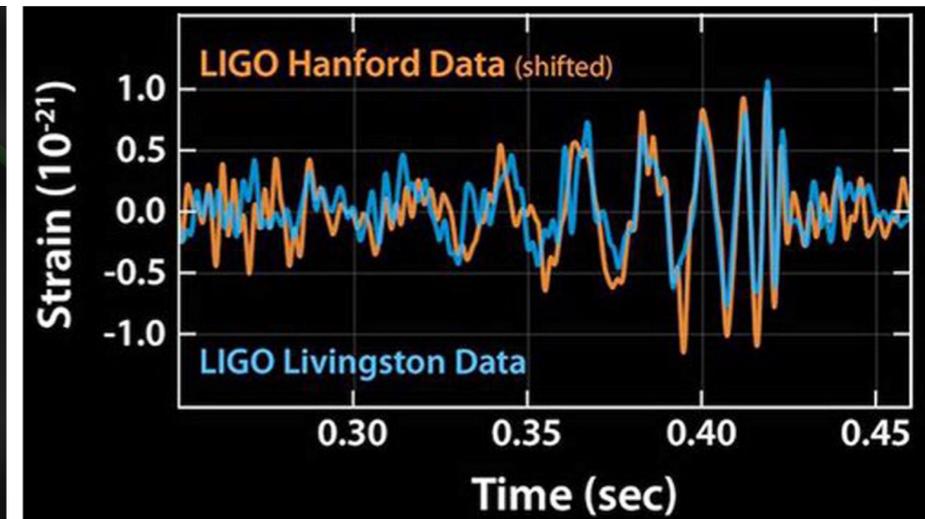
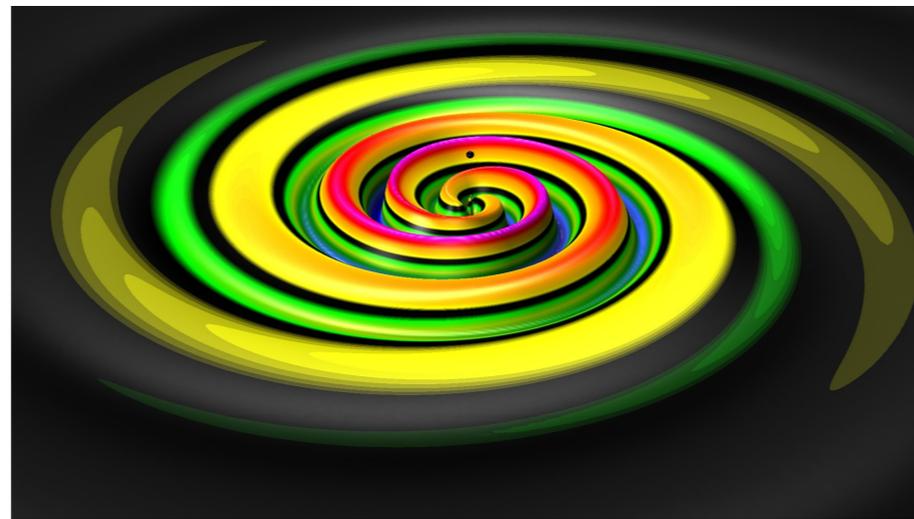
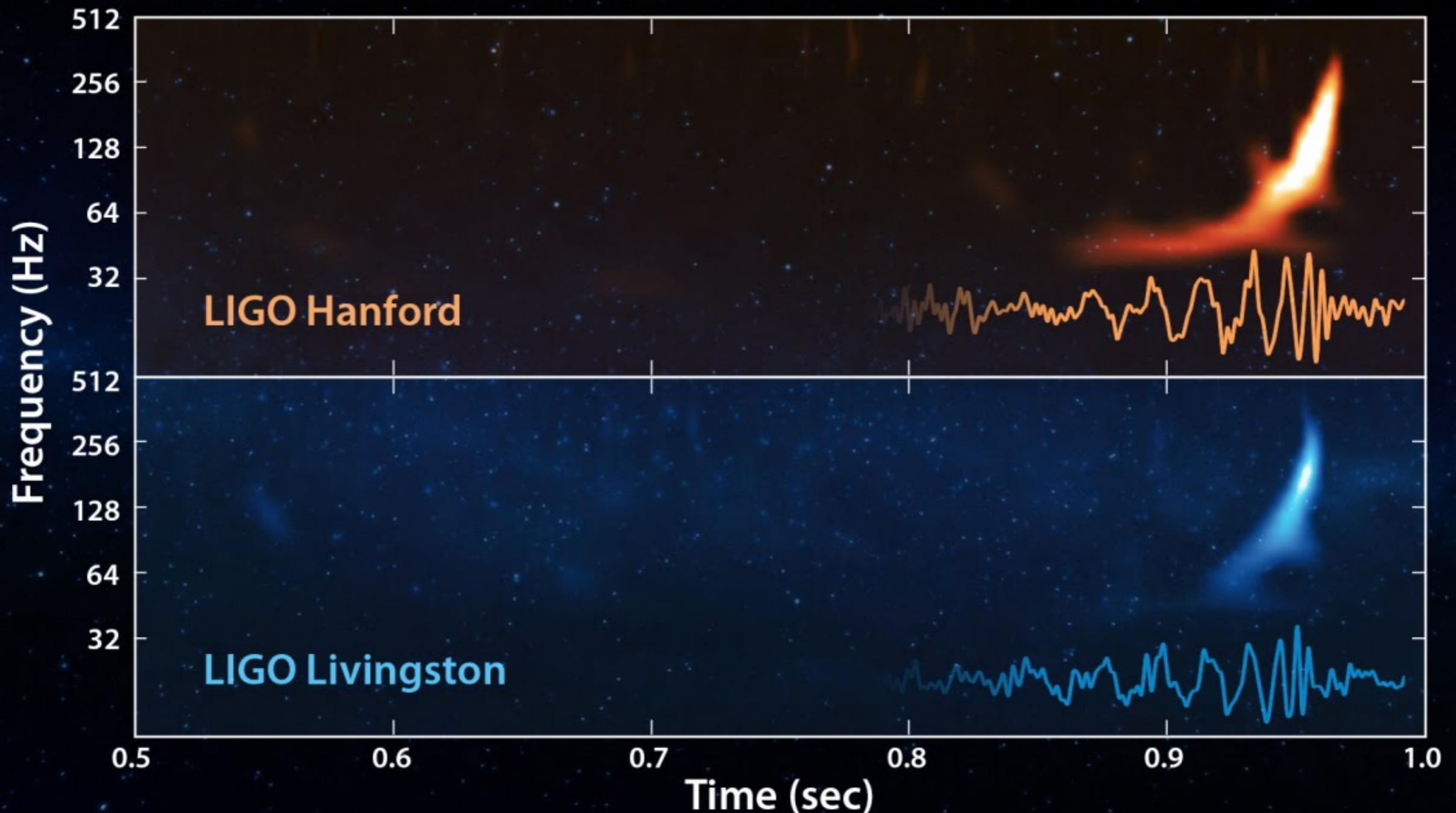


Ondas gravitatorias de binarias de agujeros negros: descifrando sus enigmas con superordenadores



Sascha Husa, UIB

Arquitectura C3smica VI - Valencia 15/11/2018



- Primera observación de ondas gravitacionales: GW150914. ~0.2 segundos de señal, aumentando en amplitud y frecuencia.
- Consistente con la fusión de 2 agujeros negros ~ 35 masas solares. ¿Cómo lo sabemos? [PRL116, 061102 \(2016\)](#)

Gravedad & Teoría de Relatividad



Newton 1666: ¡La gravedad entre 2 cuerpos disminuye con el cuadrado de la distancia!

La teoría de Newton es una de las teorías científicas más exitosas de todos los tiempos

La gravedad actúa instantáneamente.

- ¡Información viaja con velocidad finita!
- Teoría de relatividad general 1915.
- Cargas eléctricas aceleradas: a más distancia de la carga, la línea de campo aprende del movimiento más tarde - ondas electromagnéticas.



Einstein 1905:
¡La velocidad de la luz es universal!

Gravedad & Teoría de Relatividad



Newton 1666: ¡La gravedad entre 2 cuerpos disminuye con el cuadrado de la distancia!

La teoría de Newton es una de las teorías científicas más exitosas de todos los tiempos

La gravedad actúa instantáneamente.

- ¡Información viaja con velocidad finita!
- Teoría de relatividad general 1915.
- Cargas eléctricas aceleradas: a más distancia de la carga, la línea de campo aprende del movimiento más tarde - ondas electromagnéticas.



Einstein 1905:
¡La velocidad de la luz es universal!

Gravedad & Teoría de Relatividad



Newton 1666: ¡La gravedad entre 2 cuerpos disminuye con el cuadrado de la distancia!

La teoría de Newton es una de las teorías científicas más exitosas de todos los tiempos

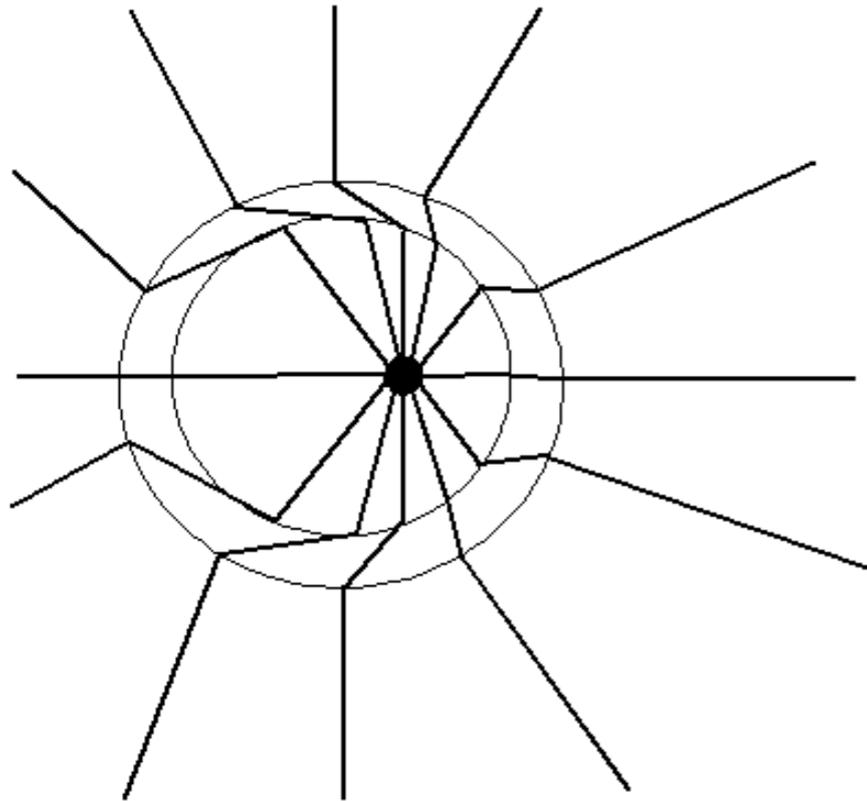
La gravedad ~~actúa~~ instantáneamente.
NO - A. Einstein

- ¡Información viaja con velocidad finita!
- Teoría de relatividad general 1915.
- Cargas eléctricas aceleradas: a más distancia de la carga, la línea de campo aprende del movimiento más tarde - ondas electromagnéticas.



Einstein 1905:
¡La velocidad de la luz es universal!

Gravedad & Teoría de Relatividad



Newton 1666: ¡La gravedad entre 2 cuerpos disminuye con el cuadrado de la distancia!

La teoría de Newton es una de las teorías científicas más exitosas de todos los tiempos

La gravedad actúa instantáneamente.

NO - A. Einstein

- ¡Información viaja con velocidad finita!
- Teoría de relatividad general 1915.
- Cargas eléctricas aceleradas: a más distancia de la carga, la línea de campo aprende del movimiento más tarde - ondas electromagnéticas.



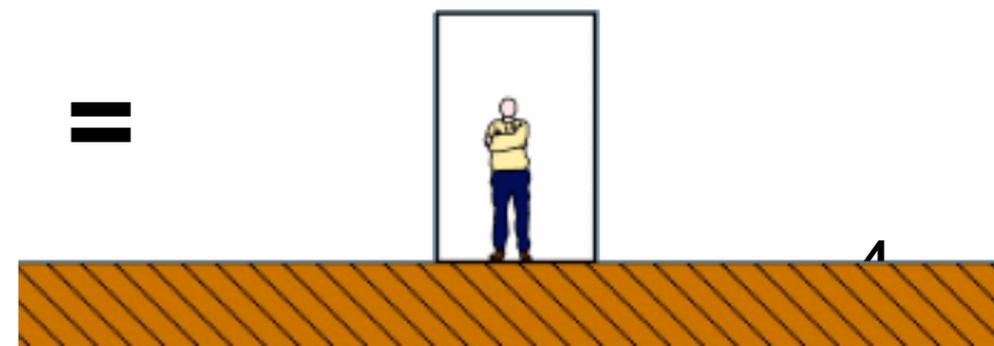
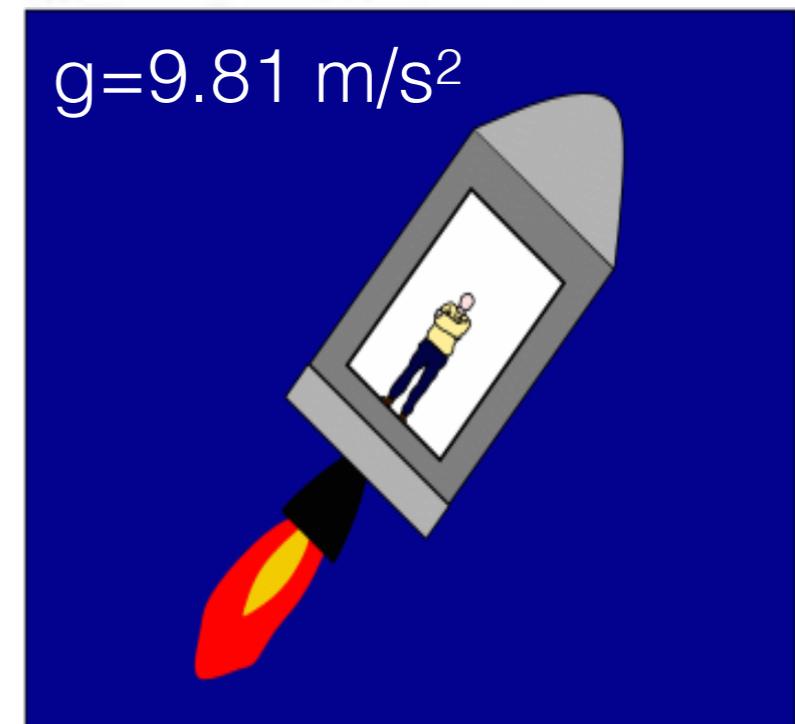
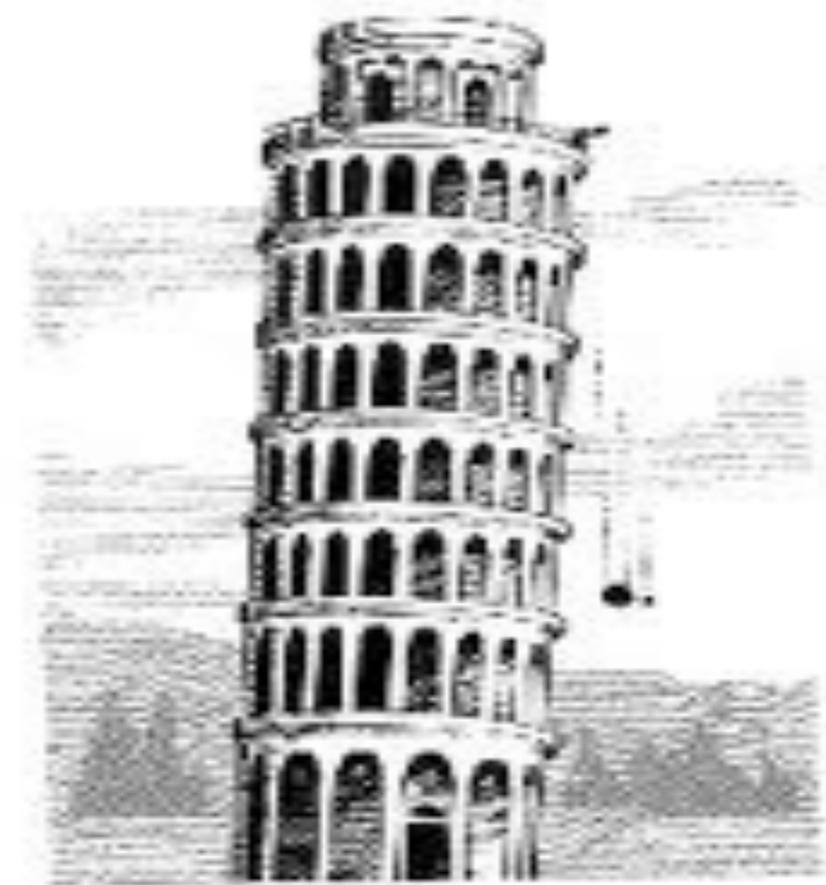
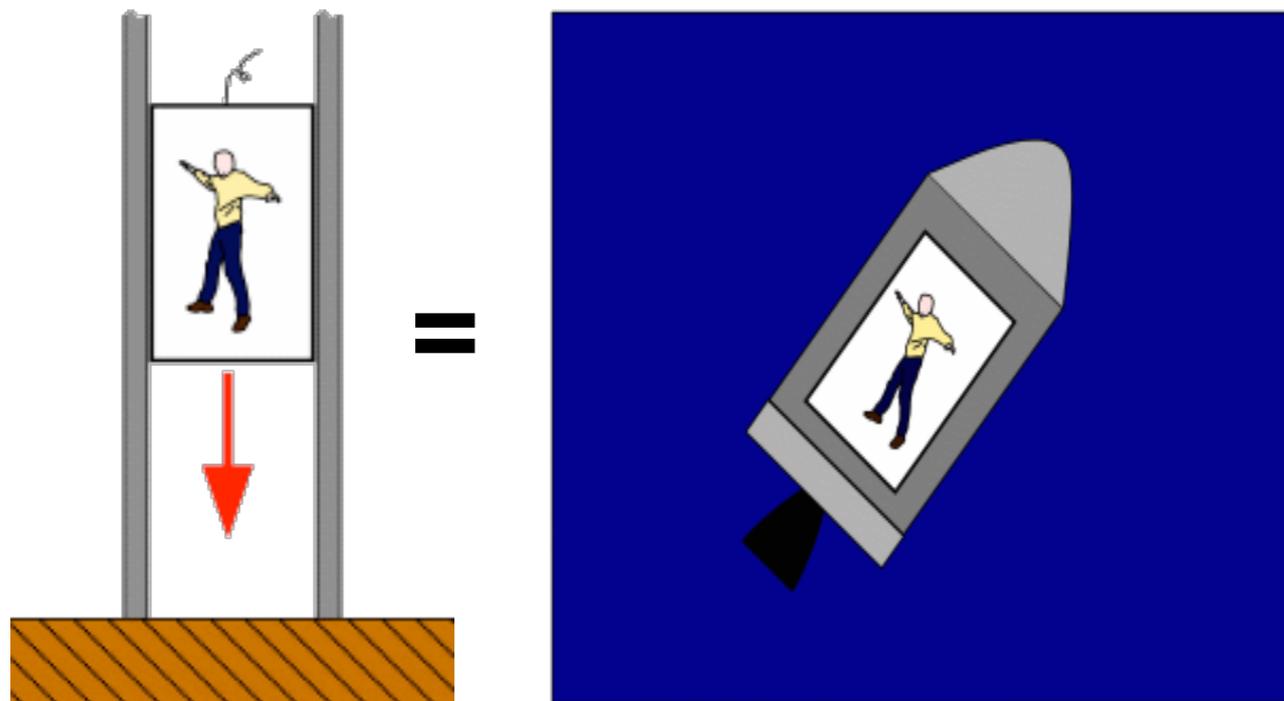
Einstein 1905:
¡La velocidad de la luz es universal!

El principio de equivalencia

Experimentos de Galileo: todos los cuerpos caen con la misma velocidad (aceleración).
masa gravitacional=masa inercial

La version de Einstein:

Un campo gravitatorio homogéneo no se puede distinguir de una aceleración uniforme.



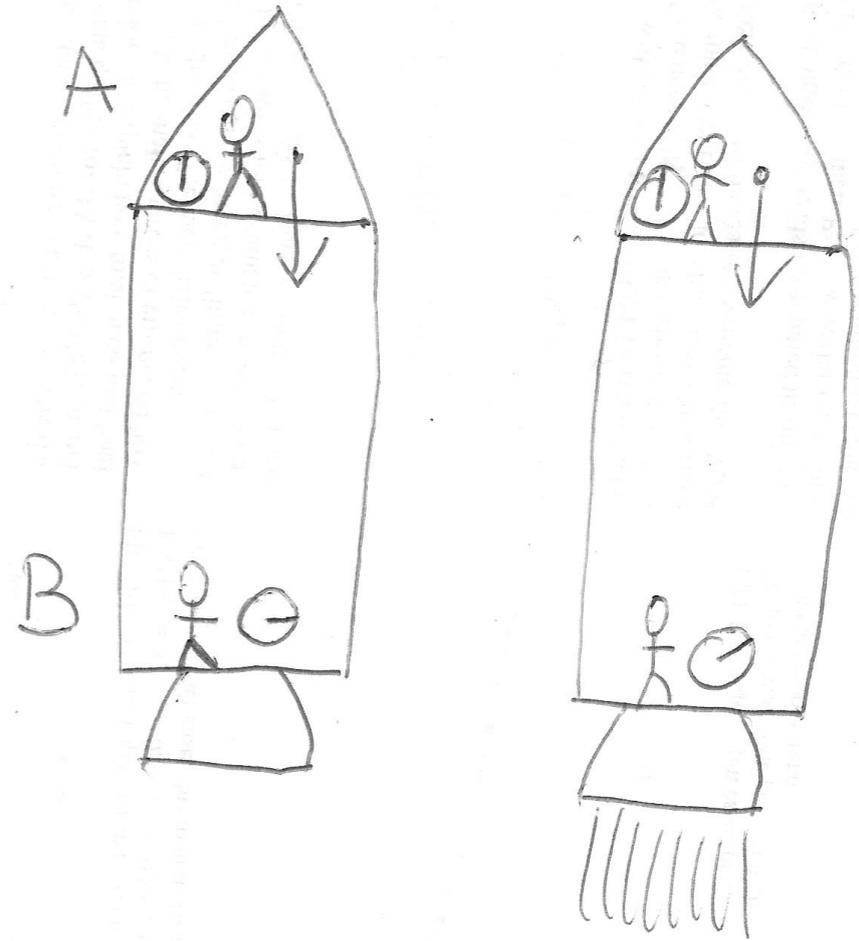
En un campo gravitacional: relojes corren más lentos

Experimento mental:

Alicia envía señales luminosas a Borja desde la parte superior de un cohete.

Debido a la aceleración, las señales llegan con una frecuencia más alta!

Según el principio de equivalencia, lo mismo gravitatorio: Borja mide las señales con un reloj y él el tiempo pasa más lento.



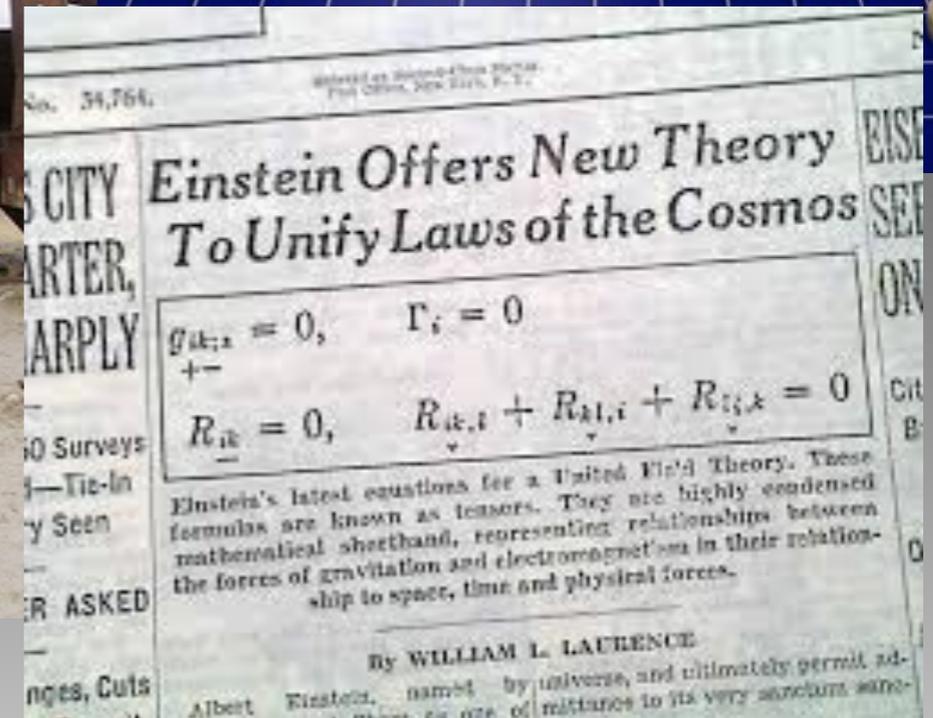
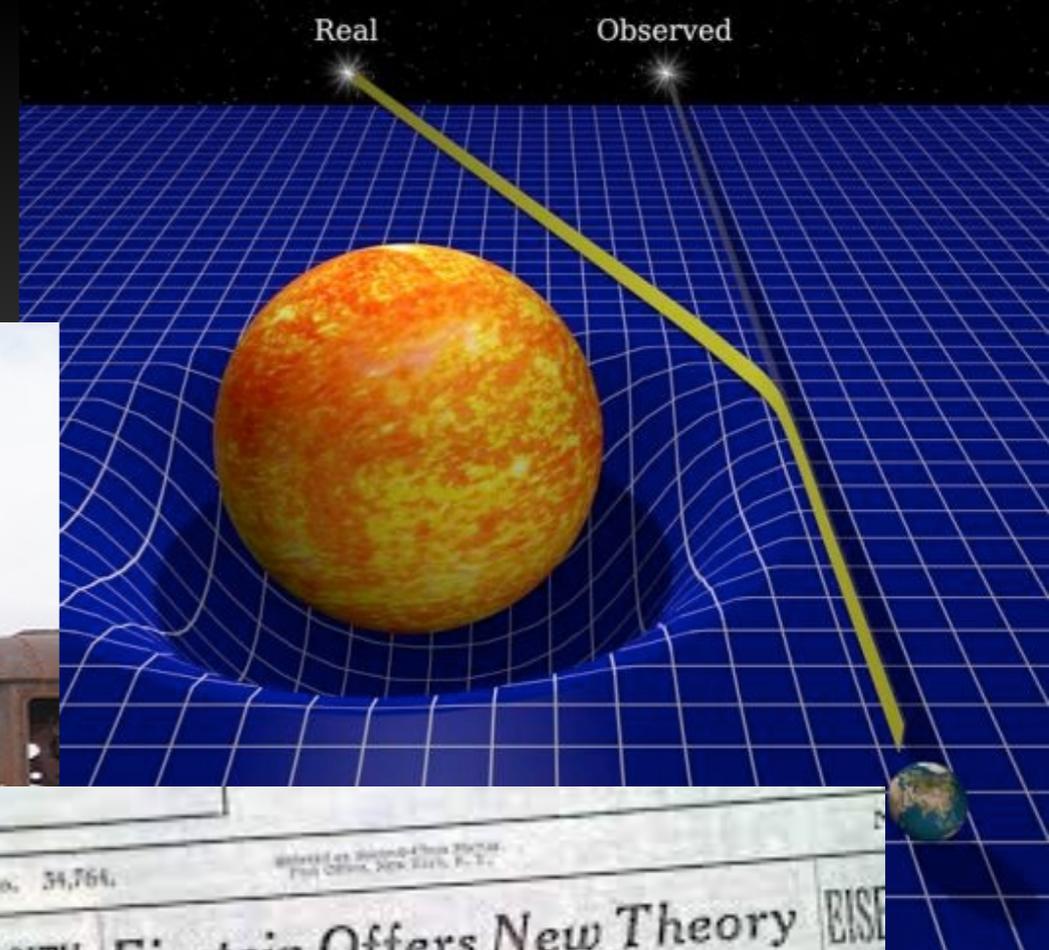
El campo gravitatorio curva el tiempo (y el espacio)!

Duraciones y distancias dependen de la presencia de masa/energía.

Ecuación de Newton del campo gravitacional:

$$\Delta\phi = 4\pi G\rho(\vec{x}, t) \quad \rightarrow \quad \vec{F} = -m\vec{\nabla}\phi$$

Ecuaciones de Einstein:



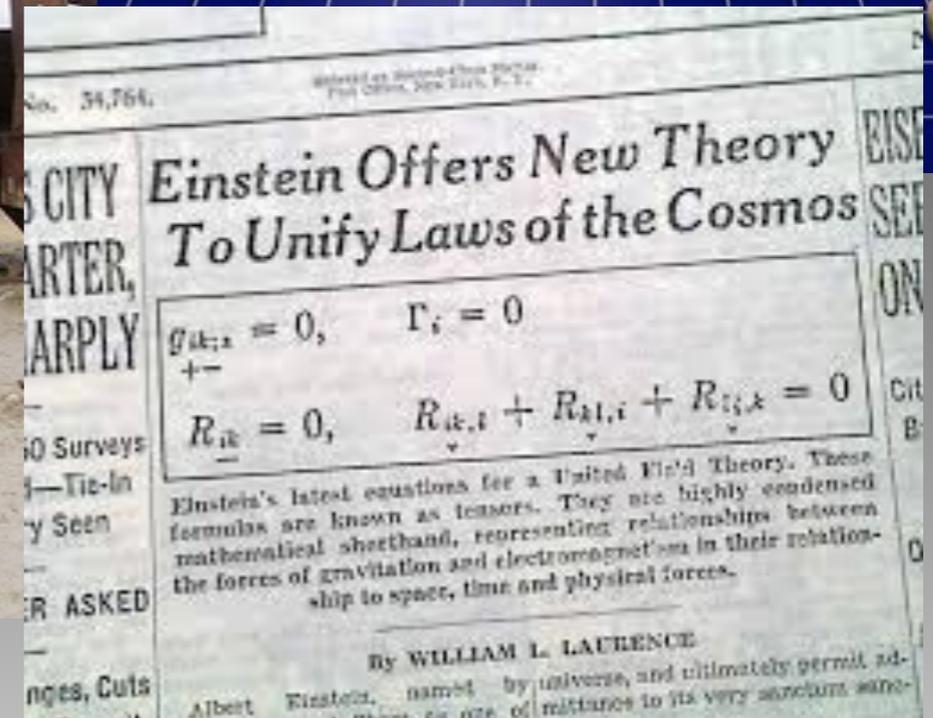
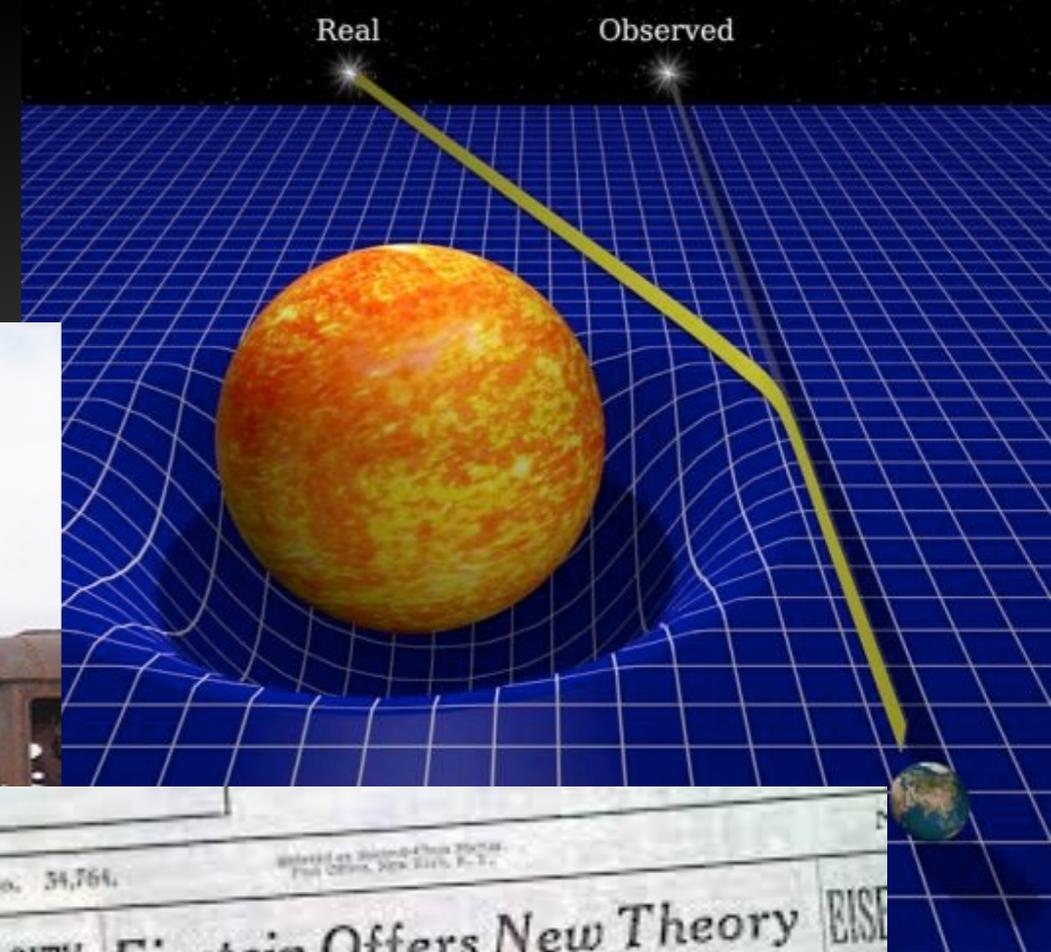
- La materia le dice al espacio-tiempo cómo debe curvarse, y la curvatura como debe moverse la materia.
- “Partículas libres” se mueven en geodésicas = curvas más rectas.
- Interpretación como ecuaciones diferenciales:
10 ecuaciones diferenciales parciales no lineales acopladas.

Ecuación de Newton del campo gravitacional:

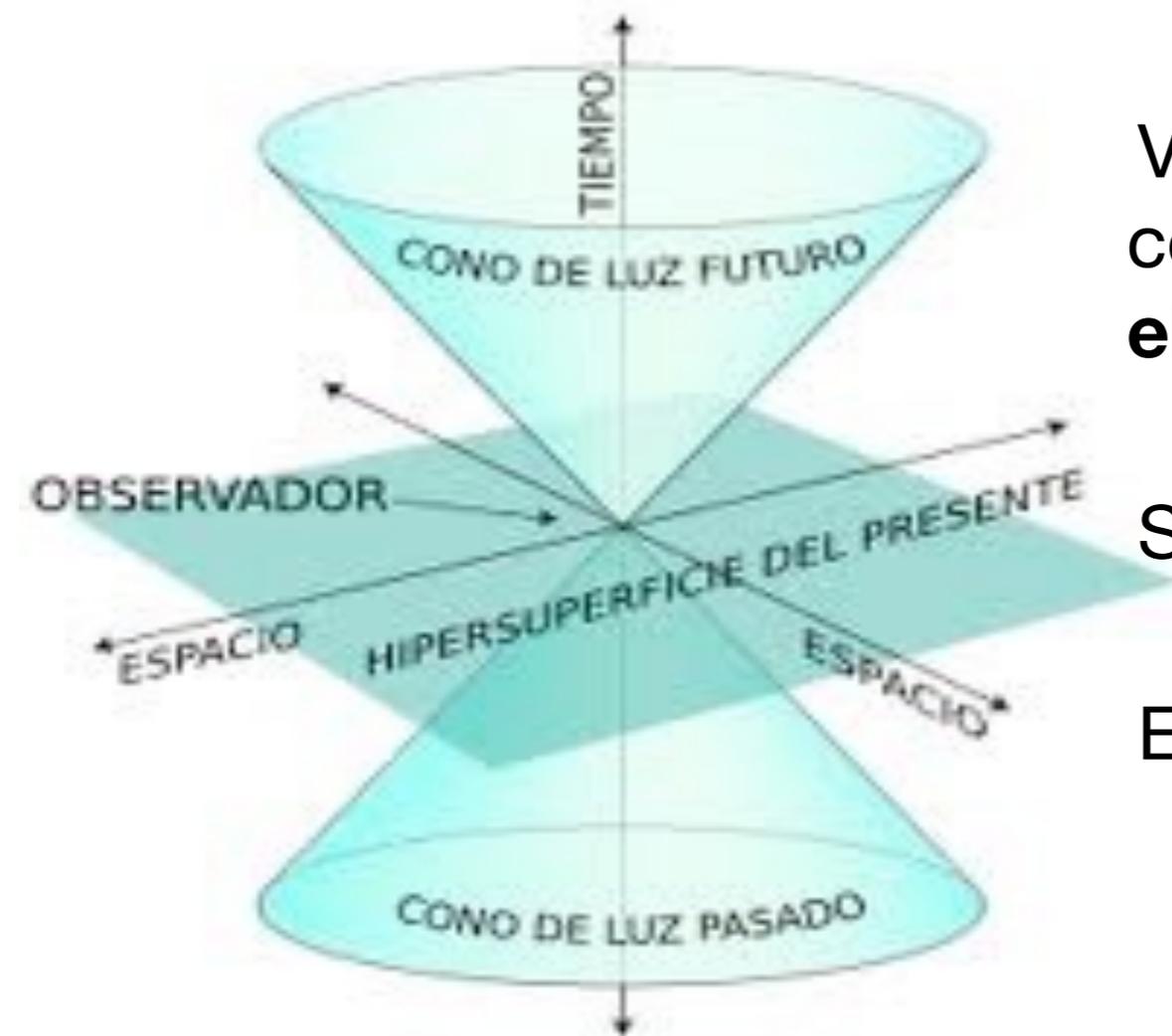
$$\Delta\phi = 4\pi G\rho(\vec{x}, t) \quad \rightarrow \quad \vec{F} = -m\vec{\nabla}\phi$$

Ecuaciones de Einstein:

Gravedad es geometría



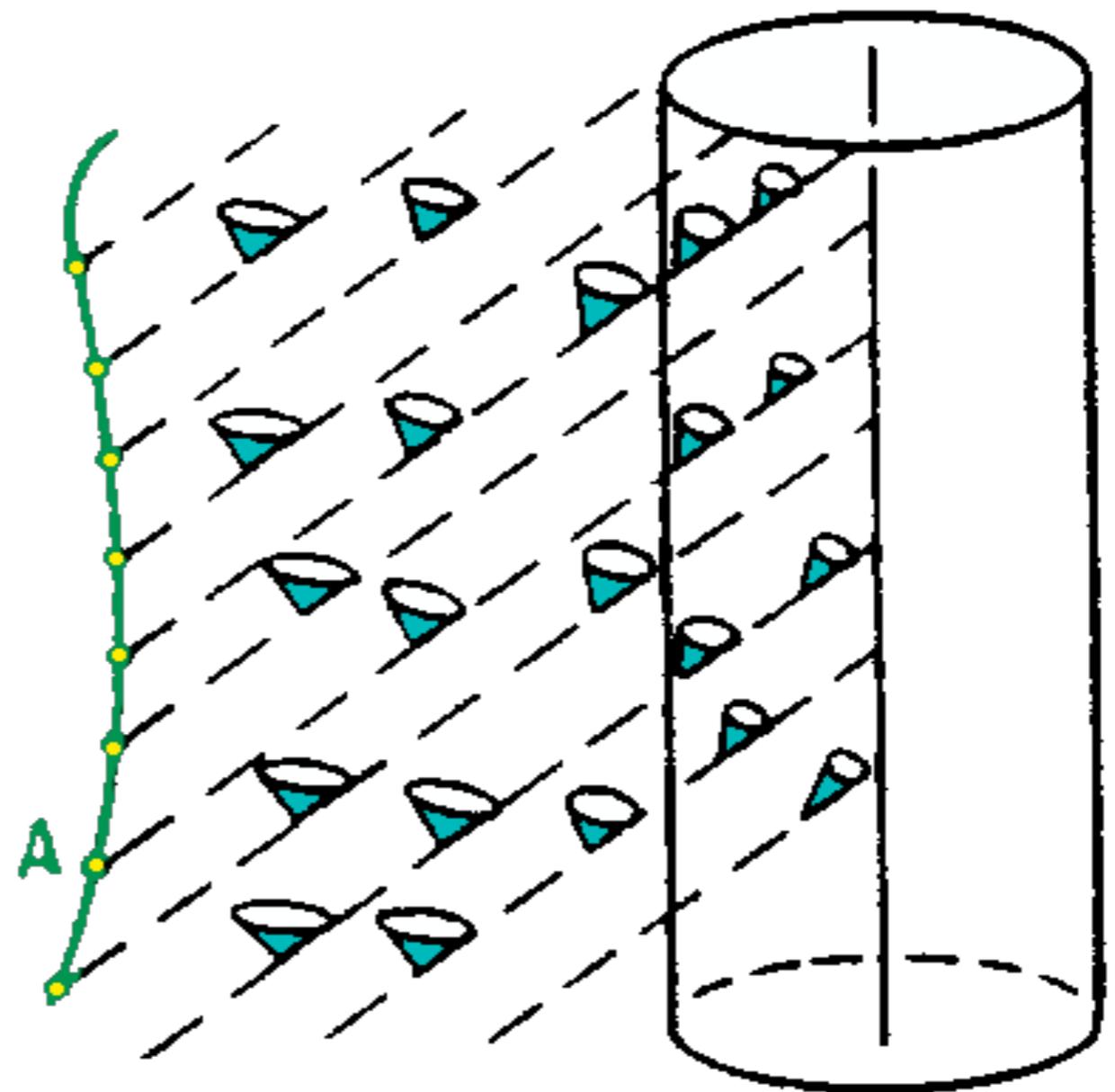
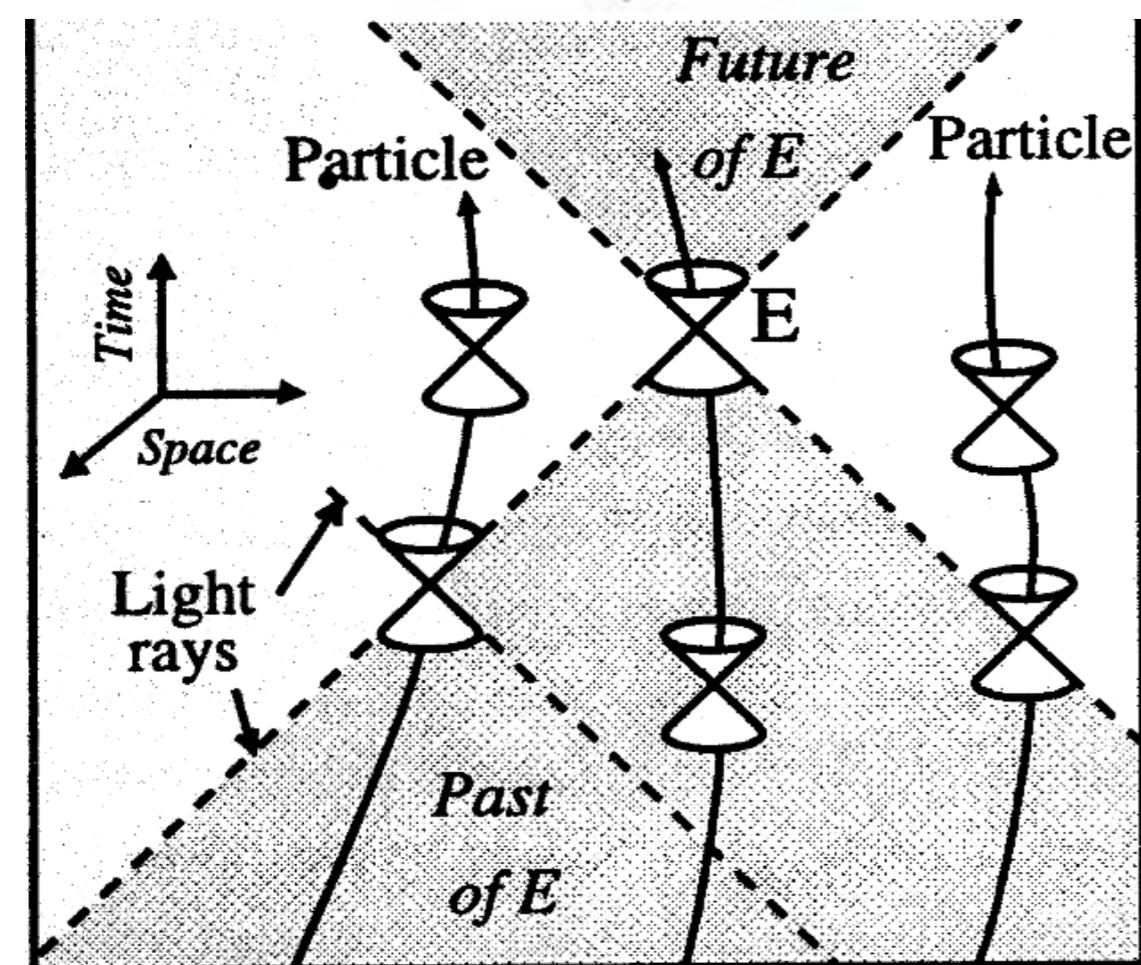
- La materia le dice al espacio-tiempo cómo debe curvarse, y la curvatura como debe moverse la materia.
- “Partículas libres” se mueven en geodésicas = curvas más rectas.
- Interpretación como ecuaciones diferenciales:
10 ecuaciones diferenciales parciales no lineales acopladas.



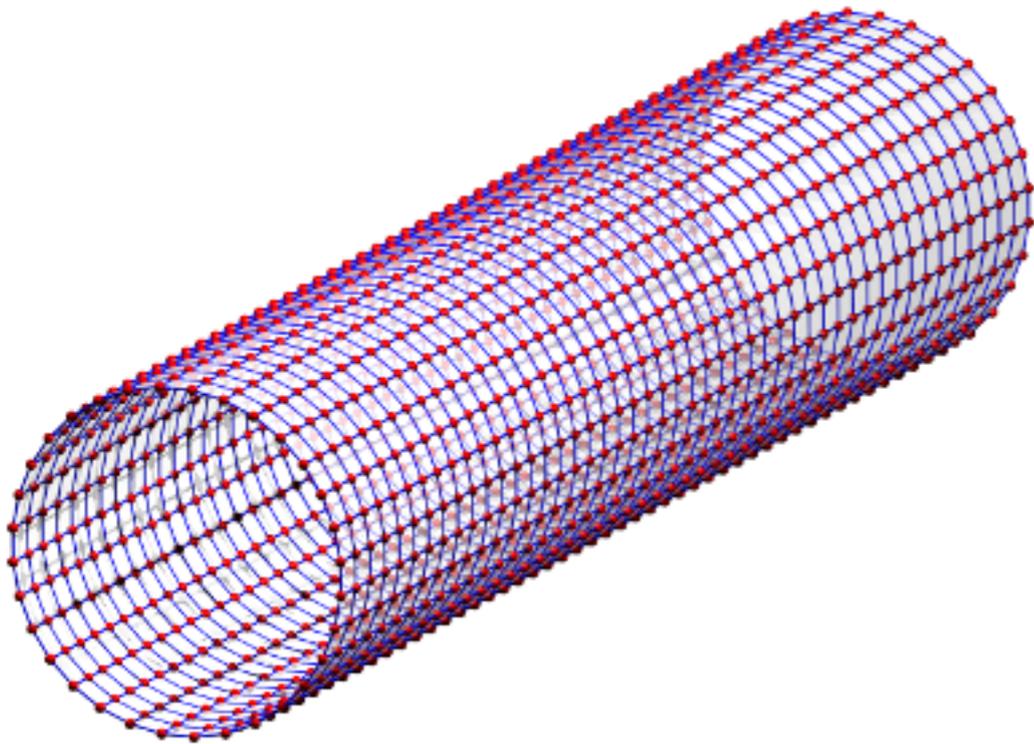
Vivimos en un universo de 4 dimensiones, con el tiempo como la cuarta dimensión: **el espacio-tiempo.**

Señales viajan dentro del "cono de luz".

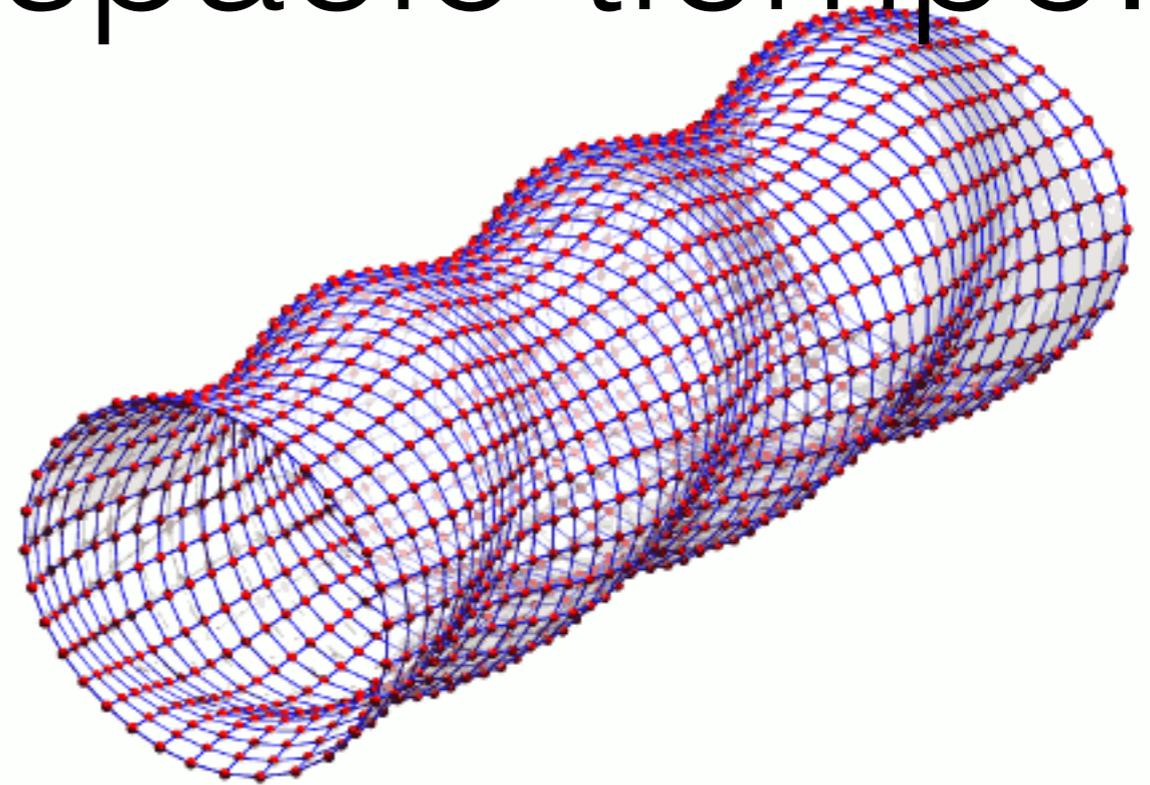
El espacio-tiempo es suave y maleable!



Ondas Gravitacionales: Vibraciones en el espacio-tiempo.

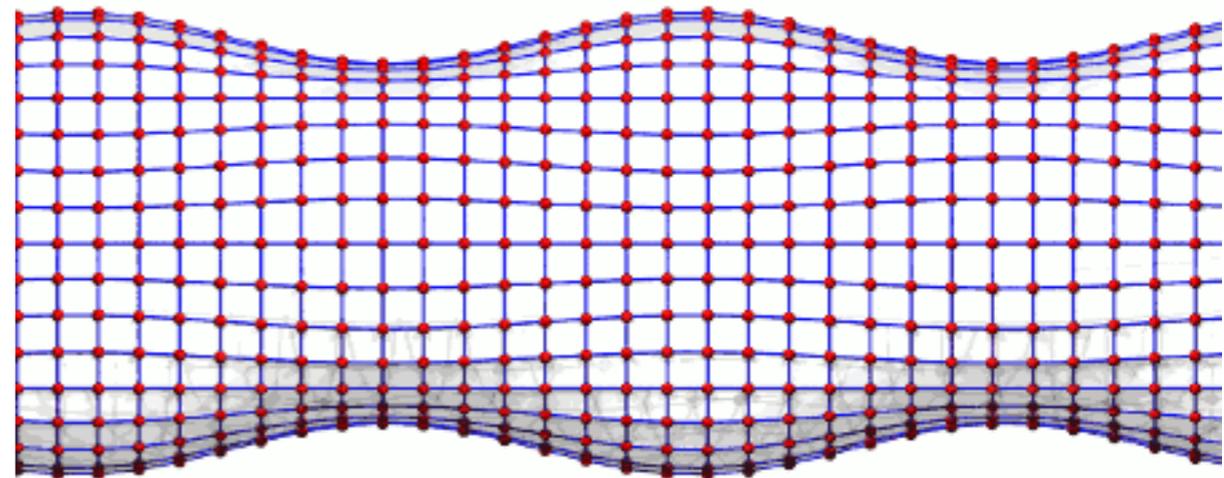


www.einstein-online.info

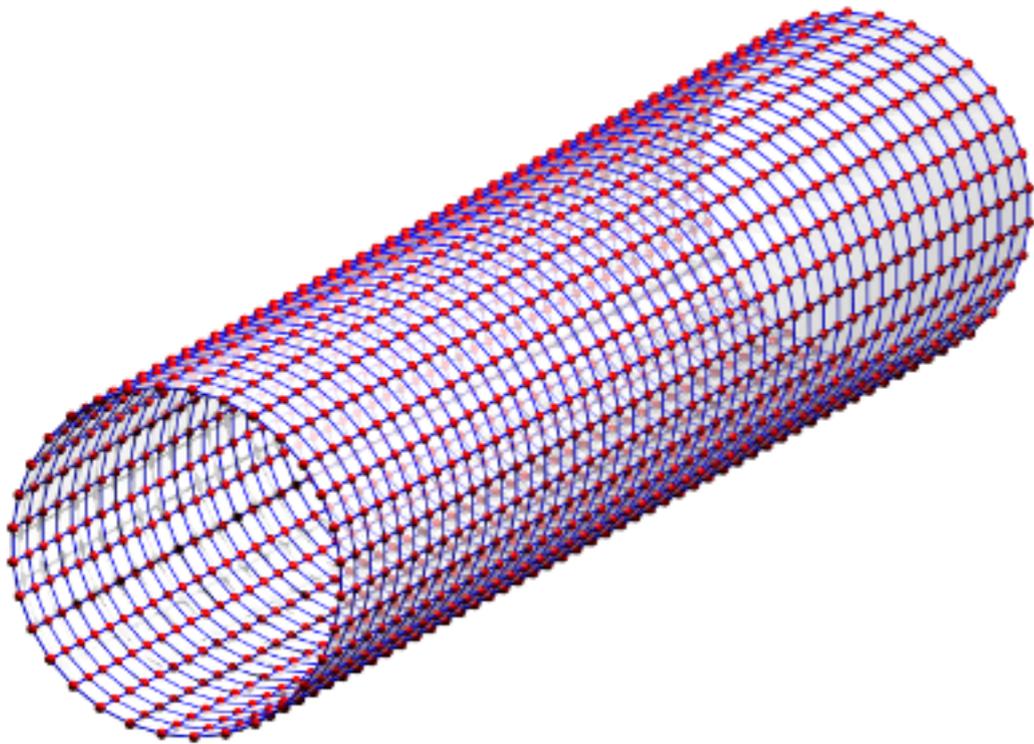


www.einstein-online.info

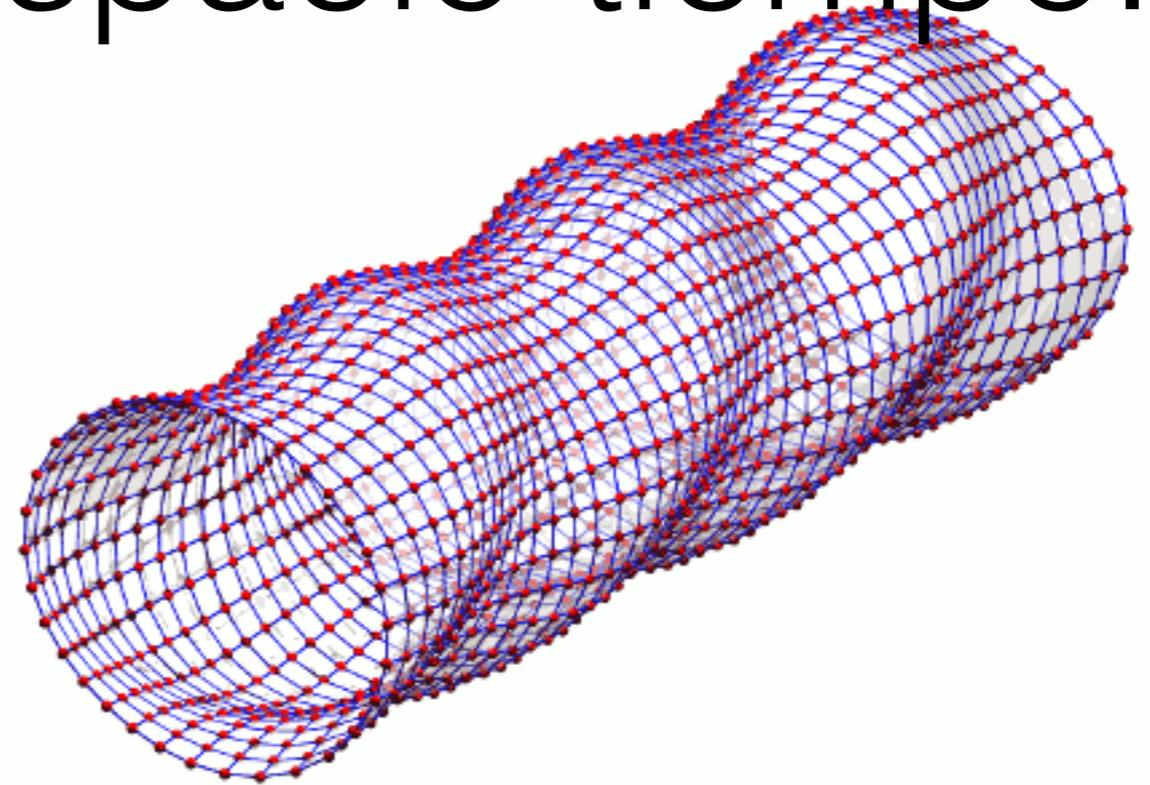
Las ondas gravitacionales son generadas por masas aceleradas y viajan a la velocidad de la luz.



Ondas Gravitacionales: Vibraciones en el espacio-tiempo.

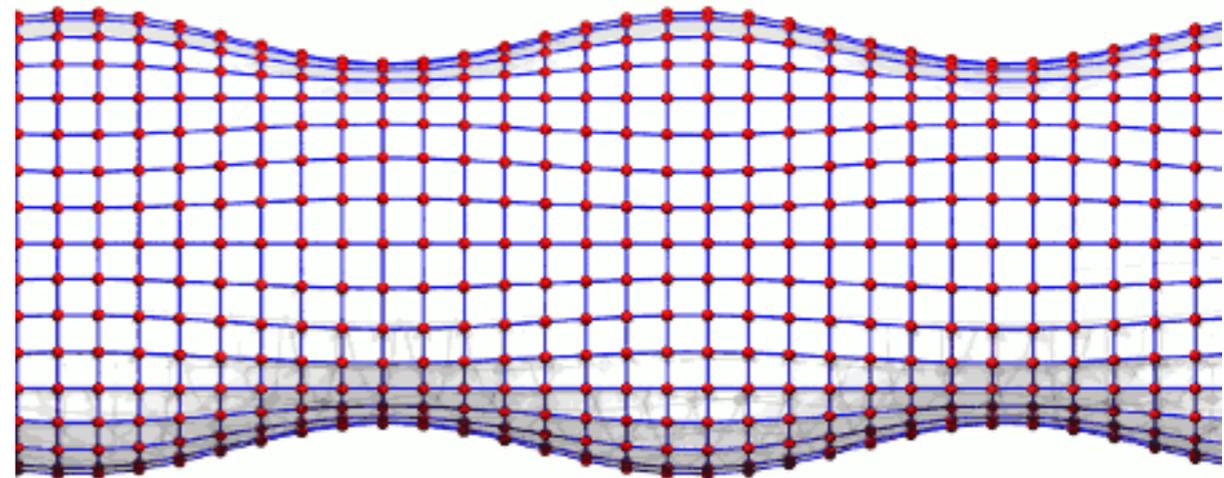


www.einstein-online.info

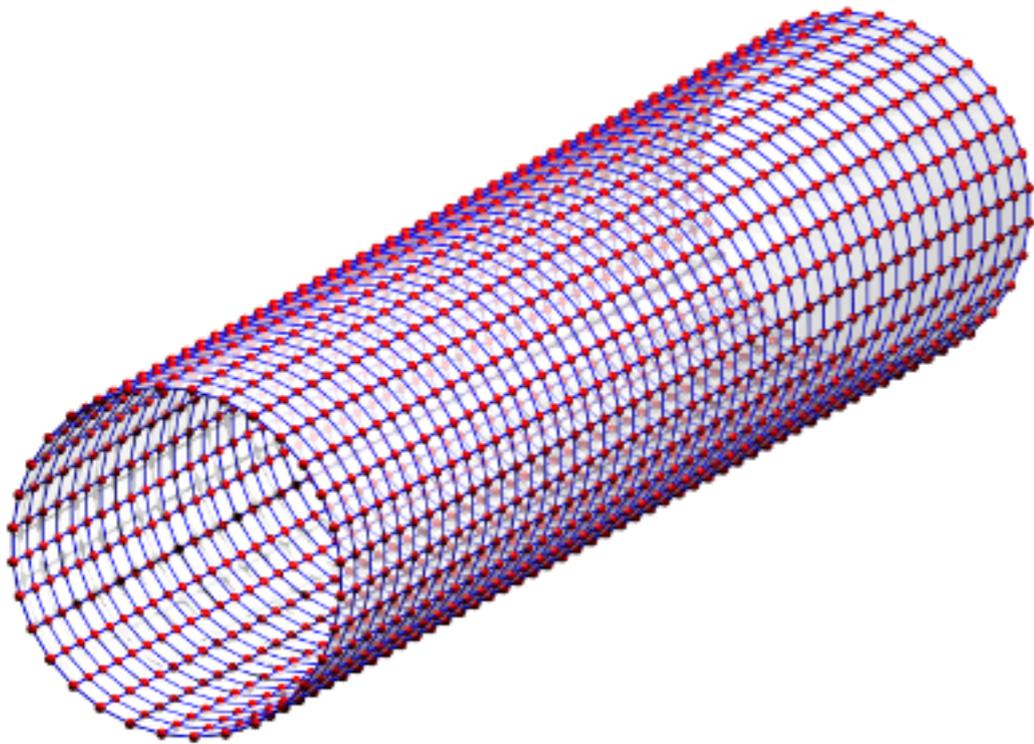


www.einstein-online.info

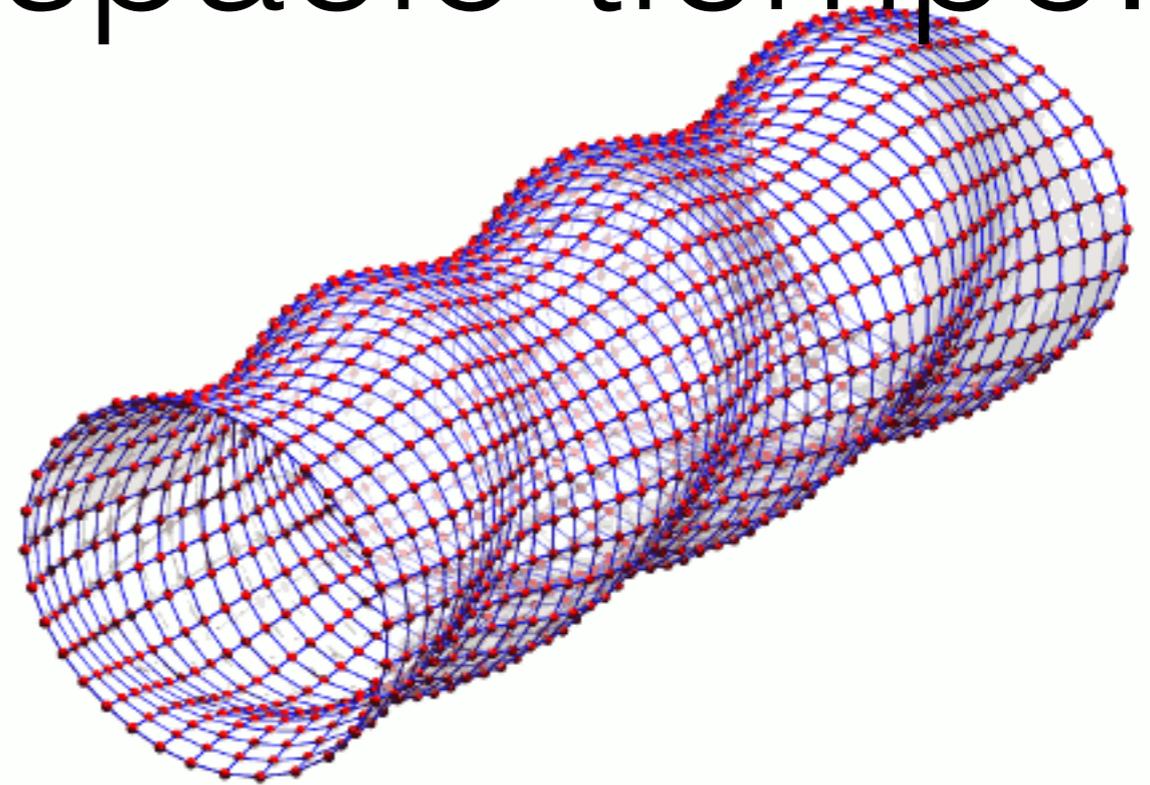
Las ondas gravitacionales son generadas por masas aceleradas y viajan a la velocidad de la luz.



Ondas Gravitacionales: Vibraciones en el espacio-tiempo.

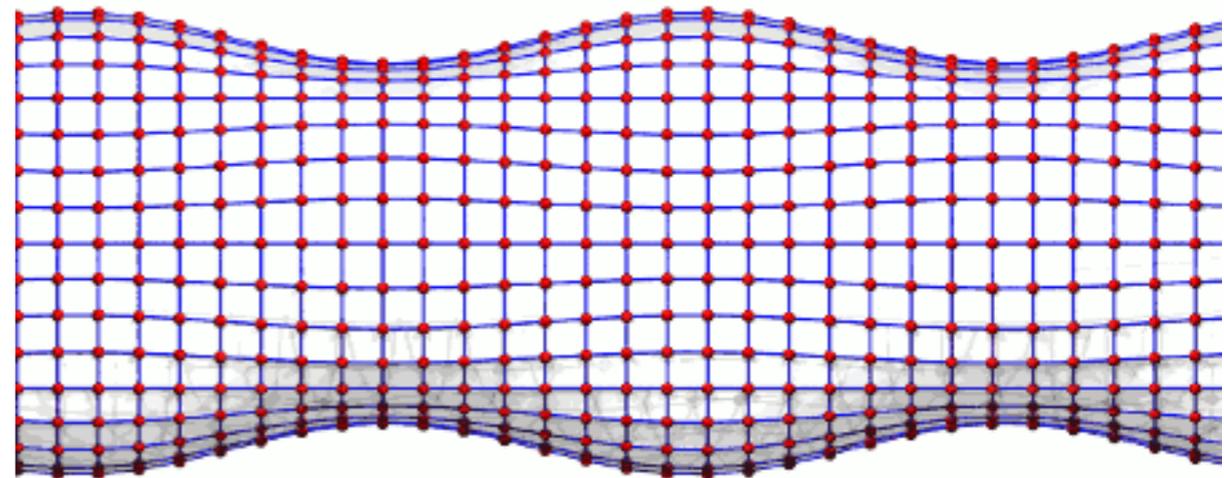


www.einstein-online.info

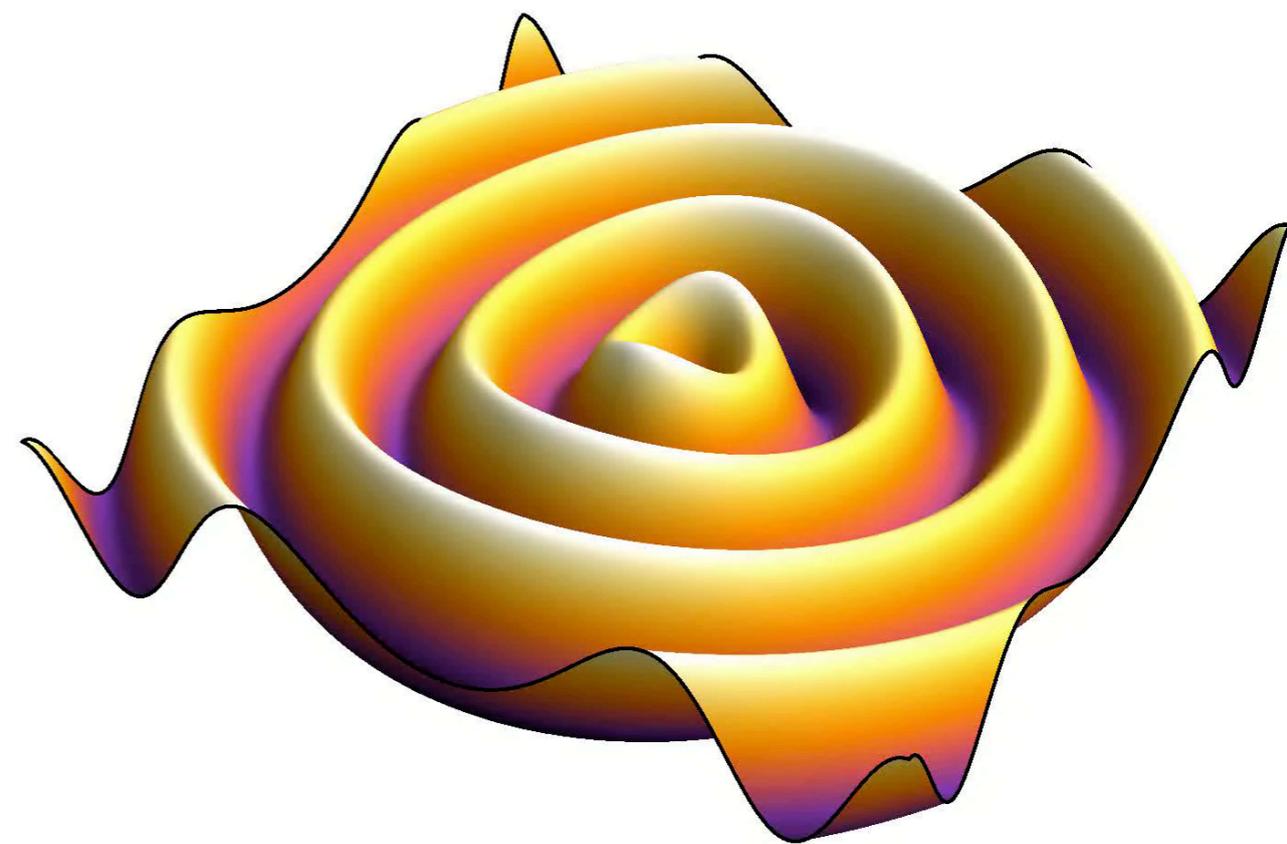


www.einstein-online.info

Las ondas gravitacionales son generadas por masas aceleradas y viajan a la velocidad de la luz.



Ondas gravitacionales & órbitas



Potencia de radiación del sol (electromagnética).

$4 \times 10^{26} \text{ W}$

barra de hierro (1000 t, 100 m, 3 Hz)

10^{-26} W

Tierra en órbita alrededor del sol

200 W

Sistema estelar binario

$10^{15} - 10^{30} \text{ W}$

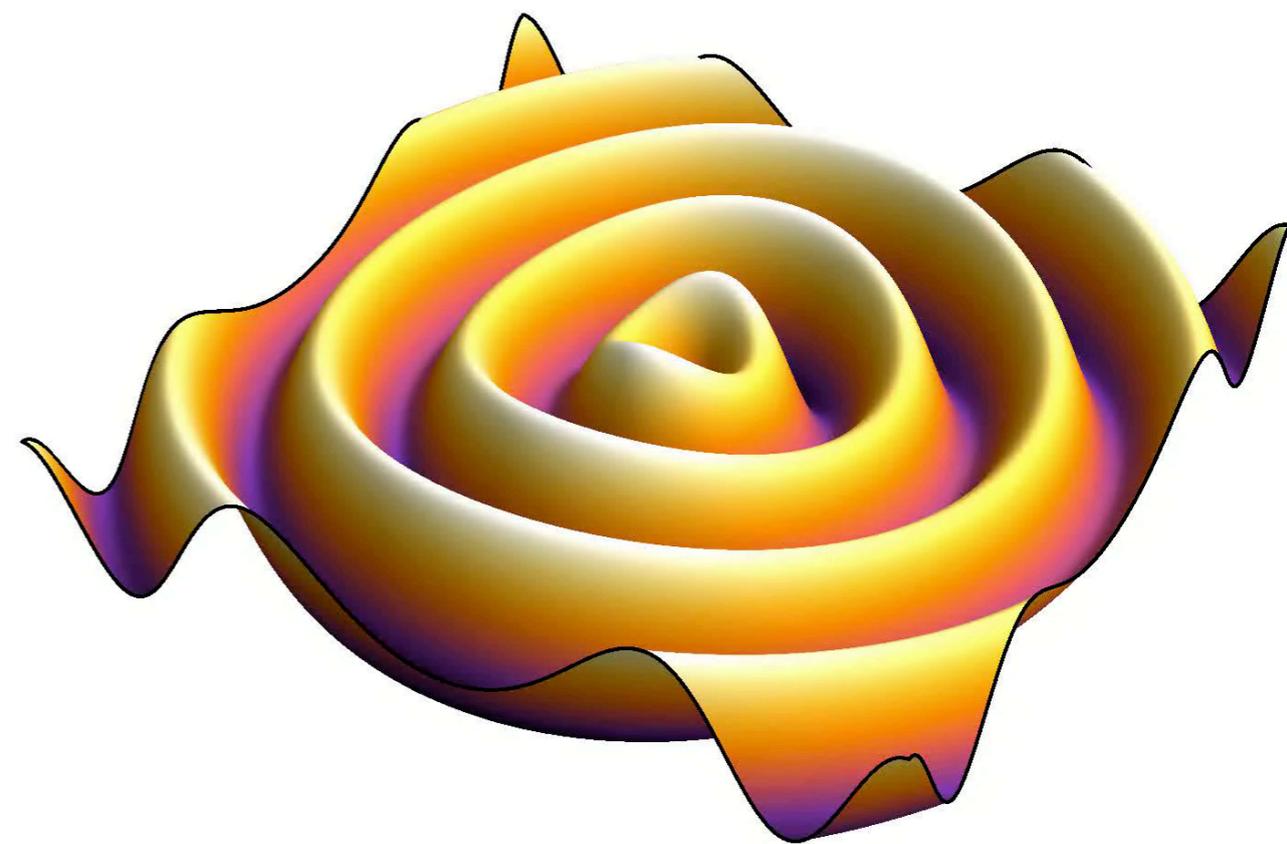
Sistema binario, estrellas de neutrones
(100 km, 100 Hz)

10^{45} W

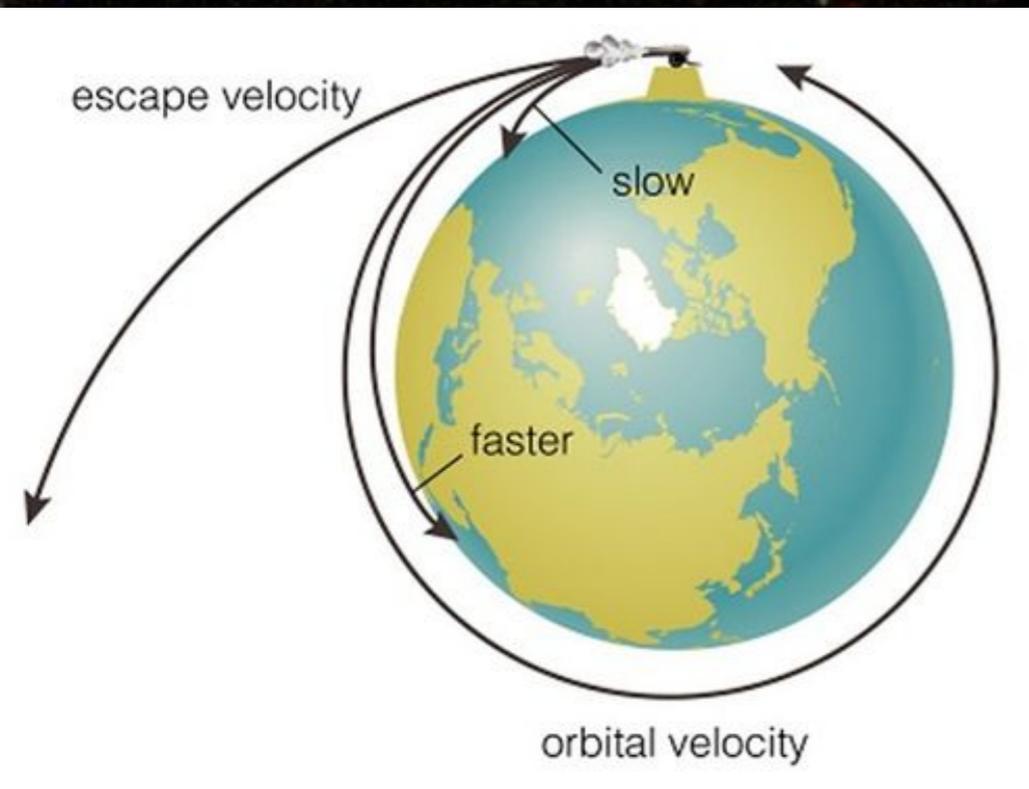
GW150914 maximo

$3.6 \times 10^{49} \text{ W}$

Ondas gravitacionales & órbitas



Potencia de radiación del sol (electromagnética).	$4 \times 10^{26} \text{ W}$
barra de hierro (1000 t, 100 m, 3 Hz)	10^{-26} W
Tierra en órbita alrededor del sol	200 W
Sistema estelar binario	$10^{15} - 10^{30} \text{ W}$
Sistema binario, estrellas de neutrones (100 km, 100 Hz)	10^{45} W
GW150914 maximo	$3.6 \times 10^{49} \text{ W}$



Mitchell (1784) & Laplace (1796):
La luz debe volver a la superficie,
si la estrella es tan compacta que
la velocidad de escape es mayor
que la velocidad de la luz.



Las estrellas son grandes bolas de gas, calentadas
por reacciones nucleares.

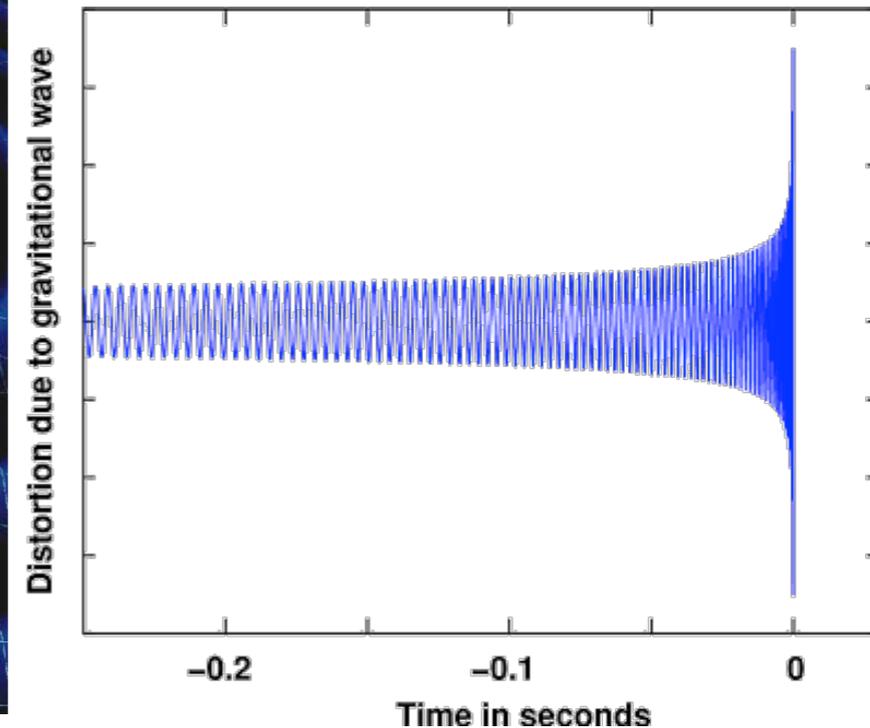
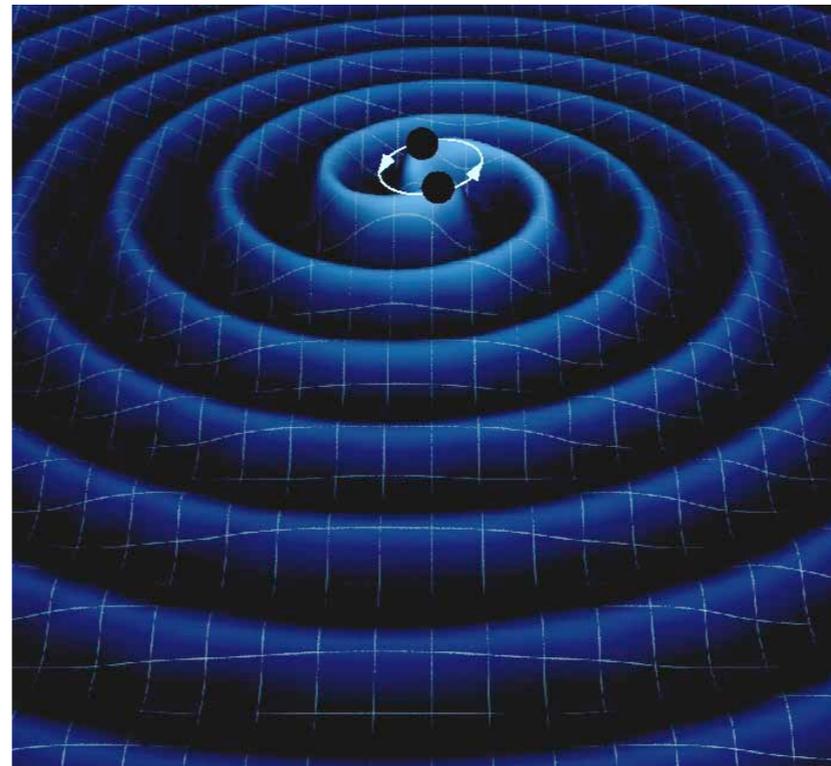
Si se agota el combustible,
¿podría una estrella encogerse tanto que absorba toda la luz?
¡El universo podría estar lleno de estrellas muertas invisibles!

Estrellas muertas son muy compactas => fuente eficiente de O.O.GG.

Entender las estrellas muertas -> entender ciclo de vida de las estrellas!

Escuchar a las ondas gravitacionales

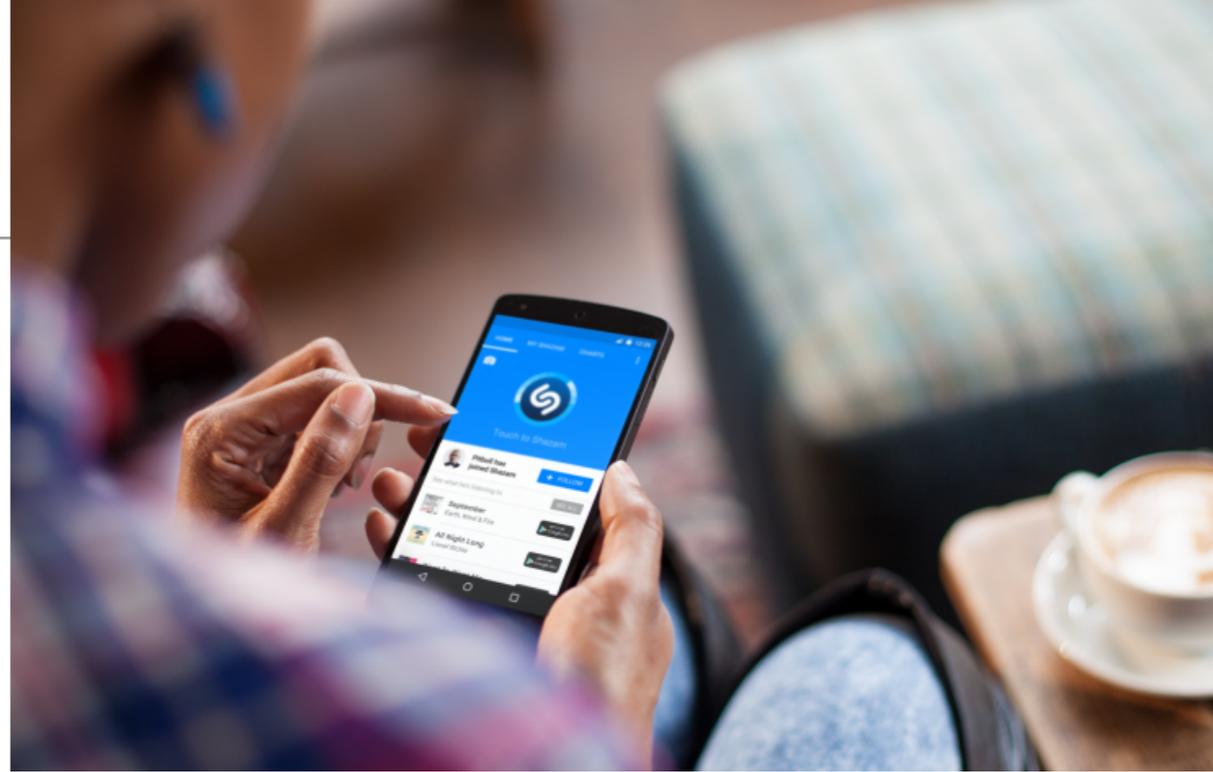
- Observación de radiación electromagnética:
 - Superposición incoherente de ondas de muchas partículas -> pérdida de información de fase
 - observar intensidad y espectro dependientes del ángulo -> imagen de la fuente



- La señal GW transporta información sobre el movimiento de los objetos:
 - ~ escuchar la banda sonora del universo.
- La señal de OO.GG. codifica las masas, los espines, la excentricidad y posiblemente nuevas leyes de física, tiene que ser descifrada.

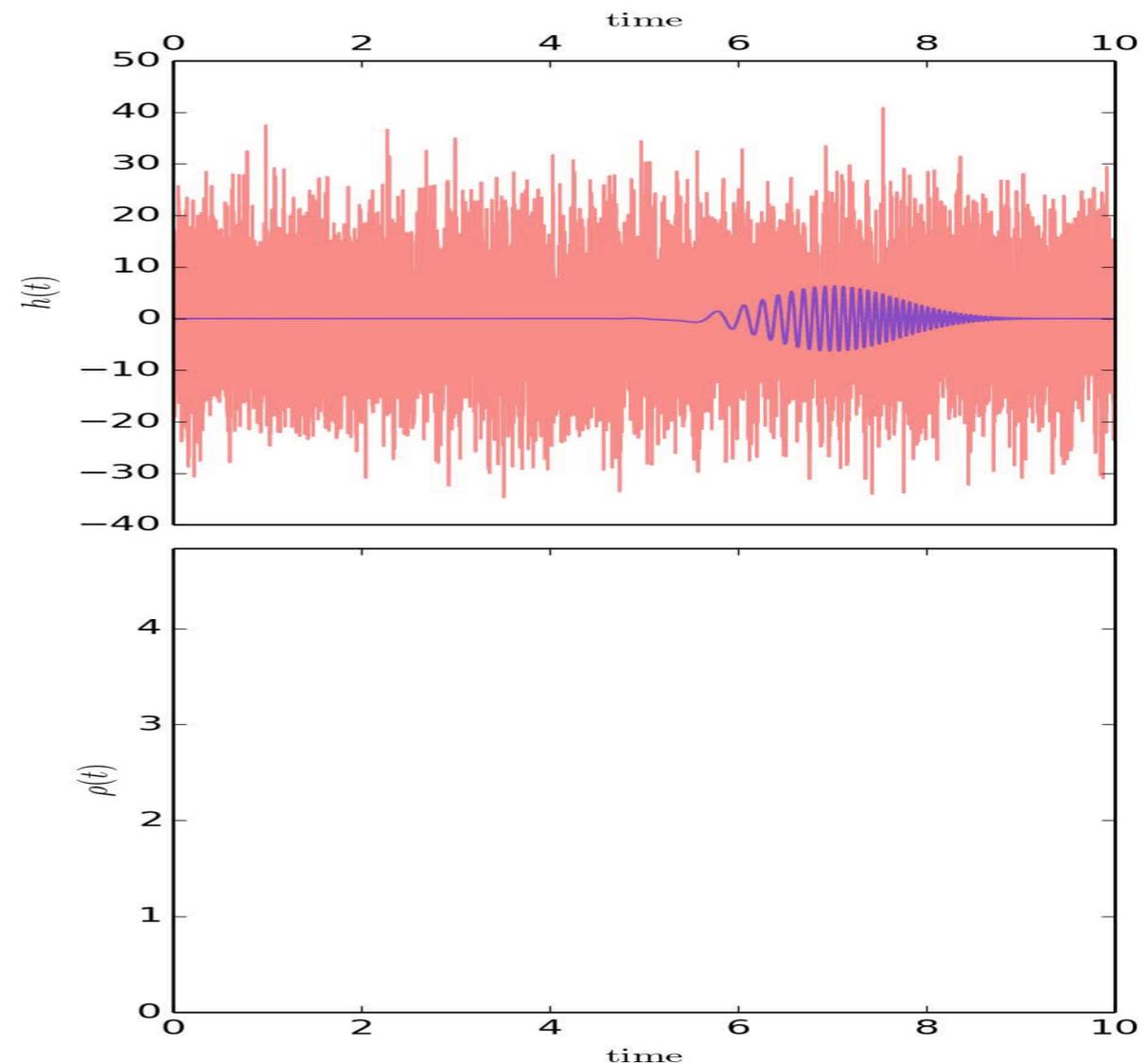
Análisis de datos

- **filtro adaptado** (matched filter): Análisis óptimo utilizando modelos de forma de onda precisos como plantillas de señal.



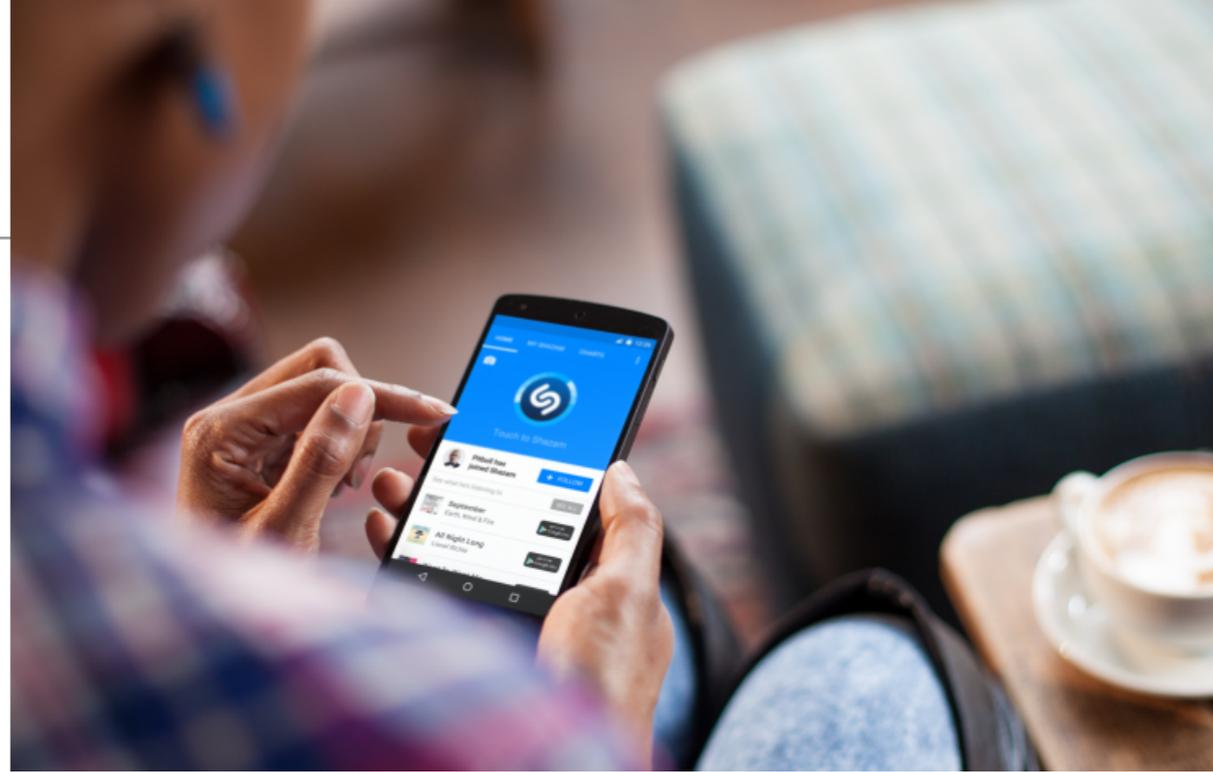
$$\langle h_1, h_2 \rangle = \max_{\phi_0, t_0} 4\Re \int_{f_1}^{f_2} \frac{\tilde{h}_1(f) \tilde{h}_2^*(f)}{S_n(f)} df$$

La identificación de las fuentes está limitada por la sensibilidad del detector y la precisión de los modelos de forma de onda.



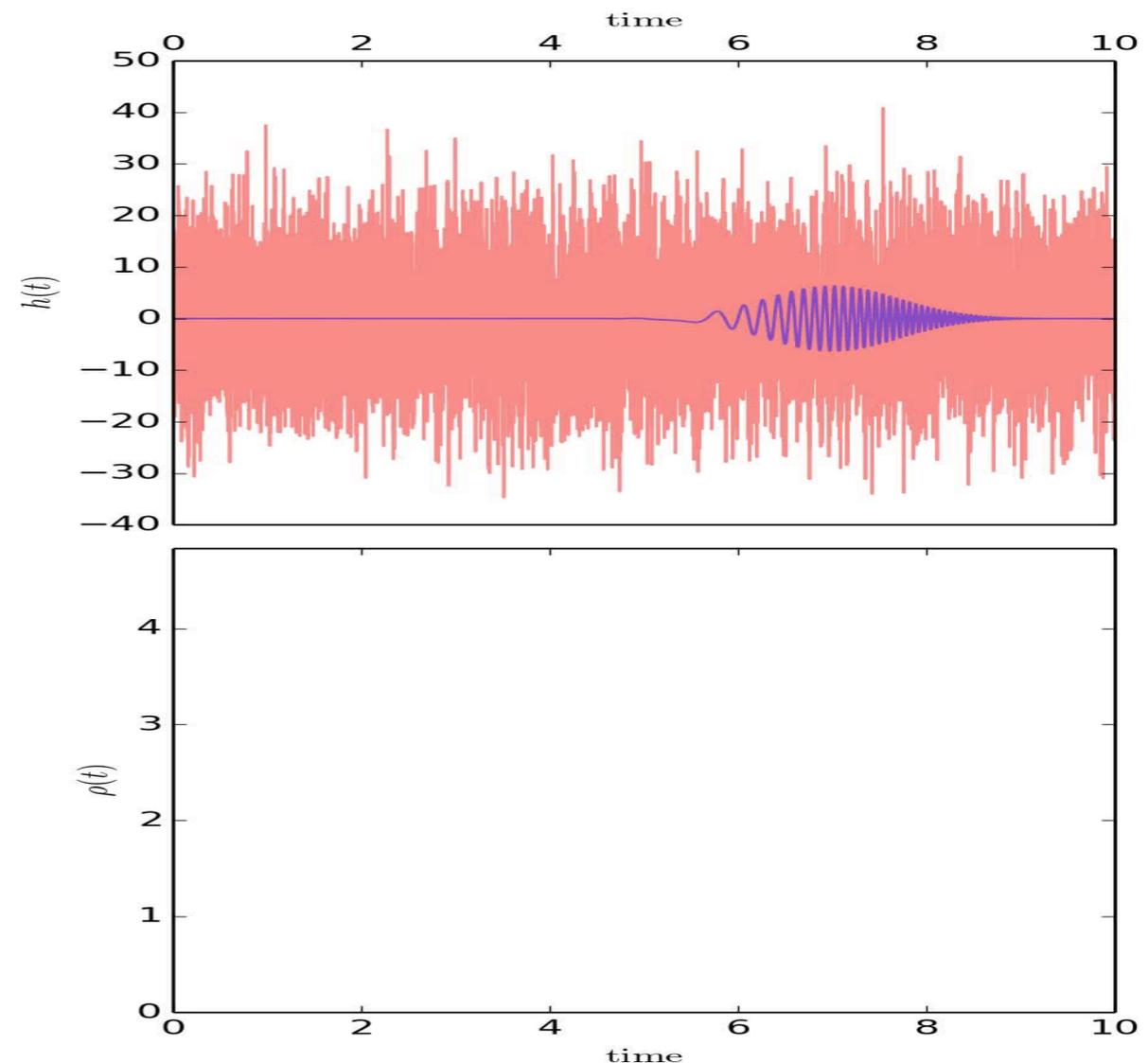
Análisis de datos

- **filtro adaptado** (matched filter):
Análisis óptimo utilizando modelos de forma de onda precisos como plantillas de señal.

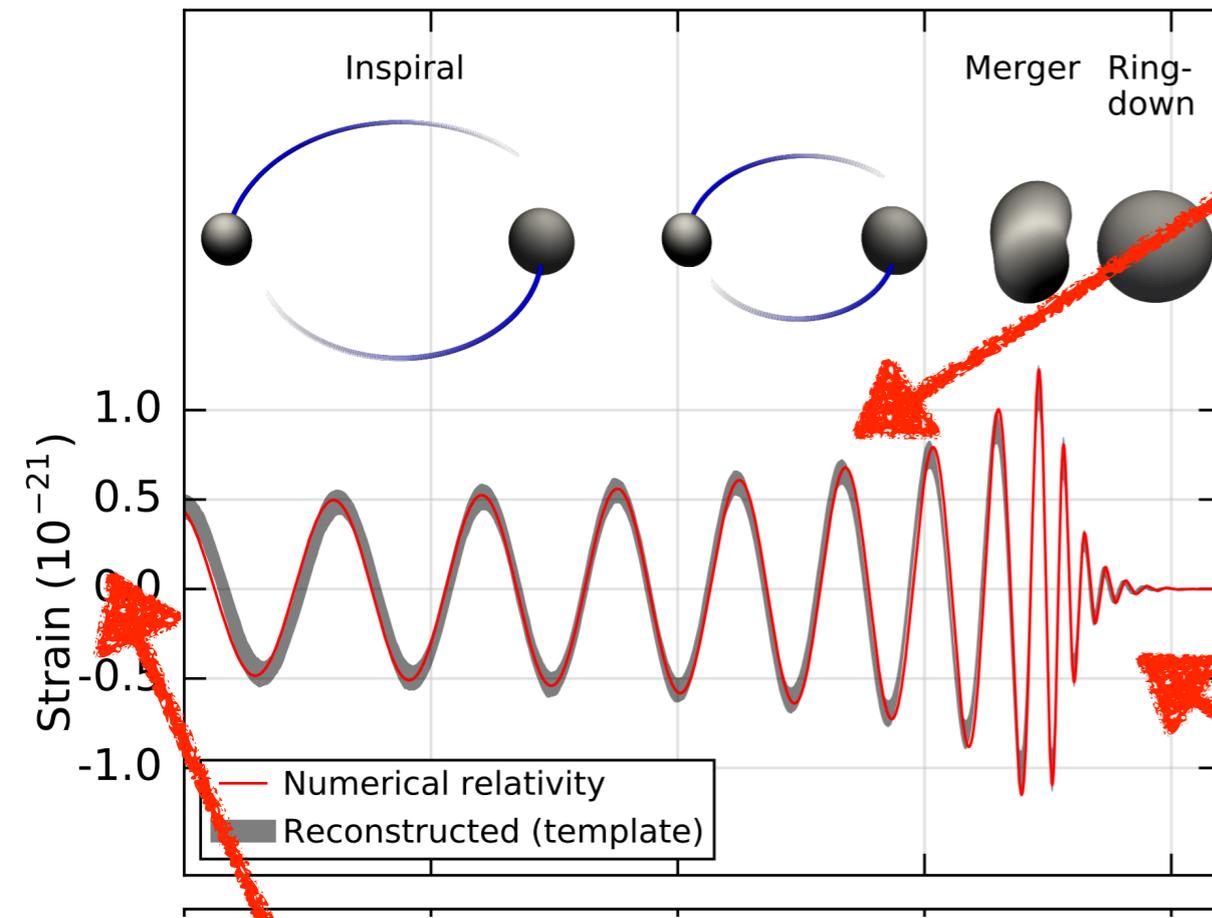


$$\langle h_1, h_2 \rangle = \max_{\phi_0, t_0} 4\Re \int_{f_1}^{f_2} \frac{\tilde{h}_1(f) \tilde{h}_2^*(f)}{S_n(f)} df$$

La identificación de las fuentes está limitada por la sensibilidad del detector y la precisión de los modelos de forma de onda.



Anatomía de OO.GG. y la Relatividad Numérica.



Para las últimas órbitas y la fusión, los agujeros negros se mueven $\sim c$. La expansión PN se rompe y se tienen que resolver las ecuaciones completas de Einstein en supercomputadoras: Relatividad Numérica.

Expansión (aproximación) Post-Newtoniana

$$\text{Hamiltoniano} = H_N + O(v/c) + \dots$$

Similar para otras cantidades como la energía radiada, ...

Estado del arte: mayormente $(v/c)^7$

Teoría de perturbaciones lineales de agujeros negros.

Señal en términos de sinusoides amortiguados con frecuencias conocidas en términos del espín del agujero negro:

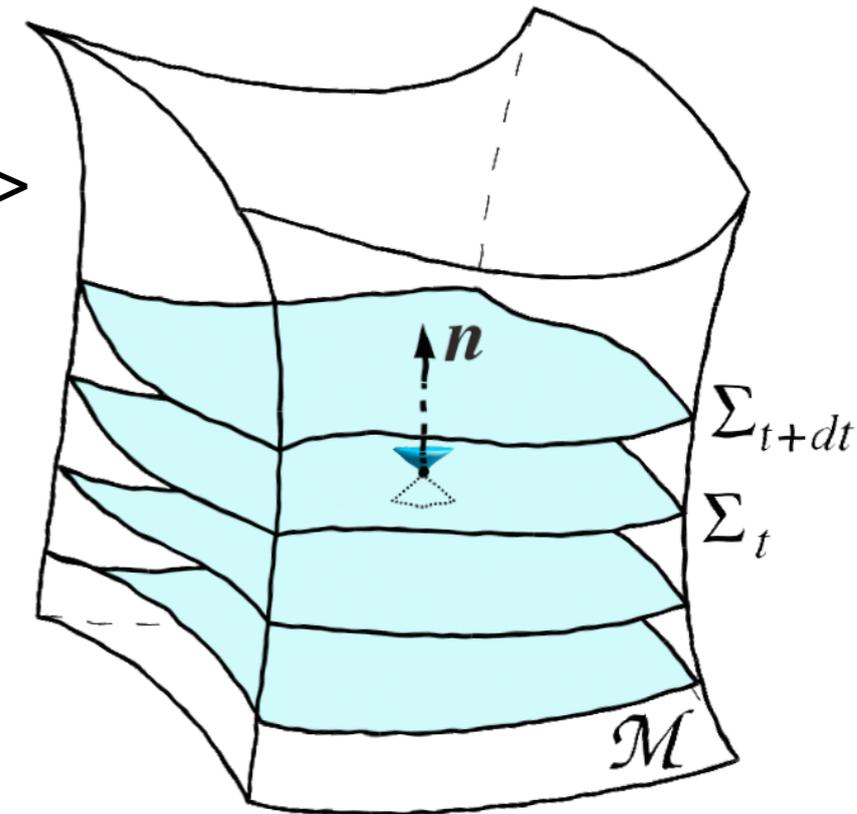
$$h = \sum_{l,m} e^{i\omega_{lm}t} e^{-t/\tau_{lm}}$$

Problema tipo “santo grial”: ¿evolucionar numéricamente AA.NN.!

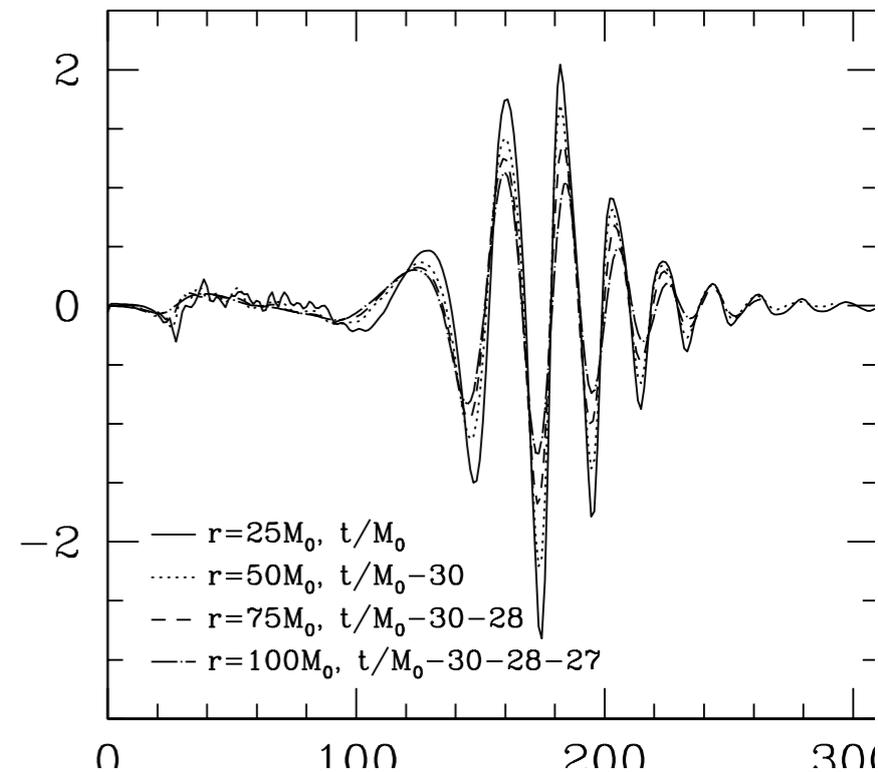
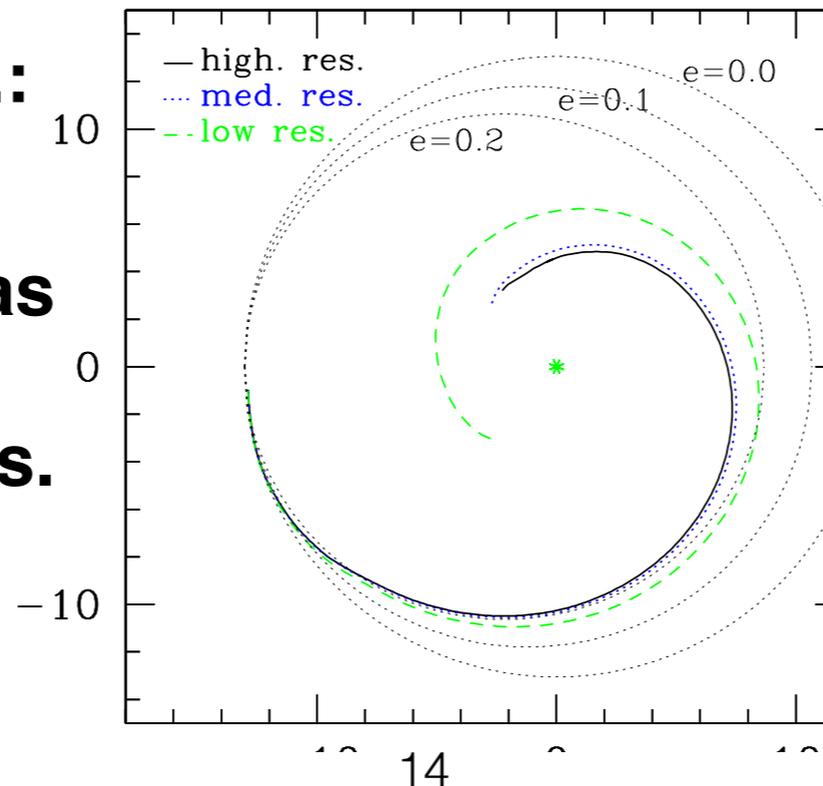
$$G_{ab} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ab} \quad \text{- comenzando 1950's } \longrightarrow$$

Carácter de las ecuaciones diferenciales depende de la prescripción de coordenadas - no existe elección natural.

No obtenemos automáticamente un problema de valores iniciales “bien planteado” (la solución única depende continuamente de los datos iniciales).

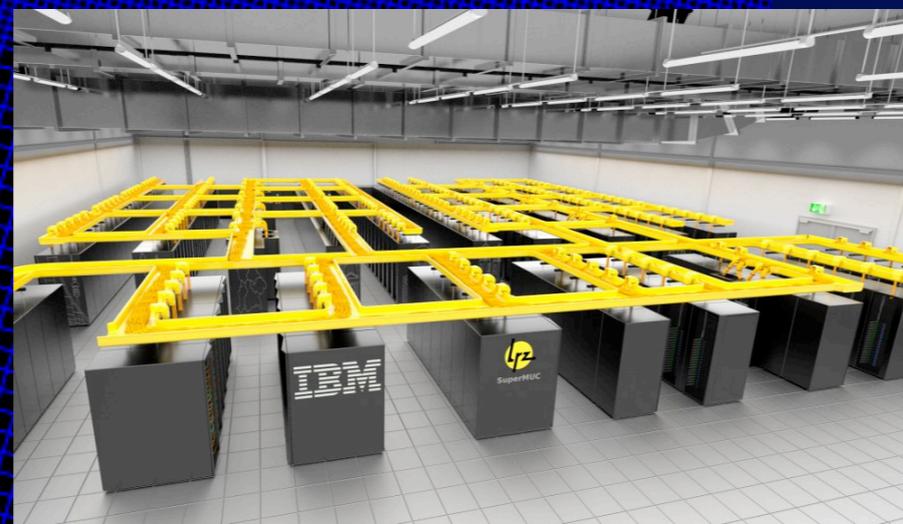
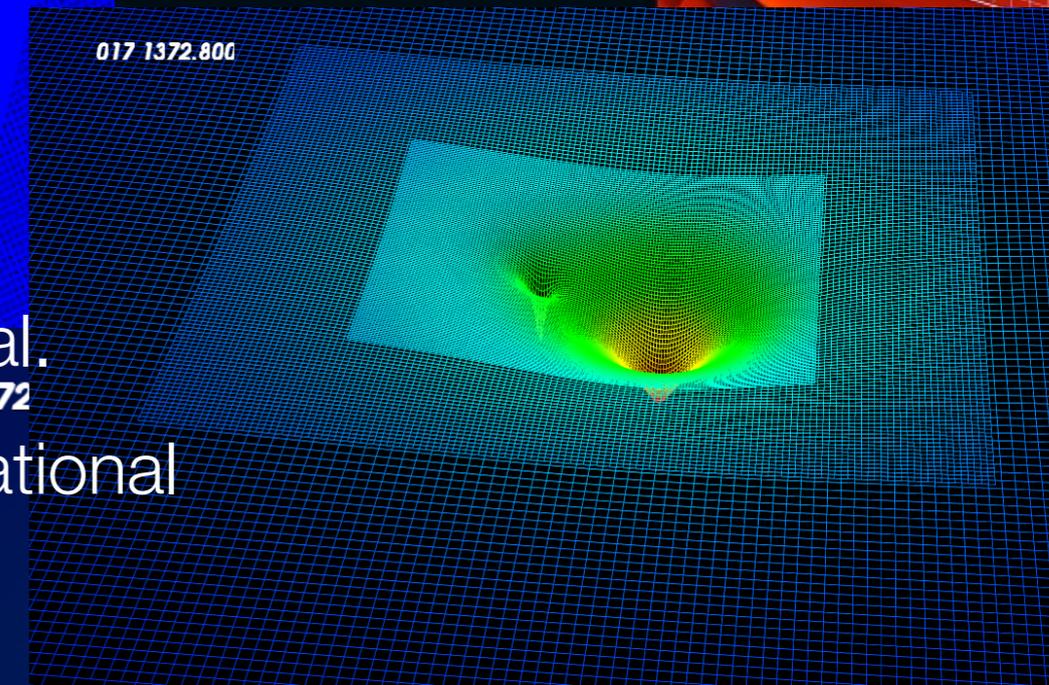
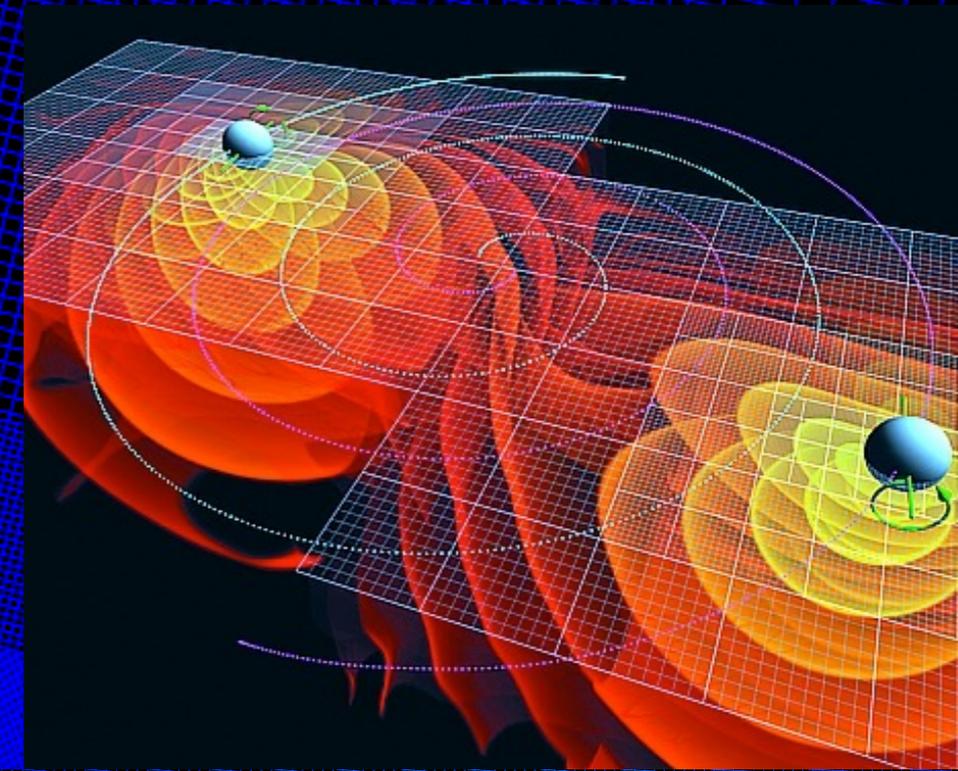


- **Primera órbita + OO.GG.: Frans Pretorius 2005**
- **Sorprendente avance tras 4 décadas de formulaciones inestables.**
- **=> Fiebre de oro de métodos y resultados.**



Métodos numéricos, escalas y refinamiento de malla.

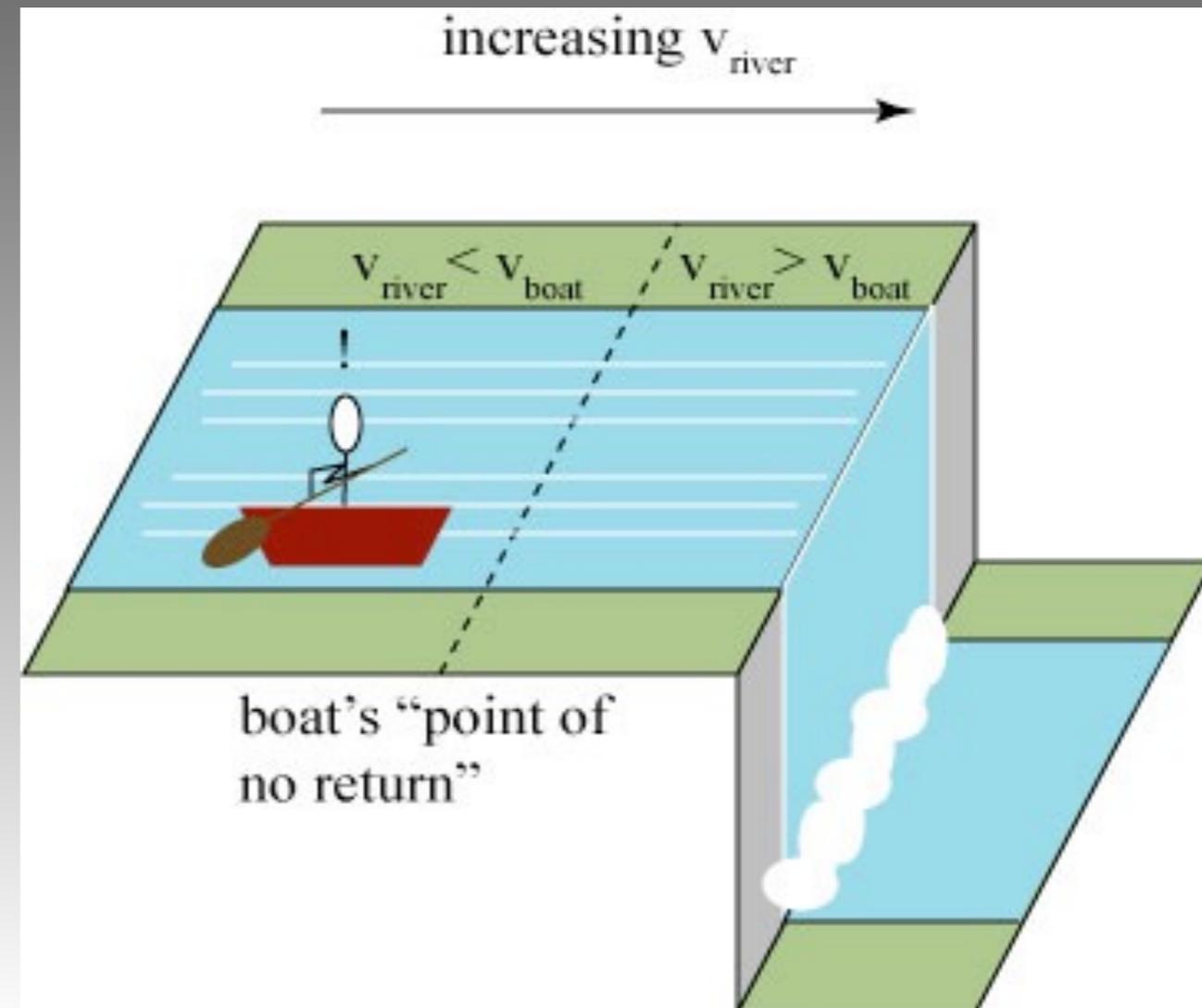
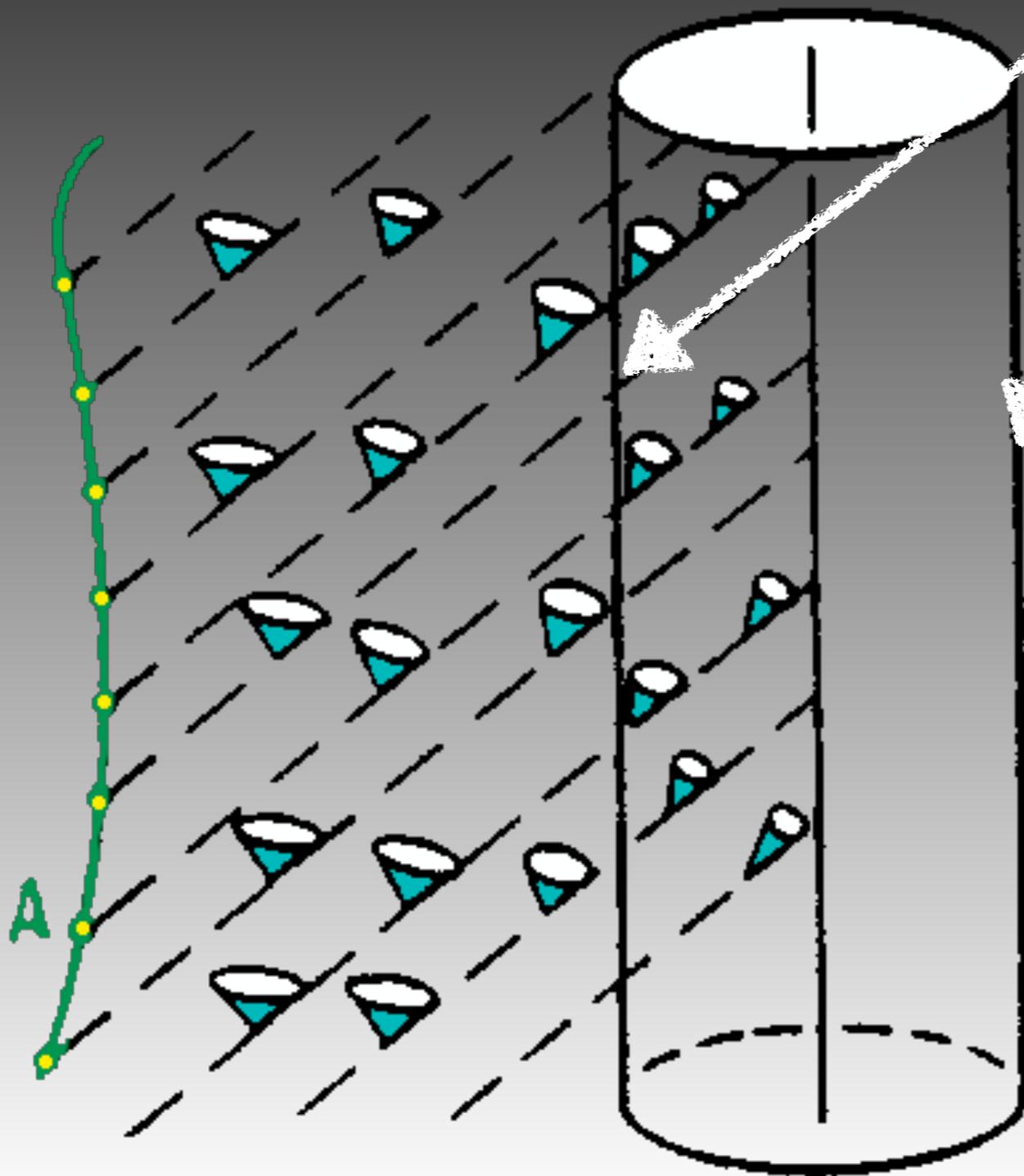
- Sin materia las soluciones son suaves: métodos de diferencias finitas o métodos espectrales.
- Varias escalas de longitud y tiempo:
 - objetos compactos individuales
 - escala orbital
 - longitud de onda, disminuye \sim factor 10
 - aislar causalmente los límites
- Necesita refinamiento de malla - espacial y temporal.
- Simulaciones $\sim 10^5 - 10^6$ horas de núcleo computacional
 - 100 - 1000 núcleos durante unas semanas.



Conos de luz y agujeros negros

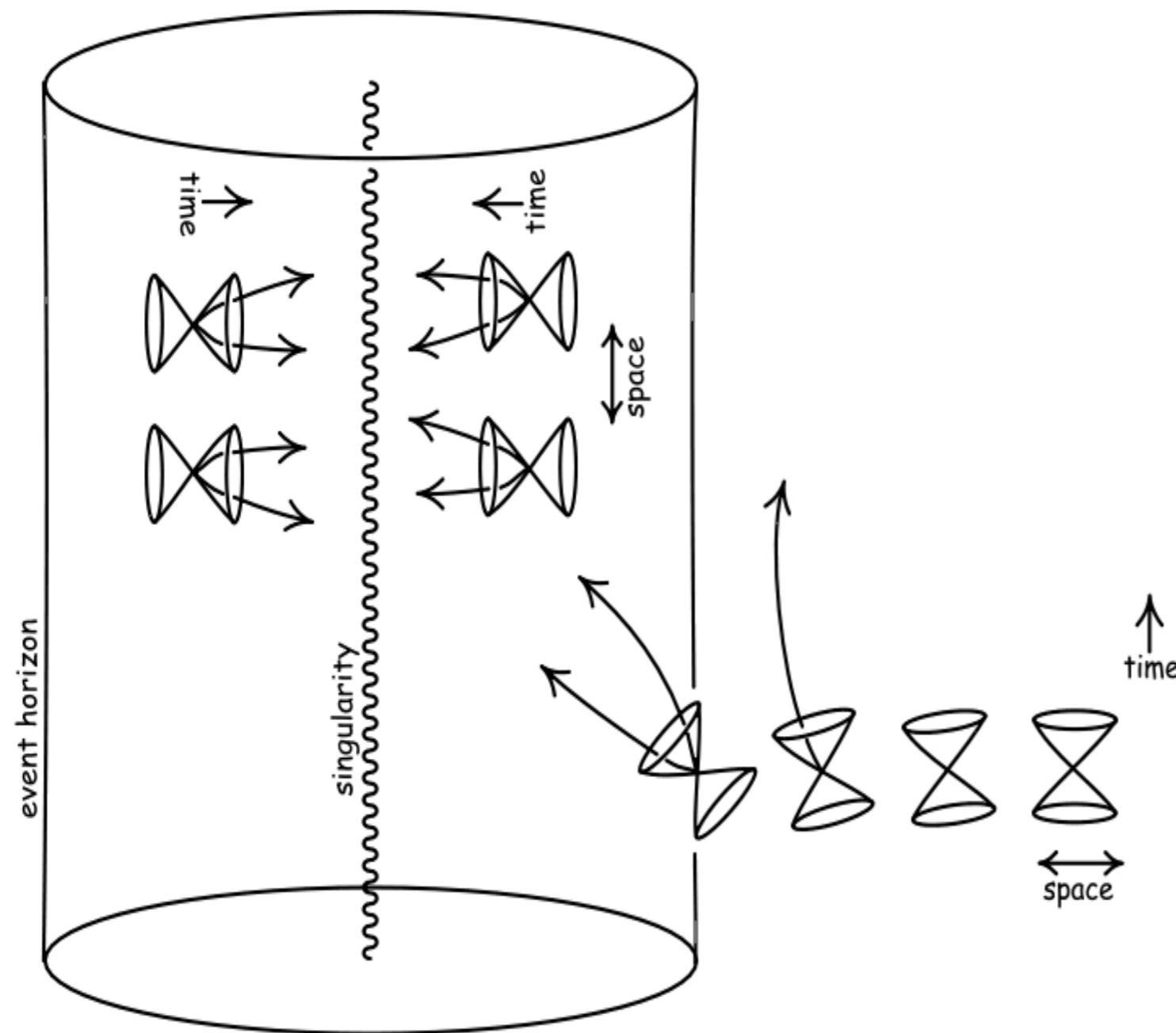
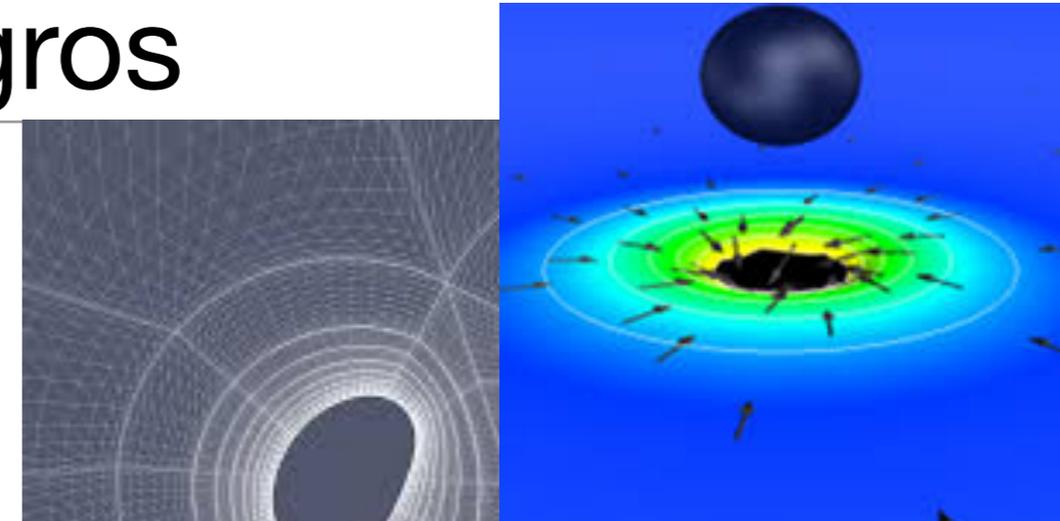
El espacio-tiempo es maleable y puede deformarse tanto, que nada puede escaparse de los conos de luz.

El horizonte de eventos es la superficie de no retorno, la region dentro del horizonte se llama agujero negro.



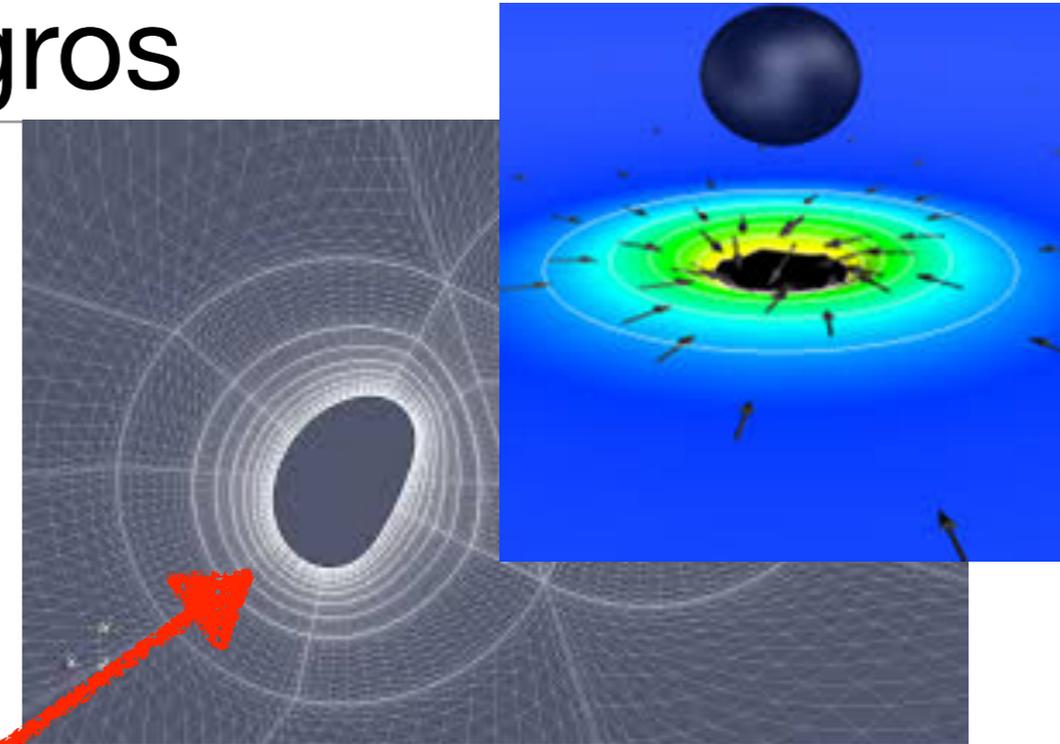
Singularidades y agujeros negros

Hawking y Penrose: dentro del agujero negro existe una singularidad del espacio-tiempo.



Singularidades y agujeros negros

Hawking y Penrose: dentro del agujero negro existe una singularidad del espacio-tiempo.



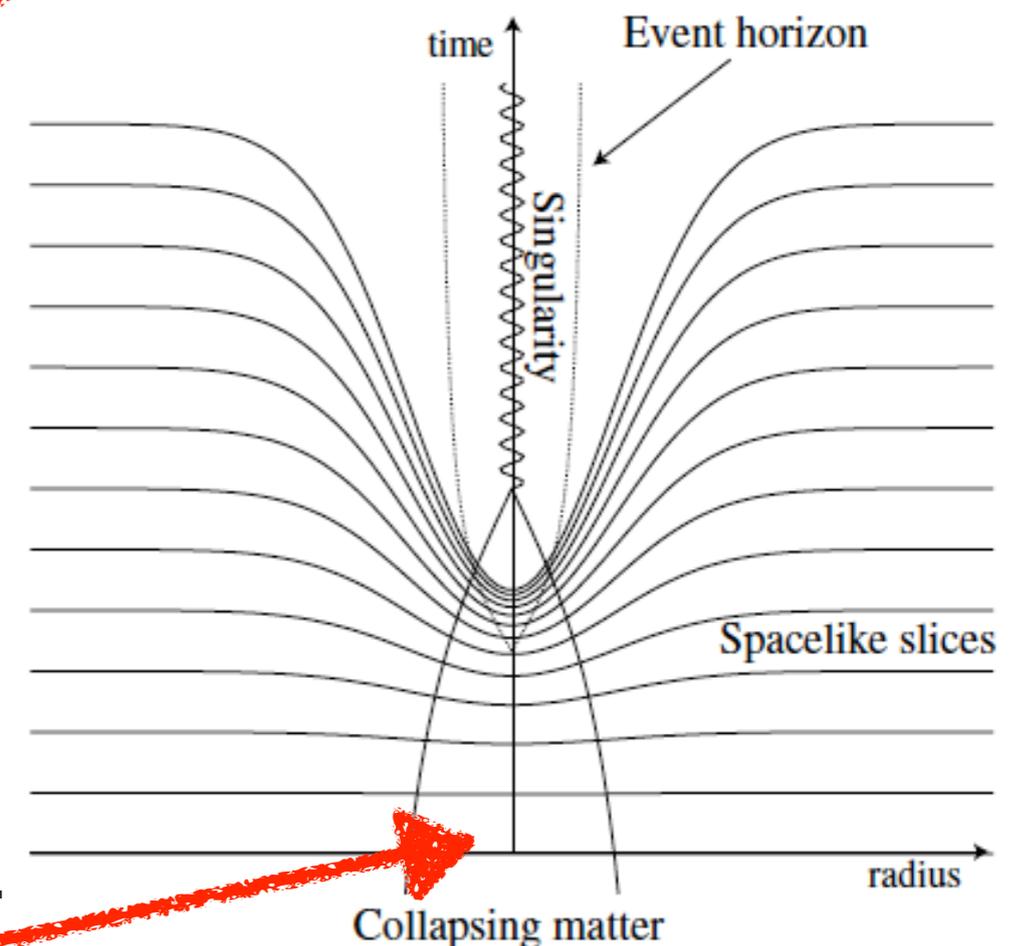
- **¡Hay que evitar simular el interior singular!**

- **Técnica de escisión:** no evolucionar los valores dentro de un límite del horizonte (aparente) - “pure outflow boundary”. Sistemas de control mantienen la superficie de escisión (agujero en el dominio) en su lugar.

[Código SpEC / colaboración SXS](#)

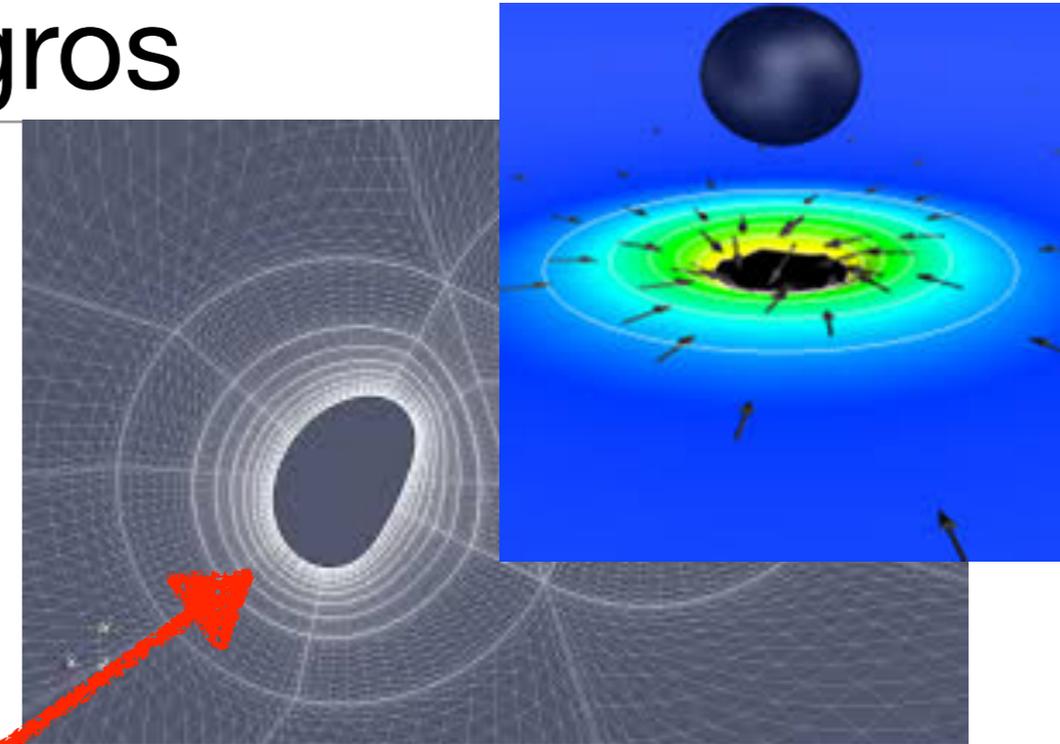
- **Coordenada de tiempo que evite la singularidad evitando cortes:** nunca alcanzar la singularidad física => sin agujeros en el dominio computacional.

[Varios códigos de diferencias finitas.](#)



Singularidades y agujeros negros

Hawking y Penrose: dentro del agujero negro existe una singularidad del espacio-tiempo.



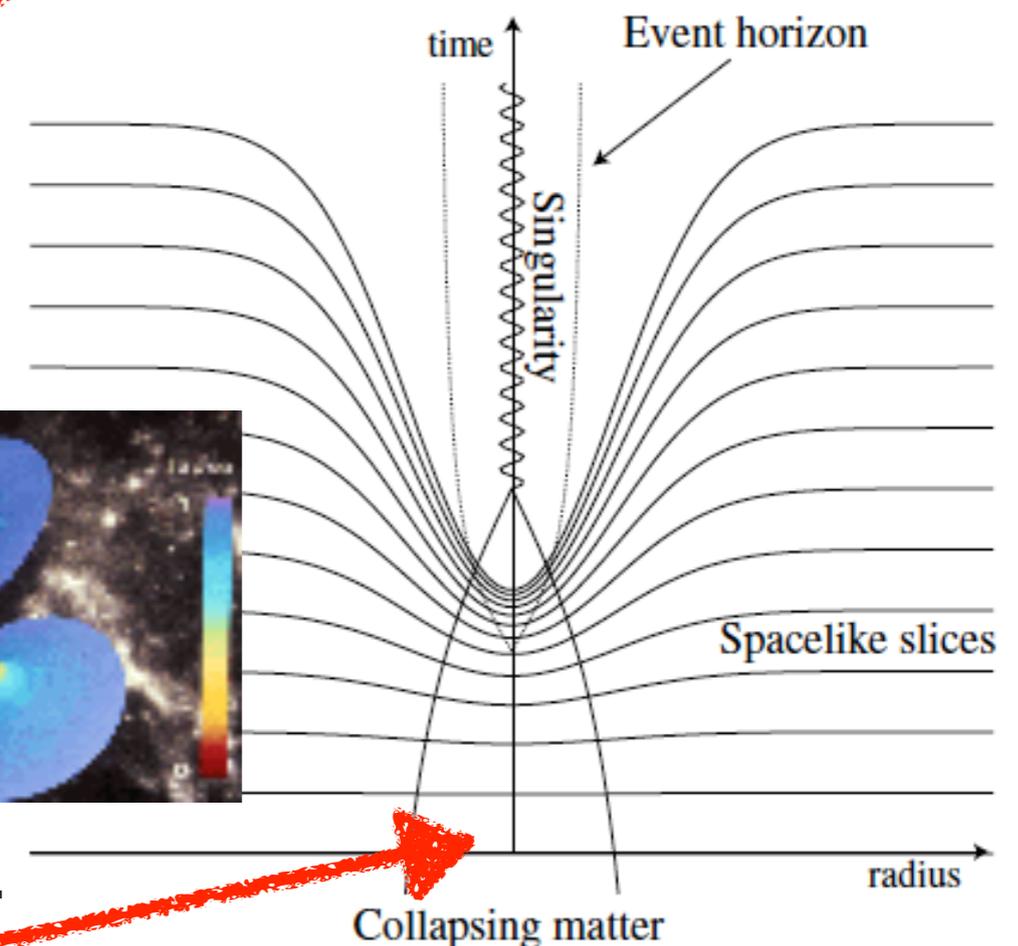
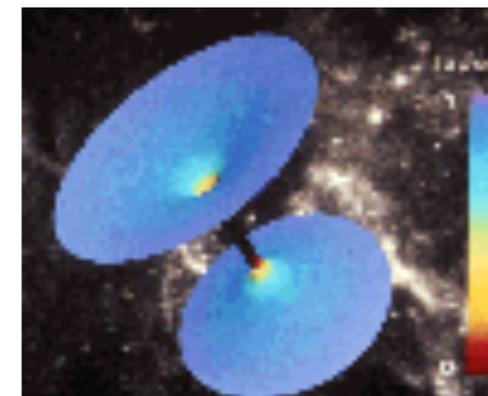
- **¡Hay que evitar simular el interior singular!**

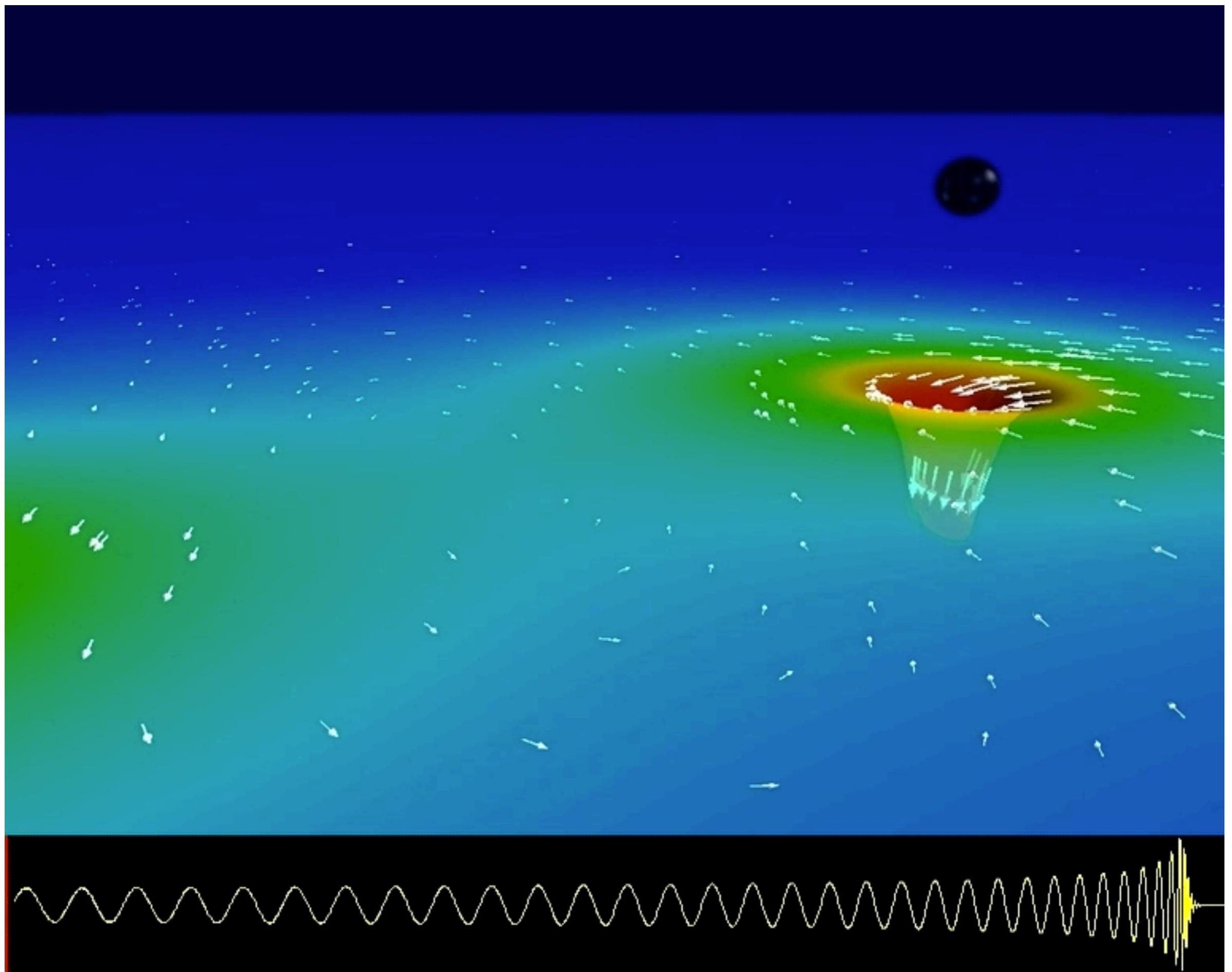
- **Técnica de escisión:** no evolucionar los valores dentro de un límite del horizonte (aparente) - “pure outflow boundary”. Sistemas de control mantienen la superficie de escisión (agujero en el dominio) en su lugar.

[Código SpEC / colaboración SXS](#)

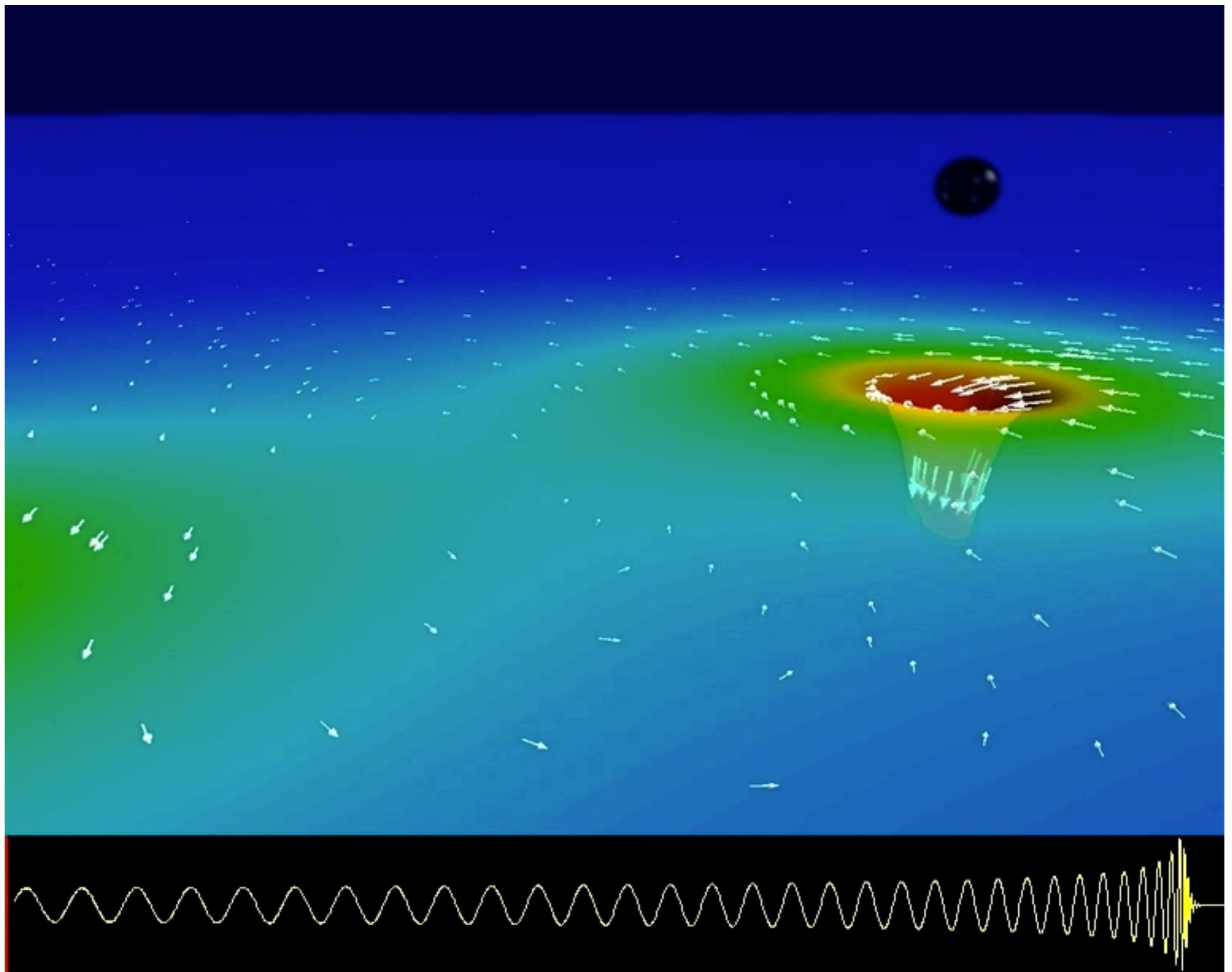
- **Coordenada de tiempo que evite la singularidad evitando cortes:** nunca alcanzar la singularidad física => sin agujeros en el dominio computacional.

[Varios códigos de diferencias finitas.](#)

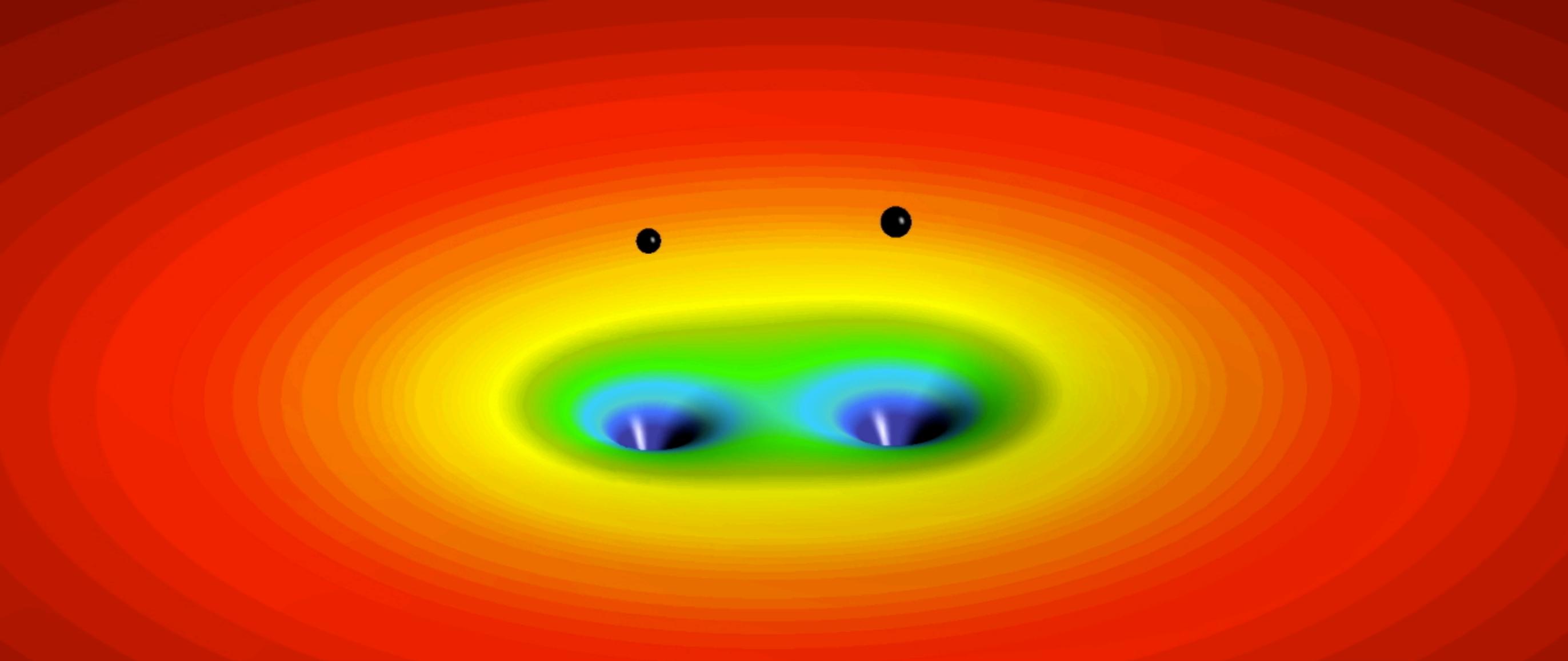




Visualización: colaboración SXS



Visualización: colaboración SXS

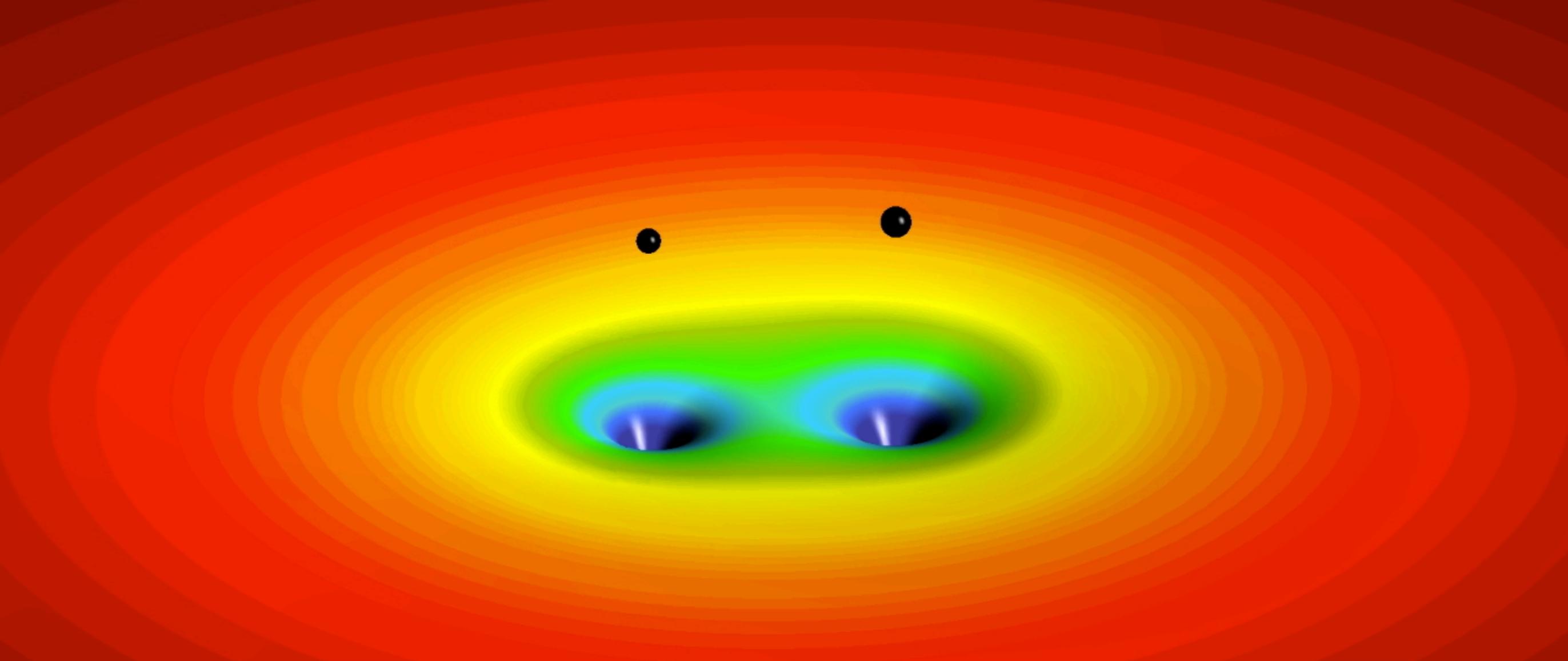


time(ms)=287.5



Visualización: Rafel Jaume Amengual, UIB

Durante la fase espiral y después de la fusión, la geometría presenta varias simetrías aproximadas, un esquema numérico exitoso debe basarse en las coordenadas que hacen que estas simetrías se manifiesten.

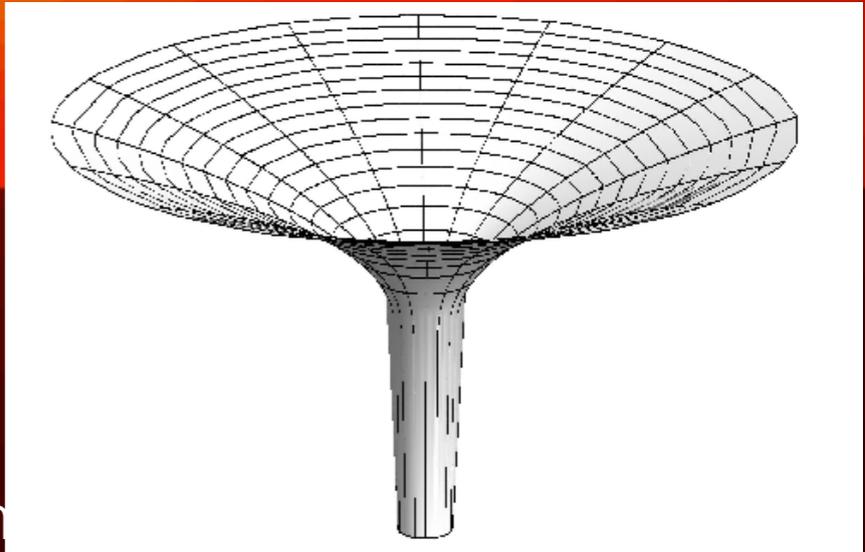
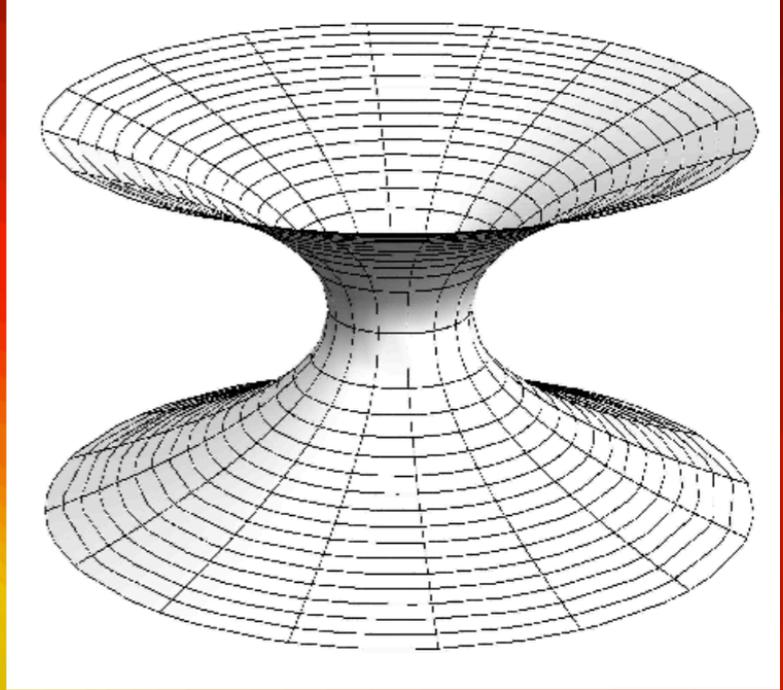
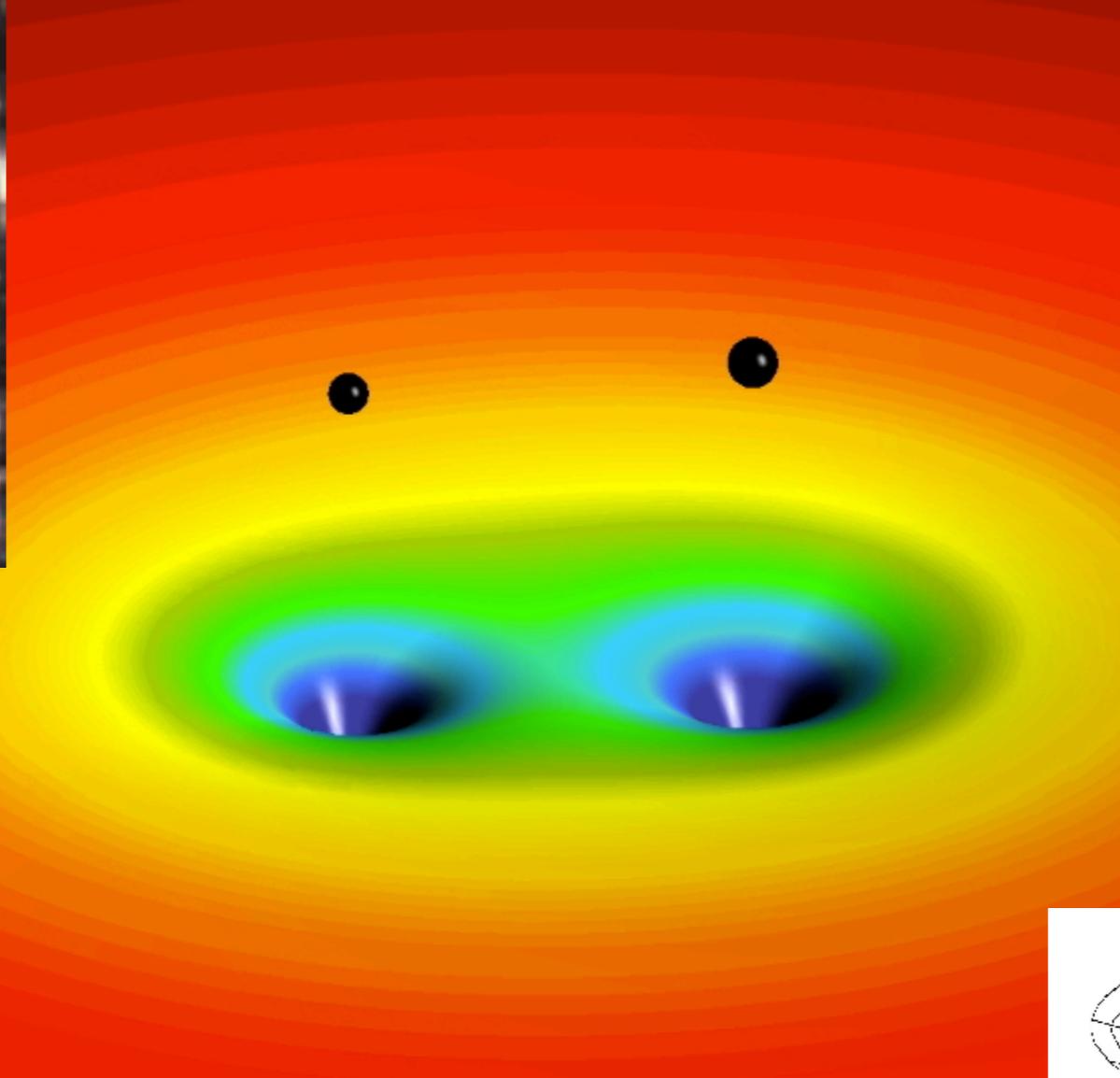
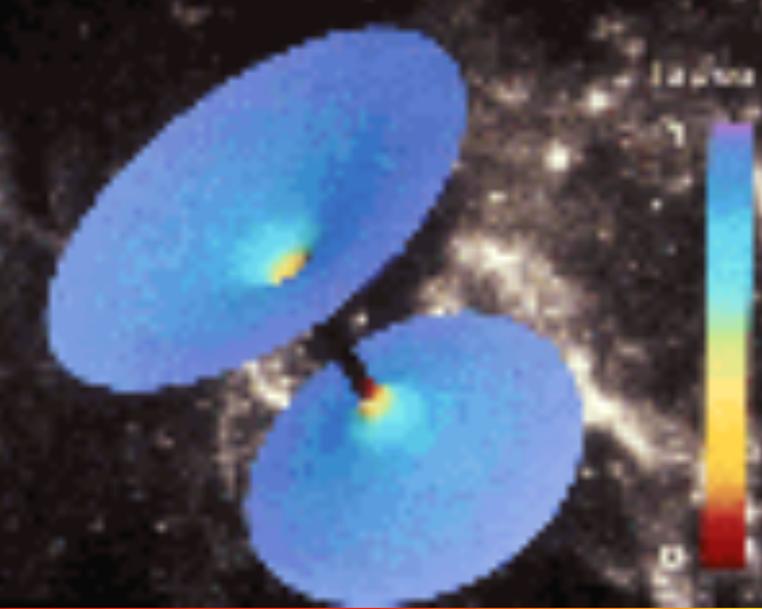


time(ms)=287.5



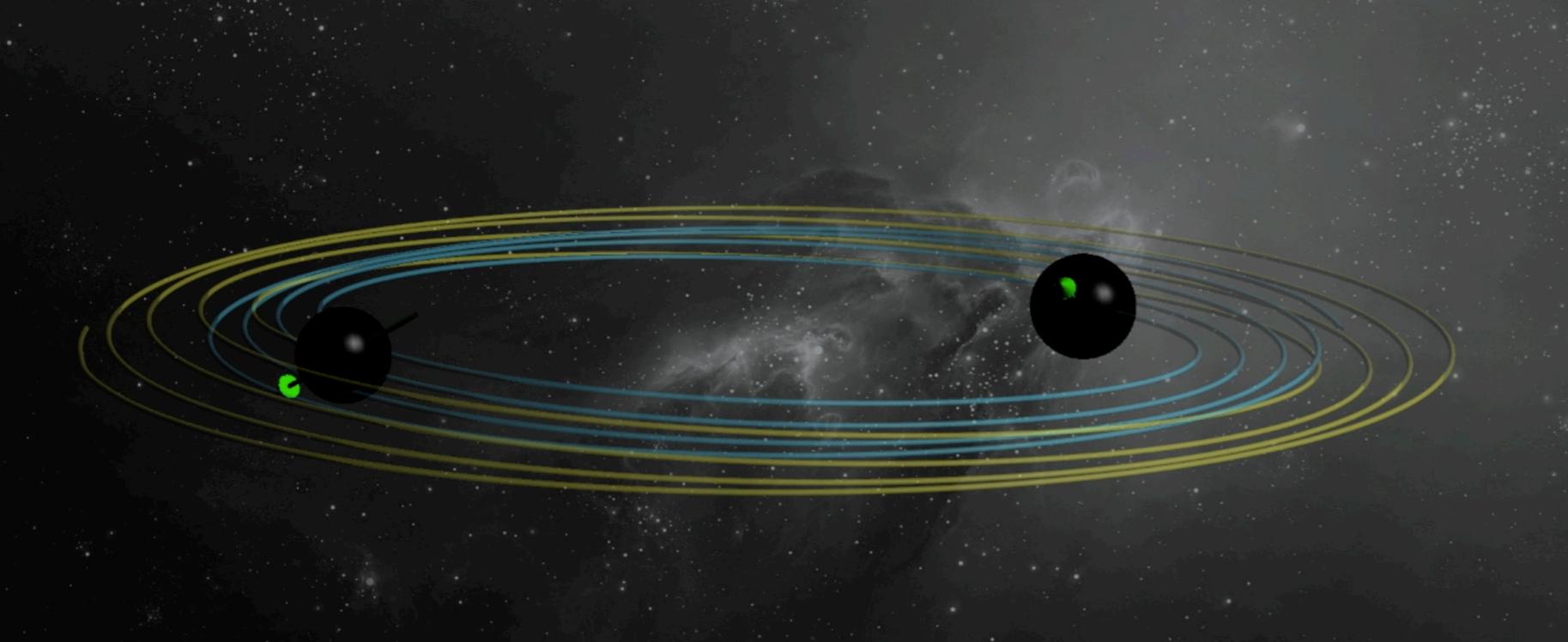
Visualización: Rafel Jaume Amengual, UIB

Durante la fase espiral y después de la fusión, la geometría presenta varias simetrías aproximadas, un esquema numérico exitoso debe basarse en las coordenadas que hacen que estas simetrías se manifiesten.

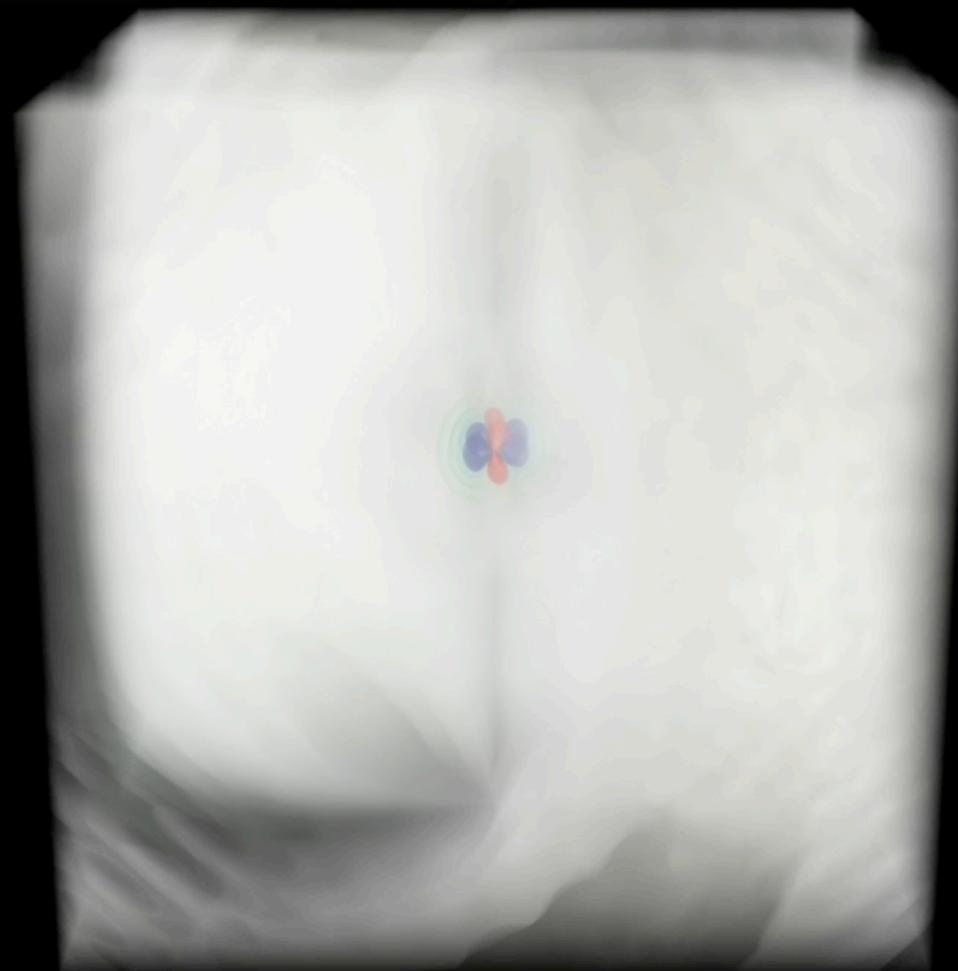
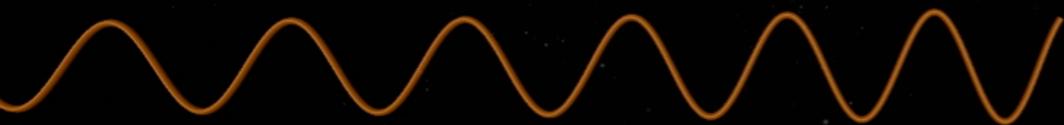


Visualización

Durante la fase espiral y después de la fusión, la geometría presenta varias simetrías aproximadas, un esquema numérico exitoso debe basarse en las coordenadas que hacen que estas simetrías se manifiesten.

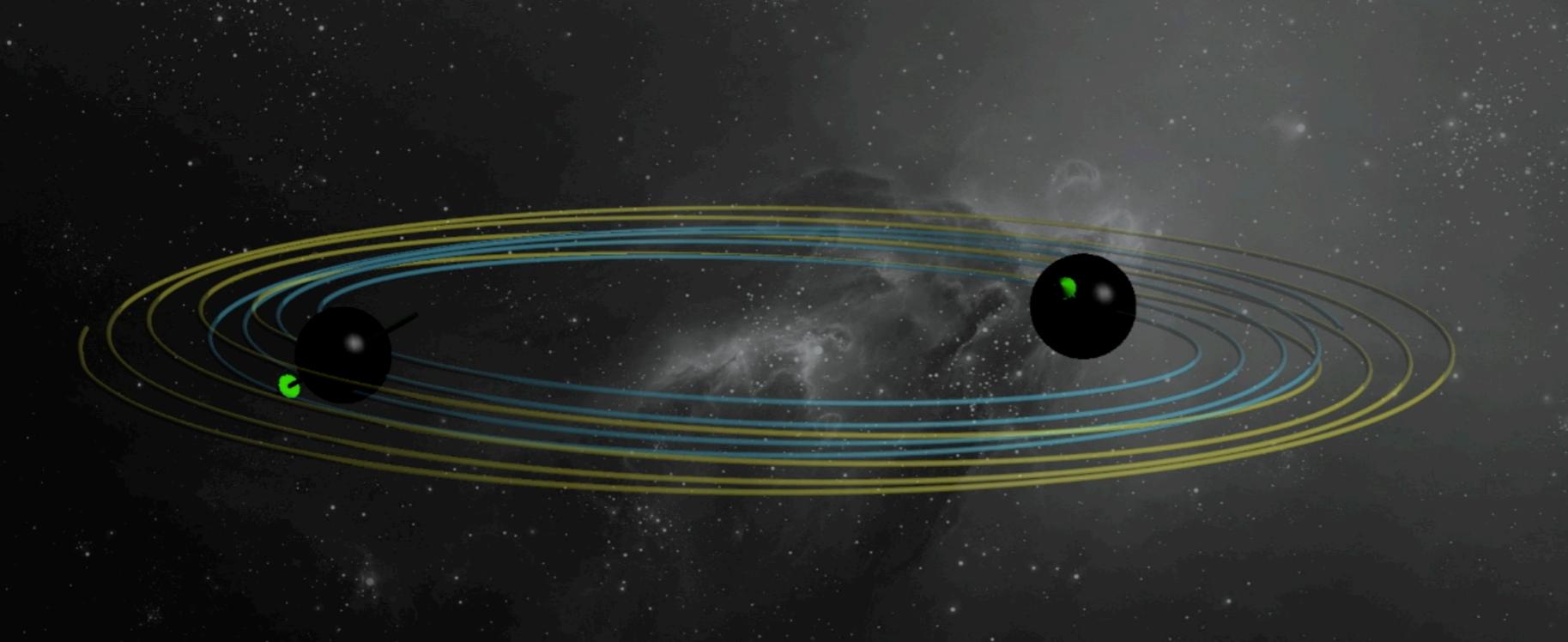


time(ms)=265.5

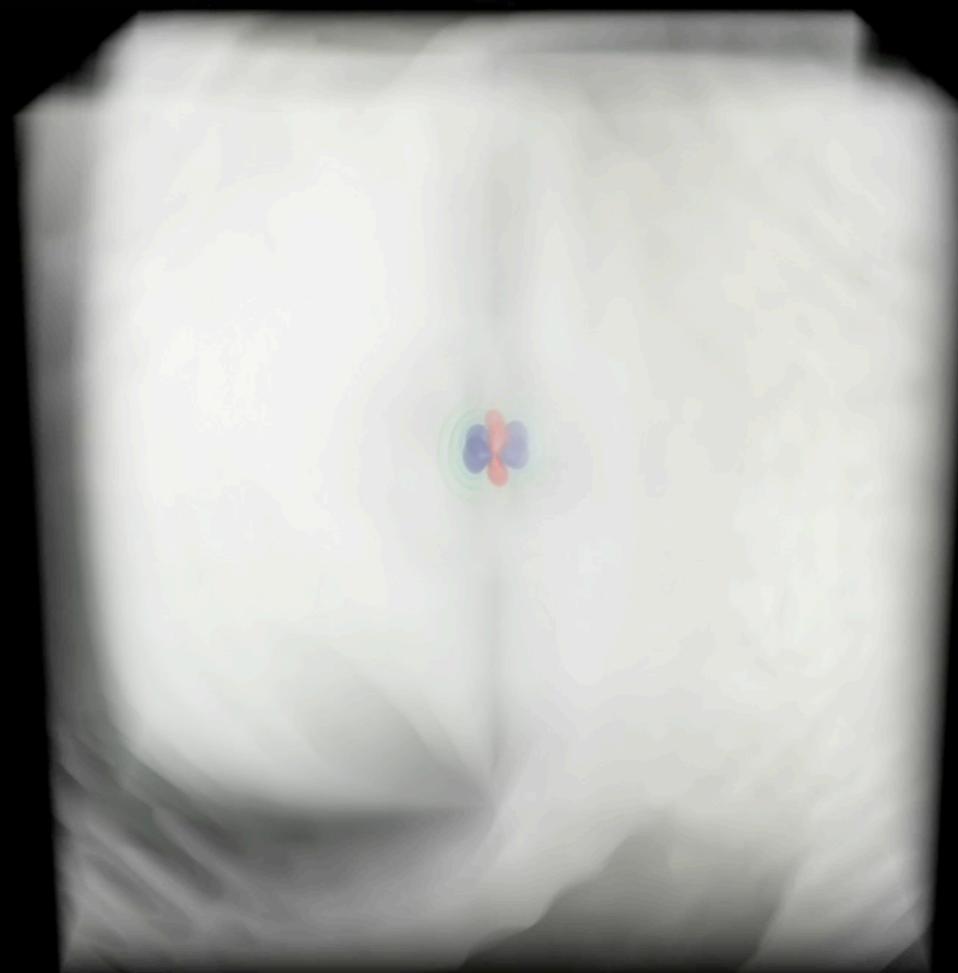


Simulaciones: Sascha Husa
Visualización: Rafel Jaume, UIB



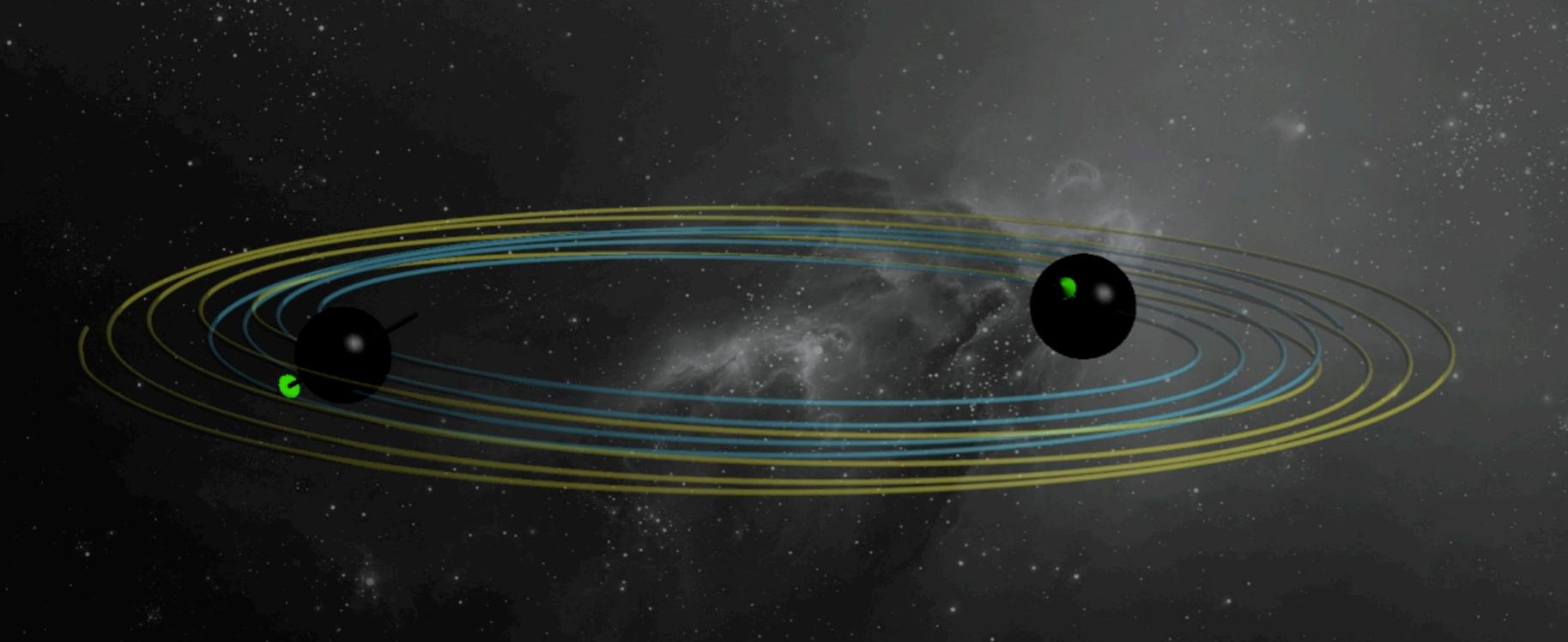


time(ms)=265.5

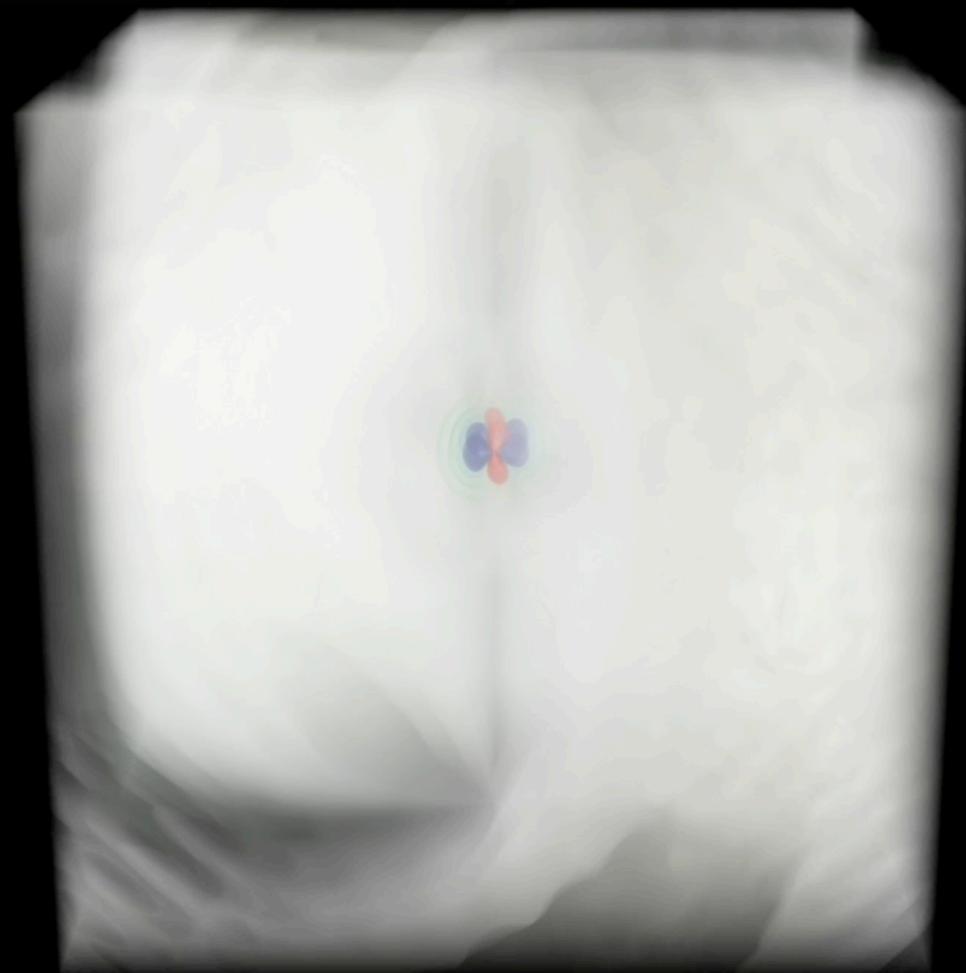
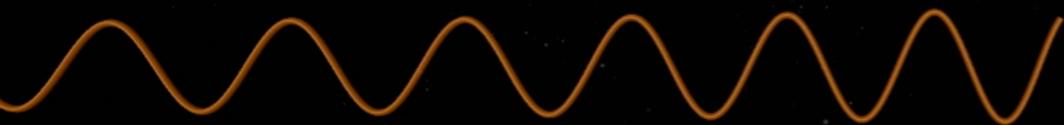


Simulaciones: Sascha Husa
Visualización: Rafel Jaume, UIB



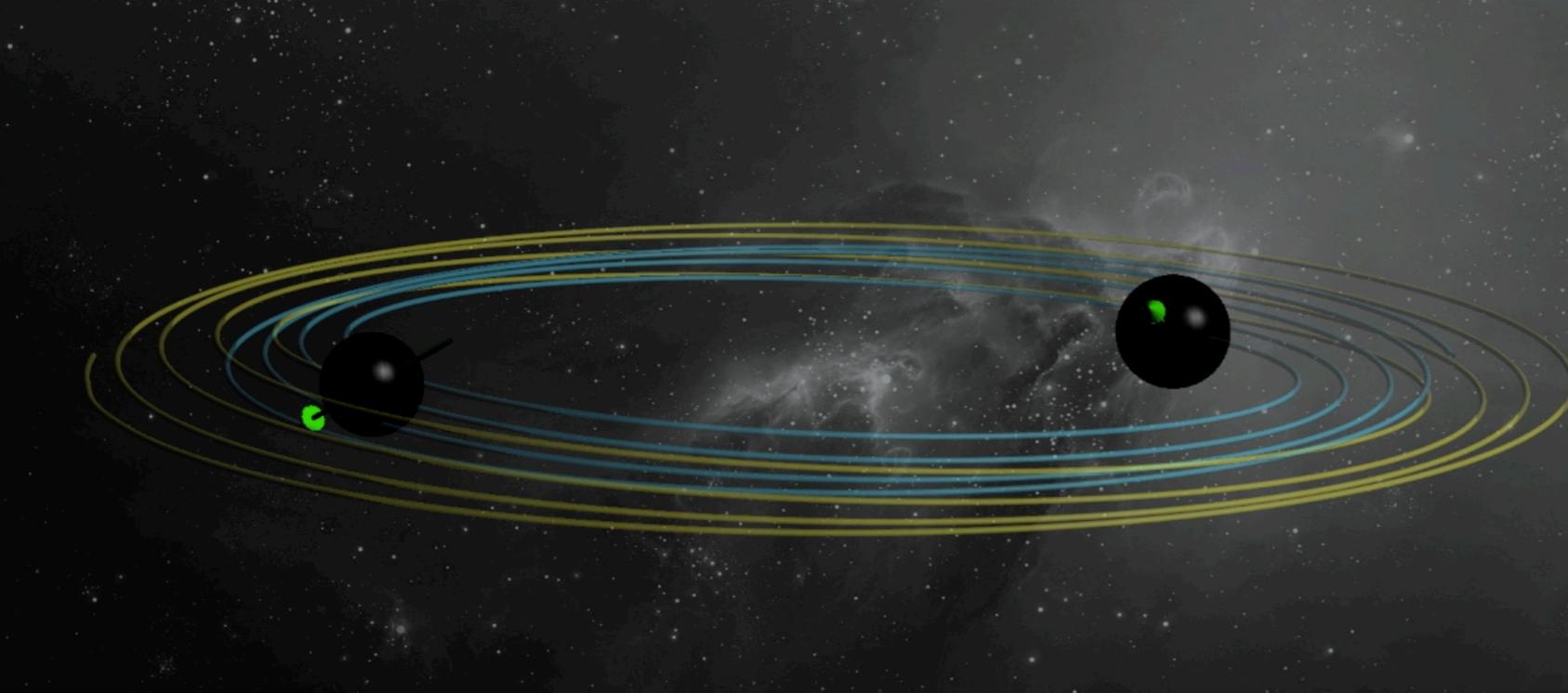


time(ms)=265.5

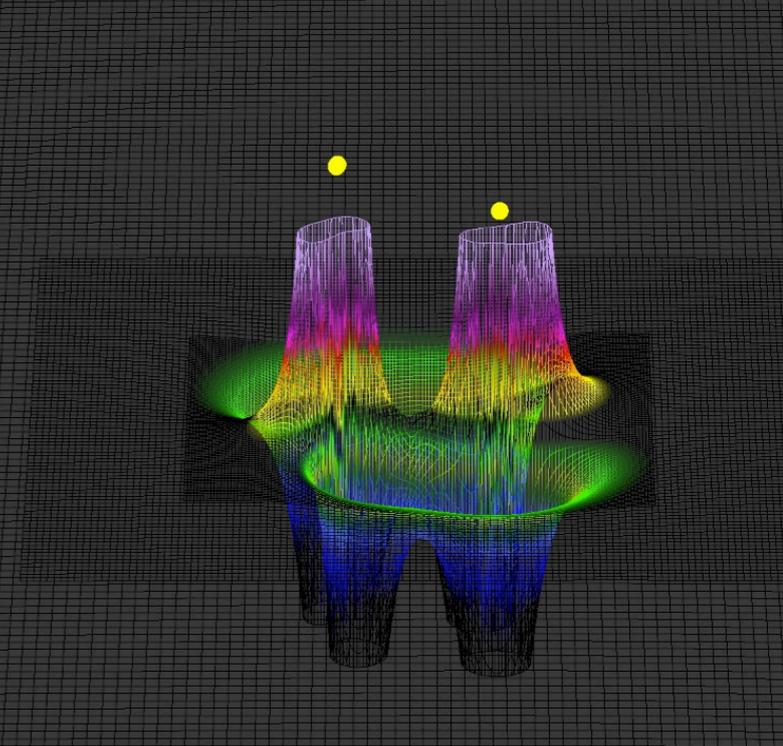


Simulaciones: Sascha Husa
Visualización: Rafel Jaume, UIB

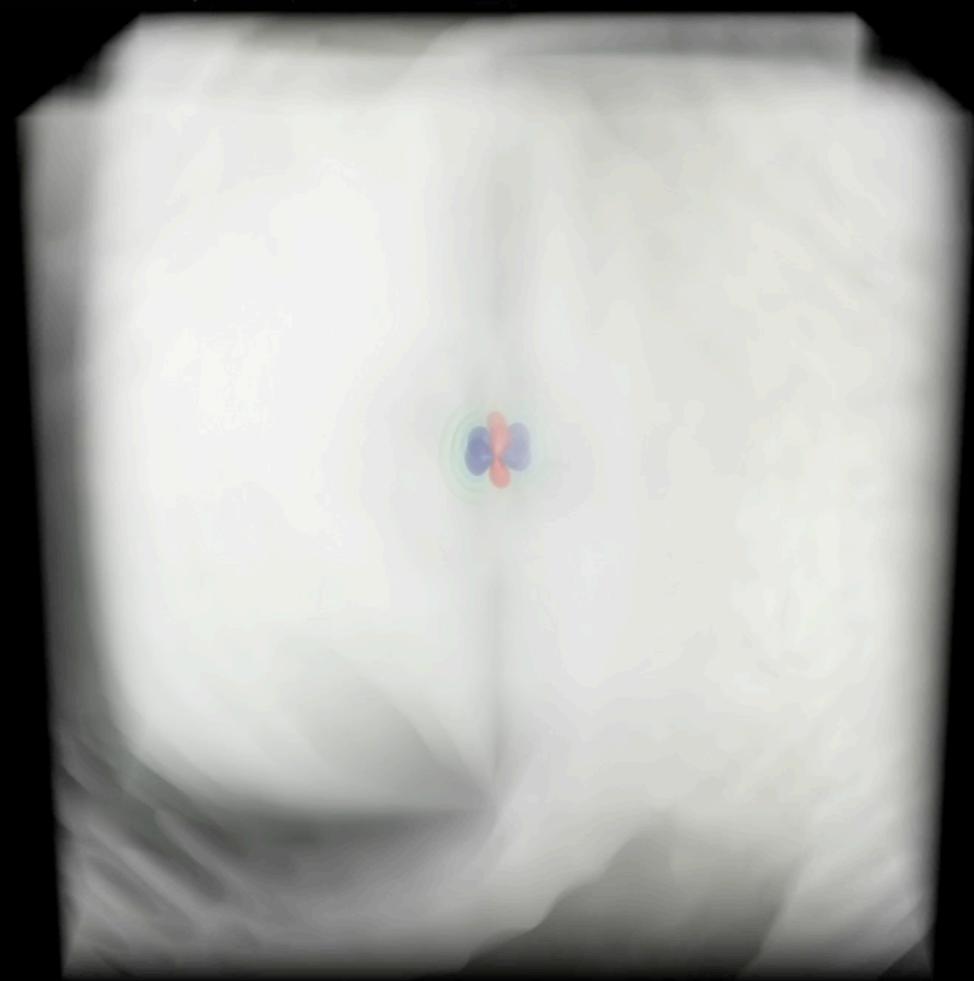
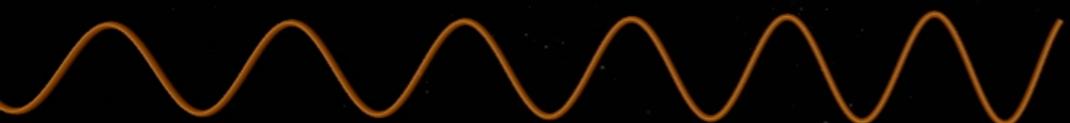




time(ms)=450



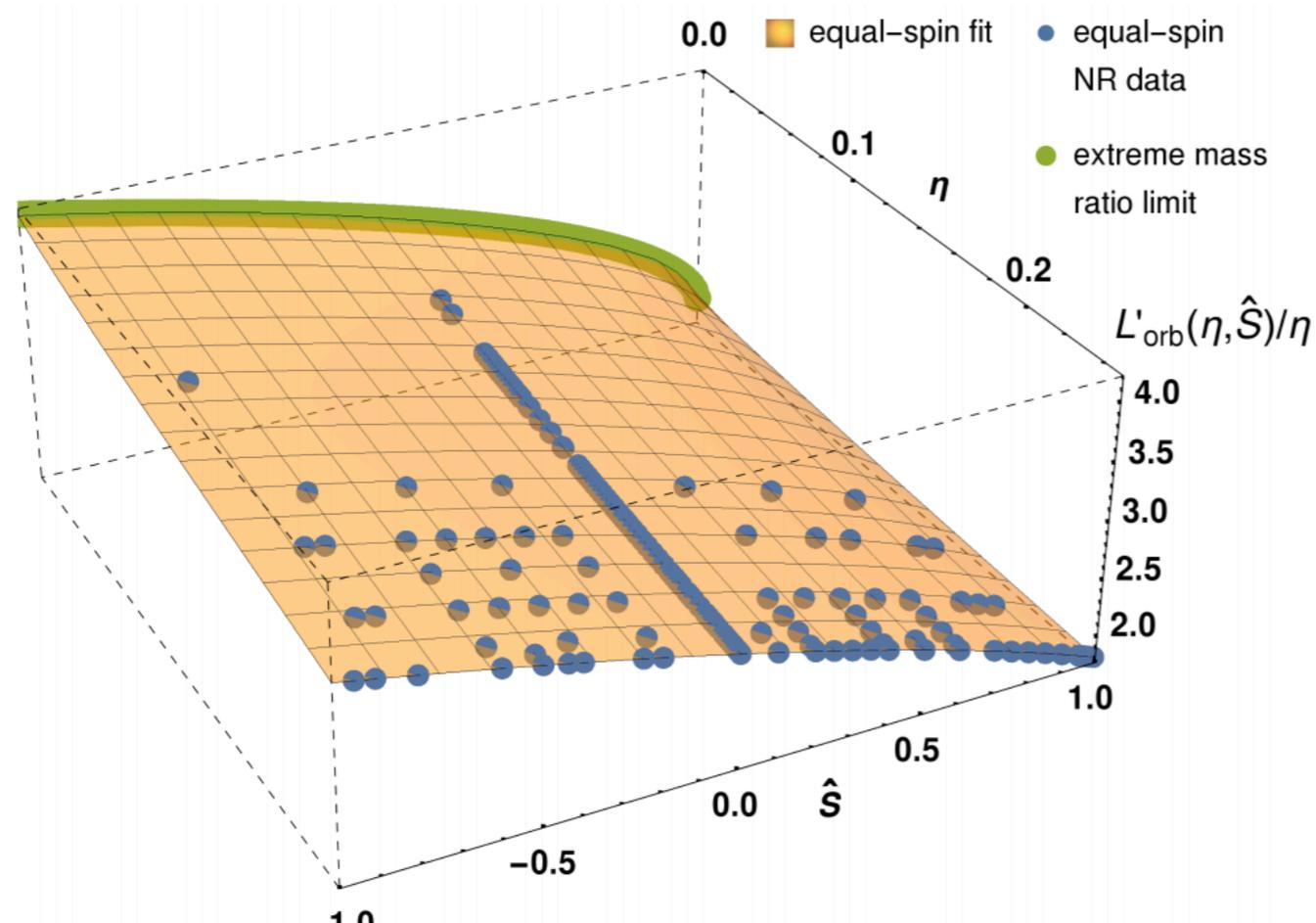
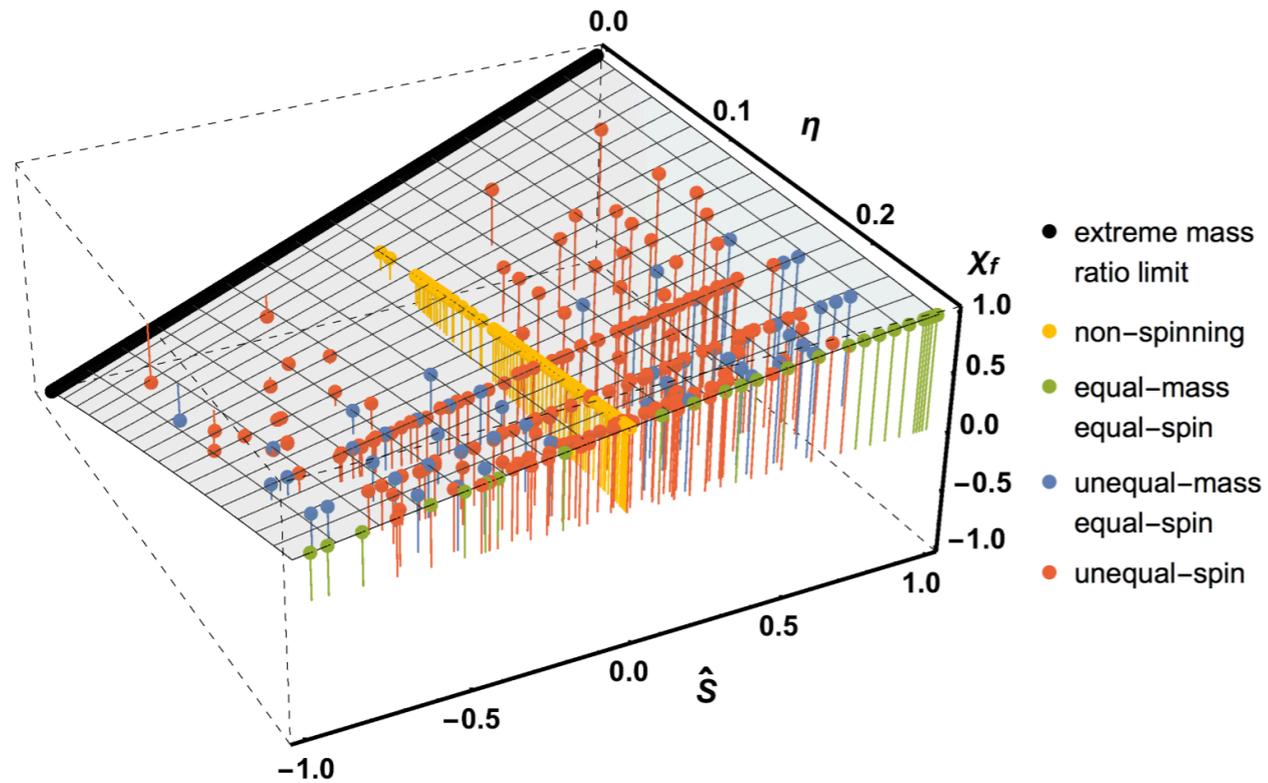
time(ms)=265.5



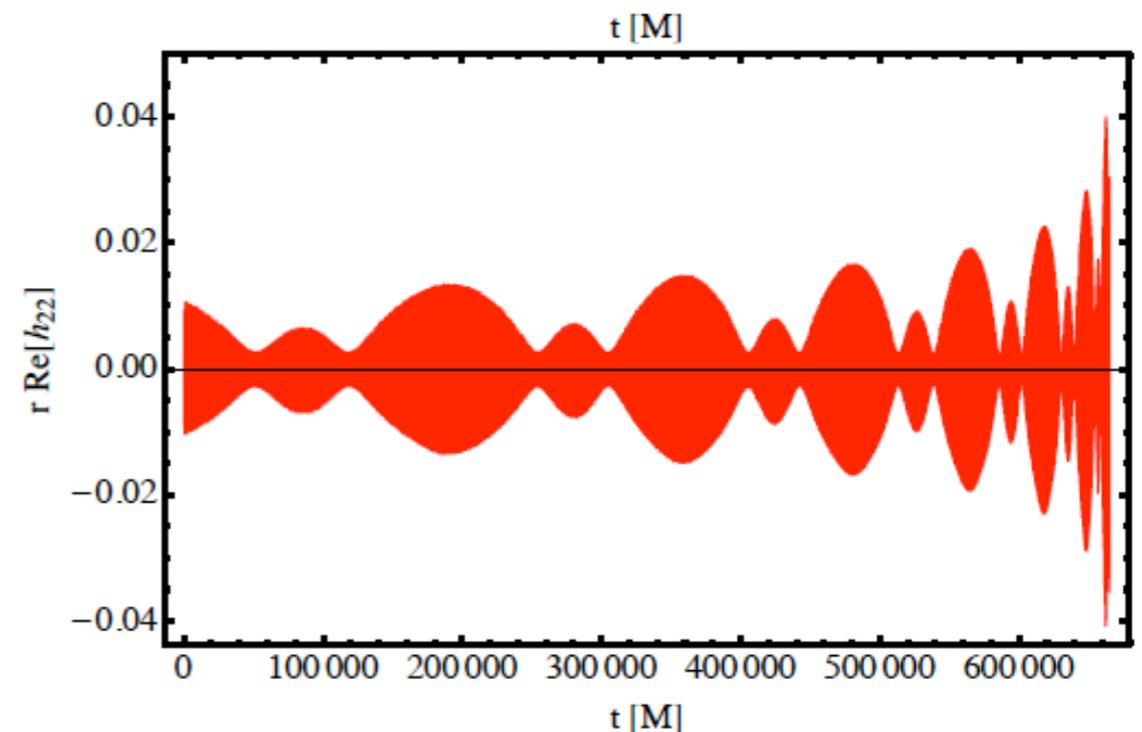
Simulaciones: Sascha Husa
Visualización: Rafel Jaume, UIB



Modelos de onda



- Un puñado (o miles) de formas de onda de relatividad numérica no bastan: ¡necesitamos calcular la señal para cualquier combinación de masas y giros!
- Modelo matemático: encuentre una ecuación que se aproxime a los datos de relatividad numérica y tenga en cuenta la información analítica (por ejemplo, de la teoría de perturbaciones): en el ejemplo, el giro final.
- Necesitamos un modelo para toda una función: la forma de onda completa.



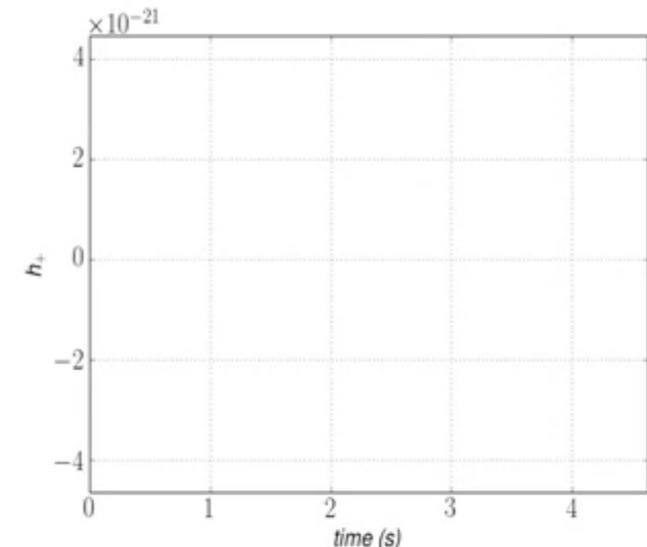
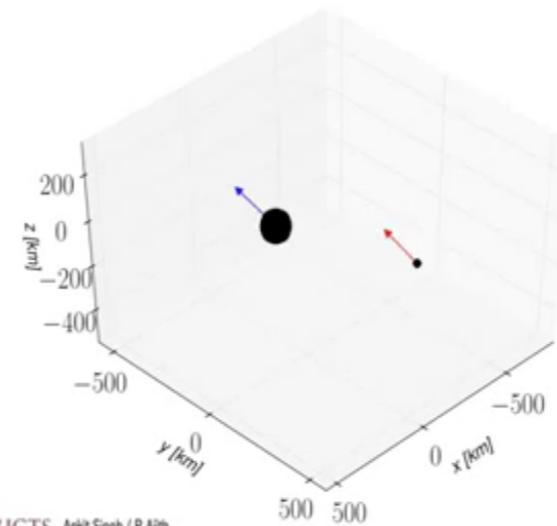
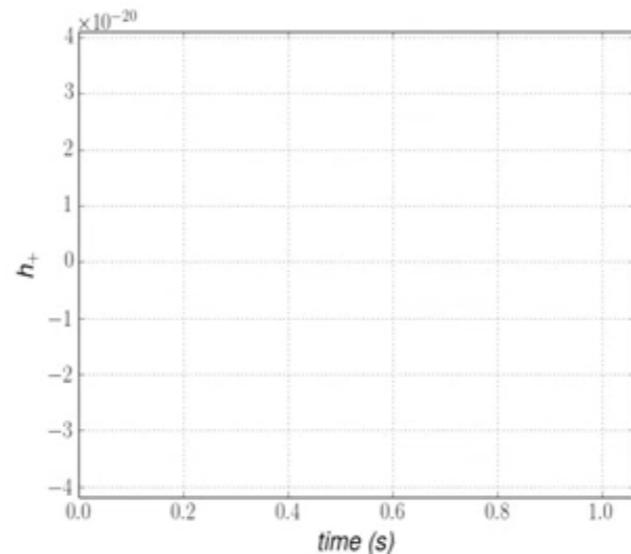
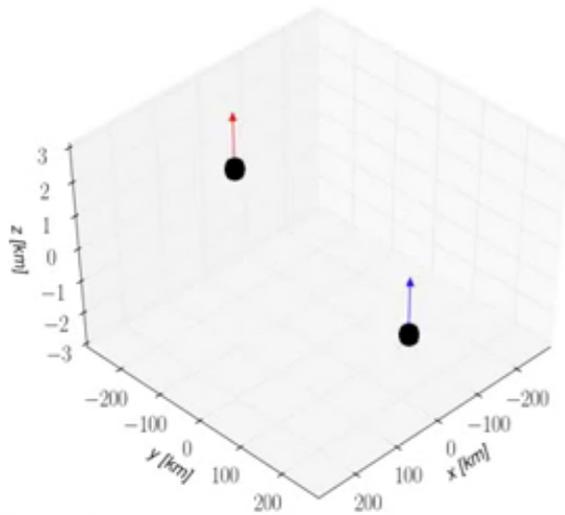
El espacio de parámetros de agujeros negros

- Agujeros negros astrofísicos en equilibrio son muy sencillos: masa y espín!
- Espacio de parámetros de binarios de agujeros negros: 9 parámetros (cociente de masa + 2 vectores de giro + 2 parámetros de excentricidad).

$$H_{SO} = 2 \frac{\vec{S}_{\text{eff}} \cdot \vec{L}}{r^3}$$

- **Efecto principal de espín: acoplamiento de espín y órbita** L: momento angular orbital

energía potencial = $H_{SO} = 2 \frac{\vec{S}_{\text{eff}} \cdot \vec{L}}{r^3}$ $\dot{\vec{S}} = -2 \frac{\vec{S}_{\text{eff}} \times \vec{L}}{r^3}$



- **espines ortogonal al plano orbital: el plano orbital se conserva.**

- Espacio de parameters de 3 dimensiones

- **Components del espín en el plano orbital: precesión**

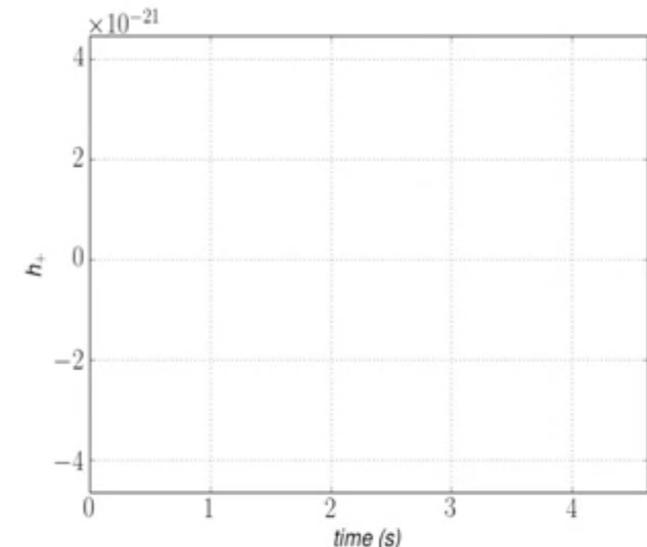
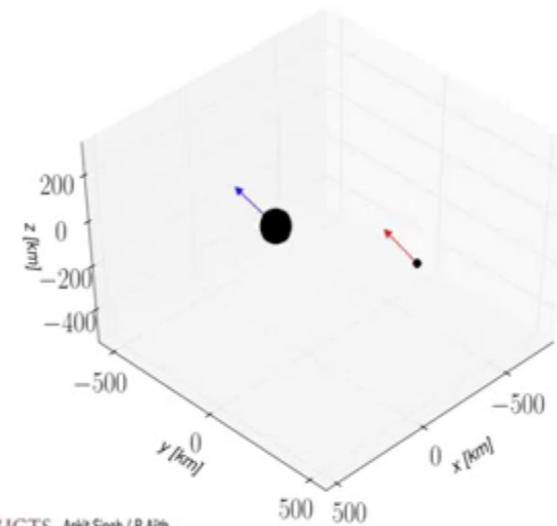
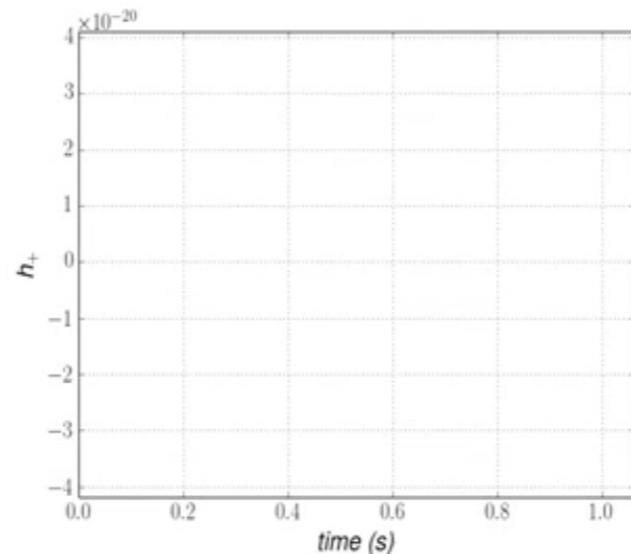
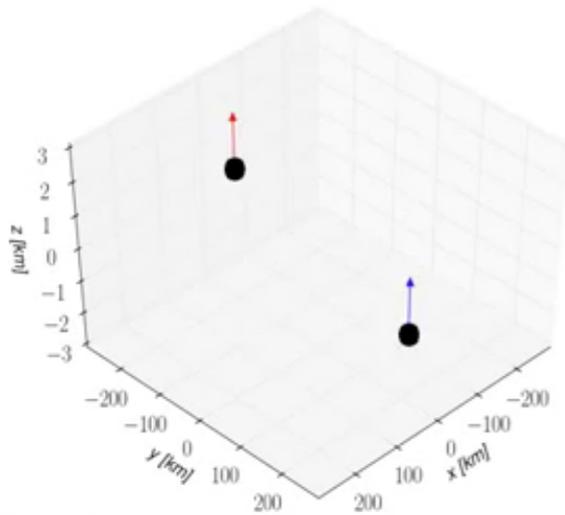
El espacio de parámetros de agujeros negros

- Agujeros negros astrofísicos en equilibrio son muy sencillos: masa y espín!
- Espacio de parámetros de binarios de agujeros negros: 9 parámetros (cociente de masa + 2 vectores de giro + 2 parámetros de excentricidad).

$$H_{SO} = 2 \frac{\vec{S}_{\text{eff}} \cdot \vec{L}}{r^3}$$

- **Efecto principal de espín: acoplamiento de espín y órbita** L: momento angular orbital

energía potencial = $H_{SO} = 2 \frac{\vec{S}_{\text{eff}} \cdot \vec{L}}{r^3}$ $\dot{\vec{S}} = -2 \frac{\vec{S}_{\text{eff}} \times \vec{L}}{r^3}$



- **espines ortogonal al plano orbital: el plano orbital se conserva.**
 - Espacio de parameters de 3 dimensiones
- **Components del espín en el plano orbital: precesión**

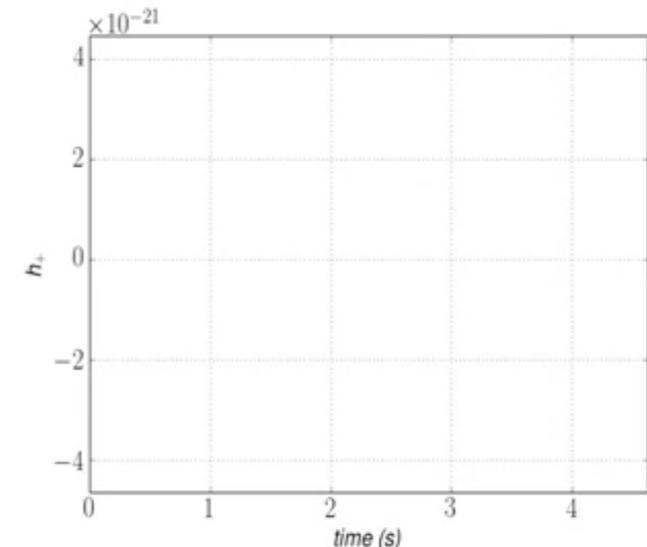
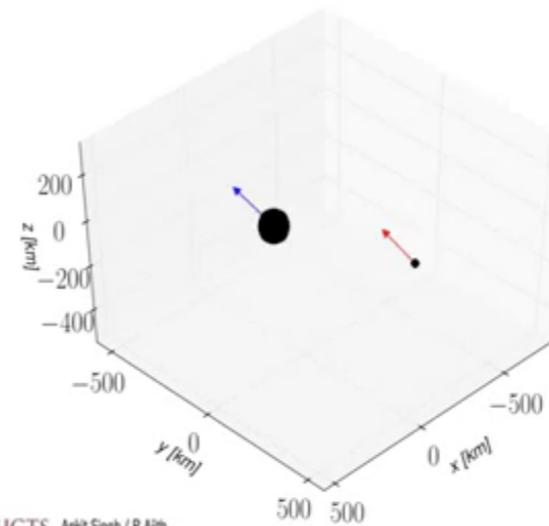
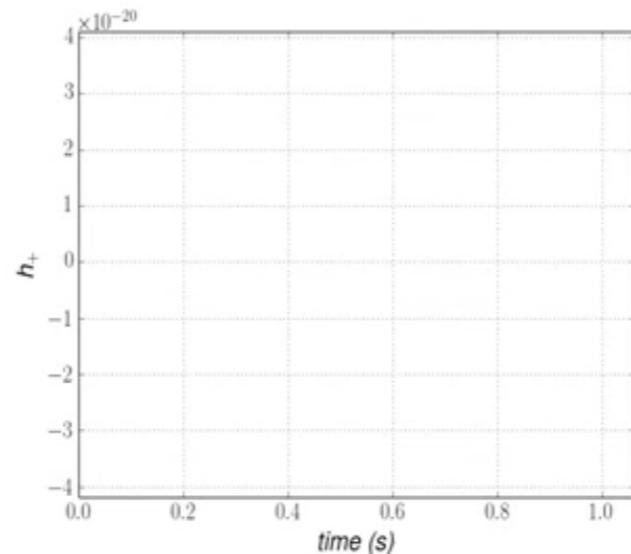
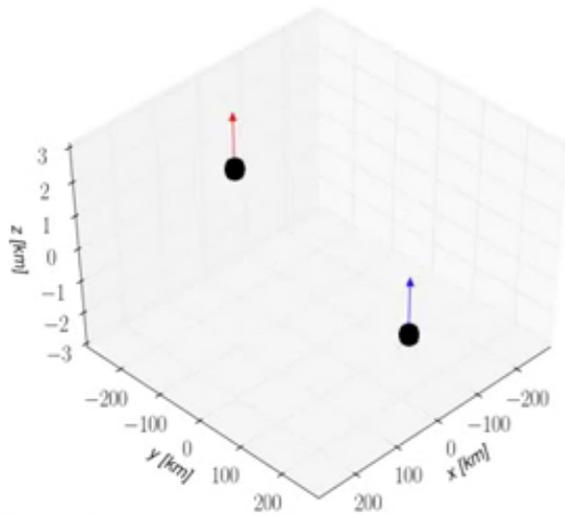
El espacio de parámetros de agujeros negros

- Agujeros negros astrofísicos en equilibrio son muy sencillos: masa y espín!
- Espacio de parámetros de binarios de agujeros negros: 9 parámetros (cociente de masa + 2 vectores de giro + 2 parámetros de excentricidad).

$$H_{SO} = 2 \frac{\vec{S}_{\text{eff}} \cdot \vec{L}}{r^3}$$

- **Efecto principal de espín: acoplamiento de espín y órbita** L: momento angular orbital

energía potencial = $H_{SO} = 2 \frac{\vec{S}_{\text{eff}} \cdot \vec{L}}{r^3}$ $\dot{\vec{S}} = -2 \frac{\vec{S}_{\text{eff}} \times \vec{L}}{r^3}$



- **espines ortogonal al plano orbital: el plano orbital se conserva.**
 - Espacio de parameters de 3 dimensiones
- **Components del espín en el plano orbital: precesión**

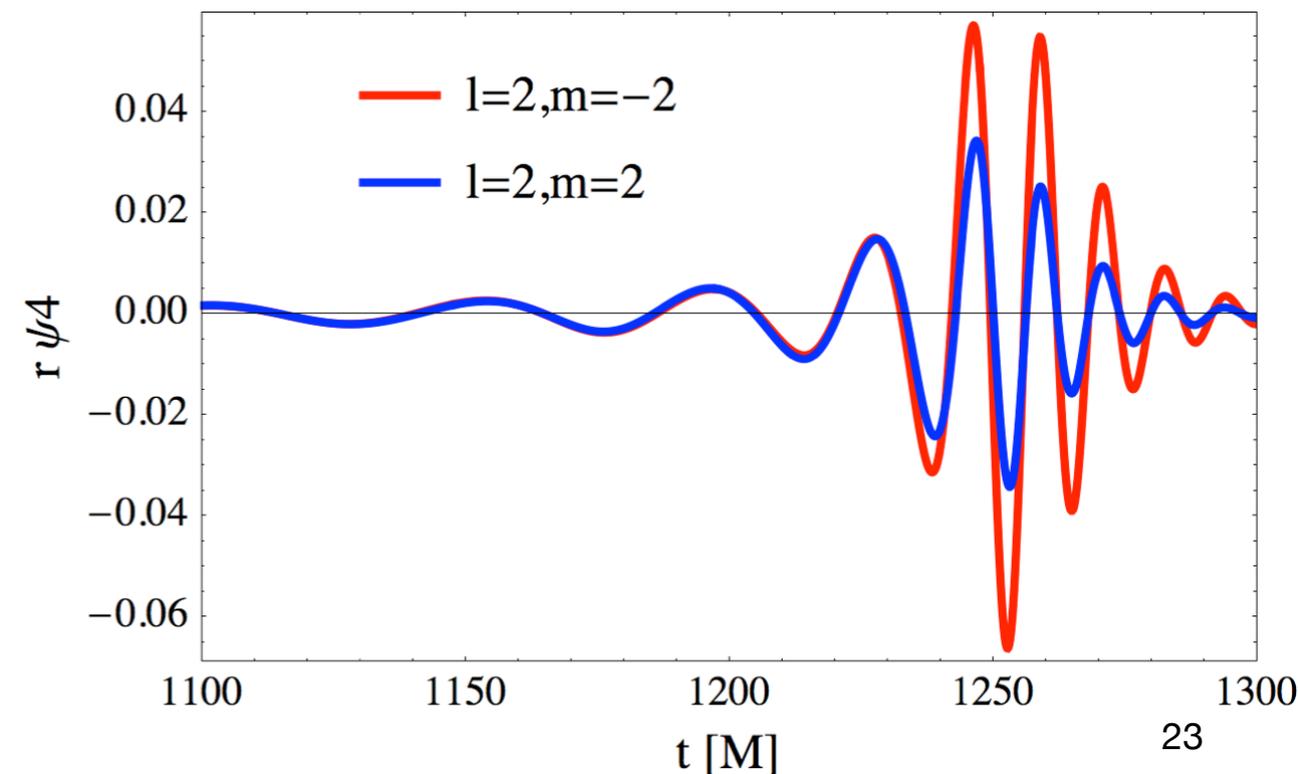
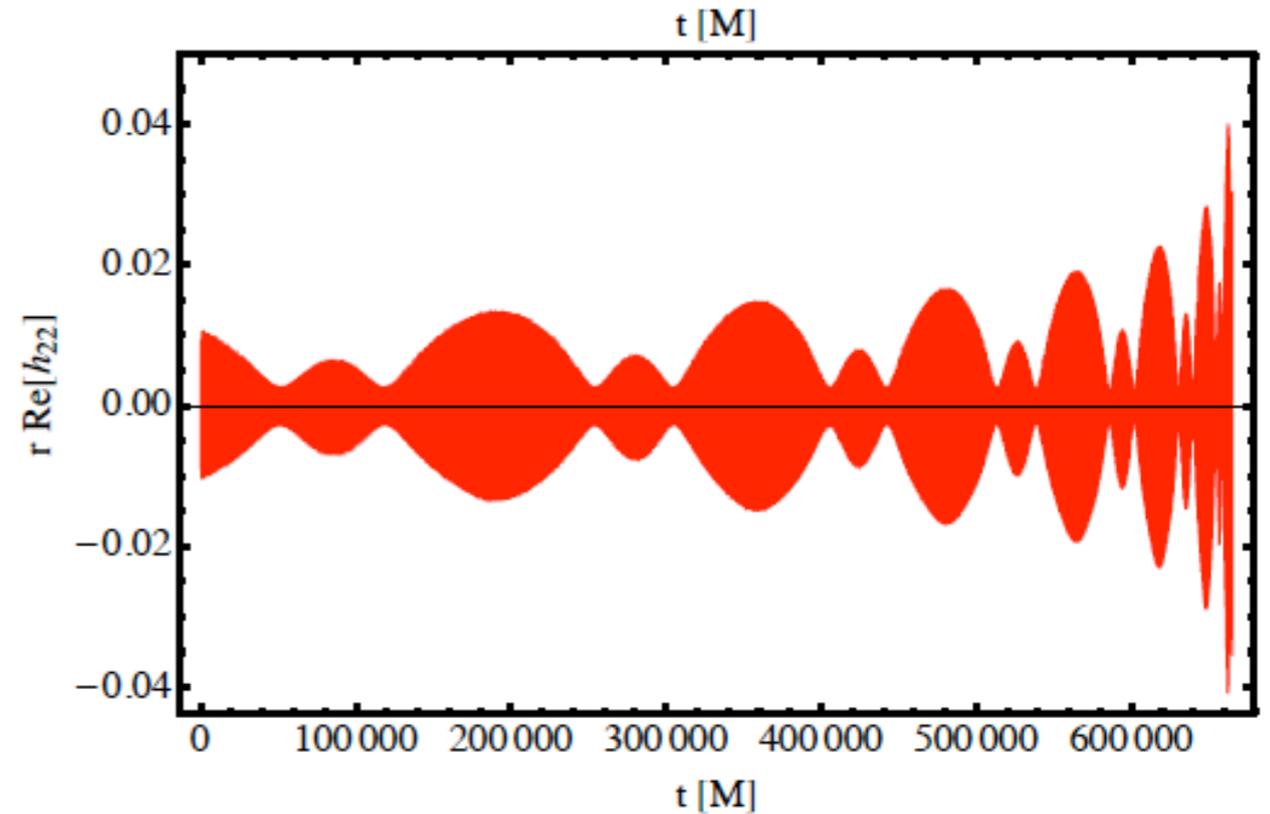
Atajos hacia la precesión

- **escala temporal orbital \ll escape temporal de precesión:**

Marco de rotación conjunta: energía radiada y forma de onda casi no afectada por la precesión [Schmidt+PRD 2011]

- -> mapa aproximado de sistema sin precesión a sistema con precesión: modelo "retorcido" sin precesión con ángulos de Euler "post-newtonianos". [Schmidt+ PRD 2012, Hannam+ PRL 2013]

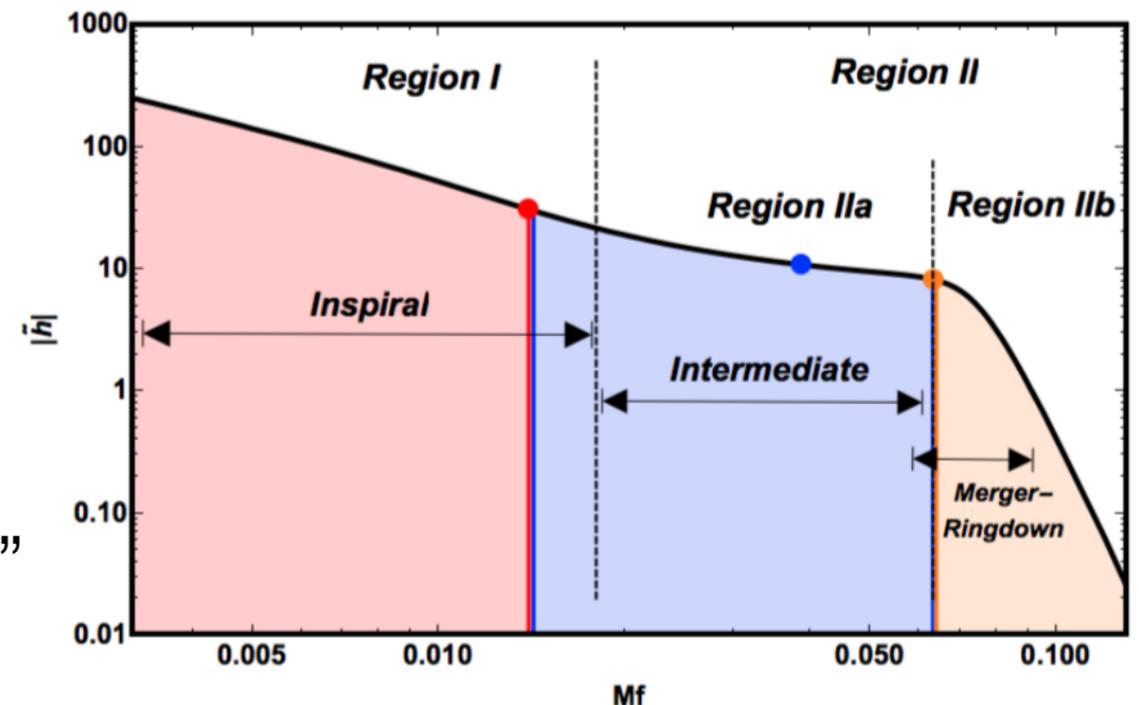
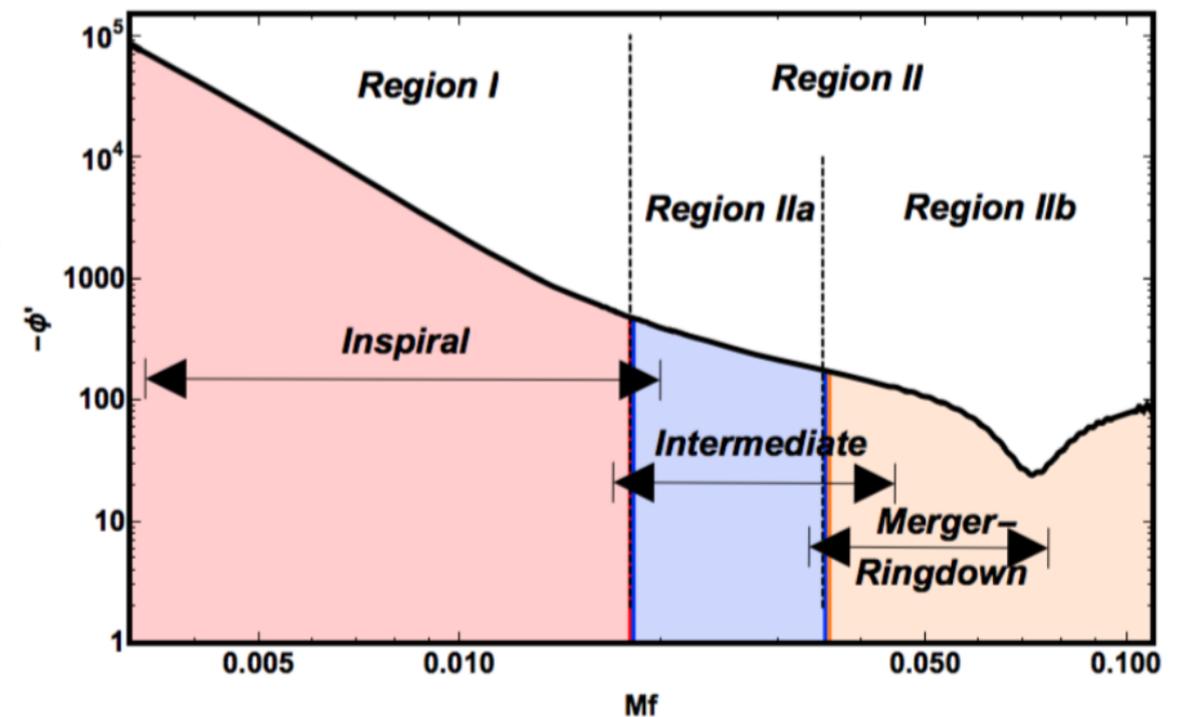
- Falta: asimetría norte/sur responsable de grandes retrocesos [Brügmann+PRD 2008]



Modelos fenomenológicos de forma de onda

(sin precesión)

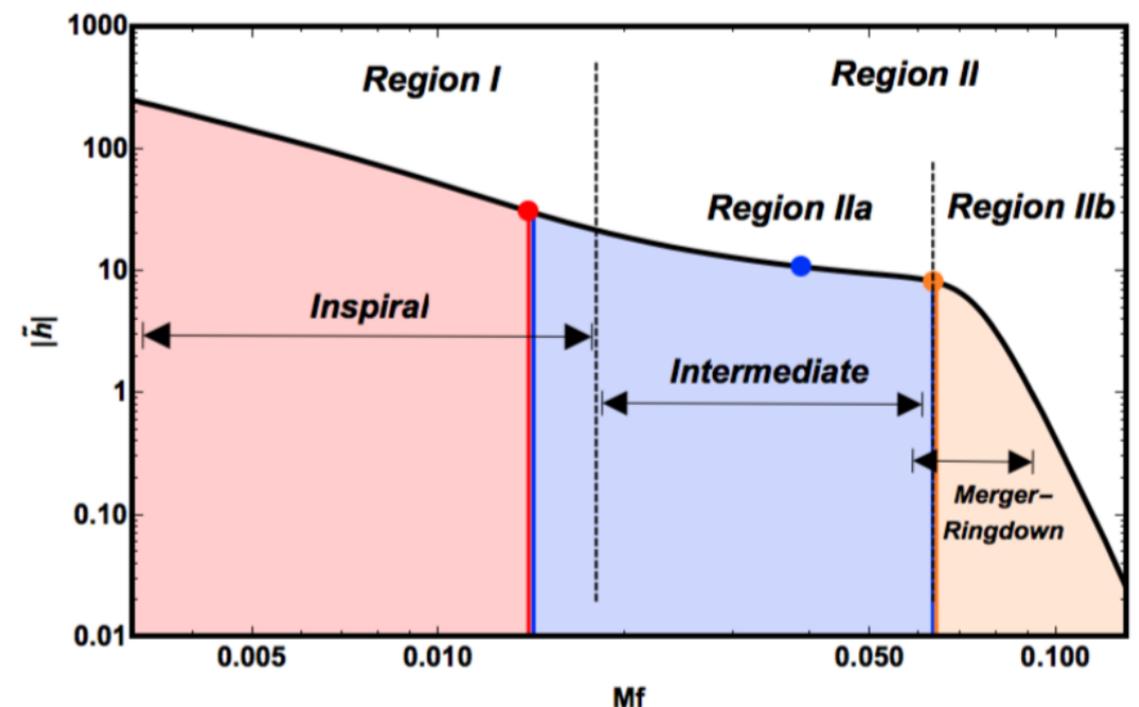
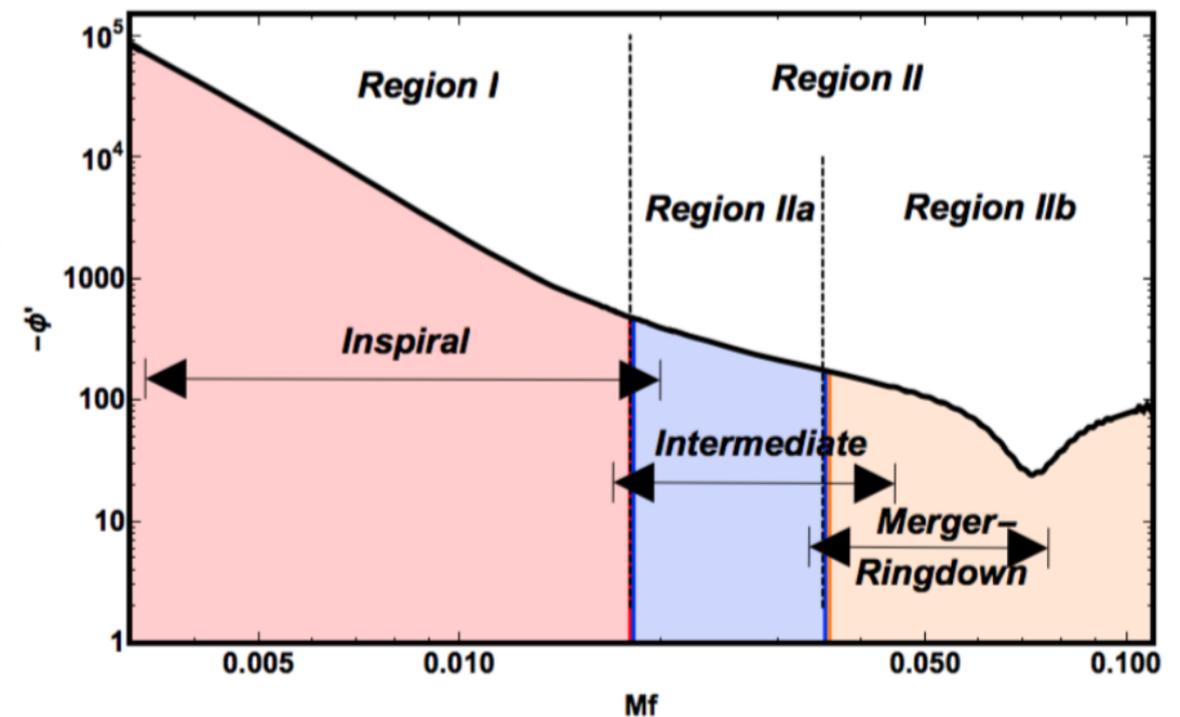
- Dividir la forma de onda en amplitud + fase de modos armónicos esféricos, modelar funciones simples no oscilatorias.
- La simplicidad del modelo aumenta con el número de regiones.
- **Ejemplo:**
 - ~ 30 puntos de de frecuencia para amplitud y fase
 - Interpolación polinómica en el espacio de parámetros.
 - reconstruir forma de onda como “spline”



Modelos fenomenológicos de forma de onda

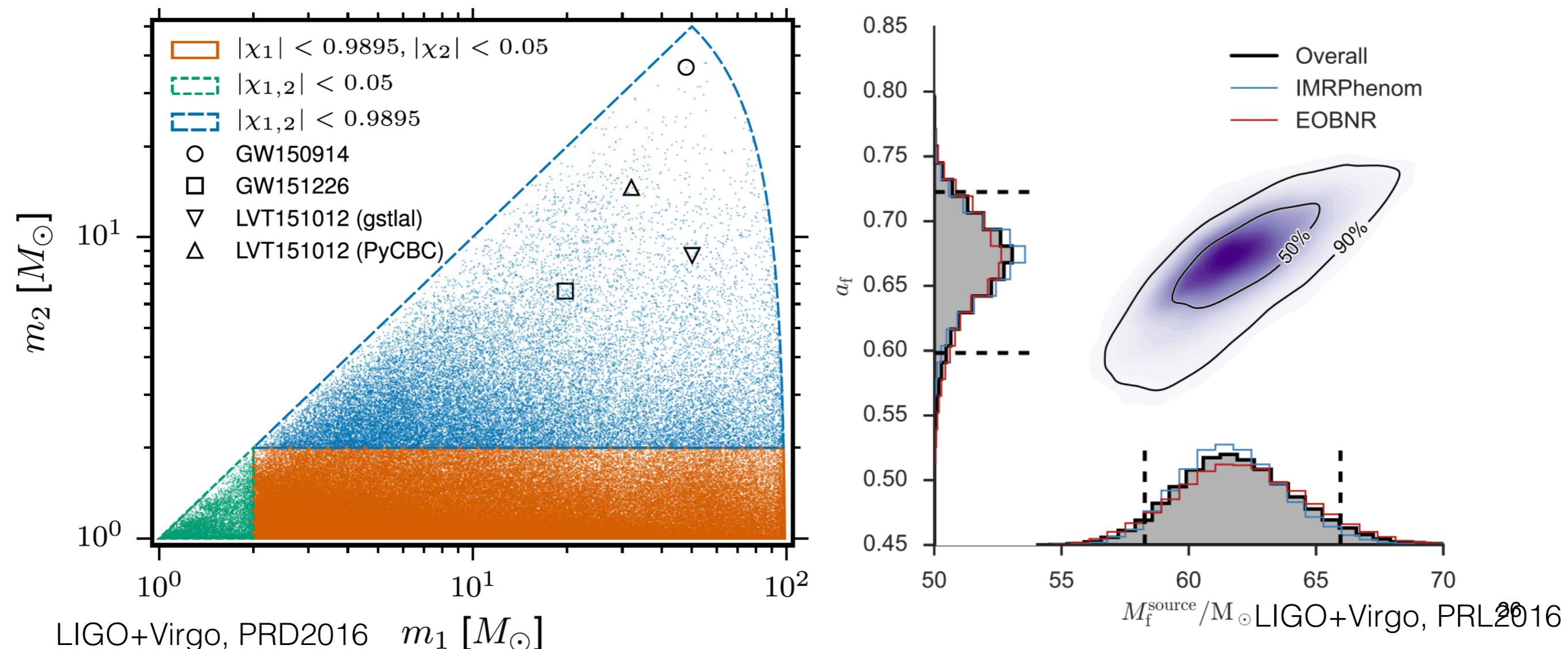
(sin precesión)

- Dividir la forma de onda en amplitud + fase de modos armónicos esféricos, modelar funciones simples no oscilatorias.
- La simplicidad del modelo aumenta con el número de regiones.
- **Nuestra elección:**
 - 3 regiones, ~ 3 parámetros cada región
 - espiral (usar intuición post-Newtoniana)
 - fusión (corto)
 - relajación (ringdown) - usar resultados perturbativos del agujero final

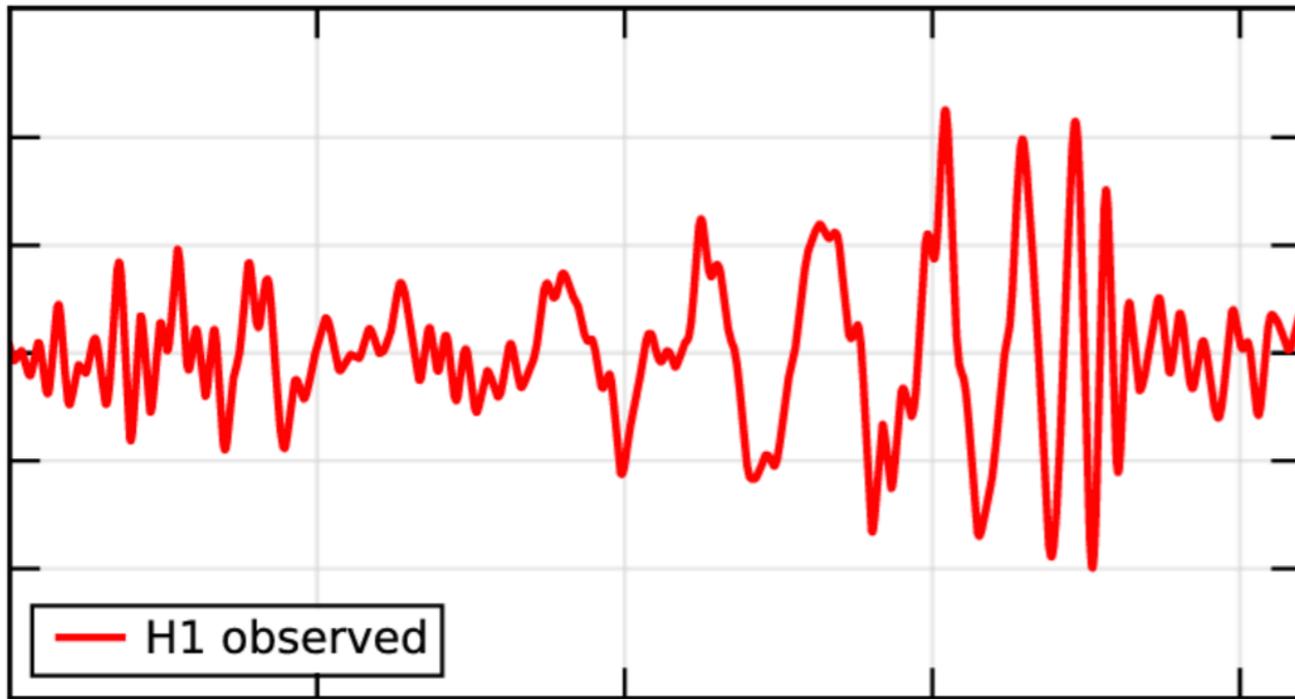


Búsquedas y estimación bayesiana de parámetros.

- **2-pasos de analysis en el LIGO/Virgo Compact binary coalescence group:**
 - **Búsquedas -> detección:** ¿Cuál es la evidencia estadística de ver una señal sobre el fondo, banco de plantillas fijas?
 - **Estimación bayesiana de parámetros:** variar plantillas con caminos aleatorias en el espacio de parámetros, utilizando MCMC, etc.

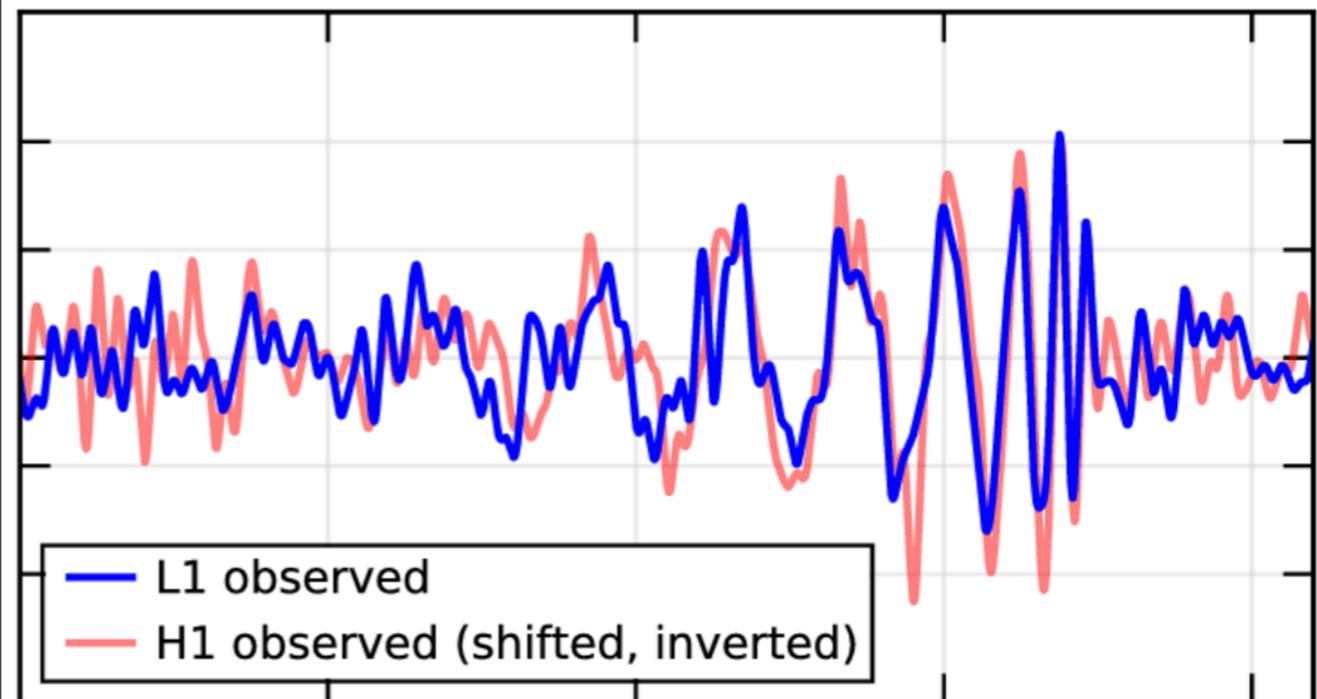


Hanford, Washington (H1)



[click for DATA](#)

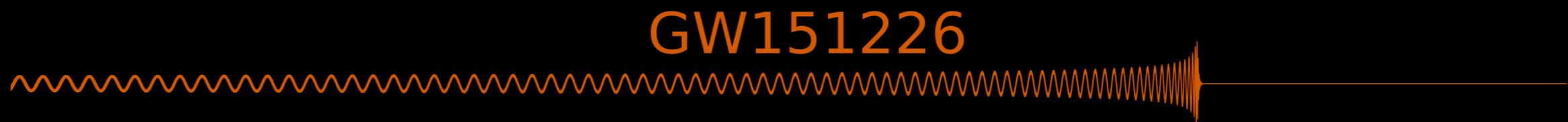
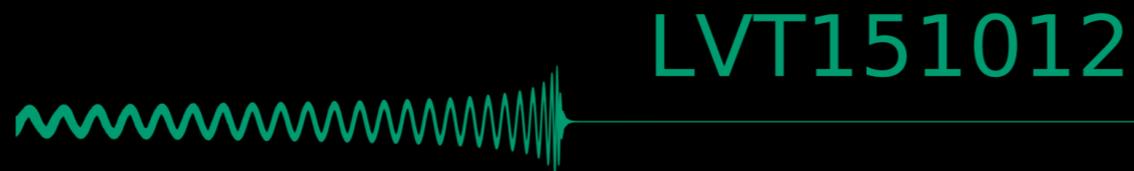
Livingston, Louisiana (L1)



[click for DATA \(L1 only\)](#)

Todos los datos están disponibles libremente
@ <http://lsc.ligo.org>

Estudiantes: Probar los tutoriales de python!



0 sec.

1 sec.

2 sec.

time observable by LIGO-Virgo

GW170608: sistema binario mas ligero hasta ahora

The Astrophysical Journal Letters 851 (2017)

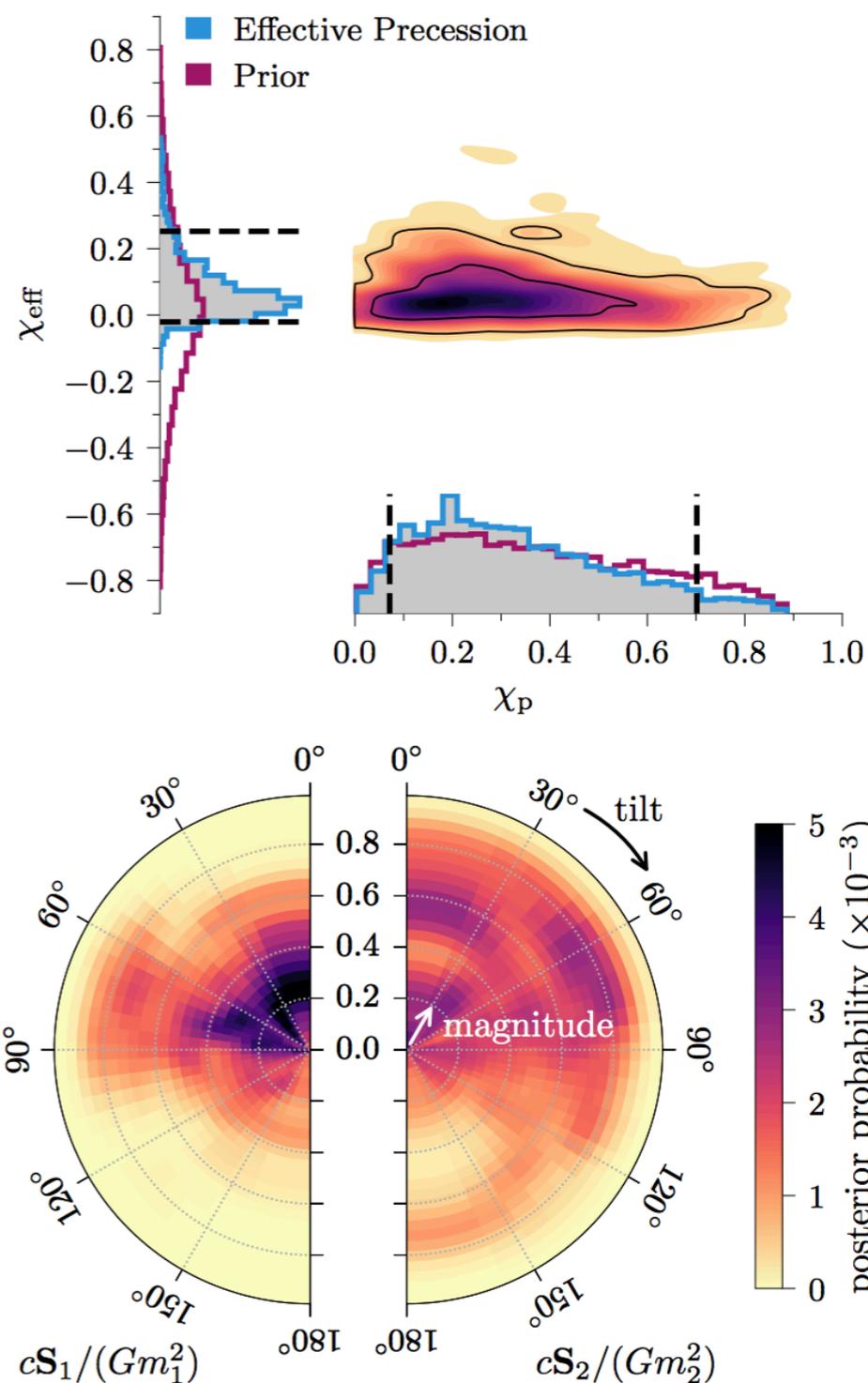
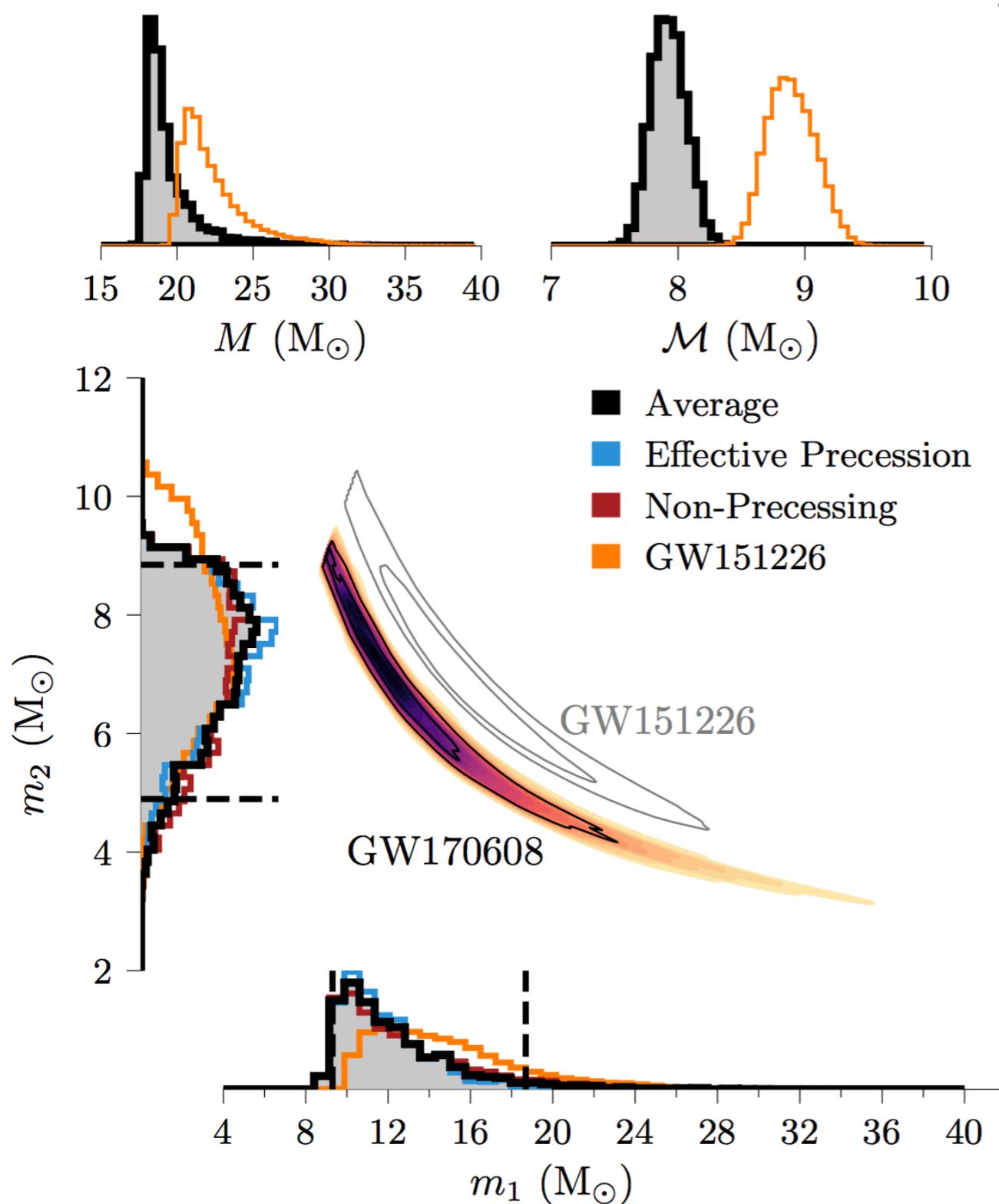


Figure 2. Posterior probability densities for binary component masses (m_1 , m_2), total mass (M), and chirp mass

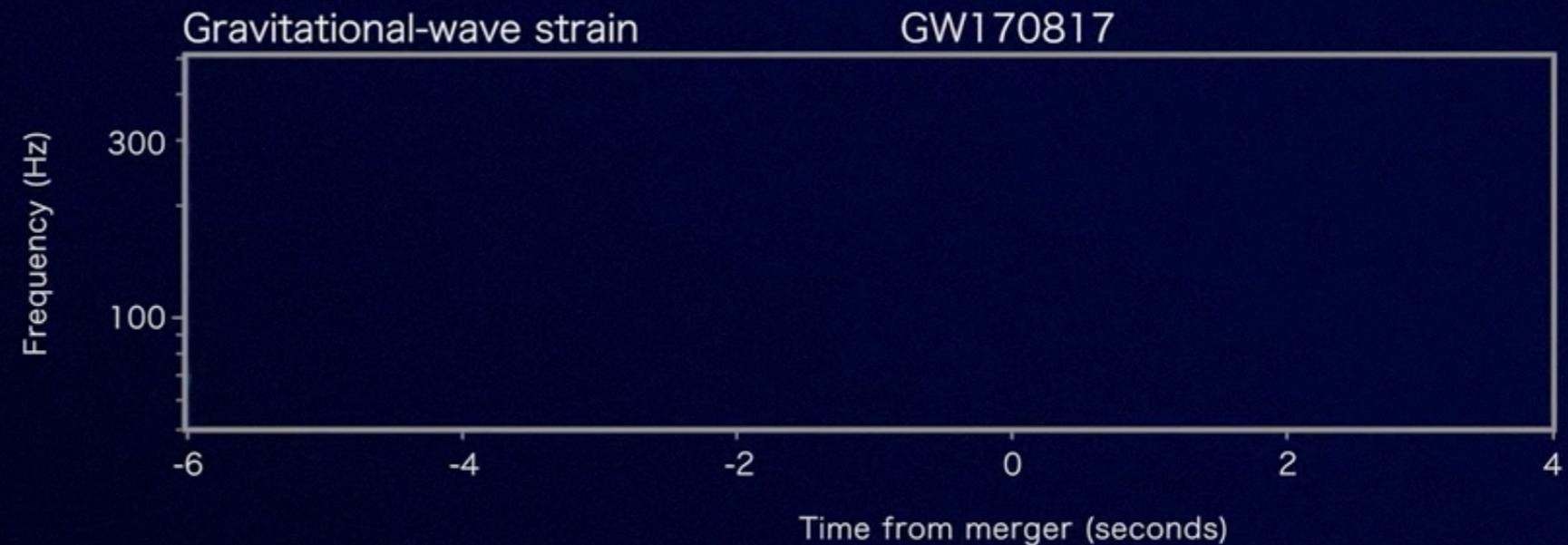
GRB 170817A y GW170817:

El albor de la astrofísica de multimensajeros con ondas gravitacionales y electromagnéticas.

Observación de ondas gravitacionales procedentes de la fusión de dos estrellas de neutrones, estallido de rayos gamma de corta duración y una kilonova.



LIGO



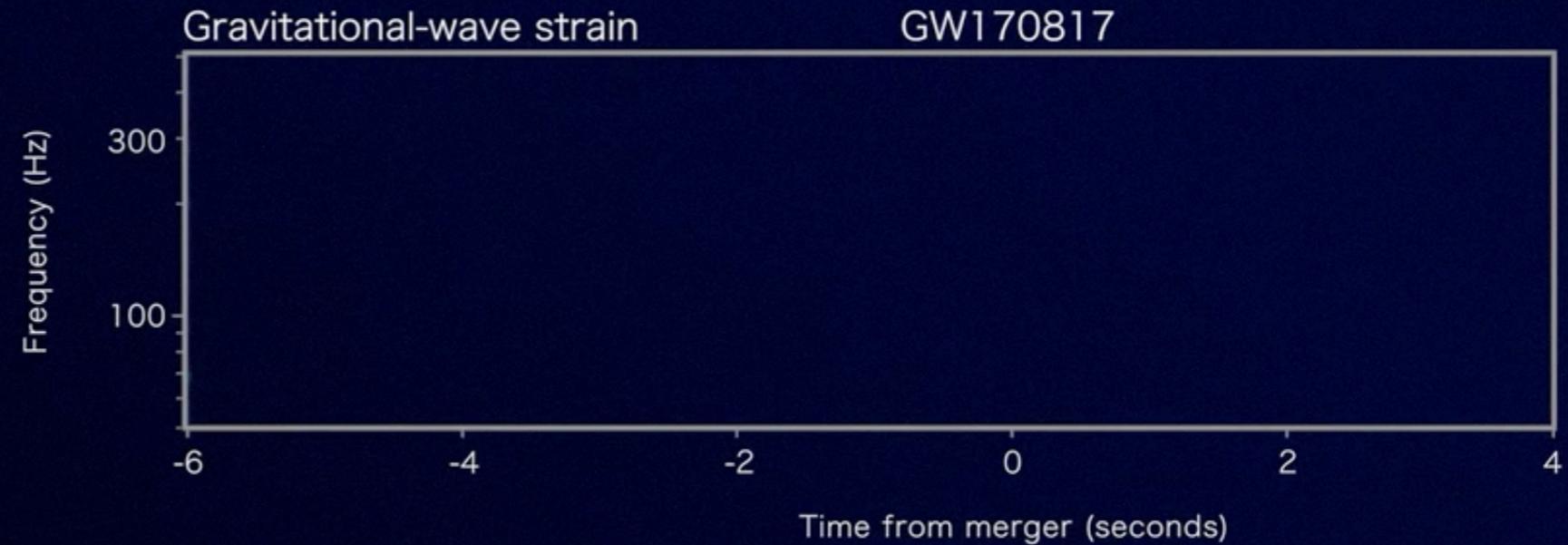
GRB 170817A y GW170817:

El albor de la astrofísica de multimensajeros con ondas gravitacionales y electromagnéticas.

Observación de ondas gravitacionales procedentes de la fusión de dos estrellas de neutrones, estallido de rayos gamma de corta duración y una kilonova.

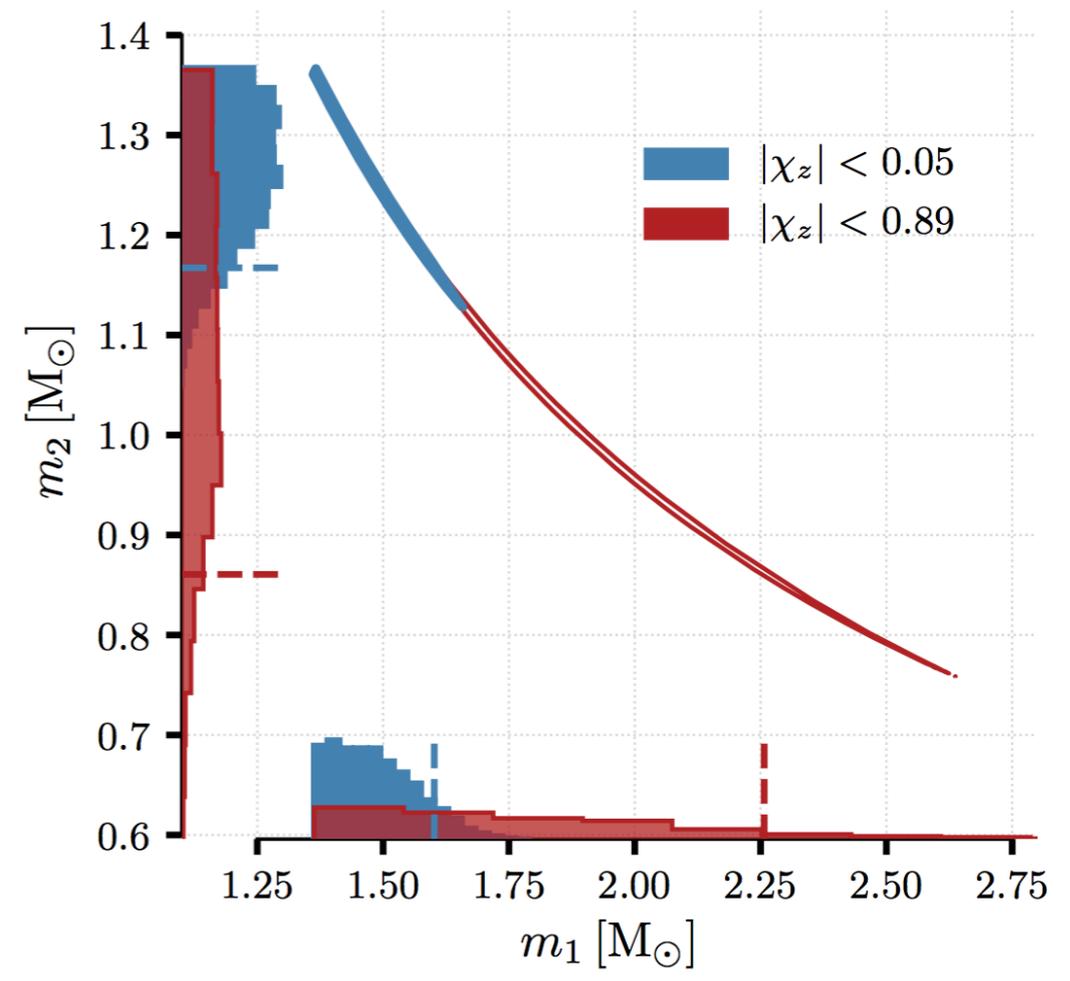
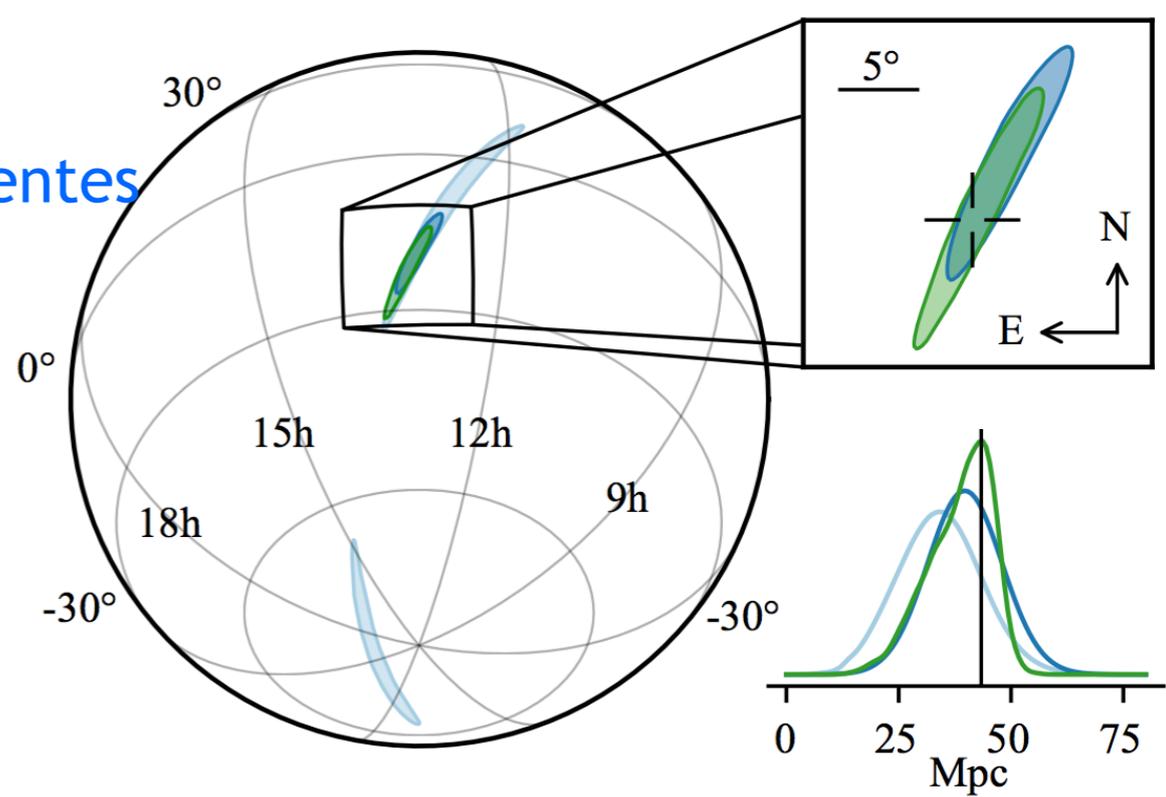
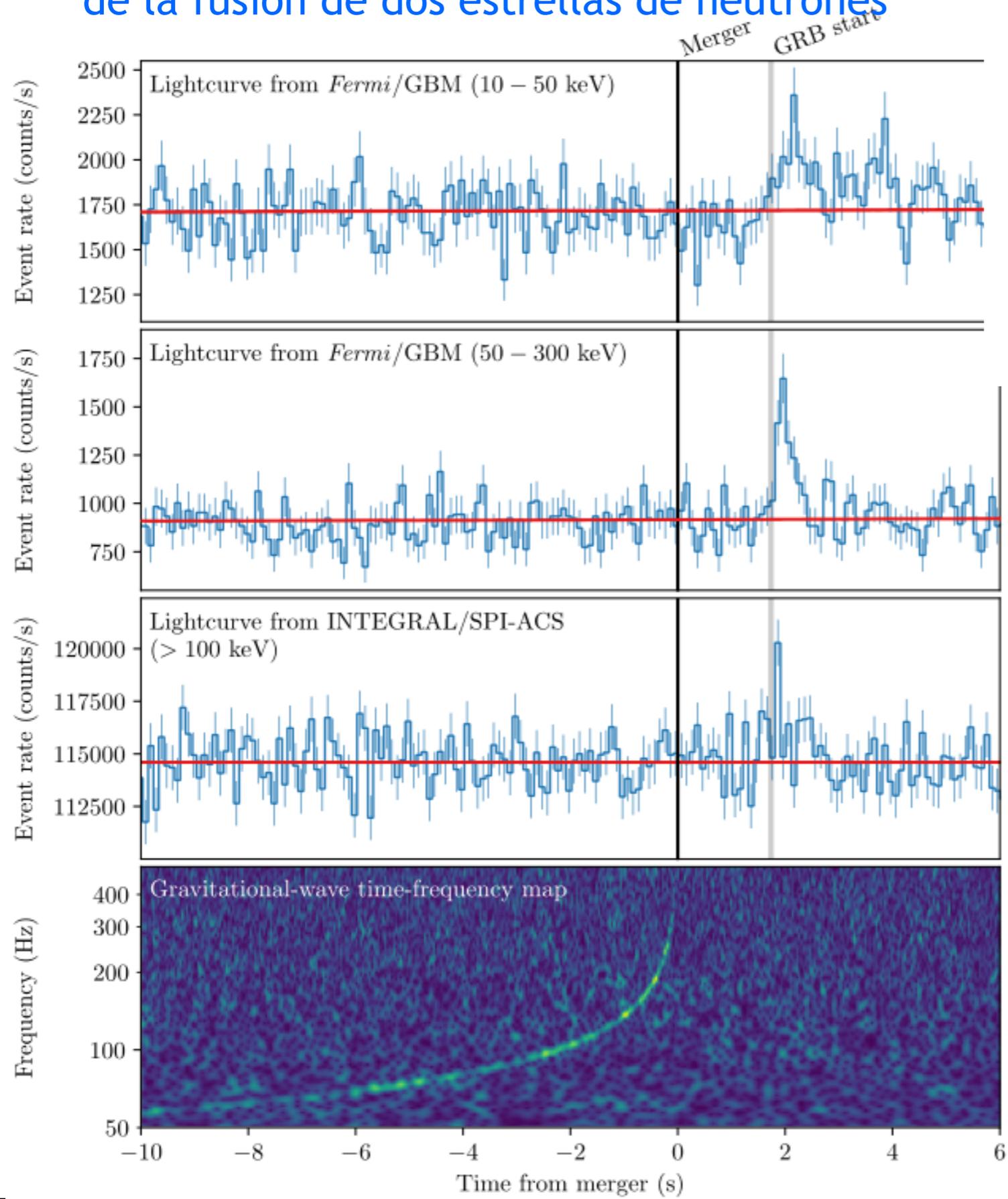


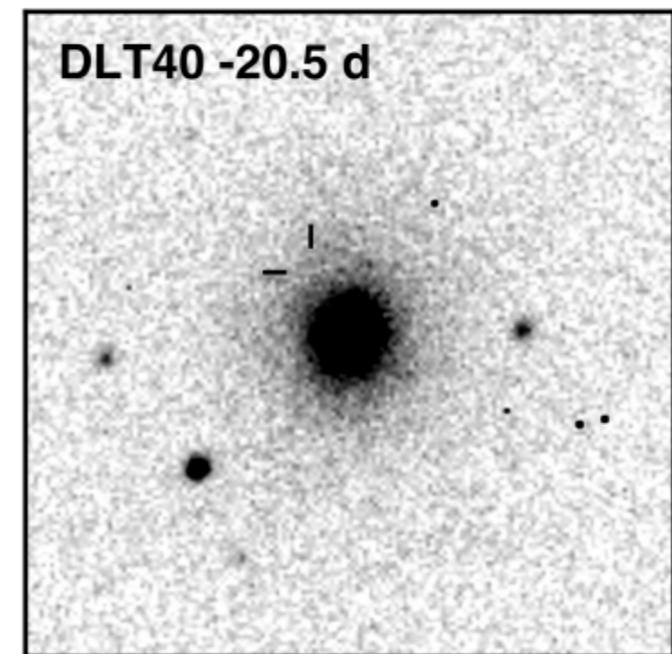
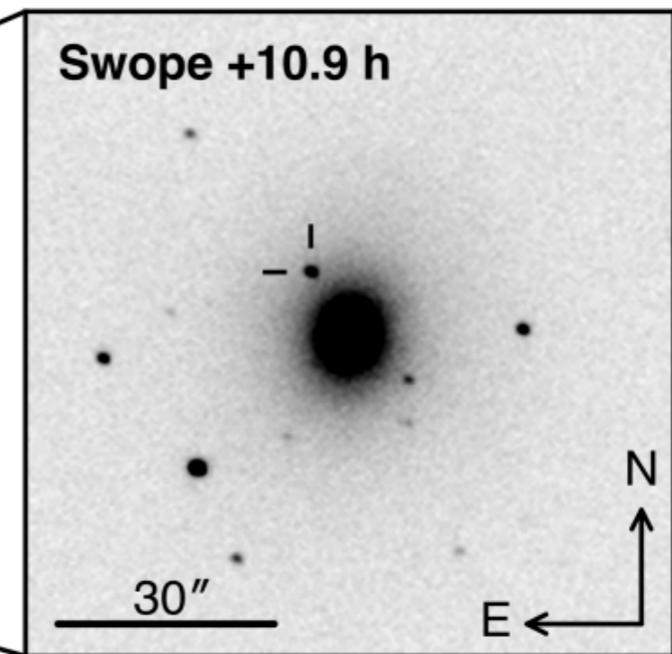
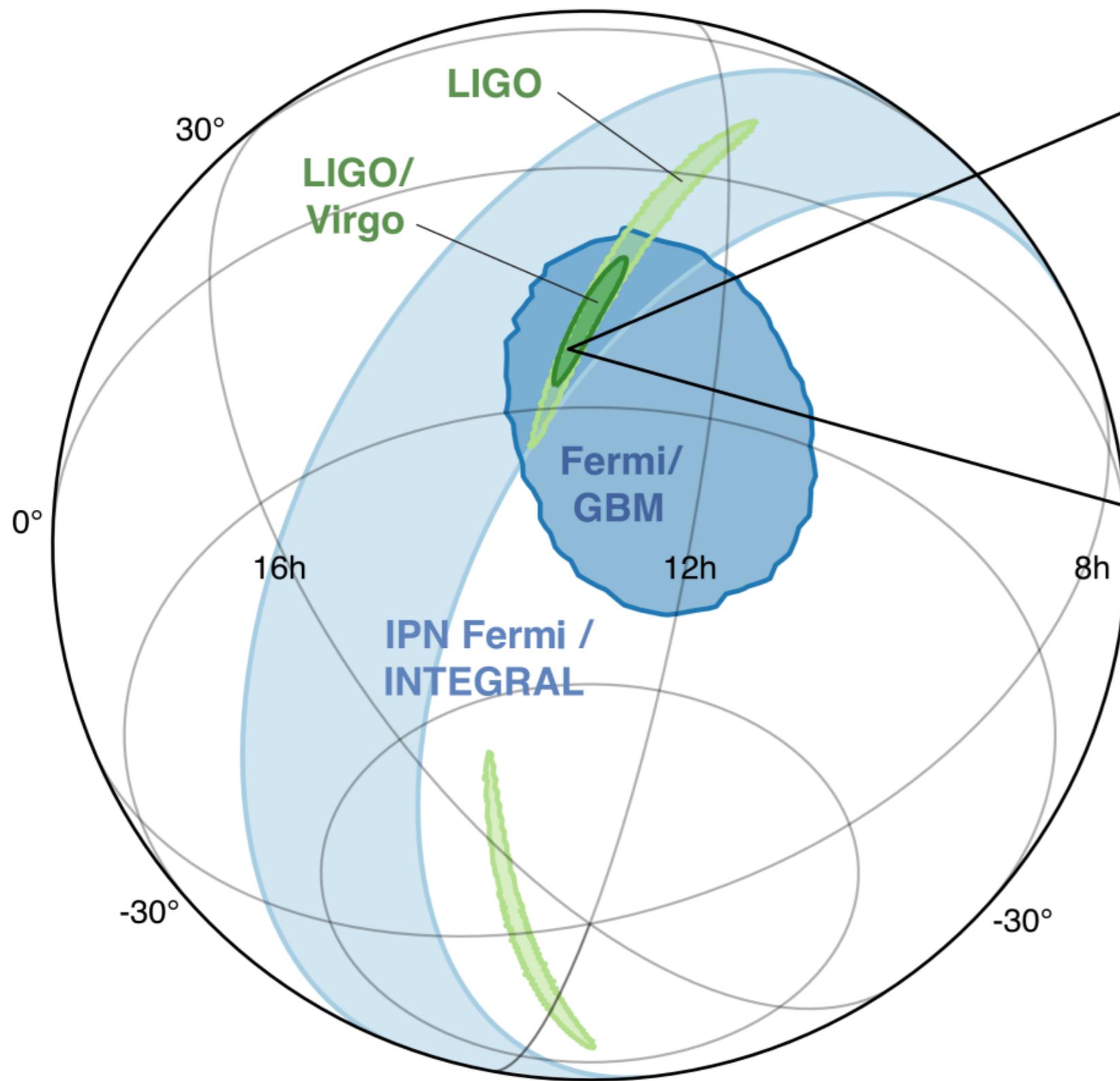
LIGO



GW170817

1^a observación de ondas gravitacionales procedentes de la fusión de dos estrellas de neutrones

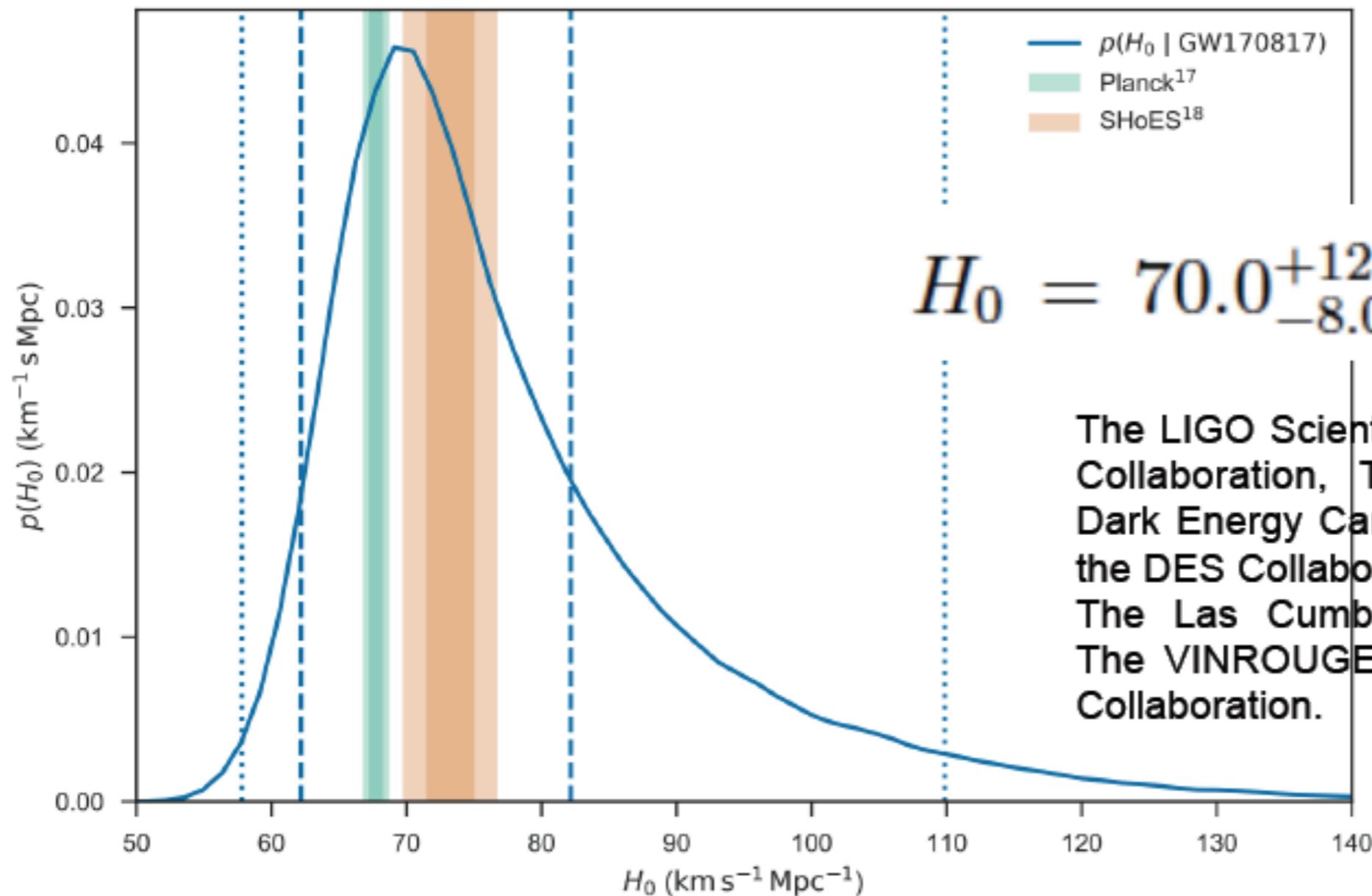




GW170817: inicio de la cosmología de GW

GW170817 puede usarse como una “**sirena estándar**”: combinando la **distancia** (inferida de la señal gravitacional) con la **velocidad** de recesión de la fuente (corrimiento al rojo; inferida de la señal electromagnética) se determina la **constante de Hubble**.

$$v_H = H_0 d$$



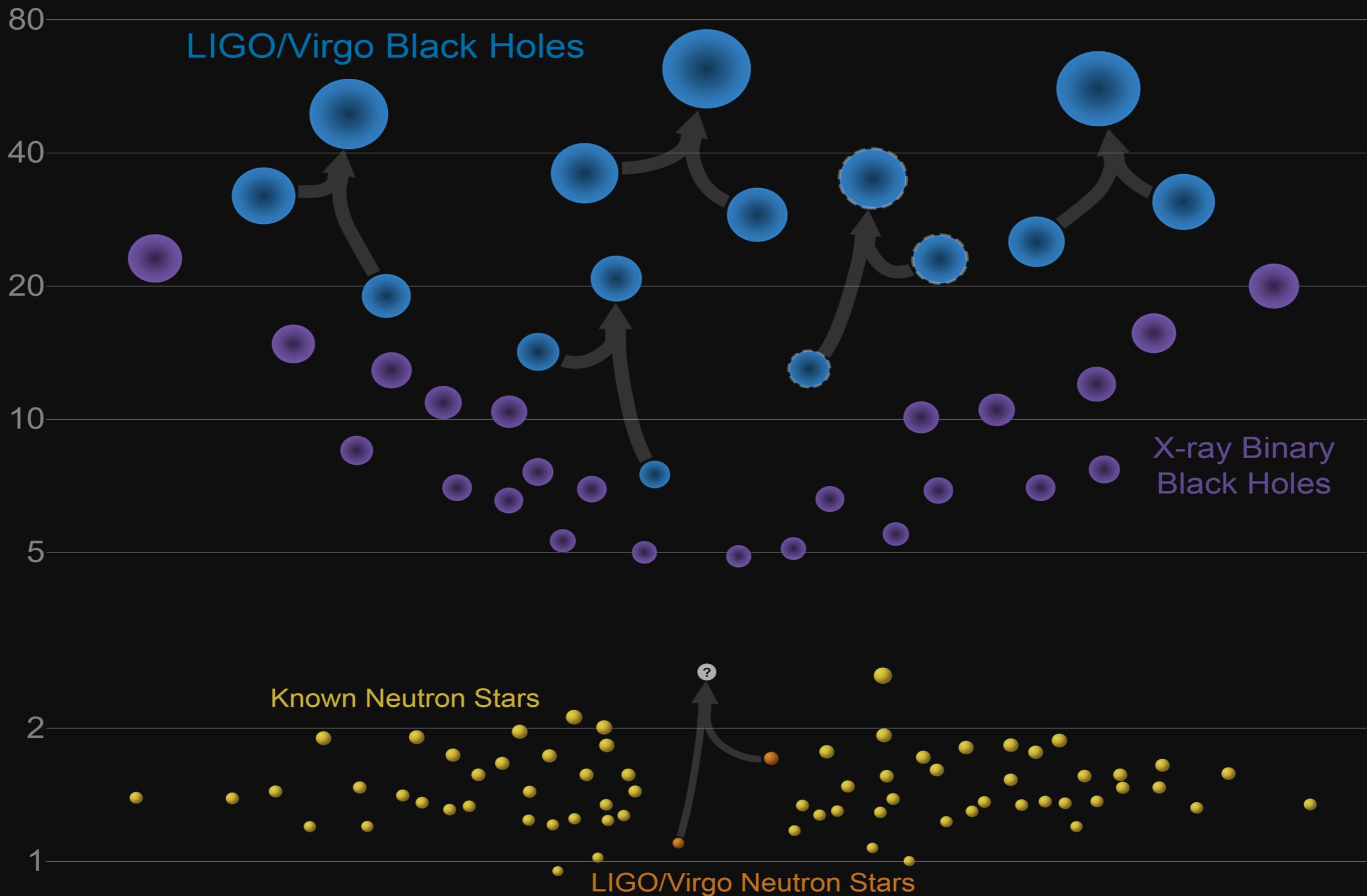
$$H_0 = 70.0^{+12.0}_{-8.0} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

The LIGO Scientific Collaboration and The Virgo Collaboration, The 1M2H Collaboration, The Dark Energy Camera GW-EM Collaboration and the DES Collaboration, The DLT40 Collaboration, The Las Cumbres Observatory Collaboration, The VINROUGE Collaboration & The MASTER Collaboration.

Nature (2017)

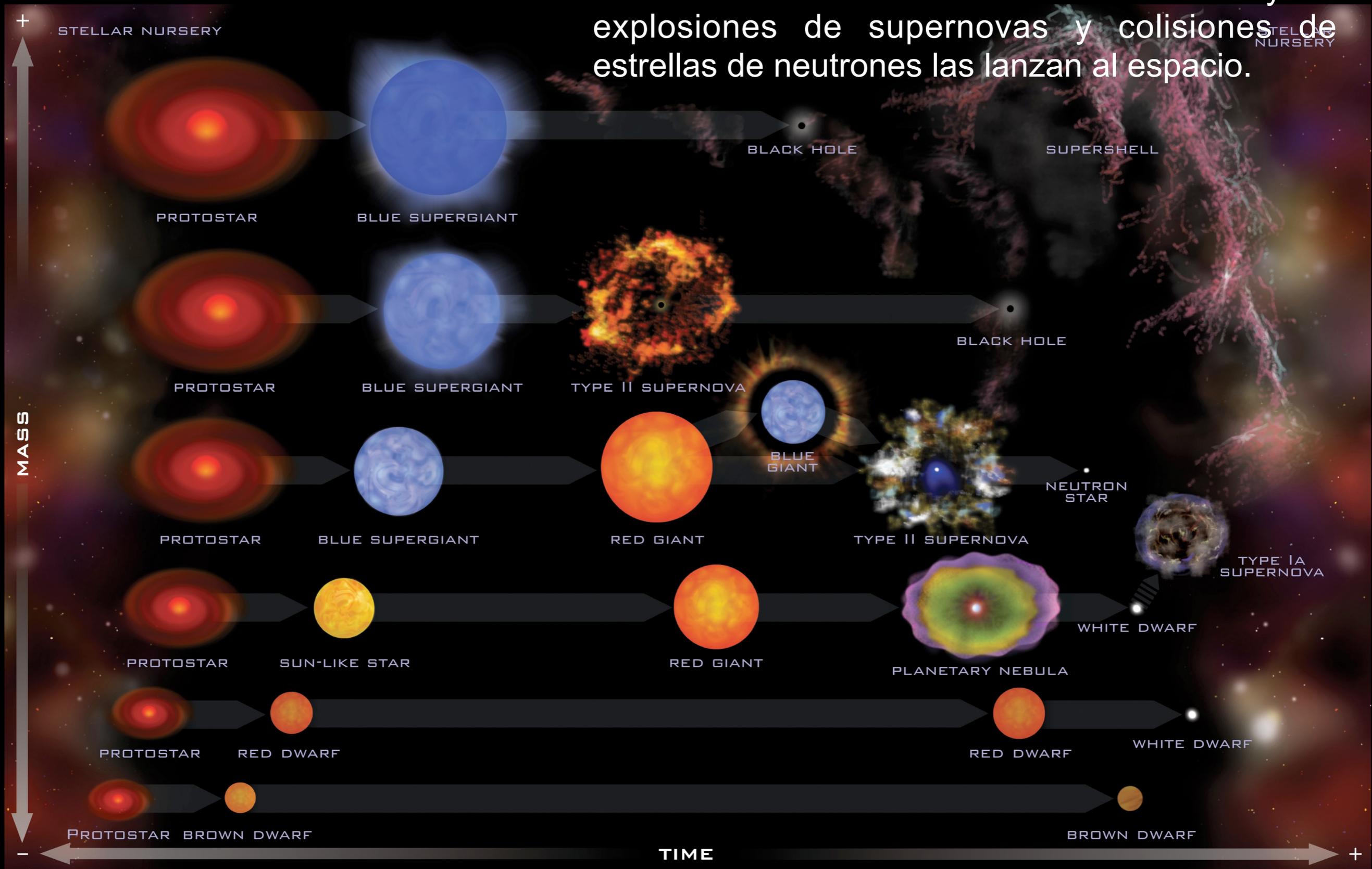
Masas en el “cementerio estelar”

in Solar Masses



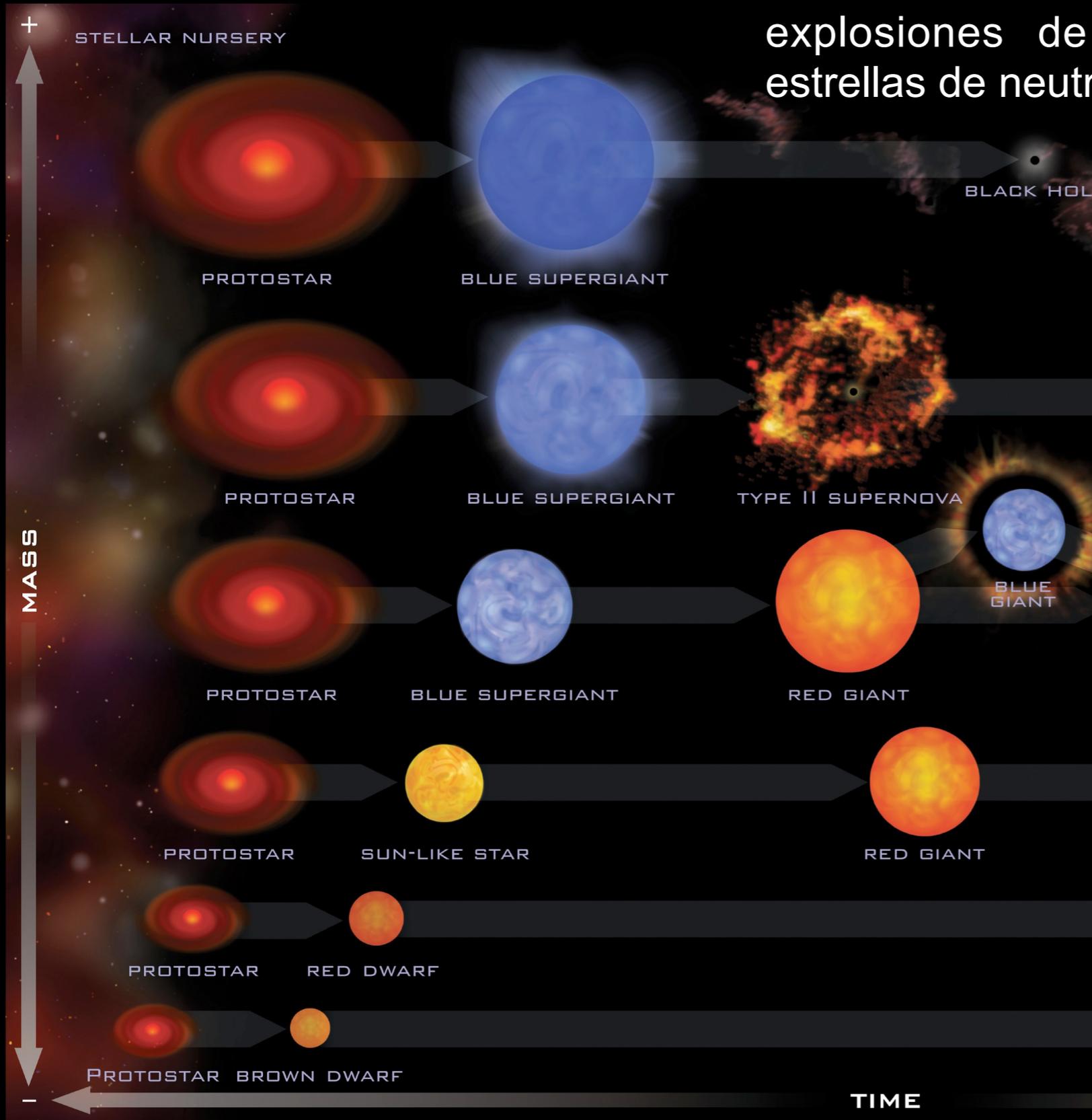
Ciclo de la vida de las estrellas

Los elementos distintos del hidrógeno y del helio se forman en los centros de las estrellas y en explosiones de supernovas y colisiones de estrellas de neutrones las lanzan al espacio.



Ciclo de la vida de las estrellas

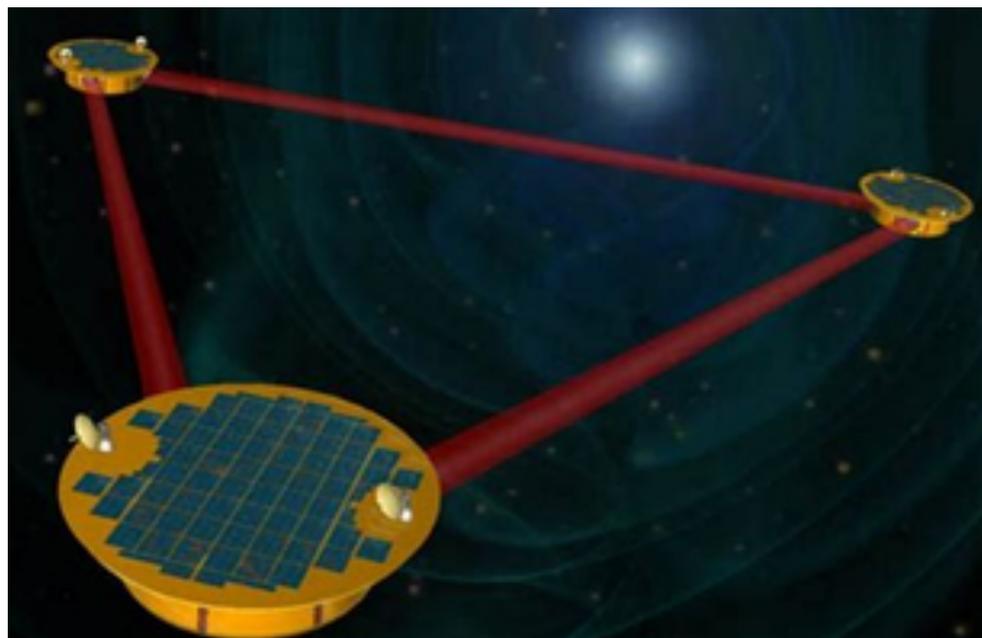
Los elementos distintos del hidrógeno y del helio se forman en los centros de las estrellas y en explosiones de supernovas y colisiones de estrellas de neutrones las lanzan al espacio.



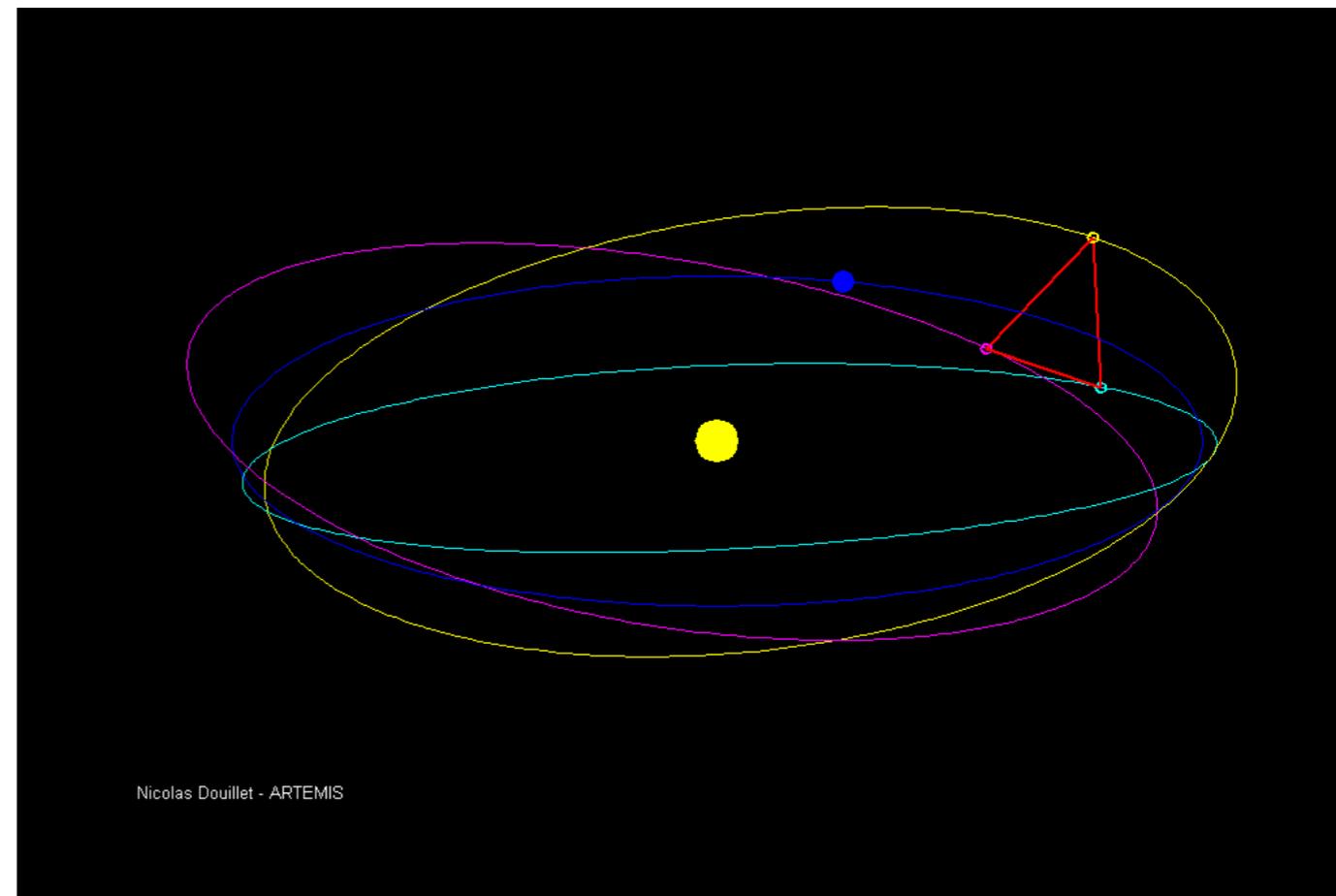
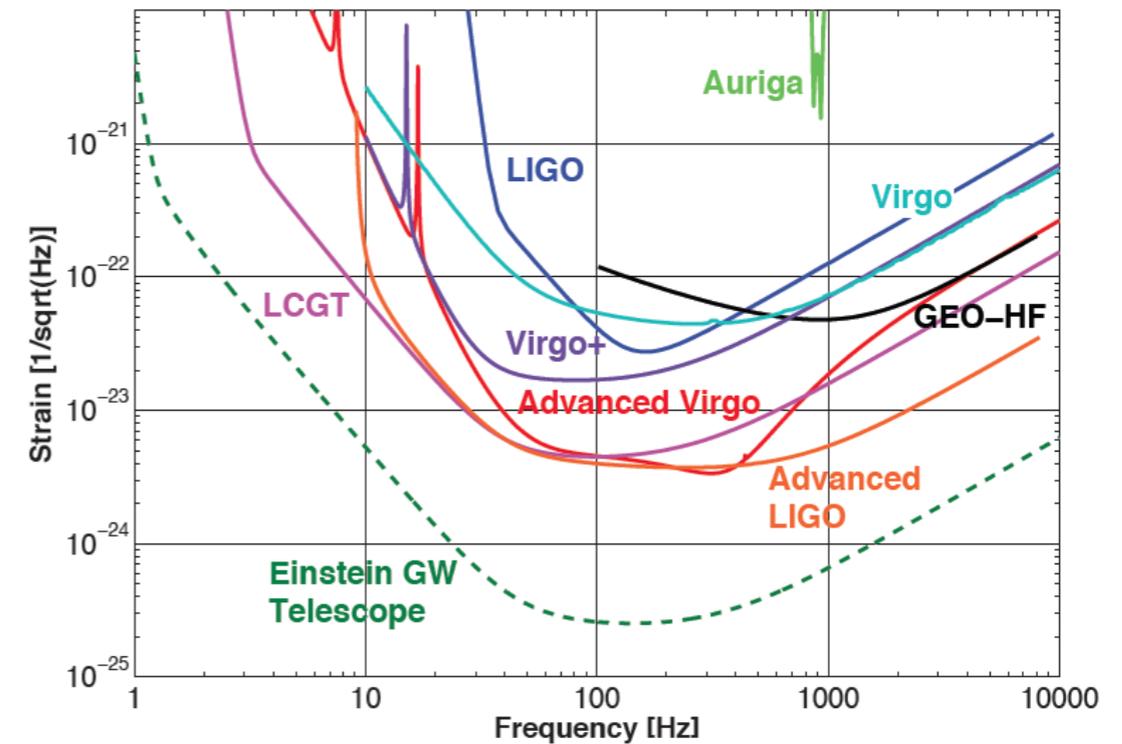
Yo soy tu padre

El Futuro

- Telescopio Einstein: tercera generación de interferómetros en la tierra.
- LISA: misión espacial ~ 2034
 - 3 naves espaciales orbitando el sol, escuchando a agujeros negros supermasivos.

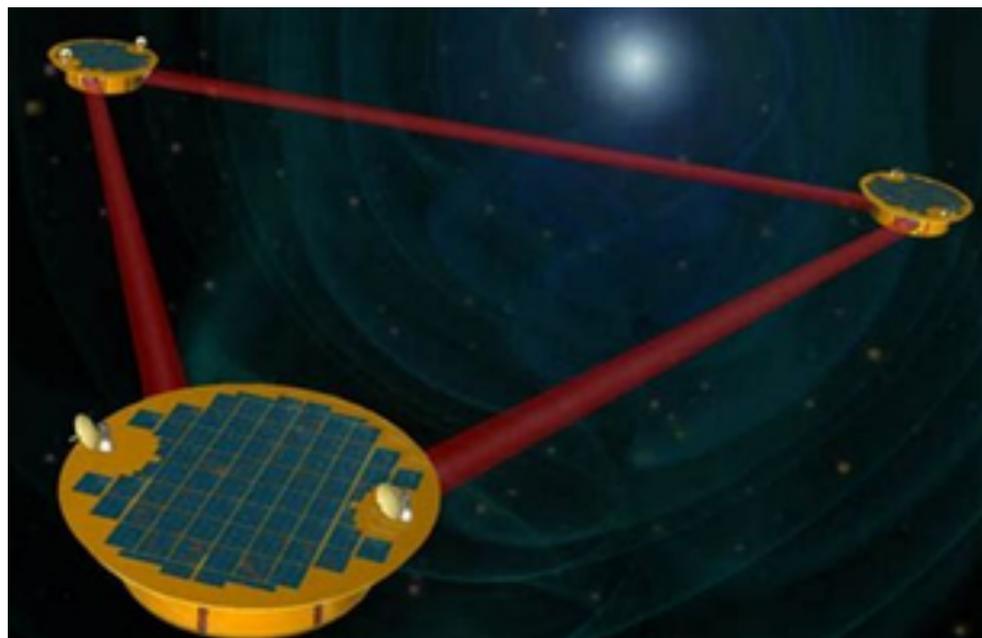


Expected ET Sensitivity

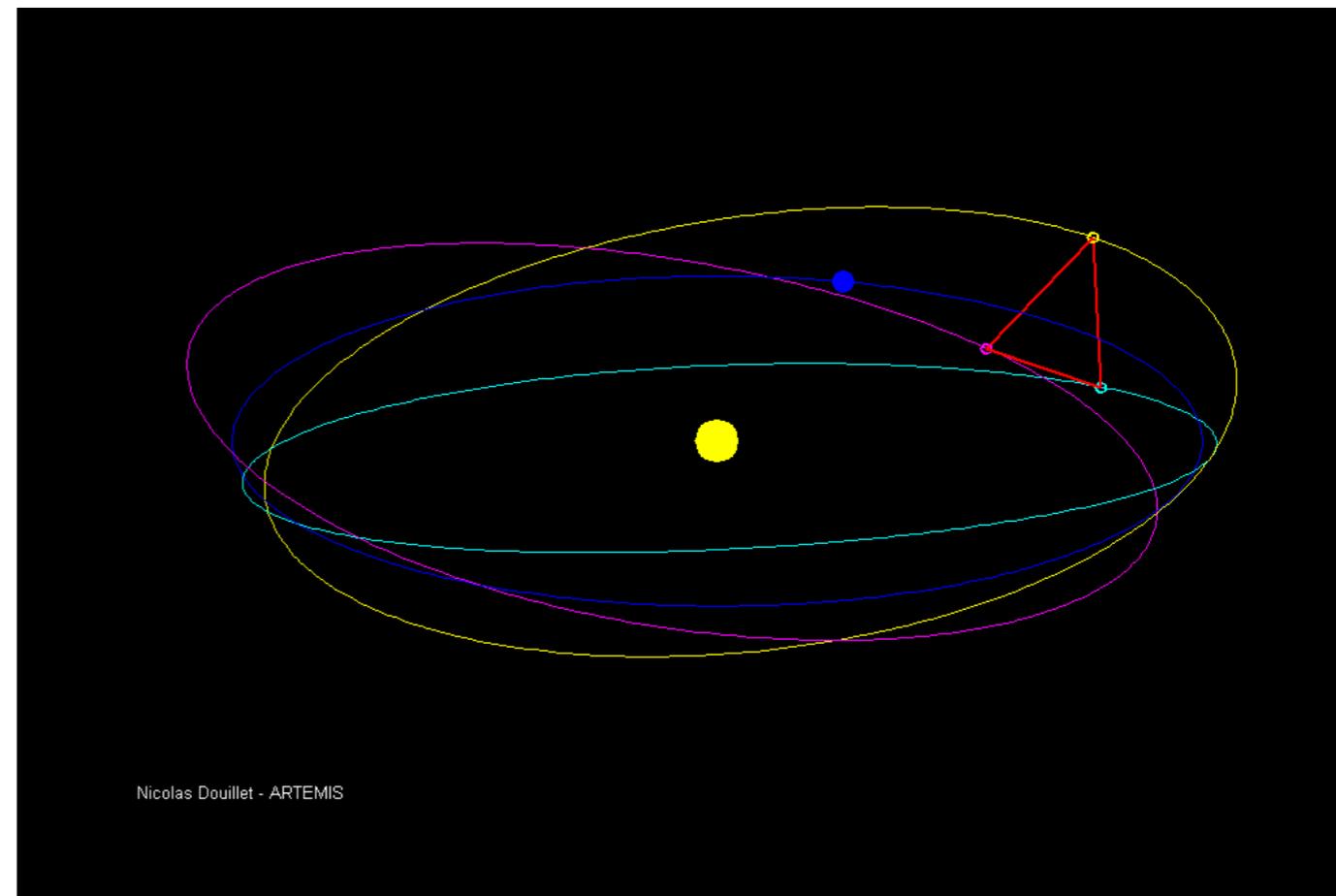
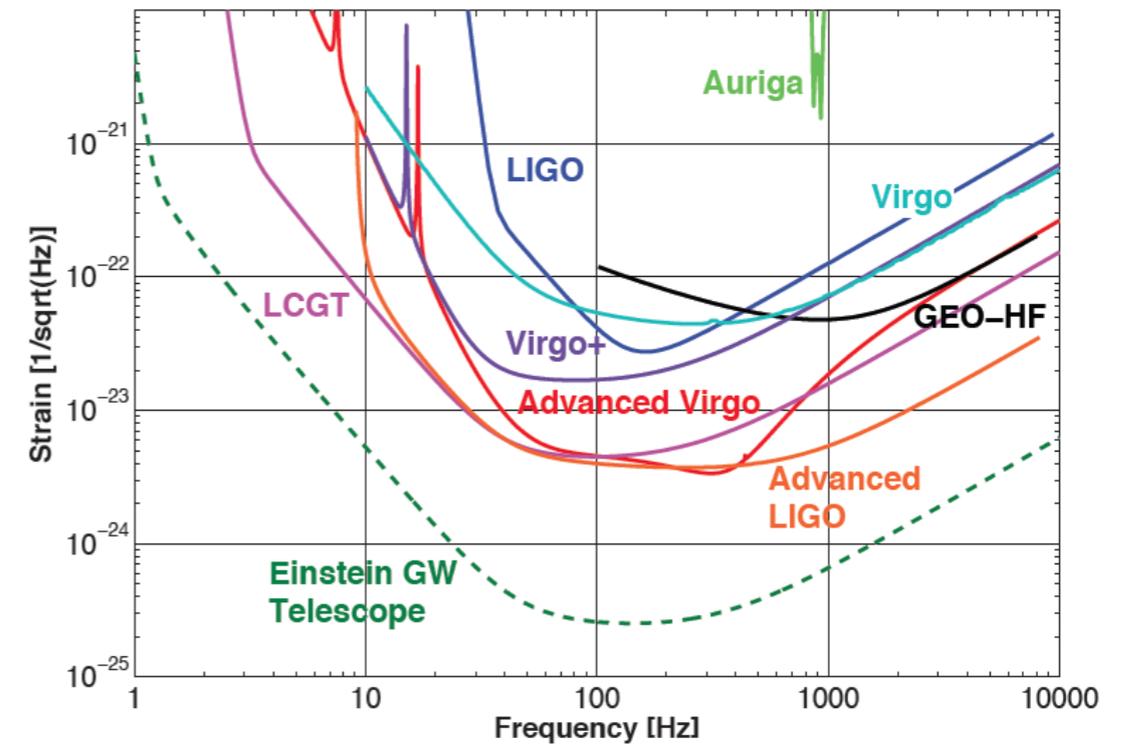


El Futuro

- Telescopio Einstein: tercera generación de interferómetros en la tierra.
- LISA: misión espacial ~ 2034
 - 3 naves espaciales orbitando el sol, escuchando a agujeros negros supermasivos.

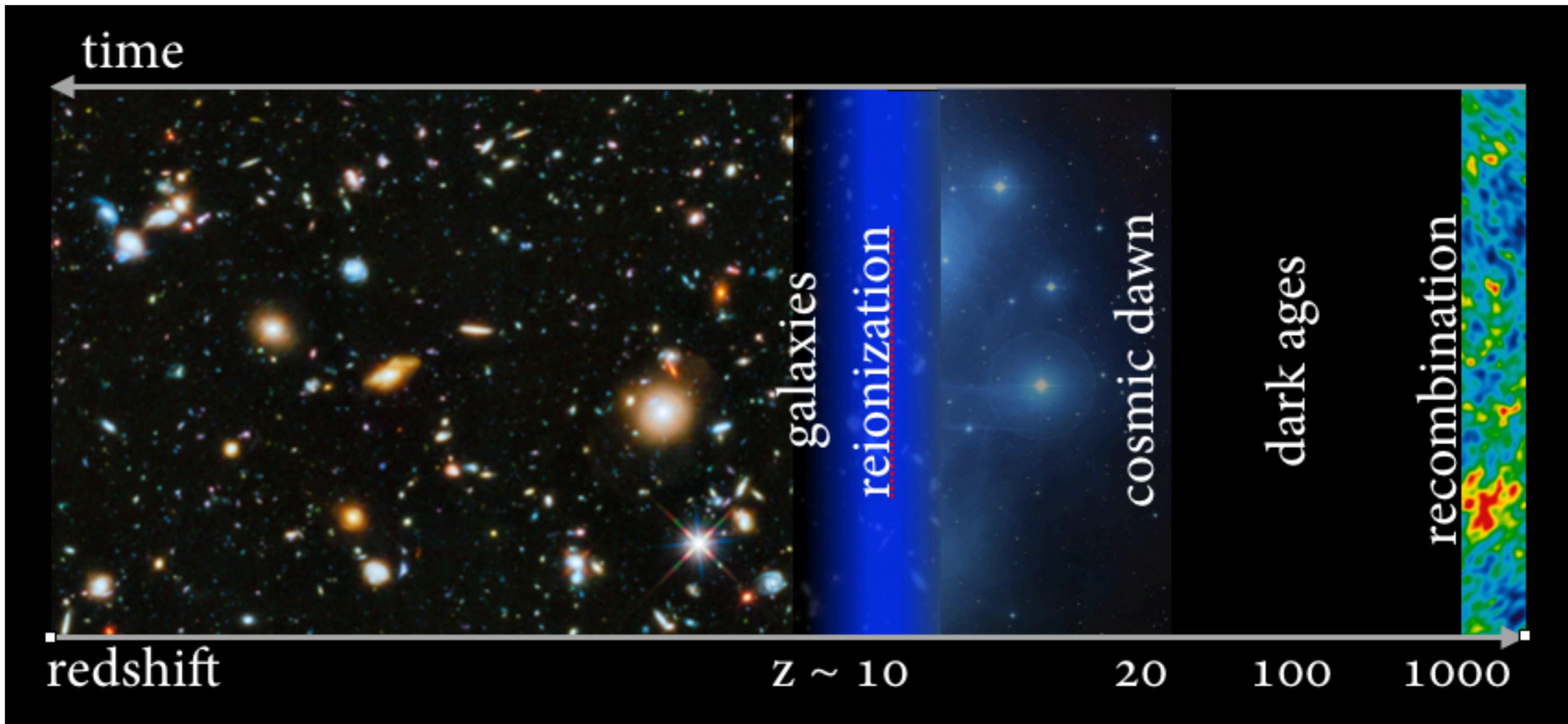


Expected ET Sensitivity



Hasta ahora hemos visto agujeros negros hasta ~ 3 mil millones de años luz, corrimiento al rojo de $z \sim 0.2$.

LISA y ET nos permitirán observar todas las fusiones de agujeros negros en el universo, e incluso las ondas gravitacionales creadas durante el Big Bang.



Mucho antes: el tercer período de observación, O3,
comenzará en marzo de 2019
¡Manténgase atentos a los nuevos descubrimientos!

