

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 14 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800169

研究課題名(和文) 超弦理論におけるモジュライ場の現象論・宇宙論的側面の研究

研究課題名(英文) Research on phenomenological/cosmological aspects of moduli field in the string theory

研究代表者

檜垣 徹太郎 (Higaki, Tetsutaro)

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・博士研究員

研究者番号：10629059

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙背景輻射(宇宙空間の温度分布)の観測結果を通じて、観測と無矛盾にさまざまな初期宇宙のシナリオ・可能性を考えることができました。特に、力の統一理論の候補である弦理論を基に、そのゲージ場由来の複数のアクシオン場(擬スカラーモジュライ粒子)が、エネルギーを供給して、存在したと思われる宇宙初期の加速膨張を引き起こしたり、軽いアクシオンが暗黒物質になる可能性を考えることができました。ここで、弦理論のゲージ場は弦理論の力を司るもので、宇宙の安定性のためにも、必ず存在するべきものです。また、暗黒物質は銀河団の種、すなわちわれわれの存在を作り出すために必要なものです。

研究成果の概要(英文)：I have found various possibilities in the early universe through observations of cosmic microwave background. They are consistent with the observations. In special, I focused on multiple axion (pseudo scalar moduli) fields/particles with various masses. The fields originate from gauge fields in the string theory which is regarded as a candidate of unified theory of natural forces. Here, the gauge fields control forces in the string theory and hence should exist. The axions can provide energy enough to explain the cosmic accelerating expansion in the early universe. Further, a light axions can become the dark matter, which are seeds of galaxies including ours in the universe.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論 素粒子現象論 素粒子宇宙論 弦理論的現象論

### 1. 研究開始当初の背景

素粒子論は、最も基礎的な単位と思われる素粒子を通じて自然界の基礎法則を研究する学問です。その意味では、標準模型は多大な成功を収めました。実際、2015年現在でも標準模型は観測とほぼ矛盾です。2012年には標準模型的なヒッグス粒子が見つかり、また一つ標準模型の確からしさが確認されました。しかしながらその模型の範囲内で説明できないようなものが存在します。それは例えば、ニュートリノ振動の物理や、バリオン、宇宙背景輻射、暗黒物質、暗黒エネルギーの起源など、宇宙論です。また一方で、素粒子標準模型がどのような原理で現れているのかも分かっていません。

### 2. 研究の目的

上記背景を受けて、量子重力を含む統一理論の候補と思われる超弦理論の有効理論を用いて、標準模型の起源や、特に未知な部分の多い宇宙論に注目し、宇宙や物質の起源を探ります。

2013年初頭に発表されたプランク衛星の結果によると、暗黒エネルギー・暗黒物質の存在を基にした、標準模型でうまく説明できることがわかってきました。一方で、宇宙背景輻射や暗黒物質等の起源は謎のままです。またラージハドロンコライダーの結果からは、現在の所、新しい物理の兆候もありません。この状況の下にさまざまなシナリオを研究します。

### 3. 研究の方法

超弦理論の低エネルギー有効理論である、4次元超重力理論の枠内で模型を構築します。特に、弦理論の真空に偏在するモジュライ(スカラー場)やアクシオン(擬スカラー場)に注目します。なぜならば、それらは標準模型には存在しない自由度で、暗黒セクターの起源になるからです。それらは超対称性の破れや、ゲージ対称性(4次元の大域的対称性)の破れのスケール次第で軽い質量を持ちます。また、それらの場の真空期待値は、弦理論のパラメータを決める重要な役割を果たします。ここで重要なのは、インスタントンなどの非摂動効果です。それらの有効理論を用いて素粒子実験・観測で得られたさまざまな物理現象を説明し、将来実験に関して、その結果を予言することを試みます。

### 4. 研究成果

#### (1) 軽い弦理論的アクシオン

軽いアクシオンは、弦理論の高次元ゲージ対称性(4次元の大域的対称性)が近似よく成り立っていると、軽い質量を持って現れます。つまり、関連する非摂動効果が小さい場合です。この時に、宇宙論的意味合いを暗黒物質に注目して議論しました。

暗黒輻射(質量に対して大きな運動量を持った暗黒物質)：

プランク衛星の結果によると、2013年当時から暗黒輻射は存在しない事と無矛盾です。この事は弦理論や宇宙論の模型に大きな制限や予言を与える事を議論しました。そのため、まず弦理論の有効理論を通じ、多くの模型で軽いアクシオンが存在する可能性を見つけました。例えば、弦理論が内包する6次元余剰次元空間が基礎スケールよりも十分大きい場合や、特別な対称性を持たない場合です。この時、大きな運動量を持ったアクシオンは余剰次元の振動から生成されます。一方で、軽いアクシオン暗黒輻射が観測と矛盾するほど多く生成されないためには、余剰次元が小さくして重くするか、物質の起源であるブレインが多く交差し、沢山のヒッグス粒子の存在がそれを薄める必要があります。あるいは、余剰次元が特別な対称性を持っている必要があるという制限が得られます。これは例えば、余剰次元に2つ穴があって、その穴の入れ替えに対して不変な空間という対称性です。

アクシオン暗黒輻射が存在すると、宇宙に存在する磁場の強さに依存して、このアクシオンが光子に転化してさまざまな観測に影響します。この事から、宇宙磁場への強さの制限が得られることを見つけました。

冷たい暗黒物質(質量に対して小さな運動量を持った暗黒物質)：

冷たい暗黒物質は銀河団など、重力を通じて我々の起源を作るために必要です。この暗黒物質の起源を弦理論的アクシオンのゼロモード振動の観点から説明することができます。

まず、これが崩壊する可能性を調べました。特にこれがエックス線観測衛星で観測されたといわれているエックス線を説明できることを示し、その時の宇宙論模型や応用を考察しました。また、この暗黒物質アクシオンが複数あると、その混合を通じて、強い相互作用セクターの微調整問題とエックス線の起源を同時に説明できることを示しました。

一方でアクシオンは、冷たい暗黒物質になる時に軽いので、後で説明する宇宙初期のインフレーションによって大きな密度揺らぎ(等曲率揺らぎ)を作ってしまう、宇宙背景輻射の中に観測される可能性があります。しかしこれは現在の所、観測されていません。それゆえ、この等曲率揺らぎを抑制する機構を包括的に議論しました。先述した4次元の大域的対称性がインフレーション中に大きく破れれば、例えば、アクシオンが非常に重くなるので揺らぎは抑制されます。

(2) 重い弦理論的アクシオンとインフレーションの起源

宇宙初期に存在したと思われる宇宙の加速度膨張（インフレーション）の起源を、重いアクシオンで説明することを試みました。もし、前述したゲージ対称性（4次元の大域的対称性）が非摂動効果によって比較的大きく破れていると、それに関連したアクシオンが大きな質量を持って低エネルギー理論に現れます。しかもその時、連続的な大域的対称性は破れますが、離散的な対称性が残ります。この対称性がアクシオン理論を制御します。その結果、適度に平坦な余弦（コサイン）型のポテンシャルを得ることができます。そのようなポテンシャルを持ったアクシオンは、場の初期位置に依存して巨大なエネルギーを生み出し、それがインフレーションを起こします。そしてアクシオンが生み出す揺らぎが宇宙背景放射の温度揺らぎを生み出し、現在の観測と無矛盾の可能性がります。このようなシナリオに沿って、重いアクシオンのインフレーションへの応用を考えました。

低エネルギーインフレーション：まず、2013年初頭に発表されたプランク衛星の結果と無矛盾に、低エネルギーインフレーション模型を考えました。この場合、インフレーションのエネルギーによって生み出される空間の揺らぎ（原始重力波）は、現在観測されるほど大きくありません。この状況を説明するために、複数のコサイン型アクシオンポテンシャルを、超重力理論に基づいて考えました。ここでは、2つのコサインポテンシャルを持つ場合に注目します。重要なのは、2つの項のパラメータが互いに調整されていれば、打消し合ってコサインの頂上部に丘のような平坦部ができることです。このようなポテンシャルはプランク衛星の結果を再現できることを示しました。また、インフレーション後にアクシオンが崩壊することで宇宙を再加熱し、右巻きニュートリノがあれば、レプトン創生によって物質と反物質の非対称性を説明できることも示しました。

以上の模型は、先述しましたが、複数のポテンシャル間に調整を要求します。それゆえ、次に調整が自然にできるような模型の実現を考察しました。弦理論がコンパクト化されていたら、周期関数が低エネルギー理論に現れることを意味します。例えば、余剰次元がトーラスを含むようなコンパクト化が行われれば、ヤコビのシータ関数が、インフレーションを起こすセクターのポテンシャルに現れます。この関数は、先ほどから述べている大域的対称性に加え、コンパクト化の性質のもつ対称性によって制御されています。実際にそのようなアクシオンポテンシャルをプロットすると、非常に平坦なインフレーションに適切なポテンシャルが得られることがわかります。このように、アクシオンのゲージ対称性の他に、

コンパクト化の対称性によって、インフレーションがうまく制御されている模型を見つけました。なお、この時はインフレーションを起こすインフラトンが、ブレインの位置です。つまり、注目するブレインが他のブレインの非摂動効果によって生み出された、波打った余剰次元トーラスの平坦な部分を動くエネルギーによってインフレーションが起きて、それが宇宙背景放射の温度揺らぎとして観測されていると解釈できます。

高エネルギーインフレーション：また、バイセップ2実験をきっかけとして、高エネルギーインフレーションへの応用も考えました。この場合、巨大なエネルギーが近い将来観測できるほど大きな原始重力波を生み出します。しかし、そのような時はアクシオンポテンシャルの平坦性を、基礎スケールを超えて制御しなければいけません。これをキム・ニレス・ペロソが考案した機構を用いて、超重力模型で実現できる事を世界で初めて示しました。ここで、彼らの提案は、複数のアクシオンとポテンシャルを用意して、その質量固有状態の混合を解くことによって、結果として平坦性を実現することでした。なお、この時には、それらのポテンシャル間のパラメータに微調整が必要です。

また、この機構に従って複数のアクシオンがあるときに、ポテンシャルの離散パラメータをランダムに振ることで、インフレーションと無矛盾な平坦性を実現する確率や、ポテンシャル構造を調べました。結果、100個程度のアクシオンがあれば、自然に平坦なポテンシャルを実現可能なことを見つけました。

また、観測されている宇宙背景放射の揺らぎを説明するため、非摂動効果を通じて、モノドロミーインフレーションへの応用を考えました。

### (3) その他の可能性

右巻きニュートリノ暗黒物質：標準模型に加えて「バリオン数 レプトン数のゲージ対称性」に対応する自由度があれば、ニュートリノ振動に加えて、暗黒物質とインフレーションを説明できる事を示しました。ここで、一番軽い右巻きニュートリノとバリオン数 - レプトン数に対応するヒッグスが、暗黒物質とインフラトンに対応します。もし右巻きニュートリノが適度な質量があれば、アイスキューブ実験への応用があることも示しました。これは弦理論では、ブレインモジュライのフェルミオンパートが右巻きニュートリノに対応している可能性があります。

R パリティの破れを用いたバリオン創生：超対称性のある理論でバリオン数の

みを破るような R パリティの破れの項を用いて、宇宙のバリオン非対称性を説明することを試みました。R パリティは低エネルギーでみると大域的対称性なので、量子重力の効果で破れている可能性があります、その項の係数は観測結果よりから小さくしなければなりません。(例えば陽子の寿命は非常に長くなければいけないので、係数の大きさは制限されます。) それゆえ、アフレック-ダイン機構により、スカラークォークが大きな期待を得ながら、場の標的空間での角運動量を与えられて最後に崩壊しバリオン非対称性を実現できることを議論しました。ここで、R パリティの破れの係数はこのシナリオからの制限があることを見つけました。大きすぎると、相互作用が熱平衡になる事で、生成されたバリオン数がウォッシュアウトされ、小さすぎると最も軽い超対称粒子の崩壊が、ビッグバン軽元素合成の結果を壊す可能性があるからです。(ただし、最も軽い超対称粒子は暗黒物質でないと、簡単のために仮定しています。) 弦理論的には、R パリティは離散的ゲージ理論で実現される可能性があり、弦理論的アクシオンがそのゲージ場と関連があります。

#### 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 13 件)

檜垣 徹太郎、北野 龍一郎、佐藤 亮介、  
「Neutrino Universe」、査読有り、  
Journal of High Energy Physics、  
Springer、2014 年 7 月号、044:1-20 ページ、2014、

DOI: 10.1007/JHEP07(2014)044

Michael Czerny、檜垣 徹太郎、高橋 史宜、  
「Multi-Natural Inflation in Supergravity and BICEP2」、査読有り、  
Physics Letter B、Elsevier、734 巻、  
167-172 ページ、2014、

DOI: 10.1016/j.physletb.2014.05.041

Michael Czerny、檜垣 徹太郎、高橋 史宜、  
「Multi-Natural Inflation in Supergravity」、査読有り、  
Journal of High Energy Physics、Springer、2014 年 5 月号、144:1-25 ページ、2014、

DOI: 10.1007/JHEP05(2014)144

檜垣 徹太郎、鄭 光植、高橋 史宜、「The 7 keV axion dark matter and the X-ray line signal」、査読有り、Physics Letter B、Elsevier、733 巻、25-31、2014、

DOI: 10.1016/j.physletb.2014.04.007

檜垣 徹太郎、中山 和則、高橋 史宜、「Moduli-Induced Axion Problem」、査読有り、Springer、Journal of High Energy Physics、2013 年 7 月号、005:1-21 ページ、2013、

DOI: 10.1007/JHEP07(2013)005

[学会発表](計 13 件)

檜垣 徹太郎、「これからのストリング現象論：弦理論的アクシオン」、これからの弦理論 橋本研クロージング研究会、2015 年 2 月 22 日、独立行政法人理化学研究所(埼玉県和光市)

檜垣 徹太郎、「Aligned natural inflation in supergravity」、Summer Institute 2014、2014 年 8 月 22 日、富士 Calm(山梨県富士吉田市)

檜垣 徹太郎、「Moduli-Induced Axion Problem」、Particle Physics and Cosmology Beyond the Higgs Boson、2013 年 10 月 24 日、東北大学片平キャンパス(宮城県仙台市)

檜垣 徹太郎、「Moduli-Induced Axion Problem」、StringPheno 2013、2013 年 7 月 16 日、ハンブルク市(ドイツ連邦共和国)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

檜垣 徹太郎 (HIGAKI, Tetsutaro)  
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・博士研究員  
研究者番号: 10629059