

2.15. Evolución Estelar: Supernovas, Pulsares y Hoyos Negros.

2.15.1. Introducción:

Una estrella gasta la mayor parte de su “vida” transmutando Hidrógeno en Helio. Dicha reacción ocurre a una temperatura superior a 5 e inferior a 25 millones de grados Kelvin. Dado que la cantidad de energía generada por unidad de masa depende de una fuerte potencia de la temperatura (entre 6 y 18) y el exponente se hace mayor con la temperatura, una estrella puede generar cantidades enormes de energía sin superar nunca en su núcleo los 20 a 25 millones de grados.

Cuando la estrella agota el Hidrógeno en su núcleo el hidrógeno sigue transmutándose en Helio en una cáscara alrededor del núcleo, que contiene Helio puro. La generación de energía empieza a ser insuficiente y la estrella contrae su zona nuclear para elevar la temperatura en la cáscara que quema Hidrógeno. La estrella sobre-reacciona generando demasiada energía, que hace que sus cáscaras intermedias aumenten su temperatura y por ende se expandan; al expandirse, su fotosfera se enfría. La estrella se transforma lentamente en una estrella **gigante roja**. La estrella tiene un núcleo más denso y más caliente que una estrella normal y sin embargo su diámetro exterior ha aumentado en un factor 100 y por ende su densidad global disminuye en un factor un millón [la densidad del Sol es de $1,4 \text{ gr/cm}^3$ y cuando llegue a gigante roja su densidad será de $1,4 \times 10^{-6} \text{ gr/cm}^3$, equivalente a $1,4 \text{ gr/m}^3$ que es mil veces menor que la densidad del aire. El Sol “casi” flotaría en el agua y una gigante roja sin duda flotaría en la atmósfera con una densidad media mil veces más baja que la del aire que respiramos].

Al alcanzar la estrella una temperatura de 200 millones de grados Kelvin en su núcleo, se inician las reacciones nucleares que transmutan Helio en Carbono. Este proceso se llama la **cadena triple-alfa** pues se necesitan que 3 partículas alfa (núcleo de Helio-4) choquen en forma cuasi-simultánea para que 3 átomos de Helio produzcan un átomo de Carbono. Una estrella como el Sol vivirá 10 mil millones de años transmutando Hidrógeno en Helio. Cuando encienda el Helio vivirá mil millones de años quemando Helio en Carbono en su núcleo (apenas un 10% del tiempo que le tomó quemar el Hidrógeno). Mientras esto ocurre el Hidrógeno continúa quemándose en una cáscara alrededor del núcleo. En la práctica la estrella tiene, después de su fase de gigante roja, dos fuentes de energía nuclear. Sin embargo la que tiene lugar en su núcleo es la más importante.

Finalmente la estrella agota el Helio en el núcleo y continúa quemando Helio en una cáscara. La estructura de la estrella se asemeja a una cebolla. A un núcleo inerte

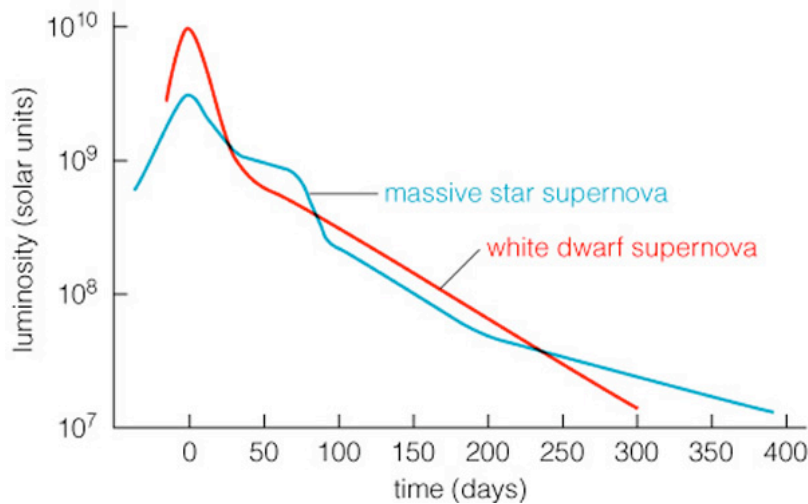
de Carbono lo rodea una capa de Helio que se transmuta en Carbono. Más afuera una capa de Helio inerte; más afuera una capa que quema Hidrógeno en Helio; todo esto rodeado por el resto de la estrella cuya composición química es primariamente Hidrógeno (75%) y Helio (25%).

La estrella, con dos cáscaras en su interior, quemando Hidrógeno y Helio, contrae su núcleo, expande sus cáscaras exteriores y sube la rama asintótica hasta empezar a quemar el Carbono al alcanzar el extremo de la rama asintótica. Transmuta Carbono en Oxígeno (C^{12} a O^{16} por captura de una partícula alfa). Para que esto ocurra es necesario que la estrella posea inicialmente una masa superior a las 8 masas solares. Las estrellas de menor masa como ya hemos visto no logran encender el Carbono y se transforman en enanas blancas pasando por una fase de nebulosa planetaria.

En la evolución de una estrella masiva, al encender el Carbono la estrella se mueve hacia la izquierda en el diagrama H-R, disminuyendo su radio y aumentando su temperatura superficial. Posteriormente se produce en el interior de la estrella Neón 20, Magnesio 24, Silicio 28, Azufre 32, Cloro 36, Calcio 40, hasta llegar al Hierro 56. Cada vez que la estrella agota un elemento se mueve hacia la derecha en el diagrama H-R y al encender el nuevo se mueve a la izquierda. Sin embargo las cosas transcurren muy rápidamente para la estrella entre la ignición del Carbono hasta la generación de un núcleo de Hierro.

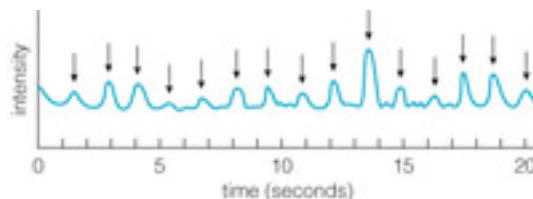
El Hierro 56 es el átomo que tiene la energía mínima por unidad de masa. Cuando la estrella contrae el núcleo compuesto por Hierro 56 la reacción que se produce es endotérmica (todas las anteriores eran exotérmicas): el átomo de Hierro se quiebra en 13 átomos de Helio más 4 neutrones y absorbe energía del corazón de la estrella. El proceso es catastrófico y la estrella se queda sin presión que la soporte. Se produce una implosión que termina en una gigantesca explosión que rompe totalmente las capas externas y medianas de la estrella. Este proceso se conoce como una supernova. La estrella aumenta su luminosidad en cientos de millones de veces, permaneciendo así por unos a dos meses. Posteriormente la estrella, o la mayor parte de ella, se disipa en el espacio, arrastrando consigo buena parte de los elementos químicos que se formaron “a fuego lento” en el interior de la estrella y también a aquellos que se forman durante la explosión. Todos los elementos químicos más pesados que el Fe-56 se forman mediante bombardeo de neutrones rápidos producidos “a fuego rápido” en la explosión de la estrella.

Existe otro tipo de supernovas conocido como supernovas de tipo Ia. Esta supernovas son enanas blancas binarias que su compañera les transfiere masa y las lleva más allá del límite de estabilidad de Chandrasekhar de 1,4 masas solares. La enana blanca, principalmente de Carbono con algo de Oxígeno “quema” en forma explosiva todo su combustible nuclear dando origen a una supernova con una variación en su luminosidad muy características (curva de luz) que es muy fácil de identificar. Las supernovas de tipo Ia tienen una magnitud en el máximo muy semejante y por ello pueden ser utilizadas como indicadores de distancia. Su uso permitió en 1998 la determinación de la aceleración del Universo. Esto lo discutiremos más adelante.

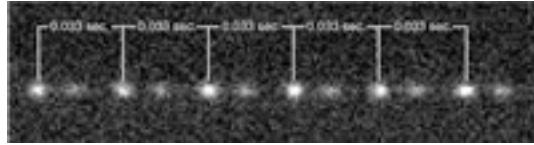


2.15.2 Pulsares:

En 1967 la joven estudiante nacida en Irlanda del Norte **Jocelyn Bell** (1943 -) trabajaba en la Universidad de Cambridge bajo la tutela del profesor **Anthony Hewish** (1924 -), estudiando posibles cintilaciones de radio fuentes debidas al medio interplanetario. Para ello habían desarrollado un receptor de ondas de radio que tenía una gran resolución temporal. Para la sorpresa de Jocelyn Bell los datos mostraron que una radio fuente variaba de forma dramática y perfectamente periódica, cada 1,34 segundos; esto ocurrió el 6 de Agosto de 1967. Otro objeto semejante fue encontrado en Diciembre y dos en el mes de enero de 1968. Las exóticas radio fuente fueron llamadas PULSARES, pues su característica más sobresaliente es su pulso extremadamente regular. Primero se sugirió que podía tratarse de estrellas enanas blancas en rápida rotación, pero era muy difícil aceptar la idea que una estrella de 10.000 kilómetros de radio pudiese girar en un segundo. El astrofísico austríaco, educado en Inglaterra, **Thomas Gold** (1920 – 2004) en la Universidad de Cornell de los Estados Unidos y el astrónomo italiano nacido en Florencia **Franco Pacini** (1939 -) propusieron que se trataba de una estrella de neutrones, altamente magnetizada, de unos 10 a 20 kilómetros de radio, que rotaba en un período inferior a un segundo y que emite radiación sincrotrón, en un angosto haz, que gira con la estrella. El modelo es semejante a esas luces rotatorias de los vehículos de emergencia, que para un observador estacionario parecen prenderse y apagarse.



Intensidad de la radiación emitida por un Pulsar.

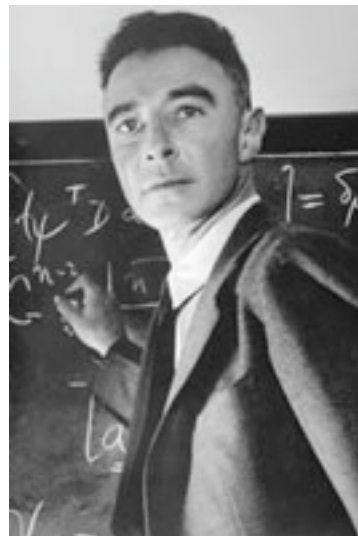


Imágenes ópticas del pulsar de la nebulosa del Cangrejo.

Las estrellas de neutrones habían sido predichas por el astrónomo suizo **Fritz Zwicky** (1898-1974) y por su colaborador alemán **Walter Baade** (1893-1960), trabajando ambos en Pasadena, California en 1934, tan sólo dos años después que James Chadwick descubriera el neutrón. Zwicky y Baade especularon con la existencia de posibles estrellas compuestas por neutrones, que podrían ser mucho más densas (y pequeñas) que las enanas blancas. El gran físico ruso **Lev Landau** (1908 – 1968) y el físico norteamericano **Robert Oppenheimer** (1904 -1967) hacia fines de los años treinta trabajaron en modelos de estrellas de neutrones, como un caso extremo de un gas degenerado. Un gas de neutrones también se encuentra afecto al principio de exclusión de Pauli y por ende al igual que las enanas blancas, que están sujetas por la presión de un gas de electrones degenerados, los pulsares son estrellas de neutrones degenerados, donde la extrema densidad proporciona la presión para soportar la estrella.



Lev Landau



Robert Oppenheimer

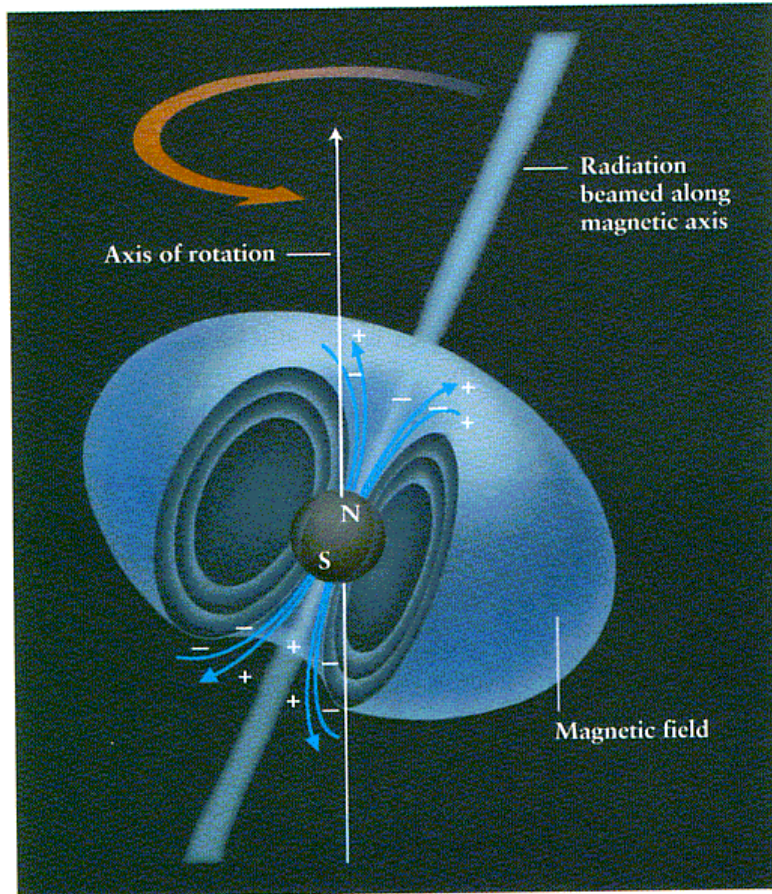


Figure 23-3

A Rotating, Magnetized Neutron Star When a neutron star forms, it is rotating rapidly and has a powerful magnetic field. Charged particles are accelerated near the star's magnetic poles, producing two oppositely directed beams of radiation that emerge from the magnetic poles. In general, a star's magnetic axis (a line that connects the north and south magnetic poles) is tilted at an angle from the axis of rotation, as shown here. Therefore, as the star rotates, the beams sweep around the sky. If the Earth happens to lie in the path of the beams, we detect radiation that appears to pulse on and off—in other words, a pulsar.

Una estrella de neutrones tiene típicamente una masa solar y un radio de 10 kilómetros. Por ende si su radio es casi 100.000 veces menor que el Sol su densidad resulta $\sim 10^{15} \text{ gr/cm}^3$. Dicha densidad es igual a las densidades nucleares de los átomos; corresponde a densidades que se obtienen cuando protones y neutrones están en contactos unos con otros. En el caso de una estrella de neutrones son neutrones que están “lo más cerca posible”.

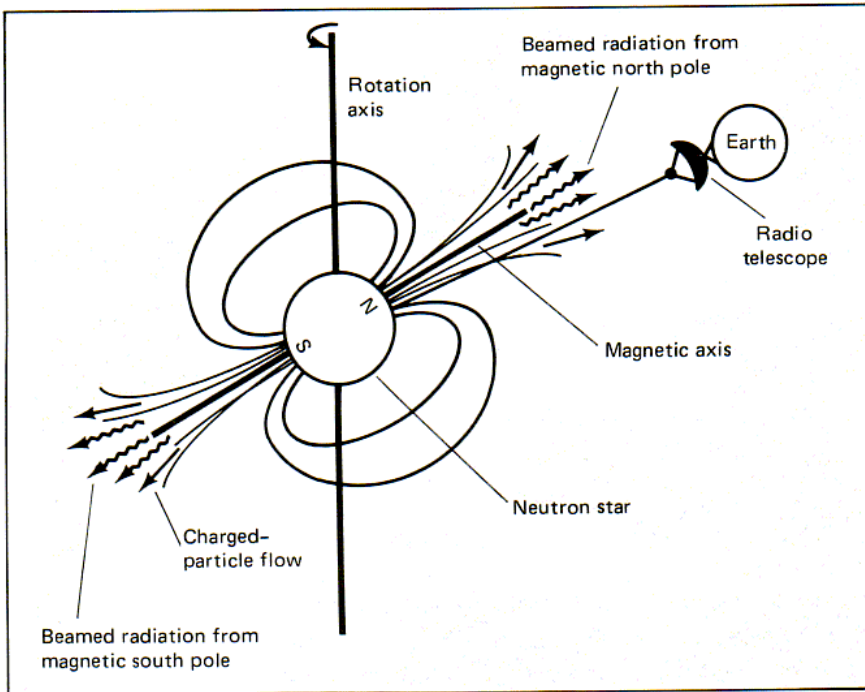
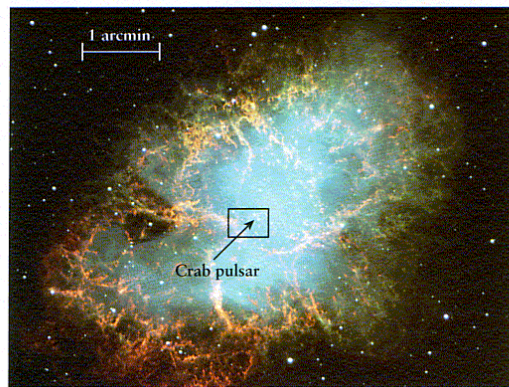


FIGURE 7-7. *Details of a Neutron Star.* Astronomers believe that neutron stars are rapidly rotating and have intense magnetic fields. Radiation streaming out of the north and south magnetic poles can account for the properties of pulsars.

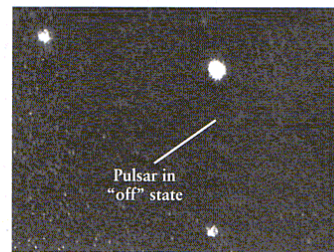
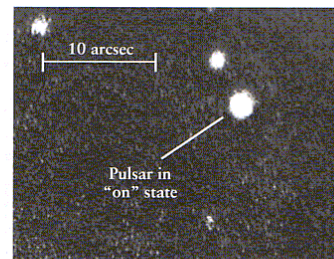
neutron star.



The name *pulsar* may have led you to the idea that the source of radio waves is actually pulsing. But in the model just described, this is not the case at all. Instead,



a



b



Figure 23-4 R I V U X G

The Crab Pulsar in Visible Light (a) A pulsar is located at the center of the Crab Nebula, which is about 2000 pc (6500 ly) from Earth and about 3 pc (10 ly) across. (b) These two close-up images show the Crab pulsar when its beam is directed toward us (upper image) and when it is not (lower image). These are called the "on" and "off" states, respectively. Like the radio pulses, these visual flashes have a period of 0.033 s. (a: The FORS Team, VLT, European Southern Observatory; b: Lick Observatory)

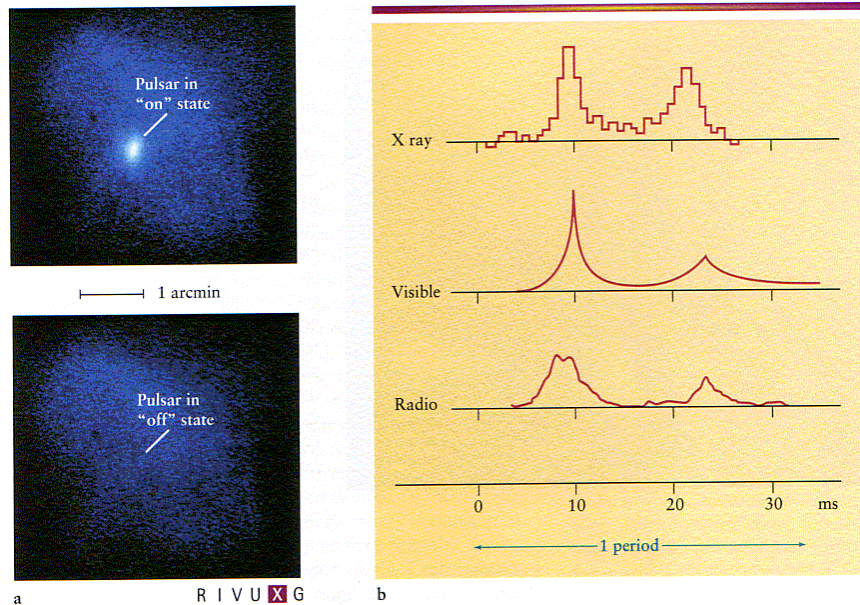


Figure 23-5

X-Ray Views of the Crab Pulsar (a) These views of the Crab pulsar were obtained with an X-ray telescope on the Earth-orbiting Einstein Observatory. They show the pulsar in its "on" state and "off" state. Compare these images to the visible-light images in Figure 23-4b. (b) These three graphs show the intensity of radiation emitted by the Crab pulsar at X-ray, visible, and radio wavelengths. At all wavelengths, the pulses repeat with a period of 33 milliseconds (ms), or 0.033 s. (One millisecond equals 10^{-3} s.) Note that there is a second, weaker pulse about halfway through the pulsar's period. One interpretation of this effect is that we are seeing emissions from both of the rotating neutron star's magnetic poles. If one of the magnetic poles is more directly aligned toward the Earth than the other, we detect one strong pulse and one weak one during each rotation of the neutron star. (a: Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)



Jocelyn Bell, descubridora de los PULSARES.

2.15.3. Los Hoyos Negros:

Un gas de neutrones degenerados puede proporcionar la presión para mantener en equilibrio a una estrella siempre que la masa de la estrella no supere las dos masas solares. Para estrellas más masivas que tres masas solares no es posible con la presión de un gas de neutrones degenerados equilibrar la estrella; el destino final será que la estrella será “vencida” por su propia gravedad llegando a tener un tamaño tan pequeño que la velocidad de escape de su superficie igualará a la velocidad de la luz.

El primero en especular con la idea de un hoyo negro fue astrónomo francés **Pierre Simon Laplace** (1749 – 1827), en 1796. Utilizando la idea del modelo corpuscular de la luz, introducido por Newton, Laplace describe posibles objetos que sean tan compactos que su velocidad de escape iguale a la de la luz. De ellos ni la luz podría escapar y aventuró que el universo podría tener esos objetos en gran cantidad y no serían percibidos.

El gran astrofísico alemán **Karl Schwarzschild** (1873 – 1916), en 1915, había demostrado utilizando la relatividad general que una masa podía curvar el espacio-tiempo a tal punto que se cerraría sobre si mismo. Para una masa M a un cierto radio, conocido como radio de Schwarzschild, la velocidad de escape igualaría a la velocidad de la luz. Corresponde a $2GM/c^2$. Para una masa como la del Sol (2×10^{33} gramos el radio de Schwarzschild resulta ser 2,7 kilómetros). El radio de Schwarzschild es directamente proporcional a la masa. La esfera de radio igual al radio de Schwarzschild se conoce como el **horizonte de eventos**. En torno a la masa sólo podremos ver hasta el radio del horizonte de eventos. Para una masa M en masas solares, el radio del horizonte de eventos es $2,7 \times M$ en kilómetros. [Si la Tierra fuese comprimida hasta llegar a un hoyo negro, su radio resultaría de 8 milímetros]. Como el radio de un hoyo negro es directamente proporcional a su masa, la densidad de un hoyo negro es menor mientras más grande es la masa (la densidad de un hoyo negro va con el inverso del cuadrado de la masa). El trabajo de Schwarzschild fue publicado en 1917.

La idea de un hoyo negro se reafirmó teóricamente por los trabajos de Oppenheimer y Snyder en 1939, quienes demostraron que una estrella fría masiva colapsaría indefinidamente.

Con el descubrimiento de los pulsares en 1967 se reinició una búsqueda de posibles hoyos negros en el Universo. Los rusos **Yakov Zel'dovich** (1914 – 1987) y **O. Kh. Guseynov** habían propuesto a comienzos de los años sesenta que se podría descubrir un hoyo negro mirando estrellas binarias con una sola componente (binarias donde sólo se ven las líneas espectrales de una estrella pero cuya velocidad radial variable la acusa de tener una compañera. Se hizo un esfuerzo por buscar casos de binarias con una sola componente pero no se encontró ninguna candidata interesante.

La historia cambió radicalmente el sábado 12 de diciembre de 1970. Ese día se lanzó al espacio desde Kenia, el satélite de rayos-X que fue bautizado UHURU (que significa *libertad* en Swahili). Dos telescopios de rayos-X a bordo del satélite barrían el cielo buscando fuente de rayos-X. En 1974 se había analizado y catalogado 161

fuentes de rayos-X. Por lo menos 8 de las 161 fuentes correspondían a estrellas binarias.

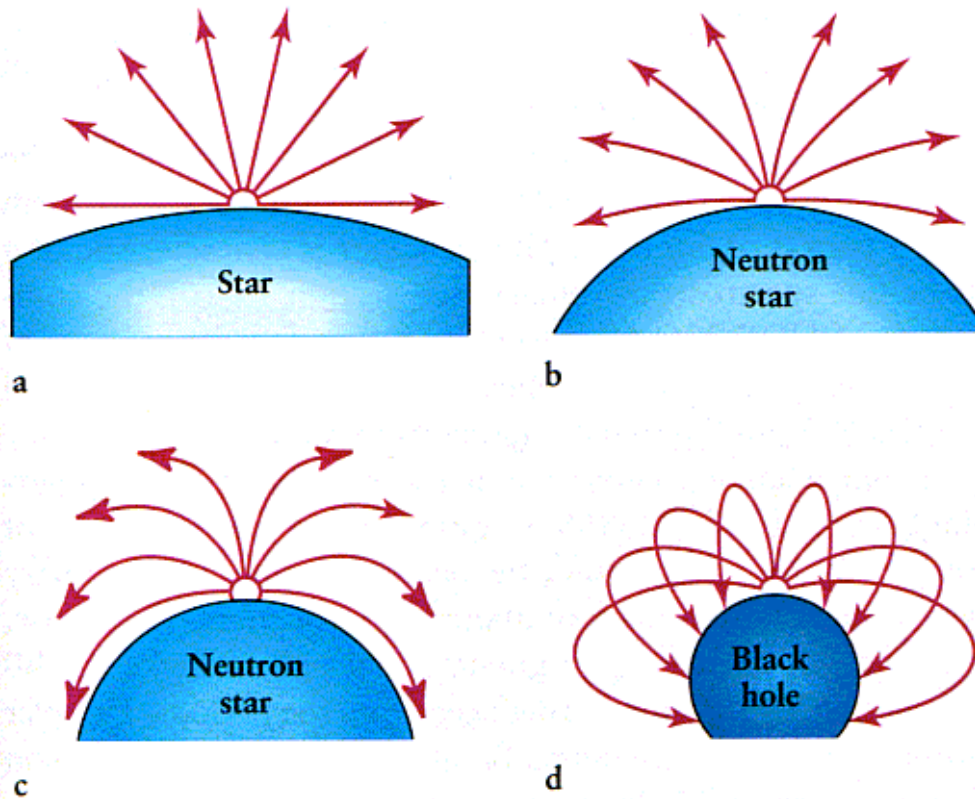


Figure 24-8

The Formation of a Black Hole (a) Photons emitted from a main-sequence, giant, or supergiant star are affected very little by the star's gravity, and travel in essentially straight lines. (b) At the surface of a collapsing neutron star, gravity is very strong and photons emitted from the surface follow curved paths. (c) As the star continues to collapse, the curvature of the surrounding spacetime increases and the trajectories of photons bend more sharply. (d) When the neutron star shrinks to a certain critical size, it becomes a black hole. The spacetime around the black hole is so highly curved that none of the emitted photons can escape. Not even photons emitted directly upward from the surface can escape; they undergo an infinite gravitational redshift and disappear.

De las ocho binarias descubiertas, en cuatro de ellas se detectaron pulsos de rayos-X, tal como un pulsar pulsa en radio. Estos pulsares de rayos-X resultaron ser SMC X-1 (con un período de 0,716 segundos), Vela X-1 (con un período de 282,9 segundos), Centauro X-3 (con un período de 4,842 segundos) y Hércules X-1 (con un período de 1,238 segundos).

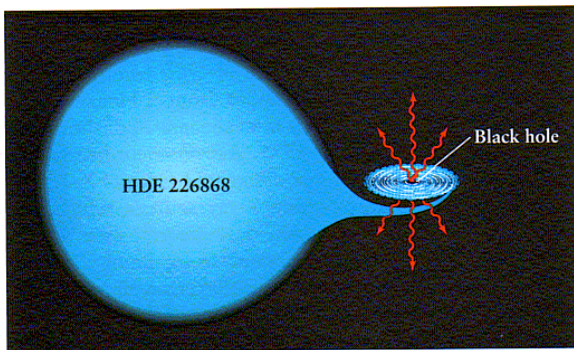
¿Cuál es el origen de los rayos-X en las binarias? Una estrella muy densa, ya sea una estrella de neutrones o un hoyo negro, al recibir masa proveniente de su compañera, genera un disco de acreción en su ecuador que va lentamente perdiendo momento angular y cayendo hacia la estrella. Tanto en el disco como en el material que cae se producen temperaturas muy altas (millones de grados) que hace que el material emita en rayos-X. La emisión en rayos-X por lo tanto no es ni de la compañera normal ni de la estrella densa, es de un disco (tipo el disco de Saturno) en torno de la estrella pequeña.



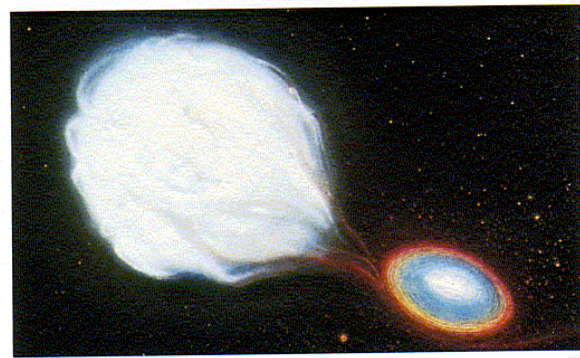
Figure 24-10 R I **V** U X G

HDE 226868 This photograph from the 5-m telescope on Palomar Mountain shows the star at the location of the X-ray source Cygnus X-1. HDE 226868, a B0 supergiant located 2500 pc (8000 ly) from Earth in the constellation Cygnus, is part of a binary system. The other, unseen member of the system has a mass of at least $7 M_{\odot}$ and is probably a black hole. The bright star directly above HDE 226868 is not part of the binary system. (Courtesy of J. Kristian, Carnegie Observatories)

La única manera de saber si una binaria de rayos-X tiene o no un hoyo negro es calcular la masa del sistema y estimar la masa de la estrella visible. Eso produce una estimación para la masa de la estrella colapsada. Si esa estimación es de más de 3 masas solares se tiene un caso para un hoyo negro. De las 8 binarias de UHURU la fuente llamada 3U 1956+35 Cygnus X-1 se identificó con la estrella HDE 226868, estrella de magnitud 9. La estrella visible es una estrella azul masiva, de unas veinte masas solares. El sistema, al ser estudiado por los desplazamientos de las líneas espectrales de ella resulta ser de unas veintiocho masas solares. Con ello la compañera invisible de HDE226868 tiene unas 8 masas solares, mucho más que lo que puede tener una estrella de neutrones. Cygnus X-1 es el mejor ejemplo de una estrella masiva que evolucionó hacia un hoyo negro.



a



b



Figure 24-11

The Cygnus X-1 System (a) Gas from the blue supergiant HDE 226868 is captured into orbit about the black hole, forming an accretion disk. As gases spiral in toward the black hole, friction heats them to high temperatures. At the inner edge of the disk, just above the black hole, the gases become so hot that they emit vast quantities of X rays. (b) This artist's rendering shows how the Cygnus X-1 system might look at close range. At even closer range, the accretion disk would appear as shown in the illustration that opens this chapter. (Courtesy of D. Norton, Science Graphics)

En el año 2002 la Academia Sueca otorgó el Premio Nobel de Física al astrónomo **Riccardo Giacconi** (1931 -) por su participación en el descubrimiento de las estrellas binarias de rayos-X y por haber desarrollado el área de la astronomía de rayos-X. Giacconi se desempeñó como primer director del Instituto del Telescopio Espacial y posteriormente fue Director General del Observatorio Europeo Austral al momento de construir el observatorio de Cerro Páranla, al sur de Antofagasta, donde se instaló el telescopio VLT (cuatro telescopios de 8,2 metros de diámetro cada uno). Giacconi fue uno de los constructores del satélite UHURU con el cual se descubrió entre otras Cygnus X-1.

En conclusión: las estrellas masivas, al final de su evolución terminan como estrellas de neutrones o como hoyos negros. La teoría lo sugería así pero a partir del UHURU Cygnus X-1 es un ejemplo de un hoyo negro de masa estelar. También han sido obtenidos recientemente datos que permiten confirmar la existencia de hoyos negros súper masivos en el centro de las galaxias; hoyos negros de masas entre un millón y cien millones de masas solares. Esos hoyos negros serían los artífices de la emisión de los cuasares. Hablaremos de ellos más adelante.

Referencias:

William Kaufmann "The Cosmic Frontier of General Relativity", Little, Brown, and Co., Boston, 1977.

Harry Shipman "Black Holes, Quasars, and the Universe" Houghton Mifflin Co. Boston, 1976.