

インフレーション宇宙の痕跡を探すー QUIET 実験の初期結果

KEK 素粒子原子核研究所

田島 治

osamu.tajima@kek.jp

2011 年 5 月 13 日

1 はじめに

「インフレーション宇宙論が実験で検証出来る」と言われたら、とてもエキサイティングだと思いませんか？

QUIET 実験は、そのインフレーション宇宙論の決定的証拠を探る実験である。その最初の結果が 2010 年 12 月に公表された[1]。3 月の物理学会のシンポジウムではりきって紹介しようと画策していたのだが、震災のため残念ながらかなわなかった。そのぶんはりきって、我々の初期結果を紹介したい。

また、本記事の登場人物達の活躍によって本研究結果がある。論文には現れない現場の雰囲気やその他のネタもざっくばらんに報告したい。

2 インフレーション宇宙

2.1 宇宙背景放射 (CMB) 偏光の B モード

宇宙初期に加速度的膨張「インフレーション」があったと記述するインフレーション宇宙論、それはビッグバン宇宙論だけでは記述しきれない観測事実を見事に説明する。インフレーションによって、原始重力波が生成される。この原始重力波を捕えればインフレーションの決定的証拠となる。

その原始重力波を検出する方法が「B モード」の測定である。B モードとは、CMB 偏光分布に生成される渦パターン(つまり奇パリティ)である。生成原理などは過去の記事[2]を読んでいただくとして、B モードの強度(⇔原始重力波の強度)は r というパラメータで記述され、それがインフレーションのエネルギースケールを決定する。それは、多くのインフレーションモデルで $\approx (r/0.01)^{1/4} \times 10^{16}$ GeV と記述され¹、 $r = 0.01 \sim 0.1$ あたりの強度が有力視されている。

B モードはまだ未発見である。CMB 偏光の測定結果から得られている上限値は $r < 0.7$ (95% C.L.) である[3]。さらに WMAP をはじめ様々な種類の実験結果を合わせた間接的な上限値は $r < 0.2$ (95% C.L.) となっている[4]。QUIET 実験は

CMB 偏光の測定から B モードの直接探索をしている実験である。

QUIET 実験はアメリカ・シカゴ大を中心に KEK も含めた世界 5 ケ国、14 研究機関で構成される約 50 人のコラボレーションである。KEK のメンバーは石徹白、永井、羽澄、長谷川、田島、茅根の 6 名である。コラボレーションメンバーの 2 割を高エネルギー実験出身者が占める²。何がそんなに高エネルギー実験屋に受けるのだろうか？ 筆者にとつての大きな魅力は、

- インフレーション宇宙論そのものが素粒子物理と同様に、非常にファンダメンタルなテーマである。
- その証拠を実験(観測)で捕まえることが出来る。
- しかも、測定結果から決まるエネルギースケールは GUT スケール程度(である可能性が高い)。
- さらに、実験規模が運用経費を含めて 5-15 億円³。

といったところであろうか。特に、インフレーションの証拠が実験で捕まえられると初めて知った時は「ガン！」と響く衝撃であった。

2.2 どうやって捕まえるのか？

さて、その魅力的な B モードをどうやって測定するのか？ B モードは CMB 偏光のパターンなのだから、やることは非常に単純である。

- ① 空を見上げて CMB 偏光マップ(空間分布図)を測定する。
 - ② マップ上の B モード(奇パリティ)成分の強度を測定する。
- 以上である。単純だが、簡単なことではない。

そもそも CMB 偏光の信号強度は非常に小さい ($\leq \mu\text{K}$; CMB は黒体放射なので、その強度を温度で記述する)。検出器ホワイトノイズの数百分の 1 程度である。十分な感度で偏光マップを測定するには、デジカメで夜景を撮影するときのように露光時間(観測時間)を長くしてマップの S/N

¹ Slow-roll を仮定。

² そのため当然のごとく quiet なコラボレーションではない。

³ 今後数年を含む現行の地上実験や気球実験。

を稼ぐ。観測時間は数ヶ月～数年にわたる。当然、従来実験の10倍、100倍の感度を達成するために10年も100年も観測を続けるわけにはいかない。そのため、検出器の数を増やして、実効的にS/N(つまり統計誤差)を向上させるというのが、一般的なアプローチである⁴。

偏光マップが測定できたら、成分強度の測定をするわけだが、図1のシミュレーションマップのように、CMB偏光のほとんどは偶パリティのEモード(これは既に発見されている)という成分が占める。マップを目視するだけでは、Bモードの有無を識別することすら難しい。

そのため、成分強度の評価は偏光マップを2次元フーリエ変換をして⁵、Eモード(偶パリティ成分)とBモード(奇パリティ成分)を分離して、図2のようなパワースペクトルによりその強度の測定を行う。EモードはCMB温度揺らぎ(無偏光のスカラー成分)に由来したものであり⁶、インフレーションの直接証拠とはならない。そして、温度揺らぎはWMAP実験などで精密測定されているので、その測定

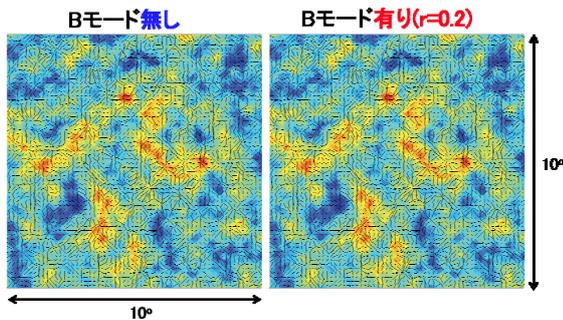


図1. シミュレーションによるCMB偏光の空でのマップ

淡い色(赤色)ほど偏光強度が強いことを示す。図中の棒は偏光の向きを表す。左図がBモード無しの場合、右図がBモード有りの場合。

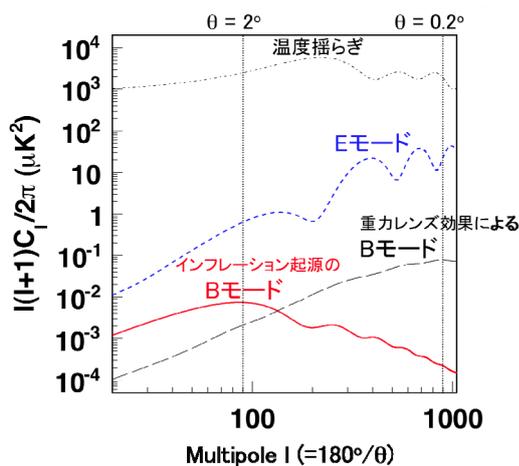


図2. Bモード, Eモード, および温度揺らぎ(無偏光成分)のパワースペクトル($r=0.1$ を仮定したシミュレーション)

⁴ CMB(および大気放射)のフォトンノイズにより、検出器単体の感度を桁違いに向上させることは難しい[2]。

⁵ 観測した偏光マップは2次元平面上の分布図ではなく、球面上の分布図であるので、実際の解析では球面調和関数で展開する。

⁶ 厳密には、Eモードの「大部分」が温度揺らぎに由来したものだ。

結果などに基づいた標準モデル(Λ CDMモデル)からEモードのスペクトルは予想されている。そのため、測定したEモードとモデルの一致性は、実験装置のパフォーマンスを示す良いデモンストレーションの一つである⁷。

図2を注意深く見ていただくと、「Bモード」と名の付くラベルが二つある。実はBモードというのはCMB偏光のパターンの名前であって、原始重力波のみがそれを生み出す訳ではない。銀河団などの重力レンズ効果もBモードを生み出す。こちらはインフレーションの直接的な証拠ではない。スペクトルの角度スケールの違いから区別するのだが、インフレーション起源のBモードの測定精度を向上するためには、重力レンズ効果によるBモードの測定精度の向上も重要である⁸。どちらもBモードとは呼ばれるが、対象とする物理は大きく異なる。本記事では特に断らない限りBモードとはインフレーション起源のものとして記述する。

3 QUIET 実験

3.1 装置概要

QUIET実験はチリ・アタカマ高地、標高5千メートルの場所で、2008年10月から2010年12月まで観測を行った。過去の記述[2]にもあるように、空気が薄く、乾燥し、晴天率が高い場所ほどCMB観測に適している。アタカマ高地はこのような条件を満たす最良の観測サイトである。天文のLHCと呼ばれるALMA実験も同じ場所で観測をおこなっている、実際ALMA望遠鏡群の敷地内にQUIET望遠鏡がある。

QUIET望遠鏡の外観写真を図3に示す。空から降り注ぐCMB偏光を直径1.4mのミラー2枚で集束させて、レシーバー内に導く。レシーバーとは検出器を内包しているクラ

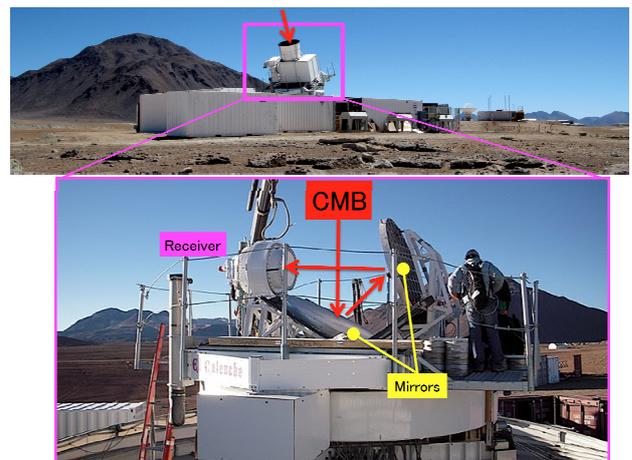


図3. QUIET望遠鏡の観測中の外観写真(上)と地面放射遮蔽用のシールドを取り外した望遠鏡内部の様子(下)

⁷ Eモードは宇宙論パラメータの精度向上に寄与するので、その精密測定自身も重要である。

⁸ Eモード同様、重力レンズ効果によるBモードもニュートリノ質量に制限を与えるなど興味深いテーマを持つ。

イオスタットである。望遠レンズ付きのデジカメを思い浮かべて頂きたい。ミラーが望遠レンズでレーザーがデジカメに相当する。レーザー内には20Kに冷却された偏光検出器モジュールがアレイ状に並べられている(図4)。これがデジカメでいうイメージセンサーに相当する。観測時には望遠鏡の周りには地面放射を遮蔽するシールドで覆われており、sidelobeと呼ばれる地面放射のしみ込みを遮蔽する。

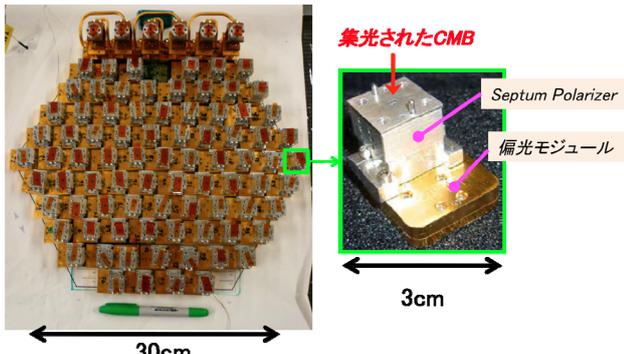


図4. 95GHz帯偏光検出器モジュール:90モジュール・アレイ(左)とモジュール一つの拡大写真(右)

3.2 観測手法

図2に見るように、Bモードは数度スケールのパターンなので、観測視野は20°もあれば十分である。QUIET実験では図5の○で囲まれた4つの領域を選んで、そこを重点的に観測した。初期の7ヶ月半は43GHz帯の検出器モジュール(19個)を使い、中盤以降の17ヶ月は95GHz帯の検出器モジュール(90個)での観測を行った。複数の周波数帯を観測する意義に関しては、今回は割愛させていただく。興味がある方は過去の記事[2]を読んでいただきたい。可視光領域ではないミリ波領域なので、観測は昼夜関係なく24時間体制で行うことができる。

地球は自転するので、観測領域は東から登って西へ沈む。この観測領域をトレースしながら重点観測するわけだが、実は大気の放射の影響は無視できない。大気の放射強度の変化と共に検出器ノイズが変化するためである。大気の放

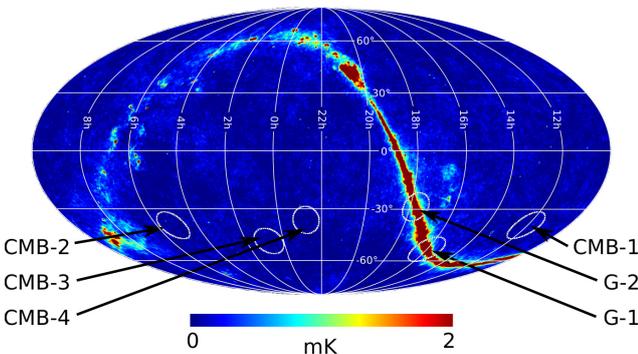


図5. QUIET実験の観測領域

地球が自転するため4つの領域CMB-1,2,3,4を選んで、それらを重点的に観測した。

射強度は望遠鏡が見込む大気の厚さに比例する。つまり、望遠鏡が空を見上げる角度「仰角」(地平線に垂直な縦方向の角度)で変化する。その影響を最小限にとどめるには、仰角を変化させる回数を最小限にすればよい。そのために、仰角を固定したまま、望遠鏡の方位角(つまり地平線に水平な横方向の角度)を $\pm 7.5^\circ$ 動かして、約20°の幅を観測する(レーザーの視野角は約8°)。観測領域は東から西へ回転しながら登る(または下る)ので、およそ1時間半毎に断続的に20°望遠鏡の仰角を変えれば、検出器ノイズの変化頻度を最小限にとどめることができる。結果として、20°四方の観測領域を自動的にカバーできる。このような観測方法は constant elevation scan と呼ばれる。

3.3 偏光測定原理

これまでは偏光とは一切関係のない話であったが、偏光測定を説明する。QUIET実験の偏光検出原理はやや複雑である。その説明を文章化するのは、正直言って面倒臭い。出来ればすっ飛ばしたいところだが、原理が複雑である反面、他実験と一線を画す強固さを持つ。偽偏光に起因する系統誤差(無偏光を偏光と間違えてしまうようなクロストーク)に圧倒的に強く、偏光角の測定精度が非常に安定している。これは検出器のバイアスコントロールに高い精度を要求しないからである。

図2をみて想像がつくと思うが、無偏光成分(温度揺らぎ)はBモードと比較して、3~4桁も大きいのである(縦軸が2乗表記になっていることに注意)。偽偏光に起因する系統誤差を0.1%程度まで抑えないとBモードの発見は難しいが⁹、QUIETの検出器ならばそれが実現出来る。

図4右に示すように、検出器モジュールは2つのコンポーネントで構成される。Septum polarizer と呼ばれる導波管コンポーネントの中には階段状にせり出す金属隔壁があり、入射電波は2つの成分に分離される(図6)。隔壁と垂直に電場成分を持つ電波(E_x)は単純に2分割される。一方、隔壁と平行な成分(E_y)は、隔壁のせり出しと共に徐々に電場の向きを回転しながら2分割される(最終的に90°回転する)。ここで肝心なのが隔壁の右側と左側で電場の回転方向が逆であるということである。そのため、septum polarizerの2つの出口L,Rでの電場強度は

$$\begin{aligned} L &= E_x + iE_y \\ R &= E_x - iE_y \end{aligned}$$

と記述できる。つまり、これは直線偏光成分を2つの円偏光成分に変換・分離するコンポーネントである。

分離されたL,Rふたつの電波は偏光モジュール内部で別々のHEMTアンプ(高速、低ノイズアンプ)で増幅され、

⁹ 観測手法の工夫によって、実はもう一桁かせいでいる[1, 6]。

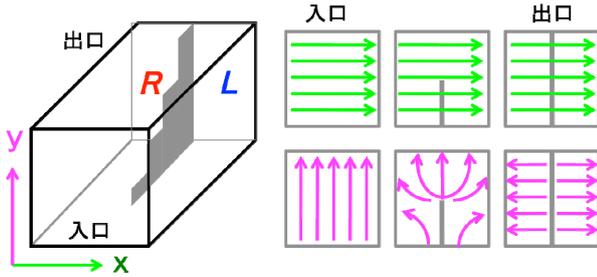


図 6. Septum polarizer の原理
直線偏光を 2 つの円偏光成分に変換・分離する。

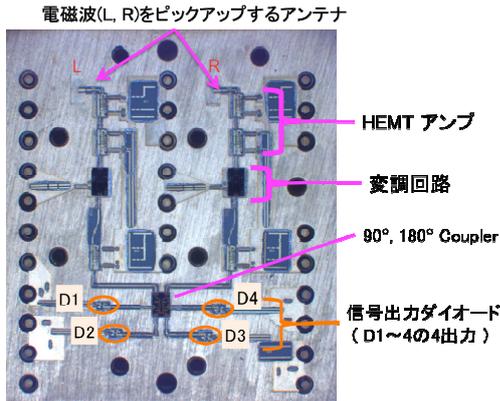


図 7. 95 GHz 帯偏光モジュールの内部
L, R 2 つの入力信号を増幅・変調・混合させて出力する。

回路上のパスを電氣的に切り替えて半波長シフトする(つまり位相を反転する)変調を与える(図7)。変調周期は 4 kHz と 50 Hz である。そのアナログ信号は、変調周期よりも速い 800 kHz で AD 変換される。そして、デジタル信号に対して変調周期と同期した復調(単なる引き算)を行う。これにより、変調と相関のないノイズは抑制しながら、変調と相関をもつ偏光信号を取り出す。直線偏光は二つのストークスパラメータ Q と U で数学的に記述され、

$$Q \equiv E_x^2 - E_y^2$$

$$U \equiv E_a^2 - E_b^2$$

と定義される。 $a-b$ は $x-y$ を 45° 回転した座標系をあらわし、 Q/U の比が偏光の角度となる。QUIET の偏光モジュールでは Q と U を同時に測定できる¹⁰。計算の詳細は[5]にゆずるが、復調後の信号出力は

$$D1 = 1/4(|LG_L + RG_R|^2 - |LG_L - RG_R|^2)$$

$$= (E_x^2 - E_y^2) \times G_L G_R \Leftrightarrow Q \times G_L G_R$$

$$D3 = 1/4(|LG_L + iRG_R|^2 - |LG_L - iRG_R|^2)$$

$$= (E_a^2 - E_b^2) \times G_L G_R \Leftrightarrow U \times G_L G_R$$

と記述される ($D1 = -D4$, $D2 = -D3$ という関係をもつ)。 G_L, G_R はそれぞれの HEMT アンプの増幅率をあらわし、もっとも注目すべきは、無偏光を偏光と間違えるような信号出力がゼロとなることである。つまり、入力光が無偏光

($E_x^2 = E_y^2$ かつ $E_a^2 = E_b^2$) の場合、 $D1 = D2 = D3 = D4 = 0$ となり、偽偏光はあらわれない。

2 つのアンプや検出器の増幅率を長期にわたる観測期間の間 0.1% 精度で一定に保ち続けることは不可能に近いが、QUIET ではアンプの増幅率が変化しても偽偏光はゼロとなり、偏光角度も時間変化することなく安定である。このような仕組みを内蔵した検出器を持つのは QUIET 実験だけである¹¹。

HEMT アンプは、BS アンテナやカーナビなど、我々の身の回りで日常的に使用されている。それ故「QUIET の検出器って出来合いの製品を買ってきて動かしているだけでしょ？」と誤解されるが、そんなことはない。モジュール内の HEMT アンプも、モジュールのアセンブル・テクノロジーも最先端の検出器である。1 検出器あたりの感度も、他の実験で使われている超伝導検出器の感度と比べると遜色はない。

3.4 建設時の雰囲気

ここで、少しでも建設時の雰囲気をお伝えしたいと思う。筆者はシカゴ大学の人々と共に 95 GHz 帯レーザーの建設と現地でのコミッショニングに携わってきた。90 個のモジュールはすべて、シカゴ大学の地下実験室で性能評価、選定された上でアセンブルされた。レーザー内の配線はすべてシカゴ大の実験室で接続し(図 8)、冷却テストと全チャンネルの導通チェックを行った上で、現地へ搬送した。



図 8. レーザー内の配線作業の様子

いずれの写真も撮影範囲は横幅約 50 cm。偏光モジュール背面に FPC を接続し(左上)、80 K シールド上で熱アンカーをとり(右上)、クライオスタット外部へ FPC の先を引き出す(左下)。クライオスタット背面で外部コネクタに接続する(右下)。バイアス線も含め全 65 本の FPC を配線した。狭いクライオスタット内の配線の取り回しルートと手順はモックアップテストを経て確立した。

¹⁰ QUIET という名前は Q と U の同時測定が出来ることに由来する: Q/U Imaging Experiment (QUIET)

¹¹ 他の実験では、直交した 2 つのアンテナの信号 E_x^2, E_y^2 を 2 つの検出器で測定するので、 $Q = E_x^2 G_x - E_y^2 G_y$ という測定原理となる。 U の測定には、さらに別のアンテナと検出器ペアが必要となる。

運搬時の振動や運送会社の粗雑な取扱い(日本ならあり得ないであろう)のせいで、なんらかの不都合があった場合は、現地で解体・組立作業をやり直さねばならない。祈るような気持ちで、金属ワイヤーを使った偏光信号キャリブレーション[6]を現地で行った。幸運にも全モジュールの正常な挙動を一発で確認することができた(図 9)。この瞬間は、さすがに私も興奮した。こういう時は、実験をやってもっとも嬉しい瞬間の一つであろう。アメリカ本土にいたコラボレーターからも興奮したメールが帰ってきた。プリンストン大の Suzanne Staggs (現実験代表者)などは “That is very exciting!! We should *definitely* have T-shirts made with that plot.” というようなメールを返信してきた(この日から 2 年近く経過したが、T シャツは作られていない)。後から考えると、これはぬか喜びであった。その後のアクシデントによって、残念ながら 4 個のモジュールが応答しなくなってしまった。

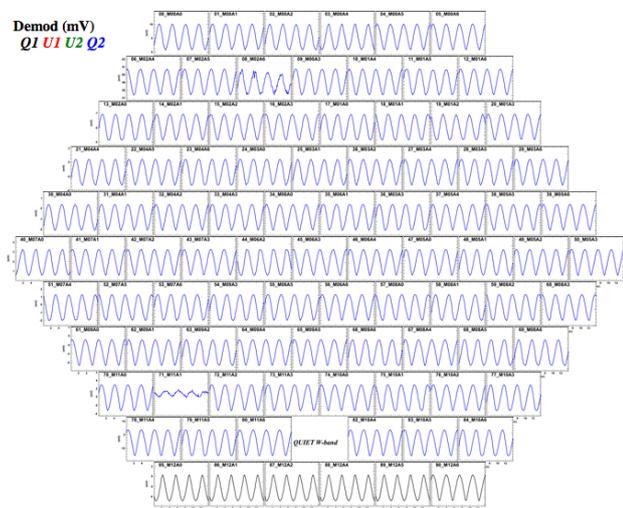


図 9. 観測サイトではじめて観測した全 90 モジュールの偏光信号出力ワイヤーによってつくられた偏光信号を回転させることにより、検出信号はきれいなサインカーブを描く。

「5 千メートルなんて、酸欠(酸素濃度は海面レベルの半分)で普通の生活もつらいでしょう。」とよく心配されるのだが、普通の生活や仕事は 10 日も働いていれば慣れてくる(それに酸素ボンベもある)。私にとって最大の誤算は、6-7 月のインストール時に南半球が冬だったということである。日中でも氷点下、日が暮れた途端に -10°C くらいまで一気に下がる。当然ながら屋外作業なので、極寒の中でほとんど感覚のなくなった手でネジを締め、ケーブリングや導通チェックを行った。「今度はホッカイロを沢山持ってこよう」と固く心に誓った。また、まれに雪がドカッと降るのだが、この雪かきが辛い! さすがに力仕事を 2~3 時間も続けられるような酸素濃度ではないのだが、雪をかかないと実験装置の一部が日照でとけた氷で凍りついてしまう。なにか修行のような日々であったが、ランナーズハイの状態を維持しつつ、チーム一丸となって観測にこぎ着けた(図 10)。

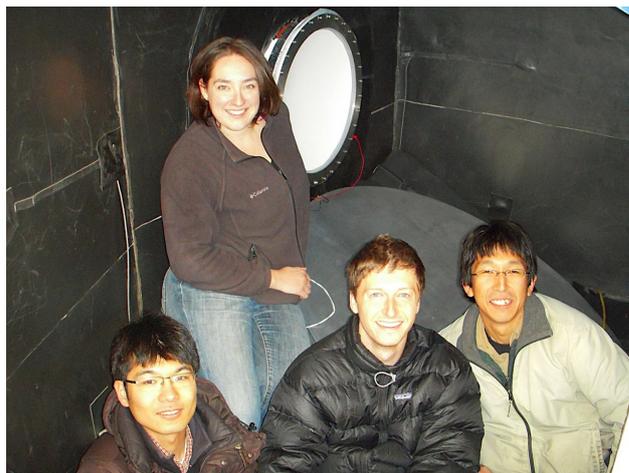


図 10. 観測サイト(標高 5 千メートル)での 95 GHz 帯レーザーのインストール後の記念写真

左から日下暁人(B ファクトリーで博士号取得後に、シカゴ大学 KICP fellow となり活躍中)、Alison Brizius(シカゴ大学大学院生。2ヶ月にわたるインストール作業計画は彼女が立てた)、Colin Bischoff(当時シカゴ大学大学院生、現ハーバード大学ポスドク。QUIET 実験の PhD 第一号)と筆者。後ろに見えるのが望遠鏡ミラーとレーザーの窓の部分。作り笑顔で写っているが、このときはクライオスタットに深刻な真空リークがあり、四苦八苦している真っ最中だった上に、みな雪かきでヘトヘトだった。

4 QUIET 実験の初期観測結果

今回発表した結果は、43 GHz 帯レーザーによる初期観測結果である。これは全データの 1/3 にあたる。

4.1 キャリブレーション

一般的な高エネルギー実験と比べると、CMB 偏光の観測装置の構造はきわめて単純である。要は偏光に感度のある光検出器が空に向けられていて、それらが偏光強度を測定しているだけである。しかしながら、装置が単純であればあるほどキャリブレーションが重要になってくる。キャリブレーションの達成度が実験精度を左右するといっても過言ではない。

もっとも重要なのが検出器の偏光特性(偏光角と偏光強度応答性)に対するキャリブレーションである。QUIET では様々なキャリブレーションを計画的に行ったが、月やおうし座カニ星雲(我々は TauA と呼んでいる)を使ったキャリブレーションを頻繁に行った。TauA のような超新星残骸はよい偏光ソース(偏光強度 5 mK)であり、その特性が良く測定されている。QUIET 望遠鏡は空を見込む角度(parallactic angle)をぐるりと回転することができる。45° 毎に parallactic angle をまわして、TauA を観測した結果が図 11 である。このきれいなサインカーブから、偏光角(⇔サインカーブの位相)と偏光強度応答性(⇔サインカーブの振幅)、偽偏光を作り出す割合(⇔サインカーブのオフセット)のキャリブレーションができる。

この TauA の解析では KEK に東北大学から特別共同利用

研究員としてきていた茅根裕司くんが非常に良い働きをしてくれた。キャリブレーションの精度を向上させるには、大気の状態変化や $1/f$ ノイズに起因するベースラインの揺らぎを無視することができない。彼はベースラインの揺らぎを4秒毎に線形近似してさつ引く66パラメータ・フィットによる解析手法を開発して、下記に示すような精度を達成した。(私見だが66パラメータ・フィットはあまりにも力づく過ぎる。次の機会にはCPU timeをセーブするエコでスマートな解析手法にも、是非挑戦してもらいたい。)

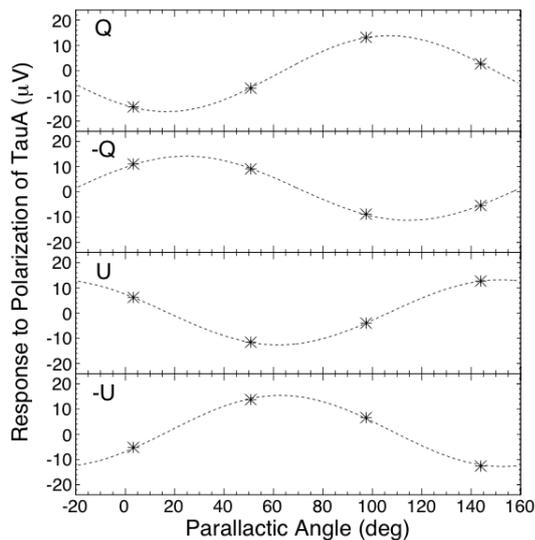


図 11. アレイの中心にあるモジュールの TauA に対する偏光レスポンス

Parallax angle をまわすことにより、きれいなサインカーブ・レスポンスを測定できる。

QUIET では、その他にも観測領域をトレースする合間(およそ1時間半毎)に望遠鏡の仰角を $\pm 3^\circ$ 振って、大気の放射強度を変化させるキャリブレーションも行っている。これは検出器の応答性や偽偏光信号の大きさをモニターするのに有用であり、その安定性を保証している。

実は、観測初期の段階ではキャリブレーションのストラテジーが定まりきらなかった。そのため今回の初期データセットに関しては、偏光角精度: 1.7° 、偏光強度応答性の精度: 6%¹²、偽偏光の割合: 0.6% (全チャンネル平均)にとどまったが、95GHz帯の観測データにおいては、その精度はさらに向上する。なお、偽偏光は septum polarizer 内のクロストークに起因するものである。しかしながら、これは常に一定で安定である(導波管内の出来事だから変化するはずがない)。そのため解析時の補正が可能である¹³。こういったクロストークも、95GHz帯のレシーバーでは大幅に改善されている。

¹² 強度応答性(ゲイン)の較正精度がこの程度であっても、前述のように QUIET の検出原理のもとでは B モードの測定には大きな影響を及ぼさない。

¹³ 今回の解析では補正を加えていない。いまのところ統計誤差に比べて十分小さいからである。

4.2 Run の定義

前述のように、QUIET では断続的に仰角を変えながら観測領域をトレースする。仰角を固定して観測している期間(約1時間半)は、検出器のノイズレベルは安定している。この期間一つ一つを run (ここでは解析に使用するひと続きのデータのこと)として解析を行う。なお、論文[1]の中では run のことを CES という単語で表記している。

非常に恥ずかしい話ではあるが、run の定義には苦労した。一般的な実験のセンスでは観測時に run モードの定義、run 開始時間、終了時間は DAQ 側で管理されるべきだが、観測開始当初はそういったものが一切なかった。DAQ 担当者(のみならず、コラボレーションの大半)が、こういった観測と解析の経験が欠落していたことが主原因だが、「(我々には)当たり前の概念」が存在していないことには衝撃を受けた。応急処置的に最低限のソフトウェアを日下(シカゴ大)や筆者が整備したが、ソフトウェアのデザイン段階で抜けていた機能を完璧に補完することは難しい。結局、最終的には長谷川雅也(KEK)が望遠鏡のモーション・エンコーダーのデータをすべて調べて、run の定義と bad run 選定を行った。このような非常に辛い「大切な仕事」を率先してやってくれた、長谷川くんの責任感には頭が下がる。

それ以外にも、本観測初日に「このままデータを取り続けると3日くらいでディスクが溢れちゃうんだけど、どうしよう?」と突然観測サイトで打ち明けられたり、単なる環境モニタープログラムが、たった一晩で100GBもあるログファイル(ちなみに環境モニターのデータサイズは ~ 20 MB/day)を作って観測をストップさせるなど、「ありえない」トラブルや準備不足には大変苦勞させられた。観測開始時は、息をつく間もないほど忙しい日々が続いた。

4.3 データ・セレクション

なんせ、見たい CMB 偏光の強度は検出器のホワイトノイズの数百分の1である。観測データにはノイズしか見えない。いや、きれいなノイズ以外は見えてはいけぬのである。つまり、「きれいなノイズ以外は見えていないよ」ということを定量的に評価して、質の悪いデータを排除することが重要となる。高エネルギー実験にたとえると、event selection というよりは、bad run selection や検出器の dead time や bad channel をマスクするようなニュアンスに近い。

当然ながら、解析の初期段階では評価する手法自身が手探りである。はじめは run 毎や個々の検出器毎にマップやノイズスペクトルなどを作って eye-scan することからはじめた。個々の観測データを見て、きれいにノイズしかないということを確認するというのは、解析というより何かの修行のような気分である。何か見つけたら、その原因を根気よく突き止めて、対処方法を検討する。そんな泥臭い作

業を何度も何度も繰り返しながら、解析手法を確立していった。

データの質を悪化させる原因としては、(1)装置の故障や不具合、(2)大気放射強度の変化、(3)装置の不完全性に起因する太陽や地面放射のしみ込み、などがある。具体的な選別条件は論文[1]を見ていただくとして、ここではエッセンスだけ述べる。(1)はまさに bad run や bad channel の選別であるが、ものによってはデータからの判別が困難な「微妙な」不具合もある。そういった不具合の開始時期の同定がもっとも難しい。たとえば、電源電圧などのモニターデータの変化と照らし合わせるなどの注意深い洞察と根気が要求される。これらは主に Colin Bischoff, Immanuel Buder (ともにシカゴ大学の大学院生)、長谷川 (KEK) らを中心におこなった。(2)は悪天候や大気圧や湿度の変化、薄い雲に起因する。ノイズスペクトルに普段は見えないスパイクやコブがないということを定量的に評価して、選別条件を決定することが腕の見せ所となる。これらの評価手法は、主に日下 (シカゴ大) と Kendrick Smith (プリンストン大) によって確立された。(3)に関しては後述(4.5)する。

4.4 強固な解析手法の確立

データの選別条件を決めるためには、それを正しいと判断するための基準が必要である。当然ながら、最終結果 (CMB 偏光のパワースペクトル) を見て、E モードが標準モデル (Λ CDM モデル) に一致するかどうか判断するなどは絶対やってはいけない。最終結果を見ることなく、解析の正当性を示すフレームワークが必要となる。それが「Null テスト」である。

データセットを適当に 2 つに分けてみよう。それぞれを A, B と名付ける。それぞれには CMB 偏光信号 $S_{A,B}$ とそれ以外のノイズ $N_{A,B}$ が含まれる。当然ながら、マップ上 (空の絶対座標系) の同一座標では、 $S_A = S_B$ である。お互いのマップを引き算すれば、ノイズの残差: $\Delta N_{\text{data}} \equiv N_A - N_B$ のみが残る、そこからノイズ残差のパワースペクトル $P(\Delta N_{\text{data}})$ が求められる。一方、モンテカルロシミュレーション (MC) から、ノイズ残差のパワースペクトル $P(\Delta N_{\text{MC}})$ を計算できる。MC に反映・再現されていない現象や問題がない限り、2 つのパワースペクトルの差はゼロ (null スペクトル) となる。図 12 に null スペクトルの一例を示す¹⁴。

このような null スペクトルを様々な観点、つまりデータセットの分割方法を色々変えて統計的に評価すれば、未知の問題や間違いを non-null のバイアスとして検知できる (null テスト)。バイアス評価には χ_{null} という null スペクトルの各 1 ビンの値をその統計誤差で割り算した値を定義し、その χ_{null} 分布 (図 13)、および χ_{null}^2 分布で評価した。QUIET で

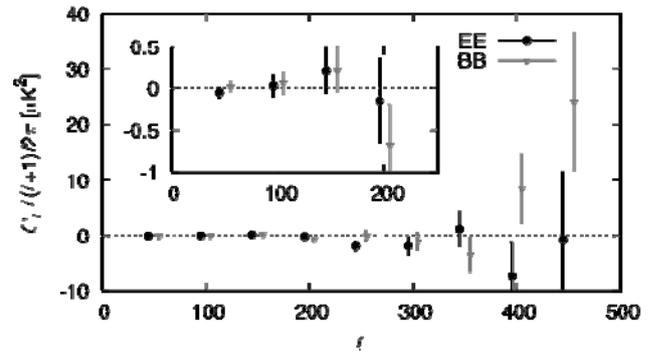


図 12. Null スペクトルの一例

同じモジュール上のストークスパラメータ Q に感度を持つチャンネルのデータセットと、 U に感度をもつチャンネルのデータセットに分割した例。EE, BB はそれぞれ、E モード、B モードに対応する null スペクトル。

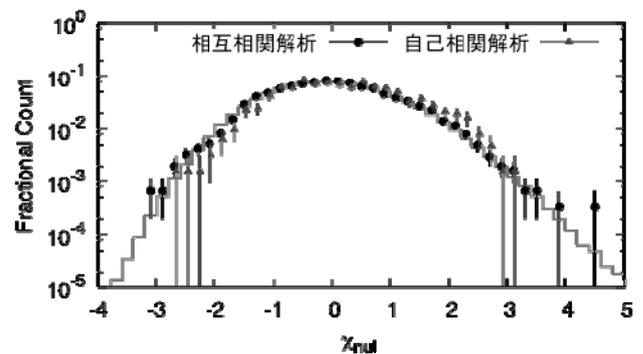


図 13. Null テストのバイアスパラメータ (χ_{null}) 分布

ヒストグラムは MC から予想される分布をあらわす。自己相関解析にはデータ・セレクションでは取り除ききれない微小なバイアス (統計誤差の 2 割程度) が残る。相互相関解析によって、これを抑制することに成功した。

は 42 種類の null テストをおこなった。もし、null にならなければ、キャリブレーション、データ・セレクション、MC などを改善する。こうやって、解析手法を確立していった。

こういった解析の中核を担うフレームワークは日下 (シカゴ大) が中心となって完成させた。非常に優れた仕事である。彼の働きなしには、ここまで強固な解析は達成し得なかったであろう。

4.5 想定外の問題とその解決

解析を進めていくと、予想もしなかった困難にぶちあたる。図 13 の「自己相関解析 ▲」とある分布を見ていただきたい。データ・セレクションを工夫しても、どうしても取り除けない微小なバイアスが null テストに残ってしまったのだ。つまり、これは「常にデータ上に存在しているが、定量的評価が困難なほどの微小な効果」である可能性が高い。「はっきりとした理由はわからないけど、系統誤差を割り当ててる (しかも他の系統誤差と比較して桁違いに大きい)」なんて結末は、実験としての敗北を意味する。なんとしても解決せねばならない。

¹⁴ 解析最終段階では後述の相互相関解析で null テストを行った。

この原因の一つとして考えられるのが、far-sidelobe と呼ばれる、視線方向以外の場所からの放射のしみ込みである。図 14 に示すように、観測初期の段階ではそれを十分に遮蔽できていなかった。この far-sidelobe の特性は、太陽をキャリブレーションソースとして使う解析により特定の角度方向に発生することが確認できた。これは茅根(東北大/KEK)による仕事である。もちろん、太陽放射のしみ込み($\sim 1\text{mK}$)をもつ run は CMB 偏光の解析から取り除く(これによるデータロスが高々数%)。しかし、太陽放射以外にも、地面放射に起因する far-sidelobe がある($\sim 100\mu\text{K}$)。Far-sidelobe の特性は理解したが、如何せん地面は広い! 相当する run を、いちいち排除しては解析に使うデータがなくなってしまふ。しかも、地面は起伏がある上に、表面温度は時々刻々と変化する。何かしらの賢い解決法が必要である。それが相互相関解析である。

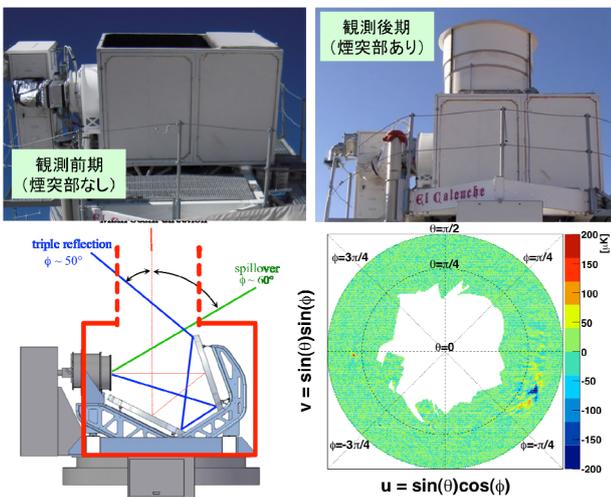


図 14. Far-sidelobe (左下に模式図)を遮断する「煙突部」の設置前後の写真(左上, 右上)。太陽を使って、2つの方向からの far-sidelobe の特性を理解・確認した(右下, 煙突部設置前のデータ)。

Null テストの時に説明したように、データセットを分割しても、マップ上の CMB 偏光信号強度は変化しない。つまり異なるデータセットの間で完全な相互相関をもつ。一方、検出器ノイズや地面放射のしみ込み、大気の変化にもなう影響などは、異なるデータセットの間で相互相関を持たない。データセットを分割して、相互相関をもつ成分のみ抽出すれば、CMB 偏光信号のみ抽出して、地面放射のしみ込みなどの影響を取り除くことが出来る。Far-sidelobe の特性を理解したことを踏まえた上で、データ分割方法を決定した¹⁵。そして相互相関解析により、上述のバイアスを取り除くことに成功した(図 13 の相互相関解析 ●)¹⁶。こちらの仕事も日下(シカゴ大)によって成し遂げられた。

¹⁵ 地面水平方向に10分割, かつ parallactic angle に対して6分割。

¹⁶ 地面水平方向に対するフィルター処理も行っており, これも地面放射のしみ込みや大気状態の変化に起因する効果の抑制に効果を発揮している[1]。

余談ではあるが、地面放射のしみ込みの重要性を当初から指摘していたのは、実験代表者の Bruce Winstein (シカゴ大)であった。皆がその深刻さをはっきりと認識するよりも前から、彼は自分自身でデータを眺めながら指摘していた。やはり、百戦錬磨の男の嗅覚は鋭い!

4.6 B モード探索結果

さて、いよいよ解析結果である。我々は null テストによって解析手法の正当性を確認しただけでなく、メジャーな系統誤差の見積りすらも「Box Open」より前にチェックしていたことを強調しておく。

E モードの測定結果を図 15(次頁)に示す。標準モデル(ΛCDM モデル)や過去の実験と一致する結果を得た。前述のように E モードの測定結果とモデルの一致は実験感度の良いデモンストレーションとなる。1st peak と呼ばれる $l \approx 150$ 領域の信号を有意な統計で観測した。インフレーション起源の B モードが最大になるのは $l \approx 100$ のため、1st peak の測定精度が B モードの探索感度の雑把な指標となる。

本命である B モードはゼロ・コンシステントな結果を得た($r = 0.35^{+1.06}_{-0.87}$)。その上限値は $r < 2.2$ (95% C.L.)、各角度スケール毎の 95% C.L. 上限値を与えたパワースペクトルが図 16(次頁)である。まだ、世界第一位の上限値ではないが、検出器感度が確認できた。全データセットによる解析で、世界最高感度の B モード探索が達成される見込みである。

図 17 に観測領域の一つ(CMB-1)にたいして、QUIET 実験が観測した偏光マップを示す。見慣れないと、測定するストークスパラメータ Q, U マップ(図 17 上段)の理解は難しいが、E モード、B モードのパワースペクトルからそれぞれ再構築したマップ(図 17 下段)に有意な E モード、ゼロ・コンシステントな B モードが確認できる。

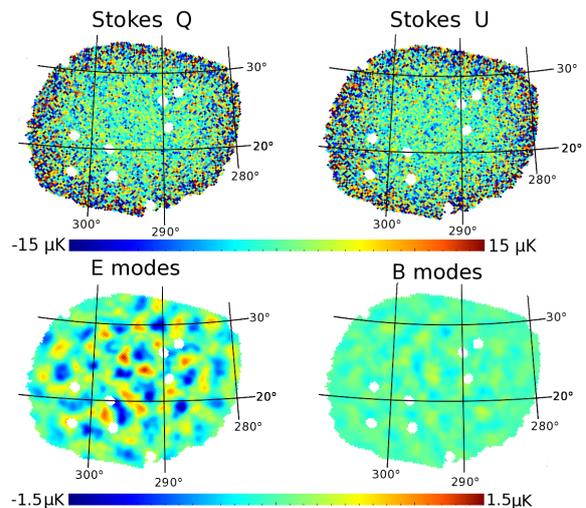


図 17. 観測領域 CMB-1 の偏光マップ

上段は直接測定したストークスパラメータ Q, U のマップ。下段はパワースペクトルから再構築した E モード、B モードのマップ。明るい銀河などは、マスクして解析を行う(白抜き部分)。

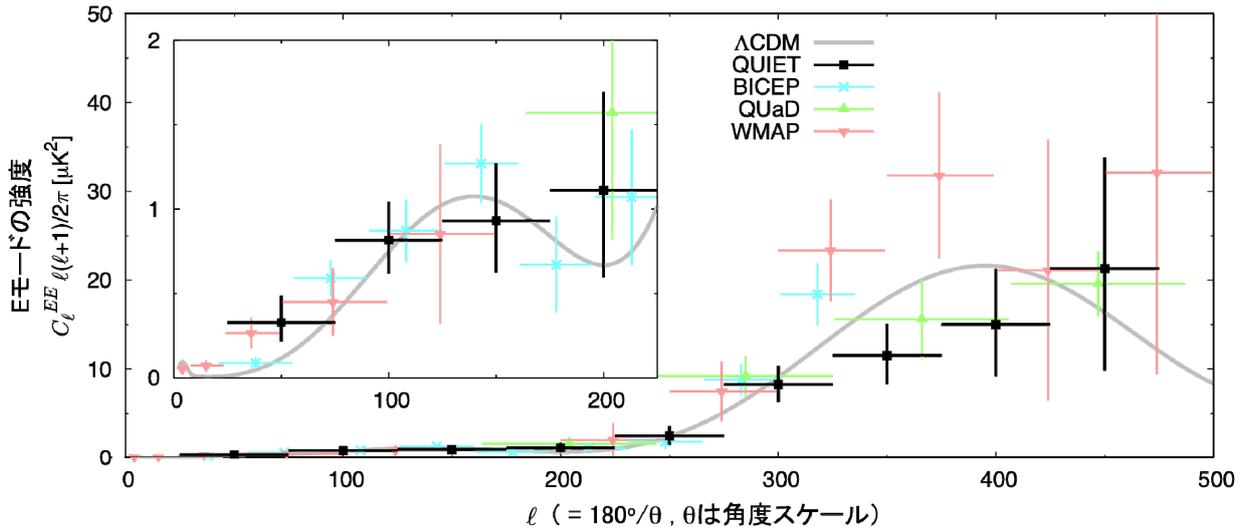


図 15. E モードのパワースペクトル

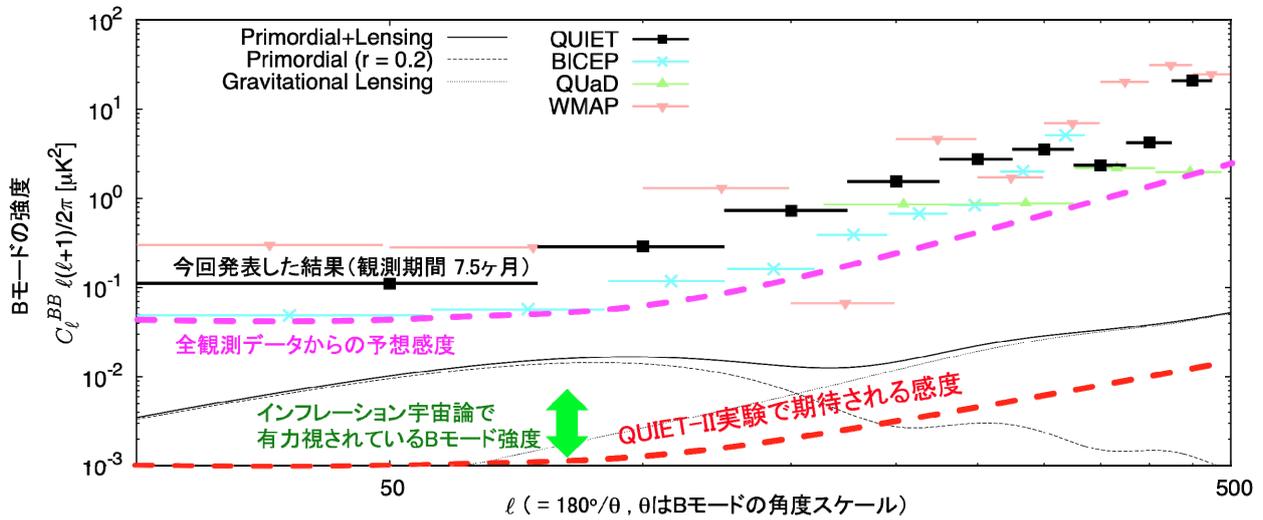


図 16. B モードの上限値

5 今後の展望

5.1 世界情勢

大型実験と比べて、これほど安価にこんなエキサイティングな実験ができるのである。当然、QUIET 実験のみが唯一の B モードの探索実験ではない。QUIET 実験より高い感度をもつ BICEP2 実験が、512 個の超伝導検出器 TES(Transition Edge Sensor)を搭載して、2010 年からその観測を開始した。また、BICEP2 のパワーアップバージョンともいえる Keck Array 実験(TES 検出器を 1,536 個搭載)も、最近その観測をスタートさせた。それらに続くように、POLARBEAR 実験¹⁷や ABS 実験などの実験も今年から観測を開始する予定である。そして、来年、再来年の観測開始を目指す実験もまだまだ多数存在する。

¹⁷ KEK から約 10 名がこれに参加しているが、こちらの話は割愛する。

図 16 にも示してあるように、Bモードは $r = 0.01 \sim 0.1$ 程度の強度がインフレーションモデルから期待されている。オーダー1,000 個の検出器を搭載した実験であれば、そのレベルの Bモード観測を数年で行うことができる。我々も検出器の数を増強して、さらなる高みを目指す実験 QUIET-II を計画している。KEK ではそれに向けた開発も進行している。ADC を含めたデータ収集システムをポスドクの石徹白と永井が、検出器の実験室キャリブレーション装置の開発を長谷川が行っている。特に後者は「実験室にしながら、本番の観測条件を再現する夢のシステム」(長谷川談)として、既に論文もアクセプトされている[7]。ただし、すべてが順調なわけではない。QUIET-II はまだ US-NSF にファンドされておらず、出遅れているというのが現状である。しかしながら、忘れてはいけない大切なことが一つある。それを次に述べる。

5.2 QUIET 実験のもう一つの成果

読者の大半はお気づきと思うが、Bモード探索実験はCMB偏光の超精密測定なのである。系統誤差の向上なしには今後の発展は見込めない。たとえば、偽偏光に起因する系統誤差を0.1%レベルまで抑制せねばならない。つまり、検出器数を増すだけの力づくのアプローチでは、系統誤差が支配的な実験となってしまう。そうなっては、元も子もない。

系統誤差をいかに小さく抑えるかが、実験屋の腕の見せどころである。QUIET 実験初期結果のもう一つの成果が、世界最良の系統誤差である(図18)。系統誤差に対して、現在もっとも強固な実験であることを証明した。

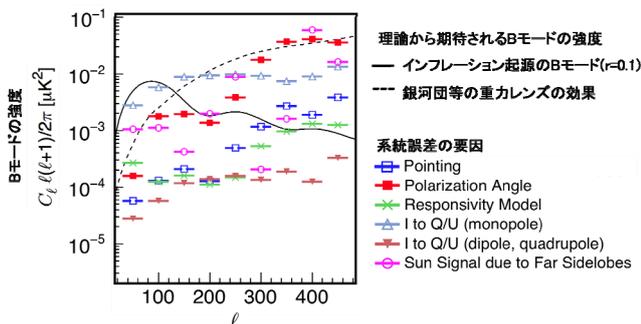


図18. QUIET 実験が達成した世界最良の系統誤差本格的な B モード探索に先立ち、実験装置の強固さを証明した。

世界最良といいながら、現段階では $r = 0.01$ の探索を可能にするレベルにまだ達していない。だが、我々は初期観測の段階でその改善方法を理解し、95GHz帯の観測では改善された septum polarizer を搭載した。さらにキャリブレーションを徹底するように観測ストラテジーを改善した。次の結果を発表するまでには、是非とも $r = 0.01$ の探索を可能にするレベルまで向上させたいところである。系統誤差のスタディの大半は筆者が行ったが、まだ満足のいくレベルには達していない。そのレベルに達した暁には大手を振って詳細を報告したいと思う。

6 おわりに

実はこの原稿の執筆依頼を頂いた4週間後に実験代表者であった Bruce Winstein (シカゴ大学) が永眠された。ご存知の方も多いと思うが、彼は直接的 CP の破れを発見した偉大な素粒子実験屋でもある。彼は3年半ものあいだ病気と戦いながら、実験の遂行と解析、論文執筆、すべてにわたって我々を叱咤激励して実験をリードしてきた。まさに、亡くなる2ヶ月前まで論文のとりまとめをし、我々の最初の論文を完成させたのだ。QUIET-I 実験の全データ解析結果を一刻も早く出し、続く QUIET-II 実験で B モードの発見を成し遂げることが、最大の恩返しと思う。それにむけて、筆者のみならず沢山の仲間が毎日頑張っている。

また、彼は KEK が、いや、日本が、こんなにも素晴らしい実験をはじめのきっかけをお膳立てしてくれた大恩人である。筆者もシカゴ大学に長期滞在中に大変お世話になった。感謝してもしきれない。

追記

KEK では B モード観測を目指し、米国との共同実験だけでなく、日本発の地上観測実験装置の製作や、衛星実験に向けたスタディ、新検出器の開発も行っている(詳細は別の機会に譲る)。新しいことに挑戦するガッツある人、一緒にこのエキサイティングな発見を目指しませんか？

参考文献

- [1] QUIET collaboration, arXiv:1012.3191, submitted to ApJ (2010).
- [2] 羽澄昌史, 高エネルギーニュース **27-4**, 245 (2009).
- [3] H. C. Chiang *et al.*, ApJ **711**, 1123 (2010).
- [4] E. Komatsu *et al.*, ApJS, **192**, 18 (2011).
- [5] K. A. Cleary, Proc. SPIE 7741 77412N (2010).
- [6] 田島 治 他 QUIET コラボレーション, 日本物理学会 第66 回年次大会 26aGQ-11 (2011), 装置は FermiLab の Hogan Nguyen によって製作された。
- [7] M. Hasegawa *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **82**, 054501 (2011).