

インフレーションとBICEP2

横山 修一郎

〈立教大学理学部物理学科 〒171-8501 東京都豊島区西池袋3-34-1〉

e-mail: shuichiro@rikkyo.ac.jp

市来 淨 與

〈名古屋大学大学院理学研究科・素粒子宇宙起源研究機構 〒464-8601 名古屋市千種区不老町〉

e-mail: ichiki.kiyotomo@c.mbox.nagoya-u.ac.jp

2014年3月、BICEP2グループは、宇宙マイクロ波背景放射のBモード偏光成分を発見したと発表した。この偏光成分の発見は、間接的に原始重力波の存在を示唆し、宇宙初期に起こったとされるインフレーション理論をこれまで以上に強く支持する、世紀の大発見とも言える。本稿では、このBモード偏光成分の観測とインフレーション理論との結びつきについて解説し、今回の発見が示唆するインフレーションモデルについて紹介する。一方で、そもそも今回の発見が真の背景放射成分なのか、それとも銀河内のダストによる前景放射なのかについて、最近活発に議論されている。この現状についても触れたい。

1. BICEP2による報告

2014年3月17日、日本時間の未明に衝撃的なニュースが飛び込んできた。「BICEP2チームが、ついにインフレーション起源原始重力波の痕跡を発見！」というものだ¹⁾。しかも、これまで考えられていたよりも、はるかに強いシグナルとして捉えられたということで、2013年3月に発表されたPlanck衛星の結果を知る人間にとっては、信じがたいものであった²⁾。

BICEP (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization) は、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、電波の高感度観測を行ってきた。BICEP2は、もともとあったBICEP1望遠鏡を口径26 cmに

アップグレードし、2010年1月から2012年12月まで周波数150 GHzの電波を観測した。今回のBICEP2の最も重要な成果は、角度スケールでいうと1度程度の相関長をもった、電波(周波数150 GHz)のBモード偏光の検出である。

当然、この検出されたBモード偏光には、われわれの銀河系内にあるダストなどによる放射(前景放射)の影響もあると考えられるが、BICEP2グループの報告によれば、検出されたシグナルをダストの影響だけで説明することは難しく、まさに宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光成分を検出したということである。この「ダストの影響の除去」という問題は、常にCMBの観測にはつきまとっているものであり、今回のBICEP2の結果に対しても、いまださまざまな議論がなされている状況である。しかし、発表から数カ月経ち、今後のPlanckによる偏光データの発表をはじめとした、追試実験の結果を待つという方向

で、多少議論は収束してきている。

そのような現状ではあるが、このあたりで、いったん今回発見されたBモード偏光というものとインフレーション理論がどのようにつながるのかについての解説をしておくのは、重要かと考える。これまで、天文月報において、インフレーション理論に関する解説記事は少ない^{3),4)}。本稿では、インフレーション理論について簡単に触れつつ、BICEP2の報告のとおり、検出されたBモード偏光がまさにCMBの成分である場合に、それが原始重力波の痕跡であるといえるのはなぜか？そしてその検出により、われわれはインフレーション理論についてどのような情報を得ることができるのかについて解説する。その後、活発に議論されているダストの寄与に関しても触れる。

2. CMB Bモード偏光とは

2.1 CMB Bモード偏光

上で述べたように、原始重力波の間接的証拠となりうるCMBのBモード偏光であるが、ここではそもそもCMB（宇宙マイクロ波背景放射）とは、Bモード偏光とは何か、について簡単に紹介する。まず、CMBとは「宇宙の晴れ上がり」と呼ばれる、宇宙誕生から約38万年後に光子と電子の結合が切れる時期から発せられた光子である。その飛んでくる光子の分布は、ほぼ等方的であり、プランク分布に従っている（黒体放射）。つまり、このCMBの発見により、初期宇宙が熱い熱浴の状態にあったことが示唆され、膨張ビッグバン宇宙論が強く支持されることとなった。さらなる詳細観測により、その飛んでくる光子の強度には、10万分の1程度のムラ（揺らぎ）が空間的に存在し、その揺らぎの詳細観測によって、われわれの宇宙の構成物質や初期宇宙の状態について詳細な議論が可能となった。特に、CMB光子が発せられた晴れ上がりの時期の宇宙の地平線（宇宙時間内に（光の速さで）情報が到達できる最長の距離）を超えたスケールでも揺らぎが観測

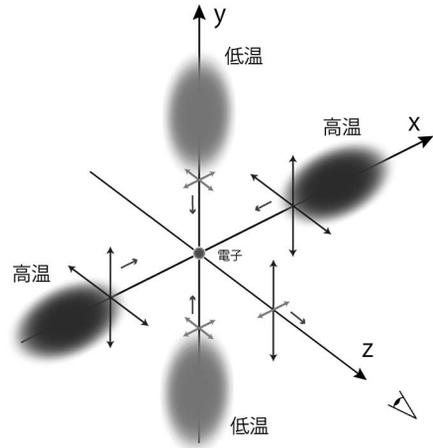


図1 偏光パターンの生成。

されており、宇宙初期に起きたとされるインフレーション理論を強く支持する結果となった^{3),4)}。

さて、上述のようにCMB観測では、宇宙から飛んでくる光子を検出している。検出された光子を特徴づ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揺らぎである。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）からきた光子は電子に散乱され、対して、東西南北平面から垂直方向（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ので、この場合、東西方向（x軸）からき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もつ（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

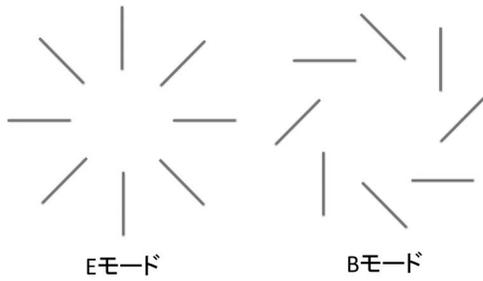


図2 二つの偏光パターン.

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づけられる。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偏光は作られ、二つのモードで特徴づけられている。

2.2 重力波によって作られるBモード

次に、重力波がつくる偏光について考える。重力波とは、空間の伸び縮みが波として伝わっていく現象である⁵⁾。先ほどの光のように、進行方向に対して垂直方向に空間が伸び縮みをする。さらに重力波は、二つの振動パターンをもっており、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）をもつ。このような重力波は、その空間の伸び縮みを通じてCMBの温度揺らぎも生成し、その二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。

詳細については後ほど触れるが、インフレーション理論で生成される波（揺らぎ）のことを通常、原始揺らぎと呼ぶ。このインフレーション起源の原始揺らぎには、先ほど述べたような重力波として伝播するようなモードと、原始密度揺らぎ

という、いわゆる音波（粗密波）として伝わるモードの2種類がある。密度揺らぎによって生じた温度揺らぎのパターンからは、Eモード偏光のみが生成される。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もって生成される。ゆえに、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。

補足として、CMBの偏光Bモードは、実際には原始重力波だけでなく、光子が宇宙の晴れ上がりからわれわれまで飛んでくる間に、宇宙大規模構造による重力レンズ効果によっても生成される⁶⁾。しかし、この重力レンズ効果によって生成される偏光Bモードは、比較的小スケールの相関しかもたず、角度スケールで言うところと0.1°程度である。一方、原始重力波起源の偏光Bモードは、それよりも大きな角度スケールにも強度をもつため、今回のBICEP2による角度スケール1°程度の偏光観測が、原始重力波発見にとって非常に重要なことは強調しておきたい。

3. インフレーション理論

これでCMB Bモード偏光が、原始重力波の痕跡となりうることはわかっていただけたであろうか。ここでは、そもそもインフレーション中にこのような原始重力波がどう生成され、どのようなインフレーションの情報が刻まれているのかについて触れたい。

3.1 インフレーション理論

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⁷⁾。先に述べたCMBがきれいなプランク分布をしていることなどから、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。われわれ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、CMB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。この驚くべき精度で微調整された宇宙を生み出すために考えだされたのが、インフレーション理論である。

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延ばされて、現在の470億光年以上にもわたる広大なわれわれの宇宙が誕生したと考えられる。この急激な加速膨張により宇宙はほぼ一様となり、空間も平坦化されたと考えられている。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る）によって引き起こされたと考えられている⁸⁾。スカラー場は、電場や磁場といったベクトル場や、電子などといったフェルミオンと違い、方向性やスピンをもたない。そのような性質が、現在の一様で等方な宇宙へと引き継がれているのである。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モデルも提唱されている。

さて、もう少しインフレーション理論の詳細に踏み込んでみよう。標準的なインフレーション理論では、加速度的膨張の実現のために、スカラー場の運動（場の値の変化）が、極めてゆっくり（スローロール）である状況（slow-roll inflation）を考える。基本的には、場のもつエネルギーは、場の値で決まる「ポテンシャル」と呼ばれる関数で与えられる。インフラトンは、このポテンシャルに従い、ポテンシャルが低い、つまりはエネルギーが低くなる方向に向かって運動する。

宇宙の膨張は、宇宙を支配している物質がもつエネルギーで決まるといのが、アインシュタイン方程式から導かれる帰結である。つまり、イン

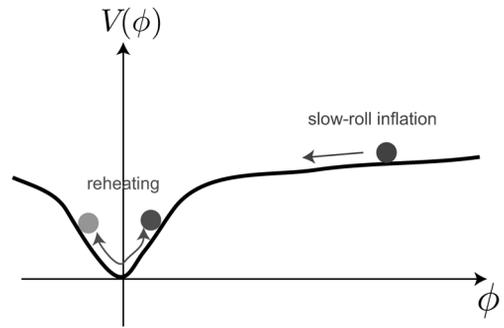


図3 ポテンシャル上を“転がる”インフラトン。

フレーション中は、インフラトンのエネルギー、つまりはポテンシャル、さらにいえば場の値によって、宇宙の膨張の様子が決まるのである。図3で示したボール（場の値）が、宇宙を表していると考えよう。先程述べたように加速度的膨張の実現には、場の値の変化がゆっくりである（ボールがゆっくり転がっていく）状況を考えるが、図3に示すように、そのような状況は、ポテンシャルの傾きが緩やかである場合に実現されると容易に想像できる。やがて、ポテンシャルの底に到達すると、その底の周りで場の値はゆらゆらと変化し始め、そのような状況では加速度的膨張は実現されない。つまり、インフレーションが終了する。その終了とともに、熱い膨張ビッグバン宇宙を実現するために、この加速度的膨張を引き起こしていたインフラトン場のエネルギーが熱エネルギーへと転換すると考えられている（宇宙再加熱, reheating）。

3.2 原始密度揺らぎ、原始重力波の生成

上で述べた、宇宙初期の加速度的膨張の実現と、その後の熱い膨張ビッグバン宇宙への進化だけでなく、インフレーション理論では、これまで説明してきた原始密度揺らぎや原始重力波といった、CMB温度揺らぎや現在の銀河や銀河団といった大規模構造の種をも生み出す。一見、急激な加速膨張によってそれら揺らぎ（非一様性）はならされてしまう気もする。ところが、量子論を考えると、この原始密度揺らぎや原始重力波の生

成がうまく説明できるのである。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。粒子として考えた場合には、粒子が絶えず対生成、対消滅を繰り返している状態である。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もっており、インフラトンの空間的非一様性をこの量子揺らぎ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ー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ーで特徴づけられることになる。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。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「時間のずれ」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る。このように生成された「原始密度揺らぎ」が、CMBの温度揺らぎや偏光、さらに宇宙大規模構造の種となり、それらの観測から、原始密度揺らぎの性質を探ることで、インフレーション中の情報を得ることができるのである。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ー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づけられる。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ー」と「スカラー場の運動」という二つのパラメーターに依存する。

次に、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播と前述したが、この伸び縮みの様子もインフレーション中は量子的に揺らいでいると考えるのである。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されて、その振幅は、「ハッブルパラメーター」で決まる。

3.3 観測量とインフレーションパラメーター

ここで重要なことは、振幅に関して言えば、原始密度揺らぎは、「ハッブルパラメーター」と「インフラトンの運動」という二つのパラメーター、原始重力波は、「ハッブルパラメーター」という一つのパラメーターで決まっているということである。原始重力波の観測によって、初めて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できるのである。

さらに、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できる。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。さて、前述したとおり、原始密度揺らぎの振幅は、インフレーション中のハッブルパラメーターとインフラトンの運動に依存している。通常これらのパラメーターは、インフレーション中ほぼ一定であるが、わずかながら時間変化している。パワースペクトルの傾きは、まさにこれらパラメーターのインフレーション中の時間変化と対応している。「ハッブルパラメーターの時間変化」と「インフラトンの運動の時間変化」である。ハッブルパラ

メーターは、インフラトンのエネルギー密度、つまり場の値で与えられるので、その時間変化は、まさに「インフラトンの運動」で記述される。一方、インフラトンの運動の時間変化は、簡単に言えば「インフラトンの加速度」である。原始重力波の振幅は、ハッブルパラメーターで決まっていたので、そのスペクトルの傾きは、「インフラトンの運動」で決まる。そして、そのハッブルパラメーター（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は、まさにインフラトンのポテンシャルとも関連づけることができる。

原理的には、スペクトルの傾きまで精密に測ることができれば、原始密度揺らぎと原始重力波の振幅、そしてその両者のスペクトルの傾きという四つの観測量が、「ハッブルパラメーター（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」という三つの理論パラメーターで記述できていることになるので、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。原始重力波の観測がインフレーション理論を議論する際に、非常に重要な位置を占めていることがこれでおわかりいただけたであろうか。言葉で書いたものより、数式で書かれたほうが見やすいという方のために、上で述べた、観測量とパラメーターとの関係を表1にまとめた。

表1 観測量とパラメーター.

観測量	パラメーター	ポテンシャル
原始密度揺らぎ パワースペクトル \mathcal{P}_s	H ; ハッブルパラメーター $\dot{\phi}$; インフラトン時間変化	$V(\phi)$ $dV(\phi)/d\phi$
密度揺らぎスペクトルの傾き $n_s - 1 = \frac{d \ln \mathcal{P}_s}{d \ln k}$	$\dot{H} (\leftrightarrow \ddot{\phi})$ $\ddot{\phi}$; インフラトン "加速度"	$dV(\phi)/d\phi$ $d^2V(\phi)/d\phi^2$
原始重力波 パワースペクトル \mathcal{P}_T	H ; ハッブルパラメーター	$V(\phi)$
重力波スペクトルの傾き $n_T = \frac{d \ln \mathcal{P}_T}{d \ln k}$	$\dot{H} (\leftrightarrow \ddot{\phi})$	$dV(\phi)/d\phi$

4. インフレーション理論と BICEP2

それでは、実際に今回の BICEP2 の観測が導き出す、インフレーション理論に対する帰結について述べたい。まずは、実際に BICEP2 グループが示した結果が図4, 5である。

図4は、BICEP2が得た、Eモード、Bモード偏光のマップである。色のコントラスト（カラー版は、参考文献1を参照していただきたい）が偏光の強度を表し、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

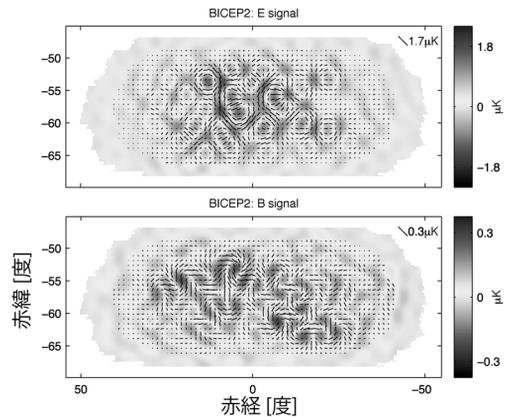


図4 BICEP2が得たE,Bモード偏光のマップ¹⁾(参考文献1より転載).

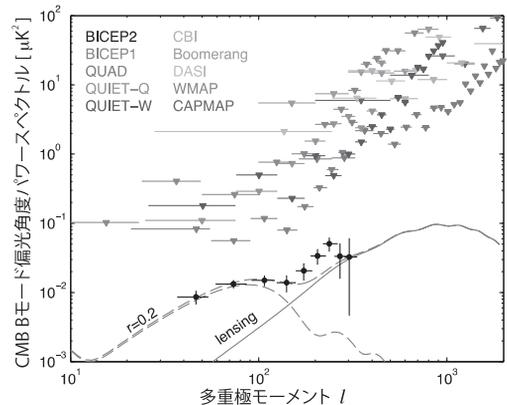


図5 BICEP2が得たBモード偏光角度パワースペクトル¹⁾(参考文献1より転載).

ができる。そして、図5が、図4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。横軸の多重極モーメントは角度スケールと対応しており、多重極モーメント $l=100$ が、 1.8° に対応する。多重極モーメントが10倍になれば、角度は10分の1になる。点で示されているのが実際に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、他の観測のデータは、三角印で書かれており、これは上限しか得られていないことを示している。

一方で、BICEP2は、点で描かれており、これは実際に検出された、ということを示している。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、先にも述べた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Bモード偏光である。破線の上にならべて書かれている、 $r=0.2$ 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。図からわかるように、今回の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。

さて、この $r=0.2$ という数字がもたらす、インフレーション理論に対する示唆をここでは紹介したい。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、いまだ具体的なインフラトンの候補を絞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、宇宙論にまたがる大きな問題であるが、今回のBICEP2の結果が、当初の報告のとお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。

前の章で解説したように、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。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も示唆が得られる。今回のBICEP2の結果が示唆するところは、「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。前の章で述べたように、インフラトンの運動は、そのポテンシャルの形により決まるが、インフレーションを起こすためには、そのポテンシャルがある領域で平坦であれば良い。例えば、簡単なものだと、図6で示すような二つのモデルが考えられる。

図6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

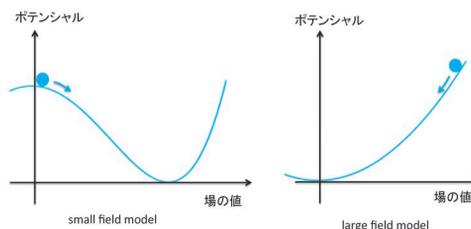


図6 二つのタイプのインフラトンポテンシャル。

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⁹⁾。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、絞り切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。

この章を終える前に、一つ述べておきたいことがある。前の章で述べたように、インフレーション中の原始重力波の生成は、「初期に量子的な揺らぎが存在する」という仮定に基づいている。つまり、インフレーション起源の原始重力波の理論予言において、暗に「重力の量子状態」を仮定しているのである。ご存じの方もいると思うが、自然界には、いわゆる四つの力、強い力、弱い力、電磁気力、そして重力、が存在する。ほかの三つと異なり、「重力の量子化」は、未解明で長い間議論されている理論である。しかし、あくまで今回の量子化は、空間的な非一様性を摂動として扱い、その摂動の初期の状態を量子揺らぎとして取り扱っただけである。決して、時空そのものの量子化に成功したわけではない。このように、今回の発見は、決して量子重力理論の完成ということにはならないが、インフレーション起源原始重力波の性質が今後より詳細にわかってくれば、この根源的な量子重力理論に迫る可能性があるかもしれない。

5. 前景放射（銀河系内ダスト）に関する話題

これまででは、基本的にBICEP2の報告どおりに、「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、理論的な論文発表が一段落ついたところで、先に述べたように、前景放射についての反論が開始した。BICEP2実験では、150GHzを

中心とする1帯域でのみ観測が行われており、原理的には宇宙論的なCMBとその他の放射を区別する術はない。（注：空間的な分布がガウシアンであることが宇宙論的なCMBの必要条件にはなるが十分ではない。）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¹⁰⁾。BICEP2実験グループでは、魔法領域 (Magic patch) と呼ばれるダストの放射が極めて小さい領域を観測しているものの、CMBのBモード偏光自体も極めて小さいので、無視できるかどうかは定かではない。問題は現時点では前景放射のテンプレート作成のために十分な精度の、マイクロ波領域で多波長にわたる偏光観測のデータがないことである。（Planck実験がこれに該当するが、現時点でデータは公開されていない。）そこで、BICEP実験グループでは前実験であるBICEP1の100 GHzのデータを用いることで放射スペクトルのべき（スペクトルの傾き）を計算している。つまり、(BICEP 2-150 GHz) × (BICEP 1-100 GHz) の相互相関を計算し、その振幅の増減からスペクトルのべきを推定するのである。その結果、シンクロトロン放射である可能性を 1.6σ 、ダスト放射である可能性を 1.7σ で棄却(?)している。もちろん、これはべき（傾き）だけの議論であって、WMAP K-bandの偏光データをシンクロトロンのテンプレートとして使用し、BICEP2のmapと相互相関をとることでシンクロトロンについては $r_{\text{sync}} < 0.003$ （シンクロトロン放射が占める割合）を得ている。したがって、シンクロトロン放射は観測されているシグナルを説明するには不十分といえる。

一方、ダスト放射の偏光成分は十分な精度をもつテンプレートが存在せず、見積もりが不十分である可能性がある。とくに、プランクの最新の論文では、BICEP2が観測しているような高銀緯の領域の偏光度は30-50%という、BICEP2が仮定

した偏光度より大きい可能性を示している¹¹⁾。ダストの放射が小さいという条件は、偏光の前景放射が小さいことを必ずしも意味しないというわけである。BICEP2実験グループでは、2013年4月に行われたPlanck実験の初期成果発表のための国際会議(ESLAB meeting)で使用された発表用のスライドの中から偏光のデータをスキャン(!)して、テンプレートとして用いるなど、できる限りの前景放射の見積りを行っている。ところがそのスキャンしたデータの利用法に誤りが指摘され、さらにFlaugerらの論文では、スキャンする際に生じるエラーまで考慮するとBICEP2のシグナルは完全に誤差棒の範囲内に入ってしまうことが示されている¹²⁾。Mortonsonらの論文では、ダストの寄与の不確定性が与える結果への影響も議論している¹³⁾。もちろん、これらの議論も未公開データに基づいたものであり、最終的にはPlanckの結果待ちというところであろう。BICEP2が主張する $r=0.2$ 程度の背景重力波が本当に存在するのであれば、Planckによって確認が可能である¹⁴⁾。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。

6. まとめと今後の展望

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、まず何がわかるかというと、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、 $r=0.2$ 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。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。手前味噌で恐縮

ではあるが、例えば、原始密度揺らぎの起源をインフラトンとは別のスカラー場の量子揺らぎであると考えた場合に、このPlanckとの矛盾を解決できる可能性がある¹⁵⁾。しかし、前の章でも触れたように、銀河系内のダストの影響などまだまだ精査すべき問題があると考えられている。まずはPlanck衛星によるCMB偏光のデータリリースが2014年の10月頃に予定されており、そこでまたこのBモード偏光について新たな議論の方向性について考えることになるであろう。さらには、POLARBEARをはじめとするさまざまなCMB Bモード観測計画が立ち上がっており、今後ますます目が離せない。

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さまざまな相関長(揺らぎの特徴的な空間スケール)をも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も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¹⁶⁾。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、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。宇宙誕生の様子が明らかになるのも、そう遠くはないのかもしれない。

最後に、今回、記事の執筆の機会を与えてくださった大栗真宗氏に感謝を申し上げます。また執筆の手助けをしていただいた田代寛之氏にも感謝申し上げます。

参考文献

- 1) BICEP2 Collaboration, (2014), Phys. Rev. Lett. 112, 241101
- 2) Planck Collaboration, (2013), e-print arXiv: 1303.5082
- 3) 杉山 直, 1992, 天文月報 85, 350
- 4) 佐藤文隆, 1992, 天文月報 85, 519
- 5) 特集: 重力波天文学, 2001, 天文月報 94, 446
- 6) 並河俊弥, 2013, 天文月報 106, 788
- 7) 近年, インフレーション理論の提唱者についてここに挙げた人々以外の名前も挙げられるようになってきた. 例えば, BICEP2, Planck の論文 1), 2) では, Kazanas D., 1980, Astrophys. J. Lett. 241, L59, Brout R., et al., 1978, Ann. Phys. 115, 78 など挙げている.
- 8) 辻川信二, 2007, 天文月報 100, 462
- 9) Linde A., 1982, Phys. Lett. B 108, 389
- 10) Ichiki K., Prog. Theor. Exp. Phys. 6109, 2014
- 11) Planck Collaboration, (2014), e-print arXiv: 1405.0871
- 12) Flauger R., Hill J., Spergel D., arXiv:1405.7351
- 13) Mortonson M., Seljak U., arXiv:1405.5857
- 14) Betoule M., et al., 2009, Astron. Astrophys. 503, 691; Bonaldi A., Ricciardi S., Brown M., arXiv: 1407.0968; Wang Y., Ma Y., arXiv: 1406.1615
- 15) Kawasaki M., Yokoyama S., 2014, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 046, 1405 (2014); Kawasaki M., et al., arXiv: 1404. 2175
- 16) 川村静児, 2006, 天文月報 99, 490

Inflation and BICEP2

Shuichiro YOKOYAMA¹ and Kiyotomo ICHIKI²

¹ *Department of Physics, Rikkyo University, 3-34-1 Nishi-ikebukuro, Toshima-ku, Tokyo 171-8501, Japan*

² *Department of Physics, Nagoya University and Kobayashi-Maskawa Institute, Furo-cho, Chigusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan*

Abstract: In March 2014, BICEP2, which has observed 150 GHz microwave at South Pole, has reported the detection of the B-mode polarization of the cosmic microwave background (CMB). This detection predicts the existence of the primordial gravitational waves which could be generated from inflation, and this could give a breakthrough for the understanding of the physics of the birth of the our Universe and also the particle physics. We would like to review this BICEP2 report, primordial gravitational waves and inflationary physics. We also discuss which inflationary model is favored by the BICEP2 result. In addition, we are going to mention the foreground issues, e.g., dust emission in our galaxy.