

”B-mode”を探せ
POLARBEAR 実験とその物理

秋葉 祥希
総合研究大学院大学
高エネルギー加速器科学研究科素粒子原子核専攻
5年一貫博士課程1年

2012年9月6日

概要

宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の発見以来，その精密測定は宇宙を研究する上で重要な知見を与えてきた．特に温度揺らぎのパワースペクトルが精密に観測されたことは，宇宙論を定量的に語る上で多くの情報を与えることとなった．現在の CMB 実験の主要な目的の一つに CMB の B-mode の観測が挙げられる．この B-mode は原始重力波によって生成されるので，原始重力波を生成するインフレーション理論の評価に B-mode からの情報を用いることができる．

POLARBEAR 実験は CMB の B-mode を探す地上実験の一つで，UC-Berkeley や KEK などによる国際共同実験である．ここでは CMB の B-mode の探査によって解明される物理と，それを探る POLARBEAR の特徴について解説・紹介する．

目次

概要	i
概要	i
第 1 章 CMB	1
1.1 宇宙マイクロ波背景放射	1
1.2 2つの偏光モード	1
1.3 CMB の偏光	1
第 2 章 B-mode を生むもの	3
2.1 原始重力波/インフレーション	3
2.2 重力レンズ	3
2.3 Leakage, Distortion	5
第 3 章 POLARBEAR	6
3.1 観測周波数・場所・領域	6
3.2 POLARBEAR の技術	6
3.3 目標	8
3.4 現状	8
3.5 POLARBEAR2	8
まとめ	9
参考文献	10

第 1 章

CMB

ここでは CMB について簡単に説明する。

1.1 宇宙マイクロ波背景放射

CMB, 宇宙マイクロ波背景放射は宇宙最古の光であり, ビックバンの強力な証拠と考えられている。宇宙初期の高温状態にある時代は, 電子と陽子が電離しており光子は散乱されて自由に進むことができない。光子が自由に移動できるようになるには,

$$\Gamma < H \quad (1.1)$$

という関係が成り立てば良い。ここで Γ は光子と電子の反応率であり, H は宇宙の膨張率である。この関係が意味することは, 宇宙の中性か及び宇宙の膨張によって自由電子と光子が出会えなくなったときに, 光子が電子と切り離され自由に進むことができるということである。この時のことを宇宙の晴れ上がりと呼び, CMB 光子はこの瞬間に生まれたことになる^{†1}。

1.2 2つの偏光モード

偏光の状態を表すパラメータとしてストークスパラメータと呼ばれる量があるが, この中で偏光の情報を持つ Q, U は回転等の座標変換に対して不変な量ではない。観測量としては座標によらない量を考えたいため, これらのストークスパラメータを組み合わせて座標変換に対して不変な量を定義する。それが E, B という量である。E-mode, B-mode はそれぞれ偏光の発散・回転成分であり, この量は座標不変なものとなる。

1.3 CMB の偏光

最終散乱はトムソン散乱であり, この過程では電子の周囲に 4 重極の温度揺らぎがある場合に散乱後の光が偏光する。最終散乱の時期には 4 重極の温度揺らぎがあると考えられるので, 当然 CMB に偏光が存在することになる。事実, WMAP は高い信頼性で偏光の E-mode の存在を確認している。この偏光は何によって作られ, またなぜ B-mode は同時には観測されなかったのだろうか。

^{†1} 光子と電子が反応しなくなることを脱結合と呼び, 陽子と電子が結合することを再結合と呼ぶ。宇宙の晴れ上がりはこれらを考慮して式 1.1 が成り立つ時期を指す。これらは同時に起こる訳ではないが, $z \approx 1000$ 付近の時代の出来事である。また, 宇宙の晴れ上がりは一瞬で起こる訳ではない。

アインシュタイン方程式に摂動を加える場合、その摂動には3つの種類、スカラー、ベクトル、テンソルという成分の摂動を考慮することができる。この時それぞれの成分は個別に考えてよいことが分かっているので^{†2}、一つ一つの効果を調べることができる。スカラータイプの摂動は現実では密度揺らぎと対応しており、E-modeを生み出す。ベクトルタイプのものは渦ような成分を表し、E-modeとB-modeの双方を生み出す。テンソル成分は重力波に対応し、こちらもE-mode, B-modeの両方を生み出す^{†3}。

ここで注意すべきは、ベクトルタイプの摂動が宇宙の発展に応じて減衰するタイプの摂動であるということである。つまり、ベクトル摂動が生まれてから宇宙の晴れ上がりの時期に至るまでに減衰して無視できるレベルにまで小さくなる。このことをふまえると、E-modeは密度揺らぎと重力波、B-modeは重力波のみから生まれることになる。密度揺らぎは大きいためそれによって生み出されるE-modeは大きく、それが観測された原因である。一方B-modeは見つかっていないが、これは原始重力波が弱く、それによって生み出されるB-modeも弱いからと考えられる。このB-modeが見つかるということは原始重力波の痕跡を捉えたことと同等である。

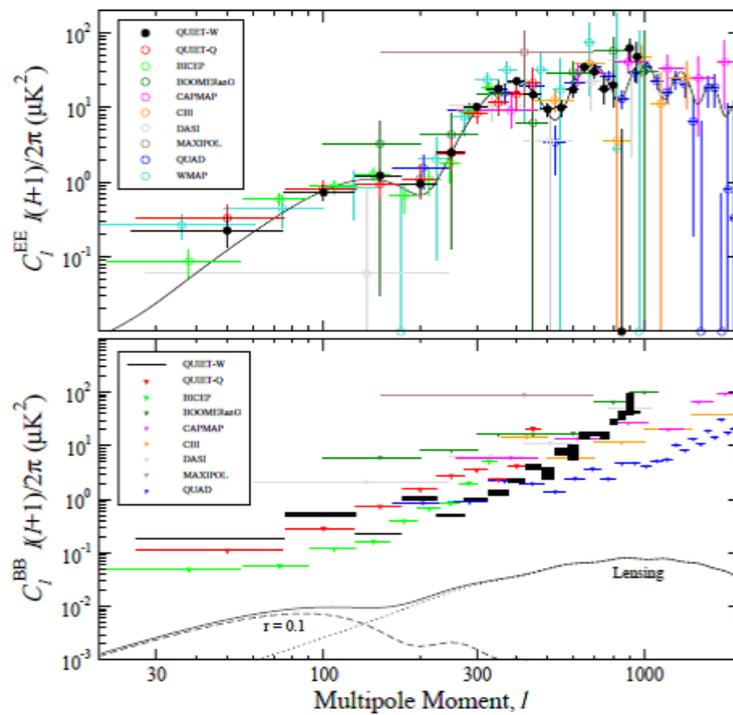


Figure 1.1 偏光観測の現状

^{†2} 1次の摂動までを考慮する場合にはこの話は適応できる。2次以上も含めるとすると個別に考えることはできなくなる。

^{†3} E-mode, B-modeはそれぞれパリティ変換に対する性質が異なる。奇パリティであるB-modeは密度揺らぎからは作り出すことができない。

第 2 章

B-mode を生むもの

ここでは B-mode を生じさせる要因について紹介し、その観測から得られうる知見について解説する。

2.1 原始重力波/インフレーション

先ほども述べたように、宇宙の晴れ上がり時に重力波があった場合 B-mode を作り出す。当時に存在する重力波は原始重力波と呼ばれ、インフレーション起源で発生すると考えられる。このことは即ち、B-mode の観測がインフレーション理論の評価に利用できることを意味している。

インフレーション理論には様々なモデルがある。当然インフレーション理論の検証に利用できる観測量は多くはないため様々なモデルが乱立している。これらの理論はそれぞれの特徴としてあるテンソルスカラー比 r を予言する^{†1}。この比は密度揺らぎと原始重力波の比なので、B-mode の観測によって r に制限を付けることができる。シングルフィールドのインフレーションモデルの中のラージインフレーションと呼ばれるタイプのモデルは $r \geq 0.01$ を予言し、スモールインフレーションと呼ばれるものは $r \leq 0.01$ を予言する^{†2}。今後の B-mode 探査は現在 WMAP によって制限されている領域を上から押さえることになり、ラージフィールドインフレーションモデルを主に検証していくことになる。

2.2 重力レンズ

CMB 偏光の B-mode は元々は原始重力波の痕跡として生まれる。しかし、CMB 光子が宇宙を伝播する過程で B-mode が生まれることがある。大規模構造等の重力ポテンシャルによって CMB 光子の軌跡は曲げられる。この現象を温度マップや偏光マップで考えると、重力レンズはマップを歪ませることがわかる。E-mode のマップが歪められることで、E-mode の一部が B-mode へと漏れだす。この B-mode を原始重力波起源の B-mode (Primordial B-mode) と区別して Lensing B-mode と呼ぶ。B-mode 探査の最も大きな目標はインフレーション理論の検証、即ち Primordial B-mode のシグナルを検出することである。Lensing b-mode と Primordial B-mode は幸いにして異なる角度スケールの相関にピークを持つ。しかしながら、Lensing B-mode は Primordial B-mode と比べ非常に大きな値を持っていると考えられ、その詳細を調べようと考えた場合には無視できるものではない。重力レンズの効果を精度よく再現することは、大規模構造の重力ポテンシャルの情報を得る上で重要である。

^{†1} ここではシングルフィールドのインフレーションモデルについて触れる。

^{†2} もちろんパラメータによってはラージインフレーションでも $r \leq 0.01$ となることもある。二つのモデルの区別の仕方は大まかな区別で絶対にそうなるというものではない。

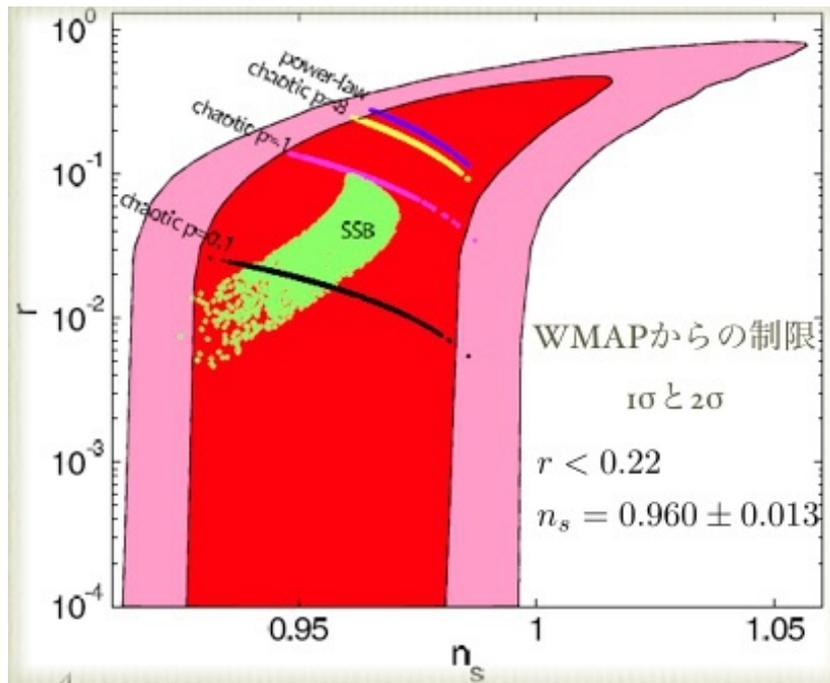


Figure 2.1 インフレーション理論への制限 (WMAP)[4]

Lensing B-mode は原始重力波の痕跡探しにとっては邪魔者扱いだが、大規模構造の重力ポテンシャルを知るという意味では重要な量になる。重力ポテンシャルを詳しく知ることによって得られる情報としてニュートリノの質量が挙げられる。ニュートリノはよく知られているようにわずかながらに質量を持つが、重力相互作用はほとんど寄与しない。大規模構造にあるニュートリノを考えると、これらは大規模構造のもつ重力ポテンシャルに捕まる k とはないが、質量を持つためポテンシャル自身を小さくする効果がある。ポテンシャルが小さくなると当然重力レンズの効果も小さくなり、Lensing B-mode も小さくなる。この量を見積もることでニュートリノ質量の総和を知ることができる。この解析で得られる質量への制限は素粒子実験で得られているものよりも強いものを与えることができると期待されている。

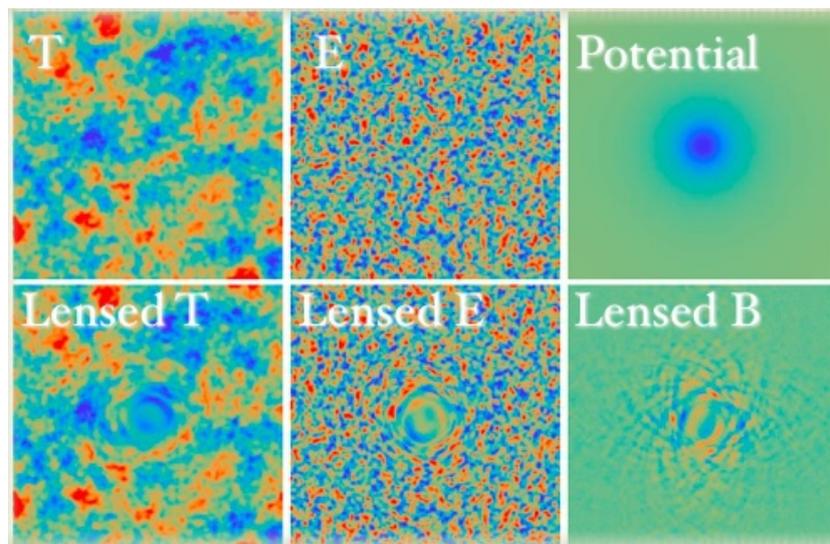


Figure 2.2 重力レンズでの B-mode 生成 [5]

2.3 Leakage, Distortion

あらゆる実験においてノイズや信号の漏れなどは重大な問題になる。いわゆる系統誤差であるが、CMBの偏光観測に置いてもそれは同様である。CMBのB-modeを測定する上で気になるのは、他の成分（温度やE-mode）からB-modeへと転化する量である。この量は例えば角度のずれや方向のずれ、回路の特性の違いなどで決まり、その見積りきれない部分が系統誤差として乗ってくる。原始重力波からの信号を捉えるには Lensing B-mode から有意に異なる大きなB-modeを見つける必要があり、系統誤差が大きいと差が大きい場合にしか発見できないことなる。

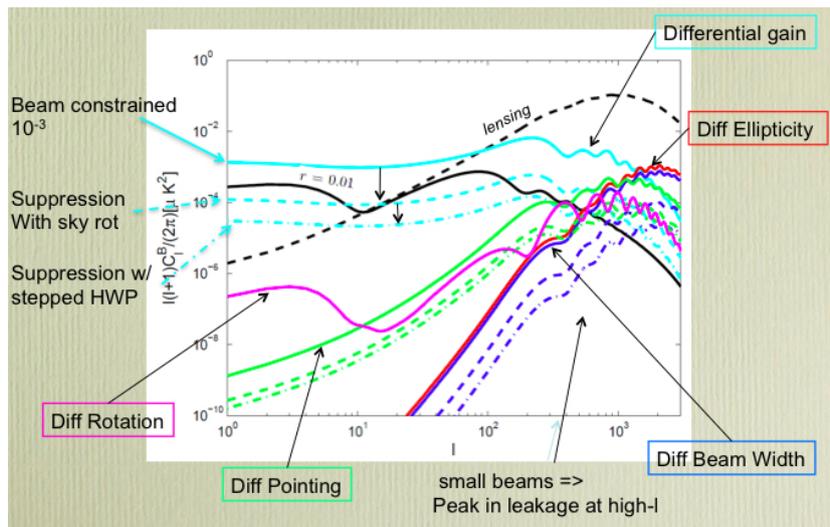


Figure 2.3 色々な系統誤差

第3章

POLARBEAR

CMB 偏光を観測する実験の一つ、POLARBEAR について紹介する。

3.1 観測周波数・場所・領域

POLARBEAR は 150GHz の周波数帯で CMB を観測する。COBE 衛星の FIRAS 実験によって示されたように、CMB は 150GHz 付近に強度のピークをもつ黒体放射である。ピークを捉えることの他に大気の影響を受けているということも重要な要素である。POLARBEAR は地上実験であるため大気の影響を受ける。大気によって吸収されにくい帯域を窓と呼ぶが、150GHz はその窓を通ることのできる周波数である。

POLARBEAR はチリのアタカマ砂漠で観測している。その理由は天気が良く、湿度が低いため水蒸気による吸収が起こりにくいことが挙げられる。

地球の自転に合わせて空を観測する。観測する領域はパッチと呼ばれ、観測可能な空すべてを観測する訳でない。統計をためるには時間が必要であることと、現在の POLARBEAR が単一周波数の観測であることもあり前景放射の大きい箇所は観測に適さないからである。

3.2 POLARBEAR の技術

POLARBEAR に用いられている各装置について説明する。

3.2.1 望遠鏡

POLARBEAR の望遠鏡は Huan Tran Telescope (HTT) と呼ばれる。この望遠鏡は 3.5m の主鏡を持っており、これは CMB 観測の望遠鏡としては比較的大きな方である。POLARBEAR が Lensing B-mode の検出を目標に挙げていることから、望遠鏡の分解能はこの B-mode のピークより細かく設定したい。Lensing B-mode のピークは $l \sim 1000$ にある^{†1}。望遠鏡の分解能は、

$$\theta_{\text{res}} \propto \frac{\lambda}{D} \quad (3.1)$$

で与えられる為、主鏡の径を広げるのは分解能の向上につながる。ここで λ は観測する波長、 D は主鏡の直径である。POLARBEAR では $\theta \sim 4'$ となるように設計されている。

^{†1} $\theta \sim 180^\circ/l$ であり、Lensing B-mode のピークは $\theta \sim 10'$ に相当する。

3.2.2 低温検出器

ここでは POLARBEAR のクライオスタットの中にある低温で作動する機器について紹介する。

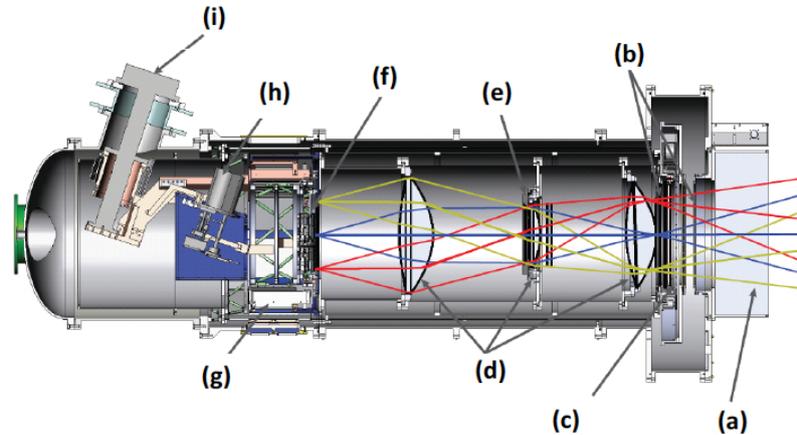


Figure 3.1 POLARBEAR クライオスタットの図。光線が入射してから焦点面までとその周りの低温部を表す。(a) : Zote Foam 窓 (b) : IR ブロッキングフィルタ (メタルメッシュフィルタ) (c) : 半波長板 (d) : レンズ (e) : コールドアパーチャストップ (f) : 検出器の並ぶ焦点面 (g) : SQUID (h) : 3He ソープション冷凍機 (i) パルス管冷凍機

熱ブロック

POLARBEAR で採用されている検出器の TES Bolometer は 0.5K 付近の低温で作動する。このため検出器を冷やす必要があるが、その為には外部からの光、熱の流入を減らさなければならない。外部からの光は、Zote Foam の窓、IR ブロッキングフィルタ、半波長版、レンズを通過する。これらは観測したい光 (150GHz) は遮らず、高周波の光を効率よく遮断し、かつ自身の熱放射を少なくする為に熱を放射以外の形で逃がす必要がある。クライオスタットは 3 層になっているが、これは冷凍機の性能上段階的に冷やすのが望まれるからである。

半波長板

半波長板は観測する光の偏光に変調をかけることに用いられる。直径 25mm、厚さ 3.1mm のサファイアを用いている。光が半波長板を通過するとその偏光の方向が変わる。半波長板を回転させることで観測する偏光の向きを変えるができる。このことは実験の系統誤差を軽減させることができる。

焦点面・検出器

POLARBEAR は検出器として TES ボロメータを用いている。TES ボロメータと超伝導体であり、温度が転移温度と同じになるように調整されている。光子が検出器にあたると温度が上昇するが、これと同時に超伝導状態が壊れ抵抗値が上昇する。この抵抗値の変化を読み取ることで、光を検出する。

焦点面には検出器が 1274 個並べられている。多数の検出器を置くには大きな焦点面が必要となり、POLARBEAR が比較的大型の望遠鏡となっている原因でもある。

多重読み出し

TES ボロメータの抵抗の変化は電流の変化という形で現れる。この電流の変化は SQUID と呼ばれるもので読み出す。SQUID は電流の変化による磁束を捉える。読み出しの線が多数あることは、そこから熱侵入が多くなることを意味するので極力少なくしたい。POLARBEAR では1本の線で多数の信号を読み出す多重読み出しを行なっている。主に検出器ごとに周波数をずらすことで、読み取り側でどの検出器からの信号なのかを判別できるようになっている。

3.3 目標

POLARBEAR の目標は $r=0.025(95\%C.L.)$ である。この数字の意味することはこの世界のテンソル・スカラー比が 0.025 以上である場合にはインフレーション起源の重力波の痕跡を捉えることができ、見つからなければテンソル・スカラー比は 0.025 以下であるという上限を与えることになる。この数字は現在与えられている制限より一桁小さい。

また Lensing B-mode を発見するという目標もある。Primordial B-mode 以前に B-mode 自体が観測されていないので、それを見つけるという指名も持っている。重力レンズについての詳しい情報も興味の対象である。

3.4 現状

POLARBEAR の現状 (2012 年 8 月時点) を紹介する。POLARBEAR はテスト観測を終え、4 月から通常の観測に入っている。テスト観測からは点源がしっかりと観測されており、また 2 つの CMB マップの比較から観測に異常がないことが確認されている。今後データを積み増して B-mode の発見へと推進していく予定である。

3.5 POLARBEAR2

POLARBEAR にはその完了型として POLARBEAR2 がある。これは望遠鏡はそのままに、クライオスタット等の中身を更新する計画である POLARBEAR2 の開発は KEK 主導で行なわれている。この改良により検出器の数が増大し、更なる感度が見込まれている。検出器の増大に伴い口径が大きくなる。そのため熱設計なども見直す必要があり、現在その作業が行われている。

まとめ

CMB 偏光の B-mode を発見することは間接的に原始重力波を確認することを意味し、それはインフレーション理論の検証に用いることができる。また、重力レンズによって生み出される B-mode も、大規模構造についての情報を持っており興味の対象となっている。

世界中で B-mode 探索は行なわれている。日本の KEK が参加する実験 POLARBEAR では $r=0.025$ の感度を目標に現在観測が行われている。またその改良として POLARBEAR2 があり、POLARBEAR では届かなかった感度まで探れるようになると期待されている。

参考文献

- [1] Scott Dodelson: "Modern Cosmology", ACADEMIC PRESS(2003)
- [2] Wayne Hu, Martin White (1997). A CMB Polarization Primer. [astro-ph/9706147v1]
- [3] Spergel, D. N. et al. (2007). First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determinations for Cosmological Parameters. [astro-ph/0302209]
- [4] L. Pagano et al. (2007). Red Density Perturbations and Inflationary Gravitational Waves. [astro-ph/0707.2560]
- [5] Wayne Hu, Takemi Okamoto (2002). MASS RECONSTRUCTION WITH COSMIC MICROWAVE BACKGROUND POLARIZATION. [The Astrophysical Journal 574:566-574]
- [6] Ultra High Energy Cosmology with POLARBEAR [astro-ph/1110.21101]
- [7] 清水景絵. 高エネルギー加速器科学認定研究認定レポート「CMB 偏光観測 POLARBEAR におけるニュートリノ質量和に対する感度の研究」
- [8] Wayne Hu の Web site" <http://background.uchicago.edu/~whu/index.html>"