

平成 22年 4月 1日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2006 ~ 2009

課題番号：18540265

研究課題名 (和文) 高次元超重力理論における超対称解の大域的構造と安定性の研究

研究課題名 (英文) Investigation of the large scale structure and stability of supersymmetric solutions in higher-dimensional supergravities

研究代表者

小玉 英雄 (KODAMA HIDEO)

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・教授

研究者番号：40161947

研究成果の概要 (和文) : 高エネルギー素粒子現象および宇宙進化の研究は、我々の宇宙が超ミクロのスケールでは5次元以上の次元をもつことを強く示唆している。この可能性を確かめるために、高次元の重力理論に基づく宇宙およびブラックホールの振る舞い、性質を調べた。成果として、高次元の時空から4次元時空が動的に導かれる過程を記述する解の候補を見いだした。さらに、高次元 Einstein 理論におけるブラックホールの安定性を組織的に解明し、特に負の宇宙定数をもつ高次元時空で高速回転ブラックホールが不安定となることを見いだした。

研究成果の概要 (英文) : The investigations of high-energy particle physics and the evolution of the Universe strongly suggest that our Universe has dimensions greater than 4 on super-micro scales. In order to make clear the validity of this suggestion, we have studied the behavior and properties of universe models and black holes in higher-dimensional gravity theories. As an achievement, we have found a candidate solution describing a dynamical process for a four-dimensional spacetime to be obtained from a higher-dimensional spacetime. Further, we have examined the stability of black holes in higher-dimensional Einstein gravity systematically, and among all, we have discovered that a rapidly rotating black hole is dynamically unstable in higher-dimensional spacetime with negative cosmological constant.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	900,000	0	900,000
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	3,400,000	750,000	4,150,000

研究分野：高次元宇宙論

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：高次元統一理論 重力理論 ブラックホール 安定性

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準モデルは、LEP 実験以降の

様々な実験により非常によい精度で検証され、低エネルギーにおける重力を除く相互作用

用に対する信頼できるモデルとなっている。しかし、ニュートリノ質量と混合の問題に代表される多くの事実から、標準モデルが最終的なモデルでないことは明らかである。そのいくつか（ハイパー電荷構造、ゲージ結合定数の統合、ニュートリノ質量、ダークマター）は（超対称）大統一理論への拡張により解決される可能性があるが、3世代の起源、ヒッグスの3重項-2重項分裂問題、インフラトンの超弱相互作用は、（インフレーション宇宙モデルがWMAPにより実質的に検証された事実を考慮すると）最終的な理論が高次元時空に基づく重力を含む統一理論であることを強く示唆している。今世紀最大の問題と見なされている宇宙項/ダークエネルギー問題は、このような枠組みでのみ解決可能であると思われる。

このような背景のもとで、現在唯一の厳密な統一理論であるM理論・10次元超重力理論・超弦理論に基づいて、宇宙項問題を解決し同時に宇宙初期のインフレーションを実現するモデルを構築する試みが多くの人々によりなされている。ただし、この試みには次の2つの大きな障害が存在する。

- 余剰次元のコンパクト化とモジュライ安定性の問題
- 宇宙の加速膨張に対する No-Go 定理

この問題に対して、最近、F理論・10次元IIB理論(+ブレイン)の枠内でモジュライの安定化と正の宇宙項を実現するモデルの可能性を示したKKLT構成法およびそれに基づいたインフレーションモデルであるKKLMMTモデルが提案され注目されている。しかし、これらは高次元インスタントンに起因する量子補正を考慮した4次元有効理論の枠内で上記の問題を解消しており、純粋に高次元理論の枠内で問題を解決したわけではない。特に、このアプローチで本質的な役割を果たす4次元有効理論は本来の高次元理論と同等でないという問題を抱えている。明らかに4次元有効理論を用いずに上記の障害を克服する方策を探る必要がある。

この課題に対する理想的なアプローチはM理論・10次元超重力理論の古典解を完全に分類し、その構造およびそれに対する量子補正を組織的に調べることである。この方法は一見不可能に見えるが、超対称性を持つ解に限れば、実行可能性がある。実際、最近いくつかの超重力理論で、組織的な超対称解の分類が実行されている。これらの解は、ブラックホール解やブラックブレイン解を含み、その研究は、高次元宇宙モデルの構築の基礎となるだけでなく、未だにほとんど解明されていない高次元ブラックホール・ブラックブレイン解の多様性についての情報を与える

ことが期待される。

## 2. 研究の目的

高次元超重力理論における超対称解の分類プログラムを具体化し、それにより得られた解の具体的表式を用いて解の表す時空の大域的構造を調べることにより、コンパクト化と超対称性の関係、宇宙モデルとなりうる超対称解の候補、4次元有効理論との関連、高次元ブラックホール解の分類を組織的に研究する。さらに、申請者がこれまでに開発した高次元時空におけるゲージ不変摂動論を拡張することにより、これらの解の安定性を調べる。これらを通して、高次元理論における様々な解の中で特別の解が宇宙進化により選ばれる可能性、超対称性と宇宙進化の関連および高次元ブラックホールの安定性について明らかにする。

## 3. 研究の方法

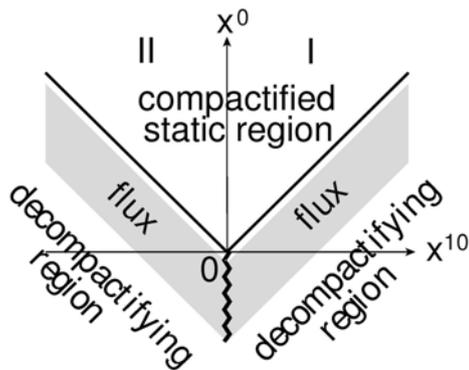
比較的独立性のある次の4つの課題を平行して研究する。

- (1) 高次元超重力理論における超対称解の分類：この問題については、Gauntlett, Gutowski らの方法 (Killing スピノールから作られる微分形式の満たす関係式から時空計量およびフラックスを分類する方法)を十分な研究がされていない11次元、10次元および6次元モデルに適用する。
- (2) 高次元超対称解のコンパクト化:すでに得られている高次元超対称解のフラックスコンパクト化により宇宙モデルを構成し、その振る舞いを調べる。さらに、その摂動論に基づいて4次元有効理論を構築し、高次元理論との同等性を検証する。(1)の結果に応じて新たな解についてこのプログラムを実行する。
- (3) ブレーンワールドモデルにおけるブラックホール: Kaluza-Klein 型コンパクト化と異なる方法で4次元理論を導く方法にブレーンワールドモデルがあるが、このモデルには解明すべき大域的問題が多く存在する。特に、その中で静的ブラックホール解の存在・非存在の問題を摂動論により研究する。
- (4) 高次元ブラックホール時空の構造と安定性解析:まず、すでに存在の知られている真空高次元回転ブラックホール解について、その内部構造および摂動安定性を調べる。摂動安定性の研究は、まずマスター方程式の導出に成功しているテンソル型摂動から始め、平行してスカラ型摂動およびベクトル型摂動の定式化を行う。

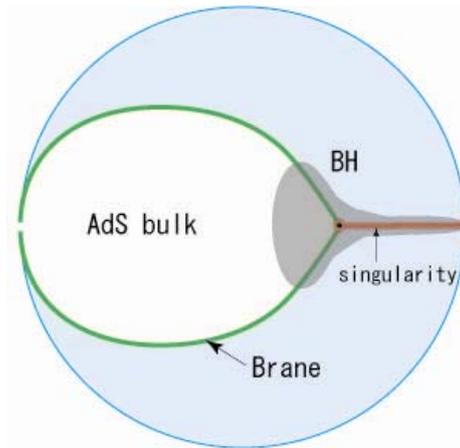
#### 4. 研究成果

主な成果は以下の通りである。

- (1) **M 理論のコンパクト化**：11次元超重力理論において、いくつかの任意関数を含む光的 Killing ベクトルをもつ超対称解 [T. Ishino, H. Kodama, N. Ohta: Phys. Lett. B631, 68 (2005)] の捻れたトーラスコンパクト化により、内部空間のサイズが時間的に変化し、11次元時空からコンパクト化された定常的な4次元時空への転移を記述する宇宙論的解を構成した。これは、M 理論の超対称性を保つフラックスコンパクト化で非特異な動的コンパクト化を初めて実現したものである。この成果は Prog. Theor. Phys. 誌に発表された。 [spires 引用数 15]

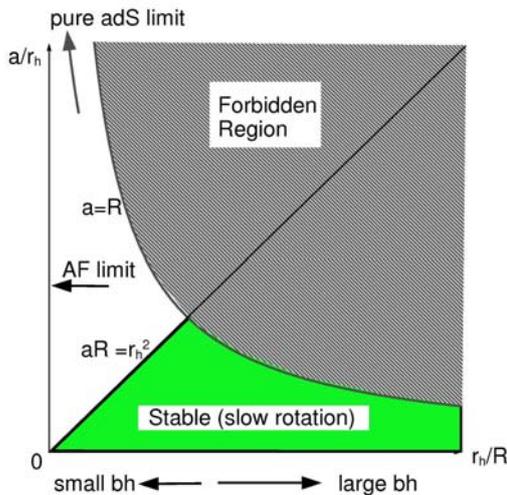


- (2) **ブレーンワールドブラックホールの摂動論的構成**：高次元球対称ブラックホール解をひもにより加速した解を高次元ブラックホールのゲージ不変摂動論により構成した。これは、4次元での対応する解 (C 計量) の高次元への拡張である。この構造を調べ、4次元解と異なり、5次元以上ではひもが半無限に伸びた細長いホライズンに囲まれるという特徴をもつことを見いだした。さらにブラックホールと交差するブレーンによりその解の特異部分 (ひも) を切除することにより、正則なブレーンブラックホール解が得られるためにひものエネルギー線密度と張力の満たすべき関係を求めた。その結果、4次元と異なり、エネルギー線密度と張力が一致するひもに対応する解はブレーンブラックホールを与えないこと、また、4次元では C 計量以外に無限のブレーンブラックホール解が存在する可能性があることを見いだした。この成果は Prog. Theor. Phys. 誌に発表された。この研究は、ブレーンワールドブラックホールに対する初めての解析的研究でまだ引用数は少ないが今後注目されると考えている。



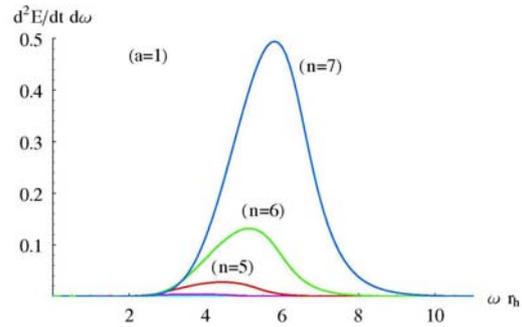
- (3) **高次元ブラックブレーンの摂動論**：高次元ブラックブレーンは Gregory と Laflamme により不安定性が発見されて以降様々な研究が行われてきたが、すべてのモードに対する組織的な研究は行われていない。そこで、ブラックブレーンのゲージ不変摂動論を展開し、すべてのモードに対してマスター方程式への導出の可能性を分析した。結果として、いくつかのモードでは2個以上の2階常微分方程式にまでしか摂動方程式が還元できないこと、また、これらの方程式が自己共役でなく、数値計算以外ではその安定性解析はできないことを示した。この成果は第4回エーゲ夏の学校における招待講義で発表し、そのノートが Springer 出版社より Lect. Notes Phys. の形で出版された。 [Spire 引用数 14]
- (4) **高次元回転ソリトン解**：ホライズンが球の位相をもつ高次元回転ブラックホール解の中で、すべての角運動量パラメータが一致する特殊 MP 解の内部構造 (特異点構造) を詳しく調べ、これらの解から負の質量をもち回転する漸近的に平坦なソリトン解が構成できることを見いだした。この解は MP 解から離散的な同一視で得られるため、無限遠は位相的には Minkowski 時空と異なり、また中心付近に時間的な閉曲線が存在するが、時空としては単連結かつ正則で、ホライズンを持たない。このような解はこれまでに超重力理論における超対称解としては得られていたが、真空解でも存在することが示されたのは初めてである。この成果は、Prog. Theor. Phys. 誌に発表された。
- (5) **高次元単純回転ブラックホール解の安定性**：角運動量パラメーターの一個のみがゼロと異なる (単純回転) 高次元回転ブ

ブラックホール解のテンソル型摂動（時空次元7次元以上）の振る舞いを組織的に研究した。まず、ゲージ不変摂動論に基づいて時空計量のテンソル型摂動の方程式が同じ背景時空における質量ゼロのスカラ場の方程式と完全に一致することを見だし、それを用いて漸近的に反 de Sitter 的な単純回転ブラックホールがテンソル型摂動に対して安定となる条件を解析的手法と数値計算を組み合わせることにより決定した。特に、ブラックホールの回転角速度が宇宙定数の値から決まるある臨界値を超えると、回転ブラックホールの増幅反射効果によりブラックホールが不安定となることを示した。また、同様の定式化に基づいて、漸近的に平坦な単純回転ブラックホールのテンソル型摂動に対する安定性を数値計算により示した。後ほど他の研究者により、これらのブラックホールはスカラ型と呼ばれるタイプの摂動に対しては不安定であることが示されたので、我々の結果は不安定性のタイプを特定する役割を果たす。これらの成果は、Prog. Theor. Phys. 誌および Phys. Rev. D 誌に発表された。[Spires 総引用数 44]



- (6) 高次元回転ブラックホールの蒸発における灰色因子の数値計算：ある種の高次元統一理論では、LHC 実験でミニブラックホールが生成され蒸発することが予言される。この可能性を検証する上で、蒸発スペクトルの詳細が重要となる。この詳細を決定するために、単純回転 MP ブラックホールのテンソル型モードに対して灰色因子（純粋の黒体放射からのずれ）を数値的に決定し、蒸発で放出される重力子のエネルギーおよび角運動量スペクトルの形から余剰次元の情報を得ることができることを示した。この成果は、Phys. Rev.

D 誌に発表された。



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 8 件)

- ① “Gravitational stability of simply rotating Myers-Perry black holes: tensorial perturbations”  
H. Kodama, R.A. Konoplya and A. Zhidenko, Phys. Rev. D81: 044007 (2010) (査読あり)
- ② “Graviton Emission in the Bulk by a Simply Rotating Black Hole”,  
P. Kanti, H. Kodama, R.A. Konoplya, N. Pappas and A. Zhidenko, Phys. Rev. D80: 084016 (2009) (査読あり)
- ③ “Gravitational instability of simply rotating Myers-Perry-AdS black holes”  
H. Kodama, R.A. Konoplya and A. Zhidenko, Phys. Rev. D79: 044003 (2009) (査読あり)
- ④ “Repulsons in the Myers-Perry Family”  
G.W. Gibbons and H. Kodama, Prog. Theor. Phys. 121: 1361 (2009) (査読あり)
- ⑤ “Perturbations and Stability of Higher-Dimensional Black Holes”  
H. Kodama, Lect. Notes Phys. 769: 427 (2009) (査読あり)
- ⑥ “Accelerating a Black Hole in Higher Dimensions”  
H. Kodama, Prog. Theor. Phys. 120: 371 (2008) (査読あり)
- ⑦ “Superradiance and Instability of Black Holes”  
H. Kodama, Prog. Theor. Phys. Suppl. 172: 11 (2008) (査読あり)
- ⑧ “Time-dependent supersymmetric solutions in M theory and compactification-decompactification transition”

H. Kodama and N. Ohta, Prog. Theor. Phys. 116: 295 (2006) (査読あり)

[学会発表] (計 11 件)

- ① “Prospects of string cosmology: Probing higher-dimensions in cosmology”  
日本物理学会第 64 回年次大会 宇宙線・宇宙物理領域, 素粒子論領域合同シンポジウム(立教大学)招待講演, 2009.3.28,
- ② “Repulsons in the 5D Myers-Perry Family”  
国際会議 JGRG-18 (広島大学, 11.17-21) 一般講演, 2008.11.20
- ③ “Accelerating a black hole in higher dimensions”  
Summer Institute 2008 (人材開発センター富士研修所) 招待講演, 2008.8.7
- ④ “Perturbations and Stability of Higher-Dimensional Black Hole”,  
4th Aegean Summer School (Lesvos, Greece) 招待講義, 2007.9.17-21
- ⑤ “Superradiance by Higher-Dimensional Black Holes”  
国際会議 ICGA-8 (奈良女子大) 招待講演, 2007.8.30
- ⑥ “Dynamical Compactification by Flux in M-theory”  
国際会議 GRG18 (Sydney, Australia) 一般講演, 2007.7.11
- ⑦ 「高次元統一理論とダークエネルギー」  
研究会「宇宙初期における時空と物質の進化」(東京大学) 招待講演, 2007.5.28-30
- ⑧ “Gauge-invariant Formulation for Spacetime Perturbations”  
招待講義 (CTP, Jamia Millia Islamia) 2007.2.9, 12
- ⑨ “Einstein's Dream”  
国際会議 IAGRG-24 (Jamia Millia Islamia, Delhi) 招待講演, 2007.2.5-8
- ⑩ “Comments on Higher-Dimensional C-metric”  
第 9 回特異点研究会「特異点とその周辺」(学習院大学) 一般講演, 2007.1.6-8
- ⑪ “Dynamics of Compactification in HUnT”  
研究会「重力と量子」(細谷暁夫教授還暦記念研究会, 箱根湯本) 招待講演, 2006.6.24

[図書] (計 2 件)

- ① 「量子重力理論」  
小玉英雄編, サイエンス社, 2009年, 192pp.
- ② “Interplay Between High Energy Physics And Cosmophysics: KEK

Cosmophysics Group Inaugural Conference 'Accelerators In The Universe'. Tsukuba, Japan, March 12-14 2008”

H. Kodama and K. Ioka (eds),  
AIP Conf. Proc. 1040 (2008) 215 pp.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小玉 英雄 (KODAMA HIDEO)

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・教授  
研究者番号: 40161947