

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K18764

研究課題名（和文）宇宙ニュートリノ背景放射

研究課題名（英文）Cosmic neutrino background radiation

研究代表者

山口 昌英（Yamaguchi, Masahide）

東京工業大学・理学院・特定教授

研究者番号：80383511

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,200,000円

研究成果の概要（和文）：初期宇宙におけるニュートリノの脱結合過程について研究しました。質量基底およびフレーバー基底の両方の基底でのニュートリノスペクトルの歪みの進化を計算し、関連する運動方程式に対する $O(e^3)$ までのQED有限温度補正による影響も初めて取り入れました。その結果、ニュートリノの有効世代数が $N_{\text{eff}}=3.044$ で与えられることを示しました。また、トリチウムによるニュートリノ捕獲を利用して、宇宙背景ニュートリノを観測する実験について考察を行いました。特に、ニュートリノデカップリングや銀河系でのニュートリノクラスターリング等の宇宙論的な効果を含む、各ニュートリノ種毎の正確な捕獲率を評価しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子標準模型からの逸脱の鍵であり、また、宇宙初期の状態を探る新しい窓ともなるニュートリノ、特に、ニュートリノ背景放射について、その存在量をこれまでにない精度で見積もり、また、その捕獲率を評価したことは、上記の目的にとって大きな進展となり学術的な意義があったといえます。

研究成果の概要（英文）：We studied the decoupling process of neutrinos in the early universe. The evolution of the distortion of the neutrino spectrum in both the mass and flavor bases is calculated, and the effect of QED finite temperature corrections up to $O(e^3)$ on the associated equations of motion is also incorporated for the first time. As a result, we show that the effective number of neutrinos is given by $N_{\text{eff}}=3.044$. We also discussed experiments that use neutrino capture by tritium to observe cosmic neutrino background. In particular, we evaluated the exact capture rate for each neutrino species, including cosmological effects such as neutrino decoupling and neutrino clustering in the galaxy.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：ニュートリノ

1. 研究開始当初の背景

星や銀河の種となる原始密度揺らぎは、宇宙初期に起こったインフレーション中に量子揺らぎとして生成されたこと、また、その大きさや性質が、宇宙マイクロ波背景放射の非等方性の観測等により分かってきました。しかしながら、実はこれらの性質が確かめられているのは、揺らぎの“スケール”に対して僅か 3,4 桁です。宇宙マイクロ波背景放射の観測では、数 Mpc 以下のスケールでは非等方性が減衰してしまうため、これ以下のスケールの原始揺らぎを直接観測することは出来ません。一方、インフレーション中に、宇宙は少なくとも e の 60 乗 = 10 の 26 乗倍膨張したことが分かっており、これは、26 桁にも渡るスケールで原始揺らぎが作られたことを意味します。つまり、原始揺らぎの性質が明らかにされたと言っても、それは僅か 10% 程のごく一部のスケール (1 Mpc 程度から観測可能な最大領域である数千 Mpc まで) の揺らぎの性質が分かったに過ぎません。また、この未開拓のスケールでの原始揺らぎの性質を明らかにするということは、単にその性質を明らかにするのみならず、同時に、その生成機構であるインフレーションについての情報ももたらしてくれます。なぜなら、原始揺らぎの性質は、その共動スケールがインフレーション中にホライズンを出た時期のインフレーションと宇宙のダイナミクスに依っているからです。もし、残りの 20 桁以上にも及ぶスケールでの原始揺らぎの性質が分かれば、それを生成したインフレーションのダイナミクスも明らかにされ、どの場・粒子がインフレーションを起こしたか、どの場・粒子が原始密度揺らぎの起源となったのか、という根源的な問いに答えられることが期待されます。さらに、振動実験により明らかになった、ニュートリノが質量を持つという事実は、素粒子標準模型からの初めての逸脱であり、ニュートリノの性質を解明することは、より高エネルギーでの素粒子模型を探る上で欠かせないものです。

2. 研究の目的

本研究の目的は、未開拓の小スケールの揺らぎの性質、また、それに伴うインフレーションの性質を明らかにし、さらにニュートリノの性質を探ることを同時に行う事ができる宇宙ニュートリノ背景放射の性質を明らかにすることです。より具体的には、(i)未開拓の 20 桁にも及ぶ小スケール (1 Mpc = 3×10 の 20 乗 km 以下のスケール) における原始密度揺らぎの性質、(ii)その原始密度揺らぎを作り出したインフレーションの性質、(iii)まだ十分に解明されていないニュートリノの性質、を明らかにすることを究極的な目的とし、宇宙初期に作られた宇宙ニュートリノ背景放射について研究を行います。

3. 研究の方法

宇宙ニュートリノ背景放射は、宇宙マイクロ波背景放射と同じように、インフレーション後の熱平衡状態の名残としてのニュートリノです。宇宙マイクロ波背景放射よりも脱結合 (他の物質と相互作用しなくなる) の時期が遥かに早く、より小さいスケールまでその非等方性を保つ事が出来るため、より小スケールでの揺らぎの情報を引き出すことが出来ます。具体的には、以下のような計画で宇宙ニュートリノ背景放射の非等方性やスペクトルの性質を明らかにします。基本的には、宇宙マイクロ波背景放射の場合と同じようにボルツマン方程式を解けば良いのですが、以下のような相違点に留意する必要があります。(i) スピン 1/2 のフェルミオンであること、(ii) 質量があること (ディラック型またはマヨラナ型)、(iii) フレーバーが少なくとも 3 種類あり、エネルギー固有状態とフレーバー固有状態が一致しないこと、(iv) 質量が 0.1eV より大きいものは、現在での平均速度が 1000km/s 以下で銀河の脱出速度より小さくなるため重力により clustering すること、(v) 数密度フラックス、運動量フラックス、運動エネルギーフラックスの関係が、質量があるときには単純なもの (定数倍) にならないため、観測手段に応じてそれぞれに対する予言を行う必要があること、等です。

スペクトルと非等方性の双方に対して、まず、散乱がない場合のニュートリノの分布関数の時間発展に相当するリウヴィル方程式を書き下します。この際に、ニュートリノの質量を取り入れることが必要になりますが、エネルギー固有状態とフレーバー固有状態のどちらを基底として発展方程式を導くかが重要になります。散乱の効果を取り入れる際には、弱い相互作用はフレーバー固有状態に対して起きるので、フレーバー固有状態での不変散乱振幅を計算する方が楽です。一方、エネルギー固有状態を基底とした発展方程式では、振動が容易に取り入れられ、リウヴィル方程式の部分の解釈は容易になります。本研究では、相互チェックを兼ねて両方の基底での方程式を正しく導きます。また、散乱項を計算する際には、陽子や中性子などの複合粒子の構造をきちんと考慮します。さらに質量に応じて、de Salas et al. 2017 で行われた N 体計算による clustering の効果を取り入れます。これらの効果を取り入れたボルツマン方程式を解くことにより、非等方性やスペクトルの性質を詳細に調べます。宇宙マイクロ波背景放射の時と同じように、原始密度揺らぎの性質、ニュートリノの質量や混合角等の性質、宇宙論パラメーター (八

ップルパラメーターや宇宙の構成要素のエネルギー密度等)にどのように依存するかを準解析的にも明らかにし、将来観測で非等方性やスペクトルが検出された場合に備え、観測結果からどのように情報を引き出せるのかを明らかにします。

4. 研究成果

ニュートリノの運動方程式を数値的に解くことにより、初期宇宙におけるニュートリノの脱結合過程について研究しました。現在の宇宙でのニュートリノ運動量スペクトルを将来的には明らかにすることを念頭に置き、質量基底およびフレーバー基底の両方の基底でのニュートリノスペクトルの歪みの進化を計算しました。さらに、ニュートリノの有効世代数 N_{eff} の正確な測定の準備として、関連する運動方程式に対する $0(e^3)$ までの QED 有限温度補正による影響も初めて取り入れました。具体的には、両方の基底でニュートリノ密度行列の運動量依存の運動方程式を解きました。ここで、ニュートリノと電子、また、それらの反粒子を含むプロセスの完全な衝突項を考慮する一方、ニュートリノの自己相互作用に関する非対角部分は無視しました。その結果、ニュートリノの有効世代数が $N_{\text{eff}} = 3.044$ で与えられることを示しました。ニュートリノ振動は、電子-陽電子対のニュートリノへの消滅を促進するため、ニュートリノ振動のない N_{eff} と比較して約 0.0005 だけ N_{eff} を増加させます。一方、 $0(e^3)$ までの QED 補正の影響は N_{eff} を減少させます。その差は、 $0(e^2)$ までの QED 補正による N_{eff} と比較して約 0.001 です。CDM モデルの Planck データ分析による N_{eff} の現在の制限は、95%CL で $N_{\text{eff}} = 2.99^{+0.34}_{-0.33}$ であり、誤差の範囲内で我々の予言 $N_{\text{eff}} = 3.044$ と一致しています。

トリチウムによるニュートリノ捕獲を利用して、宇宙背景ニュートリノを観測する実験について考察を行いました。特に、ニュートリノデカップリングや銀河系でのニュートリノクラスタリング等の宇宙論的な効果を含む、各ニュートリノ種毎の正確な捕獲率を評価しました。これらの捕獲率の正確な評価値は二つの点で重要です。一つ目は、これらの評価値が将来的に観測された捕獲率と一致した場合には、評価に用いたニュートリノデカップリングの詳細な過程や暗黒物質の分布が正しいことを示唆するからです。二つ目は、もし評価値と将来的に観測された捕獲率との間にずれが生じた際には、そのずれが、新しいニュートリノの性質または宇宙の非標準的な進化を示唆する可能性がある、という点です。さらに、ディラック型ニュートリノとマヨラナ型ニュートリノでの捕獲率の違いや、ニュートリノの質量階層が通常型と逆階層型での捕獲率の違い、各ニュートリノ種を検出するために必要なエネルギー分解能、放出された電子のスペクトルを介した宇宙ニュートリノのスペクトルの再構築方法について、特に宇宙ニュートリノ背景放射捕獲実験である PTOLEMY 実験を想定して具体的に考察を行いました。

これらの研究内容全般に関するレビュー論文の執筆を依頼され、計算過程の細かい点まで詳しく記述したレビュー論文を出版しました。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Akita Kensuke, Yamaguchi Masahide	4. 巻 2020
2. 論文標題 A precision calculation of relic neutrino decoupling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 012 ~ 012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/08/012	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 Akita Kensuke, Hurwitz Saul, Yamaguchi Masahide	4. 巻 81
2. 論文標題 Precise capture rates of cosmic neutrinos and their implications on cosmology	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 1 ~ 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-021-09133-5	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 Akita Kensuke, Yamaguchi Masahide	4. 巻 8
2. 論文標題 A Review of Neutrino Decoupling from the Early Universe to the Current Universe	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Universe	6. 最初と最後の頁 552 ~ 552
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/universe8110552	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 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------