

## BIOGRAFÍA DEL SOL (II)

Jesús Salvador Giner

jsginer@gmail.com

*En nuestro recorrido por el ciclo vital de nuestra estrella, proseguiremos en esta segunda parte por como la etapa de madurez solar (la secuencia principal) y sus primeras inestabilidades (gigante roja), hasta llegar a las últimas fases de la existencia del Sol (nebulosa planetaria, enana blanca y enana negra).*

### 3. Juventud y madurez

Como dijimos, la duración de la vida de una estrella está sujeta a su destino desde el momento mismo de su nacimiento; todo depende de su masa. El Sol es una estrella corriente; es lógico suponerle y es una suposición acertada una vida ni demasiado larga ni exiguamente corta; un término medio, pues. Pero ¿cómo será tal vida, sus etapas y el comportamiento en ellas de nuestra estrella?

Desde que la protonebulosa se comprime por la onda de choque hasta las reacciones nucleares que hacen brillar a la estrella recién nacida sólo han transcurrido, según las simulaciones, poco más de treinta millones de años. Parece mucho tiempo, pero en términos astronómicos es muy poco; si lo comparamos con la vida humana, de hecho, correspondería a algo más de ocho meses<sup>1</sup>. Las reacciones nucleares que encienden el motor estelar son la señal de que las estrellas han dejado atrás la etapa de formación y penetran hacia la placidez que caracteriza a los astros en esta etapa de sus existencias. A partir de entonces, sólo al final de su vida las estrellas volverán a sufrir agitaciones e inestabilidades importantes aunque, como veremos, siempre están sujetas a ligeros cambios en sus abrasadores interiores.

Cuando el Sol dio inicio a sus reaccio-

nes nucleares, en los lejanos y brumosos tiempos de su pasado más remoto como estrella, había ciertas huellas de su antigua génesis: el Sistema solar (con los planetas en la fase final de solidificación y enfriamiento) estaba envuelto aún por largos jirones nebulosos, residuos de la nebulosa de la que había brotado. Tales rosarios de gas a la deriva serían dispersados hacia el exterior del sistema por violentos y potentes vientos de materia estelar que brotaban del Sol recién nacido. Algunos hermosos asterismos estelares muy jóvenes conservan todavía en



FIGURA 6: FOTOGRAFÍA DE LA ESTRELLA MÉROPE, EN EL CÚMULO DE LAS PLÉYADES, ENVUELTA AÚN EN LOS RESIDUOS NEBULOSOS DE SU FORMACIÓN. (NOAO/AURA/NSF)

sus proximidades estas sugerentes trazas gaseosas (por ejemplo las Pléyades, en Tauro, un cúmulo joven cuya edad no supera los 100 millones de años, figura 6).

Una estrella, al contrario que nosotros, no disfruta de infancia; transita enseguida desde su nacimiento, marcado por el arranque de las reacciones nucleares, hacia la madurez, permaneciendo cómo único testigo de tiempos pretéritos sus restos nebulosos. Una estrella que brilla con luz propia penetra en lo que se denomina secuencia principal. Los astrónomos pueden sintetizar, en el llamado diagrama Hertzsprung-Russell (o, simplemente, diagrama H-R), los diferentes estados vitales de una estrella a lo largo de toda su vida, relacionando los cambios que sufre en cuanto a luminosidad, temperatura y magnitud absoluta. En el diagrama (figura 7) hay una línea continua muy destacada que atraviesa desde la parte inferior derecha hasta la superior izquierda; es la línea de la secuencia principal. En ella están incluidas muchas estrellas que ya atraviesan esa fase de su vida pero, como puede verse, no todas están situadas en el mismo sitio. En efecto, algunas están cercanas al borde inferior derecho —que pertenece al grupo de estrellas enanas—, y otras están por su parte cerca del extremo superior izquierdo —astros varias veces más brillantes que el Sol y con una temperatura superficial muy alta—. Esto significa que estrellas con masa distinta se situarán en lugares diversos en el diagrama y tendrán, por lo tanto, características (y existencias) muy diferentes.

Si adaptamos este gráfico a los pasos iniciales del Sol como astro, comprobaremos primero que, antes incluso de su nacimiento como tal, estaba situada en la parte central (*punto 1*). Este lugar corresponde al de un Sol aún embrionario, que seguía arremolinando materia a su alrededor el *protosol*, con una temperatura superficial aún baja (4.000 grados)<sup>2</sup>. El instante posterior (*punto 2*) representa el momento en que se inician las reacciones nucleares; el Sol está entonces justo sobre una línea discontinua, paralela a la de la secuencia principal. Esta línea discontinua indica la posición de cada estrella en el momento de su nacimiento o instante cero

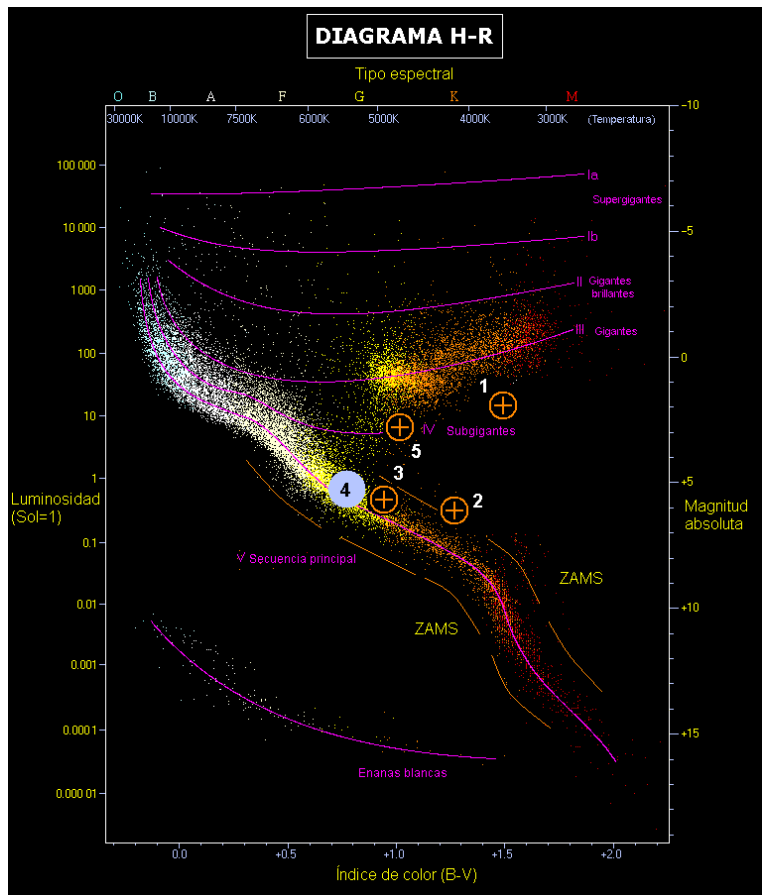


FIGURA 7: DIAGRAMA H-R MODIFICADO PARA COMPROBAR LA EVOLUCIÓN DEL SOL DESDE SU NACIMIENTO HASTA LA FASE FINAL DE LA SECUENCIA PRINCIPAL. EL SIGNIFICADO DE LOS NÚMEROS DE LA FIGURA, QUE SIMBOLIZAN LOS DIFERENTES ESTADOS DE LA ESTRELLA, ESTÁ EXPLICADO EN EL TEXTO.

en relación con su masa (las siglas ZAMS significan precisamente, en inglés, “*secuencia principal de edad cero*”). En un breve periodo el Sol franquea el límite entre el punto 2 y el punto 3 del gráfico, un segmento de su evolución que causa un importante aumento de la temperatura (los otros parámetros, sin embargo, permanecen inalterables). Inmediatamente la estrella se adentra ya en la secuencia principal estable, en la que se mantendrá durante varios miles de millones de años, etapa en la que se halla actualmente (*punto 4*), sufriendo sólo al final de la misma algunas variaciones físicas importantes (*punto 5*). Posteriormente abandonará la secuencia principal e ingresará en el siguiente periplo de su vida de estrella, que analizaremos a continuación.

Pese a hallarse en un periodo tranquilo de su vida como es la secuencia principal, astros como el Sol sufren cambios que atañen a sus propiedades físicas; por ejemplo, así ocurre con la luminosidad. Ésta depende de tres factores fundamentales: masa y tamaño solar y el peso molecular. Un cambio químico en el interior del Sol supondrá un cambio de luminosidad; así, como por medio de las reacciones nucleares el hidrógeno se con-

vierte en helio, el peso molecular<sup>3</sup> total aumenta (porque el helio es un elemento más pesado, de peso atómico mayor), con lo que el Sol elevará su resplandor a medida que envejezca. De aquí deducimos que la luminosidad actual de la estrella es mayor que la del pasado, e inferior a la que tendrá posteriormente<sup>4</sup>.

Pero estos cambios son intrascendentes y la estrella se mantiene casi inalterable en sus condiciones generales. ¿Por qué motivo es la secuencia principal la etapa más estable de las estrellas? ¿Por qué no presenta también los sobresaltos típicos de la formación estelar o las convulsiones finales? La explicación está relacionada con dos fuerzas físicas opuestas por naturaleza: la gravedad y la presión. La gravedad es mayor cuanto más masa tiene un cuerpo, por lo que a mayor masa, mayor capacidad de atracción. Si imaginamos una esfera de gas típica (el Sol, por ejemplo), es lógico suponer que su centro, más denso y compacto, tiene una mayor capacidad para atraer material hacia sí mismo que otras zonas de la esfera. De continuar indefinidamente la acción de la gravedad sin oposición, el núcleo acumularía más y más materia hasta que la esfera padecería un colapso irreversible, dado que no podría soportar la extrema gravedad de su propia masa. Sin embargo, este panorama angustioso no se produce (o, al menos, no durante la etapa de la secuencia principal) gracias a que la fuerza de la gravedad tiene una rival antagónica: la presión. En el mismo centro del Sol, al producirse las reacciones nucleares, se genera una cantidad de energía enorme. Esta energía tiende a expandir las capas externas de la estrella. Si la esfera de gas dispusiera de esta energía sin la fuerza de gravedad, la presión que generaría en las zonas internas de la estrella sería tan fuerte que ésta acabaría desvaneciéndose. Tenemos, en consecuencia, por un lado una fuerza compresiva y, por otro, una fuerza expansiva. Como en la secuencia principal ambas fuerzas tienen casi exactamente la misma intensidad (están en “equilibrio hidrostático”) el resultado es una estrella estable. Aunque el equilibrio hidrostático es frágil, una estrella mediana puede mantenerse durante muchos miles de millones de años en la secuencia principal, siempre que disponga en su interior de suficiente hidrógeno, el combustible fundamental para activar las reacciones nucleares ordinarias.

Como sabemos, el grado de consumo de hidrógeno para convertirlo en helio depende de la masa de la estrella, que determinará cuánto tiempo permanece la estrella en la secuencia principal. En el Sol se prevén unas reservas suficientes para entre unos tres o cuatro mil millones de años más de (relativa) calma, antes de que las despensas solares tengan un severo déficit de hidrógeno; si sumamos los otros 5.000 millones de años que ya han transcurrido desde la aparición del Sol tenemos una cifra aproximada del tiempo total que una estrella similar al Sol puede mantenerse en la secuencia principal.

Llegará, sin embargo, un momento en que las reservas inicien su regresión, en que toda la gigantesca provisión de hidrógeno que la nebulosa primitiva proporcionó al Sol alcance sus últimas existencias. Entonces nuestra estrella cambiará, y con ella, lógicamente, todo el Sistema solar. De hecho, esta alteración en el Sol marcará el fin de la Humanidad como tal si es que por entonces aún viven en el planeta nuestros descendientes y de toda la vida conocida en la Tierra. ¿Qué le sucederá al Sol dentro de 4.000 millones de años para hacer desaparecer para siempre todo rastro de vida sobre nuestro planeta?

#### **4. Primeras agonías**

El Sol mostrará las primeras perturbaciones físicas, algunas bastantes considerables, unos 2.000 millones de años a partir del tiempo presente. El astro empezará entonces a agotar sus depósitos de hidrógeno, tras cerca de 7.000 millones de años de consumo ininterrumpido, y el helio se convertirá en el elemento predominante en su interior. Será bastante más luminosa que hoy en día, pero al escasear el hidrógeno (el combustible más eficiente) la energía que producirá será menor, reduciéndose la temperatura en su centro. Para que la estrella mantenga su estabilidad aun disminuyendo su temperatura interna se requiere que el núcleo se contraiga ligeramente; de esta forma se produce una mayor emanación de energía, pero al hacerlo la presión gana en intensidad a la gravedad, se rompe temporalmente el equilibrio hidrostático y el resultado es una ligera expansión de la estrella. Sus estratos externos se han enfriado, ya que la temperatura ha disminuido un poco, pero sus dimensio-

nes han aumentado, de modo que el Sol deformará su rostro y se convertirá, de una estrella enana amarilla, poco brillante y caliente (unos 5.800°K, hoy en día) a una *sub-gigante roja* (figura 7, punto 5).

Este nuevo ente estelar es más grande, más brillante (un 15% más) y más frío que el Sol actual. Las consecuencias de este aumento de brillo (aparejado a una menor temperatura superficial) serán terribles para la Tierra: ocasionará la fusión total de los casquetes polares, incrementándose el nivel del mar e inundando si entonces aún existen las grandes ciudades de nuestro mundo<sup>5</sup>.

La sub-gigante roja que será entonces nuestra estrella se verá obligada, dado que carecerá de hidrógeno en su núcleo, a utilizar como combustible aquello de lo que disponga en su corazón. La dificultad radica, sin embargo, en que para poder fusionar el helio, el elemento más abundante en ese futuro remoto, se necesitan altísimas temperaturas, cercanas a los cien millones de grados.

No obstante el hidrógeno se ha agotado sólo en el núcleo de la estrella, sólo en las regiones más internas en donde queda almacenado un gran depósito de helio a la espera de ser fusionado. En las regiones que envuelven la estrella justo más allá de su núcleo sí que hay, en cambio, hidrógeno, que puede transformarse en helio si se dan las condiciones apropiadas. Mas, ¿cómo conseguirlas? Para entonces, el núcleo (literalmente) no funciona, no hay aporte de energía desde el centro de la estrella hacia las capas inmediatamente superiores, y hemos dicho que el equilibrio hidrostático se mantiene siempre y cuando la presión sea suficiente para contrarrestar la fuerza de la gravedad. Como no

hay presión que tienda a expandir la estrella, la gravedad empieza ahora a ganar terreno; el núcleo de helio se compacta, comprimido por la fuerza de gravedad, y la zona que envuelve a dicho núcleo, la que aún conservaba el hidrógeno, se comprime igualmente, aumentando su temperatura, produciendo más energía y “ardiendo” por un tiempo, favoreciendo que la presión de expansión domine nuevamente sobre la fuerza de gravedad. El resultado es otra pequeña dilatación de los límites de la estrella, que agranda un poco más su tamaño, pero como la expansión implica también disminución de temperatura, el enfriamiento de las capas que rodean al Sol dificultará que la estrella pueda transferir hacia el exterior la energía residual que aún está produciendo en su núcleo. Será, pues, una estrella con un interior todavía caliente y un envoltorio de hidrógeno cada vez más alejado del centro, expandiéndose al menguar allí la fuerza de gravedad que debería impedir la expansión.

¿Cuál será el resultado de estas interminables expansiones y contracciones, este tira y afloja entre la presión y la gravedad?: el efecto será que el Sol abandonará su etapa como estrella sub-gigante roja y pasará a ser una *gigante roja*. ¿Y cuál es la diferencia entre ambas etapas?: estriba en el tamaño y la tem-



FIGURA 8: FOTOGRAFÍA DE LA ESTRELLA ARTURO, LA MÁS BRILLANTE DE LA CONSTELACIÓN DE BOYERO. RESPLANDECE CON UN INTENSO COLOR ANARANJADO ROJIZO, TÍPICO DE ESTE TIPO DE ESTRELLAS GIGANTES, Y ANÁLOGO AL QUE TENDRÁ NUESTRO SOL DENTRO DE UNOS CUANTOS MILES DE MILLONES DE AÑOS, AL CONVERTIRSE EN GIGANTE ROJA. (YUUIJI KITAHARA)

peratura; debido a la expansión desenfrenada de sus límites externos, una gigante roja puede ver aumentadas sus dimensiones incluso centenares (!) de veces y, al hacerlo, provoca que la temperatura disminuya considerablemente; el Sol en fase de gigante roja no superará los 4.200°K de temperatura. Ejemplos de gigantes rojas, astros enormes y fríos, los encontramos en Arturo (figura 8), o Aldebarán, en la constelación de Tauro.

La expansión de nuestro futuro Sol será espectacular. A medida que sus capas más externas vayan aumentando su volumen, alcanzarán la órbita de Mercurio, carbonizándolo por completo excepto, quizá, su núcleo de hierro. Lo mismo le sucederá a Venus un poco más tarde, y puede que a la propia Tierra. Pero aunque nuestro mundo no se calcine directamente, su superficie habrá aumentando centenares de grados la temperatura, los océanos estarán completamente evaporados desde mucho tiempo atrás y la atmósfera se perderá en el espacio, despojando al planeta de su protección natural. Entonces, la superficie terrestre estará completamente fundida, con densas coladas de lava abrasando la superficie y con una temperatura de centenares de grados capaz de fundir el plomo. La Tierra será un mundo infernal, seco, desprovisto de todo atisbo de vida, y destinado a no albergar jamás el mínimo rastro de agua o de formas biológicas<sup>6</sup>.

Pero aunque la superficie del Sol metamorfoseado en gigante roja sea fría, en su interior las condiciones empiezan a ser las adecuadas para transformar el helio, elemento predominante a la sazón en el corazón de la estrella, como hemos dicho. Esta conversión química será útil, sin embargo, sólo durante unos pocos millones de años, apenas unos días en la vida del Sol; nuestro astro será entonces tan gigantesco que precisará mucha más energía que la disponible para mantenerse estable. El núcleo agotará pronto el helio, y el centro del Sol volverá a contraerse; el aumento de temperatura hará posible una última fusión nuclear de los materiales pesados, como el carbono y el oxígeno formados a partir de la combustión del helio, pero esta posterior inyección de energía será tan efímera que no podrá asegurar más que un equilibrio temporal y precario. Cada vez que en un paso posterior la estrella agote los elementos sucesivos, su núcleo se comprimirá de nuevo, la temperatura

aumentará, y el nuevo material que se fusionará prorrogará el momento del colapso final. Si observáramos al Sol desde el espacio y durante algunos millones de años a cámara rápida, lo veríamos hincharse y comprimirse alternativamente: sus capas externas cada vez estarían más lejos del centro, y el propio núcleo, compactándose sin cesar a medida que se fusionan los últimos elementos pesados, sería más y más brillante y a cada instante más pequeño.

El Sol estará para entonces, dentro de algo más de 5.000 millones de años, en una situación crítica. Será incapaz de seguir generando más energía por las reacciones nucleares, dado que no habrá nada en el núcleo que pueda proporcionarlas, y las regiones externas estarán tan distantes que tampoco la recibirán. Entonces llegará un segundo mágico y surrealista en la vida del Sol futuro, cuando el núcleo acabe colapsado sobre sí mismo por falta de presión que ayude a la expansión y, debido a ello, las partes externas de la estrella no tengan dificultad alguna para proseguir su viaje hacia fuera. En una silenciosa y discreta agonía de sobrenatural belleza, la radiación que emana del Sol en sus últimos jadeos será la precisa para que las partes externas, enrarecidas y diluidas como pintura en un estanque, se escindan del núcleo y el Sol se encamine hacia una nueva etapa de su larga y tortuosa existencia.

## 5. El fin

El clímax de la vida del Sol tendrá lugar dentro de unos 5.500 millones de años<sup>7</sup>. El periodo durante el cual una estrella vive como gigante roja<sup>8</sup>, en comparación con el de la secuencia principal, es extremadamente corto: apenas dura unos 500 millones de años. En esta fase el Sol tiene, como decíamos, un tamaño gigantesco. Su núcleo brilla intensamente, pero las capas externas no reciben ya casi energía, y son como un tenue velo de materia solar que envuelve a la estrella a centenares de millones de kilómetros. Esta delicada conexión física que enlaza el núcleo con el exterior del Sol sufrirá un repentino y fatal estremecimiento cuando el centro de la estrella emane las últimas andanadas de radiación, obligando al material enrarecido a desprenderse de la sutil gravedad que todavía les mantiene unidos a la estrella; entonces, ésta se partirá en dos. Tal escisión, sin embar-



go, no implicará la muerte directa del Sol: el núcleo continuará su ciclo vital en forma de un nuevo tipo de estrella, como veremos, mientras que las regiones externas, expelidas finalmente por la radiación solar, formarán una concha de gas que envolverá al astro e irá expandiéndose con la postrera presión solar.

La concha o envoltorio gaseoso que rodeará al Sol será excitado gracias a una ráfaga de poderosas radiaciones ultravioletas que saldrán a chorro de la estrella y en todas direcciones, radiaciones características de un sol en esta fase de su vida, capaces de calentar el gas hasta los 25.000 grados. La radiación acabará siendo absorbida por la propia nebulosa y reemitida al espacio, circunstancia que nos permitirá apreciarla; las capas más externas de la estrella, desligadas, no brillarán porque no les alcanzará la radiación ultravioleta (están demasiado alejadas), pero sí lo hará el material gaseoso expulsado, difuminándose con posterioridad por el espacio y enriqueciendo, como hicieran las supernovas anteriores, las nubes de material interestelar con residuos químicos pesados que el Sol habrá sintetizado en su núcleo antes de su disociación. La concha de material nebuloso que rodeará al viejo Sol a la sazón se denomi-

na *nebulosa planetaria* (figura 9).

La envoltura gaseosa que constituirá la nebulosa planetaria tendrá una temperatura de alrededor de 12.000 grados, el doble de la que hoy presenta el Sol en su superficie, y la expansión del gas será de 20 km/s (o 70.000 kilómetros por hora). Una propagación tan rápida, ocupando cada vez más y más volumen, perderá su brillo en poco tiempo, y al difuminarse, tenderá también a que su temperatura disminuya; por ello, la etapa de nebulosa planetaria es el estado vital de una estrella de tipo solar que más velozmente transcurre; se calcula que la concha gaseosa se convierte en inobservable en un tiempo tal vez no mayor de 50.000 años.

La belleza fugaz de las nebulosas planetarias testimonia la muerte de las capas externas de la estrella, que acabarán mezcladas con el espacio interestelar; pero no la del propio Sol, como hemos dicho. En el centro de la nebulosa planetaria, en efecto, todavía vivirá el Sol, convertido ahora en residuo estelar llamado *enana blanca*.

Las enanas blancas fueron intuitas por Bessel cuando detectó que Sirio sufría ciertas oscilaciones en su movimiento, pero fue el óptico y astrónomo estadounidense Alvan Clark (1832-1897) quien, en 1864, localizó dicho astro, al que llamó *Sirio B*. Era brillante, pero estaba tan cerca de Sirio que su detección había sido imposible hasta ese momento. Sin embargo, Sirio B era muy diferente a su compañera mayor: para provocar las irregularidades en la estrella principal, Sirio B debía ser muy masiva, y mostrar un tamaño gigantesco; mas se reveló que tenía dimensiones de tan sólo 30.000 kilómetros, siendo su masa cercana a la solar. Así pues, una estrella tan pequeña, en la que estaba comprimida la materia de un astro habitualmente cien veces mayor, tendría una densidad elevadísima, mucho mayor que la de cualquier cosa conocida en la Tierra<sup>9</sup>.

El Sol será una enana blanca (figura 10) tras una ligera disminución de su temperatura y luminosidad, posterior a la creación de la nebulosa planetaria. Cuando ésta se disi-



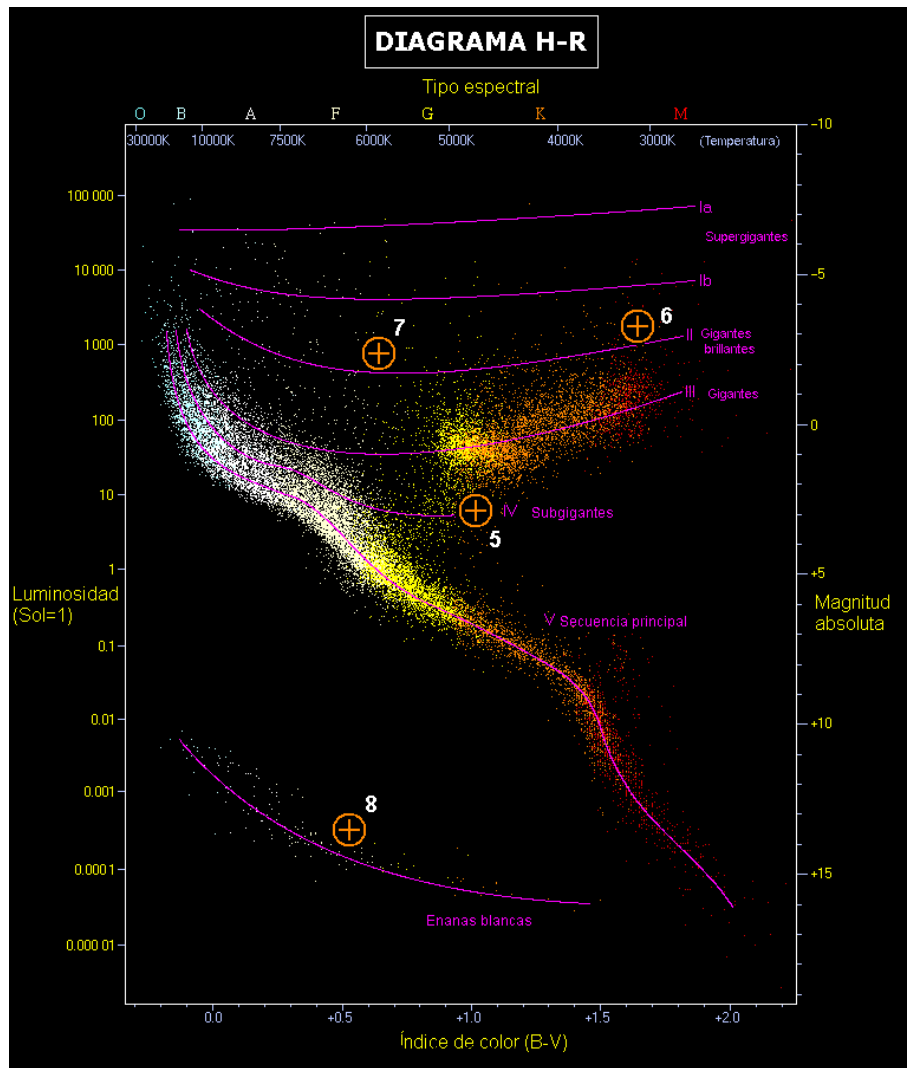
FIGURA 9: LA NEBULOSA PLANETARIA HÉLICE (AUNQUE A VECES SE LE LLAMA TAMBIÉN "OJO DE DIOS"), EN LA CONSTELACIÓN DE ACUARIO. DENTRO DE UNOS 5.000 MILLONES DE AÑOS ÉSTE SERÁ EL ASPECTO DEL SOL. (NASA, ESA, C. R. O'Dell [VANDERBILT UNIVERSITY], M. MEIXNER Y P. McCULLOUGH [STScI])

pe, el astro ya no albergará en su núcleo nada que pueda fusionar: ni hidrógeno, ni helio, ni carbono, ni oxígeno... Nada que proporcione energía, porque los elementos pesados estarán mezclados y asociados a una masa uniforme de electrones que han sido arrancados de sus átomos originarios por las condiciones extremas y porque la estrella no puede alcanzar de ninguna manera los requerimientos térmicos y de presión para iniciar cualesquiera tipos de reacciones nucleares.

Aun así, el Sol no colapsará porque, aunque la gravedad quiera comprimirlo, el gas estará ya tan aplastado en su interior que los electrones ejercerán entre ellos cierta presión hacia afuera. Esta presión no está relacionada con la temperatura que alcanza el gas sino que depende de su densidad: al alcanzar la materia una notable compresión, la presión (llamada *cuántica*) es justo la necesaria para evitar que la gravedad colapse el astro. Como

la estrella tampoco puede expandirse, dentro de unos 6.000 millones de años el Sol vivirá, sorprendentemente, un nuevo e inesperado periodo de estabilidad. Esta estabilidad, que puede ser de larga duración quizá el Sol sea enana blanca durante cientos o incluso miles de millones de años, está marcada, sin embargo, por la inexistencia de fuentes de energía en el núcleo solar: lo que persiste en el palpitante interior del Sol son meras cenizas nucleares, y sólo la compresión extrema de la materia en el interior de la enana blanca permite que el astro brille; pero su brillo será lánguido, como el último latido de un cuerpo mortecino, que irá consumiendo su calor residual, extinguiendo su luz y desapareciendo, lentamente, del escenario de la galaxia.

El último trance de la vida solar será su conversión en *enana negra*, dentro de 7.000 millones de años. No hemos visto nunca una estrella así porque, en realidad,



PUNTO 5 (INSTANTE FINAL EN LA SECUENCIA PRINCIPAL), EL SOL SE CONVERTIRÁ EN UNA GIGANTE ROJA (PUNTO 6). TRAS EL ÚLTIMO SUSPIRO DE LA GIGANTE ROJA, EXPULSARÁ SU ATMÓSFERA EXTERNA Y SE TRANSFORMARÁ EN NEBULOSA PLANETARIA (PUNTO 7). DESPUÉS EL SOL RESIDUAL QUEDARÁ INERTE E INEVITABLEMENTE DESTINADO A LA DESAPARICIÓN, COMO ENANA BLANCA (PUNTO 8, AUNQUE SU BRILLO REAL ES AÚN MENOR QUE LO INDICADO). LA ÚLTIMA FASE SOLAR SERÁ LA DE ENANA NEGRA.

es una especie de cadáver estelar, invisible e indetectable. Toda enana negra, astro extremadamente frío y de luz ahogada, es tan tenue que ni los más potentes telescopios podrían captar su resplandor. A partir de su conversión en enana negra el Sol irá disipando su último suspiro al espacio interestelar, y su núcleo abandonará toda actividad, agotado de tantas emociones durante 12.000 millones de años (figura 11).

Desde una perspectiva estelar, la muerte del Sol es sólo un paso más en la continua contribución de materiales pesados en el Universo; nuestra estrella también enriquecerá el espacio con frescos ingredientes que podrán ser asimilados por nuevos astros en formación. Esto sugiere que no hay, por así decirlo, una muerte "real" en el Cosmos; la materia sólo se reorganiza y da lugar a nacientes planetas y estrellas, fruto de un

reciclaje continuo y sutil. Esta forma de reutilizar lo inservible ha transformado el Universo, ha permitido la conversión de materia en energía y energía en luz que, combinadas, han desarrollado moléculas orgánicas hasta dar lugar a la vida; y, por lo menos en la Tierra, esa vida ha evolucionado hasta que una inteligencia, la nuestra, ha emergido para tratar de hallar cuál es su conexión con las estrellas.

### (Notas al pie)

<sup>1</sup> Intervalo cercano al que media, por ejemplo, entre el momento de la fecundación del óvulo por parte del espermatozoide y el posterior alumbramiento del recién nacido. Podría, por tanto, hacerse un bonito paralelismo entre la vida de las estrellas y la humana: una supernova inyecta a la nebulosa la energía necesaria para colapsarla y dotarla de elementos pesados (los espermatozoides, generalmente uno, fecundan a su vez el óvulo), y tras un tiempo en que la nebulosa crece y se arremolina, aumentando de tamaño y recabando materia (el feto hace exactamente lo mismo dentro del útero materno mediante la placenta), la nebulosa se convierte en un astro empezando las reacciones nucleares e iniciando en el Cosmos su viaje particular a través de la Vía Láctea (el parto marca también el inicio del camino individual de todos nosotros). Y esta analogía se repite en las restantes etapas de la vida solar y humana.

<sup>2</sup> En realidad la posición es algo falsa, pero sirve para nuestros propósitos básicos...

<sup>3</sup> Suma de los pesos atómicos de todos los átomos que constituyen una molécula: el peso atómico del hidrógeno es 1 *uma* (unidad de masa atómica), 4 *uma* en el caso del helio, etc.

<sup>4</sup> Aunque digamos que la luminosidad solar de antaño fue superior, en un 30%, a la actual en los primeros millones de años de existencia, y probablemente todavía mucho después... Es difícil contar todos los matices y detalles...

<sup>5</sup> Es posible que incluso los océanos terrestres se evaporen si el Sol aumenta su luminosidad un treinta por ciento más; es probable que ello suceda tal vez dentro de unos 4.000 millones de años, cuando el Sol haya agotado totalmente la disponibilidad del hidrógeno.

<sup>6</sup> Paradójicamente el ocaso del Sol tal vez signifique el despertar de otros mundos. Las lunas de Júpiter, sobretodo Ganimedes y Europa, aumentarán bastante su temperatura superficial y cabe pensar que la costra de hielo que recubre toda su faz se resquebraje y se funda. Quizá consigan retener una pequeña atmósfera, convirtiéndose en mundos habitables. Y en Titán, una mayor luminosidad del Sol propiciaría un efecto invernadero importante, elevando la temperatura (que

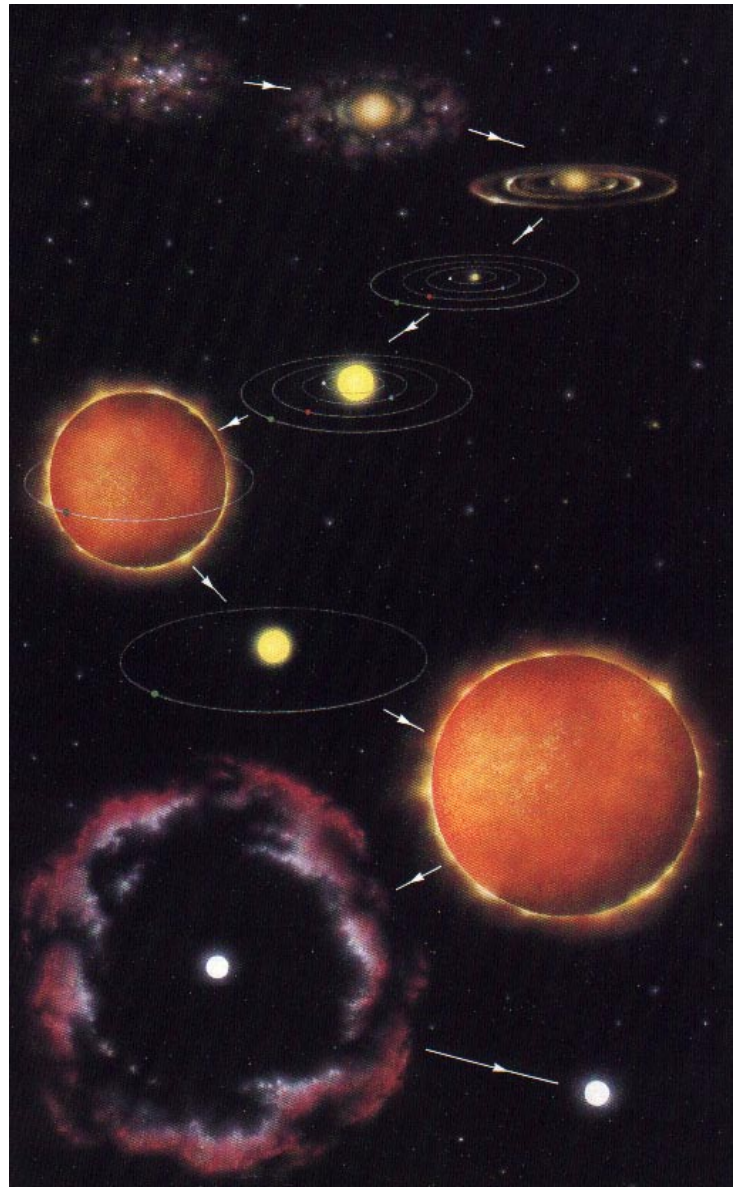


FIGURA II: LA EVOLUCIÓN DEL SOL (de ARRIBA ABAJO): NEBULOSA PROTOPLANETARIA, DISCO DE GAS Y POLVO, SISTEMA PLANETARIO, ESTRELLA DE SECUENCIA PRINCIPAL, SUB-GIGANTE ROJA, GIGANTE ROJA, NEBULOSA PLANETARIA Y ENANA BLANCA.

hoy es de  $-180^{\circ}\text{C}$ ) y facilitando quizá la formación de formas biológicas desconocidas en la Tierra.

<sup>7</sup> Este valor, y los que hemos estado citando hasta ahora, son muy aproximados. En astronomía, este tipo de inexactitudes son corrientes, disculpables dado que tratamos con periodos temporales tan dilatados.

<sup>8</sup> En el diagrama de la figura 10 (ver más adelante) habrá realizado un recorrido pasando del punto 5 al punto 6, arriba a la derecha (es decir, cada vez más fría y luminosa).

<sup>9</sup> Y así es. Digamos que la densidad de la materia de una enana blanca es similar a más de un millón de veces la del agua y diez mil la del hierro; o, más gráficamente, que en el volumen de un simple terrón de azúcar el material de la enana blanca pesaría más que una tonelada.