

BICEP2によるインフレーション起源重力波の検出をめぐって

1. はじめに

2014年3月17日に、ハーバード大学やカリフォルニア工科大学などが中心となるBICEP2(バイセップ・ツー)グループが、南極点近くに設置されたマイクロ波電波望遠鏡によって、ビッグバン宇宙誕生前からやってきている重力波を発見たと発表した。さらにこの発見はビッグバン宇宙を創る理論、インフレーション理論を実証するものだと主張したのである。このニュースは世界の大新聞、テレビなどで報じられた。日本でもほとんどすべての新聞、テレビで報道された。

私たちがこのニュースを聞いたとき、驚いたことは、重力波と通常のエネギー密度の揺らぎの強さを表すパラメータ(通常、 r という記号で表す)の測定結果が、 $r = 0.2^{+0.07}_{-0.05}$ という大きな値であったことである。これはWMAPやPlanckという宇宙マイクロ波背景放射観測衛星からこれまでに得られていた $r < 0.11$ (信頼度95%)という制限と一見矛盾するからである。両者の観測誤差を考えると誤差の範囲で矛盾は決定的ではないという主張にもかかわらず、多くの研究者は不安を感じたにちがいない。BICEP2の発表後、前景放射と呼ばれる天の川銀河内の埃、ダストが放出するマイクロ波の電波の差し引き方に問題があるのではないかと、人工衛星の観測と同じレベルの上限値、 $r < 0.11$ 程度のことしか言えないのではないかと主張する論文も現れた。この「最近のトピックス」では、インフレーション理論の概要、BICEP2の観測内容とそのインパクト、その後のこの研究の評価を巡る議論、これからの観測に対する期待などを記したい。

2. 宇宙誕生に関するインフレーション理論

インフレーション理論は、1980年頃提唱されたビッグバン宇宙を創生する理論である。この理論は、当初、佐藤勝彦や米国のアラン・グースなどによって、力の大統一理論が予言するヒッグス場の真空の相転移に起因するものとして提唱された。大統一理論を宇宙に適用すると、誕生直後の宇宙にはヒッグス場による「真空のエネギー」があり、急膨張を起こして広大な宇宙へと広がる、そして「真空のエネギー」が相転移によって消えるとき、熱エネギーに転化する宇宙は熱い火の玉となるというシナリオが描き出される。インフレーション理論は、宇宙がなぜ平坦なのか、因果関係を持ったことのない領域までなぜ一様に見えるのか、という疑問を解くことができる。しかも急激な膨張時の量子揺らぎが引き延ばされることによって、後

に宇宙の大きな構造、銀河や銀河団に成長できる「宇宙構造の種」も仕込むことができる。しかし理論の根拠とした大統一理論は、そのままでは実験結果と比較して矛盾があり、また予言される密度揺らぎも大きすぎるなどの問題が生じた。そこで、改良版インフレーションモデルが数多く生まれて来ることになった。現在ではインフレーションを引き起こす場はヒッグス場とは言わずインフラトン場と呼ぶことになり、モデルの数も100を超えると思われる。しかし、そのような状況にもかかわらず、20世紀末から今世紀にかけて宇宙マイクロ波背景放射観測をはじめとする宇宙論的な観測が進むにつれ、インフレーション理論は多様な観測と驚くほど一致することがわかってきた。インフレーション理論は概念として宇宙の創生を論ずるパラダイムとなっているのである。

3. BICEP2の結果

さて今回のBICEP2の結果は、インフレーションが起こるときに銀河などの種となる揺らぎとともに生まれた重力波を捕らえたというものである。重力波は一般相対性理論のアインシュタイン方程式を解くと得られ、電磁波と同じように光の速さで伝わる、空間や時間、時空が波打つ「時空のさざ波」とも言うべき波である。BICEP2は、重力波を直接捕らえる方法ではなく、インフレーション起源の重力波が宇宙マイクロ波背景放射に影響を及ぼして作ったパターンを観測し、間接的に重力波を見つけるという方法を取っている。^{*1}宇宙マイクロ波背景放射は、観測可能な宇宙最古の光である。ビッグバン以後に、宇宙は膨張するとともに冷えていった。およそ3,000 Kになると電子と陽子は結合して中性化し、光子がプラズマから離脱した。この光子の波長は、その後の宇宙膨張とともに長くなっていき、広い意味でのマイクロ波領域の電磁波として全天から我々に降り注いでいる。これが宇宙マイクロ波背景放射である。熱いビッグバン以前にインフレーションにより重力波が生成したとすれば、それは背景重力波となって宇宙に存在し続け、宇宙誕生からおよそ38万年後に生まれた宇宙マイクロ波背景放射にも影響を及ぼす。光は横波なので進行方向と直角方向に振動面がある。重力波があるとBモードと呼ばれる振動面が渦巻き状になるパターンが現れるのである。この、いわば「インフレーションの指紋」をBICEP2は観測し、重力波の証拠を得たとしたのである。

BICEP2は実効的に天空の約1%を観測した。その結果を図1に示す。渦巻き状のパターンが見て取れるであろう。

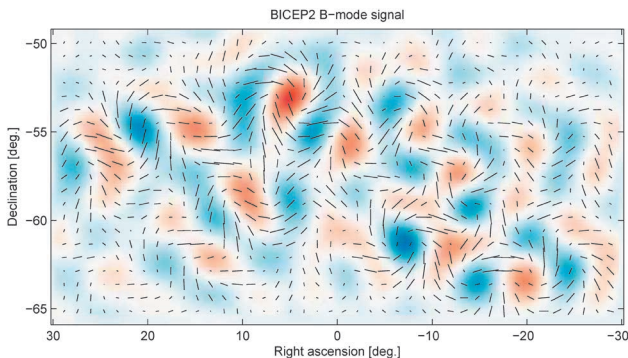


図1 BICEP2が観測した宇宙マイクロ波背景放射の偏光Bモードのマップ。¹⁾ 棒の長さと同じ向きが各点の偏光強度と向きを示す。偏光パターンが渦巻き状になるのがインフレーション起因の重力波が及ぼす影響の特徴で、この渦巻き度がBモードと呼ばれる。図中の赤い部分は時計まわりの渦巻き度が高く、青い部分は反時計まわりの渦巻き度が高い。

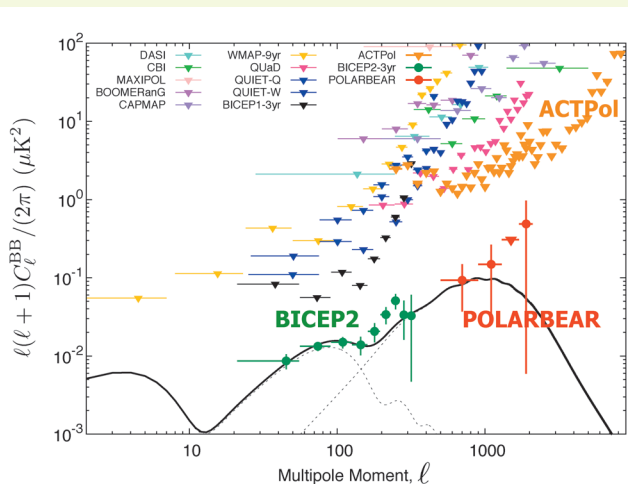


図2 様々なプロジェクトによるCMB偏光Bモードマップのスペクトル解析結果のまとめ。横軸が波数 (Multipole Moment, ℓ)、縦軸がBモードパワーに $\ell(\ell+1)/2\pi$ を掛けたもの (歴史的な理由でこの量が使われる)。図中に丸印で示されたBICEP2とPOLARBEAR (チリの高山にある望遠鏡) のデータは測定値の中央値、その他のデータ (三角) は95%信頼度の上限を示す。実線は $r=0.2$ の場合に期待されるパワースペクトルの理論予想である。波数が小さい側の二つの山がインフレーション起因の信号予想であり、BICEP2の結果は波数が100付近で最大となるピークを捕えているように見える。より波数が大きい (1,000付近) の山は、宇宙誕生後に発達した重力ポテンシャルによって我々に届く宇宙マイクロ波背景放射の進路が曲げられる一般相対論的效果によるものであり、インフレーションの証拠にはならない。作図は茅根裕司氏 (KEK素核研) による。

図ではさらにその「渦巻き度」(Bモード) を色の濃さで示してあり、濃さの「むら」(専門用語では「揺らぎ」) が観測されている。インフレーション理論は、この揺らぎのサイズと濃淡を統計的に予言してくれる。特に、パラメータ r が大きいほど、濃淡の差が大きくなることが重要である。

この偏光Bモードのマップをスペクトル解析すると、インフレーションモデルと観測データを定量的に比較し、モ

デルの正しさを検定できるようになる。スペクトル解析の結果を図2に示す。過去に様々なプロジェクトがCMB偏光Bモードの検出に挑戦しているの、その結果も併せて示し、現状を概観できるようにした。BICEP2の結果に関する驚きは予想以上に重力波が強かった点にある。これが正しければ、100以上あると思われるインフレーションモデルのなかで、カオティックインフレーションと呼ばれるタイプだけが生き残る。すなわち、熱いビッグバン以前を支配する物理学を検証し、モデルを選別できるという全く新しい時代に入力することを意味する。多くの研究者がこの点に興味を感じているのである。

4. 今後の展望

インフレーションによる重力波は、時空の量子揺らぎに起源を持つ。物理学の夢である量子重力理論の構築にとって、その観測の重要性は明らかである。現時点で発見が確定したといえることはできず、今後の検証が極めて重要である。BICEP2チームのフィジカル・レビュー・レターズに掲載された論文¹⁾でも、彼らの主張は銀河内ダストの熱放射とその偏光度のモデルに基づいているため、観測されたBモードパワーを全てダストによって説明する可能性は排除できていないことを慎重に述べている。この背景には、プランク衛星のチームが2014年5月に発表したダストの熱放射の偏光度観測結果²⁾がある。予想より大きな偏光度が見えてきているのである。2014年12月初頭に、プランク衛星の解析チームが主催する国際会議の開催が予定されており、その時までにはプランクチームの偏光観測の結果が発表されるはずだ。他のプロジェクトによる新しい結果も、この1-2年で次々と出てくるであろう。何が飛び出してくるか、予断を許さないスリリングな状況になっている。

参考文献

- 1) BICEP2 Collaboration, P. A. R. Ade, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 241101.
- 2) Planck Collaboration, P. A. R. Ade, *et al.*: Astron. Astrophys. arXiv: 1405.0871.

佐藤勝彦 (自然科学研究機構)

羽澄昌史† (高エネルギー加速器研究機構)

(2014年8月7日原稿受付)

*1 インフレーションに起因する重力波ではないが、天体現象に起因する重力波を直接捕らえようとする計画も現在世界中で進んでいる。神岡鉱山の中に建設中の「かぐら (KAGRA)」もその一つである。

† 兼 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構