

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND 実験

金 信弘, 武内勇司, 飯田崇史, 武政健一, 若狭玲那, 浅野千沙, 笠島誠嘉, 池田博一¹, 和田武彦¹, 長勢晃一¹, 松浦周二², 吉田拓生³, 坂井 誠³, 中村昂弘³, 西村 航³, 美馬 覚⁴, 木内健司⁵, 加藤幸弘⁶, 新井康夫⁷, 倉知郁生⁷, 羽澄昌史⁷, 大久保雅隆⁸, 浮辺雅宏⁸, 志岐成友⁸, 藤井剛⁸, 石野宏和⁹, 樹林敦子⁹, 川人祥二¹⁰, Erik Ramberg¹¹, Paul Rubinov¹¹, Dmitri Sergatskov¹¹, Soo-Bong Kim¹², Yong-Hamb Kim¹³, Hyejin Lee¹³
筑波大学, ¹JAXA/ISAS, ²関西学院大学, ³福井大学, ⁴理化学研究所, ⁵東京大学, ⁶近畿大学, ⁷KEK, ⁸産総研, ⁹岡山大学, ¹⁰静岡大学, ¹¹Fermilab, ¹²Seoul National University, ¹³Institute of Basic Science CUP
(COBAND Collaboration)

(1) 実験の背景および実験の科学的的重要性・学術的意義

本提案の研究課題「宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND ロケット実験」は宇宙極初期に生成された宇宙背景ニュートリノの発見とニュートリノ質量測定を目指すものであり、その緊急性・重要性について学界全体から高く評価されており、2017年2月に日本学術会議のマスタープラン2017の163大型研究計画の一つに選ばれている。本COBAND実験(Cosmic Background Neutrino Decay)では、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のエネルギーを一光子ごとに2%以下の精度で測定する。2022年に遠赤外線観測装置を搭載したロケット観測実験を行う。現在のニュートリノ寿命の下限測定値は 3×10^{12} 年であるが、この実験の寿命感度は 2×10^{14} 年であり、これまでの約100倍の感度で宇宙背景ニュートリノの崩壊を探索する。

2015年度のノーベル物理学賞を受賞した梶田隆章氏の受賞研究「大気ニュートリノ振動の発見」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高精度で測定されている[1]。しかしニュートリノ質量そのものは未だ測定されていない。図1に示すように、ニュートリノ以外の素粒子の質量はすべて測定されているが、素粒子の質量には世代間で大きな差がある。この素粒子の質量構造の起源は明らかになっていないが、それを解明するためには、ニュートリノ質量の決定は非常に重要な鍵となる。

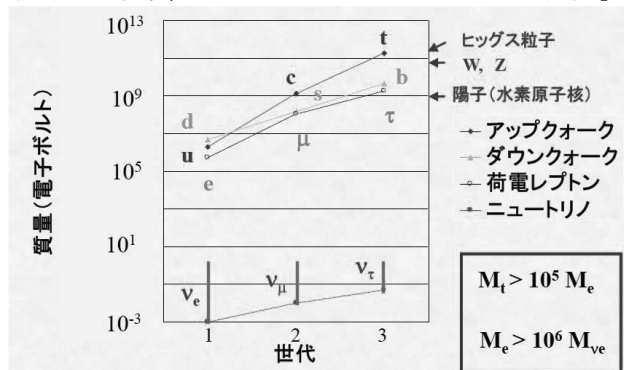


図1. 3世代の素粒子の質量。6種類のクォークの間でも質量最小のアップクォークと最大のトップクォークで5桁の差があり、同じ第1世代レプトンでも電子と電子ニュートリノで6桁以上の差がある。

ニュートリノ物理学の大きな課題は、レプトンにおける粒子・反粒子対称性の破れの検出とニュートリノの質量自体の測定である。本研究の宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND(COsmic BAcground Neutrino Decay)実験が成功すれば、ニュートリノの質量自体を測定することができる。宇宙背景ニュートリノの崩壊探索は、ニュートリノ質量決定のみならず、未発見の宇宙背景ニュートリノの発見という点でも非常に重要である。物質起源については、レプトン・セクターの粒子・反粒子非対称性が重要な鍵であるが、ビッグバン宇宙生成の数秒後に自由になった宇宙背景ニュートリノを観測できるようになれば、物質起源の理解を大きく前進させる手段を得る。間接的なニュートリノ質量の決定は、Planck衛星などによる宇宙背景放射の揺らぎの測定、バリオン音響振動の測定などの宇宙観測結果から3世代のニュートリノの質量和の上限値 0.23eV [2]が得られているが、未だ我々の測定を目指してい

る領域 ($50\text{meV} < m_3 < 75\text{meV}$ の質量範囲) には制限を与えていない。

最も重いニュートリノ ν_3 は $\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$ と輻射崩壊する。この寿命の測定下限値は 3×10^{12} 年である[3]。右巻き Weak Boson W_R が存在する左右対称模型では、このニュートリノ崩壊幅は大きくなり、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 1.5×10^{17} 年となる[4]。また vectorlike なレプトン世代を含む超対称性模型[5]では、ニュートリノの寿命は $10^{12} \sim 10^{14}$ 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、大量のニュートリノが必要であり、崩壊検出できる可能性が最も大きいニュートリノ源が宇宙背景ニュートリノ (Cosmic Neutrino Background CνB) 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、数密度 $110/\text{cm}^3$ 、温度 1.9K で宇宙空間に一様に存在すると標準宇宙理論で予言されているが、未だ発見されていない。宇宙背景ニュートリノはビッグバンの数秒後に自由になっているので、ビッグバンの 30 万年後に自由になった宇宙背景放射に比べて、はるかに初期の宇宙の情報を含んでおり、宇宙物質起源を探る重要な手がかりとなる。

ニュートリノ振動実験から得られているニュートリノの質量の 2 乗差 $\Delta m_{32}^2 \equiv (m_3^2 - m_2^2) = (2.45 \pm 0.05) \times 10^{-3} \text{eV}^2$ [1] 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 $E_0 = \Delta m_{32}^2 / 2m_3$ (1) は 25meV となり、これは温度 1.9K のニュートリノ・エネルギーに比べて十分に大きいので、温度の影響をほとんど受けない。ただし実際に観測される光子のエネルギー E は、宇宙背景ニュートリノが宇宙膨張と共に遠ざかることに起因する赤方偏移効果によって、red shift z がない場合のエネルギー E_0 に比べて $E = E_0 / (1+z)$ だけ小さくなるので、低エネルギーに尾を引く分布になる。この信号エネルギー分布は図 2 に示すように、高エネルギーの端 E_0 でカットオフがあるのが特徴であり、このカットオフ測定から E_0 が決定できる。これは(1)式に示すように、ニュートリノ質量の 2 乗差と独立な測定量なので、ニュートリノ振動の測定結果とあわせてニュートリノの質量 m_3 を決定することができる。

ニュートリノ崩壊時に発生する遠赤外線光 ($E_\gamma \sim 25 \text{meV}$) のエネルギー領域では、黄道放射 (Zodiacal Emission) と宇宙赤外線背景放射 (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 衛星観測実験による初観測[6]と、2011 年に AKARI 衛星による測定結果[7]が報告されている。宇宙遠赤外線は大気で吸収されるので、大気圏外での観測が不可欠である。COBE と AKARI は宇宙赤外線背景放射を波長 $60 \sim 240 \mu$ (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。COBE と AKARI の測定結果は図 2 に示される。我々は、この光子エネルギー・スペクトルを波長 $40 \sim 80 \mu$ ($30 \sim 15\text{meV}$) の範囲で、エネルギー分解能 2% の精度で連続的に測定して、図 2 に示される鋭い高エネルギー・カットオフをもつニュートリノ崩壊信号を探索する。我々は論文[3]で、AKARI の観測結果から求めたニュートリノ寿命の下限が 3×10^{12} 年であることを報告すると同時に、左右対称模型が予言している寿命が 1.5×10^{17} 年であり、質量が 50meV から 140meV のニュートリノの崩壊を検出できる衛星実験を提案した。衛星実験で 60 日間観測することによって宇宙

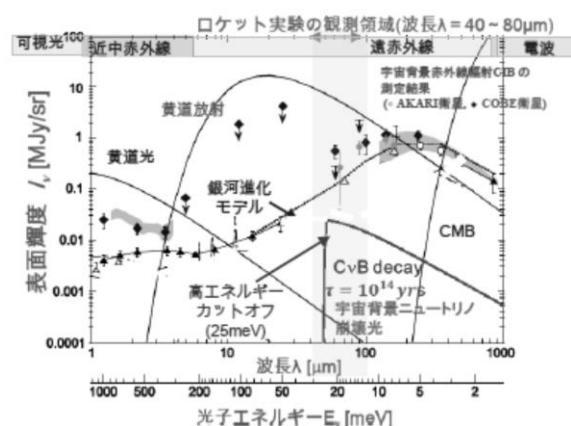


図 2. 宇宙背景ニュートリノ崩壊光のスペクトルと黄道放射スペクトルと宇宙赤外線背景放射の測定値。宇宙背景ニュートリノ崩壊光のスペクトルは寿命 10^{14} 年のときの予言曲線

背景ニュートリノの崩壊からの光子を有意度 5σ で検出できる。本研究では、衛星実験の予備実験として、2022年にロケット実験(観測時間5分間)を行う。このロケット実験によって、ニュートリノの寿命が 2×10^{14} 年以下ならば、宇宙背景ニュートリノの崩壊を発見することができる。検出できた場合、ニュートリノの質量を決定できると同時に、宇宙背景ニュートリノの存在を検証できる。

(2) 実験方法、実験シーケンス等の概念図

本 COBAND 実験では、ニュートリノ崩壊時に発生する遠赤外線 ($E_\gamma \sim 25\text{meV}$) のエネルギーを一光子ごとに 2% の精度で測定するために、Nb と Al を用いた多チャンネル超伝導トンネル接合素子 STJ (Superconducting Tunnel Junction) 光子検出器 [8] と回折格子・反射鏡等の光学系機器を組み合わせたロケット搭載用の超伝導赤外線観測装置を製作し、ニュートリノ崩壊探索ロケット実験を行う。超伝導赤外線観測装置の概略を図3に示す。

遠赤外線望遠鏡の主鏡直径は 20cm、焦点距離は 80cm、視野角は $0.029^\circ \times 0.029^\circ$ 、STJ 検出器の検出効率 22%、ロケット実験データ収集時間は 200sec である。最も重いニュートリノの

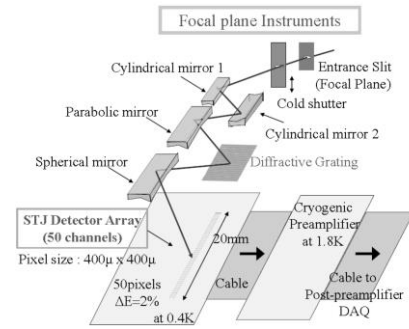
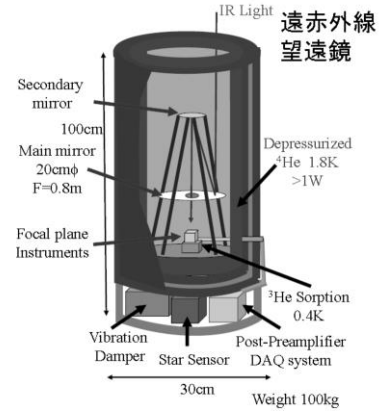


図3 50ピクセルのNb/Al-STJ検出器と回折格子を含む光学系が0.4K冷凍機内に設置されたロケット搭載用遠赤外線望遠鏡

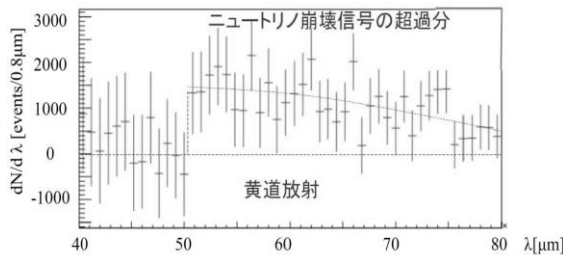


図4. 寿命 10^{14} 年を仮定した本実験シミュレーションによるニュートリノ崩壊光の波長分布の一例。最尤法によって、黄道放射の寄与を引き去った分布。

質量が 50meV、寿命が 10^{14} 年という仮定のもとで、本ロケット実験のシミュレーションをバックグラウンド(黄道放射) + ニュートリノ崩壊信号で行った。シミュレーション・データを解析して、黄道放射の寄与を最尤法によって引き去った波長分布の一例は、図4のように、 5σ 以上の有意度でニュートリノ崩壊信号を検出できることを示した。このようなシミュレーション実験を様々なニュートリノ質量と寿命について行った結果、図5に示すように、ロケット実験を実施することによって、ニュートリノの寿命が 2×10^{14} 年以下ならば、宇宙背景ニュートリノの崩壊を発見できる。

本実験では、1992年2月2日午前1時に実施された S520-15 実験[9]で測定したのと同じ方向からの宇宙遠赤外線を観測する。すなわち、A点(銀緯 52° 銀経 151°) で観測を行う。校正を目的として、A点から B1点(銀緯 33° 銀経 140.5°) へ移

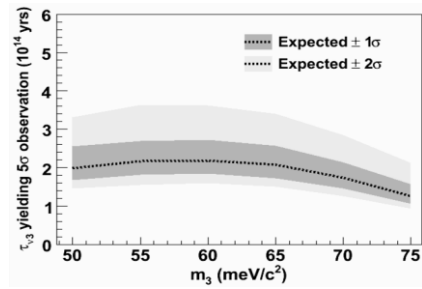


図5. 本実験によって発見可能なニュートリノ寿命のニュートリノ質量への依存性。

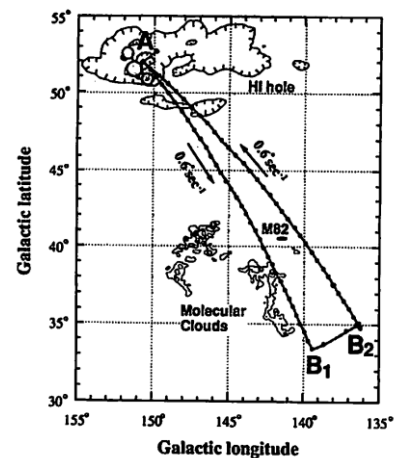


図6 測定点と移動経路。この図は S520-15 実験[8]から参照された。

動し、さらに B2 点（銀緯 35° 銀経 136.5° ）を經由して点 A へ戻ってきて、観測を行う。移動速度は毎秒 0.6° とする（図 6）。測定方向に望遠鏡を向ける絶対指向精度は現行の 1° 程度でよいが、指向

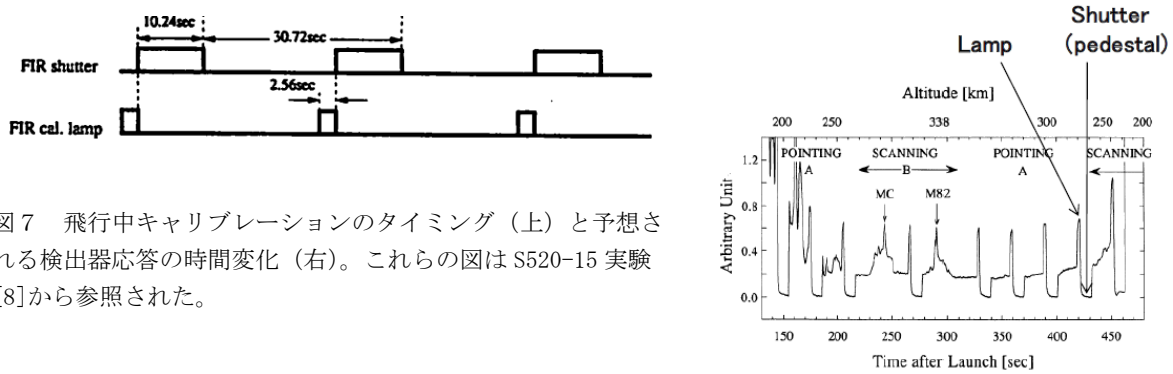


図 7 飛行中キャリブレーションのタイミング（上）と予想される検出器応答の時間変化（右）。これらの図は S520-15 実験 [8] から参照された。

安定性は露出時間中に天体が視野角内にとどまれるよう $0.1^\circ / \text{min}$ 以下が望ましい。発射後、高度 200 km 以上で測定を開始する。S520-15 実験と同じように、飛行中に 30.72 秒ごとに 10.24 秒間 cold shutter を閉めて pedestal をとる。また、cold shutter を閉める直前に 2.56 秒間 calibration lamp を ON にして calibration を行う。A 点から B1 点まで、および B2 点から A 点までの移動中は、calibration を行わない。（図 7 参照）

（3）実験のための搭載機器に関する情報

① STJ 赤外線検出器・SOI 極低温前置増幅器

本研究では、我々が 2007 年以来開発を進めてきた超伝導トンネル接合素子 STJ (Superconducting Tunnel Junction) 光子検出器 [8] をロケット実験に用いる。図 8 に示される Nb/Al-STJ で遠赤外光一光子の検出を実現し、多チャンネル Nb/Al-STJ と回折格子を組み合わせ、エネルギーを 2% の精度で測定する赤外線分光装置を製作する。50 ピクセルの Nb/Al-STJ と回折格子で 15~30meV のエネルギーの遠赤外光を一光子ごとに 2% の精度で測定する。

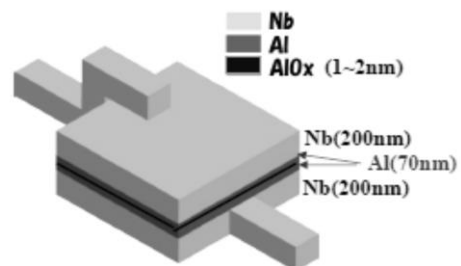


図 8. Nb/Al-STJ 検出器の構造

Nb/Al-STJ 検出器の性能については、COBAND 実験グループのメンバー研究機関である産総研の超伝導デバイス開発施設（略称 CRAVITY）を用いてリーク電流要求値 100pA を満たす Nb/Al-STJ 検出器を作製することに成功した [8]。

また $10 \mu \text{ sec}$ の積分時間に対してノイズを電荷 $30e$ 以下という観測装置に対する要求値を満たすために、極低温 0.4K で動作する SOI (Silicon On Insulator) 技術で作成した MOSFET 回路を用いた低ノイズ前置増幅器の開発を進めてきた。その成果として、我々は極低温 350mK で周波数 0.5MHz 以下の入力に対して 80 倍の増幅率をもつ SOI 前置増幅器の作成に成功した。この SOI 前置増幅器を用いて Nb/Al-STJ の可視光レーザー光応答信号を増幅した結果、70 倍の増幅信号を観測し、STJ 光応答信号を極低温 SOI 増幅器で増幅できることを確認した [10]。さらに信号ノイズ比を改善するために電荷積分型の極低温 SOI 増幅器を試作し、これも極低温で動作することを確認した。この性能試験結果に基づいて、極低温 SOI 電荷積分型前置増幅器の最終設計試作を行い、現在試験中である。

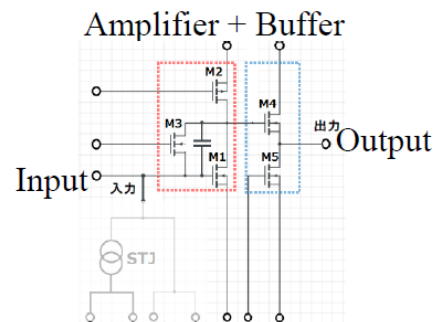
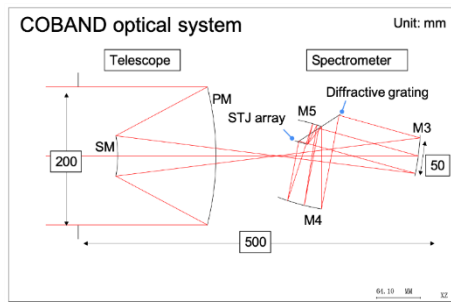


図 9. SOI 極低温前置増幅器試作 4 号機の回路図

② クライオスタット・光学系機器

反射鏡・回折格子・STJ 検出器・SOI 前置増幅器を 0.4K³He ソープション型冷凍機に格納した赤外線観測装置を製作する。この赤外線観測装置を JAXA 宇宙



Imaging performance (point spread function)

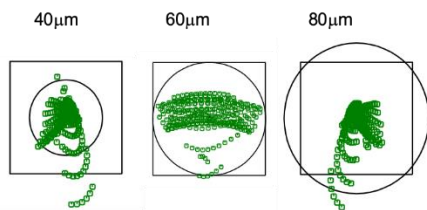


図 11. 光学系の基本設計(上)とシミュレーション結果(下)。スポットダイアグラムでは、緑色の点がシミュレーションによる STJ での波長 40 μm, 60 μm, 80 μm の遠赤外光線の広がりを示す。

400 μm 角ピクセルをカバーするために、フィードホーン結合 Nb/Al-STJ の設計を行なっている。

③ データ収集と転送

STJ 検出器のデータは 1MHz サンプリングの 7 ビット FADC (最大 127counts) で読み出す。信号パルス幅は荷電積分増幅器の出力で 50 μ sec であり、生データは 1 μ sec の分解能で信号波形情報を保存する。STJ 検出器の 1 ピクセルあたりの黄道放射のレートは 2.4kHz である(検出効率 22%を仮定)。50pixel-spectrometer を用いるので、STJ 検出器全体の黄道放射のレートは 120kHz である。またデータ収集時間は 340sec である。データサイズは以下ようになる。

<データをコンパクト化しない場合(生データ)>

毎秒 7 ビット FADC x 10⁶ Hz x 50channels = 350 Mbits/sec

全体 340 秒間 0.35 x 340 = 119 Gbits

すべての生データを収納したディスク・USB メモリーを実験後に回収する。

<データをコンパクト化した場合>

時間データとして、15 ビット時間(10ms 単位で最大 650sec)と 10 ビット時間(1 μ s 単位で最大 10 msec)を用いる。ペダスタルと Calibration Light 校正データと実データのデータ・レートは 3.16Mbps である。すなわち、コンパクト化したデータについて、3.5Mbps でデータ転送を行う必要がある。コンパクト化したデータの全データサイズは 622Mbits=78MB である。コンパクト化されたデータは、データ収集と並行して、無線データ転送装置(通信速度 6Mbps)を用いて地上局に転送する。コンパクト化しない生データは無線データ転送が難しいので、搭載メモリーに収納して、ロケット落下後に回収することを希望する。無線データ転送装置については、Addnics 社製作の S-band transmitter (>5Mbps)を用いることを計画している。



図 10. 冷凍機プロトタイプ

赤外線観測実験ロケットに搭載して観測実験を行う。0.4K³He ソープション型冷凍機は、3K ⁴He 減圧冷凍機内部に設置し、反射鏡・回折格子の光学系機器および SOI 前置増幅器は 3K に保たれる。STJ 検出器は 0.4K に保たれる。図 10 に示すように、ロケット搭載

用 3K ⁴He 減圧冷凍機プロトタイプを製作した。この 3K ⁴He 減圧冷凍機内部に 0.4K³He ソープション型冷凍機、光学系

機器、SOI 前置増幅器、STJ 検出器を設置するようにプロトタイプの設計を行った。図 11 に示すような光学系シミュレーションを用いて、反射鏡・回折格子の光学系機器および STJ 検出器の位置および大きさを最適化する設計を行っている。現在の基本設計では、望遠鏡の焦点距離を 800 mm (F/4) とし、STJ のピクセルサイズを回折限界の点像サイズ(Airy disk)である 400 μ m 角とした。光学収差がピクセルサイズより十分小さいことを光線追跡により確認した(図 11 のスポットダイアグラム)。

(3) 打ち上げまでの開発スケジュールと開発課題

本研究では、高分解能で遠赤外線一光子のエネルギーを測定するために、Nb と Al を超伝導素材として用いる多チャンネル STJ 検出器と回折格子を組み合わせた観測装置の開発を行ってきた。50 ピクセル STJ 検出器と回折格子で 15~30meV の遠赤外光のエネルギーを一光子ごとに 2%の精度で測定する。

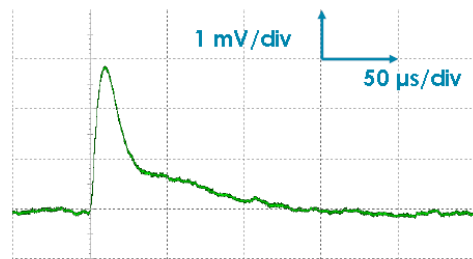
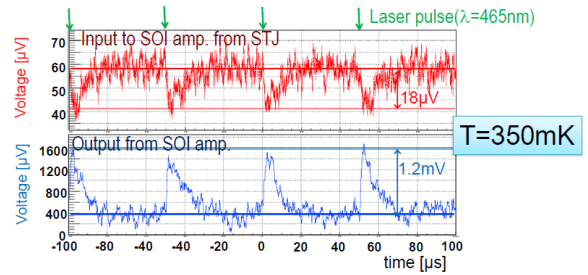
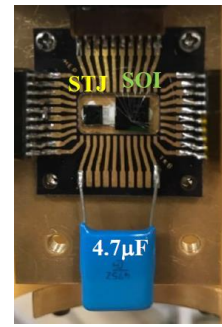
2015 年度までの研究で STJ 作成方法を改善し、100pA 以下というリーク電流に対する要求を満たす Nb/Al-STJ の作成に成功した。極低温 0.4K で動作する低ノイズ前置増幅器等のエレクトロニクスを開発を進めている。この実現によって Nb/Al-STJ 検出器の遠赤外線一光子の検出を実現する。

10 μ sec の積分時間に対してノイズを電荷 30e 以下という観測装置に対する要求値を満たすために、極低温 0.4K で動作する SOI (Silicon On Insulator) 技術で作成した MOSFET 回路を用いた低ノイズ前置増幅器の開発を進めてきた。その成果として、我々は極低温 350mK で周波数 0.5MHz 以下の入力に対して 80 倍の増幅率をもつ SOI 前置増幅器の作成に成功し、これを用いて Nb/Al-STJ の可視光レーザー光応答信号を増幅した結果、図 12 に示すように、70 倍の増幅信号を観測し、STJ 光応答信号を極低温 SOI 増幅器で増幅できることを確認した[9]。さらに信号ノイズ比を改善するために電荷積分型の極低温 SOI 増幅器を試作し、これも図 12 に示すように、極低温で設計通りに正常動作することを確認した。この性能試験結果に基づいて、極低温 SOI 電荷積分型前置増幅器の最終設計試作を行い、現在試験中である。

測定する波長領域 40-80 μ の遠赤外線光子で Nb/Al-STJ 検出器を校正するために、図 13 に示す福井大学遠赤

外領域開発研究センターが共同利用の装置として所有している遠赤外分子レーザー装置を用いる。これは遠赤外線連続ビームを出すのが、我々はこれを STJ 応答信号の応答時間数 μ sec のパルスに変換して用いる。このため、高速回転ミラーを用いて FWHM で 5 μ sec の遠赤外線レーザーパルスを作成することに成功した[11]。また、Nb/Al-STJ 検出器にその遠赤外線連続ビームを入射したときに、図 13 に示すように、STJ 検出器の電流電圧曲線の変化が見られる。この変化から遠赤外線レーザー光を入射したときに、120 nA の STJ 応答電流が流れたことを確認した。

2020 年度に、遠赤外線レーザーパルスによる Nb/Al-STJ の性能試験を行うとともに、赤外線観測装置の応答校正の方法を確立する。2020 年度に反射鏡・回折格子・フィードホーン結合 Nb/Al-STJ 検出器および 0.4K クライオスタットの試作機の振動試験を実施し、その結果に基づいて最終設計を完了する。2021 年度に反射鏡・回折格子・フィードホーン結合 Nb/Al-STJ 検出器を 0.4K クライオスタット



可視光(465nm)のSTJ信号をSOI-STJ5で増幅した波形

図 12. 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(上)と STJ 検出器の光応答信号とその SOI 前置増幅器による増幅信号(中)と電荷積分型 SOI 増幅器による増幅信号(下)

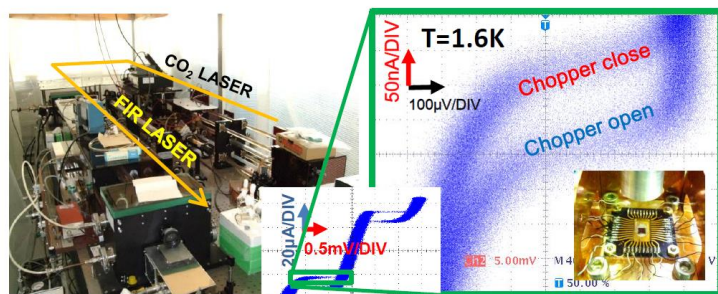


図 13. 遠赤外線レーザー発生装置(左)と Nb/Al-STJ 検出器にその遠赤外線光を入射したときの入射前後での STJ 検出器の電流電圧曲線の変化(右)。Chopper close が入射前、chopper open が入射後の電流電圧曲線を示す。

に格納した赤外線観測装置を製作する。2022年度にこの赤外線観測装置を JAXA 宇宙赤外線背景輻射観測実験ロケットに搭載して観測実験を行う。

(5) 将来計画との関係 (本実験の技術実証的な役割を含む)

我々は論文[3]で, AKARI の観測結果から求めたニュートリノ寿命の下限が 3×10^{12} 年であることを報告すると同時に, 左右対称模型が予言している寿命が 1.5×10^{17} 年で質量が 50meV から 140meV のニュートリノの崩壊を検出できる衛星実験を提案した。衛星実験で 60 日間観測することによって宇宙背景ニュートリノの崩壊からの光子を有意度 5σ で検出できる。

本ロケット実験によって現在の寿命上限を 100 倍改善できる。その後、ピクセル数を 50x8 にすることによって、8 列の位置情報を得て、感度を 3 倍程度上げるロケット実験を行う。さらに 3 桁感度をあげる衛星実験に向けた大きなステップを刻む。ロケット実験用 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っており、可視光レーザーおよび X 線に対する応答信号を検出することに成功している。開発研究を行った超伝導赤外線検出器・冷凍機・光学系機器の技術をさらに発展させて、衛星実験で使用する。

人工衛星搭載実験は 2030 年以降に実施することを目指す。そのために検出器開発・実験設計を 2030 年頃までに完成する。また、2030 年頃に打上げ予定の SPICA 衛星での観測では、大口径望遠鏡の高い空間分解能により前景にある銀河の放射を精度良く差引いて、宇宙背景ニュートリノの崩壊探索を行う観測の提案をしている。

(6) おわりに

本研究 COBAND 実験 (ホームページ <http://hep.px.tsukuba.ac.jp/coband/>) は筑波大学宇宙史研究センターの重要プロジェクトとして強力な支援を受けている。その支援で、ソウル大の共同研究者のリサーチユニットが学内に招致され、また福井大の研究分担者が筑波大併任教授として共同研究に参加し、実施の中心となる筑波大学の特命教授 1 名, 准教授 1 名, 助教 1 名, 研究員 1 名と共に、本研究を推進している。COBAND 実験は、国内機関では筑波大学, JAXA/ISAS, KEK, 岡山大学, 福井大学, 近畿大学, 関西学院大学, 静岡大学, 理化学研究所, 東京大学, 産総研, 海外機関では韓国ソウル国立大学, 韓国 IBS CUP, 米国フェルミ国立加速器研究所の 14 機関から総勢 34 名が参加して形成した宇宙背景ニュートリノ崩壊探索研究コンソーシアムの基に実験準備を進めている。

<参考文献>

- (1) Particle Data Group, “Review of Particle Physics” *Chin. Phys. C* **40**, 100001(2016).
- (2) P.A.R. Ade *et al.* (Planck Collab.) *Astron. Astrophys.* 571 A16 (2014).
- (3) S.H. Kim, K. Takemasa, Y. Takeuchi, and S. Matsuura, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** (2012) 024101.
- (4) M.A.B. Beg, W.J. Marciano, and M. Ruderman, *Phys. Rev. D* **17** (1978) 1395–1401.
- (5) A. Aboubrahim, T. Ibrahim, and P. Nath, *Phys. Rev. D* **88** (2013) 013019.
- (6) M.G. Hauser *et al.*, *ApJ*, **508** (1998) 25, D.P. Finkbeiner *et al.* *ApJ*, **544** (2000) 81.
- (7) S. Matsuura *et al.*, *ApJ*, **737** (2011) 2.
- (8) S.H. Kim *et al.*, *JPS Conf. Proc.* **1** (2014) 013127, Y. Takeuchi *et al.*, 2015 IEEE International (2015) 551–555.
- (9) H. Matsuhara *et al.*, *PASJ*, **46** (1994) 665.
- (10) S.H. Kim *et al.*, *Proceedings of International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP2017) SPPHYS* **213** (2018) 242–248.
- (11) C. Asano *et al.*, *Mem. Grad. Eng. Univ. Fukui*, (in Japanese) Vol. **66** (October 2017) 2017-1.