

## 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND 実験申請書 別添資料

## (1) 実験の背景および実験の科学的重要性・学術的意義

## (研究目的と期待される成果)

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  $3 \times 10^{12}$  年であるが、この実験の寿命感度は  $2 \times 10^{14}$  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。

## ① 実験の背景

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。

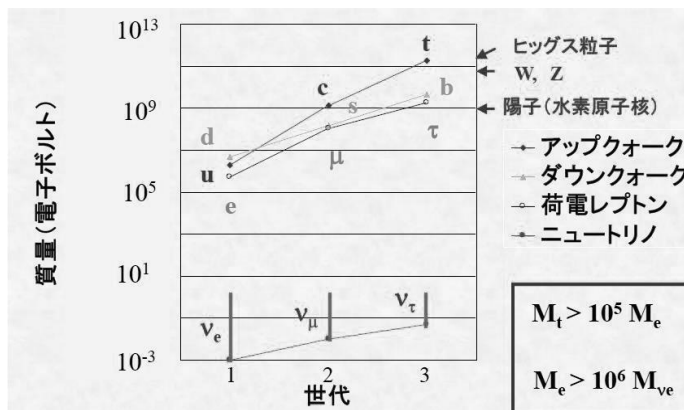


図 1. 3 世代の素粒子の質量。6 種類のクォークの仲間でも質量最小のアップクォークと最大のトップクォークで 5 桁の差があり、同じ第 1 世代レプトンでも電子と電子ニュートリノで 6 桁以上の差がある。

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。前者の検出のために国内では T2K 実験、ハイパーカミオカンデ計画など、海外

では米国の DUNE 計画などが実施あるいは準備を進められている。ニュートリノ質量測定の課題については、我々のニュートリノ崩壊探索実験以外にも、 $\beta$  崩壊の精密測定実験である KATRIN 実験の準備がドイツを中心に進められている。この実験はニュートリノの質量が 0.2eV 以上の時に、質量測定が可能なので、私たちが狙っている質量よりも高い質量領域を探索している。また KAMLAND-ZEN などの 2 重ベータ崩壊実験もニュートリノ質量の決定を目指しているが、この実験では最も軽いニュートリノの質量を決めるので、私たちの目指す最も重いニュートリノの質量の決定とは独立な結果を与える。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。

これらと異なった測定として、本研究の宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND (COsmic Background Neutrino Decay) 実験の準備を進めている。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、ビッグバン宇宙論で予言される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。

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[4]。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  $C\nu B$ ) 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  $1.9\text{K}$  ( $0.6\text{meV}$ ) で宇宙空間に一樣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  $25\text{meV}$  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 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。

## ② 実験の科学的的重要性・学術的意義

本研究は、これまでに行われたことのない方法で宇宙背景ニュートリノ崩壊を探索するものである。ニュートリノ崩壊時に発生する遠赤外線 ( $E_\gamma \sim 25 \text{ meV}$ ) のエネルギー領域では、黄道放射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[5]と、2011 年に AKARI 衛星による測定結果[6]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  $3\times 10^{12}$  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  $50\text{meV}$  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 100 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。将来の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  $2\times 10^{14}$  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。

## (2) 実験方法、実験シーケンス等の概念図

### ① 実験方法

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 [7] 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  $20\text{cm}$ 、焦点距離は  $80\text{cm}$ 、視野角は  $0.029^\circ \times 0.029^\circ$ 、ロケット実験データ収集時間は  $200\text{sec}$  である。最も重いニュートリノの質量が  $50\text{meV}$ 、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適化によって引き去った波長分布の一例は、図 4 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、

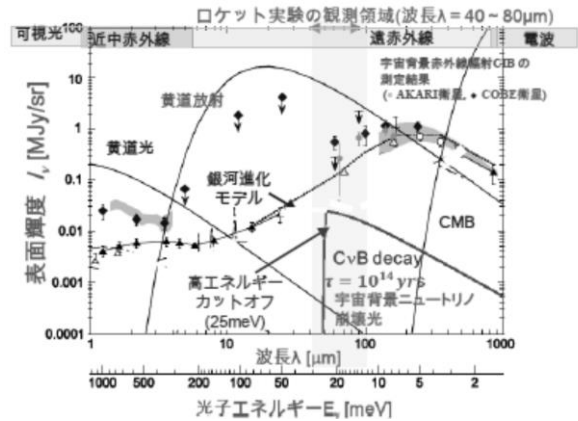


図 2. 宇宙背景ニュートリノ崩壊光のスペクトルと黄道放射スペクトルと宇宙赤外線背景放射の測定値 (COBE と AAKRI による測定。それぞれ 4 点)。宇宙背景ニュートリノ崩壊光のスペクトルは寿命  $10^{14}$  年のときの予言曲線

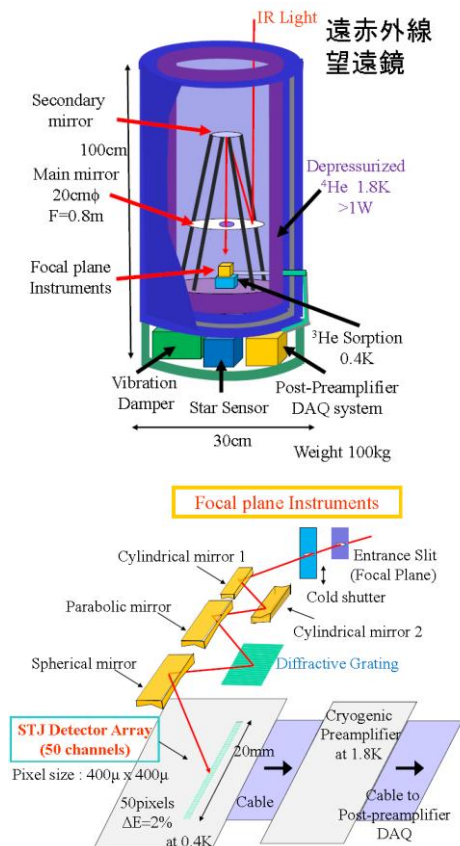


図 3 50 ピクセルの Nb/Al-STJ 検出器と回折格子を含む光学系が 0.4K 冷凍機内に設置されたロケット搭載用遠赤外線望遠鏡

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 $2 \times 10^{14}$ 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を示した。

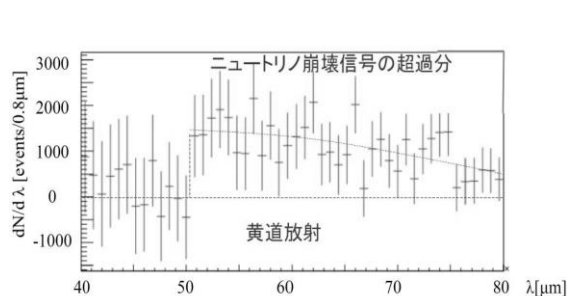


図4．本実験シミュレーションによるニュートリノ崩壊光の波長分布の一例。最適化を行うことによって、黄道放射の寄与を引き去った分布。

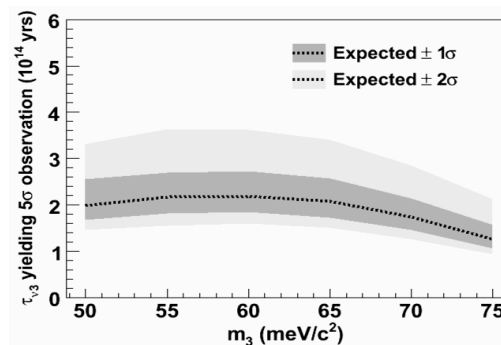


図5．本実験によって発見可能なニュートリノ寿命のニュートリノ質量への依存性。

## ② 実験シーケンス

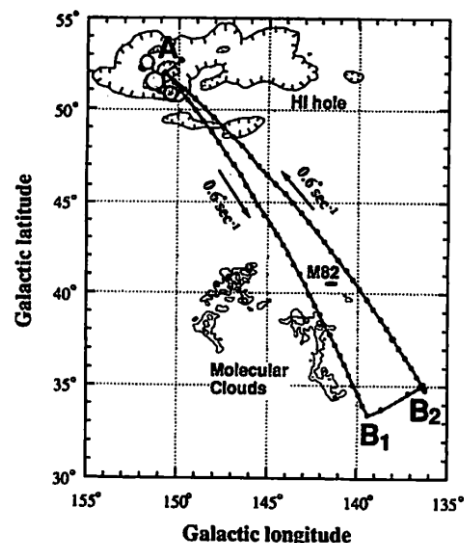
本実験は 1992 年 2 月 2 日午前 1 時に実施された S520-15 実験[8]で測定したのと同じ方向からの宇宙赤外線を観測する。打ち上げ前の作業を表1に示す。

X	10 時間 10 分	1 回目 液体 He トランスファー開始
—	4 時間 10 分	2 回目 液体 He トランスファー開始 (充填) 発射角 Az=145°, EL=85°
—	1 時間 43 分	電源オン (外部電源)
—	40 分	クライオスタット・タンクのポンピング開始
—	5 分	ポンピングラインのバルブを閉じる。 内部電源に切り替える。
—	4 分	ポンピングラインを切り離す。
X		打ち上げ

表1 打ち上げ前の作業

観測は、S520-15 実験[8]と同じように、A 点（銀緯 52° 銀経 151°）で行う。校正を目的として、A 点から B1 点（銀緯 33° 銀経 140.5°）へ移動し、さらに B2 点（銀緯 35° 銀経 136.5°）を経由して点 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）

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。



打ち上げ後の作業を表 2 に示す。

X + 55 秒	ロケットノーズコーンのカバーを除去 ポンピングラインのバルブを開ける。
+ 60 秒	ロケットモーターを切り離す。
+ 61 秒	ガスシェードを開ける。
+ 63 秒	飛行姿勢コントロールを開始。
+ 90 秒～	A 点
+ 130 秒	クライオスタットの蓋を開ける。 高度 220 km
+ 220 秒～255 秒	A 点から B1 点まで移動 (毎秒 $0.6^{\circ}$ )
+ 255 秒～	B2 点へ
+ 277 秒～310 秒	B2 点から A 点まで移動 (毎秒 $0.6^{\circ}$ ) 高度 338 km
+ 310 秒～430 秒	A 点
+ 430 秒～	地上へ向かう。(回復作業)
+ 480 秒	装置放棄 高度 182 km

表 2 打ち上げ後の作業

発射後、高度 200 km 以上で測定を開始する。S520-15 実験[8]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)

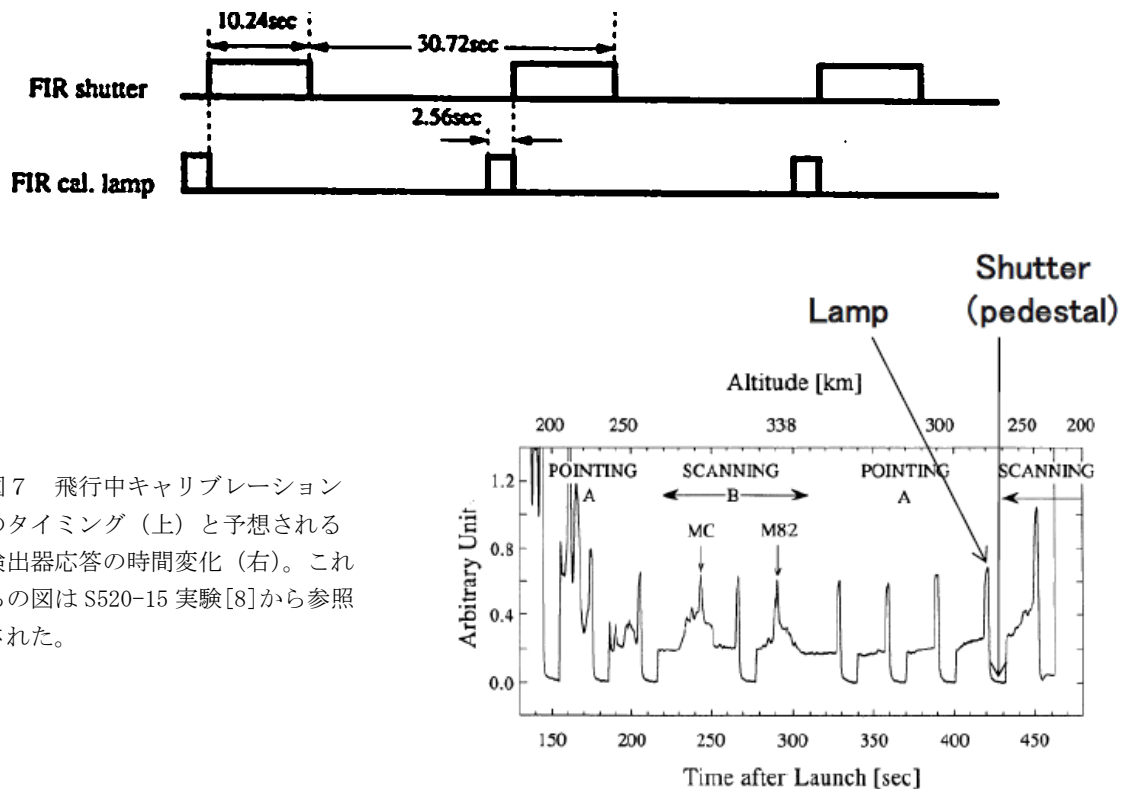


図 7 飛行中キャリブレーションのタイミング (上) と予想される検出器応答の時間変化 (右)。これらの図は S520-15 実験[8]から参照された。

### (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 [7] 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て、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。これを搭載したロケット実験により 5 分間の宇宙遠赤外線観測を行い、宇宙背景ニュートリノの崩壊を探索する。高いエネルギー分解能でエネルギーを測定するために、多チャンネル Nb/Al-STJ 検出器(50 ピクセル)と回折格子を組み合わせた観測装置を製作する。50 ピクセルの Nb/Al-STJ と回折格子で 15meV~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。

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[7]。

また 10  $\mu$  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[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、本実験で要求される増幅率を持つように設計した極低温 SOI 電荷積分型前置増幅器を現在試験中である。

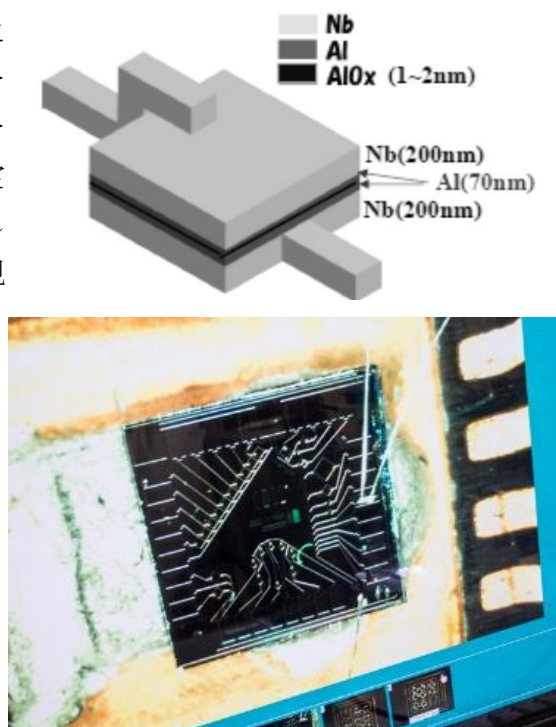


図 8. Nb/Al-STJ 検出器の構造(上)と複数の STJ を形成したチップ(下)

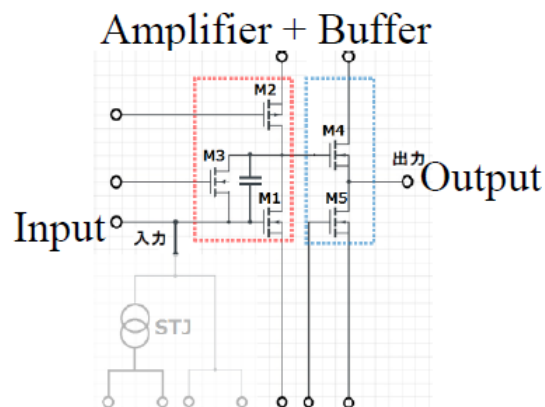


図 9. SOI 極低温前置増幅器試作 4 号機の回路図



## 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  $0.4\text{K}^3\text{He}$  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 宇宙赤外線観測実験ロケットに搭載して観測実験を行う。この観測によって、主に黄道放射による宇宙遠赤外線のエネルギースペクトルを波長  $40\sim 80\mu$  の範囲で、エネルギー分解能 2%, 統計精度 0.1% で測定する。

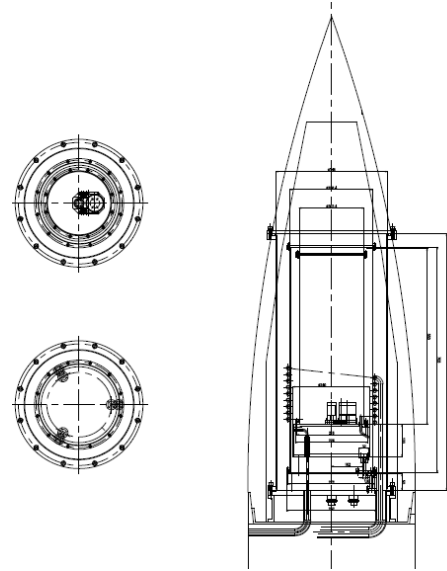
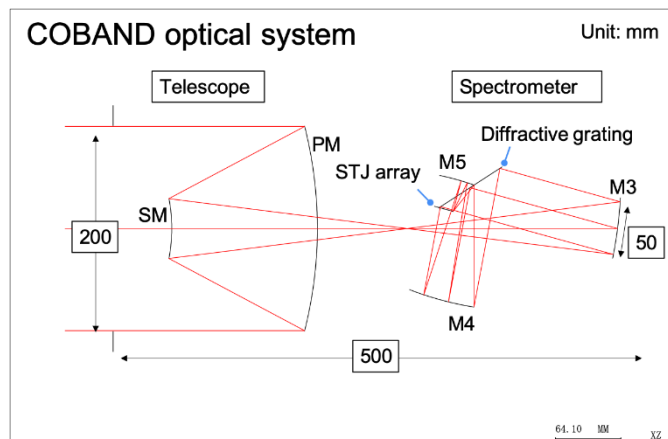


図 10. 冷凍機プロトタイプ(左)とその設計図(右)

### 0.4K $^3\text{He}$ ソープション型

冷凍機は、 $3\text{K}^4\text{He}$  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  $3\text{K}$  に保たれる。STJ 検出器は  $0.4\text{K}$  に保たれる。図 10 に示すように、ロケット搭載用  $3\text{K}^4\text{He}$  減圧冷凍機プロトタイプを製作した。この  $3\text{K}^4\text{He}$  減圧冷凍機内部に  $0.4\text{K}^3\text{He}$  ソープション型冷凍機、光学系機器、SOI 前置増幅器を設置し、 $0.4\text{K}$  冷凍機に STJ 検出器を設置する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  $800\text{ mm}$  ( $F/4$ ) 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  $400\mu\text{ m}$  角としている。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ている (図 11 のスポットダイヤグラム)。  $400\mu\text{ m}$  角ピクセルをカバーするために、フィールドホーン結合 Nb/Al-STJ の設計を行っている。



### Imaging performance (point spread function)

□ : STJ pixel size  
○ : Diffraction ring

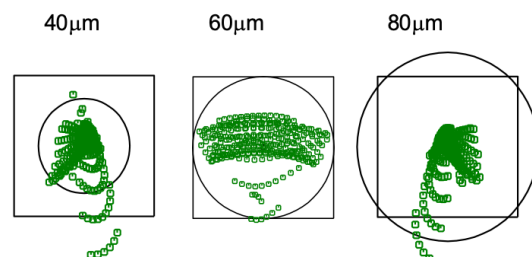


図 11. 光学系の基本設計(上)とシミュレーション結果(下)。スポットダイヤグラムでは、緑色の点がシミュレーションによる STJ での波長  $40\mu\text{ m}$ ,  $60\mu\text{ m}$ ,  $80\mu\text{ m}$  の遠赤外光線の広がりを示す。

### 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  $50 \mu \text{ sec}$  である。生データは  $1 \mu \text{ sec}$  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表 2 より、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＞

毎秒 7 ビット FADC  $\times 10^6 \text{ Hz} \times 50 \text{ channels} = 350 \text{ Mbits/sec}$

全体 340 秒間  $0.35 \times 340 = 119 \text{ Gbits}$

すべての生データ (コンパクト化していないデータ) 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 ( $1 \mu \text{ s}$  単位で最大 10msec) を用いる。

(1) ペDESTAL と Calibration Light 校正データについては、シャッターが閉じた最初の 2.5 秒間に Calibration Light 校正データをとる。そのあと続けて、シャッターが閉じている 10 秒間にペDESTAL データをとる。10msec ごとに  $50 \mu \text{ sec}$  の積分を行い、平均値をとり、1 イベント記録する。すなわち毎秒 100 イベントを記録する。Thresholds は 0 でデータをとる。このデータ群を Data Block1 (ペDESTAL と Calibration Light 校正データ) と呼ぶ。毎秒のデータサイズは、 $100 \text{ イベント毎秒} \times [15 \text{ ビット時間} (15 \text{ ビット}) + 50 \times \text{ADC} (7 \text{ ビット})] = 15 \times 100 + 50 \times 7 \times 100 \text{ bits} = 0.035 \text{ Mbps}$  である。ペDESTAL と Calibration Light 校正データを収集している期間は  $9 \times 12.5 \text{ sec} = 113 \text{ sec}$  なので、Data Block1 の全データサイズは 4.0Mbits である。

(2) 実データについては、シャッターが開いていて Calibration Light が点いていない 18 秒間に、0.5photon thresholds を超えたピクセルについて、 $50 \mu \text{ sec}$  の積分を行い、平均値をとり、1 イベントとして記録する。このデータ群を Data Block2 (実データは 10msec 毎に記録) と呼ぶ。このデータの構造はヘッダー (15 ビット時間) とデータ (10 ビット時間 (10 ビット) + ピクセルアドレス (9 ビット) + ADC (7 ビット)) から構成されており、10ms ごとにヘッダーが付く。その時間当たりのデータサイズは  $\text{毎秒 } 15 \text{ bits} \times 100 \text{ Hz} + 26 \text{ bits} \times 1 \text{ channel} \times 120,000 \text{ Hz} [\text{bits}] = 3.123 \text{ Mbps}$  となる。

また、実データ収集期間は  $11 \times 18 \text{ sec} = 198 \text{ sec}$  なので、全データサイズは 618Mbits である。

(1) + (2) より、Light 校正 + ペDESTAL + 実データ  $\rightarrow 3.16 \text{ Mbps}$  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。

以上に示した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、コンパクトディスクおよび USB 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 (通信速度 6Mbps) については、Addnics 社製作の S-band transmitter



( $>5\text{Mbps}$ )を用いることを計画している。

#### (4) 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(50 ピクセル)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  $15\sim 30\text{meV}$  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、 $100\text{pA}$  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  $0.4\text{K}$  で動作する低ノイズ前置増幅器等のエレクトロニクスの開発を進めている。この実現によって Nb/Al-STJ 検出器の遠赤外光一光子の検出を実現する。 $10\mu\text{sec}$  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  $0.4\text{K}$  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  $350\text{mK}$  で周波数  $0.5\text{MHz}$  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、本実験で要求される増幅率を持つように設計した極低温 SOI 電荷積分型前置増幅器を現在試験中である。

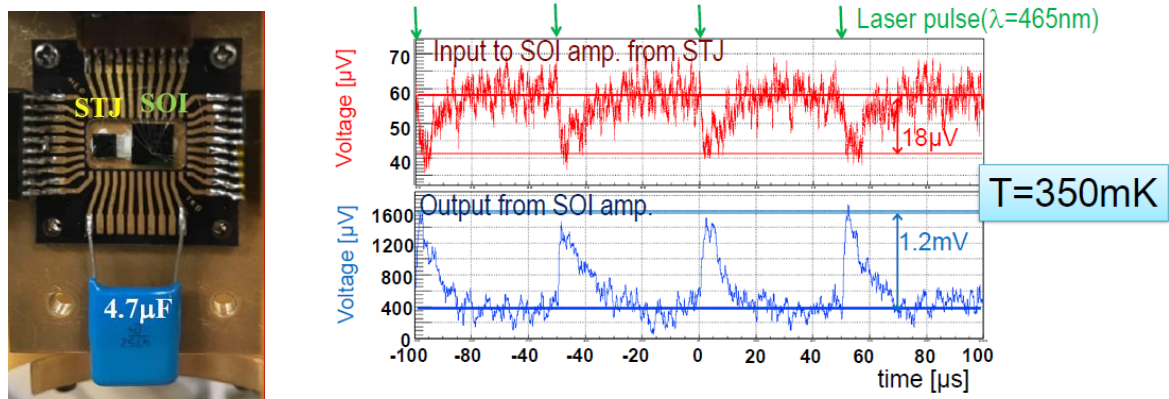
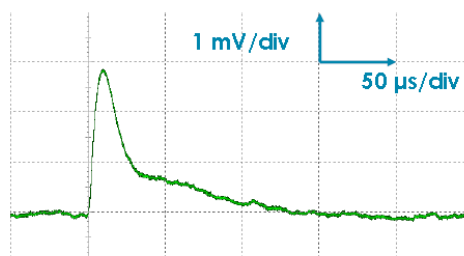


図 12. Al/Nb-STJ 検出器に SOI 極低温前置増幅器を同一チップキャリア上で接続したセットアップ (左上)、STJ 検出器の光応答信号とその SOI 前置増幅器による増幅信号(右上)、電荷積分型 SOI 増幅器による増幅信号(右下)。



可視光( $465\text{nm}$ )の STJ 信号を SOI-STJ5 で増幅した波形

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、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[10]。また、Al/Nb-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、120nA 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。

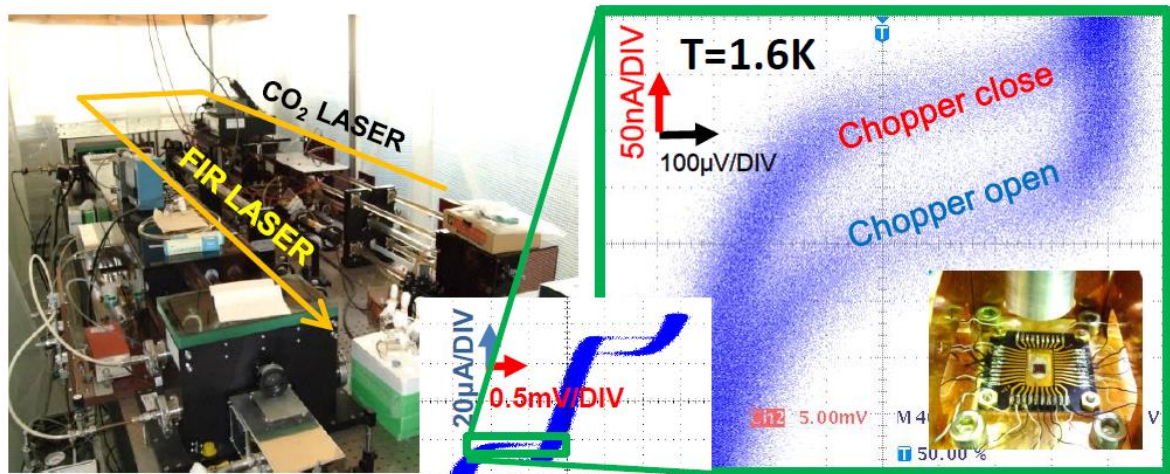


図 13. 遠赤外線レーザー発生装置(左)と Al/Nb-STJ 検出器にその遠赤外線光を入射したときの入射前後での STJ 検出器の電流電圧曲線の変化(右)。Chopper close が入射前, chopper open が入射後の電流電圧曲線を

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設計を完了し、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。これは将来の衛星実験の予備実験となる。

全研究期間を通して、勉強会、グループミーティング、研究会等を行って、情報交換を通して知識の向上をはかるとともに、検出器開発の計画を練り上げる。研究成果を物理学会・国際会議等で報告し、会議での議論・情報交換を通して検出器開発の推進に反映させる。

#### (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 100 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、可視光レーザーで光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 年までに完成する。また、2030 年頃に打上げ予定の SPICA 衛星では、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) 本実験を通じた人材の育成、教育、および社会との関わり

本研究で開発する多チャンネル STJ 赤外線検出器と分光素子を組み合わせた観測装置は、高効率・高エネルギー分解能で宇宙赤外線背景輻射の連続スペクトルを観測することを可能にするものである。この開発に携わる大学院生・若手研究者は、最先端超伝導検出器の専門家であり、かつ素粒子・宇宙融合領域の専門家となり、将来、素粒子・宇宙分野で活躍するのみならず、その先端的な知識と専門性により様々な分野で活躍することが期待される。

この赤外線検出器は高エネルギー分解能光子検出器として、他分野での応用が期待できる。たとえば X 線検出に用いれば、物質科学、生命科学で放射光を用いた実験で最先端 X 線検出器として大いに活用されることが期待される。また赤外線一光子検出が可能であることを利用して、量子情報通信分野での応用も期待される。

本研究計画では衛星実験による宇宙背景ニュートリノ崩壊探索が本実験であり、その予備実験としてロケット実験を行う。この宇宙背景ニュートリノ崩壊が検出できれば、ニュートリノの質量自体を決定できると同時に、ビッグバン宇宙論で予言されている宇宙背景ニュートリノの発見となる。この 2 つは素粒子物理と宇宙物理で緊急に解決すべき宿題であり、これを解決すれば、宇宙起源と進化の理解を深め、人類共有の科学の知の基盤を強化し、あらゆる分野の科学に大きな影響を与える。

#### (7) 概算費用内訳

本研究計画で用いるロケットは JAXA/ISAS が設計製作するもので、下記の所要経費には含まれない。2022 年度に行う予定の宇宙赤外線背景輻射観測実験で、ロケットに搭載する遠赤外線観測装置の開発・設計・製作・試験・本実験の所要経費を下記に示す。

2020 年度から 2024 年度の所要経費(単位 千円)は総額 182,000 千円であり、内訳は、以下のとおりである。

	2020 年度	2021	2022	2023	2024	計
STJ 検出器・増幅器・読み出し回路	14,300	35,000	2,000	2,000	2,000	55,300
光学系機器	6,000	14,000	0	0	0	20,000
冷凍機	7,000	19,000	0	0	0	26,000
計算機	3,000	3,000	2,000	2,000	2,000	12,000
データ通信機器	0	6,500	0	0	0	6,500
旅費・会議費・論文出版	3,500	4,000	6,000	6,600	6,600	26,700
人件費	7,100	7,100	7,100	7,100	7,100	35,500
総計	40,900	88,600	17,100	17,700	17,700	182,000

#### (8) その他

本研究は筑波大学宇宙史研究センター（<http://www.pas.tsukuba.ac.jp/~TCHoU/>）の代表的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、共同して本研究を推進している。本実験はCOBAND(Cosmic Background Neutrino Decay)実験と名付けられた。COBAND 実験のホームページは <http://hep.px.tsukuba.ac.jp/coband/> である。

本研究計画は 2008 年より筑波大学を中心にして進められてきており、現在は国内の 6 大学・4 研究所と海外の 1 大学・2 研究所による国際共同研究グループで、実験準備を進めてきた。

## 研究組織

COBAND 実験の実施機関は、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、産総研、海外機関では韓国ソウル国立大学、韓国基礎科学研究院、米国フェルミ国立加速器研究所である。実験メンバーは総勢 37 名である。筑波大学が実施の中心となり、宇宙背景ニュートリノ崩壊探索研究コンソーシアムを形成しており、実行組織の役割は以下のとおりである。

筑波大学	総括、実験設計・検出器開発・製作・試験、実験シミュレーション、光学系・クライオスタット設計開発、データ解析
JAXA/ISAS	ロケット製作、衛星製作、実験設計、エレクトロニクス開発、光学系・クライオスタット設計開発、データ解析
KEK	エレクトロニクス開発、STJ 検出器性能試験
理化学研究所	STJ 検出器設計製作・性能試験
産総研	STJ 検出器設計製作・性能試験
関西学院大学	実験設計、光学系・クライオスタット設計開発、データ解析
岡山大学	STJ 検出器設計製作・性能試験
福井大学	赤外線ビーム光源開発、光学系開発、STJ 検出器性能試験、データ解析
近畿大学	データ収集・転送
静岡大学	エレクトロニクス開発
ソウル大学	STJ 検出器設計製作・性能試験、読み出し回路開発
韓国基礎科学研究院	STJ 検出器性能試験、読み出し回路開発
フェルミ研究所	エレクトロニクス開発、STJ 検出器性能試験

主要な実験研究者(研究機関代表者など)からなる基盤研究の研究代表者、研究分担者、連携研究者、研究協力者の役割分担については、以下に示す。

研究代表者	金 信弘（筑波大学特命教授）総括、実験設計・検出器開発の検討
研究分担者	武内勇司（筑波大学准教授）STJ 検出器設計製作試験、冷凍機設計製作
研究分担者	吉田拓生（福井大学教授）赤外線ビーム光源開発、光学系開発
連携研究者	飯田崇史（筑波大学助教）光学系設計製作、STJ 検出器設計製作試験
連携研究者	和田武彦（JAXA/ISAS 助教）エレクトロニクス開発
連携研究者	松浦周二（関西学院大学 教授）実験設計の検討、光学系設計製作
連携研究者	新井康夫（KEK 教授）エレクトロニクス開発製作
連携研究者	加藤幸弘（近畿大学 教授）データ通信開発製作
連携研究者	浮辺雅宏（産総研 グループリーダー）STJ 検出器設計製作

研究協力者 Kim Soo-Bong (ソウル大教授) STJ 検出器開発, 読み出し回路開発  
研究協力者 Kim Yong-Hamb (韓国 IBS CUP 副所長) STJ 検出器試験, 読み出し回路開発  
遠赤外線観測装置の開発・設計・製作・試験・本実験の所要経費は現在申請中の科学研究費 (基盤研究 S, 基盤研究 A および新学術領域研究など) を充てることを計画している。

実施の中心となる筑波大学では上記の役割をはたすべく, 特命教授 1 名, 准教授 1 名, 助教 1 名, 研究員 1 名が本研究に専念しており, また筑波大学に 2017 年に設置された宇宙史研究センターの代表的プロジェクトとして強力な支援を受けている。

実験遂行後は, ロケット実験データの解析を速やかに行い, 研究成果を物理学会・国際会議等で報告し, 会議での議論・情報交換を通して将来計画実験の推進に反映させる。勉強会, グループミーティング, 研究会等を行って, 情報交換を通して知識の向上をはかるとともに, データ解析を練り上げ, 成果報告論文を完成し出版する。さらに将来計画の実験準備・設計を推進する。

#### <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 and W.J. Marciano, Phys. Rev. D**17** (1978) 1395-1401.
- (5) M.G.Hauser *et al.*, ApJ, **508** (1998) 25, D.P. Finkbeiner *et al.* ApJ, **544** (2000) 81.
- (6) S. Matsuura *et al.*, ApJ, **737** (2011) 2.
- (7) S.H. Kim *et al.*, JPS Conf. Proc.**1** (2014) 013127, Y. Takeuchi *et al.*, 2015 IEEE International (2015) 551-555
- (8) H. Matsuhara *et al.*, PASJ, **46** (1994) 665.
- (9) S.H. Kim *et al.*, SPPHY 213, 242 - 248 (2018) Proceedings of TIPP2017.
- (10) C. Asano *et al.*, Mem. Grad. Eng. Univ. Fukui, (in Japanese ) Vol. 66 (October 2017) 1.