



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA



Gravitational Waves Detection with Quantum Algorithms

Reporte N°1: Propuesta de proyecto

Judol Alejandro Rodríguez Franco
(juarodriguezfr@unal.edu.co)

Universidad Nacional De Colombia
Observatorio Astronómico Nacional
Facultad de Ciencias
Departamento de Física

****Asesor Principal:**** Álvaro Mauricio Montenegro Díaz

****Autor:**** Judol Alejandro Rodríguez Franco

Introducción

Las ondas gravitacionales, predichas por la teoría de la relatividad general de Einstein, representan un campo de estudio fundamental en la astrofísica. La detección precisa de estas ondas es esencial para comprender eventos cósmicos extremos, como fusiones de agujeros negros y estrellas de neutrones. Este proyecto se enfoca en la aplicación y optimización del filtrado coincidente como una técnica crucial en la detección de ondas gravitacionales en presencia de ruido.

Descripción del problema

La detección de ondas gravitacionales implica superar un desafío formidable debido a la debilidad intrínseca de estas señales y al ruido presente en los sistemas de detección. El ruido puede provenir de diversas fuentes, como vibraciones sísmicas, ruido térmico y ruido

electrónico. Para identificar y estudiar las ondas gravitacionales de interés, es necesario aplicar técnicas avanzadas de procesamiento de señales y análisis de datos. Una de las técnicas más poderosas en este contexto es el filtrado coincidente.

El filtrado coincidente es una técnica utilizada para buscar una señal específica, conocida como plantilla o template, en un conjunto de datos que contiene ruido y posiblemente señales débiles. La idea fundamental detrás del filtrado coincidente es calcular el producto interno (correlación) entre la señal esperada (plantilla) y los datos observados en diferentes momentos. Esto se puede expresar matemáticamente como:

$$\$S(t)=\int_{-\infty}^{\infty} h(t') \cdot d(t-t') dt' \tag{1}$$

- $S(t)$ representa la señal buscada en función del tiempo
- $h(t')$ es la plantilla de la señal esperada en función del tiempo
- $d(t-t')$ representa los datos observados en función del tiempo
- La integral representa la operación de correlación a lo largo de todo el tiempo.

El filtrado coincidente busca maximizar el valor de $S(t)$ ajustando adecuadamente la plantilla $h(t')$ y, de esta manera, aumentar la relación señal-ruido (SNR). Una alta SNR indica la presencia significativa de la señal buscada en los datos observados.

En este proyecto, nos proponemos aplicar y optimizar el filtrado coincidente en el análisis de datos de ondas gravitacionales. Utilizaremos datos reales de experimentos de interferometría láser y desarrollaremos algoritmos avanzados para mejorar la detección de ondas gravitacionales en presencia de ruido. Nuestro objetivo es entender el proceso, determinar el performance del método según la cantidad de parámetros libres y proponer diferentes algoritmos cuánticos que contribuyan a disminuir el tiempo de análisis y eventualmente usarlos como parte de una red neuronal para desarrollar métodos de Quantum Machine Learning.

Fuentes de datos

La metodología de filtrado de coincidencias requiere de dos tipos de datos:

Plantillas o templates: Las plantillas son modelos matemáticos que provienen de la teoría de *Binary merger dynamics* los cuales hacen uso de parámetros (hasta 18) de un sistema binario y a través de estos parámetros recrean un patrón de ondas gravitacionales con características únicas usando cálculos de relatividad numérica, geometría diferencial y ecuaciones diferenciales. El conjunto de templates producto de muchos artículos de investigación se recopilan en un paquete llamado [PyCBC](#) y cada modelo se denomina *aproximante*



Parámetros de un evento binary merger

Este conjunto de modelos no sólo se adapta a datos de series de tiempo, sino también a datos en series de frecuencia. Otras bases de datos útiles son aquellas que ya han recreado una enorme lista de ondas gravitacionales simuladas llamadas *waveforms*, las bases de datos que contienen varias de estas simulaciones son:

- LIGO Algorithm Library (LAL)
- SXS Gravitational Waveform Database
- Black Hole Perturbation Toolkit

Observaciones de interferometría: La detección de ondas gravitacionales se lleva a cabo en grandes laboratorios de interferometría láser, los consorcios que actualmente se encargan de la detección, ingeniería y análisis de datos son:

- LIGO (Hanford & Livingston)
- Virgo
- KAGRA (Japón)
- GEO600 (Alemania)
- LISA (Europa)

De los datos obtenidos por estos laboratorios, se tienen los análisis de diferentes eventos de detección recopilados en la base de datos del [Gravitational Wave Open Science Center](#)

Procesamiento ETL (Extracción, Transformación y Carga de Datos)

El procesamiento de datos implicará las siguientes etapas:

- **Extracción de datos crudos de la fuente:** El paquete `gwosc` posee los catálogos de eventos gravitacionales detectados en varios observatorios, analizados y caracterizados. Es posible obtener los resultados pero también la serie de tiempo en crudo.
- **Limpieza y preprocesamiento de datos para eliminar ruido y artefactos:** La limpieza (whitening) y el preprocesamiento se hace a través de diversas técnicas de análisis de series de tiempo tales como la transformada de fourier (fft y dft) al dominio de frecuencias y el método de Welch para la estimación de amplitud de densidad espectral, de forma que se puedan minimizar los ruidos gaussianos y no gaussianos.
- **Transformación de datos en el formato adecuado para el filtrado coincidente:** Al obtener la serie de tiempo con efectos de fuga espectral mitigados, se aplican técnicas para suavizado de datos tales como ventana de Hann y la transformada Q la cual representa los datos en un espacio cruzado (serie de tiempo Vs serie de frecuencia) para detectar ruidos indeseados en la señal, estos ruidos ya se encuentran perfilados (blips, koi fish, scratchy, scattered light etc), de manera que se pueden sustraer fácilmente de la señal original.
- **Carga de datos procesados en un entorno de análisis:** Cuando los datos se encuentran completamente procesados, se implementa el método de matched filtering utilizando convoluciones entre los perfiles de señal ya limpiados con los templates; existen diversos algoritmos para realizar este análisis y caracterización, los cuales se pueden tomar de la librería `Gwpy`.

Dependiendo de estos análisis algorítmicos, el matched filtering puede ser más o menos rápido, de igual manera más o menos preciso; el éxito de la implementación de algoritmos cuánticos será encontrar el balance entre algoritmos rápidos y altamente precisos. Para esta futura implementación se usará `Qiskit` para la simulación de circuitos cuánticos y la comunicación con computadores cuánticos.

Exploración de los datos

Se utilizarán las siguientes técnicas de visualización y análisis estadístico:

- Visualización en dominio de tiempo, dominio de frecuencia, transformada Q y gráficos de espectro de potencias.
- Análisis de correlación y gráfica de proporción ruido-señal
- Pruebas estadísticas χ^2
- Intervalos de confianza y valor σ de precisión

Técnicas de modelación propuestas

Las técnicas de modelación propuestas incluyen:

- Cálculo de la relación señal-ruido (SNR) para evaluar la significancia de las detecciones.
- Implementación y optimización del filtrado coincidente.

Conocimientos requeridos para el desarrollo del proyecto

Para llevar a cabo este proyecto, se requieren los siguientes conocimientos:

- Relatividad General y sistemas binarios
- Astrofísica de Ondas Gravitacionales
- SQL
- Datasets de series de tiempo
- Modelado, procesamiento y análisis de señales.
- Python Nivel avanzado
- Transformada de Fourier y convoluciones
- Estadística de distribuciones Gaussianas y no Gaussianas
- Computación cuántica

Resultados esperados

Para llevar a cabo este proyecto, se requieren los siguientes conocimientos:

- Bases de datos relacionales y no relacionales.
- Python: nivel intermedio a avanzado.
- Estadística y análisis de datos.
- Modelado de señales y procesamiento de señales.

- Conocimientos básicos de física y astrofísica.

Tiempo de desarrollo esperado

El proyecto está proyectado para tardar 7 semanas incluyendo el desarrollo de los algoritmos de computación cuántica y las pruebas de rendimiento, fuera de esto, se plantea el desarrollo del análisis de datos y la presentación de resultados para un plazo de 6 semanas. A continuación se muestra el calendario propuesto de manera gráfica con la metodología Scrum.



Scrum Planning
Calendario de ejecución del proyecto

Bibliografía

- Gao, S., Hayes, F., Croke, S., Messenger, C., & Veitch, J. (2022). *Quantum algorithm for gravitational-wave matched filtering*. Phys. Rev. Res., 4, 023006. [doi:10.1103/PhysRevResearch.4.023006](https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.4.023006)
- Miyamoto, K., Morrás, G., Yamamoto, T. S., Kuroyanagi, S., & Nesseris, S. (2022). *Gravitational wave matched filtering by quantum Monte Carlo integration and quantum amplitude amplification*. Phys. Rev. Res., 4, 033150. [doi:10.1103/PhysRevResearch.4.033150](https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.4.033150)