

平成31年 4月23日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K13478

研究課題名（和文）異方性を持った無機結晶シンチレーターによる方向感度暗黒物質検出器の開発

研究課題名（英文）Development of direction sensitive dark matter detectors using anisotropic inorganic crystal scintillators

研究代表者

関谷 洋之（Sekiya, Hiroyuki）

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：90402768

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：暗黒物質の直接的な検証のためには、銀河の回転方向に基づく、その到来方向を捉えることが必須である。これまで方向感度検出器として、主にガス飛跡検出器の開発が行われているが、暗黒物質検出のためには質量が稼げない問題がある。そこでより質量を稼げる検出器として、発光量に異方性があるZnWO₄結晶を製作して、線のみならず、実際に中性子を用いてkeV領域でのシンチレーション発光量の原子核反跳方向依存性を測定することに成功し、暗黒物質方向感度検出器として原理実証することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の宇宙の成り立ちの秘密を探るには、宇宙の物質の約80%を占める暗黒物質を検出しその性質を明らかにすることが不可欠である。暗黒物質がなければ宇宙、地球、太陽、生命が生まれていなかったことは明白であるが、暗黒物質そのものは全く正体不明であり、世界中で探索が行われているが未検出である。本研究では、暗黒物質検出のためのブレークスルーとなる方向に感度をもった検出器の原理検証を行った。地球が銀河の中を回転しながら白鳥座の方に進行している事実から、地球上では暗黒物質の風を感じるはずであり、この風を捉える新たな手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：In order to verify the existence of the dark matter directly, it is indispensable to identify the incident direction of the dark matter due to the galaxy rotation. Up until today, most of such detectors are developed using gaseous TPCs, however mass of those detectors are limited because the target materials are gases. Therefore, to utilize higher density material target, a direction-sensitive ZnWO₄ crystalline scintillator has been manufactured and calibrated not only with alpha particles but also by neutrons. The anisotropic response for neutrons has been successfully confirmed and it is confirmed that this crystal should work as a direction-sensitive dark matter detector.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：暗黒物質 シンチレータ 素粒子実験 宇宙線 方向感度

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、暗黒物質と通常の原子核の弾性散乱を用いた暗黒物質の直接探索実験の感度が上がり、探すべき領域が太陽ニュートリノや大気ニュートリノによる中性カレントコヒーレント散乱による断面積に近づいている。断面積がそれより小さいと、原理的にバックグラウンドに埋もれ、暗黒物質反応の直接検出が非常に困難になる。しかし、銀河に付随する暗黒物質は、銀河の回転運動により、地球上では白鳥座の方向からやってくるため、方向感度を持った検出器であれば、太陽ニュートリノや大気ニュートリノによるバックグラウンドと区別ができ、液体キセノン等を用いた大型検出器でも決して到達できない領域の探索が可能となる。

(2) これまで方向感度検出器として、主にガス飛跡検出器の開発が行われているが、核子との断面積 10^{-49}cm^2 以下の領域に到達するにはどうしても質量が稼げない。したがって大型化可能な固体方向感度検出器を実現すればブレークスルーとなる。研究代表者は発光量が粒子の入射方向によって異なる有機単結晶シンチレータを用いた暗黒物質探索を行い世界で初めて方向情報から暗黒物質に対する制限を与えたが、標的が軽い水素と炭素だけであったので、感度が制限されていた。

2. 研究の目的

有機単結晶と同様の単斜晶系の重い原子核からなる ZnWO_4 シンチレータは、 α 線に対して発光量の異方性が報告されていた。 ZnWO_4 単結晶を製作して、 α 線のみならず、実際に中性子を用いて keV 領域でのシンチレーション発光量の原子核反跳方向依存性を測定し、暗黒物質方向感度検出器として原理実証を行う。方向感度暗黒物質探索ができれば、いまだ暗黒物質の有力候補である SUSY-WIMP 探索において画期的な手法となる。そのために、実際に使用できるサイズの結晶を、中性子ビームを用いて、定量的な評価を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 結晶の作成

分担者の研究室独自開発の高速単結晶作製法であるマイクロ引下げ法 (μ -PD 法) を用いて数ミリサイズの ZnWO_4 単結晶の作製条件を見出す。その後 1 cm 径の ZnWO_4 単結晶には Cz 法を用いる。Cz 法は Si、GaAs 等の半導体単結晶や LiNbO_4 や LiTaO_4 単結晶等の量産に用いられている高品質バルク単結晶作製法である。 μ -PD 法で見出された最適組成、最適条件に基づいて、低バックグラウンド結晶の製造を見据えた結晶の育成をおこなう。また、比較のため海外等から入手可能な ZnWO_4 単結晶を調査し購入する。

(2) 結晶軸の同定

まず、作製した ZnWO_4 結晶は粉末 X 線回折法 (XRD) による相同定、フォトルミネセンス (PL) 法による発光・励起波長の解析、ラジオルミネッセンス法 (RL) による放射線励起時の発光波長の解析により、不純物や欠陥等の評価および理解を行う。結晶軸の同定はラウエ写真による方法のほか、素早く高精度で決定できる 5 軸 X 線回折計 ATX-G (RIGAKU) による解析も行う。

(3) α 線による異方性の確認

^{241}Am 線源からの 5.5MeV の α 線を 2 cm 角の立方体にカットした結晶面に照射して、発光量の異方性をみる。数十 keV の X 線や γ 線によるエネルギー較正を行い、 α 線応答と比較する。

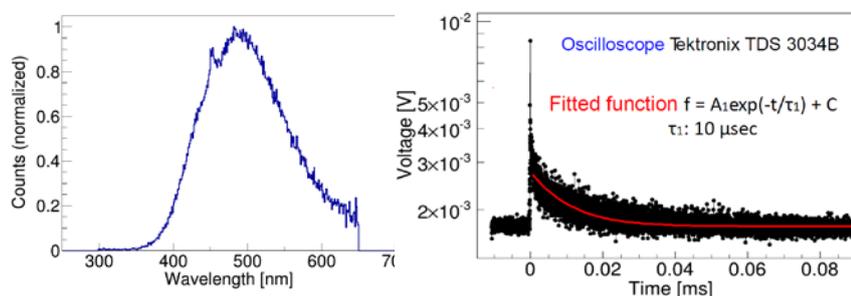
(4) 中性子による異方性の確認

^{252}Cf 線源を用いて、中性子による評価方法を確立した後、産業技術総合研究所の放射能中性子標準研究グループの 4MV ペレトロン加速器による単色中性子を 2 cm 角の立方体にカットした結晶面に照射して、発光量の異方性をみる。数十 keV の X 線や γ 線によるエネルギー較正を行い、 α 線応答と比較する。

4. 研究成果

(1) 結晶の評価

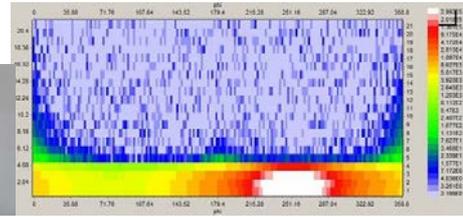
最初に作成した 2 ミリサイズ結晶についてシンチレータとしての基本的な性質を調べた。右図のように、発光波長は 490nm 程度の可視光で光電子増倍管等との光検出器との相性



が良い結晶であることが分かったが、一方、発光および減衰の時定数は $10\mu\text{sec}$ 以上の、非常に応答の遅い結晶であることが判明した。そのため、光電子増倍管からの電荷信号を長時間積分するためのプリアンプを開発するとともに、中性子の飛行時間を用いたエネルギー測定が難しく、なるべく単色の中性子源を用いて発光量の異方性を確認する方針とした。

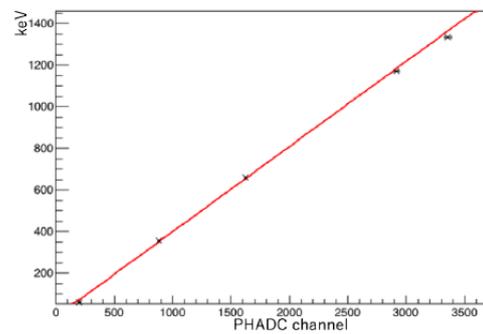
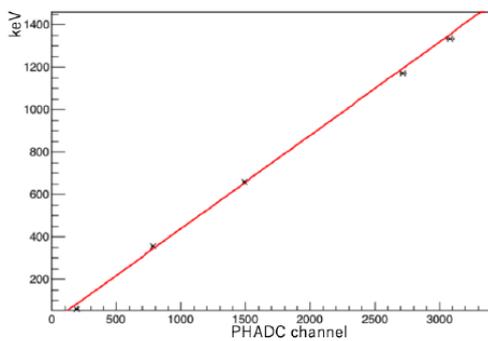
(2) 結晶軸の決定

ミリサイズの結晶については、主にラウエ法により確認、センチサイズの結晶は主に 5 軸 X 線回折計 ATX-G (RIGAKU) によって同定した。右図は、写真の面が b 軸に垂直な B 面であること同定されたことを示すピーク (白い部分) である。b 軸に複屈折面があり、それを基準に以後の照射方向の決定を行った。



(3) X/ γ 線応答

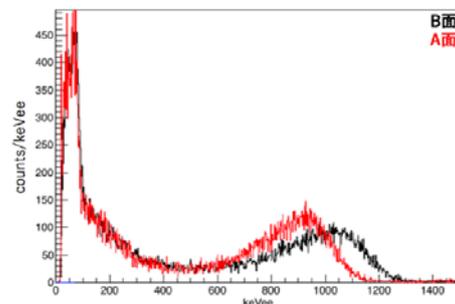
軸を同定した結晶に対し ^{137}Cs 、 ^{133}Ba 、 ^{60}Co 、 ^{241}Am からの X/ γ 線を異なる 2 面に照射した際の発光量の比較を下図に示す。



各面での応答は線形であり、2 面で差が見られないことから、X/ γ 線に対して異方性がないことを確認した。

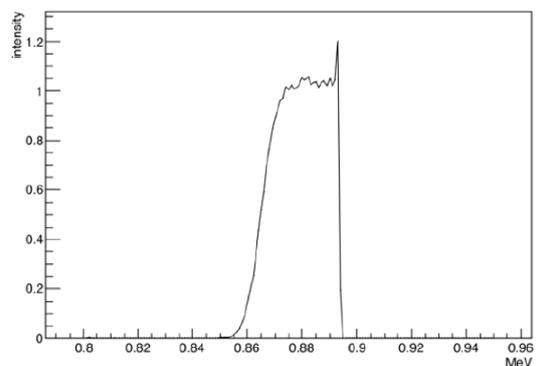
(4) α 線応答

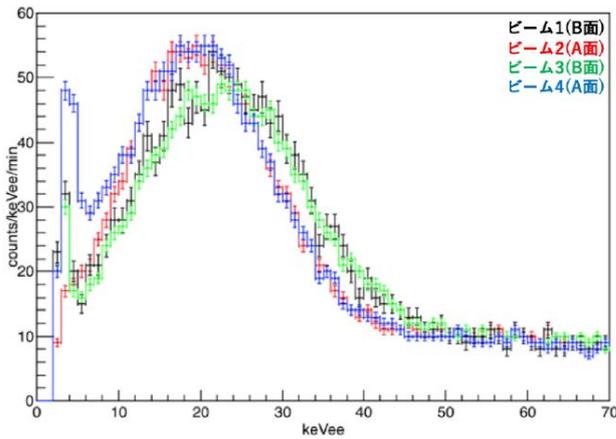
次に ^{241}Am からの α 線を A 面と B 面から照射した際のスペクトラムを示す。低エネルギーのピークは 59.5keV の γ 線ピークであり、こちらは二つの面で差が見られないのに、Visible energy で 1MeV 付近の 5.5MeV α 線によるピークは A, B 面で明確な差が確認された。発光量と実エネルギーの比で定義されるクエンチングファクターとしてあらわすと、B 面では 0.189 ± 0.005 、A 面では 0.162 ± 0.005 となり、 14.1% の異方性が確認できた。



(5) 中性子応答

最終的に暗黒物質検出器として ZnWO_4 シンチレータを利用するためには、 ZnWO_4 結晶内の原子核にエネルギーが付与された時のクエンチングファクターを測定することが必要である。Zn 所で産業技術総合研究所の放射能中性子標準研究グループの 4MV ペレトロン加速器による単色中性子ビームを用いた照射実験を行なった。照射日は 2018 年 10 月 24 日の 11 時から 21 時までであり、4 回に分けて照射したビーム照射時間の合計は 8 時間 31 分である。ビームのエネルギーは右図に示すように $0.88\text{MeV} \pm 0.03\text{MeV}$ に収まるほぼ単色であり、これを A 面及び B 面に照射した際の全発光量を比較した。結晶内に中性子が落とすエネルギーを検討すると、このエネルギーではほぼ酸素反跳のみがとらえられるはずである。中性子は $4\pi\text{sr}$ すべての角度へ放出されるが、発光スペクトルの Endpoint に着目することで、 150keV の酸素反跳に対応するイベントでの ZnWO_4 結晶のクエンチングファクターを求めた。





系統誤差を確認するため、各面 2 回ずつ中性子ビームを照射して比較した結果を左図に示す。B 面に垂直に照射した場合のクエンチングファクターは 0.150 ± 0.003 、A 面に垂直に照射した場合のクエンチングファクターは 0.129 ± 0.002 という結果が得られ、この 2 面の間の異方性は $14.0 \pm 0.5\%$ という結果が得られた。

以上の測定により、本研究において世界で初めて中性子を用いて ZnWO₄ 結晶のクエンチングファクターの測定と異方性の確認に成功し、ZnWO₄ 結晶の暗黒物質方向感度検出器としての原理検証ができた。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 25 件)

- ①黒澤 俊介 「方向感度をもつ暗黒物質検出器の開発をめざした異方性を有するシンチレータ開発の検討 VIII」 日本物理学会 第 74 回年次大会 2019 年
- ②ピーダーセン 珠杏 「暗黒物質方向感度検出器開発のための中性子散乱実験による ZnWO₄ シンチレータの異方性の測定」 日本物理学会 第 74 回年次大会 2019 年
- ③黒澤 俊介 「方向感度暗黒物質探査に向けた光学的異方性シンチレータの探索と実証」 第 5 回「極低放射能技術」研究会 東北大学 2019 年
- ④ピーダーセン 珠杏 「暗黒物質方向感度検出器開発のための中性子散乱実験による ZnWO₄ シンチレータの異方性の測定」 第 25 回東京大学素粒子物理国際研究センター(ICEPP) シンポジウム 2019 年
- ⑤ Shunsuke Kurosawa "Direction-Sensitive Dark Matter Search Using Tungstate Scintillator" VCI2019 - The 15th Vienna Conference on Instrumentation 2019 年
- ⑥黒澤 俊介 「方向感度をもつ暗黒物質検出器の開発をめざした異方性を有するシンチレータ開発の検討 VII」 日本物理学会 2018 年秋季大会 2018 年
- ⑦Shunsuke Kurosawa "Study on Zinc Tungstate Crystals for Direction-Sensitive Dark Matter Search" The 17th Symposium on Radiation Measurements and Applications SORMA XVII 2018 年
- ⑧ピーダーセン 珠杏 「暗黒物質方向感度検出器開発のための ZnWO₄ シンチレータの異方性の測定」 日本物理学会 第 73 回年次大会 2018 年
- ⑨黒澤 俊介 「方向感度をもつ暗黒物質検出器の開発をめざした異方性を有するシンチレータ開発の検討 VI」 日本物理学会 第 73 回年次大会 2018 年
- ⑩黒澤 俊介 「方向感度暗黒物質探査に向けた光学的異方性シンチレータの探索と実証」 第 4 回「極低放射能技術」研究会 山形 天童温泉 2018 年
- ⑪Juan Pedersen "Anisotropy Measurements of ZnWO₄ Crystals for Developing the Direction-Sensitive Dark Matter Detector", 2018 ICRR Master and Doctor Thesis Workshop 2018 年
- ⑫Misa Tsukahara "Scintillation Properties of ZnWO₄ Crystals for Direct-Sensitive Dark Matter Search" Second International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses (ISR2018) 2018 年

- ⑬ 関谷 洋之 「異方性シンチレータによる極低温熱量計型暗黒物質方向感度検出器の開発」
日本物理学会 2017 年秋季大会 2017 年
- ⑭ 黒澤 俊介 「方向感度をもつ暗黒物質検出器の開発をめざした異方性を有するシンチレータ
開発の検討 V」 日本物理学会 2017 年秋季大会 2017 年
- ⑮ 関谷 洋之 「ZnWO₄ 結晶による方向感度暗黒物質探索」
第 12 回 CRC 将来計画 タウンミーティング 2017 年
- ⑯ Hiroyuki Sekiya "Studies of a (Zn,Mg)WO₄ Crystal--Searching for the Origin of the
Directional Dependence of the Scintillation Response" CYGNUS2017 workshop 2017 年
- ⑰ 黒澤 俊介 「方向感度をもつ暗黒物質検出器の開発をめざした異方性を有するシンチレータ
開発の検討 IV」 日本物理学会第 72 回年次大会 2017 年
- ⑱ 関谷 洋之 「ZnWO₄」
ダークマター懇談会 2017 年
- ⑲ 黒澤 俊介 「方向感度をもつ暗黒物質検出器の開発をめざした異方性を有するシンチレータ
開発の検討 III」 日本物理学会 2016 年秋季大会 2016 年
- ⑳ Shunsuke Kurosawa "Crystal Growth of Zinc Tungstate Crystals for Dark Matter Search"
The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18) 2016 年
- ㉑ Hiroyuki Sekiya "Studies on ZnWO₄ crystals for the direction-sensitive dark matter
search" 11th International Conference on Identification of Dark Matter 2016 年
- ㉒ Hiroyuki Sekiya "Status of making ZnWO₄ Crystals"
CYGNUS-TPC kick-off meeting 2016 年
- ㉓ 黒澤 俊介 「方向感度をもつ暗黒物質検出器の開発をめざした異方性を有するシンチレータ
開発の検討 II」
日本物理学会第 71 回年次大会 2016 年
- ㉔ 関谷 洋之 「方向感度をもつ暗黒物質検出器の開発をめざした異方性を有するシンチレータ
開発の検討」 日本物理学会第 70 回年次大会 2015 年
- ㉕ Hiroyuki Sekiya "ZnWO₄"
The fifth CYGNUS workshop on directional dark matter detection (CYGNUS2015) 2015 年

[その他]

学位論文 (計 1 件)

① ピーダーセン 珠杏 修士論文「暗黒物質方向感度検出器開発のための中性子による ZnWO₄ シンチレータの異方性の測定」,
東京大学大学院理学系研究科 2019 年 1 月 4 日

ホームページ等

http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/~sekiya_s/SinglePhaseXeTPC/

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：吉川 彰

ローマ字氏名：(YOSHIKAWA, Akira)

所属研究機関名：東北大学

部局名：金属材料研究所

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：50292264

研究分担者氏名：黒澤 俊介

ローマ字氏名：(KUROSAWA, Shunsuke)

所属研究機関名：東北大学

部局名：金属材料研究所

職名：准教授

研究者番号 (8桁)：80613637

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：ピーダーセン 珠杏 ウイリアム

ローマ字氏名：(PEDERSEN, Juan William)

研究協力者氏名：市村 晃一

ローマ字氏名：(ICHIMURA, Kouichi)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。