

令和 3 年 4 月 17 日現在

機関番号：12601
研究種目：基盤研究(B) (一般)
研究期間：2017～2019
課題番号：17H02884
研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Development of a direction sensitive dark matter detector with anisotropic-response scintillators via bolometric readout

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) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙の暗黒物質は白鳥座の方向から降り注ぐと考えられることから、暗黒物質を探索するには方向感度をもった検出器が有効である。ZnWO₄という結晶は粒子の入射方向によって発光量が異なることが知られていたが、実際に暗黒物質と同様に電荷をもたない中性子を用いてその性質を確認することができた。さらにその発光の減衰する時間も発光量と同じように入射方向依存性があることを発見した。そして、この結晶を極低温まで冷却して発光量と粒子入射による温度上昇を同時に測定したところ、低温で室温と同じような発光量の入射方向依存性を確認できた。また入射粒子の種類も識別でき、暗黒物質検出器としての応用に道が開けた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙の物質の80%を占めることが分かっている暗黒物質を直接検出する試みは40年にわたり世界中で続けられているが、未だ発見できていない。そもそも様々なノイズと暗黒物質の信号を明確に見分ける手法についての研究自体は深く追求されておらず、とにかくノイズを低減することに注力されている状況である。本研究では、地球の銀河中の回転運動によって生じている暗黒物質の到来方向の特徴を積極的にとらえる手法を検証した。具体的には粒子の入射方向によって発光量の異なる結晶を極低温に冷却することで、地球の自転に基づく暗黒物質による信号の日周変化を捕らえる手法を提案することができた。

研究成果の概要(英文)：It is considered that dark matter in the universe is coming to the Earth from the direction of Cygnus, thus a direction-sensitive detector is effective in searching for dark matter. It has been known that the scintillation light yields of ZnWO₄ crystal depends on the direction of incident particles. We were able to confirm this property using neutrons which have no charge like dark matters. In addition, we discovered that the decay time of the scintillation depends on the incident direction as well as the light yields. Furthermore we cooled down the crystal to cryogenic temperature and the light yields and the temperature rise due to the particle incident were measured simultaneously. Then we confirmed the incident direction dependence of the light yields was similar to that of room temperature. We were also able to identify the type of incident particles. These results are opening the way for application as a dark matter detector.

研究分野：素粒子実験

キーワード：暗黒物質 シンチレータ ボロメータ 素粒子実験 宇宙線

1. 研究開始当初の背景

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。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ー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 [H. Sekiya et al., astro-ph/0411215; Proc. of 5th IDM workshop, pp378-383 (World Scientific, 2005)]。そこで有機単結晶と同様の単斜晶系で重い原子核からなる $ZnWO_4$ シンチレーターで高エネルギー α 粒子の入射方向によって発光量が異なるとの報告 [F. A. Danevich et al., Nucl. Instrum. Meth. A 544(2005)552-564] に基づき、 $ZnWO_4$ での方向感度暗黒物質探索を開始した。これまでに共同研究を行っている東北大金属材料研究所にて 2cm サイズの結晶を作成し、実際に α 粒子を用いて入射方向によって最大 20%ほど発光量が異なることを確認した。 γ 線に対しては異方性が無いが、 α 線に対するクエンチ割合が明らかでない異方性を持っていることが分かった。原理的に暗黒物質の入射方向に関する情報は縮退してしまうので、結晶の発光の日変化を見る等、大質量を用意して探索を行わなければならない。その点においてガス検出器とトレードオフのある状況といえる。

2. 研究の目的

(1) 地球の自転によって暗黒物質の入射方向が変わることによる発光量の日変化を用いて暗黒物質探索を行うには、10 トンオーダーの質量の $ZnWO_4$ を用意する必要があると予想される。この程度の質量は、結晶であるので不可能ではないが、入射方向に関する情報の縮退を解いて情報を増やすことができれば必要なターゲット質量を減らせることになる。そこで、極低温に冷却し photon と phonon を同時測定する scintillating bolometer として動作させることを目指す。photon シグナルだけに異方性があれば、phonon からの全エネルギー情報と合わせ、暗黒物質の入射方向の情報をより引き出せると考えられるからである。

(2) $ZnWO_4$ 結晶の発光応答の異方性について α 線による確認はなされていたが、結晶表面の構造の崩れ等が影響してしまっている可能性がある。また、実際に暗黒物質に対する応答を見積もるためには、結晶内での原子核反跳に対する異方性を直接検証する必要がある。そこで、中性子を用いたクエンチングファクターのエネルギーと角度依存性を測定することで異方性を検証することを目的とし、その結果から暗黒物質探索の手法・感度を検討し、実際の探索実験へ進む。

3. 研究の方法

(1) Institute for Basic Science Center for Underground Physics, IBS/CUP および Korea Advanced Institute of Science and Technology, KAIST(韓国テジョン)にて Bolometer として評価を行った。IBS/CUP は KAIST に AMoRE 開発用に多数のクライオスタットを保有している。その中でもっとも手軽に数十 mK まで冷却可能で、結晶導入に対する自由度が高く AMoRE 結晶スクリーニング用に開発された核断熱消磁冷凍機を使用して評価した。Bolometer としての心臓部である『温度計』には Metallic magnetic calorimeter (MMC) を用いる。MMC は常磁性体の温度変化による磁化の変化を SQUID によって読み出す仕組みであり、非常に高いエネルギー分解能を実現できるセンサーである。[C. Enss et al., Journal of Low Temperature Physics 121 Issue 3 (2000) 137-176] 図 1 にあるようにターゲット結晶に直接蒸着した金フィルムに MMC を取り付けると phonon センサーとなり、結晶から離れた Ge 基板を光吸収体として用い、そこへ MMC を取り付けると photon センサーとして働く。実際に核断熱消磁冷凍機にマウントした 1 cm 角の $ZnWO_4$ 結晶にセンサーを取り付けた様子

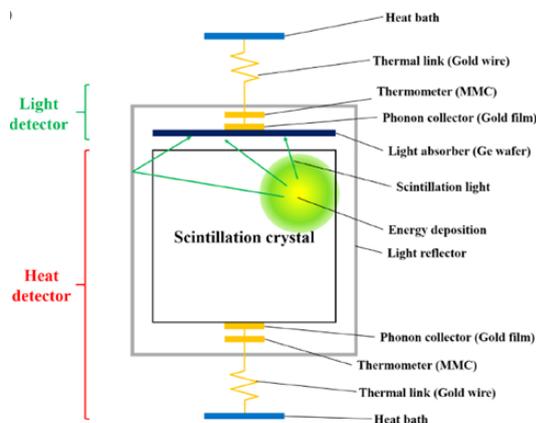


図 1 Scintillating bolometer の概念図

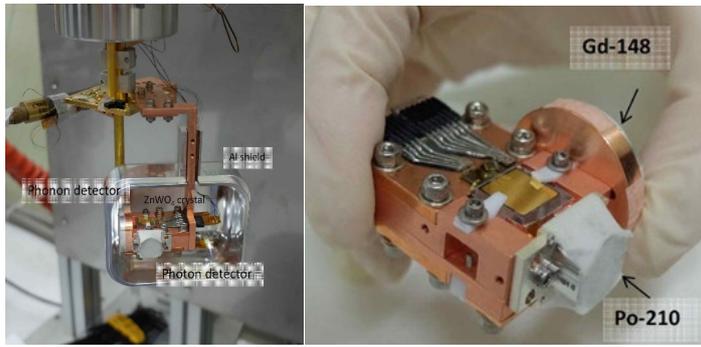


図2 冷凍機にマウントされた検出器と検出器に2種類の α 線源を取り付けた様子

を図2に示す。Photon シグナルの異方性を確認するためには α 線源を使用した。図2のように、 ^{210}Po からの5.3MeVの α 線と ^{148}Gd からの3.2MeVの α 線を結晶の2面に照射できるホルダーを用意した。phonon 検出面と photon 検出面は平行にせず、2種の α 線源を入れ替えて測定することで、結晶の照射面による発光量の違いを確認した。測定は40mKに冷却して行った。

(2) 中性子を用いた結晶応答測定には産業技術総合研究所(AIST)放射能中性子標準グループの施設を利用した。当初はKASIT保有のDD Generator($E_n=2.5\text{MeV}$)を使用してScintillating bolometerとしての応答を測定する予定であったが、KASIT側の実験の都合で延期になったところへCOVID-19による海外渡航の制限が発生したため、日本国内で常温での結晶応答を追求することとした。AISTでは2種類の中性子ビームを用いた。4MVペレットロン加速器を用い、陽子を1.7MVまで加速しトリチウムをターゲットにした $T(p, n)$ 反応からの $885\text{keV}^{+10\text{keV}}_{-20\text{keV}}$ の準単色ビームとトリチウムをターゲットにした $\text{Li}(p, n)$ 反応からの $565\text{keV}^{+7\text{keV}}_{-10\text{keV}}$ の準単色ビームを用い、主に $\sim 200\text{keV}$ の酸素反跳と $\sim 100\text{keV}$ の酸素反跳に対する ZnWO_4 の発光応答を調べた。

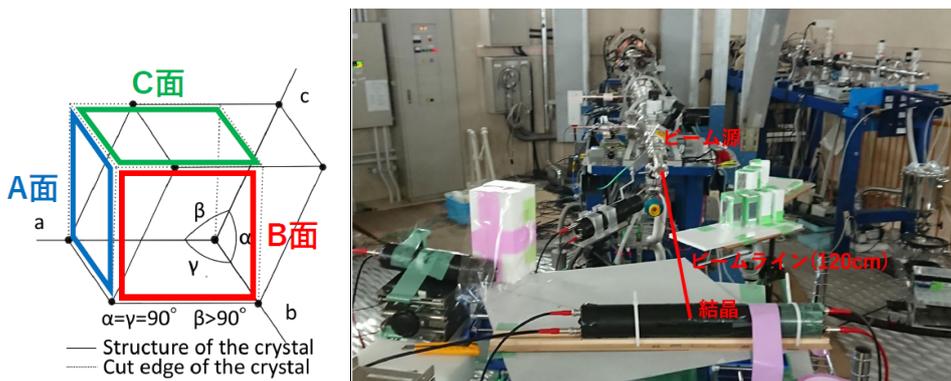


図3 結晶の面の定義とビームラインでのセットアップ

図3に示すように ZnWO_4 は単斜晶系の結晶であるが、角 $\alpha=\gamma=90^\circ$ で角 $\beta=90.2^\circ$ であるので立方体に切り出してほぼ結晶面が出ている状態である。この結晶の各面がビームに垂直に照射し、最大のEnergy depositを比較することで、原子核反跳による発光量の異方性を調べた。このエネルギーでは亜鉛(Zn)とタングステン(W)の質量が中性子に比べ十分大きいので、主に中性子と酸素(O)の弾性散乱のみが検出できることになるのがポイントである。

4. 研究成果

(1) Scintillating bolometerとしての異方性の確認

まず3.(1)の方法で述べた冷凍機にマウントした ZnWO_4 に α 線と γ 線を同時照射しMMCで読みだしたPhotonとPhononのシグナルの2次元分布を図4に示す。Scintillating Bolometerとして動作させることに成功していると同時に粒子の種類によってPhotonとPhononの比が異なることから粒子識別ができていることが見て取れる。そして、 ZnWO_4 結晶のB面とC面に5.3MeV α 線と13.2MeVの α 線を照射してその応答を測定したのち、二つの面を入れ替えて再度測定を行った様子を図5に示す。2回の測定発光量を5.3MeVのピーク位置で規格化して重ねた図となっている。この結果Photonシグナルで14%程度の異方性を生じていることを確認した。一方PhononシグナルでPhotonシグナルにおいて確認された発光量の差を生じさせるに相当する差は0.03%で

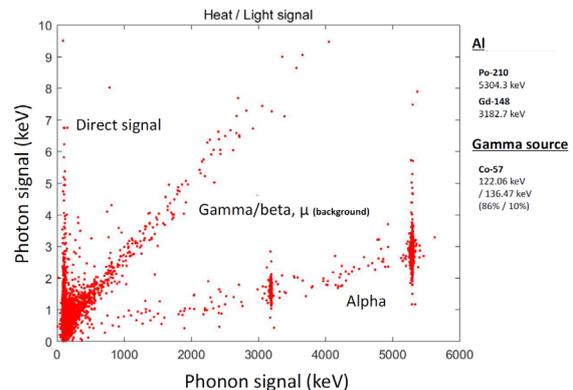


図4 Scintillation bolometerとしての ZnWO_4

あるが、それと一致した結果が得られた。また、 ^{57}Co の 122keV と 136keV の 2 本の γ 線を用いて同様に B 面と C 面にそれぞれ入れ替えて照射し測定したが Photon シグナルにおいて異方性は確認できなかった。このことから、40mK の低温でも ZnWO_4 の重粒子に対する発光量の異方性が確認したとともに γ 線に対しては異方性がないことを確認した。以上から極低温熱量計型検出器として Phonon シグナルから

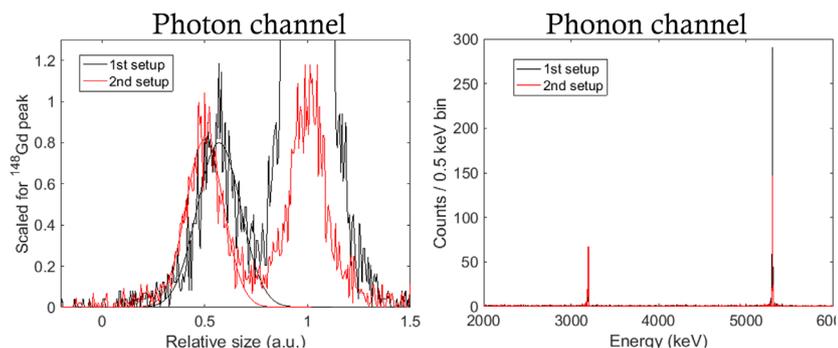


図 5 ZnWO_4 の B 面、C 面に 5.3MeV と 3.2MeV の α 線をそれぞれ入れ替えて照射した時の Photon と Phonon シグナルの様子。Photo では 14% の差が確認できるが、Phonon では差が見られない

得られる全エネルギー情報を使用すれば、Photon シグナルに畳み込まれた方向情報を抽出して入射方向に関する情報を回復できるという暗黒物質方向感度検出器の原理を検証できた。

(2) 中性子ビームを用いた発光応答の方向依存性の精査

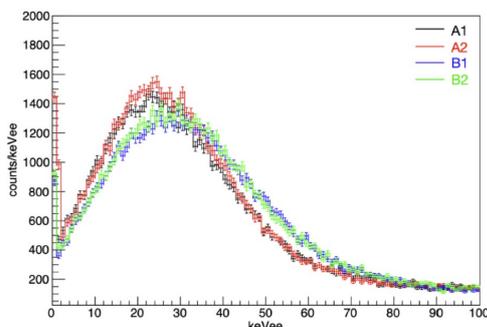


図 6 885keV 中性子を ZnWO_4 の A 面 B 面に垂直入射した際の応答

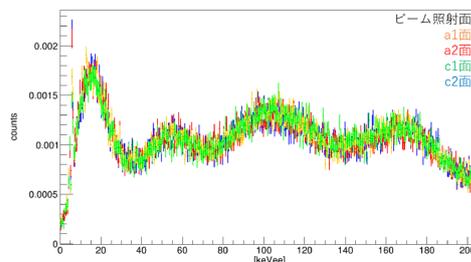


図 7 565keV 中性子を ZnWO_4 の A 面 C面に垂直入射した際の応答

3. (2)の方法で述べた酸素原子核反跳に対する発光異方性の測定について、最初に中心エネルギー0.885MeV の準単色中性子線を ZnWO_4 結晶の各面に照射し、200keV 酸素原子核反跳に対する A 面・B 面のクエンチングファクターを測定した。測定した値は A 面、B 面それぞれ 0.199 ± 0.020 、 0.235 ± 0.026 であり、図 6 に示すように、この 2 面間で 15% の異方性を示すことが確認できた。この測定により、世界で初めて中性子を用いて ZnWO_4 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、 ZnWO_4 結晶の暗黒物質方向感度の直接の検証ができた。次にさらに低エネルギーの 565keV の準単色中性子ビームを使用して、発光量の差が小さいと A 面と C 面で $\sim 100\text{keV}$ の酸素原子核反跳の発光応答の測定を行った。その結果、図 7 に示すように A 面と C 面での発光量の差は $< 5.0\%$ であり、この面間に対しては誤差範囲で、異方性は見られなかった。これにより重粒子の発光応答は A 面と B 面で大きく差異があるが A 面と C 面では差異が小さいことが確認できた。地球の自転による発光量の日周変化を測定する場合、結晶の二軸以上に対する大きな異方性があると応答が複雑になるため、この結果は暗黒物質探索においては望ましいものである。そのため、例えば暗黒物質の直接探索では b 軸を南北に固定した場合と東西に固定した場合の信号の違いを観測することで WIMP の探索実験を行うことができる。

(3) 結晶育成、異方性起源について

結晶の構造と異方性の起源の探求については東北大にて研究を進めた。最初に結晶のカットの向きと結晶軸の関係を確認するとともに、 ZnWO_4 が複屈折を示すことと、光学軸と結晶軸の関係を理解するに至った。複屈折を示す単斜晶系結晶の探索を進めていく中で、発光量の異方性を示すのは単斜晶系の中でも ZnWO_4 、 MgWO_4 、 CdWO_4 などの Wolframite 型の結晶であって、 CaWO_4 、 BaWO_4 、 PbWO_4 などの Scheelite 型の結晶では見られないことが分かった。Scheelite 型の結晶では結晶内の W-O 結合の距離がすべて等しいのに対し、Wolframite 型の結晶は W-O 結合に 2 種類の距離があり、これが発光異方性の元である可能性があると考えられる。

一方、低バックグラウンド化を見据え、Czochralski 法により、半インチサイズの ZnWO_4 結晶の育成を行い炉内の温度勾配、育成雰囲気、ロッドの回転速度、引き上げ速度等の結晶育成条件の検討を行った。また上記 W-O 結合の距離を人為的に変更した結晶として Zn^{2+} サイトを Mg^{2+} に置換した ($\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x$) WO_4 結晶の育成に取り組み成功した。

(4) 時定数の異方性について

中性子応答を調べる中、 ZnWO_4 結晶の発光減衰時定数の精査も行った。 α 線源を各結晶面に照射した際の発光減衰波形を 3000 イベント記録し、それを平均化した波形を用意し、3 成分の減衰時定数でフィットすることで減衰時定数を求めた。その結果、図 8 に示すように、時定数の主成分は入射面によって異なり、発光量の最も多い B 面への照射時が最も長く $24.5 \pm 0.2 \mu\text{sec}$ 、A 面では $24.5 \pm 0.2 \mu\text{sec}$ 、C 面では $22.1 \pm 0.3 \mu\text{sec}$ となった。また γ 線については

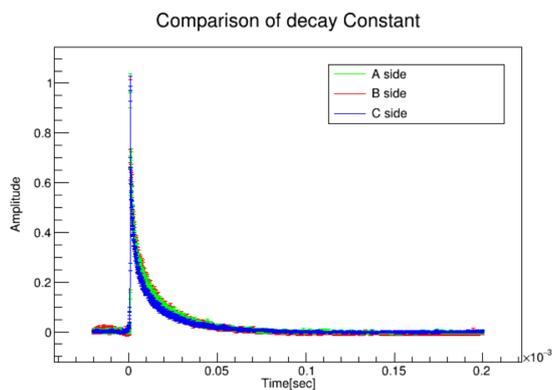


図 8 α 線に対する発光時定数の照射面による違い

$24.6 \pm 0.1 \mu\text{sec}$ であり、 α 線の B 面照射時と減衰時定数に近いことが分かった。このことから、発光量と減衰時定数にも関係があり、発光量の異方性の起源に迫ることができた。また、 ZnWO_4 の発光減衰時定数に関しては [Holl et al., IEEE TNS35, 105(1988), Shkulkova et al., IEEE TNS56, 994(2009)] などの先行研究があったが、その報告値が $20 \sim 25 \mu\text{sec}$ と異なっていたが、測定時の照射面等、異方性についての配慮がなされていなかったことに起因すると思われる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 2件）

1. 著者名 Pedersen Juan W, Sekiya Hiroyuki, Ichimura Koichi	4. 巻 2020
2. 論文標題 Anisotropic response measurements of ZnWO ₄ scintillators to neutrons for developing a direction-sensitive dark matter detector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptz168	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ichimura Koichi, Sekiya Hiroyuki, Pedersen Juan W., Yamaji Akihiro, Kurosawa Shunsuke	4. 巻 67
2. 論文標題 Measurement of the Anisotropic Response of the ZnWO ₄ Crystal for Developing the Direction-Sensitive Dark Matter Detector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 894 ~ 897
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TNS.2020.2985027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 芝田 皆人
2. 発表標題 暗黒物質方向感度検出器の開発に向けたZnWO ₄ シンチレータの単色中性子ビーム応答測定
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会（2021年）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 芝田 皆人
2. 発表標題 暗黒物質方向感度検出器開発のためのZnWO ₄ シンチレーター発光基礎特性の測定
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 黒澤俊介
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shunsuke Kurosawa
2. 発表標題 Study on Zinc Tungstate Crystals for Direction-Sensitive Dark Matter Search
3. 学会等名 The 17th Symposium on Radiation Measurements and Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shunsuke Kurosawa
2. 発表標題 Direction-Sensitive Dark Matter Search Using Tungstate Scintillator
3. 学会等名 VC12019 - The 15th Vienna Conference on Instrumentation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ピーターセン珠杏
2. 発表標題 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ZnWO ₄ シンチレータの異方性の測定
3. 学会等名 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
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒澤俊介
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第5回「極低放射能技術」研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒澤俊介
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ピーターセン珠杏
2. 発表標題 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ZnWO ₄ シンチレータの異方性の測定
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山路晃広
2. 発表標題 方向感度シンチレータ開発に向けたMg置換ZnWO ₄ 結晶の育成
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jin-A Jeon
2. 発表標題 Low Temperature Measurement on Directional Dependence of Phonon-Scintillation Signals from a Zinc Tungstate Crystal
3. 学会等名 Sixth International Workshop on Directional Detection of Dark Matter(CYGNUS2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 関谷洋之
2. 発表標題 ZnWO4 結晶による方向感度暗黒物質探索
3. 学会等名 第12回CRC将来計画 タウンミーティング
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 関谷洋之
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会大会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

結晶シンチレータによる方向感度暗黒物質検出器の開発 http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/~sekiya_s/DirectionalDM/
--

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	山路 晃広 (Akihiro Yamaji) (20779722)	東北大学・金属材料研究所・助教 (11301)	

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			
韓国	Institute for Basic Science			