

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN SOCIAL
Dirección de Investigación y Proyección Social

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Proyecto Interno Proyecto Semilla Proyecto Junior Proyecto Multi e Inter Disciplinario

Investigación Básica Investigación Aplicada Investigación Pedagógica Innovación

DEPARTAMENTO(S):

1. Departamento de Física

2.

LINEA(S) DE INVESTIGACIÓN:

1. Física Fundamental

2.

FUNDAMENTOS DE FÍSICA

1 Proyecto de Investigación

Título: Entanglement entropy for strongly coupled systems from AdS/CFT and the renormalization group flow

Resumen del proyecto

El proyecto que aquí se expone plantea el estudio de la entropía de entrelazamiento en teorías cuánticas de campo a temperatura finita y régimen no perturbativo a través de la dualidad AdS/CFT. En particular, se espera obtener cómo esta entropía holográfica evoluciona con el flujo del grupo de renormalización para establecer así propiedades que ayuden a entender cómo la irreversibilidad macroscópica surge en sistemas cuánticos a partir de una aparente reversibilidad microscópica de la teoría. Para ello se hará uso de las herramientas que brinda la dualidad gauge/gravedad recogidas en la conjetura AdS/CFT de Maldacena.

Aunque se han elaborado algunos estudios acerca del origen de la irreversibilidad en teorías de campos cuánticos a temperatura finita, el problema está lejos de ser resuelto. En este contexto, se espera usar las propiedades de entrelazamiento para obtener relaciones entre la entropía de entrelazamiento y la entropía térmica, que dependerán de la escala de energía en la que trabajemos.

Palabras clave (4-6): Holography, AdS/CFT, Entanglement Entropy.

2

Objetivos, relevancia, productos y resultados esperados de esta propuesta de investigación

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo General

- Estudiar las propiedades de la entropía de entrelazamiento en teorías de campo fuertemente acopladas a temperatura finita en régimen no perturbativo, y cómo estas se relacionan con la entropía térmica.

2.1.2 Objetivos Específicos

- a. Estudiar qué correcciones se obtienen a la entropía de entrelazamiento cuando se hacen cambios en la geometrías dual en base al principio holográfico. Se espera lograr en este sentido contribuciones no triviales para teorías de campo no conformes que no han sido tenidas en cuenta.
- b. Estudiar cómo se ven generalizadas las propiedades de la entropía de entrelazamiento cuando se incluyen las correcciones anteriores mencionadas. Se espera que haya cambios apreciables que revelarían una relación más profunda entre entropía de entrelazamiento y entropía térmica.
- c. Analizar la evolución, bajo el flujo de renormalización, de la entropía de entrelazamiento y sus correcciones. Esto es, apuntar a cómo surge la irreversibilidad microscópica de la teoría cuando se hacen modelos no conformes.
- d. Establecer posibles relaciones de desigualdad entre la entropía de entrelazamiento y la entropía térmica en teorías de campo no conformes.

2.2 Detalle de los resultados esperados (con relación a los objetivos)

Es de destacar que en física teórica de vanguardia los resultados de la investigación se miden a través de publicaciones en revistas especializadas de alto nivel. Los objetivos específicos se cumplen a través de actividades de cálculo o demostración. Los resultados esperados con relación a los objetivos, son expresiones matemáticas, conjeturas, teoremas, lemas, corolarios, etc, muy importantes dentro del marco del proyecto, y que se pueden publicar cuando se llega al final del proyecto. Esto es, no pueden ser resultados esperados bases o conjuntos de datos, medidas, software, etc, aunque se espera que en un futuro muy lejano se puedan llevar a cabo experimentos que ratifiquen los resultados netamente teóricos. De forma similar que las ecuaciones de Einstein fueron un resultado de principios del siglo XX, y una de sus predicciones, las ondas gravitacionales, no se comprobaron hasta hace un par de años, se espera que la dualidad Ads/CFT en el marco de teoría de cuerdas se pueda verificar en un futuro distante. De la misma manera, tampoco pueden ser resultados trabajos de titulación en un proyecto de investigación de este calado, ya que queda muy por encima del nivel de grado, e incluso de postgrado, cualquiera de las tareas que se van a llevar a cabo durante el proyecto. Así, en relación a los objetivos, los resultados esperados son:

- a. Cálculo explícito y resultado para las correcciones a la entropía de entrelazamiento para distintos tipos de geometrías obtenidas a partir de modificaciones sencillas del dual gravitacional.
- b. Propiedades de la entropía de entrelazamiento cuando se incluyen correcciones no triviales por la pérdida de simetría conforme.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN SOCIAL
 Dirección de Investigación y Proyección Social

	<p>c. Ecuaciones de evolución y comportamiento con el flujo del grupo de renormalización de la entropía de entrelazamiento y sus correcciones en los límites UV e IR.</p> <p>d. Relaciones para una posible cota a las correcciones de la entropía de entrelazamiento y la entropía térmica.</p>														
3	<p>Relevancia de la propuesta de investigación y su relación con la(s) líneas de investigación</p>														
	<p>Desde que Maldacena la formulase, la dualidad entre teorías gauge y (super)gravedad en el espacio de anti-de Sitter, ésta 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. La relevancia del campo queda patente simplemente señalando que, a día de hoy, el artículo original de Maldacena es el segundo más citado de la historia de la física teórica. Enmarca, además, dentro de la línea de investigación en Física Fundamental del Departamento de Física, ya que la conjetura Maldacena arroja luz sobre cómo la dinámica gravitacional puede codificarse en términos de una teoría de campos cuántica.</p> <p>Como bien es sabido, la entropía es la magnitud macroscópica asociada a la irreversibilidad en sistemas con muchos grados de libertad. Siendo una magnitud emergente de grandes números, a día de hoy no se tiene claro cuál podría ser su origen microscópico. En particular, en desarrollos perturbativos de teorías cuánticas de campos, todos los fenómenos son reversibles en el tiempo (esto es, los diagramas de Feynman pueden “leerse” tanto hacia el futuro como hacia el pasado). Por tanto, no queda claro cómo es posible que la dinámica de una teoría de campos a temperatura finita sea irreversible. Todo parece indicar que en teoría cuántica de campos la irreversibilidad podría ser un fenómeno no perturbativo. En los últimos años han aparecido algunos avances en este sentido, en particular el trabajo seminal de Ryu y Takayanagi [2], donde se introduce la entropía holográfica de entrelazamiento, o los famosos teoremas a, b y c [5,6,7]. Estudiar cómo evoluciona la entropía holográfica con el flujo de renormalización puede ayudar a entender qué ocurre.</p> <p>El origen de la irreversibilidad es un problema de importancia capital dentro de la física teórica que aún continúa abierto. Aparte de su interés fundamental, cabe notar que entender cómo surge la irreversibilidad en teorías cuánticas de campo es de relevancia para comprender cómo y por qué el Universo evoluciona en una única dirección en sus etapas tempranas. Por tanto, la relevancia del proyecto propuesto es alta. Asimismo, este proyecto forma parte de una idea aún más ambiciosa, la de arrojar algo de luz sobre la relación entre geometría y cuántica. En este sentido, hay que recalcar que los esfuerzos para avanzar hacia una teoría cuántica de la gravedad han sido enormes, y han dado lugar a cantidad de trabajos, marcando este área como de gran relevancia dentro del contexto internacional.</p>														
4	<p>Productos esperados</p>														
	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 80%;">a. Publicaciones científicas (obligatorio);</td> <td style="text-align: right; width: 20%;">1</td> </tr> <tr> <td>b. Disertación a la Comunidad Politécnica;</td> <td style="text-align: right;">2</td> </tr> <tr> <td>c. Proyecto de Titulación;</td> <td style="text-align: right;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>d. Tesis de Grado (maestría o doctorado);</td> <td style="text-align: right;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>e. Aplicación tecnológica construida o implementada;</td> <td style="text-align: right;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>f. Patente presentada;</td> <td style="text-align: right;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>g. Perfil de proyecto de mayor impacto científico, técnico, pedagógico o de innovación.</td> <td></td> </tr> </table>	a. Publicaciones científicas (obligatorio);	1	b. Disertación a la Comunidad Politécnica;	2	c. Proyecto de Titulación;	<input type="checkbox"/>	d. Tesis de Grado (maestría o doctorado);	<input type="checkbox"/>	e. Aplicación tecnológica construida o implementada;	<input type="checkbox"/>	f. Patente presentada;	<input type="checkbox"/>	g. Perfil de proyecto de mayor impacto científico, técnico, pedagógico o de innovación.	
a. Publicaciones científicas (obligatorio);	1														
b. Disertación a la Comunidad Politécnica;	2														
c. Proyecto de Titulación;	<input type="checkbox"/>														
d. Tesis de Grado (maestría o doctorado);	<input type="checkbox"/>														
e. Aplicación tecnológica construida o implementada;	<input type="checkbox"/>														
f. Patente presentada;	<input type="checkbox"/>														
g. Perfil de proyecto de mayor impacto científico, técnico, pedagógico o de innovación.															

5	<p>Descripción y metodología y diseño del proyecto</p> <p>5.1 Descripción, metodología y diseño del proyecto</p> <p>La entropía de entrelazamiento cuántico se estudia en varios contextos. En particular puede calcularse para teorías de campo bajo determinadas condiciones, definida como la entropía de Von Neumann cuando se promedia sobre grados de libertad no disponibles para el observador. A diferencia de las funciones de correlación, la entropía de entrelazamiento en una teoría de campos es una cantidad no local. En este sentido, es una herramienta eficaz en el estudio no perturbativo de aquellas teorías de campo que son fuertemente acopladas.</p> <p>La entropía de entrelazamiento para teorías de campos es realmente difícil de calcular. Algunos trabajos han conseguido fijarla para teorías conformes en 2 dimensiones, mostrando una proporcionalidad con la carga central de la teoría [3]. También se ha estudiado con dificultad para teorías conformes perturbadas dotándolas de masa, igualmente en 2 dimensiones [4]. Para dimensiones por encima de 2 el cómputo se vuelve extremadamente complicado, incluso para teorías libres. En este contexto, en [2] se propuso hacer uso de la teoría dual gravitatoria para hacer el cálculo de la entropía de entrelazamiento, partiendo de la conexión que brinda la conjetura AdS/CFT [1]. Surge así una concepción geométrica de la entropía de entrelazamiento que en cierta forma revela cómo la geometría de una región espacio-temporal puede codificar información de una teoría de campos cuánticos en su frontera.</p> <p>Cuando se cuantiza una teoría, aparece el concepto de flujo del grupo de renormalización [8,9], que en términos generales determina la evolución de los parámetros de acoplo (cargas) de la teoría con respecto a la escala de energía. El flujo del grupo de renormalización nos permite estudiar una teoría de campo a distintas escalas , por lo que es una herramienta fundamental para estudiar el comportamiento de un grupo paramétrico de teorías a distintas escalas, permitiéndonos determinar una dirección de evolución en la energía.</p> <p>En fenómenos microscópicos no existe una dirección de evolución, por lo que los procesos son reversibles. Por otro lado, existen resultados [10,11,12] que demuestran que hay cantidades que son monótonas bajo el flujo del grupo de renormalización, lo que indica la existencia de un tipo de irreversibilidad, incluso a a nivel microscópico. En este contexto, estudiar la evolución de una cantidad apropiada bajo el flujo de renormalización es una de las formas de acercarse al problema. En este sentido, la entropía de entrelazamiento presenta algunas propiedades de monotonidad bajo el flujo del grupo de renormalización [11], correspondiéndose en el límite IR con la entropía térmica [13]. Además, como se ha mencionado, es alcanzable usando la prescripción holográfica.</p> <p>Existen varias propiedades de la entropía de entrelazamiento que ya son conocidas. En particular, en este proyecto estamos interesados aquellas propiedades que se satisfacen en cualquier teoría de campos, por un lado, y por otro lado aquellas propiedades de una teoría holográfica en particular (esto es, con dual gravitacional). Las primeras nos dan algunas pistas acerca de cómo la Super Gravedad codifica algunas propiedades de la información en la geometría del espacio-tiempo. Las otras, partiendo de la entropía de entrelazamiento, nos ayudan a aprender más acerca de la conexión entre una teoría de campos y su dual gravitacional [14] .</p> <p>Estrictamente hablando, la conjetura de Maldacena conecta la dinámica gravitatoria en el espacio de anti de Sitter (AdS) con (Super) Yang Mills en su frontera. El grupo de isometrías de AdS se manifiesta como grupo de simetrías de la teoría de campos en la frontera. Así, la teoría de campos en la frontera es, obligatoriamente, conforme. Sin embargo, ninguna de las teorías de campos del modelo estándar es conforme. Para poder hacer modelos más cercanos a la realidad es necesario “cortar” y modificar la geometría del dual gravitacional. Nosotros, en este marco, pretendemos obtener correcciones no triviales a la entropía de entrelazamiento procedentes de cambios en la geometría, analizar su evolución con el flujo de renormalización, encontrar las propiedades que se</p>
----------	--

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN SOCIAL
Dirección de Investigación y Proyección Social

satisfacen, y ver su comparativa con la entropía térmica. Todos estos puntos son nuevos y se sitúan en la vanguardia actual de la física de altas energías.

Podemos dividir la metodología en cuatro etapas. En la primera, el objetivo sería, a partir de modificaciones sencillas del dual gravitacional, encontrar las correcciones a la entropía de entrelazamiento en la teoría de campos de la frontera correspondientes a cambios en el grupo de simetría. Esto se haría usando la prescripción holográfica para calcular la entropía de entrelazamiento propuesta en [2]. Una segunda etapa consistiría en analizar los cambios en las propiedades de la entropía de entrelazamiento de una teoría conforme, establecidas en [5,6,7,10], al introducir las nuevas contribuciones procedentes de la ruptura de la simetría. En la tercera, se analizaría cómo los nuevos términos evolucionan con el flujo del grupo de renormalización, lo que nos permitirá establecer qué ocurre con la monoticidad de la entropía cuando se introducen correcciones, de la teoría. Finalmente, en la etapa cuatro se verán las cotas matemáticas que cumpla la entropía de entrelazamiento, una vez introducidas las correcciones, respecto de la entropía térmica.

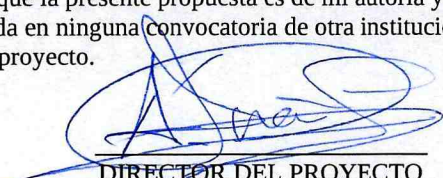
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN SOCIAL
Dirección de Investigación y Proyección Social

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] S. Ryu and T. Takayanagi, Holographic derivation of entanglement entropy from AdS/CFT, Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 181602, [hep-th/0603001].
- [3] C. Holzhey, F. Larsen and F. Wilczek, Geometric and renormalized entropy in conformal field theory, Nucl. Phys. B 44 (1994) 443 [arXiv: hep-th/9403108].
- [4] P. Calabrese and J. Cardy, Entanglement entropy and quantum field theory, J. Stat. Mech. 0406 (2004) P002. [arXiv: hep-th/0405152].
- [5] A.B. Zamolodchikov, Irreversibility of the Flux of the Renormalization Group in a 2D Field Theory, JETP Lett. 43, (1986), 730–732.
- [6] Casini, H, and Marina Huerta, On the RG Running of the Entanglement Entropy of a Circle,” Phys.Rev. D85, (2012) 125016, [1202.5650 [hep-th]]
- [7] Casini, Horacio, Eduardo Testé, and Gonzalo Torroba, Markov Property of the Conformal Field Theory Vacuum and the a-Theorem,” Phys. Rev. Lett.118 (26), (2017a), 261602, [1704.01870 [hep-th]]
- [8] C. Bagnuls and C. Bervillier, Exact renormalization group equations. An Introductory review, Phys. Rept. 348 (2001) 91, [hep-th/0002034].
- [9] J. de Boer, E.P. Verlinde and H.L. Verlinde, On the holographic renormalization group, JHEP 0008 (2000) 003, [hep-th/9912012].
- [10] C. Park, D. Ro and J. Hun Lee, c-theorem of the entanglement entropy, JHEP 1811 (2018) 165, [1806.09072 [hep-th]].
- [11] T. Nishioka, Entanglement entropy: holography and renormalization group, Rev. Mod. Phys. 90 (2018) no.3, 035007, [arXiv:1801.10352 [hep-th]].
- [12] G. M. Shore, The c and a-theorems and the Local Renormalisation Group, [1601.06662 [hep-th]].
- [13] K. S. Kim and C. Park, Renormalization group flow of entanglement entropy to thermal entropy, Phys. Rev. D 95 (2017) no.10, 106007, [arXiv:1610.07266 [hep-th]].
- [14] M. Headrick, General properties of holographic entanglement entropy, JHEP 1403 (2014) 085 [arXiv:1312.6717 [hep-th]].

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN SOCIAL
 Dirección de Investigación y Proyección Social

6	<p>Tiempo de dedicación de docentes, infraestructura, equipos y fondos adicionales.</p> <p>6.1 Tiempo máximo de dedicación semestral del Director del proyecto, de los docentes participantes y otros colaboradores. <i>El tiempo de dedicación máximo será de acuerdo al tipo de proyecto:</i></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Proyecto</th> <th style="text-align: center;">Director</th> <th style="text-align: center;">Colaboradores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">PII y PIS</td> <td style="text-align: center;">16 HSS</td> <td style="text-align: center;">8 HSS</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">PIJ y PIMI</td> <td style="text-align: center;">20 HSS</td> <td style="text-align: center;">10 HSS</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Nombre</th> <th style="text-align: center;">Rol (director o colaborador)</th> <th style="text-align: center;">Horas de dedicación</th> <th style="text-align: center;">Departamento</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">Álvaro Dueñas Vidal, PhD</td> <td style="text-align: center;">Director</td> <td style="text-align: center;">12</td> <td style="text-align: center;">Departamento de Física</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Óscar Lasso Andino, PhD</td> <td style="text-align: center;">Colaborador externo</td> <td style="text-align: center;">8</td> <td style="text-align: center;">Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas, UDLA</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table> <p>6.2 Infraestructura y equipos <i>No son necesarios</i></p> <p>6.3 Breve justificación del equipo requerido</p> <p>6.4 Fondos Adicionales</p> <p>6.5 Fecha inicio y fin: Fecha inicio: 1 Abril 2019. Fecha finalización: 30 Marzo 2020</p>	Proyecto	Director	Colaboradores	PII y PIS	16 HSS	8 HSS	PIJ y PIMI	20 HSS	10 HSS	Nombre	Rol (director o colaborador)	Horas de dedicación	Departamento	Álvaro Dueñas Vidal, PhD	Director	12	Departamento de Física	Óscar Lasso Andino, PhD	Colaborador externo	8	Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas, UDLA				
Proyecto	Director	Colaboradores																								
PII y PIS	16 HSS	8 HSS																								
PIJ y PIMI	20 HSS	10 HSS																								
Nombre	Rol (director o colaborador)	Horas de dedicación	Departamento																							
Álvaro Dueñas Vidal, PhD	Director	12	Departamento de Física																							
Óscar Lasso Andino, PhD	Colaborador externo	8	Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas, UDLA																							

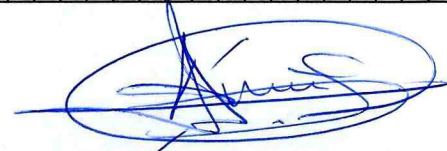
7	<p>Declaración del Director del Proyecto</p> <p>Declaro que la presente propuesta es de mi autoría y de los colaboradores mencionados y que no ha sido presentada en ninguna convocatoria de otra institución pública o privada solicitando el financiamiento total del proyecto.</p> <div style="text-align: center;">  DIRECTOR DEL PROYECTO Nombre: PhD. Álvaro Dueñas Vidal CC: 1757278948 </div> <p style="text-align: right;">Quito, 7 de Marzo de 2019</p>
----------	--

8	<p style="text-align: center;">DECLARACIÓN DEL JEFE DE DEPARTAMENTO</p> <p>Esta propuesta ha sido aprobada por el Consejo del Departamento de <i>Física</i>, en sesión del día ... <i>11 de abril de 2019</i> ... mediante resolución No. ... <i>2</i> ... 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.</p> <div style="text-align: center;">  JEFE DEL DEPARTAMENTO Nombre: PhD. César Costa Vera CC: </div> <div style="text-align: right;">  Quito, <i>11</i> de <i>abril</i> de 2019 </div>
----------	---

Título del Proyecto:

Entanglement entropy for strongly coupled systems from AdS/CFT and the renormalization group flux

		AÑO 1																																																			
N°	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	Documentación/trabajo bibliográfico	■	■	■	■																																																
2	Escritura notas preliminares									■	■	■	■																																								
3	Correcciones geométricas a la entropía de entrelazamiento													■	■	■	■																																				
4	Propiedades de la entropía holográfica con correcciones																	■	■	■	■																																
5	Evolución con el flujo del grupo de renormalización																					■	■	■	■																												
6	Relación entre entropía holográfica y entropía térmica																									■	■	■	■																								
7	Análisis de resultados																													■	■	■	■																				
8	Escritura texto artículo																																	■	■	■	■																
9	Trámites de publicación																																									■	■	■	■								
10																																																					



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