



Data-driven projected WIMP sensitivity of XENONnT Experiment with neutron Veto

水越, 隼太

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2022-03-25

(Date of Publication)

2024-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8286号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1008286>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



要旨

論文内容の要旨

氏名 水越 慧太

専攻 物理学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

Data-driven projected WIMP sensitivity of XENONnT Experiment with neutron Veto (中性子反同時計測検出器を含めた XENONnT 実験のデー タを用いた WIMP 感度評価)

指導教員 身内 賢太郎

暗黒物質の存在は、宇宙論や銀河の観測などにより、強力に示唆されているにもかかわらず、未だ直接検出には至っていない。暗黒物質の候補として非相対論的速度で運動する粒子を仮定する Cold Dark Matter モデルが有力である。特に、Weekly Interacting Massive Particle (WIMP) と呼ばれる未知の弱い相互作用をする重い粒子が探索されている。暗黒物質と通常の物質との散乱を検出する実験が世界で実施されている。XENON 実験は中でも世界をリードする実験である。XENON 実験はキセノン二相式 Time Projection Chamber (TPC) を用いて、電子散乱と原子核散乱を区別することで、強力に背景事象を弁別することが可能である。また、キセノン中のドリフト時間を用いて、イベント位置の3次元再構成をすることで、さらに背景事象を低減している。

世界最高の感度での探索を報告していた XENON1T 検出器を XENONnT 検出器にアップグレードした、XENONnT 検出器を用いた XENONnT 実験の調整が終わり、現在結果の報告のための準備をしている。検出器のアップグレードでは、単に TPC を大型化するだけでなく、中性子背景事象をタグするための中性子反同時計測 (nVeto) 検出器を導入する。中性子背景事象は前述の電子散乱と原子核散乱の区別では WIMP の信号と識別することができないため、nVeto 検出器の稼働が探索に必須となる。

本研究では、新たに構築する nVeto 検出器の性能評価を行う。nVeto 検出器はガドリニウムを質量比 0.2% 溶解させた水で満たされた水チェレンコフ検出器である。ガドリニウムは中性子に対して非常に高い捕獲断面積を有し、TPC で原子核を散乱した中性子を捕獲する。その後すぐに高エネルギーの γ 線を放出して崩壊する。この γ 線由来のチェレンコフ光を検出することで、TPC の中性子事象をタグする。

nVeto 検出器の性能評価を行う上で、nVeto 検出器内面を覆っている反射材の光学特性は非常に重要である。nVeto 検出器の反射材として延伸ポリテトラフルオロエチレン (ePTFE) が用いられている。ePTFE は高い反射率を有するが、定量的に水中での光学特性は評価されてこなかった。この ePTFE の反射率は、水の吸収長とあわせて、nVeto のタグ効率に影響する。導入前に測定を行った上で、実験中に反射率を測定することができる。リフレクティビティモニターと呼ばれる光学キャリブレーションシステムを導入した。リフレクティビティモニターはレーザー光を nVeto 検出器内部から ePTFE 壁面に照射するシステムである。いずれかの光電子増倍管 (PMT) で検出されるか、水や ePTFE に吸収されるまで、ePTFE で光子は何度も反射される。ePTFE の反射率が良ければ、光子は長い時間吸収されずに nVeto 検出器の中に残り続ける。したがって、レーザー光を照射してから光子が PMT で検出されるまでの時間分布を用いることによって、実効的な ePTFE の反射率を測定することができる。この測定値は、光学シミュレーションのパラメーターとして導入されている。実効的に、光学シミュレーション中で現実の光子の振る舞いを再現できたとと言える。

水越 慧太: NO. 2

また、放射線源を用いたキャリブレーションを用いて、nVeto 検出器の性能の確認と、シミュレーションの調整を行った。アメリカウム-ベリリウム線源は広く用いられている中性子線源である。中性子は nVeto 検出器中の水に捕獲され、2.2 MeV の γ 線を放出する。この γ 線を用いて、nVeto 検出器に用いられている PMT の効率を補正する Correction factor を得た。これらのデータを用いたシミュレーションの開発により、高い精度で nVeto 検出器の挙動を理解することが可能になった。

加えて、検出器調整期間のデータを用いて、波形を再現するシミュレーションを構築した。典型的な波形、ゲインの分布などを入力とするシミュレーションは、XENONnT 実験で、取得したデータに対して用いられている解析ツールをシミュレーションに対しても用いることを可能にし、直接にデータとシミュレーションの比較を行うことができる。

加えて、シミュレーションを用いて、nVeto を行う解析条件の検討を行った。PMT は数 kHz での暗電流があるため、全ての光子検出に対して Veto を行うと過剰に TPC の livetime を減らしてしまう。また、Veto を行う時間幅についても最適な調整を行う必要がある。本研究では、時間幅、ヒット数、検出合計電荷量のパラメータを用いて、適切な条件を求め、タグ効率 84.8%、TPC livetime 98.9% を得た。また、系統誤差についても保守的に評価した。

開発したシミュレーションを用いて、背景事象量を評価した。中性子は nVeto システムによって十分に弁別可能であると評価されており、十分な実験期間ののちにはニュートリノが背景事象となると考えられる。20 トン×年の測定を行った XENONnT 実験の感度は、50 GeV/c² の質量の、スピン依存しない相互作用をする WIMP に対して、 $1.4 \times 10^{-48} \text{ cm}^2$ の核子-暗黒物質の断面積と評価された。また、スピン依存する相互作用をする WIMP に対しては、陽子-暗黒物質断面積、中性子-暗黒物質断面積への感度はそれぞれ $1.4 \times 10^{-48} \text{ cm}^2$ と $2.2 \times 10^{-48} \text{ cm}^2$ と評価された。本研究により新導入の nVeto 検出器の構築、較正、検証が行われ、WIMP 感度の定量的評価を行うことができた。XENONnT 実験の探索結果報告の基盤となる研究である。

氏名	水越 慧太		
論文題目	Data-driven projected WIMP sensitivity of XENONnT Experiment with neutron Veto (中性子反同時計測検出器を含めた XENONnT 実験のデータを用いた WIMP 感度評価)		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	准教授	身内 賢太郎
	副査	教授	藏重 久弥
	副査	教授	藤 秀樹
	副査		
	副査		
要 旨			
<p>宇宙の構成要素のうち既知の物質は約 5% である。約 27% が未知の物質である「暗黒物質」と言われており、この正体解明は 21 世紀の宇宙・素粒子物理に課せられた大きな課題である。暗黒物質の正体や性質を知るために、暗黒物質と弾性散乱した原子核を直接捉える（直接探索）実験が世界中で行われている。本論文は、こうした直接探索実験のうちで、最も高い感度で暗黒物質直接探索を行う大質量液体キセノン 2 相式検出器による探索実験の感度評価について論じられている。全 8 章からなる本学位論文は、暗黒物質の概論から始まり、本論文の検出器について詳説され、中性子反同時計測検出器および関連したシミュレーションについて述べられている。これらを踏まえて暗黒物質探索についての感度が評価され、残された課題が検討されている。論文の内容に関して以下に概要を述べ、最後に審査結果を述べる。</p> <p>第 1 章では導入として、論文全体を俯瞰した暗黒物質、本研究の対象である XENON 実験の概説、本研究の位置づけ、本論文の構成について述べられている。</p> <p>第 2 章では、現代物理学の大きな問題であり本論文の主題でもある暗黒物質の概説がなされている。宇宙の各階層における暗黒物質の存在証拠の例示に始まり(2.1 節)、未知素粒子としての暗黒物質の候補粒子について、有力な候補で本論文の研究対象でもある、Weakly Interacting Massive Particle(WIMP)を中心に解説されている(2.2 節)。その後、WIMP 暗黒物質の実験的直接探索手法に関する原理及び直接探索実験が解説されている(2.3 節)。直接探索実験によって期待されるエネルギースペクトル、暗黒物質と原子核との散乱断面積の理論的背景について述べられている。さらに、世界中で行われている直接探索実験について、本研究の対象である大質量検出器を用いた手法を中心として紹介されている。2 章の締めくくりとして、直接探索実験以外の暗黒物質研究手法である間接探索実験及び加速器による探索が簡単に紹介されている。</p> <p>第 3 章では、本研究の研究対象の検出器となる XENONnT 検出器について詳説されている。現在本観測に向けて調整中の XENONnT 検出器の概要として、XENON1T 検出器の upgrade であること、宇宙線背景事象を防ぐために、地下（イタリア・グランサッソ研究所、水深相当 3600m）に設置されていることが記されている(3.1 節)。続いて、2 相式液体キセノン検出器の基本原理解が説明され、暗黒物質直接探索にとって主要なバックグラウンドであるガンマ線バックグラウンドの除去能力に優れていること、一方で中性子バックグラウンドについては識別能力がないことが述べられている(3.2 節)。これを受けて、XENONnT では新たに中性子反同時計測装置(nVeto)が導入されることが述べられ(3.3 節)、その他の検出器コンポーネント（ミューオン反同時計測装置(3.4 節)、各種較正装置(3.5 節)、データ取得システム(3.6 節)）について解説されている。XENONnT 検出器に関連した記述の最後に、解析のフレームワーク、特にのちの議論で頻出する様々な関連用語が紹介されている(3.7 節)。</p> <p>第 4 章では、XENONnT 実験で新たに導入された nVeto について詳説されている。nVeto の仕様についての概説の後に nVeto のコンポーネントについて詳説されている。nVeto のコンポーネントとして、ガドリニウム化合物、光電子増倍管、データ取得装置、反射材について順に述べられている(4.1 節)。nVeto の動作原理についての記述の後(4.2 節)、nVeto の解析フレームワークについて、本研究に密接に関わる多くのパラメータと共に解説されている(4.3 節)。その後、水越氏が中心となってハードウェア的に貢献した光学的な較正装置について詳しく述べられている。特に暗黒物質探索の感度に直接影響を与える、nVeto の中性子検出効率について、nVeto の光学的な特性との関連が詳しく議論されている。具体的には、nVeto の反射材の反射率が中性子検出効率に寄与するため、本研究で導入した光学較正装置によって反射率を測定することが重要であるということが、水越氏の行ったシミュレーション結果等に基づいて定量的に議論されている。また、独立に行った反射率測定結果も紹介されている(4.4 節および付録 A)。</p>			

氏名	水越 慧太
<p>nVetoに関する記述の最後に、XENONnT 検出器の検出器調整期間に取得した nVeto のデータを示し、nVeto が正しく動作していることが述べられている。</p> <p>第5章では、本研究のもう一つの主眼であるシミュレーションによる nVeto の性能評価計算について詳説されている。まず、シミュレーションの大枠と、Geant4 をベースとして nVeto ために開発されたプログラムについて述べられている。特に水越氏の導入した、実測に基づいたガドリニウムの中性子捕獲に関するモデル、検出器応答を考慮した波形シミュレータについて詳しく解説されている。波形シミュレータについては、実データとの比較によってシミュレーションの妥当性が議論されている。また、シミュレーション結果に対して、実データとの比較によって補正係数を求め、実データを再現するシミュレータを完成させている(5.1 節)。続いて XENONnT 実験の各種背景事象の定量的な見積りが紹介されている(5.2 節)。</p> <p>第6章では、第5章の結果を踏まえて、XENONnT 実験の暗黒物質探索の感度が評価されている。まずは nVeto の中性子検出効率が議論されている。中性子検出効率は、反同時計測する時間幅とのトレードオフとなるが、その関係を具体的に示し、典型的な時間幅で十分な中性子検出効率を得られることを示している(6.1 節)。次に、背景事象と暗黒物質の信号のモデルについて議論を行い(6.2 節)、系統誤差について検討している(6.3 節)。ここまでの議論に基づいて、最終的な結論と暗黒物質の探索感度を統計的な処理に基づいて導出している(6.4 節)。</p> <p>第7章では、本研究の課題について議論を行っている。5章で導入したシミュレーション結果と実験結果の整合性を取るための補正係数についてその物理的な意味が議論されている(7.1 節)。波形解析の改善についても議論がされている(7.2 節)。</p> <p>第8章で結論、すなわちXENONnT検出器のnVetoのために光学的な較正装置を導入、波形情報を含むシミュレーションを構築し暗黒物質探索の感度を求めたこと、が述べられている。</p> <p>本研究は宇宙・素粒子物理学の大問題である暗黒物質について、観測準備中の世界最高感度の検出器の重要なコンポーネントに対してハードウェア・ソフトウェアを通じた評価を行い、暗黒物質直接探索の感度評価を系統誤差まで含めて行ったものである。この研究によって、重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の水越慧太は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・特記事項 なし ・特許登録数 0件 ・発表論文数 査読付き1編 (E Aprile, ... K. Mizukoshi, et al. 'Projected WIMP sensitivity of the XENONnT dark matter experiment', Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2020.11, 031–031) 	