

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 7 日現在

機関番号：32702

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23740206

研究課題名(和文) 標準模型を超えた物理に基づく宇宙の物質の生成と密度揺らぎの形成に関する研究

研究課題名(英文) Study on matter creation and production of density perturbation in the universe based on the particle theories beyond the standard model

研究代表者

粕谷 伸太 (Shinta, Kasuya)

神奈川大学・理学部・准教授

研究者番号：00386806

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、超対称性理論におけるアフレック・ダイン場と呼ばれるスカラー場により、宇宙の物質・反物質非対称や暗黒物質の生成、および、宇宙の大規模構造の種となる密度揺らぎの形成を解明することを目指した。特に、ゲージ場媒介の超対称性の破れの理論において、暗黒物質が最も軽い超対称性粒子であるグラビティーノ、または、Qボールになり、同時に宇宙のバリオン数を説明できるシナリオを提示した。一方、アフレック・ダイン場による新たな高スケールインフレーションのモデルを構築し、密度ゆらぎの生成と宇宙のバリオン数を同時に説明した。

研究成果の概要(英文)：This research studies the production of matter-antimatter asymmetry, the dark matter, and the density perturbation, which leads to the production of the large-scale structure of the universe, by the scalar field called the Affleck-Dine field in supersymmetric theory. In particular, in the gauge-mediated supersymmetry breaking, we propose the scenarios that explain both the baryon asymmetry and the dark matter of the universe, which the latter could be gravitinos or Q balls. On the other hand, we construct the high-scale inflation model with the Affleck-Dine field as the inflaton, and could explain both the density perturbation and the baryon asymmetry of the universe.

研究分野：宇宙物理学、素粒子論的宇宙論

キーワード：暗黒物質 バリオン数 超対称性 インフレーション

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙論では、インフレーションを引き起こす場合も含め、素粒子論の中でスカラー場が果たす役割が大きい。その中で、特に、アフレック・ダイン場とアクシオン場に注目する。アフレック・ダイン場はスクォーク・スレプトンで構成される、ほぼ平坦なポテンシャルを持つスカラー場で、バリオン数を持ち、ダイナミカルに宇宙のバリオン数生成を行う。アフレック・ダイン場はその運動中、空間的に揺らぎ、Qボールと呼ばれるノントポロジカル・ソリトンを形成するという示唆がなされたが、我々は、Qボールが実際に形成されることを世界で初めて格子計算を用いて示した。Qボールは大域的U(1)チャージであるバリオン数によってエネルギー的に安定に存在する。Qボールがその崩壊に対して安定であると暗黒物質の良い候補となる。つまり、アフレック・ダイン場から宇宙のバリオン数と暗黒物質の両方を同時に説明できる画期的なシナリオになっている。このような性質を持つアフレック・ダイン場は、インフレーション中、エネルギー密度を支配しない構成要素として揺らぎを生み出し、最終的にはバリオン数やQボール暗黒物質の等曲率揺らぎとなる。この揺らぎは宇宙背景放射の観測等で制限でき、部分的には我々はインフレーションスケールへの制限として求めた。

一方、アクシオンは強い相互作用のCP問題の解決策として生まれたが、ごく初期の宇宙では、平坦なポテンシャルを持ち、インフレーション中の揺らぎが最終的にアクシオン暗黒物質の等曲率揺らぎとなる。これもやはり宇宙背景放射から制限が得られ、我々もカオス的インフレーションにおけるアクシオン模型に関する制約を調べた。しかし、等曲率揺らぎのスペクトルが著しく青方に傾いたものが支持される最近の観測解析結果を受け、我々は超対称性理論に基づいたそのようなアクシオンモデルを構築した。

## 2. 研究の目的

本研究は、素粒子の標準模型を超えた物理(特に超対称性理論)におけるスカラー場が、宇宙の物質・反物質非対称や暗黒物質の生成、および、宇宙の大規模構造の種となる密度揺らぎの形成に対して、どのように役立ち、影響するかを解明することを目指している。超対称性理論に注目するのは、LHCによって発見・解明の可能性が最もありそうだからであった。具体的には次の通りであった。

- (1) アフレック・ダイン場によるバリオン数と暗黒物質Qボールの生成において、バリオン、および、暗黒物質の等曲率揺らぎの観測的制限の検証、スカラー場のポテンシャルの形とQボールの性質の関心の解明、Qボール形成に伴う重力波の観測可能性の検討、などを行う。
- (2) 超対称性アクシオン模型において、等

曲率揺らぎスペクトルへの制限の検証、暗黒物質としてのアクシオンとその超対称性パートナーの可能性の追求、などを行う。

## 3. 研究の方法

本研究の目的に沿って、次のように行う。

- (1) アフレック・ダイン場によるバリオン数と暗黒物質Qボールの生成において、バリオン、および、暗黒物質の等曲率揺らぎの観測的制限の検証、数値シミュレーションを用いたスカラー場のポテンシャルの形とQボールの性質の関心の解明、Qボール形成に伴う重力波の発生シミュレーションとその観測可能性の検討、などを行う。
- (2) 超対称性アクシオン模型において、等曲率揺らぎスペクトルへの制限の検証、暗黒物質としてのアクシオンとその超対称性パートナーの可能性の追求、などを行う。特に、Qボールの崩壊から作られるアクシーノ暗黒物質の可能性を探る。

## 4. 研究成果

主に、アフレック・ダイン場の宇宙論的役割に関する成果が上がった。アフレック・ダイン場からQボールが形成される時、(1) Qボールが不安定な場合は崩壊して暗黒物質とバリオン数を同時に生成することがわかった。また、(2)形成したQボールが安定である場合は、Qボール自体が暗黒物質になることを突き止めた。さらに、(3)暗黒物質となるQボールの観測可能性を調査した。また、(4)アフレック・ダイン場がインフレーションを引き起こすモデルを、運動項が場に依存する枠組みの中で構築した。以下では、それぞれに関して詳細を述べる。

(1) 1つ目の成果はQボールに崩壊によって宇宙のバリオン数と暗黒物質を同時に説明するシナリオの構築である。超対称性の破れがゲージ場媒介であるときには、Qボールは安定であると思われてきたが、チャージQ(バリオン数)が十分小さい場合には、核子(バリオン)へ崩壊する。Qボールの崩壊率には上限があり、これを飽和崩壊という。本研究では、崩壊過程を詳しく調べた。崩壊の主モードの素過程は、スクォーク・スクォークの散乱からクォーク・クォークを作るものであり、飽和崩壊する。その他のモードとして、最も軽い超対称性粒子であるグラビティーノへの崩壊と次に軽い超対称性粒子(ニュートラリーノかスタウ)への崩壊が考えられる。後者は飽和崩壊するが、前者は飽和しない。そのため、崩壊の分岐比が、後者では主モードの崩壊率の比で決まり、前者では主モードの素過程の相互作用の強さの比で決まることを突き止めた。

さて、ニュートラリーノ(もしくはスタウ)は、その崩壊によって、軽元素合成で作られた元素を破壊しかねない。元素合成がうまく

働くためには、軽元素の観測から、ニュートラリーノの存在量には制限が付けられている。このモデルの場合、Qボールの崩壊で出来たニュートラリーノが対消滅して、存在量が少なくなることが分かり、多くのパラメータ領域で、この問題が回避されることを突き止めた。

一方、Qボールの崩壊で出来たバリオン(核子)とグラビティーノは、それぞれの存在量が、宇宙のバリオン数と暗黒物質の量をうまく説明できることが分かった。また、このようなシナリオが、Qボールが宇宙のエネルギー密度を支配的になった場合にもならない場合にもうまくいくことを示した。

(2) 2つ目の成果は、形成されたQボールが安定な場合、それ自身が暗黒物質になるシナリオの構築である。なお、ゲージ場媒介の超対称性の破れのメカニズムにおいて、2種類(『ゲージ場媒介型』と『新型』)のQボールが存在することが知られている。

まず、単一のアフレック・ダイン場からQボールが形成され、そのQボールと熱浴との相互作用によって、Qボールからバリオン数が『蒸発』し、熱浴中にバリオン数を生成するという従来からのシナリオに関しては、ゲージ場媒介型でも新型でも、うまくいくシナリオが様々な観測結果から排除されことを示した。この要因として、観測制限が厳しくなったことも挙げられるが、Qボールの理論、特に、Qボールを特徴付けるパラメータの関係式が改良されたことにも依っている。

しかし一般には、アフレック・ダイン場は複数存在する。そこで、2つのアフレック・ダイン場を考え、1つはゲージ場媒介型のQボールを形成し、最終的には崩壊することによって宇宙のバリオン数を説明し、もう1つが新型のQボールを形成し、核子への崩壊に対して安定で、Qボールのまま宇宙の暗黒物質となるシナリオを考察した。具体的には、アフレック・ダイン場のポテンシャルが、 $n=5$ と $n=6$ という高次のスーパーポテンシャルで立ち上がる場合に、このシナリオがうまくいくことを突き止めた。

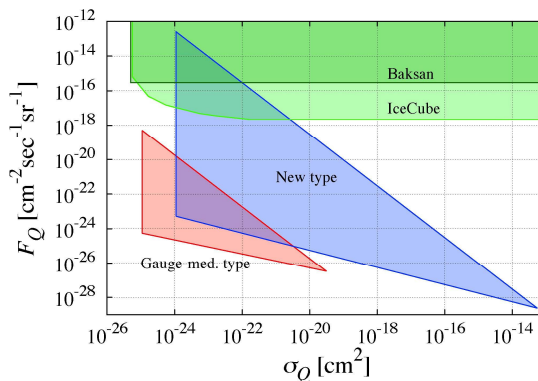
また、宇宙背景放射の観測から、インフレーションが高スケールで起こった可能性が指摘されている。その場合には、 $n=4$ の高次のスーパーポテンシャルで立ち上がるカップリングが異なる2つのアフレック・ダイン場が、それぞれゲージ場媒介型と新型のQボールを形成し、上記のシナリオを達成することを示した。

(3) Qボールが核子の崩壊に対して安定になり、それ自体で暗黒物質の候補となることが出来るのは、超対称性の破れがゲージ場媒介で起こるときである。この場合、一般的に、グラビティーノが最も軽い超対称性粒子となり、暗黒物質の有力な候補と考えられてきた。しかし、グラビティーノが暗黒物質とな

り得るグラビティーノの質量は  $0.1 \sim 100 \text{ MeV}$  と比較的軽く、他の粒子との相互作用が弱く、実験的にその存在を確かめることは困難である。

本研究では、安定なQボールが暗黒物質になり得るかどうかを考察し、実際、グラビティーノとは異なるパラメータ領域で実現することを確かめた。具体的には、上記にあるようにグラビティーノ質量が  $0.1 \sim 100 \text{ MeV}$  の領域では、インフレーション後の再加熱温度が相対的に低い場合に、Qボールが暗黒物質たり得ることを突き止めた。さらに、グラビティーノ質量が軽すぎて、グラビティーノ自体が暗黒物質になれない低質量領域でも、Qボールは暗黒物質になり得ることを示した。

このQボール暗黒物質は、いわゆるニュートラリーノなどとは異なり、大型のニュートラリーノ測定器で検出可能である。Qボール表層で核子がクォークに分解され、スクォークに変換され、Qボールに取り込まれる。その際、 $1 \text{ GeV}$  程度のエネルギーが中間子として放出される。すると、検出器内でQボールが通過した道筋上に荷電粒子が生成され、それが検出される。観測量は断面積毎のフラックスで、現時点ではQボールは見つかっていないので、フラックスの上限として、理論的な予測領域を制限する。図1では、BAKSANとIceCubeの2つの大型ニュートラリーノ観測器から得られた制限を描いた。既に、新型のQボール暗黒物質の予想領域の一部は排除されている。IceCubeチームによる未解析データの詳細な解析、および、将来の拡張版IceCube型の観測において、新型、または、ゲージ場媒介型、のQボール暗黒物質が検出される可能性は充分にあることを示した。



(4) アフレック・ダイン場による高スケールインフレーションモデルを構築した。これは、インフラトンの運動項がインフラトンの期待値が大きくなるとともに変化し、実質的にポテンシャルが平らになることによって実現されるモデルである。一般化した並進対称性をインフラトン場に課すことで、インフラトンの期待値の大きなところでポテンシャルが制御可能となるからである。インフレーション後は、インフラトンは自動的にポテンシャル中を回転し、バリオン数が生成される。

よって、自然とQボールが形成され、再加熱はQボールの崩壊を通じて行われる。すると、再加熱温度は高くなりすぎないことも分かった。インフレーション中は、インフラトン場の軌跡に直交する自由度が重くなり、等曲率のゆらぎは生成されないことも示した。

上記に見たように、本研究のような、アフレック・ダイン場の宇宙論的な性質を解明する研究、そして、Qボールの形成からその宇宙論的な役割を考察する研究は、国内外においてユニークな研究となっている。特に、ゲージ場媒介の超対称性の破れにおいて、暗黒物質がQボールであれば観測的に検出できるというのは非常に優れた特性だと考えられ、理論的、観測的発展が期待される。

また、不安定なQボールの崩壊によるシナリオでは、最も軽い超対称性粒子がグラビティーノでなくアクシーノの可能性もある。アクシーノとはアクシオンの超対称性パートナーである。この場合に、超対称性アクシオン模型の構築の新しい指針となり発展が見込まれる。

#### 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)

S.Kasuya and M.Kawasaki, Q-ball dark matter and baryogenesis in high-scale inflation, Physics Letters B 739, 174-179 (2014), 査読有り。

DOI: [10.1016/j.physletb.2014.10.059](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2014.10.059)

S.Kasuya and F.Takahashi, Flat Direction Inflation with Running Kinetic Term and Baryogenesis, Physics Letters B 736, 526-532 (2014), 査読有り。

DOI: [10.1016/j.physletb.2014.07.055](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2014.07.055)

S.Kasuya and M.Kawasaki, Baryogenesis from the gauge-mediation type Q-ball and the new type of Q-ball as the dark matter, Physical Review D 89, no. 10, 103534 (2014), 査読有り。

DOI: [10.1103/PhysRevD.89.103534](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.89.103534)

S.Kasuya, M.Kawasaki and M.Yamada, Revisiting the gravitino dark matter and baryon asymmetry from Q-ball decay in gauge mediation, Physics Letters B 726, 1-7 (2013), 査読有り。

DOI: [10.1016/j.physletb.2013.08.008](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2013.08.008)

S.Kasuya and M.Kawasaki, Gravitino dark matter and baryon asymmetry from Q-ball decay in gauge mediation, Physical Review D 84, 123528 (2011),

査読有り。

DOI: [10.1103/PhysRevD.84.123528](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.84.123528)

[学会発表](計8件)

粕谷伸太, Q-ball dark matter and baryogenesis in high-scale inflation, Particle Cosmology after Planck, 2014.9.24, ハンブルク(ドイツ)

粕谷伸太, Affleck-Dine baryogenesis and Q-ball dark matter, Enqfest, 2014.5.30, ヘルシンキ(フィンランド)

粕谷伸太, Qボール崩壊によるバリオン生成とQボール暗黒物質, 日本物理学会, 2014.3.27, 東海大学(神奈川県平塚市)

粕谷伸太, Dark matter production and baryogenesis from the Q-ball decay, Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics, 2013.11.14, ホノルル(アメリカ)

粕谷伸太, Axino dark matter and baryon asymmetry from Q-ball decay in gauge mediation, Planck 2013, 2013.5.30, ワルシャワ(ポーランド)

粕谷伸太, Dark matter and baryon asymmetry from Q-ball decay in gauge mediation, 富山理論研究会, 2012.2.20, 富山大学(富山県富山市)

粕谷伸太, Qボールの崩壊からのグラビティーノ暗黒物質とバリオン数の生成, 日本物理学会, 2011.9.19, 弘前大学(青森県弘前市)

粕谷伸太, Gravitino dark matter and baryon asymmetry from Q-ball decay in gauge mediation, COSMO-2011, 2011.8.23, ポルト(ポルトガル)

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

粕谷 伸太 (KASUYA, Shinta)

神奈川大学・理学部・准教授

研究者番号: 00386806