

赤色巨星は赤いのか？

福江 純

〈大阪教育大学 〒582-8582 大阪府柏原市旭ヶ丘4-698-1〉
e-mail: fukue@cc.osaka-kyoiku.ac.jp

西本 英里菜

〈大阪教育大学 〒582-8582 大阪府柏原市旭ヶ丘4-698-1〉
e-mail: nishimoto@cc.osaka-kyoiku.ac.jp

太陽の色は全体としては白色だが、太陽面を細かく見れば、太陽面中央の温度が高く周縁ほど低い（周縁減光効果）、多少は色味が変化する。M型主系列星も、肉眼では暗視などの効果もあって赤っぽく見えるが、3,000 Kの黒体放射はさほど赤いわけではない。では、外層大気が広がったM型赤色巨星の場合はどうだろう。今回、簡単なモデルを用い、周縁減光効果を解析的に見積もって、赤色巨星の恒星面における見かけの温度分布や予想スペクトルそして表面の色分布を求めてみた。

1. 系外惑星の空は何色？

天体現象を説明するために美しいCG画像が描かれるようになったが、多くの場合、書き手の印象で着色しており、その画像の着色が真の姿になっているかは保証がない。例えば、多くの系外惑星が発見され、さまざまなタイプの系外惑星の想像図が描かれているが、M型矮星だろうか、母星はもちろん、系外惑星の空や地面も赤く塗られている（図1）。本当にそんなに赤いのだろうか？

有効温度が約6,000 Kの太陽の場合、全体としては白色であることは現在では広く認識されてきたことと思う。太陽の色が白だからこそ、日中の雲も雪も、そして皆既日食中のコロナも白い。実際、国際照明委員会CIEでは、いわゆる xy 色度図において6,500 Kの黒体放射の色を“白”と定義している。もっとも、太陽表面を細かく見れば、太陽面中央の温度は約6,400 Kで有効温度よ

り少し高く、周縁では低くなる。同時に、表面輝度も太陽面中央から周縁へ向けて下がる（いわゆる「周縁減光効果」）。したがって、太陽面では多少は色味が変わり、周縁部ではほんのりと赤みが



図1 赤色巨星と惑星 (<http://siryl.tumblr.com/post/99262481919>)。赤色巨星は中央部がやや橙色がかっているが全体的には赤色で、岩石惑星も赤色に照らされている（カラー画像は出典元を参照）。空は黒い。

かるだろう。

一方、表面温度が3,000 KのM型主系列星なら赤いだろうと思われるかもしれないが、夜空では暗視などの効果もあって赤っぽく見えるものの、3000Kの黒体輻射の色はさほど赤いわけではない。星全体で見ても橙白色のような色味である。

これら主系列星のRGB色表現については、すでにいくつかの研究がなされている¹⁾⁻³⁾。

では、外層大気が非常に広がったM型赤色巨星の場合はどうだろうか。温度の低い領域が広がって赤っぽくなるのだろうか。それとも周縁減光効果がさらに働いて、逆に白っぽい領域が増えるのだろうか。今回、M型の赤色巨星について、簡単なモデルを用いて周縁減光効果を見積もり、表面温度分布や予想されるスペクトル、そして表面の色分布などを求めてみたので、主系列星の色と比較しながら紹介してみたい。

以下、2章で主系列星および赤色巨星で用いたモデルをまとめ、3章で光球面の温度分布を示し、4章で予想されるスペクトルを計算し、5章で色分布の違いを比較する。

2. 赤色巨星の大気モデル

恒星は自ら光を放っているガス体なので、どこから放射された光がどのように見えるか調べるためには、恒星大気の密度分布や温度分布など大気構造のモデルと、光線の伝播にかかわる吸収や散乱などのモデルが必要になる。

まず太陽のような主系列星は、大気の密度が比較的高く、光が出てくる光球面 (photosphere) は非常に薄い表層部分なので、いわゆる平行平板近似 (plane-parallel approximation) が適用できる。そしてその場合の最もシンプルで基本的なモデルとして、ミルン-エディントンモデル (Milne-Eddington model) を採用した (以下、エディントンモデル)。

いわゆるエディントンモデルでは、表面から測った光学的深さを τ 、表面の有効温度を T_{eff} と

すると、深さ τ での温度 $T(\tau)$ は、

$$T^4(\tau) = \frac{3}{4} T_{\text{eff}}^4 \left(\frac{2}{3} + \tau \right) \quad (1)$$

で表される。例えば、 $\tau=0$ での表面温度は、 $T(0) = T_{\text{eff}}/2^{1/4} = 0.84T_{\text{eff}}$ と有効温度より少し低く、 $\tau=2/3$ での温度が、 $T(2/3) = T_{\text{eff}}$ となる。

またこのようなエディントンモデルでは、表面から放射される放射輝度、すなわち表面輝度 I は方向依存性を持ち、真上ほど強く横方向に弱くなるという周縁減光効果 (limb-darkening effect) が生じる。具体的には、真上から測った角度を θ 、その余弦を $\mu = \cos \theta$ とし、表面輝度も黒体輻射だと仮定すると、

$$\pi I(\mu) = \sigma T^4(\mu) = \frac{3}{4} \sigma T_{\text{eff}}^4 \left(\frac{2}{3} + \mu \right) \quad (2)$$

のようになる。

図2を用いて、この表面輝度分布を恒星面での輝度分布に換算しよう。図2のように、観測者方向の z 軸を取った円筒座標を (p, z) とし、半径を r ($r^2 = p^2 + z^2$)、 z 方向から測った角度を θ 、星の半径を a とし、表面輝度を $I(p)$ とする。また図2では、光球面を表す破線はわかりやすいように球面からずらせて描いてあるが、平行平板大気が適用できるような場合には、この図のスケールでは光球面は球面に一致する。

エディントンモデルで真上から測った角度 θ は、図2の中心角 θ と同じなので、 $\sin \theta = p/a$ か

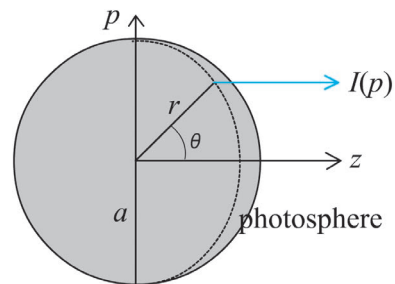


図2 主系列星 (矮星) の座標設定と、見かけの光球面の形状概念図。観測者は右方遠方に位置している。 $\mu = \cos \theta$ とする。

ら, $\cos\theta = \sqrt{1 - p^2/a^2}$ となり, 結局,

$$\pi I(p) = \sigma T^4(p) = \frac{3}{4} \sigma T_{\text{eff}}^4 \left(\frac{2}{3} + \sqrt{1 - \frac{p^2}{a^2}} \right) \quad (3)$$

が得られる. したがって, 光球面中央 ($p=0$) から周縁 ($p=a$) へ向かって表面輝度が暗くなり, 温度は低くなる. これも周縁減光効果と呼ぶ. たとえば, 光球面中央 ($p=0$) での温度は, $T(0) = (5/4)^{1/4} T_{\text{eff}} = 1.057 T_{\text{eff}}$ と有効温度より少し高く, 縁 ($p=a$) での温度が, $T(a) = T_{\text{eff}}/2^{1/4} = 0.84 T_{\text{eff}}$ と有効温度より低くなる. 有効温度を 6,000 K とすると, 前者は 6,344 K, 後者は 5,045 K になる.

次に, 本稿の核である赤色巨星の大気モデルだが, これがなかなか難航した. 先にも書いたように, 外層大気の密度が高い主系列星 (矮星) は平行平板大気で近似できるが, 赤色巨星は外層大気が広がっているため平行平板大気では近似できない. そして平行平板大気に比べて, 球状大気のほうがよりピーキング効果 (周縁減光効果を逆に捉えたもの) が効いてくることは, 古くから調べられている^{4), 5)}. 爾来, 赤色巨星の大気についても多数の研究があるのだが (あるはずだが), いざ適当な大気モデルがないか探してみても, 取り扱いの容易なものが見つからないのだ. そこで, 専門家からはお叱りを受けるかもしれないし, ここが致命的に間違っていると本稿の議論や結果も怪しくなるのだが, 解析的に取り扱える簡単なモデルを自前で用意することとした.

中心集中星や等温特異解など数ケース検討したが, 最終的には, 赤色巨星の大気がじわじわ流出していることを考え, 相対論的効果が効かない低速で一定速度の恒星風モデルとした.

球状大気の密度 ρ と温度 T は半径 r の関数だが, 表面が明確には定義できないので, 無限遠から測った光学的厚み τ が 1 (正確な値は分布が具体的に決まった後で定まる) となる準拠半径 R_1 で

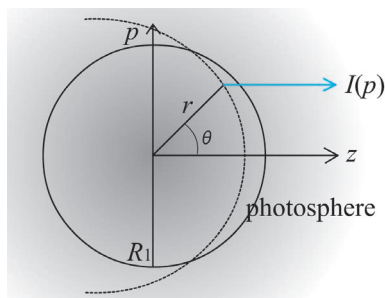


図3 赤色巨星 (風モデル) の座標設定と, 見かけの光球面の形状概念図. 観測者は右方遠方に位置している.

の密度を ρ_1 , 温度を T_1 とし, これらに準拠し, 密度分布や温度分布を与える (図3も参照).

まず速度が一定の球対称風を仮定すると, 質量流束に関する連続の式から, 密度分布は,

$$\rho(r) = \rho_1 \left(\frac{R_1}{r} \right)^2 \quad (4)$$

のように表される.

一方, 温度分布については, 拡散近似 (diffusion approximation) で決まると仮定した. この仮定はいささか問題である. というのも赤色巨星の大気では, 輻射の拡散ではなく, 対流がエネルギーを運んでいるためだ. ただし表面近傍は輻射層になるらしい. いずれにせよ, 最終的には温度を半径のべき乗で表せればいいので, 温度が半径のべき乗構造であれば, 本稿の議論はそのまま成り立つはずだ*1.

拡散近似では, 温度分布は,

$$-4\pi r^2 \frac{4acT^3}{3\kappa\rho} \frac{dT}{dr} = L_1 = 4\pi R_1^2 \sigma T_1^4 \quad (5)$$

という拡散方程式で表される. ここで, a は放射定数, c は光速, σ はステファン・ボルツマンの定数である ($ac/4 = \sigma$). また κ は不透明度で,

$$\kappa(r) = \kappa_1 \left(\frac{\rho}{\rho_1} \right) \left(\frac{T}{T_1} \right)^{-b} \quad (6)$$

*1 では, 最初から温度を半径のべき関数で仮定せずに, 何でこんな七面倒くさいことをしているかといえば, 何とか解析的にもってきたいという理論屋の意地である.



というクラマース型の表現を使うことにする。指数 b が $7/2$ のときがクラマースの式になるが、後で示すように、比較的近い値の $8/3$ のときには解析的に取り扱えることがわかった。

さきほどの準拠半径 R_1 や準拠温度 T_1 で、

$$x \equiv \frac{r}{R_1}, \quad t \equiv \frac{T}{T_1} \quad (7)$$

のように変数を無次元化すると、(5)式は、

$$-x^2 \frac{16t^3}{3\kappa\rho R_1} \frac{dt}{dx} = 1 \quad (8)$$

となる。さらに、

$$\rho = \rho_1 x^{-2}, \quad \kappa = \kappa_1 x^{-2} t^{-b} \quad (9)$$

を代入し、 R_1 に相当する光学的厚みを、

$$\tau_1 \equiv \kappa_1 \rho_1 R_1 \quad (10)$$

で定義すると、(8)式は最終的に、

$$-\frac{16x^6 t^{3+b}}{3\tau_1} \frac{dt}{dx} = 1 \quad (11)$$

という微分方程式になる。

この(11)式は変数分離型なので簡単に解け、

$$t(x) = \left(\frac{3(4+b)}{80} \tau_1 \right)^{1/(4+b)} x^{-5/(4+b)} \quad (12)$$

という解が得られる。これが、無次元化された半径のべき乗で表された無次元化された温度分布である。

ここで準拠半径 R_1 にかかわる光学的厚み τ_1 を定めておこう。密度分布と温度分布が半径のべき関数で表されたので、不透明度(6)も使って、無限遠から半径方向へ測った光学的深さ、

$$\tau(r) = - \int_{\infty}^r \kappa(r) \rho(r) dr \quad (13)$$

を計算することができるようになった。この式に(6)、(9)、(12)式を入れて丁寧に積分すると、

$$\tau(x) = \tau_1 \left(\frac{3(4+b)}{80} \tau_1 \right)^{-b/(4+b)} \frac{4+b}{12-2b} x^{-(12-2b)/(4+b)}$$

(14)

となる。したがって、半径 R_1 ($x=1$) で光学的深さがちょうど1になるためには、

$$\tau(1) = \tau_1 \left(\frac{3(4+b)}{80} \tau_1 \right)^{-b/(4+b)} \frac{4+b}{12-2b} = 1 \quad (15)$$

が条件で、結局、

$$\tau_1 = \left(\frac{3(4+b)}{80} \right)^{b/4} \left(\frac{12-2b}{4+b} \right)^{(4+b)/4} \quad (16)$$

が得られる。例えば、 $b=8/3$ のときは、 $\tau_1 = 1/2^{4/3} \sim 0.3968$ になる。

以上導出した半径方向の物理量の分布を使って、観測者から眺めた見かけの光球面や光球面での温度分布に焼き直さなければならない(図3)。主系列星の場合の図2と異なり、図3ではガスは全体に拡がっているが、座標の設定は図2と同じである。ただし、ガスが希薄で拡がっているため、見かけの光球面は一般には球形から大きくずれてくる。

見かけの光球面に必要なのは、ある固定した p に対して、無限遠から z 軸に平行に測った光学的深さ；

$$\tau(z) = - \int_{\infty}^z \kappa(r) \rho(r) dz \quad (17)$$

で、これは半径方向の(13)式とは違ってくる。準拠半径 R_1 で無次元化した座標

$$x \equiv \frac{r}{R_1}, \quad \hat{z} \equiv \frac{z}{R_1}, \quad \hat{p} \equiv \frac{p}{R_1}; \quad x^2 = \hat{z}^2 + \hat{p}^2 \quad (18)$$

を使い半径方向の分布を入れると、(17)式は、

$$\begin{aligned} \tau(z) &= - \int_{\infty}^z \kappa(x) \rho(x) R_1 d\hat{z} \\ &= - \int_{\infty}^z \tau_1 x^{-4} t^{-b} d\hat{z} \\ &= - \tau_1 \left(\frac{3(4+b)}{80} \tau_1 \right)^{-b/(4+b)} \int_{\infty}^z x^{(-16+b)/(4+b)} d\hat{z} \end{aligned} \quad (19)$$

のように整理できる。

ここで半径 x は z の関数で、一般の b の値だと積分できないことが多いが、 $b=8/3$ の場合は、上手い具合に解析的に積分できて、

$$\begin{aligned} \tau(z) &= -\tau_1 \left(\frac{1}{4} \tau_1 \right)^{-2/5} \int_{\infty}^z \frac{dz}{z^2 + \hat{p}^2} \\ &= \tau_1 \left(\frac{1}{4} \tau_1 \right)^{-2/5} \frac{1}{\hat{p}} \left(\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{\hat{z}}{\hat{p}} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

のような比較的綺麗な形に収まる。なお、 $b=8/3$ のときは、先に触れたように、 $\tau_1=1/2^{4/3} \sim 0.3968$ となる。また温度分布は、

$$t(x) = \left(\frac{\tau_1}{4} \right)^{3/20} x^{-3/4} \quad (21)$$

という、これも比較的シンプルな分布になる。

さて、見かけの光球面は、こうして得られた(20)式の光学的深さが1の面で定義される。すなわち、(20)式を1と置いて、 \tan について解き直すと、

$$\begin{aligned} \hat{z} &= \hat{p} \tan \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\hat{p}}{\tau_1 \left(\frac{\tau_1}{4} \right)^{-2/5}} \right) \\ &= \hat{p} \tan \left(\frac{\pi}{2} - \hat{p} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

が光球面の形状を表す式となる。2行目は、 $b=8/3$ で $\tau_1=1/2^{4/3}$ の場合である。こうして得られた(22)式は、非常に簡単な形をしており、 $\hat{p}=\pi$ のときに $z=-\infty$ になることから、見かけの光球面の半径は、 $\hat{p}=\pi \sim 3.14$ になることがわかる。言い換えれば、それよりも外側では、無限遠から計算した光学的厚みが1より小さくなる。

以上の解析的な式を逆にたどると、光球面の中央からの距離 p を与えれば、光球面の高さ z が決まり、半径 r がわかって、そこでの温度 T が与えられることになる。そしてその温度の黒体放射を光球面全体で積分すれば観測されるスペクトルが得られる。あるいは、その温度の黒体放射の色を計算すれば色分布も得られる。なお、上記の範囲

では有効温度はパラメーターにないので、いったん温度分布を仮に求めた後、全面で積分して光度を算出し、光度と準抛半径からステファン・ボルツマンの法則を用いて有効温度を計算して、温度換算をしてやる必要がある。

3. 光球面の温度分布

主系列星(矮星)のエディントンモデルと、赤色巨星の恒星風モデルについて、光球面における見かけの温度分布を図4-6に示す。

図4は、主系列星について、エディントンモデルで計算した光球面の温度分布と輝度分布である。横軸は面中央からの無次元化した距離で、縦軸は有効温度で規格化した温度(実線)と、中央値で規格化した表面輝度(破線)である。図4で見取れるように、表面輝度は周縁に向けて減少しており(周縁減光効果)、表面輝度ほどではないが温度も周縁に向けて下がっている。

図5は、赤色巨星について、恒星風モデルで計算した見かけの光球面の位置と温度分布である。横軸は面中央からの無次元化した距離で、縦軸は有効温度で規格化した温度(実線)と、準抛半径で規格化した光球面の高さ(破線)である。先に述べたように、光球面の形状は球形から大きくずれており、 $p=\pi$ で無限遠に発散する。また温度分布も大きく変化し(縦軸のスケールに注意)、エディントンモデルに比べて周縁減光効果は非常に強くなる。

図6に、赤色矮星(M型主系列星)と赤色巨星の具体的な温度分布を示す。横軸は面中央からの無次元化した距離で、縦軸は赤色矮星の恒星面における見かけの温度(細線)と赤色巨星の見かけの温度(太線)である。どちらも有効温度は3,000 K としてある。

こうして並べてみると、同じ有効温度でも、赤色矮星に比べ赤色巨星のほうが、見かけの温度は大きく変化していることがわかる。また赤色巨星の方は大気が希薄なので、中央部では奥の方まで

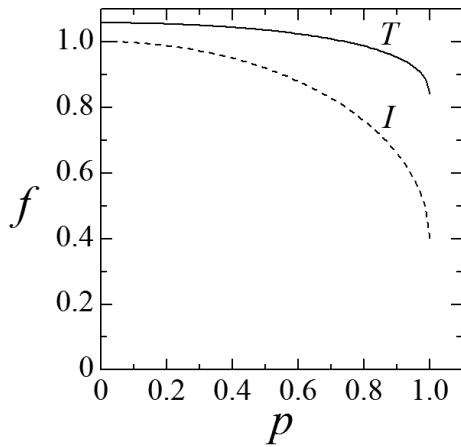


図4 主系列星の光球面の温度分布と輝度分布. 横軸は面中央からの無次元化した距離で, 縦軸は有効温度で規格化した温度 (実線) と, 中央値で規格化した表面輝度 (破線).

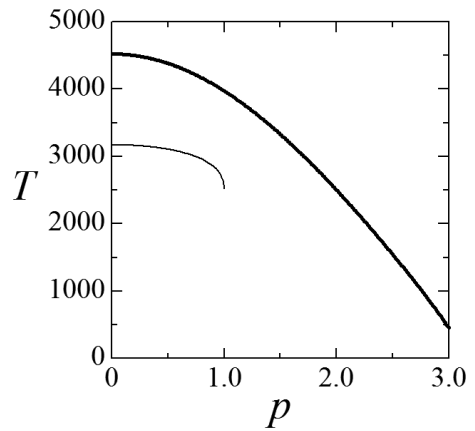


図6 赤色矮星 (M型主系列星) と赤色巨星の見かけの温度分布. 横軸は面中央からの無次元化した距離で, 縦軸は赤色矮星の恒星面温度 (細線) と赤色巨星の恒星面温度 (太線). どちらも有効温度は3,000 Kとしてある.

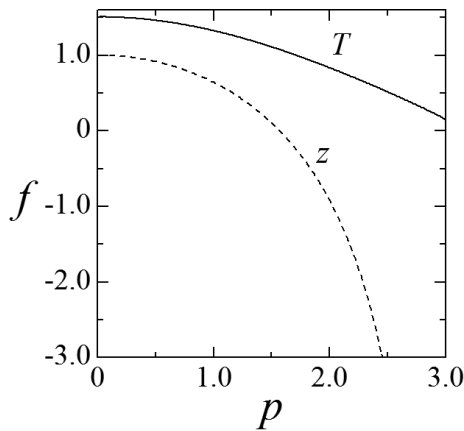


図5 赤色巨星の光球面の位置と温度分布. 横軸は面中央からの無次元化した距離で, 縦軸は準拋半径で無次元化した光球面の高さ (破線) と有効温度で規格化した温度 (実線).

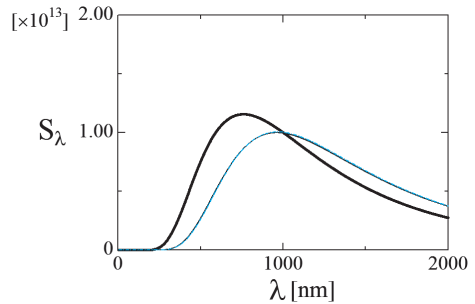


図7 赤色矮星 (M型主系列星) と赤色巨星の放射スペクトル分布. 横軸は波長 (単位は nm) で, 縦軸は赤色矮星の放射スペクトル (細線) と赤色巨星の放射スペクトル (太線). どちらも有効温度は3,000 K. 温度3,000 Kの黒体放射スペクトルも描いてあるが, 赤色矮星のスペクトルに重なっている.

透けて見えるため, 有効温度は3,000 Kにもかかわらず, 中央部の温度は4,500 Kぐらいで観測されることがわかる.

4. 多温度黒体放射スペクトル

見かけの光球面での温度分布が得られたので, 各場所での黒体放射スペクトルを足し合わせれば, 全体からの放射スペクトル分布が得られる.

具体的に求めてみた例を図7に示す.

図7の横軸は波長 (単位は nm) で, 縦軸は赤色矮星 (M型主系列星) の放射スペクトル (細線) と赤色巨星の放射スペクトル (太線) である. どちらも有効温度は3,000 Kである. 温度3,000 Kの黒体放射スペクトルも描いてあるが, 赤色矮星のスペクトルにほぼ重なっている.

得られた結果を見ると, 赤色矮星の放射スペク

トルは有効温度と同じ黒体放射スペクトルにほぼ一致するが、赤色巨星の放射スペクトルは少し青い側にシフトして、また単一温度の黒体放射スペクトルで近似できない。見かけの光球面での温度がかなり変化しており、さまざまな温度の黒体放射スペクトルを足し合わせた、いわゆる**多温度黒体放射スペクトル (multi-color blackbody)** というものになっているためだ。

実はこのスペクトルまで得られた段階になって、最初に設定した赤色巨星の簡易モデルが妥当かどうか心配になった。ベテルギウスなどの赤色巨星のスペクトルは、分子バンドで連続成分が見えないぐらいになっているものの、黒体放射スペクトルと大きくずれているとも思えないからだ。不安要素は残っているが、当初の目的の色分布へ進みたい。

5. RGB色分布

最後は、表面における見た目の色分布である。具体的には、見かけの光球面の各点において、そこでの温度の黒体放射のRGB値を計算し、RGB色合成を行い、輝度の変化も考慮してRGB表現した画像に仕立てる。RGB色表現については、詳しくは、参考文献2などを参考にして欲しい。

有効温度が6,000 Kの主系列星、有効温度3,000 Kの赤色矮星 (M型主系列星)、そして有効温度3,000 Kの赤色巨星の計算例を、それぞれ、図8-10に示す。

図8に示した有効温度が6,000 Kの主系列星、すなわちいわば太陽については、参考文献1や2にあるものと基本的に同じだが、周縁部が周縁減光効果でやや薄暗く見えるものの、おおむね全体的に白に見える。

図9に示した有効温度が3,000 Kの赤色矮星 (M型主系列星) についてもすでにあるものと同じだが、RGB色で見る限り、赤くは見えない。やはり周縁部が周縁減光効果でやや薄暗く見えるものの、全体的には白みがかかった橙色といったと

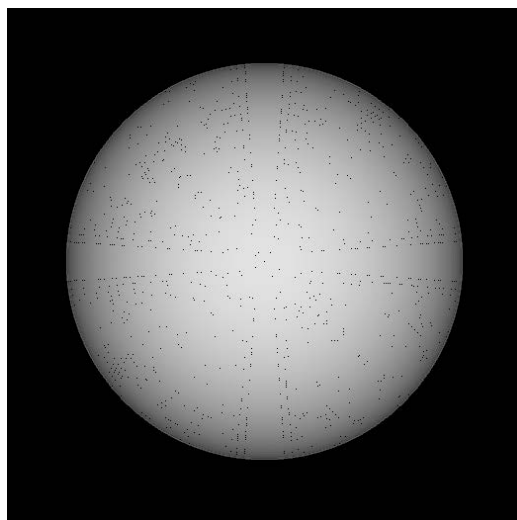


図8 有効温度が6,000 Kの主系列星の表面色分布。周縁部がやや薄暗いが、おおむね白に見える。

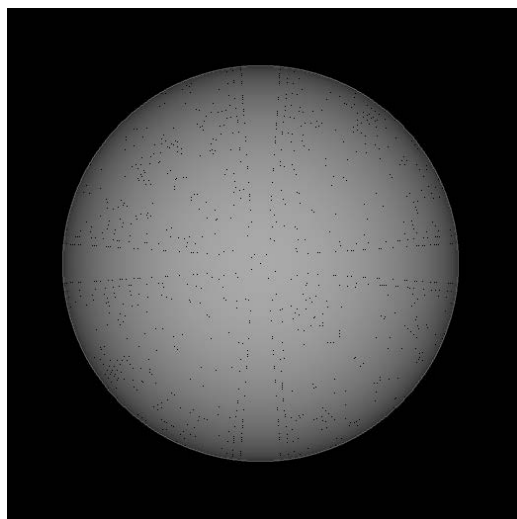


図9 有効温度が3,000 Kの赤色矮星 (M型主系列星) の表面色分布。この図ではカラー表示できないが、全体に白みがかかった橙色で、周縁部はやや薄暗いが、あまり赤くは見えない。

ころだろう。最初にも触れたように、こちらへんは、すでにずいぶん前から研究されている内容だが、現在でも赤く塗られたM型星の想像図が多い (たまに白っぽいものもある)。赤く塗ったM型主系列星の想像図があれば、これはたぶん違う

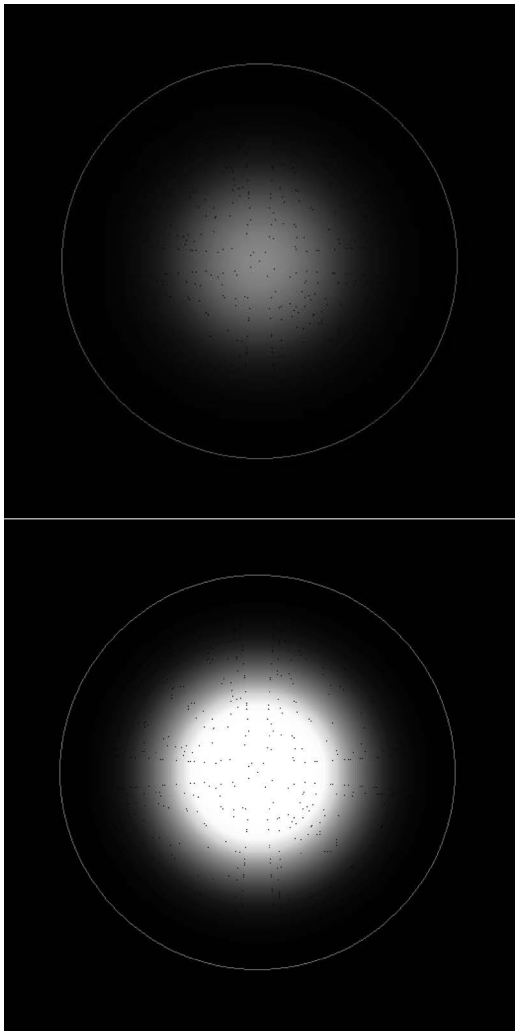


図10 有効温度が3,000 Kの赤色巨星の表面色分布. 表示範囲は図8や9の3倍. 輝度の変化が大きいため, 中央に合わせて上のように中央部のみぼやっと見え, 周縁部を強調すると下のように中央部がサチる(飽和する). この図ではカラー表示できないが, 周縁部は赤っぽいオレンジに見えるが, 中央部はどちらかといえば白っぽい.

だろうなど認識していただきたい.

最後に, 本稿で問題とした, 赤色巨星である. 赤色巨星では見かけの光球面が広がっているので ($p=\pi$ まで), 図10の画像は, 図8や9の3倍の範囲を表示している. 輝度の変化が大きいため, 中

央部に合わせて輝度を調整すると図10上のようになって周縁部が暗くなってしまい, 周縁を強調するように輝度調整すると図10下のように中央部はサチってしまう(飽和する). 色合いについては, 温度分布でみたように, 有効温度が3,000 Kでも中央部の温度は4,500 Kにもなるので, ほんのり色が着いているぐらいで, どちらかといえば白っぽい. 周縁部になると, ようやく赤みがかった橙色の様相を示す.

以上のことから, 赤色巨星も近くで見ればそれほど赤いものではなく, むしろ白っぽくて明るい中央部が目立つことがわかるだろう. 赤色巨星に照らされた惑星も(惑星大気や反射能にもよるが)おそらく赤くはないと想像される.

最後に少し問題点などを議論しておきたい.

まず今回は, 赤色巨星の簡易モデルで解析的に積分できる場合 ($b=8/3$) を考えたが, 通常のクラマースの式の場合 ($b=7/2$) でも数値計算は容易にできる. ただし, 結果は大きく変わらないのも容易に想像できる.

そもそもの簡易モデルの妥当性だが, 大気が対流的な赤色巨星でも表面近くは輻射層になっているらしいので, 本稿の拡散近似が一概に悪いとはいえないようだ. ここではペダンチックに拡散近似を用いたが, 密度や温度が半径のべき乗で表される構造になっていけば, 本稿の議論は定性的には成り立つ. 実際に, 大気が対流状態で断熱的だとし, (4)式の密度分布と, ポリトロピック関係から決まる温度分布と, クラマース型の不透明度を仮定すれば, 物理量が半径のべき乗になる類似のモデルを立てることができる. そして, 比熱比 $\gamma=5/3$ で係数 $b=3/2$ のときに, (22)式と同じ形状が得られる. スペクトルや色分布も似たり寄ったりになることは予想がつく. ただし, 大気が等温であれば, 計算するまでもなく, スペクトルは単一温度の黒体放射スペクトルになるし, 色分布も一樣になる.

また本稿では散乱の効果は無視している. 低温

の赤色巨星大気では塵も多く生成されているので、塵による散乱や、塵による吸収再放射など、スペクトルや色分布に影響があるかもしれない。

さらに本稿では、吸収係数の波長依存性を考慮していない（灰色近似）。一般に波長によって見える深さは違うので（短波長ほど奥まで見える）、波長依存性はスペクトルや色分布などの結果に大きく影響する可能性は高い。

赤色星に照らされた、系外惑星の地表面の色や“空色”など景色の色についても、今後の課題である。

まだまだ検討すべき点は残されているようだ。ご批判ご教示を仰ぎたい。

参考文献

- 1) Steffey P. C., 1992, *Sky and Telescope*, September, 266
- 2) 芝田たける, 福江純, 2009, *天文月報* 102, 27
- 3) 芝田たける, 福江純, 2009, *科学教育研究* 33, 159
- 4) Chandrasekhar S., 1934, *MNRAS* 94, 444
- 5) Chapman R. D., 1966, *ApJ* 143, 61

Red Giants Are Really RED?

Jun FUKUE and Erina NISHIMOTO

*Astronomical Institute, Osaka Kyoiku University,
4-698-1 Asahigaoka, Kashiwara, Osaka 582-
8582, Japan*

Abstract: The sun's color is totally white, while there is slight color gradient on the solar disk due to the limb-darkening effect. The color of M-type main sequence stars is not reddish, but pale orange. Then, what about the color of M-type giant stars with extended atmosphere. Using a simple model, we analytically derive the limb-darkening effect of M-type giants, calculate the apparent temperature distribution over the stellar disk, obtain the expected spectrum, and show the apparent color distribution over the stellar disk.