

平成 30 年 5 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2017

課題番号：16H06001

研究課題名(和文)超伝導ボロメータ技術を用いた高感度マヨラナニュートリノ探索

研究課題名(英文)High sensitive search for Majorana neutrinos 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) 19,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的はニュートリノのマヨラナ性(マヨラナニュートリノ)を証明することで、素粒子物理学に残された「軽いニュートリノ質量」と「物質優勢宇宙」という大きな問題を解決に導くことである。マヨラナニュートリノを示すには、特定原子核(例えば ^{76}Ge や ^{136}Xe)のニュートリノ放出を伴わない2重(0 ν 2 β)崩壊事象の検出すれば良いことが知られている。本研究では、最新超伝導検出器MKIDを放射線検出器で応用することの原理実証に成功した。また、NdGaO₃やCaF₂などの2重崩壊核を含む結晶を基板として超伝導検出器の作成にも成功した。

研究成果の概要(英文)：Majorana neutrinos could play the central role in explaining the origin of our matter-dominated universe and light neutrino mass. Neutrinoless-double-beta decay is only unique scheme to study Majorana neutrino. We proposed the new experiment based on superconducting detector for high sensitive search. We have demonstrated the use of superconducting detector, here we use Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID), as high performance radiation detector. We have also validated to fabricate MKID on NdGaO₃ and CaF₂, which includes the double beta decay nucleus.

研究分野：ニュートリノ

キーワード：超伝導検出器 ニュートリノ マヨラナニュートリノ

1. 研究開始当初の背景

近年明らかになったニュートリノの振動現象はニュートリノが質量を持つということの決定的な証拠であり、ニュートリノ質量を0と仮定している素粒子の標準理論を越えた枠組みを要求する。同時に宇宙論や崩壊の研究から来るニュートリノ質量の上限は、他のクォークやレプトンと比べてニュートリノが桁違いに軽いことを示している。このことはニュートリノが質量を持ち、しかも特別軽いという二重の問題を意味している。「軽いニュートリノ質量」問題を解く鍵が、ニュートリノのマヨラナ性(粒子と反粒子に区別が無いという性質)にある。マヨラナ性を持つニュートリノ(マヨラナニュートリノ)はシーソー機構を通じて軽いニュートリノ質量を自然に説明することができる。それだけでなく、マヨラナニュートリノはレプトン数の非保存を意味しており、「物質優勢宇宙(宇宙には反物質でなく物質が卓越しているという事実)」を説明できる可能性がある。

マヨラナニュートリノを証明する最良の方法として、原子核で起こる2重崩壊を利用する方法が良く知られている。2重崩壊は、原子核間の準位により単発の崩壊は禁止されるが2つ同時なら許容されるときに起こり、2つの反ニュートリノを放出する。マヨラナニュートリノであれば、この2つの反ニュートリノが互いに対消滅を起こし、ニュートリノ放出を伴わない2重(0ν2b)崩壊となり得る。この0ν2b崩壊はニュートリノがエネルギーを持ち出せないために、特徴的な高エネルギー事象として観測される。0ν2b崩壊こそマヨラナニュートリノの決定的証拠であり、世界中でのその探索実験が行われている。

申請者はいままで¹³⁶Xeの0ν2b崩壊探索実験(KamLAND-Zen)に参加しており、世界最高レベルでのマヨラナニュートリノ探索を成功に導いてきた。KamLAND-Zenのさらなる高感度化には、有限のエネルギー分解能に起

因する通常の2重崩壊(2ν2b)の染み出しが致命的な問題になる。染み出しを避けるためには、高いエネルギー分解能を持った検出器が必要不可欠となる。一方、海外では高いエネルギー分解能を持ったボロメータ検出器を用いた0ν2b崩壊探索実験も進んでいる。しかし、検出器表面に付着した放射性不純物に起因する線が大きなバックグラウンドとなっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は新規に開発されたNdF3結晶と最新の超伝導検出器MKIDを用いて、上記の困難を克服した新しい0ν2b崩壊検出器を実証することにある。NdF3結晶(図1)は東北大学金属材料研究所により開発が進められたもので、真空紫外の蛍光を出すことが知られている。MKIDは超伝導素子の運動学的インダクタが準粒子密度に依存することを利用する検出器で、共振回路となっている。外部からのエネルギー入射で、準粒子数が変化して、共振周波数が変化することから信号を読み出す。最大の特徴として、周波数空間に信号を分割するので、多重読み出しを容易に実現できることある。



図1 NdF3結晶を切り出したもの

3. 研究の方法

本研究では、

1. MKIDの放射線検出器として実証
2. NdF3結晶へのMKIDの取り付け
3. エネルギー分解能の評価

を行う。そのために、東北大学ニュートリノ科学研究センターにソーブションポンプ型³He 冷凍機を導入した。図2はMKID検出器を冷凍機内に設置したときの冷凍機内部の温度変化である。この図より、約20時間程度で³He ステージが0.3Kに達していることがわかる。

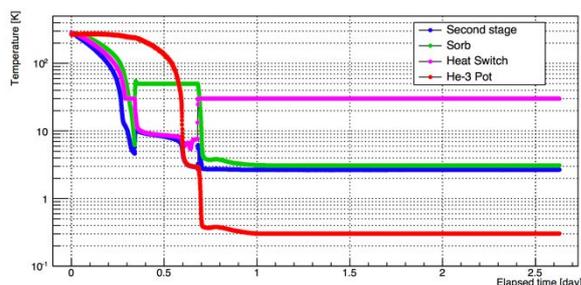


図2. 冷凍機内部の温度変化

また、超伝導素子の作成のために東北大学マイクロシステム融合研究開発センターの協力のもとに自分たち自身で試作が可能な環境を整えた。例として図3は自分たちで作ったMKID素子の写真である。

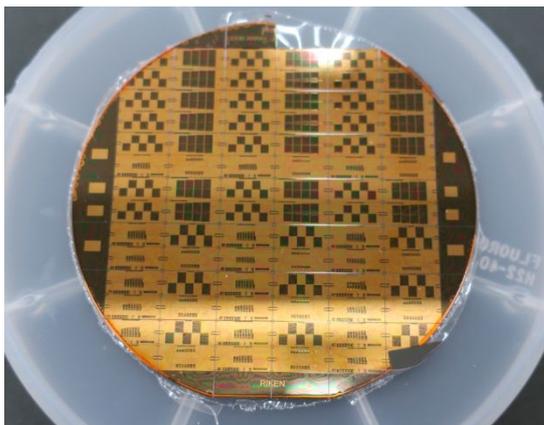


図3 作成した超伝導素子

作った素子をすぐに評価できるように読み出し系はGroundBIRD実験で実績のあるものをコピーした。読み出しシステムの概要は、図4でまとめたものである。

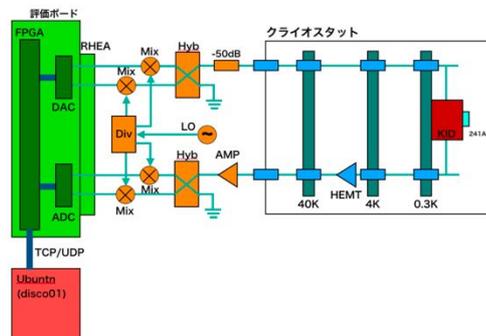


図4 読み出し系の概要

特にRHEAはGroundBIRDグループが独自開発した高周波多重読み出しの広帯域化に向けたアナログ電子回路である。

4. 研究成果

まず、Si基板をベースとしたAI-MKIDを治具に納め(図5)、冷凍機の0.3Kステージにマウントした。

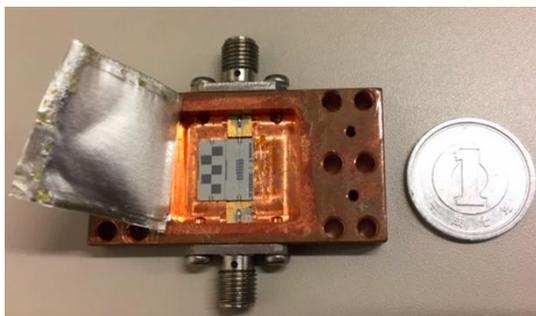


図5 Si基板上的AI-MKIDとその治具

これをもとにMKIDの基礎特性(Q値、共振周波数、準粒子寿命、雑音等価パワーなど)を評価した。さらに、²⁴¹Amを近傍においてその応答特性を調べた。図6は²⁴¹Amの59.5keV線の応答例である。

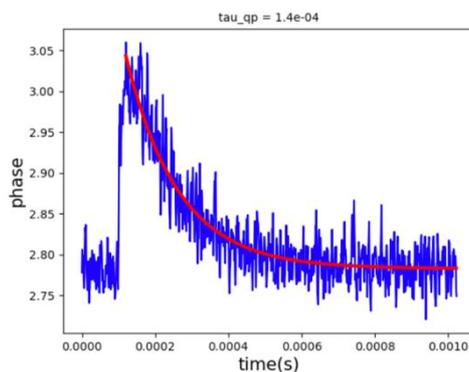


図6 線入射時の応答例

我々は、MKID を放射線検出器として使うこと
の原理的な実証には成功した。ただ現状では、
残念ながら熱雑音と迷光雑音のために雑音環
境はよくない。さらに、 ^{55}Fe の準備が遅
れたので、一点でしか応答特性が評価できな
かったために、応答の線形性やエネルギー分
解能などの評価は実現できなかった。雑音低
減の方法はわかっているので、今後は雑音低
減とその後の再測定、および ^{55}Fe を使った
評価で、放射線検出器としての性能を精査し
ていく予定である。

NdF₃ 結晶への MKID の取り付けは物理的には
うまくいった。ただし、実際に NdF₃ 結晶を
冷やしてみると、MKID の共振を見つけること
ができなかった。原因は不明だが、取り付け
の不具合、Nd の大きな磁化などが考えられる。
そこで、申請書の上手くいかなかった場合の
対処にしたがって、NdGaO₃ と CaF₂ 結晶など
で同一の評価を行なった。それらは NdF₃ と
異なり共振測定を発見し、放射線検出器とし
て使用可能であることを明らかにした。図 6
は NdGaO₃ の共振特性である。

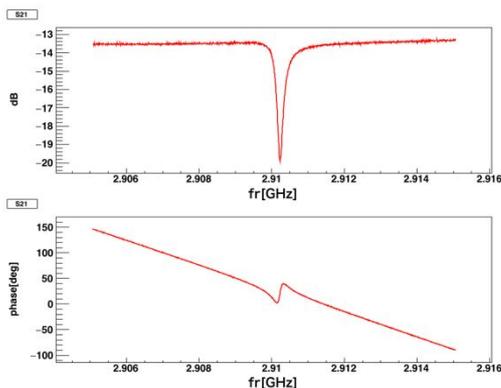


図 6 NdGaO₃ 基板の MKID の共振特性

今後は、CaF₂ に注視して、 ^{48}Ca の 0v2b 崩
壊探索の可能性や F を利用したスピンの依存
しない暗黒物質探索などへの展開を計画す
る。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に
は下線)

[雑誌論文](計 0 件)

[学会発表](計 10 件)

1. 石徹白晃治、0vbb やダークマター探索に
活かしたい、TIA かけはし事業「簡単・
便利な超伝導計測」研究会、2018
2. 杳間弘樹, 石徹白晃治, 大谷知行, 大野
敦, 岡田智香, 小栗秀悟, 官野史靖, 木
内健司, 鈴木惇也, 田島治, 長崎岳人,
服部誠, 細川佳志, 美馬覚、超伝導検出
器 MKIDs の磁場応答測定とシールド設計
の研究、日本物理学会第 73 回年次大会、
2018
3. 細川佳志, 石徹白晃治, 鈴木貴士, 大野
敦, 美馬覚, 岸本康宏、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
4. 細川佳志、Light DM、ダークマターの懇
談会、2017
5. 石徹白晃治、二重 崩壊探索と軽い暗黒
物質探索へ向けた超伝導検出器の開発、
新学術「地下素核研究」領域研究会、2017
6. Keishi Hosokawa、Dark matter search
with superconducting detector、
TIPP2017、2017
7. 石徹白晃治、超伝導ボロメータによる
0vbb 及び軽い DM の探索、CRC タウンミー
ティング、2017
8. 石徹白晃治、無ニュートリノ 2 重 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
9. 鈴木貴士、シンチレーション検出器用の
超伝導素開発、SMART2017、2017
10. 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

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

美馬 覚 (MIMA, Satoru)
国立研究開発法人理化学研究所・光量子工
学研究領域・特別研究院
研究者番号：50721578

細川 佳志 (HOSOKAWA, Keishi)
東北大学・ニュートリノ科学研究センタ
ー・教育研究支援者
研究者番号：80785105

(4) 研究協力者

鈴木 貴士 (Suzuki, Atsushi)
東北大学・ニュートリノ科学研究センタ
ー・技術一般職員