

No. 90

2014.9.30

東京大学宇宙線研究所

ICRR NEWS

CONTENTS

P. 1.
望遠鏡アレイ実験で
捉えた最高エネルギー宇宙
線のホットスポット
・・・川田 和正
佐川 宏行

P. 6.
インフレーション理論と
BICEP2
・・・横山修一郎

P. 13.
ICRR Report

P. 13.
ICRR Seminar

P. 13.
人事異動

KAZUMASA KAWATA & HIROYUKI SAGAWA, ICRR - Telescope Array Group

研究紹介



宇宙線研究所

川田 和正・佐川 宏行

望遠鏡アレイ実験で捉えた 最高エネルギー宇宙線のホットスポット

最高エネルギー宇宙線は地球上で観測される最もエネルギーの高い宇宙粒子であり、その発生源とエネルギー獲得機構は謎に包まれている。日本・米国・韓国・ロシア・ベルギーの国際共同で行われている望遠鏡アレイ (TA) 実験グループは、5年間に観測した (5.7×10^{19} eV 以上) 解析した結果、おおぐま座の方向に最高エネルギー宇宙線が集中する「ホットスポット」の兆候を捉えた。この結果は、最高エネルギー宇宙線の起源解明にむけた大きな第一歩となるであろう^[1]。

1 最高エネルギー宇宙線

最高エネルギー宇宙線の起源とその加速機構の解明は、現代宇宙物理学の最重要課題の一つである。宇宙線は 10^9 eV - 10^{20} eV まで広いエネルギー範囲にわたるが、我々の観測対象である最高エネルギー宇宙線 ($\sim 10^{20}$ eV) は、

100km² (山手線の内側と同程度の面積) に年に1発来るか来ないか程度の稀な現象である。これは地球上で観測される最もエネルギーの高い粒子で、スイス・セルンにある世界最大の粒子加速器 (LHC 実験) で作り出せるビームエネルギーの1000万倍に相当する。我々の目的は、このような極限エネルギー粒子を生み出している、宇宙のどこかにある、天然の最強加速器の探査にある。天体内で最高エネルギーまで

“銀河系磁場の構造や銀河間磁場の強度に関する情報が得られる”

宇宙線を加速するには、宇宙線を長く閉じ込めておく必要があるため、その天体の大きさと磁場強度の関係から、候補となる天体は制限される (Hillas 条件)^[2]。例えば、宇宙で最大の磁場強度を持つマグネター、宇宙で最大の大きさを持つ銀河団、宇宙で最大の重さのブラックホールを持つ活動銀河核、宇宙で最大の爆発現象であるガンマ線バーストなど、何らかの宇宙における極限天体が挙げられる。また、その他には、ビッグバン初期にできた超重粒子や宇宙紐が崩壊して、最高エネルギー宇宙線が作られるという少し突飛な理論も存在する^[3]。

ビッグバンのなごりである宇宙背景放射が発見されたあと、Greisen^[4]と Zatsepin と Kuzmin^[5]は、 $(4\sim 6)\times 10^{19}$ eV 以上の宇宙線は宇宙に満ちた宇宙背景放射光子との共鳴反応によりエネルギーを一気に損失するだろうと予言した。これを提唱者の頭文字をとって GZK 限界と呼ぶ。実際に、このエネルギー以上で急激な観測事象の減少が複数の実験で観測されており、TA 実験の測定でも確認されている^[6]。もし、この観測事象の減少が GZK 限界で説明できるならば、最高エネルギー宇宙線の発生源は、背景放射光子との衝突がほとんどない約 1.5 億光年以内に限られ、前節で述べた Hillas 条件と合わせると、さらに発生源の場所が絞られる。

一方で、宇宙線は電荷を持つために宇宙に存在する磁場によって曲げられる。特に、低エネルギーの宇宙線は、地球で観測された時には磁場によって完全に元の方向を失ってしまい、起源の特定はできない。実際に、これまでの宇宙線観測は到来方向が極めて等方的であることを示している^(注1)。しかし、最高エネルギー宇宙線は、もしその核種が陽子であり銀河系内外の磁場強度が一般的に考えられている程度であれば、ほとんど直進してくるために起源を直接特定できる可能性がある。但し、宇

宙における磁場の強度や方向はファラデー回転などを利用して測定されているが、精密な測定は非常に難しい。銀河系内の磁場構造には複数のモデルがあり^[7]、銀河間磁場の強度には大きな不定性 (10^{-17} G $\sim 10^{-9}$ G) が残っている^[8]。さらに、最高エネルギー宇宙線が鉄などの他の原子核であれば、曲がり角は陽子の 2 倍になってしまう。TA 実験の X_{MAX} (空気シャワーの最大発達の高さ) 測定の結果においては、 10^{19} eV 以上の積分値では陽子と矛盾のない結果であるが^[9]、GZK 限界のエネルギー領域 ($\sim 5\times 10^{19}$ eV 以上) に限ると観測数が不足しているために分かっていない。しかし、これは裏を返せば、最高エネルギー宇宙線の観測によって、その核種や広がり分布、発生源までの距離が特定できれば、銀河系磁場の構造や銀河間磁場の強度に関する情報が得られることを意味している。

今回、我々は TA の 5 年間の観測で最高エネルギー宇宙線が集中する領域「ホットスポット」の兆候を捉えた。本稿では、まず初めに TA 実験の概略を紹介し、次にデータ解析の詳細について説明する。そし

て、この「ホットスポット」の解釈について検討し、最後に今後の展望について述べる。

2 テレスコープアレイ実験

テレスコープアレイ (TA) は、米国ユタ州の荒野で稼働する北半球で最大の検出感度を持つ宇宙線観測装置である。図 1 のように 3m^2 のプラスチックシンチレータ地表粒子検出器 (Surface Detector : SD) 507 台を 1.2km 間隔に設置して約 700km^2 の面積で宇宙線を検出している。そして、それを見込むように三か所に大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector : FD) のステーションがあり、SD と同時に同じ宇宙線を観測できる。宇宙線が大気と相互作用を起して生じる二次粒子群を空気シャワーと呼ぶ。SD は空気シャワー中の粒子の地表レベルでの数や到来時間を測定する。それと同時に、FD は空気シャワー中の粒子が窒素分子を励起した際に生じるわずかな蛍光を観測する。SD は昼夜を問わず連続的に観測でき、東京 23 区と同程度の面積 (700km^2) で、より多くの宇宙線を観測できるという利点を持つ。FD の観測は月のない天気の良い夜に限られるが、空気

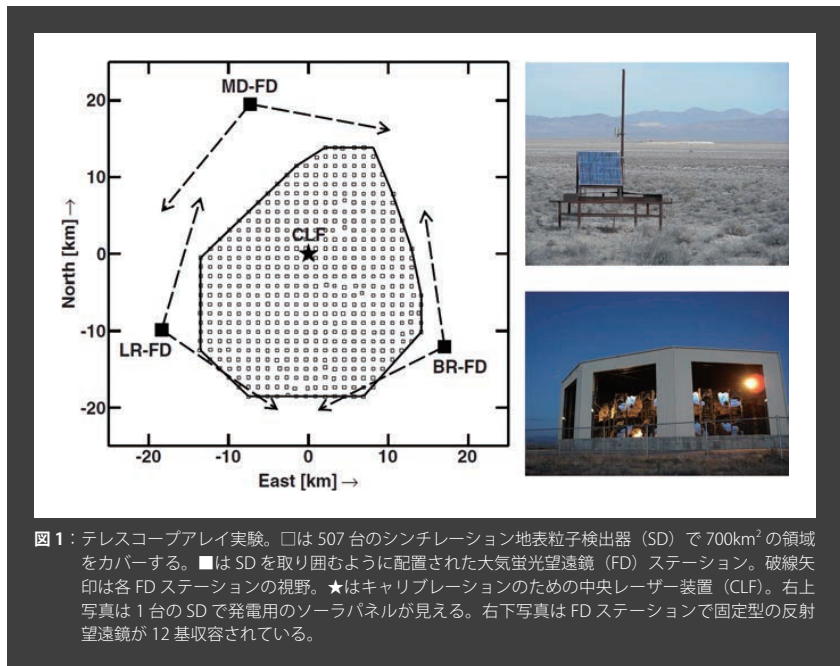


図 1 : テレスコープアレイ実験。□は 507 台のシンチレーション地表粒子検出器 (SD) で 700km^2 の領域をカバーする。■は SD を取り囲むように配置された大気蛍光望遠鏡 (FD) ステーション。破線矢印は各 FD ステーションの視野。★はキャリブレーションのための中央レーザー装置 (CLF)。右上写真は 1 台の SD で発電用のソーラパネルが見える。右下写真は FD ステーションで固定型の反射望遠鏡が 12 基収容されている。

“このような高統計と高確度での最高エネルギー宇宙線の非等方性の観測例は他にない”

シャワーの縦方向発達の全体を観測することで、宇宙線の核種が識別でき、エネルギーがより正確に分かるという利点を持つ。本解析では、SD で取得された宇宙線データを使用するが、宇宙線の絶対エネルギーに関しては、FD で得られるエネルギーに合わせるように補正している。これはSD とFD で得られるエネルギー (E_{SD} 、 E_{FD}) に系統的な差異が存在するが、空気シャワーの縦発達全体を観測でき、複数の方法で装置の較正がされているFD の信頼性が高いという理由からである。具体的には、まずFD とSD で同時に観測されている空気シャワー事象から、そのエネルギー差の平均割合 ($\langle E_{SD}/E_{FD} \rangle = 1.27$) を求める。そして、SD で得られたエネルギーをFD で得られたエネルギーに合わせるように27% 下方補正している ($E = E_{SD}/1.27$)。

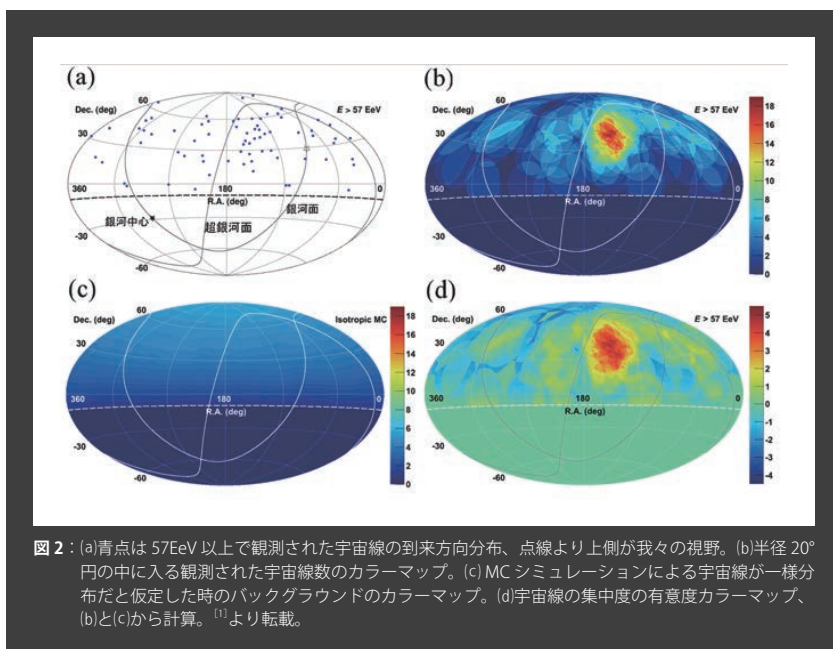
3 宇宙線到来方向のデータ解析

本解析では、2008年5月から2013年5

月までの5年間にSD によって取得されたデータを用いた。空気シャワー検出のハードウェアにおけるトリガ条件は、8マイクロ秒以内に3粒子以上記録されている検出器が3台以上と設定されている。さらに以下の解析条件が課されている。(1) 空気シャワーの再構成に使用できる粒子検出器数が4台以上、(2) 天頂角が55°以下、(3) エネルギーが57 EeV ($=5.7 \times 10^{19}$ eV) 以上、である。作為的な解析パラメータの走査を避けるために、このエネルギー閾値は2007年にAuger実験^(注2)が宇宙線と活動銀河核との位置相関解析で決められた値^(注10)を使用している。これらの条件をパスした宇宙線の角度分解能は1度程度で、エネルギー分解能は15%程度である。また、統計数を増やすために、SDアレイの縁(図1左のSD全体を取り囲む実線の付近)に落ちた事象も解析に用いている。この縁に落ちた事象は、角度分解能とエネルギー分解能が若干劣るが、後で述べる本解析のような、大きな角度スケールの到来方向の非等方性を見るためには十分と判断した。

図2(a)は、上記の条件で5年間に観測された72事象の最高エネルギー宇宙線の到来方向を赤道座標上にプロットしたものである^(注3)。ご覧のように、赤緯=40°、赤経=150°付近を中心とした数十度程度の領域に宇宙線の集中が見られる。この集中度の有意度を調べるために、半径20°の円の中に入る事象数を調べたのが図2(b)である。赤い部分が特に事象が集中しているところで、最大で19個の最高エネルギー宇宙線が半径20°円の中に観測された。さらにこれと比較するために、図2(c)は、特定の方向に事象の集中がなく、一樣に宇宙線が到来する場合のバックグラウンド分布である。TAの地理的条件なども考慮してモンテカルロ(MC)シミュレーションによって推定されている。このMCシミュレーションは、到来方向がほぼ一樣だと分かっている10EeV以上の観測データとよく一致している。図2(d)は、(b)の観測データと(c)のバックグラウンド分布から計算された、最高エネルギー宇宙線の集中度の有意度(σ)マップである。カラーは集中度の高さを表しており、最大の有意度は赤緯=43.2°、赤経=146.7°の位置で、5.1 σ (4.49事象のバックグラウンドに対して19事象を観測)となり、この領域を「ホットスポット」と呼ぶことにする。

次に、このようなホットスポットが一樣な到来方向分布から偶然に現れる確率を次のような手順で見積もった。(1) 宇宙線が一樣等方からやって来ると仮定してMCシミュレーションによってランダムな方向に72事象(観測と同数)を発生(「1MCセット」とする)。TAの地理的条件による検出効率も考慮する。(2) 1MCセットを観測データと全く同様に解析し視野内で最大の有意度(σ)を探索する。但し、この時に探索する円の半径は15°、20°、25°、30°、35°とし、その中で一番高い有意度(σ)を選ぶ。(3) これを100万個のMCセットに対して行い、5.1 σ 以上(観測と同じ有意度)が何回現れるかを数える。実際のデータ解析では、半径20°のみでの探索が行われているが、これは低エネルギー側(>1EeV)



の宇宙線の非等方性を探索する解析^[11]をそのまま踏襲している。しかし、図2(a)において、恐らく“目”で事象が集中する角度スケールをある程度の範囲で走査してしまっている可能性がある。この影響を考慮するために、(2)で半径15°-35°の5つの探索円での走査をペナルティーとして課した。結果として、このようなホットスポットが一般的な到来方向分布から偶然に現れる確率を 3.7×10^{-4} (3.4 σ)と見積もった。

4 ホットスポットの解釈

このホットスポットの中心付近には、明確な候補となる高エネルギー天体は発見されていない。しかし、ホットスポットは直径で40°程度に広がっており、幾つかの銀河団が存在する超銀河面に比較的近く、最も近い超銀河面からは19°の距離にある。GZK限界があり、磁場の影響が少ないとすると、発生源は1.5億光年以内の近傍の物質密度（銀河などの密度分布）と相関があると考えるのが最も自然である。図3は2MASS（2ミクロン全天サーベイ）による1.5億光年以内の銀河分布^[12]にTAのホットスポットを重ね合わせたものである。宇

“今回のホットスポットは特に「おおぐま座銀河団」に近い。”

宙には「宇宙の大規模構造」と呼ばれる泡構造をした銀河の密度ゆらぎがあり、図のように銀河の多い領域と薄い少ない領域が存在する。特に近傍銀河に限ると、超銀河面と呼ばれる（我々の住む天の川銀河も含むような）銀河の集中する面が現れる。この超銀河面には、いくつかの有名な銀河団があり、今回のホットスポットは特に「おおぐま座銀河団」に近い。また、ホットスポットは超銀河面からは少しずれているが、最近接の銀河団や銀河フィラメント^[注4]内の磁場の影響を受けている可能性もある。現在のところ、銀河系内外の磁場強度や構造の不定性は極めて大きい。今後、発生源を絞り込むには、より正確な磁場の情報も重要となる。

5 まとめと今後の展望

テレスコープアレイ実験の5年の観測で、72事象の最高エネルギー宇宙線を観

測し、おおぐま座の方向にその「ホットスポット」の兆候を捉えた。このホットスポットが一般的な到来分布から偶然にあらわれる確率は 3.7×10^{-4} (3.4 σ)である。これまでに、このような高統計と高確度での最高エネルギー宇宙線の非等方性の観測例はなく、本研究が最高エネルギー宇宙線の起源解明への大きな手がかりとなることを期待している。このホットスポットはまだ氷山の一角であり、検出感度を上げることでさらに詳細な構造が見えてくるであろう。現在、同グループでは「TA×4」と呼ばれる計画を提案中である。現行TAは、507台の地表粒子検出器を1.2km間隔で基盤目状に並べ、700km²の検出面積を持つ。TA×4では、さらに500台の同型の粒子検出器を追加し、検出器の間隔を2.1kmに拡げて、合計で検出器面積を4倍に拡張する計画である。検出器間隔が広くなることによって、低エネルギー側の宇宙線の検出効率は落ちるが、最高エネルギー宇宙線の検出効率はそのまま4倍になる公算である。今後も、最高エネルギー宇宙線の観測統計を着実に増やして、ホットスポットの検証、点源探索、エネルギースペクトル・質量組成の詳細解析、超高エネルギー光子・ニュートリノ探索を行う。それと並行して、他の観測グループ（高エネルギーニュートリノやガンマ線）とも連携して、最高エネルギー宇宙線の発生源をつきとめ、そこで起きている宇宙の極高エネルギー現象を明らかにしていきたい。

“検出感度を上げることでさらに詳細な構造が見えてくるであろう”

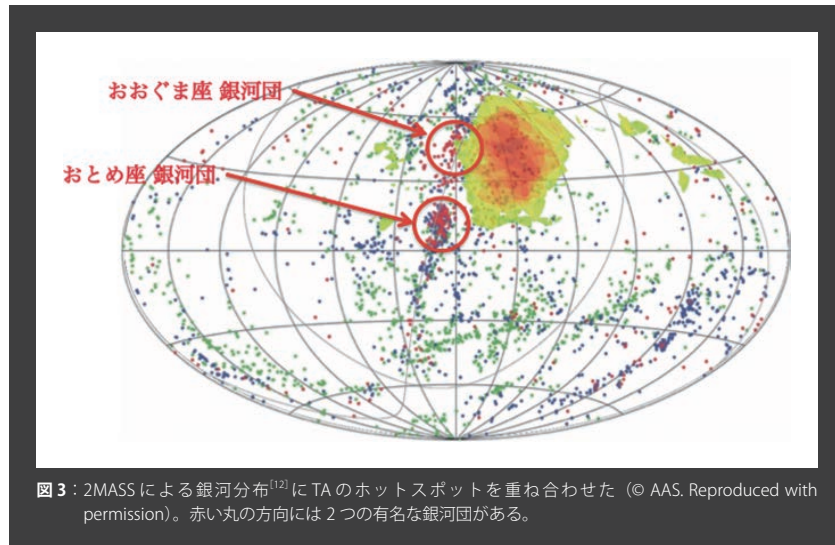


図3：2MASSによる銀河分布^[12]にTAのホットスポットを重ね合わせたもの。赤い丸の方向には2つの有名な銀河団がある。(© AAS. Reproduced with permission).

- (注1) 10^{15} eV以下の領域では最大で0.1%程度の到来方向の非等方性は観測されている。
- (注2) Auger実験は南米アルゼンチンで稼働中の宇宙線観測装置である。TAと同じエネルギー領域の宇宙線を測定しているが、南半球に設置されているためにTAとは反対の南天の空を主に観測している。
- (注3) 我々の観測装置は北半球

にあるので、図2(a)の下半分(点線以南)に相当する南天の空は観測できない。

(注4) 銀河フィラメント: 重力的に拘束された銀河からなり、長さが数億から数十億キロメートルからなる巨大な紐状の構造の集まりである。

参考文献

- [1] Abbasi, R.U., et al., ApJL, 790, L21 (2014)
- [2] Hillas, A. M., ARA&A, 22, 425 (1984)
- [3] Berezhinsky, V.S., Nucl. Phys. (Proc. Suppl), B87, 387 (2000)
- [4] Greisen, K., PRL, 16, 748 (1966)
- [5] Zatsepin, G.T., & Kuzmin, V.A., J. Exp. Theor. Phys. Lett., 4, 78 (1966)
- [6] Abu-Zayyad, T., et al., ApJL, 768, L1 (2013)
- [7] Jansson, R. & Farrar, G.R., ApJL, 761, L11 (2012)
Pshirkov, M., et al., ApJ, 738, 192 (2011)
Sun, X.H., et al., A&A, 477, 573 (2008)
- [8] Durrer, R. & Neronov, A., A&A Rev. 21, 62 (2013)
- [9] Abbasi, R.U., et al., arXiv: 1408.1726 (2014)
- [10] Abraham, J., et al., Science, 318, 938 (2007)
- [11] Kawata, K., et al. Proc. of 33rd ICRC (Rio de Janeiro), CR-EX (Id:311) (2013)
- [12] Huchra, J.P., et al., ApJS, 199, 26 (2012)

イベント報告

「大型低温重力波望遠鏡・KAGRAのトンネル完成」見学会を開催しました



KAGRA トンネル報道機関向け見学会の様子

東京大学宇宙線研究所がホスト研究機関となり、高エネルギー加速器研究機構と自然科学研究機構・国立天文台を共同ホスト機関として密接な協力体制のもと、アインシュタインの一般相対性理論により存在が予測されている重力波の世界で初めての直接的検出を目指した、大型低温重力波望遠鏡・KAGRA(かぐら)の建設が、2010年より岐阜県飛騨市神岡町池ノ山の地下において進行中です。2014年3月末をもって、そのKAGRAを格納する地下トンネルの掘削が完了し、引き続き地下空洞を実験室として整備する工事が進んでいます。2014年7月4日に開催された見学会では、KAGRAが設置されることになる地下空洞の工事の様子を報道関係者に公開いたしました。

重力波望遠鏡の設置場所として地下環境が選定されたのは、世界でKAGRAが初めてです。地下が好環境である理由は、極めて微弱な重力波の信号をとらえるKAGRAにとって、信号を掻き消す雑音となりうる地面の振動が、地表に比べて100分の1程度と小さいためです。KAGRA本体を格納するトンネル部は、地表より200メートル以深の地下に掘削され、一辺3kmを2本持つL字構造をしており、今回は中央実験室の位置する中央部分と二階構造をご見学いただきました。見学会および記者会見に続き、「KAGRAトンネル掘削記念祝賀会」が開催され、高い技術により7,687メートルのトンネル掘削を最短で実現した鹿島建設株式会社が表彰されました。

今後は、現在進めている実験設備の整備、装置の構築を経て、2015年末に最初の試験運転を行い、2017年度には、極低温鏡を用いて重力波観測運転を開始する予定です。



見学会の後に、北部会館にてKAGRAトンネル完成記者会見が行われました



宇宙線研究所
横山修一郎

インフレーション理論と BICEP2

2014年3月17日、「インフレーション起源原始重力波の痕跡を発見！」という衝撃的なニュースが飛び込んできた。アメリカの研究グループが南極に設置した電波望遠鏡 BICEP2 が、高感度観測により B モード偏光を検出したというものである。2013年春の Planck チームによる宇宙マイクロ波背景輻射 (CMB) の報告と比較すると、驚くべきほどの強いシグナルの結果となり、現在までに、双方の整合性について様々な可能性が理論的に指摘されるに至った。今後は、様々な立ち上がっている精密観測計画により、この観測間の整合性に関する議論は収束していくであろう。

1 イントロダクション

2013年春の Planck チームによる宇宙マイクロ波背景輻射 (CMB) の詳細観測に関する報告^[1]以降、次の CMB 観測における大きな成果報告は 2014年の同じく Planck チームによる、残りのデータの解析結果と偏光に関するものであろうと思っていた中、若干の閉塞感が否めなかった宇宙論業界に驚くべきニュースが飛び込んできた。「インフレーション起源原始重力波の痕跡を発見！」というものである^[2]。この報告主は BICEP (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization) と呼ばれる、アメリカ・ハーバード・スミソニアン天体物理学センターやカリフォルニア工科大学などからなる研究グループで行われてきたプロジェクトである。南極のアメリカ・アムンゼン・スコット基地にある望遠鏡を使い、周波数 100~150GHz の電波の高感度観測を行ってきた。特に今回の報告は口径 26cm にアップグレードされた望遠鏡を用いた 2010年1月から 2012年12

月まで周波数 150GHz の電波観測で得られたデータの解析に基づいており、プロジェクトの名前としてはアップグレード版という意味で BICEP2 と呼ばれる。

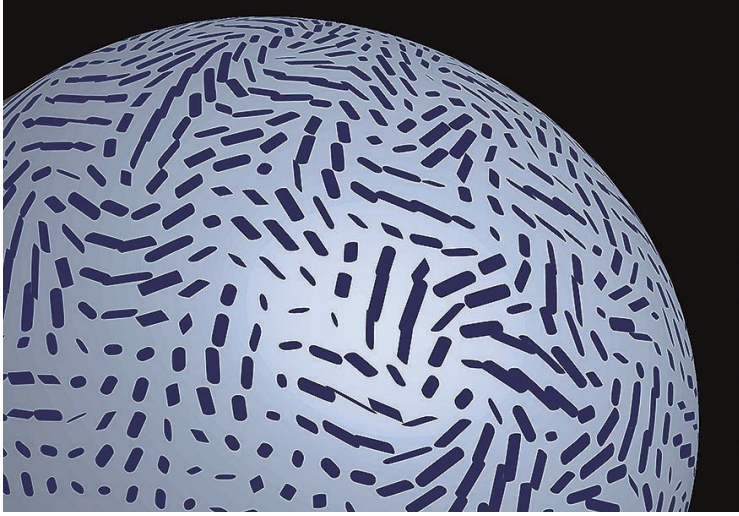
本稿では、この BICEP2 によって報告された「インフレーション起源原始重力波の痕跡を発見！」について解説し、理論グループにおいて、私と共同研究者が行った関連研究を紹介したいと思う。まずは、インフレーション理論について簡単に解説し、BICEP2 による電波観測と原始重力波の痕跡を発見したという報告がどうつながるのかについて触れて、我々の関連研究について紹介していく。

2 インフレーション理論

まずはじめに、すでにご存知の読者も多いかと思うが、インフレーション理論という、今では標準宇宙モデルにも組み込まれつつある理論について触れて、その中でも

重要な理論帰結である原始密度揺らぎ、そして原始重力波の生成について述べてい

たい。インフレーション理論とは、佐藤勝彦氏、Alan Guth 氏、Andrei Linde 氏、Alex Starobinsky 氏、Paul Steinhardt 氏らによって 1980 年代初頭に提唱された理論である^[3]。現在観測からも強く支持されている膨張ビッグバン理論であるが、自然に説明することが困難ないくつかの「不自然さ」があることが知られている。一般に、平坦性問題、地平線問題、モノポール問題などと呼ばれているが、これらの問題を「自然に」解決するために考えだされたのが、インフレーション理論である。例えば、地平線問題や平坦性問題に関して言えば、我々の宇宙は極めて一様であり、また極めて平坦な空間であることが、宇宙マイクロ波背景輻射などをはじめとする宇宙論的スケールの観測でわかってきている。インフレーション理論に基づけば、初期に極めて短い時間で、極めて小さな領域が、極めて急激な加速度的膨張によって引き伸ばされて、宇宙はほぼ一様となり、空間も平坦化されたと



“重力波の量子揺らぎは、
インフレーション中の加
速膨張によって引き延ば
される”

考えられる。一般的には、インフレーションはある種のスカラー場（インフラトンと呼ばれ、ここでは ϕ とする）によって引き起こされたと考えられている。2012年、発見の話題で注目を集めたヒッグスもこのスカラー場の一種であり、ヒッグスによってインフレーションが起きたと考える模型も提唱されている。

すでに、過去の宇宙線研究所内ニュースにも、インフレーション理論が紹介されている記事はいくつかあると信じて、今回のBICEP2の報告に特に関係する原始密度揺らぎ、原始重力波生成に注目してインフレーション理論を考える。現在の銀河や銀河団といった宇宙大規模構造の種となるのが、原始密度揺らぎである。インフレーション理論では、一見、急激な加速膨張によってそれらゆらぎ（非一様性）はならされてしまう気もする。そもそも宇宙の一樣性を説明することが、インフレーション理論を考えるモチベーションでもあった。しかし、量子論を考えると、現在の大規模構造の種として自然な原始密度揺らぎの生成を考えることができる。量子論によると、物質は量子的（確率的）にふらふらと存在していると考えられる。これを量子揺らぎと呼ぶ。当然、インフレーションを引き起こすインフラトンもこの量子揺らぎを持っており、この量子揺らぎにより、細かく見ると、

空間の各点各点でインフラトンがバラバラの値を持っている（非一様である）と考えられる。この量子揺らぎの振幅は宇宙の膨張には依存せず、量子力学的に決まっている。極端なことを言えば、宇宙の初期でも現在でも同じような振幅で存在しているのである。しかし、インフレーション期のような空間の超光速な加速度的膨張により、この量子的な揺らぎは一気に引き延ばされる。その引き延ばされ方は、そのときの宇宙の膨張率、いわゆるハッブルパラメータで決まるはずである。その結果、引き延ばされた揺らぎの振幅の大きさは、インフレーション中のハッブルパラメータで特徴付けられることになる。インフラトンは、インフレーション期が終了すると、加速度的膨張を起こす種としての役割を終え、現在の宇宙を構成する物質へと崩壊すると考えられている（宇宙再加熱）。しかし、この宇宙の各点各点でのインフラトンの揺らぎは、アインシュタイン方程式を通じて、時空の揺らぎとして記憶される。通常、インフレーション期に宇宙を支配しているインフラトンの揺らぎは、スカラー型断熱揺らぎと呼ばれており、各点各点での「時間」の揺らぎ、時間のズレとして記憶されるのである。このインフレーション中に刻まれた「時間のズレ」は、インフレーション後宇宙を支配する物質の密度の揺らぎに引き

継がれ、CMBの細かな空間非一様性や、銀河・銀河団といった構造形成の種となる。逆に読み替えれば、CMBや銀河・銀河団などの観測、特にその空間的分布をより詳細に観測することで、原始密度揺らぎの性質に迫ることができ、さらにはその原始揺らぎを生んだインフレーションの情報を抽出できるのである。上で述べたように、インフレーション中のハッブルパラメータで振幅が決まるインフラトンの揺らぎではあるが、その揺らぎは「時間のズレ」として現在の観測量と関係付けられる。インフラトンの揺らぎから、時間のズレへと焼き直す際には、インフラトンの運動（場の値の時間変化）の情報も必要である。つまり、原始密度揺らぎは、そのインフレーション中の膨張率、「ハッブルパラメータ」と「スカラー場の運動」という二つのパラメータに依存する。通常、ハッブルパラメータは H 、スカラー場の運動は、 $\dot{\phi}$ （場の値 ϕ の時間微分（ドット））と記号で表す。

次に、今回のいわば主役、原始重力波の生成について考える。一般的に考えられているインフレーション中の原始重力波生成機構は、インフラトンの揺らぎの生成機構と同じである。ここで、大きな前提条件として、空間の非一様成分も量子的に揺らいでいると考える。重力波は、空間の伸び縮みの伝搬である、ということをよく耳に思うが、この伸び縮みの様子もインフレーション中は量子的な揺らぎと考えるのである。インフラトンの場合にも述べたように、この重力波の量子揺らぎは、インフレーション中の加速膨張によって引き延ば

“インフレーション中の宇宙のエネルギー
密度の情報を直接得ることが出来る”

“スペクトルの傾きまで決定できれば、インフレーション理論の無矛盾性をチェックできる”

されて、その振幅は「ハッブルパラメータ、 H 」で決まる。ここで重要なことは、原始重力波を捉えることが出来れば、インフレーション中の膨張率、つまりはインフレーション中の宇宙のエネルギー密度の情報を直接得ることが出来るということである。

実際の観測では、揺らぎの振幅だけでなく、その振幅の波長（もしくは振動数）依存性も議論することが出来る。いわゆる揺らぎのパワースペクトルと呼ばれるものである。このパワースペクトルの傾きは、まさにそれぞれの揺らぎの振幅を表すパラメータのインフレーション中の時間変化と対応している。つまりは、「ハッブルパラメータの時間変化」と「インフラトンの運動の時間変化（加速度）」である。ハッブルパラメータはインフラトンのエネルギー密度で与えられることから、ハッブルパラメータの時間変化は、インフラトンのエネルギー密度の時間変化そのものである。通常のインフレーション理論では、インフラトンの運動エネルギーは無視できるほど小さく、場の値で与えられるポテンシャルエネルギー $V(\phi)$ がインフラトンのエネルギーを支配している（スローロールインフレーション）ので、エネルギー密度の時間変化はポテンシャルエネルギーの変化、つまりはインフラトン場の値の変化（インフラトンの運動）である。よって、ハッブルパラメータの時間変化は、インフラトンの運動と対応付けられる。このことから、原始密度揺らぎ、原始重力波の振幅、そして両者のスペクトルの傾きという4つの観測量が、「ハッブルパラメータ（インフレーション中のエネルギー密度）」、「インフラトンの運動」、「インフラトンの加速度」という3つの理論パラメータで記述できていることになる。よって、原理的にはこの四つの観測量を精密に測ることが出来れば、いわゆるインフレーション理論の無矛盾性をチェックできることになるのである。

まとめると、原始重力波の振幅の決定から、「インフレーションが起きた時の宇宙のエネルギースケール」がわかり、さらに

そのパワースペクトルの傾きまで決定できれば、インフレーション理論の無矛盾性をチェックできるのである！

3 背景重力波の痕跡; CMB Bモード偏光

前の章で、説明したインフレーション理論の有力な証拠となる原始重力波であるが、CMBの観測にどのような痕跡を残すかについてここでは簡単に解説する。今回BICEP2で観測された電波（周波数150GHz）には、正確には前景放射と背景放射という二つに通常分類される成分が含まれる。前景放射は、我々の銀河系内にある天体に付随した光、そして、背景放射がいわゆるビッグバン宇宙の名残で、温度で言うと2.725Kの光である。この背景放射を宇宙マイクロ波背景放射（Cosmic Microwave Background）、略してCMBと広く呼ばれている。さて、検出される光子を特徴付ける観測量としては、強度（温度）だけではなく、偏光パターン（光の振動パターン）も考えられる。CMBにおいてこの光の偏光度合は、トムソン散乱を通じて生じるが、元々の原因は温度のゆらぎである。つまり、温度の分布と偏光のパターンには関係がある（図1）。図1を見てほしい。ある原点に電子があり、その原点に対して東西方向（x軸）には温度が高く（強度が強い）、南北方向（y軸）には温度が低い（強度が弱い）ような場合を考える。東西方向（x軸）、南北方向（y軸）から来た光子は電子に散乱さ

れ、対して、東西南北平面（xy平面）から垂直方向（z軸）に飛んでくる光は、東西と南北の温度差によって偏光を受ける。光は、進行方向に対して垂直方向に振動しているため、この場合、東西方向（x軸）から来た光のほうが強い強度をもっているため、散乱された光は、南北方向（y軸）に強い振動パターンを持つ（y軸方向に偏光した）ことになる。温度揺らぎの分布とこの偏光を比べてみると、相対的に温度が低い方向に平行し、温度が高い領域には垂直に偏光するようになっている。また、CMB偏光マップは、一般にその空間におけるパリティの変換性により、Eモード、Bモードという二つのモードに分けて特徴付けられる。偏光パターンを放射状に描いてみると、図2のようにEモードは空間反転に対して対称であり、BモードはEモードを45度傾けたもので、空間反転に対して非対称である。このようにしてCMB偏光は生成され、二つのモードで特徴付けられている。

さて、ここで重力波に話を戻すと、重力波は、2つの振動パターンを持っており、

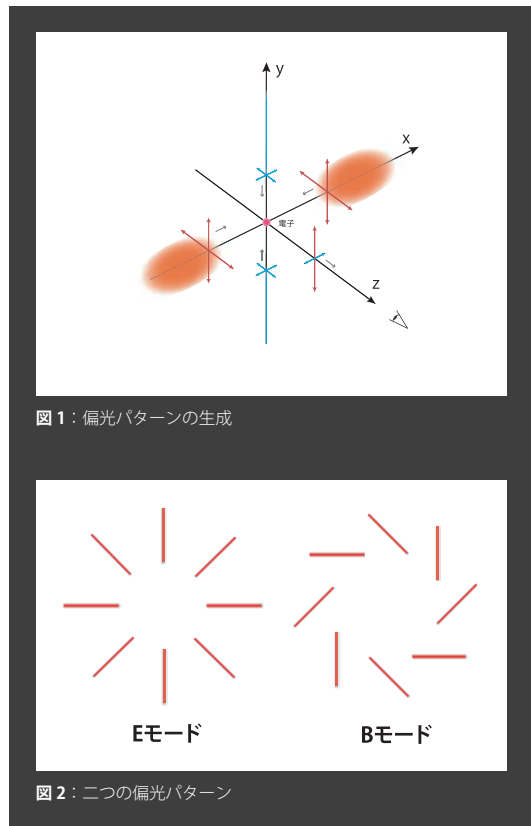


図1：偏光パターンの生成

図2：二つの偏光パターン

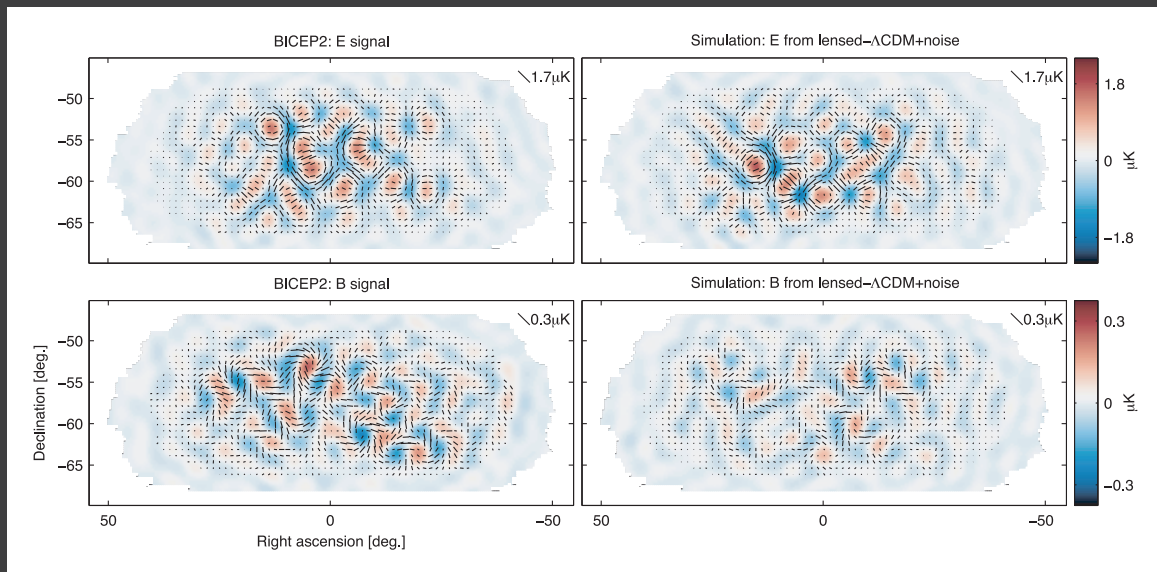


図3：観測で得られたE、Bモードのマップ。参考論文^[2]より引用。

例えばz軸方向に進む重力波は、xy軸に伸び縮みするパターン（+モード）とそれを45度傾けたパターン（×モード）を持つ。原始重力波が存在すれば、その空間の伸び縮みを通じてCMBの温度揺らぎも生成し、その2つのパターンは温度揺らぎにも刻まれている。そして、その温度揺らぎの分布に対応した偏光にも、当然その特徴が刻まれる。その特徴こそ、CMBの偏光において重力波がEモードとともに45度傾いたBモードを生成する原因となっている。標準的なインフレーション理論では、原始重力波に比べ、原始密度揺らぎのほうが大きい振幅を持って生成される（ ϕ が小さい、インフレーションの運動がゆっくりなため）。故に、原始重力波だけでなく、原始密度揺らぎからも生成される温度揺らぎ（強度）やEモード偏光では、直接原始重力波の情報を得ることは難しい。そこで、重力波のみによってしか生成されないBモード偏光こそが、インフレーション中に生成された原始重力波の強い証拠となるのである。

4 インフレーション理論とBICEP2

それでは、実際に今回のBICEP2の観測が導きだす、インフレーション理論に対する帰結について述べたい。図3は、BI-

CEP2が得た、Eモード、Bモード偏光のマップである。色が偏光の強度で黒い線が各点の偏光方向である。上がEモード、下がBモードでよく見ると図2で示したようなパターンがそれぞれの図で見ることができる。そして、図4が、図3で示したBモード偏光のマップから得られた、Bモード偏光の角度パワースペクトルである。点で示されているのが実際にBICEP2の観測で得られたデータで、誤差つきで描かれている。重要なことは、BICEP2以外の他の観測のデータは、三角印で書かれており、これは上限しかえられていないことを示している。赤の破線と実線は、それぞれ理論から予測されるBモードパワースペクトルであるが、破線が、今回注目されている原始重力波起源のBモードで、実線は、説明は割愛させていただくが、大規模構造に付随した重力レンズ効果によって生成された

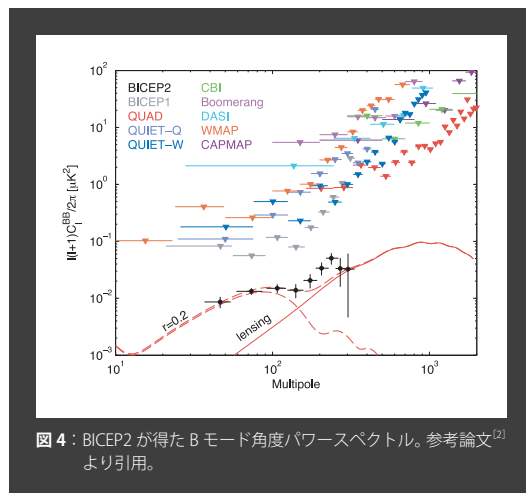


図4：BICEP2が得たBモード角度パワースペクトル。参考論文^[2]より引用。

Bモード偏光である。破線の上に書かれている、 $r=0.2$ というパラメータは、原始重力波の振幅の2乗を表すパラメータで、慣習的に原始密度揺らぎの振幅の2乗に対する比率で与えられる。これまでのCMB温度揺らぎの観測などから、原始密度揺らぎの振幅の2乗は、約 10^{-9} 程度であることがわかっており、つまり原始重力波の振幅の2乗は、 10^{-9} を r 倍したものである。図から分かるように、今回の

“インフレーションのエネルギー密度が、LHCが到達するエネルギーの約1兆倍であったということである”

“数あるインフレーションモデルをある程度絞り込むことが出来る”

BICEP2の結果は、この $r=0.2$ の原始重力波で非常に上手く説明できている。この結果、BICEP2は、「原始重力波をついにとらえた！」と発表したのである。

BICEP2チームの解析では、原始重力波のパワースペクトルは、振幅が波数（揺らぎのスケール）に依らないものを仮定しており、先に重要性を述べたパワースペクトルの傾きを観測で測定できている訳ではない。例えば、BICEP2のデータをスペクトルの傾きを固定せず、パラメータだと思って解析した場合には、ある程度の傾きがあったとしても観測を再現できるという結果を得る。インフレーションの無矛盾性をチェックするほどの精度は、残念ながらBICEP2は持っていない。よって、インフレーション理論に対する今回の観測からの示唆は、 $r=0.2$ 程度という、原始重力波の振幅に関する情報からのみ得られる。まず、先に述べたように、原始重力波の振幅は、インフレーション中のハッブルパラメータ、つまりはインフレーション中のエネルギー密度で決まっている。このことから、 $r=0.2$ が導く帰結は、インフレーションのエネルギー密度が、ヒッグス粒子発見で話題となった大型粒子加速器LHCが到達するエネルギーの約1兆倍であったということである。この数字は、素粒子大統一理論モデルのエネルギーとほぼ同程度となる。実は、理論的には、未だ具体的なインフラトンの候補をしぼることはできていな

い。インフラトンが何であるのか？という問いは、素粒子理論、宇宙論にまたがる現代の大きな問題であるが、今回のBICEP2の結果が、当初の報告の通り原始重力波そのものの発見となれば、その問題解決の大きな糸口となることは間違いないであろう。

さらに、原始密度揺らぎの情報を組み合わせることで、数あるインフレーションモデルをある程度絞り込むことが出来る。標準的なインフレーション理論が予言する原始密度揺らぎと原始重力波の振幅は、「ハッブルパラメータ（宇宙の膨張率）」と「インフラトン（インフレーションを引き起こすスカラー場）の運動」の二つのパラメータで記述されるということは先に述べた。つまり、両者の振幅が観測でわかれば、インフラトンの運動の様子について、さらにはそのポテンシャルの形状までも議論可能となる。今回のBICEP2の結果が示唆するところは、まずインフラトンの運動については「インフレーション中にインフラトン場は、極めて大きく場の値を変えなければいけない」というものである。ポテンシャルに関しては、例えば最も簡単なモデルとして、通常図5で示すような二つのインフラトンポテンシャルが考えられる。図5の左側は、small field modelと呼ばれるものの一例で、右側はlarge field modelと呼ばれるものの一例である。どちらの場合も加速度的膨張、インフレーションを引き起こすことができるのだが、インフラトン

場の変位の大きさが異なる。上で述べたように、今回のBICEP2の結果が示唆するインフレーションモデルは、右側のlarge field model (Linde (1982))と呼ばれるタイプである。chaotic タイプとも呼ばれる。このように、今回のBICEP2の報告のとおり、原始重力波を $r=0.2$ というレベルで発見したという結果に基づけば、これまで原始密度揺らぎの情報だけでは、しぼりきれなかったインフレーションモデルに対して重要な知見をもたらすのである。

5 Planckの結果との整合性

最後に、今回のBICEP2の結果を踏まえて行った我々の研究について簡単に紹介する。BICEP2の結果が世に出てくる以前は、原始重力波に対して最も厳しい制限を与えていたのは、PlanckによるCMB温度揺らぎの観測を通じて得られたものであった^[1]。その結果はさきほどの r というパラメータを用いると、95%の信頼度で $r < 0.11$ である。あきらかにBICEP2の結果とこのPlanckの結果との間には矛盾がある。まず、原始重力波は、先に述べたようにCMB Bモードだけでなく、温度揺らぎにも寄与する。その寄与は、図4の横軸でも使われているmultipole(角度スケールに対応)でいうと、 $l < 100$ 程度の範囲で顕著である。つまり、BICEP2の結果 $r=0.2$ の原始重力波を考えると、その該当する角度スケールにおけるCMB温度揺らぎの振幅が、Planckで得られたものより大きくなってしまおうということになるのである。

この矛盾の解決策としては、 $l < 100$ のCMB温度揺らぎに寄与する原始密度揺らぎの振幅を小さくすることである。しかし、 $l < 100$ に寄与するスケールで原始密度揺らぎの振幅を小さくして、標準的なスペクトルの傾きのもと、小さなスケールまで外挿した原始密度揺らぎのスペクトルを考えると $l > 100$ でのCMB温度揺らぎの結果を再現することが出来なくなるが、原始密度揺らぎのスペクトルの傾きもスケールによって大きく変化するようなモデルを考えることで観測と無矛盾なCMB温度揺らぎを再現できる。スペクトルの傾きをspectral indexと呼び、それがさらにスケール

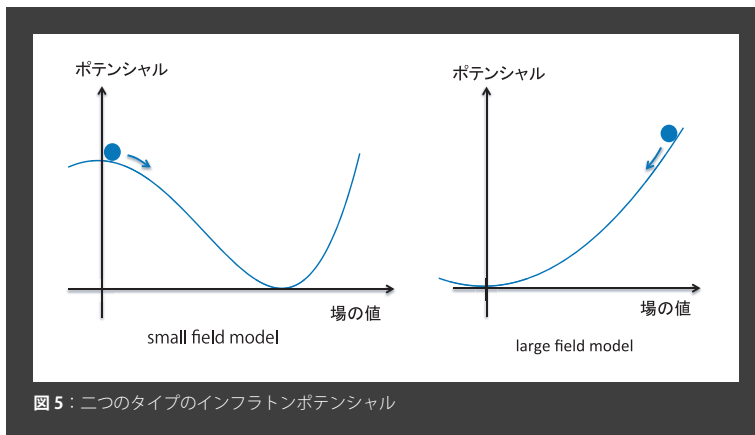


図5：二つのタイプのインフラトンポテンシャル

によって大きく変化するので large running spectral index モデルとしばしば呼ばれ、このモデルは BICEP2 の論文でも触れられている。しかし、このモデルを実現するためにはインフラトンのポテンシャルに特徴的な形状を考えなければならない。

そこで、我々は論文^{[4], [9]}において、BICEP2 と Planck の矛盾の解決策として、新たな可能性を指摘した。エントロピー揺らぎというものの導入である。これまで、原始密度揺らぎの起源として一つのスカラー場、インフラトンを考えてきたが、宇宙初期にはたくさんのスカラー場が存在していた可能性は素粒子理論においてもさかんに議論されている。そしてそれぞれのスカラー場は、インフラトンと同じようにインフレーション中に量子論起源の揺らぎを持っている。これまで考えてきた単一スカラー場によって生成された原始密度揺らぎの場合、これを断熱揺らぎと呼ぶが、宇宙に存在する様々な物質の揺らぎ同士の関係は、それぞれの状態方程式によって一意に決まる（断熱関係）。しかし、揺らぎを内在したスカラー場が宇宙初期に数多く存在し、それぞれが崩壊してできた物質の間には、一般に断熱関係は成り立たず、その関係からのずれをエントロピー揺らぎと呼ぶ。特に輻射成分から見た暗黒物質成分がもつエントロピー揺らぎをここでは考える。当然、CMB の温度揺らぎにもこのエントロピー揺らぎは影響を与える。寄与の仕方は、断熱揺らぎとは異なり、詳細は割

“あきらかに BICEP2 の結果と この Planck の結果との間には矛盾がある”

愛するが $\ell < 100$ くらいで顕著となる。まさに、原始重力波の温度揺らぎへの寄与の仕方とそっくりなのである。さらに、ある種のスカラー場のモデルでは、断熱揺らぎとこのエントロピー揺らぎは負の相互相関を持つことがある。そこで、CMB 温度揺らぎへの影響を考えると「負の相互相関の存在」+「エントロピー揺らぎは主に $\ell < 100$ で顕著」ということから、 $\ell < 100$ の温度揺らぎの振幅を小さくできる（図 6）。一方、断熱揺らぎに関しては、何も変更していないので断熱揺らぎだけでは記述される $\ell > 100$ の CMB 温度揺らぎは変更を受けない。その小さくする影響で、BICEP2 の $r=0.2$ という過剰な原始重力波の影響を相殺できる可能性を我々は指摘した。

この Planck と BICEP2 の結果の整合性に関しては、他にも様々な可能性が指摘されており、BICEP2 論文の引用数を上げて原因にもなっている。今後の Planck をはじめとした、CMB 精密観測の結果によりこの観測間の整合性に関する議論は収束していくであろう。

6 まとめ

今回の BICEP2 グループによる報告は、初期宇宙モデル構築と、今後の宇宙観測の方向性にとって非常に重要であることは間違いない。ここで、解説を終える前に、ひとつ「前景放射」に関する話題について触れておきたい。この記事では、基本的に BICEP2 の報告通りに、「原始重力波こそが、検出された電波 B モード偏光の源である」という立場で話を進めてきた。しかし、BICEP2 の結果を踏まえた理論的な論文発表がひと段落ついたところで、前景放射についての反論が出始めた。詳細は割愛させていただくが、BICEP2 がとらえた B モード偏光には、BICEP2 が考えているよりも大きな前景放射の寄与が入っているのではないか？ というものである。特に銀河系起源のシンクロトロン放射およびダストの熱放射は偏光していることが予想され、わずかなシグナルである B モードを検出するためにはこれらの寄与を丁寧に差し引かなければならない。BICEP2 が主張する $r=0.2$ 程度の背景重力波が本当に存在しているのであれば、Planck によって確認が可能であり、このあたりの前景放射に関する議論は、Planck による偏光データの解析

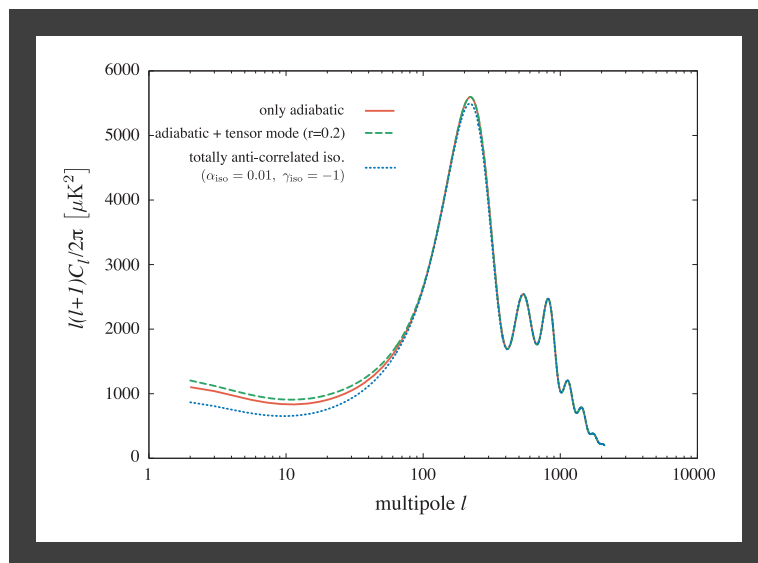


図 6 : CMB 温度揺らぎのパワースペクトル^[5]。赤線は、断熱揺らぎのみで Planck の結果にベストフィットなパラメータを用いている。緑のダッシュ線は、その断熱揺らぎに $r=0.2$ の原始重力波の寄与を足したもの。青い点線は、断熱揺らぎに、それと負の相関を持ったエントロピー揺らぎを加えたもの。図内で α_{iso} は断熱揺らぎの振幅に対するエントロピー揺らぎの振幅の比率で、 γ_{iso} は相関係数である。確かに、 $\ell < 100$ で影響が表れていることがみてとれる。

“直接観測で捉えることができるような 相関長を持った原始重力波も存在する”

結果によりある程度決着がつくと考えられる。Planck 実験については今年中に偏光も含めた宇宙論の解析結果が公開される予定で、本当に楽しみである。

以上のように、BICEP2の報告により、盛り上がりを見せている、CMB Bモード偏光観測を通じたインフレーション起源原始重力波の検出であるが、その検出を通じて、まず何が分かるかという、インフレーションのエネルギースケールであることは強調しておきたい。このインフレーションエネルギースケールがわかれば、宇宙論とともに素粒子論にとっても重要な成果となる。ただ、我々が行った研究の紹介部分で述べたように、 $r=0.2$ の原始重力波の存在というBICEP2の報告と、2013年のPlanckが報告した原始重力波の制限; $r < 0.11$ という結果の間には若干の矛盾がある。我々の研究の他にも、この矛盾の解決に関連した理論研究の論文も数多く発表された。この辺りの議論は、上で述べた前景放射の寄与の精密な除去に関する問題と大いに関係する。より前景放射の寄与が大きくなれば、背景輻射の寄与、つまりは背景重力波の振幅がある程度小さくても、BICEP2の結果を再現できてしまうからである。今年中に公開される予定のPlanckの偏光に関する結果とあわせて、さらには、

POLARBEAR、LightBIRDをはじめとする様々なCMB Bモード観測計画が立ち上がっており、今後ますますCMBから目が離せない。

最後に、この宇宙線研究所の広報誌において強調しておきたいことがある。インフレーション起源の原始重力波は、宇宙論的スケールから地球スケールまで様々な相関長(揺らぎの特徴的な空間スケール)を持って存在することが期待される。CMBのBモード観測で見ている相関長は宇宙論スケールであるが、重力波干渉計を用いた直接観測で捉えることができるような相関長を持った原始重力波も存在する。今回のBICEP2の結果で示された程度の強い原始重力波であれば、将来のスペース重力波干渉計DECIGO実験で十分捉えることが可能である。いまだ直接捉えることができていない重力波ではあるが、天体起源の重力波と並んでこのインフレーション起源の原始重力波が重要なターゲットとなることが期待される。

BICEP2によって、注目を一気に集めることになったCMB Bモード偏光とインフレーション起源原始重力波であるが、以上のように今後も精密な観測、さらには関連した理論研究が発展していくことが期待される。そう遠くない将来、我々が宇宙誕生

の様子を詳細に理解していることを期待する。

本記事を書くにあたって、共同研究者である川崎雅裕氏、高橋智氏、関口豊和氏に感謝申し上げます。また、執筆に協力いただいた、市来浄與氏、田代寛之氏にも感謝申し上げます。

参考文献

- (1) P.A.R. Ade *et al.* [Planck Collaboration], arXiv:1303.5082 [astro-ph.CO].
- (2) P.A.R. Ade *et al.* [BICEP 2 Collaboration], Phys. Rev. Lett. **112**, 241101 (2014) [arXiv: 1403. 3985 [astro-ph.CO]].
- (3) A.H. Guth, Phys. Rev. D **23**, 347 (1981); K. Sato, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **195**, 467 (1981); A.A. Starobinsky, Phys. Lett. B **91**, 99 (1980); D. Kazanas, Astrophys. J. **241**, L 59 (1980); A.D. Linde, Phys. Lett. B **108**, 389 (1982); A. Albrecht and P.J. Steinhardt, Phys. Rev. Lett. **48**, 1220 (1982); A.D. Linde, Phys. Lett. B **129**, 177 (1983).
- (4) M. Kawasaki and S. Yokoyama, JCAP **1405**, 046 (2014) [arXiv: 1403. 5823 [astro-ph.CO]];
- (5) M. Kawasaki, T. Sekiguchi, T. Takahashi and S. Yokoyama, arXiv: 1404. 2175 [astro-ph.CO].

ICRR Report

2014 年度

ICRR-Report-678-2014-4

"Inflaton potential on a Riemann surface"
Keisuke Harigaya, Masahiro Ibe.

ICRR-Report-679-2014-5

"空気シャワー観測による宇宙線研究の歴史"
Motohiko Nagano.

ICRR-Report-680-2014-6

"Non-perturbative approach for curvature perturbations in stochastic- δN formalism"
Tomohiro Fujita, Masahiro Kawasaki, Yuichiro Tada.

ICRR-Report-681-2014-7

"No quasi-stable scalaron lump forms after R^2 inflation"
Naoyuki Takeda, Yuki Watanabe.

ICRR-Report-682-2014-8

"Wino Dark Matter and Future dSph Observations"
Biplob Bhattacharjee, Masahiro Ibe, Koji Ichikawa, Shigeaki Matsumoto and Kohei Nishiyama.

ICRR-Report-683-2014-9

"A solution to the baryon-DM coincidence problem in the CMSSM with a 126-GeV Higgs boson"
Ayuki Kamada, Masahiro Kawasaki, Masaki Yamada.

ICRR-Report-684-2014-10

"Relaxing Isocurvature Bounds on String Axion Dark Matter"
Masahiro Kawasaki, Naoya Kitajima, Fuminobu Takahashi.

ICRR-Report-685-2014-11

"Gravitational waves as a probe of SUSY scale"
Ayuki Kamada, Masaki Yamada.

ICRR-Report-686-2014-12

"Blue-tilted Tensor Spectrum and Thermal History of the Universe"
Sachiko Kuroyanagi, Tomo Takahashi, Shuichiro Yokoyama.

ICRR Seminar

2014 年度

2014.6.4

Dmitry Khangulyan (JAXA)
"Gamma-Ray Emitting Binary Systems"

2014.6.5

西野玄記 (Kavli IPMU)
"CMB Bモード偏光観測実験: POLARBEAR (と BICEP2) による最新の結果"

2014.8.27

川田和正 (ICRR)
"テレスコープアレイ実験による最高エネルギー宇宙線のホットスポットの観測"

人事異動

発令日	氏名	移動内容	職
H26.5.16	江尻 碧	新規採用	事務補佐員
H26.6.1	KHALAIDOVSKI, Alexander	任期満了	学振特別研究員
H26.6.19	尹 泰賢	新規採用	特任教授
H26.7.1	田村 明子	新規採用	技術補佐員
H26.7.1	千田 藍	新規採用	事務補佐員
H26.7.16	松林 伸子	新規採用	技術補佐員
H26.8.18	尹 泰賢	任期満了	特任教授

(H26.5.2~H26.8.18)



乗鞍観測所

1950年に乗鞍岳に設置された「朝日の小屋」が宇宙線研究所の前身。1953年に東京大学宇宙線観測所となってから六十余年、銀河系・太陽惑星空間における宇宙線変動と磁場や、太陽活動に関する研究などが盛んに行われてきました。現在では、最新の望遠鏡の予備実験や性能試験、標高を活かした試験観測が行われています。

No. 90

東京大学宇宙線研究所

2014.9.30

〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 TEL (04) 7136-5148

編集 林田 美里

バックナンバー：<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/cat-icrr/>