

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年6月13日現在

機関番号：12102

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25105007

研究課題名(和文)宇宙背景ニュートリノの崩壊探索に用いる超伝導赤外線検出器の開発

研究課題名(英文)Development of superconducting infrared detector for cosmic background neutrino decay search

研究代表者

金 信弘(KIM, Shinhong)

筑波大学・数理解物質系・特命教授

研究者番号：50161609

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 59,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、宇宙背景ニュートリノの崩壊探索COBAND実験を行うために、ニュートリノ崩壊時に発生する25meV程度の遠赤外線光を一光子ごとに2%の精度でエネルギーを測定できる超伝導トンネル接合素子(STJ)検出器の開発を行ってきた。この実験要求を満たすために、STJ検出器の直近に設置した極低温0.4Kで動作する前置増幅器の開発を行い、Nb/Al-STJの光応答信号を70倍に増幅することに成功し、信号ノイズ比を大きく改善した。また、Nb/Al-STJよりエネルギー分解能の高いHf-STJ検出器を開発し、リーク電流を大幅に下げて、可視光レーザーパルスに対する光応答を観測することに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have developed the superconducting tunnel junction (STJ) detector for cosmic background neutrino decay search COBAND experiment. We required that the STJ detector should measure the energy of a single far-infrared photon with an energy around 25meV with an energy resolution of 2% for this COBAND experiment. To satisfy the requirement, we have developed a cryogenic preamplifier which can operate at 0.4K and be placed close to the STJ detector. We succeeded in amplifying the Nb/Al-STJ signal to a laser pulse light by a factor of 70 and improving the signal-to-noise ratio significantly. We have also developed Hf-STJ with higher energy resolution than Nb/Al-STJ, and succeeded in observing the Hf-STJ signal to a laser pulse light by decreasing the leakage current significantly.

研究分野：素粒子実験

キーワード：宇宙背景ニュートリノ ニュートリノ質量 超伝導トンネル接合素子検出器 宇宙赤外線背景輻射 左右対称模型 極低温SOI増幅器 ハフニウムSTJ

## 1. 研究開始当初の背景

大気ニュートリノ振動の観測をはじめとする多くのニュートリノ振動の観測によって、現在ニュートリノの質量が 0 でないことが示され、3 種類のニュートリノの質量の 2 乗差とニュートリノ混合角は測定された。しかしながら、ニュートリノの質量自体は未測定で、素粒子物理研究の大きな課題となっている。ニュートリノは  $\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$  と崩壊し、標準理論の範囲内では、この寿命は  $10^{43}$  年程度と長く、ニュートリノ崩壊の観測は極めて難しいが、ニュートリノがディラック・ニュートリノであり、右巻き Weak Boson  $W_R$  が存在する Left-Right Symmetric Model では、このニュートリノ崩壊幅はさらに大きくなり、現在の  $W_R$  の質量下限および  $W_R$  と  $W_L$  の混合角の上限を用いるとニュートリノの寿命は最小で  $\tau = 1.5 \times 10^{17}$  年となる。

このような長寿命のニュートリノの崩壊を測定するには、非常に多くのニュートリノが必要であり、宇宙背景ニュートリノが崩壊検出できる可能性が最も大きいニュートリノ源である。宇宙背景ニュートリノは宇宙背景放射と同様にビッグバン宇宙初期に生成され、宇宙空間に様に存在すると標準宇宙理論で予言されている。ニュートリノ振動から得られているニュートリノの質量の 2 乗差と矛盾しないニュートリノ質量として  $m_3 = 50\text{meV}$ ,  $m_2 = 10\text{meV}$  を仮定すると、ニュートリノ崩壊で生成される光子のエネルギー  $E_0$  は  $25\text{meV}$  となり、宇宙背景ニュートリノの崩壊で観測される光子のエネルギー分布は高エネルギーの端  $E_0$  で急に落ちるのが特徴であり、この分布の測定結果からニュートリノの質量を決定することができる。

このエネルギー領域の黄道放射と宇宙赤外線背景輻射 (Cosmic Infrared Background, CIB) が実測のバックグラウンドとなるが、CIB は人工衛星を用いた観測が行われており、1998 年の COBE 観測実験による初観測と、2011 年に AKARI による測定結果が報告されている。COBE と AKARI は宇宙赤外線背景輻射を波長  $60 \sim 240 \mu\text{m}$  (光子エネルギー  $20 \sim 5\text{meV}$ ) の範囲で離散的にそれぞれ 4 点測定した。これらの測定結果は宇宙赤外線の理論予言よりも  $2\sigma$  以上大きい。我々はこの光子エネルギースペクトルをエネルギー分解能 2% の精度で連続的に測定して、鋭い高エネルギーカットオフをもつニュートリノ崩壊信号を探索する。

現在の寿命下限はこれらの宇宙赤外線の測定結果より  $10^{12}$  年であることが分かっている。

## 2. 研究の目的

本研究では、宇宙背景放射と同様に宇宙初期に生成され、宇宙空間に様に存在すると予言されている「宇宙背景ニュートリノ」の崩壊探索を行うために、ニュートリノ崩壊時に発生する遠赤外線光子のエネルギーを一光子ごとに 2% 以下の精度で測定する超伝導トンネル接合素子 (Superconducting Tunnel

Junction, STJ) 検出器を開発する。Left-Right Symmetric Model では、ニュートリノの寿命は最短で  $\tau = 1.5 \times 10^{17}$  年となるが、そのような宇宙背景ニュートリノの崩壊からの光子は口径  $20\text{cm}$ ・視野  $0.1$  度の望遠鏡と  $25\text{meV}$  域の一光子分光が可能な遠赤外線検出器を搭載した人工衛星で 100 日間観測することによって、有意度  $5\sigma$  で検出できる。この衛星実験に先立ち、現在の寿命下限  $10^{12}$  年を 2 桁改善できる COBAND (COsmic BAcKground Neutrino Decay search) ロケット実験を行う。

- (1) このロケット実験に用いる赤外線検出器として、Nb と Al を超伝導素材とする多チャンネル Nb/Al-STJ 検出器と分光素子を組み合わせた観測装置の開発を行う。
- (2) 以上の Nb/Al-STJ 開発・製作と並行して、将来の人工衛星搭載実験に向けたエネルギーギャップの極めて小さいハフニウムを用いた Hf-STJ についても衛星搭載実験用の光学系を含めた観測装置の開発研究を行う。

## 3. 研究の方法

本研究では、遠赤外線光を一光子検出することが STJ 検出器に要求される基本性能である。これを実現するには、極低温  $0.4\text{K}$  で動作する SOI 前置増幅器を STJ 検出器の直近に設置した STJ 検出器を基本設計として、遠赤外線光一光子の検出を実現するために、以下のように今後の開発を進める。

- (1) この実験要求を満たすために、リーク電流が  $0.1\text{nA}$  以下の Nb/Al-STJ 検出器を実現する。
- (2) Nb/Al-STJ 検出器の直近に設置した極低温  $0.4\text{K}$  で動作する前置増幅器の開発を行い、信号ノイズ比を大幅に改善する。
- (3) 波長  $40 \sim 80 \mu\text{m}$  の遠赤外線パルスビームを用いて、Nb/Al-STJ 検出器プロトタイプの性能試験を行い、遠赤外線光に対する応答性能を評価して、今後の開発に必要な課題の解決を進める。
- (4) 反射鏡・分光素子・Nb/Al-STJ 検出器を  $0.4\text{K}$  クライオスタットに格納した赤外線観測装置を設計する。この設計のためにニュートリノ崩壊探索ロケット実験のシミュレーションを行う。
- (5) これらと並行して将来の赤外線衛星搭載に向けたエネルギーギャップの小さいハフニウムを用いた Hf-STJ 検出器の衛星搭載実験用観測装置開発を行う。

## 4. 研究成果

- (1) Nb/Al-STJ 検出器については、薄膜生成方法を改善し、STJ サイズを小さくすることによって、ロケット実験のための実験要求値であるリーク電流  $0.1\text{nA}$  を下回る STJ の作成に成功した。
- (2) 冷凍機内からの長い信号引き出し線が大きいノイズ源となっているので、さらに信号ノイズ比を改善するために、極低温

で動作する前置増幅器の開発を行った。SOI (Silicon-On-Insulator) 技術を用いた MOSFET が極低温 0.4K で動作することを検証した。また SOI 前置増幅器基板上に Nb/Al-STJ をプロセスした SOI-STJ 一体型検出器を設計製作して、性能試験を行い、SOI-MOSFET と STJ が共に 0.4K で正常に動作することを検証した。このように世界で初めての SOI-STJ 一体型検出器プロトタイプを作成し、その基本動作が正常であることを確認した。

- (3) この STJ 検出器の直近に設置できる極低温 0.4K で動作する SOI 技術を用いた前置増幅器の開発を行った。極低温 0.4K の冷凍機内に、図 1 に示すように、SOI 前置増幅器を Nb/Al-STJ 検出器の直近に設置し、波長 465nm の可視光レーザーパルスを用いて光応答性能試験を行った。この試験において、図 2 に示すように、Nb/Al-STJ の光応答信号を SOI 前置増幅器によって 70 倍に増幅することに成功し、信号ノイズ比を大幅に改善した。

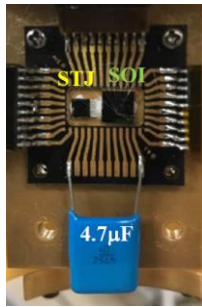


図 1. Al/Nb-STJ 検出器に SOI 極低温前置増幅器を同一チップキャリア上で接続したセットアップ

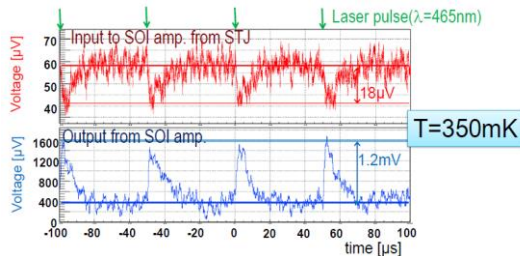


図 2. Al/Nb-STJ 検出器の光応答信号(赤)とその SOI 前置増幅器による増幅信号(青)

- (4) さらに、電荷積分型の極低温 SOI 増幅器を試作して、極低温 0.4K の冷凍機内に Nb/Al-STJ 検出器の直近に設置し性能試験を行った。この試験において設計通りの性能を示すことを確認した。この電荷積分型増幅器と上記の電圧増幅器を組み合わせた最終設計を行い、試作機を作成した。
- (5) ニュートリノ崩壊探索ロケット実験のシミュレーションを継続し、分光素子・反射鏡を含む光学系システムの設計を行なった。ロケット搭載用のクライオスタットの設計試作を行った。
- (6) 波長 40~80 μ の遠赤外線ビームを用いて、Nb/Al-STJ 検出器プロトタイプの遠赤外線光に対する応答信号を観測した。遠赤外線ビームのパルス化を行い、FWHM

で 5 μ sec のパルスビームを実現した。

- (7) 人工衛星搭載実験に向けて、Nb/Al-STJ よりエネルギー分解能の高い Hf-STJ 検出器を開発し、世界初の Hf-STJ として動作する STJ を作成することに成功した。また絶縁薄膜生成条件を最適化して、リーク電流を大幅に下げることができた。その結果、波長 465nm の可視光レーザーパルスを用いた光応答性能試験において、図 3 のように可視光レーザーパルスに対する光応答信号を観測することに成功した。

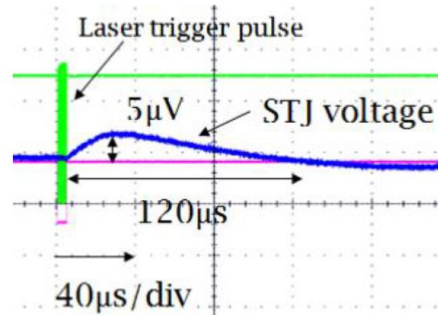


図 3. Hf-STJ 検出器の可視光レーザーパルスに対する光応答信号。温度 128mK

研究成果は国際会議での報告および論文として発表を行うと同時に、ホームページを通じて研究状況・成果に関する情報を開示している。

#### 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 9 件)

1. S. H Kim, Y. Takeuchi, T. Yoshida, et al. “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detectors with Cryogenic Preamplifier for COBAND experiment” 査読有 Proceedings of TIPP2017, 印刷中, 2018  
DOI : なし
2. K. Takemasa, S. H Kim, Y. Takeuchi, T. Yoshida, et al. “Development of Superconducting Tunnel Junction Detector using Hafnium for COBAND experiment” 査読有 Proceedings of TIPP2017, 印刷中, 2018  
DOI : なし

3. C. Asano, S. H Kim, Y. Takeuchi, T. Yoshida, et al. "ニュートリノ崩壊光子探索実験のための STJ 検出器較生用遠赤外パルス光源開発", 査読無 Mem. Grad. Eng. Univ. Fukui, Vol. 66, pp.1-10, (October 2017)
  4. R. Wakasa, S. H Kim, Y. Takeuchi, T. Iida, K. Takemasa, K. Nagata, C. Asano, A. Kasajima, H. Kanno, T. Yoshida et. al, "COBAND 実験に向けた極低温増幅器の研究開発", 査読無 電子情報通信学会技術研究報告. SCE, 117(223), pp.5-8, 2017
  5. Y. Takeuchi, S. H Kim, T. Yoshida, et al. "Development of Superconducting Tunnel Junction detectors as a far-infrared photon-by-photon spectrometer for neutrino decay search" 査読有 Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE International, P551 - 555, 2015 DOI : 10.1109/I2MTC.2015.7151327
  6. K. Kiuchi, S. H Kim, Y. Takeuchi, T. Yoshida, et al. "Development FD-SOI MOSFET amplifiers for integrated read-out circuit of superconducting-tunnel-junction single-photon-detectors" Proceedings of International Workshop on SOI Pixel Detector, FERMILAB-CONF-15-355-E-TD (2015) arXiv:1507.07424
  7. Y. Takeuchi, S. H. Kim, T. Yoshida, et al. (Neutrino Decay Collaboration) "Development of Superconducting Tunnel Junction Detectors as a far-infrared single photon detector for neutrino decay search", 査読有 Proceedings of Science TIPP, 155, P1-8, 2014 DOI : なし
  8. K. Kasahara, S. H. Kim, Y. Takeuchi, T. Yoshida, et al. "Development of Superconducting Tunnel Junction Detectors as a far-infrared single photon detector for neutrino decay search", 査読有 Proceedings of Science TIPP, 74, P1-8, 2014 DOI : なし
  9. S. H. Kim, Y. Takeuchi, K. Nagata, K. Kasahara, T. Okudaira, H. Ikeda, S. Matsuura, T. Wada, H. Ishino, A. Itsuki, S. Mima, T. Yoshida, Y. Kato, M. Hazumi, Y. Arai, E. Ramberg, J. H. Yoo, S. B. Kim "Search for Cosmic Background Neutrino Decay" 査読有 JPS Conf. Proc. 1, P013127, 2014 DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JSPSC.1.013127>
- [学会発表] (計 93 件)
1. S. H. Kim "Development of Superconducting Tunnel Junction Infrared Photon Detector for Cosmic Background Neutrino Decay Search - COBAND experiment", Unification and Development of the Neutrino Science Frontier, March 5-6, 2018, Kyoto, Japan
  2. K. Takemasa, "R&D status of Hf-STJ for COBAND" Inaugural symposium, TChOU, Univ. of Tsukuba, March 27, 2018
  3. T. Yoshida, "R&D Status of FIR source for STJ calibration for COBAND", Inaugural symposium, TChOU, Univ. of Tsukuba, Mar. 27, 2018
  4. R. Wakasa, "R&D of quantum photo-sensor based on superconductor with

- cryo-SOI readout”, Inaugural symposium, TChOU, Univ. of Tsukuba, Mar. 27, 2018
5. Y. Takeuchi, “Superconducting Tunnel Junction Detectors”, The 18th International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN17), Oct. 26–28, 2017, University of Warwick, Coventry, UK,
  6. Y. Takeuchi “Development of STJ with FD-SOI cryogenic amplifier as a far-infrared single photon detector for COBAND experiment”, 17th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-17), July 17–21, 2017, Kurume, Fukuoka, Japan
  7. S. H. Kim “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detectors with Cryogenic Preamplifier for COBAND experiment”, Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017 (TIPP 2017), May 21–26, 2017, Beijing, China
  8. K. Takemasa “Development of Superconducting Tunnel Junction Detector using Hafnium for COBAND experiment”(Poster presentation), et al., Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017 (TIPP 2017), May 21–26, 2017, Beijing, China
  9. Y. Takeuchi “Development of Far-infrared Spectrometers based on Superconducting Tunnel Junction Detector for the Cosmic Background Neutrino Decay (COBAND) experiment”, Tsukuba Global Science Week 2016 (TGSW2016), 2016/9/17–9/19, Tsukuba Epochal, Tsukuba Japan
  10. 金 信弘 “超伝導トンネル接合素子 STJ を用いた光・量子計測”, 第 2 回 TIA 光・量子計測シンポジウム, 2016/11/10, つくば国際会議場, つくば
  11. K. Takemasa “Development of Superconducting Tunnel Junction Detector and Cold Amplifier for COBAND experiment” International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors”, 2016 (IWSSD2016), 2016/11/14–11/16, AIST, Tsukuba
  12. 武内勇司 “宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験 COBAND に向けた SOI-STJ 開発” 超伝導エレクトロニクス研究会, 2016/10/26–27, 東北大学電気通信研究所, 仙台市
  13. K. Kiuchi “Development FD-SOI MOSFET amplifiers for integrated read-out circuit of superconducting-tunnel-junction single-photon-detectors”, International Workshop on SOI Pixel Detector, 2015/6/2–6/5, Sendai, Japan
  14. Y. Takeuchi “Development of Superconducting Tunnel Junction Detectors as a Far Infrared Photon-By-Photon Spectrometer for Neutrino Decay Search”, 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2015/5/11–5/14, Pisa, Italy
  15. K. Takemasa “Development of Superconducting Tunnel Junction Detector Using Hafnium for Neutrino Decay Search”, IEEE nuclear science symposium and medical imaging conference, 2014/11/8–11/15, Seattle, USA
  16. S. H. Kim “Development of Superconducting Tunnel Junction

Photon Detectors for Cosmic  
Background Neutrino Decay Search”,  
2nd International Workshop on  
Superconducting Sensors and  
Detectors (IWSSD2014), 2014/11/5-  
11/8, Shanghai, China

17. S. H. Kim "Search for Cosmic  
Background Neutrino Decay”, The 12<sup>th</sup>  
Asia Pacific Physics Conference of  
AAPPS (APPC12), 2013/7/14-7/19  
Makuhari, Japan

その他 76 件

[その他]

ホームページ等

宇宙背景ニュートリノの崩壊探索に用いる超  
伝導赤外線検出器の開発

[https://hep.px.tsukuba.ac.jp/twiki/bin/v  
iew/STJ/StjTalksPub](https://hep.px.tsukuba.ac.jp/twiki/bin/view/STJ/StjTalksPub)

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND

[http://hep.px.tsukuba.ac.jp/coband/index  
.html](http://hep.px.tsukuba.ac.jp/coband/index.html)

筑波大学宇宙史研究センター Tomonaga  
Center for the History of the Universe

[http://www.pas.tsukuba.ac.jp/~TCHoU/inde  
x.html](http://www.pas.tsukuba.ac.jp/~TCHoU/index.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

金 信弘 (KIM, Shinhong)

筑波大学・数理物質系・特命教授

研究者番号：50161609

### (2) 研究分担者

武内 勇司 (TAKEUCHI, Yuji)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：00375403

研究分担者

吉田 拓生 (YOSHIDA, Takuo)

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：30220651

### (3) 連携研究者

池田 博一 (IKEDA, Hirokazu)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・  
教授

研究者番号：10132680

### (4) 研究協力者

武政 健一 (TAKEMASA, Kenichi)

筑波大学・数理物質系・研究員

研究者番号：40817508

研究協力者

若狭 玲奈 (WAKASA, Rena)

筑波大学・数理物質科学研究科・大学院生

研究協力者

浅野 千紗 (ASANO, Chisa)

筑波大学・数理物質科学研究科・大学院生

研究協力者

笠原 宏太 (KASAHARA, Kota)

筑波大学・数理物質科学研究科・大学院生

研究協力者

木内 健司 (KIUCHI, Kenji)

筑波大学・数理物質科学研究科・大学院生