

令和 4 年 5 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01917

研究課題名(和文)フッ化物結晶を用いた軽い暗黒物質の探索

研究課題名(英文)Search for light dark matter using fluoride crystals

研究代表者

石徹白 晃治 (ISHIDOSHIRO, Koji)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授

研究者番号：20634504

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：スピンの依存した相互作用を通じた軽い暗黒物質探索のために、フッ化カルシウム基板に直接、超伝導センサー(超伝導力学的インダクタンスセンサー)を取り付けることを提案した。試作機を理化学研究所のクリーンルームで作成し、東北大学の希釈冷凍機で動作実証を行い、アイデアが正しいことを検証することに成功した。実際、 ^{55}Fe 線源から5.9KeV X線を検出することに成功し、実用的にも十分な性能を持つことを確認した。そのほかに、RFSocを使った読み出し技術、将来の低エネルギー校正のための単独電子発生装置の開発を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

暗黒物質の正体を解明することは、宇宙の進化を解き明かす鍵となる。しかし、非常な努力にも関わらずその正体は未だ未知の部分が多い。本研究は、そのような暗黒物質を探索するための新しい方法を提案し、その方法の実現性を実際に検証したものである。これにより、暗黒物質解明のための新しい道具を得たこととなる。

研究成果の概要(英文)：To search for light dark matter through spin-dependent interactions, we proposed to attach a superconducting sensor (kinetic inductance detector) directly to a calcium fluoride substrate. The prototype was fabricated in a clean room at RIKEN and demonstrated in a dilution refrigerator at Tohoku University. We experimentally validated the idea. In fact, we succeeded in detecting 5.9 KeV X-rays from a ^{55}Fe source and confirmed that the performance is sufficient for dark matter search. In addition, we have developed a readout technique using RFSoc and a single electron generator for future low-energy calibration.

研究分野：素粒子物理、宇宙物理

キーワード：暗黒物質 超伝導センサー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の天文・宇宙観測により、暗黒物質は宇宙全体の約 1/4 を占めていることが明らかになった。それ以降、最有力の 10-1000 GeV 程度の質量を持つ素粒子的暗黒物質に焦点を当てた直接検出実験や加速器実験が急激に進んでいる。しかし、非常な努力にも関わらず暗黒物質の実験的兆候は未だ発見されていない。そこで、より広い視野に立ち暗黒物質の正体を探ることが重要になってきている。特に、Freeze-in シナリオや SIMP モデルにおいて GeV 以下の軽い暗黒物質を自然に導く。

2. 研究の目的

本研究は軽い暗黒物質に特化した新しい探索実験のセットアップを確立することをも目的とする。特に、他の暗黒物質探索と比較して「フッ素ターゲット」を使ったスピンの依存する相互作用を通じた探索であること、「ターゲットを超伝導センサーの基板」であることと「最新の超伝導力学的インダクタンスセンサーを使用」することで将来の拡張性を重視したセットアップとなっている。

また、さらなる将来へ向けた低エネルギー電子を使ったキャリブレーションを実証することも目的としている。

3. 研究の方法

光学用のフッ化カルシウム板材を入手し、埼玉大学の協力のもと理科学研究所のクリーンルームで超伝導力学的インダクタンスセンサーを取り付ける。また、フッ化カルシウムはシンチレーション結晶でもあり、そのシンチレーション光を検出するためのセンサーとして通常のシリコン基板に超伝導力学的インダクタンスセンサーを取り付けたものも用意した。

ここで製作したセンサーを東北大学ニュートリノ科学研究センターが持っている希釈冷凍機で性能を評価する。性能評価としては ^{55}Fe 線源を使った X 線照射に対する応答、力学的インダクタンスが準粒子数に依存することから温度を変えて準粒子変化に対する応答性評価、読み出しに使う RF 信号パワーに対する雑音の違いなどを定量的に評価した。この性能評価の結果をデザインにフィードバックして、再度、理科学研究所のクリーンルームで新しいセンサーを作るという方法で研究を進めた。

また、将来の低エネルギー電子を使ったキャリブレーションのため単電子発生装置を開発する。UV 光を仕事関数の小さい銅や六ホウ化ランタンに照射して、光電効果で単電子を発生させる。単電子測定のために MCP を使った測定システムの準備を行い、光源、光量やターゲットなどの定量的な評価を行うという方法であった。

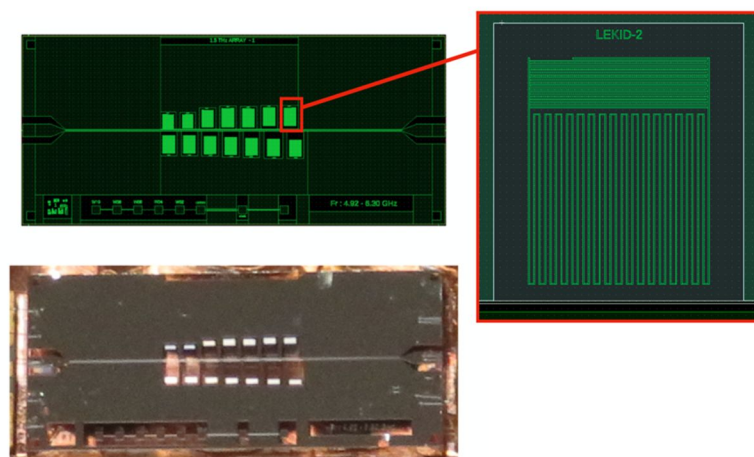


図1 フッ化カルシウム板材の上に実装した超伝導力学的インダクタンスセンサーとそのデザイン。

4. 研究成果

フッ化カルシウム板材に超伝導力学的インダクタンスセンサーを取り付ける方法を確立した(図1)。この期間、東北大での測定系は東北大学のソーブション冷凍機から希釈冷凍機を使ったものに改良が進んだ(図2)。最終的な性能は、 ^{55}Fe 線源からの 5.9keV X 線を実際に見える約 1keV 閾値を実現した。これは、本研究開始以降に海外のグループで進められた Li_2MoO_4 結晶を使った実験の 0.932keV と同等の値である。また、光検出用のセンサーでは受光面積こそ小さ

いものの 10eV 閾値という実用的には十分な性能を実証した。以上をまとめて、当初の予定であった新しい探索実験のセットアップに成功した。

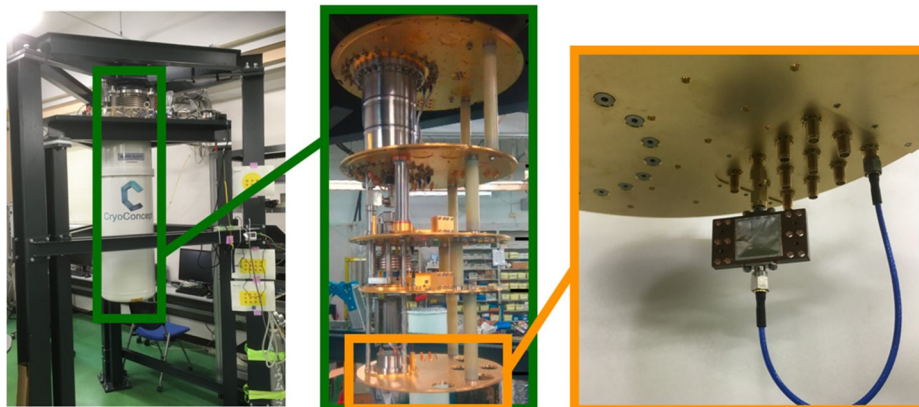


図2 東北大学希釈冷凍機とそこにセットアップした試作センサーの様子

また、Xilinx 社が提供を開始した RF-System on chip (RFSoc)に着目した。RFSoc は高速 ADC、高速 DAC、FPGA、CPU が一体となったチップであり、GS/s を超える ADC/DAC の速度を使うことで、超伝導力学的インダクタンスセンサーの多重読み出しに力を発揮すると考えられる。RFSoc の評価ボード (ZCU111) を用意して、超伝導力学的インダクタンスセンサーの読み出しをテストした。期待通り広い帯域を使って、多重読み出しに適していることを実証することに成功した (図3)。DAQ を含めた実用的な読み出しシステムとするのが、暗黒物質探索の観点からも今後の課題である。

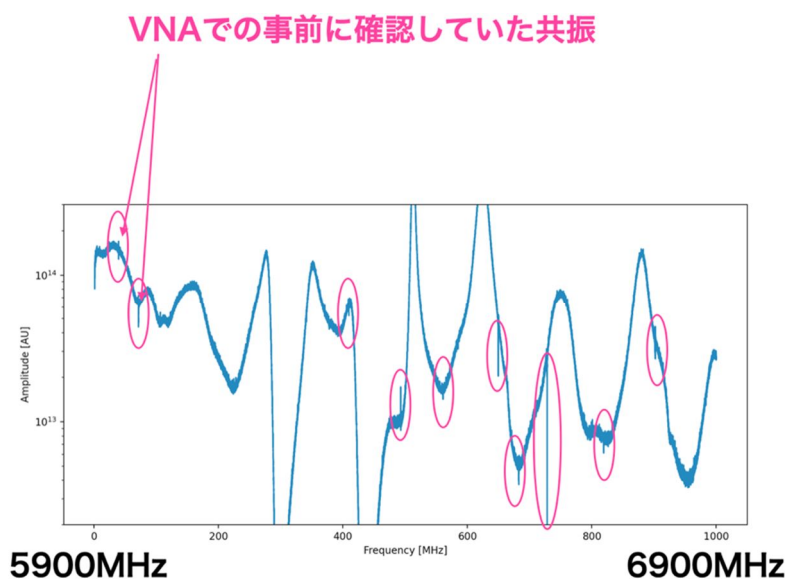


図3：RFSoc で実現した広帯域一括測定の実例
(各地の定在波は非常に暫定的なセットアップで測定したために発生したものである)

低エネルギー電子を使ったキャリブレーション装置の開発は、装置のプロトタイプまで製作した。しかし、到達真空度が想定より悪く、実際の動作実証まではいたらなかった。現在は、真空度は改善し、MCP システムの要求を満たすところまで行くことができている。本研究で進めたプロトタイプをベースに今後も開発を進める予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 K. Ishidoshiro
2. 発表標題 Kinetic inductance detectors on CaF ₂ for spin-dependent dark matter search
3. 学会等名 18th International Workshop on Low Temperature Detectors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ishidoshiro
2. 発表標題 Kinetic inductance detectors on fluoride crystal for spin-dependent dark matter search
3. 学会等名 16th International conference on Topics in Astroparticle and underground physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石徹白晃治
2. 発表標題 暗黒物質探索を目指した超伝導検出器の開発
3. 学会等名 新学術「地下宇宙」第1回低温技術研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石徹白晃治
2. 発表標題 低放射能希釈冷凍機と超伝導検出器
3. 学会等名 新学術「地下宇宙」2021年領域研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zulfakri Mohamad
2. 発表標題 Progress of kinetic inductance detectors on CaF2 for astroparticle physics
3. 学会等名 International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physic 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河村 優貴、美馬 寛、大谷 知行、石徹白 晃治、Mohamado Zulfakri、細川 佳志、成瀬 雅人、明連 広昭、田井野 徹
2. 発表標題 暗黒物質探索用LEKIDの作製に関する研究
3. 学会等名 2020年第81回応用物理学会秋季学術講演会、
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉野将生、山路晃広、石徹白晃治
2. 発表標題 軽い暗黒物質探索のためのフッ化物単結晶の育成と評価
3. 学会等名 第6回東北大学若手研究者アンサンブルワークショップ
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔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
研究 分 担 者	上野 一樹	大阪大学・理学研究科・准教授	
	(Ueno Kazuki)		
	(20587464)	(14401)	

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