de Einstein.....	20
Actividad 2.3. Newton vs Einstein.....	29
Actividad 3. Óptica geométrica	32
Actividad 4. Lente gravitacional (LG)	35
Actividad 4.1. Efectos de las lentes gravitacionales (LG)	38
Actividad 4.2. Reproduce el efecto de una lente gravitacional con una copa de vino	40
Actividad 4.3. Patrones observados de lentes gravitacionales (GL)	41
Actividad 4.4. Calcular la masa de una lente gravitacional creando un anillo de Einstein	45
Actividad 5. La materia oscura y su descubrimiento	48
Actividad 5.1. Contenido de masa inferido de una lente gravitacional	51
Actividad 6. Galaxias y tipos	52
Actividad 6.1. Clasificación de galaxias	55
Actividad 6.2. Componentes de una galaxia.....	63
Actividad 6.3. Cuásares	67
Actividad 7. El efecto Doppler	68
Actividad 7.1. El efecto Doppler (acústico)	70
Actividad 7.2. Desplazamiento al rojo y al azul de las galaxias	71
Actividad 8. Movimiento rotacional	74
Actividad 8.1. Curvas de rotación de galaxias	75
Actividad 8.2. Predicción clásica de curvas de rotación en galaxias.....	77
Actividad 8.3. Calcular la masa de una galaxia	81
Actividad 9. Coordenadas celestes: Ecuatoriales vs. Galácticas	82
Actividad 9.1. Sistema de Coordenadas Ecuatoriales (J2000)	83
Actividad 9.2. Sistema de Coordenadas Galácticas (GAL)	85
Actividad 9.3. Ecuatorial vs. Galáctico.....	86
Actividad 10. Lentes gravitacionales y exploración de materia oscura por la Agencia Espacial Europea	89



Fase 2	93
Actividad 11. ¿Qué has aprendido hasta ahora?	94
Actividad 12. Solicita una videollamada con el equipo CESAR	94
Fase 3	95
Actividad 13. Introducción al trabajo científico	96
Actividad 14. Desafío científico 1: Los anillos de Einstein	98
Actividad 14.1. ¡Comencemos!.....	98
Actividad 14.2. Familiarizarse con ESASky	99
Actividad 14.3. Toma una foto de un anillo de Einstein	101
Actividad 14.4. Calcular la masa de una lente gravitacional	105
Actividad 15. Desafío científico 2: Un estudio de caso real de un cuásar con lente gravitacional e imagen cuadripolar de SDSS J1004 + 4112	113
Actividad 15.1. Analizar el objeto SDSS J1004+4112	113
Actividad 15.2. Crea un artículo científico para tu investigación	120
Actividad 16. Desafío científico 3: Un estudio de caso real de las curvas de rotación de las galaxias espirales (La Vía Láctea y M31)	124
Actividad 16.1. Predicción teórica de curvas de rotación.....	125
Actividad 16.2. Comparar la curva de rotación predicha y observada de una galaxia.....	127
Actividad 16.3. Cómo hacer un cálculo aproximado de la masa total de una galaxia	129
Actividad 16.4. Evalúa tus resultados y obtén tus propias conclusiones.....	134
Actividad 16.5. Presenta tus estudios.....	135
Fase 4	138
Actividad 17. Autoevaluación y coevaluación	139
Actividad 17.1. Cuéntanos tu aventura.....	140
Enlaces	141
Créditos	143
Agradecimientos y menciones	Error! Bookmark not defined.



Tu reto científico

Encontrando el Universo oculto

La gravedad es un fenómeno que experimentamos en nuestra vida cotidiana. Desde el momento en que nacemos, inevitablemente notamos que las cosas "caen" debido a algún tipo de "atracción" invisible. Pero la gravedad **es mucho más importante de lo que podríamos pensar**.



Figura 1: (Izquierda) Representación esquemática de lentes gravitacionales astronómicas. (Créditos: <http://1.bp.blogspot.com>). Figura 2: (Derecha) Contenido de energía y materia de nuestro universo. (Créditos: <http://4.bp.blogspot.com>).

En este Desafío Científico estudiarás los misteriosos patrones de distorsión que aparecen alrededor de algunas galaxias masivas. ¡Aprenderás más acerca de la esquiwa **Materia Oscura**, sobre la cual se ha descubierto recientemente (en caso de confirmarse esta hipótesis), **que podría constituir el 85% de la masa de nuestro Universo!**



Sigue el camino de la famosa científica Vera Rubin (ver

Figura 3 y descubre cómo encaja la gravedad en esta historia de proporciones galácticas.

¿Estás listo para este desafío?

Figura 3: Imágenes de la joven Vera Rubin. Primera científica en trabajar en curvas de rotación de galaxias. (Créditos: es.gizmodo.com)



Fase 0

Pon las cosas en contexto. Recomendamos a los estudiantes que vean estos **videos**:

- [Esto es ESA](#) (10 min)
- [ESAC: La ventana de la ESA al Universo](#) (3 min)
- [Presentación al CESAR](#) (6 min)
- Aquí hay otro conjunto complementario de [videos](#).

Recomendamos **trabajar en equipos** de 4-6 personas con un rol claro asignado en relación a alguna profesión. **Los estudiantes están obligados a fil en la Tabla 0.**

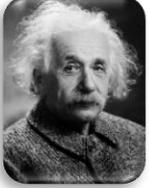
ID de desafío	Equipo (1-6):			
Nombres				
Profesión	Matemático/Ingeniero de software	Astrofísica	Ingeniero	Físico
Papeles	Lidera la corrección de los cálculos.	Liderar el uso del telescopio virtual ESASky y otras plataformas.	Encontrar la estrategia óptima acordada entre los miembros del equipo y su correcta ejecución.	Búsqueda de procesos energéticos y la composición de objetos celestes.
	Katherine Johnson 	Vera Rubín 	Samantha Cristoforetti 	María Curie 
	Steve Wozniak 	Matt Taylor 	Pedro Duque 	Albert Einstein 

Tabla 0: Asignación de roles e identificación del equipo. A ser llenado por cada grupo de estudiantes.

Nota: La documentación hace uso del [Sistema Internacional de Unidades](#).



Fase 1

Actividad 1. Refrescando conceptos

Los estudiantes deben refrescar algunos conceptos antes de comenzar con el Desafío Científico. Tú decides cuál es la mejor manera de hacerlo con tu clase. Ofrecemos un conjunto de enlaces que pueden ser divertidos de explorar. ¡Disfrútalos!

Tema	Referencias
Fuerza	QuantumFracture: Las Leyes de Newton en 2 minutos ⇒ https://www.youtube.com/watch?v=X-BTbwj3xU
Masa y peso	Física Aplicada: ¿Masa o peso? ⇒ https://www.youtube.com/watch?v=STjs6pRWHSE
Geodésicas	Derivando: ¿Cuál es el camino más corto para un avión? ⇒ https://www.youtube.com/watch?v=fMIGdxVH19g
Observación astronómica	Natural Portraits: INICIACIÓN A LA ASTRONOMÍA ⇒ https://www.youtube.com/watch?v=IATW8UyAV0E
Lentes ópticas	Cuarentaydos: ÓPTICA, ESPEJOS Y LENTES ⇒ https://www.youtube.com/watch?v=kk-74Gqduyw

Actividad 2. Gravedad y teorías relacionadas

Todos sabemos lo que es la gravedad, ¿verdad? ¡Veamos! En esta actividad, hay que pensar en **qué es la gravedad** y las diferentes teorías que se han desarrollado para entender sus consecuencias. Trata de responder a estas preguntas con tu conocimiento actual.

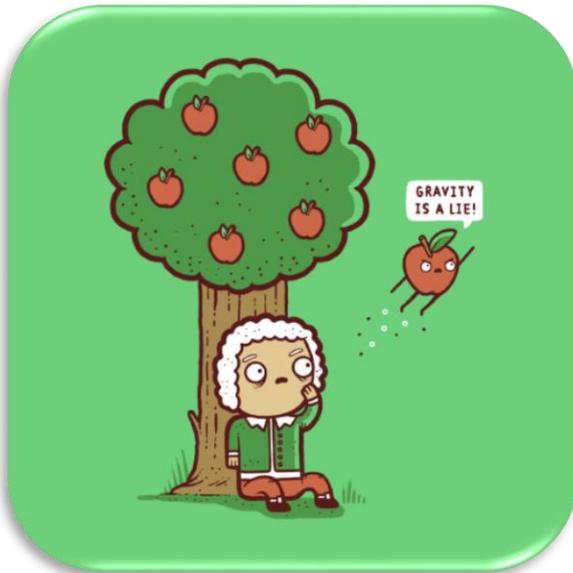


Figura 4: Representación humorística de la famosa anécdota de la gravedad de Isaac Newton. (Créditos: [teepublic](#))



Figura 5: Imagen de astronautas de la ESA explorando 0G, similar a estar en el espacio sin gravedad. (Créditos: ESA)

1. ¿Cómo explicarías qué es la gravedad?



2. ¿Qué teorías de la gravedad conoces? ¿Cuáles son sus principales diferencias?

3. ¿Conoces alguna medición que haya confirmado la Relatividad General?

4. ¿Por qué crees que la gravedad es relevante y los físicos ponen tanto esfuerzo en entenderla?

En caso de que sientas que las preguntas anteriores fueron demasiado difíciles, ¡mira el siguiente video e inténtalo de nuevo!

5. Mira el siguiente video (MinutoDeFísica: ¿Qué es la gravedad?) sobre la gravedad y revise sus respuestas.

⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=eDElh75Vq3c>

Actividad 2.1. La teoría de Newton

Método1: Aprender con recursos visuales

1. QuantumFracture: Las Leyes de Newton en 2 minutos
⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=X-BTbjw3xU>
2. Cuarentaydos: Leyes de KEPLER, campo GRAVITATORIO y TODO lo que NECESITAS para la PAU.
⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=vwPeRsreInQ>
3. Escribe lo que has aprendido y comenta la Figura 7 con tus propias palabras.

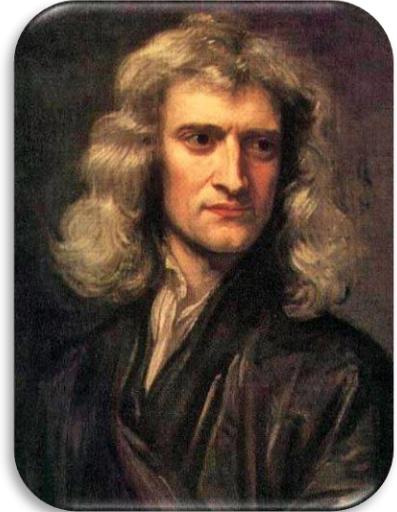


Figura 6: Isaac Newton.
(Créditos:
[commons.wikimedia](https://commons.wikimedia.org/))

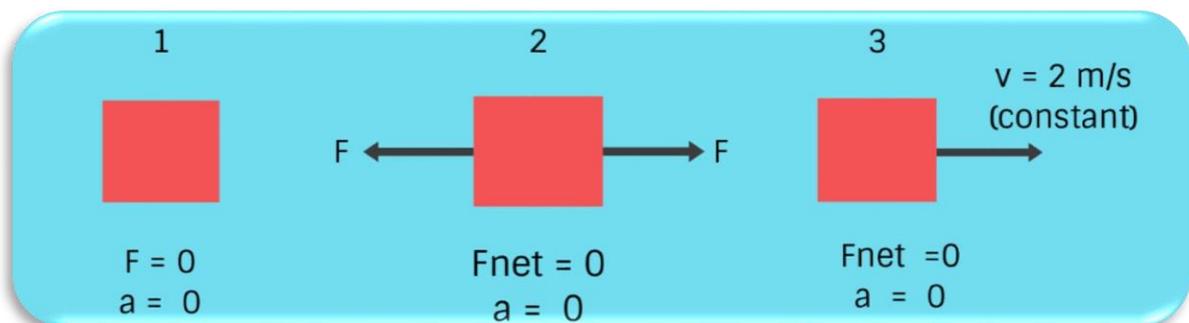


Figura 7: Representación esquemática de las leyes del movimiento de Newton. (Créditos: 1.bp.blogspot.com)

Método 2: Aprender con la teoría

Desde el comienzo de la historia humana, físicos, matemáticos, filósofos, han tratado de explicar por qué la Tierra nos atrae. Pero no fue hasta 1687 que Sir Isaac Newton publicó sus famosos Principios Matemáticos de filosofía natural, comúnmente conocidos como Principia, donde presentó las Leyes de la Gravitación Universal, dando una explicación matemática al fenómeno de la gravedad.

En el lenguaje actual, esta ley establece: Toda masa puntual atrae a cualquier otra masa puntual con una fuerza que actúa a lo largo de la línea que cruza los dos puntos. La fuerza es proporcional al producto de las dos masas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Ecuación 1: Ley Universal de la Gravedad de Newton

La Ecuación 1 es la representación matemática de la Ley Universal de la Gravitación. F representa la fuerza de gravedad entre dos objetos, G es la constante gravitacional, m_1 y m_2 las masas de los dos objetos y r la distancia entre ellos. En la Figura 8, F_1 representa la fuerza que m_2 ejerce sobre m_1 y F_2 representa la fuerza que m_1 ejerce sobre m_2 . Nótese que ambas fuerzas tienen la misma magnitud $F_1 = F_2$.

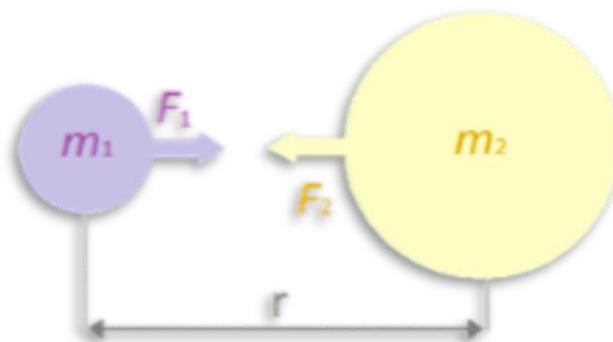


Figura 8: Representación visual de la fuerza gravitacional entre dos cuerpos descrita por Newton. (Créditos: thestargarden.co.uk)

A pesar del éxito de la contribución de Newton, esta resultó ser solo una buena aproximación para campos gravitacionales débiles. Sin embargo, sigue siendo útil y aplicada hoy en día para describir las fuerzas que experimentamos. Gracias a las leyes del movimiento de Newton, sabemos que las fuerzas que actúan sobre un cuerpo, pueden generalmente describirse como el producto de su masa multiplicada por su aceleración ($F = m \cdot a$).

Por ejemplo, el peso de los cuerpos en la Tierra se puede calcular sustituyendo en la Ecuación 1 las masas m_1 y m_2 por la masa del objeto (m) y la masa de la Tierra ($M_{Earth}=5,9722 \cdot 10^{24}$ kg); adicionalmente, la distancia r debe sustituirse por R_{earth} (6371 km) el radio de la Tierra. Esto proporciona la famosa expresión $F = mg$, donde g es la aceleración sobre la superficie de la Tierra.

$$F_{\text{peso}} = mg = G \frac{m \cdot M_{\text{Tierra}}}{R_{\text{Tierra}}^2}$$

Ecuación 2: Ley de la Gravedad de Newton aplicada al cálculo del peso en el planeta Tierra.

Esta evaluación permitió a la ley de la gravitación universal de Newton explicar el peso experimentado en la Tierra, pero también el movimiento de los objetos estelares mediante la reproducción de las relaciones experimentales detectadas por Kepler (en particular la Tercera Ley de Kepler).

$$\frac{T_1^2}{r_1^3} = \frac{T_2^2}{r_2^3}$$

Ecuación 3: Tercera ley de Kepler. La relación entre el período (T) de un planeta al cuadrado y su radio orbital en cubos es constante para todos los planetas del sistema.

La tercera ley de Kepler establece: **La relación entre el período al cuadrado de una órbita y su radio al cubo es constante e igual para cualquier planeta que orbite el Sol. Esto también es válido para cualquier sistema similar de órbitas (por ejemplo, planetas y sus lunas).**

Actividad 2.1.1. Conexión entre las leyes de Newton y Kepler

Método 1: Aprender con recursos visuales

1. Ve el siguiente video (Cuarentaydos: Leyes de KEPLER, campo GRAVITATORIO) y explica lo que has entendido con tus propias palabras.

⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=vwPeRsreInQ>

2. Demostrar que la ley de la gravedad de Newton es compatible con la de Kepler para el caso de órbitas circulares equiparando las fuerzas centrípeta y gravitacional (ver Figura 9).

$$F_{centripeta} = F_{gravitacional}$$
$$m \cdot r \cdot \omega^2 = G \frac{m \cdot M}{r^2} \Rightarrow$$

Método 2: Aprender con la teoría

Consideremos un cuerpo orbitando alrededor de otro en un movimiento constante (ver Figura 9). Una forma de describir matemáticamente este escenario es equiparando las fuerzas centrífuga y gravitacional (centrípeta)¹

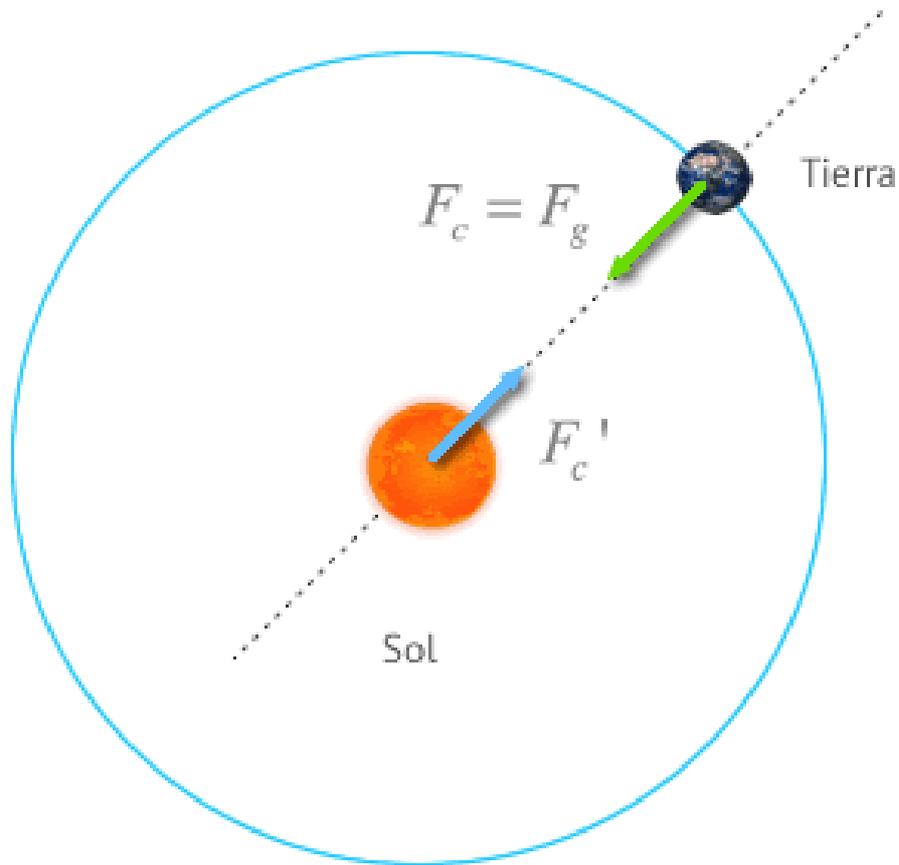


Figura 9: Fuerzas que actúan sobre la Tierra causando su movimiento orbital. (Créditos: <https://www.fisicalab.com>)

$$F_{centripeta} = F_{gravitacional}$$

$$F_{centripeta} = m \cdot a_{centripeta} = m \cdot r \cdot \omega^2$$

¹ Observa que la única fuerza real sería la gravitacional (según la teoría de Newton); la centrífuga aparece como consecuencia de la elección de coordenadas polares.



$$F_{gravitational} = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

Donde m es la masa del objeto en órbita, r es el radio de la órbita, ω es la velocidad orbital, a es la aceleración, M es la masa del objeto central y G es la constante gravitacional ($G = 6,674 \cdot 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$). Por lo tanto:

$$m \cdot r \cdot \omega^2 = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

Para órbitas circulares, la velocidad angular puede asociarse al período (T) del movimiento:

$$\omega = 2\pi/T$$

$$m \cdot r \cdot \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} \Rightarrow \frac{r^3}{T^2} = const$$

La tercera ley de Kepler (ver Ecuación 3) revela como constante la ración entre el período al cuadrado (T^2) y el radio al cubo (r^3) de una órbita.

Es importante saber que no solo las órbitas circulares son una solución a la ley de Newton, sino también su forma generalizada: **las elipses**; que resultan ser una descripción de las órbitas planetarias más precisas. Kepler pudo derivar sus leyes de las observaciones astronómicas.

- Ahora que aprendiste sobre la conexión entre la Tercera Ley de Kepler y la segunda Ley de Newton, trata de encontrar los valores constantes de la tercera Ley de Kepler para Marte y la Tierra.

Planeta	Distancia media al Sol (en UA)	Periodo (en días)	$\frac{r^3}{T^2} \left(\frac{UA^3}{días^2} \right)$
Tierra		365,25	
Marzo		689,95	



Tabla 1: Tercera ley de Kepler aplicada a la Tierra y Marte.

Consejo 1: Dado que el resultado de la tercera ley de Kepler es un valor constante para cualquier planeta del sistema, puedes usar las unidades que prefieras.

Consejo 2: Para distancias planetarias, es conveniente utilizar la Unidad Astronómica UA (la distancia media de la Tierra al Sol) y días.

1 UA = 149.597.900 km

Actividad 2.2. Teoría de la Relatividad de Einstein

Método 1: Aprender con recursos visuales

1. CuriosaMente: Teoría de la Relatividad Especial.
⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=HVbWtwQLHKk>
2. Cuarentaydos: Introducción a la RELATIVIDAD ESPECIAL y GENERAL.
⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=S6iuOpyXdec>
3. Date un Voltio: La Paradoja de los Gemelos ¡RESUELTA!
⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=IPEo0wDiU0c>
4. Escribe tus ideas sobre este tema.

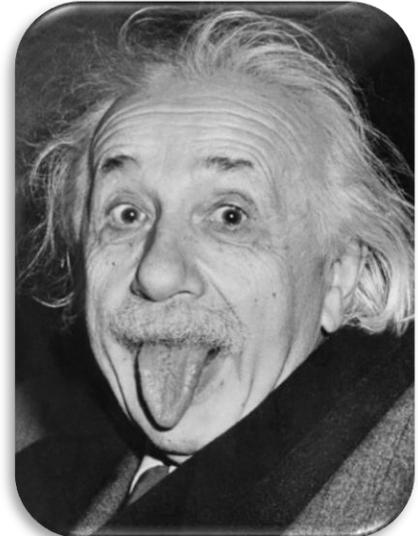


Figura 10: Albert Einstein.
(Créditos:
[commons.wikimedia](https://commons.wikimedia.org/))

Método 2: Aprender con la teoría

Albert Einstein fue un físico muy talentoso que revolucionó el mundo con sus descubrimientos. Einstein partió de dos hipótesis para desarrollar sus ideas:

Actividad 2.2.1. Teoría de la Relatividad Especial

- I. Las leyes de la física deben ser las mismas para cualquier observador no acelerado (marco de referencia inercial).
- II. La velocidad de la luz en el vacío es medida como la misma por cualquier observador.

Para que esto fuera cierto (postulados I y II) el tiempo y el espacio ya **no podían ser independientes** entre sí. Se definió un nuevo concepto, llamado **continuo espacio-tiempo, con cuatro dimensiones (x, y, z, t)**, para unificar el espacio y el tiempo en uno solo. Para entender las implicaciones de estos postulados, consulta la Figura 11.

La Relatividad Especial explica las consecuencias de objetos que se mueven rápidamente en un espacio-tiempo plano (aproximación para pequeñas distancias, masas y escalas de tiempo)

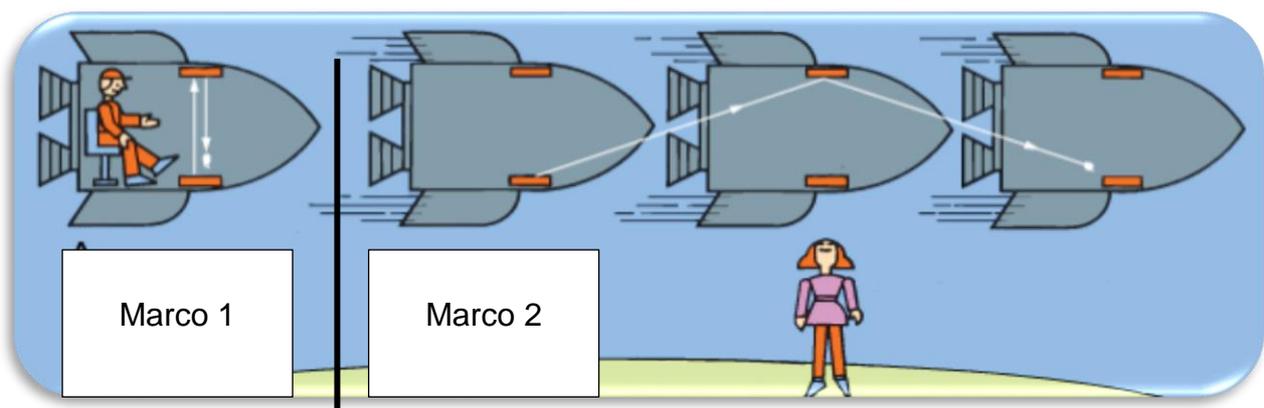


Figura 11: Experimento mental de un haz de luz que se mueve dentro de un cohete para explicar la relatividad especial. (Créditos: media.web.britannica.com)



Referencia 1 (lado izquierdo de Figura 11).

Imagina una persona sentada dentro de un cohete que se mueve a una alta velocidad constante. Esta persona está viendo un rayo de luz rebotar desde el suelo hasta el techo.

1. Si la altura del cohete es de 1 m, ¿qué distancia (d) ha recorrido el haz de luz si rebota del suelo hasta el techo y de vuelta?

2. Einstein postuló que la velocidad de la luz ($c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$) debe ser la misma para cualquier observador. Entonces, ¿cuánto tiempo tarda el haz de luz en recorrer esa distancia ($t = d/c$)?

Referencia 2 (lado derecho de Figura 11)

Ahora imagina que el cohete tiene una gran ventana transparente. Estás viendo pasar el cohete. Para ti la distancia que recorre la luz parece más larga porque el haz tiene que encontrarse con el techo en una posición diferente donde estaba el cohete cuando el haz salió del suelo. Pero, ¿cómo es esto posible si ambos deben medir la misma velocidad?

Einstein explicó que la única posibilidad de que la luz sea medida viajando a la misma velocidad por estos dos observadores es que el tiempo en sí debe ser diferente para compensar el cambio en la distancia recorrida por el haz.

La velocidad de la luz no cambia para ningún observador, por lo que deben ser el espacio y el tiempo los que cambien para cada marco de referencia. Esto sucede en procesos conocidos como **dilatación del tiempo** y **contracción de la longitud**. Estos efectos dependen de un factor de conversión llamado γ .

Un observador (O') se aleja con respecto a otro (O), que es estático, a una velocidad constante v , en dirección x' ($x'=x$ dirección). c es la velocidad máxima de la información.

Estas transformaciones entre marcos de referencia a altas velocidades (ver Figura 12) se pueden describir matemáticamente con la denominada Transformación de Lorentz (ver Ecuación 4)

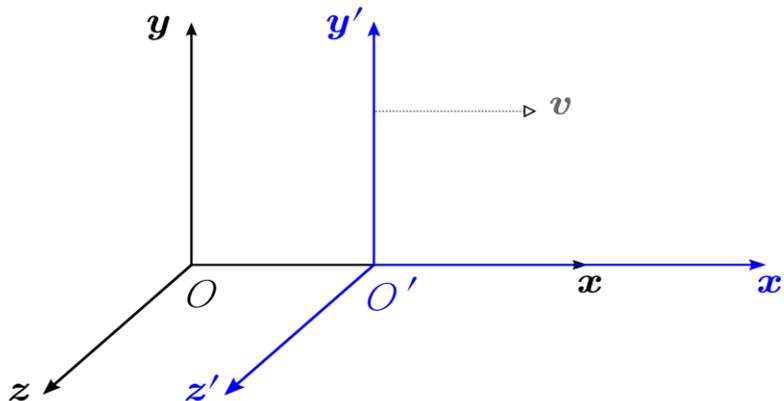


Figura 12: Dos marcos de referencia inerciales (no acelerados) utilizados para explicar la transformación de Lorentz. (Créditos: en.wikipedia.org)

$$\begin{cases} t' = \gamma \left(t - \frac{vx}{c^2} \right) \\ x' = \gamma (x - vt) \\ y' = y ; z' = z \end{cases} \quad \text{con} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Ecuación 4: Transformación de Lorentz entre dos marcos de referencia (O y O') con coordenadas (t, x, y, z) y (t', x', y', z') .

Es importante mencionar que no tiene nada de especial la luz o los fotones. La transformación de Lorentz no tiene nada que ver con la velocidad de la luz, sino que establece un límite para la velocidad de la información.

Como la partícula de luz no tiene masa, puede viajar a la velocidad máxima que nuestro Universo permite, esto se debe al cambio en masa relativista.

Actividad extra: Luz viajando horizontalmente dentro de un tren

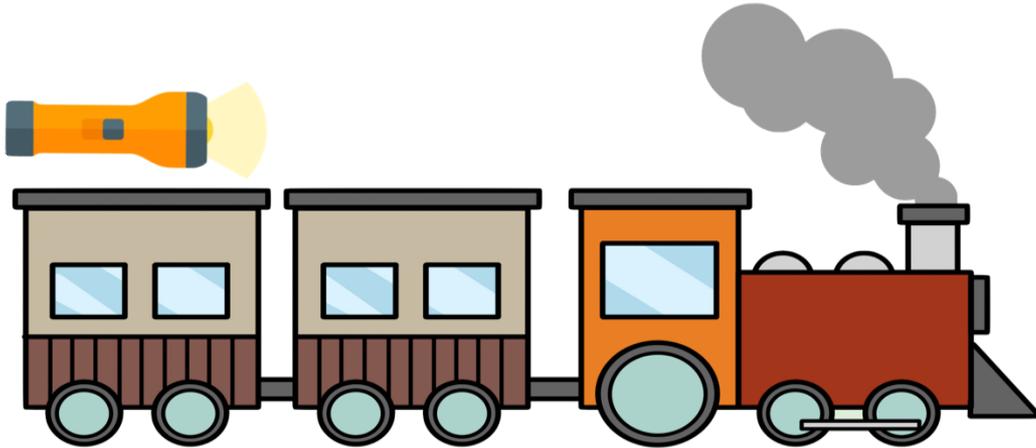


Figura 13: Imagen de un tren. (Créditos: www.wikihow.com)

- Completa la Tabla 2 teniendo en cuenta la siguiente situación.
 - Imagina un tren de 75 m conduciendo a la mitad de la velocidad de la luz ($0,5c$).
 - Según la relatividad especial, el tiempo en el sistema de referencia dentro del tren se dilata con respecto al exterior por un factor γ .
 - Adicionalmente, la longitud del tren que mides desde fuera es menor a la real. Ambas correcciones son necesarias para preservar una velocidad constante de la luz en cualquier marco de referencia (dentro y fuera del tren).
 - Imagina que el tren lleva una linterna que emite un haz en la dirección de la propagación del tren. **¿Cuánto tiempo requiere la luz para atravesar la longitud del tren para cada observador?**

Marco de referencia	Período de tiempo (en s)	Longitud del tren (en m)	Velocidad de la luz ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)
Tú (el observador en movimiento a $0,5c$, O')			
Pasajero (un observador inmóvil, O)		75	

Tabla 2: Complete los campos vacíos calculando la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud de acuerdo con el factor de Lorentz.

- Utilice el cuadro de abajo para realizar los cálculos requeridos.

Tú (un observador en movimiento con respecto al marco de referencia del haz, O')

Calcula la longitud contratada (x) del tren (longitud que mides desde fuera del tren)

Use Ecuación 4:

$$x' = 75m \Rightarrow 75m = \gamma(x - vt)$$

Imagina que eres capaz de medir la longitud instantáneamente ($t=0$)

$$75m = \gamma x \Rightarrow x =$$

Sabiendo que la velocidad de la luz debe ser constante, puede calcular ambos períodos de tiempo con $t = x / c$.

$$t = \frac{x}{c} =$$

Pasajero (un observador no móvil con respecto al marco de referencia de la viga, O)

$$t' = \frac{x'}{c} =$$



Actividad 2.2.2. Teoría de la Relatividad General

Método 1: Aprender con recursos visuales

1. Vea el siguiente video.

QuantumFracture: La Gravedad NO ES UNA FUERZA

⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=7vhc-hMWclY>

2. Explica con tus propias palabras lo que has aprendido hasta ahora.

Método 2: Aprender con la teoría

La **Relatividad General** amplía el concepto de **dilatación del tiempo** y **contracción de la longitud** y los explica en términos de un **espacio-tiempo curvo** comparando los marcos de referencia acelerados con la aceleración causada por la atracción gravitatoria (ver Figura 14).

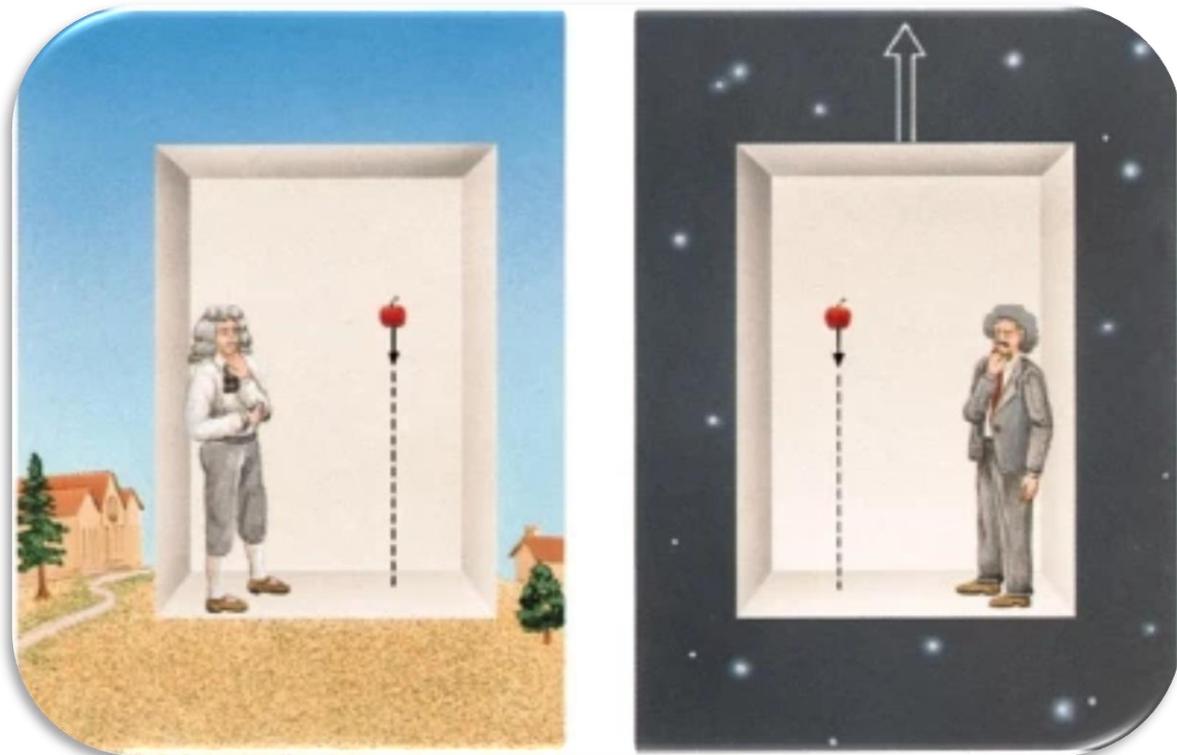


Figura 14 gravitacionales (imagen izquierda) e inerciales (imagen derecha). (Créditos: hackaday.com)

Haciendo uso de la analogía de Einstein (ver Figura 14) podemos explicar sus ideas si nos imaginamos dos escenarios que parecen diferentes a primera vista.

Einstein demostró que no hay ningún experimento físico que nos permita distinguir si estamos dentro un sistema de referencia uniformemente acelerado u otro estático sometido a un campo gravitatorio constante.

La conclusión lógica de estas afirmaciones es que el **espacio y el tiempo** deben **distorsionarse localmente alrededor de objetos masivos**.

En el marco de la Relatividad General, la gravedad no es una **fuerza, sino sólo una consecuencia del espacio-tiempo curvo**. Contrariamente a nuestra experiencia cotidiana, el espacio-tiempo no es una entidad plana ni constante sino un complicado campo de 4 dimensiones que puede verse alterado por la presencia de objetos masivos como planetas, estrellas, galaxias... **La forma local del espacio-tiempo** (su métrica) determina **el movimiento de todas las partículas** (trayectorias geodésicas⁹, que pueden parecer trayectorias curvas desde otros marcos de referencia.

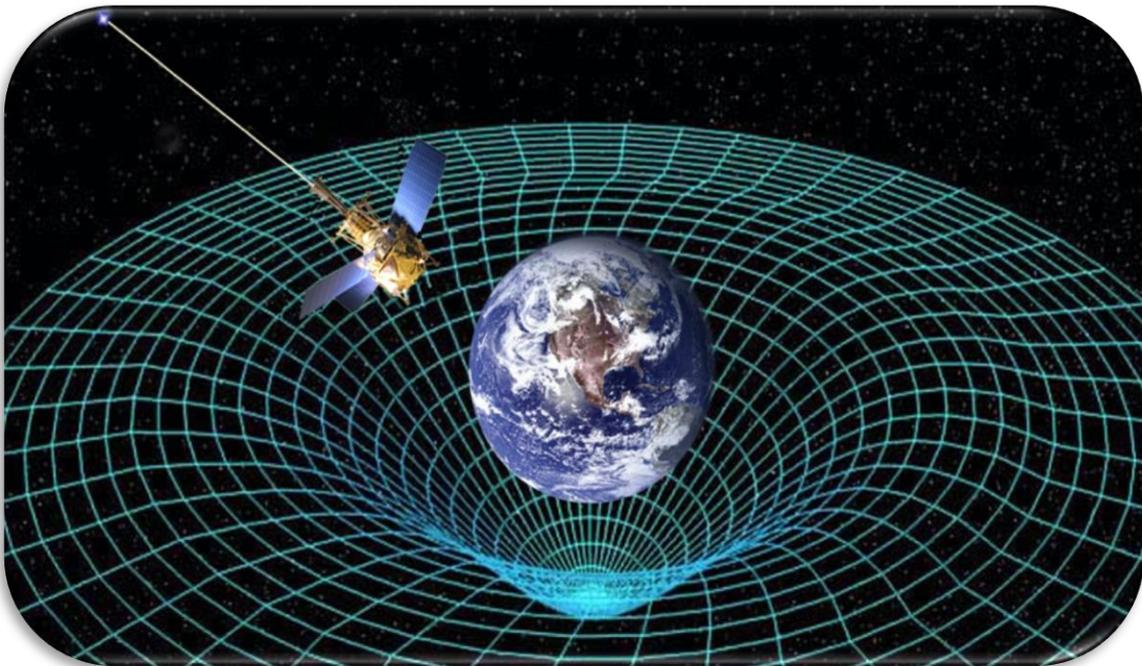


Figura 15: Representación visual del espacio-tiempo distorsionado alrededor de un objeto masivo.
(Créditos: space.com)

Resumen

El espacio-tiempo le dice a la materia cómo moverse

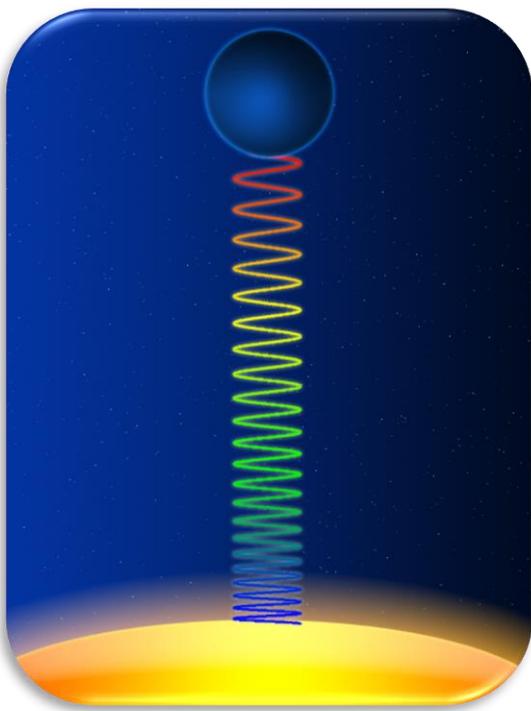


La materia le dice al espacio-tiempo cómo curvarse

Hemos aprendido de la Relatividad Especial que **diferentes marcos de referencia experimentan el tiempo con una dilatación relativa**. De la Relatividad General sabemos que los objetos **masivos pueden distorsionar el espacio-tiempo**, creando así gradientes de espacio-temporales.

Actividad extra: Un buen ejemplo que combina ambas teorías (Desplazamiento al rojo gravitacional)

Ahora imagina cómo pasa el tiempo para que un fotón escapando de la superficie del sol y explica las consecuencias que observamos.



*Figura 16: Representación visual de un fotón que escapa del campo gravitatorio del sol.
(Créditos: en.wikipedia.org)*

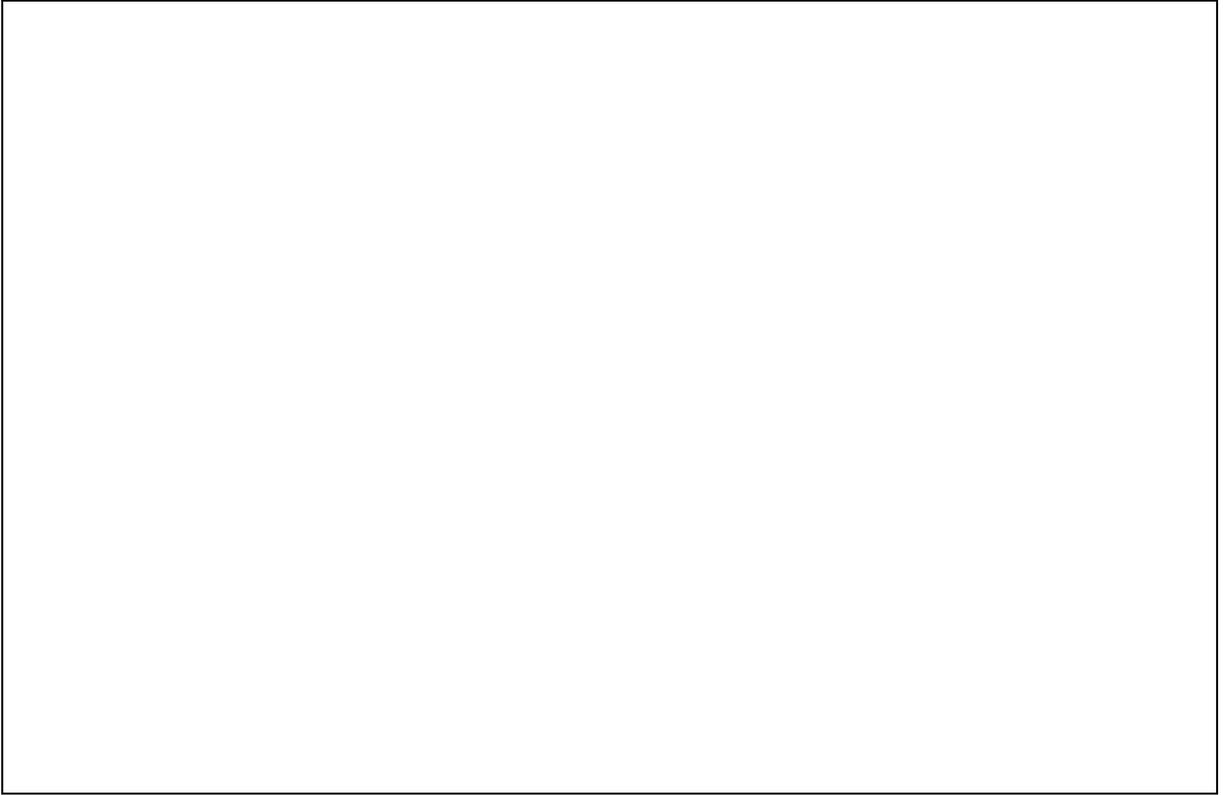
Actividad 2.3. Newton vs Einstein



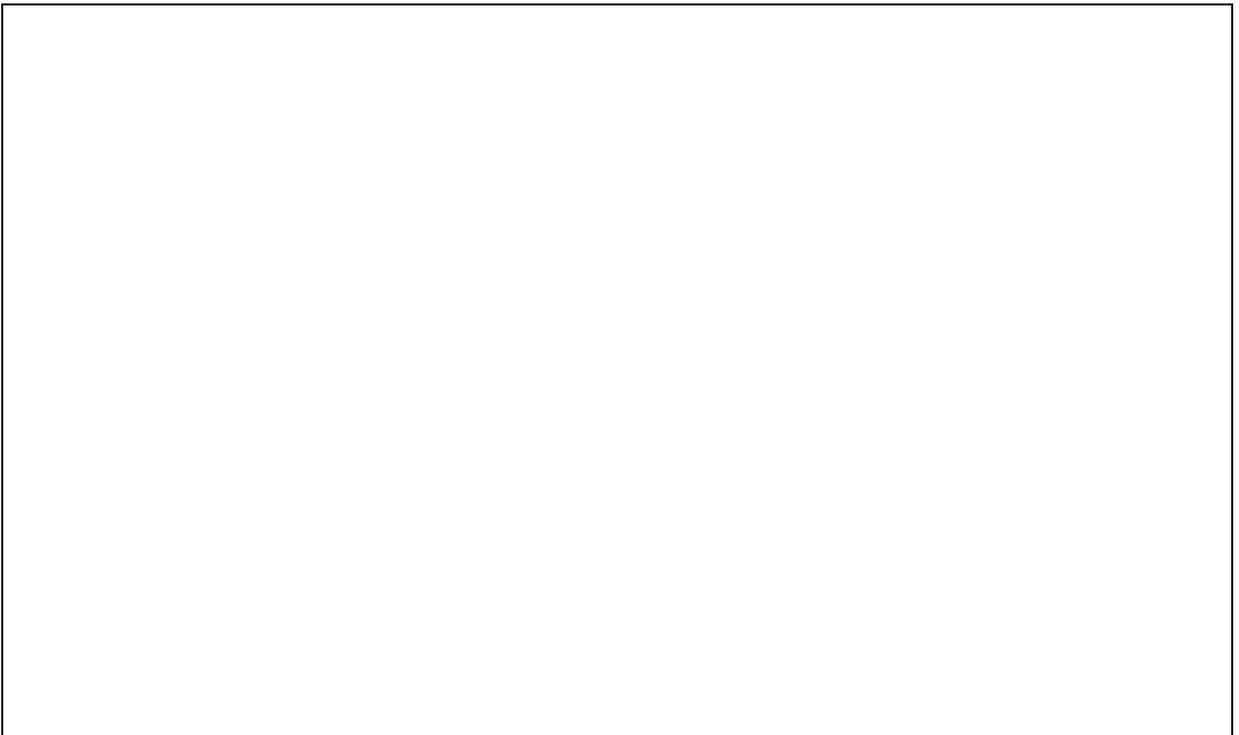
Responde a las siguientes preguntas en el marco de las teorías de Newton y Einstein de forma independiente.

1. ¿Es la gravedad una fuerza? Da una explicación completa.

2. ¿Cómo puede la luz ser doblada por la gravedad?



3. ¿Qué pasaría con un objeto que orbita un centro gravitacional rotativo?



Actividad 3. Óptica geométrica

Método 1: Aprender con recursos visuales

1. Cuarentaydos: ÓPTICA, ESPEJOS Y LENTES
⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=kk-74Gqduyw>
2. OSAL Student Chapter: Lentes y formación de imagenes
⇒ https://www.youtube.com/watch?v=1sO_0zpNjP8
3. ¿Qué has aprendido después de ver estos videos? Escribe tu propia explicación y acompáñala con algún dibujo.

Método 2: Aprender con la teoría

Las lentes son esenciales en nuestra vida diaria; de hecho, cada vez que abrimos los ojos, estamos utilizando un par de ellas para percibir nuestro entorno (ver Figura 17).

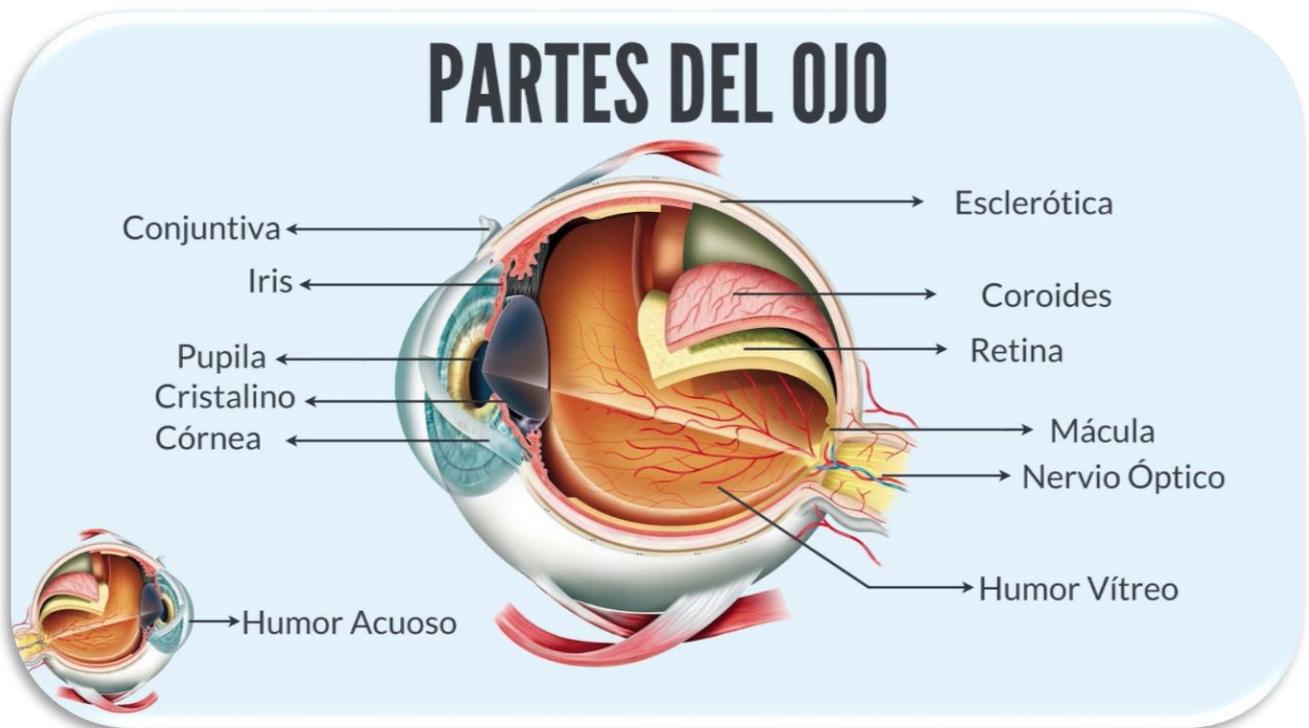


Figura 17: Representación del camino de un haz de luz dentro de un ojo humano. (Créditos: <https://www.brillpharma.com>)

Las lentes son instrumentos ópticos que cambian la dirección de la luz por refracción. Es el hecho de que la luz pase a través de un medio óptico curvo o inclinado (además del cambio de índice de refracción entre ambos medios) lo que hace que su foco cambie. Podemos diferenciar entre (ver Figura 18):

- **Lentes convergentes:** convergen los rayos de luz y los enfocan en un punto.
- **Lentes divergentes:** divergen la luz, por lo que los rayos de luz se dispersan.

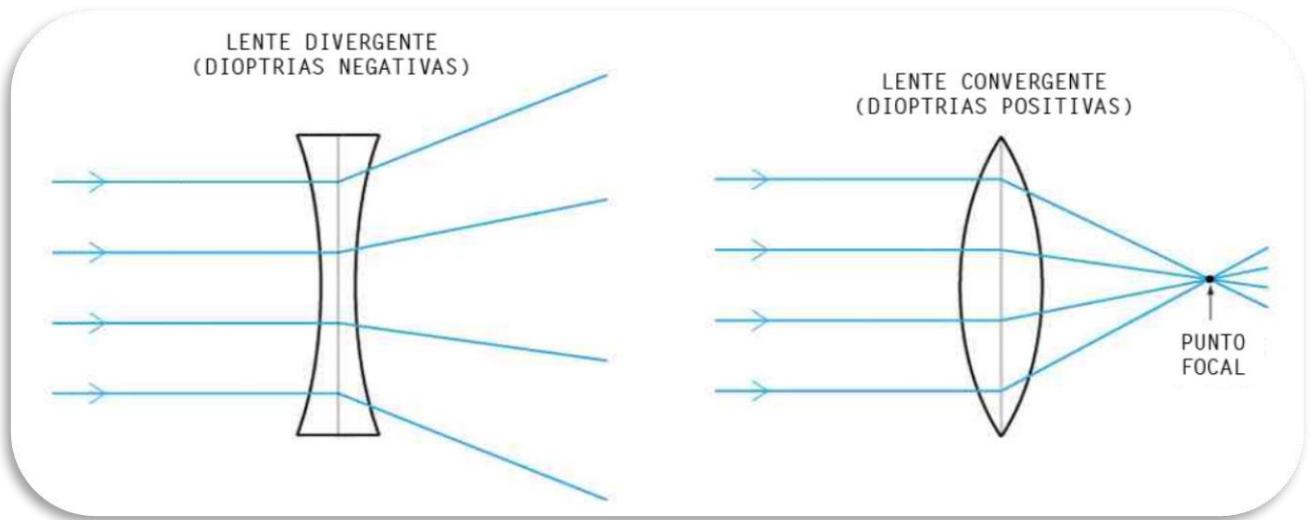


Figura 18: Diagrama de luz de una lente convergente (izquierda) y divergente (derecha). (Créditos: <http://1.bp.blogspot.com>)

Actividad 4. Lente gravitacional (LG)

1. Hemos visto en la [Actividad 3](#), cómo las diferentes lentes pueden cambiar la dirección de la luz. Pero, ¿qué pasaría si en lugar de una pieza curva de vidrio tuviéramos un espacio-tiempo curvo?



2. Solo por el nombre, ¿qué pensarías que es una lente gravitacional? ¿Cómo crees que puede funcionar el fenómeno de las lentes gravitacionales?



Método 1: Aprender con recursos visuales

Ve los siguientes videos sobre lentes gravitacionales y explica con tus propias palabras:

1. ¿Qué son las lentes gravitacionales?
2. ¿Qué efectos pueden causar?
3. ¿Qué podríamos aprender gracias a ellas?

4. Instituto de Física Teórica IFT: ¿Qué son las lentes gravitacionales?
⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=GwUww6M9bMs>

5. Veritasium en español: La SUPERNOVA que Midió el Universo
⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=4vMCRkNFG-Q>

Método 2: Aprender con la teoría

La lente gravitacional es el efecto de la flexión de la luz causado por la curvatura del espacio-tiempo. Las lentes gravitacionales más notables son las galaxias o los cúmulos, pero es importante mencionar que todos los objetos masivos pueden crear efectos de lentes (por ejemplo, estrellas o planetas).

Una lente gravitacional, al estar en la línea de visión entre objetos muy distantes y el observador, dobla la luz emitida. A partir de las mediciones de desplazamiento e intensidad de la luz podemos calcular la masa de la lente gravitacional. Además, el enfoque de la luz nos permite mirar más lejos en el espacio profundo de lo que podríamos debido a las limitaciones de nuestros telescopios.

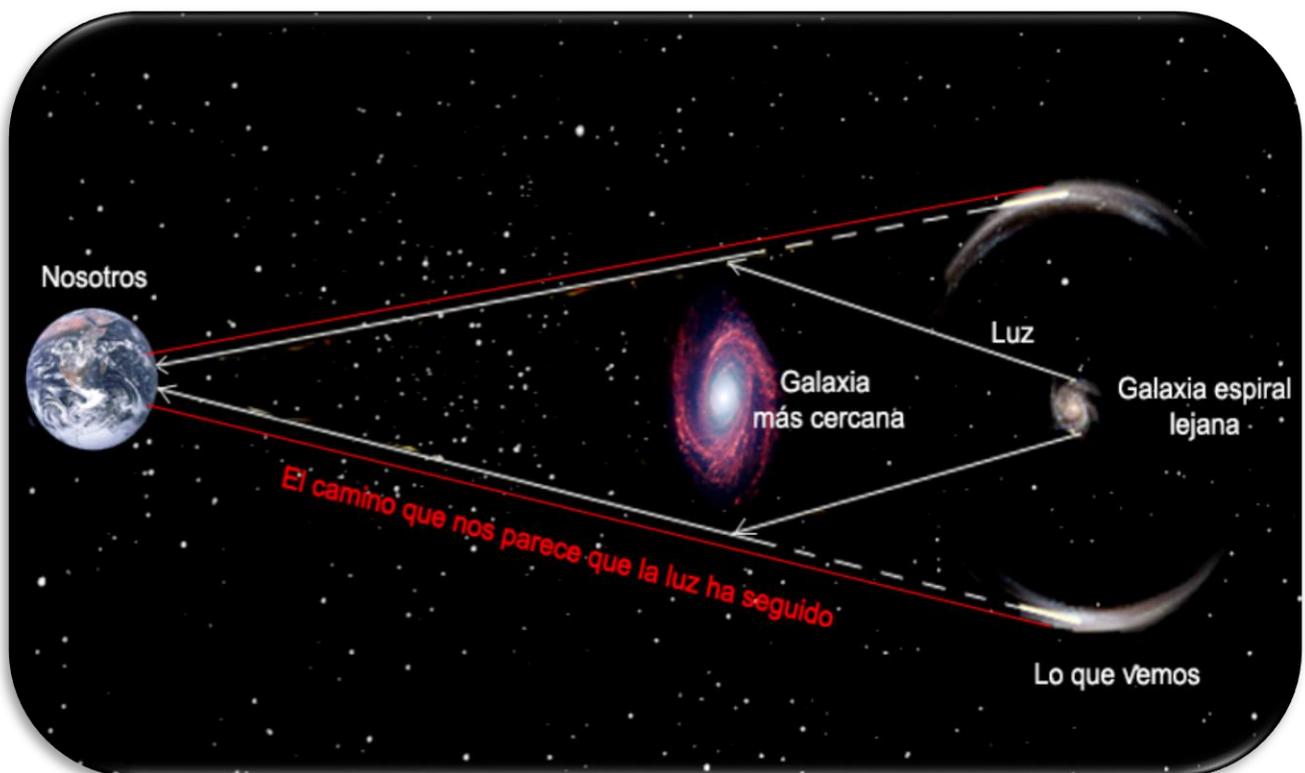


Figura 19: Efecto de flexión de la luz de la influencia gravitacional según lo explicado por la Relatividad General. (Créditos: <https://3.bp.blogspot.com>)

Actividad 4.1. Efectos de las lentes gravitacionales (LG)

1. Aquí hay algunos efectos de las lentes gravitacionales. ¿Cuáles crees que podrían ser estos efectos? Rellena Tabla 3.

Efectos	Nombre del efecto /Descripción del efecto
 <p>Figura 20: Lente que aumenta un objeto. (Créditos: https://www.educima.com)</p>	<p>Nombre:</p> <p>Descripción:</p>
 <p>Figura 21: Efecto de la flexión de la luz con una copa de vino. (Créditos: kipac.stanford.edu)</p>	<p>Nombre:</p> <p>Descripción:</p>
 <p>Figura 22: Niña usando un periscopio. (Créditos: www.onlineplaygrounds.co.uk)</p>	<p>Nombre:</p> <p>Descripción:</p>

Tabla 3: Efectos de las lentes gravitacionales.

En la siguiente tabla explicamos los efectos que las lentes gravitacionales causan en el

Universo.

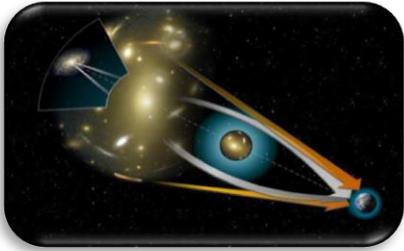
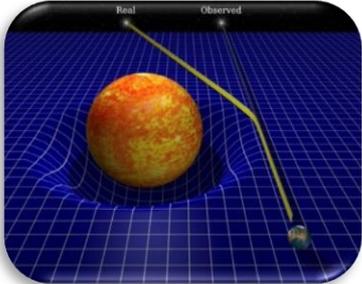
Efectos	Efectos de lente gravitacional en el Universo
 <p data-bbox="209 831 740 898"><i>Figura 23: Lente que aumenta un objeto.</i> (Créditos: https://www.educima.com)</p>	<p data-bbox="802 439 1442 573">Una lente gravitacional magnifica la luz. Los astrónomos utilizan este efecto para detectar objetos que estarían demasiado lejos para ser visto sin LG.</p>  <p data-bbox="852 848 1390 916"><i>Figura 24: Imagen de lente gravitacional.</i> (Crédito: www.businessinsider.com)</p>
 <p data-bbox="180 1229 772 1296"><i>Figura 25: Efecto de refracción con una copa de vino.</i> (Créditos: 4.bp.blogspot.com)</p>	<p data-bbox="802 943 1442 1043">Algunos objetos distantes aparecen repetidos en el cielo debido a la distribución específica de la LG, a fuente y el observador.</p>  <p data-bbox="834 1223 1410 1290"><i>Figura 26: Ejemplo de una cruz de Einstein.</i> (Crédito: www.constellation-guide.com)</p>
 <p data-bbox="209 1733 746 1800"><i>Figura 27: Niña usando un periscopio.</i> (Créditos: www.onlineplaygrounds.co.uk)</p>	<p data-bbox="802 1312 1442 1447">Gracias a la atracción gravitacional de objetos astrofísicos masivos, incluso las fuentes de luz que aparecerían ocultas por ese objeto, son visibles.</p>  <p data-bbox="807 1765 1442 1832"><i>Figura 28: Efecto gravitacional sobre un rayo de luz.</i> (Crédito: i.stack.imgur.com)</p>

Tabla 4: Recopilación de las consecuencias de las lentes gravitacionales y sus analogías cotidianas.

Actividad 4.2. Reproduce el efecto de una lente gravitacional con una copa de vino



1. Mira el siguiente video y reproduce el experimento en casa.
⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=PviYbX7cUUg>
2. Agregue una imagen de su experimento y describa sus hallazgos.

Actividad 4.3. Patrones observados de lentes gravitacionales (GL)

Dependiendo de la forma y alineación entre fuente, lente y observador; podemos ver uno u otro patrón. Podemos clasificarlos en cualquiera de estos tres tipos: Anillos de Einstein, Cruces de Einstein o Arcos (ver Figura 29)

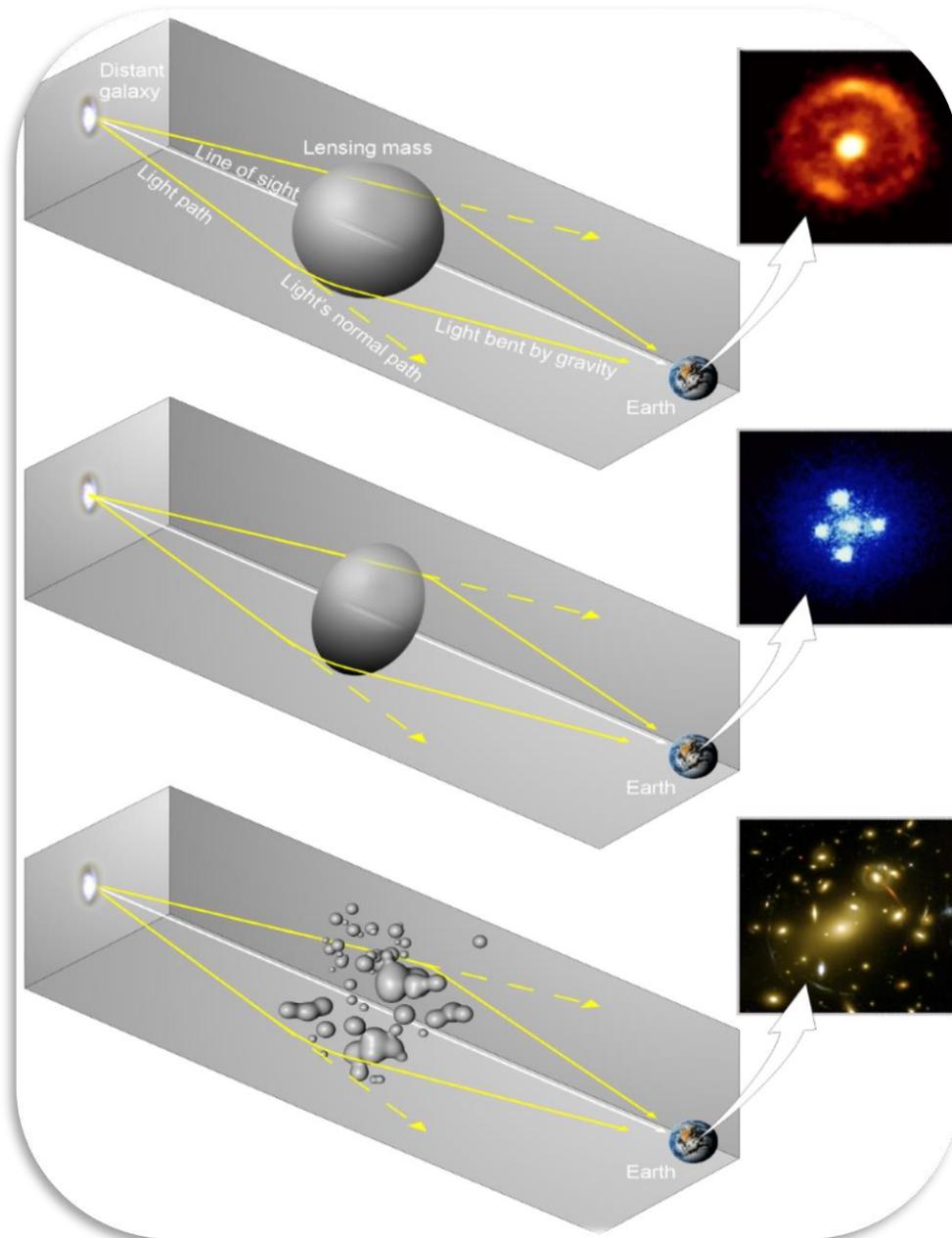


Figura 29: Luz refractada en función de la forma del objeto interviniente. Las lentes gravitacionales pueden producir anillos, cruces de Einstein o arcos. (Créditos: ESA)

1. De acuerdo con Figura 29 ¿qué distribución de materia y alineación de la lente podrían crear los patrones de imagen que se muestran en la Tabla 5?

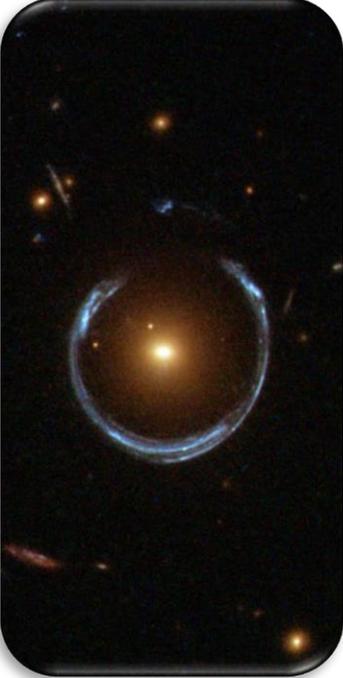
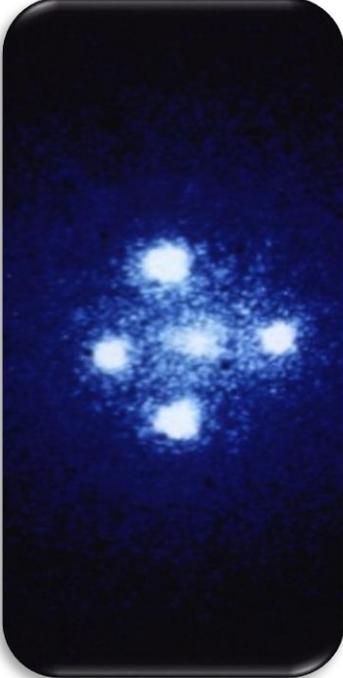
 <p><i>Figura 30: Anillo de Einstein. (Créditos: apod.nasa.gov)</i></p>	 <p><i>Figura 31: Cruz de Einstein. (Créditos: constelación-quía)</i></p>	 <p><i>Figura 32: Arcos múltiples. (Créditos: wordlesstech.com)</i></p>

Tabla 5: Diferentes patrones de transmisión producidos por LG dependiendo de la alineación.

2. Haz coincidir las imágenes de datos reales de la Tabla 6 recogidas por el Telescopio Espacial Hubble con las alineaciones teóricas de las lentes gravitacionales de la Tabla 7. Rellena la Tabla 7 con referencia a las lentes gravitacionales del 1 al 4.

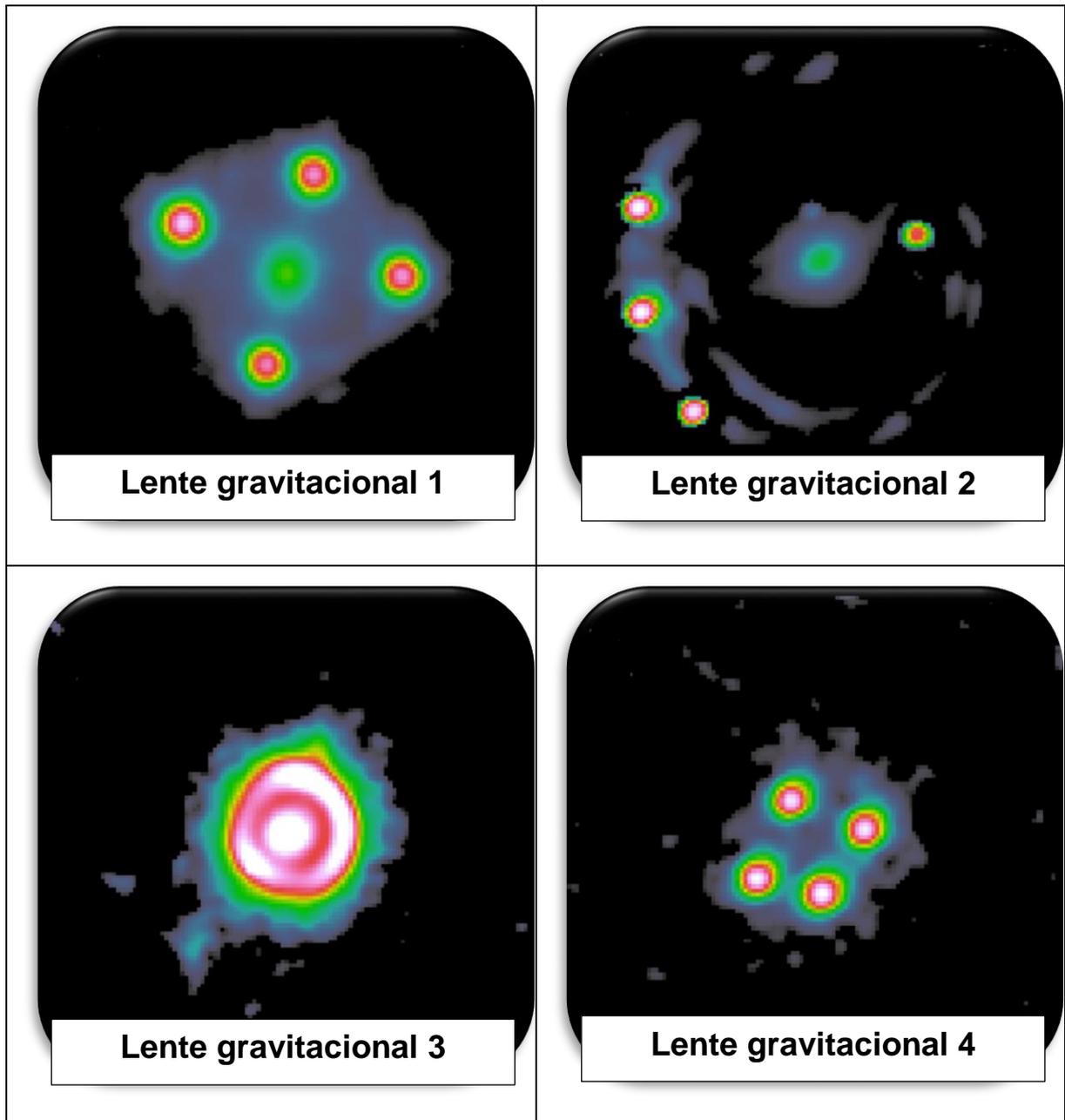


Tabla 6: Imágenes reales de diferentes lentes gravitacionales.

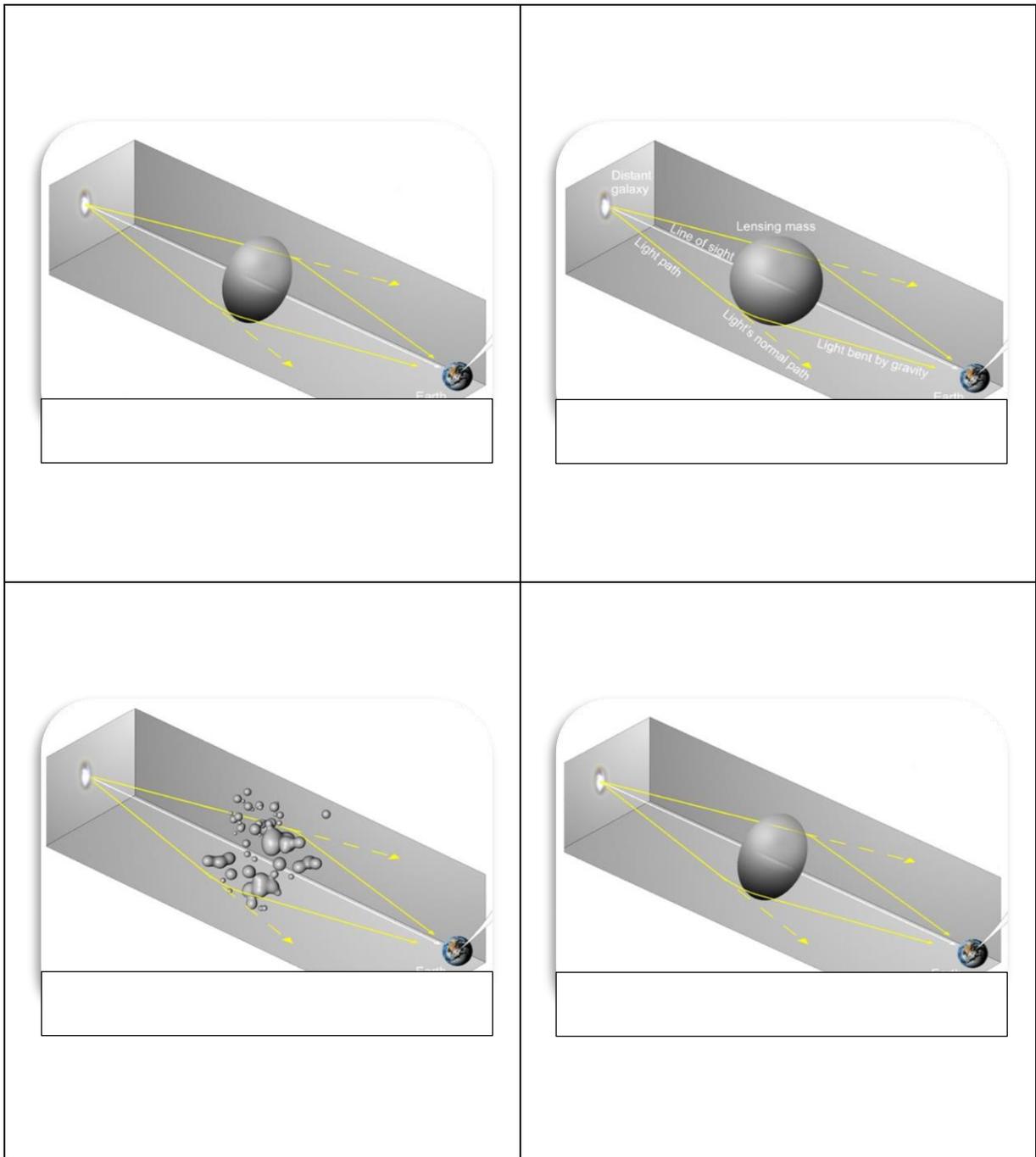


Tabla 7: Alineación teórica para diferentes efectos de lente gravitacional.

Los efectos de lente gravitacional son causados no solo por los componentes visibles sino también por los no visibles de la lente. Es posible inferir la masa total de la galaxia/cúmulo que actúa como lente gravitacional, revelando así la llamada "Materia Oscura".

Actividad 4.4. Calcular la masa de una lente gravitacional creando un anillo de Einstein

De las ecuaciones de campo de Einstein, se puede derivar la masa de una lente que causa un anillo de Einstein de cierto tamaño.

$$\theta_1 = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_s D_L}}$$

Ecuación 5: Fórmula derivada de la Teoría de la Relatividad General para calcular la masa de una lente gravitacional en función del radio del Anillo de Einstein que crea. (Crédito: en.wikipedia.org)

Aquí θ_1 es el radio del Anillo de Einstein en radianes, G es la constante gravitacional, M es la masa de la lente, c es la velocidad de la luz, D_{LS} la distancia de la fuente a la lente, D_s la distancia del objeto al observador y D_L la distancia de la lente al observador. Echa un vistazo a la Figura 33 para comprender mejor el sistema óptico.

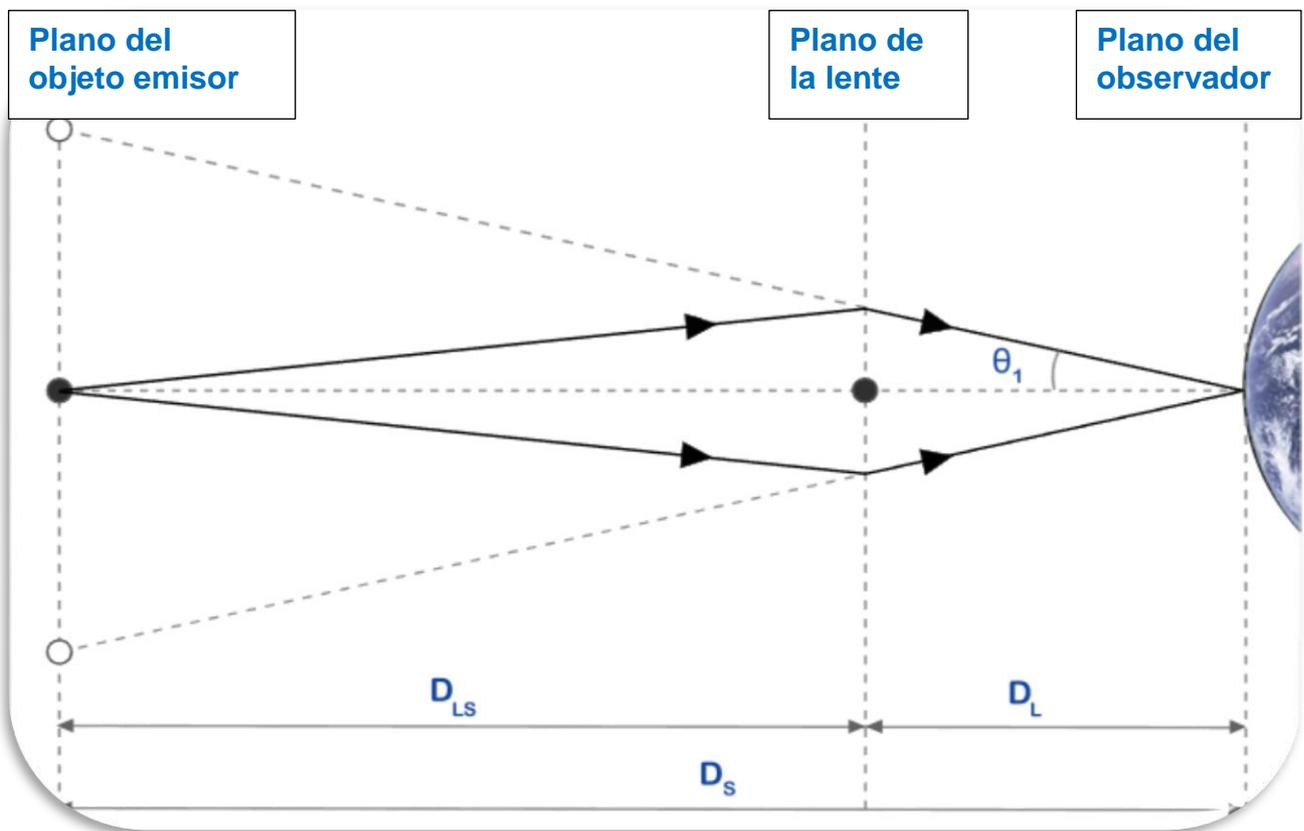


Figura 33: Representación gráfica de la alineación requerida para lentes gravitacionales con distancias etiquetadas. (Créditos: en.wikipedia.org)

Debido a la expansión del Universo (descubrimiento realizado por el astrónomo Edwin Hubble), es posible inferir la distancia aproximada (d) de lejanos objetos en la esfera celeste midiendo su valor de corrimiento al rojo (z). En la [Actividad 7.2](#), se habla con más detalles sobre este tipo de medición. De forma aproximada se puede usar la siguiente ecuación que hace uso de la constante de Hubble ($H_0 \approx 70(km/s)/Mpc$) y la velocidad de la luz ($c = 3 \cdot 10^5 km/s$) para relacionar el corrimiento al rojo con una distancia en unidades de longitud.

$$d = z \cdot c / H_0$$

Ecuación 6: Ecuación de Hubble para relacionar distancia y corrimiento al rojo de objetos celestes distantes.

Una vez obtenidas las distancias a ambos objetos (lente gravitacional y anillo) se puede reescribir la Ecuación 5 para calcular la masa de la lente gravitacional. Observando la Figura 33 se puede apreciar que la distancia entre fuente y lente (D_{LS}) se puede obtener sencillamente restando la distancia total a la Fuente menos la distancia a la lente ($D_{LS} = D_S - D_L$).

$$\theta = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_S D_L}} \Rightarrow M = \frac{\theta^2 c^2 D_L D_S}{4G(D_S - D_L)}$$

Ecuación 7: Cálculo de la masa para anillos de Einstein. Hemos utilizado $D_{LS} = D_S - D_L$.

Actividad 5. La materia oscura y su descubrimiento

1. Mira el siguiente video sobre Vera Rubin y la materia oscura y explica cuál fue el descubrimiento de Vera Rubin.

⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=XJ03k5OYaQc>

2. ¿A qué crees que los astrónomos llaman Materia Oscura?
 - a. Materia ubicada en regiones oscuras del cielo (por ejemplo, la nebulosa Cabeza de Caballo).
 - b. Materia que aparece en regiones vacías del cielo.
 - c. Materia que no se ha visto, pero que se puede inferir (por ejemplo, de observaciones gravitacionales).

La materia oscura es una solución hipotética a la aparente falta de materia a escalas galácticas. **Es importante mencionar que, hasta el momento, la Materia Oscura no se ha encontrado y que solo representa una de las posibles soluciones al problema.** Otras alternativas podrían ser que la gravedad no se comporte como se espera a escalas galácticas. Sin embargo, en aras de simplificar la explicación, procederemos bajo la hipótesis de que la Materia Oscura es algún tipo de partícula no luminosa no descubierta.

Como mencionamos en la [Actividad 4](#), cuánto se distorsiona la luz, no se puede explicar únicamente con las partes visibles de una galaxia (o cúmulo de galaxias). Sin embargo, incluso teniendo en cuenta la materia ordinaria no visible, los resultados no coinciden. La masa total de una galaxia (o cúmulo de galaxias) también involucra la llamada "Materia Oscura". Este tipo de materia puede ser detectada indirectamente estudiando las curvas de rotación de las galaxias como lo hizo Vera Rubin en el siglo 20 (ver

Figura 3).

La materia oscura es llamada oscura, pero en realidad debería **llamarse invisible**. No parece interactuar con el campo electromagnético. La materia oscura no absorbe, refleja ni emite radiación electromagnética, siendo indetectable por los telescopios.

La materia bariónica o materia ordinaria es la materia que conocemos y puede ser detectada por los astrónomos con mediciones directas. La materia ordinaria corresponde sólo a un ~5% de la materia-energía en el Universo. Se cree que el resto del Universo se divide entre la llamada materia **oscura** y la **energía oscura**, en la proporción indicada por la Figura 34.

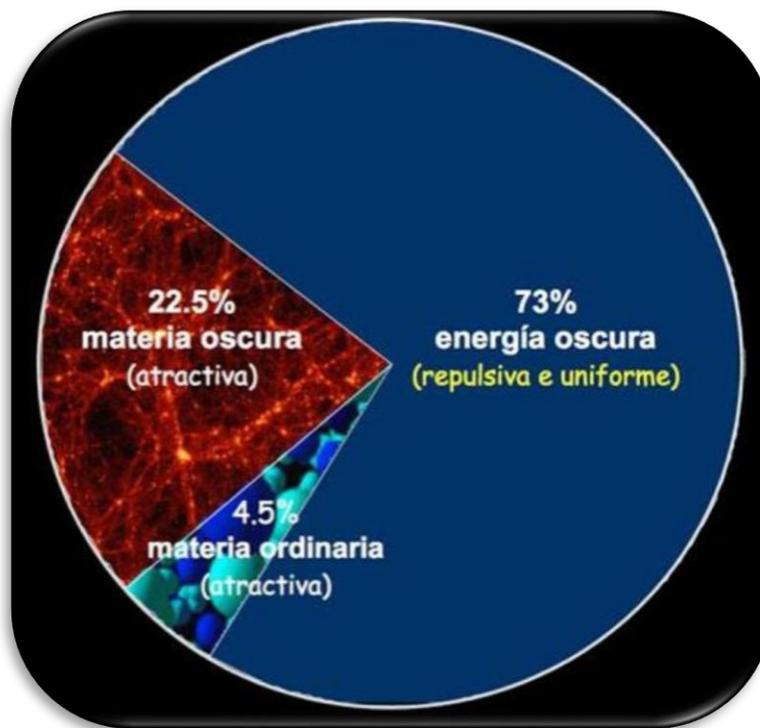


Figura 34: Contenido energético de nuestro Universo medido por la ESA/Planck. (Créditos: <http://4.bp.blogspot.com>)

Un ejemplo útil para comprender la naturaleza de la materia oscura es el cúmulo de bala (ver Figura 35). Es importante mencionar que los colores de la Figura 35 no corresponden a "colores reales" (longitudes de onda ópticas) sino que se han añadido para mostrar los diferentes componentes de las galaxias que actúan como lente gravitacional.



Figura 35: Imagen óptica del Bullet Cluster. En rojo la materia regular se revela de acuerdo con las mediciones de rayos X. En púrpura se muestra la distribución de masa de la lente gravitacional. (Créditos: apod.nasa.gov)

La Figura 35 muestra en púrpura la distribución total de masa de las dos galaxias (medición proveniente del efecto de lente gravitacional), lo que sugiere que la colisión ha ocurrido sin fricción. Sin embargo, al analizar la imagen en rayos X (región roja), se muestra una clara colisión con una mayor concentración de masa junto al centro de gravedad. La discrepancia entre estas dos mediciones sugiere que las galaxias están formadas por dos tipos diferentes de materia:

1. **Materia bariónica ordinaria - que tiene una alta interacción con la fuerza electromagnética.** Emite radiación electromagnética en alguna franja del espectro y es detectable con telescopios tradicionales.
2. **Materia Oscura – que no parece interactuar con la fuerza electromagnética.** De hecho, solo podemos hipnotizar su existencia por los efectos gravitacionales que observamos.

Como se revela en la lente gravitacional, **la mayor parte de la masa de una galaxia es Materia Oscura.** Aunque la existencia de materia oscura está generalmente aceptada por la comunidad científica, algunos astrofísicos abogan por varias modificaciones de las leyes de la relatividad general, como la dinámica newtoniana modificada. Estos modelos intentan tener en cuenta todas las observaciones sin invocar materia oscura suplementaria.

Actividad 5.1. Contenido de masa inferido de una lente gravitacional

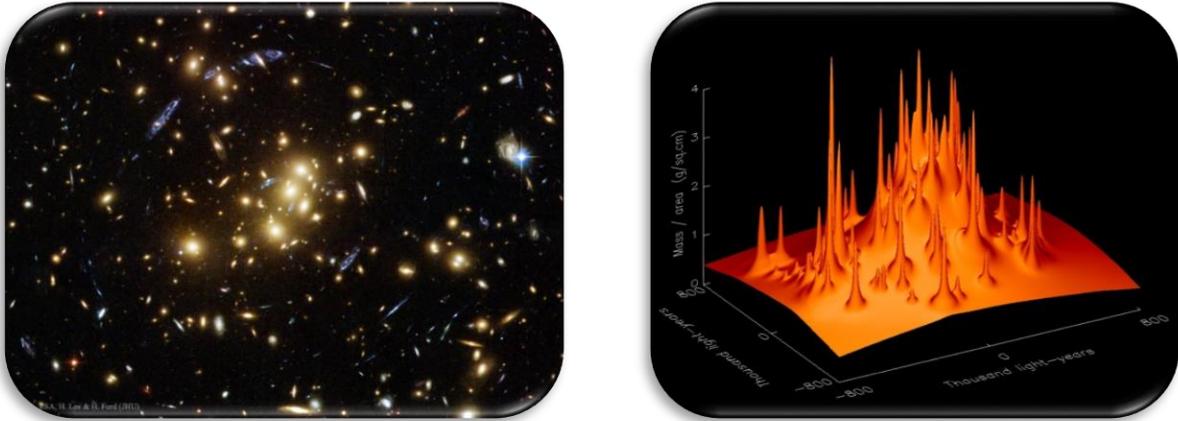


Figura 36: (Imagen izquierda) Imagen óptica del clúster CL0024+1654. (Créditos: apod.nasa.gov). (Imagen derecha) Distribución de masa del clúster CL0024+1654 obtenida a partir de mediciones en GL. (Créditos: (Evrard, 1998))

Además de revelar nuevas partes del Universo y ayudarnos a comprender la gravedad, una de las aplicaciones más útiles de las lentes gravitacionales es **el Pesado de Galaxias**.

Dependiendo del grado de refracción de la luz que pasa cerca de una galaxia o cúmulo de galaxias (que actúa como lente gravitacional), podemos inferir la masa y la distribución de masa de la misma. Las simulaciones por ordenador, como se ve en la Figura 36 han demostrado ser herramientas muy poderosas para comprender mejor la distribución de masa a partir de los datos reales recopilados.

Las mediciones de lentes gravitacionales y las curvas de rotación son dos métodos independientes para determinar la cantidad de materia en una región. Ambas mediciones han mostrado una discrepancia entre los cálculos que provienen del análisis espectral (luz emitida por los diferentes componentes de las galaxias) y aquellos que infieren la masa total de los efectos gravitacionales. Esto nos lleva a la conclusión de que existe algún tipo de materia o que no comprendemos la gravedad tan bien como imaginábamos.



Actividad 6. Galaxias y tipos

Método 1: Aprender con recursos visuales

1. Mira el siguiente video (La Pizarra del Cosmos: ¿Qué son las galaxias? ¿Qué tipos hay?) y cuéntanos lo que has aprendido sobre las galaxias.

⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=l82ADyJC7wE>

Método 2: Aprender con la teoría

Hace un siglo, los astrónomos creían que todo el Universo estaba comprimido dentro de la Vía Láctea (la galaxia donde vivimos). En los primeros años de 1900 hubo una gran discusión sobre si los parches lechosos de luz, con forma de espiral, que se veían dispersos entre las estrellas estaban fuera de la Vía Láctea o formaban parte de ella.



Figura 37: Campo profundo de galaxias del Hubble. (Créditos: ESA/NASA Hubble Space Telescope).



No fue hasta el trabajo de Edwin Hubble en la década de 1920 cuando se demostró que cada una de las nebulosas espirales era un enorme sistema estelar, llamado galaxia. Pudieron medir la distancia a algunas de estas galaxias, demostrando que el Universo era mucho más vasto de lo que se pensaba, y que nuestra Galaxia es solo una de las miles de millones de galaxias en el Universo.

Desde entonces, los astrónomos han aprendido mucho sobre las galaxias: cuántas son, qué tipos de galaxias existen y las estrellas que contienen. También han comenzado a descubrir cómo se formaron las galaxias y cómo evolucionan. Y todo esto gracias a la luz proveniente de esas galaxias, emitida por miles de billones de estrellas dentro de ellas.

1. ¿Cómo definirías qué es una galaxia y de qué está hecha? Incluye en tu respuesta una imagen de una galaxia y sus componentes.



La mayoría de las galaxias tienen un diámetro de 1000 a 100 000 parsecs (pc)² o aproximadamente 3000 – 300 000 años luz y están separadas por distancias de millones (~ 1 000 000) de parsecs. **Esto significa que un fotón (una partícula de luz) necesitaría ~3000 años para cruzar las galaxias más pequeñas y ~3 000 000 años para llegar desde el borde de una galaxia a otra.**

Consejo: A modo de comparación, un fotón "sólo" requeriría 250 minutos para cruzar nuestro sistema solar. **¡Sí, el Universo es enorme!**

El contenido de materia de las galaxias se puede clasificar ampliamente en materia luminosa y no luminosa. La materia luminosa es aquella que emite radiación en alguna franja del espectro electromagnético (estrellas, planetas, gas, etc.) y la materia no luminosa es aquella que no interactúa con la fuerza electromagnética (neutrinos o materia oscura). La materia oscura no ha sido detectada directamente, pero de existir y estar formada de un nuevo tipo de partícula, formaría parte de la materia no luminosa que parece faltar en las galaxias; como descubrió Vera Rubin.

Actividad 6.1. Clasificación de galaxias

Tu siguiente tarea es clasificar una muestra de galaxias por su morfología visual y estudiar algunas de sus propiedades, como lo hizo Edwin Hubble en 1920.

Para este ejercicio accederás a una lista de imágenes de galaxias a través del portal web ESASky, que juega el papel de un telescopio virtual.

Todos los tutoriales de ayuda de ESASky están disponibles en este [enlace](#).

² 1pc = 3,26 años luz, en otras palabras, la distancia que la luz recorre a través del vacío en 3,26 años.

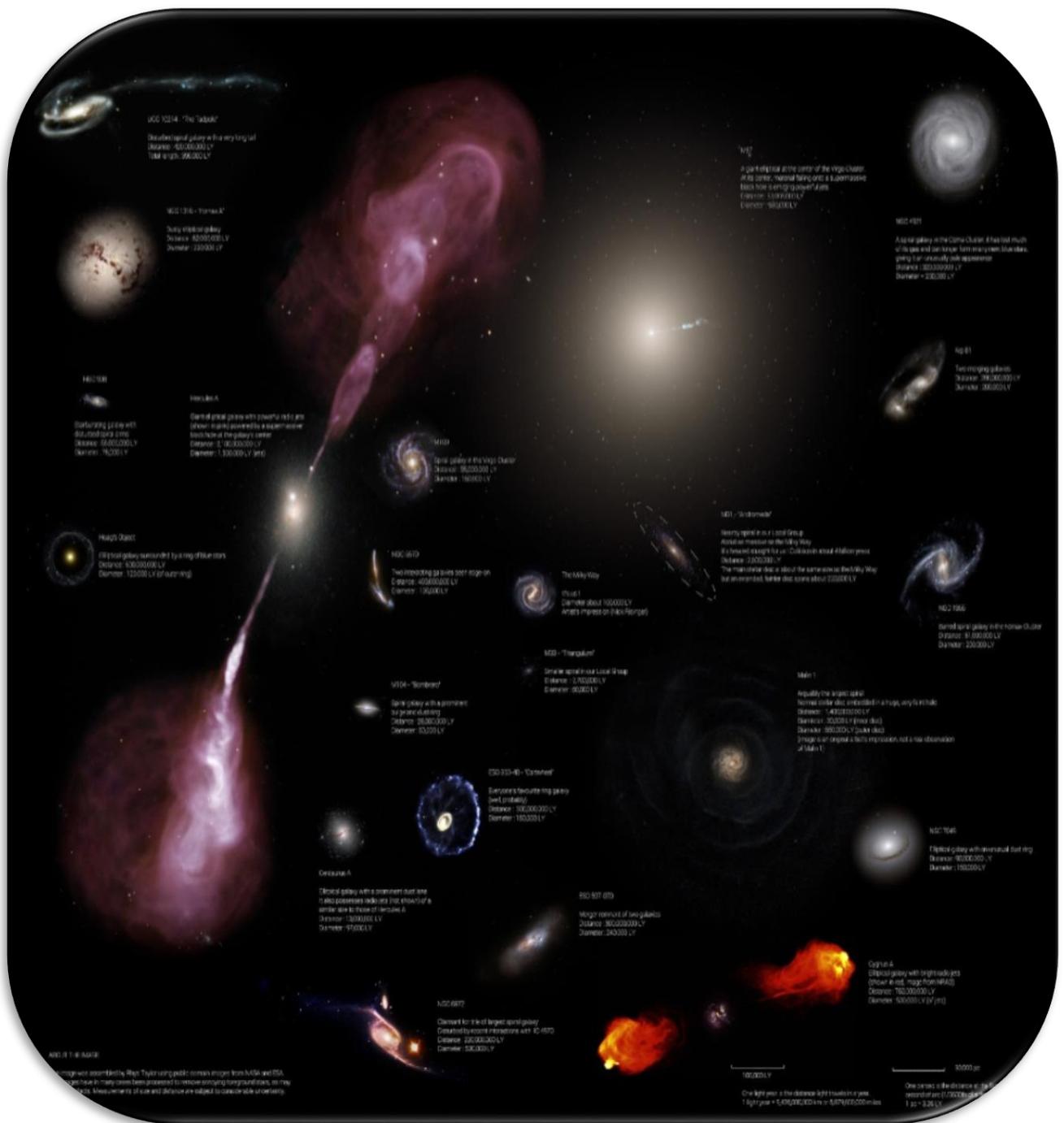


Figura 38: Comparación del tamaño de la galaxia. (Créditos: universetoday.com).

Puedes seguir cualquiera de los dos procedimientos disponibles para esta tarea: en instrucciones y/o en imágenes.

Nombre de clasificación	Características comunes de esta clasificación de galaxias	Boceto
Tipo 1:		
Tipo 2:		

Tipo 3:		
Tipo 4		

Tabla 8: Clasificación de galaxias en función de su morfología.

PROCEDIMIENTO EN INSTRUCCIONES:

1. Haga clic en este enlace para entrar en [ESASky](#) en su navegador
2. Elija la opción "Explorer" (ver Figura 39) que es la forma más sencilla de familiarizarse con ESASky.
3. Haga clic en el botón superior izquierdo (consultar Figura 40) para seleccionar una de las listas de objetivos existentes en ESASky.³
4. Agrupa las galaxias que, desde tu punto de vista, tienen algo en común y da nombre a cada tipo de galaxia en tu clasificación, explica sus características y esbózalas. (Llena tantos tipos como sea necesario para su clasificación).

PROCEDIMIENTO EN IMÁGENES:

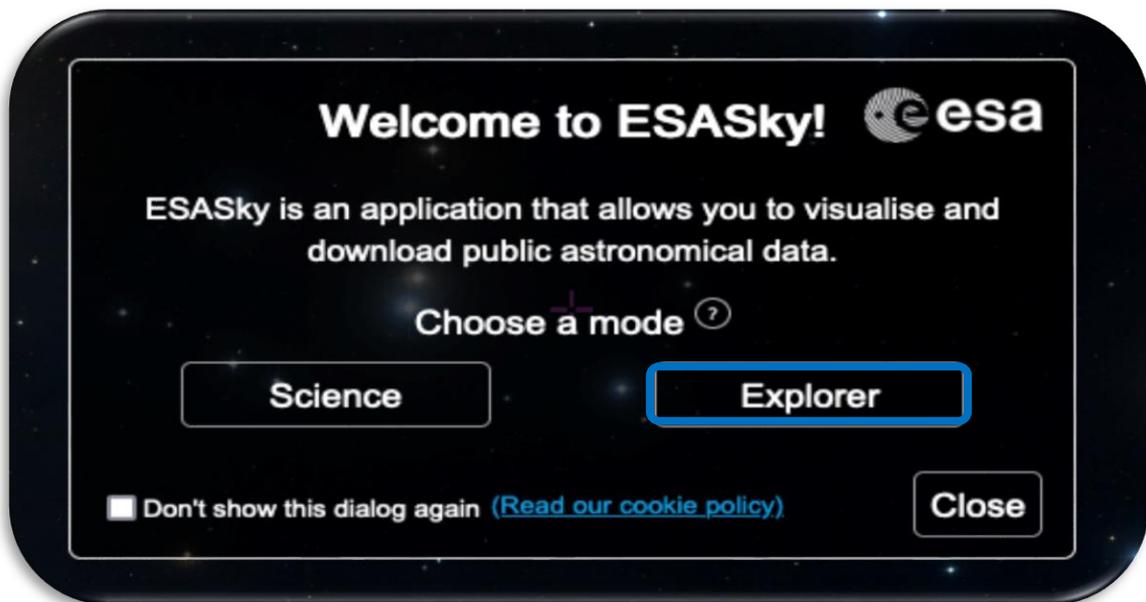


Figura 39: Portal ESASky seleccionando el modo Explorador. (Créditos: <http://sky.esa.int/>)

³ Listas de objetivos ESASky: listas compiladas por el equipo de ESASky con el mismo tipo de objetos.



Figura 40: Presiona Select Target List. (Créditos: <http://sky.esa.int/>)



Figura 41: Elige CESAR Galaxies. (Créditos: <http://sky.esa.int/>)



Figura 42: Se muestra cada una de las galaxias en la lista de ESASky. Selecciona la herramienta para elegir el nombre de Galaxias CESAR. (Créditos: <http://sky.esa.int/>)

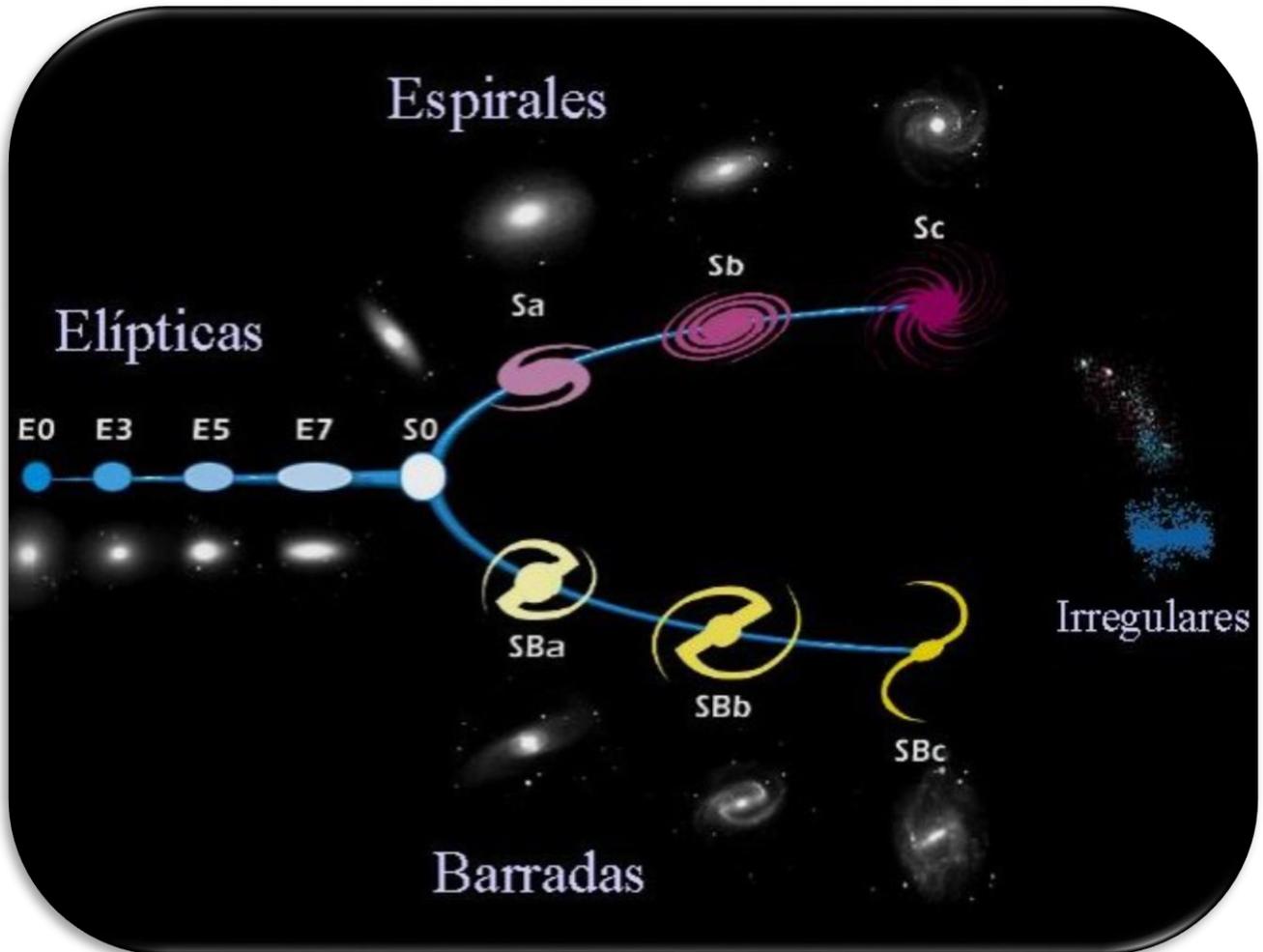


Figura 43: Clasificación de galaxias de Hubble. (Créditos: <http://www.jms7.com/atlas/b008.jpg>)

Estos son los dos principales grupos de galaxias identificados por el Hubble, basados en sus clasificaciones morfológicas como se muestra en la Figura 43

- Elípticas:** Las formas E0 a E7 se consideran elípticas (ver Figura 43). Su apariencia muestra poca estructura y, por lo general, tienen relativamente poca materia interestelar (como gas o polvo). En consecuencia, estas galaxias también tienen una baja tasa de formación de nuevas estrellas. En cambio, están dominados por estrellas generalmente más antiguas y evolucionadas que orbitan el centro de gravedad común en direcciones aleatorias.

- **Espirales:** La mayor parte de la materia luminosa se encuentra en el mismo plano de rotación. Extendiéndose fuera del bulbo hay brazos relativamente brillantes. Hubble diferenció entre galaxias espirales simples y espirales en forma de barra.
 - **Tipo S:** En el esquema de clasificación de Hubble, las galaxias espirales se enumeran como tipo S, seguidas de una letra (a, b o c) que indica el grado de estanqueidad de los brazos espirales y el tamaño del bulbo central. Una galaxia Sa tiene brazos fuertemente enrollados, mal definidos y posee una región central relativamente grande. En el otro extremo, una galaxia Sc tiene brazos abiertos y bien definidos y una pequeña región central.
 - **Tipo SB:** La mayoría de las galaxias espirales, incluida nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, tienen una banda lineal de estrellas en forma de barra que se extiende hacia fuera a ambos lados del bulbo, que se acaba fusionando con la estructura del brazo espiral. En el esquema de clasificación de Hubble, estos son designados por un SB, seguido de una letra minúscula (a, b o c) que indica la forma de los brazos espirales (de la misma manera que la categorización de las galaxias espirales simples). Se cree que las barras son estructuras temporales que pueden ocurrir como resultado de una onda de densidad que irradia hacia afuera desde el núcleo, o bien debido a una interacción de marea con otra galaxia.

Actividad 6.2. Componentes de una galaxia

La Figura 44 muestra la mayoría de objetos astronómicos que existen.

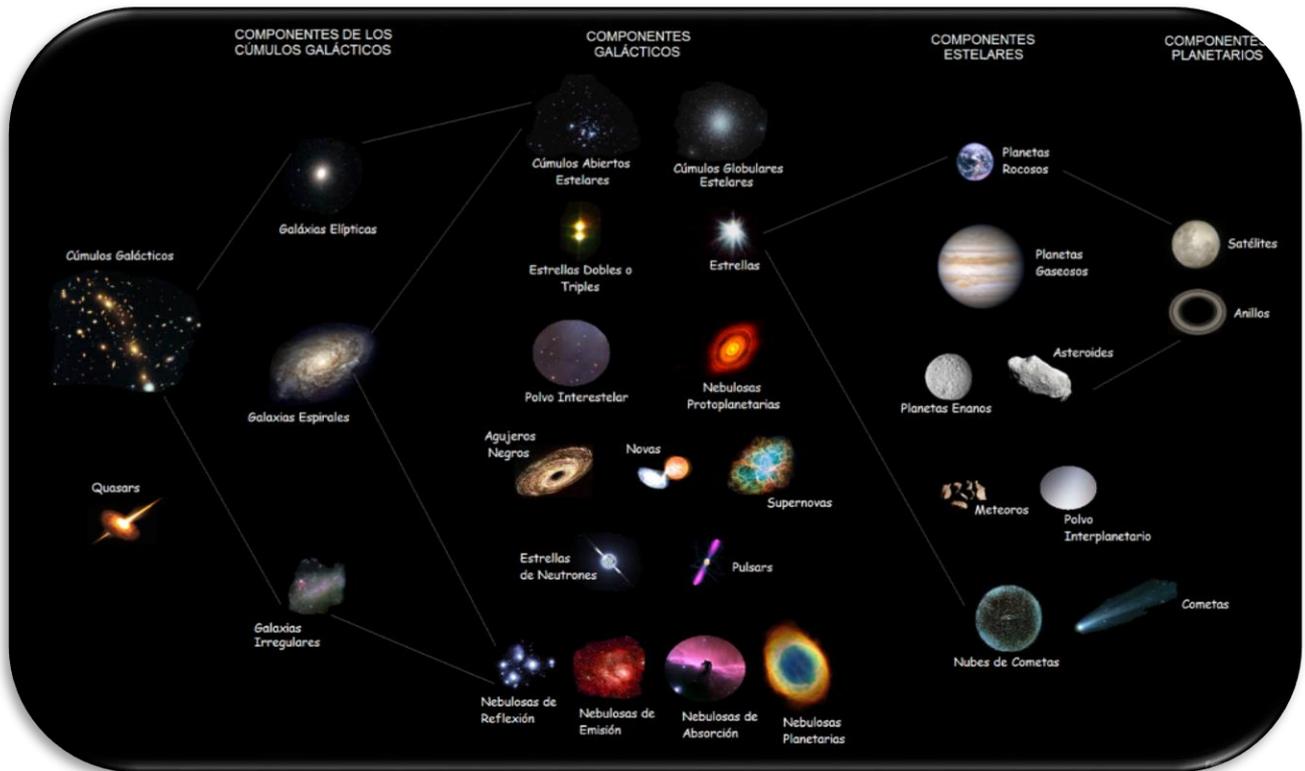


Figura 44: Objetos constituyentes de las galaxias y de la Vía Láctea. (Créditos: <http://cuadrocomparativo.org>)

De forma genérica y simplificada, podemos representar una galaxia espiral (ver figura Figura 45) constituida por tres estructuras que difieren en contenido (tipo de materia y objetos que lo constituyen) y propiedades orbitales. Generalmente se pueden distinguir observando la galaxia en diferentes imágenes del espectro electromagnético, ya que cada objeto astronómico emite radiación en franjas diferentes del espectro (exceptuando la materia oscura que no se ha visto interactuar mediante la fuerza electromagnética).

- **El Bulbo**, correspondiente al centro de la galaxia y tiene una distribución esférica. Normalmente consta de un agujero negro super masivo, rodeado de estrellas que orbitan en direcciones aleatorias. Su masa total se puede inferir del análisis del espectro de luz ya que existe una clara correlación entre el espectro de una estrella y su masa.

- **El Disco**, su forma es plana y todos los objetos que lo constituyen tienden a orbitar en la misma dirección. Su masa exacta es más difícil de inferir, debido a la existencia de materia interestelar (gas, polvo, etc.). Por lo general, se extiende hasta distancias de 4 o 5 veces el radio del Bulbo.
- **El Halo**, una esfera de materia que orbita aleatoriamente alrededor del centro de la galaxia. Contrariamente al bulbo, sus componentes se extienden a distancias mucho más lejanas que los límites del disco galáctico (100-1000 kpc). Antes del descubrimiento de la materia oscura, se pensaba que su contribución a la masa total de la galaxia era muy inferior a las del bulbo o disco. Su densidad de materia regular es inferior y en consecuencia presenta una menor densidad de estrellas.



Figura 45: Forma y componentes típicos de una galaxia espiral. (Créditos: theconversation.com)

1. Accede a ESASky y estudia la galaxia M31 en diferentes longitudes de onda. La Tabla 9 muestra la galaxia Andrómeda en diferentes longitudes de onda. Dependiendo de la imagen, el bulbo y el disco aparecen claramente distinguibles. Por el contrario, el halo no se puede detectar tan fácilmente.

Rayos X suave	Ultravioleta	Óptico
<i>Figura 46: Radiografía de M31.</i>	<i>Figura 47: Foto UV de M31.</i>	 <p><i>Figura 48: Foto óptica de M31.</i></p>
Infrarrojo cercano	Infrarrojo lejano	Submilímetro
<i>Figura 49: Foto IR cercana de M31.</i>	<i>Figura 50: Foto IR lejana de M31.</i>	<i>Figura 51: Foto submilimétrica de M31.</i>

Tabla 9: Compilación de imágenes de M31 en diferentes longitudes de onda que van desde UV hasta Submilimétrico. El bulbo y el disco pueden distinguirse al comparar todas las imágenes.

PROCEDIMIENTO EN INSTRUCCIONES:

1. Acceso a ESASky: <https://sky.esa.int>.
2. Escribe en el cuadro de búsqueda el objeto que desea buscar (M31).
3. Ve a la pestaña "skies" y crea una pila de filtros como se muestran en la Tabla 9:
 - Rayos X, ultravioleta, óptico, infrarrojo cercano, infrarrojo lejano y submilímetro.
4. Crea una instantánea de cada una de las imágenes de M31 en esas longitudes de onda, con un campo de visión (tamaño) similar al óptico proporcionado (Consejo: haz clic en el botón "-" tantas veces como sea necesario).

PROCEDIMIENTO EN IMÁGENES:



Figura 52: Portal ESASky seleccionando el modo Explorador. (Créditos: <http://sky.esa.int/>)



Figura 53: Inserta el nombre M31 en el cuadro de búsqueda. (Créditos: <http://sky.esa.int/>)



Figura 54: Añadir esta lista de "Select Sky". (Créditos: <http://sky.esa.int/>)



Figura 55: Haz instantáneas de M31 con el icono de la cámara para los diversos filtros y completa la Tabla 9. (Créditos: <http://sky.esa.int/>)

Actividad 6.3. Cuásares

Los **Cuásares** son un tipo de galaxias activas. Esto significa que son galaxias realmente poderosas y brillantes con un agujero negro activo en su núcleo. Los cuásares son en su mayoría muy viejos (aunque algunos de ellos están relativamente cerca y todavía viven hoy) y se formaron en las edades más jóvenes de nuestro Universo (hace miles de millones de años).

En su mayoría, podemos verlos a grandes distancias. Su nombre se deriva de la palabra objetos cuasi-estelares, porque inicialmente se pensó que eran estrellas debido a su alto brillo. Sin embargo, una inspección más cercana de su espectro y el corrimiento al rojo los reveló como galaxias distantes.

1. Consulte el siguiente enlace para obtener más información:

⇒ <https://es.wikipedia.org/wiki/Cuásar>

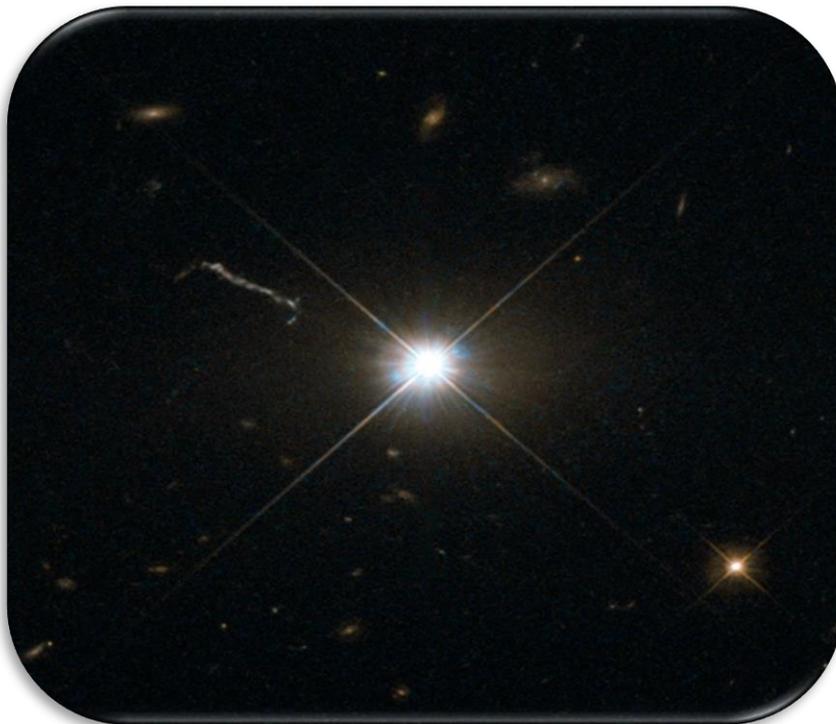


Figura 56: Imagen de un cuásar. (Créditos: esahubble.org)



Actividad 7. El efecto Doppler

Método 1: Aprender con recursos visuales

1. Ve el siguiente vídeo sobre el efecto Doppler.
⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=sIBczgRNwU8>
2. Mira el siguiente video sobre el desplazamiento al rojo de Alma Observatory.
⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=AG8RcRncr4o>
3. Escribe lo que has aprendido hasta ahora.

Método 2: Aprender con la teoría

La luz es una onda electromagnética que puede propagarse a través del vacío del espacio. La energía de una partícula de luz se puede definir por su frecuencia o longitud de onda.

- **Frecuencia (f):** Número de ondas que pasan por un punto fijo en una unidad de tiempo (por ejemplo, por segundo).
- **Longitud de onda (λ):** Un ciclo de una onda, medido como la distancia entre dos puntos consecutivos en la misma fase, por ejemplo, la distancia entre dos picos de onda consecutivos.

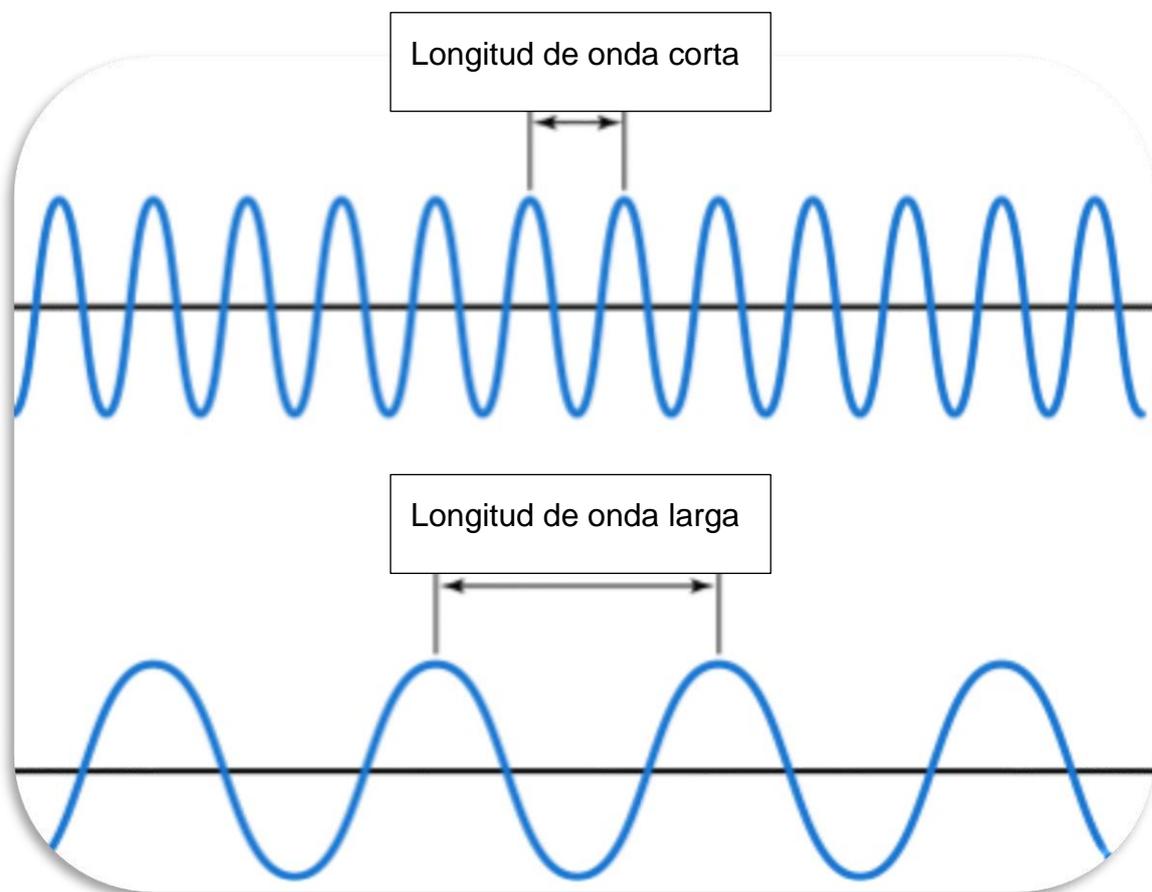


Figura 57: Imagen de cómo cambia la longitud de onda con la frecuencia. Créditos: kids.britannica.com



Como ya sabes, la luz puede entenderse como una onda o como una partícula. Las partículas que componen la luz se llaman fotones. Una manera fácil de entender cómo funcionan la energía y las ondas electromagnéticas es observando la energía de un fotón. La energía de un fotón (de luz) depende de su longitud de onda o frecuencia, como muestra la siguiente ecuación.

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda} = h \cdot f$$

Ecuación 8: Energía de una onda electromagnética.

Para esta ecuación, siendo h la constante de Planck, c la velocidad de la luz, λ la longitud de onda y f la frecuencia.

Como puedes ver, la luz de alta frecuencia (luz azul o ultravioleta) tendrá más energía que la luz de baja frecuencia (luz roja). También se puede decir que cuanto mayor es la frecuencia, más corta es la longitud de onda y al revés.

Nota: Esta es la razón por la que se insta a las personas a evitar la sobreexposición a la luz ultravioleta proveniente del Sol.

Actividad 7.1. El efecto Doppler (acústico)

Echemos un vistazo al efecto Doppler. Considera una fuente que emite ondas (acústicas o electromagnéticas) y un observador que las recibe. Imagina que eres el observador y la sirena de una ambulancia es la fuente emisora (ondas acústicas).

Si tú (el observador) estás sentado en un banco y la ambulancia, con su sirena encendida (la fuente emisora), está estacionada, recibirás ondas acústicas de frecuencia constante (y una longitud de onda constante). Sin embargo, si la ambulancia comienza a moverse hacia ti, percibirás las ondas sonoras a una frecuencia más alta (y una longitud de onda más corta).

El pico de la intensidad se alcanza una vez que la ambulancia está en su punto más cercano a ti, y disminuye a medida que se aleja. Este fenómeno se conoce como el "Efecto Doppler" y ocurre cada vez que una fuente de ondas (tanto de sonido como de luz) se aleja o se dirige hacia un observador.

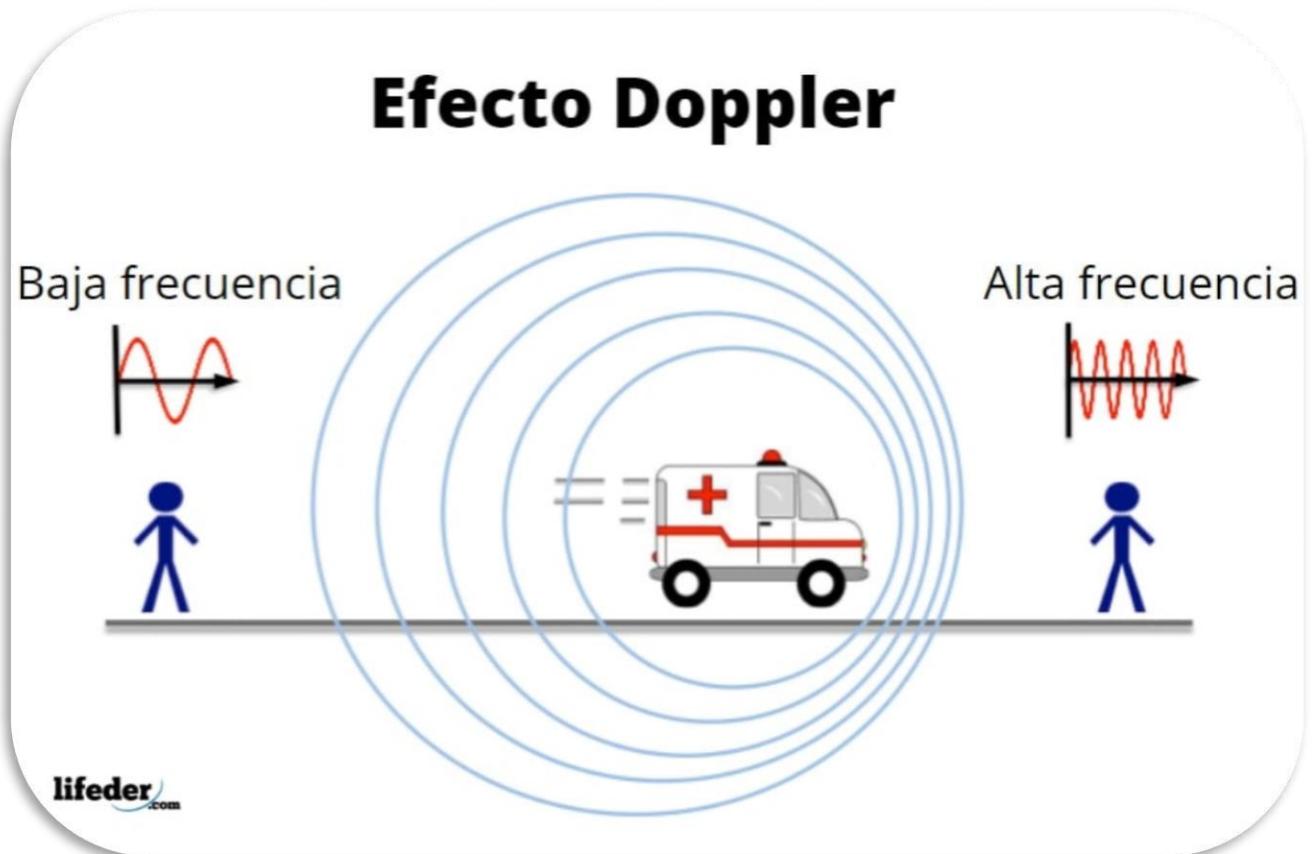


Figura 58: Representación gráfica del Efecto Doppler para dos observadores diferentes. (Créditos: <https://www.lifeder.com>)

Actividad 7.2. Desplazamiento al rojo y al azul de las galaxias

Cuando las ondas no son acústicas sino electromagnéticas, el aumento de la frecuencia se llama **desplazamiento al azul** y la disminución **desplazamiento al rojo**.

El término **desplazamiento al azul** significa que la luz cambia a colores de mayor frecuencia (no significa necesariamente que se vuelva azul). Es similar para la luz

desplazada al rojo que se desplaza hacia colores de frecuencia más baja (no necesariamente se vuelve roja).

El movimiento de rotación de las estrellas en la galaxia se puede calcular midiendo el desplazamiento rojo o azul de las estrellas que orbitan en movimiento circular. La Figura 60 representa una galaxia observadas desde la Tierra. En rojo están las regiones donde las estrellas se están moviendo más lejos de la Tierra (desplazado al rojo) y en azul, las que se están moviendo hacia la Tierra (desplazado hacia el azul). Este método funciona mejor en galaxias espirales Edge-On (galaxias que vemos de canto).

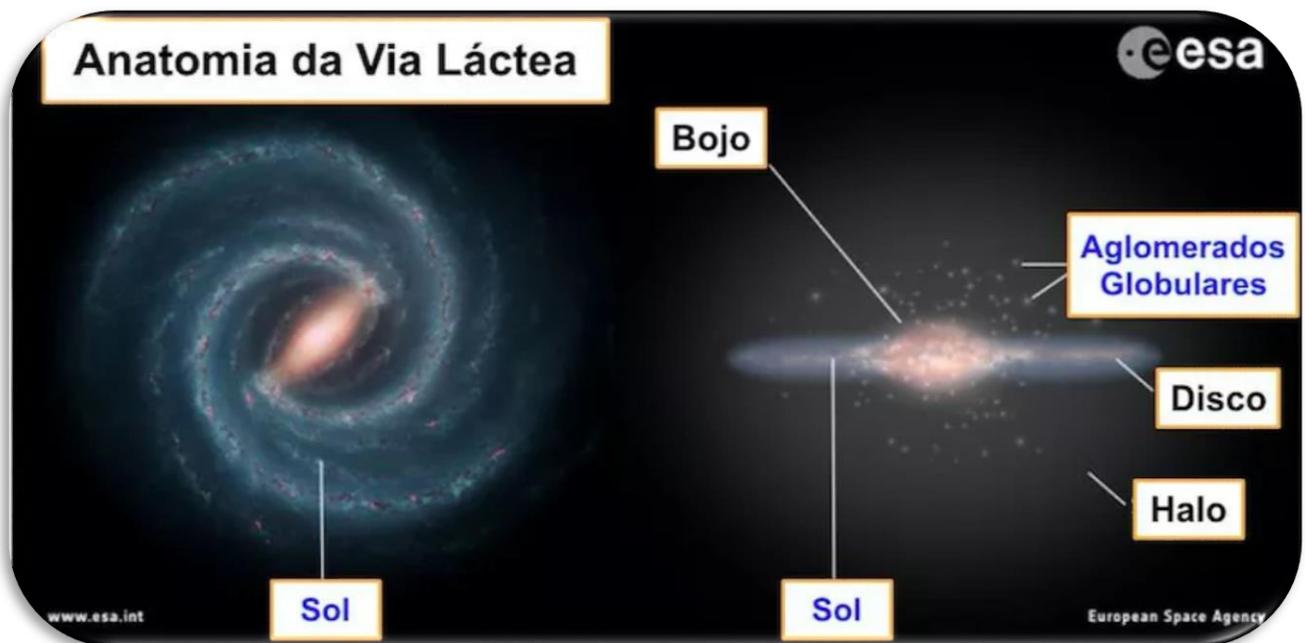


Figura 59: Vista de una galaxia espiral, la imagen izquierda con borde apagado y la imagen derecha con vista de borde. (Créditos: ESA)

Stellar velocities

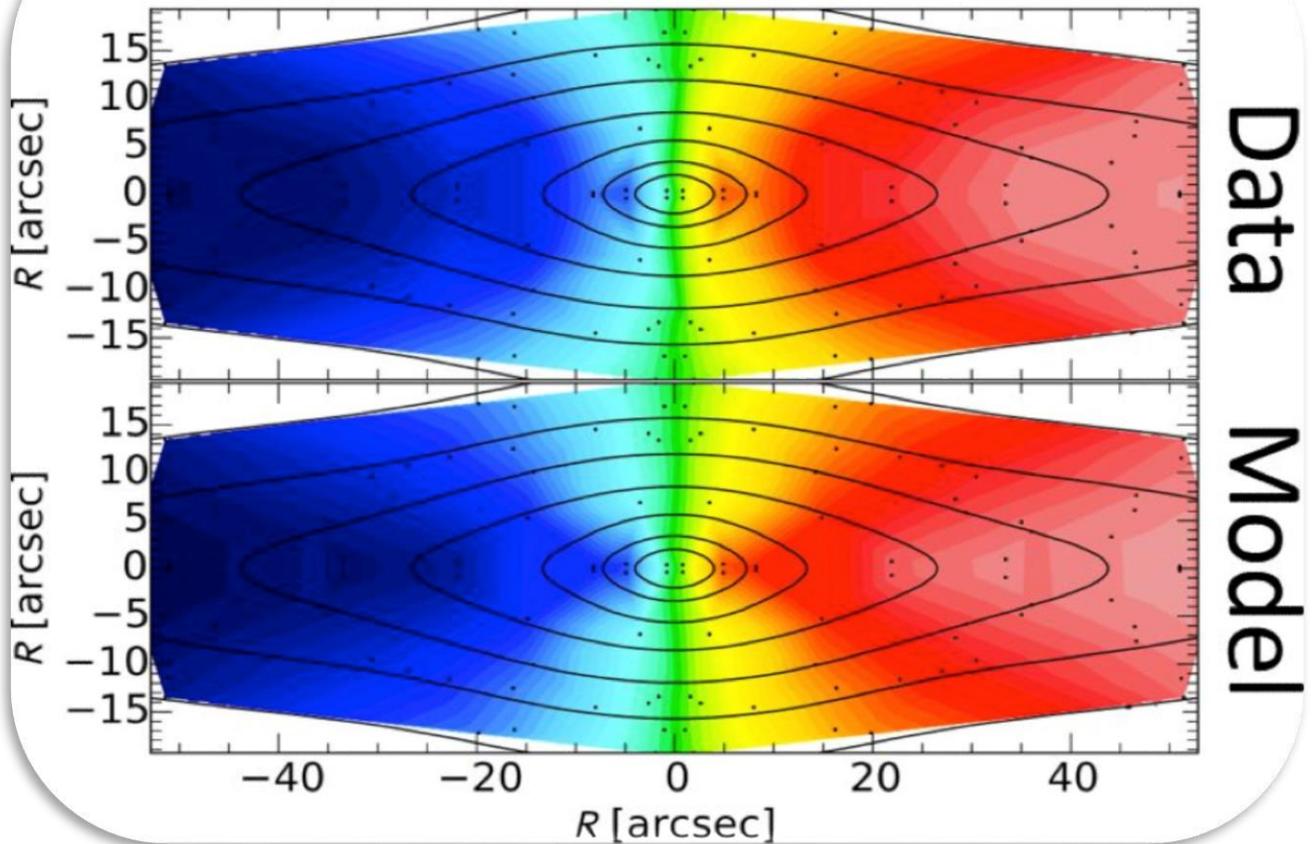


Figura 60: Ejemplo de mapeo y análisis de las velocidades de las estrellas en una galaxia elíptica. Los colores azules muestran regiones donde las estrellas se acercan hacia el observador en la Tierra, y los colores rojos muestran regiones que se están alejando. El panel superior muestra los datos originales y el panel inferior muestra un modelo numérico. (Créditos: Observatorio W.M. Keck)

Nota: Al restar el corrimiento al rojo total debido a la expansión del Universo, los físicos pueden determinar la rotación del disco a lo largo del eje perpendicular desde nuestro punto de vista.⁴

⁴ Expansión del Universo: Mira este video para saber más sobre él (<https://www.esa.int>)

Actividad 8. Movimiento rotacional

Un movimiento de rotación es el **movimiento de un objeto que mantiene una distancia constante a algún punto fijo en el espacio**. En el caso de las órbitas circulares, puede interpretarse como un cambio en la dirección de la velocidad, pero no en su valor.

En general, la mayoría de los objetos experimentan una combinación de movimiento lineal y rotacional que influye tanto en la dirección como en el valor de su velocidad. Sin embargo, para algunos sistemas como las estrellas que orbitan un centro galáctico, el movimiento se puede aproximar como un movimiento de rotación puro.

Este movimiento puede ser predicho por las leyes de Newton. Hemos aprendido que cada fuerza corresponde a alguna aceleración, lo que significa un cambio en la velocidad. Pero este cambio puede ser puramente direccional como en el caso de las órbitas circulares. Por lo tanto, los efectos de la gravedad se pueden utilizar para predecir la rotación circular esperada a cualquier distancia del centro del sistema (donde se encuentra la masa).

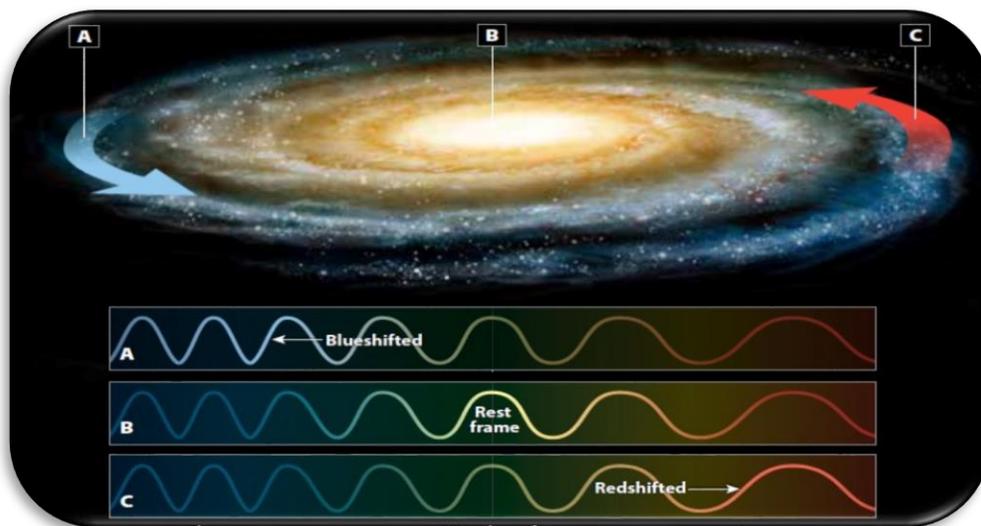


Figura 61: Descripción gráfica del movimiento de rotación de las galaxias. (Créditos: <https://astronomy.com>)



Actividad 8.1. Curvas de rotación de galaxias

Método 1: Aprender con recursos visuales

1. Mira el siguiente video del Instituto de Física Teórica sobre la materia oscura.

⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=IFXC9lrccqA>

2. Describe con tus propias palabras lo que entendiste de este video.

3. ¿Qué descubrió Vera Rubin?

Método 2: Aprender con la teoría

La **curva de rotación** de una galaxia es una representación visual de la velocidad orbital que los objetos tienen dentro de una galaxia con respecto a su distancia al centro galáctico, como se muestra en la Figura 62.

Hemos aprendido en la [Actividad 6.2.](#), que el contenido de materia de cualquier galaxia está compuesto por la materia del bulbo, el disco y el halo. Idealmente, a los físicos les gustaría desarrollar métodos para calcular individualmente cada uno de estos componentes.

$$M_{galaxy} = M_{bulge} + M_{disk} + M_{halo}$$

Ecuación 9: Contenido de masa de una galaxia para los diferentes componentes.

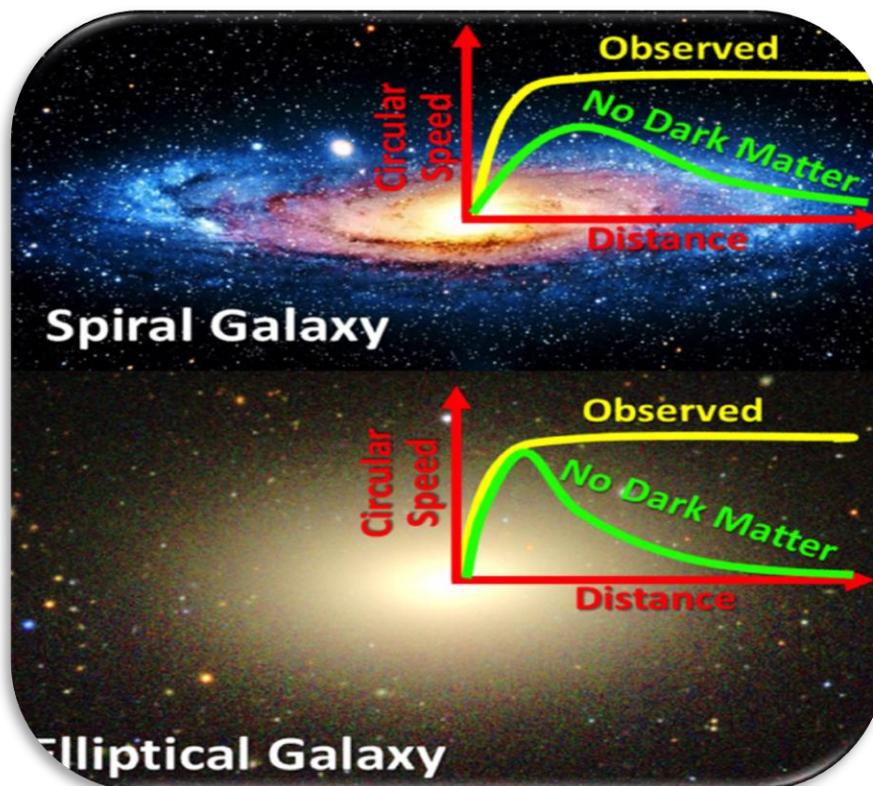


Figura 62: Las velocidades de las estrellas en órbitas circulares se han medido alrededor de galaxias espirales y elípticas. Sin materia oscura, las velocidades deberían disminuir, en cambio, la materia oscura mantiene las velocidades estables. (Créditos: [M. Cappellari](#))



Bajo la hipótesis de la existencia de Materia Oscura, la masa total de una galaxia puede pensarse como la suma de materia luminosa (estrellas, planetas, gas, polvo, etc.) y no luminosa (Materia Oscura, neutrinos). El contenido del halo de una galaxia podría inferirse de su masa total (calculada a partir de curvas de rotación o lentes gravitacionales) restando la contribución de masa del disco y del disco (calculada a partir de observaciones astronómicas del espectro electromagnético completo).

Actividad 8.2. Predicción clásica de curvas de rotación en galaxias

Método 1: Aprender con recursos visuales

1. Mira el siguiente video del Instituto de Física Teórica sobre la materia oscura.

⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=IFXC9lrccqA>

1. Escribe lo que entendiste de este video.

2. Dibuje las curvas de rotación esperadas (predichas) frente a las medidas de las galaxias. ¿Qué significa esto?

Método 2: Aprender con la teoría

En esta actividad vamos a calcular la curva de rotación de una galaxia espiral asumiendo que está formada por una esfera de densidad constante con el tamaño del bulbo. Nótese que en este modelo estamos descuidando la influencia de la materia en el disco y el halo.

Vamos a hacer uso de las siguientes ecuaciones para derivar la velocidad de rotación esperada dentro de una galaxia con respecto a su distancia al centro galáctico.

1. La Segunda Ley de Newton $F = ma$.
2. La definición de aceleración radial $a = v_{rot}^2/r$, donde v_{rot} es la velocidad de rotación y r es el radio de la órbita
3. Las fórmulas para volumen (V) y densidad (ρ) de una esfera.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad y \quad V = \frac{4}{3} \pi r^3$$

En consecuencia, podríamos considerar dos distribuciones principales para evaluar la velocidad de rotación esperada:

- 1) Objetos que orbitan fuera del bulbo, considerados como cuerpos puntuales.
- 2) Objetos que orbitan dentro del bulbo con una sola distribución de densidad.

1. **Distribución de la velocidad de rotación esperada para los objetos fuera del bulbo:** Para cada uno de los objetos con masa m y aceleración a , orbitando fuera del bulbo a una distancia r , siendo M la masa total del bulbo, la Ecuación 15 se aplica a su distribución de velocidad de rotación (v_{rot}^{out}).

$$F = ma = G \frac{Mm}{r^2} \Rightarrow m \frac{v_{rot}^2}{r} = G \frac{Mm}{r^2} \Rightarrow v_{rot}^{out} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

$$v_{rot}^{out} \propto \sqrt{1/r}$$

Ecuación 10: Velocidad de rotación esperada para los cuerpos fuera del bulbo.

2. **Distribución de la velocidad de rotación esperada para los objetos en órbita dentro del bulbo:** Para cada uno de los objetos que orbitan dentro del bulbo a una

distancia (r) del centro, suponiendo una densidad constante del bulbo (ρ), la Ecuación 16 es la que se aplica a la distribución de velocidad de rotación esperada (v_{rot}^{in}).

$$\rho = \frac{M}{V} \text{ y } V = \frac{4}{3}\pi r^3 \Rightarrow v_{rot}^{in} = \sqrt{GM/r} = \sqrt{G\rho\frac{4}{3}\pi r^3/r}$$

$$v_{rot}^{in} \propto r$$

Ecuación 11: Velocidad de rotación esperada para los cuerpos dentro del bulbo.

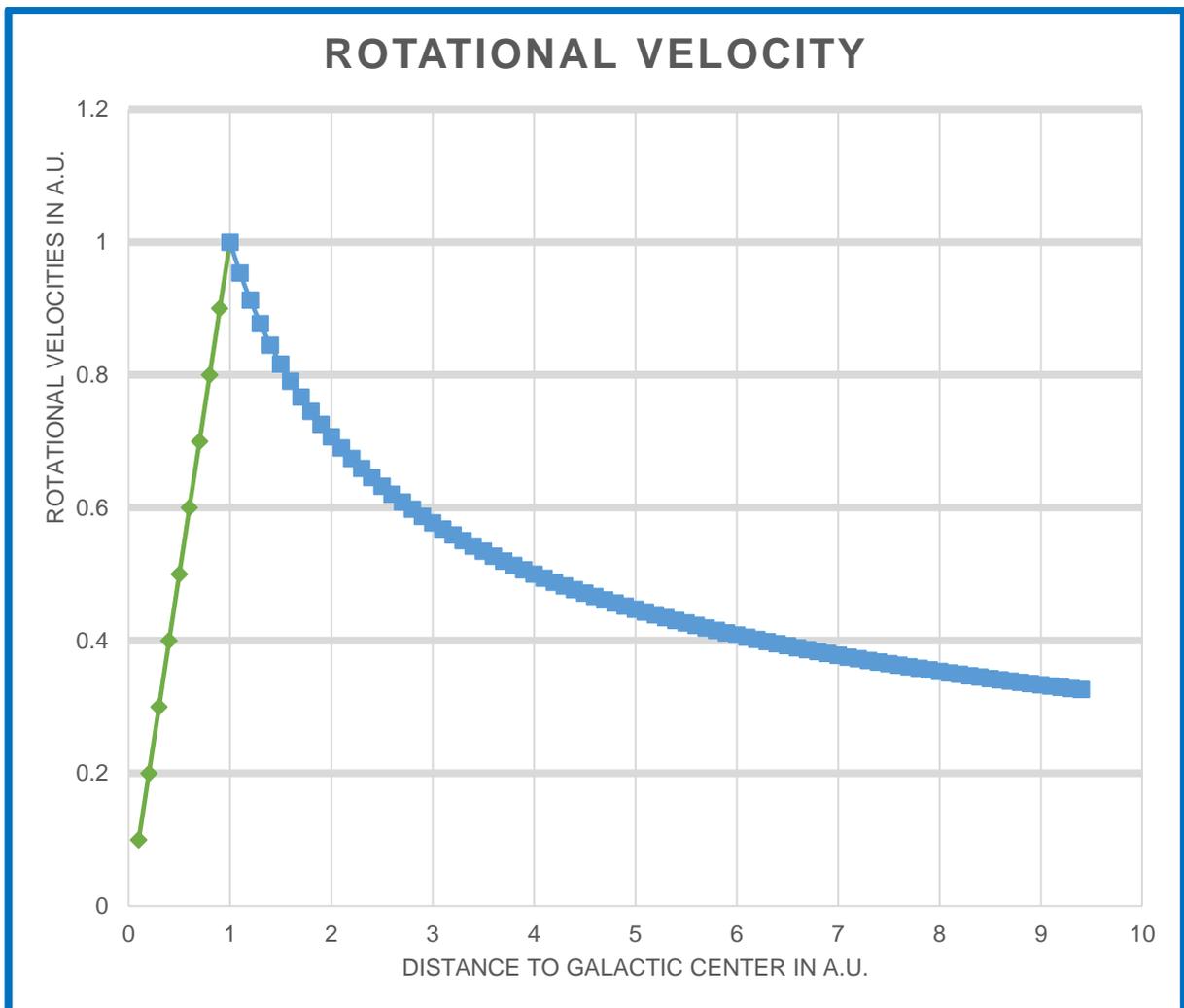


Figura 63: Representación gráfica de la distribución de velocidad esperada de objetos ligados gravitacionalmente a una galaxia espiral. (Créditos: Sergio.manthey@gmail.com)

Suponiendo que el mayor potencial gravitacional surge del bulbo galáctico y descuidando los efectos del disco y halo, se espera que las curvas de rotación aumenten linealmente dentro de la protuberancia y luego disminuyan en el interior del disco con un factor $1/\sqrt{r}$.

1. ¿Se te ocurre alguna forma de medir las curvas de rotación de las galaxias?



Actividad 8.3. Calcular la masa de una galaxia

La masa total de una galaxia se puede aproximar a partir de las curvas de rotación de los objetos que orbitan en el borde de las estructuras galácticas. Usando curvas de rotación y la siguiente ecuación se puede estimar la masa galáctica total. Esta ecuación se puede obtener fácilmente invirtiendo la expresión final en la Ecuación 10:

$$M_{galaxia} = \frac{v_{borde}^2 \cdot r_{borde}}{G}$$

Ecuación 12: Aproximación de la masa galáctica total.

$M_{galaxia}$ es la masa total de la galaxia, v_{borde} es la velocidad de rotación de los objetos que orbitan en el borde de la galaxia, r_{borde} es la distancia a los objetos en órbita lejana que aún sienten los efectos gravitacionales de la galaxia y G es la constante gravitacional.

Observe que esta medición depende en gran medida de la distancia de los objetos que considera "dentro de la galaxia". Para tener una estimación correcta de este método hay que considerar objetos que orbitan mucho más lejos que el ancho aparente del disco galáctico.

1. ¿Por qué crees que las velocidades de rotación observadas y esperadas son tan diferentes?

$$M_{galaxia} = M_{detectable} + M_{indetectable} = M_{bulbo} + M_{disco} + M_{halo} + M_{halo\ indetectable}$$

Ecuación 13: Contenido de masa de una galaxia para los diferentes componentes.



Actividad 9. Coordenadas celestes: Ecuatoriales vs. Galácticas

Método 1: Aprender con recursos visuales

1. Vea el siguiente video sobre sistemas de coordenadas celestes.

⇒ https://www.youtube.com/watch?v=JniHpg_pQp4

2. Dibuja un boceto de los sistemas de coordenadas Ecuatorial y Galáctico y descríbelos brevemente.

Método 2: Aprender con la teoría

Actividad 9.1. Sistema de Coordenadas Ecuatoriales (J2000)

Si observamos el cielo nocturno, notaremos cómo las estrellas parecen moverse en órbitas circulares con radio creciente cuanto más lejos están del punto norte (ver Figura 64). Esto no es casualidad y hoy sabemos que esta trayectoria aparente es solo una consecuencia de la propia rotación de la Tierra.



Figura 64: Trayectoria de las estrellas en el cielo nocturno. (Créditos: ak8.picdn.net)

Sin embargo, esta observación llevó a los astrónomos griegos a la creación de un modelo donde la Tierra estaba en el centro del Universo, y los planetas y el Sol orbitaban a su alrededor. Las estrellas serían agujeros en una esfera oscura que rodeaba el sistema solar y giraba alrededor de la Tierra (ver Figura 65)

Debido a la distancia de las estrellas a la Tierra, todas parecen ser puntos fijos en lo que hoy llamamos la Esfera Celeste. Un mapa 2D del cielo que contiene todos los objetos astronómicos. La forma en que nos referimos a los puntos en este mapa se denomina sistema de coordenadas celeste.

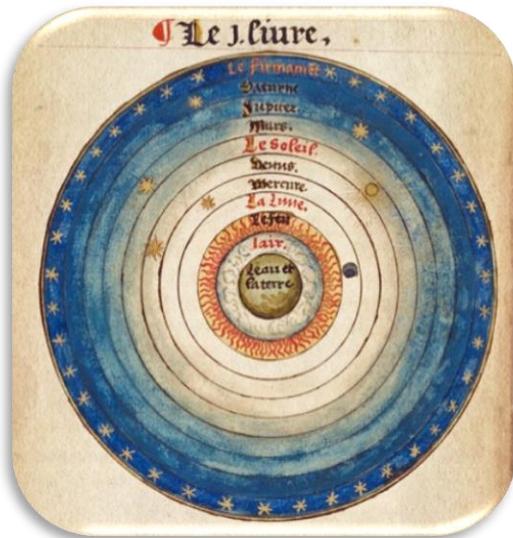


Figura 65: Representación antigua de la cosmología. (Créditos: ak8.picdn.net)



Figura 66: Modelo de la Tierra dentro de la Esfera Celeste. (Créditos: lh3.googleusercontent.com)

Hoy en día, sabemos que este antiguo modelo es erróneo. La Tierra no es el centro del Universo. Es solo otro planeta dentro de un sistema solar aleatorio dentro de una galaxia aleatoria. Sin embargo, debido a las distancias extremas entre las estrellas, no observamos los efectos del movimiento de la Tierra alrededor de nuestro Sol, de hecho (descuidando la rotación de la Esfera Celeste) la mayoría de los objetos parecen ser puntos fijos en el cielo nocturno con respecto a las escalas de tiempo humanas. El requisito de observaciones más precisas condujo al primer y más usado sistema de coordenadas utilizado en astronomía: **el Sistema Ecuatorial.**

El sistema de coordenadas ecuatoriales generalmente se implementa en coordenadas esféricas. Su plano fundamental está formado por la proyección de la línea del Ecuador sobre la Esfera Celeste. Este plano proporciona la referencia para las dos coordenadas necesarias para identificar cualquier punto de la esfera celeste:

- **La declinación (DEC)** es la distancia angular perpendicular al plano ecuatorial. Se mide en grados y convencionalmente es positivo al norte y negativo al sur.
- **La Ascensión Recta (AR)** es la distancia angular dentro del plano ecuatorial. Para esta medición, el equinoccio vernal (la intersección entre el plano ecuatorial y la

eclíptica⁵) sirve como punto de referencia. Por razones históricas, la AR se expresa en horas, minutos y segundos siderales (en lugar de grados).

Debido a la precesión del eje de rotación de la Tierra, este sistema de coordenadas gira hacia el oeste alrededor de los polos con el tiempo. Este es un efecto que solo se nota en escalas de tiempo largas. Sin embargo, para mediciones precisas, todas las coordenadas ecuatoriales deben ir acompañadas de una fecha exacta del equinoccio, conocida como época. La más común es J2000, que corresponde al año 2000 del calendario juliano.

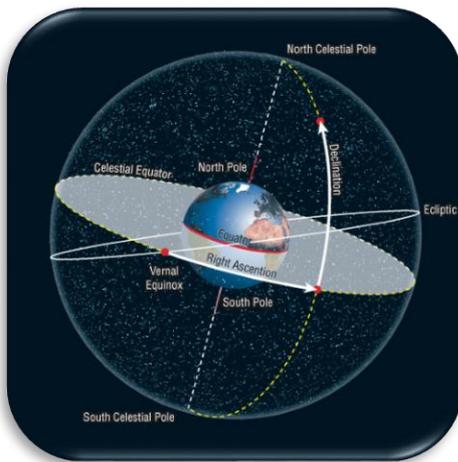


Figura 67: Sistema de coordenadas ecuatoriales. (Créditos: davamckay.ca)

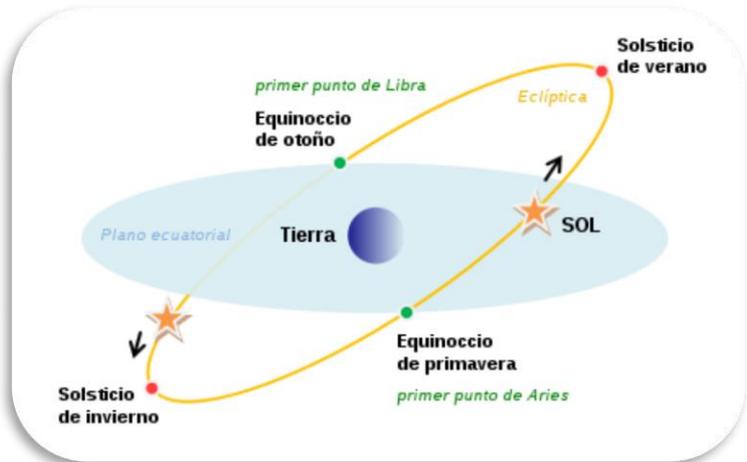


Figura 68: Representación gráfica del equinoccio vernal anual. (Créditos: <http://3.bp.blogspot.com>)

A pesar del éxito del Sistema Ecuatorial, hay casos en los que otros podrían ser más convenientes. Por ejemplo, al estudiar nuestra galaxia, la Vía Láctea, sería más claro definir un sistema esférico con su plano principal correspondiente al disco galáctico, donde se produce la mayor parte del movimiento y la mayor parte de la materia está contenida.

Actividad 9.2. Sistema de Coordenadas Galácticas (GAL)

⁵ La eclíptica es la línea que recorre el Sol con respecto al fondo fijo de la esfera celeste.

El Sistema de Coordenadas Galácticas es un sistema esférico de referencia que utiliza como plano principal, el disco galáctico de la Vía Láctea. En este plano, se elige el origen en el centro de nuestro Sol y la línea de referencia lo conecta con el centro galáctico. Está construido a partir de dos coordenadas:

- **La latitud galáctica (b)** es la distancia angular perpendicular al plano galáctico. Se mide en grados y convencionalmente es positivo al norte y negativo al sur.
- **La longitud galáctica (l)** es la distancia angular dentro del plano galáctico y hacia el este con respecto al centro. Se mide en grados.

El movimiento relativamente pequeño del Sol con respecto al centro galáctico, significa que este sistema no cambia notablemente con el tiempo, pero nuestra falta de precisión a la hora de medir el centro galáctico requiere que este sistema se defina desde el Ecuatorial.

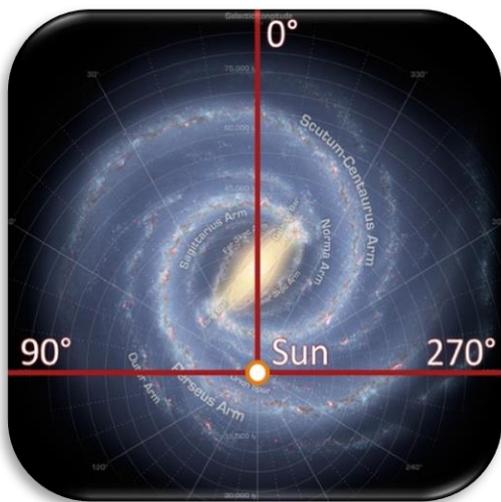


Figura 69: Coordenada longitudinal del sistema galáctico. (Créditos: es.académico)

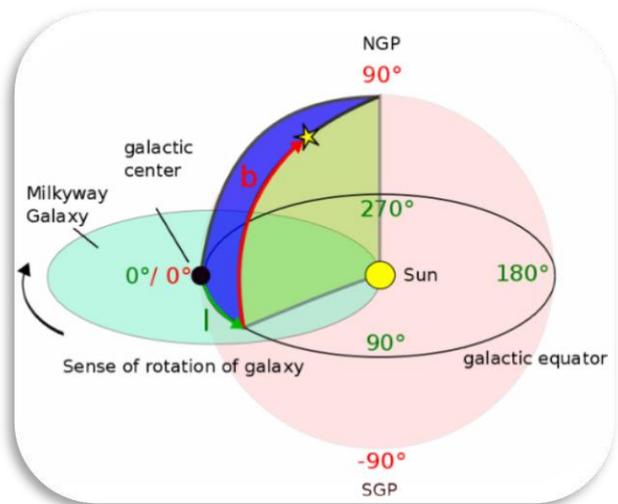


Figura 70: Representación gráfica del Sistema de Coordenadas Galácticas. (Créditos: auger.org)

Puedes utilizar el siguiente enlace para observar este sistema dinámicamente con WOLFRAM.

⇒ <https://demonstrations.wolfram.com/GalacticCoordinateSystem/>

Actividad 9.3. Ecuatorial vs. Galáctico

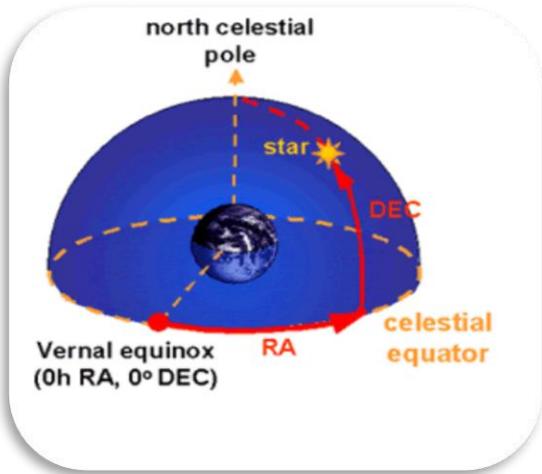


Figura 71: Sistema de coordenadas ecuatoriales. (Créditos: astronomy.swin.edu.au)

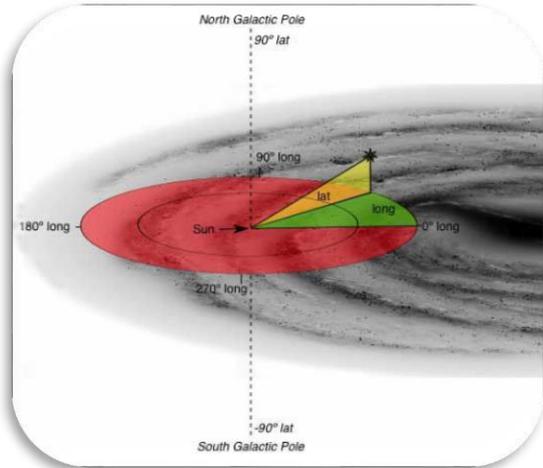


Figura 72: Sistema de coordenadas galácticas. (Créditos: 4.bp.blogspot.com)

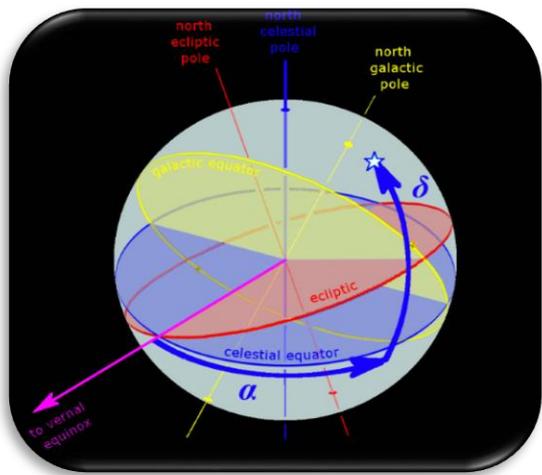


Figura 73: Superposición de sistemas astronómicos comunes con referencia ecuatorial marcada. (Créditos: upload.wikimedia.org)

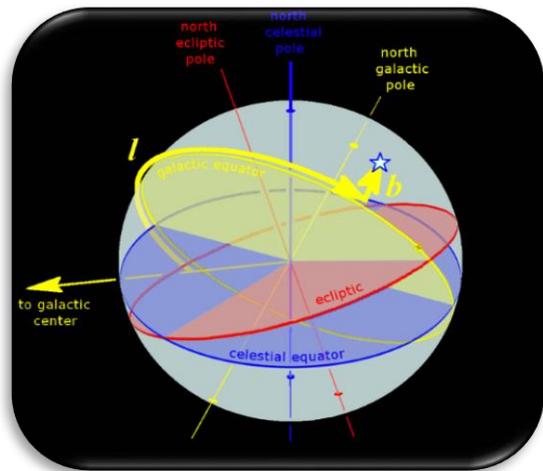


Figura 74: Superposición de sistemas astronómicos comunes con marcada referencia galáctica. (Créditos: upload.wikimedia.org)

El sistema de coordenadas J2000 es el sistema [de coordenadas ecuatoriales](#) más utilizado.

El sistema de coordenadas galácticas se utiliza principalmente cuando se estudia la Vía Láctea.

Tabla 10: Comparación de los sistemas de coordenadas ecuatoriales y galácticas.

Se puede ver la posición relativa de las estrellas en ambos sistemas en la Figura 73 y la Figura 74. Observa cómo el plano principal del sistema ecuatorial está inclinado con



respecto al galáctico. Esto tiene como consecuencia una rotación que se puede observar, por ejemplo, al cambiar entre sistemas de coordenadas en [ESASky](#).

Además de cambiar entre sistemas de coordenadas, es posible que desees representar cada coordenada en grados ($^{\circ}$) o grados ($^{\circ}$), minutos de arco ($'$) y segundos de arco ($''$). Para ello es necesario saber que 1 minuto de arco se define como $1/60$ de un grado ($^{\circ}$) y que 1 segundo de arco se define como $1/60$ de un minuto de arco.

Para pasar un punto P en grados ($^{\circ}$), minutos ($'$) y segundos ($''$) a grados ($^{\circ}$), usamos:

- $P = (x^{\circ}, y', z'') = x^{\circ} + (y/60)^{\circ} + (z/3600)^{\circ}$

Para pasar un punto P en grados ($^{\circ}$) a grados ($^{\circ}$), minutos ($'$) y segundos ($''$), usamos:

- $P = x^{\circ} = d(^{\circ}), dd('), ddd('')$
- $d(^{\circ}) = \text{entero}(P)$
- $dd(') = \text{entero}((P-d) \times 60)$
- $ddd('') = \text{entero}((P-d-dd/60) \times 3600)$

Por ejemplo, $P = 30.2638^{\circ} = 30^{\circ}, 15', 50''$

$$d(^{\circ}) = \text{entero}(P) = 30^{\circ}$$

$$dd(') = \text{entero}((P-d) \times 60) = \text{entero}(0,2638 \times 60) = 15'$$

$$ddd('') = \text{entero}((P-d-dd/60) \times 3600) = \text{entero}((0,2638 - 15/60) \times 3600) = 50''$$

Además, uno podría querer cambiar entre horas, minutos y segundos y grados para las mediciones de ascensión recta (AR). Esto se puede hacer simplemente con ($360^{\circ}/24h=15^{\circ}$):

- $P(^{\circ}) = (hh, mm, ss) = 15 \times (hh, mm/60, ss/3600)$.

Actividad 10. Lentes gravitacionales y exploración de materia oscura por la Agencia Espacial Europea

Las muchas preguntas existentes sobre las lentes gravitacionales y la Materia Oscura están un paso más cerca de ser respondidas gracias a la exploración científica realizada, por ejemplo, por la Agencia Espacial Europea (ESA). Las misiones de la ESA están constantemente empujando los límites de nuestro conocimiento y ayudando a los astrónomos a comprender la evolución de nuestro Universo. Tales misiones incluyen:

Descripción del instrumento	Imagen
<p>El Telescopio Espacial Hubble, una colaboración entre la ESA y la NASA, fue lanzado en 1990 y todavía está en funcionamiento. Uno de los principales objetivos de la misión incluía el estudio de la historia y evolución del Universo. Hubble ha producido un mapa 3D de la materia oscura en regiones concretas de nuestro Universo. Este hito es un paso fundamental para comprender cómo se formaron y crecen las galaxias.</p>	 <p><i>Figura 75: Telescopio Espacial Hubble. (Créditos: www.sun.org)</i></p>
<p>XMM-Newton significa X-ray Multi-Mirror y es un observatorio de rayos X de la ESA en honor a Sir Isaac Newton. Fue lanzado en 1999 y es el telescopio de rayos X más potente jamás construido. Todavía está detectando fuentes de rayos X y ayudando a resolver misterios cósmicos. Sus observaciones de galaxias distantes han permitido a los astrónomos estudiar la evolución de la materia oscura y producir resultados innovadores.</p>	 <p><i>Figura 76: XMM-Newton. (Créditos: www.esa.int)</i></p>

Planck es un satélite de la ESA, lanzado en 2009 y la primera misión europea con el objetivo de analizar la radiación de fondo procedente del Big Bang y al mismo tiempo proporcionar respuestas a preguntas sobre qué es la materia oscura y cómo domina en el Universo.

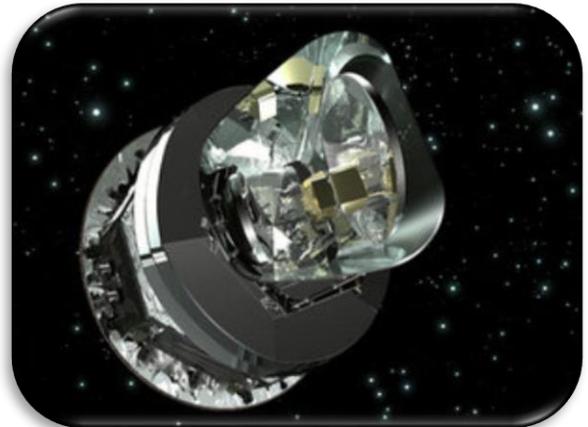


Figura 77: Telescopio Planck. (Créditos: www.21stcentech.com)

Herschel es el observatorio espacial infrarrojo más grande de la ESA, lanzado, en 2009 es el más grande jamás construido. Los primeros datos publicados por Herschel contenían cinco sistemas de lentes gravitacionales, que proporcionaron información significativa que cambió el estudio sobre las lentes gravitacionales. Herschel fue cerrado en 2013.

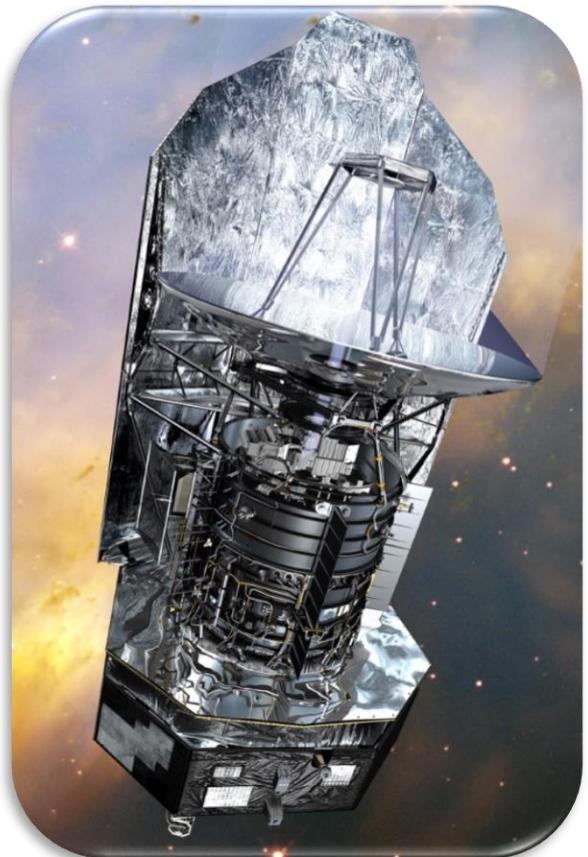


Figura 78: Telescopio Herschel. (Créditos: mappingignorance.org)

Gaia es un observatorio espacial de la ESA, lanzado en 2013 con el objetivo de producir el mapa 3D más grande de la Vía Láctea y revelar su historia. La precisión de vanguardia de Gaia al medir la posición de los objetos pondrá a prueba la teoría de la Relatividad General de Einstein, ya que podrá capturar los efectos gravitacionales que se han descuidado hasta ahora. Por ejemplo, la microlente gravitacional detectada en la estrella Gaia16aye. Se vio que su brillo variaba extrañamente debido a la presencia de un objeto masivo en su línea de visión que actuaba como una lente en la estrella. Los científicos esperan que Gaia detecte muchos de estos eventos de micro-lentes.

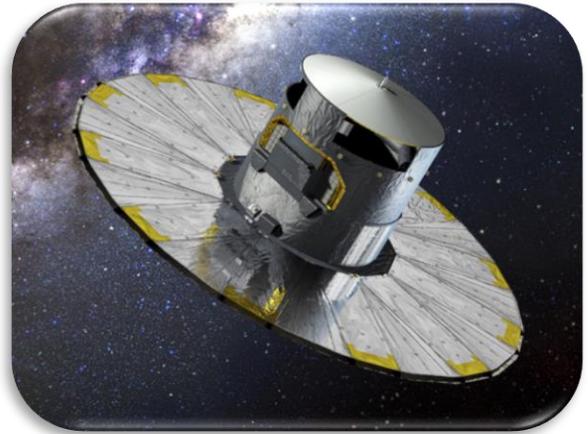


Figura 79: Telescopio Gaia. (Créditos: img.rt.com)

El **Telescopio James Webb** (JWST) es el próximo observatorio de ciencia espacial programado para ser lanzado en 2021. Es una colaboración entre la NASA, la ESA y la Agencia Espacial Canadiense y tiene como objetivo explorar las primeras galaxias y hacer descubrimientos innovadores. Es el telescopio espacial más potente jamás construido y será el sucesor del Hubble. La idea es mapear la materia oscura alrededor de las galaxias. ¡Este observatorio infrarrojo podrá observar objetos que están a más de 13 mil millones de años luz de distancia! Lo hará detectando la luz con lentes gravitacionales de los cúmulos de galaxias.



Figura 80: Telescopio James Webb. (Créditos: mediadc.brightspotcdn.com)

Euclid es un telescopio espacial de la ESA que tiene como objetivo obtener imágenes de miles de millones de galaxias en el cielo y ayudar a medir la expansión del Universo, así como la velocidad a la que crecen las estructuras galácticas. Esto, a su vez, ayudará a los astrónomos a comprender más a fondo la materia oscura y a probar la teoría de la relatividad general de Einstein. Euclid se lanzará en 2022. También está preparado para sondear lentes gravitacionales que miden la distorsión de las imágenes de galaxias y, por lo tanto, mapear la distribución de la materia oscura.

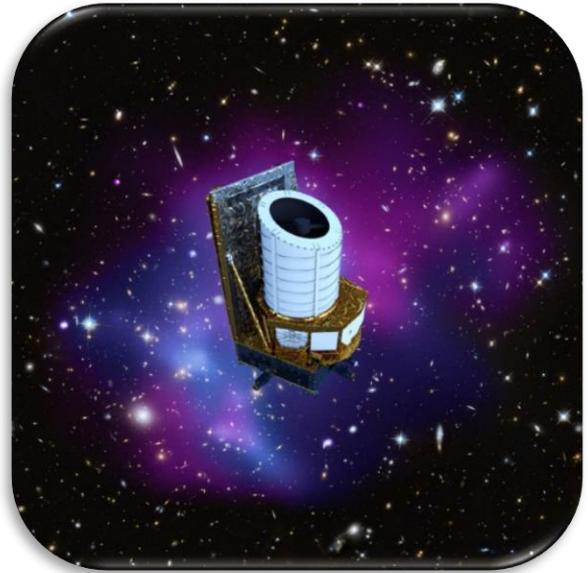


Figura 81: Telescopio Euclides. (Créditos: www.spaceneedsfeed.com)

Cuadro 11: Lista y descripción de algunas de las misiones más importantes de la ESA.



Fase 2



Actividad 11. ¿Qué has aprendido hasta ahora?

Completa [este cuestionario](#) para evaluar su aprendizaje.

Actividad 12. Solicita una videollamada con el equipo CESAR

El equipo CESAR siempre está ahí para responder a sus necesidades y preguntas. Estamos encantados de ayudar en cualquier tema relacionado con el buen funcionamiento de nuestros guías y actividades. No dude en ponerse en contacto con nosotros en caso de que necesite apoyo.

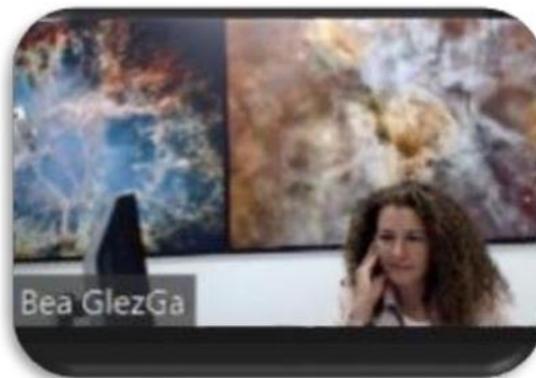


Figura 82: Imagen del equipo de CESAR haciendo una videollamada.



Fase 3



Actividad 13. Introducción al trabajo científico

Durante los siguientes desafíos seguirás el método científico. Este método asegura que el conocimiento científico conduzca a la correcta y siempre mejor comprensión de nuestro Universo (ver

Figura 83 para un resumen gráfico).

- 1) **Pregunta:** Pregúntese acerca de la realidad de la naturaleza (por ejemplo, lo que la materia oscura y las lentes gravitacionales podrían ser)
- 2) **Investigación:** Desarrolla una buena comprensión de todos los fenómenos involucrados y descríbelos de forma pertinente.
- 3) **Hipótesis:** crea un modelo del sistema que quieras estudiar e intenta predecir teóricamente el resultado de tu experimento.
- 4) **Prueba:** Realice su propio experimento (si es posible) o evalúe los datos proporcionados por otros científicos mientras recuerda verificar toda la información.
- 5) **Analizar:** Compare sus predicciones con datos reales y compruebe si hay similitudes y desviaciones.
- 6) **Resultados:** Intente dar una explicación sobre el éxito o el fracaso de su modelo y refinarlo (si es posible) agregando nuevos componentes que se ajusten mejor a los datos.
- 7) **¡Repetir!**

Modelo simplificado de las etapas del método científico

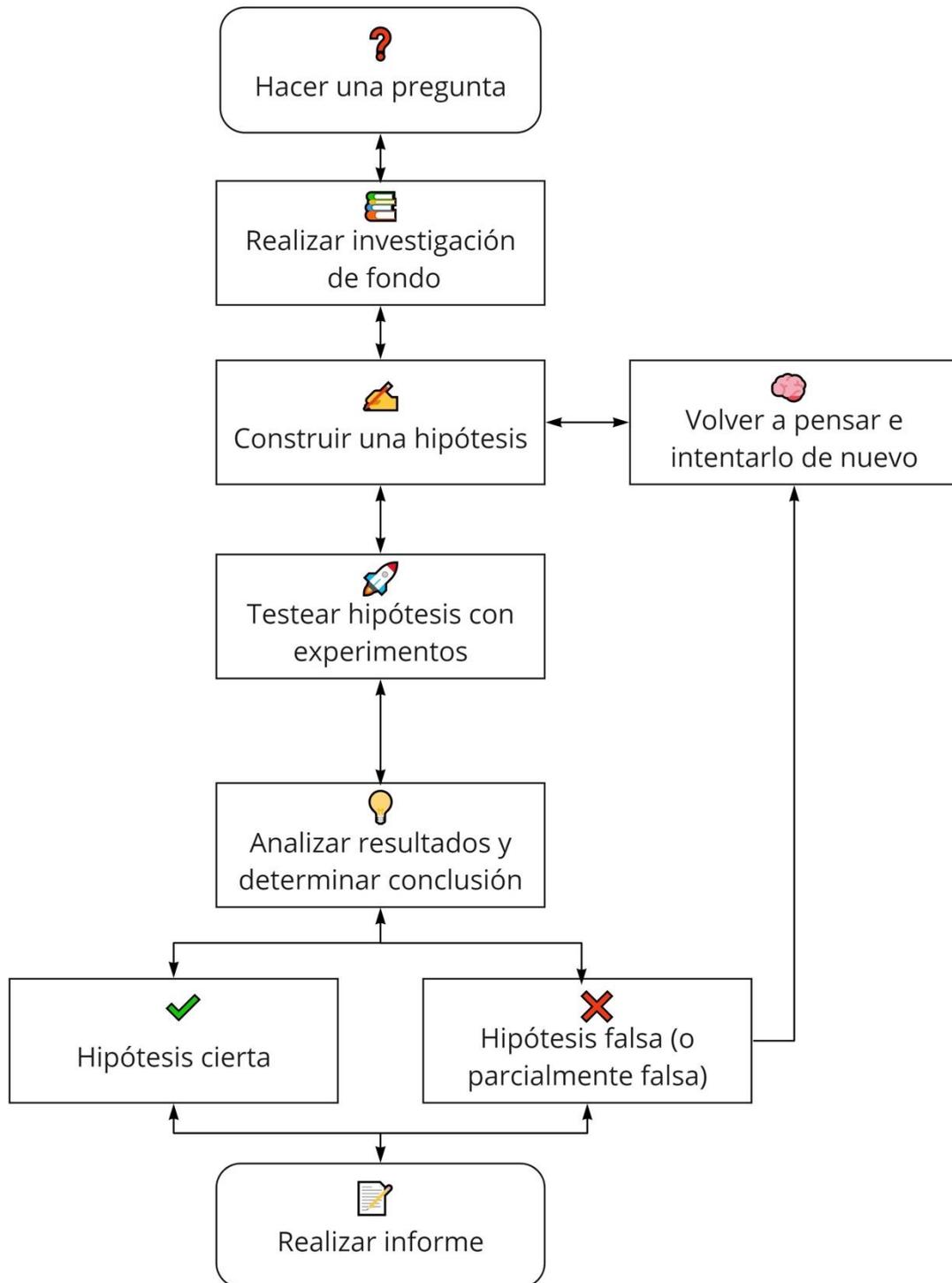


Figura 83: El método científico. Créditos: en.wikipedia.org

Actividad 14. Desafío científico 1: Los anillos de Einstein

En este desafío científico explorarás el Universo usando ESASky. Tus objetivos son los siguientes:

1. Busca diferentes patrones de lentes gravitacionales.
2. ESASky incorpora herramientas para seleccionar entre diferentes telescopios.
3. Reconoce las coordenadas del objeto y anota los dos sistemas diferentes.
4. Exporta una imagen del objeto de interés.

Se te pedirá que completes la Tabla 12 con el resultado de tu exploración y respondas las preguntas que siguen.

Actividad 14.1. ¡Comencemos!

Lo más probable es que hayas visto en la red algunas noticias sobre los anillos de Einstein:



Figura 84: Tweet de Mario Picazo sobre imágenes reales de anillos de Einstein. (Créditos: twitter.com)

¿Recuerdas qué son y cómo se forman? Consulta nuestra [Actividad 4](#) sobre lentes gravitacionales si este no es el caso.

En el sitio web de Hubble se pueden ver diferentes tipos de anillos de Einstein (ver Figura 85) Pincha en el siguiente [enlace](#) para obtener una buena impresión de lo que vamos a estar buscando.

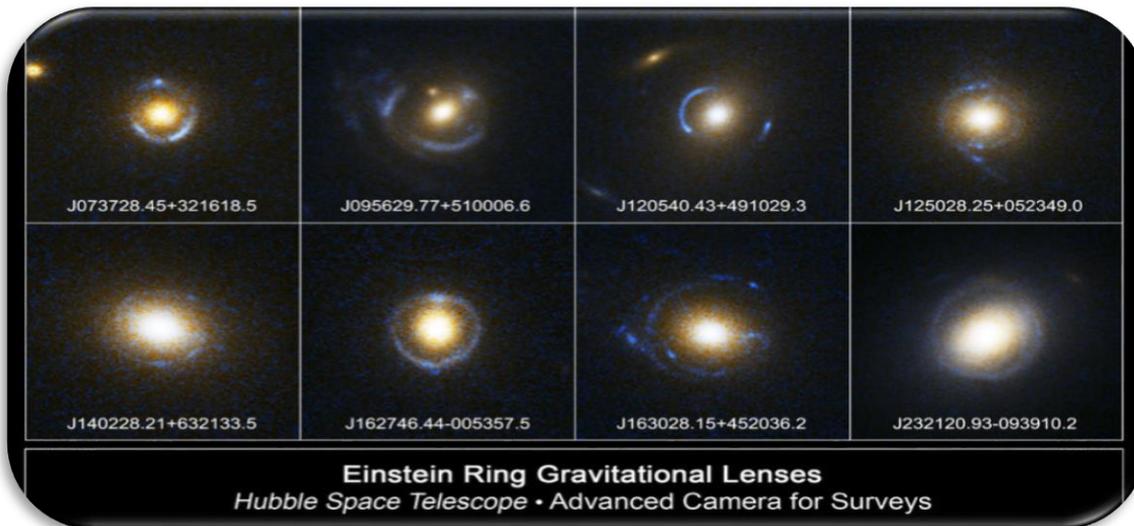


Figura 85: Galería de anillos de Einstein. (Créditos: hubblesite.org)

Actividad 14.2. Familiarizarse con ESASky

ESASky es un portal de descubrimiento científico que permite un fácil acceso a todo el cielo observado por las misiones científicas de la Agencia Espacial Europea. Todos los tutoriales de ayuda de ESASky están disponibles en este [enlace](#).

1. Haz clic en este enlace para entrar en [ESASky](#) (ver Figura 86). Elije la opción "Explorer" (la forma más sencilla de familiarizarse con ESASky).
2. Si deseas buscar un objeto específico (por ejemplo, Nebulosa del Cangrejo) escribe su nombre en el cuadro de búsqueda que se encuentra en el área superior derecha del portal (consulta la Figura 87). Ten en cuenta que es necesario escribir el nombre del objeto en inglés y/o en un formato particular, para ser reconocido por las bases de datos astronómicas.



Figura 86: Portal ESASky seleccionando el modo Explorador. (Créditos: sky.esa.int)



Figura 87: Cuadro de búsqueda de ESASky. (Créditos: sky.esa.int)

- Haga clic en el botón superior izquierdo (ver Figura 88) para activar la herramienta "Select Sky". Desde allí podrás elegir entre las diferentes longitudes de onda y telescopios disponibles. Seleccione la longitud de onda y la facilidad indicadas en la primera columna de la Tabla 12.



Figura 88: ESASky seleccione la herramienta "Select Sky" para elegir el instrumento. (Créditos: sky.esa.int)

Nota: no para todos ellos debe haber datos de su objeto seleccionado. Observa que en la parte superior izquierda hay un indicador de coordenadas (consulta la Figura 89).



Figura 89: Esquina superior izquierda con selección del sistema de coordenadas. (Créditos: sky.esa.int)

- Al hacer clic en el nombre del sistema de coordenadas (J2000 o GAL) podrá cambiar entre los dos. Los detalles exactos de ambos sistemas se pueden encontrar en [Actividad 9](#).

Las principales diferencias que hay que recordar son que J2000 es un sistema de coordenadas ecuatorial, mientras que GAL esta basado en el plano galáctico.

- Puedes tomar una instantánea en ESASky del objeto en su campo de visión. Para hacer esto, presiona el botón de la cámara en la parte superior de la pantalla como se indica en Figura 90.

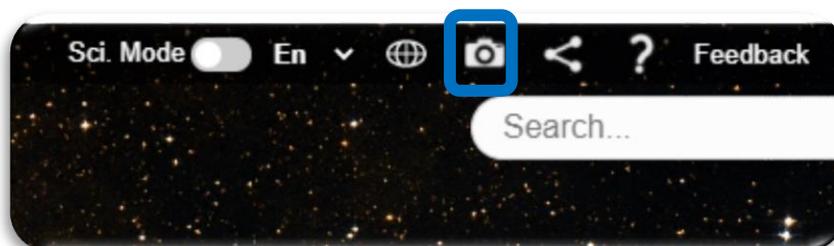


Figura 90: Esquina superior izquierda con botón de instantánea. (Crédito: sky.esa.int)

Actividad 14.3. Toma una foto de un anillo de Einstein



Rellena la Tabla 12 recopilando datos de los Anillos de Einstein de ESASky.

La información proporcionada es:

- Nombre del objeto.
- Filtro (siempre óptico).
- Instalación (telescopio y/o satélite espacial) e instrumento.

La información requerida para rellenar la tabla es:

- Coordenadas del centro del objeto en Coordenadas Ecuatoriales (época J2000).
- Coordenadas del centro del objeto en Coordenadas Galácticas.
- Imagen del Anillo de Einstein.

Para ello, sigue los siguientes pasos:

1. Selecciona la opción "*Select Sky*" e intenta encontrar el filtro / instalación / instrumento correcto para cada objeto de la Tabla 12 (consulta la [Actividad 13.2.](#) para más información al respecto).
2. Completa la columna **Coordenadas** con los sistemas Ecuatorial (J2000) y Galáctico (GAL). Consulta la [Actividad 13.2.](#) para más información al respecto.
3. Toma una imagen de cada uno de los anillos de Einstein de ESASky y completa la columna **Imagen** de la Tabla 12 (consulte la Figura 90).

Nombre del objeto, Filtro / Instalación / Instrumento	Coordenadas	Imagen
J073728.45+321618.5 Óptico/HST/WFC3	Ecuatorial J2000:	
	GAL:	
J095629.77+510006.6 Óptico/HST/WFC3	Ecuatorial J2000:	



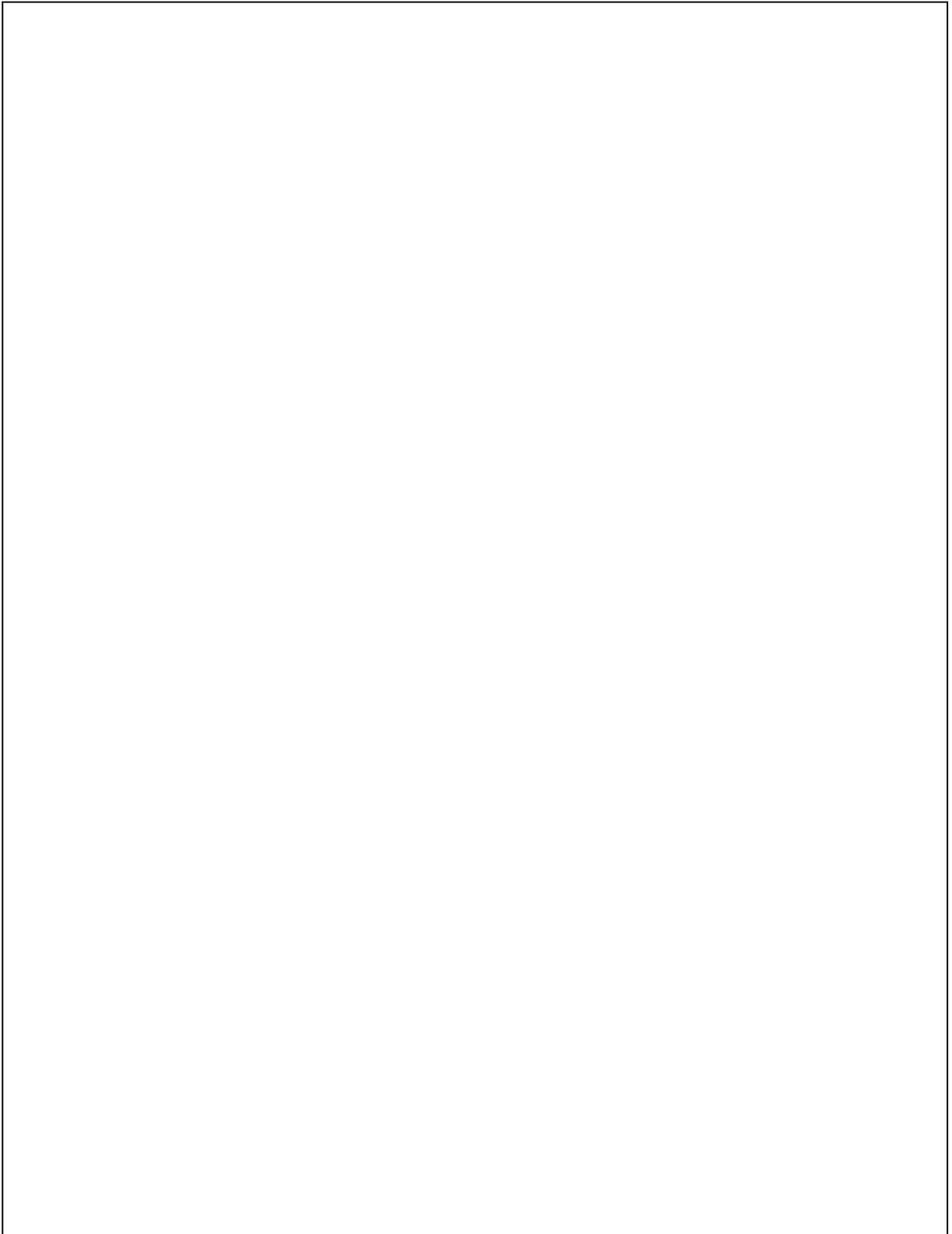
	GAL:	
J120540.43+491029.3 Óptica/HST/ACS	Ecuatorial J2000:	
	GAL:	
J125028.25+052349.0 Óptica/HST/ACS	Ecuatorial J2000:	
	GAL:	
J140228.21+632133.5 Óptica/HST/ACS	Ecuatorial J2000:	
	GAL:	
J162746.44-005357.5 Óptica/HST/ACS	Ecuatorial J2000:	
	GAL:	
J163028.15+452036.2 Óptico/HST/WFC3	Ecuatorial J2000:	

	GAL:	
J232120.93-093910.2 Óptica/HST/ACS	Ecuatorial J2000:	
	GAL:	

Tabla 12: Nombre de los anillos de Einstein con las coordenadas e imágenes correspondientes.

4. ¿Has notado alguna correlación entre el nombre de los Anillos de Einstein y sus coordenadas?

5. ¿Qué sucede cuando cambias entre los dos sistemas de coordenadas diferentes?
¿Puede explicar por qué? Añade un dibujo a tu explicación.



Actividad 14.4. Calcular la masa de una lente gravitacional

Como vimos en la [Actividad 4.3.](#), un anillo de Einstein es un patrón especial de lente gravitacional con su proyección de materia radialmente simétrica, donde el observador, la lente y la galaxia están alineados. Esta simetría causa una estructura en forma de anillo.

Calculemos la masa de ciertos anillos de Einstein proporcionados en la Tabla 12. Sigue el ejemplo de este cálculo para el anillo de Einstein J073728.45+321618.5 y replica estos pasos para otros dos objetos de la Tabla 12.

1. **Encontrar las coordenadas de los puntos de interés en ESASky:**

Busca las coordenadas del centro y el borde del Anillo de Einstein en [ESASky](#) para calcular la distancia radial en radianes (rad). **Consejo: utiliza las coordenadas GAL que se expresan en grados y se pueden transformar fácilmente a rad.**

Para leer las coordenadas en ESASky consulta la Figura 91.

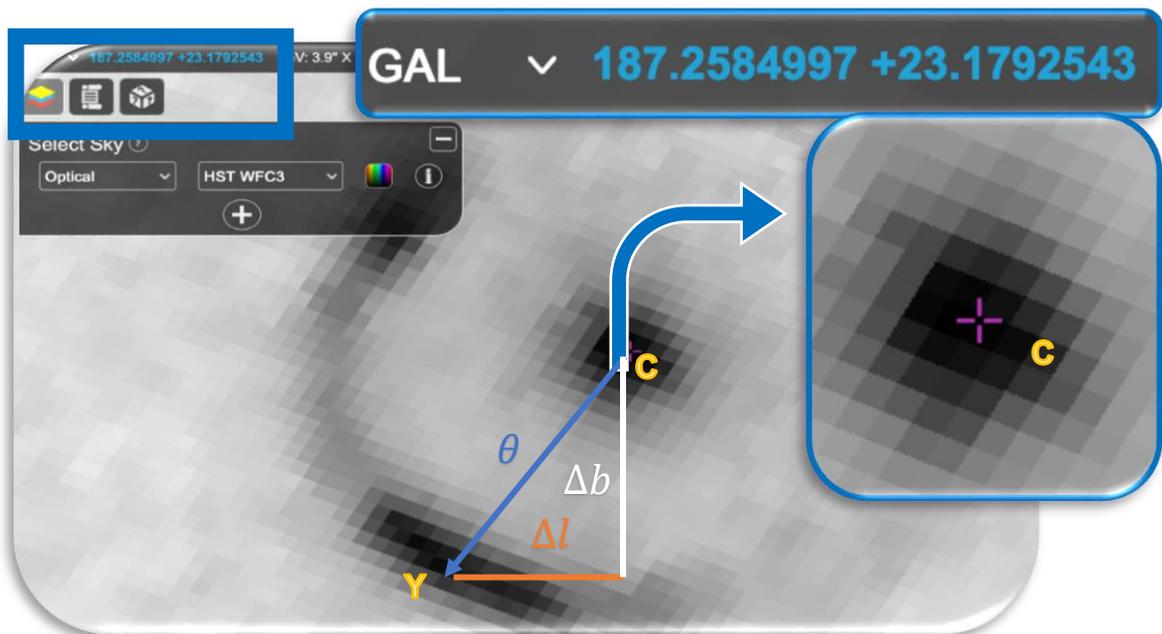


Figura 91: Guía visual para leer coordenadas en ESASky.

Puede leer las coordenadas de su cursor en la esquina superior izquierda de ESASky. Asegúrese de que ha seleccionado el sistema de coordenadas correcto, que las letras aparecen azules y que el cursor púrpura corresponde al punto que le interesa.

2. **Calcula radio del anillo siguiendo este procedimiento:**

Dados dos puntos de coordenadas $C = (l_1, b_1)$ y $E = (l_2, b_2)$, se puede calcular la distancia entre ellos usando las siguientes ecuaciones.

$$\Delta l = l_1 \cos(b_1) - l_2 \cos(b_2) \text{ o (para distancias pequeñas) } \Delta l = (l_1 - l_2)\cos(b_1)$$

$$\Delta b = b_1 - b_2$$

Ecuación 14: Cálculo vectorial entre dos puntos en coordenadas esféricas.

Para el siguiente cálculo despreciamos la curvatura de la esfera celeste. Esto es una aproximación válida ya que estamos calculando sobre una superficie muy pequeña de esta; sin embargo, es importante recalcar que en general para calcular distancias en coordenadas esféricas, se debe aplicar trigonometría esférica.

De forma aproximada, para distancias cortas, construimos geoméricamente un triángulo rectangular cuya longitud de hipotenusa θ se puede calcular utilizando el teorema de Pitágoras (ver Figura 91):

$$\Delta l^2 + \Delta b^2 = \theta^2$$

Ecuación 15: Teorema de Pitágoras. La suma de los cuadrados de los lados de un triángulo regular es igual al cuadrado de su hipotenusa.

Utiliza el cuadro siguiente para realizar los mismos cálculos para diferentes anillos. Busca las coordenadas de borde y centro de los Anillos de Einstein en ESASky (ver Figura 91).

Recuerda que para convertir Grados en Radianes tienes que multiplicar un factor de $\pi/180$.

3. Completa la tabla siguiente con los puntos seleccionados y los valores calculados para la distancia radial.

Nombre del objeto	Centro del anillo de Einstein en coordenadas GAL	Coordenadas GAL del borde del anillo de Einstein	Radio θ (en rad)
J073728.45+321618.5			

Tabla 13: Cálculo del radio para diferentes anillos de Einstein.

Utiliza el cuadro siguiente para calcular el radio del anillo de Einstein para los objetos seleccionados.

4. Usa la ecuación Ecuación 6 para calcular las distancias relativas a la lente y anillo y completa la Tabla 14. Los valores de corrimiento al rojo necesarios para este cálculo se pueden obtener para nuestro objeto J073728.45+321618.5 del siguiente link:

⇒ <https://hubblesite.org/contents/media/images/2005/32/1794-Image.html>

Consejo: Una rápida consulta del nombre en cualquier buscador de internet os llevará a la página de Hubble.org correspondiente para todos los objetos listados anteriormente.

Nombre del objeto y valores de corrimiento al rojo	D_L Distancia a la lente (en m)	D_S Distancia al anillo (en m)	D_{LS} Distancia entre anillo y lente (en m)
J073728.45+321618.5	$4,262233 \cdot 10^{25}m$	$7,6860378 \cdot 10^{25}m$	$3,423805 \cdot 10^{25}m$
$z_{Lente} = 0,3223$			
$z_{Anillo} = 0,5812$			
$z_{Lente} =$			
$z_{Anillo} =$			
$z_{Lente} =$			
$z_{Anillo} =$			

Tabla 14: Cálculo las diferentes distancias en función del valor del corrimiento al rojo.

Usa el siguiente recuadro para realizar los cálculos del resto de objetos:



Usamos la el valor de la Ecuación 6 con constante de Hubble $H_0 = 70 \cdot 10^3 (m/s)/Mpc$
Recordamos que $1Mpc = 3,0857 \cdot 10^{22}m$



5. Usa la Ecuación 7 para calcular la masa de la lente. Expresa tu resultado en kg y en términos de masas solares ($1 M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$).
6. Rellene la siguiente tabla con los valores según la Ecuación 7 para los Anillos que has evaluado en la actividad anterior.

Nombre	Radio del anillo (en rad)	Masa de la lente (en kg)	Masa de la lente (en masas solares M_{\odot})
J073728.45+321618.5			

Tabla 15: Cálculo de masa de la lente para diferentes anillos de Einstein.

Utiliza esta casilla para realizar los cálculos necesarios:

$$1 \text{ Mpc} = 3,0857 \cdot 10^{22} \text{ m}$$

$$c = 3 \cdot 10^5 \frac{\text{km}}{\text{s}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{kg s}^2$$



7. ¡Bien hecho! Ahora es el momento de detenerse y pensar en las respuestas a estas preguntas. Teniendo en cuenta los componentes individuales de una galaxia que aprendimos en la [Actividad 6](#), ¿a qué parte de la lente galáctica corresponde la masa que hemos calculado en este ejercicio?



Actividad 15. Desafío científico 2: Un estudio de caso real de un cuásar con lente gravitacional e imagen cuadripolar de SDSS J1004 + 4112

En este reto, vas a reproducir el trabajo de Naohisa Inada y sus colaboradores, publicado en Nature el año 2003 sobre la lente gravitacional SDSS J1004+4112. (Inada, 2003)

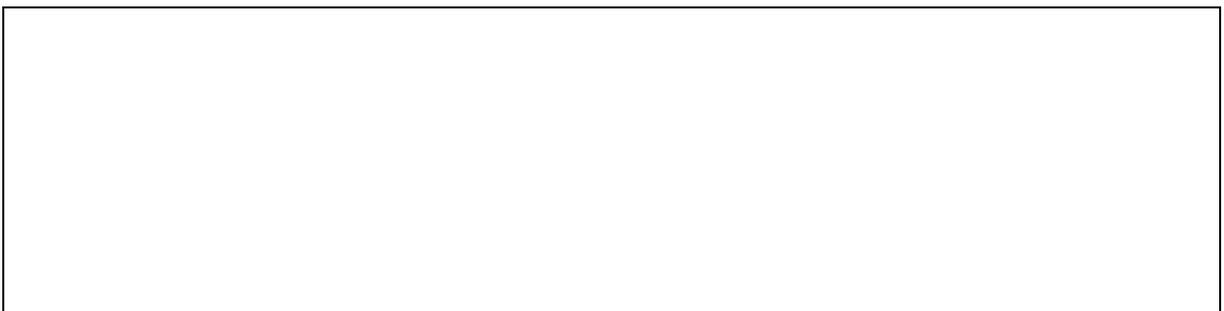
Artículo completo aquí ([*Inada n. et al., 2003, nature, 426, 810*](#))

Actividad 15.1. Analizar el objeto SDSS J1004+4112

Para ello, sigue estos pasos:

1. Busca en el portal de la ESA las coordenadas centrales de la lente gravitacional (SDSS J1004 + 4112).

⇒ <https://spacetelescope.org/images/heic0606b/>



2. Accede a la base de datos Sloan Digital Sky Survey para ver los datos disponibles para esta región (SDSS)

⇒ <http://skyserver.sdss.org/dr15/en/tools/chart/navi.aspx>

Como puedes ver, se pide que las coordenadas se introduzcan en grados y esta (ver Figura 92) es toda la información que se muestra.

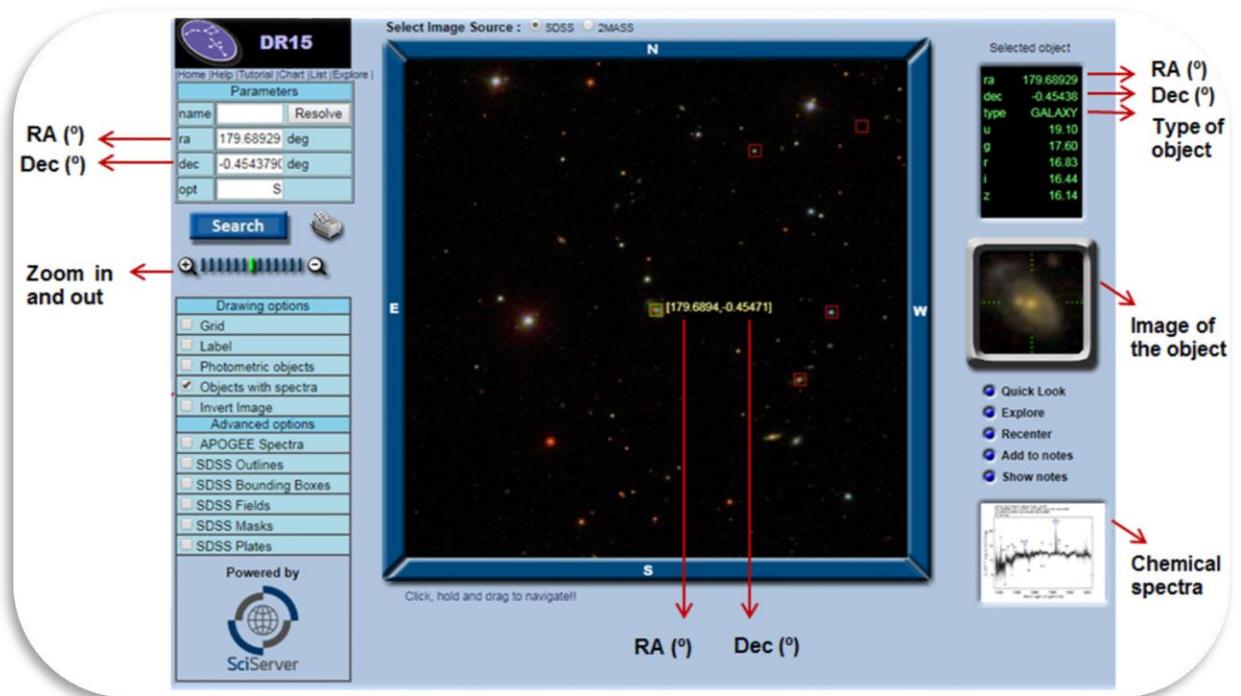


Figura 92: Captura de pantalla de Sloan Survey con información adicional sobre el diseño. (Créditos: SDSS)

3. Convierte las coordenadas ecuatoriales (hh mm ss, grados arcmin arcsec) en grados (ver [Actividad 9.3](#) en la Fase 1 para saber más sobre este procedimiento) con el fin de buscar nuestro objeto en el catálogo de Sloan Digital. Te proponemos hacer esto en 2 pasos:

- La Ascensión Recta (AR) generalmente se da en horas, minutos y segundos (hh,mm,ss). Convierte *horas, minutos, segundos* en *grados*.

$$AR = 15 * \left(h + \frac{m}{60} + \frac{s}{3600} \right) \Rightarrow$$

- La declinación (DEC) se suele dar en grados, minutos y segundos (°,',"). Convierte *grados, minutos, segundos* en *grados* (XX.YYY °).

$$DEC = \left(-9 + \frac{'}{60} + \frac{''}{3600} \right) \Rightarrow$$

4. Inserta las coordenadas adecuadas de SDSS J1004+ 4112 en el servidor Sloan Sky e inspecciona cada uno de los cinco componentes de esta lente gravitacional. Para ello, haz clic en cada una de las fuentes (Figura 94 A, B, C, D y E) en el Sloan Digital Sky Survey (<http://skyserver.sdss.org/dr15/en/tools/chart/navi.aspx>)

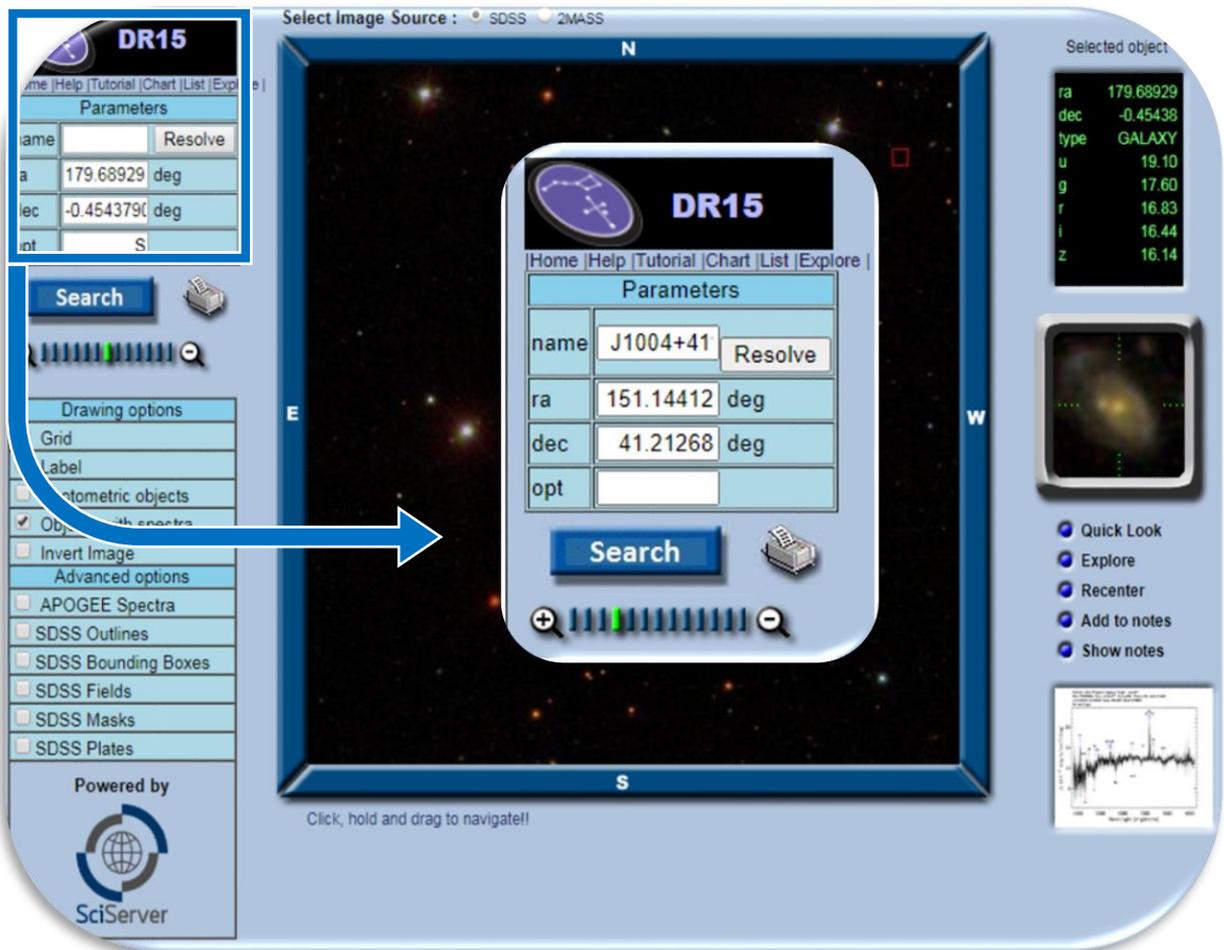


Figura 93: Captura de pantalla de la página web correspondiente al Sloan Digital Sky Survey. (Créditos: skyserver.sdss.org)

Si amplías tu imagen, deberías ver una imagen similar a la de la izquierda en la Figura 94. Trata de identificar los componentes A, B, C, D y E a partir de la imagen derecha de la Figura 94. A continuación, rellena la Tabla 16 con las coordenadas exactas de cada componente.

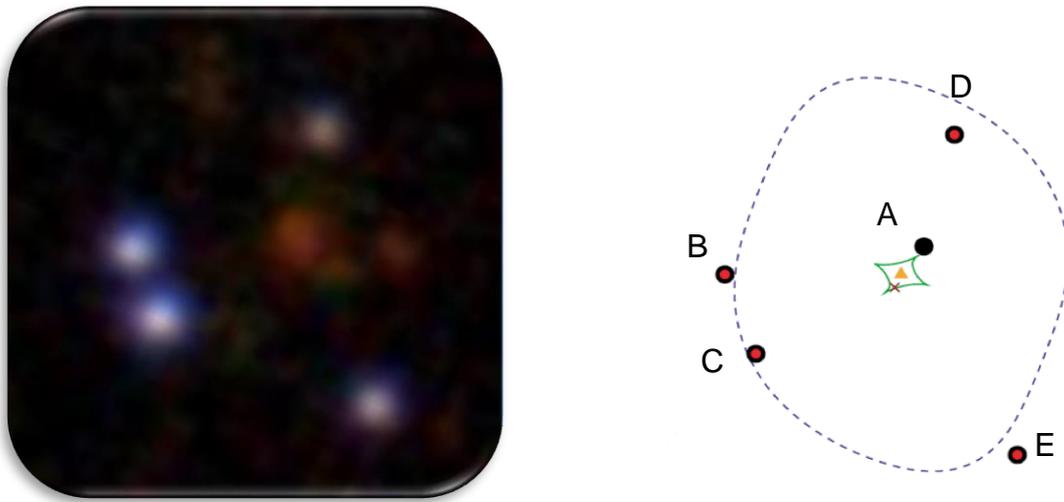


Figura 94: (Izquierda) Imagen de J1004+4112 con etiquetas (derecha) para cada objeto que observamos. (Créditos: skyserver.sdss.org)

- Intenta identificar a qué tipo de objeto corresponde cada uno de los 5 componentes de la lente gravitacional (A, B, C, D, E). Esta información se puede obtener en la ventana del cuadro superior derecho una vez que selecciones un objeto (consulte Figura 95).

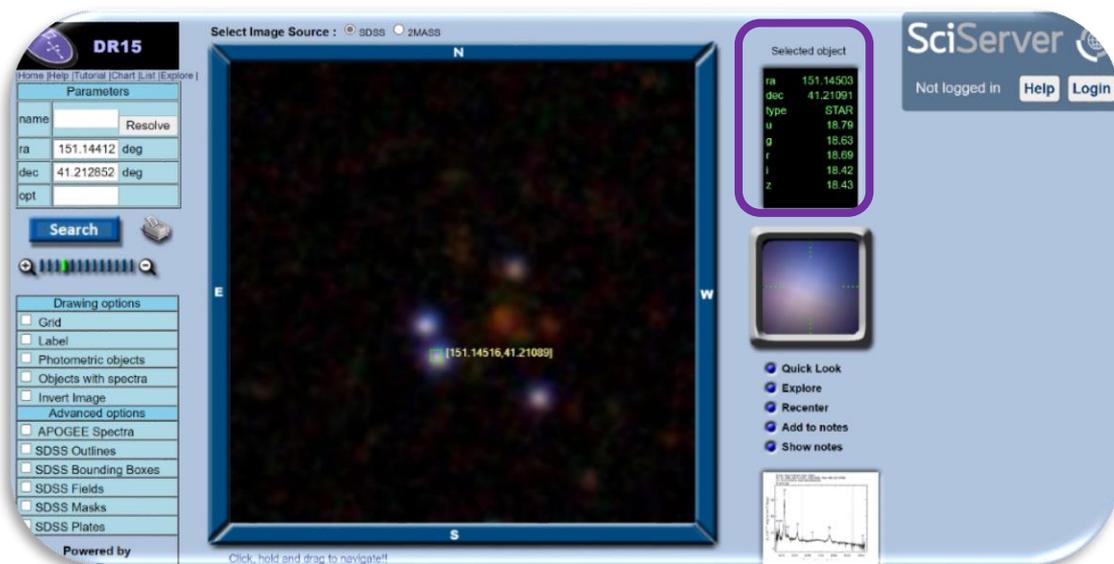


Figura 95: Captura de pantalla de la página web correspondiente al Sloan Digital Sky Survey. (Créditos: skyserver.sdss.org)

Las principales opciones son tipo GALAXIA y tipo ESTRELLA, dependiendo de su extensión.

- Analiza tus hallazgos mirando los espectros disponibles de los diferentes componentes en J1004 + 4112, presta atención a su forma (distribución de intensidad) y elementos químicos y completa la Tabla 16 con la información que se encuentra en el Sloan Digital Sky Survey siguiendo este procedimiento.

Procedimiento:

- Haz clic en el cuadro "Photometric Objects", en el panel izquierdo (ver Figura 96)
- Selecciona un objeto (un cuadro indicará qué objeto ha seleccionado).
- Verás en el panel inferior derecho una pequeña imagen de los espectros disponibles. Al hacer clic en estas imágenes tendrás acceso a sus espectros a la derecha de la pantalla. Consejo: Es posible que no haya espectro disponible para todas las fuentes.
- Escribe los elementos mostrados en los espectros de A, B, C, D y E en la ranura de elementos de la Tabla 16.

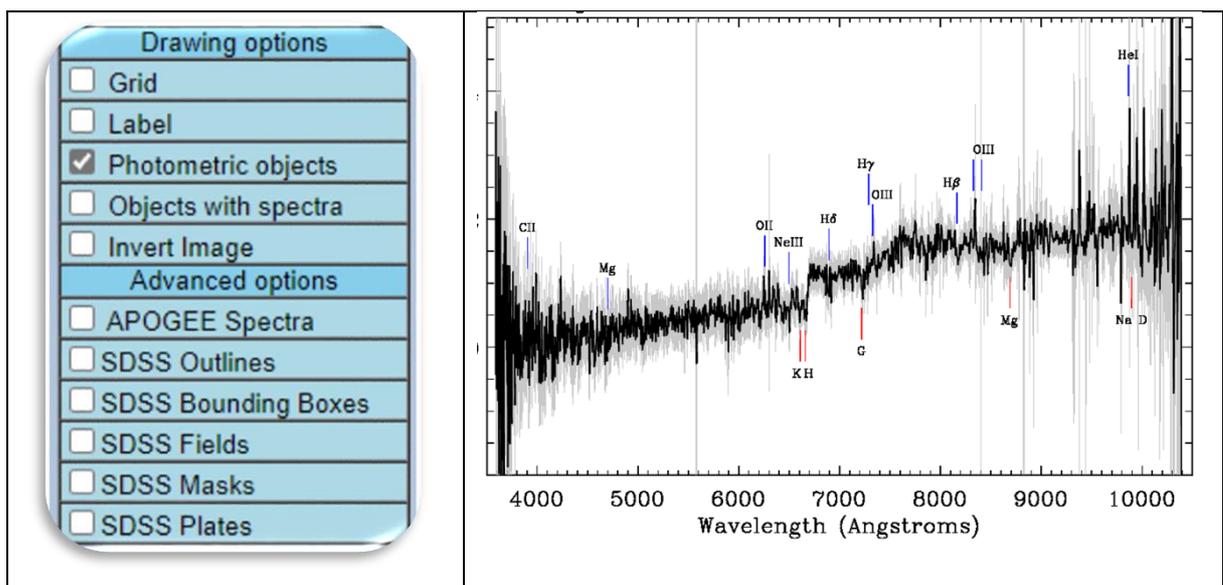


Figura 96: Captura de pantalla de la página web correspondiente al Sloan Digital Sky Survey. (Créditos: skyserver.sdss.org)

- Ahora responde a las siguientes preguntas



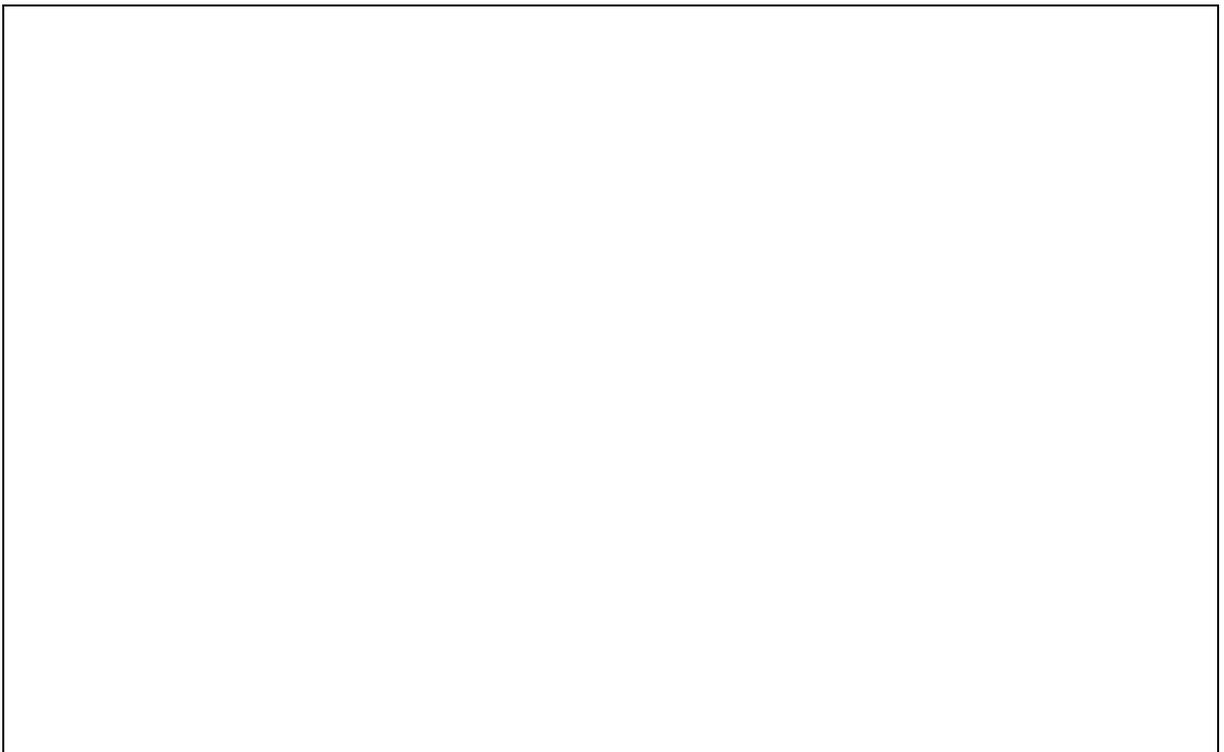
¿Ves alguna similitud entre alguno de estos espectros?

En base a sus similitudes y diferencias en los elementos e intensidades, ¿podría concluir que alguno de ellos es el mismo objeto?

¿Puede relacionar su respuesta anterior con la teoría que hemos estudiado?



Si ha llegado a la conclusión de que este es un sistema de lente gravitacional, ¿cuál de los objetos del sistema está actuando como una lente gravitacional? Haz un boceto de ello.





Actividad 15.2. Crea un artículo científico para tu investigación

CREA TU PROPIO ARTÍCULO CIENTÍFICO: Mira las instrucciones dadas en esta Actividad para rellenar las áreas apropiadas y escribir un artículo tal como lo hizo Inada.

Título	
Miembros del equipo	
Abstract	
Introducción	Análisis
<p>La lente gravitacional es una forma de investigar objetos distantes y débiles. Este efecto tiene varios patrones. Puede crear un patrón de arcos o múltiples imágenes del mismo objeto. Este último caso es el que hemos encontrado para el objeto J1004+4112, donde un cúmulo de galaxias crea cuatro imágenes del mismo cuásar.</p>	

Observaciones

Identificador de objeto	Tipo de objeto	AR	DEC	Elementos químicos
A				
B				
C				
D				
E				

Tabla 16: Caracterización de todos los objetos encontrados en el clúster J1004+4112.

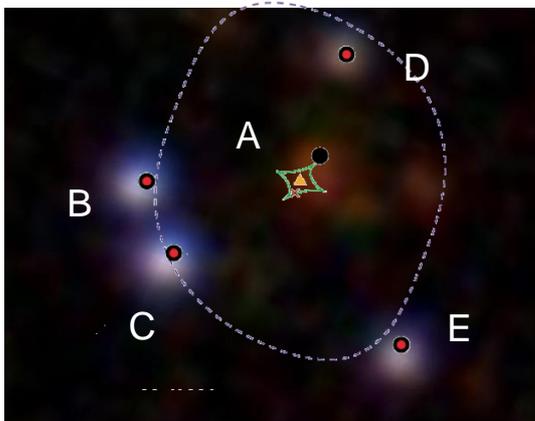
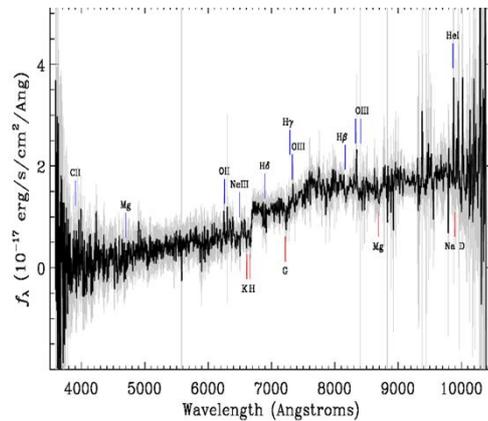
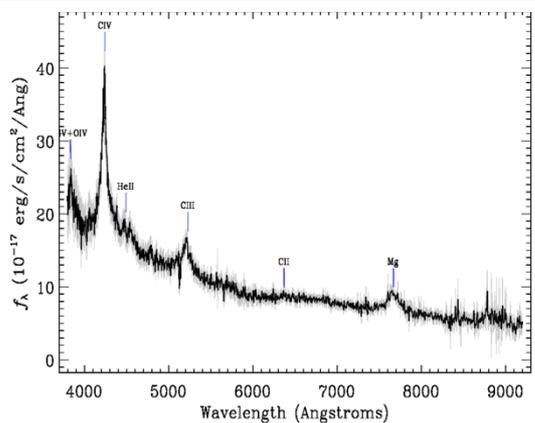


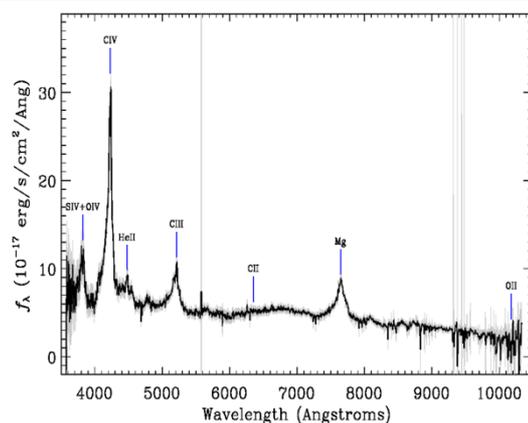
Imagen del objeto de interés.



Espectro del objeto:



Espectro del objeto:



Espectro del objeto:



Instrucciones sobre cómo escribir un artículo científico

TÍTULO:

El título debe contener una breve descripción sobre los resultados de su investigación (sus hallazgos, el objeto). Al mismo tiempo, el título debe ser pegadizo e innovador (no más de 5-10 palabras)

MIEMBROS DEL EQUIPO:

Aquí debes escribir los nombres de los miembros del equipo involucrados en la investigación. Los nombres generalmente se muestran en el siguiente formato:

Apellido, X (siendo X la primera letra de su nombre).

Ejemplo: si tu nombre es María *Arriba*, escribirías: *Arriba, M.* Si su apellido es ampliamente utilizado (por ejemplo, *Smith*) puedes usar un segundo apellido o nombre (es decir, *Smith Arriba, M.*).

ABSTRACT:

Explica brevemente de qué trata tu trabajo e incluye tus hallazgos (1 párrafo)

INTRODUCCIÓN:

Aquí debes introducir información básica sobre tu estudio. En este caso, hay al menos dos puntos de los que hablar:

- 1) Algunos antecedentes sobre el tipo de objeto estudiado (lentes gravitacionales).
- 2) Algunos antecedentes sobre lo que se conoce de la región estudiada J1004 + 4112.

Consejo: revisa el enlace <https://spacetelescope.org/images/heic0606b/>.

OBSERVACIONES:

En esta sección se deben recoger los datos relevantes utilizados para esta investigación (imágenes y/o espectros recogidos y referenciados a telescopios, servidores de datos...), tablas y un boceto de la zona. Con esta información cualquiera debería poder reproducir tu trabajo. Ten en cuenta que en este ejercicio encontrarás las figuras y una tabla que debería ayudarte a realizar la tarea. Ejemplo:



- Tabla 16: Resumen de algunas propiedades de los objetos en la región estudiada (coordenadas, características de los objetos como: tipo, forma, brillo, composición química, etc).
- Imágenes y espectros relacionados con los objetos identificados.

Si has llegado a este punto llenando el papel de arriba, ¡felicidades!

¡Tu primer artículo científico y tu trabajo como científico están completos!

Esperamos que hayas disfrutado de esta actividad y descubierto muchas cosas interesantes. ¡También esperamos verte aquí en unos años como astrónomo, cosmólogo o como ingeniero informático!

Actividad 16. Desafío científico 3: Un estudio de caso real de las curvas de rotación de las galaxias espirales (La Vía Láctea y M31)

En este reto científico vas a reproducir, de una manera más simplificada, el trabajo de investigación de (Sofue, Dark halos of M 31 and the Milky Way, 2015)

Paper completo aquí [Halos oscuros de M 31 y la Vía Láctea | Publicaciones de la Sociedad Astronómica de Japón | Académico de Oxford \(oup.com\)](#)

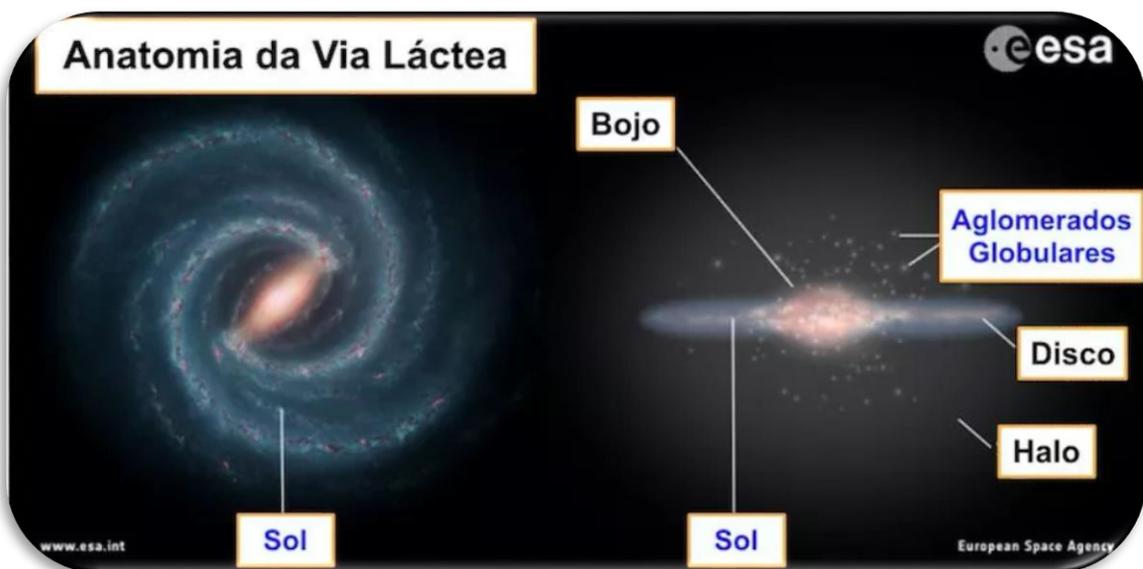


Figura 97: Topografía de una galaxia. (Créditos: www.esa.int)

Compararás la curva de rotación esperada de las galaxias en espiral con datos reales de la Vía Láctea y M31. Además, derivarás la masa total de estas galaxias. Para ello, vas a seguir algunos pasos:

Cómo realizar estos pasos se explica en las siguientes actividades.

Actividad 16.1. Predicción teórica de curvas de rotación

En este ejercicio vamos a descubrir la curva de rotación esperada de una galaxia. Para ello haremos la suposición de que una galaxia es una esfera del tamaño del bulbo con toda la materia galáctica en su interior. Nótese que en este modelo estamos descuidando la influencia de la materia distribuida en el disco y el halo.

En consecuencia, podríamos considerar dos distribuciones principales para evaluar la distribución de la velocidad de rotación esperada:

- 1) Objetos que giran fuera del bulbo, considerados como objetos puntuales
- 2) Objetos que giran dentro del bulbo, considerados con una sola distribución de densidad

1. **Distribución de la velocidad de rotación esperada para los objetos que giran fuera del bulbo:** Para cada uno de los objetos, con masa m y aceleración a , girando fuera del bulbo a una distancia r , siendo M la masa del bulbo, la Ecuación 16 se aplica a su distribución de velocidad de rotación (v_{rot}^{out}).

$$F = ma = G \frac{Mm}{r^2} \Rightarrow m \frac{(v_{rot}^{out})^2}{r} = G \frac{Mm}{r^2} \Rightarrow v_{rot}^{out} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

$$v_{rot}^{out} \propto \sqrt{1/r}$$

Ecuación 16: Relación simple entre la velocidad de rotación (v_{rot}) y la distancia (r) fuera de una esfera masiva.

2. **Distribución de la velocidad de rotación esperada para los objetos en rotación dentro del bulbo:** Para cada uno de los objetos que orbitan dentro del bulbo a una distancia r del centro, suponiendo una densidad constante del bulbo (ρ), la Ecuación 17 se aplica para calcular la distribución de velocidad de rotación esperada (v_{rot}^{in}).

$$\rho = \frac{M}{V} \text{ y } V = \frac{4}{3}\pi r^3 \Rightarrow v_{rot}^{in} = \sqrt{GM/r} = \sqrt{G\rho\frac{4}{3}\pi r^3/r}$$

$$v_{rot}^{in} \propto r$$

Ecuación 17: Relación entre la velocidad de rotación (v_{rot}) y la distancia (r) dentro de una esfera masiva.

Rellena la Tabla 17 con los valores de velocidad asociados con los valores de distancia radial dados. **Consejo:** Dependiendo de si el objeto está dentro ($r < 1$ u.a.)⁶ o fuera ($r > 1$ a.u.) del bulbo, puedes usar la Ecuación 16 o la Ecuación 17 en estos cálculos.

Distancia radial dentro de la protuberancia galáctica en a.u.									
0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Velocidad de rotación en a.u.									
Distancia radial fuera de la protuberancia galáctica en a.u.									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Velocidad de rotación en a.u.									

Tabla 17: Puntos de datos para una curva de rotación predicha de cualquier galaxia en a.u.

- Dibuja los valores que se muestran en la** Tabla 17 en la siguiente cuadrícula para obtener la curva de rotación predicha de una galaxia espiral. Consejo: puedes utilizar un archivo de Excel con la información de la Tabla 17 para hacer este dibujo automáticamente.

⁶ a.u. significa unidades arbitrarias. No nos interesan los tamaños concretos, sino solo la forma general de la curva.



Figura 98: Representación gráfica de la distribución de velocidad esperada de objetos ligados gravitacionalmente a una galaxia espiral. (Créditos: You)

4. ¿Cómo describirías estas dos distribuciones?



Este cálculo corresponde a la expectativa de los primeros científicos, como Vera Rubin, que estudiaron los efectos gravitacionales en los cuerpos en espiral.

[Actividad 16.2. Comparar la curva de rotación predicha y observada de una galaxia](#)

La Figura 99 muestra la comparación de la curva de rotación esperada de la Vía Láctea (en azul) con su curva de rotación observada (en verde). La gráfica muestra las líneas discontinuas que representan los 3 componentes principales de una galaxia espiral, como la Vía Láctea.

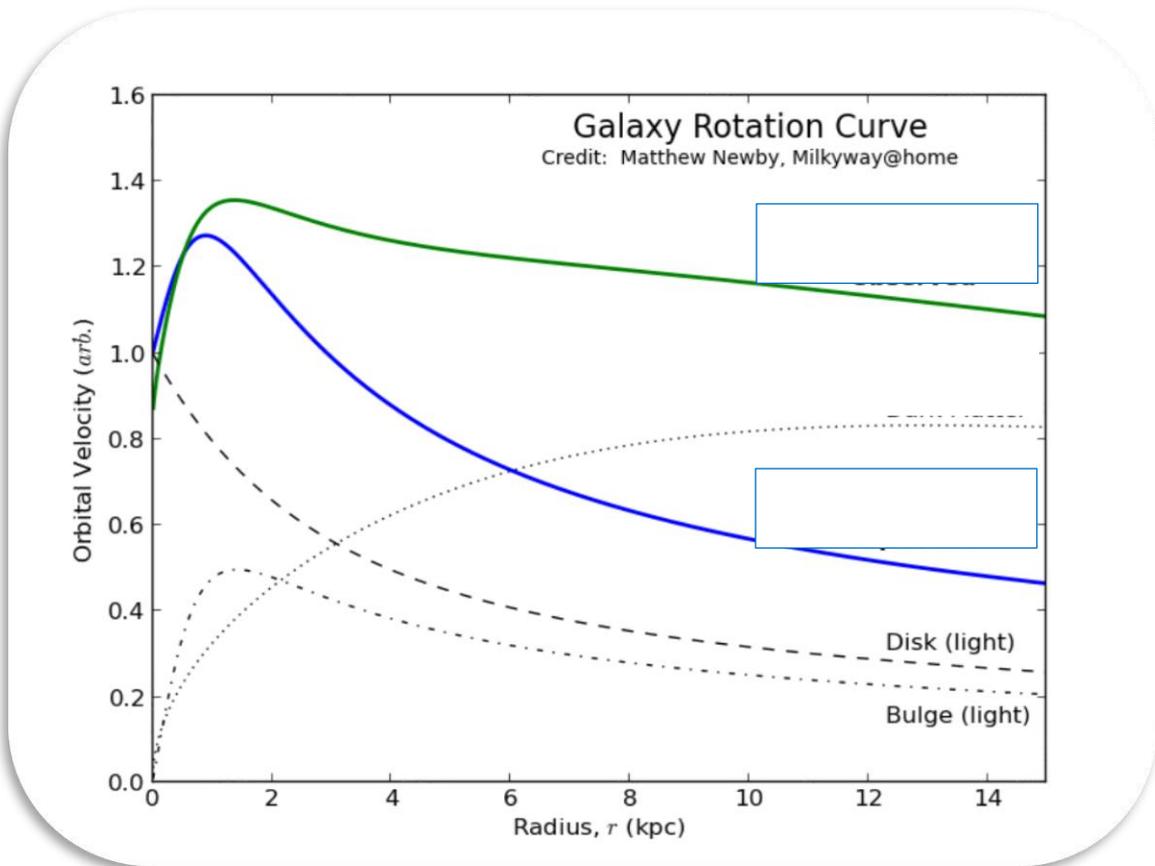


Figura 99: Representación gráfica de las contribuciones de masa individuales de los componentes de una galaxia. (Créditos: Milkyway@home)

1. ¿Por qué crees que las curvas de rotación no coinciden?

2. ¿Cuál es el componente que parecen coincidir con la distribución esperada de la curva de velocidad de rotación?



3. ¿Cuál podría ser el otro componente que está creando la principal diferencia entre la velocidad de rotación esperada y la observada?

4. ¿Qué podrías concluir, como lo hizo Vera Rubin, como parte de tu investigación?

5. Mira este video sobre los descubrimientos de Vera Rubin y comprueba si encuentras algunas similitudes con tu descubrimiento actual.

⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=XJ03k5OYaQc>

Actividad 16.3. Cómo hacer un cálculo aproximado de la masa total de una galaxia

Vamos a analizar la masa del halo de algunas galaxias espirales a partir de la investigación realizada por Sofue en 2015.

Actividad 16.3.1 La Vía Láctea

Aquí tenéis la curva de velocidad de rotación observada para la Vía Láctea y la Tabla de cálculos realizados por Sofue, de las diferentes aportaciones de sus componentes.

1. Obtén las velocidades orbitales comprobando la Figura 100.

Vía Láctea	Bulbo	Disco	Halo	Galaxia total
Radio (kpc)	$0,87 \pm 0,07$	$5,73 \pm 1,23$	$10,7 \pm 2,9$	~ 500
Velocidad orbital (km/s)				
Masa ($M_{\odot} \cdot 10^{11}$)	$0,25 \pm 0,02$	$1,12 \pm 0,4$		

Tabla 18: Contenido de materia de la Vía Láctea.

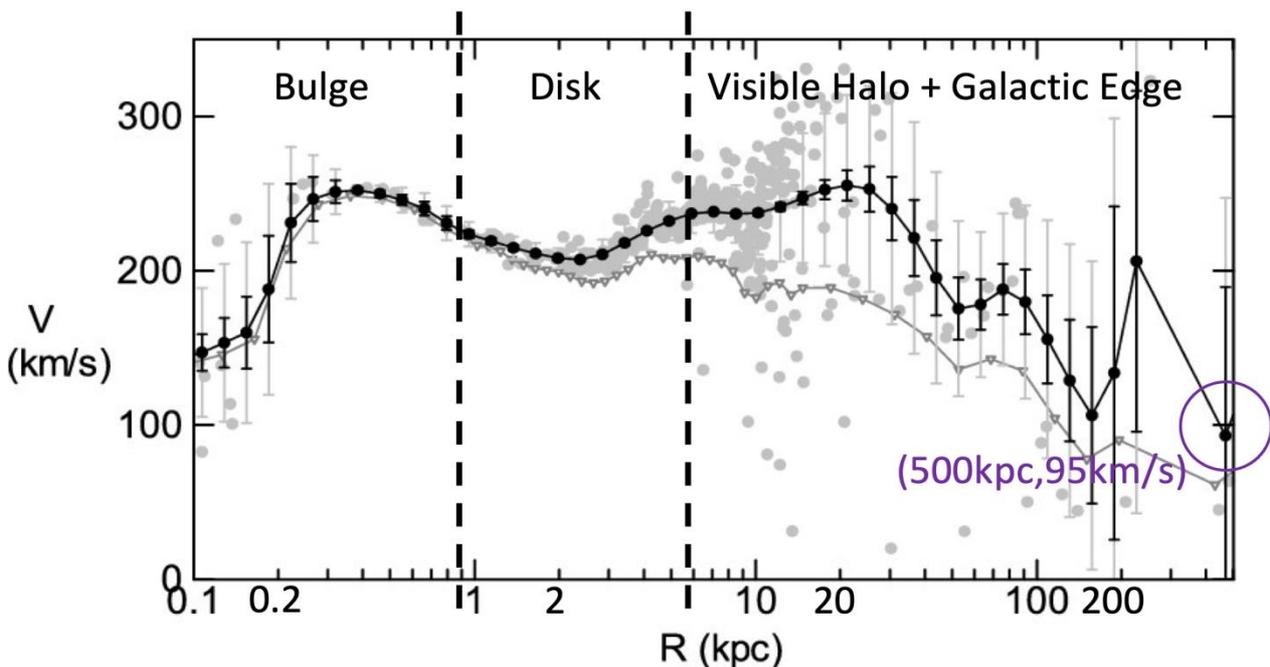


Figura 100: Gran curva de rotación para la Vía Láctea. (Créditos: arxiv.org/abs/1504.05368)

2. Calcula la masa total de la galaxia con la Ecuación 12.

Usa la expresión que aprendimos para calcular la masa total ($M_{galaxia}$) de una galaxia usando la velocidad de rotación (v_{borde}) de los objetos en el borde de su halo (r_{borde}). Los datos necesarios para realizar estos cálculos se pueden encontrar en la Tabla 18

Recuerda que:

$$1 \text{ kpc} = 3,0857 \cdot 10^{16} \text{ km}$$

$$G = 6,674 \cdot 10^{-20} \text{ km}^3 / \text{kg s}^2$$

$$M_{galaxia} = \frac{v_{borde}^2 \cdot r_{borde}}{G}$$

3. Calcula la masa en términos de masas solares.

Recuerda que: $1 M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

4. Calcula el contenido de materia del Halo restando al total las contribuciones de Protuberancia y Disco como se describe en la Ecuación 9

5. Utiliza el siguiente cuadro para calcular qué porcentaje de la masa galáctica total corresponde al Halo.

Actividad 16.3.2. Andrómeda

1. Repite el procedimiento anterior para la Andrómeda. Consulta la Figura 101 para completar la Tabla 19 con valores aproximados para las velocidades de rotación.

Andrómeda	Protuberancia	Disco	Halo	Galaxia total
Radio (kpc)	$1,35 \pm 0,02$	$5,28 \pm 0,25$	$34,6 \pm 2,1$	~ 400
Velocidad orbital (km/s)				
Masa ($M_{\odot} \cdot 10^{11}$)	$0,35 \pm 0,004$	$1,26 \pm 0,08$		

Tabla 19: Contenido de materia de Andrómeda.

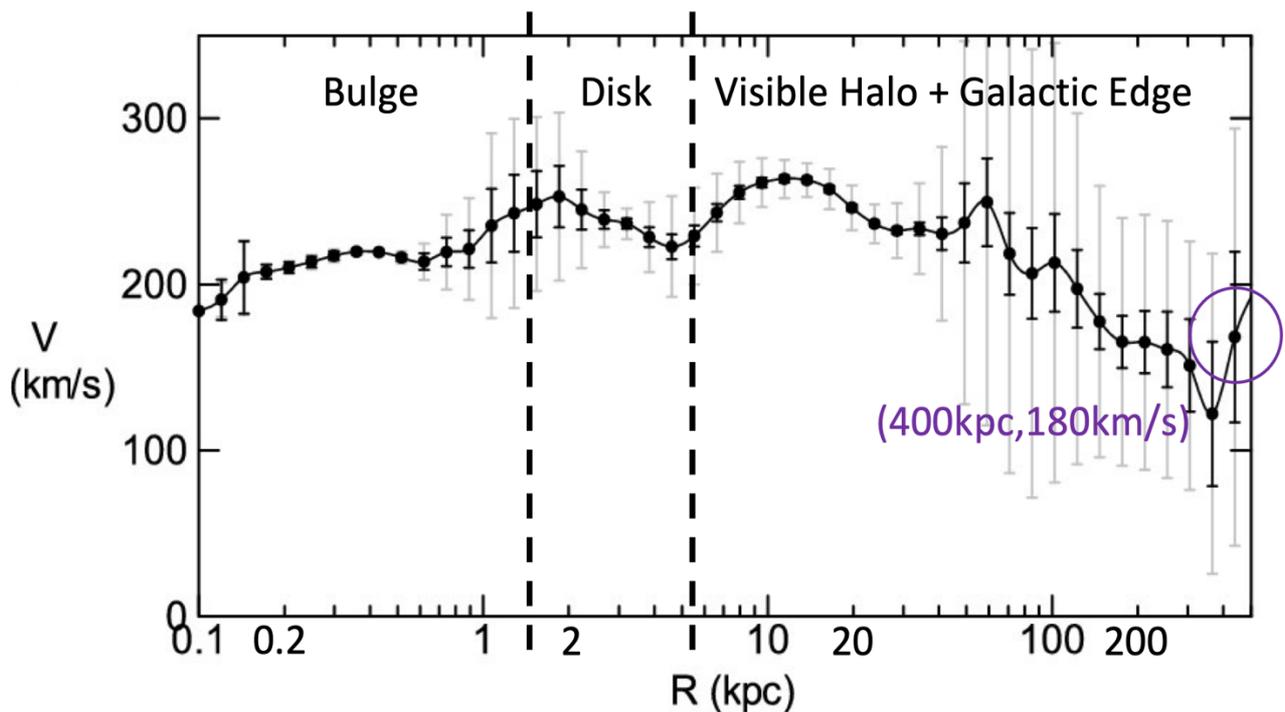


Figura 101: Gran curva de rotación para la galaxia de Andrómeda (M31, NGC224).
(Créditos: arxiv.org/abs/1504.05368)

2. Usa el cuadro a continuación para calcular la masa total de la galaxia:

3. Utiliza el siguiente cuadro para representar la masa total en términos de masas solares:

4. Utiliza el siguiente cuadro para calcular el contenido de materia del Halo:

5. Utiliza el siguiente cuadro para calcular qué porcentaje de la masa galáctica total corresponde al Halo.



Actividad 16.4. Evalúa tus resultados y obtén tus propias conclusiones

1. Si has realizado los cálculos correctamente, deberías haber visto que el Halo constituye alrededor del 90% del contenido de materia de las galaxias. **¿Qué significa esto?**

2. Compara tus resultados para la Vía Láctea y Andrómeda. A partir de tus resultados, ¿qué similitudes y diferencias ve entre estas dos galaxias?

3. ¿Cómo se compara la forma de la curva de rotación galáctica observada con el cálculo esperado? ¿Se ven iguales o diferentes?

4. ¿Qué le dice la forma de la curva de rotación sobre cómo se distribuye la masa? ¿Es la mayor parte de la masa en la protuberancia galáctica o hay una cantidad significativa de masa en el Halo o parte no luminosa?

5. ¿Cómo se compara la masa visible de la galaxia con la masa dinámica de la galaxia? ¿Cuánta materia hay en el Halo en comparación con la protuberancia galáctica y el disco?

6. ¿Conoces otros métodos para calcular el contenido de masa galáctica?

[Actividad 16.5. Presenta tus estudios](#)



Implemente la respuesta de estas preguntas y sus predicciones, cálculos y discusiones en un informe científico completo/ póster. Puede seguir una estructura similar a la siguiente (vea como ejemplo la implementación de un póster en la Figura 102).

- **Abstract/Introducción.** Indique el estado actual del conocimiento sobre la gravedad, las galaxias espirales, las curvas de rotación y la materia oscura.
- **Métodos/Análisis.** Explique los cálculos que está a punto de realizar y la meta que persigue.
- **Datos y gráficas.** Presenta los cálculos, gráficos e imágenes que muestran tu trabajo y estudios.
- **Conclusión.** Elabore la explicación de sus resultados hacia lo que quería predecir en primer lugar y las repercusiones que ha considerado.
- **Referencias.** Incluya una lista de los libros, artículos o fuentes científicas que ha utilizado para crear su trabajo.

Calidad de vida, dependencia y fisioterapia en la Distrofia Muscular

Pedro Margolles (Uned); Minerva García, Mario Margolles (Consejería de Educación y Sanidad de Asturias)

Conclusiones

Los enfermos con distrofias musculares, tanto niños como adultos, sufren una gran pérdida de calidad de vida. Además, manifiestan un elevado nivel de dependencia (en correlación inversa a la calidad de vida) y necesidad de apoyo constante para las actividades de la vida diaria. A pesar de la elevada percepción de necesidad de fisioterapia, existe escaso uso de servicios de servicios de este tipo y retraso en su inicio.

Introducción

Las distrofias musculares son enfermedades raras que alteran la vida de los enfermos, familiares y cuidadores. Disminuye su calidad de vida relacionada con la salud (CVRS) y sufren complicaciones que aumentan su grado de dependencia (GD). Estas pérdidas pueden evitarse con el uso de fisioterapia (TP). El objetivo de este estudio es conocer la CVRS, GD y uso de fisioterapia en personas con distrofia muscular en Asturias.



Envío de cuestionarios para su autocumplimentación a todos los enfermos con distrofias musculares de Asturias:

Calidad de vida relacionada con la salud: Cuestionario EQ5D (Escala visual analógica e Index) y Kidscreen-10
Grado de dependencia: Escala Barthel
Tratamiento fisioterápico

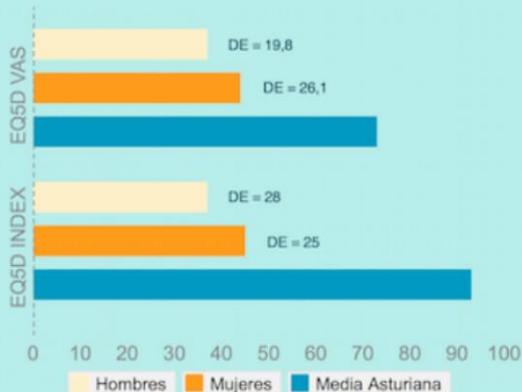


Análisis

Se comparan resultados de CVRS con valores de referencia (Encuesta de salud de Asturias, 2008; Encuesta de salud infantil, 2009) y GD

Participación

80%



Calidad de vida

- * Grandes pérdidas de calidad de vida tanto en adultos (EQ5D Index y EQ5D VAS) como en niños (Kidscreen-10).
- * Valores Kidscreen-10 (41,42,49 y 51) media asturiana (56,6).
- * Niveles EQ5D VAS (Escala visual analógica) y EQ5D Index muy inferiores a las medias poblacionales.
- * Correlación escala visual analógica (EQ5D VAS) y (EQ5D Index) $r = 0,87$ $p < 0,01$

Dependencia

- * En general gran dependencia (88% tienen dependencia y un 50% grave o total).
- * Correlación entre CVRS medida con EQ5D Index y dependencia $r = -0,83$ $p < 0,01$

Fisioterapia

- * Sólo 56% de adultos y 100% niños recibió fisioterapia alguna vez.
- * Larga espera hasta inicio de tratamiento, niveles muy bajos de prescripción (55%) y continuidad.
- * El 79% considera necesario el tratamiento fisioterápico para su enfermedad

RECIBE EL ARTÍCULO COMPLETO EN TU EMAIL



Datos de contacto: pedromargolles@neoscienza.com
marimargolles@gmail.com
www.neoscienza.com
www.asturias.es
Twitter: @pedromargolles

Agradecimiento especial a la Consejería de Sanidad del Principado de Asturias y a la Asociación de Enfermos Musculares del Principado de Asturias (ASEMPA) por la participación en este estudio. Los autores declaran que no hay conflictos de interés.

bit.ly/10MKX1b

Figura 102: Ejemplo de un póster científico simple. (Créditos: <http://cdn6.neoscienza.com>)



Fase 4



Actividad 17. Autoevaluación y coevaluación

¡Felicidades!

¡Has completado tu Desafío Científico! ¡Cuéntanos tu historia!

Tómate un momento para pensar en la experiencia con tu equipo y completa estas Actividades.

- **Equipos:** Rellena este [cuestionario](#) para que puedas comprobar lo aprendido en el Reto.
- **Con tu profesor:** Danos tu opinión



Actividad 17.1. Cuéntanos tu aventura

Si has ejecutado la [Actividad 14.](#) o la [Actividad 15.](#), ya se te ha aconsejado sobre cómo crear un artículo científico. Si lo deseas, puede utilizar la misma estructura para tu póster.

De lo contrario, puede encontrar algunos ejemplos en:

⇒ https://cesar.esa.int/index.php?Section=CESAR_online_Space_Science_Experiences_Contest

Los alumnos tendrán que crear un producto final (un póster A0 en formato pdf, utilizando power point, por ejemplo) que muestre lo aprendido en las diferentes fases del Reto Científico.

Este cartel es la entrada para participar en el concurso internacional de aventura **CESAR**.

¡Felicidades profesor!

¡Gracias a tu dedicación, tu clase recibirá un Super Diploma del Equipo CESAR!



Enlaces



ESASky

Documentos generales.

⇒ <https://www.cosmos.esa.int/web/esdc/esasky-how-to>

Cómo subir una lista de objetivos (vídeo).

⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=M-aJn5TTd50>

Cómo explorar cielos de múltiples longitudes de onda (video):.

⇒ <https://www.youtube.com/watch?v=zkJkhSDr0nQ>

Material preparado para ser ejecutado en línea, basado en actividades previas desarrolladas por la ESASky

VERSIONES INICIALES:

<http://cesar.esa.int/index.php?Section=SSE> The Secrets of the galaxies

[http://cesar.esa.int/index.php?Section=The Secrets of Galaxies](http://cesar.esa.int/index.php?Section=The%20Secrets%20of%20Galaxies)



Créditos



El Equipo CESAR contó con el apoyo del Programa Young Graduate Trainee (YGT).