

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540285

研究課題名(和文)量子重力のホログラフィー原理の基礎と応用

研究課題名(英文)Fundamentals and application of the holographic principle of quantum gravity

研究代表者

大栗 博司(Oguri, 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) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：アノマリーのある場の量子論について、ホログラフィー原理をつかって、空間変調のある相転移、角運動量の自発的生成、またホール粘性係数の生成の仕組みを分析した。また、この研究に触発されて、トポロジカルな磁性絶縁体の新しい相転移を指摘した。また、定常非平衡系の温度の振る舞いについて、ホログラフィー原理を使って分析を行った。

研究成果の概要(英文)：I studied spatially modulated phase transitions, spontaneous generation of angular momentum, and Hall viscosity in quantum field theories with anomalies using the holographic principle. Inspired by his series of works, I also found a new type of phase transitions in topological magnetic insulators. I also studied steady non-equilibrium systems, in particular behavior of their temperatures, using the holographic principle.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学

キーワード：ホログラフィー原理

1. 研究開始当初の背景

超弦理論のホログラフィー原理を使って、強結合系の性質を調べる研究は盛んに行われていた。また、 $3 + 1$ 次元でカイラルアノマリーがある場合に、それが系の流体力学性質にどのように反映されるかも、 $4 + 1$ 次元の重力理論とのホログラフィー対応によって、発見されていた。しかし、様々な次元におけるパリティの破れの効果が、重力理論やそれとホログラフィー対応にある強結合量子系にどのように反映するかの統一的な見方はまだ発展していなかった。

2. 研究の目的

ホログラフィー原理を使って、重力理論とそれに対応する強結合量子系の双方について、理解を深めることを目的とした。ゲージアノマリーや重力アノマリーは素粒子物理学で重要な役割を果たしてきたが、近年になって、アノマリーは多体模型の長距離現象、転送現象や流体力学的性質にも反映していることが明らかになった。ホログラフィー対応では、場の量子論のアノマリーは、重力理論においてチャーン・サイモンズ型の相互作用項として現れることが知られている。そこで、今回の研究では、特にチャーン・サイモンズ項が引き起こすパリティの破れの効果を、ホログラフィー対応の見地から、重力理論と強結合系の両方において研究し、その関係を体系的に理解することを目的とした。また、それに関連して、準安定状態や、非平衡定常状態を、ホログラフィー原理の立場から理解することも目的とした。

3. 研究の方法

本研究は理論的研究であり、その方法は基本的に紙と鉛筆を使った計算、共同研究者との議論や関連する分野の研究者との意見の交流を通じて行われた。今回の研究において大栗の共同研究者は、現在中央大学の教授である中村真、東京大学物性研究所の教授である押川正毅、MITの教授である Hong Liu、Montana State University の Nicolas Yunes、またカリフォルニア工科大学の大学院生の Bogdan Stoica であった。共同研究者は日本や米国の各地に分散していたが、ビデオ会議や電話、スカイプ、また電子メールの交換などによって、支障なく共同研究が続けられた。また、紙と鉛筆による計算のほか、アインシュタイン方程式を解き、それを分析するためには、Mathematica などによる数値計算も活用した。

4. 研究成果

大栗は、今回の研究以前に、重力理論にチ

ャーン・サイモンズ型の相互作用がある場合には、対応する場の量子論に空間変調のある相が現れる場合があることを指摘し、この結果をクォーク・グルーオン・プラズマの性質の解析に応用していた。また、より最近では、大栗の結果は、有限密度の基底状態の分類にも使われている。

本研究では、大栗は Hong Liu、Bogdan Stoica、Nicolas Yunes とともに、 $2 + 1$ 自弁の場の量子論において、チャーン・サイモンズ項が対応する保存カレントに表面項を与えることを、ホログラフィー原理をつ勝って示した。また、同じような機構で、アノマリーが角運動量密度を生成することも示した。アノマリーのようにパリティを破る効果が角運動量密度を生成することは、対称性の破れの効果からも期待できる。また、ヘリウム3のA相では、カイラルP波の凝縮によって、パリティが破れ、角運動量が生成されることが知られていたが、その具体的なメカニズムは明らかではなかった。

パリティの破れのもうひとつの効果は、 $2 + 1$ 次元の場の量子論の流体力学的記述に現れるホール粘性現象である。これは、流体の方程式に現れる新しい項である。場の量子論に質量ギャップがある場合には、ホール粘性定数が角運動量密度に比例することは知られていたが、ギャップのない場合、たとえば共形場の理論のときにどうなるかは知られていなかった。大栗は、Hong Liu と Bogdan Stoica とともに、 $3+1$ 次元の重力理論にゲージ場や重力場とチャーン・サイモンズ型の結合をするスカラー場が存在する場合に、それとホログラフィー対応にある $2 + 1$ 次元の場の量子論の角運動量の生成やホール粘性係数を計算した。特に、スカラー場が $2 + 1$ 次元の場の量子論の共形不変性を保つ変形を引き起こす場合には、角運動量の生成が $3+1$ 次元の軸性磁場効果 (Axial Magnetic Effect) と関係があることを明らかにした。また、共形不変性を壊す変形を引き起こす場合には、角運動量にすべてのスケールの自由度が寄与することを示した。このような研究で考察した $3 + 1$ 次元のスカラー場とゲージ場のチャーン・サイモンズ型の相互作用は、素粒子のアクシオン模型に現れるものと似ている。強い相互作用によってCPの破れがおきすぎないために提案されたアクシオンと呼ばれる粒子は、宇宙の暗黒物質の候補でもあり、その検出には様々な方法が試みられてきた。

大栗は、ホログラフィー原理についての

中村真らとの研究から、強電場をかけたときにアクシオン場が真空の相転移を引き起こすことに気がつき、これを使った新しい検出方法があるのではないかと考えた。しかし、これまでの実験や観測から知られているアクシオンの質量や電磁場との相互作用についての制限を使って見積ると、必要とされる電場が大きすぎて、この方法でアクシオンを検出するのは難しいという結論になった。

ところが、物性研究所の押川正毅との議論の中で新しい進展があった。最近物性物理学の研究で注目されているトポロジカルな絶縁体では、磁気秩序の振動から素粒子のアクシオン場と似た振る舞いをする自由度が現れる。さらに、物性の系では、不純物のドーピングを調節するなどの方法でパラメータを帰ることができる。そこで、詳しく調べてみると、トポロジカルな絶縁体や通常の絶縁体では、ドーピングの仕方を調節して系を臨界点に近づければ、アクシオン場の有効質量を小さくすることができ、電場による相転移現象が現在の物性実験の技術でも観測できることがわかった。また、個の研究の過程で、アクシオン場の引き起こす不安定性についての理論的理解も深まった。それをまとめた論文は Physical Review Letters に受理され、Editors' Choice にも選ばれた。

大栗は、中村真とともに、定常非平衡状態における温度の概念を、ホログラフィー原理を使って考察した。熱浴の中の部分系に電場をかけるなどの方法でエネルギーを注ぎ込むと、部分系の温度が上がって、部分系から熱浴の中にエネルギーが流れ込み、非平衡であるが定常な状態が実現できると思われる。これをホログラフィー原理を使って分析した。その結果、実際に部分系から熱浴へのエネルギーの流れが見られたが、温度は必ずしも上昇するわけではなく、逆に温度が下がるような状況も起きることを発見した。これは、熱力学の常識に反するようであるが、揺動散逸定理とも矛盾しないことを確認した。これは、新しいタイプの現象であり、現在もそのメカニズムについて研究を続けている。

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 3 件)

Hiroshi Ooguri, Masaki Oshikawa,

Instability of Magnetic Materials with Dynamical Axion Field, Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 161803.

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.161803>

Hong Liu, Hiroshi Ooguri, Bogdan Stoica, Nicolas Yunes, Spontaneous Generation of Angular Momentum in Holographic Theories, Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 211601.

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.211601>

Shin Nakamura, Hiroshi Ooguri, Out of Equilibrium Temperature from Holography, Phys.

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.88.126003> Rev. D88 (2013) 126003.

〔学会発表〕(計 2 件)

Hiroshi Ooguri, “Anomalies and Hydrodynamics,” at Simons Symposium Feb 4-8, 2013, US Virgin Islands.

Hiroshi Ooguri, “Anomalies, Hydrodynamics, and Nonequilibrium Phenomena,” at Strings 2013, June 24 – 28, 2013, Seoul, Korea.

〔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 ム ペ ー ジ 等

<http://www.theory.caltech.edu/~ooguri>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大栗 博司 (OOGURI Hiroshi)

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