

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Cosmic Neutrino Background
著者(和文)	秋田謙介
Author(English)	Kensuke Akita
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11870号, 授与年月日:2021年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:山口 昌英,伊藤 克司,慈道 大介,今村 洋介,須山 輝明
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11870号, Conferred date:2021/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

論文要約

秋田 謙介

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の精密観測は宇宙誕生から約 40 万年後の宇宙の情報を私たちにもたらし、宇宙の理解を大きく進めました。しかし、宇宙誕生後の 40 万年以前の観測データは現在存在せず、このような非常に初期の宇宙を観測する手法の構築は重要な課題です。

宇宙背景ニュートリノ (CνB) は初期宇宙で生成され、現在の宇宙に存在すると考えられているニュートリノで、これは宇宙誕生から約 1 秒後の宇宙の情報を私たちにもたらすと期待されています。これは、ニュートリノが弱い相互作用のみを通じて粒子と相互作用を行い、熱浴との脱結合温度がおよそ 2 MeV であるからです。さらに、CνB の存在は、CMB の温度非等方性、宇宙の軽元素量と大規模構造の観測からもその存在を間接的に裏付けられています。これらの観測は、ニュートリノ有効世代数という、ニュートリノのエネルギー密度を特徴づけるパラメータに制限を課し、この値が標準模型におけるニュートリノ世代数である 3 に近いことから、CνB の存在が裏付けられています。特に、将来の CMB 観測では、このニュートリノ有効世代数をおよそ 1 % の精度で観測することができると期待されています。一方で、将来、CνB が直接観測されると、私たちは、ニュートリノ有効世代数に加えて、より多くの初期宇宙の情報を手に入れることができると期待できます。CνB のそのような直接観測は、CνB が現在の宇宙に存在しているかを確かめるだけでなく、CMB と相補的に、標準模型を超えた物理に関するより詳細な情報も得ることができると考えられます。

本論文では、以上の背景のもとで、将来の直接・間接観測に向けて宇宙背景ニュートリノの定式化を行いました。特に、過去から現在までの CνB スペクトルを最も精度良く明らかにし、ニュートリノ有効世代数をこれまでの最高精度となる 10^{-3} の精度で評価しました。そして、このスペクトラムを精密に直接観測する手法について考察を行いました。

第二章「Dynamics in expanding Universe」では、一様等方な宇宙におけるニュートリノのダイナミクスを理解するために必要な基本事項を解説しました。そして、第三章「Review of the Cosmic Neutrino Background」では、CνB の基本的な事柄を説明しました。特に、すべてのニュートリノが平均運動量を持ち、同時に熱浴から脱結合する極限のもとで、過去の熱平衡状態から現在までの宇宙におけるニュートリノのダイナミクスを説明しました。その後、ニュートリノ有効世代数の定義と解説も行いました。

第四章「Neutrino decoupling」では、将来の CνB の直接・間接観測に向けて、脱結合後の一様等方なニュートリノスペクトラムの精密計算を行いました。将来の精密観測のために、電磁相互作用による有限温度効果の高次の寄与まで初めて取り入れてニュートリノの運動方程式を解き、脱結合後のスペクトラムを明らかにしました。そして、このスペクトラムに基づき、ニュートリノ有効世代数をこれまでの最高精度となる 10^{-3} の精度まで評価しました。さらに、現在の宇宙ではいくつかの世代の宇宙背景ニュートリノは非相対論的であるため、質量が対角化された基底でのスペクトラムは、将来の直接観測に向けて有用です。このため、質量が対角化された基底での一様等方宇宙でのスペクトラムの運動方程式の定式化を初めて行い、そのスペクトラムを明らかにしました。

第五章「Direct detections of the Cosmic Neutrino Background on tritium」では、CνB の直接観測によって、ニュートリノ有効世代数とは異なる初期宇宙の詳細な情報を手に入れるため、トリチウムを用いた直接観測実験の精密な定式化を行いました。逆 β 崩壊過程によるニュートリノとトリチウムの反応率を 1 % の精度で定式化し、CνB の観測可能性を議論しました。さらに、トリチウムから放出される電子のスペクトラムから CνB のスペクトラムを再構築する手法についても議論しました。

第六章「Conclusions」では、本研究の動機と研究成果、そして CνB 観測を通じた初期宇宙と標準模型を超えた物理へのさらなる制限に関する将来の展望について述べ、本論文を締め括りました。