

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 7 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22684009

研究課題名（和文）

レニウムと超伝導検出器を用いたニュートリノ絶対質量の測定

研究課題名（英文）Measurement of neutrino absolute mass using superconducting detectors and Rhenium

研究代表者

石野 宏和 (Hirokazu Ishino)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：90323782

研究成果の概要（和文）：

ニュートリノは素粒子の一種でその性質は未だ謎で、その絶対質量さえ測定されていない。本研究では超伝導検出器を用いてニュートリノの質量を測定する野心的な研究を行うことを目的とする。超伝導検出器として超伝導結合素子と力学的インダクタンス検出器の開発を行った。前者は実機で測定したところ検出効率が予想より悪いことが分かった。一方で後者は、高い効率でフォノン信号を検出したが、精密なエネルギー測定にはより深い検出器の解釈が必要であることがわかった。

研究成果の概要（英文）：

Neutrino is one of the elementary particles. Its properties are not known in details; even its absolute mass it not measured. The purpose of this study is to measure the neutrino absolute mass using superconducting detectors. We have developed two kinds of detectors: superconducting tunnel junction and microwave kinetic inductance detectors. The former is found to have lower detection efficiency unexpectedly. The latter, on the other hand, has higher phonon detection efficiency. We found a precise measurement of the energy needs more deep interpretation of the detector performance.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2011年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2012年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
総計	19,700,000	5,910,000	25,610,000

研究分野：素粒子実験

科研費の分科・細目：

キーワード：

ニュートリノ、超伝導検出器

## 1. 研究開始当初の背景

ニュートリノは、素粒子の一種でその性質は未だ謎で、その絶対質量さえ測定されていない。ニュートリノ絶対質量は、これまでトリチウムを用いた実験で上限値 2eV が得られている。一方で、ニュートリノ振動実験に

よって、ニュートリノ質量の下限値 0.05eV が得られている。宇宙観測からは、上限値 0.23eV が得られている。ニュートリノの質量を測定することは、基本的な物理パラメータを測定するとともに、質量階層性・二重ベータ崩壊解明へとつながるので、大変重要であ

る。最近、カロリメトリックにベータ線の全エネルギーを測定することにより、トリチウム実験で主要であった系統誤差を取り除く方法が採用されつつある。特に TES ボロメータなどの超高感度な検出器を用いることにより、1eV 以下の質量を直接測定可能になりつつある。

## 2. 研究の目的

本研究は超伝導検出器を用いてニュートリノの質量を測定する野心的な研究を行うことを目的とする。ニュートリノの絶対質量を測定する1つの方法として、ベータ崩壊時に生じるベータ線と反跳原子核のエネルギーを精密に測定し、全エネルギーからそれを引き算することによって、ニュートリノの質量を測定する。レニウムは、全元素中最小の Q 値（ベータ崩壊に要するエネルギーで 2.6keV）を持つので、1eV 以下のニュートリノ質量を測定するのに適している。1eV のエネルギーを測定するには、エネルギー分解能が大変良くかつ立体角が大きな検出器を用いる必要がある。これまでは、ボロメータによって、ベータ線エネルギーによる温度上昇が測定されていたが、高い事象頻度に対応できなく、また多重読み出しが難しいという問題があった。そこで、本研究では、STJ（超伝導結合素子、Superconducting Tunnel Junction）を用いることにより、それらの欠点を解決する方法を提案した。STJ は、ボロメータより 1000 倍程度速い応答速度を持ち、かつ半導体を凌駕するエネルギー分解能を持つ。

## 3. 研究の方法

レニウム結晶に Al で作製した STJ を張り付けて、レニウム結晶内でレニウムがベータ崩壊して生じるフォノンを Al-STJ で検出する方法を提案した。この測定方法は、基板吸収型と呼ばれ、X線や  $\alpha$  線などは既にこの方法によって検出されており、検出原理は確認済みである。また、Al とレニウムはともに低温で超伝導となるが、レニウムの方が Al よりも若干転移温度が高いので、フォノンによるクーパ対解離で生じた準粒子を、ギャップエネルギーの井戸で閉じ込め、感度を高めることができるかと期待できた。そこで、本研究では最初に純 Al からなる STJ を作製し、 $\alpha$  線照射実験により、フォノンの検出原理を確立する。その後 STJ をレニウム結晶にはりつけ、エネルギーを測定する計画を立案した。申請者は、これまでミリ波検出用の STJ の開発を行ってきた

実績を持つため、これをニュートリノ質量測定に応用できないかと考え、この計画を提案した。

## 4. 研究成果

純 Al-STJ を設計・作製をした。これまでは、Nb-Al STJ は作製したことはあったが、純 Al で STJ を作製したことが無かったので、作製手順を確立することから始めた。Al 薄膜のスパッター条件、エッチング条件、ジャンクション形成に必要な参加条件について最適化を行い、Al-STJ の実機を作製した。

STJ のサイズは直径 7 ミクロンで、フォノンを基板から受け取る部分（パッド）のサイズは 250 ミクロン角である。Al で生じた準粒子寿命は数十マイクロ秒と長く、拡散長は 500 ミクロンであるという先行研究結果があったので、このサイズにした。基板にはシリコンを用いた。0.3K まで冷却したところ、STJ の SIS (Superconducting - Insulator - Superconducting) の構造が IV カーブではっきり見え、そのギャップエネルギーは 0.34meV と測定され、確かに Al-STJ ができていることを確認した。Am-241 アルファ線源を検出器とともに冷凍機内部に入れ、基板の表側あるいは裏側に配置した。STJ からの信号を室温アンプに通し、オシロスコープで測定したところ、表側と裏側からのアルファ線の照射ともに信号を確認した（図 1）。

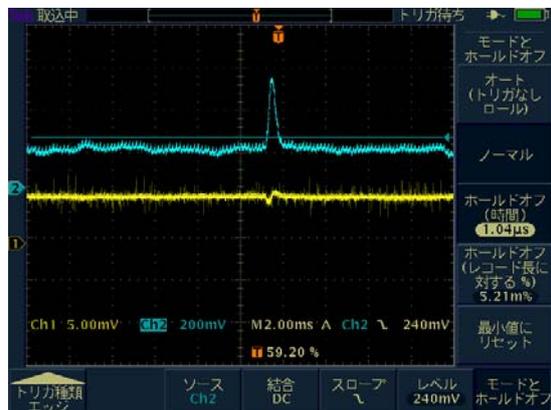


図 1 : Al-STJ のシリコン基板の裏側からアルファ線を照射した結果得られた事象信号。上の信号（青色）は STJ からの電流、下の信号（黄色）は、STJ に印加しているバイアス電圧の信号を示す。バイアス電圧装置にはフィードバック機能がついている。

図 1 において、電流とバイアス電圧同時に反応があることにより、雑音事象ではなく、アルファ線がシリコン基板にあたって生じたフォノン信号事象であることが確認できた。

電流信号のパルスの時間幅は、アンプの時定数で決まる。また、アルファ線源無しで測定したところ、そのような事象は見つからなかったことから、これはアルファ線による信号であることを裏付けた。

事象頻度を測定したところ、アルファ線源の強度と立体角から計算した頻度よりもはるかに小さいことが分かった。測定された事象頻度は、3分に1事象と極端に低かった。逆にこの測定頻度から検出器が持つ立体角を計算すると、STJのジャンクションの直径である7マイクロンと一致した。従って、Alパッド内部の準粒子拡散の効果はほとんどなく、STJジャンクション下部に到達した高エネルギーフォノンにのみ反応していると考えられた。Al-STJのジャンクションの面積を増やすと、ジャンクションに穴が開く確率が増え、歩留まりが悪くなった。

以上の結果から、当初提案した方法では、ニュートリノの質量は難しいことがわかった。

そこで、研究方針を大転換し、MKID (Microwave Kinetic Inductance Detectors) の開発に移ることにした。MKIDは2003年に提案された比較的新しい超伝導検出器である。MKIDの特徴として、STJと比較して構造が単純、周波数領域読み出しにより多重化が容易、バイアスが不必要という特徴がある。申請はこれまでMKIDの開発経験が無く、1からのスタートであった。

レニウム標的をMKIDに取り付けることを前提に考え、最初はマイクロストリップ型のMKIDの開発を行った。これは、シリコン基板の上にグラウンドとなるNb薄膜を形成し、絶縁膜(SiO<sub>2</sub>)をその上に敷き、さらにその上に共振器を配置する構造になっている。MKIDそのものの評価を行うために、純NbからなるMKIDを作製し、手軽に測定できるヘリウム減圧システムを用いて測定を行った。その結果、共振の鋭さを示すQ値が最大10,000程度までしかいかないことが分かった。MKIDのデザインを工夫し、共振器自体が持つQ値を測定した結果、低いQ値の原因は絶縁膜の誘電損失が原因であることが分かった。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>やMgOといった他の絶縁膜も試したが、改善することができなかった。MKIDを研究している他の研究者との意見交換などで、同様の事が海外の研究でも起きているということがその後わかった。

そこで、MKIDとして実績のあるCPW (Coplanar Waveguide)型のMKIDの開発に移行した。準粒子トラップを実現するために、NbとAlを組み合わせたMKIDのデザインを行った。新しいデザインだったので、最初はNbのみからなる実機を作製し、ヘリウム減圧システムで頻りに測定した。その結果、Q値が最大200,000の共振器が確認された。必要な

Q値は50,000だったので、予想よりも大変性能が良い素子が作製された。歩留まりは95%以上であった。このデザインに基づき、AlとNbを組み合わせた実機を作製した。図2は、その実機の顕微鏡写真である。

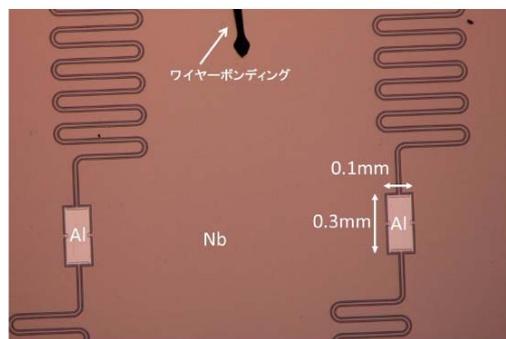


図2: AlとNbを組み合わせたMKIDの実機の顕微鏡写真。メアンダ状のNb共振器の先端にAlパッドが接続されている。

メアンダ状の構造は共振器となっており、その長さは、共振周波数信号の波長の4分の1になっている。Alパッドのところで、グラウンドに接続されているので、共振信号の電流はAlパッドの部分で振動の腹になり、最大の電流が流れる。共振器のインダクタンスをL、電流をIとすると、感度はL<sup>2</sup>に比例するため、Alパッドの部分で最大感度を持つ。

Am-241からのアルファ線を照射したところ、図3のような信号を検出した。

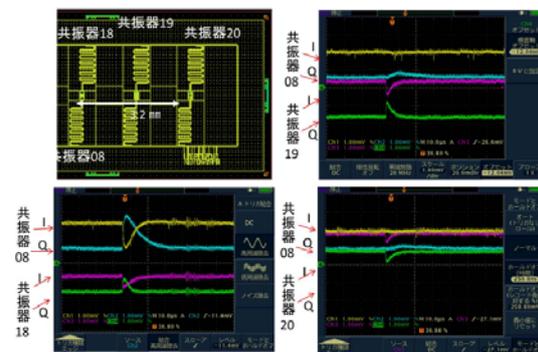


図3: MKIDのアルファ線の信号のオシロスコープの写真。

複数のMKIDが同時に反応していることを示しており、これは基板からのフォノン信号を検出している証拠である。実際、データを詳しく解析した結果が図4である。二つの異なる共振器の事象信号の立ち上がり部分を拡大した図である。位置が異なる共振器の信号到達時間の差と距離からフォノンの伝達速度が計算され、1.1~1.3 km/sを得た。この値は、他の測定結果と一致し、フォノン信号であることを裏付ける。

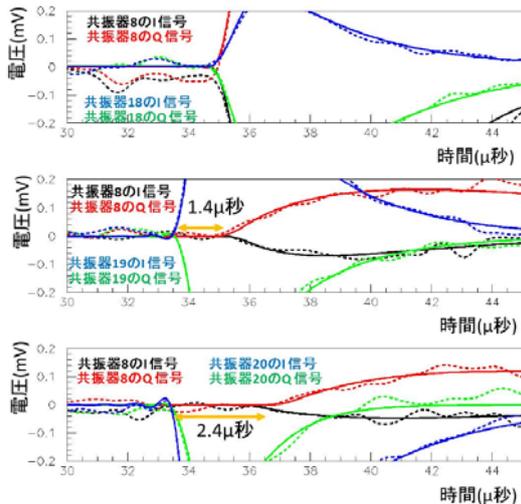


図4 : Nb と Al を組み合わせた MKID のフォノン信号事象例。二つの共振器を同時に読み出している。実線がデータをフィットした結果、点線はデータにデジタルフィルターを適用し、ノイズを落としたもの。上から下にかけて、二つの共振器は、0mm、1.6mm、3.2mm 離れている。

一方で、逆に言うと、Al パッドで落とさるエネルギーの位置はフォノンとして基板に逃げてしまうということの意味している。これはエネルギー分解能が悪くなることを意味する。そこで、Al パッドの下部に、50nm の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜を敷いた構造の MKID を作製した。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜は、基板と Al の間でフォノンをブロックするので、アルファ線が直接当たった共振器のみ反応し、他の共振器は反応しないと考えられる。測定の結果、実際そうなることを確認した。

Al パッドによるフォノン信号のパルス幅を測定したところ、それは共振器自身が持つ帯域幅の逆数に等しいことがわかった。このことは、Al 内での準粒子寿命が短いことを意味している。この事実は、STJ で検出効率が予想以上に悪かった原因の裏付けとなった。Al 薄膜は、スパッター装置を用いて行っている。今後、Al 薄膜に対する膜質の研究が必要である。

なお、今回の読み出しは、2 チャンネルのみ行ったため、アルファ線の付与エネルギーは測定できない。現在 MKID の多重読み出し系の開発を行っている。

MKID にレニウムを装着する 1 つの方法として、PLD (Pulsed Laser Deposition) 法を考えている。これは、標的物質にレーザーを照射することにより、物質を蒸発させて、近くの基板に蒸着させる方法である。この方法によって、200nm のレニウム薄膜の形成に成功した。膜質を確認するために、レニウムのみ

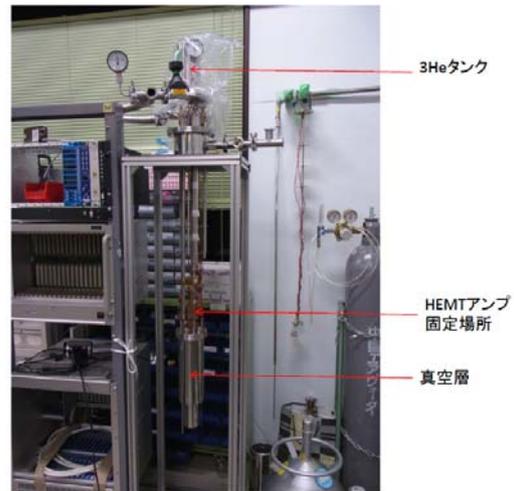


図5 : 本研究で整備した He-3 ソープション冷凍機の外形。

からなる MKID を作製し測定したところ、超伝導転移が認められ、共振ピークも観測できた。これは上質なレニウム薄膜が形成されたことを意味する。現在、レニウム薄膜を Al パッドの上に乗せる方法を試している。

本研究では、検出器開発のみならず、それを測定する測定系の開発も行った。

図5は、本研究において企業と共同で開発した He-3 ソープション冷凍機である。液体ヘリウムデュワーに挿入できる形になっている。また、内部に光ファイバーを通しており、外部からの光照射により、容易に性能評価を可能にした。最低到達温度は 0.45K であり、持続時間は 12 時間以上であった。

また、MKID 多重読み出しのために、2 種類の読み出し装置を購入した。一方は、アメリカで開発された ROACH と呼ばれるボードである。このボードは、既にアメリカでの MKID の研究において実績がある。ただし、高速 FFT を用いているので、周波数選択において自由度が狭い。そこで、Pentek 社の Model-78650 ボードを購入した。このボードは帯域幅 800MHz の高速 ADC/DAC を持ち、内部に vertex-6 の FPGA チップを持つ。これらの機能を用いることにより、より自由度を持つ MKID 読み出し装置を開発中である。

## 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 1 件)

- ① K. Hattori, M. Hazumi, H. Ishino, M. Kawai, A. Kibayashi, N. Kimura, S. Mima, T. Noguchi, T. Okamura, N. Sato, O. Tajima, T. Tomaru, H. Watanabe and M. Yoshida, “Development of superconducting Detectors for Measurements of Cosmic Microwave Background”, Physics Procedia 37 (2012) 1406 - 1412. 査読有. DOI:10.1016/j.phpro.2012.02.478

[学会発表] (計 7 件)

- ① 石野宏和、「超伝導フォノン検出器の開発」、日本物理学会、2011年3月28日、新潟大学（震災のため中止）
- ② Hirokazu Ishino, “Development of Aluminum Superconducting Tunnel Junction (STJ) detectors for millimeter wave and particle detections”, Technology and Instrumentation in Particle Physics 2011, 2011年6月13日、シカゴ、アメリカ
- ③ 石野宏和、「超伝導フォノン検出器の開発2」、日本物理学会、2011年9月17日、弘前大学
- ④ 山田要介、「超伝導検出器 Microwave Kinetic Inductance Detectors の基礎特性の研究」、日本物理学会、2012年3月25日、関西学院大学
- ⑤ 湯浅泰気、「超伝導トンネル接合素子 (STJ) 作製条件の最適化」、日本物理学会、2012年3月25日、関西学院大学
- ⑥ 石野宏和、「フォノン検出器の開発3」、日本物理学会、2012年9月11日、京都産業大学
- ⑦ 石野宏和、「超伝導フォノン検出器の開発4」、日本物理学会、2013年3月26日、広島大学

[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

<http://fphy.hep.okayama-u.ac.jp/~ishino/works/wakate-a>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石野 宏和 (Ishino, Hirokazu)  
岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授  
研究者番号：90323782

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

山田要介 (岡山大学大学院生)  
湯浅泰気 (岡山大学大学院生)