

**XXX CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E
TECNOLÓGICA DA UFRN - eCICT 2019**

30° eCICT

ANAIS

Ciências Exatas, da Terra e Engenharias

EXPEDIENTE

APRESENTAÇÃO

O Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica (eCICT) é um evento aberto à comunidade no qual todos os aproximadamente 1.500 alunos de Iniciação Científica e Tecnológica da UFRN (bolsistas e voluntários) apresentam os resultados de suas pesquisas desenvolvidas ao longo de um ano, como cumprimento de um plano de trabalho elaborado e orientado por um professor/pesquisador do quadro permanente da Instituição.

O eCICT está entre as ações inseridas no âmbito do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica e Tecnológica da UFRN, que possui entre seus objetivos: a) Contribuir para a formação e engajamento de recursos humanos em atividades de pesquisa, desenvolvimento tecnológico e inovação; b) Contribuir para a formação científica de recursos humanos que se dedicarão a qualquer atividade profissional; e c) Contribuir para a formação de recursos humanos que se dedicarão ao fortalecimento da capacidade inovadora das empresas no País. Em 2019, a Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade Federal do Rio Grande do Norte realizou a 30ª edição do Congresso, abarcando uma etapa inicial digital seguida de uma etapa presencial, no formato de apresentações em Sessões de Apresentações Orais. Na fase inicial (Online), as apresentações dos trabalhos pelos discentes se deram na forma de arquivos digitais (trabalho completo e vídeo) submetidos via Sistemas da UFRN e disponibilizados amplamente para visitantes do site do evento (www.cic.propesq.ufrn.br), avaliadores da UFRN e comitê externo PIBIC-CNPq. Durante a fase presencial do evento, os 90 melhores trabalhos, selecionados a partir da etapa anterior, seguiram para as apresentações orais.

A 30ª edição do Congresso teve como tema “Bioeconomia: Diversidade e Riqueza para o Desenvolvimento Sustentável”, estando alinhada aos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da ONU. Ao submeter os trabalhos ao Congresso, os alunos indicaram os objetivos da Agenda 2030 aos quais suas pesquisas estavam relacionadas. Essa iniciativa visa estimular a pesquisa científica e tecnológica voltada para a busca por soluções para os desafios sociais contemporâneos.

O evento cumpriu três funções valiosas para o desenvolvimento da ciência na instituição: inserção dos discentes em um ambiente acadêmico de publicação e apresentação dos resultados da pesquisa; divulgação científica por meio dos vídeos que utilizam uma linguagem científica, porém acessível a todos; e, por fim, a popularização da ciência.

Os alunos concorreram ao 3ª Prêmio Destaque na Iniciação Científica e Tecnológica da UFRN, que foi instituído pela Pró-Reitoria de Pesquisa em 2017 para reforçar as ações dos programas institucionais de iniciação científica e tecnológica. O prêmio contemplou duas categorias: Trabalho Destaque de Iniciação Científica e Tecnológica e Vídeo Destaque de Divulgação Científica. Os premiados foram contemplados com bolsas mensais de até R\$ 800,00 (oitocentos reais) durante o período de um ano. Os orientadores dos alunos premiados adquiriram precedência em relação aos demais para efeitos de concorrência no Edital de Bolsas de Pesquisa da UFRN em 2020.

Em 2019, a Pró-Reitoria de Pesquisa instituiu o Prêmio Pesquisador Destaque da UFRN, com o objetivo premiar os pesquisadores da instituição que tenham apresentado relevantes contribuições para o desenvolvimento da ciência em cada uma das três grandes áreas do conhecimento: Ciências da Vida; Ciências Exatas, da Terra e Engenharias; e Ciências Humanas e Sociais, Letras e Artes. Foram escolhidos 03 pesquisadores, um em cada grande área do conhecimento. Todos os premiados receberão auxílio no valor de R\$ 5.000,00 (cinco mil reais) para custear passagens aéreas, diárias ou taxa de inscrição para apresentar trabalho em evento científico, certificado de premiação e troféu.

Os pesquisadores premiados participam na condição de conferencista do XXX Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica, apresentando a contribuição científica oriunda de sua pesquisa.

SUMÁRIO

PROGRAMAÇÃO	6
INSTITUTO INTERNACIONAL DE FÍSICA	7

PROGRAMAÇÃO

SETEMBRO

16 a 20/09 Fase Online do eCICT 2019

OUTUBRO

11/10 Divulgação dos selecionados para apresentação na Fase Presencial

21 a 25/10 Fase Presencial do eCICT 2019

21/10 Credenciamento

21/10 Palestra de Abertura

22 a 24/10 Sessões de Apresentações Orais

22 a 24/10 Palestras de Pesquisadores Destaques da UFRN

25/10 Solenidade de Encerramento e Premiação

INSTITUTO INTERNACIONAL DE FÍSICA

CÓDIGO: ET0689

AUTOR: JOAO VICTOR FERREIRA LACERDA AIRES

ORIENTADOR: DMITRY MELNIKOV

TÍTULO: Métodos topológicos em computação quântica

Resumo

Nas últimas décadas as relações entre topologia e física ficaram mais estreitas. Isto se deu pois foi notado que a teoria quântica tem relações com a topologia. Pappers fundamentais no assunto foram os de Witten(1989) e Jones(1987). Neste projeto buscamos encontrar uma representação em termos de teoria topológica para um estado emaranhado e para isto foram estudados conceitos de TQFT (Topological Quantum Field Theory) e Entropia de Emaranhamento de von-Neumann, que tem aplicação em outras áreas da física como a Computação Quântica (da qual alguns algoritmos foram estudados como, por exemplo: Three Qutrit Code and Teleportation Algorithm).

Palavras-chave: TQFT; Métodos topológicos; Cobordismo

TITLE: Topological Methods in Quantum Computation

Abstract

In the last few decades the relationship between topology and physics became more closer. This happens because was notice that quantum theory have significant relation with topology. The fundamental pappers in the topic are Witten(1989) and Jones(1987). In this project we try to find a representation in terms of topological theory to a entangled state and to do this we study concepts of TQFT (Topological Quantum Field Theory) and von-Neumann's Entanglement Entropy, that have application to other fields of physics like Quantum Computation (of which we study some algorithms, for example: Three Qutrit Code and Teleportation Algorithm).

Keywords: TQFT; Topological methods; Cobordism

Introdução

TQFT é um mapeamento entre duas Categorias de forma que os objetos de uma Categoria são mapeados em objetos da outra Categoria, assim como os Morfismos de uma Categoria são mapeados em Morfismos na outra categoria. Se supormos que TQFT realiza o mapeamento da Categoria dos Cobordismos para a Categoria dos Espaços Lineares conseguimos associar um Cobordismo a um estado no espaço de Hilbert. Por causa da relação explicada no parágrafo anterior, conseguimos realizar cálculos com os estados de uma maneira mais visual. Um exemplo disto são os cálculos envolvendo a Entropia de Emaranhamento de von-Neumann. Durante o projeto mostramos como podemos representar um estado emaranhado e realizar um cálculo simples utilizando a Entropia de von-Neumann e artifícios matemáticos como Replica Trick e o Analytic Continuation Method para provar que um determinado estado (representado como Cobordismo) está emaranhado. Uma aplicação para os cálculos envolvendo Cobordismos se encontra na computação quântica. Alguns algoritmos como, por exemplo, o Three Qutrit Code e o Quantum Teleportation Algorithm utilizam

estados emaranhados e uma das propostas para estudos futuros é a elaboração destes algoritmos em termos de teorias topológicas.

Metodologia

Inicialmente foi realizado um estudo teórico sobre Qubits que são, na computação quântica, análogos aos bits da computação tradicional. Um Qubit $|\psi\rangle$ é um vetor no espaço de Hilbert bidimensional e pode ser representado como uma superposição dos estados $|0\rangle$ e $|1\rangle$ de forma que $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ onde α e β são tais que $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Outro elemento de computação quântica estudado foram os Qutrits. Um Qutrit é análogo ao Qubit mas no espaço de Hilbert tridimensional de forma que um Qutrit $|\phi\rangle$ é representado como superposição dos estados $|0\rangle$, $|1\rangle$ e $|2\rangle$ de forma que $|\phi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle + \gamma|2\rangle$ e onde $|\alpha|^2 + |\beta|^2 + |\gamma|^2 = 1$. Também foi estudado alguns gates (operações) básicos de circuitos quânticos como, por exemplo: NOT, Hadamard e CNOT. Já tendo uma ideia de como se realizam as operações com Qubits e Qutrits, foi estudado dois algoritmos quânticos: o Three Qutrit Code e o Teleportation Algorithm. O Three Qutrit Code é um algoritmo quântico de correção de erros que se baseia em “criptografar” o estado que se deseja mandar fazendo um produto com um estado emaranhado que, como um exemplo mais simples, foi utilizado um estado de Bell e aplicando uma matriz unitária em dois dos Qubits do estado gerado pelo produto. Deste modo mesmo que alguma informação do estado produzido seja perdida quando mandada, conseguimos recuperar o produto do estado que queríamos mandar com o estado de Bell aplicando a operação unitária inversa e assim conseguimos mandar o estado original sem perder informação durante o processo. Enquanto que o Teleportation Algorithm se baseia em fazer o produto de um estado desconhecido $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ com um estado emaranhado $|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$ (novamente usamos o exemplo mais simples que é um estado de Bell) e depois aplicar os gates CNOT e Hadamard (este aplicado no primeiro qutrit), respectivamente, no estado produto, obtendo $H \otimes CNOT \otimes I |\phi\rangle \otimes |\Psi\rangle = \frac{1}{2}(|00\rangle \otimes (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \otimes (|0\rangle + |1\rangle) + |01\rangle \otimes (\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle) \otimes (|0\rangle + |1\rangle) + |10\rangle \otimes (\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle) \otimes (|0\rangle - |1\rangle) + |11\rangle \otimes (\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle) \otimes (|0\rangle - |1\rangle)$. Feito isto manda-se o estado resultante de todo o processo para outra pessoa e a pessoa que mandou realiza a medição dos dois primeiros Qubits deste estado resultante e então envia o resultado da medição para a outra pessoa. Esta outra pessoa precisa somente aplicar uma transformação unitária no termo em parênteses para recuperar o estado original. O próximo item estudado foi a entropia de emaranhamento que, basicamente, nos dá uma medida do quanto que sistemas quânticos estão emaranhados. Para estudar a entropia precisamos do conceito de Matriz de Densidade (ρ). A Matriz de Densidade é definida como $\rho \equiv \sum_i p_i |\psi_i\rangle \langle \psi_i|$ onde o estado $|\psi_i\rangle$ possui probabilidade p_i e é um dos estados em que o sistema está definido. Assim podemos definir a entropia de emaranhamento de von-Neumann de todo o sistema como $S(\rho) \equiv -\text{Tr}(\rho \log \rho)$. No entanto se pudermos dividir o sistema em dois subsistemas A e B (ou seja, o espaço de Hilbert total puder ser escrito como produto dos espaços de Hilbert de A e de B) podemos calcular a entropia de emaranhamento para cada um dos subsistemas usando (para o caso que queremos calcular a entropia de emaranhamento do subsistema A) $S_A = -\text{Tr}_A \left(\rho_A \log \rho_A \right)$ onde $\rho_A = \text{Tr}_B \rho$, (ρ) onde ρ é a matriz densidade total do sistema e ρ_A é a matriz de densidade do subsistema A. Por

fim foi estudado Categorias que são objetos matemáticos que são formados por Objetos e os Morfismos entre os Objetos da Categoria. Outro objeto matemático estudado foi o Functor, que é um mapeamento entre duas Categorias, de modo que se A e B são objetos em uma determinada Categoria e que são relacionados por um morfismo, então um Functor associa A e B à objetos C e D, respectivamente, em outra categoria e de modo que associa o morfismo entre A e B à um morfismo entre C e D nesta outra Categoria. Foi visto que TQFT é um Functor entre a Categoria dos Cobordismos (que tem os Objetos como sendo espaços topológicos d-dimensionais orientados e possui Morfismos como sendo superfícies (d+1) – dimensionais com fronteira sendo espaços d-dimensionais) e a Categoria dos Espaços lineares e, como implicação disto, conseguimos representar um vetor no espaço de Hilbert como um cobordismo. Deste modo conseguimos representar $\lvert \psi \rangle$ como sendo um cobordismo com fronteira orientada no sentido oposto à fronteira de $\langle \psi \rvert$ de modo que $\langle \psi \rvert \psi \rangle$ é representado como uma superfície sem fronteiras orientáveis (escalar) que pode ser obtido “colando” as duas fronteiras de sentidos opostos. Desta maneira conseguimos facilitar o modo como realizamos os cálculos com estados. No caso considerado no projeto, consideramos duas candidatas a estado emaranhado e calculamos a entropia de von-Neumann usando cobordismos para saber qual era a representação correta. Como referência para este cálculo foi utilizado [11].

Resultados e Discussões

Após supormos duas possíveis representações (em cobordismos) de um estado emaranhado, fizemos inicialmente o cálculo da matriz de densidade não normalizada e depois realizamos a normalização dividindo a matriz densidade obtida anteriormente pelo seu traço (obtido colando as respectivas fronteiras iguais, mas com orientações opostas). Usando a matriz de densidade normalizada, o próximo passo foi calcular a Entropia de Emaranhamento de von-Neumann para um dos subsistemas, para isto tiramos o traço da matriz densidade do sistema todo em relação ao outro subsistema, e calculamos a Entropia de von-Neumann usando esta matriz de densidade de um dos subsistemas. No entanto o logaritmo tornava o cálculo difícil. Para contornar este problema, usamos o Replica Trick e o Analytic Continuation Method que deixou a Entropia de von-Neumann na forma $S_{\{A\}} = - \lim_{n \rightarrow 1} \frac{1}{n} \ln \text{Tr}_{\{A\}} \rho^{\wedge n}_{\{A\}}$ e ao calcularmos a Entropia de von-Neumann para as duas possíveis representações obtivemos que somente uma delas possuía $S(A) = 0$ que indica que o estado não está emaranhado. Assim, conseguimos obter através do cálculo da Entropia de von-Neumann para um dos subsistemas do sistema total, uma representação de um estado emaranhado em termos de teoria topológica. O resultado que obtivemos confere com o que foi obtido em [11].

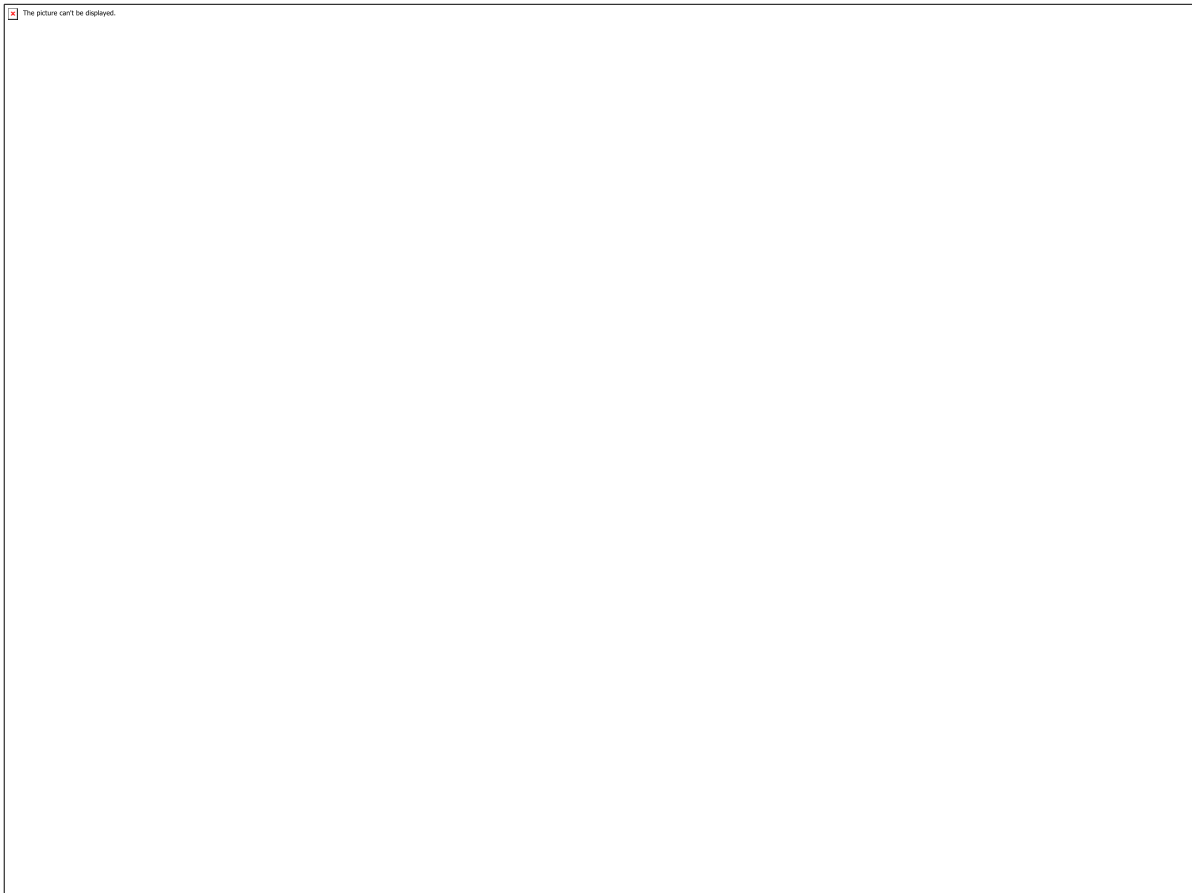
Conclusão

Ao final do projeto conseguimos adquirir uma base mínima teórica do estudo de teorias topológicas aplicadas a física de fronteira. Além disto conseguimos achar uma representação adequada para um estado emaranhado utilizando teoria topológica. Em nossos trabalhos futuros pretendemos aplicar este resultado para a representação em termos de teorias topológicas dos algoritmos de Three Qutrit Code e de Teleportation. Também pretendemos explorar a conexão existente entre TQFT e Chern-Simons Theory, além da possível introdução de Wilson Loops e conexão com Braid Group.

Referências

- [1] Sahuquillo, Miguel Angel Carretero, Kyriakos Papadodimas, and Diederik Roest. AdS/CFT Correspondence and Holographic Entanglement Entropy. (2015). [2] Nishioka, Tatsuma, Shinsei Ryu, and Tadashi Takayanagi. Holographic entanglement entropy: an overview. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* 42.50 (2009): 504008. [3] Rangamani, Mukund, and Tadashi Takayanagi. Holographic entanglement entropy. *Holographic Entanglement Entropy*. Springer, Cham, 2017. 35-47. [4] Ryu, Shinsei, and Tadashi Takayanagi. Holographic derivation of entanglement entropy from AdS/CFT, arxiv 603001. [5] Nielsen, Michael A., and Isaac Chuang. *Quantum computation and quantum information*. (2002): 558-559. [6] Kauffman, Louis H. Knot logic and topological quantum computing with Majorana fermions. *Logic and Algebraic Structures in Quantum Computing* 45 (2016): 223. [7] Harlow, D. TASI Lectures on the Emergence of Bulk Physics in AdS/CFT, *PoS(TASI2017) 2* (2018). [8] A. Almheiri, X. Dong, and D. Harlow, Bulk locality and quantum error correction in AdS/CFT. *Journal of High Energy Physics* 2015.4 (2015): 163. [9] Hirata, T., Takayanagi, T. AdS/CFT and strong subadditivity of entanglement entropy. *Journal of High Energy Physics*, 2007(02), 042. [10] Headrick, M., Takayanagi, T. Holographic proof of the strong subadditivity of entanglement entropy. *Physical Review D*, (2007), 76(10), 106013. [11] Melnikov, D., Mironov, A., Mironov, S., Morozov, A., Morozov, A. From topological to quantum entanglement. *Journal of High Energy Physics*, 2019(5), 116.

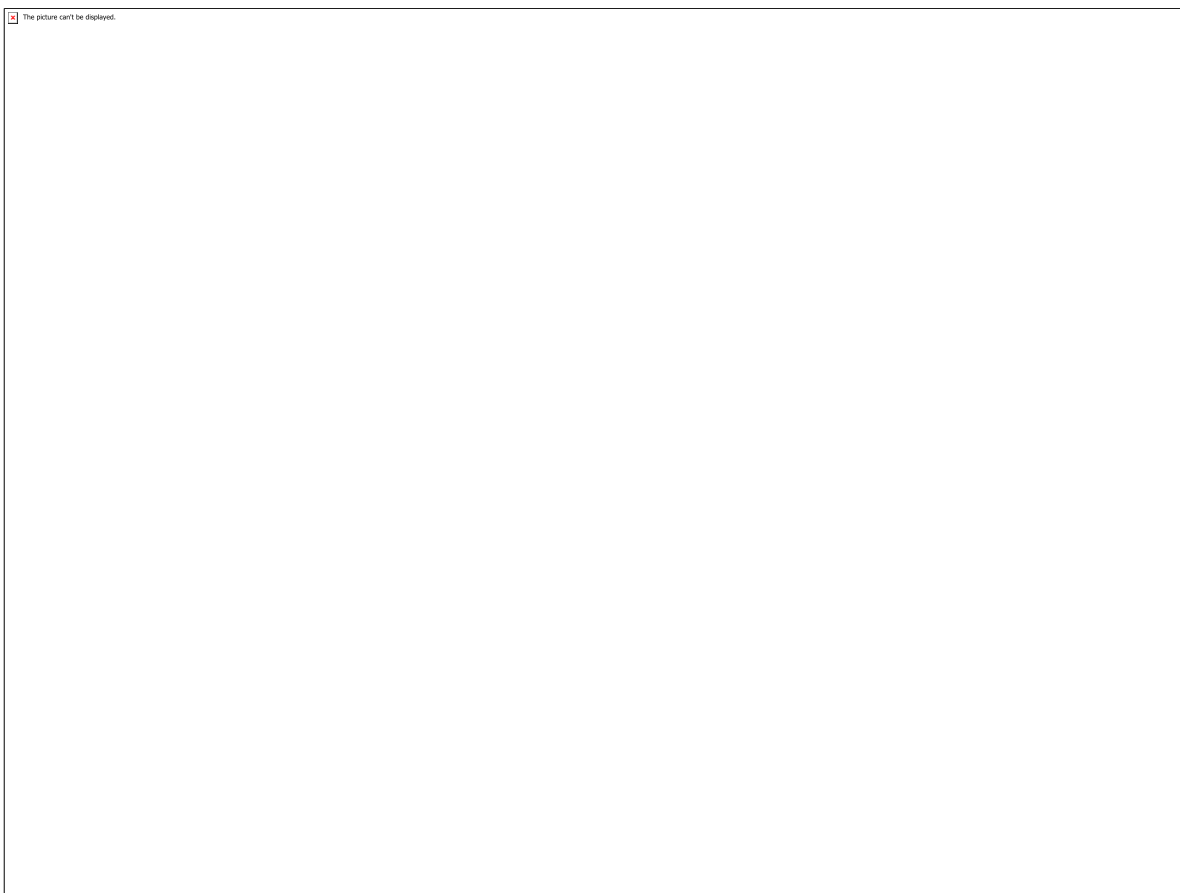
Anexos







3



4





6



7



8









12



13

CÓDIGO: ET1254

AUTOR: VICTORIA MARIA LEAO LEITE

ORIENTADOR: DMITRY MELNIKOV

TÍTULO: Métodos topológicos em gravitação quântica

Resumo

A conjectura de Ryu e Takayanagi pode ser é construída no contexto da dualidade gauge/gravidade. Nesse contexto, revisitamos alguns resultados importantes que conectam gravidade no espaço Anti de-Sitter com a teoria de Chern-Simons, que apresenta uma ação topológica. Além disso, exploramos alguns aspectos da teoria conforme de campos e da entropia de emaranhamento como uma tentativa de mostrar a validade da conjectura citada.

Palavras-chave: Topologia; Gravidade Quântica; Entropia de Emaranhamento.

TITLE: Topological Methods in Quantum Gravity

Abstract

The Ryu-Takaynagi conjecture is constructed in the context of gauge gravity duality. In this picture we revisit some important results that connect gravity in Anti de-Sitter space with the Chern-Simon theory, which presents a topological action. Moreover, we explore some aspects of the conformal field theory and entanglement entropy as an attempt to demonstrate the validity of the cited conjecture.

Keywords: Topology; Quantum Gravity; Entanglement Entropy.

Introdução

A conexão entre termodinâmica e buracos negros foi estabelecida por Bekenstein por volta de 1973, em seu artigo Black Hole and Entropy, onde ele mostrou que a entropia desses objetos é proporcional a área de seu horizonte de eventos. Em 1975, Hawking argumentou que a entropia calculada para um buraco negro deveria ser resultado da criação e aniquilação de partículas em sua fronteira. Nosso trabalho busca reconstruir o resultado de Bekenstein-Hawking a partir da dualidade entre teorias quânticas de campo e teoria conforme de campos, que foi estabelecida por Juan Maldacena em seu artigo de 1998. Veremos que tal resultado pode ser interpretado como uma projeção do bulk de uma teoria gravitacional na fronteira do espaço que a descreve, dessa perspectiva é possível construir a conjectura proposta por Ryu-Takaynagi [1], que exploraremos se seção 5. A segunda seção desse trabalho visita brevemente a teoria topológica de Chern-Simon, abordando principalmente a ação e as equações do movimento na variedade $SU(2)$. Na sessão 3, exploramos aspectos do espaço Anti de-sitter (AdS_{d+1}) como solução da equação de campo de Einstein, além disso fazemos uma conexão entre gravidade em AdS_3 e Chern-Simons. A quarta parte apresenta as transformações do grupo conforme a partir da transformação da métrica. Em seguida, na seção 5, apresentamos a conjectura de Ryu-Takaynagi com base principalmente em [1].

Metodologia

1 - Teoria de Chern-Simon: Uma teoria topológica, como CS, não apresenta dependência explícita com a métrica, e por isso não muda sua dinâmica de acordo com a geometria do espaço. Nesse trabalho, queremos relacionar Chern-Simons com a dinâmica gravitacional em AdS₃. Para isso, nesta seção obtemos as equações da dinâmica da teoria aplicando o princípio variacional nas ações, abeliana e não abeliana. Em seguida, investigamos que a equação do movimento abeliana (assim como a ação) é invariante de gauge. Desconforme, a ação não abeliana é dependente da escolha do gauge, porém mostramos que essa variação se dá apenas por um múltiplo inteiro de 'pi', o que mantém a função de partição da teoria invariante por tal classe de transformações.

2 - Gravidade em AdS₃: A métrica do espaço Anti de-Sitter é obtida como uma parametrização da variedade SO(2,2) em um hiperboloide, a qual se mostra um caso particular da métrica de Schwarzschild quando tomamos o limite no qual o raio do espaço tende ao infinito.

2.1 - AdS_{d+1} como uma Solução para a Equação de Einstein: Trabalhando com equação de Einstein-Hilbert na presença de matéria, obtivemos as equações do movimento, aplicando o princípio variacional. Em seguida, considerando a dinâmica gravitacional no vácuo obtivemos a forma da equação do movimento em termos da densidade de energia de vácuo, segundo [2]. Com isso, determinamos a constante cosmológica do espaço AdS_{d+1} como sendo negativa, diretamente proporcional a dimensão do espaço e inversamente proporcional ao raio do espaço ao quadrado.

2.2 - Descrição da Gravidade em AdS₃ em Termos de Chern-Simons: Se tomarmos a ação de Einstein-Hilbert em termos de vielbeins e conexões de spin, podemos conectar a gravitação com a topologia, escrevendo os campos de Chern-Simons, que são elementos da álgebra $sl(2,2)$, como uma combinação de translações e rotações em quatro dimensões, que são geradores da álgebra $so(2,2)$. Para dar uma realização do descrito acima, tomamos matrizes 2x2 que respeitam a relação de comutação $[L_n, L_m] = (m-n)L_{m+n}$. Nessa formulação, conseguimos escrever os vielbeins em termos dos campos de Chern-Simon, de forma que é possível recuperar a métrica do AdS₃ utilizando esses campos. Tendo calculado a métrica, determinamos o escalar de curvatura do espaço como sendo, de modo geral, proporcional a dimensão do espaço e a constante cosmológica, que foi determinada na seção anterior. Por fim, calculamos a equação da geodésica em AdS₃ utilizando a métrica de Poincaré, que é inversamente proporcional a coordenada z ao quadrado. Assim, com o objetivo de obter um resultado finito para esse cálculo, aplicamos um regulador nessa coordenada. Disso, novamente aplicamos o princípio variacional para obter a equação da geodésica na fronteira do espaço (i.e., quando z tende a zero), e nosso resultado mostra que ela é proporcional ao raio do espaço e ao logaritmo da distância entre os pontos da fronteira para o qual queremos calcular a distância.

3 - Teoria de Campos Conforme: Uma teoria de campos é dita conforme se sob uma certa classe de transformações a métrica varia por um fator de escala, que depende das coordenadas. Assim, verificamos que apesar dos valores absolutos dos vetores não serem preservados sob transformações conformes, os ângulos entre vetores se mantêm invariante. Em seguida, partindo de uma transformação infinitesimal genérica de coordenadas na métrica pudemos obter as equações de vínculo para determinar quais dessas obedecem a condição de ser conforme. Com isso, chegamos a quatro tipos de transformações, sendo essas translações, dilatações, rotações e transformações especiais conforme, que são em essência uma combinação de inversão e translação.

4 - AdS/CFT: A correspondência AdS_{d+1}/CFT_d mostra que existe uma equivalência entre teorias gravitacionais e teorias não gravitacionais de menor dimensão. Nesse caso, entendemos essa afirmação como se estivemos estudando o bulk de um espaço, e em locais onde a mecânica quântica se torna relevante pudéssemos projetar a informação contida no bulk para a fronteira do espaço. Um dos melhores exemplos do que foi dito, é o estudo de buracos negros. Isso ocorre pois a teoria da gravidade apresenta singularidades para

esses objetos, e como a escala de comprimento está além do domínio da gravitação, devemos buscar soluções que envolvam gravidade quântica. Além disso, com o advento da holografia podemos utilizar nosso conhecimento sobre certas quantidades do bulk para calcular observáveis físicos, como por exemplo relacionar o cálculo de geodésicas no bulk (AdS) com a entropia de emaranhamento na fronteira (CFT). 4.1 - Entropia de Emaranhamento: De um ponto de vista matemático, um sistema quântico é definido como um espaço de Hilbert, cujos vetores são ditos estados quânticos. No contexto de informação quântica, especificamente em duas dimensões, esses vetores são chamados qubits, de forma que podemos dizer que um espaço de Hilbert bidimensional é gerado por dois qubits. Cada estado é uma combinação linear dos estados da base, em que os coeficientes a eles associados representam a amplitude de probabilidade do sistema se encontrar naquele estado. Podemos representar ainda esses sistemas utilizando a matriz de densidade, que para um estado puro, i.e. que podemos representar da forma descrita acima, é o produto direto do estado com ele mesmo. É também possível construir espaços formados por uma composição, ou um produto direto, de N espaços de Hilbert. A esses sistemas compostos, podemos associar uma quantidade que correlaciona suas diferentes partes, assim chamada entropia de Von Neumann, cuja fórmula é proporcional ao logaritmo da matriz de densidade reduzida. Lembre que obtivemos resultado parecido ao calcular a distância entre dois pontos na fronteira do espaço Anti-de Sitter. 4.2 - Conjectura de Ryu e Takaynagi: Essa conjectura mostra a relação entre o cálculo da entropia de emaranhamento no CFT e de geodésicas em AdS.

Resultados e Discussões

Como já mencionado, podemos entender a dualidade entre gravitação em AdS_{d+1} e teorias não gravitacionais em CFT_d , como uma projeção do bulk do espaço Anti-de Sitter em sua fronteira, que no contexto da holografia coincide com o uma teoria conforme de campos. Na seção 4.1 vimos que o cálculo da entropia de emaranhamento é feito considerando que o espaço em questão está preenchido por qubits, dos quais temos acesso a apenas uma parcela que compreende o um comprimento " L ". A partir dessa mesma construção, é feito o cálculo da entropia do CFT, cujo resultado já conhecido e proporcional ao logaritmo do comprimento da cadeia de qubits e da carga central do CFT. Obtivemos resultado semelhante ao realizar o cálculo de geodésicas entre dois pontos na fronteira do espaço Anti-de Sitter em três dimensões, no qual utilizamos um regulador para obter um resultado finito. Vimos então, que o comprimento de uma curva que conecta dois pontos próximos a fronteira é proporcional ao raio do espaço e ao logaritmo da distância entre esses pontos. Conectando esses dois resultados, obtemos a fórmula que correlaciona o cálculo de área de curvas na fronteira do AdS_3 com o cálculo da entropia de emaranhamento no CFT_2 , que é assim chamada entropia de Bekenstein-Hawking. Disso, também obtivemos a equação que relaciona a carga central do CFT com o raio do AdS, que é de fato uma expressão da dualidade AdS_3/CFT_2 .

Conclusão

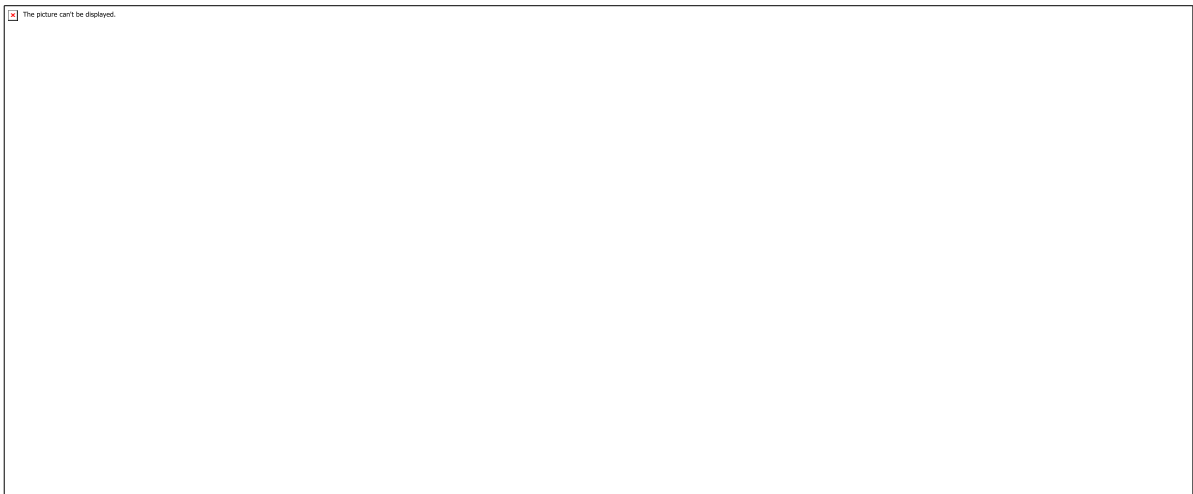
Nesse trabalho exploramos a conexão entre topologia e gravitação em espaços com constante cosmológica negativa. Mais especificamente, verificamos como se da a relação entre a dinâmica da teoria gravitacional no espaço Anti-de Sitter e a dinâmica da teoria de Chern-Simons. Além disso, fazendo-nos valer da dualidade de AdS_3/CFT_2 mostramos que é possível relacionar um observável físico, nesse caso a entropia de emaranhamento, e um ente geométrico, como as geodésicas no espaço

Anti-de Sitter. Para essa relação damos o nome de entropia de Bekenstein-Hawking, que no contexto de buracos negros calcula a entropia desses objetos dada a área do horizonte de eventos. Por fim, a dualidade AdS₃/CFT₂ é ilustrada pela fórmula que mostra que a carga central do CFT₂ é proporcional ao raio do espaço AdS₃. Com esses resultados, o próximo passo seria recobrir a conjectura de Ryu e Takayanagi no contexto da topologia, utilizando o cálculo de observáveis de Chern-Simons chamados loops de Wilson, como mostrado na referência [3].

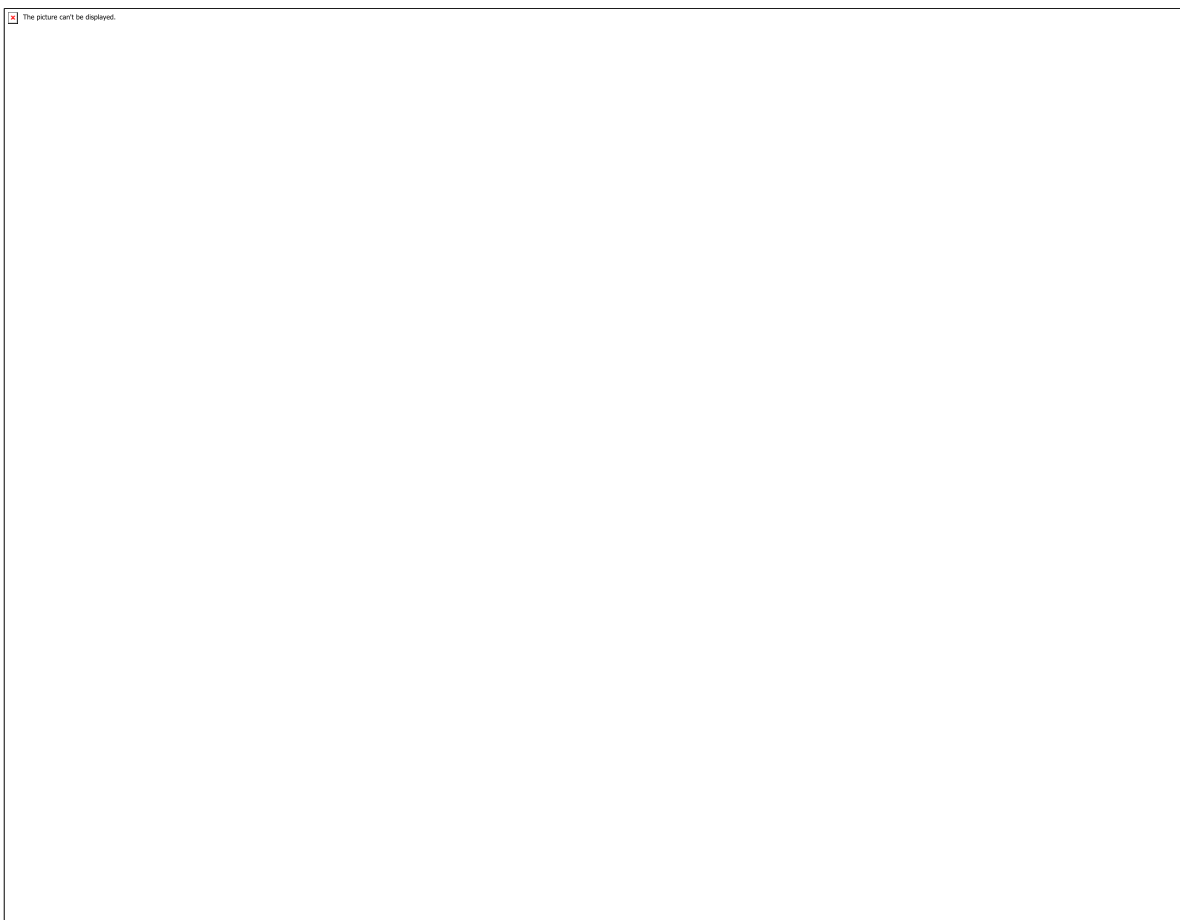
Referências

[1] S. Ryu and T. Takayanagi, "Holographic Derivation of Entanglement Entropy from AdS/CFT", (2006) [arXiv:hep-th/0603001v2]. [2] D. Harlow, "TASI Lectures on the Emergence of Bulk Physics in AdS/CFT", (2018) [arXiv:hep-th/1802.01040v3]. [3] M. Ammon, A. Castro and N. Iqbal, "Wilson Lines and Entanglement Entropy in Higher Spin Gravity", (2016) [arXiv:hep-th/1306.4338v4]. [4] Sean M. Carroll, "Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity", San Francisc, USA: Addison-Wesley (2004). [5] K. Surya Kiran, C. Krishnan, A. Raju, "3D Gravity, Chern-Simons and Higher Spins: A Mini Introduction", (2015) [arXiv:hep-th/1412.5053v3].

Anexos



Referências



Sumário