

# 審査結果の要旨

論文題目「ニュートリノの量子統計性と初期宇宙の相対論的有効自由度」

学位申請者 飯塚 純

本論文は、素粒子の1種であるニュートリノの量子統計性の変化が及ぼす初期宇宙の相対論的有効自由度への影響について述べられている。

ニュートリノは他の素粒子とはいくつもの点で異なっており、素粒子の標準理論では説明できない振る舞いをすることが多い。まず、ニュートリノは他の素粒子と比べて質量が極めて小さい。実際、1998年のスーパーカミオカンデ実験グループによる歴史的な研究報告が出るまでは、ニュートリノの質量は厳密にゼロであると考えられる理論モデルが大変に多かった。また、ニュートリノはほとんどの物質を通り抜けてしまう高い透過性も持っている。さらに、3種類あるニュートリノはお互いに混ざり合っている。素粒子の混合現象はニュートリノだけに特化した現象ではないが、他の素粒子は比較的混合しにくいのに対して、ニュートリノは容易に混合し得る。このように異質な性質を持つニュートリノの研究を通じて、素粒子物理学の標準理論を超える新理論の構築が盛んに研究されている。

ニュートリノはスピン1/2をもつため、同じスピン1/2をもつ電子などと同じフェルミ・ディラック統計に従うと考えられている。本研究ではニュートリノが持つ異質な性質から、ニュートリノがフェルミ・ディラック統計からずれた量子統計に従う可能性を調査している。この量子統計性のずれは、ニュートリノの数密度、エネルギー密度、相対論的自由度など、初期宇宙における様々な物理量にも影響を及ぼす。本論文では数値解析、および近似的な解析解導出の二つの手法により、ニュートリノが従う量子統計性がフェルミ・ディラック統計からずれた場合の相対論的有効自由度の変化量を算出している。

本論文の目的は、ニュートリノがフェルミ・ディラック統計に従うという通説を否定することではなく、実験的にはニュートリノが純粋なフェルミ・ディラック統計に従っていない可能性も残されていることから、可能性の1つとしてニュートリノが純粋なフェルミ・ディラック統計に従わない場合に起こりうる物理現象を考察している。

以下、論文の各章別の内容と審査員による評価を述べる。

第1章では緒言として、本研究の背景であるニュートリノの特異性について述べられている。審査員は、第1章が緒言としてふさわしいと評価した。

第2章では、本研究の理論的基礎である量子統計力学とニュートリノ物理学の基礎について述べられている。量子統計力学については、量子力学における波動関数のベクトル表示、固有方程式の意味、同種粒子の取り扱い、分配関数の基本、フェルミ・ディラック統計などの量子統計分布などが解説されている。また、ニュートリノ物理学については、素粒子物理学の基礎、太陽ニュートリノ、大気ニュートリノ、超新星ニュートリノなど各種のニュートリノの観測実験の概要、ニュートリノの質量生成問題などについて解説されている。審査員は、第2章で本論文を理解するために必要な基礎事項が網羅的に解説されていると評価した。

第3章では、ニュートリノが純粋なフェルミ・ディラック統計に従わずに、純粋なフェルミ・ディラック統計から純粋なマクスウェル・ボルツマン統計の中間の量子統計に従う可能性に関する研究について述べられている。特に、初期宇宙の放射優勢期における非純粋フェルミオンとしてのニュートリノと相対論的有効自由度の関係について報告されている。先行研究にて、ニュートリノのフェルミ・ディラック統計からのずれに伴って、放射優勢期におけるエネルギー密度に関わる相対論的有効自由度が増加することが報告されている。これに対し本論文では、放射優勢期の宇宙で大きなレプトン非対称がある場合には、ニュートリノのフェルミ・ディラック統計からのずれに伴って相対論的有効自由度が減少することが示されている。このように、相対論的有効自由度が増加するケースは先行研究で明らかになっていたが、減少する可能性を

示したのは本論文が初めてであり、独創的な研究成果であると評価できる。第3章ではこの他に、ニュートリノの量子統計性がフェルミ・ディラック統計からマクスウェル・ボルツマン統計へ変化するだけでは、近年の宇宙観測によって新たに報告されている有効ニュートリノ数の過剰を説明できないことも述べられている。このことは、初期宇宙のダーク放射には非標準理論粒子を含むことを示唆しており興味深い結果が得られている。審査員は、第3章に学術的価値のある研究報告が含まれていると評価した。

第4章では、第3章での解析をさらに一般化した結果が述べられている。具体的にはニュートリノの量子統計性がフェルミ・ディラック統計からマクスウェル・ボルツマン統計を介してボース・アインシュタイン統計まで変化可能な場合を考察している。本論文により、ニュートリノにマクスウェル・ボルツマン統計からボース・アインシュタイン統計までの連続変化を許容する場合、ニュートリノの縮退パラメータが極めて大きな値を取り得る可能性があることが明らかになった。さらに、ニュートリノが純粋なフェルミ・ディラック統計に従わない場合には、宇宙のダークマターの存在量が減少し、宇宙のバリオン-光子比が増加することも述べられている。審査員は、第3章に引き続き第4章にも学術的価値のある研究報告が含まれていると評価した。

第5章では、第3章と第4章で示した計算機による数値計算の妥当性を強固にするために行った、手計算による近似的な解析解の導出の結果が述べられている。具体的には、初期宇宙での素粒子の数密度とエネルギー密度を多重対数関数による級数展開により求めている。そして、級数展開による近似を用いて、第3章と第4章で行った数値計算結果を近似的に再現可能であることが述べられている。審査員は、第5章において本論文の学術的価値が更に高まったと評価した。

第6章では、結言として本研究のまとめが述べられている。審査員は第6章が結言としてふさわしいと評価した。

本研究によって明らかになった、ニュートリノがフェルミ・ディラック統計からずれた量子統計に従った場合の相対論的有効自由度の変化は、ニュートリノがフェルミ・ディラック統計に厳密に従うと考える標準的な理論では未解明な問題を解明する手がかりの1つになると期待できる。

以上の結果、本論文は学位論文として十分な内容を有するものと審査委員全員の一致で判定された。

したがって、申請者飯塚純氏は東海大学博士（理学）の学位を授与されるに値すると判断した。

#### 論文審査委員

主査	博士（理学）	新屋敷 直木	理学部教授	（総合理工学研究科総合理工学専攻）
委員	博士（工学）	山口 滋	理学部教授	（総合理工学研究科総合理工学専攻）
委員	博士（理学）	山本 義郎	理学部教授	（総合理工学研究科総合理工学専攻）
委員	理学博士	安江 正樹	東海大学名誉教授	
委員	博士（理学）	北林 照幸	理学部教授	（総合理工学研究科総合理工学専攻）