



Microcuásares

Instituto de Astronomía, UNAM

Erick Alejandro Rangel

Temario:

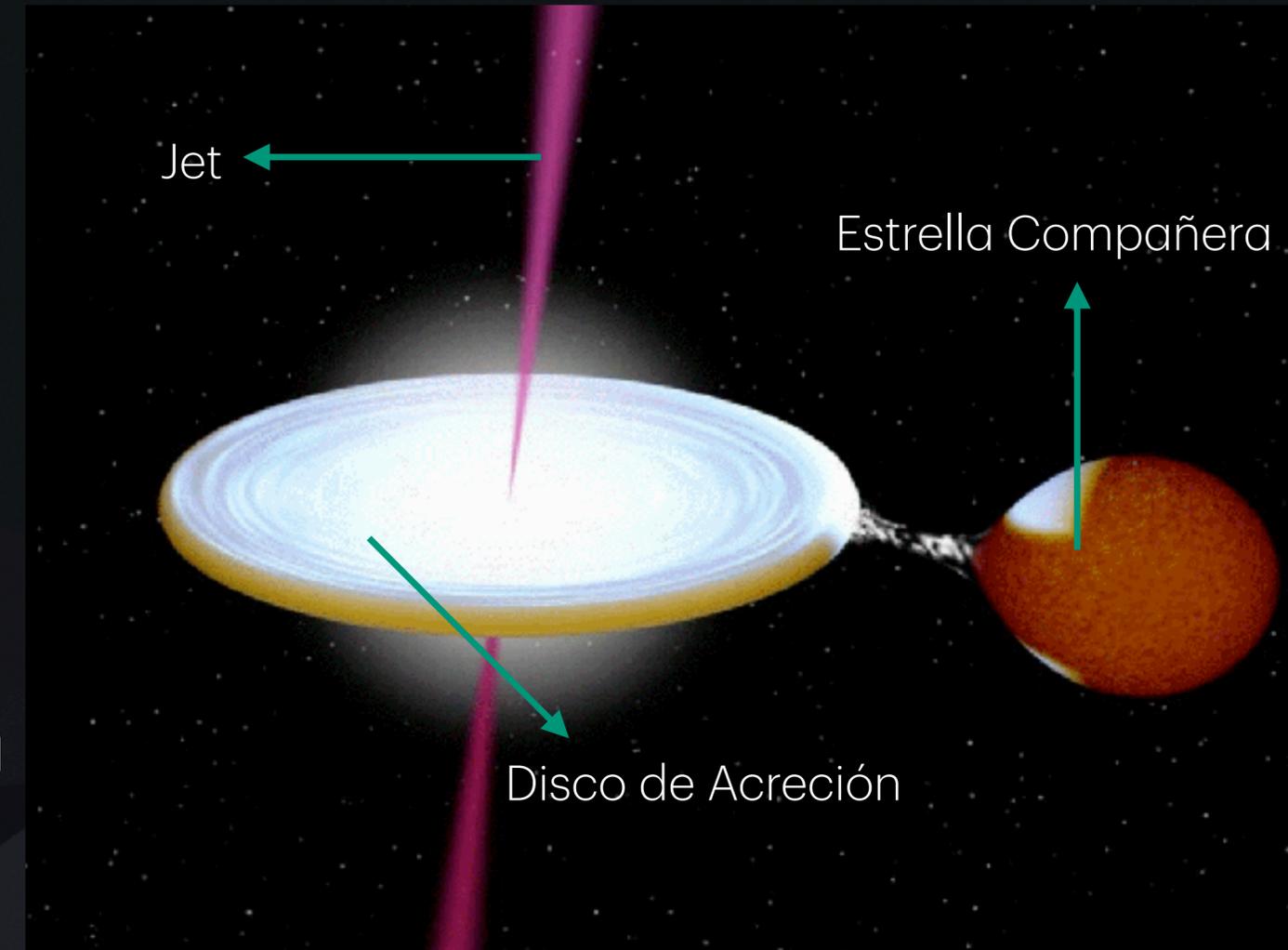
- (I) Introducción:
 - Sistemas binarios de rayos X
 - Componentes de binarias de rayos X
 - Agujero Negro y estrella compañera
 - Disco de Acreción

Introducción



Sistemas Binarios de Rayos X

- Sistema binario luminoso en rayos X.
- Compuesto por:
 - Objeto Compacto (Agujero negro de masa estelar, estrella de neutrones o enana blanca).
 - Estrella compañera.
- La emisión de rayos X es debida a la acreción de materia de la estrella al objeto compacto.
 - Potencial gravitacional \longrightarrow Emisión radiativa
- Eficiencia de $\sim 10\%$ (Factor de 10 con la fusión nuclear)

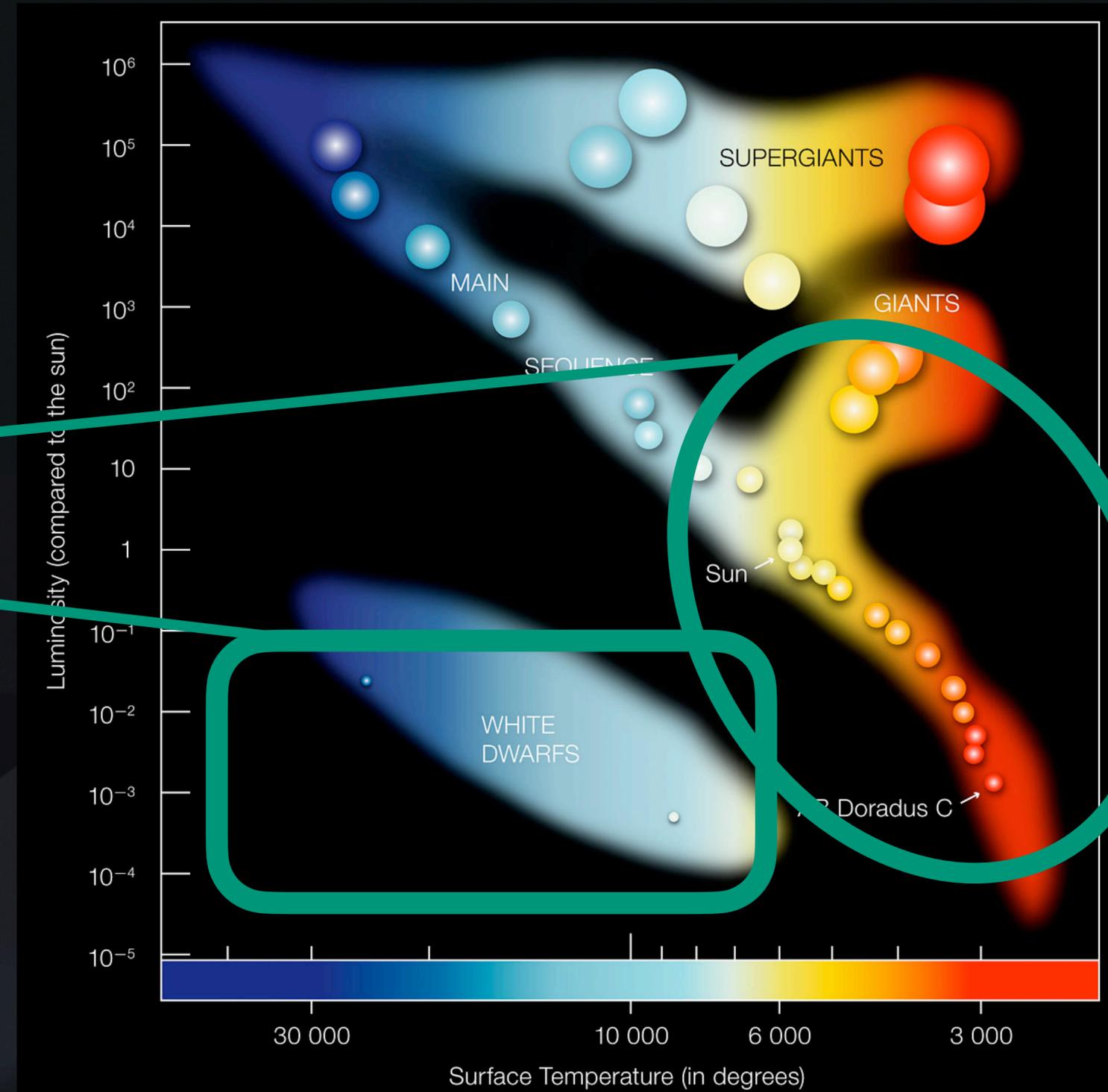


Creditos: Cambridge X-ray Astronomy

Binarios de Rayos X

Clasificación

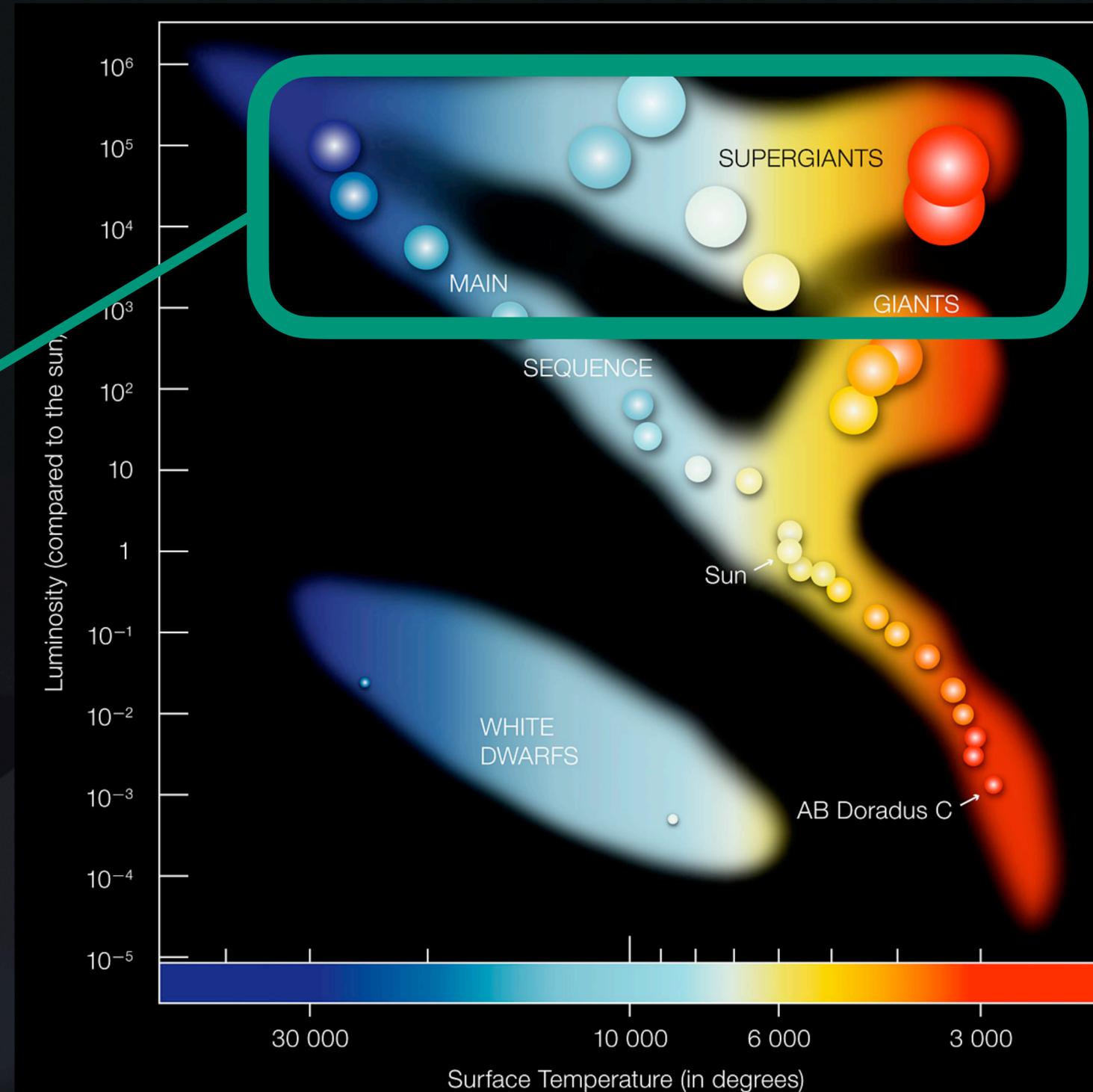
- La clasificación es basada en el tipo espectral de la estrella compañera.
- LMXBs: Binarios de rayos X de baja masa.
- Estrella con masa menor al objeto compacto.
 $\leq 1M_{\odot}$
- Se conocen ~ 200 LMXBs en la Galaxia.
- La mayoría tienen una NS como motor central (Factor ~ 2)



Binarios de Rayos X

Clasificación

- La clasificación es basada en el tipo espectral de la estrella compañera.
- HMXBs: Binarios de rayos X de alta masa
 - Masa de la estrella mayor al objeto compacto $\geq 10M_{\odot}$
- Se conocen más de 150 HMXBs en la Galaxia.
- Fueron las primeras fuentes en ser observadas por detectores de rayos X.



Binarios de Rayos X

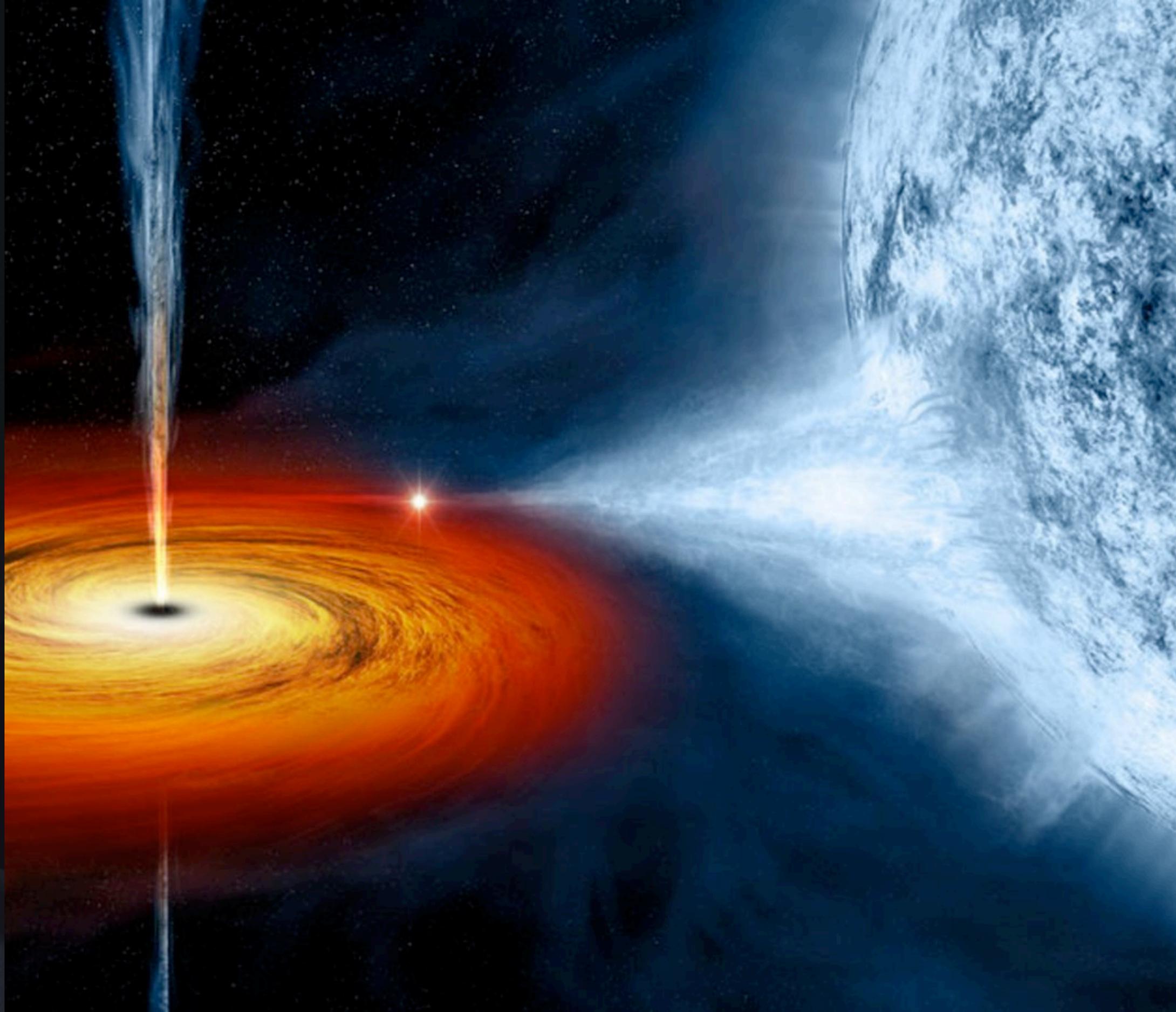
HMXBs

- En la mayoría, el objeto compacto es una NS.
- La estrella de alta masa tiene fuertes vientos estelares
 - Tasa de pérdida de masa $\gtrsim 10^{-6} M_{\odot} \cdot yr^{-1}$
 - Alta tasa de acreción.
- Luminosidades en rayos X $10^{35} - 10^{40} \text{erg} \cdot s^{-1}$
- La mayoría pasa por una fase de transferencia de masa antes de la explosión de SN.
 - Reduce la órbita.
- La fase HMXBs comienza: 4 – 40 Myr
- Duración: ~ 10 kyr



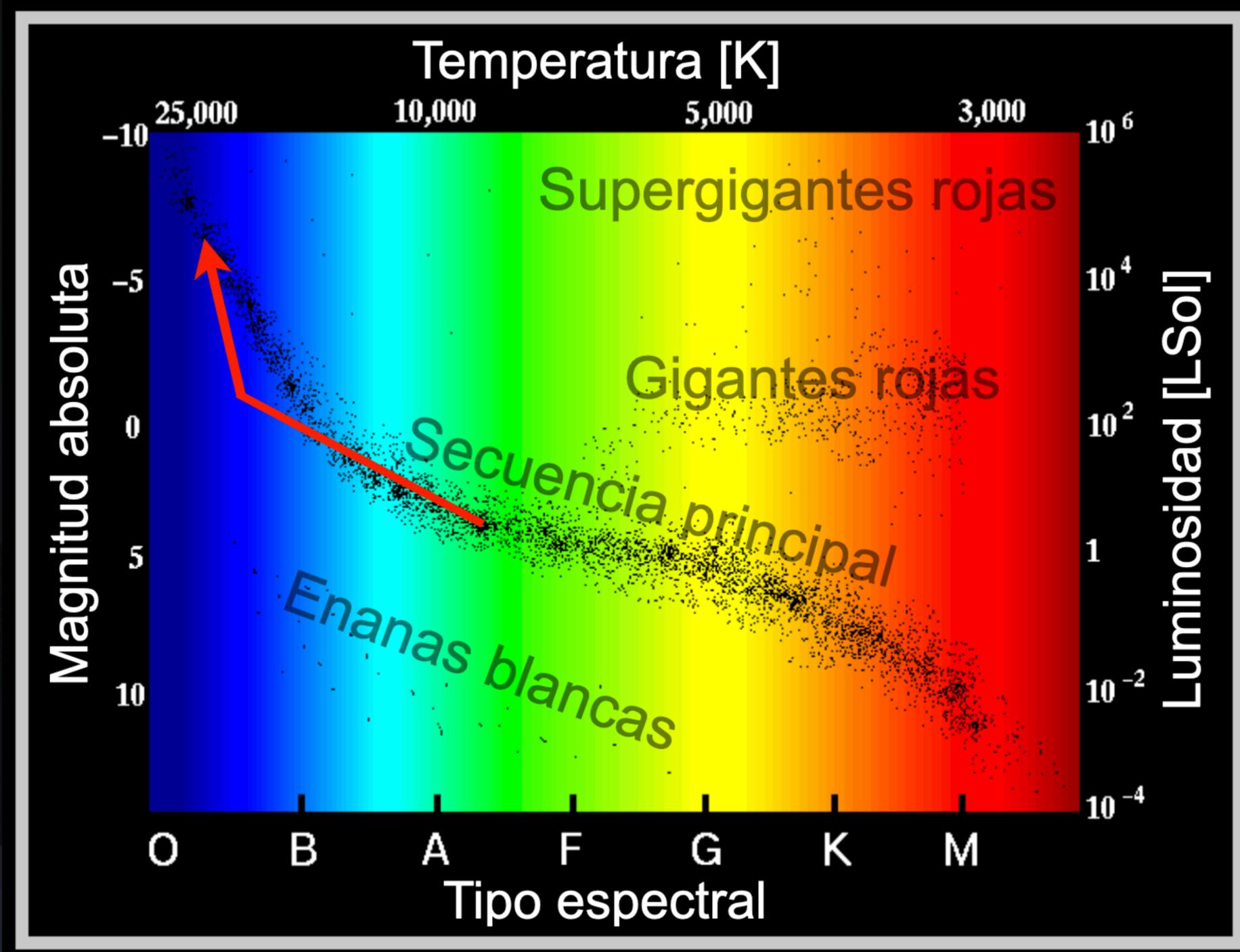
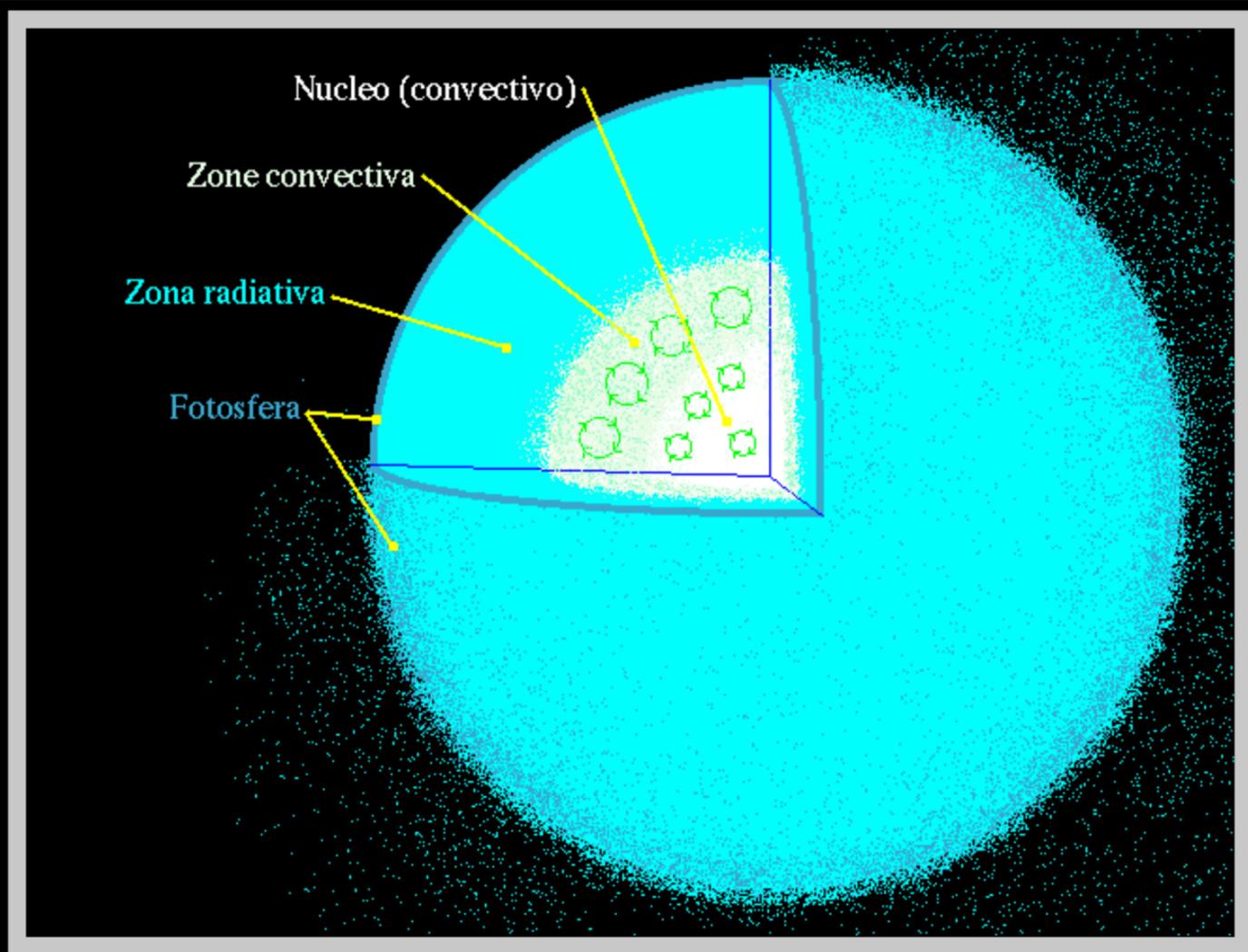
Creditos: ESO/L. Calçada/M. Kommesser/S.E. de Mink

Objeto Compacto



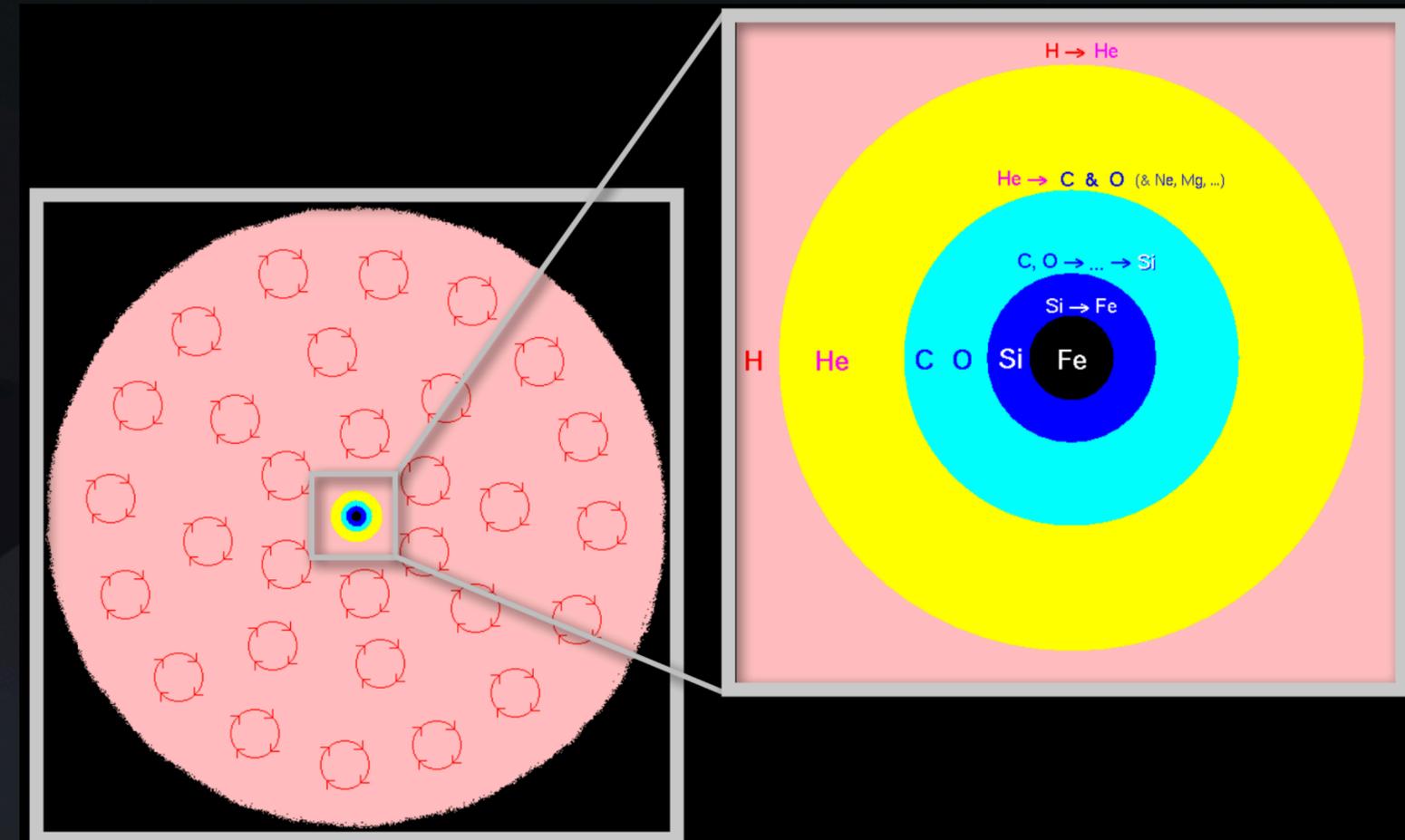
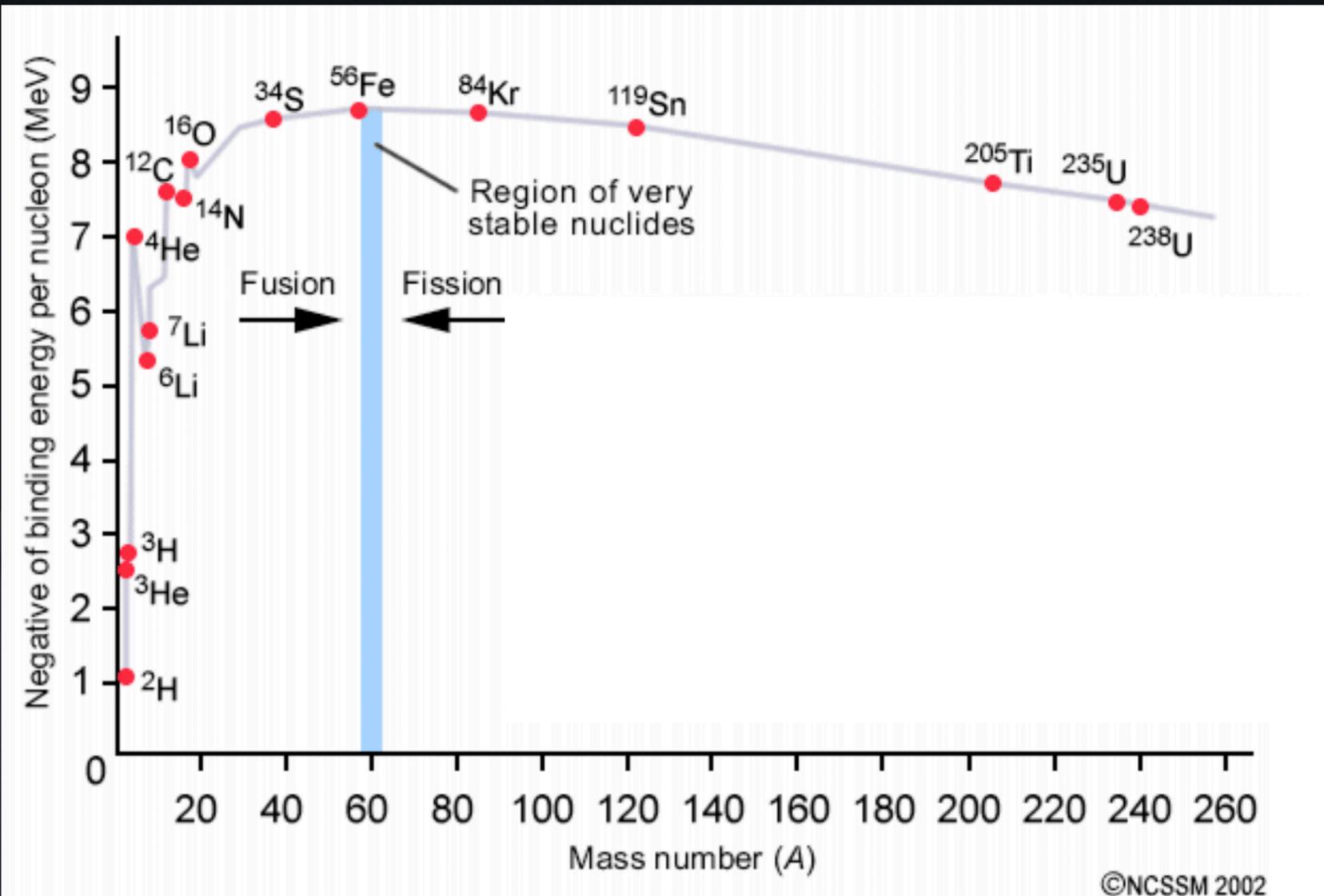
Evolución de Estrellas Masivas

- Estrellas de alta masa: $\geq 8M_{\odot}$



Evolución de Estrellas Masivas

- Fusión de elementos pesados en el núcleo, hasta Fe.
- Energía de ligadura (B)



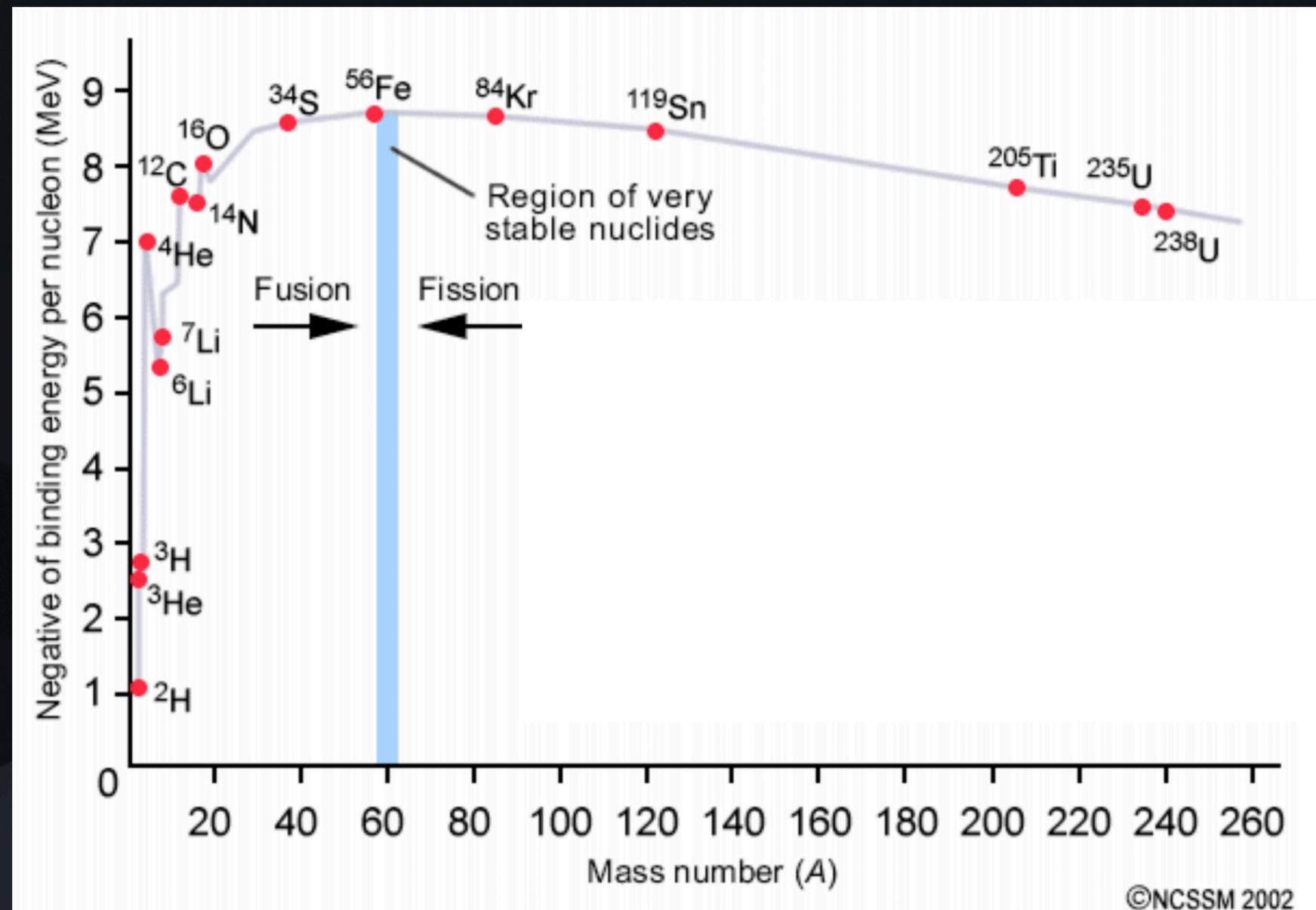
Evolución de Estrellas Masivas

- Fusión de elementos pesados en el núcleo, hasta Fe.

- Energía de ligadura (B)

$$B = [Zm_p + Nm_n - M_{\text{núcleo}}]c^2$$

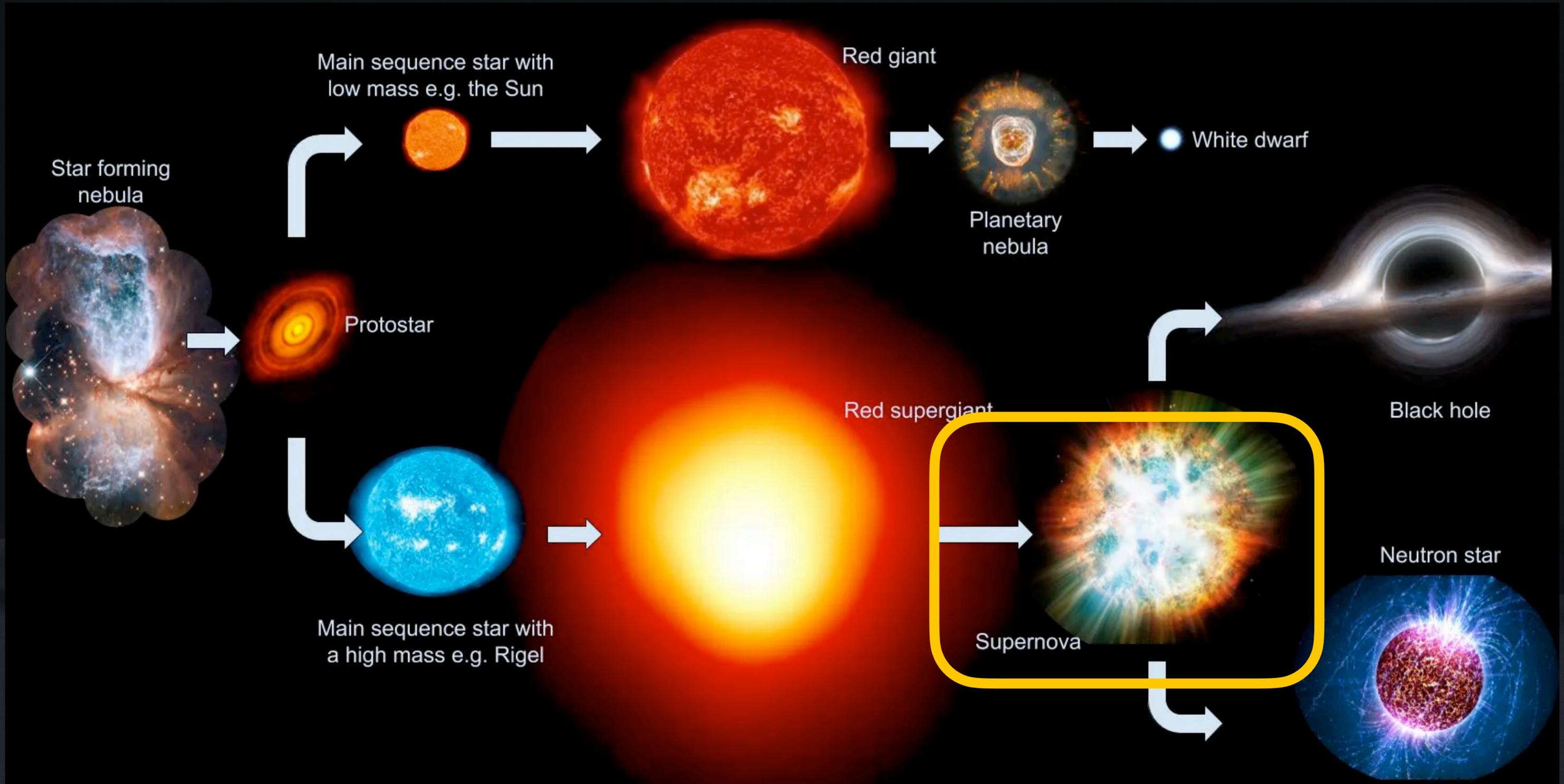
- Los núcleos ligeros tienen B baja por nucleón, fusionarlos libera energía.
- Se alcanza un máximo en ^{56}Fe
- Intentar fusionar núcleos más pesados que el hierro no produce liberación de energía, sino que requiere energía.



Evolución de Estrellas Masivas

1 H	Gran Explosión						Por Rayos Cósmicos						2 He						
3 Li	4 Be	Fusión de Estrellas de Neutrones						Explosión de Estrella Masiva						5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	Nebulosas Planetarias						Explosión Enana Blanca						13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
55 Cs	56 Ba	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn			
87 Fr	88 Ra																		
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	Elementos Muy Radioactivos: Creados en Laboratorio											

Evolución de Estrellas Masivas

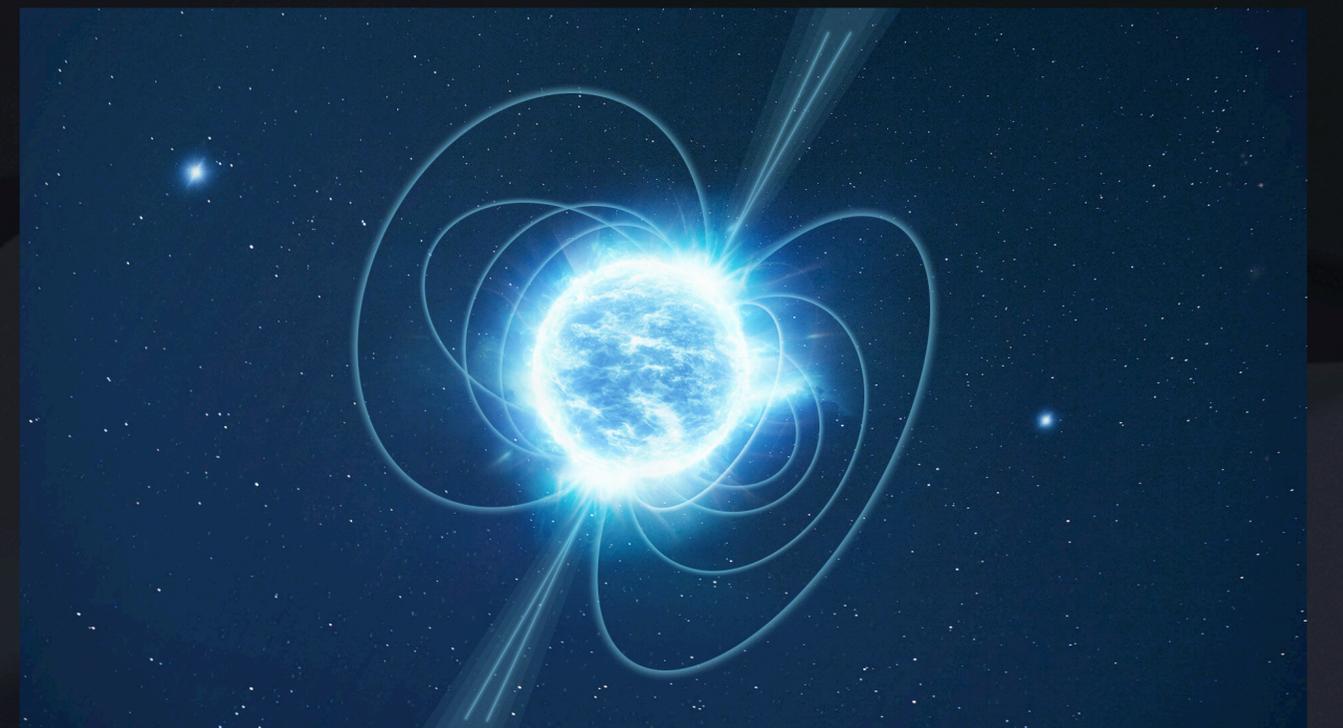


Objetos Compactos

- El núcleo de Fe alcanza la masa de Chandrasekhar y colapsa: $\tau_{col} \sim 0.2s$
- Los objetos compactos son remanentes estelares extremadamente densos.
- Se forman al final de la vida de las estrellas masivas.
- Se tienen dos tipos:
 - Agujero Negro
 - Estrella de Neutrones.



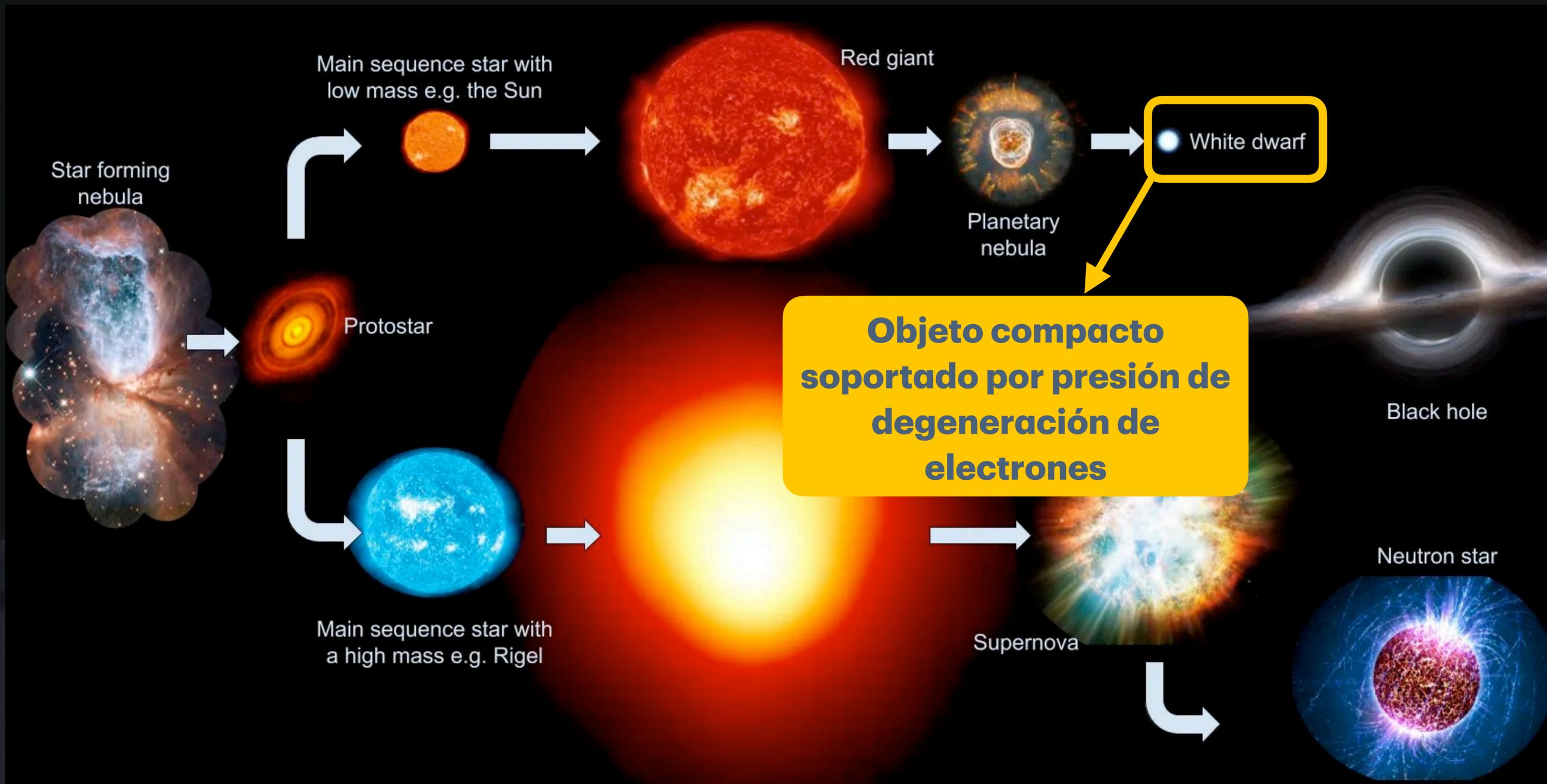
Creditos: Science Communication Lab for MPRK/H.E.S.S.



Creditos: ESA

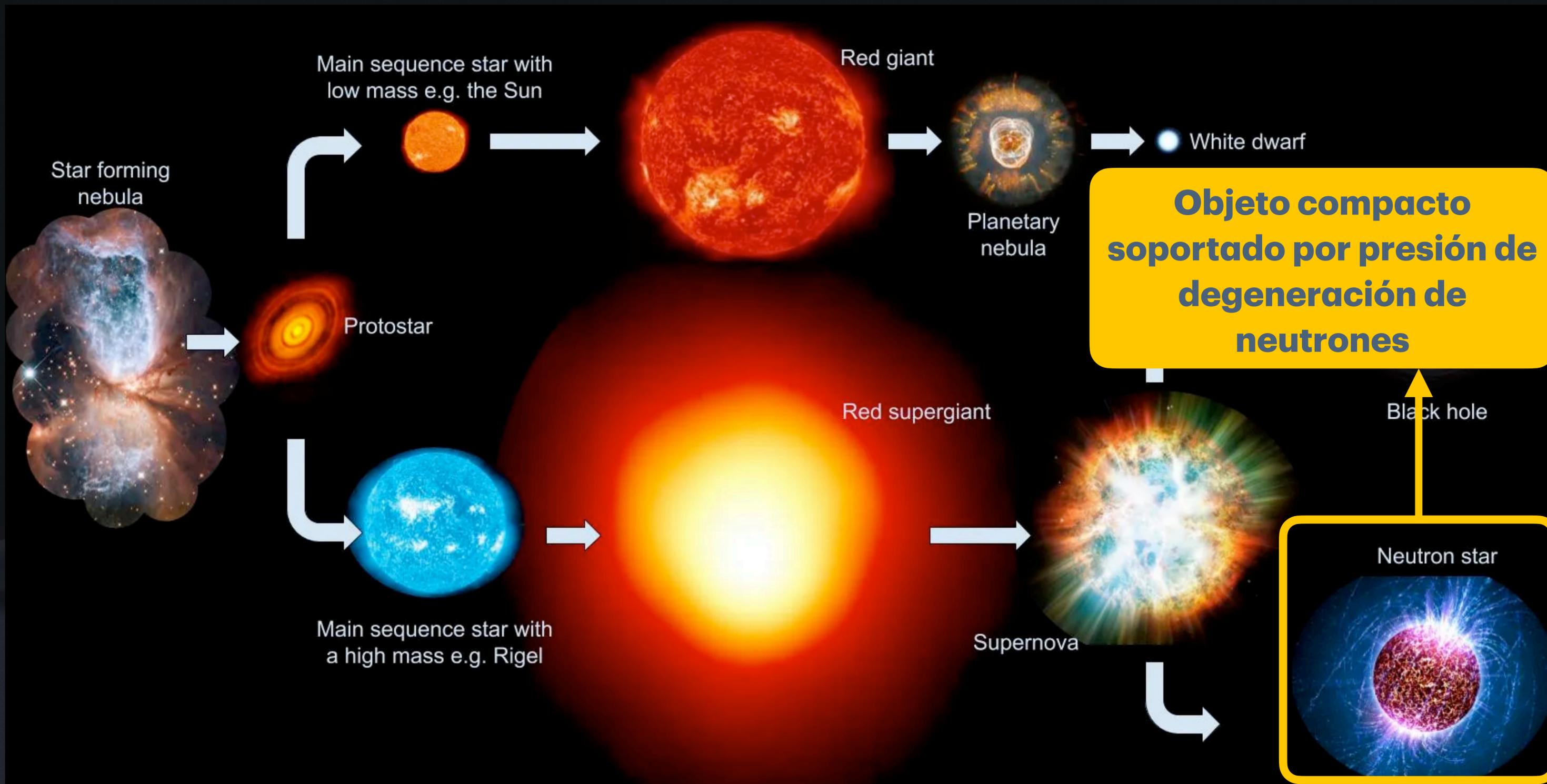
Formación

Objetos Compactos



Formación

Objetos Compactos



Formación

Objetos Compactos

- **Estrella de Neutrones:**

- Supernova por colapso del núcleo.
 - Acreción por sistemas binarios.
 - Enana blanca y supera el límite de Chandrasekhar ($\sim 1.4M_{\odot}$)
 - Fusión de estrellas de neutrones.
-
- Características observables:
 - Se liberan cantidades enormes de neutrinos en explosiones de SN.
 - Remanentes de SN.
 - Ondas gravitacionales



Formación

Objetos Compactos

- **Estrella de Neutrones:**

- Supernova por colapso del núcleo.

- Acreción por sistemas binarios.

- Enana blanca y supera el límite de Chandrasekhar ($\sim 1.4M_{\odot}$)

- Fusión de estrellas de neutrones.

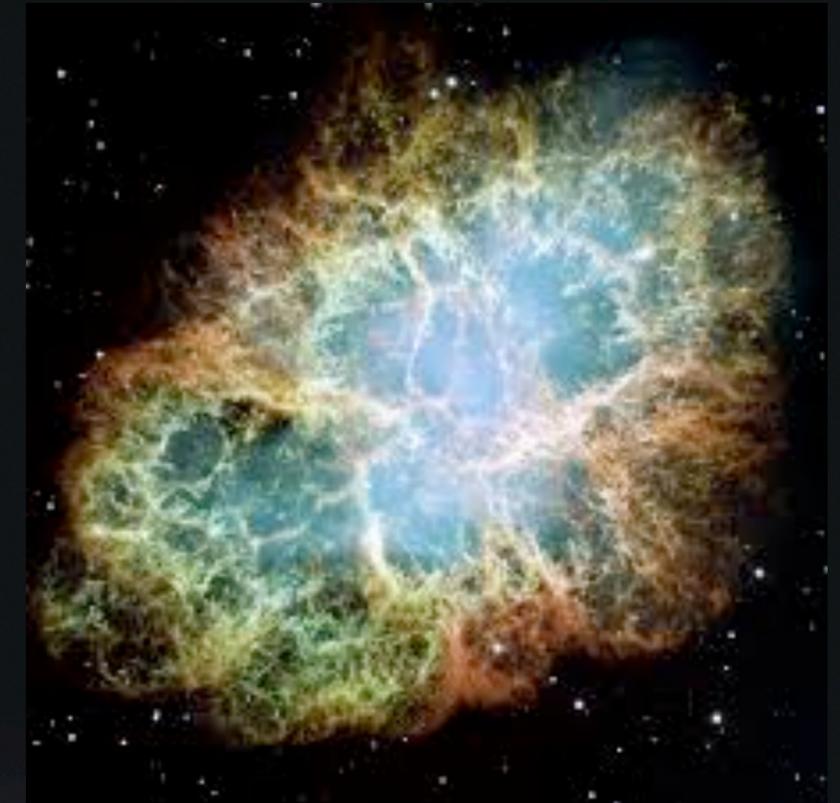
- Características observables:

- Se liberan cantidades enormes de neutrinos en explosiones de SN.

- Remanentes de SN.

- Ondas gravitacionales

Masa máxima que puede soportar la presión de degeneración de electrones



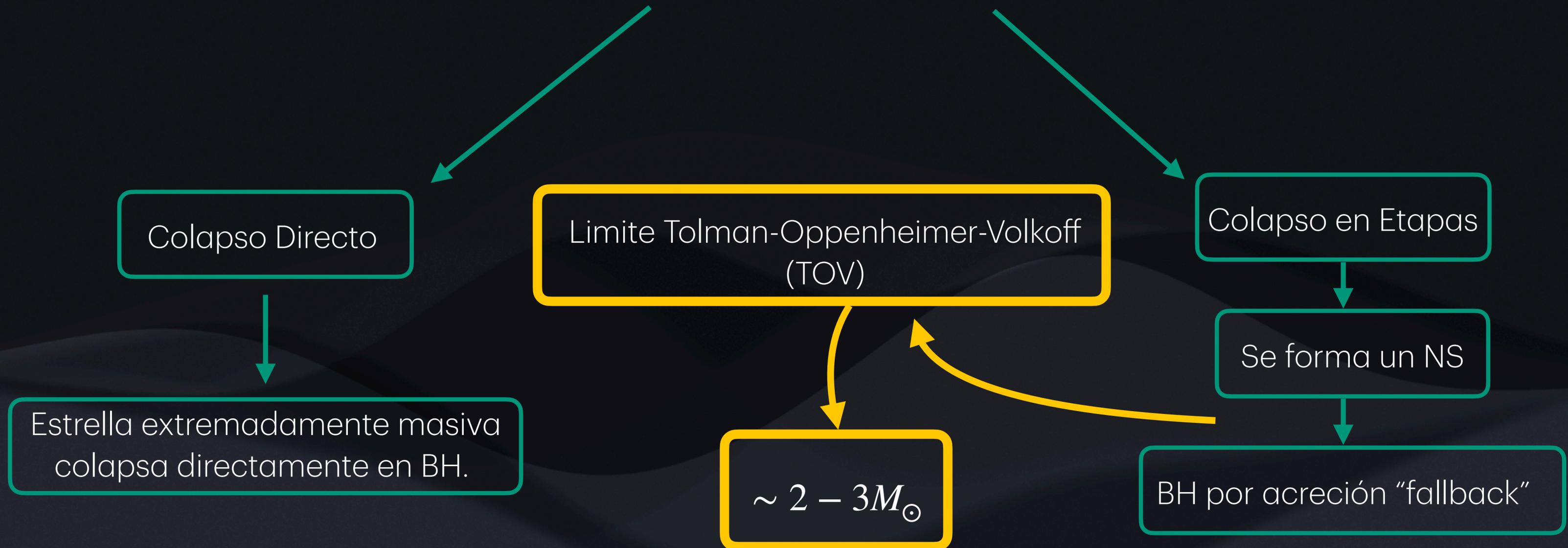
- **Agujeros Negros:**

- La estrella de alta masa llega a fusionar hasta Fe en su núcleo y posteriormente colapsa:



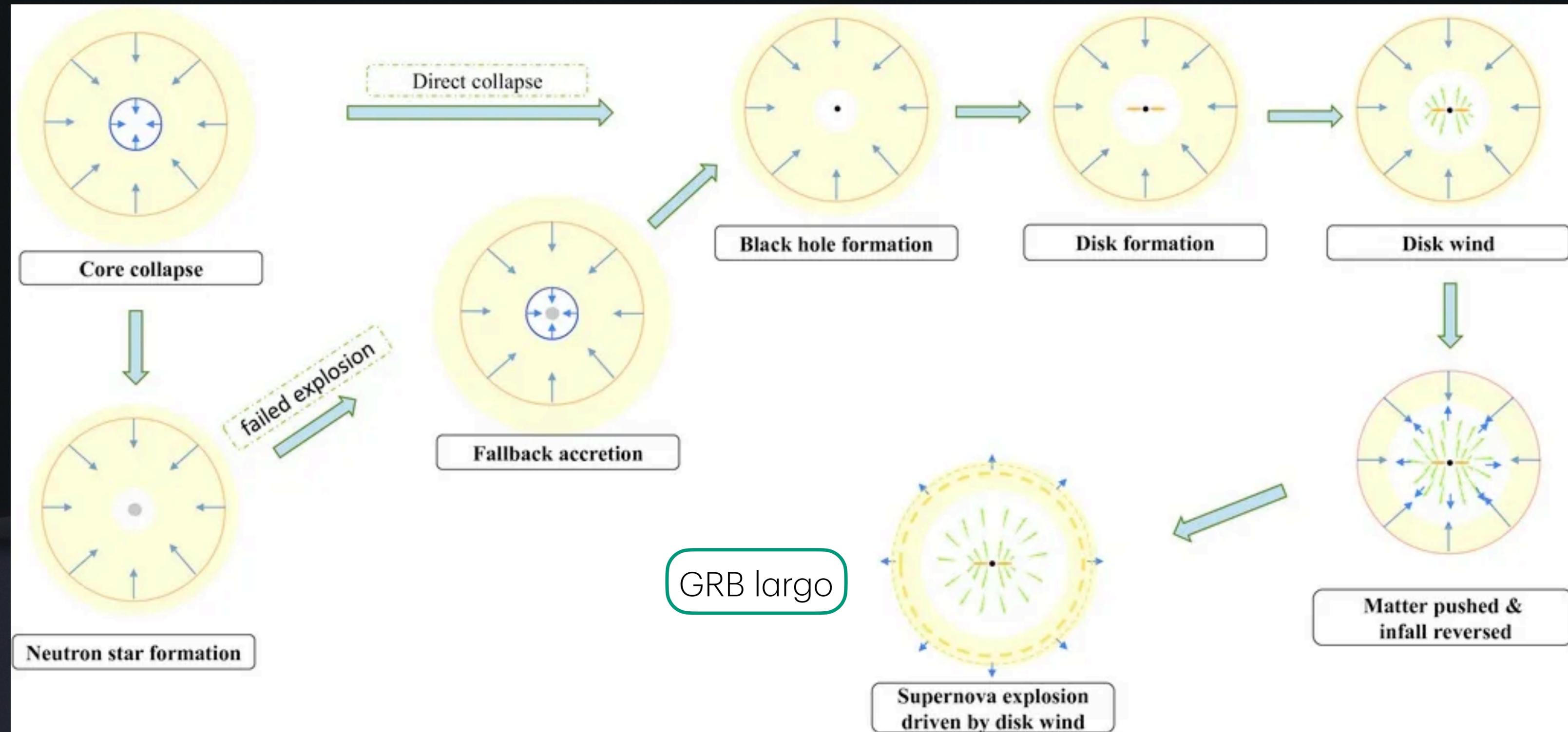
- **Agujeros Negros:**

- La estrella de alta masa llega a fusionar hasta Fe en su núcleo y posteriormente colapsa:

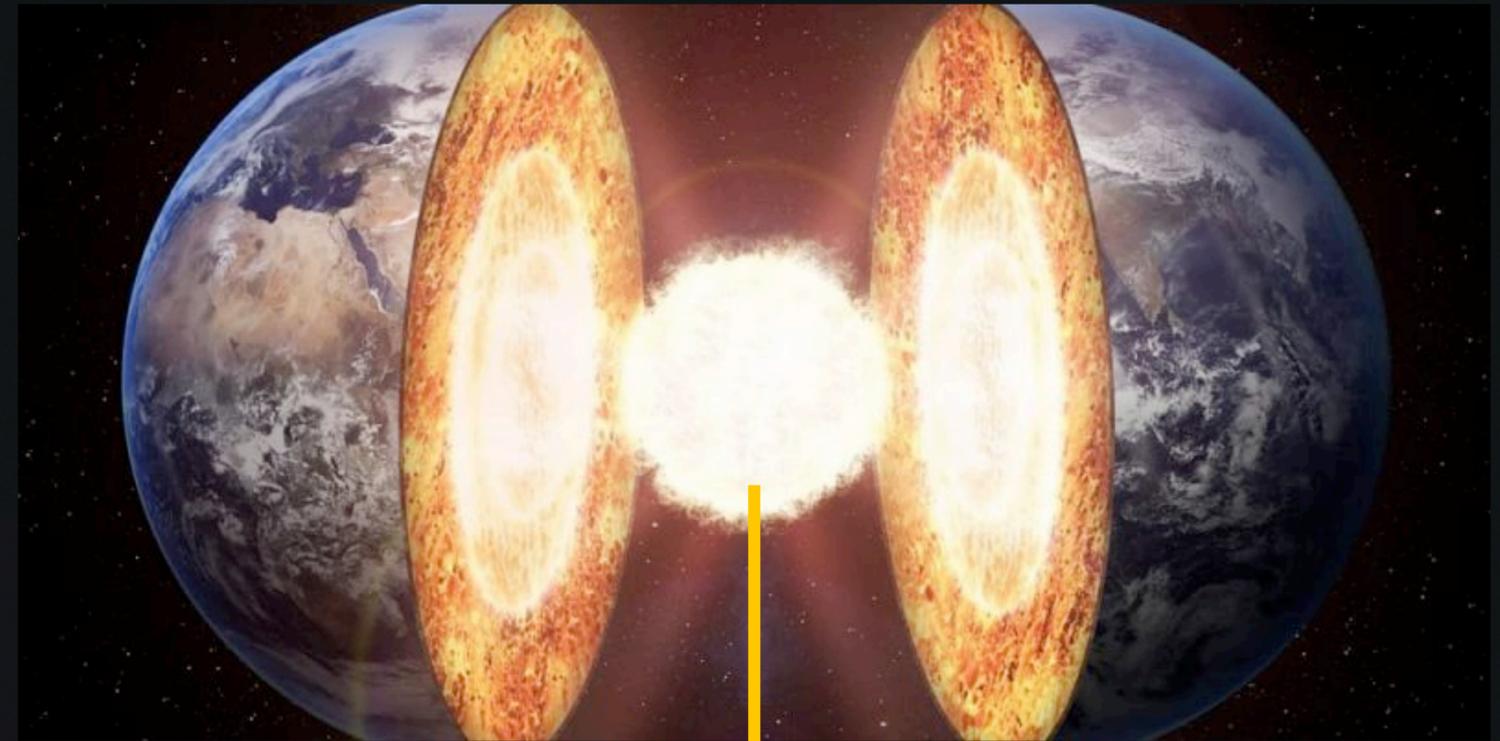


Formación

Objetos Compactos



- **Estrella de Neutrones (NS):** Estrella sostenida por presión de degeneración
 - Masa: $M \sim 0.6 - 2.5M_{\odot}$
 - Radio: $R \sim 10 - 15km$
 - Densidad: $\rho \sim 10^{11} - 10^{16}g \cdot cm^{-3}$
 - Campo Magnetico: $B \sim 10^8 - 10^{13}G$



$13.1g \cdot cm^{-3}$

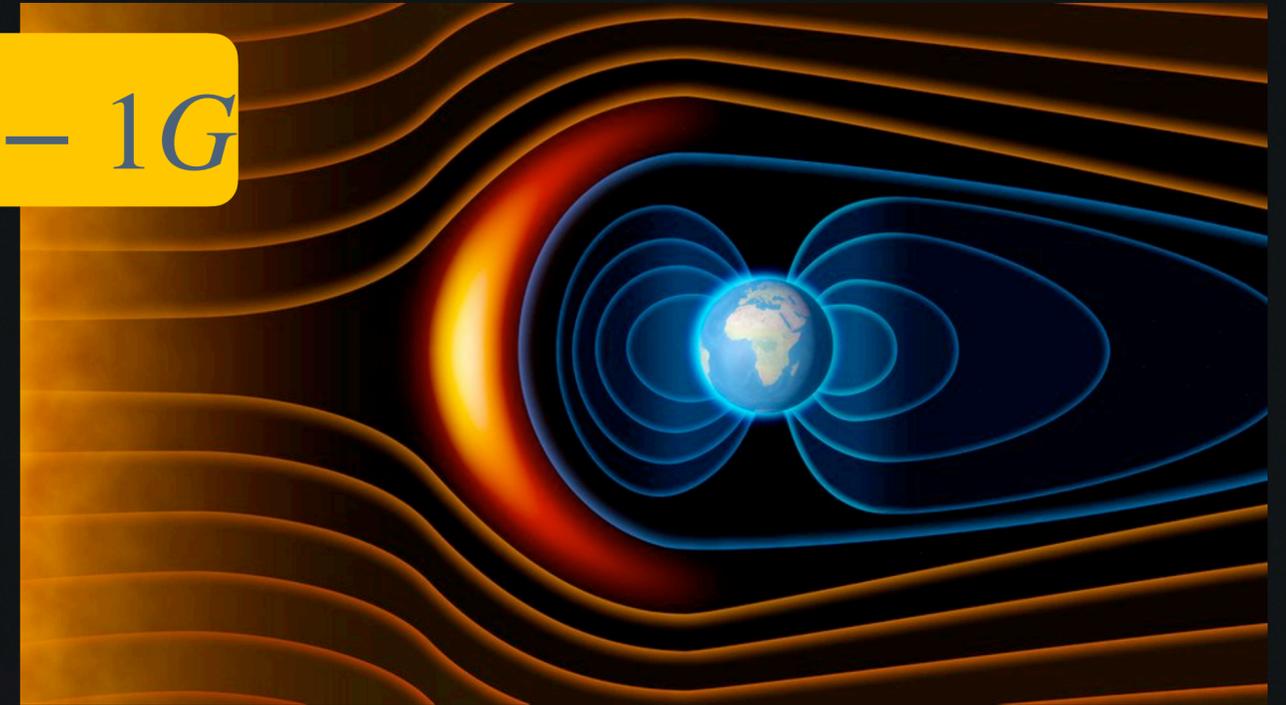
Características

Objetos Compactos

- **Estrella de Neutrones:**

- Masa: $M \sim 0.6 - 2.5M_{\odot}$
- Radio: $R \sim 10 - 15km$
- Densidad: $\rho \sim 10^{11} - 10^{16}g \cdot cm^{-3}$
- Campo Magnetico: $B \sim 10^8 - 10^{15}G$

$\sim 0.5 - 1G$



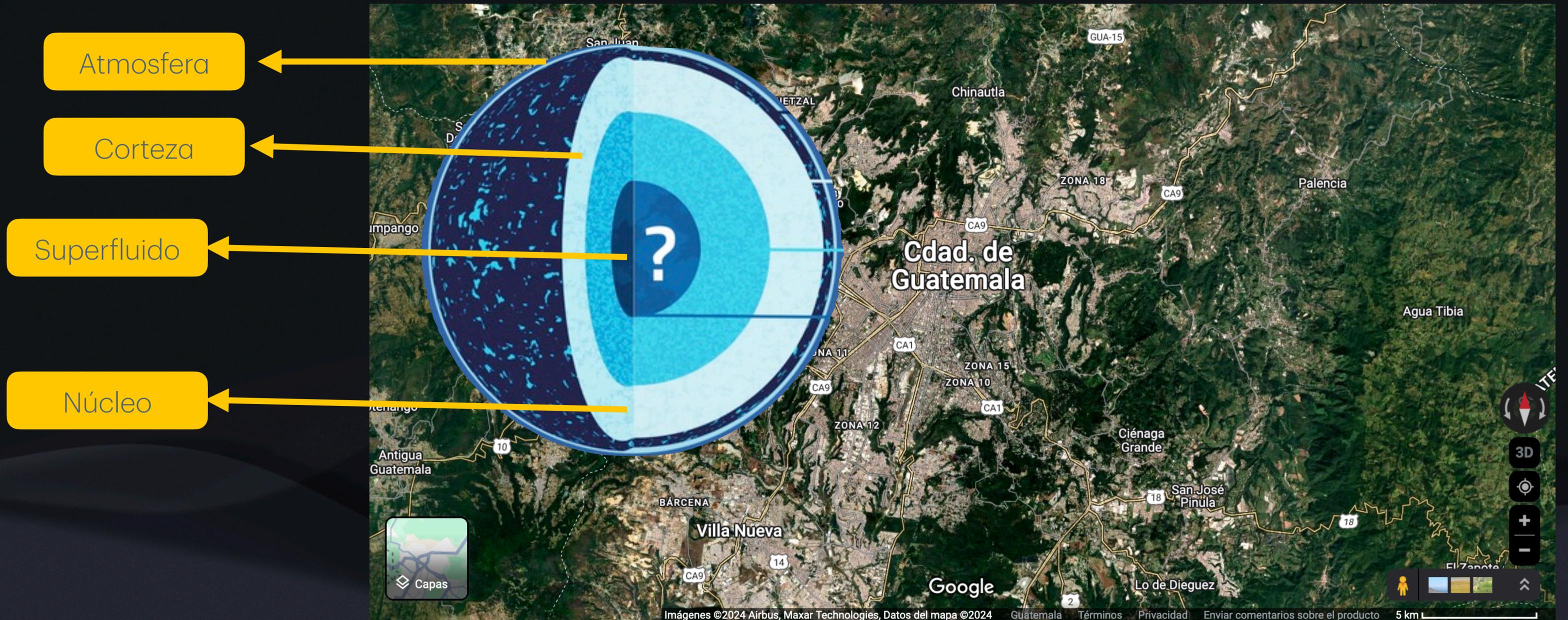
$\sim 50 - 200G$



Mayor campo magnético generado
en la Tierra: $\sim 10^7G$

Características

Objetos Compactos



- **Agujeros Negros (BH):**

- Dos tipos (observados):

- Masas estelares (baja masa)

- Supermasivos (AGNs)

- No confirmados:

- Masa intermedia.

- Primordiales.

- Origen: Remanentes estelares

- Masa: $\sim 3 - 100M_{\odot}$

- Ejemplo: Cygnus X-1

- **Agujeros Negros (BH):**

- Dos tipos (observados):
 - Masas estelares (baja masa)

- Supermasivos (AGNs)



- No confirmados:
 - Masa intermedia.
 - Primordiales.

- Origen (Incierto):
 - Fusión de BH más pequeños.
 - Acreción de material por millones de años.
 - Colapso de nubes de gas.
- Masa: $\sim 10^5 - 10^{12} M_{\odot}$
- Ejemplo: M87, Sagitario A*
- Ubicación: Centros de galaxias

Características

Objetos Compactos

- **Agujeros Negros (BH):**

- Dos tipos (observados):
 - Masas estelares (baja masa)

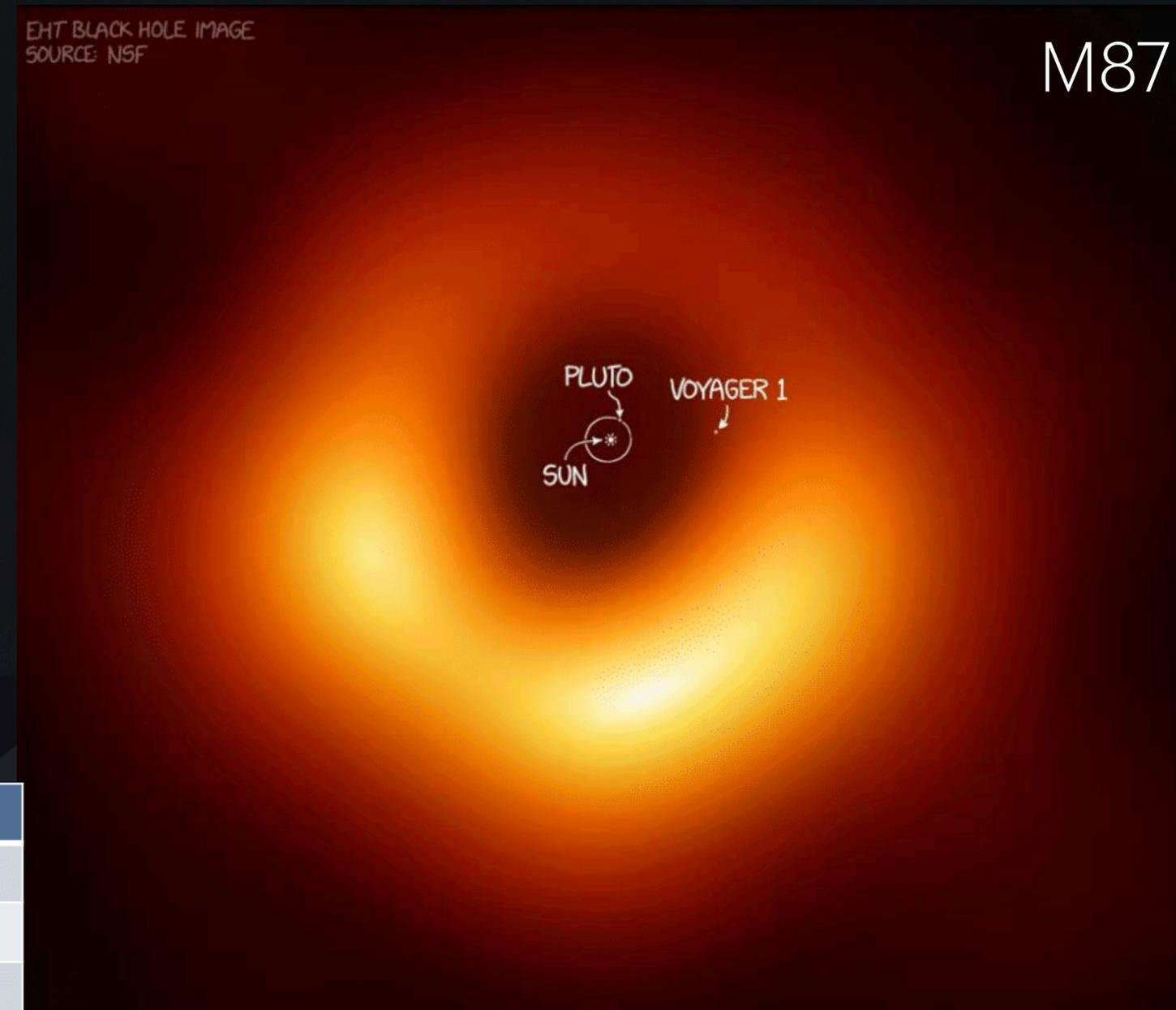
- **Supermasivos (AGNs)**



- No confirmados:

- Masa intermedia.
- Primordiales.

Nombre	M87*
Masa (Msun)	6.5×10^9
Distance (kpc)	16,400
R_{sch}	130 AU



- **Agujeros Negros (BH):**

- Dos tipos (observados):
 - Masas estelares (baja masa)
 - Supermasivos (AGNs)
- No confirmados:
 - Masa intermedia.
 - Primordiales.

- Origen (Incierto):
 - Fusión de BH más pequeños.
 - Colapso de cúmulos estelares densos.
- Masa: $\sim 100 - 10^5 M_{\odot}$
- Ejemplo: 47 Tucanae (Cúmulo estelar)

- **Agujeros Negros (BH):**

- Dos tipos (observados):
 - Masas estelares (baja masa)
 - Supermasivos (AGNs)
- No confirmados:
 - Masa intermedia.
 - Primordiales.

- Origen (Hipotéticos):
 - Poco después del Big Bang por fluctuaciones de densidad.
- Masa: Masas terrestres a miles de M_{\odot}

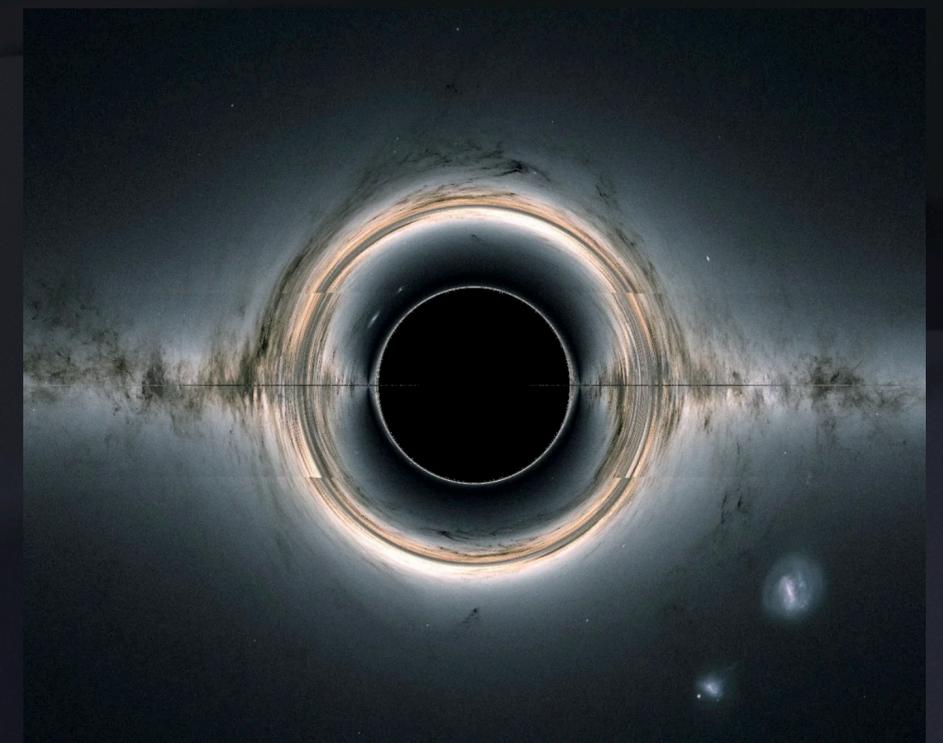
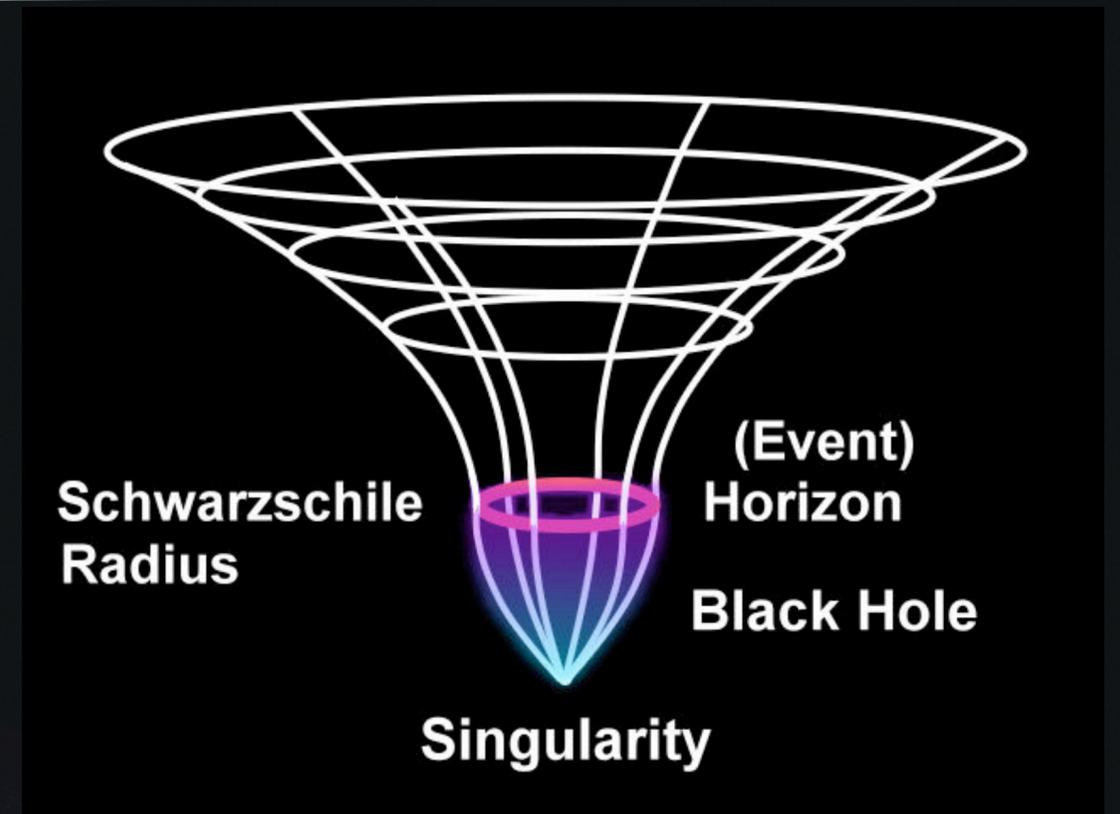
Características

Schwarzschild

- **Propiedades:**

- **Agujeros negros de Schwarzschild**

- Los más simples.
- Solución a las ecuaciones de campo de relatividad general en el vacío.
- Alrededor de una distribución de masa esférica simétrica, estática



Características

Schwarzschild

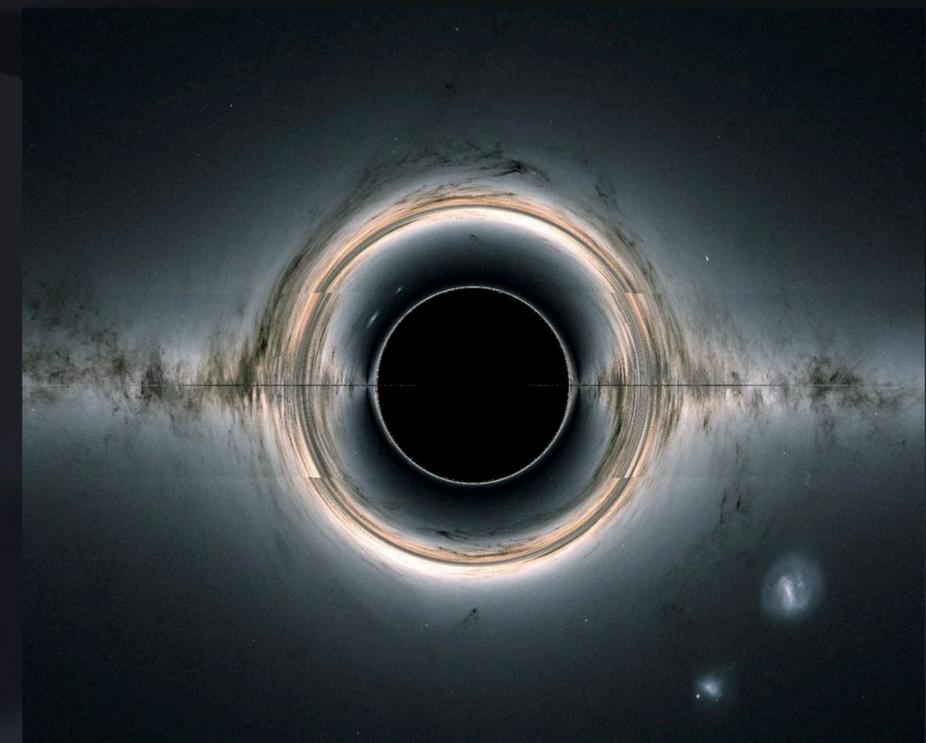
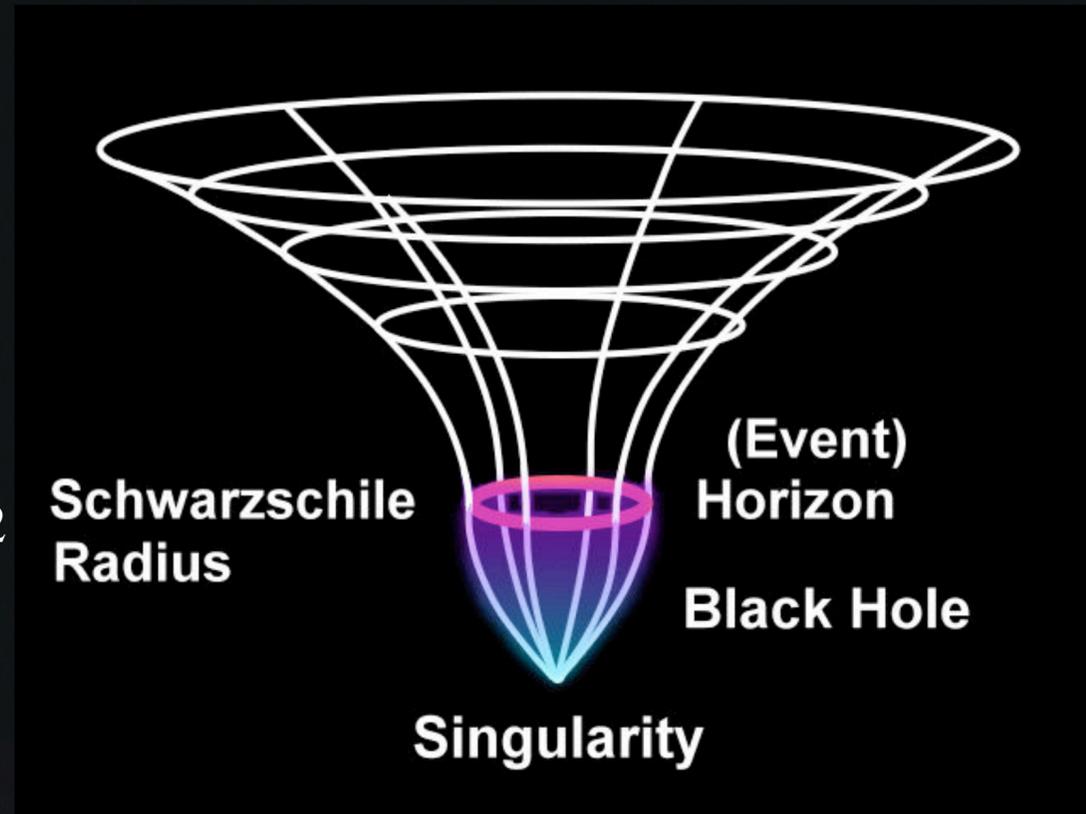
- **Propiedades:**

- **Agujeros negros de Schwarzschild:**

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right)^{-1} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2$$

- Radio de Schwarzschild: Distancia teórica a partir de la masa de un objeto, donde la velocidad de escape iguala la velocidad de la luz

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$



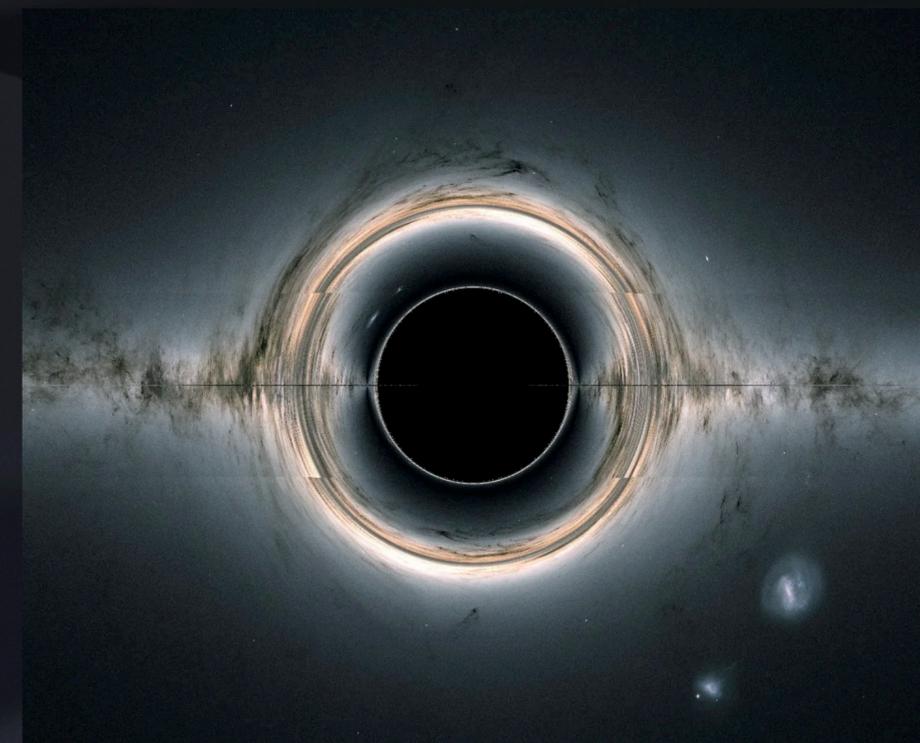
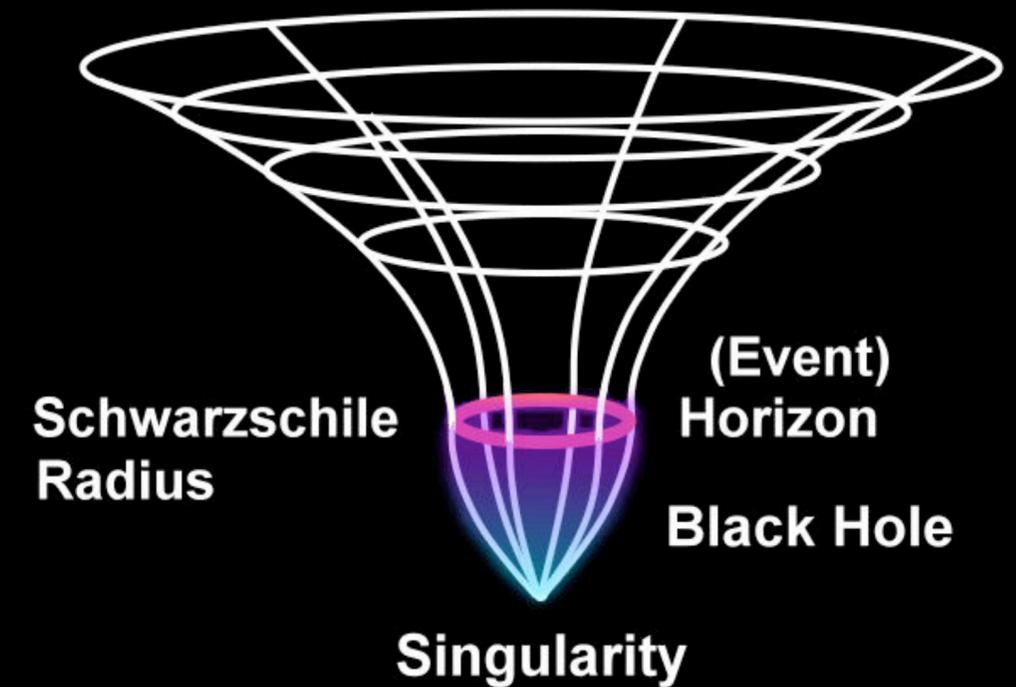
Características

Schwarzschild

- **Propiedades:**

- **Agujeros negros de Schwarzschild:**

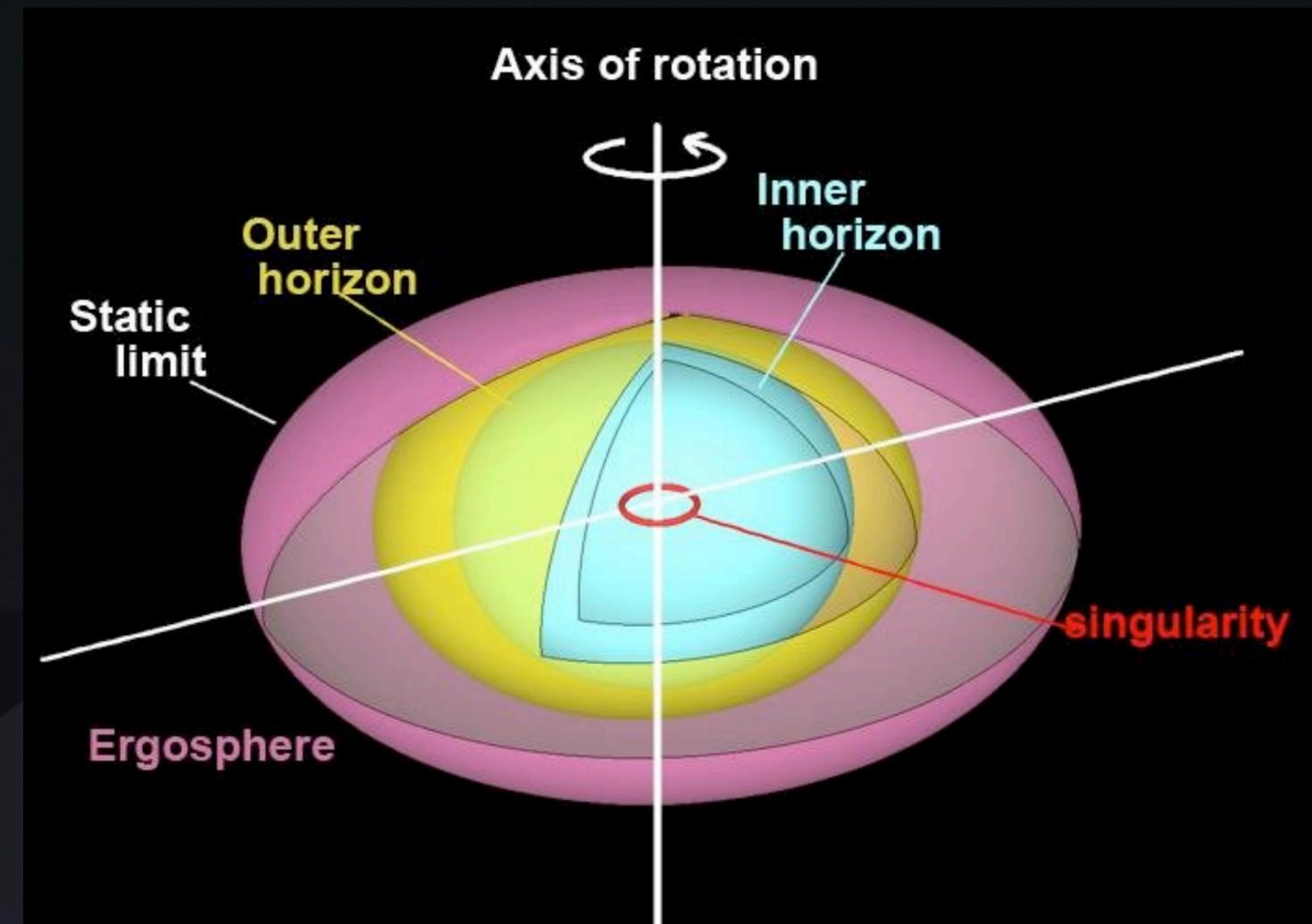
- Horizonte de eventos: Superficie esférica imaginaria que marca el límite de un agujero negro.
- Coincide con el radio de Schwarzschild para este tipo de BH



- **Propiedades:**

- **Agujeros negros de Kerr**

- Presenta rotación → Momento angular
- Singularidad es un anillo
- Dos horizontes de eventos
 - Interno: Efectos cuánticos
 - Externo: La luz no puede escapar.
- Ergosfera: Arrastre del espacio-tiempo en la dirección de rotación.



- **Propiedades:**
 - **Agujeros negros de Reissner-Nordström (teóricos)**
 - Poseen carga eléctrica.
 - Singularidad puntual.
 - **Agujeros Negros de Kerr-Newman**
 - Mismas características que el BH de Kerr pero con carga eléctrica.
 - Altera las trayectorias de las partículas cargadas por su carga eléctrica.

¿Qué hay en el núcleo de una estrella de neutrones?

¿Qué pasa con la materia que cae a un agujero negro?

¿Qué hay en el núcleo de una estrella de neutrones?

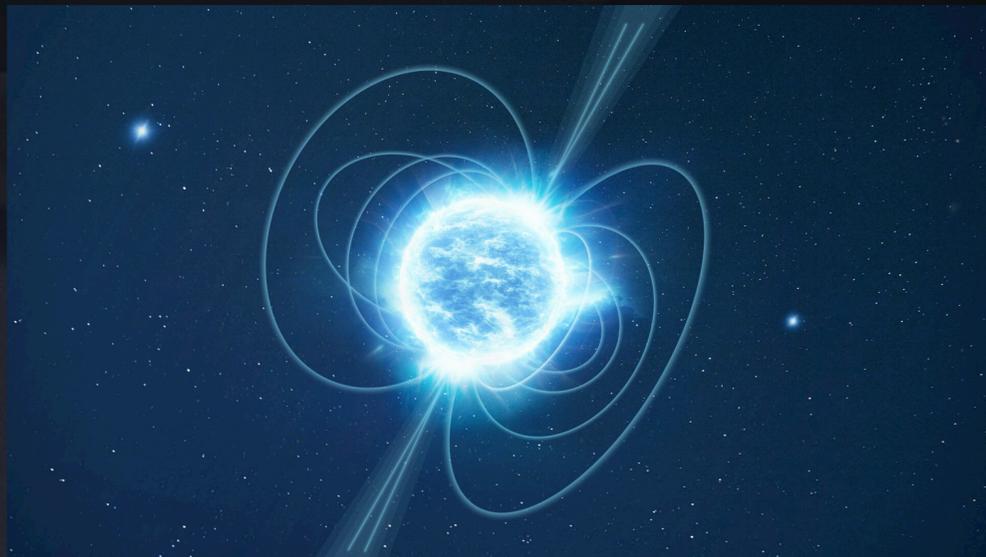
¿Qué pasa con la materia que cae a un agujero negro?



Diferencias

- **Estrella de Neutrones:**

- Campo magnetico
- Tiene superficie
- Menor masa
- Vientos de partículas.

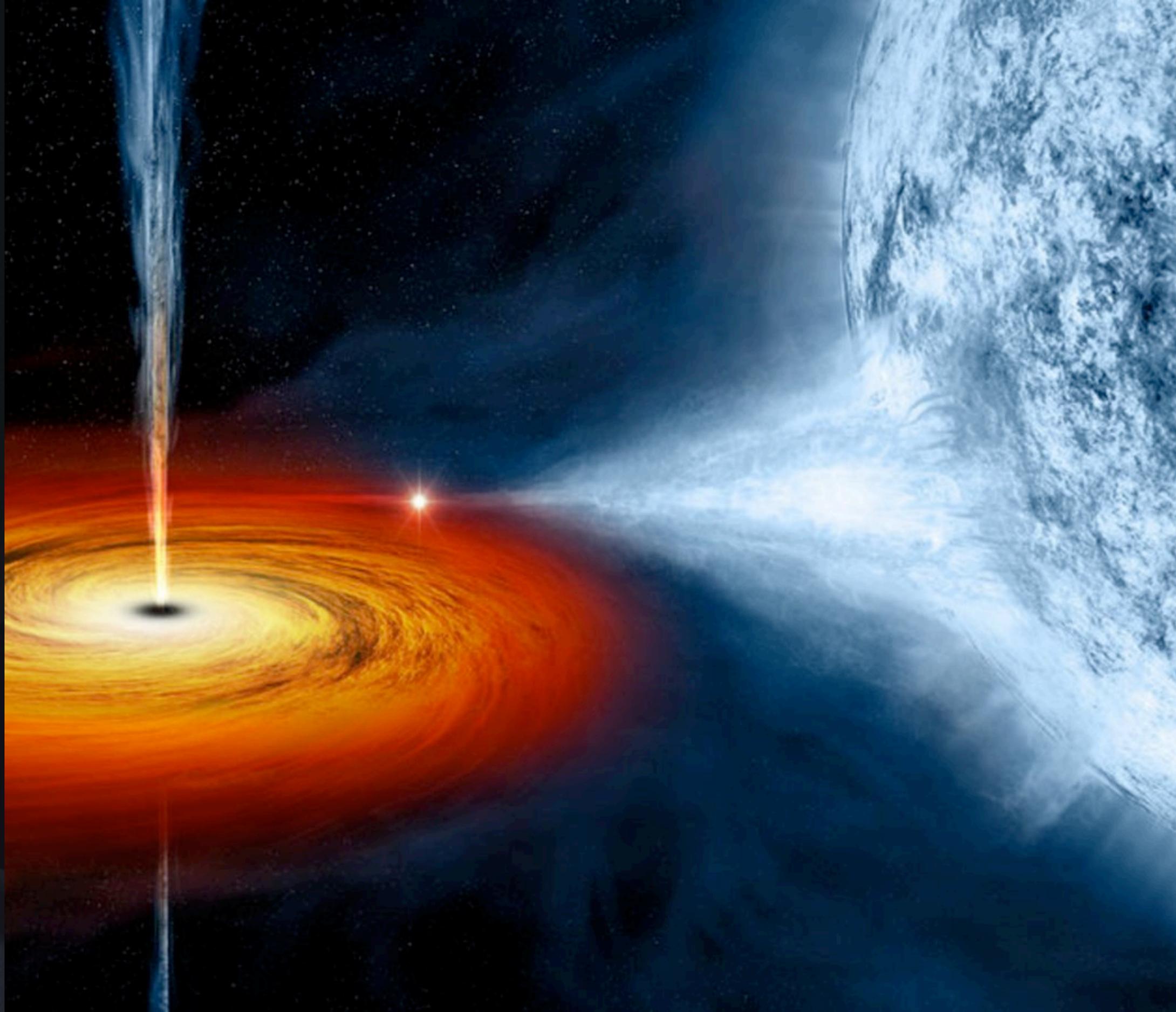


- **Agujeros Negros:**

- No tiene campo magnetico
- No tiene superficie física.
- Horizonte de eventos.
- Mayor masa



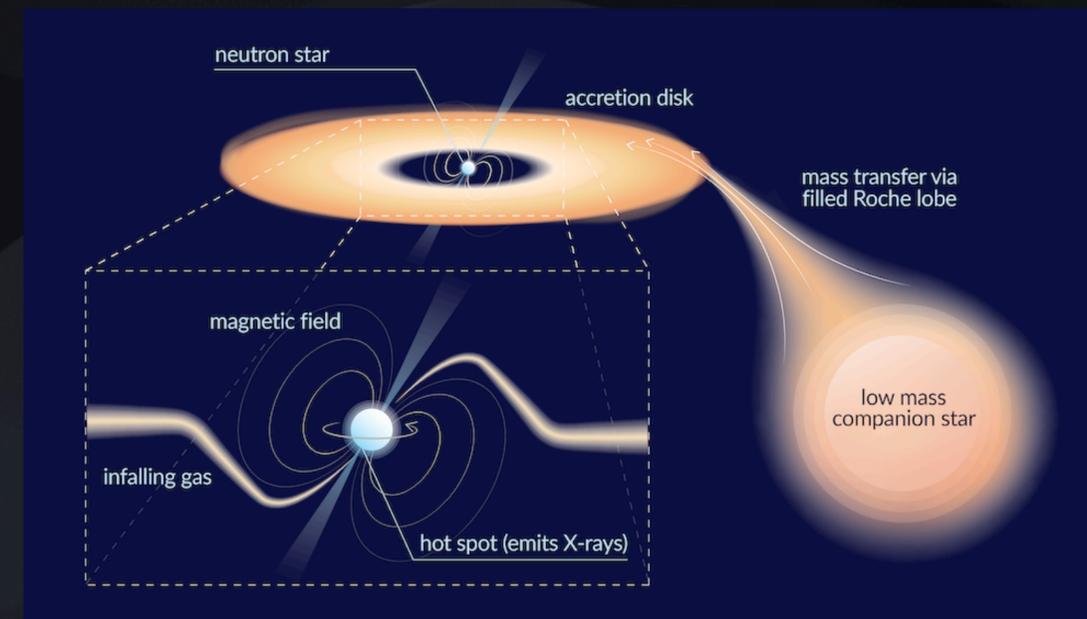
Acreción



Acreción en XBs

Acreción

- Mecanismo de transferencia en HMXBs → Acreción por vientos estelares
 - La estrella compañera no llena su lóbulo de Roche.
 - Pérdida de masa significativa por vientos estelares.
- Mecanismo de transferencia en LMXBs → Disco de acreción
 - Acreción por desbordamiento del Lóbulo de Roche



Acreción en XBs

Acreción

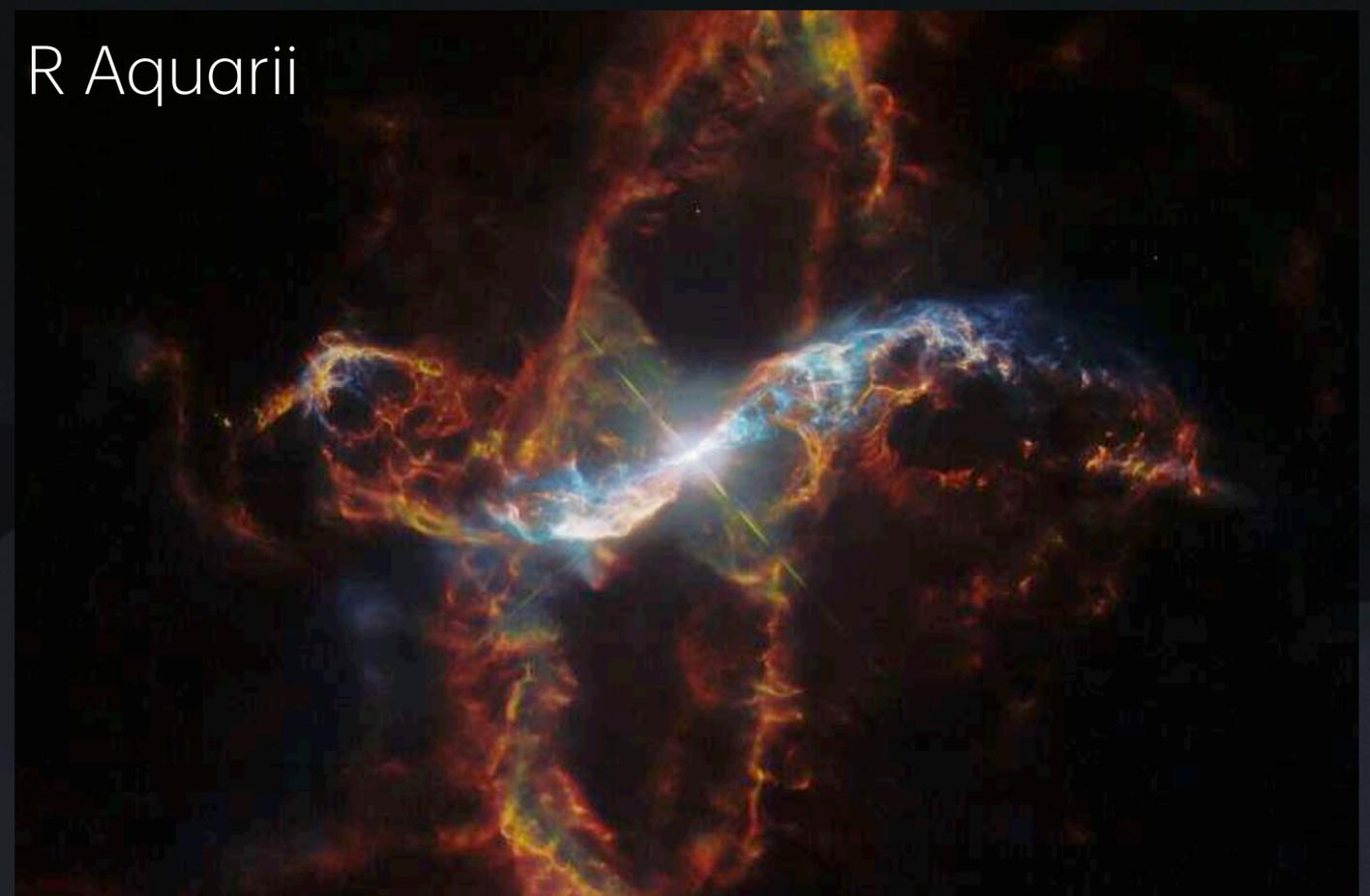
- Mecanismo de transferencia en HMXBs → Acreción por vientos estelares
- Mecanismo de transferencia en LMXBs → Acreción por desbordamiento del Lóbulo de Roche
- Binarias simbióticas → Acreción por vientos estelares



Enana Blanca + Gigante Roja

Más débiles que las HMXBs

(Luminosidad $L_X \sim 10^{30} - 10^{33} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$)



Creditos: NASA, ESA, M. Stute, M. Karovska, D. de Martin & M. Zamani (ESA/Hubble), N. Bartmann (ESA/Hubble)

Acreción en XBs

Acreción

- Mecanismo de transferencia en HMXBs → Acreción por vientos estelares
- Mecanismo de transferencia en LMXBs → Acreción por desbordamiento del Lóbulo de Roche
- Binarias simbióticas → Acreción por vientos estelares



Enana Blanca + Gigante Roja

Más débiles que las HMXBs

(Luminosidad $L_X \sim 10^{30} - 10^{33} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$)

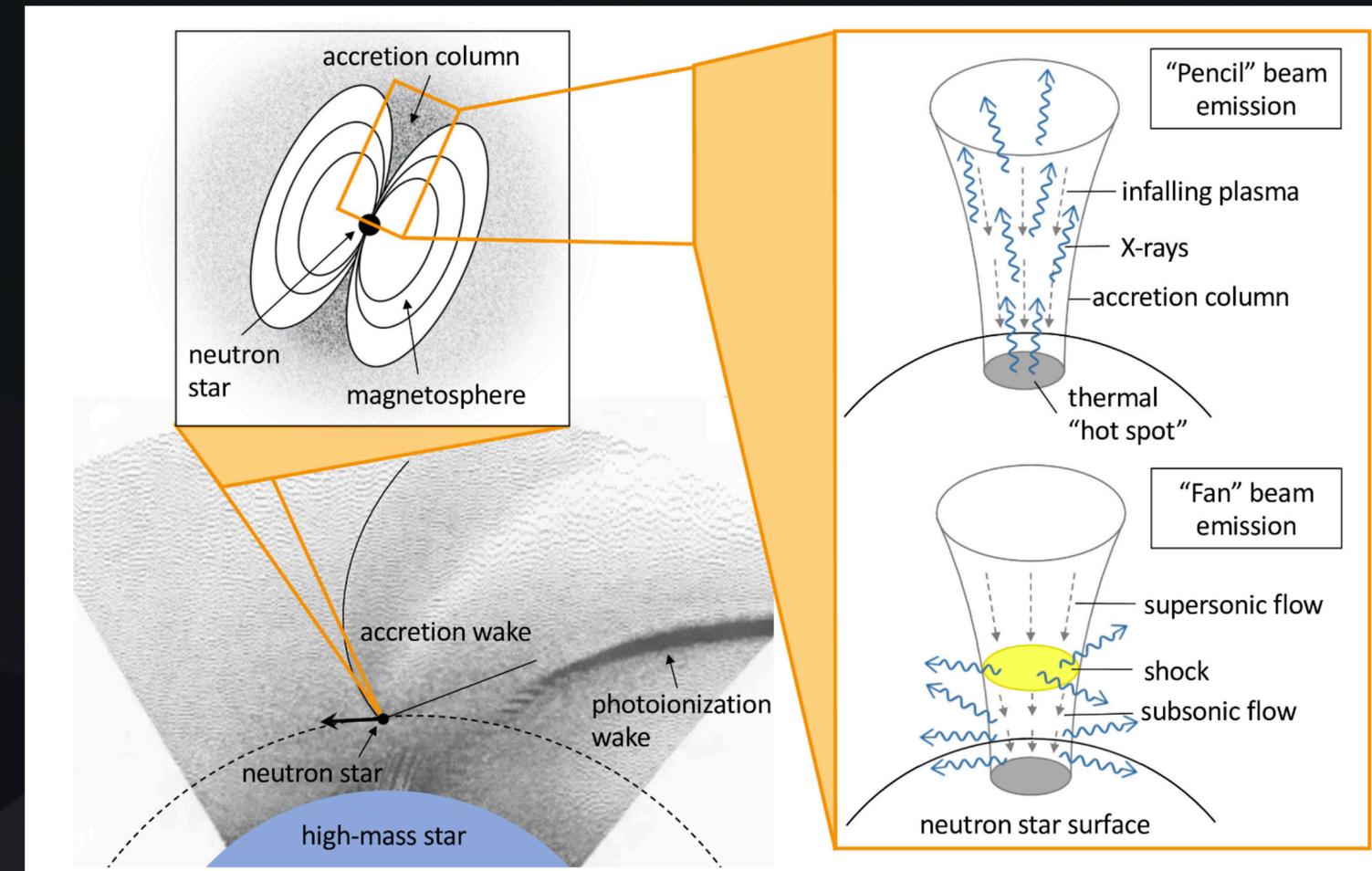


Acreción por Vientos

Acreción

Acreción por Vientos:

- La mayoría de los HMXBs contienen estrellas de neutrones.
- Los fuertes campos magnéticos canalizan el flujo de acreción a los polos magnéticos.
- Mayor parte de la emisión de rayos X se da cerca de los polos.
- Eje magnético y de rotación están desalineados, se pueden observar pulsaciones en rayos X. "Pulsares"
- Se pueden caracterizar por su periodo de giro P_S



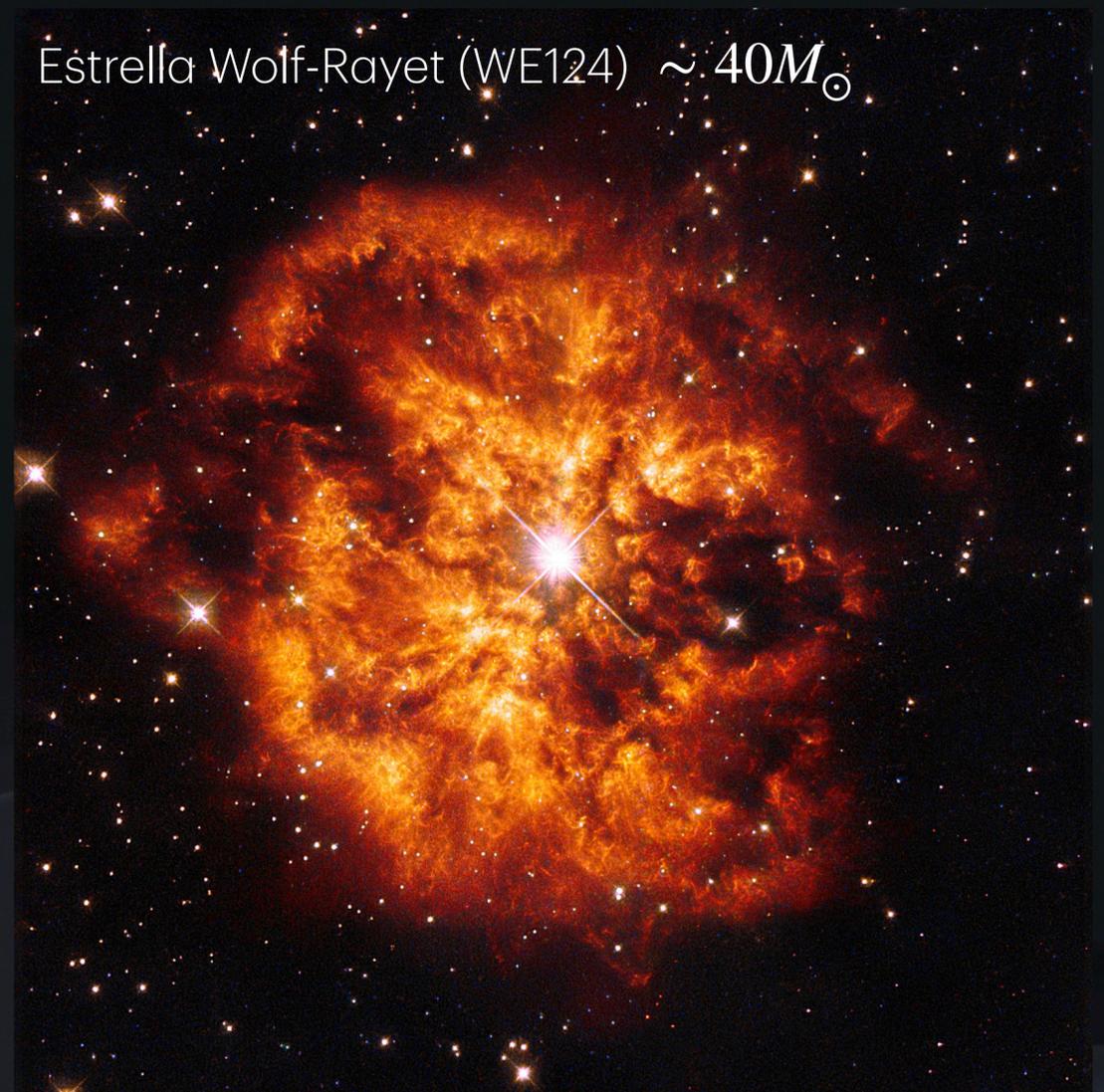
Acreción por Vientos

Acreción

- Las estrellas tipo O y B generan vientos potentes, el cual es acelerado hacia el exterior desde la atmósfera.
- La velocidad puede aproximarse por:

$$v_w(r) \approx v_\infty \left(1 - \frac{R_*}{r}\right)^\beta \quad \beta = [0.8, 1.2]$$

- Para estrellas tipo O y B: $v_\infty \sim 500 - 2000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
- Las velocidades que se alcanzan en los vientos $\sim 1000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
(a $2R_*$ y con $\beta = 1$)
- Vientos supersónicos y mucho mayor a la vel. orbital de la NS
($\sim 200 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) a $2R_*$



Estrella Wolf-Rayet (WE124) $\sim 40M_\odot$

Creditos: NASA

Acreción por Vientos

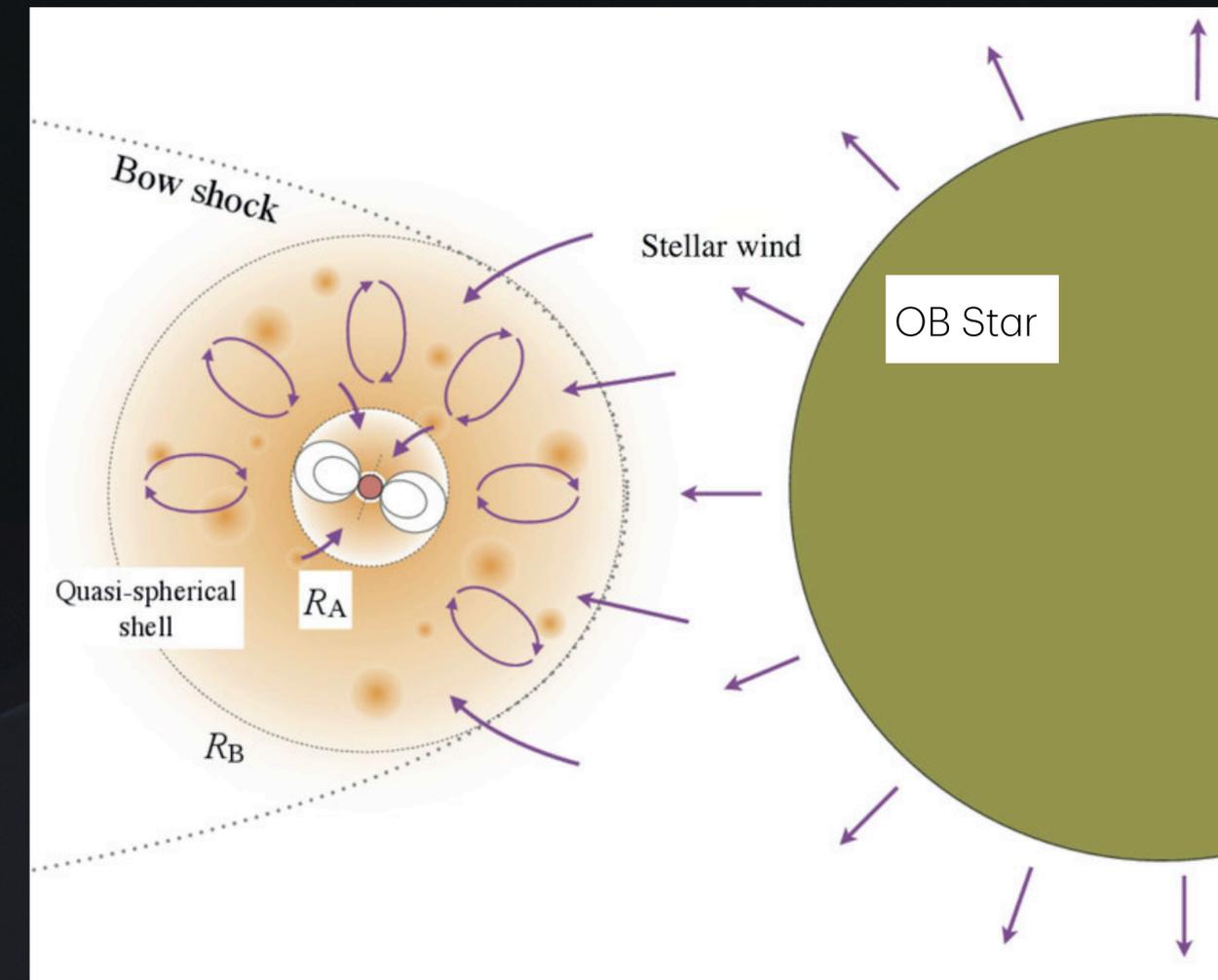
Acreción

- Bondi-Hoyle-Lyttleton es buena aproximación al proceso de acreción. Modelo de acreción con simetría esférica.
- La tasa de acreción al objeto compacto es:

$$\dot{M} \approx \pi R_A^2 \rho_w v_w$$

- ρ_w , v_w son la densidad y la velocidad del viento en la posición de la NS.
- R_A es el radio en donde el material del viento es capturado gravitacionalmente por la NS. Ubicación donde $v_w = v_{\text{escape}}$

$$R_A = \frac{2GM_{NS}}{v_w^2}$$



Creditos: Mauro Orlandini (2015)

Acreción por Vientos

Acreción

- La tasa de acreción:

$$\dot{M} \approx \frac{4\pi(GM_{NS})^2 \rho_w}{v_w^3}$$

- Velocidad del viento:

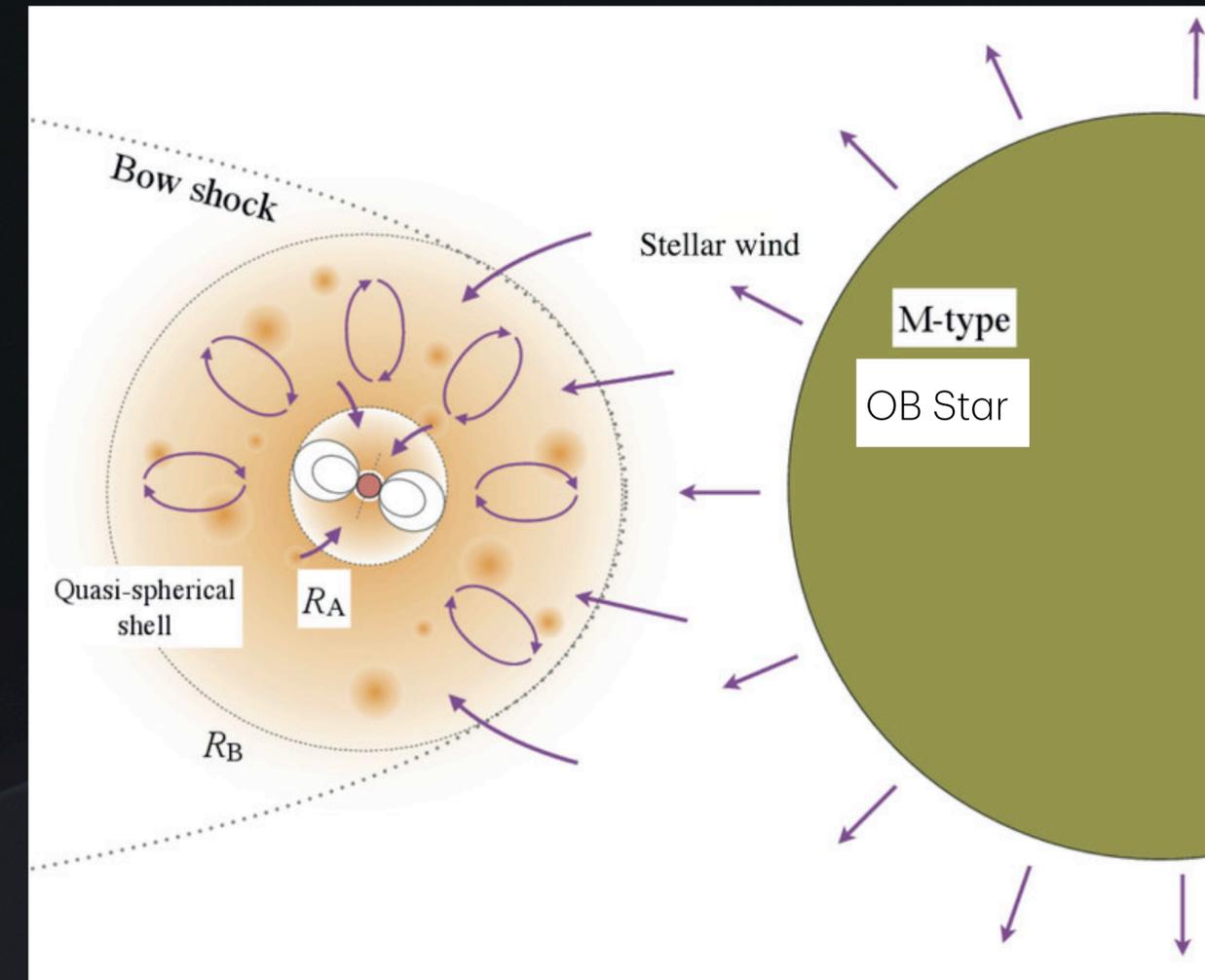
$$v_w(r) \approx v_\infty \left(1 - \frac{R_*}{r}\right)^\beta$$

- Densidad del viento:

$$\rho(r)_w \approx \frac{\epsilon L}{4\pi r^2 v_w(r) v_\infty c}$$

- ϵ : Eficiencia del momento transferido de la radiación de la estrella al material del viento.

- Para las estrellas masivas OB se tiene: $\frac{R_*}{R_\odot} \approx 0.9 \frac{M_*}{M_\odot}$, $\frac{L}{L_\odot} \approx 19 \left(\frac{M_*}{M_\odot}\right)^{2.76}$



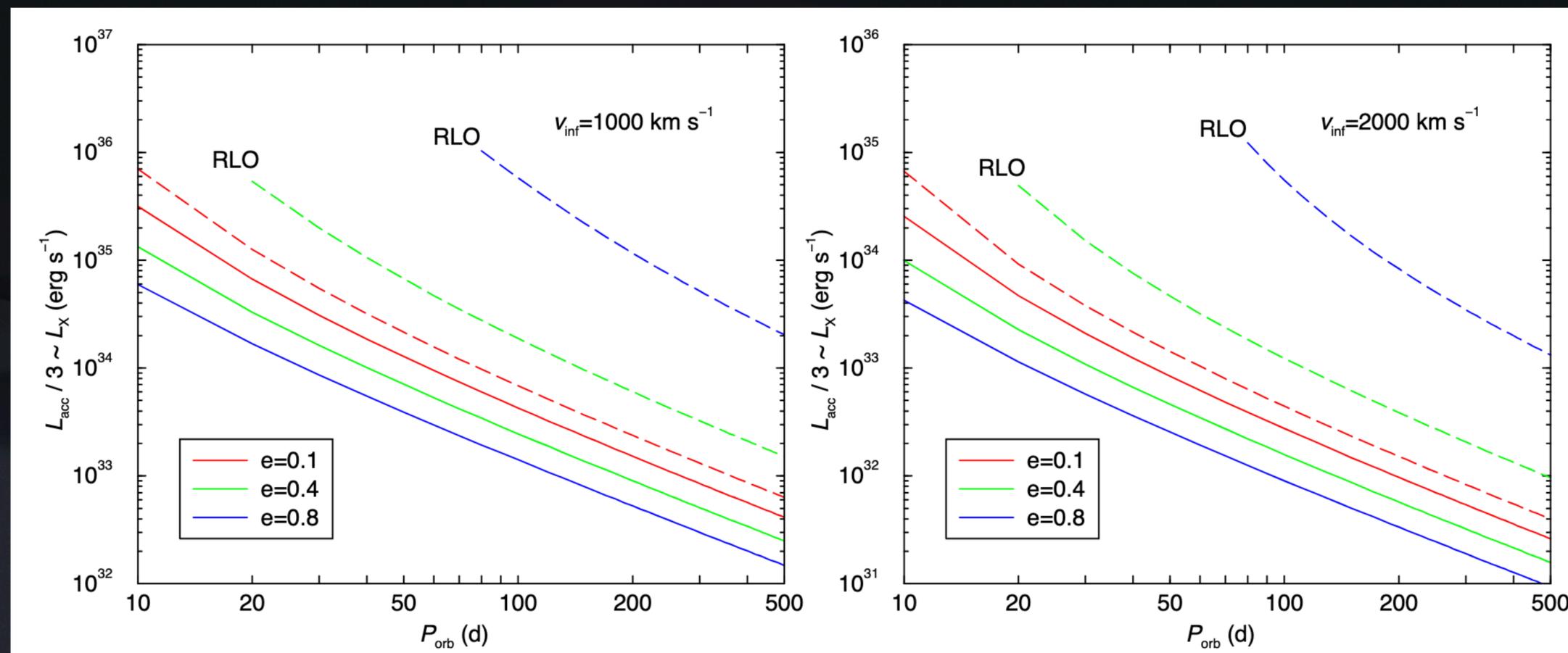
Creditos: Mauro Orlandini (2015)

Acreción por Vientos

Acreción

- Combinando todas las expresiones anteriores y evaluando los parametros del viento en el semi-eje mayor de la orbita del binario ($r = a$):

$$L_X \approx 5 \times 10^{35} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \left(\frac{M_*}{10M_\odot} \right)^{2.76} \left(\frac{M_c}{1.4M_\odot} \right)^2 \left(\frac{a}{10R_\odot} \right)^{-2} \left(\frac{v_\infty}{1000 \text{ km s}^{-1}} \right)^{2.76} \left(1 - 0.9 \frac{M_*}{M_\odot} \frac{R_\odot}{a} \right)^{-4\beta}$$

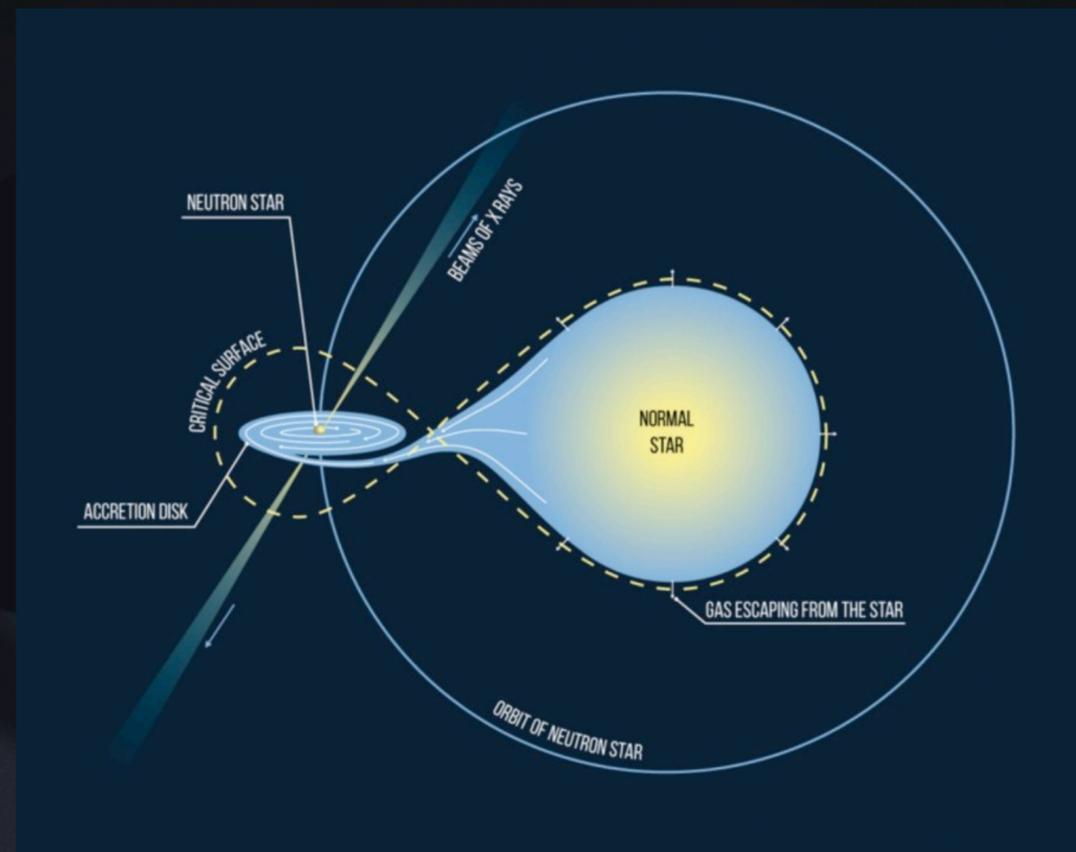


Disco de Acreción

Acreción

Lóbulo de Roche (RLO):

- Límite equipotencial gravitacional dentro del cual el material está ligado gravitacionalmente a la estrella.
- El desbordamiento ocurre cuando la estrella donante se expande más allá de su RLO.



Disco de Acreción

Acreción

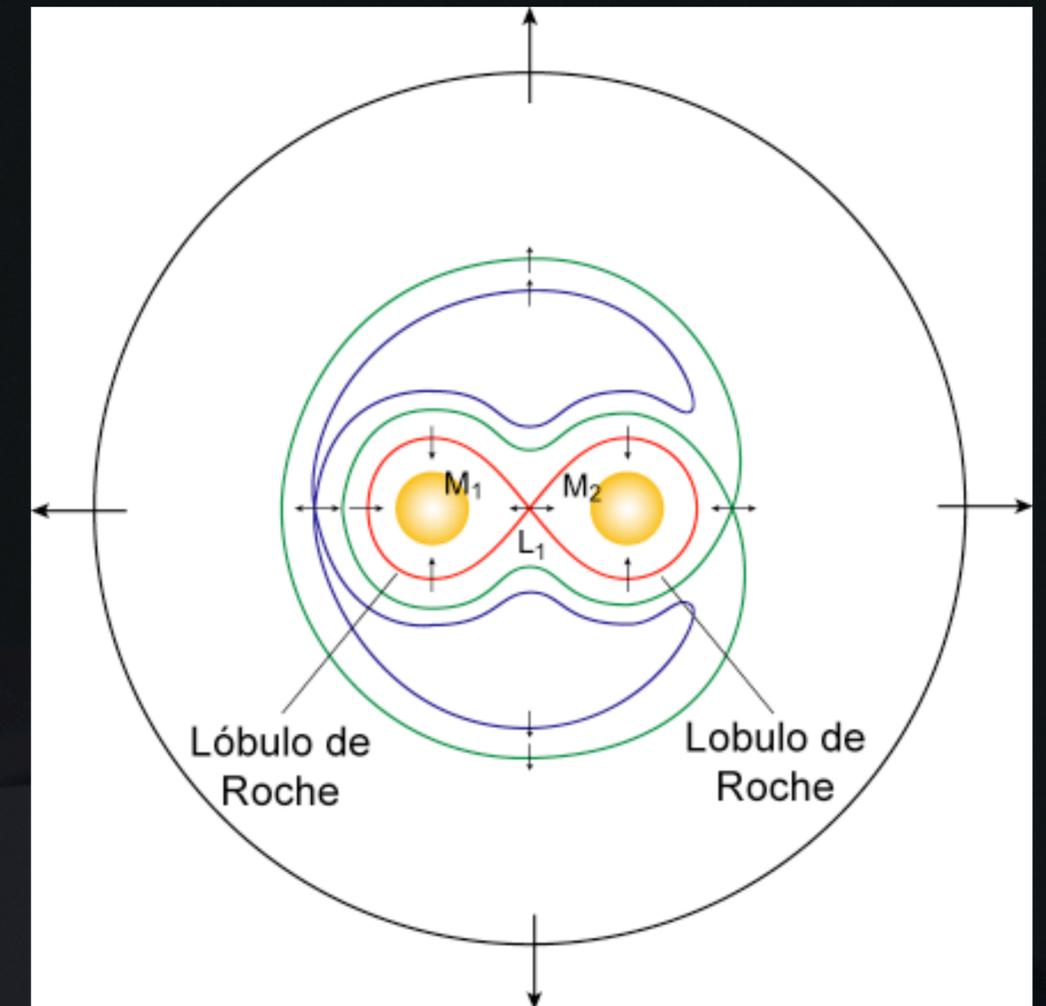
Lóbulo de Roche (RLO):

- **Sistema de referencia rotatorio:** Que gira con la misma velocidad angular que las estrellas alrededor de su centro de masa. Es decir, el sistema se mantiene "fijo".
- **Potencial Efectivo:**

$$\Phi_{eff}(x, y) = -\frac{GM_1}{r_1} - \frac{GM_2}{r_2} - \frac{1}{2}\Omega^2 R^2$$

Potencial gravitacional

Potencial centrífugo



Disco de Acreción

Acreción

Lóbulo de Roche (RLO):

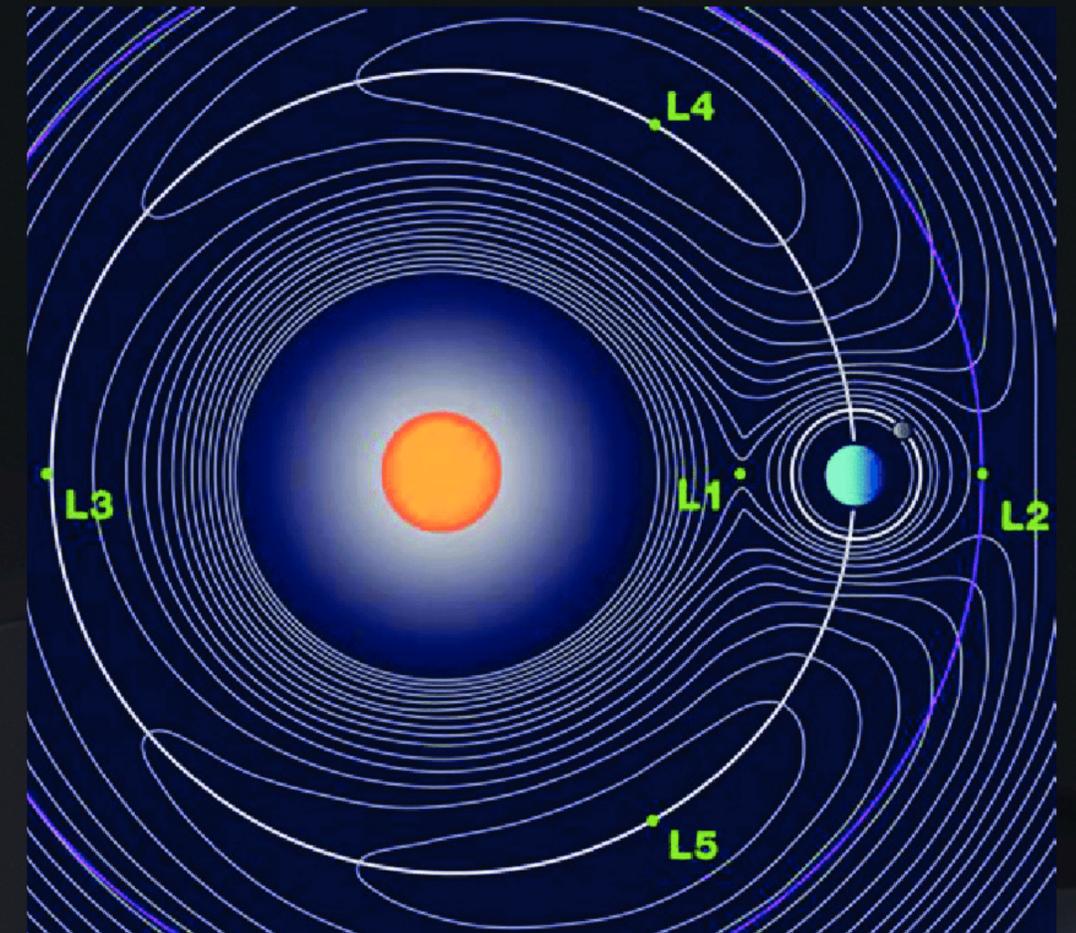
- **Potencial Efectivo:**

$$\Phi_{eff}(x, y) = -\frac{GM_1}{r_1} - \frac{GM_2}{r_2} - \frac{1}{2}\Omega^2 R^2$$

- **Puntos de Lagrange:** Puntos de equilibrio donde la fuerza neta es cero. 5 soluciones (L1, L2, L3, L4* y L5*)

$$\nabla \Phi_{eff} = 0$$

- Lóbulo de Roche: Superficie equipotencial que pasa por L1.



Creditos: Claude Nicoles (2016)

Disco de Acreción

Acreción

Lóbulo de Roche (RLO):

- **Formula de Eggleton:** Aproximación para el radio del RLO de la estrella de masa M_1

$$\frac{R_{L_1}}{d} \approx \frac{0.49 \cdot q^{2/3}}{0.6 \cdot q^{2/3} + \ln(1 + q^{1/3})}$$

$$q = \frac{M_1}{M_2}$$

