

Microlentes Gravitacionales: lupas en el Universo

Cuando se habla de lentes, viene a la mente la clásica imagen que tenemos de estos objetos: un cristal muy pulido que normalmente aumenta el tamaño del objeto que se observa. Pero la expresión lente gravitacional, ¿qué significa? Para responder a esta pregunta hemos que retroceder unos noventa años, a 1915. En este año, Albert Einstein formuló la Teoría de Relatividad General, que describe las interacciones gravitacionales entre los cuerpos celestes y amplía en gran medida la Teoría de la Gravitación de Newton.

Según la descripción einsteiniana, la materia distorsiona el espacio en el que esta inmersa y esta distorsión resulta ser la causa de la atracción gravitacional entre los cuerpos. Pero no sólo los cuerpos materiales sienten la influencia del campo gravitatorio: el camino de un haz de luz también se desviará al pasar cerca de un objeto masivo (ver Figura 1). Pero, ¿cómo comprobar las predicciones teóricas de Einstein? La idea que circuló con bastante difusión en la época consistía en observar el Sol durante un eclipse: la luz de las estrellas que se ven angularmente cercanas al Sol sería desviada por el campo gravitatorio de éste. Fotografiando este campo de estrellas próximas al Sol durante y después del eclipse, ambas placas fotográficas revelarían (en el doble sentido de este término) las diferencias en las posiciones de las estrellas cercanas (en ángulo) al Sol. Un astrónomo inglés, Arthur Eddington, llevó a cabo la tarea. Aprovechando que el día 29 mayo de 1919 tendría lugar un eclipse total del Sol, Eddington organizó dos expediciones para observarlo: una fue a la Isla Príncipe - con Eddington al mando - y la otra a Sobral (Brasil), bajo la dirección de Dyson.

La primera expedición no tuvo mucha suerte. La climatología no ayudó y aunque Eddington creyó que había comprobado las predicciones, sus fotografías no tenían la calidad suficiente. Por suerte, la región de Sobral es muy soleada y el equipo desplazado a este rincón de Brasil obtuvo unas siete fotografías de buena calidad que, después de un exhaustivo análisis, pusieron de manifiesto la concordancia entre la observación y la teoría de Einstein. Sin embargo, la calidad de estas fotografías está siendo actualmente puesta en tela de juicio.

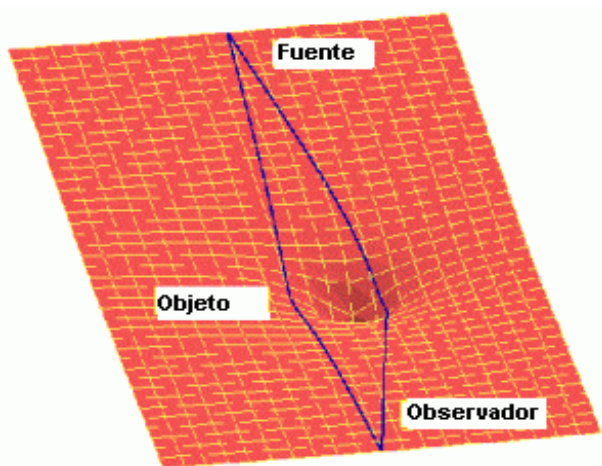


Figura 1. Ilustración de cómo la trayectoria de la luz (en azul) se desvía como consecuencia de la presencia de un objeto masivo.

Si bien todas las lentes gravitacionales se producen por la fuerza de gravedad de los cuerpos que se encuentran en la trayectoria de la luz, el resultado de las observaciones varía desde un aparente cambio de posición hasta una deformación o multiplicación de la imagen fuente. La mayoría de las lentes encontradas tiene su origen en cuásares, aunque una galaxia, en alineación con un cúmulo de galaxias, también puede dar lugar a espejismos gravitacionales y ofrecer una imagen deformada. Otra tipología de fenómenos lente es la producida por un cuerpo menor, por ejemplo una estrella (*microlente*). Su fuerza gravitatoria provoca la división de los rayos de luz en una proporción mucho menor que las galaxias, de modo que la separación nos resulta imperceptible y sólo detectamos un aumento en el brillo de la imagen lejana. Se trata de un fenómeno difícil de detectar ya que exige que la estrella-fuente, el objeto-lente y nosotros estemos alineados de forma adecuada.

No obstante, hay ya algunos casos documentados. Recientemente, un grupo de astrofísicos de nueve países, incluyendo España (IAA), ha observado una microlente que amplía el objeto fuente más de cuatrocientas veces. Cinco telescopios terrestres y el telescopio espacial Hubble fueron utilizados para seguir el evento. El Hubble se encargó de definir con precisión el tipo espectral de la estrella-fuente, una información de primera importancia ya que determina cuáles serán los modelos de atmósferas estelares que deben emplearse. La curva de luz resultante de la microlente

MOA 2002-BLG-33 (el nombre viene de un ave extinta en Nueva Zelanda) está representada en la Figura 2.

A este tipo de curva se le llama cáustica y la forma de “M” en su parte central indica que la microlente es, en realidad, un sistema binario. La forma de la curva de luz depende de las características de la microlente y de otros parámetros que también intervienen en la caracterización de la curva de luz pero que no están directamente conectados con la lente: la trayectoria, el radio y el oscurecimiento hacia el borde (*limb-darkening*) de la estrella-fuente.

El oscurecimiento hacia el borde es un fenómeno físico que puede ser observado incluso en una bombilla común: si la miramos directamente - no en exceso para no perjudicar la visión - notaremos que los bordes de la bombilla parecen ser más oscuros que su centro. Eso ocurre porque la luz que proviene del interior de la estrella recorre en los bordes un camino mayor al de la dirección central y, como consecuencia, se atenúa. Lo mismo ocurre con el Sol y con todas las estrellas. Dicho en otras palabras, el *limb-darkening* es una medida de cómo la luz de una estrella se distribuye a lo largo y ancho de su disco. Esta distribución no es uniforme: depende de la cantidad de metales que contiene la estrella, de la micro-turbulencia, de su radio, de su masa y de su temperatura.

Como la luz de la estrella-fuente fue amplificada casi quinientas veces, se nos brindaba la posibilidad, sin precedentes, de estudiar detalladamente cómo la luz se distribuye en el disco de esta estrella, de tipo solar aunque bastante más evolucionada. La calidad de los datos exigía, en contrapartida, un cálculo muy detallado de los modelos de atmósferas estelares que incluyera millones de líneas espectrales. Debido a la complejidad del problema, las técnicas usuales (y menos aún las técnicas antiguas de integración que algunos todavía insisten en utilizar) para solucionar la ecuación de la transferencia de la radiación no se aplicaron en su forma habitual, ya que se tuvieron en cuenta también los efectos de la geometría esférica, que no están incluidos en los modelos actualmente disponibles, que consideran solamente los efectos de una geometría plana.

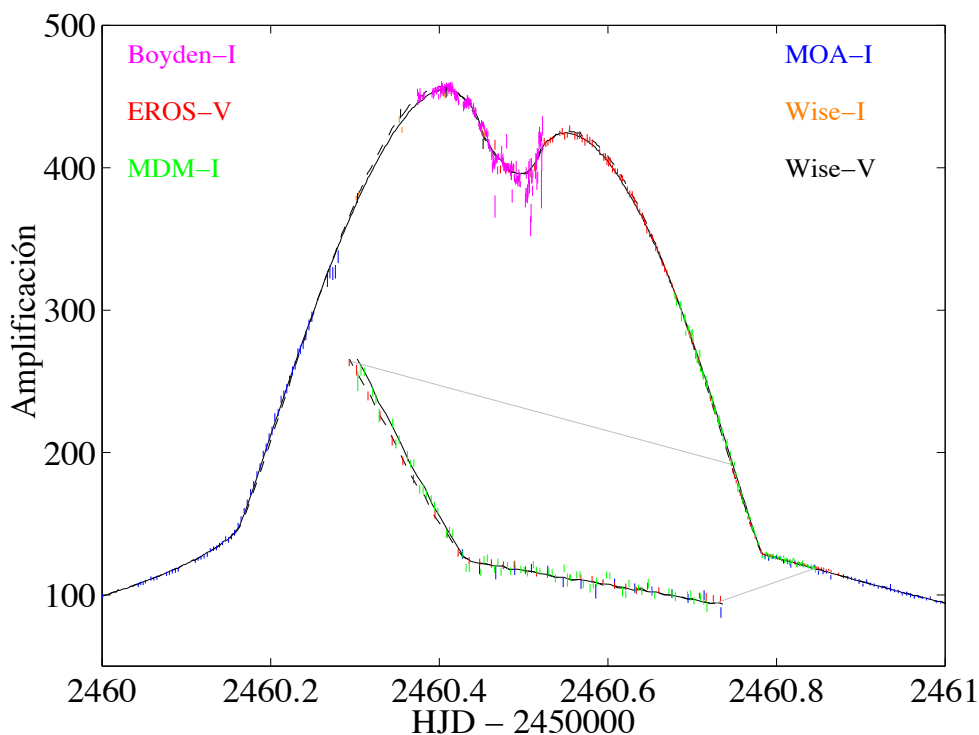


Figura 2. Curva de luz de la microlente MOA 2002-BLG-33.

El resultado de estos cálculos puede verse en la Figura 2, donde la línea negra continua representa la curva de luz calculada y las barritas en colores denotan los datos observacionales. El cálculo para reproducir la curva de luz es un proceso muy laborioso y exige muchísimo tiempo en grandes ordenadores, como también el cálculo de modelos de atmósferas. Por primera vez se pudo observar y comparar el *limb-darkening* (ver Figura 3) para este tipo de estrellas con un nivel real de confianza de cerca del noventa y cinco por ciento.

En Junio del 2005, el mismo equipo de astrofísicos, en el que participa Antonio Claret, del Instituto de Astrofísica de Andalucía, determinó por primera vez la forma de una estrella lejana, usando la microlente MOA 2002-BLG-33. Por una feliz coincidencia, se conmemoró durante el año

2005 el año Einstein, debido a que se cumplía 100 años del enunciado de la Teoría de la Relatividad. Este hecho fue convenientemente resaltado en la prensa especializada. Volviendo a los aspectos técnicos, la precisión de la medida fue de 0.04 microsegundos de arco. Para hacerse una idea de esta precisión, la Figura 4 muestra una imagen obtenida con el Telescopio Espacial Hubble (izquierda) comparada con la obtenida utilizando la técnica de las microlentes gravitacionales (derecha). La resolución es del orden de un millón de veces superior en el segundo caso. Tal precisión es realmente llamativa dado que MOA 2002-BLG-33 se encuentra a aproximadamente 17 mil años-luz de la Tierra.

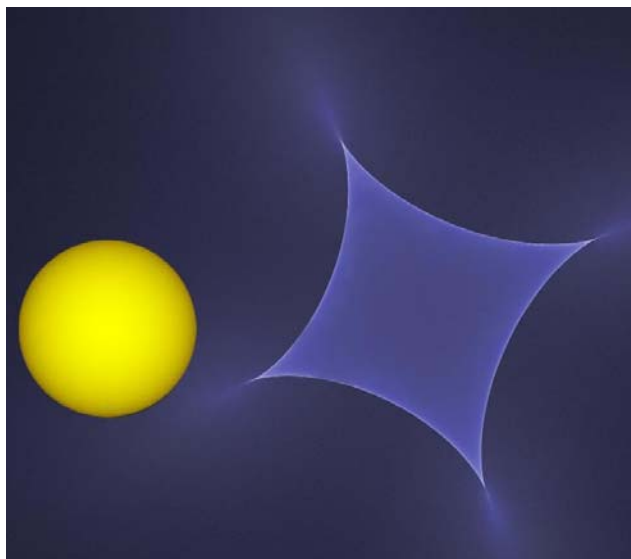


Figura 3. Representación de la microlente MOA 2002-BLG-33. Nótese que los bordes de la estrella-fuente están oscurecidos según los modelos esféricos de atmósferas estelares. El mapa de amplificación de la lente está representado en azul, siendo las regiones más claras las de mayor amplificación. La figura central en forma de diamante representa la cáustica.

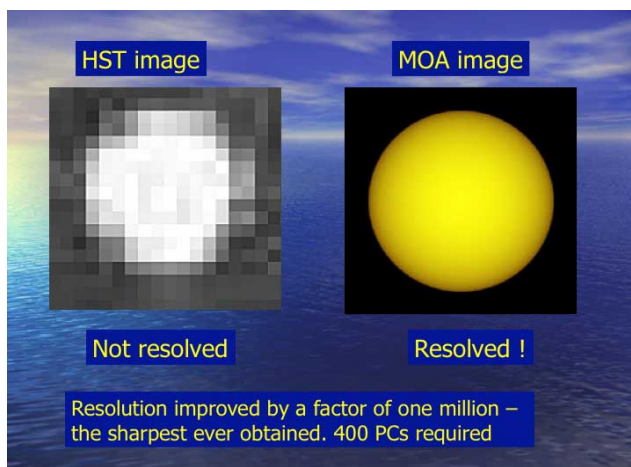


Figura 4. Imagen de MOA 2002-BLG-33 obtenida con el Telescopio Espacial Hubble (izquierda) y con la técnica de la microlente gravitacional (derecha).

Las microlentes tienen otras aplicaciones en la Astrofísica tales como:

- 1- La detección de planetas extrasolares. Se puede hacer un paralelismo entre la experiencia de Rutherford, quien usó las partículas alfa para estudiar la estructura del núcleo atómico, con la detección de planetas extrasolares en eventos de microlentes ya que los fotones servirían para estudiar la estructura planetaria a través de anomalías en la curva de luz.
- 2- Investigación de la materia oscura a través de la búsqueda del evento en enanas marrones. La duración del evento en este caso sirve con una restricción a la materia oscura debido a las enanas marrones.
- 3- Barra galáctica. La distribución observada de eventos de microlentes sugiere una estructura en forma de barra para el bulbo galáctico.

La incidencia de estrellas químicamente peculiares en las Nubes de Magallanes

Los cúmulos estelares y evolución estelar

Los cúmulos estelares son asociaciones de estrellas que se mantienen ligadas gravitacionalmente. Existen dos grupos principales: los abiertos y los globulares. Los primeros son relativamente jóvenes mientras los segundos son de los objetos más antiguos del Universo. Los cúmulos estelares presentan algunas características que los hacen particularmente útiles para la comprobación de la teoría de la evolución estelar. Aunque no se conocen las masas individuales de sus estrellas, el hecho de que tengan más o menos la misma edad introduce un concepto teórico muy útil, el de la isocrona. Una isocrona es el lugar geométrico en el diagrama HR de los puntos con la misma edad. Un diagrama HR representa la evolución de las estrellas. Se suele representar la luminosidad estelar en función de la temperatura efectiva (que es aproximadamente la temperatura de las últimas capas de la estrella). Si recordamos que las estrellas evolucionan cada cual con su ritmo, que depende primordialmente de su masa y composición química, podremos construir una curva en tal diagrama a partir de una red de modelos teóricos de evolución estelar.

En el último ensayo se puede ver una figura que muestra un típico diagrama HR (las masas están dadas en unidades solares). Si inspeccionamos numéricamente cada una de las trazas que componen la red podremos inferir para cada una de ellas la luminosidad y la temperatura efectiva para una determinada edad, digamos, diez millones de años. Procediendo de manera idéntica para otras edades, obtendremos una familia de curvas, cada una representativa de una edad. Pero estas isocronas no son muy útiles para el análisis de las propiedades de los cúmulos porque no medimos directamente las luminosidades y las temperaturas efectivas de las estrellas y sí sus magnitudes aparentes e índices de color. Así que, antes de comparar con los datos observacionales hay que transformar los parámetros teóricos en magnitudes e índices de color. Los índices de color son las diferencias de magnitudes en los diferentes filtros. Algunos índices dan buena estimación de la temperatura efectiva; otros de la gravedad superficial. Esto se hace con la ayuda de estrellas de calibración, de modelos de atmósfera estelares y de curvas de desenrojecimiento.

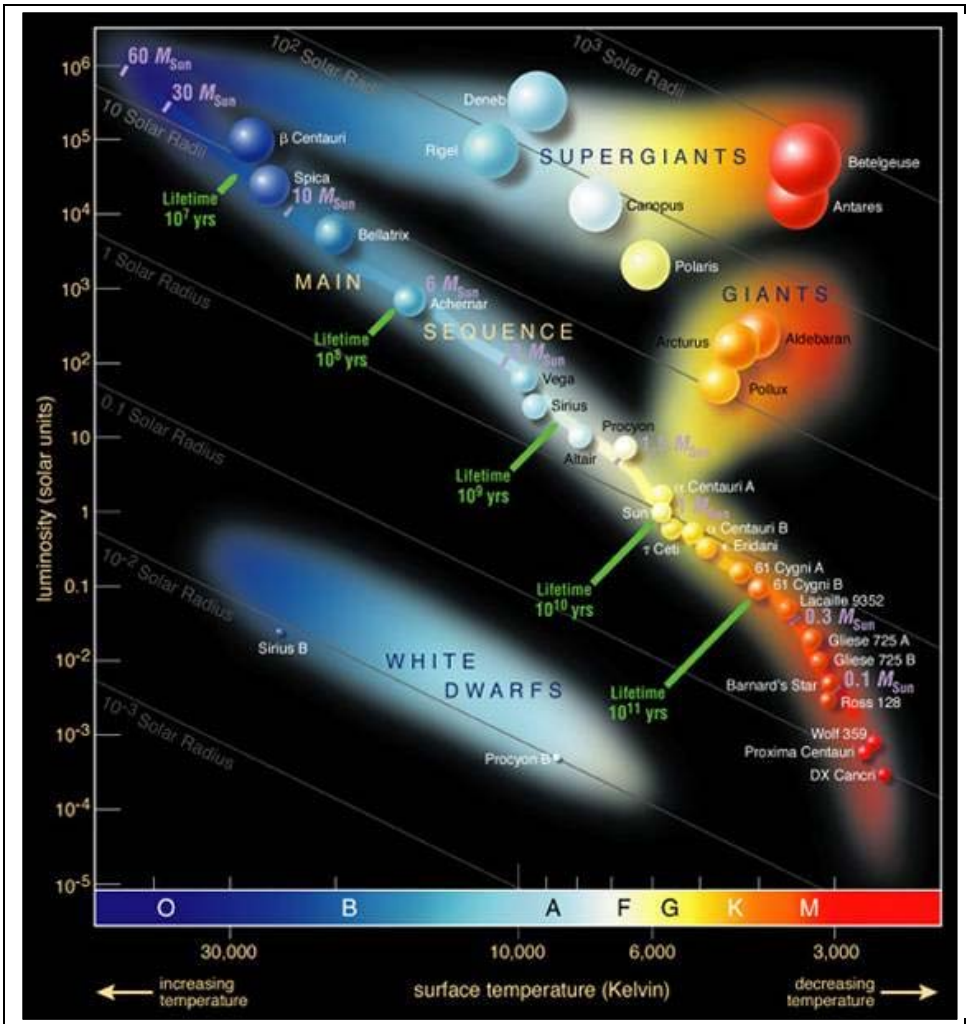


Diagrama HR esquemático (para un diagrama teórico real, ver el último ensayo)

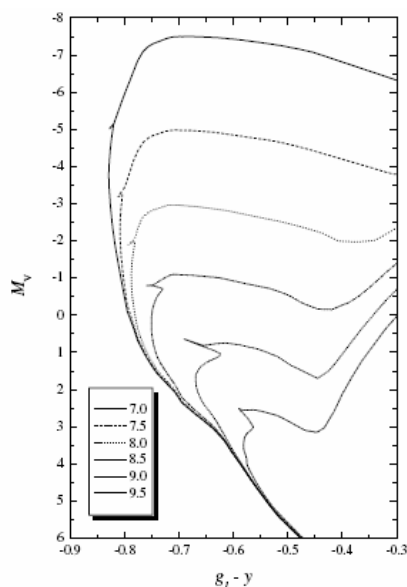


Gran Nube de Magallanes (AURA/NOAO/NSF)

El sistema fotométrico *delta a* y las estrellas químicamente peculiares

Las estrellas pertenecientes a los cúmulos pueden ser binarias o rotar muy rápido, lo que cambia radicalmente sus propiedades. Es muy difícil en muchos casos distinguir estas anomalías usando los sistemas fotométricos tradicionales. Si dicha característica viene dada por una anomalía química y por la presencia de campos magnéticos, el problema se complica aún más ya que tal estrella no se aparta considerablemente de la franja de puntos que caracteriza el cúmulo.

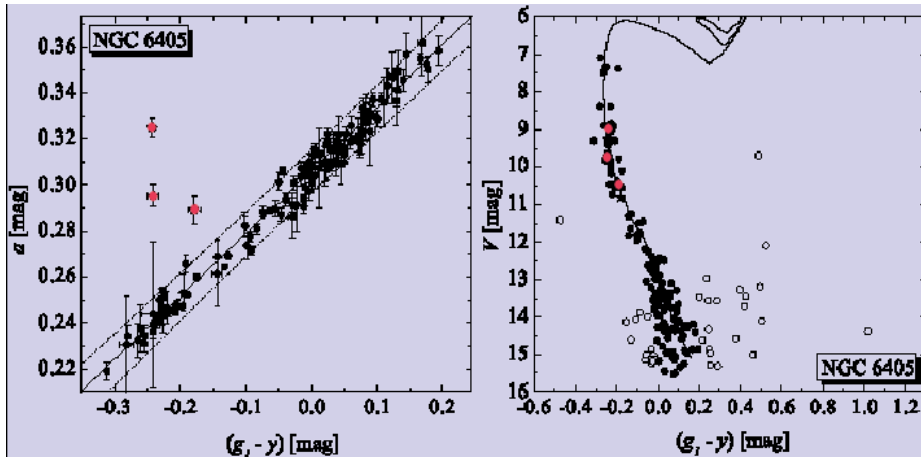
Las principales características de las estrellas químicamente peculiares (CP) son: líneas de absorción peculiares y variables, presentan sobreabundancia de silicio, cromo, estroncio y europio, y variabilidad del campo magnético. Estas estrellas CP son particularmente importantes a la hora de investigar diversos procesos, tales como difusión y convección en presencia de campos magnéticos. Por otra parte, desde el punto de vista instrumental, se ha diseñado en Austria un sistema fotométrico de tres filtros llamado *delta a*. Este sistema se ha mostrado muy útil para discriminar las estrellas CP. Por lo tanto, hemos adaptado nuestra red de modelos evolutivos teóricos a este sistema para calcular las edades, las distancias y el enrojecimiento de los cúmulos, previa transformación de los parámetros, como antes hemos comentado.



Isocronas teóricas en el sistema *delta a*.
Los números dentro del cuadro representan
los logaritmos de las edades en millones de años.

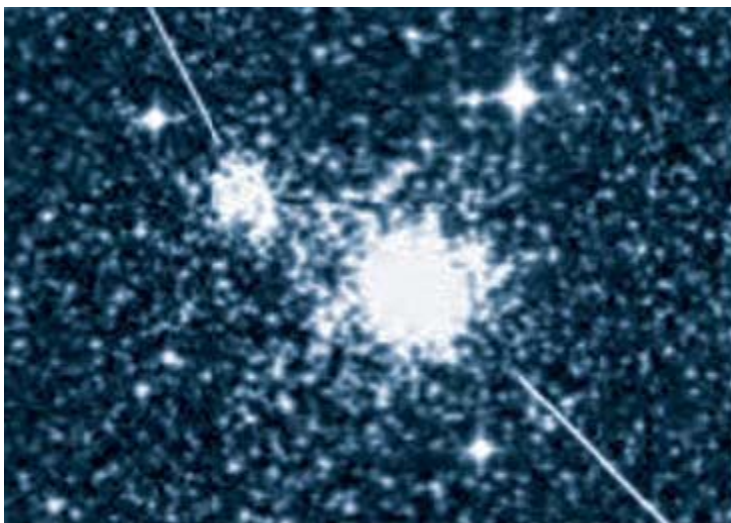
El resultado para el cúmulo NGC 6405 puede ser visto en la figura siguiente. Hemos aplicado tales isocronas a docenas de cúmulos localizados en nuestra galaxia con resultados idénticos en lo que al comportamiento de la línea de normalidad de cada uno se refiere.

El siguiente paso lógico ha sido estudiar la incidencia de las CP en otros entornos, como las Nubes de Magallanes. Se están llevando a cabo intensas campañas observacionales con telescopios situados en el hemisferio sur con el fin de obtener datos para estas dos galaxias. Se han estudiado dos campos de estrellas, uno de los que contiene un cúmulo joven (NGC 1711), en la Gran Nube de Magallanes. Más recientemente, también en la Gran Nube de Magallanes, se ha investigado el cúmulo binario (posiblemente triple) NGC 2136 y NGC 2137.



En el diagrama de la derecha (un diagrama tradicional) las CP (en rojo) no son distinguibles mientras que en el diagrama de la izquierda las CP salen notoriamente de la línea de normalidad, lo que revela claramente las anomalías.

Además de la discriminación de las CP, también se han descubierto estrellas del tipo Ae/Be. Cabe también destacar que se ha observado que solo un 2% del total de las componentes son químicamente peculiares, aproximadamente la mitad de la incidencia de las CP en nuestra galaxia. Tal dato impone restricciones muy severas a los modelos de evolución. Como próximo paso, se intentará establecer la incidencia de estrellas químicamente peculiares en la Pequeña Nube de Magallanes, una galaxia con menos contenido metálico todavía que la Gran Nube.



El sistema binario de cúmulos NGC2137 (izquierda) y NGC2136, situado en la Gran Nube de Magallanes.
Fuente: The NGC project.

Referencias:

Claret, A., Paunzen, E., Maitzen, H. M. 2003, *Astronomy and Astrophysics*, 412, 91

Paunzen, E., Pintado, O. I., Maitzen, H. M., Claret, A. 2005, *Monthly Notices of Royal Society*, 362, 1025

Paunzen, E., Maitzen, H. M., Pintado, O. I., Claret, A., Iliev, I., Netopil, M. 2006, *Astronomy and Astrophysics (Letter)*, 459, 871