

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 ($T=15000000000^{\circ}\text{K}$)

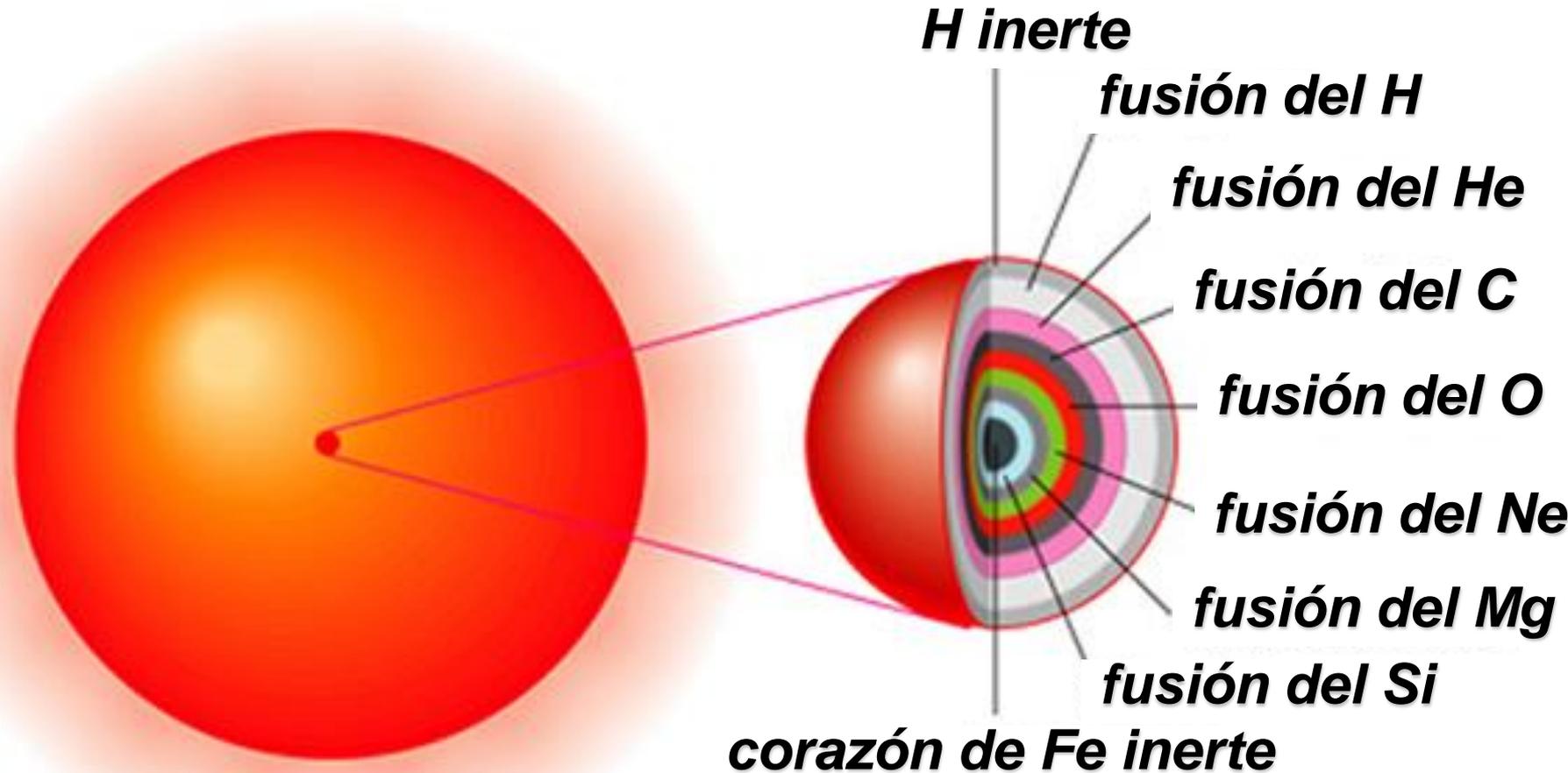
se acaba el O

⋮

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



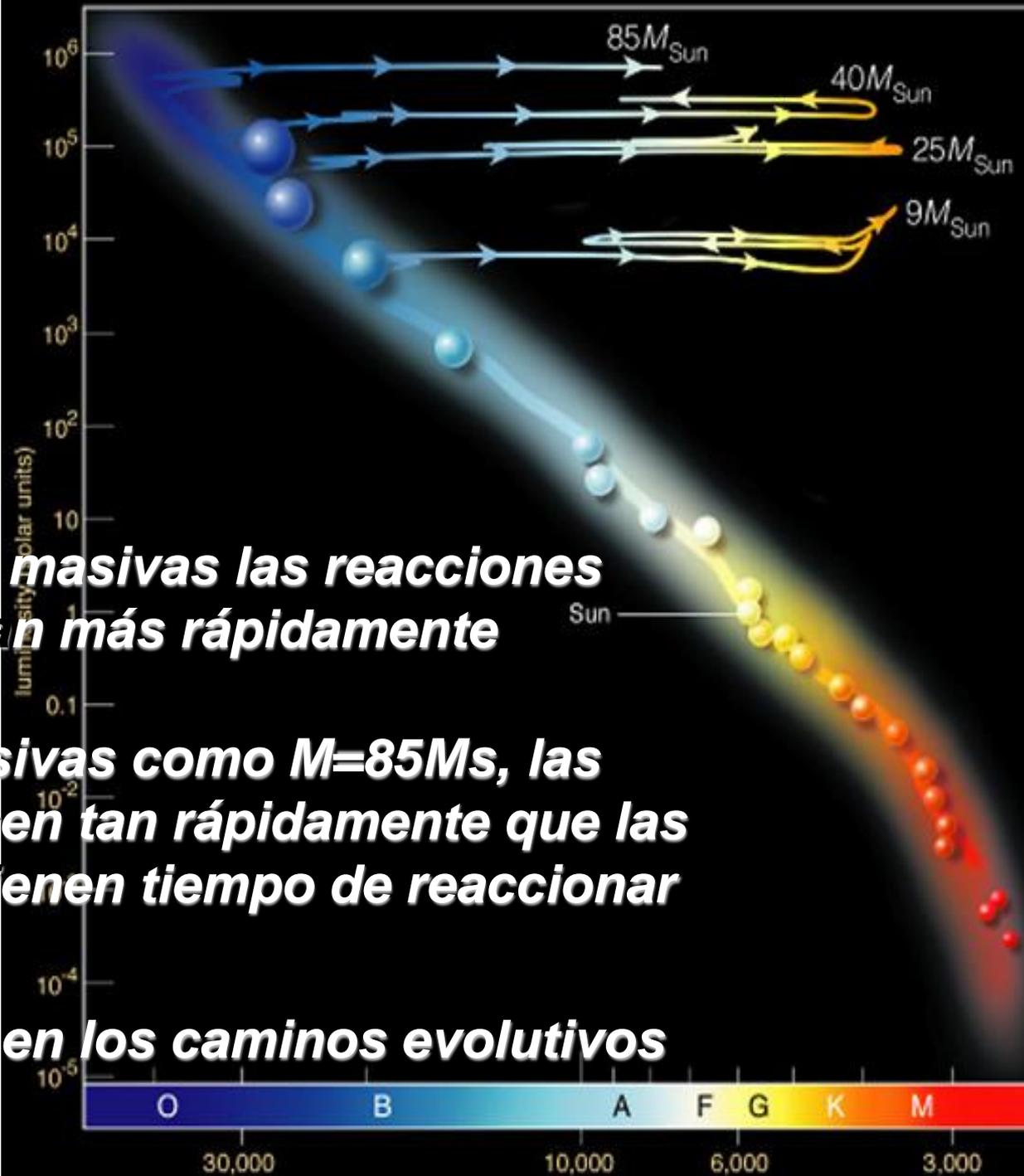
supergigante

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 ρ tan altas

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

si $4M_{\odot} < M < 9M_{\odot}$

*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 γ*



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



supernova de tipo II



brilla como una galaxia

el material se comprime

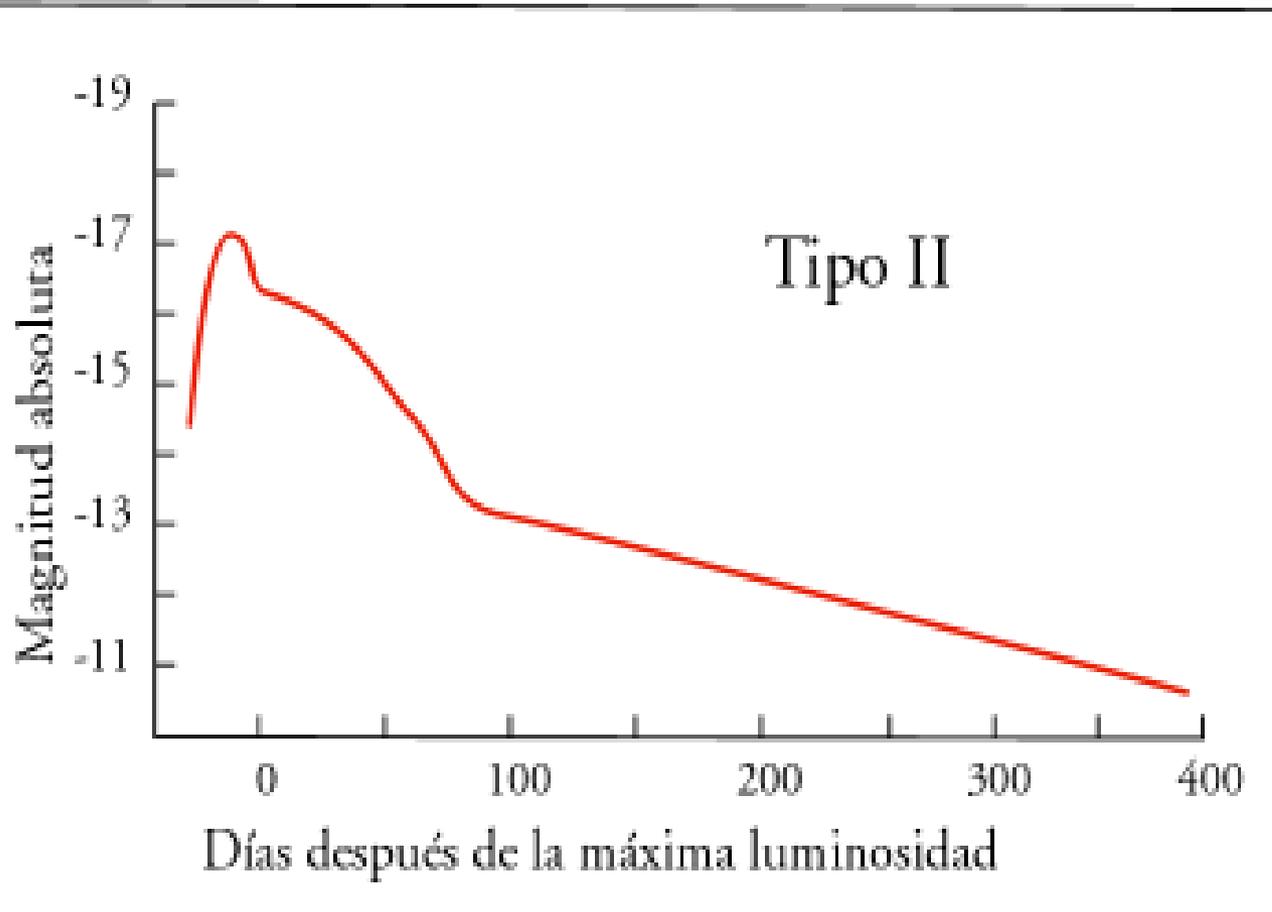


fusión de los elementos



*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

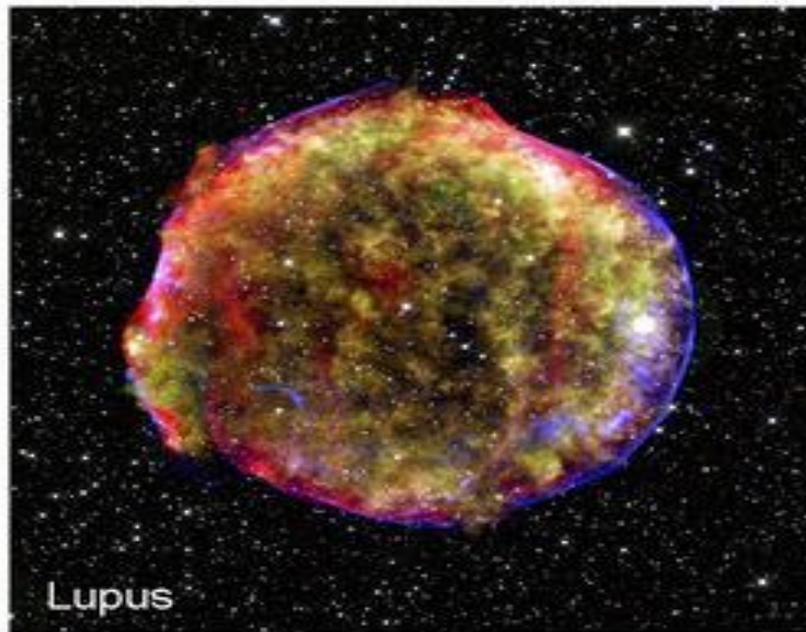
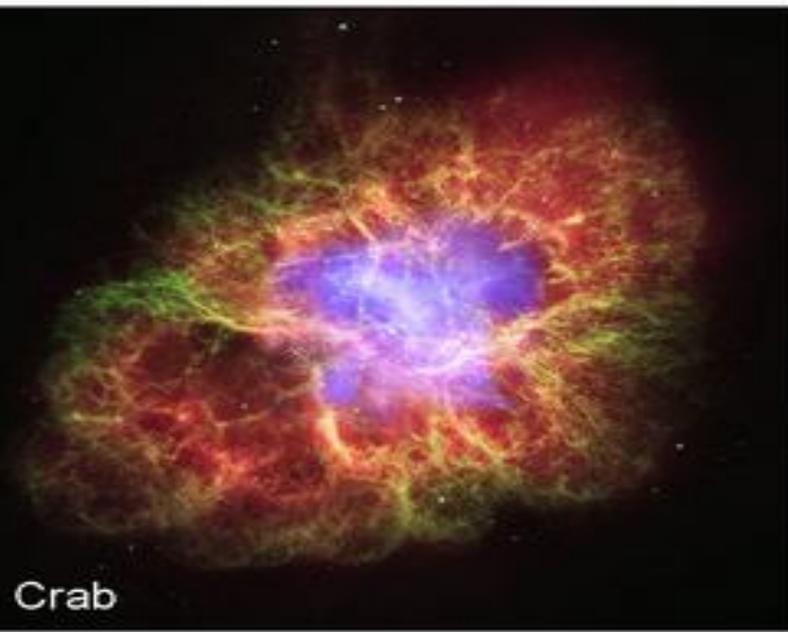
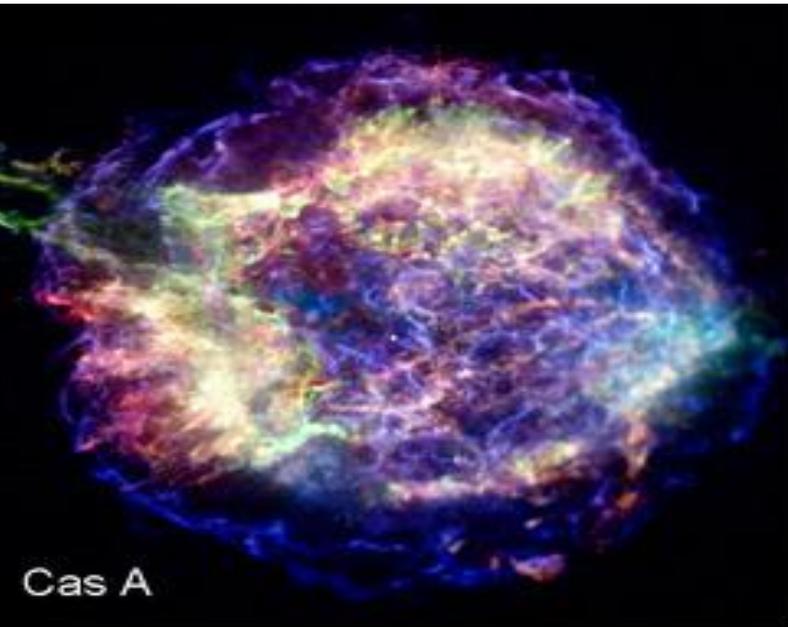
**material alejándose de la
estrella a altas velocidades**

1000-2000km/s

supernovas famosas

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

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

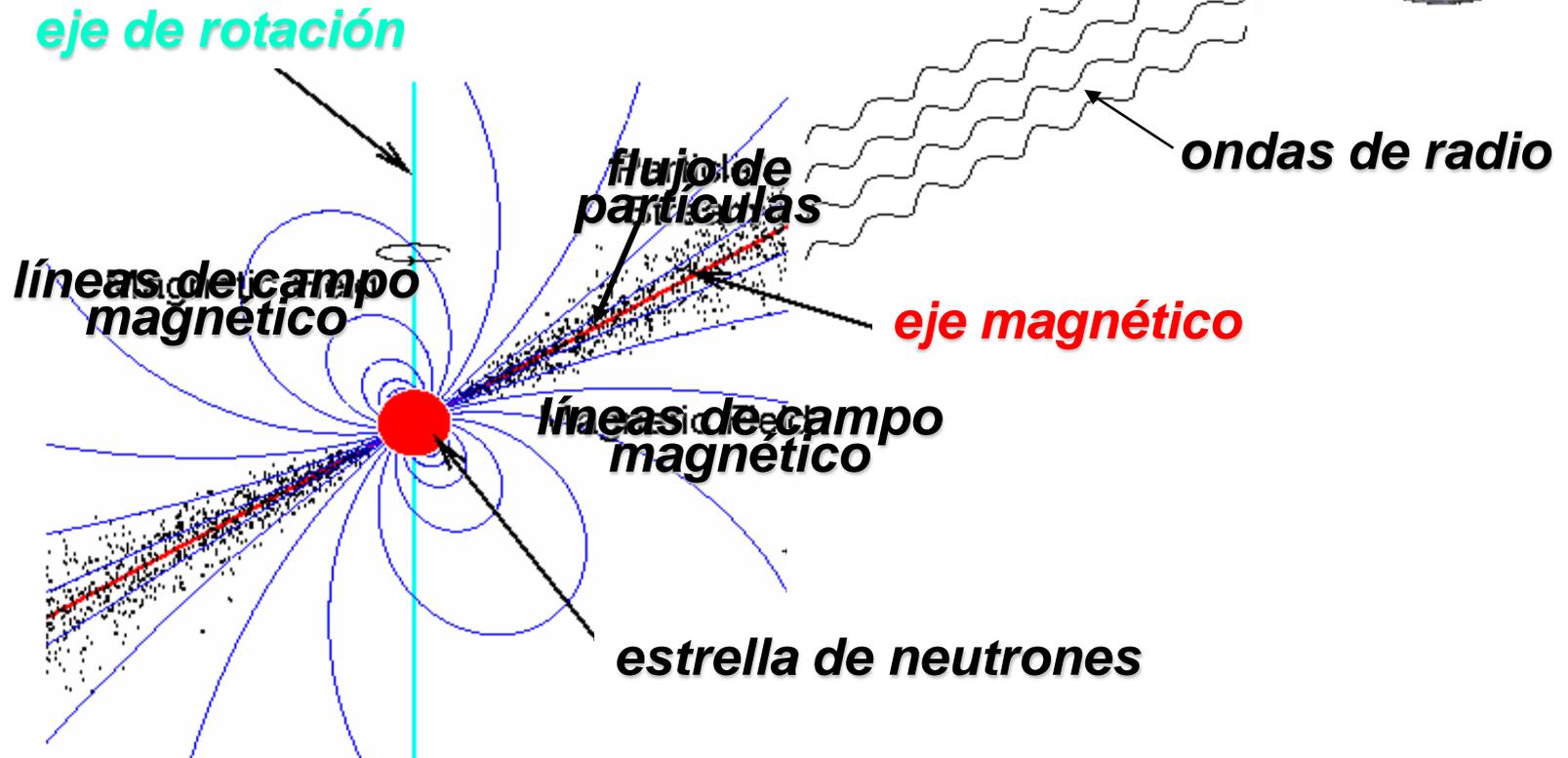
gradualmente se enfriará

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

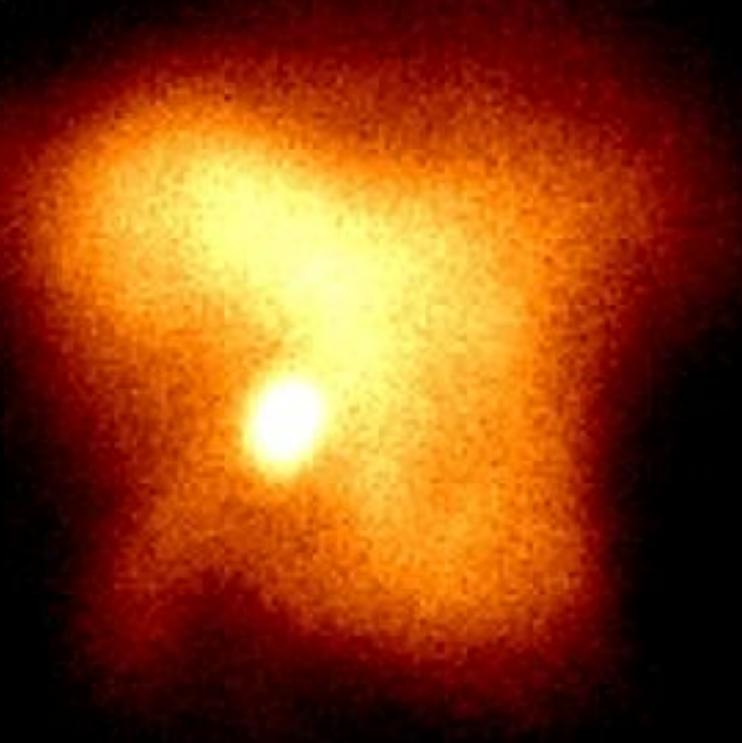
↓
pulsar! = luz pulsante periódica



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

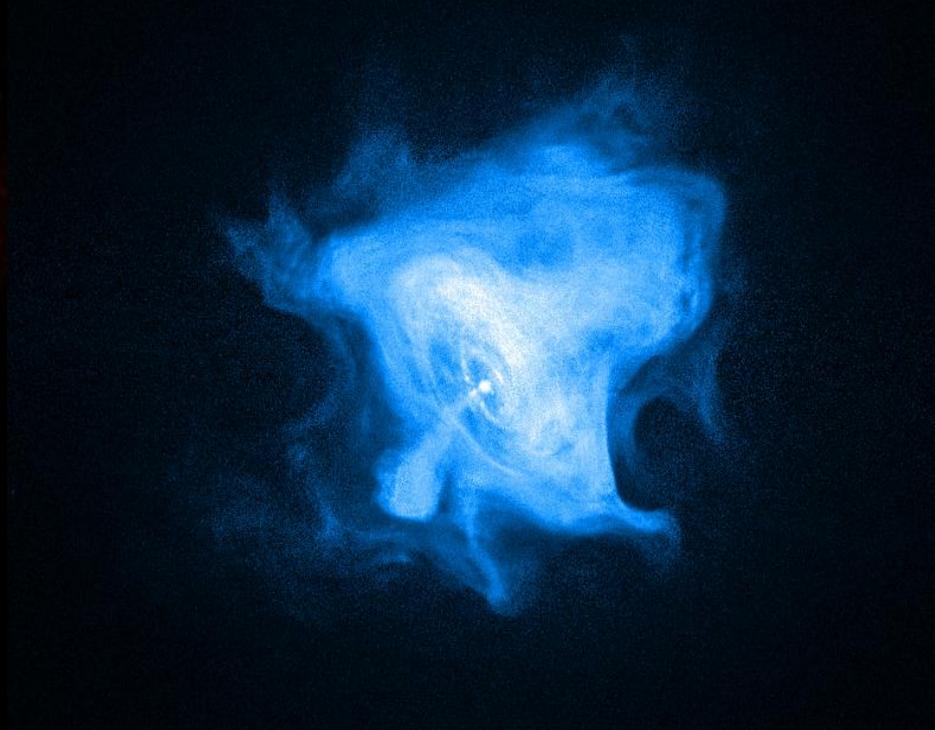
velocidad de expansión=1400km/s

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**

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

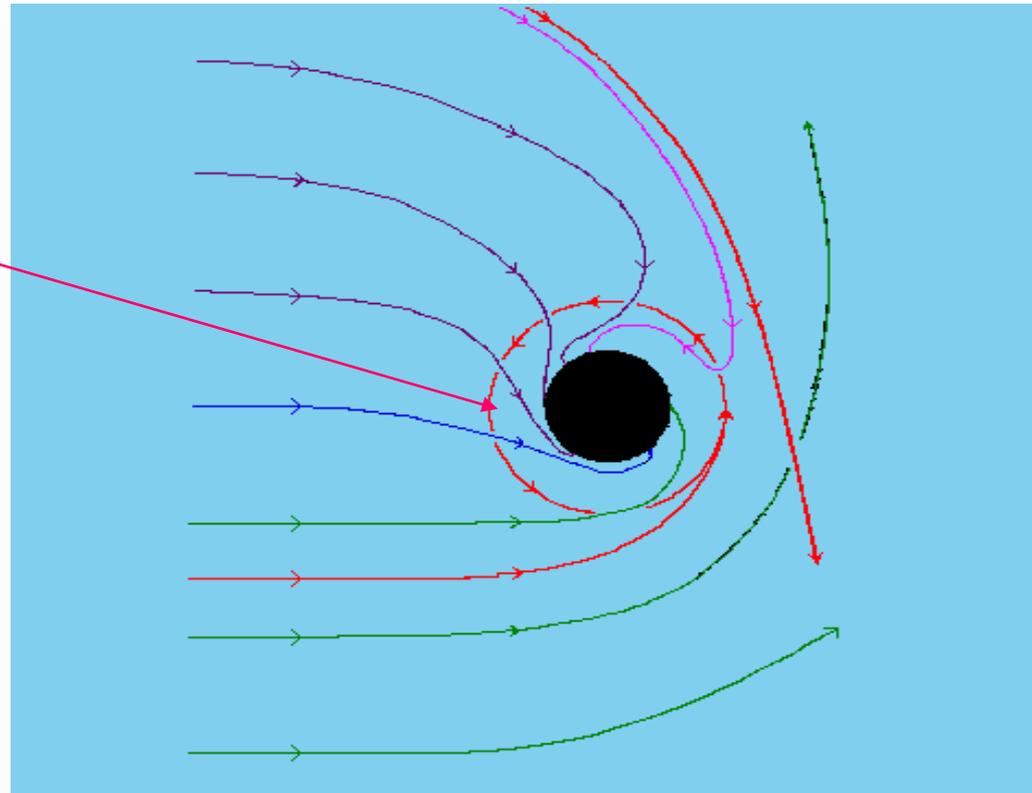
distancia a la cual $V_e = c$

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

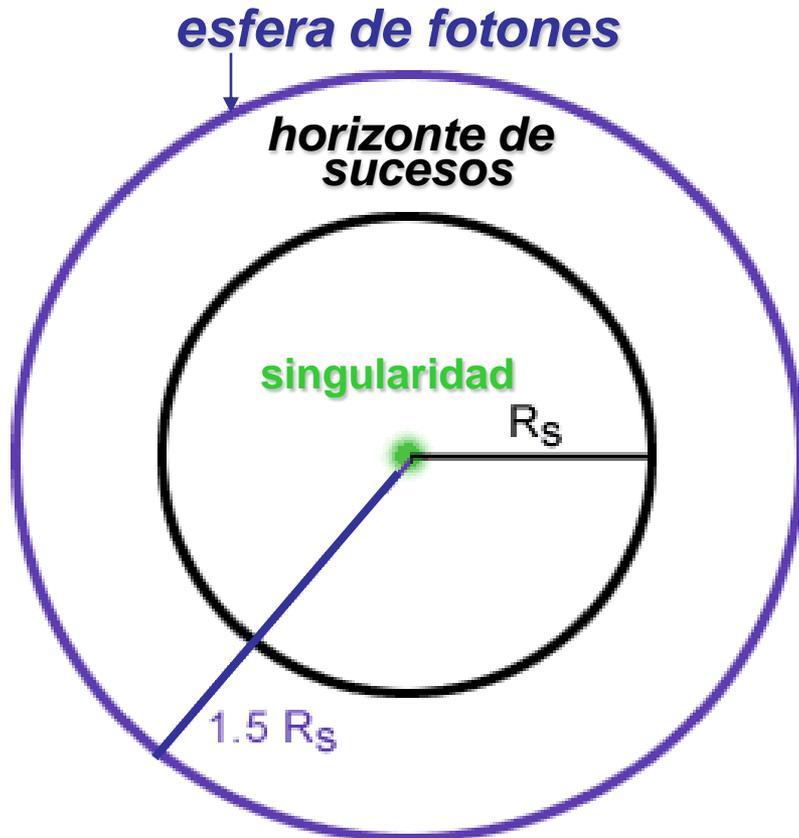
para la tierra $R_{sch} = 8\text{mm}$

esfera de fotones

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

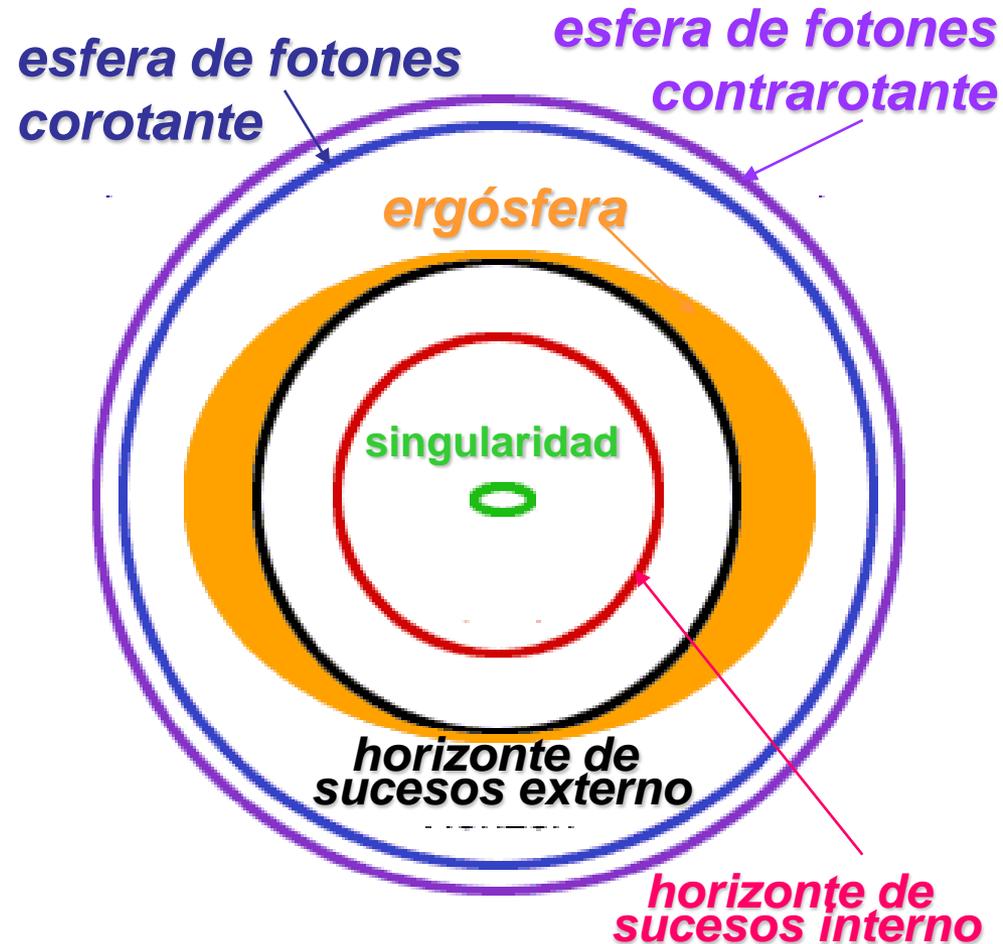


AN de Schwarzschild sin rotación



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

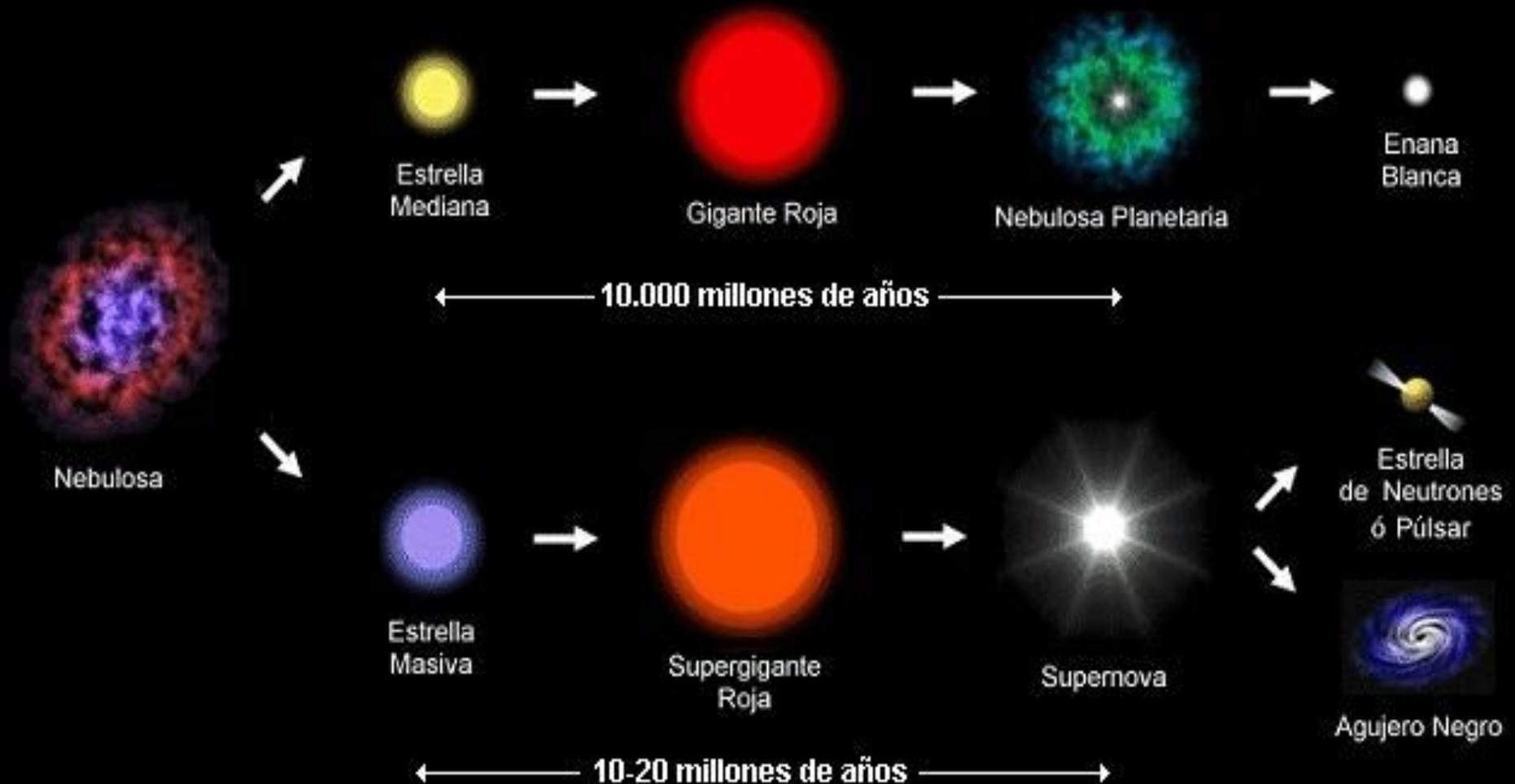
jet de energía
↓
**partículas aceleradas
por el intenso campo
gravitatorio emiten
energía**



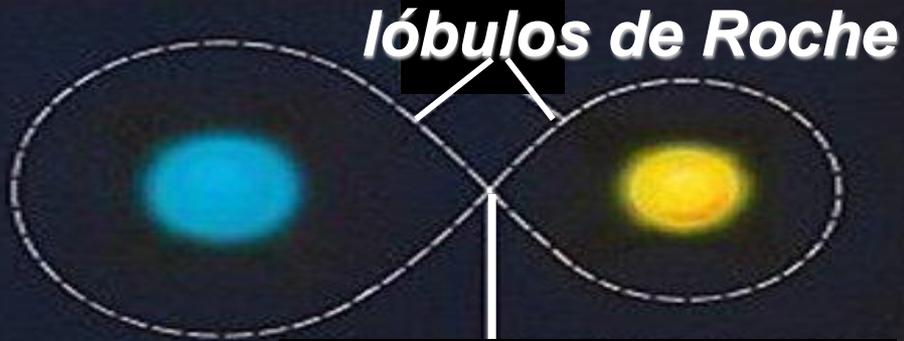
disco de acreción

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

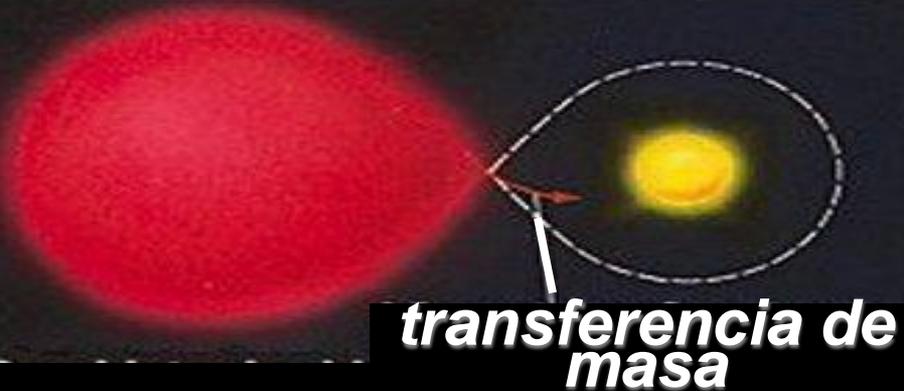


evolución en sistemas binarios



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

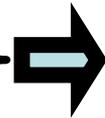
sistemas binarios con un objeto compacto:

EB, EN o AN

curva de velocidad
radial de la estrella
visible del par

+

masa estimada por
su tipo espectral

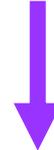


masa de la compañera invisible

$M < 1.4M_s$



enana blanca



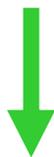
$1.4M_s < M < 3M_s$



estrella de neutrones



$M > 3M_s$



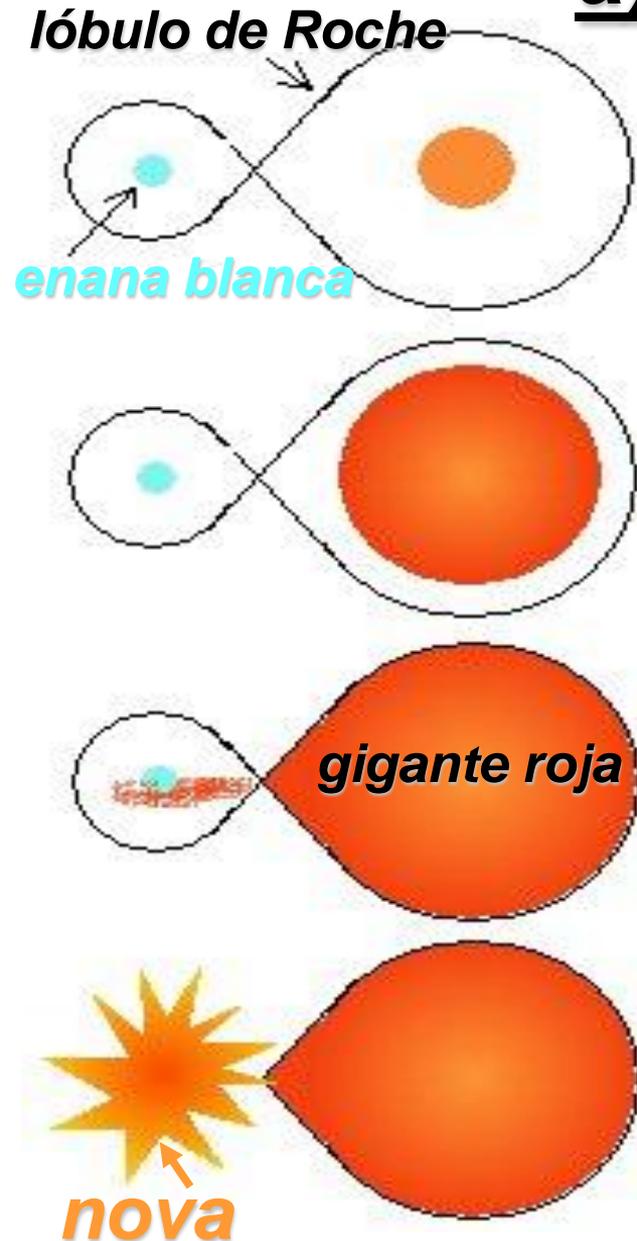
agujero negro!

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 novas



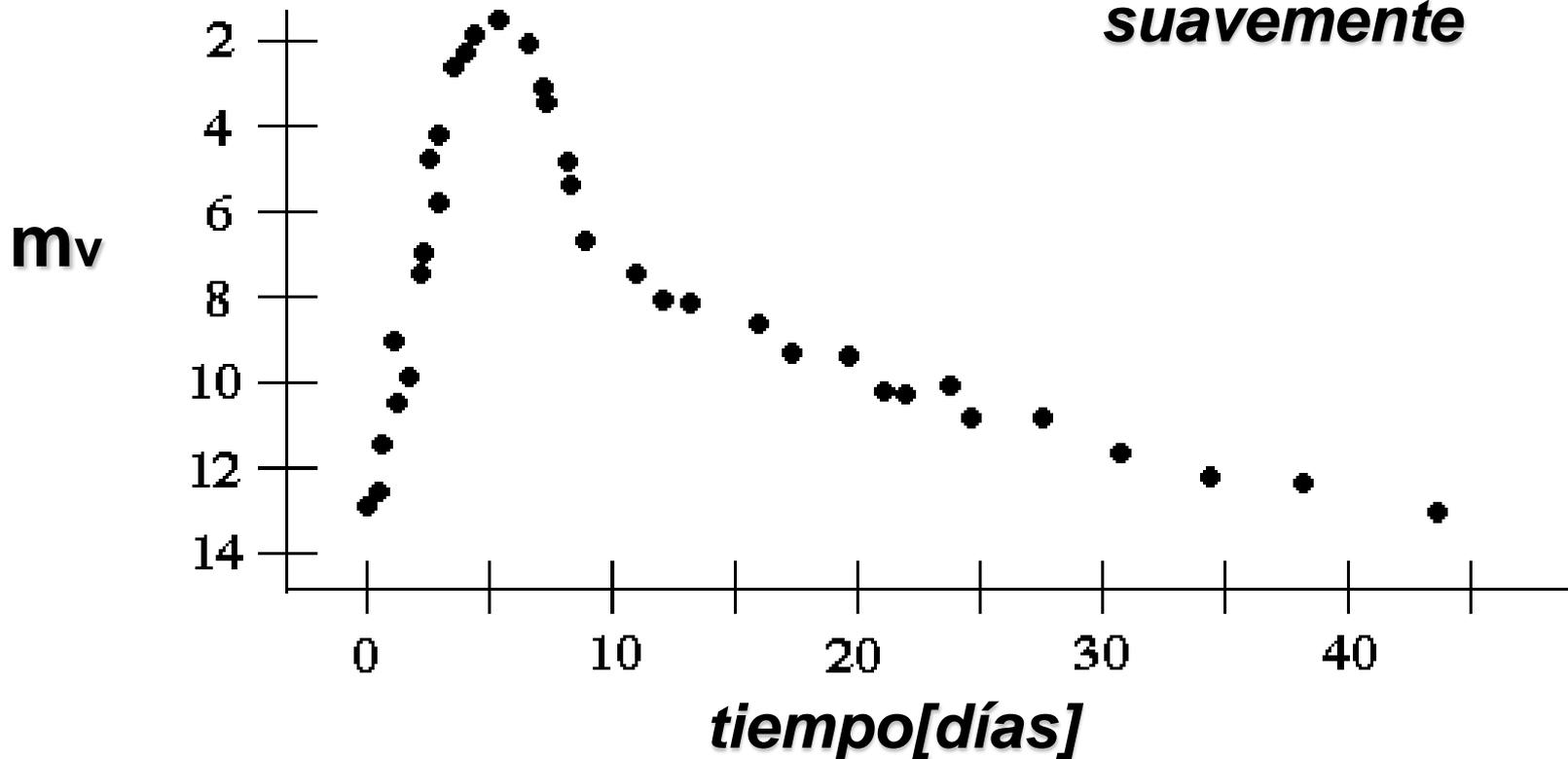
**H y He cae sobre la superficie de la EB,
es comprimido y calentado**

reacciones nucleares explosivas

gran emisión de energía! = nova

curva de luz de una nova

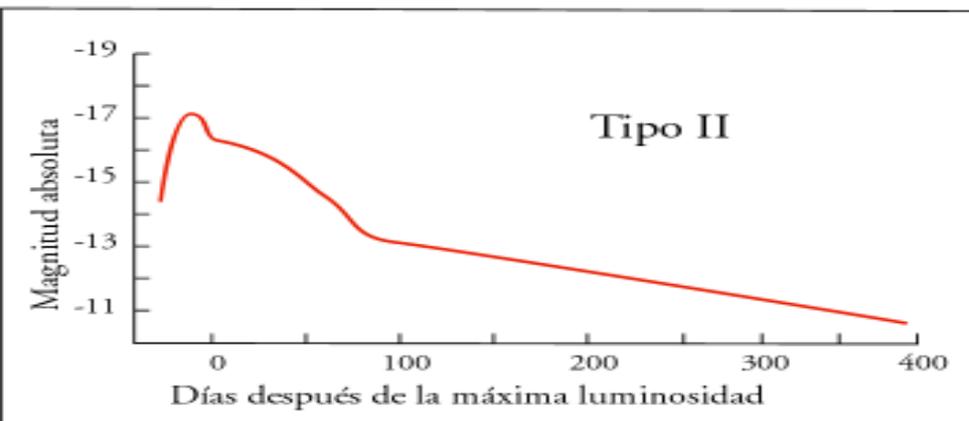
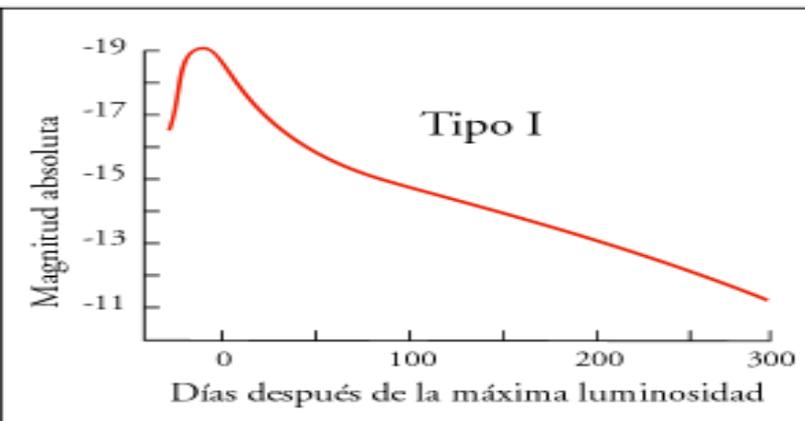
*aumenta abruptamente su
brillo alcanzando el máximo en
pocos días, y luego declina
suavemente*



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
**fuelle 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**



