

# REPORTE TÉCNICO CIENCIA DE FRONTERA AÑO 1

**No. de proyecto:** 376127

**Nombre del proyecto:** Sombras, lentes y ondas gravitatorias generadas por objetos compactos astrofísicos

**Periodo:** 7 de noviembre del 2021 al 8 de diciembre del 2022

## Resumen objetivos y productos

A continuación detallamos los avances en los 9 objetivos específicos mencionados en el plan de trabajo para el año 1:

*Objetivo 1.1 Familiarización con el código Einstein-Toolkit.*

*Productos esperados: 3 desarrollos de software.*

*Productos obtenidos: 3 desarrollos de software*

### **Desarrollos de Software**

El objetivo se cumplió con creces. Dos miembros del grupo aprendieron y dominaron el uso del código Einstein-Toolkit, que permite resolver a las ecuaciones de Einstein y se desarrollaron softwares, en el caso de Einstein-Toolkit se les llama **espinas**, para **resolver la evolución de estrellas de bosones con parámetro angular**, les llamamos estrellas de bosones 1; así mismo se desarrolló el software que permite **medir su esfericidad**, otro que permite **describir la distribución de densidad de energía** y otro que permite seguir la **evolución de cada modo de la estrella**.

*Objetivo 1.2. Procesamiento estadístico de señales.*

*Productos esperados: 2 memorias, 1 artículo, 1 postdoc*

*Productos obtenidos: 2 artículos*

Comentario: Debido a que no se pudo asistir a eventos de congresos, no se pudieron realizar memorias de congresos.

Comentario: Sobre el postdoc, las condiciones de confinamiento no nos permitieron el desarrollo del proceso de selección. Sin embargo, ya hemos identificado a varios candidatos y para inicios del 2022 ya se tendrá al postdoc incorporado al grupo y trabajando en los temas del presente proyecto.

Además de analizar la física implicada, en este apartado desarrollamos y pusimos a prueba algoritmos computacionales para la detección de ondas gravitacionales generadas

por hoyos negros y supernovas. Para lo anterior utilizamos datos liberados por la colaboración LIGO en las corridas S6 y O3.

**Artículos:**

Título: Deep learning for gravitational-wave data analysis: A resampling white-box approach

Autores: Manuel D. Morales, Javier M. Antelis, **Claudia Moreno**, Alexander I. Nesterov

Estatus: Enviado a la revista PRD (en revisión)

[ArXiv: 2111.07219](#)

Título: Using supervised learning algorithms as a follow-up method in the search of gravitational waves from core-collapse supernovae

Autores: Javier M. Antelis, **Claudia Moreno** et.al.

Estatus: Publicado en Sensors 21 (2021) 9, 3174

[ArXiv: 2009.04088](#)

*Objetivo 1.3 Métodos bayesianos en el análisis de ondas gravitacionales.*

*Productos esperados: 1 artículo, 1 tesis Maestría*

*Productos obtenidos: 4 artículos, 1 tesis de Licenciatura*

Se realizó el análisis de las ondas gravitacionales para determinar observables.

**Artículos:**

Título: Constraining extra dimensions on cosmological scales with LISA future gravitational wave siren data

Autores: Maxence Corman, **Celia Escamilla-Rivera** and Martin A. Hendry

Estatus: Publicado en JCAP 02 (2021), 005

[ArXiv: 2004.04009](#)

Título: Constraining cosmological extra dimensions with gravitational wave standard sirens: from theory to current and future multi-messenger observations

Autores: Maxence Corman, Abhirup Ghosh, **Celia Escamilla-Rivera**, Martin A. Hendry, Sylvain Marsat, Nicola Tamanini

Estatus: Aceptado en PRD 2021

[ArXiv: 2109.08748](#)

Título: A dynamical dark energy solution to Hubble-Lemaître tension in the light of the multimessenger era

Autores: **Celia Escamilla-Rivera**

Estatus: En revisión por IJMP D

[ArXiv: 2103.01318](https://arxiv.org/abs/2103.01318)

Título: Dynamical dark energy models in the light of Gravitational-Wave Transient Catalogues

Autores: **Celia Escamilla-Rivera** and Antonio Nájera

Estatus: En revisión por JCAP

[ArXiv: 2103.02097](https://arxiv.org/abs/2103.02097)

**Tesis:**

Título: Dynamical dark energy models in the light of Gravitational-Wave Transient Catalogues

Alumno: Antonio Nájera

Directora: Dra. **Celia Escamilla Rivera**

Institución: FC e ICN UNAM

Resolución: Dada la situación de pandemia, el proceso administrativo para la fecha de defensa se ha pospuesto hasta Enero 2022.

Grado: Licenciatura.

*Objetivo 1.4 Cambios en las ondas gravitacionales por la expansión del Universo.*

*Productos esperados: 1 artículo, 1 tesis de Maestría*

*Productos obtenidos: 7 artículos, 2 tesis de Doctorado*

En este apartado, investigamos el comportamiento de las señales gravitacionales generadas en el periodo de inflación cosmológica, considerando condiciones de frontera en la variación de la acción.

**Artículos:**

Título: Quantum gravity phenomenology at the dawn of the multi-messenger era -- A review

Autores: A. Addazi, **C. Escamilla-Rivera**, et al.

Estatus: Accepted por Progress in Particle and Nuclear Physics

[arXiv: 2111.05659](https://arxiv.org/abs/2111.05659)

Título: Consequences for the Scalar Field Dark Matter model from The McGaugh Observed-Barion Acceleration Correlation

Autores: Luis E. Padilla-Albores, **Jordi Solís-López**, **Tonatiuh Matos** and Ana Avilez-López.

Estatus: Publicado en Astrophys. J., 909, (2021), 62

[arXiv:2008.13455](https://arxiv.org/abs/2008.13455)

Título: On the Core-Halo Mass Relation in Scalar Field Dark Matter Models and its Consequences for the Formation of Supermassive Black Holes

Autores: Luis E. Padilla, Tanja Rindler-Daller, Paul R. Shapiro, **Tonatiuh Matos** and J. Alberto Vázquez.

Estatus: Publicado en Phys. Rev. D103, (2021), 063012.

[arXiv:2010.12716](https://arxiv.org/abs/2010.12716).

Título: The graviton Compton mass as Dark Energy

Autores: **Tonatiuh Matos** and **Laura L-Parrilla**.

Estatus: Publicado en Rev. Mex. Fis. 67 (2021), 040703.

[arXiv:2108.05206](https://arxiv.org/abs/2108.05206)

Título: Scalar Field Dark Matter as an alternative explanation for the polar orbits of satellite galaxies.

Autores: **Jordi Solís-López**, Francisco S. Guzmán, **Tonatiuh Matos**, Víctor Robles and Luis Ureña-López.

Estatus: Publicado en Phys. Rev. D103, (2021), 083535.

[arXiv:1912.09660](https://arxiv.org/abs/1912.09660).

Título: The CMB and MSP profiles for a novel and efficient model of dark energy.

Autores: **Tonatiuh Matos** and Luis Osvaldo Tellez-Tovar.

Estatus: Aceptado para publicación en Rev. Mex. Fis.

### **Tesis:**

Título: Modelos Topológicos para Universos Acelerados

Alumno: Maribel Hernández Márquez.

Directores: **Tonatiuh Matos** y Gerardo Torres del Castillo

Institución: EFM-BUAP

Resolución: Aprobada

Fecha: 8 de Enero de 2021

Grado: Doctorado:

Título: Multistate scalar field dark matter

Alumno: **Jordi Solís-López.**

Director: **Tonatiuh Matos**

Institución: CINVESTAV IPN

Resolución: El exámen se presentará en Enero de 2022

Grado: Doctorado

*Objetivo 1.5 Deflexión y sombras por cuerpos compactos.*

*Productos esperados: 2 artículos, desarrollo de software.*

*Productos obtenidos: 2 artículos, 1 Tesis de Licenciatura*

Avanzamos en este objetivo al tener ya claramente definidos las estrellas de bosones  $\ell$ , con condiciones tales que sean objetos compactos, con compacidades cercanas a las de los hoyos negros, para valores arbitrarios del parámetro angular  $\ell$ .

### **Artículos:**

Título: On the linear stability of  $\ell$ -boson stars with respect to radial perturbations,

Autores: Miguel Alcubierre, Juan Barraco, **Argelia Bernal, Juan Carlos Degollado,** Alberto Diez-Tejedor, Miguel Megevand, **Darío Núñez, Olivier Sarbach**

Estatus: Publicado en Class. Quantum Grav. 38 (2021) 17, 174001.

[arXiv: 2103.15012](https://arxiv.org/abs/2103.15012)

Título: Extreme  $\ell$ -boson stars

Autores: Miguel Alcubierre, Juan Barraco, **Argelia Bernal, Juan Carlos Degollado,** Alberto Diez-Tejedor, **Víctor Jaramillo,** Miguel Megevand, **Darío Núñez, Olivier Sarbach**

Estatus: Será enviado en breve a Class. Quantum Grav.

arXiv:

### **Tesis:**

Título: Sobre la existencia de estrellas de bosones newtonianas con momento angular en simetría esférica

Alumno: Emmanuel Chávez Nambo

Director: **Dr. Olivier Sarbach**

Institución: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Resolución: Graduado (mención honorífica).

Grado: Licenciatura

*Objetivo 1.6 Perturbación de hoyos negros y objetos compactos; generación de ondas gravitatorias.*

*Productos esperados: 2 artículos, 1 postdoc.*

*Productos obtenidos: 6 artículos, 1 tesis de Doctorado*

Comentario: Sobre el postdoc, las condiciones de confinamiento no nos permitieron el desarrollo del proceso de selección. Sin embargo, ya hemos identificado a varios candidatos y para inicios del 2022 ya se tendrá al postdoc incorporado al grupo y trabajando en los temas del presente proyecto.

En este rubro estudiamos la perturbación de agujeros negros cargados y la consecuente emisión de las ondas gravitatorias, con atención a los aspectos de la onda que indiquen los valores de los parámetros del hoyo negro. Así mismo, estudiamos el choque de estrellas de bosones 1, que con condiciones específicas es una perturbación muy importante, estudiamos a detalle la forma de las ondas gravitatorias generadas así como el objeto final producido.

#### **Artículos:**

Título: Gravitational and Electromagnetic Perturbations of a Charged Black Hole in a General Gauge Condition,

Autores: **Claudia Moreno, Juan Carlos Degollado, Darío Núñez, Carlos Rodríguez-Leal,**

Estatus: Publicado en Particles 4 (2021) 2, 106-128.

[arXiv: 2104.11742](https://arxiv.org/abs/2104.11742)

Título: Geodesics Near a Curvature Singularity of Stationary and Axially Symmetric Space-Times

Autores: **Juan Carlos del Águila and Tonatiuh Matos**

Estatus: Publicado en Class. Quant. Grav. 38, (2021), 055008.106-128.

[arXiv:2012.13465](https://arxiv.org/abs/2012.13465).

Título: Gravitational perturbations in the Newman-Penrose formalism: Applications to wormholes

Autores: **Juan Carlos del Águila and Tonatiuh Matos**

Estatus: Publicado en Phys. Rev. D 103, 084033 (2021)

[arXiv:2102.09160](https://arxiv.org/abs/2102.09160).

Título: Post-Newtonian Gravitational and Scalar Waves in Scalar-Gauss-Bonnet Gravity

Autores: Banafsheh Shiralilou, Tanja Hinderer, Samaya M. Nissanke, **Néstor Ortiz,** Helvi Witek

Estatus:

[arXiv:2105.13972](https://arxiv.org/abs/2105.13972) (2021).

Título: Nonlinear curvature effects in gravitational waves from inspiralling black hole binaries

Autores: Banafsheh Shiralilou, Tanja Hinderer, Samaya M. Nissanke, **Néstor Ortiz**, Helvi Witek.

Estatus: Publicado en Physical Review D 103, Letter L121503 (2021).

Título: Head-on merger of  $\ell$  -boson stars,

Autores: **Víctor Jaramillo**, **Nicolas Sanchis-Gual**, **Juan Barranco**, **Argelia Bernal**, **Juan Carlos Degollado**, et al.

Estatus: En redacción.

### **Tesis:**

Título: Singularidades de Curvatura y Perturbaciones Gravitacionales en Agujeros de Gusano.

Alumno: Juan Carlos del Aguila.

Director de Tesis: **Tonatiuh Matos**

Institución: Cinvestav IPN

Resolución: El examen se presentará en Enero de 2022

Grado: Doctorado

*Objetivo 1.7 Imitadores de hoyos negros y su diferenciación.*

*Productos esperados: 3 desarrollos de software.*

*Productos obtenidos: 3 desarrollos de software*

### **Desarrollos de software:**

Con una estudiante asociada al proyecto se desarrolló un [código computacional para Cálculo de geodésicas tipo tiempo y tipo luz en un espacio tiempo de Schwarzschild](#).

Se desarrolló un [segundo código para determinar la apariencia de un disco de acreción delgado que se encuentra en el plano ecuatorial de un agujero negro de Schwarzschild](#). Este código además determina la luminosidad y temperatura del disco.

Un [tercer código](#) se encarga de [interpolación de las soluciones de los códigos anteriores](#). Con el estudiante Brandon Bautista se desarrolló un [código para resolver el flujo de acreción de un fluido perfecto en un espacio tiempo que simula un agujero negro libre de singularidades](#).

*Objetivo 1.8 Sombras y EHT.*

*Productos esperados: 2 artículos, 1 desarrollo de software.*

*Productos obtenidos: 3 artículos, 1 memoria, 1 desarrollo de software, 1 Tesis de Maestría*

Este tema fue trabajado desde diferentes líneas, generando las estructuras teóricas y computacionales que nos permitan describir con precisión las características de las sombras de los hoyos negros y de otros objetos compactos. Estudiamos la dinámica, en la vecindad de un hoyo negro de Schwarzschild, de la materia descrita como una colección de partículas, para poder diferenciarla de la dinámica de la materia descrita por otros tipos de materia, fluido o campo escalar.

### **Artículos**

Título: Accretion of a Vlasov gas onto a black hole from a sphere of finite radius and the role of angular momentum,

Autores: **Aldo Gamboa, Carlos Gabarrete, Paola Domínguez-Fernández, Darío Núñez, Olivier Sarbach**

Estatus: Publicado en Phys.Rev.D 104 (2021) 8, 083001.

[ArXiv: 2107.04830](https://arxiv.org/abs/2107.04830)

Título: An introduction to the relativistic kinetic theory on curved spacetimes

Autores: Rubén Acuña-Cárdenas, **Carlos Gabarrete, Olivier Sarbach**

Estatus: en revisión

ArXiv: [2106.09235](https://arxiv.org/abs/2106.09235) [gr-qc]

Título: Kinetic gas disks surrounding Schwarzschild black holes

Autores: **Carlos Gabarrete, Olivier Sarbach**

Estatus: Aceptado en Acta. Phys. Polonica B Proceedings Series

También revisamos el modelo de acreción esférica hidrodinámica de Bondi-Michel y lo generalizamos tomando en cuenta la rotación del agujero negro central en los siguientes artículos:

Título: Spherical accretion: Bondi, Michel and rotating black holes

Autores: Alejandro Aguayo-Ortiz, Emilio Tejeda, **Olivier Sarbach**, Diego López-Cámara

Estatus: Publicado en MNRAS **504**, 5039 (2021).

ArXiv: [2102.12529](https://arxiv.org/abs/2102.12529) [astro-ph.HE]



Desde otra faceta, continuamos con el estudio en el que el grupo tiene amplia experiencia, de la descripción de la dinámica de la distribución del campo escalar en la vecindad del hoyo negro, lo que hemos llamado pelucas y hemos estudiado el caso cuando el campo escalar incluye a un parámetro de autointeracción y cuando, además, una distribución específica de momento angular, como en las estrellas de bosones I. Estos trabajos se encuentran en etapa de desarrollo y se terminarán en los primeros meses del 2022.

### **Desarrollos de software**

Para realizar dichos trabajos hemos desarrollado varios programas de software, principalmente en Python, que nos permiten **resolver la ecuación dinámica del campo escalar con diferentes valores de sus parámetros** y así describir la distribución del campo escalar y sus propiedades en dicha región.

### **Tesis:**

Título: Singularidades de Curvatura y Perturbaciones Gravitacionales en Agujeros de Gusano

Alumno: Juan Carlos del Águila Rodríguez

Director: **Tonatiuh Matos**

Institución: CINVESTAV

Resolución: Aprobado

Fecha: 14 de diciembre de 2021

Grado: Maestría

*Objetivo 1.9 Ondas y sombras en teorías alternativas.*

*Productos esperados: 1 artículo.*

*Productos obtenidos: 2 artículos, 1 Tesis de Maestría*

En este tema se exploran observaciones como pruebas para la teoría de la Relatividad General.

### **Artículos:**

Título: Improving data-driven model-independent reconstructions and updated constraints on dark energy models from Horndeski cosmology

Autores: Mauricio Reyes and **Celia Escamilla-Rivera**

Estatus: Publicado en JCAP07(2021)048

[ArXiv: 2104.04484](https://arxiv.org/abs/2104.04484)

Título: On Negative Mass Cosmology in General Relativity

Autores: Sebastián Nájera, Aldo Gamboa, Alejandro Aguilar-Nieto, **Celia Escamilla-Rivera**

Estatus: Publicado en A&A 651, L13 (2021)

[ArXiv: 2105.11041](https://arxiv.org/abs/2105.11041)

**Tesis:**

Título: Improving data-driven model-independent reconstructions and updated constraints on dark energy models from Horndeski cosmology.

Alumno: Mauricio Cruz Reyes.

Directora de Tesis: **Dra. Celia Escamilla Rivera.**

Institución: ICN UNAM.

Resolución: Aprobado con Mención Honorífica y candidato a la Medalla Alfonso Caso.

Fecha: 9 agosto 2021.

Grado: Maestría.

Se organizó también el VI Scalar Field Dark Matter Workshop <https://sites.google.com/view/sfdm-workshop/home> el cual es un Taller internacional que aborda temas de este proyecto. Hubo también participación de integrantes de este proyecto como expositores.

**Los documentos probatorios de artículos y tesis se encuentran en**

<http://gravitationalwaves.mx/colaboraciones.html>

**Relación de productos totales:**

- Desarrollos de software, 7 prometidos, elaborados 8
- 2 memorias prometidas, elaboradas 1 no hubo congresos,
- 11 artículos prometidos, elaborados 26
- 2 tesis de Maestría prometidas, elaboradas 1 de licenciatura, 3 tesis de Maestría, 3 de doctorado
- 2 postdocs se encuentran ya en proceso de contratación
- Organización del VI Scalar Field Dark Matter Workshop

Los probatorios de los trabajos elaborados se pueden consultar en la liga:

**Sobre el ejercicio de los recursos:**

Para el Instituto de Ciencias Nucleares tuvimos asignado:

- \$200,000 para equipo de cómputo que ya se ejerció para fortalecer al Cluster del ICN
- \$308,000 para un postdoc, se solicita autorizar el utilizar dicho presupuesto en la siguiente etapa
- \$50,000 seminarios, se solicita autorizar el utilizar dicho presupuesto en la siguiente etapa
- \$20,500 honorarios, se solicita autorizar el utilizar dicho presupuesto en la siguiente etapa.

Para la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo tuvimos asignado:

- \$40,000 para para trabajo de campo, se solicita autorizar el utilizar dicho presupuesto en la siguiente etapa
- \$308,220 para un postdoc: selección del candidato concluida pero iniciará su estancia durante la siguiente etapa

Para la Universidad de Guanajuato tuvimos asignado:

- \$15,000 para Estancias técnico-académicas para participantes y visitantes, se solicita autorizar el utilizar dicho presupuesto en la siguiente etapa.

Para la Universidad de Guadalajara tuvimos asignado:

- \$308,000 para un postdoc, se solicita autorizar el utilizar dicho presupuesto en la siguiente etapa
- \$50,000 para Estancias técnico-académicas para participantes y visitantes. Este rubro ha sido utilizado en los siguientes eventos:

- 1) Asistencia por parte de **Claudia Moreno y Laura Villegas** a la reunión organizada en Embry Riddle Aeronautical University, Prescott, Arizona con el Dr. Michele Zanolin. Para trabajar en el tema “Parameter estimation for rapidly rotating of CCSN’s progenitor”, los días 16 al 23 de septiembre.
- 2) Asistencia por parte de **Javier M. Antelis** al workshop "Detection and Analysis of Gravitational Waves in the era of Multi-Messenger Astronomy: From Mathematical Modeling to Machine Learning" organizado con el apoyo del “Banff International Research Station for Mathematical Innovation and Discovery (BIRS)”. Se dio la conferencia plenaria titulada “Reduction of noise events in searches of gravitational wave bursts from

core-collapse supernovae with machine learning”, los días 14 al 20 de noviembre.

Para el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN tuvimos asignado:

- \$165, 000 que no hemos podido ejercer debido a la pandemia, se solicita autorizar el utilizar dicho presupuesto en la siguiente etapa.