

論文審査の結果の要旨

氏名 小林雅俊

本論文は9章からなる。

第1章では本論文の導入が述べられている。宇宙の全エネルギー密度の内、通常の物質が占める割合はわずか5%であり、残りの70%は暗黒エネルギー、25%は暗黒物質と呼ばれる未だ正体がわからないもので占められている。暗黒物質の最も有力な候補の1つである Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) と呼ばれる未知の素粒子の探索実験の現状、特に本研究の目的である WIMPs 直接探索実験の現状がまとめられている。

第2章は本研究が採用する季節変動および原子核反跳に付随して放出される制動放射を利用した暗黒物質探索という2つの手法について述べられている。太陽系の公転方向と地球の公転方向が季節によって変化することで暗黒物質信号のエネルギースペクトルが季節変動する。この変動を捉えることで検出器の放射性バックグラウンドの中から暗黒物質信号を探索するのが前者の方法であり、2008年に DAMA/LIBRA 実験が有意な季節変動信号を観測し暗黒物質によるものと主張していることで注目されている。また最近の研究により検出器中で起こる WIMPs による原子核反跳に付随して制動放射ガンマ線が放出されることが指摘されており、この制動放射ガンマ線を利用して Sub-GeV 程度の低質量 WIMPs を探索するのが後者の手法である。

第3章では XMASS 実験の概要が XMASS-I 検出器、検出器較正システム、シミュレーションツールを中心に述べられている。

第4章では本研究における暗黒物質探索高感度化のための取り組みについて述べられている。その1つは低エネルギー閾値トリガーの導入であり、これにより2013年11月から開始された XMASS-I 検出器の改造後のデータ取得で4 PMT hitであった閾値が2015年12月より3 PMT hitまで引き下げられた。低エネルギー閾値で問題となる PMT の weak flashing 現象の対処、低エネルギー領域での精度のよい較正などにも取り組んだ。

第5章では使用したデータセットと解析で使用した事象選別の方法について述べられている。本研究では2013年11月20日から2017年6月20日までに取得されたデータが使用された。低エネルギー閾値トリガーによるデータ取得は2

015 年 12 月 8 日に開始された。

第 6 章では解析における系統誤差について議論が行われている。主な系統誤差は、検出器液体キセノンの光量の安定性、読み出しエレクトロニクスモジュールの安定性、PMT のシングルレートの安定性に関連している。これらの系統誤差を可能な限り抑制するために取られた手法について述べられている。

第 7 章では季節変動の解析方法が述べられている。季節変動の解析は χ^2 フィットに基づいて行われた。 χ^2 関数には前章で述べられた系統誤差に関連するパラメータも組み込まれている。

第 8 章では季節変動解析の結果が述べられている。制動放射効果を用いた Sub-GeV WIMPs 探索、原子核反跳を用いた WIMPs 探索ともに有意な信号は観測されなかった。これにより、Sub-GeV WIMPs については、たとえば 0.5 GeV WIMPs に対する断面積の上限値として $1.6 \times 10^{-33} \text{cm}^2$ (90% C. L.) が得られた。原子核反跳による探索ではたとえば 8 GeV WIMPs に対しては $2.9 \times 10^{-42} \text{cm}^2$ (90% C. L.) という上限値が得られた。この結果はスペクトル形状を仮定しないモデル非依存の解析で得られた結果と無矛盾であった。

第 9 章では本研究のまとめと結論、研究の今後の見通しについて述べられている。本研究の結果と他の実験で得られた結果の比較も行われている。本研究は液体キセノン検出器を用いた制動放射効果、季節変動という新しい手法で行われた世界初の探索であり、最近注目されている低質量 WIMPs をさまざまな手法で探索すべき状況にある中で学術的意義の高い結果と言える。今後、より長期間のデータを取得することで統計精度を上げるとともに、Magdal 効果など制動放射とは別の現象による Sub-GeV WIMPs の探索を行うことも期待される。

本研究は、XMASS コラボレーションによる共同研究であるが、論文提出者が主導したものであり、特にエネルギー閾値を下げるための新しいトリガーを自ら提案、導入するなど貢献は大きい。したがって、博士(理学)の学位を授与できるものと認める。