

特集

# インフレーション理論の現在

## 小松英一郎が語る 絞られてきたモデル

宇宙誕生直後に起きたインフレーションと呼ばれる急膨張  
それはどのようなものだったのか  
宇宙最古の光の全天観測から理論モデルが絞り込まれてきた

協力：小松英一郎（独マックス・プランク宇宙物理学研究所）

中島林彦（日本経済新聞）

### KEY CONCEPTS

#### 原点に回帰するモデル

- 誕生直後に宇宙が急膨張したとするインフレーション理論は宇宙最古の光、「宇宙マイクロ波背景放射」の全天観測によって検証が進んでいる。
- 独マックス・プランク宇宙物理学研究所の小松英一郎所長は、この研究の流れを生み出した探査機WMAPのデータ解析で中心的役割を果たした。
- インフレーションのモデルは多数提唱されているが、小松博士によると、有力なモデルの多くは淘汰され、最初期のモデルが改めて脚光を浴びている。現在、インフレーションで生じたと考えられる原始重力波の探索が進んでおり、その結果でモデルの正しさが試されることになる。

宇宙が誕生直後に急激に膨張したとするインフレーション理論は1980年代初めに提唱され、これまでの宇宙論的観測（宇宙の成り立ちや発展を調べるための広域的な天文観測）によって、実際にインフレーションが起きたことが有力視されている。どのように起きたのかを記述する理論モデルも数多く提唱され議論が続いていたが、2001年から始まった、深宇宙からやってくる宇宙最古の光「宇宙マイクロ波背景放射」（左下の解説を参照）の精密測定によって、理論モデルの有力候補が絞り込まれてきた。

研究の流れを作ったのが2001年に米航空宇宙局（NASA）が打ち上げたウィルキンソン・マイクロ波異方性探査機「WMAP」だ〔ウィルキンソンはこの計画を提唱した故ウィルキンソン博士（David T. Wilkinson）にちなむ〕。WMAPは第2ラグランジュ点（右下の解説を参照）にとどまって、宇宙の暗闇に目を凝らし、はるか彼方からやって来る宇宙マイクロ波背景放射（以下、背景放射）を全天で精密に測定した。

WMAPは2010年までの9年間に

### 宇宙マイクロ波背景放射

宇宙のあらゆる方向から到来するごく弱いマイクロ波のこと。1964年に米ベル研究所（現ノキアベル研究所）のベンジラス（Arno A. Penzias）とウィルソン（Robert W. Wilson）が発見した。そのスペクトルから絶対温度約2.7Kの黒体放射に一致することがわかった。超高温高密度の濁ったスープのようだった初期宇宙は膨張するにつれて冷えて透明になり、宇宙誕生から約38万年後、光があらゆる方向に伝播できるようになった。この「宇宙の晴れ上がり」の際に放出された光が約140億年かけて地球に到達したものが宇宙マイクロ波背景放射だ。

わたって観測を続け、その結果に基づいて宇宙初期、具体的には宇宙誕生から約38万年後の宇宙の温度分布を示す詳細な全天マップが作成された（右ページ上段の図）。この温度分布マップの解析からインフレーションが起きた可能性が高いことが明らかになった。WMAPの後継となる欧州宇宙機関（ESA）の探査機プランクも、2009年から2013年までの4年間、第2ラグランジュ点で背景放射を観測、より解像度が高い、宇宙初期の温度分布マップを作成し（右ページ下段の図）、WMAPの観測結果を検証した。

独マックス・プランク宇宙物理学研究所長の小松英一郎博士はWMAPのデータ解析で中心的な役割を果たした。当時は米プリンストン大学のポスドク研究員で、WMAPの研究グループの最若手の1人だった。インフレーション理論には様々なモデルがあるが、WMAPが明らかにし、プランクが確認した重要な成果は、意外な理論モデルが最有力候補として絞り込まれたことだ。それは1980年に当時のソ連（現ロシア）で生まれた、インフレーション理論の原点ともいえる最初期のモデルだった。今年3月、小松博士が一時帰国した折に、インフレーション理論の現在と将来展望を聞いた。

### インフレーションとは何か

WMAPの成果で一般に最もよく知られているのは、宇宙の年齢が137億歳だと判明したことだろう。その後、プランクの観測で微修正され、現在は約138億歳と推定されている。誕生時の宇宙の大きさは不明だが、インフレーション理論によれば、誕生したその刹那、1兆分の1の1兆分の1のさらに1兆分の1秒という極めて短時間に、空間は1兆倍の1兆倍のさらに100倍以上という途方もない膨張をした。これを例えるならば原子核ほどの大きさが瞬く間に太陽系ほどの大きさになっ

てしまう凄まじさだ。相対性理論によると、何物も光速を超えるスピードで動くことはできないが、物体が運動する舞台となる空間そのものが光速を超えるペースで膨張することは可能だ。

インフレーションは膨張のペースが時間とともに速くなる加速膨張だったとみられるが、インフレーションが終わると膨張のペースが次第に遅くなる減速膨張に移行した。物理法則によれば、短時間に一気に膨張すると温度が下がる。誕生時の宇宙が熱かったのか冷たかったのかは不明だが、インフレーションの加速膨張によって宇宙は極限まで冷え込んだとみられる。

インフレーションが終わると、加速膨張の原動力となった膨大な「真空のエネルギー」が熱エネルギーに変換され、宇宙は超高温状態になった。これがビッグバンだ。一般的に宇宙の始まりそのものをビッグバンということもあるが、インフレーション理論によれば、インフレーション終了に伴う宇宙の熱化がビッグバンになる。

インフレーション理論が提案された背景には、宇宙に関する2つの大きな謎があった。なぜ今の宇宙はこんなに

### 第2ラグランジュ点

地球から見て太陽と正反対の方向、月の周回軌道よりさらに先にある特定の場所に探査機を置くと、探査機は太陽と地球を常に同じ方向に見ながら公転運動することになる。この特定の場所は太陽と地球の重力バランスから決まるもので、これを第2ラグランジュ点という。人工衛星では観測視野から地球や太陽、月の姿を常に排除するのは難しいが、月より遠い第2ラグランジュ点に探査機を置き、太陽・地球と逆方向にアンテナを向ければ、太陽と地球、月はいずれも観測視野に入らないので、これら3天体に邪魔されずに背景放射を常時観測できる。

平坦なのか、そして一様かつ等方なのか（下の解説を参照）。こうした問題が、インフレーションによって説明できると考えられたのだ。

ところが小松博士は、インフレーションは宇宙の一様等方性についての「問題解決にはならない」と語る（以下の発言もすべて博士による）。「一様等方な宇宙を説明しようとしてインフレーションを持ってくると、最初から、つまりインフレーションが起きる前から一様等方な宇宙だったと仮定しないと、現在の宇宙が一様等方であることを説明できないというトートロジー（同義語反復）に陥ってしまう」という。

「インフレーションを起こすには真空のエネルギーが必要だが、単にエネルギーが存在するだけでなく、それがほぼ一様に分布していることが重要だということがわかってきた」。一般には、一様等方性はインフレーションに

### 平坦で一様等方な宇宙

空間が「平坦である」というのは、その空間に描いた三角形の内角の和を足すと180°になるという意味だ。曲がっていない、曲率ゼロの空間で「ユークリッド空間」とも呼ぶ。WMAPとプランクの観測で宇宙が平坦であることが確認されたが、なぜ平坦になっているかは自明ではない。

例えば空間が正の曲率で曲がっていて、三角形の内角の和が180°より大きくなる可能性もあった。2次元のイメージで表すと球面のような空間だ。逆に空間が負の曲率を持ち、三角形の内角の和が180°より小さくなる、馬の鞍（くら）のような空間も考えうる。

「一様」というのはどこにも特別な場所がない、「等方」というのはどの方向も特別ではないという意味。背景放射の観測は、銀河や銀河団などを越えた大きなスケールで見ると宇宙が一様等方であることを示しているが、なぜそうなったのかはわかっていない。

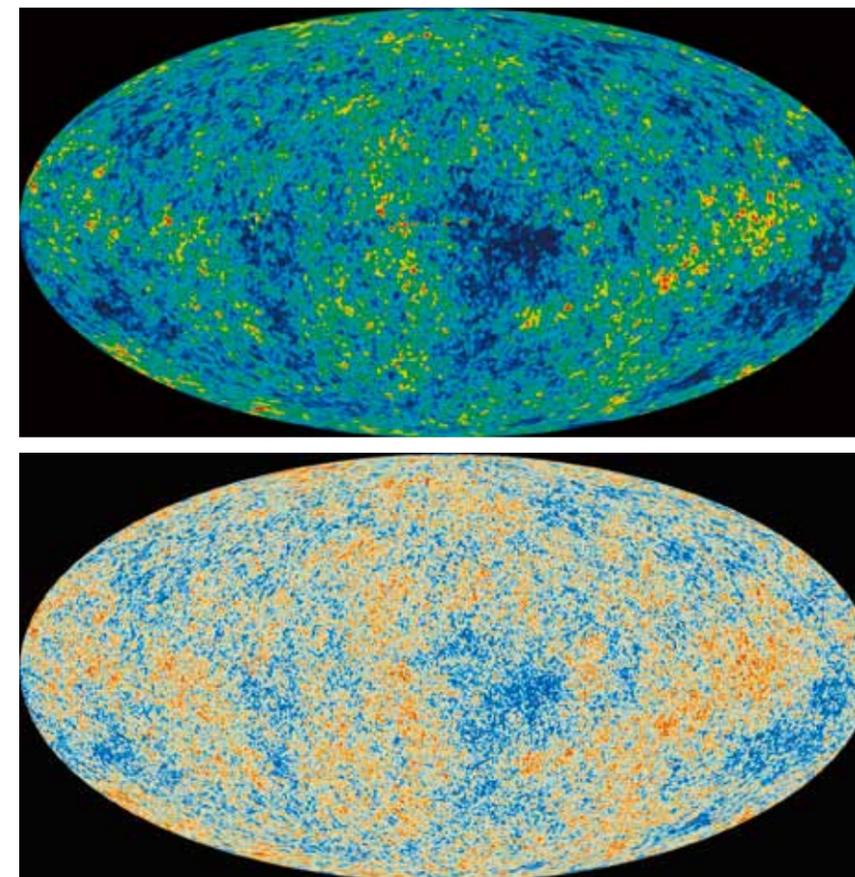
よってもたらされる結果だと考えられているが、実はそうではない。誕生直後の宇宙で「もし真空のエネルギーの分布に大きな揺らぎがあれば、インフレーションは始まらない。真空のエネルギーの値がどこもほぼ同じ、かなり大きな領域がないといけない」という。

「かなり大きな領域」とは、具体的にはインフレーションが起きる前の宇宙で、光が届くことのできる「宇宙の地平線」の中の領域だ。宇宙の地平線の内側という広大な領域で、真空のエネルギーがほぼ同じ値でなければインフレーションは起きない。これは非常に厳しい制約だ。

インフレーションが高い支持を得たのは、背景放射が隅々まで一様であることを説明する有力な仮説だったから

だ。ビッグバン直後の宇宙は超高温で、光子が物質粒子と混ざり合い、激しくぶつかり合う、不透明なスープのような状態だった。だが宇宙が膨張するに連れて温度が下がると、物質粒子の正電荷を持つもの（陽子など）と負電荷を持つもの（電子など）が結びつき、水素原子やヘリウム原子になった。原子の間に空間が空き、光子は直進を始めた。こうして宇宙が晴れ上がった。この時に宇宙に放たれ、直進を始めた光が、その後の宇宙膨張によって波長が引き伸ばされ、宇宙マイクロ波背景放射となった。

宇宙が晴れ上がったとき、それまでの時間内で、光子が到達できないほど遠く離れていた場所どうしは相互作用できないので、それらの場所の状態が



宇宙初期の温度揺らぎ WMAPとプランクは背景放射の全天観測を行い、宇宙誕生38万年後の温度揺らぎの全天マップを作成した。上段がWMAPによるマップで、青→緑→黄→赤の順に温度が高くなる。下段はプランクによるマップで、青っぽいところは低温領域、赤っぽいところは高温領域になる。見比べるとプランクのマップの方が解像度が高いことがわかる。

同じになる必然性は何らない。ところがそうした場所どうして比べても、背景放射の温度は、わずかな揺らぎを除けば同じだった。

なぜそうしたことが起きるのか。当初はインフレーションがこの謎を解決するかに思われた。もし宇宙誕生直後にインフレーションが起き、宇宙が超光速で加速膨張していたとしたら、宇宙の最初期に相互作用が十分に可能だった狭い領域がインフレーションによって引き伸ばされ、晴れ上がり当時の宇宙の地平線をはるかに超えて広がるようになったと考えられ、背景放射があらゆる場所で同じである理由もうまく説明できる。

だが、そもそもインフレーションが始まるためには、インフレーション前の宇宙において、当時の宇宙の地平線内の隅々まで真空のエネルギーが一律でなくてはならない。つまり、一様等

方宇宙はインフレーションの結果ではなく、インフレーションが起きるための要請となる。「これは困ったことだ」と小松博士は言う。

### インフレーションで平坦に

小松博士は「インフレーションが解決する最も重要な問題は、宇宙の一樣等方性ではなく平坦性問題の方だ」と話す。私たちの宇宙空間は、なぜ曲がっておらず平坦なのか。インフレーションはそれを無理なく説明する。

インフレーションが起きる前の宇宙がどんな曲率を持ち、どんなに空間が歪んでいたとしても、インフレーションによって空間が超光速のペースで一気に引き伸ばされれば、現在、私たちが観測できる範囲の宇宙くらいなら平坦になるからだ。

**時空を総覧する** 約138億年前に宇宙、つまり私たちが存在している時空が誕生してから起きた主な出来事を示すイメージ図。インフレーションによって空間が急膨張したように描かれているが、今から数十億年前から宇宙は加速膨張していると考えられている。

インフレーションが始まりさえすれば宇宙は平坦になる。しかし先述のようにインフレーションが起こる前の宇宙の、当時の地平線内の一樣等方性が要請されているとすれば、実際にインフレーションがあったかどうか、すぐに答えは出ない。

インフレーションが起きる前の宇宙で、真空のエネルギーが場所ごとに大きく揺れ動いているとしても、ある瞬間、全体として一樣な状況が出現しさえすればインフレーションが起きるのではないかとの見方もある。しかし、計算してみると「そういう瞬間が生じる確率は非常に低い。何も無いところから偶然、僕たちの宇宙がぽっと生まれるくらいの確率だ。それでは結局ダメじゃないかということになる」。

ただしいくら確率が低くても、いっ

たん始まれば、インフレーションを起こした領域はあっという間に他の領域を凌駕する。宇宙は無限に広く、時間も無限にあると考えてもよい。だからいつかどこかでインフレーションは必ず起こる。そうならばインフレーションが起きた空間が、宇宙のほとんど全てを占めることになる。「それでいいじゃないか、と、インフレーションを支持する人はいう」。

「こうした議論は非常に面白く、話を聞いていると、インフレーション支持派と不支持派のいずれの側の意見ももっともらしく聞こえる」。だがそのこと自体が問題だと、小松博士は指摘する。インフレーション理論は極めて柔軟で、あらゆる可能性を許容してしまう。「問題は、インフレーション理論では定量的に何も計算できないということだ。実際にどれくらい確率が低いのか、どれくらいの体積がインフレーションで占められるのか、だれも計算できない」。

我々の宇宙、つまりインフレーションが終了してビッグバンが起きた後の宇宙で、どのように時間軸を設定するかについては、物理学者の間に一応の合意がある。だが今問題になっているのは、我々の宇宙の母体となった、インフレーションが起きる前の何も無い（真空のエネルギーはある）宇宙の話だ。いったいだれから見て確率が低いということになるのか。時間の軸はどこにあるのか。「真空の中を走っている時間というのは、概念としてちょっとあやふやだ。僕たちの宇宙は、母体となる宇宙の真空の中から泡のように生じてくる。泡の中の時間軸は、その周りの時間軸とはまったく違ってくる。だからインフレーション理論に問題あり、という指摘はその通りだと思う」。

インフレーション理論に異を唱える急先鋒は米プリンストン大学のスタインハート教授（Paul J. Steinhardt）らのグループだが、小松博士は懐疑的だ。

「スタインハート自身もインフレーション理論で非常に重要な仕事をしたが、最近ではインフレーション理論に批判的で、自身が提唱した別のモデルを強くプッシュしている（40ページからの記事）。ただ、そのモデルを支持しているのは彼らのグループくらいだ」。

「探査機プランクの観測結果が出てきたことで、インフレーション理論に合わない点が出てきたとスタインハートらは主張しているようだが、最もシンプルなインフレーションの理論モデルが合わないというのは、WMAPのデータからすでにわかっていたことだ。これは重要な知見だが、インフレーション理論そのものを棄却しなければならぬほどの問題なのかということ、そんなことはない」。

まだデータが足りないと小松博士は指摘する。「まずは原始重力波の検出に力を注ぐことだ。現在の原始重力波の探索は、観測装置の感度が理論予想から考えてまったく不十分だ。今後の探索で原始重力波が検出されれば、たとえ確率は低くてもインフレーションで宇宙の平坦性を説明しようということになるだろう」。

### カギを握る原始重力波

ここでいう原始重力波とは、2016年2月に、米国の重力波望遠鏡LIGOによる世界初検出が発表されて大ニュースになった重力波とは発生機構が異なる。LIGOが検出した重力波はブラックホール連星の合体の際に生じたもので、物理的には物質の加速度運動によって発生した。ブラックホール連星の合体や中性子星連星の合体では超高密度で大質量の物質が激しく動くため、大きな重力波が発生する。一方、原始重力波はインフレーションで生じたものだ。これは次のように説明される。

一般的に、電磁場や重力場などの物理学的な「場」が存在すれば、その場は常に揺らいでいる。量子揺らぎとい

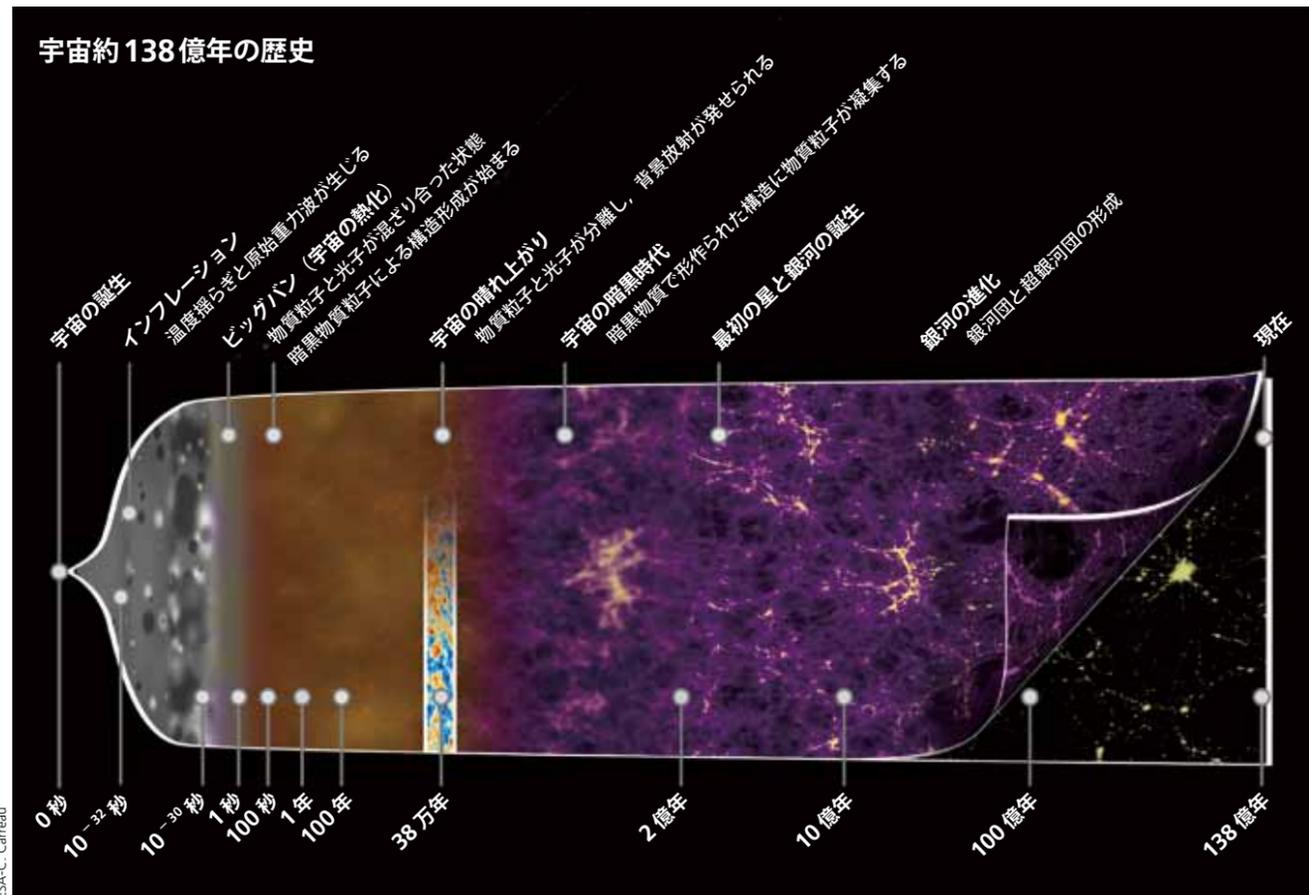
う。場の揺らぎは粒子として見ることもできるので、量子揺らぎは粒子・反粒子のペアの対生成と対消滅の繰り返しと見ることができる。量子揺らぎで生じる粒子・反粒子ペアは仮想的なものだが、インフレーションでは空間が超光速で膨張するので、量子揺らぎで対生成された粒子・反粒子ペアが超光速で引き離され、対消滅できずに双方が実体化してしまう。

インフレーションで実体化される粒子として重要なのは2つだ。1つはインフレーションを生じさせる場（インフラトン場）の粒子で「インフラトン」という。インフラトンは光子などと同様、電荷を持たない粒子。粒子と反粒子は同じものだと考えられている。

インフレーションによって実体化したインフラトンをインフラトン場の揺らぎ（波）として見ると、インフレーションによって、その波長が引き伸ばされていく。インフレーション中も量子揺らぎは生じているので、インフレーションの初期段階で実体化したインフラトンの波長は非常に長くなり、逆にインフレーションの最終段階で実体化したインフラトンの波長は短くなる。

そしてインフレーションが終了して宇宙が熱化する際、実体化したインフラトン場の揺らぎは、様々なスケールの温度揺らぎとして宇宙に刻印される。WMAPやプランクが背景放射の全天観測から求めた宇宙誕生38万年後の温度分布は、インフレーションによって実体化したインフラトン場の量子揺らぎがおおもとになっていると考えられている。温度揺らぎによって密度揺らぎが生じ、密度揺らぎが種となって、銀河団や超銀河団からなる宇宙の大規模構造が生じたとみられている。宇宙の大規模構造がなぜ生じたのかは大きな謎となっているが、インフレーションがその答えとなる。

インフレーションで実体化するもう1つの粒子は重力子（グラビトン）だ。





小松英一郎（こまつ・えいいちろう）

独マックス・プランク宇宙物理学研究所長。1974年兵庫県出身。東北大学大学院博士課程在籍時からプリンストン大学で研究、2001年プリンストン大学のポスドク研究員としてWMAPプロジェクトに参画、データ解析で中心的役割を果たす。2003年からテキサス大学オースティン校に移り、2010年同大学教授、2012年から現職。東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構（IPMU）の客員上級科学研究員も兼務。一般向けの著書（共著）に『宇宙の始まり、そして終わり』（日経プレミアシリーズ283）がある。

グラビトンも粒子と反粒子は同じものだと考えられている。検出されたことはないが理論的に存在が予言されており、重力場（時空）の揺らぎ、つまり重力波として見る事ができる。インフレーションが終了した時点では、実体化したインフラトン場の揺らぎと同様、様々な波長の重力波が存在したはずで、これが原始重力波だ。

原始重力波の中には、インフレーションとその後の宇宙の減速膨張によって、波長が100億光年以上もの超巨大サイズに引き伸ばされたものが含まれている。それらは現在に至るまで宇宙を伝わり、地球にも届いているはずだ。

インフレーションが起きたとすれば、原始重力波は必然的に生じる。LIGOの感度では到底検出できないが、背景放射の偏光分布を解析すれば、その存在がわかるとみられている。この偏光とは、光（電磁波）の振動方向の偏りのことだ。原始重力波が宇宙を伝わっていた場合、背景放射の全天マップには「Bモード偏光」という特有の偏光パターンが刻み込まれると考えられる

（ただし後述のようにBモード偏光のノイズもあるので、切り分けが重要になる）。また原始重力波がどれほどの強さになるのかはインフレーションの理論モデルによってかなり異なる。裏返して言えば、原始重力波を検出してそのスペクトルがわかれば、インフレーションの証拠となるだけでなく、その理論モデルを絞り込むことができる。

逆にもし原始重力波が見つからなかったら「何か特異なインフレーションが起きたか、あるいはインフレーションではない初期宇宙のシナリオを考えなければいけないかもしれない」。

## 2つのパラメーター

原始重力波が検出されてインフレーションが確認された場合、理論モデルを絞り込むカギとなるパラメーターは2つある。1つはインフラトン場の揺らぎの波長と振幅の大きさの相関関係を表すパラメーターで、「 $n_s$ 」と表す。振幅の大きさが波長によって変わらない場合  $n_s = 1$  だ。波長が小さくなるにつれて振幅も小さくなるなら  $n_s < 1$ 、

逆に振幅が大きくなるなら  $n_s > 1$  だ。

インフレーションの理論モデルのほとんどは、 $n_s$ が1よりやや小さい値になることを予言する。インフレーションが終わりに近づくと、加速膨張のペースが落ちると考えるのが自然だ。その場合、量子揺らぎによって実体化するインフラトンは相対的に少なくなり、波として見ると振幅が小さくなるため、 $n_s$ が1よりやや小さくなる。

小松博士らはWMAPによる背景放射の全天観測から得られた温度分布のマップと他の宇宙論的観測のデータを合わせて解析、 $n_s = 0.96$ という値をはじき出した。インフレーション理論の多くのモデルと一致し、インフレーションが起きたことを強く支持する値だ。「これはインフレーション理論にとってすごく重要なことだ。WMAPのときはほかの観測データと合わせて、この結論に至ったが、プランクのデータが出て、WMAPのデータと合わせることで初めて背景放射の観測だけから言えるようになった」。

もう1つのパラメーターは、インフレーションによって実体化したインフラトン場の量子揺らぎの大きさと、重力場の量子揺らぎの大きさの比だ。「テンソル・スカラー比」といい、 $r$ で表す（テンソルは重力場、スカラーはインフラトン場の特性を表す用語）。両方の量子揺らぎが同じ大きさの場合、 $r = 1$ となり、インフラトン場の揺らぎより重力場の揺らぎが小さい場合は  $r < 1$ 、逆の場合は  $r > 1$ となる。ほぼすべてのインフレーションのモデルは  $r < 1$ を予言する。

問題はどれほど  $r$ が小さくなるかだ。数多くあるインフレーションの理論モデルの違いは、インフラトン場のポテンシャルの形の違いだ。通常、場のエネルギーは場の値によって変わり、場の値を横軸、その場が持つエネルギーを縦軸として描いたグラフをポテンシャルと呼ぶ。例えば重力場の場合、場

の値は距離（位置）、ポテンシャルの値は位置エネルギーになる。ここでインフラトン場は宇宙の全体的な状態を表す物理量なので、場の値は宇宙のエネルギーに、ポテンシャルの値は宇宙のエネルギー密度になる点に注意が必要だ。インフラトン場のポテンシャルの形はおわん形になり、宇宙の状態は、そのおわんの中を動くボールとして表現できる（右下のグラフ）。

宇宙の誕生時、ボールはインフラトン場のおわんの斜面の上の方にある。ボールが転がり落ちるにつれてエネルギーが解放される。おわんの斜面が緩やかだったり、ボールの転がり方がゆっくりだったりした場合は、一定時間、場のエネルギーがほぼ一定になる。すると宇宙ではインフラトン場のエネルギーが支配的になり、その斥力によってインフレーションが始まる。ボールは最終的にはおわんの底に到着し、ゆらゆらと揺れる。インフレーションが終了し、インフラトン場のエネルギーが熱エネルギーに変換されてビッグバンが起きた状態だ。

ポテンシャルの形は理論モデルによって異なり、それによって2つのパラメーターの取り得る領域が異なる。小松博士らはWMAPの観測結果と他の宇宙論的観測のデータを総合して  $n_s$ と  $r$ が取り得る範囲を求め、インフレーションの理論モデルを絞り込んだ。

## 原点となった理論モデル

「インフラトン場のポテンシャルは、インフレーションのエネルギー（真空のエネルギー）がインフレーション中にどう変わるかを示す。ポテンシャルの谷の形（おわんの形）を数式で記述すると、インフラトン場の値を  $\phi$  とすれば、ポテンシャルは  $\phi$  の2乗で表せる。4乗でも6乗などでもよい（2の倍数ならグラフはおわん形になり、数が大きくなるほど傾きが急になる）。 $\phi$  の  $n$  乗（一般的に  $n$  は偶数）という

のが1つの候補になる」（45ページのグラフの青で描いたカーブが  $\phi$  の  $n$  乗のグラフのイメージ）

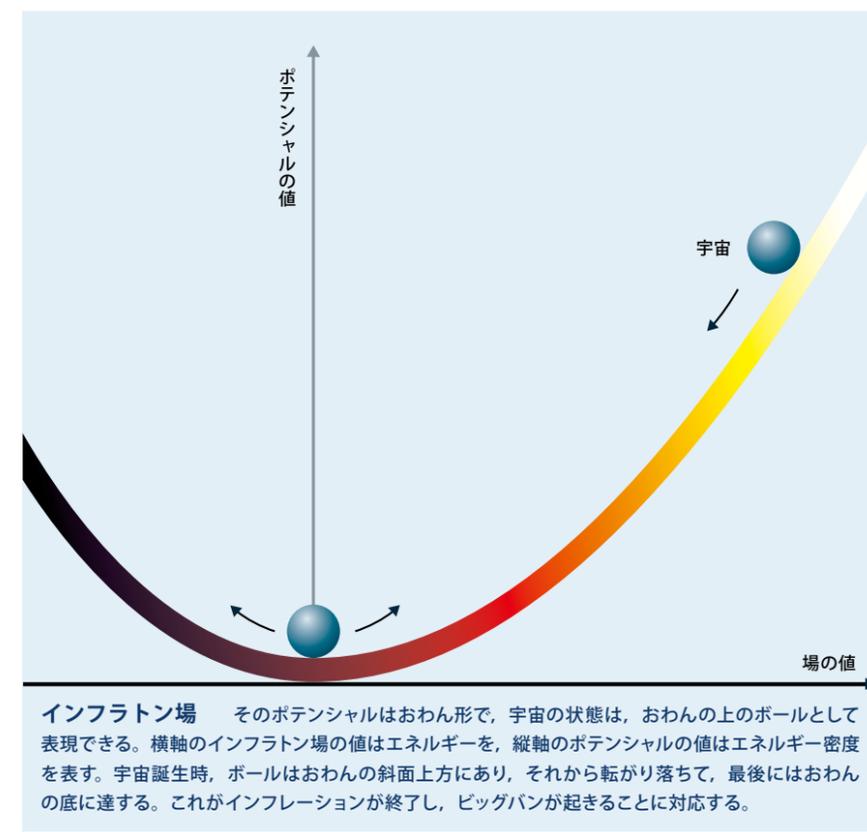
「私たちWMAPの研究グループは、2007年に発表した論文で、 $n = 4$ の理論モデルは観測結果に合わないとして棄却してしまった。当時、 $n = 4$ というのは非常にナチュラルなモデルだと思われていた。それが棄却されたので、今度は『 $n = 2$ だろうね』という話になった。 $n = 2$ 、つまり場のエネルギーは場の値の2乗で表せるというのは非常にシンプルなモデルで、多くの研究者の支持を集めていた」

WMAPの研究グループは2007年以降も背景放射の観測を続け、2013年に発表した論文で、 $n = 2$ のモデルも棄却されることを明らかにした。これによって、それまで有力視されていたインフレーションの理論モデルの多くが棄却される事態となった。

「 $n = 2$ で駄目だとなると、もう1つパラメーターが必要なのではないか。

だとすると、かなり複雑になるので『インフレーション理論なんてもういやだ』というような声も出てきた」。小松博士は、当時の雰囲気をご振り返る。「一方で、非常に多数のインフレーションモデルを提唱されている横山先生（東京大学の横山順一教授。40ページからの記事の監修者。後述するスタロビンスキー博士とは長年の共同研究者でもある）などは、『シンプルなモデルが棄却されただけで、大勢に影響はない』という立場だった。僕も同じだった」。

当時、小松博士はWMAPのリーダーであるジョンズ・ホプキンス大学のベネット教授（Charles L. Bennett）から「観測結果に合うモデルはないのか」と問われた。「そういえば、思い出したのがソ連科学アカデミー（当時、現ロシア科学アカデミー）のランダウ理論物理学研究所のスタロビンスキー博士（Alekssei A. Starobinsky）が1980年に発表したモデルだった」。



スタロビンスキーモデルでは、インフラトン場のポテンシャルを $\phi$ の $n$ 乗で表される単純なおわんの形ではなく、指数関数を用いて表している。場の値がゼロの付近ではおわんの形に似ているが、値が大きくなるにつれて場のエネルギーの増え方が頭打ちになる。このためポテンシャルが上に凸のカーブを描き、スプー皿のように縁ができる。パラメーターは1つで、これも非常にシンプルなモデルといえる(45ページのグラフの赤のカーブがスタロビンスキーのポテンシャルのイメージ)。

小松博士らWMAPの研究チームは、観測の解析結果をまとめた2013年の論文で、わざわざ独立のセクションを設けスタロビンスキーの理論モデルについて詳しく解説した。これがきっかけでモデルは再び脚光を浴び、スタロビンスキー博士はその後、グルーバー宇宙論賞やカブリ宇宙物理学賞など有力な国際賞を次々と受賞している。

スタビロンスキーモデルは、インフレーション理論の原点となったモデルだ。インフレーション理論のパイオニアとして世界的に知られるのは、東京大学名誉教授の佐藤勝彦博士と、米マサチューセッツ工科大学のグース博士(Alan H. Guth)だ。両博士は素粒子論の標準モデルの発展版である大統一理論で予言される空間の相転移が、宇宙誕生直後の超高エネルギー状態で起きるとインフレーションが生じることを理論的に発見し、それぞれ1981年に主要論文を発表した。

一方、スタロビンスキー博士は、佐藤・グース両博士の論文が出る前年の1980年に発表した論文で、一般相対論を超高エネルギー状態に適用しようとする量子論的な補正が必要になると指摘。その補正をするとインフレーションが起きることを理論的に示した。この時に博士が示したインフラトン場のポテンシャルが、指数関数で表されるスプー皿型のモデルだったのだ。

佐藤・グース両博士がそれぞれ提唱したインフレーションのモデルは、後にインフレーションをうまく終わらせることができないことがわかり、その後、米スタンフォード大学のリンデ教授(Andrei D. Linde)ら、多くの研究者が様々なモデルを提唱した。しかし精密な宇宙論的観測を経て生き残ったモデルの1つは結局、インフレーション理論の原点となったスタビロンスキーモデルだったわけだ。

「佐藤・グースはインフレーションによって宇宙の平坦性問題が解決できると指摘した。その意義は非常に大きい。スタロビンスキーは平坦性については何も言っていない。一方、原始重力波の存在を最初に言い出したのはスタロビンスキーで、しかも彼自身のインフレーションの論文が出る前年の1979年に論文発表している。原始重力波が観測で発見された場合、理論研究のパイオニアとして第一に名前が挙げられるのはスタロビンスキーだ」

### 幻となった原始重力波の検出

スタロビンスキーモデルが予言するテンソル・スカラー比 $r$ の値は0.003。重力場の揺らぎは、インフラトン場の揺らぎに対して非常に小さいということになる。小松博士らがスタロビンスキーモデルに言及した論文を発表した数カ月後、プランクの観測結果の最初の論文が出て、 $r$ は0.11より小さいと報告された。スタビロンスキーモデルとの間に矛盾は生じない。

$r$ が非常に小さいモデルは、超弦理論の研究者からも歓迎された。超弦理論は現代物理学の柱となる量子力学と一般相対論を統合する有力理論で、インフレーションへの適用も長らく研究されてきた。この超弦理論の進展を受けて提唱された新たなインフレーションのモデルでは、 $r$ の値は非常に小さく、最大でも0.001程度とされていた。超弦理論ではプランクエネルギーと

呼ばれる想像を絶する超高エネルギー状態を扱うが、 $r$ が0.001を超えるような大きな値だとすると、インフレーション時のインフラトン場のエネルギーの変化が、プランクエネルギーさえ大幅に超え、超弦理論では手に負えなくなるのだ。

「もし $r$ が0.001レベルより大きなところで原始重力波が見えてしまったら、一気に『あれ? 大丈夫なの超弦理論?』ということになってしまう。だから $r$ がものすごく小さな値になるであろうことは、専門家の中では一般的に言われていた」

かつて超弦理論でインフレーションが起きるモデルを作るのは非常に難しかった。超弦理論では宇宙定数は負の値になり、正の値を実現できない。宇宙定数は一般相対論の方程式の中に出てくる宇宙項の係数で、正の値なら空間に斥力が生じ、インフレーションが起きるが、逆に負だと引力になり、インフレーションが起きない。だが「何年前かに(超弦理論から)正の値を取り得る論文が出て、すごいインパクトがあった」。それだけに超弦理論で扱える $r$ の値に近いレベルを予言するスタロビンスキーモデルは注目された。

ところが翌2014年3月、そうした流れを一気にひっくり返すニュースが世界に発信された。南極点の米アムンゼン・スコット基地にあるBICEP(バイセップ)2望遠鏡が、天球のごく一部の領域について背景放射の偏光分布を観測した結果、原始重力波に特有のBモード偏光のシグナルを捉えたというのだ(右ページの写真と図。中島林彦「インフレーションの証拠を観測」日経サイエンス2014年6月号)。小松博士を含め多くのインフレーション理論の研究者が驚いたのは、観測された原始重力波の $r$ の値が0.2と非常に大きかったことだ。

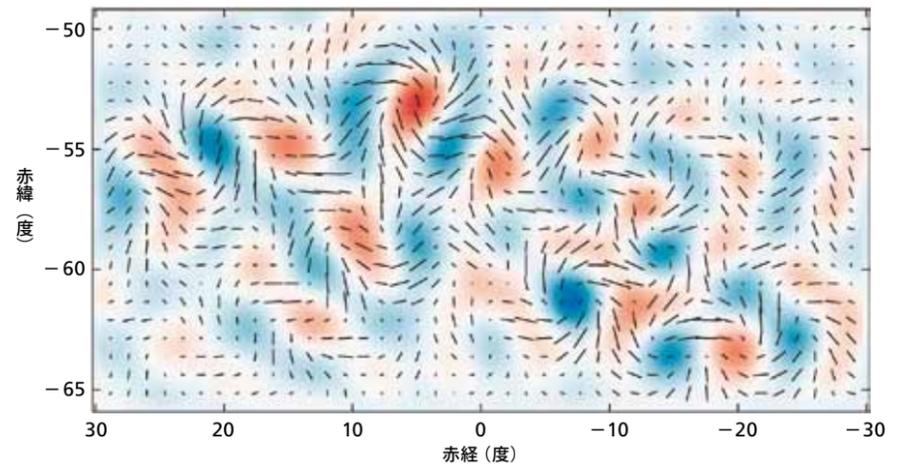
これはWMAPやプランクの結果とまったく相容れない。BICEP2の発表

を聞いた小松博士は「高熱を発して寝込んでしまった」という。「BICEP2の結果が信じられなかった。背景放射の1つの周波数帯の観測でBモード偏光が見えたというのは完全にナンセンスだった」。背景放射は幅広い周波数帯の電磁波(マイクロ波)から構成され、原始重力波のBモード偏光のシグナルをノイズから切り分けるには、複数の周波数帯で観測を行う必要があるが、BICEP2ではそうした測定はしていなかった。「でも結果は本当かもしれない。だとしたらどう解釈すればいいのか。感情の激しい起伏に身体がついて行けなくなっていた」と振り返る。

一方、BICEP2の結果に喜んだ研究者もいた。この観測が正しければ、インフラトン場のポテンシャルのグラフは $\phi$ の2乗の形になる。超弦理論の研究者にとっては残念な結果だが、スタロビンスキー以外の理論モデルの多くを支持する研究者には朗報だった。

「BICEP2のインパクトはすごいもので、超弦理論の研究者もがんばってなんとかしようという雰囲気になった」。実は超弦理論でも巧妙な工夫を凝らせば $r$ が大きな値でもインフレーションを起こすことができる。スタンフォード大学のシルバースタイン博士(Eva Silverstein)が作ったモデルだ。「だからシルバースタインはBICEP2の結果が出たときは喜んでいて。僕が『いやあ、これ(BICEP2の結果)は絶対違うよ』と言うと『何でお前はそんなことを言うんだ』と怒ったものだ」。

結局、BICEP2の結果は探査機プランクの観測データによって否定された。原始重力波は背景放射の偏光分布にBモード偏光という特有のパターンを刻み込むが、実は天の川銀河内の塵(星間塵)によっても背景放射にBモード偏光が生じる。プランクは背景放射を複数の周波数帯で観測し、星間塵によるBモード偏光の状況を詳しく調べた。その結果、星間塵のために生じるBモ



南極点で観測 BICEP2望遠鏡は南極点の米アムンゼン・スコット基地にある。上段の写真、画面手前の建物屋上にあるパラボラのようなものは、地上付近からの光が望遠鏡に入ってこないためのシールドで、この中にBICEP2が置かれている。BICEP2は南天の“サザンホール”と呼ばれる暗い領域について、背景放射に由来する波長約2mmの電波の偏光を観測、その偏光状況を天球上に棒線の向きとして記した偏光マップが作られた(下段の図)。縦軸は天球の赤緯、横軸は赤経。マップに表れている渦巻模様がBモード偏光のパターン。赤い領域と青い領域は、それぞれ時計回りと反時計回りの渦巻が強く表れているところ。その後、プランクのデータからこうしたBモード偏光は星間塵によるものだとわかった。

ード偏光のノイズは、BICEP2グループの想定よりもはるかに大きいことがわかった。原始重力波のBモード偏光のシグナルを星間塵ノイズから切り分けられないことがはっきりし、一連の騒ぎは収束した(中島林彦「幻だった『原始重力波の発見』」日経サイエンス2015年4月号NEWS SCAN)。

### ライトバード計画

原始重力波の探索は振り出しに戻り、世界初検出を目指して日米欧がしのぎを削る状態が続くことになった。プラ

ンクは背景放射の温度分布を非常に詳しく調べたが、偏光分布については感度が不十分で、ごく弱いとみられる原始重力波を検出できない。各国のグループは感度を1桁上げ、 $r$ が0.01レベルの原始重力波の検出を目指している。背景放射は大気中の水蒸気に吸収されるので、観測には通年で乾燥している場所が適している。そのため各国の観測拠点は、BICEP2などがある南極と、南米チリの標高5000mを超えるアタカマ高地に集まっている。気球を使った高空での観測も行われている。

## 宇宙背景放射の全天観測の歩み

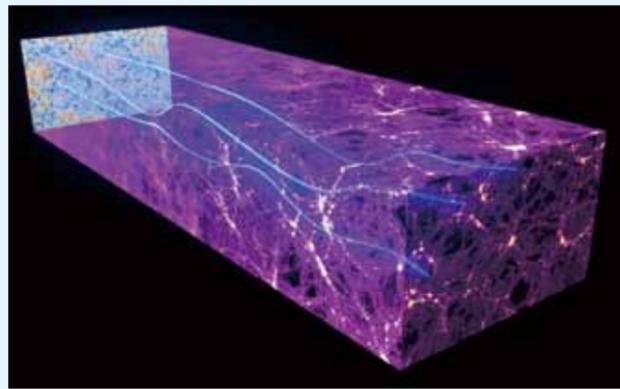
宇宙マイクロ波背景放射はNASAが打ち上げたCOBEとWMAP、ESAが打ち上げたプランクという三代の探査機によって行われ、段階的に解像度が上がってきた。WMAPに先立つ第1世代のCOBEは宇宙のビッグバンを検証、宇宙の大規模構造の種となる背景放射の温度揺らぎを発見したことで、リーダー2人にノーベル賞がもたらされた。「COBEの結果はあれほど素晴らしかったのに、WMAPが結果を出すまでノーベル賞は授与されなかった。それは誰もCOBEの結果を確認できなかったからだ。WMAPが追試して初めてノーベル賞が授与された」と小松博士は語る。宇宙の年齢や宇宙を構成する主要な要素（物質と暗黒物質、暗黒エネルギー。詳しくは本文参照）の割合、インフレーションのパラメーターについてWMAPが出した結果は、プランクによって追試され確度が上がった。

プランクの成果はWMAPの検証という側面が強調されがちだが、「プランクによって初めて成し遂げられた重要な宇宙論的観測もいくつもある。それらは背景放射が発せられた宇宙初期よりも現在に近い時刻の宇宙の物理に関するもので、素晴らしい結果だ」。1つは重力レンズ効果（物質と暗黒物質の重力によって光の進行ルートが歪む効果）を全天にわたって観測し、全宇宙の物質（暗黒物質を含む）分布マップを作ったこと。背景放射は地球に届くまでに重力レンズ効果を受けるので（右はそのイメージ）、天球上のそれぞれの場所によって2点相関関数（背景放射の温度分布から得られる）の値は全天平均から微妙にずれる。そのずれから重力レンズ効果の情報が得られ、全宇宙の物質分布がわかった。「背景放射が発せられた太古の宇宙と、138億年後の現在にいる僕たちの間の物質分布が全部見えたことになる。プランクによって背景放射の全天マップの解

像度が大幅に上がったことで初めて成し遂げられた」。

プランクのもう1つの成果は、全宇宙の高温ガスの分布を初めて測定したことだ。熱いガスに背景放射の光子が突っ込んでいくと、散乱される。そして散乱されると、ガスを構成する電子から背景放射の光子にエネルギーが流れる結果、背景放射のスペクトルが黒体輻射のスペクトルからずれてくる（スニャーエフ・ゼルドビッチ効果）。そこから温度が1億度にも達するような超高温のガスの存在がわかる。「背景放射の高周波成分がプランクによって観測され、スニャーエフ・ゼルドビッチ効果が高い精度で観測できるようになった結果だ」。

全宇宙の物質分布とガス分布の関係は宇宙の進化を考える上で非常に重要だ。「プランクの結果は、宇宙がインフレーションによって作られ、 $\Lambda$ -CDM（ラムダ・コールド・ダークマター）モデルで記述できることを明確に示していた」。 $\Lambda$ -CDMモデルとは宇宙項（暗黒エネルギー）と、冷たくて重い暗黒物質粒子を宇宙の構成要素として想定したモデルで、現在、多くの研究者が支持している。「このパラダイムは、プランクの観測によってさらに強固なものとなった」。



BICEP2の研究グループも、感度をさらに高めたBICEP3で雪辱を期している。高エネルギー加速器研究機構（KEK）を中心とする日本グループはアタカマ高地でのPOLARBEARの国際共同観測に参画している。

だが、こうした地上からの観測は原始重力波の検出感度が不十分との見方が強い。WMAPやプランクと同様、第2ラグランジュ点に置いた探査機による背景放射の全天観測が決定打になりそうだ。POLARBEAR日本グループのリーダーでもあるKEKの羽澄昌史教授が主導する探査機ライトバード（LiteBIRD）の計画は、欧米に先行

する形で準備が進んでいる。順調に進めば2020年代中盤の打ち上げ予定だ。

小松博士もライトバードの研究メンバーだ。東北大学大学院博士課程に在籍していた1999年秋、WMAPの中心メンバーであるプリンストン大学のスパーゲル教授（David N. Spergel）のグループに加わったが、すでにWMAPは打ち上げ時期を間近にしており、プロジェクトの立ち上げには関わっていない。

それだけにライトバード計画に初期段階から加わって仕事をするのは「非常に楽しい」と顔をほころばせる。「原始重力波が見つかったら科学的なイン

パクトはすごい。世界がどんな大騒ぎになるかは、BICEP2の際にもう見ている。リハーサルは終わっている」。

ライトバードは $r$ が0.001レベルの原始重力波を検出できる性能を備える。プランクの約100倍の感度だ。スタロピンスキーモデルが予言する原始重力波は $r$ が0.003なので、もし正しければ検知できる。また $r$ が0.001レベルの原始重力波であればインフレーションを超弦理論で十分、説明できる可能性が出てくる。「だから少なくとも $r$ が0.001レベルの原始重力波を観測できるところまで感度を引き上げたい。それがライトバードの研究グループの

モチベーションになっている」と話す。

このレベルを目標に設定しているのには、現実的な理由もある。原始重力波の $r$ が0.001より小さいと、天の川銀河の塵によって生じる偏光のノイズとの切り分けができなくなってしまう。人類が恒星間飛行を実現し、探査機を数万年光先に飛ばして天の川銀河の外に飛び出さない限り、どれだけがんばっても到達できる感度は $r$ が0.001レベルまでなのだ。

「もっとも僕自身は、それより1桁大きい $r$ が0.01あたりのところで原始重力波が見つかるのではないかと勝手に思っている。その場合、超弦理論で説明するのはかなり難しくなるが、そっちの方が面白いじゃないですか」。もし $r$ が0.01を超えており、超弦理論では扱えないほど大きかったら、超弦理論の研究者はそうした現実合うモデルを作るだろうと小松博士はみる。「今はそのモチベーションが足りないだけだ」。

仮に $r$ がそこまで大きければ、現在進みつつある地上観測や気球観測で近い将来、原始重力波が見えてくる可能性が高い。それでもライトバード計画の意義は薄れない。地上観測で片鱗を捉えた原始重力波を、宇宙でより詳細に観測できれば、原始重力波の存在を確証するのみならず、その発生メカニズムに迫ることができると考えられるからだ。「もっとも、もし $r$ が0.01レベルで見える事態となれば、米国はすぐに探査機打ち上げに向けて動くだろう。状況が不透明な今だからこそ、日本がチャレンジする意義がある」と力を込める。

### 暗黒エネルギーを探る

原始重力波のBモード偏光が発見されたら、次は何をするのか。「まずは観測された原始重力波が量子揺らぎから来たものであることを明示したい。どのように確証するかは考え中だ」。

ではその次のステップは？と聞くと「インフレーションはいったいどうやって起こったのかという問いの答えを求めよう」と答えた。

インフラトン場は、インフレーションを起こすものとして導入され、万物に質量をもたらすヒッグス場に似た特性を持つ「スカラー場」と考えられている。このインフラトン場と密接なつながりがあるのが、暗黒エネルギーだ。

宇宙は約138億年前に誕生した直後、インフレーションによって超光速で加速膨張した。それが終わると、インフラトン場のエネルギー（真空のエネルギー）が熱エネルギーに変わってビッグバンが起き、減速膨張に移行した。膨張速度が減速するのは、宇宙が内包する物質による重力がブレーキとなっているからだ。

かつてはインフレーションが終了して現在に至るまで、重力の作用による減速膨張が続いていると考えられていた。ところが1990年代後半に行われた超新星の宇宙論的観測から、宇宙は数十億年前、減速膨張から再び加速膨張に転じたことがわかった。この加速膨張はインフラトン場のエネルギーに似た性質を持つ真空のエネルギーによって生じていると考えられている。それが「暗黒エネルギー」だ。

小松博士らはWMAPの観測から、宇宙に占める暗黒エネルギーの割合を明らかにした（その値はプランクの観測で微修正された）。宇宙の主要な要素は星やガスを形作る普通の物質と、普通の物質とは重力を介してのみ相互作用する正体不明の暗黒物質、そして暗黒エネルギーの3つ。WMAPとプランクの観測によると、宇宙が持つ全エネルギーに占めるそれらの割合は、普通の物質は約5%、暗黒物質はその約5倍の約27%、暗黒エネルギーは実に約68%と全体の約7割を占める。

暗黒物質と暗黒エネルギーの正体解明は、物理学と天文学における最重要

の課題だ。暗黒エネルギーの特性がわかれば、インフレーションを起こす真空のエネルギーを解明する大きな手がかりになる。暗黒エネルギーの特性を考える上で重要なのは、数十億年前に始まった加速膨張のペースが一定なのか、それとも時間がたつにつれて変化しているのかという点だ。膨張ペースが一定であれば、暗黒エネルギーはアインシュタイン（Albert Einstein）が一般相対論に導入し、その後撤回された「宇宙定数」に近いものになる。

現在、日米欧の研究グループが、様々な宇宙論的観測によって宇宙の加速膨張のペースの時間変化を探っている。小松博士がマックス・プランク宇宙物理学研究所長に就く前に立ち上げた米テキサス大学オースティン校テキサス宇宙論センターの宇宙論的観測プロジェクト、HETDEX計画もその1つだ。同大学のマクドナルド天文台（テキサス州）にある口径約10mのホビー・エバリー望遠鏡を用いて、宇宙の膨張速度の時間変化を探っている。

「まさに今、データを取っているとところだ。宇宙年齢でいうと比較的最近のところを調べている研究グループは多いが、それよりも少し古い時代の宇宙を調べようとしている」と小松博士は語る。暗黒エネルギーの宇宙定数説を支持する研究者が多いが、「私たちは宇宙定数説を棄却したいというのがモチベーションになっている」。

宇宙定数でないとしたら、現在の宇宙の加速膨張をもたらしている暗黒エネルギーの場合は、インフラトン場と同じようなスカラー場である可能性がある。その正体を突き止めることは、かつて宇宙の急激な加速膨張をもたらしたインフラトン場を解明することにつながるだろう。

日米さらにはロシアの研究者によって提唱されたインフレーション理論が、観測によって検証される日が近づいている。