

10. 太陽と恒星

10-1 太陽

太陽の構造

太陽は肉眼で見ると球形に見える。これを光球と呼び、その表面は太陽内部のエネルギーが可視光として宇宙空間へ放出される面として定義される。太陽を含め、恒星の大きさとはそれぞれの天体の光球の大きさを指す。

太陽の視直径 ($31.98' = 0.533^\circ = 9.303 \times 10^{-3} \text{ rad}$) であり、これと太陽-地球間の距離から、太陽の半径 R_\odot が $696,000 \text{ km}$ と分かる。これは地球の半径の約 109 倍である。

太陽光は波長 $0.5 \mu\text{m}$ にピークを持つ黒体放射で近似できる。ここから光球面の温度は約 6000 K と分かる。太陽定数、太陽半径、太陽地球間の距離をもとに有効温度を算出しても同様の値が得られる。太陽の単位時間当たりのエネルギー放出量、すなわち光度は $3.846 \times 10^{26} \text{ J/s}$ である。

太陽光を波長別に分解したスペクトルには、特定の波長の光が吸収される様子が観察される。これは太陽大気に含まれる元素による吸収を示しており、吸収波長とその吸収の強さから、どんな元素がどんな割合で含まれているか求めることができる。太陽はほぼ水素(質量で約 75%)とヘリウム(約 25%)からなり、より重い元素群をわずかに含む(全て併せて約 1%)。また元素は電離した状態にあり、そのような気体をプラズマと呼ぶ。

表面の組成が太陽の内部まで保たれているとし、気体の状態方程式と静水圧平衡、またエネルギーの放出率から内部の温度分布を推定して太陽内部の密度分布を求めると、太陽の質量 $M_\odot = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$ をほぼ再現できる。このことは太陽全体が水素とヘリウムを主成分とするガス球であることを示す。

光球表面には粒状斑が観察される。これは表面付近のガスが対流していることを示す。この対流は深さ 20 万 km ほどまで続いているとみられる。これを対流層と呼ぶ。表面には周囲よりも温度が低い(約 4000 K)黒点も存在する。これは太陽表面の磁場が強い箇所を表している。太陽内部では電導性の流体が対流することによって地球の外核同様にダイナモ作用が働き、固有磁場が作られている。

太陽の黒点は約 11 年周期で増減し(ソーラーサイクル)、黒点の多い時期(もっとも多い時期を極大期と呼ぶ)は太陽の磁場が強く、太陽表面の爆発現象(フレア、プロミネンス)が盛んになり、放出される紫外線の強度も増す。太陽紫外線は 6000 K の黒体放射から期待される強度より強い。紫外線は波長のより短い X 線などと

もに、光球の上空に存在するもっと高温の層（彩層）から主に放出されている。さらに上空には温度が200万Kにも達する極めて薄いガスが広がっており、これをコロナという。コロナガスは太陽重力を振り切って宇宙空間に流出しており、これを太陽風と呼ぶ。太陽風が地球磁気圏に衝突することで、オーロラなどの現象が引き起こされる。

対流層より深い領域では対流は生じず、熱がもっぱら放射で運ばれている。この層のことを放射層と呼ぶ。さらに中心部には熱エネルギーを生み出している中心核が存在する。中心核の半径は10万kmほどで、中心温度は1600万K、圧力は 2.5×10^{11} 気圧、密度は $1.6 \times 10^2 \text{ g/cm}^3$ と推定される。

太陽のエネルギー源

太陽のエネルギー源として、かつては石炭のようなものが燃焼していると考えられたことがあった。また、ガス球が重力収縮することで重力エネルギーを解放する（熱に転換する）という提案もあったが、いずれの説も太陽が輝くことのできる期間が、地球の年齢よりもはるかに短くなってしまふという難点がある。特に前者の説は太陽の組成を考えるとまったく適合しない。重力収縮は太陽が星間雲の収縮で形成される際に実際に起きたと考えられる。しかし重力エネルギーの解放により現在の光度を持続できる期間は3千万年程度である。

太陽のエネルギー源は中心核における核融合反応に求められる。中心核では温度が高く、陽子が高速度で飛び交っており、これらが衝突して合体し新たな原子核を作る。合体と崩壊を連鎖的に繰り返しながら、結局、総和としては次の化学式のような変化が起こる。



ここで $^1\text{H}^+$ と $^4\text{He}^{2+}$ はそれぞれ水素原子核（陽子）と質量数4のヘリウム原子核、 e は電子を表す。天文学ではこの過程を水素燃焼と呼ぶ。¹

右辺のヘリウム原子核は、左辺の4つの陽子と2つの電子の質量和よりも0.7%分質量が小さい。これを質量欠損という。これは核力の働きでヘリウム原子核がより低い安定なエネルギー状態になっていることを意味する。質量が欠損した分はアインシュタインの関係式 $E = mc^2$ にしたがって、熱エネルギーに転換される。ここで E はエネルギー、 m は質量、 c は光速である。これが太陽のエネルギー源である。太陽内部で核融合反応が実際に生じていることは、連鎖反応によって放出されるニュートリノが実際に地球上で観測されることから裏付けられる。

¹燃焼とは本来は酸素と化合することを言うので、比喩的な用語であることに注意。核融合ではニュートリノなどの粒子も生成するが、これらの質量やエネルギーは小さいのでここでは無視した。

太陽の光度 L_{\odot} から毎秒どれだけの質量の水素がヘリウムに転換されているかが分かる

$$\left(\frac{L_{\odot}}{c^2}\right)\left(\frac{m}{\delta m}\right) = 6.1 \times 10^{11} \text{ kg/s} \quad (2)$$

ここで $\delta m/m$ は質量欠損率 0.007 である.

一方, 太陽には $1.5 \times 10^{30} \text{ kg}$ の水素があるので, このペースで水素を使い果たすには約 $2.5 \times 10^{18} \text{ s} = 8 \times 10^{10}$ 年, およそ 1000 億年かかることになる.

実際には, 水素の一定の割合がヘリウムに変化すると, 中心核でヘリウムが核融合反応を起こすようになり, 恒星が膨張して巨星の状態になる. 巨星になった後は急速に中心核で核融合が進むため, そこからは短い時間で星は一生を終える. これを考慮すると太陽の寿命は約 100 億年と推定される.

10-2 恒星

恒星のスペクトル型

星間ダストなどで遮られていない恒星の光のスペクトルは黒体放射で近似できる. みかけの色が恒星によって異なるのは, 恒星の表面温度によってピーク波長が違うためである. 基本的に星の色が青い (ピーク波長が短いほど) ほど表面温度は高く, 赤いほど表面温度が低い.

スペクトル型	ピーク波長 (μm)	色	表面温度 (K)
O	0.05–0.1	青	30,000–60,000
B	0.1–0.3	青, 青白	10,000–300,000
A	0.3–0.4	白	7,500–10,000
F	0.4–0.5	黄白	6000–7500
G	0.5–0.55	黄	5200–6000
K	0.55–0.75	橙	3700–5200
M	0.75–1.2	赤	2400–3700

恒星の明るさ

星の明るさは等級で表す. 値が小さいほど明るく, 一等級減るごとに明るさが $^5\sqrt{100} = 2.512$ 倍大きくなるものとして定義する. つまり等級の値が 5 減ると, 明るさが 100 倍になる.

星の見かけの等級は, 基準星の明るさをもとに定義されている. もともとは北極星を 2 等級と定めていたが, のちに北極星が変光星であると判明したため, 今では複数の明るさの変化しない星が基準にされている.

星の見かけの明るさは、真の明るさと地球からの距離によって変化する。真の明るさが同じでも、星までの距離が例えば2倍に増すと、見かけの明るさはその2乗に反比例して1/4になる。その結果見かけの等級の増加 Δm は、 $(\sqrt[5]{100})^{-\Delta m} = 1/4$ を解いて1.5となる。

星までの距離が計測できると、星の真の明るさを知ることができる。比較的近傍の恒星までの距離は、地球の年周運動に応じた見かけの方位の変化すなわち年周視差を計測する方法で求める。年周視差が1秒(1度の60分の1のさらに60分の1)になる距離を1パーセクと呼び、3.26光年に等しい。真の明るさを等級で表すには、その星が10パーセク(32.6光年)の距離にあるとしたときの等級で表す習慣になっている。これを絶対等級という。絶対等級 M と見かけの等級 m の間には、

$$M - m = 5 - 5 \log_{10} d \quad (3)$$

の関係がある。 d はパーセク単位で表した星までの距離を表す。例えば太陽の絶対実視等級は+4.82で、見かけの実視等級は-26.7である

HR図と恒星のタイプ

HR図 表面温度を横軸にとり、絶対等級を縦軸にとって多数の恒星をの観測値をプロットしたものをヘルツシュプルング-ラッセル図(略してHR図と呼ぶ)。この図から星のタイプを分類することができる。

主系列星 HR図上では太陽を含め多くの恒星が帯状の領域に集まる。これを主系列星と呼ぶ。主系列星は水素燃焼により輝いている恒星であり、基本的に質量が大きいほど真の明るさが大きく、表面温度も増すことが知られている²。光度 L と質量 M には

$$L \propto M^{3 \sim 5} \quad (4)$$

の関係が成り立つ。

ここから質量の大きな星ほど寿命が短いことが分かる。星の寿命は

$$\text{寿命} \propto \frac{M}{L} \propto M^{-2 \sim -4} \quad (5)$$

と評価でき、質量が倍になれば寿命はおよそ10分の1となる。

巨星 HR図上で主系列星よりも上側に分布する星は、表面温度が同じ主系列星よりも光度が大きい。単位表面積あたりの放射量は温度のみで決まるため、これらは主系列星よりもサイズが大きい星と分かる。そこでこれらの星を巨星と呼ぶ。巨星は、進化の最終段階を迎えた恒星である。

²伴星を持つ恒星は伴星の公転周期と公転半径から質量を求めることができる

白色矮星 HR 図上で主系列星よりも下側に分布する星は、逆に同じ表面温度の主系列星よりもサイズが小さい星と分かる。これらの星を白色矮星と呼ぶ。白色矮星は、恒星がその進化の最終段階で質量放出現象を起こし、核融合反応を終えた中心核が取り残されたものである。

恒星の進化

核融合反応により恒星の中心核には次第に重い元素が蓄積する。これによって核融合反応の効率や核融合反応を起こす核種が変わり、星の構造や光度が変化してゆく。それ以上の核融合反応が進まなくなり、星は一生を終える。この一連の過程を恒星の進化という。恒星の進化のスピードや最終段階におけるふるまいは、星の質量によって異なる。

0.08~0.4 M_{\odot} これらの質量の恒星は内部全体で対流が起き、星全体の化学組成が均一化する。そのため星全体の水素がすべてヘリウムに代わり、それ以上の核融合反応が進まなくなり、最後は白色矮星として一生を終える。ただしこれらの質量の恒星は宇宙年齢よりも寿命が長いので、いまのところ最終段階に到達したものは存在していない。終末段階の振る舞いは理論モデルに基づく予想である。

0.4~8 M_{\odot} この範囲の質量の主系列星では、中心に対流を起こさない放射層が形成される。中心部がすべてヘリウムになるとそこでは一旦核融合反応が停止し、ヘリウム核をとりまく層で水素燃焼が起こるようになる。中心部では核融合の停止と原子数の減少により収縮がすすみ、それによってむしろ温度が上昇するため、核融合反応の効率が上がり光度が増す。そのエネルギーによって外層が大きく膨張する。表面は主系列星段階よりも冷えて赤色巨星となる。HR 図上では時間とともに右上に移動する。太陽も約 40 億年後に赤色巨星になると予想される。

ヘリウム核の収縮はヘリウムの核融合反応（ヘリウム燃焼）による炭素や酸素の生成が開始する温度（約 1 億度）に上昇するまで続く。ヘリウム燃焼が穏やかに起こる段階では、星は光度をあまり変えず、表面温度が上昇するようになる。この段階の恒星を水平分枝星と呼ぶ。³

中心でヘリウムがすべて炭素と酸素に変わると中心核が収縮を起こし、それによる温度上昇によってこれを取り囲むヘリウム燃焼が活発になって、星は再膨張する。HR 図上では巨星分枝に再び接近するため、この段階の恒星を漸近巨星分枝星と呼ぶ。このタイプの星は、エネルギー放出が安定せず、特にその進化の最終段

³およそ $2M_{\odot}$ よりも軽い星の場合は、ヘリウム燃焼の段階に入る際に、数秒と短時間のうちに急激に光度を増す現象を経験する。これはそれ以上圧縮できない状態にまでヘリウム核が収縮してから、初めてヘリウム燃焼が起こることに起因する。このとき、ヘリウム燃焼でエネルギーが発生しても膨張による冷却が起きにくいいため、ヘリウム核全体の温度が上がり、いたるところで核融合反応が発生して急激な増光が起こる。十分に温まると中心部が膨張して、新たな構造に移行し、穏やかなヘリウム燃焼を起こすようになる。

階では時々急激な光度の上昇を起こし、そのエネルギーによって活発な対流を引き起こして核融合生成物の豊富な深部の物質と表層の物質をかき混ぜ、星の表面組成を大きく変化させる。また大きく膨張した外層部は重力の束縛が弱く、宇宙空間へ流出する。惑星状星雲はこのようにして流出したガスが、まだ十分に四散していない状態で観察されるものである。外層をほとんど失ってしまうと、それ以上核融合反応が起こらなくなり、星は白色矮星となって一生を終える。

>8 M_{\odot} 大質量星では、中心核の温度がさらに上昇し、水素燃焼とヘリウム燃焼を経た後に、炭素や酸素も核融合反応を起こしてネオン、マグネシウム、ケイ素、硫黄、鉄など質量数のより大きな元素がつぎつぎ生じる。1核子あたりの結合エネルギーは鉄が最大であり、核融合反応がそれ以上進むことはない。この間にやはり膨張を経験し赤色巨星となるが、表面温度の低下と膨張による光球面の拡大が相殺して主系列段階からの光度変化は相対的に穏やかである。これらの星は最後に超新星爆発を起こして一生を終える。超新星爆発とは中心部で一挙に大量のエネルギーが解放されて、星の外層が吹き飛ぶ現象を言う。その際の光度は、銀河全体の光度と同程度にもなる。

単独の星の場合、超新星爆発の原因となるエネルギーの放出は、星の中心核の崩壊に求められる。中心核が星の自重で十分に圧密されると、やがて電子の縮退圧（不確定性原理が理由で生じる）では重力を支えきれなくなって一挙に収縮が起こる。収縮は電子が原子核と結合して中性子となり、中性子の縮退圧（電子のそれよりも大きい）で支えることができる場合はそこで収縮が止まるが、それでも支えきれない場合は収縮を止めることができず、ブラックホールが形成される。この際に大量の中性子が周囲に放出され、これが外層を構成する原子に捉えられることで鉄を超える質量数を持つ元素が合成される。吹き飛んだ中心核の一部と外層ガスは、超新星残骸として観測される。

星の質量が8~10 M_{\odot} の場合、マグネシウムの合成まで進んだ段階で中心核が中心核が崩壊する。中心には中性子星が残る。これ以上の重さの星では、もっとも安定な原子核である鉄の合成まで進んだ後で、中心核が崩壊する。中心には中性子星やブラックホールが残る。ブラックホールを形成するには、もとの恒星の質量が25 M_{\odot} 以上必要と推定されている。