

Alberto Carramiñana

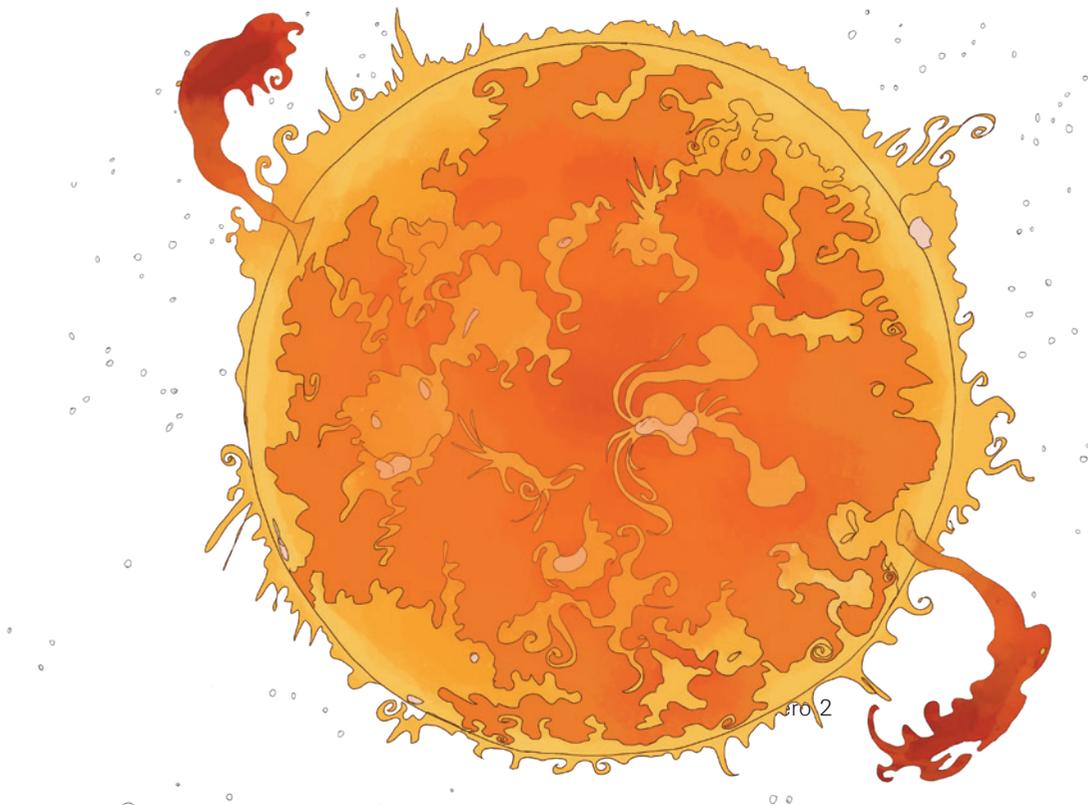


Tiempos difíciles para la estrella Betelgeuse

La estrella Betelgeuse está destinada a producir una supernova dentro de los próximos cien mil años, al término de su fase actual como supergigante roja. A finales de 2019 causó interés e inquietud por una rápida y marcada pérdida de brillo; esto abrió la especulación de que su explosión podría estar próxima y, en respuesta, impulsó la pronta investigación de este fenómeno.

La estrella alfa de la constelación de Orión

Betelgeuse debió ser conocida por los humanos desde que empezaron a identificar a los astros más brillantes del firmamento. Es la estrella brillante roja que marca el hombro de Orión, el cazador, una de las constelaciones más conspicuas del cielo invernal (véase la Figura 1), fácilmente identificable por las



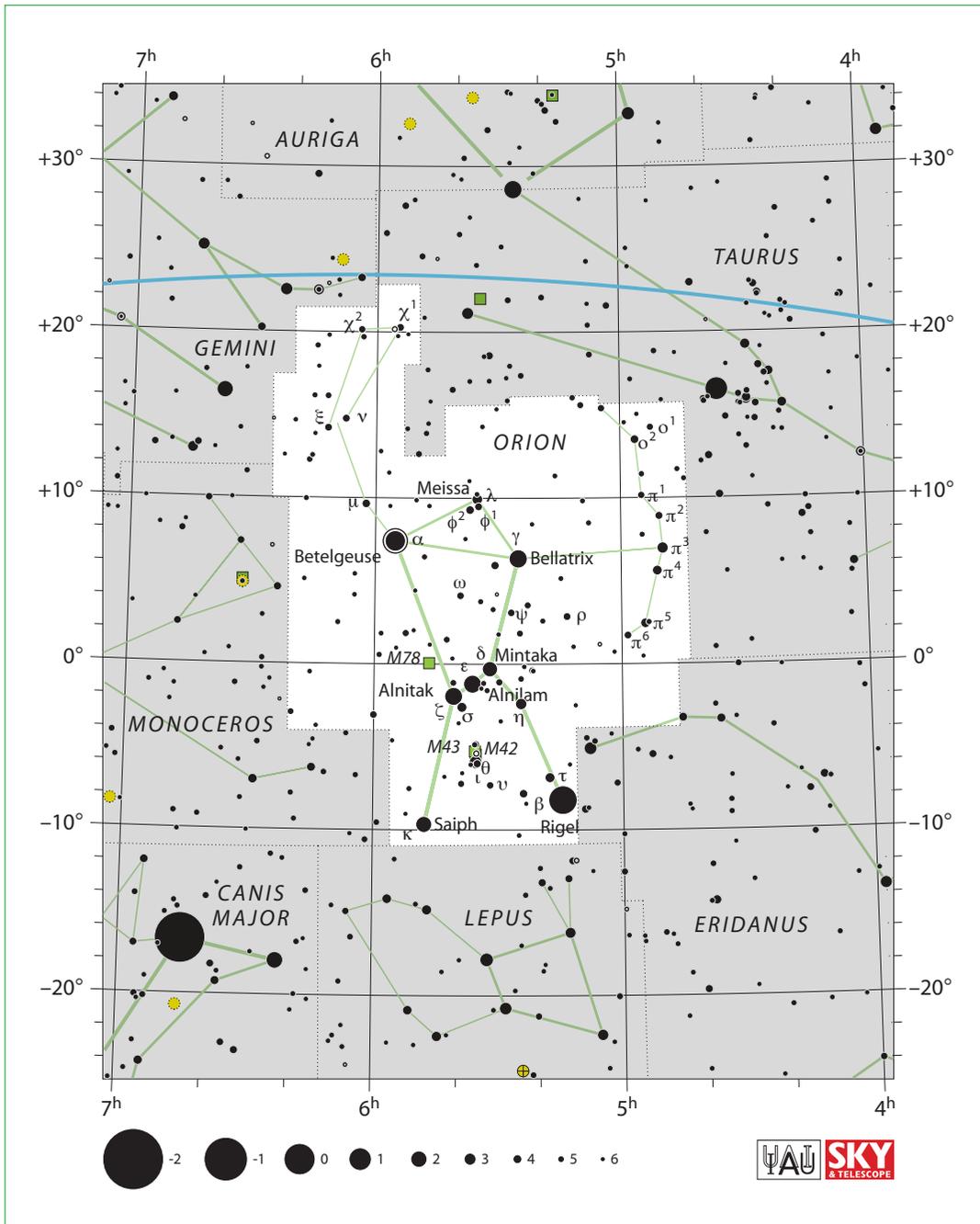


Figura 1. Mapa de la constelación de Orión, con los límites definidos por la Unión Astronómica Internacional. Crédito: IAU, <www.iau.org/public/themes/constellations/>.

tres estrellas alineadas que conforman “el cinturón”: Anilam (ϵ Ori), Alnitak (ζ Ori) y Mintaka (δ Ori). Orión es coronada al noreste por Betelgeuse (clasificada como α Orionis, la estrella más brillante de la constelación, en el *Almagesto* de Ptolomeo), y al suroeste por la gigante azul Rigel (β Ori). Tanto Betelgeuse como Rigel figuran entre las “estrellas

náuticas”, guías indispensables de los navegantes y exploradores de otras épocas.

Sin embargo, desde noviembre de 2019, la pérdida de brillo de una estrella tan notoria como Betelgeuse no podía pasar desapercibida, incluso en tiempos en que la noche es desbordada por la luz urbana y se convierte en una extensión del día.

Caracterización de las estrellas

El brillo de un objeto celeste se cuantifica con su magnitud aparente. El sistema de magnitudes tiene su origen en la percepción de los astros por el ojo humano, que ordenó a las estrellas por brillo decreciente de la primera a la sexta magnitud. El advenimiento de las placas fotográficas a finales del siglo XIX, y de los dispositivos optoelectrónicos un siglo después, hizo necesario refinar el esquema pre-telescópico de magnitudes con sistemas fotométricos que definen **bandas** del espectro electromagnético que coinciden con nuestra percepción de los colores. Uno de los primeros sistemas fue el UBVR, desarrollado por Harold Johnson y Alan Cousins, que considera el azul (B, por *blue*), visual (V) y rojo (R), así como las extensiones inmediatas al ultravioleta (U) y al infrarrojo (I).

Estos sistemas fotométricos heredan el carácter logarítmico de la respuesta del ojo humano, por lo que corresponde un aumento de cinco magnitudes a una disminución de brillo de un factor de cien; además, emplean como referencia la estrella Vega, la cual define también un color estelar estándar, al ser su magnitud cero en todas las bandas.¹ El sistema de magnitudes le asigna a Betelgeuse una magnitud visual nominal $V = 0.42$, equivalente a 68% del brillo de Vega en la misma banda. El color rojo de α Orionis se traduce en una magnitud negativa en las bandas roja e infrarroja ($R = -1.17$, $I = -2.45$). Así, Betelgeuse es la estrella más brillante del cielo nocturno en las extensiones del sistema fotométrico al infrarrojo.

Las diferencias entre las magnitudes de una misma estrella en dos bandas definen los *índices de color*. Por ejemplo, el índice (B-V) es igual a +1.85 para la roja Betelgeuse, +0.63 para el Sol, y -0.03 para Rigel. El color está estrechamente ligado a la temperatura en la superficie: las estrellas azules, como Rigel, son las más calientes; las rojas son las más frías; las estrellas amarillas, como el Sol, tienen temperaturas intermedias. Estas temperaturas superficiales se cuantifican en grados Kelvin: la temperatura de Ri-

gel es 12 100 K,² la del Sol es 5 770 K, y la de Betelgeuse, 3 600 K.

Asimismo, las estrellas se diferencian por sus luminosidades; esto es, se mide la cantidad de energía emitida como radiación por unidad de tiempo. Su estimación requiere medir el brillo (la magnitud aparente) y la distancia. Dichas luminosidades estelares abarcan un rango muy amplio de valores: las estrellas más luminosas, como Betelgeuse, superan al Sol por factores de diez mil, o incluso cien mil, mientras que el Sol es a su vez diez mil veces más luminoso que las estrellas más frías y pequeñas. La temperatura (T) y las dimensiones de la estrella (el radio, R) se relacionan directamente con la luminosidad (L):

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

En la ecuación, σ es la **constante de Stefan-Boltzmann**. Así, Betelgeuse, una estrella más fría pero mucho más luminosa que el Sol, tiene necesariamente dimensiones mucho mayores. El diámetro físico de Betelgeuse resulta ser enorme: unas 880 veces el del Sol. Es un ejemplo prototípico de una estrella supergigante roja.

El diagrama HR y la evolución estelar

Uno de los grandes logros de la astrofísica contemporánea fue comprender la naturaleza de las estrellas a partir de la clasificación presentada por Ejnar Hertzsprung y Henry Russell alrededor de 1910. De manera independiente, ambos científicos clasificaron a las estrellas en un diagrama de color y luminosidad (véase la Figura 2); notaron que la mayoría de ellas se sitúa en una franja delgada, de inclinación aproximadamente diagonal, que va de estrellas frías (rojas) y poco luminosas a estrellas más calientes (azules) y luminosas. Esta línea se denomina la secuencia principal. El diagrama HR identifica un segundo grupo, menos prominente, de estrellas de alta luminosidad y baja temperatura: la rama de las gigantes. Por encima de las gigantes están algunas cuantas estrellas de luminosidad extrema: las super-

¹ En observaciones posteriores se ha sugerido que Vega es ligeramente variable, lo que motivó al refinamiento de la definición de la magnitud cero.

² A la temperatura en grados centígrados se suma 273.16 para obtener la temperatura en grados Kelvin.

Bandas fotométricas

Intervalos de longitud de onda que se emplean en astronomía para medir la luz de los distintos astros. Por ejemplo, la banda B define la radiación electromagnética con longitud de onda entre 430 y 450 nanómetros. La banda V, entre 541 y 559 nanómetros.

Constante de Stefan-Boltzmann

Constante de proporcionalidad entre F , el flujo de energía en forma de radiación electromagnética que emite un cuerpo a una temperatura T , y la cuarta potencia de la temperatura. La relación $F = \sigma T^4$ se conoce como ley de Stefan-Boltzmann.

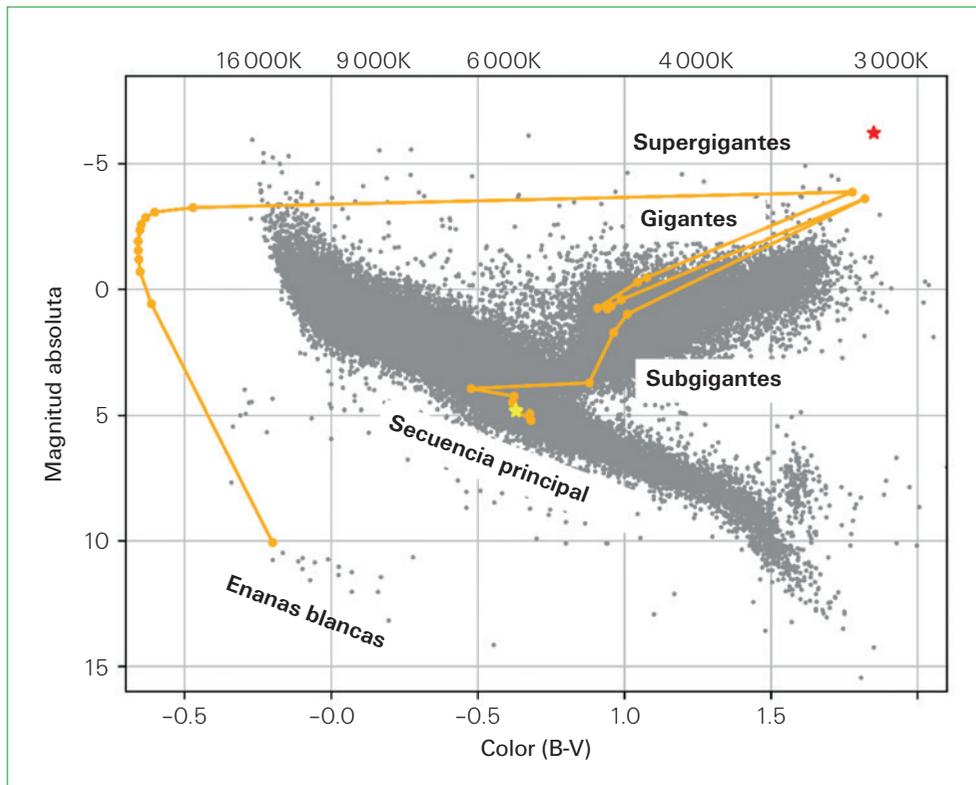


Figura 2. Diagrama Hertzsprung-Russell generado con datos del satélite *Hipparcos*. El eje horizontal muestra el índice de color (B-V), indicador de la temperatura superficial; el eje vertical muestra la magnitud absoluta, indicador de la luminosidad. Se señalan la secuencia principal, las ramas de las gigantes y supergigantes, y las enanas blancas. Se muestra la posición actual del Sol con la estrella amarilla y la de Betelgeuse en rojo. En anaranjado aparece la trayectoria evolutiva del Sol.

gigantes, con Betelgeuse y Antares (α Scorpius) en el extremo rojo del diagrama. Por último, en la parte opuesta se encuentra otro grupo de estrellas azules de muy baja luminosidad, del orden de 1% la solar: las enanas blancas. El diagrama HR motivó el desarrollo de modelos basados en las reacciones nucleares que producen vastas cantidades de energía en el interior de las estrellas.

Entre las décadas de 1930 y 1950 se desarrolló la física nuclear, herramienta teórica necesaria para entender el funcionamiento de las estrellas. Estos astros se forman por la contracción gravitacional de gigantescas nubes de gas, con las partes más densas que alcanzan presiones y temperaturas suficientes para iniciar las cadenas de reacciones nucleares necesarias para producir helio a partir de hidrógeno, y así generar la energía requerida para balancear la fuerza gravitacional. Al alcanzar el equilibrio, la estrella se sitúa en la parte de la secuencia principal corres-

pondiente a su masa: las poco masivas, en la región de estrellas frías y poco luminosas; las muy masivas, en la región de estrellas calientes y altamente luminosas. La masa determina la estructura y la evolución de cada estrella, mientras que la composición química tiene un papel secundario. Bellatrix (γ Ori), estrella que marca el hombro izquierdo de Orión, es un buen ejemplo de una estrella masiva de secuencia principal: con una masa estimada entre ocho y nueve veces la del Sol, Bellatrix tiene una temperatura superficial de 21 500 K y una luminosidad 6 400 veces la solar.

Dada la drástica dependencia de la luminosidad con la masa (L proporcional a $M^{3.5}$, arriba de dos masas solares), el hidrógeno disponible para mantener el equilibrio se consume mucho más rápidamente en las estrellas masivas, que tienen, en consecuencia, una existencia mucho más corta. El Sol ha permanecido en la secuencia principal casi cinco mil mi-

llones de años y seguirá en ella un tiempo similar; en contraste, Bellatrix consumirá el hidrógeno disponible en treinta millones de años; en cambio, una estrella con veinte masas solares, en tan sólo diez millones de años.

Una vez que se agota el hidrógeno en el núcleo, la estrella pierde el equilibrio y su núcleo se comprime bajo su propio peso, mientras que las capas externas de la estrella se expanden. Al término de la fase de secuencia principal, las condiciones internas de las estrellas con suficiente masa permiten que el helio se fusione en carbono, en una reacción nuclear resonante conocida como triple alfa. Las estrellas que brillan gracias a la fusión de helio migran a la región de las gigantes y supergigantes rojas del diagrama HR (así lo hará el Sol; véanse el Recuadro 1 y la Figura 2). Al interior de las estrellas más masivas las

condiciones son eventualmente propicias para que el núcleo de carbono se fusione con helio y forme elementos más pesados. Este proceso llega a un callejón sin salida cuando se produce hierro, el elemento más estable con relación a su masa. Las estrellas que han fabricado un núcleo de hierro están predestinadas a un final catastrófico: explotar como supernova.

■ La existencia breve e intensa de Betelgeuse

■ Se cree que Betelgeuse se formó en la región OB-1a de Orión, situada unos nueve grados al suroeste de la posición actual de Betelgeuse, o cuatro al suroeste del cinturón de Orión. Un poco más especulativa es la hipótesis de que tuvo una compañera, eventualmente engullida, que explicaría la rotación relativamente rápida, dado su tamaño. Betelgeuse pasó unos ocho millones de años consumiendo hidrógeno, como una estrella muy caliente, pero con un tamaño cien veces menor al actual y con la mitad de luminosidad. Entonces debió aparecer en el cielo como una estrella de segunda magnitud marcadamente azul. Pero hace medio millón de años, más o menos, agotó su reserva de hidrógeno y, al empezar a generar energía transformando helio en carbono y oxígeno, fue enrojeciendo y creciendo hasta adquirir las dimensiones actuales. El carbono y oxígeno se han ido acumulando en el centro y comprimiéndose en esta región a la par que desplazan al helio e hidrógeno a las zonas más externas.

Una vez que termine la fusión de helio, el desenlace vendrá rápido. Cuando el centro de la estrella alcance densidades de cientos de kilogramos por centímetro cúbico y temperaturas cercanas a 900 millones de grados, el carbono empezará a reaccionar de formas múltiples y generará elementos como neón, sodio, magnesio y aluminio. Tan sólo mil años después, la densidad será tal que el neón empezará a transmutarse en oxígeno, magnesio y silicio, entre otros elementos. Y siete meses después, las condiciones extremas permitirán que el oxígeno se transforme en una variedad de elementos, particularmente silicio y azufre, y en menor proporción cloro, argón, potasio y calcio. A doce días del final, el núcleo adquirirá temperaturas de 3 300 millones de grados y

Recuadro 1. La vida del Sol

Se estima que el Sol tiene 4 500 millones de años, en los cuales ha brillado generando energía al transformar hidrógeno en helio. Nuestra estrella ha aumentado paulatinamente en tamaño y luminosidad a medida que ha consumido hidrógeno, de forma que su luminosidad será 40% mayor dentro de 3 500 millones de años. Dejará la secuencia principal en unos 6 500 millones de años, con el doble de luminosidad, y se transformará rápidamente en una gigante roja a medida que su núcleo acumule helio inerte, el cual desplazará al hidrógeno que se irá quemando en regiones cada vez más externas. Su núcleo se irá contrayendo mientras que la superficie de la estrella se expandirá hasta alcanzar diez veces su tamaño actual, lo cual culminará en una violenta y súbita ráfaga termonuclear de quemado de helio. Este *flash* de helio hará que el Sol momentáneamente alcance un tamaño mayor a 150 veces el actual, y expulse la cuarta parte de su masa. Entonces comenzará una fase de unos 100 millones de años de relativa estabilidad, en la que el Sol estará transformando helio en carbono. Al agotarse el helio, el Sol tendrá ráfagas episódicas y violentas que terminarán en la expulsión de más material, con lo que se formará una nebulosa planetaria. En el centro de esta nebulosa quedará una estrella enana blanca muy caliente; el resto del núcleo del Sol se colapsará al tamaño de la Tierra e irá enfriándose y apagándose lenta e inexorablemente con el tiempo.

densidades de 40 toneladas por centímetro cúbico, que provocarán el consumo desesperado de silicio en una red compleja de procesos de nucleosíntesis y desembocarán en la copiosa producción de níquel y, sobre todo, hierro.

Cuando se consuma el silicio, el núcleo de hierro será incapaz de generar energía y la gravedad no podrá ser contrarrestada. Roto el equilibrio, Betelgeuse se colapsará violentamente bajo su propio peso hasta comprimir el núcleo a un diámetro de unos 15 km; el núcleo rebotará y eyectará todo el material que caía sobre él con velocidades de decenas de kilómetros por segundo, con lo cual creará una poderosa onda de choque que barrerá todo el material y lo encenderá para desencadenar la supernova. Este tipo de explosiones crean elementos químicos más pesados que el hierro.

Aunque con algo de incertidumbre, se estima que pasarán poco menos de cien mil años antes de que Betelgeuse explote. Al hacerlo se manifestará en nuestro cielo como una espectacular estrella de magnitud -12 , de brillo comparable al de la Luna llena y claramente visible en el día. Lo que quede de su núcleo se colapsará bajo su propio peso, lo cual generará uno de los objetos más exóticos del universo: una estrella de neutrones con 1.5 masas solares en un diámetro de tan sólo 20 kilómetros.

Betelgeuse inestable

 El consenso entre los especialistas es que Betelgeuse se encuentra en la fase de supergigante roja.³ Muchas estrellas en esta fase tienen un comportamiento inestable, como se observa en la que ahora nos interesa. En 1840 fue reportada como una estrella variable por John Herschel, quien estimó un rango de variabilidad de 1 a 1.2 magnitudes. A finales del siglo XX, se estableció que las variaciones contienen una componente periódica, con un aumento de 0.2 a 0.4 magnitudes, que se repite aproximadamente cada 425 días. Hay evidencia de una componente

³ Sima Qian, historiador chino del siglo I a. d. n. e., describió a Sirio como una estrella blanca, a Antares como roja, a Betelgeuse como amarilla y a Bellatrix, azul. Esta nota abrió especulaciones sobre el estado evolutivo de Betelgeuse.

adicional más lenta, de alrededor de seis años, parcialmente caracterizada. Las disminuciones más fuertes de brillo registradas en años recientes fueron de alrededor de media magnitud, equivalentes a una reducción de 60% de su brillo nominal.

A mediados de noviembre de 2019 el brillo de Betelgeuse empezó a disminuir día con día, a partir de una magnitud de $V = +0.6$, dos décimos (0.18) superior a la nominal. La pérdida de brillo fue reportada en un telegrama astronómico el 8 de diciembre (ATEL 13341), con un valor $V = +1.12$, equivalente a 52% del brillo nominal. El 23 de diciembre, el mismo grupo reportó (ATEL 13365) una caída a $V = +1.28$, y el 20 de enero de 2020, a $V = +1.50$ (37% del brillo nominal). Estos primeros reportes abrieron la especulación de que la estrella estaría sufriendo una contracción súbita, y su explosión podría ser inminente. El brillo mínimo se registró a principios de febrero de 2020 (véase la Figura 3), cuando Betelgeuse alcanzó una magnitud de alrededor de $V = +1.65$, según el reporte de la cuenta de Twitter @betelbot, que fue creada apenas en enero, cuando la estrella ya era noticia y se había vuelto viral. ¡El brillo en el espectro visible había caído a la tercera parte del nominal en cien días!

Motivados en parte por la inquietud del público, así como por un fenómeno de interés intrínseco, varios grupos se dieron a la tarea de realizar observaciones complementarias para entender mejor qué estaba pasando. Estas mediciones, en el infrarrojo, espectros en el visible e incluso imágenes de la superficie de la estrella, han ayudado a comprender este episodio en la vida de α Orionis.

Nueva luz sobre Betelgeuse

 El 24 de febrero de 2020 se reportaron (ATEL 13518) nuevas observaciones de Betelgeuse en el infrarrojo. Las mediciones de las estrellas brillantes tienen la singularidad de requerir telescopios de dimensiones modestas con buena instrumentación; estas observaciones se realizaron en la noche del 20 de febrero con un telescopio de 76 cm a longitudes de onda entre 1.2 y 8.8 micras, muy cerca del mínimo en el visible. Los resultados mostraron un

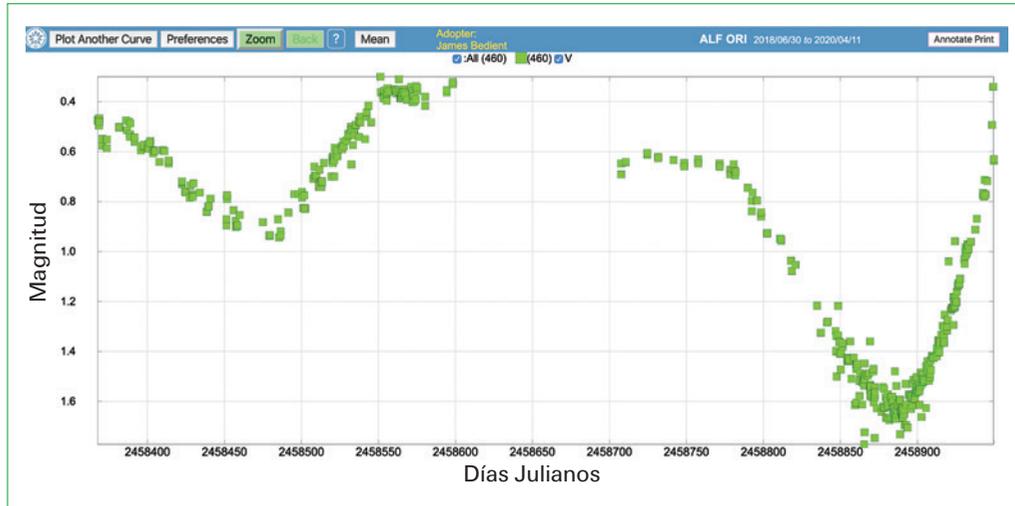


Figura 3. Curva de luz de Betelgeuse, la cual abarca 650 días entre el 30 de junio de 2018 (JD 2458300) y el 10 de abril de 2020 (2458950). Nótese la primera caída a $V=+0.9$ alrededor de JD 2458475 (diciembre de 2018), y el mínimo más profundo, de magnitud $V=+1.6$, sobre JD 2458890 (febrero de 2020). Crédito: generada con datos de astrónomos no profesionales disponibles en el sitio de la American Association of Variable Star Observers (AAVSO, <aavso.org/LCGv2>).

brillo similar al de décadas atrás, lo cual acotó la posible disminución en el infrarrojo a no más de 10 o 20 por ciento.

Por su distancia (190 pársecs = 620 años luz) y sus dimensiones, es posible obtener imágenes de Betelgeuse, aunque con un nivel limitado de detalle.

Si bien el disco estelar abarca sólo 1/20 de **segundo de arco** en el cielo,⁴ los mejores telescopios pueden distinguir los rasgos principales de Betelgeuse, así como estudiar su entorno inmediato. En 1921, Albert Michelson y Francis Pease emplearon un interferómetro y reportaron la primera medición del diámetro angular de Betelgeuse en el óptico. Obtuvieron un valor de 0.047 segundos de arco, con 10% de incertidumbre. Observaciones posteriores fueron consistentes con este valor, al mismo tiempo que evidenciaron la presencia de material alrededor de la estrella, expulsado por la misma hasta distancias de diez radios estelares. En 2011 la cámara infrarroja VISIR, instalada en uno de los cuatro telescopios de ocho metros del VLT (*Very Large Telescope*) en el desierto de Atacama en Chile, mostraron que parte de la emisión en el infrarrojo intermedio se

debe a la absorción y reemisión de luz por el polvo que rodea a la estrella. Las observaciones de febrero 2020 muestran que este flujo no ha variado, lo cual sugiere que el polvo ha seguido recibiendo la misma cantidad de radiación de la estrella.

Por otra parte, las imágenes obtenidas en el ultravioleta por el telescopio espacial *Hubble* en 1996 muestran un halo 2.2 veces mayor al tamaño de Betelgeuse debido a la presencia de una cromósfera extendida alrededor de la estrella. Mediciones en el violeta entre noviembre de 2019 y febrero de 2020 indican que la actividad cromosférica también se ha mantenido estable. Todo indica que el entorno de Betelgeuse continuó siendo iluminado sin un cambio notorio.

Entre las mejores imágenes del disco de Betelgeuse destacan las del sistema de óptica activa SPHERE, montado en uno de los telescopios VLT. Casualmente, este instrumento obtuvo imágenes de la misma estrella en enero de 2019, las cuales permitieron un análisis comparativo con las obtenidas en diciembre de 2019, durante la fase de disminución de brillo. Estas imágenes (véase la Figura 4) muestran de manera muy clara que hay una región oscura en la mitad sur de la estrella, ausente once meses antes.

Segundo de arco
 Ángulo que subtende un arco de longitud 1/1 296 000 de la circunferencia. Un grado (1/360 de circunferencia) se divide en 60 minutos de arco; un minuto de arco, en 60 segundos de arco.

⁴ El Sol subtende 1920 segundos de arco, un poco más de medio grado.

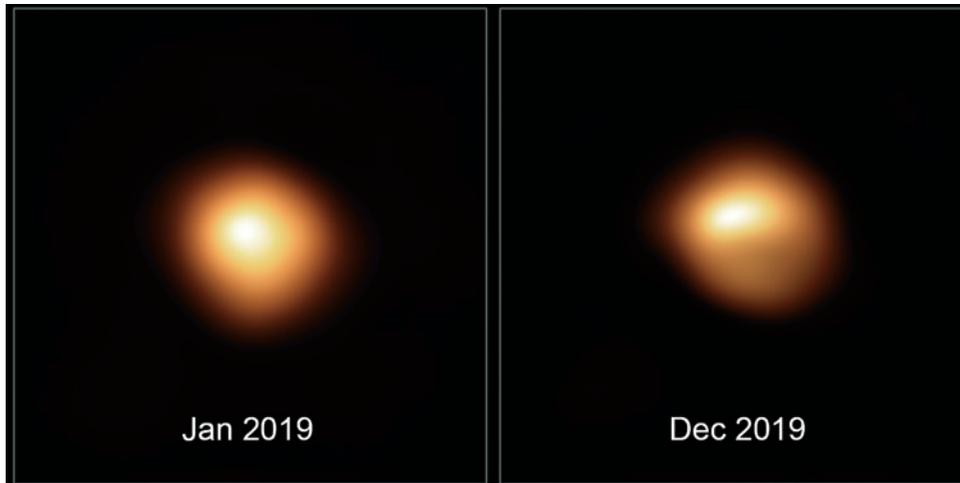


Figura 4. Imágenes de Betelgeuse obtenidas con el sistema SPHERE en uno de los telescopios VLT. A la izquierda, la imagen obtenida en enero de 2019; a la derecha, la de diciembre de 2019, que muestra el hemisferio sur oscurecido. Crédito: ESO, <www.eso.org/public/news/eso2003/>.

Las mediciones espectroscópicas mostraron que la temperatura de la estrella no ha disminuido apreciablemente. Así, el conjunto de observaciones indica que Betelgeuse ha radiado la misma cantidad de energía, y que la pérdida de brillo en el espectro visible muy probablemente se explica por el oscurecimiento parcial de su superficie debido al polvo expulsado por la estrella recientemente, el cual se interpuso en nuestra línea de visión. Los datos sugieren que la distribución de este polvo debe tener dimensiones relativamente grandes, por lo cual absorben la luz de la misma forma a lo largo del espectro visible. Es probable que en los próximos meses se sigan realizando observaciones, las cuales nos permitirán entender aún mejor los procesos que ocurren en esta estrella y en su entorno. Betelgeuse seguirá siendo una estrella especial, aun cuando no seamos testigos del espectáculo de verla explotar como supernova en los próximos miles de años.

Alberto Carramiñana

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
alberto@inaoep.mx

Lecturas recomendadas

- Dolan, M. M. *et al.* (2016), “Evolutionary tracks for Betelgeuse”, *Astrophysical Journal*, 819:7.
- Gilliland, R. L. y A. K. Dupree (1996), “First image of the surface of a star with the Hubble Space Telescope”, *Astrophysical Journal*, 463:L29-L32.
- Harper, G. M. *et al.* (2017), “An updated 2017 astrometric solution for Betelgeuse”, *Astrophysical Journal*, 154(1):1-6.
- Michelson, A. A. y F. G. Pease (1921), “Measurement of the diameter of α Orionis with the interferometer”, *Astrophysical Journal*, 53:249-259.
- Sackmann, I. J., A. I. Boothroyd y K. E. Kraemer (1993), “Our Sun. III. Present and future”, *Astrophysical Journal*, 418:457.
- SIMBAD (2020), *SIMBAD Astronomical Database*. Disponible en: <<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>>, consultado el 15 de mayo de 2020.
- The Astronomer’s Telegram (2020), *The Astronomer’s Telegram*. Disponible en: <www.astronomersteletgram.org>, consultado el 15 de mayo de 2020.
- Woosley, S. E., A. Heger y T. A. Weaver (2002), “The evolution and explosion of massive stars”, *Rev. Mod. Phys.*, 74(4):1015-1071.