

氏 名 嶋田 健悟

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1752 号

学位授与の日付 平成27年3月 24 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Resonant Leptogenesis Based on Non-equilibrium Quantum
Field Theory

論文審査委員 主 査 教授 北野 龍一郎
教授 磯 暁
准教授 西村 淳
准教授 藤井 恵介
准教授 郡 和範
講師 板倉 数記
准教授 濱口 幸一 東京大学大学院

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

素粒子標準模型(SM)では説明できない観測事実の一つとして、宇宙のバリオン数非対称性がある。レプトン数生成シナリオは、右巻きニュートリノ N を導入することでこれを解決するものであり、同時にシーソー機構によって SM ニュートリノの質量項を生成しニュートリノ振動現象を説明する。本論文では、複数の N が縮退したスペクトラムを持つ場合に起こる「共鳴レプトン数生成」に注目することで、非平衡場の量子論に基づく解析の有用性を明らかにするとともに、そこからより解析の容易な方程式を導くことを考える。

SM における宇宙の時間発展を考えた場合、十分なバリオン数が生成されるためには、CP 非対称性と非平衡性の大きさが十分でない。レプトン数生成シナリオでは、右巻きニュートリノ N が大きなマヨラナ質量項と SM レプトン L ・ヒッグス ϕ との相互作用を持ち、その結合定数 h は新たな CP 非対称性を供給する。 h 自体は十分に小さく、これにより、平衡状態から外れた N が $L\phi$ 対に崩壊する際の CP 非対称性により十分なレプトン数(B+L 数を破る SM 非摂動過程によってバリオン数に転化される)が生成される。少なくとも 2 つの右巻きニュートリノ N_1, N_2 が必要であり、最も単純な場合は、最も軽い N_1 の崩壊のみがレプトン数生成に寄与する。この時、シーソー機構により生成される SM ニュートリノの質量が 0.1eV 程度の小ささであることを要請すると、十分なレプトン数を作るためにはマヨラナ質量の下限 $M > 10^9 \text{GeV}$ が導かれる(DI-bound)。この様な大きな N の質量はヒッグス質量への大きな量子補正を引き起こし(naturalness 問題)、また超対称模型では高い再加熱温度を要求する(gravitino 問題)。この質量の下限を避けるために提案されたシナリオの一つが共鳴レプトン数生成である。その中では、質量の縮退した N_1, N_2 間での量子的振動が N 崩壊時の CP 非対称性を共鳴的に増幅する。

2 章では慣例的な $N \rightarrow L\phi$ 崩壊時の CP 非対称性の計算方法と、ボルツマン方程式を用いた解析方法を振り返る。ボルツマン方程式は古典的な on-shell 粒子分布関数の時間発展方程式であり、CP 非対称性を含む様々な量子効果は、粒子の崩壊や散乱を表す「衝突項」を平衡場の量子論によって計算する際にのみ考慮される。on-shell 粒子分布関数を扱うこの枠組みでは、「熱平衡状態においてもレプトン数が生成され続ける」間違った時間発展方程式を導いてしまうこと(double-counting 問題)が知られているが、これに加えて、共鳴レプトン数生成においては CP 非対称性の増幅率 ε にも間違った表式をもたらす。on-shell、off-shell の区別がこれらの問題を引き起こすことを見ることで、この区別を必要としない非平衡場の量子論を用いた解析方法への導入部とする。

以後の章では、閉時間経路(CTP)を用いた非平衡場の量子論の定式化に基づいて導出される、2 点関数の時間発展方程式であるカダノフ・ベイム(KB)方程式を用いる。これは一般に高次の相関関数を含むシュインガー・ダイソン方程式を、full の二点関数のみの方程式に近似したもので、2PI 有効作用から導出される。2 点関数は系の粒子数などの情報を持っているのに加え、on-shell、off-shell を同等に含んでいるため、KB 方程式はボルツマン方程式の量子的な拡張であると言える。衝突項に相当する部分は、時間方向の積分を含んでおりメモリー効果が考慮された非マルコフ的な方程式となっていることもボルツマン方程式との違いである。微分展開の 0 次のみを考慮し、特定

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

の二点関数の on-shell 部分を取り出すこと (KB ansatz) によって、有限温度・密度効果を体系的に取り入れたボルツマン方程式が得られることが知られているが、本論文では、典型的な共鳴レプトン生成では平衡からのずれが非常に小さいことに注目して、KB ansatz とは異なる二つの方法で右巻きニュートリノの二点関数 G を近似し、共鳴フレーバー振動の量子効果を正しく取り入れたレプトン数の(マルコフ的な)時間発展方程式を導出する。

3章ではまず、出発点となる SM レプトン二点関数の KB 方程式が、どの様にしてボルツマン方程式的な形になるのかを見る。特に衝突項に相当する部分は、SM レプトン・ヒッグスと右巻きニュートリノの二点関数で書かれ、SM 粒子の持つ大きな thermal width のために微分展開の低次のみを考慮することが正当化されることが分かる。レプトン数生成に主に寄与するのは、右巻きニュートリノの二点関数の平衡からのずれ ΔG であり、如何に ΔG を求めるかが問題となる。

4章では、一つ目の方法として、右巻きニュートリノの二点関数 G の KB 方程式をそのまま解くことを考える。この方法では、膨張宇宙において時刻 t における平衡からのずれ $\Delta G(t)$ が作られる理由を、「過去の高い温度における SM 粒子分布関数の情報が、右巻きニュートリノの遅延/先進二点関数によって後の時刻 t まで伝搬され平衡からのずれとして見える」と理解できる。この伝搬過程はそのまま「過去に SM 粒子の熱浴から作られた右巻きニュートリノが、後の時刻 t では平衡からのずれとして崩壊する」と解釈され、伝搬する間の共鳴的なフレーバー振動が崩壊時の増幅された CP 非対称性をもたらす。フレーバー振動によって、伝搬する右巻きニュートリノは異なる質量固有状態の重ね合わせになっており、それらの干渉項(off-shell 過程)を取り入れて初めて正しい増幅率 ε が得られる。

5章では、二つ目の方法として、右巻きニュートリノの二点関数 G に対して、多フレーバーに拡張された KB ansatz を採用し、まず G の KB 方程式をマルコフ的な形(密度行列方程式)に落とす。これは nuMSM でのバリオン数生成(数 GeV 程度の比較的軽い右巻きニュートリノが徐々に生成される際の CP 非対称性がバリオン数に転化される)の解析で用いられる方程式であるが、ここでは平衡からのずれが十分に小さいことを用いて ΔG の近似的な解析解を求める。これをレプトン数の時間発展方程式に代入することで、4章で得られた増幅率 ε と整合的な結果を得る。異なる点は一旦 KB 方程式をより単純な密度行列方程式に落とすため、相互作用の拡張が容易なことであり、増幅率 ε の一般的な形が得られる。

6章では上記の内容をまとめる。2章で挙げた慣例的な解析方法で生じる問題は「古典的ボルツマン方程式 + 平衡場の量子論での衝突項の計算」から来るものであり、レプトン数の時間発展方程式を「非平衡場の量子論」の一つの枠組みの中での導出することが重要であると結論付けられる。また本論文で注目した系では、準粒子描像が良く成り立っていたため、KB 方程式を密度行列方程式に落として考えることが良い近似となっていた。ただし相互作用によってはメモリー効果が無視できない場合も有りえ、その場合は KB 方程式に立ち戻る必要がある。これらの非平衡場の量子論を出発点とする方法では、「右巻きニュートリノは量子的な状態として伝搬する」ことを考慮することができており、特に共鳴レプトン生成では、縮退した質量スペクトラムから生じるフレーバー振動の量子的な時間スケールが、(ボルツマン方程式では古典的とみな

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

される)粒子の伝搬の時間スケールと同程度まで長くなることで、右巻きニュートリノ崩壊時の CP 非対称性の増幅率の大きさの評価に有意な影響を与えている。

(別紙様式 3)
(Separate Form 3)

博士論文の審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

本博士論文は、宇宙のバリオン数非対称性を説明する一つのシナリオである「共鳴レプトン生成機構」を、非平衡場の量子論の手法を用いて解析した嶋田健吾さんの一連の研究を元としている。

宇宙のバリオン数非対称性の起源は素粒子物理学における大きな謎の一つである。もっとも有望視されているシナリオであるレプトン生成を使ったバリオン数非対称性の説明では、 10^{10} GeV より重い右巻きニュートリノ(N_R)が、CP 非保存な崩壊をおこしてレプトン数が生成され、その後、宇宙の温度が電弱相転移の温度程度まで下がった時にスファレロン過程でバリオン数に転化する。

2012 年に LHC 実験でヒッグス粒子が発見され、同時に超対称性粒子に対する強い制限が与えられた。これを受けて、より低いエネルギースケールに右巻きニュートリノが存在し、質量の階層性を避ける可能性が考えられるが、通常の機構では、 N_R が 10^{10} GeV よりも軽い場合、十分な量の非対称性をつくることができない。しかし、二つ以上の N_R の質量が十分縮退していると、 N_R が崩壊する間にこれらの粒子の間に量子振動がおこり、その結果大きな CP 非保存が生じる。これを共鳴レプトン生成とよぶ。

共鳴レプトン生成は崩壊と量子振動、そして宇宙膨張という 3 つの時間スケールが共存するため、ボルツマン方程式と平衡場の量子論の組み合わせでは正しい取扱いができず、生成されるレプトン数に対する多くの混乱があった。

嶋田氏の学位論文では、この共鳴レプトン生成における CP 非保存量を、非平衡場の量子論の手法を系統的に用いて計算し、それまでの互いに矛盾する結果に対する最終的な解答を与えた。共鳴レプトン生成では、崩壊と振動の時間スケールが等しくなる時に最も CP 非対称性が増大する。先行研究では、この共鳴による増幅率の計算方法に種々の誤りがあり、その結果、CP 非対称性が論文により大きく異なっていた。嶋田氏は、Kadanoff-Baym(KB)方程式とよばれる非平衡場の量子論の方程式を正確に解くことで正しい CP 非対称性を導出することに成功した。また KB 方程式から密度行列に対する発展方程式を系統的に導出することに成功した。嶋田氏の手法は、レプトン生成以外の素粒子宇宙現象にも広く適用可能な汎用性をもっており、今後さらに注目されるだろう。

嶋田氏は、これらの研究を、PASCOS をはじめとする素粒子物理学の主要な国際会議で発表するのみならず、国内外の大学や研究機関でもセミナー発表をしており、高い評価がなされている。これらの研究が評価され、今夏からはフランスの ANNECY にある理論物理学研究所 LAPTh にポスドク研究員としての雇用が決まっている。

以上のように、嶋田氏の学位論文は、技術的に高度な非平衡場の量子論に基づき低いスケールでのレプトン生成の可能性を示した研究であり、十分に新しい研究結果を含んでいる。初期宇宙における様々な非平衡現象への応用も期待され、本審査委員会では、嶋田氏の提出論文が総合研究大学院大学の学位論文にふさわしい内容を持つものと認定した。