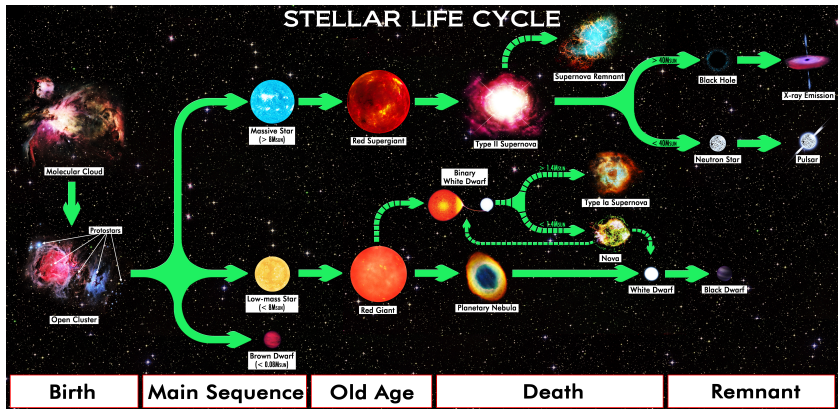




Tipos de SN

La clasificación es observacional y se basa en el espectro óptico al momento de la explosión:

- ▶ **Tipo I:** no presentan líneas de hidrógeno.
 - ▶ **Ia:** explosión termonuclear de una enana blanca en un sistema binario al alcanzar el límite de Chandrasekhar ($\sim 1,4 M_{\odot}$).
 - ▶ No deja remanente compacto.
 - ▶ Ocurre en ambientes poco densos, sin vientos previos.
 - ▶ **Ib:** colapso de una estrella masiva sin envoltura de hidrógeno, pero con helio.
 - ▶ **Ic:** colapso de una estrella masiva sin hidrógeno ni helio.

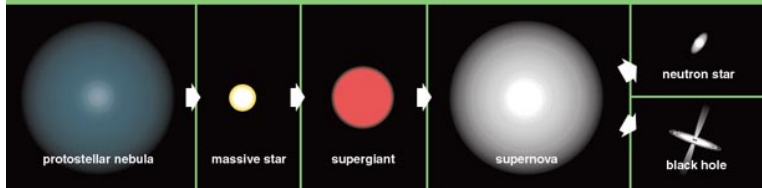
Las supernovas Ib/Ic son el resultado de la pérdida de las envolturas externas de estrellas masivas, ya sea por vientos estelares o por interacción binaria.

- ▶ **Tipo II:** presentan líneas de hidrógeno. Colapso de estrellas masivas que conservaron su envoltura.
 - ▶ **II-P:** curva de luz con meseta.
 - ▶ **II-L:** curva de luz con declive lineal.
 - ▶ **IIn:** líneas estrechas de emisión, por interacción con material circumestelar denso.

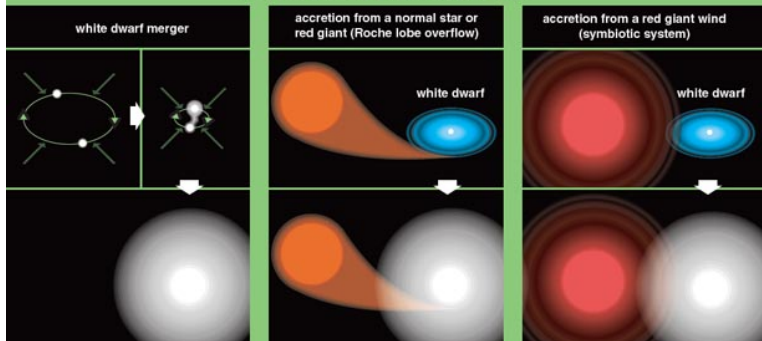
- ▶ **Tipo Ia:** explosión termonuclear de una enana blanca en un sistema binario. La enana blanca acumula masa de su compañera hasta acercarse al límite de Chandrasekhar ($1.4M_{\odot}$). La estrella se destruye por completo, sin dejar remanente compacto.
- ▶ **Tipo II:** colapso del núcleo de una estrella masiva. El núcleo colapsa y forma una estrella de neutrones o un agujero negro, dependiendo de la masa remanente.
- ▶ **Tipo Ib/c:** colapso del núcleo de una estrella masiva que ha perdido su envoltura externa (de hidrógeno y, en el caso de las Ic, también de helio). El resultado también puede ser una estrella de neutrones o un agujero negro.

Algunas remanentes de supernovas tipo II y Ib/c pueden contener una **estrella de neutrones altamente magnetizada y en rápida rotación** que sigue inyectando energía al medio circundante. Estas regiones brillantes en radio y rayos X se conocen como **pleriones** o **nebulosas de viento de púlsar**.

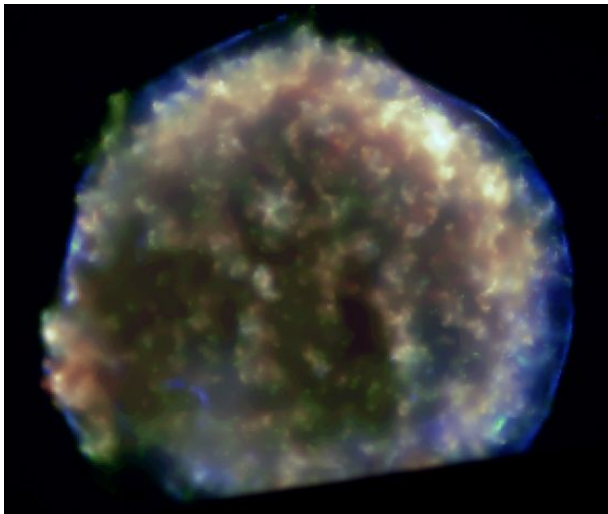
core collapse of a massive star into a Type II supernova



proposed Type Ia supernova progenitors



Tycho, SN tipo Ia



X-Rays From Tycho's Supernova Remnant Credit: SAO, CXC, NASA

Tipo II: La nebulosa del cangrejo

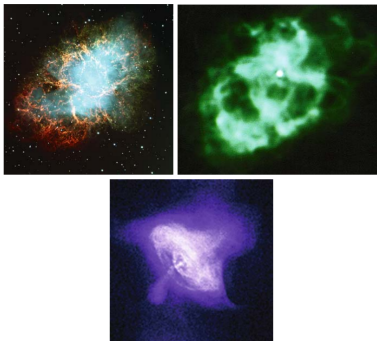


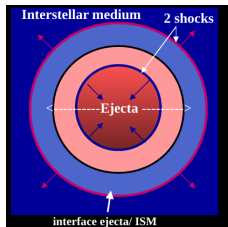
Plate 25. The Crab Nebula in the visible, radio and X-rays

The Crab nebula M 1 is the remnant of the explosion of a supernova which occurred in 1054. It is a typical example of a plerion, continuously supplied by relativistic particles from a central pulsar. Top left, a visible image obtained with one of the 8-m units of the Very Large Telescope of the European Southern Observatory (dimensions $6.8' \times 6.8'$, or 4×4 pc at the distance of the nebula, 2 kpc). It results from the combination of images in the B (blue) and R (green) bands and in the [SII] $\lambda 6716, 6731$ lines (red). The filaments are remnants of the matter ejected during the explosion; they form a rapidly expanding shell. The diffuse blue light is due to the synchrotron emission from relativistic electrons accelerated by the pulsar, interacting with the local magnetic field. Top right, a radio image obtained with the Very Large Array (size $4.7' \times 5.5'$). It shows the pulsar and the synchrotron emission, which has a similar morphology to the diffuse visible emission. There is a rather close relation between this morphology and that of the filaments, probably because the magnetic field is more intense in the filaments. Bottom, an X-ray image obtained with the CHANDRA satellite (size $2.5' \times 2.5'$). It shows the central pulsar and the synchrotron emission from very high-energy electrons, the morphology is different from that of the visible and radio emissions which are due to lower-energy electrons. Note the jets emitted more or less symmetrically by the pulsar. (Documents ESO Education and Public Relations Department, National Radio Astronomy Observatory and NASA/Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)

Evolución de un RSN en el MIE

► Esta interacción puede dividirse en 3 etapas:

1. **Fase inicial:** la masa de la eyecta $\gg$ masa barrida $\rightarrow$ el MIE tiene poco efecto. Expansión libre.
2. **Fase adiabática:** Masa barrida de MIE suficiente para bajar la velocidad de la expansión pero aún es elevada $\rightarrow$ el gas chocado no tiene tiempo de enfriarse.
3. **Fase radiativa:** La velocidad sigue bajando, las pérdidas radiativas se hacen importantes. Choque radiativo isotérmico. Cuando las presiones del RSN y el MIE se igualan $\rightarrow$ el RSN se mezcla/pierde en el MIE.



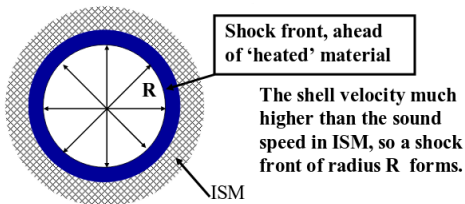
FASE INICIAL

► EXPANSIÓN LIBRE:

- Fase dominada por las CARACTERÍSTICAS DE LA EXPLOSIÓN
- Velocidad de expansión muy rápida.
- termina cuando la masa barrida es igual a la masa eyectada

$$M_{sn} = \frac{4\pi}{3} \rho_o R_1^3 \implies R_1 = \left(\frac{3M_{sn}}{4\pi\rho_o} \right)^{1/3}$$

- Ejemplo: $M_{sn} = 0,25 M_{\odot}$, $\rho_o = 2 \times 10^{-24} \text{ g cm}^{-3}$
 $\implies R_1 = 1,3 \text{ pc}$ y $t = 60 \text{ años}$ si $V_{ey} = 20000 \text{ km/s}$



- ▶ Por conservación de momento, la velocidad del choque disminuye

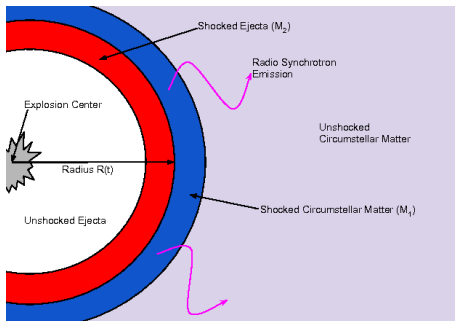
$$M_{sn} V_{ey} = (M_{sn} + \frac{4}{3}\pi\rho_0 R^3)v$$

mientras la masa barrida « M_{sn} la velocidad del choque es cte
y $R(t) \sim V_{ey} t$

- ▶ se genera un choque reverso que termaliza y calienta la masa eyectada
- ▶ La emisión de líneas en el visible en RSN jóvenes se producen en gran medida en este choque. Después del paso del choque inverso el remanente entra en la fase adiabática.

FASE ADIABATICA: Fase Sedov-Taylor

- ▶ el gas caliente se expande debido a su alta presión.
- ▶ Dura hasta que la $v_s \sim 250$ km/s, correspondiente a una $T \sim 10^6$ K
- ▶ Antes de eso, el enfriamiento es ineficiente porque los átomos están ionizados
- ▶ durante esta fase la masa barrida acumulada va a hacer que la velocidad de expansión disminuya, pero la energía se conserva.



FASE ADIABATICA

Para un choque adiabático, tenemos:

- ▶ $\rho_1/\rho_0 = 4$
- ▶ $P_1 = \frac{3}{4}\rho_0 v_s^2$
- ▶ $u_1 = \frac{3}{4}v_s$
- ▶ $T_1 = \frac{3\mu m_H}{16k} v_s^2$
- ▶ En un gas ideal la energía interna $e_I = \frac{P}{(\gamma-1)}$
- ▶ $\gamma = 5/3$ gas adiabático $\rightarrow e_I = \frac{3}{2}P$
- ▶ Entonces, las densidades de energía del gas chocado:
 - ▶ $e_k = \frac{1}{2}\rho_1 u_1^2 = \frac{9}{8}\rho_0 v_s^2$
 - ▶ $e_I = \frac{3}{2}P_1 = \frac{9}{8}\rho_0 v_s^2$
- ▶ **Conservación de energía:** $E_T = E_k + E_I = E_{sn}$

$$\Rightarrow E_T = \frac{4}{3}\pi R^3(e_k + e_I) = 3\pi\rho_0 R^3 v_s^2 \Rightarrow R^3 v_s^2 = \frac{E_{sn}}{3\pi\rho_0}$$

Expansion adiabática

$$R^3 v_s^2 = \frac{E_{sn}}{3\pi\rho_0}$$

Integrando:

$$R_2(t) \sim 1,26 \left(\frac{E_{sn}}{\rho_0} \right)^{1/5} t^{2/5}$$

y

$$v_2(t) \sim 0,5 \left(\frac{E_{sn}}{\rho_0} \right)^{1/5} t^{-3/5}$$

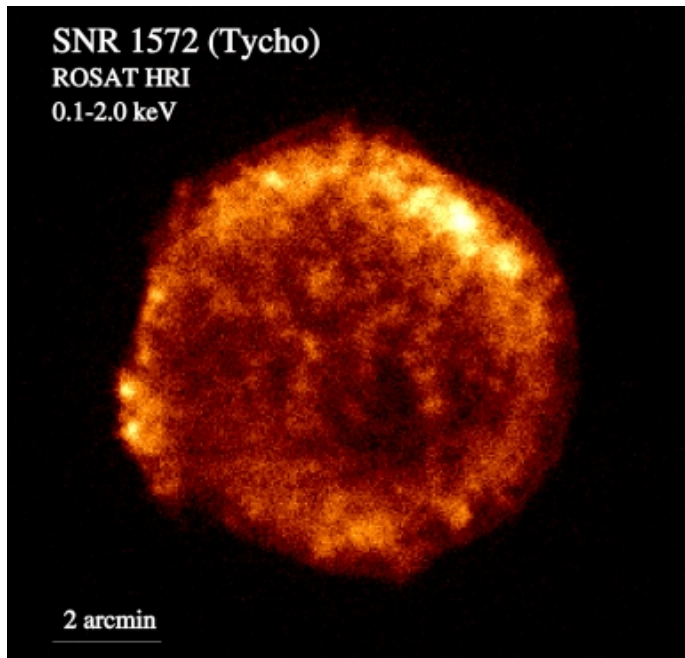
Teníamos, para un frente de choque adiabático:

$$T = \frac{3\mu m_H}{16k} v_s^2$$

Entonces, al pasar el tiempo la temperatura disminuye $\longrightarrow$ pérdidas radiativas dejan de ser despreciables.

Esta fase termina cuando $T \sim 10^6$ K o $v_s \sim 250$ km/s

Emisión en X



Fase de expansión radiativa

- ▶ Cuando la temperatura baja de 10^6 K las pérdidas radiativas comienzan a ser importantes
- ▶ choque radiativo
- ▶ Aún hay diferencia de presiones $\rightarrow$ el RSN se expande
- ▶ la energía NO se conserva
- ▶ se forma una cáscara fina de gas barrido
- ▶ radiación por excitación colisional de [OIII], cáscara visible en el óptico
- ▶ Diferencia con BI:
 - ▶ el gas barrido en la BI era MIE, acá puede ser en parte, pero es también el viento estelar
 - ▶ no hay fuente de radiación $\rightarrow$ la temperatura baja más $\rightarrow$ el gas puede recombinarse y formar HI

Expansión radiativa (barredora de nieve)

- ▶ Se conserva el momento

$$cte = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_o v$$

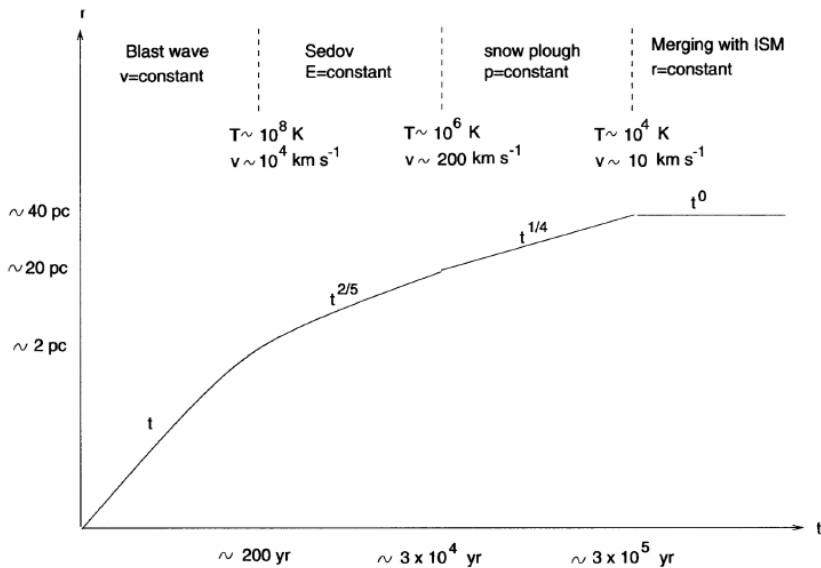
Al comienzo de esta fase: $t_2, R_2, v_2 \longrightarrow cte = \frac{4}{3}\pi R_2^3 \rho_o v_2$

- ▶ Integrando:

$$R_3(t) = R_2 \left[1 + 4 \frac{v_2}{R_2} (t - t_2) \right]^{1/4}$$

$$v_3(t) = v_2 \left[1 + 4 \frac{v_2}{R_2} (t - t_2) \right]^{-3/4}$$

- ▶ el radio aumenta más lento y la velocidad disminuye más rápido que en la fase adiabática
- ▶ la fase termina cuando $v_3 \sim 5 - 10$ km/s, movimientos turbulentos del MIE



Modelo simple: puede ser inadecuado:

- ▶ MIE no uniforme
- ▶ Las fases pueden ser muy breves
- ▶ Si la densidad es alta se puede pasar directo de expansión libre a fase isotérmica
- ▶ distintas fases pueden estar pasando simultáneamente en distintas partes del RSN si el MIE es grumoso
- ▶ nubecitas densas en el interior se evaporan → contribuyen en masa en el interior
- ▶ la explosión puede ocurrir adentro de una BI → tamaño del RSN no está relacionado con la edad

MORFOLOGIA

- ▶ En base a su morfología se los ha dividido en 3 clases diferentes:
 - ▶ **Cáscara:** 85 % de los RSN. Cáscaras incompletas y con apartamientos de simetría esférica. En la banda de radio, estos remanentes presentan un índice espectral $\alpha \sim -0,55$ y un grado de polarización $\sim 5\%$.
 - ▶ **Centro Lleno (pleriones):** 5 %. Presentan emisión brillante en la región central y ausencia de cáscara. La emisión se debe a la estrella de neutrones creada en la explosión de supernova: nebulosa del pulsar. En la banda de radio presentan un espectro chato (-0.3 a 0) y un alto porcentaje de emisión polarizada ($20 - 30\%$).
 - ▶ **Compuestos:** Este grupo está formado por los RSNs que presentan tanto la cáscara como la componente pleriónica, no sólo en radio sino también en rayos X

MORFOLOGIA

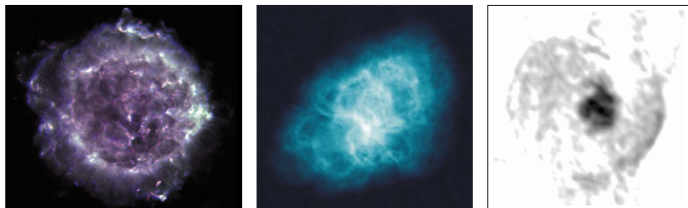
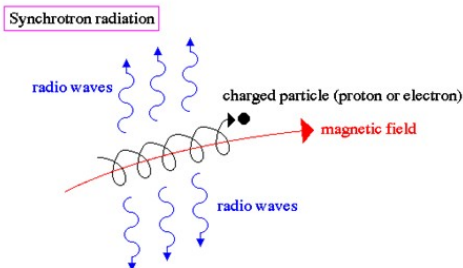


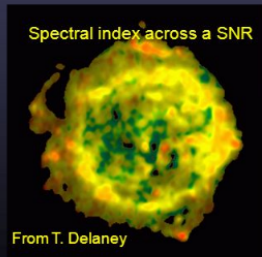
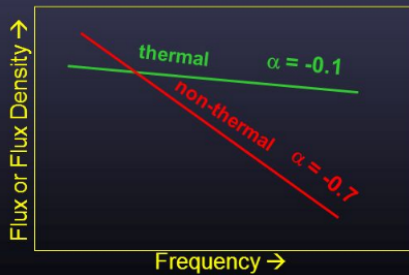
Figura 2.8: Imágenes en la banda de radio del RSN de tipo cáscara Cas A (*izquierda*, créditos: NRAO/AUI), la Nebulosa del Cangrejo, el prototipo de RSN de centro lleno (*centro*, créditos: NRAO/AUI y M. Bietenholz) y el RSN de tipo compuesto G0.9+0.1 (*derecha*, créditos: Dubner et al. (2008)).

Emisión en radio

- ▶ Choques muy potentes → Aceleración muy eficiente de electrones a energías relativistas → Interacción con campos magnéticos fuertemente amplificados por el choque → Fuerte emisión de radiación sincrotrón en un amplio rango de energías (radio a rayos X/gamma).
- ▶ la mayoría de los RSN fueron detectados en radio.
<https://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/snrs/>
- ▶ la morfología e intensidad de cada RSN da información sobre su origen y evolución



- Spectral index α , where $S_\nu \sim \nu^\alpha$



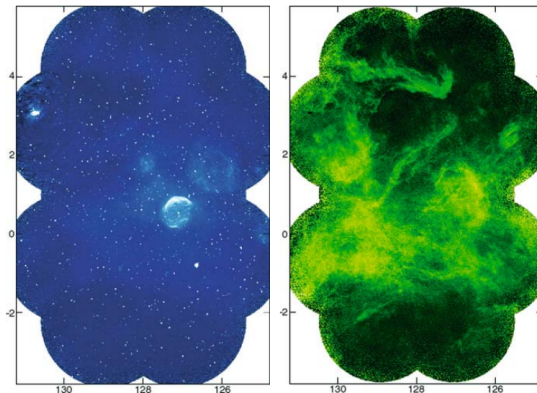


Plate 4.

A region of the Perseus arm in the radio continuum at 21 cm and in the 21-cm line

These maps were obtained as a part of the Canadian Galactic Plane Survey made with the interferometer and the 26-m radiotelescope of the Dominion Radio Astrophysical Observatory at Penticton (B.C, Canada). The angular resolution is $1'$. Abcissae are galactic longitudes and ordinates galactic latitudes. The map to the left, in the 21-cm continuum, is dominated by the synchrotron radiation of three supernova remnants: SNR G130.7+3.1 = 3C 58 (top left), whose strong emission produces circular artefacts, SNR G127.1+0.5 = R 5 (to the right of the centre), and SNR G126.2+1.6, weaker and more extended. The distances to these objects are very uncertain. The objects with smaller angular diameters throughout the map are extragalactic. The map to the right is made in the 21 cm line, at a radial velocity of $-35,3 \text{ km s}^{-1}$ relative to the LSR which corresponds to the Perseus arm. Note the filamentary structure of the gas. A cloud can be seen in the direction of SNR G127.1+0.5 and could be associated if this supernova remnant is in the Perseus arm. Absorption in front of 3C 58 is conspicuous (small dark dot), showing that this supernova remnant is located inside or behind the Perseus arm. (CGPS document, courtesy J. English & R. Taylor)

Emisión en el IR

- ▶ Los SNRs suelen ser brillantes en el IR: emisión del polvo tibio (calentado por choques) en el continuo y líneas de moléculas (H_2 x ej) y de elementos ionizados
- ▶ La eyecta enriquece el MIE con productos ricos en metales como silicio, hierro, oxígeno y magnesio → elementos encontrados en el polvo → sugiere que los granos se pueden haber formado en el gas eyectado que se expande y se enfría
- ▶ Pero a la vez, los SNR pueden modificar y destruir granos: el choque eleva mucho la temperatura del gas, emite en X → colisiona con el polvo embebido en el MIE y eleva su temperatura a algunos cientos de grados. También lo modifica y lo destruye. Incluso los granos recién formados en la eyecta pueden ser destruidos por el choque inverso
- ▶ → puede pasar que al final la SN destruya más polvo del que produce

- ▶ SNR $\rightarrow$ emiten emisión térmica (continuo y líneas) y raramente no térmica (sincrotrón) en el IR
- ▶ Cual emisión domina depende del estado evolutivo del SNR:
 - ▶ en gral, los SNR en estado evolutivo avanzado (ya sea por su edad o porque el MIE es denso): dominan las líneas de emisión atómicas y moleculares del gas. La temperatura ya bajó lo suficiente y entonces hay procesos de recombinación $\rightarrow$ Fe, O, Si y Ne dominan el espectro. En el gas molecular chocado, el enfriamiento de H_2 predomina. Estos SNR también son brillantes en el óptico (choques radiativos).
 - ▶ SNR jóvenes $\rightarrow$ los choques son aún no-radiativos. Temperatura elevada, emisión en X. No hay recombinación $\rightarrow$ emiten poco en el óptico pero pueden ser brillantes en el continuo del IR, debido al polvo tibio calentado por colisiones con partículas energéticas en la zona post-choque. En algunos SNR jóvenes, esta es la única fuente de emisión en el IR.
 - ▶ muchos SNR presentan emisión en el continuo y líneas, aunque el origen de las mismas puede venir de distintas partes del mismo, por ejemplo: Kepler

Continuo originado por el choque fuerte no-radiativo y las líneas en los choques más lentos, radiativos.

Correlación entre X e IR porque el polvo es calentado por colisión con los electrones e iones responsables de la emisión en X

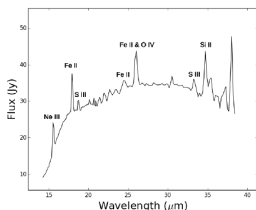


Fig. 1. *Spitzer* mid-IR spectrum of Kepler's SNR. The continuum results from warm dust at ~ 100 K. Several emission lines from low-ionization state ions are visible.

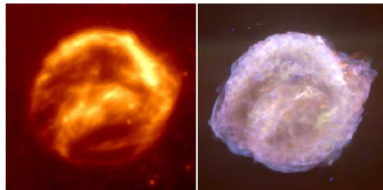


Fig. 2. *Left*: *Spitzer* 24 μm image of Kepler's SNR (PI: W.P. Blair). *Right*: *Chandra* 3-color mosaic (PI: S.P. Reynolds), with 0.3-0.72 keV emission in red, 0.72-1.7 keV emission in green, and 1.7-7.0 keV emission in blue. The morphological connections between the two wavebands are obvious; see the text for details. The image is approximately $5'$ on a side.

- ▶ En los SNR más jóvenes (como Kepler) los granos llegan a temperaturas de 50-200 K $\rightarrow$ emiten mayormente entre los 20-50 μm
- ▶ en SNR más viejos el polvo está más frío, entre 20-50 K $\rightarrow$ emiten mayormente en el IR lejano

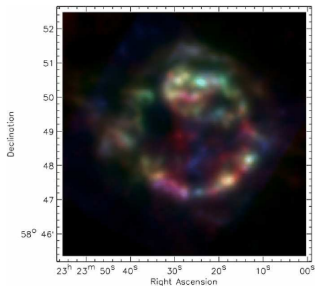


Fig. 4 A three-color image of Cas A (from Arendt et al. 2014), showing the dust continuum emission at 11.8 μm in blue, 20.8 μm in green, and 70 μm in red. The various colors seen in the image reflect the spatial distribution of distinct species of dust that condensed in different layers of the SN ejecta.

The warm component arises from dust in the ISM heated by the forward shock, but the cold component, with a measured mass of 0.075 M_{sun} , is attributed to dust formed in the ejecta. However, this cold dust is located interior to and has not yet encountered the reverse shock, so the amount that will ultimately survive is still unknown

Cassiopeia A

Radio
(VLA)

Infrared
(Spitzer)



Optical
(Hubble)

X-ray
(Chandra)

chandra.harvard.edu/photo/0237/0237_radio.jpg

NASA/ESA/
Hubble Heritage
(STScI/AURA))

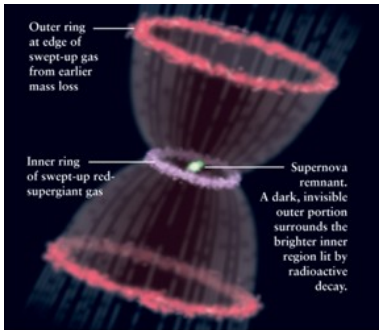
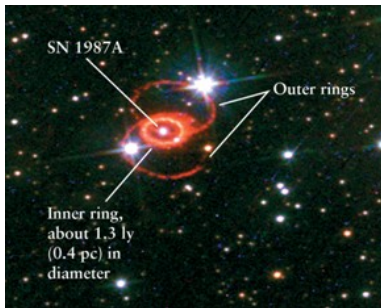
NASA/CXC/MIT/UMass
Amherst/
M.D.Stage et al.

NASA/JPL-Caltech/
O Krause(Steward Obs)

The Mysterious Rings of Supernova 1987A (LMC)

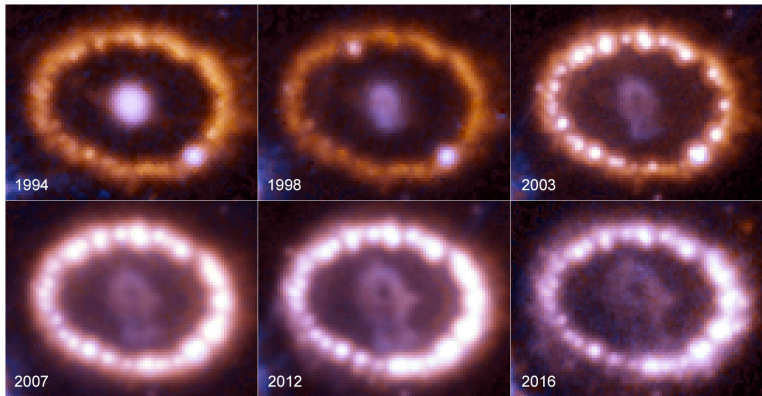
Credit: (ESA/ STScI), HST, NASA





b) An explanation of the rings

Anillos Misteriosos: El Hubble reveló una estructura de tres anillos alrededor de la supernova. El anillo brillante interior preexistía a la explosión, formado por material expulsado por la estrella progenitora en sus últimas etapas de vida. La onda de choque de la supernova interactuó con este anillo, haciéndolo brillar intensamente. Los anillos exteriores también existían antes de la explosión. El origen exacto de esta estructura sigue siendo objeto de investigación.



By observing the expanding remnant material over the years, Hubble has helped to show that the material within the ring was likely ejected 20 000 years before the actual explosion took place.

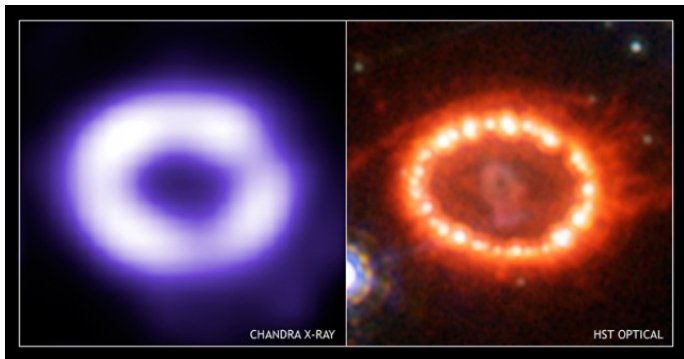
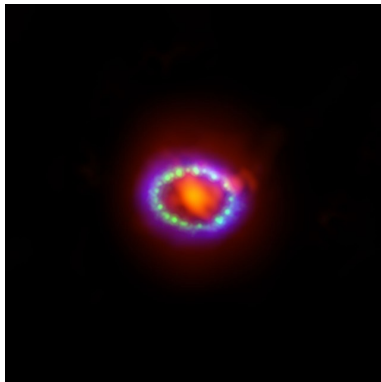


Imagen de la intensa radiación de rayos X emitida como resultado de la colisión del material expulsado por la supernova SN 1987A con el material del anillo interno formado por el material liberado por la estrella progenitora, tal y como lo observó el satélite Chandra en 2005. Imagen óptica usando el Telescopio Espacial Hubble en el mismo año. Crédito: Rayos X: X NASA/CXC/PSU/S.Park D.Burrows.; Óptico: NASA/STScI/CfA/P.Challis.



SN 1987A. Los datos proporcionados por el radio-interferómetro ALMA (en rojo) muestran el polvo creado en la explosión, que aparece en el centro. Los datos en óptico dados por el Telescopio Espacial Hubble (en verde) y en rayos X conseguidos con el satélite Chandra (en azul) muestran donde la onda de choque en expansión está chocando con el anillo de material alrededor de la supernova. Este anillo fue originariamente encendido por la luz ultravioleta de la explosión, pero durante los años siguientes su brillo se incrementó por el choque. Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/A. Angelich.

This image of supernova 1987A was created by combining a photo from the Hubble Space Telescope with data from one of JWST's instruments, which detected a signature of the neutron star (blue) at its core. Credit: J. Larsson (Nature, 2024)

