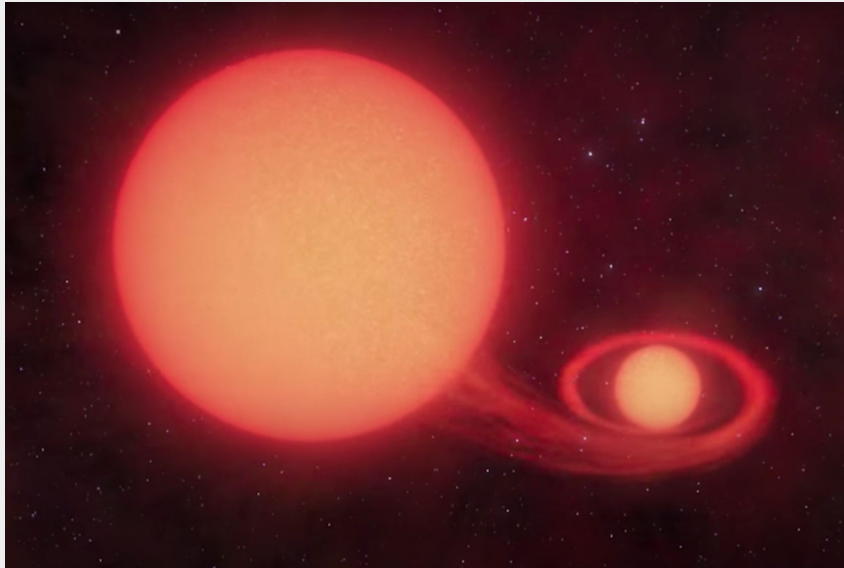


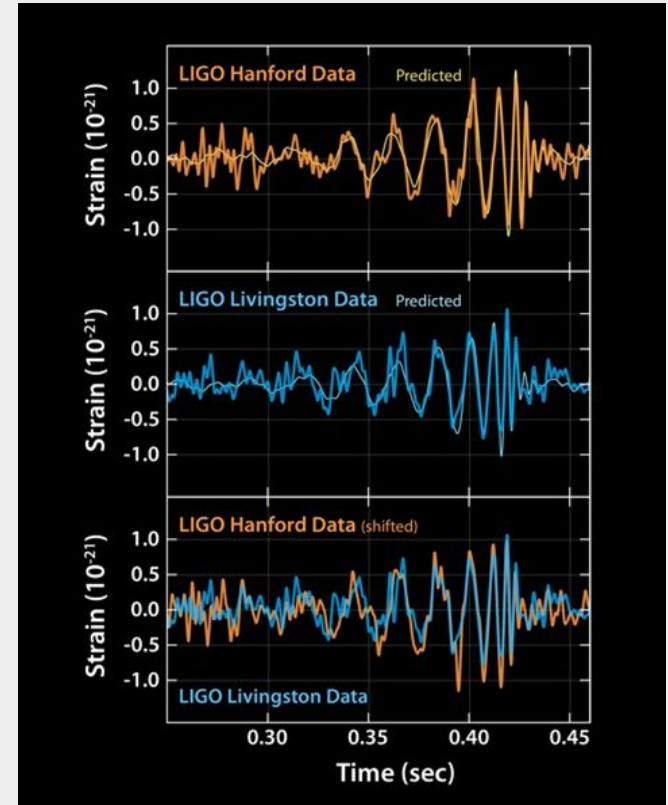
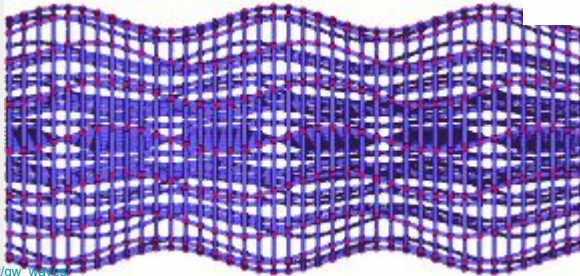
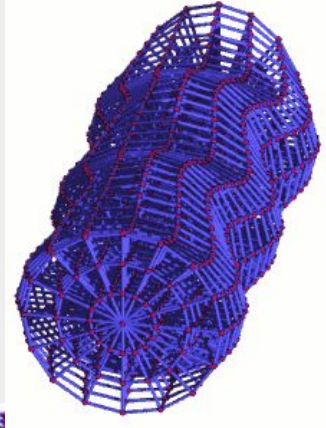
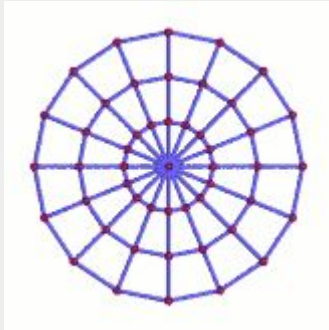
FORMACIÓN DE BINARIAS DE AGUJEROS NEGROS Y SU RELACIÓN CON LAS ONDAS GRAVITACIONALES. VIAI-2021



Dr. Aldo Batta
Clarissa I. Avilés Niebla
Enrique Galicia Pineda

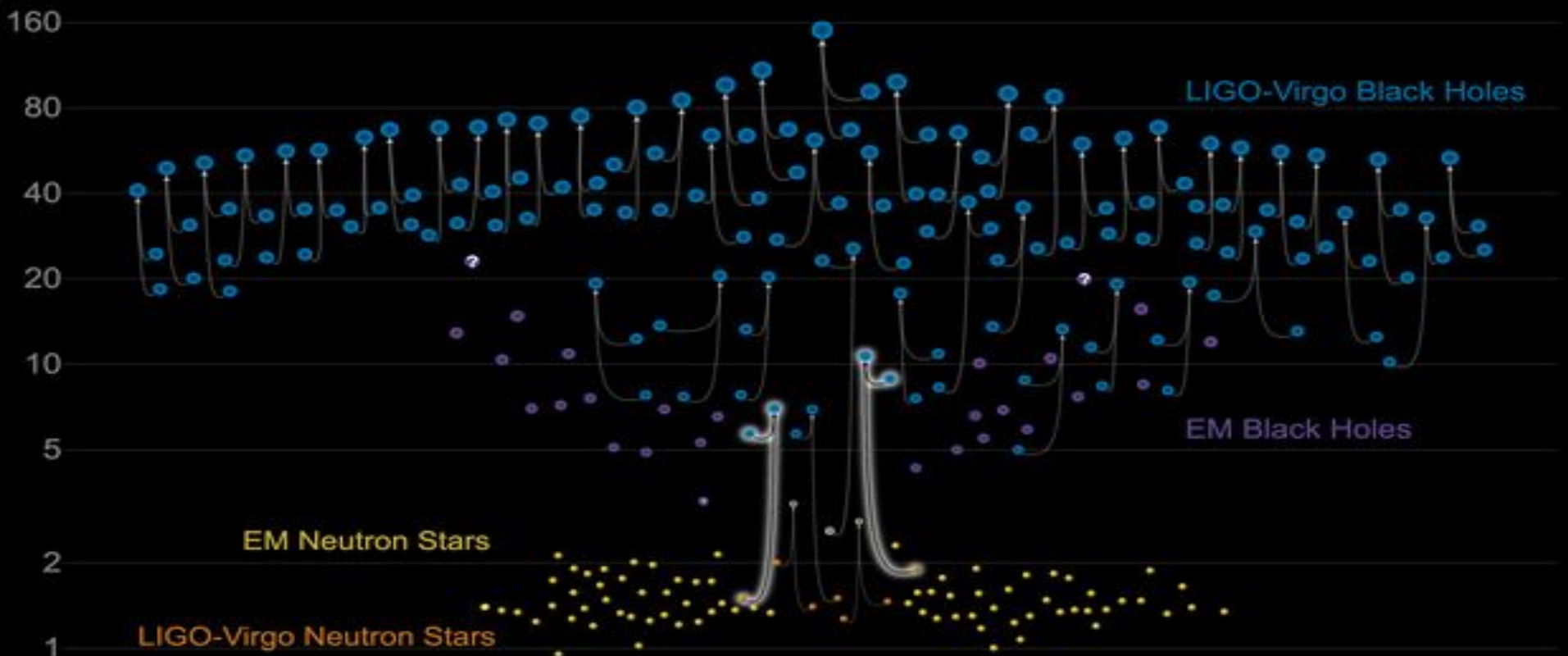
ONDAS GRAVITACIONALES

Principales características



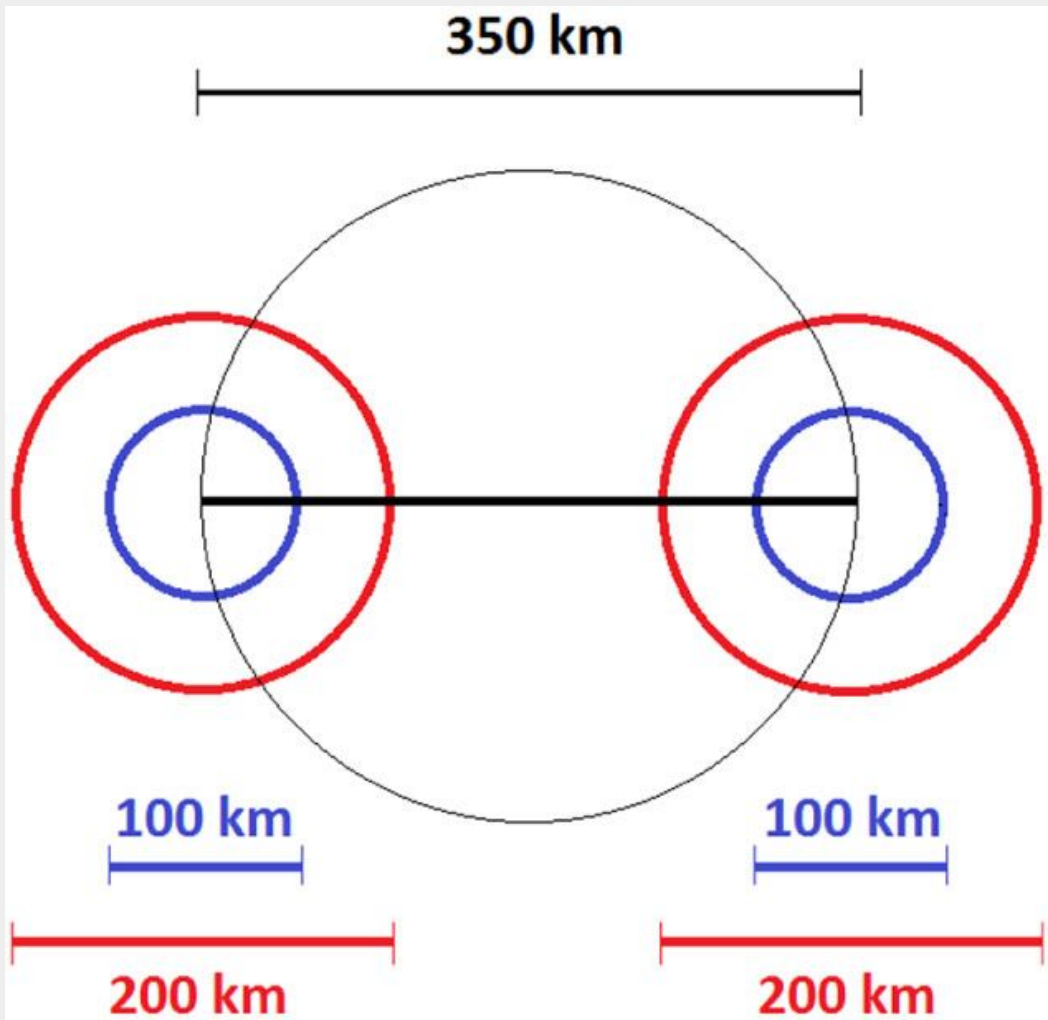
Masses in the Stellar Graveyard

in Solar Masses



GWTC-2 plot v1.0

LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern



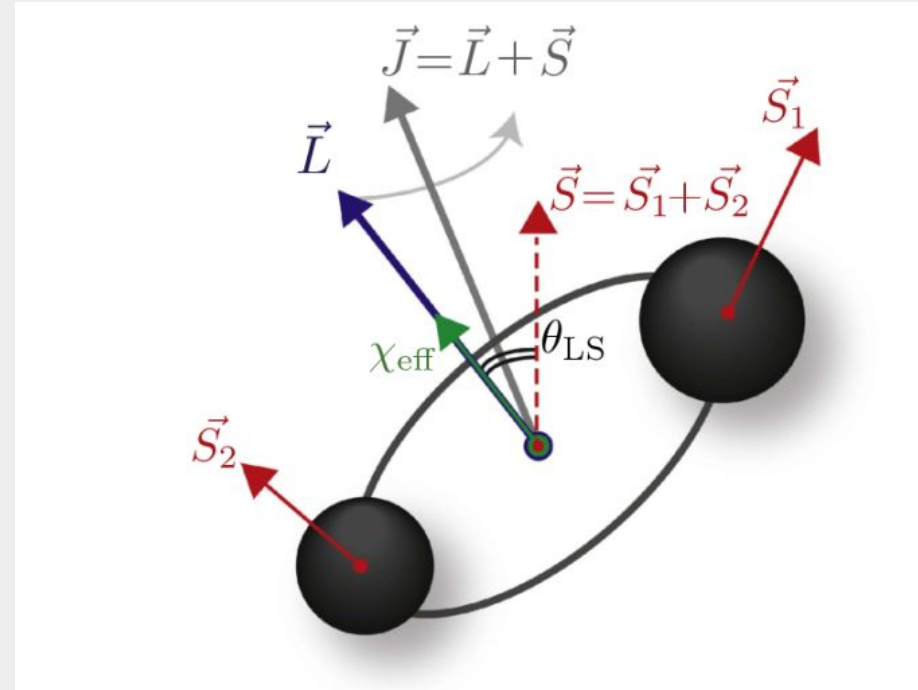
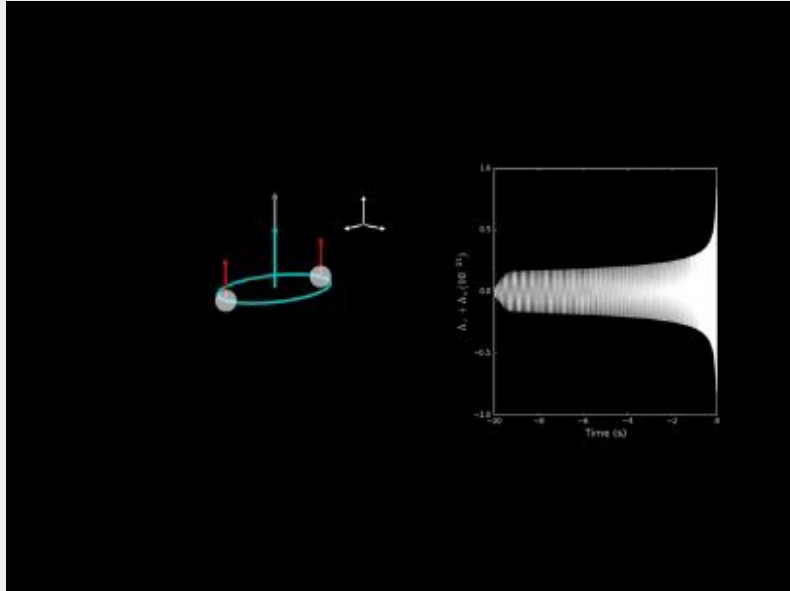
¿Qué información nos brindan las ondas gravitacionales?

- Masa
- Espín
- Locación
- Orientación

ESPÍN EFECTIVO

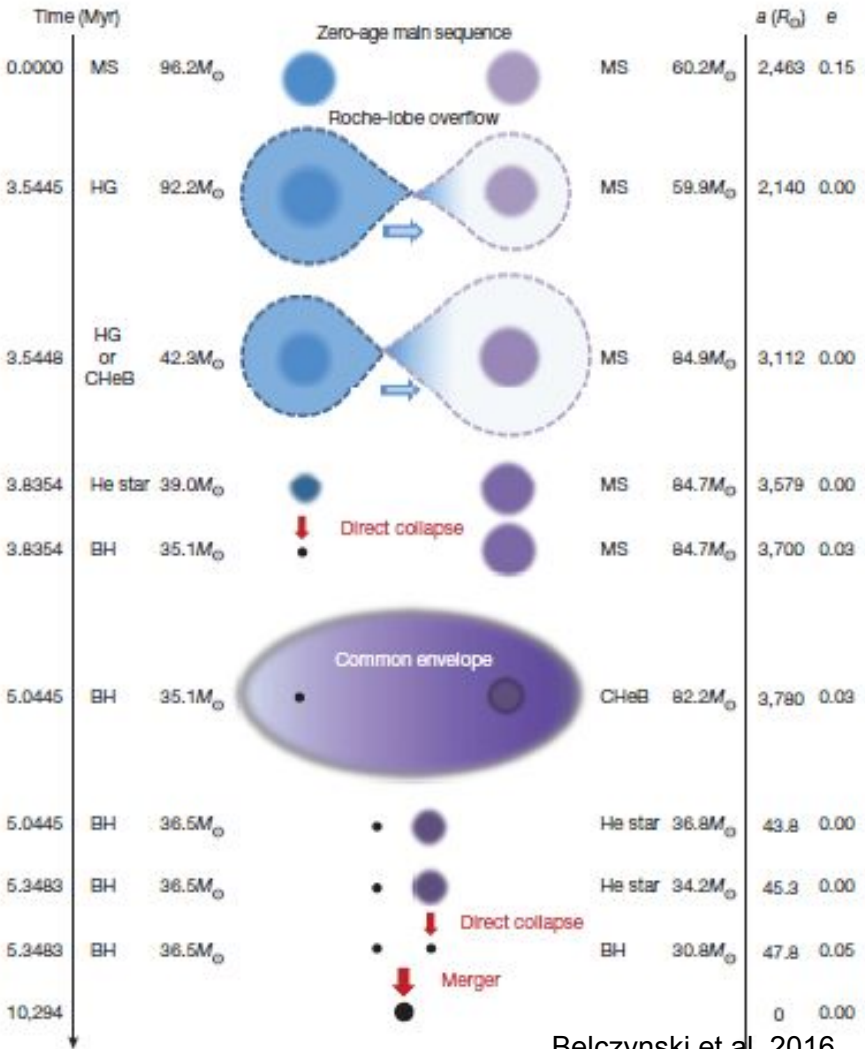
$$\chi_{\text{eff}} = \frac{m_1 \chi_1 \cos \theta_1 + m_2 \chi_2 \cos \theta_2}{m_1 + m_2}$$

χ_1 = espines de los agujeros negros
 θ_1 = ángulos de inclinación de la alineación de los espines



Abbot et al. (2021)

¿CÓMO SE FORMAN LAS BINARIAS DE AGUJEROS NEGROS?



Belczynski et al. 2016



Credit – Northwestern Visualization, Carl Rodriguez

FORMACIÓN DE BINARIAS DE AGUJEROS NEGROS Y SU RELACIÓN CON LAS ONDAS GRAVITACIONALES

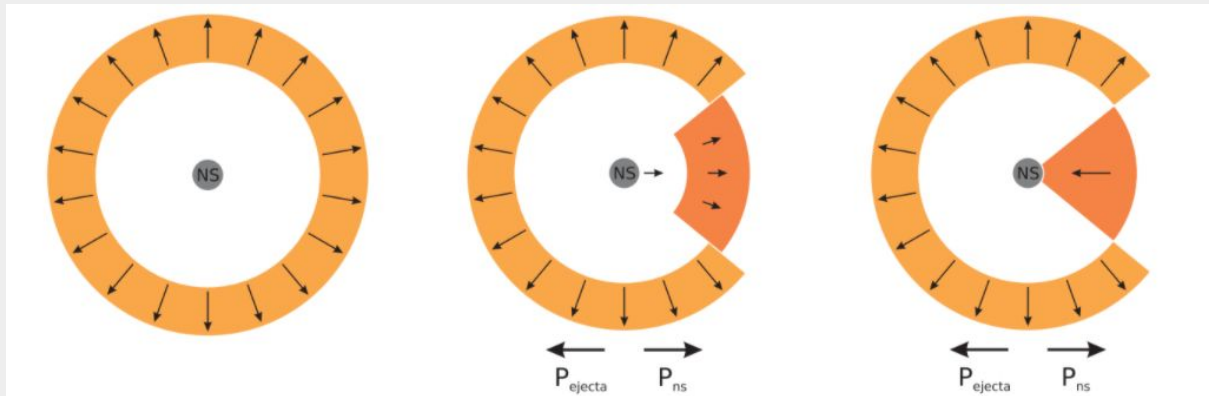
Objetivo del proyecto:

¿Se pueden formar binarias con espín efectivo negativo a partir de binarias aisladas con un agujero negro y una estrella a punto de formar el segundo agujero negro?

Explosión de estrellas en sistemas binarios

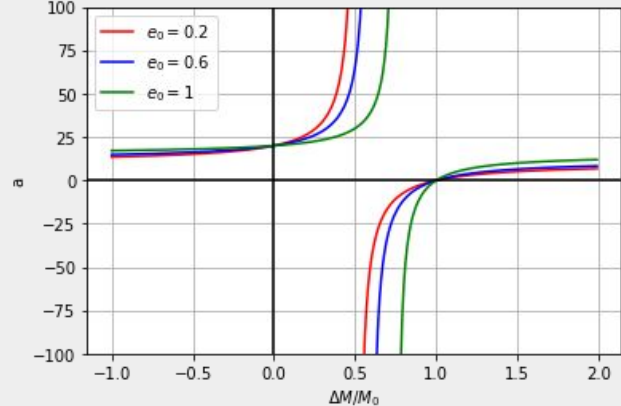
Cambios energéticos provocan cambios en la binaria

- Pérdida súbita de masa
- Transferencia de masa a la compañera
- Asimetría de la explosión
- Masa de las estrellas
- Periodo
- Longitud de semiejes
- Excentricidad
- Velocidad Orbital

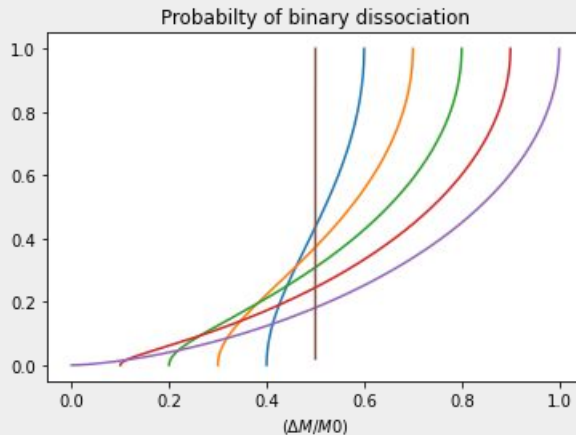


Efectos de la pérdida de masa en la binaria

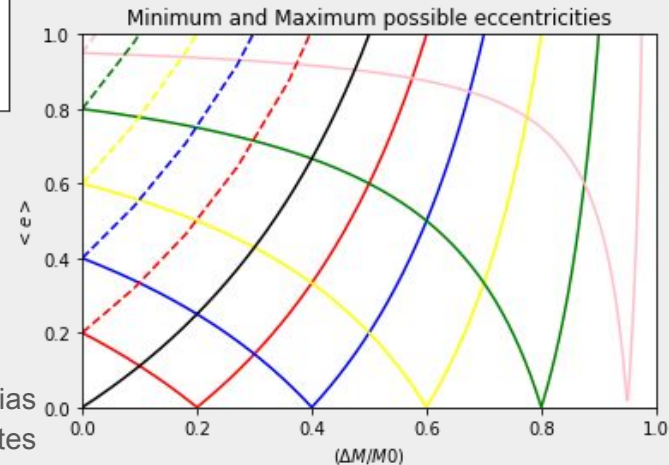
1. Cambio en el semieje mayor
2. Cambio en la excentricidad
3. Cambios en la distancia entre las componentes



Cambios en el semieje mayor



Probabilidad de que la binaria se deshaga

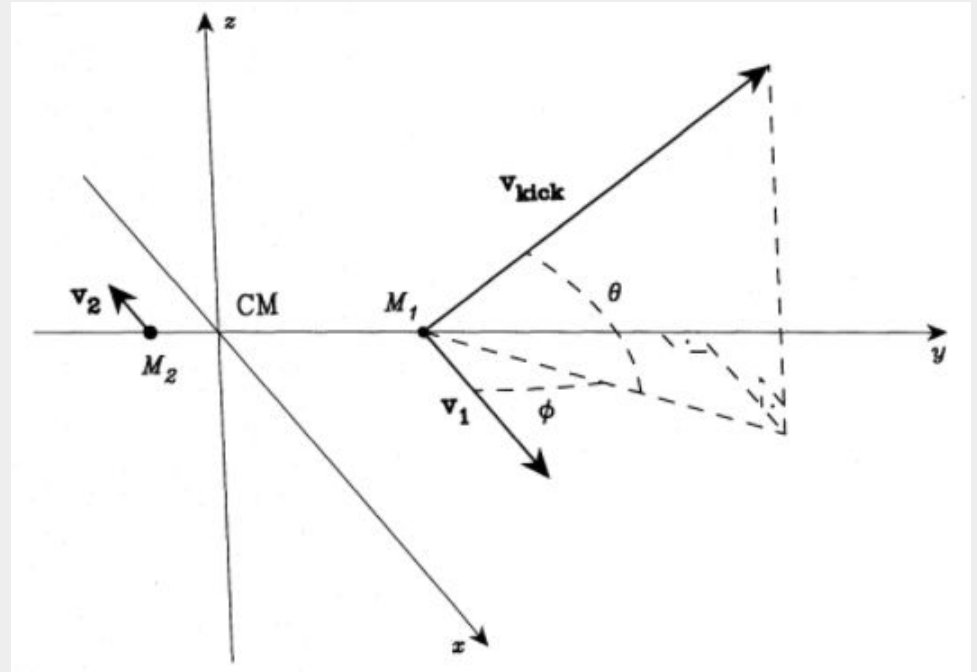


Posibles excentricidades en binarias sobrevivientes

Efectos de la asimetría en la explosión

Después de la explosión tres escenarios son posibles:

- Separación del sistema
- Sistema continúe ligado
- Fusión de la binaria



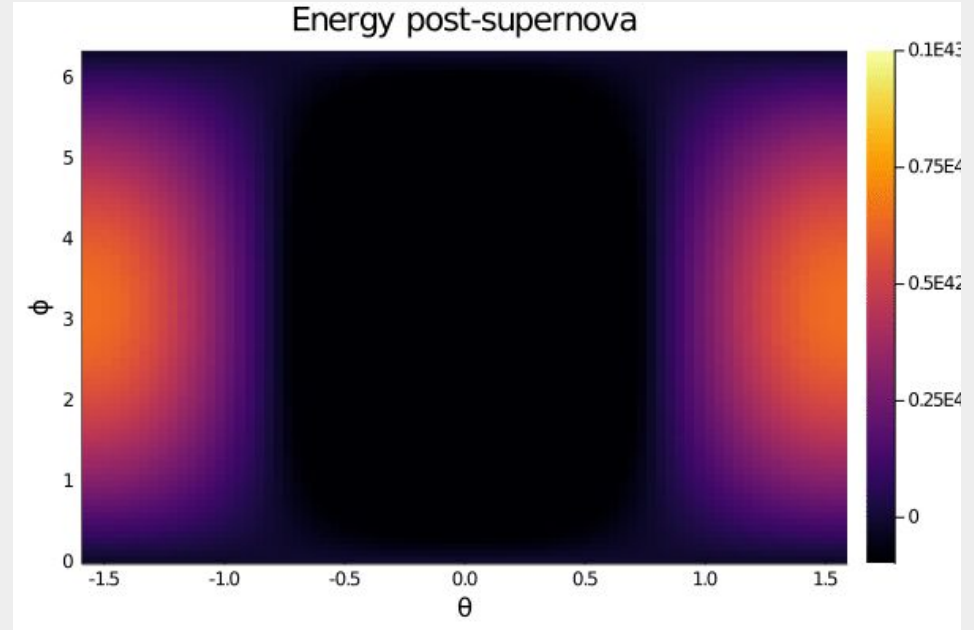
Efectos de la asimetría en la explosión

La energía del sistema post-supernova:

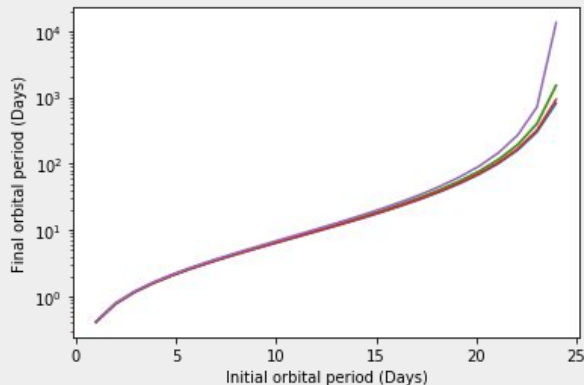
$$E = -\frac{GM'_1M'_2}{2a}[2 - m(1 + 2v\cos\theta\cos\phi + v^2)] < 0$$

Para que el sistema continúe ligado:

$$\cos\theta\cos\phi < \frac{1}{2v} \left[\frac{2}{m} - 1 - v^2 \right]$$



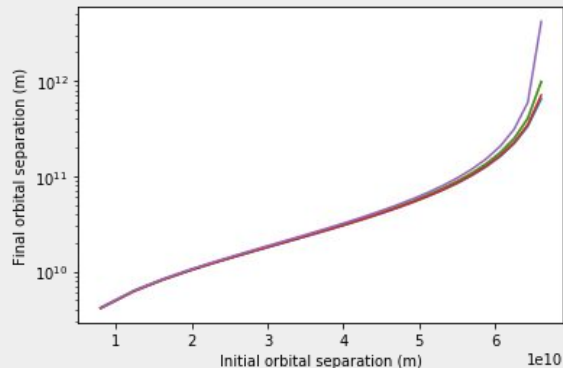
Efectos de la patada en la binaria



Cambios en el periodo orbital

Consideramos una binaria con órbita circular formada por estrella 1 de 5 masas solares y estrella 2 de 15 masas solares.

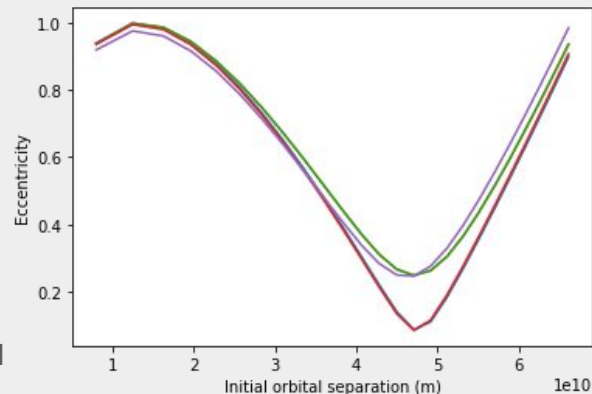
La estrella 1 experimenta una supernova que deja un objeto de 1.4 masas solares experimentando una patada de magnitud de 450km/s



Cambios en la separacion orbital

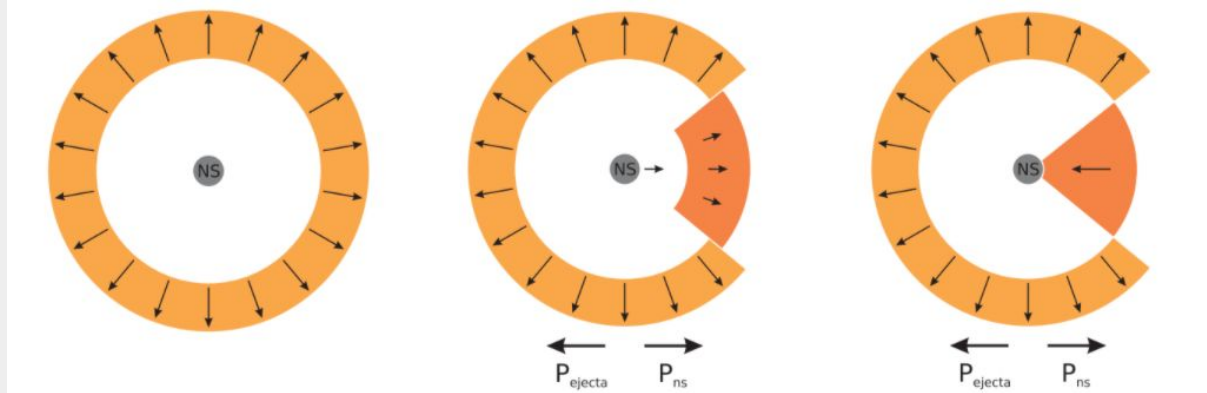
Cambio en la excentricidad

1. Cambio en el periodo orbital
2. Cambios en la excentricidad
3. Cambios en la separación orbital



¿Cómo es que un agujero negro puede recibir una patada?

Las distribuciones de en las velocidades de patada de los agujeros negros son similares a las de las estrellas de neutrones, donde ambas son consecuencia de asimetrías en la explosión de supernova¹



¹Janka, T.H. (2013)

Velocidades de expulsión de masa estelar

Utilizando un modelo estelar de 50 Masas solares obtenido de [MESA web](#) calculamos las velocidades a la que es expulsado el material remanente.

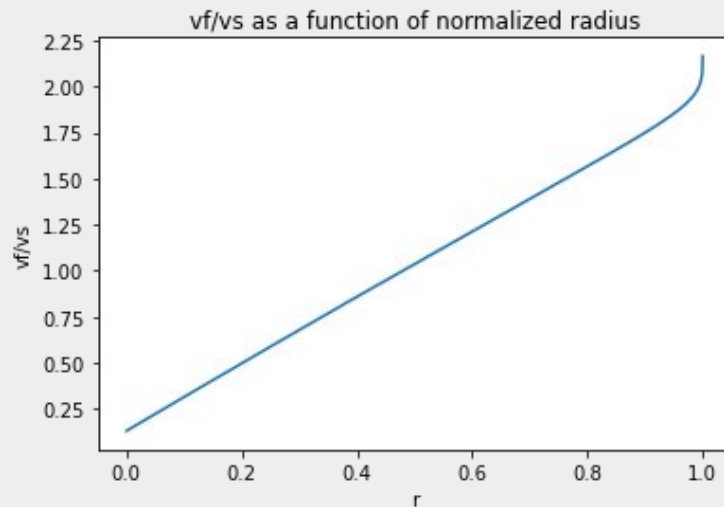
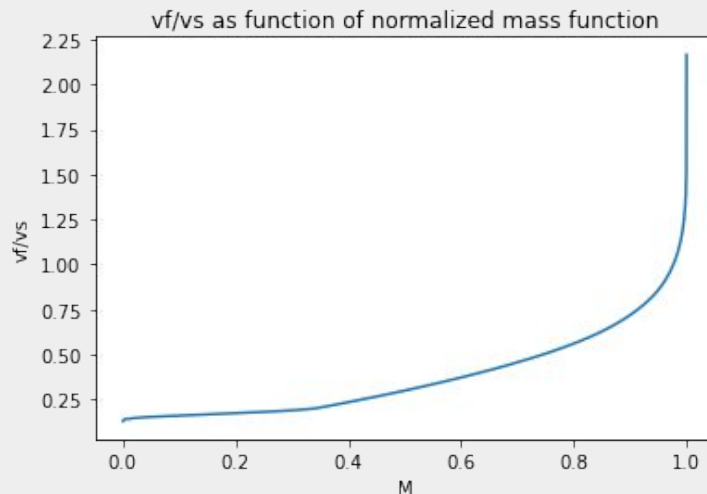
Estas velocidades son dependientes de la estructura estelar

$$\frac{v_f}{v_s} = \left(\frac{v_f}{v_s} \right)_p \left(1 - 0.51x_0^{1/3} + 0.76x_0^{2/3} - 1.19x_0 \right)$$

Donde:

$$x_0 = \frac{1 - r_0}{R_*}, \left(\frac{v_f}{v_s} \right)_p \text{ es una constante relativa a}$$

cómo se propaga la velocidad de choque.

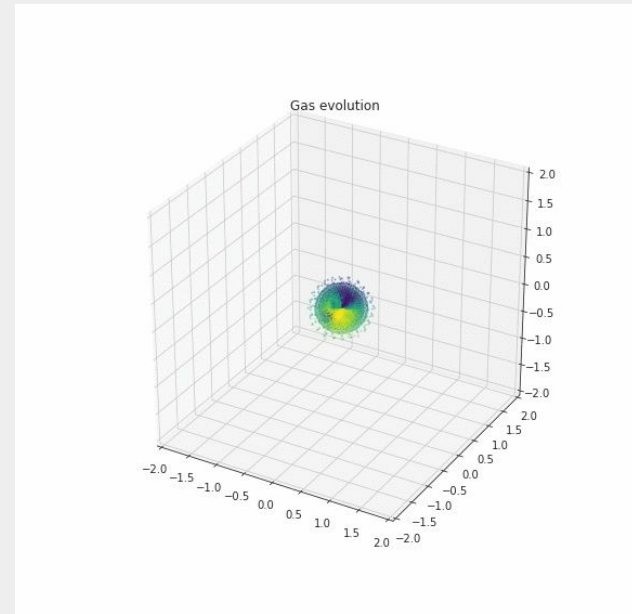
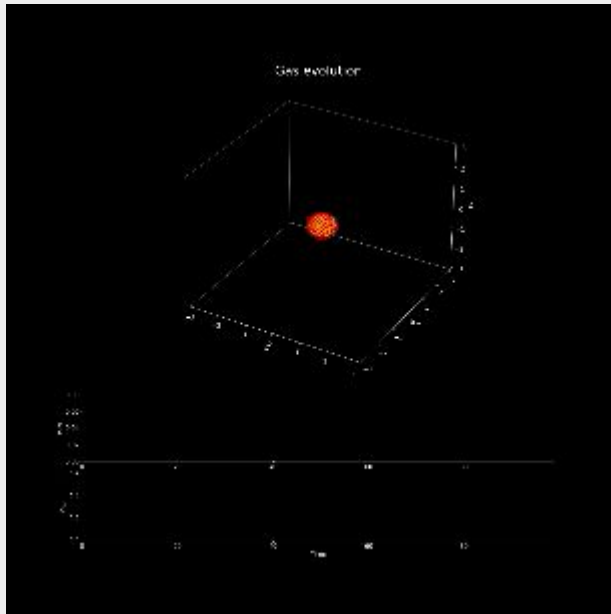


Explosiones asimétricas en una estrella aislada

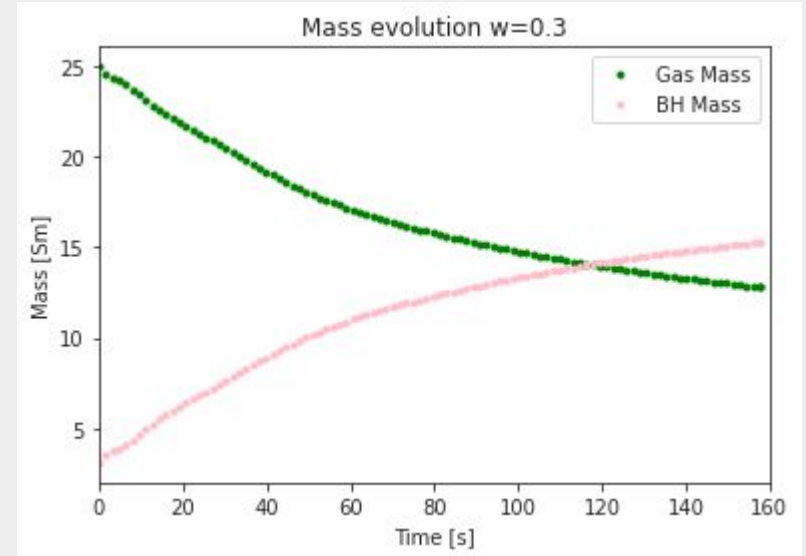
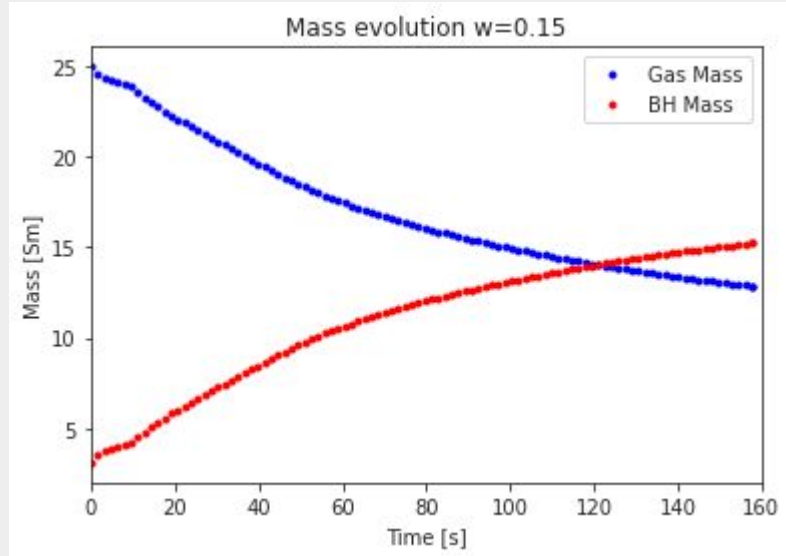
Simulaciones hidrodinámicas de SPH

Se utilizaron dos simulaciones utilizando el código Gadget de un agujero negro con una masa inicial de 3 Masas solares rodeado de gas con una masa inicial de 25 masas solares.

Entre las dos simulaciones se varió el ancho de la asimetría de la explosión $w=0.3$, $w=0.15$

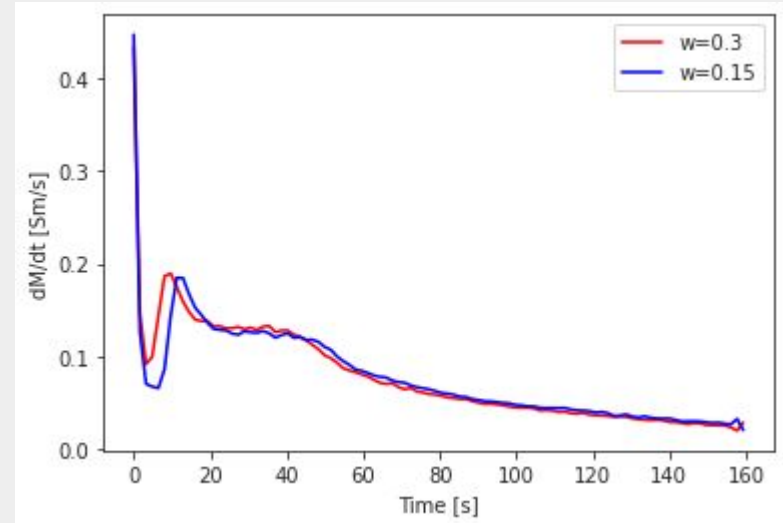
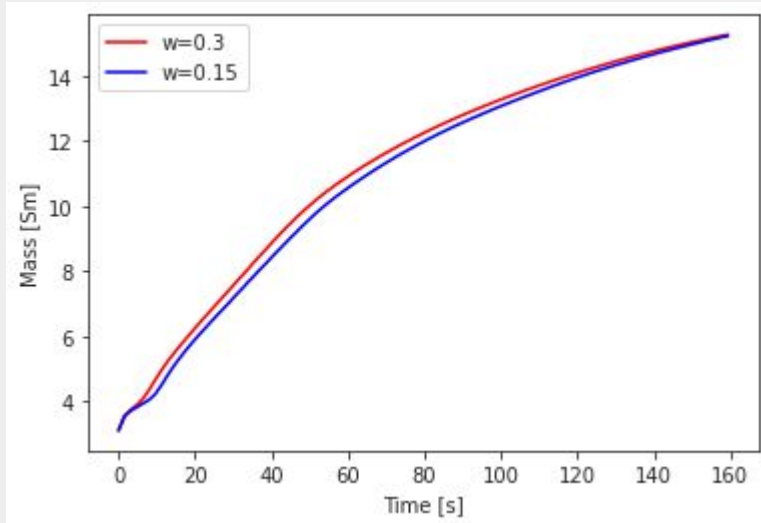


Explosiones asimétricas en una estrella aislada



Explosiones asimétricas en una estrella aislada

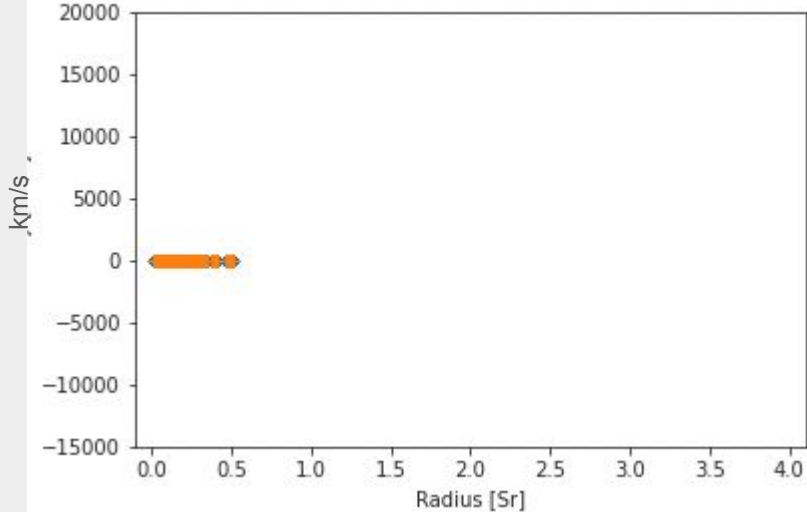
Cambios en la masa del agujero negro:



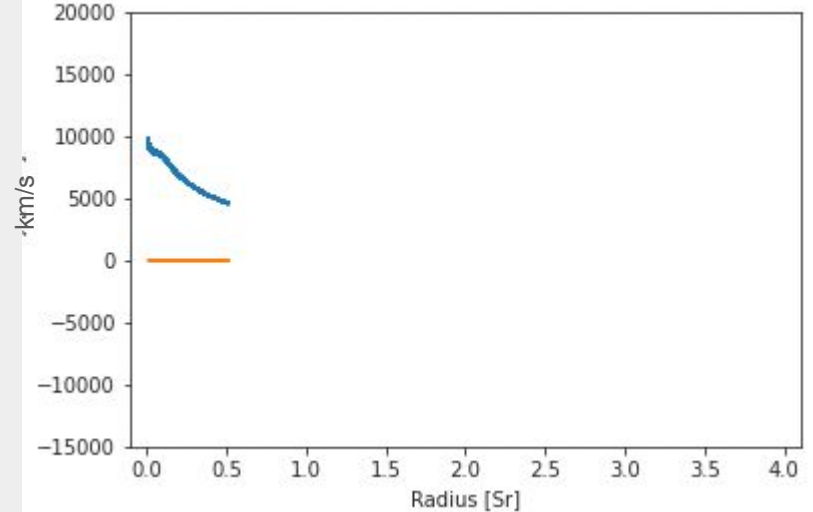
Explosiones asimétricas en una estrella aislada

Perfil de velocidades del gas con $w=0.15$

Evolución de la norma de la velocidad y la velocidad radial del gas



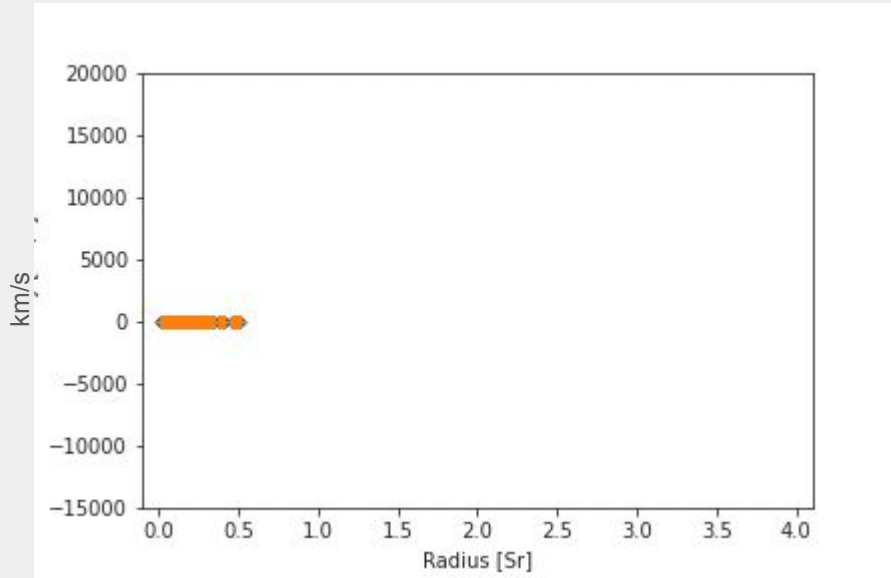
Evolución de la velocidad de escape y la velocidad radial del gas



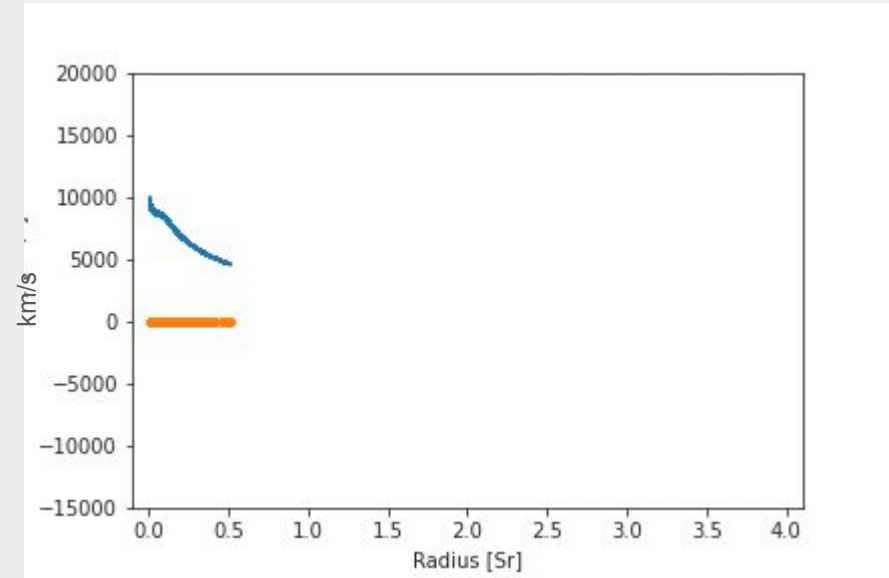
Explosiones asimétricas en una estrella aislada

Velocidad del gas con $w=0.3$

Evolución de la norma de la velocidad y la velocidad radial del gas en km/s

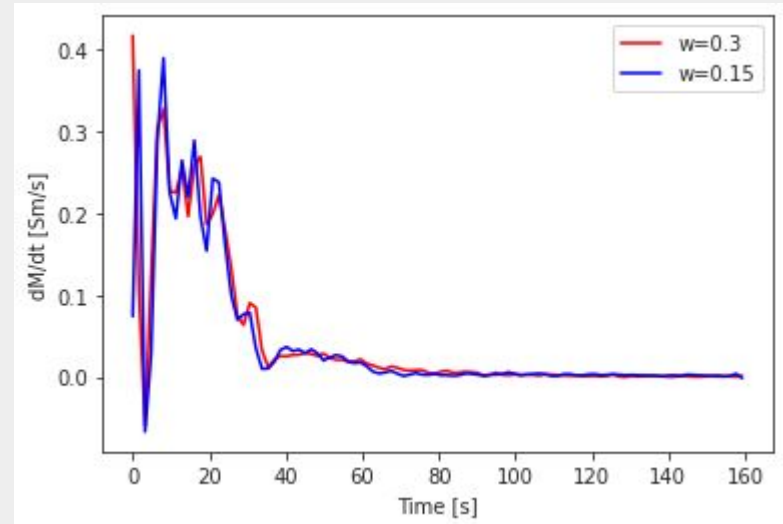
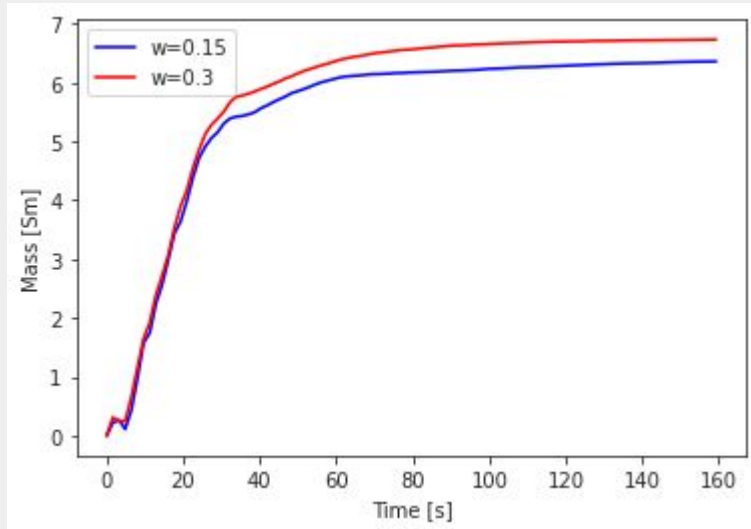


Evolución de la velocidad de escape y la velocidad radial del gas en km/s



Explosiones asimétricas en una estrella aislada

Cantidad de masa expulsada



¿Qué sigue?

De ambas simulaciones no encontramos diferencias significativas en las transferencias de masa y velocidades asociadas.

Explorados los procesos que modifican los parámetros de las binarias, el siguiente paso es considerar al segundo agujero negro, la cantidad de masa que absorbe de la explosión y las configuraciones de spin individuales y efectivo.

Referencias:

Brandt, N., Podsiadlowski, P. (1995)

https://www.einstein-online.info/en/spotlight/gw_waves/

Hills, J.G. (1982)

<https://www.ligo.caltech.edu/>

Matzner, C. D., Mckee, C. F. (1999)

<https://bhdynamics.com/2018/01/02/black-hole-spins/>

Postnov, K. A., Yungelson, L. R. (2014)

Janka, H.T. (2013)

LIGO and Virgo collaboration et al. (2016)

Belczynski et al. (2016)

Abbot et al. (2021)