

宇宙論研究の最先端について

名古屋大学大学院理学研究科 松原隆彦

宇宙論とは

宇宙論の研究分野はいま、めまぐるしく進展しています。その大きな理由として、この20年あまりで宇宙論的な観測が著しく進み、精密なデータに基づく研究が可能になったということがあります。この解説では、最先端の宇宙論がどのような状況にあるのかを、できるだけ易しくご紹介したいと思います。

まず、宇宙論とはどんな研究分野でしょうか。一般に天文学や宇宙物理学と呼ばれる分野の研究対象は、星や銀河をはじめとする様々な天体にあります。ところが宇宙論は、個々の天体というよりも、宇宙全体が研究対象です。もちろん、宇宙全体を研究するためには、宇宙に存在する天体などを用いる必要があります。このため、天文学や宇宙物理学の他分野と密接に関わりつつも、最終目的は宇宙そのもの、宇宙全体の起源や構造を明らかにすることにあります。

宇宙とは、一言で言えば時間と空間に包み込まれたすべての存在です。このため、アインシュタインによって作られた、時空間の物理学とも言うべき「一般相対性理論」が、宇宙論を研究するための基礎的な理論のひとつになっています。まずは最初に、ご存知の方も少なくないかもしれませんが、簡単に宇宙論研究の歴史を振り返っておきましょう。

宇宙論の簡単な歴史

アインシュタインは、一般相対性理論を完成させるとすぐに、自分自身で宇宙のモデルを考えました。アインシュタインが考えた一般相対性理論の基本方程式（アインシュタイン方程式）を用いると、宇宙が永遠に同じ姿を保つような解がありませんでした。そこでアインシュタインは、もともと考えた方程式はなかった「宇宙項」という余分な項を付け加えて、強引に宇宙が同じ姿を保てるようにしました。

宇宙項がなければ、重力によって宇宙は自然に小さくならうとします。宇宙はこのような引力の効果を打ち消して、空間自体を膨張させる斥力として働きます。そこで、物質の引力を打ち消すちょうどよい宇宙項の値が必要でした。

ところがその後、天の川銀河系の外にある他の銀河を測定してみると、遠くにある銀河ほど速く遠ざかっていて、宇宙が全体として膨張していることがわかりました。ちなみに宇宙が膨張していることは、これまでハッブルという人が1929年に最初に発見したと言われてきました。しかし実際には、ハッブルよりも2年ほど早い1927年、ルメートルという研究者が同等の発見をして最初に発表していました。宇宙膨張の真の発見者が、なぜ長い間ハッブルだと思われてきたのかという



経緯は、最近ちょっとした話題となりました。そのひとつには、ルメートルがキリスト教の司祭だったということもあり、個人的な名声にはあまり関心がなかったためではないか、とも言われています(写真1の左の人物がルメートル)。

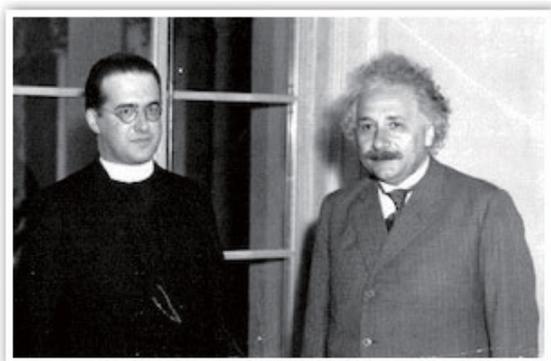


写真1:ルメートル(左)とアインシュタイン(右)。

その後、ガモフをはじめとする研究者たちによって、一般相対性理論と原子核物理学を融合させたビッグバン理論が発展させられ、宇宙初期に水素やヘリウムなどの元素が作られたことが理論的に導かれました。また、ビッグバン理論は、宇宙初期の高温・高密度の状態に存在した光が現在の宇宙にも残っていて、それは電波となって観測されるであろう、という予言をしていました。それは1967年に宇宙マイクロ波背景放射として実際に観測され、ビッグバン理論が確立したのでした。

それ以来、宇宙の観測データは質量も桁違いになりましたが、ビッグバン理論はそれらの厳しい検証にも耐えて生き残ってきました。その過程ではビッグバン理論を疑い、それを覆す証拠を探そうとする人たちも少なくありませんでした。しかし、観測データが積み重なって精密化していくにつれ、ビッグバン理論を否定する根拠は次々と失われていきました。図1は、ビッグバン理論に基づく宇宙の歴史のまとめです。



図1:宇宙の歴史。 Credit:Malcolm Godwin, Scientific American

素粒子の宇宙論

ただし、ビッグバン理論は宇宙のすべてを説明する理論ではありません。ビッグバン理論だけでは十分に説明できない問題について、現在、集中的に研究が行われています。例えば、ビッグバンそのものがなぜ起きたのか、という基本的な問題があります。この問題は宇宙そのものの始まりに直結していて、一筋縄で行かないことは容易に想像できるでしょう。

ビッグバン理論により、現在の宇宙に存在する物質の単位である元素の起源を説明することができます。宇宙初期に水素とヘリウムが作られると、その後それらを材料にして他の多様な元素が星の中で作られます。ところが、水素とヘリウムは陽子と中性子という粒子から成り立っていて、さらにこれらの粒子はクォークという素粒子から成り立っています。このような最も基本的な素粒子の起源は、現在のところはっきりしておらず、いろいろと理論的な仮説が立てられ、研究が進められています。

素粒子の起源がはっきりしていない原因は、宇宙に存在する素粒子の間に働く力をすべて包括的に説明するような理論がまだ存在しないところにあります。素粒子の法則はかなりよく分かっていて、最近では理論的に予言されていたヒッグス粒子が実験的にも見つかりました。このことにより、現在までに実験で明らかにされた素粒子の基本法則は、個別的にはほぼ解明されていると言えます。しかし、宇宙の初期に遡っていくと、宇宙があまりにも高温・高密度になっているため、私たちの知っている個別の素粒子の法則が役に立たなくなります。そのためにも、素粒子間に働く力の法則をすべて包括的に説明する理論が必要なのですが、理論的な困難が大きく、未だにそのようなものは完成していません。

ガモフたちによるビッグバン理論は、原子核物理学を宇宙論に応用することから始まりました。物質の極限的な法則の探求という意味では、当時の原子核物理学は素粒子論に取って代われ、現代では素粒子論を宇宙論に応用することで宇宙初期の物質状態が調べられています。このような研究は素粒子論的宇宙論と呼ばれ、宇宙論では活発な研究分野のひとつです。

インフレーション理論

素粒子論的宇宙論の分野の中でも、多くの研究者の興味を惹き付けている研究対象として、インフレーション理論があります。インフレーション理論はビッグバン理論を補足する理論ではありますが、正確にはビッグバン理論の中に含まれる理論ではありません。ビッグバン理論は、宇宙初期の高温・高密度状態を初期条件として与えるため、その初期状態がなぜ起きたのかという原因は明らかにしません。ところが、ビッグバン理論の初期条件には非常に不自然な点がいくつかあり、インフレーション理論は、この問題を解決しようとする仮説的理論です。この

ため、「ビッグバン以前の理論」とも言われます。

インフレーション理論は未知の素粒子の法則に依存しているため、それを実験的に直接検証することが困難です。そこで、現在の宇宙に観測可能な効果をインフレーション理論によって予言し、それが実際の宇宙をうまく説明できるかどうかを理論の判定基準とする、ということが行われています。

インフレーション理論は1980年代初頭に提案され、すでに30年以上も研究されていますが、未だ確定的な結論は出ていません。インフレーション理論は、ビッグバンによって元素などが作られるよりも前、極初期の宇宙に急膨張した時期があったとする説です。このインフレーションをどのように起こすかという問題は、いまだ確実な形では解けておらず、長年にわたり非常に多くの理論的可能性が提案されてきました。このため、現在の宇宙を再現できそうな理論の数があまりにも多く、どの可能性が真実を表しているのかがよく分かっていません。インフレーション理論は広く有望視されている理論ですが、それ自体が正しくないという可能性も排除されているわけではありません。

こうした問題は理論的な研究だけでは解決できないため、より高い精度での宇宙観測と比較することが必要です。現在、宇宙における「初期ゆらぎ」を用いて様々な理論的可能性を絞り込んでいこうとする研究が盛んに行われています。

初期ゆらぎと宇宙の構造

初期ゆらぎとは、宇宙の最初期に存在した不均一性のことです。もし初期ゆらぎがなければ、宇宙は一樣に膨張するだけで、現在の宇宙に構造が作られることはなく、銀河や星、惑星などの天体、そして私たちも存在できません。一方、宇宙初期にわずかな不均一性があれば、重力の作用によってその不均一性は目立って大きくなっていき、138億年の時の流れのなかで私たちの存在を許すような複雑な世界を作り上げることができます。

ビッグバン以前の極初期宇宙に何か起きたのかを調べるため、この初期ゆらぎの性質を観測的に精度よく決定することが重要な課題となっています。初期ゆらぎの性質を調べるために有力な方法として、宇宙マイクロ波背景放射のゆらぎと宇宙の大規模構造があります。

宇宙マイクロ波背景放射は、どの方向からもほとんど同じ電波がやってくる現象で、最初に説明したように、ビッグバン理論の重要な帰結でした。この放射は、温度が約2.7ケルビンの物体が出す電波と同じ性質を持っていますが、その温度は10万分の1ほどのレベルで微妙な方向依存性を持っています。この温度のゆらぎは、宇宙の初期ゆらぎの痕跡を表しています。2013年にはPlanck衛星によって精密な温度ゆらぎの地図が明らかにされました(図2)。

また、宇宙の大規模構造とは、比較的現在に近い宇宙における大きな空間尺度

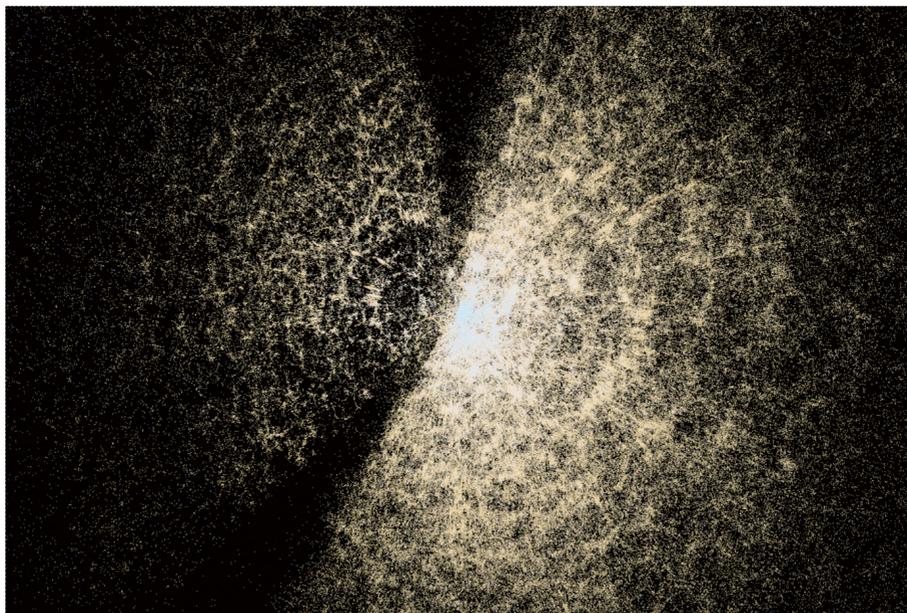


図3: 宇宙の大規模構造。スローン・デジタル・スカイ・サーベイによって観測された銀河の大局的な分布を表す(観測されていない領域も含まれる)。

Credit:SDSS, NAOJ 4D2U project

との説が有力です。この場合、未知の相互作用により直接検出のできる可能性があり、現在、様々な方法でその検出実験が行われています。また、地球付近とは環境の異なる銀河の中心部などで、ダークマターが他の素粒子と反応する痕跡があれば、それを観測できないか、という実験も行われています。時折、ダークマターらしき兆候が見えたのではないかというニュースが流れることがありますが、現状ではまだ、確実な証拠と認められるものは見つかっていません。

ダークエネルギーは、宇宙の膨張が徐々に遅くなっている、つまり宇宙膨張が加速している、という観測結果を説明するために導入されたものです。最も簡単には、アインシュタインが宇宙モデルを作ったときに最初に導入した、宇宙項がその原因と考えることができます。宇宙項は空間に斥力として作用するからです。しかし、理論的に自然に期待できる宇宙項の値は、実際よりも遥かに大きなものとなり、その説明は不自然だと考えられています。そこで単なる宇宙項に変わる理論的仮説が多数提案されています。遠方天体や宇宙の大規模構造などを用いることでこうした理論の正否を確かめることができるため、将来的に大規模な観測が計画されています。

現代宇宙論における観測と理論の密接な結びつき

現在の宇宙論は、ひと昔に比べて観測的進展の著しいものとなっています。先日(2014年3月)、宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測を行ったBICEP2チームが、インフレーション理論の証拠とも言えるビッグバン以前の重力波の痕跡を捉えたと発表しました。これによってにわかに関連する理論研究が活気づきましたが、その後、この観測の解析自体に不十分な点が指摘されたため、現時点ではそれが本当の信号でない可能性も出てきました。真相が明らかになるのは、今年末にPlanck衛星の新しい解析結果が出るまで待つ必要がありそうです。

このようなことも、現代の宇宙論という分野が活気に満ちあふれたものであり、新しい観測結果が次々と現れて、そこから理論的な研究が進展していくものであることを物語っています。宇宙論の研究は今後、予想外の進展を見せる可能性もあります。現在の標準的な理論も、観測の進展によっては覆される可能性もあり、予断を許さない今後の展開は、ますます楽しみな段階に入っていくと言えるでしょう。



著者紹介 松原 隆彦(まつばら たかひこ)

名古屋大学大学院理学研究科准教授。

著書に『宇宙に外側はあるか』(光文社新書)、『宇宙のダークエネルギー —「未知なる力」の謎を解く』(共著、光文社新書)などがある。

2012年度日本天文学会林忠四郎賞受賞。

広 告