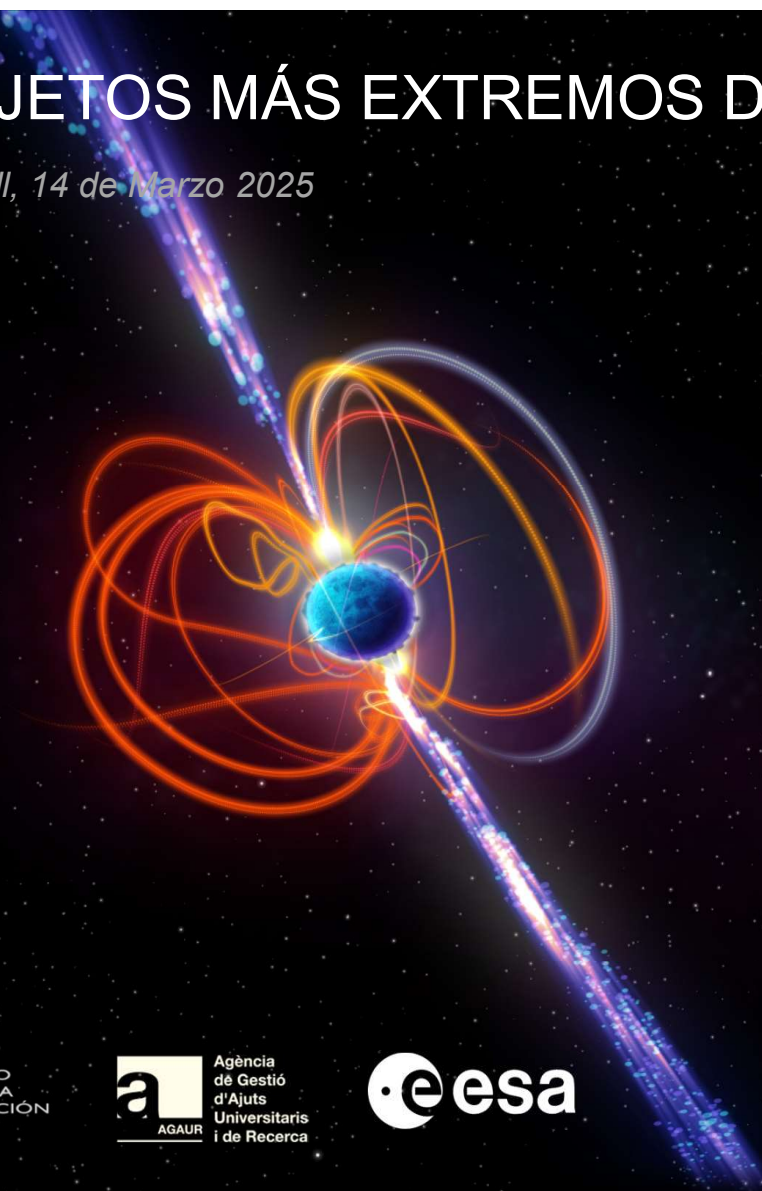


VIAJE ENTRE LOS OBJETOS MÁS EXTREMOS DEL UNIVERSO

26a Convención de Astronomía, Sabadell, 14 de Marzo 2025



Nanda Rea



European Research Council
Established by the European Commission



GOBIERNO
DE ESPAÑA

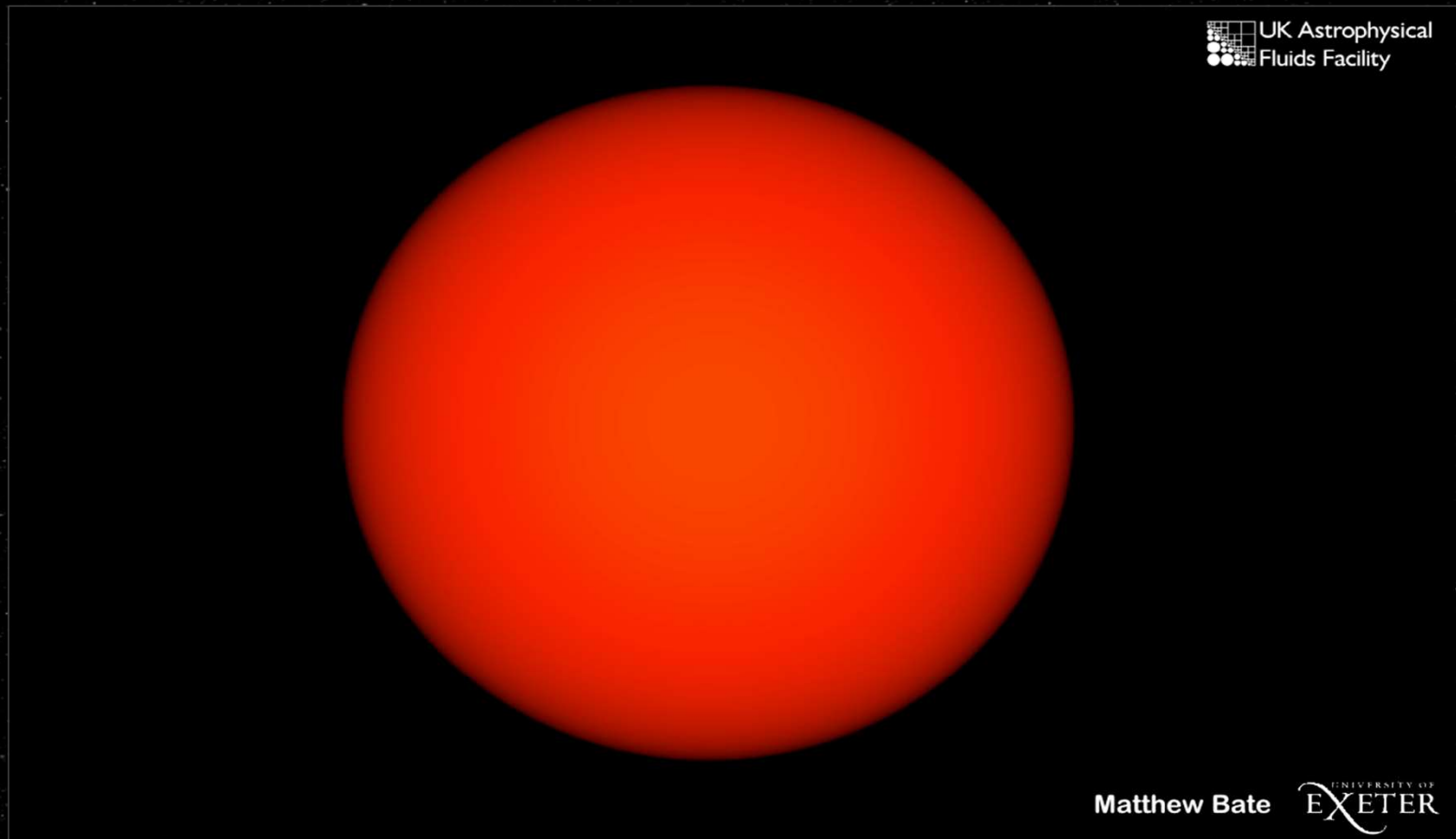
MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



Agència
de Gestió
d'Ajuts
Universitaris
i de Recerca



Formación de nuevas estrellas



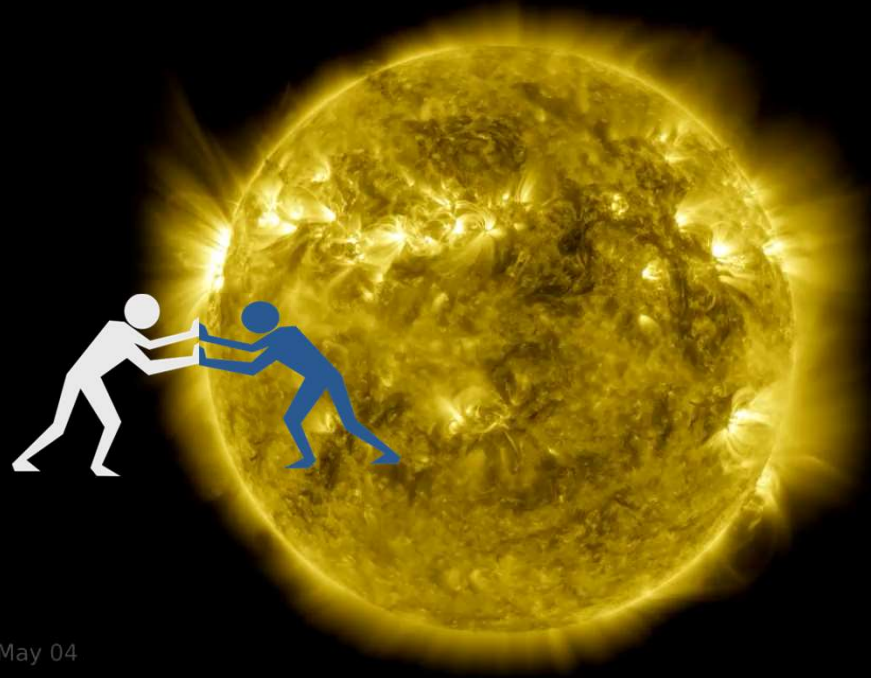
UK Astrophysical
Fluids Facility

Matthew Bate

UNIVERSITY OF
EXETER

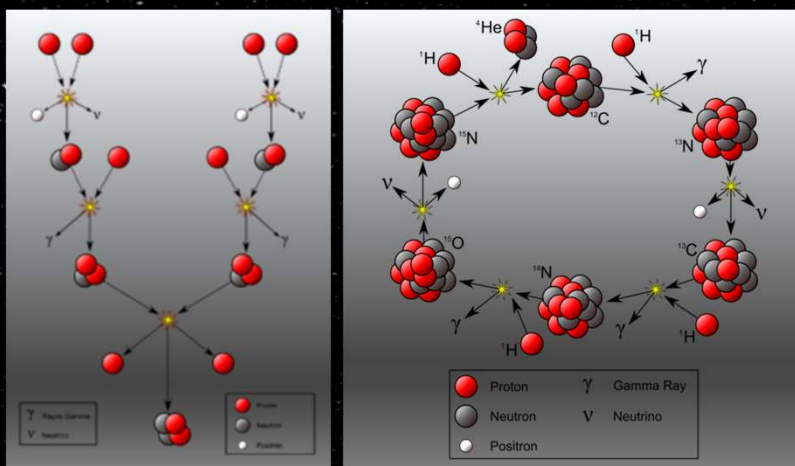
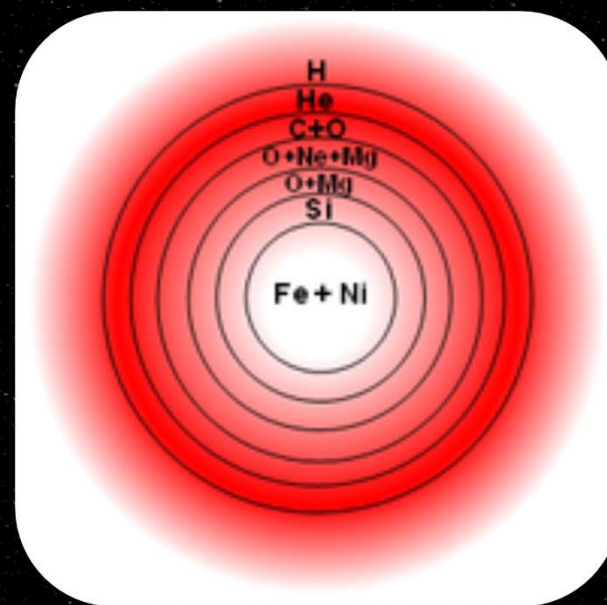
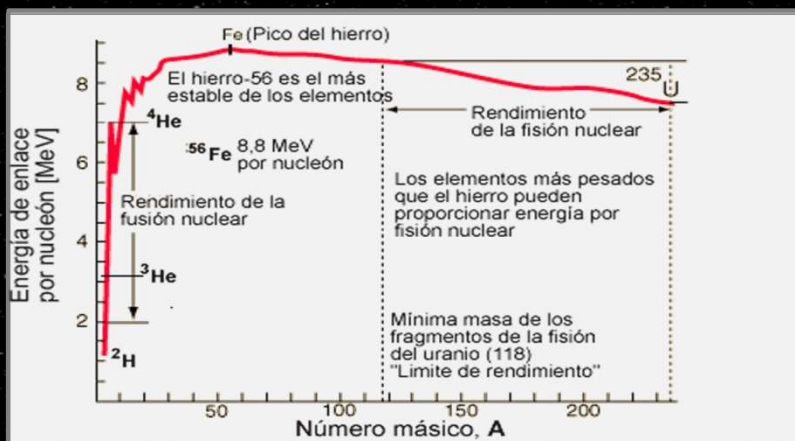
Formación de nuevas estrellas

Las estrellas tienen un tamaño dictado por el balance entre la gravedad y la **presión** debida a la producción de energía por fusión nuclear

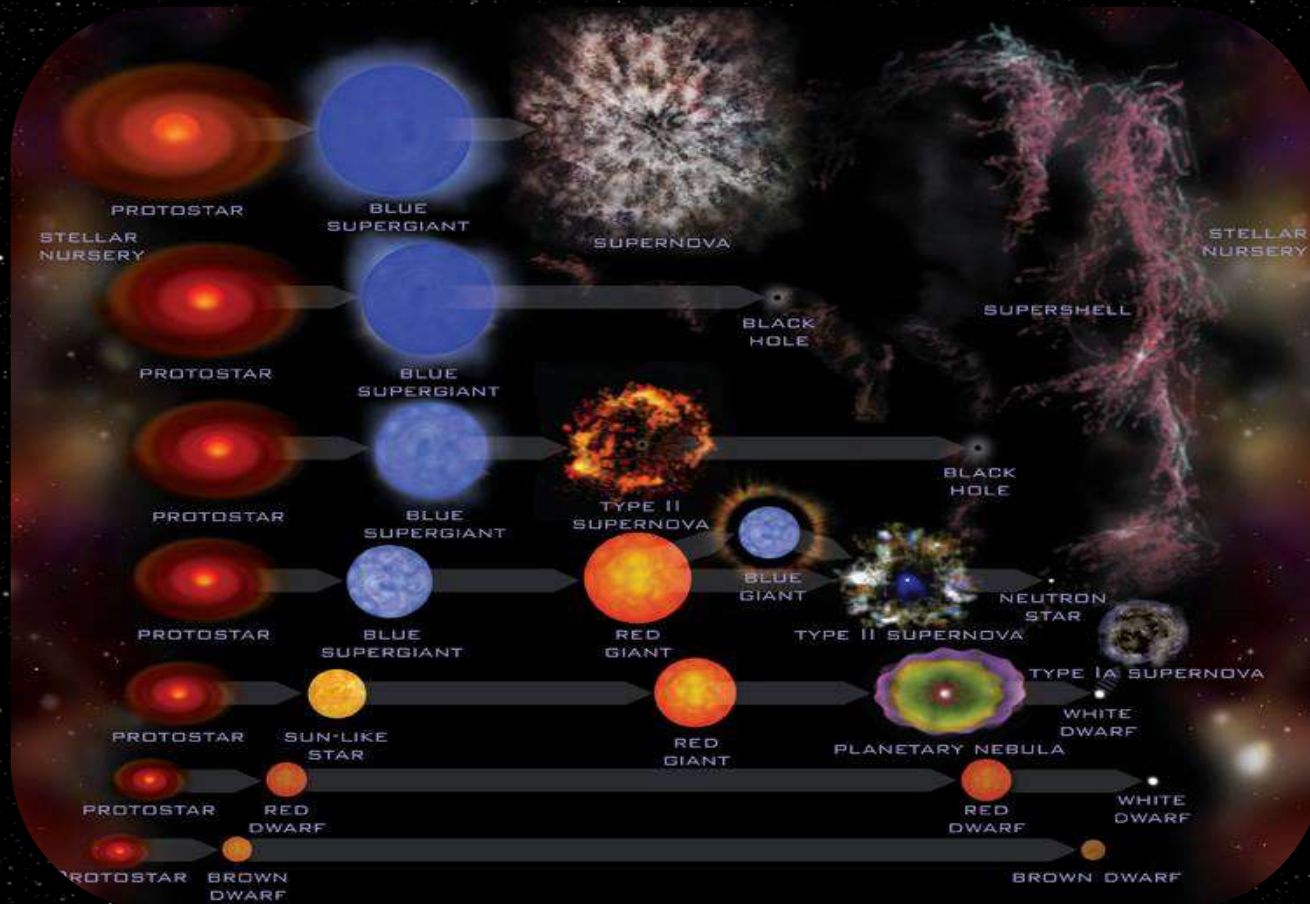


2011 May 04

Fusión nuclear en estrellas

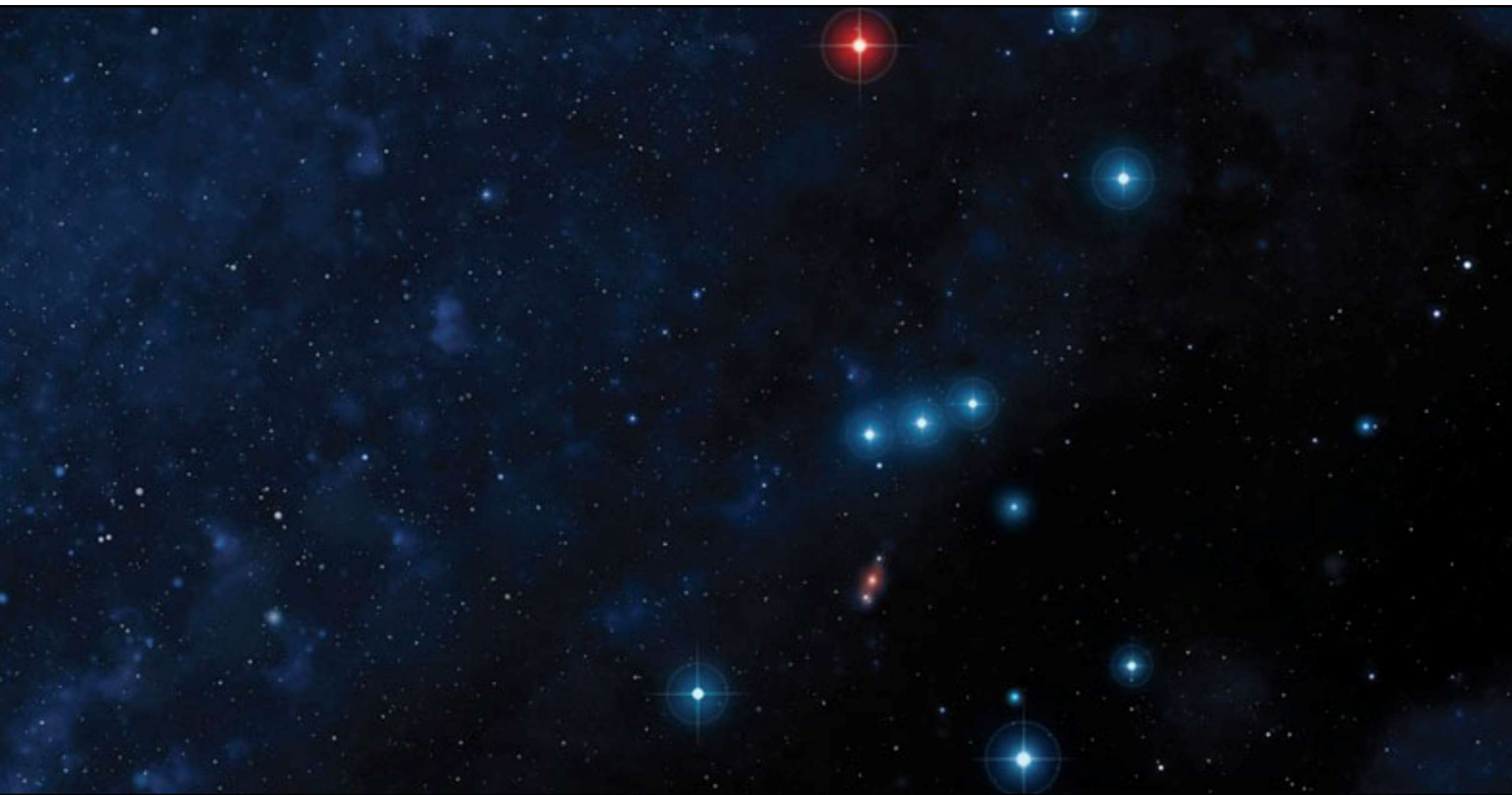


Todas las estrellas nacen parecidas pero viven
y mueren de forma distinta

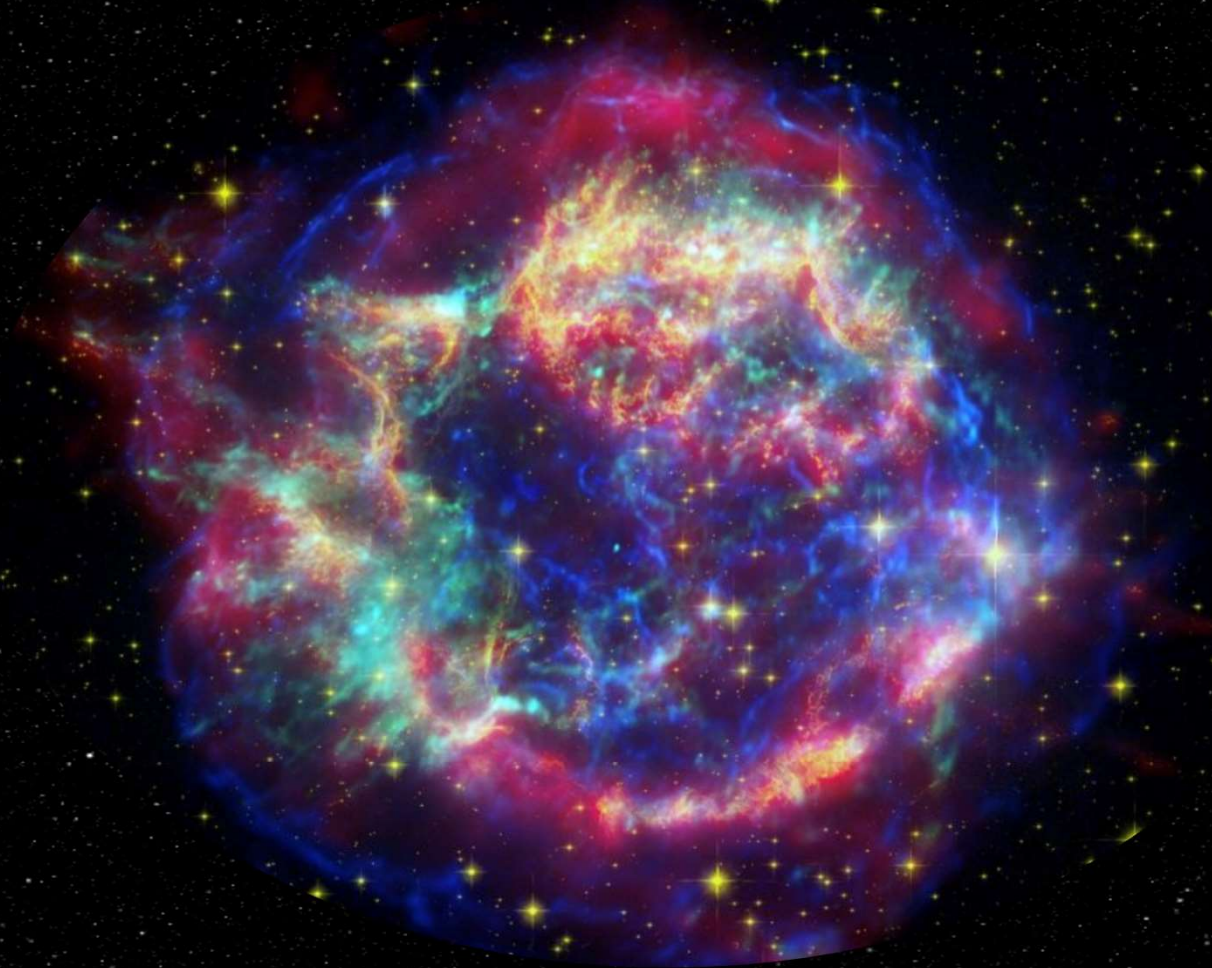


Estrellas medio-masivas (mas de 8 veces el Sol)
explotan en Supernovae de Tipo II o Ib,c





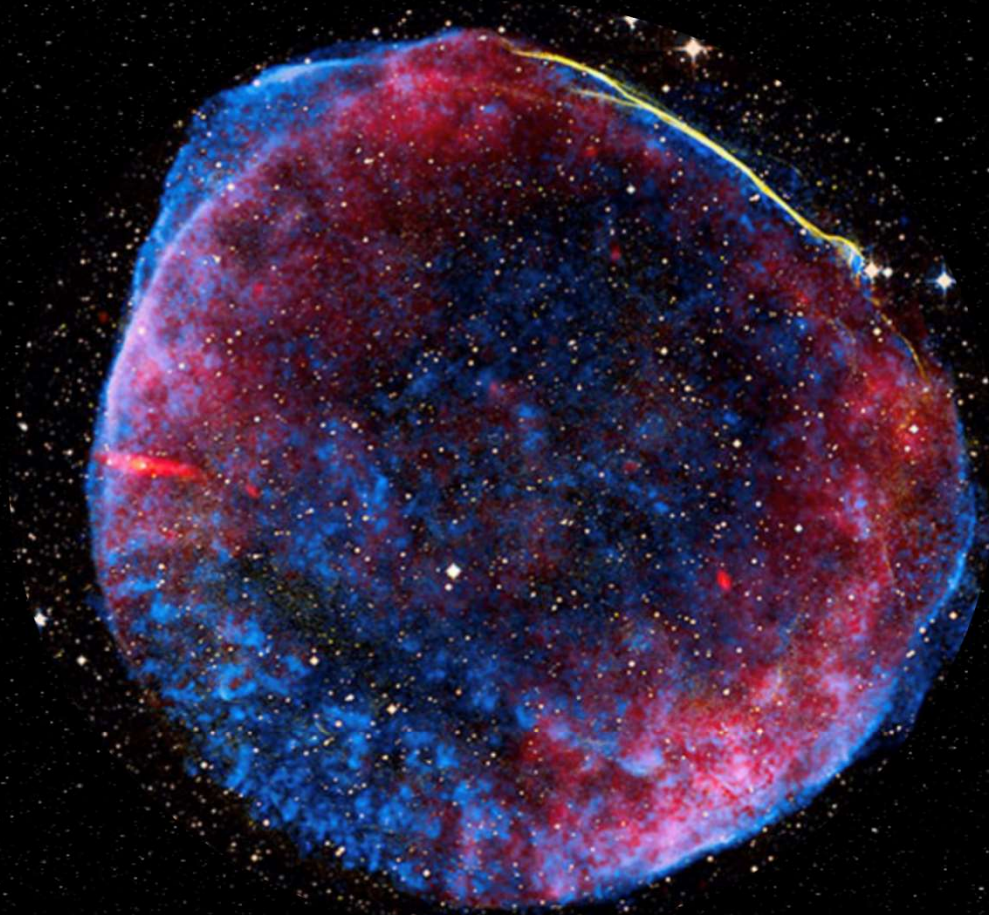
Remanentes de Supernovae



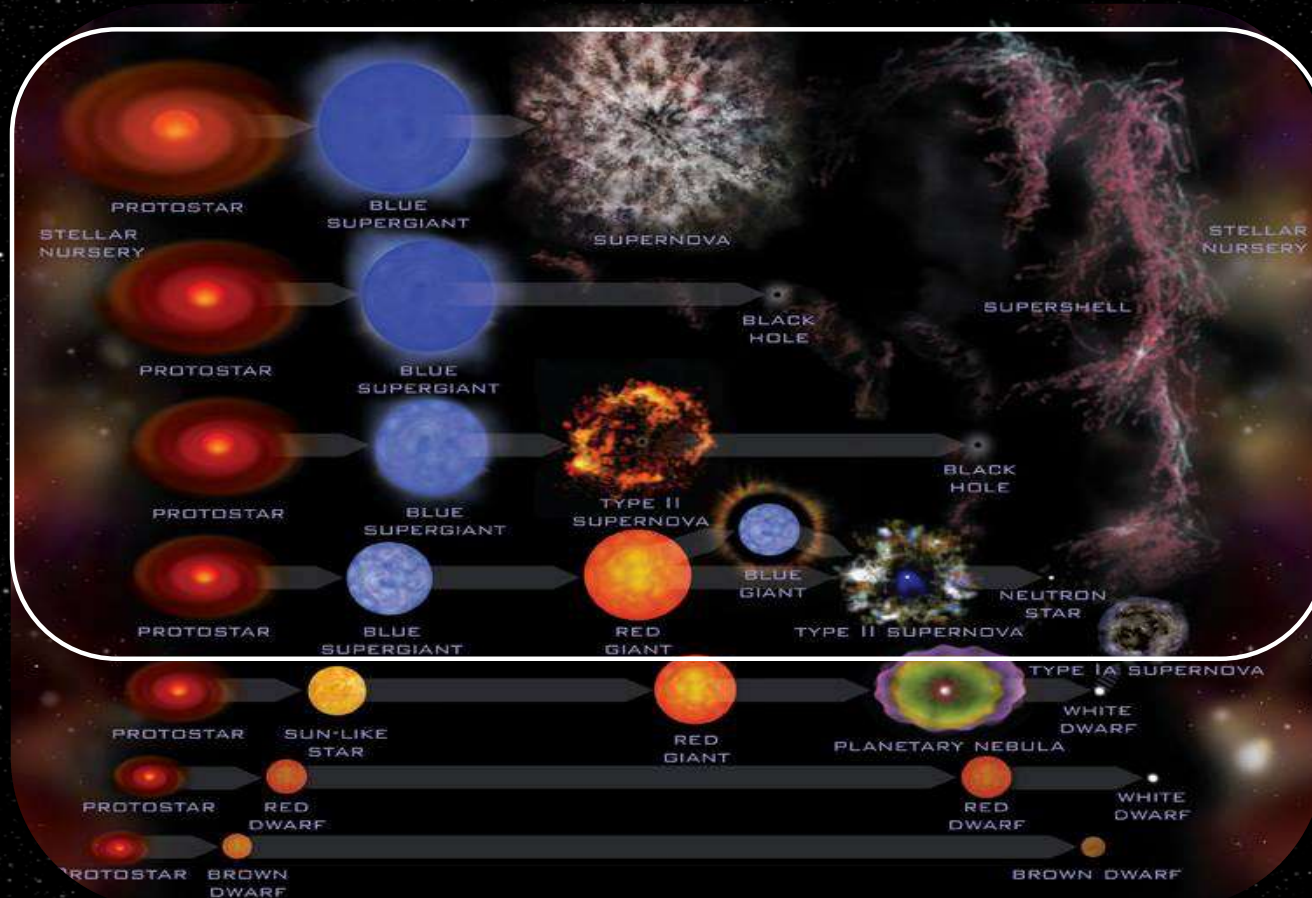
Remanentes de Supernovae



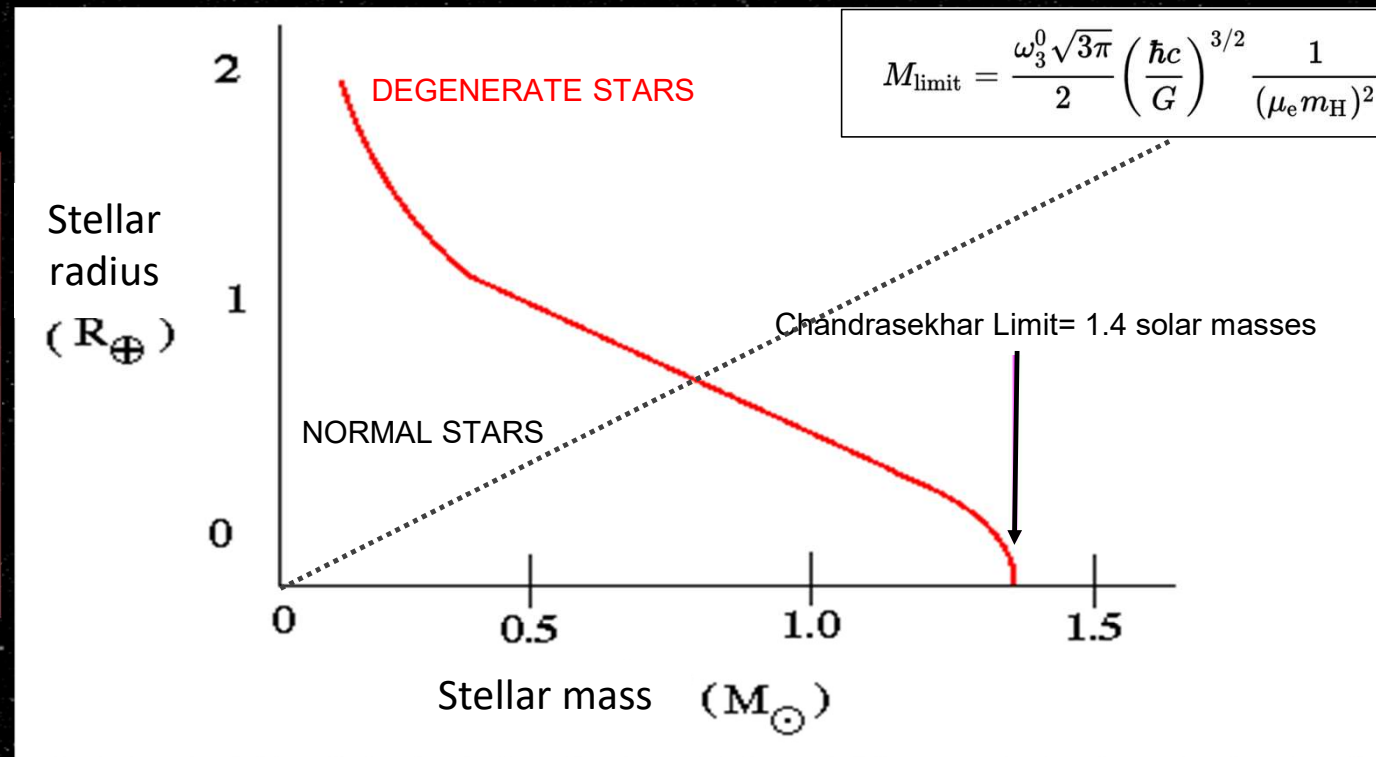
Remanentes de Supernovae



Estrellas de neutrons (púlsares y magnetares) y agujeros negros (estelares y super-masivos)



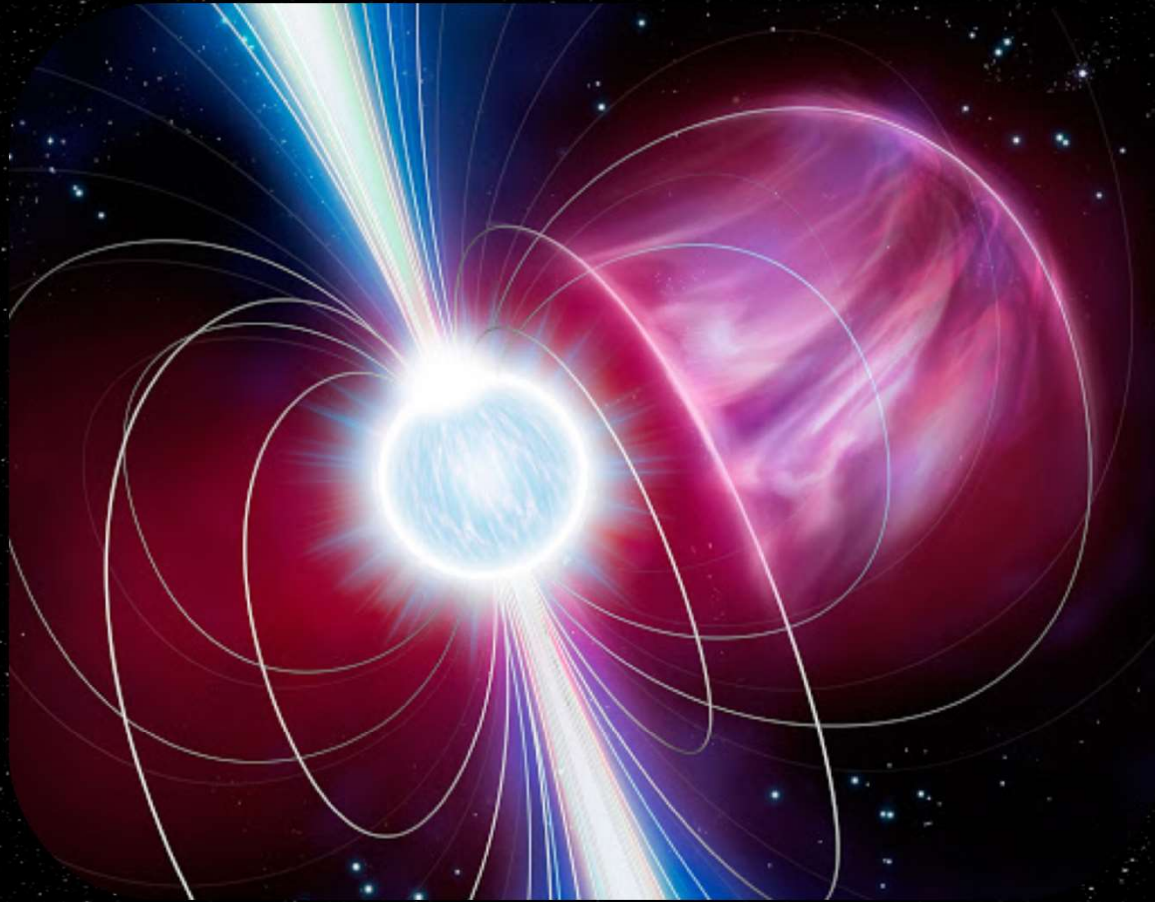
...más masa tienen más pequeñas se hacen?!



Estrellas de Neutrones: desde el exterior



Estrellas de Neutrones: desde el exterior



Premio Nobel 1974
a Hewish & Ryle

EARLY HISTORY

- **1931** Chandrasekhar argued that WDs collapse at masses $> 1.4 M_{\odot}$.
(Chandrasekhar 1931, ApJ)
- **1932** Chadwick discovers the neutron, recognized as a new elementary particle
(Chadwick 1932, proceedings of the RAS)
- **1934** Baade & Zwicky proposed the existence of NS, they predicted their formation due to supernova explosion and their radius of ~ 10 km.
(Baade & Zwicky 1934, Proc.Nat.Acad.Sci.)
- **1939** Oppenheimer & Volkoff defined the first equation of state for a NS of mass $\sim 1.4 M_{\odot}$, a radius of ~ 10 km and a density of $\sim 10^{14}$ gr/cm³
(Oppenheimer & Volkoff 1939, Phys.Rev)
- **1967** Pacini predicted electromagnetic waves from rotating NSs and that such star might be powering the Crab nebula. (Pacini 1967 and 1968, Nature)
- **1968** Jocelyn Bell studying interplanetary scintillation observed a periodicity of 1.337s, discovering the first pulsar: PSR 1919+21. (Hewish et al. 1968, Nature)

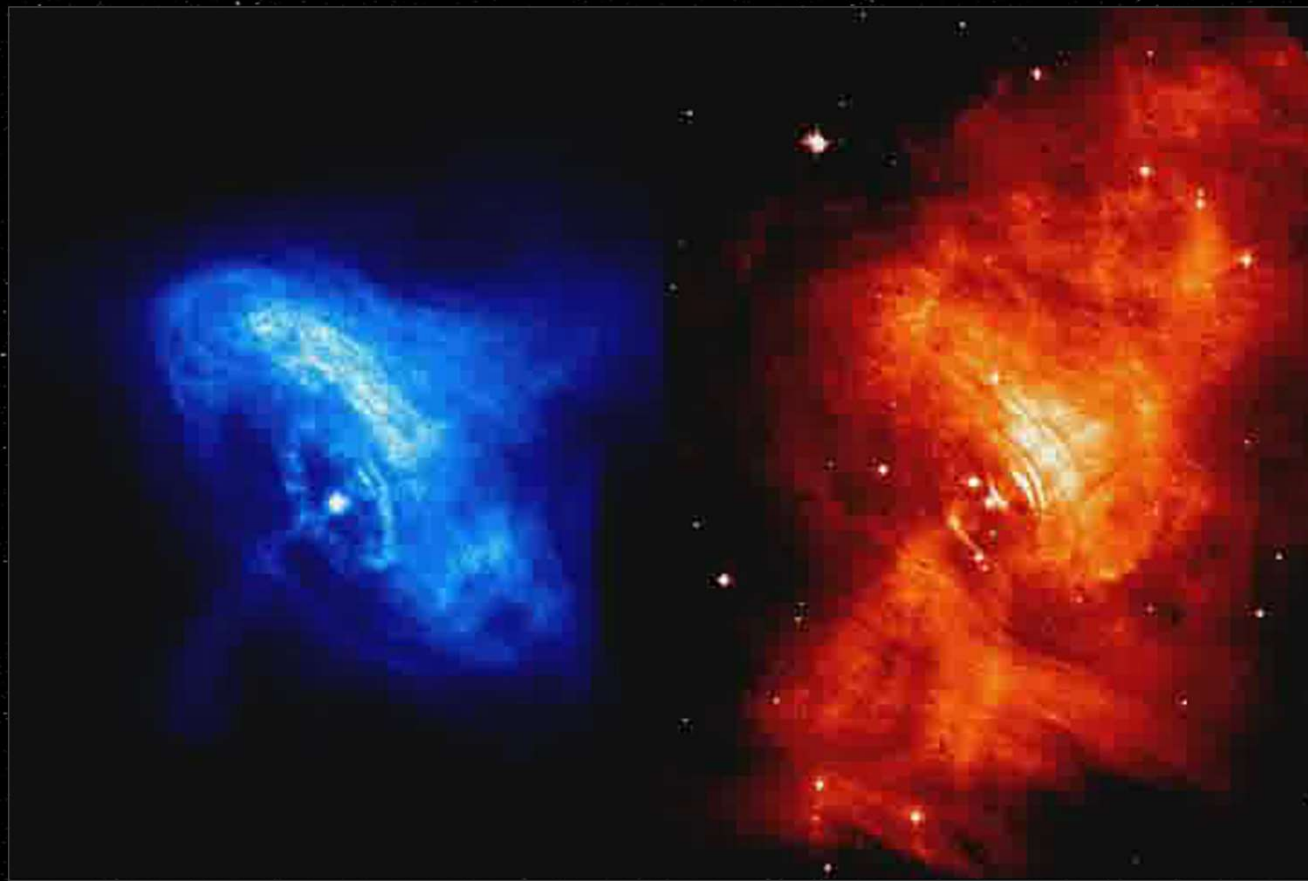


Estrellas de Neutrones: desde el exterior (los púlsares)



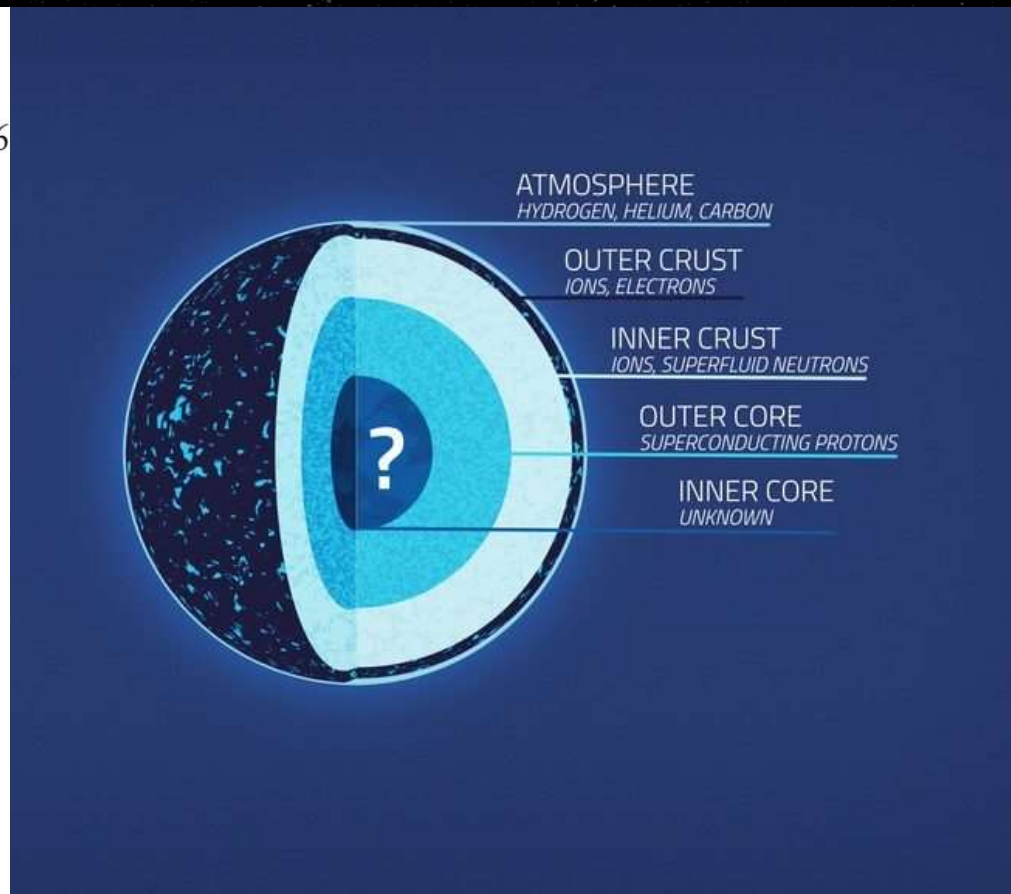
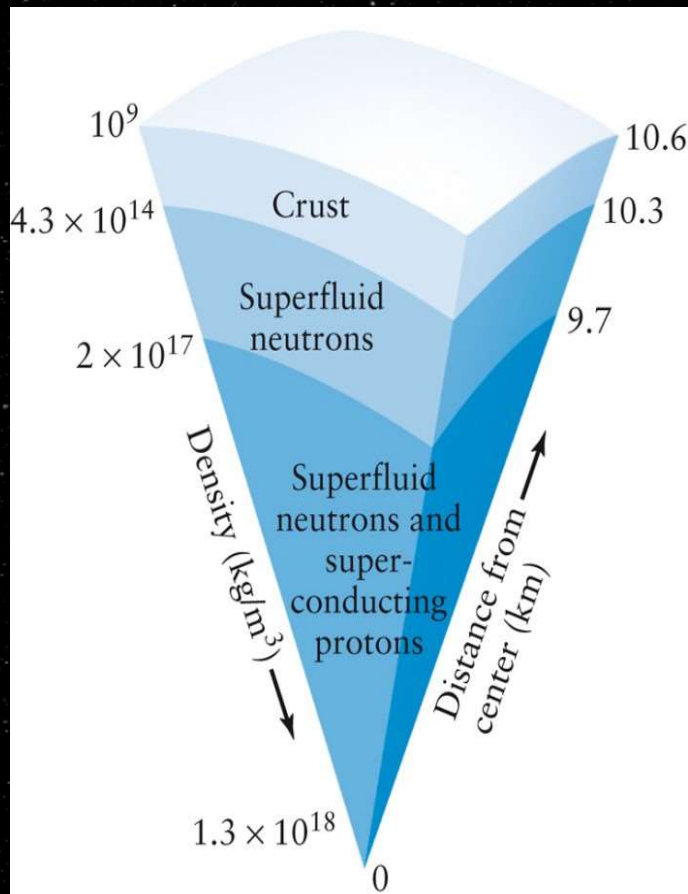
Viento de Púlsares

Chandra X-ray Observatory: banda X

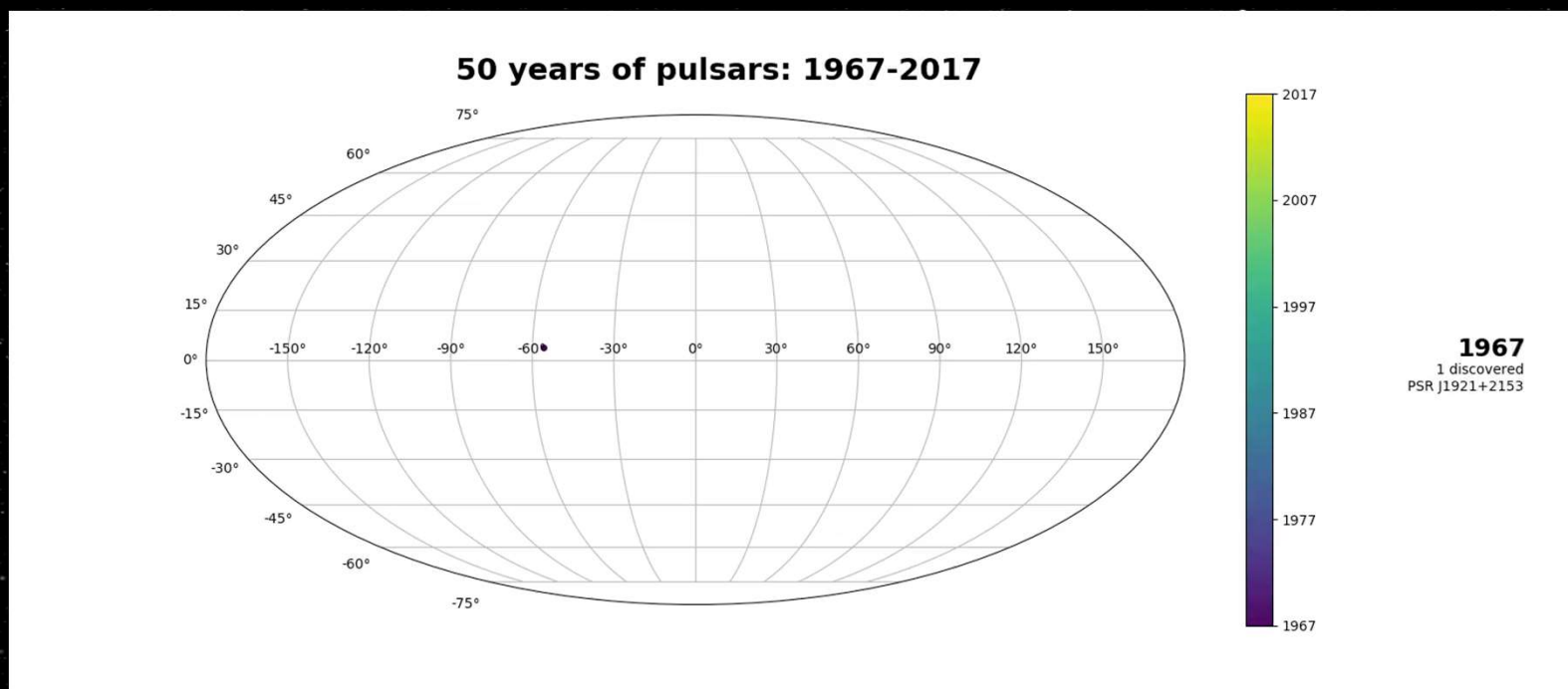


Hubble Space Telescope: banda óptica

Estrellas de Neutrones: desde dentro

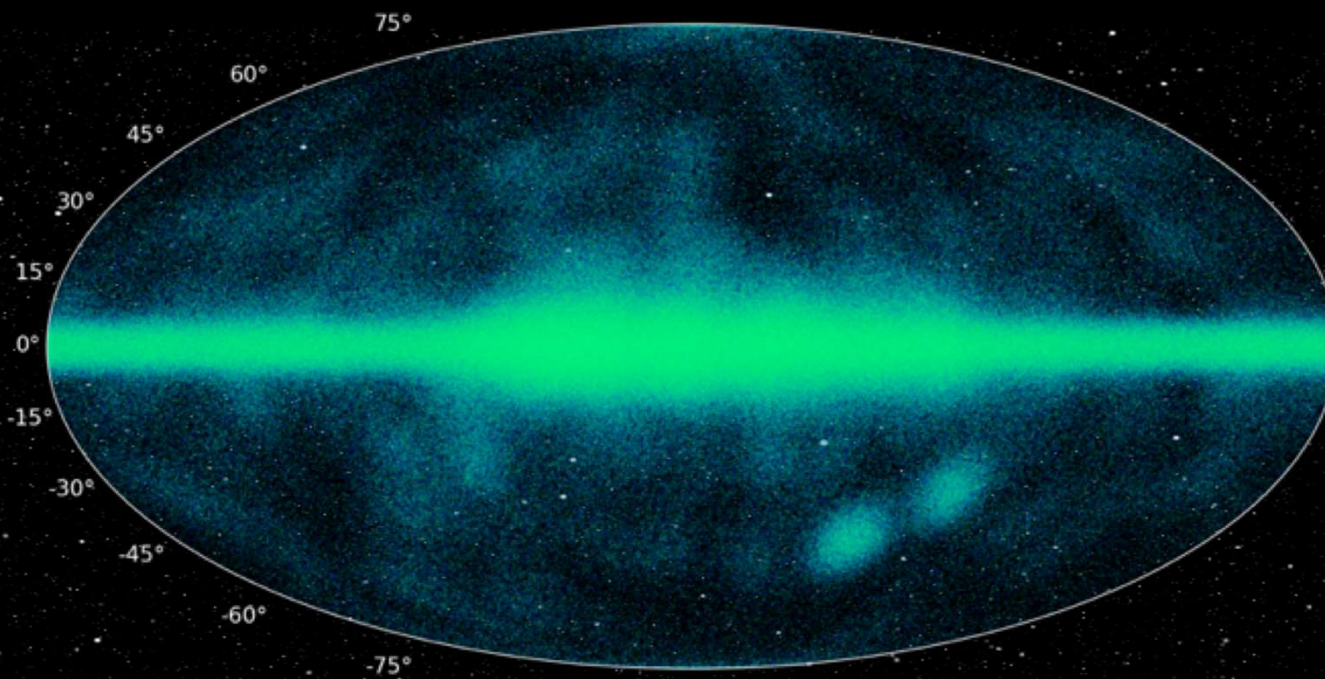


50 años de púlsares

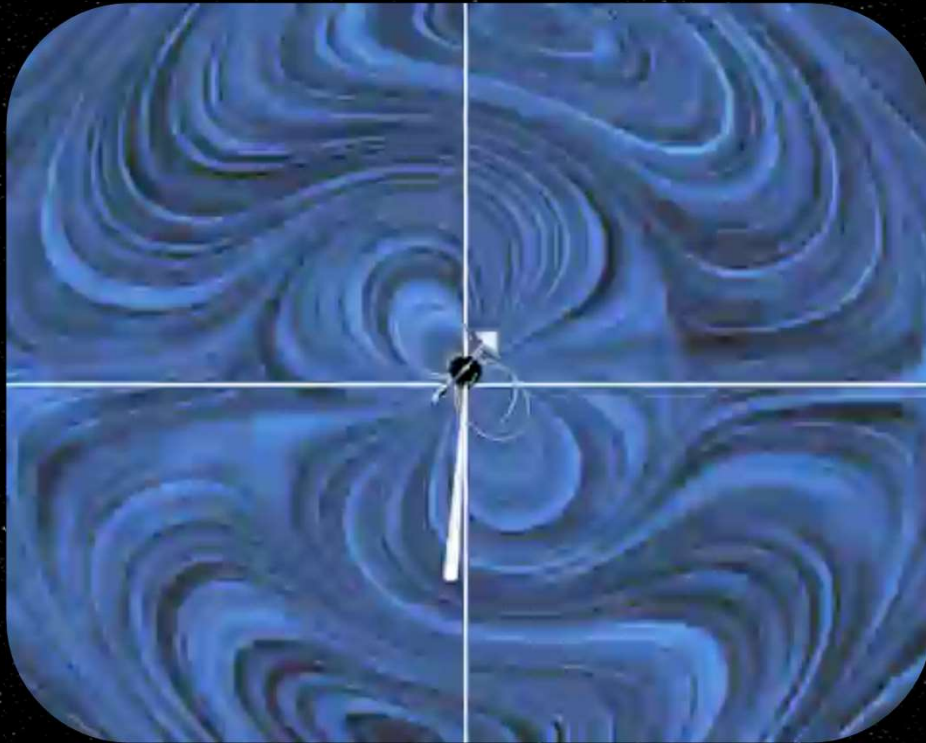


Rea 2017, Nature Astronomy, Vol. 1 p 827

Cuántos púlsares hay?



Como se mide el campo magnético de un púlsar



$$\dot{E}_{rot} = I_{ns} \Omega_s \dot{\Omega}_s = -\frac{4\pi^2 I_{ns} \dot{P}_s}{P_s^3}$$
$$P_{dip-rad} = -\frac{2}{3c^3} |\ddot{\mu}_d|^2 = -\frac{2(B_d R_{ns}^3 \sin(1+\alpha))^2 \left(\frac{4\pi^2}{P_s^2}\right)^2}{3c^3}$$

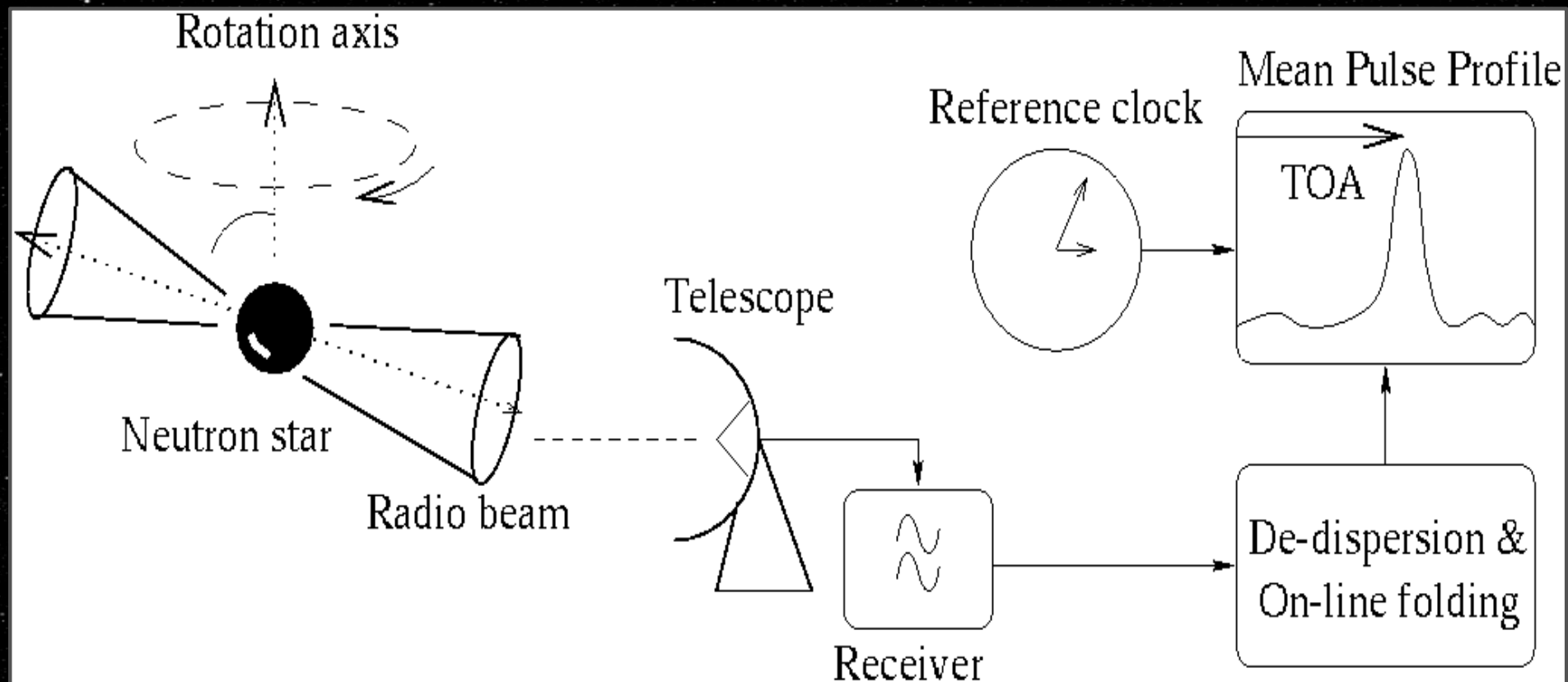


$$B = 3.2 \cdot 10^{19} \sqrt{P \dot{P}} \text{ Gauss.}$$
$$\tau = \frac{P}{2\dot{P}}$$

Los púlsares son los relojes más precisos!



Los púlsares son los relojes más precisos!



Los púlsares son los relojes más precisos!



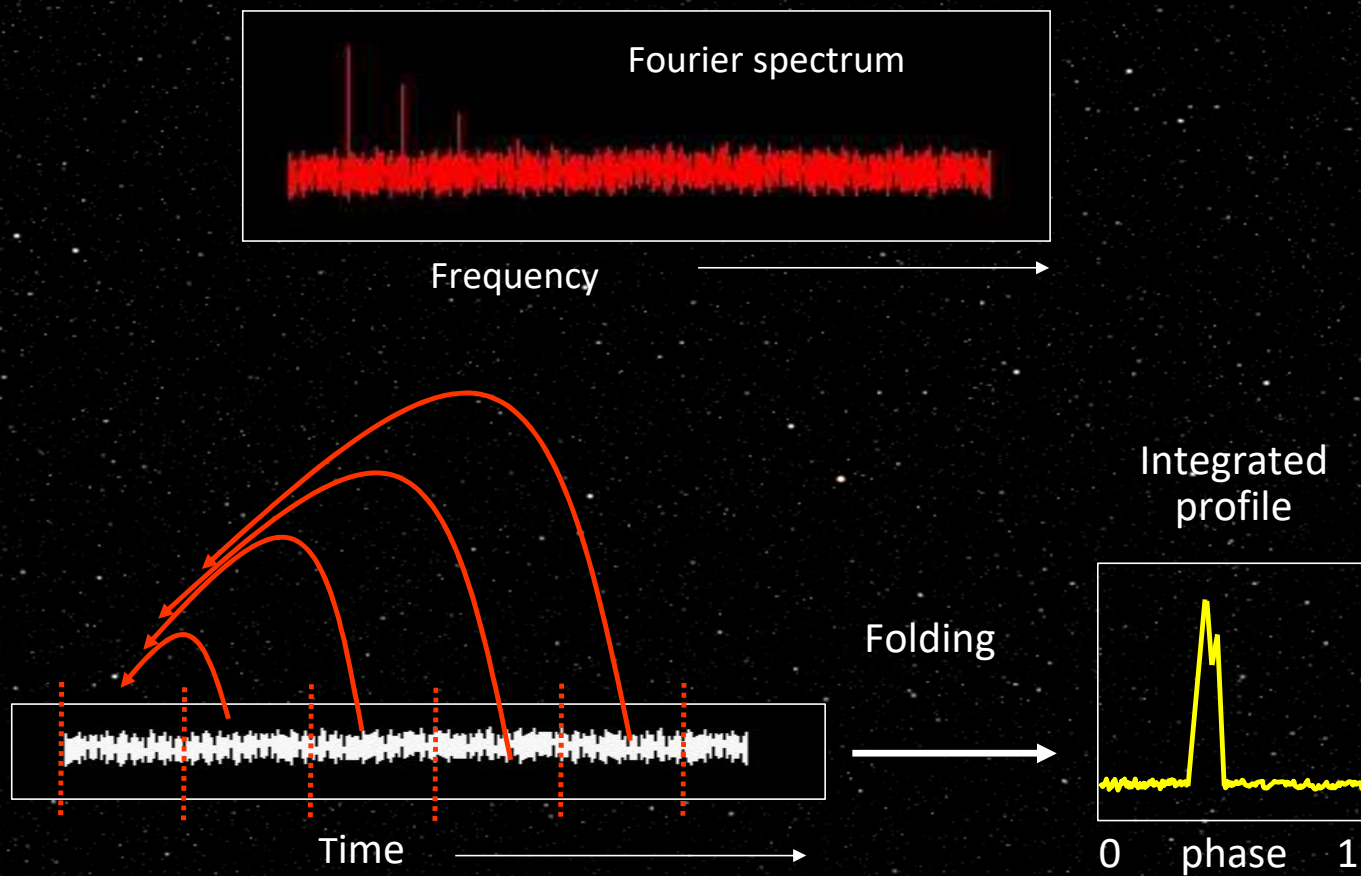
t_{begin}

t_{end}

digitization @ 1 or 2 or 4 or 8 or 16 bits

07346100374221775320153201532110233030367162

Los púlsares son los relojes más precisos!



Los púlsares son los relojes más precisos!



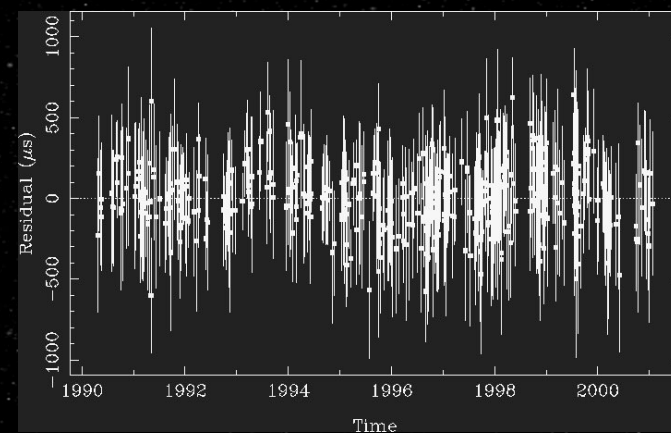
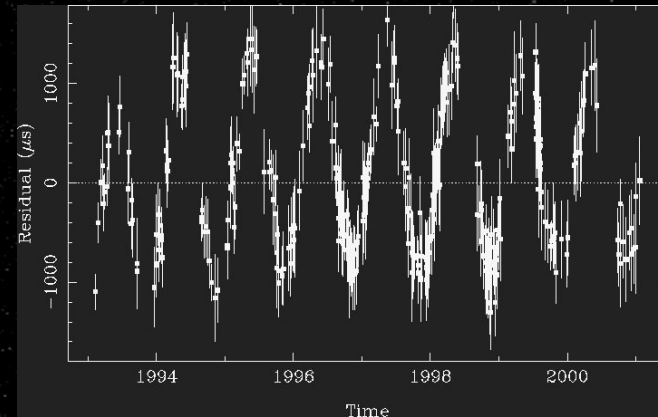
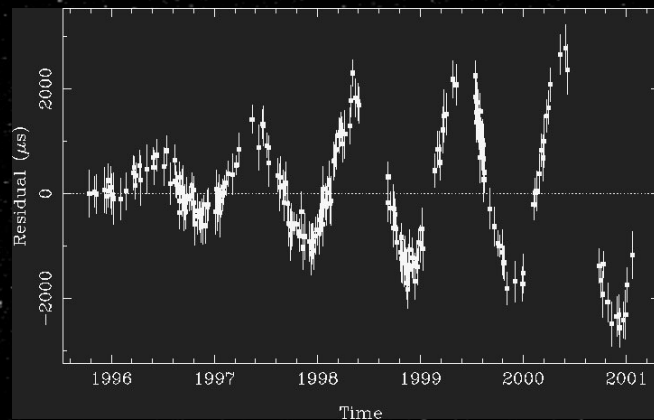
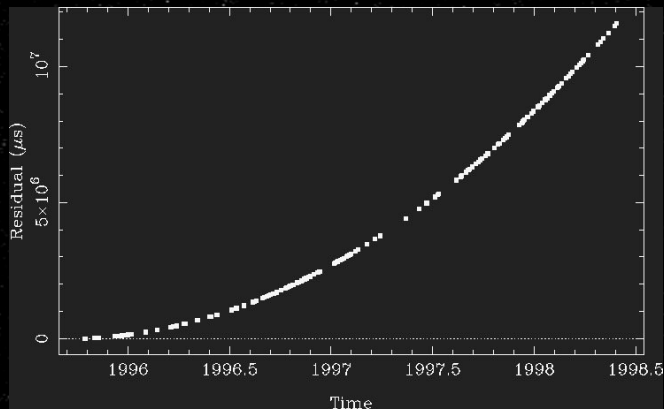
PSR J0437-4715 por ejemplo tiene un periodo de:

0.00575745192436238 ± 0.000000000000000005 s



17 dígitos!

Que pinta tienen los datos de los pulsares



- Medidas de rotación: spin, primera derivada, segunda derivada...
- Medidas de astrometria: posición, moto propio, parallax

El sonido de los púlsares



PSR B0833-45 (Vela Pulsar): rotando con un periodo de 89 milisegundos (11 veces por segundo).



PSR B0531+21 (Crab Pulsar): rotando con un periodo de 33 milisegundos (30 veces por segundo).



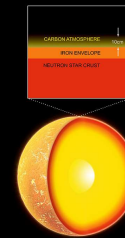
PSR J0437-4715: sistema binario rotando 174 veces por segundo.



PSR B1937+21 (el púlsar en Fa bemol): rotando con un periodo de 0.00155780644887275 segundos (642 veces por segundo).

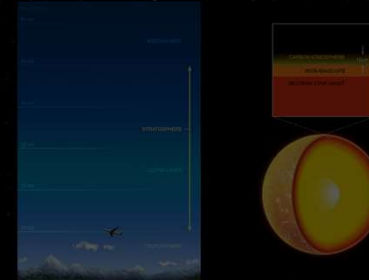
Guinness!

El cuerpo celeste más denso conocido hasta la fecha: Tan denso como el núcleo atómico, con una presión central de 100000000000000000000000000 veces la de la atmósfera terrestre.

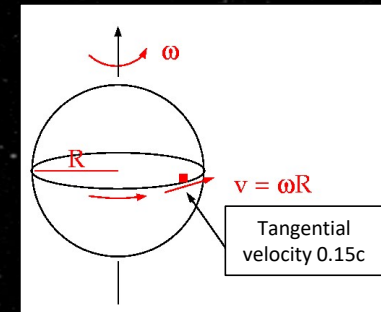


Guinness!

El cuerpo celeste más denso conocido hasta la fecha: Tan denso como el núcleo atómico, con una presión central de 10000000000000000000000000 veces la de la atmósfera terrestre.

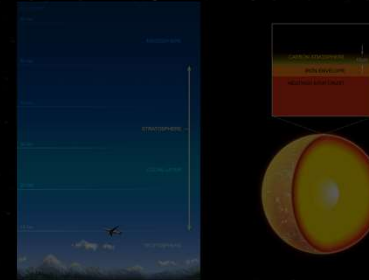


El cuerpo celeste con mayor velocidad de rotación conocido en el Universo: $1.3959546744700354 \pm 0.0000000000000003 \text{ ms}$

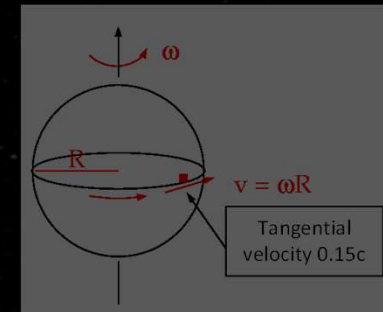


Guinness!

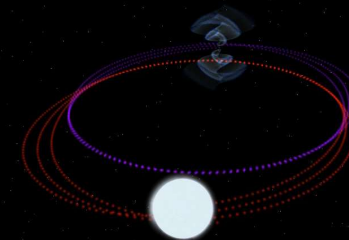
El cuerpo celeste más denso conocido hasta la fecha: Tan denso como el núcleo atómico, con una presión central de 1000000000000000000000000 veces la de la atmósfera terrestre.



El cuerpo celeste con mayor velocidad de rotación conocido en el Universo: $1.3959546744700354 \pm 0.00000000000000003 \text{ ms}$



El círculo más redondo conocido en el Universo: Corresponde a la órbita de un púlsar alrededor de una estrella convencional: La trayectoria del PSR J1909-3744 es circular con una precisión de 5 micras (1/10 del grosor de un cabello humano).



Guinness!

El reloj más estable del Universo: La señal de un púlsar es más precisa y estable que cualquier reloj atómico y cuántico construido.

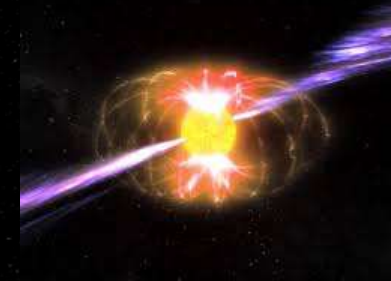


Guinness!

El reloj más estable del Universo: La señal de un púlsar es más precisa y estable que cualquier reloj atómico y cuántico construido.



Los objetos más magnéticos del Universo: El magnetar SGR 1806-20 tiene un campo magnético 100.000.000 veces más intenso que el campo B más potente producido en la tierra.

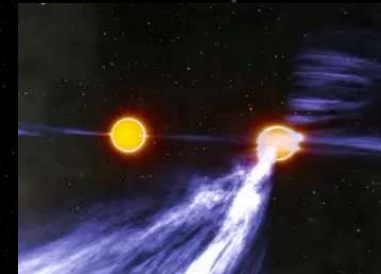


Guinness!

El reloj más estable del Universo: La señal de un púlsar es más precisa y estable que cualquier reloj atómico y cuántico construido.

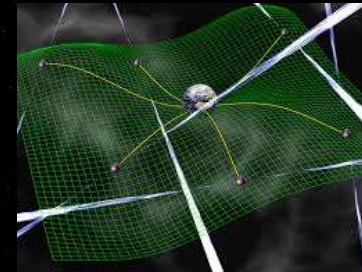
Los objetos más magnéticos del Universo: El magnetar: el SGR 1806-20 tiene un campo magnético 100.000.000 veces más intenso que el campo B más potente producido en la tierra.

Los test de relatividad general más precisos: Un sistema binario de púlsares sostiene el record Guinness de haber verificado la relatividad general a un 0.05% de nivel de confianza. Einstein está en lo cierto de momento...



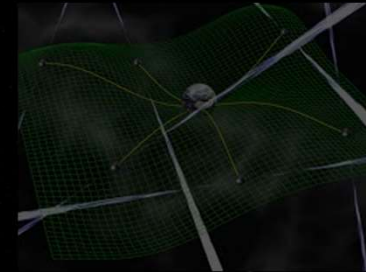
Guinness!

El detector de ondas gravitacionales más económico:
Observando de manera regular púlsares de milisegundos
podríamos detectar ondas gravitacionales (International
Pulsar Timing Array)

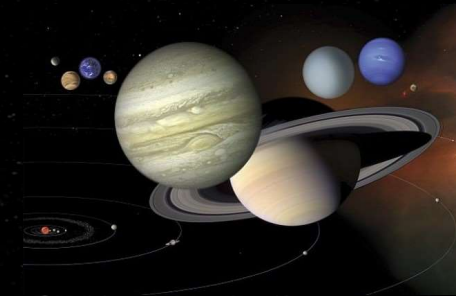


Guinness!

El detector de ondas gravitacionales más económico:
Observando de manera regular púlsares de milisegundos
podríamos detectar ondas gravitacionales (International
Pulsar Timing Array)

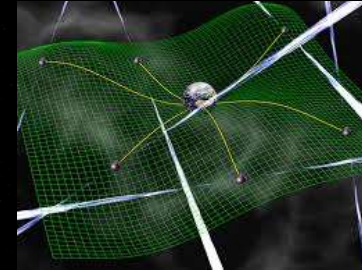


El sistema más económico para determinar masas de planetas
del Sistema Solar: Observando púlsares periódicamente
permite medir masas de planetas de forma tan precisa como
lo harían satélites dedicados a esta tarea.



Guinness!

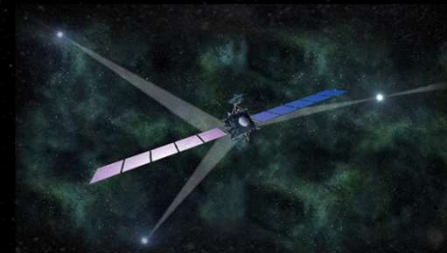
El detector de ondas gravitacionales más económico: Observando de manera regular púlsares de milisegundos podríamos detectar ondas gravitacionales (International Pulsar Timing Array)



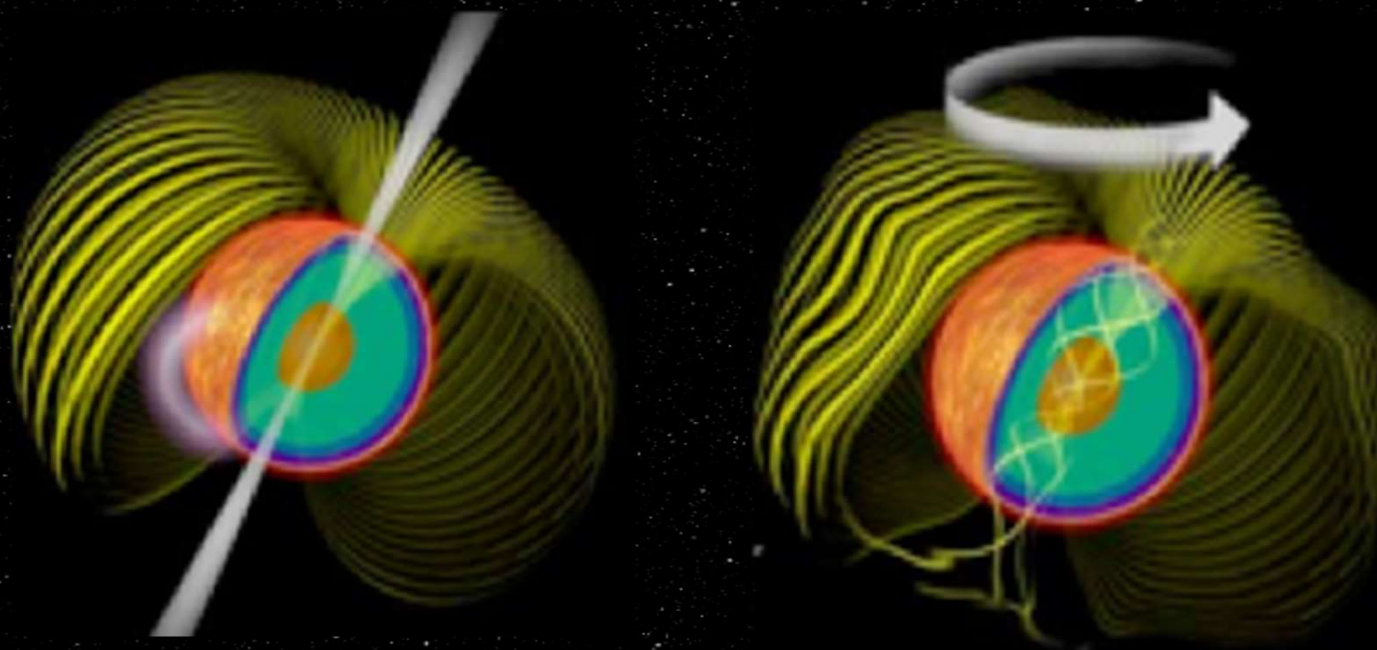
El sistema más económico para determinar masas de planetas del Sistema Solar: Observando púlsares periódicamente permite medir masas de planetas de forma tan precisa como lo harían satélites dedicados a esta tarea.



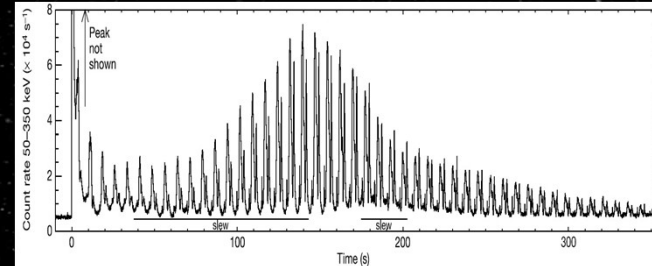
Nuestro futuro sistema de posicionamiento GPS en el espacio: Los púlsares proporcionan relojes tan precisos que servirán como nuestro único sistema de posicionamiento al viajar por el espacio sin conexión con la Tierra.



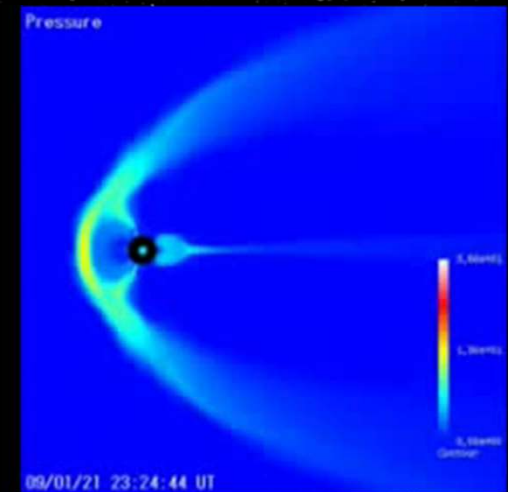
Los magnetares tienen
un campo magnético retorcido y enrollado!



Explosiones magnéticas de los magnetares!



Explosión del 27 de diciembre 2004 que afectó la ionosfera de la Tierra!



Imanes en el Universo

1 G Campo magnético de la Tierra en el Polo Norte

100 G Típico imán-juguete comercial

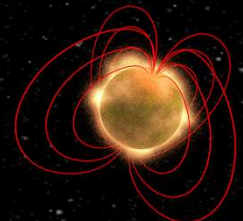
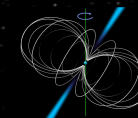
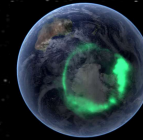
10000 G Campo magnético de una resonancia magnética

10000000 G Campo magnético más alto generado jamás

100000000000000 G Campo magnético típico de un pulsar normal

4400000000000000 G “Límite cuántico” de campo magnético

.... y hay más: los magnetares!

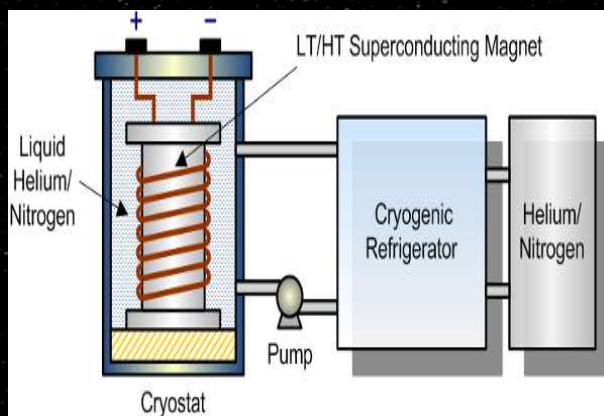


Aplicaciones?

Aplicaciones?



Tren de levitación magnética

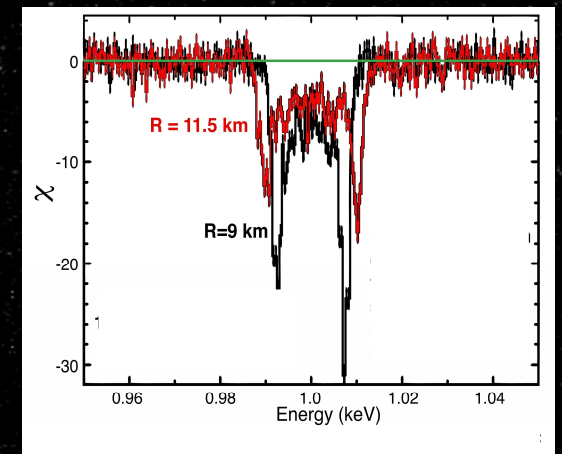
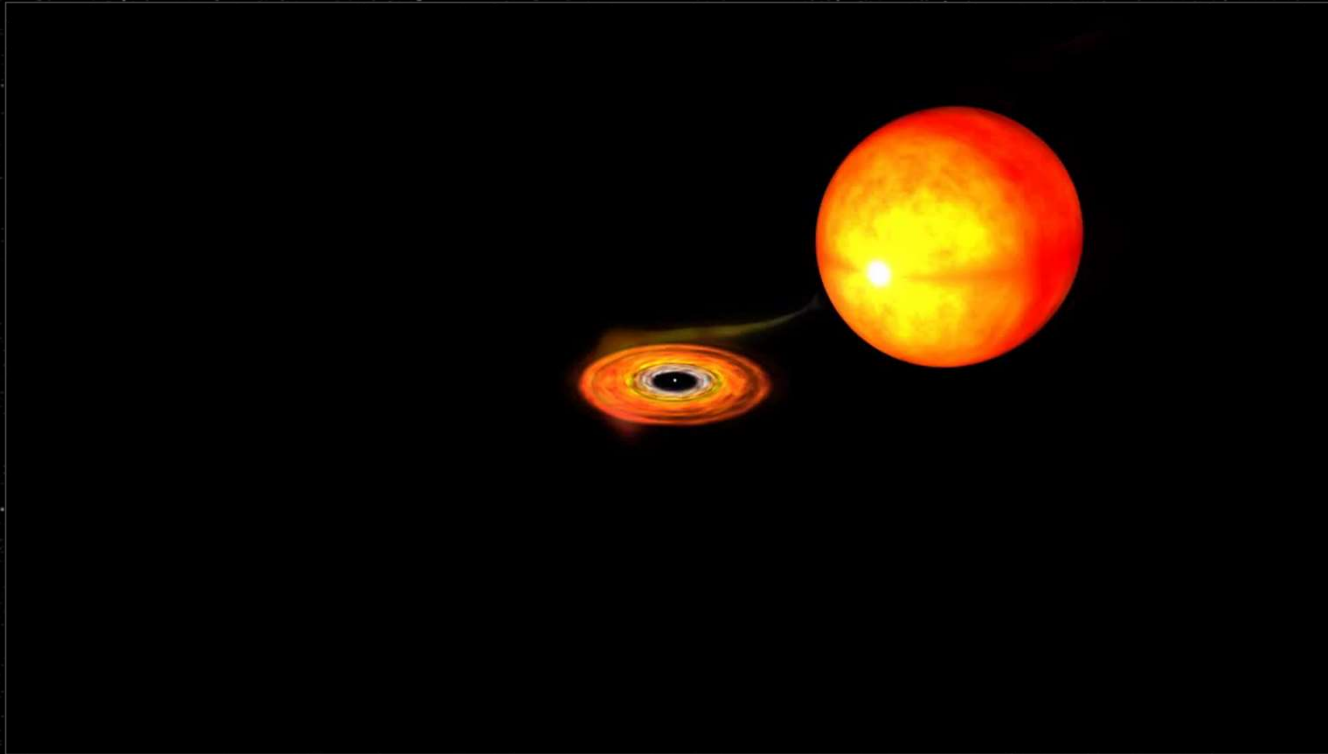


Almacenamiento de energía por superconductores magnéticos



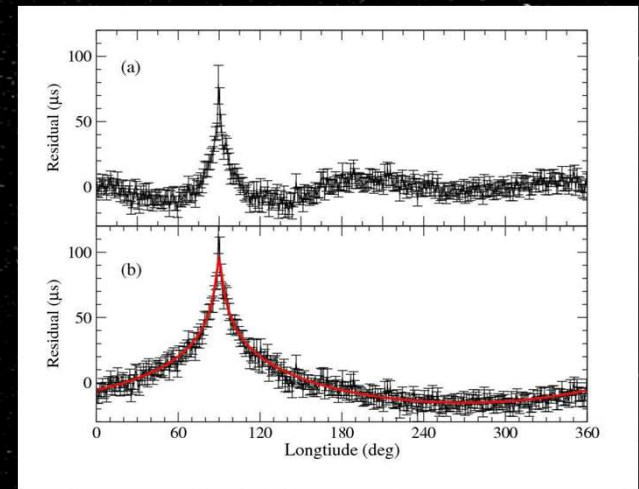
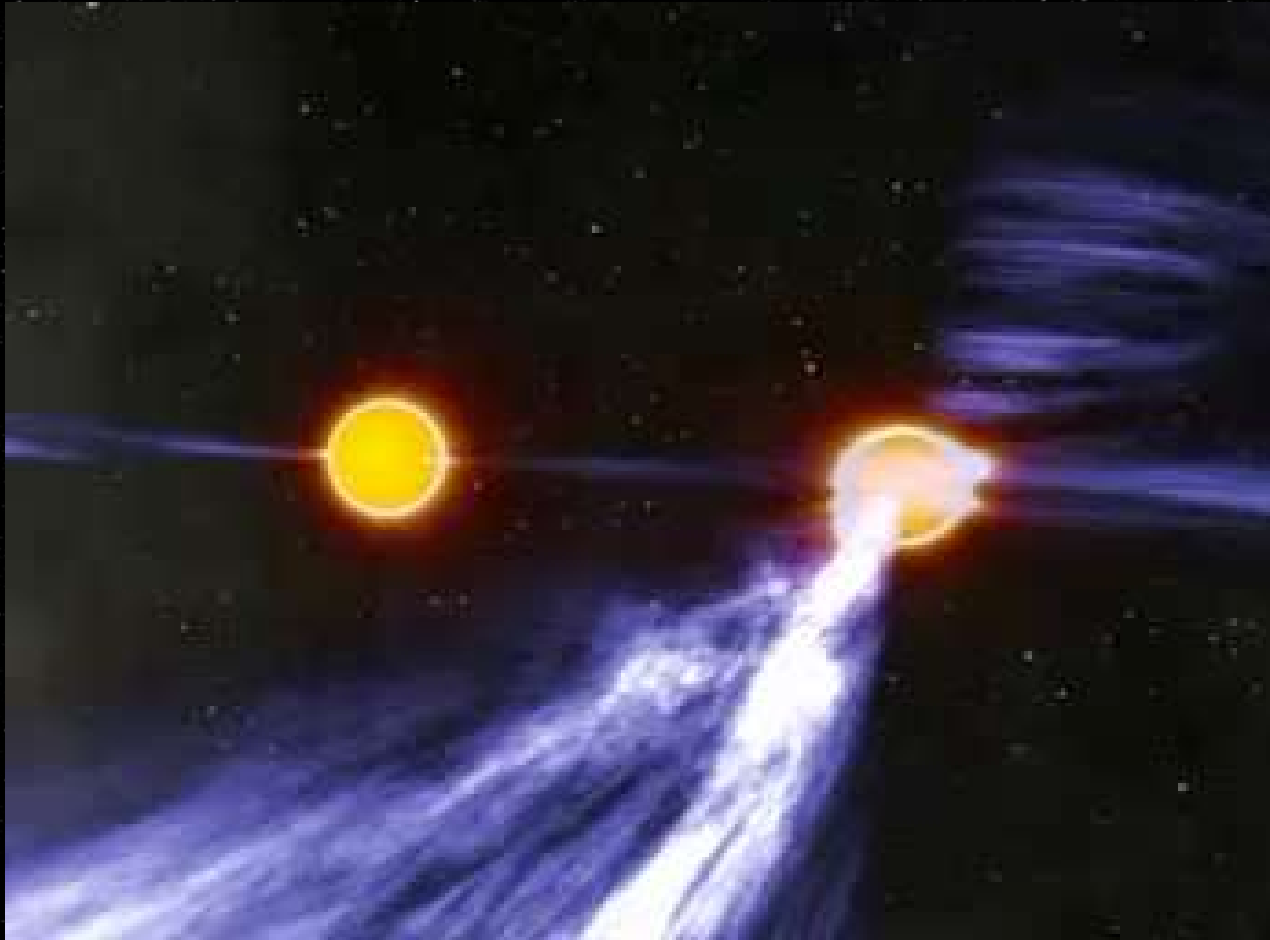
Resonancia magnética y nuclear, y otros dispositivos médicos

Púlsares en sistemas binarios



(Mendez et al. 2000)

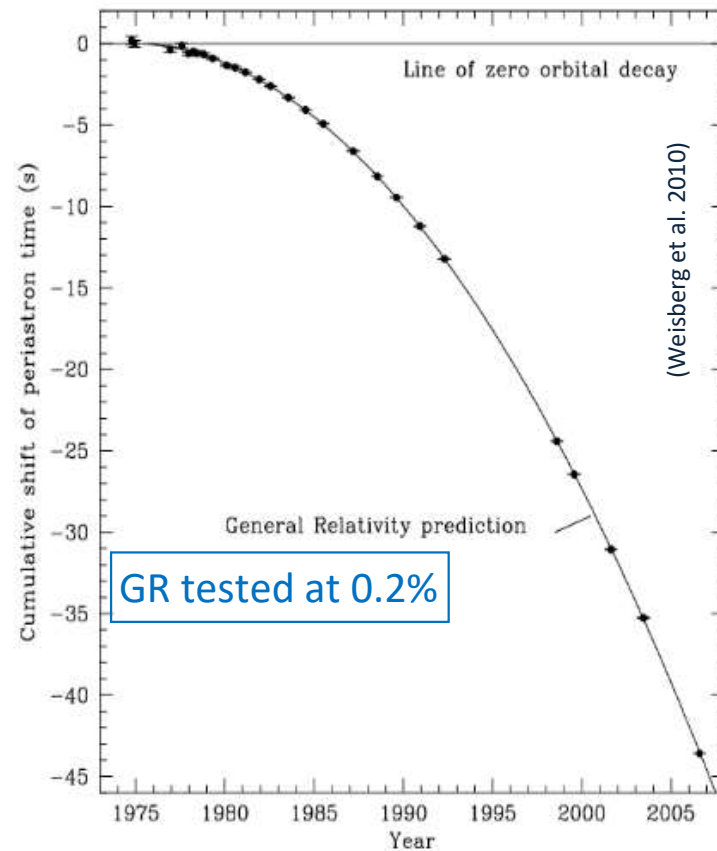
Sistemas binarios de dos púlsares



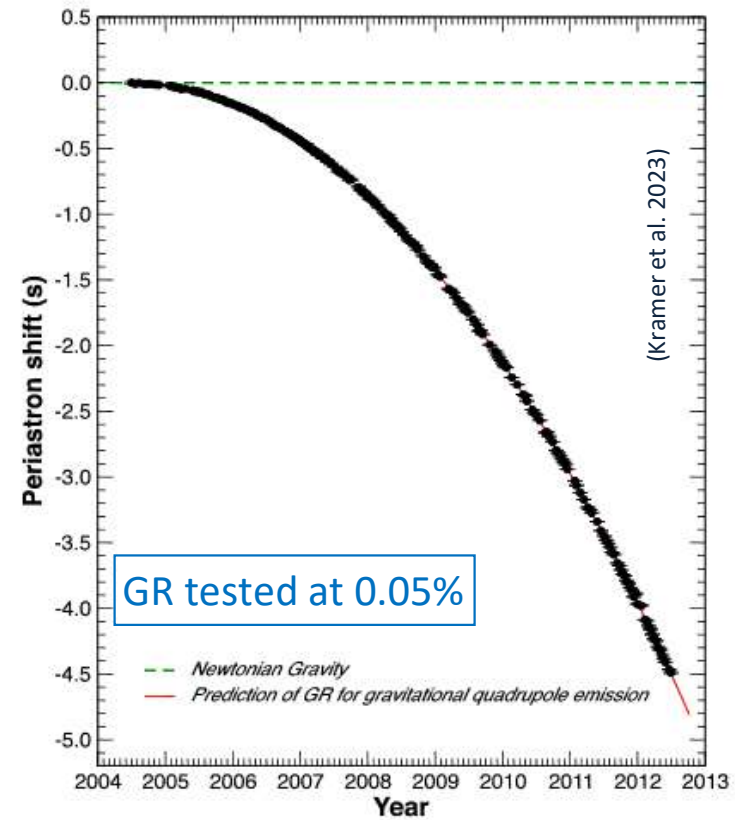
(Kramer et al. 2006)

Sistema binario de púlsar milisegundo y tests de RG

PSR B1913+16

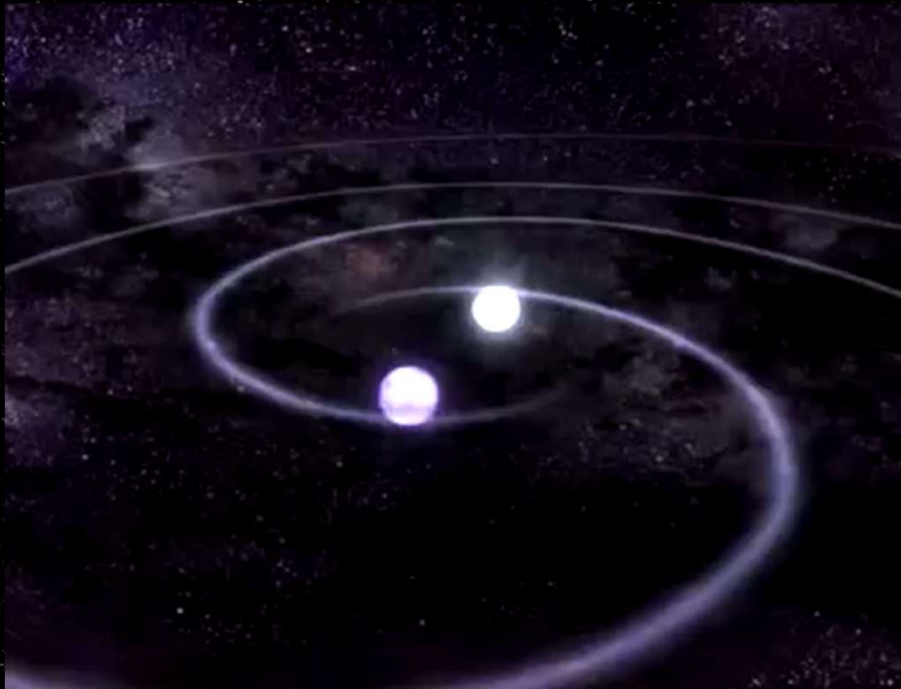


PSR J0737-3039

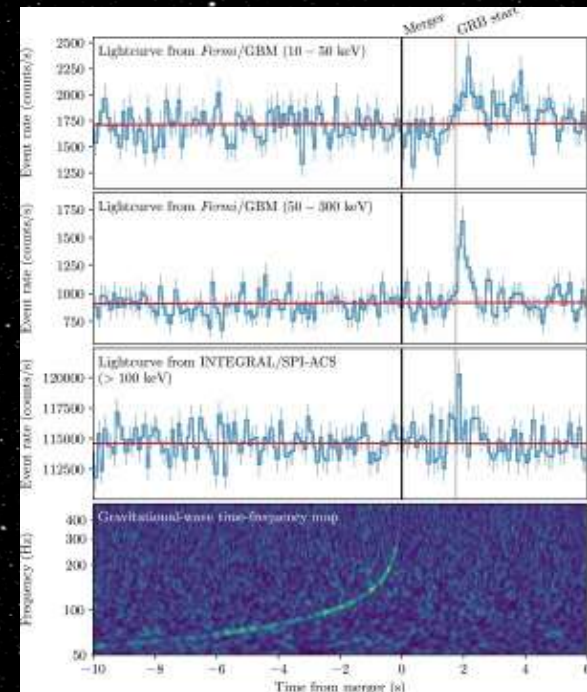


Premio Nobel 1993
a Hulse & Taylor

Colisiones de estrellas de neutrones: explosiones de rayos gamma y ondas gravitacionales

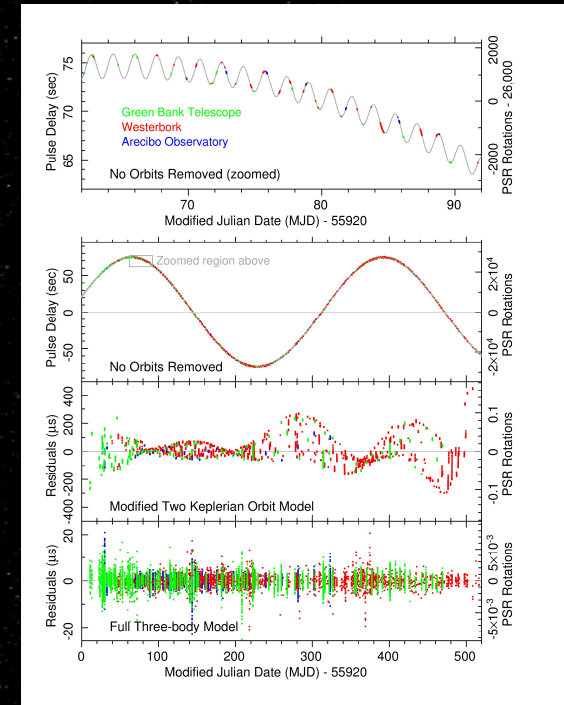
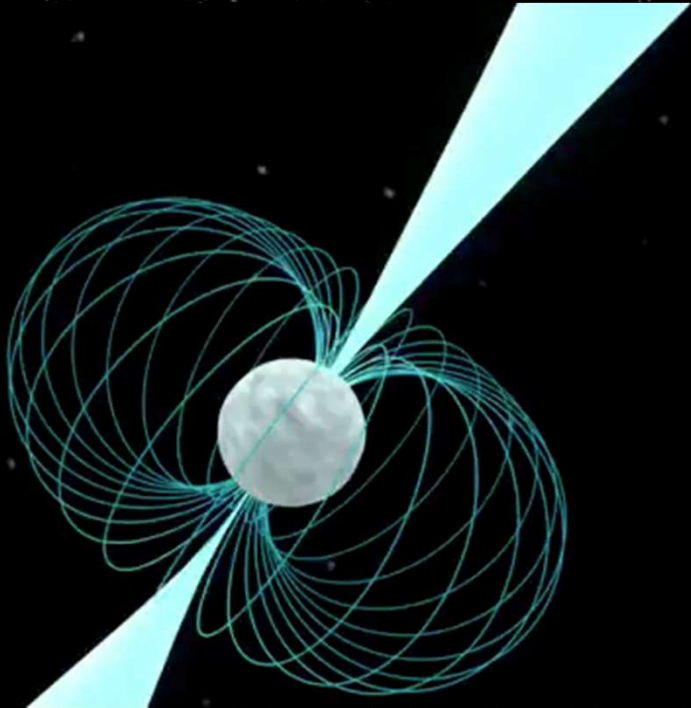


...casi Premio Nobel 2017 a
Barish, Weiss & Thorne



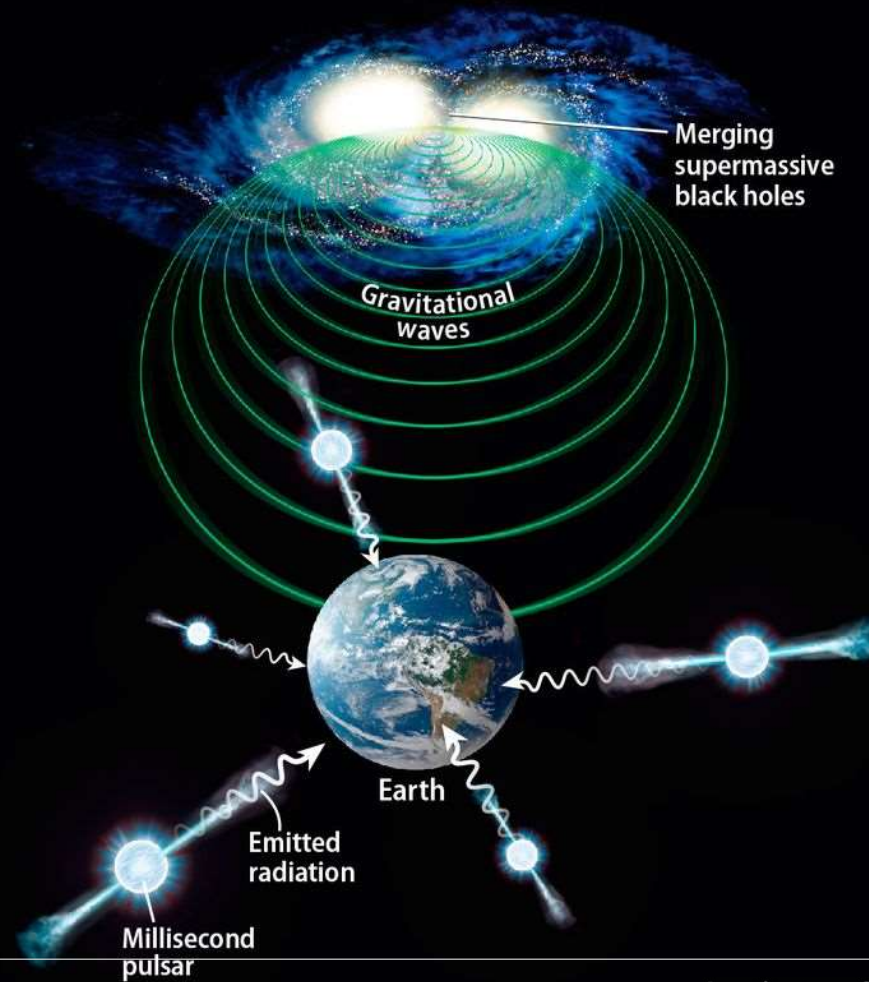
(LIGO and VIRGO collaborations 2017)

Púlsar en sistema triplo: PSR J0337+1715



(Ransom et al. 2014, Nature)

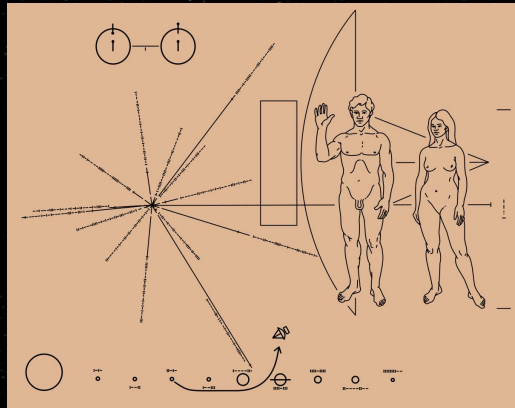
Púlsares como detectors de ondas gravitacionales



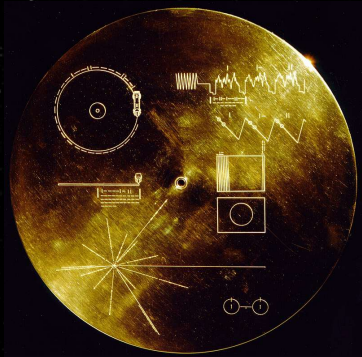
Púlsares como sistema GPS del espacio profundo



La idea de púlsares como GPS espacial está ya en órbita...

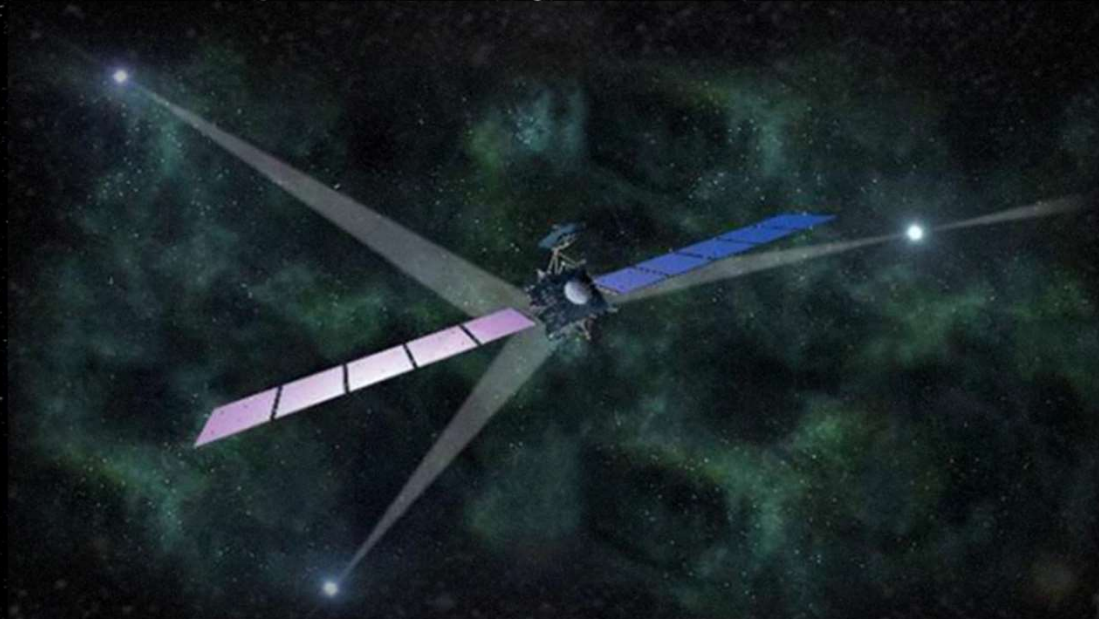


Las placas Pioneer son un par de planchas de aluminio que se colocaron a bordo de las sondas Pioneer 10 en 1972 y Pioneer 11 en 1973 e incluyen un mensaje visual por si fuesen interceptadas por vida extraterrestre.



La sonda Voyager 1 de la NASA, lanzada 35 años antes con varios mensajes de la humanidad, se encuentra al borde de adentrarse en el espacio interestelar. Contiene un disco dorado a bordo, por si fuese interceptada por vida extraterrestre.

Púlsares como sistema GPS del espacio profundo



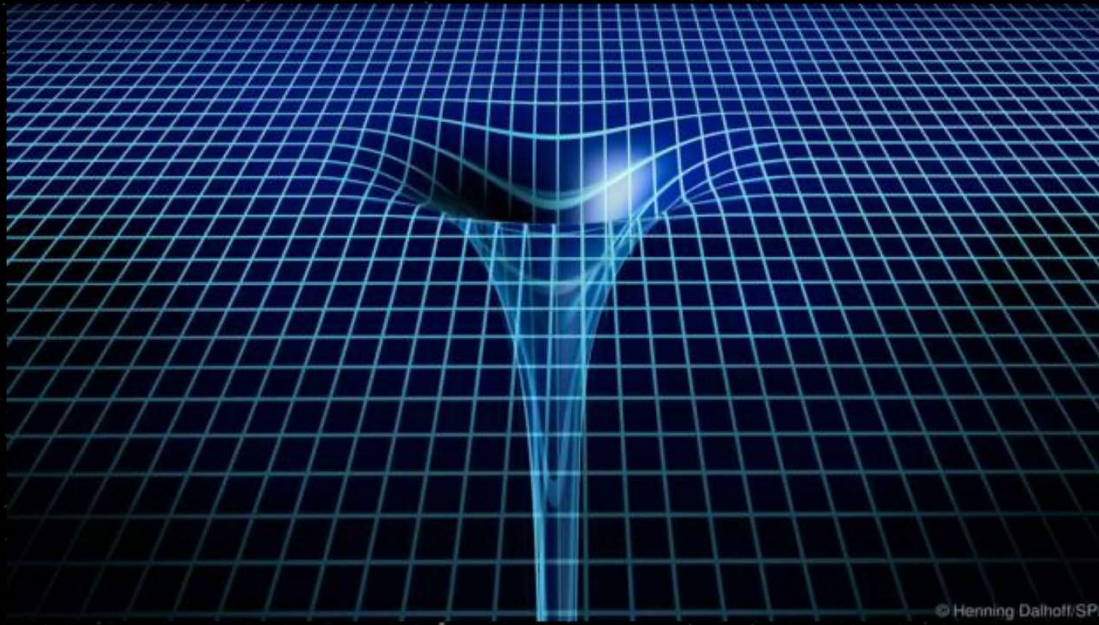
(NICER collaboration, Nature 2018)

En enero de 2018 se llevó a cabo el primer experimento de GPS púlsar, empleando el instrumento SEXTANT en la misión NICER, a bordo de la Estación Espacial Internacional, que orbita la Tierra a unos 28.000 km/h.
En 8 horas desde el inicio del experimento con 14 púlsares de rayos X, se logró determinar una posición en el espacio con un error de tan solo 10 millas.

Los Agujeros Negros

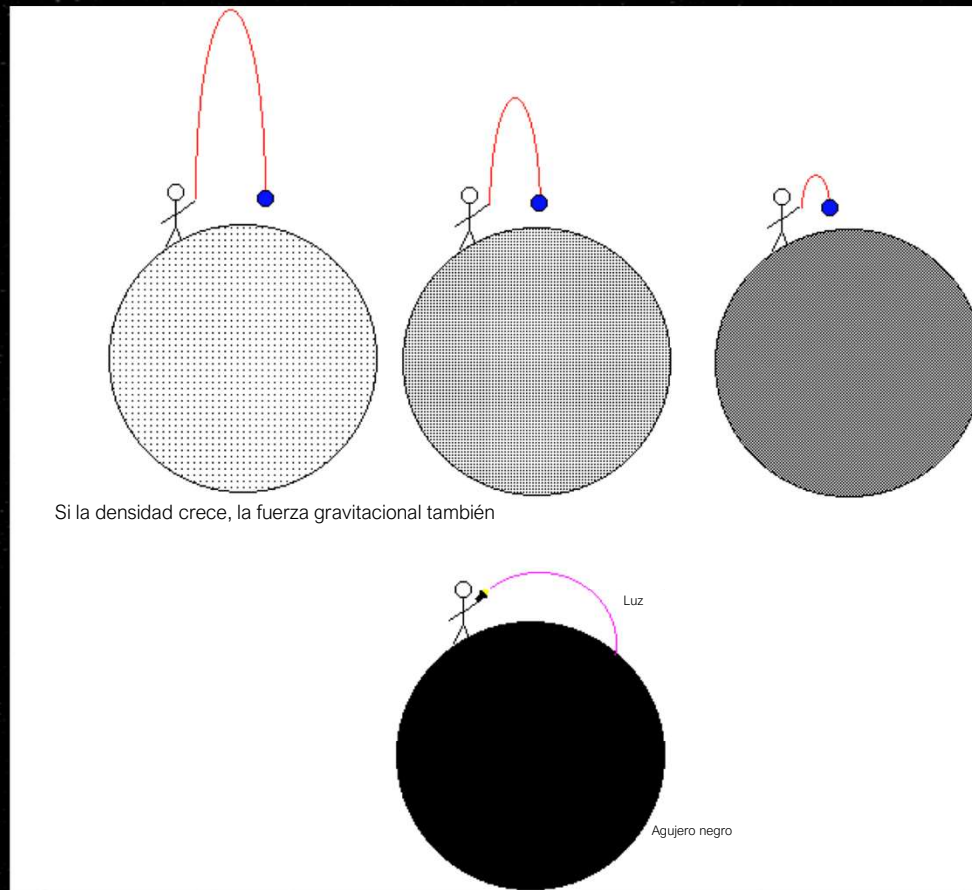


Los Agujeros Negros



Un agujero negro es una región del espacio-tiempo provocada por una gran concentración de masa en su interior, con enorme aumento de densidad, lo que provoca un campo gravitatorio donde la velocidad de escape es mayor que la velocidad de la luz.

La velocidad de escape de los Agujeros Negros



$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{G \cdot M \cdot m}{r}$$

$$V_e = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

G: constante de
gravitación universal
M: masa
r: radio

Radio de Schwarzschild

$$V_e = c$$

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

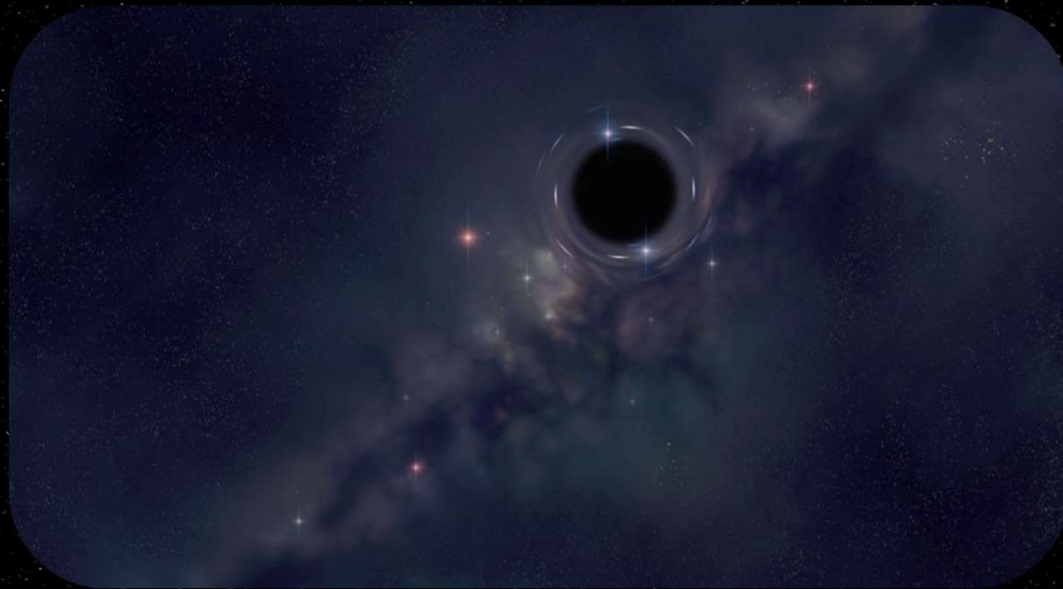
Objeto	Masa del Objeto (Masas Solares)	Radio (Km)	Velocidad de Escape (Km/s)	Radio de Schwarzschild
Tierra	0,00000304	6.357	11,3	9,0 mm
Sol	1,0	696.000	617	2,95 Km
Enana Blanca	0,8	10.000	5.000	2,4 Km
Estrella de Neutrones	2	8	250.000	5,9 Km
Agujeros negros estrellar 5		?	?	14.7km
Núcleo de una Galaxia	50.000.000	?	?	147.500.000 Km

Agujeros Negros de masa estelar



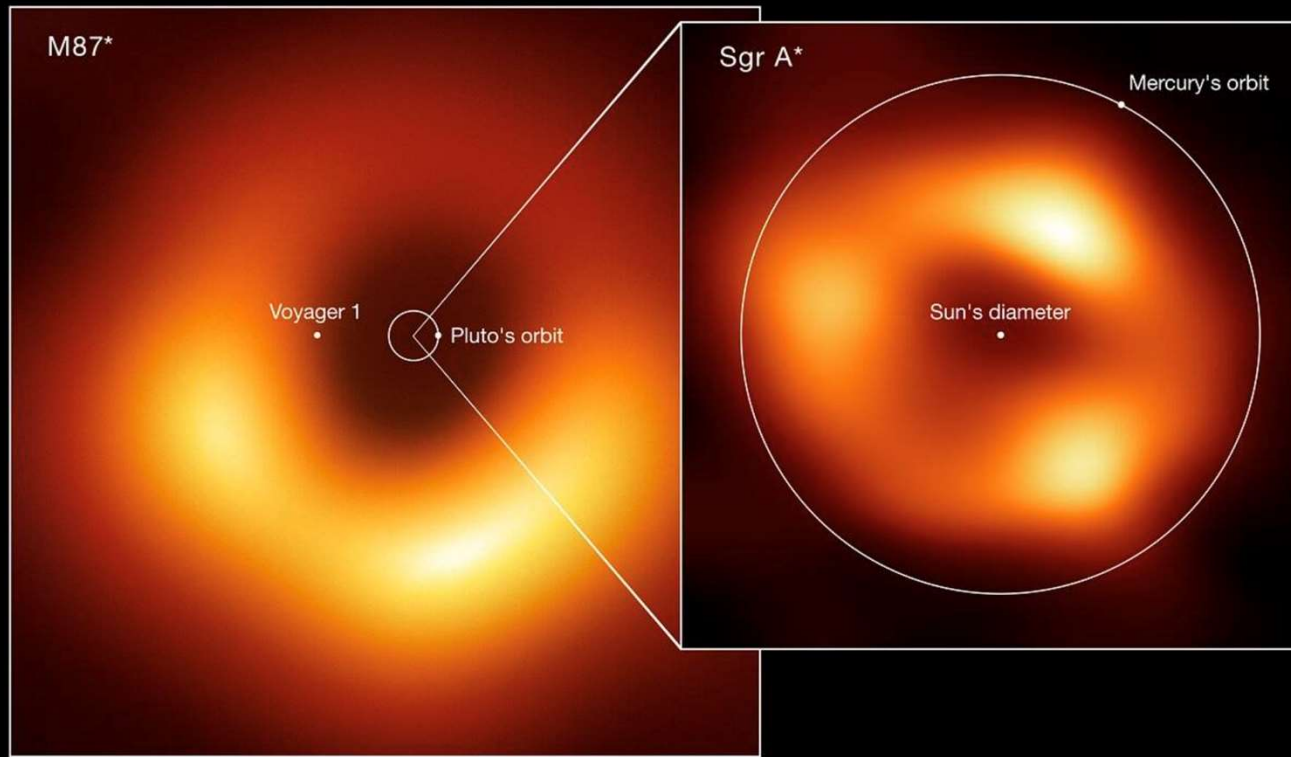
Con masas de 3-10 veces la del Sol se forman por explosión de Supernova de estrellas de alta masa. Los vemos cuando están en sistema binarios. Conocemos ~20 en nuestra Galaxia.

Agujeros Negros Primordiales



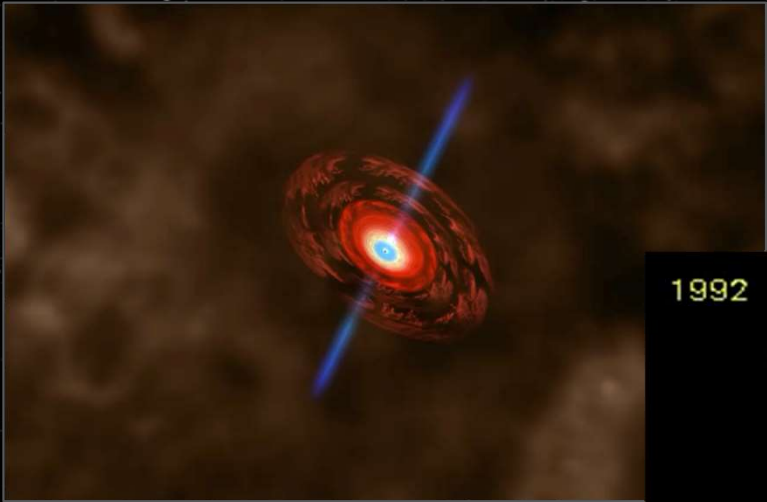
Los científicos creen que pueden tener el tamaño de un solo átomo pero tienen la masa de una montaña. Se cree que se formaron temprano (justo después del Big Bang)

Agujeros Negros Super-Masivos



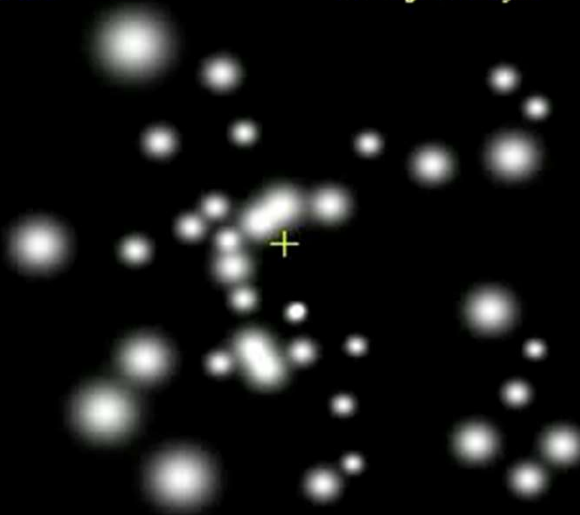
Los científicos sacaron la primera imagen de un agujero negro super-masivo, utilizando técnicas interferométrico de alta resolución.

Agujeros Negros Super-Masivos (SMBH o AGN)



1992

10 light days



Formados con la formación de la Galaxia.

Nuestro agujero negro supermasivo es SgrA*.

Medimos los movimientos de las estrellas a su alrededor.



Premio Nobel 2020
a Ghez & Genzel

Eventos de colapso de estrellas en agujeros negros (TDE)

Son eventos caníbales de agujeros negros de varias masas que encontrarán una estrella e su camino

El Cosmo está lleno de objetos extremos, que cada día conocemos un poco más.. y no es solo ciencia ficción!



Gracies!

