

# 終末、

それは冷たい空虚か  
それとも熱い火の玉か。

小玉英雄

京都大学教養部助教授／こだま・ひでお

これまで見てきたように、宇宙の誕生とともに生まれた物質は、現在までに複雑多様な形態へと進化した。それに伴って、星や銀河などさまざまな階層の天体を生み出してきた。

この物質の進化は、これから進むのであるか。

宇宙における現象の主役は星である。星は、中心部の核融合反応で生み出されるエネルギーにより、われわれ人間の一生と比べれば悠久といえる長い間輝き続ける。しかし、星といえども核燃料を消費しつくせば、輝くことをやめる。その寿命は質量の大きいものは

短く、太陽で約一〇億年、重いものだと一〇〇万年程度である。核燃料を消費しつくした星の末路はさまさまだ。太陽質量を $M_{\odot}$ とすれば、 $3M_{\odot}$ 程度より軽いものは収縮し、ヘリウムや炭素、酸素でできた白色矮星、そして最終的には冷たい黒色矮星となつて一生を終える。

一方、 $3M_{\odot}$ 程度より重い星は、最後に超新星爆発というすさまじい爆発を起こし、ほとんどの部分が吹き飛んでしまう。ただし、 $8M_{\odot}$ より重い星は、中性子星と呼ばれる超高密度の天体やブラックホールを後に残す。

## 一兆年後には 散らばった死星と ブラックホールが残される

このように、多くの星は宇宙の年齢と比べてずっと寿命が短い。それにもかかわらず、依然として大量の星が銀河に存在するのは、新しい星が次々と生まれているからである。

その材料は、星間に大量に存在する水素ガスである。ただし、これらのガスは無尽蔵ではない。もちろん、寿命の短い重い星は、超新星爆発により星間ガスへと戻っていくが、中性子星やブラックホールになった部分は、そのまま残つてしまう。また、軽い星はほとんどガスへと還元されない。

このため、約一兆年後にはわれわれの銀河から星間ガスがなくなり、星の生成は止まつてしまう。これは輝く星の集団としての銀河の死を意味する。

宇宙を大きなスケールでみると、その構造の基本単位は銀河である。この銀河は約一兆年後には、黒色矮星、中性子星、ブラックホールなど死滅した星から成る暗黒の巨大な集団になつてしまう。しかし、これが銀河の最後の姿ではない。さらに悲惨な未来が待

ち受けている。

銀河では、非常にまれではあるが三個の星が近づくことがある。このとき、ある確率で一つの星が加速されて銀河から飛び出してしまふことがある。このスリングショットと呼ばれる現象により、ゆつくりとはあるが、星が銀河から蒸発してゆく。そして、一〇の一九乗年という長い歳月の後に、銀河の約半分の星は銀河から蒸発してしまふ。

一方、残つた星はエネルギーを失つてゆく。そのため、次第に中

## 陽子崩壊が進み、 天体は光とニュートリノを出して 蒸発する

素粒子の統一理論によると、これらの天体にもさらに悲惨な最期が待っている。

現在、自然界における基本的な力として、四つの力が知られている。近年、これら四つの力のうち重力を除いて、電磁力、弱い力、強い力の三つが、じつは本来一つの力あるとする理論が提案され

てきている。この三つの力は、目を集めている。この三つの力は、われわれがこれまで実験を行つてきた低いエネルギーの世界では、三つに分かれて見えるにすぎないという指摘である。

この大統一理論と呼ばれる理論には、非常に興味深い点がある。「創生」の章とやや重複するが、ここには「物質の終末」という観

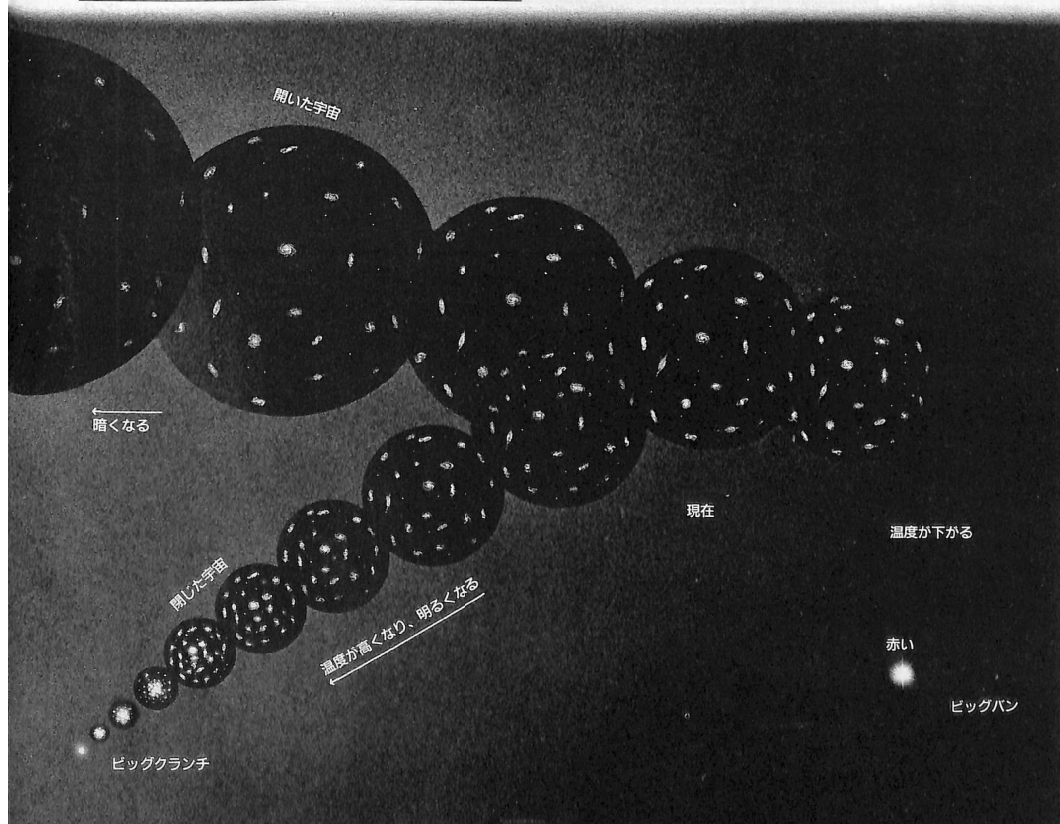
心部に落ち込み、最後には太陽の一〇の二乗倍程度の質量をもつ巨大ブラックホールになつてしまふ。さらに、一〇の二三乗年後には銀河団も蒸発して崩壊し、宇宙から構造が消滅してしまふ。あとには、宇宙に一律に散らばった黒色矮星や中性子星などの死星とブラックホールだけが残される。

点から触れてみたい。これまでに安定だと思われていた陽子が不安定となり、電子、陽電子、光、ニュートリノなど、ずっと軽い粒子に崩壊すると言っている点である。それなのに物質が消滅しないのは、陽子の寿命が、最も単純な理論によつてさへ一〇の三二乗年程度と恐ろしく長いからであった。ところが面白いことに、このように長い寿命をもつにもかかわらず、この予言を実験で確かめることが可能である。これは陽子の寿命が、単に平均寿命を表すものでないためである。したがって、たとえ一〇の三二乗年の寿命をもつていても、一〇の三二乗個の陽子、いかにいへば、約一〇の二乗個の物質あたりでは一年間に一個が崩壊する、と考えればよい。

「創生」の章で触れている岐阜県・神岡鉱山の実験は、このように考える方に基づいて行われている。

## 【宇宙の終末】

開いた宇宙は永遠に膨張を続け、閉じた宇宙はやがて収縮に転じる。ビッグクランチは、まったくの無の世界への回帰だ。



## 暗黒物質が 宇宙の質量を 支配する

宇宙に存在する物質の量を、どう決めたらよいか。

現在、それには2つの方法が考えられている。1つは光学的方法で、星からの光や星間ガスからの電波の強さによって推定する。もう1つは重力的方法で、銀河内での星やガスの運動、銀河団中での銀河の運動などから、その運動を

重力的に支えるのに必要な質量を推定する方法である。

これらの方法を用いて観測した結果、重要な事実が判明した。重力的方法で決定された質量のほうが、光学的质量に比べてずっと大きいのである。これは、電磁波を出さない物質が宇宙に大量に存在することを意味している。この物質は、輝かない物質という意味で暗黒物質（ダークマター）と呼ばれている。

現在、暗黒物質はわれわれの銀河を含むさまざまな銀河や銀河団など、銀河以上のスケールの天体に普遍的に存在していることが知られている。その量は、われわれの銀河で輝く物質の10倍以上、銀河団のスケールでは100倍以上であると推定されている。（小玉英雄）

現在の宇宙は膨張している。しかし、この膨張が永遠に続くという保証はない。実際、重力がつかねに引力として働くことから予想されるように、われわれの宇宙の膨張は時間とともに減速している。この減速の割合は、宇宙の物質密度（\*1）によって決定される。平均密度が、膨張スピードから決

## 宇宙の物質密度が、 膨張スピードの減速率を 決定する

まある臨界値（臨界密度）以下の宇宙は、いつまでも膨張を続ける。それに対して、平均密度が臨界密度より大きい宇宙は、ある程度膨張した後段階で収縮へと転じる。もう少し平均密度や臨界密度は、宇宙の膨張とともに変化する。しかし両者の大小関係が、途中で逆転することはない。

以上で述べた物質や天体の未来のシナリオは、宇宙が開いていて、宇宙が限りなく膨張を続ける場合のものである。これに対して、宇宙が閉じている場合にはシナリオが大きく変わってしまう。閉じた宇宙では、ある時間の後に宇宙は縮み始める。すると宇宙は、それまでの進化をほぼ逆にたどることになる。物質の密度は次第に上がり、それにもなつて宇宙の温度は上昇する。そして、ついには限りなく高温・高密度の火の玉へと戻ってゆくことになる。これを、ビッグクランチと呼ぶ。現在、われわれの宇宙が閉じているのか開いているのかは確定し

## 終末の迎え方は、 宇宙の暗黒物質の 存在量にかかっている

ていない。物質分布に関する直接の観測は、開いている可能性が大きいことを示唆しているものの、閉じている可能性も残されている。特に、ダークマター（暗黒物質）と呼ばれる電磁波では観測不可能な物質（\*2）が、宇宙の質量密度の主要部分を担っていることが最近確実になってきている。しかし、その正確な量は依然として決定されていない。

\*2 宇宙の物質密度 万有引力定数と宇宙の膨張率を与えるハッブル定数から求められ、臨界密度  $\rho_c = (5-20) \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$  である。これに対して実際の平均密度  $\rho$  は、 $\rho_c$  との比で  $\rho/\rho_c = 0.3-0.4$  程度の可能性が高い。遠方の銀河分布を調べた空間の曲率観測から、 $\rho/\rho_c$  が1前後の可能性があるという報告もある。  $\rho/\rho_c \leq 1$  なら開いた宇宙となり、 $\rho/\rho_c > 1$  なら閉じた宇宙となる。

\*1 S・ホーキング 20歳代の初めに「特異点定理」を証明した。これによって、古典的な相対性理論では、宇宙の初期特異点の発生が避けられないことを示した。それを皮切りにして、崩壊性側素粒子化と異なりながら、世界の物理学をリードしている理論物理学者。ブラックホールの量子論的蒸発、宇宙の量子論的創生など、次々と大胆なアイデアを提出している。

ブラックホールの蒸発

## ブラックホールも 量子論的メカニズムで 蒸発してしまう

通常、ブラックホールは物質を吸収することはあっても、放出することはないと考えられている。そうならば、陽子崩壊の後に残った唯一の天体であるブラックホールだけは、宇宙が存在する限り永遠に残りそうに思われる。

ところが、イギリスの天才物理学者ホーキング（\*1）は、じつはこのブラックホールも、量子論的なメカニズムにより、いつかは蒸発してしまうと断言している。

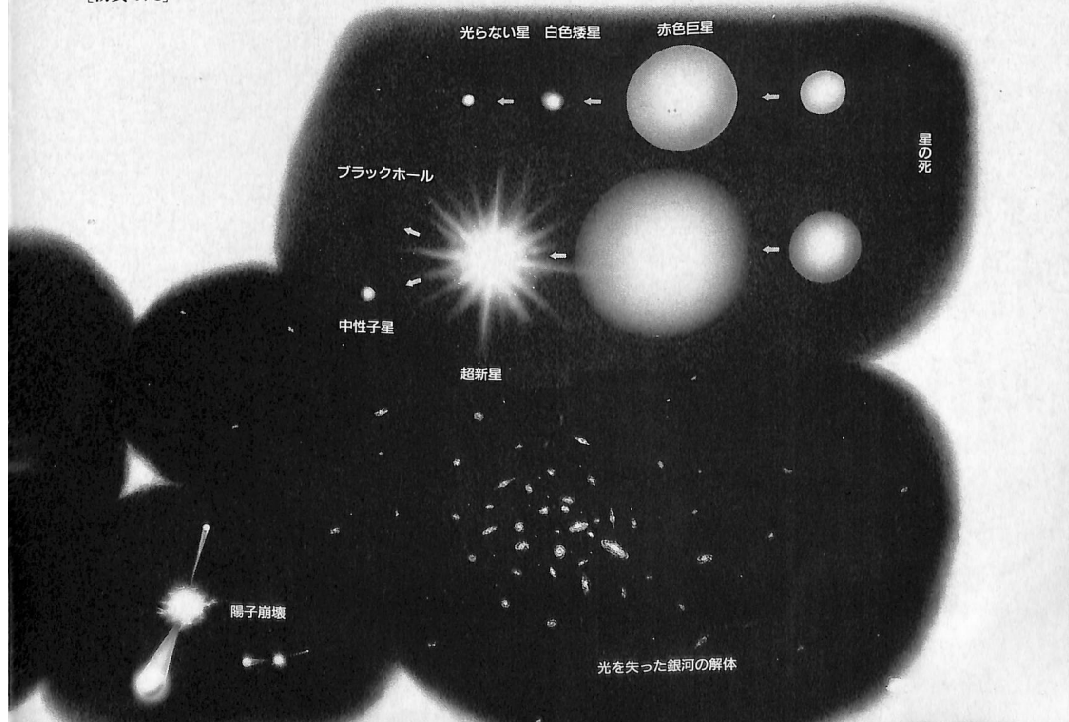
この断言に従うと、超新星のあとに残されるブラックホールは、一〇の六六乗年後には蒸発して、長波長の電磁波へと変わってしまう。さらに、銀河質量程度の大ブラックホールになると、一〇の九乗年後に同様な終末を迎える。したがって、この悠久の年月の後、宇宙の物質はすべて、電磁波とニュートリノ、およびわずかの電子、陽電子へと分解されてしまうことになる。

新たな星の誕生がなくなり、残された白色矮星や中性子星は、冷えて光らない星になる。光らない星とブラックホールと惑星とで、光らない銀河になる。やがて銀河や銀河団は解体し、光らなくなった星と「物質の死」

と、崩壊して出てくる陽電子は電子と対消滅を起こし、ほとんどが光となってしまう。このため陽子崩壊が進むにつれ、天体は次第に光とニュートリノを出して蒸発し、最後には完全に消滅してしまう。したがって、陽子の寿命を一〇の三三乗年程度と仮定すると、そのときの宇宙には、ブラックホールが残らないことになる。

あとは、宇宙に一樣に広がった光のない電磁波、ニュートリノ、対消滅を免れたわずかの電子と陽電子のみが残ることになる。当然、炭素を基礎とする生命体は、どう頑張っても存在できなくなる。

ブラックホールが宇宙にばらばらに分布する。10<sup>10</sup>年たつと陽子崩壊が起こり、宇宙には電子、陽電子、ニュートリノ、光子、ブラックホールが残る。最終的には、ブラックホールは蒸発してしまう。



光を失った銀河の解体