

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2018～2021

課題番号：18KK0082

研究課題名（和文）Optimizing the XENON Dark Matter sensitivity with Kamioka expertise

研究課題名（英文）Optimizing the XENON Dark Matter sensitivity with Kamioka expertise

研究代表者

竹田 敦（Takeda, Atsushi）

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：40401286

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：イタリア・グランサッソ国立研究所の地下実験室において、液体キセノンを用いた暗黒物質直接探索XENON-nT実験の中性子バックグラウンドを低減し検出感度を大きく改善する中性子カウンター（nVeto）の製作・設置・較正を行った。とくに nVeto を構成する光センサーの現地での性能試験、水槽内にカウンターを設置するにあたっての溶接箇所に対する不働態化処理方法の確立および実施、水槽外へのガドリニウム水純化装置の設置が行われた。世界最高感度での暗黒物質探索のデータ取得が順調に行われ、データ解析が進められた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最新の宇宙背景放射の観測結果から、宇宙全体のエネルギーのうち通常の物質はわずか4.9%しかなく、暗黒物質がその5倍以上である27%を占めていることが高い精度で明らかになってきている。一方で、素粒子物理学の標準理論が内包する様々な問題を解決するための新粒子が暗黒物質の有力候補として挙がっており、暗黒物質の発見は宇宙物理学・素粒子物理学の両方の発展への大きな寄与が期待されている。本研究は、その暗黒物質が検出器内で直接反応するさいに出す信号を世界最高感度でとらえることを目的としており、そのための大統計データをバックグラウンドを除去しながら取得した。

研究成果の概要（英文）：We manufactured, installed, and calibrated a neutron counter (nVeto) that reduces the neutron background of the XENONnT experiment for direct dark matter search using liquid xenon in the underground laboratory of Gransasso National Laboratory, Italy, and significantly improves the detection sensitivity. In particular, on-site performance tests of the optical sensors that make up the nVeto, establishment and implementation of a method for disabling the welded parts when installing the nVeto in the water tank, and installation of a gadolinium water purification system outside the tank were carried out. Data acquisition for dark matter search with the world's highest sensitivity was carried out, and data analysis was proceeded.

研究分野：素粒子、原子核、宇宙線および宇宙物理に関連する実験

キーワード：暗黒物質 中性子バックグラウンド 反同時計測 ガドリニウム 中性子捕獲反応

1. 研究開始当初の背景

イタリア・グランサッソ国立研究所にて準備が進められていた液体キセノンを用いた暗黒物質直接探索実験 XENONnT 実験において、Time Projection Chamber (TPC) 内で中性子が一回散乱するような事象が暗黒物質の有力候補である WIMP による信号と見分けることができないことから、中性子を veto するための中性子カウンター (nVeto) の開発が急務となっていた。nVeto は、TPC を取り囲む水タンク内に 0.2% 程度のガドリニウムを溶かすことで、TPC 内で一回散乱した中性子が水タンク内のガドリニウムに捕獲された後に放出する合計約 8 MeV の複数のガンマ線を光電子増倍管 (PMT) で検出することで、中性子によるバックグラウンド事象を同定する。研究開始当初は、nVeto を液体シンチレータにより構築する計画となっていたが、液体シンチレータが可燃性物質であるため安全性の観点から建設は困難を極めていた。液体シンチレータと同等以上の性能を持ち、安全な材質を用いた nVeto の開発が、世界最高感度で暗黒物質の直接探索を遂行可能な検出器を実現するために必要不可欠であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、液体シンチレータの代わりにガドリニウム水溶液を利用した水チェレンコフ型の nVeto を構築し、TPC 内で一回散乱をするような中性子事象を排除することで、世界最高感度での暗黒物質直接探索を遂行することである。そのために、シミュレーションによる水チェレンコフ型 nVeto のデザインの最適化、nVeto を建設するにあたって PMT の性能試験、nVeto を構成する全ての部材のガドリニウム水溶液中への溶出試験などを行い、nVeto の建設を遂行した。nVeto 完成後は、較正データとシミュレーションを用いた nVeto の応答理解、TPC からの暗黒物質探索実験データとのリンクの実現を経て、nVeto データを伴った暗黒物質探索データの取得を行った。

3. 研究の方法

本研究は、3つの部分からなる。1つは、ガドリニウム水溶液を用いた水チェレンコフ型 nVeto のシミュレーションを用いたデザインの最適化。2つ目は、nVeto を実際に建設するにあたって、各部材のガドリニウム水溶液中への溶出試験、nVeto が置かれる水タンク内の溶接箇所への適切な不動態化処理を施すことでガドリニウム水溶液中への鉄イオンの溶け出しを防ぎ nVeto の性能を保つための研究、3つ目は、完成した nVeto の応答理解と TPC データから中性子バックグラウンドを除去するための研究である。

- (1) **シミュレーションによる nVeto デザインの最適化:** Geant4 を用いた粒子輸送シミュレーションを行い、中性子が TPC 内で 1 回散乱した後に水タンク内のガドリニウムまたは陽子に捕獲されてガンマ線を放出し最終的にチェレンコフ光を出すことで nVeto の各 PMT にて検出される過程を詳しく研究し、PMT の配置方法、反射材の材質および配置場所などの最適化を進めた。その結果、除去効率 85% 以上で TPC 内で反応した中性子を同定・除去できるようなデザインが完成した。また、nVeto の不感時間を許容可能な値におさえるための、nVeto 内に存在が許される放射性不純物量の条件が明確化された。
- (2) **nVeto 建設:** nVeto を構成する 8 インチ PMT (Hamamatsu R5912) の性能試験を実施した。CAEN 製の V1730S digitizer (500 MS/s, 14-bit) が使用され、2 ns のサンプリングレートによりデータ取得が行われた。性能試験によって選択された 120 本の PMT のインストール作業が行われ、各 PMT と PMT の間には反射率 99% 以上の反射材 (ePTFE) が敷設された。PMT の被覆率は、10% 以下と低いにもかかわらず、ePTFE を敷き詰めることで 85% 以上の高い効率で TPC のバックグラウンドとなる中性子の事象を同定することが可能となっている。また、ディフューザーボールからのレーザー光による PMT timing の較正、ePTFE の反射率や水の透過率を常時モニターするための較正装置の構築が行われた。nVeto が構築された水タンクの内部は、ステンレスの架構やケーブルを通すための配管が走っており、多くの溶接箇所が存在する。溶接部分に適切な不動態化処理を施しておかないと水質の低下を招くため、専用の不動態化液を用いて、処理時間と不動態膜厚の関係から最適な処理手法を確立し、施工をおこなった。
- (3) **データ解析:** nVeto 内に設置された 4 個のディフューザーボールからのレーザー光を用いて、各 PMT の相対的なタイミング較正を行い timing map を作成することで時間差の補正がおこなわれた。補正したタイミングを用いて 300 ns 幅のウィンドウ内での PMT コインシデンス事象を検出することで TPC からの暗黒物質探索データを veto し、中性子事象の除去が行われる。また、nVeto の中性子除去効率は、ePTFE の反射率変化に大きく依存するため、レーザー光により ePTFE の反射率を常にモニターすることで nVeto の安定性のチェックが行われている。

4. 研究成果

(1) nVeto システムの実現:

当初、液体シンチレータにより設計された nVeto は、安全性の問題から実現が困難であった。そこで、スーパーカミオカンデ(SK)にガドリニウム(Gd)をいれる SK-Gd 計画によって日本で育まれた知見を活用し、ガドリニウム水溶液を用いた水チェレンコフ型の nVeto に設計変更をすることで、高い中性子除去効率を安全に実現できる道筋が生まれた。nVeto は、シミュレーションによるデザインの最適化、検出器に用いられる全部材のガドリニウム水溶液中への溶出試験、溶接箇所への適切な不働態化処理手法の確立、低放射性不純物の高純度ガドリニウムパウダーの調達、ガドリニウム水純化システムの構築などにより実現が成功した。最初のステップとして純水での運用を開始し、各 PMT のタイミング補正、ePTFE の反射率などのパラメータのモニタリングを遂行しながら、順調にデータ取得が行われている。

(2) 暗黒物質探索データの取得

nVeto と同時に TPC による暗黒物質探索データが順調に取得され、最初の 1 年分のデータから、スピンの依存しない WIMP との相互作用で 10^{-48} cm^2 台に踏み込む探索が行われている。高感度での測定には、低バックグラウンド環境、とくに電子散乱と原子核反跳の識別に染み込んでくる電子散乱事象の低減と、識別後に残ってくる中性子事象の低減が必要不可欠である。本研究によって実現された nVeto により 85%以上の除去効率での安定した中性子バックグラウンドの低減を行うことで、世界最高感度での暗黒物質探索が可能となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 E. Aprile, ..., Y. Itow, ..., S. Kazama, ..., K. Martens, ..., S. Moriyama, ..., A. Takeda, ..., et. al. (XENON Collaboration)	4. 巻 126
2. 論文標題 Search for Coherent Elastic Scattering of Solar B8 Neutrinos in the XENON1T Dark Matter Experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 91301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.126.091301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 E. Aprile, ..., Y. Itow, ..., S. Kazama, ..., K. Martens, ..., S. Moriyama, ..., A. Takeda, ..., et. al. (XENON Collaboration)	4. 巻 103
2. 論文標題 Search for inelastic scattering of WIMP dark matter in XENON1T	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 63028
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.103.063028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 E. Aprile, ..., Y. Itow, ..., S. Kazama, ..., K. Martens, ..., S. Moriyama, ..., A. Takeda, ..., et. al. (XENON Collaboration)	4. 巻 2020
2. 論文標題 Projected WIMP sensitivity of the XENONnT dark matter experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 031 ~ 031
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1475-7516/2020/11/031	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 E. Aprile, ..., Y. Itow, ..., S. Kazama, ..., K. Martens, ..., S. Moriyama, ..., A. Takeda, ..., et. al. (XENON Collaboration)	4. 巻 102
2. 論文標題 Excess electronic recoil events in XENON1T	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 72004
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.102.072004	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 風間慎吾
2. 発表標題 Observation of excess electronic recoil events in XENON1T
3. 学会等名 online Kashiwa Dark Matter symposium 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹田敦
2. 発表標題 XENON実験: 中性子veto内の放射性不純物モニター
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 風間慎吾
2. 発表標題 XENON1T実験における暗黒物質探索の最新結果
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹田敦
2. 発表標題 Development of high-sensitivity radon detector in water with continuous measurement
3. 学会等名 The XXIX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kai Martens
2. 発表標題 XENON/XMASS報告
3. 学会等名 新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化 第七回極低放射能技術」研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹田敦
2. 発表標題 XENONnT 中性子vetoカウンターにおけるガドリニウム水中のRn濃度モニター
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹田敦
2. 発表標題 XENONnT 中性子vetoカウンター中の放射性不純物モニター
3. 学会等名 日本物理学会 2020年第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 風間慎吾
2. 発表標題 The XENONnT Neutron Veto Detector
3. 学会等名 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kai Martens
2. 発表標題 Japan in the XENONnT Experiment: Overview
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平出克樹
2. 発表標題 XENONnT実験の中性子VETOシステムにおける時間情報を用いた背景事象の除去
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 身内賢太郎
2. 発表標題 XENONnT実験におけるシミュレーションによるnVetoシステムの評価
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 風間慎吾
2. 発表標題 XENONnT実験の準備状況
3. 学会等名 日本物理学会 2020年第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平出克樹
2. 発表標題 XENONnT実験における中性子vetoカウンターの読み出しシステム
3. 学会等名 日本物理学会 2020年第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 陳育勤
2. 発表標題 XENONnT実験の中性子vetoカウンターの性能評価手法の研究
3. 学会等名 日本物理学会 2020年第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 MARTENS Kai
2. 発表標題 The neutron veto at XENONnT
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会 (信州大学松本キャンパス)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹田 敦
2. 発表標題 XENONnT: 水タンク中ラドンの影響評価とモニターシステムの構築
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会 (信州大学松本キャンパス)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 XENON1T 実験における暗黒物質直接探索の最新結果
2. 発表標題 風間 慎吾
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会 (信州大学松本キャンパス)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹田 敦
2. 発表標題 XENONnT: 遮蔽水タンク中のラドン濃度モニター
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会 (九州大学伊都キャンパス)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 XENON1T 実験における電離信号を用いた暗黒物質の探索
2. 発表標題 風間 慎吾
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会 (九州大学伊都キャンパス)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 XENON-nT での高感度暗黒物質探索のための中性子vetoカウンターの最適化
2. 発表標題 陳 育勤
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会 (九州大学伊都キャンパス)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 XENONnT におけるシミュレーションによる中性子反同時計測システムの性能評価
2. 発表標題 上野 龍一
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会 (九州大学伊都キャンパス)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	MARTENS Kai (Martens Kai) (20535025)	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・准教授 (12601)	
研究分担者	風間 慎吾 (Kazama Shingo) (40736592)	名古屋大学・高等研究院(現)・特任助教 (13901)	
研究分担者	伊藤 好孝 (Itow Yoshitaka) (50272521)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授 (13901)	
研究分担者	森山 茂栄 (Moriyama Shigetaka) (50313044)	東京大学・宇宙線研究所・教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------