

# ESPEJISMOS CÓSMICOS: EL EFECTO LENTE GRAVITATORIO

*Se discute el efecto de la gravedad sobre la trayectoria de los rayos de luz y se presentan algunas de las consecuencias observacionales de este efecto y sus aplicaciones en la astrofísica.*

**Silvia Mollerach**

De la experiencia cotidiana sabemos que normalmente la luz se propaga en línea recta. Sin embargo, todos hemos visto en alguna tarde de calor espejismos en la ruta. En este caso, el aire más caliente cercano al asfalto, debido a su menor índice de refracción, curva los rayos de luz hacia arriba dando lugar a imágenes invertidas de objetos lejanos que vemos aparentemente sobre la ruta (Figura 1).

Como discutiremos a continuación, la gravedad juega un rol semejante sobre las imágenes de galaxias y estrellas lejanas.

## La deflexión de la luz y la relatividad general

El problema del efecto de la fuerza de gravedad debida a la presencia de cuerpos masivos sobre la trayectoria de los rayos de luz que pasan cerca de los mismos despertó el interés de los físicos desde los tiempos de Newton. En su tratado "Optiks" (1704) Newton se pregunta: ¿No actúan los cuerpos a distancia sobre la luz desviando sus rayos, y no es su acción más fuerte cuanto menor es la distancia? El primer cálculo cuantitativo de la deflexión, o desviación, que sufriría la trayectoria de una partícula que viaja a la velocidad de la luz y pasa rozando la superficie del Sol, basada en la teoría de la gravitación de Newton, se remonta a 1801. De acuerdo al mismo la trayectoria de la luz debería sufrir una desviación de tan sólo 0.85 segundos de arco (un segundo de arco es una parte en 3600 de un grado). El resultado es tan pequeño que llevó a la conclusión de que este efecto no tendría consecuencias apreciables en las observaciones astronómicas.

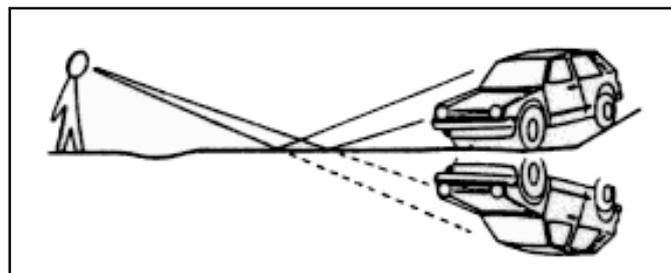
El problema volvió a considerarse más de un siglo después, luego de que Einstein formulara la teoría de la Relatividad General en 1915. En ella, se postula que la materia curva el espacio, y a su vez la curvatura del

espacio determina la trayectoria de las partículas y de los rayos de luz. De acuerdo a esta teoría, un objeto liviano no cae hacia otro objeto pesado debido a una fuerza de atracción entre los mismos, sino a que el objeto pesado deforma el espacio, de modo que la trayectoria del objeto liviano se modifica, como se ve en la Figura 2, donde hemos considerado para simplificar un espacio bidimensional, en lugar de uno tridimensional. La deflexión predicha en el marco de esta teoría resulta ser el doble de la obtenida según la teoría de Newton.

La primera confirmación experimental de la teoría de la Relatividad General fue la explicación de un problema conocido de la teoría Newtoniana, la precesión del perihelio de Mercurio. Mercurio describe una órbita elíptica, con el Sol en uno de sus focos. El punto de mayor acercamiento al Sol (perihelio) no está fijo en el espacio, sino que se desplaza alrededor del Sol con una velocidad de 756 segundos de arco por siglo. Sólo una fracción de este valor puede explicarse en la teoría Newtoniana por el efecto de los demás planetas sobre la órbita de Mercurio. Un remanente de 43 segundos de arco por siglo no puede ser explicado en el marco de esta teoría. El cálculo de la precesión esperada de acuerdo a la teoría de la Relatividad General coincide exactamente con el valor observado, como se pudo determinar poco después de la formulación de la teoría, dándole su primer éxito sobre la teoría de Newton.

La idea de tratar de medir la deflexión de la luz por el campo gravitatorio del Sol tomó impulso a partir de los trabajos de Einstein.

Debido a que es necesario medir con precisión la posición de estrellas en direcciones cercanas al Sol, estas observaciones sólo pueden realizarse durante un eclipse

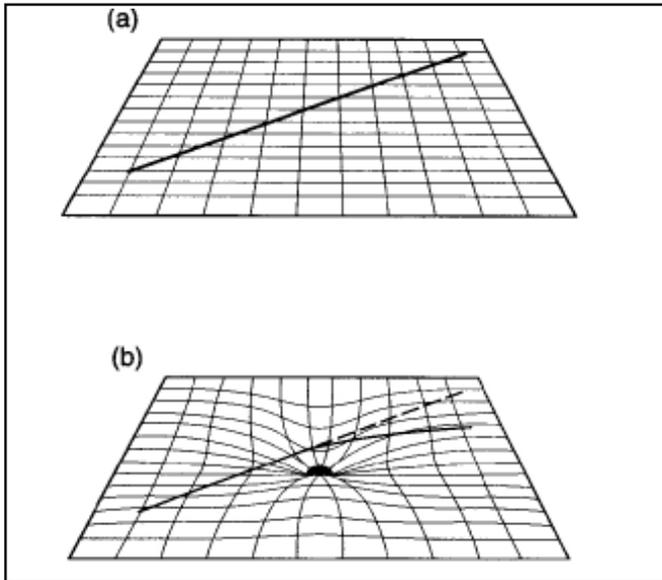


**Fig. 1. Esquema de la formación de espejismos.**

**Palabras clave:** Cosmología, relatividad general, efecto lente gravitatorio.

**Silvia Mollerach**

CONICET- Centro Atómico Bariloche  
mollerach@cab.cnea.gov.ar



**Fig. 2.** En esta figura se representa el espacio como una superficie bidimensional.

**(a)** Lejos de cuerpos masivos el espacio es plano y las trayectorias son rectas, como la de una bolita rodando sobre la superficie de una mesa. **(b)** Cerca de un cuerpo masivo el espacio se curva, como si pusiéramos un peso sobre una superficie de goma. El pozo en el centro de la superficie hace que la trayectoria de una bolita que rueda se aparte de una recta. Algo similar es lo que ocurre con la trayectoria de la luz en un campo gravitatorio.

total de Sol. Para ello es necesario tomar fotografías de las estrellas que se encuentran detrás del Sol durante el eclipse y comparar sus posiciones relativas a otras estrellas lejanas cuando el Sol no se interpone en la línea de observación. Durante el eclipse las estrellas tendrán una posición aparente más alejada de la dirección del Sol, como se esquematiza en la Figura 3.

Las primeras observaciones pudieron llevarse a cabo durante un eclipse en 1919 y confirmaron la predicción de Einstein. Este resultado dió a la Relatividad General la aceptación generalizada dentro de la comunidad científica.

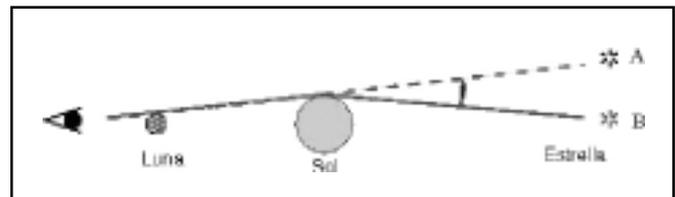
### Lentes gravitatorias

Las consecuencias prácticas de la deflexión de la luz en un campo gravitatorio son múltiples, y comenzaron a investigarse poco después de la confirmación de la teoría. Por un lado, si un cuerpo masivo se interpone cerca de la línea de observación a algún objeto luminoso más lejano, ya sea una estrella o una galaxia, no sólo la posición aparente de ese objeto se verá levemente modificada, sino que también es posible que aparezcan dos imágenes del objeto luminoso, una a cada lado del deflector. De acuerdo a la teoría, la deflexión de la luz será mayor cuanto mayor sea la masa del objeto deflector y cuanto menor sea la distancia a la que pasa el rayo de luz. Como se ve en la Figura 4, existen dos caminos posibles por los cuales la luz proveniente de la fuente puede llegar al observa-

dor y éste verá por lo tanto dos imágenes de la fuente. Este efecto lleva el nombre de lente gravitatorio. Además de afectar la apariencia de la fuente, pudiendo crear imágenes múltiples, este efecto modifica también la luminosidad aparente de la fuente, apareciendo las imágenes más o menos luminosas que como se vería la fuente en ausencia del deflector. El flujo luminoso total, sumando las distintas imágenes, se ve siempre amplificado por este fenómeno.

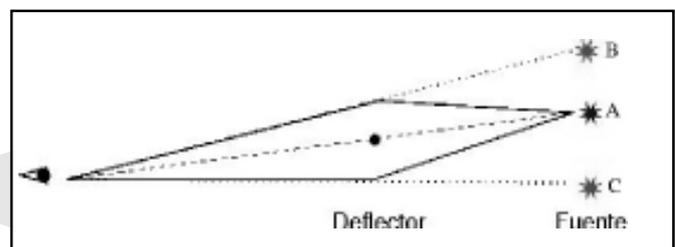
Un efecto curioso ocurre cuando el deflector es esféricamente simétrico y está perfectamente alineado con la fuente, en este caso la imagen de la fuente será un anillo alrededor de la posición del deflector, que se conoce como anillo de Einstein. Un ejemplo puede observarse en la Figura 5.

Los astrónomos pronto se dieron cuenta de que la conclusión de que los efectos de la deflexión de la luz por la materia son una curiosidad que no tendría un impacto práctico en las observaciones astronómicas, debido a que las deflexiones angulares involucradas son muy pequeñas (del orden de una milésima de segundo de arco cuando el deflector es una estrella), no se aplica en general. En efecto, si se considera como posible deflector a una galaxia, la separación angular entre las imágenes puede ser observada con los telescopios disponibles. Se comprendió también que el deflector actuaría como un telescopio natural, amplificando el flujo de luz proveniente de la fuente y ayudando a la detección de objetos más lejanos.



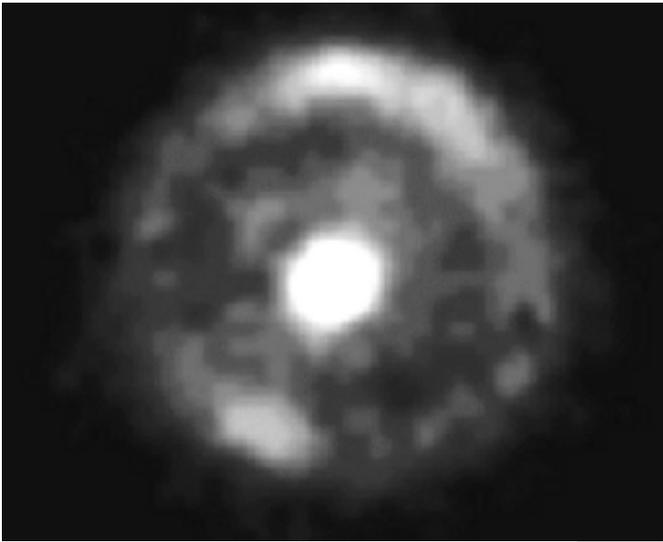
**Fig. 3.**

**Una estrella en la posición A, detrás del Sol, tendrá para el observador una posición aparente B, debido a que la trayectoria de la luz se curvó al pasar cerca del Sol.**

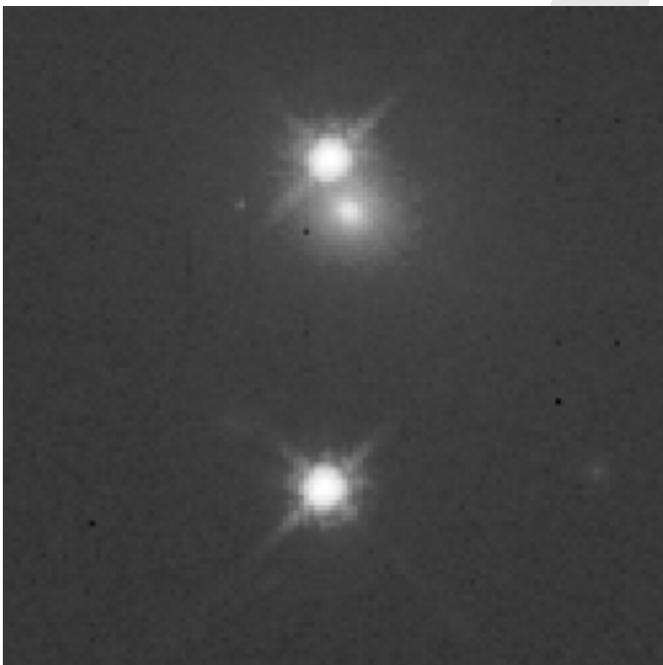


**Fig. 4.**

**Una fuente en la posición verdadera A, es observada en las dos posiciones aparentes B y C.**



**Fig. 5. Anillo de Einstein (fuente: Hubble Space Telescope).**



**Fig. 6. Primer cuasar donde se observaron dos imágenes, Q0957+561.**

### **Galaxias como lentes**

La primera observación de un par de imágenes de la misma fuente fue realizada recién en 1979. Ésta consistió en la detección de dos imágenes de un cuásar (núcleo activo de una galaxia lejana) debidas a la presencia de una galaxia más cercana que actúa como lente.

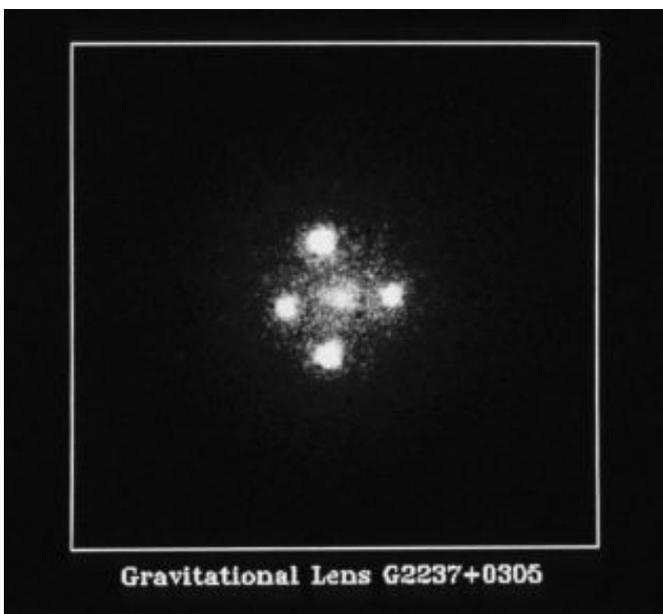
Una fotografía de este sistema se muestra en la Figura 6: los dos puntos más luminosos son las imágenes de un mismo cuásar y el punto más tenue, debajo de la imagen superior, es la galaxia deflectora. Este descubrimiento abrió una nueva rama en la astronomía, con diversas aplicaciones, como resumiremos en el resto de este artículo.

Los cuásares están entre los objetos lejanos más luminosos que podemos observar y son ideales para la observación del efecto lente gravitatorio. Esto se debe por una parte a que cuanto mayor es la distancia a la fuente, mayor es la probabilidad de encontrar una galaxia que se encuentre próxima a la línea de observación hacia ella, pudiendo actuar como lente. Por otra parte, la separación típica entre las imágenes que resultan cuando una galaxia se interpone en la línea de visión a un cuásar es de unos pocos segundos de arco, lo que permite la resolución de las imágenes individuales. Cuando se observa un par de cuásares cercanos, si su distancia y espectro son semejantes resultan ser un buen candidato para un sistema de lente gravitacional. Si se detecta una galaxia a lo largo de la línea de observación éste queda prácticamente confirmado.

Cuando el objeto que actúa como deflector no es esféricamente simétrico, el número de imágenes de la fuente es generalmente mayor que dos. Un ejemplo muy conocido es la llamada "cruz de Einstein" que puede observarse en la Figura 7, donde cuatro imágenes de un cuásar distante aparecen a los cuatro lados del núcleo de la galaxia que actúa como lente.

### **Cúmulos de galaxias como lentes**

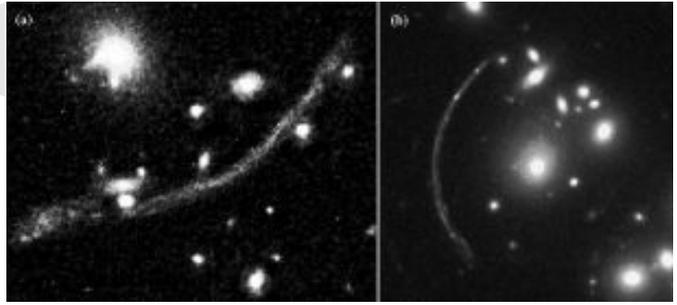
Pocos años después del descubrimiento de los primeros sistemas de lentes gravitatorias, intrigantes estructuras con forma de largos arcos fueron descubiertas en cúmulos de galaxias. Los cúmulos de galaxias son aglomeraciones de un conjunto grande de galaxias, a veces varios cientos de ellas, ligadas por la grave-



**Fig. 7. Cruz de Einstein (fuente: Hubble Space Telescope).**

Gravitational Lens G2237+0305

**Fig. 8.**  
**Grandes arcos.**



dad. Estas estructuras como las que se muestran en la Figura 8, aparecen en la parte central de los cúmulos y poseen una curvatura apreciable.

Inicialmente la naturaleza de los arcos fue bastante controvertida, hasta que pudo determinarse su distancia. Se encuentran a una distancia considerablemente mayor que la de los cúmulos en los que se los observa, lo que indica que no están físicamente asociados con ellos. Son en realidad imágenes de galaxias más lejanas muy distorsionadas por el efecto de lente gravitatorio causado por el cúmulo que se encuentra por delante. El telescopio espacial Hubble tomó algunas de las imágenes más impresionantes de este efecto, como la que se puede ver en la Figura 9.

### Aplicaciones

El efecto lente gravitatorio no sólo ha producido algunas de las imágenes astronómicas más hermosas, sino que también se ha convertido en una herramienta fundamental de los astrónomos para estudiar el universo.

### Velocidad de expansión del universo

Una de las aplicaciones más importantes es la medición de la velocidad de expansión del universo. Sabemos que las galaxias se alejan entre sí con una velocidad proporcional a la distancia que las separa. Para poder determinar la magnitud de la expansión se necesita medir las velocidades de retroceso y la distancia a la que se encuentran un conjunto de galaxias. La espectroscopia permite determinar con relativa facilidad la velocidad de retroceso mediante la determinación de la longitud de onda de ciertas líneas espectrales en la luz que se recibe de la galaxia y la comparación con su valor en el laboratorio. La medición de las distancias es más complicada, debido a que necesitamos encontrar una escala de longitud que sirva a escalas astronómicas. En algunos sistemas de lentes gravitatorias podemos encontrar esta escala. Esto sucede cuando un cuásar cuya luminosidad varía con el tiempo presenta imágenes múltiples. En este caso, la determinación de la posición angular de las imágenes respecto de la galaxia que actúa como lente, permite una reconstrucción geométrica del sistema, pero no permite determinar la escala global del mismo, es decir no se puede distinguir entre el esquema superior y el inferior en la Figura 10.

Cuando la luminosidad de la fuente es variable, midiendo la diferencia de tiempo con que las variaciones de luminosidad aparecen en cada una de las imágenes, podemos determinar la diferencia de camino que recorre la luz que recibimos de cada imagen y de allí determinar la escala global del sistema y la distancia a la que se encuentra la fuente.

Estas mediciones fueron ya realizadas para más de una docena de sistemas y las determinaciones de la velocidad de expansión por este método aportaron datos independientes y que no sufren de los problemas usuales con otros métodos utilizados.

### Medición de la materia oscura

Sabemos que en las galaxias existe más materia que la que vemos en las estrellas que las forman. Las observaciones indican que además de la materia luminosa que forma las estrellas, las galaxias poseen un halo aproximadamente esférico de materia oscura que las rodea. Por ejemplo, las curvas de rotación de las galaxias espirales, que dan la velocidad de rotación de estrellas y gas alrededor del núcleo de la galaxia en función de la distancia al mismo, indican la presencia de abundante cantidad de materia incluso más allá de donde se observan estrellas. Como no emite luz, esta materia adicional se denomina materia oscura.

Tanto la materia oscura como la luminosa es responsable del campo gravitatorio en las galaxias (o cúmulos), y por lo tanto la deflexión sufrida por la luz es proporcional a la masa total (oscura más luminosa). Es posible utilizar el efecto lente gravitatorio para determinar la masa total en la región central de galaxias y cúmulos.

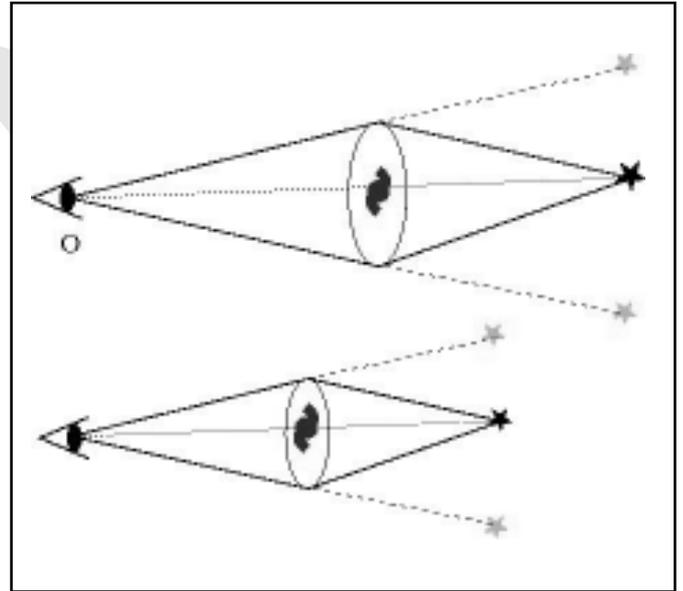


**Fig. 9.**  
**Arcos en un cúmulo de galaxias (fuente: Hubble Space Telescope).**

**Fig. 10.**  
**Medición de la velocidad de expansión del universo.**

En los sistemas en los que aparece un anillo, o imágenes múltiples de un cuásar que está detrás de una galaxia, el radio del anillo (o la separación entre las imágenes múltiples) es proporcional a la masa de la galaxia lente comprendida en la región interior a la posición de las imágenes.

En los casos en que un cúmulo de galaxias actúa como lente sobre una o varias galaxias más lejanas, distorsionando sus imágenes en forma de grandes arcos, la posición de los mismos permite de un modo similar determinar la masa total del cúmulo en la región interior a los arcos.



### Lentes débiles

Además de las pocas galaxias cuya imagen es muy distorsionada por un cúmulo de galaxias actuando como lente, hay muchísimas más cuya imagen está débilmente distorsionada. Estos pequeños arcos aparecen en las regiones más apartadas del centro del cúmulo y su estudio permite determinar la distribución de la masa total en una región del cúmulo mucho más extendida.

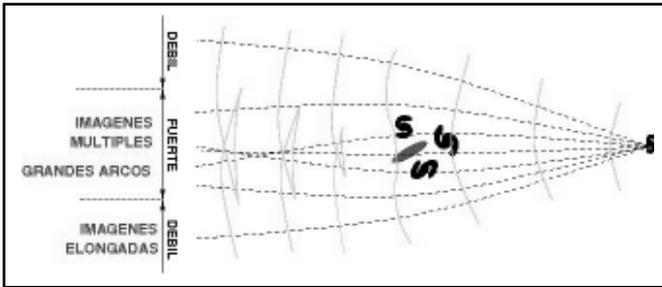
En la Figura 11 se muestra cómo el intenso campo gravitatorio en la región central de los cúmulos puede dar lugar a imágenes múltiples y grandes arcos, mientras que en la región periférica el campo más débil causa pequeñas elongaciones en las imágenes de las galaxias del fondo. El hecho de que las galaxias tienen una elipticidad natural hace difícil la determinación de la elongación de la imagen inducida por el cúmulo. Es necesario medir la elipticidad de un gran número de galaxias en cada región del cielo para poder inferir un patrón de elongación coherente debido al efecto de lente débil. Este procedimiento fue aplicado con éxito para varios cúmulos, permitiendo deducir que la distribución de materia oscura está mucho más concentrada de lo que se pensaba.

Finalmente, observando en regiones "vacías" del cielo, donde no existen concentraciones particulares de galaxias, se han determinado recientemente correlaciones muy pequeñas en la elongación de las imágenes de las galaxias del fondo. Estas correlaciones se deberían al efecto acumulado de pequeñísimas deflexiones a lo largo de la trayectoria de los rayos de luz debidas a que la distribución de materia existente a grandes escalas en el universo no es homogénea. Éste se está convirtiendo en un campo de investigación muy activo en cosmología, ya que se espera que será de gran utilidad para terminar de comprender el proceso de formación de las estructuras observadas.

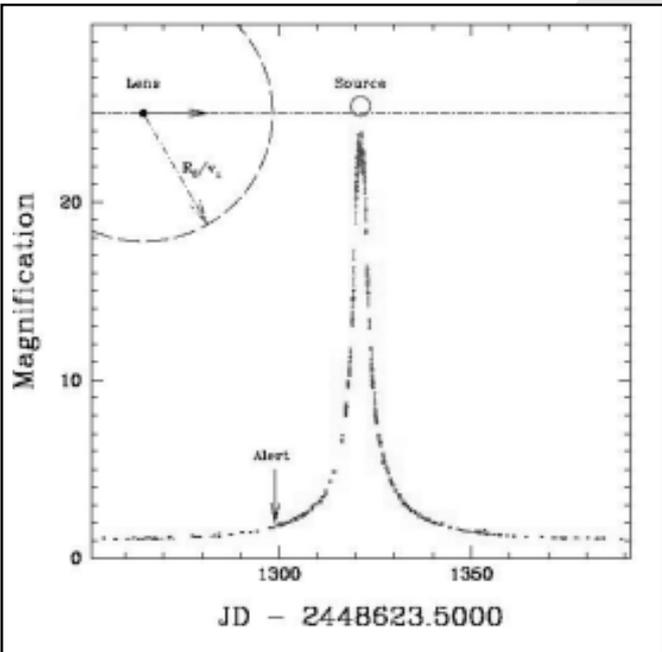
### Microlentes

En los casos en que una estrella actúa como lente y la separación de las imágenes es demasiado pequeña para poder ser visible, de todos modos el efecto de la lente no es inobservable. La presencia de la lente amplifica el flujo que recibimos de la fuente, y si la lente y la fuente se encuentran en movimiento relativo, se observará una variación en la luminosidad aparente que es función de la distancia entre la línea de observación a la fuente y la lente. Si el objeto que actúa como lente es compacto, la curva de amplificación del flujo en función del tiempo tiene una forma muy característica, siendo simétrica respecto del tiempo en que sucede el mayor acercamiento de la lente a la línea de observación hacia la fuente. La amplificación también es independiente de la longitud de onda de la luz, de modo que observaciones utilizando filtros de distintas longitudes de onda deben dar el mismo resultado. Por último, como el hecho de que la luz de una estrella sea amplificada por este efecto es tan improbable, la amplificación del flujo no debe repetirse en una misma fuente. Estas características hacen posible distinguir variaciones en el flujo debidas al efecto de microlente, de las estrellas variables, en las que procesos internos en las estrellas producen regularmente variaciones en la luminosidad de las mismas.

En la actualidad la aplicación más importante de este efecto es al monitoreo de la luminosidad de estrellas en nuestra galaxia y galaxias vecinas, como las Nubes de Magallanes y Andrómeda, con el objeto de detectar el pasaje a través de la línea de observación a las mismas de objetos oscuros compactos, como por ejemplo planetas, estrellas de neutrones o agujeros negros. El objetivo de los experimentos que llevan adelante estos monitoreos es tratar de dilucidar la naturaleza de la materia oscura en las galaxias, si está compuesta por objetos astrofísicos que no brillan, o si por



**Fig. 11. Esquema de la formación de imágenes múltiples y lentes débiles.**



**Fig. 12. Curva de amplificación medida por el experimento MACHO monitoreando una estrella en el núcleo de nuestra galaxia.**

el contrario está formada por partículas elementales que interactúan muy débilmente y no podemos detectar, como postulan otras teorías.

Aún suponiendo que todo el halo de nuestra galaxia estuviese formado por objetos compactos oscuros, la probabilidad de que alguno se interponga suficientemente cerca de la línea de observación a alguna estrella en nuestras galaxias vecinas como para causar una amplificación de su luminosidad apreciable es muy baja, cercana a uno en un millón. Es por esto que varios experimentos se propusieron monitorear varios millones de estrellas durante algunos años con el fin de poder detectar estos efectos.

Es así que muchos eventos fueron observados, dando curvas de amplificación del flujo en función del tiempo del tipo de la que se observa en la Figura 12. La conclusión de estos experimentos es que no más del veinte por ciento de la materia oscura en nuestra galaxia está compuesta por objetos astrofísicos.

La técnica de monitorear la luminosidad de un gran número de estrellas buscando detectar variaciones en su luminosidad se utiliza también para la detección de estrellas binarias (o sea dos estrellas que orbitan una alrededor de otra) y planetas. Si la lente es una estrella binaria o tiene un planeta que la orbita, la variación de

la luminosidad en función del tiempo presenta una estructura mucho más compleja que la de la curva mostrada en la Figura 12, con varios picos. Un análisis detallado de las mismas permite en muchos casos determinar las masas y la distancia relativa del sistema binario o del planeta orbitante.

Como hemos brevemente discutido, el efecto lente gravitacional se ha convertido en las últimas décadas en una herramienta sumamente útil en diversas ramas de la astronomía, contribuyendo al estudio de varios de los problemas abiertos de mayor actualidad en los campos de la astrofísica y la cosmología. Entre los más importantes se cuentan la determinación de la velocidad de expansión del universo, el estudio de la masa total y de la distribución de la materia en galaxias y cúmulos de galaxias y de la naturaleza de la materia oscura. Es un campo que continua en activa expansión, con nuevos proyectos que incluyen misiones satelitales con el objeto de estudiar la distribución de masa en tres dimensiones en el universo, creando una especie de "tomografía" de la distribución de materia. De este modo se trata de entender en detalle la historia de la formación de las estructuras que hoy observamos en el cielo.

## Lecturas sugeridas

- Harari, D. y Mazzitelli, D. 2006. 100 años de relatividad, EUDEBA, Buenos Aires.
- Mollerach, S. y Roulet, E. 2002. Gravitational lensing and Microlensing, World Scientific, Singapur.
- Wambsganss, J. 2001. Gravity's Kaleidoscope, Scientific American, vol. 285, pag. 64.
- Wambsganss, J. 1998. Gravitational lensing in Astronomy, Living reviews in relativity, <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-1998-12>.
- Wambsganss, J. 2001. Gravity's Kaleidoscope, Scientific American, vol. 285, pag. 64.
- Wambsganss, J. 1998. Gravitational lensing in Astronomy, Living reviews in relativity, <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-1998-12>.