

加速膨張宇宙の発見と展開

広島大学大学院理学研究科准教授 山本 一博

1. はじめに

2011年のノーベル物理学賞は「遠方超新星の観測による加速膨張宇宙の発見」という功績により、米ロレーンス・パークレー国立研究所のサウル・パールムッター (Saul Perlmutter) 博士、オーストラリア国立大学のブライアン・シュミット (Brian P. Schmidt) 博士、ジョンズ・ホプキンス大学のアダム・リース (Adam G. Riess) 博士に贈られました¹⁾。パールムッター博士は、いち早く Ia 型超新星の重要性に着目して Supernova Cosmology Project を主導し、1992年には遠方の Ia 型超新星の検出に成功しました。一方、シュミット博士はこの成功に刺激され、High-z Supernova Search Team を立ち上げて独立に観測を始めました。そして1998年に、二つのグループは独立な観測結果にもとづいて、宇宙が加速膨張しているという結論を報告しました。この結論は、以下に述べるように物理学の基礎的な問題に大きなインパクトを与えるもので、その後の宇宙論の研究にも多大な影響を与えています。宇宙が加速膨張しているという発見がなぜ大きなインパクトをもつのでしょうか。この辺りを中心に解説します。

2. 宇宙の膨張率を測定する

そもそも宇宙が膨張しているということを実感することは不可能に近いと思いますが、代わりに風船の表面に住んでいる2次元生物をイメージしてください。風船が一定の速さで膨らむとき、表面のある点から別の離れた点を見ると、そこまでの距離に比例した速さで遠ざかっていくように見えるはずですが、1929年にハッブル (Edwin P. Hubble) は、多くの銀河が我々の銀河から遠ざかっており、その速さが銀河までの距離に比例していることを示して、膨張する宇宙を発見しました。

さて、ここで問題にしたいのは宇宙がどのような速さで膨張してきたかです。それを測定するには、別な銀河までの「距離」と、その銀河が遠ざかる「速度」の二つを独立に測定する必要があります。これ

ら二つは Ia 型超新星の「みかけの明るさ」と光の「赤方偏移」とよばれる二つの量により測定することができます。

暗い夜に明かりが何か見えたとき、もし光源の真の明るさを知っていれば、そこまでの距離はみかけの明るさから推定できます。Ia 型超新星の真の明るさは 10^{34} ワット程度で、100 ワットの電球約 10^{32} 個分に相当します。Ia 型超新星の起源については議論のあるところなのですが、真の明るさがほぼ一定であることが分かっています。すると、みかけの明るさから距離が推定できます。このような天体を標準光源と呼びます。

一方で赤方偏移とは、遠方天体からの光の波長(振動数)が長く(小さく)なる現象です。これは遠方天体が遠ざかっているための光のドップラー効果として解釈することができます。そう解釈すると、音のドップラー効果で音源の速度を予想するのと似ていますが、正確には宇宙膨張による効果として理解する必要があります。

遠方天体までの「距離」と遠ざかる「速度」を測定すると宇宙の膨張率が分かります。また、光の速度は有限なので、遠方の天体は過去の天体でもあります。遠方天体の「距離」と遠ざかる「速度」から過去の宇宙の膨張率も分かるので、膨張率の時間変化、つまり「膨張の加速度」も分かることとなります。パールムッター博士は、効率良く Ia 型超新星を発見する方法を確立しました。それを用いて、宇宙膨張の加速度が正であること、つまり加速膨張宇宙を発見したのです。

3. 加速膨張とその発見の意味

加速膨張宇宙の発見は宇宙定数 Λ の発見とも呼ばれることがあります。宇宙定数 Λ というのは、アインシュタインが自ら構築した一般相対性理論に持ち込んだ定数のことです。重力とは時空の曲がりであり、時空の曲がりとは物質の分布によって決まるというのが、一般相対性理論の真髄です。一般相対性理論はアインシュタイン方程式によって記述され、

時空の曲がりを決定するための方程式です。宇宙の膨張を決定しているのもアインシュタイン方程式です。というと大変難しいように聞こえるかもしれませんが、宇宙の膨張もニュートン重力の延長線上にあるのです。アインシュタイン方程式を膨張宇宙模型に応用した時に出てくる方程式を下に書きます。

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \sum_i \left(\rho_i + \frac{3P_i}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3} \dots (1)$$

ここで a は宇宙の大きさを表す量でスケール因子と呼ばれ、宇宙の2点間の距離を表していると考えていただいて構いません。 \ddot{a} はその時間に関する2階微分なので、左辺は膨張の加速度に比例します。右辺の G は万有引力定数、 c は光の速度、 ρ はエネルギー密度、 P は圧力です。エネルギー密度と圧力に添え字とその和がついているのは、宇宙に存在する成分について全て和をとるという意味です。つまり、宇宙に存在するエネルギー成分が宇宙の膨張を決定しているのです。

圧力の起源は運動エネルギーですが、運動エネルギーも重力源として作用するということが、ここに圧力が現れている所以です。圧力と宇宙定数が無い場合を考えてみます。この時、上の方程式は次のように書き直すことができます。

$$\ddot{a} = -\frac{GM}{a^2} \quad \text{ただし、} \quad M = \frac{4\pi a^3}{3} \sum_i \rho_i$$

a は宇宙の2点間の距離と見なせるので、 M は半径 a 内の球の全質量になります。左の式の左辺は半径 a の地点にある単位質量をもった粒子の加速度を表し、右辺はそれにはたらく重力を表します。左の式は、ニュートン重力による質点の運動方程式そのものなのです。ここで、重力は引力なので、右辺にマイナス符号がついていることに注意しましょう。私たちの知っている物質のエネルギー密度と圧力は正ですから、宇宙定数がない場合には膨張の加速度は負、つまり宇宙は減速膨張することが重力の自然な予想なのです。

しかし、パールムッター博士たちは $\ddot{a} > 0$ であることを発見しました。この不思議さをたとえると、地上でボールを投げ上げると、ボールは減速して落ちてくることが予想されますが、実際に投げ上げたボールが落ちてくることなく、どんどん加速して遠ざかっていったということになります。もちろんこんなことが起こるのは100億光年スケールの宇宙で

の話ですが、100億光年スケールの宇宙は斥力によって支配されているという言い方もできます。

これを説明する一つの方法は、正の宇宙定数 Λ を導入することです。 Λ はアインシュタイン方程式を構築する際に現れる積分定数のようなもので、アインシュタイン自身が1917年に自ら方程式を修正し、導入したものです。正の宇宙定数の役割として斥力を生むことは先に述べましたが、アインシュタインが Λ を付け加えた理由は、以下のようなものでした。アインシュタイン自身は宇宙は始まりも進化もなく、永遠に変化しないと信じており、そのような宇宙模型を作るために、方程式に Λ を付け加えたのでした。 Λ がないと、膨張または収縮する宇宙模型しか作れませんが、 Λ を導入すれば、その斥力と物質の作る引力とがつりあって変化のない宇宙模型が作られます。この模型はアインシュタイン宇宙と呼ばれています。しかしその後、ハッブルが膨張宇宙を発見したとき、アインシュタインは「宇宙定数は人生最大の失敗」と語ったと言われています。ところが現在、宇宙定数は加速膨張宇宙を説明する最も標準的な模型となっています。アインシュタインが生きていたら、『失敗は成功のもと』と言ったかもしれません。

加速膨張が宇宙定数によるものとした場合、その値も精度良く決定されています。この決定に重要な役割を果たしているのは、3K宇宙背景放射の温度揺らぎです。

初期の宇宙は陽子と電子がバラバラのプラズマ状態で、それが光子と相互作用している時代がありました。その後、宇宙は膨張と共に冷えて、陽子と電子から水素原子を形成します。すると、光子は電子と相互作用せず直進できるようになり、現在の3K宇宙背景放射として観測されます。これを宇宙の晴れ上がりと呼び、宇宙の大きさが今より約1000分の1の時代に起こりました。3K宇宙背景放射の方向に依存した温度揺らぎを発見したマザー (J. C. Mather) とスムート (G. F. Smoot) に2006年のノーベル物理学賞が授与されています。その後の3K宇宙背景放射の温度揺らぎの精密測定から宇宙を満たすエネルギー成分の組成比もはっきりと分かるようになってきています²⁾。

3K宇宙背景放射の温度揺らぎは、宇宙が今から約1000分の1の大きさの時代の密度揺らぎを反映

しています。銀河の空間分布は一樣ではなく、凸凹があります³⁾。これを銀河の大規模構造と呼びますが、宇宙初期にあった小さな振幅の密度の凸凹が、重力で成長して出来たと考えられています。3K宇宙背景放射の温度揺らぎは、初期揺らぎの証拠です。3K宇宙背景放射の温度揺らぎや銀河の大規模構造の進化は、宇宙を満たすエネルギー成分に強く依存するので、理論と観測を比較することから、宇宙を加速膨張させる成分が必要であることが、Ia型超新星の観測とは独立に分かっています。

では、加速膨張の起源は本当に宇宙定数なのでしょう。これに関連して、宇宙定数問題とよばれる物理学の基礎的問題と深く関係する問題が昔から知られています。例えば、光は電磁場によって記述されるように、物理学の基本的法則は場の理論によって記述されます。場は調和振動子の集まりとして記述されますが、1つの調和振動子を量子化したとき、エネルギーの基底状態は零点振動と呼ばれるエネルギーを持つので、場は真空のエネルギーと呼ばれる零点振動の和に対応するエネルギーを持つことが理論の自然な帰結です。その性質は、対称性から宇宙定数と同じ性質をもつことも予言されるのですが、理論的に予言される値は、加速膨張の起源が宇宙定数にあるとした場合に比べ、数10桁～100桁以上も大きな値になってしまいます。これが宇宙定数問題です。宇宙定数問題とは何故場の真空のエネルギーが重力に作用しないかという問題であり、また加速膨張の起源が宇宙定数の場合には、なぜゼロでない小さな値を持つのかという問題も持ち上がってくるのです。

4. 宇宙の始まりにも加速膨張

ここまでは、現在の宇宙の加速膨張について述べてきたのですが、宇宙の始まりにおいても加速膨張の時代があったと考えられています。インフレーションと呼ばれ、グース(A. H. Guth)、佐藤勝彦らによって1980年頃に別々に提案されました。インフレーションを考える動機は、地平線問題や密度揺らぎの起源といったビッグバン宇宙では説明できない問題を解決できるからです。地平線問題とは、宇宙が100億光年にわたる非常に大きなスケールで一樣で等方なのは何故かという問題です。この問題を例えるならば、ある映画館に集まった満員の客の

服装が皆同じだったとしましょう。その場合、偶然ではなく客が連絡を取り合い、皆同じにしようとし合わせたと考えるでしょう。3K宇宙背景放射から、100億光年にわたるスケールで宇宙がほぼ同じ温度、同じ密度であることが分かっていますが、ビッグバン宇宙の範囲では、それを説明するための因果関係が持てません。インフレーションが起こると、因果関係を持たた小さな領域が急激な加速膨張によって大きなサイズに引き延ばされるので、この問題を解決できます。さらに、宇宙の密度がどこも全く同じでは、銀河や銀河の大規模構造が形成されないの、丁度良い大きさの初期密度揺らぎが必要です。インフレーションは、そのもととなる初期密度揺らぎを生成する機構を備えています。

インフレーションにおける加速膨張がどのように引き起こされるかを、簡単な模型で説明してみましょう。ポテンシャル $V(\phi)$ を持つ実スカラー場 ϕ を仮想的に考えます。スカラー場の作り出す圧力 P_ϕ は、スカラー場に空間依存性がない場合には、

$$P_\phi = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi)$$

と書けます。右辺第1項は運動項と呼ばれますが、この項が右辺第2項に比べ無視できるような場合、ポテンシャルエネルギー $V(\phi)$ が負の圧力を作り出すので加速膨張が引き起こされます。スカラー場の量子揺らぎは加速膨張が起こっていると波長が引き延ばされて、銀河やその大規模構造となる初期揺らぎを作り出します。作り出される初期揺らぎの進化を調べて、宇宙背景放射の温度揺らぎや銀河の大規模構造の観測と比較することもできます。

驚くべきことに、インフレーション宇宙が予言する初期揺らぎは、これらの観測を自然に説明することができます。現在では精密観測が進み、インフレーションの理論模型をある程度制限できるようになっています。マイクロな世界を記述する量子力学が、宇宙という最も大きなスケールの構造を決めたと考えるのは大変面白い考えです。この考えは、宇宙の標準模型の一部になっています。宇宙の始まりにも加速膨張が必要なのです。

5. ダークエネルギーと今後の展開

すると、現在の加速膨張も何かスカラー場のポテンシャルエネルギーが関与しているのではないかと

考えたくになります。(1)式で宇宙定数の代わりに負の圧力をもつエネルギー成分が卓越すると、膨張の加速度が正になり加速膨張が引き起こされることとなりますが、そのような模型を一般にダークエネルギー模型と呼んでいます。クインテッセンスと呼ばれるその模型は、スカラー場を導入した模型の代表です。しかし、このスカラー場の起源についてははっきり分かっておらず、仮説として現象論的にスカラー場を導入した模型です。

また、別の理論的な可能性として、一般相対性理論の修正によって加速膨張を説明する試みもなされています。太陽系スケールでは、惑星や衛星の長期間の観測によって、一般相対性理論は極めて高い精度で検証されている理論です。一般相対性理論を修正すると、必ず一般共変性を破るか、または新しい自由度が生まれることが知られており、観測との整合性が問題となります。一般相対性理論を修正して、観測と整合性のある理論を作ることはとてもチャレンジングな問題といえるのですが、巧妙な機構によって、太陽系スケールでは一般相対性理論を回復する理論模型も提案されています。

ダークエネルギーや修正重力理論を検証することは可能でしょうか。実は加速膨張の起源を探るための観測プロジェクト、通称ダークエネルギーサーベイが数多く進められています。ダークエネルギー模型では、スカラー場のエネルギー密度は宇宙の膨張にともない時間的に変化するのが一般的で、この点は宇宙定数と異なる特徴です。この違いは(1)式から分かるように、宇宙膨張の進化の違いに反映されます。観測プロジェクトの中にはIa型超新星のより精密な観測を目的とする計画もあり、加速膨張の起源が宇宙定数かどうか分かるようになるかもしれません。

進められているダークエネルギーサーベイの多くは、Ia型超新星の観測とは異なる方法を観測の主目的としています。銀河の大規模構造を精密観測することで、ダークエネルギーの性質に迫るという計画ですが、主に2つに分類されます。1つは、銀河のイメージングサーベイです。沢山の遠方銀河の写真を撮って、その形の歪みを測定します。この歪みは、途中の大規模構造が作る重力ポテンシャルによる弱い重力レンズ効果を受けているので、それを検出するのが目的です。円盤銀河や楕円銀河はもとも

と歪んでいるので、各銀河の歪みはあまり意味がありません。しかし、異なる2方向の銀河同士の歪みは途中の大規模構造が作る重力ポテンシャルによって相関を持つようになるので、それなら検出できます。ただし、小さな効果なので、 10^6 個～ 10^8 個も銀河を観測する必要があります。

もう1つの方法は、銀河の赤方偏移サーベイです。銀河の赤方偏移を一つ一つ測定し、それを距離の指標として用いることで銀河の3次元空間分布がわかります。このダークエネルギーを探る原理は、Ia型超新星のそれと似ています。「距離」と「赤方偏移」の関係から宇宙膨張の性質を探るという方法です。違うのは、距離を測定する方法で、長さの分かっているもの(物差し)の見かけの大きさ(角度)を測定すると距離が推定できるという方法を使います。晴れ上がり以前の宇宙は光子とプラズマ流体が結びついており、光子の圧力で音波的な運動をします。その名残は、現在の銀河の相関関数に特徴的な長さをもったパターンを残します。光子とプラズマ流体の音波的な運動は良く理解されているので、銀河の相関関数に現れるパターンの特徴的な長さを物差しとして利用するのです。

日本が誇るすばる望遠鏡も上記の二つの方法に基づいたダークエネルギーサーベイ計画を進めていますので今後の進展が期待されます⁴⁾。

6. 最後に

宇宙の加速膨張の起源は、宇宙定数か、それ以外に起因するものなのか良く分かっていません。どちらにしても基礎物理学と深く関係している問題に違いなく、その起源を探る研究が観測と理論の両面から進められています。観測的には、10年くらいの間で大規模サーベイの進展が見込まれます。宇宙の始まりにも加速膨張が起こったと考えられるので、初期宇宙の研究のヒントにもなるかもしれません。

参考文献

- 1) <http://www.nobelprize.org/>
- 2) <http://map.gsfc.nasa.gov/>
- 3) <http://www.sdss.org/>
- 4) <http://sumire.ipmu.jp/>