

氏 名 渡辺 広記

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1822 号

学位授与の日付 平成28年3月24日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 超伝導共振器を用いた宇宙背景放射偏光観測用ミリ波検出器(MKIDs)の開発

論文審査委員 主 査 教授 新井 康夫  
教授 羽澄 昌史  
教授 榎田 康博  
准教授 吉田 光宏  
助教 長谷川 雅也  
准教授 石野 宏和 岡山大学大学院

論文内容の要旨  
Summary of thesis contents

宇宙マイクロ波背景放射(Cosmic Microwave Background, CMB) 偏光観測実験は、CMBの偏光パターンの精密測定を目的とした実験である。現在までのCMB観測実験結果により、ビッグバン以前にインフレーションと呼ばれる急激な加速膨張があったことが支持されている。インフレーション時には急激なメトリックの変化により原始重力波が生成され、これによりCMBにはB-modeと呼ばれる渦状の偏光パターンが生成される。従って、B-mode偏光の偏光パターンと、その揺らぎを精密に観測することができれば、インフレーション時のパラメータを精密に決定することができ、インフレーションの直接的な証拠となる。

CMB偏光観測実験に用いる検出器としては、40~400 GHzの観測周波数に対して、2バンド以上の観測周波数を持ち、画素数が1000画素以上のアレイ、検出器感度は地上観測の場合で $10^{-16}$  W/√Hz以下を要求される。筆者等のグループで開発しているミリ波検出器 Microwave Kinetic Inductance Detectors (MKIDs) は超高感度かつ多素子化が可能な検出器であるため、開発に期待が寄せられている。

しかしながら、高機能アンテナを用いた従来の多色MKIDsでは、アンテナで受けた電磁波をMKIDsに吸収させようとする、共振器の共振性能が劣化し、感度が低下するという問題が知られている。原因はアンテナで受信した電磁波の導入を、共振器のCoplanar Waveguide (CPW) 構造のセンターストリップ上にマイクロストリップライン(MSL)と呼ばれる伝送線路を重ねた構造を取っているためである。この導入方法では、共振器とMSLが結合することで、共振器にたまったマイクロ波がMSLを通り放射され共振器の性能が劣化してしまう。

本論文では、この問題を回避しつつ、MKIDsに電磁波を効率よく導入することが可能な全く新たな結合手法をもつGround Side Absorption KIDs (GSA-KIDs)の開発を行っている。GSA-KIDsは従来の多色MKIDsが共振器のセンターストリップ上に導入していたMSLを、共振器のグラウンド側に導入するというデザインである。グラウンド側に導入することで共振器とMSLの結合を回避でき、共振性能の劣化を防ぐことが可能となる。

超伝導状態の金属には、2つの電子が対になったクーパー対が存在するが、このクーパー対の存在により、超伝導体には通常の磁気インダクタンスに加え、力学インダクタンスが生じる。MKIDsは超伝導体で共振器を作り、電磁波入力による共振器の力学インダクタンスの変化を利用する事で、共振周波数の変化として電磁波を検出する。クーパー対の結合エネルギーは超伝導体の材質により決まり、結合エネルギー以上の電磁波が超伝導体に入射するとクーパー対が破壊され、力学インダクタンスが変化する。超伝導体の材質を選ぶことで、目的の周波数に感度のあるMKIDsを製作することが可能である。

MKIDsの検出器感度は検出器の有感部分の体積の逆数 $1/V$ 、インダクタンス比 $\alpha$ 、共振のQ値に比例する。既存のMKIDsでは、共振器にたまったマイクロ波がMSLを通り放射され、共振器のQ値が減少することが問題となる。これに対しGSA-KIDsはMSLをグラウンド側に接続することにより、共振器とMSLのカップリングが弱くなりQ値の減少を回避できる。従って、GSA-KIDsでは感度の減少を伴わず電磁波を十

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

分に吸収することが可能となる。

本研究ではまず GSA-KIDs の感度評価を行うために、CPW 構造のセンターストリップ側に有感部分のある場合(既存の MKIDs) とグラウンド側に有感部分がある場合(GSA-KIDs) に関し、体積  $V$  を固定し  $Q$  値の算出を行っている。理論的な数値計算及び電磁界シミュレーションから、GSA-KIDs はインダクタンス比  $\alpha$  に関しては既存の MKIDs に比べて 3.8 倍劣るという結果になっているが、 $Q$  値に関しては、10 倍改善することから、最終的に 2.6 倍の感度向上が見込めることが分かった。

次に GSA-KIDs の製作を高エネルギー加速器研究機構にあるクリーンルームにて行った。二段のリフトオフとエッチングを用いた新たな手法を考案し、これにより通常工程ではサブマイクロレベルでの位置合わせが必要な GSA-KIDs に対して、位置合わせ精度が  $1.0 \mu\text{m}$  程度のマスクアライナーを用いても、 $0.1 \mu\text{m}$  以下の精度でアルミニウムをはめ込むことが可能となった。

製作した GSA-KIDs の評価は 0.3K ソープション冷凍機を使用して行っている。光学結合の評価としては、Vector Network Analyzer を用いて透過特性を測定し、共振ピーク形状から  $Q$  値を算出している。既存の MKIDs と GSA-KIDs を比較した結果、 $Q$  値は GSA-KIDs の方が既存の MKIDs に比べ  $7.8 \pm 3.6$  倍に改善するという結果を得た。この結果は電磁界シミュレーションと無矛盾な結果となっている。

これにより、 $Q$  値を高く保ちつつ、電磁波の効率的な吸収を可能にするという GSA-KIDs の利点を実証した。また、GSA-KIDs の応答性の評価に関しては、同じ有感体積をもつ GSA-KIDs と既存 MKIDs を製作し、共振周波数の温度依存性を測定することにより比較を行っている。その結果、GSA-KIDs の方が既存の MKIDs に比べ  $4.7 \pm 0.2$  倍温度依存性が低いという結果を得ている。

以上の二つの実験結果から、GSA-KIDs と既存の MKIDs の位相感度を比較すると、 $1.7 \pm 0.8$  倍となった。製作の歩留まりによる  $Q$  値の誤差が大きいため、感度の優位性を統計的には示せなかったが、少なくとも既存 MKIDs と性能に遜色がないことが確認出来た。また、この結果は理論的な数値計算及び電磁界シミュレーションを用いて算出した感度とほぼ一致している。

感度の向上と共に GSA-KIDs による  $Q$  値の大幅な改善は、狭い周波数帯域に多くの検出器配置を可能とする事を意味し、これは多色化への応用に対して大きなアドバンテージである。

以上まとめると、これまで CMB 偏光観測実験では、アンテナで受信した電磁波を MKIDs へ結合する際に共振性能が低下することが課題であったが、本研究によりこの課題を解決する新たな方法 GSA-KIDs が示された。GSA-KIDs は数値計算、シミュレーション、そして実際の検出器の性能測定により有効性が示されており、今後このアイデアを用いることで、さらなる高感度検出器の実現が期待できるものである。

(別紙様式 3)  
(Separate Form 3)

博士論文の審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

本研究は、宇宙背景放射 (CMB) 偏向観測用の超伝導共振型ミリ波検出器 (MKID: Microwave Kinetic Inductance Detector) の性能向上に関する研究で、宇宙誕生時の原始重力波による CMB の渦状偏向パターン (B-mode) の測定等を目指したものである。

MKID ではアンテナで受けた電磁波を出来るだけ効率よく超伝導共振器に導く必要があるが、この為に結合部を強くすると共振器の Q 値が下がってしまうという問題があり、感度向上に限界があった。

申請者はこれを解決する為、結合部をグランド側に持ってくる (GSA-KIDs: Ground side absorption KIDs) という新しい構造を考案し実証試験を行った。申請者はまず計算及びシミュレーションを駆使し最適な GSA-KIDs 構造を導き出し、次に GSA-KIDs の作成に取り掛かった。作成には複数ステップの半導体プロセスを行う必要があるが、エッチングによるバリの生成をなくす工夫や、2 段のリフトオフ・エッチングという方法を編み出し位置精度を上げる事により自ら高精度な GSA-KIDs を製作した。

次に完成した GSA-KIDs 及び比較の為の MKIDs を 0.3K の極低温に冷却し、電氣的に信号透過特性の測定を行った。予想通り Q 値は既存の MKIDs と比べ  $7.8 \pm 3.6$  倍高いことを確認した。但し、応答性比は  $4.7 \pm 0.2$  倍低いため、トータルの感度向上は  $1.7 \pm 0.8$  倍に留まった。しかしながら、GSA-KIDs では Q 値が 1 ケタ近く向上しているため、一定の読み出しバンド幅において、よりたくさん素子を読み出せることを意味するので、感度向上に加え GSA-KIDs の方が従来構造よりも優れていることを示すことが出来た。

博士論文においては、超伝導検出器の原理の説明から、性能を見積もる為の計算、シミュレーションによる確認、微細加工技術の開発、極低温技術の駆使と幅広い分野に渡り詳細に記述している。本論文は日本語で書かれているが、国際会議において 3 度ポスター発表を行い、一度は口頭発表も行っている。さらに、審査の際は英語で発表を行ってもらい、質問に関しても英語で答えてもらった結果、流暢ではないものの英語での発表能力に関し問題がないことを確認した。

筆頭著者でのレフリー付きジャーナルへの投稿はまだないが、すでに投稿論文のドラフトは完成しており、近々に投稿する予定である。

以上の事から、渡辺氏は研究者としての素質も十分であり、論文は新たな知見を含む学位論文としてふさわしいものであると認め合格とした。