

Enanas blancas

ESTRELLAS IMPOSIBLES

Autor: Dr. Guillermo Abramson, Centro Atómico Bariloche, CONICET e Instituto Balseiro.
guillermoabramson.blogspot.com

*You radiate away your last remaining heat
Your atmosphere has blown away when you admit defeat (*).
A-ha, White dwarf*

01

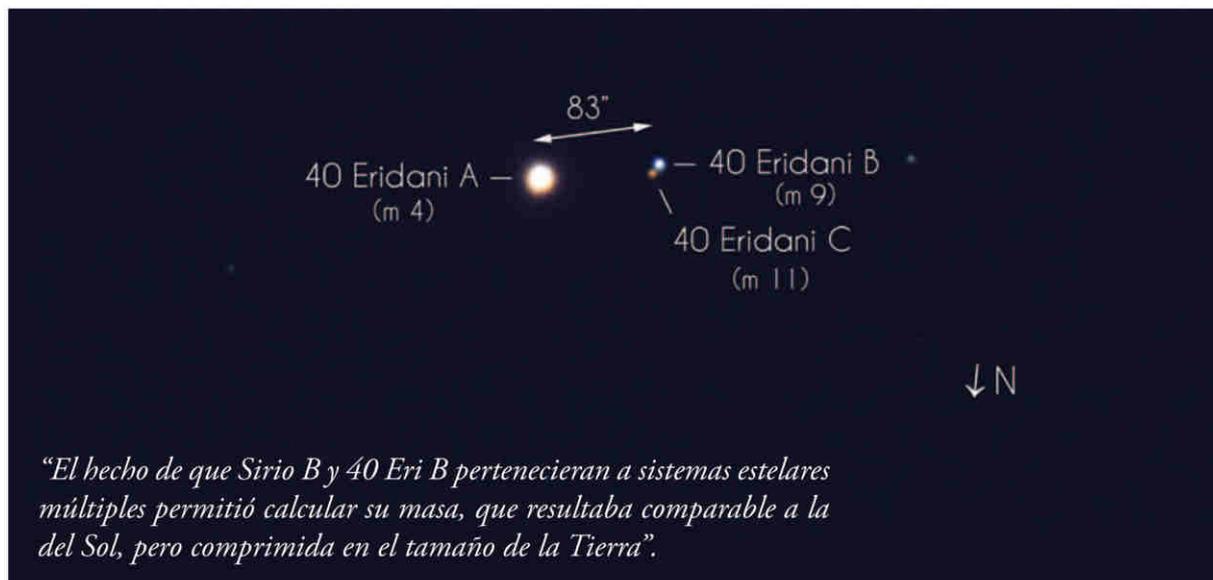


A principios del siglo XX cobró impulso la nueva ciencia de la astrofísica, buscando ir más allá de la acumulación de brillos, posiciones y movimientos estelares que había ocupado buena parte del trabajo astronómico durante el siglo anterior. Los astrónomos empezaron a emplear las técnicas y los modelos teóricos de la física para comprender cómo funcionaban las estrellas. En el camino, se encontraron con más de una sorpresa. Entre ellas, unas estrellas minúsculas y brillantes, que no podían existir: las enanas blancas.

En palabras de su descubridor “oficial”, Henry Norris Russell, la primera persona que supo de la existencia de las enanas blancas fue Williamina Fleming, una de las “computadoras” del Observatorio del Harvard College (ver recuadro). Durante sus años en el Observatorio de Cambridge, Russell había determinado con precisión la distancia a varios cientos de estrellas, lo cual le había permitido calcular su luminosidad intrínseca (la *magnitud absoluta*). Un día, en 1910, Russell estaba visitando al director del Observatorio del Harvard College, Edward Charles Pickering, para revisar las clases espectrales estelares que allí habían compilado en el notable catálogo Henry Draper, en uso hasta la actualidad. Russell no tardó en observar que todas las estrellas

intrínsecamente tenues de su colección eran de las clases G, K o M, correspondientes a colores amarillo, anaranjado y rojo. Todas, salvo una: la estrella compañera de 40 Eridani (40 Eri B), le parecía recordar, no era tan roja. Pickering llamó por teléfono a Fleming, quien un rato después les comunicó que 40 Eri B era de clase A. ¡Blanca! Russell quedó perplejo. La estrella, que brillaba con apenas el 1% de la luminosidad del Sol, era 11 magnitudes más tenue que las estrellas típicas de la clase A. La estrella principal del sistema, 40 Eri A, es de clase K. Siendo de clase A, 40 Eri B debería ser más brillante que ella, no al revés (figura 02).

01 *Representación artística de una enana blanca, una estrella del tamaño de la Tierra.*



Por otro lado, las leyes de la termodinámica requerían que fuese 150 veces más pequeña (ver el recuadro en Si Muove 26, página 23), es decir, de un tamaño comparable al de la Tierra. ¿Cómo podía ser tan caliente y tan chiquita? Russell estaba perplejo. Pickering lo tranquilizó: “*Estas discrepancias son justamente las que hacen progresar nuestro conocimiento*”.

En 1913 Russell publicó la primera versión de sus resultados, incluyendo un diagrama (figura 03, izquierda) en el cual la gran mayoría de sus estrellas ocupaba una banda estrecha (hoy llamada *secuencia principal*) cuando graficaba la magnitud absoluta como función de la clase espectral. El resto de las estrellas ocupaba una banda separada, de estrellas muy luminosas y rojas. Las leyes de la termodinámica, además, señalaban que estas estrellas eran mucho más grandes que el Sol y todas las estrellas de la secuencia principal. Russell las llamó *gigantes*, como había propuesto Ejnar Hertzsprung, el astrónomo danés que había descubierto la misma relación entre la luminosidad y el color de las estrellas (ver Si Muove 25, páginas 43-49). Poco después se conocieron y comentaron el caso de 40 Eri B. Hertzsprung se mostró escéptico: las estrellas blancas eran siempre muy luminosas, y el propio Russell empezó a tener dudas. Pero en 1914 la clasificación de la estrella fue confirmada por el astrónomo estadounidense Walter Adams, mediante el mejor telescopio del mundo, el reflector de 60 pulgadas del Observatorio de Monte Wilson. Y con el mismo instrumento, meses después, logró obtener un espectro de la tenue estrella compañera de Sirio, conocida desde el siglo XIX, pero de difícil observación por el resplandor de la estrella más brillante del cielo nocturno (figura 04).

El espectro resultó idéntico al de Sirio (clase A), pero la estrellita era 10 magnitudes más tenue. Adicionalmente, el corrimiento al rojo de las líneas espectrales, por efecto de la relatividad general, le permitió a Adams calcular directamente el radio de la compañera, lo que confirmó

su minúsculo tamaño. Si 40 Eri B era una rareza, dos estrellas ya hacían sospechar la existencia de algún fenómeno desconocido. Seguramente habría más.

Pero el mundo entró en guerra, y recién en 1922 Willem Luyten publicó tres notitas con un puñado de estrellas que parecían del mismo tipo, y acuñó el nombre que se imponía naturalmente: *enanas blancas*. Para 1939 se conocían 18, y hacia 1950 un centenar. Hoy en día se conocen cientos de miles, como muestra el diagrama H-R compilado con el inmenso catálogo del observatorio espacial Gaia (figura 03, derecha).

El misterio de las enanas blancas fue inmediatamente reconocido por Arthur Eddington, director del Observatorio de Cambridge y uno de los astrofísicos más brillantes de principios del siglo XX. El hecho de que tanto Sirio B como 40 Eri B pertenecieran a sistemas estelares múltiples permitía calcular su masa, que resultaba comparable a la del Sol, pero comprimida en el tamaño de la Tierra (figura 01). ¡Una cucharadita de materia de enana blanca pesaría una tonelada! Eddington observó que esto podía ocurrir solamente si los electrones estaban completamente separados de los núcleos atómicos, permitiendo que esos núcleos estuviesen mucho más próximos que en la materia ordinaria. Pero, en tal caso, aparecía una paradoja termodinámica. Si la estrella se enfriara, al recombinarse los átomos y adquirir la densidad de la materia sólida, la estrella se expandiría, haciendo trabajo en contra de la gravedad. Es decir, la estrella *necesitaba energía para enfriarse*. Acertadamente, concluyó que la solución surgiría de la nueva física que se estaba

02 El sistema estelar triple 40 Eridani (también llamado σ^2 Eridani), a 16,3 años luz del sistema solar. La estrella principal, 40 Eri A, lleva el nombre propio Keid y es una estrella de secuencia principal. La segunda es 40 Eri B, de magnitud 9. Es la enana blanca más fácil de observar para los aficionados. La tercera es también una estrella de secuencia principal, una enana roja de magnitud 11.

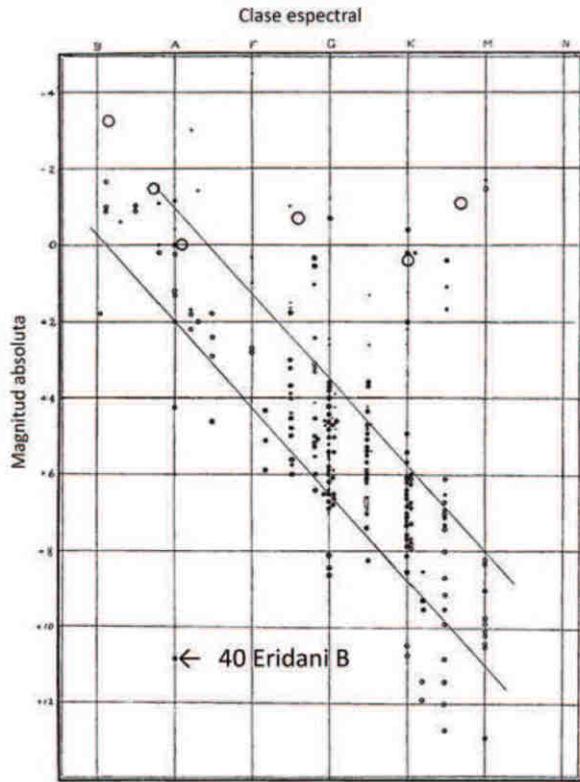
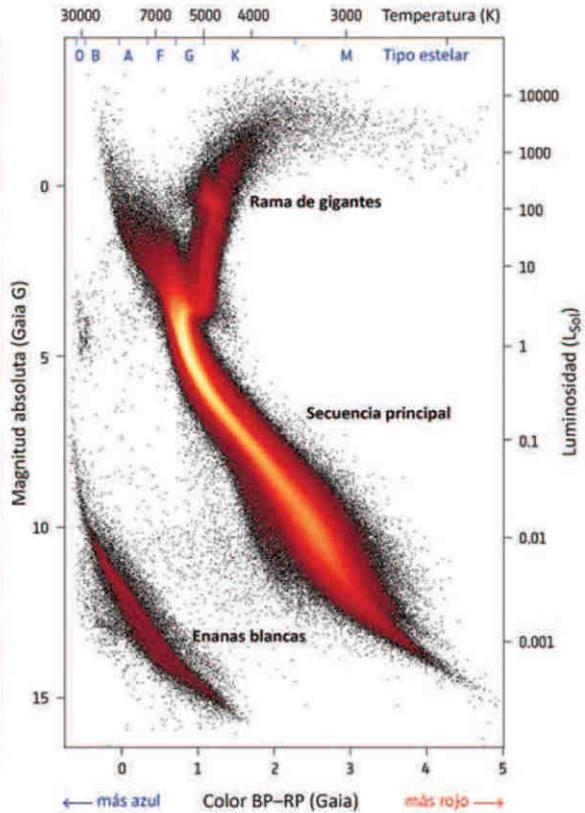


FIG. 1.



desarrollando en esos años: la mecánica cuántica. Llegó en 1926, justo para que pudiera incluirla en un apéndice de su libro de divulgación *Estrellas y átomos*, en el que popularizó las enanas blancas como una historia de misterio. Y vino de la mano de otro astrónomo de Cambridge, Ralph Fowler, quien usó una nueva mecánica estadística cuántica, recién inventada por Enrico Fermi en Italia y por Paul Dirac, también de Cambridge. Fowler descubrió que esta nueva teoría, inventada de manera abstracta por la fuerza de la lógica cuántica y distinta de la de los gases normales, tenía una aplicación en el interior de estas paradojas astronómicas. Vamos a tratar de explicarlo de manera conceptual, no solo porque involucra una de las rarezas de la física cuántica,

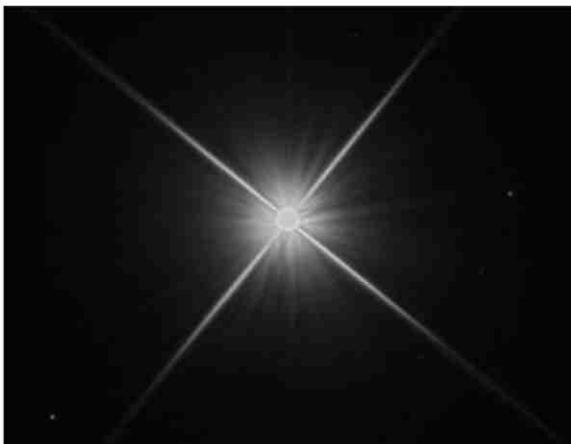
sino que tiene una inesperada conexión con un fenómeno cotidiano.

Estrellas degeneradas

Aprieto un dedo contra la mesa y siento su dureza, no puedo penetrarla. Aprieto más fuerte y me duele un poco. Ni el dedo ni la mesa se mueven, así que no hay trabajo mecánico realizado, pero siento una energía. ¿Qué es lo que está pasando? Estamos ante un caso de física cuántica en la vida cotidiana. Si bien existe una impresión generalizada de que la física cuántica solo tiene que ver con el mundo microscópico, en realidad se manifiesta también a escala humana. O astronómica. Solo hay que saber mirar. Cuando aprieto el dedo contra la mesa, los electrones de mi dedo se acercan a los electrones de la mesa. Resulta que para los electrones vale el *principio de exclusión de Pauli*: dos electrones no pueden estar en el mismo estado

04

Aldo Kleiman



03 Diagramas de Hertzsprung-Russell, que vinculan la luminosidad (o la magnitud absoluta) de las estrellas, con su temperatura (o su color, o su clase espectral). Izquierda: el diagrama original de Russell, donde cada punto es una estrella. Derecha: más de mil millones de estrellas observadas por el telescopio espacial Gaia. En las regiones más densas, los colores rojos a amarillo representan la cantidad de estrellas en cada punto del diagrama. El diagrama H-R de Gaia es tan rico que ha permitido descubrir fenómenos desconocidos, o apenas conjeturados, sobre las enanas blancas y otros tipos estelares.

04 Sirio, la estrella más brillante del cielo nocturno, es una estrella de la secuencia principal. La acompaña una enana blanca muy difícil de observar por el resplandor de la primaria.

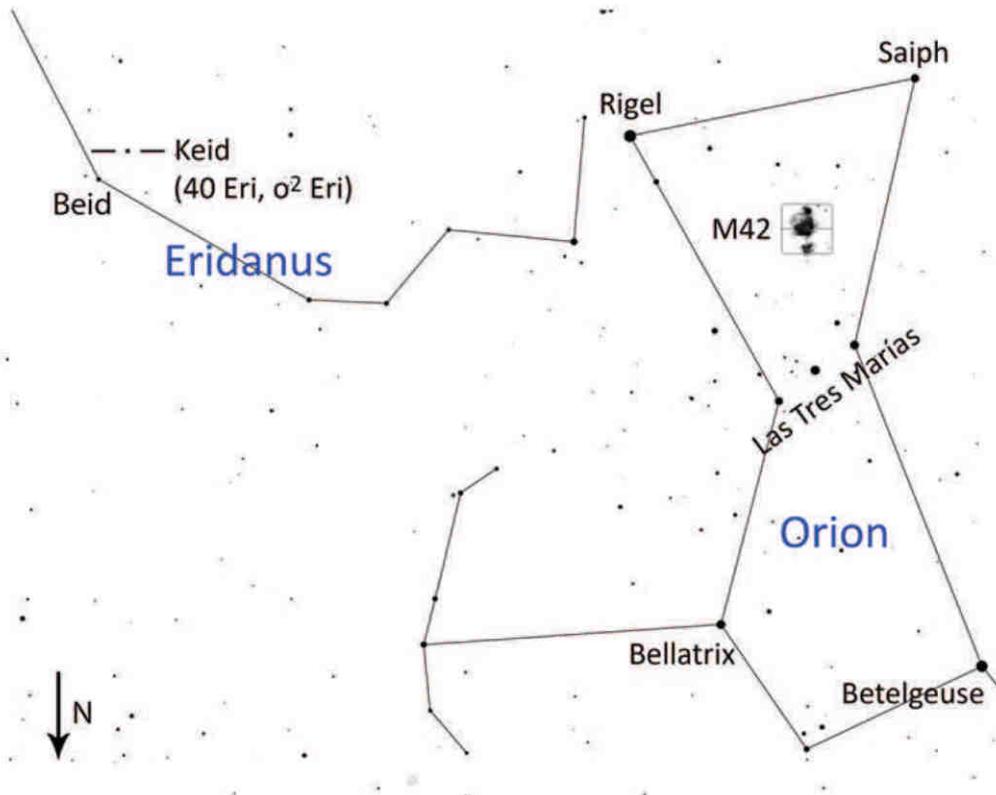
cuántico. El estado cuántico está compuesto de una variedad de parámetros: la energía, el momento lineal, y también la posición, el lugar donde están. Cuando trato de poner los electrones de mi dedo en el mismo lugar que los de la mesa, algunos electrones tienen que pasar a otros niveles de energía, para no compartir el mismo estado cuántico que los que están tratando de ocupar el mismo lugar. Este aumento de energía es lo que siento en el dedo cuando hago fuerza: estoy sintiendo en carne propia el principio de exclusión de Pauli.

La exclusión electrónica entre mi dedo y la mesa es un fenómeno localizado; solamente ocurre donde el dedo hace contacto con la mesa. Para que ocurra de manera volumétrica, en todo un pedazo de materia, la gravedad es la respuesta. Una cantidad de materia suficientemente grande, bajo la acción de su propio peso, podría comprimirse toda ella de tal modo que todos sus electrones sintieran la presencia de los demás, formando un estado de la materia muy distinto del cotidiano, llamado *degenerado*. ¿Cuánta materia? Claramente, esto no es lo que ocurre con la Tierra. Se necesita más materia. ¿Júpiter? Más. Pero si uno pone más materia, se enciende una estrella, y la radiación producida por las reacciones nucleares la mantiene inflada, contrarrestando la tendencia gravitatoria a comprimirla. Pero cuando se apagan las reacciones nucleares al acabarse el combustible, hacia el final de la vida de la estrella, se reinicia la contracción y solo la detiene la degeneración de los electrones. Esto es efectivamente lo que ocurre con la mayoría de las estrellas del universo. Es lo que pasará con el Sol, en un futuro lejano.

Durante la mayor parte de sus vidas, las estrellas convierten hidrógeno en helio en sus núcleos supercalientes. En esta fase permanecen en la secuencia principal que descubrieron Russell y Hertzsprung. Esta reacción de fusión nuclear produce energía, que calienta la estrella y la mantiene “inflada”, en equilibrio con la fuerza de la gravedad, que tiende a comprimirla. Cuando empieza a escasear el hidrógeno en el núcleo, la estrella se comprime; esto agrega nuevo hidrógeno al núcleo y dispara una nueva etapa de fusión. La estrella se recalienta y se infla, abandona la secuencia principal y se convierte temporariamente en una gigante roja mientras empieza a fusionar helio. Finalmente pasa con el helio lo mismo que con el hidrógeno, el núcleo vuelve a comprimirse y la estrella rejuvenece. Durante esta etapa la estrella acumula carbono y oxígeno, productos de la fusión del helio, en el núcleo. A medida que el helio se acaba, el núcleo vuelve a contraerse. El futuro de la estrella depende ahora de su masa: las estrellas de masa como el Sol, o un poco más livianas, o un poco más pesadas, son las que se convierten en enanas blancas. Si la estrella tiene menos de 8 masas solares, nunca llega a tener temperaturas suficientes para fusionar el carbono ni el oxígeno¹. La contracción aporta helio e hidrógeno remanentes como para recalentar el núcleo y expulsar las capas exteriores de la estrella, formando una *nebulosa planetaria* (ninguna relación con los planetas, el confuso nombre obedece a razones históricas). Detrás queda el núcleo estelar desnudo, formado por carbono y oxígeno principalmente, contrayéndose y calentándose, hasta que los electrones están tan apretados que se dege-

05

G. Abramson, Cartes du Ciel





G. Abramson, Space Engine

“Una enana blanca no es una estrella, ya que no produce reacciones de fusión nuclear en su interior. Brilla intensamente, simplemente, porque está muy caliente”.

neran, y nace una enana blanca como 40 Eri B o Sirio B. Estrictamente, como vemos, una enana blanca no es una estrella, ya que no produce reacciones de fusión nuclear en su interior. Brilla intensamente simplemente porque está muy caliente, pero es solo un rescaldo estelar, enfriándose muy lentamente. Hipotéticamente, debería ir perdiendo el lustre, pasando por los colores usuales para cualquier asador dominiguero: amarillo, naranja, rojo, rojo oscuro, negro. Acabaría convertida en una esfera negra de carbono y oxígeno, una especie de diamante del tamaño de un planeta. El tiempo requerido para llegar a semejante estado, de todos modos, es abrumador, mucho mayor que la edad del universo, de manera que nunca se ha observado y, seguramente, nunca se observará.

Algo distinto puede ocurrir, sin embargo, si la estrella tiene una compañera, como es el caso de 40 Eri B o Sirio B. Sus compañeras eventualmente pasarán por las mismas fases y, al inflarse como gigantes, si la distancia lo permite, empezarán a aportar nuevo hidrógeno a la enana blanca. Esto produce un aumento de su masa y, por consiguiente, de la temperatura en el centro. Otro físico de Cambridge, Subrahmanyam Chandrasekhar (conocido, comprensiblemente, como Chandra), observó que la temperatura de los electrones en el centro de la estrella podía llegar a ser tan elevada que era necesario hacer un cálculo relativista. Descubrió entonces que el comportamiento de la materia de la enana blanca era sutilmente distinto del calculado por Fowler². En particular, si la masa total era mayor que 1.44 masas solares, su fórmula no tenía ninguna solución de equilibrio estable (una condición hoy conocida como *límite de Chandrasekhar*). Es decir, la degeneración de los electrones era insuficiente para equilibrar la fuerza de la gravedad. Al aproximarse al límite de Chandrasekhar, la temperatura

en el centro de la enana blanca alcanza para iniciar la fusión del carbono. La materia degenerada no puede expandirse para disipar la energía producida, y una detonación termonuclear consume y destruye a la enana blanca en cuestión de segundos. Esta explosión se llama supernova de tipo Ia (uno-a). Su magnitud absoluta típica es -19; es decir, entre la enana blanca (de magnitud típica +11) y la supernova, hay 30 magnitudes de diferencia de brillo, lo que equivale a un descomunal factor 10^{12} en la luminosidad. Dependiendo de sutilezas del aporte de materia que realiza la compañera, también puede ocurrir que se produzca una explosión termonuclear en la superficie de la enana blanca, sin llegar a destruirla. Son las *novas*, mucho menos energéticas que las supernovas, que incluso pueden volver a explotar si la situación de aporte de hidrógeno sobre la enana blanca persiste. Eventualmente, cuando la compañera se convierta a su vez en enana blanca, y si la primera no detonó, el sistema estará formado por dos enanas blancas, que pueden llegar a colisionar, si sus órbitas lo permiten, explotando como supernova.

En el cielo de Vulcano

En *Star Trek* (en Argentina, *Viaje a las Estrellas*), el planeta Vulcano orbita la estrella principal del sistema triple 40 Eridani. La estrella principal, 40 Eri A, tiene nombre propio: Keid. Es una estrella amarilla, de tipo espectral K, un

05 Mapa del cielo para encontrar 40 Eridani, cerca de la bien conocida constelación de Orión.

06 Representación artística de un planeta rocoso en órbita de Keid, con la enana blanca y la enana roja en la distancia.

poco más chica, menos caliente y la mitad de luminosa que el Sol. ¡Y tiene al menos un planeta!¹³ Designado 40 Eri Ab, o Keid b, es una supertierra. No sabemos mucho de este tipo de planetas, con tamaño y masa entre la Tierra y Neptuno, porque en nuestro sistema solar no hay ninguno. En todo caso, es muy difícil que sea como Vulcano, ya que está en una órbita muy apretada y tiene una insolación mucho mayor que la de la Tierra. Vulcano es caliente, pero no tanto. Pero, si hay un planeta, seguramente haya más, y quizás alguno de ellos sea rocoso y cálido; un verdadero Vulcano, como el del Sr. Spock.

40 Eri B es, de lejos, la enana blanca más fácil de observar para un aficionado. El sistema es una triple preciosa, porque el amarillo de Keid contrasta con el blanco azulado de la enana blanca, y con el rojo de la componente C, una enana roja mucho más tenue (figura 02). Las dos estrellas menores están relativamente cercanas entre sí (período de 230 años, como si fueran Plutón y el Sol), pero orbitan bastante lejos de Keid, una vez cada 8000 años. Eridanus, el río Eridano, es una constelación gigante y es fácil perderse en sus meandros. Pero Keid está cerca de Orión, y es fácil encontrarla si partimos desde Rigel (figura 05). Imaginen, cuando la observen, que en el cielo de Vulcano

brilla no un sol sino tres, y que, aunque Vulcano no tiene luna (capítulo 1 de la temporada 1), sus noches suelen estar iluminadas por una estrella rara, 15 veces más brillante que Venus en nuestro cielo, con una compañera roja con el brillo de la Estación Espacial Internacional. ■

Notas

(*) "Radiás todo el calor que te queda, tu atmósfera se vuela cuando admitís la derrota". A-ha, Enana blanca.

1 Si la estrella es suficientemente pesada, su destino es otro: explotará como supernova de tipo II. El núcleo estelar se contrae hasta alcanzar una densidad aún más increíble que la de las enanas blancas, comparable a la de un núcleo atómico. La mayor parte de las veces lo que queda es una *estrella de neutrones*, sostenida por la degeneración de los neutrones, que también son fermiones. Solo las más pesadas de todas logran vencer a Pauli por completo y formar un agujero negro (que no es materia, sino pura geometría).

2 Chandrasekhar recibió el Premio Nobel en Física en 1983, el año que yo empecé mi carrera de física en la universidad, más de 50 años después de sus trabajos. Lo compartió con otro Fowler, William, quien junto a Fred Hoyle y el matrimonio Burbidge, desarrollaron la teoría de cómo se forman los elementos químicos en las estrellas.

3 El planeta en órbita de Keid, conjeturado por variaciones en la velocidad de la estrella, es todavía controversial y podría no existir.

Las computadoras de Harvard

Hoy en día las computadoras son máquinas. Pero hasta la revolución de las máquinas electrónicas programables, las computadoras eran personas, generalmente chicas, que hacían buena parte del trabajo de cómputo tanto en instituciones científicas como en empresas. Un caso es el que muestra la película *Talentos Ocultos* (*Hidden Figures*, 2016), en el origen de la Era Espacial en la década de 1960, cuando incluso ya existían computadoras electrónicas. Williamina Fleming, "la primera persona que supo de la existencia de las enanas blancas", nació en Escocia y emigró a Boston, EE.UU., en 1871, a los 21 años. Madre soltera, consiguió trabajo de mucama en la casa del Profesor Pickering, director del Observatorio del Harvard College. La esposa de Pickering no tardó en notar que Mina (como la llamaban todos) tenía talentos más allá de las tareas domésticas, y le recomendó a su marido que la emplease en el Observatorio. Pickering le asignó inicialmente tareas administrativas, pero también le enseñó a analizar los espectros estelares que el Observatorio estaba obteniendo como parte de un proyecto de largo plazo, financiado por Mary Anna Draper en memoria de su marido, el fallecido astrónomo Henry Draper. Fleming se convirtió en una de las primeras computadoras de un equipo que llegó a ser legendario, conocido durante mucho tiempo con el desafortunado nombre de "el harén de Pickering". Fleming llegaría a ser la mano derecha de Pickering, en los hechos una vicedirectora sin cargo, y finalmente Curadora de Placas Astronómicas de Harvard, la primera



Las computadoras de Harvard en 1891. Durante una visita de Mary Anna Draper (sentada, a la derecha), Mina Fleming, de pie junto a ella, le muestra los espectros estelares del catálogo.

mujer con este cargo. Durante toda su destacada carrera abogó por la participación de las mujeres en la ciencia y su trato igualitario con los varones. La clasificación de los espectros que propuso inicialmente Fleming fue modificada por otra miembro del equipo, Annie Jump Cannon, autora de la "clasificación espectral de Harvard", que es la que se usa actualmente. Cannon se hizo cargo de la dirección del equipo a la muerte de Pickering, en 1919. Otra miembro destacada de las computadoras de Harvard fue Henrietta Leavitt, quien descubrió que el brillo de las estrellas variables llamadas *cefeidas* estaba relacionado con su período de variación. Esto abrió la puerta a un método fantástico para calcular distancias estelares, en particular en otras galaxias, y que hoy en día forma parte del segundo escalón de la escalera de distancias cósmicas, entre la paralaje estelar y las supernovas de tipo Ia (ver artículo en Si Muove 16, páginas 31-37).