



大阪科学・大学記者クラブ 御中
(同時資料提供先：科学記者会)

2020年8月7日
大阪市立大学

宇宙の万物を説明できる理論の探求へ！

宇宙項^{*1}を小さくしながら、ゲージ対称性^{*2}を拡大するメカニズムを、ヘテロティック超弦理論^{*3}の内挿コンパクト化^{*4}模型に於いて世界で初めて実現

<本研究のポイント>

- ◇超対称性はプランクスケールで破れ、一方宇宙項は小さくなる素粒子物理の新たなパラダイム
- ◇今後の探求点として、不安定な極値が宇宙項を十分抑制する準安定真空に落ち着くか否かが焦点になる
- ◇素粒子物理学の2つの階層性問題が連動する可能性を示した

<本研究の概要>

糸山 浩司 (いとやま ひろし) 大阪市立大学大学院理学研究科教授・南部陽一郎物理学研究所所長と、同研究科後期博士課程2年生の中島 爽太 (なかじま そうた) さんは、超対称性がプランクスケールで破れている超弦理論と従来の超弦理論との内挿コンパクト化模型に於いて、宇宙項の値を小さくしながら、現代素粒子物理学の基本原理解であるゲージ対称性を拡大する新規なメカニズムを提案し、最も簡単なコンパクト化の場合に対してゲージ対称性を拡大でき、これと1:1に対応している有効ポテンシャルの様々な極値を決定することに、世界で初めて成功しました。また弦の摂動論の最低次で真の真空が反ド・ジッター時空^{*5}になることを明らかにしました。

本研究の成果は、2020年7月20日、Elsevier社物理専門雑誌 Nuclear Physics B に著者最終稿がオンライン掲載されました。

^{*1} 宇宙項…一般相対性理論に基づく重力場の方程式に斥力を発生させるためにアインシュタインによって導入された項で、一時は存在を否定されていたが、近年、宇宙の加速膨張を説明するメカニズムとして支持されている。

^{*2} ゲージ対称性…粒子の場が局所的な位相や座標の変換で結果が変わらないこと。すなわち、物理状態を表す波の位相を時空のそれぞれの点で任意に選んでも、同じ方程式が成り立つことをいう。

^{*3} 超弦理論…弦理論は、粒子を点ではなく1次元の弦として扱う理論であり、超対称性をもたせるように更に拡張した理論を超弦理論と呼ぶ。

^{*4} コンパクト化…超弦理論では宇宙の時空構造は10次元とされ、人間が認識できる4次元(縦、横、高さ、時間)に加えて余剰次元(6次元)から成るとされている。この余剰次元はプランク距離(10^{-33}cm)に縮んでいるとされ、この考え方を「コンパクト化」と呼ぶ。

^{*5} 反ド・ジッター時空…物質がなく負の宇宙項だけがある場合のアインシュタイン方程式の解として最大の対称性をもつ時空。

【発表雑誌】 Nuclear Physics B

【論文名】 Stability, enhanced gauge symmetry and suppressed cosmological constant in 9D heterotic interpolating models (9次元ヘテロ型内挿弦模型における安定な真空、ゲージ対称性の拡大、宇宙項の抑制)

【著者】 H. Itoyama, Sota Nakajima

【掲載 URL】 <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2020.115111>

<研究の背景>

「弦理論」とは、本学特別荣誉教授であり 2008 年ノーベル物理学賞を受賞された南部陽一郎博士により、強い相互作用をする素粒子（ハドロンと呼ばれる）の散乱現象を説明するために導入された一次元的な拡がりを持つ紐の量子論です。今日まで 30 年以上に渡り、重力を含む自然界の 4 つの力の統一理論として、刷新を繰り返しながら世界中の物理学者の研究対象となってきました。本学理学研究科基礎物理学講座でも、場の量子論と並び、主要テーマの一つとして過去 20 年間、活発に研究されてきました。もともとの弦理論では、「虚数の質量をもつ素粒子(タキオン)の存在」という難題があり、それを克服するため、ボース粒子とフェルミ粒子の間の取り換えの対称性(超対称性と呼ばれる)が要求されます。また時空次元は 10 でなければならず、6 個の余剰次元(体積有限と考えられコンパクト化されている)の存在の有無は、超高エネルギー実験での行方不明のエネルギーから判定しようと考えられています。

超弦理論の自然なエネルギースケールは、重力定数から算定されるエネルギースケール(プランクスケールと呼ばれる)で、 10^{19} GEV と言うとてつもなく大きいものです。それ故、弦の摂動論では、測定にかかる素粒子の質量は総てゼロと近似されます。ヘテロティック超弦理論¹⁾(1984 年)に基づくもともとの素粒子物理学の 1 つのシナリオは、「マイクロの真空エネルギーの証であると考えられる宇宙定数 Λ をゼロに保ちつつ、超対称性の破れのスケールが LHC 実験等で到達できるエネルギースケール位であり、沢山の新しい粒子(超対称パートナー)が見つかるだろう」というものでした。しかし、2012 年のヒッグス粒子発見以降現在に至るまで、そのような新粒子の兆候はありません。一方、現代の観測論的宇宙論では、宇宙の質量の 7 割程度は、ダークエネルギーと呼ばれる物質を起源としないエネルギーでなければならず、ゼロでない宇宙定数の存在はダークエネルギーの存在に対する最も単純明快な説明とみなされています。自然単位系でゼロでないオーダー 1 の強さの宇宙項を超弦理論から生成するには、 10^{-120} もの微調整が要求されます。これは、素粒子物理学の最も顕著な階層性問題のひとつです。

ヘテロティック超弦理論の発見から 2 年後、その亜種^{2) 3)}として、超対称性を最初から持たないがタキオンの問題もない理論が提案されました。それに従えば、超対称パートナーなど最初からいないので、LHC^{*6} 実験で見つからないのは当然です。しかし、一方、この理論ではプランクスケール程度の 10 次元の意味での莫大な真空エネルギーを予言してしまいます。この提案から半年後に、糸山と T.Taylor⁴⁾ は、この亜種理論と元々のヘテロティック超弦理論を内挿し連続的につなぐコンパクト化のもっとも簡単な例を発見し、大きな超対称性の破れを保ちながら宇宙定数を小さくする可能性を指摘しました。

1) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.54.502>

2) [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(86\)90619-X](https://doi.org/10.1016/0550-3213(86)90619-X)

3) [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(86\)91524-8](https://doi.org/10.1016/0370-2693(86)91524-8)

4) [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(87\)90267-X](https://doi.org/10.1016/0370-2693(87)90267-X)

*6 LHC…大型ハドロン衝突型加速器(英: Large Hadron Collider)の略称。高エネルギー物理実験を目的として CERN が建設した世界最大の衝突型円形加速器の名称。

<研究の内容>

所謂「ゲージ理論」に基づく現代の素粒子物理学の最重要課題の一つとして、自然界の3つの相互作用（電磁気力、弱い力、強い力）の統一が挙げられます。これは場の量子論から得られる「走る結合定数」に基づき広く支持されている描像です。相互作用の統一を成し遂げるには、ゲージ群が半単純 Lie 代数に基づいていることが必要です。

弦理論のコンパクト化では、余剰次元の形状や Wilson line と呼ばれる定数外場に基づく多くのパラメータが生じ（その全体はモデュライ空間と呼ばれる）、モデュライ空間の総称的な点では、10次元で得られている統一理論の描像を壊してしまいます。値を決定するためには、有効ポテンシャルの考察に基づき、真空の候補となるすべての場合を尽くさねばなりません。上記の内挿コンパクト化模型に関する先行研究では、導入されたパラメータは1つだけで、宇宙定数を小さく保ちながら、素粒子の統一理論が4次元でどのような形で得られるのかに関しては、何の知見も得られませんでした。

今回の研究では、半径パラメータに加え可能なすべての Wilson line を導入し、弦の摂動論の1ループ近似の範囲内で、宇宙項の値が小さくなっていく漸近領域での有効ポテンシャルの極小点を尽くすことに成功しました。極値を与える点では、ゲージ群の拡大現象が見られ、数々の半単純 Lie 代数が得られました。とりわけ $SO(18) \times SO(14)$ を与える点では、質量無しフェルミ粒子とボース粒子の数が等しくなり（近年 $n_f = n_b$ の場合と呼ばれている）、宇宙項が指数的に抑制され、上記の階層性問題の解決策の端緒になると期待されます。

このような拡大現象を明らかにするには、「カレント代数の指標」の上記パラメータ依存性を頭に見出す必要がありますが、この問題を解決するために、我々は「ローレンツ格子関数」と指標を連動させつつブーストする手法を編み出しました。極値を与える一連の点は有効ポテンシャルの鞍点になっているため不安定であり、最小を与える点ではゲージ群は最大限に拡大していることが判明しました。

こうして得られた摂動論的に安定な真空は質量無しのボース粒子の励起のみを持っており、負の宇宙項を持つ反ド・ジッター真空を与えてしまいます。従って、素粒子物理学の真空としても、宇宙論的考察からも望ましいものではありません。今後の主要な探求点としては、摂動論高次ループ補正、非摂動効果により、不安定な極値が宇宙項を十分強く抑制する準安定真空に落ち着くか否かが焦点となるでしょう。

<期待される効果>

ごく最近の我々のグループの考察により、今回探索した漸近領域では、場の量子論が適用可能であることが判明しています。摂動の高次補正や非摂動効果の問題は、場の量子論の手法により今後解決に向け進展していくと思われます。超対称性が無い弦理論に基づく素粒子物理学は、近年ヨーロッパを中心に活発に進められています。特に今回の研究で実際に得られたような、超対称性が無いにも拘らず $n_f = n_b$ を与え、ゲージ群が拡大する場合に関しては、新たな現象論的考察が現在進展しています。またこのタイプの弦理論研究では、宇宙項の大きさに関する階層性問題と、ヒッグス質量に関する階層性問題が連動して来る可能性があり、多くの研究者の好奇心を刺激する新たなパラダイムの形成が期待されています。

<資金情報>

本研究の一部は以下の支援を受けて行われました。

- ・日本学術振興会科学研究費基盤研究 C JSPS KAKENHI Grant Number 19K03828
- ・2019年度 大阪市立大学戦略的研究経費（重点研究）

【研究内容に関するお問い合わせ先】

大阪市立大学 大学院理学研究科教授・
南部陽一郎物理学研究所所長 糸山 浩司
TEL : 06-6605-2538
Email : itoyama@sci.osaka-cu.ac.jp

【報道に関するお問い合わせ先】

大阪市立大学 広報課
担当 : 西前 香織
TEL : 06-6605-3411
Email : t-koho@ado.osaka-cu.ac.jp