

## 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索

### ① 計画の概要

本研究では、宇宙背景放射と同様に宇宙初期に生成され、宇宙空間に一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。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%以下の精度で測定する超伝導トンネル接合素子 (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 20cm・視野 0.1 度の望遠鏡と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トンネル接合素子検出器 STJ (Superconducting Tunnel Junction) と分光素子を組み合わせた観測装置の開発を行う。Nb/Al-STJ 検出器の構造は、2層の Nb 薄膜の間に Al 薄膜層と AlOx の酸化絶縁膜が挟まれた Nb/Al/AlOx/Al/Nb サンドウィッチ構造である。本研究では、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設計・開発・製作を行い、2021-2022 年にこの観測装置を搭載したロケット観測実験を予備実験として行う。このロケット実験によって現在の寿命下限  $10^{12}$  年を 100 倍改善する。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観測装置として開発研究を行う。人工衛星搭載実験は 2030 年頃実施することを目指す。

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・1 研究所による国際共同研究グループで、年 6 回程度の計画検討会で実験準備を進めてきた。

### ② 学術的な意義

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。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 20cm・視野 0.1 度の望遠鏡と赤外線検出器を搭載した人工衛星で観測するとき信号のレートは毎秒 30 事象となる。COBE と AKARI による黄道放射バックグラウンド実測値を用いると、S/N 比は  $2 \times 10^{-6}$  となるので、100 日間観測することによって、有意度  $5\sigma$  で検出できる。我々が 2012 年に発表した JPSJ 論文では、AKARI の観測結果から求めたニュートリノ寿命の下限が  $4 \times 10^{12}$  年となることを報告すると同時に、この衛星実験の提案を行った。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、標準宇宙理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。2021-2022 年に予備実験として観測時間 5 分間のロケット実験を行う。これによって、ニュートリノ寿命下限を 100 倍改善できる。

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放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。

### ③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

ニュートリノ物理学はニュートリノ振動の発見以来、大きな発展を示している分野である。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ている。現在、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。前者の探索のために国内では 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。後者の課題については  $\beta$  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おり、それ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を筑波大学が中心となって進めている。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、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。

### ④ 実施機関と実施体制

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、東京大学、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。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、データ解析
理化学研究所	STJ 検出器設計製作・性能試験、データ解析

東京大学	STJ 検出器設計製作・性能試験、データ解析
産総研	STJ 検出器設計製作・性能試験
岡山大学	STJ 検出器設計製作・性能試験、データ解析
福井大学	遠赤外線ビーム光源開発、STJ 検出器性能試験、データ解析
近畿大学	STJ 検出器性能試験、データ解析
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
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、データ解析
韓国基礎科学研究所	STJ 検出器設計製作・性能試験、データ解析
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、データ解析

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年に新設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。

### ⑤ 所要経費

本研究計画で用いるロケットおよび観測衛星は 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。2021-22 年に行う予定である宇宙赤外線背景輻射観測実験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・本実験および、2030 年頃に行う予定である宇宙赤外線観測衛星に搭載する遠赤外線観測装置の開発・設計・製作・試験の所要経費を下記に示す。

2019 年度から 2026 年度の所要経費(単位 百万円)は総額 1996 百万円であり、内訳は、計算機システムは総計 520 (2019 年度 30、2020-2026 年度 70)、検出器開発製作は総計 990 (90、150、110、100、100、200、140、100)、光学系システムは総計 150 (10、25、15、10、10、40、30、10)、旅費・会議費・論文出版は総計 140 (10、10、20、20、20、20、20)、人件費(研究員 2~4 名、事務補助員 1 名)は総計 196 (14、26、26、26、26、26、26) である。

### ⑥ 年次計画

本研究では、高いエネルギー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いる。この装置で 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。

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の開発によって、これまでに STJ の光応答信号を 70 倍に電圧増幅することに成功し、0.3mV/fC の増幅度で荷電積分増幅することにも成功した。15mV/fC の増幅度の荷電積分増幅部と 70 倍の電圧増幅部を組み合わせた極低温増幅器を試作して試験中である。この極低温増幅器が設計通りに動作すれば 2019-2020 年度に Nb/Al-STJ 検出器の遠赤外線一光子の検出を実現する。

2019-2020 年度に反射鏡・分光素子・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(図1)を製作する。この製作に要する予算として応募中の科研費基盤 S が期待されている。

2021-2022 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。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。衛星搭載実験を 2030 年頃に実施するための光学系・冷凍機・検出器製作を 2024 年に開始する。

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。

### ⑦ 社会的価値

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、標準宇宙理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 つは素粒子物理学と宇宙物理学で緊急に解決すべき宿題であり、これが解決すれば、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。

この実験に用いるために開発している超伝導赤外線検出器は高エネルギー分解能光子検出器として、非常に多くの用途があり、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、生命科学の分野で放射光を用いた実験研究において高エネルギー分解能 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。これらの応用は経済的・産業的価値を生み出す。

### ⑧ 本計画に関する連絡先

金 信弘 (筑波大学・数理解物質系)

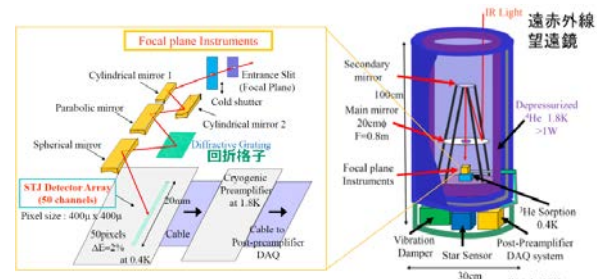


図1 遠赤外線観測装置