

Cómo la luz revela lo invisible

Detección y caracterización de exoplanetas mediante fotometría de tránsito y simulación de lentes gravitacionales

Jorge Barrio Luna - Profesor de Física y química

Colegio Miramadrid (Paracuellos de Jarama)

La luz no solo transporta información sobre los objetos celestes, sino que permite extraerla de dos formas complementarias: a través de su intensidad y de su trayectoria.

1. Resumen / Abstract

El presente proyecto propone una aproximación experimental al estudio de la astrofísica y la cosmología moderna mediante el análisis de la luz como fuente de información.

A través de un montaje didáctico, se simula la detección de exoplanetas utilizando el método de tránsito, registrando variaciones en la intensidad luminosa mediante un luxómetro y analizando las correspondientes curvas de luz.

De forma complementaria, se incorpora un segundo experimento basado en la simulación de lentes gravitacionales mediante una lente óptica sencilla, utilizando la base de una copa de vino y una tela de nylon. Este montaje permite visualizar la desviación de la luz y la consiguiente distorsión de imágenes, estableciendo una analogía accesible con la curvatura del espacio-tiempo descrita por la relatividad general.

El proyecto pone de manifiesto que la luz permite obtener información del universo a través de dos enfoques complementarios: la variación de su intensidad y la modificación de su trayectoria. Asimismo, introduce conceptos clave de la astrofísica y la cosmología contemporánea, como la detección indirecta de exoplanetas y la inferencia de masa no visible asociada a la materia oscura.

Desde el punto de vista educativo, la propuesta fomenta el aprendizaje activo, la interpretación de datos experimentales y la divulgación científica, al haber sido desarrollada y explicada por alumnado de bachillerato en contextos reales como la feria Madrid es Ciencia.

This project presents an experimental approach to modern astrophysics and cosmology through the study of light as a source of information. A didactic setup is used to simulate the detection of exoplanets via the transit method, recording variations in light intensity with a lux meter and analyzing the resulting light curves.

In a complementary manner, a second experiment is incorporated based on the simulation of gravitational lenses through a simple optical lens, using the base of a wine glass and a nylon fabric. This setup allows the visualization of light deflection and image distortion, providing an accessible analogy to the curvature of spacetime described by general relativity.

The project demonstrates that light provides information about the universe through two complementary approaches: changes in its intensity and modifications in its trajectory. It also introduces key concepts of contemporary astrophysics and cosmologies, such as the

indirect detection of exoplanets and the inference of non-luminous mass associated with dark matter.

From an educational perspective, the project promotes active learning, experimental data analysis, and science communication, as it has been developed and presented by high school students in real outreach contexts such as the Madrid es Ciencia science fair.

2. Introducción

La luz permite revelar lo invisible tanto por absorción como por desviación. Basaremos nuestro presente proyecto sobre estas dos ideas ópticas. Estos pilares permitirán al alumnado, accediendo a las técnicas más modernas en la investigación astrofísica, entender por dos métodos distintos cómo la luz permite detectar lo invisible.

Detección de materia ordinaria por absorción de la luz.

La interacción entre la luz y la materia constituye la base de las técnicas modernas de observación en astrofísica.

Hasta 1995, el sistema planetario de nuestro sistema solar era único y representaba la excepcionalidad de nuestro universo.

En el citado año, el físico y astrónomo Michel Mayor y el astrofísico Didier Queloz, ambos suizos, descubrieron, en el Observatorio de Haute-Provence con el espectrógrafo ELODIE, el primer planeta que orbitaba otra estrella distinta al Sol, 51 Pegasi b, utilizando el método de velocidades radiales. Por ello fueron galardonados en 2019 con el premio Nobel de Física.

A fecha del 31 de marzo de 2026, se han descubierto 8175 cuerpos extrasolares que orbitan diferentes estrellas, según la página

web exoplanet.eu, convirtiendo a nuestro sistema planetario en un fenómeno común.

Estos planetas que orbitan estrellas distintas a nuestro Sol se denominan *exoplanetas* y su descubrimiento ha revolucionado la astronomía moderna. Sin embargo, la enorme distancia a la que se encuentran y el brillo de sus estrellas anfitrionas hacen que su observación directa sea extremadamente difícil.

Por ello, los astrónomos han desarrollado métodos indirectos basados en el análisis de la luz. Misiones como *Kepler* o *TESS* han permitido descubrir miles de exoplanetas midiendo pequeñas variaciones en la luminosidad de las estrellas.

Actualmente existen nueve métodos para la detección de exoplanetas, la mayoría de ellos relacionados con medidas de luz y óptica. Los cuatro métodos más destacados son:

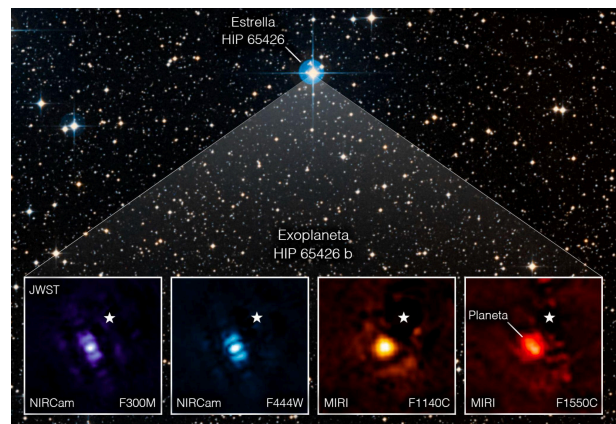


Imagen 1. Imágenes tomadas por el *JWST* del planeta HIP 65426 B en diferentes bandas de luz infrarroja. Crédito: NASA/ESA/CSA, A. Carter (UCSC), el equipo del ERS 1386 y A. Pagan (STScI).

- **Observación directa.** Sin duda uno de los métodos más espectaculares, modernos y técnicamente exigentes. Se necesitan telescopios con una instrumentación muy técnica, como óptica adaptativa, coronógrafos e instrumentación infrarroja muy sensible. Por ejemplo, en 2022, el

James Webb Space Telescope (JWST) descubrió HIP 65426 B observando en infrarrojo. (Imagen 1)

- **Micro lente gravitacional.** Se basa en una predicción de la relatividad general; la gravedad curva el espacio-tiempo y, por tanto, desvía la trayectoria de la luz. Cuando una estrella pasa exactamente por delante de otra más lejana (desde nuestra línea de visión), su gravedad actúa como una lente gravitacional que amplifica la luz de la estrella de fondo. Si la estrella que actúa como lente tiene un planeta, ese planeta produce una pequeña perturbación adicional en la amplificación de la luz (Imagen 2). Estas observaciones no son periódicas, por lo que deben ser observados por otros métodos para confirmar el hallazgo. Los equipos BLG y MOA del Observatorio Universitario Mount John, en Nueva Zelanda, descubrieron en 2008 el exoplaneta MOA-2007-BLG-192-L b por este método.

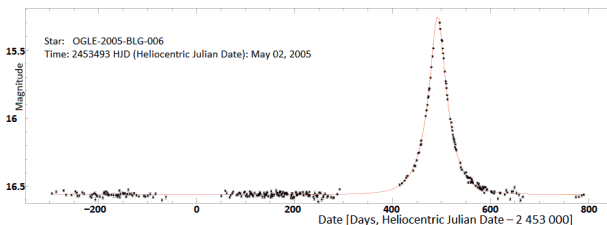


Imagen 2. Curva de luz típica de una microlente gravitacional. Crédito: Jan Skowron, OGLE home page.

- **Velocidades radiales.** La detección de exoplanetas mediante este método se basa en la observación indirecta por efecto Doppler. Las estrellas que tienen exoplanetas no están fijas. Planeta y estrella giran alrededor de un centro de masas común (baricentro). La estrella, por tanto, describe una pequeña órbita. Si esa velocidad tiene una componente radial (en dirección a la Tierra) cambia la frecuencia de la luz que emite por

efecto Doppler. Cuando la estrella se aleja de nuestra línea de visión, la longitud de onda de su luz se estira, provocando el desplazamiento al rojo de su luz. De la misma forma, cuando la estrella se acerca, en nuestra línea de visión, la longitud de onda de su luz se estrecha, lo que provoca que su luz se vea desplazada al azul (Imagen 3). Este método mide la componente de la velocidad en nuestra línea de visión (velocidad radial) y, por ende, el periodo orbital de la estrella y del planeta. Aplicando la tercera ley de Kepler se puede obtener el radio orbital del planeta y la masa mínima del planeta (pues solo vemos variaciones radiales). Fue el método utilizado para descubrir el primer exoplaneta en 1995.

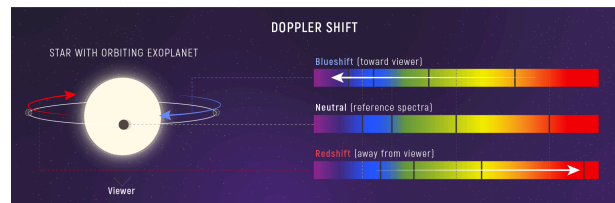


Imagen 3. Fases del método de velocidades radiales basado en el efecto Doppler. Crédito: NASA/ESA/CSA, Leah Hustak (STScI).

- **Tránsitos.** Este método se basa en fotometría y permite detectar exoplanetas por la caída periódica del brillo de las estrellas. Es el método que más exoplanetas ha permitido descubrir. Cuando un planeta pasa por delante de su estrella desde nuestra línea de visión bloquea una fracción de su luz. Esto produce una caída breve y periódica del brillo observado. (Imagen 4) La observación fotométrica genera una función que puede ser del flujo respecto del tiempo o de la luminosidad respecto del tiempo. El

primer exoplaneta descubierto por este método es HD 209458 b en 1999.

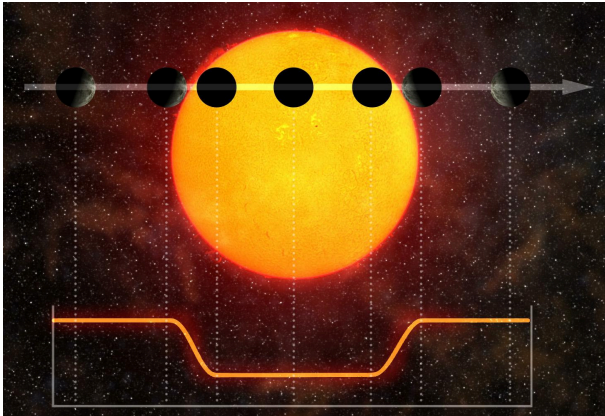


Imagen 4. Método de tránsitos. Disminución del brillo de una estrella durante el tránsito de un planeta. Crédito: G. Pérez, IAC (SMM).

El proyecto que se presenta a continuación, reproduce de forma experimental y accesible el *método del tránsito por fotometría*, mostrando cómo ligeras variaciones en la luz permite detectar y caracterizar objetos que no pueden observarse directamente.

Detección de materia oscura por desviación de la luz.

La luz no solo permite detectar objetos que bloquean su paso, sino también inferir la presencia de masa que curva su trayectoria.

1905 es considerado el *annus mirabilis* de, con solo 26 años, Albert Einstein. En él, mientras compaginaba sus estudios doctorales con su trabajo en la Oficina de Patentes de Berna (Suiza), publicó una serie de artículos científicos que revolucionarían la física. En marzo publica, lo que muchos consideran uno de los pilares de la física cuántica, las ideas del efecto fotoeléctrico. Su cubista interpretación de la luz como onda y corpúsculo simultáneamente le permitiría obtener en 1921 el premio Nobel de Física. En mayo explica el movimiento browniano. Demuestra física y matemáticamente el movimiento de las partículas en un líquido, proporcionando una prueba empírica de la existencia real de los

átomos y moléculas. En junio, postulando que la velocidad de la luz es una constante universal, introduce las bases de la *relatividad especial*, donde plantea la idea de que el tiempo y el espacio no son absolutos, sino relativos al observador. Finalmente, en septiembre, derivada de la relatividad especial, estableció la famosa ecuación de la equivalencia masa-energía:

$$E = mc^2$$

indicando que la masa de un cuerpo es una medida de su energía.

En 1915, tras una década intentando reformular las bases de la relatividad especial, consigue incluir en ellas la gravedad (aceleración de los objetos). La nueva teoría recibe el nombre de *relatividad general* y reconfigura la definición de gravedad establecida por Newton cuatro siglos y medio atrás. La gravedad deja de ser una fuerza y se convierte en un fenómeno de distorsión del espacio y el tiempo.

Esta teoría establece que la presencia de masa y energía deforma el espacio-tiempo y, como consecuencia, la trayectoria de la luz que pasa cerca de un objeto masivo no es rectilínea, sino que se curva.

Cuando la luz procedente de una fuente lejana, como una galaxia, atraviesa una región del espacio donde existe una gran concentración de masa (por ejemplo, un agujero negro, otra galaxia o un cúmulo de galaxias), su trayectoria se desvía. Este fenómeno puede dar lugar a distintos efectos observacionales, como la formación de imágenes múltiples, arcos luminosos o aumentos de brillo de la fuente original. Este efecto se conoce como *lente gravitacional*. (Imágenes 5 y 6)

Desde un punto de vista conceptual, una lente gravitacional actúa de forma análoga a

una lente óptica: ambas modifican la trayectoria de la luz y generan distorsiones en las imágenes observadas. Sin embargo, mientras que en una lente óptica la desviación se debe al cambio de índice de refracción del medio, en una lente gravitacional la curvatura de la luz es consecuencia de la deformación del espacio-tiempo.

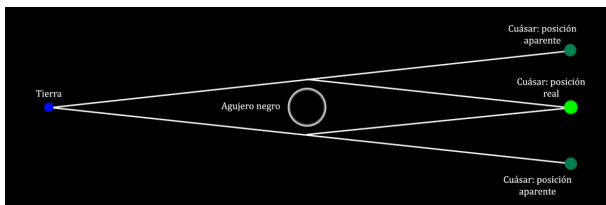


Imagen 5. Fenómeno de curvatura de la luz a su paso por un objeto masivo conocido como lente gravitacional. Crédito: Elaboración propia.

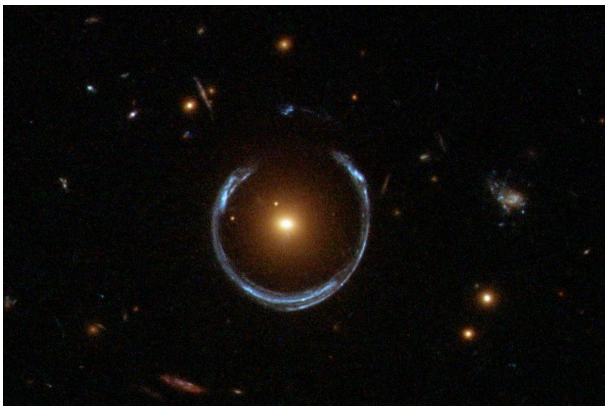


Imagen 6. Efecto de lente gravitacional, conocido como «anillo de Einstein», observado por el telescopio espacial Hubble. Crédito: ESA/Hubble/NASA.

El estudio de las lentes gravitacionales permite, no solo observar objetos lejanos con mayor detalle, sino también inferir la distribución de masa en el universo, incluyendo la *materia oscura*, que no emite luz pero sí ejerce influencia gravitatoria. Por ello, este fenómeno se ha convertido en una herramienta fundamental para investigar la estructura y evolución del cosmos.

3. Objetivos

La presente propuesta tiene como objetivo principal acercar la astrofísica moderna al aula

mediante el estudio de la interacción entre la luz y la materia, mostrando cómo es posible extraer información física de sistemas no observables directamente. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Comprender cómo se detectan exoplanetas con el método del tránsito a partir de variaciones en la intensidad de la luz.
- Analizar la relación entre la luz y la presencia de materia interpretando las disminuciones de flujo luminoso como evidencia de objetos ocultos.
- Simular experimentalmente la obtención de curvas de luz y su análisis, reproduciendo de forma accesible técnicas utilizadas en la investigación astrofísica actual.
- Explorar una segunda vía de obtención de información a partir de la luz basada en la modificación de su trayectoria, mediante la simulación de lentes gravitacionales.
- Comparar ambos enfoques (variación de la intensidad y desviación de la trayectoria) como herramientas complementarias para el estudio del universo.
- Desarrollar una propuesta experimental con alto valor didáctico que fomente el pensamiento científico, el análisis de datos y la divulgación.

4. Fundamento teórico

Método de tránsito.

España será escenario de tres eventos astronómicos entre 2026 y 2028 que harán de la península un lugar privilegiado y que marcará un hito histórico en la astronomía nacional. El 12 de agosto de 2026 se producirá un eclipse solar total; el 2 de agosto de 2027 se presenciara otro eclipse total de Sol; el 26 de

enero de 2028 podremos disfrutar de un eclipse solar anular. Una situación como esta es realmente excepcional.

Incluso sin haber presenciado un eclipse solar, nuestra razón, y cultura, nos hace saber que en estos eventos se produce una caída drástica de la luz solar que llega hasta nosotros.

Cuando observamos estrellas lejanas puede ocurrir que un planeta que orbita una estrella pase, visto desde nuestra posición, por delante de aquella. Ahora no podemos hablar de eclipse por no ser comparables los tamaños de ambos astros, sino más bien de tránsitos como aquellos que raramente podemos ver cuando Mercurio y Venus pasan por delante del Sol.

La reducción en la luz que recibimos de una estrella cuando se produce el tránsito de un planeta puede oscilar entre un 2 % en el caso de superjúpiteres y un 0,0001 % cuando se trata de un planeta tipo Tierra. En cualquier caso, para la detección de exoplanetas mediante este procedimiento debemos utilizar fotómetros hipersensibles de última generación. Por otra parte, dado que los tránsitos se producen solo en determinadas posiciones orbitales, es recomendable un seguimiento continuo, lo cual es práctico tan solo cuando los planetas presentan periodos orbitales cortos.

Tres misiones espaciales, *CoRoT*, *Kepler* y *TESS*, son las que, con más éxito, han participado en el descubrimiento de exoplanetas mediante tránsitos.

CoRoT, acrónimo de *Convection Rotation et Transits Planetaries*, fue un telescopio de 0,27 m de diámetro que la Agencia Espacial Francesa, en colaboración con la Agencia Espacial Europea, puso en órbita polar el 27 de diciembre de 2006. Descubrió 32 exoplanetas, uno de ellos, *CoRoT 7b*, con una masa de solo 1,7 masas terrestres (15 de febrero de 2009).

La misión concluyó en noviembre de 2012 tras un fallo técnico, pese estar operativo más de tres años de lo esperado.

La misión *Kepler*, que debe su nombre al astrónomo y matemático alemán Johannes Kepler, es un telescopio espacial de la NASA con un espejo principal de 1,4 m de apertura. Fue lanzado el 7 de marzo de 2009 con la misión de detectar exoplanetas mediante tránsitos en una zona de la constelación del Cisne. En 2013, tras el fallo de dos de sus ruedas de reacción, y ante la imposibilidad de realizar correctamente su apuntado, se aprobó la misión *K2* en la que se escanearía la zona de la eclíptica en busca de exoplanetas. Esta misión, finalizada en 2018 por agotar su combustible, ha sido la que más exoplanetas ha descubierto, más de 2600, incluidos algunos con un diámetro hasta el doble de la Tierra en la zona de habitabilidad de la estrella.

Hay que decir que, dado el ingente volumen de datos, las observaciones de *Kepler* son públicas para que, quien esté interesado en colaborar, busque curvas de luz peculiares que podrían corresponderse con exoplanetas y escapen a la detección de los algoritmos.

La misión *TESS* (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*) es un telescopio espacial de la NASA lanzado el 18 de abril de 2018 con el objetivo de detectar exoplanetas mediante el método de tránsito. A diferencia de *Kepler*, que se centraba en una pequeña región del cielo, *TESS* realiza un estudio prácticamente completo del firmamento, dividiéndolo en sectores que observa de manera sistemática.

En lugar de un espejo como el que portaba *Kepler*, este está equipado con cuatro cámaras con una apertura de gran campo, de 10,5 cm. *TESS* se enfoca especialmente en estrellas cercanas y brillantes, lo que facilita posteriores estudios detallados desde otros observatorios.

Su órbita altamente elíptica alrededor de la Tierra le permite mantener una gran estabilidad y minimizar interferencias, optimizando la precisión de sus medidas fotométricas.

Desde el inicio de su misión, *TESS* ha descubierto miles de candidatos a exoplanetas y ha confirmado centenares de ellos, incluyendo supertierras y subneptunos, algunos situados en la zona de habitabilidad de sus estrellas. Además, al igual que *Kepler*, sus datos son públicos, lo que permite la participación de la comunidad científica y de proyectos de ciencia ciudadana en el análisis de curvas de luz y la búsqueda de nuevos mundos.

Tal y cómo hemos podido deducir, el método de tránsito consiste en medir la disminución de luz de una estrella cuando un planeta pasa por delante de ella. Esta disminución, aunque pequeña, es detectable con instrumentos adecuados.

La representación de la luminosidad en función del tiempo da lugar a una *curva de luz*, cuya profundidad depende del tamaño del planeta, cuya periodicidad está relacionada con su órbita y cuya duración del tránsito nos proporcionará datos sobre la velocidad y radio orbital.

Desde un punto de vista físico, la fracción de luz bloqueada puede aproximarse como:

$$\frac{\Delta I}{I} \simeq \left(\frac{R_p}{R_E} \right)^2$$

donde R_p es el radio del planeta y R_E el radio de la estrella.

Para que este método sea observable, es necesario que el plano orbital del planeta esté alineado con la línea de visión del observador, lo que implica que solo una pequeña fracción

de los sistemas planetarios sean detectables por este procedimiento.

Además, el análisis detallado de la curva de luz puede revelar información adicional, como la presencia de varios planetas en el sistema o incluso indicios sobre la estructura atmosférica del exoplaneta.

Fotometría. Medición de la luz.

La fotometría es la técnica que permite medir cuantitativamente la radiación luminosa procedente de una fuente. En el contexto de la detección de exoplanetas, *se emplea para registrar variaciones extremadamente pequeñas en el flujo luminoso de una estrella.*

Desde un punto de vista físico lo que realmente se mide no es «luz» en sentido general, sino una magnitud relacionada con la energía radiada por unidad de tiempo y superficie. En términos radiométricos, esto se expresa mediante la *irradiancia* (W/m^2), mientras que en el ámbito instrumental educativo se utiliza el *lux* (lx), que pondera la sensibilidad del ojo humano.

El *detector* (*luxómetro* o *fotómetro*) mide una señal proporcional al flujo de fotones incidentes. Si consideramos una fuente estelar ideal, la señal registrada I es proporcional a:

$$I \propto \frac{L}{4\pi r^2}$$

donde L es la luminosidad de la fuente y r es la distancia al detector.

En la maqueta que desarrollamos, estos parámetros permanecen constantes, por lo que cualquier variación en la señal se debe exclusivamente a la interposición de un objeto (simulación del planeta) y, en menor medida, a ruidos instrumentales del propio sensor.

Cuando un objeto opaco se interpone entre la fuente y el detector, bloquea parte del flujo

luminoso. Esta reducción puede modelizarse como:

$$I = I_0(1 - f)$$

donde I_0 es la intensidad inicial y f es la fracción de área bloqueada. En el caso de un tránsito planetario ideal:

$$f \approx \left(\frac{R_p}{R_E} \right)^2$$

lo que conecta directamente con la curva de luz observada.

En las curvas de luz, uno de los aspectos clave fotométricos es la *capacidad de detectar variaciones pequeñas frente al ruido*. La señal medida presentará fluctuaciones debidas al ruido instrumental (sensor), a variaciones de la fuente o, incluso, al ruido electrónico.

La detectabilidad de un tránsito depende de la relación señal-ruido (SNR):

$$SNR = \frac{\Delta I}{\sigma}$$

donde ΔI es la variación de la intensidad luminosa y σ es la desviación estándar de las medidas de intensidad cuando no hay tránsito.

En astronomía, detectar exoplanetas tipo Tierra implica medir variaciones del orden de menos del 1%, lo que exige instrumentos extremadamente precisos.

Otro aspecto fundamental es la resolución temporal de la medida. El detector debe registrar la señal con suficiente frecuencia para reconstruir correctamente la curva de luz. En el experimento, esto se traduce en la frecuencia de adquisición de datos del luxómetro.

Más allá de la detección: espectroscopía.

La señal detectada depende también de la longitud de onda. Los sensores no responden de igual forma a todas las frecuencias del

espectro electromagnético. Este hecho es clave para conectar la fotometría con la *espectroscopía*, ya que la absorción de luz por parte de la materia depende de la energía de los fotones.

La espectroscopía es un método muy utilizado en astrofísica para el estudio de la composición de estrellas, nebulosas, galaxias y exoplanetas. Cuando un planeta con atmósfera pasa por delante de su estrella, la atmósfera absorbe parte de la luz emitida por la estrella que llega a nosotros (Imagen 7). Estudiando su análisis espectral podemos conocer su composición atmosférica (Imagen 8). Introducir estos conceptos permite al alumnado de bachillerato la comprensión de aplicaciones directas de la espectroscopía atómica.

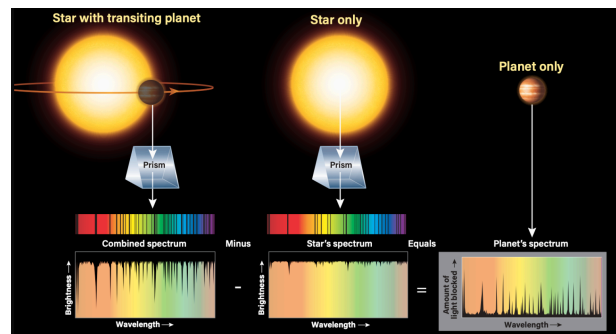


Imagen 7. Método por espectrometría por el cual se puede analizar la composición atmosférica de un exoplaneta. Crédito: Roen Kelly/Astronomy Magazine.

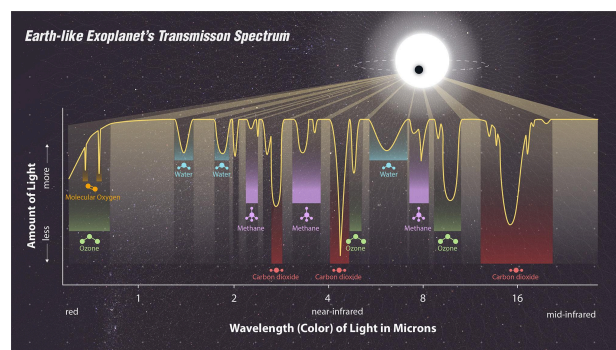


Imagen 8. Ejemplo del análisis espectral recibido tras el tránsito de un exoplaneta tipo Tierra a su paso por delante de su estrella. Crédito: NASA/ESA/CSA/STScI, Joseph Olmsted (STScI).

La fotometría constituye, por tanto, una herramienta fundamental para la astrofísica

moderna, ya que permite extraer información física relevante a partir de variaciones extremadamente pequeñas en la luz haciendo posible la detección indirecta de sistemas planetarios lejanos.

Relatividad especial.

La teoría de la relatividad especial desarrollada por Einstein en 1905 basa sus pilares en la frustrada búsqueda del «éter» lumínico que trajo de cabeza a científicos de la época. Los científicos Michelson y Morley buscaron, por analogía a la propagación del sonido a través de un medio, el medio por el que la luz se propaga, denominado «éter». Su delicado y técnico interferómetro que utilizaba el movimiento de traslación terrestre no resultó dar respuesta.

Tras infructuosos experimentos, la conclusión parecía clarividente: la luz se propaga de manera absoluta; todos los observadores, independientemente de la velocidad a la que se desplacen, medirán la misma velocidad de propagación de la luz.

Sobre esta idea, Einstein desarrolla su teoría de la relatividad especial. Esta teoría unifica el espacio y el tiempo en una única entidad, el espacio-tiempo. Si la velocidad de la luz no cambia respecto a un observador, entonces es el espacio y el tiempo el que cambia respecto a este. Sin embargo, la relatividad especial no considera los efectos de la gravedad. Esta necesidad, u obligación a efectos prácticos, exigía a Einstein a reformular la teoría de la relatividad.

Relatividad general.

Durante una década completa, Einstein, auxiliado por su amigo matemático y geómetra húngaro Marcel Grossmann, se dedicó a buscar las complejas matemáticas geométricas no euclidianas que estructuraran los cimientos

de la que sería la ampliación y el colofón a su teoría de la relatividad especial.

En noviembre de 1915, Einstein y el matemático alemán D. Hilbert protagonizaron una carrera final para formular las ecuaciones de la relatividad general. Mientras Einstein se guiaba por la intuición física, Hilbert aplicaba un rigor matemático extremo, llegando ambos a la solución casi al mismo tiempo. Finalmente, en diciembre del mismo año, Einstein publicó las ecuaciones que completaban su obra magna, clausurando uno de los capítulos más revolucionarios de la física moderna: la relatividad general.

Pese a la tensión inicial y la proximidad de sus publicaciones, Hilbert admitió siempre que la visión original era de Einstein. Este duelo intelectual no solo perfeccionó la teoría, sino que consolidó las ecuaciones de campo como uno de los pilares de la ciencia moderna.

La relatividad general extiende estas ideas al incluir la gravedad, proponiendo que la presencia de masa y energía deforma el espacio-tiempo. El núcleo de la relatividad general se puede sintetizar en dos enunciados:

- La trayectoria de un cuerpo en un campo gravitatorio adopta la forma de una *geodésica* del espacio-tiempo.
- La relación entre la presencia de masa y la forma del espacio tetradimensional viene dada por la compleja ecuación:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = - 8\pi G T_{\mu\nu}$$

El físico estadounidense John Wheeler describe esta fórmula de forma brillante y simple:

«La materia le dice al espacio-tiempo cómo debe curvarse, y el espacio-tiempo curvado le dice a la materia cómo comportarse».

Lentes gravitacionales.

En este contexto, la luz no se propaga en línea recta en sentido clásico, sino que sigue trayectorias curvas denominadas geodésicas, determinadas por dicha curvatura.

Cuando un rayo de luz procedente de una fuente lejana pasa cerca de un objeto masivo su trayectoria se desvía un ángulo α que, en primera aproximación, viene dado por:

$$\alpha \simeq \frac{4GM}{c^2 b}$$

donde G es la constante de gravitación universal, M la masa del objeto que actúa como lente, c la velocidad de la luz en el vacío y b la distancia mínima entre el rayo de luz y el centro de la masa.

Este efecto da lugar a configuraciones características dependiendo de la alineación entre la fuente, la lente y el observador:

- Alineación perfecta: formación de un «anillo de Einstein». (Imagen 6)
- Alineación parcial: imágenes múltiples o arcos distorsionados. (Imagen 9)
- Alineación débil: los objetos presentan pequeñas deformaciones. (Imagen 10)



Imagen 9. Arcos gravitacionales observados por el telescopio espacial *Hubble*. Crédito: ESA/Hubble/NASA, Rivera - Thorsen et al.

Desde un punto de vista observacional, las lentes gravitacionales permiten detectar y estudiar objetos que no emiten luz directamente, ya que la desviación de la luz

depende únicamente de la masa, independientemente de su naturaleza. Esto convierte a las lentes en una herramienta fundamental para investigar la distribución de materia en el universo, incluida la materia oscura.



Imagen 10. En esta imagen tomada por el *Hubble* se puede observar cómo el cúmulo galáctico gigante Abell 1689 genera pequeñas deformaciones en objetos lejanos. Crédito: NASA/ESA, D. Coe, N. Benitez, T. Broadhurst, and H. Ford.

Materia oscura.

Uno de los aspectos más relevantes de las lentes gravitacionales es su capacidad para revelar la presencia de materia que no emite luz conocida como materia oscura. A diferencia de la materia ordinaria, la materia oscura no interactúa de forma significativa con la radiación electromagnética, por lo que no puede observarse directamente mediante telescopios.

Sin embargo, su existencia puede inferirse a través de sus efectos gravitatorios. En el contexto de la relatividad general, la curvatura del espacio-tiempo depende de la distribución total de masa y energía, independientemente de si esta es visible o no. Por tanto, la desviación de la luz en una lente gravitacional proporciona información directa sobre la masa total del sistema.

En numerosas observaciones astronómicas, la magnitud de la distorsión de la luz observada no puede explicarse únicamente con la materia visible presente en galaxias o

cúmulos de galaxias. Esto indica la existencia de una cantidad adicional de masa no observable que se identifica como materia oscura. Aunque existen otras evidencias de la existencia de materia oscura, como las velocidades de rotación de las galaxias o la formación de estas, centraremos nuestra atención en las pistas que nos ofrecen las lentes gravitacionales.

Estas lentes permiten «cartografiar» la distribución de la materia invisible. Mediante el análisis de la forma y la intensidad de las distorsiones observadas (lente débil) o de estructuras más evidentes como arcos y anillos (lente fuerte), es posible reconstruir la distribución de masa en grandes estructuras del universo.

En este sentido, las lentes gravitacionales constituyen una de las evidencias más sólidas de la existencia de materia oscura, ya que proporcionan una medida directa de la masa total sin depender de la luz emitida. Este hecho refuerza la idea central del proyecto: la luz no solo permite observar lo visible, sino también inferir la presencia de aquello que permanece oculto.

Analogía con lentes ópticas.

Existe una analogía conceptual entre una lente gravitacional y una lente óptica convencional. En una lente óptica, la desviación de la luz se produce por un cambio en el índice de refracción del medio. En cambio, en una lente gravitacional, la desviación se debe a la curvatura del espacio-tiempo.

A pesar de su origen físico diferente, ambos sistemas comparten efectos similares:

- Desviación de la luz
- Formación de imágenes distorsionadas
- Amplificación de los objetos

Esta analogía permite reproducir de forma cualitativa el fenómeno mediante sistemas ópticos sencillos.

Importancia en astrofísica.

El estudio de las lentes gravitacionales tiene aplicaciones fundamentales en la astrofísica y la cosmología moderna, como:

- la detección de materia oscura,
- el estudio de galaxias lejanas,
- la medida de parámetros cosmológicos y
- la observación de objetos amplificados por efecto lente.

En este sentido, las lentes gravitacionales constituyen una herramienta clave para explorar el universo a gran escala, complementando otros métodos basados en la intensidad de la luz, como la fotometría de tránsito.

5. Descripción del experimento

Detección de exoplanetas mediante fotometría de tránsito.

El experimento consta de una caja cilíndrica cerrada. En su interior, una lámpara blanca en el centro y a media altura simula una estrella como fuente de luz. Tres motores de 5, 8 y 15 revoluciones por minuto, conectados por un mecanismo de correas al eje central de la maqueta, hacen girar tres bolas esféricas de porexpan que simulan los planetas. Cada bola tiene un tamaño distinto para simular planetas de diferentes tamaños. (Imágenes 11, 12 y 13)

Debemos destacar que el sistema de correas modifica la frecuencia orbital de los «planetas», por lo que el periodo orbital registrado de estos no coincide con el de los motores.

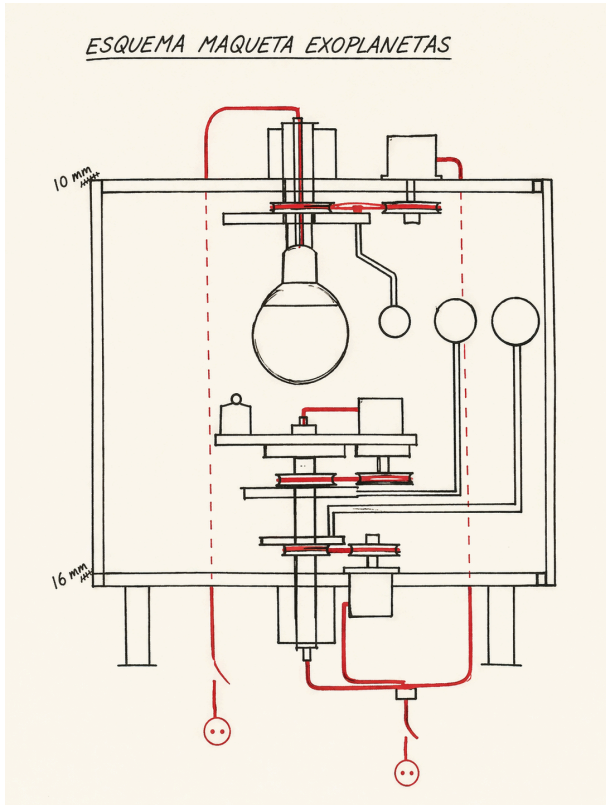


Imagen 11. Boceto inicial de la maqueta. Crédito: Elaboración propia.

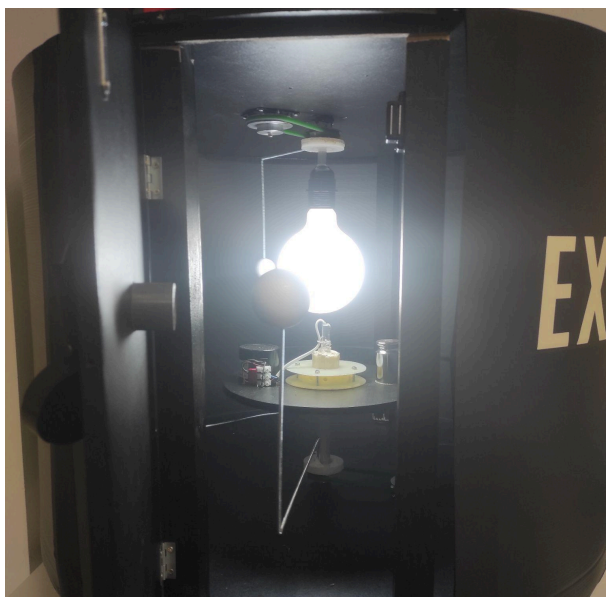


Imagen 12. Imagen del sistema construido que permite ver el interior de la maqueta. Crédito: Autor.

En la parte frontal de la caja cerrada se ha dispuesto una puerta que permite ver el interior al abrirla y en ella se ha realizado un agujero con el tamaño del sensor del luxómetro para focalizar las medidas de luz. (Imagen 14)

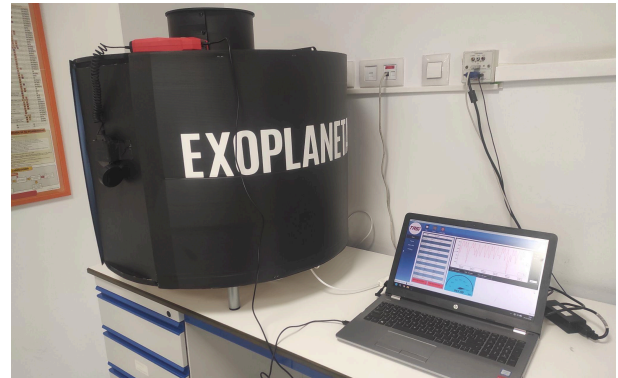


Imagen 13. Conjunto de la maqueta que incluye la caja con el sistema de exoplanetas, el luxómetro y un ordenador que registra en vivo una gráfica. Crédito: Autor.

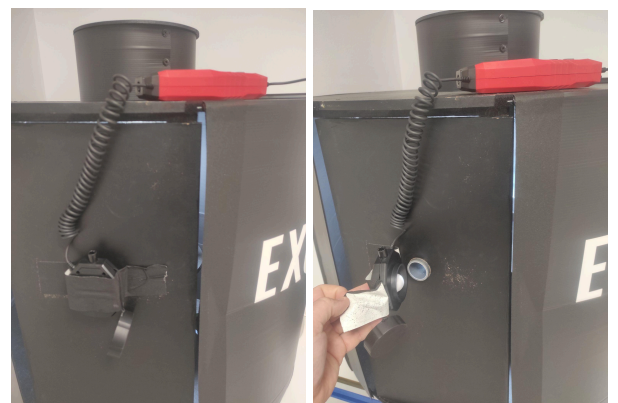


Imagen 14. El luxómetro, acoplado a una pequeña apertura, mide las variaciones de luz del sistema. Crédito: Autor.

El luxómetro utilizado, TASI TA632B, permite la visualización de datos en vivo y la graficación de estos. (Imagen 15)

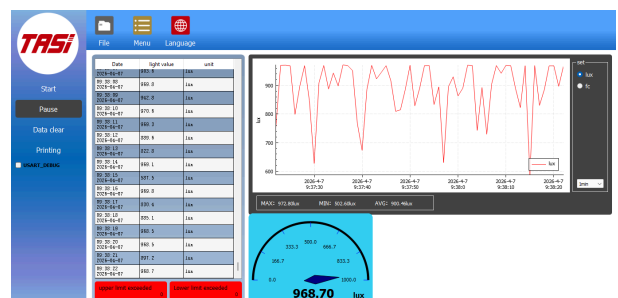


Imagen 15. Gráfica y datos proyectados en tiempo real en un ordenador. Crédito: Autor.

Este luxómetro realiza 8 medidas por segundo. Las medidas tomadas miden la iluminancia, es decir, cantidad de luz recibida en el sensor. La unidad es el lux:

$$1 \text{ lux} = 1 \text{ lumen/m}^2$$

El lux mide la luz tal como la percibe el ojo humano; no toda la energía luminosa, es decir, no mide energía pura (W/m^2).

En astrofísica real no se usa el lux; se usan detectores que miden energía. En el experimento desarrollado, el lux es didáctico y reproduce de forma fiable las variaciones relativas de la señal luminosa, que son la base del método de tránsito.

Cuando las bolas esféricas de porexpan, que giran entorno a la fuente luminosa, pasan por delante del luxómetro (lámpara, planos orbitales y sensor se encuentran en el mismo plano, lo cual permite que el experimento funcione), producen descensos periódicos en la intensidad luminosa registrada.

Para enriquecer el experimento, se pueden incorporar filtros de color (rojo, azul, etc.) entre la fuente y el sensor. Esto permite analizar cómo varía la intensidad de la luz según la longitud de onda, simulando la absorción selectiva que produciría una atmósfera planetaria.

De este modo, el experimento no solo reproduce la detección de exoplanetas, sino también una aproximación a su caracterización.

Simulación de lentes gravitacionales.

Con el objetivo de complementar el estudio de la interacción entre la luz y la materia se ha incorporado un segundo experimento centrado en la desviación de la luz. Mientras que en el experimento de fotometría de tránsito la información se obtiene a partir de la disminución de la intensidad luminosa, en este segundo montaje se estudia cómo la modificación de la trayectoria de la luz puede producir distorsiones visibles a través de una lente óptica en una imagen de fondo, de forma análoga a lo que ocurre en una lente gravitacional.

El montaje consiste en unas láminas con un fondo estelar impreso de imágenes tomadas por el *Hubble Space Telescope* o por el *James Webb Space Telescope*, que representa una región del cielo observada. Sobre este fondo se desplaza la base de una copa de vino transparente cortada previamente y cuya sección de corte ha sido pintada en negro para no poder observar la imagen a través del corte, que actúa como una lente óptica convergente (Imagen 16). Esta lente presenta los siguientes detalles técnicos:

- **Forma:** la base de la copa (donde se une al tallo) suele ser más gruesa en el centro y más delgada hacia los bordes, lo que define a una lente convergente.
- **Comportamiento de la luz:** al ser convexa en su forma (una curvatura hacia afuera), desvía los rayos de luz paralelos para unirlos en un punto denominado foco.
- **Resultado visual:** si miras a través de la base de una copa, los objetos cercanos suelen verse magnificados o con mayor detalle, característico de una lente convergente, lo que simula el efecto de una lente gravitacional.



Imagen 16. Materiales utilizados para la experiencia de lentes gravitacionales. Crédito: Autor.

La base de la copa se sitúa entre el observador y el fondo estelar de manera que la

luz reflejada o transmitida desde dicho fondo atraviesa el vidrio antes de llegar al ojo.

Cuando la luz atraviesa la base de la copa experimenta un cambio de dirección debido al fenómeno de la refracción. Este cambio se produce porque la velocidad de propagación de la luz es distinta en el aire y en el vidrio, lo que da lugar a una desviación de los rayos luminosos en las superficies de separación entre ambos medios. Como consecuencia, la imagen del fondo aparece deformada: algunas estrellas o galaxias del fondo se desplazan aparentemente de su posición original, otras se ensanchan, se duplican parcialmente o experimentan cambios en su forma. (Imagen 17)



Imagen 17. Efecto de lente gravitacional creada con la base de una copa sobre un fondo celeste. Crédito: Autor.

Esta simulación de lentes gravitacionales es acompañada de una experiencia que simula el efecto de la deformación espacio temporal con una tela de nylon elástica enganchada a un aro de gimnasia rítmica (hula hop) de casi un metro de diámetro. Sobre esta tela medianamente tensa, que simula el espacio-tiempo, se coloca en el centro un objeto masivo, una bola metálica de petanca. Este objeto provoca que la tela de nylon se deforme simulando la deformación espacio temporal de un cuerpo celeste masivo. (Imagen 18)

Con otros objetos esféricos menores (canicas, pelotas de golf, pelotas de espuma o boliches de madera) se simulan trayectorias geodésicas, como la que seguiría la luz, y órbitas.



Imagen 18. Deformación de la tela de nylon al colocar una bola de petanca metálica sobre ella que simula la deformación espacio temporal que provocaría un objeto masivo. Crédito: Autor.

Es importante destacar que este modelo no representa fielmente la relatividad general, pues usa la gravedad terrestre para ello y representa solo dos dimensiones. La curvatura real es del espacio tridimensional y del tiempo.

No obstante, esta maqueta sirve para visualizar:

- órbitas,
- curvatura y
- desviación de trayectorias.

6. Resultados del experimento de detección de exoplanetas por fotometría

La maqueta permite obtener curvas de luz con descensos periódicos y diferencias en la profundidad del tránsito según el tamaño del objeto. Estos resultados reproducen de forma cualitativa y parcialmente cuantitativa los datos obtenidos en observaciones y medidas astronómicas reales.

La imagen 19 muestra una curva de luz obtenida en el experimento. La gráfica extraída representa la evolución temporal de la luminosidad registrada por el luxómetro durante un minuto.

En ausencia de tránsito la señal se mantiene aproximadamente constante en torno a valores

entre 800 – 1000 lux, lo que corresponde a la intensidad de la fuente luminosa sin obstrucción. La ligera variabilidad observada en este régimen puede atribuirse al ruido instrumental y a pequeñas fluctuaciones en la medida.

Las medidas evidencian múltiples caídas abruptas de la luminosidad, algunas de ellas muy pronunciadas, alcanzando valores cercanos a cero. Estas disminuciones corresponden al paso de los objetos (simulación de planetas) entre la fuente de luz y el detector.

Las caídas presentan diferentes profundidades y duraciones:

- Caídas profundas (hasta valores próximos a 0 lux). Indican el paso de objetos que bloquean casi por completo la luz, simulando tránsitos centrales de planetas de gran tamaño.
- Caídas medias (valores en el entorno de los 200 lux). Son compatibles con la presencia de un planeta de tamaño medio y con un periodo orbital menor al anterior.
- Caídas parciales menores (a valores alrededor de los 600 lux). Representan tránsitos de objetos más pequeños o

trayectorias no centradas, donde solo se bloquea una fracción del flujo luminoso.

La duración de los eventos varía en función de la velocidad de los objetos y de su tamaño, reproduciendo cualitativamente la dependencia observada en tránsitos reales.

Nivel base y ruido.

El valor medio de la señal ($\approx 873 \text{ lux}$) y el máximo registrado ($\approx 1082 \text{ lux}$) permiten definir un nivel de referencia para la intensidad luminosa. Las fluctuaciones en torno a este valor base evidencian la presencia de ruido en la medida, lo cual es coherente con cualquier sistema de adquisición real. Este aspecto es especialmente relevante, ya que en astrofísica la detección de exoplanetas depende de la capacidad de distinguir pequeñas variaciones de señal frente al ruido.

Interpretación física y matemática.

Las variaciones observadas pueden interpretarse en términos de fotometría como una atenuación del flujo luminoso causada por la interposición de un objeto. La profundidad de cada caída está directamente relacionada con la fracción de área bloqueada, lo que permite establecer una analogía directa con el

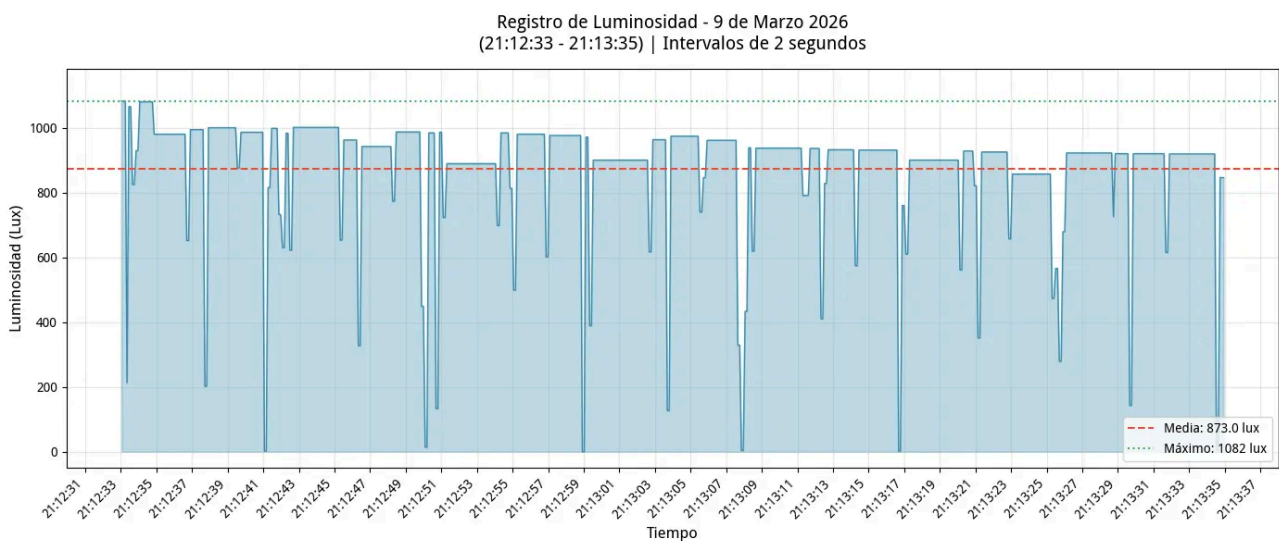


Imagen 19. Registro de luminosidad (en lux) tomados durante aproximadamente un minuto. Crédito: Autor.

método de tránsito utilizado en la detección de exoplanetas.

Asimismo, la repetición de eventos y su distribución temporal reflejan la dinámica del sistema, análoga al movimiento orbital de planetas alrededor de una estrella.

El análisis matemático de la gráfica muestra que el sistema experimental reproduce correctamente tres rasgos esenciales de la fotometría de tránsito:

- Un nivel base de luminosidad aproximadamente constante.
- Caídas de distinta profundidad, cuantificables mediante la fracción de luz bloqueada.
- Duraciones variables de los eventos relacionados con la geometría y la dinámica del sistema.

Por tanto, la maqueta no solo ofrece una demostración visual del fenómeno, sino también una base cuantitativa suficiente para interpretar los resultados en términos físicos y matemáticos.

El valor máximo medido es de 1082 lux, que se puede considerar como la intensidad de referencia sin ningún objeto interpuesto. Para analizar los datos se define la *transmitancia* como:

$$T(t) = \frac{L(t)}{L_{max}}$$

donde $L(t)$ es la luminosidad medida en cada instante y L_{max} el valor máximo registrado. De forma equivalente, se define la *fracción de luz bloqueada* como:

$$B(t) = 1 - T(t)$$

El valor medio de la luminosidad es de 873 lux, lo que corresponde, en promedio, a una transmitancia de:

$$T_{media} = \frac{L_{media}}{L_{max}} = \frac{873}{1082} = 0,807$$

El sistema transmite un 80,7 % de la luz, o lo que es lo mismo, existe un bloqueo medio de aproximadamente un 19,3 %.

En la gráfica se observan caídas de distinta intensidad:

- Para valores cercanos a 0 lux:

$$B \approx 1$$

Indican bloqueo casi total de la luz.

- Para valores en el entorno de 200 lux:

$$B \approx 1 - \frac{200}{1082} \approx 0,82$$

Indican bloqueo del 82 % de la luz

- Para valores cercanos a 600 lux:

$$B \approx 1 - \frac{600}{1082} \approx 0,45$$

Indican bloqueo del 45 % de la luz.

Estas diferencias indican la presencia de objetos de distinto tamaño o con diferentes trayectorias respecto al detector.

La gráfica permite observar la periodicidad de los eventos:

- El objeto de mayor tamaño presenta un periodo orbital de 9 segundos.
- El objeto que produce caídas en las medidas a 200 lux presenta un periodo orbital de unos 6 segundos.
- Se pueden observar caídas menores (alrededor de 600 lux) que, estando mezcladas con el ruido generado por la incertidumbre del propio sistema y del luxómetro, se producen cada 3 segundos.

El análisis matemático confirma que la gráfica reproduce los elementos fundamentales del método de tránsito.

Esto permite interpretar los resultados de forma cuantitativa y relacionarlos directamente con la detección de exoplanetas mediante fotometría.

7. Resultados de la simulación de lentes gravitacionales

En ausencia de la lente, el fondo estelar de las láminas se percibe sin alteraciones, manteniendo la posición relativa de los cuerpos celestes y su forma original. Sin embargo, al situar la base de la copa sobre distintas regiones del fondo se observan deformaciones claramente apreciables:

- Desplazamiento aparente de objetos celestes: las fuentes puntuales parecen cambiar de posición, lo que indica una desviación de la trayectoria de la luz al atravesar la lente. (Imagen 20)



Imagen 20. En esta imagen puede apreciarse cómo la lente provoca el desplazamiento de la imagen de fondo. Crédito: Autor.

- Distorsión geométrica de las imágenes: en determinadas zonas las estrellas aparecen alargadas, ensanchadas o deformadas, reproduciendo los arcos gravitacionales observados en sistemas astrofísicos reales. (Imagen 21)

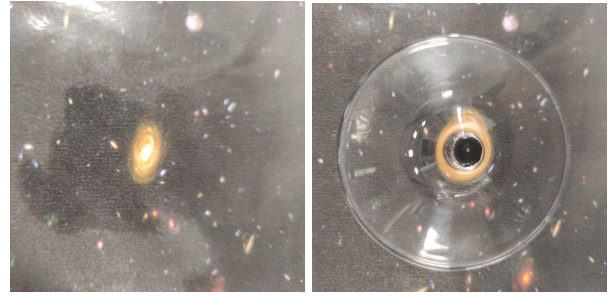


Imagen 21. En esta composición puede apreciarse cómo el objeto estelar de fondo forma un «anillo de Einstein» y se magnifica: la imagen izquierda representa el fondo estelar en ausencia de lente y la imagen derecha con la lente. Crédito: Autor.

- Variación del efecto con la posición y el tipo de lente: la magnitud de la distorsión depende de la zona de la copa utilizada, ya que el espesor y la curvatura del vidrio no son uniformes. Esto permite observar que la desviación de la luz no es constante, sino que depende de las características locales de la lente. (Imagen 22)
- Efectos de aumento (magnificación): en ciertas posiciones algunas regiones del fondo aparecen ampliadas, evidenciando un comportamiento análogo al de las lentes gravitacionales que pueden actuar como «telescopios naturales». (Imagen 21)

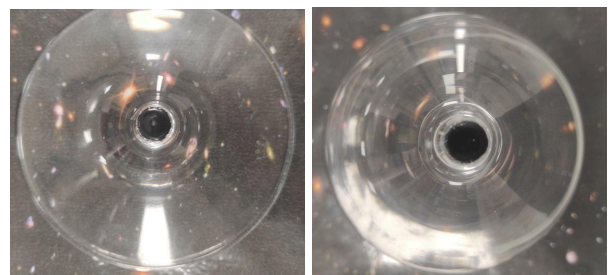


Imagen 22. En esta imagen puede apreciarse cómo el objeto estelar de fondo varía su proyección dependiendo del tipo de lente: la imagen izquierda muestra una imagen tomada con la base de la copa y la imagen derecha con el cáliz de la copa. Crédito: Autor.

Desde el punto de vista visual, este efecto reproduce de forma cualitativa el comportamiento de una lente gravitacional. En astrofísica, la desviación no se debe a la

refracción en un medio material, sino a la curvatura del espacio-tiempo generada por una gran concentración de masa. Sin embargo, en ambos casos el resultado observable es similar: la trayectoria de la luz se modifica y la imagen final de la fuente lejana aparece distorsionada.

Para llevar a cabo la demostración, la base de la copa se desplaza lentamente sobre diferentes zonas del fondo celeste, permitiendo observar cómo varía la deformación de la imagen con la posición de la lente. Cuando la copa se sitúa sobre una fuente puntual, como una galaxia, o sobre una pequeña agrupación de estrellas, la distorsión resulta especialmente evidente, ya que se aprecia con claridad el desplazamiento aparente y la deformación geométrica de la imagen. Esto permite mostrar de forma sencilla que la luz no siempre nos ofrece una imagen directa y fiel del objeto observado, sino que puede verse alterada por la presencia de una «lente» intermedia.

El experimento pone de manifiesto que la información contenida en la luz no se limita a su intensidad (como en el caso de la fotometría), sino también a su trayectoria. La modificación de esta trayectoria constituye una fuente adicional de información que puede utilizarse para estudiar sistemas físicos complejos.

Simulación de la deformación espacio temporal con la tela de nylon.

La maqueta de la tela de nylon representa, sin duda, una de las experiencias más visuales de la deformación del espacio-tiempo. Sin olvidar que esta demostración hace uso de la gravedad terrestre y representa exclusivamente dos dimensiones, permite comprender las bases de la relatividad general y cómo, a partir de la formulación de la ley de gravitación universal de Newton, el concepto de fuerza es suplantado por la torsión espacio temporal.

Con esta simple construcción puede observarse en primera instancia la deformación que producen diferentes cuerpos (Imagen 17). La trivialidad del fenómeno lleva a concluir que cuanto más masivo sea el cuerpo que se coloca sobre la tela mayor deformación provocará.

Dada esta deformación, al lanzar objetos menos masivos (como una canica) en una trayectoria diametral, pero evitando la colisión con el objeto central, se puede observar como es desviada de su trayectoria recta obligándola a realizar una curva al pasar por la deformación provocada en la tela. (Imagen 23)

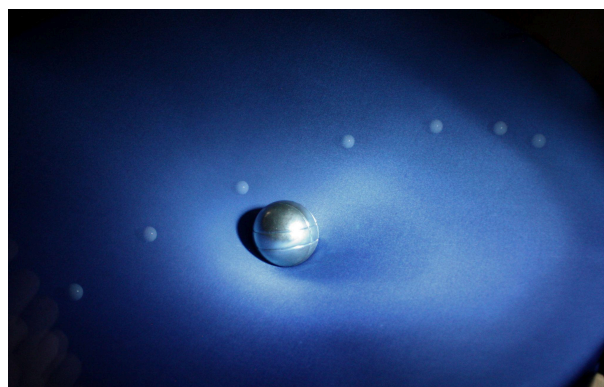


Imagen 23. Fotografía tomada con luz estroboscópica que muestra cómo la trayectoria descrita por la canica se ve afectada por la deformación de la tela sobre la que se desplaza. Esta trayectoria simula el movimiento de la luz al pasar cerca de un cuerpo masivo. La línea descrita se denomina geodésica. Crédito: Autor.

De la misma manera, con lanzamientos «tangenciales» precisos, pueden simularse órbitas, observando cómo un cuerpo puede mantenerse estable alrededor de otro. No obstante, la fricción generada entre la tela y el objeto en movimiento provoca la precipitación de este hacia el objeto masivo.

Aunque ambos experimentos no reproducen las condiciones físicas de una lente gravitacional real, sí permiten visualizar de forma clara su efecto observacional más característico: la desviación de la luz y la consiguiente distorsión de la imagen. En este sentido, los resultados obtenidos son

coherentes con los fenómenos observados en astrofísica y teorizados en cosmología, permitiendo establecer una analogía directa con sistemas reales.

En conjunto, estos experimentos complementan el análisis realizado mediante fotometría de tránsito, mostrando que la luz puede revelar información sobre el universo tanto a través de su atenuación como de su desviación, ampliando así la comprensión del papel de la óptica en la investigación astrofísica.

8. Discusión

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que es posible detectar la presencia de materia no observable directamente mediante el análisis de variaciones en la luz, bien por absorción o por desviación de esta.

Por absorción.

La gráfica registrada en la maqueta de los exoplanetas reproduce de forma clara el comportamiento esperado en un sistema de tránsitos: un nivel base de luminosidad aproximadamente constante y descensos puntuales asociados al paso de los objetos.

Desde el punto de vista físico, estas caídas de luz pueden interpretarse como una atenuación del flujo luminoso debida a la interposición de un cuerpo opaco. La profundidad de cada evento está relacionada con la fracción de área bloqueada, lo que permite establecer una analogía directa con el método de tránsito utilizado en la detección de exoplanetas. En este sentido, el experimento no solo permite reproducir el fenómeno cualitativamente, sino también permite dar una interpretación cuantitativa.

Asimismo, la variabilidad en la duración y profundidad de los eventos refleja la influencia de factores geométricos y dinámicos, como el tamaño de los objetos o su velocidad de desplazamiento. Esto resulta coherente con los sistemas planetarios reales, donde la forma de la curva de luz depende de parámetros orbitales y físicos del planeta.

Un aspecto relevante es la presencia de ruido en la señal, observable como pequeñas fluctuaciones en torno al nivel base. Lejos de ser una limitación, este hecho aporta realismo al experimento, ya que en astronomía la detección de exoplanetas requiere precisamente distinguir variaciones muy pequeñas frente al ruido instrumental y ambiental. Este punto permite introducir conceptos clave como la relación señal-ruido (*SNR*) y la importancia del tratamiento de datos.

No obstante, el modelo presenta algunas simplificaciones. Las curvas de luz obtenidas muestran transiciones más abruptas que en sistemas reales, donde intervienen efectos como el *oscurecimiento del limbo estelar* (los bordes de una estrella se ven más oscuros que el centro) o la *extensión finita de la fuente*. Asimismo, las escalas temporales y geométricas no corresponden a valores astronómicos reales. Sin embargo, estas simplificaciones no afectan a la validez del modelo como herramienta didáctica.

En conjunto, el experimento permite establecer una conexión directa entre un montaje accesible y las técnicas empleadas en la investigación astrofísica actual, mostrando cómo el análisis de la luz constituye una herramienta fundamental para revelar información sobre sistemas lejanos.

Por desviación.

El experimento de simulación de lentes gravitacionales permite abordar el estudio de

la luz desde una perspectiva complementaria a la fotometría, centrada en la trayectoria de los rayos luminosos en lugar de en su intensidad. Los resultados obtenidos muestran que la interposición de una lente óptica produce una distorsión sistemática de la imagen de fondo, evidenciando que la luz puede cambiar de dirección al atravesar un medio con determinadas propiedades físicas.

Aunque en el montaje experimental la desviación de la luz se debe al fenómeno de la refracción (experiencia de lente gravitacional) y a una deformación claramente bidimensional (experiencia con la tela de nylon), el comportamiento observado es cualitativamente análogo al que se produce en una lente gravitacional real, donde la curvatura de la trayectoria de la luz viene determinada por la deformación del espacio-tiempo en presencia de masa. Esta analogía permite trasladar un fenómeno complejo de la astrofísica y de la cosmología a un contexto accesible, facilitando su comprensión sin necesidad de recurrir a desarrollos matemáticos avanzados.

Desde el punto de vista interpretativo, el experimento pone de manifiesto que la información contenida en la luz no depende únicamente de su intensidad, sino también de su dirección de propagación. La distorsión de la imagen observada permite inferir la presencia de una «lente» intermedia, incluso cuando esta no es evidente a simple vista. Este principio es fundamental en astrofísica, donde la observación de imágenes deformadas permite detectar estructuras masivas que de otro modo pasarían desapercibidas.

En este contexto, las lentes gravitacionales adquieren un papel especialmente relevante en cosmología, en particular, en el estudio de la materia oscura. Dado que la desviación de la luz depende de la masa total del sistema, independientemente de si esta emite radiación o no, las distorsiones observadas en la luz de

objetos lejanos constituyen una evidencia directa de la existencia de materia no visible. En numerosos sistemas astrofísicos, la magnitud de estas distorsiones no puede explicarse únicamente a partir de la materia observable, lo que implica la presencia de una componente adicional de masa, comúnmente conocida como materia oscura, y que supera en casi seis veces más a la materia ordinaria del universo.

El análisis de lentes gravitacionales permite reconstruir la distribución de masa en galaxias y cúmulos de galaxias, proporcionando información clave sobre la estructura del universo a gran escala. Este hecho refuerza la idea central del proyecto: la luz no solo permite detectar objetos que bloquean su paso, sino también revelar la influencia de masas invisibles a través de la desviación de su trayectoria.

Al igual que en el experimento de fotometría, ambos modelos presentan ciertas limitaciones. La lente utilizada no reproduce la geometría ni la física exacta de una lente gravitacional, y los efectos observados dependen de las propiedades ópticas del material. De la misma forma, la tela de nylon utiliza los efectos gravitacionales terrestres y solo representa una versión simplificada en dos dimensiones. No obstante, estas simplificaciones no afectan a la validez del experimento como herramienta didáctica, ya que permite visualizar de forma directa el principio fundamental: la desviación de la luz como fuente de información.

En conjunto, este experimento amplía la comprensión del papel de la luz en la investigación astrofísica, mostrando que su análisis incluye también el estudio de su trayectoria, lo que permite acceder a información sobre la distribución de masa en el universo, incluida aquella que permanece invisible.

9. Valor educativo

El proyecto presenta un elevado valor educativo al integrar de forma efectiva conceptos teóricos de astrofísica con una propuesta experimental accesible y visual. A través del montaje, el alumnado puede comprender de manera tangible cómo es posible detectar exoplanetas mediante el análisis de la luz, trasladando técnicas reales de investigación a un entorno didáctico. Asimismo, el proyecto se amplía con la simulación de lentes gravitacionales permitiendo abordar, no solo la interacción de la luz en términos de intensidad, sino también su comportamiento en términos de trayectoria.

Uno de los aspectos más relevantes es el enfoque de aprendizaje activo, en el que el alumnado no se limita a recibir información, sino que participa directamente en la construcción del dispositivo experimental, en la toma de datos y en su interpretación. Este proceso favorece el desarrollo del pensamiento científico, incluyendo la formulación de hipótesis, el análisis de resultados y la comprensión de modelos físicos.

Además, el proyecto permite trabajar de forma integrada distintos contenidos del currículo de Física y Química de 1º de bachillerato:

- Medida de magnitudes físicas
- Tratamiento y análisis de datos experimentales
- Representaciones gráficas
- Interpretación de resultados
- Uso de modelos y analogías
- Relación entre modelo experimental y fenómeno real
- Naturaleza de la luz
- Movimiento periódico
- Relación entre periodo y frecuencia

de Física de 2º de bachillerato:

- Análisis cuantitativo de datos experimentales
- Ondas electromagnéticas
- Refracción
- Lentes
- Introducción a la relatividad general

y de Química de 2º de bachillerato:

- Espectroscopía como herramienta de análisis
- Estructura de la materia
- Espectros atómicos
- Absorción y emisión de radiación
- Propiedades ópticas de la materia

Asimismo, introduce al alumnado en técnicas actuales de la astrofísica y la cosmología, como la fotometría, la espectroscopía, la relatividad general, las lentes gravitacionales y una aproximación a la materia oscura, conectando el aula con la investigación científica contemporánea.

Un elemento especialmente significativo es su *dimensión divulgativa*. Los experimentos han sido presentados por alumnado de bachillerato del Colegio Miramadrid en la feria Madrid es Ciencia (organizada por la Fundación para el conocimiento Madri+d, en La Nave del 19 al 21 de marzo), donde han explicado el funcionamiento de estas experiencias (junto a otras dos experiencias sobre eclipses) a un público diverso, incluyendo estudiantes de diferentes niveles educativos, familias y visitantes abarcando desde expertos en la materia hasta visitantes profanos (Imágenes 24, 25 y 26). Esta experiencia ha permitido al alumnado desarrollar competencias comunicativas, adaptando el discurso científico a distintos niveles de comprensión y fomentando la alfabetización científica de la sociedad.



Imagen 24. Un alumno de 1º de bachillerato del Colegio Miramadrid explica al público el método del tránsito para detectar exoplanetas en la feria Madrid es Ciencia 2026. Crédito: Autor.



Imagen 25. Una alumna de 1º de bachillerato del Colegio Miramadrid explica al público el efecto de lente gravitacional en la feria Madrid es Ciencia 2026. Crédito: Autor.



Imagen 26. Stand del colegio Miramadrid en la feria Madrid es Ciencia 2026. Crédito: Autor.

La interacción directa con el público ha contribuido, además, a consolidar el aprendizaje, ya que la necesidad de explicar los experimentos obliga a una comprensión profunda de los conceptos. Del mismo modo, ha potenciado habilidades como la expresión oral, el trabajo en equipo y la capacidad de responder a preguntas en contextos reales.

El propio alumnado ha desarrollado en equipo dos pósteres científicos que se adjuntan

junto con el resto de archivos y al final del documento.

Una encuesta pasada al alumnado participante en la feria para valorar diversos aspectos muestra que el proyecto sobre detección de exoplanetas por tránsitos ha sido el más valorado (de los cuatro expuestos) y destacan haber comprendido los conceptos que engloban este método, así como su aplicación en la astrofísica contemporánea, seguido del experimento de lentes gravitacionales.

Por último, el proyecto destaca por su capacidad de motivación. El hecho de reproducir en el aula técnicas utilizadas en misiones espaciales reales genera un alto grado de interés y conexión con la ciencia actual, acercando al alumnado a la práctica científica.

La combinación de dos enfoques complementarios, la atenuación y la desviación de la luz, contribuye a una comprensión más profunda del papel de la óptica en la astrofísica moderna.

10. Conclusión

El presente proyecto demuestra que el análisis de la luz constituye una herramienta fundamental para el estudio del universo. A través de una propuesta experimental accesible se ha reproducido el método de tránsito empleado en la detección de exoplanetas, evidenciando cómo es posible inferir la presencia de objetos no observables directamente mediante variaciones en la señal luminosa. De forma complementaria, se ha incorporado un segundo enfoque basado en la desviación de la luz mediante la simulación de lentes gravitacionales con una lente óptica sencilla basada en la relatividad general.

Los resultados obtenidos muestran que la medición de la intensidad de la luz permite

identificar eventos de ocultación, analizar su profundidad y duración y relacionarlos con propiedades físicas del sistema, como el tamaño relativo de los objetos o su dinámica de movimiento. De este modo, el experimento no solo reproduce el fenómeno, sino que permite interpretarlo en términos físicos y matemáticos.

Asimismo, la incorporación de elementos como los filtros de color introduce una aproximación al análisis espectral, poniendo de manifiesto que la luz no solo informa sobre la presencia de un objeto, sino también sobre su naturaleza. Esta idea conecta directamente con técnicas actuales de la astrofísica en las que la espectroscopía permite estudiar la composición de atmósferas en exoplanetas.

Por otro lado, el experimento de lentes muestra que la luz también aporta información a través de su trayectoria, permitiendo inferir la presencia de masa incluso cuando esta no es visible, como ocurre en el caso de la materia oscura.

Desde el punto de vista educativo, el proyecto destaca por su capacidad para trasladar conceptos complejos a un entorno experimental comprensible, fomentando el aprendizaje activo y el pensamiento científico. Además, su implementación en contextos de divulgación como la feria Madrid es Ciencia, refuerza su impacto al conectar la ciencia con la sociedad y promover la comunicación del conocimiento por parte del propio alumnado.

En conjunto, este trabajo pone de manifiesto que, mediante recursos sencillos, es posible aproximarse a los métodos de la investigación científica actual.

Este proyecto demuestra que mediante el análisis de la luz es posible no solo observar el universo, sino comprenderlo, ya sea por lo que se pierde en su intensidad o por cómo se desvía en su trayectoria.

La combinación de ambos enfoques, la atenuación y la desviación de la luz, permite ofrecer una visión más completa del papel de la óptica en la exploración del universo. La luz, entendida como portadora de información, se convierte así en una herramienta clave para revelar lo invisible, estableciendo un puente entre la experimentación en el aula y la exploración del universo.

11. El futuro: escuchar y curvar la luz para revelar lo invisible

La historia de la astrofísica es, en esencia, la historia de cómo aprendemos a interpretar la luz. Sin embargo, el futuro inmediato apunta a una idea aún más ambiciosa: no solo observarla, sino exprimir toda la información que transporta, incluso cuando se manifiesta en formas no visibles o indirectas.

En esta línea, una de las propuestas más innovadoras para la detección de exoplanetas consiste en «escuchar» su campo magnético a través de emisiones de radio generadas por su interacción con el viento estelar. Este enfoque abre una nueva ventana en la que la luz deja de ser únicamente visible o infrarroja para convertirse en señal electromagnética de muy baja frecuencia. El proyecto *FARSIDE* (*Farside Array for Radio Science Investigations of the Dark ages and Exoplanets*), impulsado por la NASA, propone situar una red de radiotelescopios en la cara oculta de la Luna, un entorno naturalmente protegido del ruido radioeléctrico terrestre. (Imagen 27)

Este escenario, que hace apenas unas décadas pertenecía al terreno de la ciencia ficción, comienza a tomar forma dentro del marco del programa *Artemis Program*.

Misiones como Artemis II representan los primeros pasos hacia una presencia sostenida en el entorno lunar, condición necesaria para desplegar infraestructuras científicas de gran escala. En este contexto, la cara oculta de la Luna se convierte en un auténtico laboratorio natural donde, por primera vez, podríamos detectar directamente la huella magnética de mundos lejanos.

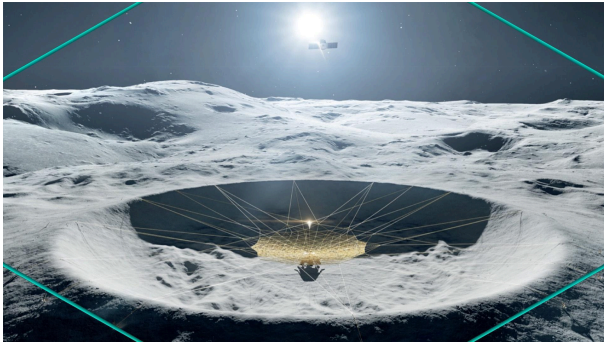


Imagen 27. Concepto de radiotelescopio desplegado en un cráter lunar (proyecto *FARSIDE*). La cara oculta de la Luna ofrece un entorno libre de interferencias para detectar emisiones de radio de exoplanetas. Crédito: NASA/JPL-Caltech, V. Vustysnky.

En paralelo, el estudio de las lentes gravitacionales está experimentando una revolución impulsada por la mejora en la calidad y resolución de las observaciones. Misiones como *Euclid* de la ESA o el telescopio *Nancy Grace Roman Space Telescope* de la NASA permitirán cartografiar con precisión sin precedentes la distribución de materia oscura en el universo (Imagen 28). En este caso, la luz no se emite: se deforma. Y es precisamente esa deformación, esa sutil distorsión geométrica, la que revela la estructura invisible del cosmos.

Más allá, propuestas como el uso del Sol como lente gravitacional natural (misiones de tipo *Solar Gravitational Lens*) apuntan hacia un horizonte aún más disruptivo: obtener imágenes directas de exoplanetas con un nivel de detalle comparable al de la observación planetaria en el Sistema Solar. De nuevo, la

clave no está en mirar más, sino en comprender mejor cómo la luz se curva, se amplifica y codifica la información del universo.

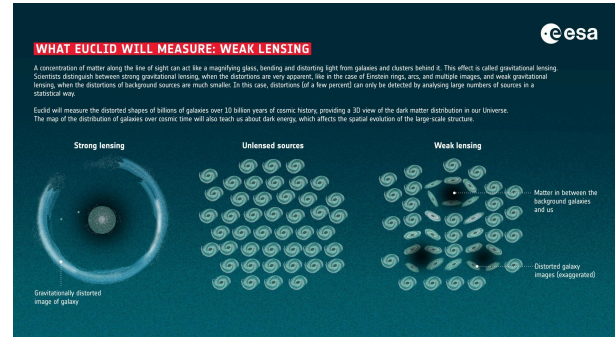


Imagen 28. Esquema del efecto de lente gravitacional: comparación entre lente fuerte (formación de «anillos de Einstein» y múltiples imágenes) y lente débil, donde la presencia de materia (incluida materia oscura) produce pequeñas distorsiones sistemáticas en la forma de galaxias de fondo. La misión *Euclid* permitirá medir estas distorsiones en miles de millones de galaxias para reconstruir la distribución tridimensional de la materia en el universo. Crédito: ESA/Euclid Consortium/Euclid Science Team.

Así, el futuro de la astrofísica refuerza la idea central de este proyecto: la luz, en todas sus formas, no solo ilumina, sino que traduce lo invisible. Ya sea mediante la alineación precisa que permite detectar un tránsito, la variación de intensidad registrada por un sensor o la distorsión generada por una lente gravitacional, el universo se nos revela a través de patrones geométricos y electromagnéticos que, interpretados correctamente, nos permiten acceder a realidades que no pueden observarse de manera directa.

Este horizonte convierte al alumnado, no solo en espectador, sino en intérprete de un lenguaje universal: el de la luz.

En el futuro, no observaremos el universo: aprenderemos a interpretarlo a través de la luz.

EXOPLANETAS



Colegio
Miramadrid



Mirando al futuro



ASTROFÍSICA OBSERVACIONAL REAL EN MINIATURA

Alumnos del Bachillerato de Ciencias
Colegio Miramadrid (Paracuellos del Jarama)

¿QUÉ ES UN EXOPLANETA?

Un **exoplaneta** es un cuerpo celeste que orbita una estrella diferente al Sol y, por tanto, no pertenece a nuestro sistema solar.

- No emiten luz propia.
- Son detectables por métodos gravimétricos o fotométricos.
- No han iniciado fusión nuclear.
- Dominan gravitatoriamente su órbita.
- Son esféricos

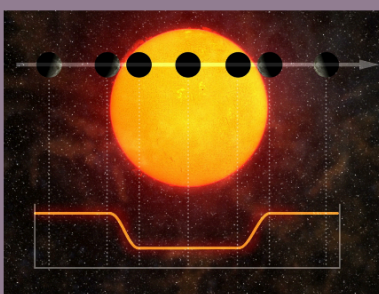
El **primer exoplaneta** descubierto fue 51 Pegassi B en 1995.



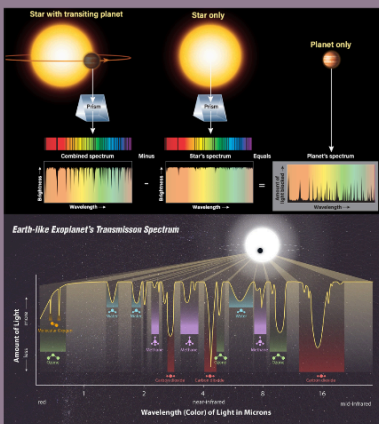
Exoplanetas Sistema Kepler-90

TIPOS DE EXOPLANETAS

- **Gigantes gaseosos:** compuestos principalmente por H y He.
- **Júpiteres calientes:** muy cercanos a su estrella.
- **Supertierras:** rocosos con probabilidad de vida.
- **Neptunianos:** similares a Neptuno.
- **Planetas errantes:** no orbitan ninguna estrella y han sido expulsados dinámicamente.



Método del tránsito (superior)



Espectroscopía (superior)

Velocidades radiales (inferior)

MÉTODO DE VELOCIDADES RADIALES

Exoplaneta y estrella orbitan alrededor de un centro común, el centro de masas, denominado **baricentro**.

Si la estrella, en su movimiento en torno al baricentro (velocidad), tiene una **componente radial**, esta se puede medir por **EFEECTO DOPPLER**:

- Cuando **la estrella se aleja** de nuestra visión, la longitud de onda de su luz se estira (**desplazamiento al rojo** de su luz)
- Cuando **la estrella se acerca**, la longitud de onda de su luz se estrecha (**desplazamiento al azul** de su luz)

DOPLER SHIFT

STAR WITH ORBITING EXOPLANET

Blueshift (toward viewer)

Neutral (reference spectra)

Redshift (away from viewer)

Viewer

MÉTODO DEL TRÁNSITO

El método del tránsito consiste en detectar exoplanetas por la caída periódica en el brillo de una estrella (**fotometría**).

Al pasar un planeta por delante de su estrella, este bloquea, por un instante, parte de su luz, produciendo una **caída breve y periódica en el brillo de la estrella**.

Las medidas fotométricas pueden ofrecer la siguiente información:

- Profundidad del tránsito ⇒ radio del planeta
- Repetición del tránsito ⇒ periodo orbital ⇒ radio orbital
- Duración del tránsito ⇒ velocidad orbital

ESPECTROSCOPIA

La **espectroscopía** es un método muy utilizado en **astrofísica** para el estudio de la composición (átomos, moléculas, compuestos...) de estrellas, nebulosas, galaxias y **exoplanetas**.

Cuando un planeta con atmósfera pasa por delante de su estrella, **la atmósfera absorbe parte de la luz emitida por la estrella** que nos llega a nosotros.

Estudiando su **análisis espectral**, podemos conocer su **composición atmosférica**.

OTROS MÉTODOS

OBSERVACIÓN DIRECTA

La **detección directa** de exoplanetas es técnicamente muy exigente.

Se necesitan telescopios con una instrumentación muy técnica.

MICROLENTE GRAVITATORIA

El método de **microlente** gravitacional se basa en una predicción de la Relatividad General. La gravedad curva el espacio-tiempo y, por tanto, desvía la trayectoria de la luz.

LENTES GRAVITACIONALES

ALUMNOS DEL BACHILLERATO DE CIENCIAS
COLEGIO MIRAMADRID (PARACUELLOS DEL JARAMA)





CÓMO LA RELATIVIDAD PREDICE LENTES GRAVITACIONALES Y CÓMO LAS LENTES GRAVITACIONALES PREDICEN LA MATERIA QUE NO VEMOS

LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD DE ALBERT EINSTEIN

LA IDEA RADICAL DE A. EINSTEIN (1905 - 1915)

Einstein descubrió que el espacio y el tiempo deben cambiar para que la velocidad de la luz sea constante.

Einstein comienza a definir el concepto de ESPACIO - TIEMPO (RELATIVIDAD ESPECIAL).

Einstein generaliza la relatividad especial añadiendo la gravedad a sus ecuaciones.

CONCLUSIÓN: la gravedad curva el ESPACIO - TIEMPO (RELATIVIDAD GENERAL) y LA LUZ debe curvarse a su paso por cuerpos masivos.

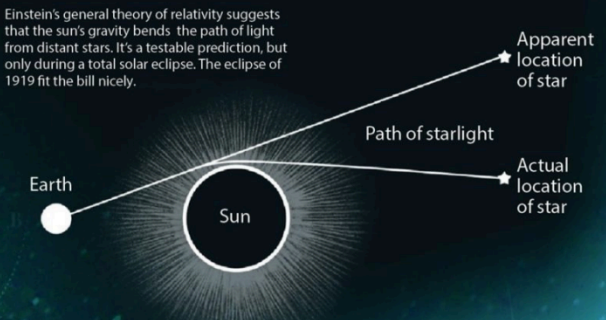
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

ECUACIÓN DE LA CURVATURA DEL ESPACIO - TIEMPO (RELATIVIDAD GENERAL)

En palabras del físico John Wheeler:
«La materia le dice al espacio-tiempo como curvarse y el espacio-tiempo curvado le dice a la materia como comportarse».

CONFIRMACIÓN DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD GENERAL (1919)

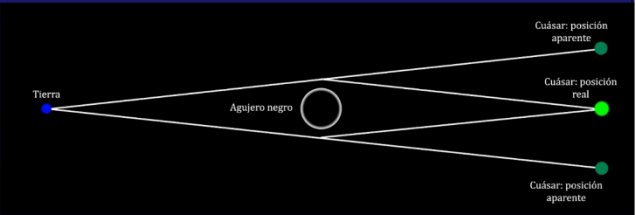
Durante el **eclipse total** del 29 de mayo de 1919, A. Eddington dirigió una de las dos expediciones **para medir la desviación de la luz estelar por la gravedad solar**, predicha por la relatividad general. Las observaciones confirmaron el efecto y demostraron que **la luz se curva en presencia de masa**.



LAS CONSECUENCIAS DE LA RELATIVIDAD GENERAL

LOS OBJETOS MASIVOS QUE DEFORMAN EL ESPACIO - TIEMPO

- Planetas y estrellas (poca deformación)
- Enanas blancas (deformación moderada)
- Estrellas de neutrones y púlsares (mucho deformación)
- Agujeros negros (máxima deformación)
- Cúmulos estelares y galácticos (enormes deformaciones)



LENTES GRAVITACIONALES

Los objetos muy masivos, que deforman mucho el espacio-tiempo, generan grandes desviaciones en la trayectoria de la luz. Una estrella, una estrella de neutrones, un agujero negro o un cúmulo de galaxias pueden actuar como lente.

Este efecto se denomina LENTE GRAVITACIONAL. Las lentes gravitacionales predicen más masa de la esperada.

Esto implica que hay masa que no vemos, que denominamos MATERIA OSCURA.

