

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 24 年 4 月 30 日現在

機関番号：24303

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2011

課題番号：20540249

研究課題名（和文）素粒子の統一理論における素励起の研究

研究課題名（英文）Research on the fundamental modes in unification theory

研究代表者

上原 正三（UEHARA SHOZO）

京都府立医科大学・医学研究科・教授

研究者番号：20168652

研究成果の概要（和文）：素粒子の統一理論として有力なM理論において、その素励起のひとつである空間的には2次元の広がりを持つM2ブレインについて解析した。空間の2次元分が2次元トーラスにコンパクト化された場合を考える。すると、その空間へのM2ブレインの巻き付き方により、超弦理論の励起状態である基本弦ないしはDブレイン、またはそれらの結合状態とみなせることを、超膜理論のラグランジアンを用いることにより、具体的に導くことに成功した。

研究成果の概要（英文）：M-theory is expected to be the unified theory and it has been analyzed vigorously in the world. M2 brane is one of the fundamental excitations in M-theory and we have analyzed how it looks like when the two-space dimensions are compactified on the 2-dim Tori. With the supermembrane action we have explicitly shown that the M2 brane can be a fundamental string, a D-string or their composite states in superstring according to the way of the wrapping on 2-dim Tori.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：素粒子論

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：M理論、超弦理論、統一理論

1. 研究開始当初の背景

自然界の究極の構成要素である素粒子は、いわゆる標準模型においては、物質を構成する6種類のクォークおよびレプトン、それらを結合するゲージ場、そして、現時点において、実験的にはまだ確認されていないヒッグス粒子に分類される。

これらのクォークやレプトン間には、重力

を含め、4種類の力が、結合（相互作用）するゲージ場の種類によって、それぞれに固有の強さで働いている。

これが現在までに確立している低エネルギー領域での素粒子の標準理論である。この標準理論を含み、クォークやレプトンだけでなく、ゲージ場まで同じ種類もの、すなわち、物質場と力の場さえも同じ起源とみな

す統一理論の研究が、国内国外を問わず、精力的におこなわれている。

この素粒子の統一理論の有力候補が超弦理論/M理論である。この超弦理論/M理論は、今や素粒子の標準理論を含む様々な素粒子モデルの研究においても、無視できない理論になっている。またさらに、初期宇宙の理論的研究においても、この超弦理論/M理論から触発された研究が活発に行われている。

このように、超弦理論/M理論の研究が、素粒子論の他の研究や宇宙論の研究に大きな影響を与えているのは、現在まで実験で未発見の超対称性粒子や4次元を越える余剰次元の存在などが、超弦理論/M理論の論理的な要請から帰結されるものであり、決して、単なる便宜的ないしは根拠に乏しい仮定に基づいたものではないためである。

超弦理論/M理論それ自体の研究は、多くの理論研究者によって着実に進んでいる。しかしながら、その理論的緻密さによる難しさから、これまでもその進行の度合いは、飛躍的に進む場合もあれば、様々な解析手法が模索されるものの、遅々として進展のない時期も幾度となくある。

いずれにせよ、上に述べたように、今や素粒子論の研究における最重要課題のひとつとなっていることは明らかであり、国内・国外を問わず、多くの研究者が、様々な方向から、この統一理論の全貌解明に取り組んでいる。

2. 研究の目的

標準理論における4種類の相互作用を、すべてのひとつの相互作用からの枝分かれとして理解しようとする統一理論の試みは、素粒子論における重要な研究分野の一つである。この素粒子の統一理論として、現在、有力な候補と考えられている理論が超弦理論/M理論である。これは、過去の数々の研究において、重力相互作用をどのように他の相互作用と統一するが一つの大きな課題であったが、この超弦理論/M理論では、重力のモードさえも、あらゆる物質の主な構成要素であるクォーク・レプトンと同じように、もともとは同じ物体、励起状態、の運動形態、励起の状態、が異なるものとして、統一的に取り扱うものである。

この統一理論の候補を解明するには、10次元時空間で摂動的に矛盾なく存在することが示された超弦理論と、その強結合極限を考えることにより提唱された11次元時空間

のM理論それぞれにおける励起状態を詳しく解析する必要がある。即ち、超弦理論の基本弦だけではなく、一般に空間的な広がりをもち、ソリトンの物体であるDブレーンも混在する状態、さらには、M理論における2種類の素励起である、M2ブレーンとM5ブレーンを含めたそれぞれの励起状態相互の関連まで詳しく解析する必要がある。

そこで、空間次元をコンパクト化することにより、これらの素励起がどのように時空間で記述されるか、素励起相互の関係を詳しく解析する。また、それらの解析がある程度進めば、次にその力学過程を解析することを研究目的とする。

3. 研究の方法

(1) M理論は、2次元物体である超膜理論を含んでいると思われる。そして、この超膜の励起モードはM理論における基本的なブレーンの一つであるM2ブレーンと思われる。

一方、超弦理論とM理論の関係から、11次元時空の空間1次元をコンパクト化した時空でのM理論を考え、コンパクト化した方向に巻きついている膜が、弦、すなわち、超弦理論の基本弦とみなせることは直感的には明らかである。

しかしながら、超膜理論が複雑なために、具体的にこの関係を示すことは、これまで古典論の範囲内だけであった。

我々の研究も含めて量子論的取り扱いの試みはあるが、解析はまだ十分とはいえない。量子論的取り扱いには正則化の問題がついてくる。どのように定式化できるか、この研究期間内に、量子論的取扱いを考察する。

(2) 同様に、11次元時空の空間2次元をコンパクト化し、その方向に巻きついた超膜は、10次元時空の空間1次元コンパクト化した超弦理論の励起モードと関係していることは明らかである。この関連についても、この期間内に具体的に詳しく調べ、量子論的解析も行う。

(3) M理論には、2次元物体のM2ブレーンの他に、5次元物体のM5ブレーンが、基本的な励起として存在することが知られている。このM5ブレーンは、双対性から、1次元コンパクト化した時空に巻き付くと4次元物体であるD4ブレーンになると思われている。さらに、空間の2次元以上をコンパクト化した場合についても様々は予想はつけられている。

しかし、残念ながら、M2ブレーンと比べると、M5ブレーンについては、これらを具体的に

示すことは、全く出来ていないといってもよいくらいである。

したがって、M2ブレインの解析の進行度に
応じ、このM5ブレインについても、幾何的
な取り扱い方を含め、古典論の範囲内でも定
式化を試みる。

4. 研究成果

(1) M理論におけるM2ブレインを表すと
考えられている超膜理論のラグランジアン
(作用積分)を用いることで、ひとつのM2ブ
レインの励起についても調べることができ
るであろうことに着目し、さらに、超対称性
が破れない状態を解析することを考慮して、
まずボーズ自由度に限り解析をすすめた。
この手法により、超弦理論のひとつである
type IIB 弦理論に含まれる基本弦とD弦の
結合状態と考えられている、いわゆる(p, q)-
弦を、直接かつ具体的に導出することに成功
した。

(2) 次に、同じように超膜理論の作用積分
を用い、空間次元が2次元トーラスへのコン
パクト化する場合において、ボーズ自由度だ
けではなく、フェルミ自由度も含めての解析
を試みた。この際、超対称性を明確に表すこ
とができる超場形式においても、フェルミ自
由度に関してベキ展開をおこなうことができ
る。しかし、展開の基底となるフェルミ自
由度の取り方により、対応する係数(ボーズ
自由度による場)の複雑さが異なり、解析に
影響する。そのため、我々はノーマル座標展
開の手法を用いて、超膜理論をフェルミ自
由度についてベキ展開した。

(3) フェルミ自由度のベキ展開では、超膜
理論は32乗までの有限展開となる。しかし、
ノーマル座標展開を用いたことにより、ボ
ーズ自由度により書き下されるそれらの展開
係数は、幾何学的量を用いて表されることで、
非常に複雑な形になる高次の展開係数にお
いても比較的に見通しのよい記述が可能とな
る。

(4) 以上の様なノーマル座標展開の手法を
踏まえ、超膜理論の2次元トーラスへのコン
パクト化の具体的な導出を、非自明なフェル
ミ自由度の2次の展開まで行うことに成功し
た。

(5) コンパクト化によって導出された作用
の具体的な表式は、基本弦とD弦の結合状態
である、いわゆる(p, q)-弦の作用であることを、
反対称テンソル場との結合から、確認す
ることができた。このことにより、具体的に
超膜理論からコンパクト化により(p, q)-弦

理論を導くことに成功した。

(6) さらに、もとはM理論(超膜理論)であ
り、コンパクト化の極限で超弦理論とみなせ
るのであるが、もとのM理論の何らかの影響
名残りが、コンパクト化後の弦理論の中に見
えることも期待される。そこで、我々はそれ
らについて様々な側面から考察をすすめる
ことにした。

(7) その結果、弦の摂動展開のパラメータ
と深く関係するディラトンと弦の世界面
の曲率の結合が、コンパクトの結果導かれる
ことを、経路積分法におけるアノマリーの計
算手法を用いて導くことに成功した。

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2件)

- ① Shozo Uehara, Dilaton coupling revisited, Progress of Theoretical Physics, 124, 2010, 581-590, 有.
- ② Hiroshi Okagawa, Shozo Uehara, Satoshi Yamada, Green-Schwarz superstring action for (p, q)-strings from a wrapped supermembrane on a 2-torus, Progress of Theoretical Physics, 121, 2009, 445-475, 有.

[学会発表] (計0件)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：

取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上原 正三 (UEHARA SHOZO)
京都府立医科大学・
医学研究科・教授
研究者番号：20168652

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：