

**Isaac Asimov**

**EL  
COLAPSO  
DEL  
UNIVERSO**

**La historia  
de los agujeros negros**

**KIANA**

1ª. EDICION. MARZO DE 1980  
3ª. EDICION. SEPTIEMBRE DE 1982  
4ª. EDICION. JULIO DE 1987

## *Indice*

ISBN 968-13-0456-X

Título original: THE COLLAPSING UNIVERSE. THE STORY OF BLACK HOLES  
— Traductor: Mayo Antonio Sánchez — DERECHOS RESERVADOS © —  
Copyright ©, 1977, by Isaac Asimov — Edición original en inglés  
publicada por Walker and Company, New York, N. Y., U.S.A. —  
Copyright ©, 1980 por EDITORIAL DIANA, S. A. — Roberto Gayol 1219,  
Esq. Tlacoquemécatl, México 12, D. F.

# Contenido

1. PARTÍCULAS Y FUERZAS . . . . .	.11
<b>Las cuatro fuerzas</b> . . . . .	<b>.11</b>
<b>Átomos</b> . . . . .	<b>.16</b>
<b>Gravitación</b> . . . . .	<b>.24</b>
2. Los PLANETAS. . . . .	.33
<b>La Tierra</b> . . . . .	<b>.33</b>
<b>Los otros planetas</b> . . . . .	<b>.38</b>
<b>Velocidad de escape</b> . . . . .	<b>.42</b>
<b>Densidad y formación planetarias</b> . . . . .	<b>.47</b>
3. LA MATERIA COMPRIMIDA . . . . .	.55
<b>Interiores planetarios</b> . . . . .	<b>.55</b>
<b>Resistencia a la compresión</b> . . . . .	<b>.59</b>
<b>Las estrellas</b> . . . . .	<b>.64</b>
<b>Materia degenerada</b> . . . . .	<b>.68</b>
4. ENANAS BLANCAS . . . . .	.75
<b>Gigantes rojas y compañeras oscuras</b> . . . . .	<b>.75</b>
<b>El efecto Einstein</b> . . . . .	<b>.85</b>
<b>Formación de las enanas blancas</b> . . . . .	<b>.88</b>
5. MATERIA EXPLOSIVA . . . . .	.95
<b>El gran estallido</b> . . . . .	<b>.95</b>

La secuencia principal . . . . .	.100
Las nebulosas planetarias. . . . .	.106
Las novas. . . . .	.111
Las supernovas. . . . .	.118
6. ESTRELLAS NEUTRONES. . . . .	.128
Más allá de las enanas blancas. . . . .	.128
Más allá de la luz. . . . .	.130
Los pulsares. . . . .	.134
Propiedades de las estrellas neutrones. . . . .	.140
Efectos de marea. . . . .	.146
7. LOS AGUJEROS NEGROS. . . . .	.157
La victoria final. . . . .	.157
La detección de los agujeros negros. . . . .	.171
Miniagujeros negros. . . . .	.171
Los usos de los agujeros negros. . . . .	.176
8. FINALES Y PRINCIPIOS. . . . .	.181
¿El final?. . . . .	.181
Túneles en el espacio y agujeros blancos. . . . .	.186
Los cuasares. . . . .	.191
El huevo cósmico. . . . .	.195
APÉNDICE 1. Números exponenciales. . . . .	.205
índice de materias. . . . .	.207

Para PHYLLIS y AL BALK  
quienes estaban allí el 30 de noviembre de 1973

# 1

## Partículas y fuerzas

Desde 1960, el universo ha adquirido un nuevo rostro. Se ha vuelto más excitante, más misterioso, más violento, y más extremo al aumentar nuestro conocimiento al respecto. Y el más excitante, misterioso, violento y extremo de todos sus fenómenos tiene el más simple, llano, calmado e inocuo de los nombres: el "agujero negro".

Un agujero es nada, y si es negro, ni siquiera podemos verlo. ¿Vale la pena entusiasmarse por una nada invisible?

Sí, si ese agujero negro representa el estado más extremo posible de la materia; si representa el posible fin del universo; si representa el probable comienzo del universo; si representa nuevas leyes físicas y nuevos métodos para superar las que hasta ahora se consideraban limitaciones absolutas.

Para comprender el agujero negro, sin embargo, debemos empezar por el principio y avanzar paso a paso en el proceso del entendimiento.

### LAS CUATRO FUERZAS

Hay cuatro maneras diferentes en las que las diferentes partículas que forman el universo pueden interactuar entre sí. Cada una de ellas es una variedad particular de *interacción*, o para emplear un término más anticuado pero más común, una *fuerza*. Los científicos no han podido encontrar una quinta fuerza o, al menos

hasta ahora, encontrar una razón para que pudiera existir esa quinta fuerza.

En la tabla 1 aparecen las cuatro fuerzas en orden decreciente.

TABLA 1. Intensidad relativa de las cuatro fuerzas

Fuerza	Intensidad relativa <sup>1</sup>
Nuclear	10 <sup>8</sup>
Electromagnética	1
Débil	10 <sup>-11</sup>
Gravitacional	10 <sup>-39</sup>

Cada partícula en el universo es fuente de una o más de estas fuerzas. Cada partícula sirve como centro de un volumen de espacio en el que existe la fuerza con una intensidad que disminuye al aumentar la distancia desde la fuente. El volumen de espacio en el que se hace sentir la fuerza se conoce como *campo de fuerza*.

Cualquier partícula que pueda servir como fuente de un campo particular responderá a otro campo semejante establecido por otra partícula. La respuesta es generalmente en forma de movimiento: las partículas se mueven unas hacia otras (una *atracción*) o tienden a apartarse entre sí (una *repulsión*) a menos que se impida físicamente que lo hagan.

De este modo, cualquier objeto capaz de producir un campo gravitacional, si se sitúa en el campo gravitacional de la Tierra, se moverá hacia el centro de nuestro planeta, esto es, caerá. La Tierra también se moverá hacia el centro del objeto, pero dado que es mucho más grande que lo que cae, su elevación será más lenta; de hecho, incommensurablemente más lenta.

De esas cuatro fuerzas, por lo menos dos, la *fuerza nuclear* y la *fuerza débil*, se hacen sentir solamente a distancias increíblemente diminutas de 10<sup>-13</sup> centímetros o menos. Éstas corresponden más o menos al diámetro del minúsculo núcleo que hay en el mismo centro del átomo. Estas fuerzas solamente existen dentro del núcleo, en la

<sup>1</sup> Las intensidades relativas se dan en números exponenciales en los que 10<sup>8</sup> es igual a 1 000 y 10<sup>-11</sup> equivale a 1/100 000 000 000.

Las potencias relativas se dan en números exponenciales. Si el lector no está familiarizado con ellos, consulte el Apéndice sobre números exponenciales al final del libro.

vecindad inmediata de partículas aisladas. Por esta razón, el término *fuerza nuclear* a veces se aplica a ambas, y para diferenciar sus relativas intensidades se les llama *fuerza nuclear intensa* y *fuerza nuclear débil*.

En este libro, empero, en pocas ocasiones se mencionará la fuerza débil, por lo que simplemente nos referiremos a la fuerza más vigorosa como fuerza nuclear.

No es probable que una partícula dada produzca cada una de las fuerzas o responda a ellas. Solamente ciertas partículas, por ejemplo, producen la fuerza nuclear y responden a ella. Las que tienen esta propiedad son llamadas *hadrones*, según la raíz griega que significa "fuerte" ya que la fuerza nuclear es la más intensa de las cuatro. Los hadrones más comunes e importantes en la estructura del universo son los dos *nucleones*: el *protón* y el *neutrón*.

El protón fue descubierto en 1914 por el físico británico Ernest Rutherford (1871-1937), y su nombre se deriva de la palabra griega que significa "primero" ya que en la época de su descubrimiento era el objeto más pequeño conocido que tuviera una carga eléctrica positiva.

El neutrón fue descubierto en 1932 por el también físico inglés James Chadwick (1891-1974). No tiene carga eléctrica, ya sea positiva o negativa. En otras palabras, es eléctricamente neutro; de ahí su nombre.

Ya desde 1911 Rutherford había demostrado que casi toda la masa del átomo se concentra en una región muy pequeña de su centro, el *núcleo*. Una vez que se descubrieron los protones, se advirtió que son partículas relativamente masivas y que deben localizarse en el núcleo. El número de protones varía de una clase de átomo a otro. El átomo de hidrógeno tiene un solo protón en su núcleo, el átomo del helio tiene 2, el átomo del litio tiene 3, y así sucesivamente hasta llegar al átomo de uranio que tiene 92. En los laboratorios se han obtenido átomos aún más masivos.

Pero, ¿qué mantiene unidos a todos los protones en el núcleo, donde se agrupan de modo tan compacto?

Antes de 1935 solamente se conocían dos fuerzas, la electromagnética y la gravitacional. La *fuerza gravitacional* es demasiado débil para mantener unidos a los protones. La *fuerza electromagnética*

tiene la potencia suficiente, pero solamente puede manifestarse como atracción o como repulsión. Entre dos partículas de carga eléctrica opuesta (más o menos) hay una atracción. Dos partículas de la misma carga eléctrica (más y más, o menos y menos) se repelen. Todos los protones tienen carga positiva y por tanto deben repelerse entre sí; y la repulsión debe ser más intensa mientras más cercanos estén los protones entre sí. En un núcleo atómico, con los protones tan amontonados que están virtualmente en contacto, la repulsión electromagnética debe ser de enorme potencia; pero los protones se mantienen unidos.

Además de los protones, también hay neutrones en el núcleo, pero esto no mejora la situación. Ya que los neutrones carecen de carga eléctrica, no producen fuerza electromagnética ni responden a ella. Por lo tanto, no deben atraer ni repeler a los protones. Tampoco ayudan a mantener unidos los protones ni aceleran su separación.

No fue sino hasta 1935 que el físico japonés Hideki Yukawa (1907- ) presentó una teoría satisfactoria de la fuerza nuclear. Demostró que era posible que los protones y neutrones, al estar muy cerca unos de otros, produjeran una fuerza de atracción mil veces mayor que la fuerza electromagnética repelente. Lo que une la fuerza nuclear no puede separarlo la fuerza electromagnética.

La fuerza nuclear trabaja mejor y mantiene estable el núcleo solamente cuando los protones y electrones están presentes en ciertas proporciones. Para los átomos cuyo núcleo contiene 40 partículas o menos, la mejor proporción parece ser números iguales de protones y neutrones. Para núcleos más complicados, tiene que haber una preponderancia de neutrones, que será mayor al ser el núcleo más complejo. Un núcleo de bismuto, por ejemplo, contiene 83 protones y 126 neutrones.

Cuando se fuerza un núcleo atómico a rebasar las proporciones estables, no se mantiene intacto. Se emiten pequeñas *partículas beta* (*beta* es la segunda letra del alfabeto griego) bajo el influjo de la fuerza débil hasta que la proporción se ajusta para alcanzar la estabilidad. También son posibles otros modos de desintegración nuclear, pero todos ellos se agrupan bajo el rubro de *radioactividad*.

Aun siendo potente, la fuerza nuclear tiene sus limitaciones. La intensidad de la fuerza nuclear decae *muy* rápidamente con la dis-

tancia, y no puede hacerse sentir fuera del núcleo. De hecho, su influjo de atracción se desvanece considerablemente cuando se extiende de un extremo a otro del núcleo de mayor tamaño.

La fuerza electromagnética también se atenúa, pero de un modo bastante más lento. El tamaño del núcleo es limitado, ya que a final de cuentas la repulsión electromagnética de extremo a extremo igualará a la rápidamente decreciente atracción nuclear en la misma distancia. A esto se debe que los núcleos atómicos sean tan infinitamente pequeños. Simplemente la fuerza nuclear no puede producir nada de mayor tamaño (excepto bajo condiciones muy poco comunes, como se verá más adelante).

Veamos ahora la interacción electromagnética que, como he dicho, solamente es producida por aquellas partículas portadoras de una carga eléctrica, y a la cual responden únicamente aquellas partículas con carga. Esta carga se presenta en dos variedades, positiva y negativa. La fuerza entre las cargas positiva y negativa es arráyente, en tanto que la que existe entre dos cargas positivas o entre dos cargas negativas, es repelente.

El protón, con su carga eléctrica positiva, es una fuente de fuerzas nuclear y electromagnética y responde ante ambas. El neutrón, que no tiene carga eléctrica, solamente produce fuerza nuclear y únicamente responde a este tipo de fuerza.

También hay partículas llamadas *leptones* (de la raíz griega que significa "débil"), que producen fuerza débil y responden a ella pero nunca a la fuerza nuclear. Algunos leptones, sin embargo, tienen carga eléctrica y producen fuerza electromagnética y reaccionan ante esta así como a la fuerza débil.

El más importante de los leptones, hasta donde concierne a la materia ordinaria, es el *electrón*, que lleva una carga eléctrica negativa. (Se comprobó que las partículas beta producidas por un núcleo inestable mediante la fuerza débil son electrones acelerados). El electrón fue descubierto en 1897 por el científico inglés Joseph John Thomson (1856-1940), y recibió ese nombre porque era la unidad más pequeña de carga eléctrica conocida hasta entonces (o para el caso, conocida hasta hoy).

La información que ahora tenemos puede resumirse en la Tabla 2.

TABLA 2. Partículas y fuerzas

	Protón	Neutrón	Electrón
Fuerza nuclear	Sí	Sí	No
Fuerza electromagnética	Sí	No	Sí

*Nota:* También existen partículas como el electrón pero con carga eléctrica positiva. Son los *antielectrones*, o *positrones*. Un *protón* con carga eléctrica negativa es un *antiprotón*. Un neutrón con ciertas otras propiedades invertidas es un *antineutrón*. En conjunto estos opuestos se llaman *antipartículas*. Así como las partículas ordinarias constituyen la materia que nos rodea, las antipartículas forman la *antimateria*. Esta antimateria puede existir en algún lugar del universo pero nunca hemos podido detectarla. Sin embargo, los científicos han podido producir cantidades diminutas en el laboratorio.

## ÁTOMOS

Dado que los electrones no están sujetos a la fuerza nuclear, no pueden formar parte del núcleo. Sin embargo, el electrón es atraído por el protón, gracias a la fuerza electromagnética, y tiende a permanecer cerca de alguno. Así, si un núcleo está formado por un solo protón, será de esperarse que haya en su cercanía un electrón solitario mantenido por la fuerza electromagnética. Si hay dos protones en el núcleo, será probable que haya dos electrones cautivos en su vecindad, y así sucesivamente.

El núcleo y los electrones vecinos forman el *átomo*. (*Átomo* es una palabra griega que significa indivisible porque cuando se tuvo por primera vez el concepto de átomo se pensaba que era imposible dividirlo en unidades más pequeñas).

Sucede que la carga del electrón es precisamente igual (aunque de naturaleza opuesta) a la carga del protón. Por lo tanto, cuando hay  $x$  número de protones en el núcleo, la existencia de  $x$  electrones en las regiones exteriores inmediatas al núcleo significará que las dos clases de carga se neutralizarán exactamente entre sí. El átomo como un todo será eléctricamente neutral.

Aunque el electrón y el protón son iguales en el tamaño de la carga eléctrica, no tienen la misma masa.<sup>2</sup> El protón es 1836.11

<sup>2</sup> Cuando decimos que un objeto posee masa, queremos decir que se necesita de fuerza para moverlo, si está en reposo, o para cambiar su velocidad o dirección, si ya está en movimiento. Mientras más masa tenga, mayor será la fuerza necesaria. Bajo circunstancias ordinarias en la superficie de la Tierra los objetos masivos dan a nuestros sentidos la impresión de ser "pesa-

más grande que el electrón. Imaginemos un átomo con 20 protones -y 20 neutrones en el núcleo y 20 electrones en la región exterior del átomo. La carga eléctrica estará equilibrada, pero más del 99.97 por ciento de la masa del átomo está en el núcleo.

Pero aunque el núcleo contiene casi toda la masa de un átomo, solamente representa una diminuta fracción de su volumen. (Esto es importante en cuanto al tema de este libro, como veremos). El diámetro de un núcleo es alrededor de  $10^{13}$  centímetros en tanto que el de un átomo es de unos  $10^8$  centímetros.

Esto significa que un átomo es 100 000 más ancho que su núcleo. Se necesitarían 100 000 núcleos, colocados en hilera, para llenar la distancia que existe de un lado a lado del átomo del cual forma parte. Si se imagina el átomo como una esfera hueca y se desea llenarla con núcleos, se necesitarían  $10^{15}$  (un millón de billones) de núcleos para llenar el átomo.

Consideremos ahora dos átomos. Cada uno de ellos tiene una carga eléctrica total de cero. Podemos suponer, entonces, que no se afectarán mutuamente; que, por decirlo así, ignoran recíprocamente su existencia, en cuanto se refiere a fuerza electromagnética.

Así debería ser idealmente. Si en varios átomos la carga de los electrones se extendiera con regularidad perfecta en una esfera alrededor del núcleo, y si la carga positiva del núcleo se mezclara regularmente con la carga negativa de los electrones, entonces la fuerza electromagnética no jugaría ningún papel entre los átomos.

Sin embargo, no sucede así. La carga negativa de los electrones está presente en las regiones exteriores del átomo, y la carga positiva del núcleo está oculta dentro. Cuando dos átomos se aproximan, es la región exterior negativamente cargada de uno la que se acerca a la región exterior negativamente cargada del otro. Las dos regiones negativamente cargadas se repelen mutuamente (como lo hacen las cargas) y eso significa que dos átomos solamente se aproximan para repelerse de inmediato.

Una muestra de gas helio, por ejemplo, está hecha de átomos separados de helio que se mueven constantemente y se repelen entre

dos". Mientras más masivos sean, mayor será su peso. Sin embargo, no es lo mismo masa que peso, y aunque sería claro decir que el protón es mucho más pesado que el electrón, es mejor expresar que es "más masivo".

si. A temperaturas ordinarias, los átomos de helio se mueven muy rápidamente y se repelen con fuerza considerable. Al descender la temperatura, sin embargo, los átomos se mueven con más y más lentitud y se repelen con creciente debilidad. Los átomos del gas helio se agrupan más, y el helio se contrae y su volumen se hace menor.

A la inversa, si sube la temperatura los átomos se mueven con mayor rapidez, se repelen con mayor vigor y el helio se expande.

Parecería que no hay límite a la rapidez con la que los átomos se mueven (dentro de lo razonable), pero hay un límite definido para la lentitud con que se pueden mover. Si la temperatura descende lo suficiente, se llega a un punto en el que se mueven tan lentamente que ya no se puede extraer energía de ellos. A ese nivel de frigidéz llegamos a la temperatura de *cero absoluto*, que es  $-273.18^{\circ}\text{C}$ .

Aunque el átomo del helio tiene una distribución de la carga que está muy cerca de ser perfectamente simétrica, solamente está *bastante* cerca y no es totalmente perfecta. La carga eléctrica no está distribuida de modo exactamente regular, y como resultado, partes de la superficie del átomo están un poco menos negativamente cargadas que otras. Por esta razón, la carga interior positiva del átomo se asoma a través de las partes menos negativas de la parte exterior, por decirlo así, y dos átomos contiguos se atraerán entre sí muy débilmente. Esta débil atracción recibe el nombre de *fuerzas van der Waals* porque fueron descubiertas por el físico holandés Johannes Diderik van der Waals (1837-1923). Al descender la temperatura y moverse los átomos de helio más y más lentamente, la fuerza repelente llega a ser tan débil como para no sobreponerse a las fuerzas van der Waals. Los átomos se unen y el helio gaseoso se convierte en helio líquido.

Las fuerzas van der Waals son tan débiles en el altamente simétrico átomo de helio, que la temperatura debe caer tan baja como 4.3 grados por encima del cero absoluto para que se forme helio líquido. Todos los otros gases tienen una distribución de carga menos simétrica en sus átomos: por lo tanto, experimentan fuerzas van der Waals más intensa y se licúan a temperaturas más elevadas.

En ocasiones los átomos se atraen recíprocamente de modo más enérgico. Los electrones de las regiones exteriores de los átomos están dispuestos en forma de capas, y la estructura es más estable si todas las capas están llenas. Excepto en el caso del helio y algunos cuantos elementos similares, los átomos generalmente no tienen su capa exterior totalmente llena, o por el contrario, les sobran algunos electrones cuando se llenan sus capas.

Hay una tendencia en los átomos, cuando chocan, de transferir uno o dos electrones del que los tiene sobrantes al que le faltan.

Cuando chocan dos átomos suele haber una transferencia de uno o dos electrones del átomo que los tiene en exceso a aquel al que le faltan, lo que deja a ambos con la capa exterior llena. Pero entonces el que gana electrones también ha ganado una carga negativa, y el que los pierde ya no puede equilibrar del todo la carga de su núcleo y gana una carga positiva. Los dos átomos tendrán entonces la tendencia a mantenerse unidos.

También ocurre que dos átomos, al chocar, compartan electrones que entonces los ayudan a llenar sus capas externas. Pero esto ocurrirá solamente si permanecen en contacto.

En cualquiera de los dos casos, transferencia o compartimiento de electrones, es necesaria una energía considerable para separar los átomos, y en circunstancias ordinarias, permanecerán unidos. Esas combinaciones de átomos reciben el nombre de *moléculas*, una palabra latina que significa: "objeto pequeño".

A veces bastan dos átomos en contacto para producir estabilidad. Dos átomos de hidrógeno forman una molécula de hidrógeno; dos átomos de nitrógeno, una molécula de nitrógeno; y dos átomos de oxígeno, una molécula de oxígeno.

En otras ocasiones son necesarios más de dos átomos en contacto para llenar todas las capas. La molécula de agua está hecha de un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno; la molécula de metano requiere un átomo de carbono y cuatro de hidrógeno; la de dióxido de carbono tiene un átomo de carbono y dos de oxígeno; y así sucesivamente.

En algunos casos se necesitan millones de átomos para formar una molécula. Esto es porque los átomos de carbono en particular pueden compartir cada uno de ellos electrones con cada uno de otros

cuatro átomos. Pueden formarse entonces largas cadenas y complicados anillos de átomos de carbono. Esas cadenas y anillos son la base de las moléculas características del tejido vivo. Las moléculas de las proteínas y los ácidos nucleicos del cuerpo humano y todos los demás seres vivos son ejemplos de dichas *macromoléculas* (marro es la palabra griega que significa "grande").

Las combinaciones de átomos con electrones transferidos pueden dar lugar a la formación de *crisales* en los que los átomos existen en incontables millones alineados en hileras regulares.

En general, mientras más grande sea una molécula y menor sea la regularidad de la distribución de la carga eléctrica en su superficie, mayor probabilidad habrá de que muchas moléculas se aglomeren y la sustancia sea líquida o sólida.

Todas las sustancias sólidas que vemos están unidas fuertemente por las interacciones electromagnéticas que existen primeramente entre los electrones y protones, después entre los diferentes átomos, y finalmente entre las diferentes moléculas.

Lo que es más, esta habilidad de la fuerza electromagnética de mantener juntas millares de partículas, se extiende indefinidamente. La interacción nuclear, que implica una acción que se desvanece con mucha rapidez al aumentar la distancia, puede producir solamente el diminuto núcleo atómico. La fuerza electromagnética, que se desvanece lentamente al aumentar la distancia, puede agrupar cualquier cosa desde partículas de polvo hasta montañas; puede producir cuerpos del tamaño de la misma Tierra y aún mayores.

La fuerza electromagnética está íntimamente ligada a nosotros de muchas maneras además de hacer posible mantenernos unidos al igual que el planeta en que vivimos. Todo cambio químico es resultado de cambios o transferencias de electrones de un átomo a otro. Dentro de esto incluimos los muy delicados y versátiles cambios y transferencias en los tejidos de los seres vivos como nosotros. Todos los cambios que ocurren dentro de nuestro cuerpo, la digestión de los alimentos, la contracción de los músculos, el crecimiento de nuevos tejidos, el chispazo de los impulsos nerviosos, la generación de pensamientos en el cerebro, todo esto, es el resultado de cambios bajo el control de la fuerza electromagnética.

Algunos de los cambios de electrones liberan una cantidad considerable de energía. La energía de una hoguera, de la combustión de carbón o aceite, así como la energía producida dentro del tejido vivo, son resultado de los cambios controlados por la fuerza electromagnética.

#### DENSIDAD

Cuando los átomos o moléculas de una fracción determinada de materia se separan a causa de un aumento de temperatura o por cualquier otra razón, habrá menos masa en un determinado volumen fijo de esa materia. Ocurre lo contrario si los átomos o moléculas se agrupan más estrechamente.

La cantidad de masa en un volumen dado se llama *densidad*; por lo que decimos que cuando la materia se expande, disminuye su densidad, y cuando la materia se contrae, aumenta su densidad.

Los hombres de ciencia, por medio del sistema métrico decimal, miden la masa en *gramos* y el volumen en *centímetros cúbicos*. El gramo es la milésima parte de un kilogramo y el centímetro cúbico equivale a la milésima parte de un decímetro cúbico (o litro).

Para ofrecer un ejemplo típico, un centímetro cubierto de agua tiene una masa de un gramo (Esto no es una coincidencia. Las dos medidas se originaron allá por 1790 buscando el ajuste entre ambas). Esto significa que podemos decir que el agua tiene una densidad de 1 gramo por centímetro cúbico o, de manera abreviada, 1 g/cm<sup>3</sup>.

Los cambios en densidad no solamente se deben a la expansión y la contracción. Las diferentes sustancias tienen diferentes densidades a causa de la misma naturaleza de su estructura.

Los gases tienen densidades mucho menores que las de los líquidos, porque los gases están hecho de átomos o moléculas separados con poca atracción entre sí. En tanto que las moléculas líquidas están en virtual contacto, los átomos o moléculas de los gases se mueven rápidamente, rebotando entre sí para permanecer separados de ese modo. La mayor parte del volumen de un gas está formado por el espacio vacío entre los átomos o moléculas.

Por ejemplo, una muestra de gas hidrógeno preparada en la Tierra a una temperatura y presión ordinarias tendrá una densidad de



De este modo, el cesio, con un peso atómico de 132.91, tiene una densidad de solamente 1.873 g/cm<sup>3</sup> porque sus electrones ocupan mucho espacio. El mucho más compacto átomo del cobre, con un peso atómico de 63.54, menos de la mitad del cesio, da a aquel metal una densidad de 8.95 g/cm<sup>3</sup>, casi cinco veces mayor que la del cesio.

Si se desea conocer la sustancia con la mayor densidad conocida, se debe buscar entre las que tengan los átomos más masivos pero no necesariamente entre los más grandes de todos. El elemento natural con los átomos de mayor tamaño es el uranio, con un peso atómico de 238.07. Su densidad es de 18.68 g/cm<sup>3</sup>, el doble de la del cobre, pero no es la mayor. Hay por lo menos cuatro elementos con densidad mayor que la del uranio. Junto con este elemento aparecen en la Tabla 3 en orden de densidad creciente.

TABLA 3. Elementos de elevada densidad

Elemento	Peso atómico	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Uranio	238.07	18.68
Oro	197.0	19.32
Platino	195.09	21.37
Iridio	192.2	22.42
Osmio	190.2	22.48

El récord lo tiene el raro metal osmio. De todos los materiales que forman la corteza terrestre o que pueden obtenerse de ella, este es el más denso. Imaginemos un lingote de osmio puro de la longitud y ancho de un billete de banco y 2.54 centímetros (una pulgada) de grueso. No sería un lingote de gran tamaño, pero pesaría 5.85 kilogramos.

#### GRAVITACIÓN

Hasta este momento hemos hablado un poco de la fuerza nuclear y la fuerza electromagnética, y hemos despreciado la fuerza débil como relativamente poco importante para nuestros propósitos. Apenas hemos citado la fuerza gravitacional, sin embargo, y sucede

que es la más importante en lo que se refiere a este libro. De hecho, hablaremos de ella con tanta frecuencia que bien podemos ahorrar sílabas refiriéndonos a la fuerza gravitacional simplemente como *gravitación*, cuando parezca natural hacerlo.

La gravitación afecta cualquier partícula que tenga masa, hadrones, leptones, y cualquier combinación de estos (lo que significa todos los objetos que rodean la Tierra en el espacio<sup>3</sup>). Ahora podemos ampliar la Tabla 2 para formar la Tabla 4, añadiendo la fuerza débil y la gravitación.

TABLA 4. Partículas y las cuatro fuerzas

	Protón	Neutrón	Electrón
Fuerza nuclear	Sí	No	No
Fuerza electromagnética	Sí	No	Sí
Fuerza débil	No	No	Sí
Fuerza gravitacional	Sí	Sí	Sí

De las cuatro fuerzas, la gravitación es con mucho la menos vigorosa, como indicamos en la Tabla 1. Podemos demostrar esto, no solamente afirmarlo, por medio de matemáticas simples.

Supongamos que consideramos dos objetos con masa aislados en el universo. La fuerza gravitacional entre ellos puede expresarse por medio de la ecuación calculada por primera vez por el sabio inglés Isaac Newton (1642-1727) en 1687, y que es;

$$F(g) = \frac{Gmm'}{d^2} \quad (\text{Ecuación 1})$$

En esta ecuación  $F(g)$  es la intensidad de la fuerza gravitacional entre dos cuerpos,  $m$  es la masa de un cuerpo,  $m'$  la masa del otro,  $d$  la distancia entre ellos, y  $G$  es una *constante gravitacional* universal.

<sup>3</sup> Hay algunas partículas sin masa a las que la gravitación no afecta en el sentido ordinario. Las partículas de luz y radiaciones similares, llamadas *fotones* (de una palabra griega que significa "luz"), por ejemplo, no tienen masa. Tampoco la tienen ciertas partículas sin carga llamadas *neutrinos*. Más adelante ambas partículas aparecerán en el libro.



diciones que he establecido, las dinas se cancelarán, y terminaremos con un número "puro", un número sin unidades.

Si dividimos la Ecuación 6 entre la Ecuación 3, tendremos:

$$\frac{F(e)}{F(g)} = \frac{2.3 \times 10^{-19}}{1 \times 10^{-58}} = 2.3 \times 10^{39}. \quad (\text{Ecuación 7})$$

En otras palabras, la fuerza electromagnética es de 2 300 000 000-000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 veces más fuerte que la fuerza gravitacional.

Para tener una idea de lo enorme que es esta diferencia en intensidad, supongamos que consideramos a la fuerza gravitacional como una masa de un gramo. ¿Qué masa tendríamos que usar para representar la fuerza electromagnética según la relación indicada? Tendría que ser una masa igual a un millón de cuerpos de la masa de nuestro Sol.

Supongamos que la intensidad de la fuerza gravitacional está simbolizada por una distancia igual al diámetro de un átomo. La intensidad de la fuerza electromagnética tendría que simbolizarse por una distancia mil veces mayor que el diámetro del universo conocido.

La gravitación, es, con mucho, la más débil de nuestras cuatro fuerzas. Aun llamada fuerza débil es 10 000 billones de billones de veces más fuerte que la gravitación.

No es sorprendente, entonces, que los físicos nucleares que estudian la conducta de las partículas subatómicas tomen en cuenta la fuerza nuclear, la fuerza electromagnética, y la fuerza débil pero ignoren totalmente la gravitación. La gravitación es tan débil que nunca influye en el curso de los eventos dentro de los átomos y núcleos atómicos de manera apreciable.

También es este el caso de la química, En todas las consideraciones de los diversos cambios químicos en el cuerpo y en el ambiente exterior no viviente, solamente es necesario considerar la fuerza electromagnética, con alguna atención a la fuerza nuclear y la fuerza débil en el caso de la radioactividad, pero nunca la gravitación. La gravitación es tan débil que no afecta de manera registrable los cambios químicos ordinarios.

Entonces, ¿por qué preocuparnos por la gravitación?

Porque de algún modo allí está y porque, a pesar de su increíble debilidad, de alguna manera se hace sentir. Nos damos cuenta de ello cada vez que caemos. Sabemos que si caemos de una distancia tan pequeña como es la que separa una ventana del tercer piso del suelo, muy posiblemente nos mate la atracción gravitacional. Sabemos que es la gravitación lo que mantiene a la Luna en su órbita alrededor de la Tierra y a esta en órbita alrededor del Sol. ¿Cómo es posible que logre esto una fuerza tan débil?

Consideremos nuevamente las cuatro fuerzas. La fuerza nuclear y la fuerza débil disminuyen tan rápidamente con la distancia que no es necesario considerarlas fuera de objetos como el núcleo atómico.

La fuerza electromagnética y la gravitacional, sin embargo, decrecen solamente con el cuadrado de la distancia, y esta es una tasa de disminución la suficientemente lenta como para hacer posible que ambas fuerzas se hagan sentir a grandes distancias.

Hay una crucial diferencia entre las dos fuerzas, sin embargo. Hay dos clases opuestas de carga eléctrica y, hasta donde sabemos, solamente una clase de masa.

En el caso de la fuerza electromagnética, hay atracciones (entre cargas de signos opuestos) y repulsiones (entre cargas semejantes). Dado que la fuerza electromagnética es vigorosa, la poderosa repulsión entre cargas semejantes tiende a dispersarlas, evitando una acumulación apreciable en un lugar determinado. La igualmente poderosa atracción entre cargas desiguales tiende a unir estas bastante bien, neutralizando las cargas. Al final, las cargas positivas y negativas (que están presentes en el universo en cantidades iguales, hasta donde sabemos) se entremezclan plenamente, y en ningún lugar hay algo más que algún diminuto exceso de cualquiera de las dos cargas.

Entonces, en tanto que la interacción electromagnética es poderosa y dominante para mantener a los electrones en la vecindad del núcleo y para mantener unidos a los átomos contiguos, un trozo de materia que tenga tamaño considerable tendrá muy poca atracción electromagnética o repulsión electromagnética para otro pedazo de materia de tamaño análogo que se encuentre a cierta distancia, ya que en ambos fragmentos de materia, los dos diferentes tipos de

carga se encuentran tan bien mezclados que ambos cuerpos terminarán teniendo una carga cero.<sup>5</sup>

Ya que solamente hay una clase de masa, únicamente hay una atracción gravitacional. Hasta donde sabemos, no existe una repulsión gravitacional. Todo objeto con masa atrae a cualquier otro objeto con masa, y la fuerza gravitacional total entre dos cuerpos cualesquiera es proporcional a la masa total de los dos cuerpos juntos. No existe límite para esto. Mientras más masivos sean los cuerpos, mayor será la fuerza gravitacional que actúe entre ellos.

Consideremos un objeto como la Tierra, que tiene una masa igual a  $3.5 \times 10^{31}$  veces la de un protón. En otras palabras, es 3 500 billones de billones de billones de billones de veces más masivo que un protón. Por lo tanto la Tierra produce un campo gravitacional que es  $3.5 \times 10^{31}$  veces de un solo protón. Otro modo de considerarlo es que cada partícula en la Tierra que posee masa, cada protón, neutrón, y electrón, es fuente de un pequeñísimo campo de gravitación, y todos ellos se combinan y suman para integrar el campo gravitacional total de la Tierra.

La Tierra también tiene campos electromagnéticos, de los cuales son fuente cada protón y electrón. Los campos de protones y electrones tienden a cancelarse, sin embargo, de tal modo que el campo electromagnético total de la Tierra es realmente muy pequeño. Es suficiente como para atraer la aguja de una brújula o desviar las partículas cargadas que vienen del Sol y otras partes, pero es muy débil para un objeto tan enorme como la Tierra, hecho de tantas partículas cargadas.

Así, aun cuando la fuerza gravitacional es mucho más débil que la electromagnética si se consideran las partículas aisladas, la fuerza gravitacional de la Tierra como un todo es mucho mayor que su fuerza electromagnética.

<sup>5</sup> Es posible quitar algunos electrones de un objeto por medio de fricción, dejándolos con una pequeña carga positiva, o añadirles algunos electrones, dejándolos con una pequeña carga negativa. Esos cuerpos pueden atraerse o rechazarse mutuamente o a otros objetos, pero la fuerza implicada es inconcebiblemente diminuta comparada con la que sería si todas las partículas cargadas en cualquiera de los dos cuerpos pudieran ejercer toda su fuerza electromagnética.

La fuerza gravitacional de la Tierra es lo suficientemente potente como para que la percibamos inequívocamente, y para matarnos si no tenemos cuidado.

El enorme campo gravitacional de la Tierra es capaz de interactuar con el campo más pequeño de la Luna, de tal modo que ambos cuerpos permanecen juntos. Las fuerzas gravitacionales mantienen juntos al Sol y los planetas. Existen fuerzas gravitacionales apreciables entre los planetas y las diferentes estrellas.

Ciertamente, es la fuerza gravitacional y *sólo* ella lo que mantiene unido al universo y dicta los movimientos de todos sus cuerpos. Todas las otras fuerzas están localizadas. Solamente la fuerza gravitacional, que es con mucho la más débil de todas, al combinar sus propiedades de largo alcance y de ser solamente de atracción, guía los destinos del universo.

En particular, es la fuerza gravitacional la clave de cualquier consideración de los agujeros negros, por lo que estamos en el camino principal para llegar a ellos y debemos estudiar los peldaños mientras ascendemos.

## 2

### Los planetas

#### LA TIERRA

Uno de los primeros peldaños hacia el conocimiento del agujero negro (aunque en esa época no se soñó con que lo fuera) fue la determinación de la masa de la tierra por medio de la fuerza gravitacional.

Newton habla determinado que la intensidad del campo gravitacional producido por cualquier objeto es proporcional a su masa. Ciertamente, hay otra manera de definir la masa: aquella propiedad de la materia que produce un campo gravitacional.

Esta no fue la definición que di de la masa previamente en este libro. Entonces la describí como aquella propiedad de la materia que hace necesario el uso de una fuerza de alguna clase para producir un cambio en el movimiento de la materia, ya sea en velocidad o en dirección. Mientras mayor sea la fuerza necesaria para producir un cierto cambio en el movimiento, mayor será la masa del cuerpo a la cual se aplica la fuerza.

En ocasiones se llama *masa gravitacional* a la primera definición de masa dada anteriormente. La segunda, dado que implica la resistencia de la materia a sufrir un cambio en su movimiento (la propiedad llamada *inercia*) se conoce como *masa inercial*. La inercia y la gravitación parecen ser dos propiedades enteramente diferentes, y no hay razón para suponer que las dos clases de masa correspondan exactamente entre sí; esto es, que cuando una masa tenga

el doble de inercia que otra, también tendría un campo gravitacional del doble de la intensidad. Sin embargo, aparentemente ocurre de ese modo. Nadie ha podido demostrar ninguna distinción entre masa gravitacional y masa inercial, por lo que se da por sentado que las dos son idénticas.

De este modo, el campo gravitacional de la Tierra ejerce una fuerza sobre un cuerpo que cae de tal modo que éste sufre un cambio de movimiento, o *aceleración*, y cae con mayor rapidez cada vez. Dado que la masa inercial y la masa gravitacional son lo mismo, podemos suponer que el aumento de la velocidad con que un objeto cae puede usarse para medir la intensidad de la gravitación de la Tierra.

Esta aceleración fue medida por primera vez alrededor de 1590 por el científico italiano Galileo Galilei (1564-1642). Es igual a 980 centímetros por segundo por segundo. Esto significa que cada segundo un cuerpo que cae se mueve 980 centímetros por segundo más rápidamente que cuando caía durante el segundo anterior.

Volvamos a la ecuación de Newton.

$$F = \frac{Gmm'}{d^2} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde  $F$  es la intensidad del campo gravitacional y por lo tanto el valor de la aceleración de un cuerpo que cae, el cual, como he dicho, es conocido desde hace mucho tiempo.  $G$  es la constante gravitacional,  $m$  es la masa del cuerpo que cae,  $m'$  es la masa de la Tierra, y  $d$  es la distancia entre el cuerpo que cae y la Tierra. En lo que realmente estamos interesados es la masa de la Tierra, por lo que alteraremos la ecuación mediante las acostumbradas técnicas algebraicas para poner la  $m$  aislada del lado izquierdo de la ecuación. De este modo, la ecuación será

$$m' = \frac{Fd^2}{Gm} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Si tenemos valores para cada símbolo del lado derecho de la ecuación, podemos multiplicar el valor de  $F$  por el valor de  $d$ , mul-

tiplicar nuevamente el producto por  $d$ , dividir este resultado entre  $G$ , dividir el cociente entre  $m$ , y eso nos dará el valor de  $m'$  la masa de la Tierra.

Bueno, eso se ve soberbio, porque para empezar tenemos ya el valor de  $F$ , como acabo de explicar. También tenemos el valor de  $m$ , la masa del cuerpo que cae, porque podemos pesarlo simplemente en una balanza para encontrar la masa expresada en gramos.

La distancia entre el cuerpo que cae y la Tierra es un poco complicada. Newton demostró que cuando un cuerpo produce un campo gravitacional, ese campo se comporta como si fuera producido por toda la masa del cuerpo concentrada en su centro de gravedad. Cuando el cuerpo tiene una forma y propiedades que satisfacen ciertas condiciones de simetría, el centro de gravedad está en el centro geométrico del cuerpo. Estas condiciones de simetría funcionan para la Tierra y por todos los cuerpos medibles que conocemos en el universo.

Esto significa que la Tierra actúa como si su campo gravitacional se originara en su centro; por lo tanto  $d$  sería la distancia desde el cuerpo que cae hasta el centro de la Tierra, no hasta la superficie terrestre. Si el cuerpo que cae está cerca de la superficie, entonces la distancia sería igual al radio de la esfera terrestre.

Este valor fue determinado por primera vez alrededor del año 240 a.C. por un geógrafo griego llamado Eratóstenes (276-192 a.C.). Él determinó el tamaño de la esfera terrestre por la proporción en que se hace curva su superficie, lo cual a su vez determinó midiendo el ángulo que los rayos del Sol formaban con respecto a diferentes partes de aquella superficie en el mismo momento. El radio (la distancia de la superficie de la Tierra a su centro) es igual a 637 000 000 de centímetros.

Ahora tenemos los valores de  $F$ ,  $m$ , y  $d$ , pero hasta el siglo XVIII todavía no se tenía el valor de  $G$ , y hasta que no tengamos el valor de  $G$ , no podemos utilizar la ecuación 9 para calcular  $m'$ , la masa de la Tierra.

¿Hay algún modo en que podamos determinar el valor de  $G$ ?

Bueno, si  $G$  es verdaderamente universal, supongamos que medimos la intensidad del campo gravitacional entre dos esferas de

plomo y usamos otra forma de la ecuación 8. Las técnicas algebraicas las pueden convertir en:

$$G = \frac{Fd^2}{mm'} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Podemos medir fácilmente la masa de cada una de las bolas de plomo que nos dan,  $m$  y  $m'$ . También podemos medir la distancia entre ellas y eso nos da  $d$ . Si entonces podemos medir igualmente la fuerza gravitacional entre ellas para obtener  $F$ , es posible resolver de inmediato la ecuación de  $G$ . Para hacerlo colocamos el valor de  $G$  en la ecuación 9 y calculamos al instante la masa de la Tierra.

Hay otro truco. Las fuerzas gravitacionales son tan increíblemente débiles en relación con la masa que necesita un objeto tan enorme como la Tierra para que tenga un campo gravitacional lo suficientemente intenso para que pueda medirse con facilidad. Antes de que podamos trabajar con objetos suficientemente pequeños como para manejarlos en el laboratorio, debemos encontrar algún medio para medir fuerzas muy pequeñas.

El necesario refinamiento de la medición surgió en 1777, cuando Coulomb (quien calculó la ecuación 4 que ya mencioné antes en este libro) inventó la *balanza de torsión*. En la balanza de torsión se miden fuerzas diminutas mediante la torsión de una cuerda o alambre muy finos. Para detectar la torsión, se necesita fijar a un alambre colocado verticalmente, una larga varilla horizontal equilibrada en el centro. Una torsión diminuta, casi imperceptible, producirá un movimiento apreciable en el extremo de la varilla. Si el alambre sujeto a la torsión es lo suficientemente delgado y la varilla es suficientemente larga, podemos medir la torsión producida por los pequeñísimos campos gravitacionales de objetos de tamaño ordinario.

Como verán, el alambre o hilo son elásticos, por lo que dentro de ellos hay una fuerza que tiende a destorcerlos. Mientras más torcidos estén, mayor será la fuerza que tienda a destorcerlos. Finalmente la fuerza destorcedora se equilibrará con la fuerza de torsión, y la varilla permanecerá en una nueva posición de equilibrio. Es mediante la medición del grado de torsión o movimiento de la varilla

para llegar a un nuevo equilibrio, que se puede determinar la intensidad de la fuerza que actúa sobre aquella.

En 1798, el químico inglés Henry Cavendish (1731-1810) intentó el siguiente experimento.

Empezó con una varilla de 180 centímetros de longitud y colocó en cada extremo una bola de plomo de 5 centímetros de diámetro. A continuación suspendió la varilla por medio de un fino alambre en su centro.

Después Cavendish suspendió una bola de plomo de un poco más de 20 centímetros de diámetro a un lado de una de las esferas de plomo más pequeñas en el extremo de la varilla horizontal. Suspendió otra bola semejante en el lado opuesto de la otra bola pequeña de plomo. El campo gravitacional de las bolas de plomo de mayor tamaño serviría ahora para atraer las pequeñas esferas y torcer el alambre para que adoptara una nueva posición. Mediante el cambio representado por la nueva posición comparado con la anterior Cavendish pudo medir la diminuta atracción gravitacional entre las esferas de plomo.

(Naturalmente, Cavendish encerró todo el aparato dentro de una caja y tomó todas las precauciones necesarias para evitar que el alambre se agitara debido a las corrientes de aire).

Cavendish repitió una y otra vez el experimento hasta que estuvo satisfecho de que tenía una buena medición de  $F$ . Dado que no había problema en medir la masa de las bolas de plomo o las distancias entre las esferas grandes y las pequeñas, ya disponía de  $m$ ,  $m'$  y  $d$ . Ahora podía resolver la  $G$  de la ecuación 10 y así lo hizo.

Usando refinamientos modernos de los experimentos de Cavendish, ahora creemos que la masa de la Tierra es de 5.983 por  $10^7$  gramos, o a *grosso modo* 6 000 billones de billones de gramos.

Podemos determinar la densidad de cualquier objeto dividiendo su masa por su volumen. El volumen de la Tierra había sido calculado correctamente, o por lo menos con bastante aproximación, utilizando la cifra de Eratóstenes referente a la circunferencia terrestre. Una vez que Cavendish calculó la masa de la Tierra, fue posible determinar la densidad promedio de nuestro planeta. Resultó ser  $5.52 \text{ g/cm}^3$

## LOS OTROS PLANETAS

La importancia de la determinación de la masa de la Tierra estriba no solamente en sí misma sino en el hecho de que hace posible que los astrónomos determinen la masa de un gran número de otros objetos en el universo.

Tenemos la Luna, por ejemplo, el único satélite de la Tierra que está a una distancia de 384 000 kilómetros y que gira alrededor de la Tierra una vez cada 27 1/3 días.

Para decirlo con mayor precisión, tanto la Tierra como la Luna, giran alrededor de un centro común de gravedad. Las leyes de la mecánica requieren que la distancia de cada cuerpo de ese centro de gravedad esté en relación con su masa. En otras palabras, si la Luna tuviera la mitad de la masa de la Tierra, estaría al doble de la distancia del centro de gravedad de esta; si su masa fuera de una tercera parte de la masa de la Tierra, estaría tres veces más alejada; y así sucesivamente.

Los astrónomos han podido determinar la posición del centro de gravedad del sistema Tierra-Luna, y ha resultado estar localizado a unos 1 650 kilómetros debajo de la superficie de la Tierra y a unos 4 720 kilómetros de su centro. (Recordemos que en los asuntos gravitacionales lo que cuenta es el centro). La Luna gira alrededor de ese punto, y alrededor de la Tierra; el centro de nuestro planeta gira alrededor de ese punto una vez cada 27 1/3 días.

El centro de gravedad está 81.3 veces tan lejos del centro de la Luna como lo está del centro de la Tierra, por lo que la Luna tendrá 1/81.3 ó 0.0123 veces la masa de la Tierra. La masa de la Luna será entonces  $7.36 \times 10^{25}$  gramos, pero es más fácil expresar el valor como una fracción de la masa de la Tierra.

Los astrónomos pueden determinar la masa de los otros planetas del sistema solar en relación con la de la Tierra. Uno de los modos es la comparación del efecto de un planeta sobre su satélite con el de la Tierra sobre la Luna.

El tiempo en el cual un satélite pequeño completa su órbita alrededor de su planeta depende solamente de dos cosas: la distancia del satélite al centro del planeta y la intensidad del campo gravitacional del mismo.

Por ejemplo, el planeta Júpiter tiene un satélite, Io, que está casi exactamente a la misma distancia de Júpiter que la Luna está de la Tierra. Sin embargo, Io gira alrededor de Júpiter en 1 3/4 días, en tanto que la Luna gira alrededor de la Tierra en 27 1/3 días.

Podemos calcular que la gravitación de Júpiter sea 318.4 veces más intensa que la de la Tierra, para que Júpiter pueda hacer girar a Io con tanta rapidez. En otras palabras, Júpiter deberá tener una masa 318.4 veces la de la Tierra. Usando este método de satélites y otros, se puede determinar la masa de todos los objetos medibles del sistema solar.

En la tabla 5 se dan las masas y densidades de los nueve planetas del sistema solar, así como de nuestra Luna en orden de las distancias que los separan del Sol.

TABLA 5. Masa y densidad de los planetas

	<i>Masa</i> (Tierra = 1)	<i>Densidad</i> (g/cm <sup>3</sup> )
Mercurio	0.055	5.4
Venus	0.815	5.2
Tierra	1	5.52
Luna	0.0123	3.3
Marte	0.108	3.96
Júpiter	317.9	1.34
Saturno	95.2	0.71
Urano	14.6	1.27
Neptuno	17.2	1.7
Plutón	0.1	4.

La intensidad del campo gravitacional de cada uno de estos cuerpos está en proporción con sus masas, y como podemos ver, de ningún modo la Tierra tiene la mayor intensidad gravitacional o la mayor masa entre los planetas del sistema solar. Hay cuatro planetas más masivos que la Tierra: Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, Júpiter es el gigante del sistema planetario. Es más o menos 2.5 veces más masivo que los otros ocho planetas juntos.

La intensidad del campo gravitacional de cada planeta (o de cualquier cuerpo) disminuye con el cuadrado de la distancia, lo

que significa que la intensidad *relativa* del campo gravitacional de dos cuerpos de diferentes masas permanece igual a cualquier distancia.

Por ejemplo, una nave espacial a un millón de kilómetros del centro de Júpiter sentiría que la atracción gravitacional de Júpiter es 317.9 veces más fuerte que la atracción gravitacional de la Tierra a un millón de kilómetros del centro de este último planeta.

Si la nave espacial aumentara su distancia del centro de Júpiter de un millón a dos millones de kilómetros, el campo gravitacional de Júpiter sería únicamente de la cuarta parte de la intensidad en la nueva posición que en la anterior. Si lo mismo se hiciera con relación a la Tierra, el campo gravitacional de nuestro planeta también sería de un cuarto de la intensidad en la nueva posición que en la previa. El campo de Júpiter en su nuevo punto permanecería siendo 317.9 veces tan fuerte como el de la Tierra en la nueva posición.

El campo gravitacional de Júpiter sería 317.9 veces tan fuerte como el de la Tierra en cualquier par de puntos correspondientes. ¿Pero qué ocurriría si los puntos no correspondieran?

Hay una situación importante en que estaríamos forzados a permanecer a distancias diferentes del centro de un planeta que del de otro. Esto ocurriría cuando estuviéramos primero en la superficie de un planeta y después en la de otro, si los dos planetas son de diferentes tamaños.

Podemos demostrar mejor esto comparando la Tierra con la Luna, ya que el hombre ha estado situado en las superficies de ambos mundos y hemos confirmado lo que había predicho la teoría.

La masa de la Tierra es 81.3 veces la de la Luna, y para las posiciones a igual distancias del centro de cada uno de los cuerpos la intensidad del campo gravitacional de la Tierra siempre es 81.3 veces la de la Luna.

Supongamos que estamos de pie en la superficie de la Luna. Nos encontraremos a 1 738 kilómetros del centro del satélite. Si estuviéramos situados en la superficie de la Tierra, nos separarían 6 371 kilómetros del centro del planeta.

La intensidad gravitacional en la superficie de un cuerpo es su *gravedad de superficie* (un concepto importante en la historia de los agujeros negros) y al calcularla, debemos tener en cuenta las

diferencias en distancia desde el centro. La distancia de la superficie de la Tierra a su centro es 3 666 veces la distancia de la superficie de la Luna a su propio centro.

La intensidad gravitacional se debilita con el cuadrado de la distancia, por lo que la gravedad de la superficie terrestre disminuye en comparación con la gravedad superficial de la Luna por un factor igual a  $3.666 \times 3.666$ , o sea 13.44. Por lo tanto debemos dividir la intensidad gravitacional innata de la Tierra de 81.3 (comparada con la de la Luna) entre 13.44, y eso nos da como resultado 6.05.

Así, aunque la Tierra tenga una masa 81.3 veces la de la Luna, su gravedad superficial es solamente 6.05 veces de la Luna. Para decirlo de otro modo, la gravedad superficial de la Luna es alrededor de un sexto que la de la Tierra.

De modo similar, podemos calcular la gravedad superficial de todos los cuerpos del sistema solar. Los cuatro planetas gigantes ofrecen un problema, porque lo que vemos como "superficie" es en realidad el borde exterior de sus gruesas atmósferas, cuyo espesor no podemos juzgar con facilidad. Ni siquiera podemos tener la certeza de que en algún punto debajo de esa atmósfera existe una superficie sólida o líquida. Si pretendemos, sin embargo, que podemos posarnos en la cima de esa capa de nubes y calcular la intensidad del campo gravitacional en ese punto, podemos llamarla gravedad superficial. Teniendo presente esto pasemos a la Tabla 6.

TABLA 6. Gravedad superficial

	<i>Gravedad superficial (Tierra = 1)</i>
Mercurio	0.37
Venus	0.88
Tierra	1.00
Luna	0.165
Marte	0.38
Júpiter	2.64
Saturno	1.15
Urano	1.17
Neptuno	1.18
Plutón	0.4

## VELOCIDAD DE ESCAPE

Es el campo gravitacional de la Tierra la base del antiguo refrán de que "todo lo que sube debe bajar". Cualquier objeto arrojado al aire a determinada velocidad está bajo la constante atracción de la gravitación de la Tierra. Por lo tanto, pierde velocidad constantemente hasta que llega a un alto momentáneo en cierto punto por encima de la superficie de la Tierra. Entonces empieza a caer, ganando constantemente velocidad hasta que toca el suelo a la misma velocidad con que originalmente fue lanzado hacia arriba.<sup>6</sup>

Si dos objetos son lanzados hacia arriba y uno de ellos tiene mayor velocidad que otro, le tomará más tiempo perder su velocidad; por lo tanto ascenderá a mayor altura antes de retornar. Pudiera parecer que no importa lo grande que sea la velocidad con la cual el objeto empieza su ascenso, aquella velocidad finalmente disminuirá. Puede subir cien kilómetros, mil kilómetros, pero al cabo el inagotable efecto de la fuerza gravitacional se hará sentir.

Así parece y así sería si la intensidad del campo gravitacional no se debilitara con la distancia.

La gravedad superficial de la Tierra ejerce una cierta fuerza sobre un objeto en la superficie, que está a 6 371 kilómetros del centro del planeta. La intensidad de la gravitación disminuye cuando cualquier objeto sujeto a esa fuerza se levanta de la superficie y aumenta su distancia del centro de la Tierra. La disminución e intensidad es proporcional al cuadrado, pero de la distancia al centro, no a la superficie.

Supongamos que nos elevamos en la estratosfera, hasta unos 35 kilómetros sobre la superficie terrestre. Para las normas ordinarias esta es una gran altura, pero la distancia desde el centro de la Tierra aumenta solamente de 6 371 kilómetros a 6 406 kilómetros. No es un cambio muy grande; la intensidad gravitacional a esta altura es todavía el 98.9% de la que existe en la misma superficie. Un ser

<sup>6</sup> En realidad la resistencia del aire complica la situación y ayuda a frenar la velocidad de los objetos, tanto ascendentes como descendentes. En esta sección, sin embargo, pretendemos que no existe la resistencia del aire. El cambio es pequeño y no altera ese ni aun en te nuestro argumento.

humano que pese 70 kilogramos en la superficie todavía pesará 69.23 kilogramos en la estratosfera. En la vida ordinaria, por lo tanto, no tenemos conciencia de ningún cambio significativo en la intensidad de la gravitación de la Tierra, por lo que nunca tomamos en cuenta ese cambio.

Supongamos, sin embargo, que un objeto se eleva a una distancia realmente grande, digamos a una altura de 6 371 kilómetros por encima de la superficie terrestre. Estará entonces a 6 371 más 6 371, o sean 12 742 kilómetros del centro de la Tierra. Su distancia desde el centro habrá aumentado en un factor de dos, y la intensidad gravitacional habrá disminuido a una cuarta parte de la que era en la superficie.

Si imaginamos que un objeto es lanzado hacia arriba con una velocidad tal que llegue a la estratosfera antes de perder aquella velocidad, entonces veremos que en las últimas etapas de su vuelo hacia arriba la intensidad gravitacional es ligeramente menor que en las primeras etapas. La posterior pérdida de velocidad será menos, entonces, de lo que se esperaría si la intensidad gravitacional permaneciera igual durante toda la subida. El objeto se mueve hacia arriba un poco más alto que lo que esperaríamos antes de aquel alto momentáneo y su retorno.

Imaginemos después que un segundo objeto es lanzado hacia arriba con una velocidad inicial del doble de la del primer objeto. Para cuando el segundo objeto haya alcanzado la altura en la cual el primer objeto había ya perdido toda su velocidad, habrá perdido solamente la mitad de su velocidad. Ahora se estaría moviendo a la velocidad con la que se inició el vuelo del primer objeto.

¿Ascenderá el segundo objeto a una distancia adicional igual a la distancia total a la que ascendió el primer objeto?

No, ya que el segundo objeto ahora hace su ascenso adicional a través de una región de gravitación un poco más débil. Pierde velocidad más lentamente y asciende a una distancia mayor que la que le tomó al primer objeto ascender desde la superficie.

Debido a la declinación de la intensidad gravitacional con la altura, la duplicación de la velocidad inicial de un objeto arrojado hacia arriba logra superar la duplicación de la altura que alcanza. En la

Tabla 7 vemos la altura a las que los objetos ascienden sobre la superficie de la Tierra a determinadas velocidades iniciales.

TABLA 7. Cuerpos ascendentes

<i>Velocidad inicial</i> (kg/seg)	<i>Altura máxima sobre la</i> <i>superficie terrestre</i> (km)
1.6	130
3.2	560
4.8	1450
6.4	3100
8.0	6 700
9.6	17 900

Al aumentar la velocidad inicial, también aumenta la máxima altura, y aumenta más y más rápidamente en tanto el objeto avanza hacia regiones de gravitación más y más débil. Entre la primera y última cifras de la Tabla, la velocidad inicial ha aumentado en un factor de 6 pero la altura máxima ha aumentado en un factor de 140.

Llega a un punto donde un objeto se eleva tan rápidamente que su disminución en velocidad equivale a la disminución de la intensidad gravitacional. Cuando ha perdido la mitad de su velocidad, la intensidad gravitacional también se habrá reducido a la mitad, de tal modo que ahora tomará tanto tiempo para que esa intensidad debilitada elimine la media velocidad restante como el que hubiera tomado a toda la intensidad gravitacional para contrarrestar la velocidad completa. El objeto que se mueve hacia arriba continúa perdiendo velocidad pero a un ritmo cada vez más lento, ya que la gravitación también disminuye constantemente. El cuerpo ascendente no llega a perderla del todo y en ese caso, lo que sube no baja porque nunca termina de subir.

La velocidad mínima a lo que esto ocurre es la *velocidad de escape*.

La velocidad de escape desde la superficie terrestre es de 11.23 kilómetros por segundo. Cualquier cosa que se lance desde la Tierra a una velocidad de 11.23 kilómetros por segundo más subirá y no bajará nunca; se moverá más y más lejos de la Tierra. Todo lo que

se mueva hacia arriba con una velocidad inicial de menos de 11.23 kilómetros por segundo (sin más impulso añadido al que ya tiene<sup>7</sup>) retornará a la Tierra.<sup>8</sup>

El valor de la velocidad de escape depende de la intensidad del campo gravitacional. Al declinar esta intensidad, también declinará la velocidad de escape. Al aumentar nuestra distancia desde el centro de la Tierra, la velocidad de escape disminuye en razón de la raíz cuadrada de aquella distancia.

Supongamos que estamos en el espacio a 57 400 kilómetros del centro de la Tierra. Eso nos situaría nueve veces tan lejos del centro que si estuviéramos en la superficie terrestre. La raíz cuadrada de nueve es 3 y eso significa que la velocidad de escape a la altura de 57 400 kilómetros del centro de la Tierra será solamente de un tercio de la necesaria en la superficie del planeta. A esa altura es de 11.23/3, o sea 3.74 kilómetros por segundo.

La velocidad de escape es diferente en los distintos mundos. Un cuerpo celeste que tenga menos masa que la Tierra y una menor gravedad de superficie también tendrá una menor velocidad de escape desde su superficie. La velocidad de escape de la superficie lunar, por ejemplo, es solamente de 2.40 kilómetros por segundo.

Por otra parte, los mundos que son más masivos que la Tierra tienen mayores velocidades de escape que esta. En la Tabla 8 se dan las velocidades de escape de los diversos planetas, medidas desde la superficie visible (esto es, el borde superior de la cubierta nebulosa en el caso de los planetas gigantes).

<sup>7</sup> Un objeto que tenga una velocidad inicial sin que se le añada otro impulso estará en *vuelo balístico* y debe tener inicialmente la velocidad de escape o más para alejarse indefinidamente de la Tierra. Una nave espacial, sin embargo, puede recibir continuamente el empuje de sus cohetes por lo que, aunque se mueva a menos velocidad que la de escape, puede ascender tanto como desee. Pero cuando no intervienen cosas vivientes, el movimiento en el universo es casi siempre de carácter balístico, con un solo impulso inicial y nada más.

<sup>8</sup> Si un objeto se mueve a menos de la velocidad de escape pero a no menos que un 70 por ciento de esa velocidad, y si también tiene un movimiento lateral, tal vez no pueda escapar de la Tierra pero tampoco caerá sobre su superficie. Entrará en órbita alrededor de la Tierra y allí permanecerá indefinidamente. Un astronauta en órbita terrestre a unos doscientos kilómetros por encima de su superficie deberá viajar por lo menos a 7.94 kilómetros por segundo para permanecer en esa órbita.

TABLA 8. Velocidades de escape de los planetas

	<i>Velocidad de escape (km/seg.)</i>
Mercurio	4.2
Venus	10.3
Tierra	11.23
Luna	2.40
Marte	5.0
Júpiter	60.5
Saturno	35.2
Urano	21.7
Neptuno	24.0
<b>Plutón</b>	5.0

No es sorprendente que el gigante del sistema planetario, Júpiter, tenga la mayor velocidad de escape.

Además, por ser tan voluminoso, Júpiter tiene un campo gravitacional que declina con la distancia más lentamente que el de la Tierra. Ya que la superficie terrestre está a 6 371 kilómetros de su centro, su gravitación se debilita a una cuarta parte de su valor superficial a una altura de 6 371 kilómetros sobre la superficie. A una altura de 19 113 kilómetros sobre la corteza terrestre, la distancia desde el centro de la Tierra es cuatro veces la que hay desde su superficie, y la gravitación terrestre es de solamente 1/16 del valor superficial.

La superficie de Júpiter, sin embargo, está a 71 450 kilómetros de su centro. Por lo tanto será necesario elevarse a una altura de 71 450 kilómetros sobre la superficie de Júpiter antes de que su gravitación descienda a una cuarta parte del valor superficial, y hasta una altura de 214 350 kilómetros sobre su superficie antes de que su gravitación decaiga a 1/16 de su valor de superficie.

La intensidad gravitacional de Júpiter decae con una lentitud mucho mayor que la de la Tierra de tal modo que, a iguales distancias desde el exterior, la intensidad gravitacional de Júpiteres 317.9 veces mayor que la de la Tierra (como debe ser considerando sus respectivas masas) aun cuando la gravedad superficial de Júpiter es solamente 2.64 veces la de la Tierra.

La velocidad de escape de Júpiter también disminuye con la distancia más lentamente que la de nuestro planeta. Desde la superficie de Júpiter la velocidad de escape es solamente 5.4 veces la de la superficie terrestre. La velocidad de escape de Júpiter disminuye con tanta lentitud con la distancia, sin embargo, que aun a una altura de dos millones de kilómetros sobre la superficie de aquel planeta todavía es igual a la de la superficie de la Tierra.

#### DENSIDAD Y FORMACIÓN PLANETARIAS

A pesar de la cuantía de la gravedad superficial y velocidad de escape de Júpiter comparados con los de la Tierra, la impresión que debiéramos tener es de sorpresa por la debilidad del primero.

Después de todo, Júpiter es más de 300 veces más grande que la Tierra y tiene un campo gravitacional más de 300 veces mayor que el de aquella en consecuencia; sin embargo, la gravedad superficial de Júpiter es menos de tres veces la de la Tierra. La misma disparidad entre la intensidad gravitacional, por un aparte, y la gravedad superficial y velocidad de escape por la otra, también podemos apreciarla en los otros planetas gigantes.

La razón de esto es que los planetas gigantes son tan voluminosos que sus superficies (o de cualquier modo sus superficies cubiertas de nubes) están entre cuatro y once veces más alejadas de sus centros planetarios que la superficie de la Tierra de su propio centro.

Y esta no es toda la explicación. Los planetas gigantes tienen densidades bajas, lo que significa que la materia de la que están hechos no está compactada, sino que se encuentra dispersa para ocupar un volumen mayor que el normal de acuerdo con las normas terrestres. Sus superficies están de este modo más alejadas de lo que estarían si fueran más densos los planetas gigantes.

Supongamos que dejamos volar la fantasía para imaginar que el planeta Saturno pudiera comprimirse hasta que su densidad promedio fuera la de la Tierra. Sería necesario comprimirlo hasta el punto en que su volumen fuera únicamente una octava parte del actual. Su radio únicamente alcanzaría la mitad de lo que es ahora: 30 000 kilómetros en vez de los actuales 60 000.

Saturno todavía tendría el total de su masa bajo estas condiciones. Tanto su masa como su campo gravitacional serían aún 95.2 veces los de la Tierra. La superficie estaría más lejos del centro que en el caso de nuestro planeta, pero no mucho más lejos, por lo que cuando Saturno se comprimiera a la densidad de la Tierra, la gravedad superficial no sería 1.15 veces sino 4.60 veces mayor.

Supongamos que también pudiéramos comprimir a Júpiter a la densidad promedio de la Tierra. Su volumen sería solamente la cuarta parte del que tiene ahora, y su radio cinco octavos del que posee en realidad: 44 200 kilómetros en vez de 71 400. Con su masa intacta y su superficie más cercana al centro, la gravedad superficial de Júpiter sería siete veces mayor que la gravedad superficial terrestre.

¿Hay alguna otra manera en la cual podamos acercarnos más al centro de un planeta y aumentar por tanto la intensidad gravitacional? Por ejemplo, si hiciéramos un agujero dentro de la corteza terrestre, ¿aumentaría la fuerza gravitacional sobre nosotros constantemente a medida que nos aproximamos al centro? ¡No!

Supongamos que la Tierra tuviera una densidad promedio de  $5.52 \text{ g/cm}^3$  de un lado a otro y que pudiéramos perforarla sin dificultades. Al excavar, parte de la estructura de la Tierra quedaría encima de nosotros. De hecho, toda una esfera exterior de la estructura terrestre estaría más lejos del centro de lo que estuviéramos nosotros. Las matemáticas de Newton demostraron que esta parte exterior no contribuiría a la fuerza gravitacional tirando de nosotros hacia el centro. Solamente la parte de la Tierra que estuviera más cercana al centro que nosotros, contribuiría a ello, y sería menos con relación a la profundidad que excaváramos.

Esto significa que la atracción gravitacional sobre nosotros sería más y más débil a medida que excaváramos hasta que llegáramos al mismo centro del planeta, donde sería cero. En el centro de la Tierra o de cualquier mundo esférico, toda la masa del mundo estaría tirando de nosotros hacia el exterior porque toda estaría encima de nosotros. Su atracción, sin embargo, sería igual en todas direcciones, por lo que se cancelaría dejándonos con nuestra gravedad cero.

Si pudiéramos imaginar un agujero considerable en el centro de la Tierra o de cualquier mundo esférico, habría gravedad cero en

cualquier punto dentro del agujero. Algunos relatos de ficción científica han presentado una Tierra hueca con espacio interior habitable iluminado con un objeto semejante al Sol situado en el centro. Las historias de Edgard Rice Burroughs sobre "Pellucidar" son un ejemplo. Los habitantes de un mundo de ese tipo, sin embargo, no sentirían atracción gravitacional que los mantuviera fijos a esa superficie interior, sino que flotarían libremente en el espacio interno, algo de lo que no se percató Burroughs.

No, la única forma de aumentar la atracción gravitacional es comprimir todo un mundo, empacando *toda* la masa de manera más compacta de tal modo que pueda uno aproximarse al centro sin dejar de conservar *toda* la masa entre uno mismo y el centro. Un concepto que es de capital importancia para comprender los agujeros negros.

La única cosa del universo que puede comprimir un mundo de esa manera es la misma gravitación, y ya ha ocurrido así en el pasado cuando, por ejemplo, se formaron los planetas de nuestro sistema solar.

En un principio, el material del que se formaron los planetas era una vasta masa de polvo y gas. La mayor parte de este material era: hidrógeno, helio, carbono, neón, oxígeno y nitrógeno, con el hidrógeno constituyendo tal vez el 90% de todos los átomos. Todo esto, girando lentamente en remolinos turbulentos separados, se consolidó poco a poco bajo la débil, pero constante atracción de la gravitación mutua de todos los átomos y moléculas.

Mientras más se compactaba el material, mientras más se comprimía, mayor era la mezcla y mutuo refuerzo de los campos gravitacionales de las partes constituyentes. Aumentó la intensidad gravitacional y también la compresión de modo más y más acelerado.

La mayoría del material permaneció en estado gaseoso. El helio y el neón permanecieron como átomos separados. Los átomos de hidrógeno se combinaron en moléculas de hidrógeno de dos átomos pero permanecieron como moléculas separadas. Los átomos de carbono se combinaron cada uno de ellos con cuatro átomos de hidrógeno para formar moléculas de metano, que permanecieron separadas. Los átomos de nitrógeno se combinaron cada uno de ellos con tres átomos de hidrógeno para formar moléculas de amoníaco,

que se conservaron separadas. Cada uno de los átomos de oxígeno se combinó con dos átomos de hidrógeno para formar moléculas de agua, que se mantuvieron separadas.

Hubo dos elementos moderadamente comunes que no permanecieron como átomos por separado o como pequeñas moléculas separadas. Estos fueron el silicio y el hierro. Los átomos de silicio se combinaron con los del oxígeno pero, en el proceso, formaron moléculas que permanecieron separadas. En este caso, la fuerza electromagnética, continuó trabajando para continuar acumulando más y más combinaciones de silicio con oxígeno sin límite de tiempo. Estas combinaciones, llamadas *silicatos*, formaron partículas de polvo, guijarros, rocas y macizos pétreos. Se añadieron átomos de otros elementos que podían encajar dentro de la estructura del silicio: magnesio, sodio, potasio, calcio, aluminio, y además. Es esta mezcla de silicatos la que forma la materia rocosa de la corteza terrestre que nos es tan familiar.

Los átomos de hierro se mantuvieron unidos en su mayor parte, junto con otros metales, tales como cobalto y níquel, que se mezclaban libremente con ellos.

Así, al girar y comprimirse hacia adentro el polvo y el gas, se formaron grandes trozos de rocas y metales (o combinaciones de ambos). Dado que el metal era más denso que la roca, respondió mejor a la atracción gravitacional. Al formarse un mundo, el metal se hundió hacia el centro, formando un núcleo, en tanto que el material rocoso permanecía como un cascarón por fuera del metal.

La Luna y Marte están hechos principalmente de roca. Mercurio, Venus, y la Tierra se formaron de rocas y metal. Todavía hay pequeños trozos sólidos de materia viajando por el espacio y en ocasiones llegan a la atmósfera terrestre como *meteoros*, los que si sobreviven para llegar a la superficie sólida o líquida de la Tierra se llaman *meteoritos*. Algunos meteoritos son de piedra, otros de metal, y otros de una mezcla de ambos.

Los mundos pequeños como los asteroides de menor tamaño no son lo suficientemente grandes como para tener un campo gravitacional que pueda mantenerlos unidos. Se sostienen por la fuerza electromagnética dentro de y entre sus átomos, que es por supuesto»

enormemente más intensa que la fuerza gravitacional en esos cuerpos tan pequeños.

Los átomos y moléculas que permanecen separados y no constituyen combinaciones infinitas electromagnéticamente asociadas no se unen a los planetas por interacción electromagnética sino que solamente pueden hacerlo gravitacionalmente. Los átomos y moléculas separados que forman la atmósfera gaseosa son ejemplos de esto.

Los cuerpos pequeños carecen de campo gravitacional suficientemente intenso como para retener gases de este tipo. La Luna, por lo tanto, con una gravedad superficial de solamente la sexta parte de la Tierra, no puede retener las moléculas de gas y no tiene una atmósfera. Lo que es más, no puede retener moléculas de líquidos que son *volátiles*, esto es, que se evaporan y convierten fácilmente en gases. Por esta razón la Luna no tiene agua en estado libre en su superficie. Los mundos aún más pequeños que la Luna tampoco tendrían atmósfera y líquidos volátiles.

Mercurio, con una gravedad superficial 2.3 veces la de la Luna, pero que todavía es solamente tres octavos la de la Tierra, tampoco tiene atmósfera ni océanos, en tanto que Marte, con una gravedad superficial semejante a la de Mercurio, se las arregla para tener una atmósfera muy tenue, alrededor de 0.006 veces de la densidad de la nuestra, y algunos rastros de agua.

¿Por qué?

La respuesta es que la temperatura tiene un efecto. Mientras más elevada sea la temperatura, mayor será la rapidez con que se mueven los átomos y moléculas de los gases, más probable será que algunos de ellos se muevan a velocidades mayores que la velocidad de escape del planeta al cual pertenecen, más posible será que la atmósfera (en caso de que exista) se disipe en el espacio, y menos factible es que esa atmósfera haya llegado a formarse. Mientras más baja sea la temperatura, los átomos y moléculas de los gases se moverán con menos rapidez, habrá menos probabilidades de que cualquiera de ellos se mueva a velocidades por encima de la de escape, será más improbable que la atmósfera se disipe, y también será más factible que se haya formado dicha atmósfera.

Marte tiene la misma gravedad de superficie que Mercurio, pero Marte está casi cuatro veces más alejado del Sol que Mercurio y

por lo tanto es considerablemente más frío. En tanto que la superficie de Mercurio puede alcanzar temperaturas de  $350^{\circ}\text{C}$ , la temperatura superficial marciana promedio es de solamente  $20^{\circ}\text{C}$ .

Consideremos a Titán, el satélite más grande del planeta Saturno. La gravedad superficial de Titán probablemente no es mayor que la mitad de la de Marte, pero Titán tiene una temperatura de superficie de unos  $-180^{\circ}\text{C}$ , o sea 90 grados por encima del cero absoluto. Por lo tanto posee una atmósfera que parece ser más densa que la de Marte y puede ser casi tan densa como la de la Tierra.

Mientras menos masivo sea un átomo o molécula, con mayor rapidez se moverá a una temperatura dada, más probable será que escape al espacio, y más difícil será conservarlo como parte de una atmósfera.

De este modo, el campo gravitacional de la Tierra es suficientemente intenso como para retener átomos de argón (con un peso atómico de 40). También puede conservar el dióxido de carbono, dado que el átomo de carbono que contiene tiene un peso atómico de 12 y los dos átomos de oxígeno que lo complementan tienen un peso atómico total de 32, para dar un *peso molecular* conjunto de 44.

De la misma manera el campo gravitacional de la Tierra es lo suficientemente intenso como para retener oxígeno (peso molecular 32) y nitrógeno (peso molecular 28), pero no helio (peso atómico 4) o hidrógeno (peso atómico 2).

Si la acumulación gradual del material que forma un planeta alcanza el tamaño suficiente como para dar lugar a un campo gravitacional lo suficientemente intenso para retener helio o hidrógeno, el planeta empezará a crecer rápidamente, dado que estos dos elementos son los más comunes de los materiales iniciales. El planeta crecerá como una bola de nieve que rueda cuesta abajo, ya que mientras más crece más intenso será su campo gravitacional y podrá reunir con mayor efectividad el helio y el hidrógeno.

Esto ocurre con mayor facilidad lejos del Sol, donde hay más frío y los gases ligeros están hechos de átomos y moléculas que se mueven con relativa lentitud. El resultado es la formación de los planetas gigantes como Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, relativamente alejados del Sol. Es a causa de que están hechos principalmente de los elementos ligeros que poseen densidades tan bajas.

Los planetas que se forman en la cercanía del Sol donde las temperaturas son más elevadas, no pueden retener los elementos livianos; están hechos principal o enteramente de aquellos átomos menos comunes que pueden mantenerse unidos por medio de la fuerza electromagnética. A ello se debe la existencia de los pequeños planetas de roca y metal, con altas densidades, que constituyen el sistema solar interior.

# 3

## La materia comprimida

### INTERIORES PLANETARIOS

Cuando las partículas que forman un planeta se unen, formando guijarros, rocas, montañas, y mundos, se calientan. La gravitación produce un movimiento de aceleración hacia adentro; mientras más grandes se hacen los fragmentos crecientes y más rápido se muevan, mayor será la *energía cinética* (*cinética* viene de una palabra griega que significa "movimiento") que posean. Los fragmentos de mayor tamaño, los *planetesimales* que caen en el creciente mundo, tienen la energía suficiente como para abrir grandes cráteres. Estos se eliminan por los impactos de otros cuerpos que caen y que forman otros cráteres a continuación, hasta que finalmente algunos de los últimos permanecen indefinidamente.

En la Luna, en Mercurio, en Marte, y en los dos pequeños satélites marcianos, Fobos y Deimos, podemos ver los cráteres que marcan esas últimas colisiones. Seguramente los veríamos en Venus si fuera posible echar una ojeada debajo de las nubes que lo rodean y en los satélites de Júpiter si pudiéramos obtener fotografías lo suficientemente detalladas.

Indudablemente, también la Tierra tuvo sus cráteres. En nuestro planeta, sin embargo, el agua corriente y la acción de los seres vivos los ha erosionado, y solamente pueden verse rastros débiles.

Toda la energía cinética del choque de esos cuerpos que se mueven con rapidez no se pierde. La energía no puede perderse; so-

lamente se transforma. En este caso la energía cinética se convierte en calor y se concentra en el centro del mundo que se forma. Esto ocurre en la Tierra y probablemente en todos los mundos de tamaño considerable que han recibido una gran cantidad de energía cinética en el proceso de formación. Este calor interno es producto, en el último análisis, de la energía del campo gravitacional al concentrarse más y más intensamente en el proceso de creación del planeta.

En el caso de la Tierra, desde hace muchos años se obtuvo evidencias de que el interior es muy caliente. Cuando se excavan minas profundas en este planeta, la temperatura asciende constantemente mientras más profundo se penetra. También hay pruebas del calor interno en los manantiales termales y en los volcanes (lo cual probablemente dio al nombre de la antigüedad la idea de un infierno subterráneo).

El moderno conocimiento del interior de la Tierra parte del análisis de las ondas de choque de los terremotos, que viajan a través del cuerpo del planeta. De las rutas que siguen, el tiempo que les lleva viajar, y la manera en que hacen o no cambios repentinos de dirección, puede inferirse mucho sobre las propiedades del interior de la Tierra. Se cree que la temperatura aumenta constantemente mientras más cerca se llega al centro de la Tierra, y en este punto la temperatura puede alcanzar los  $5\,000^{\circ}\text{C}$  (casi tan caliente como los  $6\,000^{\circ}\text{C}$  de la superficie del Sol).

El hecho de que el interior de la Tierra se encuentre al rojo vivo significa que una gran parte de su estructura interna estaba (todavía está) en estado líquido después de que se formó y después de que el planeta alcanzó más o menos su actual tamaño. Eso significa que si estuviera hecho de diferentes clases de materia que no se mezclen fácilmente entre sí, se separarían, moviéndose las variedades más densas hacia el centro y las más livianas desplazándose encima de las otras.

Esto fue lo que ocurrió. La Tierra está hecha totalmente de silicatos rocosos y una mezcla metálica de hierro y níquel en proporción de nueve a uno. El metal se asentó en el centro, donde ahora forma un *núcleo de ferro-níquel*. Alrededor está el *manto de silicato*. El manto es sólido, ya que su temperatura más elevada (la cual se localiza, por supuesto, en su punto más profundo) probable-

mente no es más de  $2\,700^{\circ}\text{C}$ , que no es suficiente para fundir las rocas. El núcleo, que tiene una temperatura considerablemente más elevada, está suficientemente caliente como para que se funda el hierro; así, la Tierra tiene un núcleo líquido.

El calor en el interior de la Tierra se originó en las etapas tempranas de la historia del planeta, hace  $4\,600\,000\,000$  de años. (Se suele llamar *eon* a un millar de millones de años, por lo que podemos decir que la Tierra se formó hace 4.6 eones). Tal vez hace 4 eones se terminaron las principales colisiones planetesimales, y fue poco más lo que se añadió a la Tierra en cuanto a energía cinética. La gravitación había completado su labor de formación.

Parecería que en los 4 eones que han transcurrido desde entonces, el calor interno debiera haberse escapado de la Tierra, y que todo el planeta podría haberse enfriado. La roca del manto y la corteza es, seguramente, un conductor muy pobre del calor, por lo que el calor interno solamente podría escaparse de modo muy lento, pero 4 eones es un tiempo muy largo.

En realidad, la Tierra contiene como parte de sus constituyentes pequeñas cantidades de elementos como uranio y torio que por medio de la fuerza nuclear y de la fuerza débil se desintegran lentamente a través de los eones y liberan calor. (Después de 4.6 eones de existencia en la Tierra todavía se conservan la mitad del uranio original y cuatro quintas partes del torio inicial). El calor liberado por estos elementos radioactivos no es mucho, pero se acumula durante los eones; es por lo menos tan grande como la cantidad de calor interno que se escapa. Lo que se inició por medio de la fuerza gravitacional ahora se conserva con ayuda de las fuerzas nuclear y débil. El interior de la Tierra no se enfriará durante muchos eones.

Naturalmente un planeta de mayor tamaño que la Tierra, habrá recibido una cantidad mucho mayor de energía cinética en el proceso de formación. En primer lugar, la masa que ha chocado con el planeta en formación será cientos de veces mayor. Además, debido al campo gravitacional constantemente más intenso, esas masas habrán chocado a velocidades mayores. Tanto la masa como la velocidad contribuyen a la energía cinética. Por lo tanto, un planeta de mayor tamaño tendrá un interior más caliente que el de la Tierra (y un planeta pequeño lo tendrá más frío).

Consideremos a Júpiter. En los años de 1974 y 1975 dos sondas espaciales, el *Pioneer 10* y *Pioneer 11*, pasaron bastante cerca del planeta (a unos 100 000 kilómetros de su superficie), y por los datos recibidos, los científicos pudieron estimar las temperaturas interiores del gigante del sistema solar.

La distancia de la capa exterior de nubes de Júpiter hasta su centro es de 71 400 kilómetros. Cuando se llega a una profundidad de 2 900 kilómetros debajo de la superficie nebulosa (solamente el 4% de la distancia hacia el centro), la temperatura ya es de unos 10 000 °C, el doble de elevada que la del centro de la Tierra.

A una profundidad de 24 000 kilómetros debajo de la superficie nebulosa, un tercio de la distancia del centro de Júpiter, la temperatura es de 20 000 °C. En el centro mismo la temperatura ha alcanzado 54 000 °C, nueve veces la de la superficie del Sol.

Pero no es solamente la temperatura elevada lo que se produce en los interiores planetarios por medio de la interacción gravitacional. También se producen presiones elevadas.

Bajo la acción del campo gravitacional las capas externas del planeta son atraídas hacia el centro y ejercen presión sobre las capas interiores, que también sufren la atracción hacia el centro y presionan las capas que están debajo de ellas. Esta serie de presiones se acumulan hacia el centro, cada capa transmitiendo el peso y empuje de todo lo que está encima añadido al suyo propio, de tal modo que la presión aumenta constantemente mientras más profundamente se penetra en un planeta.

La presión se suele medir como determinado peso distribuido sobre cierta área; el número de gramos que hace presión sobre un centímetro cuadrado, por ejemplo. Consideremos nuestra atmósfera. Es empujada contra la superficie de la Tierra por la gravitación con intensidad suficiente como para causar que ejerza una presión considerable sobre esa superficie; cada centímetro cuadrado de la superficie terrestre recibe el empuje (o el *peso*, como se suele llamar a este empuje) de 1 033.2 gramos de aire. Podemos decir, entonces, que la presión del aire al nivel del mar es de 1 033.2 g/cm<sup>2</sup>, a lo que llamamos una *atmósfera*. Esta presión también se ejerce sobre nuestros cuerpos, pero en todas las direcciones tanto dentro como afuera, por lo que se anula y no nos percatamos de ello.

En la parte más profunda del océano la presión del agua es un poco más de 1 000 000 g/cm<sup>2</sup>, o sea unas mil atmósferas. Las criaturas vivientes expuestas a estas atmósferas, tanto dentro como fuera, están perfectamente a gusto bajo estas condiciones (pero, si un animal de las profundidades marinas es subido a la superficie, la presión interna disminuye solamente de modo ligero, en tanto que la presión externa declina enormemente. Sus células estallarán y el animal morirá. Nosotros mismos moriríamos por las razones opuestas si las presiones sobre nosotros aumentarían en forma considerable).

Si consideramos el interior de la Tierra, las presiones ascenderán aún más, ya que la roca y el metal son más densas que el agua, y las profundidades son mayores (las columnas de roca y metal que pesan sobre las capas que descansan debajo son más largas que las columnas de aire que pesan sobre la superficie de la Tierra o las columnas de agua que pesan sobre el fondo del mar).

Así, a una profundidad de 2 200 kilómetros, una tercera parte de la distancia hacia el centro de la Tierra, la presión ya será de 1 000 000 de atmósferas o sea mil veces más que la presión de la parte más profunda del océano. A una profundidad de 4 000 kilómetros será de 2 500 000 atmósferas. En el centro de la Tierra posiblemente llegue a los 3 700 000 atmósferas. Esta enorme presión fuerza al núcleo líquido para que se solidifique en el mismo centro a pesar de su enorme temperatura, por lo que dentro del núcleo central de ferro-níquel líquido hay un pequeño núcleo central de ferro-níquel sólido.

Naturalmente, una vez más Júpiter muestra condiciones aún más extremas. Su región central tiene columnas de material once veces más profundas que el núcleo de la Tierra (aunque el material de Júpiter es menos denso que el nuestro) y sufre una presión de 10 000 000 de atmósferas.

#### RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

¿Qué hay en el material del interior de los mundos que hace posible que resistan presiones tan enormes?

Para responder a esto, consideremos una mesa en cuya superficie se ha colocado un objeto, digamos un libro. La gravitación de la Tierra sirve para atraer al libro hacia abajo. Si el libro pudiera moverse libremente, caería en respuesta a la gravitación de la Tierra y continuaría cayendo hasta el mismo centro de la Tierra si nada lo detuviera.

Pero hay algo que lo detiene: la mesa. Ciertamente que la mesa también es atraída hacia abajo pero el piso sobre el que descansa impide que caiga, el cual a su vez está sostenido por los muros del edificio, cuya caída impiden los cimientos, los cuales a su vez...

Si nos concentramos nuevamente en la mesa y en el libro, ¿por qué no cae a través de la mesa el libro en respuesta a la atracción de la Tierra?

No puede. El libro está hecho de átomos, lo mismo que la mesa. El exterior de todos los átomos tanto del libro como de la mesa, está formado por electrones. Eso significa que existe, por decirlo así, una superficie de electrones en el libro y también una superficie de electrones en la mesa.

Las dos superficies de electrones se repelen entre sí, y tanto más intensa es la fuerza electromagnética que la gravitación, que toda la atracción de la enorme Tierra no puede forzar a que el libro pase a través de la mesa en contra de la resistencia de los electrones repelentes. En otras palabras, la fuerza gravitacional es contrarrestada por la fuerza electromagnética, y se llega a un equilibrio en el cual el libro descansa tranquilamente sobre la mesa, sin pasar a través de ella en respuesta a la atracción gravitacional ni elevándose sobre ella en respuesta a la repulsión electromagnética.

Sin embargo si el peso de los objetos sobre la mesa es suficientemente grande, si se apilan suficientes libros de gran tamaño, la mesa se romperá en algún punto débil; los átomos que la forman se separan en un punto donde el aglutinante electromagnético es más débil que en otros lados.

Si el peso está colocado sobre otra clase de objeto, un bloque de cera por ejemplo, bajo la presión del peso, las moléculas de cera se deslizarán muy lentamente una sobre otras. El bloque de cera se deformará, y el peso se hundirá en la cera; no dentro de la sustancia, sino más abajo de la superficie original porque la cera fluirá hacia los

lados para darle paso. (Después posiblemente volverá a cerrarse sobre el peso).

Ambos efectos se producen en la Tierra bajo el peso de sus propias capas superiores. Hay figuras, por ejemplo, que representan puntos débiles en la corteza de la Tierra. De hecho, esta corteza está hecha de cierto número de grandes placas que constantemente se están separando, reuniéndose, y frotándose lateralmente entre sí. Un súbito movimiento del material en un lado de una grieta contra el material de la otra, es el equivalente a un repentino rompimiento bajo tensión, y el resultado es un terremoto. A cierta distancia debajo de la superficie, donde el calor hace que la roca sea capaz de deformarse lentamente a la manera de la cera, la roca ardiente o *magma*, puede escurrir a través de los puntos débiles de las capas más duras, y producir una erupción volcánica.

Mientras más se penetra en el interior de la Tierra, sin embargo, habrá menos posibilidades de que haya grietas y fallas, y la deformación se hace más lenta. Algo más debe suceder al material a grandes profundidades y bajo grandes presiones. Es la *comprensión*.

En el laboratorio, los científicos están familiarizados con los efectos del aumento de presión en relación con los gases. Los gases se componen de moléculas en movimiento que están separadas unas de otras por distancias que son grandes comparadas con su propio tamaño. Si se comprimen los gases, las moléculas se agrupan más estrechamente, y una parte del espacio vacío, por decirlo así, se expulsa. Los gases se comprimen fácilmente en pequeños volúmenes por medio de la presión. Los gases pueden comprimirse a un volumen de 1/1 000 de su volumen original o menos antes de que se haya expulsado todo el espacio vacío y las moléculas entren en contacto.

En los líquidos y sólidos, sin embargo, los átomos y moléculas ya están en contacto y por lo tanto no pueden comprimirse como los gases, expulsando simplemente el espacio vacío. A esto se debe que nada ocurra a los líquidos o sólidos colocados bajo la clase de presión que basta para comprimir a los gases. Se dice entonces que los líquidos y sólidos son "incomprimibles".

Esto es verdad en condiciones ordinarias y hace posible que funcionen las prensas hidráulicas y que las armazones de hierro sostengan a los rascacielos. Sin embargo, no es una verdad absoluta.

Si se hace presión sobre líquidos y sólidos los átomos en sí sufren la compresión; los electrones son empujados hacia adentro en dirección del núcleo. Esto sucede aun bajo la más ligera presión, la del libro sobre la mesa por ejemplo. Los electrones externos son forzados hacia adentro a lo largo del contacto; la cantidad de desplazamiento de los electrones hacia adentro bajo el tipo de presiones que encontramos en la vida cotidiana es tan microscópicamente pequeña, sin embargo, que es inapreciable.

Al comprimirse los átomos y desplazarse sus electrones hacia adentro en dirección del núcleo, la intensidad de la repulsión entre los electrones de los átomos adyacentes (que también se desplazan hacia dentro con las presiones) aumenta. Es algo semejante a comprimir un resorte que tiende a ejercer mayor presión hacia afuera entre más se le comprime. En ambos casos se llega a un nuevo equilibrio. La presión del exterior comprime al átomo o al resorte hasta que la presión de respuesta desde adentro aumenta hasta el punto que se equilibra con la presión externa.

A pesar de que una compresión ilimitada basta para una presión ordinaria, si se da *suficiente* presión, la compresión de átomos se puede medir y los electrones se desplazarán hacia adentro de un modo apreciable. Esto significa que los átomos de las sustancias bajo presión ocupan menos espacio, lo que equivale a que habrá menos masa en un volumen dado, que es otro modo de decir que la densidad aumenta.

Por lo tanto, podríamos esperar que en el interior de la Tierra las densidades de las sustancias que la forman aumenten y sean más elevadas de lo que serían si aquellas sustancias estuvieran en la superficie y sin otras presiones mayores que la de la atmósfera.

En realidad, la densidad de la sustancia de la Tierra aumenta con la profundidad y con la presión que se ejerce sobre ella. Tan pronto como Cavendish calculó la masa de la Tierra, fue evidente de inmediato que la Tierra no podía tener la misma densidad homogénea, que tendría que ser considerablemente más densa en las profundidades que en la superficie.

El océano tiene una densidad de  $1 \text{ g/cm}^3$ , y las rocas de la corteza terrestre exterior, aunque difieren en densidad unas de otras.

tienen una densidad promedio de  $2.8 \text{ g/cm}^3$ . Sin embargo, la densidad total de la Tierra tiene un promedio de  $5.52 \text{ g/cm}^3$ .

Puesto que las capas exteriores de la Tierra tienen una densidad menor de  $5.52 \text{ g/cm}^3$  las capas interiores deberán tenerla de más de  $5.52 \text{ g/cm}^3$ . El núcleo interior de la Tierra consiste en ferro-níquel fundido, y es ciertamente más denso que la capa exterior. La densidad del hierro, el componente principal del núcleo, es de  $7.86 \text{ g/cm}^3$  en la superficie del planeta. Eso sin embargo, no basta para justificar la densidad promedio del planeta. Lo que la explica es el aumento de densidad en todo el proceso de presión y compresión.

El manto de la Tierra se extiende desde casi la superficie hasta una profundidad de unos 2 900 kilómetros, cerca de 4/9 partes de la distancia hacia el centro. En todo este espesor la composición química del manto no cambia mucho, y una muestra de su sustancia en la superficie tendría una densidad de un poco más de  $3 \text{ g/cm}^3$ . Su densidad crece constantemente elevándose con la profundidad, sin embargo, y en la parte inferior del manto es cerca de  $6 \text{ g/cm}^3$ . La densidad promedio del manto es de  $4.5 \text{ g/cm}^3$ .

A una profundidad de 2 900 kilómetros, se pasa del manto rocoso al núcleo líquido de ferro-níquel, y hay un súbito aumento en la densidad, ya que el hierro es más denso que la roca. Sin embargo, aunque el hierro tiene una densidad de  $7.86 \text{ g/cm}^3$  en la superficie bajo la presión del manto de 2 900 kilómetros de espesor, la densidad del núcleo en su capa exterior es de unos  $9.5 \text{ g/cm}^3$ . Esta densidad se eleva aun más conforme se penetra más en el núcleo, y en el mismo centro de la Tierra es de unos  $12 \text{ g/cm}^3$ . La densidad promedio del núcleo es  $10.7 \text{ g/cm}^3$ . Aun la máxima densidad del núcleo, sin embargo, apenas es la mitad de la densidad del osmio en la superficie terrestre. Si el núcleo de la Tierra estuviera hecho de osmio, la presión llevaría su densidad a unos  $30 \text{ g/cm}^3$ .

(Anteriormente dijimos que si la Tierra tuviera una densidad homogénea, la atracción gravitacional declinaría constantemente a medida que penetráramos debajo de la superficie y que llegaría a cero en el centro. A causa de la cambiante densidad en el interior de la Tierra no ocurre así. Hay una cantidad tan grande de la masa de la Tierra concentrada en el relativamente pequeño núcleo líquido, que contiene 31.5% de la masa terrestre en solamente el

16.2% de su volumen que la atracción gravitacional en realidad aumenta ligeramente a medida que se penetra en la Tierra. De hecho, para cuando nos encontramos, imaginariamente, en los límites del manto y el núcleo, la atracción gravitacional sobre nosotros sería 1.06 veces la de la superficie. Al penetrar al núcleo, empero, la atracción gravitacional finalmente empezaría a disminuir y llegaría a cero en el centro).

En el centro de la Tierra los átomos tienen solamente un 85% del diámetro que tendrían en la superficie. Los electrones han sido empujados en un 15% de la distancia hacia el núcleo central, y ese pequeño empuje hacia adentro crea suficiente presión hacia afuera como para equilibrar lo peor que pueda lograr la atracción gravitacional de la Tierra hacia el centro. Esta es otra indicación de cuánto más intensa es la fuerza electromagnética que la fuerza gravitacional.

#### LAS ESTRELLAS

Vemos, entonces, que todos los objetos hasta el tamaño de Júpiter por lo menos son estables, gracias a la fuerza electromagnética.

Para empezar, las moléculas individuales de gas, las pequeñas partículas de polvo, y las partículas sólidas que alcanzan el tamaño de guijarros, rocas y montañas, se mantienen unidas sólo debido a la fuerza electromagnética. La fuerza gravitacional de cuerpos tan pequeños es tan escasa en comparación que puede ignorarse.

En los objetos del tamaño de asteroides grandes, los campos gravitacionales establecidos por estos objetos, empiezan a atraer la materia de los objetos hacia adentro con fuerza apreciable. Las regiones interiores sufren compresión gravitacional notable, por lo tanto, y el fenómeno aumenta a medida que son más grandes los objetos que consideremos: la Luna, la Tierra, Saturno, Júpiter. En cada caso los átomos del objeto son comprimidos hasta que el nivel de compresión produce un empuje hacia afuera capaz de equilibrar la atracción gravitacional hacia adentro.

El equilibrio así establecido es esencialmente permanente.

Imaginemos un cuerpo como la Tierra o Júpiter aislado en el universo. La fuerza gravitacional y la fuerza electromagnética en

ese mundo permanecerían en un equilibrio eterno, y la estructura material del cuerpo en sí permanecería, hasta donde sabemos, en una condición general estable para siempre. Tal vez hubiera pequeños terremotos al ajustar su posición la sustancia del planeta. El cuerpo pudiera enfriarse lentamente hasta que no tuviera ya más calor, ni el centro ni en la superficie, congelándose sus océanos y atmósfera, pero estos son lo que pudieran llamarse, desde el punto de vista astronómico, cambios triviales.

El equilibrio no es, sin embargo, entre iguales. Aunque la fuerza electromagnética es inimaginablemente más intensa que la fuerza gravitacional, es la primera de ellas la que lleva la peor parte.

La fuerza electromagnética, por más grande e intensa que sea, sol' mente opera en el átomo individual. Cada átomo individual en su interior está comprimido y no puede pedir ayuda, por decirlo así, a sus vecinos, ya que todos sufren una compresión igual. Cuando, por lo tanto, un átomo ejerce la máxima resistencia a la compresión, todos la ejercen bajo la misma presión. Si se aumenta la presión aún más, cada átomo y el conjunto de todos ellos llegarán al final de su resistencia.

La fuerza gravitacional, sin embargo, por más increíblemente débil que sea, se acumulará indefinidamente a medida que se agrupa más y más materia en un lugar, ya que cada partícula de materia añade su propio campo gravitacional al total. Aunque la resistencia a la compresión puede llegar solamente hasta cierto límite, las fuerzas que producen la compresión pueden aumentar sin límites.

La fuerza electromagnética resiste la compresión y soporta (quejándose, podemos imaginar) las presiones de las capas terrestres al ser empujadas hacia adentro por el campo gravitacional de la Tierra. También soportan (con quejidos más angustiosos, en nuestra fantasía), las mucho mayores presiones de las cajas de Júpiter empujadas hacia adentro por su enorme campo gravitacional.

Bien, entonces, ¿qué sucede si amontonamos materia suficiente para hacer un cuerpo mayor que Júpiter? ¿No llegará un momento en que el campo gravitacional se haga tan intenso y las presiones en el centro tan grandes, que cedan los átomos que deban soportarlo todo, como una mesa que se rompe finalmente bajo el enorme peso que se ha colocado encima de ella?

¿Pero podemos decir honestamente que sea posible un montón de materia más grande que Júpiter? Pudiera ser que, por alguna razón, Júpiter fuera lo más grande que un objeto pudiera crecer.

Por supuesto que no. Júpiter puede ser con mucho el planeta más grande que hayamos observado, pero tenemos a mano, aún más cerca que Júpiter, un objeto de tamaño mucho mayor: el Sol.

El Sol es mayor que Júpiter en la misma proporción en que este es más grande que la Tierra. El Sol tiene un diámetro de 1 391 400 kilómetros, que es 9.74 veces mayor que el de Júpiter. Se necesitarían casi diez Júpiteres colocados lado a lado para cubrir la distancia entre caras opuestas del Sol. Comparemos esto con las once Tierras puestas en hilera que se requerirían para igualar el diámetro de Júpiter.

Y en tanto que Júpiter es 317.9 veces más grande que la Tierra, el Sol es 1 049 veces más masivo que Júpiter.

Otra indicación del gran tamaño del Sol en comparación con cualquiera de los planetas, aun el mismo Júpiter, la encontramos en la gravedad superficial. En la superficie visible del Sol, la atracción de su campo gravitacional es 28 veces la de la Tierra, o 10.6 veces la de Júpiter.

La velocidad de escape de la superficie del Sol es de 617 km/seg, que es 55 veces la de la Tierra y 10.2 veces la de Júpiter. De hecho, a una distancia de 149.5 millones de kilómetros del centro del Sol la velocidad de escape de este cuerpo celeste es todavía de 40.6 km/seg.

Dado que 149.5 millones de kilómetros es la distancia de la Tierra al Sol, se desprende que la velocidad de escape del Sol desde una posición sobre la Tierra, es considerablemente mayor que la velocidad de escape de la Tierra misma. Esto significa que cuando se envía un satélite a la Luna, Marte, o Venus a una velocidad lo suficientemente elevada como para liberarse de la atracción gravitacional terrestre, no queda Ubre necesariamente de la atracción gravitacional del Sol. Dicho satélite tal vez no gire alrededor de la Tierra, pero permanece en órbita alrededor del Sol.

Hasta ahora solamente dos objetos hechos por el hombre han alcanzado velocidades que los liberen del Sol, así como de la Tierra, enviándolos fuera del sistema solar. Estas son las dos sondas de Júpiter,

*Pioneer 10 y Pioneer 11*. Ello se logró haciendo que las sondas giraran alrededor de Júpiter para que el campo gravitacional de este planeta las acelerara hasta alcanzar la velocidad adecuada (la velocidad de escape del Sol que es, de cualquier modo, menor a la distancia de Júpiter que a nuestra propia distancia).

Hay diferencias más importantes entre el Sol y Júpiter. Este es mucho más grande que la Tierra, pero todavía es un planeta. Tanto Júpiter como la Tierra son, al menos en la superficie, cuerpos fríos, y estarían oscuros si no fuera porque reflejan la luz del Sol.

El Sol, sin embargo, es una *estrella*. Brilla con luz propia, resplandeciente.

¿Es una coincidencia que el Sol sea bastante más masivo que cualquier planeta que conozcamos y que también tenga luz propia? ¿O ambas cosas van juntas?

Podemos argüir que el tamaño y la luz van juntos de acuerdo con estos datos:

Al constituirse un mundo, se convierte en calor la energía cinética de la caída de sus componentes, como hemos visto anteriormente. Mientras más grande sea ese mundo, mayor será su calor interno. La Tierra está de calor blanco en su centro y Júpiter está mucho más caliente.

El Sol, entonces, al ser mucho más grande que Júpiter, estaría mucho más caliente en el centro, lo bastante tal vez para que la región exterior ya no pudiera servir como aislamiento suficiente para mantener fría la superficie. Pudiéramos argüir que el calor interno de un objeto del tamaño del Sol sería suficiente para fluir al exterior en cantidad que baste para mantener la superficie solar a la temperatura de calor blanco de 6 000°C.

El problema de este punto de vista sobre el Sol y su estructura, es que se puede demostrar su imposibilidad.

El Sol, después de todo, está descargando energía a un ritmo amplio y ciertamente lo ha estado haciendo durante toda la historia. Parece que así ha ocurrido durante muchos millones de años en el pasado, a juzgar por el registro de la vida sobre la Tierra a través de esas épocas pasadas. Sin embargo, si toda la energía del Sol fuera solamente ganada mediante la energía cinética de su formación,

entonces simplemente no tendría la suficiente energía a su disposición para formar el Sol que conocemos.

En 1853. Hermann Ludwing Ferdinand von Helmholtz (1821-1894) trató de calcular cuánta energía cinética se requeriría para abastecer la radiación solar. Decidió que el Sol hubiera tenido que contraerse a partir de una masa de materia de 300 000 000 de kilómetros hasta su tamaño actual en unos 25 millones de años para producir toda la energía que el Sol ha gastado durante ese tiempo.

Con un diámetro de 300 millones de kilómetros, sin embargo, el Sol hubiera llenado completamente la órbita de la Tierra, la cual tendría entonces por lo tanto unos 25 millones de años cuando mucho. Pero eso es imposible. Los geólogos y los biólogos están de acuerdo en que la Tierra tiene una edad mucho mayor.

Esto significa que el Sol en realidad obtenía energía de una fuente ajena a su propia contracción, que esta energía la irradiaba como luz y calor, y que pudiera continuar irradiándola durante toda la historia de la Tierra sin enfriarse en modo alguno. Durante el siglo XIX, sin embargo, no se pudo imaginar ninguna fuente de la cual obtuviera el Sol su energía sin que la hipótesis tuviera que recurrir a elementos inexplicables.

Todo cambió a fines de ese siglo, cuando se descubrió la estructura del átomo. Se conoció la existencia del núcleo atómico, y quedó claro que allí dentro del núcleo había energía mucho mayor que la existente entre los electrones, de la cual se derivan las formas más comunes de energía.

El Sol no es, por lo tanto, una bola de fuego ordinaria. Es una bola de fuego nuclear, por decirlo así. En algún lugar de su centro su energía surge de la fuerza nuclear, mil veces más intensa que la fuerza electromagnética.

#### MATERIA DEGENERADA

La densidad promedio del Sol es  $1.41 \text{ g/cm}^3$ , un valor un poco mayor que el de Júpiter. Es esta una densidad asociada con líquidos o sólidos constituidos por las variedades más ligeras de átomos. Definitivamente no se asocia con los gases. Aun el gas más denso en la

Tierra tiene una densidad de solamente un poco más de  $1/100$  que la del Sol.

La cifra de  $1.41 \text{ g/cm}^3$  representa solamente la densidad promedio del Sol. Dentro de las profundidades del Sol su sustancia, bajo la enorme presión de las capas superiores, que son empujadas hacia abajo por la enorme gravitación solar, debe estar comprimida hasta una densidad considerablemente mayor que el promedio.

Las capas exteriores del Sol son claramente gaseosas, ya que lo único que podemos ver a través del telescopio son grandes descargas de gas que se desprenden de la superficie. La temperatura superficial del Sol es de  $6\,000^\circ\text{C}$ , y ninguna sustancia conocida puede permanecer en estado líquido o sólido a esa temperatura bajo presiones ordinarias.

El interior del Sol debe ser considerablemente más caliente que la superficie, pero las presiones deben ser enormes. Parecería natural que aun en fecha tan tardía como 1890, se supusiera que bajo aquellas presiones la sustancia solar estuviera comprimida en sólidos o líquidos de calor blanco y que eso explicara la elevada densidad del Sol. (Se sabe ahora que esto es cierto en Júpiter).

Una consideración más profunda de las propiedades del Sol en las primeras décadas del presente siglo, sin embargo, pusieron en claro que se conduce como si fuera homogéneamente gaseoso, aun en el mismo centro. Esto podría haber parecido absolutamente imposible a los científicos de 1890, pero una generación después parecía bastante natural porque para entonces se había logrado conocer el interior del átomo. Se comprendió que el diminuto átomo es una estructura de partículas sueltas aún más diminutas.

Se explicó entonces de este modo:

Los átomos están comprimidos en el centro de la Tierra y la fuerza expansiva de estos átomos comprimidos, es lo suficientemente grande como para sostener toda la sustancia de las capas superiores del planeta como muchos atlas diminutos. Los átomos están aún más comprimidos en el centro de Júpiter, y por lo tanto, pueden sostener la mucho mayor masa de aquel planeta gigantesco.

Sin embargo, aun los pequeños atlas tienen su punto de resistencia límite. La masa del Sol, un millar de veces mayor que la de Júpiter, bajo el empuje hacia adentro de una enorme atracción

gravitacional sobrepasa los límites de resistencia de los átomos intactos. La presión en el centro del Sol es igual a 100 000 millones de atmósferas, o sea 10 000 veces más que la de Júpiter.

La constante acumulación de materia fortalece la intensidad gravitacional hasta el punto en que sobrepasa a la fuerza electromagnética que conserva intactos los átomos, y esos átomos, por decirlo así, se derrumban.

Las capas de electrones se destroran bajo la presión, y los electrones se pueden mover sin que los retengan aquellas capas. Se unen para formar una especie de fluido electrónico no estructurado, que ocupa menos espacio del que llenarían como parte de las capas en átomos intactos. Al empujar conjuntamente, aumenta aún más la repulsión electromagnética entre ellos; el fluido electrónico puede resistir una compresión gravitacional mucho mayor que los átomos intactos.

Dentro del fluido electrónico, los núcleos se mueven libremente y pueden aproximarse más entre sí, tan cercanamente como el azar determine. Aun pueden llegar a chocar unos contra otros.

En los átomos ordinarios, como existen en la Tierra, o aun en el centro de Júpiter, las capas de electrones actúan como "parachosques". Las capas de electrones de un átomo no pueden ser interpenetradas muy profundamente por las de otro; y en tanto el núcleo permanezca en el centro de estas capas, se mantienen relativamente separadas. Una vez que las capas de electrones destruyen y los electrones se comprimen en un fluido electrónico más compacto, disminuye considerablemente el promedio de separación de los núcleos.

La materia en que se convierten las capas de electrones una vez rotas y en la cual se mueven los núcleos en un fluido electrónico recibe el nombre de *materia degenerada*. Este tipo de materia puede ser mucho más densa que la materia ordinaria. Son los núcleos los que constituyen la porción masiva de la materia y también los que contribuyen realmente a la masa de cualquier objeto. Si se les fuerza a estar más cerca unos de otros en la materia degenerada en comparación con la materia ordinaria, habrá mucho mayor masa por volumen en la primera y, por lo tanto, una densidad mucho más elevada.

A pesar de esta elevada densidad, puesto que el núcleo solamente constituye un millonésimo de billón del volumen de los átomos intactos, puede todavía moverse libremente, del mismo modo que los átomos o moléculas en los gases ordinarios. La materia degenerada, a pesar de su elevada densidad, por lo tanto, actúa como un gas y tiene las propiedades características de un gas, un "gas nuclear", si se quiere decir así.

La primera discusión del concepto de un Sol homogéneamente gaseoso apareció en 1907, en un libro del astrónomo suizo Jacob Robert Emden (1862-1940). La idea fue complementada en 1916 por el astrónomo inglés Arthur Stanley Eddington (1882-1944).

El astrónomo razonó que si el Sol fuera una bola homogénea de gas, con átomos ordinarios en las capas exteriores y átomos destruidos en las capas inferiores, debería actuar como cualquier otro gas. Cuando se estudian los gases en el laboratorio, siempre hay un equilibrio entre cualquier fuerza que tienda a comprimir el gas y la temperatura de ese gas que tiende a expandirlo.

En el Sol la atracción gravitacional, por lo tanto, debe ser contrarrestada por la temperatura interna del Sol. El tamaño del campo gravitacional solar y de su efecto compresor ya eran conocidos. Eddington trató de determinar qué tan elevadas debieran ser las temperaturas solares para producir un efecto expansivo que pudiera compensarlo.

Los resultados fueron sorprendentes. Las enormes compresiones producidas por la gravitación del Sol, dan como resultado una densidad de la materia solar en el centro que debe ser alrededor de 100 g/cm<sup>3</sup>, cuatro veces tan denso como el material más denso que exista sobre la superficie de la Tierra. Sin embargo, el Sol, aun con un núcleo tan denso, se comporta como si fuera un gas homogéneo. La temperatura central del Sol es de 15 millones de grados centígrados. Se necesita una temperatura tan elevada para mantener al Sol expandido lo suficientemente como para producir una densidad promedio de solamente 1.41 g/cm<sup>3</sup> ante su gravitación. (Lo intrigante de esta densidad no es que sea tan grande, sino que sea tan pequeña).

¿Y qué es lo que produce una temperatura tan enorme en el núcleo del Sol? Era claro en la época de Rutherford, que solamente

podía lograrse con la energía nuclear. Las *reacciones nucleares* en las cuales los núcleos absorben, desprenden, y transfieren hadrones, producen mucha más energía que las *reacciones químicas* con las que estamos familiarizados, en la cual los átomos absorben, desprenden, y transfieren electrones. Las primeras implican la fuerza nuclear, que es mucho más intensa que la fuerza electromagnética que interviene en las segundas.

La siguiente pregunta, entonces, es, cuáles reacciones nucleares intervienen para darle energía al Sol.

Para responder a esa pregunta, es necesario saber algo sobre la constitución química del Sol, de tal modo que se pueda empezar con una noción razonable de qué núcleo existe en el centro y cuáles reacciones nucleares son posibles.

Afortunadamente, la composición química del Sol puede deducirse mediante el análisis de su luz. La luz está compuesta de ondas diminutas, y la luz solar consiste en una mezcla de luz de todas las posibles longitudes de onda.

Los diferentes átomos producen luces con longitudes de onda particulares características solamente de ellas, y en ocasiones absorben luz de exactamente las mismas longitudes de onda. La luz solar puede descomponerse por medio de un instrumento llamado *espectroscopio* para formar un *espectro*, en el cual todas las longitudes de onda se arreglan en órdenes.<sup>9</sup> En el espectro hay millares de líneas oscuras que representan longitudes de onda que han sido absorbidas por los átomos en las capas exteriores del Sol. Las posiciones de esas líneas en el espectro pueden determinarse con precisión, y de estas posiciones pueden identificarse las diversas clases de átomos que hicieron la absorción.

Ya desde 1862, el físico sueco Anders Joñas Angstrom (1814-1874) detectó la presencia de hidrógeno en el Sol. El conocimiento de la composición del Sol aumentó constantemente y en 1929 el astrónomo norteamericano Henry Norris Russell (1877-1957) pudo describir detalladamente la composición del Sol.

<sup>9</sup> Nosotros percibimos las diferentes longitudes de onda de la luz como diferencias en color, y el ejemplo más espectacular de un espectro que ocurre en la naturaleza es el arcoiris.

Alrededor del 90% de todos los átomos del Sol, según resultó, son de hidrógeno, y por lo tanto parece plausible suponer que el núcleo en el centro debe ser predominantemente de hidrógeno, que consiste en protones simples. Por lo tanto, las reacciones nucleares que deben requerirse para proporcionar las vastas reservas de energía que el Sol irradia constantemente, ciertamente deben de comprender el núcleo de hidrógeno. Simplemente no hay ninguna otra clase de núcleo que pueda explicar toda la energía que el Sol ha irradiado durante sus cinco mil millones de años de existencia.

En 1938, el físico germano-norteamericano Hans Albrecht Bethe (1906-2005) aprovechó los nuevos conocimientos sobre las reacciones nucleares en el laboratorio para calcular lo que pudiera estar pasando en el *Sol*.

A las grandes presiones y densidades del núcleo del centro del Sol, los núcleos de hidrógeno, protones, están agrupados muy estrechamente y no están protegidos por capas intactas de electrones. A la enorme temperatura del centro del Sol deben moverse a una velocidad mucho mayor de la que podrían tener en la Tierra. La combinación de cercanía y velocidad significa que los protones chocan entre sí muy frecuentemente y con enorme fuerza. Ocasionalmente, permanecen juntos *fusionándose* en núcleos de mayor tamaño.

Pueden discutirse los detalles menores de lo que ocurre, pero parecen ciertos los resultados generales. En el centro del Sol, los núcleos de hidrógeno se fusionan para formar núcleos de helio, el espécimen que les sigue en complejidad. Cuatro protones se combinan para formar un núcleo de helio, formado de cuatro nucleones: dos protones y dos neutrones.

Aquí tenemos, entonces, una diferencia fundamental entre un planeta y el Sol.

En un planeta la atracción gravitacional hacia adentro da como resultado de la compresión de átomos, que produce un empuje compensador hacia afuera gracias a la fuerza electromagnética.

En el Sol, la mucho mayor atracción gravitacional hacia adentro ya no puede ser contrarrestada por la resistencia de los átomos a la compresión, y los átomos se despedazan, por decirlo así, bajo la presión. En este caso, la gravitación es contrarrestada por el empuje expansivo del calor producido por reacciones nucleares que no son

posibles en las temperaturas y presiones más bajas de los interiores planetarios.

Sin duda existe cierta masa crítica por debajo de la cual es suficiente la compresión de los átomos, y el cuerpo que tenga esa masa será un planeta; y encima de la cual los átomos centrales se fracturarán, iniciándose una reacción nuclear, y el cuerpo será entonces una estrella. En algún sitio de la escala de masas entre la de Júpiter y la del Sol debe estar esa masa crítica.

Se conocen estrellas que tienen una masa mucho menor que la del Sol. Una estrella que en los catálogos aparece como Luyten 726-8B tiene aproximadamente 1 / 25 de la masa del Sol, como podemos apreciar a la luz de su débil brillo propio. Luyten 726-8B es solamente 40 veces más masiva que Júpiter, pero es una estrella y no un planeta. -

Ciertamente, el mismo Júpiter es sospechoso. Irradia al espacio unas tres veces más de energía que la que recibe del Sol. ¿De dónde proviene esa energía extra?

Pudiera ser que Júpiter todavía se está contrayendo ligeramente y que la energía cinética de esa contracción se convierte en calor. También pudiera ser que los átomos del centro de Júpiter están a una presión y temperatura que los pone al borde del punto de ruptura y que tiene lugar una pequeña cantidad de fusión de hidrógeno, apenas la suficiente para justificar la pequeña fuga de calor extra del planeta.

Si es así, Júpiter está al borde de una ignición nuclear. Por supuesto que no se debe temer una ignición real; no es lo suficientemente grande y estará siempre solamente al borde de esa ignición.

## 4

### Enanas blancas

#### GIGANTES ROJAS Y COMPAÑERAS OSCURAS

Hay una diferencia entre planetas y estrellas, que a la larga es más importante que el simple hecho de que los planetas son menos masivos que las estrellas, o que los planetas son fríos y opacos y las estrellas calientes y brillantes.

Los planetas están en una situación de estabilidad esencialmente estática. El equilibrio entre la atracción gravitacional hacia adentro y el campo electromagnético de los átomos comprimidos ejerciendo presión hacia afuera es un equilibrio perpetuo. Puede, hasta donde sabemos, mantenerse eternamente si no hay interferencia exterior. Si estuviéramos solos en el universo, la Tierra estaría tal vez helada y sin vida, pero su estructura física persistiría posiblemente para siempre.

Las estrellas, sin embargo, se encuentran en un estado de estabilidad dinámica, ya que una estrella mantiene su estructura a costa de algo interno que está cambiando constantemente. La atracción gravitacional hacia adentro ciertamente permanece sin cambiar, pero el empuje exterior de la temperatura en el centro del Sol, que equilibra la atracción, depende de reacciones nucleares que consumen hidrógeno y producen helio. El Sol permanece en su estado solamente a expensas de convertir constantemente 600 000 millones de kilogramos de hidrógeno en 595 800 millones de kilogramos de helio *cada segundo*.<sup>9.bis</sup>

<sup>9\_\_bis</sup> Los 4 200 millones de kilogramos faltantes se convierten en la radiación que fluye constantemente del Sol en todas direcciones.

Afortunadamente, hay una cantidad tan enorme de hidrógeno en el Sol que aun a este ritmo de consumo no debemos temer que ocurra algo drástico en el futuro cercano. El Sol ha estado consumiendo hidrógeno en sus hornos atómicos durante unos 5 000 millones de años y aún así queda lo suficiente para durar por lo menos entre 5 y 8 mil millones de años más.

Pero aun esos 5 u 8 mil millones de años no representan una eternidad. ¿Qué sucederá cuando se termine el hidrógeno?

Hasta donde pueden decirlo los astrónomos con base en sus estudios sobre las reacciones nucleares y la naturaleza de las estrellas que podemos ver, parece que la disminución de hidrógeno es el preludio de cambios importantes en la estructura de una estrella.

A medida que el Sol, por ejemplo, use el hidrógeno y acumule helio en su centro, el núcleo se contraerá más al concentrarse los átomos más pesados en la porción interior del campo gravitacional. El núcleo se hará más denso y más cálido. Finalmente el calor del núcleo empezará a elevarse rápidamente, y el calor adicional forzará a que las regiones exteriores del Sol se expandan enormemente.

Aunque el calor total de las regiones externas del Sol será entonces considerablemente más elevado que ahora, se extenderá una superficie bastante mayor. Cada fracción de esta superficie tendrá menos calor que ahora, y la nueva superficie será más fría que la actual. Donde el Sol tiene una temperatura superficial de  $6\,000^{\circ}\text{C}$ , la superficie del Sol expandido no tendrá una temperatura mayor de  $2\,500^{\circ}\text{C}$ . A esa temperatura más baja su brillo será rojizo. Esta combinación de gran tamaño y color rojizo dará a esta etapa de la historia de la vida de una estrella el nombre de *gigante roja*. Hay estrellas que actualmente han alcanzado esta etapa, notablemente Betelgeuse y Amares.

En su máxima extensión, la estrella gigante roja en que se convertirá nuestro Sol tendrá un tamaño suficiente para abarcar la órbita de Mercurio, o aun la de Venus.<sup>10</sup> La Tierra sería entonces inhabitable; la vida sobre el planeta sería imposible en las primeras

<sup>10</sup> Naturalmente, si una estrella es más grande que el Sol, se expandirá aún a mayor distancia. La estrella Amares es tan grande que si estuviera en el lugar del Sol, su gigantesca esfera incluiría las órbitas de Mercurio, Venus, la Tierra y Marte.

etapas de la expansión del Sol. (Tal vez para entonces la humanidad habrá dejado la Tierra para buscar alojamiento en otros planetas que giren alrededor de otras estrellas, o en colonias artificiales construidas en otros rincones del espacio).

Para cuando nuestro Sol llegue a su expansión máxima, como una gigante roja, estará terminando con sus últimas reservas de hidrógeno. El centro del Sol, sin embargo, habrá alcanzado una temperatura suficientemente alta para entonces (por lo menos  $100\,000\,000^{\circ}\text{C}$ ) que causará que los átomos de helio que se han formado de los átomos de hidrógeno durante los pasados eones, se fundan en un núcleo aún más grande y aquellos en otros núcleos de mayor tamaño hasta que se formen núcleos de hierro, cada uno de los cuales tendrá 26 protones y 30 neutrones.

La cantidad de energía disponible para un mayor crecimiento del núcleo es solamente el 6% de la cantidad originalmente disponible para la conversión de hidrógeno en helio. Una vez que se ha formado el hierro, las materias llegan a un callejón sin salida. No hay disponible más energía para las reacciones nucleares.

Después que se ha utilizado el hidrógeno, por lo tanto, y la gigante roja está en su máxima extensión, su vida restante como un objeto alimentado por reacciones nucleares será de menos de un millar de millones de años, aun considerablemente menos.

Y cuando las reacciones nucleares disminuyen y se debilitan, no hay entonces nada para resistir la inexorable atracción hacia adentro del campo gravitacional producido por su propia masa. La gravitación ha estado aguardando, esperando paciente e incansablemente durante muchos miles de millones de años, y finalmente la resistencia cede ante ese empuje, y el Sol expandido, o cualquier gigante roja, no le queda otra cosa que hacer sino encogerse.

Se inicia el encogimiento, y eso es lo que nos pone de lleno en el camino hacia el agujero negro con dos paradas antes de la meta que examinaremos.

La historia de nuestra primera estación empieza con un astrónomo alemán llamado Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846). Él fue uno de los que intentaron medir la distancia a las estrellas y de hecho fue el primero en alcanzar el éxito en su empresa.

Las estrellas tienen su movimiento individual (*movimiento propio*) pero es ciertamente muy pequeño en apariencia porque aquellas están lejos. (Piénsese lo muy lentamente que parecen moverse en el cielo los aeroplanos que vuelan a gran altura comparado con los que vuelan a poca altura).

Además del movimiento propio, las estrellas parecen moverse en respuesta al cambio del ángulo en el cual se contemplan desde la Tierra, mientras ésta se mueve a su vez en su amplia órbita elíptica alrededor del Sol. Al moverse la Tierra alrededor del Sol de esta manera, una estrella debería trazar una elipse muy pequeña en reflejo de este movimiento, (siempre y cuando se eliminen el movimiento propio y otros efectos de interferencia). Mentías mas lejos esté la estrella, menor será la elipse, y si se puede medir el tamaño de la elipse (llamada paralaje) por medio de ciertas técnicas telescópicas muy delicadas, podrá establecerse la distancia a la que se encuentra la estrella.

En 1838, Bessel anunció que había logrado su objetivo para una estrella bastante opaca llamada Cisne 61, la cual a su vez está a unos 150 billones de kilómetros de la Tierra. Aun la luz que viaja a una velocidad de 299 792.5 kilómetros por segundo no puede cubrir con rapidez esa enorme distancia. Son necesarios once años-luz para viajar de Cisne 61 hasta nosotros; por lo tanto, se dice que Cisne 61 está a 11 años-luz de distancia de nosotros.

Bessel trató de determinar la distancia de otras estrellas, e inició sus trabajos con Sirio, que por diversas razones parecía aún más cercana que Cisne 61. Sirio es la estrella más brillante del cielo, y esta brillantez pudiera deberse a su relativa cercanía.

Bessel estudió cuidadosamente la posición de Sirio noche tras noche y notó la manera en la cual se mueve muy lentamente en relación con las otras estrellas en el curso de un movimiento propio mayor que el promedio. Esperaba que el movimiento cambiara de manera que indicara la formación de una elipse en respuesta al movimiento de la Tierra alrededor del Sol. Esta elipse existe, pero superimpuesta sobre ella notó un ondulamiento que claramente no tenía nada que ver con la manera en que la Tierra se mueve alrededor del Sol.

Después de un cuidadoso análisis del intrigante movimiento de Sirio, Bessel concluyó que se movía en una elipse propia y que completaba cada vuelta de esa elipse en unos 50 años.

Lo único que puede hacer que una estrella se mueva en una elipse como esa es la respuesta a un campo gravitacional. Nada más se sabía en la época de Bessel que pudiera hacerlo, ni tampoco se sabe en nuestros tiempos, salvo un campo gravitacional lo suficientemente grande e intenso como para sacar a una estrella de su órbita y forzarla a describir una elipse que podía medirse a una gran distancia y que debió originarse en una masa tan grande como para constituir otra estrella

Bessel no podía ver nada en la cercanía de Sirio que pudiera servir como fuente de un campo gravitacional; sin embargo, algo tenía que haber allí. Decidió, por lo tanto, que había una masa semejante a una estrella en el lugar adecuado, pero que se originaba en una estrella que no era brillante sino oscura. Era un planeta del tamaño de una estrella, por decirlo así. Los astrónomos por lo tanto hablaron de la "compañera oscura" de Sirio.

Bessel señaló igualmente que Procyon, otra estrella brillante, también tenía un movimiento ondulante, y por lo tanto, concluyó que de modo similar tendría una compañera oscura. Parecía aun como si las compañeras oscuras pudieran ser bastante comunes, pero que este hecho quedaba oculto por la imposibilidad de verlas directamente.

Hoy en día desconfiaríamos de tal conclusión. Sabemos que cualquiera con una masa estelar, debe encender en reacciones nucleares en el centro y arder si es algo parecido a nuestro Sol. Tendría que haber condiciones muy diferentes de aquellas que conocemos dentro de nuestro Sol para tener una masa estelar y estar oscuro al mismo tiempo.

A Bessel y a sus contemporáneos, sin embargo, no pareció nada misterioso un compañero oscuro. Era una estrella que por cualquier razón ya no brillaba más. Debía haber consumido toda su reserva de energía (sea lo que sea, pues Bessel no podía saber nada de reacciones nucleares) y seguía girando, tan grande como siempre y con un campo de gravitación tan grande como siempre, pero frío y oscuro.

¿Cómo podría sospechar Bessel qué objeto tan extraño había descubierto? Seguro que nunca podría relacionarla con gigantes rojas, pues en su época no se imaginaba siquiera su existencia.

#### SUPERDENSIDAD

La oscuridad de las compañeras oscuras terminó en 1862, gracias al trabajo del fabricante de telescopios Alvan Graham Clark (1832-1897). Clark preparaba una lente para un telescopio ordenado para la Universidad de Mississippi poco antes de la guerra civil. (Debido a la guerra no pudo entregarse y fue a parar a la Universidad de Chicago).

Cuando estuvo hecha la lente, Clark decidió probarla en la práctica. La apuntó hacia la estrella Sirio en el curso de sus pruebas y notó una diminuta chispa de luz en su vecindad, algo cuya existencia no estaba indicada en ninguno de los mapas estelares.

Al principio, Clark supuso que la chispa de luz era el resultado de una imperfección de la lente y que aquella era parte de la luz de Sirio que se desviaba de algún modo. Otras pruebas, sin embargo, demostraron que no había ningún defecto en la lente. Tampoco pudo hacer nada que hiciera desaparecer o cambiar de posición aquella chispa. Además, esa posición correspondía exactamente al sitio donde se suponía que debería estar en ese momento la acompañante oscura de Sirio.

La conclusión fue que Clark tenía ante sus ojos la compañera oscura. Su luz era muy débil, solamente de 1/10 000 del brillo de Sirio, pero no era totalmente oscura. La compañera oscura de Sirio se había convertido en la compañera poco brillante de Sirio y ahora se le suele llamar Sirio B, en tanto que la Sirio original recibe el nombre de Sirio A. Sirio es lo que se llama una *binaria*, o sistema de doble estrella.

En 1895, el astrónomo germano-norteamericano John Martin Schaeberle (1853-1924) detectó una chispa de luz cerca de Procyon. Su "compañera oscura" era también una compañera poco brillante y ahora se le conoce como Procyon B.

En realidad esto no parece cambiar mucho las cosas. Significa que si bien las compañeras no son estrellas totalmente muertas, al menos son estrellas moribundas; aunque no totalmente oscuras, están apagándose.

Sin embargo, para cuando Schaeberle vio la débil compañera de Procyon, las cosas estaban cambiando.

En 1893, el físico alemán Wilhelm Wien (1864-1928) había demostrado que la naturaleza de la luz emitida por cualquier objeto caliente (ya sea una estrella o una hoguera) varía con la temperatura. Se pueden estudiar las longitudes de onda de la luz emitida y la naturaleza de las líneas oscuras en el espectro y llegar a conclusiones firmes en cuanto a la temperatura de cualquier cosa que esté irradiando luz.

De acuerdo con la ley de Wien, cualquier estrella que se esté apagando y por lo tanto enfriándose, deberá tener un color rojo antes de oscurecerse. Pero Sirio B y Procyon B son blancas; de luz débil, tal vez, pero blancas.

No bastaba estudiar a las compañeras simplemente con la vista. Lo que se necesitaba era un espectro, de tal modo que las longitudes de onda y las líneas negras pudieran estudiarse en detalle. Eso no era fácil, dado que las compañeras son tan tenues y están tan próximas a sus brillantes acompañantes, que tienden a perderse.

A pesar de todo, en 1915 el astrónomo norteamericano Walter Sydney Adams (1876-1956) pudo pasar la luz de Sirio a través del espectroscopio produciendo un espectro que pudo estudiar. Una vez analizado aquel espectro, no le quedó duda de que Sirio B no estaba apagándose. Está caliente, casi tan caliente como Sirio A y con una temperatura considerablemente más elevada que la de nuestro Sol.

En tanto que Sirio A tiene una temperatura superficial de 10 000°C, la de Sirio B es de 8 000°C. La temperatura de la superficie del Sol es de solamente 6 000°C.

Por la temperatura de Sirio A, sabemos lo brillante que debe ser cada pequeña porción de su superficie; cuatro veces más brillante que una porción igual a la superficie del Sol. También sabemos lo luminoso que debe ser el conjunto de la superficie a juzgar por su aparente brillo cuando lo contemplamos desde la Tierra a una distancia de 8.8 años-luz. Debemos calcular que su irradiación de luz

es 35 veces mayor que la del Sol; y que para producir esa cantidad de luz (considerando la que produce cada fracción de su superficie), debe ser de un diámetro 1.8 veces mayor que el del Sol, o sea 2 500 000 kilómetros.

(Como se ve, al terminar el siglo los astrónomos empezaron a darse cuenta que el Sol, que había reinado como el más glorioso de todos los cuerpos celestes y de cuya energía dependían todos los seres vivientes de la Tierra, era después de todo una estrella de tamaño promedio y nada más. Sirio A es del doble del tamaño que el Sol, casi dos veces tan caliente, y más de treinta veces tan luminoso. Pero no es necesario sentirse decepcionado por eso. Si Sirio A remplazara al Sol en el cielo, sería demasiado brillante, los océanos de la tierra hervirían y desaparecerían como una nube de gas y pronto nuestro planeta sería un mundo muerto).

Lo misterioso, sin embargo, era Sirio B. Con su temperatura superficial, toda la faz de ese astro debería producir casi tanta luz como la producida en la superficie de Sirio A. Para explicar entonces por qué Sirio B debería, ser bastante más opaco que Sirio A, debemos concluir que la superficie de Sirio B es menor, bastante menor. A la temperatura de Sirio B, debería tener una superficie de solamente  $1/2\ 800$  que la de Sirio A.

Para tener esa superficie, Sirio B debe tener un diámetro de solamente  $1/53$  del de Sirio A, o sea 47 000 kilómetros. Si así ocurre, entonces Sirio A es apenas de tamaño planetario, ya que su diámetro sería más o menos el de Urano o Neptuno. Tiene solamente un tercio del diámetro de Júpiter y su volumen es  $1/30$  del de este planeta. De hecho, su diámetro es apenas 3.7 veces el de la Tierra.

El descubrimiento de Adams significa que Sirio B es una clase de estrella completamente nueva y que su temperatura está al blanco caliente pero también que su tamaño es muy pequeño comparado con estrellas ordinarias como nuestro Sol. Sirio B es una *enana blanca* y, como pronto se descubrió, también lo es Procyon B.

Si Sirio B no solamente fuera de tamaño planetario sino también de masa planetaria, no habría modo de que pudiera arder a temperaturas tan elevadas. Los objetos del tamaño y masa de Urano o Neptuno simplemente no tienen el tipo de presiones en sus centros que necesitarían para encender los fuegos nucleares.

No podía pensarse, sin embargo, en que Sirio B tuviera una masa planetaria, cualquiera que fuera su tamaño. No podría causar que una gran estrella como Sirio A se apartara de su curso en línea recta, si no tuviera ella misma una masa como la de las estrellas. Por lo menos la desviación no sería tan marcada.

Por medio de la distancia conocida que nos separa de Sirio A y Sirio B, y la aparente posición en el cielo, podemos calcular lo separadas que están Sirio A y Sirio B. En promedio están separadas por 3 000 millones de kilómetros, una distancia un poco mayor que la que existe entre el planeta Urano y nuestro Sol. Sin embargo, en tanto que Urano tarda 84 años en girar alrededor del Sol, Sirio B solamente necesita 50 años para completar su órbita alrededor de Sirio A.

Con esto se puede calcular que la intensidad de los campos gravitacionales de Sirio A y Sirio B es 3.4 veces los del Sol y Urano. Esto significa que Sirio A y Sirio B juntos son 3.4 veces más masivos que el Sol y Urano juntos (o que el Sol, ya que Urano añade tan poco a la masa solar que bien puede ignorarse).

En realidad, Sirio B no gira alrededor de Sirio A. Ambas estrellas giran alrededor del centro de gravedad del sistema. Se les puede imaginar como los dos extremos de una mancuerna gimnástica que giran alrededor de un punto, el centro de gravedad, situado a lo largo del bastón de madera que las conecta. Si los dos extremos de la mancuerna fueran exactamente iguales, el centro de gravedad estaría a la mitad de la distancia entre ellas. Si una fuera más masiva que otra, el centro de gravedad estaría cerca de la más grande, y en proporción con la diferencia que tenga con la más pequeña.

En el caso del Sol y cualesquiera de sus planetas, el Sol es tan superiormente grande que el centro de gravedad está siempre tan cerca del centro del Sol como para que sea razonablemente correcto decir que el planeta gira alrededor del Sol. Lo mismo ocurre cuando hablamos de la Luna girando alrededor de la Tierra, dado que la Tierra es 81.3 veces más grande que la Luna, por lo que el centro de gravedad del sistema Tierra-Luna se encuentra 81.3 veces más cerca de la Tierra que de la Luna. Lo mismo se aplica cuando hablamos de cualquier otro sistema planeta-satélite entre la familia de mundos que rodean al Sol.

En el caso de Sirio A. y Sirio B, sin embargo, la masa se divide con más o menos igualdad, por lo que el centro de gravedad está en, el centro de la distancia que los separa. Ambas estrellas giran alrededor de ese centro, por lo tanto cambian considerablemente sus posiciones mientras giran. (Si no fuera así, Bessel no hubiera notado una clara ondulación en el movimiento de Sirio a través del cielo).

Con las órbitas de Sirio A y Sirio B puede determinarse la ubicación del centro de gravedad de las dos estrellas. Con la posición de este centro de gravedad en relación con ambos cuerpos celestes resulta que Sirio A debe tener 2.5 veces la masa de Sirio B. Dado que la masa total de las dos estrellas es 3.4 veces la del Sol, vemos que Sirio A, la hermosa estrella que brilla en nuestro cielo, tiene 2.4 veces la masa de nuestro Sol en tanto que Sirio B, esa chispa apenas perceptible, tiene una masa un poco mayor que la de nuestro Sol.

No es sorprendente que Sirio A tenga 2.4 veces la masa de nuestro Sol. Después de todo es de mayor tamaño, más caliente, y más brillante. Sirio B, sin embargo, es claramente una anomalía. Con un tamaño semejante al de Urano o Neptuno, tiene una masa aproximadamente igual a la de nuestro Sol.

Eso significa que debe ser muy densa. Su densidad promedio deberá ser algo como  $35\,000\text{ g/cm}^3$ , que es 3 000 veces más densa que el material del núcleo de la Tierra y 350 veces más densa que el material en el centro del Sol.

En la época en que Adams calculó el tamaño de Sirio B, esto fue una verdadera sorpresa ya que era muy difícil aceptar densidades de ese tamaño. Y sin embargo, cuatro años antes del descubrimiento de Adams, Rutherford había calculado la estructura del átomo y demostrado que la mayoría de su masa está concentrada en el ultradiminuto núcleo. A pesar de ello, los científicos todavía no se acostumbraban a esa noción, y era difícil de aceptar la idea de átomos desintegrados, cuyas partes se encogían para agruparse más estrechamente de lo que ocurre en los átomos intactos. Había, pues, un escepticismo considerable sobre la posibilidad de la existencia de las enanas blancas.

#### EL EFECTO EINSTEIN

Sin embargo, poco tiempo después del descubrimiento de Adams, se calculó una manera posible de examinar la materia desde una dirección completamente diferente.

En 1915, el físico germano-suizo Albert Einstein (1879-1955) publicó su teoría general de la relatividad. Esta representaba un punto de vista del universo totalmente nuevo, como un todo. De acuerdo con esta nueva teoría, podía haber algunos fenómenos observables que no serían posibles si fueran correctos los antiguos puntos de vista. Por ejemplo, cuando la luz es irradiada por un cuerpo masivo, el fuerte campo gravitacional del cuerpo debería, de acuerdo con la relatividad general, tener algún efecto sobre la luz.

Siguiendo los trabajos hechos en 1900 por otro científico alemán, Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), Einstein había demostrado que la luz no consiste solamente en ondas, sino en ondas reunidas en paquete que en cierto modo actúan como partículas. Estas partículas de luz se llaman *fotones*, de acuerdo con una palabra griega que significa "luz".

Los fotones tienen una masa de cero cuando están en reposo y por lo tanto no actúan como fuente de un campo gravitacional, ni responden a la gravitación de modo ordinario. Sin embargo, los fotones nunca están en reposo sino que viajan (en el vacío) a una velocidad particular precisa: 299 792.5 kilómetros por segundo. (Al igual que cualquier otra partícula sin masa). Cuando viajan a esta velocidad los fotones poseen cierta energía; y aunque la acción de un campo gravitacional no puede alterar la velocidad de los fotones en un vacío (nada puede hacerlo), sí puede cambiar la dirección en la cual viaja la luz, y puede disminuir la energía.

El cambio de dirección fue observado en 1919. El 29 de mayo de ese año fue visible un eclipse total de Sol desde la isla Príncipe, cercana a la costa de África. Las estrellas brillantes fueron visibles en el cielo cerca del Sol oscurecido y la luz que enviaban en dirección de la Tierra, pasaba cerca del Sol. La teoría de Einstein predecía que esta luz debería desviarse ligeramente hacia el Sol al pasar en su cercanía, por lo que las estrellas mismas, observadas a lo

largo de la nueva dirección parecían estar ubicadas ligeramente más lejos del disco solar de lo que realmente estaban. Las posiciones de las estrellas fueron registradas cuidadosamente durante el eclipse y se repitió la medición medio año después, cuando el Sol estaba en la mitad opuesta del cielo y no podía ejercer efecto alguno en la luz de aquellas mismas estrellas. Resultó que la luz se comportó de acuerdo con las predicciones de la teoría de Einstein y ello contribuyó mucho a establecer la validez de la relatividad general.

Naturalmente, los astrónomos estaban ansiosos de llevar a cabo otras comprobaciones de la teoría. ¿Qué había acerca de la pérdida de energía de la luz en un campo gravitacional? La luz que se aleja del Sol debe hacerlo al sufrir la atracción de la gravitación solar. Si los fotones eran partículas ordinarias con masa, sus velocidades disminuirían al elevarse. Dado que los fotones tienen una masa cero en reposo, eso no ocurre, pero de todos modos cada fotón pierde un poco de su energía.

Esta pérdida de energía debiera detectarse en el espectro solar. Mientras más larga sea la longitud de onda de un fotón particular, menor será su energía. En el espectro, donde la luz aparece en orden de longitudes de onda desde el violeta (con la menor longitud de onda) hasta el rojo (con la más larga), hay una progresión constante desde la alta energía del violeta hasta la baja energía del rojo.

Si la luz solar pierde energía debido a que se desprende contra la atracción gravitacional, cada fragmento de ella deberá terminar ligeramente más cerca del extremo rojo del espectro como si no hubiera efecto gravitacional. Ese *desplazamiento hacia el rojo* pudiera detectarse al estudiar las líneas del espectro solar y comparando sus posiciones con las líneas oscuras en los espectros de objetos sujetos solamente a efectos gravitacionales pequeños, por ejemplo, en los espectros de objetos brillantes o luminosos en los laboratorios de la Tierra.

Lamentablemente, no tenía caso buscar este desplazamiento hacia el rojo (al que se llamó "efecto Einstein") en el espectro solar, porque el efecto es tan tenue que aun el poderoso campo gravitacional del Sol no lo produciría en cantidad suficiente como para medirlo.

Pero entonces Eddington (quien trabajaba en la estructura interna del Sol y tenía gran entusiasmo por la teoría de la relatividad) señaló que si Sirio B era tan masivo y tan diminuto como parecía, aquello podía ser la respuesta. No es tanto la atracción gravitacional general lo que afecta a la luz como lo es la intensidad en la superficie, donde la luz se desprende y donde inicia su viaje hacia el espacio.

Ahora bien, la intensidad del campo gravitacional del Sol es 333 500 veces mayor que la de la Tierra, pero la superficie solar está tan lejos de su centro, que la gravedad superficial del Sol es solamente 28 veces la de la Tierra.

¿Y en cuanto a Sirio B? Tiene la masa del Sol comprimida en un objeto del tamaño de Urano. Tiene la misma intensidad gravitacional que el Sol, pero se puede estar mucho más cerca del centro de Sirio B al permanecer en su superficie (por supuesto, solamente de modo imaginario), que lo que se pudiera estar con respecto al centro del Sol.

La gravedad superficial de Sirio B es, por tanto, unas 840 veces la del Sol y 23 500 veces la de la Tierra. El efecto Einstein pudiera ser mucho más pronunciado en la luz que sale de Sirio B que la luz que sale del Sol.

Eddington sugirió a Adams, quien era el experto en Sirio B, que estudiara el espectro de su luz para ver si podía detectar el efecto Einstein. En 1925, Adams intentó el experimento y encontró que ciertamente podía detectar el desplazamiento y precisamente hasta donde predecían las teorías de Einstein.

No solamente ofreció esto otra verificación importante de la relatividad general, sino que si la teoría era correcta, proporcionaría una prueba vigorosa de que Sirio B era ciertamente tan masiva y tan pequeña como había sostenido Adams, ya que solamente así podía tener suficiente gravedad superficial como para producir el efecto Einstein que se había observado.

En 1925, por lo tanto, tuvo que aceptarse la existencia de las enanas blancas y desde entonces no ha habido dudas al respecto.

La enorme gravedad de superficie de Sirio B implica una enorme velocidad de escape. Desde la superficie de la Tierra un proyectil enviado al cielo sin más fuente de energía que el ímpetu inicial debe empezar su viaje a una velocidad mínima de 11.23 km/seg, si se in-

tenta que abandone permanentemente la Tierra. Desde la superficie del Sol la velocidad de escape es de 617 km/seg. Desde la superficie de Sirio B la velocidad de escape sería de unos 3 300 km/seg.

Aun 11.23 km/seg es una velocidad bastante rápida para las normas terrestres. Una velocidad de 3 300 km/seg es enorme. Viene a ser 1/90 de la velocidad de la luz.

#### FORMACIÓN DE LAS ENANAS BLANCAS

Veamos nuevamente, lo que ocurrirá después de que nuestro Sol llegue a la etapa de gigante roja y agote toda la energía nuclear de su interior. La atracción gravitacional, que ya no tendría la oposición expansiva del calor, empezará a encoger el Sol (como parece ocurrir con otras estrellas que están en esa etapa) hasta un punto en que la gravitación encuentra la oposición de algo más que el calor.

Al encogerse, ganará en densidad hasta que llegue al punto en que pudiera estar compuesto por átomos intactos en contacto, al igual que los cuerpos planetarios tales como la Tierra y Júpiter. Una masa del tamaño de una estrella, sin embargo, produce un campo gravitacional lo suficientemente fuerte como para desintegrar a esos átomos intactos. De este modo, continuará el encogimiento. Si este proceso se detiene finalmente, tendrá que ocurrir mediante las partículas subatómicas que forman los átomos.

¿Cuáles son esas partículas subatómicas, y de qué manera cambian al envejecer el Sol (o cualquier otra estrella)?

Para empezar, el Sol, o cualquier estrella, está formado principalmente por hidrógeno. El hidrógeno consiste en un núcleo formado por un solo protón con carga positiva equilibrado por un solo electrón con carga negativa para completar el átomo.

Al envejecer el Sol, poco a poco su hidrógeno se fusiona y cuatro de sus núcleos formarán un solo núcleo de helio. Dado que el helio consiste en dos protones y dos (eléctricamente descargados) neutrones, podemos decir que cuando todo el hidrógeno se ha fusionado y agotado, la mitad de los protones de la estrella se han convertido en neutrones. Al sufrir otra fusión, los núcleos de helio durante la formación de la gigante roja hasta que se convierten

finalmente en núcleos de hierro, unos cuantos protones más se transforman en neutrones, y al final la estrella será una mezcla de 45/55 de protones y neutrones.

¿Qué pasa mientras tanto con los electrones?

Cada vez que un protón con carga positiva se convierte en un neutrón sin carga, algo tiene que ocurrir con aquella carga positiva. No puede desvanecerse por sí misma. El núcleo que se fusiona la expulsa con una cantidad mínima de masa. Esta diminuta cantidad de masa es suficiente para producir una partícula exactamente igual que el electrón a excepción de que tiene una carga positiva en vez de negativa. Este electrón con carga positiva recibe el nombre de *positrón*. Por cada cuatro protones que se fusionan para dar lugar a un núcleo de helio, se forman dos positrones.

Una vez que se forma el positrón, es seguro que chocará con uno de los electrones presentes en el Sol (y en toda la materia ordinaria) en un abrumador número de ocasiones. Aunque una carga eléctrica positiva no puede desaparecer por sí misma y tampoco puede hacerlo una carga eléctrica negativa, las dos pueden cancelarse entre sí cuando se encuentren. Cada vez que chocan un positrón y un electrón, hay una *aniquilación mutua* tanto de carga eléctrica como de masa, y los dos se convierten en radiaciones energéticas llamadas *rayos gamma*, que no poseen ni carga eléctrica ni masa.

De esta manera, alrededor de la mitad de los electrones del Sol habrán sido destruidos en el curso de su vida como estrella normal. La mitad restante será suficiente para equilibrar los protones que hayan quedado como tales.

En la conversión de protones a neutrones y la aniquilación mutua de electrones y positrones se pierde suficiente masa como para convertirla en las vastas cantidades de radiación que el Sol emite durante su vida como un reactor de fusión de hidrógeno. Otra parte de la masa se pierde porque el Sol siempre deja escapar en todas direcciones una corriente de protones, el llamado *viento solar*.

Toda esta pérdida es trivial comparada con la masa total del Sol. Para cuando el Sol, o cualquier estrella que exista aislada, haya completado su periodo de gigante roja y esté lista para encogerse, puede tener todavía hasta el 98 por ciento de su masa original; es esta masa la que empieza a encogerse.

Tanto los electrones como los protones y neutrones tienen propiedades como ondas al igual que propiedades como partículas. Mientras mayor sea la masa de una partícula, más cortas serán las ondas asociadas con ella y más pronunciadas sus propiedades como partículas. A menor masa, mayor será la longitud de las ondas y más acentuadas las propiedades como tales.

Los protones son mucho más masivos que los electrones (1 836 veces más masivos). Los neutrones son 1 838 veces más masivos que los electrones. Los protones y neutrones se asocian con ondas muy pequeñas y son partículas pronunciadas de tamaño extremadamente pequeño. El electrón se asocia con ondas de longitud relativamente larga y por lo tanto ocupan mucho más espacio que los protones y neutrones.

Al encogerse la estrella, entonces, más allá de los límites señalados por los átomos intactos, son los relativamente voluminosos electrones, por decirlo así, los que primero entran en contacto.

Los electrones puestos en contacto están mucho más estrechamente agrupados que lo que estarían en átomos intactos. Así, Sirio B y el Sol tienen masas más o menos iguales, pero Sirio B ocupa solamente 1/27 000 del espacio que ocupa el Sol. (Es algo así como la diferencia entre el espacio que ocuparían cien pelotas de ping pong intactas y el que llenarían las mismas pelotas rotas en pedacitos de plástico).

A pesar de todo, aun después de que los electrones han entrado en contacto, los mucho más pequeños (pero más masivos) protones y neutrones, y los núcleos atómicos que forman, tienen todavía espacio suficiente para moverse. Estos núcleos están mucho más justos que si formarían parte de átomos intactos, pero todavía están lo suficientemente separados como para que las distancias entre ellos sean muy grandes en comparación con su propio tamaño.

En lo que concierne a los núcleos, aun siendo tan densa una estrella enana blanca en su mayor parte es espacio vacío. En Sirio B, por ejemplo, que pudiera casi considerarse como un fluido electrónico continuo, los núcleos ocupan solamente 1/4000000000 de su volumen. Los núcleos, por lo tanto, muestran las propiedades de los gases.

Naturalmente, una estrella enana blanca no tiene una estructura homogénea, al igual que cualquier otro objeto masivo. Desde la superficie hasta el centro hay una presión creciente.

Una enana blanca tiene una superficie casi normal, una capa externa de átomos intactos que son atraídos enérgicamente hacia abajo por la intensa atracción gravitacional en la superficie pero que no sufren el peso de otras capas encima de ellos. En esta "atmósfera" de la enana blanca pueden existir diferentes clases de átomos, aun una pequeña cantidad de hidrógeno que de algún modo, durante la vida de la estrella, ha escapado a la fusión porque esos átomos en particular nunca estuvieron en las profundidades estelares. La atmósfera puede tener un espesor de solamente un par de cientos de metros.

A medida que se profundiza en el material de la enana blanca, estos átomos atmosféricos gradualmente se descomponen en electrones y núcleos que se mueven libremente. Allí, ocurren pequeñas series de reacciones nucleares que continúan hasta que se agota todo el hidrógeno. A mayor profundidad, los electrones entran en contacto y empiezan a resistirse a sufrir una mayor compresión. Mientras más estrechamente estén comprimidos, mayor será su resistencia, y es esta resistencia la que finalmente pone un alto a la contracción de la estrella en la etapa de enana blanca.

En el centro de la enana blanca el material es considerablemente más denso que en el promedio de la estrella. La densidad central puede ser tan alta como 100000000 g/cm<sup>3</sup>.

Cuando se forma una enana blanca, tiene una temperatura muy elevada, ya que la energía cinética de los impactos se ha convertido en calor. Una enana blanca recién formada puede tener una temperatura superficial de más de 100 000 °C.

Al irradiar la enana blanca su calor al espacio que la rodea, sin embargo, debe disminuir su contenido de energía, y muy poca de esta disminución puede compensarse por las reacciones nucleares en los restos de material más o menos normal que en un principio queda en sus capas exteriores. Gradualmente la enana blanca se enfría. Se conocen enanas blancas viejas cuyas temperaturas superficiales no son de más de 5 000 °C.

La pérdida de calor no afecta seriamente la estructura de la enana blanca. Las estrellas ordinarias se encogerían si perdieran calor, ya que es el calor producido en el centro el que las conserva expandidas contra la atracción de la gravedad que tiende a encogerlas. Una enana blanca resiste la atracción gravitacional hacia adentro por medio del empuje hacia afuera de los electrones comprimidos, y esto no depende del calor. Los electrones resisten la compresión tan eficientemente cuando están fríos que cuando están calientes.

Presumiblemente, entonces, continuará la pérdida de temperatura, sin cambios significativos en la estructura de la enana blanca, hasta que esta ya no esté lo suficientemente caliente como para brillar. Se convierte en una *enana negra* y continúa enfriándose a través de los eones hasta que su contenido de energía es solamente la del promedio de todo el universo: unos pocos de grados por encima del cero absoluto.

Este es un proceso muy lento, y la duración total del universo no ha sido suficientemente larga para que se haya dado la extinción total de energía de alguna enana blanca. Todas las enanas blancas que se hayan formado todavía tienen brillo, pero con el paso del tiempo, se apagarán.

Hasta esta parte del libro hemos discutido dos clases de objetos eternos; esto es, objetos que pueden resistir el empuje hacia adentro de la gravedad durante periodos indefinidamente largos. Hay objetos planetarios que tienen una masa lo suficientemente pequeña como para que nunca se haya iniciado en su interior una fusión nuclear, y en los cuales la compresión gravitacional está compensada para siempre por el empuje hacia afuera de los átomos intactos comprimidos en su centro.

También hay (o habrá alguna vez) enanas negras, que tienen suficiente masa como para haber iniciado una reacción nuclear pero que, con el tiempo, se han consumido, y en las que la compresión gravitacional está equilibrada para siempre por el empuje hacia afuera de los electrones comprimidos.

Todos los objetos que vemos en el cielo fuera de nuestro propio sistema solar, más el Sol dentro de nuestro sistema solar, *no* son objetos eternos. Las estrellas ordinarias que vemos son estructuras

temporales que se consumen hasta que llegan a convertirse en enanas negras (o, como veremos, en objetos todavía más extraños).

También podemos ver nubes de polvo y gas en el espacio interestelar, pero bajo la atracción de su propio campo gravitacional una gran parte de estas nubes se condensa finalmente para formar estrellas y recorrer también todo el largo camino hasta llegar a ser enanas negras. Algunas de las nubes podrán condensarse en cuerpos cuya masa será demasiado pequeña como para iniciar la fusión nuclear, y entonces serán *cuerpos planetarios*. Si cualquiera de las nubes escapa a la condensación y se une al tenue vapor de átomos individuales, moléculas y partículas de polvo que se extienden entre las estrellas y galaxias, estos se consideran cuerpos planetarios ultradiminutos.

Quedamos, entonces, en que los cuerpos planetarios y las enanas negras son las dos clases de objetos eternos del universo que hemos discutido en el libro hasta este momento.

Se han observado varios centenares de enanas blancas, pero eso no es mucho entre los miles de millones de miles de millones de estrellas blancas que hay en el cielo. Recordemos, sin embargo, que las enanas blancas, aunque brillantes para su tamaño, son bastante opacas en promedio. Hay solamente de 1/1 000 a 1/10 000 de luminosas que las estrellas ordinarias y, por lo tanto, no pueden ser vistas a menos que estén muy cerca de nosotros.

Vemos tan pocas enanas blancas a causa de sus distancias estelares habituales, donde las estrellas ordinarias son lo suficientemente brillantes como para ser percibidas y estudiadas, en tanto que las enanas blancas son demasiado tenues como para poderse reconocer, o aun verse. La única manera en que podemos juzgar realmente el número de enanas blancas será, entonces, estudiar la vecindad inmediata del Sol.

Dentro de una distancia de 35 años luz del Sol, por ejemplo, hay unas 300 estrellas. De estas, ocho son enanas blancas. Si clamamos por sentado que esta es la proporción habitual en el espacio (y no tenemos ninguna razón para pensar que no sea así), podemos decir que hay entre 2 y 3 por ciento de todas las estrellas son enanas blancas. Solamente en nuestra galaxia puede haber hasta 4 billones de enanas blancas.

# 5

## Materia explosiva

### EL ORAN ESTALLIDO

¿Por qué hay tantas enanas blancas como existen? ¿Por qué hay 4 000 millones solamente en nuestra galaxia?

Después de todo, una estrella no se convierte en una enana blanca sino hasta que ha usado todo su combustible nuclear, y nuestro Sol, por ejemplo, todavía tiene suficiente combustible nuclear para durar miles de millones de años. También esto puede ser cierto de un número muy grande de los 135 000 millones de estrellas de nuestra galaxia. ¿Por qué, entonces, se les ha acabado el combustible, se han expandido y después agotado 4 000 millones de esas estrellas?

Supongamos que lo miramos desde el lado opuesto. ¿Por qué hay tan pocas enanas blancas? Si miles de millones de estrellas han agotado su combustible nuclear y se han apagado, ¿por qué no ha ocurrido lo mismo con todas las estrellas?

Para responder a estas preguntas, primero debemos saber la antigüedad del universo, y por lo tanto, hace cuánto tiempo se formaron las estrellas. Entonces podríamos tener una idea de cuánto tiempo han estado fusionando núcleos y cuántos quedan por fusionar.

Pero, ¿cómo podemos saber la edad del universo?

La respuesta a esto llegó, de modo bastante inesperado, al considerarse los espectros de las estrellas.

Al estudiar los espectros de las estrellas es posible decir si una estrella particular se aleja de nosotros o se aproxima, y en cual-

quiera de los dos casos, la rapidez con que esto ocurre. Si las líneas espectrales se desplazan hacia el extremo rojo del espectro, la estrella se aleja de nosotros. Si las líneas espectrales se desplazan hacia el extremo violeta del espectro, la estrella avanza hacia nosotros.

Por supuesto, podemos preguntar cómo se puede decir si el desplazamiento hacia el rojo de las líneas es causado por un movimiento de alejamiento o por un efecto gravitacional como el que se discutió en el capítulo anterior. La respuesta es que la mayoría de las estrellas no tienen la densidad suficiente como para producir un desplazamiento apreciable hacia el rojo como resultado de un efecto gravitacional. Por lo tanto, a menos que haya una razón para creer lo contrario, toda observación de un desplazamiento hacia el rojo se toma como causada por un movimiento de alejamiento.

Naturalmente, algunas estrellas se alejan de nosotros y otras se aproximan, por lo que los desplazamientos hacia el rojo y el violeta se presentan en número aproximadamente igual.

Alrededor de 1912, sin embargo, los astrónomos empezaron a estudiar los espectros de las galaxias (que son vastas y distantes agrupaciones de millones, o billones, o aun trillones de estrellas similares a nuestra propia galaxia Vía Láctea) que están más allá de la nuestra. Para 1917, era claro que todas las galaxias más cercanas, con excepción de un par, mostraban un desplazamiento hacia el rojo y por lo tanto se están alejando de nosotros. Esos desplazamientos rojos son más amplios que los asociados con las estrellas de nuestra propia galaxia.

Al estudiar más y más galaxias, resultó que todas ellas (a excepción del mismo par de las más cercanas) tienen un desplazamiento rojo y que el tamaño de este aumenta consistentemente mientras más alejadas estén las galaxias de nosotros.

Teniendo todo esto en cuenta, el astrónomo norteamericano Edwin Powell Hubble (1889-1953) enunció en 1929 la llamada Ley de Hubble. De acuerdo con esta regla, la velocidad con que se aleja de nosotros una galaxia es directamente proporcional a la distancia que la separa de nosotros. Esto es, si la galaxia A retrocede de nosotros a 5.6 veces la velocidad de la galaxia B, entonces la galaxia A estará 5.6 veces tan lejos de nosotros como la galaxia B.

No es fácil determinar la tasa de incremento de la velocidad de recesión de las galaxias con la distancia. En un principio los astrónomos pensaban que la velocidad aumentaba con bastante rapidez, pero datos más recientes han enseñado que el incremento es mucho más pequeño que lo que se pensó al principio. En el presente, los astrónomos estiman que la velocidad de recesión aumenta 16 kilómetros por segundo por cada millón de años luz de distancia. Por ejemplo, una galaxia que esté a 10 millones de años luz de nosotros, estará alejándose a una velocidad de 160 km/seg.; una que esté a 20 millones de años luz retrocederá a una velocidad de 320 km/seg.; una que se encuentre a 50 millones de años luz se alejará a una velocidad de 800 km/seg., y así sucesivamente.

¿Pero por qué ocurre esto? ¿Por qué se alejan de nosotros todas las galaxias, por qué su velocidad de alejamiento es proporcional a la distancia que nos separa de ellas? ¿Qué es lo que nos hace ser la clave de la conducta del universo?

¡No lo somos!

Ya desde 1917 el astrónomo holandés Willem De'Sitter (1872-1934) demostró que desde un punto de vista teórico, usando las ecuaciones de la relatividad general, el universo debe estar expandiéndose. Las galaxias individuales, y a veces un enjambre que puede tener desde docenas hasta millares de galaxias, se mantiene unido por la atracción gravitacional. Pero las unidades galácticas (ya sean galaxias solas o enjambres de ellas) están separadas de sus vecinas por distancias tan grandes que la gravitación es demasiado débil para influenciarlas suficientemente, y apartarlas de la expansión general del universo. Esto significa que las unidades galácticas individuales están todas alejándose unas de las otras a velocidad constante.

Desde un punto de observación en *cualquiera* de las galaxias, parecería que todas las otras están alejándose (a excepción de aquellas que son parte del enjambre original, si hay alguno). Lo que es más, la velocidad constante de expansión aumenta con la distancia, por lo que caemos dentro de la ley de Hubble no importa en qué galaxia vivamos.

Si las unidades galácticas se extienden más y más lejos unas de las otras al avanzar el tiempo y envejecer el universo, entonces, si

vemos hacia atrás en el tiempo (como si pasáramos un filme cinematográfico hacia atrás) veríamos cómo las unidades galácticas se acercan más y más unas a otras. El universo será más compacto en otras palabras, mientras más joven sea; y si retrocedemos lo suficiente en el tiempo, podríamos ver cómo todas las galaxias deben haber estado agrupadas en un gran amontonamiento de materia.

En 1927 el astrónomo belga Georges Lemaitre (1894-1966) sugirió que efectivamente hace cierto número de miles de millones de años la materia del universo estaba concentrada en un solo sitio formando una estructura que él llamó el *átomo primeval*. Otros lo han llamado el *huevo cósmico*.

Lemaitre no se aventuró a estimar cómo se formó o cuánto tiempo existió ese huevo cósmico, pero en algún momento debió haber estallado. Seguramente fue la mayor explosión que haya experimentado L1 universo; ciertamente lo creó tal y como lo conocemos. El físico ruso-norteamericano George Gamow (1904-1968) lo llamó el *gran estallido* (*big bang*, en inglés).

Con el tiempo se formaron las estrellas y las galaxias con los fragmentos del huevo cósmico que se separaban a grandes velocidades, y es a causa de ese impulso divergente del gran estallido que nuestro universo continúa expandiéndose. En el último medio siglo se han acumulado evidencias a favor de la teoría del gran estallido, y hoy día casi todos los astrónomos aceptan la idea de que así se originó el universo.

Por supuesto que la pregunta principal es cuándo tuvo lugar el gran estallido. Los astrónomos saben (o creen saber) la rapidez con que se expande el universo. Si suponen que esta tasa de expansión ha sido siempre la misma y que así se mantendrá, si vemos hacia el futuro, el universo continuará expandiéndose eternamente; las unidades galácticas se separarán más y más. Finalmente un astrónomo que observe el universo desde la Tierra verá únicamente nuestra galaxia y las otras que forman parte de nuestro enjambre local. Todo lo demás estará demasiado lejos para poderse ver.

Por otra parte, si volvemos los ojos hacia atrás y suponemos que el universo se contraerá consistentemente a un ritmo uniforme, se reagrupará en el átomo primeval dentro de 20 mil millones de años.

Sin embargo, las diversas galaxias ejercen una fuerza gravitacional mutua. Esto no puede ser suficiente para evitar la expansión, pero tenderá a frenarla. Significa que si vemos hacia el futuro, el ritmo de expansión irá disminuyendo cada vez más y pasará más tiempo de lo que creemos antes de que todas las distantes galaxias fuera del enjambre local se pierdan de vista. De modo similar, esto significa que al ver hacia el pasado, las galaxias se reagruparán más y más rápidamente al hacerse más y más importante la atracción gravitacional. Por lo tanto, el momento del huevo cósmico y el gran estallido pudo haber sido hace menos de 20 mil millones de años.

No estamos seguros de exactamente en qué medida frena la velocidad de expansión la fuerza gravitacional del universo. Depende de cuánta materia haya (en promedio) por volumen de espacio; en otras palabras, la densidad promedio de la materia en el universo.

Si la densidad es lo suficientemente elevada, el efecto de freno será lo suficientemente grande como para que la velocidad de expansión llegue finalmente a cero. Una vez que eso ocurra, bajo la atracción de sus propias fuerzas gravitacionales, el universo empezará a contraerse (muy lentamente al principio, con creciente rapidez después) hasta que nuevamente se forme el huevo cósmico y vuelva a explotar. Esto puede ocurrir una y otra vez, y tendríamos un *universo oscilante*. El astrónomo norteamericano Allan Rex Sandage (1928- ) ha sugerido que un huevo cósmico se forma y explota cada 80 mil millones de años.

Si la densidad de la materia en el universo es apenas lo suficientemente elevada como para hacer detenerse las galaxias (una densidad igual a  $6 \times 10^{-29}$  g/cm<sup>3</sup>, o alrededor de un protón o neutrón en cada 350 000 centímetros cúbicos de espacio), entonces la expansión se frena a una velocidad tal que el gran estallido debió haber tenido lugar hace unos 13 300 millones de años.

En realidad, los astrónomos no están seguros de la densidad promedio de la materia del universo, por lo que no podemos saber con precisión cuándo tuvo lugar el gran estallido o si el universo oscila o no. En nuestros días, la impresión general es que la densidad promedio no es lo suficientemente alta como para la oscilación, por lo que el gran estallido debe haber ocurrido entre hace 13 300 y 20 000 millones de años.

En este libro hagamos la suposición razonable (sujeta a cambios si se encuentran otras evidencias) de que el universo tiene 15 000 millones de años de edad.

Sin embargo, pudiera ser más joven. El Sol, por ejemplo, debe tener una edad menor, o para hoy ya hubiera consumido su combustible nuclear, se habría expandido para convertirse en una gigante roja y agotada para quedar como enana blanca.

¿Pudiera ser, entonces que las enanas blancas sean los restos de estrellas muy antiguas que han brillado desde los comienzos del universo, en tanto que aquellas que todavía brillan por la fusión nuclear se formaron mucho más tarde y son mucho más jóvenes?

Posiblemente hay algo de cierto en eso, pero no satisface totalmente las dudas. *Muchas* estrellas deben de haberse formado después del gran estallido, y si todas ellas hubieran llegado a la etapa de enanas blancas para ahora, habría en nuestra galaxia muchas más estrellas de este tipo de las que realmente hay. Consideremos también a Sirio A y Sirio B. Parecería lógico suponer que las dos estrellas de una binaria se formaran al mismo tiempo (del mismo modo que el Sol y los planetas debieron formarse esencialmente al mismo tiempo), y sin embargo, una es una enana blanca y la otra no lo es.

¿Pudiera ser que no fuera solamente la edad el factor que cuenta? ¿O algunas estrellas tienen más combustible nuclear inicial que otras? En cualquier caso, ¿tardan algunas estrellas más que otras en llegar a la etapa del colapso?

La respuesta a estas preguntas se obtiene, también, del estudio de los espectros.

#### LA SECUENCIA PRINCIPAL

Por principio de cuentas, una estrella nace de una masa de polvo y gas que gira lentamente y que se consolida poco a poco bajo su propia atracción gravitacional. Al agruparse esta masa de polvo y gas (extendida por el espacio con el gran estallido), la atracción gravitacional se hace más y más intensa, por lo que el proceso se acelera.

Al condensarse la nube, la temperatura y presión en el centro se hacen mayores hasta que finalmente son tan elevadas como para desintegrar los átomos centrales e iniciar la fusión nuclear. En este momento de ignición nuclear nace la estrella en formación.

El periodo de condensación no es muy largo comparado con la vida total de miles de millones de años de una estrella. Mientras más grande y masiva sea la nube inicial, mayor será la atracción gravitacional en todas las etapas y menor el tiempo de condensación. Una estrella de la masa de nuestro Sol puede tomarse treinta millones de años en alcanzar la ignición nuclear, en tanto que una estrella que tenga diez veces la masa del Sol puede condensarse para iniciar la ignición nuclear en solamente diez mil años. Por otra parte, una estrella con solamente la décima parte de la masa del Sol pudiera tardar cien millones de años en iniciar ese proceso.

Naturalmente, las estrellas que vemos en el cielo ya han alcanzado la ignición nuclear. Una vez que la han iniciado, continúan produciendo e irradiando energía a un ritmo bastante constante durante un largo periodo. El ritmo actual al que cualquier estrella produce e irradia energía depende de lo masiva que sea.

Cuando Eddington calculó las temperaturas internas de las estrellas, se dio cuenta de que mientras más masiva sea una estrella, mayor será la temperatura interna requerida para forzarla a mantenerse expandida ante la gravedad. Mientras más elevada sea la temperatura interna, mayor energía producirá e irradiará la estrella. En otras palabras, mientras más masiva sea una estrella, será más luminosa. La regla de Eddington recibe el nombre de *ley de la masa-luminosidad*.

Si estudiamos las estrellas que vemos, encontramos que forman una secuencia regular desde las estrellas muy masivas, muy luminosas y muy calientes, pasando por etapas de menor masa, luminosidad y temperatura hasta las estrellas de masa muy pequeña, muy escasa luminosidad y superficies bastante frías. Esta secuencia es llamada la *secuencia principal*, ya que constituye alrededor del 90 por ciento de todas las estrellas que conocemos. (El otro diez por ciento son las estrellas poco usuales, tales como las gigantes rojas y las enanas blancas).

Los espectros de las estrellas de la secuencia principal forman una secuencia propia. Al recorrer la secuencia principal hacia las estrellas más frías, los espectros reflejan las temperaturas descendentes en la naturaleza de las líneas oscuras que contienen. Por lo tanto, es posible dividir a las estrellas en *clases espectrales* de acuerdo con el patrón de líneas oscuras.

Las clases espectrales en las que se dividen las estrellas de la secuencia principal son O, B, A, F, G, K, y M. De estas, O es la más masiva, la más luminosa, y la de temperatura más elevada, en tanto que M es la menos masiva, la menos luminosa, y la más fría. Cada clase espectral se divide en subclases numeradas del 0 al 9. Así podemos hablar de B0, B1, B2, y así sucesivamente hasta que lleguemos a B9 a la cual sigue A0. Nuestro propio Sol es de una clase espectral G2.

En la Tabla 9 la masa y luminosidad de las estrellas se muestran por su clase espectral.

¿Son todas estas estrellas igualmente comunes?

La respuesta es no.

Tabla 9. La secuencia principal

<i>Clase espectral</i>	<i>Masa (Sol=1)</i>	<i>Luminosidad (Sol=1)</i>
O5	32	6000000
B0	16	6 000
B5	6	600
A0	3	60
A5	2	20
F0	1.75	6
F5	1.25	3
G0	1.06	1.3
G5	0.92	0.8
K0	0.80	0.4
K5	0.69	0.1
M0	0.48	0.02
M5	0.20	0.001

Por lo general, en el universo los objetos grandes son siempre excepcionales y menos comunes que los objetos pequeños de la mis-

nía categoría. Hay un menor número de animales grandes que de animales pequeños (comparemos el número de elefantes con el número de moscas), menos rocas de gran tamaño que de pequeños granos de arena, menos planetas grandes que asteroides pequeños, y así sucesivamente.

Podemos esperar, entonces, que haya un menor número de estrellas grandes, masivas y luminosas, que de estrellas pequeñas, ligeras y poco brillantes, y estaremos en lo cierto. Las investigaciones que han hecho los astrónomos de las estrellas que pueden ver y las conclusiones a que han llegado basados en esos trabajos, los lleva a suponer que cerca de tres cuartas partes de todas las estrellas de nuestra galaxia caen dentro de la clase espectral M, la menos luminosa de todas. Los resultados, en detalle, se presentan en la Tabla 10.

TABLA 10. Frecuencia de clase espectral

<i>Clase espectral</i>	<i>Porcentaje de estrellas</i>	<i>Número de estrellas en la galaxia</i>
O	0.00002	20 000
B	0.1	10000000
A	1	1 200 000 000
F	3	3 700000000
G	9	11000000000
K	14	17000000000
M	73	89 000 000000

(Podemos suponer, por supuesto, que lo que es cierto en nuestra galaxia también lo será en la gran mayoría de las otras galaxias. No tenemos razón para pensar que nuestra propia galaxia sea particularmente fuera de lo común).

La siguiente pregunta es si las estrellas en las diversas clases espectrales se llevarán tiempos diferentes para consumir su combustible nuclear, y si por lo tanto algunas de ellas permanecen en la secuencia principal durante más tiempo que otras y así retrasan la inevitable expansión y colapso.

Si suponemos, por ejemplo, que todas las estrellas empiezan su existencia con una constitución principal de hidrógeno, el principal combustible nuclear, podremos ver que mientras más masiva sea una

estrella, mayor será la reserva de combustible que tenga. Una estrella 05, que tendrá 32 veces la masa, y por lo tanto, la reserva de combustible nuclear, que el Sol, debiera (podemos suponer) llevarse 32 veces más tiempo para consumir su combustible y por lo tanto también permanecería en la secuencia principal 32 veces más tiempo que nuestro propio Sol, y para el caso, 160 veces más tiempo que una estrella M5.

Sin embargo, las estrellas no consumen combustible nuclear con el mismo ritmo independientemente de sus masas. Mientras más masiva sea una estrella, con mayor fuerza comprimirá la materia su propio campo gravitacional y mayor será la temperatura de su centro para poder contrarrestar esa compresión gravitacional. Mientras más caliente sea su núcleo, mayor será la cantidad de combustible que deberá consumir por segundo para mantener esa temperatura. En pocas palabras, mientras más masiva sea una estrella, mayor será la rapidez con que consumirá su combustible nuclear.

Eddington pudo demostrar, de hecho, que al avanzar de estrellas menos masivas hacia las más masivas, el ritmo en que debe consumir su combustible nuclear aumenta con una rapidez mucho mayor que las reservas de combustible nuclear. Así, aunque una estrella 05 pueda poseer 32 veces más combustible nuclear que el Sol, esa estrella 05 deberá consumir su combustible nuclear con una rapidez 10 000 veces mayor que el Sol, por lo tanto consumirá su enorme reserva de combustible nuclear bastante más pronto que lo que el Sol tarda en agotar sus reservas más pequeñas. Por el mismo razonamiento, el Sol debe usar su combustible nuclear con mucha mayor rapidez que una pequeña estrella M5 que solamente tiene la quinta parte de las reservas que tiene el Sol.

En pocas palabras, mientras más masiva sea una estrella, menor tiempo permanecerá en la secuencia principal y será más corto el plazo que le tome convertirse en una gigante roja y después en apagarse. La duración de las diversas clases espectrales aparecen en la Tabla 11.

TABLA 11. Duración de la secuencia principal

Clase espectral	Duración de vida (años)
O	1 000 000 o menos
BO	10 000 000
B5	100 000 000
AO	500 000 000
A5	1 000 000 000
FO	2 000 000 000
F5	4 000 000 000
GO	10 000 000 000
G5	15 000 000 000
KO	20 000 000 000
K5	30 000 000 000
MO	75 000 000 000
M5	200 000 000 000

Ya que son las estrellas más grandes y menos comunes las que primero se extinguen, esta será una explicación de la relativa rareza de las enanas blancas. Ninguna de las estrellas de las clases espectrales K o M, que conjuntamente constituyen el 87% de todas las estrellas, todavía no han tenido oportunidad de agotar su combustible nuclear, aun si cada una de ellas hubiera estado quemándolo e irradiando energía desde el momento del gran estallido. Solamente las estrellas O, B, A, F y algunas de la G puede haber salido ya de la secuencia principal y eso constituye menos del 10 por ciento de todas las estrellas.

Aun así, no hemos explicado todavía completamente la rareza de las enanas blancas. Si todas las estrellas en la galaxia se hubieran formado poco después del gran estallido y después no se hubiera formado ninguna otra, no habría en la galaxia estrellas de mayor tamaño y densidad que la clase G. Todas las más brillantes ya se hubieran expandido y extinguido. Pero no ocurre así. Actualmente hay en el cielo estrellas extraordinariamente brillantes, aun estrellas de la clase O.

Claramente, las estrellas brillantes que existen ahora no pudieron haber existido durante todo el tiempo que lleva de vida el universo. Su formación debe ser relativamente reciente. Nuestro propio Sol (clase espectral G2) debe ser bastante más joven que el univer-

El límite de Chandrasekhar no es muy elevado. Todas las estrellas de las clases espectrales O, B y A, junto con las estrellas más masivas de la clase espectral F, tienen masas mayores que 1.4 veces la del Sol. Estas son también las estrellas con los periodos de vida más cortos, y los ejemplos de estrellas de este tipo formadas en los primeros días del universo seguramente para hoy ya se han expandido y encogido. ¿En qué se transformaron al encogerse? ¿Podrían algunas de ellas haberse convertido en enanas blancas muy masivas más allá del límite de Chandrasekhar, probando de este modo que el análisis del astrónomo es incorrecto?

Pudiera ser posible, pero el hecho es que todas las enanas blancas estudiadas tienen masas menores que las del límite de Chandrasekhar, y mientras más se encuentran y estudian más se comprueba su hipótesis.

Otra alternativa es que las estrellas más masivas que el límite de Chandrasekhar pudieran haber perdido algo de su masa en algún momento antes o durante su colapso.

Esta parece ser una alternativa extrema; ¿cómo puede perder masa una estrella? El hecho es, sin embargo, que conocemos varias maneras en las cuales una estrella puede perder masa, y una estrella particularmente masiva es tan propensa a perder masa de uno de estos modos que podríamos juzgar el fenómeno como inevitable.

Consideremos el hecho de que cuando llega a su fin la permanencia de cualquier estrella en la secuencia principal porque sus reservas de combustible nuclear han caído debajo de cierto valor crítico, la estrella se expandirá para formar una gigante roja y después se encogerá.

Mientras más masiva sea la estrella, mayor será la temperatura de su núcleo en el momento de la expansión. La combinación de una gran masa y mayor calor producen una gigante roja más y más grande. Mientras más masiva sea la estrella, será más rápida su contracción cuando llegue el momento, ya que será mayor el campo gravitacional que impulsa el proceso de la contracción.

Suponiendo que consideramos una estrella, que es bastante más masiva que nuestro Sol y que se expande para formar una gran gigante roja. Las capas exteriores de la gigante roja que están muy alejadas de las más densas capas inferiores, sufren una atracción

gravitacional relativamente débil. Cuando se contrae la estrella, las capas interiores se mueven rápidamente hacia el centro dejando atrás las más delgadas capas exteriores. La porción que se contrae de la estrella se calienta rápidamente cuando se convierte en calor la energía de la contracción. El aumento de calor inside en las capas más externas, que descienden con una mayor lentitud, y nuevamente las impulsa hacia afuera.

Si una estrella es lo suficientemente grande, y forma una gigante roja de volumen suficiente, solamente la porción interior de la misma se encogerá mientras que la porción exterior se expandirá como un turbulento cascarón de gas. En ese caso, aunque la estrella como un todo esté por encima del límite de Chandrasekhar, la porción que se contrae puede estar debajo de ese límite y por lo tanto formar una estrella blanca.

El resultado será, entonces, una enana blanca rodeada por una corteza de gas. La enana blanca estará muy caliente ya que irradiará toda la gran energía del rápido colapso y la radiación será en forma de luz ultravioleta y otras variaciones aún más enérgicas. La corteza de gas absorberá esta radiación energética y la irradiará a su vez como una fluorescencia de colores suaves.

Lo que veremos desde la Tierra, será una estrella con un anillo nebuloso a su alrededor. En realidad se trata de una envoltura, pero las partes del cascarón de gas que vemos frente a la estrella y las que observamos del otro lado son difíciles de ver, porque solamente contemplamos un pequeño espesor del mismo. En todos los lados de la estrella (visibles a nosotros), nuestra línea de visión llega hasta el final de la envoltura, pasando a través de un espesor relativamente grande. Por lo tanto el cascarón nos parece un anillo de humo. El más notable ejemplo de esto es la Nebulosa Anular de la constelación de Lira.

Estas nebulosas se llaman *nebulosas planetarias* porque el cascarón de gas parece rodear la estrella como si estuviera en una órbita planetaria.

Se conocen alrededor de un millar de nebulosas planetarias, aunque pueden existir muchas más que no podemos ver. Cada una de las nebulosas planetarias conocidas tiene una pequeña estrella, densa y de elevada temperatura en su centro (probablemente una enana

blanca) aunque esto solamente se ha demostrado plenamente en algunos pocos casos.

Si las estrellas centrales de las nebulosas planetarias son en realidad enanas blancas, su formación debe ser reciente ya que hay pocas probabilidades de que hayan irradiado mucho del calor que pudieran haber ganado al formarse. Y de hecho, estas son las estrellas con las temperaturas superficiales más elevadas que se conocen, desde por lo menos  $20\,000^{\circ}\text{C}$  hasta, en algunos casos, bastante más de  $100\,000^{\circ}\text{C}$ .

Las envolturas de gas que observamos parecen tener, hasta donde es posible observar, una masa igual a la quinta parte de la de nuestro Sol, pero también son posibles cascarones gaseosos de mayor tamaño. Algunos astrónomos sugieren que una estrella puede perder más de la mitad de su masa en forma de envoltura gaseosa, y si así fuera una estrella hasta de 3.5 veces la masa del Sol puede perder una cantidad suficiente de masa en la formación de una nebulosa planetaria como para permitir que el núcleo que se enjute quede debajo del límite de Chandrasekhar y forme una enana blanca.

Naturalmente, el cascarón gaseoso de la nebulosa planetaria, empujado hacia el exterior por las energías del colapso central, tiende a alejarse de la estrella. Es posible medir este movimiento de alejamiento y su velocidad suele ser de 20 a 30 kilómetros por segundo.

Al alejarse de la estrella la envoltura gaseosa, se distiende en un volumen cada vez mayor, y su materia se hace cada vez menos densa. Al alejarse de la estrella central, cualquier porción del cascarón recibe cada vez menos radiaciones de la estrella y disminuye la fluorescencia que produce. El resultado es que a medida que se agranda la envoltura gaseosa se hace más tenue y menos visible.

En la típica nebulosa planetaria la envoltura de gas se encuentra entre un cuarto a un medio de año-luz de la estrella central, lo que equivale a unas 500 veces la distancia de Plutón a nuestro Sol.

Posiblemente se han necesitado de 20 000 a 50 000 años de expansión para que el cascarón de gas se aleje a esta distancia, y es un período breve para el de la vida de las enanas blancas. El simple hecho de que la envoltura gaseosa sea visible es por lo tanto una evidencia definida de que la enana blanca se formó recientemente.

Unos 100 000 años después de la formación de la enana blanca, la envoltura gaseosa se habrá extendido y adelgazado hasta el punto en que ya no es lo suficientemente luminosa como para distinguirse desde la Tierra. Pudiera ser, entonces, que aquellas enanas blancas que carecen de envoltura gaseosa, no la tienen porque tal vez tengan más de 100 000 años de antigüedad.

Pero la formación de una nebulosa planetaria no es el único modo en que una estrella puede perder masa. De hecho, hay diversas maneras en las cuales podemos encontrar explosiones de materia. El gran estallido tal vez sea la mayor y más espectacular manifestación de este fenómeno, pero hay "pequeños" estallidos de uno u otro tipo que son tan imponentes como para mostrar una sobrecogedora grandeza.

#### LAS NOVAS

Cualquiera que contemple a simple vista el despejado cielo nocturno presenciara un aparente espectáculo de inigualable e invariable serenidad. Esta invariabilidad se ha considerado hasta tal grado un signo de seguridad en medio del turbulento mundo durante nuestra historia, que cualquier alteración desacostumbrada, un eclipse, una estrella fugaz, un cometa, se tiende a contemplarse con temor.

Para cualquier casual observador esos prominentes cambios no afectan a las estrellas, sin embargo, son fenómenos de nuestro sistema solar. Para un cuidadoso observador ocasional, sin embargo, aparecen cambios aun en el universo de las estrellas. Ocasionalmente aparece una nueva estrella en el cielo donde antes no se había detectado ninguna. No se trata de una estrella fugaz; permanece en su sitio. Pero tampoco es un residente permanente. Finalmente, se apagará y desaparecerá nuevamente.

El más grande de los astrónomos antiguos, Hiparco de Nicea (190-120 a.C.), observó una estrella de ese tipo en el año 134 a.C. y eso le inspiró a preparar el primer mapa celeste de tal modo que en el futuro se pudieran reconocer con mayor facilidad a las intrusas.

Una estrella temporal particularmente brillante apareció en noviembre de 1572 en la constelación de Casiopea. y un astrónomo

danés, Tycho Brahe (1546-1601), escribió un libro acerca del fenómeno con el título *De Nova Stella* (que en latín significa "Concerniente a la nueva estrella"). De este título la expresión *Nova* llegó a aplicarse generalmente a las estrellas temporales.

En cierto modo el nombre es pobre, ya que las novae no son realmente nuevas, y no son verdaderas estrellas creadas de la nada o de material no estelar que después retornan a la nada, o nuevamente a ser material no estelar.

Una vez inventado el telescopio en 1608, quedó bastante claro que hay incontables millones de estrellas demasiado débiles para observarse a simple vista. Algunas de esas estrellas por alguna razón, se hacen más brillantes durante un breve periodo y después nuevamente se desvanecen. Pudiera ser que una estrella demasiado débil como para verse sin telescopio pudiera aumentar su brillo hasta el punto de ser visible a simple vista y después volver a caer en una disminución de su brillo hasta quedar nuevamente debajo del nivel de la visión ordinaria. En los días anteriores al telescopio esto haría parecer que una estrella había surgido de la nada para desaparecer después.

Esta noción se fortalecería mucho si se pudiera ver alguna diminuta estrella encenderse hasta el nivel de la visión ordinaria, pero no fue sino hasta 1848 cuando se pudo ver a una nova de este tipo. El astrónomo inglés John Russell Hind (1823-1895) estaba observando una pequeña estrella ordinariamente invisible a simple vista cuando empezó a aumentar su brillo. Llegó a su climax en la quinta magnitud, cuando ya podía ser visible como una pequeña estrella para cualquiera que mirara sin necesidad de un telescopio en el punto adecuado en el cielo; después desapareció.

Una vez que se inventó la fotografía, pudieron tomarse placas de porciones de cielo en diferentes ocasiones y efectuar comparaciones que demostrarían si alguna estrella había cambiado su brillo. De este modo se pudieron detectar muchas más novae; no tendrían que aceptarse en el momento preciso de su brillo. Se comprobó entonces que no era un fenómeno tan poco común como se había pensado anteriormente. Actualmente se estima que puede haber unas 30 novae por año como promedio en nuestra galaxia. ¿Pero qué causa una nova?

Cualquier cosa que sea, debe ser algo violento. La estrella que se convierte en nova se vuelve millares o decenas de millares de veces más brillante de lo que fuera anteriormente. Además, el aumento de brillo puede tener lugar con mucha rapidez, a veces en un día o menos. Después de que se llega al punto máximo de brillo, la declinación nunca es tan rápida como el aumento. Al disminuir de brillo, la estrella va disminuyendo la velocidad de su opacamiento de tal modo que a final de cuentas puede tomar años para que regrese a su estado original.

Es muy posible que el súbito aumento del brillo sea explosivo en sentido literal. Un estudio que se hizo del espectro de las novae, hace parecer como si esas estrellas emitieran envolturas de gas.

¿Puede una nova ser una nebulosa planetaria en proceso de formación? ¿Puede la explosión de la nova ser el último destello de brillo antes de que una estrella se convierta en una enana blanca?

Probablemente no. Antes de que se forme la enana blanca, la estrella debe estar en la etapa de gigante roja; pero cuando se ha observado estrellas antes de la transformación en novae no parece que antes hayan sido gigantes rojas. Además, la masa de gas expulsada por una nova es solamente de alrededor de 1/50 000 de la masa del Sol. Una nebulosa planetaria es por lo menos decenas de millares de veces mayor.

¿Pueden esperarse otras clases de explosiones además de las que forman las nebulosas planetarias?

Al principio, las posibilidades parecen débiles. Después de todo la mayoría de las estrellas parece bastante estable, como nuestro Sol. La atracción gravitacional y el empuje de las temperaturas están en equilibrio, y una estrella como nuestro Sol puede brillar durante miles de millones de años sin ningún cambio súbito en tamaño o en temperatura. Hay manchas solares que enfrían ligeramente al Sol y llamaradas que lo calientan también ligeramente, pero los cambios son muy pequeños y microscópicos en comparación con los que tienen lugar en las novae.

No todas las estrellas, sin embargo, son tan estables como el Sol. Tenemos, por ejemplo, estrellas cuyo brillo varía continuamente, en ocasiones con regularidad rítmica. Esto puede ser porque una estrella brillante esté parcial o totalmente eclipsada por una compa-

ñera de menos brillo que en su órbita alrededor de la estrella brillante pasa periódicamente entre ella y nosotros.

En otras ocasiones la variación se debe a cambios en la misma estrella.

En 1784 el astrónomo holandés-británico John Goodricke (1764-1786), un sordomudo que murió a la edad de 21 años, notó que la estrella Delta Cefei (en la constelación Cefeo) variaba en brillo. No era un cambio muy grande: su brillo pasaba de la magnitud 4.3 a 3.6" y después nuevamente se desvanecía hasta 4.3, y repetía este patrón una y otra vez. En su punto más brillante Delta Cefei es solamente 2 veces más brillante que en su punto más opaco, y eso no se nota sin ayuda del telescopio.

La naturaleza del cambio, sin embargo, es muy sorprendente. La estrella aumenta de brillo con bastante rapidez, lo disminuye con mayor lentitud, se vuelve a encender con prontitud, se desvanece con más lentitud, con gran regularidad tomando como ciclo 5.4 días. En los últimos 200 años, unas 700 estrellas con el mismo patrón de rápido abrillantamiento y lento opacamiento una y otra vez se han detectado en nuestra galaxia y se les llama *variables cefeidas* en honor de la primera en descubrirse.

Las variables cefeidas difieren entre sí en la longitud de sus periodos. En algunas llega hasta 100 días, y en otras es tan breve como un solo día; (hay un grupo especial de estrellas variables, muy parecidas a las cefeidas, que tienen periodos de 6 a 12 horas y que se llaman *estrellas RR Lyrae* en atención a las primeras en descubrirse).

En 1915 la astrónoma norteamericana Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) pudo demostrar que la longitud del periodo depende de la masa y brillo de la estrella. Mientras más masiva y luminosa sea una cefeida variable, más largo será su periodo.

Aparentemente, las variables cefeidas tienen pulsaciones y esa es la razón de su brillo vacilante. La variante cefeida ha llegado a una etapa en su evolución en que el equilibrio entre gravitación y temperatura ya no es estable. Las reservas de combustible nuclear tal vez han disminuido hasta el punto en que empieza a fallar la

" Al aumentar el brillo, disminuye el valor de la magnitud.

temperatura interna. Por lo tanto se inicia el colapso de la estrella, pero el mismo hecho de su enjutamiento comprime el interior de la estrella, acelera las reacciones nucleares, y eleva la temperatura. Eso empuja nuevamente hacia afuera la sustancia de la estrella, y la misma expansión hace menos denso el interior y lo enfría de tal manera que nuevamente se inicia la compresión.

Mientras más masiva sea una estrella, más tiempo tardará la oscilación hacia dentro y hacia afuera en completar un ciclo. Esta etapa es probablemente de corta vida en la escala astronómica, y después de algún tiempo puede haber cambios finales que lleven a la expansión que las convierta en gigantes rojas y después empezar su contracción.

¿Podría ser que las novas sean variables cefeidas en las cuales la pulsación se ha hecho extrema? Tal vez al continuar las pulsaciones, se hacen más y más aceleradas hasta que finalmente la expansión se hace explosiva y la sección más externa de las cefeidas estalla en un proceso que abrillanta muy temporalmente la estrella, no solamente al doble o al triple, sino 10 000 veces más. La pérdida de la masa pudiera apaciguar a la variable cefeida y hacerla regresar a un estado de pulsaciones regulares las cuales, sin embargo, después de pasado algún tiempo, tal vez nuevamente adquieran su carácter explosivo. Podría haber varias explosiones antes de la expansión y colapso final.

Ciertamente se han observado estrellas que son *novas recurrentes*, que han explotado dos o aun tres veces en el corto periodo de un poco más de un siglo durante el cual los astrónomos han observado cuidadosamente las estrellas. Lo que es más, todas las variables cefeidas, aun las más pequeñas, son considerablemente más masivas que el Sol. Son estrellas grandes, brillantes, justamente la clase de estrellas que tendrían que perder masa para permanecer dentro del límite de Chandrasekhar y tener la capacidad de formar una enana blanca.

Todo parece encajar, pero la noción no se sostiene. El estudio de las estrellas que se convierten en novas, tanto antes de que hallan alcanzado este estado como después de que se han desvanecido nuevamente, muestran que no son simplemente variables cefeidas. Ni

siquiera son estrellas grandes; son pequeñas y opacas, aun cuando tengan una elevada temperatura de superficie.

La combinación de pequenez y opacidad con una elevada temperatura superficial, sugiere que sean enanas blancas; sin embargo, las enanas blancas son tan compactas y densas que tienen una gravedad superficial tan elevada que deben ser bastante estables. ¿Cómo pueden entonces sufrir una expansión tan explosiva?

Una sugerencia que parece ganar apoyo, propuesta primeramente en 1955 por el astrónomo ruso-norteamericano Orto Struve (1897-1963), es que todas las novae son miembros de una *binaria cercana*, una de dos estrellas que circulan alrededor una de la otra a una distancia relativamente corta. Una de ellas, que llamaremos A, es la mayor de las dos y por lo tanto llega al final de su permanencia en la secuencia principal antes que su compañera más pequeña, B. Al expandirse A para pasar a la etapa de gigante roja algo de su materia puede derramarse sobre B que todavía no se ha expandido. Como resultado, B crece, y A disminuye en tamaño.

A puede pasar directamente a la condición de enana blanca, sin atravesar por la etapa de nebulosa planetaria, aun cuando su masa pudiera haber sido inicialmente un poco mayor que la señalada por el límite de Chandrasekhar.

Cuando llegue el momento adecuado, B abandonará la secuencia principal, acortando su periodo de vida por la ganancia de masa a expensas de A. Al expandirse B para entrar en la etapa de gigante roja, devuelve el servicio: algo de su materia se derrama sobre A que ahora es una enana blanca.

La gravedad de superficie de A es extremadamente intensa y la materia que gana sufre una compresión súbita. Dado que esa materia puede contener algunos átomos susceptibles a fusión, la compresión puede llegar a producir una reacción nuclear muy rápida una vez que se unen la suficiente masa y compresión. La reacción nuclear libera cantidades inmensas de energía que producen un vasto destello luminoso, que explica el súbito y enorme brillantamiento en una nova, así como la expulsión del gas que produjo el destello. La nova puede recurrir si recibe incrementos de materia adicional como resultado de la expansión de B.

De este modo, B puede llegar a ser una enana blanca, aun cuando haya ganado suficiente masa al expandirse A como para que sobrepase el límite de Chandrasekhar.

Sirio A y Sirio B serían un buen ejemplo de esta situación si estuvieran más juntas. Lamentablemente su separación promedio es un poco mayor que la de Urano con respecto al Sol, por lo que es limitado su intercambio de materia.

Cuando ambas se formaron tal vez hace 250 millones de años, la estrella que ahora conocemos como Sirio B debió haber sido la más grande y brillante de las dos, con una masa tal vez tres veces mayor que la del Sol. Brillaba sobre la Tierra (entonces en la era de los dinosaurios) con un brillo igual al de Venus.

Sirio B no permaneció mucho tiempo en la secuencia principal; se expandió para formar una gigante roja y después una nebulosa planetaria que tenía posiblemente dos terceras partes de su masa en la envoltura gaseosa. Esa envoltura gaseosa se ha vuelto invisible al expandirse, pero un poco de ella debió haber sido capturado por la distante Sirio A, cuyo brillo pudo haberse incrementado al mismo tiempo que su vida se acortaba como resultado de esto. Si Sirio A hubiera estado considerablemente más cerca de Sirio B, hubiera recibido una cantidad mucho mayor de las capas exteriores de Sirio B y pudiera haber ganado también la masa suficiente como para dejar la secuencia principal poco tiempo después que lo hizo Sirio B. En ese caso, es posible que Sirio fuera ahora una binaria de enanas blancas.

En algún momento futuro, Sirio A se expandirá para entrar en la etapa de gigante roja y después formará una nebulosa planetaria. Sirio B puede recoger algo de la envoltura gaseosa, posiblemente en cantidades suficientes como para convertirse en nova. Esto sería algo bastante espectacular para los descendientes de la humanidad que para entonces estén vivos y observen las estrellas.

Ahora tenemos dos métodos por los cuales las estrellas masivas pueden librarse de una cantidad suficiente de masa como para quedar debajo del límite de Chandrasekhar y formar una enana blanca. Los dos métodos, la formación de nebulosas planetarias y el intercambio de materia entre las dos componentes de un sistema binario cercano, son efectivos sólo para estrellas de tamaño moderado, con

una masa hasta dos o tres veces mayor que el Sol. Sin embargo, hay estrellas mucho más masivas. ¿Y qué hay de ellas?. Volvamos al problema de las novas.

#### LAS SUPERNOVAS

Antes de que se inventara el telescopio, las únicas novas que podían observarse y registrarse eran aquellas que tenían un brillo extraordinario.

La nova de la que Tycho Brahe habló en su famoso libro, el mismo que dio su nombre al fenómeno, fue un ejemplo de esa clase. La nova de Tycho en el climax de su brillo era entre cinco y diez veces más brillante que el planeta Venus y tal vez cien veces más luminosa que Sirio, la más brillante de las estrellas brillantes. La nova de Tycho podía verse a la luz del día, y por la noche producía una tenue sombra apreciable si la Luna no estaba en el cielo.

Después, en 1604, apareció otra brillante nova en la constelación de Ofiuco. Esta era tal vez solamente de 1/30 del brillo de la nova de Tycho, pero aun así, unas tres veces más brillante que Sirio. Hasta ahora no ha aparecido en el cielo otra nova tan espectacular como esas dos.

Hubo un caso más antiguo de una nova muy brillante, la que apareció en julio de 1054 en la constelación de Tauro. En Europa no existen registros de su observación, porque la región apenas salía de la oscuridad de la Edad Media durante la cual la astronomía fue prácticamente inexistente. Tenemos registros, sin embargo, de astrónomos chinos y japoneses.

La nova de 1054, al igual que la de Tycho era mucho más brillante que Venus. De hecho, la nova de 1054 fue probablemente la más brillante de las dos y durante 23 días pudo ser vista a plena luz del día. Después de su apogeo disminuyó lentamente su brillo pero pasaron cerca de dos años antes de que se opacara lo suficiente como para no poder verse a simple vista.

¿Por qué son estas novas mucho más brillantes que otras? Una respuesta lógica parece ser que eso ocurre porque están más cerca de nosotros y eso las hace aparecer mucho más brillantes.

En 1885, sin embargo, apareció una nova en la que entonces era llamada nebulosa de Andrómeda (la palabra *nebulosa* proviene de un vocablo latino que significa nube). La "nebulosa de Andrómeda" es una mancha confusa de luz que los astrónomos supusieron se trataba de un enjambre de polvo y gas de nuestra propia galaxia. La nova, que ellos supusieron estaba en la misma dirección de esa nube, no era particularmente espectacular, ya que solamente llegó a un brillo máximo de séptima magnitud y nunca llegó a ser lo suficientemente brillante como para apreciarse sin el auxilio del telescopio.

Empero, al observarse la nebulosa de Andrómeda cuidadosamente en los años que siguieron, se encontraron numerosas novas dentro de sus confines. No era natural encontrar tantas novas en una sola dirección; rebasaba los límites de las coincidencias. Empezó a ganar terreno la idea de que la nebulosa de Andrómeda era un grupo de estrellas muy distantes, demasiado tenues como para apreciarse individualmente, a excepción de cuando una de ellas se convertía en nova. Ya para 1920 los astrónomos estaban de acuerdo en que se debe hablar de la galaxia de Andrómeda, la cual es una galaxia muy alejada de la nuestra y de tamaño aún mayor.

Todas las novas observadas en la galaxia de Andrómeda después de la nova de 1885, fueron extraordinariamente tenues y equivalentes a las novas ordinarias de nuestra propia galaxia.

La nova de 1885 fue algo excepcional. Tuvo que haber sido mucho más brillante que las novas ordinarias de la galaxia de Andrómeda y de la nuestra. Fue tan brillante que momentáneamente tuvo casi tanto brillo como toda la galaxia de Andrómeda. En su apogeo fue diez mil millones de veces más brillante que nuestro Sol y 100 000 veces más brillante que una nova ordinaria. Fue lo que se ha dado en llamar una *supernova* por lo que la nova de 1885 fue bautizada como S Andromedae, con la inicial S caracterizando su condición de supernova.

Una vez establecido eso, fue claro que las brillantes novas de 1054, 1572 y 1604 fueron supernovas de nuestra propia galaxia.

Las supernovas son de ocurrencia mucho menos común que las novas. Los astrónomos pueden observarlas algunas veces, aquí y allá, en alguna distante galaxia o en otra. Una vez que aparece una

supernova es fácilmente detectable. Tan pronto como una estrella estalla en alguna galaxia y llega al apogeo de su brillo que la hace tan luminosa como todo el resto de la galaxia en conjunto, el astrónomo sabe que se encuentra ante una supernova. Parece ser que hay, como promedio, tres supernovas por siglo en cada galaxia, en comparación con tres mil novae ordinarias en el mismo periodo. En otras palabras hay una supernova por cada millar de novae.

Es difícil estudiar las supernovas en detalle cuando se encuentran ubicadas en galaxias distantes millones de años-luz. Sería mucho más útil el estudio de una supernova en nuestra propia galaxia, pero para nuestra mala suerte en nuestra galaxia no ha aparecido ninguna supernova desde 1604, de tal modo que no ha sido posible el estudio telescópico de uno de esos objetos a cercana distancia. De hecho, en las centurias transcurridas desde 1604, la S Andromedae ha sido la supernova más cercana que se ha podido observar.

Claramente, la supernova debe representar la explosión de una enorme estrella particularmente masiva. Nada más puede producir una radiación de 10 mil millones de veces la del Sol.

Lo que es más, la supernova lanza al espacio envolturas de gas, que empujeñecen las producidas por las nebulosas planetarias tanto en términos de masa como en energía. El ejemplo más conocido de esto lo encontramos en la constelación de Tauro, en el lugar donde existió la gran supernova de 1054. Todavía existe allí una gran mancha de gas luminoso.

Esta mancha fue observada por primera vez en 1731 por el astrónomo inglés John Bevis (1693-1771). En 1844 el astrónomo irlandés William Parsons Lord Rosse (1800-1867), la examinó con un gran telescopio que había construido y observó que la nube estaba llena de filamentos irregulares que le recordaban las patas de un cangrejo. La llamó la nebulosa del Cangrejo, y es el nombre con la que la conocemos hasta ahora.

El estudio de los gases de la nebulosa del Cangrejo demuestra que todavía se mueven hacia afuera a una velocidad de unos 1 300 kilómetros por segundo. (Esa velocidad de movimiento, mucho mayor que en el caso de una nebulosa planetaria, es en sí una prueba del incomparable poder de la explosión de una supernova). Si calcu-

lamos retroactivamente, parecería que todo el gas estaba en el centro en los momentos en que apareció la supernova de 1054.

En otros casos los astrónomos también calculan retroactivamente. Si encuentran en el cielo tenues rastros de gas que parecen formar parte de una envoltura gaseosa, sospechan que en algún momento explotó una supernova en el centro de esta envoltura gaseosa. De la velocidad de expansión de la envoltura pueden aún estimar hace cuánto tiempo brilló la supernova. En los últimos 20 000 años parecen haber explotado en nuestra galaxia unas 14 supernovas, incluyendo las 3 que conocemos. Si el número en nuestra galaxia fue aproximadamente el mismo que en otras galaxias, debieron haber habido unas 60 o 65. Las cincuenta y tantas que no vemos, sin embargo, deben haber ocurrido en partes distantes de la galaxia, partes que no podemos ver debido a la interposición de las nubes de polvo que las ocultan a nuestros ojos.

De los restos de supernovas que podemos detectar, la más cercana parece haberse localizado en la constelación de Vela. Esa supernova, que dio lugar a una envoltura gaseosa llamada la nebulosa Gum, (nombrada en honor del astrónomo australiano Colin S. Gum, quien fue el primero en estudiarla detalladamente en los años cincuenta y que murió en un accidente mientras esquiaba en 1960) tiene su centro a solamente 1 500 años-luz de nosotros, en comparación con la distancia de 4 500 años-luz que nos separan de la nebulosa del Cangrejo. El extremo más cercano a nosotros de la nebulosa Gum está únicamente a unos 300 años-luz de la Tierra.

La supernova de Vela que dio origen a la nebulosa de Gum, brilló hace unos 15 000 años, cuando se terminaba la edad glacial. En su climax pudo haber sido tan brillante como la Luna llena durante algunos días, y podemos envidiar a aquellos seres humanos prehistóricos que presenciaron un espectáculo tan magnífico.

¿Qué es lo que origina una supernova?

Mientras más masiva sea una estrella, mayor será su temperatura interior en todas las etapas de su evolución. Una estrella realmente masiva alcanza temperaturas internas que nunca tendrán las estrellas más pequeñas, y debemos buscar lo que ocurre a esas temperaturas elevadas para explicar la supernova.

El astrónomo chino-norteamericano Hong-Yee Chiu (1932-) ha sugerido una muy interesante explicación. Las reacciones nucleares en el centro de las estrellas, dice, emiten dos clases de partículas sin masa que viajan a la velocidad de la luz. Una es el fotón, que es la partícula fundamental de la luz y las radiaciones lumínicas. La otra es el *neutrino*.

Estos dos tipos de partículas difieren de la siguiente manera:

Los fotones son fácilmente absorbidos por la materia, por lo que se absorben tan pronto como se forman. Después son reformados y reabsorbidos un número indefinido de veces, de tal modo que solamente pueden moverse a la velocidad de la luz en los dos diminutos y raros intervalos entre formación y absorción. El resultado es que toma a los fotones alrededor de un millón de años viajar desde el centro de la estrella, donde se forman, hasta la superficie, de donde escapan. Así, es muy pequeña la pérdida de energía central a causa de los fotones, y al emitirlos las estrellas irradian su energía de modo lento y consistente y pueden durar miles de millones de años.

Los neutrinos que se forman no reaccionan con la materia (o lo hacen de modo imperceptible), y una vez que se forman en el centro, pasan a través de las capas exteriores de la estrella a la velocidad de la luz como si no hubiera nada. Los neutrones tardan unos tres segundos en viajar desde el núcleo de nuestro Sol hasta su superficie y volar al espacio. En las estrellas más grandes de la secuencia principal les puede tomar 12 segundos el viaje del núcleo a la superficie de aquellas. Cualquier energía emitida en forma de neutrinos, por lo tanto, se escapa casi instantáneamente.

En las estrellas ordinarias, sin embargo, el porcentaje de energía emitida en la forma de neutrinos es muy pequeña, por lo que generalmente sólo necesitamos considerar los fotones.

Chiu sugiere, sin embargo, que a temperaturas extremadamente elevadas, digamos, seis mil millones de grados, la clase de reacciones nucleares que tienen lugar empiezan a formar neutrinos en grandes cantidades. Actualmente la temperatura interna del Sol es de solo 15 000 000 °C y nunca alcanzará una temperatura de 6 000 000 000 °C bajo ninguna circunstancia. Sin embargo, eso sí ocurre en estrellas con masa suficiente, y cuando se llega al punto crítico en el

que de pronto se forma un gran número de neutrinos, todos ellos escapan de la estrella en cuestión de segundos, llevando consigo energía y quitando al núcleo la atracción gravitacional hacia adentro.

El resultado es que el centro de la estrella se enfria súbitamente, tal vez en pocos minutos, y la estrella se enjuta con una rapidez mucho mayor de la que ocurre en el caso de la formación de nebulosas planetarias.

En estas estrellas masivas, donde la temperatura del centro llega a los seis mil millones de grados y donde los núcleos han evolucionado hasta el nivel del hierro, las capas exteriores todavía están relativamente frías y formadas por núcleos más pequeños. Al pasar del núcleo de la estrella hacia afuera, se atraviesan regiones menos transformadas, que tienen un mayor número de núcleos pequeños, que pueden combinarse y producir energía y cuyas temperaturas son cada vez más bajas, por lo que todavía no tienen lugar las reacciones de fusión. En las regiones más externas de la estrella todavía puede haber mucho hidrógeno.

Con la súbita y abrumadora implosión de la estrella, la temperatura general se eleva enormemente debido a la conversión de la energía gravitacional en calor, y todo el combustible nuclear que queda en la estrella se fusiona casi de inmediato. Esto da origen a la enorme explosión de la supernova y permite que la estrella temporalmente brille tan intensamente como toda una galaxia.

En la furia de la explosión ocurren dos cosas. Primero, se forman muchos núcleos que son aún más complejos que el hierro, ya que hay un excedente temporal de energía que hace posible la formación de esos núcleos. Segunda, la explosión arroja hacia afuera vastas cantidades de la materia de la estrella como una envoltura de gases calientes que contienen todos los átomos completos que se han formado, hasta aquellos con núcleos cinco veces mayores que los de hierro. Durante un periodo de millares de años esta materia gradualmente se extiende hacia el exterior, se adelgaza, y llega a ser parte de los muy tenues gases del espacio interestelar.

Finalmente, de los gases que son en parte los restos de estas viejas estrellas, se forman nuevas *estrellas de segunda generación*.

Las *estrellas de primera generación*, formadas de la materia original del gran estallido, están constituidas casi totalmente por hidrogeno y helio, y así deben ser sus planetas. Los núcleos más complejos que el helio solamente se encuentran en el centro de estas estrellas, donde es probable que permanezcan salvo en el caso de las explosiones de supernovas.

Las estrellas de segunda generación, como nuestro Sol, empiezan con los núcleos complejos que las supernovas han esparcido en todas direcciones, añadidos en pequeñas cantidades al hidrógeno y helio. Los planetas de las estrellas de segunda generación tales como la Tierra, también tienen esos átomos. La vida sería imposible sin aquellos elementos más complejos que el helio, y todos los átomos dentro de nuestros cuerpos a excepción del hidrógeno, estuvieron alguna vez en el centro de estrellas que explotaron como supernovas.

La enorme explosión de una supernova puede lanzar al espacio hasta nueve décimas de la materia de una estrella, dejando solamente un pequeño remanente que se enjuta y así permanece. No es difícil suponer que una supernova siempre dejará un remanente menor que el límite de Chandrasekhar, por lo que no importa lo grande o pequeña que sea una estrella, siempre se encogerá para formar una enana blanca. Quietamente si tenía menos que 1.4 veces la masa del Sol, o con una explosión de enormes proporciones en razón directa con el exceso de su masa sobre ese límite.

Dado que se estima que hay tres supernovas por siglo en cada galaxia, y puesto que se considera que el universo tiene unos 15 mil millones de años de edad, pudo haber unos 45 millones de explosiones de supernovas durante la existencia de nuestra galaxia. Si todas ellas dieron lugar a enanas blancas, representarían un 10% del número total estimado de enanas blancas en nuestra galaxia.

Eso parece razonable. Podemos suponer que solamente las estrellas muy masivas sufren explosiones de supernova, en tanto que las más pequeñas solamente llegan a ser enanas blancas por medio del proceso de las nebulosas planetarias o por contracciones aún más apacibles. Y como hay más estrellas pequeñas que grandes, debe haber muchas más enanas blancas que explosiones de supernova. (Deberá recordarse, sin embargo, que aun "las estrellas pequeñas" mencionadas a este respecto no son mucho más pequeñas que núcs-

tro Sol. Ninguna de las estrellas realmente pequeñas que forman la gran mayoría han vivido todavía lo suficiente como para llegar al punto de expansión y colapso, aun cuando hubieran nacido en el momento del gran estallido).

Puede parecer así que tenemos una imagen clara del final de las estrellas, y que ese final es siempre la enana blanca que se enfría para convertirse en enana negra. Pero algunos astrónomos no están satisfechos.

# 6

## Estrellas neutrones

MÁS ALLÁ DE LAS ENANAS BLANCAS

Se han detectado estrellas individuales que tienen hasta cincuenta, posiblemente setenta veces, la masa de nuestro Sol. Cuando una estrella de ese tipo estalla lo hace con un estruendo sin precedente. Lo que es más, en el estallido tendrá que deshacerse del 97 o 98 por ciento de su masa para que le reste solamente 1.4 veces la masa del Sol y pueda encogerse sin problemas para formar una enana blanca.

Eso puede ocurrir, por supuesto, pero, ¿qué pasa si no ocurre? Los astrónomos saben que las supernovas pierden mucha masa, pero no hay nada en el proceso, hasta donde se conoce que establezca que una supernova *debe* desechar suficiente masa para dejar un cuerpo que se enjute por abajo del límite de Chandrasekhar. ¿Qué sucede si después de que una supernova explota, lo que queda de la estrella tiene una masa del doble de la del Sol y que esta masa equivalente a la de dos soles se encoge? Se formará fluido electrónico y se contraerá. La atracción gravitacional hacia adentro simplemente será demasiado intensa para equilibrarse por medio del fluido electrónico a su mayor compresión.

Los electrones serán empujados hacia adentro en una densidad en la cual no pueden existir. Dentro del fluido electrónico se habrán estado moviendo libremente los protones y neutrones; ahora los electrones se combinarán con los protones para formar neutrones adi-

cionales. Los electrones y protones están presentes en cualquier fragmento de materia, ya se trate de partículas de polvo o estrellas, en un número aproximadamente igual, por lo que el resultado de la unión es que la estrella en proceso de colapso consistirá enteramente en neutrones.

Estos neutrones se agruparan por el colapso gravitacional hasta que estén en virtual contacto. Entonces, y sólo entonces, terminará el colapso. La fuerza nuclear que gobierna la interacción de las partículas masivas, evita que los neutrones se agrupen más estrechamente. Ahora ya no se trata de la fuerza gravitacional contrarrestada por la fuerza electromagnética como ocurre en los planetas, las estrellas ordinarias, y aun las enanas blancas. Es la fuerza gravitacional equilibrada con la fuerza nuclear que es mucho más potente que la fuerza electromagnética.

La estrella formada por neutrones en contacto recibe el nombre de *estrella neutrón*. Está compuesta de un fluido neutrónico al que se suele llamar *neutronium*. En cierto modo un núcleo atómico está hecho de neutronium, y reciprocamente, una estrella neutrón es como un gigantesco núcleo. El neutronium es increíblemente denso; llega a ser algo así como 1 000 000 000 000 000 o sea  $10^{14}$  veces más denso que la materia ordinaria.

Si una esfera de materia común se convirtiera en una esfera de neutronium, su diámetro se encogería a  $1/100000$  del original sin perder masa. Así, la Tierra, que tiene 12 740 kilómetros de diámetro, si repentinamente se convirtiera en neutronium, sería una esfera de 0.127 kilómetros de diámetro. Una esfera de ese tamaño tendría únicamente el diámetro de una y media cuadras comunes de una ciudad pero contendría toda la masa de la Tierra.

De modo similar, si el Sol, que tiene 1 400 000 kilómetros de diámetro se convirtiera en neutronium, resultaría una esfera de solamente 14 kilómetros de diámetro. Tendría el volumen de un pequeño asteroide, pero también tendría toda la masa del Sol.

No es adecuado, como veremos, suponer que las estrellas neutrones tienen una masa mucho mayor que la del Sol, pero para que tengamos una idea clara podemos imaginar la estrella más masiva que se conozca convertida en neutronium sin pérdida de ninguna

parte de su masa. Sería una esfera de solamente 30 o 60 kilómetros de diámetro.

Aun el huevo cósmico, en ocasiones, ha sido imaginado como una gigantesca bola de neutronium que tuviera toda la masa del universo, un "universo de neutrón" por decirlo así, tendría 300 millones de kilómetros de diámetro. Si ese huevo cósmico se colocara en el sitio del Sol, llegaría solamente hasta la órbita de los asteroides pero contendría todas las masas de los 100 000 millones de estrellas de nuestra galaxia y todas las estrellas de otros 100 000 millones de galaxias.

Tampoco tenemos que imaginar que solamente las masas por encima del límite de Chandrasekhar pueden formar estrellas neutrones. Cuando una supernova explota, es tan repentino el colapso de aquella porción de la estrella que no es proyectado hacia el espacio que se abate sobre el fluido electrónico con velocidad increíble. No es tanto la enorme masa como la rápida caída lo que logra atravesar la barrera del fluido electrónico. Una vez que se desintegra el fluido electrónico, esa destrucción es irreversible. El fluido electrónico no puede reconstituirse a sí mismo. Como resultado, se puede formar una estrella neutrón con una masa tan pequeña como la quinta parte de nuestro Sol, con un diámetro de solamente 8.2 kilómetros.

La posibilidad de que la fuerza del colapso de una supernova pueda aplastar el fluido electrónico, aun cuando la masa esté por debajo del límite de Chandrasekhar, hace parecer como si las supernovas están destinadas a formar estrellas neutrones. Las enanas blancas se formarían solamente cuando las estrellas demasiado pequeñas como para explotar como supernovas lleguen a alcanzar su ciclo de expansión y contracción sin que ocurra nada peor que el desarrollo de una nebulosa planetaria.

En 1934 el astrónomo suizo-norteamericano Fritz Swicky (1898-1974) y el astrónomo germano-norteamericano Walter Baade (1893-1960) fueron los primeros en especular sobre la posible formación de estrellas neutrones. Unos pocos años más tarde el físico norteamericano J. Robert Oppenheimer (1904-1967) y uno de sus ayudantes, George M. Volkoff, trabajaron en esa teoría.

Pero al llegar la Segunda Guerra Mundial, esto preocupó a los científicos con exclusión de casi todo lo demás, Oppenheimer por ejemplo, encabezó el equipo que creó la bomba nuclear.

Aun descontando las presiones del trabajo bélico, sin embargo, el interés en las estrellas neutrones no era compartido por todos los astrónomos. Después de todo, el asunto parecía desesperadamente teórico. Un astrónomo podía calcular exactamente lo que podría ocurrir en la explosión de una supernova; podía calcular la manera en la cual la materia podría estallar; cuál podría ser la velocidad del colapso; hasta qué punto se aplastaría el fluido electrónico, y cómo podría formarse neutronium; pero todo quedaría simplemente en cifras sobre un papel.

¿Cómo se podía probar que la teoría era correcta y que existían las estrellas neutrones? ¿Era razonable suponer que un objeto con un diámetro de 8 a 15 kilómetros, y situado, con seguridad, a muchos años-luz de distancia podía ser observado?

Aun si una estrella neutrón fuera tan intensamente brillante como la más luminosa de las estrellas, su diminuta superficie se reduciría a una chispa muy débil. Aun si el mayor de los telescopios se enfocara en su dirección, en el mejor de los casos mostraría solamente una estrella imperceptible ¿Cómo sería posible decir que era una estrella neutrón que estaba lo suficientemente cerca como para distinguirse y no una estrella ordinaria que parecía tan pequeña solamente por estar extremadamente lejos?

Entonces, ¿por qué molestarse con las estrellas neutrones?

Bueno, en tanto que la única manera importante en que los astrónomos podían estudiar el cielo era mediante la observación de la luz emitida por los objetos del universo, parecía inútil tomarse la molestia. Pero al avanzar el siglo xx, sin embargo, los astrónomos tuvieron una creciente preocupación por radiaciones cósmicas distintas de la luz y finalmente ya no pareció tan imposible la tarea de detectar las estrellas neutrones.

#### MAS ALLÁ DE LA LUZ

En 1911 el físico austríaco-norteamericano Victor Francis Hess (1883-1964) pudo demostrar que desde el espacio llegan hasta la

Tierra ciertas formas de radiación muy enérgicas, a las que se dio el nombre de *rayos cósmicos*.

Los rayos cósmicos están compuestos de núcleos atómicos muy rápidos con carga eléctrica, que muy posiblemente se originaron en los millones de supernovas que han estallado durante la vida de nuestra galaxia. Debido a que las partículas de rayos cósmicos tienen carga eléctrica, sin embargo, sufren desviaciones en sus trayectorias a causa de los diversos campos asociados con las estrellas y con la galaxia como un todo. Terminan llegando hasta nosotros desde todas direcciones, y no hay modo de saber desde qué dirección específica empezó su trayectoria una determinada partícula de rayos cósmicos. Si bien los rayos cósmicos interesan a los astrónomos, no pueden usarse para dar información sobre estrellas particulares.

En 1931 el radio-ingeniero norteamericano Karl Guthe Jansky (1905-1950) descubrió que desde el cielo llegan hasta nosotros las *microondas*. Las microondas son radiaciones semejantes a la luz pero sin carga eléctrica, por lo que viajan en línea recta sin que las afecten los campos magnéticos. Las microondas, como su nombre implica, están formadas de ondas al igual que la luz, pero con una longitud de un millón de veces mayor.

Las microondas pertenecen a un grupo de radiaciones llamadas *ondas de radio*, y son precisamente las más pequeñas de este grupo particular. (También se suele llamar ondas de radio a las microondas).

Debido a la gran longitud de las ondas de radio comparadas con las ondas luminosas, las primeras tienen menos energía y es más difícil detectarlas. Además, a medida que aumenta la longitud de onda, disminuye la precisión con que puede ser ubicada el origen de esas ondas, pero por lo demás ambos tipos de onda son muy semejantes. Fue por lo tanto mucho más difícil calcular el punto de origen de las microondas en comparación con las ondas luminosas. Durante algún tiempo no se logró avanzar mucho con las microondas.

La existencia de microondas que llegaran hasta nosotros desde el espacio exterior puso en claro que las estrellas irradian en todas las longitudes de onda. Sucede que la brevedad de longitud de onda de la luz ordinaria y la amplitud de las microondas pueden atrave-

sar nuestra atmósfera, lo que no pueden hacer otras longitudes de onda. Por alguna razón la atmósfera es más o menos opaca a las longitudes de onda más corta que las de la luz visibles, a las más largas que las de las microondas, y a las intermedias entre ambas.

A principio de la década de los cincuenta se enviaron cohetes a través de la atmósfera para salir al espacio exterior de tal modo que se pudieran observar y medir aquellos tipos de longitud de onda bloqueados por la atmósfera. En un principio los cohetes solamente podían permanecer más allá de la atmósfera durante periodos cortos antes de regresar a la Tierra.

Sin embargo, a partir de 1957 la Unión Soviética primero, y después Estados Unidos, empezaron a colocar satélites en órbita alrededor de la Tierra. Podían permanecer más allá de la atmósfera durante periodos indefinidos, y llevaban instrumentos que hacían posible detectar toda la gama de radiaciones que llegaban del cielo. Con los instrumentos adecuados fue posible detectar la *luz ultravioleta*, que tiene longitudes de onda más cortas que la de la luz visible; los *rayos-X* con longitudes de onda aún más cortas, y los *rayos gamma*, con la longitud de onda más corta de todas.

Esto despertó esperanzas, ya que los eventos violentos implican temperaturas más elevadas y por lo tanto radiaciones más energéticas. Cualquier estrella puede irradiar luz, pero solamente las estrellas violentas, por lo tanto interesantes, pueden irradiar rayos-X, por ejemplo.

Como ejemplo, nuestro propio Sol emite rayos-X desde su delgada atmósfera exterior, la *corona*. Esto es debido a que el calor emanado del Sol se absorbe en los átomos muy difusos de la corona y por lo tanto cada átomo se eleva a una temperatura de un millón de grados o más. (El calor total de la corona no es, sin embargo, muy grande, ya que aunque los átomos individuales están muy calientes hay muy pocos de ellos).

Debido a la cercanía del Sol, es el más importante emisor de rayos-X en el cielo; pero si estuviera a la distancia de la estrella más cercana, su radiación de rayos-X estaría tan diluida por la lejanía que no sería percibida. Sirio, por ejemplo, es considerablemente más grande y más caliente que nuestro Sol, y por lo tanto, indudablemente emite rayos-X con una intensidad varias veces ma-

yor que la de este. Sin embargo, Sirio está a una distancia de casi 9 años-luz, y no es posible detectar sus rayos-X.

Si los rayos-X pudieran percibirse a distancias estelares, ciertamente indicarían violencia, pero en un principio los astrónomos no pensaron que pudieran llegarse a detectar. Aunque a principios de los años sesenta suponían que el Sol era la única fuente de rayos-X detectables en el cielo, a pesar de todo había cierto interés en estudiar los cielos nocturnos, ya que era posible que los rayos-X solamente pudieran reflejarse en la Luna y que esto nos daría alguna información sobre la superficie lunar (esto ocurría antes de que los astronautas descendieran en la Luna).

En 1963, bajo la dirección del astrónomo norteamericano Herbert Friedman (1916- ) se llevaron a cabo investigaciones más allá de la atmósfera para detectar los rayos-X procedente de la Luna. No se detectaron ese tipo de rayos-X, pero sorprendentemente se encontraron los que venían de otras direcciones. Desde entonces se han enviado al espacio algunos satélites cuyo único propósito es encontrar fuentes de rayos-X en el cielo, y se han encontrado centenares de ellas.

Esto daba al universo un aspecto totalmente nuevo. Una fuente detectable de rayos-X situada en estrellas lejanas y aun, en muchos casos, otras galaxias, debe señalar eventos fuera de lo común.

La existencia de esas fuentes de rayos-X hizo surgir esperanzas sobre la detección de las estrellas neutrones. Cuando se forma una estrella neutrón en cierto modo es como el centro expuesto de una estrella y posee superficialmente la temperatura de un núcleo estelar. Las consideraciones teóricas que se hicieron plantearon la posibilidad de que en la superficie de una estrella neutrón hubiera temperaturas de  $10\,000\,000^{\circ}\text{C}$ .<sup>12</sup>

Una estrella neutrón cuya superficie tuviera esa temperatura emitiría radiaciones principalmente en la región de los rayos-X. En consecuencia, surgió la pregunta de si algunas de las fuentes de rayos-X en el cielo pudieran originarse en las estrellas neutrones.

<sup>12</sup> Si el huevo cósmico fuera una gigantesca estrella neutrón, su temperatura superficial probablemente sería de  $1\,000\,000\,000\,000^{\circ}\text{C}$  por lo menos, e irradiaría rayos gamma.

Por supuesto, esa no era la única posibilidad. Los rayos-X pudieran originarse en los gases a altas temperaturas expelidos por las supernovas, por ejemplo, de la misma manera que se originan en la corona del Sol.

Estas dos posibilidades pueden distinguirse del modo siguiente: una estrella neutrón sería un punto diminuto en el cielo en tanto que una región de gases se apreciaría como una mancha definida. Mucho dependería, entonces, de si los rayos-X parecieran surgir de un solo punto o de una área más amplia.

La primera sospechosa fue la nebulosa del Cangrejo. Son los restos de una tremenda supernova, y pudiera haber una estrella neutrón en algún sitio en el centro de todos aquellos gases. Y por supuesto, allí están los gases y claramente se encuentran en con-moción energética. Los rayos-X pudieran venir de la supuesta estrella neutrón si hubiera alguna allí, o de los gases, o de ambos.

En 1964, la Luna cruzó por el frente del área del cielo donde está la nebulosa del Cangrejo. Al avanzar la Luna interceptaría la emisión de los rayos-X. Si los rayos-X venían solamente del punto donde se supone que se encontraba una estrella neutrón, se detectarían con plena intensidad mientras avanzaba la Luna para después reducirse súbitamente a cero. Pero si los rayos-X procedían de los gases, entonces la declinación de su intensidad sería paulatina. Por otra parte, si los rayos-X procedieran de ambas fuentes, al principio declinarían progresivamente, después experimentarían un súbito descenso, y finalmente continuarían declinando con la misma secuencia que antes.

Se envió al espacio un cohete en el momento adecuado para medir la intensidad de los rayos-X procedentes de la nebulosa del Cangrejo y la intensidad decreció más o menos gradualmente a medida que la Luna avanzaba. Los rayos-X parecían venir por lo tanto del gas turbulento y se apagaron las esperanzas de identificar una estrella neutrón.

#### LOS PULSARES

Mientras tanto, los astrónomos habían empezado a trabajar con las microondas, y la ciencia de la *radioastronomía* se desarrolló

rápidamente para alcanzar un alto grado de complejidad y de eficiencia. Los astrónomos aprendieron a usar complicadas instalaciones de aparatos (los *radiotelescopios*) de tal manera que pudieran encontrar con gran precisión las fuentes de microondas y estudiar detalladamente sus propiedades.

Al principio de los años sesenta, los radioastrónomos se dieron cuenta de que algunas fuentes de microondas cambian de intensidad con bastante rapidez como si estuvieran parpadeando. Empezaron a diseñar radiotelescopios diseñados especialmente para registrar los rápidos cambios. Anthony Hewish (1924- ) instaló un radiotelescopio de ese tipo en el observatorio de la Universidad de Cambridge que consistía en 2 048 instrumentos receptivos separados extendidos en una área de 18 000 metros cuadrados.

En julio de 1967 se puso en operación el nuevo radiotelescopio y antes de un mes una joven estudiante, Jocelyn Bell, empezó a percibir descargas de microondas que provenían de un lugar situado a la mitad de la distancia entre las estrellas Vega y Altair. Se trataba de descargas muy rápidas. En un principio, ella pensó que se trataba de interferencia sufrida por el radiotelescopio a causa de aparatos eléctricos del vecindario. Sin embargo, pronto descubrió que las fuentes de las descargas de microondas se movían regularmente noche tras noche a través del cielo siguiendo el movimiento de las estrellas. La responsabilidad del fenómeno estaba seguramente fuera de la Tierra y así lo informó a Hewish.

Para fines del mes de noviembre ya podía estudiarse libremente el fenómeno. Hewish había esperado fluctuaciones rápidas pero no tan rápidas. Cada descarga de microondas duraba solamente 1/20 de segundo, y venían a intervalos de uno un tercio de segundo. Llegaban con regularidad. Se presentaban cada 1.33730109 seg.

Los nuevos instrumentos recogieron fácilmente estas emisiones de microondas ya que las descargas individuales tenían la suficiente energía como para percibirse sin problemas. Los radiotelescopios ordinarios no habían sido diseñados para recibir estas breves descargas; solamente detectaban microondas de intensidad promedio incluyendo los períodos muertos entre las descargas. Este promedio es solamente del 3.7 por ciento del máximo de la descarga y este había pasado desapercibido.

La cuestión era: ¿qué representa este fenómeno? Dado que la fuente de microondas parece ser un simple punto en el cielo, Hewish pensó que pudiera representar cierto tipo de estrella. Puesto que las microondas surgían en pulsaciones breves, se imaginó una especie de *estrella pulsante*. Casi de inmediato se abrevió esto a *pulsar*, y este fue el nombre con que se conoció el nuevo objeto.

Hewish buscó en las largas estadísticas hechas con los resultados de las observaciones previas con sus instrumentos y encontró 3 pulsares más. Comprobó las evidencias, y el 9 de febrero de 1968 anunció al mundo su descubrimiento.

Otros astrónomos empezaron a buscar ávidamente y pronto se descubrieron más pulsares. Para 1975 ya se conocían 100 pulsares aunque en nuestra galaxia deben existir unos 100 000.

Dos terceras partes de los pulsares que se han localizado se encuentran en aquellas direcciones donde son más abundantes las estrellas de nuestra galaxia. Es una buena señal que los pulsares generalmente sean parte de nuestra propia galaxia. (No hay razón para suponer que no hayan en otras galaxias, pero debido a las enormes distancias probablemente son demasiado débiles para apreciarse). El pulsar conocido más cercano puede estar a una distancia de unos 300 años luz.

Todos los pulsares se caracterizan por la extrema regularidad de las pulsaciones, pero por supuesto el período exacto varía de un pulsar a otro. El que tiene el período más largo es de 3.75491 segundos.

El pulsar con el período más breve conocido fue descubierto en octubre de 1968 por los astrónomos de Green Bank, West Virginia. Parece estar en la nebulosa del Cangrejo (estableciendo el primer eslabón claro entre los pulsares y las supernovas) y se encontró que tenía un período de sólo 0.033099 segundos. Sus pulsaciones son de 30 por segundo o sea 113 veces más rápidas que el pulsar que tiene el período más largo.

¿Pero qué puede producir esos destellos tan breves con una regularidad tan fantástica?

Tan sorprendidos estaban Hewish y sus colegas astrónomos con los primeros pulsares que se preguntaron si fuera posible que fueran señales de algunas formas de vida inteligentes en el espacio.

De hecho, entre ellos se referían al asunto como *L G M* antes que se empezara a usar la palabra *pulsar* (las siglas LGM significaban, en inglés, *little green men*, "hombrecillos verdes").

La noción no duró mucho tiempo. Para producir las pulsaciones se requerirán 10 mil millones de veces la cantidad total de energía que puede producir la humanidad. No parecía probable que tanta energía se desperdiciara solamente para enviar señales muy regulares que virtualmente no llevaban ninguna información. Además, al detectarse más y más pulsares, pareció muy poco probable que tantas diferentes formas de vida enfocaran todas sus señales hacia nosotros. La teoría se abandonó rápidamente.

Pero algo debía estarlas produciendo, algún cuerpo astronómico posiblemente sufría un cambio periódico consistente —una revolución alrededor de otro cuerpo, una rotación sobre su propio eje, un latido— a intervalos lo suficientemente rápidos como para producir las pulsaciones.

La producción de cambios tan rápidos con la descarga de tanta energía necesitaría un campo gravitacional de enorme intensidad. Los astrónomos no conocían nada que pudiera funcionar de ese modo. Instantáneamente pensaron en las enanas blancas.

Los teóricos se pusieron en obra, pero por más que lo intentaron, no parecía haber modo de explicar que una enana blanca girara alrededor de otra, que girara sobre su eje, o que tuviera pulsaciones, con un período lo suficientemente breve como para explicar los pulsares. Pudieran existir enanas blancas pequeñas y con una gravitación intensa, pero no existían lo suficientemente pequeñas ni podrían ser sus campos gravitacionales tan intensos como para justificar el fenómeno. Si giraran alrededor de otro cuerpo, de su propio eje, o tuvieran pulsaciones en períodos menores de cuatro segundos, se harían pedazos.

Se requería algo más pequeño y más denso que una enana blanca, y el astrónomo austríaco Thomas Gold (1920- ) sugirió que los pulsares eran las estrellas neutrones que había anunciado teóricamente Oppenheimer. Gold señaló que una estrella neutrón tiene la suficiente densidad y pequeño tamaño como para girar sobre su eje en cuatro segundos o menos.

Lo que es más, las estrellas neutrones deben tener un campo magnético igual que las estrellas ordinarias, pero ese campo magnético debe estar comprimido y concentrado de la misma manera que lo está la estrella neutrón. Por esa razón, el campo magnético de una estrella neutrón es enormemente más intenso que los campos que rodean las estrellas ordinarias. Al girar sobre su eje la estrella neutrón emite electrones, pero estos son atrapados por el campo magnético y solamente pueden escapar por los polos magnéticos, que están en los extremos opuestos de la estrella.

Los polos magnéticos no son necesariamente los polos de rotación (no lo son en el caso de nuestra propia Tierra, por ejemplo). Cada polo magnético puede girar alrededor del polo de rotación en segundos o en una fracción de segundo y descargar electrones al hacerlo (de la misma manera que un aspersor giratorio de riego deja escapar chorros de agua). Al descargar los electrones, estos cambian su trayectoria en respuesta al campo magnético y campo gravitacional de la estrella neutrón. Al perder energía, tal vez no lleguen a escapar pero la energía que pierden se manifiesta en forma de microondas.

De esta manera, cada estrella neutrón emite dos chorros de microondas desde los lados opuestos de su diminuto globo. Si una estrella neutrón hace pasar uno de esos chorros de electrones a través de nuestra línea visual al girar, la Tierra recibirá una muy breve pulsación de microondas en cada rotación. Algunos astrónomos estiman que solamente una estrella neutrón de cada cien podría enviar microondas en nuestra dirección, por lo que de unas 100 000 posibles estrellas de este tipo en nuestra galaxia tal vez nunca podremos detectar más de mil.

Gold señaló también que si su teoría era correcta la estrella neutrón pierde energía por los polos magnéticos, y que su velocidad de rotación debe estar disminuyendo. Eso significa que entre más rápido sea el período de un pulsar, más joven será y más rápidamente estará perdiendo energía y disminuyendo su velocidad.

El pulsar más rápido conocido y uno de los que tienen las pulsaciones más enérgicas, es el de la nebulosa del Cangrejo, y bien pudiera ser el más joven de los que hemos observado hasta ahora, ya que la explosión de supernova que pudo haber originado esa

estrella neutrón tuvo lugar hace solamente 900 años. En el mismo momento de su formación, el pulsar de la nebulosa del Cangrejo pudo haber estado girando sobre su eje con una velocidad de mil rotaciones por segundo, pero la pérdida de energía fue muy rápida; en los primeros 900 años de su existencia perdió el 97% de su energía hasta que ahora solamente gira 30 veces por segundo. Y todavía debe estar disminuyendo su velocidad, aunque con creciente lentitud.

Se estudió cuidadosamente el periodo de la nebulosa del Cangrejo y se encontró que efectivamente el pulsar disminuye su velocidad. Tal como lo había predicho Gold, el periodo se ha incrementado en 36.48 billonésimos por segundo cada día, y esta proporción se habrá duplicado en 1 200 años. El mismo fenómeno se ha descubierto en otros pulsares cuyos periodos son más lentos del de la nebulosa del Cangrejo y cuya tasa de disminución de velocidad también es más lenta. El primer pulsar descubierto, llamado ahora CP 1919, tiene un período 40 veces más largo que el pulsar de la nebulosa del Cangrejo y disminuye su velocidad a un ritmo que duplicará este período solamente después de 16 millones de años. Al hacerse más lento el pulsar, sus pulsaciones se hacen menos enérgicas. Para cuando el periodo haya superado los cuatro segundos de duración, el pulsar se hace demasiado débil para ser detectado. Sin embargo, los pulsares probablemente duren como objetos detectables durante decenas de millones de años.

Como resultado de estos estudios de la disminución de velocidad de las pulsaciones, los astrónomos están bastante convencidos de que los pulsares son estrellas neutrones.

En ocasiones un pulsar repentinamente acelera su periodo muy ligeramente y después reasume la tendencia hacia la disminución de velocidad. Esto se detectó por primera vez en febrero de 1969, cuando el periodo del pulsar de Vela X-1 (encontrado entre los restos de la supernova que estalló hace 15 000 años) pareció alterarse súbitamente. El rápido cambio recibió el nombre en slang de *glitch* (de acuerdo con una palabra yidish que significa "resbalón") y en consecuencia *glitch* ha pasado a formar parte del vocabulario científico.

Algunos astrónomos sospechan que los *glitches* pudieran ser causados por un *sismo estelar*, un cambio de la distribución de la masa dentro de la estrella neutrón que da por resultado el enjuntamiento de su diámetro en un centímetro o algo así. O tal vez pudiera deberse a un meteoro de gran tamaño que cae en la estrella neutrón y añade su propia velocidad a la de la estrella.

Por supuesto, no hay razón por la cual los electrones que surgen de una estrella neutrón deban perder energía solamente como microondas. Deben producir ondas de todo tipo del espectro. Por ejemplo, también deben emitir rayos-X, y así lo hace de hecho la estrella neutrón de la nebulosa del Cangrejo. Entre el 10 y 15% de todos los rayos-X que produce la nebulosa del Cangrejo parten de su estrella neutrón; fue el otro 85% o más que llega de los gases turbulentos lo que oscureció este hecho y desanimó a aquellos astrónomos que buscaban una estrella neutrón en ese sitio en 1964.

Una estrella neutrón debe producir también destellos de luz visible. En enero de 1969 se notó que la luz de una débil estrella de 16a. magnitud dentro de la nebulosa del Cangrejo se encendía y se apagaba a un ritmo preciso con las pulsaciones de microondas. Los destellos y los periodos entre ellos son tan breves que se requirió de un equipo especial para captarlos. Bajo observación ordinaria la estrella parecería tener una luz invariable. La estrella neutrón de la nebulosa del Cangrejo fue el primer *pulsar óptico* descubierto, la primera estrella neutrón visible. Pero hasta ahora ha sido la única.

#### PROPIEDADES DE LAS ESTRELLAS NEUTRONES

Los astrónomos especulan sobre la composición detallada de las estrellas neutrones. En la superficie puede haber una delgada capa de materia normal, principalmente hierro. Puede tal vez existir una atmósfera de hierro gaseoso, de un espesor quizás de medio centímetro. También hay partículas cargadas tales como electrones y núcleos atómicos que están unidos al superintenso campo magnético de la estrella neutrón. Son estos, los electrones particularmente, los que se descargan en los polos magnéticos y producen las pulsaciones de radiación que detectamos en la Tierra.

Debajo de la capa más externa de materia normal están los núcleos de hierro que tienen características que pudiéramos llamar "sólidas", aun cuando su envoltura esté a una temperatura de millones de grados. Este borde exterior de la corteza tendrá una densidad de solamente 100 000 g/cm<sup>3</sup>, pero rápidamente aumenta con la profundidad.

Es esta sólida superficie, con una resistencia casi de un billón de billones de veces la del acero y con "montañas" de una altura de un centímetro, posiblemente, la que se reajusta en ocasiones y se asienta para hacerse más compacta produciendo los *glitches* que disminuyen ligeramente en períodos de rotación.

Debajo de la corteza, al aumentar más la densidad, los núcleos no pueden mantener su integridad, y la materia se convierte en una masa de neutrones. Cerca del centro posiblemente haya un mar de partículas más masivas llamadas *hyperones*.<sup>13</sup>

Una propiedad importante de la estrella neutrón es su masa. En 1975 se determinó por primera vez la masa de una estrella neutrón. La estrella neutrón en cuestión, Vela X-1, resultó tener una masa 1.5 veces la del Sol. Esto es interesante, ya que la masa está ligeramente por encima del límite de Chandrasekhar. Ninguna enana blanca pudo haber tenido esa masa (aunque debemos recordar que también son posibles teóricamente estrellas neutrones con masas considerablemente por debajo del límite de Chandrasekhar.

La masa de Vela X-1 pudo ser determinada porque esa estrella neutrón es parte de un binaria. Su compañera es una estrella masiva de la secuencia principal, que tiene 30 veces la masa del Sol. Indudablemente las binarias, si son suficientemente masivas, pueden intercambiar materia en sus respectivos procesos de expansión, y terminar formando un par de estrellas neutrones, del mismo modo que las estrellas menos masivas pueden de esta manera producir un par de enanas blancas.

Originalmente Vela X-1 debió haber sido la más brillante de las dos y hace 15 000 años, cuando se convirtió en supernova, la estrella compañera debió de haber capturado hasta una milésima parte de la materia expulsada por la explosión, ganando considera-

<sup>13</sup> Es posible producir hiperones en el laboratorio, pero en condiciones terráqueas se desintegrarán en menos de un billonésimo de segundo.

clemente en masa y brillo y, por supuesto, acortando su propia vida en la secuencia principal. Finalmente, en un millón de años o menos, la compañera de Vela X-1 se convertirá en supemova por su propio derecho, y tal vez haya entonces dos estrellas neutrones girando alrededor de un centro común de gravedad. El hecho de que una estrella neutrón pueda formar parte de una binaria, como su\* cede con Vela X-1, demuestra que cuando una estrella de un par se convierte en supemova, la otra estrella puede sobrevivir.

El cambio de materia de una estrella a otra cuando se expanden sucesivamente, dará como resultado la conversión de energía gravitacional en radiación, especialmente si está implicada una enana blanca o una estrella neutrón con un campo gravitacional muy intenso. Hasta el 40% de la masa de materia puede convertirse en energía de este modo; más de 100 veces la cantidad de masa que puede convertirse en energía por medio de la fusión nuclear. Este es otro punto que explica el brillo de las novae y las supernovas.

Consideremos ahora algunas de las propiedades gravitacional de una estrella neutrón tomando como nuestro espécimen promedio uno que tenga exactamente la masa de nuestro Sol pero un diámetro de solamente 1/100 000 de este. Esa estrella neutrón deberá tener un diámetro de 14 kilómetros y una densidad promedio de 1400 000 000 000 000 g/cm<sup>3</sup>

Si consideramos primero al Sol, su gravedad superficial será igual a 28 veces la de la superficie de la Tierra. Así, una persona que pese 70 kilogramos en la Tierra pesará en la superficie del Sol (suponiendo que el Sol tenga una superficie en el sentido terrestre y que una persona pueda sobrevivir al experimento) de un poco menos de 2 000 kilogramos.

Si imaginamos que un cuerpo de una masa dada se comprime hasta hacerse más y más pequeño, cualquier objeto sobre su superficie estará más y más cerca del centro. De acuerdo con la ley de gravitación de Newton la gravedad superficial (suponiendo que no cambie la masa) cambia en relación<sup>14</sup> inversa con el cuadrado del

<sup>14</sup> Al decir *inversamente* expresamos que la gravedad superficial y el diámetro cambian en direcciones opuestas. Al disminuir el diámetro, aumenta la gravedad superficial; al aumentar el diámetro, disminuye la gravedad superficial.

diámetro. De este modo, si se comprime una estrella de tal modo que tenga la mitad de su diámetro la gravedad de la superficie será 2 X 2 o sea cuatro veces la original. Si se comprime a 1/6 de su diámetro original, entonces la gravedad superficial será de 6 X 6, o sea 36 veces la original.

Sirio B, con un diámetro de 1/30 del solar y una masa aproximadamente semejante debe tener una gravedad superficial de 30 X 30, o sea 900 veces la del Sol. Nuestra mítica persona de 70 kilogramos de peso, capaz de sobrevivir a cualquier experiencia, sobre la superficie de Sirio B pesaría 1 800 000 kilogramos.

Una estrella neutrón con la masa del Sol y un diámetro de 14 kilómetros (1/100 000 veces el del Sol) debe tener una gravedad superficial de 100 000 X 100 000 o sea 10 000 millones de veces más que la del Sol. Nuestra persona pesaría 20 billones de kilogramos ¿Y qué hay acerca de los periodos de rotación?

Nuestra Tierra, con una circunferencia de 40 000 kilómetros, gira sobre su eje en un día. Esto significa que un punto sobre el ecuador de la Tierra al describir en ese día de rotación un círculo de mayor tamaño que el de cualquier otro punto que no esté en el ecuador, viaja alrededor de la Tierra a una velocidad constante de 0.5 kilómetros por segundo. Esta velocidad disminuye consistentemente a medida que se aleja del ecuador, ya sea al norte o hacia el sur, hasta que es igual a cero en los polos.

Una velocidad de rotación establece un efecto centrífugo que tiende a contrarrestar la atracción de gravedad. Este efecto centrífugo aumenta la velocidad de rotación por lo que es de cero en los polos y se incrementa a medida que se aproxima al ecuador hasta que está a su máximo sobre esta línea imaginaria. El efecto centrífugo tiende a alejar el material del eje, y lo hace con más vigor en el ecuador, por lo que podemos decir que la Tierra tiene un *engrosamiento ecuatorial*. No es mucho. El diámetro del ecuador (la distancia desde un punto del ecuador al punto opuesto, a través del centro de la Tierra) es 43 kilómetros más larga que el diámetro polar (de polo a polo). El diámetro ecuatorial de la Tierra es a *grosso modo* 1/300 más largo que el diámetro polar y esa es la medida del *achataamiento* de la Tierra.

Consideremos a Júpiter, por otra parte. Júpiter, el planeta de mayor tamaño, tiene una circunferencia ecuatorial de 449 000 kilómetros y gira en 9.85 horas. Un punto sobre el ecuador de Júpiter por lo tanto se moverá a una velocidad de 12.7 kilómetros por segundo, un poco más de 25 veces más rápido que un punto en el ecuador terrestre.

A pesar de la mayor gravedad de Júpiter, esta enorme velocidad de rotación, combinada con el hecho de que la sustancia de Júpiter se compone de elementos más ligeros agrupados de modo mucho menos compacto que en la Tierra, da como resultado un mayor aplastamiento de Júpiter. El diámetro ecuatorial de ese planeta es 8 700 kilómetros más largo que su diámetro polar. Su achatamiento es de  $1/16$ .<sup>15</sup>

En comparación, el Sol tiene una circunferencia de 4 363 000 kilómetros y gira en su eje en 25.04 días. Por lo tanto, un punto sobre su ecuador se mueve a una velocidad de más o menos 2 kilómetros por segundo. Esto es cuatro veces la velocidad de un punto sobre el ecuador terrestre, pero equivale solamente a  $1/6$  de un punto en el ecuador de Júpiter. La combinación de velocidad de rotación relativamente lenta y su enorme gravedad de superficie es tal que no puede apreciarse ningún achatamiento. Hasta donde podemos saber, el Sol es una esfera perfecta.

No conocemos cuál es el periodo de rotación de Sirio B, o de cualquier enana blanca, pero sabemos que una estrella neutrón tipo tardará alrededor de un segundo en girar sobre su eje a juzgar por los latidos en los pulsares. Si nuestra estrella neutrón de 14 kilómetros de diámetro girara alrededor de su eje en un segundo, entonces un punto sobre su ecuador se movería con una rapidez de 44 kilómetros por segundo.

Esto es 3.5 veces más rápido que un punto sobre el ecuador de Júpiter, 21.8 veces más rápido que un punto sobre el ecuador solar, y 95 veces más rápido que un punto del ecuador de la Tierra. Sin embargo, considerando el enormemente intenso campo gravitacional de una estrella neutrón, podemos estar seguros de que su velo-

<sup>15</sup> Saturno es un poco más pequeña que Júpiter y no gira con tanta rapidez, pero su campo gravitacional también es menor, y está aún más achatado que Júpiter.

cidad de rotación, por más rápida que pudiera ser de acuerdo con los estándares del sistema solar, simplemente no podrá ni siquiera aproximarse a ser capaz de proyectar hacia el exterior cualquier material venciendo la fuerza de gravedad por medio de un efecto centrífugo. La estrella neutrón deberá ser una esfera perfecta de cualquier modo. También podemos confiar en que la enana blanca sea una esfera perfecta.

Si no parece posible que la fuerza centrífuga pueda proyectar la sustancia de las enanas blancas y las estrellas neutrones hasta una distancia apreciable en contra de la gravedad, podremos imaginar que la velocidad de escape de esos cuerpos debe ser muy elevada, y así ocurre efectivamente.

La velocidad de escape varía inversamente con la raíz cuadrada del diámetro (suponiendo que no haya cambio en la masa). De este modo si se hace disminuir una estrella a  $1/36$  veces su diámetro original, entonces la velocidad de escape aumentará solamente 6 veces dado que 6 es la raíz cuadrada de 36.

Calculando sobre esta base, se puede ver que Sirio B, cuya masa es igual a la del Sol y su diámetro de  $1/30$  del solar, debe tener una velocidad de escape 5.5 veces mayor que la del Sol. Dado que la velocidad de escape de la superficie del Sol es de 617 km/seg la de la superficie de Sirio B deberá ser de 3 400 km/seg.

Por otra parte, nuestra estrella neutrón, con su masa igual a la del Sol pero con un diámetro de solamente  $1/100\,000$ , deberá tener en la superficie una velocidad de escape mayor que la del Sol en proporción igual a la raíz cuadrada de 100 000 o sea 316. La velocidad de escape de la estrella neutrón deberá ser entonces igual a  $617 \times 316$  o sea alrededor de 200 000 km/seg.

Estas cifras de velocidad de escape son particularmente importantes porque serán otro peldaño valioso en la escalera que nos llevará a los agujeros negros. Véamosla en forma tabular en la Tabla 12.

TABLA 12. Velocidades de escape

Objeto	Velocidad de escape	
	Kilómetros por segundo	Fracción de la velocidad de la luz
Tierra	11.2	0.0000373
Júpiter	60.5	0.00020
Sol	617	0.0020
Sirio B	3.400	0.011
Estrella neutrón	200 000	0.67

Para objetos de materia ordinaria las velocidades de escape son fracciones diminutas de la velocidad de la luz. Aun para el Sol la velocidad de escape es de 1/500 de la velocidad de la luz. En el caso de la enana blanca la velocidad de escape será de 1/100 de la velocidad de la luz, y la misma luz perderá una apreciable cantidad de energía al partir. Fue por esta pérdida de energía y el consecuente pequeño desplazamiento hacia el rojo en la luz de Sirio B que Adams pudo checar su naturaleza densa.

Es probable que una estrella neutrón tenga una velocidad de escape de 2/3 de la de la luz, y el desplazamiento einsteniano será mucho mayor. Podemos tener radiaciones X de una estrella neutrón pero sino fuera por el intenso efecto gravitacional de la estrella, los rayos-X que recibimos tendrían ondas mucho más cortas que las que tienen en realidad. En cuanto a radiación de ondas largas que recibimos —las ondas luminosas visibles y las microondas de longitud mucho mayor— una gran parte de ellas tampoco existirían si no fuera por efecto de alargamiento de onda del campo gravitacional de la estrella neutrón.

#### EFFECTOS DE MARRA

Hay otro efecto gravitacional que hemos menospreciado en la superficie terrestre, pero que se convierte en algo de gran importancia en la vecindad de una estrella neutrón. Es el *efecto de marea*.

La fuerza de la atracción gravitacional entre dos objetos particulares de masa dada, depende de la distancia entre sus centros. Por

ejemplo, cuando estamos sobre la superficie de la Tierra, la potencia de la atracción gravitacional sobre nosotros depende de la distancia que nos separe del centro del planeta.

No todo nuestro cuerpo, sin embargo, está a la misma distancia del centro de la Tierra. Nuestros pies están casi dos metros más cerca que la cabeza. Eso significa que los pies son más fuertemente atraídos a la Tierra que la cabeza, porque la atracción gravitacional aumenta al disminuir la distancia. Esta diferencia en la atracción gravitacional entre los dos extremos de un objeto es el efecto de marea.

Bajo circunstancias ordinarias los efectos de marea no son grandes. Consideremos a una persona (de talla bastante grande) que tenga dos metros de altura y un peso de 90 kilogramos. Si está de pie sobre la Tierra al nivel del mar en Estados Unidos, las suelas de sus zapatos estarán a 6 370 000 metros del centro de la Tierra. Digamos que están exactamente a esa distancia. En ese caso, la parte superior de su cabeza estará a 6 370 002 metros del centro de la Tierra.

La atracción gravitacional en la parte superior de su cabeza será de  $(6\,370\,000/6\,370\,002)^2$  veces la atracción gravitacional existente en las plantas de los pies. Esto significa que la atracción sobre sus pies es alrededor de 1 0000008 veces la atracción que sufre su cabeza; equivale a decir que está sobre un potro de tortura con el extremo de su cabeza y la planta de los pies estirados por el efecto de un peso 0.000071 kilogramos, que es el equivalente de unas 4 gotas de agua. Esta clase de atracción es demasiado pequeña para que pueda sentirse y a ello se debe que no tengamos noción de los efectos de marea producidos por la Tierra sobre nuestros cuerpos.

El efecto de marea es mayor a medida que sea más grande el tamaño de un objeto sujeto a un campo gravitacional de tal modo que se ejerza una fuerza mayor sobre el objeto desde sus extremos. En vez de una persona examinemos la Luna.

La Luna tiene un diámetro de 3 475 kilómetros, y su centro está a una distancia promedio de 384 321 kilómetros del centro de la Tierra. Si imaginamos que la Luna siempre estará a esa distancia (en realidad hay una ligera variación durante el mes, aunque no es muy grande) entonces la parte de su superficie que mira directa-

mente a nosotros estará a 382 584 kilómetros del centro de la Tierra, y la parte de su superficie situada directamente en el lado opuesto estará a 386 058 kilómetros del centro de la Tierra.

La atracción gravitacional sobre el lado cercano de la Luna, debido a su proximidad, bajo estas circunstancias será 1.018 veces la del lado contrario.

La fuerza total de la atracción gravitacional de la Tierra sobre la Luna (a la que podríamos imaginar como una pesa que descansa sobre una plataforma de 384 321 kilómetros de altura sobre el centro de la Tierra) sería de 20 000 000 000 000 000 000 de kilogramos.

Si toda la Luna estuviera a la distancia de su superficie más próxima a la Tierra, entonces pesaría 800 000 000 000 000 000 kilogramos más que si toda estuviera a la distancia de la parte más alejada. Podemos imaginar, entonces, a la Luna distendida entre la Tierra y el exterior por esa cantidad de fuerza; 800 millones de billones de kilogramos, que no es poca cosa, y a causa de la cual la Luna muestra un pequeño abultamiento en esa dirección. El diámetro perpendicular al centro de la Tierra es ligeramente más largo que el diámetro en ángulo recto sobre esa distancia.

El efecto es recíproco. La Luna atrae a la Tierra, y lo hace con más vigor en el lado de la Tierra que está más cercano de la Luna que en las partes más alejadas. Dado que la Tierra tiene un diámetro mayor que el de la Luna, hay una mayor distancia sobre la cual puede disminuir el efecto gravitacional y eso aumenta el efecto de las mareas. La Luna es un cuerpo más pequeño que la Tierra y produce un efecto gravitacional total menor, y eso causa una disminución en el efecto de marea.

Esa disminución resulta dominante. El menor campo gravitacional de la Luna es un factor más importante que el mayor diámetro de la Tierra. Si fuera más importante el efecto gravitacional, el efecto de marea de la Luna sobre la Tierra sería de 1/81 del efecto de marea de la Tierra sobre la Luna. El mayor diámetro de la Tierra lo compensa ligeramente, y de hecho el efecto de marea de la Luna sobre la Tierra es de 1/70 del efecto de marea de la Tierra sobre la Luna.

La Tierra se abulta en dirección de la Luna en una cantidad perceptible. La esfera sólida terrestre tiene un abultamiento aproxi-

mado de 1/3 de un metro. El agua de los océanos cede con mayor facilidad y se abulta en más de un metro.

En consecuencia se forma un abultamiento en el océano (y uno menor en la corteza sólida) en el lado de la Tierra más cercano a la Luna y otro en el lado opuesto, el más alejado de la Luna. Al girar nuestro planeta las superficies de tierra firme entran y salen del abultamiento, al igual que en el lado opuesto. Como resultado, el agua de los océanos sube sobre las playas y vuelve a bajar dos veces al día (afectada de acuerdo con la forma de las líneas costeras y otros factores en los cuales no entraremos en detalle). Este movimiento del mar que se repite dos veces al día es conocido como las mareas y es por eso que el fenómeno recibe el nombre de efectos de marea.

Los efectos de marea en cuerpos como la Tierra y la Luna no son realmente muy grandes comparados con la fuerza gravitacional, pero con el tiempo se acumulan. Al girar la Tierra por los abultamientos, la fricción del agua contra el fondo de las porciones menos profundas del océano, convierte algo de la energía rotativa en calor. Como resultado la Tierra disminuye lentamente la velocidad de su rotación y también lentamente se aumenta la duración de su día. El día se hace un segundo más largo cada 100 000 años. Eso no parece mucho, pero si ha habido un ritmo constante de disminución, quiere decir que cuando se formó la Tierra giraba sobre su eje en solamente 12.7 horas.

La Tierra no puede perder velocidad angular (algo relacionado con su ritmo de rotación) sin que se produzca una ganancia en el sistema Tierra-Luna. La Luna es la que obtiene la ganancia y, como resultado, se aleja lentamente de la Tierra, ya que esto es un movimiento que aumenta su velocidad angular.

El efecto de marea de la Tierra sobre la Luna ha frenado la rotación de la Luna hasta el punto en que en todo momento presenta a la Tierra una sola cara.

Al igual que la gravitación como un todo, el efecto de marea cambia con la distancia entre dos cuerpos dados pero de una manera diferente.

Supongamos que la Tierra y la Luna se aproximan lentamente entre sí. La atracción gravitacional total aumentará a medida que

se acercan variando inversamente con el cuadrado de la distancia. Si la Luna y la Tierra estuvieran a la mitad de su distancia actual, la atracción gravitacional aumentaría  $2 \times 2$ , o sea 4 veces. Si la Luna y la Tierra estuvieran a  $1/3$  de su distancia actual, la atracción gravitacional existente entre ambas aumentaría  $3 \times 3$ , o sea 9 veces y así sucesivamente.

El efecto de marea aumenta con el de la atracción gravitacional total. También *aumenta* por otra razón.

Ese efecto depende del tamaño del cuerpo sujeto a un campo gravitacional. Mientras mayor sea el tamaño del cuerpo, mayor será el efecto de marea. Sin embargo, lo que cuenta no es solamente el tamaño del cuerpo sino la relación existente entre su tamaño y la distancia total desde el centro de la atracción gravitacional.

En el momento presente el diámetro de la Luna es de 3.475 kilómetros, lo que representa 0.009 de la distancia entre la Luna y la Tierra. Si la distancia entre los dos planetas se redujera a la mitad, el diámetro de la Luna (que sería el mismo) sería de 0.018 de esa distancia. En otras palabras, al disminuir la distancia el efecto de marea aumentaría en proporción a esa disminución porque el diámetro de la Luna sería una fracción mayor de la distancia total.

Se tienen dos factores que tienden a aumentar los efectos de marea, entonces: uno que varía inversamente con el cuadrado de la distancia y otro que varía inversamente con la distancia. Si se disminuye a la mitad la distancia entre la Tierra y la Luna, el efecto de marea aumentará  $2 \times 2$  veces debido al primer factor y 2 veces a causa del segundo. El incremento total sería de  $2 \times 2 \times 2$  o sea 8. Ahora, bien  $2 \times 2 \times 2$  es el cubo de 2, por lo que decimos que el efecto de marea varía inversamente en relación con el *cubo* de la distancia.

Si la distancia entre dos cuerpos se aumenta tres veces el efecto de marea disminuye en  $1/3 \times 1/3 \times 1/3$  o sea  $1/27$  del original. Recíprocamente, cuando la distancia entre dos cuerpos se disminuye en  $1/3$  de la original, el efecto de marea aumenta  $3 \times 3 \times 3$ , o sea 27 veces el original.

Si la Tierra y la Luna, por lo tanto, se aproximaran entre sí, el efecto de marea de uno con respecto al otro aumentaría constante

y rápidamente. (Cualquiera que sea la distancia, sin embargo, el efecto de marea sobre la Luna permanecerá siendo 70 veces mayor que el efecto de marea de la Luna sobre la Tierra).

Finalmente se llega a un punto, bastante antes de que se haga contacto, en que el efecto de atracción sobre la Luna será tan enorme que se resquebrajaría su estructura. En aquel momento la Tierra, que solamente sufrirá  $1/70$  del efecto que padece la Luna, todavía podrá mantener su integridad, aunque las enormes mareas del océano indudablemente destruirían todo en la superficie terrestre.

En 1849 el matemático francés Edouard A. Roche (1820-1883) demostró que si un satélite se mantiene unido solamente por la atracción gravitacional, por ejemplo si se tratara de un líquido, se desintegrará si se acerca al planeta que circula a una distancia de menos de 2.44 el radio del planeta. Esto recibe el nombre de *límite de Roche*. Si un satélite se mantiene unido por las fuerzas electromagnéticas, como ocurre con nuestra Luna, puede acercarse un poco más que 2.44 veces el radio de la Tierra antes de que el estiramiento de marea sea tan poderoso que lo destruya.

El radio de la Tierra en el ecuador es de 6 378.5 kilómetros, por lo que el límite de Roche en la Tierra es de unos 15 500 kilómetros. Esto es solamente alrededor de  $1/25$  de la distancia a la que se encuentra la Luna. Si nuestro satélite llegara a acercarse a esa distancia de la Tierra, se desintegraría, y sus partículas se extenderían girando en órbita alrededor de nuestro planeta. Se convertiría en un conjunto de anillos como los de Saturno, pero más masivos, y ya no ejercería ningún efecto de marea importante sobre la Tierra porque las diversas partes del anillo ejercerían atracción igual en todas direcciones.

La desintegración no continuaría indefinidamente. Al romperse la Luna en fragmentos más pequeños, cada fragmento, por su menor tamaño, experimentaría un efecto de marea más restringido. A la larga cada fragmento sería demasiado pequeño para que lo subdividiera más el decreciente efecto de marea.

Si un objeto es lo suficientemente pequeño, el efecto de marea no basta para desintegrarlo, aun cuando esté en contacto con el cuerpo que lo atraiga. Es por ello que una nave espacial puede

llegar a la Luna sin desintegrarse y también por lo que nosotros y todos los demás objetos sobre la superficie terrestre permanecen intactos. El efecto de marea sobre objetos de nuestro tamaño y sobre el de las cosas que manejamos es insignificante.

Mientras más intenso sea un campo gravitacional, sin embargo, más intenso será el efecto de marea y también más diminuta la pulverización de los objetos que se encuentren en el límite de Roche.

Para pasar a campos gravitacionales más intensos que el de la Tierra, consideremos al Sol que es 333 500 veces más masivo que la Tierra y por lo tanto tiene un efecto gravitacional 333 500 veces más intenso. El mayor diámetro del Sol sitúa a su superficie más lejos de su centro que la superficie de la Tierra del suyo, y dado que la intensidad de la atracción gravitacional varía inversamente con el cuadrado de la distancia, la gravedad superficial del Sol es únicamente 28 veces la de la Tierra.

El efecto de marea, sin embargo, varía inversamente con el cubo de la distancia. Dado que el diámetro del Sol es de 109.2 veces el de la Tierra, debemos dividir 333 500 (la intensidad del campo gravitacional del Sol comparado con el de la Tierra) entre  $109.2 \times 109.2 \times 109.2$ , o sea 1 302 170. Dividiendo 333 500 entre 1 302 170, el resultado será 0.256.

Se sigue, entonces, que el efecto de marea del Sol sobre los objetos en su superficie será únicamente de 1/4 del efecto de marea de la Tierra en los objetos sobre su superficie.

Pero supongamos que el Sol se contrajera sin perder masa. Cualquier objeto sobre su superficie estaría más y más cerca de su centro y el efecto de marea aumentaría rápidamente.

Sirio B tiene una masa igual que la del Sol, pero su diámetro es de solamente 1/30 del de el Sol. El efecto de marea en la superficie de Sirio B será de  $30 \times 30 \times 30$ , o sea 27 000 veces mayor que el existente en la superficie del Sol, y 7 000 veces que el que sufre la superficie terrestre.

Si podemos imaginar a un ser humano (de dos metros de altura y un peso de 90 kilogramos) de pie sobre una estrella enana blanca sin que lo afecten las radiaciones, el calor y la gravedad total, no sufriría ninguna grave incomodidad por su efecto de marea, aun cuando ese efecto sea mucho mayor que en la superficie terrestre.

Multiplicando el efecto terrestre por 7 000 ese ser humano sufriría un estiramiento debido al efecto de marea de solamente unos 0.5 kilogramos.

¿Y qué sucede con el límite de Roche? Dado que el límite de Roche es 2.44 veces el radio del cuerpo que ejerce la atracción gravitacional y que el cubo de 2.44 es 14.53, el efecto de marea producido por cualquier cuerpo en el límite de Roche es 1/14.53 del efecto de marea que produce en su superficie. Si el efecto de marea de Sirio B es en su superficie de 7 000 veces el producido en la superficie terrestre, y si ambos efectos se dividen entre 14.53, la proporción será la misma; el efecto de marea en el límite de Roche de Sirio B será 7 000 veces el del límite de Roche de la Tierra.

Esto significa que cualquier objeto de gran tamaño que se acerque demasiado a una enana blanca se desintegrará en pedazos mucho más pequeños que si hubiera quedado atrapado demasiado cerca del Sol o de la Tierra. También significa que los objetos pequeños que pudieran resistir los efectos de marea del Sol o de la Tierra en sus límites de Roche y que permanecerían enteros, sin embargo, sí se desintegrarían bajo la influencia de una enana blanca.

Vayamos más lejos, y supongamos que un objeto con la masa del Sol se encoge hasta la etapa de estrella neutrón y que solamente tiene un diámetro de 14 kilómetros. Cualquier objeto sobre su superficie estará ahora a solamente 1/100 000 de la distancia desde su centro que si estuviera en la superficie del Sol. El efecto de marea sobre la superficie de la estrella neutrón será por lo tanto  $100\,000 \times 100\,000 \times 100\,000$  veces el de la superficie solar, o sea un millón de mil millones de veces más, y un cuarto de un millón de mil millones de veces el de la superficie terrestre.

Un ser humano de dos metros de altura que esté sobre una estrella neutrón y que sea inmune a su radiación, calor, o gravedad total, sin embargo sufrirá una distensión debida a una fuerza de 18 mil millones de kilogramos hacia el centro de la estrella neutrón y hacia su exterior, y por supuesto el ser humano o cualquier otra cosa se desintegraría en partículas de polvo. De modo similar la estrella neutrón en su límite de Roche de 34 kilómetros desde su centro pulverizaría finamente cualquier objeto.

(Un segundo efecto de marea surge del hecho de que un cuerpo esférico tendrá sus dos extremos atraídos hacia el centro en direcciones ligeramente diferentes. Esto tenderá a comprimir el cuerpo de lado a lado. En tanto el cuerpo sea de suficiente tamaño como para que la superficie esté virtualmente plana sobre el ancho del cuerpo, este efecto es muy pequeño. Aun en una estrella neutrón es lo suficientemente pequeño como para ignorarse, ciertamente en comparación con el enorme efecto de distensión haría adentro y hacia afuera).

Un ser humano, aun a una distancia de 5 000 kilómetros del centro de una estrella neutrón, sentiría un estiramiento de marea de unos 45 kilogramos si el eje mayor de su cuerpo estuviera apuntando hacia la estrella, y ciertamente sería muy doloroso.

Si una nave espacial del futuro, protegida adecuadamente contra el calor y la radiación, se aproximara a 5 000 kilómetros de distancia de una estrella neutrón (distancia en la que contemplada a simple vista sería meramente un tenue objeto en el espacio), no tendría necesidad de preocuparse con el efecto gravitacional total. La nave se deslizaría en caída libre más allá de la estrella neutrón en una órbita elíptica y se alejaría nuevamente (si se moviera a una velocidad lo suficientemente alta). No sentiría la gravitación más de lo que nosotros sentimos la atracción gravitacional del Sol mientras, junto con la Tierra y todo lo demás que hay sobre ella, nos movemos en caída libre alrededor del Sol.

No habría modo, sin embargo, de eliminar el efecto de marea, y el paso cerca de una estrella neutrón a 5 000 kilómetros de distancia sería una experiencia muy desagradable. (A distancias más cortas los astronautas morirían y la nave se desintegraría).

En 1966 el escritor de ficción científica Larry Ni ven escribió una excelente historia titulada "Estrella neutrón", en la cual los efectos de marea de uno de estos cuerpos está a punto de destruir a un descuidado astronauta que se aproxima demasiado. La historia ganó un premio Hugo (el equivalente en ficción científica al Osear de Hollywood) el siguiente año.

En realidad, no pudieron haber ocurrido los sucesos de esa historia. Los efectos de marea no son un misterio para los astrónomos ni lo han sido desde los días de Isaac Newton, hace 300 años. Cual-

quier grupo de científicos capaces de construir una nave espacial diseñada para aproximarse a una estrella neutrón ciertamente entenderían el efecto de marea y el astronauta con toda seguridad estaría consciente (salvo fallas del equipo) de los peligros de acercarse demasiado.

# 7

## Los agujeros negros

### LA VICTORIA FINAL

Todavía no hemos terminado.

La fuerza nuclear que mantiene al neutronium en existencia puede resistir una atracción gravitacional hacia dentro lo suficientemente intensa como para aplastar los átomos ordinarios y aún el fluido electrónico. El neutronium puede soportar el peso de masas superiores al límite de Chandrasekhar. Pero con toda seguridad ni aún la fuerza nuclear es lo infinitamente grande. Ni siquiera el neutronium puede soportar el aumento interminable de la masa.

Dado que hay estrellas hasta de 50 a 70 veces más masivas que el Sol, no es inconcebible que una vez que se inicia el colapso, en ocasiones pueda ser acompañado por una furia gravitacional aún mayor y más intensa que la que pudiera resistir una estrella neutrón. ¿Qué sucede entonces?

En 1939, cuando Oppenheimer elaboraba las implicaciones teóricas de la estrella neutrón, tomó también en cuenta esta posibilidad. Parecía que durante el colapso de una estrella, si es suficientemente masiva, se puede contraer con una fuerza tal que los neutrones se desplomen bajo el impacto; aún la misma fuerza nuclear tendría que ceder ante la gravitación.

¿Cuál sería entonces la siguiente estación del colapso?

Oppenheimer se dio cuenta de que no habría ninguna; no más paradas. Cuando la fuerza nuclear falla, no queda nada para resis-

tir a la gravitación, la más débil de todas las fuerzas, pero que cuando se incrementa mediante el interminable aumento de la masa finalmente llega a ser la más potente de todas. Si una estrella que se encoge atraviesa la barrera del neutronium la gravitación gana su victoria final. La estrella seguirá encogiéndose indefinidamente, enjútándose su volumen hasta cero y aumentando sin límites su gravedad superficial.

Parece que el límite crucial es 3.2 veces la masa del Sol. De la misma manera que ninguna enana blanca puede tener más de 1.4 veces la masa del Sol sin encogerse más, así ninguna estrella neutrón puede tener más de 3.2 veces la masa del Sol sin continuar su colapso.

Cualquier masa que se contraiga y que tenga más de 3.2 veces la masa del Sol no puede detener su encogimiento en la etapa de enana blanca o en la etapa de estrella neutrón, sino que debe continuar más allá. Además, parece que cualquier estrella de la secuencia principal que tenga 20 veces más la masa del Sol no podrá eliminar suficiente masa por medio de una explosión de supernova como para hacer posible su conversión en una enana blanca o una estrella neutrón, sino que eventualmente su contracción llegará a cero. Para cualquier estrella de clase espectral O entonces, la victoria final de la gravitación parece un destino seguro una vez que se agota el combustible nuclear.

(Mientras que las masas que tienen 3.2 veces la del Sol *deben* sufrir este colapso final una vez que empieza el proceso, también puede ocurrir con masas menores como veremos).

¿Qué sucede cuando tiene lugar esta victoria final de gravitación y aun el neutronium cede? ¿Qué ocurre si una estrella neutrón se contrae aún más?

La gravedad superficial de una estrella neutrón que se encoja continuará aumentando consistentemente, y lo mismo ocurre con la velocidad de escape, ya que la superficie del objeto que se contrae disminuye cada vez más su distancia hacia el punto central al cual tiende toda contracción. Ya hemos visto anteriormente en este libro que una estrella neutrón con la masa de nuestro Sol tendrá una velocidad de escape de 200 000 kilómetros por segundo, que es dos tercios de la velocidad de la luz.

Si la materia de una estrella neutrón continúa contrayéndose y se hace más intensa la gravedad superficial, seguramente llegará una etapa en que la velocidad de escape igualará a la velocidad de la luz. El valor del radio de un cuerpo donde ocurre esto recibe el nombre de *radio de Schwarzschild* porque fue calculado por primera vez por el astrónomo alemán Karl Schwarzschild (1873-1916). El punto cero en el centro tiene un nombre de *singularidad de Schwarzschild*.

Para una masa igual a la del Sol, el radio de Schwarzschild es un poco menos de 3 kilómetros. El diámetro será igual al doble de este o sea 6 kilómetros.

Imaginemos entonces una estrella neutrón con la masa del Sol que se contrae atravesando la barrera de los neutrones y que se encoge de su diámetro de 14 kilómetros hasta tener solamente 6 kilómetros. Su densidad aumentará 13 veces y será de 17 800 000 000-000 000 g/cm<sup>3</sup>. Su gravedad superior será 1 500 000 000 000 de veces la de la Tierra, por lo que un ser humano promedio pesará 100 billones de kilogramos si estuviera sobre un objeto semejante. El efecto de marea de ese objeto será 13 veces más intenso que el de una estrella neutrón.

La propiedad más importante de ese objeto superencogido, sin embargo, se da el hecho de que la velocidad de escape es igual a la de la velocidad de la luz. (Naturalmente, si el objeto disminuye hasta un tamaño aún más pequeño que el radio de Schwarzschild, la velocidad de escape será mayor que la velocidad de la luz).

Ocurre que los físicos tienen la certidumbre de que ningún objeto material puede moverse a una velocidad igual o mayor que la de la luz. Eso significa que ningún cuerpo que tenga el radio de Schwarzschild podrá perder masa por eyección. Nada que posea masa podrá escapar a su sujeción final, ni aun objetos como electrones, que pueden, con cierta dificultad, escapar de la estrella neutrón.

Pueden caer cosas sobre este objeto superencogido, pero no pueden ser expulsadas nuevamente, es como si el objeto fuera un agujero en el espacio de profundidad infinita.

Ni siquiera podrá escapar la luz o cualquier radiación similar. La luz consiste de partículas sin masa, por lo que se puede pensar que la atracción gravitacional de cualquier objeto, por más poderosa

que sea, no tendría efecto sobre la luz. Pero por la teoría de la relatividad general de Einstein, sin embargo, sabemos que la luz que surge de un objeto oponiéndose a la gravedad pierde algo de su energía y sufre el llamado efecto Einstein. Esto ha sido un hecho establecido desde que Adams lo detectó en conexión con Sirio B. Cuando un objeto que se encoge llega al radio de Schwarzschild o menos, la luz que emite pierde toda su energía y experimenta un infinito desplazamiento hacia el rojo. Eso significa que no surge nada.

Los objetos superencogidos no solamente actúan como un agujero, sino como un agujero negro, ya que no pueden emitir luz o radiaciones semejantes a las luminosas. De hecho es por esta razón que se les llama *agujeros negros*.

La frase apenas parece ser apropiada para un objeto astronómico cuya existencia se calcula mediante un complicado razonamiento teórico. Es una frase demasiado común y cotidiana. Se ha sugerido también el nombre de *colapsar*, una versión abreviada de *collapsed star* (estrella contraída). La dramática imagen de un "agujero negro" y la misma simplicidad del nombre, sin embargo, parecen asegurar que continuará usándose.

Tenemos entonces cuatro tipos de posibles objetos estables:

1) *Objetos planetarios*, que van de las partículas subatómicas individuales hasta masas iguales a unas 30 veces la de Júpiter pero no más de esa. Todos están formados (a excepción de las partículas subatómicas individuales) por átomos intactos, y generalmente tienen densidades promedio de menos de  $10 \text{ g/cm}^3$ .

2) *Enanas negras*, que son enanas blancas que han perdido tanto de su energía que ya no pueden brillar visiblemente. Estas tienen masas que van desde 1.4 veces la masa de nuestro Sol pero no más que eso. Están hechas de fluido electrónico dentro del cual hay núcleos que se mueven libremente y tienen densidades en la categoría de  $20\,000 \text{ g/cm}^3$ .

3) *Estrellas neutrones negras*, que son estrellas neutrones que han perdido tanta de su energía que ya no pueden brillar visiblemente. Estas tienen masa que es hasta 3.2 veces la de nuestro Sol pero no más que eso. Están hechas de neutronium con densidades aproximadas a  $1\,500\,000\,000\,000\,000 \text{ g/cm}^3$ .

4) *Agujeros negros*, que no producen luz, que pueden tener masas hasta de cualquier valor, y que están hechos de materia en un estado que no podemos describir y con densidades de cualquier valor hasta el infinito.

¿Pero son estas cuatro variedades de objetos realmente estables en el sentido de que no sufrirán más cambios sin importar cuanto tiempo existan?

Si un miembro de cualquiera de estas cuatro clases estuviera a solas en el universo, hasta donde podemos decir, sería estable y nunca sufriría ningún cambio sustancial. El problema es, sin embargo, que ninguna de estas cosas está sola en el universo. El universo es una vasta colección de objetos en diferentes situaciones de estabilidad, junto con objetos inestables como son las estrellas que evolucionan para quedar incluidas en las últimas de las tres clases mencionadas o, que después de haber alcanzado una de estas clases, todavía están irradiando luz en tanto no alcanzan la estabilidad y negrura finales. ¿Qué sucede entonces?

Consideremos la Tierra. Tiende a perder algo de su masa ya que su atmósfera se desintegra muy lentamente. También tenderá a ganar alguna masa, ya que choca con material meteórico y lo retiene en un promedio de 35 millones de kilogramos al día. Esto no es mucho, comparado con la masa de la Tierra, pero es considerablemente mayor que la cantidad de masa que la Tierra pierde cada día. Podemos decir, por lo tanto, que la Tierra se está haciendo más masiva, de modo muy lento, pero consistentemente.

Del mismo modo el Sol está perdiendo masa constantemente, en parte por la conversión de hidrógeno a helio y en parte por la expulsión de protones y otras partículas en la forma de viento solar. Sin embargo, también debe estar recibiendo polvo y materia meteórica del espacio a través del cual viaja.

Con excepción de los agujeros negros, todos los objetos tienen capacidad para perder masa. (En casos especiales, también ocurrirá con los agujeros negros, de acuerdo con las sugerencias especulativas, como veremos). Aún las estrellas neutrones expulsan electrones, y de no ser así no podríamos recibir las pulsaciones de microondas. Y las supernovas expulsan masa de materia que puede ser varias veces la masa de nuestro Sol.

Sin embargo, puede argüirse fácilmente, que la tendencia general en el universo es que los objetos grandes crezcan a expensas de los chicos. Podemos imaginar, por lo tanto, (simplemente como una concepción abstracta) que un objeto planetario eventualmente pudiera ganar tanta masa que sufriera la ignición nuclear y se convirtiera en una estrella —una estrella muy pequeña, por supuesto— que eventualmente llegaría a la etapa de enana blanca y que finalmente se convertiría en una enana negra.

También podemos imaginar que después de que una estrella se ha establecido de un modo o de otro, en la presumiblemente etapa estable en enana negra, pudiera recoger suficiente masa en su viaje a través del espacio como para desintegrar el fluido electrónico y encogerse aún más para hacerse una estrella neutrón. Una estrella neutrón, del mismo modo, pudiera acrecentar su masa lo suficiente como para aplastar el neutronium y encogerse aún más para formar un agujero negro; este no puede perder masa sino solamente ganarla, sin límite en cuanto a la capacidad para hacerlo.

Solamente hay un objeto, entonces, que puede ciertamente aparecer estable a través de la eternidad, y ese es el agujero negro. Al final, y suponiendo siempre que las cosas continuaran moviéndose en la dirección que parece tener todas, pudiéramos decidir que el universo consistirá de agujeros negros y finalmente, tal vez, pudiera ser un solo agujero negro que contenga a todos. Se habrá llevado a cabo el colapso del universo (como lo estoy implicando en el título de este libro). »

O tal vez no sea tan simple. Volvamos a la consideración de que el destino final del universo pudiera ser en términos de agujeros negros una vez que revisemos una vez más sus propiedades.

Y ciertamente la primera propiedad que debemos considerar es la materia de existencia. En teoría, los agujeros negros deben existir; pero en la práctica, ¿existen?

#### LA DETECCIÓN DE LOS AGUJEROS NEGROS

No es fácil detectar un agujero negro. Las enanas blancas, debido a su pequeño tamaño y su opacidad, fueron bastante más difíciles

de identificar, como tales, que las estrellas ordinarias. Las estrellas neutrones más pequeñas y todavía más tenues, fueron aún más difíciles de detectar, si se tuviera que depender exclusivamente de la radiación luminosa tal vez nunca hubiera sido posible conocerlas. Fueron las pulsaciones de microondas las que las delataron. Obviamente un agujero negro que no emite luz ni microondas ni ninguna radiación similar, puede evadir por completo la observación.

Sin embargo la situación no es tan desesperante. Tenemos al campo gravitacional. Cualquier cosa que sucede a la masa que parece interminablemente añadida y comprimida dentro de un agujero negro esa masa debe seguir existiendo (hasta donde sabemos) y debe continuar como fuente de origen de un campo gravitacional.

Con seguridad, la atracción gravitacional total ejercida por un agujero negro a una gran distancia no es mayor que la atracción gravitacional total ejercida por esa masa en cualquier otra forma. De este modo, si se está a 100 años-luz de distancia de una estrella gigante que tenga 50 veces la masa del Sol, su atracción gravitacional estará tan diluida por la distancia que será insensiblemente pequeña. Si de algún modo esa estrella se convierte en agujero negro con una masa 50 veces mayor que la del Sol, su atracción gravitacional a una distancia de 100 años-luz será precisamente la misma que antes y no será apreciable.

La diferencia es esta: un objeto puede acercarse mucho más al centro de un agujero negro que al centro de una estrella gigante, por lo que experimentará una atracción gravitacional enormemente más concentrada en la vecindad inmediata de un agujero negro que la que pudiera sufrir en la superficie de una gran estrella de la misma masa, pero en la cual estaría muy alejado del centro de la misma.

¿Puede de algún modo detectarse a grandes distancias la existencia de esas intensidades gravitacionales tan enormemente concentradas?

De acuerdo con la teoría de la relatividad general de Einstein la acción gravitacional libera *ondas gravitacionales*, cuyas partículas reciben el nombre de *gravitones* (del mismo modo que las partículas de las ondas luminosas se conocen como fotones). Los gravitones son mucho menos enérgicos que los fotones, sin embargo, y no pue-

den ser detectados a menos que estén presentes en energías elevadas fuera de lo común y solamente de manera que apenas se pueda percibir.

Nada de lo que conocemos es susceptible de producir gravitones que se puedan percibir, a excepción posiblemente de un gran agujero negro en proceso de formación y desarrollo.

A fines de la década de los sesentas el físico de nacionalidad estadounidense Joseph Weber 1919- ) usó grandes cilindros de aluminio como detectores de gravitones; el peso de cada una de estas piezas era de varias toneladas y fueron colocados a cientos de millas de separación.

Estos cilindros se comprimirían y expandirían ligeramente al pasar las ondas gravitacionales. Fue de esta manera como Weber detectó ondas gravitacionales y su informe de lo sucedido produjo excitación considerable.

La conclusión más inmediata, si los datos de Weber eran correctos, fue que en el centro de la galaxia estaban teniendo lugar eventos enormemente energéticos. Podría localizarse en este sitio un agujero negro.

Sin embargo, otros científicos han tratado de repetir los experimentos de Weber y han fracasado, por lo que actualmente ha quedado en suspenso la cuestión de si se detectaron o no los gravitones.

Puede haber un agujero negro en el centro de la galaxia, pero por el momento se han interrumpido los experimentos de Weber, por lo que hay que considerar otros medios de localizar los agujeros negros.

Otro procedimiento, en el que también se hace uso del intenso campo gravitacional en las proximidades del agujero negro, es el estudio de la conducta de la luz que puede pasar rozando un agujero negro.

La luz se desviará ligeramente en dirección de la fuerza gravitacional; se ha comprobado que lo hace de manera apreciable, aun cuando ocurra esto al pasar cerca de un objeto como el Sol, que tiene un campo gravitacional ordinario.

Supongamos que hay un agujero negro precisamente entre una galaxia distante y la Tierra. La luz de la galaxia pasará por el invisible y diminuto agujero negro por todos lados. En todo su derredor la luz se desviará hacia el agujero negro y convergirá en nuestra dirección. Gravitacionalmente la luz sufre el mismo efecto que experimenta convencionalmente con una lente. Por lo tanto, se llama a ese efecto la *lente gravitacional*.

Si viéramos una galaxia que a pesar de su distancia parece anormalmente grande, podríamos sospechar que su imagen está aumentada por una lente gravitacional y que entre aquella galaxia y nosotros se encuentra un agujero negro.

Sin embargo, todavía no se ha observado un fenómeno semejante.

Los agujeros negros, sin embargo, no están solos en el universo. Pudiera ser que haya materia ordinaria en sus cercanías. Si es así, los objetos de tamaño apreciable que se aproximen demasiado serán convertidos en polvo y, junto con la materia que ya exista en la forma de polvo y gas, circularán en órbita alrededor del agujero negro como un disco situado a unos 200 kilómetros fuera del radio de Schwarzschild.

El polvo y el gas que se mueven en órbita alrededor del agujero negro bien pudieran estar para siempre en esa órbita si no se interfiriera con las partículas individuales. Pero las colisiones mutuas producirán una transferencia de energía, y algunas partículas, al perder energía, se acercarán más al agujero negro, y eventualmente rebasarán el radio de Schwarzschild para nunca volver a salir.

En general habrá una pequeña y constante fuga de partículas hacia adentro que perderán energía gravitacional, convertida en calor, y sufrirán mayor calentamiento por el estiramiento y compresión de los efectos de marea. El resultado será que se calentarán a enormes temperaturas e irradiarán rayos-X.

De este modo, en tanto que no podemos detectar a un agujero negro desnudo, rodeado de vacío, sí podemos percibir posiblemente a uno que está devorando materia, ya que esa materia, al ser ingerida, emitirá rayos-X.

La radiación de rayos-X tiene que ser de una intensidad tal como para poderse detectar a través de muchos años-luz de espacio, por lo que tendrá que representar más que un fino polvo ocasional.

Se necesitan torrentes de materia que caigan en el agujero, y esto significa que el agujero negro tendrá que estar en sitios bastante especializados.

Por ejemplo, será más factible encontrar agujeros negros donde hay grandes concentraciones de estrellas muy próximas entre sí y en donde la acumulación de la masa puede alcanzar más fácilmente el nivel donde tarde o temprano será inevitable la formación de agujeros negros.

Existen, por ejemplo, enjambres globulares de estrellas en los cuales algunas decenas de millares o tal vez cientos de miles se agrupan como en una esfera bastante apiñada. Aquí en las cercanías de nuestro universo las estrellas están separadas por una distancia promedio de unos 5 años-luz. En el centro de un enjambre globular pueden estar separadas solamente por una distancia promedio de medio año-luz. En un volumen dado de espacio de un enjambre estelar pudieran existir mil veces más estrellas que en el mismo volumen de nuestra región del espacio.

Se ha encontrado que algunos enjambres estelares son fuentes de rayos-X, y existe la posibilidad de que en su centro se localicen agujeros negros. Algunos astrónomos suponen que esos agujeros negros de enjambres estelares puedan tener masas de 10 a 100 veces mayores que la del Sol.

Las regiones centrales de las galaxias se asemejan a gigantescos enjambres globulares que contienen decenas o centenas de millones de estrellas. La separación promedio en las regiones centrales pudiera ser de la décima parte de un año-luz y en el mismo centro tal vez disminuya hasta 1/40 de año-luz. Así es que en el núcleo de una galaxia cierto volumen de espacio pudiera tener millares o millones de estrellas por cada una de las que aparecen en un volumen semejante de espacio en nuestra galaxia.

Ese amontonamiento no significa que las estrellas estén chocando entre sí. Aún 1/40 de años-luz es 40 veces la distancia que existe entre el Sol y Plutón. De todos modos las posibilidades de eventos violentos seguramente aumentarán a medida que sea mayor la densidad estelar en el espacio. En años recientes se ha tenido una creciente evidencia de explosiones en los centros de las galaxias, explosiones tan energéticas que los astrónomos no alcanzan a explicar

su liberación de energía. ¿Pudieran ser responsables de alguna manera los agujeros negros? ; Muy posiblemente!

Nuestra propia galaxia no es inmune. En el centro de ella se ha detectado una fuente muy compacta y enérgica de microondas, y es tentador suponer que se debe a la existencia de un agujero negro. Algunos astrónomos han ido tan lejos como para especular que el agujero negro de nuestra galaxia tiene la masa de 100 millones de estrellas, por lo que tendría la masa de 1/1 000 del total de la galaxia. Su diámetro es de 700 millones de kilómetros, lo que equivale al tamaño de una estrella gigante roja, pero es algo tan superiormente masivo que por su efecto de marea desintegraría a estrellas enteras, si se acercaran demasiado, o las tragaría enteras antes de que pudieran desintegrarse, si su acercamiento fuera lo suficientemente rápida

Tal vez todos los enjambres globulares y todas las galaxias tengan un agujero negro en el centro, tomándolo todo sin devolver nada, engullendo constantemente materia normal y creciendo sin interrupción. ¿Llegarán a devorar todo? Teóricamente sí, pero el ritmo con que lo hagan sería muy lento. El universo tiene una antigüedad de 15 000 millones de años, y todavía existen enjambres globulares y galaxias que no han sido afectadas. Hay inclusive una sugestión de que los agujeros negros centrales son más bien los creadores de enjambres y galaxias y no sus devoradores. El agujero negro pudo haber aparecido primeramente y después servido como "semilla", reuniendo a su alrededor estrellas como discos que se convirtieron en enjambres y galaxias.

Pero por más constructivo que pudiera haber sido originalmente un agujero negro, ahora está devorando materia, y por más lento que lo haga, no sería saludable estar cerca de uno de ellos. Si existe un agujero negro en el centro de toda galaxia, el que estaría más cercano a nosotros sería el del centro de nuestra propia galaxia, y eso significaría una distancia de 30 000 años-luz. Es una distancia bastante segura aun cuando en el otro extremo exista un gigantesco agujero negro.

Si hay un agujero negro en el centro de todo enjambre estelar el más cercano a nosotros sería el perteneciente al enjambre conocido como Omega Centauri, que está a 22 000 años-luz de distancia.

Hasta ahora, sin embargo, los agujeros negros en los centros de enjambres y galaxias son únicamente una especulación. No podemos ver el centro de un enjambre o de una galaxia para estudiarlo directamente. El gran número de estrellas periféricas lo ocultan, y cualquier evidencia indirecta que obtengamos en forma de rayos-X o aun de ondas gravitacionales no resulta muy concluyente en el futuro cercano.

¿Qué otra cosa entonces?

Supongamos que no consideramos conglomerados vastos de estrellas sino solamente un par de ellas. Supongamos que examinamos las binarias.

Podemos conocer la masa total de una binaria si determinamos la distancia que nos separa de ella y el periodo de su revolución. Si una estrella es de tamaño muy pequeño, y sin embargo su masa es muy grande, podemos decir que está en una u otra etapa de su colapso. Así es como fue detectada la compañera de Sirio y como se le reconoció finalmente como enana blanca.

Supongamos, entonces, que tenemos un sistema binario en el cual ambos miembros se han enjutado hasta formar agujeros negros. Las masas, a pesar de ser invisibles como materia de observación directa todavía giran una alrededor de la otra y, si son jóvenes, muy posiblemente recojan restos de la materia dispersada durante la explosión de supernova. Por lo tanto podríamos detectar una doble fuente de rayos-X que giran alrededor de un centro de gravedad. Hasta ahora se conocen 8 binarias de rayos-X, pero se desconoce la naturaleza del origen en esos casos.

¿Qué sucede si solamente una estrella de un par binario se encoge para formar un agujero negro? La compañera de ese agujero negro, que fácilmente podría estar a varios billones de kilómetros de distancia, será afectada por la energía y se encontrará girando a través de un volumen de espacio que tiene ahora mucho más polvo que antes, gracias a la materia expulsada en la supernova que precedió a la formación del agujero negro.

La compañera puede calentarse más al recoger algo de esta materia y en consecuencia acortar su vida, pero por el momento permanece en la secuencia principal. La atracción gravitacional a la que está sujeta no aumenta como resultado del nuevo agujero

negro que tiene como asociada; por el contrario tenderá a disminuir debido a la pérdida de masa en la explosión de supernova de su compañera.

Visto desde la Tierra, lo que se pudiera observar sería una estrella normal de la secuencia principal, moviéndose en órbita alrededor de un centro de gravedad en el lado opuesto de lo que sería simplemente una intensa fuente de rayos-X.

¿Indicarían esos rayos-X la presencia de una estrella neutrón o de un agujero negro? Hay diferencias que pudieran evaluarse para identificarlos. Los rayos-X de una estrella neutrón pudieran aparecer en forma de pulsaciones regulares equivalentes a las pulsaciones de las microondas. De hecho, se han detectado dos pulsares de rayos-X de ese tipo, Centauro X3 y Hércules X-1. Desde un agujero negro los rayos-X variarían irregularmente al ser ingerida la materia —a veces en cantidades copiosas, en ocasiones en pequeña cantidad— además, si esa fuente de rayos-X tuviera una masa de más de 3.2 veces la del Sol, debiera ser un agujero negro. (Si se llegara a probar de modo inequívoco que una masa de más de 3.2 veces la del Sol fuera una estrella neutrón eso alteraría toda la teoría de los agujeros negros. Pero hasta ahora, no ha sido encontrada una estrella neutrón con esa masa).

A principios de los años sesenta, cuando se descubrieron por primera vez en el cielo fuentes de rayos-X, por medio de la observación de cohetes se localizó en 1965 un emisor particularmente intenso en la constelación del Cisne. A esta fuente de rayos-X se le dio el nombre de Cisne X-1.

En 1965 un satélite de detección de rayos-X se lanzó desde la costa de Kenya en el quinto aniversario de la independencia de este país. Se le dio el nombre de Uhuru que es la palabra en swahili que significa "libertad". El satélite multiplicó nuestros conocimientos de fuentes de rayos-X de manera inesperada, al detectar 161 de tales fuentes, la mitad de ellas en nuestra propia galaxia y 3 enjambres globulares.

En 1971 el satélite Uhuru detectó un marcado cambio en la intensidad de los rayos-X de Cisne X-1, que virtualmente la eliminaba como una posible estrella neutrón y que hizo surgir las posibilidades de que se tratara de un agujero negro. Ahora que la atención

estaba enfocada en Cisne X-1, también se detectaron microondas, y esto hizo posible definir la fuente con mucha precisión y colocarla justamente al lado de una estrella visible.

La estrella era HD-226868, una gran estrella azul caliente de clase espectral B unas 30 veces más masiva que nuestro Sol. El astrónomo C. T. Bolt de la Universidad de Toronto demostró que HD-226868 era una binaria. Circula claramente en una órbita con un periodo de 5.6 días, una órbita cuya naturaleza hace aparecer como si la otra estrella fuera tal vez de 5 a 8 veces más masiva que el Sol.

Sin embargo, no pudo verse a la estrella compañera, aun cuando fuera una fuente intensa de rayos-X. Si no puede verse debe ser muy pequeña. Es demasiado masiva ya sea para ser una enana blanca o una estrella neutrón, y por lo tanto la inferencia es de que la estrella invisible es un agujero negro.

Además, HD-226868 parece estarse expandiendo como si entrara a la etapa de gigante roja. Por lo tanto su materia debe estarse derramando sobre el agujero negro que la acompaña, lo cual explicaría porqué es tan intensa la fuente de rayos-X de este último.

Esta es una evidencia bastante indirecta, y no todos los astrónomos están de acuerdo en que Cisne X-1 es un agujero negro. Mucho depende de la distancia de la binaria. Mientras mayor sea la distancia mayor será la masa requerida en las estrellas para que tengan un período orbital tan corto, y más posiblemente sea Cisne X-1 lo suficientemente masiva como para ser un agujero negro. Algunos astrónomos sostienen que la binaria está considerablemente más cerca que los 10 000 años-luz en que se estima comúnmente su distancia y que por lo tanto Cisne X-1 no es un agujero negro. Sin embargo, el consenso parece (por lo menos hasta ahora) favorecer la hipótesis del agujero negro.

Desde entonces se han observado algunas otras binarias en las cuales uno de los cuerpos que forman el par pudiera ser un agujero negro. Entre estos se contarían las fuentes de rayos-X conocidas como X Persei y Circinus X-1.

También hay posibilidades de agujeros negros donde no interviene como factor la emisión de rayos-X. En algunos casos se puede deducir una binaria muy cercana por la conducta de las líneas del

espectro. Epsilon Aurigae, a juzgar por la conducta de estas líneas espectrales, parece girar alrededor de una compañera invisible, Epsilon Aurigae B. Lo que es más, los datos espectroscópicos hacen parecer que Epsilon Aurigae A, la estrella visible, tiene una masa 17 veces la del Sol, en tanto que Epsilon Aurigae B, la invisible, tiene una masa 8 veces la del Sol. Nuevamente la combinación de invisibilidad y grandes masas indica la posibilidad de que Epsilon Aurigae B sea un agujero negro (aunque algunos astrónomos sostienen que Epsilon Aurigae B es invisible debido a que se trata de una nueva estrella en formación, que todavía no ha iniciado su ignición).

i,

#### MINIAGUJEROS NEGROS

Si los agujeros negros existen solamente en los centros de las galaxias, entonces debe de haber uno en la nuestra. Si también se admite que existen en el centro de los enjambres globulares, tendría que haber unos 200 de ellos en nuestra galaxia. Sin embargo, si igualmente admitimos que pueden existir como parte de los sistemas binarios ordinarios, habrá entonces potencialmente un vasto número de ellos. Después de todo, hay decenas de miles de millones de estrellas binarias en nuestra galaxia.

Además, no solamente pueden ser parte de sistemas binarios. Sucede que pensamos en ellos en relación con las estrellas binarias porque es la compañera cercana la que delata su existencia. Pero también pueden existir agujeros negros originados en estrellas aisladas y entonces, sin que haya cerca materia que produzca los rayos-X ni una compañera por la que se pueda medir su masa, sería imposible detectarlos, pero de todos modos estarían allí.

Tomando todo esto en consideración, algunos astrónomos sospechan que pueden haber hasta mil millones de agujeros negros del tamaño de estrellas en una galaxia como la nuestra. Si esto es cierto y si los agujeros negros están distribuidos con más o menos regularidad, la distancia promedio entre ellos será de 40 años-luz y cualquier estrella particular estaría, en promedio, a 20 años-luz de distancia de un agujero negro o de otro.

Por supuesto, es más probable que los agujeros negros estén distribuidos de modo tan irregular como las mismas estrellas. El 90 por ciento de todas las estrellas en nuestra galaxia (o en cualquier galaxia similar) están localizadas en las relativamente pequeñas regiones centrales. Solamente el 10 por ciento están en los voluminosos brazos espirales, escasamente poblados, donde se ubica nuestro propio Sol. Pudiera ser, entonces, que solamente el 10 por ciento de los agujeros de nuestra galaxia se localicen en los brazos espirales, que aquí estén muy dispersos, y que lo más probable es que el agujero negro más cercano a nosotros se encuentre a varios cientos de años-luz de distancia.

Por supuesto, al hablar de agujeros negros, hasta ahora nos hemos referido a agujeros negros con masas iguales a las de las estrellas masivas, y ciertamente hay astrónomos que piensan que el agujero negro promedio tendrá una masa de más o menos de 10 veces la de nuestro Sol.

Parecería que no pudiera existir ninguno de un tamaño menor, ya que solamente los objetos del tamaño de las estrellas pueden poseer un campo gravitacional lo suficientemente grande como para producir una compresión de tal intensidad que rompa la barrera del neutronium y produzca un agujero negro.

De acuerdo con la teoría de la relatividad general de Einstein, sin embargo, los agujeros negros pueden tener cualquier tamaño. Todo objeto que posee una masa, no importa lo pequeña que pudiera ser esa masa, también tendrá un campo gravitacional. Si el objeto se comprime para formar un volumen más y más pequeño, ese campo gravitacional se vuelve más y más intenso en su inmediata vecindad y finalmente llegará a ser tan intenso que la velocidad de escape de su superficie sea mayor que la velocidad de la luz. En otras palabras, se habrá encogido hasta menos de su radio de Schwarzschild.

La Tierra sería un agujero negro si se encogiera hasta un diámetro de 0.87 centímetros (el tamaño de una perla). Una masa del tamaño del monte Everest se convertiría en un agujero negro si se encogiera hasta el tamaño de un núcleo atómico.

Pudiéramos seguir de este modo hasta llegar a la masa más pequeña conocida, la de un electrón, pero hay razones teóricas sutiles

para suponer que las masas menores de  $10^6$  gramos sean incapaces de formar agujeros negros. Una masa de  $10^{-6}$  gramos (una fracción de materia apenas visible a simple vista) se convertiría en un agujero negro si se redujera a un diámetro a algo así como  $10^{-33}$  cm., con lo cual su densidad sería  $10^{66}$  g/cm<sup>3</sup> (A esa densidad un objeto del tamaño de un núcleo atómico contendría una masa igual a la de todo el universo).

Pero, ¿qué puede comprimir a los objetos pequeños para formar esos miniagujeros negros? No pueden ser sus propios campos gravitacionales, sino que debe ser alguna fuerza compresora que venga del exterior. ¿Pero qué fuerza proveniente del exterior puede tener la suficiente potencia como para producirlos?

En 1971 el astrónomo inglés Stephen Hawking sugirió que una fuerza de ese tipo pudo originarse en el momento en que se formó el universo; la fuerza del mismo gran estallido. Con grandes cantidades de materia explotando por todos lados pudieron haber chocado diferentes secciones de la sustancia en expansión. Una parte de esta materia al chocar pudo haberse comprimido bajo presiones enormes desde todas direcciones. La materia comprimida pudo enjuntarse entonces hasta un punto en que la creciente intensidad gravitacional la mantendría encogida para siempre.

No hay evidencia de que existan esos miniagujeros negros, ni siquiera el tipo de evidencia que ofrece Cisne X-1 para los agujeros negros de tamaño estelar. Lo que es más, algunos astrónomos desechan la idea y piensan que solamente existen agujeros negros con masas bastante más grandes que las de nuestro Sol.

Sin embargo, si existen los miniagujeros negros, será entonces probable que haya muchos más de éstos que de los de tamaño estelar. Pudiera ser, entonces, que si hay agujeros negros de tamaño estelar dispersos con una separación promedio de 40 años-luz pudiera haber una gran cantidad de agujeros negros desde los de tamaño moderado hasta los de tamaño microscópico en intervalos mucho más cercanos. ¿Estará el espacio lleno de ellos? Hawking piensa que tal vez haya hasta 300 por año-luz cúbico en el universo.

Es importante recordar que de cualquier modo no hay indicación de esto. Pero entonces, si los miniagujeros negros abundan en el espacio, el efecto gravitacional total es diminuto, y solamente pue-

de ser detectado en la cercanía inmediata del objeto, a unos cuantos kilómetros de distancia, a unos cuantos centímetros, a unos cuantos microcentímetros, dependiendo de su tamaño.

Aún los más pequeños agujeros negros deben estar creciendo incansablemente, ya que devorarán cualquier partícula de polvo con la que choquen o por lo menos así se suele imaginar. (Hawking también presenta argumentos sutiles para suponer que los mini-agujeros negros pueden perder masa, y que en realidad los de tamaño pequeño pueden "evaporarse" y explotar antes de que puedan ganar mucha masa).

Si un miniagujero negro choca con un cuerpo de mayor tamaño, simplemente pasará a través de él. Absorberá la primera fracción de materia con la que choque, liberando en el proceso suficiente energía como para derretir y vaporizar la materia que se encuentre en su camino. Pasará entonces a través del vapor ardiente, absorbiéndolo y aumentando el calor, emergiendo finalmente del cuerpo de mayor tamaño como un agujero negro considerablemente más grande que cuando penetró en él.

(Si un miniagujero negro entra a un cuerpo de mayor tamaño que tenga muy poca energía o muy poco movimiento, pudiera quedarse atrapado dentro del cuerpo y hundirse hasta su centro donde gradualmente consumiría la materia interior y continuaría creciendo lentamente como un parásito dentro de un organismo).

El volumen de esos miniagujeros negros es tan diminuto, su gravitación total tan pequeña, y el volumen y vacuedad tan enorme que deben ser muy raras las colisiones. En los 15 mil millones de años transcurridos desde el gran estallido la gran mayoría de los pequeños agujeros negros deben haber ganado tan poca masa que todavía siguen siendo diminutos y casi imposibles de detectar.

De acuerdo con las probabilidades, por supuesto, es posible que un miniagujero negro choque con la Tierra. El calor producido al pasar a través de la atmósfera sería suficiente como para producir efectos espectaculares que no podrían dejar de percibirse y también tendría efectos especiales su paso a través del globo terrestre.

¿Ha llegado a ocurrir eso?

No lo sabemos. No hay señales que sepamos de que algo como esto haya ocurrido en tiempos prehistóricos. ¿Pero podemos estar

seguros? ¿Fue Sodoma destruida por el choque con un miniagujero negro? ¿Cómo podemos saberlo? La destrucción pudo haber sido causada por un meteorito ordinario, una erupción volcánica, o tal vez nunca ocurrió en realidad. Los datos que se tienen no son lo suficientemente adecuados.

¿Ha ocurrido algo en los tiempos históricos que pudieran atribuirse a un miniagujero negro? ¡Una sola cosa!

El 30 de junio de 1908, en la región Tunguska de la Siberia central ocurrió lo que en un principio se pensó que era efecto de la caída de un gran meteorito. Quedaron destruidos los árboles en un radio de 30 kilómetros, y pereció completamente un rebaño de 500 renos. Las cuidadosas pesquisas llevadas a cabo en años posteriores no dieron por resultado el hallazgo de cráteres o fragmentos meteoríticos.

Los investigadores decidieron entonces que la exposición debió de tener lugar en la atmósfera. Algunos pensaron que pudiera haberse tratado de un pequeño cometa hecho de materiales congelados que se derritió y vaporizó a su paso por la atmósfera, creando una gran explosión y bombardeando la Tierra con fragmentos de grava (incrustados en el hielo) de tal modo que no aparecieron cicatrices perceptibles.

Otros creen que pudo haberse tratado de un fragmento de antimateria que pudo haber chocado con la Tierra. La antimateria está hecha de materiales parecidos a la materia ordinaria, con la excepción de que todas las partículas subatómicas que la componen tienen propiedades opuestas a las partículas que integran la materia ordinaria. La antimateria interactúa con la materia, convirtiendo todo lo de ambas en energía. Una partícula de antimateria que choque contra la materia normal de la Tierra desaparecerá, haciendo desaparecer una masa igual de materia normal y produciendo una explosión análoga a la de una bomba de hidrógeno con una carga nuclear de unas 15 o más veces la masa que tenga.

Se ha llegado a sugerir que la explosión fue causada por el choque de una nave espacial de propulsión nuclear manejada por astronautas extraterrestres.

Otra sugerición, sin embargo, es que el causante fue un mini-agujero negro que chocó, creó una vasta explosión y al pasar a

través de la atmósfera entró a la Tierra en determinado ángulo, pasó por su interior absorbiendo más materia, y salió finalmente en el océano Atlántico Norte donde produjo una gigantesca columna de agua y una explosión que nadie pudo ver o escuchar. Continuó después su viaje con una masa considerablemente mayor que cuando llegó, pero todavía con las proporciones de un miniagujero negro.

Por supuesto, la sugestión del miniagujero negro es una simple especulación. Algunos astrónomos señalan que un miniagujero negro que pasara a través del cuerpo de la Tierra y saliera por el océano hubiera producido terremotos y ciertamente una gran marejada, y ninguna de estas cosas ocurrieron simultáneamente con el incidente de 1908.

Todavía no hay modo de probar o rechazar la explicación del miniagujero negro como causante de la catástrofe de 1908. Tal vez nunca se pueda hacer a menos que ocurra un evento similar en un momento en que los científicos, con su conocimiento del universo bastante más adelantado del que tenían en aquel año, puedan estudiar el suceso en el momento de su ocurrencia.

#### LOS USOS DE LOS AGUJEROS NEGROS

Naturalmente cualquier científico, por más dedicado que sea, no puede contemplar con satisfacción la posibilidad de un choque entre un miniagujero negro y la Tierra. Si el suceso de 1908 no hubiera ocurrido por fortuna en una de las pocas vastas áreas de la superficie terrestre en las que no viven seres humanos, la destrucción de propiedades y vidas pudiera haber sido aterradora.

Se puede fácilmente imaginar que un choque semejante borraría del mapa a Washington, D. C. o Moscú, por ejemplo, si llegara a tocarlos. Los resultados serían tan parecidos a la explosión de una bomba de hidrógeno que cualquiera de las dos superpotencias que fuera afectada descargaría inmediatamente un ataque de represalia antes de conocerse la verdad y la destrucción se extendería a todo el planeta.

Por supuesto, vuelvo a repetir que el incidente de Siberia tal vez no haya sido causado por un miniagujero negro; que tal vez no existan los miniagujeros negros; y que si existen, las probabilidades de un choque quizá sean bastante menos que la de que nos caiga encima un meteorito mientras estamos dormidos en nuestras camas.

Sin embargo, ¿y si acaso existen los miniagujeros negros?

Eventualmente podemos aprender a protegernos contra ellos. Si los seres humanos llegan alguna vez a la etapa en donde tengan observatorios y colonias en otros mundos del sistema solar y en estructuras artificiales en el mismo espacio, tal vez tengan oportunidad de estudiar los miniagujeros negros, en su ambiente familiar, por decirlo así, en condiciones que no impliquen un choque con la Tierra.

De hecho, tal vez podemos hasta soñar que se desarrollen técnicas para capturar un agujero negro por medio de su campo gravitacional (muy intenso en su cercanía pero muy pequeño en total) y forzarlo a cambiar su dirección lo necesario para evitar que choque con la Tierra si hubiera peligro de ello. Eso sería un resultado de accesorio de la exploración del espacio que bien pudiera valer la cantidad de dinero que se gastara en ello.

Aquellos que especulan bastante más adelante de las actuales capacidades de la ciencia y que disfrutan en imaginar visiones fantásticas futuras,<sup>18</sup> tal vez aún tengan la esperanza de que estemos relativamente cercanos a un agujero negro (aunque lo suficientemente alejados para estar a salvo).

Después de todo, un agujero negro es el umbral de energías enormes; cualquier objeto que sea absorbido por aquellos irradiará una gran cantidad de energía durante el proceso.

La mayor parte de la energía de cualquier objeto reside en su masa, dado que cada gramo de masa es el equivalente de  $9 \times 10^{10}$  ergs de energía. La energía que obtenemos al quemar petróleo o carbón, por ejemplo, solamente emplea una diminuta fracción de uno por ciento de la masa del combustible. Aun las reacciones nucleares liberan solamente el dos por ciento de la masa. Un objeto

<sup>18</sup> Estoy incluido aquí porque (como tal vez sepa el lector) soy un escritor de ficción científica de cierto renombre.

que caiga en un agujero negro o que, bajo ciertas condiciones, pase muy cerca de él aún sin entrar tal vez convierta hasta el 30 por ciento de su masa en energía.

Lo que es más, solamente ciertas sustancias pueden quemarse para producir energía; solamente ciertos núcleos atómicos pueden ser desintegrados o fusionados para producir energía. Sin embargo, *cualquier cosa* producirá energía al caer en un agujero negro. El agujero negro es un horno universal, y todo lo que existe y tenga masa será su combustible.

Tal vez podemos imaginar alguna civilización extraordinariamente avanzada en el futuro que domine a los agujeros negros para extraerles la energía que pueden producir, alimentándolos con asteroides de la misma manera que nosotros alimentamos con carbón un horno ordinario. En ese caso, si la galaxia posee centenares o tal vez millares de civilizaciones avanzadas (como algunos astrónomos sospechan que pudiera ser) serían aquellas situadas razonablemente cerca de agujeros negros del tamaño adecuado, quienes tendrían las reservas más ricas de energía disponible y quienes florecerían al igual que las naciones de la Tierra que son ricas en recursos energéticos.

Es muy poco probable que encontremos agujeros negros masivos que podamos usar como horno universal. Ni tampoco estamos ansiosos de encontrar uno a solamente unos cuantos años luz de distancia de nosotros, ya que los de mayor tamaño serían los más difíciles de controlar.

Tal vez lo mejor sea, hasta el momento en que nuestra tecnología adelante lo suficiente, contentarnos con uno de los mucho más comunes (si es que existen) miniagujeros negros y tratar de seguir empleando medios más convencionales para obtener energía.

Supongamos que encontramos un miniagujero negro pasando por algún punto del sistema solar o, aún mejor, en órbita alrededor del Sol. En cualquiera de los dos casos tal vez fuera posible atraparlo por medio de su campo gravitacional, remolcarlo con algún objeto masivo, y ponerlo en órbita alrededor de la Tierra (si es que la nerviosa humanidad lo permite).

Se puede disparar una corriente de pequeños proyectiles de hidrógeno congelado de tal modo que pasen muy cerca del miniagu-

jero negro, rozando su radio de Schwarzschild, sin entrar a él. Los efectos de marea calentarán el hidrógeno hasta el punto de fusión, por lo que del otro lado saldrá helio. De este modo el miniagujero negro sería el reactor de fusión nuclear más simple y seguro que pudiera imaginarse, y la energía que produzca puede ser almacenada y enviada a la Tierra,

# 8

## Fines y principios

¿EL FINAL?

Naturalmente que tenemos curiosidad para saber lo que puede suceder a la materia que cae dentro de un agujero negro.

Es muy difícil satisfacer esa curiosidad. Ciertamente, todo lo que podemos hacer es especular, ya que no tenemos manera de saber si las leyes de la naturaleza que tan trabajosamente hemos establecido al observar el universo que nos rodea funcionan bajo las condiciones extremas del agujero negro. No podemos duplicar esas condiciones de ninguna manera aquí en la Tierra, y no podemos observar esas condiciones en el cielo, ya que sabemos que en las cercanías de nuestro planeta no hay ningún agujero negro.

Se sigue, entonces, que solamente podemos asumir que las leyes de la naturaleza funcionarán y tratar de especular qué pudiera ocurrir.

Una cosa que pudiera suceder es que *no* ocurra lo peor o por lo menos que no se observe su ocurrencia. ¿Cómo, por ejemplo, puede la masa comprimirse hasta el volumen cero y una densidad infinita en la singularidad de Schwarzschild? Esto confunde tanto la mente que debemos buscar algo que lo impida.

Por ejemplo, la teoría de Einstein hace parecer que el incremento de la intensidad de la gravedad tiene el efecto de hacer más lento el paso del tiempo. Esto es algo que no podemos observar con facilidad en el universo, ya que fuera de los agujeros negros y

las estrellas neutrones aquellas intensidades gravitacionales que encontramos solamente tienen un efecto insignificante en la velocidad del tiempo.

Debido a esto, si pudiéramos observar algo que cae en un agujero negro, lo veríamos moverse más y más lentamente al acercarse al radio de Schwarzschild, disminuir aún más su velocidad hasta que nos parecería haberse detenido en el radio de Schwarzschild. Sin embargo, al acercarse, el efecto Einstein, que también depende de la intensidad gravitacional, roba sus energías a la luz y a las radiaciones semejantes a las luminosas. El objeto que cae hacia adentro se hará más difuso al moverse más lentamente, y en el radio de Schwarzschild, donde se inmoviliza, también desaparece. El resultado es que no podemos observar nada dentro del radio de Schwarzschild.

Si imaginamos que un astronauta cae en un agujero negro y que de alguna manera puede conservar la conciencia y la capacidad de darse cuenta de lo que le rodea, no sentirá ningún cambio en el paso del tiempo; ese cambio es algo que solamente existirá para el que contemple el fenómeno desde el exterior.

El astronauta que caiga en un agujero negro pasará a través del radio de Schwarzschild sin saber que aquello era una especie de barrera, y continuará cayendo hacia la singularidad. Sin embargo, un modo de interpretar los eventos siguientes es suponer que desde el punto de vista del astronauta la distancia que tiene por delante se expandirá a medida que cae, de tal manera que caería eternamente, sin llegar nunca al centro. Desde este punto de vista el agujero negro es un agujero sin fondo.

Aunque de cualquier modo que veamos a los objetos que caen en un agujero negro, nunca se llega al centro, no hay volumen cero, no hay densidad infinita, tampoco hay modo de regresar. La caída es irreversible, por lo que nuevamente consideremos la posibilidad del fin del universo.

Si ciertamente no hay manera de revertir o neutralizar el agujero negro, aquellos que existen ahora no pueden hacer otra cosa que crecer; y se pueden formar nuevos.

Si hay un agujero negro en el centro de toda galaxia y en el centro de todo enjambre globular, entonces al final (no importa lo

que esto tarde) cada galaxia se convertirá en un gran agujero negro rodeado de agujeros negros satélites de tamaño más pequeño.

Dos agujeros negros pueden chocar y convertirse en uno solo, pero una vez formado un agujero negro no puede dividirse. Por lo tanto podemos imaginar que tarde o temprano los agujeros negros de los enjambres globulares en órbita alrededor del agujero negro galáctico pueden fundirse entre sí y finalmente con el central de tal manera que, pasado el tiempo suficiente, la galaxia sea un solo agujero negro.

Las unidades galácticas pueden consistir de una galaxia. Pero también pueden consistir de varias galaxias (en casos extremos, varios millares) que están unidas por la atracción gravitacional. Cada galaxia de la unidad puede ser un agujero negro, y también estos podrán unirse.

¿Podemos llegar a la suposición de que todos los agujeros negros del universo eventualmente formarán un solo agujero negro universal?

No necesariamente. El universo está en proceso de expansión, por lo que las unidades galácticas (ya sean simples galaxias o enjambres galácticos) constantemente aumentan la distancia que las separa entre ellas. La mayoría de los astrónomos parecen creer que en el futuro esto continuará indefinidamente. Si es así, tenemos la visión de un universo que consiste en miles de millones de agujeros negros, cada uno con una masa que puede variar de miles de millones a un billón de veces la de nuestro Sol, separándose interminablemente unos de otros.

El mismo acto de expandirse, sin embargo, puede posiblemente producir un cambio.

Allá por 1937 el físico inglés Adrien Maurice Dirac (1902-) planteó la sorprendente teoría de que la intensidad de la fuerza gravitacional en lo general depende de las propiedades totales del universo. Mientras mayor sea la densidad promedio del universo, más potente será la fuerza gravitacional, en relación a las otras fuerzas del universo.

Dado que el universo se está expandiendo, disminuye la densidad promedio de la materia al extenderse constantemente sobre un volumen mayor. A causa de la gran expansión que ha tenido lugar

hasta ahora (según su punto de vista) se debe que la fuerza gravitacional sea tan débil en comparación con las otras, y al continuar expandiéndose el universo, la fuerza se hará aún más débil.

Todavía no se ha comprobado que pueda ser cierta la sugestión de Dirac, y muchos físicos sospechan que la constante gravitacional (cuyo valor dicta la potencia básica de la fuerza gravitacional) no solamente es la misma en cualquier parte del espacio sino que tampoco varía con el tiempo. Sin embargo, si se comprobara la teoría de Dirac, se alteraría todo el cuadro que hemos descrito.

Al expandirse el universo y hacerse más débil la gravitación, estos objetos que se mantienen unidos principalmente por la fuerza gravitacional se expandirán y se harán menos compactos y densos. Dentro de estos se incluirán las enanas blancas y las estrellas neutrón que ya se han formado, y también quedarán incluidos los agujeros negros. Habrá una tendencia para que todos los objetos se conviertan en materia unida por la fuerza electromagnética o no unida de ninguna manera. Aun los agujeros negros, poco a poco, se desintegrarán y al final el universo será una vasta e increíblemente fina nube de grava, polvo, y gas que interminablemente se haga cada vez más vasta y tenue.

Si es así, pudiera parecer que el universo se inicia como una enorme masa de materia comprimida y terminará como un enorme volumen de materia mala.

Esto plantea el enigma de dónde vino la materia comprimida. No necesitamos preocuparnos de la materia como tal, ya que no es sino una forma muy compacta de energía, y podemos suponer que la energía siempre ha existido y siempre existirá, mucha de ella en forma de materia. La cuestión es, en principio, ¿cómo se comprimió la materia en el huevo cósmico?

Pudiéramos suponer que si consideramos que el universo se desarrolla de lo comprimido a lo expandido, estamos tomando en cuenta solamente la mitad de su vida.

Supongamos que el universo empezó como un interminablemente tenue volumen de grava, polvo, y gas. Lentamente, durante incontables eones se concentró hasta formar el huevo cósmico que después explotó y que durante igualmente incontables eones ha ido restableciendo la materia como lo ha hecho. Ocurre que vivimos

durante el periodo transcurrido poco tiempo (sólo 15 mil millones de años) después de la explosión.

Sin embargo, la idea del universo como una sola ocurrencia parece vagamente insatisfactoria. Si la materia dispersa pudo agruparse, consolidarse, contraerse y finalmente formar un huevo cósmico, entonces, ¿por qué la materia dispersa que se forma como producto final de la explosión del huevo cósmico (ya sea que consista de agujeros negros o de materia dispersa) no puede agruparse nuevamente, contraerse una vez más, y formarse un segundo huevo cósmico?

¿Por qué no puede esto repetirse una y otra vez? ¿Por qué, en breve, no pudiera tratarse de un *universo oscilante* interminable?

Los astrónomos han calculado las condiciones que se requerirían para producir un universo oscilante. La elección depende de algo como la velocidad de escape. Hay una cierta fuerza gravitacional general entre las unidades galácticas del universo, y hay una velocidad de escape asociada con aquella fuerza.

Si el universo se expande hacia afuera a una velocidad mayor que la velocidad de escape, entonces se expandirá eternamente y nunca se contraerá. Si se expande a menos de la velocidad de escape, la presente expansión finalmente se detendrá, y empezará la contracción.

¿Pero es la velocidad de expansión que se observa mayor o menor que la velocidad de escape? Eso depende de la velocidad del valor de la velocidad de escape, que a su vez depende del valor de la fuerza gravitacional total entre las unidades galácticas, la que depende, según se sabe, de la densidad promedio de la materia en el universo.

Mientras mayor sea la densidad promedio de la materia en el universo, mayor será la fuerza gravitacional entre las galaxias, mayor la velocidad de escape, y también mayor la probabilidad de que la presente velocidad de expansión no sea mayor que la velocidad de escape y que el universo oscile, que sea un sistema *cerrado*.

Naturalmente es problemático determinar la densidad promedio del universo, ya que no es fácil determinar cuánta masa total está presente en un volumen lo suficientemente grande como para ser representativo del todo. Usando los mejores datos disponibles,

algunos astrónomos parecen bastante convencidos de que la densidad promedio es solamente de 1/100 del valor necesario para la oscilación, lo que significaría que el universo es un sistema *abierto* y que está condenado a expandirse eternamente. (Si la fuerza gravitacional se debilita a medida que se expande el universo, entonces se requeriría para la oscilación una densidad promedio aún mayor, y la aparente densidad estaría todavía más lejos de llenar esos requisitos).

Sin embargo, aunque los argumentos contra un universo cerrado y oscilante parecen muy fuertes, ¿puede ser eso la última palabra? Algunos enjambres de galaxias que parecen mantenerse unidos por la atracción gravitacional no parecen tener la masa suficiente como para mantener esa fuerza. Deben estar separando en respuesta a la expansión general del universo y sin embargo no parecen hacerlo. Aquí tenemos lo que se llama el problema de la masa perdida.

¿Puede esa masa faltante consistir de agujeros negros? Con excepción de algunos pocos casos no hay modo de detectar los agujeros negros, y no tenemos la más ligera noción de cuánta masa está invisiblemente aprisionada en aquellos agujeros negros de todos tamaños. Parece difícil creer que los agujeros negros constituyan una masa más de 100 veces mayor que la de todos los objetos visibles del universo. Sin embargo, estamos en el mismo límite de lo que podemos observar y razonar, y no podemos permitirnos estar demasiado ciertos de una cosa o de otra. La evidencia *parece* señalar hacia un universo abierto, que se expande, pero *pudiera ser* que, teniendo en cuenta los agujeros negros, haya suficiente masa como para que se trate de un universo cerrado y oscilante después de todo.

#### TÚNELES EN EL ESPACIO Y AGUJEROS BLANCOS.

La incomodidad con respecto a un universo abierto, que se expande eternamente y que sólo existirá una sola vez, es tal que los astrónomos parecen buscar por todo concepto la manera de apartarse de las evidencias que señalan hacia ello.

Ya en 1948 Thomas Gold, junto con los astrónomos ingleses Fred Hoyle y Hermann Bondi trataron de rodear el obstáculo su-

giriendo lo que se ha llamado el universo de *creación continua*. La idea es que la materia es creada continuamente de átomo en átomo, aquí y allá en el universo. Se crearía a un ritmo tan lento que no podríamos detectarlo.

A pesar de todo, al expandirse el universo y al aumentar el espacio entre las unidades galácticas, se formaría suficiente materia para reunirse en nuevas galaxias en aquellos espacios que quedan entre las unidades galácticas que se separan. En conjunto se formarían suficientes galaxias nuevas como para compensar la separación de las viejas. El universo sería un vasto ordenamiento de galaxias que variarían desde aquellas que apenas se están formando, pasando por todas las etapas del desarrollo hasta aquellas que están muriendo. El universo sería infinitamente grande en el espacio y eternamente duradero en el tiempo. Nacerían y morirían las estrellas y galaxias pero el universo como un todo sería inmortal y nunca habría nacido ni nunca moriría.

Esta era una teoría atractiva, pero casi no existían evidencias en su favor y nunca prosperó. De hecho más bien se debilitó. Si existiera una continua creación del universo nunca hubiera habido un gran estallido. Por esta razón una evidencia que respaldara la teoría del gran estallido desearía la de la creación continua.

En 1964 el físico norteamericano Robert Henry Dicke (1916-) hizo notar que el gran estallido, si tuvo lugar hace 15 mil millones de años, debió dejar rastros que aún ahora serían visibles a 15 mil millones de años-luz de distancia (ya que la luz necesita 15 mil millones de años para llegar hasta nosotros desde aquella distancia, y de esta manera la luz del gran estallido apenas llegaría a nosotros en este momento).

La radiación del gran estallido, de tipo muy enérgico y de onda corta, se ha desviado debido a la gran distancia hacia el extremo rojo de gran energía en el espectro. Se ha desplazado más allá del rojo hasta la sección de microondas del espectro de baja energía y mucha mayor longitud. Ya que el gran estallido debe ser visible a 15 mil millones de años-luz de distancia en cualquier dirección, las microondas deben venir de todas partes del cielo como una *radiación de fondo*.

En 1965 dos científicos del Bell Telephone Laboratories, Arno A. Penzias y Robert W. Wilson, demostraron la existencia de una leve radiación de fondo justamente con las características que había predicho Dicke. Se había detectado el gran estallido, y eso dio muerte a la teoría de creación continua (al menos por ahora).

Había fallado esa ruta para eludir el concepto del universo abierto. Hay otras, sin embargo, y para encontrarlas regresemos a los agujeros negros.

Hasta ahora hemos hablado de agujeros negros que solamente tienen una propiedad, la masa. No importa la naturaleza de la masa. Si se añade a un agujero negro un kilogramo de platino, o un kilogramo de hidrógeno, o para el caso un kilogramo de tejido vivo, lo que se añade es un kilogramo de masa sin ningún antecedente de su estado previo.

Hay otras dos propiedades, y solamente dos, que puede poseer un agujero negro. Una es la carga eléctrica y la otra es la velocidad angular. Eso significa que cualquier agujero negro puede describirse completamente al medir su masa, carga eléctrica y velocidad angular. (Es posible que tanto la carga eléctrica como la velocidad angular sean cero; pero la masa no puede ser cero, o no se trataría de un agujero negro).

En tanto que un agujero negro puede tener carga eléctrica, solamente puede tenerla si la masa que formó originalmente el agujero negro o la que se le añadió posteriormente tiene una carga eléctrica. Las cargas eléctricas —positiva y negativa— en trozos de materia de tamaño apreciable tienden a existir en cantidades iguales, por lo que la carga total es cero. En consecuencia, es muy probable que los agujeros negros tengan una carga eléctrica igual a cero.

No ocurre así con la velocidad angular. Por el contrario, la situación es la opuesta y es muy posible que todos los agujeros negros tengan una considerable velocidad angular.

La velocidad angular es una propiedad de cualquier objeto que gire sobre su eje, o que gire alrededor de un punto externo, o ambas cosas. La velocidad angular incluye tanto la velocidad de rotación o de revolución del objeto y la distancia de sus diversas partes hacia el eje o centro alrededor del cual gira. La velocidad angular

total de un sistema cerrado (uno en el cual no puede ganarse o perderse velocidad angular) debe conservarse; esto es, ni puede ser aumentada ni disminuida.

Esto significa que si se aumenta la distancia debe disminuirse la velocidad de rotación, y viceversa. Un patinador sobre hielo aprovecha esto cuando empieza un giro con los brazos extendidos. Recoge sus brazos hacia su cuerpo disminuyendo la distancia promedio de las partes de su cuerpo hacia el eje de rotación, y aumenta notablemente la velocidad de su giro. Al extender nuevamente los brazos, de inmediato lo hace más lento.

Todas las estrellas que conocemos giran sobre su eje y por lo tanto tienen una gran cantidad de velocidad angular de rotación. Cuando una estrella se encoge, para compensar, debe aumentar su velocidad de rotación. Mientras más extremo sea el colapso, mayor será la ganancia en velocidad de rotación. Una estrella neutrón nueva puede girar hasta 1 000 veces por segundo. Los agujeros negros deben girar con velocidad aún mayor. No hay modo de evitarlo.

Podemos decir, entonces, que todo agujero negro tiene masa y tiene velocidad angular.

El análisis matemático de Schwarzschild se aplicaba solamente a agujeros negros no giratorios, pero en 1963 el astrónomo Roy P. Kerr calculó una solución para agujeros negros giratorios.

Al girar los agujeros negros todavía está allí el radio de Schwarzschild, pero en su exterior hay un *límite estacionario*, que forma una especie de abultamiento ecuatorial alrededor del agujero negro como si fuera algo empujado hacia afuera por el efecto centrífugo.

Un objeto que caiga dentro del límite estacionario pero que permanezca fuera del radio de Schwarzschild estará semiatrapado. Esto es, todavía puede escaparse, pero solamente bajo circunstancias especiales. Si se mueve en dirección de su rotación, el agujero negro giratorio tenderá a arrastrar el objeto de su derredor como una piedra en una honda y a lanzarlo nuevamente hacia afuera más allá del límite estacionario con mayor energía que con la que entró. La energía adicional es a expensas de la rotación del agujero negro. En otras palabras la velocidad angular se transfiere del agujero negro al objeto, y el agujero negro disminuye su velocidad de rotación.

En teoría hasta un 30 por ciento de la energía total de un agujero negro giratorio puede extraerse al enviar cuidadosamente objetos a través del límite estacionario y recogiendo a su salida, y este es otro modo en el cual algunas civilizaciones avanzadas pudieran usar los agujeros negros como fuente de energía.<sup>17</sup> Una vez que se ha terminado toda la energía giratoria, el agujero negro solamente tendrá masa; el límite estacionario coincide con el radio de Schwarzschild. Se dice entonces que el agujero negro está "muerto" ya que no podrá obtenerse directamente de él más energía (aunque podrá obtenerse alguna de la materia que caiga dentro).

Aún más extraña que la posibilidad de obtener energía rotacional del agujero negro es el análisis que Kerr ofrece como un nuevo tipo de final para la materia que entre a un agujero negro. Este nuevo tipo de final fue anticipado por Albert Einstein y su colega Rosen unos treinta años antes.

La materia que entre a un agujero negro giratorio (y no es muy probable que haya otra clase) puede, en teoría, volver a salir en otro sitio como pasta dentífrica que salga de un fino agujero de un tubo rígido sometido a la lenta presión de una aplanadora.<sup>14</sup>

La transferencia de materia aparentemente puede tener lugar a través de distancias enormes —millones o miles de millones de años-luz— en un rápido periodo de tiempo. Estas transferencias no pueden tener lugar de modo ordinario, ya que en el espacio que conocemos la velocidad de la luz es el límite de velocidad para cualquier objeto que tenga masa. Para transferir masa a distancias de millones o miles de millones de años-luz de la manera ordinaria se necesitarían millones o miles de millones de años tiempo.

Se debe asumir por lo tanto que la transferencia que se realiza a través de túneles o puentes que no tienen, estrictamente hablando, las características de tiempo que tiene nuestro universo familiar. En ocasiones se llama a ese conducto el *puente Einstein-Rosen*, o de modo más pintoresco, el *túnel del espacio*.

<sup>17</sup>No todos los astrónomos están de acuerdo con este concepto de quitarle la energía rotacional a un agujero negro. De hecho, casi todo lo que algunos astrónomos sugieren acerca de los agujeros negros es negado por otros. Aquí nos encontramos en el filo del conocimiento, y cualquier cosa, en uno o en otro sentido, es muy incierta y vaga.

<sup>14</sup>Esto también es negado por algunos astrónomos.

Si la masa pasa a través del túnel del espacio y repentinamente aparece a mil millones de años luz de distancia una vez más en el espacio ordinario, algo debe compensar la gran transferencia en la distancia. Así, este imposible y rápido paso a través del espacio se equilibra con una compensación del paso a través del tiempo, por lo que esa masa aparecerá mil millones de años atrás.

Una vez que la materia emerja en el otro extremo del túnel del espacio, se expandirá súbitamente para convertirse nuevamente en materia ordinaria, y al hacerlo así, irradiará energía, la energía que había estado, por decirlo así, atrapada en el agujero negro. Aparecerá entonces un *agujero blanco*, un concepto que se sugirió por primera vez en 1964.

Si todo esto ocurre realmente así, podrán detectarse los agujeros blancos o al menos algunos de ellos.

Esto dependería por supuesto, del tamaño de los agujeros blancos y de la distancia que los separe de nosotros. Tal vez los mini-agujeros negros formen miniagujeros blancos a grandes distancias, y probablemente nunca los veamos. Los agujeros negros de gran tamaño formarían grandes agujeros blancos, sin embargo, y estos sí los podremos ver. ¿Hay alguna señal de dichos agujeros blancos?

Tal vez la haya ...

#### LOS QUASARES

En los años cincuenta se detectaron fuentes de ondas de radio que cuidadosamente examinadas parecían muy compactas y proceder de puntos específicos del cielo. Ordinariamente, las fuentes de ondas de radio encontradas en aquellos días procedían de nubes de polvo o *de* galaxias y por lo tanto estaban más o menos extendidas sobre una determinada porción del cielo.

Entre aquellas compactas fuentes de radio se contaron varias conocidas como 3C48, 3C147, 3C196, 3C273 y 3C286. (Desde entonces se han descubierto muchas más). El 3C es la abreviatura de *Third Cambridge Catalog of Radio Stars*, una lista compilada por el astrónomo inglés Martin Ryle (1918- ).

En 1960 las áreas que contenían estas fuentes de radio fueron investigadas por el astrónomo norteamericano Alan Rex Sandage

(1926- ), y en cada caso la fuente parecía ser algo que tenía el aspecto de una estrella muy tenue. Había una indicación de que pudieran no ser estrellas normales, sin embargo. Algunas de ellas parecían tener alrededor tenues nubes de polvo o gas y una de ellas, la 3C273, mostraba señales de un diminuto chorro que surgía de ella. De hecho hay dos fuentes de radio en conexión con la 3C273, una de la estrella y la otra del chorro de materia.

Por lo tanto, había cierta resistencia a llamar estrellas a estos objetos, por lo que se les describió como *fuentes de radio quasi estelares* (de aspecto de estrellas). En 1964 Hong Yee Chiu abrevió esto a *quasar*, y desde entonces se conservó el nombre.

En 1960 se descubrieron los espectros de estos quasares, pero tenían un patrón de línea completamente desconocido, como si estuvieran hechos de sustancias totalmente ajenas al universo. En 1963, sin embargo, el astrónomo alemán-norteamericano Maarten Schmidt (1929- ) resolvió aquel problema. Las líneas hubieran sido perfectamente normales de existir en el extremo del área ultravioleta. Su aparición en la gama de luz visible significaba que habían sido desplazadas a una gran distancia hacia las longitudes de onda más largas.

La explicación más fácil de esto es que los quasares están muy alejados. Dado que el universo está expandiéndose, las unidades galácticas se están separando, y todas parecen alejarse de nosotros. Por lo tanto, todos los objetos distantes tienen sus líneas espectrales desplazadas hacia las ondas más largas debido a que es lo habitual cuando una fuente de luz se aleja de nosotros. Además, ya que el universo se expande, mientras más lejos esté un objeto, mayor será la velocidad con que se aleja de nosotros y mayor el desplazamiento de las líneas espectrales. Por lo tanto, se puede calcular la distancia de un objeto por su desplazamiento espectral.

Resultó que los quasares estaban a miles de millones de años-luz de distancia. Uno de ellos, el 0Q172, está a unos 12 mil millones de años-luz de distancia, y aún el más cercano, el 3C273, está a más de mil millones de años-luz y más lejos que cualquier objeto que conozcamos y que no sea un quasar. Pueden haber 15 mil millones de quasares en el universo.

Como lo vemos, un quasar es un objeto muy tenue, pero para que sea visible a esas enormes distancias, debe ser extraordinariamente luminoso. El quasar 3C273 es cinco veces más luminoso que nuestra galaxia, y algunos quasares pueden ser 100 veces más luminosos que el promedio de cualquier galaxia.

Pero, de ser así, si los quasares fueran simplemente galaxias COL hasta 100 veces más estrellas que una galaxia común y por lo tanto tuvieran el brillo proporcional a ello, deberían ser de dimensiones lo suficientemente grandes, como para que aparecieran aún a tan gran distancia como pequeñas manchas de luz y no como puntos semejantes a estrellas. Por lo tanto, a pesar de su brillo, deben ser más compactas que las galaxias ordinarias.

Desde 1963 se encontró que la energía emitida por los quasares era variable, tanto en la región de la luz visible como en la de microondas. En unos pocos años se registraron aumentos y disminuciones de hasta tres magnitudes.

Para que la radiación varíe en un tiempo tan breve, debe tratarse de cuerpos pequeños. Esas variaciones comprenden al cuerpo como un todo, y si es así, debe hacerse sentir algún efecto en toda la anchura del cuerpo durante el tiempo de la variación. Dado que ningún efecto puede viajar más rápido que la luz, eso significa que si un quasar varía marcadamente durante un periodo de unos cuantos años, no puede tener más de un año-luz de diámetro y tal vez sea considerablemente menor.

Un quasar, el 3C446, puede duplicar su brillo en un par de días, por lo tanto no debe tener más de 0.005 años-luz (50 mil millones de kilómetros) de diámetro, o sea menos de 5 veces el diámetro de la órbita de Plutón alrededor del Sol. Una galaxia ordinaria puede tener un diámetro de 100 000 años-luz y en la cual el núcleo más denso puede tener 15 000 años-luz de diámetro.

Esta combinación de pequeña dimensión y enorme luminosidad hace que los quasares parezcan enteramente diferente de cualquier cosa que conozcamos. Su descubrimiento hizo que los astrónomos se dieran cuenta de la posibilidad de fenómenos en gran escala hasta entonces desconocidos en el universo y los estimuló, por primera vez, a considerar la posibilidad de aquellos fenómenos, incluyendo los agujeros negros.

Y es concebible que haya un nexo entre los agujeros negros y los cuasares. El astrónomo soviético Igor Novikov y el astrónomo israelí Yuval Ne'eman (1925-2006) han sugerido que los cuasares son gigantescos agujeros blancos, en el otro extremo de un túnel del espacio que va desde un gigantesco agujero negro en alguna otra parte del universo.<sup>19</sup>

Pero veamos nuevamente los cuasares. ¿Son realmente únicos, como parecen ser, o son simplemente ejemplos extremos de algo más familiar?

En 1943 un estudiante de astronomía recién graduado, Carl Seyfert, describió una galaxia peculiar que desde entonces ha sido reconocida como parte de un grupo al que ahora se llama *galaxias de Seyfert*. Pueden constituir el uno por ciento de todas las galaxias conocidas (lo que equivale a más o menos mil millones) aunque en realidad hasta la fecha solamente se ha descubierto una docena de ejemplos.

En muchos aspectos las galaxias de Seyfert parecen normales y no están extraordinariamente alejadas de nosotros. Los núcleos de las galaxias de Seyfert, sin embargo, son muy compactos, muy brillantes, y parecen desusadamente calientes y activos; de hecho casi como un cuasar. Muestran variaciones en radiación que implican que los centros emisores de radio en sus núcleos no son de mayor tamaño que lo que se cree que son los cuasares. Una galaxia de Seyfert, la 3C120, tiene un núcleo que consiste en menos de un octavo de la galaxia como un todo, pero que es tres veces más luminoso que todo el resto de la galaxia.

El fuertemente activo centro sería visible a mayores distancias que las capas exteriores de la galaxia de Seyfert, y si esas galaxias estuvieran suficientemente alejadas, todo lo que veríamos ya fuera por medio del telescopio o por medio del radiotelescopio sería el núcleo. Entonces las consideraríamos como cuasares, y por lo tanto los cuasares muy distantes tal vez sean simplemente los intensamente luminosos núcleos de galaxias de Seyfert muy grandes y muy activas.

<sup>19</sup> Esto es meramente especulativo, por supuesto, y el resto del libro es casi totalmente especulación; la mía, en parte.

Pero consideremos entonces el núcleo de una galaxia de Seyfert: muy compacto, muy caliente y muy activo. Una galaxia de Seyfert la NGC4151, puede tener hasta 10 mil millones de estrellas en un núcleo de solamente 12 años-luz de diámetro.

Estas son precisamente las condiciones ideales para la formación de agujeros negros. Tal vez el solo hecho de que cierto volumen de espacio esté sujeto a la formación de agujeros negros también lleve a hacerlo susceptible al florecimiento de un agujero blanco.

Podemos imaginar que en el universo se forman agujeros negros aquí y allá, produciendo cada uno de ellos una enorme tensión en la tersa estructura del espacio. Entre ellos se formarán túneles del espacio y a través de ellos se puede filtrar materia en una proporción lenta en comparación con la cantidad total del agujero negro que sirve como fuente de origen pero lo suficientemente grande como para producir en algunos casos enormes cantidades de radiación. La velocidad del flujo de materia tal vez puede variar y producir las variaciones en el brillo de los cuasares.

Puede haber agujeros blancos de todos tamaños, cada uno de ellos conectado con su agujero negro (que a su vez también puede ser de cualquier tamaño), y posiblemente solo percibamos los de tamaño gigantesco. Pudiera ser que si se tomaran en cuenta todos los agujeros negros/agujeros blancos, se vería que los túneles del espacio que los conectan tal vez crucen el universo en todas direcciones y con bastante densidad.

Esta idea ha servido para estimular las facultades imaginativas de astrónomos como Carl Sagan (1934-1996). Es imposible pensar en algún modo de conservar intacta cualquier fracción de materia de tamaño regular cuando esta se aproxima a un agujero negro, y mucho menos hacerla pasar intacta a través de un túnel del espacio y salir por el agujero blanco, pero Sagan no permite que esto sea un obstáculo para sus especulaciones.

Después de todo, podemos hacer cosas que parecían inconcebibles para nuestros antecesores, y Sagan se pregunta si una civilización avanzada no pudiera inventar maneras de bloquear los efectos gravitacionales y de marea de tal modo que una nave espacial pudiera usar los túneles del espacio para viajar a través de grandes distancias en una fracción de tiempo.

Supongamos que hubiera en el universo una civilización avanzada en este momento que hubiera trazado un mapa en el que aparecieran los túneles del espacio con sus entradas a través de los agujeros negros y sus salidas por medio de sus agujeros blancos. Por supuesto, serían más numerosos y por lo tanto más útiles los túneles del espacio de menor tamaño.

Imaginemos un imperio cósmico comunicado a través de una red de esos túneles del espacio, con centros civilizados localizados cerca de las entradas y salidas. Sería tan importante, después de todo, la ubicación de un mundo cerca de una intersección de rutas de transporte de esta clase como es para una ciudad terrestre estar situada en un puerto o a la orilla de un río.

Los planetas más próximos a los túneles pudieran estar a una distancia segura, pero en las cercanías habría enormes estaciones espaciales construidas como bases para las naves que se movieran a través de los túneles y como estaciones generadoras de energía para los planetas.

¿Y cómo afecta la teoría de los túneles del espacio al pasado y el futuro del universo?

Aun cuando el universo esté expandiéndose, ¿es posible que la expansión se equilibre por medio de materia enviada al pasado a través de los túneles del espacio?

Ciertamente las docenas de quasares que se han detectado están todos a miles de millones de años-luz de distancia de nosotros, y por lo tanto, lo vemos como eran hace miles de millones de años. Por lo tanto, están principalmente agrupados hacia las mayores distancias y hacia el pasado más remoto. Se estima que si los quasares estuvieran espaciados regularmente a través del universo, habría varios cientos de ellos más cercanos y brillantes que el 3C273, que hasta la fecha es el más cercano y brillante conocido.

Bien, entonces, ¿tenemos después de todo un universo eterno, una especie de creación continua en otro sentido?

¿Ha estado expandiéndose el universo durante incontables eones, prácticamente a través de toda la eternidad, sin haber llegado a expandirse más allá de su actual nivel a causa de que los túneles del espacio crean un circuito cerrado, enviando materia hacia el pasado para empezar nuevamente la expansión?

¿Nunca ha estado realmente contraído el universo, y nunca hubo verdaderamente un gran estallido? ¿Pensamos que hubo un gran estallido solamente porque estamos más conscientes de la expansión a la mitad del ciclo que comprende a las galaxias y no nos damos cuenta de la materia que regresa hacia el pasado a través de los túneles de espacio?

Pero si no hubo gran estallido, ¿cómo explicamos la radiación de fondo que es el eco del gran estallido? ¿Puede esta radiación ser producto del flujo general hacia atrás de la materia transferida al remoto pasado? ¿Pueden los agujeros blancos o quasares ser numerosos "pequeños estallidos" que se suman al gran estallido y producen la radiación de fondo?

Y si es así, ¿de dónde viene la energía que mantiene al universo repitiendo el ciclo interminablemente? Si el universo se hace más lento a medida que se expande (los físicos llaman a esto un *aumento de entropía*), ¿aumentará su velocidad (o su *entropía decreciente*) al moverse hacia el pasado a través de los túneles del espacio?

No existen respuestas para ninguna de estas cuestiones hasta hoy. Todo es especulación, incluyendo la misma existencia de los agujeros de gusano y los agujeros blancos.

#### EL HUEVO CÓSMICO

Debe admitirse que la noción de que el universo está repitiendo su ciclo es una especulación bastante débil.

Si la desechamos, sin embargo, nos quedamos con el gran estallido, ya sea como algo que ocurrió una sola vez si es que vivimos en un universo abierto, o como un fenómeno repetido interminablemente si se trata de un universo cerrado y oscilante. De cualquier manera hay un problema: ¿Cuál es la naturaleza del huevo cósmico?

Cuando se sugirió por primera vez el huevo cósmico, se contempló con una actitud muy parecida a la que existe ahora hacia las estrellas neutrón. El problema es que un huevo cósmico con toda la masa del universo (igual a la masa de 100000 millones de galaxias, posiblemente) ciertamente es demasiado grande como para ser una estrella neutrón. Si es cierto que cualquier cosa con una masa más

de 3.2 veces la de nuestro Sol debe formar un agujero negro cuando se encoge, entonces el huevo cósmico fue el mayor de todos los agujeros negros.

¿Cómo, entonces, pudo haber explotado y haber producido el gran estallido? Los agujeros negros no explotan.

Supongamos que imaginamos un universo que se contrae, que formará agujeros negros de diversos tamaños al contraerse. Los agujeros negros individuales pueden perder algo de sus masas a través de los túneles del espacio, contrarrestando la contracción general pero no lo suficiente para detenerla del todo (o ni el universo en expansión ni nosotros estaríamos aquí).

Al comprimirse el universo, los agujeros negros crecen a expensas de la materia que no está incluida en ellos, y con más y más frecuencia, chocan y se combinan. Finalmente, por supuesto, todos los agujeros negros se combinan en el huevo cósmico. Este pierde materia a través de su túnel del espacio a una enorme velocidad, produciendo el más grande de los agujeros blancos concebibles en el otro extremo. Es el agujero blanco del huevo cósmico, entonces, lo que fue el gran estallido que creó nuestro universo en expansión. Esto sería cierto tanto en el caso de que el universo sea abierto o de que se trate de un universo cerrado; ya sea que el huevo cósmico se formara una sola vez o que su creación se repitiera indefinidamente.

Por supuesto, esta solución solamente funcionaría si existieran realmente los túneles del espacio y los agujeros blancos, lo cual es incierto. Y aún sí existen, solo funcionarían si el huevo cósmico tuviera rotación. ¿Pero la tiene?

Ciertamente hay una velocidad angular en el universo, pero pudo haber sido creada, a pesar de la ley de la conservación, donde nada había existido antes.

Esto es porque hay dos clases de velocidad angular, en sentido opuesto. Un objeto puede girar ya sea en el sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario (o si se prefiere en sentido positivo o en sentido negativo). Dos objetos con igual velocidad angular, una positiva y otra negativa, si chocan y se combinan terminarán con una velocidad angular cero, habiéndose convertido en calor la energía de los dos movimientos de rotación. Recíprocamente, un objeto con velocidad angular cero puede, con la adición de la ener-

gía adecuada, dividirse para formar dos objetos, uno con velocidad angular positiva y el otro con velocidad angular negativa.

Tal vez todos los objetos del universo tengan velocidad angular, pero es muy probable que una parte de esa velocidad angular sea positiva y que otra parte sea negativa. No tenemos manera de saber si uno de los dos tipos está presente en mayores cantidades que el otro. Si existe esa desproporción, entonces cuando toda la materia del universo se encoja para formar un huevo cósmico, ese huevo cósmico terminará con una cantidad de velocidad angular igual al exceso de una clase sobre la otra.

Pudiera ser, sin embargo, que la cantidad de velocidad angular de una clase en el universo sea igual a la cantidad de la otra clase. En ese caso, cuando se forme el huevo cósmico, no tendrá velocidad angular y estará muerto. Entonces no podríamos confiar en los túneles del espacio y los agujeros blancos para explicar el gran estallido.

¿Y qué otra cosa?

Del mismo modo que existen dos clases opuestas de velocidad angular, también existen dos clases de materia.

Un electrón está equilibrado por un antielectrón o positrón. Cuando se combinan un positrón y un electrón, hay una aniquilación mutua de las dos partículas. No queda nada de masa. Esta se convierte en energía bajo la forma de rayos gamma. De la misma manera, un protón y un antiprotón se combinarán para perder masa y formar energía, y así ocurrirá con un neutrón y un antineutrón.

Podemos tener materia hecha de protones, neutrones, y electrones; y antimateria hecha de antineutrones, antiprotones, y antielectrones. En ese caso, cualquier masa de materia que se combine de una masa igual de antimateria sufrirán una aniquilación mutua para formar rayos gamma.

Recíprocamente, la masa puede formarse a partir de la energía, pero nunca de solamente una clase de partícula. Por cada electrón que se forme deberá formarse un antielectrón, por cada protón un antiprotón, por cada neutrón un antineutrón. En breve, cuando la energía se convierte en materia, deberá formarse una cantidad igual de antimateria.

Pero si ocurre así, ¿dónde está la antimateria que debió haberse formado al mismo tiempo que se creó la materia del universo?

La Tierra está ciertamente hecha totalmente de materia (con excepción de pequeñas cantidades de antimateria formada en los laboratorios o encontrada entre los rayos cósmicos y que rápidamente se desvanece). De hecho todo el sistema solar es materia, y probablemente también lo es la unidad galáctica de la que formamos parte.

¿Dónde está la antimateria? Tal vez también haya unidades galácticas formadas enteramente por antimateria. Habría unidades galácticas y unidades antigalácticas, que debido a la expansión general del universo nunca entrarán en contacto y nunca se someterán a la aniquilación mutua. Del mismo modo que la materia forma agujeros negros, la antimateria formaría antiagujeros negros. Estas dos clases de agujeros negros serían idénticos en todos sus aspectos a excepción de estar hechos de sustancias opuestas.

Si el universo siempre estuvo contrayéndose en el pasado, los agujeros negros y los antiagujeros negros se hubieran formado aún con más facilidad; y al continuar la contracción, aumentarían las posibilidades de colisión entre dos agujeros negros de naturaleza opuesta con la enorme y consecuente aniquilación mutua. En la combinación final se daría la mayor de todas las grandes aniquilaciones mutuas.

Desaparecería la masa total del universo y con ella el campo gravitacional que sostiene el agujero negro, y que también da lugar a la existencia del huevo cósmico. En su lugar quedaría una radiación increíblemente energética, que se expandiría hacia afuera. Eso sería el gran estallido.

Algún tiempo después del gran estallido, al hacerse más intensa la energía por la expansión, disminuiría lo suficiente como para formar una vez más materia y antimateria, creando unidades galácticas separadas por medio de algún mecanismo, que, deberá admitirse, todavía no se ha calculado cuál pueda ser, y tomaría forma el universo en expansión.

Desde este punto de vista del gran estallido como la aniquilación mutua de materia y antimateria, no importa que el huevo cósmico gire o no, que esté vivo o esté muerto.

Pero no tenemos evidencia de que existan unidades antigalácticas. ¿Podría ser que por alguna razón que todavía no comprendamos, el universo consista simplemente de materia?

Pudiéramos argüir que esto es imposible; el universo no puede consistir simplemente de materia, ya que eso haría imposible el gran estallido. O pudiéramos pensar en un modo de explicar el gran estallido aun en un universo constituido solamente por materia, y aún así, al contraerse, el universo formará un huevo cósmico que no gira y que por lo tanto es un agujero negro muerto.

Bien, de acuerdo con las ecuaciones empleadas para explicar la formación de los agujeros negros el tamaño del radio de Schwarzschild es proporcional a la masa de aquellos.

Un agujero negro de la masa del Sol tiene un radio de Schwarzschild de 3 kilómetros y por lo tanto su diámetro será de 6 kilómetros. Un agujero negro que tenga el doble de la masa del Sol tendrá el doble del radio, 12 kilómetros. Sin embargo, una esfera que tiene el doble de diámetro de una esfera más pequeña tendrá 8 veces más volumen que la esfera menor. Se sigue que un agujero negro con el doble de la masa del Sol tendrá esa doble masa repartida en un volumen 8 veces mayor. Por lo tanto la densidad del agujero negro de mayor tamaño será solamente de la cuarta parte de la densidad del agujero negro más pequeño.

En otras palabras, mientras más masivo sea un agujero negro, será mayor su tamaño y menor su densidad.

Supongamos que nuestra galaxia entera, que tiene unos 100 000 millones de veces la masa de nuestro Sol, se comprimiera para formar un agujero negro. Su diámetro sería de 600 000 millones de kilómetros, y su densidad promedio sería de alrededor de 0.000001 gramos por centímetro cúbico. El agujero negro galáctico sería entonces más de 50 veces mayor que el diámetro de la órbita de Plutón y su densidad no excedería a la de un gas.

Supongamos que todas las galaxias del universo, posiblemente 100 000 millones de ellas, se encogieran para formar un agujero negro. Ese agujero negro, contuviera toda la materia del universo tendría un diámetro de 10 000 millones de años-luz, y su densidad promedio sería la de un gas extremadamente tenue.

Pero no importa lo tenue que fuera este gas, la estructura sería la de un agujero negro.

Supongamos que la masa total del universo es 2.5 veces mayor de lo que parece a los astrónomos. En ese caso el agujero negro formado por toda la materia del universo tendría un diámetro de 25 000 millones de años-luz, y ese parece ser precisamente el diámetro del universo en que vivimos (hasta donde sabemos).

Es muy posible, entonces, que el universo entero no sea más que un agujero negro. (Como lo ha sugerido el físico Kip Thorne).

Si es así, entonces muy probablemente siempre ha sido un agujero negro y siempre será un agujero negro. Si eso es cierto, vivimos dentro de un agujero negro y si deseamos saber cuáles son las condiciones que existen en un agujero negro (siempre y cuando sea extremadamente masivo), lo único que tenemos que hacer es mirar a nuestro alrededor.

Al encogerse el universo, entonces, pudiéramos imaginar la formación de cualquier número de agujeros negros relativamente pequeños (¡agujeros negros dentro de un agujero negro!) con diámetros muy limitados. En los últimos segundos del colapso catastrófico final, sin embargo, cuando todos los agujeros negros se unan en un solo agujero negro cósmico, el radio de Schwarzschild se extenderá hasta los límites del universo conocido.

Y pudiera ser que *dentro* del radio de Schwarzschild hubiera la posibilidad de una explosión. Pudiera ser que al desplazarse el radio de Schwarzschild miles de millones de años-luz en un destello, en el mismo instante de su formación el huevo cósmico saltará para seguirlo, y *eso* sería el gran estallido.

Si fuera así, podríamos argüir que el universo no puede ser abierto cualquiera que sea el estado presente de las evidencias, ya que el universo no se puede expandir más allá de su radio de Schwarzschild. De alguna manera la expansión tendrá que cesar en ese punto, y después inevitablemente empezará nuevamente a contraerse e iniciar una vez más el ciclo. (Algunos opinan que con cada gran estallido, se inicia la formación de un universo en expansión totalmente diferente con distintas leyes naturales).

¿Pudiera ser, entonces, que lo que vemos a nuestro alrededor sea el ciclo respiratorio inimaginablemente lento (decenas de miles

de millones de años de inspiración y decenas de miles de millones de años de expiración) de un agujero negro del tamaño del universo?

¿Y pudiera ser que separados de nuestro universo de alguna manera que todavía no podemos concebir, hubiera muchos otros agujeros negros de distintos tamaños, tal vez en número infinito, expandiéndose y contrayéndose con ritmo propio?

Y nosotros estamos en uno de ellos, y mediante las maravillas del pensamiento y la razón pudiera ser que desde nuestro puesto en una partícula más pequeña que el polvo perdida en las profundidades de uno de estos universos nos hayamos trazado una imagen de la existencia y conducta de todos aquellos agujeros negros.



Aceleración, 34  
 Adams, Walter Sydney, 81, 84, 87  
 Agua, 21  
 Agujeros blancos, 191  
   los cuasares como, 194  
 Agujeros negros, 160 y ss.  
   centros galácticos y, 166  
   civilizaciones galácticas y los 195,  
   196  
   detección de, 162 y ss.  
   energía de los, 190  
   enjambres globulares y, 166  
   huevo cósmico y, 197, 198  
   interior de, 182  
   momento angular de los, 188, 189  
   número de, 171  
   propiedad de los, 188  
   rayos X y, 165 y ss.  
   rotación de, 189  
   tamaño de los, 201  
   transferencia de materia y, 190,  
   191  
   universo como un, 201, 202  
 Aluminio, 23  
 Andrómeda, galaxia de, 119  
 Angstrom, Anden Joñas, 72  
 Angular, velocidad, 149, 188  
 Aniquilación mutua, 89  
 Amares, 76  
 Antiagujeros negros, 200  
 Antielectrones, 16  
 Antigalaxias, 200  
 Antimateria, 199, 200  
 Antineutrón, 16  
 Antipartículas, 16  
 Antiprotón, 16  
 Años-luz, 78  
 Átomos, compresión de tos, 61  
   colapso de los, 69 y ss.  
   diámetro de los, 17  
   estructura de los, 13, 16  
   interacción de, 17  
   luz y los, 72  
   Átomo pnmeval, 98  
   Atómico, peso 23  
   Arcoiris, 72  
  
 Baade, Walter, 129  
 Balanza de torsión, 36  
 Bell, Jocelyn, 135  
 Bessel, Friedrich Wilhelm, 77, 79  
 Beta, partículas, 14, 15  
 Betelgeuse, 76  
 Be vis, John, 120  
 Binarias los agujeros negros y las,  
   169-171  
 Binarias cercanas, 116  
 Bolt, C. T., 170  
 Bodí, Hermann, 186  
 Brahe, Tycho, 112  
 Burroughs, Edgar Rice, 49  
  
 Campos de fuerza, 12  
 Cangrejo, nebulosa del, '20  
   estrellas neutrón y la, 134  
   pulsar en la, 136, 138, 139, 140  
 Cavendish, Henry, 37  
 Centaurus X-3, 169  
 Centro galáctico, 164  
 Cero absoluto, 18  
 Cesio, 24  
 Chadwick, James, 13  
 Chandrasekhar, Subrahmanyan, 107  
 Chandrasekhar, límite de, 107  
 Chiu, Hong-Yee, 122, 1'2  
 Cinética, energía, 55  
 Circinus X-1, 170  
 Clark, Alvan Graham, 80  
 Cobre, 24  
 Cohetes, 132  
 Colapsares, 160  
 Compresión, 61, 62

- Corona solar, 132  
 Coulomb, Charles Augustin, de, 26  
 36  
 Cristales, 20  
 Cygnus X-1, 169  
 Creación continua, 187
- Delta Cephei, 114  
*De Nova Stella*, 112  
 Densidad, 21 y ss.  
 Dicke, Robert Henry, 187  
 Di rae, Paul Adrien Maurice, 183,  
 184  
 Disco de acreción, 165
- Eddington, Arthur Stanley, 71, 87,  
 101, 104  
 Efecto centrífugo, 143  
 Efecto de marea, 146 y ss.  
 Einstein, Albert, 85, 190  
 Einstein-Rosen, puente, 190  
 Electromagnética, fuerza, 12  
 energía y, 21  
 el universo y la, 29-31  
 estructura atómica y, 14, 15  
 la Tierra y la, 20  
 Electrón(es), 14  
 Electrones, capas de, 19  
 Emden, Jacob Robert, 71  
 Enana blanca, 82  
 densidad central de, 91  
 estructura de, 91  
 formación de, 88 y ss.  
 masa de, 106  
 nebulosas planetarias y, 109-110  
 novas y las, 115, 116  
 número de, 93  
 pulsares y, 137  
 temperatura superficial de, 91  
 Enana negra, 92, 160  
 Energía, 21  
 agujero negro y la, 176-179, 190  
 el Sol y la, 67  
 formación de los planetas y la, 55  
 Enjambres globulares, 166  
 Enjambres de galaxias, 97  
 recesión de, yb, 97  
 Enjambre local, 98  
 Eón, 57  
 Epsilon Aurigae B, 171  
 Eratóstencs, 35  
 Escape, velocidad de, 42-47  
 Espectrales, clases, 102  
 duración y, 105  
 frecuencia de, 103
- luminosidad y, 101  
 masa y, 101  
 Espectro, 72  
 Espectroscopio, 72  
 Estrellas), 67  
 cambios entre, 111  
 colapso de, 107 y ss., 123, 127-129,  
 160  
 etapas finales de, 161  
 ignición de, 73  
 inestables, 113  
 masa de, 127  
 movimiento de, 95  
 nacimiento de, 100  
 composición química de, 116  
 movimiento propio de, 78  
 paralela je de, 78  
 periodo de vida de, 103-105  
 primera generación, 124  
 pulsantes, 114  
 segunda generación, 123  
 temperatura de, 81  
 Estrellas) neutrón,  
 campos magnéticos de, 138  
 densidad de, 142  
 detección de, 154 y ss.  
 diámetro de, 143  
 efecto de marea de, 154  
 estructura de, 140-141  
 masa de, 128, 141  
 masa máxima de, 158  
 microondas y, 138  
 pulsares y, 137-139  
 rayos X y, 132, 134  
 rotación de, 144  
 temperatura superficial de, 133  
 velocidad de escape de, 146
- Fotografía, 112  
 Fotones, 25, 85, 122  
 Friedmann, Herbert, 133  
 Fuerza(s), 11  
 Fuerza, campos de, 12  
 Fuerza débil, 12  
 Fuerza nuclear, 12  
 núcleo y la, 14  
 alcance de, 13
- Galilei, Galileo, 34  
 Gamow, George, 98  
 Gates, 18  
 compresión de, 61  
 densidad de, 21, 22  
 Gigantes rojas, 16  
 Glitch, 139

- reacciones nucleares y, 74  
 rotación de, 143  
 velocidad de escape de, 47
- Kerr, Roy P., 189
- Leavitt, Henrietta Swan, 114  
 Lemaitre, Georges, 98  
 Leptones, 15  
 Límite estacionario, 189  
 Luna, 134  
 atmosfera y, 50  
 campo gravitacional de, 38  
 efectos de marea de, 147, 148  
 gravedad superficial de, 41  
 rotación de, 149  
 velocidad de escape de, 45  
 Luyten 726-8B, 74  
 Luz, 72  
 campo gravitacional y, 85, 86  
 velocidad de, 158
- Macromoléculas, 20  
 Magma, 61  
 Manto de la Tierra, 57  
 densidad de, 62, 63  
 Mareas, 50, 51  
 Marte, 50, 51  
 Masa, 16, 34  
 Masa-luminosidad, ley de, 101  
 Masa perdida, 186  
 Materia degenerada, 70  
 Mercurio, 50, 51  
 Meteorito, 50  
 Meteoros, 50  
 Microondas, 131  
 Mini-agujeros negros, 173  
 la Tierra y, 174, 175  
 evaporación de, 174  
 número de, 173  
 posibles usos de, 176-179  
 Moléculas, 19  
 Movimiento propio, 78
- Nebulosas planetarias, 109-110  
 Nebulosa anular, 109  
 Ne'eman, Yuval, 194  
 Neutrinos, 25n, 122  
 Neutrón(es), 13  
 masa de, 90  
 Neutronium, 128  
 "Neutrón Star", 154  
 Newton, Isaac, 25, 33, 154  
 NGC 4151, 195  
 Niven, Larry, 154
- Gold, Thomas, 137, 186  
 Goodricke, John, 114  
 Gravedad superficial, 40-42  
 Gravitacional constante, 25  
 valor de, 36 y ss.  
 Gravitacional, fuerza, 183  
 potencia relativa de, 12, 24-27  
 universo y, 29-31  
 Gravitacional, lente, 165  
 Gravitacional, masa, 33  
 Gravitacional, onda(s), 163  
 Gravitones, 163  
 Gum, Colin S., 121  
 Gum, Nebulosa, 121
- Hadron, 12  
 Hawking, Stephen, 173  
*HD-226868*, 170  
 Helio, 17, 18  
 licuefacción del, 17  
 Sol y el, 72  
 Helmholtz, Hermann Ludwig Ferdi-  
 nand von, 68  
 Hércules X-1, 169  
 Hess, Victor Francis, 130  
 Hewish, Anthony, 135  
 Hierro, densidad del, 23, 63  
 Tierra y el, 50, 56  
 Hind, John Russell, 112  
 Hiparco, 111  
 Hoyle, Fred, 186  
 Hubble, Edwin Powell, 96  
 Huevo cósmico, 98  
 agujero negro y, 198  
 antimateria y, 199, 200  
 formación del, 184  
 tamaño del, 129  
 temperatura superficial de, 133  
 velocidad angular y, 198  
 Hidrógeno, densidad del, ¿2  
 fusión del, 73  
 Sol y el, 72  
 Hyperones, 141
- Inercia, 33  
 Inercial, masa, 33  
 Interacciones, 11  
 lo, 39  
 Indio, 24
- Jansky, Karl Guthe, 131  
 Júpiter, 39  
 achatamiento de, 143, 144  
 campo gravitacional de, 40, 46, 47  
 presiones internas de, 59  
 temperaturas internas de, 58

# El colapso del universo

Isaac Asimov

¡FUENTES INAGOTABLES DE ENERGIA... VIAJES EN EL TIEMPO...!

Todo esto puede reservarnos el futuro en uno de los fenómenos más misteriosos y apasionantes que han descubierto los científicos: los "agujeros negros".

Es tan desconcertante el concepto de estas "ventanas hacia la nada" que salpican nuestro universo, que solamente un escritor y científico como Isaac Asimov puede explicarlo con la mayor amenidad.

En las páginas de **El colapso del universo** el lector recorrerá el camino que lleva desde los secretos de la estructura íntima del átomo hasta las galaxias, para conocer las fuerzas básicas que mueven el universo e indagar los orígenes, evolución y muerte de todo lo que existe.

Nunca se había publicado algo tan comprensible e informado acerca de los mecanismos del cosmos: las "supernovas", el "huevo cósmico", el "gran estallido" y, en fin, los "agujeros negros", en los que puede estar el secreto del principio y del fin del universo, así como los adelantos tecnológicos que harán realidad las fantasías más audaces.

Un libro para el profesional, para el estudiante y para todo aquel que desee estar informado, del modo más ameno y excitante, acerca de las maravillas del cosmos.