# Pulsares

# y

# Estrellas de Neutrones

Dany Page

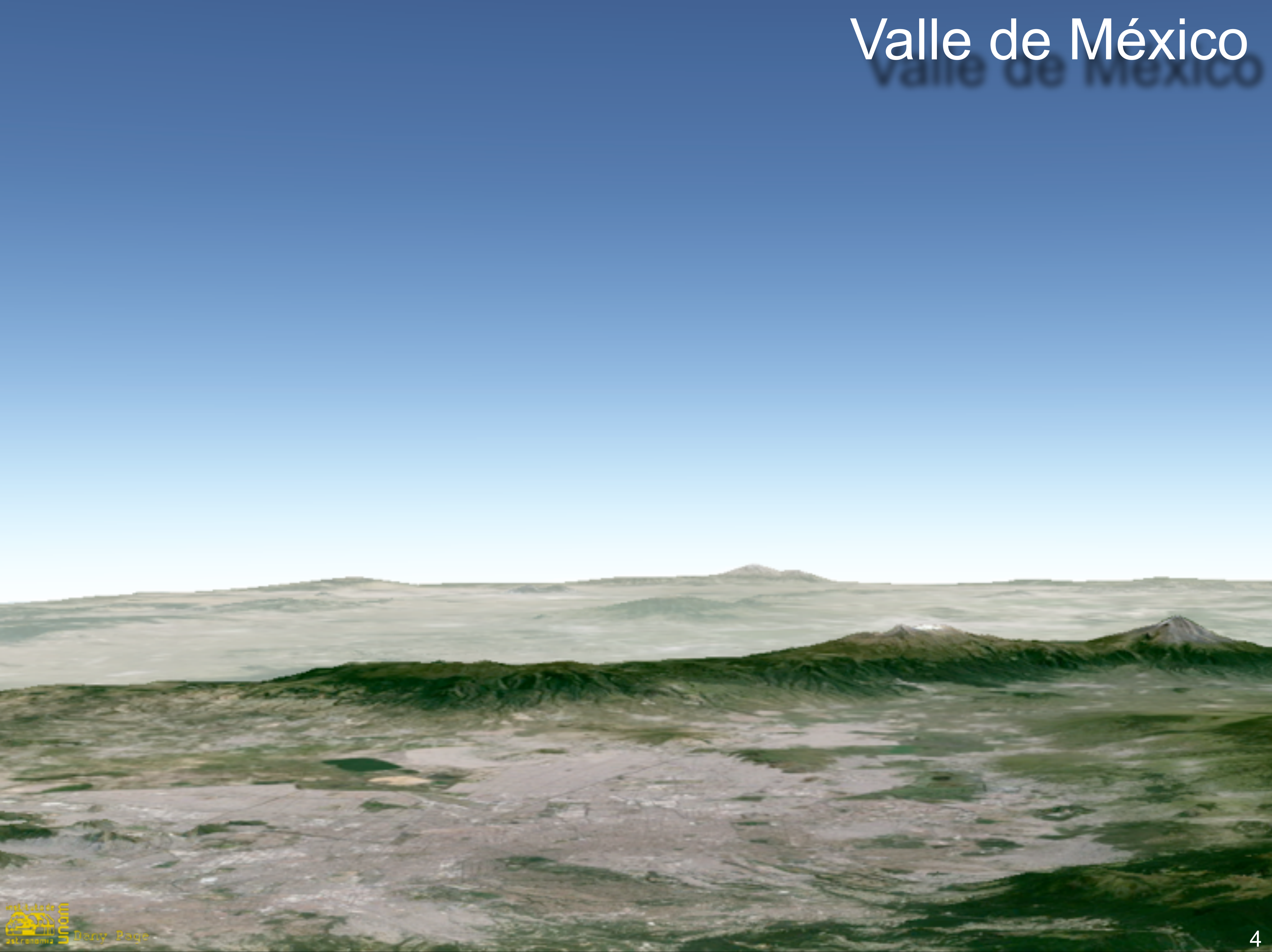
*Instituto de Astronomía*

*Universidad Nacional Autónoma de México*

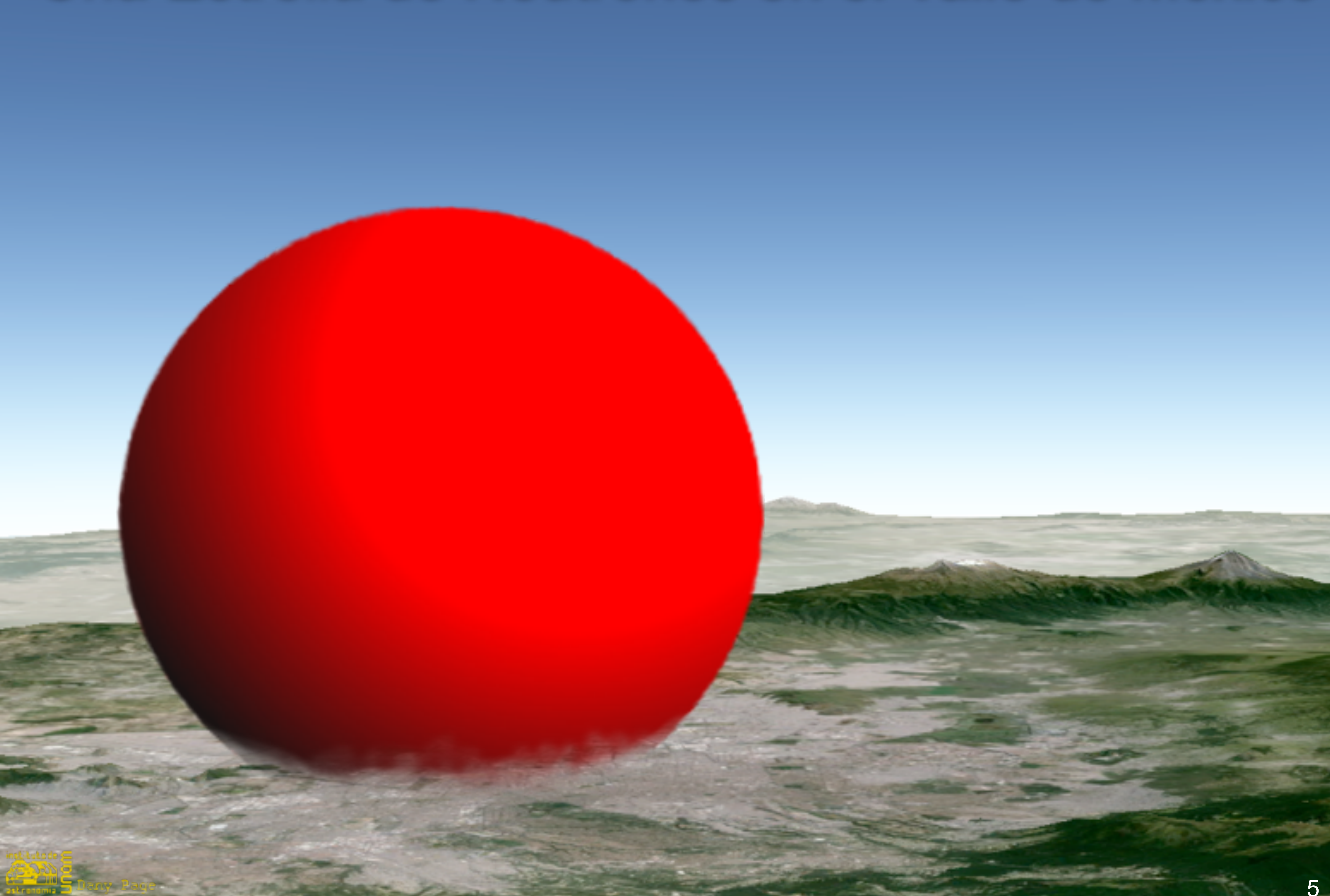
- Estrellas de Neutrones
- Pulsares
- Supernovas
- Campos Magnéticos
- Binarias de Rayos X

# Estrellas de Neutrones

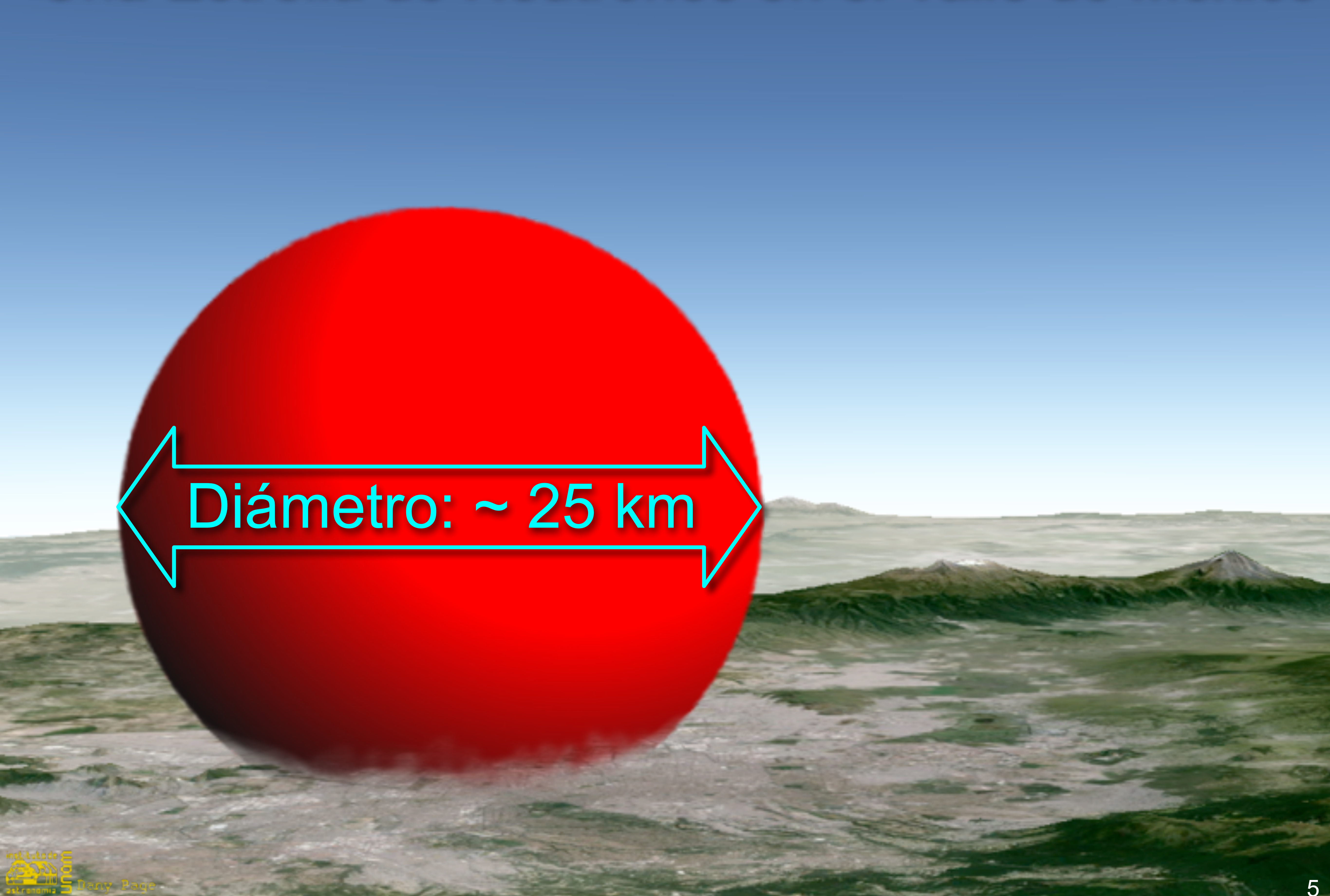
# Valle de México



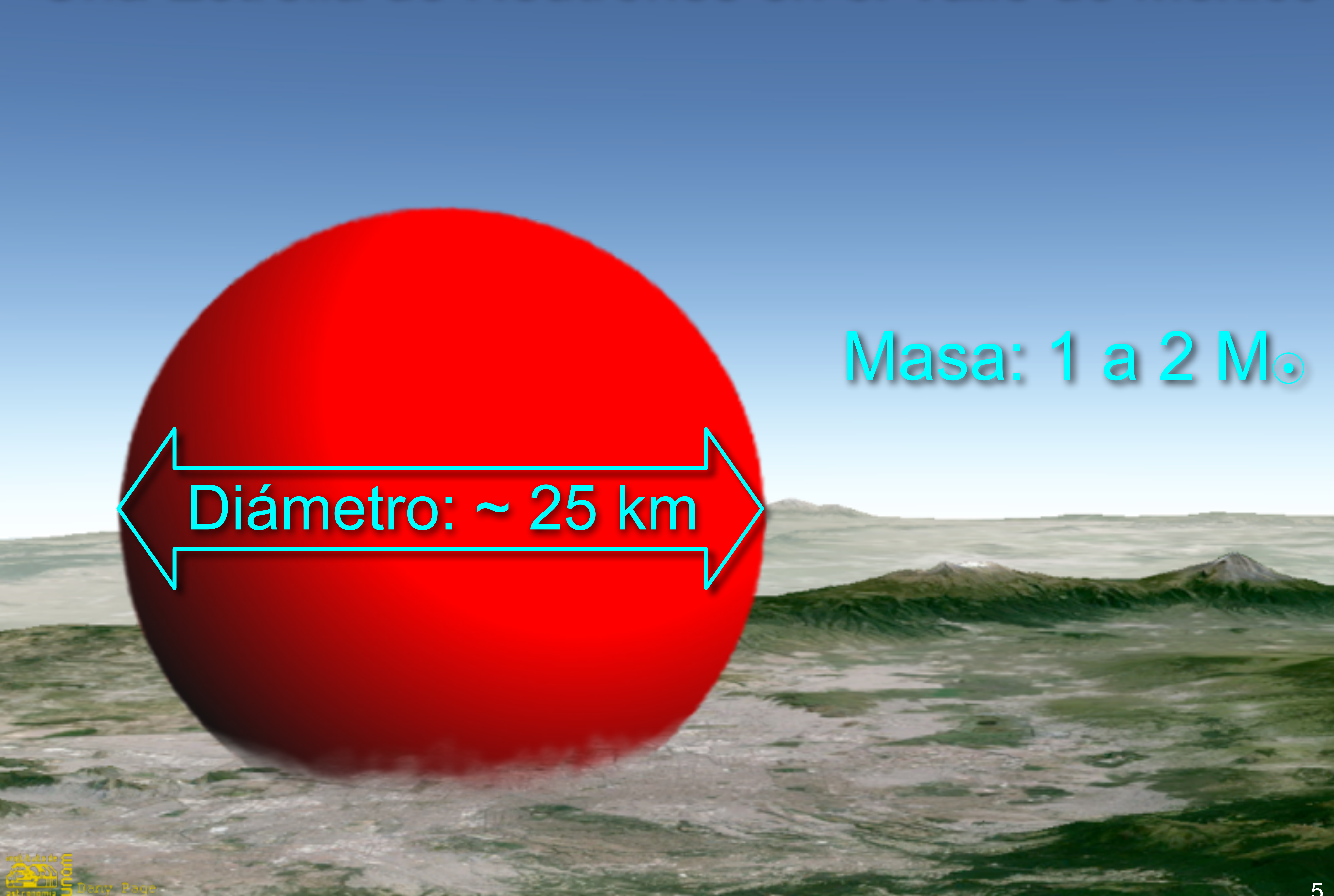
# Una Estrella de Neutrones en el Valle de México



# Una Estrella de Neutrones en el Valle de México



# Una Estrella de Neutrones en el Valle de México

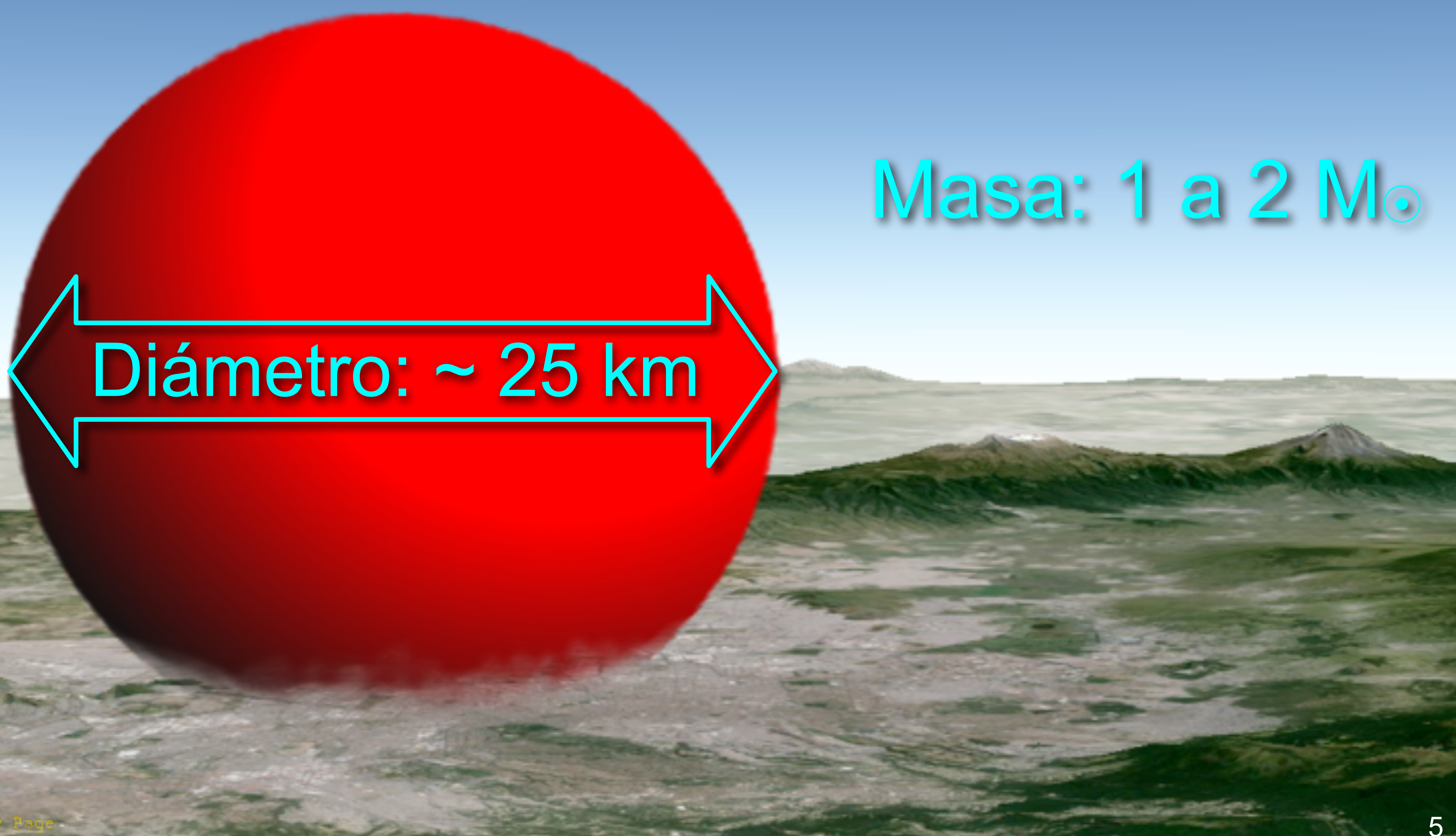


# Una Estrella de Neutrones en el Valle de México

Una Estrella de Neutrones en el Valle de México

Densidad central: ~ $10^{15}$ g $cm^{-3}$
(mil millones de toneladas por $cm^3$ !)

Masa: 1 a 2 $M_\odot$



# Una Estrella de Neutrones en el Valle de México

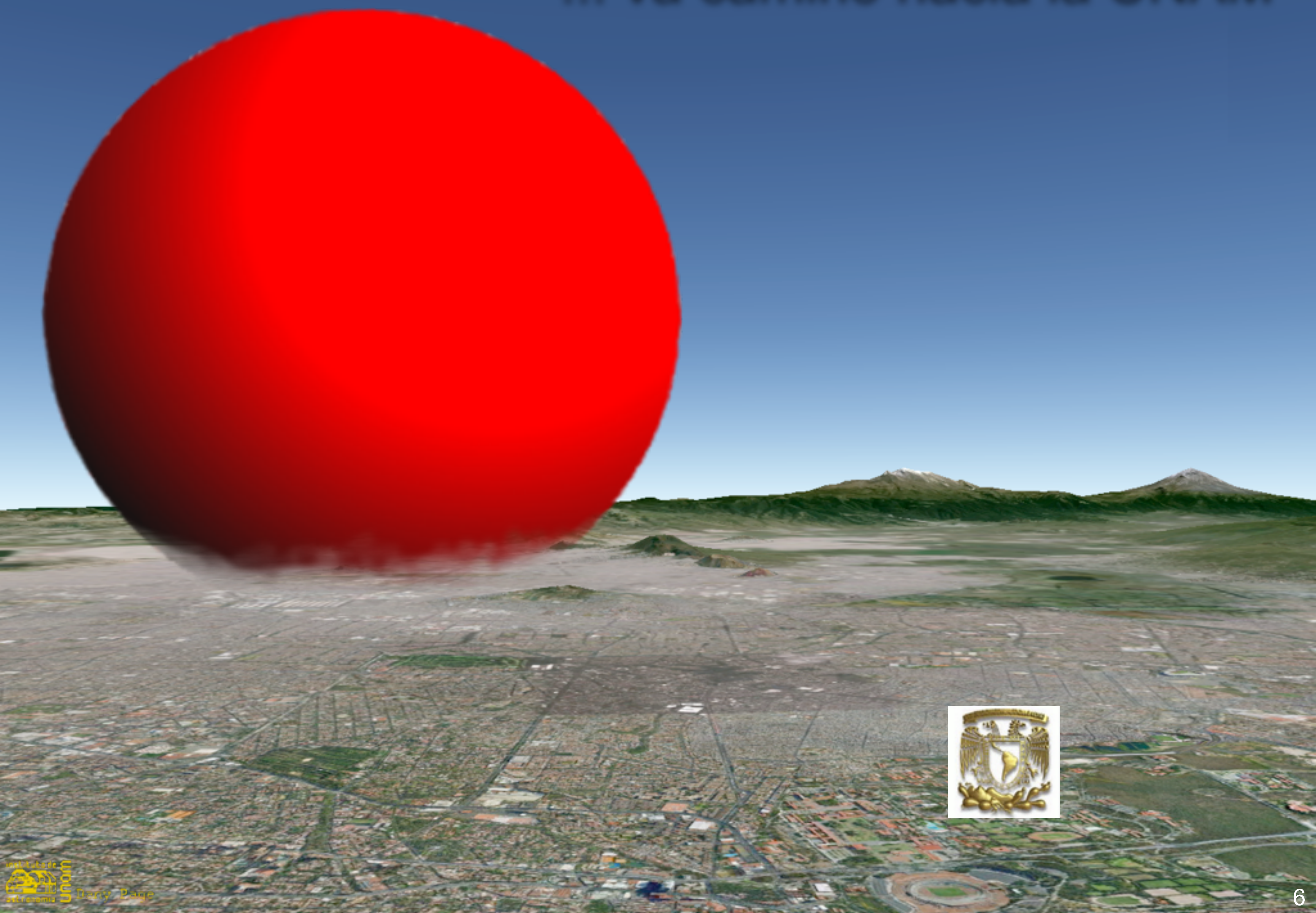
Densidad central: ~ $10^{15}$ g $cm^{-3}$
(mil millones de toneladas por $cm^3$ !)

Masa: 1 a 2 $M_\odot$


Una cucharada de materia de estrella de neutrones pesa mas que todos los edificios de la Ciudad de México

Dany Page

# ... va camino hacia la UNAM

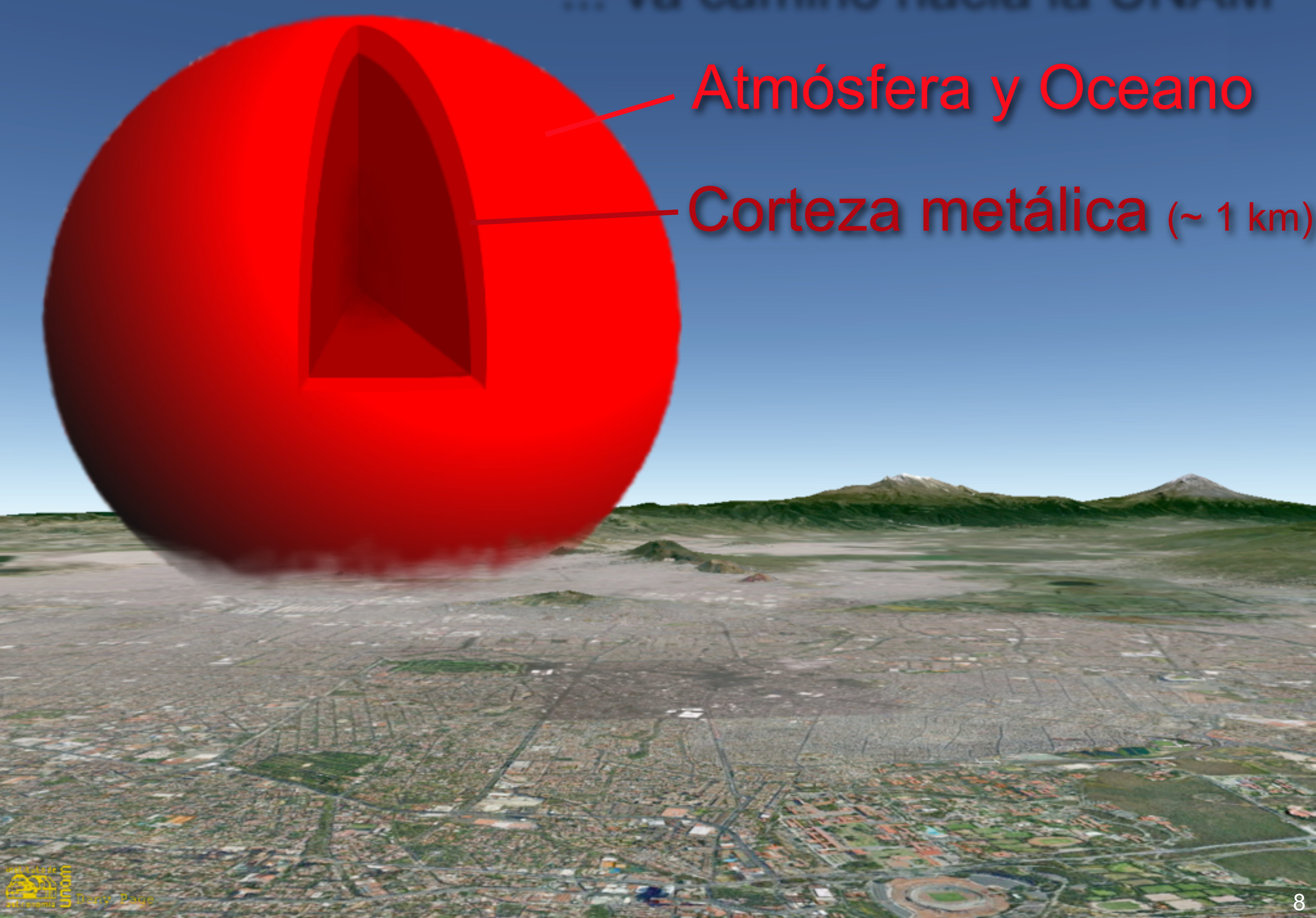


instituto de astronomía unam Dany Page

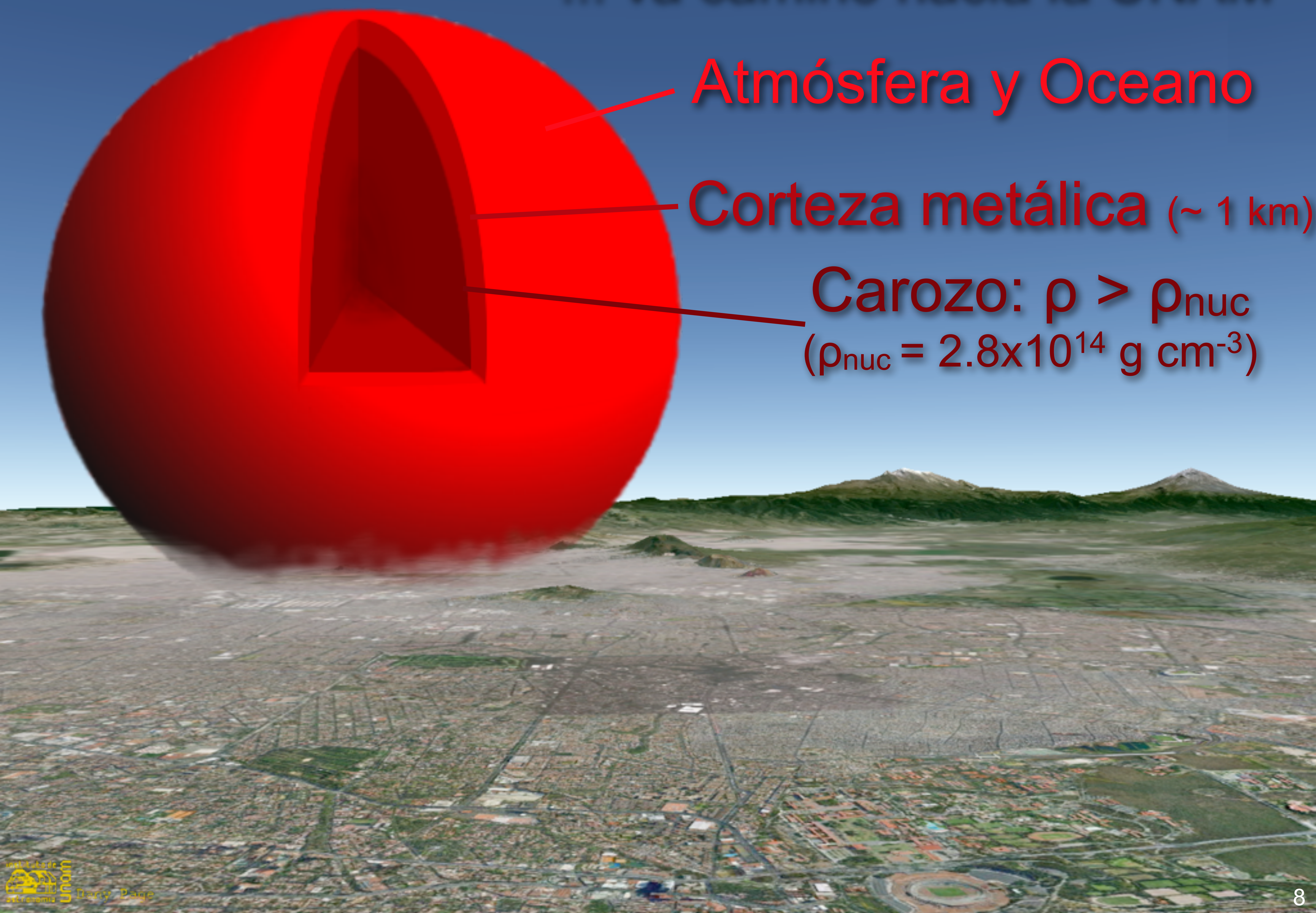

... va camino hacia la UNAM
Atmósfera y Oceano

# ... va camino hacia la UNAM

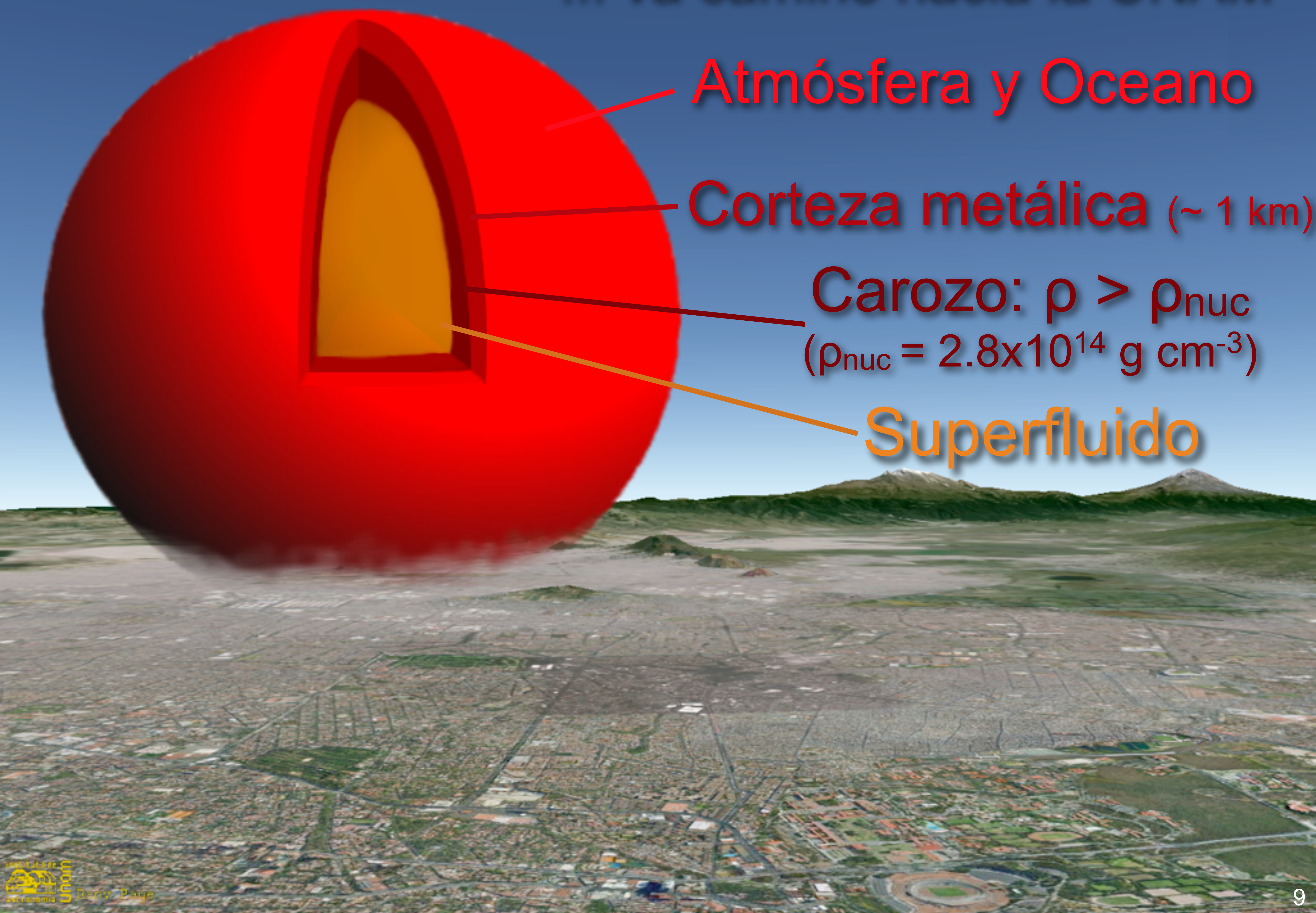
# ... va camino hacia la UNAM



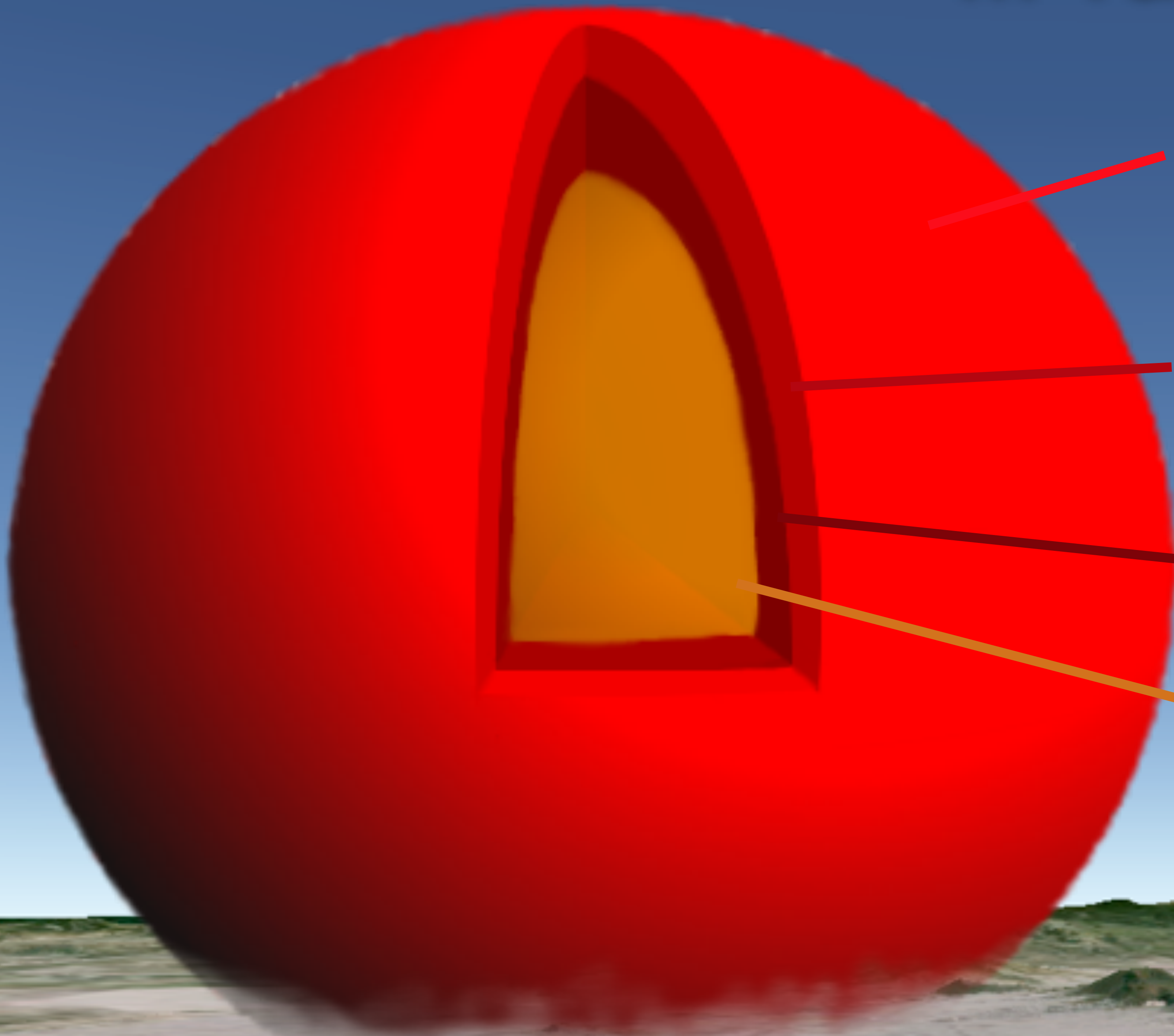
# ... va camino hacia la UNAM



# ... va camino hacia la UNAM



# ... va camino hacia la UNAM




Superfluido en estrellas de neutrones: postulado en 1959 por A. Migdal

Primera evidencia observacional: enfriamiento de “Cas A”

# Las Estrellas de Neutrones Existen

Consideremos el pulsar mas rápido conocido:
**PSR J1748.2448aD** en Terzan 5: periodo rotacional **P=1.39 ms**

---

Velocidad en el equador < velocidad de la luz:

$$v_{\text{equator}} = \Omega R = \frac{2\pi R}{P} < c \Longrightarrow R < 2\pi c P = 65\,\text{km}$$

---

# Las Estrellas de Neutrones Existen

Consideremos el pulsar mas rápido conocido:
**PSR J1748.2448aD** en Terzan 5: periodo rotacional **P=1.39 ms**

Velocidad en el equador < velocidad de la luz:

$$v_{\rm equator} = \Omega R = \frac{2\pi R}{P} < c \Longrightarrow R < 2\pi c P = 65\,{\rm km}$$

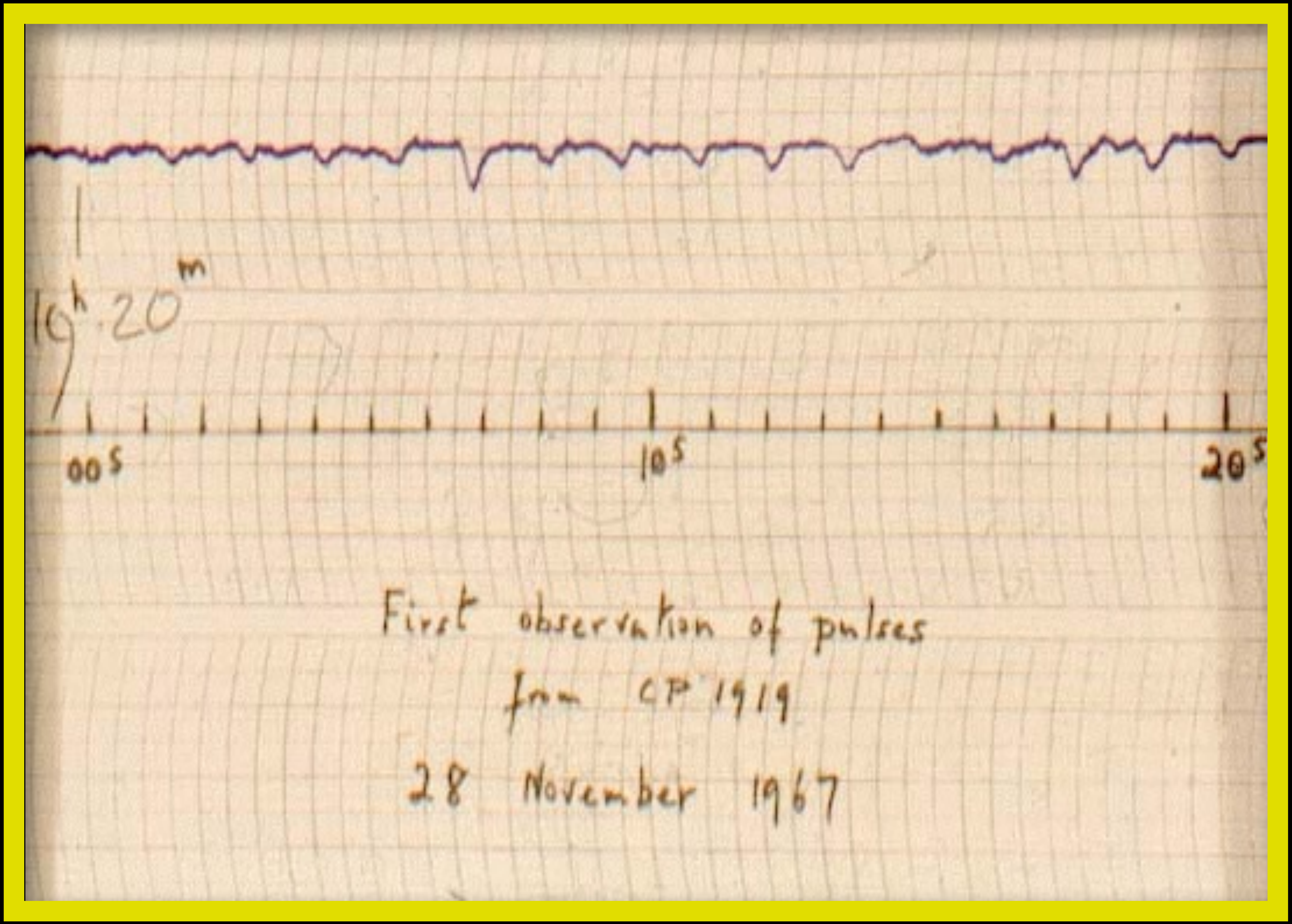
Acceleración gravitacional: $a_{\rm gravedad} > a_{\rm centrifuga}$ en el equador:

$$a_{\rm gravity} = \frac{GM}{R^2} > a_{\rm centrifugal} = \Omega^2 R = \frac{4\pi^2 R}{P^2} \quad \text{or} \quad \frac{M}{R^3} > \frac{4\pi^2}{GP^2}$$

$$\Longrightarrow \bar{\rho} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} > 8 \times 10^{13}\ {\rm g\,cm^{-3}}$$

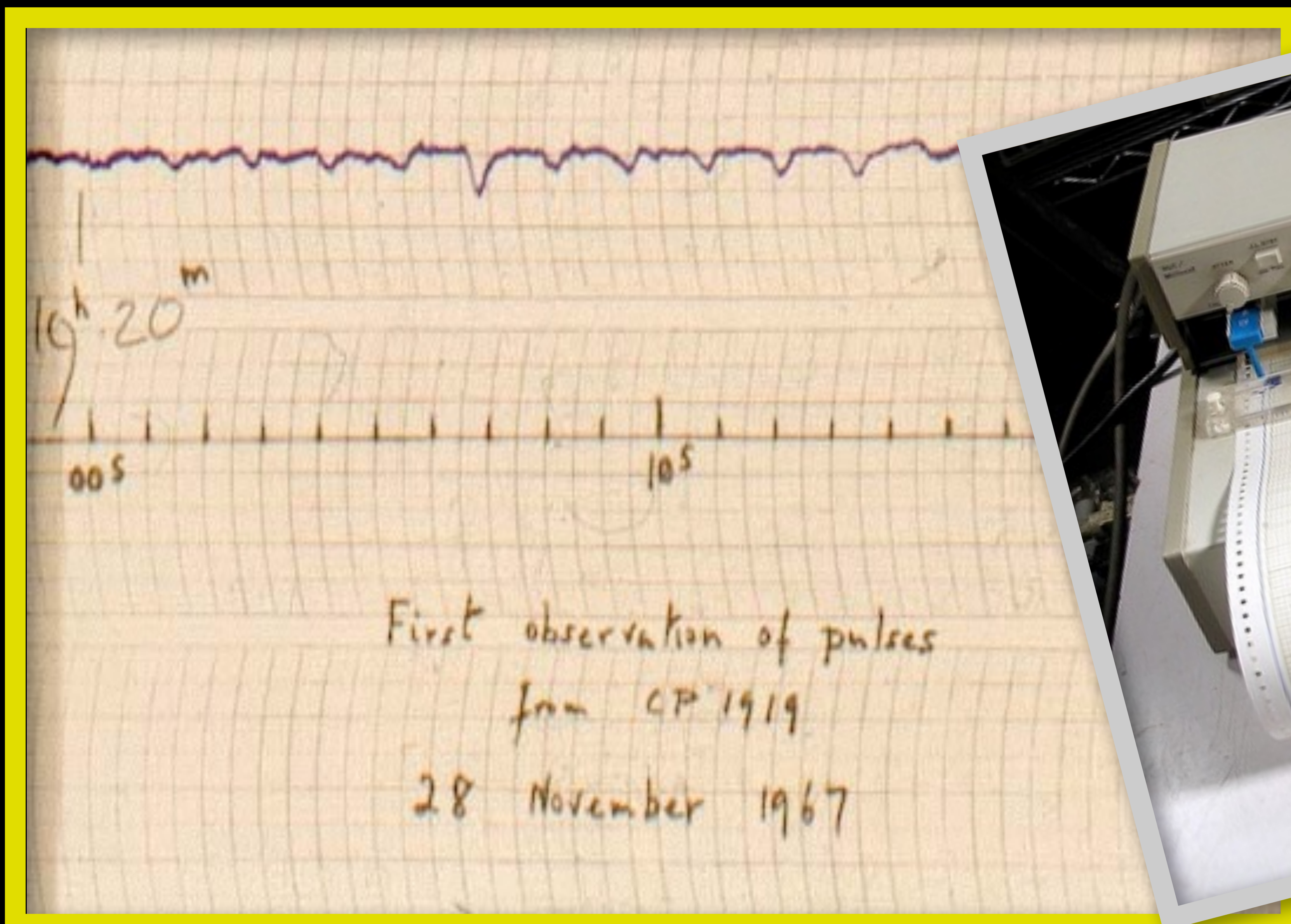
# Pulsares

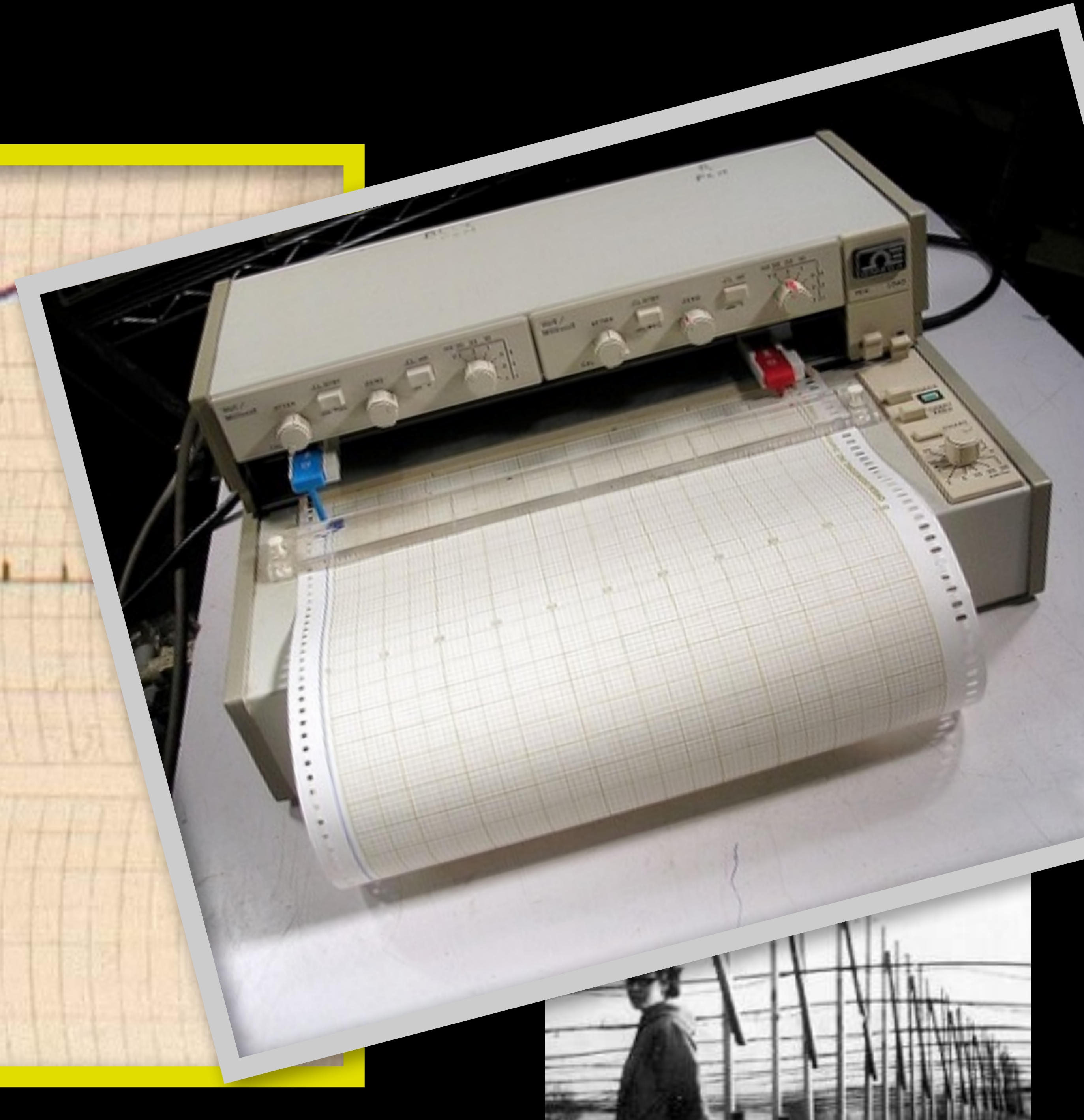
# El Descubrimiento del Primer Pulsar (1967)




Jocelyn Bell

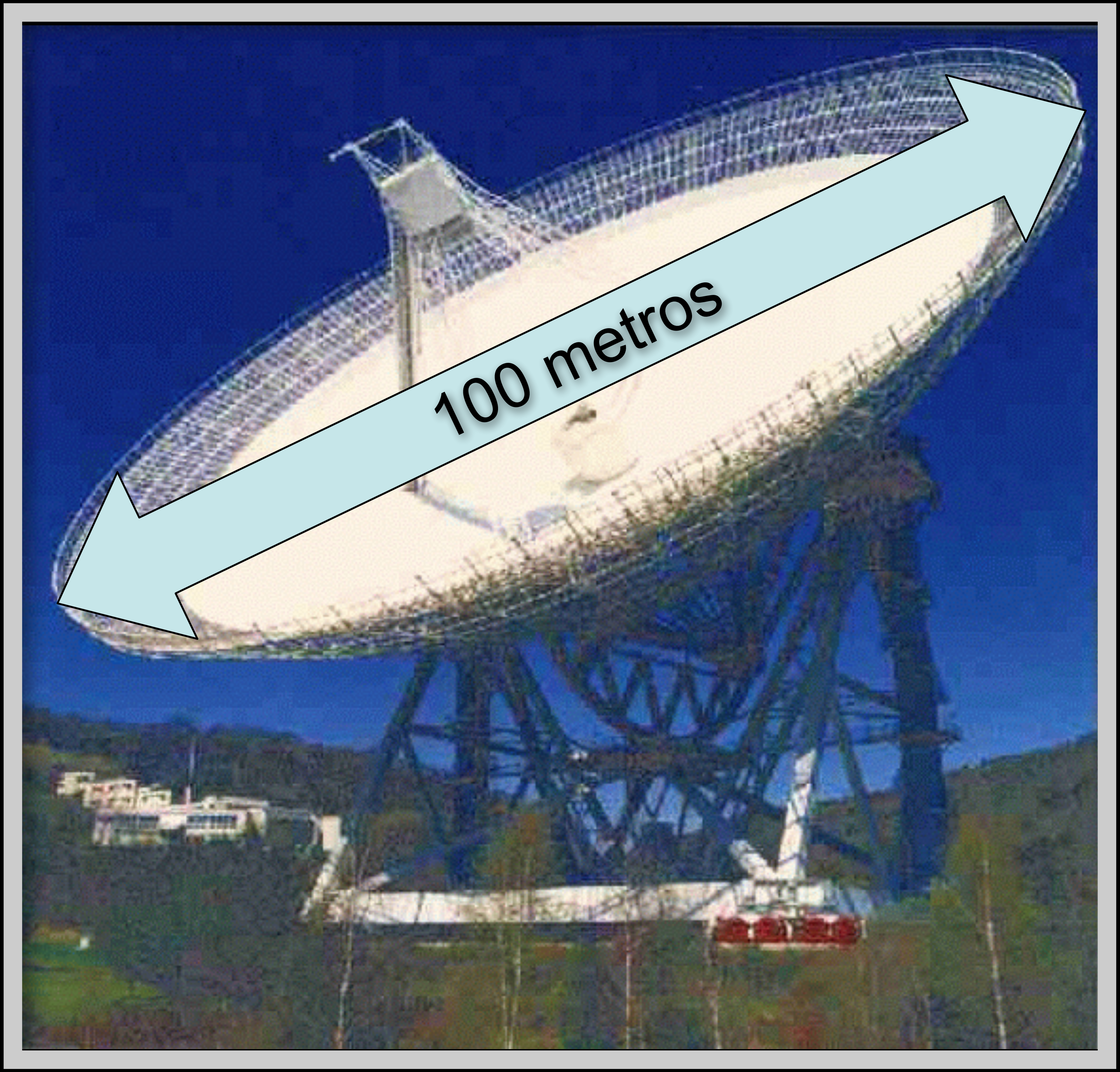
# El Descubrimiento del Primer Pulsar (1967)



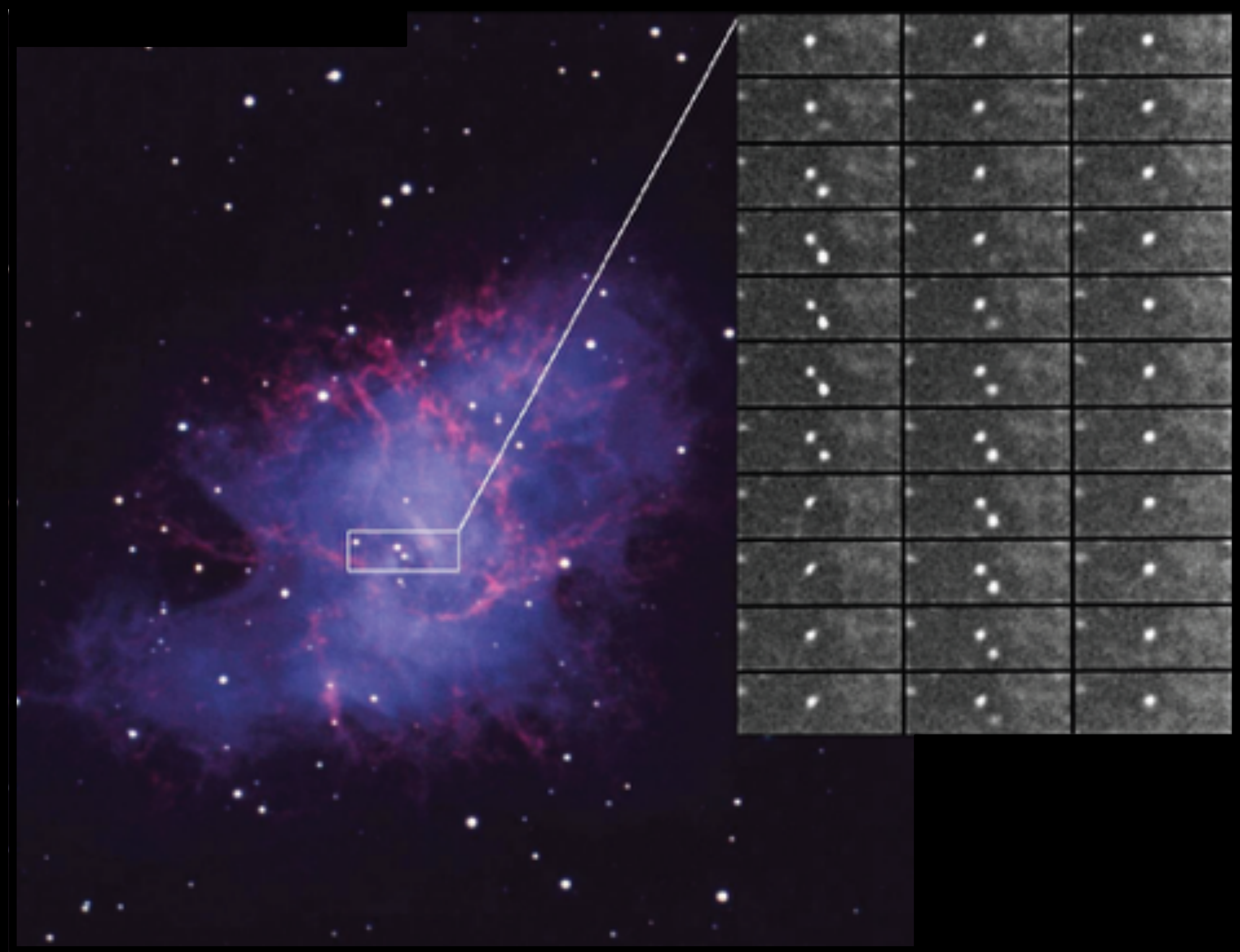
Jocelyn Bell

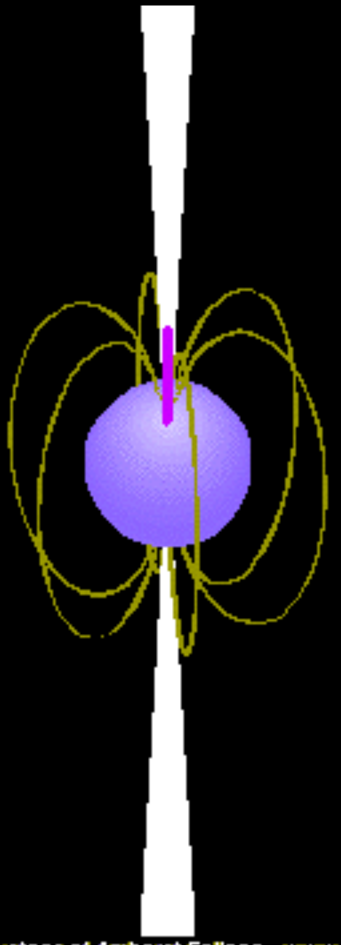
# El Radio-Telescopio de Effelsberg (Bonn)



# El Pulsar del Cangrejo

Periodo de rotación: 33 milisegundos

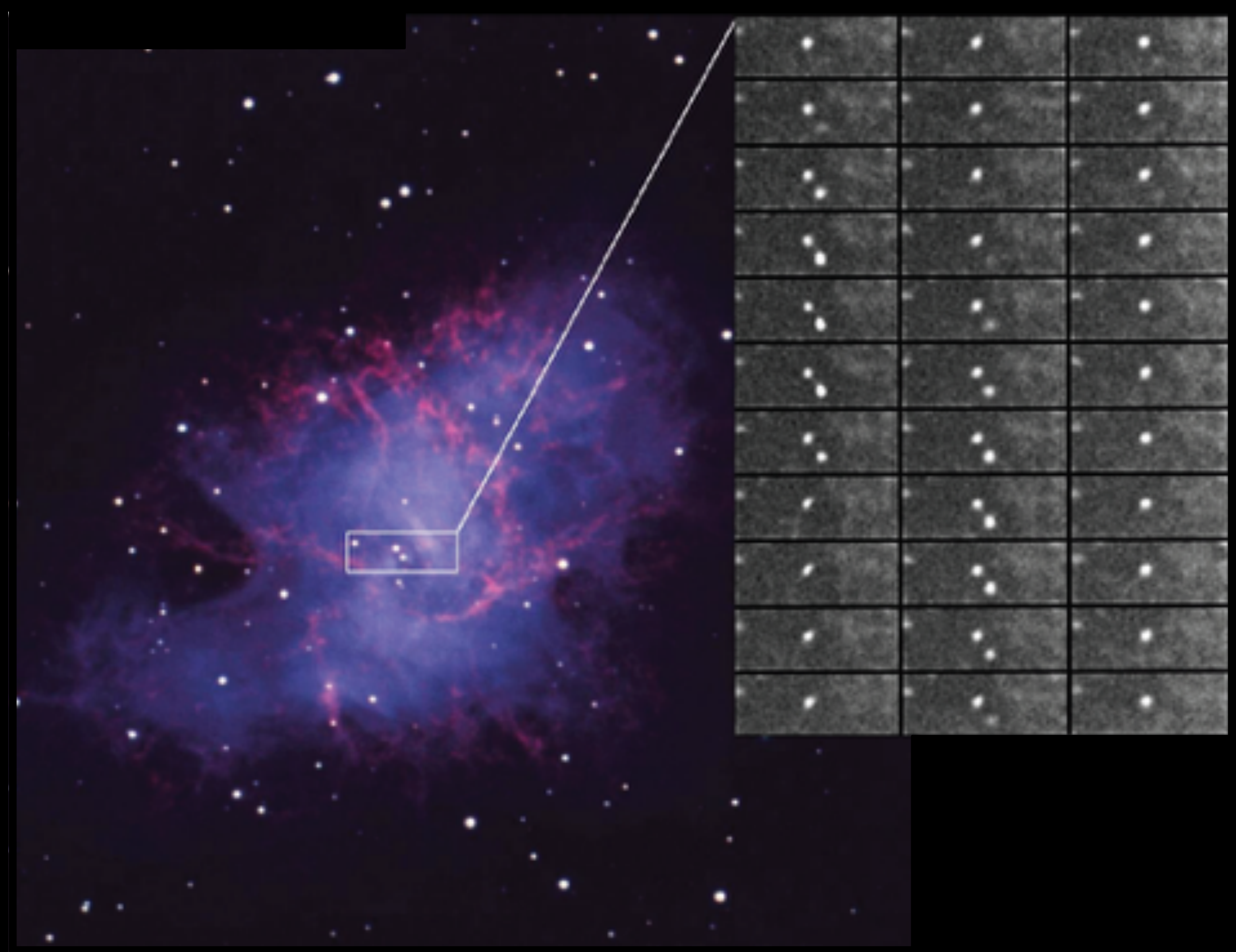


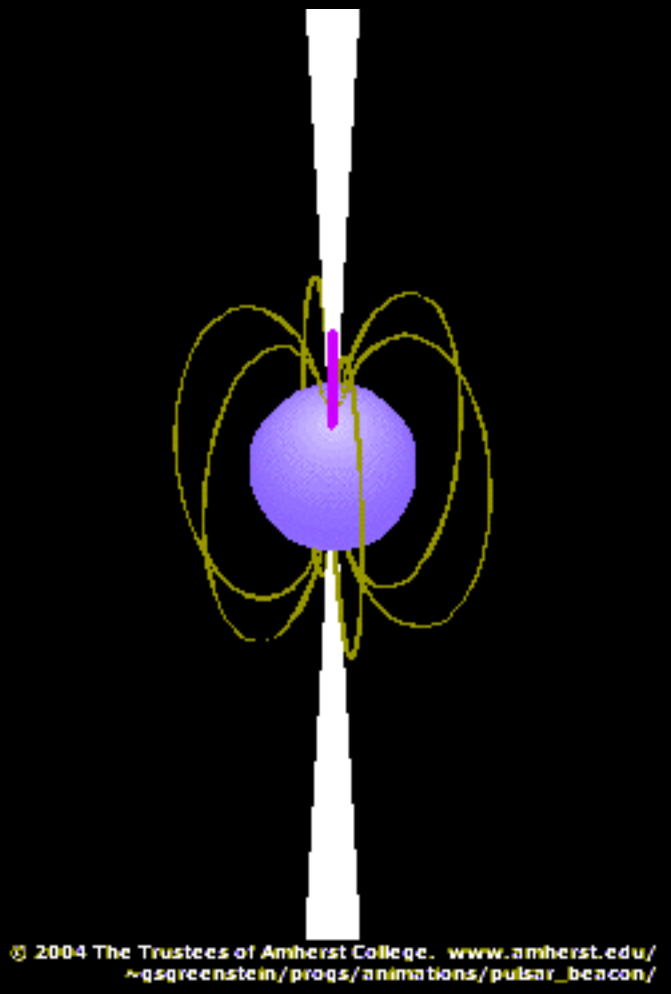



Solo un pugnado de pulsares se ven en el óptico: la gran mayoría se had descubierto en ondas radio

# El Pulsar del Cangrejo

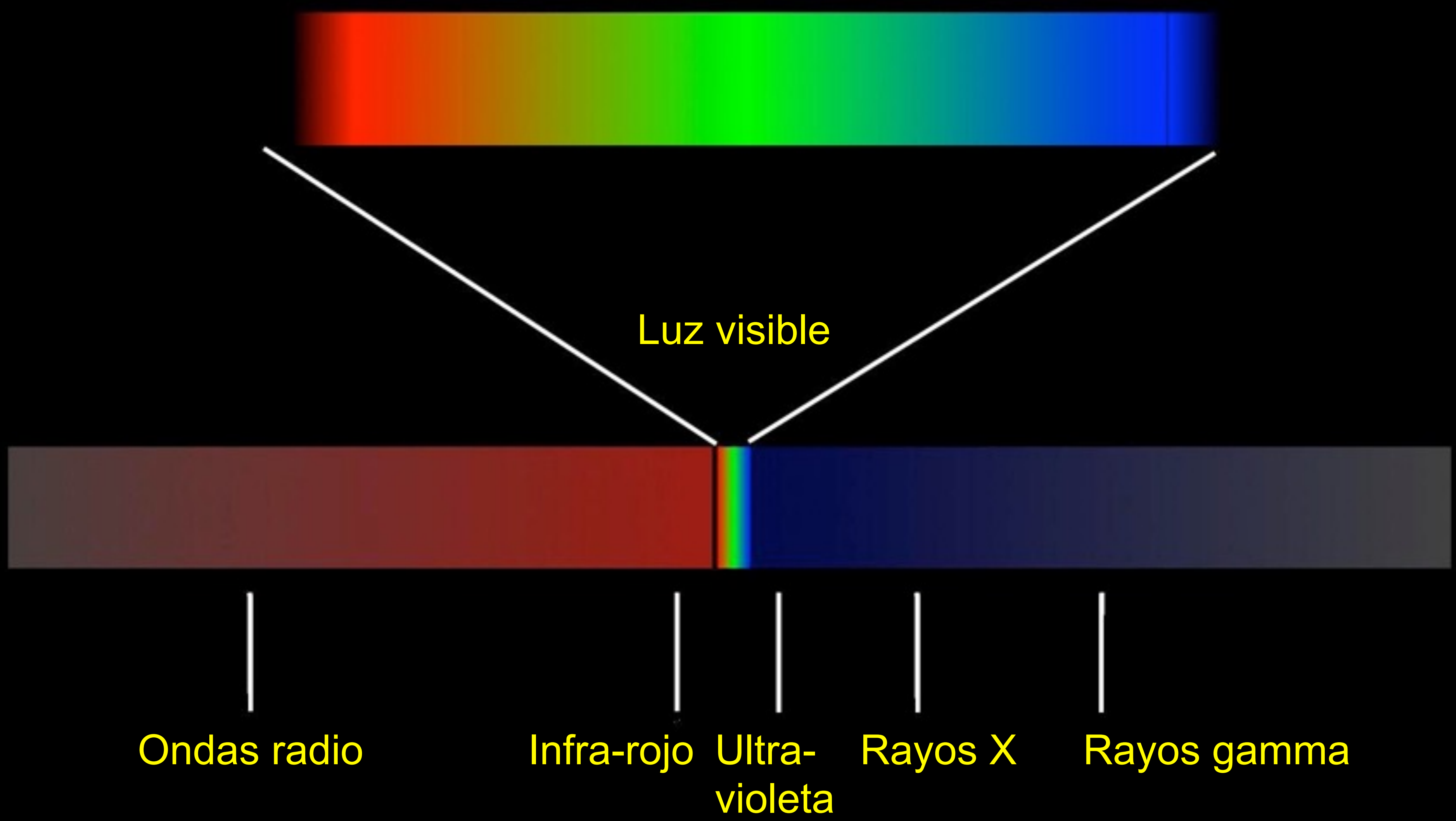
Periodo de rotación:
33 milisegundos






Solo un pugnado de pulsares se ven en el óptico:
la gran mayoría se had descubierto en ondas radio

# El Espectro Electromagnético




Chandra
Lanzado el 23 de julio de 1999

# ¿ Que es un pulsar ?

Un pulsar, “PSR”, es una ESTRELLA de NEUTRONES con un periodo de rotación o “espín”, P, medido

Es todo.

# ¿ Que es un pulsar ?

Un pulsar, “PSR”, es una ESTRELLA de NEUTRONES con un periodo de rotación o “espín”, P, medido

Es todo.

# ¿ Que es un pulsar ?

Un pulsar, “PSR”, es una ESTRELLA de NEUTRONES con un periodo de rotación o “espín”, P, medido

Es todo.

Un PSR puede ser un

- Pulsar radio
- Pulsar óptico
- Pulsar de rayos X
- Pulsar de rayos gamma

...

- Pulsar de neutrinos
- Pulsar de ondas gravitacionales

¡ Todavía no detectados !

y puede ser aislado o binario.
En un sistema binario puede estar acretando, o no acretando o puede a veces estar acretando y luego ya no, …

# ¿ Que es un pulsar ?

Un pulsar, "PSR", es una ESTRELLA de NEUTRONES con un periodo de rotación o "espín", P, medido

Es todo

La inmensa mayoría de las estrellas de neutrones no son pulsares.

La mayoría de las estrellas de neutrones conocidas son pulsares.

yos gamma

...

- Pulsar de neutrinos
- Pulsar de ondas gravitacionales

¡ Todavía no detectados !

y puede ser aislado o binario.

En un sistema binario puede estar acretando, o no acretando o puede a veces estar acretando y luego ya no, …

# ¿ Que es un pulsar ?

Un pulsar, "PSR", es una ESTRELLA de NEUTRONES con un periodo de rotación o "espín", P, medido

Es todo

La inmensa mayoría de las estrellas de neutrones no son pulsares.

La mayoría de las estrellas de neutrones conocidas son pulsares.

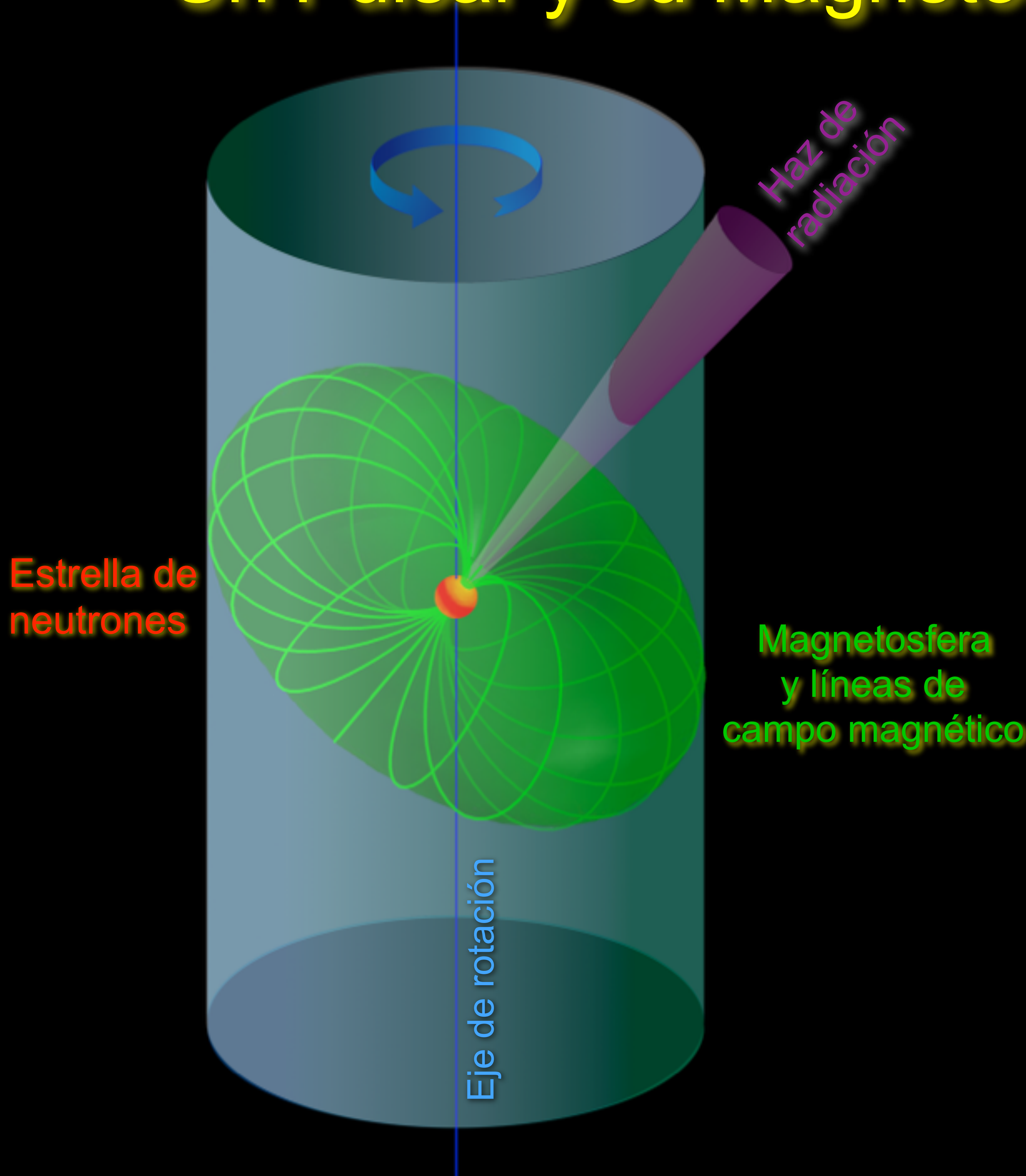
gamma

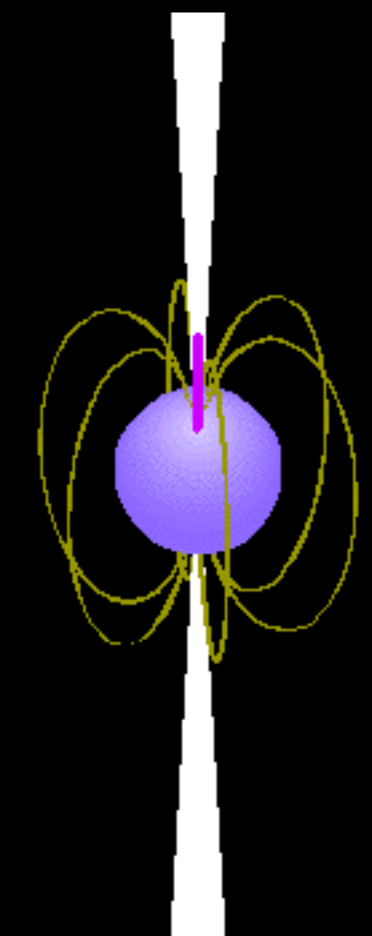
Hay unas $10^{11}$ estrellas en la Vía Láctea y un $1\%$ de ellas ($10^8$-$10^9$) son estrellas de neutrones $0.1\%$ de ellas ($10^4$-$10^5$) han de ser pulsares de los cuales unos 2000 han sido detectados.

no

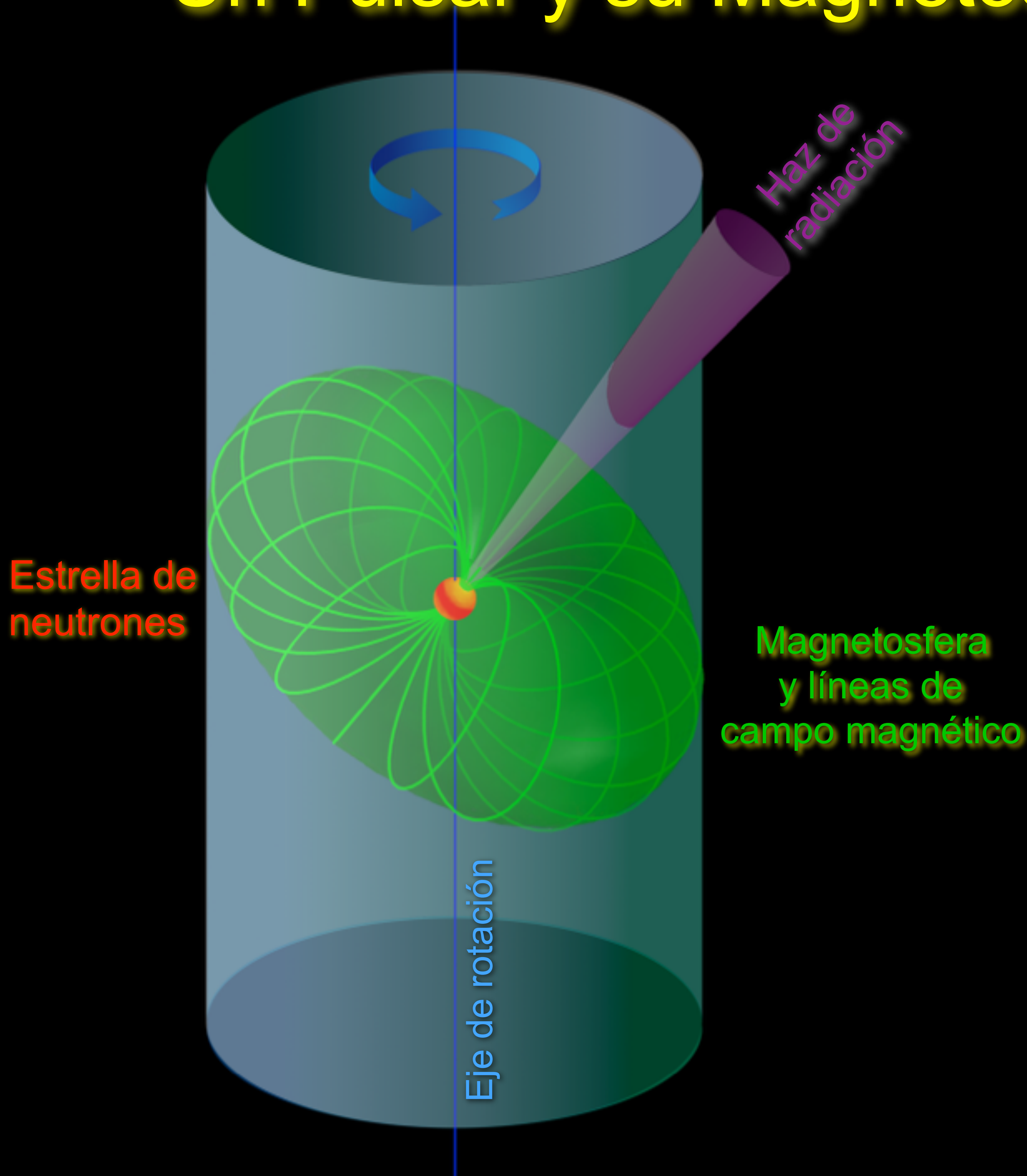
s !

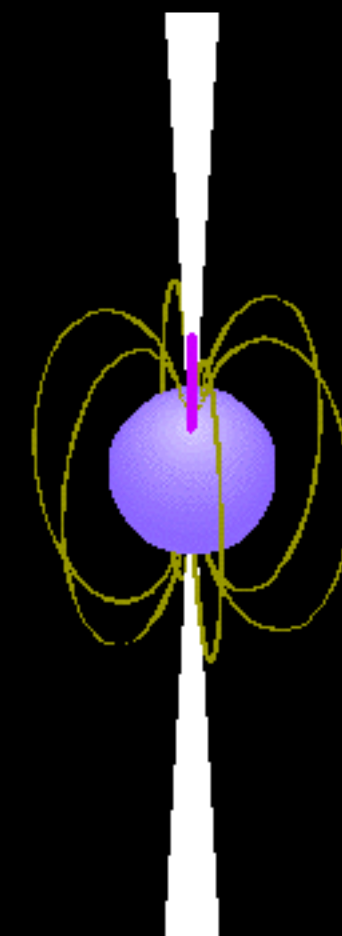
# Un Pulsar y su Magnetosfera



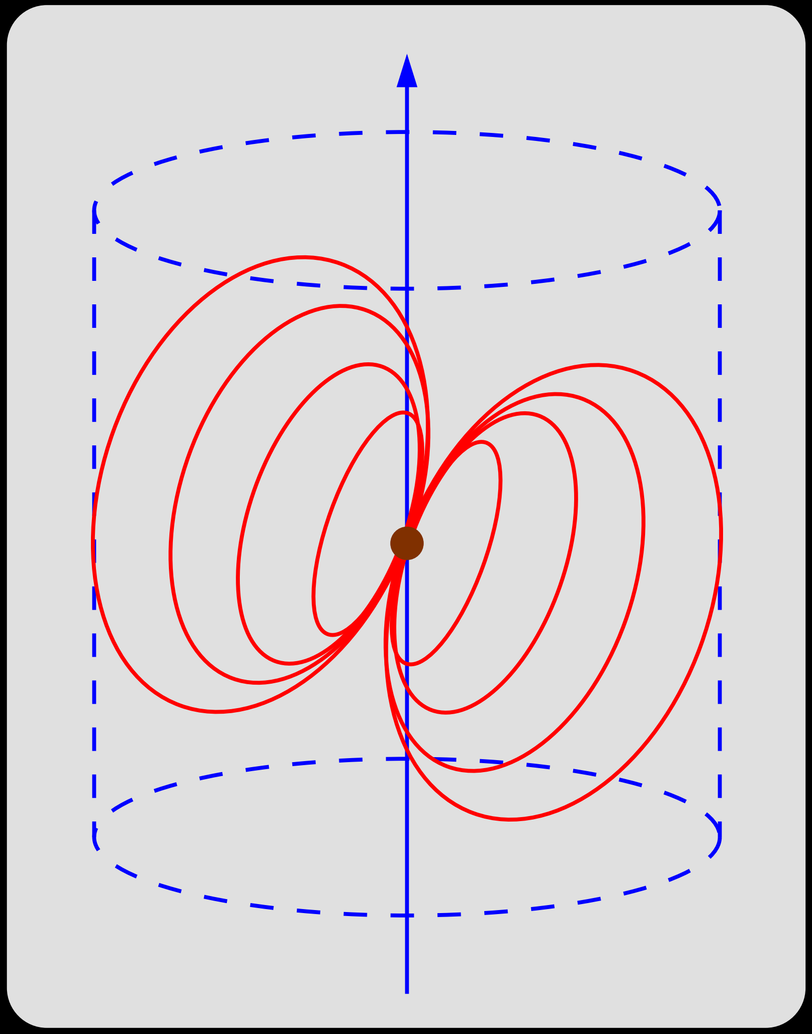



# Un Pulsar y su Magnetosfera



# El Modelo Magneto-Dipolar de Frenado I



$$R_{lc} = \frac{c}{\Omega} = \frac{cP}{2\pi} \simeq 50\,\mathrm{km} \times P_{\mathrm{millisec.}}$$

$$B_{lc} \cong B_0 \left(\frac{R}{R_{lc}}\right)^3 = \frac{B_0 R^3}{c^3}\Omega^3$$

$$E_{m,\,lc} = \frac{B_{lc}^2}{4\pi} = \frac{B_0^2 R^6}{4\pi c^6}\Omega^6$$

$$\dot{E}_{\mathrm{md}} \sim -A_{lc}\, E_{m,\,lc}\, c \simeq \frac{B_0^2 R^6}{c^3}\Omega^4 \quad \text{con} \quad A_{lc} \simeq 4\pi R_{lc}^2$$

Radiación magneto-dipolar en el vacío:

$$\dot{E}_{\mathrm{md}}^{\mathrm{vac.}} = -\frac{B_p^2 R^6 \Omega^4}{c^3} \times \frac{1}{6}\sin^2\alpha$$

# El Modelo Magneto-Dipolar de Frenado II

Energía cinética de rotación $E_{\rm rot} = \frac{1}{2} I \Omega^2 \implies \dot{E}_{\rm rot} = I\Omega\dot{\Omega}$

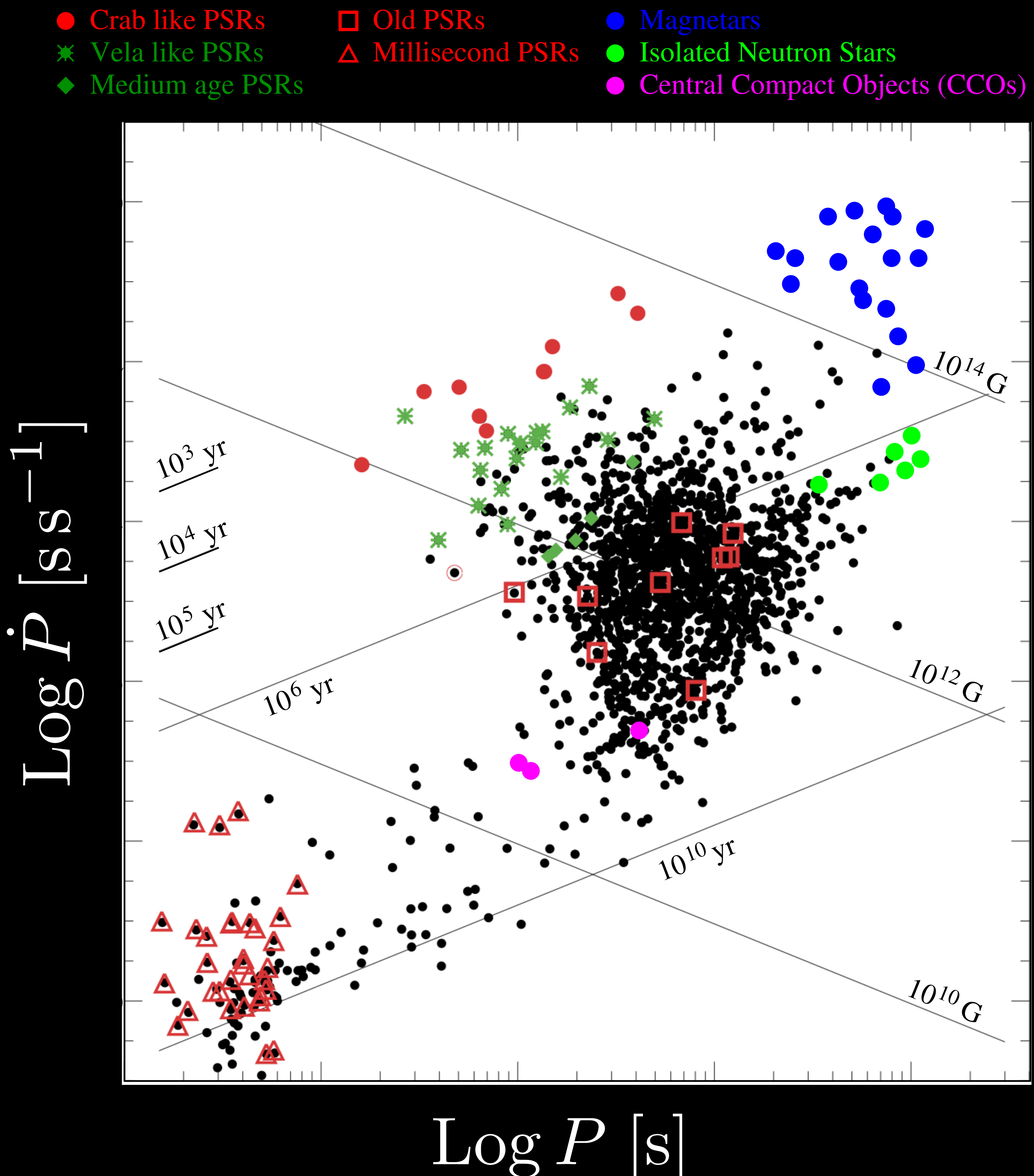
Ecuación de frenado magneto-dipolar: $\dot{E}_{\rm rot} = -\dot{E}_{\rm md}$

nos da: $\dot{\Omega} = -k \frac{B_0^2 R^6}{c^3 I} \Omega^3 \quad (k \simeq 1)$

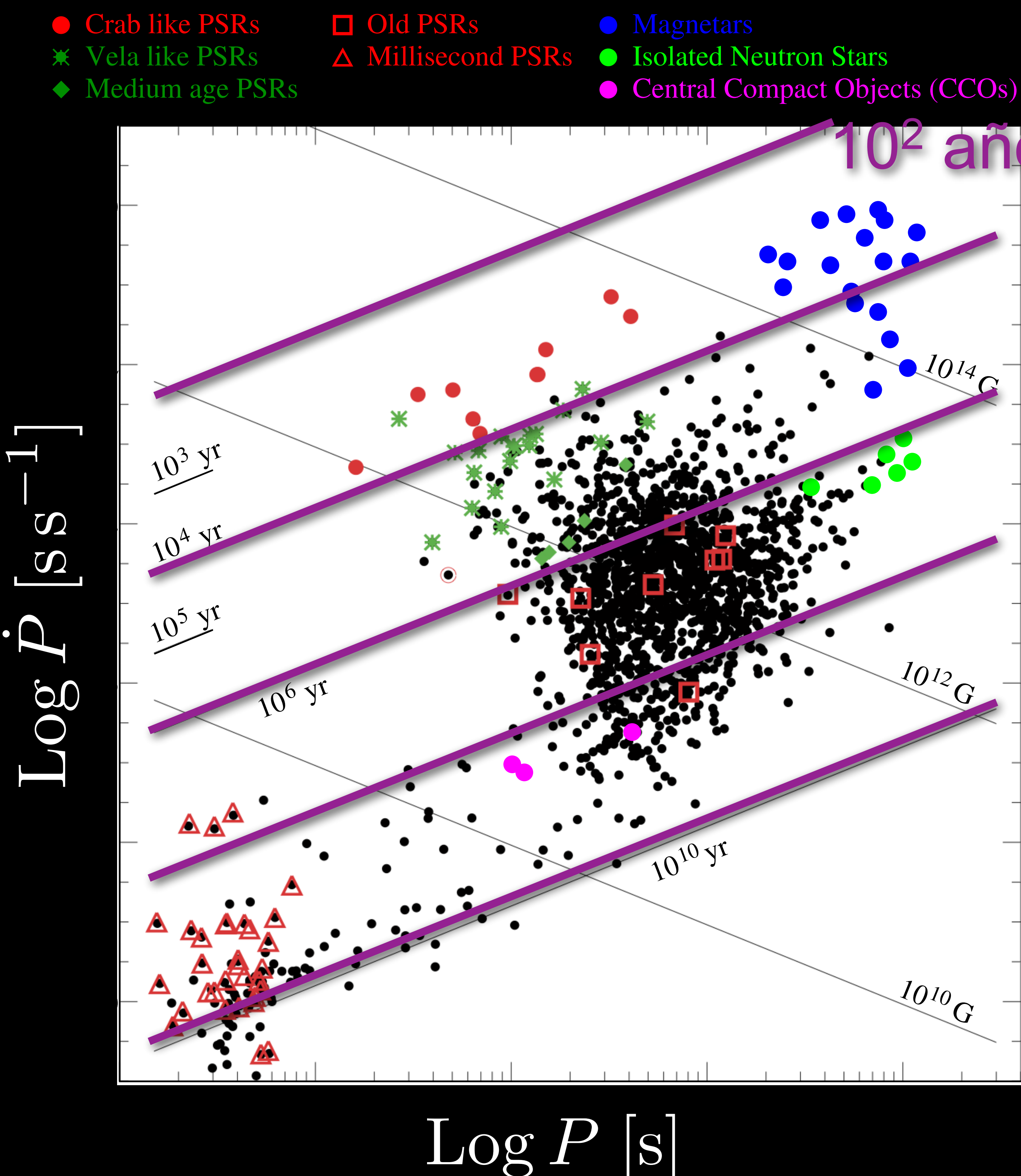
Campo magnético superficial: $$\boxed{B_p \simeq \sqrt{\frac{c^3 |\dot{\Omega}|}{\Omega^3 I R^6}}}$$

$$\simeq 3.2 \times 10^{19} (P\dot{P})^{1/2}\ \mathrm{G} \simeq 1.5 \times 10^{12} \frac{P}{0.01\mathrm{s}} \left( \frac{1000\,\mathrm{yr}}{\tau_c} \right)^{1/2} \mathrm{G}$$

# El diagrama P-Ṗ



# El diagrama P-$\dot{P}$




$10^2$ años

$10^4$ años

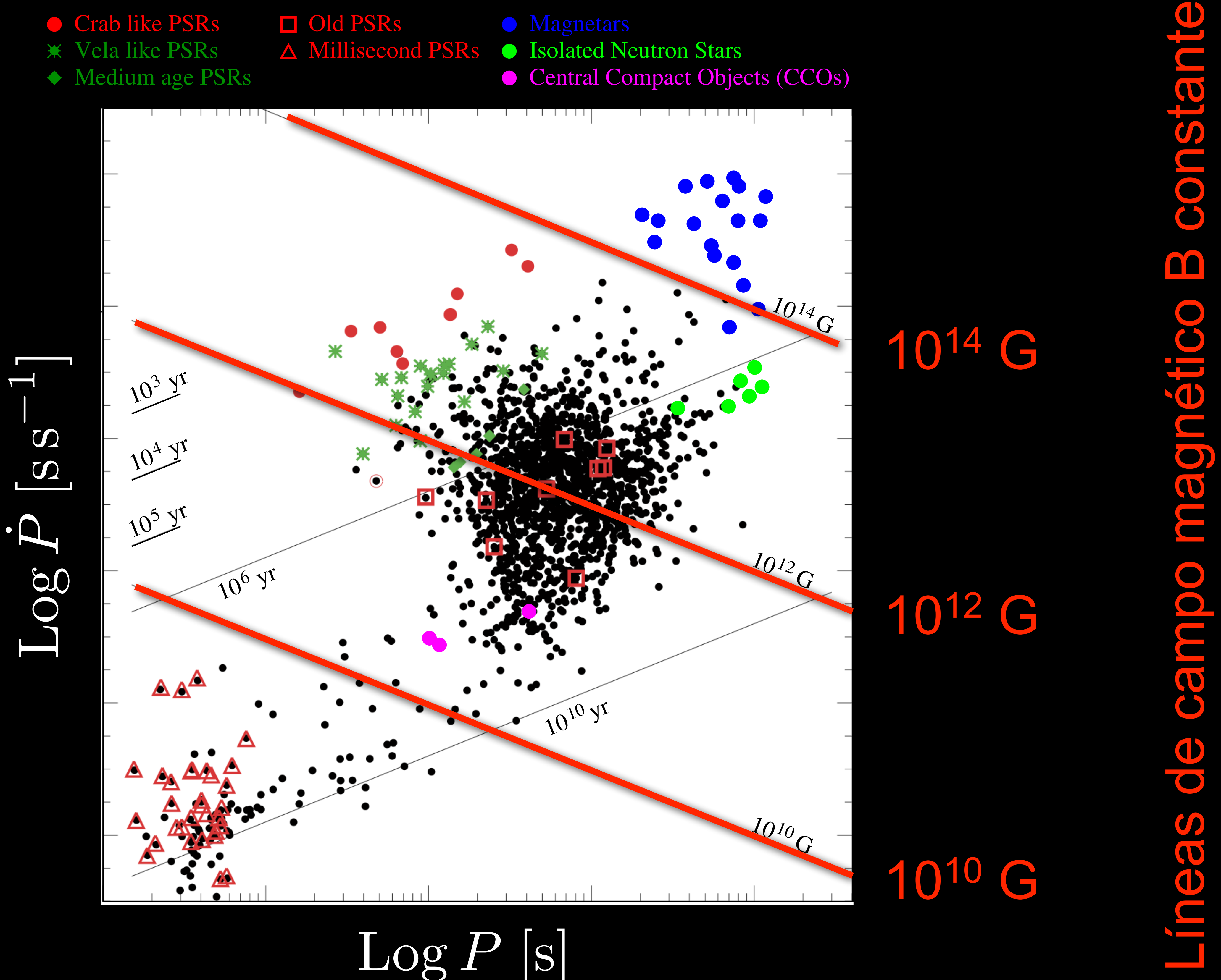
$10^6$ años

$10^8$ años

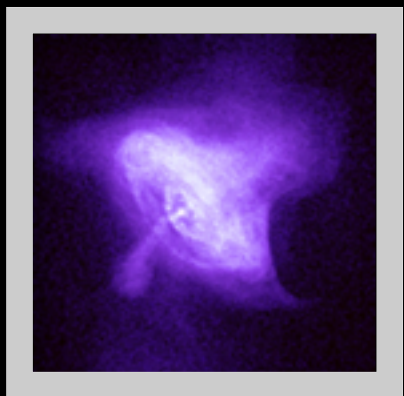
$10^{10}$ años

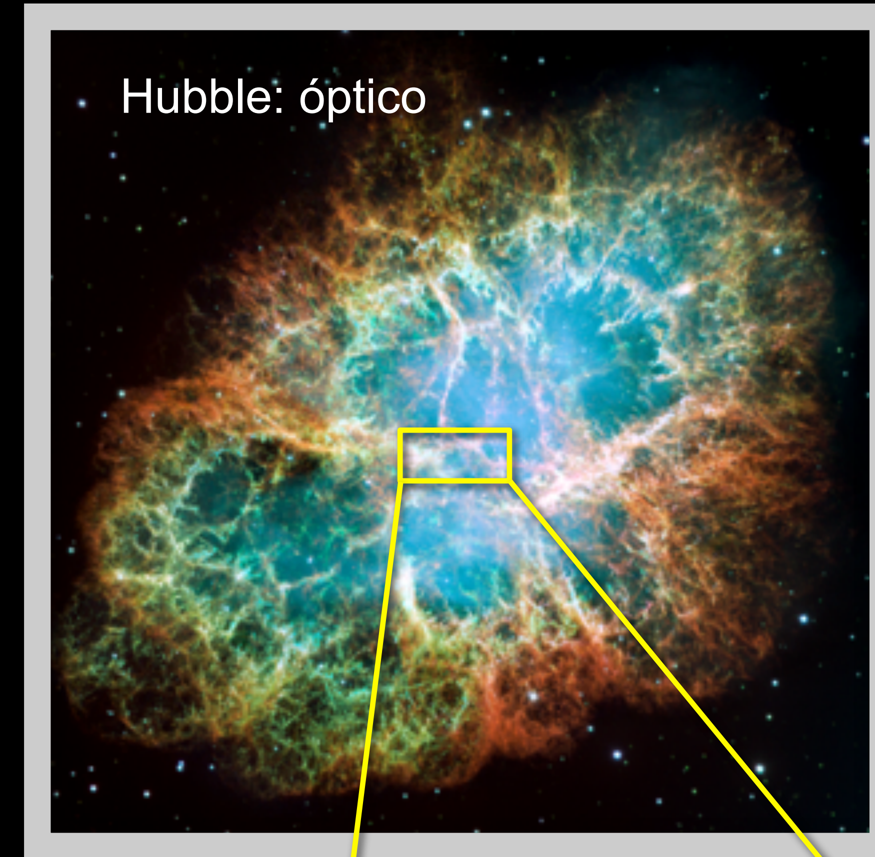
Líneas de edad dinámica $\tau_c$ constante

# El diagrama P-Ṗ



Chandra: rayos X

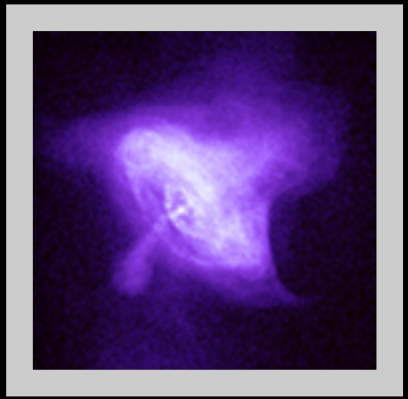


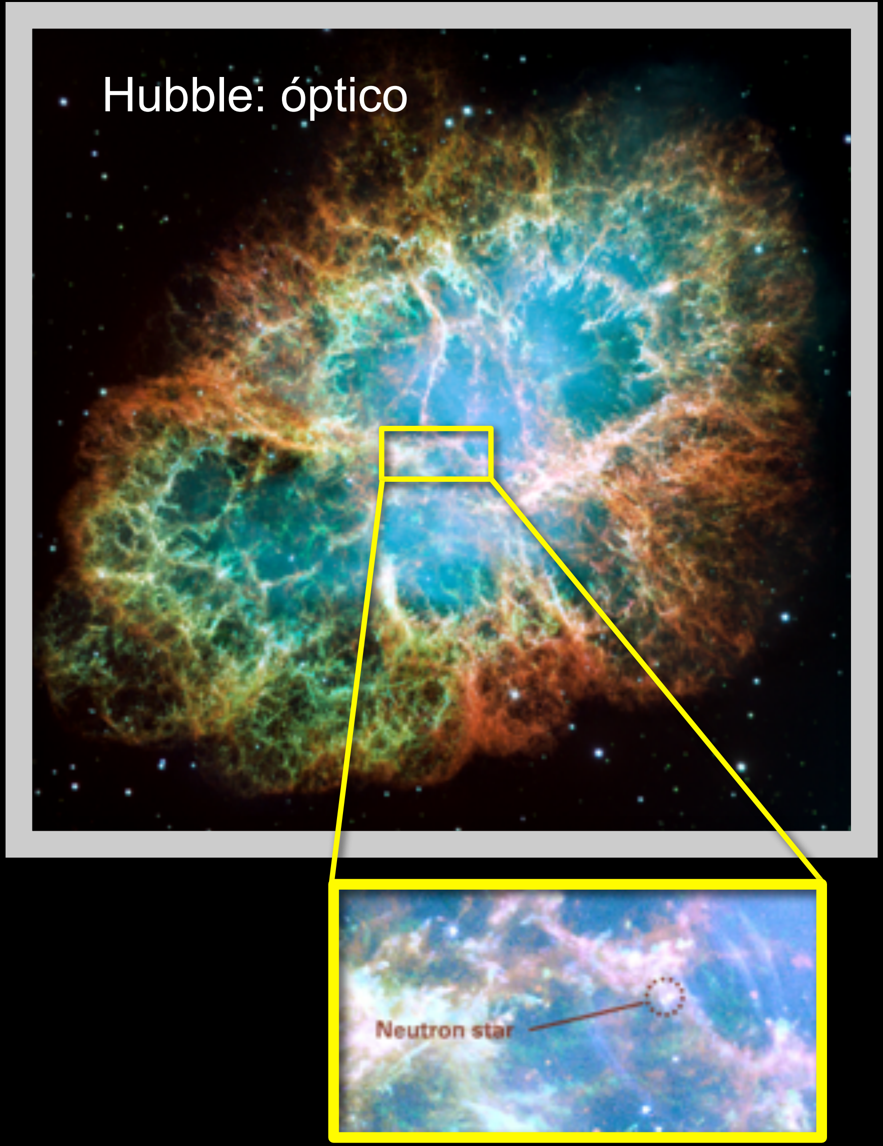




# El Pulsar del Cangrejo


Credit: NASA/CXC/ASU/J.Hester et al.

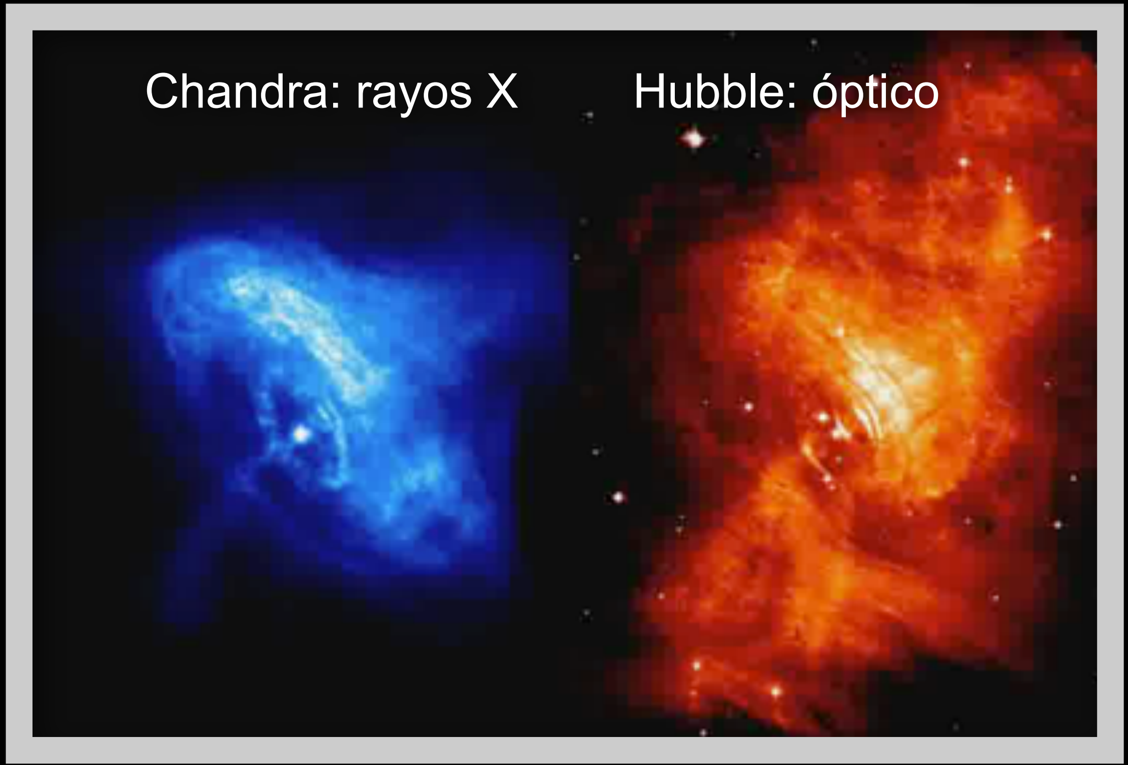
Chandra: rayos X



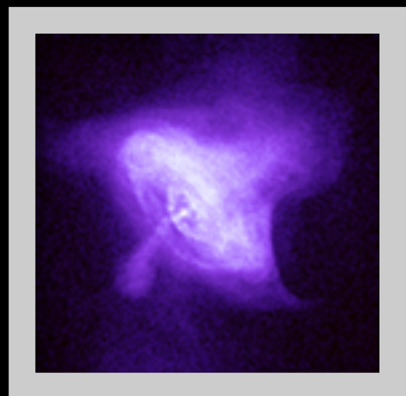

# El Pulsar del Cangrejo y su maquinaria en acción

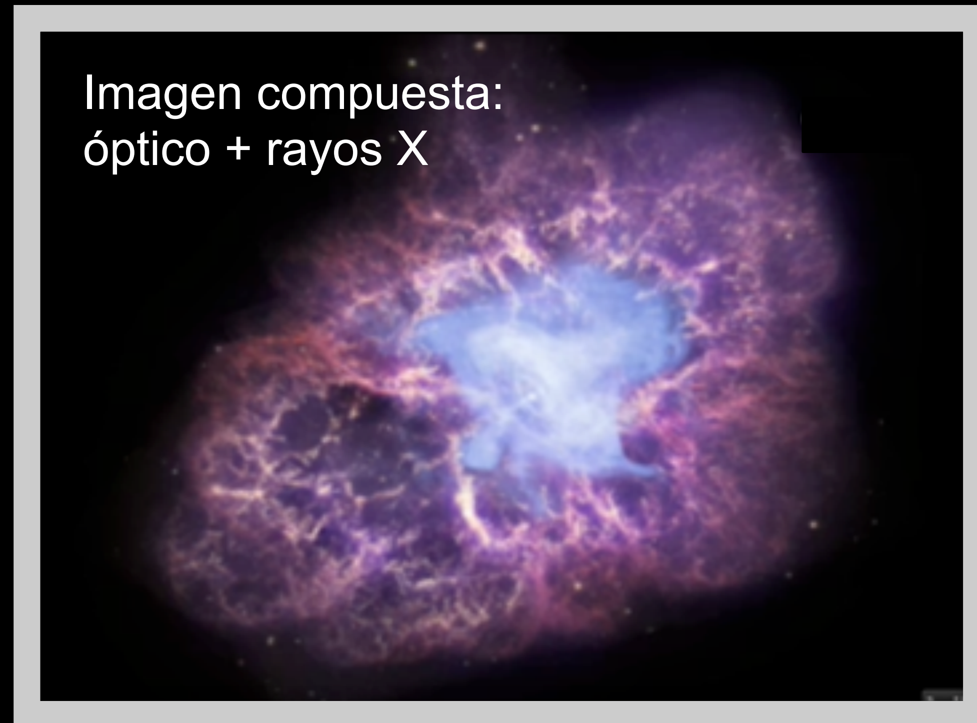
Animación “artística”

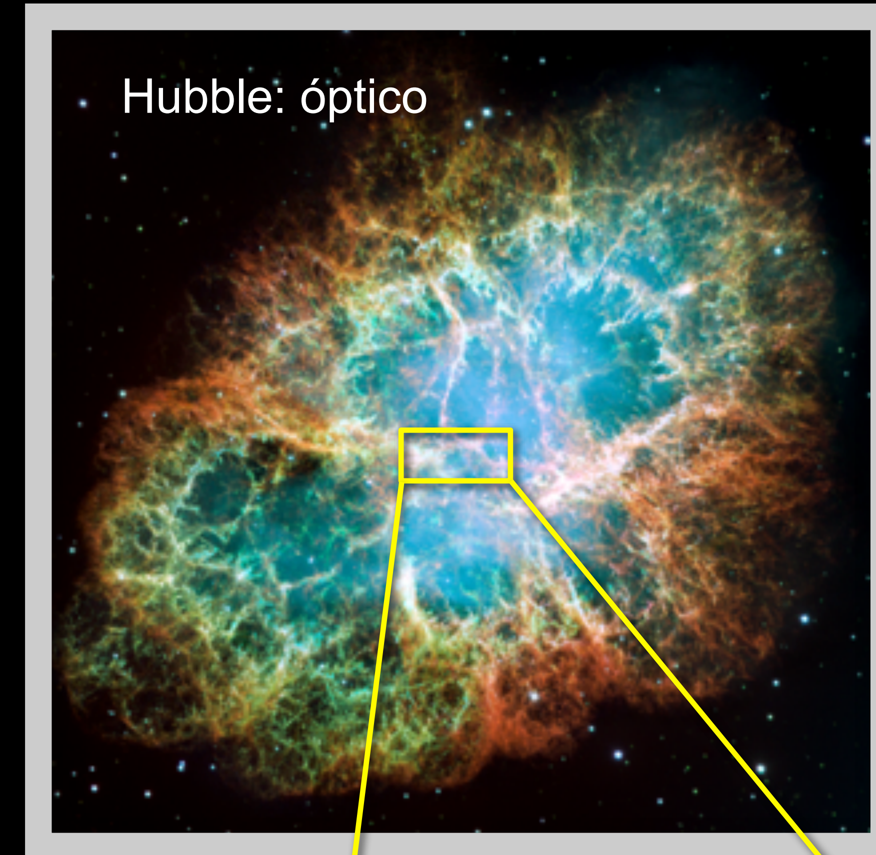



La animación usa observaciones realizadas en unos 7 meses

Credit: NASA/CXC/ASU/J.Hester et al.



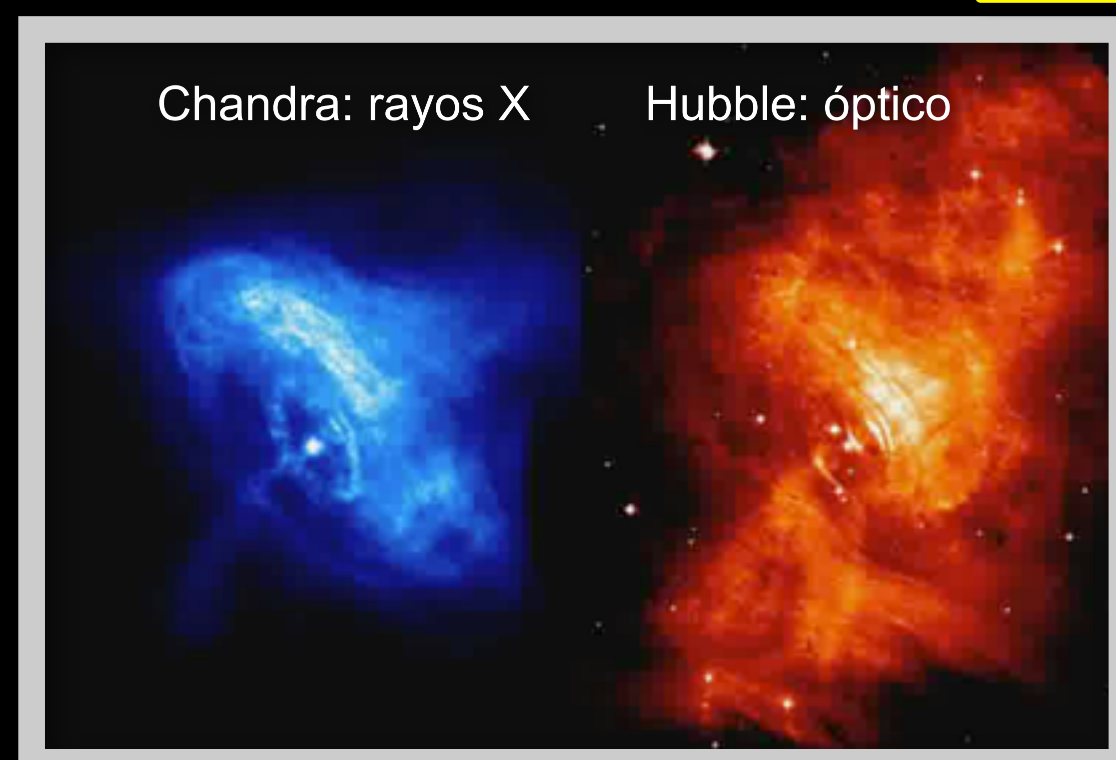





# El Pulsar del Cangrejo y su maquinaria en acción

Animación “artística”




La animación usa observaciones realizadas en unos 7 meses

Credit: NASA/CXC/ASU/J.Hester et al.

# Supernovas

# Betelgeuse
# una estrella masiva a punto de explotar

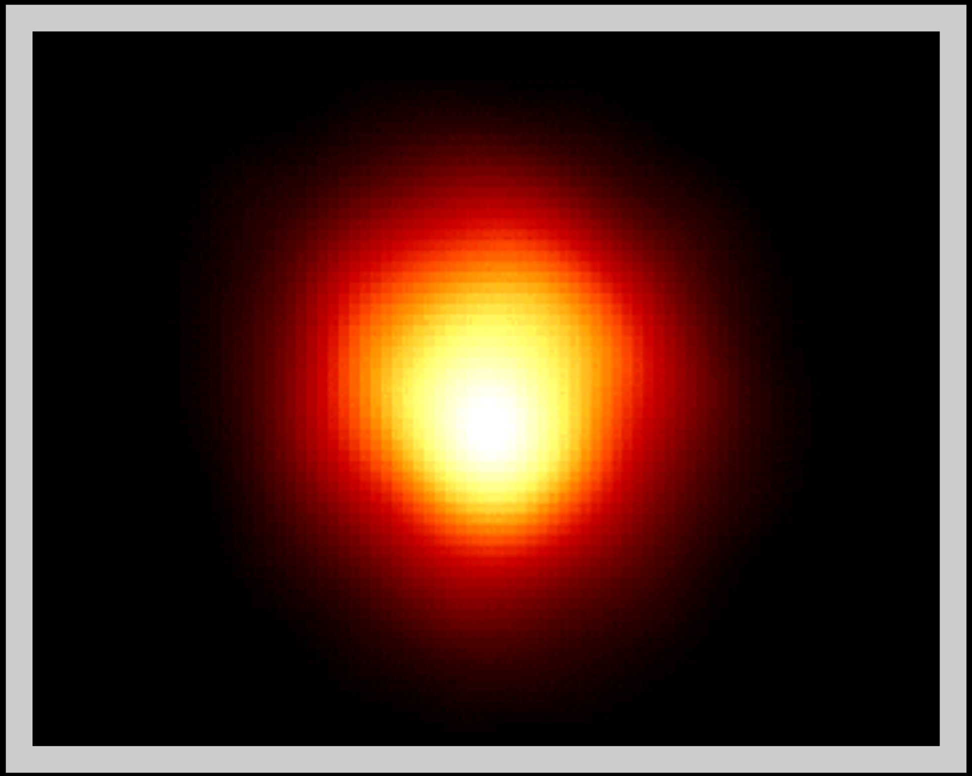
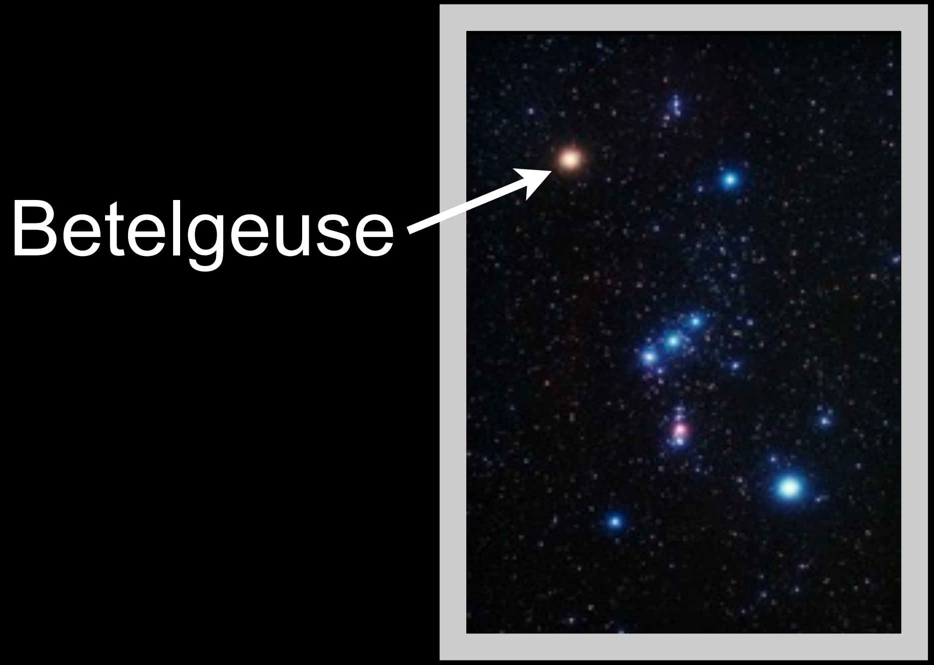
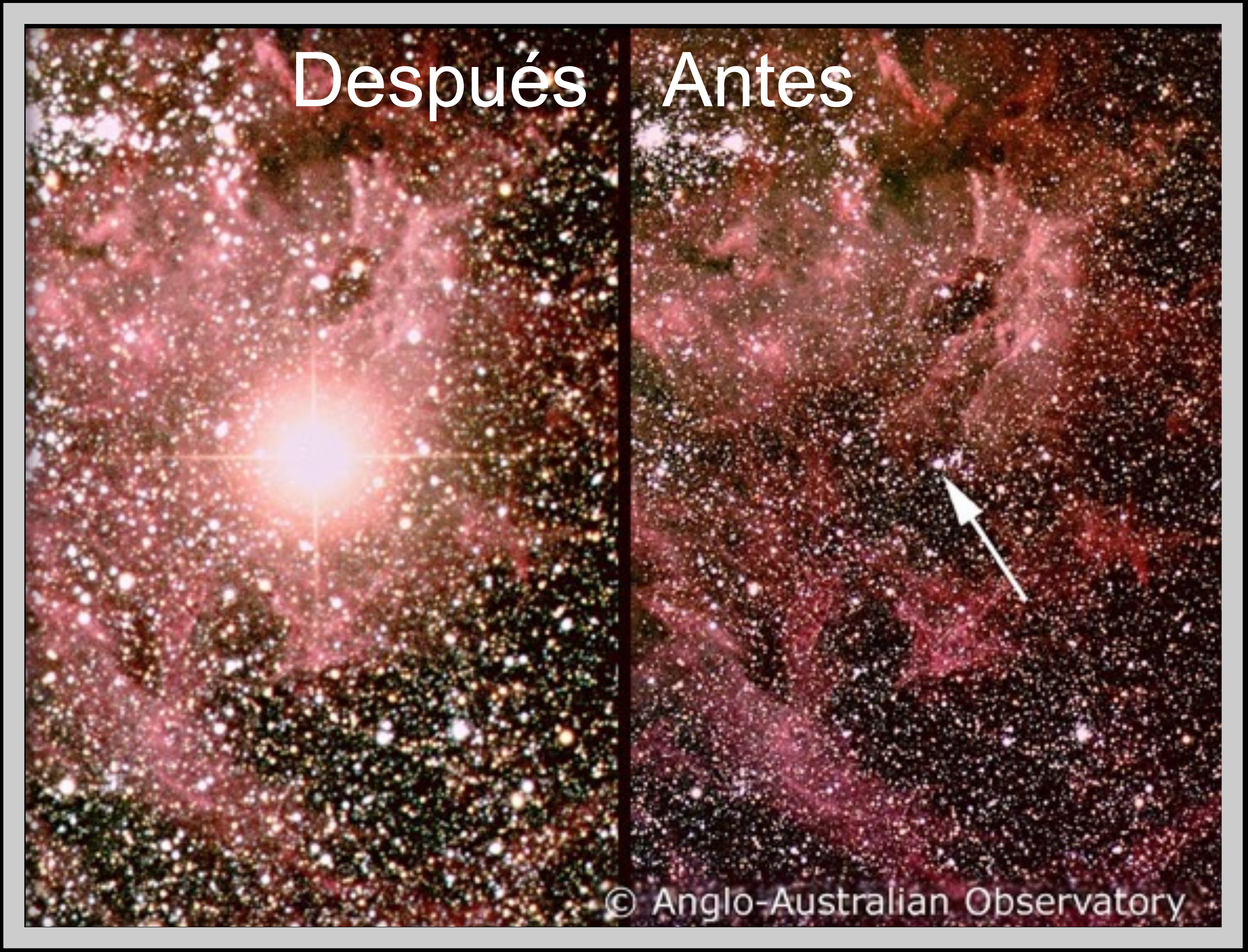


Imagen del Telescopio Espacial (HST)



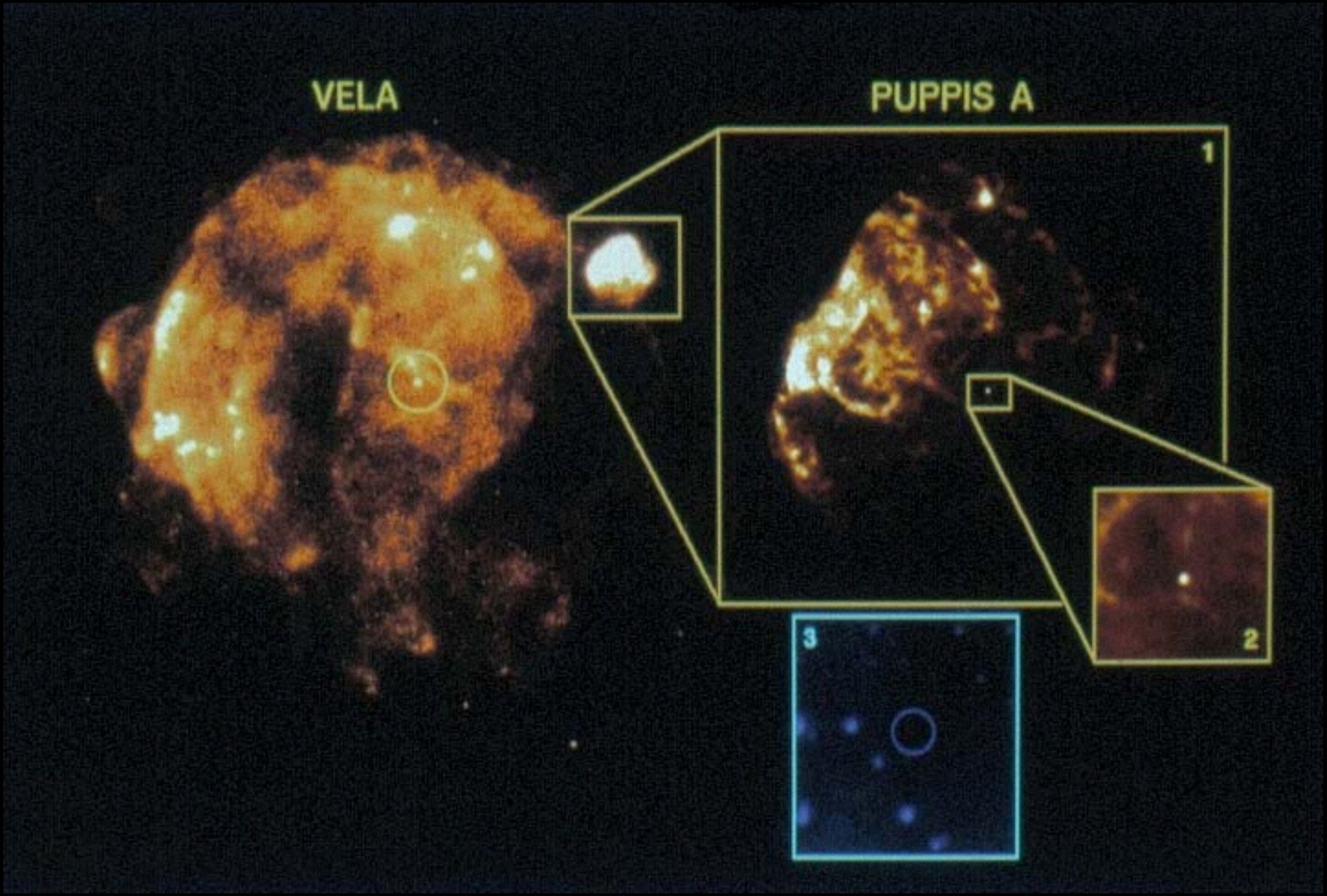

# La Supernova SN 1987A




Descubierta el 23 de febrero de 1987 por
Ian Shelton (Observatorio Las Campanas, Chile)

Una supernova emita mas luz (durante unos días) que toda un galaxia.

# Remanentes de Supernovas ``Vela'' y ``Puppis A''




Imágenes de satélite de rayos X Rosat

# Remanente de Supernova “Cassiopeia A” Optico (Hubble Space Telescope)

Image Credit: NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
Acknowledgment: R. Fesen (Dartmouth) and J. Morse (Univ. of Colorado

# Remanente de Supernova “Cassiopeia A”
# Optico (Hubble Space Telescope)

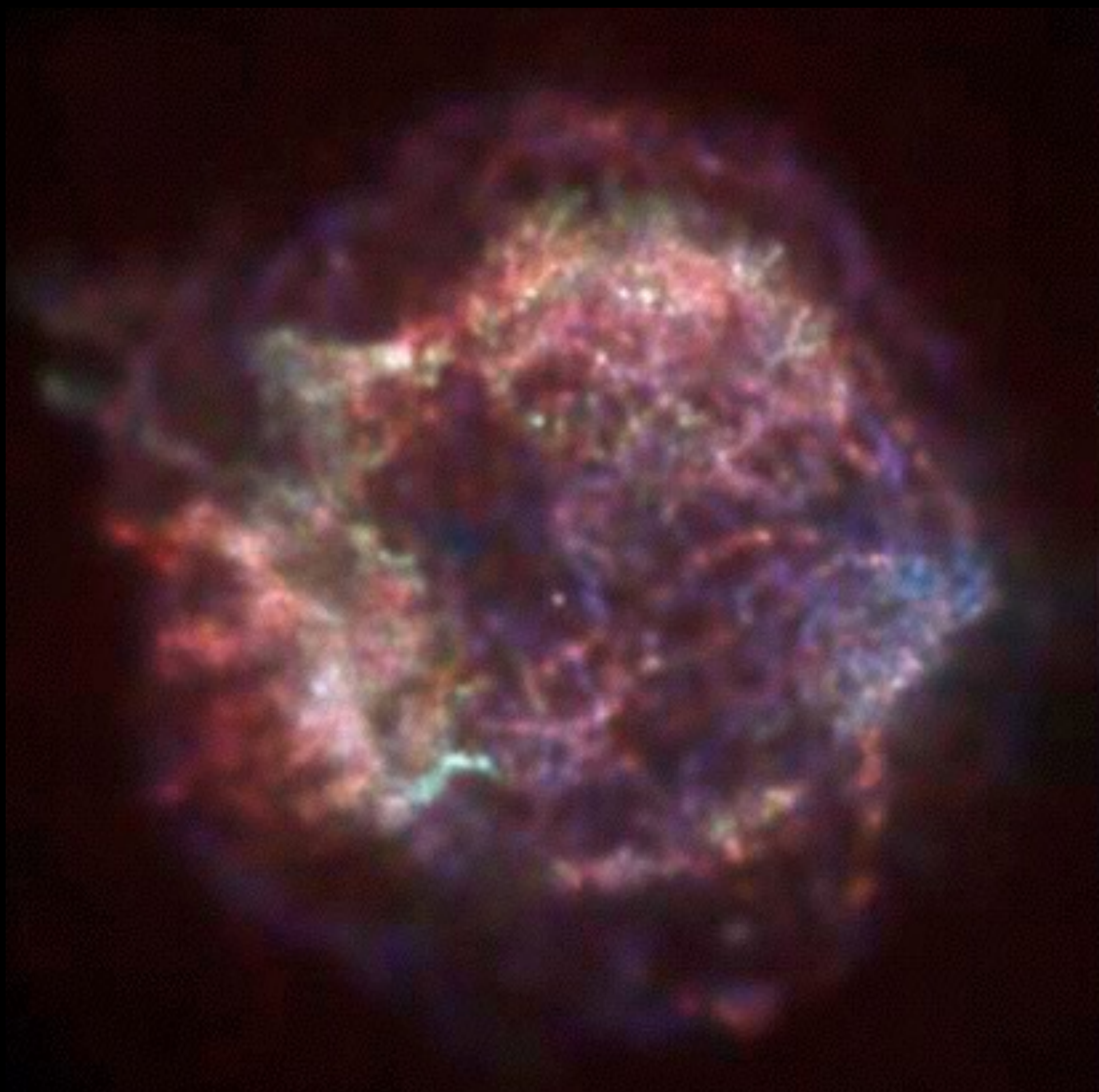

Image Credit: NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
Acknowledgment: R. Fesen (Dartmouth) and J. Morse (Univ. of Colorado

# Remanente de Supernova "Cassiopeia A" Optico (Hubble Space Telescope)

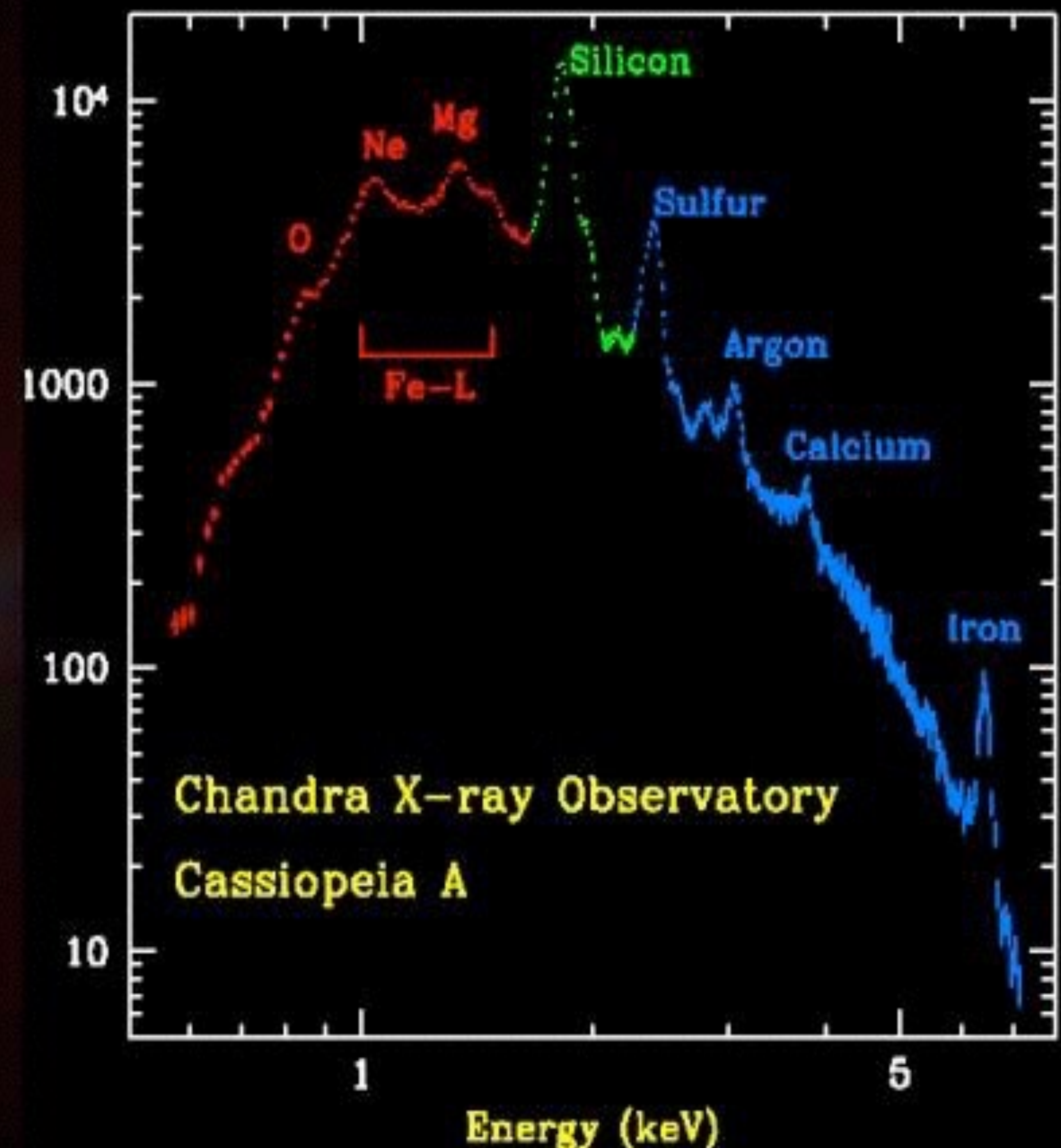

- Remanente mas joven conocido: expansión da ~300 años
- Supernova probablemente observada por J. Flamsteed en 1680
- Proviene de la explosión de una estrella de unas 20-25 $M_{\odot}$

Image Credit: NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
Acknowledgment: R. Fesen (Dartmouth) and J. Morse (Univ. of Colorado

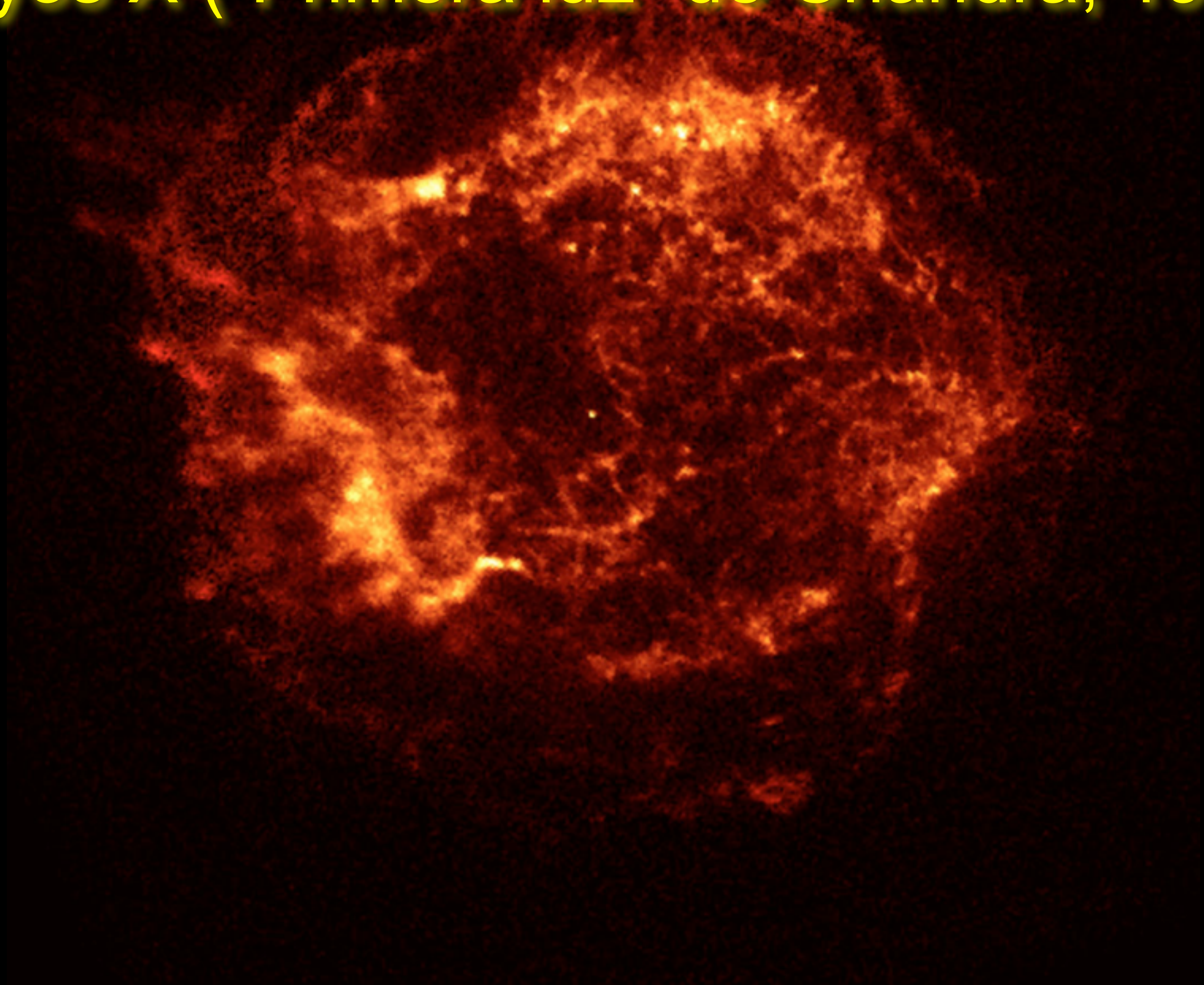
# Cassiopeia A: primera luz de Chandra



Hughes, Rakowski, Burrows, & Slane ('99)

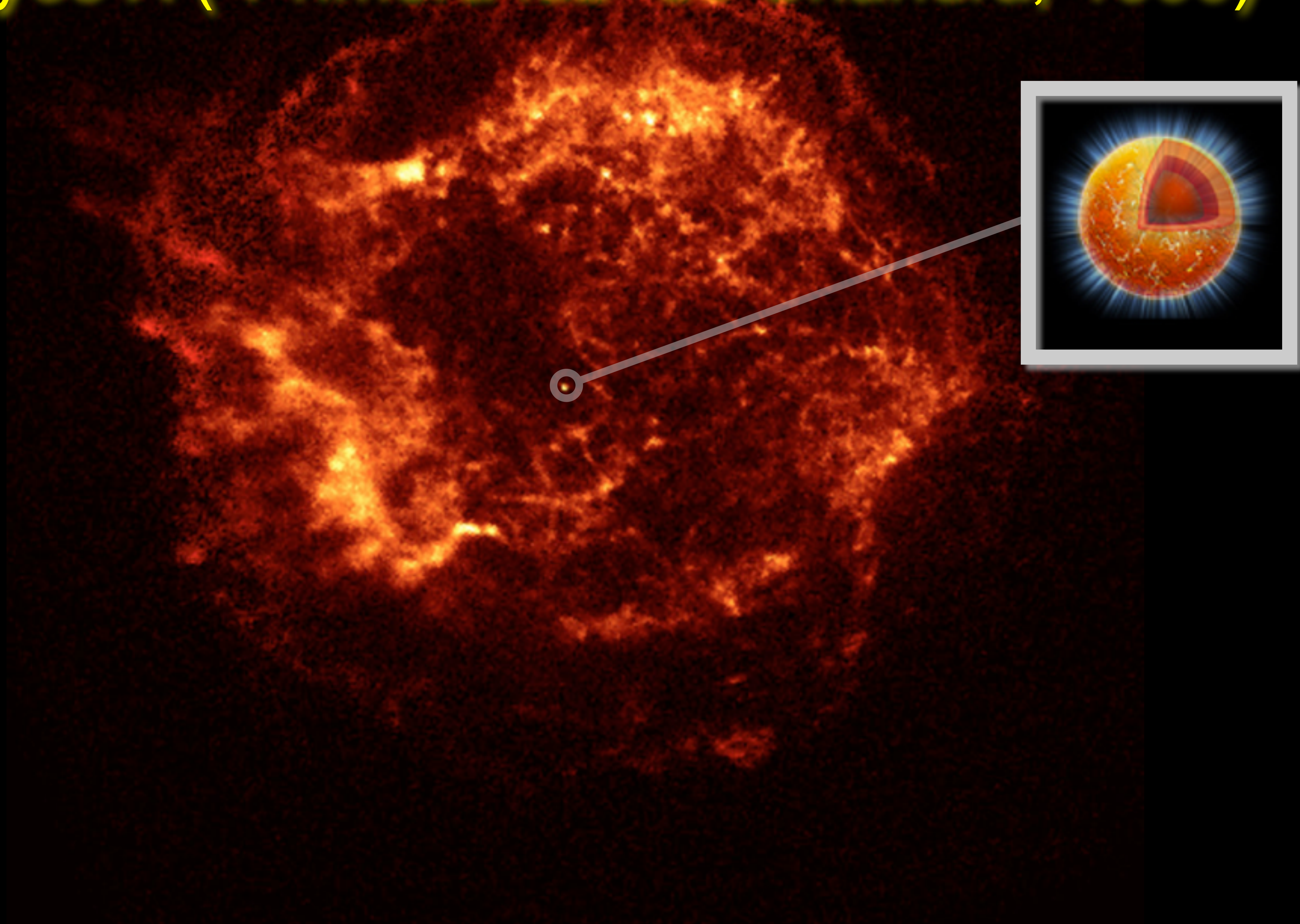


# Remanente de Supernova "Cassiopeia A" Rayos X ("Primera luz" de Chandra, 1999)



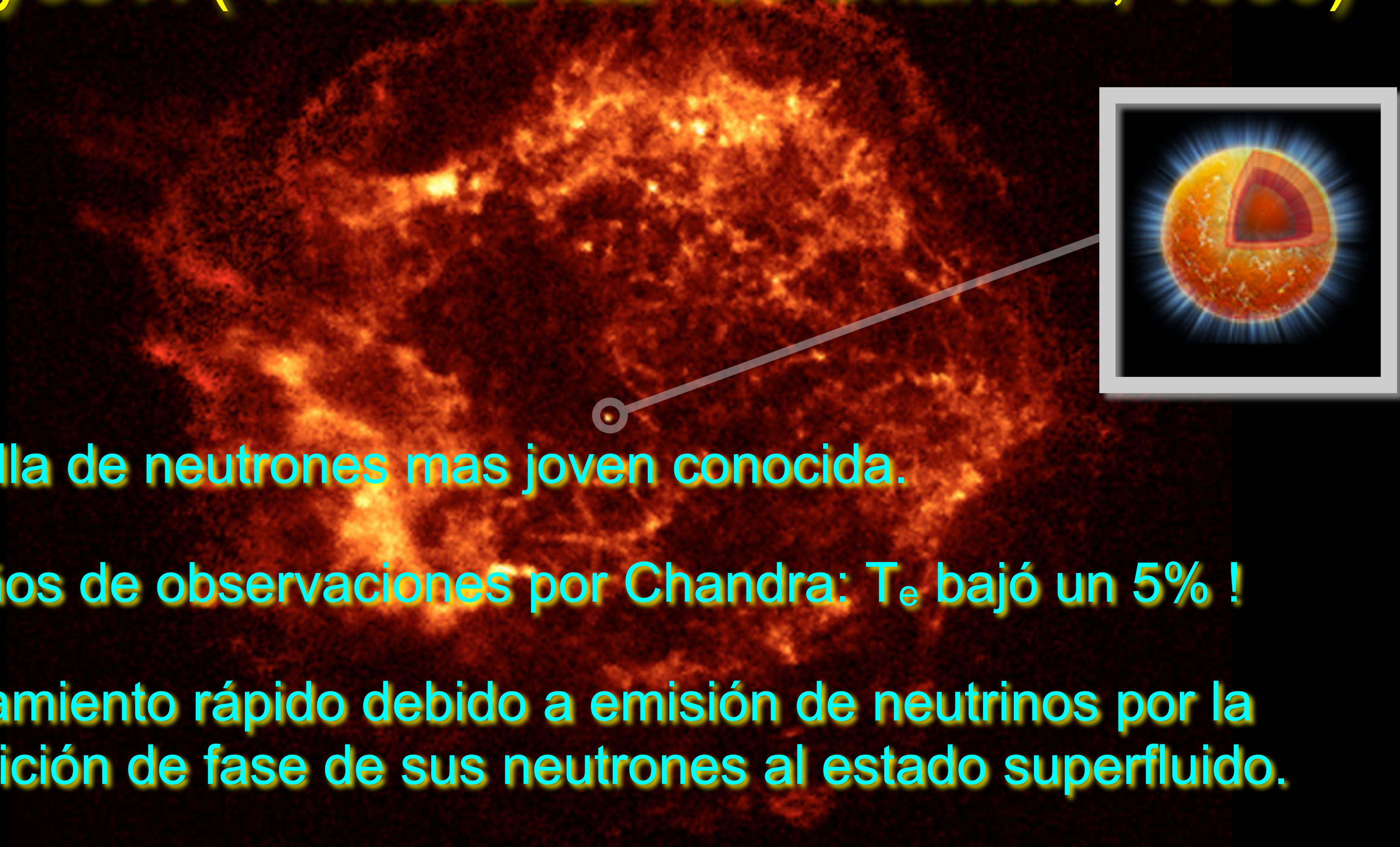
Credit: Chandra X-ray Observatory, NASA

# Remanente de Supernova “Cassiopeia A”
# Rayos X (“Primera luz” de Chandra, 1999)



Credit: Chandra X-ray Observatory, NASA

# Remanente de Supernova “Cassiopeia A” Rayos X (“Primera luz” de Chandra, 1999)



- Estrella de neutrones mas joven conocida.
- 12 años de observaciones por Chandra: $T_e$ bajó un 5% !
- Enfriamiento rápido debido a emisión de neutrinos por la transición de fase de sus neutrones al estado superfluido.
- Superfluido mas denso conocido ($10^{15}$ g $cm^{-3}$) a la fecha y temperatura crítica mas alta: $T_c$ ~ 500,000,000 K

Credit: Chandra X-ray Observatory, NASA

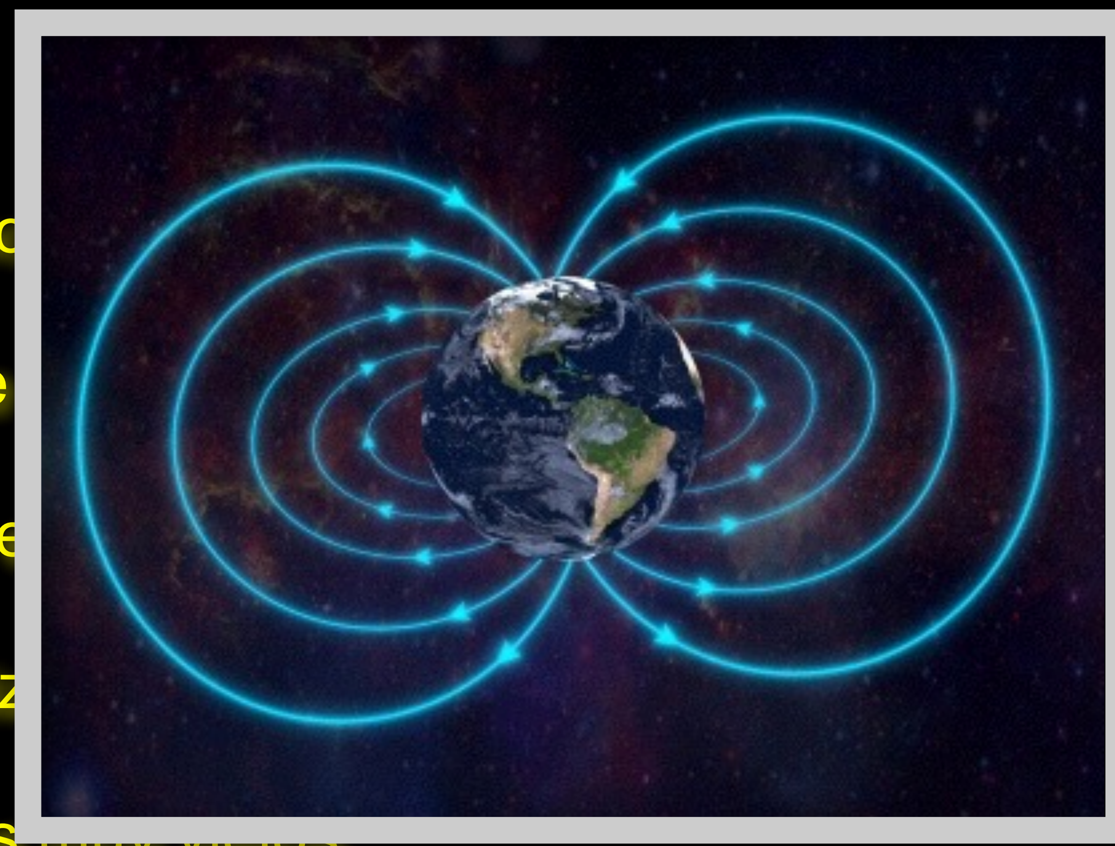
# Campos Magnéticos

# Campos Magnéticos: tabla comparativa

| | |
|---|---|
| Campo magnético terrestre | 0.6 Gauss |
| Iman de refrigerador | 100 G |
| Electro-iman de IRMN \| Manchas solares | 10,000 G = $10^4$ G |
| Campo persistente mas fuerte producido por electro-imanes | $5 \times 10^5$ G |
| Campo mas fuerte producido en laboratorio | $10^6$ - $10^7$ G |
| Enanas blancas ultra-magnetizadas | $10^9$ G |
| Campo magnético en pulsares muy viejos | $10^8$-$10^9$ G |
| Campo magnético de un pulsar típico | $10^{12}$ G |
| Campo magnetico de un magnetar | $10^{15}$ G |
| Máximo campo magnético teoricamente posible (efectos cuánticos) | $10^{24}$ G |

# Campos Magnéticos: tabla comparativa

| | |
|---|---|
| Campo magnético terrestre | 0.6 Gauss |
| Iman de refrigerador | 100 G |
| Electro-iman de IRMN \| Manc | 10,000 G = $10^4$ G |
| Campo persistente mas fuerte | $5x10^5$ G |
| Campo mas fuerte producido e | $10^6$ - $10^7$ G |
| Enanas blancas ultra-magnetiz | $10^9$ G |
| Campo magnético en pulsares muy viejos | $10^8$-$10^9$ G |
| Campo magnético de un pulsar típico | $10^{12}$ G |
| Campo magnetico de un magnetar | $10^{15}$ G |
| Máximo campo magnético teoricamente posible (efectos cuánticos) | $10^{24}$ G |



# Campos Magnéticos: tabla comparativa

| | |
|---|---|
| Campo magnético terrestre | 0.6 Gauss |
| Iman de refrigerador | 100 G |
| Electro-iman de IRMN \| Mancha | 10,000 G = $10^4$ G |
| Campo persistente mas fuerte pro | $5 \times 10^5$ G |
| Campo mas fuerte producido en la | $10^6$ - $10^7$ G |
| Enanas blancas ultra-magnetizadas | $10^9$ G |
| Campo magnético en pulsares muy viejos | $10^8$-$10^9$ G |
| Campo magnético de un pulsar típico | $10^{12}$ G |
| Campo magnetico de un magnetar | $10^{15}$ G |
| Máximo campo magnético teoricamente posible (efectos cuánticos) | $10^{24}$ G |

# Campos Magnéticos: tabla comparativa

| | |
|---|---|
| Campo magnético terrestre | 0.6 Gauss |
| Iman de refrigerador | 100 G |
| Electro-iman de IRMN \| Manchas solares | 10,000 G = $10^4$ G |
| Campo persiste | $5 \times 10^5$ G |
| Campo mas fue | $10^6$ - $10^7$ G |
| Enanas blancas | $10^9$ G |
| Campo magnéti | $10^8$-$10^9$ G |
| Campo magnéti | $10^{12}$ G |
| Campo magnetico de un magnetar | $10^{15}$ G |
| Máximo campo magnético teoricamente posible (efectos cuánticos) | $10^{24}$ G |

# Campos Magnéticos: tabla comparativa

Campo magnético terrestre — 0.6 Gauss

Iman de refrigerador — 100 G

Electro-iman de IRMN | Manchas solares — 10,000 G = $10^4$ G

Campo persistente mas fuerte producido por electro-imanes — $5x10^5$ G

Campo mas fuerte producid

Enanas blancas ultra-magne

Campo magnético en pulsar

Campo magnético de un pu

Campo magnetico de un ma

Máximo campo magnético t

# Campos Magnéticos: tabla comparativa

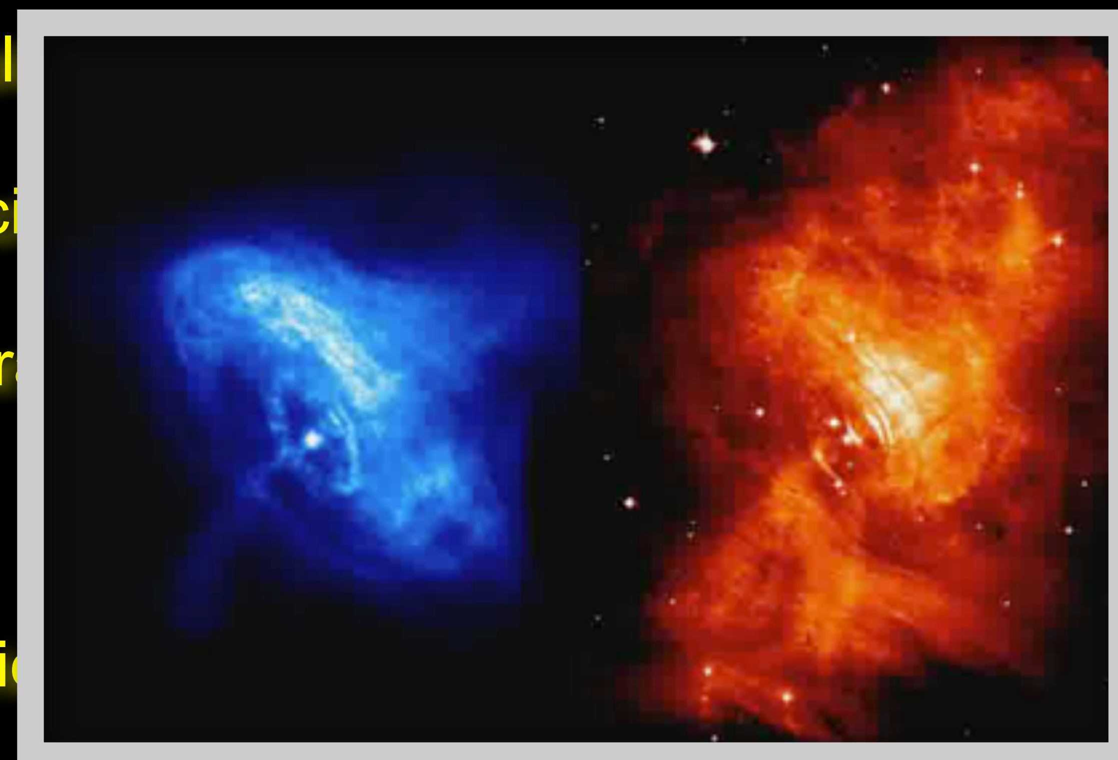
| | |
|---|---|
| Campo magnético terrestre | 0.6 Gauss |
| Iman de refrigerador | 100 G |
| Electro-iman de IRMN \| Manchas solares | 10,000 G = $10^4$ G |
| Campo persistente mas fuerte producido por electro-imanes | $5 \times 10^5$ G |
| Campo mas fuerte producido en laboratorio | $10^6$ - $10^7$ G |
| Enanas blancas ultra-magnetizadas | G |
| Campo magnético en pulsares muy vie | $^{9}$ G |
| Campo magnético de un pulsar típico | G |
| Campo magnetico de un magnetar | G |
| Máximo campo magnético teoricament | G |

# Campos Magnéticos: tabla comparativa

| | |
|---|---|
| Campo magnético terrestre | 0.6 Gauss |
| Iman de refrigerador | 100 G |
| Electro-iman de IRMN \| Manchas solares | 10,000 G = $10^4$ G |
| Campo persistente mas fuerte producido por electro-imanes | $5x10^5$ G |
| Campo mas fuerte producido en laboratorio | $10^6$ - $10^7$ G |
| Enanas blancas ultra-magnetizadas | $10^9$ G |
| Campo magnético en pulsares muy viejos | $10^8$-$10^9$ G |
| Campo magnético de un pulsar típico | $10^{12}$ G |
| Campo magnetico de un magnetar | $10^{15}$ G |
| Máximo campo magnético teoricamente posible (efectos cuánticos) | $10^{24}$ G |

# Campos Magnéticos: tabla comparativa

| | |
|---|---|
| Campo magnético terrestre | 0.6 Gauss |
| Iman de refrigerador | 100 G |
| Electro-iman de IRMN \| Manchas sol | 0 G = $10^4$ G |
| Campo persistente mas fuerte produci | x$10^5$ G |
| Campo mas fuerte producido en labor | 6 - $10^7$ G |
| Enanas blancas ultra-magnetizadas | $10^9$ G |
| Campo magnético en pulsares muy vi | 8-$10^9$ G |
| Campo magnético de un pulsar típico | $10^{12}$ G |
| Campo magnetico de un magnetar | $10^{15}$ G |
| Máximo campo magnético teoricamente posible (efectos cuánticos) | $10^{24}$ G |

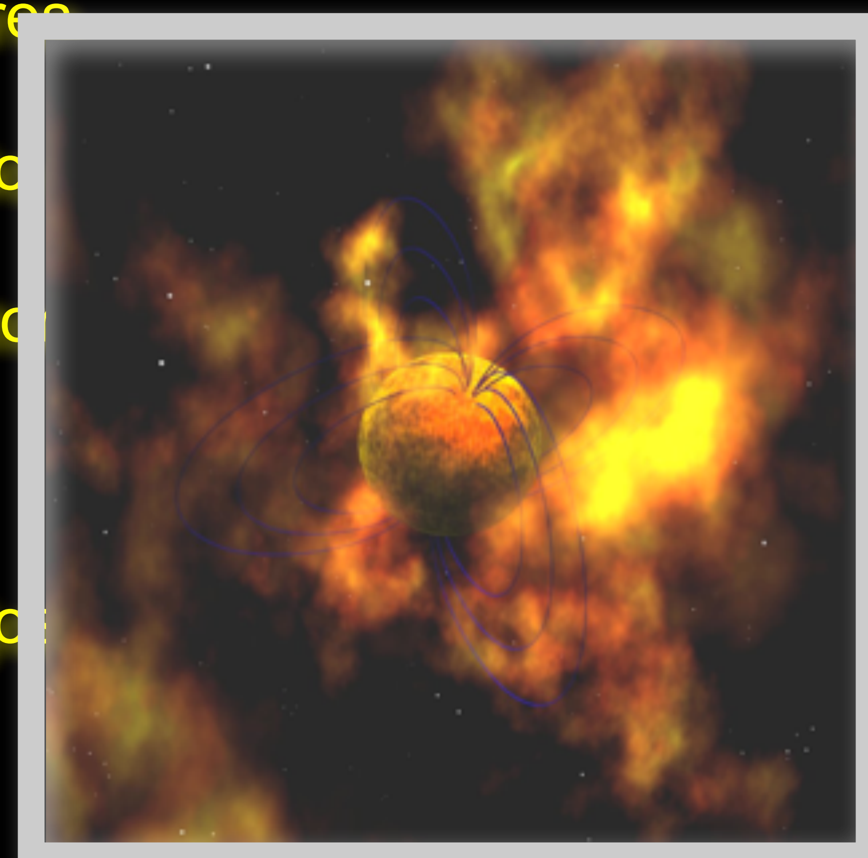


# Campos Magnéticos: tabla comparativa

| | |
|---|---|
| Campo magnético terrestre | 0.6 Gauss |
| Iman de refrigerador | 100 G |
| Electro-iman de IRMN \| Manchas sol | 0 G = $10^4$ G |
| Campo persistente mas fuerte produci | x$10^5$ G |
| Campo mas fuerte producido en labor | $^6$ - $10^7$ G |
| Enanas blancas ultra-magnetizadas | $10^9$ G |
| Campo magnético en pulsares muy vi | $0^8$-$10^9$ G |
| Campo magnético de un pulsar típico | $10^{12}$ G |
| Campo magnetico de un magnetar | $10^{15}$ G |
| Máximo campo magnético teoricamente posible (efectos cuánticos) | $10^{24}$ G |

# Campos Magnéticos: tabla comparativa

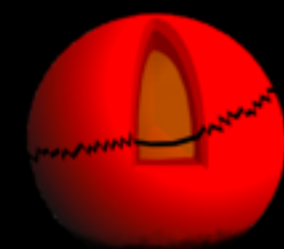
| | |
|---|---|
| Campo magnético terrestre | 0.6 Gauss |
| Iman de refrigerador | 100 G |
| Electro-iman de IRMN \| Manchas solares | 10,000 G = $10^4$ G |
| Campo persistente mas fuerte producido | $5 \times 10^5$ G |
| Campo mas fuerte producido en laborato | $10^6$ - $10^7$ G |
| Enanas blancas ultra-magnetizadas | $10^9$ G |
| Campo magnético en pulsares muy viejo | $10^8$-$10^9$ G |
| Campo magnético de un pulsar típico | $10^{12}$ G |
| Campo magnetico de un magnetar | $10^{15}$ G |
| Máximo campo magnético teoricamente posible (efectos cuánticos) | $10^{24}$ G |



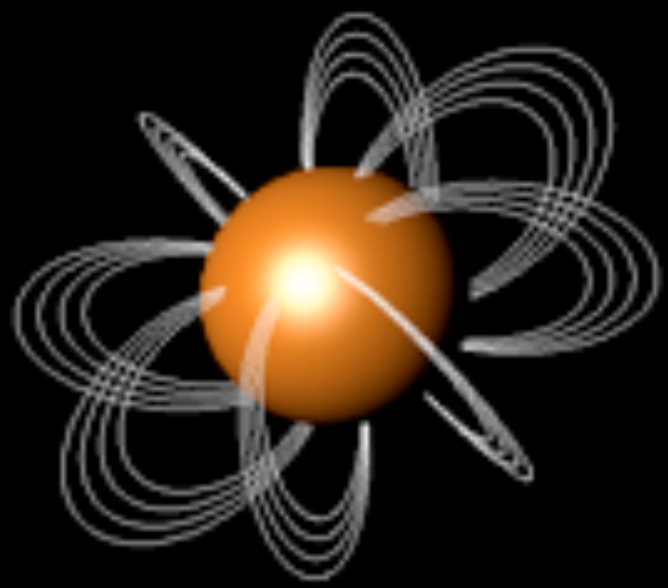
# Magnetares: destellos de rayos γ

Tensión magnética
interna

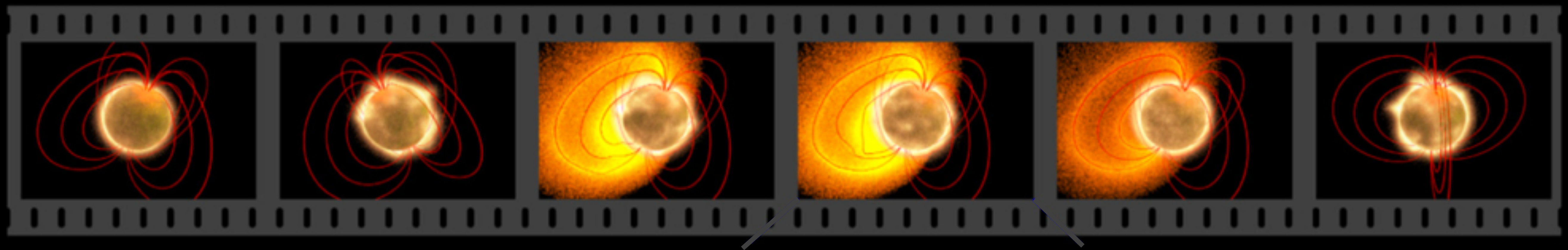
Rompimiento de la
corteza sólida



Campo magnético
dipolar

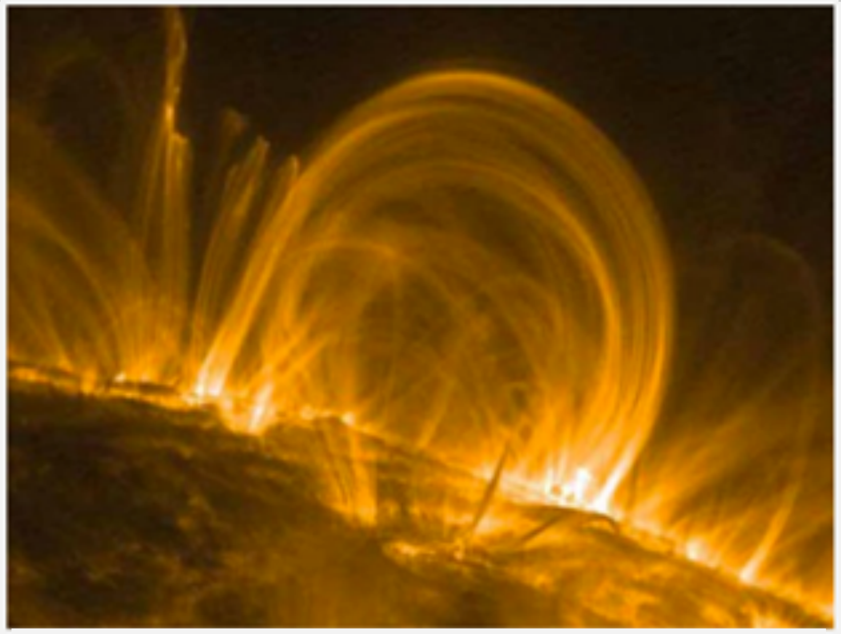


Campo magnético
torcido



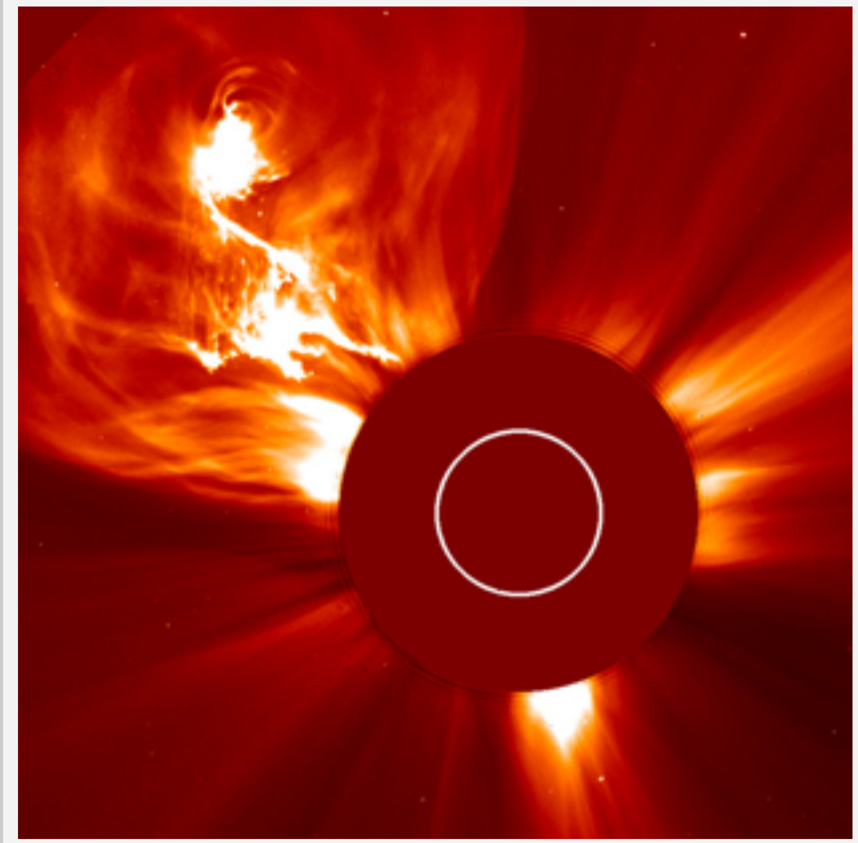
# Magnetares: destellos de rayos $\gamma$

Rompimiento de la corteza sólida



Solar magnetic field lines.
Credit: Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences)

Sun protuberance.
Credit: Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences)



Coronal mass ejection.
Credit: NASA/ESA SOHO, Instrument LASCO on SOHO
(Large Angle and Spectrometric COronagraph)

# Campos Magnéticos: tabla comparativa

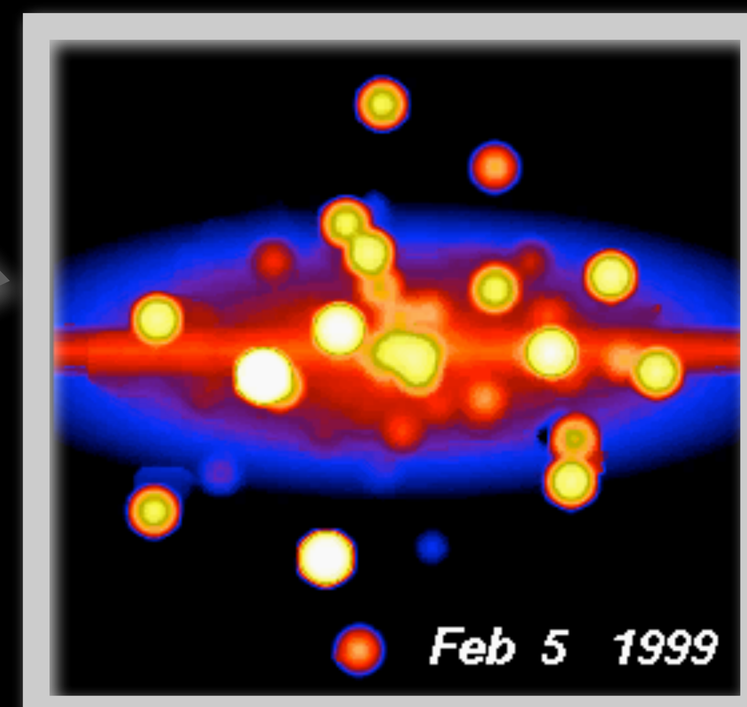
| | |
|---|---|
| Campo magnético terrestre | 0.6 Gauss |
| Iman de refrigerador | 100 G |
| Electro-iman de IRMN \| Manchas solares | 10,000 G = $10^4$ G |
| Campo persistente mas fuerte producido por electro-imanes | $5x10^5$ G |
| Campo mas fuerte producido en laboratorio | $10^6$ - $10^7$ G |
| Enanas blancas ultra-magnetizadas | $10^9$ G |
| Campo magnético en pulsares muy viejos | $10^8$-$10^9$ G |
| Campo magnético de un pulsar típico | $10^{12}$ G |
| Campo magnetico de un magnetar | $10^{15}$ G |
| Máximo campo magnético teoricamente posible (efectos cuánticos) | $10^{24}$ G |

# Binarias de Rayos X

# Binarias de Rayos X: Región del Centro Galáctico

La Vía Láctea desde San Pedro Mártir (Stéphane Guisard)

**Binarias de Rayos X en el Centro Galáctico**

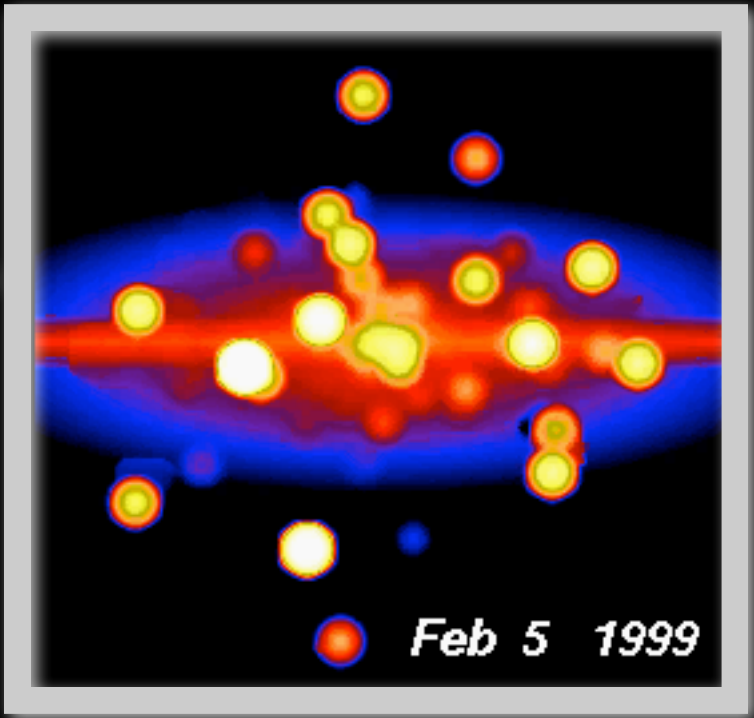



Observaciones del Rossi X-Ray Timing Explorer (RXTE)

# Binarias de Rayos X:
# Región del Centro Galáctico

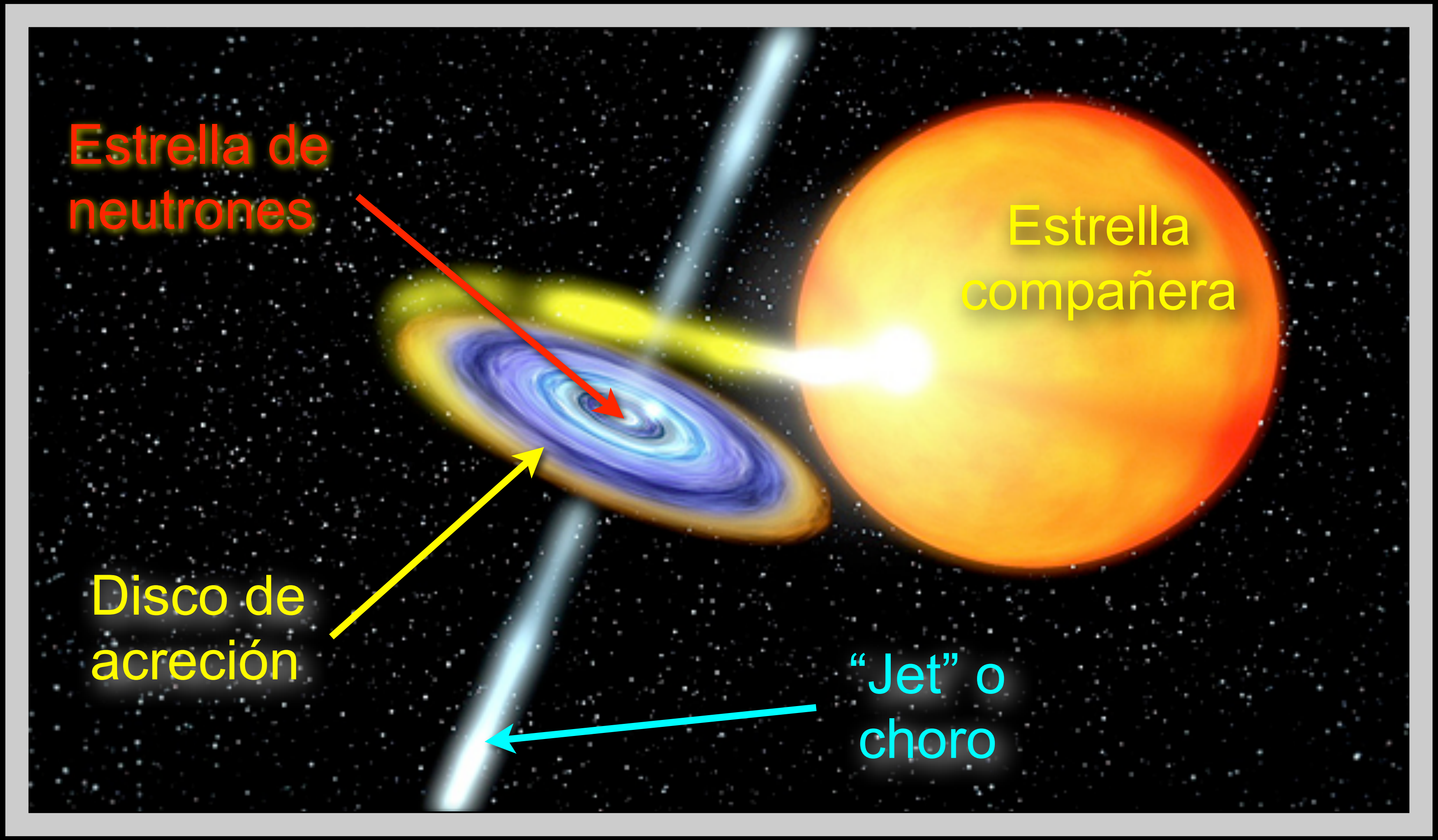
La Vía Láctea desde San Pedro Mártir (Stéphane Guisard)

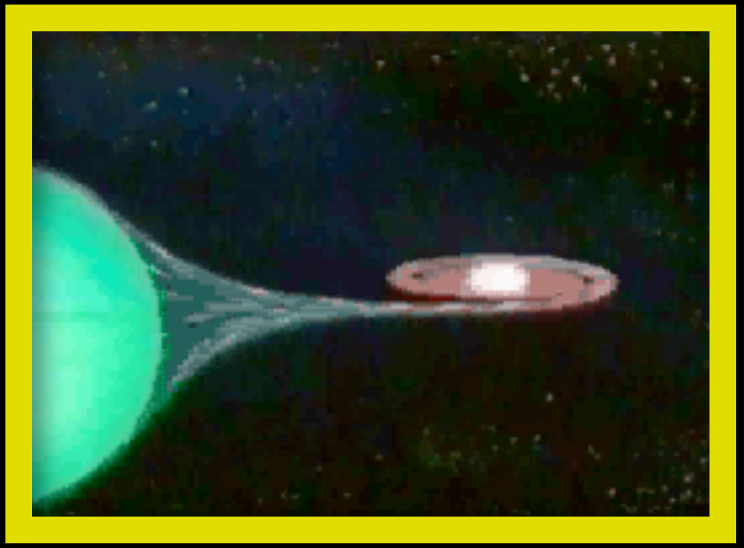
## Binarias de Rayos X en el Centro Galáctico



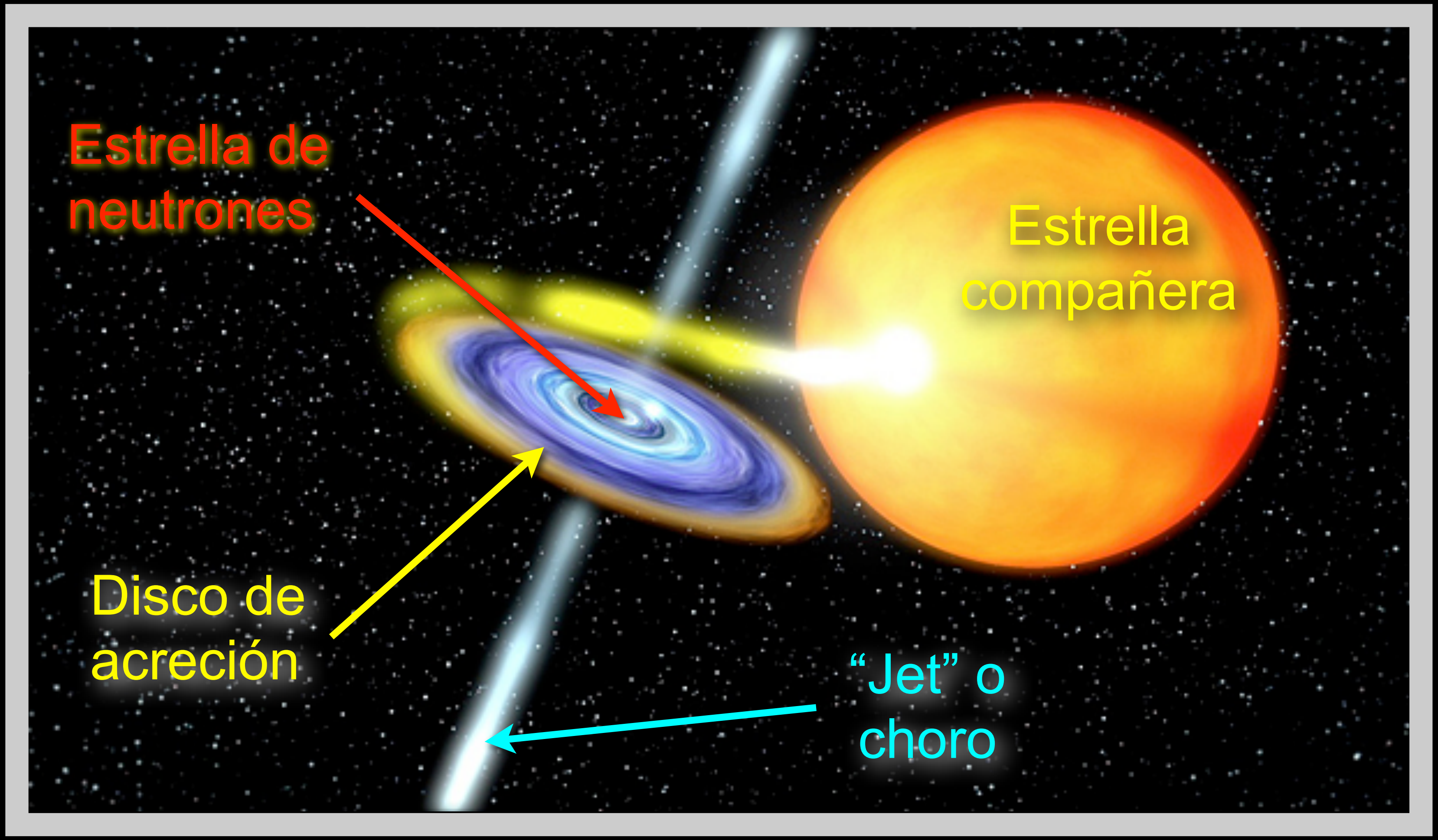

Observaciones del Rossi X-Ray Timing Explorer (RXTE)

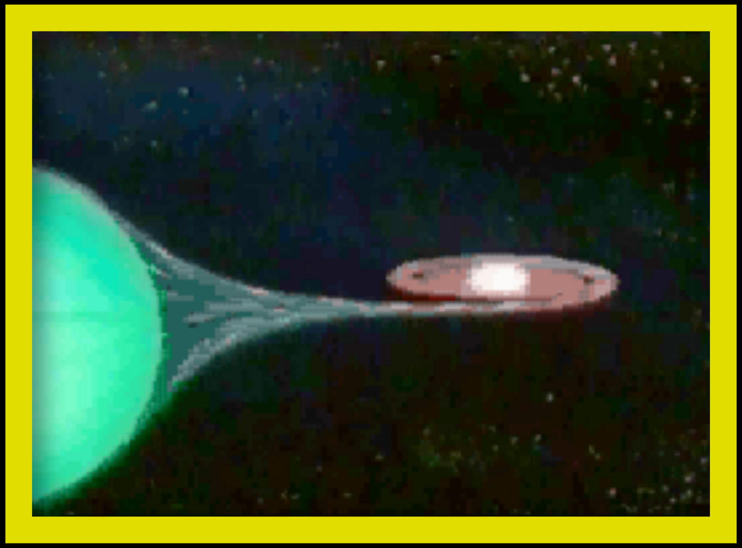
# Simulaciones de binarias con acreción



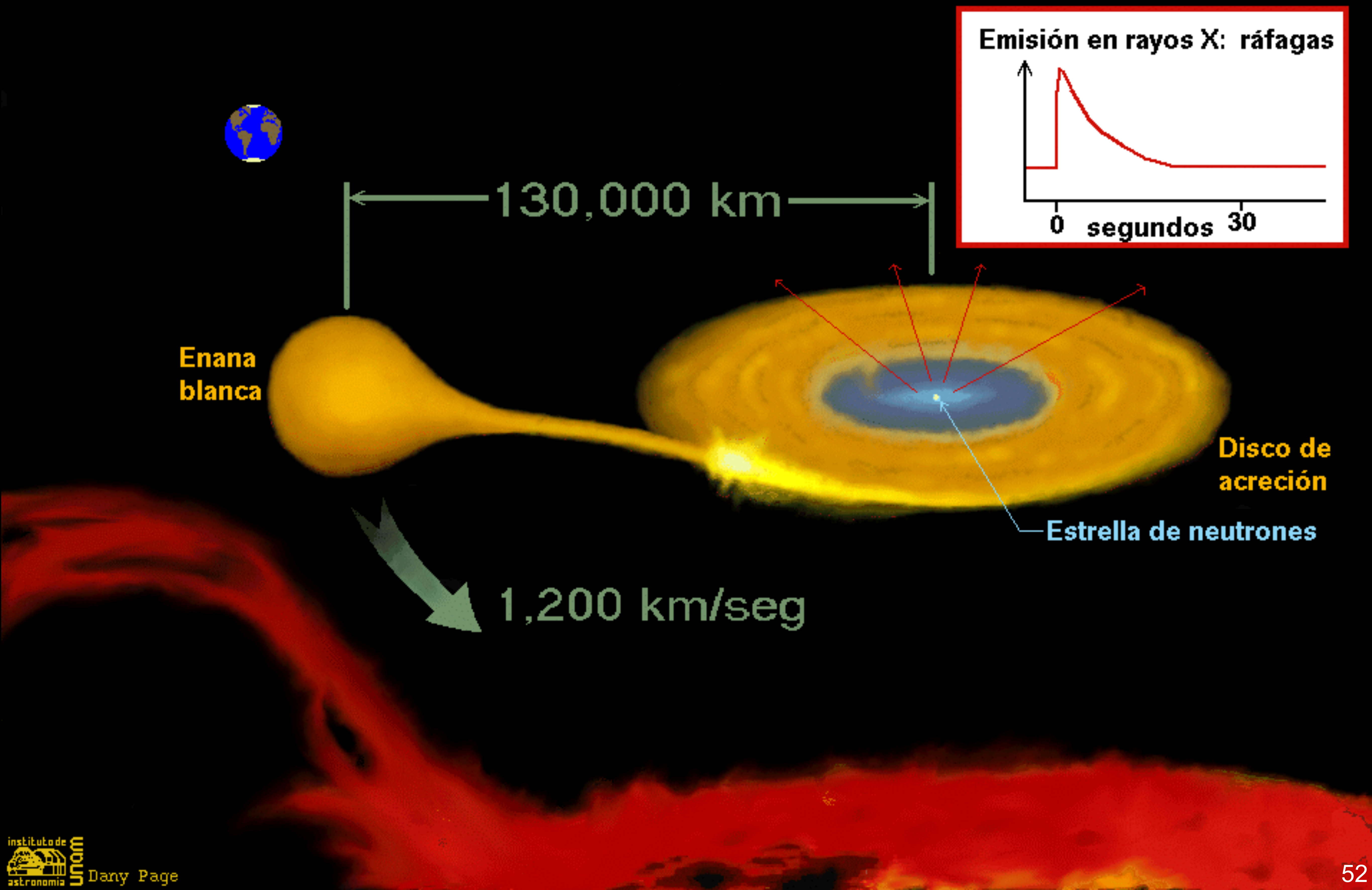



# Simulaciones de binarias con acreción

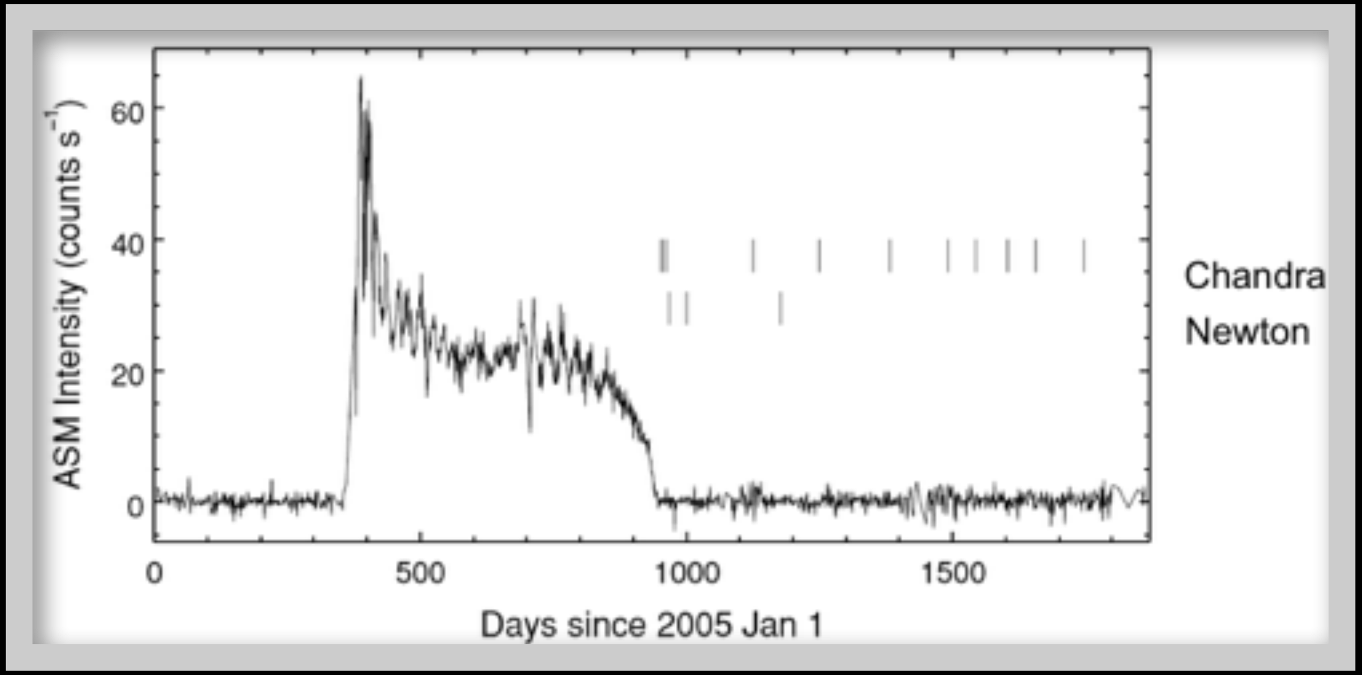


# BINARIA de RAYOS X de MASA BAJA (4U 1820–30)



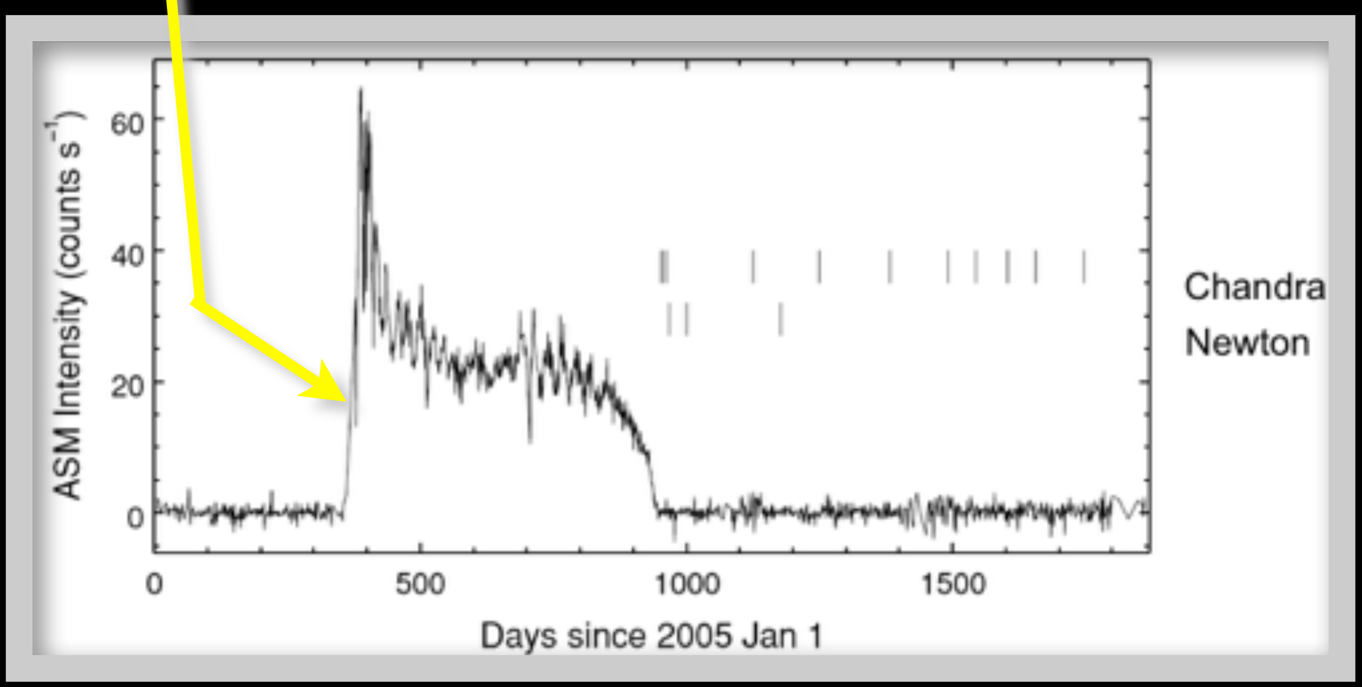
# Estrellas de Neutrones con Acreción Transitoria




**Observación de la fuente XTE J1701-462**
por el ASM ("All Sky Monitor") del RXTE

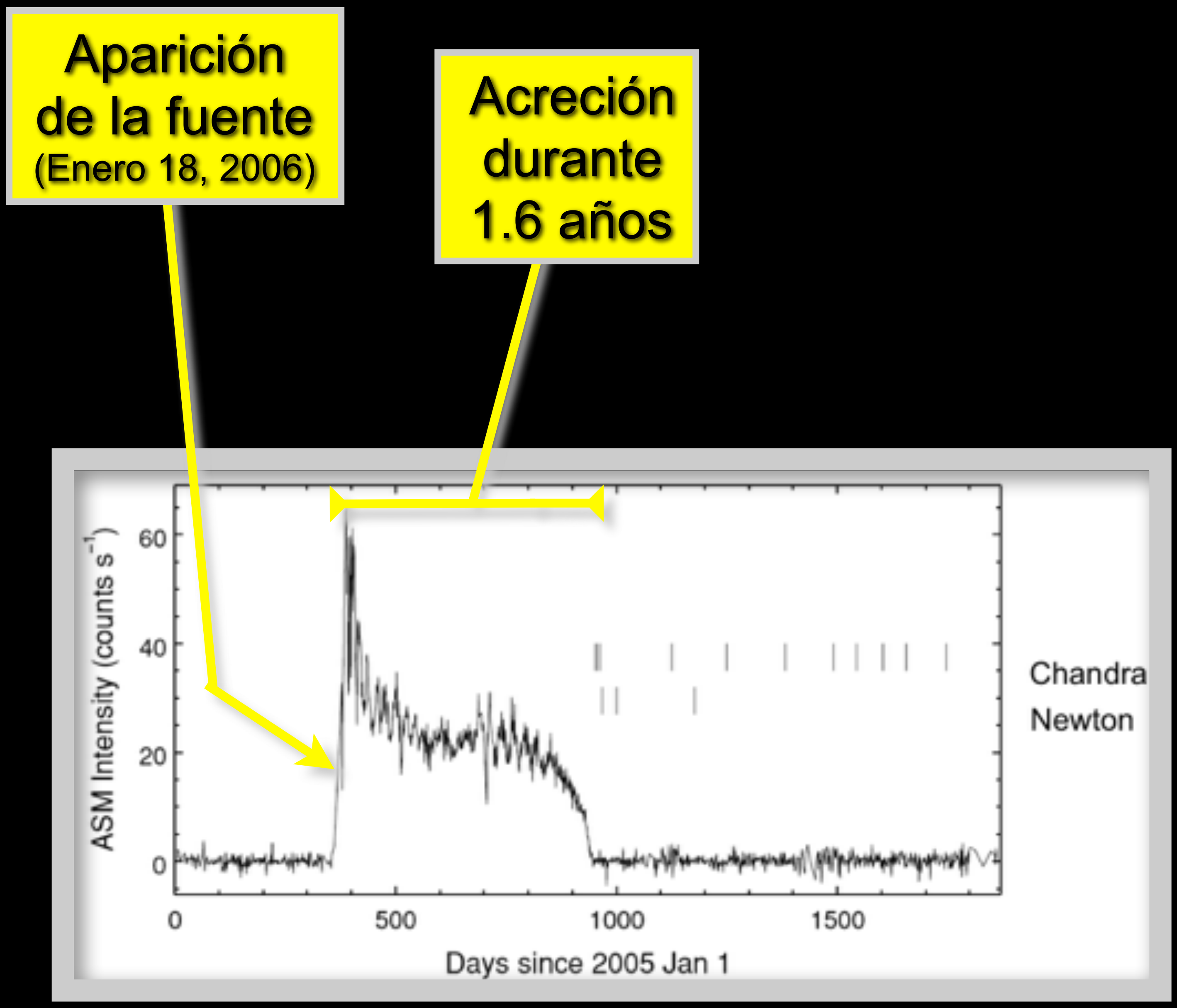
# Estrellas de Neutrones con Acreción Transitoria

Aparición de la fuente (Enero 18, 2006)



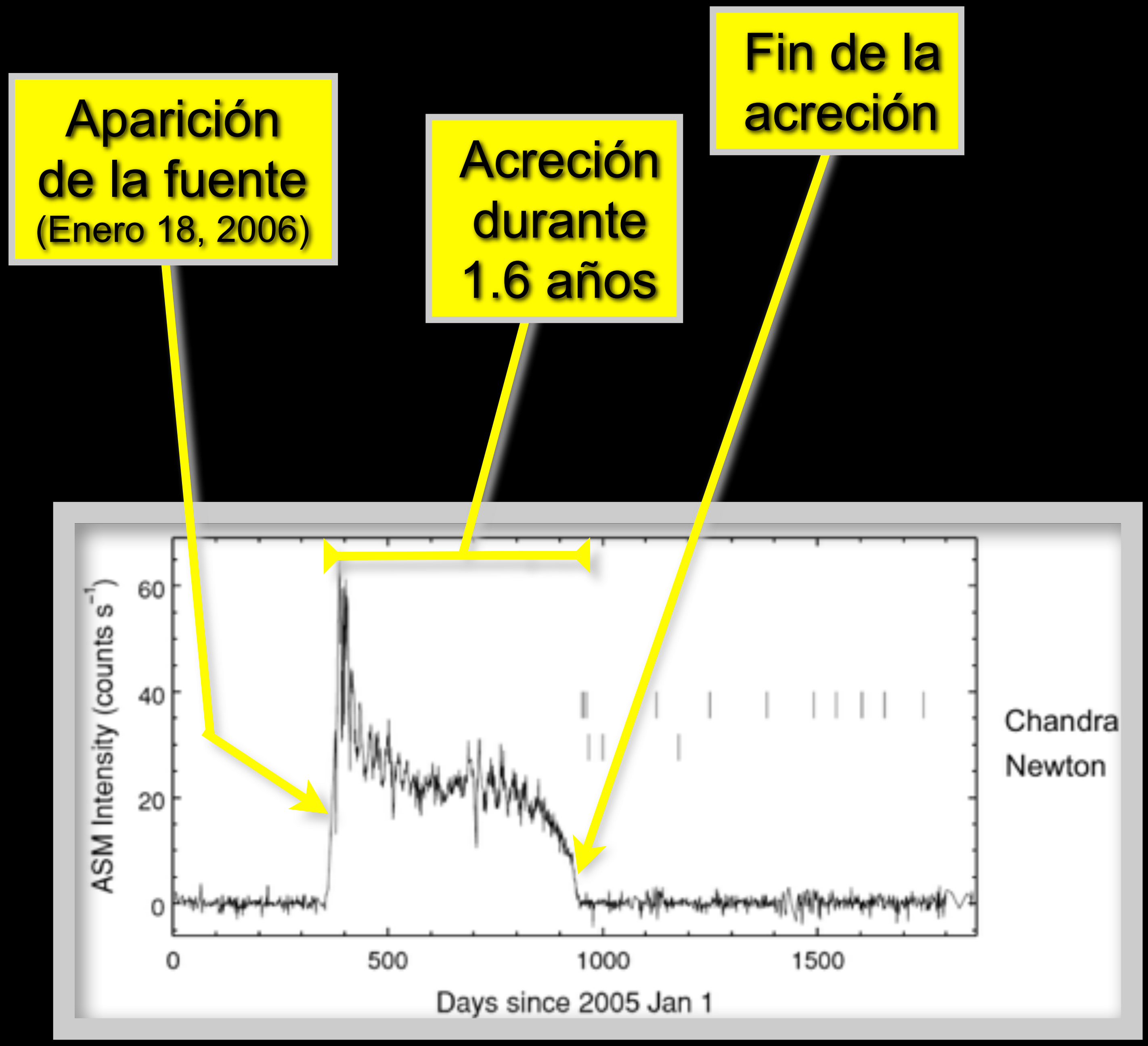

**Observación de la fuente XTE J1701-462**
por el ASM ("All Sky Monitor") del RXTE

# Estrellas de Neutrones con Acreción Transitoria




Observación de la fuente XTE J1701-462
por el ASM ("All Sky Monitor") del RXTE

# Estrellas de Neutrones con Acreción Transitoria



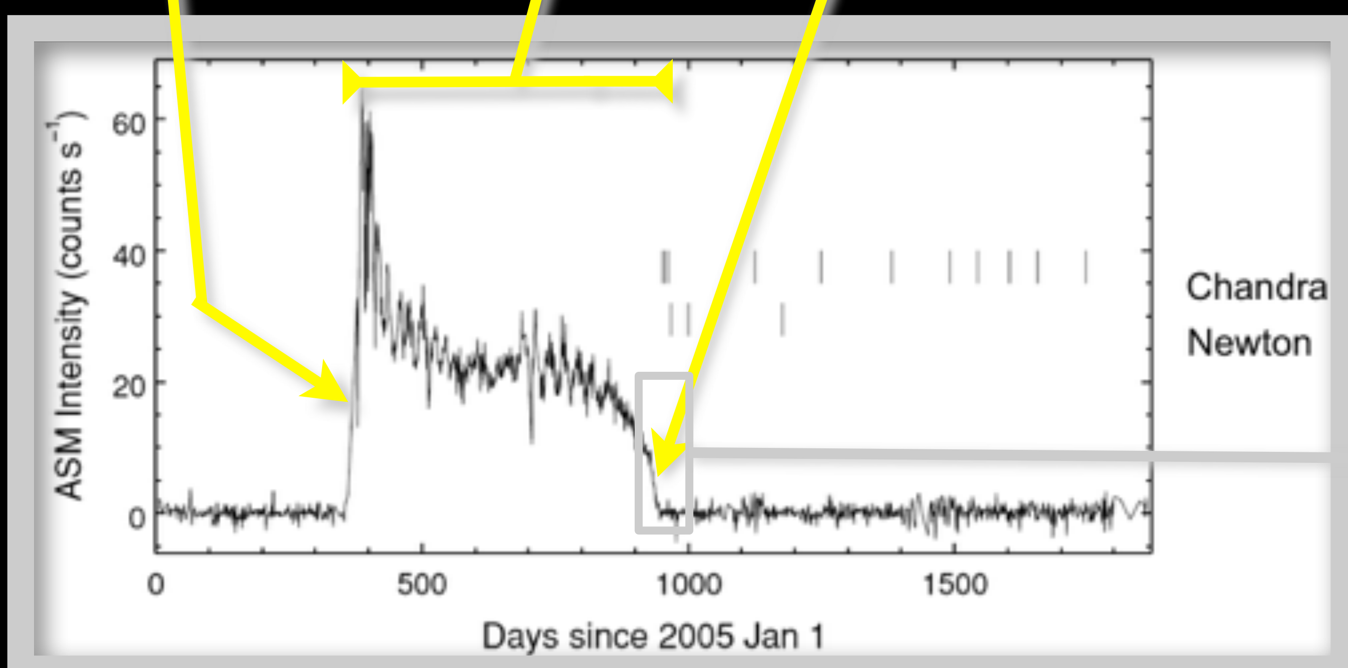

Observación de la fuente XTE J1701-462
por el ASM ("All Sky Monitor") del RXTE

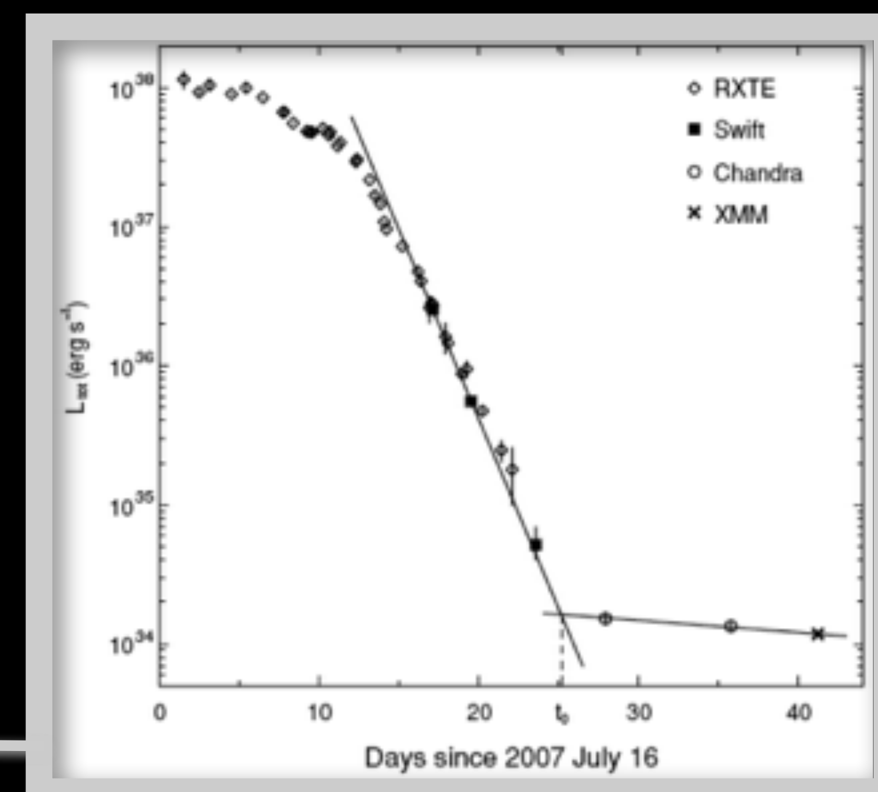
# Estrellas de Neutrones con Acreción Transitoria

Aparición de la fuente
(Enero 18, 2006)

Acreción durante 1.6 años

Fin de la acreción




**Observación de la fuente XTE J1701-462**
por el ASM ("All Sky Monitor") del RXTE

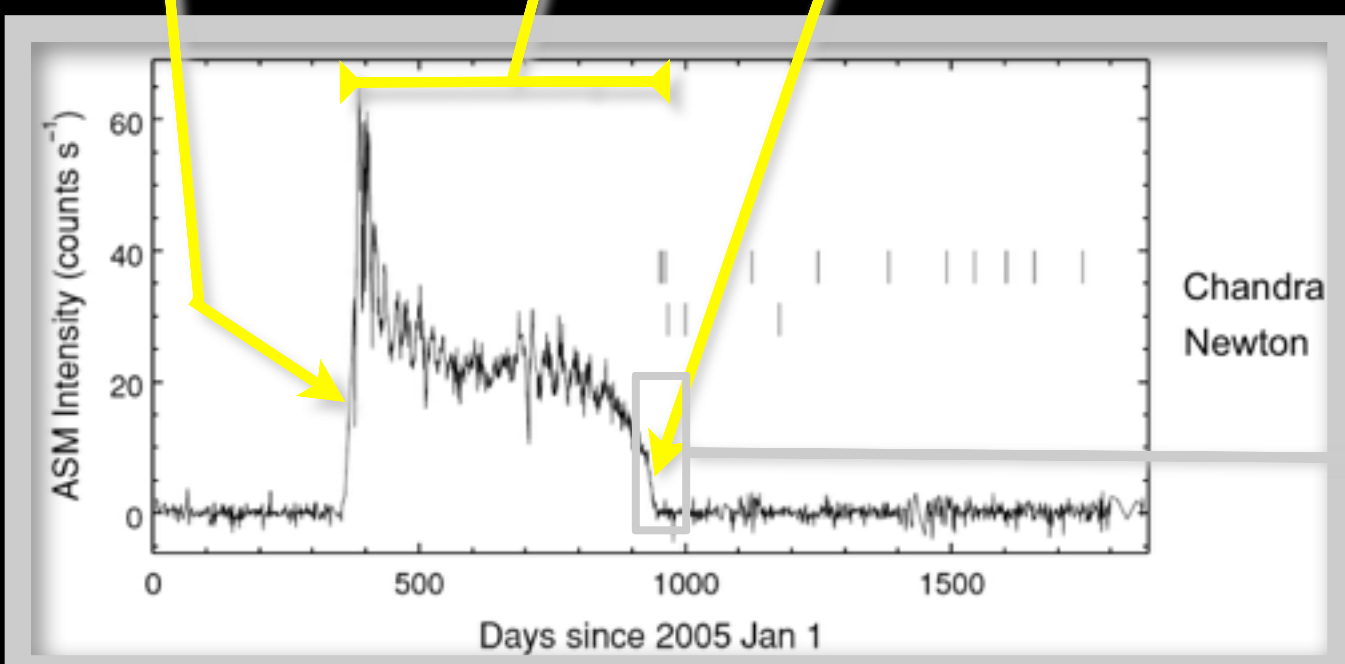
# Estrellas de Neutrones con Acreción Transitoria

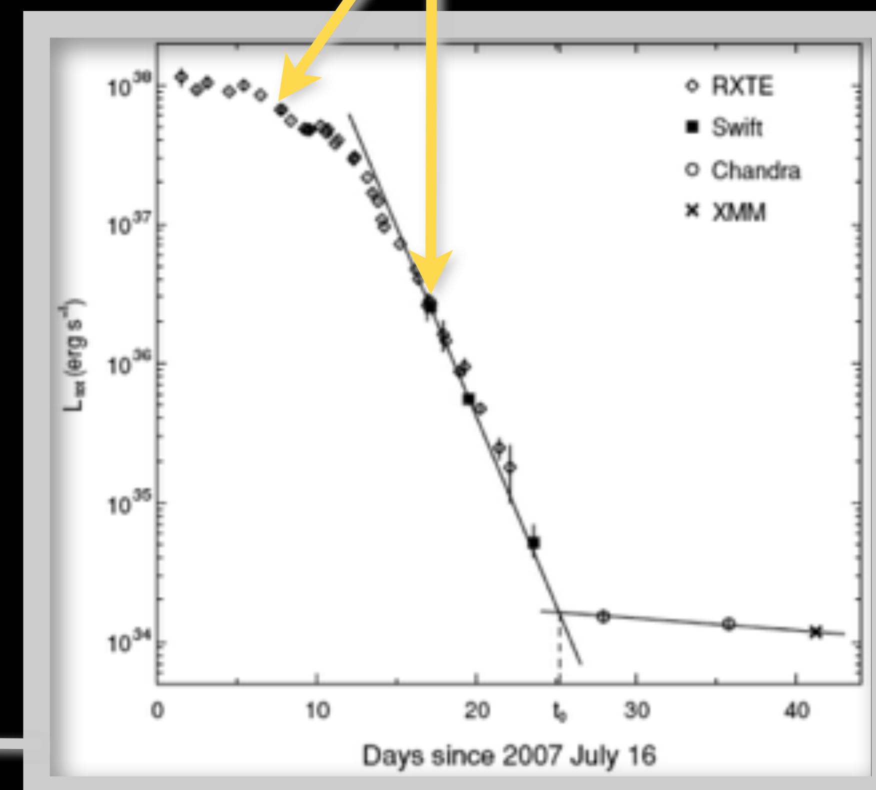
Aparición de la fuente (Enero 18, 2006)

Acreción durante 1.6 años

Fin de la acreción

Emisión del disco



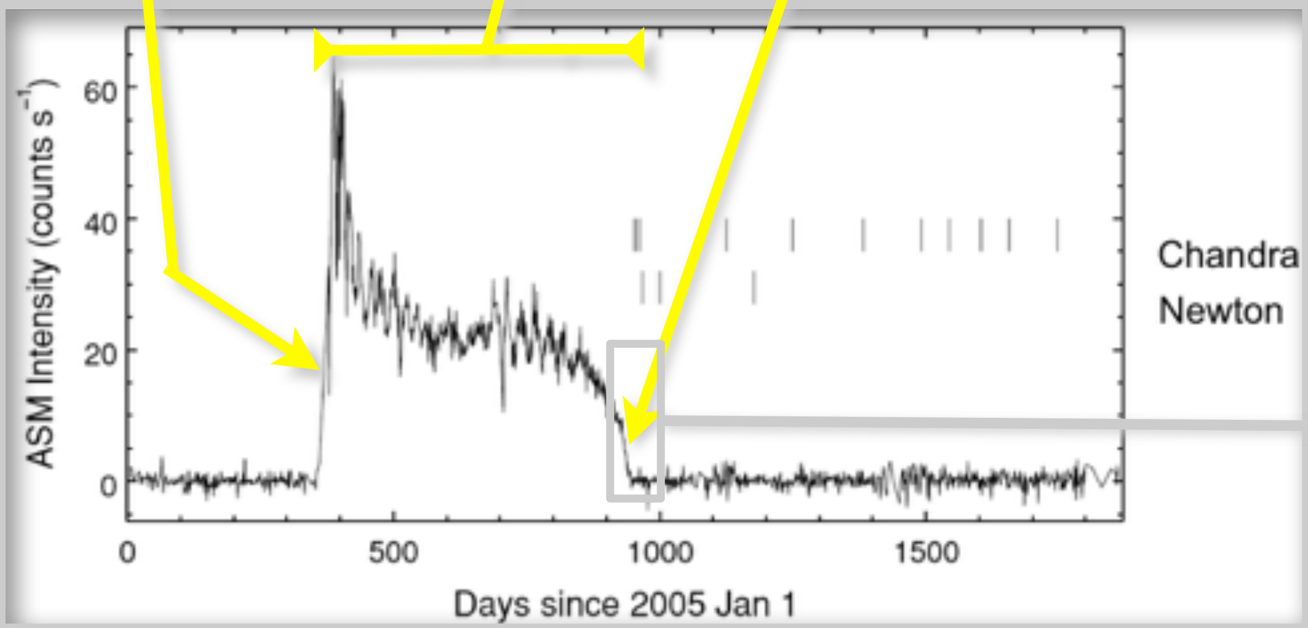

Observación de la fuente XTE J1701-462
por el ASM ("All Sky Monitor") del RXTE

# Estrellas de Neutrones con Acreción Transitoria

Aparición de la fuente
(Enero 18, 2006)

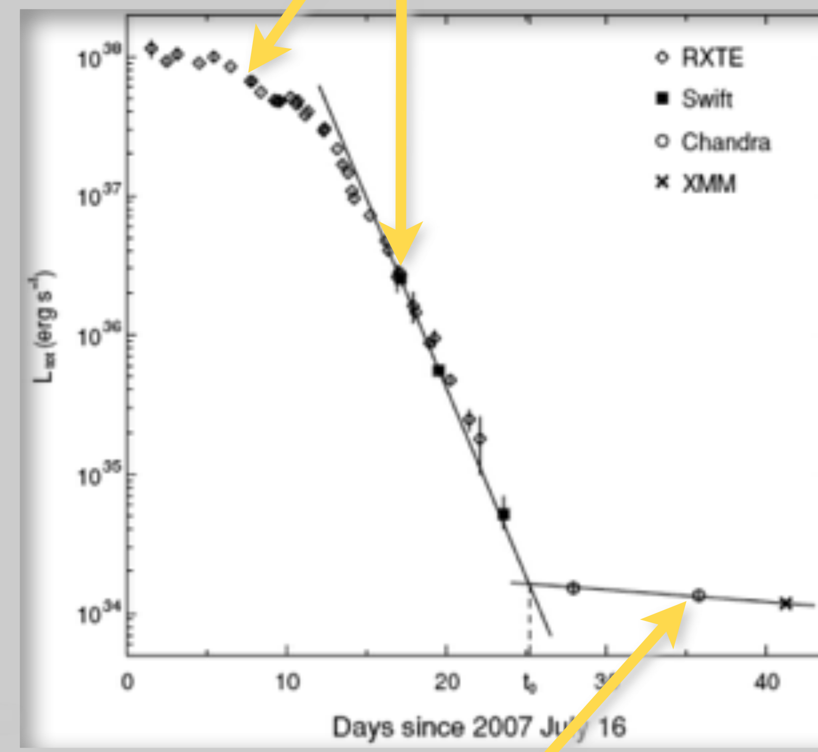
Acreción durante 1.6 años

Fin de la acreción




Observación de la fuente XTE J1701-462
por el ASM ("All Sky Monitor") del RXTE

Emisión del disco




Emisión de la superficie de la estrella de neutrones

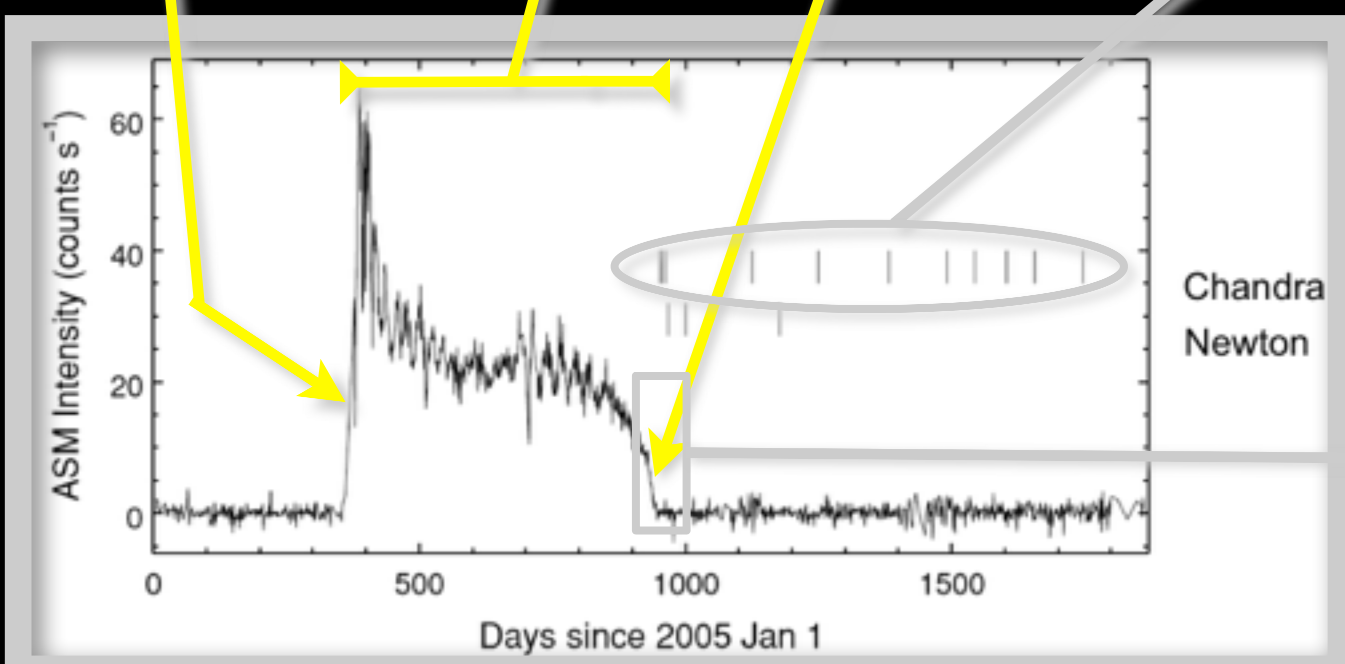
# Estrellas de Neutrones con Acreción Transitoria

Aparición de la fuente (Enero 18, 2006)

Acreción durante 1.6 años

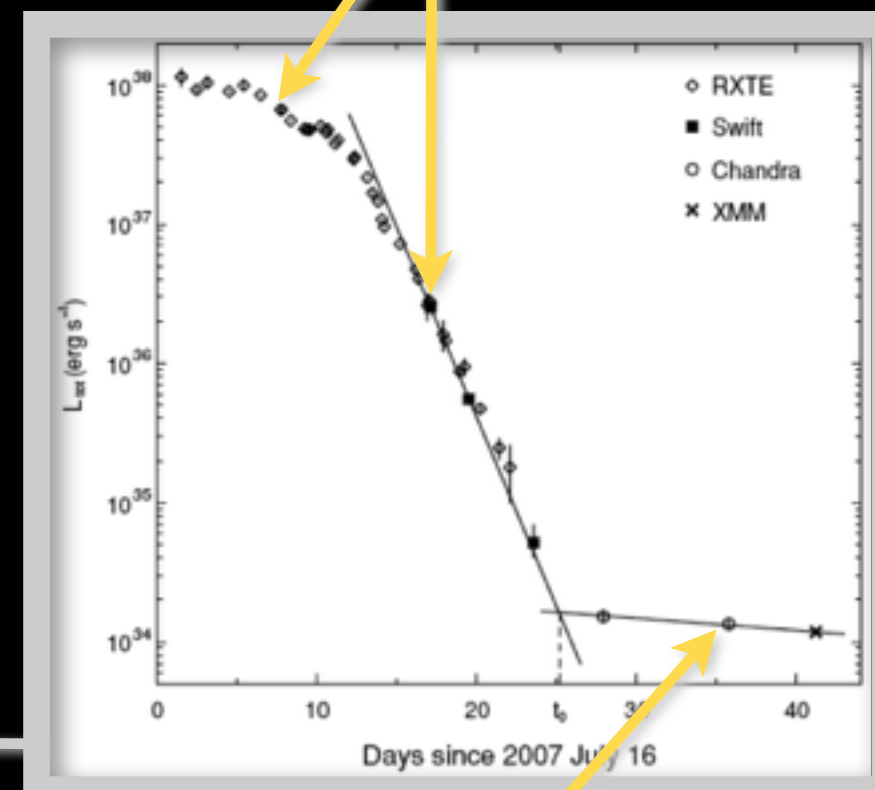
Fin de la acreción

Seguimiento detallado con Chandra




Observación de la fuente XTE J1701-462
por el ASM ("All Sky Monitor") del RXTE

Emisión del disco




Emisión de la superficie de la estrella de neutrones

# Estrellas de Neutrones ... Transitoria

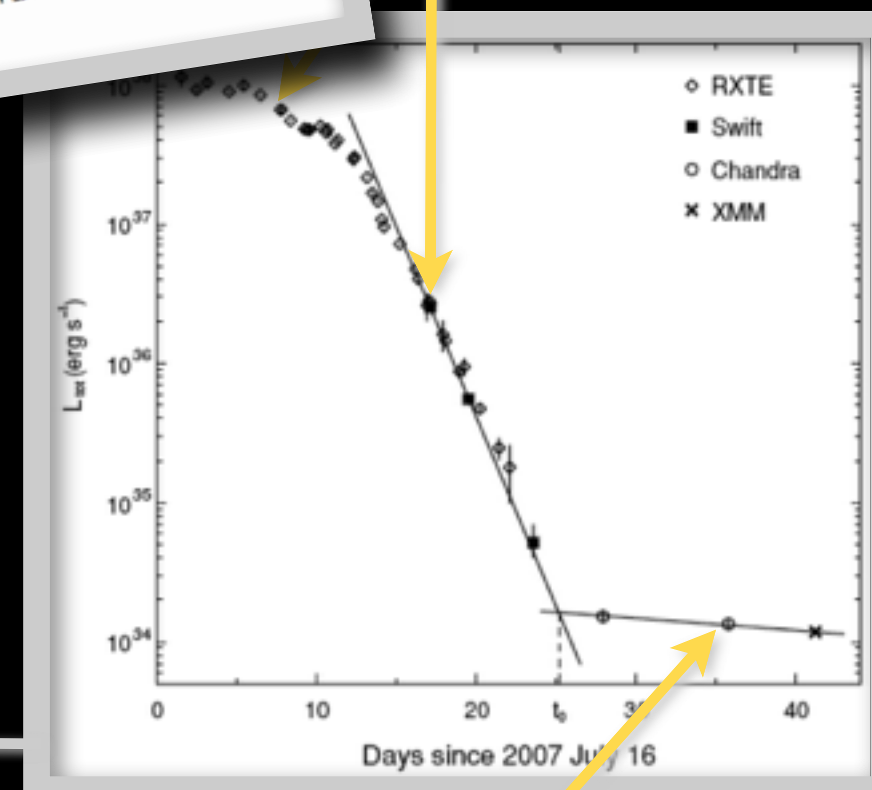
## Neutron Star Crust Team:

### Probing Deep into the Neutron Star Crust with Transient Neutron-Star Low-Mass X-Ray Binaries

Welcome | Team Members | More about our Project | First Meeting | Projects

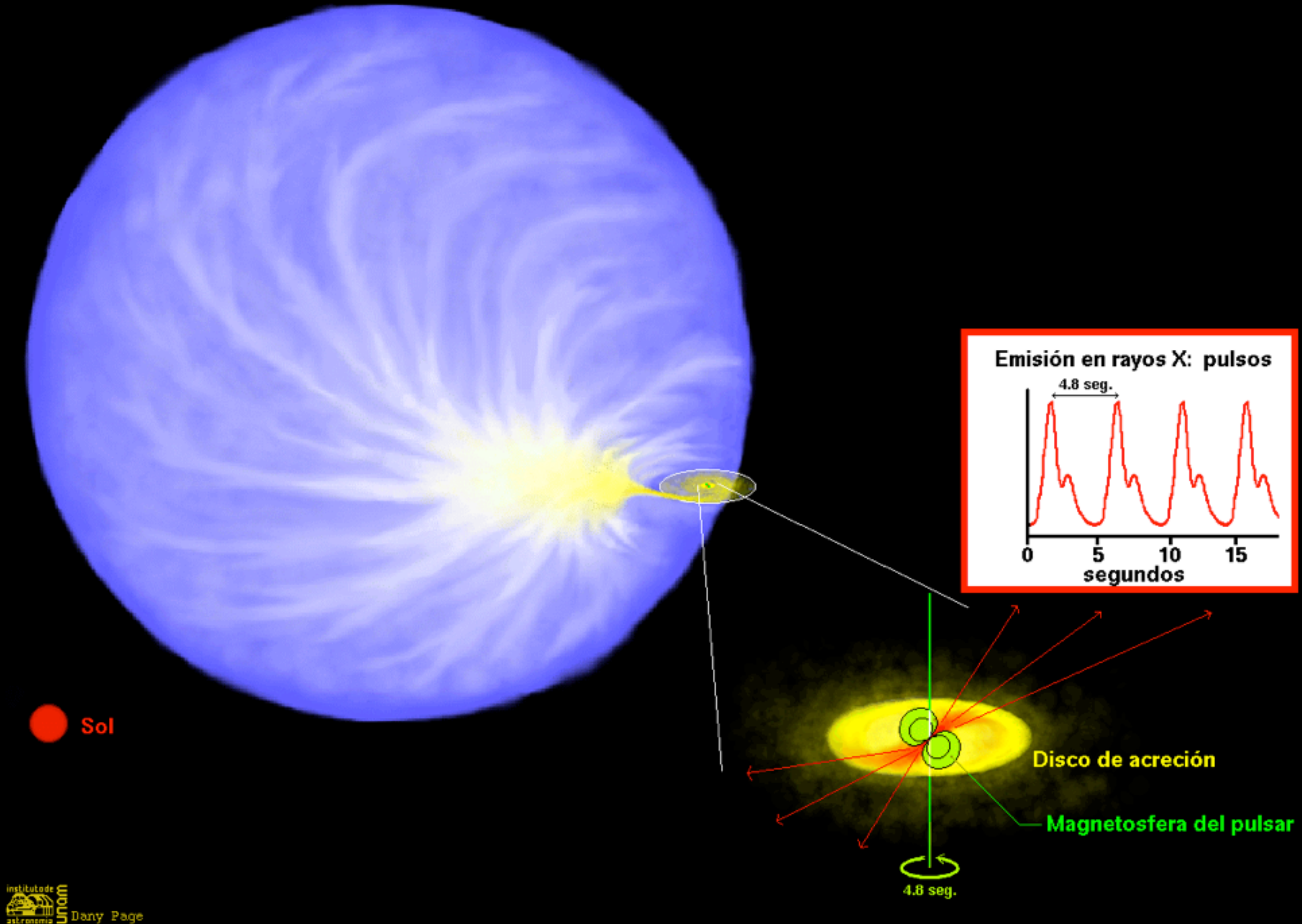
Welcome to the home page for the ISSI InternationalTeam on Probing Deep into the Neutron Star Crust with Transient Neutron-Star Low-Mass X-Ray Binaries.

**Abstract:** The outer region of a neutron star, called the crust, is predicted to host novel states of matter containing exotic neutron-rich nuclei (which in the inner crust are highly deformed), relativistic electrons, and a superfluid of neutrons. Recently, transiently accreting neutron-star low-mass X-ray binaries have emerged as unique laboratories to study thermal and transport processes in these extreme environments and phases encountered in the crust. During a long period of accretion, years to decades, the crust is heated out of thermal equilibrium with the stellar core. When accretion ends, the subsequent thermal relaxation can, and has been, observed in detail. Modeling these events has been fairly successful, but with the introduction of "fudge parameters" which mask our current ignorance about the interesting physics of heat transport, nuclear reactions, and neutron superfluidity at these fairly extreme densities. It is now timely to bring together a team of X-ray observers, theoretical astrophysicists, and theoretical physicists to interpret and guide observations of thermal relaxation with a view to learn about fundamental processes and phases of matter encountered at these extreme densities.

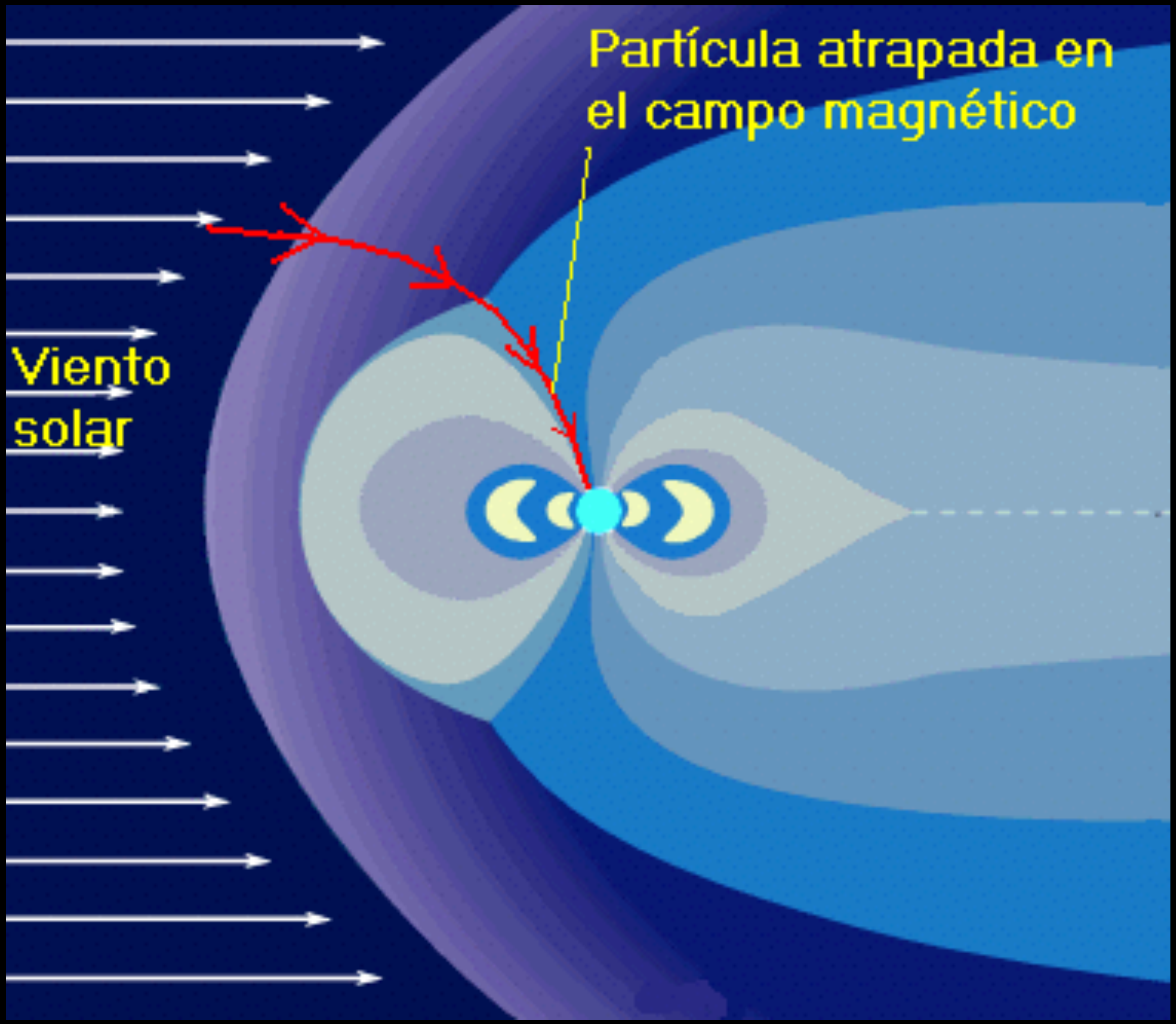



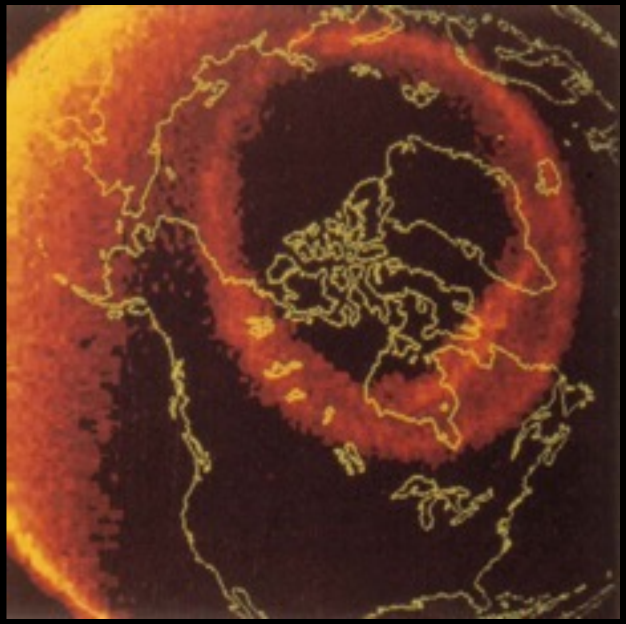

Emisión de la superficie de la estrella de neutrones

# BINARIA de RAYOS X de MASA ALTA (CENTAURO X–3)

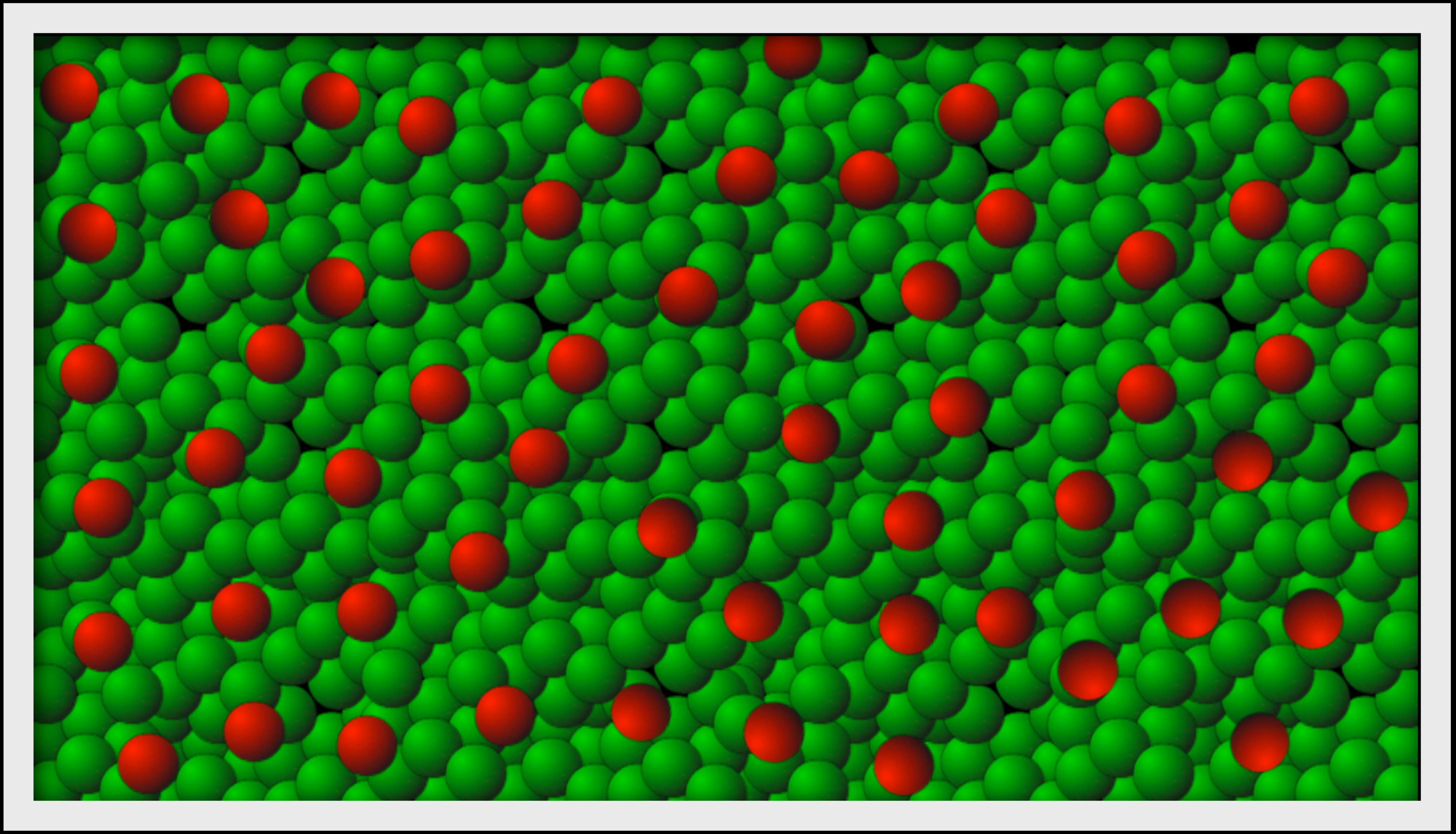


# Aurora Boreal



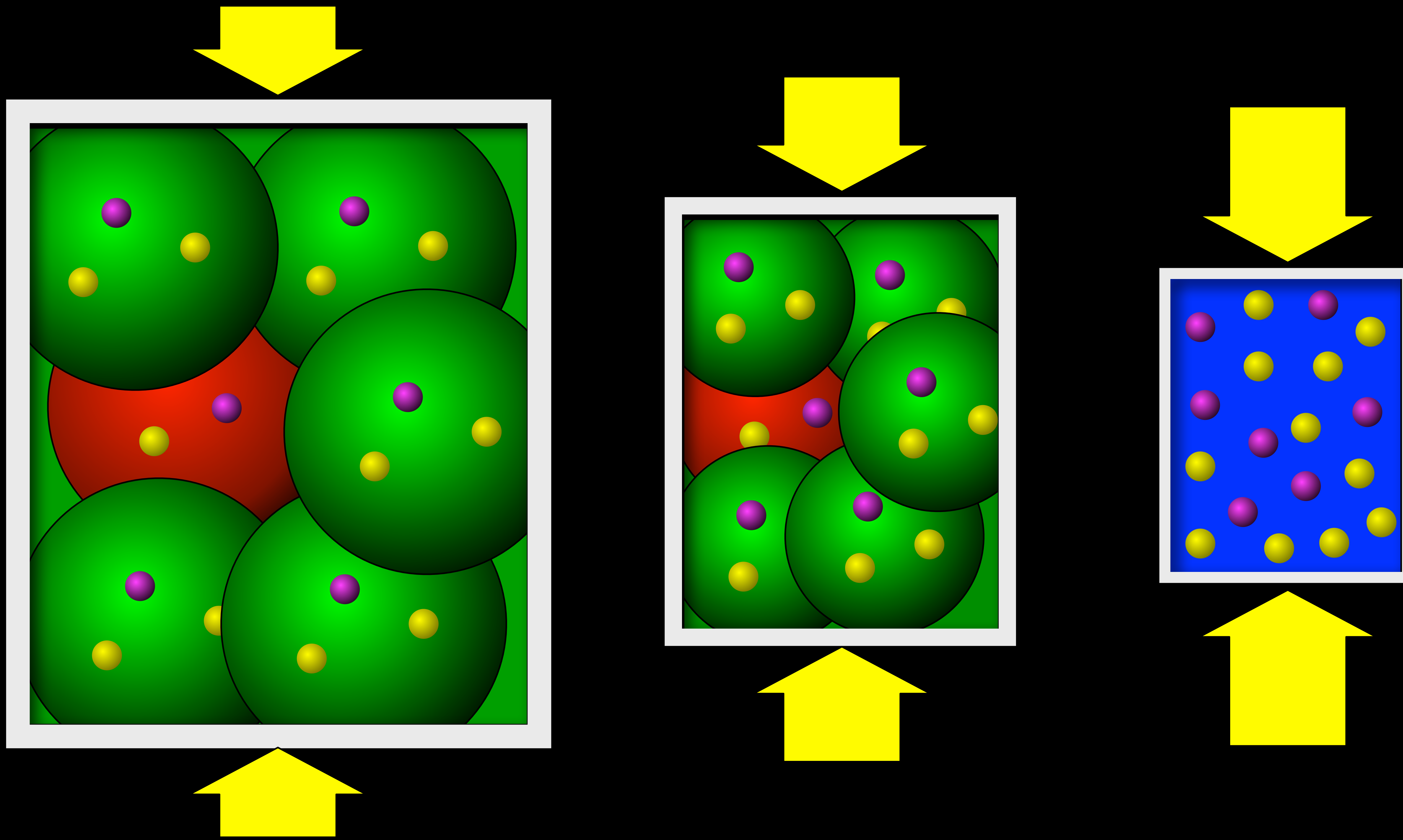



# El interior de una estrella de neutrones

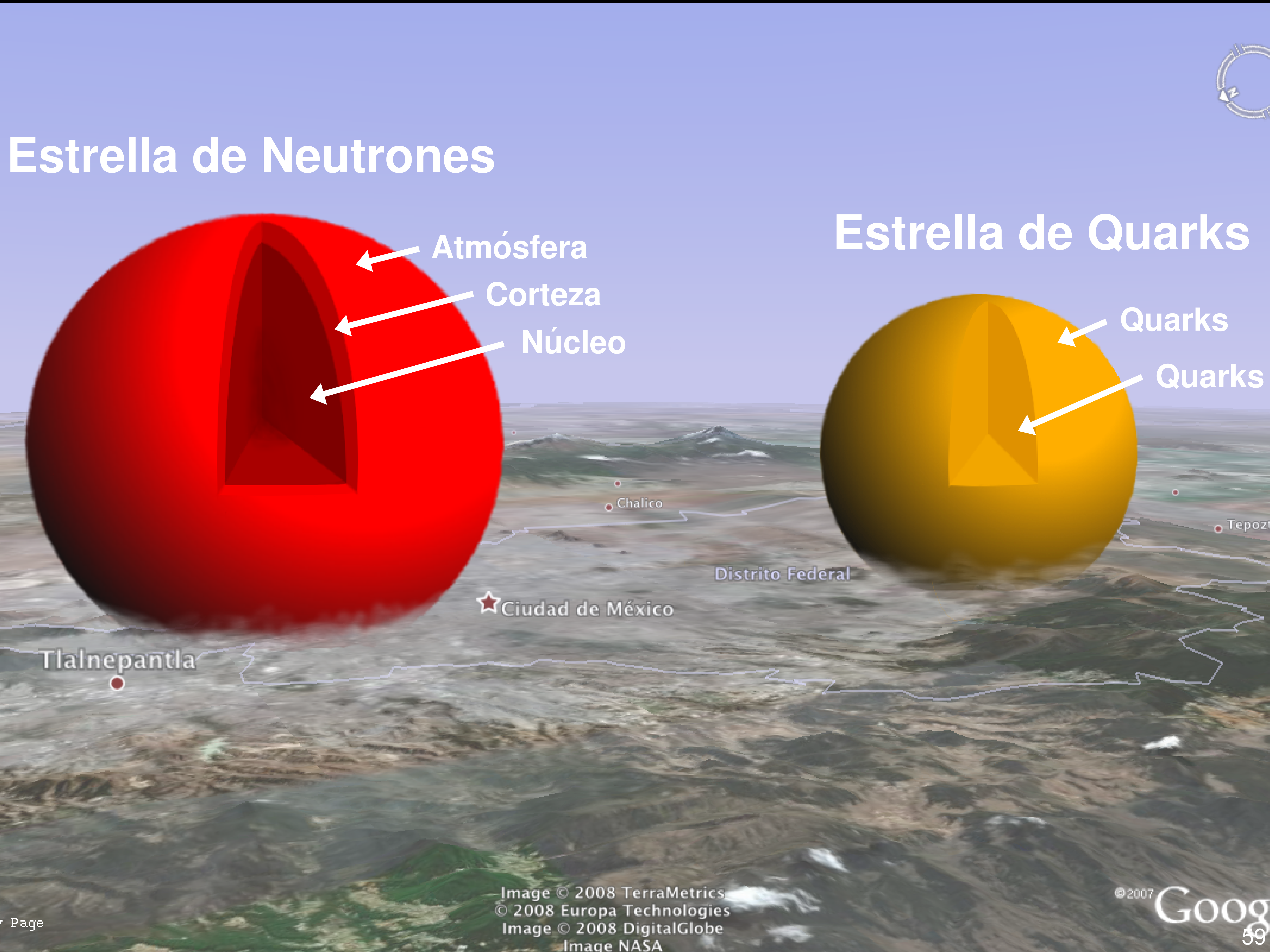


Contiene un 90% de neutrones y un 10% de protones

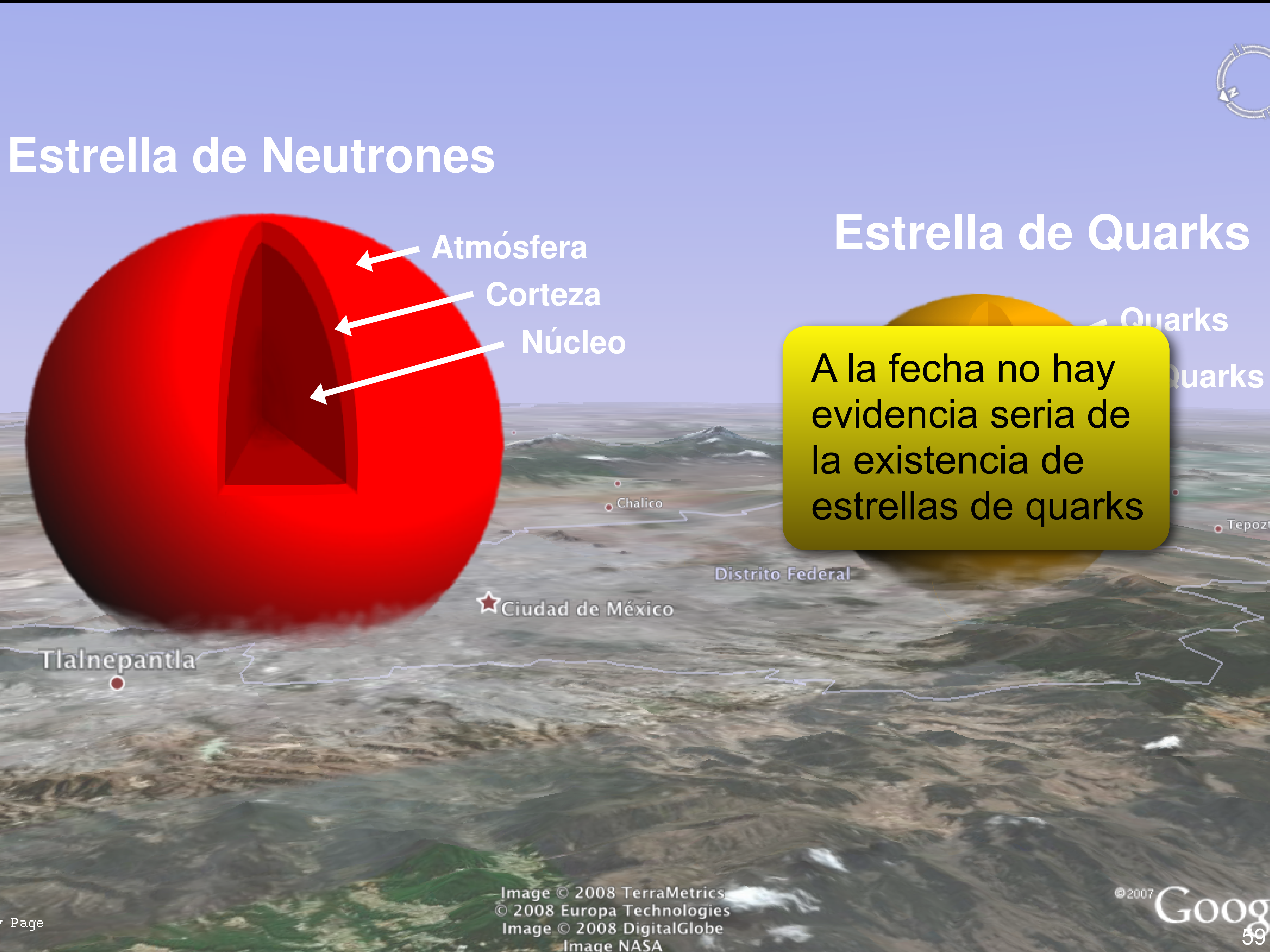
# ¿ De nucleones a quarks ?



El aumento de presión por la gravedad en el centro puede llevar al desconfinamiento de los quarks



Estrella de Neutrones
Atmósfera
Corteza
Núcleo
Estrella de Quarks
Quarks
Quarks
Chalico
Distrito Federal
Ciudad de México
Tlalnepantla
Image © 2008 TerraMetrics
© 2008 Europa Technologies
Image © 2008 DigitalGlobe
Image NASA


Estrella de Neutrones
Atmósfera
Corteza
Núcleo
Estrella de Quarks
Quarks
uarks
A la fecha no hay evidencia seria de la existencia de estrellas de quarks
Chalico
Distrito Federal
Ciudad de México
Tlalnepantla
Tepoz
Image © 2008 TerraMetrics
© 2008 Europa Technologies
Image © 2008 DigitalGlobe
Image NASA
©2007 Goog


¿ Que Ching…
pasa cuando el
D.F. cae en una
cucharita ?


"That's all Folks!"