

EARENDEL. UNA ESTRELLA A REDSHIFT 6.2

En la era de los grandes telescopios, la naturaleza es aún capaz de superar a la tecnología gracias al efecto lente gravitatoria. Alrededor de grandes concentraciones de materia, como cúmulos de galaxias, este efecto es capaz de magnificar objetos distantes que estén perfectamente alineados con la lente y telescopios como el Hubble por factores de varios miles. En términos de brillo superficial, los objetos más brillantes en el óptico y compactos conocidos son estrellas gigantes que pueden alcanzar varios millones de veces la luminosidad del Sol.



José María Diego
Instituto de Física de Cantabria
jdiego@ifca.unican.es

Yolanda Jiménez Teja
Instituto de Astrofísica de Andalucía
yoli.jimenez.teja@gmail.com

Tom Broadhurst
Universidad del País Vasco
tom.j.broadhurst@gmail.com

Hasta hace unos pocos años, y a pesar de su gran luminosidad, estas estrellas solo podían ser estudiadas en nuestro universo local, hasta distancias comparables al cúmulo de Virgo. Desde 2018, con el descubrimiento de Ícaro (Kelly et al. 2018), una estrella luminosa a redshift $z=1.49$, el estudio de estrellas luminosas a distancias cósmicas es una realidad. El descubrimiento de Ícaro y su posterior estudio fue posible gracias a la magnificación extrema producida por un cúmulo de galaxias que focalizó las trayectorias de los fotones de Ícaro en los detectores del Hubble, igual que hace una lente ordinaria, logrando amplificar el flujo de Ícaro un factor entre 2000 y 3000, convirtiendo al conjunto Hubble+Cúmulo en un telescopio enorme con un tamaño efectivo del espejo primario de más de 100 metros. Tras el descubrimiento de Ícaro siguieron descubrimientos similares de varias estrellas a distancias comparables, o incluso superiores. No obstante ninguna de ellas ha estado tan alejada como Earendel (Welch et al. 2022), con un redshift estimado de $z=6.2$ y que, como las anteriores estrellas fue, también detectada con el telescopio espacial Hubble cerca de la zona de magnificación máxima de un cúmulo de galaxias. La luz que observamos de Earendel surgió de esta estrella hace 12700 millones de años, o unos 900 años después del Big Bang. Irónicamente el descubrimiento de Earendel tiene lugar en el momento en el que el sucesor del telescopio Hubble, JWST, está a punto de comenzar operaciones. JWST fue diseñado en parte para estudiar las primeras galaxias y estrellas como Earendel, que contribuyeron en una cierta proporción (aún por determinar con mayor precisión) a la época de reionización del universo. El telescopio Hubble, en lo que podrían ser sus últimos años en operación, muestra el camino a JWST en este nuevo campo del estudio de estrellas individuales a distancias cósmicas y amplificadas por valores extremos.

El descubrimiento de Earendel no hubiera sido posible sin la ayuda del efecto lente gravitatoria. Earendel se encuentra en una galaxia a redshift 6.2 formando un arco gigante de unos 15" de longitud. Dicho arco, bautizado con el nombre Sunrise en relación al amanecer de las galaxias, fue detectado por el Hubble en imágenes tomadas en 2016 y hasta la fecha es la galaxia más magnificada conocida por encima de redshift 5. El nombre de Earendel está en parte ligado al nombre de esta galaxia ya que Earendel era

usado en el pasado (en Inglés antiguo) para referirse a la primera estrella del amanecer. El nombre Earendel también hace honor a la literatura de Tolkien, que al igual que los telescopios actuales fue capaz de llevarnos a mundos lejanos y pasados.

Una de las curvas críticas del cúmulo de galaxias WHL0137-08 (a $z=0.566$ y que actúa como una potente lente gravitatoria) atraviesa el arco justo en la posición donde está Earendel. Diferentes modelos de lente gravitatoria de este cúmulo predicen que la curva crítica pasa por la posición de Earendel. Las curvas críticas son zonas en el plano de la lente relativamente pequeñas pero donde la magnificación es máxima. Cuando estas zonas de magnificación máxima se representan en el plano de la fuente se les conoce como cáusticas. Dentro de la galaxia Sunrise, Earendel está posicionada muy próxima a una de las cáusticas que atraviesan esta galaxia. Posiblemente otras estrellas estén incluso más cerca de la cáustica, pero para poder verlas sería necesario que tuviesen una luminosidad comparable a la de Earendel que tiene una luminosidad estimada de al menos varios millones de veces la luminosidad del Sol. Ya que estrellas tan luminosas son poco abundantes, solo la combinación de luminosidad y magnificación de Earendel hace posible que esta estrella sea visible

La magnificación cerca de una curva crítica escala con la distancia como A/d , donde A se puede aproximar por el radio de Einstein de la lente (unos $50''$ para un cúmulo como WHL0137-08) y d es la distancia a la curva crítica en segundos de arco. A distancias menores que la resolución espacial del Hubble la magnificación puede ser de varios cientos y llegar hasta varios miles para distancias muy pequeñas. Valores tan extremos de la magnificación sólo pueden observarse para objetos muy compactos, como estrellas, ya que la magnificación máxima de un objeto es inversamente proporcional a su tamaño. Así, en galaxias las magnificaciones más grandes que se han observado es de unas pocas decenas, aumentado hasta magnificaciones del orden de 100 para quasars. Estrellas en cambio pueden ser órdenes de magnitud más pequeñas y dado su reducido tamaño pueden estar lo suficientemente próximas a las cáusticas resultando en magnificaciones de hasta varios miles. La probabilidad de tener factores de magnificación extremos es baja, pero cuanto mayor

es la magnificación menor es la luminosidad de la estrella que se necesita para que esta pueda ser observada una vez es amplificada. De este modo la escasa probabilidad de tener un factor de magnificación elevado es parcialmente compensada por la mayor abundancia de objetos menos luminosos resultando en probabilidades razonables de observar estrellas muy cerca de las curvas críticas de lentes gravitatorias. Por ejemplo, una estrella luminosa a redshift $z>1$ con magnitud aparente 36 (sin efecto lente gravitatoria) pero amplificada por un factor 5000 sería observada con una magnitud aparente de 26.7, y por lo tanto detectable con exposiciones del orden de 1 hora con Hubble. En el caso de Earendel estimamos que la magnificación puede acercarse a 10000, lo cual haría de Earendel el objeto con la mayor amplificación jamás observado.

Una de las características del efecto lente gravitatoria es que imágenes que se forman cerca de curvas críticas aparecen en pareja, con una imagen siendo imagen especular de la otra y la curva crítica actuando como eje de simetría del par de imágenes. Cerca de Earendel existen dos puntos de luz no resueltos, con brillo similar y simétricamente situados con respecto a la posición de Earendel. Estos dos puntos son en realidad una de estas parejas de imágenes y corresponden a un pequeño cúmulo globular en la galaxia Sunrise que aparece amplificado por un factor más modesto de unas decenas. No obstante, en el caso de Earendel solo se observa un punto de luz (también no resuelto) lo cual solo se puede entender si la pareja de imágenes que necesariamente ha de formarse están separadas una de la otra por una distancia menor que la resolución de Hubble, o aproximadamente $0.1''$. Por lo tanto la distancia máxima a la que cada una de las dos imágenes puede estar de la curva crítica no puede ser mayor que $0.05''$.

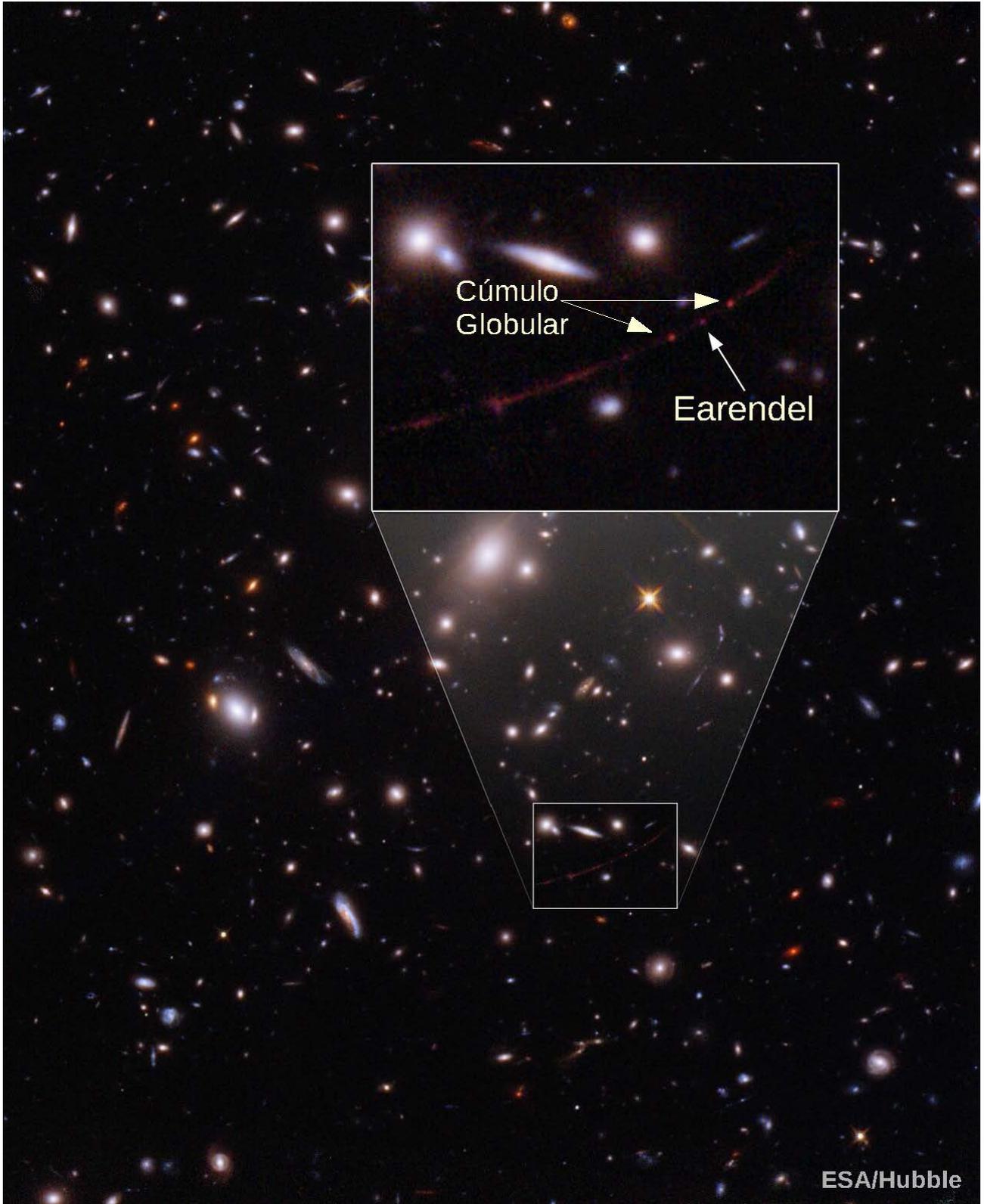
Cuando se tiene en cuenta cómo varía la magnificación con la distancia a la curva crítica (aproximadamente $50''/d$) automáticamente resulta en factores de magnificación de al menos 2000 después de tener en cuenta el flujo combinado de las dos imágenes no resueltas. Diversos modelos de lente gravitatoria desarrollados para describir este cúmulo llegan a conclusiones similares. Esta estimación de la magnificación combinado con el flujo observado, puede usarse para acotar los posibles

candidatos. Comparando el flujo estimado con modelos evolutivos en el diagrama H-R para distintas metalicidades indican que la estrella ha de tener al menos 50 veces la masa del Sol y luminosidades de al menos 1 millón de veces la Solar. Este tipo de estrellas tienen temperaturas típicamente entre 10000 K y 40000 K y suelen vivir unos pocos millones de años, por lo que Earendel habrá muerto ya hace muchos eones, pero su luz sigue viva y sigue iluminando el universo.

Las observaciones del Hubble no permiten extraer mucha más información sobre Earendel pero afortunadamente el nuevo telescopio James Webb tiene ya programada una observación de esta estrella. Con el James Webb será posible obtener mejores medidas fotométricas y en rangos espectrales no accesibles por Hubble. Dada la proximidad de Earendel a la cáustica del cúmulo, y si existe la fortuna de que el movimiento relativo de Earendel con respecto a esta cáustica es tal que se va acercando cada vez más a medida que pasa el tiempo, cabe la posibilidad de que la magnificación de Earendel siga aumentando durante los próximos años lo cual permitiría incluso obtener un espectro de la estrella. Dicho espectro podría confirmar sin apenas ambigüedad la metalicidad de la estrella y si se trata, como se sospecha, de una estrella de segunda generación o Pop II.

Las observaciones del James Webb permitirán también estudiar no solo una estrella a redshift $z=6.2$, sino también estrellas dentro del cúmulo WHL0137-08. Estrellas del medio intracúmulo que se posicionan cerca de la posición de Earendel (en proyección) actuarán como microlentes, introduciendo pequeñas distorsiones en la magnificación que se transforman en variaciones temporales en el flujo observado a medida que Earendel se mueve en relación a estas microlentes. Estas variaciones en flujo se espera que sean relativamente pequeñas (menos de una magnitud), pero estudiando el número de eventos microlente así como su duración se puede estimar tanto la abundancia de las microlentes (estrellas en el medio intracúmulo) así como su masa. Este tipo de observaciones pueden usarse incluso para estudiar candidatos exóticos de la materia oscura como son los agujeros negros primordiales que podrían contribuir como microlentes de masa elevada a las fluctuaciones de flujo de Earendel.

«Earendel está posicionada muy próxima a una de las cáusticas que atraviesan esta galaxia. Posiblemente otras estrellas estén incluso más cerca de la cáustica, pero para poder verlas sería necesario que tuviesen una luminosidad comparable a la de Earendel que tiene una luminosidad estimada de al menos varios millones de veces la luminosidad del Sol.»



Earendel forma parte del arco "Sunrise", una galaxia distante a $z=6.2$ fuertemente distorsionada por el cúmulo de galaxias WHL0137-08.