

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05100

研究課題名(和文) 大深度地下実験室における中性子束の長期測定及び稀事象探索に与える影響の定量評価

研究課題名(英文) Long term measurement of neutron flux at deep underground and evaluation of neutron contribution to rare event searches

研究代表者

竹田 敦 (Takeda, Atsushi)

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号：40401286

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：既存の資源を有効利用しながら液体シンチレータ、光電子増倍管、及びデータ収集系からなる中性子束モニターシステムを安価に構築し、水深2700m相当の神岡地下実験室において150日以上に渡る環境中性子束の長期連続測定を遂行した。この測定結果をもとに、同じく神岡地下実験室において稼働中であった暗黒物質の直接探索実験である XMASS 実験の背景事象として中性子が与える影響の詳細な見積もりを、モンテカルロ・シミュレーションを用いて行った。この結果、従来の中性子以外の背景事象の詳細定量に加えて中性子による寄与も考慮することで、暗黒物質信号に対する感度をより高感度化することが可能になった。

研究成果の概要(英文)：We established a monitor system for neutron flux in deep underground site by using liquid scintillator, photo multipliers, and data acquisition equipments. We measured neutron flux at Kamioka Observatory (2700 m.w.e.) for more than 150 continuous days. Based on the measurements, we evaluated effect of neutron to background of XMASS experiment which is dark matter search experiment and has been running at the same term by using Monte Carlo simulation. As a result, improvement of sensitivity for dark matter search became possible owing to evaluation of neutron background as well as other contributions.

研究分野：素粒子実験物理学、宇宙物理学

キーワード：暗黒物質探索 ダブルベータ事象探索 ニュートリノ観測 地下実験室 中性子束

1. 研究開始当初の背景

宇宙物理学における最大の謎の一つである暗黒物質の正体の究明や、素粒子物理学で大きな問題となっているニュートリノの階層性及び質量の決定に必要なダブルベータ崩壊の探索に代表されるような稀事象探索は、宇宙線の影響を避けるために大深度地下での実験遂行が必須になっている。さらに、宇宙線以外のベータ・ガンマや中性子等の環境放射線は、鉛や水などで遮蔽する必要がある。これら環境放射線の中でも特に中性子は、原子核を反跳させるような暗黒物質を探索する際の重大なバックグラウンド源になる可能性があるため、そのフラックスを常時モニターし、探索に与える影響を定量評価することが重要である。また、ダブルベータ崩壊探索においても、環境中性子による (n, γ) 反応で発生する高エネルギーガンマ線が信号領域に重なると重大なバックグラウンド源になることが近年問題になってきており、大深度地下実験室において稀事象探索を進める上で、中性子研究の重要性が高まっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、大深度地下実験室である神岡地下実験室（水深相当 2700m）において環境中性子フラックスの長期連続測定を行い、稀事象探索に中性子が与える影響をモンテカルロ・シミュレーションにて評価することである。特に、暗黒物質探索データを汚染しているバックグラウンド事象から信号成分を抽出するためには、考えうる全バックグラウンド事象の寄与をシミュレーションで精度よく見積もる必要がある。

現在、神岡地下実験室で稼働中の 1 相型大質量液体キセノン検出器(XMASS 検出器)では、これまでベータ線やガンマ線による電子散乱バックグラウンドが主成分であったが、ベータ線・ガンマ線によるバックグラウンドを大幅に低減する改修作業を経て 2013 年からそれまでより 1 桁近い低バックグラウンドな環境での探索を再開した。これにともない、これまでは見えてこなかった中性子によるバックグラウンド寄与の定量評価を再度、詳細に行う必要性が出てきた。

3. 研究の方法

神岡地下実験室で中性子フラックスを測定するためのシステムの構築と、そこから得られる測定結果を反映させた暗黒物質探索データに混入するバックグラウンド事象の見積もりを以下のような方法で行った。

(1) ^3He ガスカウンター及び液体シンチレータを用いた中性子フラックスのモニターシステムを既存の資産を有効に利用して構築した。液体シンチレータ検出器は、内容積約 1100cm^3 のステンレス製円筒型容器内部にバ

イクロン社製の液体シンチレータ (BC-501A) が満たされており、円筒の両端から 2 本の光電子増倍管 (浜松ホトニクス, R6091) でシンチレーション光を読み出す構造になっている。容器の内面は、発生したシンチレーション光を効率よく光電子増倍管に導くために、反射材 (BC-622A) が塗られている。このモニターシステムに、ガンマ線源 (^{137}Cs , ^{60}Co , ^{88}Y) と中性子線源 (^{252}Cf) をそれぞれ照射し、ガンマ線に対するエネルギースケールの較正及び、ガンマ事象と中性子事象の弁別能の測定を行った。構築したモニターシステムを神岡地下実験室に設置し、環境中性子束の長期連続測定を行った。

(2) 粒子輸送シミュレータである Geant4 をベースに開発された XMASS 検出器のシミュレータを用いて、環境中性子が与える影響の見積もりを行った。XMASS 検出器は、約 1 トンの液体キセノンが満たされた無酸素銅製の 2 重断熱容器 (直径約 1.3 メートル) が、直径 10 メートル、高さ 10.5 メートルの円筒型の純水タンクの中央に設置されている。地下実験室の岩盤から主にウラン/トリウム放射性系列中の (α, n) 反応を経て出てくる中性子が、遮蔽体のタンクの水によって減衰され、あるいはタンク内にある配管等の水が無い領域をすり抜けて、最終的に液体キセノン検出部に到達する状況を詳細にシミュレートした。キセノンは、蒸発したガスが配管を通過して水タンク外に設置されている冷凍機に導かれた後に液化され、再び配管を通過してタンク内の液体キセノン容器にもどされることで、液体状態が保たれている。このキセノンガスが水タンク外で環境熱中性子を捕獲して放射性同位体となり液体キセノン容器に戻った際に検出器に与える影響についても詳細な見積もりを行った。

また、中性子が液体キセノン中で起こす事象がシミュレーションで正しく再現されているのかを確認するために、XMASS 検出器に ^{252}Cf 線源を照射し、得られた実データとシミュレーションデータを比較するといったことが行われた。この ^{252}Cf は、内径 45 mm のステンレス製パイプの中を通すことで水タンクの外から XMASS 検出器に接近させることが可能で、プラスチックシンチレータと 1.5 インチ光電子増倍管がトリガー発生用に組み合わせて設置されている。

4. 研究成果

(1) 神岡地下実験室における中性子フラックスの測定

^3He ガスカウンターによって、熱中性子フラックスの測定を行い、 $\sim 1 \times 10^{-5} / \text{cm}^2 / \text{sec}$ という測定結果を得た。この値は、神岡地下坑内の他の場所で既に得られている値と矛盾しない結果であった。また同じ実験室内でも、水タンクから離れた場所と水タンクの頂部

では factor 2 ほどの違いがあることが明らかになった。

液体シンチレータによる測定は、150 日以上に渡る長期連続測定を行い、XMASS 実験の測定時期と連動した中性子フラックスの変動をモニターすることができた。これまでにない大深度地下実験室での長期間の測定による大統計データから、液体シンチレータ検出器自身に含まれる放射性不純物起因のアルファ線の影響が無視できないことが分かり、今後のさらなる研究課題も明らかになった。以上の結果を反映させた詳細なシミュレーションによる中性子バックグラウンドの見積もりを行った。

(2)シミュレーションによる中性子バックグラウンドの定量評価

シミュレーションによる研究の結果、XMASS 検出器で取得される暗黒物質探索データに対する中性子の影響は、主に以下のように分類されることが分かった。

(i) 水タンクを直接突き抜けて入ってくる高速中性子の影響

(ii) 水タンク内に存在する配管等の水の無い領域をすり抜けて入ってくる高速中性子の影響

(iii) 水タンク外のキセノンガス領域で熱中性子を捕獲することによって生じるキセノンの放射性同位体の影響

(iv) 宇宙線ミュオンが水タンク内で核破砕反応を起こして生じる中性子の影響

(v) 水タンク中のウラン系列ラドン (^{222}Rn) の崩壊系列内で (α, n) 反応により生じる中性子の影響

(vi) 検出器部材及びキセノン中の放射性不純物が自発核分裂もしくは (α, n) 反応を起こして生じる中性子の影響。

上記の中で、直接的に環境中性子が関係するものは、(i)～(iii)である。このうち暗黒物質探索で興味のあるエネルギー領域 (2-5 keV) に中性子が与えるバックグラウンド量は、(i)の場合で $< 1 \times 10^{-5}$ 事象/日/kg/keV であり、現在の XMASS 検出器のバックグラウンドレベルである 1×10^{-2} 事象/日/kg/keV に比べ十分無視できることが分かった。また、(ii)は、(i)よりも寄与が大きく約 4×10^{-5} 事象/日/kg/keV であることが分かったが、それでも他のバックグラウンドに比べて無視できるレベルであることが分かった。この中で問題となるのは(iii)であり、特に ^{124}Xe が熱中性子を捕獲して ^{125}Xe となった後に、電子捕獲を起こして不安定な ^{125}I (半減期 59.4 日)が生成され、この ^{125}I が液体キセノン中で

電子捕獲反応を起こして最終的に約 68 keV のピーク事象を作る可能性が無視できないことが分かった。通常の暗黒物質探索において、このピーク事象のエネルギーは興味あるエネルギー領域より十分高いため問題とはならないが、暗黒物質以外の稀事象(二重電子捕獲事象等)を探索する上で重要なバックグラウンドとなることが分かった。特に XMASS 検出器で取得されたデータから、ニュートリノ放出を伴う二重電子捕獲事象の探索を行うにあたって、 ^{125}I の寄与を組み入れることにより探索感度の向上が達成された[雑誌論文-①参照]。

残りの(iv)～(vi)は、直接的に環境中性子が関与するものではないが、これらの影響についても詳細なシミュレーションによる研究を行い、その寄与の見積もりを行った。以上のシミュレーション結果は、招待講演である極低放射能技術研究会で報告された[学会発表-⑦参照]。

以上の結果を反映させて、XMASS 検出器によって取得された暗黒物質探索データから信号を抽出する解析が行われた。実データとバックグラウンドの見積もり値が矛盾しなかったため、暗黒物質との反応断面積に上限値を与えることができた。その際にバックグラウンドの系統誤差を 10%程度に抑えることができたため、実データの全ての事象を暗黒物質からの信号であると仮定した場合に比べて 1 桁程度感度を上昇させることに成功した。これらの結果は、国際会議 (TAUP2017[学会発表-①参照])及び日本物理学会[学会発表-③～⑥]で発表された。現在、論文投稿中 (“A direct dark matter search in XMASS-I”, arXiv:1804.02180)である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① “Improved search for two-neutrino double electron capture on ^{124}Xe and ^{126}Xe using particle identification in XMASS-I”, K. Abe et al. (41 人), ..., A. Takeda (14 人目), Prog. Theor. Exp. Phys. 2018, 053D03.

[学会発表] (計 7 件)

- ① “WIMP search from XMASS-I fiducial volume data with background prediction”, A. Takeda for the XMASS Collaboration, XV International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP 2017), 24-28 July, 2017, Sudbury, Ontario, Canada.
- ② “XMASS experiment”, A. Takeda for the XMASS Collaboration, 3rd

international conference on Science, Application, and Technology of Xenon Radiation Detector (XeSAT 2017), 3-7 Apr., 2017, Pullman Raja Orchid Hotel, Khon Kaen, Thailand.

- ③ “XMASS 実験：バックグラウンド事象を考慮した有効体積解析による暗黒物質探索” 竹田 敦, 日本物理学会 秋季大会 (宇都宮大学 峰キャンパス) 2017 年 9 月 15 日.
- ④ “XMASS 実験：有効体積による暗黒物質探索”, 竹田 敦, 日本物理学会 第 72 回年次大会 (大阪大学豊中キャンパス), 2017 年 3 月 20 日.
- ⑤ “XMASS 実験：有効体積内でのバックグラウンド事象を考慮した暗黒物質探索”, 竹田 敦, 日本物理学会 秋季大会 (宮崎大学木花キャンパス), 2016 年 9 月 22 日.
- ⑥ “XMASS 実験：有効体積領域を用いた暗黒物質探索”, 竹田 敦, 日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大学泉キャンパス), 2016 年 3 月 20 日.
- ⑦ “XMASS の中性子バックグラウンド”, 竹田 敦, 極低放射能技術研究会 (徳島大学常三島キャンパス), 2016 年 3 月 15 日. (招待講演)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹田 敦 (TAKEDA, Atsushi)
東京大学・宇宙線研究所・助教
研究者番号：40401286