

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01916

研究課題名（和文）インフレーション仮説検証に向けた0.1ケルビン冷却と高速スキャン技術の融合

研究課題名（英文）Development of the technology of 0.1-Kelvin cooling on a high-speed rotating platform for the inflation hypothesis verification

研究代表者

小栗 秀悟（Oguri, Shugo）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：20751176

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：インフレーション宇宙論の解明を目指し、次世代CMB偏光観測実験のための技術開発を行った。CMB偏光観測の高感度化に必要なのは、検出器自体の高感度化と、高速な信号変調技術の両立である。この両立を目指して、希釈冷凍機を回転台の上で運用するための技術開発を行った。実現のために課題になるのは、台上の冷却部と台の下にあるガスハンドリングシステムの間の配管（回転継手）である。試作機を開発してテストした結果、回転部のシール能力が、希釈冷凍機の要求を満たせないことが明らかになった。一方で、ある程度のリークがあっても成立する継手のデザインが固まり、実現への足がかりを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の目指す、「インフレーション宇宙論の解明」は、我々の宇宙はどうやって始まったのか、という根源的な問いである。すでにビッグバンは一定の市民権を得ているが、それより前の宇宙は未知であり、ここに光をあてることで人類の知的好奇心を満たせると信じている。

今回開発を行った、回転系の上で100mKを実現する技術は、世界に類を見ない。希釈冷凍機は、物性や量子コンピュータなど様々な分野で活用されており、本技術も宇宙素粒子分野外への波及効果が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We developed technology for next-generation CMB experiments for the verification of the inflation cosmology. To improve the sensitivity, we tried to decrease the detector temperature to 100 mK, while maintaining the high-speed rotation scan. The main development item is to confirm the technology to operate a dilution refrigerator on a rotation table via the rotary joint for the gas line.

We made a prototype of the rotary joint and check the leak rate. The leak speed of helium was no problem to operate pulse tube coolers, but it was not negligible for dilution refrigerators.

We also make an updated design of the rotary joint. It can be operated in the gas line of dilution refrigerators by collecting and putting back the leaked helium gas. It is a milestone to establish this technology.

研究分野：宇宙マイクロ波背景放射

キーワード：CMB

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙初期を記述するインフレーション宇宙論、その解明を目指し CMB 偏光観測の分野では多くの実験がしのぎを削っている。インフレーション宇宙論は、急激な空間の膨張により原始重力波が発生したと予言しており、その痕跡を、ビッグバンの残光である CMB の偏光パターン上に見出そうとするのが研究の最前線である。本研究の主眼は、その観測技術向上に向けた研究開発である。

(2) CMB 偏光観測の高感度化に必要なのは、検出器自体の高感度化と、高速な信号変調技術の両立である。そもそもの信号が微小のため、検出器の低ノイズ化に加え、検出器応答性能のドリフトも低く抑える必要があるのが、その理由である。ノイズレベルは、検出器の冷却温度に大きく依存する。申請者の参加する GroundBIRD プロジェクトでは、ソーブション冷凍機を用いて検出器を 250mK 近くまで冷却するが、仮に希釈冷凍機を導入して 100mK まで冷却できれば、一桁以上の高感度化が期待できる。一方、信号変調技術は色々な手法が研究されている。中でもロバストな方法として多くの実験に取り入れられているのがスキャン変調と呼ばれる手法である。簡単にいうと、望遠鏡を向ける方向を周期的に動かして、その周期的な信号以外を除去する手法であるが、望遠鏡を動かす時間周期によって制限を受ける。GroundBIRD では、回転台の上に望遠鏡を設置して1周3秒で回転させることで、業界でトップクラスのスキャン変調を実現している。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、回転台による高速スキャン変調と希釈冷凍機を融合させて、高感度な CMB 偏光観測技術を確立させることである。現行の高速スキャン変調システムでは、パルス管冷凍機のための高圧ヘリウム配管(10 20 気圧)を回転継手を通じて回転台上に供給している。パルス管冷凍機の冷却温度は 4K までであり、単体では不十分なため、ソーブション冷凍機で 250mK までの冷却を行う。このソーブション冷凍機は、常温部(回転台の下)とのガス交換が必要ないのが強みである。

(2) このソーブション冷凍機を希釈冷凍機に変更する場合は、新たに He3・He4 混合ガスを回転台下のガスハンドリングシステムとやり取りさせる必要がある。He3・He4 ガスの混合比は、希釈冷凍機の運用においてシビアなため、パルス管冷凍機用の配管と混ざらないようにする必要がある。

3. 研究の方法

(1) 図 1 のような断面図の、回転継手の試験器を製作した。この回転継手は GroundBIRD で用いられている回転継手を元としている。固定部の内

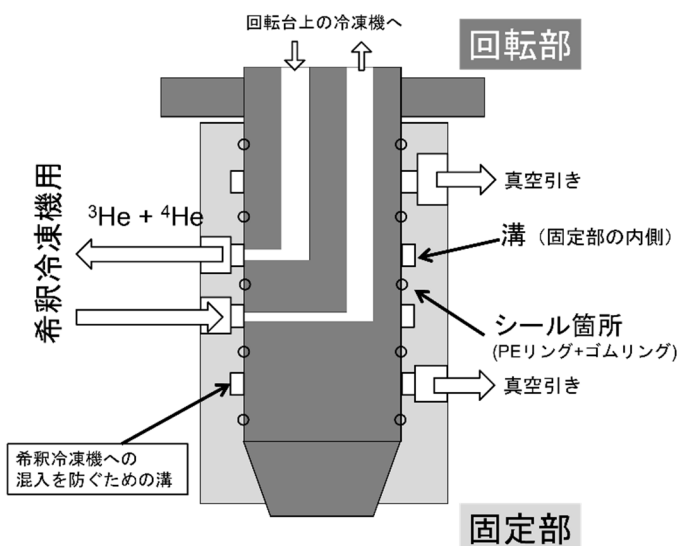


図 1: 試作した回転継手の断面図のデザイン。台上につながるポートは 2 つで、その両側に真空引き用ポートを追加した。

側に円周上の溝を掘り、回転部の配管の端点が常に溝と向かい合うことで、回転中の配管の接続を可

能にしている。溝と溝の間は、ゴムとプラスチックを組み合わせたシール材で、ガス漏れを防止する。しかし、漏れを0にはできないため、ガス受け渡し用のラインとは別にダミーのラインを追加し、そこに漏れ出たガスを回収して戻すことで、長期運用を可能にするデザインとなっている。

(2) 試験器に加圧し、ガスのリークを評価した。具体的には、ラインの一つにヘリウムリークディテクターを取り付け、隣のラインにヘリウムを封入し、そのリーク量を測定した。

(3) (2)の結果、思ったよりも大きいリーク量だったため、そのリークの原因を調査した。リークの原因として、シール材のヘリウムの透過(吸収と放出)が考えられたため、シール材にヘリウムを吸収させ、その後リークディテクターで放出量を測定し、透過量を見積もった。

(4) 並行して、CMB 偏光観測技術の向上の検証用に、検出器やそのノイズ評価系の開発も行った。GroundBIRD で用いる KID(力学的インダクタンス検出器)のアップデートを東大にて、KID にミリ波信号を入れてノイズ評価する系の構築を理研で行った。今回の報告書では、その内容も報告する。

4. 研究成果

(1) 作成した試験用の継手を図 2 に示す。回転部の配管は上部に、固定部の配管は側面に配置されている。ダミーポートは、袋小路になっており、固定部のみ配管を接続できる。行きと帰りの2ポートをダミーポートが挟むような形で配置されている。帰りのポートのみ、真空引き用に KF のポート、残りは加圧することも想定して Swagelok のポートとした。また、回転時の漏れもチェックするため、手動のハンドルも取り付けた。



図 2: 作成した回転継手と、その試験中の様子。回転部の上部には黒いハンドルをとりつけ、回転させながらリークの状況を確認した。

(2) 最初に、バルブのみを取り付けて、数気圧ヘリウムを封入し、漏れをチェックした。本来は循環用の配管を接続するが、このテストでは回転継手内部の容積しかないため、数十倍～数百倍の加速試験をしていることになる。その結果、真空引きのライン、ヘリウム封入のラインも、1ヶ月程度で大気圧近くまで下がってしまうことが確認された。ラインごとの漏れやすさの違いはなく、いずれも同様の時間スケールでの圧力低下が確認された。

(3) 次に、バルブにヘリウムリークディテクターをとりつけ、隣のラインをヘリウムで加圧し、漏れの状況を定量的に確認した。その結果、断続的なリークが確認でき、平均すると 10^{-8} Pa m³ /sec 程度の漏れが確認された。漏れ量は、数十秒～数分ぐらいのスパンでの変動はあるものの、継手の回転とは無関係なタイミングで変動しており、継手の周囲にヘリウムを吹き付けても、鋭敏に反応するところは確認できなかった。また、全ラインから一度ヘリウムガスを抜いても、断続的な変化は続いたため、シール部がヘリウムを吸収、透過、放出させていると推論した。



図 3: 溝と溝の間を分離するためのシール材。PE 部分と回転部が擦れる構造。

(4) シール材のヘリウム吸収・放出量を測定した。メーカーより支給頂いたシール材を図 3 に示す。このシール材を小さな真空容器にいれ、放出されるヘリウムを測定した(図 4)。その結果、空のデュワーでは 10^{-9} Pa m³/sec 以下だったのに対し、ヘリウムを吸収したシール材は、ゴム部、PE 部いずれも、 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ Pa m³/sec 程度放出があり、しかもこの放出が長い期間継続することが確認できた。この値は、継手のリーク量と無矛盾な結果である。



図 4: シール材からのヘリウムの放出量を測定するためのセットアップ

(5) 以上の結果を総合して、回転継手のシール材を透過する形で、ヘリウムが断続的にリークしていると結論づけた。このリーク量は、PTC の配管として用いる場合には、空になるまで数万年もかかる計算になるため、影響は軽微である。しかし、希釈冷凍機にとっては無視できないリーク量であり、改善が必要である。残念ながら、本研究期間内ではこの解決には至らなかった。

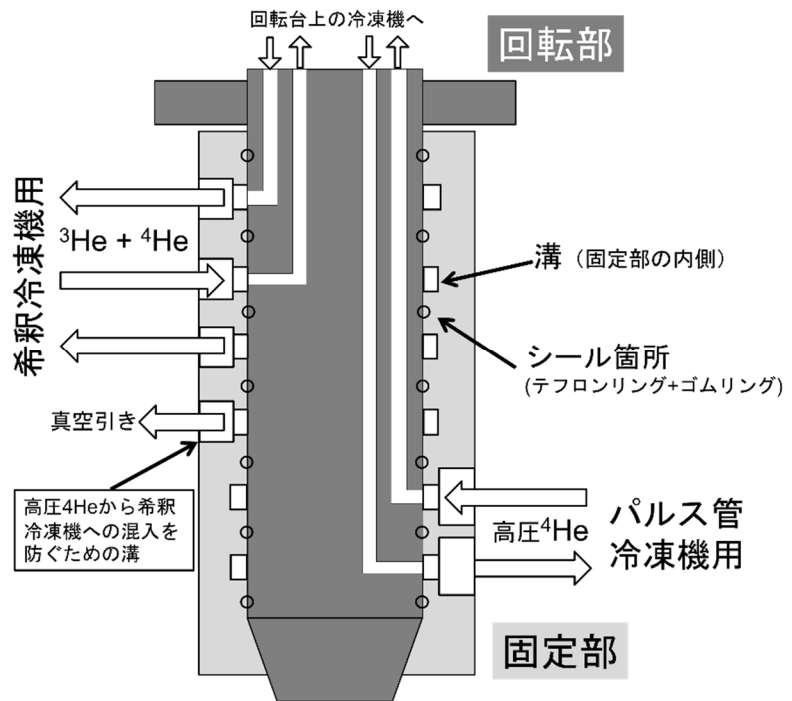


図 5: 今回の研究成果を踏まえた回転継手のデザイン。希釈冷凍機にとって、シール材部分のヘリウムの行き来の影響は無視できないため、リーク前提のセットアップとなっている。

(6) この改善のためには、リークすることが前提で継手を設計する必要がある。現在考えているのは、図 5 のようなセットアップである。希釈冷凍機の 2 つのポートは、大気圧前後の冷凍機へ送るラインと、ほぼ真空の冷凍機が

ら戻るラインがある。希釈冷凍機からのリークは、主に「送る」ラインで起こるため、その両側のラインをどちらも「戻る」ラインにすることで、防止することができる。一方で、「戻る」ラインへは外部からのガス混入が懸念される。空気の混入はトラップで回収できるため問題ないが、PTCのラインからのHe4の混入は、He3/He4のバランスが崩れるために致命的である。そこで、PTCのラインと「戻る」ラインの間には、真空引きのラインを追加することで、混入を防ぐ。この知見を得られたのが、今回の成果の一つである。

(7) GroundBIRD はクーパー対が持つ慣性によるインダクタンスを利用した超伝導力学的インダクタンス検出器(KIDs)を採用した。KIDs で CMB 偏光を観測するためにはミリ波を電気信号に変換してセンサー一部である KIDs に導くための超伝導のミリ波回路が必要不可欠となる。本研究では歩留まり向上のためピアと呼ばれる層間配線を必要としないピアなしの交差回路を研究した。図はデザインの検証用に高周波基板を用いて作製した交差回路である。先行研究[Abbosh2012]を参考として検証を容易にするため 6GHz 程度を中心周波数として設計・試作し、シミュレーションと整合性のある比帯域約 100%を確認した。(図 6)

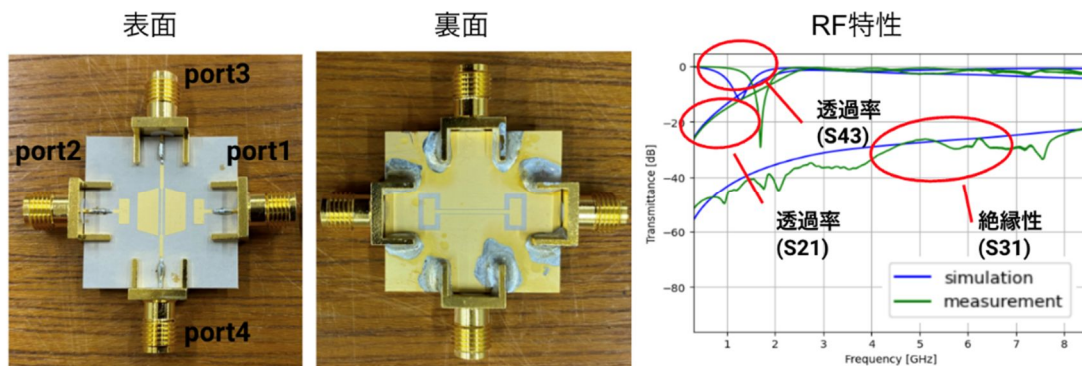


図 6: 検出器の性能向上に向けて開発した交差回路。層間配線を排除することで歩留まり向上が期待できる。

(8) 理研で構築したノイズ評価系の模式図を、図 6 に示す。回転継手の運用までは至らなかったが、運用後のノイズ評価系として、並行して準備を進めていた。KID は希釈冷凍機の冷却ヘッドにて 100mK まで冷却される。下部には、光学フィルターを通して、ミリ波を導入できる窓があり、逓倍器によって入射パワーをコントロールできる。逓倍器と局部発振器の間にはスイッチも入っており、入射条件を変えながらノイズ評価をできる系を構築した。

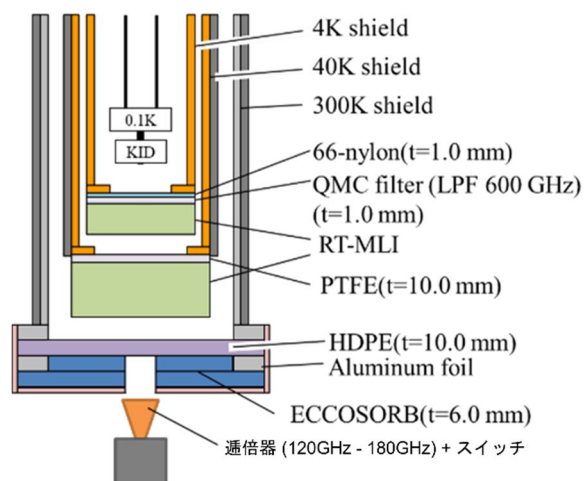


図 7: 検出器のノイズ評価システム。超伝導検出器 KID を 100mK まで冷却し、逓倍器によってミリ波を照射した状態でのバックグラウンドノイズを測定できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kutsuma H., Hattori M., Koyano R., Mima S., Oguri S., Otani C., Taino T., Tajima O.	4. 巻 115
2. 論文標題 A measurement method for responsivity of microwave kinetic inductance detector by changing power of readout microwaves	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 032603 ~ 032603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5110692	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Terasaki Tomoki, Kiuchi Kenji, Honda Shunsuke, Oguri Shugo, Nishinomiya Yume, Kusaka Akito	4. 巻 209
2. 論文標題 Development of Al-Nb Hybrid Lumped-Element Kinetic Inductance Detectors for Infrared Photon Detection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 441 ~ 448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-022-02745-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 長崎岳人, 木内健司, 美馬寛, 小栗秀悟, 他30名
2. 発表標題 CMB観測実験GroundBIRDにおける最終試験ならびに観測サイト整備状況
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 美馬寛, 小栗秀悟, 木内健司, 長崎岳人, 他32名
2. 発表標題 CMB偏光観測実験GroundBIRD - 検出器アレイ開発とその評価
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本多俊介, 小栗秀悟, 木内健司, 長崎岳人, 美馬覚, 他31名
2. 発表標題 CMB望遠鏡GroundBIRDのコロナ禍での再始動
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本多俊介, 小栗秀悟, 木内健司, 長崎岳人, 美馬覚, 他31名
2. 発表標題 CMB望遠鏡GroundBIRDのフルリモート観測に向けた開発状況
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本多俊介, 小栗秀悟, 木内健司, 長崎岳人, 美馬覚, 他32名
2. 発表標題 CMB望遠鏡GroundBIRDのサイエンス観測に向けた準備状況 - ワイヤーを用いた偏光応答特性の評価
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤濤, 木内健司
2. 発表標題 両偏波感度を有する超伝導検出器に向けたミリ波回路の開発
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

research map https://researchmap.jp/shugo_oguri/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	長崎 岳人 (Nagasaki Taketo) (00752346)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子 原子核研究所・研究員 (82118)	
研究分担者	木内 健司 (Kiuchi Kenji) (00791071)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教 (12601)	
研究分担者	美馬 覚 (Mima Satoru) (50721578)	国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所神戸フロンティア研究センター・研究員 (82636)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
スペイン	IAC			
韓国	Korea University			