

# Las Estrellas: Su Vida y Muerte

Jane Arthur

IRyA, UNAM: Morelia

Escuela de Verano en Astrofísica, 2017

## Nebulosa Planetaria y Enana Blanca, $M < 8M_{\odot}$



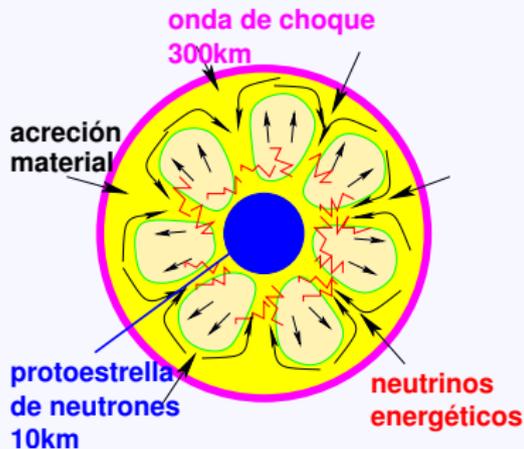
- ▶ Capas exteriores expulsados
- ▶ C-O núcleo expuesto

## Nebulosa Planetaria y Enana Blanca, $M < 8M_{\odot}$



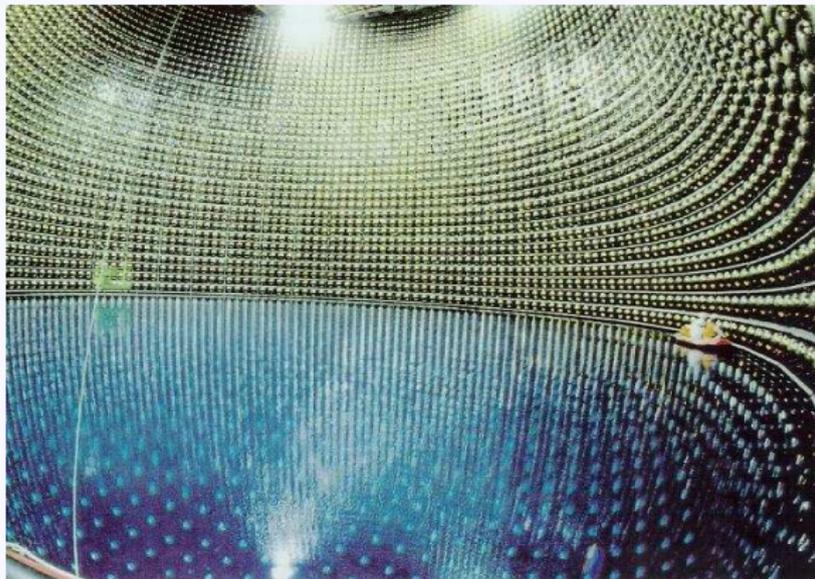
- ▶ No hay reacciones nucleares
- ▶ Presión de degeneración de los electrones
- ▶ Enfriamiento paulatino
- ▶  $M(\text{enana blanca}) < 1.4M_{\odot}$

# Supernova Tipo II



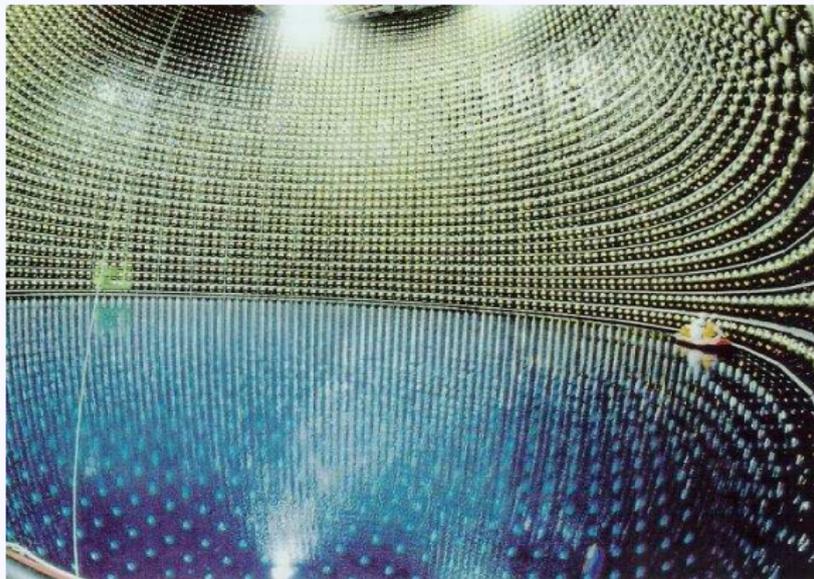
- ▶ Centro del núcleo se colapsa en 1 segundo
- ▶ Rebota y envía onda de choque
- ▶ Disociación de Fe estanca el choque
- ▶ Reaceleración por calentamiento por neutrinos
- ▶ Energía transferido al envolvente de H, He estalla la supernova

# Energía



- ▶ Neutrinos:  
 $10^{53}$  ergs  
( $10^{46}$  J)
- ▶ Energía cinética:  
 $10^{51}$  ergs  
( $10^{44}$  J)
- ▶ Luz:  
 $10^{49}$  ergs  
( $10^{42}$  J)

# Energía



Neutrinos de  
SN1987A  
detectados.



Walter Baade y Fritz Zwicky  
diferenciaron “novas comunes” de “super-novas”

.

## Novas comunes

- ▶ Brillo máximo corresponde a 20,000 luminosidades solares.
- ▶ Corresponde a la estrella más brillante en un sistema estelar,  $M = -5$
- ▶ Son visibles en todas partes donde un telescopio alcanza  $M=-5$
- ▶ Hay 10 a 20 novas por año en nuestra Galaxia.
- ▶ Una frecuencia parecida en la galaxia (nebulosa) de Andromeda.

## Supernovas

- ▶ Las Super-novas son visibles a todas distancias
- ▶ Su brillo máximo es tan brillante como una galaxia entera
- ▶ Corresponde a  $M = -14$
- ▶ Distancia a Andromeda era conocida (mediante las cefeidas)
- ▶ Luminosidad integrada sobre 25 días corresponde a 10 millones de años de radiación solar
- ▶ Energía es comparable a la energía total de aniquilación de una estrella.
- ▶ Menos frecuentes: estimaron una por siglo por galaxia
- ▶ No hay eventos intermedios entre novas y supernovas

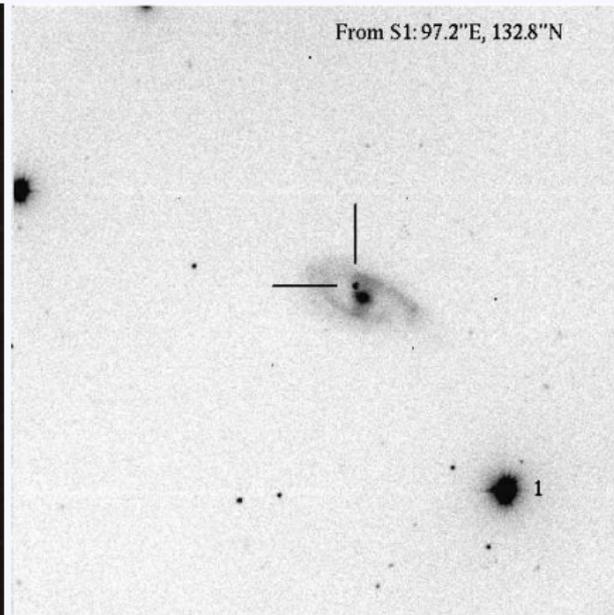
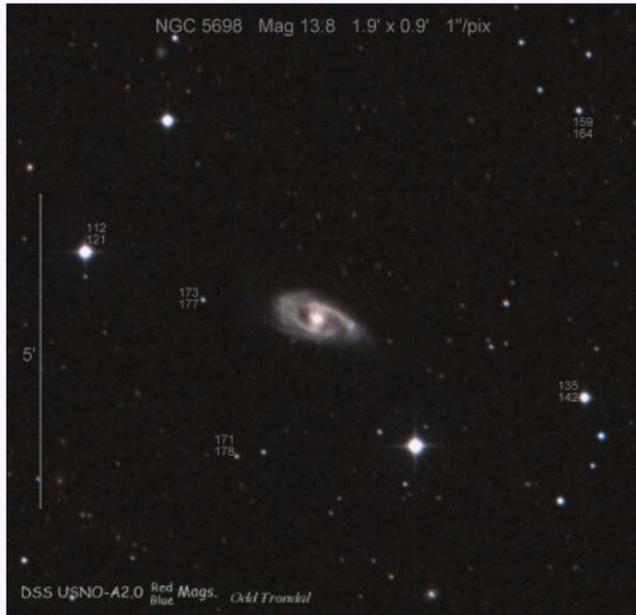
¿Cómo se ve una supernova?



# ¿Cómo se ve una supernova?

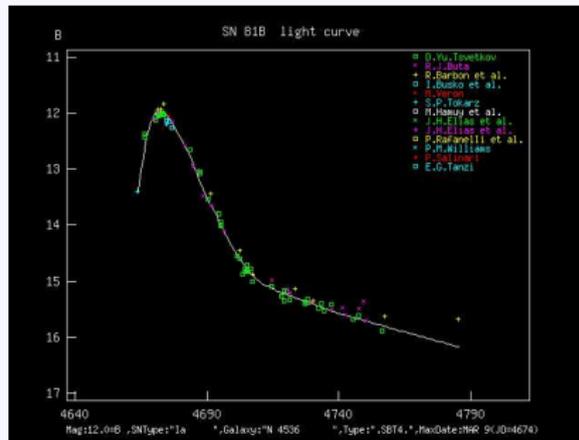
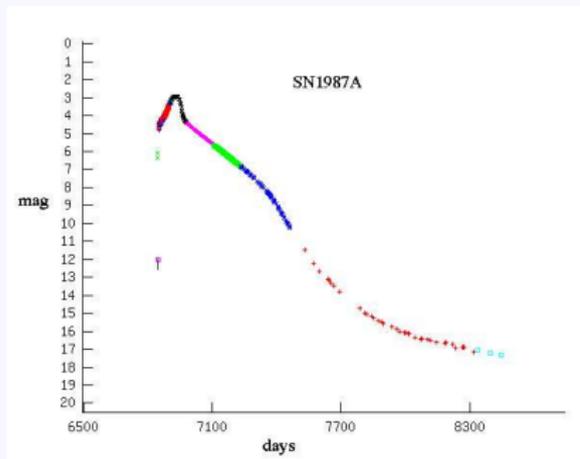


# ¿Cómo se ve una supernova?



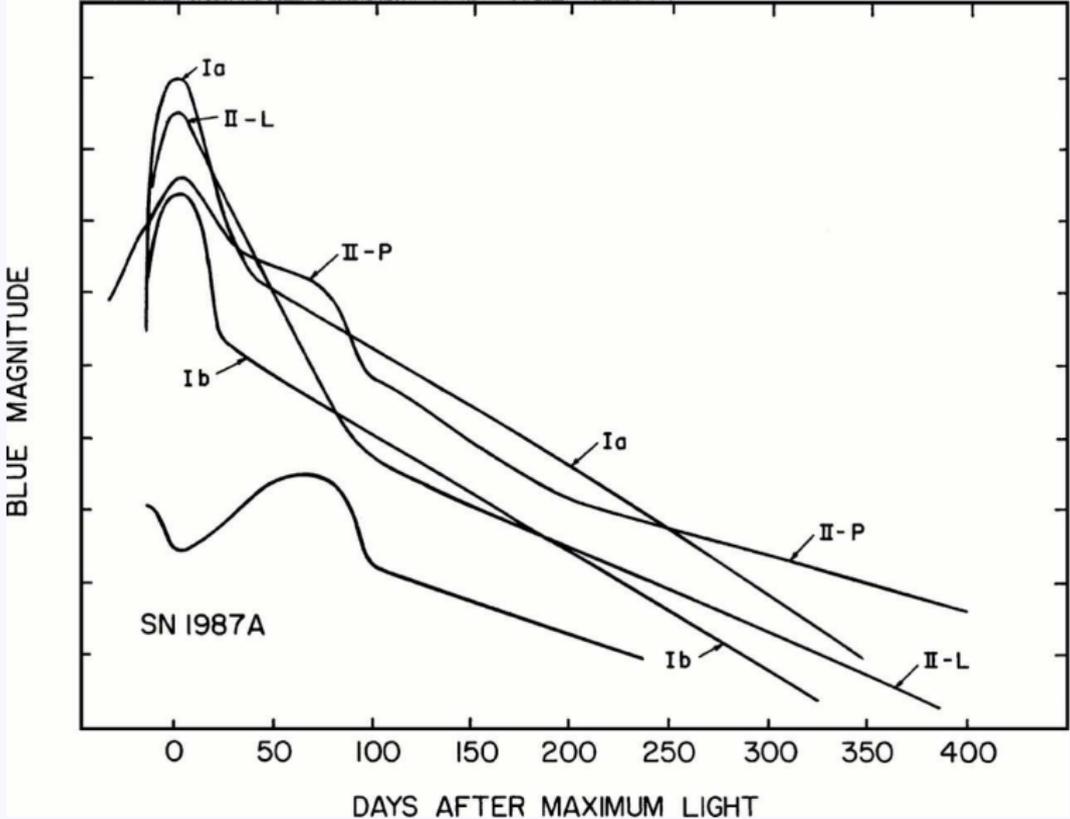
Una supernova cada 30 años en promedio en una galaxia típica

# Fotometría

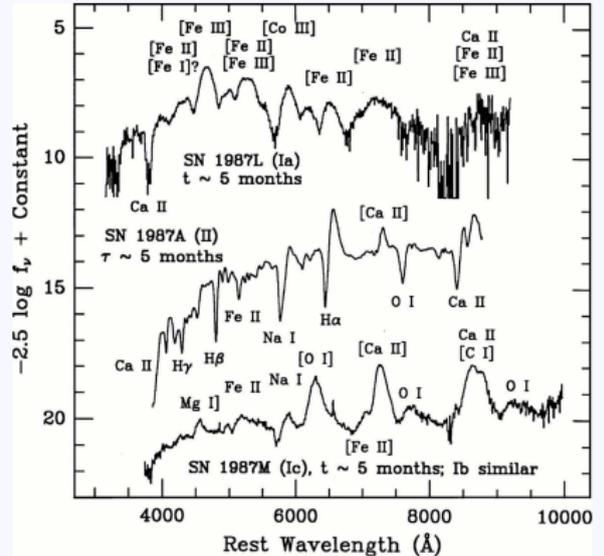
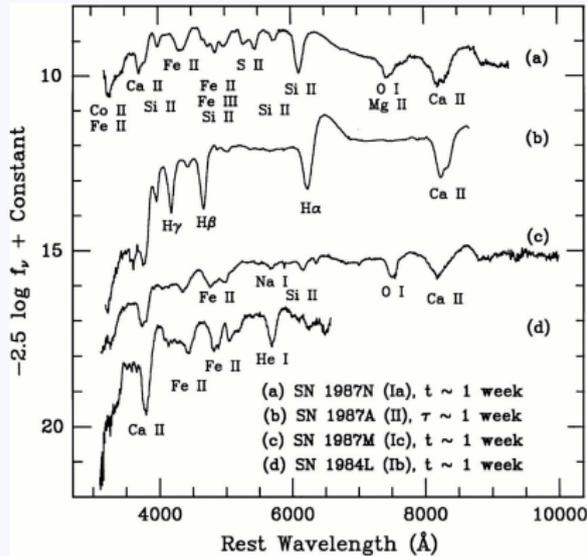


Curvas de luz

# Fotometría

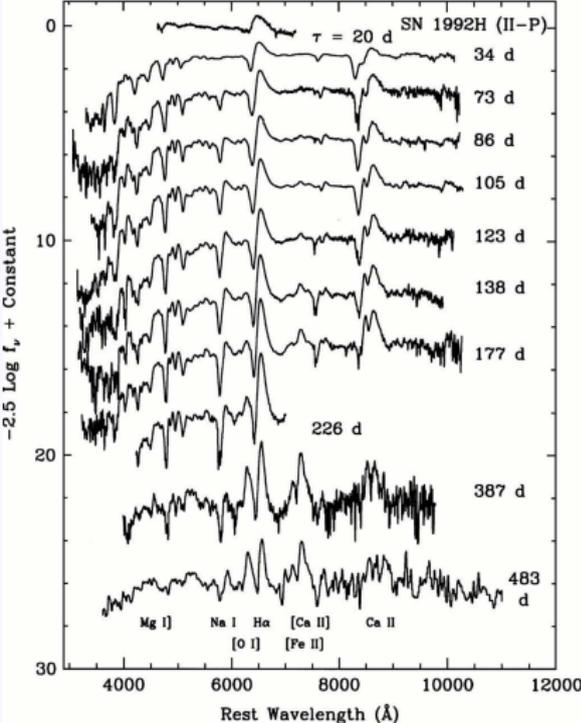
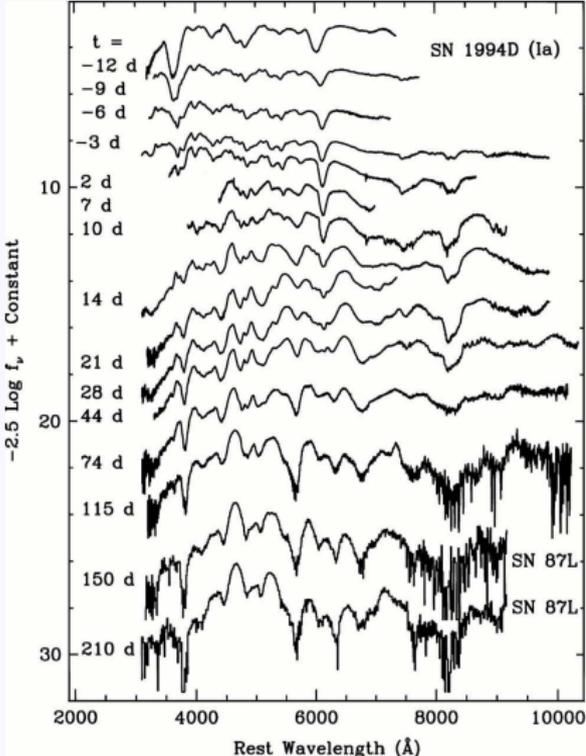


# Spectroscopía



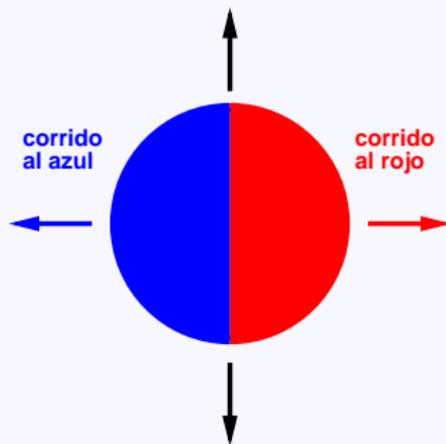
Spectro visible (óptico)

# Spectroscopía



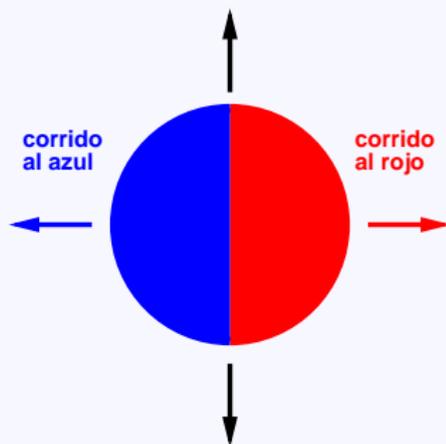
# Efecto Doppler

observador



# Efecto Doppler

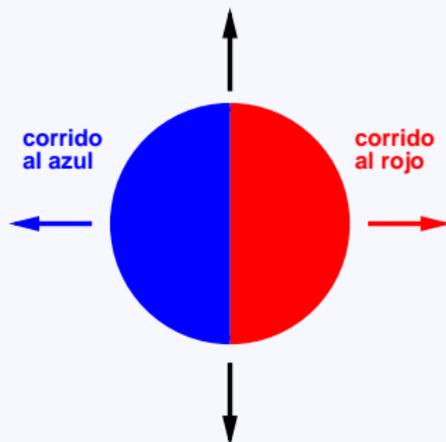
observador



continuo

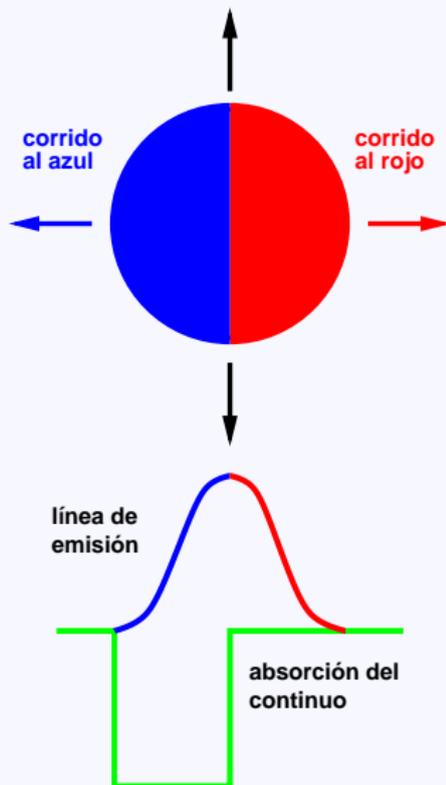
# Efecto Doppler

observador

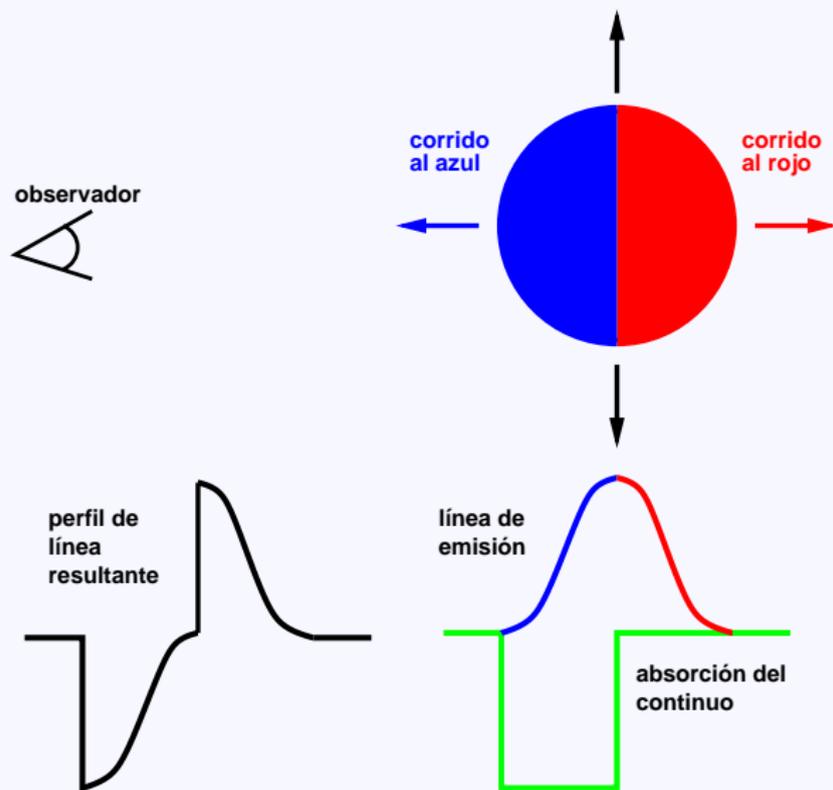


# Efecto Doppler

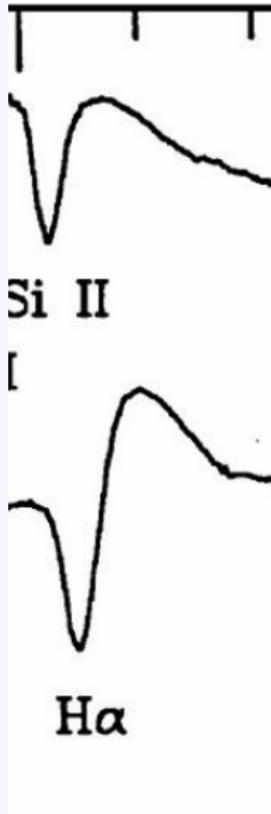
observador



# Efecto Doppler



## Efecto Doppler



$$\frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

$$\Delta\lambda = 22 \text{ nm} ,$$

$$\lambda_0 = 656.3 \text{ nm} ,$$

$$v \approx 10,000 \text{ km s}^{-1}$$

¿En dónde se encuentran?



Galaxias Espirales: Todo tipo de SNe

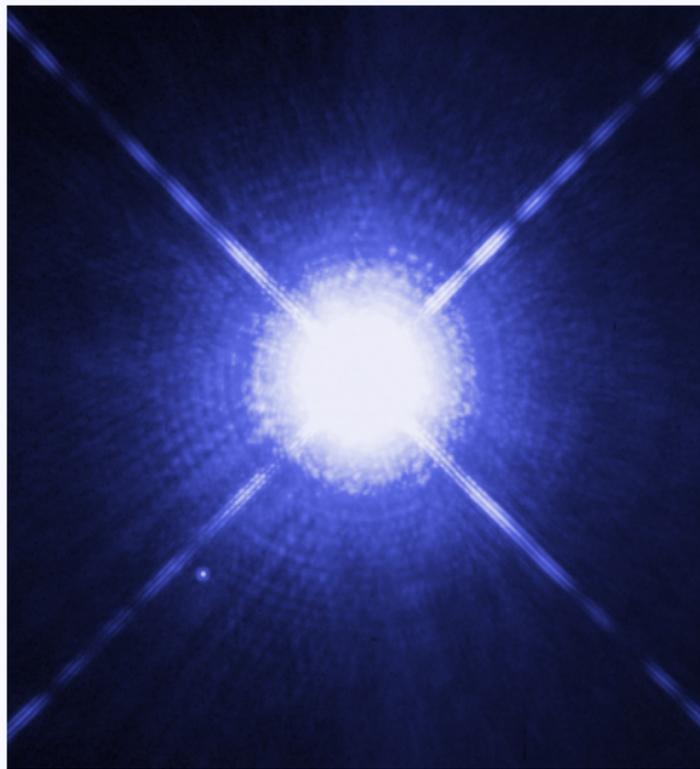
¿En dónde se encuentran?



Galaxias Elípticas: Únicamente SN Tipo Ia

¿Qué son las supernovas Tipo Ia?  
Tienen algo que ver con estrellas viejas  
Estrellas de baja masa - enanas blancas

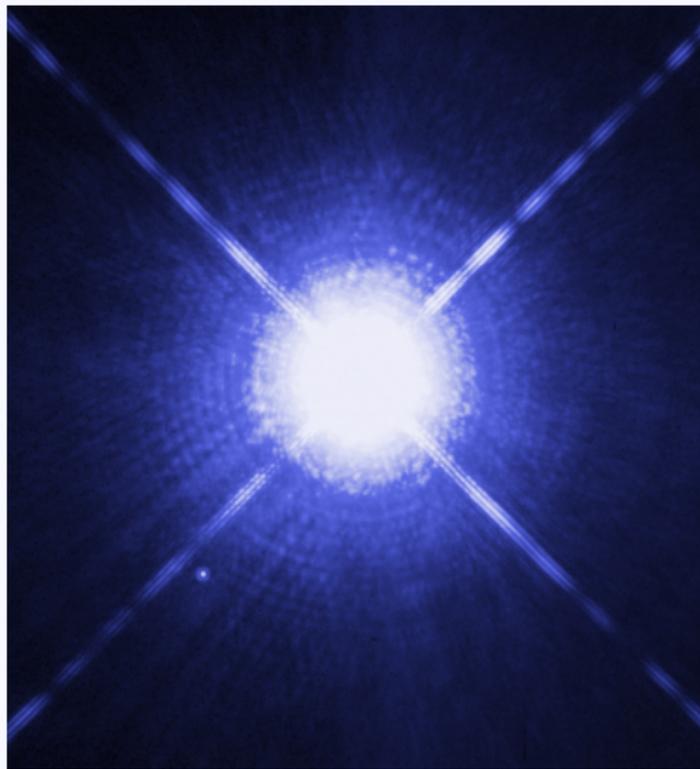
# ¿Cómo se puede vencer el Límite de Chandrasekhar?



## Estrellas binarias

- ▶ Sirio A en secuencia principal
- ▶ Sirio B ya es enana blanca ( $1M_{\odot}$ )

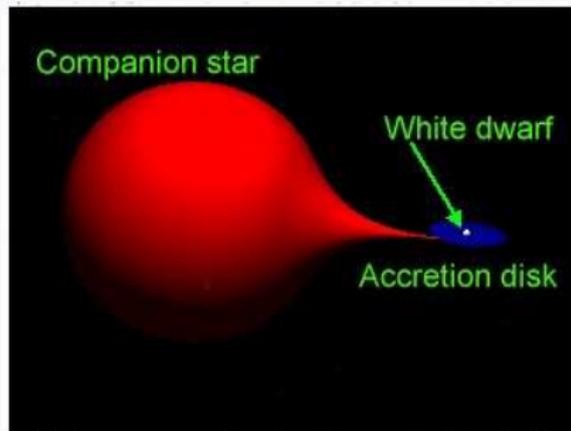
# ¿Cómo se puede vencer el Límite de Chandrasekhar?



## Estrellas binarias

- ▶ Separación es 20 veces distancia Tierra-Sol
- ▶ 1000,000,000 años Sirio A se transformará en gigante roja

# Supernova Tipo Ia



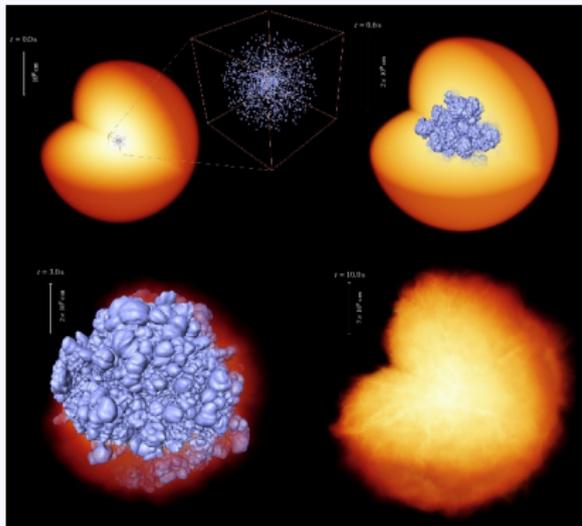
- ▶ Estrella que ha perdido envoltente de H, He
- ▶ Enana blanca limitada por masa de Chandrasekhar— $1.4M_{\odot}$
- ▶ No hay reacciones de fusión

# Supernova Tipo Ia



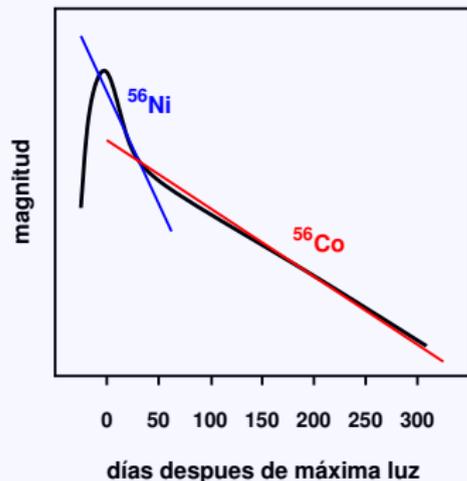
- ▶ Estrellas binarias—acreción de la compañera
- ▶ Fenómeno de nova recurrente (RS Oph)
- ▶ Quemado de H en C y O aculuma masa suficiente para explosión

# Deflagración del carbono

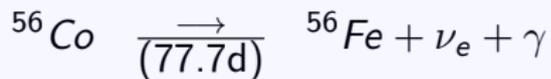
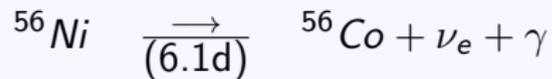


- ▶ Ignición ocurra cuando  $M > 1.38M_{\odot}$
- ▶ C y O se queman hasta Fe en el núcleo
- ▶ Onda de deflagración (llama subsónica)
- ▶ Inestabilidades RT y KH aceleran el quemado termonuclear
- ▶ Suficiente energía generada para romper la estrella.

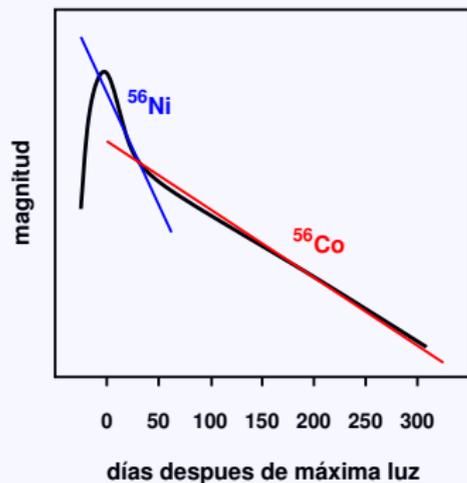
## Curva de luz



►  $^{56}\text{Ni}$  liberado por supernova



## Curva de luz



► Tiempo medio

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$
$$\lambda = \frac{\log 2}{t_{\frac{1}{2}}}$$

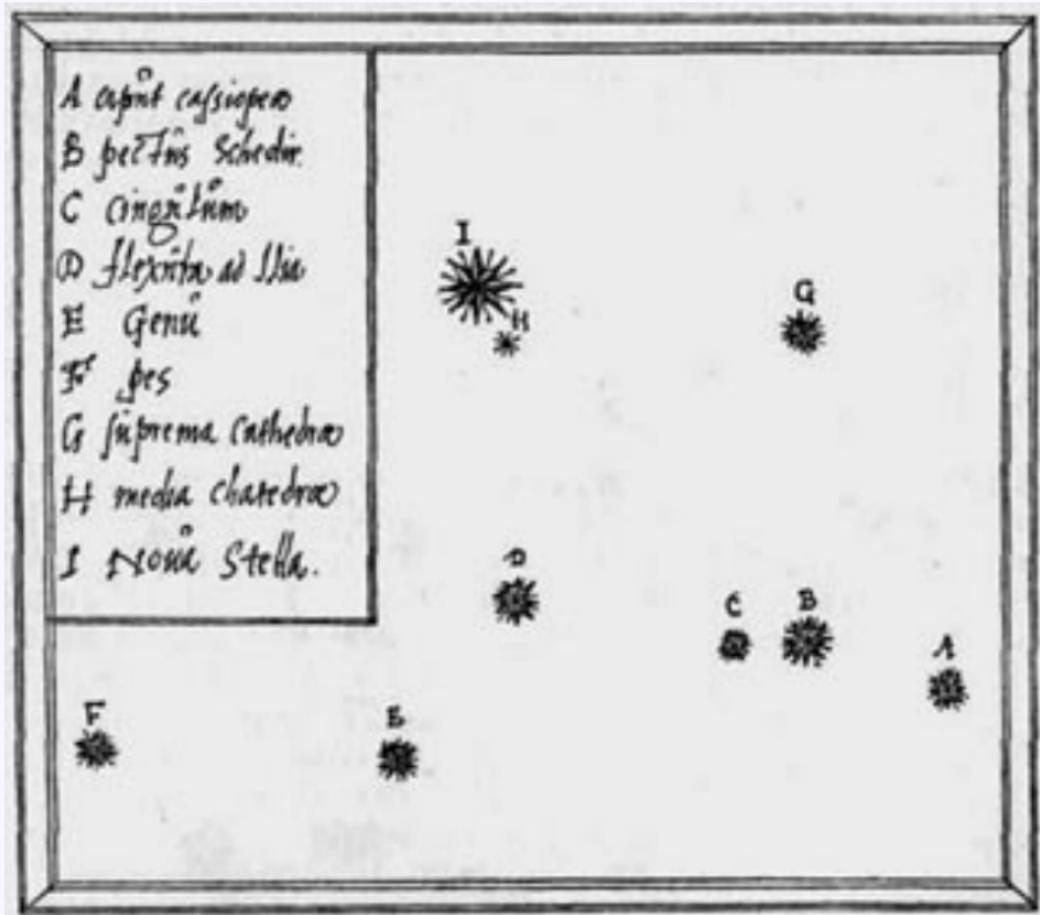
ii QUIZ!!



Supernova

Histórica:

Tycho



Tycho Brahe (1573, De Stella Nova)

## B. CASSIOPEIAE AS A SUPERNOVA OF TYPE I\*

W. BAADE

Mount Wilson Observatory

*Received June 13, 1945*

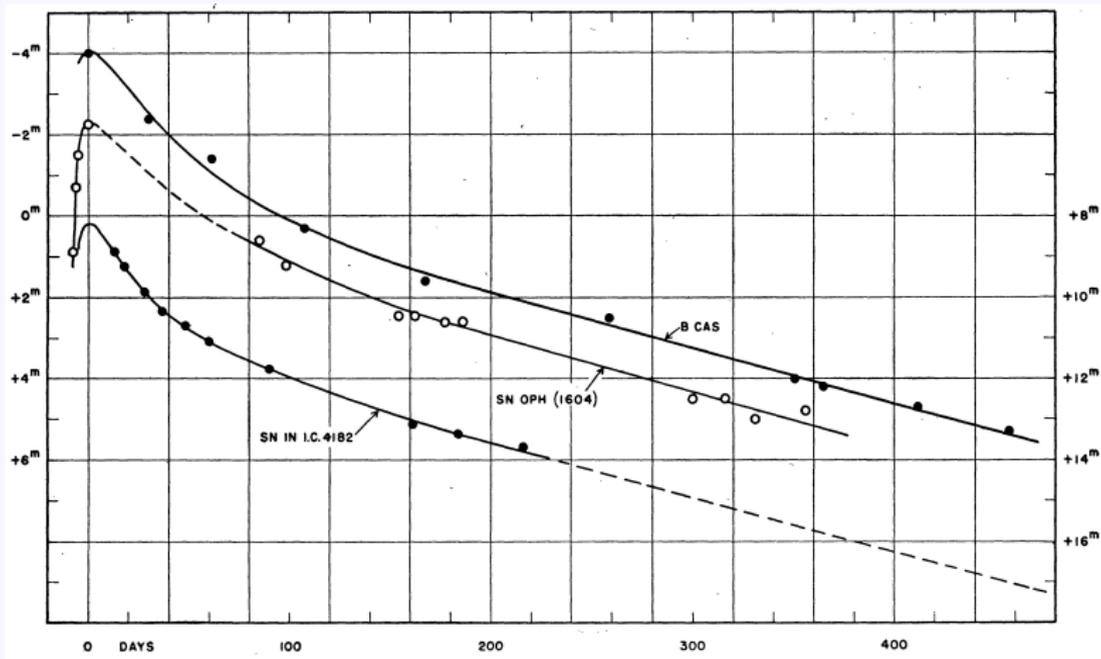
### ABSTRACT

The light-curve of the nova of 1572, derived from Tycho's observations, shows that the star was a supernova of type I which reached at maximum the apparent magnitude  $-4.0$ .

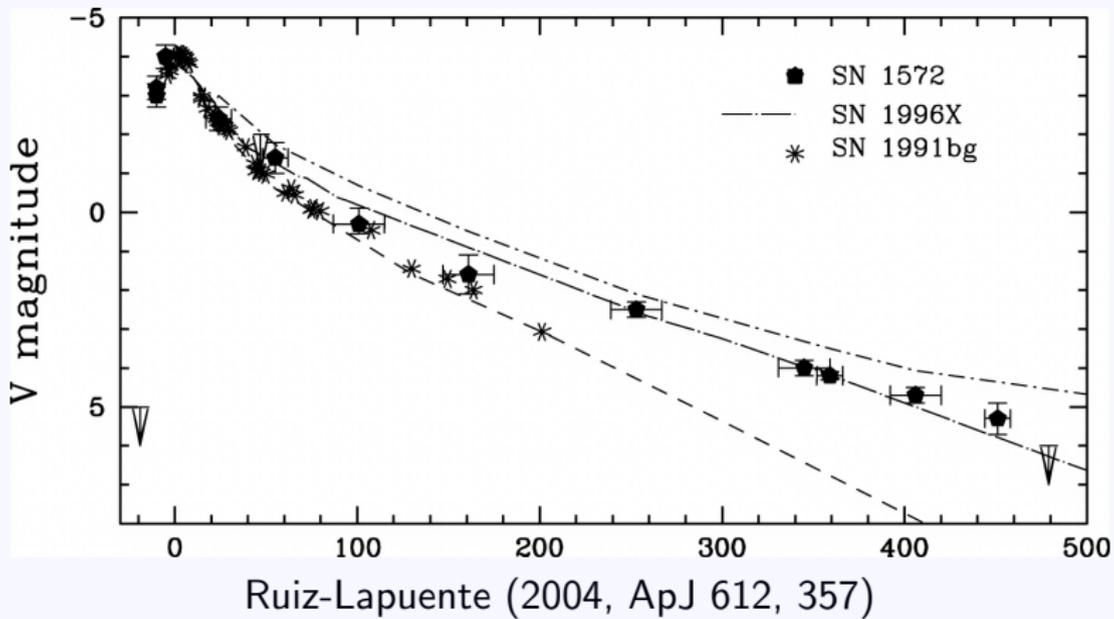
The fact that no expanding shell can be detected at the place where the supernova flared up indicates that the excitation provided by the stellar remnant is insufficient. This, in turn, suggests that the star is much more advanced toward the final white-dwarf state than are the stellar remnants of the supernovae of A.D. 1054 and 1604.

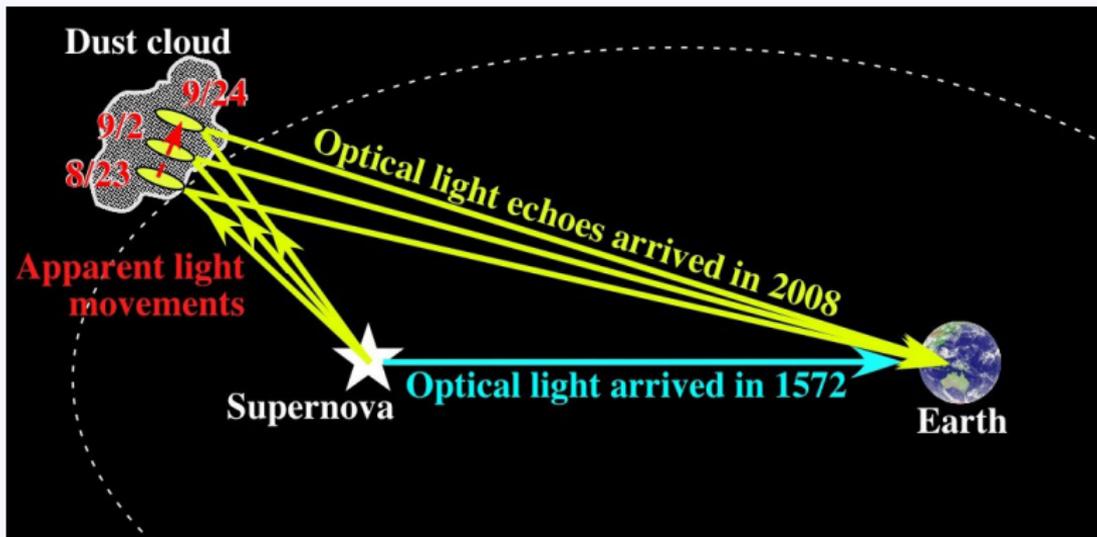
It has been pointed out in a previous paper<sup>1</sup> that B Cassiopeiae, the bright nova of 1572, was undoubtedly a supernova because of its amplitude, which exceeded 22 mag. The recent recognition of two types of supernovae makes it desirable to decide whether the star was a supernova of type I or type II. The light-curve of the nova, derived in the present paper, clearly indicates a supernova of type I. Because it throws new light on the final state of a supernova, B Cas is of particular interest.

Baade (1945, ApJ 102, 309)

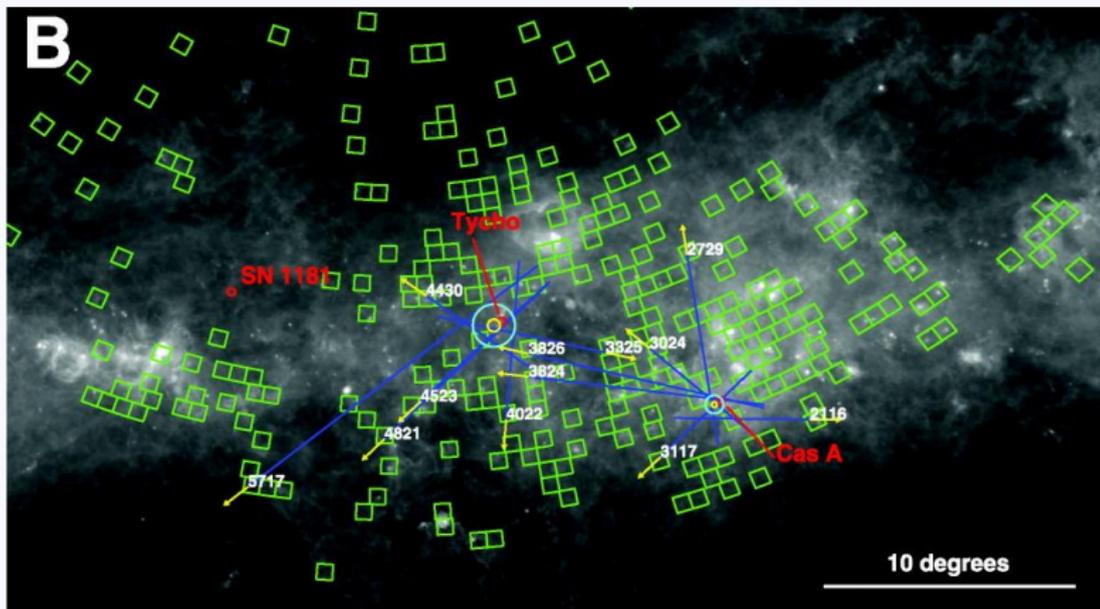


Baade (1945, ApJ 102, 309)

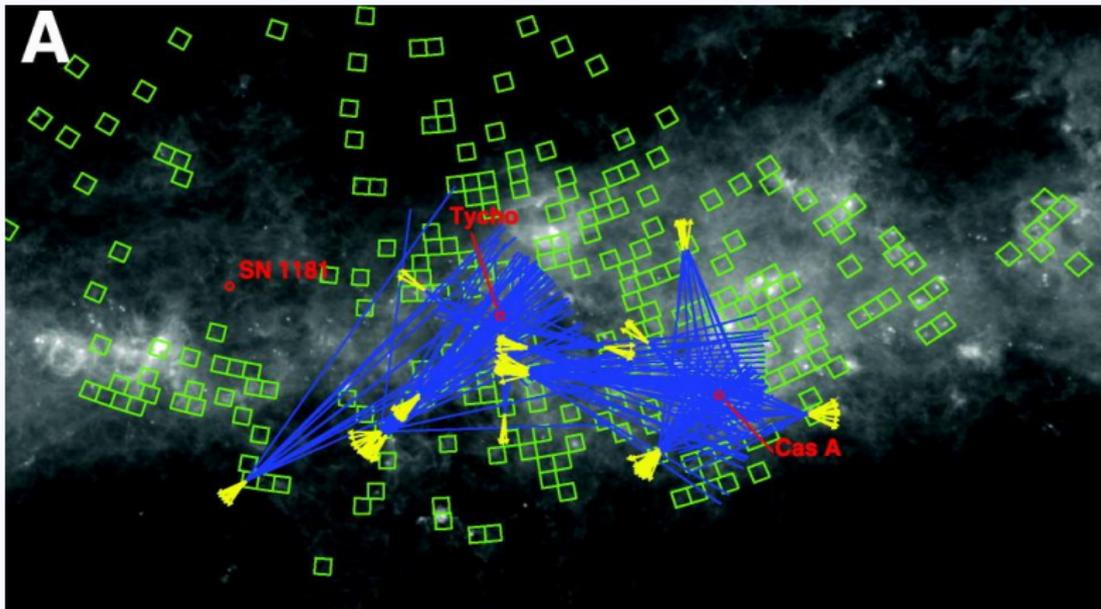




Krause et al. (2008, Nature 456, 617)

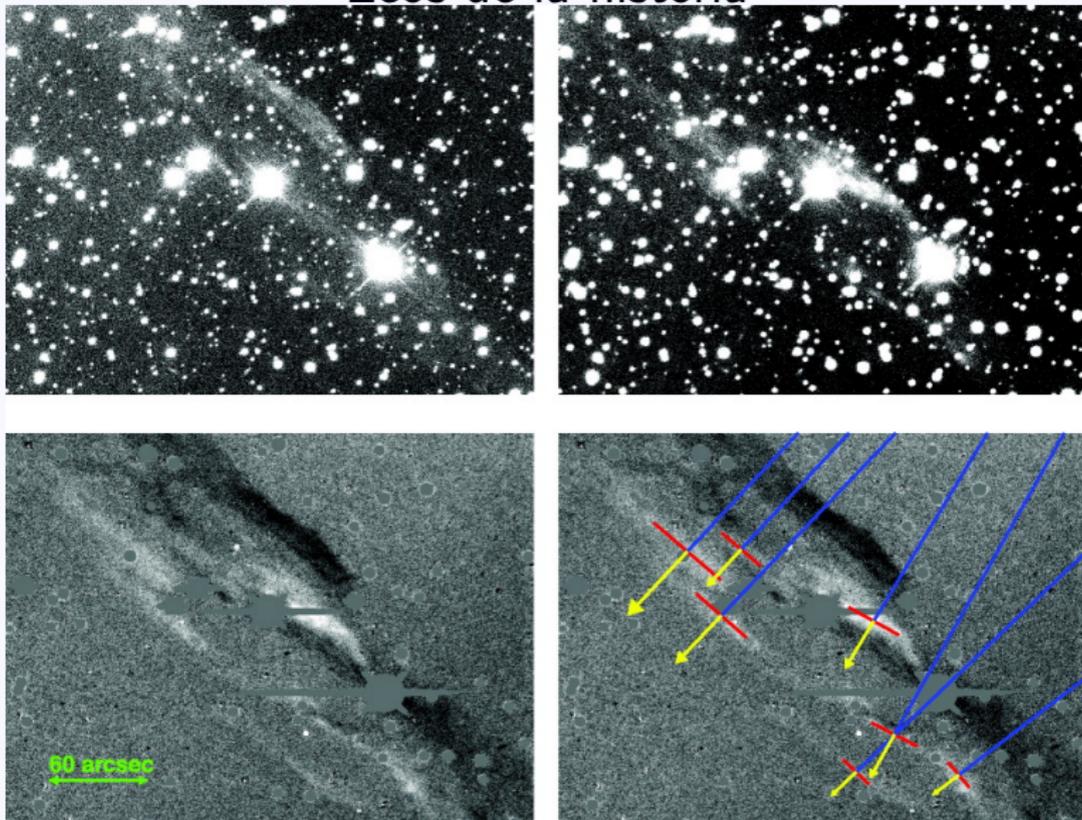


Rest et al. (2008, ApJ 681, 81)

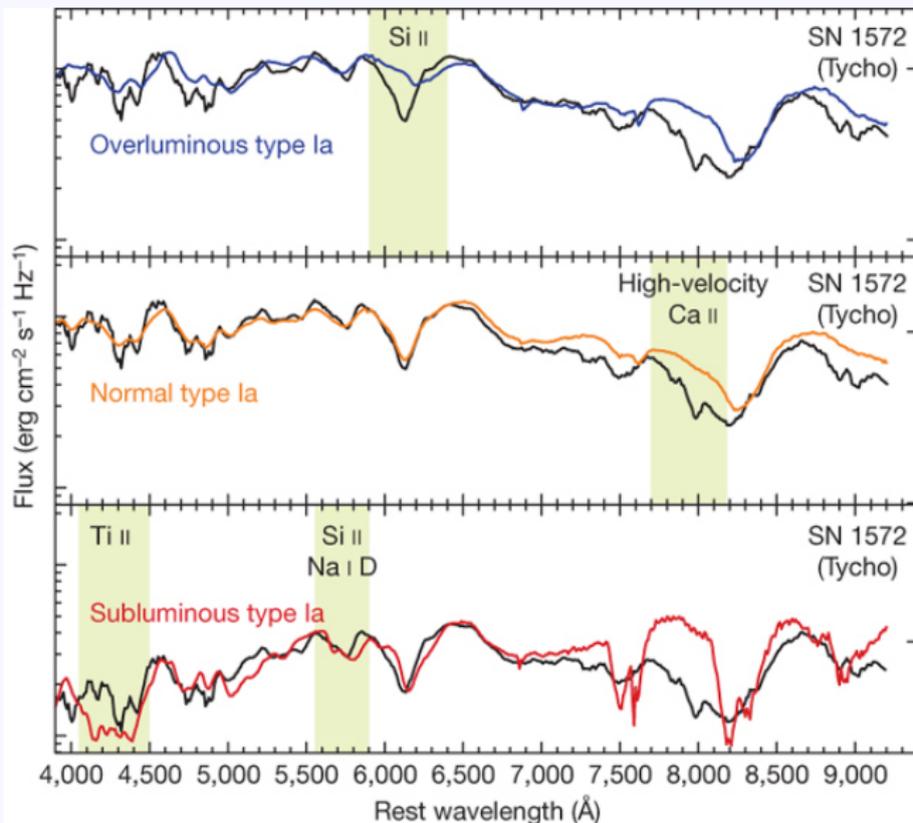


Rest et al. (2008, ApJ 681, 81)

# Ecos de la historia

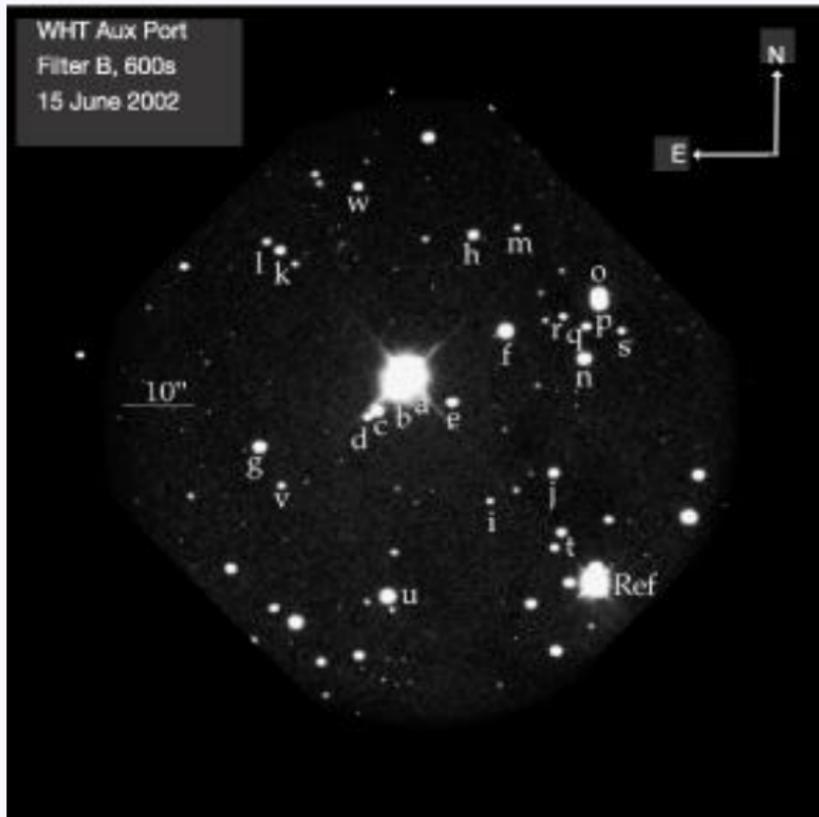


Rest et al. (2008, ApJ 681, 81)

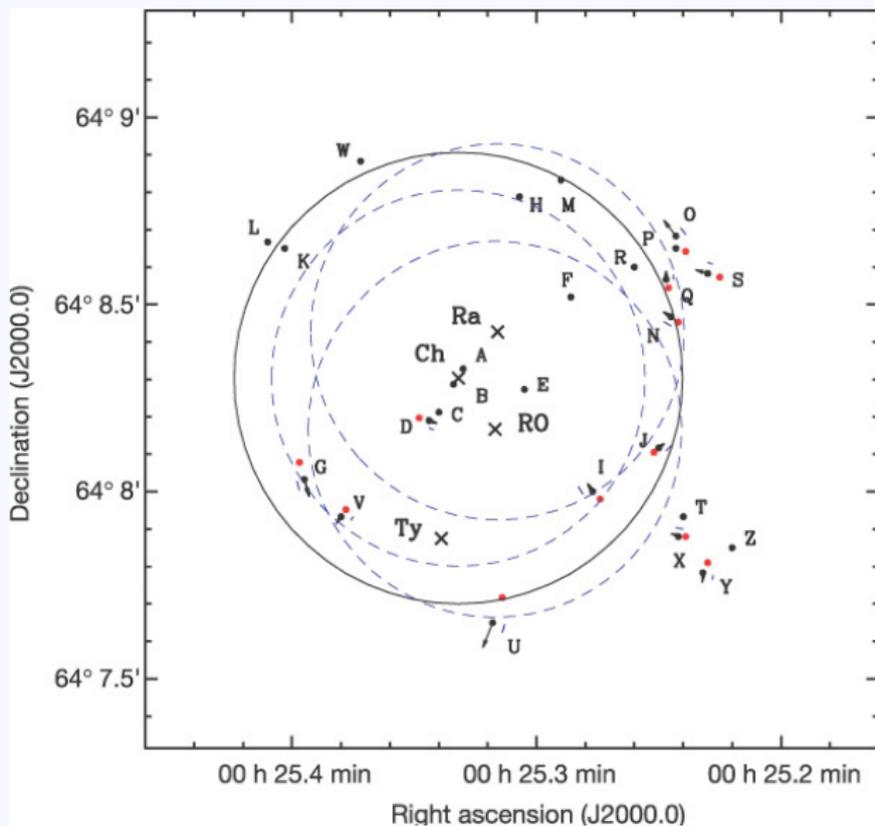


Krause et al. (2008, Nature 456, 617)

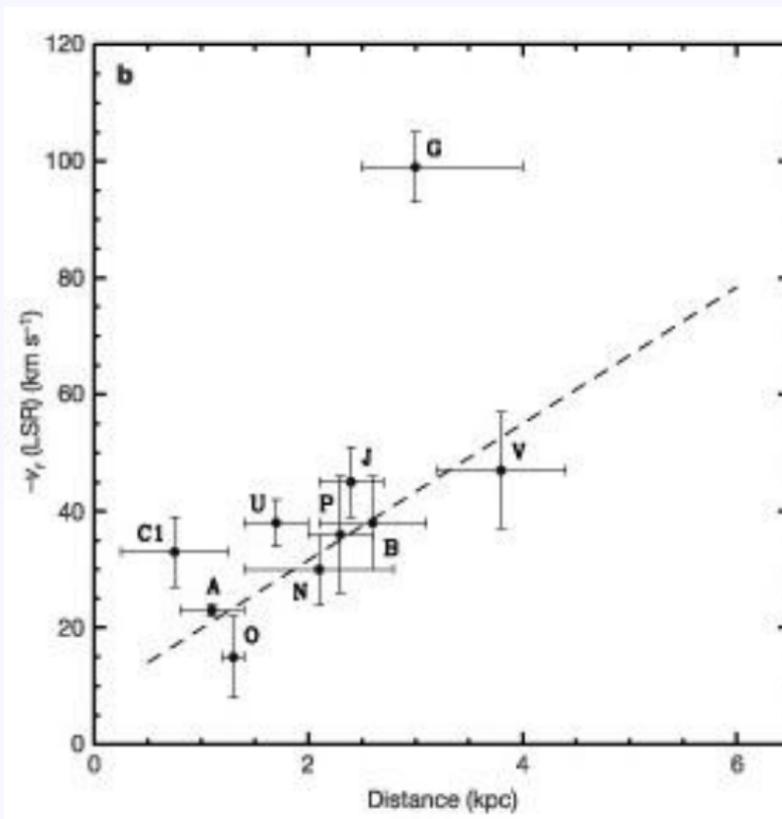
## Una progenitora binaria



Ruiz-Lapuente, et al. (2004, Nature 431, 1096)

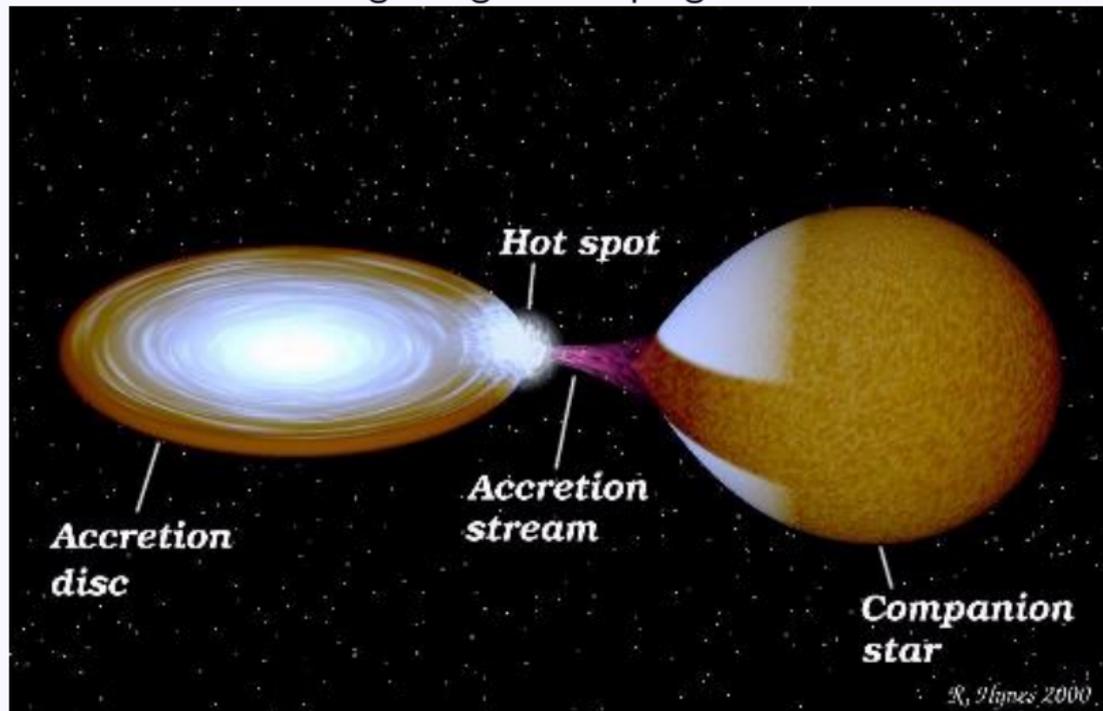


Ruiz-Lapuente, et al. (2004, Nature 431, 1096)

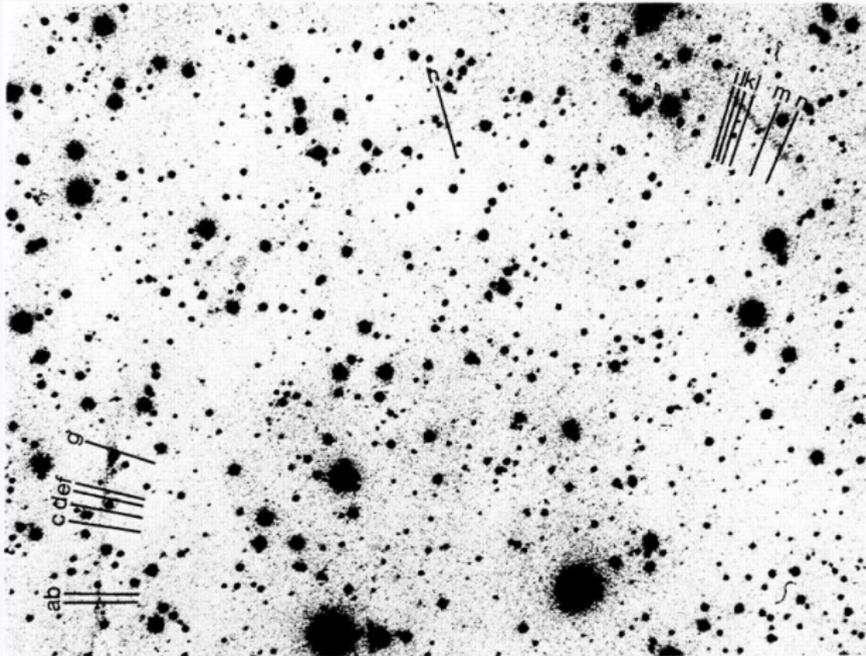


Ruiz-Lapuente, et al. (2004, Nature 431, 1096)

## Single-degenerate progenitor

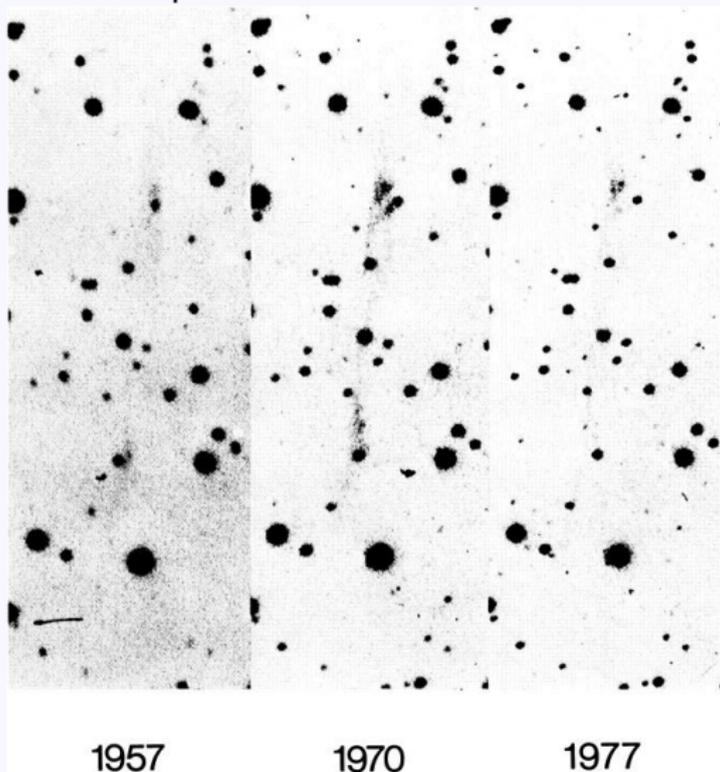


## El remanente de supernova

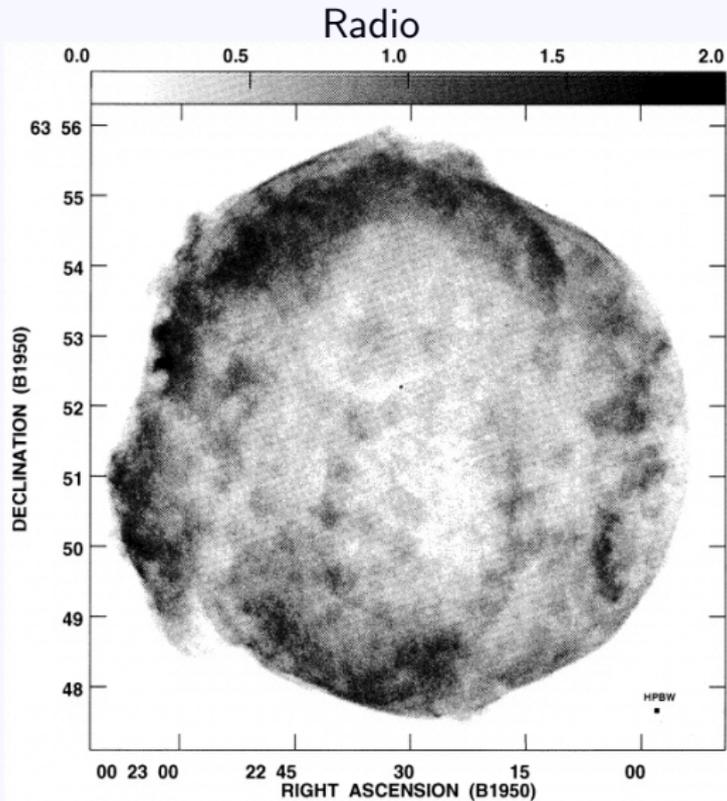


Kamper & van den Bergh (1978, ApJ 224, 851)

## Expansión de los filamentos

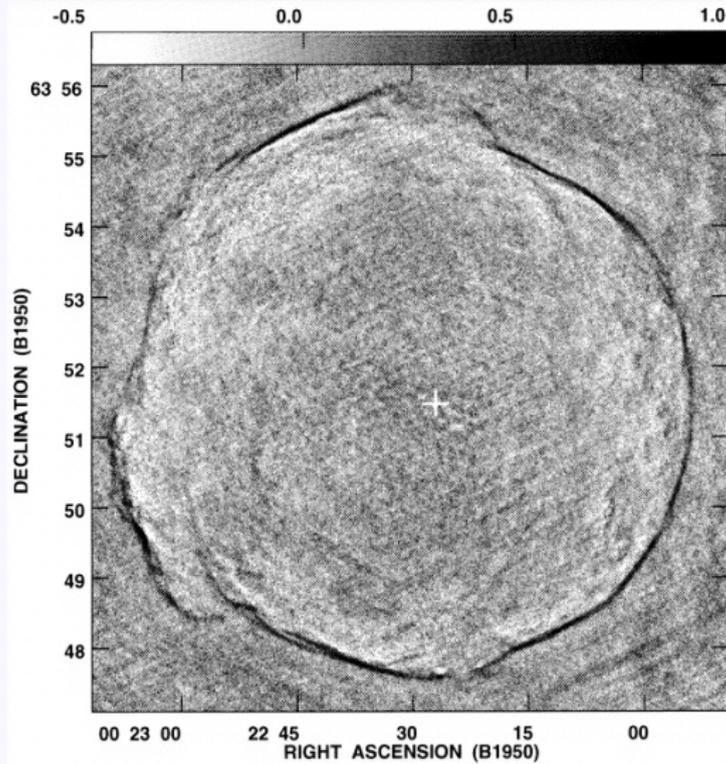


Kamper & van den Bergh (1978, ApJ 224, 851)

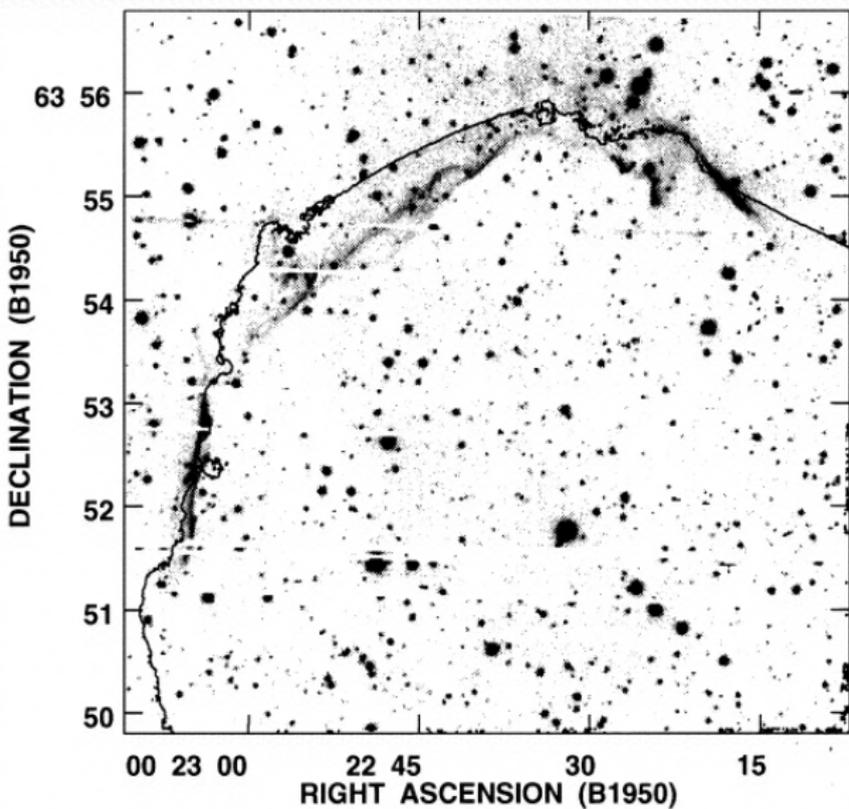


Reynoso et al. (1997, ApJ 491, 816)

# Expansión

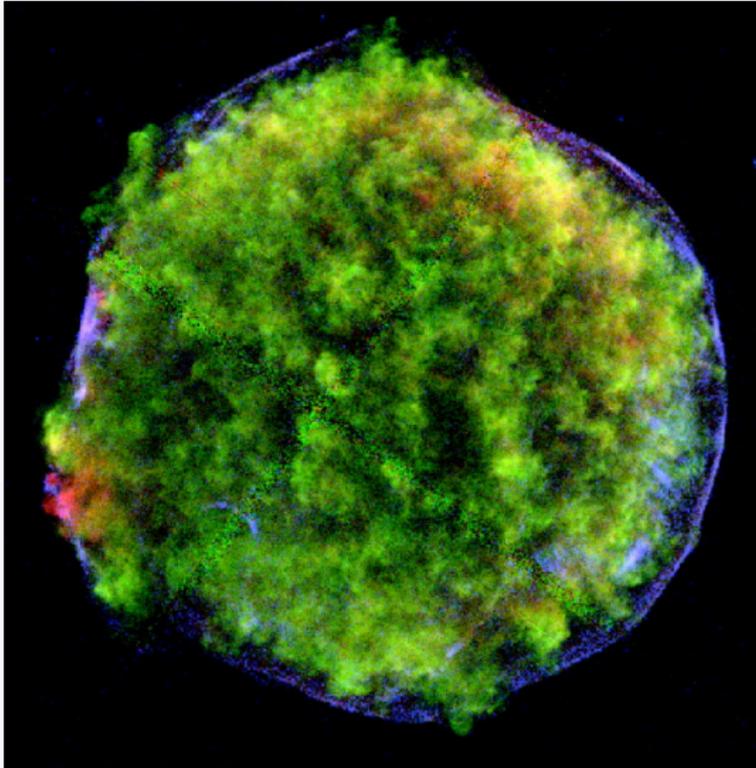


Reynoso et al. (1997, ApJ 491, 816)



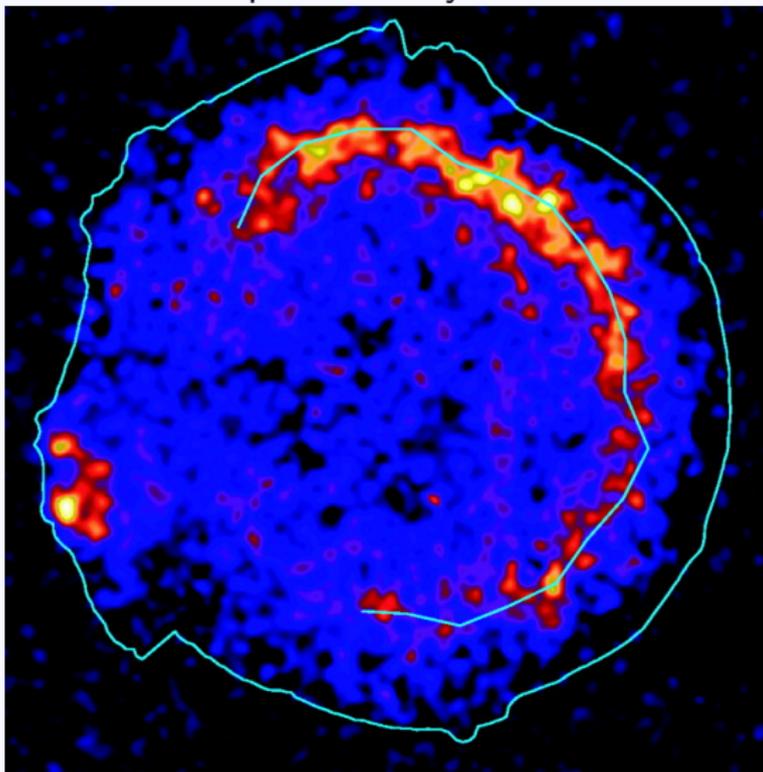
Reynoso et al. (1997, ApJ 491, 816)

Rayos X



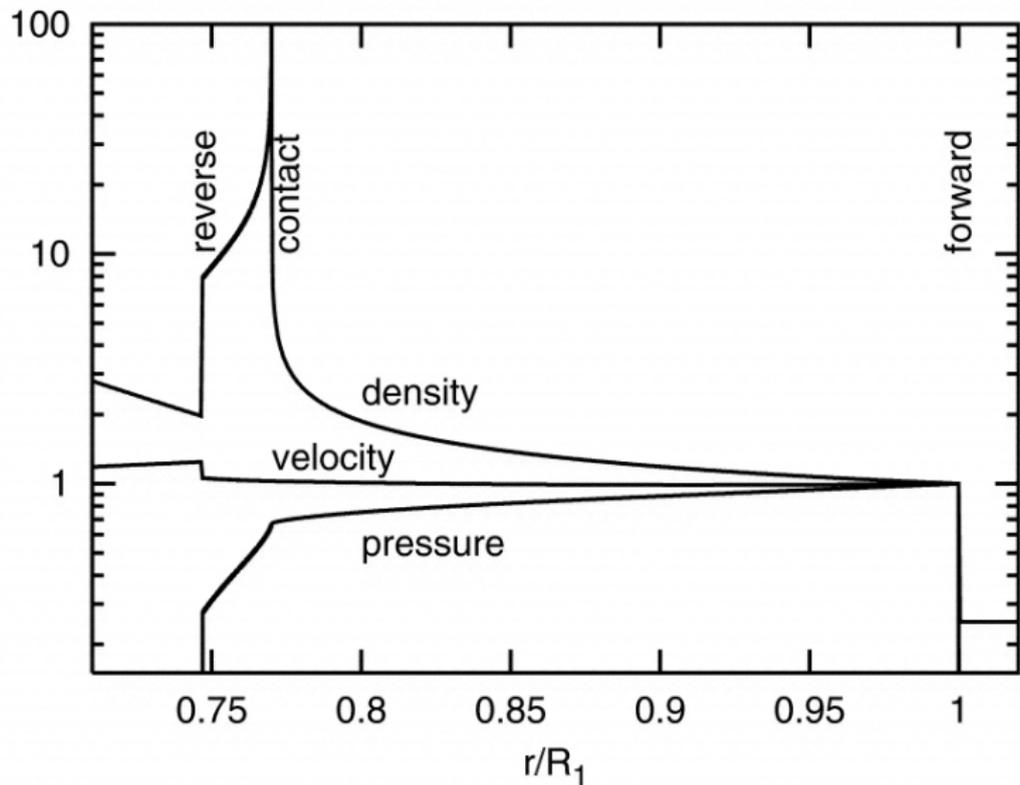
Warren et al. (2005, ApJ 634, 376)

## Choque interno y externo



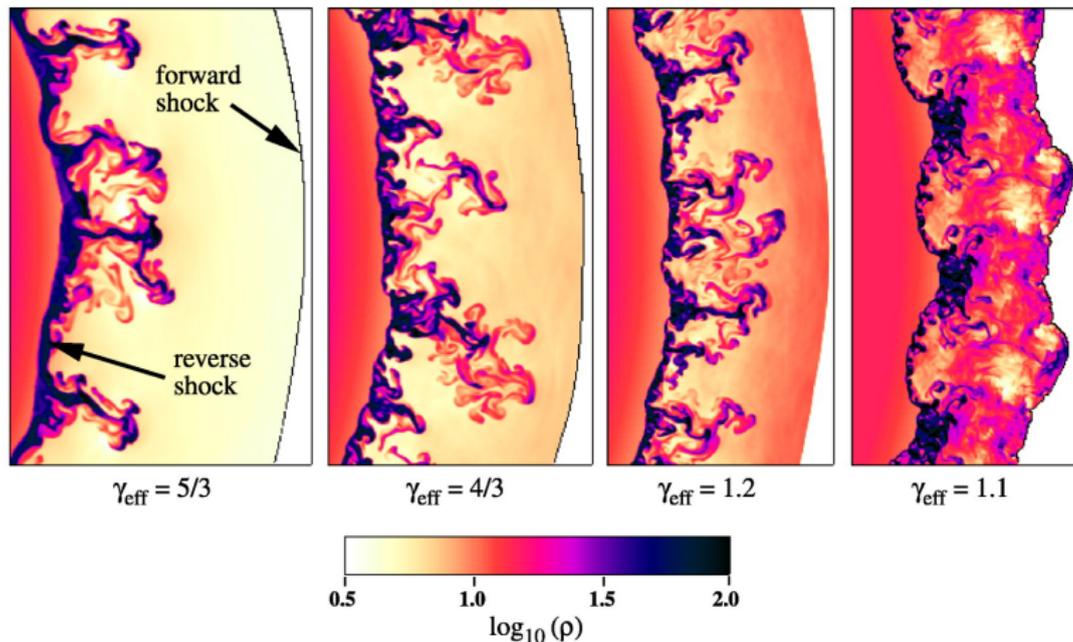
Warren et al. (2005, ApJ 634, 376)

# Simulación numérica



Blondin & Ellison (2001, ApJ 560, 244)

## Efecto de producción de rayos cósmicos

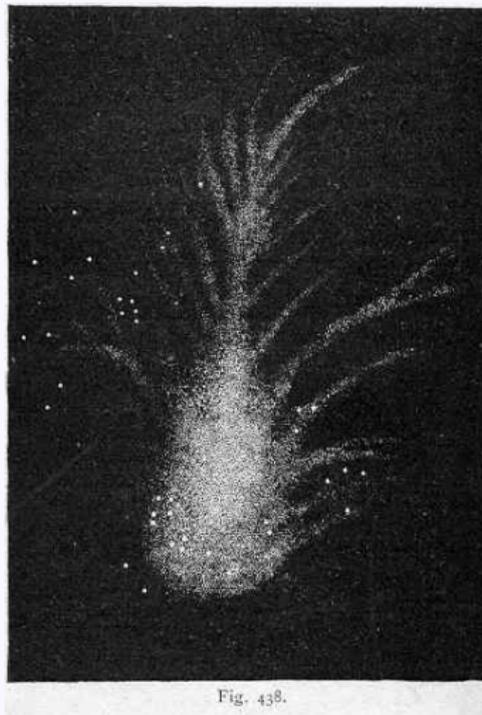


Blondin & Ellison (2001, ApJ 560, 244)

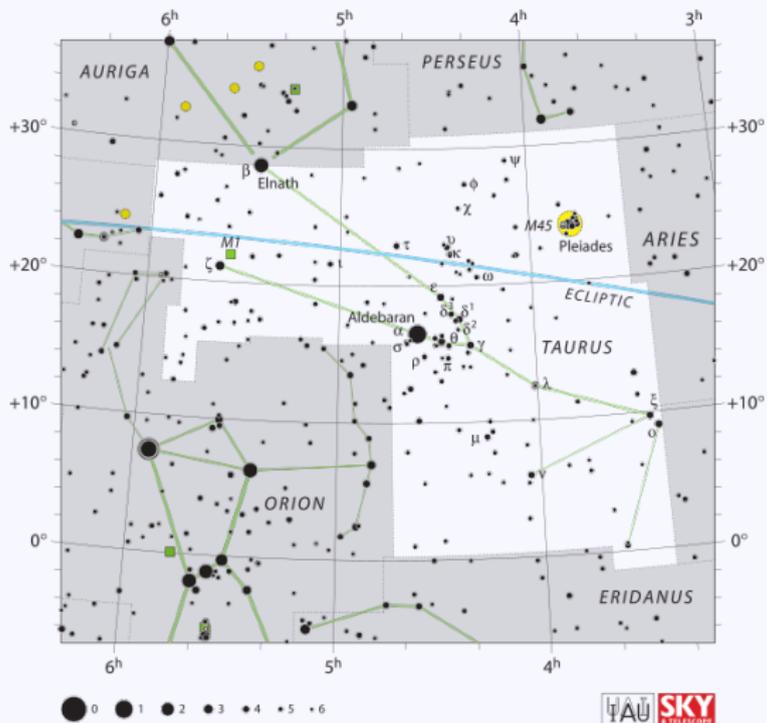
# Resumen: Supernova de Tycho

- ▶ Estandarización de supernovas Tipo Ia - cosmología
- ▶ Mecanismo de explosión
- ▶ Aceleración de rayos cósmicos
- ▶ Expansión de remanentes de supernova

# Supernovas Históricas: Nebulosa del Cangrejo



# Nebulosa del Cangrejo



## La supernova de 1054

- ▶ No hay información contemporánea
- ▶ Referencias Chinas y Japonesas de 100 años después
- ▶ Estrella nueva visible al amanecer durante tres semanas
- ▶ Hasta 4 veces más brillante que el planeta Venus

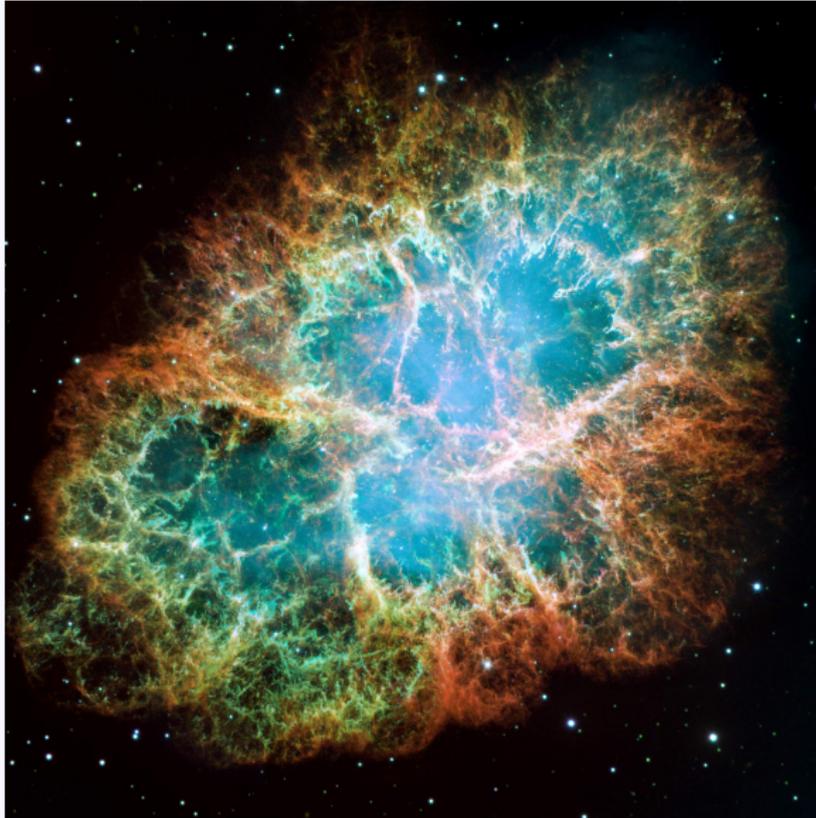
## La supernova de 1054

- ▶ Fecha identificada con 4 de julio 1054
- ▶ Desaparecio del cielo nocturno visible en abril 1056
- ▶ Ubicado al SE de Zeta Tauri (Tianguan)

## Supernova de 1054



# Nebulosa del Cangrejo



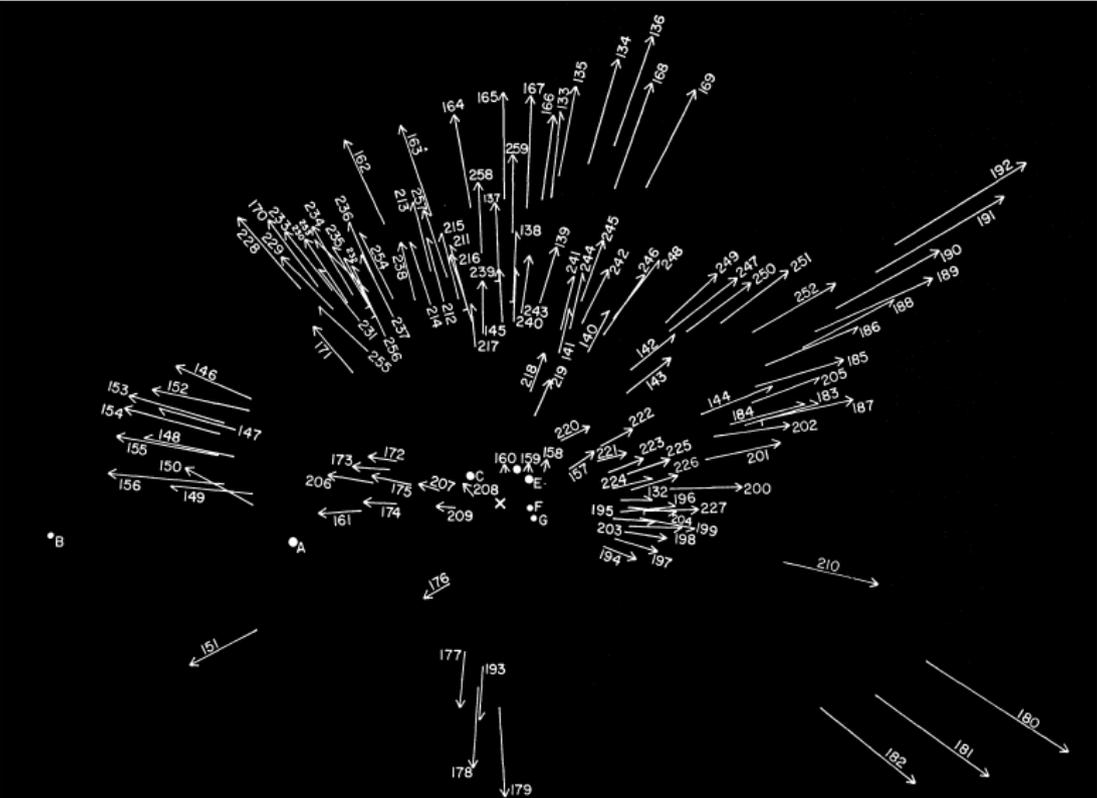
# Expansión de la nebulosa



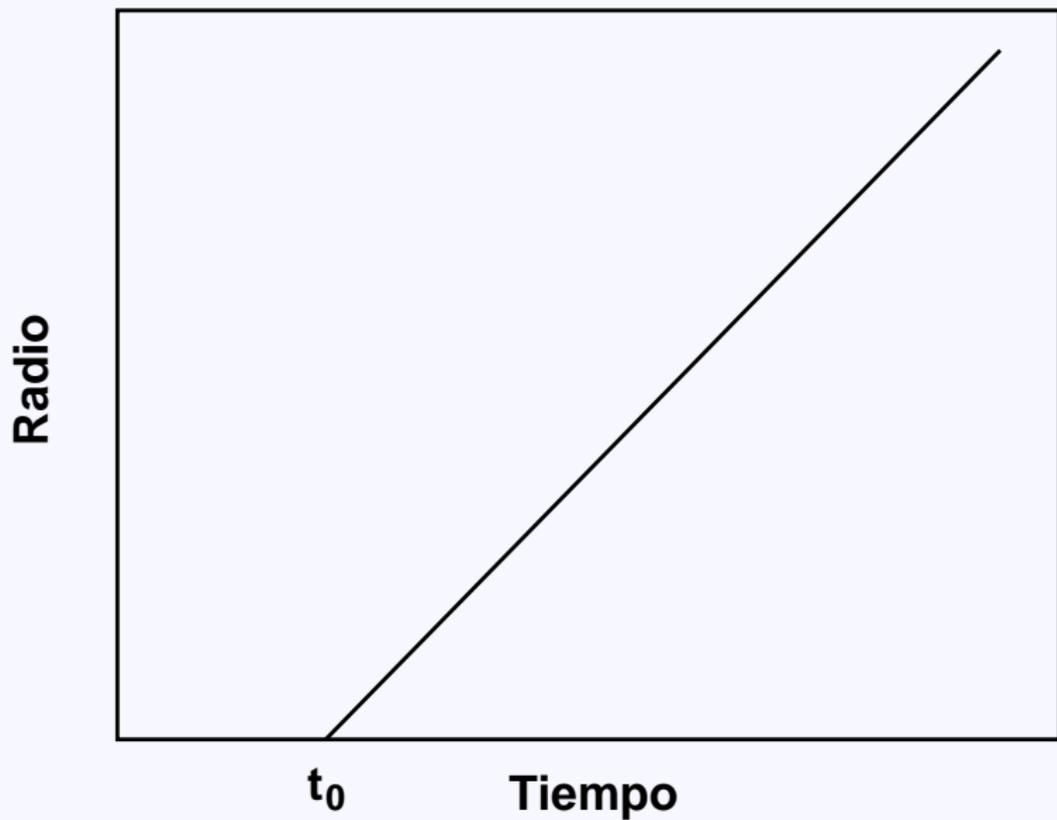
# Expansión de la nebulosa



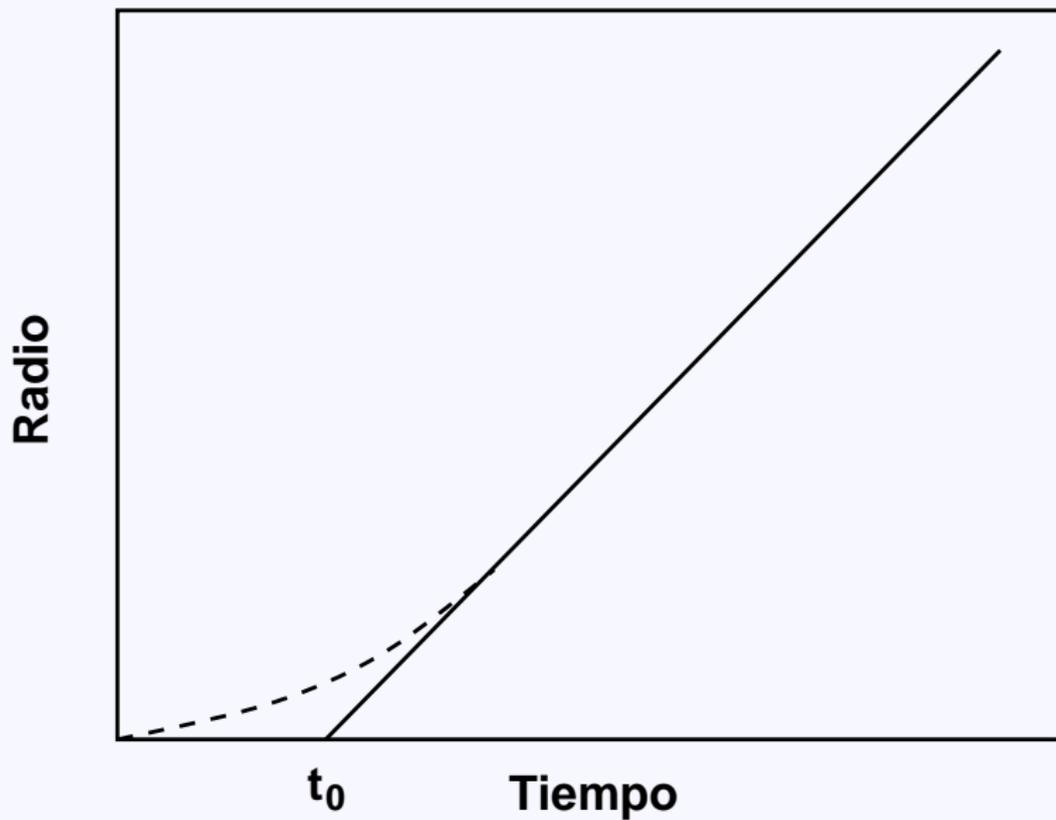
# Expansión de la nebulosa



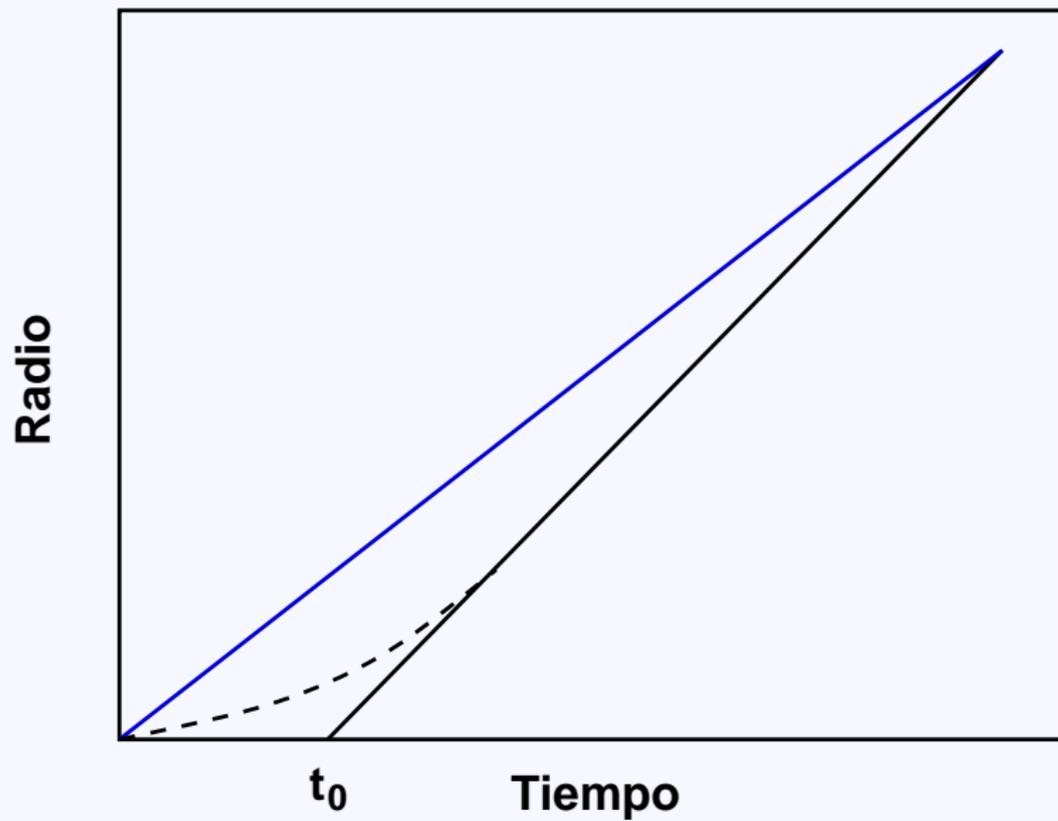
## Expansión de la nebulosa



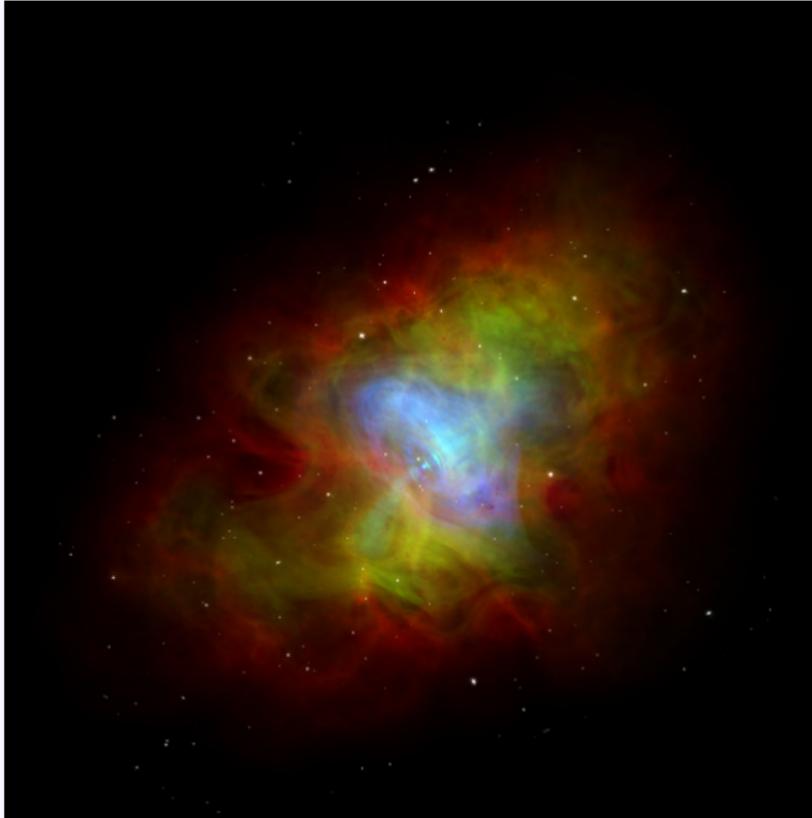
## Expansión de la nebulosa



## Expansión de la nebulosa



# Emisión Sincrotrónica



# Emisión Sincrotrónica

- ▶ Radiación electromagnética emitida cuando partículas cargadas están aceleradas radialmente.
- ▶ Artificialmente por aceleración por imanes en maquinas sincrotrones.
- ▶ Naturalmente por electrones relativistas desviados por campos magnéticos en el espacio.

## Emisión Sincrotrónica

Factor de Lorentz:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Energía del electrón relativista

$$E = \gamma m_e c^2$$

Frecuencia característica de sincrotrón:

$$\nu_c = \frac{\gamma^2 e B}{2\pi m_e c} \propto \gamma^2 B$$

## Emisión Sincrotrónica

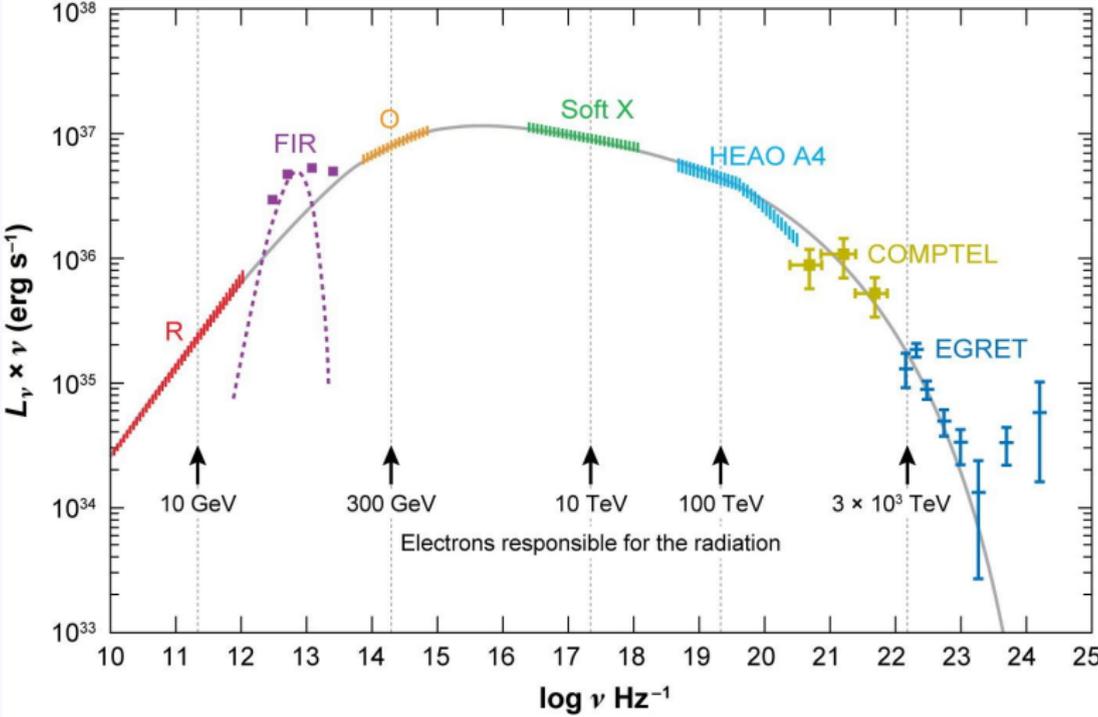
Energía emitida por unidad tiempo:

$$\dot{E} = \frac{2e^4}{3m_e^2c^3} B^2 \gamma^2 \propto B^2 \gamma^2$$

Tiempo característico de pérdida de energía:

$$\tau = \frac{E}{\dot{E}} \propto \frac{1}{B^2 \gamma}$$

# Emisión Sincrotrónica



## Emisión Sincrotrónica

- ▶ Espectro se aplana a  $10^{15}$  Hz
- ▶ Se atribuye a enfriamiento de los electrones relativistas (cansancio)
- ▶ Tiempo desde la explosión es 956 años

$$\tau = \frac{17}{B^2 \gamma} \text{yrs}; \quad \nu_c = 4 \times 10^6 B \gamma^2 \text{Hz}$$

$$\rightarrow B \sim 10^{-4} \text{G}$$

## Un pulsar impulsa la nebulosa

- ▶ Fuente pulsante de radio descubierto en Arecibo en noviembre 1968
- ▶ Fue detectado en el óptico en enero 1969
- ▶ Primer pulsar óptico
- ▶ Periodo  $P = 33\text{ms}$
- ▶ Decaemiento  $\dot{P} = 4.21 \times 10^{-13}$

## Un pulsar impulsa la nebulosa

- ▶ Velocidad Angular

$$\Omega = \frac{2\pi}{P}$$

- ▶ Frenado

$$\frac{d\Omega}{dt} = -K\Omega^n$$

$K$ ,  $n$  son constantes

- ▶ Obtener  $K$  y  $n$  (índice de frenado) por observar  $\Omega, \dot{\Omega}, \ddot{\Omega}$ .

$$K = 4.66 \times 10^{-15}$$

$$n = \frac{\Omega \ddot{\Omega}}{\dot{\Omega}^2} = 2.509$$

## Un pulsar impulsa la nebulosa

- ▶ Velocidad angular inicial

$$\Omega_i = [\Omega_p^{1-n} - K(t_p - t_i)(n-1)]^{1/(1-n)} = 325.757\text{s}^{-1}$$

- ▶ Periodo inicial

$$P_i = \frac{2\pi}{\Omega_i} = 19.3\text{ms}$$

- ▶ Pérdida de energía rotacional

$$\dot{E}_{\text{rot}} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} I \Omega^2 \right)$$

## Un pulsar impulsa la nebulosa

- ▶ Energía rotacional se convierte en luminosidad de radiación y emisión de partículas en forma de un viento ultrarelativista.
- ▶ Momento de inercia  $I = \frac{2MR^2}{5}$  con  $M \sim 1.4M_{\odot}$  y  $R \sim 10$  km.
- ▶ Luminosidad “*spin down*” (frenado) es  $\dot{E}_{\text{rot}} = 5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$  (130,000  $L_{\odot}$ )

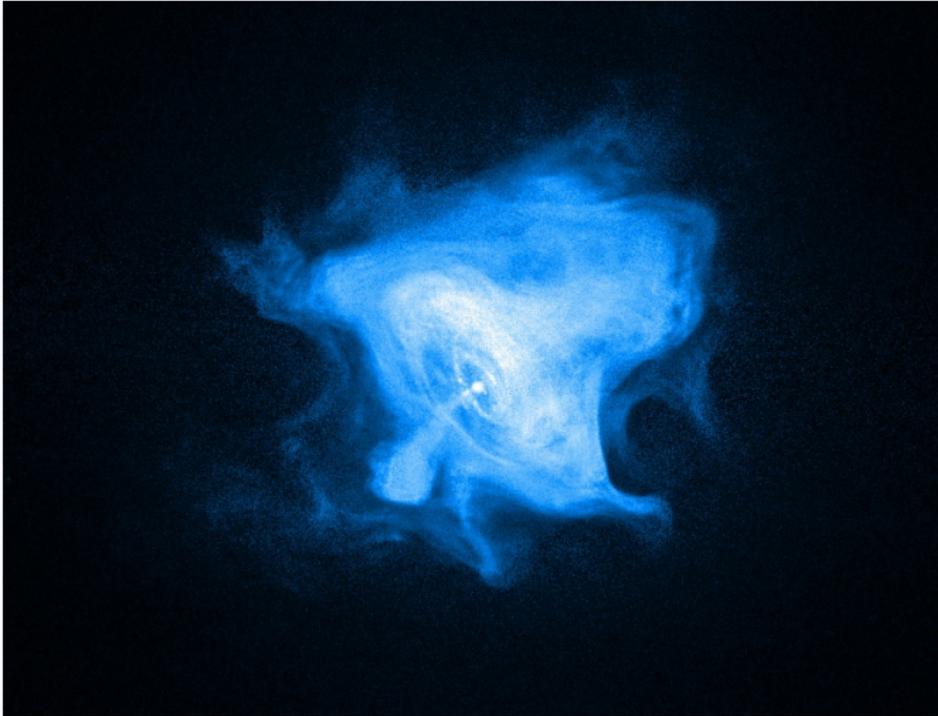
## Un pulsar impulsa la nebulosa

Luminosidad integrada de la emisión sincrotrónica: 25 %

Trabajo hecho para acelerar los filamentos ópticos: 25 %

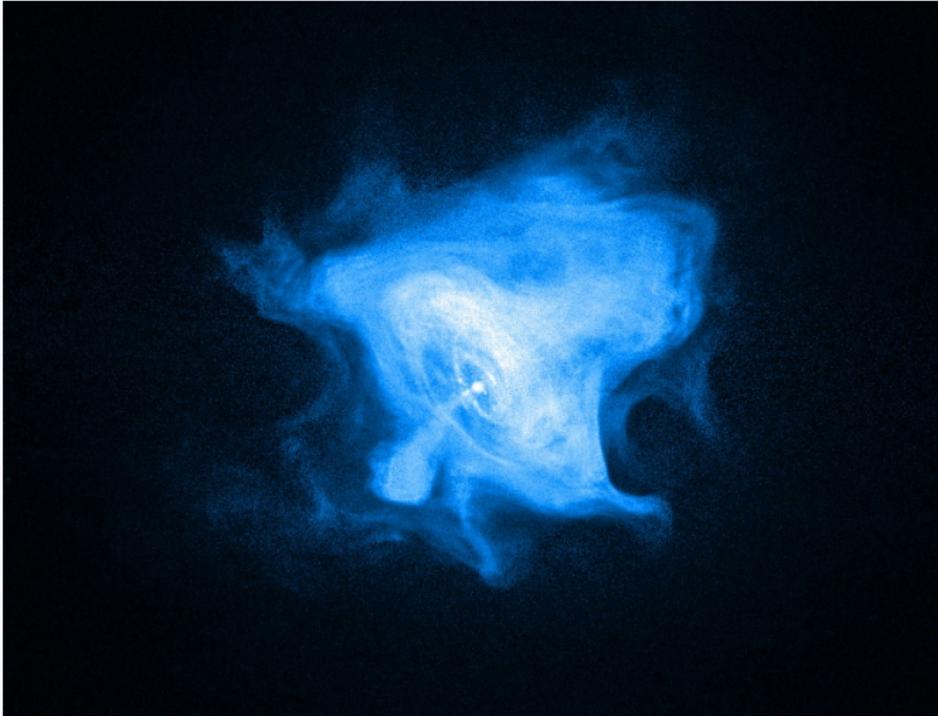
Energía atrapada en la nebulosa sincrotrónica (presión): 50 %

## Viento del pulsar



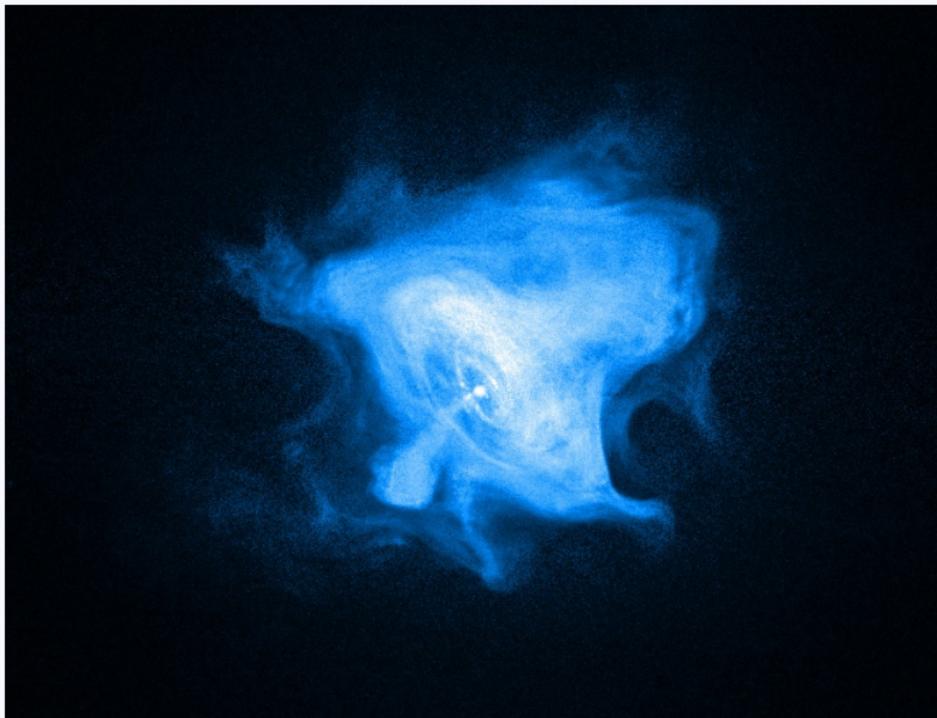
Emisión de rayos- $\gamma$  duros del pulsar se convierte en pares  $e^+/e^-$

## Viento del pulsar



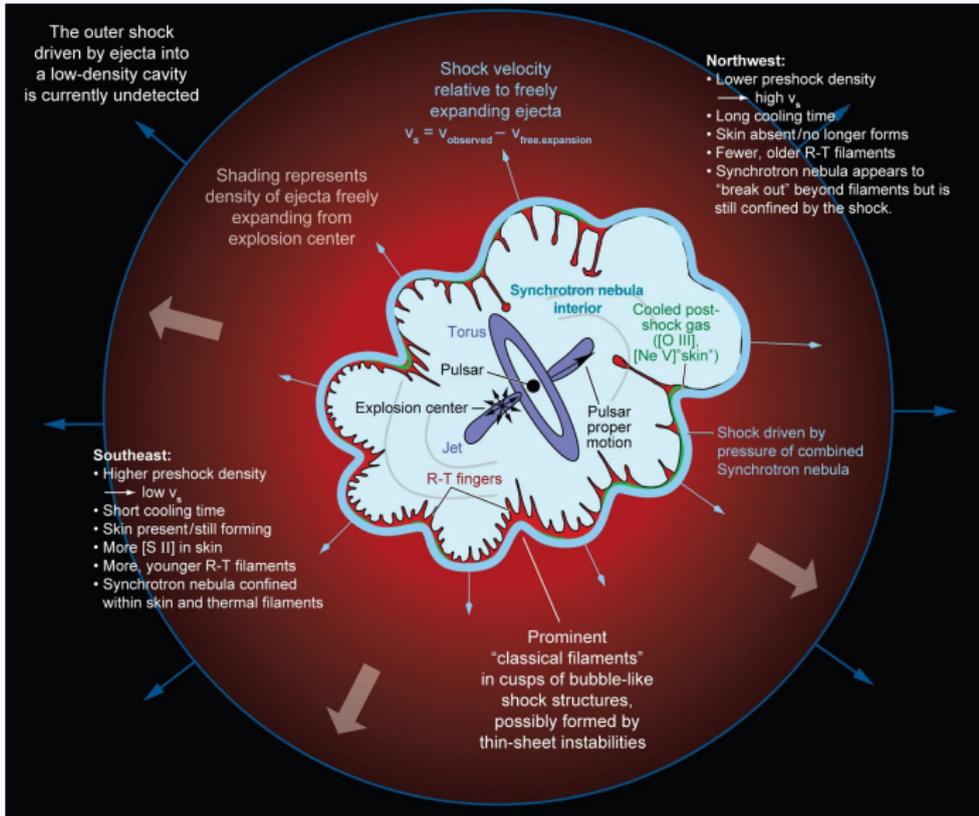
Viento sale frío y rápido

## Viento del pulsar

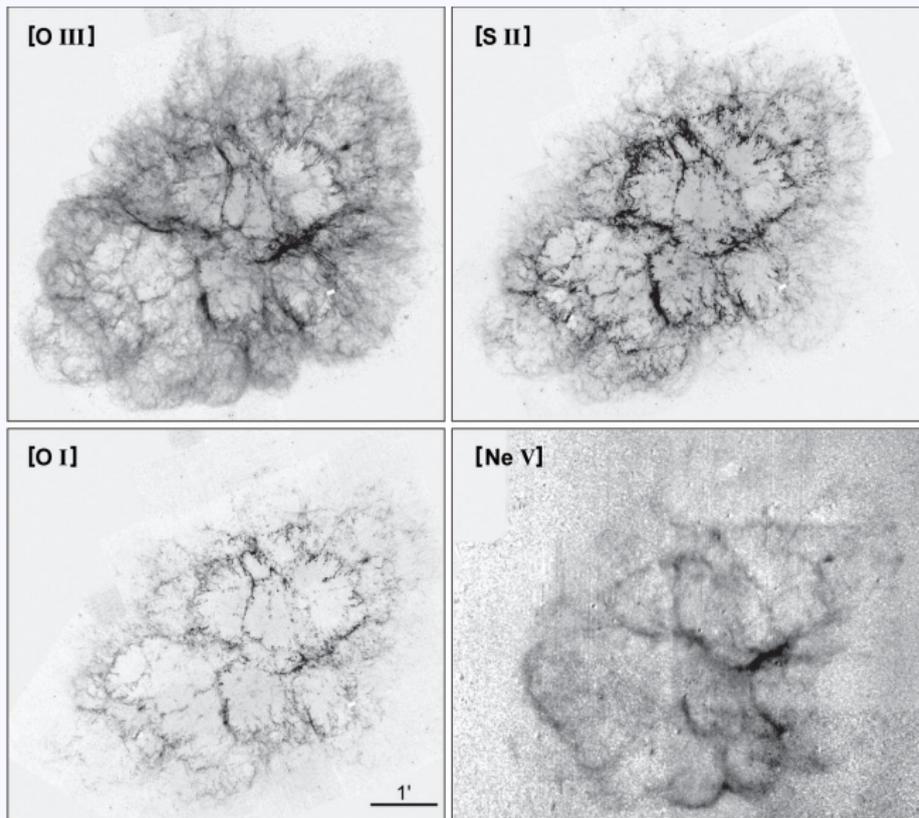


Choque a  $3 \times 10^{17}$  cm (0.1 pc) del pulsar: se convierte en plasma caliente

# Estructura de la nebulosa del Cangrejo



# Remanente de supernova



## Resumen nebulosa del Cangrejo

- ▶ Nebulosa observable es la burbuja del viento del pulsar.
- ▶ Filamentos son eyecta chocado por choque impulsado por nebulosa sincrotrónica.
- ▶ Se ven  $\sim 5M_{\odot}$  del estimado  $> 8M_{\odot}$  eyectados.
- ▶ Energía del pulsar es transferida a la nebulosa: emisión sincrotrónica y aceleración de filamentos.
- ▶ Filamentos formados por inestabilidades Rayleigh-Taylor.
- ▶ Fotoionizados por continuo sincrotrónico.
- ▶ Choque externo no observado: expansión dentro de una cavidad.