

宇宙背景放射偏光測定が拓く超高エネルギー物理学

KEK 素粒子原子核研究所

羽澄 昌史

masashi.hazumi@kek.jp

2009年(平成21年)3月2日

1 はじめに

今、チリの山の中、標高 5080 メートルの観測所でこれを書いています。これまで加速器を使った素粒子実験に従事していた私が、このような解説記事をこのような酸素の薄い場所で書くことになるとは、自分自身も予想しておりませんでした。私が宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background, 以下 CMB と記す) の偏光測定という新しい分野に魅せられ、飛び込んでから約 1 年が経過しようとしています。本解説記事は、高エネルギー実験屋を対象に、CMB 偏光測定の魅力をお伝えすることを目的としています。特に、1) CMB 偏光測定がインフレーションに起因する原始重力波を発見する最良の方法であること、2) したがって「ビッグバンの前」を探る強力な方法であること、3) インフレーション宇宙のエネルギースケールを決定できる可能性があること、4) 量子論と重力理論の統一を実験・観測により検証する道を拓くこと、を説明したいと思います。はじめに、これから説明することを図にまとめてしまいました。図 1 がそれです。この図を眺めながら、以下の説明を読んでいただければと思います。

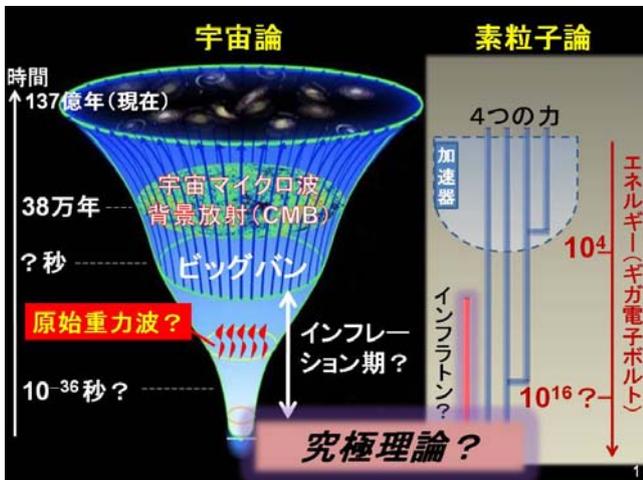


図 1: インフレーション宇宙論と素粒子論

2 インフレーション宇宙と原始重力波

宇宙はビッグバンによりはじまった、というのは様々な観測を経て揺るぎない定説になっています。具体的には宇宙は最初、熱い火の玉のような高温、高密度の状態であったとします。ところが、このビッグバン理論だけでは、観測によりわかってきた宇宙の平坦性、一様等方性、また宇宙の構造形成を説明することができません。

これらを見事に説明するのがインフレーション仮説です。インフレーションは「ビッグバンの前」(すなわち熱い火の玉宇宙ができる前)に何が起きたかを記述します。インフレーションは、これらの謎に対する解を見事に与える一方、その代償として、宇宙の極初期における急激な加速膨張を仮定します。どの程度の膨張かということ、典型的なインフレーションモデルでは宇宙誕生後、 10^{-36} 秒というまさに「一瞬」に、 $e^{60} \simeq 10^{28}$ 倍程度の膨張が必要になります。これは、アメーバが銀河のサイズになるほどの膨張です。このような加速膨張を起こす微視的(素粒子論的)物理法則は解明されておらず、もちろん素粒子の標準理論では作り出すことができません。

さて、ここでいう宇宙の膨張とは一体何をあらわすのでしょうか? われわれ高エネルギー物理屋はふだん一般相対論に触れる機会が少ないため、膨張の意味をしばしば誤解しているようです。宇宙の膨張を考えるときには、計量(メトリック) $g_{\mu\nu}$ について考えないといけません。高エネルギー物理実験屋が普段取り扱う計量は

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

で、時間変化をしたりしません。もし膨張を、計量がこのまま変化せず、物質が空間の中を飛び散っていくようなものと考えていたら、それは間違いです。膨張とは計

量そのものの膨張なのです。ここがポイントです。一様等方な膨張宇宙は

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a^2(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a^2(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a^2(t) \end{pmatrix} \quad (2)$$

という形の Friedmann-Robertson-Walker (FRW) 計量であらわせます。 $a(t)$ はスケール因子と呼ばれ、これが時間が経つにつれて大きくなっていきます(現在が $a = 1$ であるとして規格化します)。これが宇宙の膨張であり、これ以上でも、これ以下でもありません。

このように、計量が時間変化をすることが一般相対論の現象論でもっとも肝心な点で、このことさえ押さえておけば、一気に視野が広がります。計量は時空内で変化し、波を伝えたりできるのです。まさに場としてふるまうのです。一般相対論の要諦を一言でいえば、「計量は場だ!」ということになります。計量の場の方程式は等価原理から導かれるアインシュタイン方程式

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} \quad (3)$$

によって与えられます(宇宙項は本稿の議論で本質的ではないのでゼロと置いています)。ここで、右辺の $T_{\mu\nu}$ はエネルギー運動量テンソルで、ここにいろいろな粒子の場が寄与し、左辺に影響を与えます。左辺(アインシュタインテンソル)は計量の関数なので時空そのものを規定します。

さて、インフレーションを実現するには、 $T_{\mu\nu}$ によほど強烈な影響を与えるような新しい場を導入してやる必要があります。そこで、新しいスカラー場(インフラトン)が登場します。これはヒッグス場と似たようなポテンシャルを持ち、ポテンシャルの深さとその形(未知です)をうまく調節してやることによってインフレーションを実現しようというのです。これにより $t = 10^{-36}$ 秒(これが GUT スケールに相当します)のころに $a(t)$ を 28 桁大きくすることができるようになります。

インフラトンのような新しい場を導入し、 $a(t)$ の「暴力的な」加速膨張を達成すると、これに付随して、計量にこれ以外のゆらぎ(摂動)も生まれます。特に非対角成分にもゆらぎが生じます。このゆらぎが原始重力波です。くどいようですが、計量がどう変化するか、が問題の中心であり、重力波とは計量という場の波なのです。

原始重力波生成を、グラビトン生成と考える方が、われわれ高エネルギー物理屋にはわかりやすいかもしれませんが、真空のなかでは、一般に、様々なバーチャル粒子が量子論的生成消滅を繰り返します。グラビトンとて例外ではありません。さて、普通の真空では、バーチャル

グラビトンを実粒子として取り出すことは原理的に不可能とは言わないまでも、実際的な手段がありません。しかし、宇宙初期の真空という特別な装置では、先程のべた「暴力的な」加速膨張により、バーチャルグラビトン対が再結合する間もなく、あっという間に引き離されて、実粒子になってしまうのです [1]。

さて、原始重力波は非対角成分のゆらぎだといいました。これは計量がテンソルであるからこそ生じるゆらぎなのでテンソルゆらぎ (T) といえます(これも、グラビトンはスピン 2 を持つ、といったほうがピンとくるでしょうか)。一方、対角成分のみに生ずるゆらぎも存在し、スカラーゆらぎ (S) といえます。二つの大きさの比 $r \equiv T/S$ が原始重力波の強度を表します。 r はインフレーションモデルのパラメータとなり、実験観測により決定する必要があります。興味深いことに、もっともシンプルなく(したがって「そうであってほしい」)インフレーションのシナリオ (single-field slow-roll inflation) では、インフレーションのエネルギースケールは

$$3.3 \times 10^{16} \times r^{1/4} \text{ (GeV)} \quad (4)$$

となります。さらに多くのモデルでは、これまでの観測により、間接的にですが $r > 0.01$ というような制約が課されています (slow-roll consistency)。したがって、インフレーションのエネルギースケールは力の大統一スケール (GUT スケール) 10^{16} GeV あたりになるのです。直接関係のない二つのエネルギースケールが同じになるのは、まことに不思議なことといえます [2]。

原始重力波を検出することにより、GUT スケールのエネルギーが定量的に決まってしまう! 地上の加速器で現在直接到達できるエネルギーの 1 兆倍のエネルギーの物理を探れる!(しかも、驚くほど低予算)。ここが高エネルギー物理屋にとって大きな魅力となるところです。勿論、宇宙論研究者にとっても、原始重力波の検出は今後の最大目標といっても過言ではありません。それは、原始重力波の強度測定から、ビッグバンの初期温度と開始時刻を決められる可能性があるからです。

もうひとつ興味深いこと。式 4 からわかるように、インフレーションエネルギースケールが高いほど、放出される原始重力波の強度は大きくなります。高エネルギー物理の普通の new physics search では概ねエネルギースケールの下限が上がっていき、最後に発見が訪れるわけですが、原始重力波探索では、反対に、エネルギーの上限が下がっていくのです。エネルギーの上限が決まるといのは、何と興味深いことでしょう!

では、原子重力波をどうやったら検出できるでしょうか? 答えは、「CMB の偏光度を見よ」です。次節でそのからくりを説明します。

3 CMB 偏光を通した原始重力波検出

ビッグバンから 38 万年たったとき、宇宙が十分に冷えて、それまでプラズマ状態で存在していた電子と陽子が結合し、水素原子となります。光子はそれまでうよよよしていた荷電粒子と高い頻度で散乱していたのですが、パタッと相手が消えたため、以後、自由に宇宙空間を伝わります。これが宇宙の晴れ上がりで、この自由に伝わり、宇宙に満ちている「電磁波の化石」が CMB です。38 万歳の宇宙の温度は約 3000 度で、その時点での CMB の温度も同じです。ところが現在の観測では CMB の温度は 2.7 K (約 3 K) です。CMB は赤方偏移しているわけです。これが「ドップラー効果」のようなものによると思っていたら、それも高エネルギー屋によくある誤解です。ポイントはまたも計量です。晴れ上がり時のスケール因子は $a \approx 1000$ です。今は $a = 1$ です。この宇宙膨張により、光子の波長も長くなっているのです。

さて、宇宙が晴れ上がるとき、光子は荷電粒子と「最後の散乱」をおこして決別します。これは通常のトムソン散乱です。よく知られているように、光は散乱すれば偏光成分を持ちます。したがって CMB も偏光成分をもてるわけです。ただし偏光度は大きくありません。もし CMB が空のどこでもまったく同じ温度だとすると、四方から来た光子が散乱されてわれわれの視線方向にやってくる場合の平均はゼロ偏光になってしまいます。2006 年のノーベル物理学賞が Mather と Smoot に与えられたことを記憶しているでしょうか？ あれは COBE という CMB 観測衛星による業績です。Smoot の業績は CMB の温度分布を全天にわたり測定し、 $30 \mu\text{K}$ の温度ゆらぎ (3 K の 10 万分の 1) を発見したことです。この揺らぎがあると、温度が高い領域から来る光子が勝つため、ようやく偏光が生まれるのです。したがって偏光のゆらぎは温度ゆらぎより更に小さくなります。

このように小さな偏光度ですが、よい測定器があれば観測できます。皆さん WMAP 衛星の全天マップをご覧になったことがあるかと思います。あれは温度ゆらぎですが、同様に偏光の測定により、CMB 偏光マップを得ることができるはずですが、それは、たとえば図 2 のようなイメージとなります。各点での棒 (ロッド) の向きと長さが直線偏光の向きと強さに相当します。

これで偏光が生ずるメカニズムはわかりました。でもここまでのところ原始重力波と何の関係もありません。では、どのように原始重力波が影響するのでしょうか？ ポイントはトムソン散乱に起因する偏光マップが原始重力波により変更を受け、偏光マップに特殊なパターンが生成される、ということです。これを利用すると、まるで現場についた指紋から犯人を割り出すように、原始重

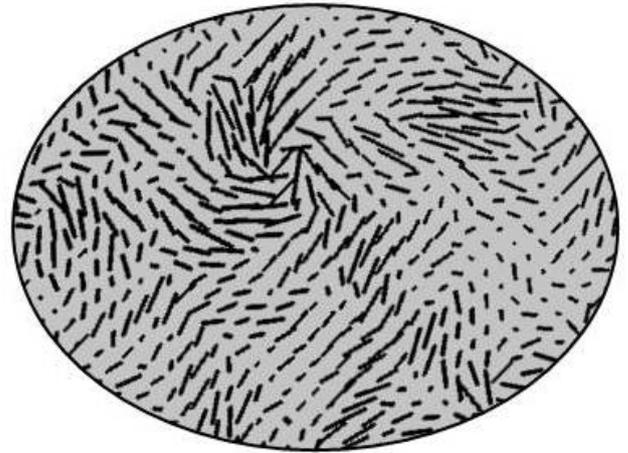


図 2: CMB 偏光マップのイメージ

力波を発見することができるのです。

では、それは具体的にどんなパターンなのでしょう？ それを理解するためには、もう少し我慢していただき、偏光解析の基礎について知る必要があります。偏光をあらゆるパラメータはストークスパラメータと呼ばれます。これ自体は 150 年以上前に考案されたものであり何ら新しいことはありません。電場のみに着目し、その x 成分と y 成分をそれぞれ \mathcal{E}_x , \mathcal{E}_y とします。偏光はこれらの相関となるので、一般的に

$$\langle \mathcal{E}_x \mathcal{E}_y \rangle = \frac{1}{2} (I\sigma_0 + Q\sigma_3 + U\sigma_2 + V\sigma_1) \quad (5)$$

と書けます。ここで I, Q, U, V がストークスパラメータ、 σ_i はパウリ行列です。CMB の偏光は直線偏光なので (超弦理論では円偏光も可能になります)、 Q と U のみを考えればよくなります。したがって偏光のマップ (図 2) は、天空の各点 (θ, ϕ) での

$$P_{ab} = \begin{pmatrix} Q(\theta, \phi) & U(\theta, \phi) \\ U(\theta, \phi) & -Q(\theta, \phi) \end{pmatrix} \quad (6)$$

というテンソルの分布となります。原始重力波の特殊なパターンを議論するには、これをさらに二つのモードに分解します。これは $\nabla^2 P_E \equiv \partial_a \partial_b P_{ab}$, $\nabla^2 P_B \equiv \epsilon_{ac} \partial_b \partial_c P_{ab}$, と定義されます (ϵ_{ac} は反対称テンソル) [3]。テンソルの微分形なのでここがわかりにくいところですが、電場・磁場と電磁ポテンシャルの関係に似ています。だから実際、 P_B を偏光の B モード、 P_E を偏光の E モードと呼びます。式だけではイメージがわかりませんから、図 3 に B モードと E モードの具体例を示します。

ひらたくいえば、以下ようになります。天空の各点で棒を書くと、これを流れとして表現してもよいことがわかります。流体を表現するには各点で「湧き出し」と「渦」を決めてやればよいです。これがまさに E モードと B モードに対応しているのです。

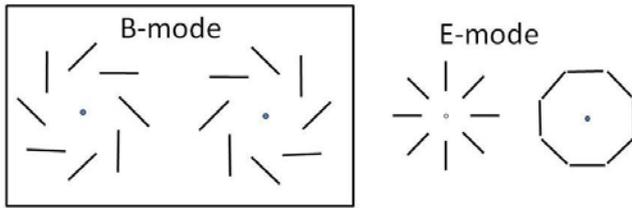


図 3: 偏光の B モードと E モード

さて、ようやく核心に触れることができます。EモードとBモードの本質的な違いは、Eモードのパリティが正であり、Bモードのパリティが負であることです。そして、スカラーゆらぎはEモードしか作ることが出来ません。したがって、Bモードという偏光の特殊なパターンを検出することにより、重力と関係ない「普通の物理」にわずらわされることなく、原始重力波を発見できるのです。スカラー（スピン0）ではパリティ正のモードしか作れない、テンソル（スピン2）ならパリティ正と負の両モードを作れる、とまとめてよいかと思います。

以上がCMB偏光を通して原始重力波を発見するからくりです。ここで皆さんは、レーザー干渉計を用いて原始重力波は発見できないのか、という疑問を持つかもしれません。実際に比較してみると、CMB偏光Bモードによる測定はレーザー干渉計よりはるかに高感度な測定となることが知られています[4]。では、レーザー干渉計による原始重力波探索は無意味かという決してそうではありません。現時点での緊急性はあまりないのは事実でしょう。しかし、CMB偏光Bモードで原始重力波が発見された場合、レーザー干渉計で目標とすべき感度も定まるわけです。これは何としても実行したい観測になるでしょう。まとめると、原始重力波を発見するベストチャンスはCMB偏光Bモード測定にあります。それは、これまで行われてきた電磁波による測定と遠い将来のレーザー干渉計による原始重力波測定との懸け橋として、今まさに人類が挑むべきテーマであるといえます。

先に、多くの自然なインフレーションモデルで、 $r > 0.01$ が予言されていることを述べました。現在までの観測で r に対する制約はまったくないのでしょうか？CMB偏光測定についていえば、これまで十分な感度の測定がなかったのですから、答えはイエスです。一方、どんな観測でもよいとすれば、答えはノーで、間接的な弱い制約があります。WMAPのデータ、バリオン振動の観測、SDSSのデータから、 $r < 0.2$ (95% C.L.) という結果が得られています。なぜこういう制約が出せるかというと、原始重力波の影響は幅広い影響を与えるからです。ただし、これらの観測の精度を上げるより、今後は、混じり気がないCMB偏光Bモードを攻めていく方が圧倒的に有利になるということなのです。

日本ではなぜかこれまで本格的取り組みがありませんでしたが、欧米ではCMB偏光Bモード観測の重要性はよく認識されており、究極の測定に向けたロードマップが議論されています。以下は2006年に出たUS Roadmap [4]からの抜粋です（括弧内は私の意識）。

- The accurate measurement of CMB polarization is the next critical step in extending our knowledge of both the early Universe and fundamental physics at the highest energies. (CMB偏光測定は、「初期宇宙」と「最高エネルギーの根本的物理法則」を探究する王道である。)
- Detecting primordial gravitational waves would be one of the most significant scientific discoveries of all time. (原始重力波の発見は科学史上最大の発見となる。)

ロードマップの著者は原始重力波発見を目指している人たちなので、2番目の点は割り引いて受け止める必要があると思いますが、それにしても自らの目指すサイエンスが「史上最大の発見」だと言い切れるテーマは数少ないことも事実かと思います。

さて、ここまで、なぜCMB偏光測定をやりたいか、その動機を説明してきました。次節から、実際の研究活動について説明していきます。後発の日本で最終的にどうすればトップに立てるか、がプロジェクトを推進する上でもっとも大事な点で、私の考えは本稿の後半に説明しますが、まずは、観測の概要と世界の情勢について見ていきましょう。

4 観測の概要と世界の情勢

CMBの大気による吸収の様子を図4に示します。地

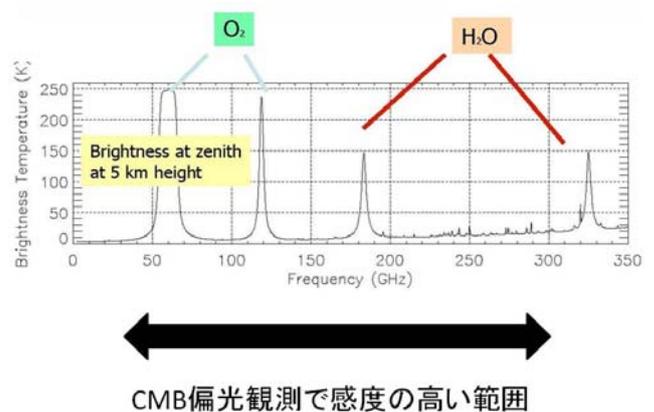


図 4: CMBの大気による吸収

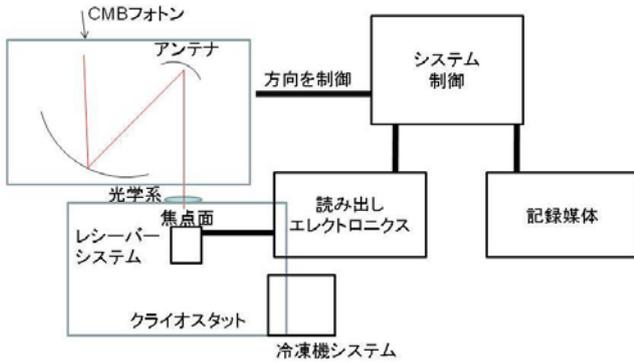


図 5: CMB 偏光測定の概要

上で観測をおこなう場合、酸素と水の吸収を避ける必要があります。よく使用される周波数は、40 GHz, 90 GHz, 150 GHz, 220 GHz などです。それでも吸収を可能な限り避けるため、できるだけ高所での測定が望まれます。しかも空気が乾燥していて、一年を通して晴天率が高いところとなると限られてきます。現在 CMB 観測サイトとしておもなものは南米チリのアタカマ高地、および南極です。もちろん宇宙空間での測定をおこなえば、大気の影響による制約はなくなります。

図 5 は（地上での）一般的な CMB 観測装置の概要です。一般的な電波天文観測装置と同様の構成です。空から降ってくる CMB の光子は、電波としてアンテナと光学系で焦点面に集められます。ミリ波が対象なので、可視光の望遠鏡のような精度は必要ありません。焦点面には検出器（レーザー）アレイが配置されます。これらにはノイズを極限まで抑え、かつ系統誤差を注意深く取り除いたデザインが要求されます。レーザーは大別すると、コヒーレントレーザーとインコヒーレントレーザーの二種類があります。

高周波の電波に対するコヒーレントレーザーは、無線 LAN や BS 放送のレーザーなど、われわれの日常で重要な役割を果たしています。これらは決められた周波数（2.4 GHz, 12 GHz など）の電波を受け、増幅し、信号の復調、検波を行います。CMB に対しても、原理的にはまったく同じ方法が使えます。しかし、CMB 観測に必要なのは 30 ~ 300 GHz というひとけた以上周波数の高い電波のレーザーです。しかも通信と比べてはるかに高い感度が要求されます。HEMT（High Electron Mobility Transistor）と呼ばれる特別に速く動作するトランジスタを使ったアンプを、20 K 程度に冷やして使用します。いったん低温で増幅してしまえば、後は通信で広く使われているダイオードによる二乗検波などが可能です。

インコヒーレントレーザーとして代表的なのはポロメーターです。従来は半導体を使ったポロメーターが主

流でしたが、最近では、より感度の高い超伝導転移端センサー（TES, Transition Edge Sensor）が実用化されつつあります。これは 300 mK というような極低温で使用します。

単一のレーザーのノイズを小さくするだけでは限界があります。CMB の光子がふりそそぐ量に統計的な揺らぎがあるからです。現代の最先端検出器では、この揺らぎ（フォトンノイズ）の影響が無視できなくなっています。これに対処するためには、高エネルギー物理業界でいうところの「統計を増やす」必要があります。解決策はレーザーの数を増やすことです。現在準備中の実験は、いずれも 1000 チャンネル程度のレーザーをアレイ化して焦点面に置くことをめざしています。より将来の実験のためには、CMB カメラとでも呼ぶべきである多素子アレイの開発 [4] がおこなわれています。

偏光を受ける方法はいくつかあります。偏光板、半波長板スロットアンテナ、OMT といった、これまで天文観測でよく使用されてきたものとその組み合わせといった感じです。最後にとても大事なのが、信号に変調をかけることです。これにより $1/f$ ノイズを取り除いたり、系統誤差をおさえたりします。このあたりの構成をどうするかは実験屋の腕の見せ所となるわけですが、かなり細かい話になってしまうので、本稿ではこの辺にします。興味のある方は、文献 [4] を読むことを勧めます。

さて、世界を見渡せば、当然ながら、原始重力波という金鉱脈を狙う山師たちがいるわけです。この原稿を書いている現在、データを取得しているのは、KEK CMB グループが推進している QUIET 実験のみですが、予算がついて準備中のものを含めると、QUIET, Clover, POLARBeaR（以上はチリでの観測）、BICEP2, SPT-POL（以上は南極での観測）、EBEX, SPIDER（以上は気球での観測）、Planck（ラグランジュポイントでの観測）があります。特筆すべきことは、Planck 以外のすべての実験が、 $r = \mathcal{O}(0.01)$ の感度を持つと主張していることです。しかも、今後 5 年以内にそれを達成するという計画です。Planck 衛星は ESA（ヨーロッパ）と NASA（米国）の共同プロジェクトで、今年打ち上げ予定です。これは CMB 温度揺らぎに関する決定的な測定を行うと期待されていますが、残念なことに、偏光についての精度は不十分です。CMB 偏光 B モードによる原始重力波検出というアイデアが論文雑誌に掲載されたのは 1997 年 [5, 6, 7, 8] ですが、そのときすでにデザインを固めていた Planck は対応できなかったというのが理由のようです。一方、あとからでてきた地上と気球による CMB 偏光 B モード観測計画では、主目的が原始重力波検出であり、より野心的な検出器を考案できたわけです。Planck 衛星のデザインを決める充分前に、CMB

偏光 B モードによる原始重力波検出というアイデアが出現していたら、世界は変わっていたかも知れません。

5 KEK CMB グループ

極めて重要でありながら、CMBの観測はこれまで(特に1990年代以降)日本で空白になっていました。その解決には、空白のすぐ横にいる力をもったグループが参入するのがベストです。そこで昨年、KEKでCMB偏光測定グループ[9]を立ち上げました。現在は、次節で紹介するQUIET実験[10]をメインプロジェクトとして推進しており、羽澄昌史、田島治、樋口岳雄、長谷川雅也(以上KEKのスタッフ)、茅根裕司(D1, 東北大, KEK特別共同利用研究員)の5名が参加しています。また、QUIET実験と共同観測を予定しているPOLARBeaR実験[11]に羽澄と都丸隆行(KEK低温センター)が参加しています。2009年4月からは、ポスドク研究員と、総研大の大学院生3人も参加することになります。さらに、2008年9月にJAXA、国立天文台、KEK、カリフォルニア大パークレー校、カリフォルニア工科大学、東北大、岡山大などの有志により、将来(10年後)のCMB偏光観測衛星のスタディグループを立ち上げました。これは現在JAXAの小型科学衛星プロジェクトワーキンググループの一つとして認知されています。簡単にいえば、今後5年は地上で頑張る、その後5年で衛星を打ち上げる、というプランです。

高エネルギー物理から見た宇宙論、いわゆるコズミック・コネクション、の重要性は近年ますます高まっています。われわれの活動が日本の高エネルギー物理研究と宇宙論実験にとって少しでもプラスとなるようにと一同がんばっています。

以上がCMBグループの活動概要です。これと深く関連して、将来のCMB観測に使用可能な超伝導検出器アレイ開発をKEK測定器開発室の活動の一環としておこなっております。この活動はCMBグループの科学志向で焦点を絞った研究スタイルとは異なり、技術志向で幅広い応用を開拓しようというものであり、本稿では触れず、またの機会を設けて説明したいと思います。

では、残りの紙面で、KEK CMBグループの現在の活動について、さわりを紹介いたします。

6 QUIET 実験

QUIET実験の装置は、チリ・アタカマ高地標高5080メートルに設置されたCMB望遠鏡です。参加研究機関はシカゴ大、マイアミ大、スタンフォード大、カリフォルニア工科大、NASAジェット推進研究所、プリンスト

ン大、コロンビア大、KEK、オスロ大で、PIはシカゴ大のBruce Winsteinです。米国でもCMB観測は天文学科より物理学科のプロジェクトとして進んでいるところが多く、QUIETも高エネルギー実験、重力実験などの多彩なバックグラウンドを持った物理屋、天文屋、計算科学屋の混成部隊です。WMAPメンバーの一部も入っています。

図6が観測中の望遠鏡の写真です。白い箱状の部分は周囲のミリ波を遮蔽しており、上面に黒く見える部分からCMBを観測します。遮蔽部を取り除いた内部は図7のような構造を持ちます。空から降ってくるCMB光子は、主鏡、副鏡と反射してプレートレットアレイと呼ばれる集光部(ホーン)を通り、焦点面のレシーバーに叩き込まれます。これら全体がマウントの上に乗せられており、3軸制御により視線方向とそれに対する焦点面の回転角を自由に変えることができます。

レシーバーシステム全体は、土管のような形をしたクライオスタットの中で20Kまで冷却されています。図8に概要を示します。QUIETの最大の特長は、JPLが新



図6: 紺碧の空と観測中のQUIET望遠鏡 ミリ波の観測を昼夜を問わずおこなうことができる。

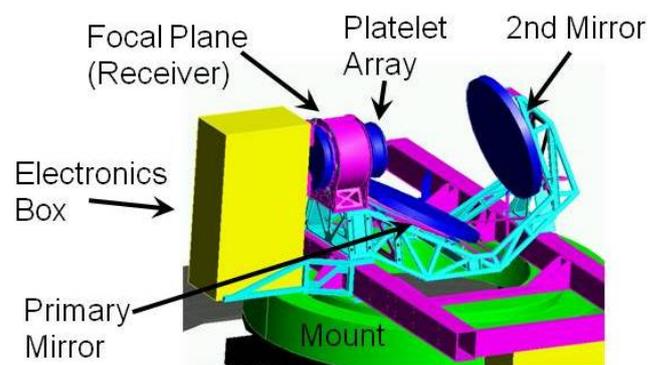


図7: QUIET実験装置概要

たに開発した HEMT ポーラリメータチップ (図 9) を使用することです。従来の HEMT レシーバモジュールの大きさは導波管を用いているため約 30 cm 程度でした。これを使って 1000 モジュールというのは巨大な焦点面が必要になってしまい、現実的ではありません。QUIET のチップは 3 cm 角程度 (切手くらい) なので、1000 モジュールが可能です。

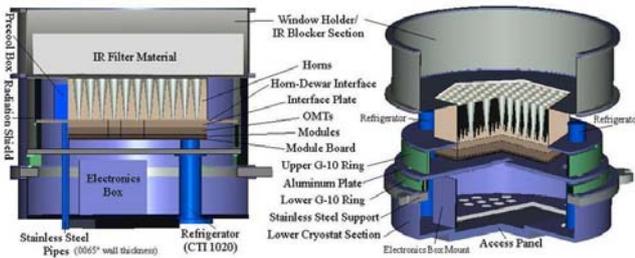


図 8: QUIET レシーバシステム概要

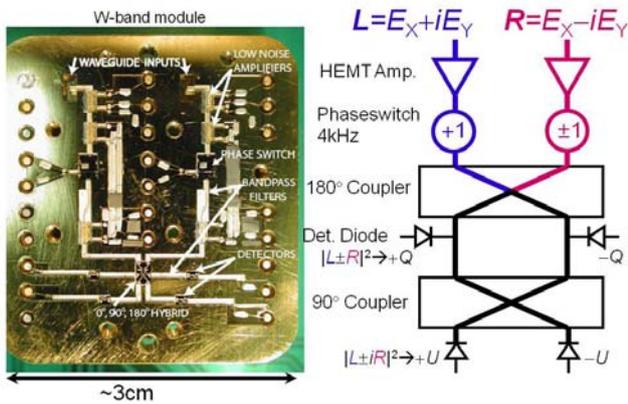


図 9: QUIET で使用するポーラリメータチップと偏光度測定方式

Phase I は現在 Q バンド (40 GHz) 19 モジュールを用いて順調にデータを取得中です。CMB のデータだけでなく、測定器システム校正のためのデータが非常に重要です。ミリ波を強く放出する天体の観測や身近なところでは月の観測など様々な観測を組み合わせ、またノイズ源を用いて、総力戦で系統誤差を減らす努力をしています。2009 年 5 月ごろに W バンド (90 GHz) 91 モジュールへ交換し、2009 年末までデータ取得を続け、その後 1000 モジュールへアップグレードして Phase II の観測をおこなう予定です。Phase II で予想される感度を図 10 に示します。もしインフレーションが大統一エネルギースケールで起きているなら、原始重力波発見の十分なチャンスがあります。次回はぜひ phase I の予備的な結果が出たところに報告させていただきたいと思ひます。

QUIET: phase II forecasts (90 GHz alone)

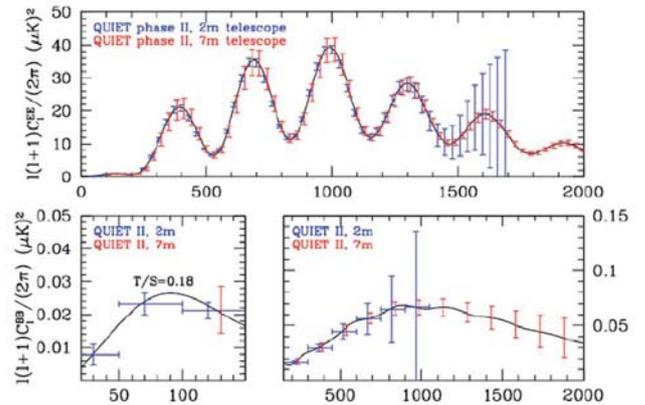


図 10: QUIET phase II で期待される検出感度

7 QUIET+POLARBeaR 共同観測

紙面の都合で POLARBeaR 実験についてはごく短く触れさせていただきます。POLARBeaR は UC Berkeley が中心に準備を進めている実験で、QUIET と同時期に同じ空を共同観測することが検討されています。POLARBeaR は TES ポロメータを用いて 150 GHz, 220 GHz を中心に測定をする予定であり、QUIET の 40 GHz, 90 GHz と統合すると、今後 5 年の地上実験でもっとも広い周波数をカバーできることになります。広い周波数をカバーすることは、銀河や宇宙塵に由来するミリ波 (フォアグラウンドと呼ばれます) を CMB シグナルからうまく分離する上で決定的に重要となります。

8 小型科学衛星 LiteBIRD

地上では全天を観測することが不可能なこと、 $r < 0.01$ のレベルに到達するには大気の影響を除去したいこと、などを考慮すると、CMB 偏光観測衛星が将来的に絶対に必要となります。今後 5 年間の地上実験で原始重力波を発見できた場合には、あとに続く衛星の精密測定により B モードのパワースペクトルを測定し、インフレーションモデルを選別するという一段高いレベルの研究を拓くことができます。背後にある究極の物理に対しても厳しい制約が与えられ、量子重力理論を実験的にテストできる時代が訪れます。地上実験で原始重力波が発見できなかった場合、さらに一桁以上感度の高い実験により、もっともシンプルなインフレーションモデル群を完全にカバーすることが必要です。それでも原始重力波が見えない場合、インフレーションは当初の予想と異なり場が多重にある (ハイブリッドインフレーション) など、複雑な様相をしているか、インフレーションとは別の何かであるか、いずれにせよ、未知の領域であり、観測が研

究の方向を決めます。以上の理由により、今の「原始重力波発見レース」の後には、CMB 偏光に特化した科学衛星が必要と考えられています。米国ではEPIC [12] という衛星のスタディが、ヨーロッパではB-Pol [13] という衛星のスタディがおこなわれています。EPICは重さ1トン以上の中 - 大型衛星で、打ち上げは2020年以降になる可能性が大了。B-Polは小型衛星ですが、Planckとの絡みで、やはり2020年以降になるかと思われます。

KEK CMBグループでは、2010年代に日本を主導とした小型CMB偏光衛星を打ち上げる構想を提案し、2008年9月にワーキンググループ申請をJAXAに提案し、認められました。衛星の仮称はLiteBIRD [Lite (Light) satellite for the studies of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection] で、KEK, JAXA, 国立天文台, 理研, 東北大, 岡山大, 近畿大, テキサス大オースティン校, カリフォルニア大バークレイ校, カリフォルニア工科大から総勢26名(設立時)の研究者が参加しています。図11にLiteBIRD

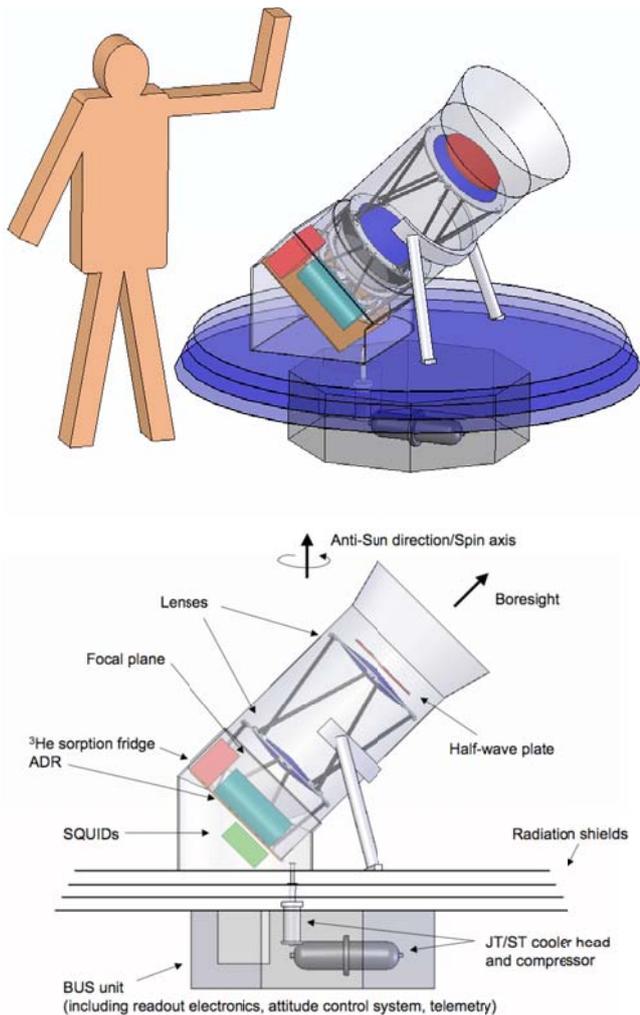


図 11: LiteBIRD 衛星の概要図

衛星の概念図を示します。JAXA が世界に誇る軽量な冷却システムの技術をベースにすることにより、観測感度で妥協することなく、総重量 400 kg という画期的な軽さを実現することが目標で技術検討を開始したところです。JAXA が最近立ち上げた小型科学衛星シリーズ (2012 年以降, 18 ヶ月に一機のペースで定期的な打ち上げを行い, 多彩な科学的要求に応じていく新しい枠組み) の枠を使うことを検討しており, 2018 年の打ち上げを目指します。検出の要になる焦点面検出器には, 超伝導検出器を用いる予定で, TES ボロメータ, STJ (Superconducting Tunnel Junction) センサの開発研究を進めています。後者は KEK 測定器開発室の活動とも大いに関連しており, 機会があればこれらの活動についてもご報告していきたいと思ひます。

図 12 に, LiteBIRD で期待される検出感度と, さまざまなインフレーションモデルの原始重力波の予想を示しました。参考に, Planck の感度も示してあります。LiteBIRD は角度スケールで 1° 程度以上のパワースペクトルをこれまでにない精度で測定することを目標にするため, 望遠鏡のサイズを小さくでき, 軽量化ができます。そのかわり角度分解能は, Planck や地上実験と比べてよくありません。

私の考えでは, LiteBIRD と組み合わせると, 地上で 10000 アレイ程度の実験を展開するのがベストだと思っています。コスト的には, 大きな望遠鏡を打ち上げる場合の 1/10 程度ですんでしまい, サイエンスアウトプットには遜色がないと思ひます。 $r = 0.001$ をめざすには, フォアグラウンドの理解と除去が非常に重要となります。現在の知識を用いて除去のスタディをしてみると,

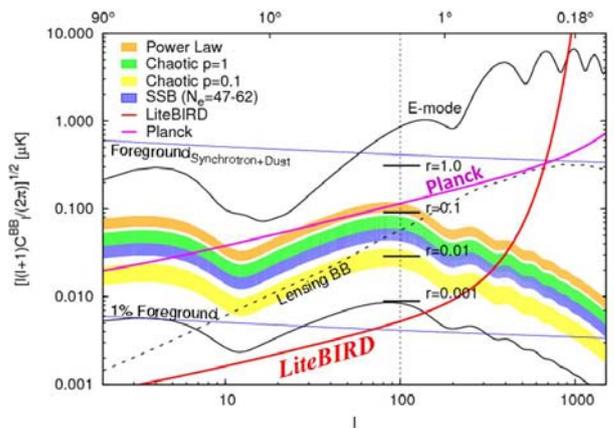


図 12: 様々なインフレーションモデルのパワースペクトル予想と Planck および LiteBIRD における B モード測定感度予測

$r = 0.01$ は OK だとされていますが, $r = 0.001$ は未踏の領域です。しかし, Planck が広い周波数にわたる測定を行いますので, フォアグラウンドの理解と除去方法に関しては今後 5 年で格段の進展を遂げることは疑いありません。したがって $r = 0.001$ をターゲットとすることは, よい目標だと思います。

9 おわりに

最後に戸塚洋二先生と CMB の話をしたことについて書きたいと思います。私が KEK に CMB グループを立ち上げた 2007 年の 12 月に, 戸塚先生からメールをいただきました。お前の始めたことに興味があるので説明しに来い, とのことでしたので, 年が明けて 2008 年 1 月 11 日に, 日本学術振興会の先生のオフィスにお邪魔し, 約 2 時間ほど説明をさせていただきました。先生はダークエネルギーに興味を持たれていたもので, 密接な関連を持つ CMB の観測を私が始めたことに興味を持たれたとのことでした。終始楽しそうに私の説明を聞いてくださり, 最後に「どんどんやれ」と激励していただきました。当時私は先生の体調について詳しく知らなかったのですが, あとで先生のブログを読む機会があり, あのような大変な闘病時期に貴重な時間を使ってチンピラの私の話をわざわざ聞いてくださったのだと思い, ジーンときてしまいました。戸塚先生の早すぎのご逝去は何とも残念なことでした。高エネルギーコミュニティにとっても如何ともしがたい大きな空白ができてしまったように感じられ, 残されたわれわれはどうしていけばよいのか, 途方に暮れる思いもあります。しかし, われわれは前を見て進むべきであり, その中で私ができることは, 素粒子と宇宙を不可分な対象とらえて研究プロジェクトを推進された戸塚先生の姿勢を見習い, 微力ながら自分の限界まで働くことだけかと思っています。

最後に, CMB 偏光測定による原始重力波発見というテーマに, より多くの高エネルギー実験研究者が興味を持ってくださることを希望します。思い切ってこの新しい挑戦に飛び込もうという方は大歓迎ですので, ご連絡をお待ちしております。

10 謝辞

辛抱強く原稿を待ってくださった高エネルギーニューズの編集委員の皆様へ感謝いたします。

参考文献

- [1] ロバート・R・コールドウェル, マーク・カミオンコウスキー「ビッグバンの始まりを探る重力波観測」, 日本経済新聞社「宇宙の創成と進化」サイエンティフィック・アメリカン編、林一訳, p.73
- [2] たとえば S. Weinberg, “Cosmology” Section 10.3 を参照のこと。
- [3] P. Cabella and M. Kamionkowski, arXiv:astro-ph/0403392.
- [4] J. Bock *et al.*, “Task Force on Cosmic Microwave Background Research,” arXiv:astro-ph/0604101.
- [5] M. Kamionkowski, A. Kosowsky, and A. Stebbins, Phys. Rev. Lett. **78**, 2058–2061 (1997).
- [6] U. Seljak, and M. Zaldarriaga, Phys. Rev. Lett. **78**, 2054–2057 (1997).
- [7] M. Zaldarriaga, and U. Seljak, Phys. Rev. **D55**, 1830–1840 (1997).
- [8] M. Kamionkowski, A. Kosowsky, and A. Stebbins, Phys. Rev. **D55**, 7368–7388 (1997).
- [9] <http://cmbpol.kek.jp/>
- [10] <http://quiet.kek.jp/>
- [11] <http://bolo.berkeley.edu/polarbear/>
- [12] J. Bock *et al.*, arXiv:0805.4207 [astro-ph].
- [13] P. de Bernardis, M. Bucher, C. Burigana, L. Piccirillo, for the B-Pol Collaboration, arXiv:0808.1881 [astro-ph].