

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17644

研究課題名(和文) 初期宇宙における物質-反物質非対称性の生成と素粒子集団励起

研究課題名(英文) Matter-antimatter asymmetry creation in the early Universe and particle collective excitations

研究代表者

三浦 光太郎 (Miura, Kohtaroh)

名古屋大学・基礎理論研究センター・研究員

研究者番号：50511432

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、初期宇宙の電弱相転移前後における素粒子の集団励起の観点から、宇宙における物質-反物質非対称性の生成について調べた。現象論的に注目されるレゾナント-レプトジェネシスでは、レプトン数が素粒子物理学の最前線の電弱相転移前後で生成される。相転移前後の左巻きニュートリノのスペクトル関数は、有限のWeak Boson質量により非自明な集団励起を持つ。本研究ではこの効果を取り入れて、レプトン数生成の鍵となる右巻きニュートリノの崩壊率を計算した。Weak Boson質量を無視した場合に比べ、100GeV前後の温度領域で20%-30%ほど崩壊率が大きくなる事を示唆した。

研究成果の概要(英文)：We have investigated a creation mechanism of matter-antimatter asymmetry observed in the Universe in terms of a collective excitation of elementary particles in the electroweak phase transition (EWPT) era. We have focused on the resonant-leptogenesis in which the lepton number would be created at around the EWPT - a frontier of the high energy particle physics, and it is thus under scrutiny with phenomenological interests. An important feature in the EWPT is that left-handed neutrinos possess a non-trivial collective excitation due to the presence of massive weak bosons. We have taken account of this effect and evaluated the decay rate of the right-handed neutrino, a key quantity in the leptogenesis. Comparing to the case assuming massless weak bosons, the decay rate gets 30% enhancement at around 100 GeV.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ニュートリノ集団励起とレプトン数生成

1. 研究開始当初の背景

(1) 素粒子物理学における基本理論(標準理論)は理論・実験双方で決定的成功を収めた。基礎物理学の最前線は、標準理論を超える現象の観測と理論体系(Beyond Standard Model, BSM)の創出である。その突破口となり得るのが、物質・反物質非対称性の問題だ。天体観測によれば、我々の宇宙は物質優勢宇宙であり、その度合いを特徴付ける、宇宙の時間発展における不変量-Baryon Number Asymmetry(BAU=バリオン数密度/エントロピー密度)は、Big-Bang 核生成理論や宇宙背景放射観測から「定量的」に評価されている。

(2) 一方、標準理論における殆どの素粒子反応過程は、粒子と反粒子をペアで生成/消滅し、正味の粒子数変化を許さない。より正確には、標準理論は BAU 生成の必要条件(Sakharov の条件: Baryon 数の破れ、CP の破れ、非平衡過程の存在)を同時には満たさず、物質優勢宇宙を説明できない。つまり BAU = BSM のヒントである。Resonant Leptogenesis は、BAU 生成機構として最近注目を集めている。その理由は、このモデルでは BAU が電弱スケール(ヒッグス機構のスケール)の物理である事、左巻きニュートリノ振動実験と BSM の仮説粒子-右巻きニュートリノの研究に係る事から、近い将来検証可能性を持つ素粒子現象論のスコープ内で捉えられるからである。Resonant Leptogenesis では、右巻きニュートリノ(N)の左巻きニュートリノ(ν) + ヒッグス(Φ) + 荷電レプトン(l)への崩壊で粒子数が生じるので(図 1)、その崩壊率が重要であり、近年多数の研究が報告されている。

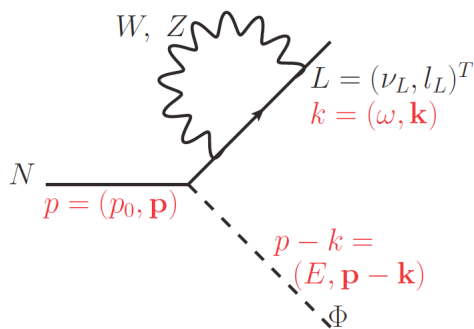


図 1

2. 研究の目的

本研究の目的は、電弱相転移(初期宇宙においてヒッグス粒子が凝縮して、素粒子が質量を獲得した相転移)前後における、右巻きニュートリノの崩壊率を計算する事である。電弱相転移後では、ニュートリノを感じる弱い相互作用を媒介する weak boson(図 1 の W と Z)は質量を持つ。これにより、左巻きニュートリノのスペクトル関数が非自明な振る舞いを示す。この効果を取り入れる事が本研究のコアである。

3. 研究の方法

我々は先行研究で、左巻きニュートリノのスペクトル関数を、1-loop 摂動論に基づいて計算した。重要な点は、weak boson 質量を無視した hard-thermal loop(HTL) 近似を用いず、正確な 1-loop 量子補正を計算した事である。本研究では、そのスペクトル関数を用いて、右巻きニュートリノの崩壊率の計算を行う。特に、用いるスペクトル関数が持っている非自明な集団励起モードが崩壊率に与える影響について考察する。

4. 研究成果

(1) 右巻きニュートリノ崩壊前後におけるエネルギー保存則から、崩壊先粒子が持ち得るエネルギーには制限がつく(図 1 の p, k の関係: support と呼ばれる)。図 2 と 3 に示す様に、support 領域と集団励起モードが存在するエネルギー領域の重なり方が、崩壊率を決定づける。図 2-3 は右巻きニュートリノの質量(M_R)が比較的小さい(電弱スケール $v_0 = 246\text{GeV}$ の 6 割)場合の相転移直後に対応する。図 2 では、右巻きニュートリノの運動量がその質量 M_R より小さい場合、図 3 では同程度の場合を示した。紫色の部分が support に対応し、赤/青/ピンクの線が崩壊先(左巻きニュートリノ)の集団励起スペクトルピークで、main / anti-plasmino / ultrasoft モードに対応する。右巻きニュートリノの運動量が大きい方が、重なり合いが増える事から崩壊率が大きくなる。一方、スペクトル関数において最も特徴的であった ultrasoft モードは、support 領域から外れている。 M_R を更小さく取れば support に入るかもしれないが、この場合は崩壊多く起こる温度領域低くなり、電弱相転移前後における BAU 生成シナリオから外れてしまう。

(2) では、崩壊率に修正を与える要因はどこに見出せるだろうか? 答えは main / anti-plasmino モードが持っている幅である。この幅は、HTL に寄らずに 1-loop 量子補正を計算した事から出てくる。また 1-loop の範囲で幅が出るのは、有限温度プラズマ中における場の量子論に特徴的な性質である。図 4 に、右巻きニュートリノの崩壊率のエネルギー依存性を示す(質量と温度は図 2、3 と同じ)。これを積分したものが、最終的な崩壊率である。青線は従来の HTL 近似、一方赤線が 1-loop 量子補正を全て取り入れたスペクトル関数を用いた場合で、我々の新しい結果に対応する。後者は、被積分関数がピークを持つあたりで、30%程度大きい事がわかる。この様に、崩壊先の左巻きニュートリノが、電弱相転移直後に非自明な集団励起を持つ事から、右巻きニュートリノの崩壊率が大きくなる事が示された。この結果は、ノルウェーで開催された国際会議(SEWM2016)で発表した[1]。

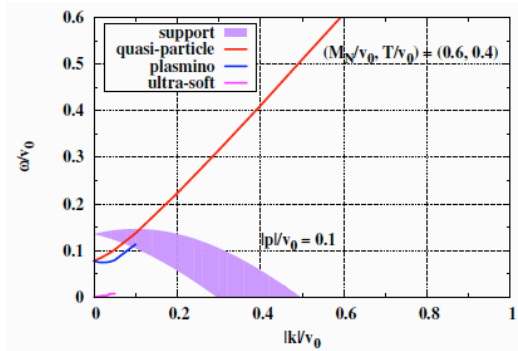


図 2

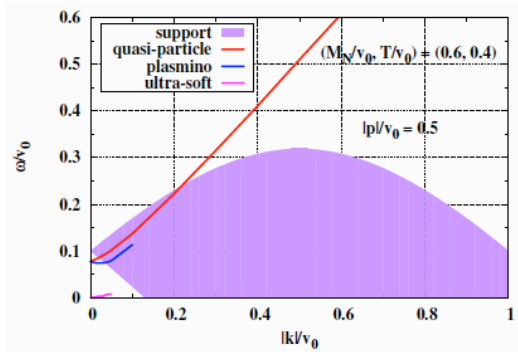


図 3

(3) 本研究で用いた 1-loop スペクトル関数は、電弱相転移温度よりも高温では妥当ではない。一方、BAU の生成には、その様な高温領域も重要になる。高温領域でも妥当なスペクトル関数を求めるには、Schwinger-Dyson 方程式による非摂動計算が必要である。これが次のステップである。得られた崩壊率から、具体的に BAU を見積もる事が更に先の課題である。計画当初はそれらも研究計画に入れていたが、上記で示したその前のステップが既に奥深い内容を持つ事から、本研究機関においてはそちらに集中する事にした。

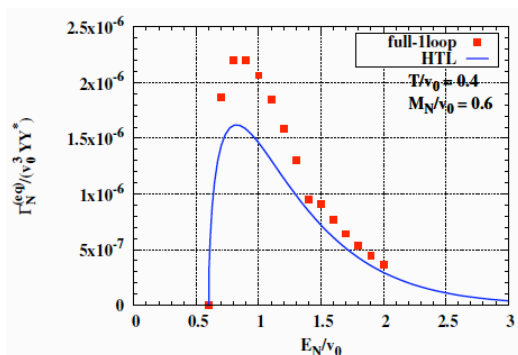


図 4

(4) 既に述べた様に本研究課題の背景には、ヒッグス粒子による電弱対称性の自発的破れがあり、これは現代素粒子論の中心的なテ

ーマである。従って本研究課題の副産物として、電弱対称性の自発的破れに関する第一原理計算の研究にも貢献した。この研究は、査読付きのアメリカの物理学会誌に掲載された[2]。

引用文献

[1] K. Miura and T. Kunihiro, ``Decay Rate of Right-Handed Neutrinos in Light of Collective Excitations at Electroweak Scale,`` talk at ``Strong and Electroweak Matter 2016``, July 11 - 15, 2016, University of Stavanger, Norway.

[2] Y. Aoki, T. Aoyama, M. Kurachi, T. Maskawa, K. Miura, K. -i. Nagai, H. Ohki, E. Rinaldi, A. Shibata, K. Yamawaki, and T. Yamazaki, ``Light flavor-singlet scalars and walking signals in Nf = 8 QCD on the lattice,`` Phys. Rev. D 96, no. 1, 014508 (2017) doi: 10.1103 / PhysRevD. 96. 014508

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 1 件)

Y. Aoki, T. Aoyama, M. Kurachi, T. Maskawa, K. Miura, K. -i. Nagai, H. Ohki, E. Rinaldi, A. Shibata, K. Yamawaki, and T. Yamazaki, ``Light flavor-singlet scalars and walking signals in Nf = 8 QCD on the lattice,`` Phys. Rev. D 96, no. 1, 014508 (2017) doi: 10.1103 / PhysRevD. 96. 014508 査読あり

[学会発表] (計 1 件)

K. Miura and T. Kunihiro, ``Decay Rate of Right-Handed Neutrinos in Light of Collective Excitations at Electroweak Scale,`` talk at ``Strong and Electroweak Matter 2016``, July 11 - 15, 2016, University of Stavanger, Norway.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三浦 光太郎 (MIURA Kohtaroh)

研究者番号 : 50511432

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者 ()