

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26400240

研究課題名（和文）量子重力のホログラフィー原理と量子エンタングルメント

研究課題名（英文）Holography in Quantum Gravity and Quantum Entanglement

研究代表者

大栗 博司 (Ooguri, Hirosi)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・主任研究員

研究者番号：20185234

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000 円

研究成果の概要（和文）：大栗らは、ホログラフィーによってアインシュタイン重力理論の幾何学的状態と対応する状態については、どのような数の領域に対しても、エンタングルメント・エントロピーの不等式をすべて見つけ出し分類する有限なアルゴリズムを発見し、このような状態については独立なエントロピー不等式が有限であることを証明した。また、相対エントロピーの正値性と単調増加性が、重力理論の弱場近似では、積分されたエネルギー密度の正値性を意味することを示した。

研究成果の概要（英文）：Ooguri and his collaborators discovered a finite algorithm to classify entanglement inequalities for any number of regions for states dual to geometric states of the Einstein gravity via holography and used the algorithm to prove that the number of independent entropy inequalities is finite for such states. He and his collaborators also showed that the positivity and monotonicity of the relative entropy implies a new class of integrated positive energy conditions in the weak gravity approximation.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論

1. 研究開始当初の背景

大栗博司はAdS/CFT対応発見当初からホログラフィー原理の理論物理学のさまざまな問題への応用にも取り組んできた。しかし、既存の手法ではホログラフィー原理の応用には限界がある。たとえば、量子重力の側では、もっぱら、時空間の曲率が小さいと仮定した重力の半古典近似が使われていが、これは対応する重力を含まない量子系が特別な強結合状態にある場合に対応し、現実的な問題への応用には必ずしも適さない。この問題の根幹にあるのは、ホログラフィー原理のからくり、特に重力を含まない場の量子論の現象が重力現象に翻訳される微視的なメカニズムはわからないことであった。

2. 研究の目的

ホログラフィー原理のより深い理解に向けて、最近注目されているのが量子エンタングルメントである。たとえば、高柳匡と笠真生が提案した公式では、空間の果てにおいたスクリーンの上でのエンタングルメント・エントロピーは、重力の半古典近似では、時空間の中に伸びた極小局面の面積に比例する。量子エンタングルメントの分析を通じて、ホログラフィー原理の微視的理解を進め、その応用のための新しい手法の開発を目指した。

3. 研究の方法

重力を含まない量子系のエンタングルメントに、対応する重力理論の力学的性質がどのように反映されているのかを調べ、このようなエンタングルメントの情報を使うことで、ホログラフィー原理の対応関係のより精密な理解を進める。

4. 研究成果

(1) 大栗らは、ホログラフィーによってアインシュタイン重力理論の幾何学的状態と対応する状態について、どのような数の領域に対しても、エンタングルメント・エントロピーの不等式をすべて見つけ出し、さらにそ

れを分類するアルゴリズムを発見した。また、このような状態については、独立なエンタングルメント不等式の数がある有限であることを証明した。これは、ホログラフィックな状態が、エンタングルメントについて特別な性質を満たしていることを示している。

(2) 大栗らは、重力理論におけるエネルギーの局所的な分布を、ホログラフィー原理を使って、対応する場の量子論のエンタングルメント情報で表現する公式を導くことに成功した。これは、重力理論の時空間の局所的な性質が、場の量子論のエンタングルメントの情報から創発すること示すものである。また、量子情報理論を使って導くことができるエントロピーに関する不等式から、重力理論のエネルギー 運動量 ストレス・テンソルの満たすべき不等式を発見した。これは、一般相対性理論の古典的解析で用いられるエネルギー条件と異なり、どのような量子重力理論でも一般的に満たされるべき不等式である。

(3) 大栗らは、場の量子論における相対エントロピーの正値性と単調増加性が、重力のアインシュタイン方程式の一般解について、新しいタイプのエネルギー正値定理を含意することを示した。この定理は、これまで反ドジッター時空間について導かれてきたエネルギー正値定理の拡張になっている。AdS/CFT 対応においては、反ドジッター時空間のなかで定義された重力理論で、整合性を持つ量子理論に埋め込むことのできるものは、必ず何らかの共形場の理論と対応していると考えられている。そのため、共形場の理論から導かれる相対エントロピーの正値性と単調増加性は、対応する重力理論が整合性を持つ量子理論であるための必要条件でもある。つまり、これは、大栗らがこれまで追求してきた「スワンプランド条件」のひとつと考えることもできる。また、大栗は、スワンプランド条件のひとつである「弱い重力予

想」の精密化を提案し、これにより超対称性を持たない AdS/CFT 対応が不安定になると議論した。

反ドジッター時空間の中の局所作用素が、対応する共形場の理論においてどのような作用素として表現されるのかを理解することは、ホログラフィー原理の解明において重要である。大栗らは、反ドジッター時空間の中の局所作用素が、共形場の理論におけるクロスカップを生成する「石橋状態」の重ね上げとして表現できることを示した。また、

においては、この重ね上げを制限する条件として、反ドジッター時空間における微視的因果律と、共形場の理論におけるブートストラップ条件について比較し、一般にこの二つの条件が矛盾することを示した。すなわち、反ドジッター時空間の中の局所作用素に関しては、一般にブートストラップ条件は課することができないという結論である。

引用文献

- N. Bao, S. Nezami, H. Ooguri, B. Stoica, J. Sully, M. Walter, The Holographic Entropy Cone, JHEP, 09, 2015, 130.
- J. Li, M. Marcolli, H. Ooguri, B. Stoica, Locality of Gravitational Systems from Entanglement of Conformal Field Theories, Phy. Rev. Lett., 査読有, 114, 2015.
- N. Lashkari, J. Lin, H. Ooguri, B. Stoica, M. Van Raamdsomk, Gravitational Positive Energy Theorems from Information Inequalities, PTEP, 2016, 12C109.
- Y. Nakayama, H. Ooguri, Bulk Locality and Boundary Creating Operators, JHEP, 1510, 2015, 114.
- Y. Nakayama, H. Ooguri, Bulk Local States and Crosscaps in Holographic CFT, JHEP, 1610, 2016, 085,

5. 主な発表論文等 (研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

Y. Nakayama, H. Ooguri, Bulk Local States and Crosscaps in Holographic CFT, JHEP, 査読有, 1610, 2016, 085, DOI: 10.1007/JHEP10(2016)085

Y. Nakayama, H. Ooguri, Bulk Locality and Boundary Creating Operators, JHEP, 査読有, 1510, 2015, 114, DOI: 10.1007/JHEP10(2015)114.

N. Lashkari, J. Lin, H. Ooguri, B. Stoica, M. Van Raamdsomk, Gravitational Positive Energy Theorems from Information Inequalities, PTEP, 査読有, 2016, 12C109, DOI: 10.1093/ptep/ptw139.

J. Li, M. Marcolli, H. Ooguri, B. Stoica, Locality of Gravitational Systems from Entanglement of Conformal Field Theories, Phy. Rev. Lett., 査読有, 114, 2015, 221601, DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.221601.

N. Bao, S. Nezami, H. Ooguri, B. Stoica, J. Sully, M. Walter, The Holographic Entropy Cone, JHEP, 査読有, 09, 2015, 130, DOI: 10.1007/JHEP09(2015)130.

〔学会発表〕(計 3 件)

大栗博司、量子重力理論、日本物理学会総合講演、池田市市民文化会館 (大阪府池田市) 2017年3月19日。

H. Ooguri, Weak Gravity Conjecture, Quantum Entanglement, ストローニーブルック大学, Stony Brook (USA)、招待講演, 2016年12月5日。

H. Ooguri, Entanglement and Bootstraps, Eurostrings 2015, ケンブリッジ大学, Cambridge (UK)、招待講演, 2015年3月23日。

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://ooguri.caltech.edu/japanese>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大栗博司(OOGURI, Hirosi)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・

主任研究員

研究者番号：20185234