

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2016

課題番号：23540326

研究課題名(和文) 超弦理論の現実的な強結合系への応用

研究課題名(英文) Applications of superstring theory to strongly-coupled systems

研究代表者

夏梅 誠 (Natsuume, Makoto)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師

研究者番号：90311125

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)：本研究では、超弦理論のAdS/CFT双対性を現実の強結合系へ応用することを目的として、強相関の非平衡系や物性系を扱った。これらの系では強結合の物理の理解が必須であるために、理論的な計算はこれまで困難であった。AdS/CFTによると、強結合の場の理論は重力理論と等価であるため、重力理論を使ってこれらの物理の解析が可能になった。本研究では特に(1) Kibble-Zurek機構、(2) 非平衡超伝導、(3) 教科書執筆(日本語版および英語版)などの成果を上げた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to apply the AdS/CFT duality in superstring theory into strongly-coupled systems. The computations in such systems are difficult to carry out, so there was little progress in theoretical understanding. The AdS/CFT duality claims that strongly-coupled field theories are equivalent to gravitational theories, so the computations become possible using gravitational theories. Some of our accomplishments are (1) the Kibble-Zurek mechanism, (2) nonequilibrium superconductivity, and (3) Japanese and English textbooks on the applications of the AdS/CFT duality.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論 超弦理論 AdS/CFT双対性 ブラックホール 流体力学

1. 研究開始当初の背景

超弦理論から生まれた考えであるAdS/CFT双対性によると、有限温度の強結合ゲージ理論は反ド・ジッター時空(AdS)での重力理論と等価である。AdS/CFTは、重力理論を使って場の理論が解析できることを意味する。このため、近年AdS/CFTは超弦理論にとどまらず、「現実世界」を解析する上で強力な手法になりつつある。応用分野としては、QCD、原子核物理、物性論、非平衡統計力学などがある。

たとえば、クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)はQCDの非閉じ込め相であるが、実験によればQGPは強く相互作用しており、その性質の理論的予言は困難であった。しかし、AdS/CFTを通して、理論的な予言が可能になってきた。一例として、AdS/CFTによると、強結合のゲージ理論プラズマのずれ粘性率は極めて小さい普遍的な値をもつ。そして、その値は実験結果と近いことが判明した。

AdS/CFTは、当初QCDや原子核物理の分野に盛んに応用されてきた。しかし、強結合系(強相関係)は物性物理でもしばしば現れるため、AdS/CFTは物性系にも応用されるようになり、我々も各種の成果を上げてきた。この状況を踏まえて、このような研究をさらに進めることにした。

2. 研究の目的

物性系でも強相関係問題は高い関心を集めている。特に注目されるのは、高温超伝導体である。高温超伝導体は、その発見より四半世紀以上が経つが、いまだその理解は十分ではない。特に電子系が強結合系だと考えられるさまざまな実験的根拠があるため、弱結合系に基づいた通常のBCS理論では不十分である。

高温超伝導の特徴の一つはその豊かな相図であり、超伝導相だけでなく、非フェルミ流体相、擬ギャップ相、モット絶縁体相などの存在が知られている。これらの相はおそらく密接に関わっており、高温超伝導の解決にはその統一的な理解が必要となる可能性が高い。

後述のように、AdS/CFTでは「ホログラフィック超伝導」と呼ばれる超伝導を起こすモデルが知られている。しかし、高温超伝導を理解する上で、このモデルだけでは明らかに不十分である。AdS/CFTで高温超伝導を理解するには、上述の相も含めて理解する必要がある。そこで、このように広い意味での超伝導の相図の理解につながる研究をAdS/CFTの立場から進めることにした。

3. 研究の方法

AdS/CFT双対性に従って、基本的には様々な物質場がある場合の重力理論を解く。ただ、複数の場が存在する場合、その運動方程式を解くのは容易ではなく、主に「プローブ近似」として知られる手法を用いた。プローブ近似では、重力解は背景解として与え、その背景解の下で物質場の運動方程式を解く。

AdS/CFTで強結合超伝導の問題を調べるために、特に「ホログラフィック超伝導」として知られる系がある。この系は、アインシュタイン・マクスウェル・複素スカラー場の系であり、スカラー場が秩序変数の役割を果たす。この系の解として、自明な解(スカラー場ゼロの解)があり、十分高温ではこれが安定な解である。しかし、十分低温ではこの解は不安定化し、二次相転移を起こす。そして、非自明なスカラー場のある解が安定な解となる。このホログラフィック超伝導を用いて、様々な性質を調べた。

AdS/CFTの現実の強結合系への応用は近年進展が著しいため、期間中しばしば新たな進展が起こった。そこで分野の発展とともに適宜新しい研究課題にも取り組んだ。

4. 研究成果

(1) AdS/CFTでのKibble-Zurek機構

二次相転移を起こす系を急冷すると、位相欠陥が自発的に生成される。例えば、超伝導では渦糸(vortex)がそれにあたる。系を急冷することで対称性が破れるが、空間的に隔たった領域は違う状態を取りうるからである。相関が保たれる典型的なサイズは、スケール則に従うことが知られている。

AdS/CFTでも、このKZ機構はホログラフィック超伝導を使い調べられているが、困難な数値計算によるものであり、結果そのものに対する物理的理解も進んでいない。そこで、我々はスケール則をAdS/CFTの立場から解析的に、比較的容易な議論で導出した。

通常の場合の理論では、このスケール則は系の対称性を用いて理解することができる。AdS/CFTでは、重力系を解くことで強結合場の理論を解く。したがって、AdS/CFTでも、本来重力系の対称性からスケール則を理解できるはずである。しかし、重力系の場合、その対称性はあらわには見えず、emergentな対称性であることが判明した。

(2) 超伝導の増強

時間依存する外場の下では、超伝導が増強され転移温度が増大することが知られている。これが高温超伝導体でも起こると主張する実験的な報告がある。通常の場合の超伝導では増強の効果は小さく、転移温度の増加はわずかだが、この報告によると増加は大きく、しかも

擬ギャップ相との相境界で起こっているようであり、高温超伝導の相図を理解する上で重要となる可能性がある。

そこで、まずAdS/CFTの枠内で超伝導の増強が可能かどうかを調べた。このテーマについては先行研究がある。シルバースタインらは、ホログラフィック超伝導を使い、この現象を調べているが、この研究には深刻な疑義がある。彼女らは、時間依存する外場として、化学ポテンシャルを使っているが、このような時間依存性は物理的に意味がないと考えられるからである。

そこで、その研究の問題点を指摘した上で、この現象を正しく扱う方法を提案した（時間依存する電場）。しかし、残念ながらホログラフィック超伝導では、増強が起きないことが判明した。これは超伝導の増強が、強結合超伝導体では（少なくとも従来のメカニズムでは）難しいことを示唆しており、報告された増強は従来とは異なるメカニズムで起こっているとも考えられる。

(3) AdS/CFTとその応用についての教科書執筆

AdS/CFTの「現実世界」への応用は、この10年で急激な進展が見られた分野であり、まだまとまった形での教科書は存在しなかった。そこで、これまでの研究を基として、日本語教科書ならびに英語教科書を執筆した。英語版は日本語版の単なる翻訳ではなく、大幅に改訂されたものであり、ページ数も1.5倍へと増加した。また英語版は、著名な“Lecture Notes in Physics”のシリーズとして出版された。このシリーズからの出版には、通常の書籍プロポーザルのレビューだけではなく、Editorial boardからのプロポーザル承認および実際の原稿を査読した上での出版承認を要する。その意味で出版にはハードルが高いが、幸いにして高い評価を得た。

(4) 背景流のある超流動の不安定性
超流動流の不安定化機構には、素励起不安定性と渦生成不安定性がある。異なる機構にもかかわらず、それらは動的な密度揺らぎの増大を通じて統一的に理解できることが、弱結合希薄ボーズ系に適用可能なグロス・ピタエフスキー（GP）方程式を用いて指摘されている。強結合する凝縮場でも同様の性質が現れるか、AdS/CFTで調べることは興味深い。そこで渦生成不安定性を念頭に、渦生成の引き金となる障害物ポテンシャルをもつホログラフィック超伝導を解析した。まずGP方程式の場合と同様、超流動流不安定化がサドル・ノード分岐型であることを明らかにした。そして、凝縮場の動的揺らぎへの障害物ポテンシャルの影響を詳細に調べた。

(5) 温度ゼロ荷電ブラックホールの摂動解
AdS/CFTの物性系への応用では、しばしば温度ゼロの荷電ブラックホールを利用する。しかし、通常、そのようなブラックホール背景時空上の物質場の振る舞いのみが調べられ、時空への物質場の影響（反作用）については詳しく調べられていない。そこで、物質場の反作用を取り入れた静的時空の計量を摂動的に構成し、因果構造と特異点構造を調べた。その結果、亜臨界荷電ブラックホールの因果地平面は曲率特異点となり、強い宇宙検閲仮説を満たすこと、臨界荷電ブラックホールの場合、十分長波長の摂動に対して事象の地平面が特異点になること、などを示した。

(6) AdS/CFTとメンブレン・パラダイムの関係

場の理論は、低エネルギーでは流体力学に帰着するので、AdS/CFTによると重力理論は流体と対応する。もっとも、この対応については、AdS/CFT以前からメンブレン・パラダイムを始めとする様々な手法が存在する。

重力の基本変数はメトリック（重力摂動）であるが、一方流体の基本変数は流体変数（速度場）である。したがって、重力と流体を比べるうえで、流体変数と重力摂動の関係を同定する必要がある。ところが、AdS/CFT以外の多くの手法では、これを恣意的に定めているだけである。そこで、流体変数を重力摂動の応答として定める、という手法を提案した。こうして流体変数を消去することで、重力・流体どちらも重力摂動で記述され、直接的な比較を可能とした。

<引用文献>

Kaiser et al., Phys. Rev. B, 89, 2014, 184516.

Bao, Dong, Silverstein, and Torra, JHEP1201, 2012, 103.

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)

Makoto Natsuume and Takashi Okamura, Kibble-Zurek scaling in holography, Phys. Rev. D, 95, 2017, 106009-1--10, 査読有 doi: 10.1103/PhysRevD.95.106009

Akihiro Ishibashi, Kengo Maeda and Takashi Okamura, Holographic superfluid flows with a localized repulsive potential,

Phys. Rev. D, 94, 2016, 046007-1--11, 査読有

doi:10.1103/PhysRevD.94.046007

Makoto Natsuume and Takashi Okamura,
The enhanced holographic superconductor:
is it possible?, JHEP08, 2013, 139 (27pp.) ,
査読有

doi:10.1007/JHEP08(2013)139

Yoshinori Matsuo, Makoto Natsuume,
Masahiro Ohta, and Takashi Okamura, "The
Incompressible Rindler fluid versus the
Schwarzschild-AdS fluid," PTEP 2013,
023B01 (18pp.) , 査読有

doi:10.1093/ptep/pts069

Kengo Maeda, Takashi Okamura, and
Jun-ichirou Koga
Inhomogeneous charged black hole solutions
in asymptotically anti-de Sitter spacetime
Phys. Rev. D, 85, 2012, 066003-1--11, 査読有

doi:10.1103/PhysRevD.85.066003

〔図書〕(計2件)

Makoto Natsuume, AdS/CFT Duality User
Guide (Lecture Notes in Physics 903),
Springer, 2015, 294pp.

doi:10.1007/978-4-431-55441-7

夏梅 誠, 超弦理論の応用 物理諸分野でのAdS/CFT双対性の使い方, サイエンス社SGCライブラリ, 2012, 203pp.

〔その他〕

アウトリーチ活動(解説記事)

夏梅 誠, インフォメーション・パラドックスとは何か, 数理科学2016年5月号.

夏梅 誠, 超弦理論と実験, 数理科学2013年11月号.

夏梅 誠, ブラックホールはもっとも完全流体に近い?, 日本流体力学会誌「ながれ」vol 31, 2012, 387-395.

夏梅 誠, ブラックホールからストレンジメタルへ, パリティ vol. 28, No. 6, 2013.

夏梅 誠, ホログラフィー原理仮説と弦理論, 数理科学2011年12月号.

ホームページ等

<http://research.kek.jp/people/natsuume/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

夏梅 誠 (Natsuume Makoto)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子
原子核研究所・研究機関講師
研究者番号: 90311125

(2) 研究分担者

岡村 隆 (Okamura Takashi)
関西学院大学・理工学部・教授
研究者番号: 30351737