

Ver. 12/30

超伝導検出器多重読み出し用フロントエンド回路の開発

総合研究大学院大
高エネルギー加速器科学研究科
素粒子原子核専攻

学籍番号: 20111451

石塚 光

平成27年1月9日

概要

CMB (Cosmic Microwave Background; 宇宙マイクロ波背景放射) の温度異方性の精密測定により、ビッグバン宇宙模型は宇宙の標準模型として今日定着している。しかし、この模型には「地平線問題」・「平坦性問題」・「残存粒子問題」などの未解決な問題がある。これらを解決する有力な理論のひとつが、インフレーション宇宙論である。インフレーション宇宙論は、宇宙初期の時空の指数関数的な膨張によって、これらの問題を一挙に解決する。この急激な膨張は、原始重力波を生成し、その痕跡は CMB の偏光地図に表れると期待される。

GroundBIRD 実験はこの原始重力波によって偏光地図に表れる B モードと呼ばれる信号の検出を目的とした地上実験である。一般に、観測領域を制限するのは検出器の $1/f$ ノイズである。GroundBIRD はこのノイズの影響を受けない観測を行うために、望遠鏡自身が高速で回転 (20 RPM) しながら測定を行う。また、GroundBIRD は検出器として超伝導検出器 MKID を採用する。

MKID は極低温 (< 250 mK) で動作するため、冷却光学系への熱流入を抑えることが肝要である。MKID は一本のフィードラインから多数の素子を読み出すことが容易なため、読み出し系への配線数を減らすことができる。現在、市販のアナログ基板 (ADC/DAC ドーターボード) と FPGA (Field-Programmable Gate Array) 評価基板を組み合わせ、比較的簡単に読み出し系を構成することができているが、この市販品にはローパスフィルタが実装されているため透過特性が悪く、使用帯域が制限される。また、クロック生成器の周辺が必要以上に複雑であり、かつ、消費電力が大きく動作が不安定になるという問題がある。これら三つの問題を解決するために、広帯域かつシンプルな構成のアナログ基板の開発を行った。

まず、帯域を制限していたローパスフィルタを排除して、使用可能帯域をおよそ 1.5 倍広帯域化することに成功した。次に消費電力が大きく、現在の用途に不釣り合いな位相同期回路 (PLL) の代わりに、消費電力が小さく、必要最低限の機能をもったクロック・ファンアウト・バッファを搭載した。PLL をはじめ、種々の IC を選定しなおし、さらに電源回路を見直すことで、フロントエンド回路全体の消費電力は従来の回路の 60% まで抑えることができた。これらの改善は、同時に回路全体の簡素化を実現し、~~HDL による FPGA のコーディングも簡素化する。~~

ユーザーによる制ギョファームウェアのコーディングの容易さをもたらす。

アンテナで受信した電波信号が共振器内のクーパー対をかいりし、インダクタンスが変化する。
MKIDは、その変化を共振状態の変化として検出する。
共振周波数は4-6GHzあたりに設定されていることが多い。

第2章 超伝導検出器MKIDとその読み出し

Ver. 12/21のてんぷくを反映

この章では、MKIDの動作原理の概要とその読み出し方法について述べる。MKIDの利点のひとつである周波数多重読み出しは、市販品ではうまく活かすことができない。その他にもこの市販品をMKIDの読み出しに使うには不満となる要素が存在する。章の最後で既存の読み出し系についてまとめ、その解決すべき課題について議論する。

2.1 動作原理

[X] 参考文献をここにきけ

2003年に発表された

Microwave Kinetic Inductance Detectors (MKID) は、~~マイクロ波帯に感度をもつ~~超伝導検出器である。MKIDは~~マイクロ波を受信するアンテナと超伝導共振器、それにC-coupledしたフィードラインから構成される(図??)。~~また、~~MKIDは各共振器で固有の共振周波数 $\omega = 1/\sqrt{LC}$ をもち、このインダクタンス L の変化を検出することで、入射する光子のエネルギーを測定する。~~

ここで、 L は共振器のインダクタンス、 C は共振器とフィードラインのカップリングキャパシタンスをあらわす。

2.2 周波数多重読み出し

2.3 読み出し系

読み出し系はMKIDの共振ピークの振幅と位相の変化を測定する。MKIDの読み出し方法には、DDC (Direct Down-Conversion) 方式とFFT (Fast Fourier Transform) 方式の二種類が存在し、本論文では構成が比較的簡易なDDC方式によるMKIDの読み出しについて述べる。

共振周波数をより高い精度で設定できる

2.3.1 読み出し系の構成

と大まかな流れ

読み出し系の構成を図2.3.1に示す。読み出し系は大きく4つの要素に分けられる:

1. 「冷却回路」: MKID と LNA (Low Noise Amplifier) を含めたクライオスタット内にある読み出し部分。
 2. 「~~送受信回路~~」: MKID に入力する読み出し信号を高周波 (4–8 GHz) に変換 (アップ・コンバート)、または MKID から出力される読み出し信号を低周波 (< 100 MHz) に変換 (ダウン・コンバート) する部分。
デジタル変換
 3. 「アナログ基板」: ~~送受信回路に読み出し信号をアナログ信号に変換して送信し、~~
~~またはデジタル信号に変換して受信する部分。~~
アナログ信号を受信して
 4. 「FPGA 評価基板」: アナログ基板に渡すデジタル信号を生成し、またデジタル信号を受け取り ~~デジタル情報を~~ 処理する部分。
デジタル情報は
- また、3、4. をまとめてフロントエンド回路と呼ぶ。

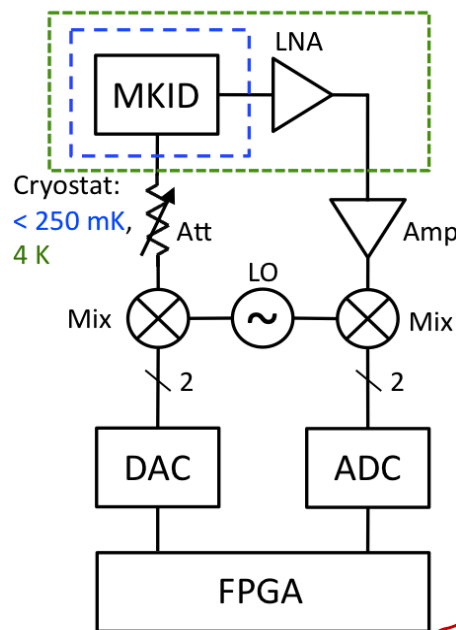


図 2.1: MKID の読み出し系

2.3.2 読み出しの流れ

読み出し原理についての詳細は次の款に譲り、この款ではおおまかな読み出しの流れについて述べる:

1. FPGA 評価基板でデジタル信号を生成し、アナログ基板の DAC (Digital to Analog Converter) から複数の周波数 (< 100 MHz) を重ね合わせた読み出し信号を出力する。

2.3.1 とコンパインセル. 同じようなことを 2 回繰り返して読み出し. といふか非効率

Ver. 12/29

超伝導検出器多重読み出し用~~フ~~フロントエンド回
路の開発

総合研究大学院大
高エネルギー加速器科学研究科
素粒子原子核専攻

学籍番号: 20111451

石塚 光

平成27年1月9日

これまで市販のアナログ基板(μAとADCを2装したアナログ・デジタルインターフェース基板)を用いたフロントエンド回路の開発が行われてきたが、その利点を最大限に生かせていない。

第2章 超伝導検出器MKIDとその読み出し

~~この~~^本章では、MKIDの動作原理の概要とその読み出し方法について述べる。MKIDの利点のひとつである周波数多重読み出しは、市販品ではうまく活かすことができない。その他にもこの市販品をMKIDの読み出しに使うには不満となる要素が存在する。章の最後で既存の読み出し系についてまとめ、その解決すべき課題について議論する。

2.1 動作原理

Microwave Kinetic Inductance Detectors (MKID) は、マイクロ波帯に感度をもつ超伝導検出器である。MKIDはマイクロ波を受信するアンテナと超伝導共振器、それにC-coupledしたフィードラインから構成される(図??)。また、MKIDは各共振器で固有の共振周波数 $\omega = 1/\sqrt{LC}$ をもち、このインダクタンス L の変化を検出することで、入射する光子のエネルギーを測定する。

2.2 周波数多重読み出し

2.3 既存の読み出し系と解決すべき課題

RHEA

第3章 アナログ基板の設計と試作

この章では、~~アナログ基板に要求される仕様についてまとめる。~~また、市販品と比較した改良点について整理する。最後に、試作した基板の概要を述べ、~~次章、その評価への導入とする。~~

中 *分析にもとづいて* *アナログ基板の設計を行う、* *そうにも*

3.1 要求分析

前章で述べたように、市販品には大きく~~ふたつ~~の解決すべき課題があった。ひとつ目はローパスフィルターによる帯域の制限、ふたつ目は消費電力の過大である。これらの課題に対する解決方法は、次の通りである：

1. ローパスフィルターの排除
2. 位相同期回路（PLL）の代わりにクロック・ファンアウト・バッファを用いる

1. は単純である。高周波をカットしているローパスフィルターを排除することで、ADC のサンプリング周波数の $1/2$ まで帯域を使用可能にする。2. は市販品に搭載されている IC の中で最も消費電力が大きい部品である PLL (Typ. 2.9 W) の代わりに、クロック・ファンアウト・バッファ (Typ. 0.29 W) を使うことで 2 W 以上消費電力を抑制する。このクロック・ファンアウト・バッファは水晶から出たクロックを分配するのみなため、PLL と異なり FPGA による制御が不要であることも利点ひとつである。

3.2 仕様

3.3 設計

3.4 試作

RHEA
✓

第4章 試作基板の評価

4.1 試作時の諸問題の洗い出しと解決

4.2 バンド幅

4.1 入力電力の評価

4.2 クロックの周波数変化の評価

4.3 帯域の評価

4.4 ばうてい市販品
との比較