

De noche, todos los gatos son pardos, pero las estrellas son de colores

EL COLOR DE LAS ESTRELLAS

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

01

Tragoolchitr Jittasaiyapan, Tailandia.



Los colores de las estrellas no son del todo obvios a ojo desnudo, porque nuestra vista no funciona igual de noche que de día. Cuando hay poca luz nuestra retina es casi ciega a los colores. ¡A quién no le pasó ponerse medias de colores distintos si nos vestimos con poca luz a la madrugada! Pero algunas estrellas son suficientemente brillantes como para que veamos su color. En particular, se distingue perfectamente que estrellas como Betelgeuse (en Orión) o Antares (en el Escorpión) son rojizas. A través del telescopio, que recoge mucha más luz que nuestras pupilas, los colores son más evidentes, y podemos ver estrellas azules, blancas, amarillentas, anaranjadas o rojas. En fotografías, en particular si tenemos la precaución de no saturar la exposición, los colores son todavía más notables (figura 01).

"El color de la luz de las estrellas depende en gran medida de la temperatura de su superficie".

Andrea Anfossi



03

En la escuela nos enseñaron que el rojo es un color cálido y el azul es un color frío. Uno aprendió que los colores cálidos se destacan y avanzan, mientras que los fríos retroceden. Parece algo bastante natural: el fuego quema y es rojo, el pasto es verde y fresco, los lagos y el hielo son azules y fríos... Una estrella roja, ¿acaso es más caliente que una azul? Parece lógico. Veamos.

El color de la luz de una estrella depende en gran medida de la temperatura de su superficie, tal como el de una brasa en el fuego del asado. Es algo de lo más familiar: un cuerpo caliente, brilla. En el siglo XIX los físicos estudiaron este fenómeno, conocido desde que la gente del Paleolítico inventó el asado, y descubrieron cuánto brilla en cada color. Vale decir, el *espectro* de un objeto caliente. Y encontraron algo sorprendente: el espectro es el mismo, ya sea que el cuerpo sea un carbón del asado, un vaso de vidrio que sale del horno del vidriero, un pedazo de hierro en la fragua, o una estrella en el espacio. El espectro obedece a la ley que mostramos en la figura 03: tiene un “pico” en un cierto color (un máximo donde está el máximo brillo) y brilla menos (de una manera matemática precisa) en los colores de longitud de onda mayor o menor que la del pico. Este tipo de fenómeno universal es irresistible para un físico: tiene que entender de dónde sale. Debe haber algún mecanismo único que lo explique.

El fenómeno es extremadamente sencillo: una cosa (cualquier cosa) caliente. Y su descripción en el contexto de la física de fines del siglo XIX (la mecánica hoy llamada clásica, más el electromagnetismo) es un modelo también muy sencillo. Pero es un modelo que fracasa estrepitosamente. Muchas de las mejores mentes científicas de aquel entonces atacaron el problema: Josef Stefan, Ludwig Boltzmann, Wilhelm Wien, Lord Rayleigh (el del color del cielo), James Jeans, entre otros. En particu-

lar, los dos últimos descubrieron que la energía radiada por un cuerpo caliente parecía depender de su temperatura (lo cual está muy bien) y de la longitud de onda (o sea, del color) de una manera particularmente sencilla. Pero había un problema: en la fórmula de Rayleigh-Jeans la longitud de onda aparece dividiendo, y encima elevada a la cuarta potencia. ¿Qué pasa cuando la longitud de onda es más chica? Al dividir por un número más chico, la energía da más grande. ¿Y si es más chica todavía? La energía es todavía más grande. Así no habría un pico: el brillo sube y sube sin parar para longitudes de onda menores y menores: ultravioleta, rayos X, rayos gamma... Si fuera así, cuando prendemos el fuego para el asado, ¡los carbones nos fulminarían con rayos gamma! Cosa que no pasa; miles de asadores domingueros damos fe. El fracaso recibió un nombre digno de una banda de rock: catástrofe ultravioleta.

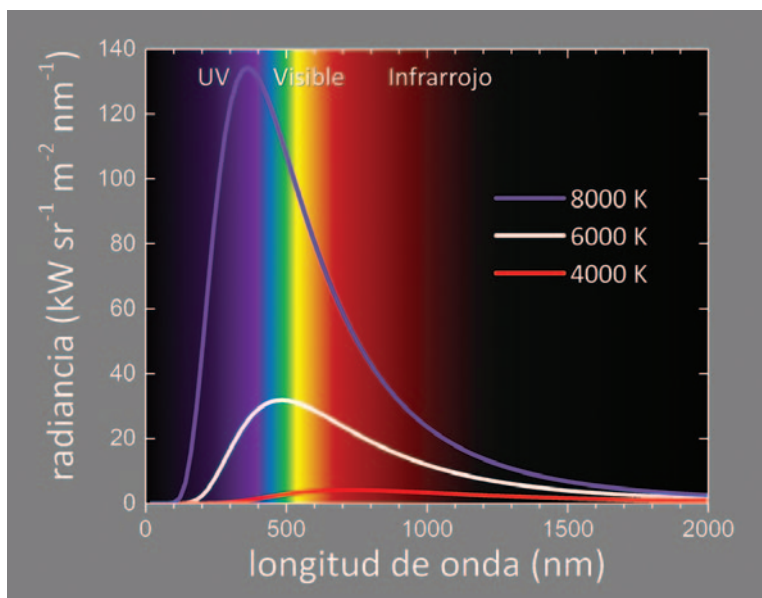
La radiación de cuerpo negro

La solución fue descubierta por Max Planck. Su presentación en la última reunión del siglo de la Asociación Física Alemana en diciembre de 1900 es uno de los momentos de gloria de la física, y marca el comienzo de la física moderna, la Física Cuántica. Planck propuso que el objeto caliente emite su energía en “paquetes” (los *cuantos* que le dan nombre a la teoría), cada uno con una energía que solo puede ser un múltiplo entero de una energía fundamental (que es además proporcional a la frecuencia, o sea la inversa de la longitud de onda). *Y le dio el pico de la curva*. Hoy la llamamos ley de radiación de Planck, una expresión matemática cuyo gráfico tiene la forma que mostramos en la figura 03 para varias temperaturas. La ley de Planck explica el espectro de cualquier objeto caliente (llamado “cuerpo negro” por una cuestión técnica, pero que no necesita ser de color negro¹). Hay que decir que la ley de Planck de radiación del cuerpo negro fue un comienzo, y que se necesitarían 30 años para tener una teoría razonable de los fenómenos cuánticos.

Y aun hoy es un edificio que no hemos terminado de construir. Quiero enfatizar, a propósito de lo que generalmente se cree, que la mecánica cuántica no es *apenas* una rareza de fenómenos microscópicos y exóticos, como átomos y electrones, aceleradores de partículas, o gatos vivos y muertos a la vez. *Necesitamos* la física cuántica para entender incluso fenómenos cotidianos: por qué y cómo brillan los alambres del tostador cuando preparamos el desayuno. En un sentido muy estricto, la física cuántica está detrás de toda la civilización tecnológica en la que vivimos hoy en día.

Pero volvamos a la astronomía. Existe un enorme rango de temperaturas estelares, desde algunas apenas tibias hasta otras a decenas de miles de grados. En la figura 03 mostramos espectros correspondientes a

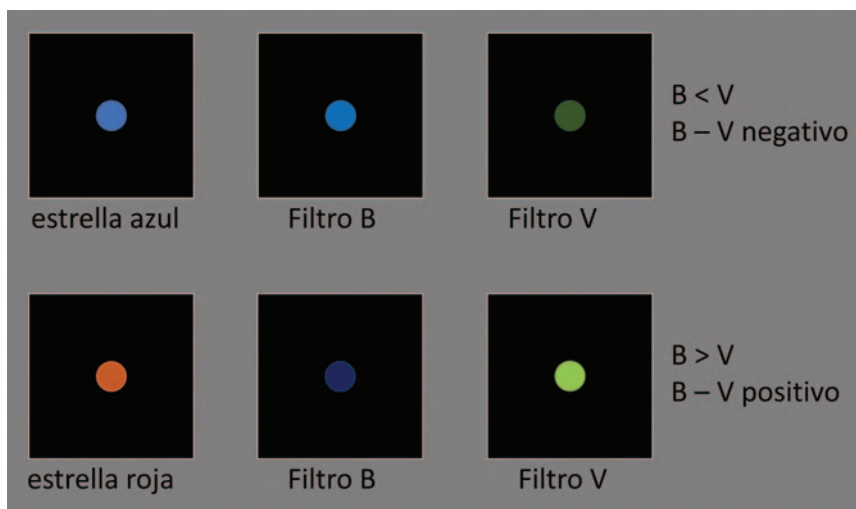
03



tres temperaturas, 4000, 6000 y 8000 K. Podemos ver que, cuando la temperatura es mayor, el pico es más alto. Esto dice que las estrellas más calientes emiten más energía electromagnética. Pero, además, vemos que el pico se corre hacia la izquierda (hacia longitudes de onda más cortas) al aumentar la temperatura. Por ejemplo, una estrella cuya superficie esté a 4000 K tiene el máximo en el infrarrojo (es la curva roja bien bajita en la figura). Es decir, de los colores visibles (entre 400 y 700 nm), el más intenso es el rojo. Estas es-

trellas “frías”, entonces, se ven rojas. Es el caso de Betelgeuse, Antares, Aldebarán o Gacrux (la estrella roja en la “cabeza” de la Cruz del Sur). Una estrella más caliente, como el Sol o Alfa Centauri (la estrella blanca brillante en el Puntero de la Cruz), tiene el máximo en la región visible (curva blanca, a 6000 K), de modo que mezcla en forma bastante pareja los colores. Vemos estas estrellas blancas, amarillentas o anaranjadas (según sean más o menos calientes). Las estrellas aun más calientes tienen el máximo todavía más a la izquierda, inclusive en el ultravioleta (curva violeta, a 8000 K). Así que el máximo de intensidad visible está en la región violeta y azul del espectro, y las vemos azules (como las otras estrellas de la Cruz, o las Tres Marías, por ejemplo). Existen estrellas cuyas superficies están a temperaturas aún mayores, hasta a 35.000 K, cuyos picos son muchísimo más altos y más dentro del ultravioleta que los que mostramos en la figura 03. Así que, en astronomía, es al revés que en las artes plásticas: rojo es frío y azul es caliente.

La forma del espectro de cuerpo negro correspondiente a las temperaturas estelares permite caracterizar el color (y la temperatura) de una manera matemática muy precisa, sin necesidad de conocer toda la curva. En las que dibujamos en la figura 03 puede verse que, para una estrella caliente (la curva de 8000 K, por ejemplo), la radiancia es decreciente en la región visible. Podemos usar dos colores (dos longitudes de onda) para ejemplificarlo: la estrella brilla más en el color azul que en el verde. En cambio, para una estrella roja (menos caliente), la curva es creciente en la región azul-verde del espectro. Así que la estrella roja es menos brillante en el azul que en el verde. En la práctica esto se hace tomando fotografías a través de filtros, y midiendo la magnitud estelar con cada uno (figura 04). Existen muchos sistemas fotométricos de este tipo, pero por lejos el más usado es el de Johnson (estandarizado en 1953). Se usan tres filtros, uno ultravioleta, uno azul y uno verde-amarillo, y se miden las magnitudes correspondientes, U, B (de *blue*, “azul”) y V (de *visual*). La diferencia entre estas magnitudes se usa para definir índices de color: U–B y B–V, de los cuales



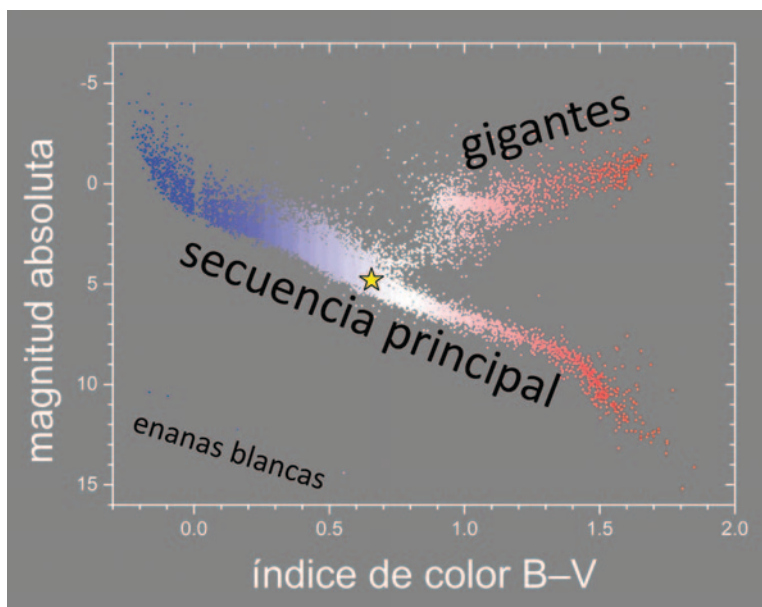
el B–V (a veces indicado BV) es el más común. Cuando la diferencia es negativa, es porque la magnitud B es menor que la magnitud V. Una magnitud menor significa mayor brillo (por la manera caprichosa en que funciona el sistema de magnitudes astronómicas), así que en tal caso la estrella brilla más en el azul que en el verde. Nuestro ojo, o cualquier instrumento, la verá azulada (figura 04, arriba). Por el contrario, cuando la diferencia es positiva, la estrella tiene mayor magnitud B que V, y la

01 Las 25 estrellas más brillantes del cielo, en una cuidadosa composición fotográfica de Tragooolchitr Jittasaiyapan, muestran una variedad de colores.

02 Si en lugar de hacer foco tomamos una imagen desenfocada, el color de las estrellas se hace aún más notable. Se ven las constelaciones de la Cruz del Sur (arriba a la izquierda), el Centauro, el Lobo, entre otras. Abajo, a la izquierda de la esfera, la estrella roja es Antares, la más brillante del Escorpión.

03 Un gráfico que muestra la intensidad luminosa de cada color (cada longitud de onda) se llama espectro. Aquí mostramos tres curvas, y cada una es un espectro de cuerpo negro correspondiente a cierta temperatura, según se indica. En el fondo del gráfico hemos usado colores para ilustrar las longitudes de onda del eje horizontal. El rango de luz visible es aproximadamente el que va de 400 a 700 nm (nanómetros, millonésimas de milímetro). Hemos usado colores también en la región ultravioleta e infrarroja de manera representativa, si bien esas longitudes de onda son invisibles para el ojo humano. La unidad de temperatura es el Kelvin (no “grado Kelvin”), igual en tamaño al grado Celsius, pero con el cero a -273.15°C . La radiancia es complicada y los detalles no vienen al caso: representa la energía radiante a cada longitud de onda.

04 Representación esquemática del índice de color B–V: se restan las magnitudes medidas en fotografías tomadas a través de filtros estándar. El filtro B está centrado en 445 nm (azul) y el filtro V (visual, verde-amarillo) está en 551 nm. La magnitud es mayor si la intensidad es menor.



vemos rojiza (figura 04, abajo). Usados en conjunto, los índices U-B y B-V permiten calcular muy exactamente la temperatura de una estrella.

La ciencia de las estrellas

Además de esta cuestión de los colores, mencionamos más arriba que la ley de Planck nos dice que los objetos más calientes emiten más radiación (figura 03). ¿Esta mayor emisión de radiación, corresponderá a un mayor brillo estelar? Para verificarlo, primero tenemos que observar que la luminosidad intrínseca de una estrella no necesariamente coincide con su brillo aparente en el cielo. Una estrella podría ser muy luminosa, pero resultar muy tenue por encontrarse muy lejos. O, a la inversa, podría ser muy poco luminosa, pero verse relativamente brillante si se encontrara cerca nuestro. Pero si conocemos (porque medimos o calculamos) la distancia a la estrella, es fácil convertir el brillo en el cielo (la *magnitud aparente*) en luminosidad intrínseca (*magnitud absoluta*). El primero en explorar esta relación entre luminosidad y color fue un astrónomo aficionado danés, Ejnar Hertzsprung, a principios del siglo XX. Independientemente, el destacado astrónomo de Princeton Henry Norris Russell puso la misma relación en forma de gráfico, que hoy se llama diagrama de Hertzsprung-Russell, o diagrama H-R (figura 05). En el eje vertical se representa la luminosidad de la estrella, y en el

horizontal su color (o temperatura)².

Cada punto en este diagrama representa una estrella. Y la principal característica que observamos es que casi todas las estrellas (el 90%) forman una franja ondulante en diagonal: desde las estrellas más azules y calientes, arriba a la izquierda, hasta las más rojas y “tibias”, abajo a la derecha. Esta franja se llama hoy en día *secuencia principal*. Juega un rol importante en la teoría de la evolución estelar, ya que es allí donde las estrellas pasan la mayor parte de sus existencias, fusionando hidrógeno en sus núcleos. El Sol es una estrella de la secuencia principal, con magnitud absoluta 4.8 e índice de color B-V 0.656. Y lo hemos marcado en la figura.

Esta reducción de la temperatura al aumentar la longitud de onda es precisamente lo que predice la ley de Planck para

cuerpos negros de distintas temperaturas, siempre que sean del mismo tamaño. Así que la secuencia principal nos dice, de paso, que casi todas las estrellas son aproximadamente del mismo tamaño (ver recuadro). Sin embargo, por encima de la secuencia principal hay una nube de estrellas que, teniendo los mismos colores, son mucho más luminosas. Las leyes de la radiación del cuerpo negro dicen que esas estrellas deberían ser más grandes (*mucho* más grandes) que las correspondientes, del mismo color, que se encuentran debajo de ellas en la secuencia principal. Este fue precisamente el descubrimiento de Hertzsprung y Russell, y llamaron a esas estrellas “gigantes”. Hoy sabemos que es así, y que estas estrellas gigantes (y supergigantes) corresponden a fases especiales de la evolución de las estrellas a lo largo de su existencia. Típicamente, son estrellas maduras, que han agotado el hidrógeno en sus núcleos, empie-

06



Sergio Eguívar

La secuencia principal

Las estrellas de la secuencia principal no son exactamente del mismo tamaño. Las más luminosas y calientes, en el extremo izquierdo del diagrama H-R, son más grandes (hasta unas 10 veces el tamaño del Sol), mientras que las del extremo inferior derecho, menos calientes y luminosas, son más pequeñas (hasta un 20% del tamaño del Sol). Pero este factor 10 en el tamaño es insignificante frente al enorme tamaño de las gigantes y supergigantes (que son cientos o miles de veces mayores). La razón, para los que disfruten de los aspectos técnicos de la astrofísica, es la siguiente. En un cuerpo negro de radio R a temperatura T , la luminosidad está dada por la ley de Stefan-Boltzmann: $L=4\pi\sigma R^2T^4$, donde σ es una constante de la naturaleza (relacionada con la velocidad de la luz, la constante de Planck y la constante de Boltzmann). Por lo tanto, si dos estrellas tienen la misma temperatura, pero una es 100 veces más luminosa que la otra, el radio de la más luminosa es $\sqrt[4]{100}=10$ veces más grande. Este hecho es lo que llevó a Hertzsprung y Russell al descubrimiento de las estrellas gigantes, con radios entre 10 y 100 veces el solar, mientras que las supergigantes son todavía mayores. Por otro lado, las líneas de R constante son rectas decrecientes en un gráfico del logaritmo de la luminosidad (que es la magnitud absoluta) en función del logaritmo de la temperatura (con las temperaturas más elevadas a la izquierda, como es habitual en el diagrama H-R). La secuencia principal es aproximadamente paralela a estas rectas, que podemos ver dibujadas en la figura original de Russell, publicada en la revista *Nature* en 1914. Russell usó unas 300 estrellas para las cuales se cono-

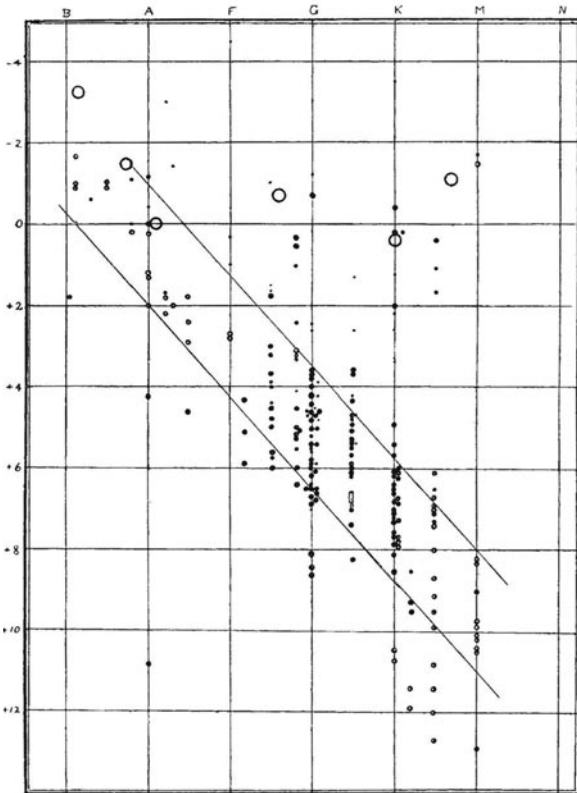


FIG. 1.

cía la distancia, y por lo tanto la magnitud absoluta representada en el eje vertical, con un error menor que el 42% (un valor enorme para el estándar actual). La única excepción a la secuencia principal y las gigantes, observó Russell, es la estrella que vemos abajo y a la izquierda. Se trata de Omicron2 Eridani B, que les dio dolores de cabeza a los astrónomos por muchos años: fue la primera enana blanca conocida, el núcleo supercaliente de una estrella muerta que ha dispersado completamente sus capas exteriores.

05 Diagrama de Hertzsprung-Russell. Se grafica la luminosidad intrínseca de cada estrella en el eje vertical (en unidades de magnitud absoluta), versus su índice de color (representando mayor temperatura hacia la izquierda, y menor hacia la derecha). La inmensa mayoría de las estrellas (el Sol incluido) aparecen agrupadas en una franja llamada secuencia principal. (Selección de estrellas del catálogo Hipparcos [van Leeuwen, 2007], más el Sol indicado por una estrella amarilla). El viboreo de la secuencia principal es una manifestación de que las estrellas no son exactamente cuerpos negros. La curvita hacia arriba en las estrellas más calientes, en particular, nos dice que estas estrellas muy calientes y brillantes son mayores que el Sol y comparables a las gigantes. Y la curva hacia abajo en las enanas rojas, en cambio, nos dice que son más pequeñas que el Sol (que está en el medio,

en la parte bastante recta de la secuencia principal). En la región media, donde se encuentra el Sol, el tamaño es casi el mismo. La existencia de una relación tan sencilla entre la luminosidad y la temperatura fue una clave importante de que la posición de una estrella en la secuencia principal depende de un solo factor: su masa.

06 La estrella 145 CMa, en la constelación del Can Mayor, son en realidad dos estrellas, que no tienen relación física entre sí, sino que casualmente están en la misma dirección vistas desde la Tierra, pero a distancias muy diferentes. La estrella azul se encuentra a 258 años luz de nosotros, mientras que la naranja está a 6272 años luz, y ambas están separadas visualmente por 26 segundos de arco.



zan a fusionar helio, abandonan la secuencia principal y se acercan al final de sus vidas³. Es una fase relativamente breve de la evolución estelar, y por eso la rama de estrellas gigantes (y también, las supergigantes) está mucho menos poblada que la secuencia principal. Las estrellas de la secuencia principal, en contraste con la rama de gigantes, recibieron el nombre de “enanas”, una designación un poco confusa que hoy en día casi no se usa; es preferible llamarlas estrellas de la secuencia principal.

Por debajo de la secuencia principal hay una tercera rama, todavía menos poblada (en el diagrama original de Russell había una sola estrella aquí, y en el catálogo que usamos para la figura 05 hay apenas cuatro). La mayor parte de ellas tienen temperaturas que se manifiestan en un color blanco o blanco azulado. Y como son poco luminosas, las leyes del cuerpo negro nos dicen que son pequeñas. Así que recibieron el nombre de “enanas blancas”, y su naturaleza fue misteriosa durante bastante tiempo. ¿Cómo podrían ser tan chiquitas y tan calientes? Otro día nos ocuparemos de ellas.

A lo largo de un siglo se acumularon millones y millones de observaciones y se desarrolló toda una ciencia de la evolución estelar, que confirmaron estas observaciones básicas acerca de los colores y la luminosidad de las estrellas. Se trata de un logro extraordinario, teniendo en cuenta que todo lo que sabemos sobre las estrellas, lo sabemos mirando de lejos. El astrónomo no puede meterle un termómetro para medir la temperatura, por ejemplo. Así que todo lo hemos averiguado analizando la luz que nos llega de ellas con nuestros mejores instrumentos: telescopios, espectroscopios y el cerebro humano. ■

“Las estrellas de la secuencia principal, en contraste con las gigantes, recibieron el nombre de ‘enanas’, una designación un poco confusa que hoy en día casi no se usa; es preferible llamarlas estrellas de la secuencia principal”.

07 *La constelación del Can Mayor, con una gran variedad de colores en las estrellas. A la izquierda, la estrella más brillante es Sirio, y el grupito cerca del centro de la imagen, el cúmulo abierto M 41.*

Notas:

1 Los objetos reales son cuerpos negros solo aproximadamente, si bien existen dispositivos diseñados especialmente para calibrar instrumentos, que radian casi exactamente con la Ley de Planck. Las estrellas son muy aproximadamente cuerpos negros, pero otros objetos naturales radian de otra manera: nebulosas, chorros de materia y energía, láseres y másers, etc., no son cuerpos negros. El mejor cuerpo negro que conocemos es la radiación cósmica de microondas, el resplandor residual de cuando el universo entero estaba muy caliente.

2 Russell no usó el color ni la temperatura en el eje horizontal, sino la “clase espectral”, un tema que abordaremos en otra oportunidad. Hertzsprung no hizo un gráfico, sino que presentó sus resultados en forma de tabla.

3 Nos ocupamos de gigantes y supergigantes rojas en Si Muove N° 25 (planetario.buenosaires.gob.ar/revista).