

Big Bang cosmology : The test of inflation

インフレーション理論のゆくえ

Nature Vol.458(820-824)/16 April 2009

欧州宇宙機関 (ESA) が 5 月 14 日に打ち上げたプランク衛星は、ビッグバン直後に宇宙が急激に膨張したとするインフレーション理論にどのようなインパクトを与えるのか。Eric Hand が報告する。

宇宙空間の温度は低い。しかし欧州宇宙機関 (ESA) が打ち上げた人工衛星「プランク」の温度はもっと低い。その心臓部は高度な超低温冷却系を備え、0.1 K (ケルビン、絶対温度) まで冷やされている。真空に近い空間の中で、極細の糸がクモの巣のような形に張られた検出器が、宇宙創造の残光である宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) からの光子を集めることになる。

プランク衛星のミッションは CMB の超精密地図を作ることだ。その遂行のために、この極端な低温が欠かせない。1cm³ の宇宙空間には、原始の光子、す

なわち宇宙で最も古い光が、平均 2.7K の温度で飛び回っている。その光子の温度が、ごくごくわずかではあるが、空の部分から来ているかによって異なる。温度ゆらぎが存在するのだ (『宇宙の地図を作る』参照)。

プランク衛星の超低温検出器は、この温度ゆらぎを 100 万分の 1K 以下のレベルで測定できるよう設計されている (『プランク衛星を冷却する』参照)。衛星の設計者によると、この驚異的な精度の検出器を搭載した衛星は、2009 年 5 月 14 日の打ち上げから 2 年の生涯を終えるま

で、天体物理学の世界を約 1 世代 30 年にわたってかき回してきた問題に、決着をつけることになる。「私たちはさらに深く掘り進めていかなければなりません。その絶好の機会を与えてくれるのがプランク衛星なのです」と、ノールトヴェイク (オランダ) を本拠地とする ESA のプロジェクトサイエンティスト Jan Tauber は言う。

Tauber によれば、かれこれ 30 年近くの間、宇宙論研究者の思考はインフレーション理論に支配されてきた。インフレーション理論は、ビッグバン直後の宇宙の進化を説明しようとする理論であり、これま

宇宙の地図を作る

でのところ、観測に基づく検証をすべてパスしている。つまり、プランク衛星の前任機によって CMB の温度ゆらぎが観測されてきたが、インフレーション理論はその統計データをきちんと予測したのである。しかし、プランク衛星の温度ゆらぎに対する感度は高く、インフレーション理論をこれまでにない厳しい試験にさらすことになる。はたして、プランク衛星はインフレーション理論の正しさを証明するのか、それともこの理論を否定して、いくつかある対抗理論のいずれかを支持することになるのだろうか。

重さ 2 トンの超低温衛星は、CMB を精密に測定するために 6 億ユーロ (8 億米ドル) の費用をかけて建造された。一方で、地上実験や気球を使った実験も精力的に進められている。現代宇宙論にとってインフレーション理論がどれだけ重要であるかは、このようにプランク衛星も含めた数十のグループが、すべて同じ目的をめざして熾烈な競争を繰り広げている事実からもわかるであろう (『B モード探しの競争』参照)。「まさにビッグレースなのです」と、シカゴ大学 (米国イリノイ州) の宇宙論研究者 Michael Turner は言う。「勝者が手にするのはスウェーデンクローナ (ノーベル賞の賞金) です」。

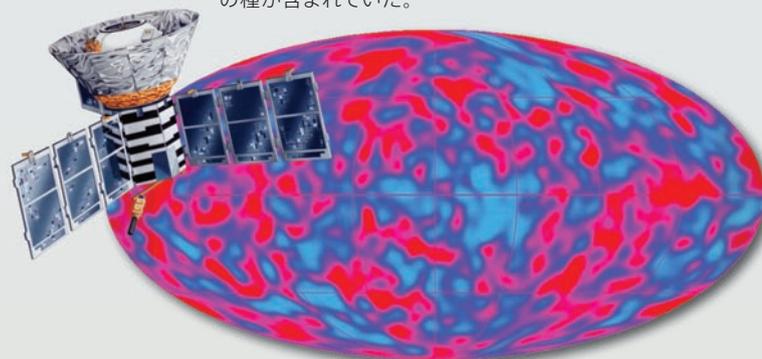
大成功をおさめたインフレーション理論

ビッグバン後の宇宙は、何らかの後押しなしには非常に小さいままであったと考えられている。物理学者は量子論と宇宙論の折り合いをつけるため、原始の宇宙の直径がわずか 10^{-35} m であったと考える必要があった。けれどもそこから矛盾が生じた。よく知られているように、私たちの宇宙は 137 億年前に誕生したが、もし理論家が要請するような大きさから始まっていたのなら、宇宙はまだこの文の終わりの句点の中に収まりきる程度の大きさにしかなくなってはいないはずなのだ。

インフレーション理論は、「誕生直後の宇宙が猛烈に膨張した」と仮定すること

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) は、空から聞こえてくるような雑音として、1960 年代に最初に検出された。その後、精密な宇宙論研究のために一連の探査機が建造され、より詳細に CMB の実体が明らかにされてきた。COBE の主任研究員であったノーベル賞受賞者の George Smoot は、「前年の発見が翌年の基準として利用されたのです」と言う。ここにあげたのは 3 機の重要な探査機とそれが描き出した全天地図 (プランク衛星についてはシミュレーション)。

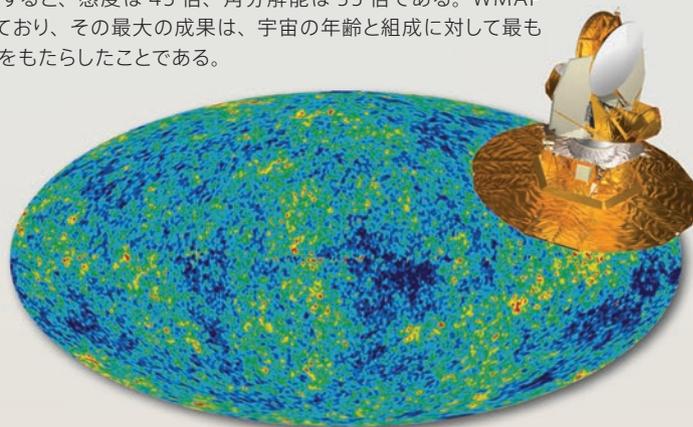
宇宙マイクロ波背景放射探査機 (COBE) : 1989 年打ち上げ
COBE では、全天を大きく区分けした部分どうしを比較して、大きな角度スケールで温度ゆらぎを求めた。この異方性 (10 万分の 1 のレベル、つまり約 $30 \mu\text{K}$ のゆらぎ) の中に、銀河の種が含まれていた。



NASA

ウィルキンソンマイクロ波異方性探査機 (WMAP) : 2001 年打ち上げ

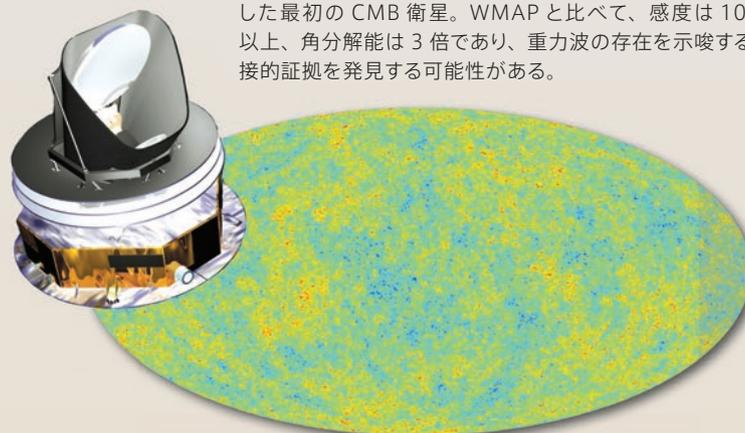
WMAP は、COBE よりもはるかに小さな角度スケールで地図を作成した。COBE と比較すると、感度は 45 倍、角分解能は 33 倍である。WMAP はまだ稼動しており、その最大の成果は、宇宙の年齢と組成に対して最も精密な推定値をもたらしたことである。



NASA/WMAP SCIENCE TEAM

プランク衛星 : 2009 年打ち上げ

プランク衛星は、ボロメーター (超高感度温度計) を搭載した最初の CMB 衛星。WMAP と比べて、感度は 10 倍以上、角分解能は 3 倍であり、重力波の存在を示唆する間接的証拠を発見する可能性がある。



ESA

でこのパラドックスを抜け出した（『インフレーション宇宙の年表』参照）。その膨張がどんなに激しく、速かったのか、残念ながら簡単にイメージしてもらえないような比喩はない。例えばある単純なインフレーションモデルによると、 10^{-35} m という極小の宇宙は直径約 $10^{1,000,000,000,000}$ m まで膨張できたことになる。これは、1 の後ろに 0 が 1 兆個続く数字だ。

しかもこの膨張が、1 秒の 1 兆分の 1 の 1 兆分の 1 のそのまた 1 兆分の 1 という短時間に起きたというのである。この膨張には光でさえついていけない。ビッグバンの瞬間から飛び続けている光子が到達できる最も遠い距離（地平線距離）でさえ、たったの約 10^{27} m なのである（これは、相対性理論とは矛盾しない。インフレーションの間、同じ点にあった 2 つの粒子が光より大きい相対速度をもつことは決してなかった。爆発的な膨張速度とは、あくまでも宇宙全体のスケールについての話である）。

インフレーション理論は宇宙の巨大さを説明できるだけでなく、そのほかの多くの問題をきれいに解決することができる。まずは、宇宙が幾何学的にカーブせずに平坦であるように見える理由を説明できる。風船をどんどんふくらませて、表面が無限に広い平面のように見えている様子を考えてみてほしい。これにより、空のどの方向に目を向けるかで宇宙の様子が全く違って見えても不思議ではないのに、実際にはどこも同じように見える（銀河の平均密度も平均 CMB 温度も同じになっている）。この理由をインフレーション理論なら説明できる。

何よりも、インフレーション理論は私たちの銀河が存在している理由を説明することができる。インフレーションは生まれたばかりの宇宙をほぼ完全に平坦かつ一様にしたにもかかわらず、量子力学の命ずるところには従わなければならない。点と点の間にきわめて小さな密度のゆらぎが生じた。こうして、宇宙のある部分はほかの部分よりも密度が高くなった。これらの高密度領域が「種」となり、重力により物質を

引きつけ、やがて銀河や恒星を作っていたのである。NASA が 2001 年に打ち上げたウィルキンソンマイクロ波異方性探査機（WMAP）などによる観測から、CMB にこうしたゆらぎが存在するだけでなく、インフレーション理論が予測したとおりのサイズ分布を示すことが明らかになった¹。

理論の弱点と克服への取り組み

これだけの説明ができるにもかかわらず、インフレーション理論には問題がある。第一に、何がインフレーションを引き起こしたのかわからない。理論家はその「力」を場として説明し、インフラトンという名前をつけたが、謎が解決したわけではない。それは、ダークエネルギー（宇宙のエネルギーの 4 分の 3 を占めており、いまだにその膨張を加速している未知の力）について研究している天文学者を悩ませているのと同じ種類の欲求不満を生じさせる。ダークエネルギーの背後には、インフレーションの原因と同じものがあるのだろうか？ その類似性は興味深い、作用するスケールがあまりにも違いすぎる。インフレーションがゾウだとしたら、ダークエネルギーはノミである。「両者が関連しているようには見えません」と Turner は言う。「だからこそ、そのアイデアを追究するという考え方もあるのですが」と、茶目っ気たっぷりに付け加えた。

プリンストン大学（米国ニュージャージー州）の物理学者 Paul Steinhardt によれば、インフレーション理論にとっての大きな問題は、それが何であるかということではなく、どうして終わったのかにあるという。「インフレーションはひとたび始まったら、絶対に終わることがないのです」と Steinhardt は言う。彼は、1980 年代にはインフレーション理論の創始者の 1 人であったが、現在は、その批判の急先鋒に立っている。超高速の膨張が減速され、今日のようなゆるやかな膨張になる理由が見つからないからだ。「最初だけ、この概念は拍手喝采を浴びたわけですね」と

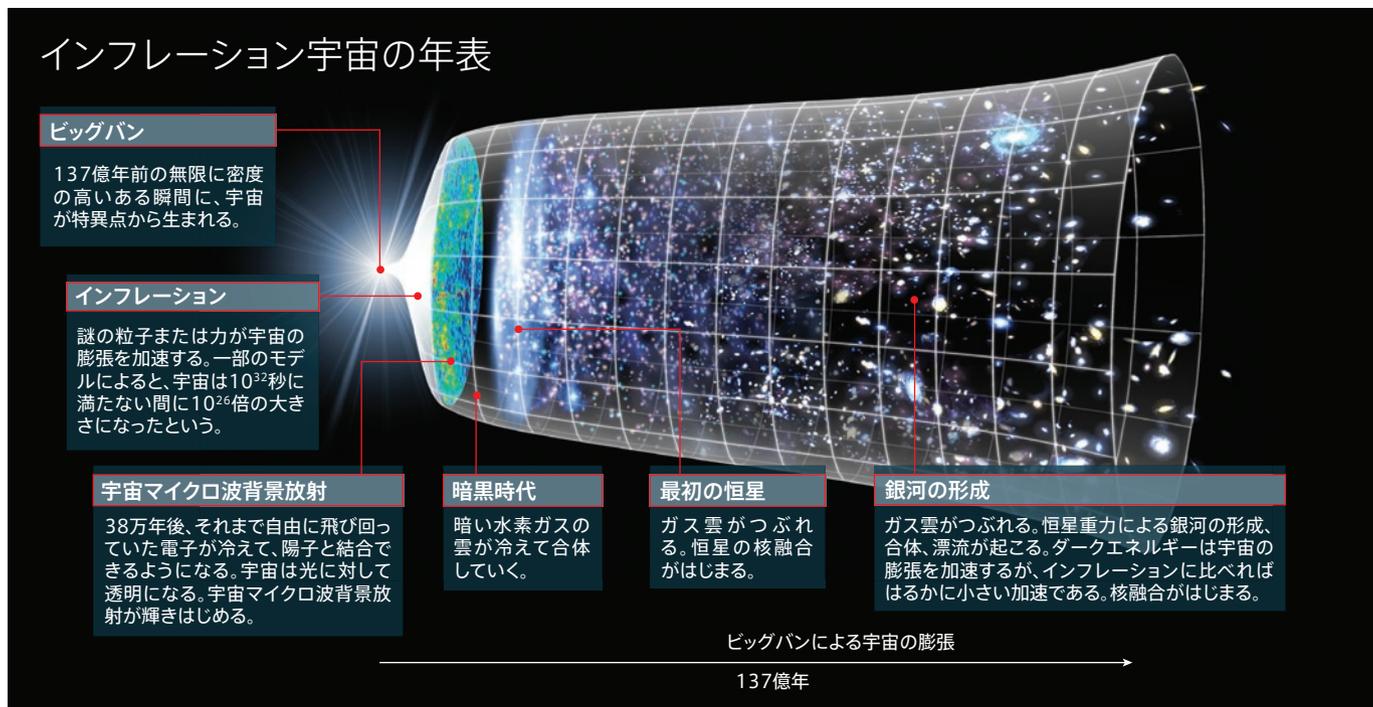
Steinhardt は皮肉っぽく言う。

このプレーキなしのインフレーションの概念に対する「拍手喝采」は、Steinhardt の同僚であり、ときにはライバルにもなるスタンフォード大学（米国カリフォルニア州）の物理学者 Andrei Linde の研究グループを刺激した〔Linde、Steinhardt、および Steinhardt の 1980 年代初頭の大学院生は、しばしば Alan Guth とともにインフレーション理論の確立に貢献したと言われている。Guth は 1980 年に最初にインフレーション理論を提唱した科学者で²、現在はマサチューセッツ工科大学（米国マサチューセッツ州ケンブリッジ）に所属している〕。

Linde は 1986 年までに、「量子ゆらぎのため、宇宙の一部は平均よりも強くインフレーションの力を感じた可能性がある」とする理論を提案した³。その結果、こうした部分は局所的なふくらみとなる。しかし、インフレーションは途方もなく強いため、このふくらみがたちまち支配的になり、まったく新しい宇宙へと膨張する。この新しい宇宙は、量子スケールの糸によって、古い宇宙とくろうじてつながっている。古い宇宙の住人にとって、そのつながりは小さすぎて目に見えない。彼らは自分の目の前で新しい宇宙が創造されたことを知らない。一方、新しい宇宙の住人の目には、それは新たなビッグバンとして見えるだろう。つまり、宇宙から宇宙が出芽するのだ。まるでフラクタルのように、である。Linde が言うところの多宇宙（マルチバース）は永遠に続いていく。

永遠に出芽する宇宙は、Linde の目には創造的なものとして映ったが、Steinhardt の目には不健康なものに見えた。それは、すべてを包含する理論にとって、致命的ではないにしても大きなダメージを与えるものだった。新たに誕生した宇宙が支配的となる傾向があるのなら、それ以外の宇宙は取り残された島になる。支配的な宇宙になろうとしていたものが、新興の宇宙に取って代われ、みるみるうちに取り残されてしまうのだ。その上、新

インフレーション宇宙の年表



興の宇宙どうしの間で物理法則が異なっている可能性もあるため、理論家は、私たちの宇宙の物理学がどんな場合にも通用するのかわかることができない。「私たちが観測している部分の宇宙、すなわち私たちの宇宙は、存在していないに等しいものになってしまうのです。つまり、特殊な領域でしかないことになってしまう」とSteinhardtは言う。

特異点を回避するための試み

インフレーション理論には第3の問題もある。それは、理論そのものの問題というよりは、理論がカバーする範囲の問題である。インフレーション理論は、すべてがどのようにして始まったかという理論ではなく、宇宙が始まった直後に何が起きたか、という理論なのである。言うなれば、「コト」が終わってからの理論なのだ。

インフレーション理論でも、ビッグバンの瞬間は時間と空間の密度が無限に高い特異点であり、相変わらず私たちの理解を超えている。「インフレーション理論の

最大の欠点は、特異点を理解することなく宇宙論を作ろうとしている点にあります」と、ペリメーター理論物理学研究所（カナダ・オンタリオ州ウォーターロー）の所長Neil Turokは言う。「それは、『ちょっと後から時計を動かしてはじめよう』と言っているようなものです」。

Steinhardtは、ビッグバンという用語がもともと、この理論に一貫して反対していたFred Hoyleが、手品師が手を叩いたら突然宇宙が出現したとでも言うのかと揶揄したときに使った言葉だったと指摘する。皮肉にも、この用語は定着した。「創造の瞬間があったと考えることを好む人もいますからね」とSteinhardtは言う。

もちろん彼はそうではない。Turokもまた同じである。2001年、2人の物理学者はインフレーションの革新的な提案として、「火の中から」という意味のギリシャ語に由来するエクピローシスという概念を提唱した⁴。エクピローシス宇宙論は、ひも理論家との議論の中から生まれてきた。ひも理論家は、私たちが見ている世

界は、少なくとも10次元からなる宇宙の中にある、より低い次元の膜（ブレン）であると主張している。

SteinhardtとTurokは、別々の3次元のブレンの上にある2つの宇宙が、相互に垂直な次元に沿って振動していると提案した。イメージとしては、平行な物干し竿に2枚のシーツを干してあるようなものである。約1兆年の周期で、膨張期にそれぞれの宇宙が暗闇の中に散っていった後、2つのブレンが互いに接近して衝突し、エネルギーの火の玉を生じて、それぞれにおいて新たな宇宙が始まるという。「つまり、ビッグバンは始まりではなく、衝突であるということになります」とSteinhardtは解説する。

エクピローシス宇宙論はインフレーション宇宙論の特徴の多くを模倣しているが、いくつか重要な相違点がある。定義上、ブレンの衝突を連続的な過程としているエクピローシス宇宙論には特異点の問題がない。「私たちは、ものごとの前後を分けて考えなければなりません」とTurok

プランク衛星を冷却する

プランク衛星は、地球から150万km離れた重力の影響を受けないポイントに落ち着くと、太陽に背を向ける。このミッションの米国のプロジェクトサイエンティストであるジェット推進研究所（米カリフォルニア州パサデナ）のCharles Lawrenceは、「太陽光が衛星の心臓部に当たることは決してありません」と言う。「地球や月からの照り返しもあります。それは完全な暗闇の中に置かれるのです」。さらに、光子の間のわずかな温度ゆらぎを検出するためには、信じられないほど冷たくしておかなければならない。

プランク衛星の背中には太陽のほうを向いているため、その温度は380Kにもなる。そこで、3枚の円盤を重ねた受動冷却系で、背中からの熱を散逸させる。具体的には、円盤が自動車のラジエーターのようなしくみで熱を吐き出し、温度を50Kまで下げるわけだ。

プランク衛星が軌道に到達すると、入れ子構造になった3台の極低温冷却器が稼働をはじめ。第1の冷却器は、減圧された水素の吸熱能力を利用して20Kまで温度を下げる。第2の冷却器は機械式圧縮器で、一気に4Kまで冷却する。第3の冷却器はヘリウム4とヘリウム3の熱容量の差を利用した装置で、分子運動をほとんど停止させ0.1K（絶対零度より0.1度だけ高い温度）まで下げる。

その最も奥まったところに52個のボロメーターがある。ボロメーターは電磁波（この場合は宇宙マイクロ波）のエネルギーを取り込んで熱に変換し、それを温度計で測定する装置。プランク衛星のボロメーターは、金でコーティングした窒化ケイ素の繊維から作られている。繊維の太さは人毛のわずか100分の1。ボロメーターは、クモの巣のような形に張られている。真空に近い宇宙空間からはときおり宇宙線や荷電粒子も入ってくるが、これらが観測の邪魔になることはない。ボロメーターのクモの巣は、宇宙マイクロ波背景放射に反応するのにぴったりの大きさになっていて、宇宙線や荷電粒子はすり抜けてしまうからである。また、入れ子の極低温冷却器から突き出たフィードホーンは、異なる周波数のマイクロ波を集めてボロメーターへと送り込む。

この観測について考えるたびに圧倒されるとLawrenceは言う。プランク衛星は、ビッグバンのときから飛んできた光子を集めて、ほかの光子よりも1000万分の1度だけ高温の光子があるかどうかを確認するのだ。「それは映画でも、歴史小説でもありません。最初の光子なのです」とLawrenceは言う。「その光子は、私たちに向かって137億年も飛び続けてきたのです。私はいつもそのことを考えます」。

E.H.

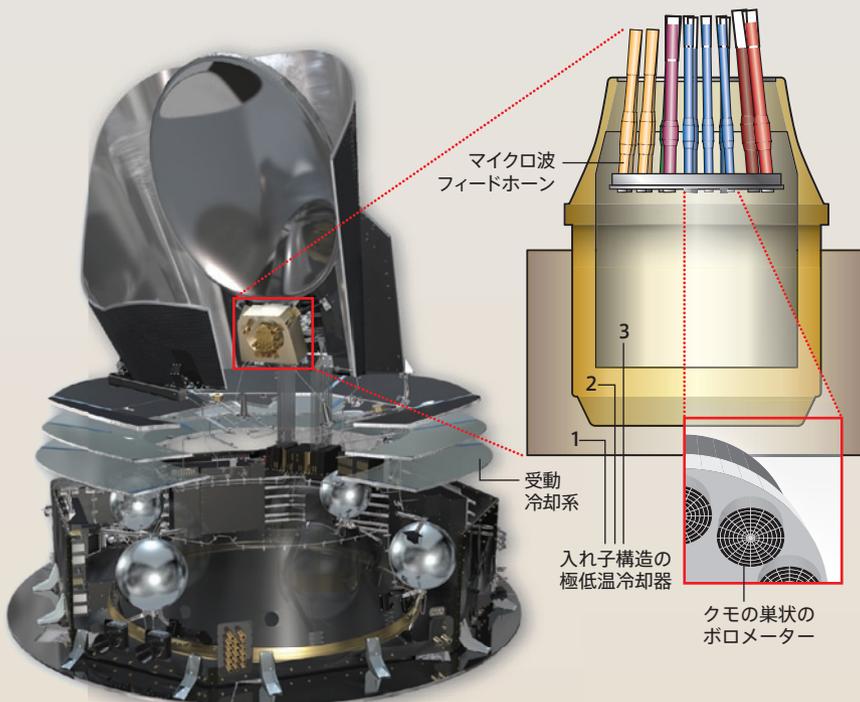
は言う。「インフレーション理論は、それを無視してきました」。彼は、ひも理論を利用するエキピロティック宇宙論によってはじめて、特異点を完全に避けてこの状況を説明することが可能になったと指摘する。

対立する見解

これに対してLindeは、実際に見ることができるならエキピロースを信じてやってもいい、と言っている。彼はエキピロティック宇宙論の数学的問題点を指摘し、その支持者らに当初の提案を修正させた。彼はときにひも理論家の協力を頼むことがあるが、今では、彼らにインフレーション理論の代わりとなる理論に注目させるのにさえ苦労する、とまで言う。過去5年間の大きな前進をしいてあげるなら、ひも理論家がついに自分たちの研究とインフレーション理論とのつながりを見つけたということである。「エキピロースはトランプの札で作った家のおぼつかない理論です」とLindeは断定する。

ほとんどの理論家は、インフレーション理論がいまだに最も有力であると見ている。けれども、ハーバード大学のポスドク研究員Daniel Baumannは、SteinhardtやTurokとともに研究を進め、最近、インフレーション宇宙論やそれに代わる宇宙論の理論的風景（位置関係）について、筆頭著者として論文⁵を発表した。そのBaumannは「それは挑戦しなければいけない相手なのです」と語っているが、この指摘が多くの研究者のいまの気持ちを代弁している。

インフレーション理論をめぐる議論には、異なる世代間の研究者の対立が関係しているのかもしれない、とLindeは言う。若い科学者は、既存の理論に磨きをかけることでキャリアを築くことを潔しとしないものだと言っている。つまり、独自の革命的な理論をひっさげて世に出ることを望んでいる。Linde自身が30代前半でインフレーションに関する最初の論文を発表したときもそうだった。これに対して、



インフレーション理論の枠組みを作り、それによって恩恵を受けてきた年長の科学者たちは、なんとしてもそれを守り通そうとするというわけだ。

しかしこの見方では、Turok や Steinhardt といった年長の科学者が反対にまわる理由を説明できない。特に Steinhardt は、インフレーション理論の確立に貢献した人物だったのである。WMAP チームに所属するプリンストン大学の天体物理学者 David Spergel は、それは個人のスタイルの問題にすぎないと言う。「混乱を作り出すのが好きな人がいれば、それをきれいにおさめるのが好きな人もいるわけですね」。

理論家たちが繰り広げている論争には、もう1つ理由があるかもしれない。彼らは単に、新しいデータが入ってこない現状にうんざりしているのかもしれないのだ。WMAP のデータはほぼ出尽くした。新しい理論は既存の CMB データと矛盾してはならず、この制約が、エキピロティック宇宙論のような急進的な理論を提案したい理論家の前に壁として立ちはだかっている。

しかし、インフレーションに少し手を加えるだけなら、障害はほとんどない。レーストラック・インフレーション、マルチフィールド・インフレーション、ハイパーエクステンディッド・インフレーションなど、インフレーションという主題がさまざまに変奏されている（しかし、その多くは即座に否定されている）。こうした理論はどれもインフレーション理論の基本的な体系をもっているが、既存のデータでは、その差異（主としてインフレーションパルスの形と持続時間）を判別することができないのだ。

単純理論に迫る「非ガウス性」の刃

プランク衛星は、こうした現状を変えられるはずである。2つのテストは特に重要であり、間違った理論を否定するだけでなく、インフレーションが本当に起きていたとしたら、それがいつ起きたのか、どのくらいの時間続いたのかなど、カギとなるパラ

メーターに制約を課すと考えられている。

テストの1つは、CMB の「ガウス性」についてのものである。空のまだら模様として見える CMB の温度ゆらぎは一見ランダムなようだが、冷たい隣の隣に熱い点がある確率は、何らかの法則に従っている可能性がある。初期の宇宙を完全に単純なインフレーションが支配していたなら、これらの熱い点から冷たい点へのシフト（ゆらぎのゆらぎ）は鐘型のガウス曲線になっていなければならない。エキピロシスや、より複雑なインフレーション理論の多くは、ガウス曲線からの特徴的なずれが見られるはずだとしている。「非ガウス性の意味は非常に深く、それが実在している証拠は、のどから手が出るほど欲しいのです」と Spergel は言う。

プランク衛星のミッションにかかわっているイリノイ大学アーバナ-シャンペーン校の科学者 Benjamin Wandelt は、昨年、WMAP のデータを使って計算した結果、CMB には有意な非ガウス性があるようだという結論に達した⁶。これは、彼自身にも意外だった。数か月にわたって集中的にコンピューターを走らせた結果は、99.5% 確実であると推測されたが、容易に覆される可能性もあった。「それはぎりぎりのところで、決定的とは言えないレベルなのです」と Wandelt は言う。

独自に分析を進めた WMAP チームは、今のところ、非ガウス性を宣言することには抵抗している。しかし、非ガウス性を主張する研究の数は増え続けており、最近では、マックス・プランク地球外物理学研究所（ドイツ・ガルヒンク）の Christoph Rath が率いるチームも、同様の結論に達した⁷。「一貫した不一致が見られる」と彼は言う。ただそれでも、プランク衛星からのデータなしで決定的な結論が出る見込みはない。

B モードをつかまえる!

インフレーションの決定的な証拠を押さえようとする科学者たちは、南極にマイクロ

波望遠鏡を建造し、宇宙に近い高さまで気球をあげている。彼らが探しているのは「B モード」だ。B モードは、CMB に刻まれている可能性がある、特殊な種類の偏光である。B モードが見つかった場合、それはインフレーションに伴う重力波の存在を間接的に証拠立てることになる。

B モードについて、エキピロティック宇宙論の立場は明確である。エキピロシスからは重力波の存在は予測されないため、この理論が正しいならば B モードが見つかるはずがないのである。しかしインフレーション理論では、ガウス性についてと同様、B モードについての話はより複雑になる。最も単純なインフレーションでは、プランク衛星で検出できる程度の、比較的大きな B モード信号が発生するとされている。しかし、ほかの形のインフレーションでは、B モード信号はもっと小さくなる可能性がある。Turok によれば、プランク衛星が B モード信号と非ガウス性を発見した場合、インフレーション理論は、確実に「コーナーぎりぎりに追い詰められることになる」と言う。追い討ちをかけずにはいられない彼は、「今でも十分、追い詰められているのですがね」と言い足した。

プランク衛星が B モードを検出できなかった場合には、地上実験や気球実験に期待がかかることになる。こうした実験の中には、プランク衛星ほど広範囲の空をカバーすることはできないが、B モードへの感度は約 1 桁高いと主張するものもある。しかし、カリフォルニア工科大学（米国カリフォルニア州バサデナ）の物理学者であり、ポロメーター（プランク衛星で使われる高分解能マイクロ波温度計）技術のパイオニアである Andrew Lange は、その観測には限界があると指摘する。B モード信号があまりにも弱い場合、どんなに高性能のポロメーターを使っても、今日の宇宙（大部分は天の川銀河）からくるマイクロ波放射がその信号をかき消してしまうからである。

その場合、インフレーション宇宙論を検

証できる機会は、「ビッグバン・オブザーバー」などのミッションによる重力波の直接観測だけになる。この人工衛星は、レーザー干渉計宇宙アンテナ (LISA) という重力波の観測をめざす壮大な宇宙ミッションに続くものとして、提案された。各種の B モード実験が CMB の中から重力波が存在する証拠を間接的に拾い出そうとしているのに対して、「ビッグバン・オブザーバー」は、インフレーションによる重力波の低いハミングを直接検出するという困難な任務に挑戦することになる。しかし、その技術も資金も、まだ現実のものにはなっていない。そして、いずれかの B モード実験から重力波の存在を示唆する間接証拠が得られないかぎり、このプロジェクトを正当化するのは難しい状況にある。私た

ちの宇宙がエキピローシスによって始まったとしたら、どんなに精密な装置を製作しても、観察すべきビッグバンの重力波は存在しないからである。

ノーベル賞か、見果てぬ夢か

B モードの最初の発見者と、おそらくはインフレーション理論の提唱者に贈られるであろうスウェーデンクローナ (ノーベル賞) について語る時期は、はたして今がちょうどよいのか、それとも遠い先のことなのか。Lange 自身は前者であってほしいと願っている。数年以内に、みずから考案したポロメーターが、宇宙と気球と南極に設置されることになるからだ。

後者になることも覚悟している。Lange は B モード探しについて講演するとき、い

つもガチョウを追いかける人々の写真を聴衆に見せる。英語文化圏では、それは、得られるあてのない追求、無駄な骨折りを意味している。彼は、この世代の実験で何も検出できなかつたら、現実を謙虚に認めるつもりだ。自然は、自分の手の届く範囲と自分の人生の時間を超えるものを生み出した、と。「そうになったら、別のことを始めるつもりです」。

Eric Hand は、米国の首都ワシントンに拠点を置く Nature のリポーター。

1. Wright, E. L. et al. *Astrophys. J.* **396**, L13.L18 (1992). (far left) to cool
2. Guth, A. H. *Phys. Rev. D* **23**, 347.356 (1981).
3. Linde, A. D. *Phys. Lett. B* **175**, 395.400 (1986).
4. Khoury, J., Ovrut, B. A., Steinhardt, P. J. & Turok, N. *Phys. Rev. D* **64**, 123522 (2001).
5. Bauman, D. et al. Preprint at <http://arxiv.org/abs/0811.3919> (2009).
6. Hand, E. *Nature* doi:10.1038/news.2008.755 (2008).
7. Rath, C., Morfill, G. E., Rossmannith, G., Banday, A. J. & Gorski, K. M. *Phys. Rev. Lett.* **102**, 131301 (2009).

Bモード探しの競争

ビッグバン直後の重力波は、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) にインフレーションの証拠となる信号を刻み込んだ可能性がある。ゴダード宇宙飛行センター (米国メリーランド州グリーンベルト) のポスドク研究員 James Hinderks は、「これを検出できたグループにはノーベル賞がほぼ確約されているのです」と言う。

現在、多くのグループが、新しい世代の地上実験や気球または衛星を利用した実験により、B モードと呼ばれる全天の CMB の偏光のパターンを最初に検出しようとしのぎを削っている。けれども、B モードの存在は確実ではない。存在している場合でも、CMB の 1000 分の 1 以下というかすかな信号になるはずだ。ある単純なインフレーション理論で

は、B モードはほとんどの実験で検出できる範囲内にあるとされているが、その他のインフレーション理論では、信号ははるかに小さいとされている。

Hinderks は、Primordial Inflation Polarization Explorer (PIPER) という気球実験に従事している。2013 年にこの気球をあげることができれば、プランク衛星よりも 1 桁高い感度で B モードを探ることができる。しかしそのためには、成層圏気球を使って 3,500 リットルの液体ヘリウムが入った桶を空にあげなければならない。マイクロ波望遠鏡は桶の中から「南の穴」に目を凝らす。これは、空にあいた小さな窓であり、天の川のちりがほとんどないため、CMB がよく見える。

一方、南極大陸の地上に設

置された望遠鏡では、長い冬の間、つまり空気が非常に乾燥していて、マイクロ波を放射する水蒸気に邪魔されない季節に同様の観測を行う。そして宇宙では、プランク衛星が前景のマイクロ波に煩わされることなく、はるかに広範囲の空から B モードの信号を探す。プランク衛星のチームは 2012 年末までに最初のデータの分析結果を発表する予定であり、その頃までには、ほかのところの実験結果も一部発表されているはずだ。

それぞれのアプローチには長所と短所がある。地上に設置する望遠鏡は、最新技術を使って安く建造することができる。これに対して衛星は高価で、開発にも時間がかかるが、広範囲の空を鮮明に見ることができる。気球はその中間である。米国が CMB の観測を行う 12 の地上実験と気球実験に提供している研究費の総

額は年間約 2,500 万ドルであり、1 機あたり数億ドルにのぼるプランク衛星の後継機のどれよりも少額である。シカゴ大学 (米国イリノイ州) の物理学者 Stephan Meyer は、「わずか 2,500 万ドルで、すばらしい科学的知見を得ることができるのです」と言う。

しかし、どの場所から観測するにせよ、温度はきわめて正確に測定しなければならない。空のある場所からくるビッグバン光子と別の場所からくるビッグバン光子の間にある 100 万分の 1 度から 10 億分の 1 度の差を発見しなければならないのだ。「nK (ナノケルビン) 単位の温度ゆらぎを測定しなければならないのです」とシカゴ大学の Michael Turner は言う。「それが重要な点であり、また心配している点なのです」。

E.H.