

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18768

研究課題名（和文）フッ素を含む大質量暗黒物質検出器の基礎開発

研究課題名（英文）Development of a large mass dark matter detector containing fluorine

研究代表者

身内 賢太郎（Miuchi, Kentaro）

神戸大学・理学研究科・准教授

研究者番号：80362440

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、宇宙の組成の1/4を占める未発見の素粒子「暗黒物質」の発見及び性質解明を究極の目標として研究を進めた。暗黒物質の発見および性質解明に重要となる方向に感度を持つ手法の感度を向上させるために、新しい技術の検出器「液化CF₄検出器」の実現のための基礎開発を行った。CF₄ガスの光量測定のために、光電子検出器2ヶを用いた冷却可能な検出器を新しく製作し、ガンマ線の検出によって、検出器応答を測定、暗黒物質検出器としての使用可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、宇宙の組成の1/4を占める未発見の素粒子「暗黒物質」の発見及び性質解明を究極の目標として研究を進めた。暗黒物質の発見および性質解明に重要となる方向に感度を持つ手法の感度を向上させるために、新しい技術の検出器「液化CF₄検出器」の実現のための基礎開発を行った。こうした結果は、宇宙の大きな謎である暗黒物質の正体解明に対する大きな一歩となった。

研究成果の概要（英文）：The ultimate goal of this work is to detect and reveal the nature of the unknown material in the universe, the dark matter. The dark matter is known to contribute one fourth of the total energy in the universe. We developed a prototype detector with two photomultiplier tubes aiming a realization of a liquid CF₄ scintillation detector. We measured the performance of this prototype detector with gamma-ray sources. This device should be a breakthrough technology towards the discovery of the dark matter. Development of a low background and large volume detector would enable us to start the investigation of the indicated region.

研究分野：宇宙素粒子物理学

キーワード：暗黒物質 シンチレーション検出器 粒子検出器 素粒子実験 宇宙線実験

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

宇宙のエネルギー密度の約 1/4 は、未知の素粒子「暗黒物質」で構成されている。暗黒物質の正体を解明するために、世界中で多くの研究がなされている。その中でも暗黒物質と原子核との弾性散乱による反跳原子核を検出する手法は「直接探索」と呼ばれ、大質量検出器による制限が大きく進み、14 サイクルの季節変動を報告しているイタリアの DAMA 実験の結果などがある。一方で、液体キセノンを用いた実験が感度を飛躍的に向上させており、原子核依存を残すものの、DAMA 領域の排除という結果を与えている。

また、スピんに依存した反応に注目すると、暗黒物質の性質によってはキセノンよりもフッ素が有利に働く場合があり、PICO と呼ばれるフッ素を含むバブルチェンバー（エネルギー情報を取得できない閾値型検出器）を用いた実験も感度をのぼしている。知名度としては液体キセノンを用いた実験が上だが、数年以内に PICO 実験によって暗黒物質発見の示唆がなされる可能性もある。こうした場合には、フッ素を含み、エネルギー情報を取得可能な実験による検証が必要であるが、こうした検出器の開発は世界的に行われていない。

2. 研究の目的

本研究は、フッ素を含む気体として、発光及び電離電子の検出が実証されている CF_4 ガスを液化し、大質量検出器として用いるための基礎研究を行う。キセノンの例では液化による発光量の変化は大きくないなど、液化 CF_4 が検出器として動作する可能性は十分に持つ一方で、検出器としての性能評価が行われていない、萌芽的な研究である。本研究では、フッ素を含む大質量検出器の有力な材料として液化 CF_4 (沸点 145K) に着目、その性質を研究する。液体希ガス検出器としてキセノン（沸点 165K）が用いられているが、 CF_4 に関しては検出器としての性能はこれまで調べられていない。本研究では、液体 CF_4 の発光量を測定することを目標とし、低温での CF_4 の発光量測定を行った。

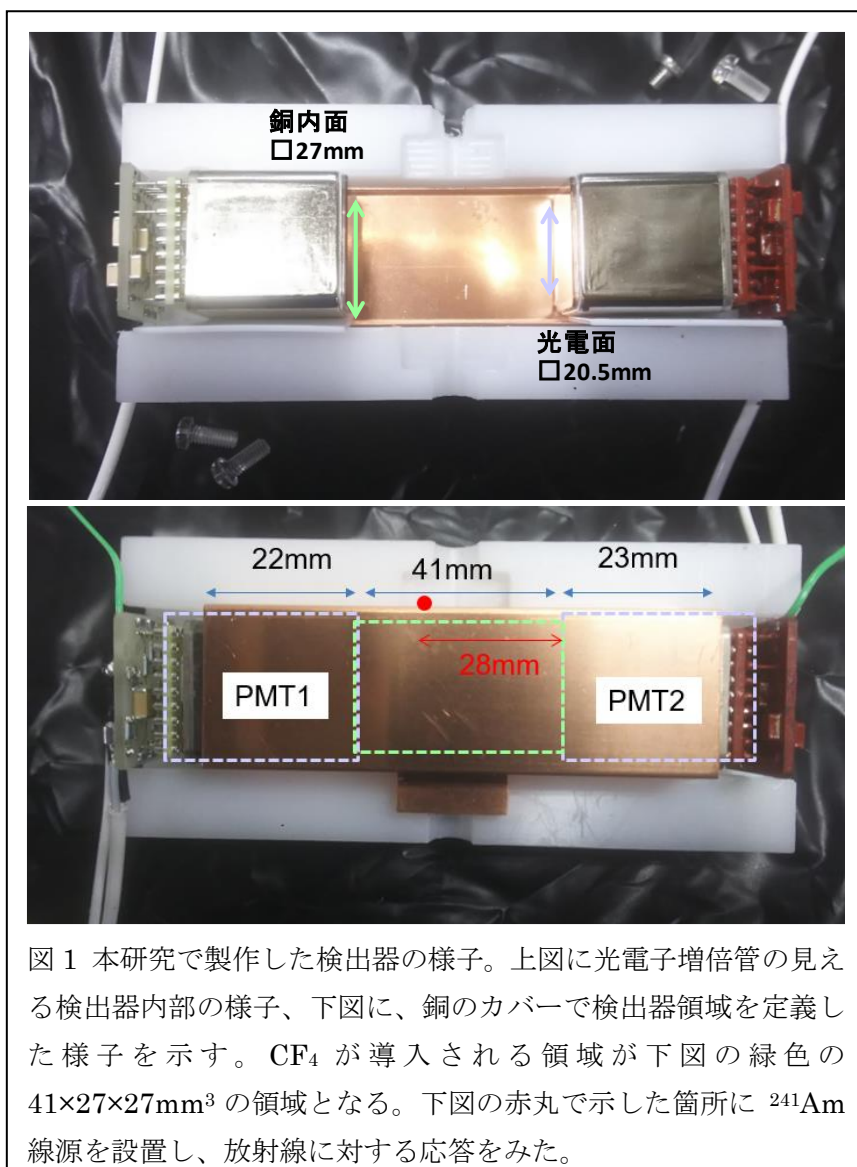


図1 本研究で製作した検出器の様子。上図に光電子増倍管の見える検出器内部の様子、下図に、銅のカバーで検出器領域を定義した様子を示す。 CF_4 が導入される領域が下図の緑色の $41 \times 27 \times 27 \text{mm}^3$ の領域となる。下図の赤丸で示した箇所に ^{241}Am 線源を設置し、放射線に対する応答をみた。

3. 研究の方法

本研究では、図1に示すような検出器を製作して、放射線による光量測定を行った。 CF_4 の導入される領域は、図に示すようにコの字型の銅部品2ヶで構成し、 $41 \times 27 \times 27 \text{mm}^3$ の領域とした（以降検出領域と呼ぶ）。直方体の検出領域の端面2面に光電子増倍管（浜松ホトニクス社製 R8520-406）配し、検出領域内で発生した光子を検出する構成とした。図1の赤丸で示す箇所

に ^{241}Am 線源及び緑色 LED を設置し、放射線への応答及び光応答の較正を行った。検出領域中心から、 $20.5 \times 20.5 \text{mm}^2$ の光電を直接見込む立体角は約 8% である。銅面での光子の反射率、 CF_4 内での光子の平均自由行程は不明であるため、1 つの光電子増倍管への光の入射割合に関しては不正性が残る。

こうして構成された検出器は、液化 CF_4 の量を減らすためのフィルターとしてのポリエチレンの構造体の中に設置され、既製品の ICF 真空配管に入れられた。図 2 に示す通り、パルスチューブ冷凍のコールドヘッドと内部の銅構造体が銅のコールドフィンガーを通じて熱的に接続された。容器は外真空容器内部に設置、検出器の冷却を行った。

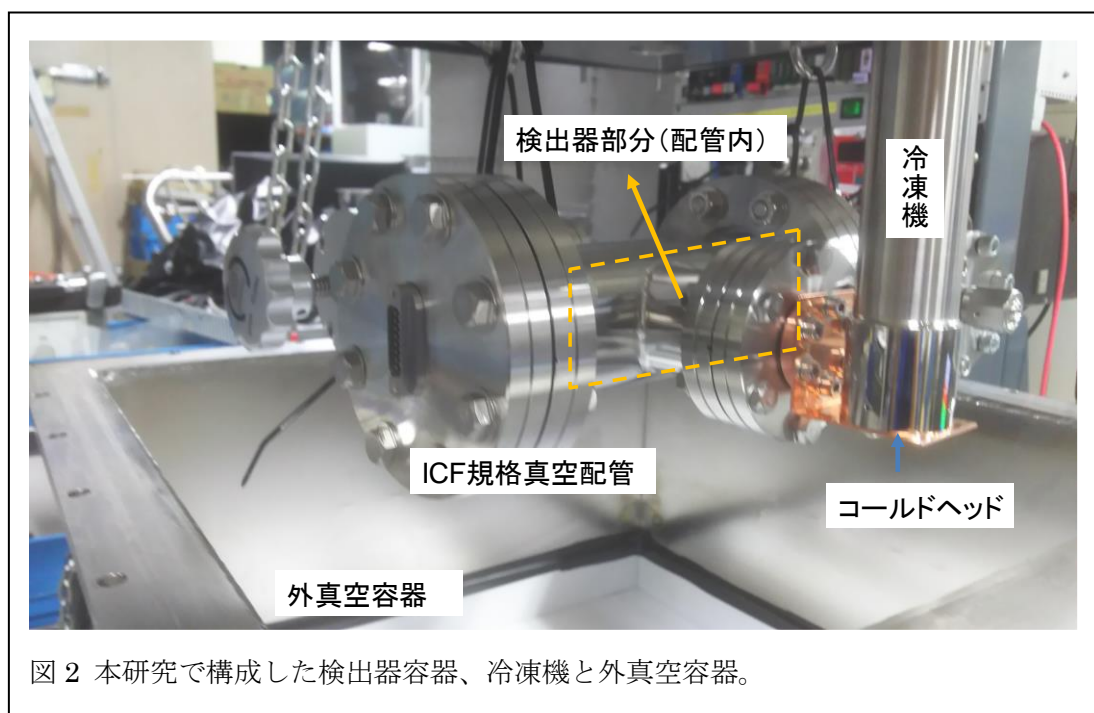


図 2 本研究で構成した検出器容器、冷凍機と外真空容器。

4. 研究成果

2 ケの光電子増倍管は、LED によってゲインの調整が行われ、いずれも約 10^7 のゲインで動作させた。この光電子増倍管からの信号は、電圧増幅率 5 倍のアンプを通して波形を取得した。この時の光電子数 (p. e.) と電荷量の関係は、 5pC/p. e. であった。

この際、トリガーとしては 2 ケの光電子増倍管の同時計測を用いることで、 ^{241}Am からの信号を

検出した。 α 線による、発光量の大きい信号を規定よりも小さいゲインでの測定で確認したのち、 60keV のガンマ線を検出した。図 3 に一つの光電子増倍管 (PMT2) で検出されたガンマ線のエネルギースペクトルを示す。上記電荷量と光電子数の関係より、 60keV のガンマ線に対して、約 50 個の光電子が観測されていることが分かる。エネルギー分解能は約 8% (σ) であった。詳細に関してはさらに詳しい測定および観測が必要であるが、本観測から電子換算で 10keV を下回る

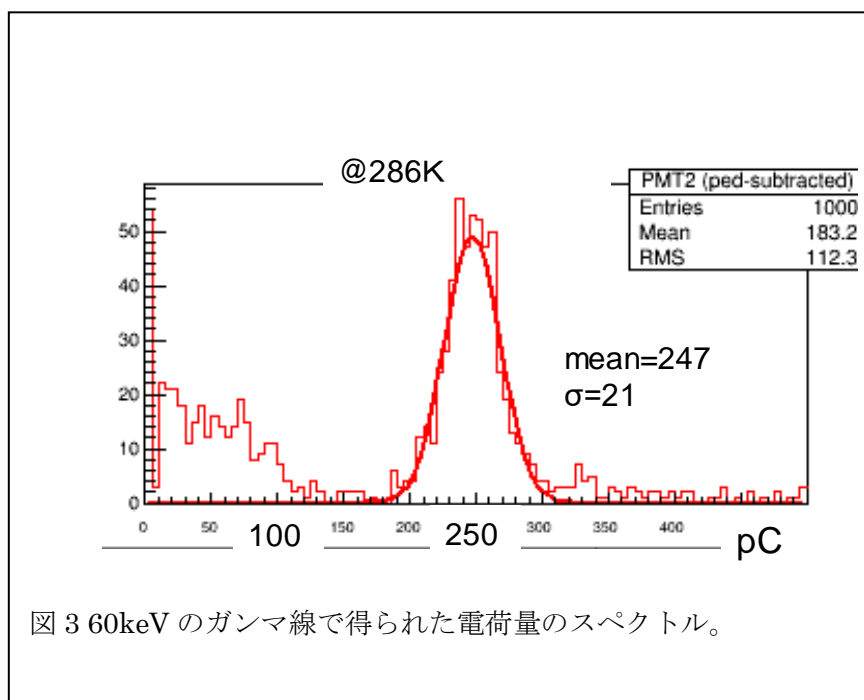


図 3 60keV のガンマ線で得られた電荷量のスペクトル。

エネルギー閾値が達成可能であることが示唆された。また、室温から 10 度程度温度を下げるだけで得られる光電子数が 30%程度向上するという興味深い結果も得られた。光電面被覆率の向上や CF₄ の純化などによって、光量の増加が見込まれるため、フッ素を含んだ大質量暗黒物質検出器として使用可能である可能性を示すことができ、萌芽的挑戦研究としては十分な成果を得られたと言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 身内賢太郎、濱口幸一	4. 巻 75
2. 論文標題 宇宙のダークマター直接探索の現状	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 68-76
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 身内賢太郎
2. 発表標題 いま、探すべきDM質量領域
3. 学会等名 2018年度年度 早稲田大学素粒子物理実験研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 高原文郎、家正則、小玉英雄、高橋忠幸 編（5.6.1 暗黒物質直接探索 の項執筆(p762-767)）	4. 発行年 2020年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 912
3. 書名 宇宙物理学ハンドブック	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----