

Informe final publicable de proyecto

Gravedad cuántica y física de los agujeros negros

Código de proyecto ANII: FCE_1_2019_1_155865

21/09/2023

GAMBINI ITALIANO, Rodolfo (Responsable Técnico - Científico)

CHARBONNIER, Mathias (Investigador)

SKIRZEWSKI PRIETO, Aureliano (Investigador)

BENÍTEZ MARTÍNEZ, Florencia (Investigador)

CAMPIGLIA, Miguel (Investigador)

EYHERALDE SASTRE, Rodrigo (Investigador)

HERNANDEZ, Guzman (Investigador)

MATO CAPURRO, Esteban (Investigador)

PERAZA MARTIARENA, Javier (Investigador)

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE CIENCIAS (Institución Proponente) \\
PROGRAMA DE DESARROLLO DE LAS CIENCIAS BÁSICAS. ÁREA FÍSICA (PEDECIBA) \\
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE CIENCIAS

Resumen del proyecto

Los agujeros negros son uno de los objetos más fascinantes del Universo. Aunque a primera vista muy simples: bastan tres magnitudes para describirlos: masa, carga y momentum angular se producen un conjunto de fenómenos excepcionales para cuyo estudio se requiere del uso simultáneo de la Relatividad General, Teoría de campos y Termodinámica. Aun no se dispone de una teoría completa que permita estudiar sus regiones centrales. Hemos desarrollado en este proyecto avances hacia tal teoría que permitieron un tratamiento de dichas regiones centrales donde los agujeros negros tienen propiedades cuánticas [1,2]. Los mismos valen para agujeros negros esféricamente simétricos y, en algunos casos, con simetría axial [3,4]. También se estudió su formación [5,6] y evaporación [7,8]. En paralelo se estudiaron efectos de gravedad cuántica en el régimen opuesto de largas distancias, el cual es dominado por gravitones de baja energía. Se lograron avances en la descripción de las simetrías asintóticas que caracterizan a estos gravitones [9,10,11]. Se realizaron una quincena de publicaciones que ya han recibido más de 200 citas [1-17]. Cuatro tesis de doctorado resultaron de este Proyecto. Un review de los resultados aparecerá próximamente en el Handbook of Quantum Gravity publicado por Springer [18].

Ciencias Naturales y Exactas / Ciencias Físicas / Física de Partículas y Campos / Gravedad cuántica

Palabras clave: Gravedad cuántica / Agujeros negros / Cuantización de la gravedad /

Introducción

El estudio de situaciones de alta simetría en las que primero se aplica la simetría a la teoría clásica y luego se procede a cuantizar ha demostrado ser una herramienta valiosa para probar los regímenes de la gravedad cuántica en un escenario donde son posibles cálculos detallados y bien controlados. Un buen ejemplo de esto es la cosmología cuántica de bucles (LQC) donde se impone la homogeneidad espacial antes de la cuantificación. Ha dado lugar a varias ideas atractivas como la eliminación de la singularidad del Big Bang, aunque implica una reducción radical de los grados de libertad de la teoría (de un número infinito a uno finito). Es una progresión natural intentar considerar situaciones con menos simetría. En ese contexto, los espacio-tiempos esféricamente simétricos aparecen como un escenario atractivo ya que incluyen el importante caso de los agujeros negros. Y aunque la relatividad general con simetría esférica no tiene grados locales de libertad, inicialmente el tratamiento se asemeja al de una situación con infinitos grados de libertad. En particular, los vínculos de la teoría no forman un álgebra de Lie, sino un álgebra con funciones de estructura como en la teoría completa. Esto puede ser un impedimento importante para completar la cuantización de Dirac de la teoría, ya que existen varios obstáculos bien conocidos que introducen las funciones de estructura. Aquí cuantizaremos distintos tipos de agujeros negros usando diversas técnicas y estudiaremos su estructura cuántica, evaporación de Hawking y el colapso de materia que conduce a su formación.

En una perspectiva complementaria a la anterior, se estudian propiedades de sistemas gravitacionales cuando son observados a grandes distancias. Esto ofrece simplificaciones complementarias a la estrategia discutida anteriormente. En particular, es posible trabajar sin reducción por simetrías así como identificar un espacio de fases libre de vínculos. Como contraparte, esta estrategia no permite obtener información de lo que sucede en el interior del espaciotiempo, en particular en el interior de agujeros negros.

Metodología/diseño del estudio

Los avances alcanzados en estos trabajos surgen cuando se notó que un cambio de escala de las restricciones puede convertirlas en un álgebra de Lie. Esta propiedad no parece sobrevivir a la inclusión de la materia. Sin embargo, permite completar la cuantización de Dirac y discutir propiedades interesantes en el caso del vacío. En el caso material se puede realizar un análisis cuántico efectivo usando técnicas de polimerización que reproducen muchas de las propiedades cuánticas de la teoría a nivel semiclásico. La inclusión de efectos cuánticos para estudiar la evaporación de agujeros negros con simetría esférica puede hacerse vía la definición de operadores asociados a los coeficientes de Bogoliubov de la radiación de Hawking. Por último se pueden incluir agujeros negros rotantes usando las técnicas desarrolladas por Thiemann.

Resultados, análisis y discusión

Se cuantizaron los agujeros negros de Schwarzschild utilizando la técnica llamada mejorada y se obtuvo una descripción cuántica donde el espacio tiempo está compuesto por cascadas de radio cuantizado y la singularidad clásica es sustituida por una cascada de radio mínimo donde la curvatura del espacio es máxima y orden Planck. Dicha región conecta el agujero negro con otra región asintóticamente plana que se comporta como un agujero blanco. Se estudió la formación de agujeros negros por campos de materia colapsante. Se usó una descripción efectiva de la teoría cuántica donde los campos son polimerizados para que resulten bien definidos cuánticamente. Se demostró que a medida que la intensidad del campo crece se pasa de una región donde no se producen agujeros negros a otra en que sí se crean. La transición entre ambas regiones es un cambio de fases de segundo orden. Se estudió la evaporación de agujeros negros esféricos de masa fluctuante que emiten radiación de Hawking en una teoría donde la masa es cuantizada e induce fluctuaciones en la posición del horizonte. Se cuantizaron a la Thiemann agujeros negros rotantes realizando los primeros avances en esa dirección. Se estudió el álgebra de Poisson de observables de Dirac asociados a las componentes del tensor de Riemann respecto a un sistema de referencia definido intrínsecamente. Se logró identificar el espacio de fases que soporta la acción del grupo de simetría asintótico extendido. Se estudió el vínculo formal que existe entre las simetrías asintóticas en teorías de Yang-Mills con las de gravedad. Estos trabajos han dado lugar a una quincena de publicaciones.

Conclusiones y recomendaciones

Concluyendo, se ha completado el análisis de la física de los agujeros negros cuánticos esféricamente simétricos de Schwarzschild. Quedan numerosos temas de gran interés por estudiar. Ellos incluyen el estudio de agujeros cargados y rotantes así como la inclusión de campos materiales cuánticos para los cuales la gravedad cuántica proporciona una regularización natural que elimina la necesidad de renormalización. Por otra parte el estudio de las propiedades de sistemas gravitacionales cuando son observados a grandes distancias ha permitido determinar el espacio de fases asintótico libre de vínculos pero aún plantea grandes desafíos y nuevos estudios son requeridos.

Referencias bibliográficas

- [1] Spherically symmetric loop quantum gravity: analysis of improved dynamics *Class.Quant.Grav.* 37 (2020) 20, 205012 Rodolfo Gambini, Javier Olmedo, Jorge Pullin
- [2] Loop Quantum Black Hole Extensions Within the Improved Dynamics *Front.Astron.Space Sci.* 8 (2021) Rodolfo Gambini, Javier Olmedo, Jorge Pullin
- [3] Classical axisymmetric gravity in real Ashtekar variables. *Class.Quant.Grav.* 36 (2019) 12, 125009, Rodolfo Gambini, Esteban Mato, Javier Olmedo, Jorge Pullin
- [4] Axisymmetric gravity in real Ashtekar variables: the quantum theory *Class.Quant.Grav.* 37 (2020) 11, 115010 Rodolfo Gambini, Esteban Mato, Jorge Pullin
- [5] Critical collapse of a scalar field in semiclassical loop quantum gravity *Phys.Rev.Lett.* 124 (2020) 7, 071301 Florencia Benitez, Rodolfo Gambini, Luis Lehner, Steve Liebling, Jorge Pullin
- [6] Criticality in the collapse of spherically symmetric massless scalar fields in semiclassical loop quantum gravity *Phys.Rev.D* 104 (2021) 2, 024008 Florencia Benítez, Rodolfo Gambini, Steven L. Liebling, Jorge Pullin
- [7] Quantum fluctuating geometries and the information paradox II *Class.Quant.Grav.* 37 (2020) 6, 065001 Rodrigo Eyheralde, Rodolfo Gambini, Jorge Pullin
- [8] Hawking radiation from an evaporating black hole via Bogoliubov transformations *Class.Quant.Grav.* 39 (2022) 22, 225002 Rodrigo Eyheralde
- [9] Generalized BMS charge algebra *Phys.Rev.D* 101 (2020) 10, 104039 Miguel Campiglia, Javier Peraza
- [10] BMS Algebra, Double Soft Theorems, and All That arXiv: 2106.14717 Miguel Campiglia, Alok Laddha
- [11] A double copy for asymptotic symmetries in the self-dual sector *JHEP* 03 (2021) 262 Miguel Campiglia, Silvia Nagy
- [12] Charge algebra for non-abelian large gauge symmetries at $O(r)$ *JHEP* 12 (2021) 058 Miguel Campiglia, Javier Peraza
- [13] Radiative phase space extensions at all orders in r for self-dual Yang-Mills and Gravity *JHEP* 02 (2023) 202 Javier Peraza, Silvia Nagy
- [14] Fermionic asymptotic symmetries in massless QED. Arxiv: 2307.11171 . Aceptado para publicación en *Phys Rev D* Adrián Agriela, Miguel Campiglia
- [15] Gravitation in terms of observables 2: the algebra of fundamental observables *Class.Quant.Grav.* 37 (2020) 14, 145013 Rodolfo Gambini, Saeed Rastgoo, Jorge Pullin
- [16] A Covariant Polymerized Scalar Field in Semi-Classical Loop Quantum Gravity *Universe* 8 (2022) 10, 526 Rodolfo Gambini, Florencia Benítez, Jorge Pullin
- [17] Towards a quantum notion of covariance in spherically symmetric loop quantum gravity *Phys.Rev.D* 105 (2022) 2, 2 Rodolfo Gambini, Javier Olmedo, Jorge Pullin
- [18] Quantum geometry and black holes in "Handbook of Quantum Gravity" (Eds. C. Bambi, L. Modesto and I.L. Shapiro, Springer Singapore, expected in 2023) Rodolfo Gambini, Javier Olmedo, Jorge Pullin

Licenciamiento

Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional. (CC BY-NC)