

やさしい天文学シリーズ (IV)

星 (1)*

星は生きている**

尾崎 洋 二***

1. 星は生きている

ウォルト・ディズニーの「砂漠は生きている」という映画を、子供の頃見られた読者も多い事と思う。この映画は、一見死の世界と考えられる砂漠も、よく見ると色々の生き物の活躍する実に変化に富んだ世界であるというものである。天文学の歴史をふりかえてみると、私達の星や宇宙についてのイメージも、この映画に似た所がある。

恒星という言葉は、もともと fixed star の訳語で、黄道 12 宮をぬって歩く太陽や惑星に対して、天球上に固定された星という意味であった。この言葉は、また未来永劫に変化することのない宇宙の象徴という風にも理解できよう。しかし、現在ではこれら恒星の一つ一つが我々の太陽と同じように、自ら光り輝く天体であることを、私達は知っている。そして、恒星が一見天球上に固定された小さな点にしか見えないのは、それがあまりに遠方にあるためである。

太陽をはじめ、星は莫大なエネルギーを出して輝いている。このような星が永遠に輝き続けることの出来ないことは明らかである。星が現在も星間ガスの中から生まれ、核燃料を使い果たし、最後は死んで行く事を、私達は知っている。しかし、このような星の一生は、何千万年、何億年という気の遠くなるような時間の話である。現在私達が普通観測する時間のスケールでは、大部分の星は安定で、静かに変ることなく輝き続けていると言ってよいであろう。しかし、これらの星一つ一つを詳しく調べてみると、星の世界は決して静かな死の世界ではなく、そこには激しく変化する活動に満ちた世界が繰りひらげられているのである。

たとえば、ある星では丁度心臓が脈打つように星全体が規則正しく膨脹と収縮を繰り返す脈動変光星であったり、また他の星では恒星風といって星の表面から秒速 1000 km にもものぼる速度でガスが噴き出していたり、また別の星では光球の外側に 1 千万度という高温のコロナが広がっていて、そこから強力な X 線を放射していたり、……といった具合である。私自身は、これまで星の脈動など恒星における動的現象に興味を持って研究してきた。このような立場から恒星の世界をながめると、

「星は生きている」という表現が一番びったりくると、私は思っている。

さて、やさしい天文学シリーズの今回の題目は「星」、すなわち恒星の物理学ということである。恒星の物理学は、普通二つの研究分野に分類される。一つは星のスペクトル解析などから星の大気構造を調べる恒星大気の研究、もう一つは星の進化について調べる恒星内部構造の研究である。これら両分野のすべてにわたって解説することは、紙数からも私自身の力量から言っても、不可能である。ここでは、むしろ「星の生きている」姿といった事に光をあてて、いくつかの話題について解説することにしよう。

2. 星って、なあに？

そもそも、星とは一体なんであろうか？ この問いに厳密に答えるのは難しい。しかし簡単に言えば、星とは自分自身が作り出す重力を内部の圧力で支えて、自ら光り輝いているガス球である、と言ってよいであろう。それでは、なぜ星は自ら輝いているのであろうか？ この質問に対して読者の中には、「星の内部に核燃料があるから」と答える人がいるかと思う。この答えは、半分正しく、半分間違っている。半分正しいと言ったわけは、大部分の星の光のエネルギー源は核融合エネルギーである、という点である。一方間違っていると言ったわけは、核燃料がなくても星は光り輝く運命にある、すなわち星はもっと別の理由で光を出しているのである。

別の理由とは、次のようである。星は自分自身の重みを支えるために、内部が高圧でなければならない。ところが、大部分の星では内部のガスは理想気体の状態方程式（ボイル・シャルルの法則）に従うと考えられる。この場合、内部ほど圧力が高いということは、内部ほど高温であるということの意味する。このように、星の中心が高温で外へ行くほど温度が低くなっていると、必然的に内部から表面へ向って熱が流れる。そして、この熱は最終的には星の表面から光になって宇宙空間に放射されるのである。これが星の光り輝く理由である。言いかえると、星が星である故に、星は自ら光を出すのである。

しかしながら、星が永い間輝いているためには、なんらかの形で表面から失うエネルギーを補ってやる必要がある。これが星の“エネルギー問題”である。よく知られているように、太陽のような主系列星の場合、水素

* Stars

** Stars are alive

*** 東大理 Yoji Osaki

をヘリウムに変換する核融合反応により、エネルギーを得ている。この水素燃焼反応では、できたヘリウム核の質量が使われた4個の水素原子核の質量の和より0.7%だけ少なくなっている。この不足した0.7%の質量が、アインシュタインの質量とエネルギーの等価原理 ($E=mc^2$) により莫大なエネルギーにかわるわけである。

星のエネルギー源としては、核エネルギー以外に重力エネルギーがある。すでに見たように、核エネルギーの発生がなくても、星は表面から光を放射している。このような星では表面からエネルギーを失った分だけ、星全体が収縮し重力エネルギーを開放する。開放された重力エネルギーの内、約半分は星の内部の温度を上げるのに使われ、残りの半分が表面からの放射エネルギーとして使われるのである。

太陽の場合、エネルギー源として重力エネルギーだけしかないとした場合約1千万年しか持たないが、水素融合エネルギーを考えれば約100億年も輝き続けることができる。上記の時間尺度を、それぞれヘルムホルツ・ケルヴィンのタイムスケール、核タイムスケールと呼んでいる。

核エネルギーと言えども、それは有限である。従って、核融合反応により恒星内部の化学組成は変化し、それともなると星は“進化”する。星は重力収縮と核融合反応を交互に繰り返しながら、水素からヘリウムへ、そして炭素へ、……と順次重い元素を合成し、より高密度の中心核を持った星へと進化していく。

3. 星の観測

さて、次に星の観測の方に少し目を向けてみよう。私達が星を観測する場合、直接見ることのできるのは星のほんの表面の部分だけである。私達はこの部分を星の大気と呼んでいる。私達は星の大気を観測することにより、星の質量 M 、半径 R 、表面温度 (有効温度 T_e)、光度 L といった基本的物理量を知り、更にその内部構造まで推定するのである。

星の観測で最も基礎になるのが、可視光による (すなわち地上望遠鏡を使った) 星の分光観測 (スペクトロスコピー) と測光観測 (フォトメトリー) である。私達は、恒星のスペクトルの詳しい解析から、星の有効温度・絶対等級といった基本的物理量を求めるだけでなく、星の大気中の元素の組成比、大気の運動状態といった事についても知ることができる。

実際 1950 年代までは、恒星分光学と言え、天体物理学とほとんど同義語に近い存在であった。現在では、天体物理学の研究対象は星間物質から銀河系外星雲までずっと広範囲にわたっている。また、恒星の観測についても、可視光による観測だけでなく電波、赤外、紫外、

X線とすべての波長域をカバーするようになった。実際、本稿の主題である活動性に満ちた星の姿についての最近の発見は、これら可視域以外の波長域の観測によるものが多い。しかし、星の観測に関する限り、光による分光観測・測光観測は、現在でも最も重要な観測であることに変わりない。

星には、色々の種類の星がある。これらの星について、その基本的性質に着目して分類することが重要である。この目的のための基礎になるのが、いわゆるヘルツスプルング・ラッセル図 (略して HR 図) である。これは、横軸に星の表面温度、縦軸に星の明るさをとり、この図上に色々の星をプロットするものである。星の表面温度を観測的に求める方法としては、星の色を使う方法と星のスペクトル型を使う方法の二通りがある。前者は測光学的方法によるもので、この場合の HR 図は色等級図とも呼ばれる。それに対して、後者はスペクトルの二次元分類に対応するものである。

星の光をプリズムに通してみると、7色の連続した光の帯が見える。これを連続スペクトルと呼ぶ。星の連続光エネルギーの波長分布は星の表面温度による。例えば、表面温度が2万度以上の高温星では、エネルギーの大部分は紫外域で放射され、肉眼では青白く見える。また表面温度3千度の低温星では、エネルギーの大部分は赤外域で放射され、肉眼では赤く見える。従って、星の色を測れば星の表面温度が推定できることになる。これが UVB 測光システムなどによる星の表面温度を求める方法である。

それに対して、スペクトル観測の場合は、吸収線の見え方を使う。星のスペクトルをとると、連続光スペクトルを背景にして、ところどころ吸収線が見える。このスペクトル線の見え方によって星を分類することができ、星のスペクトル型という。現在使われている分類はハーバード分類と呼ばれ、星によって O 型星、A 型星、K 型星などと分類される。そして、このスペクトル型は、星の表面温度と対応がついていることが、現在ではわかっている。星のスペクトル型を高温の星から低温の星へとならべると、次のようになる。

O—B—A—F—G—K—M.

O 型星は表面温度3万度あるいはそれ以上の青白い星であり、A 型星は1万度くらいの白い星、M 型星は3千度あるいはそれ以下の赤い星である。また、太陽は表面温度約6000度、G 型の黄色の星である。

さて実際に観測される星の HR 図について見てみよう。図1は、太陽近傍の星あるいは我々から見て明るく見える星についてつくった模式的 HR 図である。ほとんどの星は HR 図上の三つの領域に大別されることがわかる。

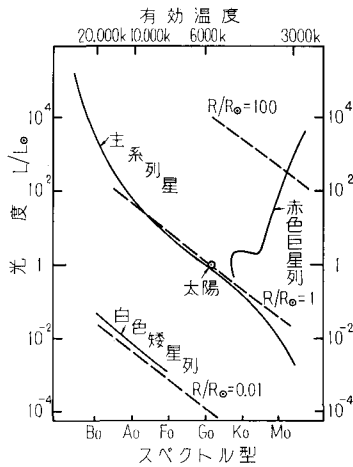


図1 HR図

一つはHR図を左上から右下にかけて対角線上に分布している主系列星である。実際太陽近傍の星の95%以上は、この主系列上にある。次に多いのが白色矮星で、HR図の左下にほぼ主系列に平行に走っている。星の光度 L は星の半径 R の2乗、星の有効温度 T_e の4乗に比例する、という関係がある。すなわち

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4, \quad (1)$$

(ここで σ はシュテファン・ボルツマン定数である)。表面温度が比較的高いのに、光度の低い白色矮星では、星の半径は太陽半径の約1/100と大変小さい。これとは反対に表面温度は低い、半径の非常に大きい赤色巨星が、HR図の右上に分布している。

4. 星にはどんな活動現象があるか？

第一章で、私は「星は生きている」という表現を使った。この表現は二通りの意味に解釈することができる。一つは星の進化を人の一生になぞらえて考えるもので、いわば平均像としての星の一生を問題とするものである。星の一生については、次回に概観する予定である。それに対して、もう一つは個々の星を取り上げて、そこで現に生起している諸々の活動を、人間の生き様にたとえて考えるものである。丁度、人間一人一人をとってみると、それぞれ顔や性格が違うように、星も一つ一つ異なった形の活動を行なっている。言ってみれば、星一つ一つがそれぞれ違った“顔”を持っているのである。

それでは、一体どのような星で、どのような現象があるのだろうか？ 図2を見ていただきたい。この図は色々の活動性や特異性を示す星のHR図上の位置を示したものである。この図において、主系列に沿って高温の星から見ていこう。

まず左上のO型星、B型の超巨星といった高温で光度の大きい星がある。これらの星について、最近10年～

15年間にロケットや人工衛星を使って、紫外域スペクトルの観測がなされるようになった。その結果、これらの星の外層大気は秒速2000~3000kmにもぼる速度で膨張していて、星から質量放出が起こっていることが明らかになった。さらに、1978年末アメリカが打上げたX線衛星アインシュタイン天文台の観測により、これらの早期型星はX線も放射していることが明らかになった。

B型星の領域に移ると、ケフェウスβ型と呼ばれる脈動変光星が主系列からほんの少し進化した位置に存在する。ケフェウスβ型脈動変光星は、HR図上でセファイド・こと座RR型といった脈動変光星とはかなりかけ離れた高温領域に存在し、現在でも“なぜ脈動するのか？”という基本的問題が解決されていない謎の星である。またB型星には、Be型と呼ばれる輝線スペクトルを示す星がある。Be星は星自身が高速に自転していて、赤道附近からガスが噴き出していると考えられている。A型星の領域には、Ap・Am星と呼ばれる金属元素の組成異常を示す星がある。また、Ap星の中には数千~数万ガウスという強い磁場を持つ磁変星と呼ばれる星もある。

次に晩期型星について見てみよう。晩期型星の代表として太陽がある。太陽はG型の主系列星で、星としてはもっとも平凡な、おとなしい星と言ってよいであろう。ところが、太陽の場合、他の星とちがって我々に近いため、その表面の細かい点までよく観測できる。実際、太陽では黒点があらわれ、フレア(太陽面爆発)やプロミネンスが発生したり、電波やX線でバーストを起こしたり、……といった具合で、活動と変化に満ち満ちているのである。晩期型星の中には、太陽の活動を何十倍、何百倍にも大きくしたような活動を示す星がある。このよ

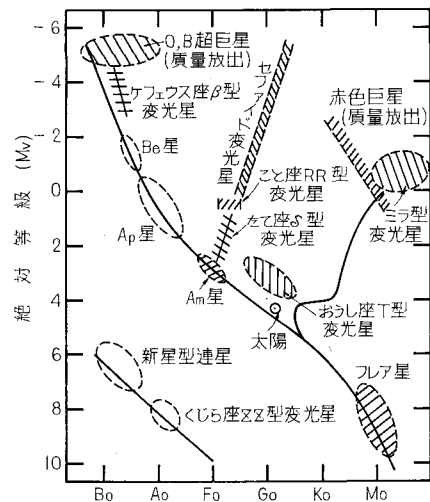


図2 活動性を示す星のHR図

うな星としては、太陽のフレアのように星全体の明るさが突然明るくなるフレア星、また最近注目をあびている星に、りょう犬座RS型の連星がある。りょう犬座RS型星というのは、成分星がG型星とK型星、周期数日の一見したところなんの変哲もない連星系である。ところが、このりょう犬座RS型星は、HR図上の主系列近傍の星としては格別に強力なX線を放射しており、また電波やX線などでも大規模なフレアが観測されている。

次に主系列から離れて巨星領域を見てみよう。まず目につくのが脈動変光星である。HR図上でG・K型の超巨星からA型の主系列星にかけて細長い帯状の領域に脈動変光星が存在する。これはセフィイド変光星、こと座RR型変光星、たて座δ型変光星など主だった脈動変光星を含む領域で、セフィイド不安定帯と呼ばれている。また赤色巨星・超巨星の領域にはミラ型脈動変光星(長周期変光星)が存在する。また赤色超巨星の場合、星の表面から質量放出が起っていることも知られている。


今度は主系列よりも暗い側の星に目を転じてみよう。ここには白色矮星列があるが、白色矮星の中にも脈動変光星の存在することが最近になってわかってきた。この白色矮星の脈動星は、変光周期100~1000秒、くじら座ZZ型変光星と呼ばれている。また新星型近接連星の主

星も白色矮星であると考えられている。一方白色矮星列を高温側に延長したところに、惑星状星雲の中心星が存在する。惑星状星雲の中心星は、赤色巨星がその外層を放出した後、白色矮星へ進化する途中にある星と考えられている。

さらにHR図上には示すことができないが、白色矮星よりもっと極端な高密度星として中性子星がある。中性子星は、質量が太陽と同程度であるのに半径はたった10kmしかなく、中に中性子が一杯つまっていて、丁度一個の巨大な原子核のような星である。中性子星の存在はすでに1930年代に予言されていたが、長い間見つからず、まぼろしの星であった。それが1967年パルサーとして劇的にその姿をあらわした事は周知の事と思う。

以上ざっと一わたりHR図をながめてみた。これからもわかるようにHR図上ほとんど全域にわたって、なんらかの活動性や特異性のある星が存在することである。別の言い方をすると、完全に静かでなんの活動性も特異性も示さない星は実際上存在しないと言っても過言ではあるまい。ただ星によって違っている点は、それぞれHR図上の異なった領域にある星は異なった現象を呈するという事である。次回以後では、これらの現象のいくつかを取上げて、もう少し詳しく調べてみよう。



★営業  品 目★

天体望遠鏡と双眼鏡
各種部品と撮影用品
ドームの設計と施工

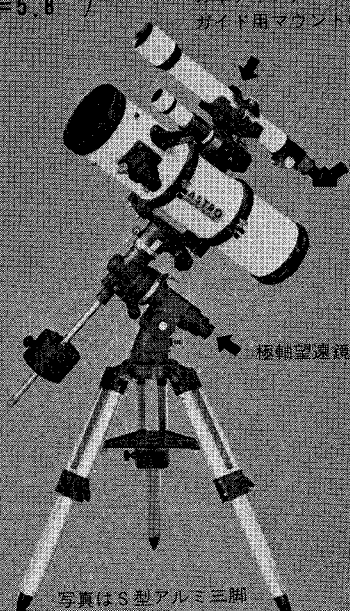
ASIBO 光学工業株式会社

〒170 東京都豊島区池袋本町2-38-15
☎03(985)1321 振替口座東京5-52499番

LN-100S型 (精鋭な超焦点) スーパーミラー

(D=103mm) (F=5.8)

ガイドリングスコープ
ガイド用マウント(別売)



極軸望遠鏡内蔵

写真はS型アルミ三脚

★新総合カタログご希望の方は切手100円を同封下さい。
★全国有名デパート・光学品取扱店でお買い求め下さい。