

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17625

研究課題名(和文) 低エネルギー中性子線源を用いた暗黒物質-原子核散乱プロセスの理解

研究課題名(英文) Neutron calibration with low energy monochromatic neutron source

研究代表者

市村 晃一 (Ichimura, Koichi)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教

研究者番号：80600064

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では暗黒物質探索の為に低エネルギー中性子線源の開発を行った。今回制作したベリリウムセラミック(BeO)とイットリウム(Y88)を組み合わせた線源では、単色152keVの中性子が発生し、質量が10GeV程度の暗黒物質の場合と同様な原子核散乱による信号が得られる。

この線源を制作し、ヘリウム3中性子カウンターによる中性子検出や暗黒物質探索実験であるXMASS実験検出器での線源のデータ収集を行った。実験の都合上目標に掲げていた発光効率や発光時定数の評価をするのに十分なデータ量は得られなかったものの、原子核散乱らしい信号を観測することは達成した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we developed a low energy neutron source for dark matter search. From Yttrium (Y88) and Beryllium9 (BeO ceramic), we can obtain almost monochromatic 152 keV neutron via photo-nuclear reaction. Obtained energy spectrum from this calibration source is similar to the few keV nuclear recoils expected from low-mass weakly interacting massive particles.

We developed this source and collected neutrons with helium 3 neutron counter and with XMASS-I experiment detector, which is a dark matter search experiment. Due to insufficient data taking time, it is hard to evaluate the scintillation efficiency and the scintillation decay time constant of this low energy neutron nuclear recoil, which was set for the purpose of this research. However, it was achieved to observe nuclear recoil-like signal from this calibration source.

研究分野：非加速器素粒子実験

キーワード：中性子 原子核散乱

1. 研究開始当初の背景

暗黒物質は様々な観測結果からその存在が示唆されており、現在も世界中で暗黒物質観測実験が行われているが未だ発見には至っていない。暗黒物質の候補としては超対称性理論などで Weakly Interacting Massive Particle(WIMP)と呼ばれる、質量が 1GeV から 1000GeV のオーダーの安定で中性な粒子が挙げられる。

この WIMP と原子核との散乱を観測することで暗黒物質の探索が行われているが、この反応は非常に稀で、また非常に低エネルギーの事象であるため大型の極低バックグラウンドかつ低しきい値の検出器が必須である。特に暗黒物質の存在を示唆している DAMA/LIBRA 実験等が主張する、質量が 10GeV 相当の WIMP 探索をする場合、期待される信号は殆どが検出器しきい値付近のエネルギーしか落とさない事象である。このため、検出器しきい値近傍での原子核散乱事象による検出器の応答の理解は暗黒物質探索において極めて重要である。

2. 研究の目的

検出器しきい値付近での原子核散乱プロセスの理解を深め、液体キセノンでの原子核散乱の発光効率・発光時定数を評価し、原子核散乱・電子散乱事象を判別する方法の確立のため、中性子線源の開発を目的とする。

研究代表者が所属する XMASS 実験は有効体積 832kg の液体キセノンを暗黒物質の標的として用いる大型実験装置である。暗黒物質はキセノン原子核との散乱による発光を 642 本の光電子増倍管で観測する。本研究の目的は製作した中性子線源を用いて XMASS 検出器の較正を行い、検出器のしきい値付近での原子核散乱の事象を収集し、プロセスの理解を深めることにある。XMASS 検出器の原子核散乱に関するシミュレーションツールについて、中性子線源の較正データを再現するようなシンチレーション発光効率、発光時定数のチューニングを行う。

3. 研究の方法

本研究で製作する中性子線源は、イットリウム 88 (Y88)ガンマ線源とベリリウム(Be9)セラミックを組み合わせることで中性子が発生する。Y88 線源からは 1836 keV と 898 keV の 2 本のガンマ線が発生する。このうち 1836 keV のガンマ線と Be9 の光核反応によってエネルギーが約 152keV の中性子が発生する。

(1)まずは本研究で参考にした参考文献 (J.I.Collar, Physical Review Letters, 110, 211101, 2013) の線源の構造でシミュレーションを行い、中性子の発生数について再現するかを確認する。

また、この中性子線源の課題としては中性子の発生数に比べて Y88 起源のガンマ線の発生数が約 4 桁大きい事が挙げられる。この対策としては鉛やタングステンによる遮蔽が必要であり、XMASS 検出器に導入する際に必要な鉛の厚さ、中性子線源の形状を決定する。

(2)線源の形状が決定したら実際に Y88 線源およびベリリウムセラミックを購入し、ヘリウム 3 中性子検出器等を用いて中性子が発生している事を確認する。この際、Y88 のガンマ線のうち中性子生成に寄与しない 898keV ガンマ線を検出するためのシンチレーション検出器および光電子増倍管を組み合わせたセットアップでデータを収集し、コインシデンス情報を用いることで中性子が効率的に検出出来るかについて確認する。

(3)上記の過程に問題がなく中性子が確認されれば、実際に XMASS 検出器での中性子線源のデータ収集を行う。シンチレーション検出器と光電子増倍管、中性子線源を組み合わせた線源機構を XMASS 実験の中性子線源導入用配管から導入する。中性子起因の事象を効率的に集めるために、Y88 のガンマ線がシンチレーション検出器にエネルギーを落とす、コインシデンス事象を集める。得られた結果から原子核散乱の発光効率や発光時定数に関してモンテカルロシミュレーションをチューニングしてデータを再現するパラメータを得る。

4. 研究成果

(1)低エネルギー中性子線源製作関連について

XMASS 実験の中性子線源導入用配管に入るサイズの要求から、直径 40mm、厚さ 25mm の 2 個のベリリウムセラミックを購入し、その間にディスク状のイットリウム 88(Y88)線源を挟む仕様の線源の形状を決定し、この形状での中性子の発生数についてモンテカルロシミュレーションを行った。上記形状で、1MBq の Y88 線源から、152keV のほぼ単色の中性子は 1 秒あたり約 100 個、等方的に発生することをシミュレーションで確認し、XMASS 検出器の構造をいれたシミュレーションで、この線源から発生した中性子による信号が検出器内部の液体キセノンと原子核散乱を起こす信号について観測されることが分かった。

ベリリウム(Be9)セラミックについてはマテリオンブラッシュジャパン社から、Y88 線源については日本アイソトープ協会からそれぞれ購入し、XMASS 実験共同研究者が所有するヘリウム 3 中性子検出器を用いた測定を行い、中性子が発生している事を確認した。

また、Y88 線源から同時に発生する 898keV ガンマ線を検出する同時計測法の検証のために、ヘリウム 3 中性子検出器の他にガンマ線検出器用の液体シンチレーションと光電

子増倍管を組み合わせたセットアップでもデータ収集を行った。

上記過程に問題が無かったので実際に XMASS 検出器の中性子線源導入用配管に線源を導入してデータを収集した。図 1 に線源の写真と各要素の説明を示す。

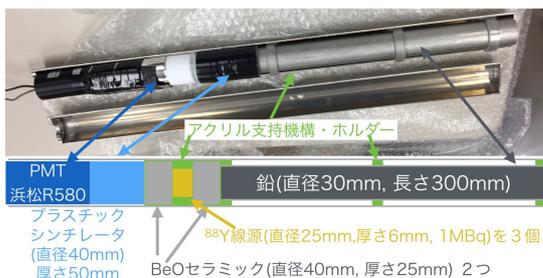


図 1：線源の写真および各要素

XMASS 検出器でこの線源でのデータを収集するためには、中性子と同時に発生するガンマ線によるイベントレートを低減する必要がある。鉛遮蔽体の厚さはガンマ線および中性子のモンテカルロシミュレーションから 30cm 厚に決定した。シミュレーションからは期待通り中性子のエネルギーが別の中性子線源であるカリフォルニウム 252(Cf252) の中性子エネルギーよりも低いため、低エネルギーに事象が集中し、1日あたり 100 イベント程度期待されることなどが分かった。

今回の測定では 2016 年末に約 4 日間中性子線源のデータを収集した。実験の都合上、最終目標に掲げていた発光効率や発光時定数の評価が出来る程長期間のデータ収集は出来なかったが、中性子起源の原子核散乱らしい信号を確認した。プラスチックシンチレータでもガンマ線による信号が観測されており、偶発同時計測の評価や、得られた低エネルギー事象に関して雑音事象の低減などといった今後の改良は必要なものの他実験でも使用可能な低エネルギー中性子線源の開発という目標は達成した。

(2)シミュレーション・解析ツールの改善について

XMASS 実験では GEANT4 とよばれるモンテカルロコードを用いてシミュレーションを行っている。本研究の為に原子核散乱断面のライブラリを最新のものに更新し、Cf252 の中性子による原子核散乱のエネルギースペクトルや時間分布についてよく再現する結果を得た。図 2 でエネルギースペクトルおよび時間分布について示す。ここで時間分布は 252Cf 線源の自発的核分裂によって発生するガンマ線が隣接するプラスチックシンチレータで発光した時間から、XMASS 検出器でキセノンが発光した時間の広がりをしており、図のようにガンマ線による信号から遅れて中性子による信号が観測される分布についてよく再現している。

低エネルギーでの発光時定数の評価方法についても解析ツールを改善し、これまでの全光電子増倍管からの波形を重ねた波形を指数関数でフィットする方法から、各光電子増倍管で検出された光子の検出時間、検出光量情報を用いて評価する手法を構築した。これにより、光電子増倍管で取得される波形の広がりの影響を受けない時定数評価が可能になった。

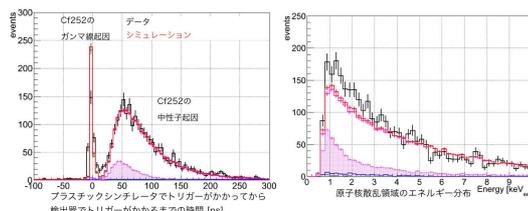


図 2：カリフォルニウム 252 中性子線源でのデータとシミュレーションの比較（時間分布およびエネルギースペクトル）日本物理学会第 72 回年次大会にて発表

今後の展望について

今回開発した Y88 と Be9 を組み合わせた中性子線源は XMASS 実験のみならず、他の低エネルギー原子核散乱事象探索実験にも応用出来ると期待される。また、発光時定数の評価方法の確立により、XMASS 実験でのガンマ線源を用いた電子散乱事象での発光時定数は既に論文になっており、今後系統誤差の評価など精密な解析が必要ではあるが、原子核散乱散乱でも同様に発光時定数を評価出来ると考えられる。現在までの解析で電子散乱に比べ原子核散乱では発光時定数が早く、現在の暗黒物質探索の主流である液相、気相の 2 層式キセノン実験での事象識別能には及ばないものの事象識別があることが分かった。発光時定数に関しても XMASS 実験のみならず他の液体キセノンを使う実験に適用可能であり、引き続き解析を進めていく。

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 4 件)

論文名：Detectability of galactic supernova neutrinos coherently scattered on xenon nuclei in XMASS、著者名：K.Abe, K.Hiraide, K.Ichimura, Y.Kishimoto et al. (43 人中 番目)、掲載誌名：Astroparticle Physics 89 (2017)51-56、査読有り、DOI: 10.1016/j.astropartphys.2017.01.006

論文名:A measurement of the time profile of scintillation induced by low energy gamma-rays in liquid xenon with the XMASS-I detector、著者名:H.Takiya, K.Abe, K.Hiraide,K.Ichimura et al. (39人中 番目)、掲載誌名: Nuclear Instruments and Method A 834 (2016) 192-196、査読有り、DOI: 10.1016/j.nima.2016.08.014

論文名:XMASS detector calibration using a neutron source、著者名:K.Ichimura for the XMASS collaboration、掲載誌名:Journal of Instrumentation 11 (2016) no.02, C02034、査読有り、DOI: 10.1088/1748-0221/11/02/C02034

論文名:Direct dark matter search by annual modulation in XMASS-I、著者名:K.Abe,K.Hiraide,K.Ichimura,Y.Kishimoto et al. (41人中 番目)、掲載誌名:Physics Letters B 759 (2016) 272-276、査読有り、DOI: 10.1016/j.physletb.2016.05.081

〔学会発表〕(計 6件)

市村 晃一、XMASS 実験:低エネルギー中性子線源の開発研究、日本物理学会 第72回年次大会、2017年3月20日、大阪大学豊中キャンパス(大阪府豊中市)

市村 晃一、XMASS 実験:中性子による原子核散乱を用いた XMASS 検出器の較正、日本物理学会 2016年秋季大会、2016年9月22日、宮崎大学木花キャンパス(宮崎県宮崎市)

市村 晃一、Recent results from XMASS、Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research 2016、2016年5月12日、東京大学小柴ホール(東京都文京区)

市村 晃一、XMASS 実験:中性子による原子核散乱を用いた XMASS 検出器の較正、日本物理学会 第71回年次大会、2016年3月20日、東北学院大学泉キャンパス(宮城県仙台市)

市村 晃一、XMASS 実験:中性子による原子核散乱を用いた XMASS 検出器の較正、日本物理学会 2015年秋季大会、2015年9月27日、大阪市立大学杉本キャンパス(大阪府大阪市)

市村 晃一、XMASS detector calibration using neutron source、Light Detection In Noble Elements (LIDINE 2015)、2015年8月29日、University at Albany, Albany(USA)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市村 晃一 (ICHIMURA Koichi)
東京大学・宇宙線研究所・特任助教
研究者番号: 80600064

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()