

平成 21 年 4 月 1 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18540283

研究課題名（和文） 超対称性と時空間の微細構造

研究課題名（英文） Supersymmetry and the microscopic structure of spacetime

研究代表者

セルゲイ V ケトフ (SERGEI V KETOV)

首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：70347269

研究成果の概要：

我々の研究の主な成果は、初期宇宙での新しい幾何学的なインフレーションモデルの発見である。これはアインシュタイン重力理論へ、以前から知られていた量子論的超弦理論の補正を考慮することに基礎を置いている。その補正の最初の項は時空の曲率で言うと4階になっているが、4次元時空での構造を詳細にみると、本質的にはベル・ロビンソンテンソルの2乗で与えられている。我々はFRW宇宙モデルでその高階微分項を持つ一般化されたフリードマン方程式を導き、それが厳密にインフレーションを生成する(ド・ジッターの)厳密解を持つことを発見した。また、この超弦理論に由来する4次の曲率項について、量子論的不定性、安定性、そしてスケール因子双対性から課される制限などを系統的に調べた。我々の方法は時空の曲率の高次項からくる量子重力補正に一般化できるものである。我々が提案したインフレーション・シナリオは完全に幾何学的で、新たなスカラー場(インフラトン)やスカラー・ポテンシャルを必要としないものだが、現実的なインフレーションのための膨張指数を得ることは未解決問題として残っている。

我々はまた、ある2+1次元の超対称非線形シグマ模型に、もともとそれを記述しているグラスマン奇の超空間座標がなすグラスマン代数をクリフォード代数に置き換えるという非反可換変形を施し、新しい厳密な多重ソリトン解を見つけた。その変形で新たに加わるスピン1/2の自由度を持つ、静的なCP(1)と散乱しているU(2)ソリトンを詳細に計算した。アーベル的BPSソリトンの存在は確かめられたものの、それはモヤル積の場合と違い作用が無大である。さらに、我々はC変形または非反可換化と呼ばれる手法で、4次元ユークリッド空間上で一般の物質場を持つN=1/2超重力理論を、初めて系統的に定式化した。物質場を持つN=1/2超重力理論は、還元と切詰めによって、N=2超共形テンソル計算を使って構成した。この結果は、N=1/2しかない局所超対称性を持つ「極小」超重力理論で、全ての素粒子と重力を非標準的に統一するための理論的基礎を与えたともいえる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,200,000	0	1,200,000
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	660,000	4,060,000

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：Supersymmetry, Supergravity, Superstrings, Noncommutativity

1. 研究開始当初の背景

時空の微視的構造と自然界における超対称性の役割を理解することは、今日の高エネルギー物理学にとっての最も基本的な挑戦である。理論的側面からすると、超対称性はボソンとフェルミオンを統一し、素粒子物理学でいうエネルギースケールの階層性問題を解決に導き、さらには場の量子論での紫外発散を抑えることなどから必要である。超対称性はまた超弦理論が無矛盾であるために必要とされている。超対称性は標準模型を超える素粒子物理学の研究の殆ど全てで主要な手段になっている。セルンで現在建設されている大型ハドロン衝突型加速器（2009年に全稼動する予定）は世界規模の先端実験施設であるが、それはヒッグス粒子、超対称性、そして自然界にあるかもしれない隠れた余剰次元の発見を目指して造られているのである。

一般相対性理論と場の量子論はどちらも（紫外極限で）不完全な理論であって、プランク距離とプランク時間では量子重力理論に置き換えられる（乃至は拡張される）べきものである。プランク・スケールでは重力と他の基本的相互作用とは違いはないから、ビッグバン特異点解消と、全ての素粒子と相互作用との統一の問題は一緒に、ひとつの理論で解決されるべきなのである。量子重力を実現できる最も有力な候補は超弦理論である。超弦理論はまた、紫外発散のない、自然界の全ての基本的相互作用を統一的に記述しうる、最も有望で理論的に魅力的な提唱なのである。量子重力が必須であるエネルギースケール（プランクスケール）を考える際には、初期宇宙の研究が超弦理論の自然なテストを与えてくれる。

超対称性は時空と密接に関係している。というのは二つの超対称変換の交換子が時空の並進になるからである。そのために局所的な超対称性は自動的に一般座標変換不変性を示唆し、それゆえ重力理論を内包している。このような超重力理論は超弦理論やM理論の低エネルギー近似で自然に出てくる。超重力理論は古典的なアインシュタイン重力理論の無矛盾な拡張になっており、超弦理論は無矛盾な量子重力理論を与えている。全てこれらの理論には様々な興味深い物理的応用

がある。高エネルギーの素粒子物理、初期宇宙、暗黒物質、暗黒エネルギー、ブラックホール、それにハドロンや原子核物理などである。

同時に、超弦理論と超重力理論はどちらも実験とは深い隔りがある。超対称性や余剰次元に対する実験的証拠は何もなく、超弦理論に至っては言わずもがなである（もっともそれらが間違っているという実験的証拠もない！）。従って、超対称性や超弦理論の理論的結論を全て調べ、それらからの確認可能な物理的予言を引き出すことは極めて重要である。つまり「万物は弦からなっている」ことを示すのである。超対称性の破れは超弦理論と素粒子現象論とのギャップを埋めるとともに、冷たい暗黒物質の起源を説明する鍵となると信じられている。

我々の研究課題は、先端的な理論物理学と数学での現在の（学術における）フロンティアに属している。特に、超弦理論がもつ数学的かつ物理的に興味深い応用はソリトンである。ソリトンとは、物理で言えば有限なエネルギーを持っている、非線形な偏微分運動方程式の（非摂動的またはトポロジカルな）解のことである。非可換な時空上でのソリトンとその物理的性質は殆ど理解されていない。

2. 研究の目的

我々の研究は、標準模型を超える素粒子物理の新しい超対称なモデルを構成することによる、新しい超対称性の破れの機構の提唱と、超重力理論や超弦理論に基づいた新しいインフレーションシナリオの提唱をして、はっきりした物理的予言を引き出すことに目標をおいている。

我々の研究の重要な目標は、素粒子と場と弦の現代的な量子論において、超対称性と超重力理論そして素粒子物理の間にある様々なつながりを理解することにある。我々が理解したいというのは、(i)低エネルギー近似を超えた、超弦理論から得られる有効場の理論に、どのような超対称な相互作用が現れるのか(ii)超対称性と可積分性との関係は何か(iii)上述のような場の理論的モデルの背景にある対称性は何か、である。そういったことが、

素粒子の標準模型を超えた素粒子現象論や初期宇宙での場の理論的なインフレーションモデルに対する、我々のモデルで可能な現象論的応用に光を当ててくれる。

我々の宇宙の一様性と等方性や、観測された密度揺らぎのスペクトラムはインフレーション宇宙で説明できる。インフレーションは通常、スカラー場（インフラトン）を導入し適当にスカラーポテンシャルを決めることによって実現されている。アインシュタイン方程式を使うと、強エネルギー条件の有質量的破れと、大きな負の圧力を持ったエキゾチック物質が現れる。このようなインフレーションシナリオの簡明さにもかかわらず、インフラトンとそのスカラーポテンシャルのような、鍵となるものの起源ははっきりしていない。

超弦理論やM理論を使って明確なインフレーションの機構を構成するのは自然である。最近では、沢山のブレーンインフレーションシナリオが提唱された。それらは、(ワープ化され)コンパクト化された超弦理論のモデルに埋め込まれており、素粒子物理から課される現象論的な制限を満たしてもいる。しかしながら、インフレーションの鍵となるものの起源を解明するには至っていない。それにまた、可能な数が飛躍的に増大して(これはストリング・ランドスケープとして知られている)、宇宙に超弦理論の証拠を求めるための具体的な理論的予言を阻んでしまった。

我々はまた、Dブレーンによって引き起こされる非反可換性を有する場合に明示的なソリトン解を導き、その物理的性質を研究したい。

3. 研究の方法

我々の研究の方法は学際的であり、場の量子論、重力理論、超対称性理論そして現代幾何学にまたがっている。同時に、現在、高エネルギー理論物理学と数学で使える最先端の計算機を使う。

アインシュタイン重力理論の幾何学的記述はリーマン幾何学でなされている。同様に、超対称変換は、超空間と呼ばれている(量子的な)フェルミオンの方向を持つよう拡張された時空の並進と理解できる。標準的な超空間には互いにきっちりと反交換するフェルミオンの座標がある。超対称性が、或る高エネルギースケールで現れるとき、実験が行われうる(低い)エネルギースケールでは、超対称性は破れていなければならない。自発的

な超対称性の破れは、超重力理論に現れる(補助)場に真空期待値を与えることにより可能である。超空間座標のうちフェルミオンの座標はグラスマン型の代数をなすが、その代わりにクリフォード(またはディラック)代数に従うようにすることは、超対称性の自発的破れの自然な方法のひとつである。実際、そういう理論は、いわゆる非反可換な場の理論と同等なのである。

スカラーポテンシャルから得られるインフレーションや超弦理論とブレーンを使って得られるインフレーションは決して要求されるものではない。他の可能性は、アインシュタイン方程式の重力部分を、時空の曲率の高階項によって変形する方法である。この方法ではインフレーションもエキゾチック物質も要求しない。特定の高階曲率項は超弦理論の有効作用に現れることがよく知られている。

摂動論的超弦理論はオンシェルで(量子論的振幅のかたちで)定義されていて、無限に多くの高階曲率項からの補正がアインシュタイン方程式に加わるが、それはレジェスローブパラメータと弦結合定数の全ての次数にわたる。これらの全ての補正は閉じた形では知られておらず、全てを扱うのは無理である。しかしながら、弦とブレーンから来る、アインシュタイン方程式への最初の補正項を考察するのは意味のあることである。もちろん、単に最初の量子論的補正項から得られた結果は、最終的なものではない。それにもかかわらず、定義され十分に制限された枠組みの中では、補正された理論は初期宇宙へ定量的技術的な洞察を与えてくれる。

我々は、時空の曲率で4階の、超弦理論由来の重力項のうち、最初の補正項で変形したアインシュタイン方程式に基づいたやり方を用いた。その4階の曲率項をアインシュタイン項と同等に、つまり非摂動論的に扱ったのである。

我々は4次元時空上のM理論の低エネルギー有効作用で幾何学的な項(つまり純粋重力項)のみを考察した。我々の仮定では、量子論的超弦理論の補正は、最初のツリーの超弦理論補正で抑えられるとし、ディラトンやアクシオンなどを含め全てのモデュライは安定化されるとした。(例えば、フラックスによって、ワープ化された4次元へのコンパクト化をし、自発的に超対称性を破った後にこういう状況になる。)

4. 研究成果

我々は、レゾナンスパラメータに関して最初の次数での、(ワーブ化されたトーラスにコンパクト化した)超弦理論/M理論に由来する4次の項(時空の曲率で4階)を調べた。そしてそれが4次元FRW宇宙で、ハッブルスケールの発展に(非摂動的に)どう影響するかを研究した。オフシェル超弦理論の有効作用の定義に量子論的不定性があることを考慮に入れ、われわれは一般化されたフリードマン方程式を提唱した。それには時空特異点のない(ド・ジッターの)厳密にインフレーションを起こす解があることを見つけ、そして安定性と、我々の解にスケール因子の双対不変性を課すことによって先の量子論的不定性を制約した。最も素朴な(ベル・ロビンソンテンソルの2乗である)4階の項は除外され、従って超弦理論のオフシェルの重力の有効作用には(リッチテンソルに依存した)別の4階の項が必要であることの証拠を与えた。我々の手法は時空の曲率のさらに高次まで一般化できるものである。

副産物として、FRW計量を明白に共形平坦な形にする、新しい分離不可能な座標変換族を見出した。我々の結果は簡潔で完全であり、我々の導出は極めて明示的である。我々はまた、ワイルテンソルを含めて全てのFRW曲率を計算した。

4次元ユークリッド空間上の、ベクトル多重項とスカラー多重項が結合した $N=1/2$ 超重力理論を初めて構成した。我々は標準的な4次元ユークリッド空間上の $N=(1,1)$ に拡張された共形超重力理論から出発し、重力光子の場の強さをある任意の自己双対場にして非物理的にした(C変形といわれる)。局所的超対称性の下ではこのような手続きの無矛盾性は保証されないのだが、我々は、局所的超対称性を $3/4$ だけ落とし、対応する重力微子を消すような簡潔で無矛盾な代数的制限を見つけた。最終的に得られた場の理論は(超共形ゲージ固定をした後)、局所的な $N=(0,1/2)$ または簡単に $N=1/2$ 超対称性を持ち、対応するゲージ場としてのカイラルな重力微子をひとつだけ持っている。我々の理論は、ノンゼロの自己双対重力光子の真空期待値のために、`ローレンツ`不変ではないが、それは非反可換な超空間上で得られるC変形をうけた超対称性理論に共通していることである。

我々は $2+1$ 次元のある超対称シグマ模型を考察した。それは多重ソリトン解を持ち、散乱するものとしなものがある。我々はこの場の理論的モデルを、グラスマン奇の超空間座標のなすグラスマン代数をクリフォ-

ド代数に置き換えて非反可換変形した。静的なCP(1)ソリトンとU(2)ソリトンを詳しく構成した。非反可換変形のために、それらはスピン $1/2$ の自由度を余計にもっている。我々はアーベル的BPS解を明示的に導いたが、それらはモヤル変形の場合と異なり、無限大の作用を持っていることを発見した。

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6件)

- ① M.Iihoshi, S.V. Ketov,
On the superstrings-induced four-dimensional gravity, and its applications to cosmology
Advances High Energy Physics, 521389, 23 pages, 2008, 査読有
 - ② S.V. Ketov, O. Lechtenfeld,
Non-anticommutative solitons
Physics Letters, B663, 353-359, 2008, 査読有
 - ③ M.Iihoshi, S.V. Ketov,
On the quartic curvature gravity in the context of FRW cosmology
International Journal of Modern Physics, A23, 2153-2160, 2008, 査読有
 - ④ M. Iihoshi, S.V. Ketov, A. Morishita,
Conformally flat FRW metrics,
Progress of Theoretical Physics, 118, 475-489, 2007, 査読有
 - ⑤ T.Hatanaka, S.V. Ketov,
N=1/2 supergravity with matter in four Euclidean dimensions,
Nuclear Physics, B794[PM], 495-511, 2008, 査読有
 - ⑥ T.Hatanaka, S.V. Ketov,
C-deformation of supergravity,
Classical and Quantum Gravity, 23, L45-L50, 2006, 査読有
- [学会発表] (計3件)
- ① S.V. Ketov, On the superstrings-induced four-dimensional gravity, and its applications to cosmology, invited talk at "Strings, Non-commutativity and All That", 2008年1月3-5日、ハノーヴァー(ドイツ)
 - ② S.V. Ketov, On the quartic curvature gravity in the context of FRW

cosmology, invited talk at the International Workshop “Progress of String Theory and Quantum Field Theory”, 2007年12月7 - 10日、大阪(日本)

- ③ S.V. Ketov, On the superstring-generated gravitational equations of motion, invited plenary talk at the 62nd annual meeting of the Japanese Physics Society, 2007年9月21 - 24日、札幌(日本)

[図書] (計1件)

Guest M.A., Oxford University Press, From quantum cohomology to integrable systems, 2008, 305 pages, ISBN: 978-0-19-856599-4

[その他]

ホームページ等

<http://www.slac.stanford.edu/spires/find/hep/www?rawcmd=find+a+ketov&FORMAT=WW&SEQUENCE=>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

セルゲイ V ケトフ (SERGEI V KETOV)
首都大学東京・理工学研究科・准教授
研究者番号: 70347269

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

ゲスト マーチン (GUEST MARTIN)
首都大学東京・理工学研究科・教授
研究者番号: 10295470

