

論文審査の結果の要旨

氏名 高知尾理

本論文は12章からなる。

第1章では、本論文の導入として、研究対象である hidden photon dark matter (HPDM)、実験に使用した XMASS 検出器について簡単に述べられている。

第2章では、暗黒物質に関する観測的事実、代表的な暗黒物質候補とその検出方法について述べられている。

第3章では、hidden photon の理論と導入の背景、これまで行われた探索実験について述べられている。

第4章では、hidden photon がどのようにして暗黒物質候補になり得るかにについて述べられている。これまで宇宙初期に熱的に光子から hidden photon が生成されるシナリオが検討されてきたが、以前の XMASS 実験の探索によってその可能性はほぼ排除されている。一方、最近非熱的に hidden photon が生成されるシナリオが新たに提唱され注目を集めている。このシナリオに基づく HPDM は、依然広大なパラメータ領域が排除されずに残っており、本研究では $50\text{--}120\text{ keV}/c^2$ の質量領域で非熱的に生成された HPDM の探索を行った。

第5章では、XMASS 検出器における HPDM の検出原理が述べられている。HPDM は物質中の電子と光電効果と類似の反応を起こし hidden photon の静止質量と同じ単一のエネルギーを付与すると考えられる。本研究では XMASS 検出器で得られたエネルギー分布において HPDM によるエネルギーピークを探索する。

第6章では XMASS 検出器の詳細、データ収集システム、シミュレーションツール、事象再構成方法が述べられている。

第7章では XMASS 検出器の較正方法が述べられている。検出器の較正は主に検出器中を移動可能な各種ガンマ線源により行われた。

第8章では、HPDM 探索解析における背景事象の原因について議論がなされている。特に本研究で主要な背景事象の原因となる液体キセノン中の内部背景事象のうち、その存在が判明している放射性不純物について定量評価が行われた。判明している放射性不純物からの寄与では本研究で解析するエネルギー領域 ($50\text{--}120\text{keV}$) で観測された背景事象数の全てを説明することはできていない。

第9章では本研究に先立ち行われた XMASS 検出器の改修作業について述べられている。ただし、この改修作業は主に外部背景事象について対処したものであり、本解析のエネルギー領域で問題となっている内部背景事象についてのものではない。解析エネルギー領域での背景事象レベルは改修後に逆に増加してしまっている。しかし、本解析では以前の解析に比べて解析有効体積を広げることで、高統計を活かしたより高感度な探索を行うことに成功している。

第10章では HPDM の探索解析の詳細が述べられている。アフターパルス事象を除くためのタイミングカット、外部背景事象を除くための有効体積カットを施した後、適切なエネルギースケールなどの補正を行って得られたスペクトルに対して、各 hidden photon 質量に対応したエネルギーにおいてピーク探索が行われた。背景事象スペクトルはいくつかのモデル関数を比較し最もよく背景事象スペクトルに合うモデルを選択した。また系統誤差の主な原因として、エネルギー、位置の再構成に関する不定性、エネルギー分解能の不定性等を考慮し、最終的な kinetic mixing に対する信頼区間の見積もりに組み込んでいく。

第11章では、HPDM 探索解析の結果について議論している。今回解析した hidden photon 質量領域 ($50\text{--}120\text{keV}/c^2$) で有意な信号の超過は認められず、各質量に対して光子との結合定数 (kinetic mixing) に対する上限値を与えた。この質量領域ではこれまでで最も厳しい上限値である。XMASS 検出器改修前の探索結果と比較しても 2-3 倍上限値を更新することとなった。なお、統計的に有意ではないものの $67.5\text{keV}/c^2$ 付近にわずかにピークらしきものが観測されたが、Xe-124 の中性子捕獲反応から来るものと考えて矛盾はないことがわかった。また最後にさらなる探索感度改善に向けて、背景事象のさらなる理解とその低減に向けた可能性について議論している。

第12章で得られた結果をまとめている。

本研究は、XMASS コラボレーション内での共同研究であるが、論文提出者が主導しており、カットの最適化、信号ピーク解析等、解析の本質的な部分を独自に提案、実施しており、その寄与は十分であると判断する。したがって、博士(理学)の学位を授与できるものと認める。