

機関番号：82118

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2011

課題番号：20540285

研究課題名 (和文) 超弦理論によるクォーク・グルーオン・プラズマの物理

研究課題名 (英文) Physics of quark-gluon plasma using string theory

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

研究成果の概要 (和文)：本研究では、超弦理論の AdS/CFT 双対性をクォーク・グルーオン・プラズマや強相関の物性系といった現実の物理系へと応用した。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 双対性によると、強結合の場の理論はブラックホールと等価だとされ、ブラックホールによるこれらの物理の解析の可能性が開かれた。本研究では、特に (1) 因果的流体力学の解析、(2) 二次相転移点での臨界現象の解析、(3) 強結合超伝導系への応用について成果をあげた。

研究成果の概要 (英文)：We applied the AdS/CFT duality in superstring theory into real-world systems such as quark-gluon plasma and condensed-matter systems. Because strongly-coupled computations are necessary to understand those systems, there was little progress in theoretical computations. However, the AdS/CFT duality claims that strongly-coupled field theories are equivalent to black holes, so computations become possible using black holes. In particular, we analyze (1) transport coefficients of causal hydrodynamics, (2) critical phenomena near second-order phase transitions, (3) and analysis of strongly-coupled superconductors.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：素粒子論

科研費の分科・細目：物理学 (分科)・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理 (細目)

キーワード：素粒子論、超弦理論、AdS/CFT 双対性、クォーク・グルーオン・プラズマ、流体力学、超伝導

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) でのブラックホールと等価である。AdS/CFT は、ブラックホール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挙げられる。

たとえば、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) は、QCD の非閉じこめ相である。ブ

ルックヘブン国立研究所 RHIC での実験によると、QGP は強く相互作用している。このような状況において、強結合でのゲージ理論に対して予言可能性を持つ AdS/CFT は、格子数値計算とは別の計算手段を与えるものとして注目されている。

AdS/CFT によると、強結合のゲージ理論プラズマのずり粘性率は、きわめて小さい普遍的な値をもつ。この値は、RHIC 実験結果に近く、実験のプレスリリースでも言及された。本研究に入る以前、我々はこの普遍性が精力的に調べられるきっかけとなった研究を行った。当時、普遍性が成り立たないと思われていた状況下でも、普遍性の成立を示したからである。この仕事が契機となり、さまざまな場合で普遍性の成立が調べられた。

このように AdS/CFT 双対性の応用は多分野で注目され、また我々も各種の成果を挙げている。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

当初、主に以下のテーマの解析を目的としていた：

(1) 因果的流体力学の解析：QGP の解析では、通常の流体力学ではなく「因果的流体力学」を使う必要性が示唆されている。この場合、新たな輸送係数が現れることが知られているが、これらの輸送係数を強結合のゲージ理論の立場から計算することは著しく困難である。そこで、ブラックホールの立場からこれらの輸送係数を求める。

(2) 二次相転移点での臨界現象の解析：QCD の相図には、二次相転移を起こす臨界点が存在すると考えられ、理論的にも実験的にも大きな注目を集めている。そこで、二次相転移を起こす AdS ブラックホールを使い、臨界現象を調べる。

これらの目的に沿って、実際の研究がおこなわれた。(2) の当初の目的は、AdS/CFT 双対性が二次相転移近傍でも通常の統計系の結果を正しく再現するかどうかであった。すなわち、臨界現象を通して、AdS/CFT 双対性が確からしいことを示すのが主目的であった。しかし、研究が進展するについて、臨界現象について今までに得られていなかった知見が得られ、また QCD および物性系への応用という意味でも興味深い知見が得られた。

3. 研究の方法

AdS/CFT 双対性に従って、基本的に様々な摂動を加えた場合のアインシュタイン方程

式を解いた。もっとも、現実の強結合系への応用のためには厳密解は必要ではなく、しばしば摂動の低エネルギー・長波長近似で十分である。これは場の理論の言葉では、流体力学極限に相当する。そこで、そのような近似の下で、アインシュタイン方程式を解析的および数値的に解き、結果を流体力学と比較して、流体力学の輸送係数を決定した。

この分野は近年進展が著しく、研究期間中に QGP だけではなく物性系への応用も議論されるようになった。そこで、物性系への応用も見据えて研究を進めることにした。特に「ホログラフィック超伝導」と呼ばれるモデルは、通常の超伝導同様、二次相転移を起こし、そこでは我々が培った(2)の手法が使えるため、臨界現象を中心に研究した。

4. 研究成果

(1) 因果的流体力学の解析：ブラックホールの立場から、強結合ゲージ理論に対して因果的流体力学の輸送係数を求めた。特に着目したのは一般的な傾向・特徴である。このため、該当する輸送係数を様々なブラックホール(様々なゲージ理論)で系統的に見積もった。我々の仕事で求めた因果的流体力学の輸送係数は、QGP の数値計算にも広く用いられている。また、我々の研究がきっかけとなり、超弦理論、原子核理論両分野で因果的流体力学の研究が活発に行われた。

(2) 二次相転移点での臨界現象の解析

① 二次相転移を起こす AdS ブラックホールを使い(ホログラフィック超伝導もその1つ)、静的臨界指数や動的臨界指数を求め、それらが通常の臨界現象の理論通りの振るまいをすることを確かめた。ブラックホールに対して

- ・静的臨界指数をすべて求めたこと
- ・動的臨界現象が調べられたこと

はいずれも本研究がはじめてである。

② QCD の動的臨界指数は、Hohenberg - Halperin の分類でモデル H の振るまいとされている。AdS/CFT を使い、改めてこの問題を調べた。ラージ- N_c SU(N_c) ゲージ理論では、モデル H の効果は $1/N_c^2$ で抑えられ、モデル B との区別が困難であることが判明した。この結果から、モデル H の効果は重イオン実験では実際には観測が難しいことを指摘した。

(3) 物性系への応用

① (2) の方針に従って、ホログラフィック超伝導に対しても臨界指数を求め、通常の超伝導の場合の振るまいを確認した。

② AdS/CFT で調べられている系では、ずり粘性率とエントロピー密度の比は強結合で普遍的な値を持つことが知られているが、ホログラフィック超伝導に対してこのずり粘性率を調べた。ホログラフィック超伝導でも普遍的な値を持ち、常流動相でも超流動相でも同じ値になることを示した。ただし、一部の系ではこの結果が成り立たないこともわかった。現時点で、普遍性が成り立たないことが知られている系はこれらだけであり、このため我々の結果を踏まえて様々な研究がなされている。

③ 超伝導体は、磁場への反応の違いによって第 I 種と第 II 種に分けられるが、第 II 種超伝導では、全体として超伝導状態を保ちつつ磁気侵入が起こる。この磁気侵入は渦糸の生成という形で起こる。ホログラフィック超伝導は第 II 種超伝導であるため、このモデルでアブリコソフ渦糸格子を構成した。さらに、超伝導の平均場理論、ギンツブルグ-ランダウ理論によると、渦糸格子の配位として三角格子がもっとも安定な配位であるが、ホログラフィック超伝導でも同じ結果が成り立つことを示した。

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 12 件)

① Kengo Maeda, Takashi Okamura, Vortex flow for a holographic superconductor, Physical Review D、査読有、83、2011、06604-1--9

② Makoto Natsuume, Takashi Okamura, Dynamic universality class of large-N gauge theories, Physical Review D、査読有、83、2011、046008-1--10

③ Makoto Natsuume, Masahiro Ohta, The shear viscosity of holographic superfluids, Progress of Theoretical Physics、査読有、124、2010、931-951

④ Makoto Natsuume, Critical phenomena in the AdS/CFT duality, Progress of Theoretical Physics Supplement、査読有、186、2010、491-497

⑤ Kengo Maeda, Makoto Natsuume, Takashi Okamura, Two pieces of folklore in the AdS/CFT duality, Physical Review D、査読有、82、2010、046002-1--11

⑥ 前田健吾, AdS/CFT 対応の超伝導理論への挑戦、日本物理学会誌、査読有、65、2010、94-97

⑦ Kengo Maeda, Makoto Natsuume, Takashi Okamura, Vortex lattice for a holographic superconductor, Physical Review D、査読有、81、2009、026002-1--10

⑧ Kengo Maeda, Makoto Natsuume, Takashi Okamura, Universality class of holographic superconductors, Physical Review D、査読有、79、2008、126004-1--13

⑨ Kengo Maeda, Takashi Okamura, Characteristic length of an AdS/CFT superconductor, Physical Review D、査読有、78、2008、106006-1--6

⑩ Kengo Maeda, Makoto Natsuume, Takashi Okamura, Dynamic critical phenomena in the AdS/CFT duality, Physical Review D、査読有、78、2008、106007-1--11

⑪ Makoto Natsuume, String theory implications on causal hydrodynamics, Progress of Theoretical Physics Supplement、査読有、174、2008、286-297

⑫ Makoto Natsuume, Causal hydrodynamics and the membrane paradigm, Physical Review D、査読有、78、2008、066010-1--5

[図書] (計 1 件)

① 夏梅 誠, 超ひも理論への招待、日経BP社、2008、282.

[その他]

アウトリーチ活動 (解説記事) :

① 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.

② 中村 真, 夏梅 誠, 超弦理論がつなぐブラックホールと流体力学、物性研究 vol. 54、2010、350; 素粒子論研究 vol. 118、No. 2、2010に転載.

③ 夏梅 誠, 線形応答理論で学ぶAdS/CFT双対性、原子核研究 vol. 54 Supplement 3、2010、110; 素粒子論研究 vol. 118、No. 2、2010に転載.

④ Makoto Natsuume, “String theory meets QCD again,” *KEK Annual Report 2008, Research Highlights*.

⑤ 夏梅 誠、曲がった時空を使って場の量子論を解く、*バリテイ* vol.24、No.3、2009.

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

前田健吾 (Maeda Kengo)

芝浦工業大学・工学部・准教授

研究者番号：10390478

(3) 連携研究者

なし