

La entropía y el sistema solar

Rafael Andrés Alemañ Berenguer



Revista Digital de ACTA

2015

Publicación patrocinada por



La entropía y el sistema solar

© 2015, Rafael Andrés Alemañ Berenguer

© 2015, 

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley.

Se autorizan los enlaces a este artículo.

ACTA no se hace responsable de las opiniones personales reflejadas en este artículo.

INTRODUCCIÓN

Entre las preguntas que desde el comienzo del pensamiento racional aguijonearon el espíritu humano destaca la cuestión referida a la perdurabilidad del cosmos y la repetibilidad indefinida de los procesos naturales. En otras palabras, ¿todo permanece esencialmente igual a través de los continuos ciclos de la naturaleza? ¿o puede distinguirse en ellos una dirección, una tendencia susceptible de ser desvelada por una paciente indagación científica?

La respuesta a tan trascendente cuestión llegó de la mano de la termodinámica, una rama de la física fuertemente emparentada en sus orígenes con el uso y la explotación de la maquinaria durante la Revolución Industrial. Los ingenieros encargados de obtener el máximo rendimiento a sus factorías, estaban muy interesados en descubrir si existía algún procedimiento para incrementar la cantidad de trabajo útil extraíble de las máquinas que allí se empleaban. Un asunto en apariencia tan mundano, implicaba en realidad profundas investigaciones acerca de la transformación de la energía en trabajo y calor.

Los físicos del siglo XIX se enzarzaron en tales estudios no tanto por las repercusiones industriales que de ellos se pudieran desprender, como por los avances en la comprensión de las características de un concepto capital de la física, cual es el de la energía. Los resultados de sus esfuerzos alumbraron la mayor parte de lo que todavía hoy se estudia bajo el nombre de termodinámica.



Figura 1. La máquina de vapor fue otro de los resultados de la Revolución Industrial que impulsó poderosamente las investigaciones en termodinámica.

El término en sí es suficientemente sintomático, pues se deriva de las raíces griegas *termos* (“calor”) y *dynamis* (“fuerza”), indicando con ello la atención dedicada por sus cultivadores a desentrañar las relaciones entre los focos de calor y las fuerzas motrices que éstos podían ejercer.

El cuerpo teórico de la termodinámica se asienta sobre un conjunto de leyes que parecen ser soberanas en todos los campos de la naturaleza, y actuar como principios genuinamente fundamentales del mundo físico. La primera ley termodinámica enuncia que la energía no se crea de la nada ni se desvanece sin más, sino que tan solo se transforma ordenadamente de unos tipos en otros. Los principales procesos mediante los que se transfiere la energía de unos sistemas a otros, son el trabajo y el calor.

Cuando un remolcador arrastra una embarcación averiada hasta la costa, la energía generada por el motor de la nave remolcadora se emplea en el arrastre de la nave remolcada y decimos que la primera realiza un trabajo sobre la segunda. En cambio, si el remolcador permanece amarrado a puerto con el motor en marcha, el único efecto conseguido será calentar sus piezas y engranajes; la energía del motor se ha disipado como calor.

En los dos casos expuestos nada de la energía producida se ha perdido; simplemente en el primero se ha transmitido a otro cuerpo como trabajo, y en el segundo se ha transferido al ambiente como calor. La primera ley de la termodinámica –“ley de conservación de la energía”– determina la imposibilidad de que las máquinas funcionen sin combustible o cualquier otra fuente de energía motriz. Esto es lo que se conoce como “imposibilidad del móvil perpetuo de primera especie”, pues de lo contrario la energía que mantuviese la máquina en funcionamiento habría aparecido de la nada.

LA LEY DE LA ENTROPÍA

Esta primera ley de la termodinámica, sin embargo, nada establece sobre el grado en que una determinada cantidad de energía puede convertirse en trabajo útil. Este era un asunto de primera magnitud para los ingenieros decimonónicos dedicados a la termodinámica por motivos profesionales. Ellos sabían que cuando un motor está en marcha, tanto produce trabajo como calor, y eran asimismo conscientes de que cuanto mayor fuese el calor generado menor era el trabajo útil obtenido. Sería muy conveniente –se dijeron– conocer las normas que regulan esta clase de situaciones.

La termodinámica aportó de nuevo la solución a través de su segundo principio, o “ley de la entropía”. En su versión más simplificada declara que cualquier sistema físico debe poseer dos de sus partes a diferente temperatura si deseamos obtener de él algún trabajo útil. Definiendo una magnitud denominada *entropía* como la cantidad de energía transferida en forma de calor desde la parte caliente a la fría dividida entre la temperatura a la que sucede la transferencia, resulta que el trabajo útil extraíble de un sistema es inversamente proporcional a su entropía. Cuando la entropía en un sistema dado alcanza un valor máximo, éste se mantiene constante con el tiempo, el trabajo útil extraíble es cero, y la temperatura se hace la misma en todas sus partes.

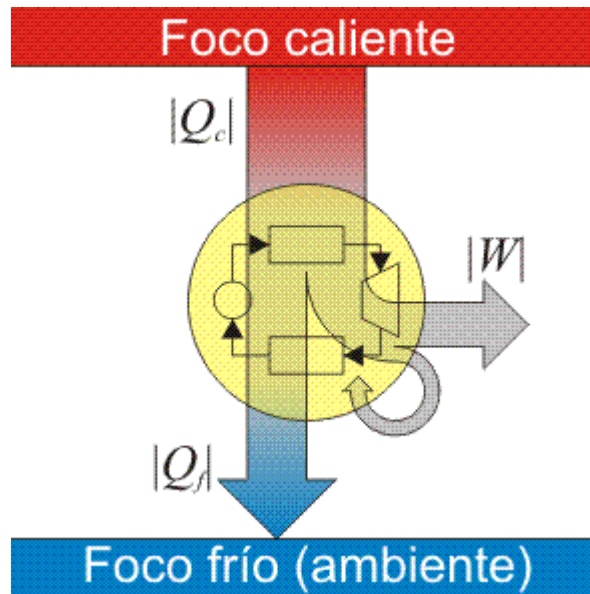


Figura 2. Una máquina real sólo puede funcionar cuando hay una diferencia de temperaturas de la que extraer trabajo útil

La entropía se entiende así como una forma “degradada” de la energía, en la cual no puede ser empleada para realizar trabajo alguno. En la práctica el rendimiento mecánico de un proceso, η , se expresa mediante la igualdad $\eta = 1 - (T_{\text{frío}} / T_{\text{caliente}})$, donde aparecen las temperaturas del foco frío y del caliente. Cuando la entropía es máxima, $T_{\text{frío}} = T_{\text{caliente}}$, y el rendimiento se anula incluso aunque utilizásemos una maquinaria ideal sin fricción entre sus piezas.

En otras palabras, ni siquiera en un mecanismo ideal sin rozamiento la energía invertida puede convertirse íntegramente en trabajo; una porción de ella se disipará siempre como calor. Sólo si $T_{\text{frío}} = 0 \text{ K}$ el rendimiento será la unidad. Sin embargo, el tercer principio de la termodinámica proclama precisamente la imposibilidad física de acceder al cero absoluto de temperaturas.

Otro modo de expresar la segunda ley de la termodinámica es el que establece que en un sistema aislado –uno que no intercambia materia ni energía con su entorno– la entropía siempre aumenta o, en caso de alcanzar su máximo, permanece constante, pero jamás disminuye por sí sola. A ello se debe que las máquinas se desgasten, las rocas se erosionen y la vitalidad de los organismos decaiga. No es cierto, pues, que el comportamiento cíclico de la naturaleza no introduzca en ella cambios sustanciales. De un modo u otro, la entropía siempre acaba creciendo, la energía se degrada en su capacidad de producir trabajo, y la temperatura tiende a hacerse uniforme por todo el universo.

Esta circunstancia nos brinda un peculiar procedimiento para distinguir el pasado del futuro, pues los estados de mayor entropía serán los que se encuentren en el futuro de aquéllos con entropía menor, y este es un hecho tan esencialmente irreversible como el mismo paso del tiempo. Imaginemos que proyectan ante nosotros una película donde se ve un péndulo oscilando de derecha a izquierda. Sin mejores detalles nos resultaría imposible decidir si la película estaba siendo proyectada hacia delante o hacia atrás, ya que en ambos casos el péndulo se limitaría a oscilar de un lado a otro.

Pero si en esa filmación apareciese un charco de agua derramada saltando para retornar al vaso del que había caído, no abrigaríamos dudas de que estaba siendo proyectada a la inversa. El agua derramada no regresa espontáneamente a su recipiente, ni los jarrones de porcelana china –por desgracia– se recomponen de sus pedazos por sí mismos cuando caen al suelo. El transcurso del tiempo desde el pasado hacia el futuro viene marcado en física por el crecimiento de la entropía en la naturaleza, fenómeno que se designa como “la flecha termodinámica del tiempo”.

El siguiente paso de importancia en la historia de esta ciencia se dio por obra del físico austriaco Ludwig Boltzmann (1844-1906), una de las más esclarecidas mentes de su tiempo y pionero en muchos de los conceptos que hoy son de uso cotidiano para todos los profesionales de la física. De entre los grandes méritos de Boltzmann, el que aquí más nos interesa se refiere a su novedosa manera de enfocar el estudio de la termodinámica. Boltzmann fue el primero en apelar a la estructura microscópica de la materia como base y justificación de los intercambios de energía que la termodinámica anterior a él sólo había estudiado desde un punto de vista macroscópico.



Figura 3. Ludwig Boltzmann

Para lograrlo hubo de admitir como punto de partida la existencia de los átomos como microcomponentes individuales de la materia, y aplicarles métodos estadísticos a fin de inferir la conducta colectiva de grandes cantidades de ellos. Semejante decisión le enfrentó por un lado con W. Ostwald y los llamados “energetistas”, físicos convencidos de que la hipótesis atómica de la materia era tan superflua como imposible de probar, y por otro con quienes repudiaban el uso de la estadística en la ciencia física, hasta entonces caracterizada por la perfección y exactitud de sus predicciones. Estos dos arduos frentes de oposición enredaron a Boltzmann durante años en amargas disputas, las cuales, probablemente, acentuaron los amagos depresivos de su temperamento que finalmente le llevaron al suicidio.

Su obra, empero, sobrevivió largamente a la desaparición de su autor y a la resistencia de sus detractores, encarnándose hoy en un campo de la física tan imponente como la termodinámica estadística. En ella se relaciona la temperatura con la energía cinética de vibración de los componentes microscópicos de un sistema, y la entropía con el grado de desorden de éstos. Que un vaso de agua se halle a 50°C significa que sus moléculas vibran con una cierta medida de energía cinética menor que las de otro vaso, digamos, a 30°C.

Asimismo, las moléculas del agua desparramada por el suelo presentan un mayor grado de desorden que cuando se encontraban todas reunidas en el interior del recipiente que las contenía. En opinión de Boltzmann, los sistemas físicos evolucionan hacia sus estados más probables y permanecen en ellos indefinidamente cuando tras un cierto tiempo los alcanzan. Por tanto, podríamos decir con el físico austriaco que la segunda ley de la termodinámica no obliga al crecimiento ineludible de la entropía; más bien determina que su aumento sea extraordinariamente más probable que su disminución.

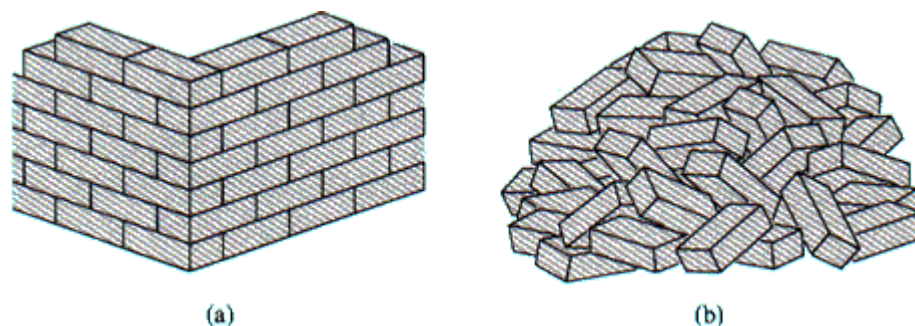


Figura 4. La configuración (a) está más ordenada –posee menos entropía– que el estado (b)

Recurramos de nuevo a un ejemplo lo más gráfico posible. Cuando dejamos abierto un frasco de colonia durante un caluroso día de verano, es de esperar que si tardamos mucho en regresar por él lo encontremos prácticamente vacío. La elevada temperatura ambiente ha suministrado a las moléculas de colonia la energía cinética necesaria para desligarse unas de otras y comenzar a flotar en el aire: la colonia se ha evaporado.

Indudablemente el grado de desorden de las moléculas de colonia cuando flotan por todo el volumen de la habitación, es superior al que exhibían cuando estaban todas concentradas en el interior del frasco, aunque sólo sea porque en el primer caso tienen bastante más espacio para moverse que en el segundo. Pero no es del todo imposible, desde este punto de vista, que por una casual coincidencia de sus movimientos la totalidad de las moléculas de colonia volviesen a reunirse en el interior del frasco del que escaparon; tan sólo resulta extremadamente improbable.

Trabajos recientes del químico y premio Nóbel Ilya Prigogine aplicando la dinámica no lineal a los sistemas termodinámicos, parecen indicar que tal improbabilidad es realmente infinita, por lo que a todos los efectos podría mantenerse el planteamiento de que la segunda ley de la termodinámica es inviolable y el crecimiento de la entropía indefectible.

Las consecuencias de la ley de la entropía para los seres vivos, distan mucho de resultar alentadoras. La vida se sostiene gracias al flujo constante de energía que los organismos reciben de su exterior en forma de luz, calor, alimentos y –los que respiren– oxígeno. Cuando la entropía sea máxima en el universo, todas las regiones igualarán sus temperaturas, cualquier flujo de energía cesará y la vida se tornará insostenible.

La degradación energética implícita en el aumento de entropía, entraña que finalmente no quedará energía útil para impulsar las delicadísimas reacciones químicas que constituyen el soporte vital de los organismos. A fin de cuentas, todos nuestros alimentos proceden directa o indirectamente de la actividad vegetal, bien porque consumamos las mismas plantas, o bien porque consumamos animales alimentados a su vez con vegetales. Las plantas sustentan su metabolismo con la energía luminosa que reciben del Sol, y el Sol sigue luciendo a causa de las reacciones nucleares que acaecen en su seno.

Pero toda esa cadena se basa en procesos que aumentan día a día la entropía del conjunto. En algún momento del futuro nuestra estrella agotará su combustible nuclear y cualquier rastro de vida en la Tierra se extinguirá. Nada podremos hacer por evitarlo, ni aunque la tecnología haya alcanzado cotas suficientes para trasladarnos a vivir en otro sistema estelar, pues más tarde o más temprano la entropía reinará por doquier en el cosmos.

LA DESAPARICIÓN DEL SISTEMA SOLAR

El triunfo de la ley de la entropía sobre el desequilibrio térmico hoy presente en la naturaleza no tendrá lugar de modo súbito sino gradualmente. Una simple observación del firmamento demuestra que nuestro universo se halla muy alejado de un estado de equilibrio en el que la entropía sea máxima. Los minúsculos puntos brillantes que contemplamos en el cielo nocturno, como incandescentes cabezas de alfiler prendidas en un hermoso acerico negro, son estrellas ardientes separadas entre sí por inmensas distancias de gélido espacio vacío.

De haberse alcanzado un equilibrio térmico universal, no nos encontraríamos con tan acusadas diferencias de temperatura. Las estrellas, por consiguiente, terminarían por apagarse y sus restos igualarían su temperatura a la del espacio circundante. Pero antes de que ello ocurra, habrán tenido lugar muchos otros fenómenos interesantes de degradación en los sistemas ordenados.

El más evidente de ellos es la perturbación que en la rotación terrestre introducirán las fuerzas gravitatorias de marea producidas por el Sol y la Luna. En el capítulo precedente vimos que los efectos gravitacionales de marea provocan una fricción de los mares y océanos contra las tierras emergidas, que frena lentamente la rotación de nuestro planeta sobre su eje. El día, tomado como el periodo de rotación terrestre, se alarga una milésima de segundo en cada siglo.

Ahora bien, las leyes de conservación impuestas por la física, exigen que el momento angular perdido por la Tierra se transfiera en primer lugar a la Luna. A resultas del momento angular ganado, nuestro satélite¹ se alejará de la Tierra incrementando el tamaño de su órbita y la duración del mes lunar

¹ Por la misma razón se calcula que hace 4.000 millones de años, la Luna se situaba a unos 16.000 km de centro de la Tierra, el día terrestre era de cinco horas y el mes lunar duraba algo más que uno de esos días.

(tiempo tardado por la Luna en completar su órbita). Dentro de muchos miles de años este proceso conducirá a la igualación final entre el mes lunar y el día terrestre, ambos equivalentes a 47 de los actuales días terrestres de 24 horas. Entonces la Tierra presentará siempre la misma cara a la Luna, la cual será perpetuamente visible en uno solo de los hemisferios, el occidental o el oriental.

Cuando todo esto haya ocurrido, la fuerza de marea debida al Sol ocupará el lugar de la de la Luna frenando todavía más el giro terrestre. Esta influencia producirá un nuevo acercamiento de la Luna a la Tierra, mientras que ambos se alejan progresivamente del Sol. La excesiva proximidad de nuestro satélite ocasionará efectos gravitacionales desastrosos sobre la superficie terrestre. Mareas oceánicas de decenas de metros arrasarán las costas y gran parte de la extensión de todos los continentes, provocando la desaparición de numerosas islas y archipiélagos.

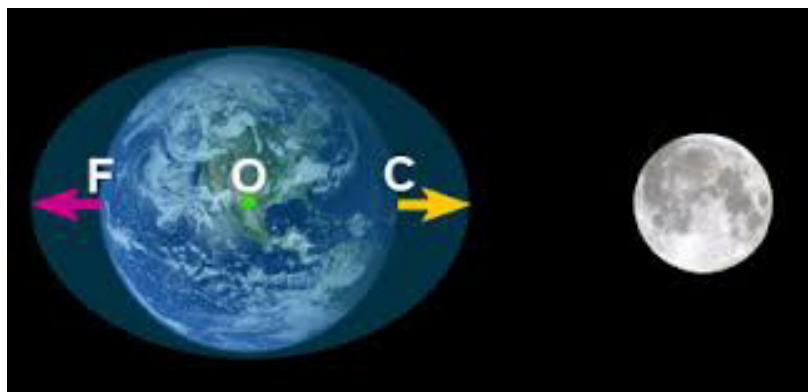


Figura 5. Las mareas gravitatorias frenan nuestro planeta

Las tensiones ejercidas sobre el mismo material rocoso del interior terrestre se propagarían como ondas de un hemisferio al otro causando gigantescos terremotos y erupciones volcánicas sin parangón. Una vez que nuestro satélite haya reducido su distancia a la Tierra a menos de unos 16.000 km, habrá traspasado el límite de Roche, distancia dependiente de la masa de cada cuerpo celeste a partir de la cual su fuerza de marea es capaz de despedazar cualquier objeto en órbita a su alrededor. Así, la Luna se verá convertida en escombros que compondrán en torno a la Tierra un anillo como el de Saturno.

La acción de las mareas gravitacionales solares proseguirá aun después de la destrucción de la Luna, hasta que el periodo de rotación de la Tierra sobre su eje se equipare al de su órbita en torno al Sol, el cual durará para entonces unas cuantas semanas más que en la actualidad. En ese momento nuestro planeta presentará ya para siempre la misma cara hacia el Sol, de modo que ese hemisferio quedará convertido en un desierto abrasador donde la vida se hará imposible.

Por el contrario, el lado opuesto pasará a cubrirse con fabulosas cortezas de hielo cuyo grosor se contará por centenares de metros. La vida –si algo de ella resiste tras tan formidables cataclismos– únicamente resultaría sostenible en una estrecha franja, tal vez unos cientos de kilómetros, entre ambos hemisferios, suponiendo, desde luego, que el alejamiento del Sol mencionado antes no haya transformado la totalidad del planeta en una inhóspita bola de nieve.

El único consuelo que puede aportarse ante tan lóbregas perspectivas es que antes de que todo esto suceda habrán tenido lugar en el propio Sol cambios mucho más espectaculares y dramáticos para nosotros. Tales alteraciones están estrechamente relacionadas con la composición química y la masa de las estrellas, características estas que deciden su destino final y el del séquito de planetas que acaso las acompañe. El género y proporción de los elementos químicos contenidos en las estrellas o en cualquier objeto astronómico, se determinan de modo muy similar al empleado con cualquier muestra en un laboratorio terrestre. En ambos casos la herramienta primordial del análisis es la luz emitida o absorbida por el elemento a especificar, actividad a la que técnicamente se conoce como *espectroscopía*.

EL DESTINO DE LAS ESTRELLAS

Pensemos en una muestra de un elemento a la que se obliga a emitir luz mediante una descarga eléctrica u otro procedimiento cualquiera. La luz despedida se hace pasar por una rendija para enfocarla como un estrecho haz luminoso, y luego atraviesa un prisma detrás del cual se coloca una pantalla o una placa fotográfica. Sobre ella se observará una serie de líneas de colores, correspondientes a la descomposición de la luz emitida en las distintas longitudes de onda que contenía.

El conjunto de estas líneas constituye el llamado “espectro” (electromagnético) de un elemento, una marca de identificación tan particular e intransferible como la huella dactilar de un individuo. En lugar de un espectro de emisión, como era éste, podemos contar también con uno de absorción, originado por la ausencia de unas líneas debidas a la absorción de ciertas longitudes de onda por un elemento en estado gaseoso a través del cual se ha hecho pasar un haz de luz blanca.

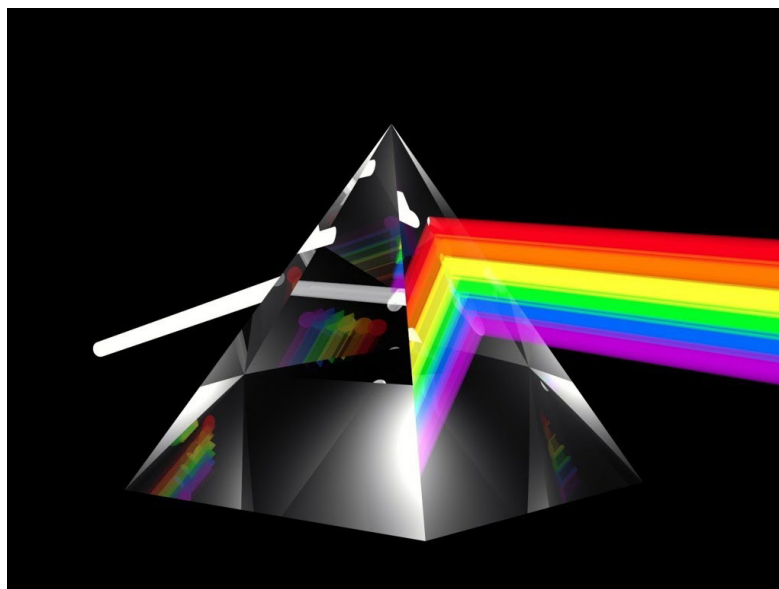


Figura 6. Un rayo de luz blanca se descompone en colores al atravesar un prisma de vidrio

El espectro de la radiación emitida por las estrellas se realiza de manera análoga, enfocando en primer lugar mediante un telescopio la luz del astro sobre los dispositivos pertinentes. A partir del estudio de

las líneas registradas, es posible deducir abundante información sobre la presión y la temperatura estelares, así como la propensión a irradiar o absorber de los átomos y las energías puestas en juego.

Una de las conclusiones, a la vez más importantes y menos resonantes de los primeros análisis espectroscópicos, fue la constatación de que todo lo que conocemos en el universo se halla constituido por los mismos elementos presentes en la Tierra. Ello, pese a su aparente insignificancia, refuerza nuestra seguridad en el hecho de que las leyes de la naturaleza son las mismas con independencia del lugar del cosmos donde nos encontremos. Así, por lo menos, cuando nuestras investigaciones se vean recompensadas por el éxito, sabremos que nuestros descubrimientos gozarán de validez universal.

La mayor parte de la vida de una estrella corriente discurre transformando hidrógeno en helio por medio de las oportunas reacciones nucleares. La radiación desprendida en tales reacciones –parte de la cual sale al exterior y, por ejemplo, llega a la Tierra en el caso del Sol– equilibra con su presión la tendencia de la masa estelar a comprimirse sobre sí misma por causa de su propia gravedad. En un diagrama en el que se represente la luminosidad en función de la temperatura, o diagrama H-R, el 98% de las estrellas se agrupan en una zona llamada por ello *secuencia principal*.

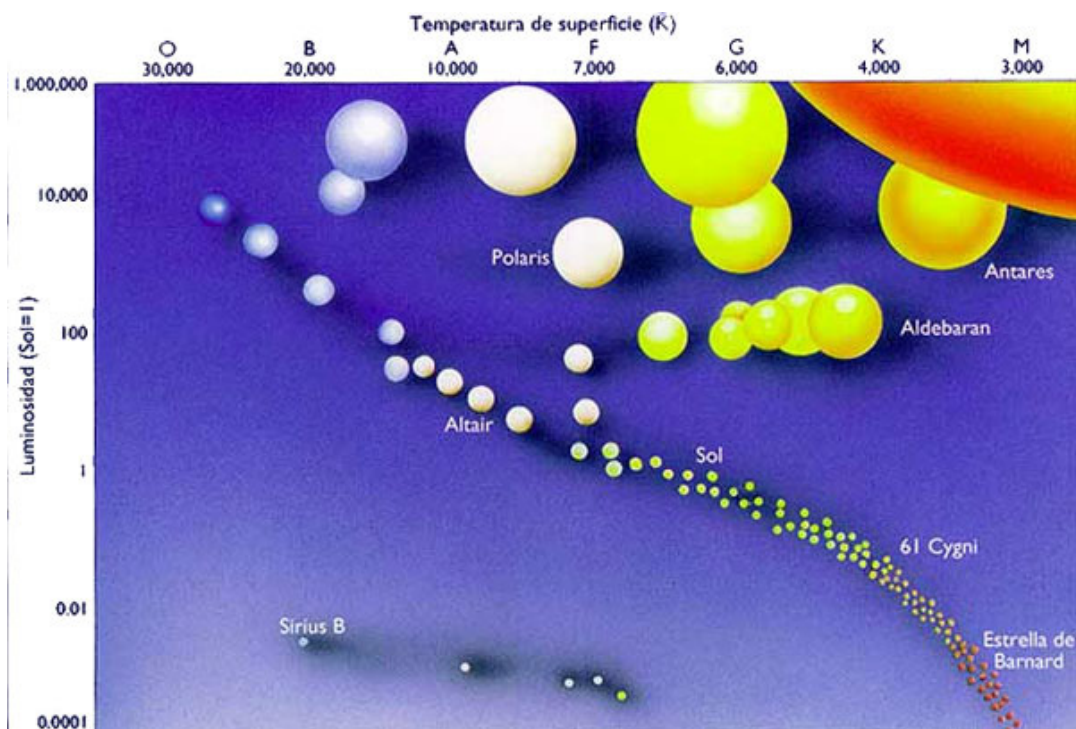


Figura 7. Ejemplo del diagrama H-R, donde la aparece la secuencia principal

Como sabemos, los átomos son los constituyentes microscópicos de la materia, formados ellos mismos a su vez por partículas llamadas protones (con carga eléctrica positiva), neutrones (sin carga) y electrones (carga negativa). Los protones y los neutrones se concentran en el núcleo, mientras los electrones permanecen en la corteza externa del átomo. El número de protones de cada núcleo –el *número atómico*– define el tipo de elemento químico de que se trate, de manera que las reacciones nucleares

producidas en las estrellas modifican la cantidad de protones de ciertos núcleos para convertirlos en otros.

El proceso no es sencillo por cuanto que las cargas eléctricas del mismo signo se repelen y, por tanto, la repulsión de los protones que se combinan para formar núcleos más pesados debería descomponerlos al instante. Si no es eso lo que ocurre, hemos de agradecerlo a la interacción nuclear fuerte, una fuerza de corto alcance que opera en todos los núcleos atómicos y predomina sobre la repulsión eléctrica.

Las principales vías para convertir hidrógeno en helio, son dos: el ciclo protón-protón, o ciclo de Bethe, y el ciclo del carbono, o ciclo de Critchfield. El primero precisa para tener lugar temperaturas superiores a $2 \cdot 10^7$ K e inferiores el segundo.

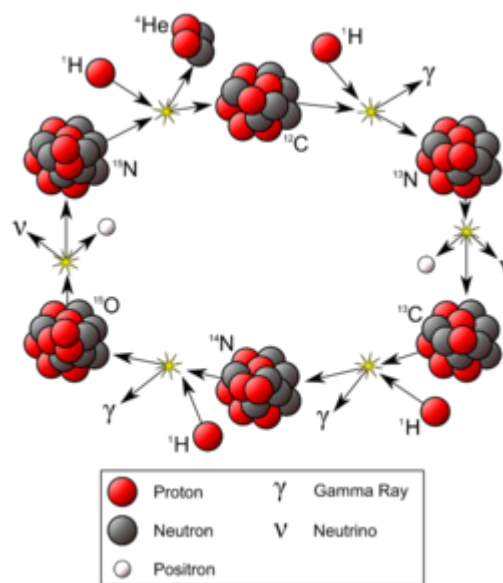


Figura 8. El ciclo nuclear del carbono

En cada ciclo cuatro átomos de hidrógeno son transformados en uno de helio, o mejor dicho –ya que la enorme temperatura del interior del Sol escinde los átomos en un amasijo de núcleos y electrones– cuatro protones (núcleos de hidrógeno) se convierten en una partícula alfa (un núcleo de helio).

A medida que la cantidad de hidrógeno disminuye, la energía producida en estas reacciones decrece, y el equilibrio entre la atracción gravitacional y la presión de la radiación se ve alterada. La fuerza gravitatoria se hace preponderante sobre la presión de radiación, el corazón de la estrella se contrae a la vez que las capas exteriores se expanden hasta tamaños fabulosos, y la evolución del astro entrará en la etapa llamada “de gigante o supergigante” dependiendo de su masa. Una estrella de tipo solar permanece unos diez mil millones de años en la secuencia principal, a diferencia de las más ligeras, que resisten más tiempo, o las más masivas, que evolucionan más deprisa.

La senda que desembocará en la muerte de la estrella, depende esencialmente de la masa de ésta. En la fase de gigante roja y a temperaturas de unos cien millones de grados kelvin, entran en escena otras

reacciones que convierten el helio en otros elementos más pesados, como el carbono, el oxígeno y el berilio. No obstante, este género de procesos no suele durar mucho dado que en la etapa de gigante roja la estrella posee mucho menos helio que hidrógeno tenía en su estado anterior. Antes o después el helio acaba por agotarse, lo que conduce a otro colapso gravitacional, la temperatura interior vuelve a aumentar y prosiguen las reacciones nucleares generando elementos químicos más pesados. Las capas exteriores se expanden de nuevo y con ello se enfrían, permitiendo a algunos núcleos recapturar parte de los electrones perdidos. La reunión de núcleos y electrones tiene un precio energético que el átomo reconstituido paga emitiendo radiación, la cual presiona sobre las capas exteriores de la estrella separándolas del resto.

El residuo de este proceso de disgregación es una estrella pequeña, muy densa y muy caliente, llamada *enana blanca*. La altísima densidad de estas estrellas –que puede superar con facilidad un millón de veces la del agua– resulta posible gracias a que en su interior los átomos se hallan totalmente escindidos en núcleos y electrones, y estos últimos pueden ocupar así un volumen mucho menor que cuando formaban parte de los cortezas atómicas. Tan elevada es la temperatura en el corazón de estas estrellas, que los electrones se mueven allí con velocidades próximas a la de la luz y la mecánica de Newton deja de serles aplicable.

Es el turno de utilizar la Teoría de la Relatividad, elaborada por Einstein, en la construcción de modelos sobre las enanas blancas. Así lo comprendió el astrofísico Chandrasekar, quien llegó a concluir que sólo las estrellas de 1,4 veces la masa del Sol pueden ser estables como enanas blancas². Estas estrellas encuentran su definitivo final radiando toda su energía hasta enfriarse y convertirse en una enana negra.

Con valores que excedan las 1,5 masas solares, las temperaturas suelen elevarse tanto como para fusionar el carbono y el oxígeno produciendo neón, sodio, magnesio, fósforo y azufre. Pasan por la etapa de supergigante, pierden quizás algo de masa y después, tras contraerse de nuevo, pueden generar todos los elementos del sistema periódico³. Al alcanzar temperaturas cercanas a los cinco mil millones de grados, se desintegran los núcleos menos estables dejando en el interior de la estrella una variedad de núcleos pesados con predominio del Fe⁵⁶.

Las reacciones de esta última fase son endotérmicas –es decir, requieren aporte de energía para realizarse– y la energía que precisan la obtiene la estrella mediante la contracción gravitacional de sus capas internas en forma de implosión. Así, el rapidísimo colapso del corazón estelar provoca una colosal onda de choque que proyecta hacia el exterior gran cantidad de su masa en una explosión de inimaginable violencia denominada *supernova*.

La enorme cantidad de materia y radiación emitidas (las partículas aceleradas que constituyen los rayos cósmicos, electrones de alta energía, gases incandescentes) es la causa de que el brillo de la estrella que estalla como supernova, sobrepase al de toda la galaxia a la que pertenece. En el curso de este proceso una fracción sustancial de la masa de la estrella sale despedida al espacio enriqueciendo el

² Estrellas de masa superior pueden convertirse en enanas blancas perdiendo algo de ella, en ocasiones por intercambio entre miembros de un sistema binario. Sirio-B y 40-Eridani-B son conocidos ejemplos de ello.

³ A la tabla en la que los elementos químicos aparecen clasificados en orden según su número atómico se la llama “sistema periódico de los elementos”.

medio interestelar con elementos pesados, los cuales tal vez lleguen a configurar planetas u otras estrellas de generación posterior.

Mientras tanto, el corazón interno de la estrella prosigue su colapso comprimiendo la materia que lo forma hasta densidades fantásticas de unos $3 \cdot 10^{14}$ g/cm³, muy por encima de los 10^8 g/cm³ de una enana blanca. A tales presiones y densidades los electrones se aceleran a velocidades próximas a la de la luz, combinándose con los protones para dar neutrones. Lo que queda de la estrella se convierte en un apretado cúmulo de neutrones cuyo contenido apenas puede comprimirse más. Ese estado de la evolución estelar se designa como *estrella de neutrones*, la cual para un valor aproximado de tres masas solares suele contar con un diámetro de entre 10 y 30 km.

Pero si la estrella moribunda posee una masa que supera quince veces la del Sol, ni siquiera una estrella de neutrones es el peldaño final de su declive. Con masas tan importantes, la fuerza gravitacional es demasiado intensa para ser detenida por las presiones internas de los neutrones que ahora forman la estrella. En lugar de eso, el corazón estelar se comprime sin límite hasta un estado en el que su volumen es cero y su densidad infinita.

Toda la masa restante de la estrella se ha concentrado en un punto sin dimensiones –la *singularidad*– donde la gravitación es asimismo infinita. En sus cercanías la atracción gravitatoria disminuye un tanto, aunque de todos modos sigue siendo suficiente para retener incluso los rayos de luz que pasen a una cierta distancia. Como un túmulo terrorífico, la contracción infinita de la estrella se ve rodeada por un tenebroso halo de penumbra; estamos pues ante un *agujero negro*.

Lo cierto es que nuevamente ha de recurrirse a la Teoría de la Relatividad para abordar el tratamiento de objetos cósmicos tan exóticos como los agujeros negros. Haciéndolo así se comprueba que cuanto menor es la masa de un cuerpo, mayor ha de ser su densidad (o, lo que es lo mismo, menor debe ser su volumen) para que corra el peligro de transformarse en agujero negro. Una estrella con la masa del Sol necesitaría reducirse a un tamaño de 3 km, lo que decrece hasta 3 mm si la masa es la de la Tierra. El colapso de una estrella con cien millones de masas solares la convertirá en un agujero negro si su densidad es igual o superior a la del agua, 1 gramo/cm³.

La densidad crítica a partir de la cual una masa en implosión se derrumba sobre sí misma imparablemente hasta el estado de agujero negro, se calcula mediante la ecuación, $r_c = c^6 / (4,2 \cdot G^3 \cdot M^2)$, siendo c la velocidad de la luz en el vacío (300.000 km/s), G la constante gravitatoria y M la masa que se contrae. Por otro lado, el radio de la región en torno a un agujero negro donde la luz queda cautiva (técnicamente, “el horizonte de sucesos”) se designa como radio de Schwarzschild, en honor al astrónomo alemán Karl Schwarzschild (1873-1916), y es $r_s = 2 GM/c^2$.

¿Qué sentiría un incauto astronauta que se aproximase demasiado a uno de estos monstruos cósmicos, y qué vería otro que se mantuviese a salvo observando desde una distancia segura? El primero probablemente no percibiría nada sospechoso durante gran parte del viaje de acercamiento. Pronto, su proximidad le haría notar el crecimiento desmesurado de la atracción gravitatoria ejercida por la oscura esfera que tiene delante. Sus instrumentos detectarían entonces que el ritmo de los acontecimientos en el universo que deja tras de sí se acelera vertiginosamente, en tanto que para él el tiempo transcurre con normalidad.

Antes de cruzar el radio de Schwarzschild las fuerzas de marea le despedazarían a él y a su nave, puesto que la diferencia de intensidad gravitatoria entre un extremo y otro se haría descomunal a causa del rápido crecimiento de la gravitación en la vecindad de un agujero negro. Traspasando el horizonte de sucesos, los restos del desdichado cosmonauta y de su nave se comprimirían infinitamente en la singularidad central, como toda la materia que allí cayese.



Figura 9. Representación figurativa de un agujero negro

Otro observador situado a una prudente distancia, comprobaría cómo los movimientos de su compañero y de su vehículo se irían haciendo más lentos conforme se aproximase a su objetivo; tales son los efectos de la gravitación sobre el discurrir del tiempo según las teorías de Einstein. Cuando el viajero suicida alcanzase el horizonte de sucesos, al astronauta alejado le parecería que tarda una eternidad en traspasarlo si pudiese seguir contemplándolo indefinidamente.

Pero no es eso lo que ocurre, pues en lugar de ello observa como el viajero se queda paralizado justo en el radio de Schwarzschild, su imagen se hace progresivamente más tenue y finalmente desaparece de la vista en una fracción de segundo. Así acontece porque un objeto irradia una cantidad finita de luz antes de acerca un agujero negro, y esa cantidad finita es la que llegaría a un observador externo antes de ser perdido de vista para siempre.

Parece natural, sin embargo, que a distancias tan ínfimas como las que alcanzaría una gran masa en proceso de conversión en agujero negro, la Teoría Cuántica –rama de la física a la que concierne investigar el reino de las micropartículas– tuviese algo que decir. Desafortunadamente la unificación de las teorías de Einstein y las derivadas de la física de partículas elementales, ha sido una de las empresas más abstrusas y difíciles de la ciencia del siglo XX todavía sin completar. Los teóricos no se dejan arredrar por ello, y prefieren considerar esta circunstancia como un fastidio pasajero sin demasiada trascendencia. Confían en que los modelos que describen la aparición y el comportamiento de un agu-

jero negro, no se apartarán demasiado de los contruidos con una teoría unificada como la que se busca con ahínco, opinión ésta harto discutible.

Ante semejante situación, los astrofísicos han optado por intentar el descubrimiento de algún fenómeno cósmico que proporcione indicios a favor o en contra de la existencia de estos objetos. Una forma de lograrlo sería detectando los rayos X emitidos por el gas y el polvo candente que suele orbitar a su alrededor. Y así se ha pretendido, pero las fuentes de rayos X halladas hasta el momento bien pueden atribuirse con igual derecho a muchos otros procesos cósmicos. Otra opción consiste en estudiar los sistemas estelares dobles en los que se observa un solo miembro del par, con unas siete u ocho masas solares, girando alrededor de algo que no se percibe. Ese compañero invisible podría ser un agujero negro, causante de la órbita de su pareja y con frecuencia también emisor de rayos X. Sobre la base de tales suposiciones se juzga que unos buenos candidatos a la categoría de agujero negro son los objetos catalogados como Cisne X-1, 226868 HD y Beta-Lyrae.

El Sol carece de masa y densidad suficientes para contraerse en un agujero negro, por lo que es de esperar que su final discurra por las etapas de una estrella poco masiva que le conduzcan a morir como una fría y estéril enana negra. Pero antes, en sus últimos y angustiosos estertores, nuestra estrella habrá destruido gran parte del sistema planetario, y en particular la Tierra, durante su fase de gigante roja. Este fatídico desenlace se demorará todavía unos 2.000 millones de años, tiempo estimado en que permanecerá dentro de la secuencia principal.

Al término de ese periodo, el Sol habrá aumentado su tamaño (un 15% mayor que ahora), su temperatura (unos 6.400 K en superficie) y su luminosidad (unas dos veces más que en la actualidad). Tan intensas serán las radiaciones ultravioletas recibidas en esos momentos por la Tierra, que resultarán intolerables para la vida. La temperatura global del planeta y su presión atmosférica ascenderán un 25 %, lo que ocasionará la ebullición violenta de lagos, ríos y buena parte de los mares, mientras inmensas nubes de vapor de agua se ciernen sombrías sobre continentes convertidos en infernales desiertos.

Tras unos cuatro mil millones de años en este estado, el Sol alcanzará el punto culminante de su etapa como gigante roja. Su temperatura superficial descenderá hasta los 4.800 K, al tiempo que sus dimensiones y su luminosidad se triplican. Nuestro planeta será poco más que un páramo abrasado cuando la expansión solar comience a engullir los planetas interiores vaporizándolos en fúnebre sucesión: primero Mercurio, luego Venus, y por fin la Tierra. Los siguientes acontecimientos en nada divergirán de los relatados antes para una estrella poco masiva.

ELUDIR LA CATÁSTROFE

Las previsible vías de escape propuestas, ante el horroroso destino que espera a nuestro mundo, caen todavía hoy en el terreno de la más especulativa ficción científica. En los tiempos en que la gigante roja no se haya desarrollado plenamente, el exceso de radiaciones nocivas puede afrontarse engrosando por medios artificiales la capa de gases atmosféricos —especialmente el ozono— que nos protegen de ellas. De la luminosidad excesiva podríamos deshacernos poniendo en órbita grandes sistemas reflectores que desviarán parte de la luz o la transformasen en energía aprovechable.

No obstante, nada de esto servirá cuando el Sol crezca hasta devorar los planetas más cercanos. Como es evidente, la única salida para que la humanidad sobreviva consistiría en escoger entre una doble elección: o bien toda la población del globo (o parte de ella) se trasladaría a colonizar otros planetas de condiciones más favorables para la vida, o bien la propia Tierra habría de ser desviada de su órbita en una proporción suficiente para escapar al desastre que se avecinará.

La primera alternativa se enfrentaría, desde nuestra perspectiva actual, a gravísimas complicaciones técnicas concernientes al suministro de energía necesario para el trayecto, el sostenimiento de las necesidades de tan ingente masa de viajeros, el peligro de los rayos cósmicos o de colisión con algún cuerpo celeste, los problemas fisiológicos y de convivencia derivados de la falta de gravedad o de la escasez de espacio vital, las reparaciones en pleno vuelo y, sobre todo, la necesidad de encontrar un mundo que se adecue a nuestras características biológicas. Probablemente la ciencia futura solucione estos inconvenientes, pero en el presente no podemos asegurarlo.

La alternativa de alterar la órbita de la Tierra, en cambio, resulta mucho más difícil de contemplar con seriedad. La idea en sí no es nueva; Julio Verne la utilizó ya en su novela *El secreto de Maston*, en la que un sabio excéntrico (como suelen ser todos los sabios novelescos) sugiere variar el eje de rotación de la Tierra mediante un explosivo de su invención al efecto de descongelar los polos y explotar las riquezas mineras que esconden bajo sus hielos.

La empresa, desde luego, fracasa y se tranquiliza a los lectores con una breve nota final en la que se afirma sin ambages: “(...) Por consiguiente, los habitantes del globo pueden dormir tranquilamente. La modificación de las condiciones en que se mueve la Tierra es un empeño superior a los esfuerzos posibles de la humanidad. Los hombres no podrían alterar el orden fijado por el Creador del sistema del Universo”.

Obviamente, Verne desconocía la potencia de las bombas atómicas. E ignoraba también las predicciones astrofísicas antes expuestas, pues en ese caso hubiera pensado que dentro de unos miles de millones de años los habitantes del globo, si los hay, acaso solo dormirán tranquilos si confían en las posibilidades humanas para variar la órbita terrestre.

Las energías a poner en juego son, naturalmente, casi inconmensurables. Para dotar a la Tierra con una velocidad de 44,2 km/s –indispensable para agrandar su órbita y alejarla de un Sol en expansión– partiendo de sus 29,7 km/s actuales, necesitaríamos la energía total emitida por nuestra estrella durante tres meses. No obstante, las cifras se tornan menos inmanejables si el proyecto se extiende a lo largo de dilatadísimos periodos de tiempo. Haciendo explotar cada segundo en el lado del planeta contrario a su avance una bomba H de 6.880 kg durante cien millones de años, la Tierra se vería incrementada su velocidad en 0,01 cm/s cada año, hazaña no del todo impensable para una civilización situada en tan lejano futuro como al que ahora nos referimos.

De todos modos, los escollos en este asunto no son únicamente técnicos. Los cálculos habrían de tener en cuenta la posibilidad de caer bajo el perturbado influjo gravitacional de planetas tan poderosos como Júpiter y Saturno. Un acercamiento excesivo a estos colosos podría precipitarnos fatalmente contra ellos sin tiempo a corregir el error. Además no debemos olvidar la dificultad introducida por el efecto de frenado que introducen las mareas gravitatorias de la Luna y del Sol.

Algunos autores de anticipación científica han propuesto reducir nuestro satélite a escombros para evitarlas. Sabemos del capítulo anterior que una acción como ésa ocasionaría graves desajustes en la inclinación del eje terrestre, por la que la única solución sería sustituir la Luna por un satélite artificial con la misma masa, cuyo movimiento dirigido compensase en lo posible los inevitables efectos de marea. Como se ve, especular es fácil, ya que después de todo nadie sabe cuáles son los sueños de hoy que el mañana convertirá en realidades tangibles.

LOS ESTERTORES DEL UNIVERSO

Las evidencias en favor de un cosmos en movimiento llegaron en el umbral de la década de 1930, de la mano de los astrofísicos Slipher, Humason y Hubble. El primero determinó las variaciones de las longitudes de onda de la luz emitida por diversas galaxias en función de su distancia a la nuestra; el segundo dedujo de tales variaciones la existencia de una expansión global en el cosmos; mientras el tercero confirmaba estos hechos por otros caminos al tiempo que les daba popularidad. Ese es el motivo de que la ecuación que proporciona el ritmo de tal expansión, se conozca hoy como *ley de Hubble*.

Después de 1929 pocos discutían ya que el universo se estaba expandiendo a una velocidad dependiente de su densidad de materia y energía, mediante un parámetro aún por especificar experimentalmente. Aceptar que el universo se expande en la actualidad, implica admitir que antaño su volumen fue menor. Esto es claro: si su tamaño depende del tiempo, a medida que retrocedemos hacia el pasado el cosmos se hará correlativamente más pequeño.

Cuando su radio sea cero habremos alcanzado la singularidad inicial de los modelos cosmológicos⁴; un punto –como en los agujeros negros– en el que la densidad de materia y energía se hace infinita, y las leyes físicas habituales pierden su validez. La explosión de esta singularidad inicial con una violencia más allá de la imaginación humana, se conoce hoy popularmente como *Big Bang* (traducción inglesa de “Gran Explosión”) y se considera que en él se crearon el espacio y el tiempo junto a la materia y la energía.

El eco de tan inconmensurable estallido permanece todavía reverberando en forma de una radiación de microondas que baña la totalidad del universo. Esta radiación de fondo fue detectada en primer lugar por Penzias y Wilson en 1964, brindando una espléndida corroboración experimental de la hipótesis del Big Bang. Otras predicciones basadas en la idea del Big Bang que han quedado confirmadas por la experiencia, han sido la distribución de radiofuentes (objetos celestes que emiten con regularidad ondas de radio, púlsares básicamente) en el espacio profundo, y la proporción prevista de elementos químicos en el universo (22-28 % de helio y el resto de hidrógeno; las cantidades de los demás elementos resultan irrelevantes a escala cósmica).

Si las condiciones de su nacimiento son relativamente bien conocidas –siempre y cuando nos refiramos a acontecimientos posteriores a la singularidad inicial– algo similar ocurre con su futuro declive. Dos son los escenarios posibles en los que nuestro universo agonizará hasta el final definitivo, dependiendo de la relación entre la densidad de materia y energía en su interior y la densidad crítica. Su-

⁴ No faltan los modelos *sin* singularidad inicial, como el de Hawking y Hartle en el que se introduce un “tiempo imaginario”, o el del físico español Martín Senovilla.

puesto que el valor de la densidad sea igual o superior al crítico, la expansión continuará para siempre sin detenerse, lo que no influirá de forma apreciable en nuestra galaxia durante muchos miles de millones de años.

Incluso después de que nuestra estrella muera y con ella todo el sistema solar, seguirán todavía naciendo legiones de nuevas estrellas en generaciones sucesivas, cada una hija de los escombros de sus predecesoras. Pero dado que el contenido de materia y energía en cualquier galaxia es finito, antes o después la gestación de nuevas estrellas cesará, el material restante ya no podrá llevar a cabo las reacciones nucleares que dan vida a una estrella, la luz y el calor de las últimas en apagarse se dispersarán por la negrura de un vacío sin fin, y nuestra galaxia perderá progresivamente su brillo.

La incesante expansión habrá alejado tanto al resto de las galaxias antes cercanas en las que todavía queden estrellas, que su luminosidad se percibirá débil y vacilante desde la nuestra; las tinieblas comenzarán a ganarle su batalla definitiva a la luz. La mayoría de las estrellas fenecidas encontrarán su tumba en forma de agujeros negros que vagarán por el espacio devorando cuanta materia hallen a su paso, ya sea como nubes de polvo, enanas negras o estrellas de neutrones. Las pocas estrellas moribundas que logren escapar por azarosas colisiones con otros cuerpos, exhalarán solas su último aliento en la fría inmensidad del espacio intergaláctico.

Mientras, los agujeros negros crecerán de tamaño al engullir toda la materia circundante o al fundirse con otros agujeros. Aparecerán así agujeros negros supermasivos –más probablemente cerca del núcleo galáctico, donde la densidad de materia es mayor– que atraparán todo lo existente a distancias cada vez mayores. La materia caída en un agujero negro radiará parte de su masa como ondas gravitatorias hacia el infinito, lo que debilitará progresivamente su capacidad de atracción gravitacional. La integridad de las galaxias, o de lo que quede de ellas, se descompondrá en una maraña más y más dispersa de agujeros negros, polvo cósmico y cadáveres estelares.

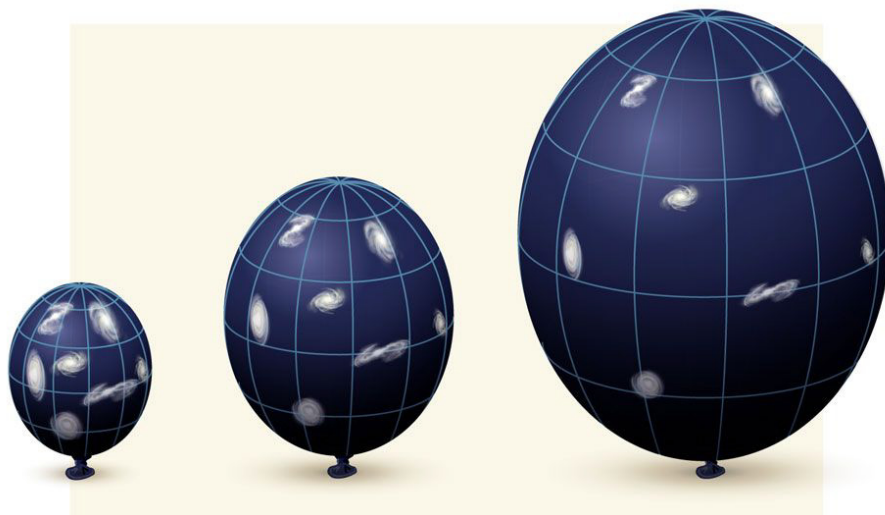


Figura 10. Metáfora de la expansión del universo como aumento de la superficie de un globo

La expansión continuada del universo provocará un descenso de la temperatura asociada con la radiación de fondo de micro-ondas. En tanto esta temperatura sea superior a la de los agujeros negros (unos 10^{-10} K), estos absorberán energía térmica de su entorno. Pero cuando los términos se inviertan, serán los agujeros negros los que habrán de radiar energía a un espacio intergaláctico más frío que ellos mismos. La radiación Hawking emitida por el agujero le robará parte de su masa, obligándolo a contraerse y a aumentar su temperatura, lo que a su vez acelerará el proceso de emisión en una espiral enloquecida.

Al cabo de 10^{67} años estos agujeros negros –con tamaños de unas millonésimas de centímetro pero con miles de millones de toneladas de masa– alcanzarán temperaturas comparables a las de las estrellas que una vez fueron, y se mantendrán así durante otros 10^{30} años. Finalmente, acaso en 10^{108} años, hasta los agujeros negros más masivos se evaporarán en un fulgurante y breve estallido de rayos gamma, sin dejar tras de sí el menor vestigio de su existencia. El universo habrá acabado en un oscuro vacío en perpetua expansión surcado tal vez por un tenue mar de radiaciones cuyas frecuencias se extinguirán lentamente a lo largo de un tiempo infinito.

Por razones de índole psicológica, hay a quienes desagrada semejante destino para el universo, y prefieren pensar en algo distinto a la expansión sin final que lo convertirá en una infinitud desolada y baldía. La alternativa reside en una contracción que lo devuelva a un estado similar a la singularidad inicial de la que emergió. A fin de cuentas –se puede pensar– un universo con tanta majestad merece un epitafio igualmente grandioso. Si la densidad del cosmos es menor que la crítica, la gravitación generada por la masa que contiene llegará a detener con el tiempo el movimiento de expansión, invirtiéndolo en una nueva fase caracterizada por la gradual aproximación de todas las masas ahora separadas.

Durante eones –como ocurría en el caso anterior– careceremos del menor indicio de que algo inusual está sucediendo, pues tan inmensas son las distancias cósmicas que la luz emitida por las galaxias más distantes nos llegará todavía con las imágenes emitidas antes de detenerse la expansión. Mucho antes de que esto ocurra, desde luego, la Tierra y todo el sistema solar habrán perecido, pero por comodidad de lenguaje conviene expresarse desde el punto de vista de un observador humano.

Las estimaciones más prudentes señalan que la nueva etapa contractiva podría comenzar dentro de unos 27.000 millones de años y durar después 40.000 millones más. Poco a poco observaríamos que en la luz emitida por las galaxias visibles predomina la longitud de onda correspondiente al azul, indicio claro de que se mueven en dirección a nosotros. Cuando el diámetro del universo sea una centésima del actual, la compresión aumentará la temperatura de la radiación de fondo cosmológica por encima de la de ebullición del agua.

Los planetas, si en algún lugar queda alguno, se tornarán inhabitables. Una contracción mayor calentará el espacio interestelar más que la superficie de las estrellas. Las pocas de ellas que queden aún con vida, estallarán víctimas de terribles inestabilidades térmicas. Las galaxias se entremezclarán unas con otras, mientras los agujeros negros se fusionan en otros cada vez mayores, engullendo los restos de las explosiones estelares y toda la materia restante.

La compresión se acelera a medida que la materia se condensa más y más de modo que su gravedad crece en igual proporción. En unos pocos miles de años el proceso desemboca en una implosión incon-

trolada (lo que, con humor negro, algunos llaman el *Big Crunch*, o “Gran Crujido”) donde toda estructura organizada se desmorona, los átomos se descomponen y las partículas subatómicas se dispersan.

La temperatura media aumenta frenéticamente conforme el cosmos se hunde sobre sí mismo; a los diez mil millones de grados la temperatura se duplica en el segundo siguiente, y la velocidad va en aumento. Protones y neutrones se disgregan en sus partículas constituyentes como en una especie de Big Bang a la inversa. Los agujeros negros absorben toda la materia y radiación presente a su alrededor, y por fin el universo entero colapsa en una singularidad que, en vez de inicial, podríamos calificar más propiamente de “final”. En esa fase las leyes físicas conocidas dejan de regir, como acaeció en el instante primigenio del Big Bang, por cuanto el propio espacio-tiempo se resquebraja. Quizás una futura teoría que combine las exigencias de la Relatividad General con las de la física de partículas nos suministre la respuesta, más, por el momento, nada es lo que realmente sabemos.

Algunos científicos de renombre suponen que tal vez el universo no llegue a colapsar del todo en una nueva singularidad, sino que alcanzando una densidad impensablemente elevada, fenómenos físicos aún ignorados intervienen para provocar una suerte de rebote como el de un muelle comprimido al soltarlo. Quizás esto fuese lo acontecido en el origen a nuestro universo, y quién sabe si ha ocurrido infinidad de veces antes del Big Bang, y ocurrirá otras tantas tras el colapso de nuestro cosmos.

En ello consiste la idea de un “universo pulsante”, que repite sus ciclos de expansión y contracción en una sucesión inacabable. Este modo de ver las cosas comparte los mismos defectos que cualquier otro modelo de universo potencialmente infinito en el tiempo. Si el comportamiento del universo es realmente pulsante, resultaría muy extraño que tal proceso hubiese comenzado con nosotros, por lo que parece sensato aceptar que participamos en uno de más de sus infinitos ciclos. Pero de ser así puede demostrarse que la entropía se habría hecho máxima a partir del primer ciclo, de forma que ahora no existirían galaxias, estrellas o planetas.

La entropía mínima con que partió nuestro universo se debió a las especialísimas condiciones iniciales del Big Bang, y ningún extraño rebote anterior al colapso total podría repetirlos. Alegar que tras el colapso definitivo cabría esperar un nuevo Big Bang, no salva la hipótesis. Tras cada singularidad se crearía un espacio-tiempo absolutamente desconectado de los anteriores. Así, no podría hablarse de distintos ciclos de un mismo universo; más bien se trataría de distintos universos por completo independientes.

Asimismo, el problema de la masa oscura en el universo permanece como uno de los más intrigantes enigmas de la cosmología moderna. Se sabe, por medidas de la velocidad de rotación de los brazos de las galaxias, que la rapidez con la que éstos giran es superior a la permisible para mantener la integridad del disco galáctico. Al igual que un motorista derrapa cuando toma una curva a demasiada velocidad, grandes fragmentos de esos brazos espirales deberían separarse de la galaxia si toda la fuerza gravitatoria que los retiene es únicamente la generada por la materia visible, la que emite luz.

Como no es eso lo que ocurre, los astrofísicos infieren que debe haber presente en torno a las galaxias mucha más materia que la que se deja ver. Podría tratarse de neutrinos, de partículas elementales todavía desconocidas u otras ya clasificadas, y un sinfín más de posibilidades. Entramos de cualquier modo en el indómito territorio de las partículas subatómicas, que esconde sus propias e inquietantes amenazas para la existencia del cosmos

LA CONTROVERTIDA ESTABILIDAD DE LA MATERIA

Hacia mediados de la década de 1930 había cundido entre los físicos la esperanza de que la estructura fundamental de la materia pudiese ser explicada en base a un reducido número de partículas elementales. El electrón, el protón y el neutrón parecían bastar por sí solos para justificar la existencia de todos los elementos químicos conocidos, los cuales, a juzgar por las radiaciones emitida por las estrellas más alejadas, conservaban sus propiedades características cualquiera que fuese el lugar del cosmos en que se encontrasen.

La posterior detección experimental de las antipartículas –partículas elementales gemelas de las ordinarias pero con signo opuesto en algunas magnitudes (momento angular, carga eléctrica, paridad)– no varió sustancialmente el escenario; los antiprotones, antielectrones y antineutrones no eran más que imágenes especulares de las partículas habituales, y no intervenían para formar átomos o moléculas estables.

Los años pasaron, no obstante, sin que la física de partículas alcanzase el prometido esquema de unificación en que todas las fuerzas fundamentales aparecerían como aspectos particulares de una única interacción básica. Al contrario, desde el nuevo punto de vista introducido por la teoría cuántica, las fuerzas ejercidas por las micropartículas entre sí se debían al intercambio entre ellas de otras partículas, llamadas “mediadoras”.

Esto complicó todavía más una situación en la que al trío electrón-protón-neutrón se le habían ido agregando una plétora de nuevas partículas con objeto de explicar el extraño comportamiento del mundo subatómico. El avance en la tecnología de los aceleradores de partículas y el estudio de los rayos cósmicos, permitieron la caracterización experimental de centenares de nuevas partículas elementales, de tal manera que el uso del término “elemental” llegó adquirir un eco burlesco.

Con la intención de reordenar lo que por entonces se antojaba ya una verdadera manigua de partículas supuestamente elementales, un grupo de físicos especuló con la posibilidad de que, al igual que los átomos se componen de partículas subatómicas, quizás estas mismas partículas se hallen compuestas a su vez por otras auténticamente elementales.

Con ello se daba un paso más en el esfuerzo histórico de los científicos por explicar la complejidad del mundo perceptible mediante el recurso a unas entidades fundamentales no directamente perceptibles, cuyo comportamiento y propiedades son los responsables de la riqueza y variedad del mundo físico. Primero fueron los átomos, concepto que en su versión más primitiva se remonta a los antiguos griegos; después las partículas subatómicas descubiertas por los investigadores de finales del siglo XIX y principios del XX, que tampoco lograron poner fin a la búsqueda; ¿qué nos esperaba ahora?

En torno a 1964 los físicos Gell-man y Zweig desarrollaron la idea de unos subcomponentes de las micropartículas conocidas hasta entonces, a fin de poderlas organizar de modo coherente y sistemático, a los que llamaron *quarks*. Equipados con esta nueva hipótesis, los físicos intentaron abordar la explicación de la materia observable en el universo a partir de seis quarks, seis leptones (otra familia de partículas, una de las cuales es el electrón) y sus correspondientes antipartículas.

Los leptones se distinguen por resultar insensibles ante la fuerza nuclear fuerte. De ellos parecen ser estables el electrón, el positrón (o antielectrón), el neutrino y el antineutrino. Los quarks constituirían los hadrones, sensibles a la fuerza fuerte, y divididos en bariones y mesones, según tuviesen más o menos masa respectivamente. Los mesones, que son todos inestables, estarían formados por un quark y un antiquark; los bariones, en cambio, nacerían de la conjunción de tres quarks o tres antiquarks. Con este modelo podrían explicarse al fin las cargas eléctricas y demás propiedades de los mesones y los bariones.

La interacción entre leptones y quarks se interpreta por medio de las cuatro clases de fuerzas fundamentales: gravitación, electromagnetismo, nuclear fuerte y nuclear débil. La fuerza electromagnética es la responsable de la estabilidad de los átomos al mantener unidos los electrones a los núcleos. La fuerza fuerte liga los quarks para formar hadrones, y a ella se debe la unión de los protones y los neutrones en el núcleo atómico.

La fuerza débil es la protagonista de ciertas desintegraciones nucleares y de algunos aspectos de los procesos de fusión que tienen lugar en el corazón de las estrellas. Como ya se ha dicho, todas estas fuerzas se transmiten por el intercambio de las partículas mediadoras. El fotón es el mediador de la interacción electromagnética, los gluones transmiten la fuerza fuerte, la fuerza débil se propaga mediante las partículas W^+ , W^- , Z^0 , y al gravitón correspondería ejercer la fuerza gravitacional.

Las investigaciones en teorías de gran unificación (abreviadamente TGUs, o GUTs en inglés) han conducido a un esquema en el que se considera que la fuerza débil y la electromagnética son dos manifestaciones de una única interacción, la electrodébil. El modelo de unificación electrodébil, desarrollado hacia 1967 por S. Weinberg, A. Salam y J. Ward, ha de implicar algún género de proceso que vincule ambas fuerzas, lo que es tanto como decir alguna transformación que convierta las partículas mediadoras de una en las de la otra. Así ocurre de hecho, y una de sus implicaciones más peculiares es la predicción teórica de la inestabilidad de los protones, susceptibles de desintegrarse a causa de que ahora la transmutación de un quark en un leptón –y a la inversa– se halla permitida.

La secuencia de hechos por la que esto podría acaecer, al menos en esta teoría de unificación, es como sigue. De acuerdo con el modelo de los quarks, un protón es un barión formado por tres quarks o tres antiquarks; tomemos el caso de los tres quarks, por ejemplo. Si la teoría de Weinberg, Salam y Ward es cierta, uno de esos quarks se convertiría inopinadamente en un antileptón, digamos, un positrón, mientras que otro se transforma en un antiquark.

La pareja quark-antiquark forma un pión neutro (π^0) que se separa del positrón desintegrando de esa manera el protón del que eran componentes. Si el protón que hemos considerado en el ejemplo formase parte como núcleo de un átomo de hidrógeno, bien pudiera ser que el positrón se aniquilase con el electrón del H. Entre tanto, el pión –intrínsecamente inestable– también acabaría convertido en radiación cuando el quark interaccionase con el antiquark. Así, donde antes había un átomo de hidrógeno, pieza básica en la construcción de la materia, ahora sólo queda un disperso puñado de fotones gamma.

De verificarse la inestabilidad del protón, resultaría que la materia misma en sus más íntimas entrañas se erosiona con el tiempo de modo inexorable. Si la expansión de universo dura lo suficiente y es lo bastante rápida, los electrones y positrones fruto de la desintegración de protones y neutrones, quedarán separados antes de poder destruirse mutuamente. Los que sí lo consigan producirán rayos gam-

ma que se irán debilitando con la expansión cosmológica. A ellos se unirán en el progresivo desfallecer los omnipresentes neutrinos y la radiación remanente del Big Bang.

Como el ritmo de enfriamiento de la materia es superior al de la radiación, siempre existirá una diferencia de temperaturas entre positrones y electrones por un lado y los rayos gamma y la radiación de fondo por otro (no es fácil saber dónde colocar a los neutrinos en esa clasificación). Aun cuando el universo en su conjunto se aproxime hacia el cero absoluto de temperatura, la mencionada diferencia persistirá para siempre y la muerte térmica estricta no se dará jamás.

Mas si el cosmos se expande a menor velocidad, el contacto entre electrones y positrones tendrá lugar en el curso de unos acontecimientos muy particulares. La mayoría de estas partículas, al poseer cargas eléctricas de signo opuesto, formarán unos extraños átomos, remedo del hidrógeno, donde el positrón hará de núcleo y el electrón orbitará a su alrededor. En unos 10^{71} años casi todos los positrones y electrones habrán formado átomos de positronio, cada uno de ellos con miles de millones de años-luz de radio. El positronio, empero, es inestable y el tamaño de su órbita se irá reduciendo hasta que el electrón se precipite sobre el positrón para una muerte segura tras haber emitido en el proceso unos 10^{22} fotones dentro de 10^{116} años.

Los quarks interaccionan tan débilmente entre sí en interior de un protón que el promedio de vida calculado para estos últimos alcanza los 10^{32} años. Ello significa que para cuando haya transcurrido este plazo de tiempo la mitad de los protones se habrán desintegrado ya, pero como la edad del universo se estima en 10^{10} años no resulta difícil conciliar el hecho de que todos los protones a nuestro alrededor permanezcan intactos.

Los experimentos llevados a cabo en voluminosos tanques de agua, colocados bajo tierra para minimizar las interferencias de rayos cósmicos, han sido negativos hasta el presente. Se supone que, como en un gran depósito de agua hay más de 10^{32} protones, estadísticamente ha de desintegrarse algún protón en un periodo aproximado de un año. Pero no ha sido así, y ésta es una de las más graves objeciones que militan contra el modelo ortodoxo de partículas elementales⁵.

Aunque la inestabilidad de los protones no se corresponda con la realidad, todavía hay motivos de preocupación en el quark *s*, cuya singulares propiedades le hicieron acreedor al nombre de “extraño” (*strange* en inglés). Ciertas variantes en las ecuaciones de la física de partículas sugieren que los quarks *s* podrían participar, bajo muy especiales condiciones, en la formación de átomos que por ello se denominarían también “extraños”.

La materia extraña no existe como tal en la naturaleza, pero si así fuese, ¿qué habría de amenazador en ello? El peligro reside en la estabilidad relativa de ambas clases de materia. Las predicciones teóricas apuntan hacia una estabilidad de la materia extraña mucho más elevada que la de la ordinaria. Ello comportaría el gravísimo problema de evitar que toda la materia ordinaria, menos estable energéticamente, se convirtiese en extraña, más estable pero muy distinta de la que sirve de soporte a la vida y a todo género de cosas a las que estamos habituados.

⁵ Por esa razón, y por otras técnicamente más complejas, el modelo ha sido abandonado en la práctica, siendo sustituido por teorías gauge más complicadas y por las llamadas teorías supersimétricas.

La situación se comprenderá mejor con una analogía mecánica muy visualizable. Imaginemos una bolita en un pequeño foso en la cima de un montículo. La bolita no se encuentra en un estado inestable porque no cambia de posición por sí sola con el tiempo. Pero tampoco podemos asegurar que se halle estabilizada, ya que un suave empujón podría desplazarla de la cima despeñándola ladera abajo. Decimos entonces que la bolita se encuentra en un estado *metaestable*, esto es, su situación no cambiará a menos que sufra una somera perturbación. En cambio, pensemos ahora en una bola idéntica situada en el fondo de un valle, donde es necesario un impulso muy decidido para sacarla de él. Obviamente estaremos justificados al afirmar que su estado es estable.

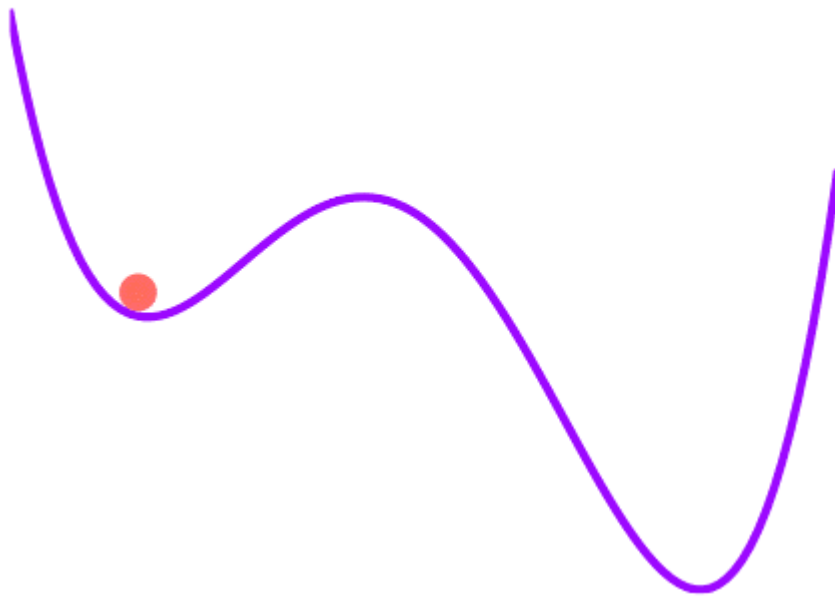


Figura 11. La bolita se halla en un estado metaestable, ya que puede descender a otra posición con mayor estabilidad.

El leve empujón que convertiría toda la materia ordinaria en extraña, podría darse sin más que poner una mínima cantidad de la segunda en contacto con la primera. La mayor estabilidad de la materia extraña arrastraría a la ordinaria a un estado similar, y como el proceso se vería favorecido energéticamente –la energía desprendida en la transformación desplazaría de su estado metaestable a la siguiente materia ordinaria a transformar– la reacción en cadena adquiriría una velocidad vertiginosa.

Contamos con situaciones análogas, aunque más prosaicas, en la física cotidiana. Bajo una presión menor que la atmosférica, el agua permanece líquida a temperaturas inferiores a los 0°C. Pero basta que se restablezca la presión corriente para que la formación de un diminuto cristal de hielo dispare la congelación acelerada del resto del líquido.

Las ecuaciones de las que se desprende una alternativa tan aterradora como esa, a decir verdad, son poco más que enrevesados artificios matemáticos, con toda seguridad muy lejanamente relacionados

con el mundo real. Las condiciones que exige son tan especulativas que sus resultados se reducen a simples divertimentos exóticos para el físico teórico.

Sin embargo, la mera posibilidad teórica de algo semejante abre la puerta a la duda de si algún día, en el curso de los experimentos en los aceleradores de partículas, donde entran en juego energías colosales, no ocurrirá un suceso que desestabilice la composición última de la materia. Tal composición nos es todavía desconocida, y quizás encierre inestabilidades y peligros ante los que nos convendría actuar con cautela.

REFERENCIAS

- Audouza, J. y otros, *Astrofísica*, Orbis (Barcelona), 1985
- Bonilla, L. *Mitos y creencias sobre el fin del mundo*, E. Escelicer (Madrid), 1967
- Burcham, W.E., *Nuclear and particle physics*, Longman (Great Britain), 1995
- Chaisson, E. *Relatividad, agujeros negros y destino del universo*, Plaza&Janés (Barcelona), 1990
- Charon, J. *Los grandes enigmas de la astronomía*, Plaza&Janés (Barcelona), 1971
- Davies, P., *El universo desbocado*, Salvat (Barcelona), 1985
- Johnston, K., *Into the void?*, Earth's Friends Ed. (London), 1987
- Kippenhahn, R., *Cien mil millones de soles*, Salvat (Barcelona), 1988
- Porcellino, M.R., *En busca de las estrellas*, McGraw-Hill (Madrid), 1992
- Sagan, C., *Cosmos*, Planeta (Barcelona), 1987.