

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

PROYECTO DE GRADO

---

—

---

*Autor:*

Juan BARBOSA

*Director:*

Jaime FORERO, Dr.Sc.

*Proyecto de Grado para optar por el título de Físico*

Departamento de Física

29 de octubre de 2018



## 1. Introducción

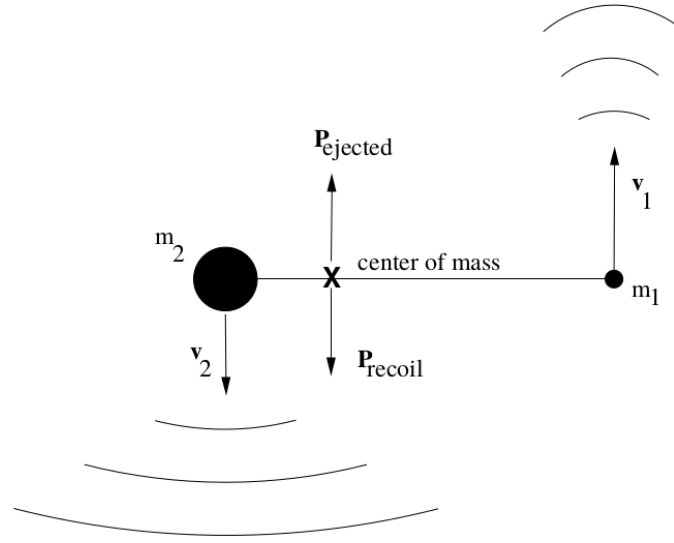
La Teoría de la Relatividad General de Albert Einstein fue publicada en 1916, de dicha teoría surgen las ondas gravitacionales como una, entre varias predicciones, las cuales incluyen lentes gravitacionales en donde cuerpos masivos modifican la trayectoria de la luz, así como la dilatación del tiempo. El término “ondas gravitacionales” fue introducido por primera vez en una publicación de Henri Poincaré, 10 años antes, donde proponía la primera ecuación para el campo gravitacional invariante ante transformaciones de Lorentz [1, 2].

Si bien, cuales quiera dos objetos con masa al orbitar generan ondas gravitacionales, 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 objetos 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 [3]. 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 [3].

Los esfuerzos por detectar ondas gravitacionales empezaron con el uso de barras resonantes por el físico estadounidense Joe Weber en 1965 [2, 4]. Por varias décadas, la tecnología y 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, como térmico, sísmico, *shot noise*, además de caracterizar su frecuencia [2]. Si bien los detectores de interferometría no estaban exentos de estas fuentes de ruido, presentan mayor sensibilidad que las barras resonantes, por lo cual hoy en día son los más usados. Siendo los dos más representativos LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* por sus siglas en inglés) y Virgo, en Estados Unidos y Europa, correspondientemente [2, 5, 6].

Las ondas gravitacionales, como cualquier tipo de onda, llevan energía y momento angular [7]. Esto ocasiona que en el caso de los sistemas binarios, 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, es que estas ondas también pueden transmitir un momento lineal desde el sistema. Esto implica que al aumentar la amplitud de la onda al momento de la función, también lo hace el momento lineal de la onda, por lo cual la fusión ocasiona que el centro de masa se mueva en dirección opuesta a la onda para conservar el momento. A este movimiento del centro de masa se le conoce con el nombre de retroceso o patada (*recoil* o *kick*) [7] y fue descrito por Bonnor y Rotenberg en 1966 [8].



Una forma de entender cómo sucede este fenómeno, es usando un sistema con masas desiguales. Se puede considerar dos cuerpos, uno con masa  $m_1$  y otro con masa  $m_2$ , donde  $m_2 > m_1$ . En el caso clásico, donde no existe ningún efecto nuevo, se tiene que el centro de masa orbitaría alrededor de un círculo. Sin embargo, cuando se tiene una onda que lleva energía y momento angular, se tiene que los cuerpos seguirían una trayectoria en espiral, por lo cual al considerar toda una órbita ( $\mathcal{O}$ ) se tendría que:

$$\int_{\mathcal{O}_1} m_1 \vec{v}_1 dl \neq \int_{\mathcal{O}_2} m_2 \vec{v}_2 dl \quad (1)$$

## 2. Objetivo general

### 3. Objetivos específicos

## 4. Metodología

Las simulaciones serán realizadas en el cluster de la universidad 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

Se manejará un repositorio de uso privado a través de Github en donde se encontrarán los códigos implementados en cada parte del proceso, junto con los resultados obtenidos, de forma que se asegure la reproducibilidad del modelo hallado, al mismo tiempo que se permita el seguimiento del uso de recursos. Además al mantener la información abierta se asegura que no se están utilizando resultados obtenidos por otros investigadores de forma directa.

## 6. Cronograma

TABLA 1: Cronograma de actividades

[illegible]



# Referencias

- (1) Straumann, N., *General relativity*; Springer Science & Business Media: 2012.
- (2) Bassan, M. *Astrophysics and Space Science Library* **2014**, 404, 275-290.
- (3) Meier, D. L., *Black hole astrophysics: the engine paradigm*; Springer Science & Business Media: 2012.
- (4) Weber, J. *Physical Review Letters* **1967**, 18, 498.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Hughes, S. A.; Favata, M. y Holz, D. E. en *Growing Black Holes: Accretion in a Cosmological Context*; Springer: 2005, págs. 333-339.
- (8) Bonnor, W. y Rotenberg, M. *Proc. R. Soc. Lond. A* **1966**, 289, 247-274.