

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

PROYECTO DE GRADO

—

Autor:

Juan BARBOSA

Director:

Jaime FORERO, Ph.D.

Proyecto de Grado para optar por el título de Físico

Departamento de Física

2 de noviembre de 2018

1. Introducción

La Teoría de la Relatividad General de Albert Einstein fue publicada en 1915, de dicha teoría surgen las ondas gravitacionales como una, entre varias predicciones, las cuales incluyen lentes gravitacionales en donde cuerpos masivos modifican la trayectoria de la luz, así como la dilatación del tiempo. El término “ondas gravitacionales” fue introducido por primera vez en una publicación de Henri Poincaré, 10 años antes, donde proponía la primera ecuación para un campo gravitacional invariante ante transformaciones de Lorentz [1, 2]. Actualmente se entiende por ondas gravitacionales a las variaciones periódicas de la geometría del espacio-tiempo, y tienen su origen en que la energía y densidad de momento de un campo gravitacional actúan a su vez como fuentes de gravedad [3]. A pesar que han pasado más de 100 años desde la publicación de la teoría, aun hoy en día existen vacíos en el entendimiento y las implicaciones de las ecuaciones de Einstein. Lo anterior se debe en parte a la dificultad de resolver las ecuaciones para situaciones físicas de interés, por ejemplo en el caso de las ondas gravitacionales sólo se pueden resolver analíticamente para campos débiles usando una forma lineal de estas ecuaciones. Los cuales detectaron en 2016 de forma simultánea y por primera vez en la historia de la humanidad una onda gravitacional, lo cual fue reconocido por la comunidad científica en 2017 con el Premio Nobel de Física [4].

Si bien cuales quiera dos objetos con masas desiguales generan ondas gravitacionales al orbitar sobre el centro de masa, la mayoría de campos gravitacionales en el universo son débiles, entre las pocas excepciones se encuentran los campos cercanos a cuerpos extremadamente masivos, como agujeros negros y estrellas de neutrones, razón por la cual en la práctica solo las ondas gravitacionales provenientes de cuerpos extremadamente masivos son detectables [1]. Esto restringe las fuentes a sistemas binarios de estrellas, agujeros negros y supernovas (siempre que la explosión no sea simétrica). En el caso de los agujeros negros las ondas gravitacionales constituyen una herramienta muy poderosa para su estudio, pues a excepción de su gravedad, y su tamaño, un agujero negro es muy similar a cualquier otro objeto en el universo, bien sea una estrella o un planeta [5]. Dada la magnitud de la gravedad generada, no es posible que la luz escape de él. Esto da lugar a una superficie invisible, en el caso de encontrarse cerca, es posible detectar un agujero negro pues el paso de este por el firmamento ocultaría las estrellas del fondo. Pero a largas distancias, este efecto es poco apreciable y por ende no es posible observarlos por un instrumento óptico como un telescopio. Por otro lado, cuando la distancia entre el observador y un agujero negro es muy grande, sus efectos gravitacionales son poco distintos a los presentados por un objeto con la misma masa, pero un volumen considerablemente mayor, pues a largas distancias ambas serán aproximadamente masas puntuales [5].

Los esfuerzos por detectar ondas gravitacionales empezaron con el uso de barras resonantes por el físico estadounidense Joe Weber en 1965 [2, 6]. Por varias décadas, la tecnología, la sensibilidad y la extensión de las barras de Weber mejoró, a tal punto de formar la primera red de observación global ondas gravitacionales. Sin embargo el acoplamiento entre materia y

ondas es tan pequeño, que en el caso de la detección de ondas gravitacionales existen factores que en otros contextos no serían tan relevantes, como es el caso de las fuentes de ruido, entre los cuales se encuentran: térmico y sísmico, *shot noise* y su frecuencia [2]. Si bien los detectores de interferometría no estaban exentos de estas fuentes de ruido, presentan mayor sensibilidad que las barras resonantes lo cual los hace los instrumentos más usados hoy en día, ejemplos de estos son: LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* por sus siglas en inglés) y Virgo, en Estados Unidos y Europa, correspondientemente [2, 7, 8].

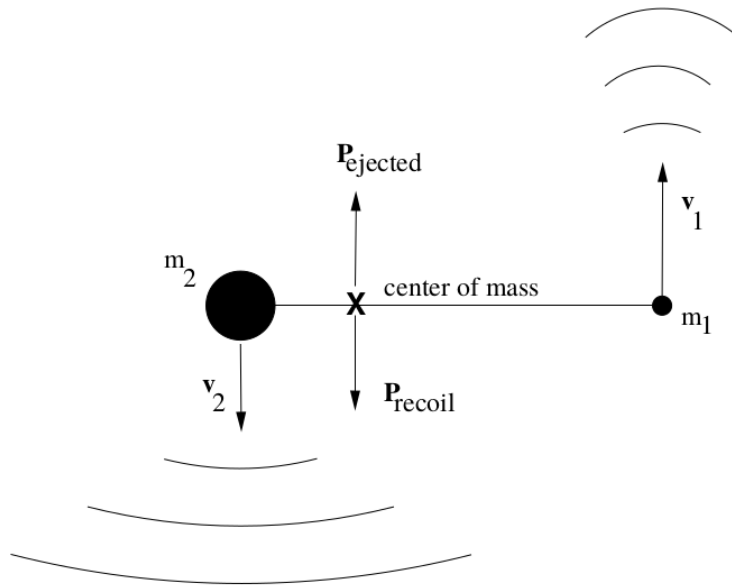


FIGURA 1: Sistema binario con cuerpos de masas m_1 y m_2 ($m_2 > m_1$), emisor de ondas gravitacionales [9].

En el caso de un sistema binario como el de la **Figura 1**, visto desde la gravitación universal de Newton, se tendría como solución a las ecuaciones de movimiento trayectorias elípticas en concordancia con las leyes de Kepler. Sin embargo, al considerar la Relatividad General, se producirán ondas que llevan energía y momento [3, 4, 9]. Esto ocasiona que poco a poco la órbita decaiga y los dos objetos se fusionen en un único cuerpo. En el momento en que tiene lugar la fusión de los cuerpos la amplitud de la onda aumenta considerablemente. Un fenómeno que se ha comprendido durante bastante tiempo, sin embargo sus implicaciones han sido poco estudiadas, son aquellas que se relacionan con el momento lineal que lleva la onda. Esto implica que al aumentar la amplitud de la onda con la fusión, también lo hace el momento lineal de la onda ($\mathbf{P}_{\text{ejected}}$), por lo cual la fusión ocasiona que el centro de masa se mueva en dirección opuesta con momento $\mathbf{P}_{\text{recoil}}$ para conservar el momento del sistema. A este movimiento del centro de masa se le conoce con el nombre de retroceso o patada (*recoil* o *kick*) [9] y fue descrito por Bonnor y Rotenberg en 1966 [10], siendo un proceso que ocurre en una etapa con el nombre de coalescencia.

En la mayoría de los casos el decaimiento de un sistema binario es tan lento que sucede en escalas de millones o billones de años, pero para el caso de los agujeros negros y estrellas de neutrones las ondas gravitacionales son de vital importancia. En estos mismos casos los campos gravitacionales son fuertes, por lo cual no es posible usar las soluciones analíticas a las ecuaciones de Einstein, por lo cual los métodos numéricos adquieren particular relevancia, pues aplicados a simulaciones computacionales permiten obtener soluciones a las ecuaciones de Einstein y de esta forma proveer un marco de referencia teórico para el estudio de agujeros negros binarios, estrellas de neutrones y ondas gravitacionales en general [4]. Aun cuando los métodos numéricos constituyen la mejor forma de estudio de estos sistemas están lejos de ser perfectos pues incluso pequeños errores de aproximación numérica pueden dar lugar a divergencias que ocasionan que la simulación falle [4]. Por esta razón se busca comparar la evolución de un sistema binario de dos agujeros negros de Schwarzschild (no contienen carga, ni rotan sobre su eje) en la etapa de coalescencia, usando distintos algoritmos de integración para las ecuaciones de movimiento de los cuerpos, así como su influencia sobre el *kick* generado.

2. **Objetivo general**

Comparar la evolución de un sistema binario de dos agujeros negros de Schwarzschild en la etapa de coalescencia, usando distintos algoritmos de integración para las ecuaciones de movimiento de los cuerpos, así como su influencia sobre el *kick* generado.

3. **Objetivos específicos**

- Ensamblar el equipo 2277 Thermal Activity Monitor.
- Realizar el cableado y conexiones electrónicas pertinentes al mismo.
- Calibración eléctrica, determinación de las señales de entrada y salida, flujo de las bombas hidráulicas y temperatura del baño.
- Calibración química, determinación de la entalpía molar, energía libre de Gibbs, entropía, y constante de equilibrio, del acomplejamiento del catión bario con éter 18-corona-6.

4. **Metodología**

Las simulaciones serán realizadas en el cluster de la universidad (HPC) con el fin de paralelizar procesos, de forma que a haciendo uso de sus recursos se minimice el tiempo de simulación a fin de lograr la mayor cantidad de simulaciones posibles con el fin de obtener una cantidad significativa de datos de validación.

5. Consideraciones éticas

Referencias

- (1) Straumann, N., *General relativity*; Springer Science & Business Media: 2012.
- (2) Bassan, M. *Astrophysics and Space Science Library* **2014**, 404, 275-290.
- (3) Hoynig, P. *Relativistic Astrophysics and Cosmology: A Primer* **2006**, 133-154.
- (4) Brüggmann, B. *Science* **2018**, 361, 366-371.
- (5) Meier, D. L., *Black hole astrophysics: the engine paradigm*; Springer Science & Business Media: 2012.
- (6) Weber, J. *Physical Review Letters* **1967**, 18, 498.
- (7) Abbott, B.; Abbott, R; Adhikari, R; Ajith, P; Allen, B.; Allen, G; Amin, R.; Anderson, S.; Anderson, W.; Arain, M. y col. *Reports on Progress in Physics* **2009**, 72, 076901.
- (8) Acernese, F.; Alshourbagy, M.; Amico, P.; Antonucci, F.; Aoudia, S; Astone, P; Avino, S.; Baggio, L; Ballardin, G; Barone, F. y col. *Classical and Quantum Gravity* **2008**, 25, 114045.
- (9) Hughes, S. A.; Favata, M. y Holz, D. E. en *Growing Black Holes: Accretion in a Cosmological Context*; Springer: 2005, págs. 333-339.
- (10) Bonnor, W. y Rotenberg, M. *Proc. R. Soc. Lond. A* **1966**, 289, 247-274.