

POLARBEAR-2 における大型低温光学系のアライメント試験

高取沙悠理 (総合研究大学院大学 高エネルギー加速器科学研究科)

Abstract

発表者が行う POLARBEAR-2(PB-2) は原始重力波によって宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) に生成される特殊な偏光パターン (B モード) の精密観測を行うことで、インフレーションモデルやニュートリノ質量和に強い制限を与える事を目的とした CMB 観測実験である。十分な角度分解能で CMB の測定を行う為には、光学系のアライメントが重要となる。そこで、発表者は大型アルミナレンズを用いた光学系に対して、観測に十分な性能を持つ光学系を構築する為に必要な条件をシミュレーションによって求めた。

1 Introduction

1.1 研究背景

近年の観測から宇宙が熱い火の玉宇宙から膨張したとされるビッグバン理論が確立された。しかし、ビッグバン理論では説明する事の出来ない問題が宇宙の精密測定から明らかになった。これらの問題は宇宙初期に加速膨張があったと仮定する事で解決できる。このような仮定に基づく理論をインフレーション理論という。インフレーション理論の実験的検証はまだ行われていない為、この検証は現代において最重要課題の一つである。

インフレーション理論は原始重力波の生成を预言する。したがって、原始重力波によって宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) に生成される特殊な偏光パターン (B モード) を直接観測するとインフレーション理論の検証ができる。さらに宇宙の大規模構造によって生じる重力レンズ効果によっても B モードは生成され、重力レンズ起源の B モードの観測によってニュートリノ質量和に関する制限が可能となる。インフレーションのモデルは r というパラメータで特徴付けられる。現在の観測から $r < 0.09$ (95% C.L.) の制限が与えられているが、インフレーションモデルに対して十分な感度で観測を行うためには $r=0.01$ までを精度よく測定する必要がある。図 1 は予想される POLARBEAR2 の実験感度と主なインフレーションモデルのパワースペクトルである。

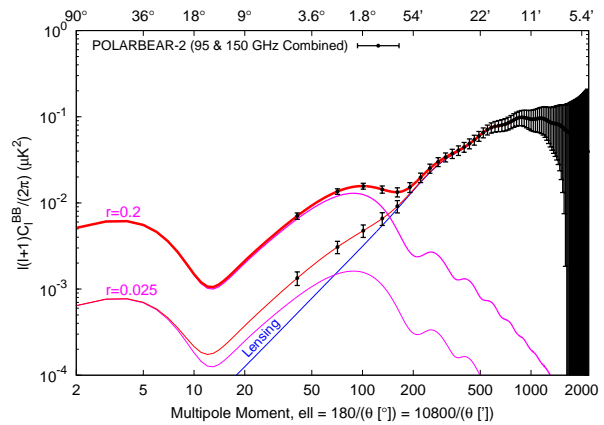


図 1: POLARBEAR2 の実験感度と主なインフレーションモデルのパワースペクトル。縦軸は規格化されたパワースペクトルで横軸は角度スケールの逆数である。青線は重力レンズ起源の B モードである。

1.2 POLARBEAR-2 実験の概要

POLARBEAR-2(PB-2) は現在行われている POLARBEAR(PB-1) のアップグレード実験であり、2016 年よりチリのアタカマ高地で観測を開始する。図 2 は現在運転中の PB-1 望遠鏡である。PB-2 は B モード偏光の精密観測を行う事でインフレーションモデルやニュートリノ質量和に強い制限を与える事を目的とした実験である。PB-2 実験は以下の 3 点の特徴をもつ：

- (1) 超伝導 transition edge sensor(TES) ボロメータを 7588 個用いる、
- (2) 95 GHz と 150 GHz の 2 周波数帯で同時測定す

る、

(3) 大型の低温光学系。

各々の検出器の感度は大気からの輻射によるノイズのために限界があり、統計感度を上げるには検出器の数を増やす必要がある。PB-2 では PB-1 実験のおよそ 6 倍の数の TES ボロメータを使用している。図 3 は 7588 個のボロメータを用いた検出器を搭載した大型の焦点面である。焦点面の直径は 365mm である。また、ノイズ源となる銀河からの輻射の影響を見積もって差し引く必要がある。銀河からの輻射の強度は周波数に大きく影響するので複数の周波数帯で観測を行うことで前景放射の分離能力を向上することができる。さらに、光学系を 4 K まで冷却することで光学系由来のノイズを抑制する。さらに PB-2 の主なスペックについては表 1 で示した。PB-2 は上記の特徴を有することで、観測からインフレーションモデルに対しては $r = 0.01(95\%C.L.)$ 、ニュートリノ質量和に対しては $\Sigma m_\nu < 90 \text{ meV} (95\%C.L.)$ の制限を与える。



図 2: 現在運転中の POLARBEAR 望遠鏡。2016 年より同場所で POLARBEAR-2 も観測開始予定である。

表 1: POLARBEAR-2 の性能

| | |
|--------|------------------------------|
| 観測周波数帯 | 95 GHz と 150 GHz の 2 周波数 |
| ボロメータ数 | 7588(焦点面直径 365mm) |
| アレイ感度 | $5.8\mu\text{K}\sqrt{s}$ |
| 視野 | 4.8 度 |
| 角度分解能 | 5.2/3.5 arcmin. (95/150 GHz) |

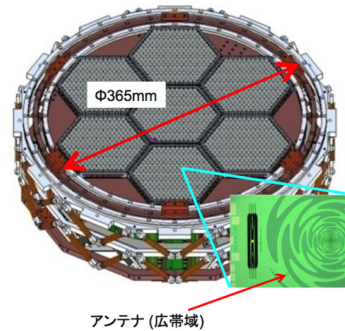


図 3: 7588 個のボロメータを用いた検出器を搭載した焦点面。単一の焦点面としては CMB 史上最大となる。

2 POLARBEAR-2 光学系

2.1 光学系に対するビーム評価

PB-2 光学系では空からの光は主鏡と副鏡で反射され、レシーバーに入射する。レシーバーに入射した光は三枚のレンズを通り、焦点面に集光される。図 4 に PB-2 の光学系を示した。各レンズでは高純度の大型アルミナレンズを採用している。アルミナは低コストで大型化が容易なうえ、屈折率が高いため薄いレンズを作製することができる。レンズを薄くすることで収差の広がりを抑え、また電磁波の内部吸収を抑えることができるため観測感度は向上する。PB-2 で用いるアルミナレンズは世界最大の直径であり、大型のアルミナレンズに対するアライメントと観測感度についての先行研究はまだ無い。

2.2 要求

7588 個のボロメータを用いた検出器アレイを構築する為には大きな焦点面とそれに対応する大型低温光学系が必要である。大型低温光学系において十分な角度分解能で測定を行う為には、この全ての検出器に対して 95 GHz と 150 GHz の 2 周波数帯とも回折限界を満たす位置に各レンズを配置する必要がある。ストレール比が回折限界 0.8 以上であればその光学系は十分な角度分解能を満たしていると言える。したがって、焦点面の全ての検出器でストレール比が回折限界 0.8 以上を満たすことが要求される。要

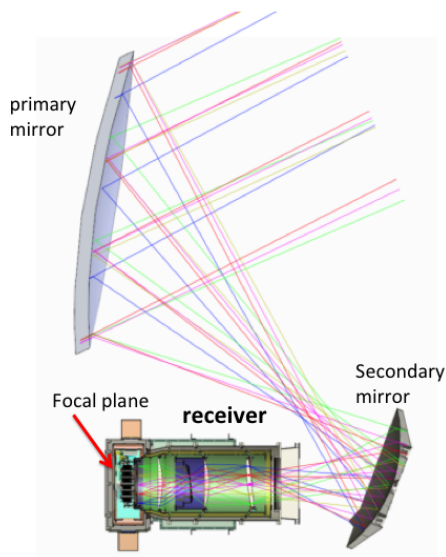


図 4: POLARBEAR-2 光学系。空からの光は二つのミラーで反射されレシーバーに入射する。

求を満たすには焦点面でのストレール比に対するトレランス計算から回折限界を満たすような各レンズ位置の精度を決定し、精密観測する上で十分な光学系の実現が必要となる。要求を満たす光学系の実現のために次の2つのステップを行った：

- (1) トレランス計算
- (2) アライメント評価

これらについては以下で説明する。

2.3 トレランス計算

アルミナレンズのデザイン位置からのずれによるストレール比の低下を評価し、アライメントの際に許容される位置のずれを評価した（以下トレランス計算と呼ぶ）。評価には、光学シミュレーションソフト ZEMAX を使い、焦点面でのストレール比に対してモンテカルロ法によるトレランス計算を行った。計算の際は実際の観測時に較正源によるレシーバー位置の微調整を加えることを想定して実際の調整可能な範囲でレシーバーの位置の最適化を行っている。さらにトレランス計算を元に焦点面でのストレール比が回折限界を満たす範囲で各レンズのアライメントの際に許容される位置のずれを決定し、観測に十

分な性能を持つ光学系をシミュレーションにより実現した。ここで、レンズの厚み、半径、表面形状、曲率、屈折率等のアライメント以外のストレール比に関するパラメータについては、あらかじめ実測した値と不定性を用いている。レンズの実測値としては同グループで過去に測定されたアルミナの屈折率のデータと、文献 [3] のレンズの形状測定のデータを利用した。アルミナレンズの実測は図5のようにCMM測定によって求めた。



図 5: アルミナレンズの実測の様子。CMM を用いて測定を行った。

2.4 アライメント評価

シミュレーションにより決定された各レンズの許容される位置のずれを実際のレンズ位置が十分満たしているか評価する必要がある。今後、組み立てる光学系に対して実測値をシミュレーションと比較し評価していく予定である。

3 Summary

大型アルミナレンズを用いた光学系に対して、レンズの実測値を考慮しトレランス計算を行った。焦点面の全ての検出器でストレール比が回折限界を満たす範囲で各レンズのアライメントの際に許容される位置のずれを決定し、観測に十分な性能を持つ光学系をシミュレーションにより実現した。今後はシミュレーションにより決定された、各レンズの許容される位置のずれを実際のレンズ位置が十分満たしているか評価する予定である。

Reference

- [1] K.Sato,1981,MIRAS,195:467-479

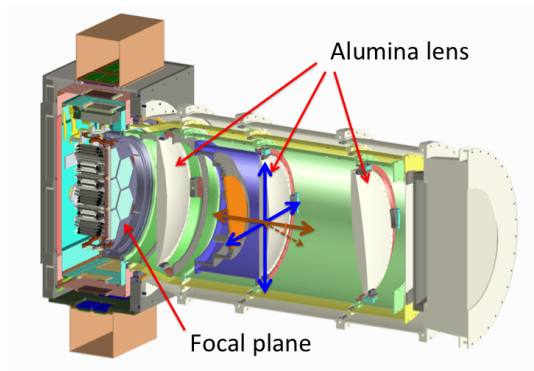


図 6: POLARBEAR-2 のレシーバーの断面図。右側からの光は三枚のアルミナレンズを通り焦点面に集光される。アライメント評価では各レンズを置いたときの位置や傾きを評価する。

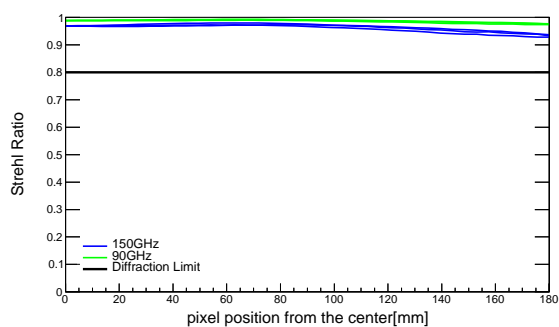


図 7: 光学系焦点面でのストレーラ比。横軸は焦点面中心からの距離であり、全焦点面で回折限界 0.8 以上を十分満たしている。

- [2]U.Seljak and M.Zaldarriaga. 1997,Phys.Rev. Lett.78,2054
- [3]Yuki Inoue, Nathan C. Stebor, Peter A. R. Ade, et al. 2014, Proc. of SPIE Vol. 9153, 91533A
- [4]Tomotake Matsumura et al. 2012, Proc. of SPIE Vol. 8452 84523E-5
- [5]Takayuki Tomaru,Masashi Hazumi, Adrian T. Lee et al. 2012 Proc. of SPIE Vol. 8452H
- [6]S.Hanany,M.Niemack,L.Page.2012,arXiv:1206.2402
- [7]Aritoki Suzuki. 2012 Ph.D. Dissertation