

EXPLOSIONES CÓSMICAS

JUAN MARÍA MARCAIDE OSORO *

* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Valverde 22, 28004 Madrid.

INTRODUCCIÓN

Tras la apariencia de gran tranquilidad que nos transmite una noche estrellada, se esconde un universo en transformación, con eventos muy violentos. A veces, el arte (*noche estrellada*, Vincent van Gogh) se anticipa en mostrárnoslo. En el universo se dan procesos violentos como el canibalismo galáctico, la actividad en el entorno de los agujeros negros, las novas en binarias... y las explosiones cósmicas. Las novas tienen lugar a distancias de unos miles de años-luz. El agujero negro más cercano, y que está en fase casi-inactiva a pesar de que su masa es de 4 millones de masas solares, está a 25 mil años-luz en el centro de nuestra galaxia, la Galaxia o Vía Láctea. Sin embargo, a 60 millones de años-luz, en el centro de la galaxia elíptica gigante M87, se encuentra en plena actividad un agujero negro con una masa de mil millones de masas solares. El centro de esa galaxia emite continuamente material reprocesado de su entorno en grandes y estrechos chorros, a casi la velocidad de la luz. Finalmente, las explosiones cósmicas tienen lugar por todo el universo en forma de supernovas o estallidos de rayos gamma (GRB, por sus siglas en inglés). La supernova más cercana a nosotros en 400 años tuvo lugar en 1987 en la Gran Nube de Magallanes, a 160 mil años-luz. Las señales luminosas de otras explosiones cósmicas nos llegan desde los confines del universo explorado tras unos 12 mil millones de años.

Debido a que el universo que rastreamos a diario es tan grande, y a que recibimos señales de ese pasado tan remoto, detectamos 2 ó 3 explosiones cada día. En ellas se liberan en unos pocos días cantidades de energía del orden de 10^{51} ergios, dando lugar a lumi-

nosidades comparables a las de la galaxia en la que tienen lugar las explosiones. En muchos casos las luminosidades son tan altas que corresponderían a energías del orden de 10^{54} ergios si la emisión fuera isotrópica, es decir igual en todas las direcciones, pero hay evidencia de que esas tremendas emisiones tienen lugar frecuentemente en conos muy estrechos que apuntan hacia nosotros. Ello sirve para rebajar el estimado energético a niveles aceptables, pero también nos indica que hay muchas explosiones (GRBs) de las que no tenemos noticia y de que ese número diario de detecciones es un límite inferior del número de GRBs, que podría ser mil veces mayor. En una docena de casos se ha encontrado que los GRB muestran también características espectrales de supernova, pero en la mayoría de los casos la conexión GRB-supernova no se ha establecido.

SUPERNOVAS

Se clasifican según las características de sus espectros en el rango visible durante las primeras semanas. Existe un gran consenso en que un tipo de supernovas (tipo Ia) se producen como explosiones termonucleares de estrellas enanas blancas y que todas las demás se originan en el colapso de estrellas masivas.

Chandrasekhar demostró que una estrella enana blanca (esencialmente un gas degenerado de electrones) es estable si su masa es menor que 1.4 veces la masa solar. Si supera esta masa, la enana blanca colapsa y sólo quizás la eventual degeneración de un gas de neutrones puede detener su colapso. Sin

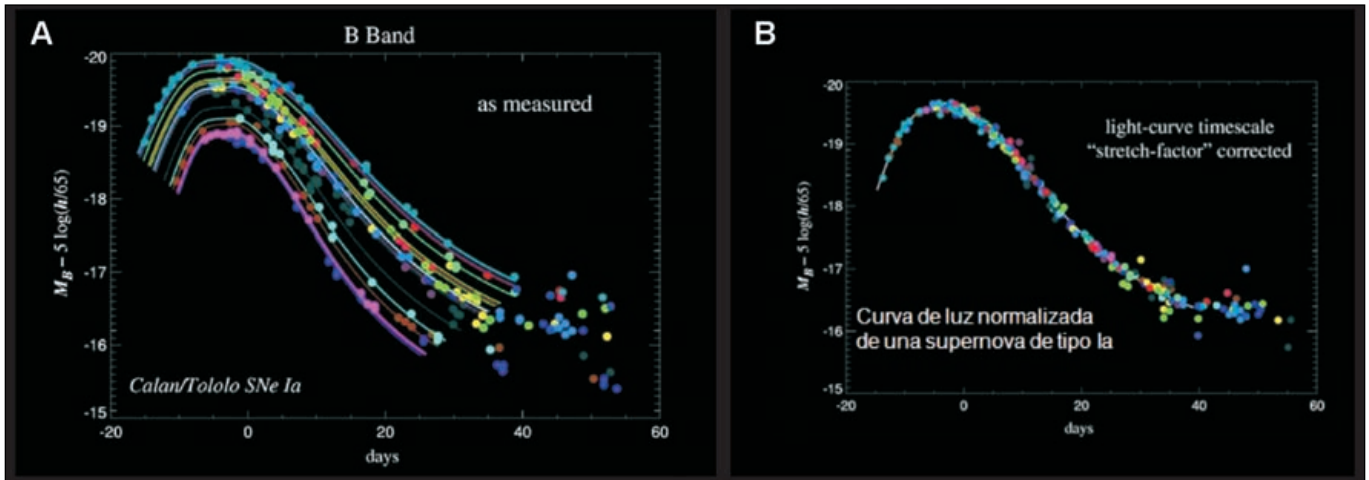


Figura 1. A) Curvas de luz de supernovas de tipo Ia. B) Curva de luz normalizada de supernovas de tipo Ia. La normalización se realiza a partir de una correlación entre el pico de la emisión y la anchura de la curva para distintas supernovas de tipo Ia.

embargo, si la enana blanca es rica en carbono y oxígeno las reacciones termonucleares dan lugar a una explosión violenta, debido a que la enana blanca permanece con aproximadamente el mismo tamaño sobre un gran rango de presiones. La enana blanca no sabe cómo expandirse para compensar el exceso de calor y presión por la combustión del carbono y, siendo su conducción térmica muy buena, mantiene todo el calor de las nuevas reacciones nucleares del carbono dentro de su pequeño volumen hasta la explosión final. Si una estrella enana blanca rica en carbono y oxígeno es parte de un sistema binario de pequeña separación con una compañera gigante roja, puede recibir masa de ésta hasta superar el límite de Chandrasekhar. Estos sistemas binarios son relativamente comunes. En la explosión, las partes de la enana blanca se expanden en el espacio circundante a velocidades que van en aumento desde el centro hasta el exterior, alcanzando velocidades de más de 20.000 km/s.

Las curvas de luz de las supernovas de tipo Ia no son todas iguales. Sin embargo, las curvas se pueden re-normalizar a una única forma patrón. Para la curva normalizada, la magnitud absoluta en el azul y en máximo es -19.6 ± 0.2 (equivalente a $10^{9.72}$ luminosidades solares). Esta re-normalización tiene gran importancia, pues permite utilizar las supernovas de tipo Ia como candelas estándar que se ven a grandes distancias en el universo. Precisamente su utilización reciente ha dado lugar a un descubrimiento sorprendente que volveremos a considerar al final de la conferencia: el universo se expande aceleradamente. Las

Figuras 1 a y b muestran las curvas de varias supernovas de tipo Ia, antes y después de normalizar, respectivamente.

Por otro lado, la teoría de evolución estelar está ya tan desarrollada como para poder concluir que las estrellas que en secuencia principal tienen una masa superior a aproximadamente 9 masas solares dan lugar a explosiones supernova (de tipo II o de los tipos relacionados Ib y Ic) por colapso de su núcleo. En el núcleo de estas estrellas masivas tienen lugar reacciones nucleares que sintetizan en sucesivas fases de la vida de la estrella elementos químicos cada vez más pesados y que eventualmente dan lugar a la formación de un *núcleo de hierro*. Llegado a un punto, las altísimas temperaturas del *núcleo de hierro* provocan una foto-desintegración del mismo y luego un colapso extremadamente rápido del caldo de protones y neutrones inicialmente resultante.

El colapso es homólogo en las partes interiores. A la distancia radial a la que la velocidad de colapso iguala la velocidad local del sonido hay un desacoplamiento entre la parte interior y la parte exterior, supersónica, en caída libre. Más hacia afuera, la estrella sigue sin enterarse de lo que está pasando en su interior, pues la transmisión de información mecánica se propaga a la velocidad del sonido. Así pues, la mayor parte de la estrella queda momentáneamente sin "cimientos" mientras el colapso homólogo de la parte interior del núcleo continúa hasta que la densidad excede ampliamente la densidad de un núcleo

atómico. En ese momento se tiene un gas de neutrones, un gas de Fermi, que se torna degenerado y que cesa en su compresión. Los detalles de lo que sucede en este momento no son muy conocidos, pero se supone que hay una especie de rebote de las partes más exteriores de la estrella de neutrones que se acaba de formar que provoca una onda en sentido contrario al material que está colapsando supersónicamente. Se forma una onda de choque que se desplaza en sentido radial, ayudada por la presión de los neutrinos que constituyen la mayor parte de la energía liberada en el colapso.

Cuando la onda de choque avanza en su camino, procesando todo el material intermedio y externo de la estrella, tiene lugar la explosión supernova con una energía cinética total de unos 10^{51} ergios. Para que la supernova sea tan brillante en el visible es necesario que la onda de choque alcance primero la superficie de la estrella progenitora (lo que hará en un día aproximadamente) y luego la supernova aumente hasta la distancia radial a la que la emisión es máxima. Eso tiene lugar en 10-15 días, para un radio de supernova de unos 10^{10} km y entonces se produce una luminosidad pico de 10^{10} luminosidades solares. Parece que las estrellas masivas de hasta 25 masas solares podrían dar lugar a una explosión supernova dejando como resto compacto una estrella de neutrones. Para estrellas todavía más masivas la presión de degeneración de los neutrones podría no ser suficiente para evitar el colapso y éste conduciría directamente a un agujero negro.



Figura 2. Resumen esquemático de parecidos y diferencias entre los dos tipos de explosiones supernova.

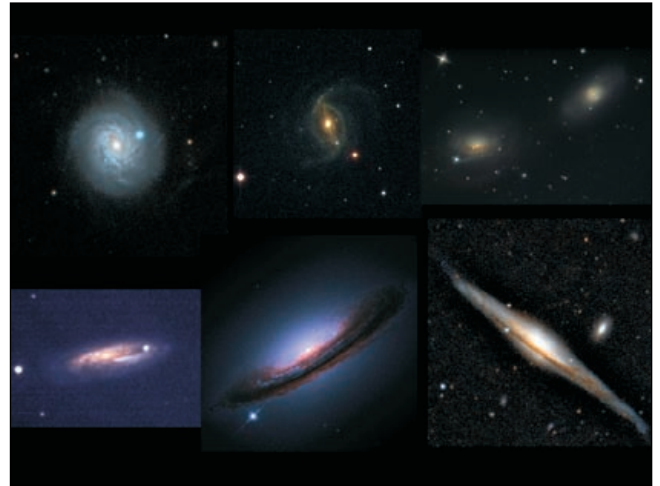


Figura 3. Supernovas en varias galaxias.

De este modo, estrellas enanas blancas y estrellas masivas, utilizando en su explosión mecanismos completamente distintos, y que quedan resumidos en la Figura 2, dan lugar a supernovas de parecida luminosidad y vida media en el visible. Durante los 40 días que dura la subida y bajada de la curva de luz, las supernovas brillan de modo comparable a las galaxias en las que tienen lugar, como se ilustra en la Figura 3.

¿Por qué son tan interesantes las supernovas? Se pueden aducir al menos cuatro razones:

- Son la fuente de todos los elementos químicos a partir del hidrógeno y del helio (y de trazas de otros elementos ligeros) primigenios
- Producen sistemas físicos extremos: estrellas de neutrones, agujeros negros...
- Regulan la formación de estrellas y sistemas planetarios
- Utilizándolas como candelas estándar, nos permiten indagar sobre el origen y el destino del universo.

Antes de considerar estas razones (que en la presentación oral fueron más extensamente tratadas) quisiera apuntar que, las supernovas han sido observadas históricamente al menos desde el año 393. Durante el último milenio se han conocido cinco supernovas en la Vía Láctea: SN1006, SN1054, SN1181, SN1572 y SN1604, todas ellas anteriores al uso del telescopio en astronomía. No son muchas ni

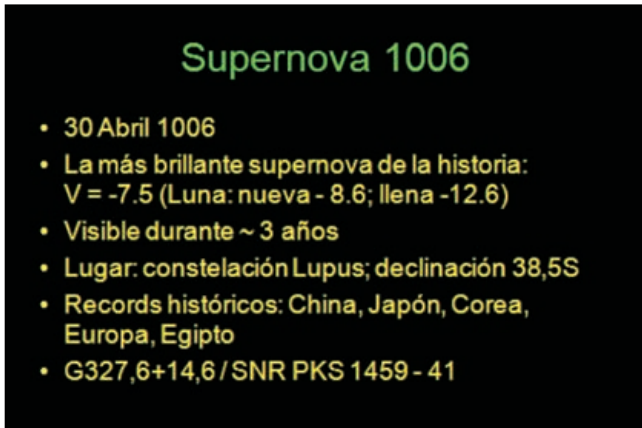


Figura 4. Características básicas de la SN1006.

muy uniformemente espaciadas. La más brillante de ellas fue la SN1006. La Figura 4 recoge el resumen de los detalles de esa supernova.

De las supernovas históricas tenemos sus restos, que se estudian a muchas longitudes de onda con instrumentos en tierra y en el espacio y de las que se muestra un montaje en la Figura 5. Las coloraciones llevan una codificación de la emisión a distintas longitudes de onda.

La SN1054, cuyos restos se conocen como M1 o nebulosa del Cangrejo, Figura 6, es una supernova importante bien documentada por los chinos. En el

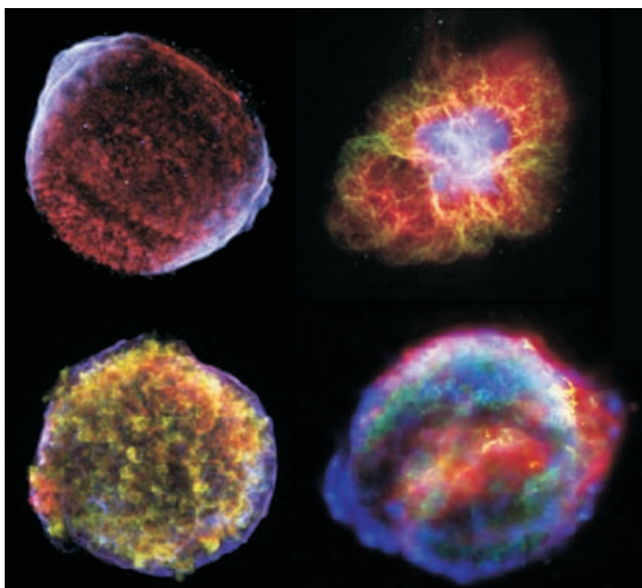


Figura 5. (De izquierda a derecha y de arriba abajo) Restos de supernova de SN1006, SN1054, SN1572 y SN1604.



Figura 6. Imagen de la nebulosa del Cangrejo en la que se muestran los filamentos de modo resaltado.

centro de la nebulosa se ha detectado un pulsar tanto el rango de radio como en el visible y rayos X. Este pulsar evidencia la formación de una estrella de neutrones magnetizada como consecuencia del colapso del núcleo de la estrella masiva progenitora que también dio lugar a los restos, a la nebulosa. El pulsar alimenta la expansión de la nebulosa M1. Se muestran en la Figura 7 una serie de imágenes que evidencian la emisión del pulsar en el visible y las velocidades de expansión de las distintas partes de la nebulosa.

Hay evidencia de que dos supernovas que debieron ser históricas pasaron inadvertidas quizás porque quedaron ocultas debido al polvo en el plano de la Galaxia: la correspondiente a la radio fuente Cas A, alrededor de 1680, y la denominada G1.9+0.3 por sus coordenadas galácticas, alrededor de 1860. En estos dos casos se ha podido determinar la fecha aproximada de la explosión a partir de la determinación del ritmo de crecimiento de sus restos de supernova.

En tiempos recientes ha habido dos supernovas relativamente cercanas y especiales: SN1987A en la Gran Nube de Magallanes a 51 Kpc (ver Figura 8) y SN1993J en la galaxia M81 a 3.6 Mpc. La relativamente pequeña distancia a la primera permitió por vez primera la detección de neutrinos en una supernova.

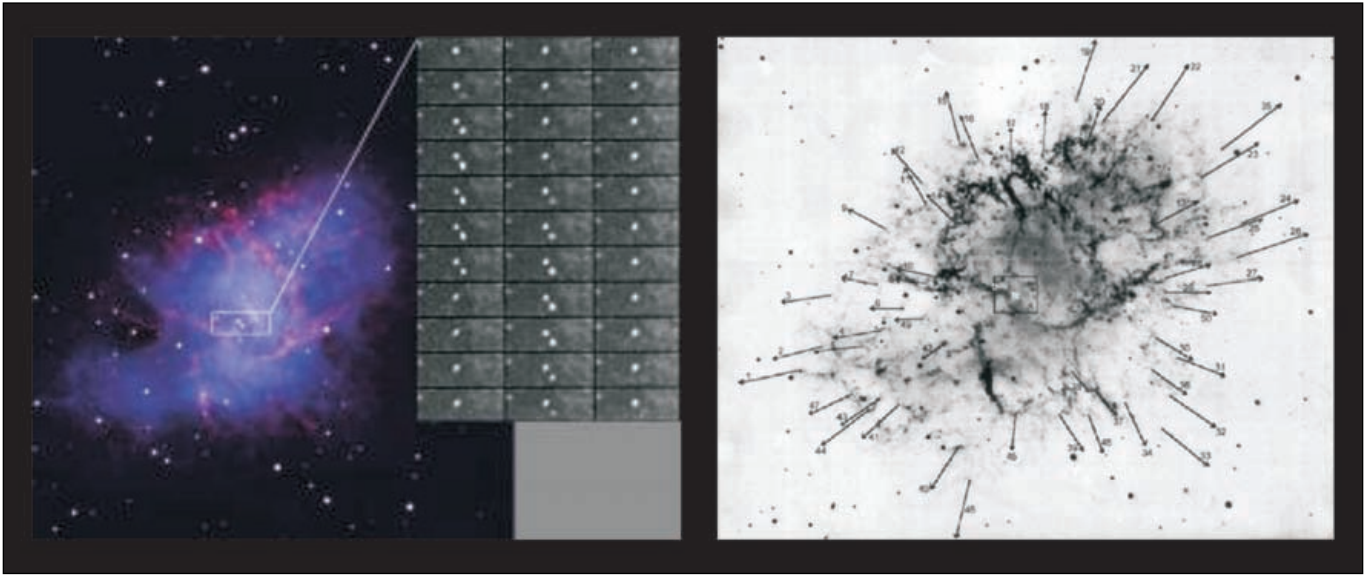


Figura 7. (Izquierda) Secuencia de imágenes que muestran al púlsar en M1 en el visible; (derecha) Vectores de velocidad de expansión de la nebulosa (típicamente a velocidades de alrededor de mil km/s).

También dio la sorpresa al mostrar un anillo brillante de material expulsado por la progenitora (gigante azul de viento estelar muy rápido) excitado por el fogonazo inicial y centrado entre otros dos anillos más tenues. La determinación de la velocidad del material estelar eyectado en la supernova permitió predecir el choque del material estelar con el material del anillo, predicción que se ha visto confirmada por la secuencia



Figura 8. Imágenes de la Gran Nube de Magallanes y del lugar de la explosión de la supernova SN1987A antes y después de la explosión.

de imágenes que se muestran en la Figura 9 y que muestra, sobre todo en el visible debido a su resolución angular, a lo largo del anillo un conjunto regular de puntos de emisión acentuada que indican zonas de mayor densidad en el material del anillo. La regularidad en la distribución azimutal de esas zonas de emisión es sorprendente.

La SN1993J explotó en la galaxia M81 (véase la Figura 10) y tuvo de progenitora una estrella gigante roja canónica. Presentó desde el principio emisión radio muy fuerte. Ello, unido a su ubicación en la constelación de la Osa Mayor a alta declinación, y a la existencia de una gran red de radio interferómetros intercontinentales (VLBI) en el hemisferio norte, permitió el estudio exhaustivo de la estructura y evolución de la región emisora de microondas. La Figura 11 muestra la estructura en forma de corteza que descubrimos con observaciones de interferometría intercontinental realizadas el día 239 tras la explosión.

Se pudo seguir en detalle su expansión durante años y determinar el ritmo de expansión e incluso cambios en ese ritmo de expansión como se muestra en la Figura 12. La Figura 13 muestra una secuencia bianual de la expansión. La película completa de la expansión durante más de una década se puede ver en <http://www.uv.es/radioastronomia/SN1993J-10yr-AA09.jpg>. Se trata esencialmente de una expansión

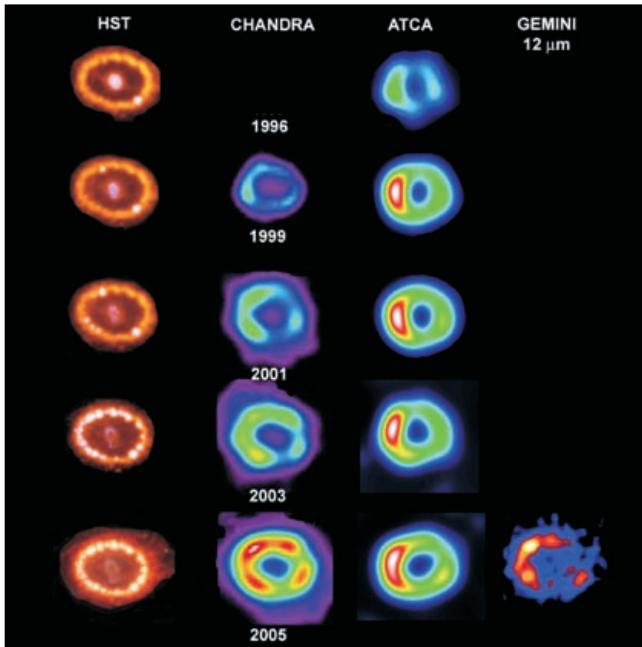


Figura 9. Secuencia de imágenes de la emisión del anillo de SN1987A en las bandas visible, rayos-X, radio e infrarrojo.

autosimilar (que no cambia su morfología con el tiempo salvo por un factor de escala que es una potencia del tiempo transcurrido desde la explosión) de una estructura de corteza esférica como la predicha por los modelos teóricos estándar.

También las supernovas SN1986J y SN2008D han sido estudiadas con alta resolución. En la primera se ha descubierto en su centro una componente de espectro



Figura 10. Imagen de la galaxia M81. En la parte derecha se muestra la parte relevante antes de la explosión (arriba) y después de la explosión de la SN1993J.

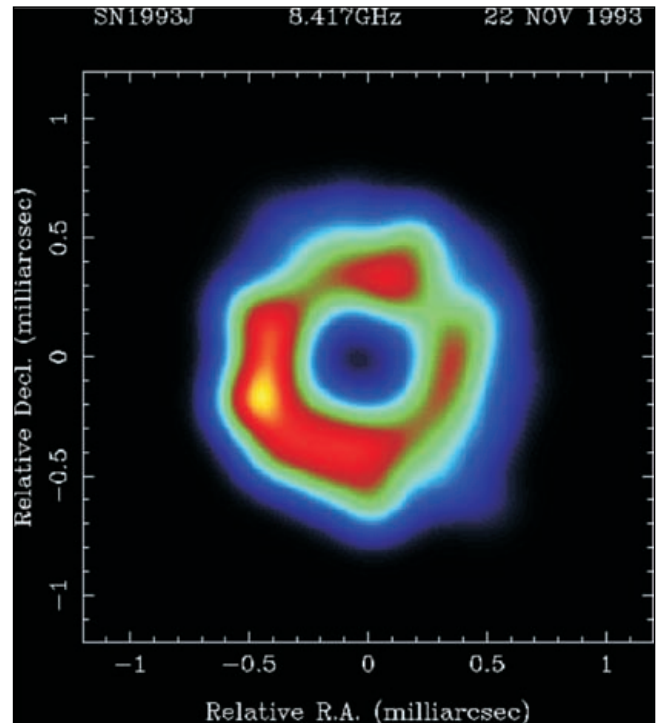


Figura 11. Imagen en falso color de la emisión radio de la supernova SN1993J, obtenida con observaciones de VLBI realizadas 239 días después de la explosión a la longitud de onda de 3.6cm, en la que se aprecia una emisión en forma de corteza (de un grosor estimado en 30% del radio externo de la corteza).

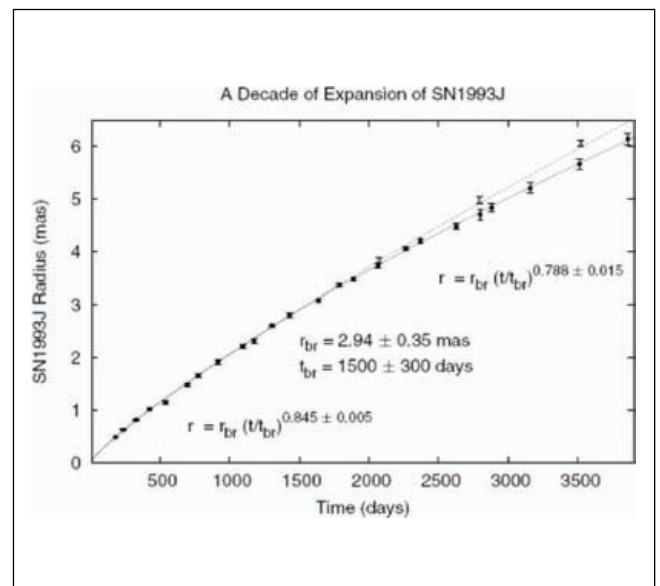


Figura 12. Expansión de la supernova SN1993J. La línea continua muestra los datos a longitudes de onda de 6cm y más cortas. La línea discontinua muestra la expansión a 18cm. La diferencia es debida a una combinación de efectos en la estructura de la radioemisión y de efectos de sensibilidad de los interferómetros.

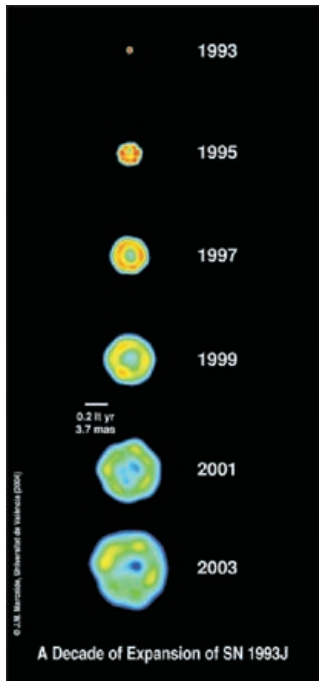


Figura 13. Imágenes en falso color de la emisión radio que muestran la expansión de SN1993J durante una década.

plano que sugiere que puede estar relacionada no con el resto externo de supernova sino al objeto compacto resultante del colapso. En la segunda, que se descubrió por azar en la galaxia NGC2770 (a 80 millones de años-luz) mientras se observaba en rayos X la

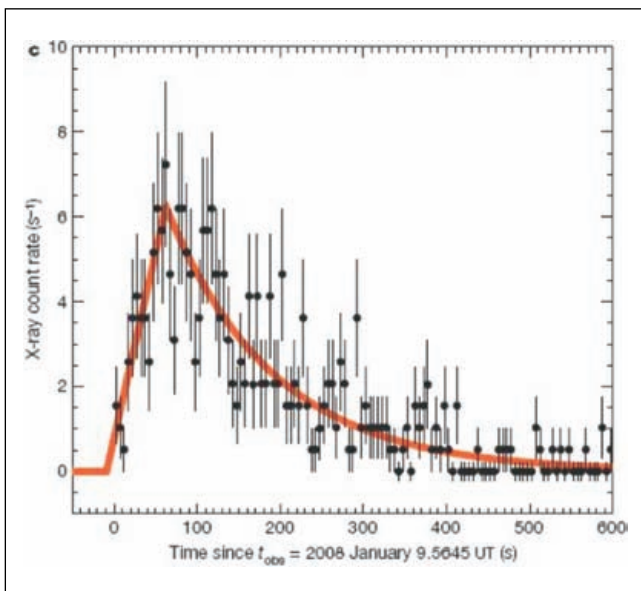


Figura 14. Emisión de rayos-X producida cuando la onda de choque generada en la explosión supernova SN2008D alcanza la superficie de la estrella progenitora.

supernova SN2007uy, también en la misma galaxia, se detectó por vez primera la emisión de rayos X resultante del momento en que la onda de choque llega a la superficie de la estrella progenitora. Véase Figura 14. No daremos aquí más detalles.

ESTALLIDOS DE RAYOS GAMMA (GRB)

El estallido de rayos gamma recibe este nombre por razones históricas y porque su energía se emite principalmente por encima de los 25 Kev. Durante 25 años, tras el anuncio de su descubrimiento en 1973, se creyó que se trataba de alguna emisión de origen galáctico, relativamente débil y supuestamente asociada a estrellas de neutrones, y su estudio no pasó de ser poco más que una curiosidad. La evidencia de su distribución isotrópica y las detecciones de contrapartidas ópticas en varias galaxias distantes cambiaron por completo la percepción. Hoy sabemos que los GRBs son las explosiones cósmicas más brillantes del universo. Se han detectado GRBs a las mayores distancias cosmológicas. Un GRB puede durar entre 0,01 y 1.000s, con una distribución bimodal: alrededor de 0,1s (tipo corto, 25%, SGRB) y alrededor de 20s (tipo largo, 75%, LGRB), tomándose 2s como la frontera de los tipos.

En muchos de los LGRB se ha detectado emisión posterior, conocida como *afterglow*, que aparece sucesivamente en rayos-X, óptico y radio con duraciones de horas, semanas y meses, respectivamente. Se ha podido determinar que la radio emisión es debida a material ultra-relativista colimado en un chorro de unos pocos grados de apertura, que según va avanzando sobre el material estelar se va haciendo menos relativista y menos colimado. Con ésta, y otra información similar en el óptico, emerge el siguiente cuadro conceptual: el LGRB se forma en el colapso de estrellas muy masivas en rotación. Cuando el núcleo colapsa hacia un agujero negro rodeado de un campo magnético fuerte, la energía sale muy colimada en las direcciones polares. Esta energía se invierte en acelerar capas estelares a velocidades ultra-relativistas. Cuando estas capas colisionan entre ellas dan lugar a choques internos que aceleran los electrones y emiten rayos gamma primero y luego radiación de menor energía. Eventualmente, el material chocado se va haciendo menos relativista y llega a interactuar con

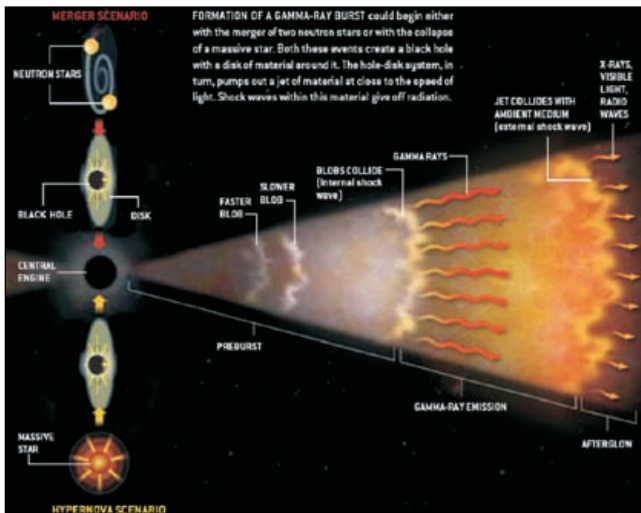


Figura 15. Esquema de la formación del GRB a partir de colapso de estrellas masivas en rotación o de estrellas de neutrones en órbita que dan lugar a un agujero negro con un disco de acrecimiento en rotación, que a su vez da lugar a un chorro relativista en el que se producen ondas de choque que emiten rayos gamma primero y radiación visible y radio luego.

el viento estelar o el medio interestelar, dando lugar a choques externos. La Figura 15 muestra un esquema.

La descripción anterior recuerda a las explosiones supernovas, excepto por las velocidades ultra-relativistas iniciales y la colimación del movimiento y de la emisión. En vez de una explosión hidrodinámica como en las supernovas, se tiene una explosión alimentada por una “máquina” central (un agujero negro) rodeada de un disco de acrecimiento del que extrae la energía¹. La emisión en haces estrechos tiene una ventaja añadida: traslada unos estimados de energías (isotrópicas) inaceptablemente grandes (10^{53-54} ergios) para explosiones estelares a energías (en haces estrechos) más aceptables: 10^{51} ergios. También, ello mismo indica que los LGRB son mucho más habituales, ya que los estaríamos viendo sólo en las orientaciones favorables. Las detecciones actuales y esta interpretación implicarían una frecuencia de LGRB de unos mil LGRBs por día en todo el universo. Hay evidencia que apunta a que los LGRB podrían ser explosiones de estrellas de poca metalicidad y muy masivas en las que, debido al colapso, se formaría un agujero negro en rotación alimentándose de un disco de acreci-

miento, dando lugar a un chorro muy relativista que sólo en los casos de no tener una excesiva envoltura de hidrógeno y helio conseguiría abrirse camino hasta la superficie a velocidades relativistas.

Por otro lado, la asociación de los SGRB con galaxias elípticas favorecería una interpretación de coalescencia (*merger*) de binarias de estrellas de neutrones o agujeros negros. El tiempo característico para la coalescencia sería 10^8 - 10^9 años y las energías involucradas en la emisión colimada serían de un orden de magnitud menor que en los LGRB, como se observa. Una predicción de esta hipótesis es que los SGRB deberían estar asociados a emisores de ondas gravitatorias.

LAS EXPLOSIONES CÓSMICAS COMO HERRAMIENTAS ASTRONÓMICAS

Comentaremos dos usos destacados de las explosiones cósmicas. En el primero se utilizan las supernovas de tipo Ia como candelas estándar para estudiar distancias en el universo y determinar el ritmo de expansión de él. Es un trabajo muy elaborado que consiste en descubrir las supernovas en galaxias muy lejanas y medir su curva de luz para poder determinar la distancia fotométrica. Al comparar esa distancia fotométrica con la distancia determinada por el corrimiento al rojo se descubrió en 1998 que el universo se expande aceleradamente. Las supernovas distantes son menos brillantes que si la expansión fuera constante o desacelerada. Actualmente, se interpreta esta aceleración como debida a una energía oscura de repulsión que vence a la de atracción gravitatoria a partir de un momento en la expansión del universo. En la Figura 16 se muestran los resultados. El modelo del universo acelerado se ha visto confirmado indirectamente por resultados obtenidos por otros medios, como el estudio de las anisotropías del fondo de microondas por WMAP.

En el segundo, los estallidos de rayos gamma se utilizan para explorar el universo más lejano. Estos

¹ Las velocidades ultra-relativistas, el movimiento y emisión en haces estrechos, y un agujero negro en rotación alimentando todo ello resultará familiar a quienes estén acostumbrados a los conceptos utilizados en la generación de los chorros en núcleos activos de galaxias y cuásares.

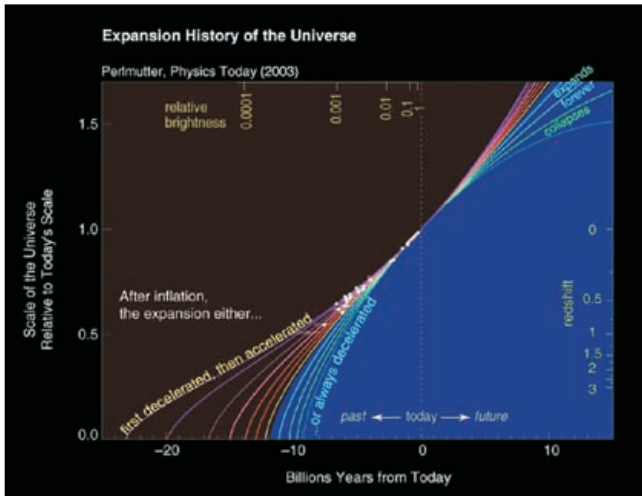


Figura 16. Evidencia de expansión acelerada del universo basada en la determinación de distancias utilizando las supernovas de tipo Ia como candelas estándar.

estallidos, sobre todo los de duración más larga, LGRBs, son los más brillantes del universo y, por tanto, podríamos verlos desde los confines del universo y extender estos confines. En este momento el objeto conocido más lejano del universo es un GRB de corrimiento al rojo $z=8.2$. Al parecer, y por la evidencia disponible, los LGRBs tienen lugar con cierta preferencia en estrellas muy masivas de poca metalicidad. De ser así, deberían producirse LGRB a partir de las estrellas masivas de población III que dieron lugar a la reionización detectada por WMAP a corrimientos al rojo entre 10-20 y que podría confirmar el observatorio espacial PLANCK. El estudio espectral de los objetos LGRBs con estrellas progenitoras en esa inicial población III podría servir para proporcionarnos información preciosa sobre las progenitoras de baja metalicidad y sobre el contenido del universo en las líneas de visión a los GRBs de modo similar a lo

que los QSOs han proporcionado para regiones más cercanas.

CONCLUSIONES

Las explosiones cósmicas, supernovas y estallidos de rayos gamma, son los eventos más energéticos y brillantes conocidos en el Universo, y liberan al menos 10^{51} ergios en cada explosión. En el último milenio hemos conocido sólo una media docena larga de supernovas en nuestra propia galaxia, la Vía Láctea. Actualmente, con telescopios robóticos y sobre todo desde el lanzamiento del observatorio *Swift*, el ritmo de detección de supernovas y GRB es de 2-3 por día, lo que da una medida de la eficiencia observacional y del inmenso tamaño del Universo. En algunos casos los GRBs se han podido asociar a supernovas, pero la relación entre los dos tipos de explosiones cósmicas no está del todo clara. Muy pocas explosiones cósmicas se pueden estudiar con gran resolución angular. Las supernovas SN1987A y SN1993J, relativamente cercanas, han sido estudiadas con todo lujo de detalles. Todas estas explosiones suponen la muerte de estrellas, a menudo dando lugar a agujeros negros. Cuando son supernovas de tipo Ia no dan lugar a agujeros negros, pero sirven para calibrar las distancias en el universo, hasta el punto de mostrar que está en expansión acelerada. Los estallidos de rayos gamma tienen la promesa de extender los confines del universo ya que son los eventos más brillantes y se pueden observar a distancias inmensas. En este momento el universo explorado llega hasta el corrimiento al rojo $z=8.2$. Se confía en extender esa frontera y entender lo que pudo suceder en la época previa a la de reionización.