

Un modo interesante de visualizar la dualidad onda-partícula es a través del método conocido como suma sobre historias posibles, inventado por el científico norteamericano Richard Feynman. En esta aproximación, la partícula se supone que no sigue una única historia o camino en el espacio-tiempo, como haría en una teoría clásica, en el sentido de no cuántica. En vez de esto, se supone que la partícula va de A a B a través de todos los caminos posibles. A cada camino se le asocia un par de números: uno representa el tamaño de una onda y el otro representa la posición en el ciclo (es decir, si se trata de una cresta o de un valle, por ejemplo). La probabilidad de ir de A a B se encuentra sumando las ondas asociadas a todos los caminos posibles. Si se compara un conjunto de caminos cercanos, en el caso general, las fases o posiciones en el ciclo diferirán enormemente. Esto significa que las ondas asociadas con estos caminos se cancelarán entre sí casi exactamente. Sin embargo, para algunos conjuntos de caminos cercanos, las fases no variarán mucho de uno a otro; las ondas de estos caminos no se cancelarán. Dichos caminos corresponden a las órbitas permitidas de Bohr.

Con estas ideas, puestas en forma matemática concreta, fue relativamente sencillo calcular las órbitas permitidas de átomos complejos e incluso de moléculas, que son conjuntos de átomos unidos por electrones, en órbitas que giran alrededor de más de un núcleo. Ya que la estructura de las moléculas, junto con las reacciones entre ellas, son el fundamento de toda la química y la biología, la mecánica cuántica nos permite, en principio, predecir casi todos los fenómenos a nuestro alrededor, dentro de los límites impuestos por el principio de incertidumbre. (En la práctica, sin embargo, los cálculos que se requieren para sistemas que contengan a más de unos pocos electrones son tan complicados que no pueden realizarse.)

La teoría de la relatividad general de Einstein parece gobernar la estructura a gran escala del universo. Es lo que se llama una teoría clásica, es decir, no tiene en cuenta el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica, como debería hacer para ser consistente con otras teorías. La razón por la que esto no conduce a ninguna discrepancia con la observación es que todos los campos gravitatorios, que normalmente experimentamos, son muy débiles. Sin embargo, los teoremas sobre las singularidades, discutidos anteriormente, indican que el campo gravitatorio deberá ser muy intenso en, como mínimo, dos situaciones: los agujeros negros y el *big bang*. En campos así de intensos, los efectos de la mecánica cuántica tendrán que ser importantes. Así, en cierto sentido, la relatividad general clásica, al predecir puntos de densidad infinita, predice su propia caída, igual que la mecánica clásica (es decir, no cuántica) predijo su caída, al sugerir que los átomos deberían colapsarse hasta alcanzar una densidad infinita. Aún no tenemos una teoría consistente completa que unifique la relatividad general y la mecánica cuántica, pero

sí que conocemos algunas de las características que debe poseer. Las consecuencias que éstas tendrían para los agujeros negros y el *big bang* se describirán en capítulos posteriores. Por el momento, sin embargo, volvamos a los intentos recientes de ensamblar las teorías parciales de las otras fuerzas de la naturaleza en una única teoría cuántica unificada.

Capítulo 5

LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES Y LAS FUERZAS DE LA NATURALEZA

Aristóteles creía que toda la materia del universo estaba compuesta por cuatro elementos básicos: tierra, aire, fuego y agua. Estos elementos sufrían la acción de dos fuerzas: la gravedad o tendencia de la tierra y del agua a hundirse, y la ligereza o tendencia del aire y del fuego a ascender. Esta división de los contenidos del universo en materia y fuerzas aún se sigue usando hoy en día.

También creía Aristóteles que la materia era continua, es decir, que un pedazo de materia se podía dividir sin límite en partes cada vez más pequeñas: nunca se tropezaba uno con un grano de materia que no se pudiera continuar dividiendo. Sin embargo, unos pocos sabios griegos, como Demócrito, sostenían que la materia era inherentemente granular y que todas las cosas estaban constituidas por un gran número de diversos tipos diferentes de átomos. (La palabra átomo significa 'indivisible', en griego.) Durante siglos, la discusión continuó sin ninguna evidencia real a favor de cualesquiera de las posturas, hasta que en 1803, el químico y físico británico John Dalton señaló que el hecho de que los compuestos químicos siempre se combinaran en ciertas proporciones podía ser explicado mediante el agrupamiento de átomos para formar otras unidades llamadas moléculas. No obstante, la discusión entre las dos escuelas de pensamiento no se zanjó de modo definitivo a favor de los atomistas, hasta los primeros años de nuestro siglo. Una de las evidencias físicas más importantes fue la que proporcionó Einstein. En un artículo escrito en 1905, unas pocas semanas antes de su famoso artículo sobre la relatividad especial, Einstein señaló que el fenómeno conocido como movimiento browniano -el movimiento irregular, aleatorio de pequeñas partículas de polvo suspendidas en un líquido- podía ser explicado por el efecto de las colisiones de los átomos del líquido con las partículas de polvo.

En aquella época ya había sospechas de que los átomos no eran, después de todo, indivisibles. Hacía varios años que un *fellow* del Trinity College, de Cambridge, J. J. Thomson, había demostrado la existencia de una partícula material, llamada electrón, que tenía una masa menor que la milésima parte de la masa del átomo más ligero. Él utilizó un dispositivo parecido al tubo de un aparato de televisión: un filamento metálico incandescente soltaba los electrones, que, debido a que tienen una carga eléctrica negativa, podían ser acelerados por medio de un campo eléctrico hacia una pantalla revestida de fósforo. Cuando los electrones chocaban contra la pantalla, se generaban destellos luminosos. Pronto se comprendió que estos electrones debían

provenir de los átomos en sí. Y, en 1911, el físico británico Ernest Rutherford mostró, finalmente, que los átomos de la materia tienen verdaderamente una estructura interna: están formados por un núcleo extremadamente pequeño y con carga positiva, alrededor del cual gira un cierto número de electrones. Él dedujo esto analizando el modo en que las partículas α , que son partículas con carga positiva emitidas por átomos radioactivos, son desviadas al colisionar con los átomos.

Al principio se creyó que el núcleo del átomo estaba formado por electrones y cantidades diferentes de una partícula con positiva llamada protón (que proviene del griego y significa 'primero', porque se creía que era la unidad fundamental de la que estaba hecha la materia). Sin embargo, en 1932, un colega de Rutherford, James Chadwick, descubrió en Cambridge que el núcleo contenía otras partículas, llamadas neutrones, que tenían casi la misma masa que el protón, pero que no poseían carga eléctrica. Chadwick recibió el premio Nobel por este descubrimiento, y fue elegido *master* ['director'] de Gonville and Caius College, en Cambridge (el colegio del que ahora soy *fellow*). Más tarde, dimitió como *master* debido a desacuerdos con los *fellows*. Ha habido una amarga y continua disputa en el *college* desde que un grupo de jóvenes *fellows*, a su regreso después de la guerra, decidieron por votación echar a muchos de los antiguos *fellows* de los puestos que habían disfrutado durante mucho tiempo. Esto fue anterior a mi época; yo entré a formar parte del *college* en 1965, al final de la amargura, cuando desacuerdos similares habían forzado a otro *master* galardonado igualmente con el premio Nobel, sir Nevill Mott, a dimitir.

Hasta hace veinte años, se creía que los protones y los neutrones eran partículas «elementales», pero experimentos en los que colisionaban protones con otros protones o con electrones a alta velocidad indicaron que, en realidad, estaban formados por partículas más pequeñas. Estas partículas fueron llamadas *quarks* por el físico de Caltech, Murray Gell-Mann, que ganó el premio Nobel en 1969 por su trabajo sobre dichas partículas. El origen del nombre es una enigmática cita de James Joyce: «¡Tres *quarks* para Muster Mark!» La palabra *quark* se supone que debe pronunciarse como *quart* ['cuarto'], pero con una k al final en vez de una t, pero normalmente se pronuncia de manera que rima con *lark* ['juerga'].

Existe un cierto número de variedades diferentes de *quarks*: se cree que hay como mínimo seis *flavors* ['sabores'], que llamamos *up*, *down*, *strange*, *charmed*, *bottom*, y *top* ['arriba', 'abajo', 'extraño', 'encanto', 'fondo' y 'cima']. Cada *flavor* puede tener uno de los tres posibles «colores», rojo, verde y azul. (Debe notarse que estos términos son únicamente etiquetas: los *quarks* son mucho más pequeños que la longitud de onda de la luz visible y, por lo tanto, no poseen ningún color en el sentido normal de la palabra. Se trata solamente de que los físicos modernos parecen tener unas formas

más imaginativas de nombrar a las nuevas partículas y fenómenos, ¡ya no se limitan únicamente al griego!) Un protón o un neutrón están constituidos por tres *quarks*, uno de cada color. Un protón contiene dos *quarks up* y un *quark down*; un neutrón contiene dos *down* y uno *up*. Se pueden crear partículas constituidas por los otros *quarks* (*strange, charmed, bottom y top*), pero todas ellas poseen una masa mucho mayor y decaen muy rápidamente en protones y neutrones.

Actualmente sabemos que ni los átomos, ni los protones y neutrones, dentro de ellos, son indivisibles. Así la cuestión es: ¿cuáles son las verdaderas partículas elementales, los ladrillos básicos con los que todas las cosas están hechas? Dado que la longitud de onda de la luz es mucho mayor que el tamaño de un átomo, no podemos esperar «mirar» de manera normal las partes que forman un átomo. Necesitamos usar algo con una longitud de onda mucho más pequeña. Como vimos en el último capítulo, la mecánica cuántica nos dice que todas las partículas son en realidad ondas, y que cuanto mayor es la energía de una partícula, tanto menor es la longitud de onda de su onda correspondiente. Así, la mejor respuesta que se puede dar a nuestra pregunta depende de lo alta que sea la energía que podamos comunicar a las partículas, porque ésta determina lo pequeña que ha de ser la escala de longitudes a la que podemos mirar. Estas energías de las partículas se miden normalmente en una unidad llamada electrón-voltio. (En el experimento de Thomson con electrones, se vio que él usaba un campo eléctrico para acelerarlos. La energía ganada por un electrón en un campo eléctrico de un voltio es lo que se conoce como un electrón-voltio.) En el siglo xix, cuando las únicas energías de partículas que la gente sabía cómo usar eran las bajas energías de unos pocos electrón-voltios, generados por reacciones químicas tales como la combustión, se creía que los átomos eran la unidad más pequeña. En el experimento de Rutherford, las partículas alfa tenían energías de millones de electrón-voltios. Mas recientemente, hemos aprendido a usar los campos electromagnéticos para que nos den energías de partículas que en un principio eran de millones de electrón-voltios y que, posteriormente, son de miles de millones de electrón-voltios. De esta forma, sabemos que las partículas que se creían «elementales» hace veinte años, están, de hecho, constituidas por partículas más pequeñas. ¿Pueden ellas, conforme obtenemos energías todavía mayores, estar formadas por partículas aún más pequeñas? Esto es ciertamente posible, pero tenemos algunas razones teóricas para creer que poseemos, o estamos muy cerca de poseer, un conocimiento de los ladrillos fundamentales de la naturaleza.

Usando la dualidad onda-partículas, discutida en el último capítulo, todo en el universo, incluyendo la luz y la gravedad, puede ser descrito en términos de partículas. Estas partículas tienen una propiedad llamada espín. Un modo de imaginarse el espín es representando a las partículas como pequeñas peonzas

girando sobre su eje. Sin embargo, esto puede inducir a error, porque la mecánica cuántica nos dice que las partículas no tienen ningún eje bien definido. Lo que nos dice realmente el espín de una partícula es cómo se muestra la partícula desde distintas direcciones. Una partícula de espín 0 es como un punto: parece la misma desde todas las direcciones (figura 5.1 a). Por el contrario, una partícula de espín 1 es como una flecha: parece diferente desde direcciones distintas (figura 5.1 b). Sólo si uno la gira una vuelta completa (360 grados) la partícula parece la misma. Una partícula de espín 2 es como una flecha con dos cabezas (figura 5.1 c): parece la misma si se gira media vuelta (180 grados). De forma similar, partículas de espines más altos parecen las mismas si son giradas una fracción más pequeña de una vuelta completa. Todo esto parece bastante simple, pero el hecho notable es que existen partículas que no parecen las mismas si uno las gira justo una vuelta: ¡hay que girarlas dos vueltas completas! Se dice que tales partículas poseen espín $1/2$.

Todas las partículas conocidas dej universo se pueden dividir en dos grupos: partículas de espín $1/2$, las cuales forman la materia del universo, y partículas de espín 0, 1 y 2, las cuales, como veremos, dan lugar a las fuerzas entre las partículas materiales. Las partículas materiales obedecen a lo que se llama el principio de exclusión de Pauli. Fue descubierto en 1925 por un físico austríaco, Wolfgang Pauli, que fue galardonado con el premio Nobel en 1945 por dicha contribución. Él era el prototipo de físico teórico: se decía que incluso su sola presencia en una ciudad haría que allí los experimentos fallaran. El principio de exclusión de Pauli dice que dos partículas similares no pueden existir en el mismo estado, es decir, que no pueden tener ambas la misma posición y la misma velocidad, dentro de los límites fijados por el principio de incertidumbre. El principio de exclusión es crucial porque explica por qué las partículas materiales no colapsan a un estado de muy alta densidad, bajo la influencia de las fuerzas producidas por las partículas de espín 0, 1 y 2: si las partículas materiales están casi en la misma posición, deben tener entonces velocidades diferentes, lo que significa que no estarán en la misma posición durante mucho tiempo. Si el mundo hubiera sido creado sin el principio de exclusión, los *quarks* no formarían protones y neutrones independientes bien definidos. Ni tampoco éstos formarían, junto con los electrones, átomos independientes bien definidos. Todas las partículas se colapsarían formando una «sopa» densa, más o menos uniforme.

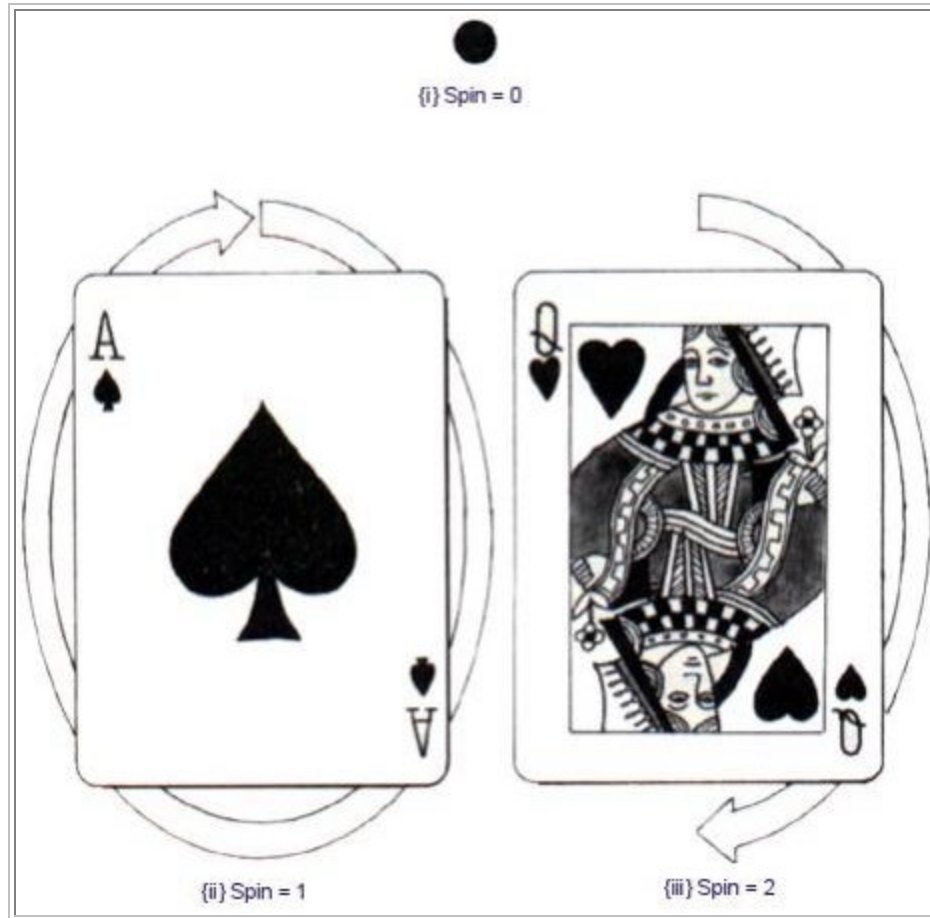


Figura 5:1

Un entendimiento adecuado del electrón y de las otras partículas de espín $1/2$ no llegó hasta 1928, en que una teoría satisfactoria fue propuesta por Paul Dirac, quien más tarde obtuvo la cátedra *Lucasian* de Matemáticas, de Cambridge (la misma cátedra que Newton había obtenido y que ahora ocupó yo). La teoría de Dirac fue la primera que era a la vez consistente con la mecánica cuántica y con la teoría de la relatividad especial. Explicó matemáticamente por qué el electrón tenía espín $1/2$, es decir, por qué no parecía lo mismo si se giraba sólo una vuelta completa, pero sí que lo hacía si se giraba dos vueltas. También predijo que el electrón debería tener una pareja: el antielectrón o positrón. El descubrimiento del positrón en 1932 confirmó la teoría de Dirac y supuso el que se le concediera el premio Nobel de física en 1933. Hoy en día sabemos que cada partícula tiene su antipartícula, con la que puede aniquilarse. (En el caso de partículas portadoras de fuerzas, las antipartículas son las partículas mismas.) Podrían existir antimundos y antipersonas enteros hechos de antipartículas. Pero, si se encuentra usted con su antiyó, ¡no le dé la mano! Ambos desaparecerían en un gran destello luminoso. La cuestión de por qué parece haber muchas más partículas que antipartículas a nuestro alrededor es extremadamente importante, y volveré a ella a lo largo de este capítulo.

En mecánica cuántica, las fuerzas o interacciones entre partículas materiales, se supone que son todas transmitidas por partículas de espín entero, 0, 1 o 2. Lo que sucede es que una partícula material, tal como un electrón o un *quark*, emite una partícula portadora de fuerza. El retroceso producido por esta emisión cambia la velocidad de la partícula material. La partícula portadora de fuerza colisiona después con otra partícula material y es absorbida. Esta colisión cambia la velocidad de la segunda partícula, justo igual a como si hubiera habido una fuerza entre las dos partículas materiales.

Una propiedad importante de las partículas portadoras de fuerza es que no obedecen el principio de exclusión. Esto significa que no existe un límite al número de partículas que se pueden intercambiar, por lo que pueden dar lugar a fuerzas muy intensas. No obstante, si las partículas portadoras de fuerza poseen una gran masa, será difícil producirlas e intercambiarlas a grandes distancias. Así las fuerzas que ellas transmiten serán de corto alcance. Se dice que las partículas portadoras de fuerza, que se intercambian entre sí las partículas materiales, son partículas virtuales porque, al contrario que las partículas «reales», no pueden ser descubiertas directamente por un detector de partículas. Sabemos que existen, no obstante, porque tienen un efecto medible: producen las fuerzas entre las partículas materiales. Las partículas de espín 0, 1 o 2 también existen en algunas circunstancias como partículas reales, y entonces pueden ser detectadas directamente. En este caso se nos muestran como lo que un físico clásico llamaría ondas, tales como ondas luminosas u ondas gravitatorias. A veces pueden ser emitidas cuando las partículas materiales interactúan entre sí, por medio de un intercambio de partículas virtuales portadoras de fuerza. (Por ejemplo, la fuerza eléctrica repulsiva entre dos electrones es debida al intercambio de fotones virtuales, que no pueden nunca ser detectados directamente; pero, cuando un electrón se cruza con otro, se pueden producir fotones reales, que detectamos como ondas luminosas.)

Las partículas portadoras de fuerza se pueden agrupar en cuatro categorías, de acuerdo con la intensidad de la fuerza que transmiten y con el tipo de partículas con las que interactúan. Es necesario señalar que esta división en cuatro clases es una creación artificiosa del hombre; resulta conveniente para la construcción de teorías parciales, pero puede no corresponder a nada más profundo. En el fondo, la mayoría de los físicos esperan encontrar una teoría unificada que explicará las cuatro fuerzas, como aspectos diferentes de una única fuerza. En verdad, muchos dirían que éste es el objetivo principal de la física contemporánea. Recientemente, se han realizado con éxito diversos intentos de unificación de tres de las cuatro categorías de fuerza, lo que describiré en el resto de este capítulo. La cuestión de la unificación de la categoría restante, la gravedad, se dejará para más adelante.

La primera categoría es la fuerza gravitatoria. Esta fuerza es universal, en el sentido de que toda partícula la experimenta, de acuerdo con su masa o energía. La gravedad es la más débil, con diferencia, de las cuatro fuerzas; es tan débil que no la notaríamos en absoluto si no fuera por dos propiedades especiales que posee: puede actuar a grandes distancias, y es siempre atractiva. Esto significa que las muy débiles fuerzas gravitatorias entre las partículas individuales de dos cuerpos grandes, como la Tierra y el Sol, pueden sumarse todas y producir una fuerza total muy significativa. Las otras tres fuerzas o bien son de corto alcance, o bien son a veces atractivas y a veces repulsivas, de forma que tienden a cancelarse. Desde el punto de vista mecano-cuántico de considerar el campo gravitatorio, la fuerza entre dos partículas materiales se representa transmitida por una partícula de espín 2 llamada gravitón. Esta partícula no posee masa propia, por lo que la fuerza que transmite es de largo alcance. La fuerza gravitatoria entre el Sol y la Tierra se atribuye al intercambio de gravitones entre las partículas que forman estos dos cuerpos. Aunque las partículas intercambiadas son virtuales, producen ciertamente un efecto medible: ¡hacen girar a la Tierra alrededor del Sol! Los gravitones reales constituyen lo que los físicos clásicos llamarían ondas gravitatorias, que son muy débiles, y tan difíciles de detectar que aún no han sido observadas.

La siguiente categoría es la fuerza electromagnética, que interactúa con las partículas cargadas eléctricamente, como los electrones y los *quarks*, pero no con las partículas sin carga, como los gravitones. Es mucho más intensa que la fuerza gravitatoria: la fuerza electromagnética entre dos electrones es aproximadamente un millón de billones de billones de billones (un 1 con cuarenta y dos ceros detrás) de veces mayor que la fuerza gravitatoria. Sin embargo, hay dos tipos de carga eléctrica, positiva y negativa. La fuerza entre dos cargas positivas es repulsiva, al igual que la fuerza entre dos cargas negativas, pero la fuerza es atractiva entre una carga positiva y una negativa. Un cuerpo grande, como la Tierra o el Sol, contiene prácticamente el mismo número de cargas positivas y negativas. Así, las fuerzas atractiva y repulsiva entre las partículas individuales casi se cancelan entre sí, resultando una fuerza electromagnética neta muy débil. Sin embargo, a distancias pequeñas, típicas de átomos y moléculas, las fuerzas electromagnéticas dominan. La atracción electromagnética entre los electrones cargados negativamente y los protones del núcleo cargados positivamente hace que los electrones giren alrededor del núcleo del átomo, igual que la atracción gravitatoria hace que la Tierra gire alrededor del Sol. La atracción electromagnética se representa causada por el intercambio de un gran número de partículas virtuales sin masa de espín 1, llamadas fotones. De nuevo, los fotones que son intercambiados son partículas virtuales. No obstante, cuando un electrón cambia de una órbita permitida a otra más cercana al núcleo, se libera energía emitiéndose un fotón real, que puede ser observado como luz visible por el ojo humano, siempre que posea la longitud de onda adecuada, o por un detector de fotones, tal como una película fotográfica. Igualmente, si un fotón real colisiona con un átomo, puede cambiar a un electrón de una órbita cercana al núcleo a otra más lejana. Este proceso consume la energía del fotón, que, por lo tanto, es absorbido.

La tercera categoría es la llamada fuerza nuclear débil, que es la responsable de la radioactividad y que actúa sobre todas las partículas materiales de espín $1/2$, pero no sobre las partículas de espín 0 , 1 o 2 , tales como fotones y gravitones. La fuerza nuclear débil no se comprendió bien hasta 1967, en que Abdus Salam, del Imperial College de Londres, y Steven Weinberg, de Harvard, propusieron una teoría que unificaba esta interacción con la fuerza electromagnética, de la misma manera que Maxwell había unificado la electricidad y el magnetismo unos cien años antes. Sugirieron que además del fotón había otras tres partículas de espín 1 , conocidas colectivamente como bosones vectoriales masivos, que transmiten la fuerza débil. Estas partículas se conocen como W^+ (que se lee W más), W^- (que se lee W menos) y Z^0 (que se lee Z cero), y cada una posee una masa de unos 100 GeV (GeV es la abreviatura de gigaelectrón-voltio, o mil millones de electrón-voltios). La teoría de Weinberg-Salam propone una propiedad conocida como ruptura de simetría espontánea. Esto quiere decir que lo que, a bajas energías, parece ser un cierto número de partículas totalmente diferentes es, en realidad, el mismo tipo de partícula, sólo que en estados diferentes. A altas energías todas estas partículas se comportan de manera similar. El efecto es parecido al comportamiento de una bola de ruleta sobre la rueda de la ruleta. A altas energías (cuando la rueda gira rápidamente) la bola se comporta esencialmente de una única manera, gira dando vueltas una y otra vez. Pero conforme la rueda se va frenando, la energía de la bola disminuye, hasta que al final la bola se para en uno de los treinta y siete casilleros de la rueda. En otras palabras, a bajas energías hay treinta y siete estados diferentes en los que la bola puede existir. Si, por algún motivo, sólo pudiéramos ver la bola a bajas energías, entonces ¿pensaríamos que había treinta y siete tipos diferentes de bolas!

En la teoría de Weinberg-Salam, a energías mucho mayores de 100 GeV, las tres nuevas partículas y el fotón se comportarían todas de una manera similar. Pero a energías más bajas, que se dan en la mayoría de las situaciones normales, esta simetría entre las partículas se rompería. W^+ , W^- y Z^0 adquirirían grandes masas, haciendo que la fuerza que transmiten fuera de muy corto alcance. En la época en que Salam y Weinberg propusieron su teoría, poca gente les creyó y, al mismo tiempo, los aceleradores de partículas no eran lo suficientemente potentes como para alcanzar las energías de 100 GeV requeridas para producir partículas W^+ , W^- o Z^0 reales. No obstante, durante los diez años siguientes, las tres predicciones de la teoría a bajas energías concordaron tan bien con los experimentos que, en 1979, Salam y Weinberg fueron galardonados con el premio Nobel de física, junto con Sheldon Glashow, también de Harvard, que había sugerido una teoría similar de unificación de las fuerzas electromagnéticas y nucleares débiles. El comité de los premios Nobel se salvó del riesgo de haber cometido un error al descubrirse, en 1983 en el CERN (Centro Europeo para la Investigación Nuclear), las tres partículas

con masa compañeras del fotón, y cuyas masas y demás propiedades estaban de acuerdo con las predichas por la teoría. Carlo Rubbia, que dirigía el equipo de varios centenares de físicos que hizo el descubrimiento, recibió el premio Nobel, junto con Simon van der Meer, el ingeniero del CERN que desarrolló el sistema de almacenamiento de antimateria empleado. (¡Es muy difícil realizar hoy en día una contribución clave en física experimental a menos que ya se esté en la cima!)

La cuarta categoría de fuerza es la interacción nuclear fuerte, que mantiene a los *quarks* unidos en el protón y el neutrón, y a los protones y neutrones juntos en los núcleos de los átomos. Se cree que esta fuerza es transmitida por otra partícula de espín 1, llamada gluón, que sólo interactúa consigo misma y con *los quarks*. La interacción nuclear posee una curiosa propiedad llamada confinamiento: siempre liga a las partículas en combinaciones tales que el conjunto total no tiene color. No se puede tener un único *quark* aislado porque tendría un color (rojo, verde o azul). Por el contrario, un *quark* rojo tiene que juntarse con un *quark* verde y uno azul por medio de una «cuerda» de gluones (rojo + verde + azul = blanco). Un triplete así, constituye un protón o un neutrón. Otra posibilidad es un par consistente en un *quark* y un *antiquark* (rojo + antirrojo, o verde + antiverde, o azul + antiazul = blanco). Tales combinaciones forman las partículas conocidas como mesones, que son inestables porque el *quark* y el *antiquark* se pueden aniquilar entre sí, produciendo electrones y otras partículas. Similarmente, el confinamiento impide que se tengan gluones aislados, porque los gluones en sí también tienen color. En vez de ello, uno tiene que tener una colección de gluones cuyos colores se sumen para dar el color blanco. Esta colección forma una partícula inestable llamada *glueball* ('bola de gluones').

El hecho de que el confinamiento nos imposibilite la observación de un *quark* o de un gluón aislados podría parecer que convierte en una cuestión metafísica la noción misma de considerar a los *quarks* y a los gluones como partículas. Sin embargo, existe otra propiedad de la interacción nuclear fuerte, llamada libertad asintótica, que hace que los conceptos de *quark* y de gluón estén bien definidos. A energías normales, la interacción nuclear fuerte es verdaderamente intensa y une a los *quarks* entre sí fuertemente. Sin embargo, experimentos realizados con grandes aceleradores de partículas indican que a altas energías la interacción fuerte se hace mucho menos intensa, y *los quarks* y los gluones se comportan casi como partículas libres. La figura 5.2 muestra una fotografía de una colisión entre un protón de alta energía y un antiprotón. En ella, se produjeron varios *quarks* casi libres, cuyas estelas dieron lugar a los «chorros» que se ven en la fotografía.

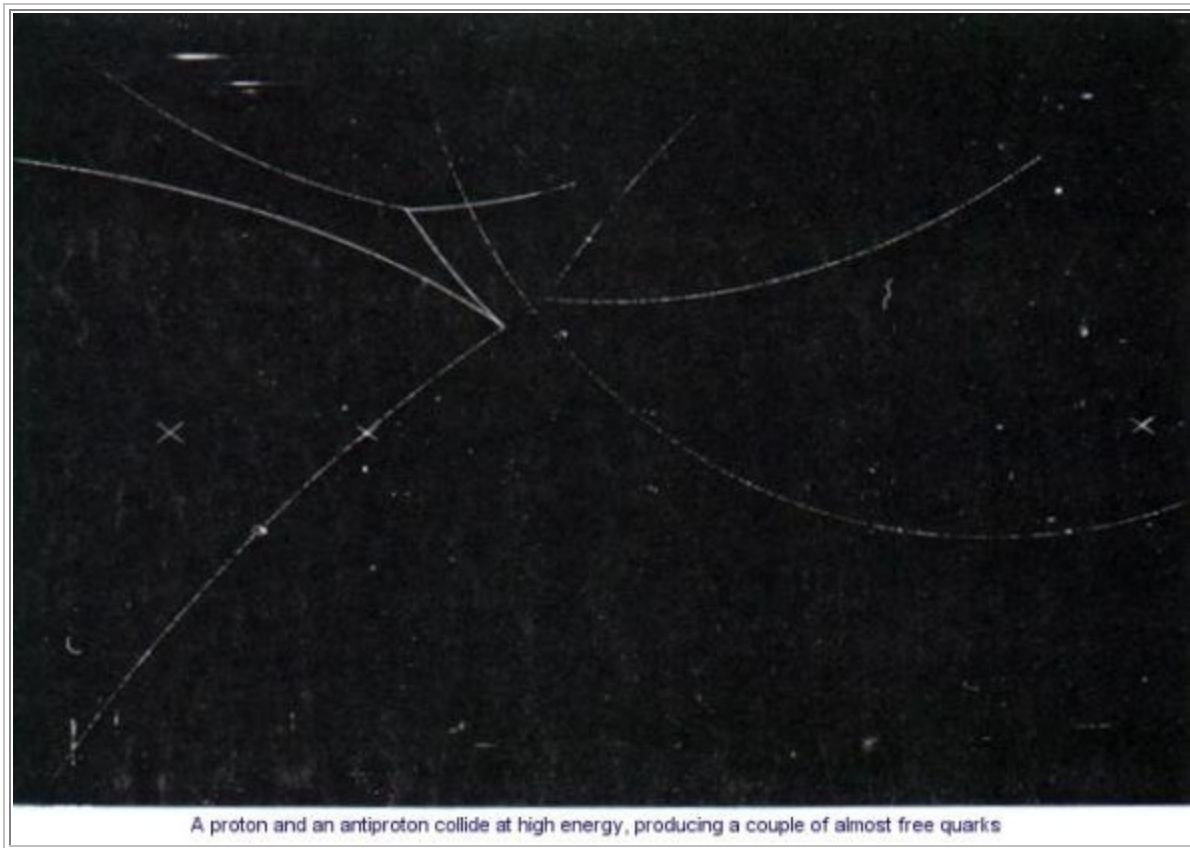


Figura 5:2

El éxito de la unificación de las fuerzas electromagnéticas y nucleares débiles produjo un cierto número de intentos de combinar estas dos fuerzas con la interacción nuclear fuerte, en lo que se han llamado teorías de gran unificación (o TGU). Dicho nombre es bastante ampuloso: las teorías resultantes ni son tan grandes, ni están totalmente unificadas, pues no incluyen la gravedad. Ni siquiera son realmente teorías completas, porque contienen un número de parámetros cuyos valores no pueden deducirse de la teoría, sino que tienen que ser elegidos de forma que se ajusten a los experimentos. No obstante, estas teorías pueden constituir un primer paso hacia una teoría completa y totalmente unificada. La idea básica de las TGU es la siguiente: como se mencionó arriba, la interacción nuclear fuerte se hace menos intensa a altas energías; por el contrario, las fuerzas electromagnéticas y débiles, que no son asintóticamente libres, se hacen más intensas a altas energías. A determinada energía muy alta, llamada energía de la gran unificación, estas tres fuerzas deberían tener todas la misma intensidad y sólo ser, por tanto, aspectos diferentes de una única fuerza. Las TGU predicen, además, que a esta energía las diferentes partículas materiales de espín 1/2, como los *quarks* y los electrones, también serían esencialmente iguales, y se conseguiría así otra unificación.

El valor de la energía de la gran unificación no se conoce demasiado bien, pero probablemente tendría que ser como mínimo de mil billones de GeV. La generación actual de aceleradores de partículas puede hacer colisionar partículas con energías de aproximadamente 100 GeV, y están planeadas unas máquinas que elevarían estas energías a unos pocos de miles de GeV. Pero una máquina que fuera lo suficientemente potente como para acelerar partículas hasta la energía de la gran unificación tendría que ser tan grande como el sistema solar, y sería difícil que obtuviese financiación en la situación económica presente. Así pues, es imposible comprobar las teorías de gran unificación directamente en el laboratorio. Sin embargo, al igual que en el caso de la teoría unificada de las interacciones electromagnética y débil, existen consecuencias a baja energía de la teoría que sí pueden ser comprobadas.

La más interesante de ellas es la predicción de que los protones, que constituyen gran parte de la masa de la materia ordinaria, pueden decaer espontáneamente en partículas más ligeras, tales como antielectrones. Esto es posible porque en la energía de la gran unificación no existe ninguna diferencia esencial entre un *quark* y un antielectrón. Los tres *quarks* que forman el protón no tienen normalmente la energía necesaria para poder transformarse en antielectrones, pero muy ocasionalmente alguno de ellos podría adquirir suficiente energía para realizar la transición, porque el principio de incertidumbre implica que la energía de los *quarks* dentro del protón no puede estar fijada con exactitud. El protón decaería entonces. La probabilidad de que un *quark* gane la energía suficiente para esa transición es tan baja que probablemente tendríamos que esperar como mínimo un millón de billones de billones de años (un 1 seguido de treinta ceros). Este período es más largo que el tiempo transcurrido desde el *big bang*, que son unos meros diez mil millones de años aproximadamente (un 1 seguido de diez ceros). Así, se podría pensar que la posibilidad de desintegración espontánea del protón no se puede medir experimentalmente. Sin embargo, uno puede aumentar las probabilidades de detectar una desintegración, observando una gran cantidad de materia con un número elevadísimo de protones. (Si, por ejemplo, se observa un número de protones igual a 1 seguido de treinta y un ceros por un período de un año, se esperaría, de acuerdo con la TGU más simple, detectar más de una desintegración del protón.)

Diversos experimentos de este tipo han sido llevados a cabo, pero ninguno ha producido una evidencia definitiva sobre el decaimiento del protón o del neutrón. Un experimento utilizó ocho mil toneladas de agua y fue realizado en la mina salada de Morton, en Ohio (para evitar que tuvieran lugar otros fenómenos, causados por rayos cósmicos, que podrían ser confundidos con la desintegración de protones). Dado que no se observó ninguna desintegración de protones durante el experimento, se

puede calcular que la vida media del protón debe ser mayor de diez billones de billones de años (1 con treinta y un ceros). Lo que significa más tiempo que la vida media predicha por la teoría de gran unificación más simple, aunque existen teorías más elaboradas en las que las vidas medias predichas son mayores. Experimentos todavía más sensibles, involucrando incluso mayores cantidades de materia, serán necesarios para comprobar dichas teorías.

Aunque es muy difícil observar el decaimiento espontáneo de protones, puede ser que nuestra propia existencia sea una consecuencia del proceso inverso, la producción de protones, o más simplemente de *quarks*, a partir de una situación inicial en la que no hubiese más que *quarks* y *antiquarks*, que es la manera más natural de imaginar que empezó el universo. La materia de la Tierra está formada principalmente por protones y neutrones, que a su vez están formados por *quarks*. No existen antiprotones o antineutrones, hechos de *antiquarks*, excepto unos pocos que los físicos producen en grandes aceleradores de partículas. Tenemos evidencia, a través de los rayos cósmicos, de que lo mismo sucede con la materia de nuestra galaxia: no hay antiprotones o antineutrones, aparte de unos pocos que se producen como pares partícula/antipartícula en colisiones de altas energías. Si hubiera extensas regiones de antimateria en nuestra galaxia, esperaríamos observar grandes cantidades de radiación proveniente de los límites entre las regiones de materia y antimateria, en donde muchas partículas colisionarían con sus antipartículas, y se aniquilarían entre sí, desprendiendo radiación de alta energía.

No tenemos evidencia directa de si en otras galaxias la materia está formada por protones y neutrones o por antiprotones y antineutrones, pero tiene que ser o lo uno o lo otro: no puede, haber una mezcla dentro de una misma galaxia, porque en ese caso observaríamos de nuevo una gran cantidad de radiación producida por las aniquilaciones. Por lo tanto, creemos que todas las galaxias están compuestas por *quarks* en vez de por *antiquarks*; parece inverosímil que algunas galaxias fueran de materia y otras de antimateria.

¿Por qué debería haber santísimos más *quarks* que *antiquarks*? ¿Por qué no existe el mismo número de ellos? Es ciertamente una suerte para nosotros que sus cantidades sean desiguales porque, si hubieran sido las mismas, casi todos los *quarks* y *antiquarks* se hubieran aniquilado entre sí en el universo primitivo y hubiera quedado un universo lleno de radiación, pero apenas nada de materia. No habría habido entonces ni galaxias, ni estrellas, ni planetas sobre los que la vida humana pudiera desarrollarse. Afortunadamente, las teorías de gran unificación pueden proporcionarnos una explicación de por qué el universo debe contener ahora más *quarks* que *antiquarks*, incluso a pesar de que empezara con el mismo número de ellos. Como hemos visto, las TGU permiten a los *quarks* transformarse en

antielectrones a altas energías. También permiten el proceso inverso, la conversión de *antiquarks* en electrones, y de electrones y antielectrones en *antiquarks* y *quarks*. Hubo un tiempo, en los primeros instantes del universo, en que éste estaba tan caliente que las energías de las partículas eran tan altas que estas transformaciones podían tener lugar. ¿Pero por qué debería esto suponer la existencia de más *quarks* que *antiquarks*? La razón es que las leyes de la física no son exactamente las mismas para partículas que para antipartículas.

Hasta 1956, se creía que las leyes de la física poseían tres simetrías independientes llamadas C, P y T. La simetría C significa que las leyes son las mismas para partículas y para antipartículas. La simetría P implica que las leyes son las mismas para una situación cualquiera y para su imagen especular (la imagen especular de una partícula girando hacia la derecha es la misma partícula, girando hacia la izquierda). La simetría T significa que si se invirtiera la dirección del movimiento de todas las partículas y antipartículas, el sistema volvería a ser igual a como fue antes: en otras palabras, las leyes son las mismas en las direcciones hacia adelante y hacia atrás del tiempo.

En 1956, dos físicos norteamericanos, Tsung-Dao Lee y Chen Ning Yang, sugirieron que la fuerza débil no posee de hecho la simetría P. En otras palabras, la fuerza débil haría evolucionar el universo de un modo diferente a como evolucionaba la imagen especular del mismo. El mismo año, una colega, Chien-Shiung Wu, probó que las predicciones de aquéllos eran correctas. Lo hizo alineando los núcleos de átomos radioactivos en un campo magnético, de tal modo que todos giraran en la misma dirección, y demostró que se liberaban más electrones en una dirección que en la otra. Al año siguiente, Lee y Yang recibieron el premio Nobel por su idea. Se encontró también que la fuerza débil no poseía la simetría C. Es decir, un universo formado por antipartículas se comportaría de manera diferente al nuestro. Sin embargo, parecía que la fuerza débil sí poseía la simetría combinada CP. Es decir, el universo evolucionaría de la misma manera que su imagen especular si, además, cada partícula fuera cambiada por su antipartícula. Sin embargo, en 1964 dos norteamericanos más, J. W. Cronin y Val Fitch, descubrieron que ni siquiera la simetría CP se conservaba en la desintegración de ciertas partículas llamadas mesones-K. Cronin y Fitch recibieron finalmente, en 1980, el premio Nobel por su trabajo. (¡Se han concedido muchos premios por mostrar que el universo no es tan simple como podíamos haber pensado!)

Existe un teorema matemático según el cual cualquier teoría que obedezca a la mecánica cuántica y a la relatividad debe siempre poseer la simetría combinada CPT. En otras palabras, el universo se tendría que comportar igual si se reemplazaran las partículas por antipartículas, si se tomara la imagen especular y se

invirtiera la dirección del tiempo. Pero Cronin y Fitch probaron que si se reemplazaban las partículas por antipartículas y se tomaba la imagen especular, pero no se invertía la dirección del tiempo, entonces el universo no se comportaría igual. Las leyes de la física tienen que cambiar, por lo tanto, si se invierte la dirección del tiempo: no poseen, pues, la simetría T.

Ciertamente, el universo primitivo no posee la simetría T: cuando el tiempo avanza, el universo se expande; si el tiempo retrocediera, el universo se contraería. Y dado que hay fuerzas que no poseen la simetría T, podría ocurrir que, conforme el universo se expande, estas fuerzas convirtieran más antielectrones en *quarks* que electrones en *antiquarks*. Entonces, al expandirse y enfriarse el universo, los *antiquarks* se aniquilarían con los *quarks*, pero, como habría más *quarks que antiquarks*, quedaría un pequeño exceso de *quarks*, que son los que constituyen la materia que vemos hoy en día y de la que estamos hechos. Así, nuestra propia existencia podría ser vista como una confirmación de las teorías de gran unificación, aunque sólo fuera una confirmación únicamente cualitativa; las incertidumbres son tan grandes que no se puede predecir el número de *quarks* que quedarían después de la aniquilación, o incluso si serían los *quarks* o los *antiquarks* los que permanecerían. (Si hubiera habido un exceso de *antiquarks*, sería lo mismo, pues habríamos llamado *antiquarks* a los *quarks*, y *quarks* a los *antiquarks*.)

Las teorías de gran unificación no incluyen a la fuerza de la gravedad. Lo cual no importa demasiado, porque la gravedad es tan débil que sus efectos pueden normalmente ser despreciados cuando estudiamos partículas o átomos. Sin embargo, el hecho de que sea a la vez de largo alcance y siempre atractiva significa que sus efectos se suman. Así, para un número de partículas materiales suficientemente grande, las fuerzas gravitatorias pueden dominar sobre todas las demás. Por ello, la gravedad determina la evolución del universo. Incluso para objetos del tamaño de una estrella, la fuerza atractiva de la gravedad puede dominar sobre el resto de las fuerzas y hacer que la estrella se colapse. Mi trabajo en los años setenta se centró en los agujeros negros que pueden resultar de un colapso estelar y en los intensos campos gravitatorios existentes a su alrededor. Fue eso lo que nos condujo a las primeras pistas de cómo las teorías de la mecánica cuántica y de la relatividad general podrían relacionarse entre sí: un vislumbre de la forma que tendría una verdadera teoría cuántica de la gravedad.

Capítulo 6

LOS AGUJEROS NEGROS

El término *agujero negro* tiene un origen muy reciente. Fue acuñado en 1969 por el científico norteamericano John Wheeler como la descripción gráfica de una idea que se remonta hacia atrás un mínimo de doscientos años, a una época en que había dos teorías sobre la luz: una, preferida por Newton, que suponía que la luz estaba compuesta por partículas, y la otra que asuma que estaba formada por ondas. Hoy en día, sabemos que ambas teorías son correctas. Debido a la dualidad onda/corpúsculo de la mecánica cuántica, la luz puede ser considerada como una onda y como una partícula. En la teoría de que la luz estaba formada por ondas, no quedaba claro como respondería ésta ante la gravedad. Pero si la luz estaba compuesta por partículas, se podría esperar que éstas fueran afectadas por la gravedad del mismo modo que lo son las balas, los cohetes y los planetas. Al principio, se pensaba que las partículas de luz viajaban con infinita rapidez, de forma que la gravedad no hubiera sido capaz de frenarlas, pero el descubrimiento de Roemer de que la luz viaja a una velocidad finita, significó el que la gravedad pudiera tener un efecto importante sobre la luz.

Bajo esta suposición, un catedrático de Cambridge, John Michell, escribió en 1783 un artículo en el *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* en el que señalaba que una estrella que fuera suficientemente masiva y compacta tendría un campo gravitatorio tan intenso que la luz no podría escapar: la luz emitida desde la superficie de la estrella sería arrastrada de vuelta hacia el centro por la atracción gravitatoria de la estrella, antes de que pudiera llegar muy lejos. Michell sugirió que podría haber un gran número de estrellas de este tipo. A pesar de que no seríamos capaces de verlas porque su luz no nos alcanzaría, sí notaríamos su atracción gravitatoria. Estos objetos son los que hoy en día llamamos agujeros negros, ya que esto es precisamente lo que son: huecos negros en el espacio. Una sugerencia similar fue realizada unos pocos años después por el científico francés marqués de Laplace, parece ser que independientemente de Michell. Resulta bastante interesante que Laplace sólo incluyera esta idea en la primera y la segunda ediciones de su libro *El sistema del mundo*, y no la incluyera en las ediciones posteriores. Quizás decidió que se trataba de una idea disparatada. (Hay que tener en cuenta también que la teoría corpuscular de la luz cayó en desuso durante el siglo xix; parecía que todo se podía explicar con la teoría ondulatorio, y, de acuerdo con ella, no estaba claro si la luz sería afectada por la gravedad.)

De hecho, no es realmente consistente tratar la luz como las balas en la teoría de la gravedad de Newton, porque la velocidad de la luz es fija. (Una bala disparada hacia arriba desde la Tierra se irá frenando debido a la gravedad y, finalmente, se parará y caerá; un fotón, sin embargo, debe continuar hacia arriba con velocidad constante. ¿Cómo puede entonces afectar la gravedad newtoniana a la luz?) No apareció una teoría consistente de cómo la gravedad afecta a la luz hasta que Einstein propuso la relatividad general, en 1915. E incluso entonces, tuvo que transcurrir mucho tiempo antes de que se comprendieran las aplicaciones de la teoría acerca de las estrellas masivas.

Para entender cómo se podría formar un agujero negro, tenemos que tener ciertos conocimientos acerca del ciclo vital de una estrella. Una estrella se forma cuando una gran cantidad de gas, principalmente hidrógeno, comienza a colapsar sobre sí mismo debido a su atracción gravitatoria. Conforme se contrae, sus átomos empiezan a colisionar entre sí, cada vez con mayor frecuencia y a mayores velocidades: el gas se calienta. Con el tiempo, el gas estará tan caliente que cuando los átomos de hidrógeno choquen ya no saldrán rebotados, sino que se fundirán formando helio. El calor desprendido por la reacción, que es como una explosión controlada de una bomba de hidrógeno, hace que la estrella brille. Este calor adicional también aumenta la presión del gas hasta que ésta es suficiente para equilibrar la atracción gravitatoria, y el gas deja de contraerse. Se parece en cierta medida a un globo. Existe un equilibrio entre la presión del aire de dentro, que trata de hacer que el globo se hinche, y la tensión de la goma, que trata de disminuir el tamaño del globo. Las estrellas permanecerán estables en esta forma por un largo período, con el calor de las reacciones nucleares equilibrando la atracción gravitatoria. Finalmente, sin embargo, la estrella consumirá todo su hidrógeno y los otros combustibles nucleares. Paradójicamente, cuanto más combustible posee una estrella al principio, más pronto se le acaba. Esto se debe a que cuanto más masiva es la estrella más caliente tiene que estar para contrarrestar la atracción gravitatoria, y, cuanto más caliente está, más rápidamente utiliza su combustible. Nuestro Sol tiene probablemente suficiente combustible para otros cinco mil millones de años aproximadamente, pero estrellas más masivas pueden gastar todo su combustible en tan sólo cien millones de años, mucho menos que la edad del universo. Cuando una estrella se queda sin combustible, empieza a enfriarse y por lo tanto a contraerse. Lo que puede sucederle a partir de ese momento sólo se empezó a entender al final de los años veinte.

En 1928, un estudiante graduado indio, Subrahmanyan Chandrasekhar, se embarcó hacia Inglaterra para estudiar en Cambridge con el astrónomo británico sir Arthur Eddington, un experto en relatividad general. (Según algunas fuentes, un periodista le dijo a Eddington, al principio de los años veinte, que había oído que había sólo tres

personas en el mundo que entendieran la relatividad general. Eddington hizo una pausa, y luego replicó: «Estoy tratando de pensar quién es la tercera persona».)

Durante su viaje desde la India, Chandrasekhar calculó lo grande que podría llegar a ser una estrella que fuera capaz de soportar su propia gravedad, una vez que hubiera gastado todo su combustible. La idea era la siguiente: cuando la estrella se reduce en tamaño, las partículas materiales están muy cerca unas de otras, y así, de acuerdo con el principio de exclusión de Pauli, tienen que tener velocidades muy diferentes. Esto hace que se alejen unas de otras, lo que tiende a expandir a la estrella. Una estrella puede, por lo tanto, mantenerse con un radio constante, debido a un equilibrio entre la atracción de la gravedad y la repulsión que surge del principio de exclusión, de la misma manera que antes la gravedad era compensada por el calor.

Chandrasekhar se dio cuenta, sin embargo, de que existe un límite a la repulsión que el principio de exclusión puede proporcionar. La teoría de la relatividad limita la diferencia máxima entre las velocidades de las partículas materiales de la estrella a la velocidad de la luz. Esto significa que cuando la estrella fuera suficientemente densa, la repulsión debida al principio de exclusión sería menor que la atracción de la gravedad. Chandrasekhar calculó que una estrella fría de más de aproximadamente una vez y media la masa del Sol no sería capaz de soportar su propia gravedad. (A esta masa se le conoce hoy en día como el límite de Chandrasekhar.) Un descubrimiento similar fue realizado, casi al mismo tiempo, por el científico ruso Lev Davidovich Landau.

Todo esto tiene serias aplicaciones en el destino último de las estrellas masivas. Si una estrella posee una masa menor que el límite de Chandrasekhar, puede finalmente cesar de contraerse y estabilizarse en un posible estado final, como una estrella «enana blanca», con un radio de unos pocos miles de kilómetros y una densidad de decenas de toneladas por centímetro cúbico. Una enana blanca se sostiene por la repulsión, debida al principio de exclusión entre los electrones de su materia. Se puede observar un gran número de estas estrellas enanas blancas; una de las primeras que se descubrieron fue una estrella que está girando alrededor de Sirio, la estrella más brillante en el cielo nocturno.

Landau señaló que existía otro posible estado final para una estrella, también con una masa límite de una o dos veces la masa del Sol, pero mucho más pequeña incluso que una enana blanca. Estas estrellas se mantendrían gracias a la repulsión debida al principio de exclusión entre neutrones y protones, en vez de entre electrones. Se les llamó por eso estrellas de neutrones. Tendrían un radio de unos quince kilómetros aproximadamente y una densidad de decenas de millones de

toneladas por centímetro cúbico. En la época en que fueron predichas, no había forma de poder observarlas; no fueron detectadas realmente hasta mucho después.

Estrellas con masas superiores al límite de Chandrasekhar tienen, por el contrario, un gran problema cuando se les acaba el combustible. En algunos casos consiguen explotar, o se las arreglan para desprenderse de la suficiente materia como para reducir su peso por debajo del límite y evitar así un catastrófico colapso gravitatorio; pero es difícil pensar que esto ocurra siempre, independientemente de lo grande que sea la estrella. ¿Cómo podría saber la estrella que tenía que perder peso? E incluso si todas las estrellas se las arreglaran para perder la masa suficiente como para evitar el colapso, ¿qué sucedería si se añadiera más masa a una enana blanca o a una estrella de neutrones, de manera que se sobrepasara el límite? ¿Se colapsaría alcanzando una densidad infinita? Eddington se asombró tanto por esta conclusión que rehusó creerse el resultado de Chandrasekhar. Pensó que era simplemente imposible que una estrella pudiera colapsarse y convertirse en un punto. Este fue el criterio de la mayoría de los científicos: el mismo Einstein escribió un artículo en el que sostenía que las estrellas no podrían encogerse hasta tener un tamaño nulo. La hostilidad de otros científicos, en particular de Eddington, su antiguo profesor y principal autoridad en la estructura de las estrellas, persuadió a Chandrasekhar a abandonar esta línea de trabajo y volver su atención hacia otros problemas de astronomía, tales como el movimiento de los grupos de estrellas. Sin embargo, cuando se le otorgó el premio Nobel en 1-983, fue, al menos en parte, por sus primeros trabajos sobre la masa límite de las estrellas frías.

Chandrasekhar había demostrado que el principio de exclusión no podría detener el colapso de una estrella más masiva que el límite de Chandrasekhar, pero el problema de entender qué es lo que le sucedería a tal estrella, de acuerdo con la relatividad general, fue resuelto por primera vez por un joven norteamericano, Robert Oppenheimer, en 1939. Su resultado, sin embargo, sugería que no habría consecuencias observables que pudieran ser detectadas por un telescopio de su época. Entonces comenzó la segunda guerra mundial y el propio Oppenheimer se vio involucrado en el proyecto de la bomba atómica. Después de la guerra, el problema del colapso gravitatorio fue ampliamente olvidado, ya que la mayoría de los científicos se vieron atrapados en el estudio de lo que sucede a escala atómica y nuclear. En los años sesenta, no obstante, el interés por los problemas de gran escala de la astronomía y la cosmología fue resucitado a causa del aumento en el número y categoría de las observaciones astronómicas, ocasionado por la aplicación de la tecnología moderna. El trabajo de Oppenheimer fue entonces redescubierto y adoptado por cierto número de personas.

La imagen que tenemos hoy del trabajo de Oppenheimer es la siguiente: el campo gravitatorio de la estrella cambia los caminos de los rayos de luz en el espacio-tiempo, respecto de como hubieran sido si la estrella no hubiera estado presente. Los conos de luz, que indican los caminos seguidos en el espacio y en el tiempo por destellos luminosos emitidos desde sus vértices, se inclinan ligeramente hacia dentro cerca de la superficie de la estrella. Esto puede verse en la desviación de la luz, proveniente de estrellas distantes, observada durante un eclipse solar. Cuando la estrella se contrae, el campo gravitatorio en su superficie es más intenso y los conos de luz se inclinan más hacia dentro. Esto hace más difícil que la luz de la estrella escape, y la luz se muestra más débil y más roja para un observador lejano. Finalmente, cuando la estrella se ha reducido hasta un cierto radio crítico, el campo gravitatorio en la superficie llega a ser tan intenso, que los conos de luz se inclinan tanto hacia dentro que la luz ya no puede escapar (figura 6.1). De acuerdo con la teoría de la relatividad, nada puede viajar más rápido que la luz. Así si la luz no puede escapar, tampoco lo puede hacer ningún otro objeto-, todo es arrastrado por el campo gravitatorio. Por lo tanto, se tiene un conjunto de sucesos, una región del espacio-tiempo, desde donde no se puede escapar y alcanzar a un observador lejano. Esta región es lo que hoy en día llamamos un agujero negro. Su frontera se denomina el horizonte de sucesos y coincide con los caminos de los rayos luminosos que están justo a punto de escapar del agujero negro, pero no lo consiguen.

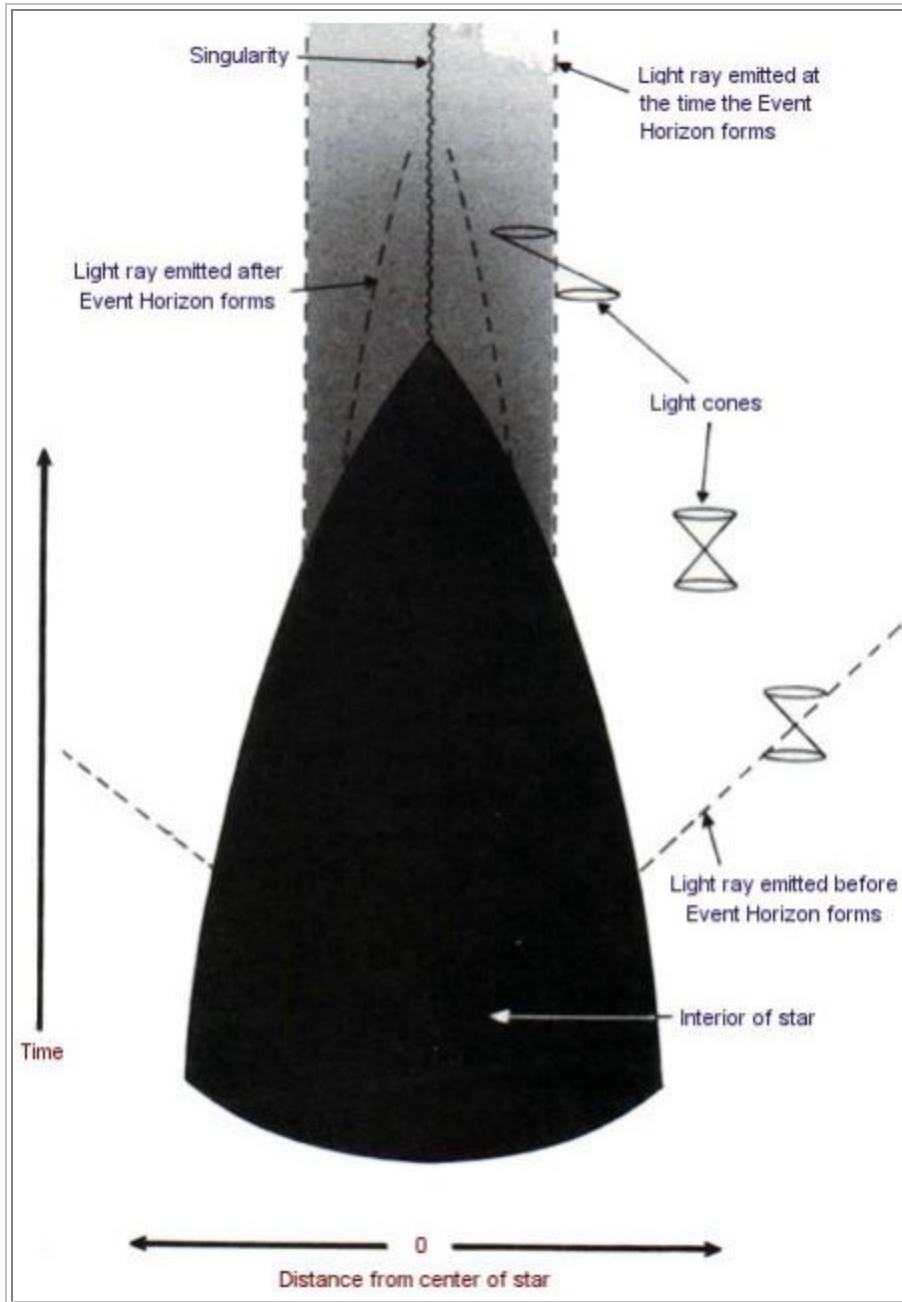


Figura 6:1

Para entender lo que se vería si uno observara cómo se colapsa una estrella para formar un agujero negro, hay que recordar que en la teoría de la relatividad no existe un tiempo absoluto. Cada observador tiene su propia medida del tiempo. El tiempo para alguien que esté en una estrella será diferente al de otra persona lejana, debido al campo gravitatorio de esa estrella. Supongamos que un intrépido astronauta, que estuviera situado en la superficie de una estrella que se colapsa, y se colapsara hacia dentro con ella, enviase una señal cada segundo, de acuerdo con su reloj, a su nave espacial que gira en órbita alrededor de la estrella. A cierta hora según su reloj, digamos que a las 11:00, la estrella se reduciría por debajo de su radio crítico, entonces el campo gravitatorio se haría tan intenso que nada podría escapar y las señales del astronauta ya no alcanzarían a la nave. Conforme se acercaran las 11:00, sus compañeros, que observaran desde la nave, encontrarían los intervalos entre señales sucesivas cada vez más largos, aunque dicho efecto sería muy pequeño antes de las 10:59:59. Sólo tendrían que esperar poco más de un segundo entre la señal del astronauta de las 10:59:58 y la que envió cuando en su reloj eran las 10:59:59; pero tendrían que esperar eternamente la señal de las 11:00. Las ondas luminosas emitidas desde la superficie de la estrella entre las 10:59:59 y las 11:00, según el reloj del astronauta, estarían extendidas a lo largo de un período infinito de tiempo, visto desde la nave. El intervalo de tiempo entre la llegada de ondas sucesivas a la nave se haría cada vez más largo, por eso la luz de la estrella llegaría cada vez más roja y más débil. Al final, la estrella sería tan oscura que ya no podría verse desde la nave: todo lo que quedaría sería un agujero negro en el espacio. La estrella continuaría, no obstante, ejerciendo la misma fuerza gravitatoria sobre la nave, que seguiría en órbita alrededor del agujero negro.

Pero este supuesto no es totalmente realista, debido al problema siguiente. La gravedad se hace tanto más débil cuanto más se aleja uno de la estrella, así la fuerza gravitatoria sobre los pies de nuestro intrépido astronauta sería siempre mayor que sobre su cabeza. ¡Esta diferencia de las fuerzas estiraría a nuestro astronauta como un *spaghetti* o lo despedazaría antes de que la estrella se hubiera contraído hasta el radio crítico en que se forma el horizonte de sucesos! No obstante, se cree que existen objetos mayores en el universo que también pueden sufrir un colapso gravitatorio, y producir agujeros negros. Un astronauta situado encima de uno de estos objetos no sería despedazado antes de que se formara el agujero negro. De hecho, él no sentiría nada especial cuando alcanzara el radio crítico, y podría pasar el punto de no retorno sin notarlo. Sin embargo, a las pocas horas, mientras la región continuara colapsándose, la diferencia entre las fuerzas gravitatorias sobre su cabeza y sobre sus pies se haría tan intensa que de nuevo sería despedazado.

El trabajo que Roger Penrose y yo hicimos entre 1965 y 1970 demostró que, de acuerdo con la relatividad general, debe haber una singularidad de densidad y curvatura de; espaciotiempo infinitas dentro de un agujero negro. La situación es parecida al *big bang* al principio del tiempo, sólo que sería el final, en vez del principio del tiempo, para el cuerpo que se colapsa y para el astronauta. En esta singularidad, tanto las leyes de la ciencia como nuestra capacidad de predecir el futuro fallarían totalmente. No obstante, cualquier observador que permaneciera fuera del agujero negro no estaría afectado por este fallo de capacidad de predicción, porque ni la luz ni cualquier otra señal podrían alcanzarle desde la singularidad. Este hecho notable llevó a Roger Penrose a proponer la hipótesis de la censura cósmica, que podría parafrasearse como «Dios detesta una singularidad desnuda». En otras palabras, las singularidades producidas por un colapso gravitatorio sólo ocurren en sitios, como los agujeros negros, en donde están decentemente ocultas por medio de un horizonte de sucesos, para no ser vistas desde fuera. Estrictamente, esto es lo que se conoce como la hipótesis débil de la censura cósmica: protege a los observadores que se quedan fuera del agujero negro de las consecuencias de la crisis de predicción que ocurre en la singularidad, pero no hace nada por el pobre desafortunado astronauta que cae en el agujero.

Existen algunas soluciones de las ecuaciones de la relatividad general en las que es posible al astronauta ver una singularidad desnuda: él puede evitar chocar con la singularidad y, en vez de esto, caer a través de un «agujero de gusano», para salir en otra región del universo. Esto ofrecería grandes posibilidades de viajar en el espacio y en el tiempo, aunque desafortunadamente parece ser que estas soluciones son altamente inestables; la menor perturbación, como, por ejemplo, la presencia del astronauta, puede cambiarlas, de forma que el astronauta podría no ver la singularidad hasta que chocara con ella, momento en el que encontraría su final. En otras palabras, la singularidad siempre estaría en su futuro y nunca en su pasado. La versión fuerte de la hipótesis de la censura cósmica nos dice que las singularidades siempre estarán, o bien enteramente en el futuro, como las singularidades de colapsos gravitatorios, o bien enteramente en el pasado, como el *big bang*. Es muy probable que se verifique alguna de las versiones de la censura cósmica, porque cerca de singularidades desnudas puede ser posible viajar al pasado. Aunque esto sería atractivo para los escritores de ciencia ficción, significaría que nuestras vidas nunca estarían a salvo: ¡alguien podría volver al pasado y matar a tu padre o a tu madre antes de que hubieras sido concebido!

El horizonte de sucesos, la frontera de la región del espaciotiempo desde la que no es posible escapar, actúa como una membrana unidireccional alrededor del agujero negro: los objetos, tales como astronautas imprudentes, pueden caer en el agujero negro a través del horizonte de sucesos, pero nada puede escapar del agujero negro

a través del horizonte de sucesos. (Recordemos que el horizonte de sucesos es el camino en el espacio-tiempo de la luz que está tratando de escapar del agujero negro, y nada puede viajar más rápido que la luz.) Uno podría decir del horizonte de sucesos lo que el poeta Dante dijo a la entrada del infierno: «Perded toda esperanza al traspasarme». Cualquier cosa o persona que cae a través del horizonte de sucesos pronto alcanzará la región de densidad infinita y el final del tiempo.

La relatividad general predice que los objetos pesados en movimiento producirán la emisión de ondas gravitatorias, rizados en la curvatura del espacio que viajan a la velocidad de la luz. Dichas ondas son similares a las ondas luminosas, que son rizados del campo electromagnético, pero mucho más difíciles de detectar. Al igual que la luz, se llevan consigo energía de los objetos que las emiten. Uno esperaría, por lo tanto, que un sistema de objetos masivos se estabilizara finalmente en un estado estacionario, ya que la energía de cualquier movimiento se perdería en la emisión de ondas gravitatorias. (Es parecido a dejar caer un corcho en el agua: al principio se mueve bruscamente hacia arriba y hacia abajo, pero cuando las olas se llevan su energía, se queda finalmente en un estado estacionario.) Por ejemplo, el movimiento de la Tierra en su órbita alrededor del Sol produce ondas gravitatorias. El efecto de la pérdida de energía será cambiar la órbita de la Tierra, de forma que gradualmente se irá acercando cada vez más al Sol; con el tiempo colisionará con él, y se quedará en un estado estacionario. El ritmo de pérdida de energía en el caso de la Tierra y el Sol es muy lento, aproximadamente el suficiente para hacer funcionar un pequeño calentador eléctrico. ¡Esto significa que la Tierra tardará unos mil billones de billones de años en chocar con el Sol, por lo que no existe un motivo inmediato de preocupación! El cambio en la órbita de la Tierra es demasiado pequeño para ser observado, pero el mismo efecto ha sido detectado durante los últimos años en el sistema llamado PSR 1913+16 (PSR se refiere a «pulsar», un tipo especial de estrella de neutrones que emite pulsos regulares de ondas de radio). Este sistema contiene dos estrellas de neutrones girando una alrededor de la otra; la energía que están perdiendo, debido a la emisión de ondas gravitatorias, les hace girar entre sí en espiral.

Durante el colapso gravitatorio de una estrella para formar un agujero negro, los movimientos serían mucho más rápidos, por lo que el ritmo de emisión de energía sería mucho mayor. Así pues, no se tardaría demasiado en llegar a un estado estacionario. ¿Qué parecería este estado final? Se podría suponer que dependería de todas las complejas características de la estrella de la que se ha formado. No sólo de una masa y velocidad de giro, sino también de las diferentes densidades de las distintas partes en ella, y de los complicados movimientos de los gases en su interior. Y si los agujeros negros fueran tan complicados como los objetos que se

colapsan para formarlos, podría ser muy difícil realizar cualquier predicción sobre agujeros negros en general.

En 1967, sin embargo, el estudio de los agujeros negros fue revolucionado por Werner Israel, un científico canadiense (que nació en Berlín, creció en Sudáfrica, y obtuvo el título de doctor en Irlanda). Israel demostró que, de acuerdo con la relatividad general, los agujeros negros sin rotación debían ser muy simples; eran perfectamente esféricos, su tamaño sólo dependía de su masa, y dos agujeros negros cualesquiera con la misma masa serían idénticos. De hecho, podrían ser descritos por una solución particular de las ecuaciones de Einstein, solución conocida desde 1917, hallada gracias a Karl Schwarzschild al poco tiempo del descubrimiento de la relatividad general. Al principio, mucha gente, incluido el propio Israel, argumentó que puesto que un agujero negro tenía que ser perfectamente esférico, sólo podría formarse del colapso de un objeto perfectamente esférico. Cualquier estrella real, que nunca sería *perfectamente* esférica, sólo podría por lo tanto colapsarse formando una singularidad desnuda.

Hubo, sin embargo, una interpretación diferente del resultado de Israel, defendida, en particular, por Roger Penrose y John Wheeler. Ellos argumentaron que los rápidos movimientos involucrados en el colapso de una estrella implicarían que las ondas gravitatorias que desprendiera la harían siempre más esférica, y para cuando se hubiera asentado en un estado estacionario sería perfectamente esférica. De acuerdo con este punto de vista, cualquier estrella sin rotación, independientemente de lo complicado de su forma y de su estructura interna, acabaría después de un colapso gravitatorio siendo un agujero negro perfectamente esférico, cuyo tamaño dependería únicamente de su masa. Cálculos posteriores apoyaron este punto de vista, que pronto fue adoptado de manera general.

El resultado de Israel sólo se aplicaba al caso de agujeros negros formados a partir de cuerpos sin rotación. En 1963, Roy Kerr, un neozelandés, encontró un conjunto de soluciones a las ecuaciones de la relatividad general que describían agujeros negros en rotación. Estos agujeros negros de «Kerr» giran a un ritmo constante, y su tamaño y forma sólo dependen de su masa y de su velocidad de rotación. Si la rotación es nula, el agujero negro es perfectamente redondo y la solución es idéntica a la de Schwarzschild. Si la rotación no es cero, el agujero negro se deforma hacia fuera cerca de su ecuador (susto igual que la Tierra o el Sol se achatan en los polos debido a su rotación), y cuanto más rápido gira, más se deforma. De este modo, al extender el resultado de Israel para poder incluir a los cuerpos en rotación, se conjeturó que cualquier cuerpo en rotación, que colapsara y formara un agujero negro, llegaría finalmente a un estado estacionario descrito por la solución de Kerr.

En 1970, un colega y alumno mío de investigación en Cambridge, Brandon Carter, dio el primer paso para la demostración de la anterior conjetura. Probó que, con tal de que un agujero negro rotando de manera estacionaria tuviera un eje de simetría, como una peonza, su tamaño y su forma sólo dependerían de su masa y de la velocidad de rotación. Luego, en 1971, yo demostré que cualquier agujero negro rotando de manera estacionaria siempre tendría un eje de simetría. Finalmente, en 1973, David Robinson, del Kings College de Londres, usó el resultado de Carter y el mío para demostrar que la conjetura era correcta: dicho agujero negro tiene que ser verdaderamente la solución de Kerr. Así, después de un colapso gravitatorio, un agujero negro se debe asentar en un estado en el que puede rotar, pero no puede tener pulsaciones [es decir, aumentos y disminuciones periódicas de su tamaño].

Además, su tamaño y forma sólo dependerán de su masa y velocidad de rotación, y no de la naturaleza del cuerpo que lo ha generado mediante su colapso. Este resultado se dio a conocer con la frase: «un agujero negro no tiene pelo». El teorema de la «no existencia de pelo» es de gran importancia práctica, porque restringe fuertemente los tipos posibles de agujeros negros. Se pueden hacer, por lo tanto, modelos detallados de objetos que podrían contener agujeros negros, y comparar las predicciones de estos modelos con las observaciones. También implica que una gran cantidad de información sobre el cuerpo colapsado se debe perder cuando se forma el agujero negro, porque después de ello, todo lo que se puede medir del cuerpo es la masa y la velocidad de rotación. El significado de todo esto se verá en el próximo capítulo.

Los agujeros negros son un caso, entre unos pocos en la historia de la ciencia, en el que la teoría se desarrolla en gran detalle como un modelo matemático, antes de que haya ninguna evidencia a través de las observaciones de que aquélla es correcta. En realidad, esto constituía el principal argumento de los oponentes de los agujeros negros: ¿cómo podría uno creer en objetos cuya única evidencia eran cálculos basados en la dudosa teoría de la relatividad general? En 1963, sin embargo, Maarten Schmidt, un astrónomo del observatorio Monte Palomar de California, midió el corrimiento hacia el rojo de un débil objeto parecido a una estrella, situado en la dirección de la fuente de ondas de radio llamada 3C273 (es decir, fuente número 273 del tercer catálogo de Cambridge de fuentes de radio). Encontró que dicho corrimiento era demasiado grande para ser causado por un campo gravitatorio: si hubiera sido un corrimiento hacia el rojo de origen gravitatorio, el objeto tendría que haber sido tan masivo y tan cercano a nosotros que habría perturbado las órbitas de los planetas del sistema solar. Esto indujo a pensar que el corrimiento hacia el rojo fue causado, en vez de por la gravedad, por la expansión del universo, lo que, a su vez, implicaba que el objeto estaba muy lejos. Y para ser visible a tan gran distancia, el objeto debería ser muy brillante, debería, en otras palabras, emitir una enorme

cantidad de energía. El único mecanismo que se podía pensar que produjera tales cantidades de energía parecía ser el colapso gravitatorio, no ya de una estrella, sino de toda una región central de una galaxia. Cierta número de otros «objetos cuasi-estelares», o *quasars*, similares han sido descubiertos, todos con grandes corrimientos hacia el rojo. Pero todos están demasiado lejos y, por lo tanto, son demasiado difíciles de observar para que puedan proporcionar evidencias concluyentes acerca de los agujeros negros.



Figura 6:2

Nuevos estímulos sobre la existencia de agujeros negros llegaron en 1967 con el descubrimiento, por un estudiante de investigación de Cambridge, Jocelyn Bell, de objetos celestes que emitían pulsos regulares de ondas de radio. Al principio, Bell y su director de tesis, Antony Hewish, pensaron que podrían haber establecido contacto con una civilización extraterrestre de la galaxia. En verdad, recuerdo que, en el seminario en el que anunciaron su descubrimiento, denominaron a las primeras cuatro fuentes encontradas LGM 1-4, LGM refiriéndose a «*Little Green Men*» [hombrecillos verdes]. Al final, sin embargo, ellos y el resto de científicos llegaron a la conclusión menos romántica de que estos objetos, a los que se les dio el nombre de *pulsars*, eran de hecho estrellas de neutrones en rotación, que emitían pulsos de ondas de radio debido a una complicada interacción entre sus campos magnéticos y la materia de su alrededor. Fueron malas noticias para los escritores de *westerns*

espaciales, pero muy esperanzadoras para el pequeño grupo de los que creíamos en agujeros negros en aquella época: fue la primera evidencia positiva de que las estrellas de neutrones existían. Una estrella de neutrones posee un radio de unos quince kilómetros, sólo una pequeña cantidad de veces el radio crítico en que una estrella se convierte en un agujero negro. Si una estrella podía colapsarse hasta un tamaño tan pequeño, no era lógico esperar que otras estrellas pudieran colapsar a tamaños incluso menores y se convirtieran en agujeros negros.

¿Cómo podríamos esperar que se detectase un agujero negro, si por su propia definición no emite ninguna luz? Podría parecer algo similar a buscar un gato negro en un sótano lleno de carbón. Afortunadamente, hay una manera. Como John Michell señaló en su artículo pionero de 1783, un agujero negro sigue ejerciendo una fuerza gravitatoria sobre los objetos cercanos. Los astrónomos han observado muchos sistemas en los que dos estrellas giran en órbita una alrededor de la otra, atraídas entre sí por la gravedad. También observan sistemas en los que sólo existe una estrella visible que está girando alrededor de algún compañero invisible. No se puede, desde luego, llegar a la conclusión de que el compañero es un agujero negro: podría ser simplemente una estrella que es demasiado débil para ser vista. Sin embargo, algunos de estos sistemas, como el llamado Cygnus X-1 (figura 6.2), también son fuentes intensas de rayos X. La mejor explicación de este fenómeno es que se está quitando materia de la superficie de la estrella visible. Cuando esta materia cae hacia el compañero invisible, desarrolla un movimiento espiral (parecido al movimiento del agua cuando se vacía una bañera), y adquiere una temperatura muy alta, emitiendo rayos X (figura 6.3). Para que este mecanismo funcione, el objeto invisible tiene que ser pequeño, como una enana blanca, una estrella de neutrones o un agujero negro. A partir de la órbita observada de la estrella visible, se puede determinar la masa más pequeña posible del objeto invisible. En el caso de Cygnus X-1, ésta es de unas seis veces la masa del Sol, lo que, de acuerdo con el resultado de Chandrasekhar, es demasiado grande para que el objeto invisible sea una enana blanca. También es una masa demasiado grande para ser una estrella de neutrones. Parece, por lo tanto, que se trata de un agujero negro.

Existen otros modelos para explicar Cygnus X-1, que no incluyen un agujero negro, pero todos son bastante inverosímiles. Un agujero negro parece ser la única explicación realmente natural de las observaciones. A pesar de ello, tengo pendiente una apuesta con Kip Thorne, del Instituto Tecnológico de California, de que ¡de hecho Cygnus X-1 no contiene ningún agujero negro! Se trata de una especie de póliza de seguros para mí. He realizado una gran cantidad de trabajos sobre agujeros negros, y estaría todo perdido si resultara que los agujeros negros no existen. Pero en este caso, tendría el consuelo de ganar la apuesta, que me proporcionaría recibir la revista *Private Eye* durante cuatro años. Si los agujeros

negros existen, Kip obtendrá una suscripción a la revista *Penthouse* para un año. Cuando hicimos la apuesta, en 1975, teníamos una certeza de un 80 por 100 de que Cygnus era un agujero negro. Ahora, diría que la certeza es de un 95 por 100, pero la apuesta aún tiene que dirimirse.

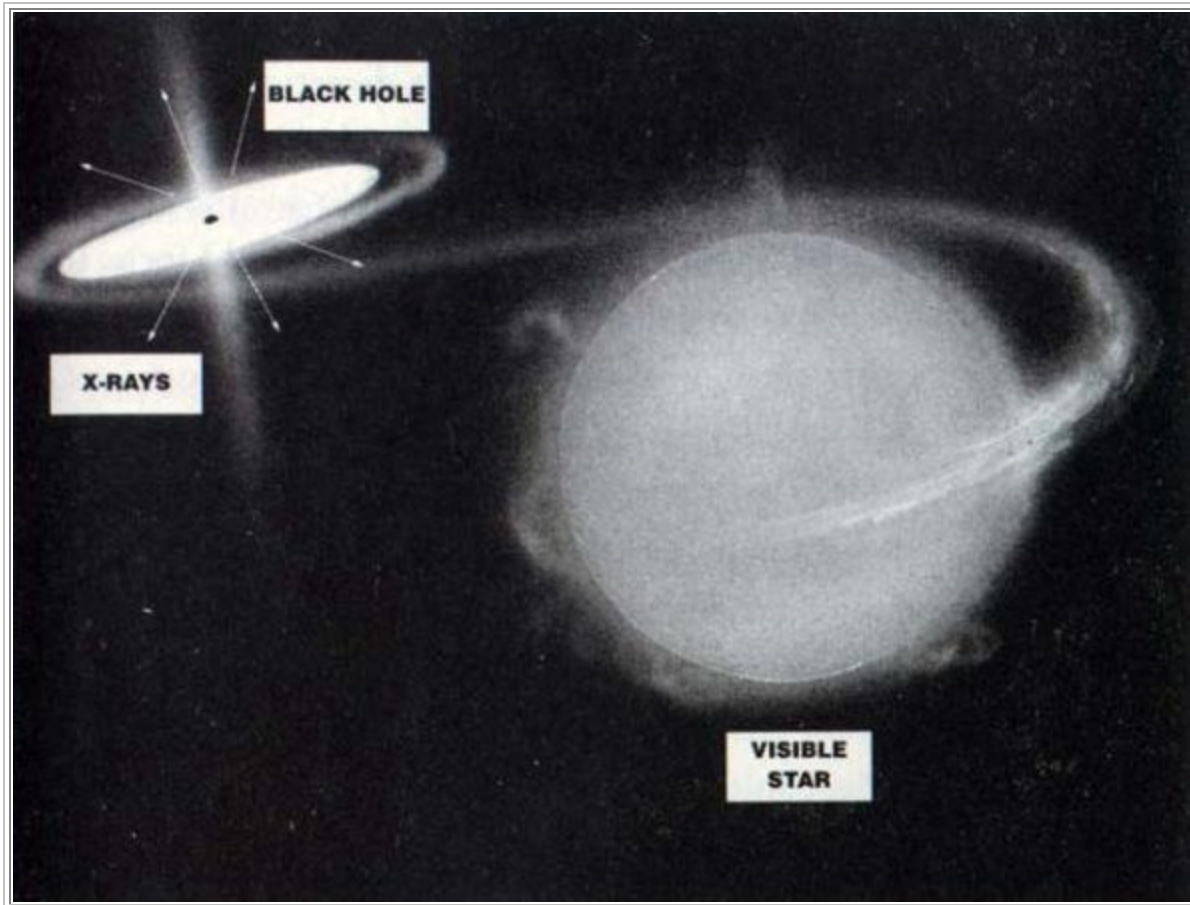


Figura 6:3

En la actualidad tenemos también evidencias de otros agujeros negros en sistemas como el de Cygnus X-1 en nuestra galaxia y en dos galaxias vecinas llamadas las Nubes de Magallanes. El número de agujeros negros es, no obstante, casi con toda certeza muchísimo mayor; en la larga historia del universo, muchas estrellas deben haber consumido todo su combustible nuclear, por lo que habrán tenido que colapsarse. El número de agujeros negros podría ser incluso mayor que el número de estrellas visibles, que contabiliza un total de unos cien mil millones sólo en nuestra galaxia. La atracción gravitatoria extra de un número tan grande de agujeros negros podría explicar por qué nuestra galaxia gira a la velocidad con que lo hace: la masa de las estrellas visibles es insuficiente para explicarlo. También tenemos alguna evidencia de que existe un agujero negro mucho mayor, con una masa de aproximadamente cien mil veces la del Sol, en el centro de nuestra galaxia. Las