

宇宙の起源と進化

—星が作った多様な宇宙—

東京大学大学院理学系研究科
ビッグバン宇宙国際研究センター准教授 茂山 俊和



今日皆さんにお話しするのは、「宇宙の起源と進化」ということで、宇宙の中でも恒星によって作られた、あるいは恒星の進化によってもたらされた非常に多様な宇宙について、そして、われわれと恒星の進化との密接な関係についてお話しするつもりです。

恒星というのは、もともとは英語のFixed Star、空にフィックスしている、動かない星のことで、天球の上で位置を変える惑星に対する名前です。しかし、恒星が動かないように見えるのは非常に遠くにあるからです。

天の川を見たことがある方も多いと思いま

すが、天の川の写った写真でもその光っている部分は点状に見えて、ほとんどが恒星です。あるいはそれに照らされた、星と星の間にある雲が見えています。

われわれの太陽も恒星です。図1はX線で見た画像ですが、表面ではいろいろな活動を起こしていることがわかります。今日は表面の話ではなくて、太陽を含めた恒星の中身でどういうことが起こっているかという話をしようと思います。

まずは恒星がどういうものなのかを説明いたします。恒星というのは、一言でいえば高

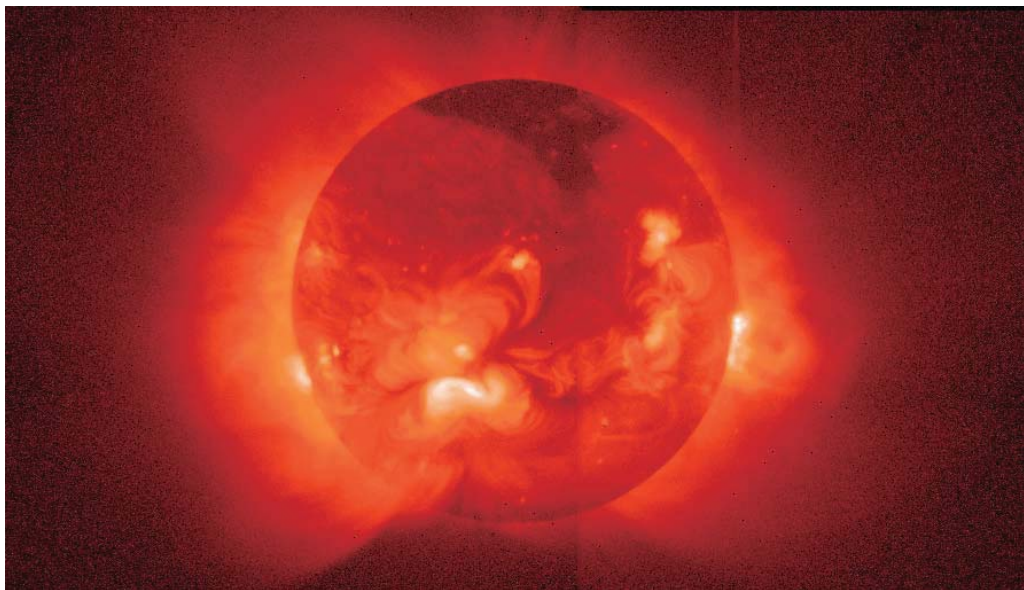


図1 太陽観測X線衛星ようこうによる太陽の画像
(国立天文台、宇宙科学研究所)

温ガスの塊です。何でかたまっているかというと、万有引力という、全ての物の間に働く、質量の積に比例して距離の二乗に反比例した強さを持って引き合う力で塊を維持しています。地球がわれわれを地上に引き止めておく力と同じ力が恒星を構成するガス同士にも働いています。しかし、引力だけでは恒星は潰れてしまいます。これと対抗する外向きの力と釣り合って、恒星はその形を維持できます。その外向きの力が圧力の勾配です。つまり、ガスが持つ圧力が外に向かって小さくなっていて外向きに力が加わっているのです。

太陽の場合は、そのガスの塊がどれくらいあるのかというと、キログラムにするとおよそ $2 \times 10^{30} \text{kg}$ です。10の30乗というあまり見慣れない数ですが、1のあとに0が30つく非常に膨大な量です。地球もわれわれの日常の感覚から言うと非常に大きなものですが、太陽はその30万倍ぐらゐもある非常に巨大なガス球です。

サイズを見てみると、半径はだいたい70万km、これは質量に比べると想像できないくらい大きいというわけではありません。地球の半径は6,400kmですから、それと比べると100倍ちょっと大きいくらいです。

太陽の表面温度はスペクトル観測から測る

ことができ、5,800ケルビンくらいです。ケルビン (K) という単位はこの話でもよく出てくると思いますが、これは絶対温度の単位でわれわれの日常使っている摂氏との関係では、摂氏0度がだいたい273Kくらいです。高い温度のことを言うときは、ケルビンでも、度でもほとんど変わらないので、私はどちらも混ぜて使うことがあると思います。

一方、中心の温度は直接測定するのはなかなか難しいのですが、いまではニュートリノを使って測定値としてもある程度の範囲では決まっています。推定値としては約1,600万Kで、もともとは理論的な太陽モデルを使って出された値です。これくらいの温度になっていると、ガスの中の主成分である水素が4つつくつく反応が起きています。「くつつく」というのはどういう意味かというと、化学反応で分子を作るということではなくて原子核同士がくつついて違う元素になってしまうことです。つまり、4つの水素原子核がヘリウムになってしまうという核融合反応が起きている。ここから出てきたエネルギーで太陽は長い間光り続けていると考えられています。

太陽のほかにも銀河系にはいろいろな星があります。図2にありますように横軸に星の色をとり、縦軸に絶対等級、本来の明るさを取って星を1つ1つプロットすると、この面に一様に分布するのではなく、あるところに集まって分布するようになっています。太陽をプロットすると矢印の位置になります。太陽と同じ質量の星は、だいたいこの位置にきます。

ではこの図で線状になった分布は何を表すのでしょうか。それにはまず星の色と表面温度の関係

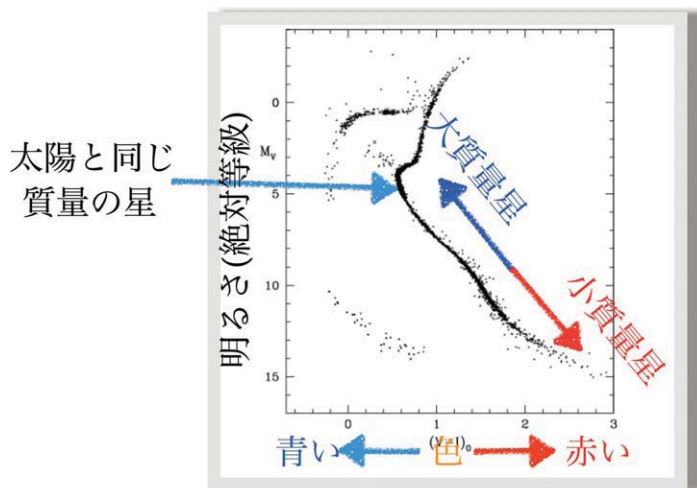


図2 恒星の色等級図

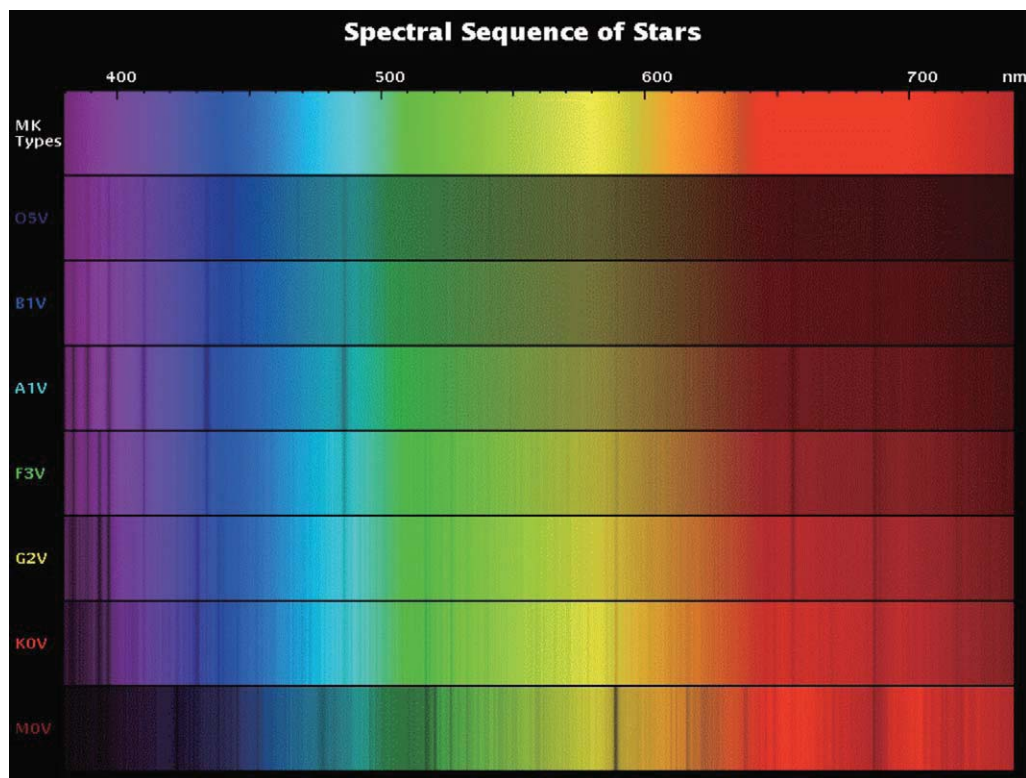


図3 色の違う7つの恒星のスペクトル
一番上の帯は白色光のスペクトル

を知っておかなければなりません。星の場合は色が青いものは表面温度が高い。日常生活では青いほうが冷たいような印象を受けますが、星では逆になっています。赤いほう、暖色系のほうが表面温度が低いというのが星です。

この星の光をプリズムなどで虹のように色別に分けたものをつくってやると、図3のように、星によってその明るさの分布が違ってきます。一番上のスペクトルを除く七つのスペクトルは、違った色を持つ七つの星のスペクトルです。たとえば上の星と下の星を見比べると、上の星は紫色のところは明るいのに対して、赤いところはちょっと暗くなっています。一方、一番下の星は、青いところは暗くて、赤いほうで明るい。このようにして色が違ってくる。そのほかにこの虹色の中に黒い線が見えていますが、この見え方も違って

くることになります。

実は、図2の星の分布は質量の違いによって明るさと表面温度が違う星であるということになります。下にある暗い星ほど質量が小さく、上にいくほど質量が大きくなります。このプロットでは質量の大きい星は、進化していて内部で構造上の変化が起こってしまっています。

ではその進化の原因を見るために、水素の核融合反応について少しお話しします。核融合反応は、先ほどお話ししましたが4つの水素原子核が結合して、一つのヘリウム原子核になるというものです。その原子核の1個1個を描くと、ナノメーターよりももっと小さいその100万分の1ぐらいのスケールになります。図4に赤い丸印で示すように、小さい水素原子核（陽子といいます）が4つあって、それが2つずつくっついて、重水素という原

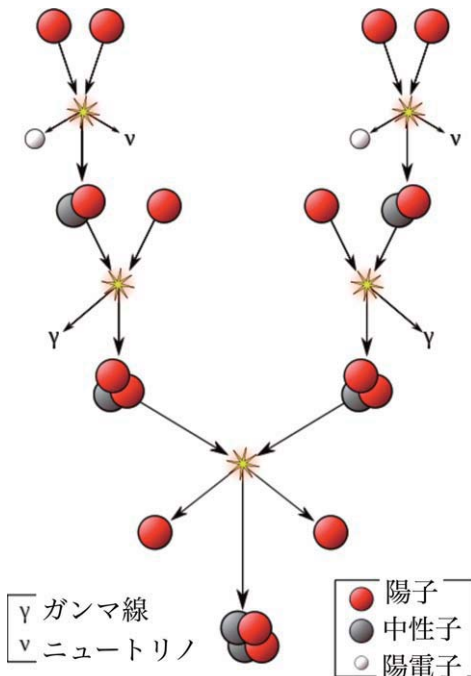


図4 水素核融合反応 (p-p chain) の模式図 (Wikipedia)

子核になります。さらにもう1個陽子がくっついて、ヘリウムの同位体、ヘリウム3になります。このヘリウム3が2つくっついて、陽子2個を弾き飛ばして、ヘリウムの原子核、陽子2つと図では灰色の丸印で示してある中性子が2つで構成される原子核を合成します。こういう反応 (p-p chainといいます) が絶えず太陽の中心部分では起こっています。

実は、恒星の内部では、陽子が4つくっつく反応はもう1種類あって、CNOサイクルと呼ばれています。このCNOは何かというと、炭素 (C) と窒素 (N) と酸素 (O) で、これらを触媒にして反応が起こります。図5がその模式図ですが、右回りに炭素、窒素、炭素、窒素、酸素、窒素と回っていくうちに、最後に窒素15が水素と衝突するときに壊れて、ヘリウムと炭素12になる。1周すると1つヘリウム原子核が合成される。使われる水素原子は4個なので先の反応と原料と合成物の関係は同じです。

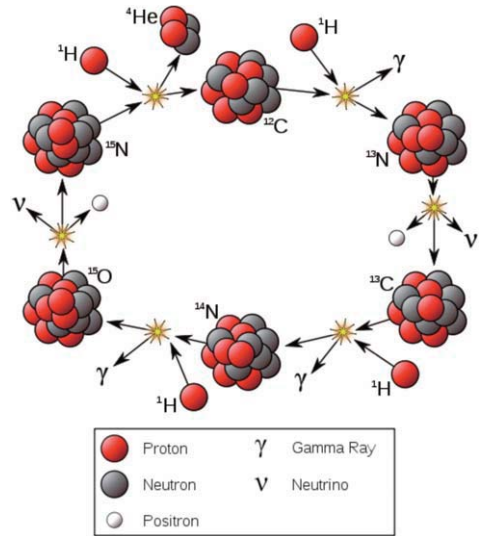


図5 水素核融合反応 (CNO cycle) の模式図 (Wikipedia)

このように触媒を通してヘリウムをつくるという反応も起こるのですが、太陽ではそれほど起こっていません。この反応が盛んに起こる星は、太陽より高温の星、図2に戻って頂ければ分かると思いますが、つまり太陽より明るく質量が大きい星です。この反応は温度に非常に敏感で、温度がちょっと高くなると、非常に早く回るようになるので、ヘリウムがいつぱいつくられ、水素の消費も激しくなります。

では水素核融合反応でどうして太陽は輝けるのか。これはアインシュタインの相対性理論のエネルギーと質量の関係、 $E = mc^2$ 、エネルギー (E) = 質量 (m) × 光速 (c) の2乗に拠っているわけです。どういう意味かというと、質量とエネルギーは、置き換え可能である。ある質量を持った粒子が消えて、エネルギーにもなるし、あるエネルギーから質量をつくれる、こういう意味を持ったものです。

では水素の核融合の場合どうなるか。水素原子核4個とヘリウム原子核1個の質量を比べてみると一つのヘリウム原子核のほうが

四つの水素原子核を足したものよりも軽いのです。そうすると、この式から余分な質量がエネルギーに変わったことになります。そのエネルギーは γ 線という非常に高エネルギーの電磁波とニュートリノが主に担います。ニュートリノは小柴先生がノーベル賞をとって有名になりました。

ではこの核融合反応生成物で出てきたもの（ヘリウムと γ 線とニュートリノ）はどうなるのでしょうか。ヘリウムは中心付近に貯まります。 γ 線は、恒星内部のガス、主に電子と散乱、吸収・再放射を何回も繰り返しつつ、外側にじわじわと広がっていきます。表面からはわれわれが太陽で見ているように、可視光として放射されて、この核融合反応から出てきたエネルギーが外に出てきます。恒星が輝き続けられる理由がここにあります。水素核融合反応が続く限り恒星は輝いているのです。

一方、ニュートリノは、エネルギーとしては太陽のような星の場合はそんなに多くないのですが、そのほとんどは恒星内部のガスと反応せずにそのまま外に出ていきます。ということは、ほぼ光の速さでニュートリノは飛んでいきますから、太陽だとだいたい2.3秒で表面を通過していってしまう。そして、宇宙空間にエネルギーを持ち去っていきます。

さて、太陽の内部の話をしました。いろいろな星をプロットした図2の色と等級の図で最も星が集まっている右斜め下に向かう線上の列は主系列と呼ばれていて、中心で水素の核融合反応を起こしている星が並ぶ列です。上にいくほど大質量の星が並んでいて、下にいくほど小質量の星が並んでいます。こういう傾向になることが理論モデルとの比較でわかっています。

しかし、主系列の上の部分を見ると右に折れ曲がっています。実は水素核融合反応が中心で起こっている太陽より重い星が、このサンプルの中にはほとんどないことを示しています。水素核融合反応が大質量の星の中心部分でまだ起こっているのであれば、こ

のまま左上に延長するかたちで星の分布が伸びるはずですが、ここで折れ曲がるということは、大質量星ではすでに何か異変が起きているということになります。そして、折れ曲がった先の右上に延びている部分にある、絶対等級が大きい、つまり明るくて色は赤い星を赤色巨星といいます。こういう星に主系列から進化していきます。

このように質量が様々に違う星が主系列に並んで、進化とともにこの図の上で決まった道筋を通っていくということで、一様には分布しないのです。もし、形成されて間もない星団の色と等級の図を描いてみると、主系列だけがずっと大質量星のほうまで延びています。進化した星はまだなく、水素核融合反応を中心に起こしている星ばかりになります。

水素核融合反応はエネルギーが出てくる発熱反応なので、天文の業界では化学反応の燃焼との類推から核融合反応の生成物を「燃えかす」と言ったりします。反応が続いていくと中心付近では燃えかすが貯まってしまい、核融合反応は中心では一旦止まってしまいます。しかし、核融合反応は燃料の水素がまだ残っているその周りで起こるようになってきます。そうすると恒星の構造がガラッと変わり、水素のある外層が膨らんでいきます。そして図6に示してあるように赤色巨星になっていきます。

水素核融合反応の燃えかすとして中心に残ったものをヘリウム中心核といいます。水素の核燃焼、核融合反応が外側で起こっているため、ヘリウム中心核の質量はどんどん増え続けます。すると、自分の万有引力でどんどん収縮していきます。物質が熱を逃がさずに収縮していくと、温度が上昇していきます。ヘリウム中心核は密度が高いので熱を外に輸送するのに時間がかかり、熱をあまり出せないということで、収縮に伴って温度が上昇していきます。

先ほど水素核融合反応が起こっているところの温度は、太陽の場合、約1,600万度だと言いましたが、この温度上昇によって中心核

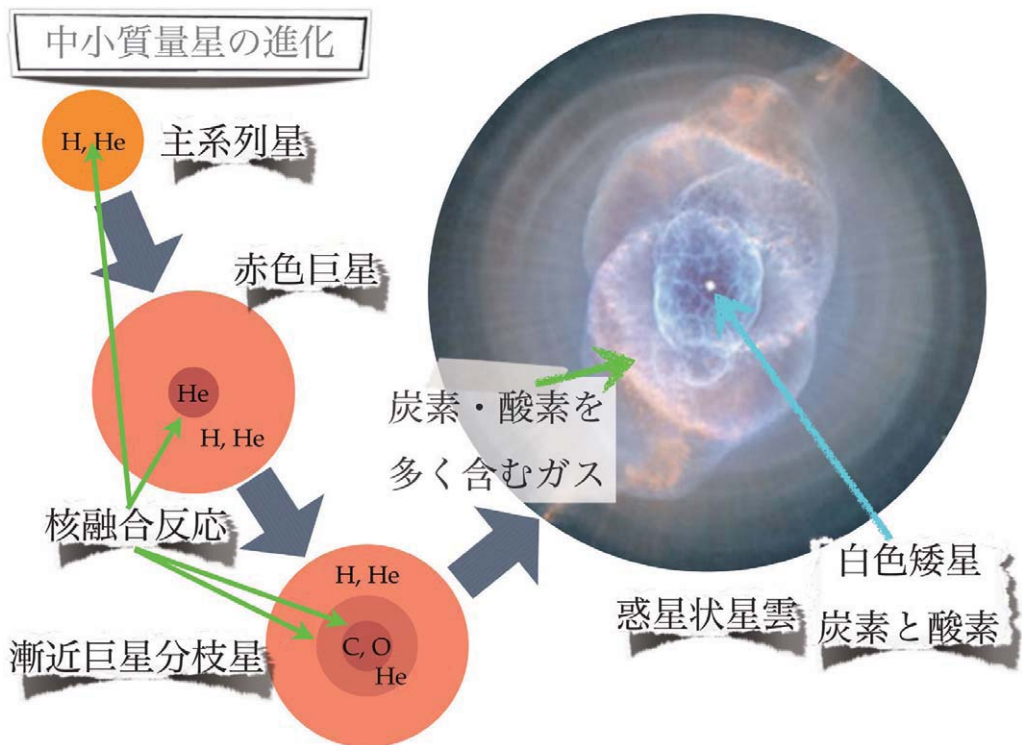


図6 中小質量星の進化とそれにも伴う元素組成の変化の模式図
(写真：NASA)

の温度が3億K、3億度ぐらいまでになると、今度は新たな核融合反応が起こります。つまりヘリウム原子核同士がくっついて違う元素になるという核融合反応が起こり始めます。

ヘリウムの原子核のことは、昔、アルファ粒子と言っていたので、その名残でトリプルアルファ・リアクションと言います。これはヘリウムが3つくっつく三体反応です。その結果、炭素原子核が合成されます。この反応もやはり発熱反応です。先ほどの $E=mc^2$ を使った議論をもう一度繰り返すと、ヘリウムの原子核三つの質量よりも炭素の原子核の質量のほうが軽いので、エネルギーを放出します。もう少し詳しく見てみると、まず、ヘリウム二つがくっついて、一瞬ベリリウム8という原子核をつくります。しかし、このベリリウム8という原子核は、 10^{-17} 秒というものすごく短い時間で壊れてしまいます。壊れ

る前に三つ目のヘリウムがくっつく炭素になる。こういう奇跡的なタイミングでヘリウムがくっつくことができる状況は、自然界ではおそらく恒星の中しかないでしょう。非常に時間をかければまれにこういう反応が起こるのです。また、反応の確率を増やす条件として、非常に速いヘリウムがあること（温度が高い）とたくさんヘリウムがあることも必要です。したがって温度が高くて、物質がたくさんあって、長い間存在できる。そういう条件を備えた恒星の中でこういう反応が起こって炭素ができるわけです。

炭素ができたとこで、炭素にもう一つヘリウム原子核がくっついて酸素をつくるという反応も起こります。そこまでの進化を遂げると、図6の漸近巨星分岐星と示してあるような星の内部の構造になります。中心では炭素と酸素でできた核ができて、その周りにヘ

リウムがあって、その周りに水素とヘリウムがある。この境目ではそれぞれ原子核反応が起こっています。

中小質量星、太陽やあるいは太陽の7～8倍ぐらいの質量を持った星の進化というのはここで終わりです。最後には、水素とヘリウムの外層、およびヘリウムの外層、両方を図6の写真にあるように周りに吹き飛ばして、中心には白い天体、炭素と酸素でできた白色矮星と呼ばれる天体が残ります。

これは非常にきれいな天体で、惑星状星雲と言います。なぜ広がったガスがこのようにきれいに光るかという、白色矮星は紫外線をたくさん出して、周りのガスに含まれる炭素や酸素、あるいは窒素原子を励起して、その励起したものが脱励起するときに特有の色の光を出すので、カラフルな天体として観測されるわけです。これが中小質量星の進化の最後です。惑星状星雲は炭素や酸素を多く含むガスが宇宙空間にばらまかれる現場なのです。

さて、白色矮星はどうなるか。まず白色矮星が、なぜ矮星と呼ばれているかということ、小さい星だからです。半径はだいたい地球と同じくらいで、1万kmぐらいしかない星です。白色矮星の質量は、もともと白色矮星をつくった星の質量によるわけですが、だいたい太陽の10分の1から、太陽の1.4倍近い星まで見つかっています。このように地球の半径の中に太陽と同じぐらいの質量を詰め込むと、非常に高密度になります。この高密度になった物質は、ある程度質量が大きくなるとその自己重力を支えきれなくなります。つまり、限界の質量があるのです。このことをチャンドラセカールというインドの天文学者が、19歳のときにインドからイギリスのケンブリッジに留学に向かったときの船の中で考えたとされています。その限界質量が太陽質量のだいたい1.4倍ぐらいというのをかれは導き出しました。この限界質量というのは天体現象、特に超新星等の爆発現象を考えるうえで重大な意味があるものです。

白いということはすべての色で光を強く出していることを示しています。従って表面温度は高く、数万度、数万ケルビンぐらいある。すでに内部で核融合反応は起こしていないので、熱源が無く温度は下がる一方です。最後は光をほとんど発しなくなって、黒色矮星になるだろうと考えられています。

しかし、暗くなるには非常に時間がかかると思われます。数十億年から100億年、宇宙の年齢がいま137億年といわれていますから、宇宙の年齢と同じぐらいかかる。こういうことを利用して、いろいろな白色矮星について、その温度と明るさを系統的に計ることで、時計として使おうという試みもしています。

では次に、太陽よりずっと重い星、太陽より10倍以上重い星はどう進化するのか。このような星は主系列にいるときには、中心付近での水素の核融合反応は、より高温下で起こるCNOサイクルにより進みますので、中小質量星より速く進みますが、同じように炭素と酸素の中心核ができます。大質量星では炭素と炭素が核融合反応を起こし、さらにその先に核融合反応が進みます。そして、さまざまな核融合反応が起こります。質量も大きいので、サイズも大きくなって、超巨星という星になり、最後は超新星爆発を起こしてその一生を閉じるわけです（図7）。

その超新星爆発を起こす直前の星の中を見してみると、おそらくこうなっているだろうというのが図7に示してあります。いろいろな元素の層が玉ねぎ構造になっていて、一番内側では鉄の中心核ができています。その外にケイ素や硫黄の層ができています。その外に酸素、ネオン、マグネシウムなどの層があって、その外に炭素、酸素、またその外にヘリウム、さらに水素、ここにはヘリウムも含まれています。それぞれの境目でなお核融合反応が起こっています。この状態で中心にある鉄でできた核が増え続け、自身の重さに耐えきれずに不安定を起こして超新星爆発になります。

図7の写真は超新星爆発を起こしてから数千年たった残骸を望遠鏡で撮影したものです。

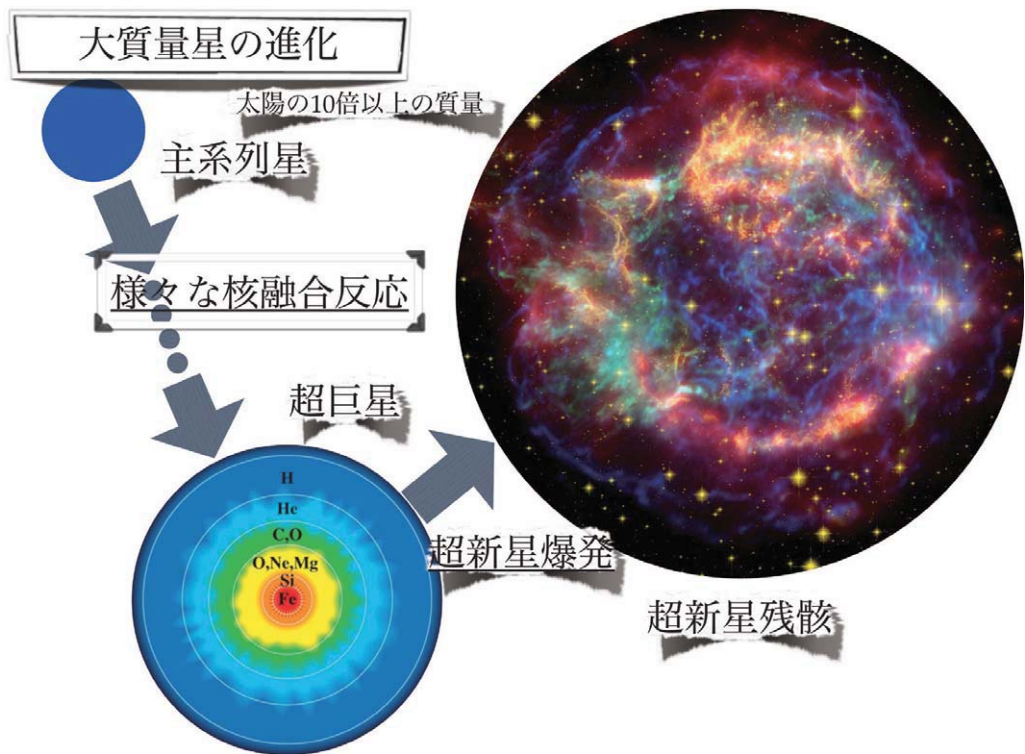


図7 大質量星の進化の模式図
(写真：NASA)

だいたい秒速数千キロで広がったガスとして観測されます。超新星残骸と呼んでいます。

では内部での核融合反応をもう少し詳しく見てみます。中小質量星は炭素・酸素ができたところで進化が終わりました。しかし、大質量星になると炭素と炭素がくっついて、マグネシウムやネオン、あるいはネオンをつくったときにおつりとしてヘリウムが出てくる反応が起こります。酸素と酸素がくっついてケイ素ができるという反応もおきています。ネオンが存在するところでは非常に温度が高いため、 γ 線もたくさん周りにある。それがネオンの原子核を壊してしまい、酸素とヘリウムができます。このヘリウムが、残ったネオンにくっついてマグネシウムをつくる。また、ヘリウムがケイ素とくっつくとか、いろいろな反応が起こるようになります。温度は非常に高くなり、最終的には放射性元素ニッケル56を経て、鉄56が合成される。これが反応の

主なパターンです。

鉄56というのは、原子核の中で一番強く結びついた原子核なので、その鉄の原子核が壊れる反応が起こると恒星にとって致命的なことが起こります。図7に示した構造で、鉄の中心核の周りでも鉄をつくる反応が起こっていて、鉄の中心核の質量はどんどん増えていきます。より質量が増えていくと、自分の重力にだんだん耐え切れなくなって、収縮していった高密度になり、同時に高温になる。非常に温度が高くなると鉄の原子核が壊れる反応が起こります。

ここまでの原子核反応はみんな発熱反応でエネルギーを取り出すことができたのですが、鉄の原子核が壊れて別の原子核になると、壊して他の原子核を作るのにエネルギーが要るということで吸熱反応になります。圧力を担っているエネルギーを取ってしまうので、圧力が減少してしまいます。

星というのは、中の圧力が高くて外に向かって低くなる、その力で万有引力に対抗していると言いましたが、中心の圧力が低くなると、その対抗する圧力の勾配が減ってくるわけです。そうすると万有引力が勝って収縮し続ける。これが重力崩壊と呼ばれるものです。

図8にあるポンチ絵が示すように、鉄の中心核が重力崩壊寸前のときは、半径が1,000 kmぐらいで、その中に太陽の1から数倍の質量の鉄が入っている。その原子核が壊れる反応が進むと、原子核が隣の原子核とびっしりくっついて、中心核全体が1個の原子核みたいな星が数秒でできます。それを中性子星と言います。もちろん高温高密度なので熱い中性子星になっています。半径は数十キロメートルです。

この非常に高温の中性子星は、光を出すよりももっと効率よくニュートリノを放射しています。ニュートリノでエネルギーを外に出して冷えていき、その冷える時間は約10秒です。星は寿命が非常に長いわけですが、最後はこんなに速く進んでいって、できた熱い中性子星の質量が軽い時には、冷えても中性子星のまま残り、重い時にはさらに重力に耐え切れなくなってつぶれてブラックホールになる。このような運命をたどります。

中心核は中性子星やブラックホールになりますが、では外側はどうなるのか。そこでは重力エネルギーを爆発のエネルギーに変えると考えられています。どういうことかということ、たとえばジェットコースターで高いところにほとんど止まるような速度でゆっくり来て、それから落ちていくと位置エネルギーを失う代わ

りに運動エネルギーを得て、一番低いところでは非常に速くなる。

これと同じようなことが、外にあったガスが中心核に落ち込むときに起こって、運動エネルギーになる。しかし、このエネルギーの90%以上はニュートリノが持ち去ってしまい、残りの10%か数%のエネルギーは中心核にガスが衝突してできた衝撃波が外側に持っていくことができると考えられています。この衝撃波が恒星の表面に達してどんどん広がっていくと、爆発して激しく光るので、われわれは超新星として観測することができます。これが大質量、太陽よりも10倍以上重い恒星の最期だと考えられています。

図9は超新星が起こっている銀河の写真です。左側は超新星が爆発する前の銀河で、同じ銀河を超新星が出現したときに撮ったものが右側の写真です。矢印の先にある白い点が、大質量星が爆発した超新星だと思われています。

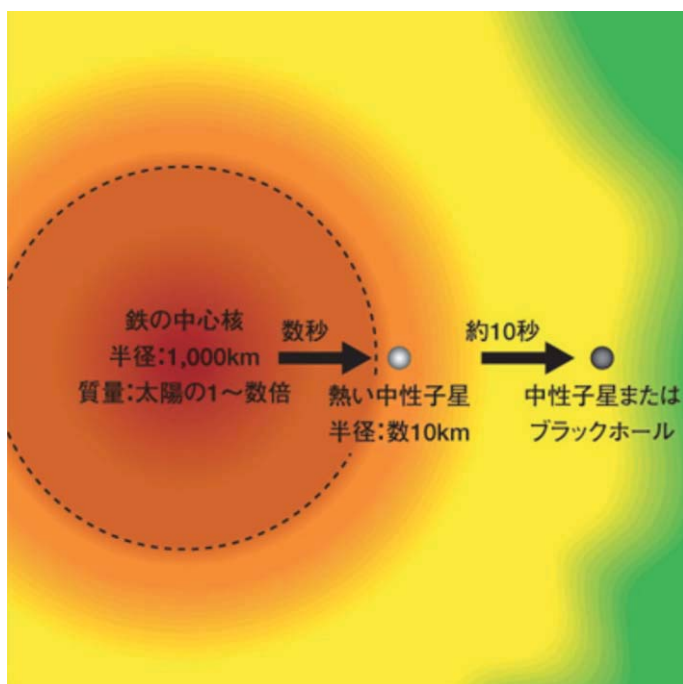


図8 大質量星中心核の進化の模式図

(理科年表：丸善、徹底解説天文部「超新星とは何か」より転載。

URL : http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/tenmon/tenmon_016.html)



図9 超新星が出現した銀河の画像
(NASA)
右の画像に超新星が写っている (矢印参照)

このように銀河の中でひととき明るく光る星が突然出現することが観測されます。1987年にお隣の大マゼラン雲というところで起きた超新星では、小柴先生が率いたチームによって、可視光で出現が確認された約3時間前にニュートリノが11個検出されて、それをきっかけにしてニュートリノ天文学ができ、小柴先生はノーベル賞を受賞されました。

ではこういう現象を理論的にはどのように理解するか。先ほどシナリオをお話ししましたが、物理の分野では運動を記述する方程式を立てて、それを解くことによって現象を再現します。こういう複雑な系では、紙と鉛筆だけでは方程式を解けませんので、コンピューターを使って計算します。しかし、実は計算上は大質量星を爆発させて超新星を再現するということは、まだ成功していないのです。この数年で数例、計算上でも超新星爆発が成功したと言う報告がありますが、未だ検証が必要な段階です。どうして外層を吹き飛ばすような超新星が起こるのか、まだ本当の意味ではだれも知らないのです。シナリオはできているけれども、計算上はまだ再現できていないという状態にあります。

こういう重力崩壊型超新星、非常に重い星が最後に爆発したときには、非常に温度が高

くなる領域があるので、そこではやはり核融合反応、あるいは融合だけではなくて破砕反応が起こって新たな元素が合成されています。ニュートリノ放射で中性子星が冷えるのは10秒ぐらいなので、こういう反応が起こる時間はおそらく10秒ぐらいしかありません。温度がだいたい50億度の領域では、鉄になる放射線元素、ニッケル56が合成されます。もっと温度が高くなってしまふところもあり

ますが、そういうところではニッケル56が壊れてしまって、ヘリウムになることが知られています。

ニッケル56は、実は半減期が6日ぐらいでコバルト56に変化して、そのコバルト56は半減期が77日ぐらいで鉄56になる。このときに γ 線が放射されます。そのエネルギーで超新星は光っていて、明るさが減る時間もだいたい77日ぐらいになっています。

鉄ができるということを強調しましたが、実はこういう超新星では鉄より重い(原子番号が大きい)元素も合成して放出するだろうと考えられています。重い元素とはどういうものかという、おなじみの元素としては、たとえば銀、金、鉛、ウランなど、このほかにもいろいろな元素がありますが、そういう元素が超新星でだいたい10秒ぐらいという短い間につくられます。

ではこういう現象は、どれくらい待てば起こるのかということで、恒星の寿命は何で決まっているかという話をします。恒星が光りつづけていられるのは核融合反応による発熱のおかげなので、核融合反応が起こらなくなると恒星の寿命もそこで尽きる。中心で水素核融合反応が止まると、先ほど言ったように周りで燃えるようになる。そうすると赤色巨

星になります。その後の進化は非常に速いことが観測・理論、両面から推測できます。そうすると恒星の寿命は、中心で水素核融合反応が始まってから中心で止まるまでです。つまり主系列にとどまっている時間がほとんど恒星の寿命であり、赤色巨星になっている時間は少ししかないということです。

では恒星の寿命はどうやって見積もられるのでしょうか。水素核融合反応で決まるとすると、燃料とそれを燃やす効率の割り算で決まってくる。燃料を燃やす効率は、明るさと比例関係にあると考えられるので、質量を明るさで割れば恒星の寿命にだいたい比例したものになります。

明るさは星の構造で決まっています。星の構造を理論的に計算してみると、明るさは恒星の質量の3～4乗に比例しています。つまり太陽より2倍質量の大きい星では、2の3～4乗、つまり8倍とか16倍ぐらいの明るさで光る。これで質量を割ると恒星の寿命は、恒星の質量の2～3乗に反比例していることが分かります。つまり質量の大きい星は寿命がかなり短くなります。太陽の2倍の質量を持った星の寿命は、太陽の寿命のだいたい10分の1ぐらいだと考えられています。

いろいろな人が恒星の理論的モデル計算をしていますので、図10に星の寿命と質量の関係をまとめてみます。たとえば太陽の寿命はだいたい100億年とよく言われていますが、それに対して太陽の2倍の質量を持つ星の寿命は、この図によると10億年ぐらい、太陽質量の10倍ぐらいの星は、1,000万年ぐらいで寿命が尽きて超新星爆発を起こしてしまうことになります。もっと重い、太陽の100倍ぐらいの質量の星になると、実は明るさが恒星の質量に比例するようになってきます。星の構造が軽い星と比べてガラッと変わってく

るのが原因です。そうすると恒星の寿命は一定になり、だいたい200万～300万年ぐらいです。

宇宙年齢は、137億年ですから、この図を見てみると、太陽の80%ぐらいの質量の星の寿命が宇宙の年齢ぐらいになります。そこで、そういう質量を持った星の中で非常に古い、つまり昔に生まれた星を観測することで、できたての宇宙の情報を引き出すことも行われています。

恒星の進化といっても、恒星が単独でいる場合、ほかの影響をほとんど受けない状況ではこうなるとい話をしましたが、実は恒星の多くは連星系をなしています。半分以上は連星系であるとも言われています。

連星系にいる場合は、星の進化が単独でいる場合と比べて変わることがあります。特に、星がお互いの非常に近くを回っている場合です。これを文字どおり近接連星系と言います。そうするとガスをお互いにやりとりします。たとえば中小質量星同士の連星系であった場合、先ほどの星の寿命のグラフから分かるように質量が大きい星が先に進化して白色矮星

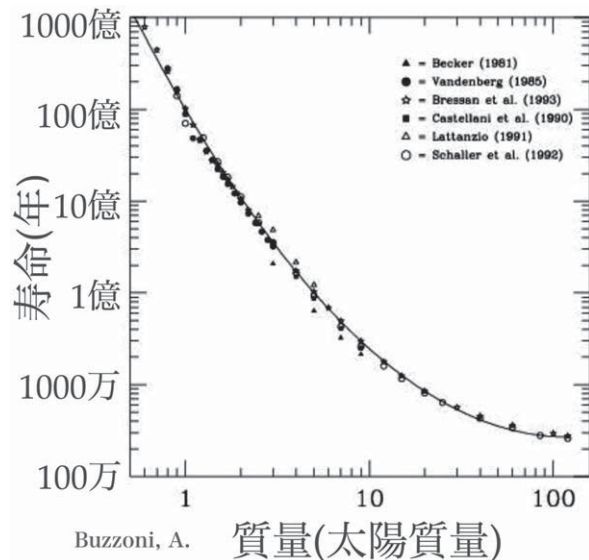


図10 恒星の質量と寿命の関係

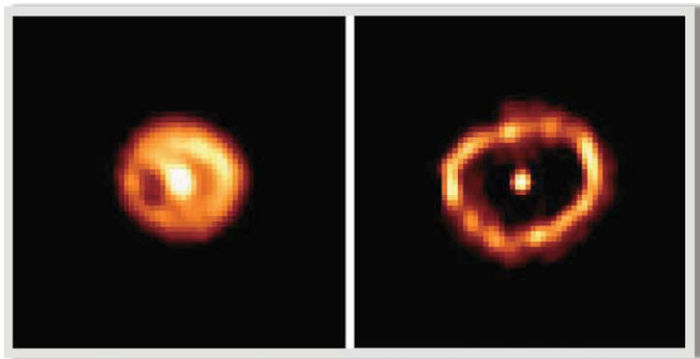


図11 新星によって放出された物質が膨張する様子を捉えた画像 (NASA)
左は爆発から1年3ヶ月後の画像で、右は爆発から2年後の様子

になってしまいます。

次に質量の小さい星が、赤色巨星になったときに、ガスが白色矮星のほうに降り積もってくるという現象が起きます。あるときには降り積もったガスが白色矮星の表面で核融合反応を急に起こし新星になったり、これからお話しする白色矮星自体が全部吹っ飛んで、先ほどの重力崩壊型超新星と別種の超新星ができると考えられています。

大質量星の場合にも、中性子星と恒星とか、ブラックホールと恒星とかいった組合せの天体が知られていて、X線で主に観測されます。

新星は白色矮星の表面での核融合反応によって起こる爆発現象です。この現象の後に白色矮星自体は生き残ります。図11は爆発から1年3ヵ月後と2年後に撮った、ある新星の写真です。光っているリング状のものがだんだん大きくなっている、つまり飛び散っているのが見えています。

連星系で起こるもう一つの超新星についてお話しします。これには炭素爆燃型という難しい呼び名がついています。先ほど、中小質量星が進化を終えて、炭素と酸素でできた白色矮星になり、周りは惑星状星雲になると説明しました。しかし、連星系の場合には相手の星があります。その相手の星からガスをもらうことによって、白色矮星の質量がまた増えることがあります。

白色矮星には限界の質量があると言いました。この相手の星からガスをもらうことによって、自分の質量が限界質量に達することがあります。そうすると、白色矮星は自分の重力でつぶれてますます高温高密度になり、炭素・炭素の核融合反応が白色矮星の中心近くで起こります。普通の星、すなわち大質量の星の場合、炭素・炭素の

核融合反応が起こっても、これでネオンやマグネシウムをつくって、最後は鉄の核ができます。しかし、白色矮星は、非常に高密度になっているせいで圧力の担い手が電子の縮退圧と言う圧力に変わっていることで、進化が大きく異なってきます。電子の縮退圧は温度が変わってもほとんど影響を受けません。従って、核融合反応による発熱で温度が上がっても圧力が上がらない一方で、核融合反応速度は温度上昇によってまた高くなり、反応が暴走した後に圧力が急上昇します。そしてその暴走が星全体に及んで、いわゆる核爆発が起こります。これを炭素爆燃型超新星と呼んでいます。この爆発では、限界質量の星の大半がニッケル56になり、太陽の質量の60%から多くて70%ぐらいのニッケル56、あるいは鉄が合成されると思われています。

こういう超新星が起きるには、恒星が生まれてからちょっと時間がかかります。それは、白色矮星をつくる中小質量星の寿命が長いからです。超新星になるまでにだいたい10億年ぐらいはかかるであろうと考えられています。

いまの連星系のイメージを描いてみると図12のようになっている、赤い星が普通の恒星で、円盤の中心に白色矮星がいます。ガスが直接落ちるわけではなくて、円盤をつくりながら落ちていく様子を描いています。一部はジェットになって出ていくかもしれませ

ん。この型の超新星爆発は数値計算でほぼ再現されていて、こちらのほうは爆発しないということはありません。ちゃんと飛んでいて、ある程度観測と矛盾のないような結果がでるようになってきています。

いままで星の進化と超新星のお話をしてきました。恒星の内部では核融合反応によっていろいろな元素が合成されるというのを見てきました。合成された物質は、超新星や新星で放出されます。超新星爆発自体で合成される元素もあることを見てきました。ではこういう元素は出てくるとしても、超新星や新星は、いま写真で見たように遠くの銀河で起こり、われわれの銀河系で起こっても太陽系からは非常に遠い。そこで、われわれやその周りにあるものと恒星や超新星はどういう関係があるのだろうかということを考えてみます。

われわれの身の回りには、超新星

や新星でできたものと同じ種類の元素でできているけれども、そもそもの初めから存在すればいいじゃないか、関係はないかもしれないというふうにも思うかもしれませんが、実はそうではありません。宇宙が膨張しているということで、その見方がガラッと変わるわけです。

宇宙が膨張しているのを発見した方法を簡単にご説明します。まず、遠方にある銀河のスペクトルをとります。その銀河のスペクトルを見ると距離が遠いほど、スペクトルの波長が長いほうにずれていることが観測から分かってきました。星のスペクトルをお見せしたときに暗いところがあると言いました。この暗いパターン（吸収線と言います）が遠くの銀河では赤いほうにずれていくのです。このずれはドップラー効果と呼ばれている現象で、銀河の運動と関係があります。

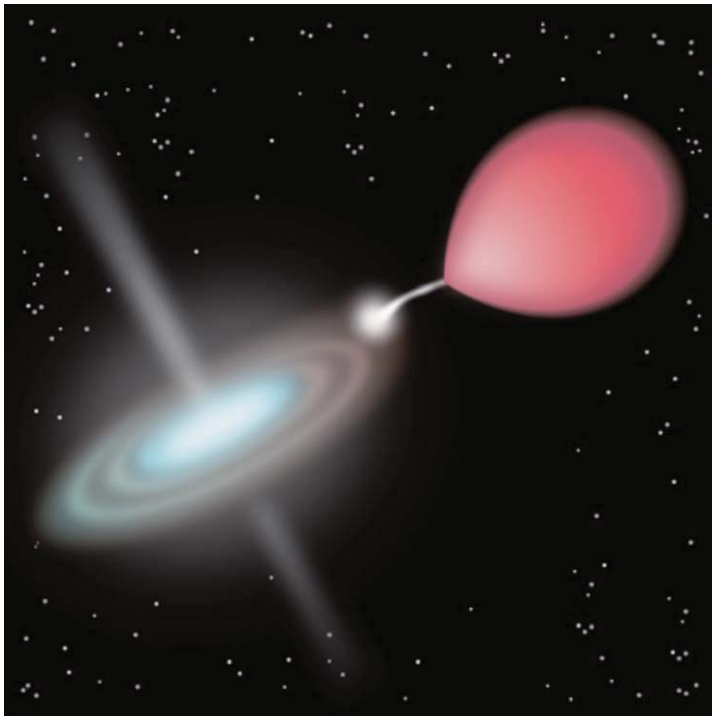


図12 炭素爆燃型超新星を起こす連星系の模式図
(理科学年表：丸善、徹底解説天文部「超新星とは何か」より
URL: http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/tenmon/tenmon_016.html)

たとえばある銀河を地球から見たときに、その銀河が遠ざかっていると、銀河が止まっているときと比べて、光の波長が伸びて、吸収線の位置も赤い方向にずれます。逆に、銀河が近づいていると、波長が縮んで吸収線は青いほうにずれます。これを光のドップラー効果と言います。音では、救急車のサイレンが近づくときに高く（波長が短く）なって、

遠ざかるときに低く（波長が長く）なるのは経験されていると思います。この吸収線の波長のずれから銀河の運動がわかるわけです。ドップラー効果で測れるのは視線方向の速度だけです。

ここでは方法は述べませんが、銀河の距離を計ってやると、銀河の距離と視線方向の速度に図13のような関係を1929年にエドウィ

ン・ハッブルという人が見つけました。点の1つ1つが測定した銀河です。結構ばらついているのですが、これに大胆に直線を引き距離と後退速度が比例していると彼は結論づけました。これが、宇宙が膨張している証拠であると彼は言ったわけです。現在ではもっと広い範囲で銀河の速度と距離の関係が調べられていて、彼の結果は非常に高い精度で確認されたことになります。

そうすると宇宙は膨張しているということになって、過去に遡れば宇宙は小さかったことになる。宇宙をそのまま縮めていくと、温度が上がります。これは熱を逃がさないように空気ポンプを素早く圧縮していくと中が熱くなるのと同じ原理で、宇宙を収縮させれば、宇宙には熱の逃げ場が外にないので、温度が上がることになります。

昔は熱かった。熱くなるとどうなるか。温度がおよそ3,000Kになると、水素がイオン化します。

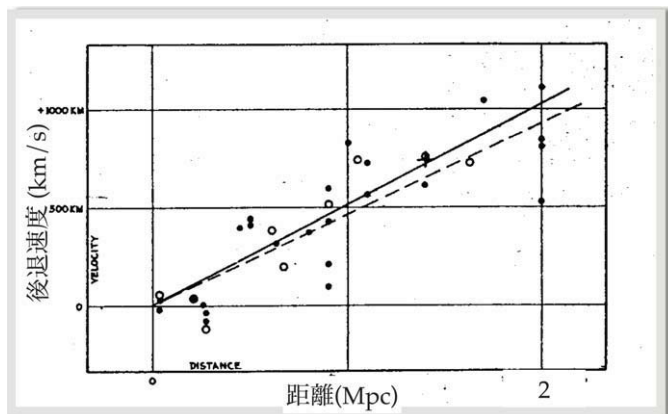


図13 Edwin Hubbleによって観測された銀河の距離と後退速度の関係 (Hubble 1929)

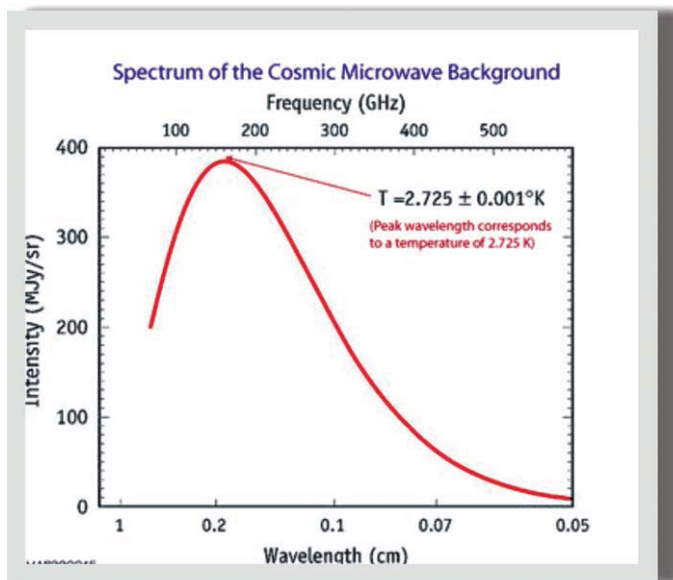


図14 宇宙背景放射観測衛星COBEによって取られた宇宙背景放射観測のスペクトル (NASA)

水素原子では、水素原子核の周りに電子が1個回っています。イオン化するとその電子が離れていってしまう。その離れていった電子は光と非常によく相互作用して、光を散乱します。そうすると光はまっすぐに進めなくなるので不透明になります。光と電子が非常に密接に絡み合っただけでプラズマ状態になったところでは、黒体放射と呼ばれる放射が宇宙に満たされることになります。

ここから、過去に遡っていた時間を未来に向けて進めてみます。そうすると、膨張とともに温度が下がる。この時代では温度が宇宙の大きさにだいたい反比例することがわかっています。温度が3,000 Kより小さくなると、先ほど言ったのと逆のことが起こり、電子は水素の原子核と再結合します。

そうすると光にとって邪魔ものの電子が水素原子に取り込まれてしまったので、宇宙が晴れ上がり、光がまっすぐ進める。ということは、先ほど黒体放射と言った光は、そのままの情報をまっすぐ進んでだれにも邪魔されずに、われわれのところに、今でも届けています。つまり、そういう光がわれわれの周りには満たされていて、図14のようなスペクトルとして観測され、宇宙背景放射と呼ばれています。

この図は、もともとは温度3,000 Kの黒体放射の光だったものが宇宙の温度の低下とともにどんどんエネルギーを下げて、あるいは膨張とともに波長が伸びて、いまでは零点何センチメートルという波長に伸びていることを示しています。温度3,000 Kの黒体放射は主に赤い光なので、先ほどの岡田先生の話にもあったように何百ナノメートル、600とか700nmぐらいの光だったものが、膨張とともに波長が伸びて零点何センチメートルになっています。温度に換算するとおよそ3 K、これは絶対温度で、摂氏に直すと-270度ぐらいになります。つまり、宇宙背景放射は温度3 Kという非常に冷たい物質から出てくる黒体放射と同じスペクトルを持っています。

正確には温度は3 Kではなくて測定結果を

見ると 2.725 ± 0.001 Kという非常に精度のいい観測値が得られています。これはどの方向を見ても、ほぼ同じ値です。宇宙背景放射は宇宙全体が昔は熱かった証拠なのです。

では高温の宇宙にあったものをもうちょっと考えてみます。もっと時間を遡ると、たとえば温度が1,000億度まで遡ってしまうと、そこで存在できる元素は、水素と中性子だけになってしまいます。元素のほかに素粒子としてはニュートリノ、光、電子、陽電子、このようなものだけで宇宙は構成されていました。

つまり、現在われわれの体をつくっているような炭素、酸素、鉄、骨にあるカルシウムなど、あるいは地殻を形成するケイ素とか、そういうものも全然ない世界だったのです。宇宙背景放射というのは宇宙全体の情報を含んでいるわけですから、われわれ地球があったところも、太陽があったところもこうなっていたわけです。つまりわれわれが存在するためには、恒星の中で水素の核融合反応を起こしてもらわなければならないということが、これでわかります。

実は高温の宇宙が膨張とともに冷めるときにも、核融合反応は起こります。しかし、宇宙は星の中ほど高温の状態が長続きせず、また密度も低いので、原子核が会って核融合反応を起こす頻度が非常に低く、図15にあるように、できる元素は主にヘリウムで、あとは少量のリチウムという軽い元素だけです。炭素や酸素が全然ない世界が宇宙開闢後1万秒後に宇宙を満たしていたということになるわけです。

先ほど言ったように38万年後には水素と電子が結合して宇宙が晴れ上がってきて、しばらく何も天体がない状態が続いた後、星や銀河が生まれ、現在に至ります。

でも宇宙背景放射が一樣だったならば、われわれはどうやって存在できるのかと考えると、たぶん存在できる可能性はないわけです。一樣のものが膨張していったら、また一樣なままですが、実は完璧に一樣ではないという

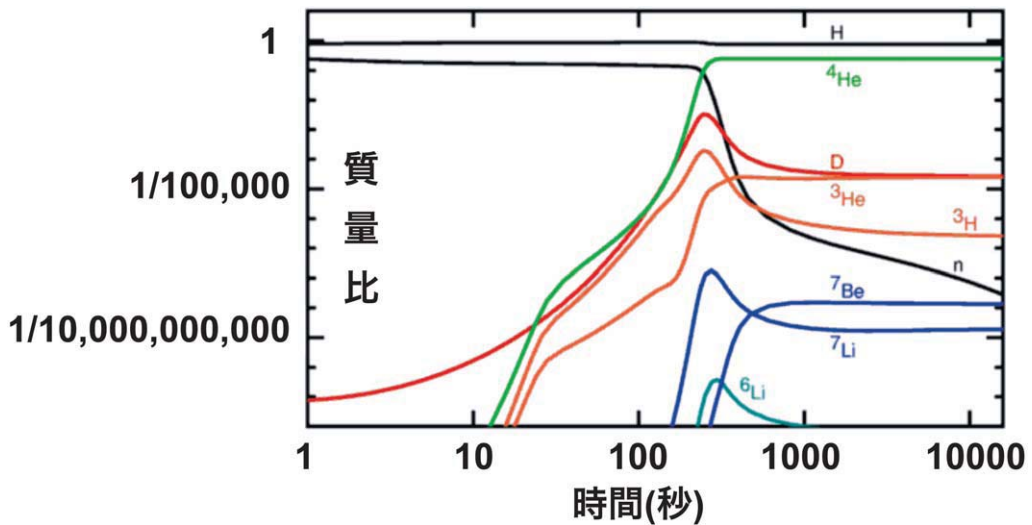


図15 ビッグバン元素合成による元素組成の時間変化
(Burles, Nollett & Turner 1999)

ことが、アメリカのCOBEやWMAPという観測衛星でわかりました。

図16がその衛星で観測した結果です。見る方向によって宇宙背景放射の強度がどう違うのかを天球図で表したのですが、ムラがあります。高いところ、低いところがあるわけで、この非一様性がその後、宇宙が膨張していくときに成長して天体の種になる。われわれもこの中で密度が高いところのどこかとつながっているはず。そのムラの違いは、この段階では0.001%ほどの非常にわずかな違いです。それが百数十億年をかけて今ある天体をつくったということになります。

ここでまとめに入りたいと思います。皆さんにまずお伝えしたかったのは、天体は変化、進化し続けるということです。恒星という呼び名にだまされないように。恒星は不変では

ありません。次に、われわれの存在には恒星は不可欠だということです。太陽はもちろん不可欠ですが、ほかの星も、もう死んでいった星たちもわれわれにとっては不可欠です。それはさまざまな元素がそういう恒星の中でつくられて、宇宙空間に放出されて、それをもとに地球がつくられて、われわれもいるということなのです。

とは言っても、天体が変化するのは、日常感覚からすると非常にまれなことです。では

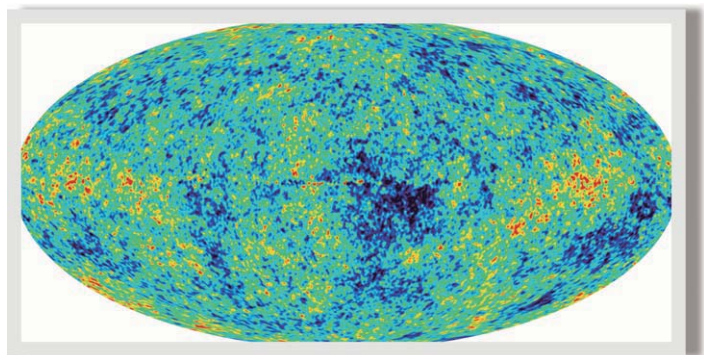


図16 宇宙背景放射観測衛星WMAPによって撮られた宇宙背景放射強度の天球分布
(NASA)

天文学はどうやってそういうことを観測で探っているかということ、一つのものを見ているとまれかもしれないけれども、たくさん見ればいい。たとえば100年に1度銀河で起こる現象も、100個の銀河を見れば1年に1回ぐらいになる。そういう論理を使って、たくさん天体を観察していれば変化が見えるわけです。こうやって天文学者は長い時間をかけてゆっくり変化する現象も理解することができます。

さまざまな元素がつくりだす多様性としては、もちろんわれわれに一番身近で変化に富んでいると思われているのは惑星です。これは固体を含んでいて、固体というのは星の中でつくられた元素が原料になっている。惑星の中には木星型惑星がありますが、木星型惑星よりもたぶん地球型惑星に非常にバラエティがある。先ほどの岡田先生のお話にもあったように、生命がそこで生まれて進化して、このあと未来はどうなるのかわかりませんが、様々な元素が星でつくられたことによって非常に興味深い現象が続いているということになります。

天体の多様性もあります。万有引力によってその多様性が生まれるわけですが、さまざまな質量の星があったり、連星系を成していて、いろいろな現象を起こしたり、あるいは星の集団をつくったり、その集団がもっと大きな集団をつくって銀河になったり、その銀河がまた群れて銀河団になります。

このように宇宙は天体の多様性も生み、いろいろな元素をつくることで、われわれの周りに広がる非常に多様な世界をつくったというお話をさせていただきました。どうもありがとうございました。