

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 奥井 恒
学位 博士 (理学)
学位記番号 新大院博 (理) 第 460 号
学位授与の日付 令和3年3月23日
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当
博士論文名 ニュートリノ質量と背景重力波

論文審査委員 主査 教授・浅賀 岳彦
副査 教授・大原 謙一
副査 教授・小池 裕司
副査 准教授・中野 博章
副査 准教授・江尻 信司

博士論文の要旨

本博士論文では、素粒子物理学における最重要課題の一つであるニュートリノ質量の起源について探究した。特に、最も軽いニュートリノの質量を宇宙背景重力波の観測から探索する方法を提案した。

標準模型と呼ばれる素粒子物理学の基礎理論は、地上加速器実験における素粒子反応を高精度で記述する大成功をおさめた理論である。しかし、20世紀後半からこの理論では説明できない実験・観測事実が見出された。その一つがニュートリノ質量である。スーパー神岡実験によるニュートリノ振動の発見にはじまり、様々な実験でニュートリノ振動が確認され、これまでは質量を持たないとされてきたニュートリノは極微の質量を持つことが判明した。しかし、振動実験からは質量の二乗差の値は得られるが、質量の大きさは不明である。質量の大きさ決定のためには、質量階層性と一番軽いニュートリノの質量を解明することが必要となる。特に、一番軽い質量は宇宙背景放射や構造形成の観測、およびベータ崩壊の運動学により探索可能であるが、 meV 程度以下の小さな質量に対しては感度がないため、検証方法の確立が重要な課題となっている。

本研究では、上記の一番軽いニュートリノ質量の課題をシーソー機構の枠組みで検討した。シーソー機構は、ニュートリノが他のクォークやレプトンより遥かに小さい質量を持つことを自然に説明する機構であり、理論に右巻きニュートリノを導入することにより実現する。右巻きニュートリノは、宇宙暗黒物質や宇宙物質・反物質非対称性の起源も同時に説明する魅力的な素粒子である。

奥井氏は、シーソー機構では一番軽いニュートリノが 10^{-7}eV 程度より軽くなると、右巻きニュートリノの相互作用が非常に弱く長寿命となり、宇宙のエネルギーを支配し、その崩壊により付加的なエントロピーを生成することが可能であることを示した。本研究の着眼した点は、この宇宙発展の変化を背景重力波スペクトルの変化の中に見出すことである。

重力波は、1916年にアインシュタインが一般相対性理論に基づき予言した、時空の歪みが光速で伝搬する現象であり、2016年に世界で初めてLIGOにより発見された。重力波には、天体起源による重力波とともに、背景重力波と呼ばれるものがある。背景重力波は、

宇宙誕生直後のインフレーション時の量子揺らぎに起因して生じ、重力波スペクトル中の各周波数における強度から、周波数に対応する時刻での宇宙膨張率の情報を知ることができる。現時点では背景重力波は検出されていないが、様々な観測が現在計画されており、その検出が期待されている。

本研究では、上記の付加的なエントロピー生成が生じた場合、臨海周波数より大きな周波数帯でのスペクトルが減衰されることに注目した。特に、臨海周波数は一番軽いニュートリノ質量と右巻きニュートリノ質量により決まり、減衰率は一番軽いニュートリノ質量により決まることを見出した。さらに、現在計画されているパルサータイミングアレイやレーザー干渉計による重力波観測による想定感度と比較し、理論が予言する臨海周波数と減衰率の観測が期待できることを示した。

審査結果の要旨

本博士論文では、素粒子物理学の最重要課題の一つであるニュートリノ質量の起源について研究を行った。特に、ニュートリノの極微質量を自然に説明するシーソー機構を対象に、振動実験では測定できない一番軽いニュートリノ質量の検出方法について検討を行った。一番軽いニュートリノの質量が非常に小さくなると、対応して右巻きニュートリノの寿命が長くなり、その崩壊から付加的なエントロピー生成が生じる。この宇宙発展の変更が背景重力波に記録される。特に、背景重力波スペクトルの変更を特徴付ける臨海周波数と減衰率を観測することにより、地上実験では測定が困難である 10^{-7}eV 程度以下のニュートリノ質量を探索可能であることを示した。この結果は、重力波などの宇宙物理だけでなく、ニュートリノ質量起源の解明につながり素粒子物理に対しても重要なインパクトを与えた。

よって、本論文は博士（理学）の博士論文として十分であると認定した。