

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 25 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740153

研究課題名（和文） 一般的な超弦理論とその応用

研究課題名（英文） Generic Superstring Theory and its Applications

研究代表者

ヘラーマン シメオン (HELLERMAN Simeon)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任准教授

研究者番号：70534949

研究成果の概要（和文）：弦理論は宇宙のすべての物質と重力を含むそれらの相互作用を統一的に記述する量子論の有力候補である。これまで、摂動論を越える「ひも」の力学について考察の大部分は高い超対称性を持つ、つまり厳密にゼロ（または負）の真空エネルギーと整数および半整数のスピンを持つ粒子間の厳密な対称性を持つ配位についてであった。私の研究は超対称性が完全に破れた状態での弦理論研究にいくつかの新しい方法とアイデアを持ちこんだ。私の研究および共同研究者の研究によって、今では弦理論の超対称性のない状況の多くについて弱結合展開を越えた定量的な研究ができるようになった。

研究成果の概要（英文）：String theory is the leading candidate for a unified quantum theory of all matter in the Universe and its interactions, including gravity. Previously, the majority of understanding of string dynamics beyond perturbation theory, came from highly supersymmetric configurations of string theory -- those with exactly zero (or negative) vacuum energy and an exact symmetry between particles of integer and half-integer spin. My research developed a new set of techniques and ideas to study string theory in phases with fully broken supersymmetry. Due to my work and that of my collaborators, we now have the ability to understand many non-supersymmetric regimes of string theory quantitatively, beyond the weak coupling expansion

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：超弦理論、超対称性、ホログラフィー、ヴァシリエフ重力理論、オメガ変形、カーラー・ポテンシャル、繰りこみ

1. 研究開始当初の背景

弦理論は宇宙のすべての物質と重力を含むそれらの相互作用を統一的に記述する量子

論の有力候補である。これまで、「ひも」の力学についての考察の大部分は次の二つの形を取った。第一は個別の「ひも」の間に任

意に小さいがゼロではない力が作用する場合の摂動論の使用である。第二は高い超対称性を持つ、つまり厳密にゼロ（または負）の真空エネルギーと整数および半整数のスピンの持つ粒子間の厳密な対称性を持つ配位に関する研究である。しかし弦理論を系統立てて解析する手法、さらに言えば摂動展開を越えて素粒子物理学を記述する量子場理論、は存在しない。しかし、特に宇宙現象のように、多くの重要な現象は超対称性が大きく破れた状況での非摂動的量子重力理論に関係する。したがって、これは我々の科学研究にとって非常に困った欠陥である。このギャップを可能なかぎり埋めることが重要な試みだと考えたことが、この科研費研究で提案した研究テーマである超対称性が大きく破れた状況での弦理論と量子重力の研究の動機である。

2. 研究の目的

明らかに、超対称性を持たない理論では一般に厳密解を求めることは難しい。しかし、超対称性がない理論における特徴的な現象をうまく現わすようにデザインされた特殊なモデルを分析することによって、超対称性が存在しない状況での超弦理論および関連する量子場理論の非摂動レベルでの重要な特徴を学べると期待する。

3. 研究の方法

次の3つの重要な性質を共有するモデル群を検討することによって研究を進める。第一にこれらの理論は、強結合現象の厳密な解析や強結合と弱結合の効果に関連づける双対性から我々が弦理論に関してこれまでに学んできたことすべてを活用して、摂動論的手法を越えた解析を行う必要があることである。第二にこれらのモデルが超対称性を破る（完全にしろ、部分的にしろ）だけでなく、超対称性のない系に特徴的な兆候を示すことである。第三にこれらのモデルは解析的な扱いが可能であることである。厳密解が無理な場合、少なくとも、ここで研究対象としている非超対称的現象に関連する系の特徴を示す確率振幅のうちいくつかは、制御不可能な展開やどんなタイプの外挿も使わずに計算でき、超対称性のない場合の振る舞いの信頼のおける推察ができなければならない。

4. 研究成果

上で述べた研究計画は高エネルギー物理学のいくつかの分野の現状に大きなインパクトをもたらした。

(A) 共形場理論への制約

この研究がもたらした大きな進展のひとつは、2次元の離散スペクトルを持つ一般的な

ユニタリー共形場理論の性質に制約を与える二つの新手法の開発である。結果は最近開発された新ブートストラップ法に近い。しかし我々の結果はより強力で、中心電荷が一般の場合に適用でき、演算子のスペクトルへの特殊な制約がなく、複雑な4点関数の交差対称性を使うかわりに、より簡単なモジュラー不変性の方法を使っている。この方法の一番簡単な場合、理論に含まれる最も共形次元の低い非自明なプライマリー演算子（以下、最低プライマリー演算子と呼ぶ）のウェイトの上限を与える。これは、AdS/CFT 対応を使って *anti-de Sitter* 空間の重力理論によるホログラフィックな解釈がなされた場合、重力部分を除いた最低質量粒子の質量の上限を与える。さらに、我々の方法は最低プライマリー演算子のウェイトを共形場理論の熱的集団のエントロピーとマイクロカノニカル・アンサンブルにおける縮重度とを関連づけるために使うこともできる。ひとつの特別な応用として、最低プライマリー演算子のウェイトに一定の仮定を与えた場合、マージナル演算子の数に制限を与えることができる。我々の方法はその後、別の研究者によってカラビ・ヤウコンパクト化に拡張され、シグマ模型のスペクトルに一定の仮定を与えた場合にカラビ・ヤウ 3次元多様体のモジュライ数の制限を与えた。ここで得られた制限は驚くほどカラビ・ヤウ 3次元多様体で解かっているモジュライ数の最大値に近い。

(B) ホログラフィーと高スピン重力

海外の共同研究者とともに *anti-de Sitter* 空間で2以上のスピンを持つゲージ場に結合する重力の理論（一般に超対称性がない）の力学を、時空の境界に定義されるホログラフィック双対な共形場理論を使って分析した。4次元バルクと3次元の境界の場合、双対な関係にある共形場理論は比較的簡単で、ゲージ群のランクと Chern-Simons 理論のレベルが両方とも大きいとした場合、基本表現に属する物質に結合する Chern-Simons 理論で表現される。この場合、「Vasiliev 重力」として知られているバルク内での高スピン重力有効理論が、球体あるいは無限に平坦な背景についてのすべての相関関数を正確に記述する。しかし、我々の発見によると Vasiliev 重力が根本的に不完全で、時空の境界が可縮でないループを含む幾何形状である場合に現れる低エネルギーでのトポロジカルセクターに対応した膨大な数の状態を補ってやる必要がある。この結果は Vasiliev 理論がさらにずっとたくさんの自由度を持つ理論の中に組み込まれる必要があることを示している。多分それは弦理論であろう。

(C) オメガ変形の弦理論

日本および海外の共同研究者とともにゲージ理論で「オメガ変形」と呼ばれる現象を弦

理論でとらえる研究を行った。このゲージ理論における変形は、3形式フラックス、曲がった計量、または位置に依存する「ひも」の結合などの弦理論の背景解によって変形された時空の中にブレーンを置くことで実現することができる。一連の論文で、この背景の中での「ひも」とブレーンの力学を考察し、弦理論が持つ網の目のような双対性のもとでのさまざまな位置づけと変換を考察した。これにより、スピン鎖との関連、幾何学的表現論、非可換幾何、トポロジカル・ストリングなど、この背景が持つすでに知られているが依然として良く理解されていない多くの性質に光を投げかけた。さらに、ある特殊なケースではいわゆる AGT 関係と呼ばれる関係（オメガ変形された超対称ゲージ理論と超対称性のない Liouville/戸田理論との関係）が、M 理論に乗せた後にオメガ変形の定義に使われた等長回転の軌道上への再コンパクト化によって導き出されことを示した。M 理論から IIB 型超弦理論へ双対変換すると、Liouville/戸田理論のいくつかの側面がはっきりと現れてくる。ひとつの驚くべき例は、弦理論に埋め込むことによって、我々が考察する Liouville/戸田理論における強結合と弱結合の間の双対性は、よく知られている IIB 型超弦理論の S 双対性に還元されることである。AGT 対応は大変興味深い双対性で、超対称理論と超対称のない理論の間の双対性の最初の例である。それを弦理論に組み込むことによって、我々は超対称性がない状況での弦理論の量子的振る舞いに関して重要な事柄を学び始めた。

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 7 件)

- ① Simeon Hellerman, “Light States in Chern-Simons Theory Coupled to Fundamental Matter”, JHEP, 査読あり, 1303, 2013, pp.97 DOI:10.1007/JHEP03(2013)097
- ② Simeon Hellerman, Domenico Orlando, Susanne Reffert, “String Theory of the Omega Deformation”, JHEP, 査読あり, 1201, 2012, pp.148 DOI:10.1007/JHEP01(2012)148
- ③ Simeon Hellerman, Domenico Orlando, Susanne Reffert, “The Omega Deformation From String and M-Theory”, JHEP, 査読あり, 1207, 2012, pp.61 DOI:10.1007/JHEP07(2012)061
- ④ Simeon Hellerman, “A universal inequality for CFT and quantum

gravity”, JHEP, 査読あり, 1108, 2011, pp.130

DOI: 10.1007/JHEP08(2011)130

- ⑤ Simeon Hellerman, Cornelius Schmidt-Colinet, “Bounds for state degeneracies in 2D conformal field theory”, JHEP, 査読あり, 1108, 2011, pp.127

DOI: 10.1007/JHEP08(2011)127

- ⑥ Simeon Hellerman, Eric Sharpe, “Sums over topological sectors and quantization of Fayet-Iliopoulos parameters”, Advances in Theoretical and Mathematical Physics, 査読あり, Vol.15, No.4, 2011 pp. 1141-pp.1199

<http://intlpress.com/site/pub/files/fulltext/journals/atmp/2011/0015/0004/ATMP-2011-0015-0004-00024592.pdf>

- ⑦ Simeon Hellerman, Matthew Kleban, “Dynamical Cobordisms in General Relativity and String Theory”, JHEP, 査読あり, 1102, 2011, pp. 22

DOI:10.1007/JHEP02(2011)022

[学会発表] (計 17 件)

- ① Simeon Hellerman, “Chern-Simons-Matter Theory and its Holographic Dual, MIT/CTP String/Gravity Theory Seminar”, 2013 年 3 月 6 日, MIT, Cambridge, U.S.A
- ② Simeon Hellerman, “Universal Inequalities for CFT and Quantum Gravity, OR, String Theory and its Implications”, SPOCK Meeting, 2013 年 3 月 2 日, University of Cincinnati, Cincinnati, U.S.A
- ③ Simeon Hellerman, “Chern-Simons-Matter Theory and its Holographic Dual, High Energy Theory Seminar”, 2013 年 2 月 27 日, University of Kentucky, Lexington, U.S.A
- ④ Simeon Hellerman, “Chern-Simons-Matter Theory and its Holographic Dual”, High Energy Physics Seminar, 2013 年 1 月 18 日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都市
- ⑤ Simeon Hellerman, “Chern-Simons-Matter Theory and its Holographic Dual”, Elementary Particle study group seminar, 2012 年 10 月 4 日, 東京大学駒場キャンパス, 東京都
- ⑥ Simeon Hellerman, “Chern-Simons-Matter Theory and its Holographic Dual”, UCB High-energy seminar, 2012 年 9 月 12 日, UC Berkeley, Berkeley, U.S.A

- ⑦ Simeon Hellerman,
 “Chern-Simons-Matter Theory and its Holographic Dual”, SITP High-energy theory seminar, 2012年8月30日, Stanford Institutue for Theoretical Physics, Palo Alto, U.S.A
- ⑧ Simeon Hellerman,
 “Chern-Simons-Matter Theory and its Holographic Dual”, KITP High-energy theory seminar, 2012年8月21日, KITP, Santa Barbara, U.S.A
- ⑨ Simeon Hellerman,
 “Chern-Simons-Matter Theory and its Holographic Dual, Cosmology and Complexity 2012”, 2012年6月9日, Hydra’s Historic Archives and Museum, Hydra, Greece
- ⑩ Simeon Hellerman,
 “A Universal Inequality for CFT and Quantum Gravity”, Simons Center Theory Seminar, 2010年12月14日, Stony Brook, U.S.A
- ⑪ Simeon Hellerman,
 “A Universal Inequality for CFT and Quantum Gravity”, Harvard University High Energy Theory Seminar, 2010年9月9日, Cambridge, U.S.A
- ⑫ Simeon Hellerman,
 “A Universal Inequality for CFT and Quantum Gravity”, Brown University High Energy Theory Seminar, 2010年9月7日, Providence, U.S.A.
- ⑬ Simeon Hellerman,
 ”A Universal Inequality for CFT and Quantum Gravity”, Summer School on Mathematical String Theory 2010, 2010年7月1日, Blacksburg, U.S.A.
- ⑭ Simeon Hellerman,
 ”Modular Averages and D-Instantons”, Summer School on Mathematical String Theory 2010, 2010年6月28日-30日, Blacksburg, U.S.A. Simeon Hellerman, ”A Universal Inequality for CFT and Quantum Gravity”, KITP Theory Seminar, 2010年4月29日, Santa Barbara, U.S.A.
- ⑮ Simeon Hellerman,
 “The Expanding Triniverse -- Dynamical Cobordisms in String Theory and General Relativity”, Berkeley String Theory Seminar, 2010年4月27日, Berkeley, U.S.A.
- ⑯ Simeon Hellerman,
 “A Universal Inequality for CFT and Quantum Gravity”, University of Kentrucky Physics Seminar, 2010年4

月7日, Lexington, U.S.A.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等
 無

6. 研究組織

(1) 研究代表者

ヘラーマン シメオン (Hellerman Simeon)
 東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・
 特任准教授
 研究者番号：70534949