

# 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, 浅野千紗, 若狭玲那, 守屋佑希久, 柏木隆城, 王生尚志,  
松浦周二<sup>1</sup>, 長勢晃一<sup>2</sup>, 和田武彦<sup>3</sup>, 吉田拓生<sup>4</sup>, 古屋岳<sup>4</sup>,  
中山和也<sup>5</sup>, 木内健司<sup>6</sup>, 加藤幸弘<sup>7</sup>, 新井康夫<sup>8</sup>, 倉知郁生<sup>8</sup>, 羽澄昌史<sup>8</sup>,  
大久保雅隆<sup>9</sup>, 浮辺雅宏<sup>9</sup>, 志岐成友<sup>9</sup>, 藤井剛<sup>9</sup>, 石野宏和<sup>10</sup>, 樹林敦子<sup>10</sup>, 川人祥二<sup>11</sup>, 美馬覚<sup>12</sup>,  
Erik Ramberg<sup>13</sup>, Paul Rubinov<sup>13</sup>, Dmitri Sergatskov<sup>13</sup>,  
Soo-Bong Kim<sup>14</sup>, Yong-Hamb Kim<sup>15</sup>, Hyejin Lee<sup>15</sup>  
筑波大学, <sup>1</sup>関西学院大学, <sup>2</sup>JAXA/ISAS, <sup>3</sup>国立天文台, <sup>4</sup>福井大学, <sup>5</sup>中部大学, <sup>6</sup>東京大学, <sup>7</sup>近畿大学,  
<sup>8</sup>KEK, <sup>9</sup>産総研, <sup>10</sup>岡山大学, <sup>11</sup>静岡大学, <sup>12</sup>情報通信研究機構, <sup>13</sup>SFermi National Accelerator Laboratory,  
<sup>14</sup>Sun Yat-sen University, <sup>15</sup>Institute 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、2020年1月に日本学術会議のマスタープラン2020の146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。

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。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。

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 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  $0.23\text{eV}$ [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  $\nu_3$  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  $3 \times 10^{12}$  年である[3]。右巻き Weak Boson  $W_R$  が存在する左右対称モデルでは、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  $1.5 \times 10^{17}$  年となる[3, 4]。また vectorlike なレプトン世代を含む超対称性モデル[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  $1.9\text{K}$  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  $\Delta m_{32}^2 \equiv (m_3^2 - m_2^2) = (2.45 \pm 0.05) \times 10^{-3} \text{eV}^2$  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  $25\text{meV}$  となり、これは温度  $1.9\text{K}$  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1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  $60 \sim 240 \mu\text{m}$  (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1に示される。我々は、波長  $40 \sim 80 \mu\text{m}$  ( $30 \sim 15\text{meV}$ ) の範囲で、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、図1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  $3 \times 10^{12}$  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  $1.5 \times 10^{17}$  年であり、質量が  $50\text{meV}$  から  $140\text{meV}$  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  $5\sigma$  で検出できる。

本研究では、衛星実験の予備実験として、2027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  $0.7 \times 10^{14}$  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[8]。

## (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[9]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。

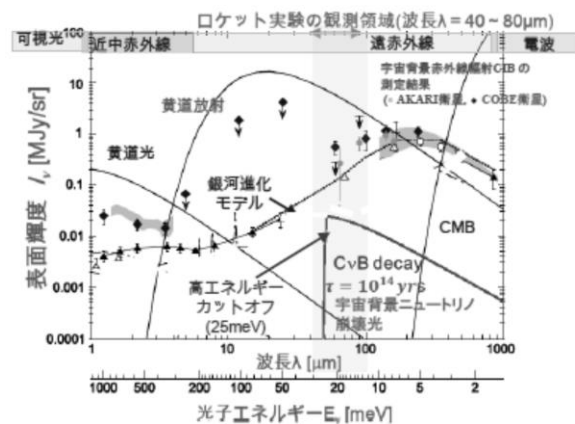


図1. 宇宙背景ニュートリノ崩壊光のスペクトルと黄道放射スペクトルと宇宙赤外線背景放射の測定値。宇宙背景ニュートリノ崩壊光のスペクトルは寿命  $10^{14}$  年のときの予言曲線

超伝導赤外線観測装置の概略を図2に示す。

遠赤外線望遠鏡の主鏡直径は20cm、焦点距離は55cm、視野角は0.042°、光学系を含む検出器の検出効率11%、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質量が50meV、寿命が $10^{14}$ 年

という仮定のもとで、本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3のように、 $5\sigma$ 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4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 $2 \times 10^{14}$ 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ことがわかった[8]。

以上の議論は統計誤差のみに基づいている。系統誤差は、統計誤差と同程度の0.1%まで抑える。主要な系統誤差は、以下の3つである。

- 50ピクセルSTJ間の検出効率のばらつき
  - 光学系アクセプタンスの波長依存
  - バックグラウンド(黄道放射+系外銀河の寄与+銀河系内ダスト)スペクトルの不定性
- これらは50K黒体輻射ランプによる校正と方向スキャンデータを用いた校正で目標値をほぼ実現できる[8]。

COBAND実験の上記に示した当初計画では、生データをすべて無線で転送することが不可能なので、S-520-31号機と同様な回収システム(RATS)を使うことを予定していた。しかしRATS設置場所と望遠鏡設置場所が干渉し、レイアウトを検討したが改善できなかったため、データ回収ではなく送受信機の増強で対応することをCOBAND実験グループ内で検討した。その結果、計画当初(検出効率11%)の10分の1にイベントレートを落として実験を行う変更することに決定した。イベントレートは12kHzとなり、7ビットFADC(サンプリング $1\mu\text{s}$ 毎、最大127counts)を用いて $50\mu\text{sec}$ 分の信号波形を無線転送すると、転送速度4.6Mbps以上が要求される。このデータ減少によって、FADCで記録した信号波形を含めてコンパクト化したデータを送受信機の増強によって10Mbpsで無線データ転送するので、データ回収をする必要はなくなる。このデータ減少によって、当初計画の寿命下限値が現在の寿命下

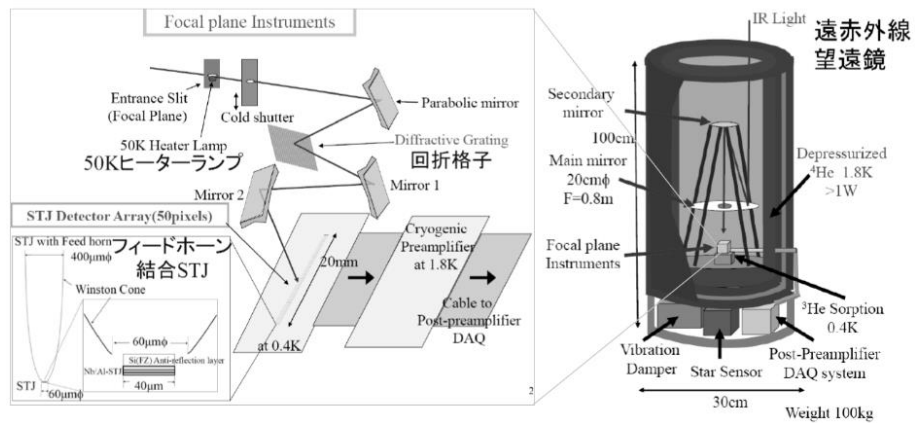


図2 50ピクセルのNb/Al-STJ検出器と回折格子を含む光学系が0.4K冷凍機内に設置されたロケット搭載用遠赤外線望遠鏡

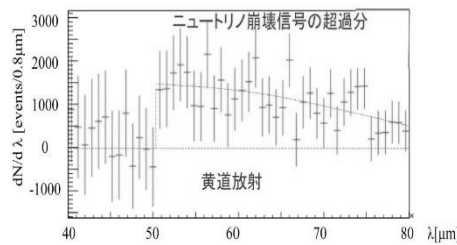


図3. 寿命 $10^{14}$ 年を仮定した本実験シミュレーションによるニュートリノ崩壊光の波長分布の一例。最尤法によって、黄道放射の寄与を引き去った分布。

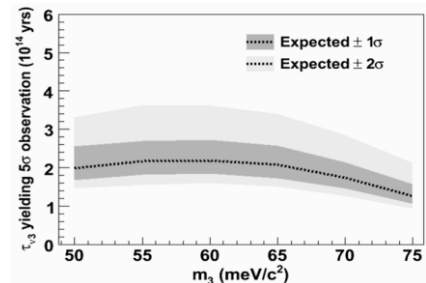


図4. 本実験によって発見可能なニュートリノ寿命のニュートリノ質量への依存性。

限値の 200 倍だったのが、70 倍に減少するが、MSSM 模型予言値をほぼカバーしており、科学的価値の低減は許容範囲である。系統誤差に対する要求は 0.1%から 0.3%に緩和される[8]。

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[10]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  $52^\circ$  銀経  $151^\circ$ ) で観測を行う[8]。高度 200 km 以上に到達後、測定を開始する。A 点方向に合わせるまでに観測したデータをスキャンデータとして用いる。A 点で 200 秒間観測を行った後に、校正を目的として、A 点から B1 点(銀緯  $33^\circ$  銀経  $140.5^\circ$ ) へ移動しながら、 $30^\circ$  の方向スキャンデータをとる。移動速度は毎秒  $0.6^\circ$  とする(図 5)。測定方向に望遠鏡を向ける絶対指向精度は  $1^\circ$  程度、指向安定性(機体軸直交)は A 点での観測時間中に A 点付近の Lockman hole が視野角内にとどまれるよう  $0.5^\circ/\text{min}$  が要求される。観測方向はスター・トラッカー(先端技術研究所製 CubeStar)を用いて 10 秒角の精度で測定される。S520-15 実験と同じように、飛行中に 30.72 秒ごとに 5.12 秒間シャッターを閉めてペDESTAL とする。また、シャッターを閉める直前に 5.12 秒間 50K ヒーターランプを ON にして校正を行う。スキャンデータ収集中、すなわち A 点から B1 点までの移動中は、この校正を行わない。(図 5 参照)

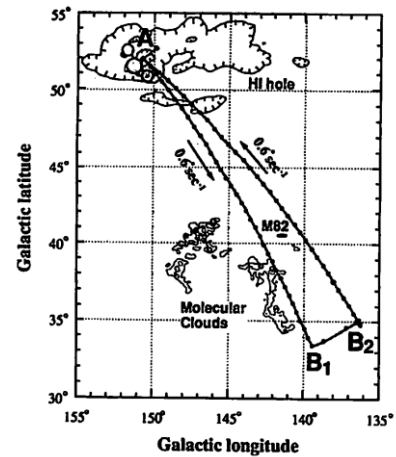


図 5. 測定点と移動経路。この図は S520-15 実験[10]から参照された。

### (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

本実験では、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 光子検出器を用いる。Nb/Al-STJ で遠赤外光一光子の検出を実現し、50 ピクセルの Nb/Al-STJ と回折格子を組み合わせて、 $15\sim 30\text{meV}$  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。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[9]。測定する波長領域  $40\sim 80\mu$  の遠赤外線光子で Nb/Al-STJ 検出器を校正するために、福井大学遠赤外領域開発研究センターの遠赤外分子レーザー装置を用いる。これは遠赤外線の連続ビームを出す。我々はこれを STJ 応答信号の応答時間数  $\mu\text{sec}$  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  $5\mu\text{sec}$  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 検出器にその波長  $57\mu\text{m}$  の遠赤外線連続ビームを入射したときに、120 nA の STJ 応答電流が流れることを確認した。

波長  $50\mu\text{m}$  の遠赤外光の信号電荷は  $0.03\text{fC}$  ( $250e$ ) なので、 $5\sigma$  で一光子検出するために、 $10\mu\text{sec}$  の積分時間に対してノイズを電荷 50e 以下という要求を観測装置に対して課す。この要求を満たすために、極低温 0.4K で動作する SOI (Silicon On Insulator) 技術で作製した 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、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[12]。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、STJ 信号を  $6.9\text{mV/fC}$  の増幅率で増幅することに成功した。この時の入力換算雑音は  $0.1\text{fC}$  ( $600e$ ) であった。さらに高い増幅率  $15\text{mV/fC}$  の SOI 電荷積分型増幅器を作成して現在試験中である。現在、この電荷積分型増幅器では、 $10\mu\text{sec}$  の積分時間に対しオープンループゲインの周波数帯域が十分でないため、STJ からの電荷を十分収集していないという問題がある。この問題を解決する試作器を

完成し、これも試験中である。その性能試験結果に基づいて、本実験で要求される低ノイズかつ十分な増幅率を持つように極低温 SOI 電荷積分型前置増幅器を設計する。

## 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 0.4K<sup>3</sup>He 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 ロケットに搭載して観測実験を行う。0.4K<sup>3</sup>He ソープション型冷凍機は、3K <sup>4</sup>He 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。ロケット搭載用 3K <sup>4</sup>He 減圧冷凍機プロトタイプを製作した。この 3K<sup>4</sup>He 減圧冷凍機内部に 0.4K<sup>3</sup>He 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的设计を行った。図 6 に示すような光学系の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、望遠鏡の主鏡直径 200mm、焦点距離を 546mm とし、STJ のピクセルサイズを回折限界の点像サイズ (Airy disk) を十分に含む 400 μm 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。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 を用いる。フィードホーン結合 Nb/Al-STJ は、

図 6 に示すように、入射口径が 400 μm φ、出射口径が 60 μm φ のウィンストンコーンの出口に 40 μm 角の Nb/Al-STJ が位置するものであり、Nb/Al-STJ 表面には反射防止のための Si 膜がつけられている。回折格子の設計は DiffractMOD 回折格子シミュレーションを用いて行い、回折格子試作器を遠赤外分子レーザーを用いて性能試験を行った結果、シミュレーション予測が正しいことを確認し、溝幅 365 μm の Al 製回折格子を用いることに決定した。回折効率は波長 40~80 μm の入射赤外線に対して 51~85% となった。CODE V 光学シミュレーションを用いて、集光効率を計算した結果、波長 40~80 μm の入射赤外線に対する集光効率は 18~37% となった。この集光効率は回折格子の回折効率を含む[8]。

反射防止膜の効率を評価するために、Si 製反射防止膜付き Nb 基板を試作し、遠赤外レーザービームを用いて、その性能試験を行った[13]。Si 反射防止膜は 2mm 角、厚み 10 μm で作製され、Si 基板上に Nb をスパッターした Nb 基板上に接着した。まず Nb の屈折率 n と消費係数 k が遠赤外領域で測定されていなかったため、室温で波長 47 μm と 118 μm について測定した結果、遠赤外領域でそれぞれ n=13, k=30 となった。その値を用いて波長 47 μm で反射率を計算した結果と反射防止膜効果を測定した結果は、図 7 に示すようにほぼ一致した。反射防止膜のある場合の反射率は、反射防止膜の大きさより十分に大きい 10 mm 直径の遠赤外レーザービームを照射して、ビームプロファイルを遠赤外検出器で水平方向、および垂直方向にスキャンして測定することによって、決定された。このように反射防止膜によって、集光効率を 5 倍以上改善できた。

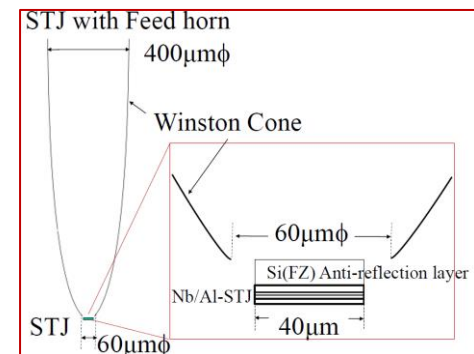
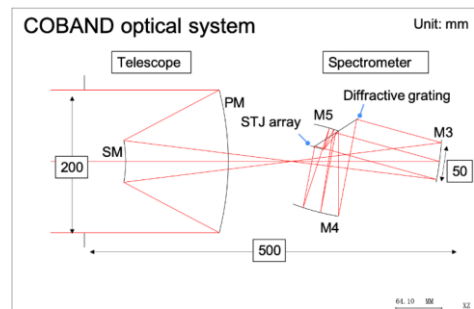


図 6. 光学系の基本設計(上)とフィードホーン結合 Nb/Al-STJ(下). 入射口径が 400 μ φ、出射口径が 60 μ φ のウィンストンコーンの出口に 40 μ 角の Nb/Al-STJ が位置する。

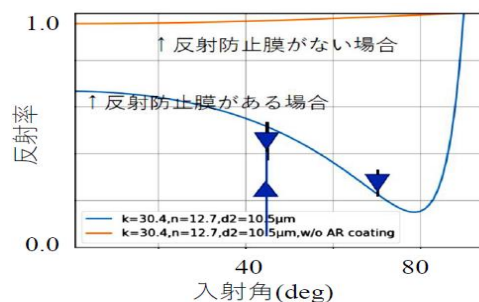


図 7. 波長 47 μm, S 波の遠赤外線に対する反射防止膜の有無による反射率. 曲線は理論予測を示し、▲は水平スキャン測定結果、▼は垂直スキャン測定結果を示す。

集光器はウィンストンコーン以外に円錐型、角錐型の集光器シミュレーションも行った結果、図 8 に示すように、円錐形集光器がウィンストンコーン集光器と同程度の集光効率をもつことがわかった。

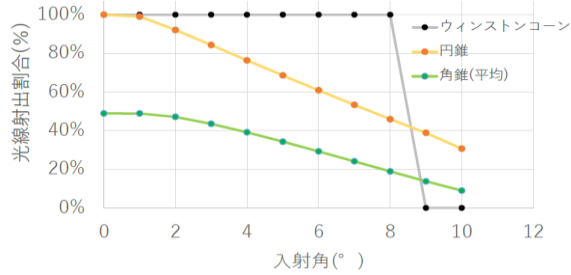


図 8. 集光器の集光効率の入射角依存性 (ウィンストンコーン, 円錐, 角錐について, それぞれ示す).

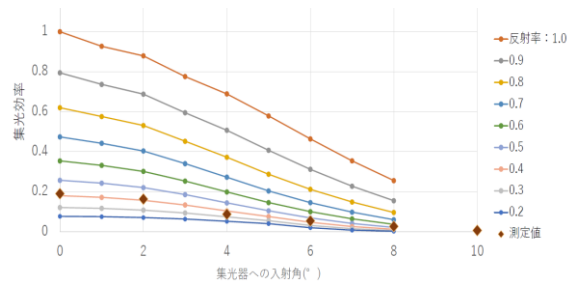


図 9. 円錐形集光器の集光効率の入射角依存性. 曲線はそれぞれ円錐壁面の反射率に対応する.

石英を加工し 100nm 厚の Al を蒸着した円錐形集光器を試作し、可視光から遠赤外線 (波長 400nm, 1.5 μm, 9.7 μm, 57 μm) までレーザービームを用いて性能試験を行った。その結果、遠赤外領域の集光効率が波長 9.7 μm で 20%以下 (図 9)、波長 57 μm で 0 となった。予想に比べて小さい集光効率は円錐壁面の Al の厚みが設計値より薄いことに起因している。

図 10 に示されるように、円錐壁面の Al の厚みが 4nm である場合、波長 1.5 μm, 9.7 μm, 57 μm の赤外光に対する反射率の測定値が予言値と一致した [14]。2024 年度に円錐壁面の Al の厚みが 100nm の集光器を製作し、遠赤外レーザービームを用いて性能試験を行う予定である。

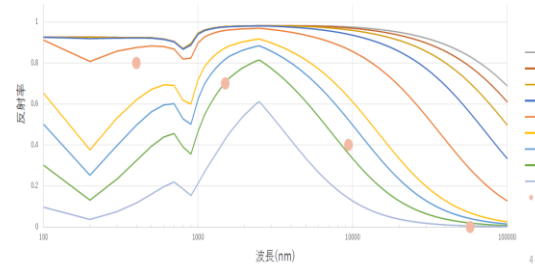


図 10. 円錐形集光器壁面の反射率の波長依存性. 曲線はそれぞれ異なる円錐壁面の Al の厚さに対応する.

反射防止膜の効率とフィードホーン結合 Nb/Al-STJ の集光器の効率を含むと、集光効率は 7~13% となった。今後 2024 年度に、極低温で、すでに試作している反射防止膜付き Nb/Al-STJ と防止膜なしの Nb/Al-STJ の遠赤外レーザービーム応答を比較して、反射防止膜による集光効率を測定する。

### (3) 打ち上げまでの開発スケジュールと開発課題

本実験の主要な開発課題としては、極低温 SOI 電荷積分型前置増幅器の開発があるが、これまでの試作器の性能試験で改良すべき点は明らかになったので、現在試験中の高周波数帯域で十分オープンループゲインの高い試作器が設計通りに動作すれば、この性能試験結果に基づいて、本実験で要求される低ノイズかつ十分な増幅率を持つように極低温 SOI 電荷積分型前置増幅器を設計し、その試作器を 2024 年度に製作する。この性能試験を 2024 年末に終えて最終設計を行い、2025 年に本実験用極低温増幅器を完成する。もう一つの主要開発課題である 0.4K 冷凍機については、2024 年度に既存の 3K<sup>4</sup>He 減圧冷凍機内部に、新たに製作する 0.4K<sup>3</sup>He ソープション型冷凍機を製作して設置する。2025 年夏までに、この性能試験を終えて、最終設計を行い、2026 年度に本実験用 0.4K 冷凍機を完成する。

フィードホーン結合 Nb/Al-STJ 検出器と回折格子を含む光学系の試作器を 2024 年度に製作する。2025 年度に、遠赤外線レーザーによる 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。2025 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 冷凍機の試作機のロケット打ち上げ時の振動環境を再現する振動試験を実施し、その結果に基づいて最終設計を完了する。2026 年春に反射鏡・回折格子・フィードホーン結合 Nb/Al-STJ 検出器を 0.4K 冷凍機に格納した本実験用赤外線観測装置を製作し、2026 年度に振動試験および検出器応答校正を行う。2027 年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  $3 \times 10^{12}$  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  $1.5 \times 10^{17}$  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  $5\sigma$  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 70 倍改善できる。その後, ピクセル数を  $50 \times 8$  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あるいは宇宙望遠鏡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, 将来は前景放射の寄与が少ない太陽-地球ラグランジュ点や惑星間空間に滞在することで極めて高い精度の観測を行う探査機計画 (宇宙望遠鏡) に向けて, 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, 将来実験で使用する。

人工衛星実験あるいは宇宙望遠鏡実験は 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 年までに完成する。

## (6) おわりに

本 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。その支援のもとに, 筑波大学の特命教授 1 名, 准教授 1 名, 助教 1 名が実施の中心となって本実験を推進している。COBAND 実験は, 国内機関では筑波大学, 関西学院大学, JAXA/ISAS, 国立天文台, 福井大学, 中部大学, 東京大学, 近畿大学, KEK, 産総研, 岡山大学, 静岡大学, 情報通信研究機構, 海外機関では中国中山大学, 韓国 IBSCUP, 米国フェルミ国立加速器研究所の 16 機関から総勢 33 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.* **D17** (1978) 1395-1401.
- (5) A. Aboubrahim, T. Ibrahim, and P. Nath, *Phys. Rev.* **D88** (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.*, 観測ロケットシンポジウム2022 講演集 Proceedings of Sounding Rocket Symposium 2022 SA6000185010, II-1 (2023).
- (9) S.H. Kim *et al.*, *JPS Conf. Proc.* **1** (2014) 013127, Y. Takeuchi *et al.*, 2015 IEEE International (2015) 551-555.
- (10) H. Matsuhara *et al.*, *PASJ*, **46** (1994) 665.
- (11) C. Asano *et al.*, *Mem. Grad. Eng. Univ. Fukui*, (in Japanese ) Vol. **66** (2017) 1.
- (12) S.H. Kim *et al.*, Proceedings of International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP2017) *SPPHYS* **213** (2018) 242-248.
- (13) 柏木隆城, 2022 年度筑波大学修士論文(2023).
- (14) 柏木隆城, 日本物理学会 2024 年春季大会講演(2024).