

論文の内容の要旨

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

キーワード：ニュートリノ，素粒子の標準理論，初期宇宙，量子統計力学，相対論的有効自由度

宇宙で最も小さく，最も基本的な存在を素粒子という．現在のところ17種類の素粒子が発見されている．これら17種類の素粒子の基本的な振る舞いは，場の量子論とゲージ理論を元に構築された素粒子の標準理論によって大変よく記述されている．しかしながら，素粒子の標準理論には改良すべき点もある．その改良の糸口としても注目されている素粒子が，弱い相互作用のみをする電氣的に中性な素粒子であるニュートリノである．

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と考えることが通説であった．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を持っている．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．このような異質な性質を持つニュートリノの研究を通じて，標準理論を超える素粒子物理学の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た．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た．

なお本研究の目的は，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い．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があることから，あくまでも可能性の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するものである．

論文の構成は以下の通りである．

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た．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，同種粒子の扱い，分配関数の基本，フェルミ・ディラック

ク統計などの量子統計分布の解説を行った。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た。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であるニュートリノと相対論的有効自由度の関係についてを報告した。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た。これに対して本研究では、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を示した。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研究が初めてであり、独創的な研究成果である。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た。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いる。

第4章では、第3章での解析をさらに一般化して、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できるものとした。本研究により、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を述べた。

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を述べた。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た。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を述べた。

第6章では、結言として本研究のまとめを行なった。

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。