

令和元年5月30日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13794

研究課題名（和文）超伝導検出器を用いた軽い暗黒物質探索

研究課題名（英文）Search for low-mass dark matter with superconducting detectors

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・助教

研究者番号：20634504

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：世界中でGeVスケールの質量を持つWIMP暗黒物質の直接探索実験が進んでいる。しかし、非常な努力にも関わらずWIMP暗黒物質の兆候は発見されていない。そこで、本研究では目先を変えて、近年理論的な注目の集まるGeV以下の軽い暗黒物質に注目する。軽い暗黒物質探索には低エネルギー閾値の検出器が必要になる。それを超伝導素子で実現するために、作成環境、低温環境、読み出し環境を構築した。また、放射線をあてて実際に検出器が放射線に反応することを定量的に確認した。これにより、軽い暗黒物質を探る最初のステップを進むことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

天文学・素粒子・宇宙論にとって重要な暗黒物質の正体を探るための新しい実験の可能性を示すことができた。特に、超伝導素子を使うことで、既存の検出器より小型でかつ軽い暗黒物質を探索できることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：Recently, there are many dark matter experiments targeting a WIMP dark matter. However, they have not found the evidence of the WIMP dark matter. Thus, we focus on light dark matter under the GeV scale. For that study, low energy threshold detectors are one of the key. We use superconducting detector. We developed fabrication system, low-temperature system, readout system for superconducting detectors. In addition, we validated the detector is sensitive to particle with gamma-ray tests. Therefore, the initial test is find.

研究分野：宇宙線

キーワード：超伝導素子 低温検出器 暗黒物質

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

長年の暗黒物質直線探索実験(例えば, XMASS, LUX やSuperCDMS など) や加速器実験(LHC など) がまったく暗黒物質の兆候を発見できない時点で, 目先を変えて未探索の軽い暗黒物質を研究することは, 新しい発見へとつながる可能性がある. 特に, WIMP 以外では最有力である非対称暗黒物質や近年注目されはじめてるSIMP 暗黒物質の探索を行う. 非対称暗黒物質が検出できると, 暗黒物質問題だけでなく, 「宇宙の物質, 反物質の謎」という素粒子・宇宙論の大問題を解決できる. また, SIMP暗黒物質は WIMP 暗黒物質では説明できない矮小銀河の暗黒物質問題を解決できるものとして注目されている.

2. 研究の目的

本研究では, 超伝導クーパー対解離を応用した新しい超伝導放射線検出器を開発し, 軽い暗黒物質探索実験を切り開く. この超伝導放射線検出器は, 暗黒物質との反応で作られた反跳電子による超伝導材アルミニウムのクーパー対解離を, 超伝導検出器MKID でフォノン信号として読み取るものである. アルミニウムはギャップエネルギーが他の超伝導体と比べて低く($2\Delta=0.36$ meV), エネルギー閾値を下げるのに有利である. また, フォノン検出器として用いる超伝導検出器MKID は, フォノンの入射により生じる系の力学的インダクタンス変化を共振周波数変化として読み出す. 数あるフォノン検出器からMKID を選ぶのは, 以下の点で有利であるからである. 1) 広いダイナミックレンジが実現可能で, バックグラウンドを調べるのに有利. 2) アレイ化が容易で, 波高や到達時間情報で反応点再構成が可能. これは表面のバックグラウンドをタグできることを意味する. 3) 共振周波数を変えることで, 多重読み出しが可能. これにより読み出しケーブルを極小化して, 熱流入を低減しより低温化が可能.

3. 研究の方法

本研究では, 超伝導放射線検出器が動作する低温系と読み出しシステムを確立して, 実際にMKID ベースの超伝導検出器を動かすことを目標とする. また, 今後の効率的な進捗のために, 自作で超伝導素子を作れる環境の構築も目指す.

4. 研究成果

^3He ソープション冷凍機と希釈冷凍機の2つの低温測定環境 (図1, 2)を整えることができた. また, 東北大学 西澤潤一記念研究センターにおいて自作で超伝送素子を作れる環境を構築した(図2, 3).

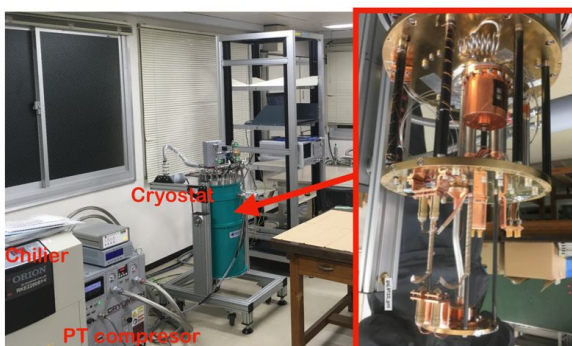


図1 ソープション冷凍機

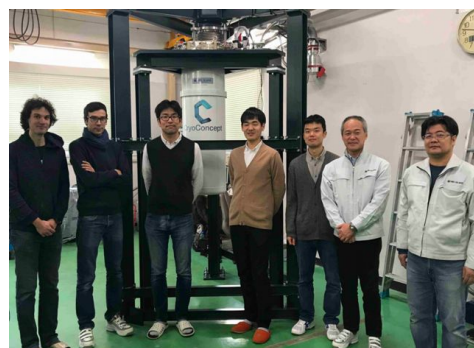


図2 希釈冷凍機

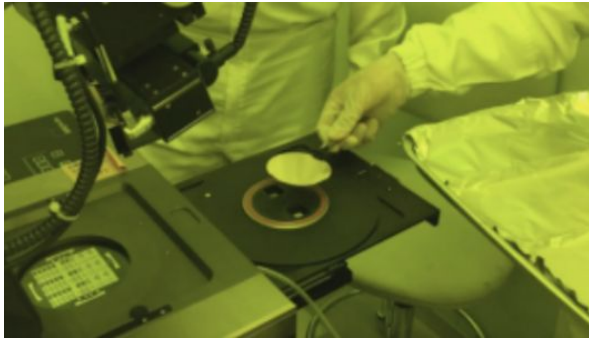


図3 西澤センターでの素子作成の様子

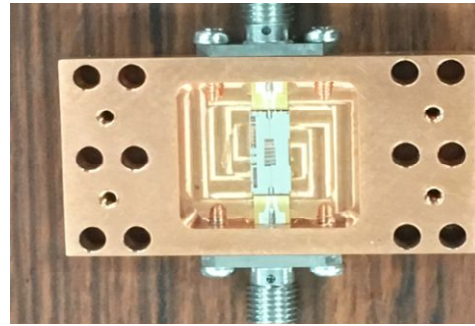


図4 治具に取り付けた素子

また、GroundBIRD 実験グループが開発した読み出し電子回路を応用し、東北大学で読み出し環境を構築した。その後、西澤潤一記念研究センターと理化学研究所で作成した超伝導素子を使い、MKIDの基礎的な性能評価を行った。結果、自作した超伝導素子でも十分な性能を発揮することを確認することができた。また、現状は放射線の応答に最適化していないが、Si 基盤にMKIDを取り付けて、放射線に応答を示すことを確認することができた。

さらに、CaF₂ 結晶へのMKID素子取り付けを試みた。48Caは二重崩壊核で、Fはスピンの依存する反応で暗黒物質に高い感度を持つ。そのために、CaF₂に超伝導素子を取り付けられたら、宇宙素粒子実験に新しい可能性を示すことになる。我々は実際にCaF₂結晶にMKIDを取り付けることに成功した。また、その性能がSiにMKIDを取り付けた場合とほぼ同じような高性能を持つことを確認することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

[1] Keishi Hosokawa, Koji Ishidoshiro, Atsushi Suzuki, Satoru Mima, Yasuhiro Kishimoto “Dark Matter Search with Superconducting Detector”, International conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics, Springer, Singapore, 97-100, 査読無, https://doi.org/10.1007/978-981-13-1316-5_18

〔学会発表〕(計 11 件)

- [1] K. Ishidoshiro, “Lumped element kinetic inductance detectors on CaF₂ for neutrino-less double-beta decay and spin-dependent dark matter search” The Vienna Conference on Instrumentation, 2019
- [2] 細川 佳志, “超伝導検出器を用いた暗黒物質探索実験”, 日本物理学会 第73回年次大会, 2018
- [3] 石徹白 晃治, “無機結晶を基材とする超伝導検出器の開発”, SMART2017, 2017
- [4] 石徹白 晃治, “無ニュートリノ2重ベータ崩壊及び軽い暗黒物質探索を目指した超伝導放射線検出器の開発”, 超伝導エレクトロニクス研究会, 2017
- [5] 細川 佳志, “Dark matter search with superconducting detector”, International conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics, 2017

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

アウトリート

[1] 石徹白晃治, 熊本工業高等専門学校「ニュートリノで探る宇宙・素粒子の謎」, 出前授業, 2018 年

[2] 石徹白晃治, 仙台市天文台×東北大学大学院理学研究科公開サイエンス講座第 4 回「ニュートリノからさぐる宇宙の謎」, ニュートリノで予報する超新星爆発, 2017 年

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：美馬 覚

ローマ字氏名：Mima Satoru

所属研究機関名：国立研究開発法人理化学研究所

部局名：光量子工学研究領域

職名：研究員

研究者番号（8 桁）：50721578

(2)研究協力者

研究協力者氏名：中村 公亮

ローマ字氏名：Nakamura Kosuke

研究協力者氏名：細川 佳志

ローマ字氏名：Hosokawa Keishi

研究協力者氏名：鈴木 貴士

ローマ字氏名：Suzuki Atsushi

研究協力者氏名：大野 敦

ローマ字氏名：Ohno Atsushi

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。