

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540294

研究課題名(和文) 積層型無機シンチレーターによる宇宙暗黒物質探索

研究課題名(英文) Search for cosmic dark matter by means of planar inorganic scintillator

研究代表者

伏見 賢一 (FUSHIMI KENICHI)

徳島大学・大学院ソシオ・アーツ・アンド・サイエンス研究部・准教授

研究者番号：90274191

研究成果の概要(和文)：

宇宙暗黒物質探索のために使用する、薄型・大面積 NaI(Tl)シンチレーターを開発した。NaI(Tl)は予想されている宇宙暗黒物質の候補に対する感度が高い。シンチレーターのサイズは0.5cm×15cm×15cmで、蛍光は薄い側の4端面から取り出した。

エネルギー分解能と低エネルギー閾値を確認した。エネルギー分解能では60keVの γ 線に対して20%を得た。低エネルギー閾値は3keVであり、低エネルギー測定が重要な宇宙暗黒物質探索に十分適用できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：

A thin and wide area NaI(Tl) scintillator for cosmic dark matter search was developed. The NaI(Tl) has a good sensitivity for the candidates for cosmic dark matter. The dimension of the scintillator was 0.5cm×15cm×15cm. The scintillation photons were collected at the four ends of thinner edges.

The energy resolution and energy threshold were tested. The energy resolution was 20% in full-width-half-maximum at 60keV. The energy threshold was as low as 3keV. These performances were suitable for cosmic dark matter search.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：実験核物理学・宇宙線

科研費の分科・細目：物理学：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙暗黒物質、

1. 研究開始当初の背景

宇宙暗黒物質探索実験は世界で多くのグループが取り組んでいる最重要課題である。多数の宇宙暗黒物質候補のうち、質量が重くて物質と弱い相互作用しかしない未知素粒子 WIMPs は有力候補とされている。WIMPs

の発見は宇宙物理学および素粒子物理学に対して大きなインパクトを与える重要な研究である。

イタリアの DAMA グループは大型の NaI(Tl)を用いた実験を長期間に実施し、世界で唯一 WIMPs の信号をとらえたと報告して

いた。

Geを用いたCDMSやXeを用いたXenon 10グループが相次いでDAMAの報告と矛盾する結果を報告し、NaI(Tl)による検証実験の必要性、複数のターゲット核を使用する実験を計画する必要が出てきた。

日本では液体キセノンを用いたXMASS実験の建設が進んでいる。他にも様々な形式の検出器による探索が計画されている。

2. 研究の目的

本研究では、積層薄型NaI(Tl)シンチレーターの基礎となる薄型・大面積シンチレーターの開発を主に遂行した。

研究の最終目標は、宇宙暗黒物質の探索とその性質の研究である。1.で述べたように、世界では大型の検出器による探索実験が進められている。DAMA/LIBRAやXMASSは数100kgに及ぶ巨大なシンチレーターを使用してWIMPsを探索する。一方SuperCDMS実験ではSiとGeを多数積層させてWIMPsを探索する。

本研究では、DAMA/LIBRAやXMASSで示されているシンチレーターの良いところと、SuperCDMSで示されている積層型検出器の利点を両方とも活かしたシステムを開発する。

本研究ではシンチレーターにNaI(Tl)を用いた。NaI(Tl)に含まれる原子核は全てWIMPsに対して大きな散乱断面積を有する。更に、 ^{127}I は57.6keVの低エネルギーに励起されやすい励起状態を有する。WIMPsのスピン結合型相互作用によって ^{127}I が励起された後に放出される57.6keV γ 線と原子核反跳を別々のモジュールで計測することで、WIMPsの相互作用形式を調べることができる。

3. 研究の方法

薄型・大面積のシンチレーターを開発し、その基本性能を調査した。NaI(Tl)シンチレーターは

(1) 大きさ 18.6cm×18.6cm×0.5cm

(2) 大きさ 15cm×15cm×0.1cm

の二種類を作成し、それぞれの性能を調べた。

双方ともにエネルギー分解能、低エネルギー領域の閾値、位置依存性に関するデータを収集した。(1)についてはNaI(Tl)結晶内部に含まれる放射性不純物の濃度を測定した。以下にそれぞれの測定方法を示す。

共通の設定：

シンチレーターの蛍光は薄い側の4端面から読み出した。光電子増倍管を各端面に3本ずつ接着してNIM規格回路およびCAMAC規格回路で収集した。

位置依存性に関するデータは ^{241}Am に厚さ

15mmの鉛ブロックに直径3mmの穴をあけたコリメーターによってガンマ線束を絞って照射した。

(1)の性能評価

数keVの低エネルギー領域から3MeVに至る幅広いエネルギー領域で性能を調べた。1MeV以上のエネルギー領域についても性能を調べ、二重ベータ崩壊実験にテストに用いた放射線源は、標準ガンマ線源に使用されている ^{22}Na 、 ^{60}Co 、 ^{133}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{241}Am で、それぞれの強度は約3.7kBqである。

(2)の性能評価

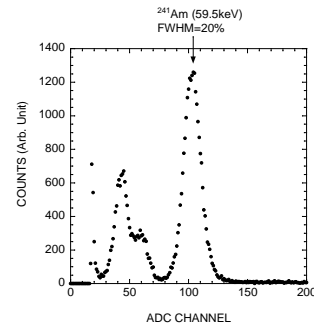
NaI(Tl)結晶は潮解性に富むうえ脆いため、厚さ1mm面積15cm×15cmという形状の検出器を安定に保持できるフレームや防湿システムの確認を重点的に行った。

厚さ1mmの検出器は宇宙暗黒物質探索に特化した設計としたため、エネルギー分解能は100keV以下の低エネルギー領域のみで測定した。

4. 研究成果

(1)の結果

エネルギー分解能は60keV領域では20%以下の半値全巾、662keVでは10%程度の半値全巾を得ることができた。下図に、低エネルギー領域の分解能測定結果を示す。 ^{241}Am を照射した結果、約100ch付近に見られるように59.5keVのガンマ線に対して半値全幅20%の測定に成功した。この性能は特殊な形状の検出器であるにもかかわらず、通常の形状を持つ検出器を同等の性能を示したことで非常に有望な結果となった。



次に検出器結晶に含まれる放射性不純物の濃度を測定した。検出器に含まれる放射性不純物は宇宙暗黒物質の感度に直接悪影響を及ぼすため、十分に調査して除去しなければならない。この研究では、特に悪影響を及ぼすウラン系列の核種 ^{210}Pb について注目した。 ^{210}Pb のベータ崩壊によって発生する放射線は、WIMPsによる非弾性散乱の事象と類似しているため、この濃度を正確に測定し、除去する必要性を確認する必要がある。 ^{210}Pb を直接計測するには装置を極めて高感度な環境に設置しなければならないため、この子孫核である ^{210}Po のアルファ崩壊を測定することにした。 ^{210}Pb と ^{210}Po は放射平衡

になっており、 ^{210}Po のアルファ崩壊に伴うアルファ線の強度を測定すれば ^{210}Pb の濃度を精度よく、かつ通常のバックグラウンド環境下で測定することができる。

アルファ線の測定は、 NaI(Tl) の蛍光信号の時定数がガンマ線とアルファ線で異なることを利用した波形弁別法を用いて行った。その結果、 NaI(Tl) 検出器に含まれる ^{210}Pb の濃度は 10mBq/kg であることが明らかになった。

PICO-LONによるWIMPs探索で要求する ^{210}Pb の濃度は 0.1mBq/kg なので、今後二桁の純度向上を行なう必要がある。純度向上の方法について情報収集を行い、高速液体クロマトグラフィーに用いる樹脂による吸着の方法が効果的であることを確認した。この方法で純度の向上を実行するためにはさらなる予算の獲得が必要であるため、次回以降の課題にすることとした。

低バックグラウンドのテスト測定を平成 20 年 6 月～8 月実施した。実験は奈良県五條市の大阪大学核物理研究センター大塔コスモ観測所で実施した。観測所は地下約 450m のトンネル内に設置された低バックグラウンド観測施設で、高感度測定に適している。

この測定では厚さ 0.5cm の NaI(Tl) 検出器を二枚作成し、それらを重ねて実験した。二枚のシンチレーターの信号識別は、本予算で整備した高感度光電子増倍管を使用した。

その結果、検出器周辺の部材に含まれる放射性不純物によるバックグラウンドでスペクトルを完全に説明することができた。この結果をもとに周辺部材の素材を選別した装置を平成 21 年 2 月～3 月にかけて大塔コスモ観測所に設置して測定した。その結果、バックグラウンドが 3 桁以上低下し、期待される性能を得ることができた。

低エネルギー領域 (100keV) 近辺では、 10day/kg/keV 程度になった。今回の装置で除去できなかった部分を考慮すると、予定していた性能を満たしていることが明らかになった。

二枚の結晶を重ねて測定することで、 γ 線の同時計数を実施することができるようになった。この際に重要な影響を与える、検出器間のクロストークは 0.3% であることが解析から明らかになった。この性能は、 γ 線の同時計数に重大な障害となるクロストークが無視できるという非常に有望な成果となった。

(2)の結果

$15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 0.1\text{cm}$ の大きさを持つ NaI(Tl) 結晶を、アクリルライトガイドと ESR フィルムおよびアクリルフレームで保持させた。 NaI(Tl) 結晶の防湿は実験に際して非常に重要な性能であるため、長期間の測定

で湿度による潮解が起こらないことを確認しながら開発を進めた。

2010 年夏に試作一号機が完成し、性能評価を実施した。しかし、この試作機は防湿が不十分であったためすぐに潮解してしまった。業者と防湿の方法について入念に打ち合わせを実施し、改良した試作二号機を 2011 年当初に完成させた。

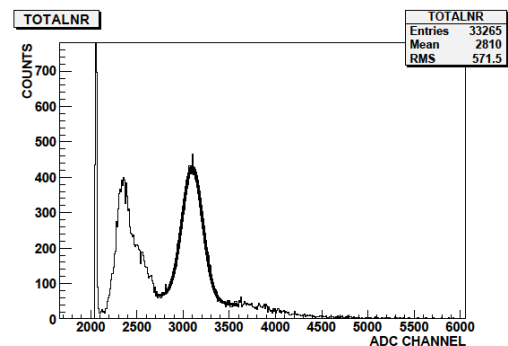
試作二号機の写真を下に示す。



図の中央に配置されている四角の黒枠はアクリルのフレームである。検出器の薄い側の 4 面から蛍光を取り出して測定した。

エネルギー分解能を測定するために ^{241}Am 及び ^{133}Ba のガンマ線源を照射して低エネルギーのガンマ線に対する応答を測定した。測定に際して、高速波形弁別の方法を開発し、ノイズの除去に成功した。

下図に ^{241}Am 照射による蛍光量スペクトルを示す。



図において、横軸は光電子増倍管から出力された電荷量をデジタル変換したADCのチャンネル値でエネルギーに対応する。縦軸は実計測時間 1 分の計数値である。スペクトルの 3100 チャンネル付近に見られる大きなピークが ^{241}Am 崩壊に伴う 59.5keV のガンマ線と NaI(Tl) との光電効果によるピークである。

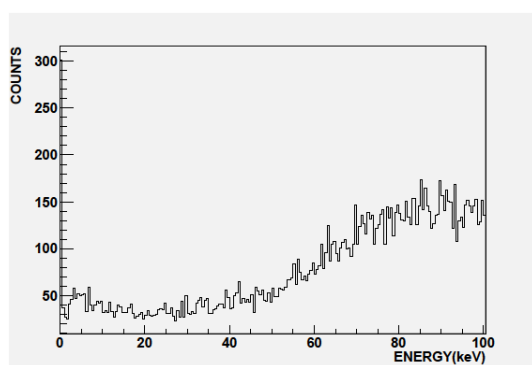
このピークのエネルギー分解能は半値全幅で 24% となった。研究の目的で述べたように、 ^{127}I の励起状態からのガンマ線を測定し、妨害となる不純物からのガンマ線(^{210}Pb の 46.5keV)を分離するには 20% 程度のエネルギー分解能が必要である。

今回の開発では目標とするエネルギー分解能にわずかに届かなかったが、薄型・大面積の NaI(Tl) シンチレーターとしては十分に

高い性能を得ることができた。宇宙暗黒物質探索に十分応用可能な性能である。

次に、低エネルギー測定のエネルギ閾値を測定した。低エネルギー閾値は WIMPs 測定において最も重要な性能である。NaI(Tl)シンチレーターにおける WIMPs の信号は、電子によるエネルギー換算で 5keV 以下に分布し、エネルギーが低いほど指数関数的に頻度が高くなる。DAMA グループは NaI(Tl)シンチレーターによって実効的なエネルギー閾値 2keV を得ている。

エネルギー閾値の測定ではガンマ線源を用いずに測定を行い、高速波形弁別によってノイズ事象を除去して解析を行った。下図に低エネルギー領域のエネルギースペクトルを示す。



図において、横軸はガンマ線照射によって得られた電子換算のエネルギー、縦軸は実計測時間 30 分の計数値を表わす。

本測定において、環境放射線を遮蔽するための施設は使わず、地上の実験室で測定した。波形弁別法によって光電子増倍管起因のノイズを除去できたため、電子換算エネルギーにおいて 2keV の低エネルギー閾値を実現することに成功した。

光センサーの調査

平成 22 年度には積層型 NaI(Tl)シンチレーターに適した次世代光センサーの性能評価を実施した。次世代光センサーには半導体素子を用いた SiPM (Silicon PhotoMultiplier) や MPPC (Multi Pixel Photon Counter) が開発されている。次世代の光センサーには光子の計数効率が高いことと設計の自由度が高いことを要求される。

単一光電子の測定を実施し、期待される性能を調べたところ、NaI(Tl)シンチレーターに接着した時に既存の光電子増倍管と同等の計数効率を得たことから、光電子増倍管の代替として使用できることを確認した。

設計については業者との打ち合わせで 1 ロットごとの作成となるためチャンネル数が多いほど単価が下がるが、NaI(Tl)一枚あたりのコストは光電子増倍管の 2 倍程度に上がる

ことがわかった。コストに見合う性能を確保することが課題である。

まとめ

薄型・大面積の無機シンチレーターを開発し、宇宙暗黒物質の探索への応用可能性を検討した。

- (1) 18.6cm×18.6cm×0.5cm の NaI(Tl)シンチレーターを開発し、エネルギー分解能について、59.5keV のガンマ線に対して半値全幅 20%を得た。
- (2) 検出器に含まれる放射性不純物濃度はウラン系列について 10 μBq/kg以下であるが、²¹⁰Pbについては放射平衡が崩れていて 10mBq/kg程度の汚染があることを確認した。今後の開発で²¹⁰Pbの低減を検討する必要がある。
- (3) 薄型・大面積 NaI(Tl)検出器を瀬起草させることでバックグラウンドを 3 桁程度低減させることに成功した。これによって、将来多数の NaI(Tl)結晶を積層させて宇宙暗黒物質探索を計画する妥当性を確認した。
- (4) さらに薄い 15cm×15cm×0.1cm の NaI(Tl)検出器開発に成功した。エネルギー分解能は 59.5keV で半値全幅が 24%と少々悪くなっているがだま探索には十分な性能を得ることができている。
- (5) 薄型 NaI(Tl)シンチレーターのエネルギ閾値については電子エネルギー換算で 2keV となり、宇宙暗黒物質探索に十分な性能であることを確認した。
- (6) 将来計画では光センサーの性能評価を実施した。半導体を用いた SiPM や MPPC の性能を調べ、宇宙暗黒物質探索に十分応用できる性能を有していることを確認した。

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 8 件)
(全て査読あり)

1. K.Fushimi他9名の筆頭, “SEARCH FOR COSMIC DARK MATTER BY MEANS OF THIN AND WIDE AREA NaI(Tl) ARRAY”, Proceedings of the 24th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, Vol. 2010-10, p99, 2010
2. K.Fushimi 他8名の筆頭, “PICO-LON Project for Cosmic Dark Matter”, The 10th

International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, AIP Conference Proceedings, Vol.1269, pp.333-335, Mar. 2010.

3. K.Fushimi他9名, "Dark matter search by means of segmented scintillator (PICO-LON)", Journal of Physics Conference Series, Vol.203, 012064, 2010.
4. K.Fushimi他8名, "MOON for Double-Beta Decays and Neutrino Nuclear Responses", Journal of Physics Conference Series, Vol.203, 012046, 2010.
5. Y.Kameda, K.Fushimi他10名, "Dark matter search by means of thin NaI(Tl) scintillator array", Proceedings of the 23rd Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, Vol. 2009-12, p8, 2009
6. H.Ejiri, K.Fushimi他3名, "Double beta decay experiments and ν -mass sensitivities", Journal of Physics Conference Series, Vol.120, pp.052050, 2008.
7. T.Shima, K.Fushimi他31名, "MOON for a next-generation neutrino-less double-beta decay experiment; present status and perspective", Journal of Physics Conference Series, Vol.120, pp.052055, 2008.
8. K.Fushimi 他13名の筆頭, "PICO-LON project for WIMPs search", Journal of Physics Conference Series, Vol.120, pp.042024, 2008.

[学会発表] (計 12 件)

1. 伏見賢一他 10 名「PICO-LONプロジェクト報告(積層型NaI(Tl)シンチレーターの開発, 2011年3月日本物理学会第66回年次大会(東日本大震災の影響でWEBによる発表形式に変更)
2. 原田克哉, 伏見賢一他 10 名, 「積層薄型検出器PICO-LONによる宇宙暗黒物質探索」, 「放射線検出器とその応用」(第25回), 2011年2月2日, 高エネルギー加速器研究機構(つくば市)

3. 伏見賢一, "PICO-LON project for rare decay physics", 二重ベータ崩壊懇談会, 2010年12月17日, モンタナリゾート岩沼(宮城県)

4. 伏見賢一他 8 名, 「積層型シンチレーターPICO-LONによる宇宙暗黒物質探索」, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 14 日, 九州工業大学(北九州市)

5. K.Fushimi他 8 名, "PICO-LON project for search for WIMPs dark matter", The 10th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of the Galaxies (OMEG10), 2010 年 3 月 9 日, 大阪大学核物理研究センター(茨木市)

6. 伏見賢一他 10 名, 「薄型・大面積シンチレーターPICO-LONによる宇宙暗黒物質探索」, 「放射線検出器とその応用」(第24回), 2010年1月27日, 高エネルギー加速器研究機構(つくば市)

7. 原田克哉, 伏見賢一他 10 名, 「積層薄型NaI(Tl)検出器MOONの性能評価」, 「放射線検出器とその応用」(第24回), 2010年1月27日, 高エネルギー加速器研究機構(つくば市)

8. K.Fushimi他 9 名, "Dark matter search by means of segmented scintillator", International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, 2009年7月3日, The Pontifical University of Saint Thomas Aquinas (イタリア・ローマ)

9. K.Fushimi他8名, "MOON for Double-Beta Decays and Neutrino Nuclear Responses", International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, 2009年7月2日, The Pontifical University of Saint Thomas Aquinas (イタリア・ローマ)

10. K.Fushimi, "Application of thin NaI(Tl) scintillator for rare decay physics", Japan-US seminar on "Double Beta Decay and Neutrinos, 2009年10月12日, Hilton Waikoloa Village (ハワイ島・米国)

11. K.Fushimi, "Dark matter search by means of segmented scintillator", Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS, 2009年10月16日, Hilton Waikoloa Village (ハワイ島・米国)

12. 亀田勇樹, 伏見賢一他 3 名, 「積層型NaI(Tl)シンチレーターによる宇宙素粒子探索計画」, 研究会「放射線検出器とその応用」(第23回), 2009年1月28日, 高エネルギー加速器研究機構(つくば市)

[その他]
報道(計 1 件)

研究の現場から 「ダークマター検出に挑む」
毎日新聞 2010 年 9 月 8 日

アウトリーチ活動(計 5 件)

1. 徳島県立城南高等学校 (2010 年 9 月 17 日～2010 年 9 月 17 日) ニュートリノの不思議
2. 徳島市両国本町商店街 (2010 年 7 月 4 日～2010 年 7 月 4 日) 「宇宙のおはなし」
3. 徳島県立富岡西高等学校 (2010 年 3 月 12 日～2010 年 3 月 12 日) 「宇宙物理学初歩」
4. 徳島県立城東高等学校 (2009 年 10 月 29 日～2009 年 10 月 29 日) 「宇宙暗黒物質探索について」
5. 徳島県立城北高等学校 (2009 年 7 月 30 日～2009 年 7 月 3 日) 「宇宙物理学とニュートリノ」

6. 研究組織

(1)研究代表者

伏見 賢一 (FUSHIMI KENICHI)
徳島大学・大学院ソシオ・アーツ・アンド・サイエンス研究部・准教授
研究者番号：90271491

(2)研究分担者

()
研究者番号：

(3)研究分担者

()
研究者番号：