様　式　C－19、F－19－1、Z－19　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　４ 年　 ６ 月　 ７ 日現在

機関番号：１１３０１
研究種目：研究活動スタート支援
研究期間：2020～2021
課題番号：２０Ｋ２２３４４

研究課題名（和文）素粒子理論に基づく初期宇宙の熱的進化および重力波の研究

研究課題名（英文）Thermal history of the Universe and generation of gravitational waves in physics beyond the Standard Model of particle physics

研究代表者
山田　將樹（Yamada, Masaki）

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：２０８７１１０６

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,200,000円

研究成果の概要（和文）：我々を構成する物質の起源を説明する機構の１つに、右巻きニュートリノの崩壊によるシナリオが提案されていた。本研究では、右巻きニュートリノが崩壊する以前から何らかの非対称性が存在していた場合、その非対称性が右巻きニュートリノの相互作用を通してバリオン数の非対称性に転換されうることを示した。これはより広い範囲の素粒子理論においても物質を作り出せることを示している。また、研究期間中に報告された暗黒物質探査実験や重力波観測実験に対する理論的な帰結を議論し、これらのシグナルが他の宇宙観測によるシグナルと関係している可能性を指摘した。これらの成果により、宇宙の熱史に関して新たな理解を与えることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義
宇宙の歴史のなかで、我々を構成する通常の物質の起源については未だに謎に包まれている。一方で、素粒子のニュートリノ振動の観測は右巻きニュートリノの存在を理論的に示唆している。本研究では、この右巻きニュートリノの質量がある広い範囲に入っていれば、宇宙初期に存在する任意の保存量がバリオン数（物質）に転換されることを示した。これにより、物質の起源を説明するシナリオとしてより広い可能性が開かれた。また、研究期間中に報告された暗黒物質探査実験や重力波観測実験の結果を受けてその理論的な解釈を議論し、現在の観測によって宇宙の謎の解明につながりつつあることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The origin of baryon asymmetry is a long-standing mystery in cosmology. One of the possible mechanisms to generate baryon asymmetry is the decay of right-handed neutrinos in the early Universe. In the present study, we have revealed that almost any asymmetry can be converted to baryon asymmetry via the interaction associated with the right-handed neutrinos. This opens a broader possibility for the generation of baryon asymmetry in physics beyond the Standard Model. Moreover, we have discussed theoretical implications of recently reported signals of a dark-matter direct detection experiment and a pulsar-timing array experiment and have pointed out that they are related to other astrophysical observations. These works have provided a new insight into the thermal history of the Universe.

研究分野：素粒子論的宇宙論

キーワード：宇宙の熱史　バリオン数の非対称性　重力波　暗黒物質　インフレーション

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

１．研究開始当初の背景

ビッグバン標準宇宙論と軽元素の観測によれば、ビッグバン元素合成時期の宇宙のバリオン数密度は、光子数密度と比べておよそ 10 桁も小さいことが知られている。また、銀河の回転曲線などの観測から暗黒物質の存在が確かめられている。一方で、インフレーション理論は地平線問題や平坦性問題などの宇宙論的な諸問題の解決や、宇宙の構造形成の種の生成などの成功を収め、観測的にも確かな理論である。しかし、このインフレーションはあらゆる数密度を薄めてしまう。このため、インフレーションからビッグバン元素合成までの時期に、バリオン数および暗黒物質の生成が起こるシナリオが必要である。このような初期宇宙の現象においては、高エネルギーの物理である素粒子理論が密接に関わっており、素粒子の標準理論を超えた物理を考えることによって宇宙論の問題が解決すると期待されている。

特に、ニュートリノ振動の観測から右巻きニュートリノの存在が示唆されており、この右巻きニュートリノが物質と反物質に非対称に崩壊することによってバリオン数の非対称性を作り出すことができると考えられている。このとき、右巻きニュートリノが崩壊する以前から何らかの(任意の)非対称性が存在していた場合には、その非対称性が右巻きニュートリノの相互作用を通してバリオン数の非対称性に転換されると考えられるが、それに関する研究はこれまでになされていない。

また、素粒子標準理論の持つ強い CP 問題を解決するために PQ 機構が働いていたとすると、アクシオンと呼ばれる新粒子が予言される。超弦理論においても同様の性質を持つ粒子が予言されることも指摘されている。宇宙論においては、このアクシオンは暗黒物質の有力な候補として考えられており、場合によっては同時にインフレーションも引き起こすこともできるなど、宇宙論に様々な可能性を与えている。

初期宇宙にどのような現象が起きていたかを観測するためには、一度放射されればその後ほとんど乱されることなく現在まで届くという性質を持つ重力波の観測が有用である。これは光などの電磁波は宇宙の晴れ上がり以前の情報を直接伝えることができないことと比較して、初期宇宙論を検証するための重要な観測方法である。

２．研究の目的

本研究では、インフレーション終了後からバリオン数および暗黒物質の生成を通してビッグバン元素合成までの宇宙の熱史を包括的に考え、無矛盾な宇宙論シナリオを構築することを目的としている。またその宇宙モデルの重力波観測実験による検証可能性についても議論する。

特に、右巻きニュートリノを通して初期宇宙においてバリオン数の非対称性を作り出す機構について、一般的な初期条件の下で最終的に形成されるバリオン数がどのような変更を受けるのか明らかにする。

また、アクシオンと呼ばれる仮想的な新粒子が初期宇宙論のダイナミクスにどのように影響を与えるかを明らかにする。さらに初期宇宙のダイナミクスから放射される重力波のスペクトルの計算を行う。これらの研究を通して初期宇宙の熱史を明らかにし、またその検証方法を提案していく。

３．研究の方法

右巻きニュートリノを含めた素粒子標準理論の輸送方程式を書き下し、各相互作用の脱結合時期および各時期の平衡解を求める。これによって、初期宇宙にある非対称性が存在したとき、それが輸送方程式を通してどのようにバリオン数の非対称性に転換されるかを明らかにする。

また、宇宙が高温高密度であった時期に様々な相転移が起きている可能性があり、その過程で観測可能な重力波が生じる可能性がある。この可能性を探求し、観測によってビッグバン元素合成時期以前の熱史の情報を得る方法を議論する。

４．研究成果

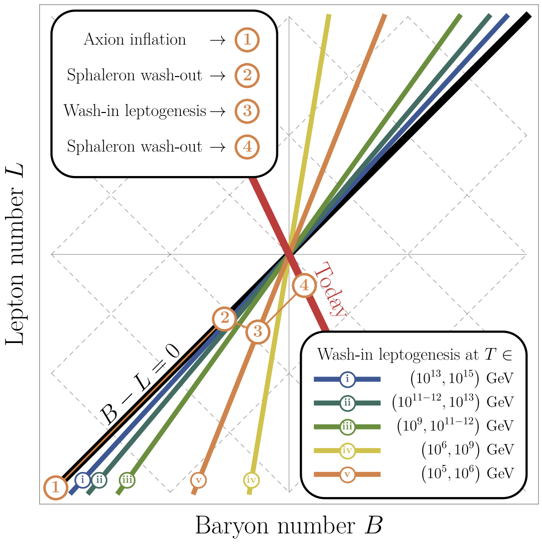
宇宙初期のインフレーション終了後からビッグバン元素合成時期までの間の時期に、宇宙の熱史のなかでどのように物質を作り出し、そのなかでどのような重力波のシグナルを出すのかという研究を行った。特に、本研究の期間において XENON1T の暗黒物質探査実験および NANOGrav のパルサータイミングアレイ実験の結果が報告されたため、それらの結果が示唆することについての研究も行った。以下では特に重要な３つの成果について説明する。

(1) 右巻きニュートリノの相互作用を通したバリオン数の生成について

ニュートリノ振動の観測から右巻きニュートリノの存在が示唆されており、この右巻きニュートリノの相互作用を通して初期宇宙においてバリオン数の非対称性を作り出すことができると考えられている。
本研究では、まず右巻きニュートリノを含めた素粒子標準理論の輸送方程式を書き下し、各相互作用の脱結合時期および各時期の平衡解を求めた。これにより、仮に初期宇宙において任意の粒子の非対称性が存在していたとすると、右巻きニュートリノの相互作用を通してその非対称性が再配分されることによってバリオン数の非対称性を作り出すことを示した。

特に、初期値のバリオン数とレプトン数の値が等しく B-L=0 であった場合、通常は電弱スファレロンの効果によってその非対称性がすべて消されてしまうと思われていたが、宇宙の温度が電子の湯川相互作用の脱結合時期よりも高い時代においては完全には消されていないことが明らかになった。このため、右巻きニュートリノがそれ以前に脱結合した場合、ほぼ任意の非対称性が右巻きニュートリノの相互作用によって B-L 非対称性に転換され、それが電弱スファレロンの効果によってバリオン数の非対称性に転換されることになる（図 1）。

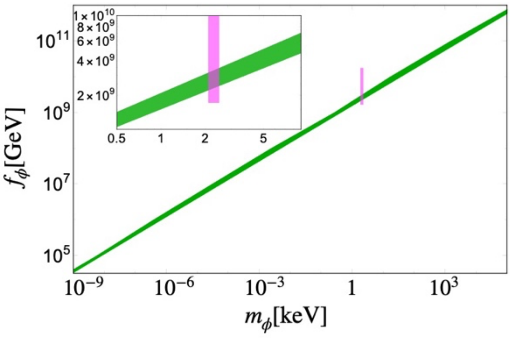
この機構は右巻きニュートリノの相互作用が CP 対称性を保っていても、またその相互作用が非常に強い場合でも働く。これらの性質は通常のバリオン数の非対称性を作り出す機構とは全く異なり、より広い範囲のモデルでも非対称性を作り出すことができることを示している。



（図 1：ある非対称性からバリオン数の非対称性が作られる様子を表したグラフ。元々の非対称性が B-L=0 であったとしても、右巻きニュートリノの質量が図の右下に示されている温度範囲にあれば、輸送方程式を通してバリオン数 B の非対称性が作り出されている。[次項 主な発表論文等の 3 本目より抜粋]）

(2) XENON1T 実験の観測事象を説明するアクシオンインフレーションモデル

暗黒物質直接探査実験である XENON1T 実験のグループが電子反跳事象の超過を報告していた。これはアクシオンダークマターの吸収によるものである可能性が議論されているが、我々はそのアクシオンが初期宇宙のインフレーションをも引き起こしていた可能性を指摘した。この二つの現象を一つのアクシオンで実現するためにはそのパラメーターにある非自明な関係が成り立っていることが必要であったが、XENON1T 実験の結果はまさにその関係を満たしていることを明らかにした（図 2）。

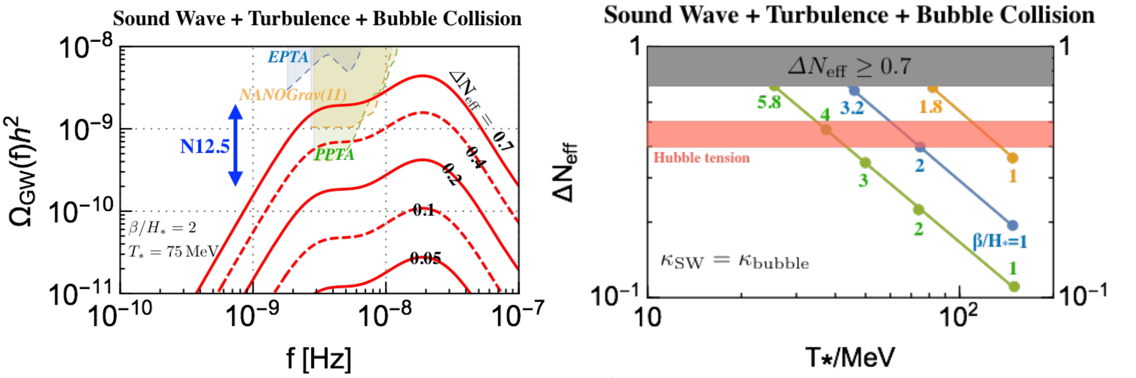


（図２：XENON1T 実験の電子反跳事象の超過を説明できるパラメーター領域（赤い領域）およびアクシオンがインフレーションも引き起こすことができるパラメーター領域（緑の領域）。前者は小さい範囲でのみ説明できるが、それは後者のパラメーターの範囲と確かに被っている。［次項 主な発表論文等の 1 本目より抜粋］）

(3) NANOGrav 実験の観測事象を説明する相転移と残された暗黒輻射について

宇宙が高温高密度であった時期に様々な相転移が起きている可能性があり、その過程で観測可能な重力波が生じる可能性がある。本研究の期間中に NANOGrav によるパルサータイミング実験のデータが重力波のようなシグナルを示唆している可能性が報告された。本研究では、このシグナルが初期宇宙における相転移のダイナミクスにおいて放射されたものであるとしたとき、その相転移の残りのエネルギーが暗黒輻射として現在まで残っている可能性について議論した。特に、相転移による重力波のシグナルと、残る暗黒輻射のエネルギー密度の間には特定の関係があることを示し、NANOGrav のシグナルを説明するような相転移が起きていたとすると、将来的に宇宙マイクロ波背景放射の観測によって確かめられる程度の暗黒輻射が存在しているはずであることを示した。

さらに、暗黒輻射の存在は宇宙マイクロ波背景放射の現在の観測にも影響し、そこから得られている宇宙のハッブルパラメータの観測値にも影響しうることを明らかにした。このとき、ハッブルパラメーターには直接観測実験による値と宇宙マイクロ波背景放射によって求められた値の間にいくらかの差があることが知られているが、その差をある程度緩められることを示した。



（図 3-左：相転移による重力波のスペクトル（赤線）と、NANOGrav の報告が示唆している重力波の振幅（青い矢印の範囲）。赤線に沿って書かれているΔNeff の値は暗黒輻射の存在量を表している。 図 3-右：相転移が起きた温度とΔNeff の値の関係（実線）。赤い領域であれば、ハッブルパラメーターの観測の差をある程度狭めることができる。［次項 主な発表論文等の 2 本目より抜粋］）

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計9件（うち査読付論文　9件／うち国際共著　5件／うちオープンアクセス　8件）

１．著者名 Fuminobu Takahashi, Masaki Yamada, Wen Yin	４．巻 152
２．論文標題 What if ALP dark matter for the XENON1T excess is the inflaton	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Journal of High Energy Physics	６．最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP01(2021)152	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

１．著者名 Yuichiro Nakai, Motoo Suzuki, Fuminobu Takahashi, Masaki Yamada	４．巻 10
２．論文標題 Gravitational waves and dark radiation from dark phase transition: Connecting NANOGrav pulsar timing data and hubble tension	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Physics Letters B	６．最初と最後の頁 816
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2021.136238	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

１．著者名 Domcke Valerie, Kamada Kohei, Mukaida Kyohei, Schmitz Kai, Yamada Masaki	４．巻 126
２．論文標題 Wash-In Leptogenesis	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Physical Review Letters	６．最初と最後の頁 201802
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.126.201802	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

１．著者名 Nakagawa Shota, Takahashi Fuminobu, Yamada Masaki	４．巻 5
２．論文標題 Trapping effect for QCD axion dark matter	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	６．最初と最後の頁 062～062
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1475-7516/2021/05/062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

1．著者名 Yamada Masaki, Yanagida Tsutomu T.	4．巻 816
2．論文標題 A natural and simple UV completion of the QCD axion model	5．発行年 2021年
3．雑誌名 Physics Letters B	6．最初と最後の頁 136267～136267
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2021.136267	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1．著者名 Nakagawa Shota, Takahashi Fuminobu, Yamada Masaki	4．巻 127
2．論文標題 Cosmic Birefringence Triggered by Dark Matter Domination	5．発行年 2021年
3．雑誌名 Physical Review Letters	6．最初と最後の頁 181103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.127.181103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 Hiroyuki Kitamoto, Masaki Yamada	4．巻 -
2．論文標題 Semiclassical analysis of axion-assisted and axion-driven pair production	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Accepted in Journal of High Energy Physics	6．最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 Kyohei Mukaida, Kai Schmitz, Masaki Yamada	4．巻 -
2．論文標題 Leptoflavorgenesis: baryon asymmetry of the Universe from lepton flavor violation	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Accepted in Physical Review Letters	6．最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1．著者名 Fujikura Kohei, Nakai Yuichiro, Sato Ryosuke, Yamada Masaki	4．巻 4
2．論文標題 Baryon asymmetric Universe from spontaneous CP violation	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Journal of High Energy Physics	6．最初と最後の頁 105
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP04(2022)105	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕　計12件（うち招待講演　4件／うち国際学会　7件）

1．発表者名 Masaki Yamada
2．発表標題 NANOGrav and first-order phase transition in the early Universe and its implication to H0 tension
3．学会等名 KEK-PH Lectures and Workshops 2020 (KEK-Cosmo GW)（招待講演）（国際学会）
4．発表年 2020年

1．発表者名 Masaki Yamada
2．発表標題 Present status of axion theories and searches and ALP DM interpretation of the XENON1T excess
3．学会等名 Kashiwa DM symposium 2020（招待講演）（国際学会）
4．発表年 2020年

1．発表者名 Masaki Yamada
2．発表標題 What is dark matter? - XENON1T excess from axion dark matter -
3．学会等名 第5回 FRIS若手研究者学際融合領域研究会
4．発表年 2020年

１．発表者名
Masaki Yamada

２．発表標題
宇宙における複屈折現象について

３．学会等名
第5回 FRIS/DIARE Joint Workshop

４．発表年
2021年

１．発表者名
Masaki Yamada

２．発表標題
Cosmic Birefringence Triggered by Dark Matter Domination

３．学会等名
PPC 2021: XIV International Workshop on Interconnections between Particle Physics and Cosmology（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
Masaki Yamada

２．発表標題
Cosmic Birefringence Triggered by Dark Matter Domination

３．学会等名
PASCOS 2021, the 26th International Symposium on Particle Physics, String Theory, and Cosmology（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
Masaki Yamada

２．発表標題
Cosmic Birefringence Triggered by Dark Matter Domination

３．学会等名
Cambridge High Energy Workshop 2021 - Axion Physics（招待講演）（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名 Masaki Yamada
２．発表標題 Cosmic Birefringence Triggered by Dark Matter Domination
３．学会等名 The XXVIII International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY 2021)（国際学会）
４．発表年 2021年

１．発表者名 Masaki Yamada
２．発表標題 物質優勢期をトリガーとしたアクシオンの振動について
３．学会等名 基研研究会 素粒子物理学の進展２０２１
４．発表年 2021年

１．発表者名 Masaki Yamada
２．発表標題 球対称ブラックホールの Scalar Hair
３．学会等名 日本物理学会 2021年秋期大会
４．発表年 2021年

１．発表者名 Masaki Yamada
２．発表標題 ブラックホールに毛はあるか？
３．学会等名 令和３年後期 第2回 FRIS若手研究者学際融合領域研究会
４．発表年 2021年

１．発表者名 Masaki Yamada
２．発表標題 Leptoflavorgenesis: baryon asymmetry of the Universe from lepton flavor violation
３．学会等名 New observational windows on the high-scale origin of matter-antimatter asymmetry（招待講演）（国際学会）
４．発表年 2022年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

－

６．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究協力者	北本　浩之 (Kitamoto Hiroyuki)	東北大学・学際科学フロンティア研究所・学術研究員 (11301)	

７．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

８．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	Shanghai Jiao Tong University			
スイス	CERN	LPPC		
ドイツ	DESY			