

# ***evolución estelar***

# evolución post-Secuencia Principal

## b) estrellas de alta masa: $>4M_{\odot}$

estrellas de SP con  $M > 4 M_{\odot}$  dejan remanentes  $> 1.4 M_{\odot}$  y no pueden ser sostenidos por la presión de los e- degenerados

**el corazón se contrae**  $\Rightarrow$  **las capas externas se expanden**



**hasta que comienza la quema del C ( $T=6000000000^{\circ}\text{K}$ )**

**se acaba el C**

**el corazón se contrae**  $\Rightarrow$  **las capas externas se expanden**



**hasta que comienza la quema del O ( $T=15000000000^{\circ}\text{K}$ )**

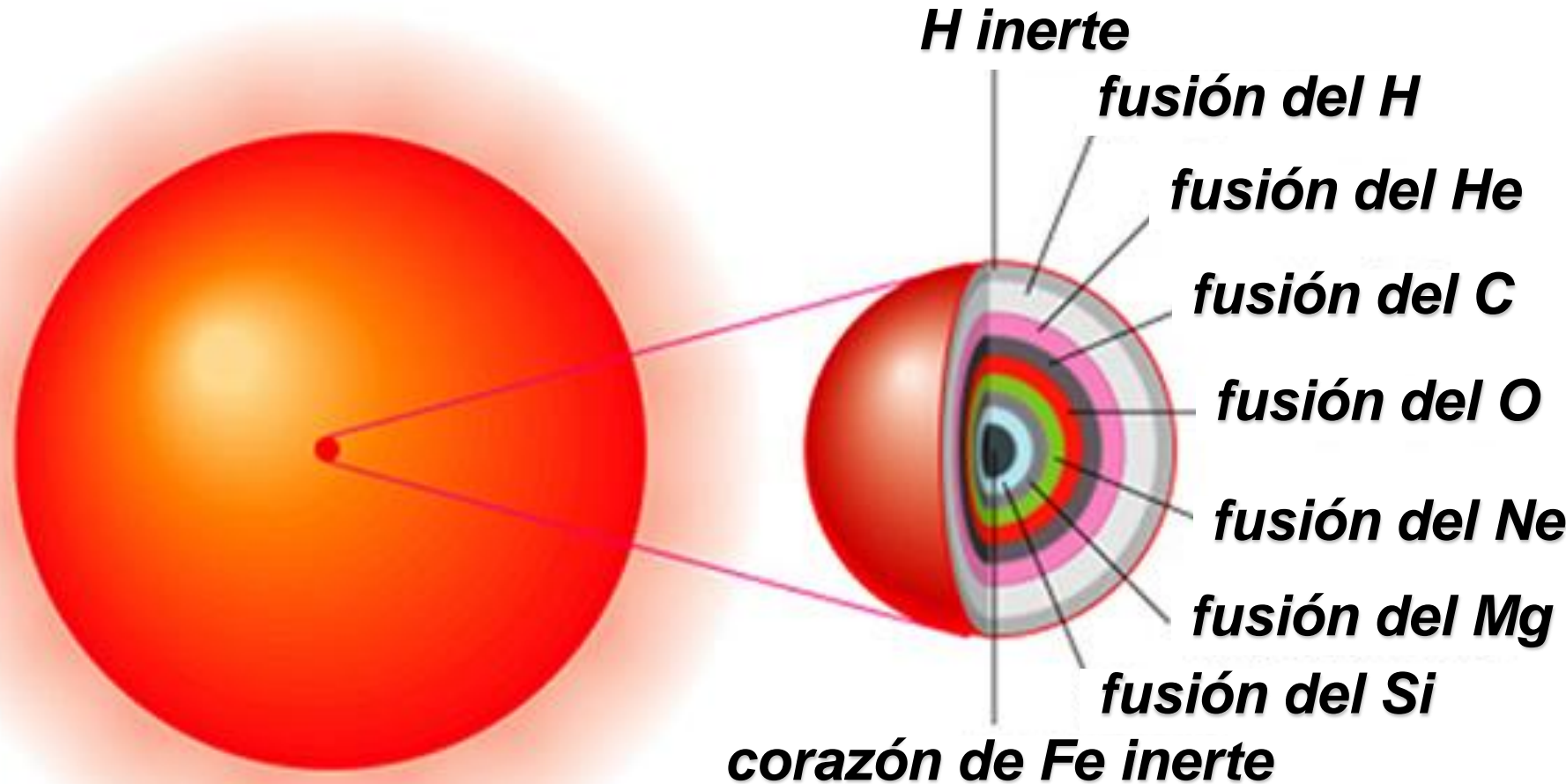
**se acaba el O**

**⋮**

**hasta el Fe!!**

**cada sucesiva ronda de fusión nuclear  
se completa más rápidamente**

# estructura interna de una estrella de alta masa en sus últimas etapas de evolución



**al finalizar cada sucesiva ronda de fusión nuclear, el corazón se contrae y las capas exteriores se expanden**



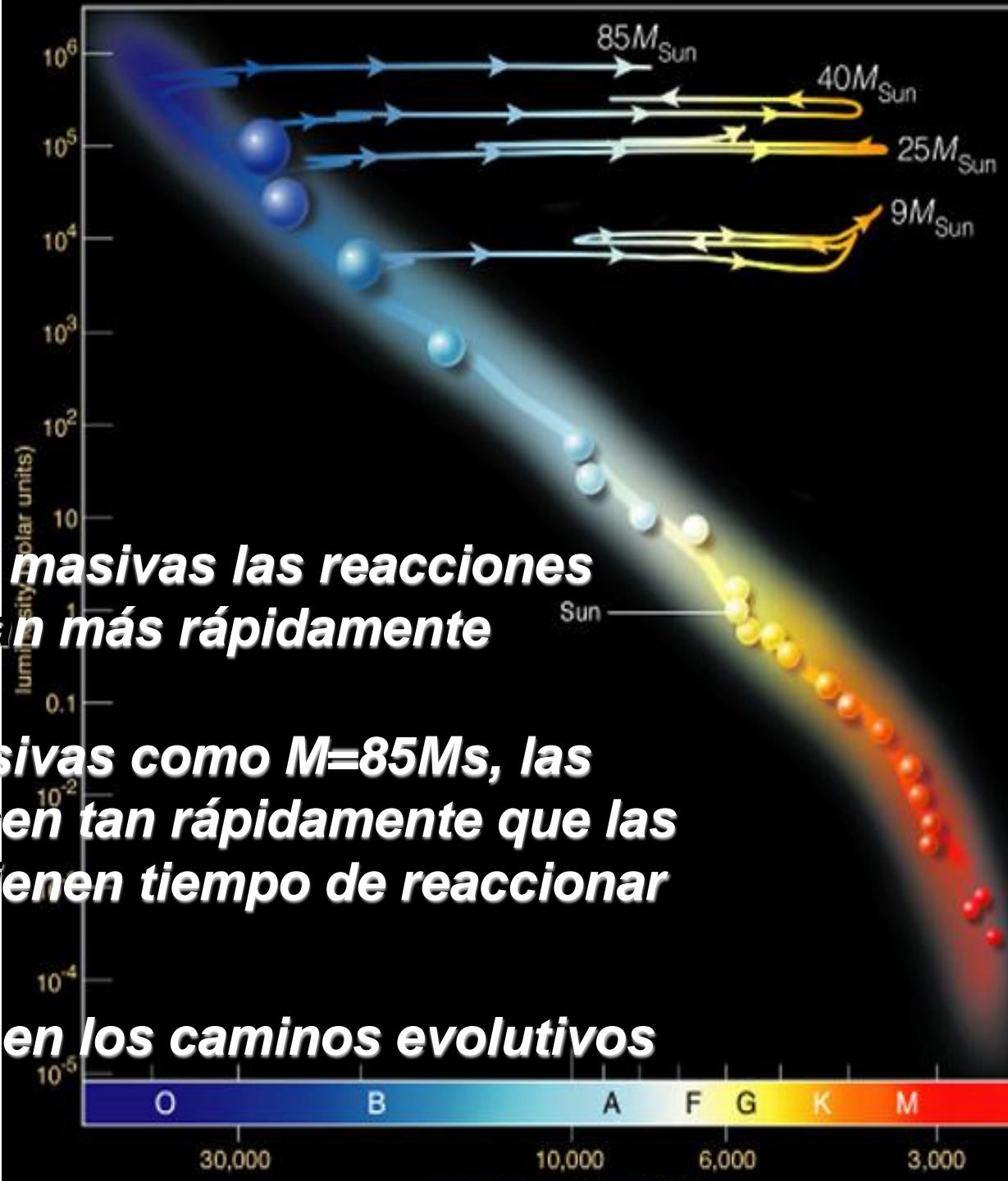
**supergigante**

**para las estrellas más masivas las reacciones nucleares se completan más rápidamente**

**para estrellas tan masivas como  $M=85M_{\text{Sun}}$ , las reacciones se producen tan rápidamente que las capas exteriores no tienen tiempo de reaccionar**



**no se observan loops en los caminos evolutivos**



***el corazón de Fe se contrae***

***el Fe es el elemento más pesado que puede formarse por fusión nuclear liberando energía***

***la fusión del Fe con otros elementos para formar elementos más pesados absorbe energía***

***no hay reacciones nucleares y la presión de degeneración de los e- no puede detener la contracción***

**$\rho \uparrow \rightarrow T \uparrow \rightarrow$  fotodesintegración del Fe**

**$p^+$**   
 **$e^-$**   
 **$n + \gamma$**   
**no pueden escapar libremente a  $\rho$  tan altas**

- la presión de degeneración de los n detiene la contracción***
- estrella de neutrones***

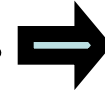
***si  $4M_s < M < 9M_s$***

*el material abruptamente se vuelve incompresible  
y el colapso se detiene*



*el material de las capas exteriores (con  $v \approx 15\%c$ ) rebota*

*onda de choque acelerada  
hacia afuera  
+ fuerza creada por  $\gamma$*



*expulsión de las últimas  
capas hacia afuera en una  
gran explosión*



*supernova de tipo II*



*brilla como una galaxia*

*el material se comprime*

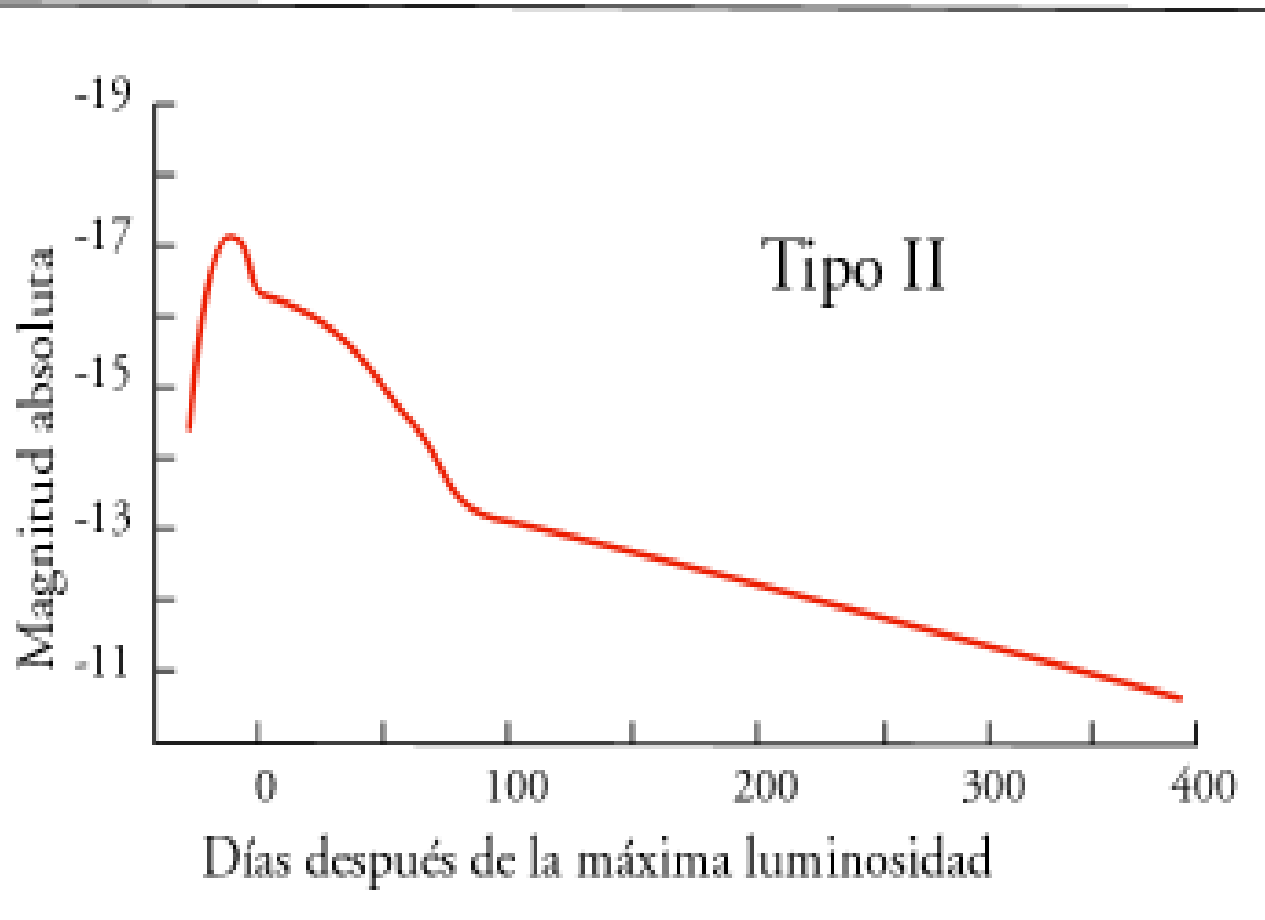


*fusión de los elementos*



*creación de los elementos  
más pesados que el Fe*

## curva de luz de una supernova Tipo II



***el brillo  
aumenta  
rápidamente  
hasta alcanzar  
un máximo y  
luego decae  
variando su  
pendiente***

**b1) si  $4M_{\odot} < M < 9M_{\odot}$ , después de la explosión**

**remanente de supernova**

**estrella de neutrones**

**material alejándose de la  
estrella a altas velocidades**

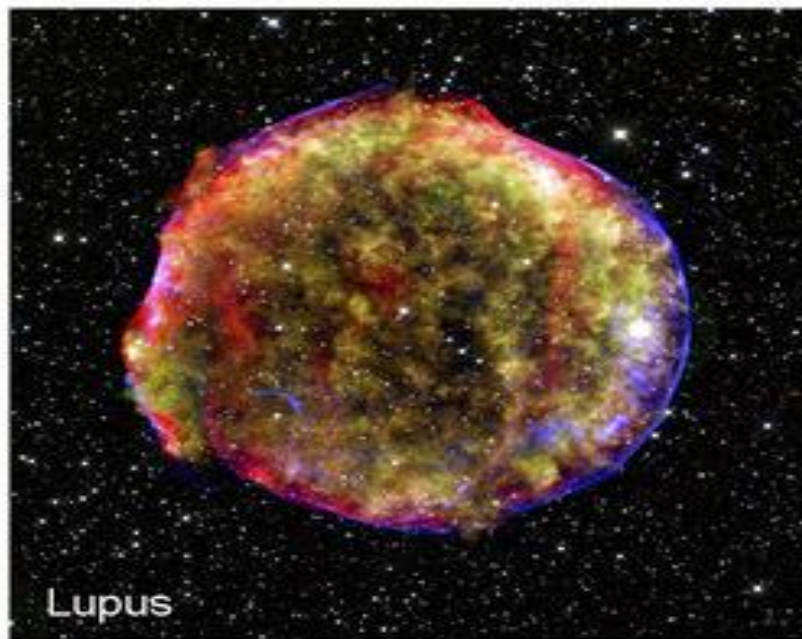
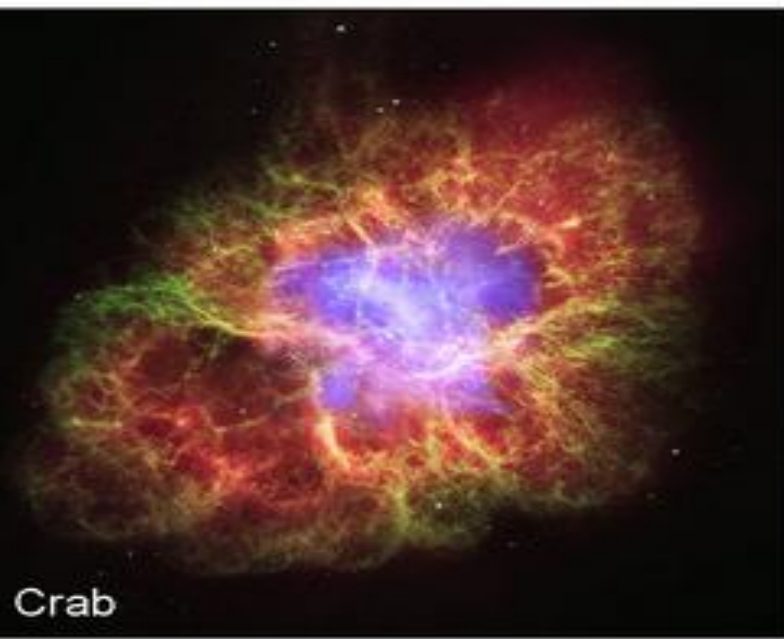
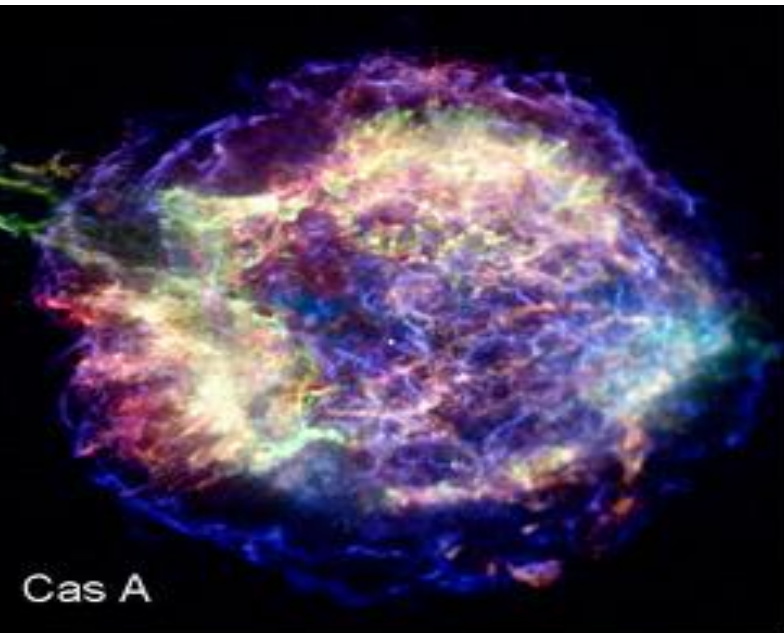
**1000-2000km/s**

### **supernovas famosas**

<b>SN 1054 o Neb. del Cangrejo Tauro (obs. en China)</b>	<b>Tipo II</b>
<b>SN 1572 o de Tycho</b>	<b>Cassiopea Tipo I</b>
<b>SN 1604 o de Kepler</b>	<b>Ofiuco Tipo I</b>
<b>SN 1006</b>	<b>Lupus Tipo I</b>



# imágenes de remanentes de supernovas



# estrella de neutrones (EN)

**EN: última etapa de evolución de una estrella de  $4M_{\odot} < M < 9M_{\odot}$**

**remanente estelar de neutrones con  $1.4M_{\odot} < M < 3M_{\odot}$**

**sostenida por la presión degeneración de los n**

**estrellas de SP con  $M > 9M_{\odot}$  dejan remanentes  $> 3M_{\odot}$  y no pueden ser sostenidos por la presión de los n degenerados**

**$M=3M_{\odot}$  → límite de Tolman-Oppenheimer-Volkoff**

**temperaturas superficiales de millones de °K**

**muy pequeña! si  $M=2M_{\odot}$ ,  $R=8\text{km}$**

**muy poco luminosas**

# estructura de una EN



*no hay reacciones termonucleares en el interior de una EN*

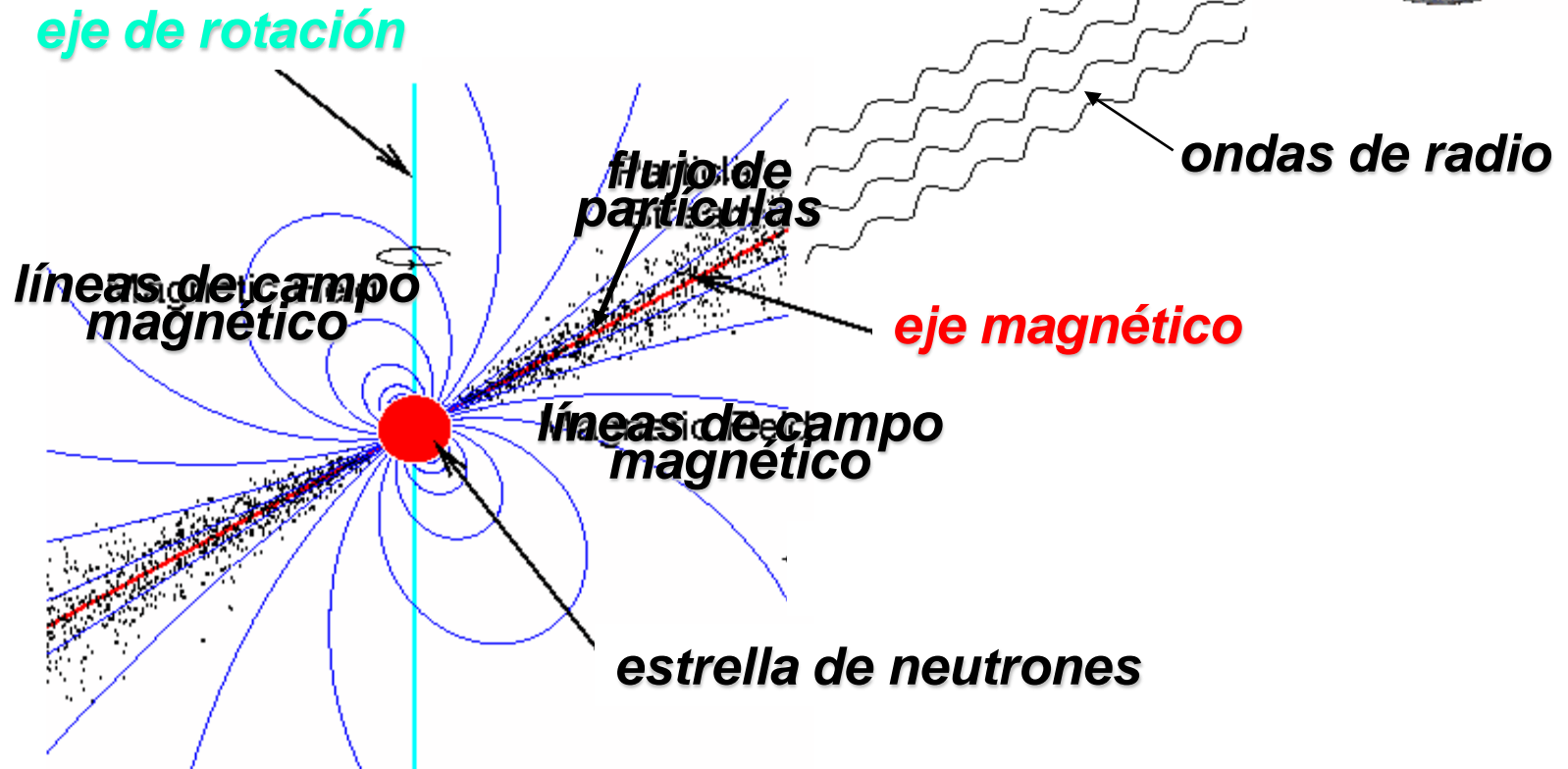
*gradualmente se enfriará*

gran contracción → **alta rotación** → **fuertes campos magnéticos**

**p+ y e- cerca de la superficie son acelerados  
fluyen por las regiones polares, se aceleran y emiten  
energía en radio (los muy jóvenes también en el visible)**

haz de luz en una dirección + rotación

**pulsar!** = luz pulsante periódica



**imágenes de la nebulosa del cangrejo y el pulsar,**  
**remanentes de la supernova 1054**

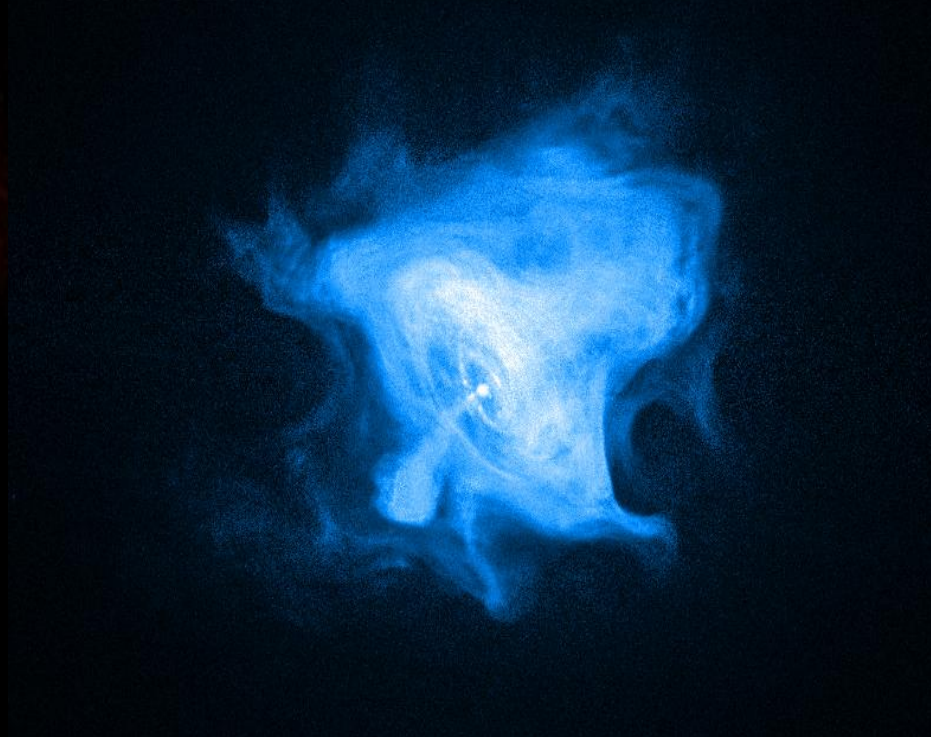
**velocidad de expansión=1400km/s**

Crab Nebula  
ROSAT HRI  
0.1-2.0 keV



30 arcsec

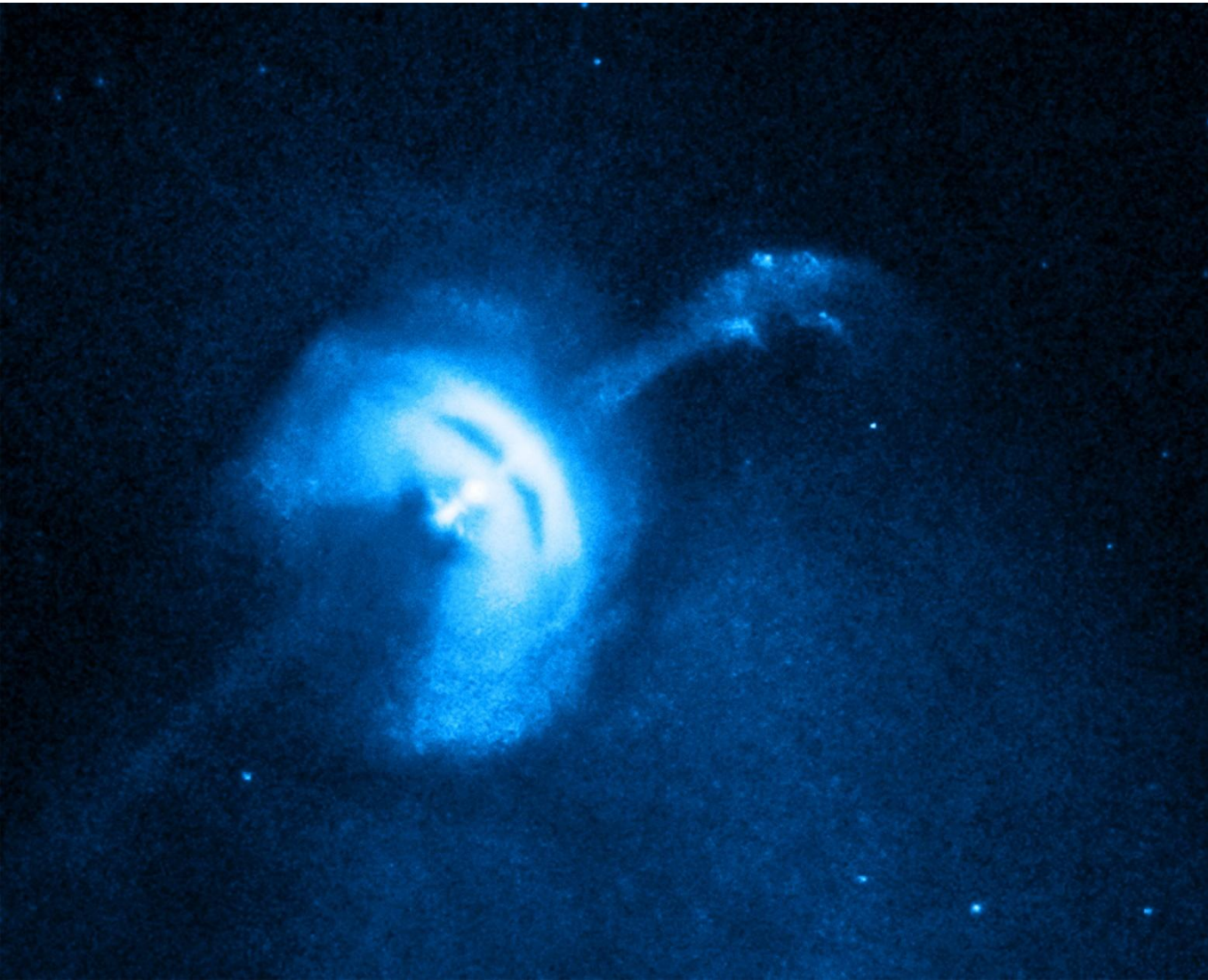
Crab Nebula  
CHANDRA  
0.5-8.5KeV



2 arcmin

# *pulsar de Vela (imagen de CHANDRA)*

*1000 años luz de la tierra*



***b2) si  $M > 9M_{\odot}$ , después de la explosión***



***remanente de supernova***



***algunas capas de la envoltura  
expulsada en la fase de SN son  
atraídas nuevamente por la estrella***



***segundo colapso***



***brote de rayos gama***



***agujero negro***



***destello de radiación durante  
segundos, en forma de jet  
bipolar, debido a material  
acretado por el agujero negro***

# agujeros negros

**agujeros negros de masa estelar**

**última etapa de evolución de  
una estrella de gran masa**

**agujeros negros supermasivos**

**centro de algunas galaxias y  
originados en el proceso de  
formación de la misma**

**región del espacio dentro de la cual existe suficiente  
cantidad de masa como para generar un campo gravitatorio  
tal que ni las partículas ni la luz pueden escapar de ella.**

**horizonte de sucesos: límite del agujero negro**

**no sabemos que pasa dentro del agujero negro,  
ni teórica ni observacionalmente**



**velocidad de escape**

$$V_e^2 = 2MG/R$$

**horizonte de sucesos**

**o radio de Schwarzschild**

$$R_{sch} = 2MG/c^2 \quad \text{si } M=3M_s, R_{sch}=9\text{km}$$

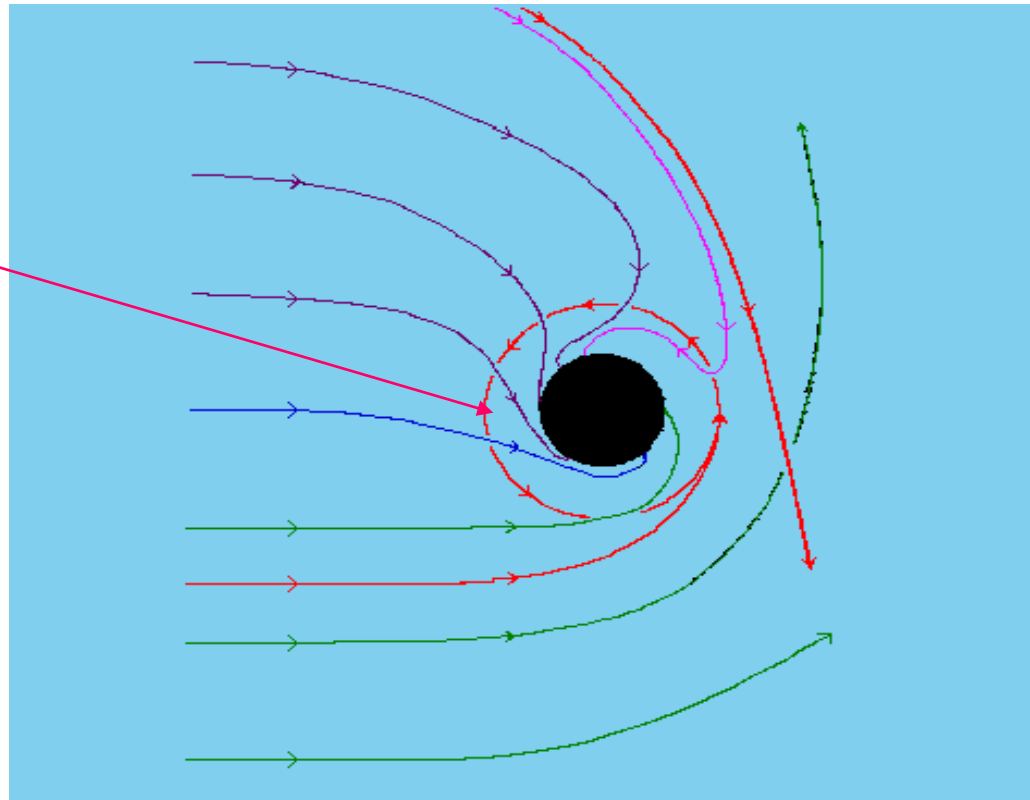
**distancia a la cual  $V_e=c$**

**todo objeto cuya masa esté contenida dentro de su radio de Schwarzschild es un agujero negro**

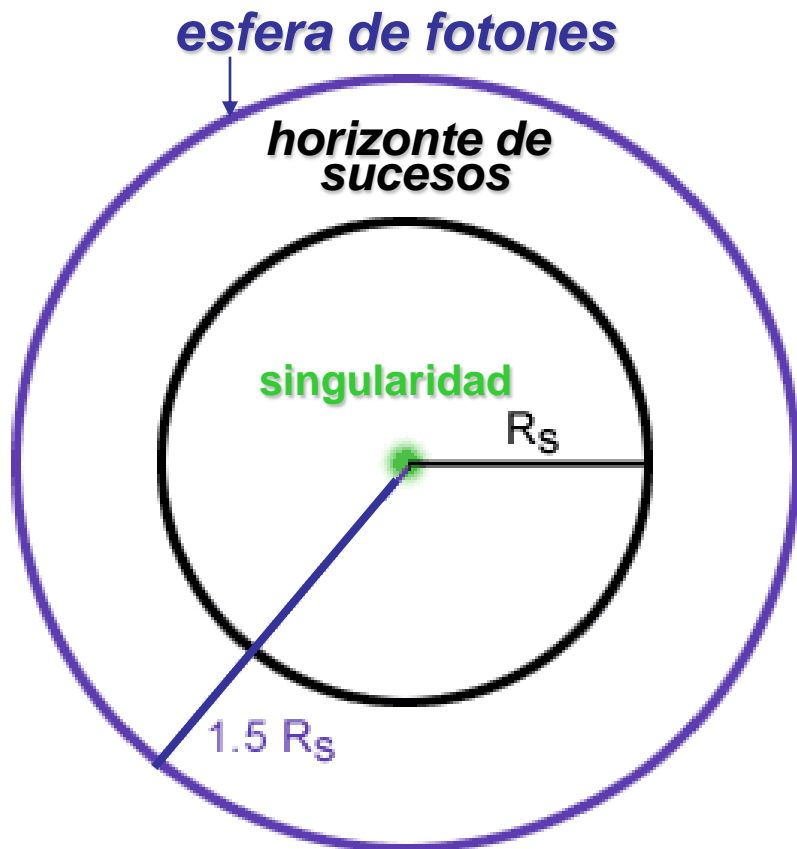
**para la tierra  $R_{sch}=8\text{mm}$**

**esfera de fotones**

**la luz que se acerca suficientemente al agujero negro se curva completamente y los fotones describen órbitas circulares alrededor de él**

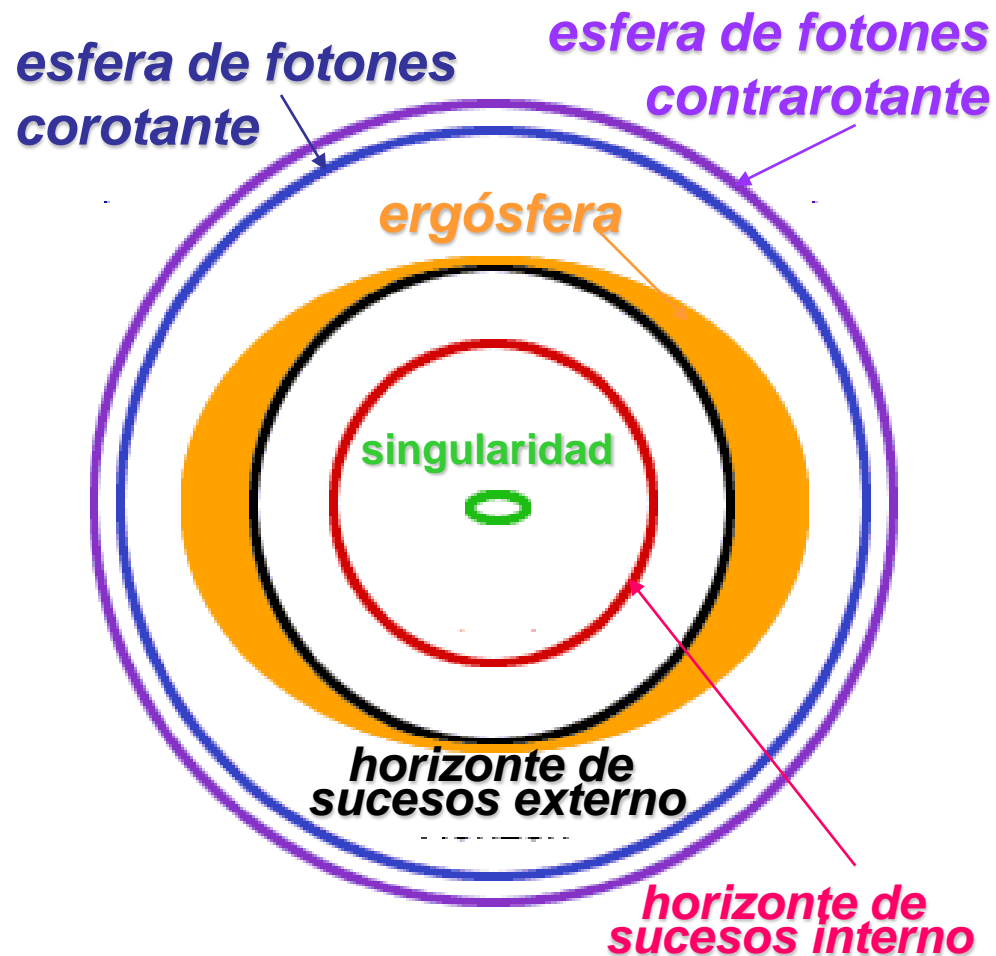


# AN de Schwarzschild sin rotación



# AN de Kerr con rotación

dentro de la ergósfera las partículas corotan con el AN porque el espacio-tiempo rota



# esquema de un AN acretando masa

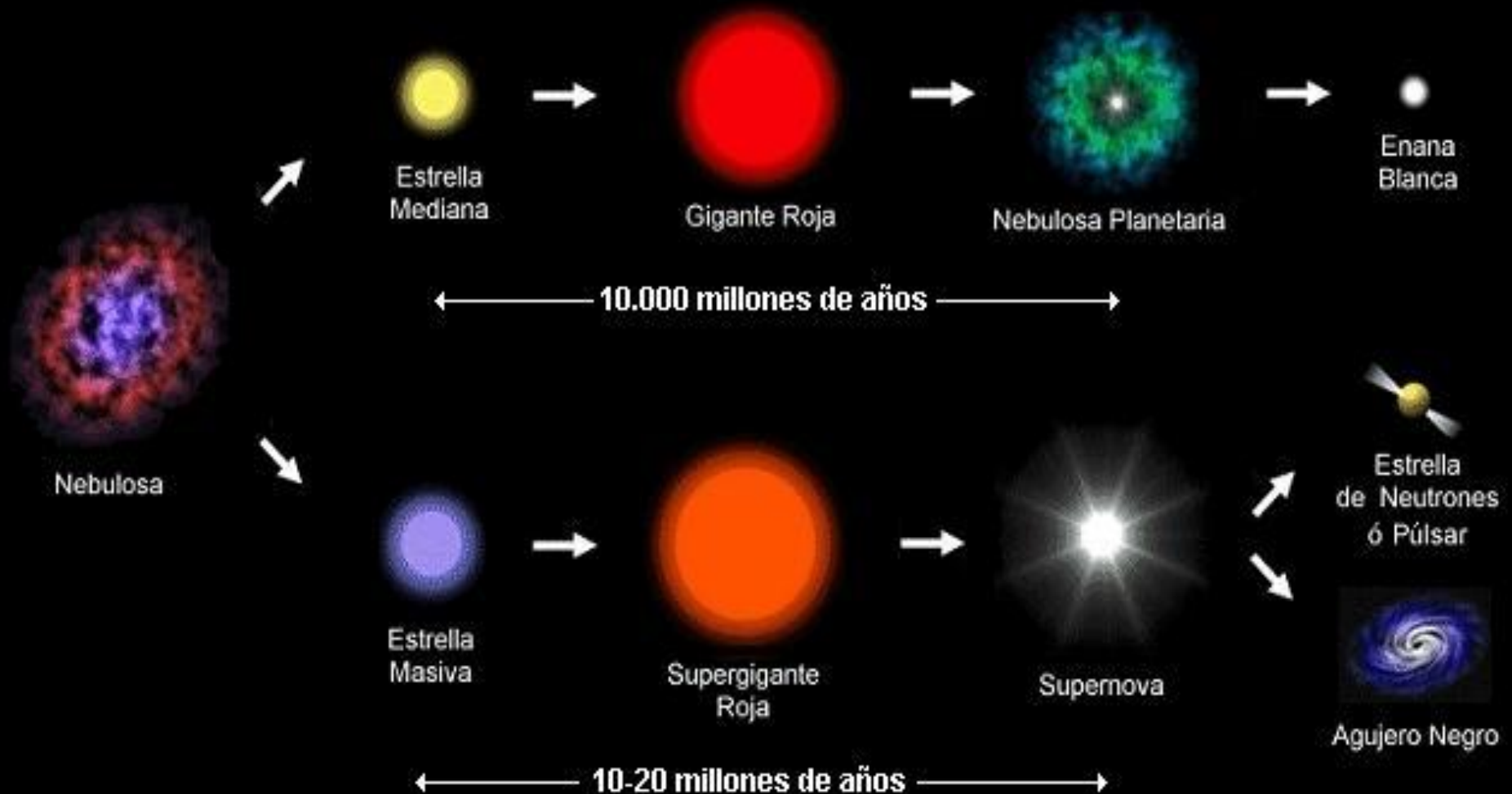
**jet de energía**  
↓  
**partículas aceleradas  
por el intenso campo  
gravitatorio emiten  
energía**



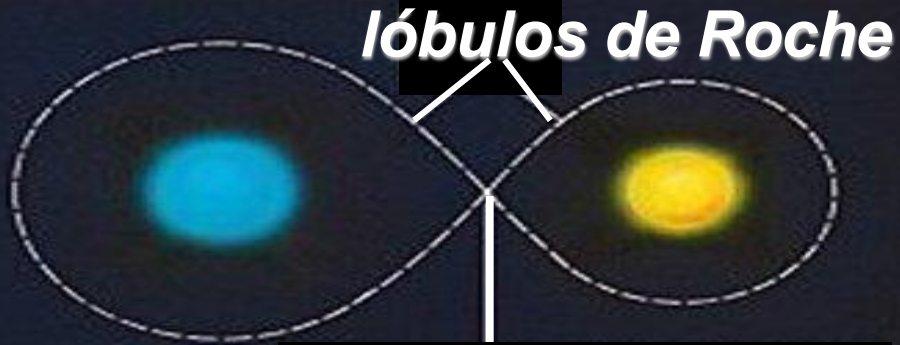
**disco de acreción**

# **la masa es el parámetro que fundamentalmente determina cómo evoluciona una estrella**

**pero también influyen la metalicidad, la rotación y la presencia o no de una compañera**



# evolución en sistemas binarios



**punto de Lagrange**

**sistema separado**  
**ninguna de las estrellas del**  
**par llena su lóbulo de Roche**



**transferencia de**  
**masa**

**sistema semi-separado**  
**una de las estrellas del par**  
**llena su lóbulo de Roche**



**lóbulos de Roche**

**sistema interactuante**  
**ambas estrellas del par**  
**llenan su lóbulo de Roche**

# sistemas binarios con un objeto compacto:

## EB, EN o AN

curva de velocidad  
radial de la estrella  
visible del par

+

masa estimada por  
su tipo espectral

masa de la compañera invisible

$M < 1.4M_s$

enana blanca

$1.4M_s < M < 3M_s$

estrella de neutrones

$M > 3M_s$

agujero negro!

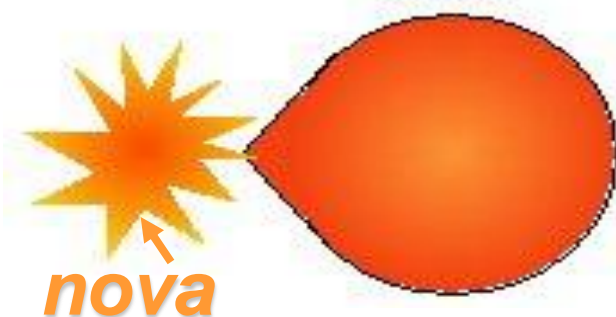
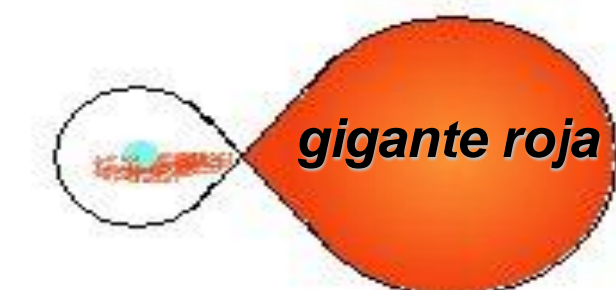
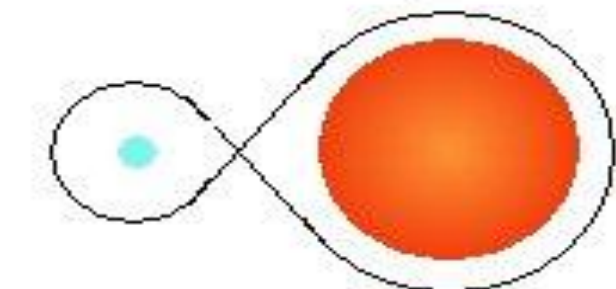
agujeros negros aislados en el universo imposible de detectar

agujeros negros miembros de sistemas binarios son  
detectados por sus efectos sobre la compañera

# sistemas binarios con una EB:

## a) estrellas novias

*lóbulo de Roche*



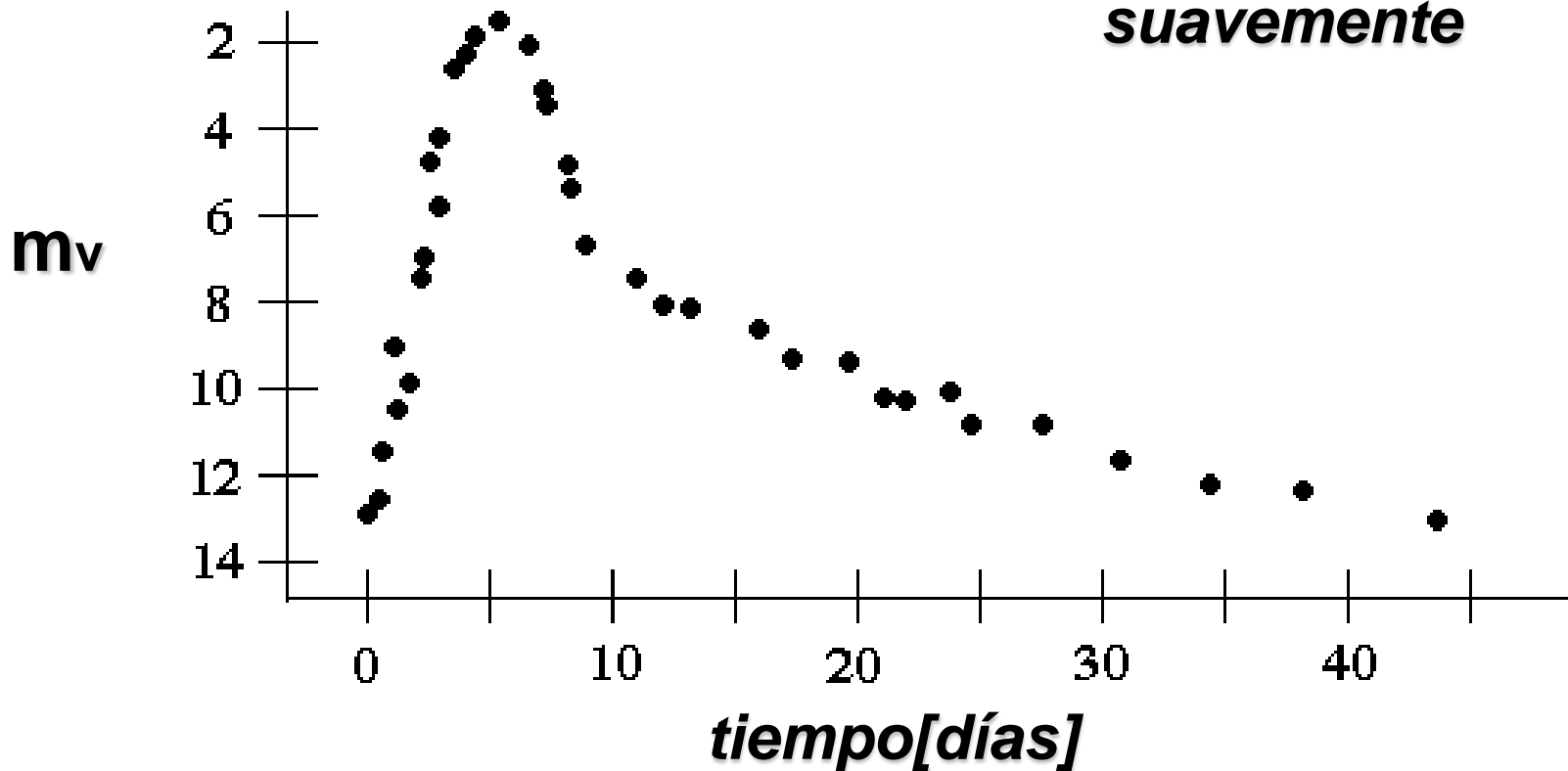
**H y He cae sobre la superficie de la EB, es comprimido y calentado**

**reacciones nucleares explosivas**

**gran emisión de energía! = nova**

# *curva de luz de una nova*

*aumenta abruptamente su  
brillo alcanzando el máximo en  
pocos días, y luego declina  
suavemente*

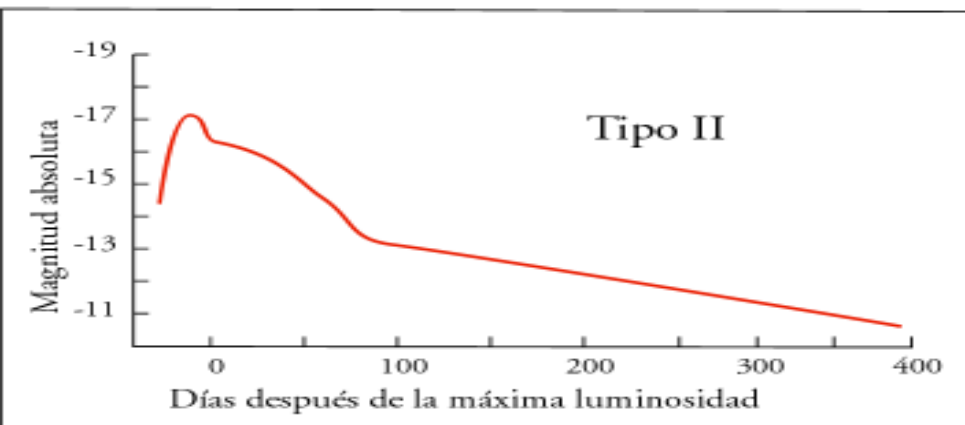
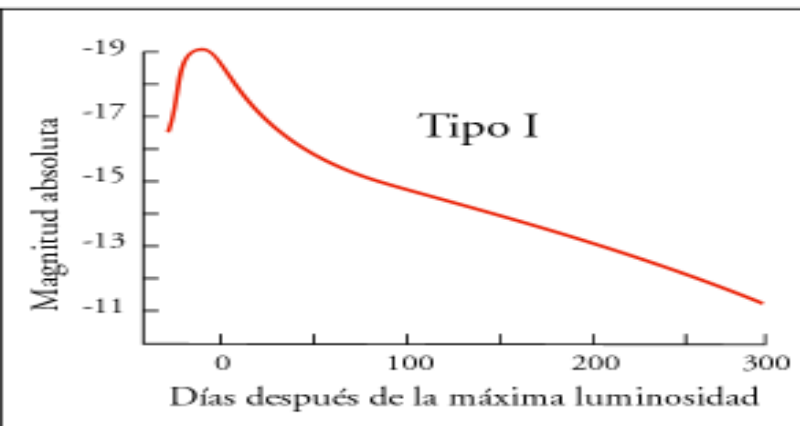




## **b) supernovas de Tipo I**

**se generan en un sistema binario  
en forma similar a una nova**

**en las supernovas de tipo I la enana blanca del par supera el límite de Chandrasekhar por la donación de masa de su compañera y colapsa en un evento de supernova**



**todas las SN Tipo I tienen  
 $M_v$  en el máximo = -19.5mag**



**indicadores de distancia  
hasta 1000Mpc!**

**3200 millones de años luz!**

# sistemas binarios con una EN o un AN

↓  
*disco de acreción*

↓  
*fricción en el disco  
calienta el material:  
millones de grados!*

↓  
*emisión en rayos X* →

**Cygnus X-1**  
*f fuente de rayos X proveniente del  
lugar donde se observa la estrella  
supergigante azul HDE 226868*

↓  
*la emisión de rayos X no puede  
ser de la estrella observada!*

↓  
*del espectro de HDE 226868 se  
deduce además un período de 5.6 días*

↓  
**Cygnus X-1:**  
*agujero negro  
de 8-10Ms*



