

機関番号：12601
研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2008～2010
課題番号：20540256
研究課題名（和文） 超弦理論と超対称ゲージ理論における超対称性の破れ
研究課題名（英文） Supersymmetry Breaking in Superstring Theory and Supersymmetric Gauge Theories
研究代表者 大栗 博司（Hirosi Ooguri）
東京大学・数物連携宇宙研究機構・主任研究員
研究者番号：20185234

研究成果の概要（和文）：超対称性の破れの一般化されたゲージ媒介機構において、低エネルギー有効理論で超対称性を破る項を計算する新しい手法を開発した。また、AdS/CFT 対応をつかって空間変調を起こす新しい相転移現象を発見し、この相転移現象が QCD の酒井・杉本模型のクォーク・グルーオン・プラズマ相で起きることを指摘した。

研究成果の概要（英文）： We studied the generalized gauge mediation of supersymmetry breaking effects and developed a new method to compute supersymmetry breaking low energy effective theory terms. We also used the AdS/CFT correspondence to discover a new spatially modulated phase transition and pointed out that such a phase transition takes place in the quark-gluon-plasma phase in the Sakai-Sugimoto model of QCD.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：①素粒子論、②超対称性、③超弦理論

1. 研究開始当初の背景

超対称性は素粒子理論の階層構造のナチュラルネスの問題に対する解答をあたえ、超対称性を持つ理論は宇宙の暗黒物質の有望

な候補となる粒子を含み、また超対称性は超弦理論の理論的整合性のために必要である。そのため、超対称性を持つ場の量子論は素粒子の標準理論を超える理論の最も有望な候補の一つと考えられている。現在の素粒子の

標準理論は超対称性を持っていないので、自然界の基本法則が超対称性を持っているとすると、超対称性は弱電磁相互作用のエネルギースケールより高いところで自発的に破れていないといけない。一方で、超対称性がナチュラルネスの問題の解決に関与しているならば、この数年以内にヨーロッパ統合原子核研究機構（CERN）の大ハドロン衝突器（LHC）を使った実験で超対称性で予言される新粒子が発見される可能性が高いとされている。したがって、超対称性を持つ素粒子のモデルの構成、およびそのモデルの中での超対称性の自発的破れの機構の分析は素粒子理論の焦点の課題である。

超対称性を持つ素粒子の現象論的モデルの構成は長年にわたって研究されてきたが、最近になって、ゲージ理論や超弦理論の数理的な研究からもたらされた新しい知見によって、以前には考えられてこなかった素粒子のモデルの可能性があることがわかってきた。大栗博司は、超弦理論における超対称性の破れの機構についても、すでにいくつかの成果をあげており、この方向の研究にも更なる進歩が期待できた。

2. 研究の目的

本研究では、超対称性を破る真空における超弦理論の振る舞いを、ゲージ理論と弦理論の't Hooft 対応（例えば、AdS/CFT 対応とその一般化）によって、ゲージ理論の問題に翻訳することで理解することを目指した。

超弦理論においては、これまで様々な厳密な結果が得られており、またその深い数学的内容も明らかになって来た。しかし、これまでのところ、超弦理論の強力な結果は、もっ

ぱら超対称性が保たれている状況に限って得られており、超対称性が自発的に破れているような場合については、場の理論を使った近似（いわゆる超重力場近似）に頼るほかは有益な結果はほとんど得られていないのが現状であった。本研究では、超対称性を破る真空における超弦理論の振る舞いを、ゲージ理論と弦理論の't Hooft 対応（例えば、AdS/CFT 対応とその一般化）によって、ゲージ理論の問題に翻訳することで理解することを目指した。

暗黒エネルギーの本性の解明は、長期的な目標である。超対称性の破れの機構についての知見を深めることで、この大きな目標に向かう進歩に貢献できると考えた。

3. 研究の方法

本研究の開始当時には、超対称性をもつゲージ理論における準安定な真空の解析や準安定な真空を使った現象論的なモデルの構成について、すでに具体的なプロジェクトが進行中であったが、このプロジェクトの完成には、今回の科学研究費補助金によって共同研究者を呼び寄せて研究ができたことが重要であった。

さらに、その後の研究においては東京大学数物連携宇宙研究機構の研究者との意見交流が重要であった。数物連携宇宙研究機構は、超対称性を使った素粒子のモデル構成の中心地のひとつであり、現象論的見地から、必要とされる理論的手法について示唆を受け、これに基づいて国内外の理論物理学者と共同研究を行った。

4. 研究成果

論文⑩では、超対称性の破れの一般化されたゲージ媒介機構について、低エネルギー有効理論の超対称性を破る項の計算方法を開発した。この方法では超対称性を破る Hidden Sector の非摂動的効果も計算に入れることができた。この成果は、本研究以前の研究結果と合わせて、著名なレビュー雑誌 Annual Review of Nuclear and Particle Physics に招待総説記事として発表した（論文④）。

また、研究の目的でもあげた、AdS/CFT 対応を使ったゲージ理論の理解としては、空間変調のある相転移現象のホログラフィックな記述を開発した。3次元では、ゲージ理論の通常のマックスウェル項にチャーン・サイモンズ項が付け加わるとゲージ場が質量を持つことが知られている。我々は5次元の場合にはチャーン・サイモンズ項がゲージ場の不安定性を起こすことを発見した。電場が一定の配位では、マックスウェル項とチャーン・サイモンズ項をもつゲージ場には、有限運動量で不安定が生ずる。これをホログラフィックに4次元の見方から解釈すると、4次元の共形場理論の有限密度状態が空間変調をもつ相転移を起こすことが示された。具体的には、酒井・杉本の QCD のモデルで、クォーク・グルーオン・プラズマ相においてこのような現象が起こることを指摘した。この結果は査読雑誌掲載論文①、②、⑤として発表され、また国際研究集①、③でも招待講演を行った。

超対称性の破れの機構の解明は、この数年の間に画期的な発展を遂げている。特に、Kachru, Kallosh, Linde, Trivedi は、超弦理論の Calabi-Yau コンパクト化に一般化された磁場を導入し、さらにインスタントン効果などの非摂動的効果を取り入れること

で、弦理論の枠組みの中で超対称性が準安定真空において破れる機構を提案した。この、いわゆるフラックス・コンパクト化の機構については、理論的に不明な点が多く、実際に準安定な真空が構成できているのかどうかについて疑義がある。一方、この機構は、超弦理論が天文学的な数の準安定な真空を持つ可能性を示唆することにより、素粒子理論や宇宙論に大きな影響をあたえている。そのため、その理論的基礎である準安定な真空の存在を確認することは、重要な問題である。フラックス・コンパクト化の理解のための新しい理論的手法の開発のため、Berkovits 形式を詳しく研究した。

また、この研究の自然な流れとして、カラビ・ヤウ多様体を使ったコンパクト化における D ブレーンの量子束縛状態を数え上げる方法を開発した。この問題は、研究代表者の大栗が以前から研究しているトポロジカルな弦理論の方法を深い関連がある。論文⑧では、トーリック型のカラビ・ヤウ多様体の場合に、束縛状態の数え上げの問題が、ダイマー模型と呼ばれる統計模型の問題と等価であることを示した。この統計模型は、厳密に解くことができる。これによって得られた束縛状態の計算は、カラビ・ヤウ多様体の幾何学構造の量子化と深い関連があることがわかった。また、論文⑦では、統計模型の熱力学極限を使って、D ブレーンの荷電が大きくなる極限の評価し、この極限で量子化されたカラビ・ヤウ多様体から滑らかな古典的な多様体の幾何が再現されることを示した。この成果については、国際研究集会②、④でも招待講演を行った。

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10件)

- ① “Spatially Modulated Phase in Holographic Quark-Gluon Plasma,” Hiroshi Ooguri, Chang-Soon Park, Phys. Rev. Lett. 106: 061601, 2011. 査読有
- ② “Holographic End-Point of Spatially Modulated Phase Transition,” Hiroshi Ooguri, Chang-Soon Park, Phys. Rev. D82: 126001, 2010. 査読有
- ③ “Notes on the K3 Surface and the Mathieu Group M24,” Tohru Eguchi, Hiroshi Ooguri, Yuji Tachikawa, Exper. Math. 20: 91, 2011. 査読有
- ④ “Supersymmetry Breaking and Gauge Mediation,” Ryuichiro Kitano, Hiroshi Ooguri, Yutaka Ookouchi, Annual Review of Nuclear and Particle Science 60: 491, 2011. 査読有
- ⑤ “Gravity Dual of Spatially Modulated Phase,” Shin Nakamura, Hiroshi Ooguri, Chang-Soon Park, Phys. Rev. D81: 044018, 2010. 査読有
- ⑥ “Supersymmetric non-relativistic geometries in M-theory,” Hiroshi Ooguri, Chang-Soon Park, Nucl. Phys. B824:136-153, 2010. 査読有
- ⑦ “Emergent Calabi-Yau Geometry,” Hiroshi Ooguri, Masahito Yamazaki, Phys. Rev. Lett. 102: 161601, 2009. 査読有
- ⑧ “Crystal Melting and Toric Calabi-Yau Manifolds,” Hiroshi Ooguri, Masahito Yamazaki, Commun. Math. Phys. 292:179-199, 2009. 査読有
- ⑨ “Superconformal Chern-Simons Theories and the Squashed Seven Sphere,” Hiroshi Ooguri, Chang-Soon Park, JHEP 0811:082, 2008. 査読有
- ⑩ “Current Correlators for General Gauge Mediation,” Hiroshi Ooguri, Yutaka Ookouchi, Chang-Soon Park, Jaewon Song, Nucl. Phys. B808:121-136, 2009. 査読有

[学会発表] (計5件)

- ① Hiroshi Ooguri, “Spatially Modulated Phases,” Aspen Winter Conference “Strongly Correlated Systems and Gauge/Gravity Duality” (Aspen Center for Physics, Aspen, Colorado, January 31 - February 5, 2011).
- ② Hiroshi Ooguri, “Topological String Theory,” Sanya International Mathematical Forum (Sanya, Hainan Island, China, December 22 - 25, 2010).

- ③ Hiroshi Ooguri, “Instability with Chern-Simons Terms,” Strings 2010 (Texas A & M University, College Station, Texas, March 15-19, 2010).
- ④ Hiroshi Ooguri, “Topological Strings and Crystal Melting Revisited,” Strings 2000 (Pontificia Universita S. Tommaso, Rome, Italy, June 22-26, 2009).
- ⑤ Hiroshi Ooguri, “Summary Talk,” Strings 2008 (CERN, August 18-13, 2008), “Summary Talk”

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

- (1) 研究代表者 大栗 博司
(Hiroshi Ooguri)
東京大学・数物連携宇宙研究機構
・主任研究員

研究者番号：20185234

- (2) 研究分担者
()

研究者番号：

- (3) 連携研究者
()

研究者番号：