

特集

宇宙の過去！現在！未来！

宇宙誕生の秘密を求めて

ビッグ・バンにさかのぼる

遠方の銀河の挙動の視測から現在の膨張宇宙論が支えられているが、この事実にもとづいて時間の歯車を逆転させ、誕生時の宇宙の姿の極限にせまってみました。

東京大学理学部
物理学教室

小玉英雄

Kodama Hideo

われわれの日常の世界では、物事には常に始まりと終わりがある。特に生物の場合は、始まりと終わりが明確である。

たとえば、多細胞生物の場合、一個の個体の一生は卵子の受精に始まる。最初は単に一個の細胞にすぎなかった受精卵は、つぎつぎに細胞分裂をくり返しながら、しだいに複雑な構造を作り出してゆく。この成長の過程を終了して成体になった個体は、こんどは、細胞の機能低下と構造のゆるやかな崩壊によって、最後には死という終りをむかえる。

このような事情は、生物だけに特有なものではない。実は、われわれの住む宇宙自体にもビッグ・バンと呼ばれる誕生と、構造の分化を行う成長の過程が存在したのである。そして現在、青年期にあるわれわれの宇宙も、いつかは死をむかえることになる。それでは、以下に、われわれの宇宙の誕生と成長のようすについて、現代の物理学の考え方を紹介しよう。

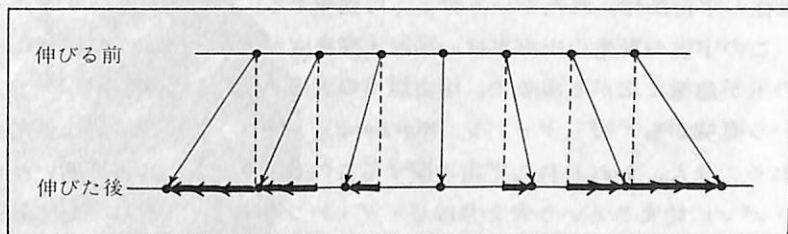
◆ 膨張する宇宙

われわれの宇宙に始まりがあるという考え方は、単なる思想としては古来から存在した。しかし、それが自然科学の立場から真剣に取り上げられるようになったのは、今世紀初頭のハッブルの発見、すなわち、遠い銀河ほど、われわれから遠ざかる後退速度が大きいという論証によってい

る。

後退速度のもつ意味

スライファーによって、アンドロメダを含む20数個の遠方の星雲が、われわれの銀河から遠ざかってゆく運動の速度（後退速度）が求められていた。一方、ハッブルは、これらの星雲の中の変光星の光度一周期関係から、われわれの銀河からこれらの星雲までの距離を求め、その距離とスライファーの後退速度を比較して、おもしろい事実気づいた。つまり“十分に遠方の星雲は、われわ



【第1図】 ハッブルの法則を解説するときによく使われるゴム膜の伸び

れの銀河からの距離に比例する速度で遠ざかっている”というのだ。1924年頃のことである。

現在、ハッブルの法則と呼ばれているこの事実は、一見、われわれの銀河系が宇宙の中心にいることを示しているように見えるが、実はそうではない。

たとえば、ゴム膜にインクでたくさんの印をつけておく。このゴム膜を適当な速さで一様に伸ばしてゆくと、インクの印の間の距離はしだいに大きくなってゆく。いま、一つの印に着目してみると、他の印はゴム膜の膨張と共に遠ざかっていくように見える。

第1図を見るとわかるように、他の印の遠ざかる速さは、その印までの距離に比例している。この状況は、どの印を基準にしても変わらない。この例からわかるように、ハッブルの法則は、実はわれわれの宇宙が、ゴム膜のようにいたるところで、一様に膨張していることを意味しているのである。

ハッブルの法則からの帰結

現在、宇宙が膨張しているということは、過去にさかのぼると、宇宙がどんどん小さく縮んでゆくことになる。気体を断熱的に圧縮する場合を思い起こしてみるとわかるように、宇宙が縮むと、宇宙の物質の平均的な密度や温度はどんどん上昇してゆく。したがって、宇宙の膨張が途中で止まることなくずっと続いていたとすると、ある有限な時間だけさかのぼった時点で、宇宙は一点に縮んでしまい、温度も密度も無限大となってしまう。

このように、ハッブルの法則からの自然な帰結として、われわれの宇宙は、ある有限な昔におそらく高温・高密度の火の玉として誕生し、それがしだいに膨張して温度や密度が下がった結果、現在の宇宙が作られたという考え方に到達する。

この宇宙の誕生の出来事は、高温・高密度の火の玉が急激に広がる現象で、宇宙規模の大爆発という意味から、ビッグ・バン (Big-Bang) と呼ばれる。また、われわれの宇宙に関するこのビッグ・バンに始まるという考え方はビッグ・バンモデル、特に、上述のように宇宙の初期は非常に高温であったとする考え方は、熱いビッグ・バンモデル (ないし標準宇宙モデル) と呼ばれている。

ハッブルの法則は、通常次のように書かれる。

$$V = Hr$$

V は遠方の星雲がわれわれから遠ざかる速度、 r は星雲までの距離、 H はハッブル定数と呼ばれる比例定数である。現在の観測では、 H は 50 km/s/Mpc と 120 km/s/Mpc の間にあることが知られている ($1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc} = 3.26 \times 10^6 \text{ 光年}$)。以下では $H = 75 \text{ km/s/Mpc}$ とする。

たとえば、アンドロメダ星雲は、われわれの銀河系から約200万光年の距離にあるので、アンド

ロメダ星雲がハッブルの法則にしたがうとすると(註1)、われわれから約 50 km/s で遠ざかっていることになる。これは光速の約6千分の1なので、アンドロメダ星雲とわれわれの銀河系との距離は、約100億年前には0となることになる。このことは、とりも直さず、われわれの宇宙の年齢は約100億年ということになる。第2図に、宇宙の成長の中間段階での典型的な時期の年齢と、その時の宇宙の平均密度、温度および大きさを示しておく(註2)。

◆ 過去からのメッセンジャー

これまでは、わかりやすくするために少し独断的に述べてきたが、正確には、宇宙の膨張という事実だけからは、必ずしも時間をさかのぼるにつれて宇宙の物質の密度や温度が上昇するとの結論は下せない。実際、今世紀の中頃、ホイールによって提唱された定常宇宙論というのが流行したことがある。これは、宇宙の膨張とともに物質が一定の比率で生成され続けることにより、宇宙の物質の密度や温度は変化せず、宇宙は常に同じ姿を保つという考え方である。

このような考え方に反論するためには、実際に宇宙が、かつて高温・高密度であったことを示す直接的な証拠を見つけなければならない。そのためには熱いビッグ・バンモデルをもう少し詳しく調べてみる必要がある。

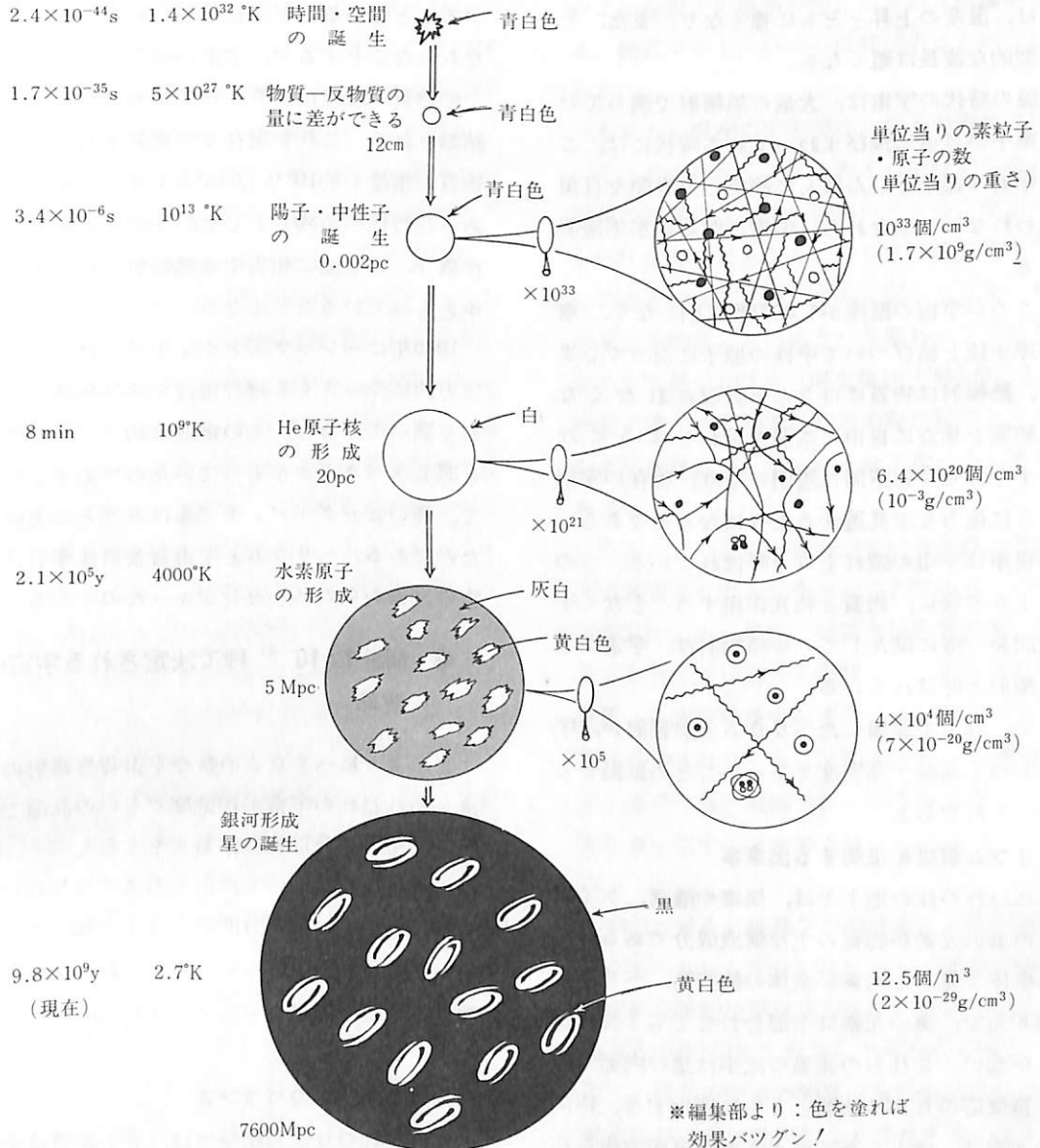
熱いビッグ・バンモデルをたどると

物質は温度や密度をどんどん上げてゆくと、分子→原子→原子核と電子→陽子、中性子と電子→……と、より基本的な構成要素へとつぎつぎに分解してゆく。したがって熱いビッグ・バンモデルでは、この逆の過程が起ったと考えられる。特に宇宙の温度が約10億度の頃には、物質は高速で飛びかう陽子と中性子と電子の気体であったことに

註1) 厳密には、各星雲の固有運動のために、1000万光年より近い星雲にはハッブルの法則は十分成立しない。たとえば、アンドロメダ星雲は、逆に約 200 km/s の速度でわれわれの銀河系に近づく運動をしている。

註2) 第2図の数値は、ハッブル定数を 75 km/s/Mpc 、現在の宇宙の物質の平均密度を $9.4 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$ 、宇宙背景放射の温度を 2.7°K とした場合のものである。

ビッグ・バン 温度
からの経過時間



【第2図】 ビッグ・バンから現在の宇宙にいたるまでの経緯

なる。さらに高温では、陽子と中性子は電子およびニュートリノないしそれらの反粒子を放出、吸収して互いに移り変わることができるので、この時期の陽子と中性子はほぼ同量と考えてよい。

宇宙の温度が10億度からだんだん下がってくると、核力のために陽子と中性子は互いに結びついてヘリウムを中心とする軽い原子核を作り出す。この時点では核力に比べて弱い電磁力でしか相互作用しない電子は、依然として自由に飛びまわっている。しかし、宇宙がどんどん膨張して温度が

4,000度ぐらいいまで下ってくると、熱運動はもはや電気力にうちかてなくなって、それまで互いに独立に運動していた電子と原子核は結びついて原子を作るようになる。この時、非常に興味深いことが起こる。

宇宙を満たす熱輻射

電気ストーブのスイッチを入れると、ヒーターは温度の上昇につれて黒から赤、赤から白とだいに色を変えてゆく。これは、物体がその温度に特有の光（電磁波）を放出するためである。この

ような電磁波は熱輻射と呼ばれている。熱輻射の強さは、温度の上昇とともに強くなり、また、その典型的な波長は短くなる。

高温の時代の宇宙は、大量の熱輻射で満ちている。電子が自由に飛びまわっている時代には、この熱輻射は電子とひんぱんに衝突して空間を自由に伝われない。すなわち、宇宙は明るい却不透明である。

ところが宇宙の温度が4,000度以下になり、電子が原子核と結びついて中性の原子になってしまうと、熱輻射は物質にほとんど吸収されなくなり、物質と独立に自由に空間を伝わるようになる。すなわち宇宙空間は透明になり、現在の宇宙のように遠方まで見透せるようになるのである。この現象は宇宙の晴れ上りと呼ばれている。この晴れ上りの後に、物質と相互作用することなく宇宙空間を一様に満たしている熱輻射は、宇宙背景黒体輻射と呼ばれている。

さて、以上で登場したヘリウムと熱輻射が、宇宙がかって高温・高密度であったことの証拠として使えるのである。

ヘリウム創成を説明する出来事

われわれの住む地上では、炭素や酸素、ケイ素などの重い元素が物質の主な構成成分であるが、宇宙全体で見ると水素が全体の約70%、ヘリウムが約30%で、重い元素は全部合わせても2%ほどでしかない。これらの元素の比率は星の内部で起こる核反応のために時間とともに変化する。特に重い元素は、ほとんどこのような核反応で作られたとして定量的に説明がつく。

ところが、ヘリウムを説明するとなると、星の核反応ではうまくゆかない。100億年間にくり返される星の核反応では、たかだか数パーセントほどしか作れないのである。そこで、現在の宇宙のヘリウムの大部分は、さきほど述べた、宇宙が高温の時代に作られたと考えたくなる。

ここで大切なことは、自由な中性子は不安定で約10分ほどで陽子と電子および反ニュートリノに壊れてしまうために、宇宙初期に作られるヘリウムの量が、そのときの陽子と中性子の結びつく

反応の速さ、したがって物質の密度に大きく依存することである。その結果、全物質の30%がヘリウムになるとすると、宇宙の温度が10億度の時点での物質の密度は約 $5 \times 10^{-4} \text{g/cm}^3$ であることが結論される。これを現在まで延長すると、現在の物質の密度を約 10^{-29}g/cm^3 として、宇宙が高温であった時代の名残りとしての宇宙背景輻射が、現在数°Kの温度に相当する熱輻射と同じスペクトルをもっていることになる。

1965年にペンジアスとウィルソンは、宇宙から等方的にやってくる雑音電波を偶然発見した。詳しく調べてみると、その電波は約3°Kの熱輻射と同じスペクトルをもっていたのである。かくして、熱いビッグ・バンモデルはみごとに実証されたのである。ヘリウムと宇宙背景黒体輻射は、宇宙の過去からのメッセンジャーなのである。

◆ 誕生後 10^{-34} 秒で決定される宇宙の運命

このようにヘリウムの量や宇宙背景輻射の温度は、われわれの宇宙が10億度ぐらいの高温であった、誕生後数分以後の情報をもたらしてくれるが、それ以前については何も教えてくれない。この宇宙が生まれて数分間のようすを知るためには何か別のメッセンジャーをさがさねばならない。そこで宇宙の歴史をもう少しさかのぼってみよう。

物質と反物質のバランス

われわれの日常の現象では、光と物質はまったく別物のようにふるまっている。ところが宇宙初期のような高温・高エネルギーの世界では事情が変わってくる。光はしだいに粒子のようにふるまうようになり、光を光子と呼ばれる粒子の集まりとして表わす方が適切になってくる。しかも、高エネルギーの光子は電荷をもつ粒子と衝突することにより、粒子と反粒子の対へと変化できるようになるのである。

その結果、宇宙の温度が 10^{10} 度をこえるようになると、大量に存在する熱輻射の光子の一部は電子と陽電子へと変化するようになる。そして温度

が 10^{13} 度程度になると、熱輻射から大量の陽子、中性子とそれらの反粒子が作られるようになる。

さらに温度が上がると、陽子や中性子などの核子は、より基本的な構成要素であるクォークと呼ばれる粒子へと分解する。温度が 10^{13} 度を超えるごく初期の宇宙（誕生後 10^{-6} 秒）は、クォーク、反クォーク、電子、陽電子、光子などの基本粒子の濃密なスープで満たされていると考えられる。

このような物質と反物質が共存する時代からみると、われわれの宇宙が非常に特殊なものであることに気づく。このような時代には、大量の光子がクォークと反クォークに変化するために、物質と反物質はほぼ等量になっている。もし両者が厳密に等量であるとすると、宇宙の温度が低下すれば、物質と反物質は対消滅によって光になってしまい、物質はほとんどなくなってしまう。

大統一理論と 10^{18} 度の世界

現在の宇宙には十分に大量の物質が存在しているのであるから、高温の時代には物質の量が反物質の量より多かったはずである。このズレの大きさは、現在の宇宙の物質の密度と、宇宙背景輻射の温度から計算することができる。結果は、なんと約 10^{-9} となる。すなわち、宇宙の初期の物質粒子と反物質粒子の数は、 $10000000001 : 10000000000$ とほんのわずかにずれていたにすぎない。このズレが大きくても小さくても、現在の宇宙の姿は大きく変わってしまうのである。

最近では、この物質—反物質の量のわずかなズレが、宇宙の過去からの第3のメッセンジャーであるという考えが出され、注目されている。

近年、基本粒子の間に働くさまざまな力を統一的に記述する、大統一理論というものが詳しく研究されるようになった。従来、陽子や中性子は、互いに移り変わることはあっても、それらが電子などの軽い粒子にこわれることはないと考えられていた。たとえば、原子は重い原子核と軽い電子という組み合わせの結果として安定であるために、このような核子の崩壊が起こると、物質自身が崩壊してしまうためである。

ところが大統一理論では、クォークや反クォー

クが互いに移り変わる反応が可能になるため、このような粒子の崩壊が起こるという結論が得られる。物質でさえ、いつかは滅び去るというわけである。

もちろん現在の宇宙では、陽子の寿命は 10^{31} 年以上と非常に長く、まったく心配はいらないが、宇宙の初期では事情が変わってくる。宇宙の温度が 10^{15} 度を超えるようになると（誕生後 10^{-30} 秒）、このような反応はひんぱんに起こるようになり、物質と反物質が互いにうつり変わるようになる。さらに温度が 10^{18} 度（誕生後 10^{-36} 秒）をこえると、物質と電子や中性微子などの軽い粒子とクォークとの区別自体が、まったくなくなってしまうのである。

ただ、この反応の変わっている点は、反物質の方が物質より作られやすいことである。このことに着目すると、最初、物質と反物質がまったく等量に存在する状態から出発して、さきほど述べた物質と反物質の量のわずかなズレを説明できる可能性が生まれてくる。実際に詳しい計算によると、適当な統一理論では、 10^{-9} 程度のズレを定量的に導き出すことができることが示されるのである。

残念ながら、世界中の実験家たちの精力的な努力にもかかわらず、いまのところ陽子の崩壊を直接示す実験的証拠は得られていない。しかし、宇宙が生まれて 10^{-30} 秒というほんの一瞬といえる間に、現在の宇宙の物質の量が決定されたという考え方は非常に魅力的なものである。現在、世界中の物理学者が、陽子の崩壊実験の成り行きに注目している。

◆ 終わりに

現在の宇宙論は、いまや宇宙の誕生後 10^{-36} 秒間という、まさにビッグ・バンそのもののようなすを解明しようとしている。そこでは、もはや十分確立した物理法則すら存在しない。熱いビッグ・バンモデルは、もはやそれ自身の妥当性を問う時代を終え、自然界の基本法則をさぐる場として利用され始めている。