

岐阜大学 (工学部) 特別講義 B

漸近巨星分枝星で探る恒星と銀河の進化

松永典之
(東京大学・天文学教室)

2021年1月24日

本資料は、2021年1月にオンラインで行う集中講義（岐阜大学工学部）のために準備したものである。講義に使用している図の多くは、それぞれの著作権者のために著作権法上保護されている。講義以外のための利用、再配布、インターネット・SNSなどで本資料の全部または一部を公開することは禁止する。

目次

I 講義内容	iv
I.1 講義概要	iv
I.2 講義計画	iv
I.3 6時限目の議論について	iv
1 恒星の構造と進化	1
1.1 恒星とは何か	1
1.1.1 恒星の記述	1
1.1.2 光度と有効温度	3
1.1.3 HR図と恒星進化	4
1.2 恒星の内部構造と進化の基本	7
1.2.1 基礎方程式	7
1.2.2 恒星の構造・進化について参考になる基本原理	9
1.3 AGB星になるまでの進化	14
1.4 AGB星の構造と進化	18
1.4.1 AGB星の構造	18
1.4.2 熱パルスと third dredge-up	19
1.4.3 Hot Bottom Burning	22
1.4.4 質量放出	23
1.5 最近の研究紹介	26
2 ミラ型変光星とその周期光度関係	27
2.1 距離や等級に関する諸関係式	27
2.1.1 年周視差とパーセクの定義	27
2.1.2 等級の定義	28

2.1.3	距離指数	29
2.1.4	光度と輻射等級	31
2.1.5	色指数、輻射補正	31
2.2	脈動変光星の基本的性質	34
2.2.1	長周期変光星の分類	34
2.2.2	脈動の駆動: セファイド不安定帯の場合	36
2.2.3	脈動の駆動: AGB 星の場合	40
2.2.4	脈動変光星の周期	42
2.3	脈動変光星の周期光度関係	47
2.3.1	セファイドの周期光度関係	47
2.3.2	長周期変光星の周期光度関係	50
2.4	周期光度関係の較正	53
2.4.1	較正すべき関係式について	53
2.4.2	周期光度関係較正の実例	55
2.5	最近の研究紹介	60
3	AGB 星の質量放出と星周構造 (赤外編)	62
3.1	光球 + 恒星大気のスเปクトル	62
3.2	ダストシエルの観測	67
3.3	ダストシエルの性質と質量放出率の導出	72
3.3.1	星周エンベロープの速度・密度構造	72
3.3.2	星周エンベロープによる減光と放射	76
3.3.3	ダストシエルの観測による質量放出率の導出	77
3.4	最近の研究紹介	81
4	AGB 星の質量放出と星周構造 (電波編)	83
4.1	熱的に励起された分子からの輝線	83
4.1.1	分子エンベロープのサイズ	83
4.1.2	熱的分子輝線のプロファイル	84
4.1.3	CO 分子輝線の観測による質量放出率の導出	90
4.2	メーザ輝線	94
4.2.1	質量放出星からのメーザ放射	94
4.2.2	OH メーザ	94
4.2.3	H ₂ O メーザ	98
4.2.4	SiO メーザ	100
4.3	最近の研究紹介	102
5	恒星種族の代表としての AGB 星	104
5.1	トレーサとしての AGB 星の性質	104
5.1.1	恒星種族の中の AGB	104
5.1.2	年齢などによって変わる AGB 星の性質	107
5.2	各恒星系で観測されているミラ	111
5.2.1	星団のミラ	111
5.2.2	銀河系各領域のミラ	112

5.3 最近の研究紹介	116
-----------------------	-----

I 講義内容

I.1 講義概要

1-8 太陽質量程度の恒星は、進化の最終段階で漸近巨星分枝星 (AGB 星) という低温・高光度の天体になる。この段階の天体では、ミラ型という大振幅の脈動星となったり、激しい質量放出を起こしてそれまで恒星内部で生成した重元素を星間空間へまきちらしたり、さまざまな興味深い現象が観測される。恒星の構造や進化を調べるためにも、銀河にある恒星種族や銀河自体の進化を探るためにも、重要な天体である。本講義では、AGB 星の性質と応用について解説・議論を行う。

I.2 講義計画

- (1) 恒星の内部構造と進化
- (2) ミラ型変光星とその周期光度関係
- (3) AGB 星の星周構造と質量放出 (赤外線編)
- (4) AGB 星の星周構造と質量放出 (電波編)
- (5) 恒星種族の代表としての AGB 星
- (6) 最近の研究についての議論

I.3 6 時限目の議論について

最終の 6 時限目は、以下に挙げる (1) ~ (3) のいずれかの内容について何人かの受講生に発表してもらい、質疑応答・議論を行うことで、研究を行う上で意識すべき点や AGB 星に関する最近の研究の流れについて考える時間とする。

- (1) 1 節 から 5 節の各節の最後にある「最近の研究紹介」に挙げた論文のひとつについて、内容を紹介する。
- (2) 「最近の研究紹介」に限らず、自分の研究に関わる論文について紹介する。
- (3) 自分が行っている研究について紹介する。

発表についてお願い

いずれの発表内容に関しても、

- (ア) その論文 (あるいは自身の研究の) で実際に解明しようとしている課題
- (イ) 観測または理論計算の内容
- (ウ) 得られた結果とその意義 (いくつかの図の解説を含めること)
- (エ) 今後どのようなことをさらに調べていく必要があるか

という 4 点に的を絞って簡潔にまとめること。

本講義全般に関して参考になる教科書、レビュー論文など

- シリーズ 現代の天文学、日本評論社 (特に、「恒星」および「銀河 II—銀河系」)
- “Asymptotic Giant Branch Stars”, H. J. Habing & H. Olofsson (eds), Springer-Verlag New York (2004)
- Habing H. J., 1996, A&ARv, 7, 97
- “Stellar Structure and Evolution” (2nd or 3rd Edition), R. Kippenhahn, A. Weigert, A. Weiss, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2012)
- “An Introduction to Distance Measurement in Astronomy”, R. de Grijs, John Wiley & Sons Ltd (2011)
- “Pulsating Stars”, M. Catelan, S. A. Horace, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. (2015)
- “Physics and Chemistry of Circumstellar Dust Shells”, H.-P. Gail & E. Sedlmayr, Cambridge University Press (2014)
- Iben I. Jr., Ranzini A., 1983, ARA&A, 21, 271
- Höfner S., Olofsson H., 2018, A&ARv, 26, 1
- Karakas A. I., Lattanzio J. C., 2014, PASA, 31. e030
- Willson L. A., 2000, ARA&A, 38, 573
- Herwig, 2005, ARA&A, 43, 435
- The AGB Newsletter — <https://www.astro.keele.ac.uk/AGBnews/>

1 恒星の構造と進化

1.1 恒星とは何か

1.1.1 恒星の記述

恒星はつまるところ自己重力で支えられたガスのかたまり (特殊な条件が無ければ球形) であるから、そのガスの構造 (大きさや内部のガスの状態量など) を記述すればよい。まず、恒星全体としてどのようなものを記述する基本的な物理量として、質量 M 、半径 R 、光度 L 、有効温度 T_{eff} という 4 つが最も重要なものとして挙げられる。表 1 に、太陽のこれらの物理量をまとめた。☉ の添え字は、太陽に対する値であることを表すのに用いられる。有効温度 T_{eff} 以外は、太陽の値を単位としてさまざまな星の物理量を表すことが多い。本講義で取り上げる AGB 星に進化するの、 $1-8M_{\odot}$ 程度の星である。光度 L と有効温度 T_{eff} については、明るさや色などの観測と直接結びつく重要な物理量であり、1.1.2 節でより詳しく説明する。また、ガスの化学組成も重要であり、星を生成した分子雲に応じて初期化学組成が星ごとに異なっているのに加えて、星が進化する間に起こる核融合によって化学組成も変化していく。ただし、そのように変化した化学組成というのは星の中の位置によって異なっている。おおまかな化学組成の指標として、水素・ヘリウム・それ以上の重元素の 3 つに分けた元素質量比 X, Y, Z が用いられる ($X + Y + Z = 1$ となる)。表 1 に太陽の場合の質量比を記すが、それらの値はそれほど高い精度で求められたものではない。特に、重元素の質量比 Z は、原子番号などと混同しやすいので注意すること。

表 1: 太陽の諸定数を理科年表より転載

項目	定数
質量	$M_{\odot} = 1.9884 \times 10^{30} \text{ kg}$
半径	$R_{\odot} = 6.960 \times 10^8 \text{ m}$
全放射量 (光度)	$L_{\odot} = 3.85 \times 10^{26} \text{ W}$
有効温度	$T_{\text{eff},\odot} = 5777 \text{ K}$
実施絶対等級	$M_{V,\odot} = +4.82 \text{ mag}$
色指数	$B - V = +0.650$
スペクトル型	G2V
元素質量比 (水素)	$X_{\odot} = 0.7381$
元素質量比 (ヘリウム)	$Y_{\odot} = 0.2485$
元素質量比 (重元素)	$Z_{\odot} = 0.0134$

星を構成するガスの状態は、密度 ρ 、圧力 P 、温度 T などによって記述される。それらが位置によってどう変化するかを表すことによって、恒星の内部構造が与えられる。また、後で述べるように自己重力でつぶれないガス球の当然の性質として、温度・圧力が内側ほど高くなるので、その温度勾配に応じてエネルギーが内から外へ流れる。そのエネルギーの輸送量が各層でどう変化するかということも、星の構造の重要な要素である。図 1 に内部構造の例を示す。

特に AGB 星においては、星の周囲にも比較的密度の高い物質 (星周物質) があり、本講義でも取り上げるようにさまざまな観測を行うことができる。星の表面の一般的な定義は、その場所から放出される光子がそれ以上ガスと相互作用することなく星間空間に飛び出すような平均的な位置 ($\tau \simeq 1$) であり、その表面を光球と呼ぶ。多くの星では、表面付近で密度が急勾配で下がり (図 1)、光球の位置が比較的是っきり決まる。しかし、光球より上にガスがないわけではなく、恒星大気はどんな星にも多少なりとも存在し、スペクトルに現れる吸収線

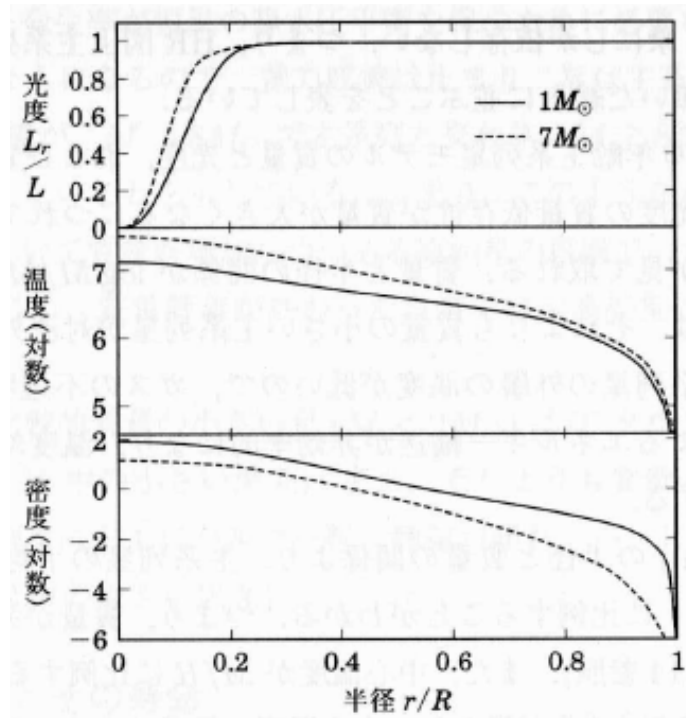


図 1: ゼロ年齢主系列星内部の光度 L_r 、温度および密度分布 (野本 他編、シリーズ現代天文学 7「恒星」より転載)

を形成するなど星の観測的特徴に大きな影響を与える存在である。彩層 (chromosphere) やコロナ (corona) など、光球よりも温度が高くなり、さまざまな活動性を示す領域も多くの星に存在する。さらに、一部のガスは恒星の重力ポテンシャルを逃れて、星間空間へ放出される。そのような領域では、(少なくとも近似的には成り立っている) 静水圧平衡状態にある光球から大気までの定常状態とは異なって、ガスが定常的あるいは非定常的に運動しているのでその速度場を記述する必要がある。AGB 星では質量放出が特にさかんに起こり、その星の進化も決定づける重要な現象である。光球面までは、高温高密度である恒星中心から温度・密度が低いという勾配をもち、質量と進化段階に応じて理論計算で予測できるような比較的わかりやすい構造をもっている。これに対し、星周物質 (および彩層、コロナ) は複雑な構造をもつことが多く、天体ごとの多様性も豊かである。星周空間では、ダスト (固体微粒子) が形成され、その存在自体が質量放出を強く促進する。一方で、彩層やコロナでは電離が起こり、低温度星の大気から星周にかけての領域では多様な化学反応が起こっている。図 2 は、本講義での主なターゲットとなる質量放出を行う AGB 星に対して、恒星内部から恒星風が星間空間へ広がるところまでの広い範囲で、どのような物理過程が起こり、いかなる化学的特徴を示すのかをまとめた概念図である。この図の中の各領域で何が起こっていて、観測でどのように見えるのかを理解することが本講義の大きな目標である。

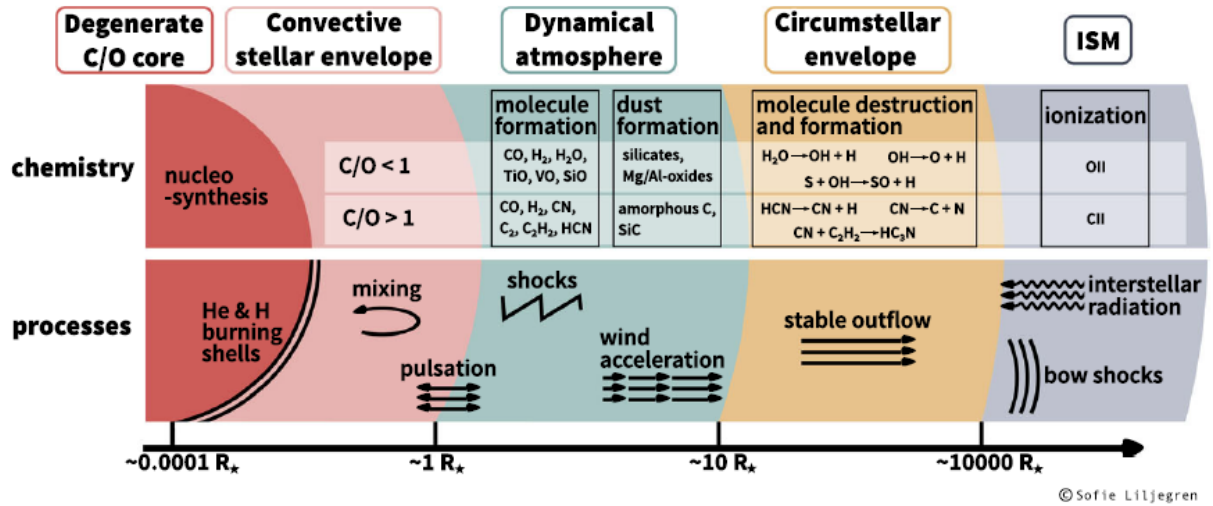


図 2: AGB 星およびその星周空間における物理過程と化学的特徴の概念図。典型的な AGB 星の半径 R (図中では R_*) は、1 天文単位オーダー ($> 100 R_\odot$)。(Hofner & Olofsson, 2018, A&ARv, 26, 1 より転載)

1.1.2 光度と有効温度

星の放射エネルギー分布 (Spectral Energy Distribution=SED) は、表面 (光球面) の温度 T に対応する黒体放射

$$B_\nu = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \quad (1)$$

の形で近似できることが多い (ただし、次の段落に注意)。この式は、星の単位表面積、単位時間、単位周波数あたりから放射されるエネルギー量を表す。このスペクトルを周波数 ν で積分すると σT^4 となる。ここで、 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ はステファン-ボルツマン定数である。これに、星の表面積を掛ければ星の全放射エネルギー (単位時間あたり) は

$$\mathcal{L} = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4 \quad (2)$$

となる。この式は、光度 \mathcal{L} と半径 R によって与えられる有効温度 T_{eff} の定義となっている。ほとんどの場合、式 (1) に現れる光球面のガスの温度 T は有効温度 T_{eff} と同一と考えてよい。

量子力学・統計力学でよく知られているように、黒体放射は温度に応じてエネルギー放射のピークとなる波長がウィーンの変移則

$$\lambda_{\text{max}} = \text{const.} \times \frac{hc}{kT} = \frac{2.8978 \text{ mm}}{T [\text{K}]} \quad (3)$$

に従って変化する。このことは、有効温度の低い星ほど赤く見えることを示している。有効温度が 5777 K の太陽 (表 1) は、式 (3) の表すピーク波長 λ_{max} が約 500 nm に対応し、ヒトの目が感じる波長範囲のおおよそ中央が放射スペクトルのピークとなっている。星の SED が有効温度によって変化する様子は、 $B-V$ などの色指数やスペクトル型 (高温側から O-B-A-F-G-K-M) によっても表現される (詳しくは 2.1.5 節で紹介)。

太陽よりもずっと赤く見えないアンタレスやベテルギウスは、有効温度が 3500 K 程度である。ただし、それらの星の赤さには、恒星大気中の分子が可視光の青い側を中心に非常に強い吸収を起こしていることも寄与している。AGB 星、特にミラ型変光星のような進化の進んだ低温度星では、分子による強い吸収バンドが多く観測されるようになる。図 3 は黒体放射で予想される色と実際の星の色の違いを示していて、M 型星に向かって