

ジャイアントの誕生

2014年11月29日
連星系・変光星・低温恒星研究会
中田 好一(東京大学)

巨星はどうして大きいのだろう？

星はその大きさから、矮星と巨星の2種類に大きく分けられることは良く知られています。

では、どうして巨星は大きいのか？

改めて考えると、案外説明しにくいものです。教科書の説明を眺めてもどうもピンとこないという方が多いように思えます。
Sugimoto, Fujimoto 2000 "Why Stars Become Red Giants" という立派な論文もあるのですが、途中で分からなくなりました。

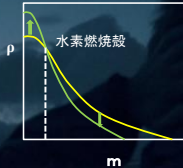
それで、自分なりに納得したいと考えた結果をお話します。
皆さんの考えと突き合わせることが出来たら大変愉快であります。

学生諸君による説明

以前、天文学科の学生諸君に、「赤色巨星はなぜ大きいのか？」
考えてもらった時の答えを以下に列挙します。

- coreがHydrogenを使い果たすとそれまで保たれていたエネルギーバランスが崩れ自己重力によって収縮する。その結果、coreは重力エネルギーを解放することになる。外層はcoreの収縮によって生まれたエネルギーを吸収して膨張する。
- 核燃焼による熱によって星の外層が急速に膨張するが故に大きいと思われる。
- 赤色巨星は大体10太陽質量の程度の質量の恒星が主系列を経て膨張し、肥大化したものである。
- ヘリウムのコアのまわりのシェル部分で水素の燃焼が始まる。この水素の燃焼によるエネルギーの流れによって、星の対流層の重力と圧力の釣り合いが主系列の時とは変化するため外層が膨れ上がるので赤色巨星は大きい。
- 主系列時の中心核で水素が枯渇することで終わってしまうと、中心核付近では重力を支えることができなくなり収縮するが、外層部はその反動で膨らむ。

- 進化の過程で核燃焼により光度が大きくなるので輻射圧により膨張する？
- 軽い元素が多いため膨らみやすい(イメージ)。同じ温度なら平均分子量が小さい方がスケールハイトが大きいので星の大気も厚そう。
- 水素殻燃焼が起こっている場所は熱的に安定であり、その状態はほとんど変化しない。燃焼殻の内側は殻を通じて熱が逃げて行く分収縮し、外側は膨張する。下図のように質量座標で密度勾配が発達(急になる)→星全体が大きくなる。



HR-図の発見

星はB型からM型へと冷却していく

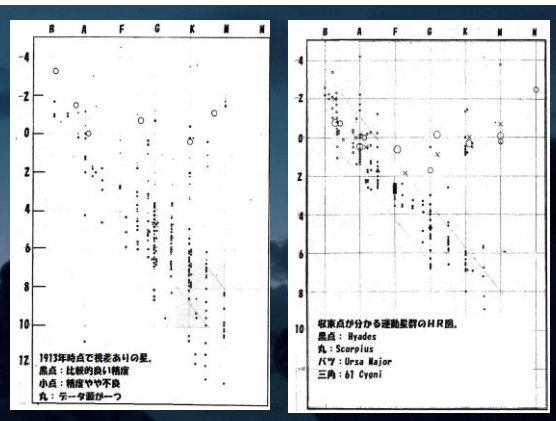
1838年に61 Cygの視差がBesselにより測定されました。Kapteinは視差のデータから、星の明るさはB型から、A, F, G, K, M型へと順に暗くなって行くことを見出しました。
19世紀末から20世紀初頭にかけて、この系列は、ガスからB型星として生まれた星が冷却しつつ暗くなって行く順序を示す、と理解されていた(ようです。)

巨星(giant)と矮星(dwarf)の発見

2005年に Hertzsprung は、視差の得られた数十個の星の等級とスペクトル型を整理して、それぞれが「巨星」=光度一定で明るい「矮星」= B型から、A, F, G, K, M型へと暗くなるの2種類に分けられることを発見しました。ただし、その論文 Zeitschrift für Wissenschaftliche Photographie 3, 442 (1905) は見ていません。

HR図の発見

1910年頃から視差の測定数が急増し始めます。Russellは1914年に当時視差が知られていた約300星の絶対等級とスペクトル型をプロットしました。それを次ページに示します。



RussellによるHR-図の解釈

巨星進化

Russellは前ページの図を見て次のように考えました:
星間ガスが集まって星が誕生する時にはまだガスの名残りを留め、薄く広がった低温の大気を持っているだろう。それがM型巨星である。
星はM型巨星として誕生するので、次にRussellは、Lane-Ritterの恒星進化理論に従い、巨星は収縮と共に高温化して行くと考えました。図のM型からA型巨星の並びは巨星が収縮していく進化系列という解釈です。そしてその収縮はB型で最高温度に達します。

矮星進化

Lord Kelvinは星の密度が水の1/10に達すると、気体は圧縮されにくくなる考えました。もはや理想気体ではなくなるのです。このため、巨星の収縮がB型まで達すると、エネルギーを失って収縮するに連れ、星は冷却されていきます。その結果、B型星からM型星まで、今度は矮星系列を逆にたどって降りて行きます。

余談1 Ritterの論文は多分、
 "On the Constitution of Gaseous Celestial Bodies"
 A. Ritter ApJ. 8, 293 - 315 (1898)
 で、この論文は Wiedemann's Annalen に 1878 から1883 に掛けて、
 "Researches on the Height of the Atmosphere and the
 Constitution of the Gaseous Celestial Bodies" という題で18回の
 連続論文として掲載されたものの1部です。その第16論文を、ApJ編
 集部が「恒星分類の観点から興味深い」として翻訳したものです。
 "neutral equilibrium" = 断熱平衡にあるガス球の構造を述べています。

余談2 Russell のHR図の解釈は Eddington 1913 により、星の速度とスペク
 トルクラスの間係に矛盾するという批判を浴びました。
 Russell も直ちに応酬していますが、論戦の決着までは見届けていま
 せん。Russell の恒星進化論がその後どのくらい生き延びたか調べてい
 ませんが、既にご存知の方がいらしたら御教示下さい。

という訳で、100年前に巨星が発見された当時は、
 巨星が大きいのは星間ガスが集まって収縮していく途中だから、
 と考えられていました。

では、**今ならどう考えるのでしょうか？**

今なら UV-線 で考える

星の構造を表す方法の一つに UV-線と言うものがあります。UとVの定義は
 以下の通りです。M_r は半径 r 内の質量、ρ は半径 r での密度として、

$$U \equiv \frac{4\pi r^3 \rho}{M_r} = \frac{d \ln M_r}{d \ln r}, \quad V \equiv \frac{GM_r \rho}{rP} = \frac{d \ln P}{d \ln r}$$

Uの意味:
 上の式を少し変形すると、 $\langle \rho \rangle =$ 半径 r 内の平均密度として、

$$U = \frac{3\rho}{(3M_r/4\pi r^3)} = 3 \frac{\rho}{\langle \rho \rangle} = 3 \frac{\text{その点での密度}}{\text{その点の内側の平均密度}}$$

Vの意味:
 理想気体で、 $(P/\rho) = (kT/\mu H) = (2/3) * \text{熱エネルギー}$ なので、

$$V = \left(\frac{GM_r}{r} \right) / \left(\frac{P}{\rho} \right) = \frac{3}{2} \frac{\text{その点の内側質量によるポテンシャルエネルギー}}{\text{その点での熱エネルギー}}$$

UV-線 が示す星の中心と表面

星の中心では $\rho < \rho >$ です。また、 $r \rightarrow 0$ につれ、 $(M_r/r) \propto r^2 \rightarrow 0$ です。
 したがって、中心 $r=0$ では、 $(U, V) = (3, 0)$ となります。

一方、星の表面では $(\rho, T) = (0, 0)$ という条件を課するので、 $(P/\rho) = 0$
 となります。そのため、表面では $(U, V) \rightarrow (0, \infty)$ となります。

星の構造は UV 面では 中心 = (3, 0)
 から 表面 = (0, ∞) へと延びる曲線で
 表されるのです。

まともなUV-線 と ちょっとおかしいUV-線

前頁で述べたように、星の UV-線 を描くと、 $(U, V) = (3, 0)$ と $(0, \infty)$ を結ぶ曲線
 になります。

ところが、星の構造を表す微分方程式を表面から内側へ解いていくと、出発点
 の微妙な差で星の内部の解が大きく変わることが分かります。

正常解:
 半径 $r=0$ になった時、質量 $M_r=0$ 。
 $(U, V) = (3, 0)$ を通る。

空洞解:
 $r=0$ まで行かないうちに M_r を使い切
 ってしまう。星の真ん中に空洞が広がる。
 線での $\langle \rho \rangle > 0$ なので $U \rightarrow \infty$ となる。

質点解:
 $r=0$ になったのにまだ質量 M_r が残って
 いる。 $\langle \rho \rangle \rightarrow \infty$ となるので $U(r=0) > 3$ 。

矮星と巨星のUV-線

左の図は太陽のような矮星の UV 図です。
 星の構造線は $(U, V) = (3, 0)$ から $(0, \infty)$ へとすんなり伸びて行きます。

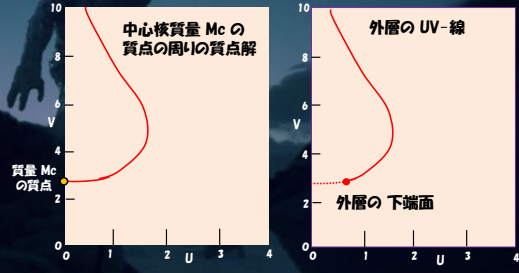
右の図は巨星の UV 図です。星の構造線が $(U, V) = (3, 0)$ から $(0, \infty)$ へと
 伸びて行く点は左図と変わりません。ただし、青線から赤線へ移る際に飛び
 が生じています。この飛びの内側を中心核、外側を外層と呼びます。

中心核のUV-線

赤色巨星の中心核は基本的には白色矮星です。ただし白色矮星の場合は表面で
 $(U, V) = (0, \infty)$ になりますが、巨星中心核の表面という端はまた星の奥深
 くにあります。それで、中心核の UV-線 は白色矮星の UV-線 が途中で切れたも
 のと考えてよいでしょう。

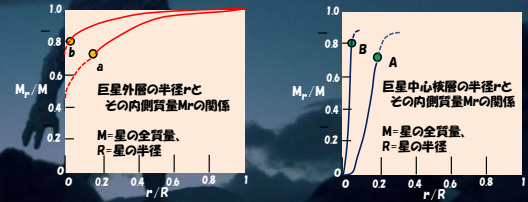
外層のUV-線

赤色巨星の外層はスライド10で示した質点解の一部です。質点解は、中心に存在する質点(半径ゼロで質量有限)重力の影響下で平衡にある恒星内部構造です。赤色巨星の中心核は高密度で半径が小さいために、外層から見ると質点のように見え、このため外層部の構造は質点解(の途中まで)になったのです。



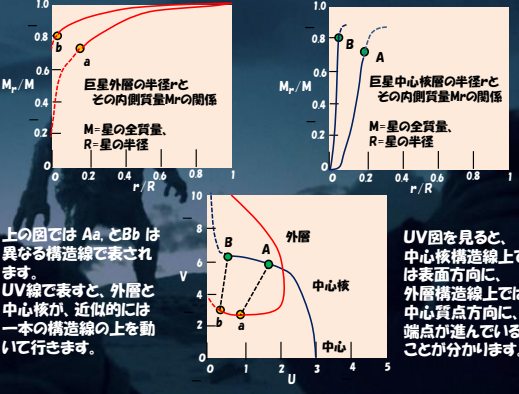
外層と中心核での質量分布の変化

外層の下端では水素殻燃焼により水素がヘリウムに転換されます。このヘリウムは連続的に中心核に押し込まれていきます。それに伴う物質分布の変化を下に示します。Aa から Bb への進化の間、M は一定ですが、R は変わります。



外層: a → b へ進化します。実線 = 外層の半径・質量関係。破線 = 中心まで外挿した質点解。a, b はそれぞれ外層の下端です。星の半径に対する相対値では a の方が b より内側です。
 中心核: A から B へ進化します。実線 = 中心核。破線 = 表面まで外挿した白色矮星解。A, B は中心核の上端です。r/R は大きく変わっていますが、r はあまり変わりません。

前ページの進化を UV 図で表してみたのが下の図です。



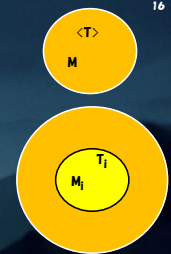
上の図では Aa, と Bb は異なる構造線で表されます。UV 図で表すと、外層と中心核が、近似的には一本の構造線の上を動いて行きます。UV 図を見ると、中心核構造線上では表面方向に、外層構造線上では中心質点方向に、端点が進んでいることが分かります。

境界面温度 T_1

一般に N 個のガスからなる重力系では、 $K \langle T \rangle = \alpha \mu H (GM/R)$
 ここに、 $\alpha =$ 系の構造に依存する定数で 1 のオーダー。
 $\langle T \rangle =$ 系の平均温度。

$T_1 =$ 中心核と外層との境界面の温度、
 $r_1 =$ 中心核半径 = 境界面半径
 $M_1 =$ 中心核質量
 とした時も類似の考えで、
 $K T_1 = \alpha \mu H (GM_1/r_1)$
 となります。

赤色巨星中心核と外層の境界面では水素燃焼が起きています。この核反応で発生するエネルギー = 星が放射するエネルギーという条件で決まる境界面の温度 $T_1 \approx 1000$ 万度です。したがって、
 $r_1 = \alpha \mu H (GM_1 / K T_1)$
 は、ほぼ一定と見なせます。



復習すると、

- (1) 中心核の上端は A → B へ段々表面的になって行き、U → 0 に近づきます。
 - (2) つられて、外層の下端も a → b と、U → 0 に近づきます。この場合は表面的になるのとは逆に、質点中心的になっていきます。
 - (3) 質点中心型の外層構造では、U → 0 つまり、外層下端の密度が低下することは $R/r_1 \rightarrow \infty$ を意味します。
 - (4) 一方、核反応で決まる r_1 は、ほぼ一定です。
 - (5) この結果、外層は質点型でその下端がますます中心近くへと追って行く一方、下端の半径 r_1 は固定されているという状況になります。
- (b) **それで、巨星は膨らむのです。**

