

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24年 5月 18日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2011

課題番号：20740132

研究課題名（和文） 超弦理論における時空構造のホログラフィー原理を用いた解明

研究課題名（英文） Study of Spacetime Structure via Holography in Superstring Theory

研究代表者

高柳 匡 (TAKAYANAGI TADASHI)

東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任准教授

研究者番号：10432353

研究成果の概要（和文）：超弦理論の D ブレインを用いて、時空のトポロジーが変化する例を発見した。また、ホログラフィー原理を用いて、ブラックホールの生成過程を調べ、エントロピーに関するパラドクスを解明した。

研究成果の概要（英文）：We constructed an example where the topology of spacetime changes by using the D-branes in string theory. We showed that the holography resolves a paradox on the entropy in the process of black hole formation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	4,000,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子

キーワード：超弦理論、ホログラフィー、量子重力、量子エンタングルメント

1. 研究開始当初の背景

超弦理論において発見されたホログラフィー原理、もしくは AdS/CFT 対応は、10年以上にわたって盛んに研究されている。これを用いると、強結合の物理を重力で記述することができるので、物性物理などの分野への応用の研究が世界で行われている。また、研究代表者らが 2006 年に発見した AdS/CFT 対応による量子エンタングルメントの解析方法も世界中で注目を浴びようになってきた。一方で、逆に物性物理や量子情報理論などの知識を、量子重力の解明に役立てようという方向性も AdS/CFT 対応によって可能になるが、研究開始当初ではあまり研究がなされていない状況であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、特にホログラフィー原理と量子エンタングルメントなどに着目しながら、理論物理の最大の問題である量子重力理論にアプローチすることである。それと同時に、関連する手法を用いて AdS/CFT 対応の物性物理や量子情報理論への応用も研究する。特に時空のダイナミクスを明らかにすることを目的としており、時間発展やトポロジーの変化の解析を行う。

3. 研究の方法

本研究は、超弦理論の記述する量子重力理論を対象したもので、その時空を記述するため

にホログラフィー原理を用いて、重力を含まない、ゲージ理論などの場の理論の立場にたって解析を行う。本研究の目的においては、具体的に計算する量としては、重力理論における時空の広がり具合と等価な量子エンタングルメント・エントロピーが便利である。

また、様々な興味深い物性物理系をホログラフィーで実現させるために、新しい重力の古典解を構成することが必要で、そのためには超重力理論の運動方程式を数値的に解くことになる。また、超弦理論のDブレーンを適当に配置することでフレーバーを導入することも便利な道具である。

4. 研究成果

(1) 初期宇宙のような重力の量子揺らぎが無視できない状況では、時空のトポロジー自体も変化する可能性が高い。そこで、高柳は、3次元 $N=6$ 超対称性チャーンサイモンズ理論と AdS/CFT 対応で等価な4次元反ドジッター空間中の D2 ブレインを考え、そのトポロジーの変化を研究した。この背景の RR 場の作用で D2 ブレインが2次元球面状に膨らむ。このときに、北極と南極を通る軸の周りに角運動量を与えるとどうなるのか解析した。その結果、角運動量が小さいうちは、その量子化された値に比例した数の開弦が北極から南極に延びることが分かった。角運動量をさらに大きくしてゆくとその弦の本数も増えるので、球面に2つ穴があいて両者が内部でつながることを見出した。つまり最初は球面であったものが、回転を加えることでトポロジーがトーラスに徐々に変化する。この系は、回転したブラックホールが、ブラックリングに変化する過程の超弦理論での実現と思うこともできる。

(2) ブラックホールの生成は、ホログラフィー原理を用いると量子多体系の熱化現象と等価であると期待されている。このとき、量子多体系はマイクロにみると常に純粋状態の時間発展であり、マイクロなエントロピーは0のままである。一方、ブラックホールが生成すると重力理論ではエントロピーが生成されるように思われ、一見パラドクスに見える。そこで、我々はエンタングルメント・エントロピーとその AdS/CFT 対応を用いて、実はブラックホールでもそれがブラックホールがないところから生成された場合にはエントロピーは0のままであることを初めて証明した。この成果は、ブラックホールの情報損失問題を解決していく上での最初のステップとなる。

また、エンタングルメント・エントロピーが一般には粗視化したエントロピーとみな

せることに注目して、その時間変化からブラックホールの生成を探ることがせきことを示した。スカラー場の簡単なモデルでエンタングルメント・エントロピーの時間変化を計算し、有限サイズの場合は振動することを示した。これはブラックホールの生成と消滅が繰り返し起きていることに相当する。

(3) AdS/CFT 対応を、共形場理論(CFT)が境界のある時空で定義されている場合に初めて拡張することに成功した。具体的には、CFTの境界部分をバルクに伸ばすのであるが、その曲面において重力のノイマン境界を課すべきであることを見出した。その結果を用いて分配関数を計算することでg定理の証明と、その高次元への拡張が得られた。

(4) AdS/CFT 対応の古典重力極限で実現できるフェルミ面をもった物質に対する制限を初めて明らかにした。フェルミ面の存在をエンタングルメント・エントロピーを用いて定式化し、AdS/CFT 対応を用いて解析した。その結果、比熱の温度依存性に制限が付き、例えばランダウのフェルミ液体は許されないことを証明した。また現実には重い電子系などで存在する非フェルミ流体と同じように比熱が振る舞うことを明らかにした。この研究は、超弦理論のみならず、物性物理の研究者からも多くの反響があり、現在もこのモデルが世界中で研究されている。

(5) 非相対論的なスケール対称性を持つ場の理論をリフシツ型理論と呼び、物性物理で重要な役割を果たすことが知られている。そのホログラフィーに相当する重力理論はスタンフォード大学の Kachru らによって提唱されている。我々は、このリフシツ理論と等価な重力理論が超弦理論において実現できることを初めて証明した。この研究は多くの反響を呼んだ。特に最近この理論における粘性の計算が行われ、粘性率/エントロピー密度の比が $1/4\pi$ よりも小さくなることが示され注目を浴びている。

(6) 分数量子ホール効果を AdS/CFT 対応で初めて実現した。エッジ状態がDブレーンを用いて簡単に記述できることを示した。また、3次元超対称性チャーンサイモンズ理論である ABJM 理論にフレーバーの自由度入れた場合の AdS/CFT 対応を初めて構成した。このモデルからも分数量子ホール効果が実現できることを見出した。

またトポロジカル絶縁体を超弦理論のDブレーンを用いて分類した。

(7) ホログラフィック超伝導は、盛んに研究されているが、良く知られている例では、金属相が超伝導相に相転移する。一方で、高温超電導体などの強相関係では、絶縁体が直接超伝導相に転移する例もある。そこで、絶縁体と超伝導の相転移に相当するモデルをホログラフィーを用いて初めて構成した

(8) 閉じ込め状態にあるゲージ場にフェルミオンが結合した系からなるフェルミ液体の AdS/CFT 対応による記述を初めて与えた。また、その相構造を明らかにした。

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 25 件、すべて査読あり)

- ① N.Ogawa, T.Takayanagi and T.Ugajin, "Holographic Fermi Surfaces and Entanglement Entropy," JHEP 1201 (2012) 125
- ② T.Takayanagi, "Holographic Dual of BCFT," Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 101602.
- ③ M.Fujita, W.Li, S.Ryu and T.Takayanagi, "Fractional Quantum Hall Effect via Holography: Chern-Simons, Edge States, and Hierarchy," JHEP 0906 (2009) 066.
- ④ T.Nishioka and T.Takayanagi, "Fuzzy Ring from M2-brane Giant Torus," JHEP 0810 (2008) 082.

[学会発表] (計 31 件)

- ① T. Takayanagi, "Entanglement Entropy and AdS/CFT," The CERN Winter School on Supergravity, Strings and Gauge Theory (招待講義), スイス, 2012 年 2 月 6 日-10 日.
- ② T. Takayanagi, "Holographic Entanglement Entropy and its New Developments," 国際会議 Strings 2011 (招待講演), Uppsala, スウェーデン, 2011 年 6 月 27 日-7 月 1 日.
- ③ 高柳 匡、「AdS/CFT と物性」、理論核物理領域, 素粒子論領域合同シンポジウム、主題: 強相関物理の新展開、日本物理学会、弘前大、2011 年秋季大会、2011 年 9 月 18 日。
- ④ T. Takayanagi, "Holographic Entanglement Entropy, Fractional Quantum Hall Effect, and Lifshitz-like Fixed Points", Quantum Theory and Symmetries 6 (Plenary 講演), Lexington, Kentucky, 米国, 2009 年 7 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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高柳 匡 (TAKAYANAGI TADASHI)

東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任准教授

研究者番号：10432353

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：