

Supernovas y el futuro de las ondas gravitatorias



Pablo Cerdá Durán
Departamento de Astronomía y Astrofísica
Universitat de València

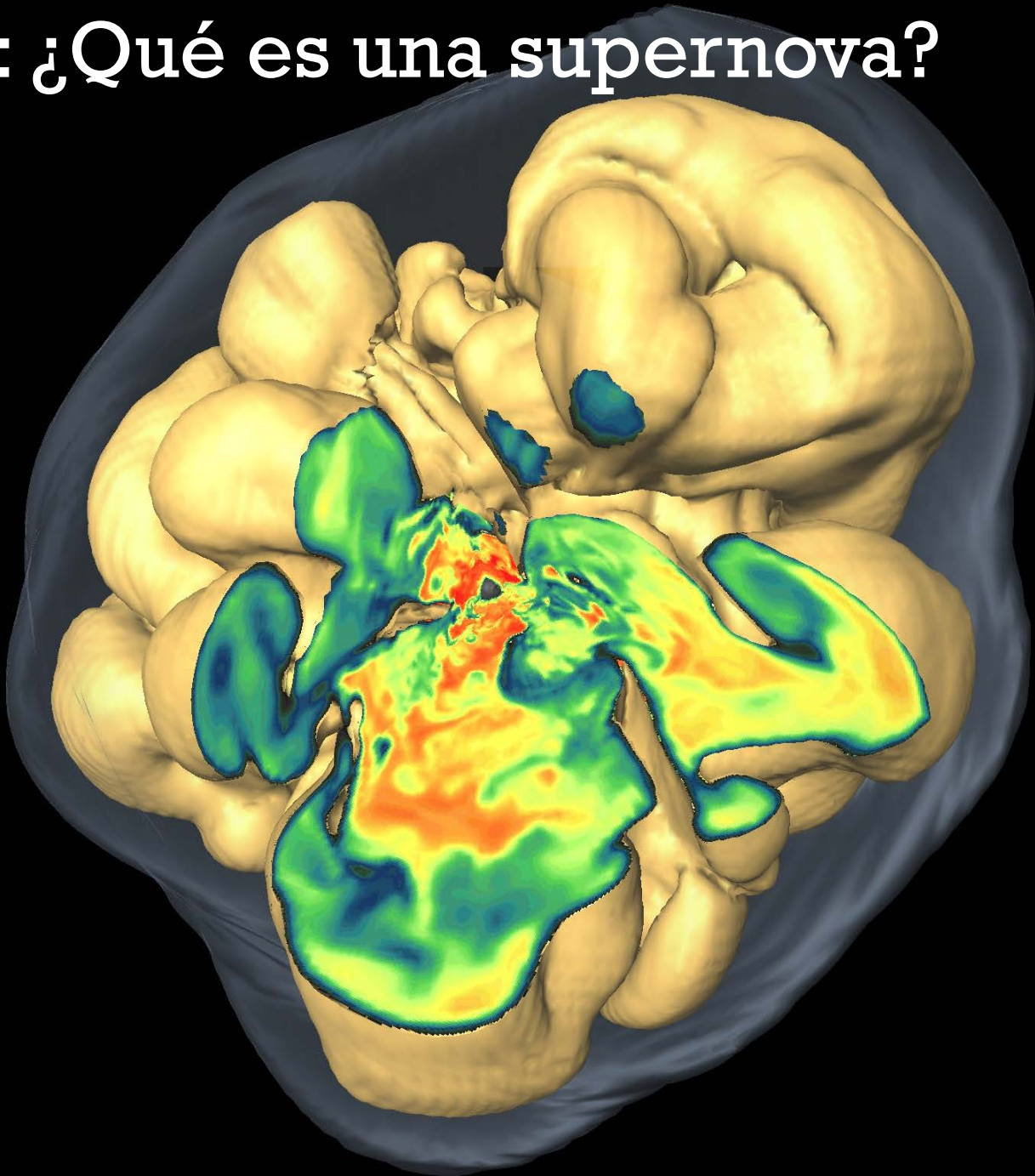
¿Qué es una supernova?

¿Qué son las ondas gravitatorias?

¿Qué podemos aprender de ellas?

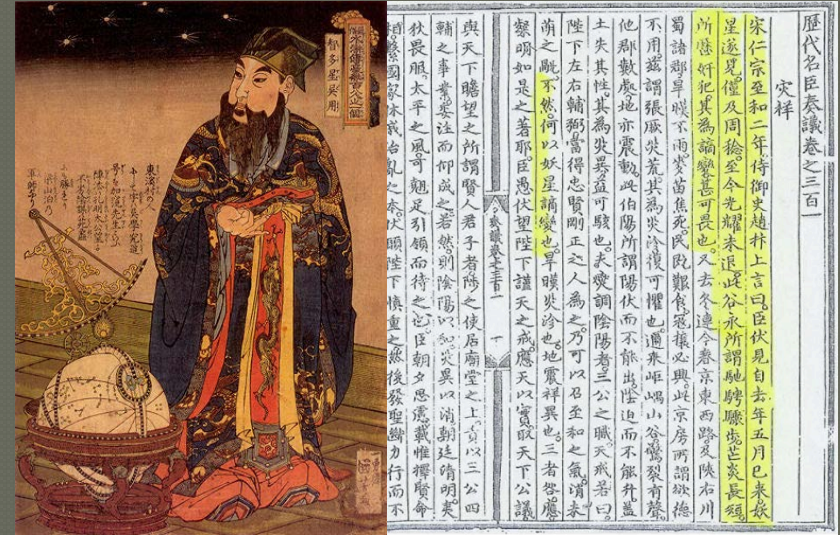
¿Cómo las podemos detectar?

Parte 1 : ¿Qué es una supernova?

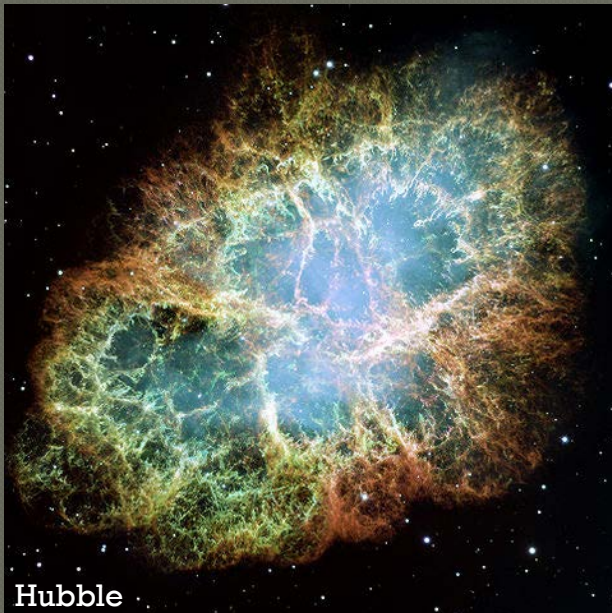


SN 1054 y la nebulosa del cangrejo

- 1054: Astrónomos chinos, japoneses y árabes observan una “estrella invitada”.
- La nueva estrella es visible a simple vista y llega a ser más brillante que Venus
- La estrella permanece visible durante casi dos años.
- Hoy se conoce como SN 1054



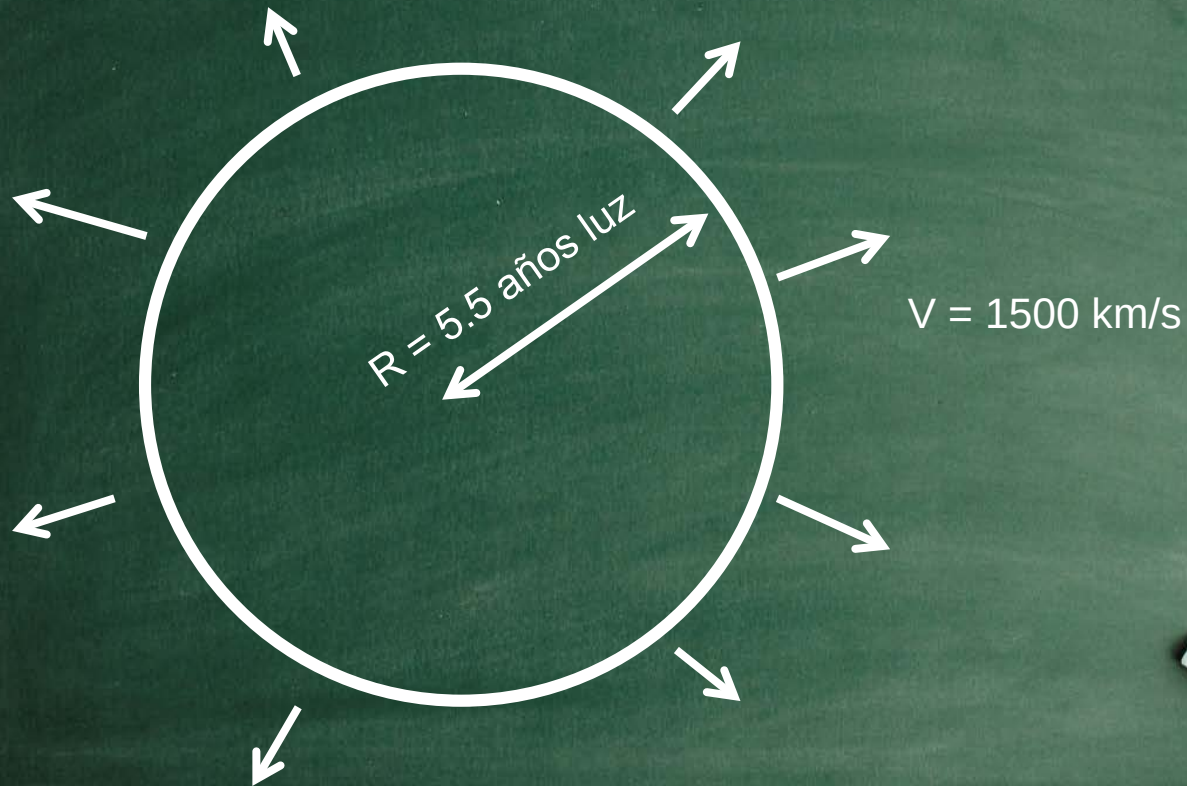
- En la dirección de aquella SN 1054 hoy se encuentra la nebulosa del cangrejo.
- Tiene un radio de 5.5 años luz
- Se expande a 1500 km/s



¿Son el mismo objeto?

$$T = \frac{R}{V} = \frac{5.5 \text{ años luz}}{1500 \text{ km/s}} \sim 900 \text{ años}$$

$$2018 - 900 \text{ años} \sim 1054$$



estrella invitada



Tycho Brahe
(1546 – 1601)

nova = nueva estrella

- 1572: Tycho Brahe observa una *nueva* estrella.
- Hoy se conoce como SN1572 o supernova de Tycho..



Astrónomos chinos
(desde el siglo II)

nova gigante

nova excepcional



Edwin Hubble
(1889 – 1953)

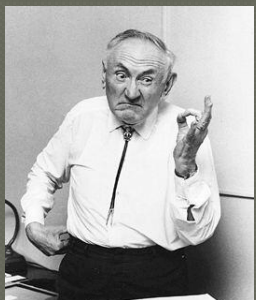
- A principios del siglo XX, los astrónomos se dan cuenta de que algunas novae son especialmente luminosas.



Knut Lundmark
(1889 - 1958)

¡Supernova!

- Hoy en día se sabe que son fenómenos completamente distintos a las *novae clásicas*.



Fritz Zwicky
(1898 - 1949)



Walter Baade
(1893 – 1960)

¿Cuántas supernovas se han observado?

Se producen en torno a 2 o 3 supernovas por siglo en nuestra galaxia.

Sólo somos capaces de observar 1 de cada 6, debido al polvo galáctico.



Via lactea, Anne Dirkse



Cas A (Hubble/Spitzer/CHANDRA)

~1667: Cassiopea A, última observada en la via láctea

1987: SN1987A, en la Gran Nube de Magallanes



SN1987A (Hubble)

En la actualidad observamos supernovas extra-galácticas a diario

Se han observado más de 15.000

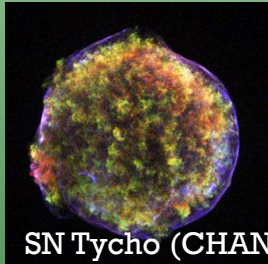


PTF

Tipos de supernovas

Clasificación observacional

Tipo I (sin hidrógeno)



SN Tycho (CHANDRA)

Tipo II (con hidrógeno)



SN1987A (Hubble)

Tipo Ia
(con silicio)

Tipo Ib
(sin silicio, con helio)

Tipo Ic
(sin silicio, sin helio)

Tipo II-P

...

Clasificación teórica

Supernova
termonuclear

Colapso de núcleos
estelares

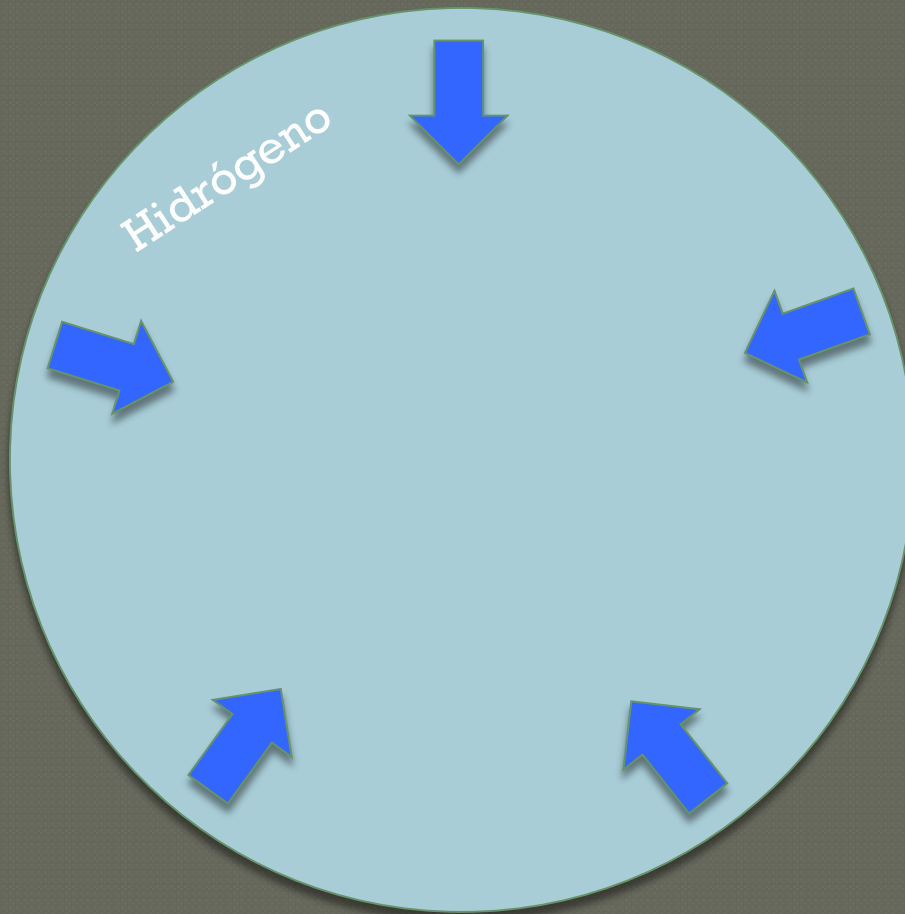
¿Qué es una estrella?

Hidrógeno

- 90% del gas en el universo es Hidrógeno
- Las estrellas se forman a partir de nubes de hidrógeno

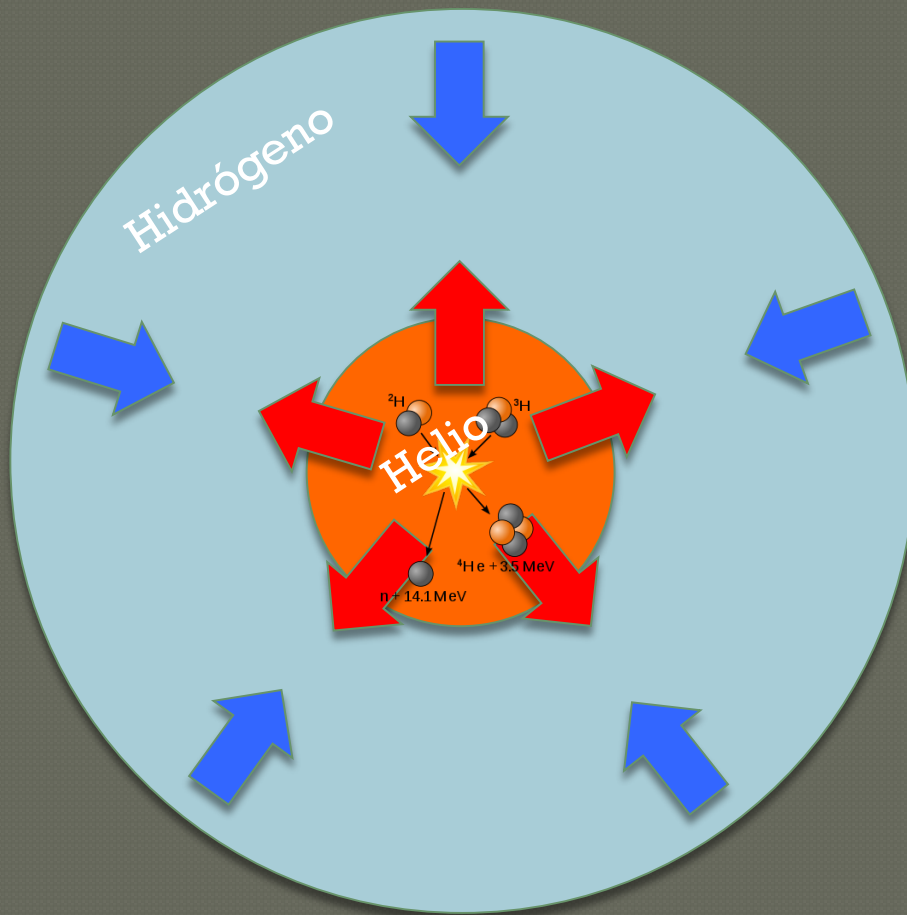


¿Qué es una estrella?



- El gas colapsa por su propia gravedad
- La temperatura aumenta

¿Qué es una estrella?



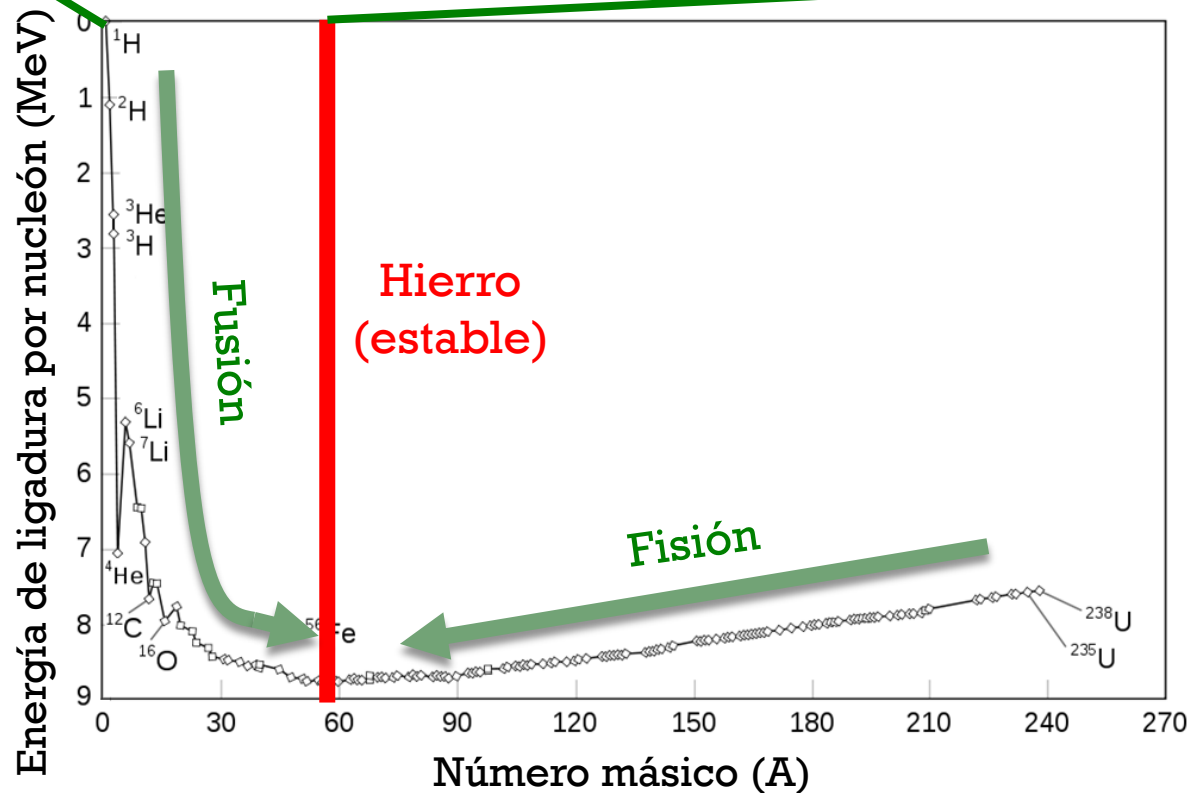
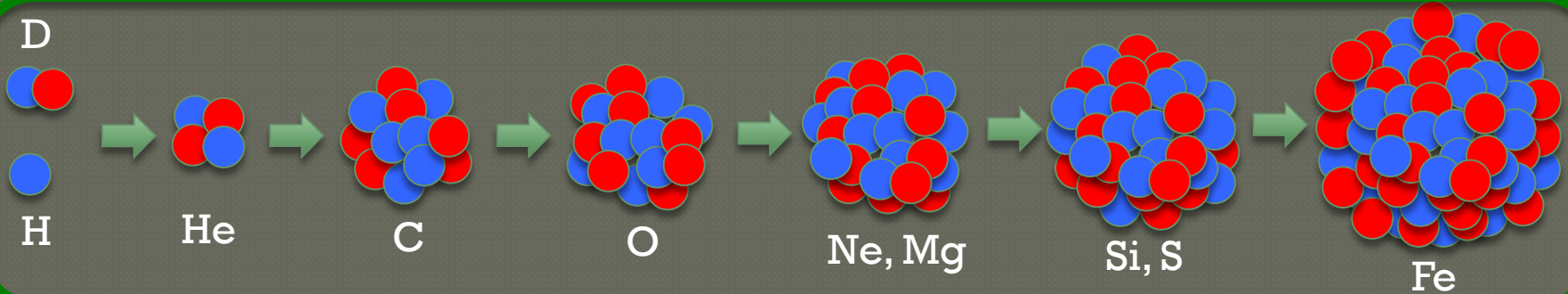
- Al alcanzar varios millones de Kelvin en el centro se inician **reacciones termonucleares**
- La presión aumenta debido al incremento de temperatura

Estrella

=

objeto en el que la presión encuentra un equilibrio con la gravedad

Reacciones termonucleares

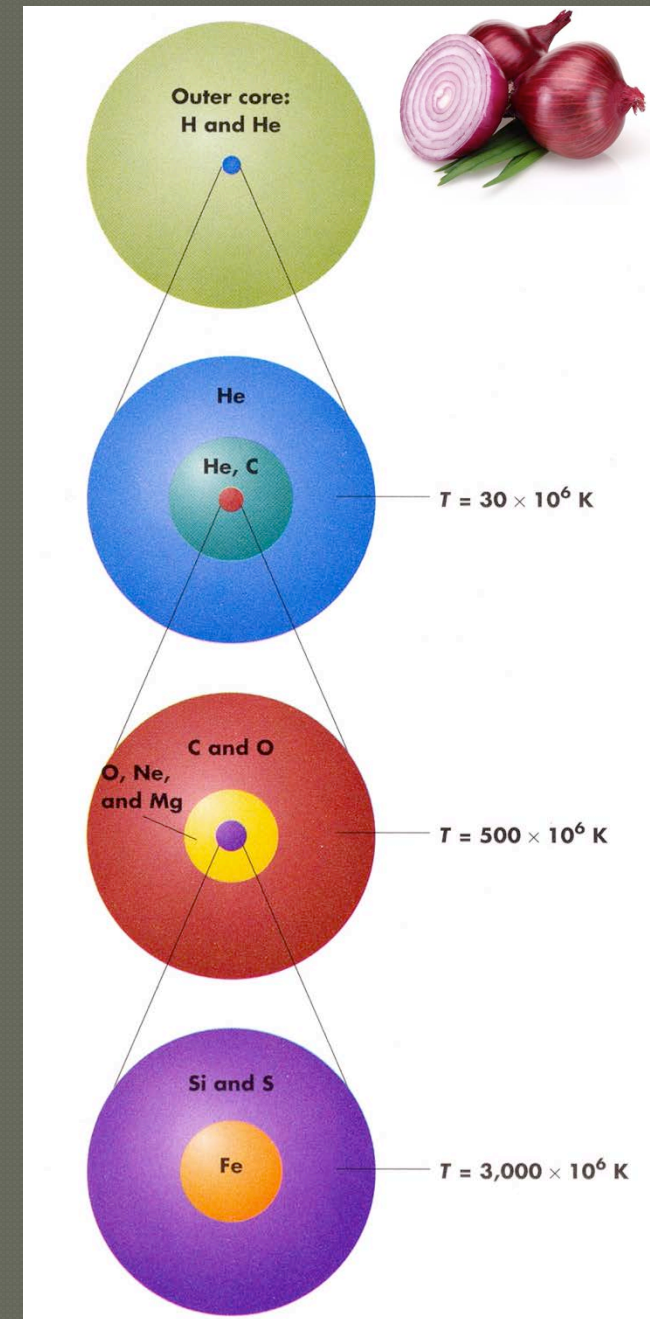


- Las reacciones producen elementos más pesados
- El final de la cadena son elementos del grupo del hierro
- El hierro ya no se puede “quemar”

Estructura de las estrellas masivas

Estrellas masivas entre 10 y 100 $M_{\odot}$

- Los distintos elementos se producen secuencialmente
- Al final de su vida la estrella tiene una estructura de capas “de cebolla”
- Los elementos más pesados están en el interior
- El final de la vida de una estrella se da cuando se forma un núcleo inerte que ya no experimenta reacciones termonucleares



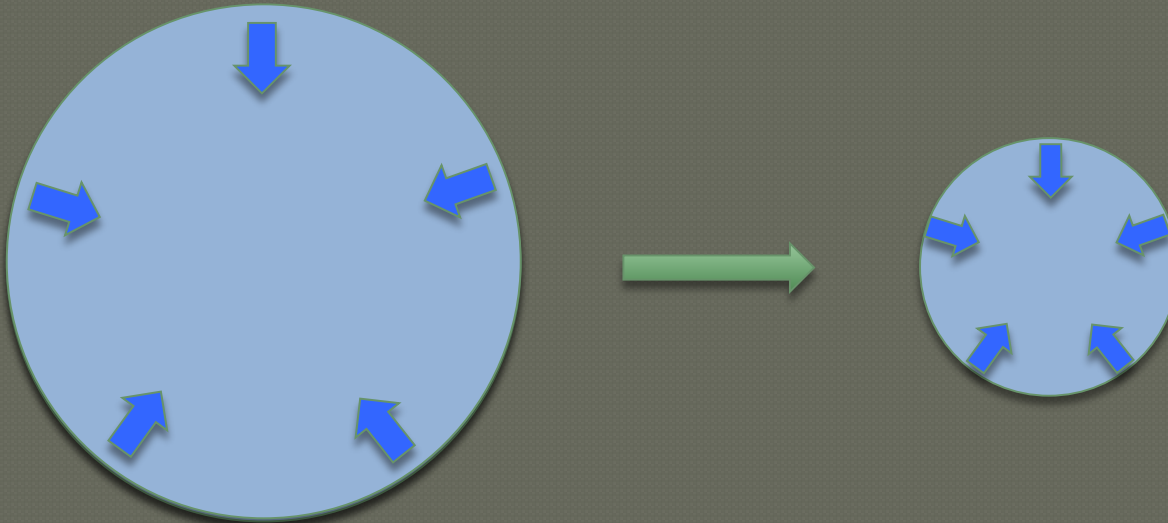
Vida de las estrellas masivas ($10 - 100 M_{\odot}$)



Nube de gas

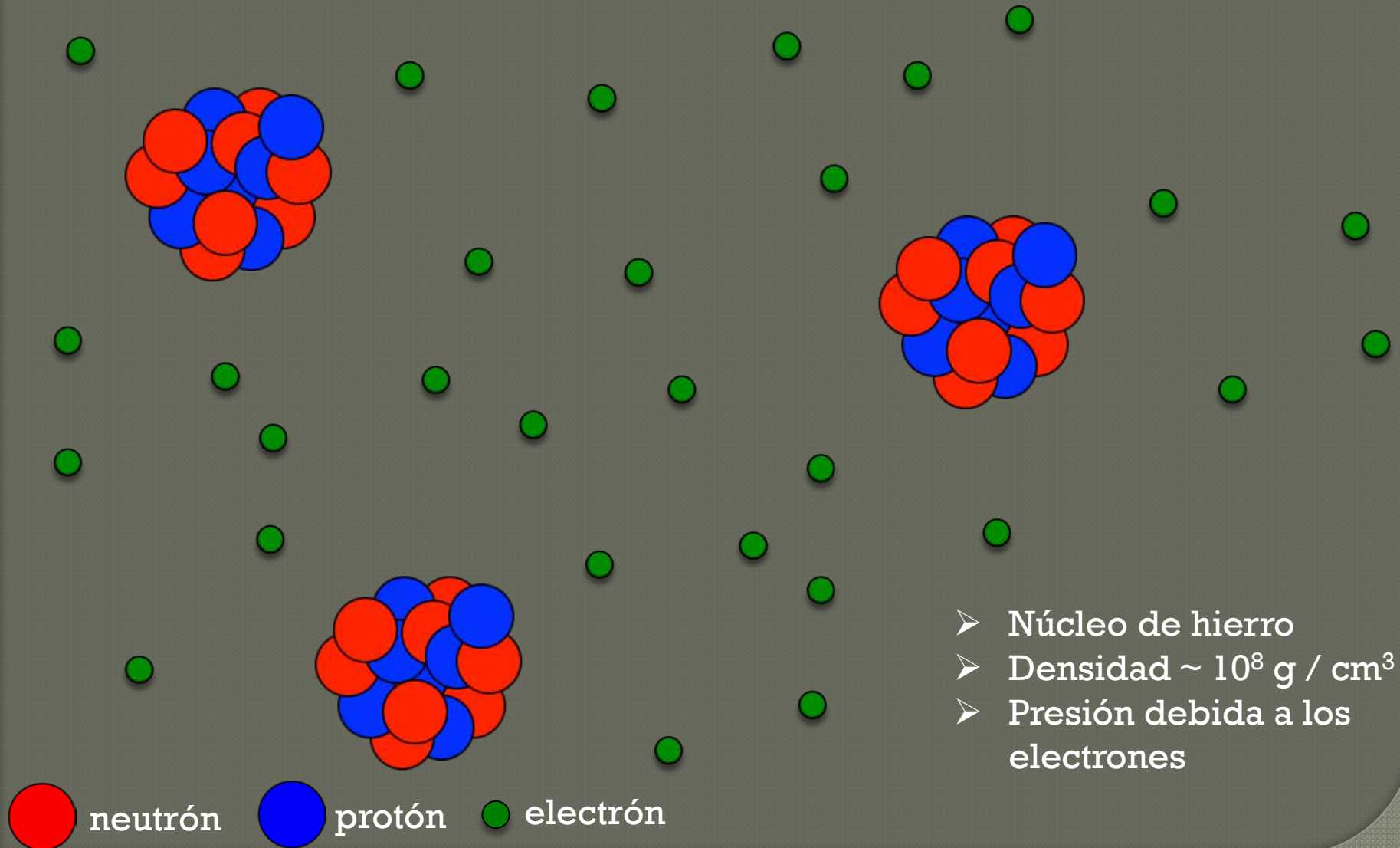
La masa máxima

- El núcleo de hierro se va haciendo cada vez más pesado
- ¿Cuál es la masa máxima del núcleo de hierro?
- Masa de Chandrasekhar
= masa máxima soportada por un gas de electrones degenerados (gas “frio”)
= 1.4 masas solares
- El núcleo colapsa al sobrepasar la masa máxima

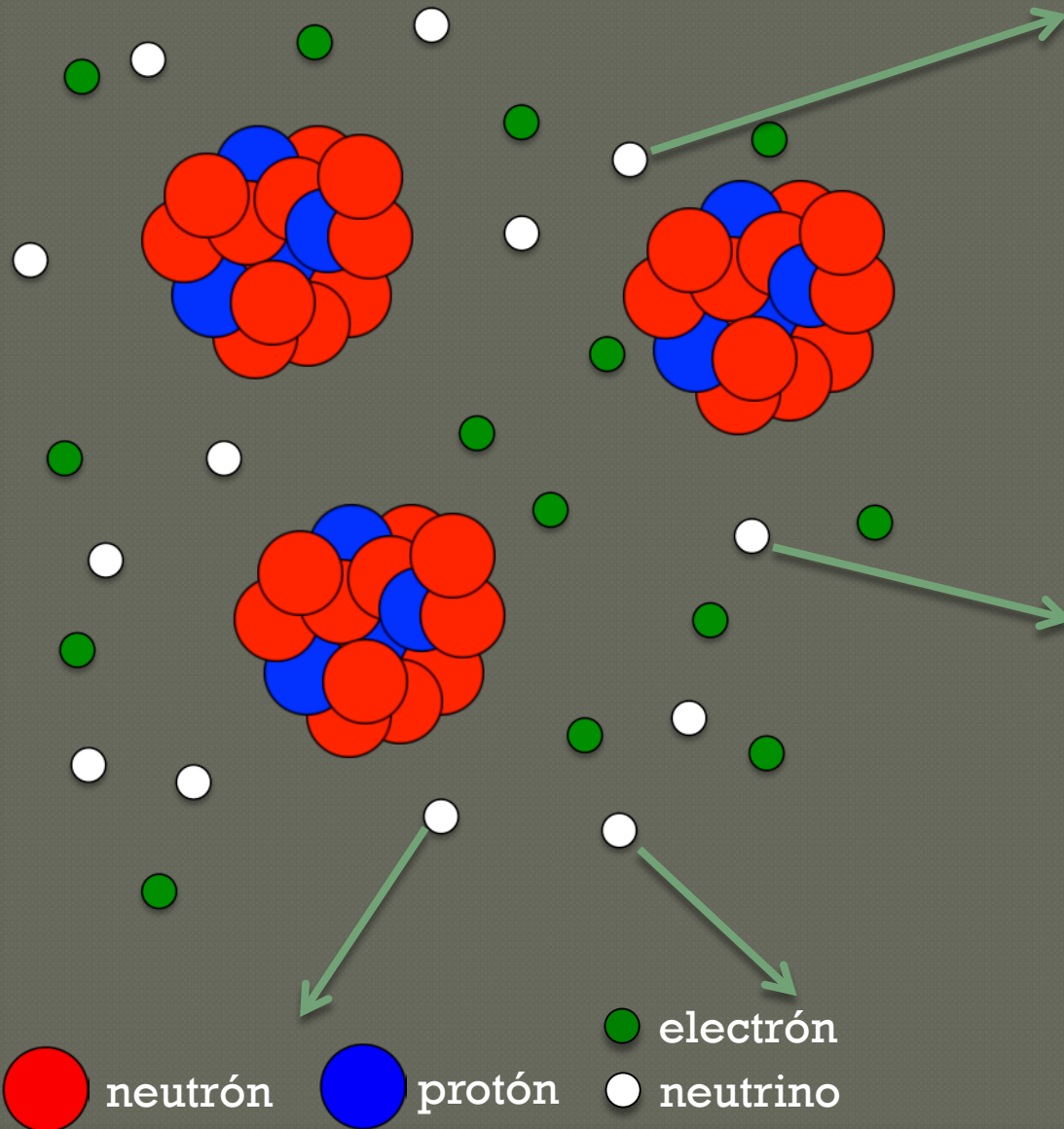


Subrahmanyan
Chandrasekhar
(1910 - 1995)

Materia a altas densidades



Materia a altas densidades

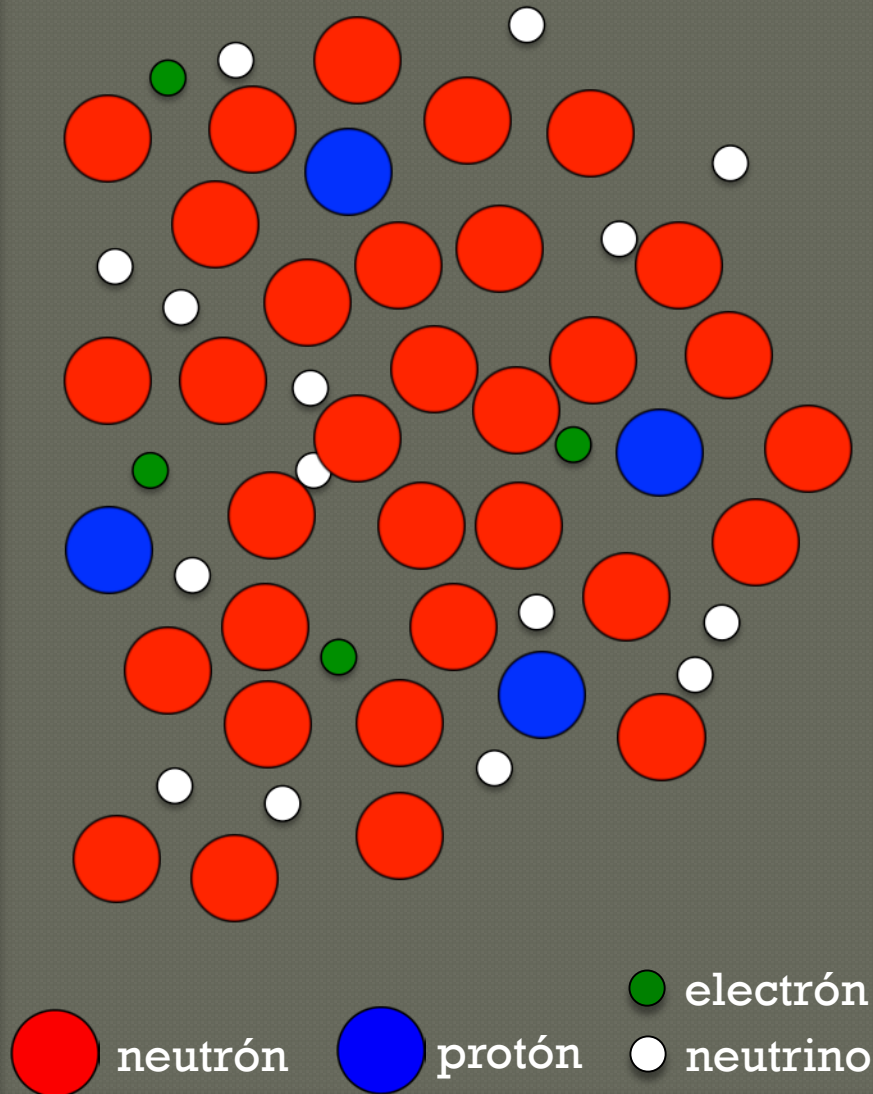


➤ Densidad $\sim 10^{12} \text{ g / cm}^3$

➤ Al comprimir la materia los protones absorben electrones emitiendo

NEUTRINOS

Materia a altas densidades



- Densidad $\sim 10^{14} \text{ g / cm}^3$
- Los núcleos se rompen y queda una sopa de neutrones:

MATERIA NUCLEAR

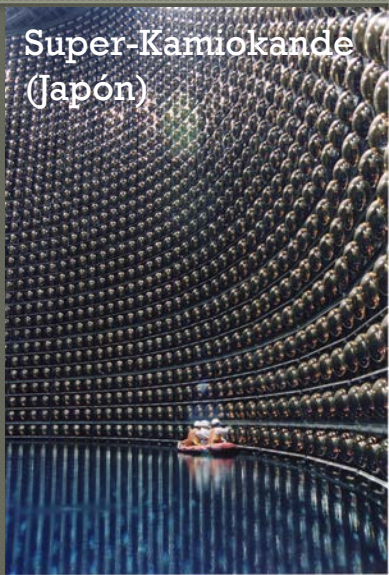


Ingredientes: neutrones (95%), protones, electrones, neutrinos. Puede contener trazas de hiperones.

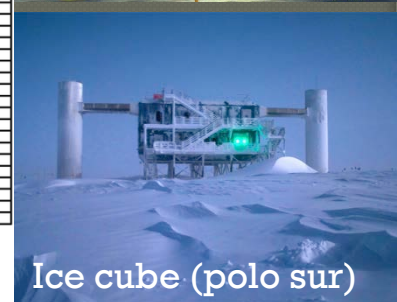
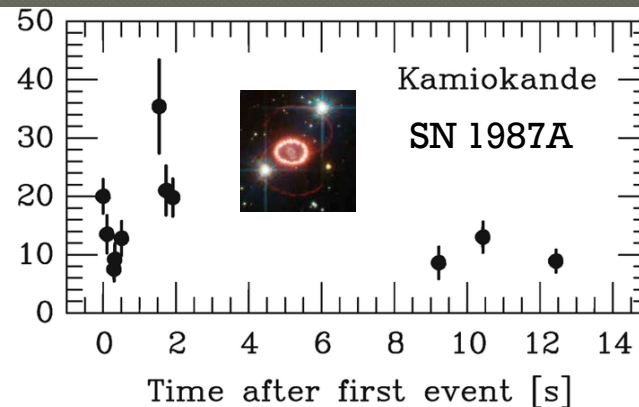
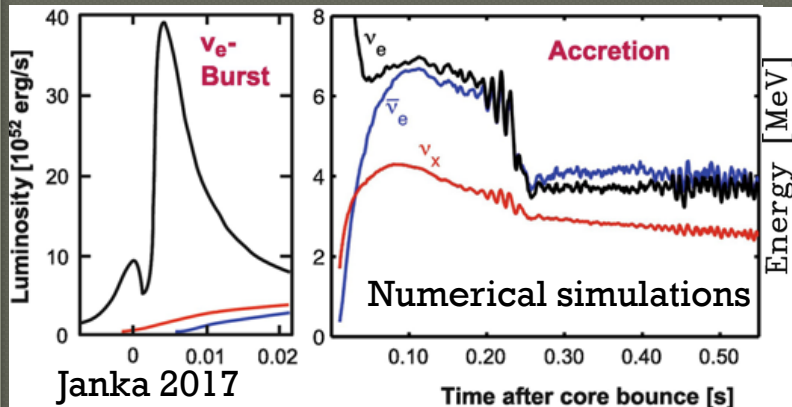
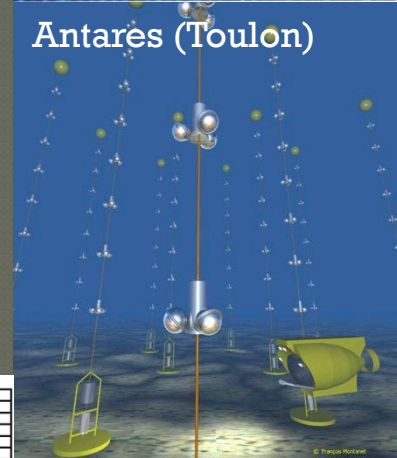
- La interacción nuclear fuerte es dominante
- Muy difícil de comprimir

Neutrinos

- Interaccionan poco con la materia: lo atraviesan casi todo
- 65 millones de neutrinos solares atraviesan tu dedo cada segundo
- Los detectores de neutrinos necesitan grandes cantidades de agua (liquida o sólida).
- Se detectaron ~20 neutrinos de SN1987A
- La próxima supernova galáctica se podrá observar con gran detalle



Antares (Toulon)



Ice cube (polo sur)

Resto de la estrella

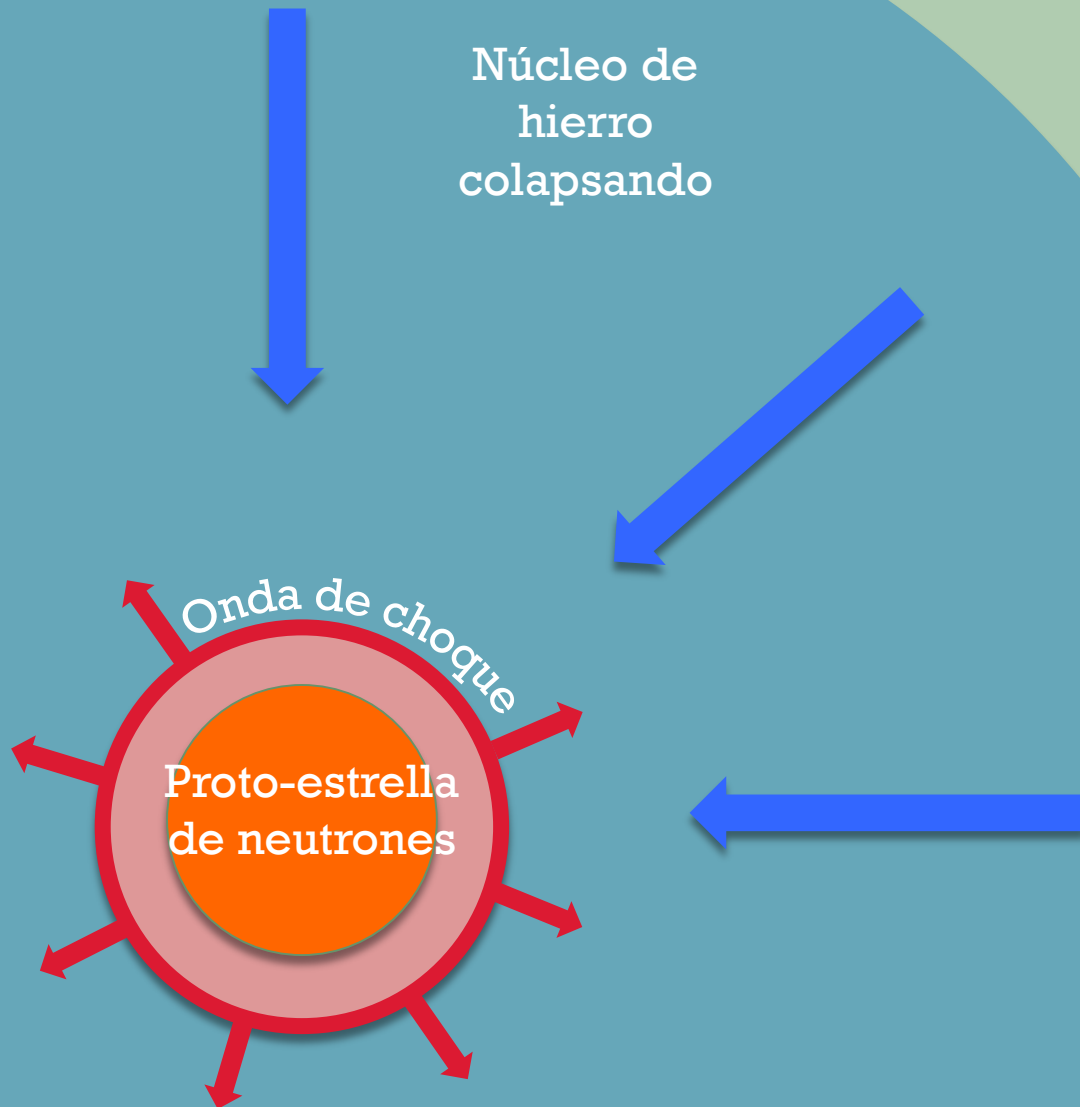
Núcleo de
hierro
colapsando



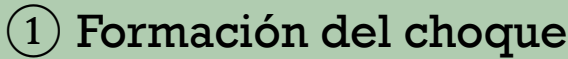
$t=0$

Resto de la estrella

① Formación del choque



$t=0$



Resto de la estrella

Núcleo de
hierro
colapsando

Proto-estrella
de neutrones

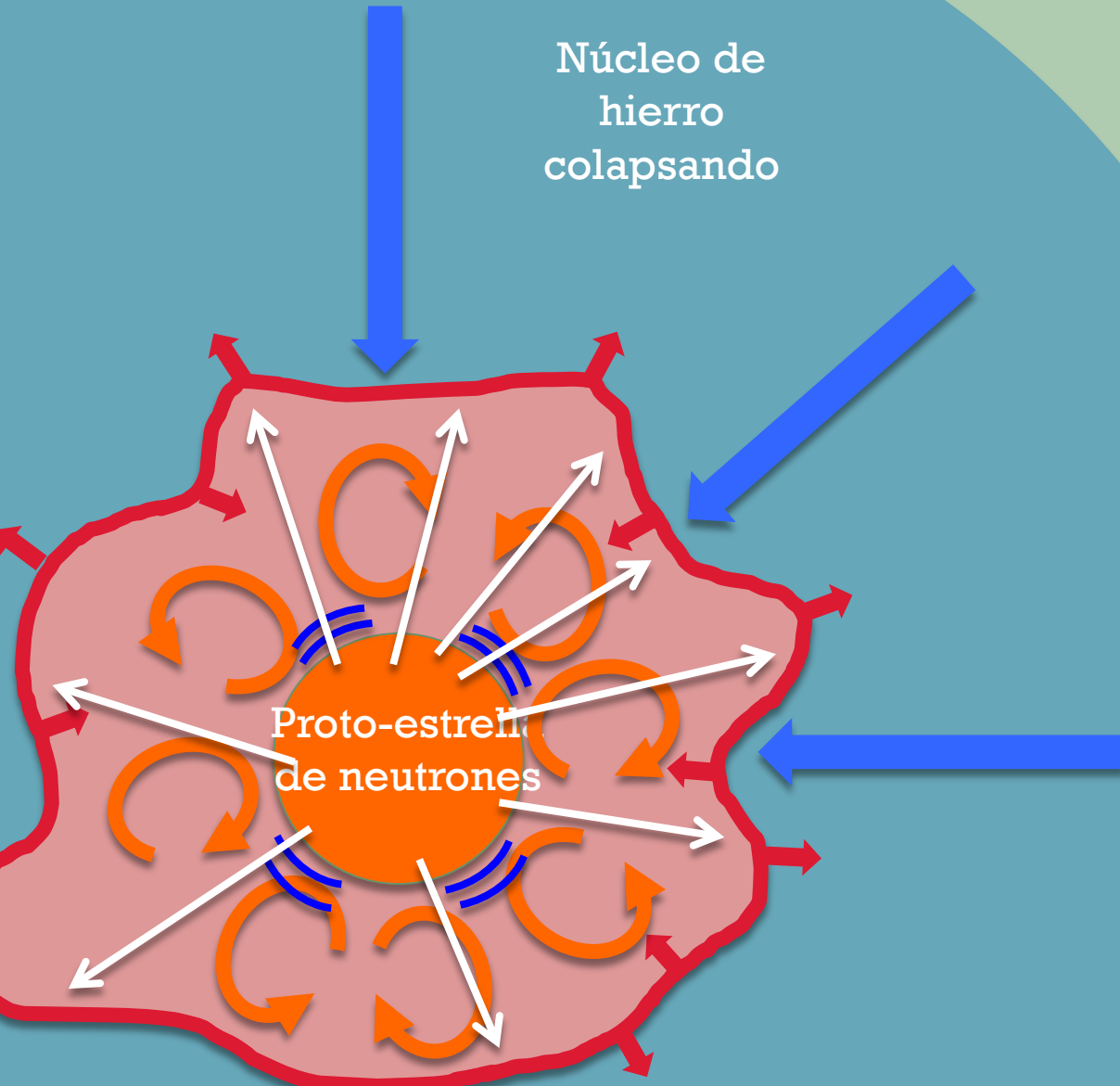
① Formación del choque

② Choque estancado

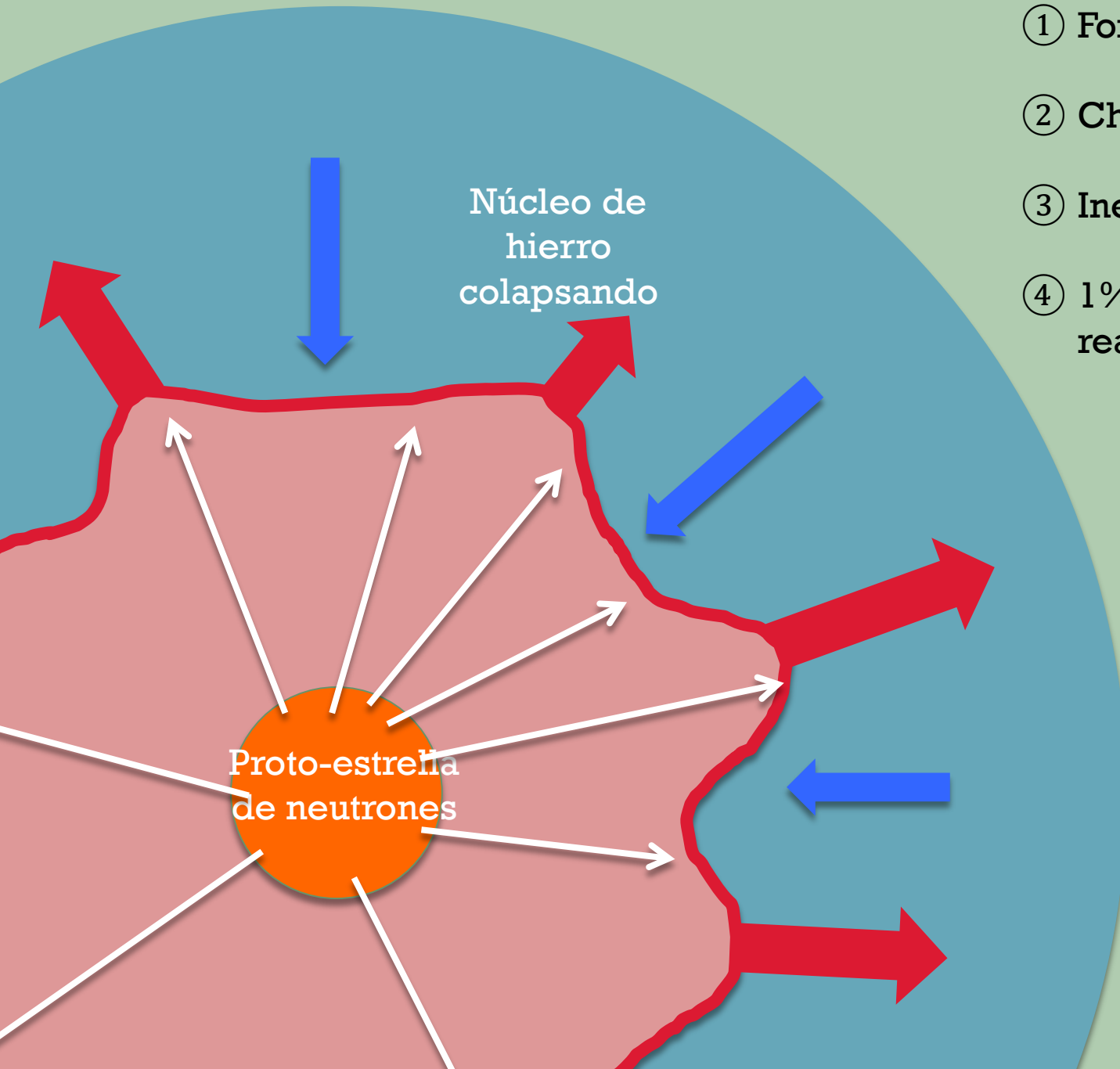
③ Inestabilidades

- Del choque (SASI)
- Convección y oscilaciones de la proto-estrella de neutrones

$t = 100 \text{ ms}$



Resto de la estrella



Núcleo de
hierro
colapsando

Proto-estrella
de neutrones

① Formación del choque

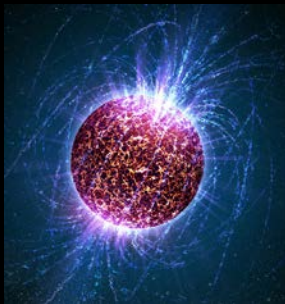
② Choque estancado

③ Inestabilidades

④ 1% de los neutrinos
reactivan el choque

$t=1\text{ s}$

- ① Formación del choque
- ② Choque estancado
- ③ Inestabilidades
- ④ 1% de los neutrinos reactivan el choque
- ⑤ Estrella de neutrones



$t=60$ s

Simulaciones numéricas

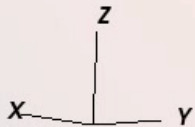
DB: x00004000.xmf

Time:0.4

Contour
Var: thd-11



Max: 4386.
Min: 1.068



user: martin
Tue Jul 17 09:29:15 2018



Marenostrum-4 (RES/BSC)
~50.000 cores

Martin Obergaulinger
(U. Valencia / TU Darmstadt)

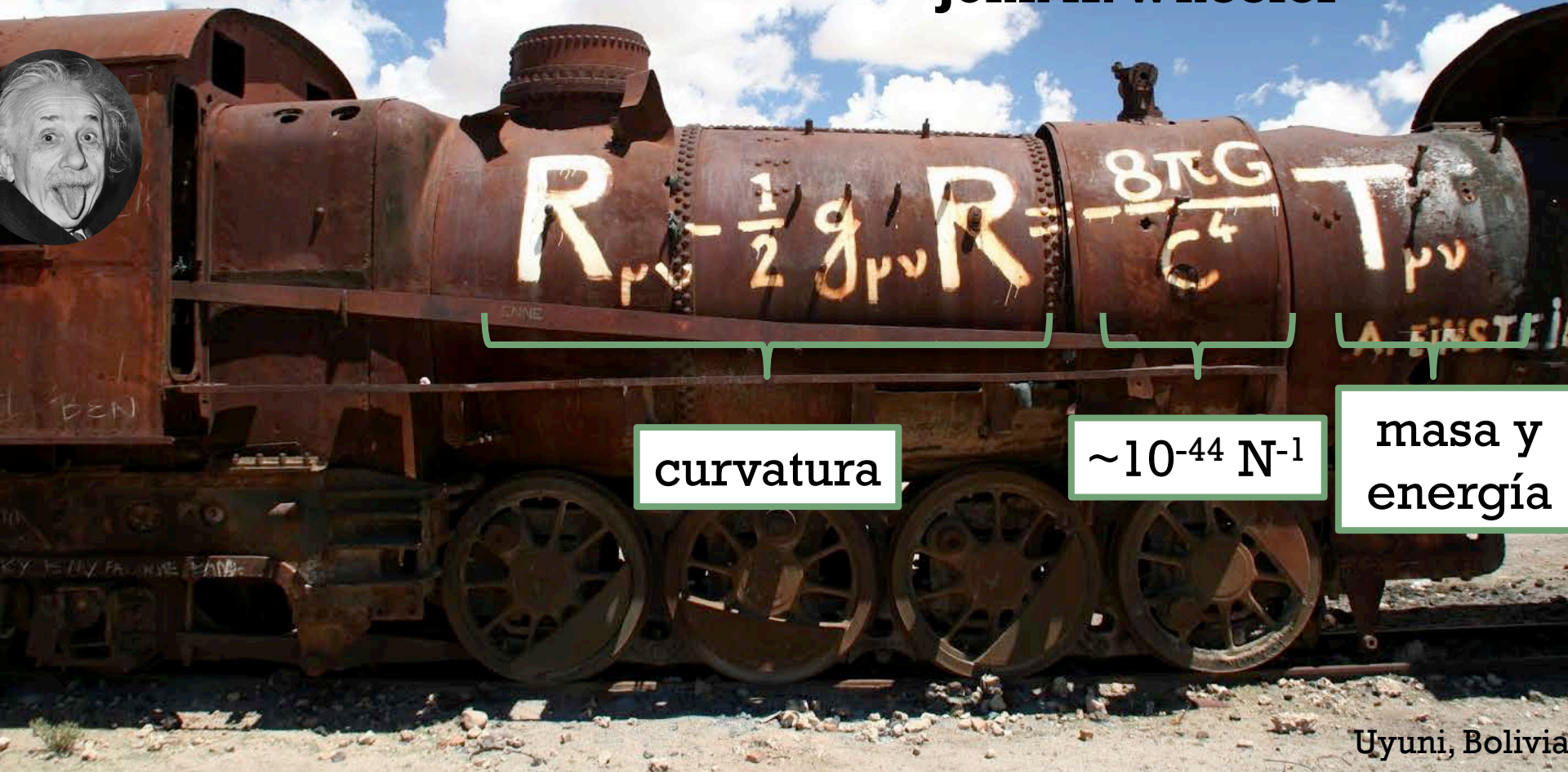
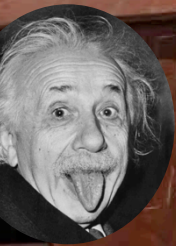
Parte 2 : ¿Qué son las ondas gravitatorias?



Ecuaciones de Einstein

**“El espacio-tiempo le dice a la materia
como moverse; la materia le dice al
espacio-tiempo como curvarse ”**

John A. Wheeler





Cualquier objeto con masa produce una distorsión del espacio-tiempo...

... pero solo objetos muy masivos producen distorsiones observables (tierra, sol ...)

Ondas gravitatorias = distorsiones del espacio-tiempo que se propagan en el vacío



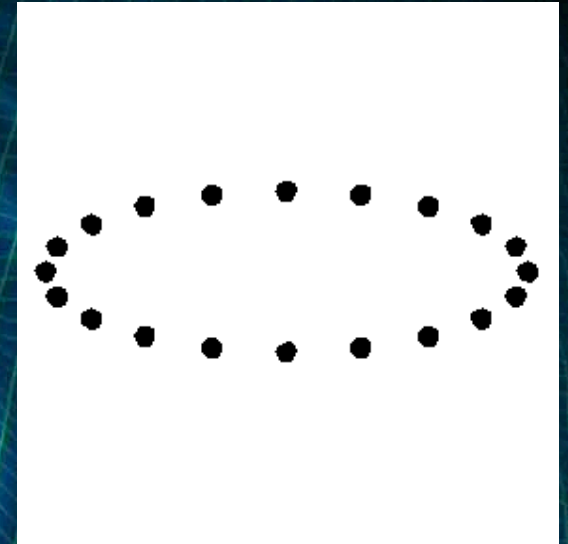
Similar a ondas en un estanque

Distorsión espacio-temporal = cambio de la distancia y el tiempo

Propagación

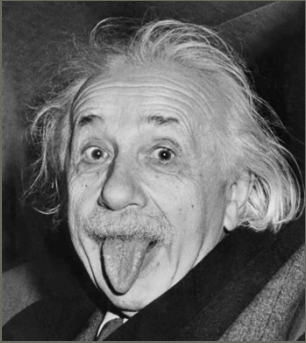
- Velocidad de la luz
- Amplitud decae con $1/D$
- Apenas interaccionan

← $D \sim 10.000$ años luz →



Si el círculo tiene 1 km de diámetro cambios de distancia de 10^{-18} m ($h \sim 10^{-21}$)

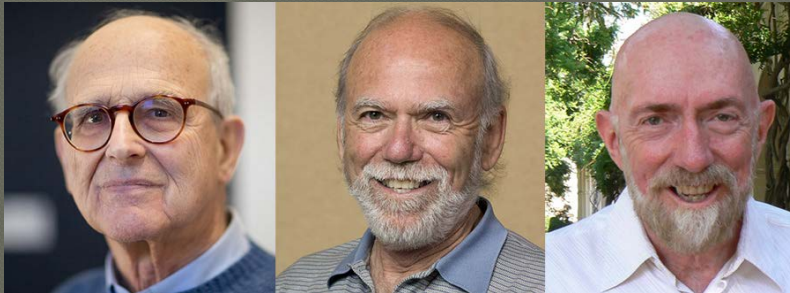
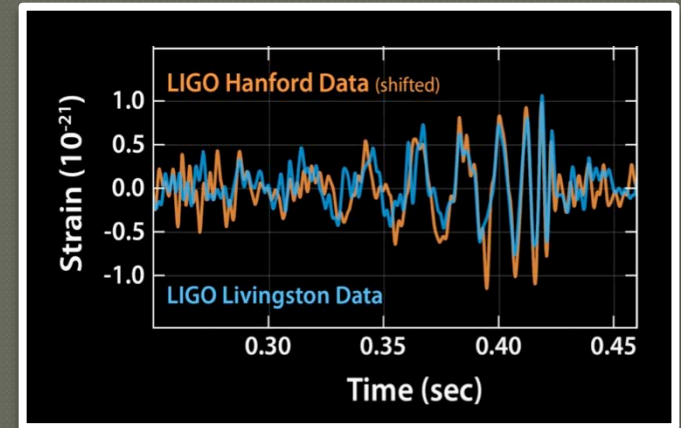
1 milésima del radio del protón



Albert Einstein
(1879 - 1955)

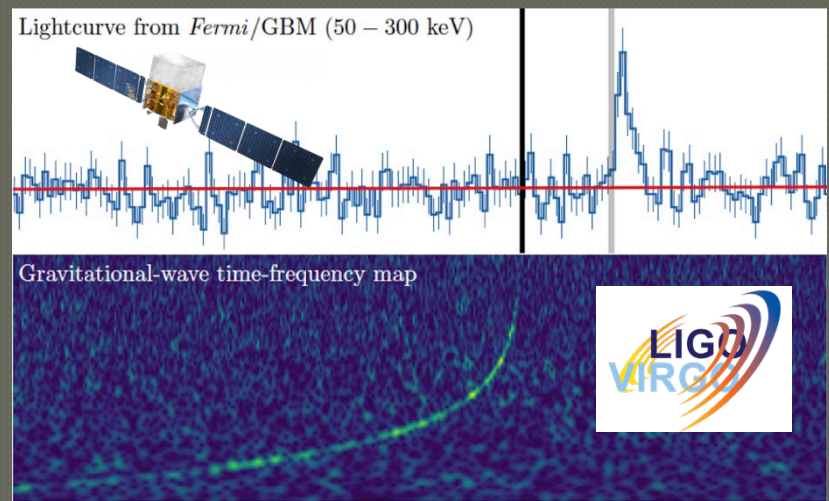
La existencia de las ondas gravitatorias fue predicha por **Albert Einstein** hace 100 años ...

... y se confirmó el 14 de Septiembre de 2015 con la detección de las ondas producidas por la **colisión de dos agujeros negros**.



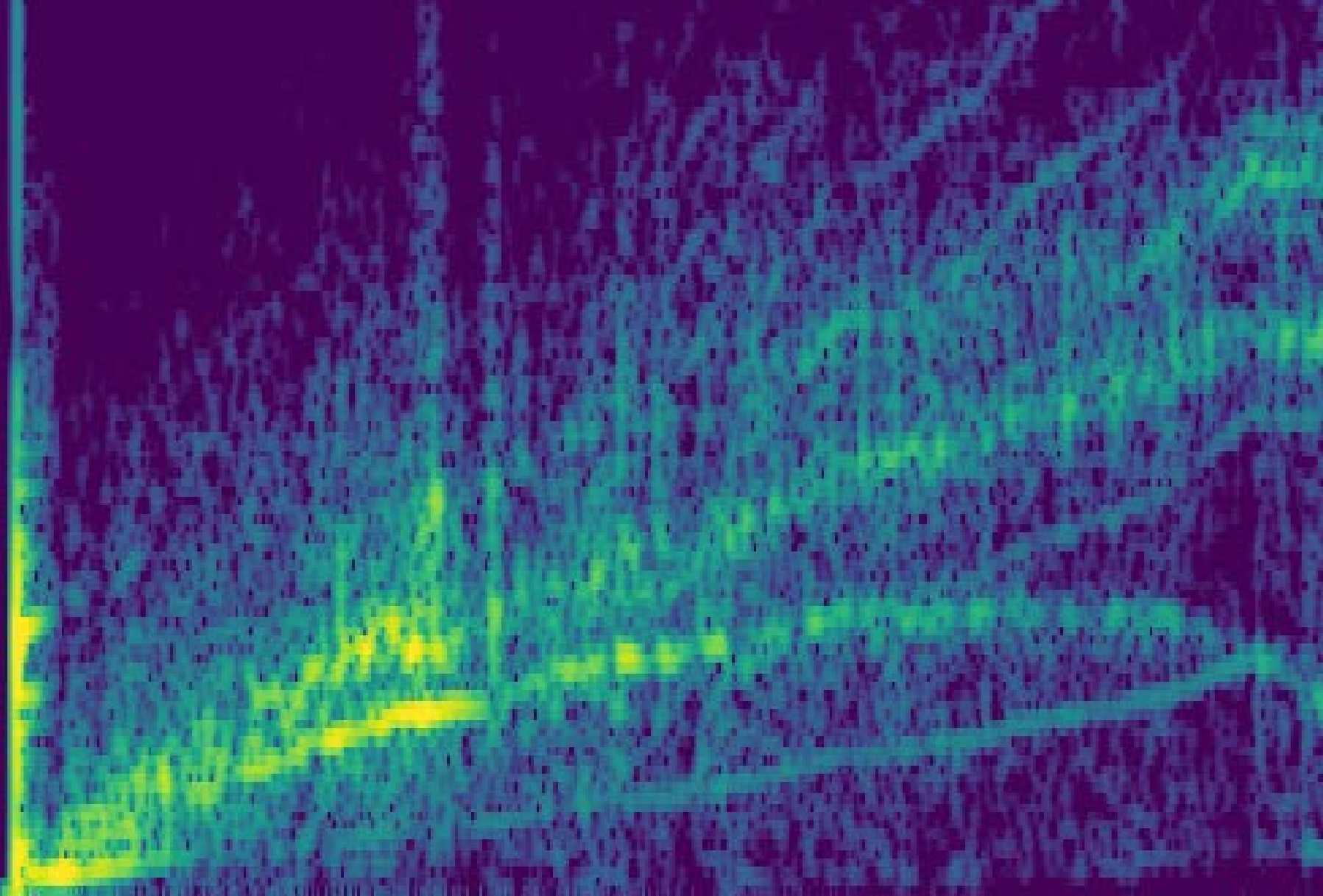
Reiner Weiss Barry C. Barish Kip S. Thorne

Premio Nobel de física 2017 por sus “*contribuciones decisivas al detector LIGO y la observación de ondas gravitatorias*”



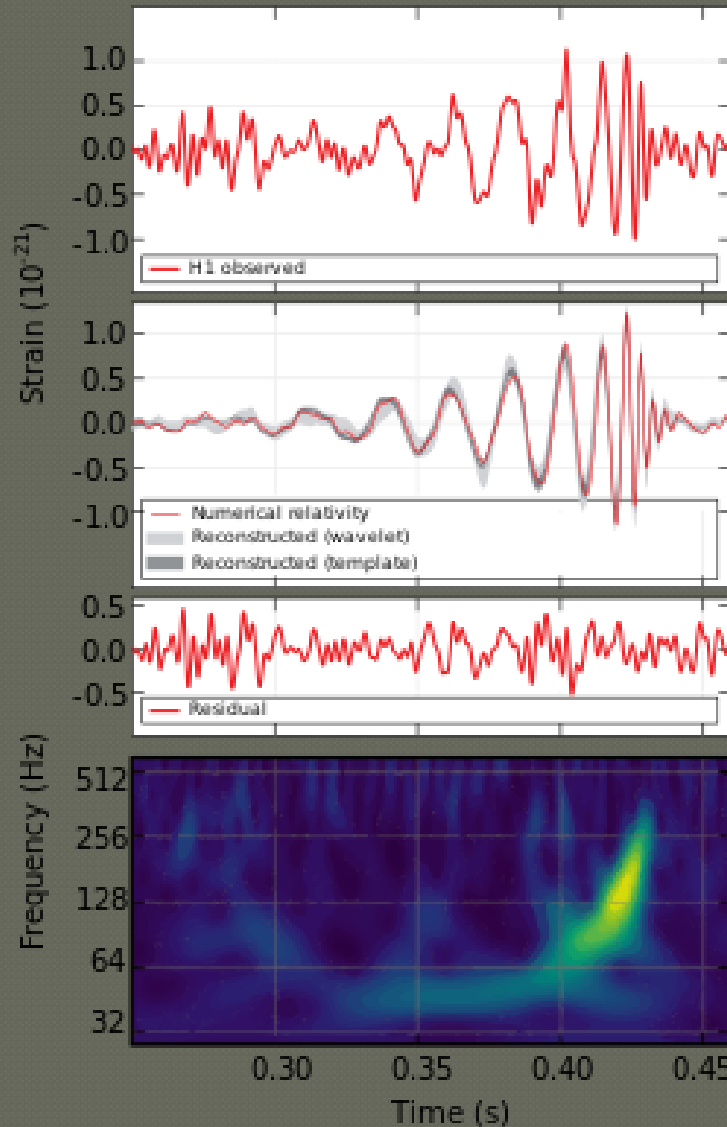
17 agosto 2017: Detección de la **colisión de dos estrellas de neutrones**

Parte 3 : ¿Qué podemos aprender de las ondas gravitatorias?



¿Qué es un espectrograma?

Hanford, Washington (H1)



Señal en el detector
(binaria agujeros negros,
GW150914)

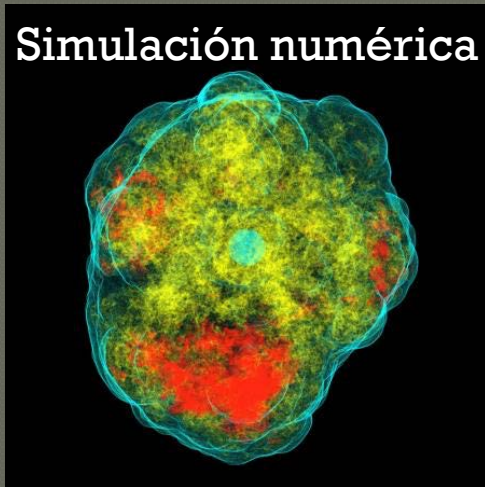
Señal en reconstruida

Ruido residual

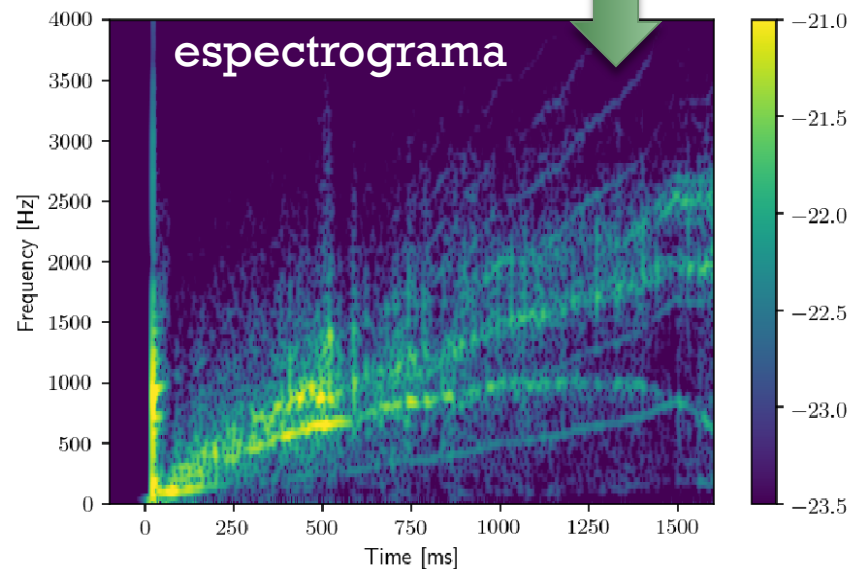
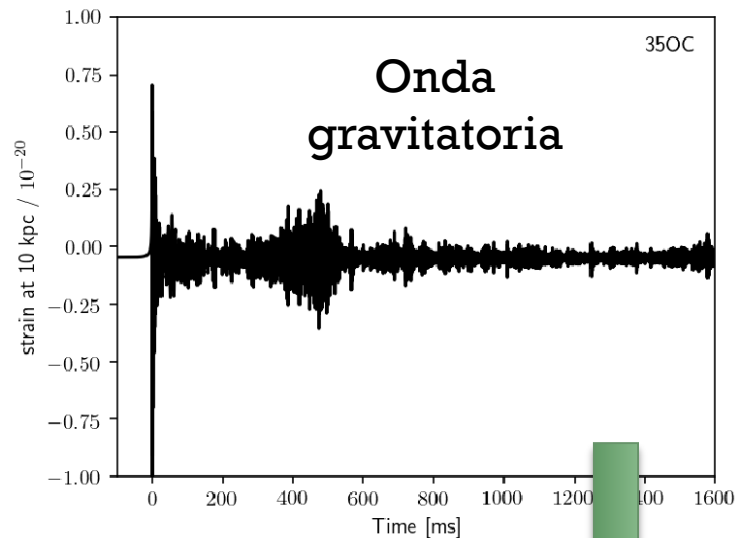
Espectrograma

Espectrogramas de supernovas

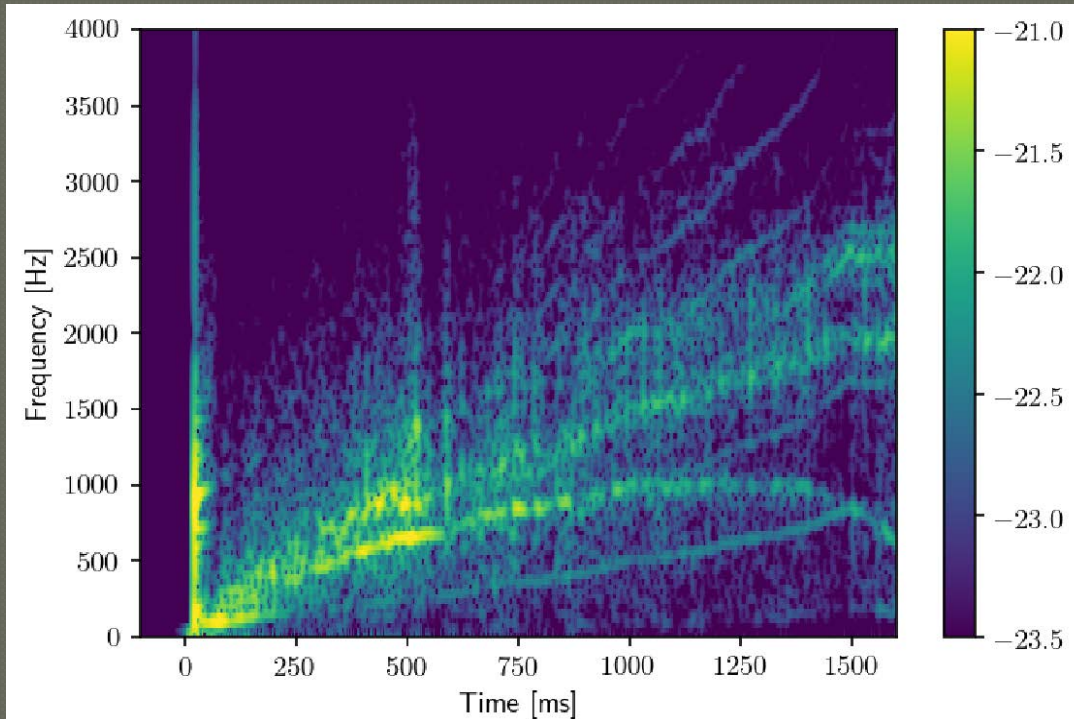
Simulación numérica



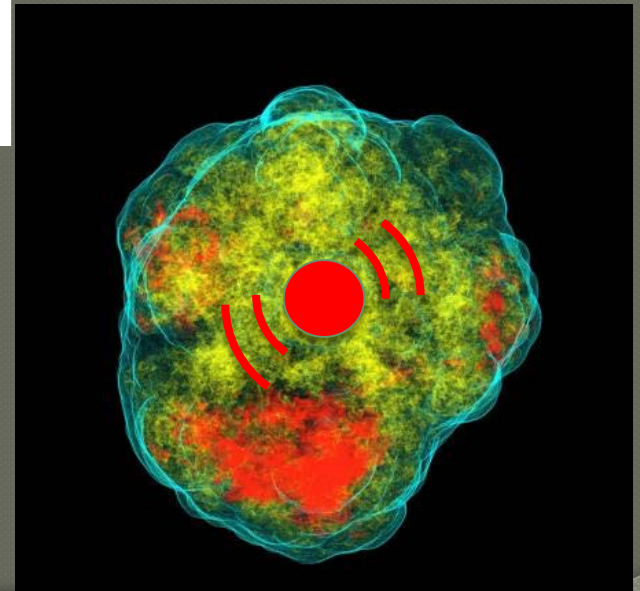
- La supernova es un fenómeno mucho más complejo
- La señal de onda gravitatoria es más rica y compleja



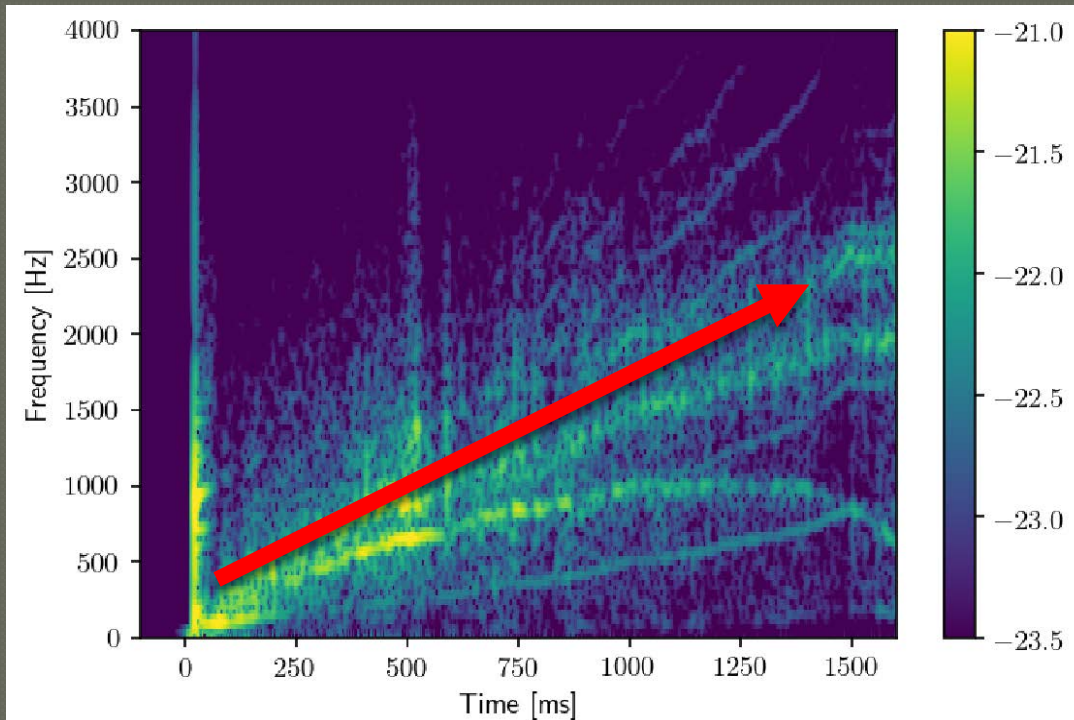
Oscilaciones de proto-estrellas de neutrones



- La proto-estrella de neutrones es golpeada por el material que cae
- Cada traza es un modo de oscilación (modos f, g o p)



Oscilaciones de proto-estrellas de neutrones



Frecuencias altas
= más compacto
(más pequeño)

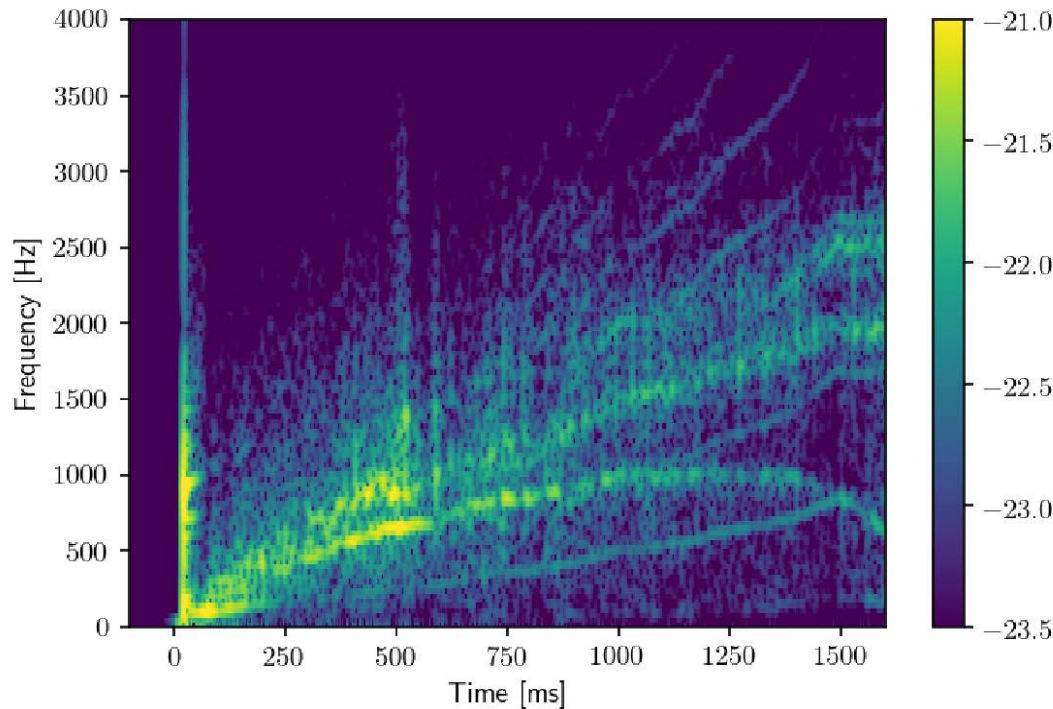


Frecuencias bajas
= menos compacto
(más grande)



más masivo
más compacto
(más pequeño)

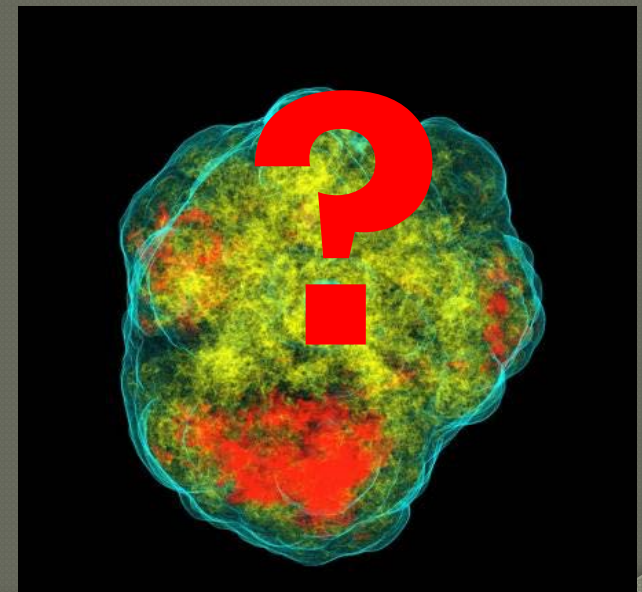
Inferencia



➤ Tratamos de determinar las propiedades de la proto-estrella de neutrones (masa, radio, rotación ...) a partir de su señal



Bayes (1701 - 1761)



¿Qué hacemos con esta información?

➤ Descubrir cual es el mecanismo que produce las supernovas

➤ ¿Confirmación de los modelos teóricos?

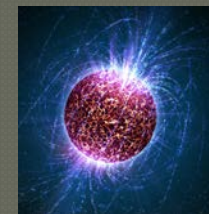
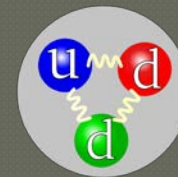
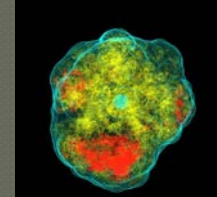
➤ ¿Algo distinto? → cambio de paradigma

➤ Propiedades de la materia a altas densidades

➤ Aprender sobre la interacción nuclear fuerte

➤ Determinar la ecuación de estado de la materia nuclear (esencial para entender las estrellas de neutrones)

➤ ¿Existencia de transiciones de fase (hiperones, quarks ...)?



Parte 4 : ¿Cómo detectamos ondas gravitatorias?





Advanced VIRGO



Lugar: Cascina, Pisa (Italy)
Construcción: 2003
Longitud brazos: 3 km

Miembros: Francia, Italia, Holanda, Polonia,
Hungria y España (UV, IFAE-UAB)



Advanced LIGO



Lugar: Hanford (Washington) y Livingston (Louisiana)

Construcción: 2002

Longitud de brazos: 4 km

Miembros: MIT y Caltech (USA) + additional institutions worldwide



Colaboración LIGO/Virgo

- Más de 1000 científicos en más de 100 instituciones en 20 países
- Intercambio tecnológico y de conocimiento
- *Análisis de datos unificado*



Retos

La detección de ondas gravitatorias de supernovas es un reto tecnológico:

- 10.000 veces más débiles que las binarias
- Los detectores actuales pueden observar supernovas cercanas (galácticas)
- En nuestra galaxia hay una cada 30-50 años

Nuestra galaxia

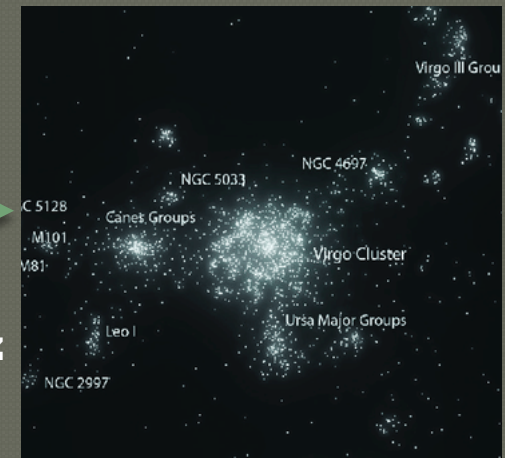


Andrómeda (M31)



2 M
años luz

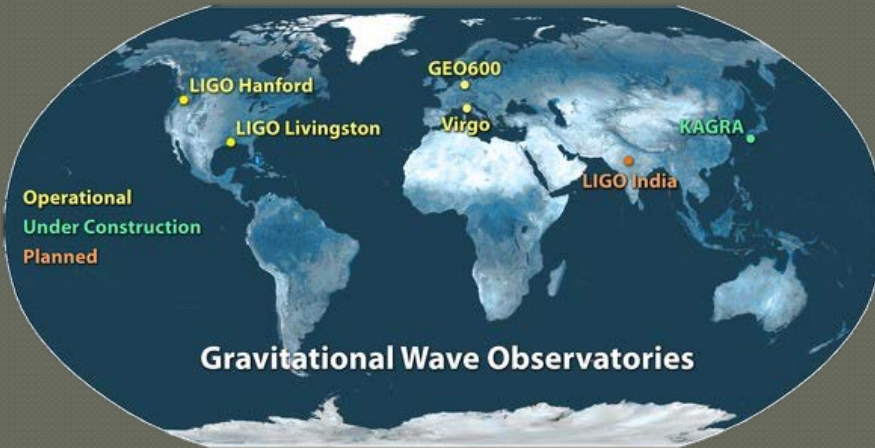
Cúmulo de Virgo
(~2000 galáxias)



50 M
años luz

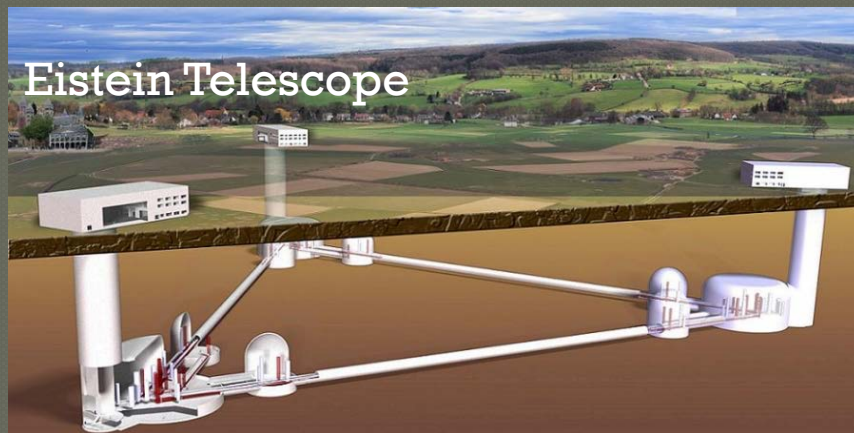
Para comparar: binarias agujeros negros (400-900 M años luz)
Binaria estrellas de neutrones (130 M años luz)

Futuro I – nuevos observatorios

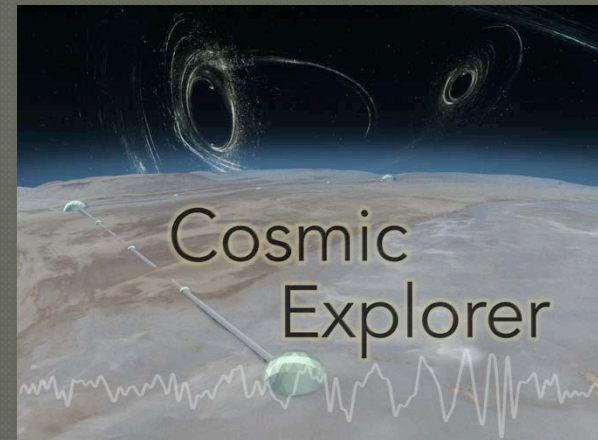


- Ampliar la red de detectores avanzados
 - KAGRA (Japón, 2019) y LIGO India (2025)
 - Mejor localización en el cielo
 - Mejor cobertura temporal

- Diseño de detectores de 3ª generación (sensibilidad x 10)



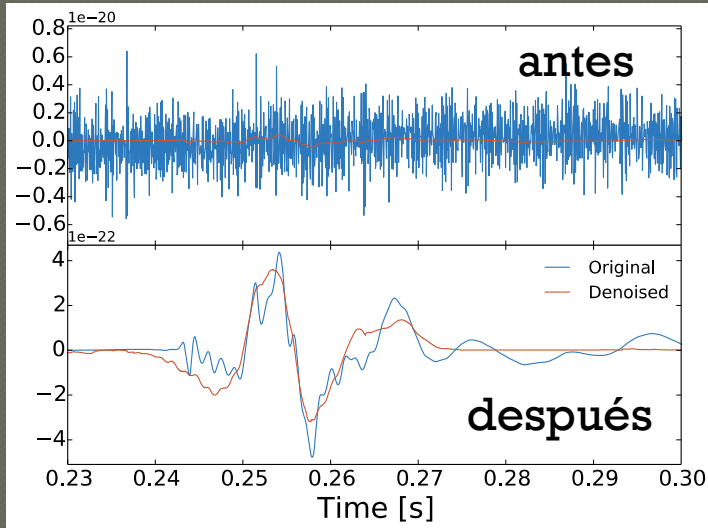
- Europeo
- 30 km - triangular
- Subterráneo y criogénico



- USA
- 40 km - L
- En superficie

Futuro II – análisis de datos

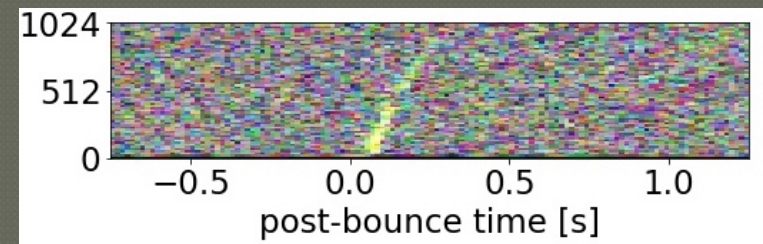
- Mejorar nuestras técnicas de análisis de datos para extraer señales muy débiles del ruido del detector



Torres-Forné et al 2016

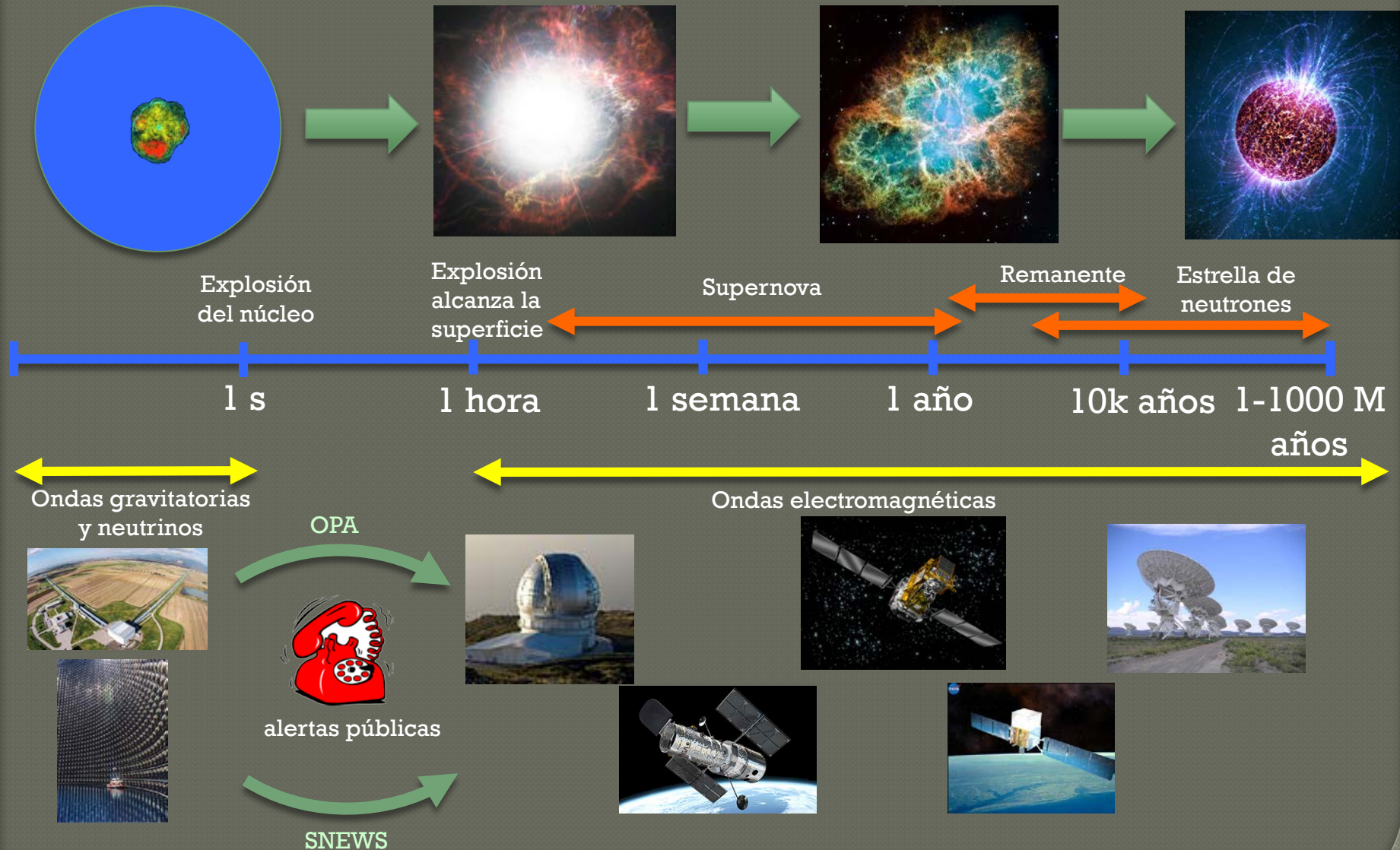
- Desarrollo de nuevas técnicas de eliminación del ruido

- Uso de técnicas de **machine learning** y **deep learning** como las usadas en **Big data**
 - Reconocimiento automático de patrones en los datos
 - Clasificación de datos: ¿señal o ruido?



Astone et al 2018

Futuro III – astronomía multi-mensajero





Grupo Virgo de la Universitat de València



www.uv.es/virgogroup

@VirgoValencia



- Departamento de astronomía y astrofísica, (parte del grupo de astrofísica relativista)
- Modelado de fuentes de ondas gravitatorias
- Análisis de datos
- En VIRGO desde 2016



22nd International Conference on General Relativity and Gravitation
13th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves

Valencia 7-12 Julio 2019





¡Gracias!