



A. PROPUESTA PROYECTO DE INVESTIGACIÓN INTERNO SIN FINANCIAMIENTO O AUTOGESTIONADO

1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Básica	x	Aplicada	
--------	---	----------	--

2. DEPARTAMENTO O INSTITUTO

1. Departamento de Física

2.

3. LINEA(S) DE INVESTIGACIÓN:

1. Física Fundamental Fundamentos de Física

2.

4. TÍTULO DEL PROYECTO (mínimo 10 palabras):

Black hole entropy and entanglement entropy in the framework of the AdS/CFT correspondence

5. RESUMEN (máximo 200 palabras)

El proyecto que aquí se expone plantea el estudio de la relación entre la entropía de Bekenstein-Hawking y la entropía de entrelazamiento a partir de la dualidad AdS/CFT. En particular, se pretende entender si la entropía de Bekenstein-Hawking, que responde a una característica puramente geométrica, puede interpretarse en algún modelo como entropía de entrelazamiento. En este sentido, Ryu y Takayanagi han planteado recientemente que la entropía de entrelazamiento en una teoría de campo conforme puede entenderse como la medida sobre una hipersuperficie mínima en el interior del espacio de anti-de Sitter. Se establece así una conexión geometría-entropía de entrelazamiento que puede explorarse como un indicativo de relación con la entropía de Bekenstein-Hawking.

Aunque la entropía de Bekenstein-Hawking ha sido ampliamente calculada para multitud de soluciones en la teoría de la Relatividad General de Einstein y en otros modelos, su origen fundamental no está aún bien entendido.

6. PALABRAS CLAVE (4-6)

Holography, entanglement entropy, AdS/CFT, black-hole thermodynamics.

7. DISCIPLINA CIENTÍFICA (Marque X, solamente una opción)

Ciencias Naturales y Exactas;	x
Ingeniería y Tecnologías;	
Ciencias Médicas;	
Ciencias Agrícolas;	
Ciencias Sociales;	
Humanidades	



8. OBJETIVO SOCIECONOMICO *(Marque X, solamente una opción)*

Exploración y explotación del medio terrestre; Ambiente;	
Exploración y Explotación del espacio;	
Transporte, telecomunicaciones y otras infraestructuras;	
Energía;	
Producción y tecnología industrial;	
Salud;	
Agricultura;	
Educación;	
Cultura, ocio, religión y medios de comunicación;	
Sistemas políticos y sociales, estructuras y procesos;	
Defensa;	
Avance general del conocimiento: I+D financiada con los Fondos Generales de Universidades (FGU);	
Avance general del conocimiento: I+D financiados con otras fuentes.	X

9. OBJETIVOS

9.1 Objetivo General

Estudiar la posibilidad de entender la entropía de Bekenstein-Hawking como una entropía de entrelazamiento.

9.2 Objetivos Específicos

- a. Estudiar la entropía de entrelazamiento en AdS3/CFT2 para la solución BTZ.
- b. Estudio de extensiones maximales a soluciones en AdS3 con frontera disconexa, en un paralelismo con la extensión maximal de Kruskal de la solución de Schwarzschild.
- c. Cálculo de entropía de entrelazamiento en la frontera de soluciones maximales en AdS3 con frontera no conexas usando la prescripción de Ryu y Takayanagi (cálculo holográfico).
- d. Límite para cubrir toda una componente conexas de la frontera y estudio de equivalencia con entropía de Bekenstein- Hawking.
- e. Estudio del mecanismo de entrelazamiento entre componentes disconexas de la teoría de campos en la frontera de AdS3. Propagación de perturbaciones hacia el interior de AdS.
- f. Estudio de posible generalización a dimensiones superiores.

10. HIPÓTESIS *(opcional)*

No hay hipótesis reseñables, más allá de la conjetura de Maldacena.



11. DETALLE DE LOS RESULTADOS ESPERADOS (con relación a los objetivos)

- a. Entropía de entrelazamiento en AdS3/CFT2 para BTZ.
- b. Obtención de extensiones maximales a soluciones en AdS3 con frontera desconexa.
- c. Obtención de la entropía de entrelazamiento en la frontera de soluciones maximales en AdS3 con frontera no conexa usando la prescripción de Ryu y Takayanagi.
- d. Límite sobre el cálculo holográfico de la entropía de entrelazamiento anterior para cubrir toda una componente conexa de la frontera. Se espera que coincida con la entropía de Bekenstein-Hawking.
- e. Obtención de cómo los modos en cada componente conexa de la teoría de campos en la frontera de AdS3 puede entrelazarse entre ellos.
- f. Obtención de posible generalización a dimensiones superiores.

12. PRODUCTOS ESPERADOS

Tipo de Producto:	Marcar con una "X"
a. Disertación a la Comunidad Politécnica (obligatorio);	X
b. Presentación de un artículo en formato de la Revista Politécnica (obligatorio)	X
c. Proyecto de Titulación;	
d. Aplicación tecnológica construida o implementada;	
e. Patente presentada;	
f. Perfil de proyecto de mayor impacto científico, técnico, pedagógico o de innovación.	x
g. Publicaciones científicas indexada en SCIMAGO-SCOPUS/WoS/SCIELO/Latindex Catálogo o un artículo en congreso indexado en SCOPUS.	x

13. IMPACTO DE LA INVESTIGACIÓN (científico, social, económico u otros)

El origen fundamental de la entropía de Bekenstein-Hawking es un problema de importancia capital dentro de la física teórica que aún continúa abierto. Aparte de su interés meramente matemático, cabe notar que entender cómo surge esta entropía nos permitiría entender mejor la dinámica gravitacional a falta de una teoría microscópica de la gravedad que aún no está disponible. Por tanto, el impacto en el conocimiento fundamental de los mecanismos que rigen en el Universo es alto.



14. ESTADO DEL ARTE, E INVESTIGACIONES PREVIAS DEL EQUIPO (máximo tres carillas)

Desde que Maldacena la formulase, la dualidad entre teorías gauge y (super)gravedad en el espacio de anti-de Sitter se ha convertido en una herramienta inestimable para estudiar teorías de campo en regímenes no perturbativos [1]. Actualmente, AdS/CFT y sus aplicaciones son un campo de investigación en sí mismo. Recientemente la descripción holográfica de la entropía de entrelazamiento en teorías de campo conforme ha desatado enorme interés en los últimos años [3,4,5].

Como bien es sabido, la entropía es la magnitud macroscópica asociada a la irreversibilidad en sistemas con muchos grados de libertad. Para teorías de campo, la entropía de entrelazamiento, a temperatura cero, marca cómo de entrelazados están los estados del sistema entre dos regiones disjuntas del espacio. Sin embargo, cuando se tiene una teoría a temperatura finita, la entropía de entrelazamiento de una región del espacio con respecto a otra asume efectos térmicos, con lo que la distinción entre una entropía térmica y una entropía de entrelazamiento no está clara [2]. Además, la entropía de entrelazamiento puede ser entendida desde un punto de vista puramente geométrico en el marco de la correspondencia AdS/CFT [3].

Típicamente, la entropía de Bekenstein-Hawking ha sido entendida como una entropía térmica estrechamente relacionada con la radiación y temperatura de Hawking, de modo que los horizontes de eventos cumplirían las leyes de la termodinámica. Sin embargo, el cálculo propuesto originalmente por Hawking parece indicar que se trata más de una entropía de entrelazamiento con origen en la desconexión causal a ambos lados de un horizonte de eventos. Desde este punto de vista, la entropía de Bekenstein-Hawking tiene una naturaleza plenamente geométrica, hecho que engrana con la descripción geométrica de la entropía de entrelazamiento de Ryu y Takayanagi [4, 5, 6].

15. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL PROYECTO, INCLUIDO METODOLOGÍA (máximo tres carillas)

La entropía de Bekenstein-Hawking es aquella asignada a los horizontes de eventos como consecuencia de la segunda ley de la termodinámica de agujeros negros. Puede calcularse siguiendo un razonamiento heurístico llevando a cabo una rotación de Wick sobre el *near horizon limit*. La variedad resulta así compactificada en un cilindro de signatura Euclídea. Se argumenta entonces que una teoría de campos cercana al horizonte resulta en una teoría de temperatura finita. Esto es, sin embargo, un razonamiento poco riguroso. En cuanto al cálculo de Hawking original, establece una diferencia entre los vacíos cuánticos a ambos lados de un horizonte de eventos. Dado que una teoría cuántica de campos en espacio curvo no ha sido aún formulada, el cálculo de Hawking tampoco es riguroso. Así, la naturaleza de la entropía de un agujero negro no está aún bien entendida. Además, es el origen del principio holográfico de 't Hooft y Susskind, cuya única realización conocida es la correspondencia AdS/CFT de Maldacena.

La entropía de entrelazamiento es aquella que aparece en una teoría de campos cuando una parte del espacio es aislada del observador. Esta entropía puede calcularse para teorías de campo conforme en dos dimensiones siguiendo el *replica trick* de Cardy [2]. En otras situaciones, la entropía de entrelazamiento resulta imposible de calcular analíticamente. No obstante, Ryu y Takayanagi propusieron en [3] una alternativa para calcular la entropía de



entrelazamiento a partir de superficies mínimas en el dual gravitacional, dentro del espacio de anti-de Sitter [4, 5]. En la correspondencia AdS₃/CFT₂ puede comprobarse como la entropía de entrelazamiento ajusta la entropía térmica en el límite a todo el espacio, alcanzando así la entropía de Bekenstein-Hawking del horizonte dentro del espacio de anti-de Sitter [6].

La metodología propuesta consiste en aplicar la herramienta de Ryu y Takayanagi para estudiar si es posible entender la entropía de Bekenstein-Hawking como entropía de entrelazamiento en soluciones maximales con frontera no conexas. Habrá que estudiar, en este caso, si existe un mecanismo que lleve al entrelazamiento de los modos que pertenecen a piezas separadas de la frontera del dual gravitacional. Bastará para ello con llevar a cabo perturbaciones en una pieza conexas de la frontera y ver cómo se ven reflejadas en otras piezas conexas. La teoría dual gravitacional será la que, mediante la dualidad AdS₃/CFT₂, permitirá ver cómo esta perturbación se propaga hacia el interior de AdS y alcanza otras piezas de la frontera. La generalización a dimensiones más altas puede hacerse usando las mismas herramientas holográficas.

Referencias

- [1] J. M. Maldacena, The Large N limit of superconformal field theories and supergravity, Int. J. Theor. Phys. 38 (1999) 1113 [hep-th/9711200].
- [2] J. L. Cardy, O. A. Castro-Alvaredo and B. Doyon, Form factors of branch-point twist fields in quantum integrable models and entanglement entropy, J. Stat. Phys. 130 (2008) 129-168
- [3] S. Ryu and T. Takayanagi, Holographic derivation of entanglement entropy from AdS/CFT, Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 181602, [hep-th/0603001].
- [4] T. Nishioka, S. Ryu and T. Takayanagi, Holographic Entanglement Entropy: An Overview, J. Phys. A42 (2009) 504008.
- [5] S. Ryu and T. Takayanagi, Aspects of Holographic Entanglement Entropy, JHEP 0608 (2006) 045.
- [6] B. Chen and J. Wu, Universal relation between thermal entropy and entanglement entropy in CFT, Phys. Rev. D 91, (2015) 086012 .

16. INFRAESTRUCTURA Y EQUIPOS

No son necesarios equipos o laboratorios por tratarse de un proyecto de fundamentos de física, netamente teórico.



B. DATOS INFORMATIVOS

1. INFORMACIÓN DEL DIRECTOR, COLABORADORES Y COLABORADORES TÉCNICOS

Apellidos y nombres	No. de Cédula	HSS*	Departamento	Rol	Título de mayor nivel y mención.
Álvaro Dueñas Vidal	1757278948	8	Física	Director	PhD. en Física fundamental y matemáticas.

C. DECLARACIÓN FINAL DECLARACIÓN DEL DIRECTOR DEL PROYECTO

El equipo de investigadores, representado por el Director del Proyecto declara lo siguiente:

- Que el presente proyecto es una creación original de mi autoría y del equipo de investigadores, y por tanto asumimos la completa responsabilidad legal en caso de que un tercero alegue la titularidad de los derechos intelectuales del proyecto, exonerando a la EPN de cualquier acción legal que se derive por esta causa.
- Que el presente proyecto no ha sido presentado en ninguna convocatoria de otra institución pública o privada. El incumplimiento será causal para que el proyecto no sea tomado en consideración.
- Que si el proyecto genera algún producto o procedimiento susceptible de obtener derechos de propiedad intelectual, de los cuales se deriven beneficios, aceptamos que éstos serán compartidos entre los investigadores y la institución o las instituciones participantes en el proyecto, conforme a lo establecido en el COESC.
- Que el equipo de investigadores y/o instituciones participantes se comprometen a mantener la confidencialidad de la información si ésta podría ser susceptible de protección por patentes, y solicitar la valoración de propiedad intelectual respectiva previa a cualquier publicación o difusión.
- Que para el caso de derechos de autor otorgamos una licencia de uso exclusivo con fines académicos para la o las instituciones participantes en el proyecto.
- Que aceptamos conocer y cumplir con la normativa vigente para la gestión de proyectos.

Firma del Director del Proyecto
Nombre: Álvaro Dueñas Vidal
C.I.: 1757278948



D. AVAL DEL JEFE DE DEPARTAMENTO

Esta propuesta ha sido recibida y avalada por el Jefe del Departamento de Física el día 20 de octubre de 2020.

Las instalaciones, incluyendo personal, edificios, equipo y recursos financieros están a disposición del proponente y sus colaboradores de acuerdo con las especificaciones que se encuentran en esta propuesta.

Firma del Jefe del Departamento (s)

Nombre: Dr. César Costa Vera

C.I.: 1102550801



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y VINCULACIÓN
Proyecto de Investigación Interno
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES DEL PROYECTO



Título del Proyecto:

Black hole entropy and entanglement entropy in the framework of the AdS/CFT correspondence

		AÑO 1																																																										
Nº	Actividad	Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4				Mes 5				Mes 6				Mes 7				Mes 8				Mes 9				Mes 10				Mes 11				Mes 12														
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4											
1	Estudiar la entropía de entrelazamiento en AdS3/CFT2 para la solución BTZ.																																																											
1.1	Escritura de notas preliminares: cálculo de entropía de entrelazamiento en CFT2 usando replica trick.	■	■	■																																																								
1.2	Entropía de entrelazamiento en AdS3/CFT2 BTZ usando la técnica de Ryu-Takayanagi					■	■	■																																																				
2	Estudio de extensiones maximales a soluciones en AdS3 con frontera disconexa									■	■	■	■	■	■	■																																												
2.1	Extensión de la solución BTZ							■	■	■	■																																																	
2.2	Estudio de la frontera conforme de l solución BTZ extendida.											■	■	■	■																																													
3	Cálculo de entropía de entrelazamiento en la frontera de soluciones maximales en AdS3 con frontera no conexa usando la prescripción de Ryu y Takayanagi (cálculo holográfico).														■	■	■	■	■	■																																								
3.1	Cálculo de hipersuperficies mínimas en AdS.																■	■																																										
3.2	Cálculo de Ryu y Takayanagi para las soluciones propuestas en el objetivo 2. Limite para cubrir toda una componente conexa de la frontera y estudio de equivalencia con entropía de Bekenstein- Hawking.																			■	■	■	■																																					
4	Estudio de entropía de entrelazamiento en la frontera de soluciones maximales en AdS3 con frontera no conexa usando la prescripción de Ryu y Takayanagi (cálculo holográfico).																							■	■	■	■																																	
4.1	Límite a toda una componente conexa de la frontera																																																											
4.2	Entropía de Bekestein-Hawking de la solución propuesta en 2.																																																											
5	Estudio del mecanismo de entrelazamiento entre componentes disconexas de la teoría de campos en la frontera de AdS3.																																																											
5.1	Propagación de perturbaciones en la frontera hacia el interior de AdS.																																																											
6	Estudio de posible generalización a dimensiones superiores.																																																											
6.1	Estudio de generalización para la extensión de Kruskal de Schwarzschild en AdS4.																																																											
7	Escritura de artículo.																																																											
7.1	Escritura de notas finales y artículo.																																																											
7.2	Trámites de publicación.																																																											

Firma del Director del Proyecto
 Nombre del Director del proyecto.
 Álvaro Dueñas Vidal