

宇宙の進化と暗黒エネルギー

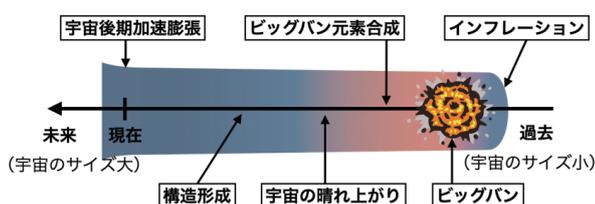
東京理科大学 理学部第二部 物理学科 准教授 ^{かせ}加瀬 ^{りょうたろう}竜太郎

1. はじめに

宇宙は膨張している。遙か過去から現在に至るまで膨張を続けている。具体的にどれくらいの期間、宇宙はこの膨張を続けているのだろうか。人類が誕生するより以前からだろうか。恐竜が闊歩していた時代より以前からだろうか。あるいは、地球が誕生するより以前からだろうか。138億年。これは宇宙論の標準的な理論模型に基づき複数の観測データから算出された現在の宇宙年齢だが、この気の遠くなるような年月、宇宙は膨張を続け、その間に様々な現象を経て現在の姿まで進化したと考えられている。本稿では特集記事「宇宙を探る理学研究」の一部として、この宇宙進化の歴史を物理学の観点から紐解いていく。宇宙誕生後に生じた諸現象のうち特に、インフレーション、ビッグバン、ビッグバン元素合成、宇宙の晴れ上がり、構造形成、そして宇宙後期加速膨張といった現象に焦点をあて、理論的な背景と観測的事実とを織り交ぜながら解説を行う。

2. 宇宙進化の概略

まず宇宙進化の歴史を俯瞰的に見ていく。本稿で解説する現象を時系列順に簡単にまとめたものが【図1】である。宇宙論の標準的な理論模型に基づくと、誕生後の初期の宇宙において急激な加速膨張であるインフレーションと呼ばれる現象が起きたと考えられている。この現象は短い期間で終了し、インフレーションを駆動していた源の崩壊が始まる。これによって解放されたエネルギーは宇宙を一気に加熱し、ビッグバンと呼ばれる超高温・超高密度の状態が作り上げられる。この時期の宇宙の温度は、全ての物質が素粒子レ



【図1】宇宙進化の概略

ベルまで分解されるほどの高温にあるが、この状態もずっとは続かない。というのも、インフレーション終了後も宇宙は減速しつつ膨張を続けており、時間とともに宇宙の温度が下がっていくためである。宇宙の温度がある程度まで下がると、陽子や中性子が安定して存在できるようになり、これを材料に軽元素原子核が合成されるビッグバン元素合成が起こる。この段階では電子はまだ原子核に捕獲されておらず自由に宇宙を飛び回っているが、宇宙膨張により更に温度が下がると、最終的に電子も原子核に捕獲されることになる。自由電子は光を散乱するため、これ以前の宇宙において光は真っ直ぐに伝播することができない。このため、電子が原子核に捕獲された時期を指して宇宙の晴れ上がりと呼ぶ。その後星が誕生し、重力によって複数の星が引かれ合い銀河が、更に複数の銀河が集まって銀河団等のより大きな構造が形成されていく。これが構造形成である。以上を経て、我々が知る今日の宇宙の姿が形作られたのである。

では、その後の宇宙は一体どのように進化するのだろうか。これについては、宇宙膨張が重力により減速されて収縮に転じ一点まで潰れるというビッグクラッシュや、逆に重力を振り切り延々と膨張し続けることで行き着く宇宙の熱的死、といった未来がかつては予測されていた。これらの未来はどちらも宇宙膨張が減速することを前提としているが、我々の周りにある通常の物質やエネルギーはいずれも宇宙膨張を減速させる働きをすることが分かっているため妥当な前提であると考えられる。しかし、1998年に奇妙な現象が観測的に発見される。現在の宇宙膨張は加速していたのだ。宇宙初期に起こったとされる加速膨張（インフレーション）と区別するため、現在の加速膨張を宇宙後期加速膨張と呼ぶ。従来の理論予測を完全に裏切る現象であり、既存の物質やエネルギーとは異なる未知の源によるものと考えられる。この未知の源は暗黒エネルギーと名づけられ、その性質と起源を探る研究が世界中で行われている。以上が宇宙誕生後から現在までの宇宙進化の概略である。次節から個々の現象についてより詳しく解説していく。

3. インフレーションとビッグバン

1915年、アルベルト・アインシュタインが一般相対論を提唱した。これにより、宇宙全体の時間発展を物理的に記述することが可能となった。当時、宇宙は不変不動のものであるという静止宇宙が信じられていた中で、一般相対論はこれと真逆の宇宙の姿を予言する。膨張する宇宙像である。1920年代後半には、ルメートルやハッブルという研究者により、この宇宙膨張の観測的な証拠が発見されることとなる。その後、理論と観測の研究の積み重ねにより宇宙膨張は確固たるものとして受け入れられていくことになるが、この前後の詳しい流れは科学フォーラム2021年12月号において解説を行なったため、ここでは割愛する。宇宙膨張を事実として認めると、熱力学と組み合わせることで衝撃的な過去の宇宙の姿が導かれる。宇宙が膨張しているのであれば時計の針を巻き戻すことにより宇宙はどんどん小さくなる。すると、ピストンのついた容器の中に封入された気体の温度がピストンを押し込むことで上昇するのと同様に、過去の宇宙は超高温の状態に行き着くことになる。これがビッグバンである。

上記のような状態から宇宙が始まったとするビッグバン宇宙論は、観測とよく整合する一方でいくつかの問題点を持っていた。代表的なものを二つ紹介しよう。平坦性問題と地平線問題である。まず前者について、観測的に現在の宇宙の曲率は非常に小さく、ほぼ平坦に近いことが分かっている。これは奇妙なことである。というのも、宇宙初期に多少なりとも曲率が存在していれば、これは時間とともに成長し現在では大きな曲率となっているはずであり、この問題を指して平坦性問題と呼ぶ。一方で後者について、ビッグバン宇宙論に基づくと宇宙が誕生してから現在まで経過した時間は有限である。これに加えて光の速さも有限であることから、この宇宙の中で光によって情報をやりとりできる、すなわち互いに因果関係を持つことのできる領域の大きさには限界が存在し、この境界を地平線と呼ぶ。減速膨張を前提とすると地平線の大きさを理論的に計算することができるが、後述する宇宙背景放射の観測結果は地平線を超えて同じ情報を共有しており、これは論理的に矛盾している。これら二つの問題以外にも、ビッグバン宇宙論は複数の問題を抱えている。しかし、これら複数の問題を同時に解決する一つのシンプルなアイデアが提唱された。急激な加速膨張、すなわちインフレーションである。ビッグバン以前に急

激な加速膨張が一定期間続いたとすれば、丁度ベッドメイキングにおいてシーツを引っ張ることでシワがなくなるように、時空が限りなく平坦に整えられ平坦性問題は解決される。また、宇宙初期に因果を持っていた小さな領域がインフレーションによって急激に引き伸ばされ地平線サイズを超えることが可能となり、地平線問題についても解決される。では具体的にどの程度急激な膨張だったのだろうか。典型的には、宇宙誕生直後の 10^{-38} 秒後から 10^{-36} 秒後までという非常に短い間に、宇宙は 10^{-30} m程度の大きさから1cm程度まで膨張したと考えられている。比較としては、原子核が太陽系程度まで引き伸ばされることに相当する。このような劇的な変化がビッグバン以前の宇宙に起こったと考えられている。

量子論において真空は単なる無ではなく、0でないエネルギーに満たされた状態である。この真空のエネルギーは実効的に負の圧力を持ち、通常物質が重力によって宇宙膨張を減速させるのと反対に、宇宙を加速膨張させる働きを持つ。インフレーションは、この真空のエネルギーによって引き起こされたと考えられている。また、非常に重要な点として、真空のエネルギーは完全に一様ではなく、空間の各点で量子効果の無視できない微小なゆらぎ(量子ゆらぎ)を持つことが予測される。この量子ゆらぎは様々な波長を持った波の重ね合わせとして表現されるが、インフレーションによって各々の波長は引き伸ばされ、当時の地平線サイズを超えて成長する。そして、インフレーション終了後、宇宙膨張とともに地平線が成長すると波長が小さい量子ゆらぎから順に地平線内に戻ってきて様々な可観測量に影響を与えることが予言されるのである。量子ゆらぎが宇宙背景放射と構造形成に与える影響は次節以降で説明する。これらはよく検証されており、インフレーション理論の妥当性を支持している。ただし、インフレーションの理論モデルは数多く存在し、観測データとの比較から妥当であるモデルとそうでないモデルの選別は進んでいるが、現時点ではどのモデルが真に正しいのかを断ずることはできない。技術進歩によって観測データの精度が上がっていくにつれ、徐々に真の理論へと迫ることが可能となる。

4. ビッグバン元素合成と宇宙の晴れ上がり

インフレーションによる急激な膨張は、気体を封入した容器のピストンを引っ張るのと同様に、宇宙の温度を一気に引き下げる効果がある。当然、このままで

は超高温のビッグバンには繋がらない。インフレーションとビッグバンを橋渡しするのが再加熱と呼ばれる現象であり、インフレーションの終了とともに解放された真空のエネルギーが宇宙の温度を上昇させるのである。この再加熱により、典型的には 10^{20} K 以上まで宇宙の温度が上昇することになる。例えば太陽の表面温度は 10^3 K、中心温度が 10^7 K のオーダーであることを考えると、とてつもない高温であることが分かる。また、この再加熱期には解放されたエネルギーから様々な粒子が生成される。ところで、このような高温下において、物質はどのように振る舞うだろうか。我々の身の回りにある物質は様々な原子によって構成されており、原子は陽子と中性子からなる原子核と電子に分けることができる。更にミクロに見ていくと陽子や中性子はクォークと呼ばれる素粒子の集まりである【図2】。再加熱時の 10^{20} K 以上という極度の高温環境下では、物質はこのような構造を安定して保つことができず、クォークや電子といったバラバラの素粒子の状態で存在することになる。宇宙膨張によって宇宙の温度が段々と低下し、 10^{12} K 程度まで下がると、まずクォークが結合を始め陽子や中性子が安定して存在できるようになる。更に、 10^{10} K まで低下すると、陽子と中性子1個ずつが結合し、重水素原子核が合成され始める。驚くべきことに、ここまでが宇宙誕生後からおよそ1秒間の間に起こった現象である。その後、300秒程度が経過して一定量の重水素原子核が合成されると、これと残った陽子、中性子を素材としてヘリウムやリチウム、ベリリウムといった軽元素の原子核が次々に合成される。これがビッグバン元素合成である。宇宙がある程度膨張し核融合に必要な温度と密度を下回るとこの元素合成は終了する。ちなみに、上記よりも重い元素はビッグバン元素合成ではなく、その後の星の内部での核反応によって合成され、超新星爆発等によって宇宙にばらまかれる。

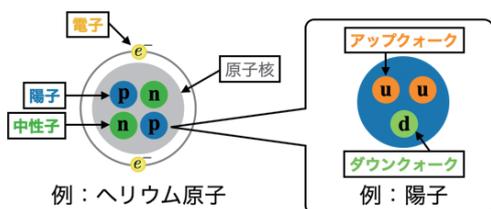
さて、ここまでの議論では電子について触れてこなかった。実は電子が原子核に捕獲されるためには更なる温度の低下を待つ必要がある。具体的には、 10^4 K 程度まで温度が下がると宇宙を満たす光の平均エネルギー

が水素のイオン化エネルギーを下回り、更に 3700 K 程度になると本格的に原子核は電子を捕獲して原子となる。この現象を宇宙の晴れ上がりと呼ぶ。これ以前、電子は自由電子として宇宙を満たしており、光はこの自由電子によって絶えず散乱されている状態にある。光にとっては霧がかかった状態にあり、自由電子が原子核に捕獲されて初めて真っ直ぐに進めるようになる。このような意味合いで宇宙の「晴れ上がり」と呼ぶ。宇宙誕生後から、およそ38万年後の出来事である。

この宇宙の晴れ上がりから直進を始め、宇宙空間を旅して現在の我々まで届いた光を宇宙背景輻射と呼ぶ。現在まで旅する間に宇宙膨張によって 2.73 K まで冷やされたこの光は1964年に実際に観測的に発見されておりビッグバン宇宙論を支える強力な証拠となった。また、前述のインフレーション時に生成された量子ゆらぎは空間の微細な非等方性を生み出し、これが基となって宇宙背景輻射に僅かな温度ゆらぎを生じさせることが予測される。この温度ゆらぎについても、後のより詳細な宇宙背景輻射の観測によってその存在が確認されており、インフレーションの理論模型を検証する上で非常に強力なデータを提供している。

5. 構造形成

宇宙の晴れ上がり後も膨張による温度低下は続く。この時期の宇宙は自ら光を発する恒星が存在しない暗黒時代にある。ただし、後の時代へと移る変化が水面下で継続している。インフレーション中に生じて引き伸ばされた量子ゆらぎは、宇宙背景輻射に微細な温度ゆらぎを生み出し、更に物質分布にも僅かな粗密を生じさせる。初期に僅かに密だった箇所は重力によって周りから物質を集め更に密になっていく。時計の針を一気に進めよう。宇宙誕生後から数億年後、ビッグバン元素合成によって生成された水素やヘリウムは重力的に収縮し、ついに巨大な恒星が産み出される。最初の星の誕生である。恒星は内部での核融合反応によって、水素やヘリウムを原料に酸素や炭素といったビッグバン元素合成時には作られなかった重元素を作り上げる。そうして核融合の燃料がつかると自重を支えられなくなり爆発する。これを超新星爆発と呼ぶ。超新星爆発によって宇宙空間に放出された重元素を含んだガスは、次の世代の星々を産み出す。このようなサイクルを重ねて、宇宙は様々な元素に満たされることになる。誕生した星々は万有引力で引かれ合い、銀河を、

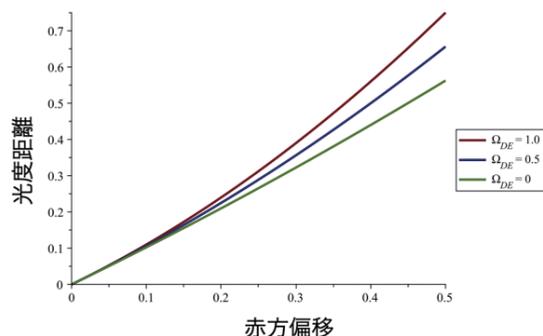


【図2】物質の構造

銀河群を、銀河団を、超銀河団を形成する。このようにして宇宙の大規模構造が徐々に形作られていったのである。これを構造形成と呼ぶ。

6. 宇宙後期加速膨張

そして現在、宇宙誕生から 138 億年が経過した。宇宙は長らく減速膨張を続けてきたが、現在付近で異変が起こる。宇宙後期加速膨張の開始である。第 2 節末において触れた通り、この現象は従来の理論的な予測と真逆の結果であり、これを引き起こす未知の成分を暗黒エネルギーと呼ぶ。後期加速膨張は超新星の観測を通して 1998 年に発見された。超新星の中には原理的に爆発時の光度が一定になるものがあり、このような天体の観測データから得られた結果である。以下で詳しく見ていこう。まず、光源から発せられる光が単位面積あたりを通過する量を考える。光がどの方向にも同様に、すなわち球対称に伝搬する場合、球の表面積は星からの距離の二乗に比例するため、光が単位面積あたりを通過する量は光源からの距離の二乗に反比例することになる。よって、光源の元々の光度が分かっているならば、単位面積あたりを通過する光の量を測ることで、光源までの距離を割り出すことができる。更に、天体からの光は放出された後、観測者に到達するまでの間に宇宙膨張を経験するため、光度距離には宇宙膨張の情報が焼き付けられることになる。よって、光度距離を介して暗黒エネルギーが存在する加速膨張宇宙と、暗黒エネルギーが存在しない減速膨張宇宙を観測的に見分けることが可能となる。なお、この光度距離は、理論的には天体から発せられる光の赤方偏移の関数として求まる。赤方偏移とは、宇宙膨張によって天体が観測者から遠ざかる方向に動くことに起因し、音のドップラー効果の類似で天体から発せられた光の波長が引き伸ばされる度合いを表す。【図 3】が光度距離の理論曲線である。横軸が赤方偏移、縦軸が無次元化した光度距離であり、 Ω_{DE} は現在の宇宙の組成比全体を 1 としたとき暗黒エネルギーが占める割合を表す。 $\Omega_{DE}=0$ の緑の曲線は暗黒エネルギーが存在しない減速膨張宇宙を、 $\Omega_{DE}=1$ の赤の曲線は暗黒エネルギーのみが存在する加速膨張宇宙に相当している。1998 年に超新星の観測データの統計解析から、 $\Omega_{DE} \approx 0.7$ が観測的に好まれることが示され、宇宙後期加速膨張の存在が発見されたのである。超新星からの光以外にも、暗黒エネルギーは様々な可観測量に影響を与える。例えば、宇宙背景放射は我々に届くまで



【図 3】光度距離の理論曲線

の間に暗黒エネルギーによる宇宙の膨張率の変化を感じ取り温度ゆらぎのスペクトルを変化させる。これははじめとした様々な独立した観測から、暗黒エネルギーの性質を明らかにしようとする研究が全世界で進められている。

暗黒エネルギーの正体は現時点では不明だが、理論模型を構築することは可能である。一般相対論のアインシュタイン方程式に、宇宙項と呼ばれる定数を追加した宇宙項模型は、この暗黒エネルギーを記述する上での標準的な模型となっている。ただし、この模型には、理論的に求まるエネルギースケールと観測値の間に桁外れの違いが生じるという問題や、初期値の微調整問題といった未解決問題を抱えている。そのため、宇宙項以外の理論模型も提唱されており、素粒子物理学に現れるものと類似のスカラー場を用いた模型や、一般相対論を拡張した修正重力理論に基づく模型が世界中で活発に研究されている。

7. おわりに

物理学は、宇宙が誕生してから現在に至るまでに引き起こされた驚異的な現象の数々を理論と観測の両輪により次々に解き明かしてきた。しかし、その度にまた宇宙は予想外な新たな姿を明らかにしている。例えば本稿では触れることができなかったが、宇宙にはもう一つの暗黒成分である暗黒物質が存在しており、現在の宇宙は約 68% が暗黒エネルギーに、約 27% が暗黒物質によって占められている。我々の知る通常物質は全体のうち残り 5% 程度に過ぎない。暗黒エネルギーと暗黒物質、現在の宇宙の大半を満たすこの二つの暗黒成分の起源解明は 21 世紀の物理学における最大の課題の一つと言えるだろう。この解明に向けて、理論と観測の垣根を越えて忌憚なく意見を交わし、既存の枠組みにとらわれることなく長期的な視野を持って研究を推進していく必要がある。