

第1章 序論

宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background; CMB) の温度異方性の精密測定により、ビッグバン宇宙模型は今日、宇宙の標準模型として確立した。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存在する。本章では、これらを解決する有力な理論として、インフレーション宇宙論について述べ、この理論を検証する CMB 偏光観測とその現状についてまとめる。最後に、本研究で開発するフロントエンド回路のアプリケーションとなる GroundBIRD 実験の概要について述べる。

1.1 インフレーション理論と宇宙マイクロ波背景放射

1.1.1 インフレーション理論 ~~による3大問題の解決~~

インフレーション理論は、1981年に発表された理論である [1, 2]。この理論は、ビッグバン宇宙模型の問題であった「地平線問題」・「平坦性問題」・「残存粒子問題」を一挙に解決する。これら3つの問題は、宇宙初期がフリードマン的な宇宙であるために存在する。そこで、インフレーション理論では、宇宙初期のある一定期間をフリードマン的ではなく、ド・ジッター的であったと仮定する。このド・ジッター的な期間（インフレーション期）は、ハップル・パラメーター $H = \dot{a}/a$ が一定となるため、 $a \propto e^{Ht}$ となり、時空が指數関数的に引き伸ばされる。この急膨張をインフレーションと呼ぶ。

インフレーション期が存在すると、フリードマン的であるとして求めた地平線（粒子地平線）は実際の地平線ではなくなる。インフレーション期以前に因果関係を持っていた時空の2点は、インフレーションによって急激に引き離される。その共動距離が現在の見かけの地平線半径よりも大きければ、現在の宇宙が地平線よりも大きなスケールで因果関係を持っていたとしても問題にはならない。よって、地平線問題は解決する。

さらに、インフレーションは時空の曲率を急激に小さくする。インフレーション期が十分長ければ、曲率はゼロに漸近してゆき宇宙は平坦になる。つまり、平坦性問題も解決する。また、インフレーション期以前に生成された残存粒子の密度も、インフレーションによって急激に小さくなる。よって、残存粒子問題も解決する。

フリードマン的な宇宙における見かけの地平線を表す量として、ハップル半径 $d_H \equiv c/H$ を考える。宇宙のある場所に固定された任意の2点を考え、その物理的距離を l_{phys} とする。この距離はスケール因子 a に比例し、これらの長さの時間変化は図 1.1 のようになる。

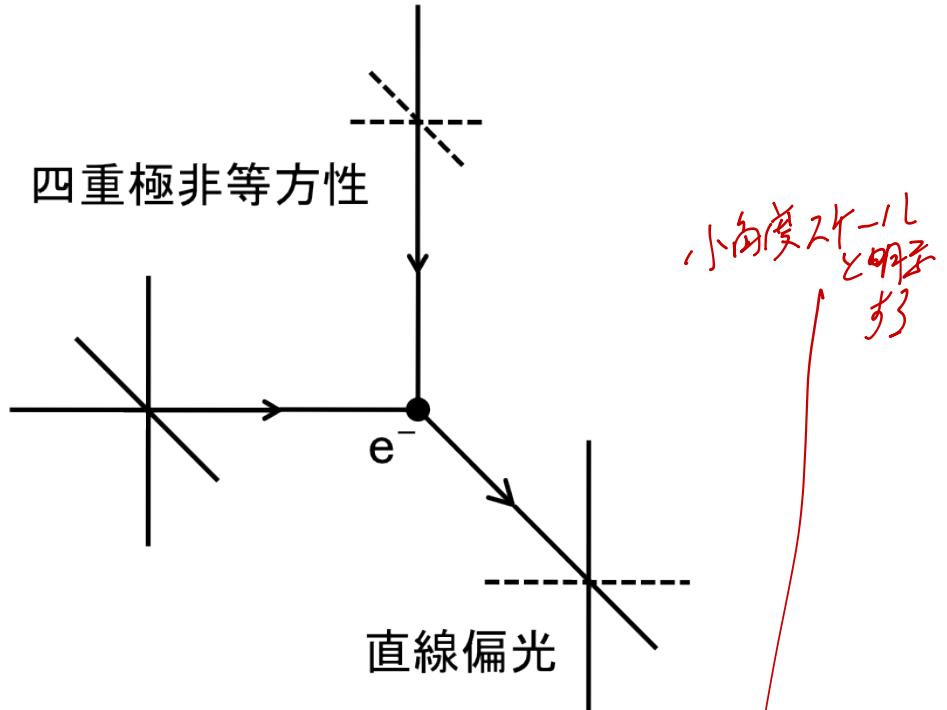


図 1.3: 非等方的なトムソン散乱により偏光がつくられる

線形密度ゆらぎから生じる偏光は B モードを生じない。一般に、線形密度ゆらぎは各フーリエモードの重ね合せで与えられるため、そこから生じる偏光は E モードのみである。

B モードが生じる原因是、ふたつ考えられる。ひとつ目は、弱い重力レンズ効果である。重力レンズ効果により、光は進行方向を変える。このとき、重力レンズの効果は、最終散乱面のゆらぎとはほとんど関係がないので、1 次的な温度ゆらぎから幾何学的に決まる E/B モードの区別ができなくなる。ふたつ目は、重力波によるものである。重力波は空間を非等方に歪めるので、光の散乱時に偏光を生じる。重力波による空間の歪みは、重力波の波数ベクトルと垂直な平面の方向になる。このため、密度ゆらぎの場合と異なり B モード E モードと同様に生成される。

偏光の E/B モードの検出は、パワースペクトルを観測量として求められる。 E/B モードのパワースペクトル C_l^{EE} 、 C_l^{BB} は次のように定義される。

$$\langle E^*(\mathbf{l})E(\mathbf{l}) \rangle = (2\pi)^2 \delta^2(\mathbf{l} - \mathbf{l}') C_l^{EE} \quad (1.5)$$

$$\langle B^*(\mathbf{l})B(\mathbf{l}) \rangle = (2\pi)^2 \delta^2(\mathbf{l} - \mathbf{l}') C_l^{BB} \quad (1.6)$$

重力波のパワースペクトルへの寄与は、密度ゆらぎによる寄与よりも小さい。重力波の振幅は、ハップル半径内減衰してしまうので、小角度スケールのパワースペクトルへの寄与は小さくなる。重力波が寄与すると、大角度スケールの温度パワースペクトルだけが強められる。

つまり、インフレーションによる重力波（原始重力波）を観測するためには、大角度スケールの B モードを観測する必要がある。

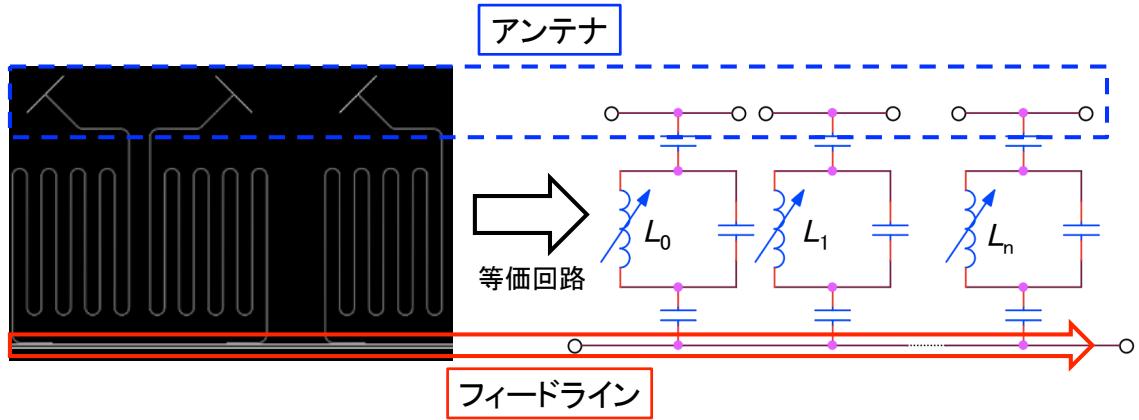


図 2.3: 異なる共振周波数をもつ、多素子化した MKID (MKID アレイ) の基板図とその等価回路。MKID は周波数空間に信号を多重化し、それを一本のフィードラインで読み出す。

[6] の二種類が存在し、本論文では共振周波数をより高い精度で設定でき(つまり、検出感度を最大限に発揮できる)かつ、各 MKID の共振周波数をオンラインで調整できる(つまり、観測時間を最大化できる)というふたつの観点から、DDC 方式による読み出しに注力した開発を行う。

3
↙ 実は同じ事
をいぢる。

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 2.4(a) に示す。読み出し系は大きく 4 つの要素に分けられる。

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。

MHz/GHz コンバーター

MKID に入力するフィード信号 (読み出し用変調信号) を MHz 帯から GHz 帯に変換 (アップ・コンバード) また、MKID を通った後に出力されるフィード信号を GHz 帯から MHz 帯に変換 (ダウン・コンバート) する部分。

アナログ基板

デジタル変調信号をアナログ信号に変換して送信し、入力したアナログ信号を受信してデジタル信号に変換する部分。

デジタル基板

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情報を処理する (信号復調等を行う) 部分。

本論文では、アナログ基板とデジタル基板をまとめてフロントエンド回路と呼ぶ。なお、冷却回路、MHz/GHz コンバーターの構成要素の型番や特性一覧は付録 A.3 に記述する。

読み出しの大まかな流れは次のようになる:

3.1.4 要求分析を反映した解決方法

以上、三つの課題に対する解決方法をまとめると、次のようになる:

- ❶. DAC の出力部分にある LPF を排除する。
- ❷. 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。
- ❸. 水晶発振器を整数倍の周波数のものに変更する。
- ❹. コネクターの規格を MMCX から SMA に変更する。

4.3 試作

試作したアナログ基板 RHEA の写真を図 4.8、4.9 に、FMC150 との比較を図 4.10、4.11 に示す。また、RHEA による新しいフロントエンド回路を図 4.12 に示す。

—アナログ基板の制作はプリント基板制作会社「(有)ジー・エヌ・ディー¹」に依頼した。このアナログ基板 RHEA の評価を次章で行う。

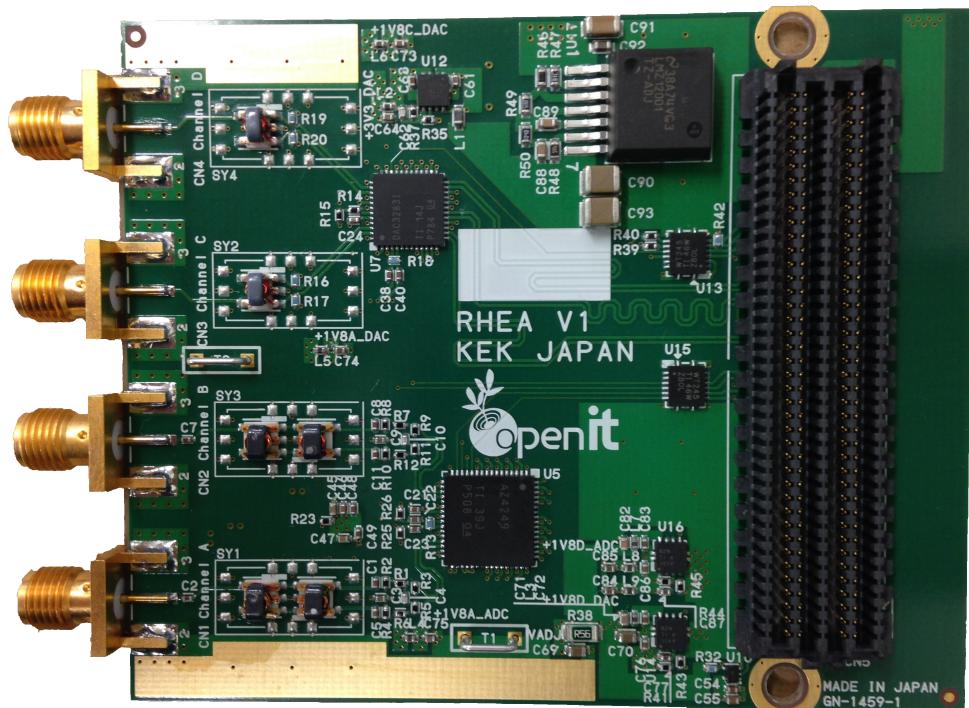


図 4.8: RHEA Ver. 1.0 (表面)

¹<http://www.gn-d.jp/>

5.4 評価結果まとめ

以上より、評価結果をまとめると次のようになる:

1. 帯域は ± 100 MHz に広がり、従来よりおよそ 30% 広帯域化した。
2. 消費電力は、読み出し多重度 32 の状態で 7.9 W であり、従来のおよそ半分になった。
3. 発熱を抑制し、USB 扇風機が不要になった。また、コネクター規格を SMA に統一したことや基板の固定構造の実装、ユーザーが使用しやすいクロック周波数など、ユーザビリティが飛躍的に向上した。

今後、実際に MKID を使っての使用実績を積み重ねてくことが重要な課題であるが、
「*へこたれ*」 GroundBIRD 実験の読み出し回路としての要求を満たすことを確認した。

5.5 さらなる高みを目指した改造案の検討

アナログ基板 RHEA のさらなる改造 (RHEA 改; 図 5.10) として、ADC と DAC のサンプリング周波数をより高くすることが考えられる。RHEA に搭載している ADC (ADS4249) と DAC (DAC3283) の最大サンプル・レートはそれぞれ、250 MSPS と 800 MSPS である。つまり、RHEA にはあと 25 MHz、翼を広げる余地がある。

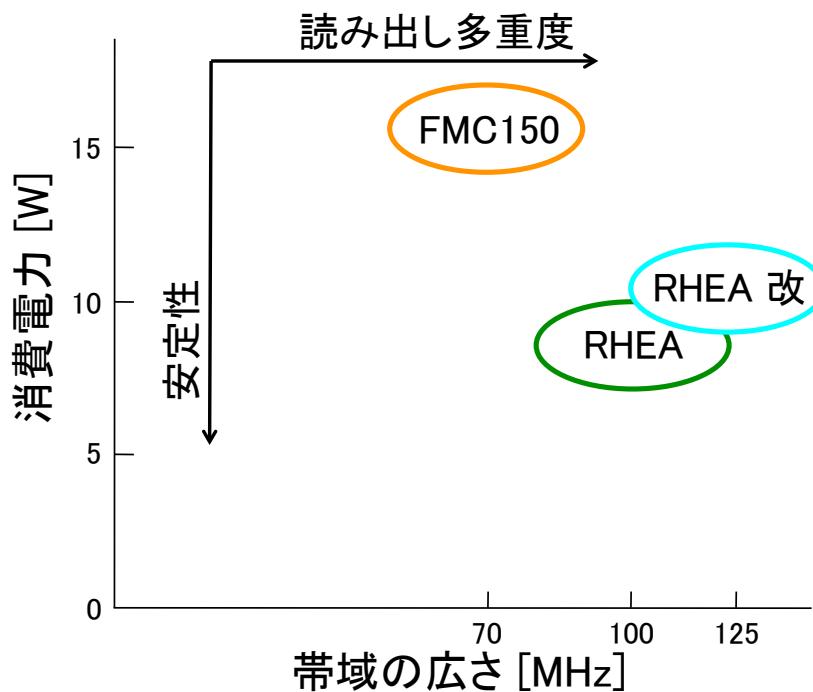


図 5.10: RHEA のさらなる改造により到達する境地