

PROYECTO DE RED TEMÁTICA:
AGUJEROS NEGROS Y ONDAS GRAVITATORIAS

Responsable técnico: Claudia Moreno González

EMAIL: claudia.moreno@cucei.udg.mx

LOCALIZACION: Departamento de Física, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Av. Revolución #1500, Colonia Olímpica, C.P. 44430, Guadalajara, Jalisco México.

1. Antecedentes

La detección de ondas gravitacionales generadas por la colisión de agujeros negros y de estrellas de neutrones, realizadas por los observatorios LIGO [1] (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) en EEUU y VIRGO [2] en Italia, han generado una gran expectación y entusiasmo en la comunidad científica ya que este descubrimiento abre una nueva ventana para explorar nuestro universo [3]. A esta red de detectores se unirán en un futuro los observatorios de LIGO India [4] y KAGRA [5] en Japón, los cuales se encuentran en construcción.

Durante el primer periodo (o corrida) de observación, LIGO detectó la señal de ondas gravitacionales de dos sistemas binarios distintos de agujeros negros [6, 7]. Posteriormente durante la segunda corrida de observación, LIGO detectó tres señales de ondas gravitacionales de distintos sistemas binarios de agujeros negros [8-10] y una más generada por el choque de dos estrellas de neutrones [11]. Los últimos dos eventos también fueron observados por VIRGO, lo que disminuyó el error de localización de la fuente. Esta mejora en la localización permitió que observatorios como *Fermi*, *Swope*, *HAWC* y *IceCube* por mencionar algunos, dieran seguimiento a la contraparte electromagnética y de neutrinos para el mismo evento del choque de estrellas de neutrones [12]. Esta observación de un mismo evento con diferentes técnicas dio origen a una nueva era en la astronomía de multi-mensajeros. Adicionalmente permitió entender cómo se crean los metales pesados como el oro y platino [13]. Los eventos detectados en los últimos tres años han permitido generar investigaciones en temas tales como, semillas de hoyos negros, estrellas de neutrones, cosmología, supernovas, emisión de ondas electromagnéticas y redes de detectores entre otros; estos temas se trabajan activamente a través del comité para la tercera generación de detectores de ondas gravitatorias [14]. Los recientes hallazgos en el tema de agujeros negros y ondas gravitatorias dieron argumentos y justificaciones para que Rainer Weiss, Kip Thorne y Barry C. Barish recibieran el premio nobel de física en 2017 [15].

Actualmente, los observatorios de ondas gravitacionales como LIGO, utilizan la técnica de filtro adaptado (o *matched filter* en inglés) para realizar sus detecciones [16]. En palabras simples, la señal detectada es comparada con un extenso banco de formas de onda de sistemas binarios compactos. Para simular estas ondas gravitacionales, se utilizan distintos programas numéricos. Uno de los programas que sirven para simular modelos relativistas de formas de onda de sistemas binarios compactos es el *Einstein Toolkit* [17], el cual ha sido utilizado para simular las posibles fuentes para detectores de nueva generación como LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*) [18]. Científicos a nivel mundial trabajan en la tercera generación de detectores de ondas gravitatorias. Las mejoras en estos detectores incluyen investigaciones en componentes tecnológicos tales como instrumentos ópticos, láseres, sensores, análisis de datos, modelos teóricos y relatividad numérica entre otros.

Por lo antes mencionado, el estudio de los agujeros negros y ondas gravitacionales es de gran interés. La investigación científica en este tema potencializaría las oportunidades de desarrollo científico y tecnológico en México, con grupos de investigación que se generen en diversos estados del país gracias al crecimiento de esta red temática. En el año de 2016 formamos la Red Temática de Agujeros Negros y Ondas Gravitatorias [19] motivados por los recientes descubrimientos. Anteriormente en México, las ondas gravitatorias eran un tema de investigación de un par de científicos. Con la creación de la red temática, el número de integrantes aumentó a 27 personas, incluyendo investigadores y estudiantes nacionales y 6 investigadores extranjeros. Gracias a la promoción y actividades como reuniones y talleres organizados por la red temática y financiadas por el CONACYT, el número de integrantes aumentó a 75 investigadores y estudiantes en el 2017. Para nuestra última reunión anual, contamos con la participación de 5 miembros de la colaboración LIGO (de la Universidad de Illinois, la Universidad de Luisiana y la Universidad de Texas en el Valle de Rio Grande en Estados Unidos de América). Miembros de la red tuvieron la oportunidad de asistir y presentar sus trabajos en simposios y conferencias internacionales organizados por científicos de la colaboración LIGO.

A nivel mundial, las investigaciones en el tema de ondas gravitatorias se enfocan en la mejora tecnológica de la red de observatorios (LIGO, VIRGO, KAGRA, y LIGO India), así como el desarrollo de modelos teóricos liderados por diversos expertos en el mundo y abiertos a la inclusión de investigadores de todos los países; este proyecto se llama *3G-Scientific Collaboration*. Integrantes mexicanos de nuestra red son miembros de ambos grupos.

En los próximos años de la red buscaremos: aumentar el número de participantes mexicanos, en particular estudiantes los cuales se capacitarían en estancias académicas con los colaboradores extranjeros de la red; y participar en proyectos de

colaboración entre instituciones. Estos dos objetivos nos abren la posibilidad de colaborar con otros grupos y en un futuro desarrollar un brazo interferómetro dentro de México. Este interferómetro, aunque no cuente con la sensibilidad de LIGO ayudará a realizar experimentos que sean de interés científico; los interferómetros de GEO 600 en Alemania, ACIGA en Australia y el prototipo de LIGO de 40 m en California, EEUU [20-22].

2. Justificación

A lo largo de estos dos años de la creación de la red temática, se ha logrado motivar a alumnos e investigadores de diversas universidades y centros de investigación a incluirse en los proyectos realizados en el tema de hoyos negros y ondas gravitatorias. Realizamos un vínculo con la División de Gravitación y Física Matemática de la Sociedad Mexicana de Física, con este vínculo nuestras investigaciones tendrán una mayor difusión e inclusión de universidades pequeñas en nuestro país. Hemos comenzado con la elaboración de proyectos de investigación con universidades de Estados Unidos de América para el intercambio de investigadores y estudiantes, los cuales se especializaran en los temas de análisis de datos y relatividad numérica, temas que son importantes tanto para investigaciones científicas en agujeros negros y ondas gravitatorias como en disciplinas de tecnología, medicina, matemáticas, economía entre otros. Nuestra red además de realizar eventos y actividades de investigación, como la búsqueda de proyectos de investigación con la colaboración LIGO, ha realizado actividades de divulgación en la que se motiva a niños y estudiantes en el gusto por la ciencia, la tecnología, además de las áreas de astrofísica y gravitación.

Es importante resaltar que el tipo de investigación que realiza la red no puede llevarse a cabo por un sólo investigador o por un sólo grupo de investigadores, dado su carácter multidisciplinar que involucra a diversos temas de la física, ingeniería y matemáticas aplicadas, es por lo anterior que hemos logrado también fortalecer vínculos de colaboración con miembros de los cuerpos académicos que representan los investigadores de la red en sus propias universidades, con la Escuela Normal Superior de Jalisco así como asociaciones civiles de divulgación tales como la Sociedad Astronómica de Guadalajara.

3. Beneficios

- Continuar con la consolidación y fortalecimiento del área de investigación en agujeros negros y ondas gravitatorias y vincularlo con otros temas de gravitación y cosmología.
- Aumentar el número de estudiantes de posgrado en física, matemáticas e ingenierías para la realización de investigaciones en los temas de la red.

- Motivar estudiantes de todos los niveles educativos a involucrarse en actividades científicas.
- Sinergia entre los investigadores de la red para realizar artículos de investigación con los miembros de la colaboración LIGO.
- Capacitación de los estudiantes de la red en los temas de análisis de datos y relatividad numérica.
- Intercambio de profesores y estudiantes entre las universidades nacionales y extranjeras para desarrollar los proyectos de investigación de la red.
- Presentación de conferencias y asistencia a escuelas y congresos nacionales e internacionales donde se presenten las actividades de investigación de la red.
- Inclusión de miembros de la red en los proyectos de la colaboración LIGO y otras redes de investigación en el extranjero que trabajen en los temas de la red.
- Fortalecimiento de los Cuerpos Académicos PRODEP a los cuales pertenecen los integrantes de la red temática.
- Aumentar el número de universidades de provincia con sus investigadores y estudiantes.
- Impulsar el desarrollo de actividades científicas en el tema de métodos y herramientas, basados en técnicas de inteligencia computacional y análisis de datos, para el estudio de ondas gravitacionales usando datos reales del experimento LIGO.
- Incrementar en número de investigadores y estudiantes en temas de análisis de datos para la detección y caracterización de ondas gravitacionales.
- Difusión de la ciencia y la tecnología implicada en los proyectos de la red.

4. Descripción de la etapa (objetivos para el año)

El objetivo principal de la red es reunir a los investigadores nacionales y extranjeros que trabajan en áreas afines a los temas de la red, así como la motivación a estudiantes de todos los niveles educativos a involucrarse en las actividades de la red temática, además de iniciar estudios de licenciatura y posgrado. Entre otros objetivos tenemos:

- Realizar la tercera reunión de la red temática para analizar los avances del proyecto de red, así como retroalimentar las actividades de investigación.
- Realizar la tercera escuela de la red temática en donde participen investigadores y estudiantes nacionales (miembros y no miembros de la red) y extranjeros. Se tiene contemplado la participación de 4 miembros de LIGO.
- Realización de al menos 8 artículos de investigación.
- Realizar reuniones de grupos de investigación para la publicación de artículos de investigación.

- Proyecto de colaboración con la universidad de Texas en Rio Grande Valle y la universidad de Illinois y la Universidad de Luisiana, todas ellas en Estados Unidos de América y parte de la colaboración LIGO.
- Realizar estancia y/o visita corta de estudiantes y profesores con investigadores de LIGO.
- Seguimiento de tesis de licenciatura, maestría y posgrado con los estudiantes participantes de la red.
- Realización de conferencias y actividades de divulgación para todo público.
- Captación de estudiantes para la realización de estudios de posgrado.
- Mantenimiento y mejora de nuestra pagina web.

5. Descripción de la meta (actividades a desarrollar)

- Publicación de al menos 8 artículos científicos en el año en las líneas de investigación de la red.
- Entrenar un grupo de estudiantes en los temas de análisis de datos, relatividad numérica, astrofísica y aspectos teóricos de la gravitación.
- Aumentar el numero de líneas de investigación así como de proyectos entre los miembros de la red temática.
- Difusión de los temas de la red entre la sociedad civil y niveles de educación básica, media superior y superior.

6. Descripción y justificación de la actividad (justificación de la actividad para alcanzar los objetivos)

Las actividades se justifican como fortalecimiento, impulso y desarrollo de los temas de investigación de la red. Además, llevarán a un incremento en la formación de Recursos Humanos altamente calificados. Uno de los beneficios importantes de la red es que ayudará a optimizar la formación de los estudiantes de maestría y de doctorado, a través de co-asesorías e intercambios académicos con los miembros de la red.

Además, los estudiantes se beneficiarán de las varias visitas y estancias de los miembros investigadores de la red, de las video-conferencias previstas y a través del apoyo que se les brindará para asistir a conferencias y talleres. Cabe mencionar que esta propuesta también contempla la participación varios investigadores post-doctorales que apoyarán las actividades de investigación y de formación de recursos humanos de la red. Es importante mencionar que esta propuesta contempla también la organización de talleres que reunirá miembros de la red, y tendrá como propósito la presentación en grupo de los resultados y avances obtenidos de las investigaciones realizadas; además de la conclusión de resultados y discusión de nuevas ideas que se podrían desarrollar a futuro dentro de los temas de la presente propuesta.

7. Productos e entregar

8 artículos de investigación, comprobantes de la ejecución de la escuela y la reunión anual de la red temática, comprobantes de presentación de conferencias de divulgación, comprobantes de los eventos de divulgación realizados en escuelas y plazas publicas, fotos de las actividades realizadas.

8. Bibliografía

1. Advanced LIGO - LIGO Scientific Collaboration (Aasi, J. et al.) *Class.Quant.Grav.* 32 (2015) 074001 arXiv:1411.4547.
2. Advanced Virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector - VIRGO Collaboration (Acernese, F. et al.) *Class.Quant.Grav.* 32 (2015) no.2, 024001 arXiv:1408.3978.
3. M. Holst, O. Sarbach, M. Tiglio, and M. Vallisneri. The emergence of gravitational wave science: 100 years of development of mathematical theory, detectors, numerical algorithms, and data analysis tools. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 2016.
4. LIGO India <<http://www.gw-indigo.org/tiki-index.php?page=LIGO-India>>.
5. Interferometer design of the KAGRA gravitational wave detector - KAGRA Collaboration (Aso, Yoichi et al.) *Phys.Rev.* D88 (2013) no.4, 043007 arXiv:1306.6747.
6. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger - LIGO Scientific and Virgo Collaborations (Abbott, B.P. et al.) *Phys.Rev.Lett.* 116 (2016) no.6, 061102 arXiv:1602.03837.
7. GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence - LIGO Scientific and Virgo Collaborations (Abbott, B. P. et al.) *Phys.Rev.Lett.* 116 (2016) no.24, 241103 arXiv:1606.04855.
8. GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2 - LIGO Scientific and VIRGO Collaborations (Abbott, Benjamin P. et al.) *Phys.Rev.Lett.* 118 (2017) no.22, 221101 arXiv:1706.01812 [gr-qc] LIGO-P170104.
9. GW170608: Observation of a 19-solar-mass Binary Black Hole Coalescence - LIGO

Scientific and Virgo Collaborations (Abbott, B. P. et al.) *Astrophys.J.* 851 (2017) no.2, L35 arXiv:1711.05578.

10. GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence - LIGO Scientific and Virgo Collaborations (Abbott, B.P. et al.) *Phys.Rev.Lett.* 119 (2017) no.14, 141101 arXiv:1709.09660 [gr-qc].
11. GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral - LIGO Scientific and Virgo Collaborations (Abbott, B. P. et al.) *Phys.Rev.Lett.* 119 (2017) no.16, 161101 arXiv:1710.05832.
12. Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger - LIGO Scientific and Virgo and Fermi GBM and INTEGRAL and IceCube and IPN and Insight-Hxmt and ANTARES and Swift and Dark Energy Camera GW-EM and Dark Energy Survey and DLT40 and GRAWITA and Fermi-LAT and ATCA and ASKAP and OzGrav and DWF (Deeper Wider Faster Program) and AST3 and CAASTRO and VINROUGE and MASTER and J-GEM and GROWTH and JAGWAR and CaltechNRAO and TTU-NRAO and NuSTAR and Pan-STARRS and KU and Nordic Optical Telescope and ePESSTO and GROND and Texas Tech University and TOROS and BOOTES and MWA and CALET and IKI-GW Follow-up and H.E.S.S. and LOFAR and LWA and HAWC and Pierre Auger and ALMA and Pi of Sky and DFN and ATLAS Telescopes and High Time Resolution Universe Survey and RIMAS and RATIR and SKA South Africa/MeerKAT Collaborations and AstroSat Cadmium Zinc Telluride Imager Team and AGILE Team and 1M2H Team and Las Cumbres Observatory Group and MAXI Team and TZAC Consortium and SALT Group and Euro VLBI Team and Chandra Team at McGill University (Abbott, B.P. et al.) *Astrophys.J.* 848 (2017) no.2, L12 arXiv:1710.05833.
13. Origin of the heavy elements in binary neutron-star mergers from a gravitational wave event - Kasen, Daniel et al. *Nature*, *Nature* 551 (2017) 80 arXiv:1710.05463.
14. Gravitational Wave international Committee <<https://gwic.ligo.org/3Gsubcomm/>>.
15. The Official Website of the Nobel Prize - Nobel Prize in Physics 2017 <https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2017/>.
16. GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO - LIGO Scientific and Virgo Collaborations (Abbott, B.P. et al.) *Phys.Rev. D* 93 (2016) no.12, 122003 arXiv:1602.03839.
17. The Einstein Toolkit <<http://einstein toolkit.org/>> revisada enero 2018.

18. Laser Interferometer Space Antenna - Amaro-Seoane, Pau et al. eprint arXiv:1702.00786.
19. Página web de la red temática de Agujeros Negros y Ondas Gravitatorias <www.redtematicaanyog.mx>.
20. Dual recycling for GEO 600 - Grote, H. et al. Class.Quant.Grav. 21 (2004) S473-S480
21. Technology developments for ACIGA high power test facility for advanced interferometry - Barriga, P. et al. Class.Quant.Grav. 22 (2005) S199-S208
22. LIGO Caltech 40 meter prototype
<https://labcit.ligo.caltech.edu/~ajw/40m/40m_upgrade.html>.