

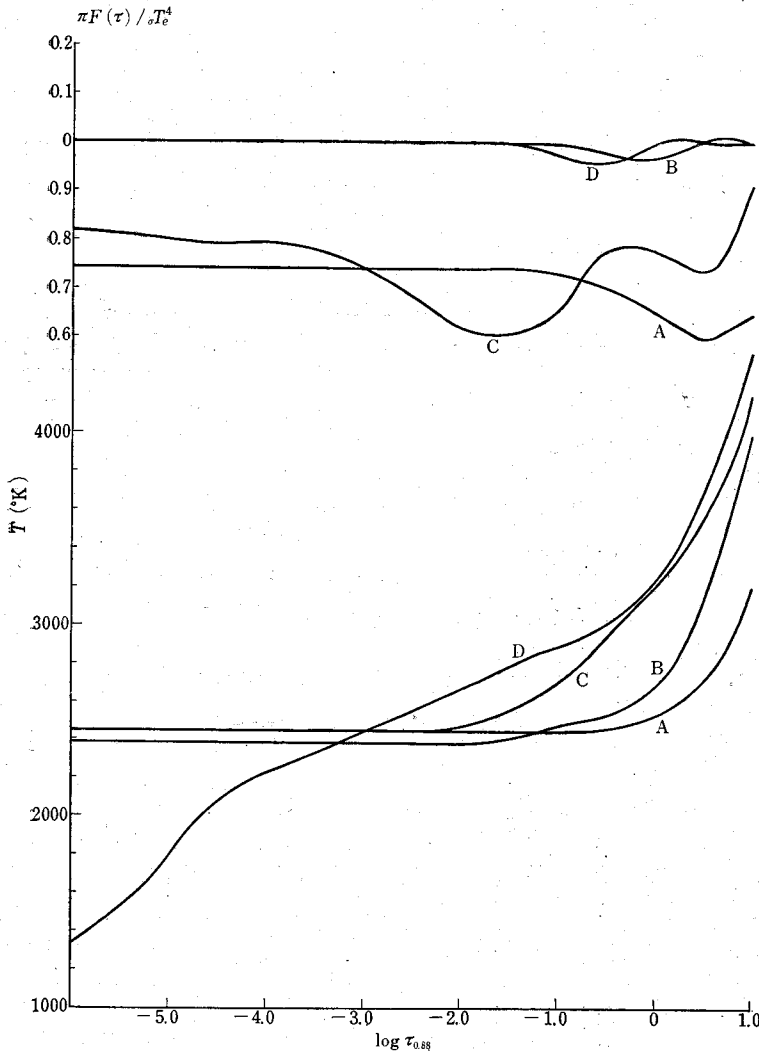
低温度星の大気構造 (II)

辻 隆*

4. M型星の大気構造

前節で述べた議論に基づいて、M型巨星のモデル大気を計算した結果を第4図に示す。この図で横軸は波長 0.88μ に於ける光学的深さの対数で、これに対して温度がどのように変化しているかを示したものである。ここではモデル大気がどのような因子によって、どのような影響を受けるかを見るために、4つのモデル大気を示してある。これらのモデル大気は全て標準化学組成（太陽大気の化学組成とほぼ同じ）で、 $T_e = 3000^\circ\text{K}$ 及び $g = 10 \text{ cm/sec}^2$ に対するものである。

まず吸収係数として、分子帯の影響は無視して、連続吸収だけを考慮したモデルを考えてみよう。モデルAはこのような連続吸収係数のRosseland平均（一種の調和平均）に対する灰色温度分布に基づくモデルである。灰色温度分布と云うのは、吸収係数が波長に全くよらないで一定である場合に、あらゆる点で輻射流量一定であるような温度構造のことであり、厳密解が知られている唯一の場合である。このようなモデルが、一般の非灰色大気モデル即ち吸収係数が波長によって変化するような場合にも、あらゆる点で一定の輻射流量を与えることはあまり期



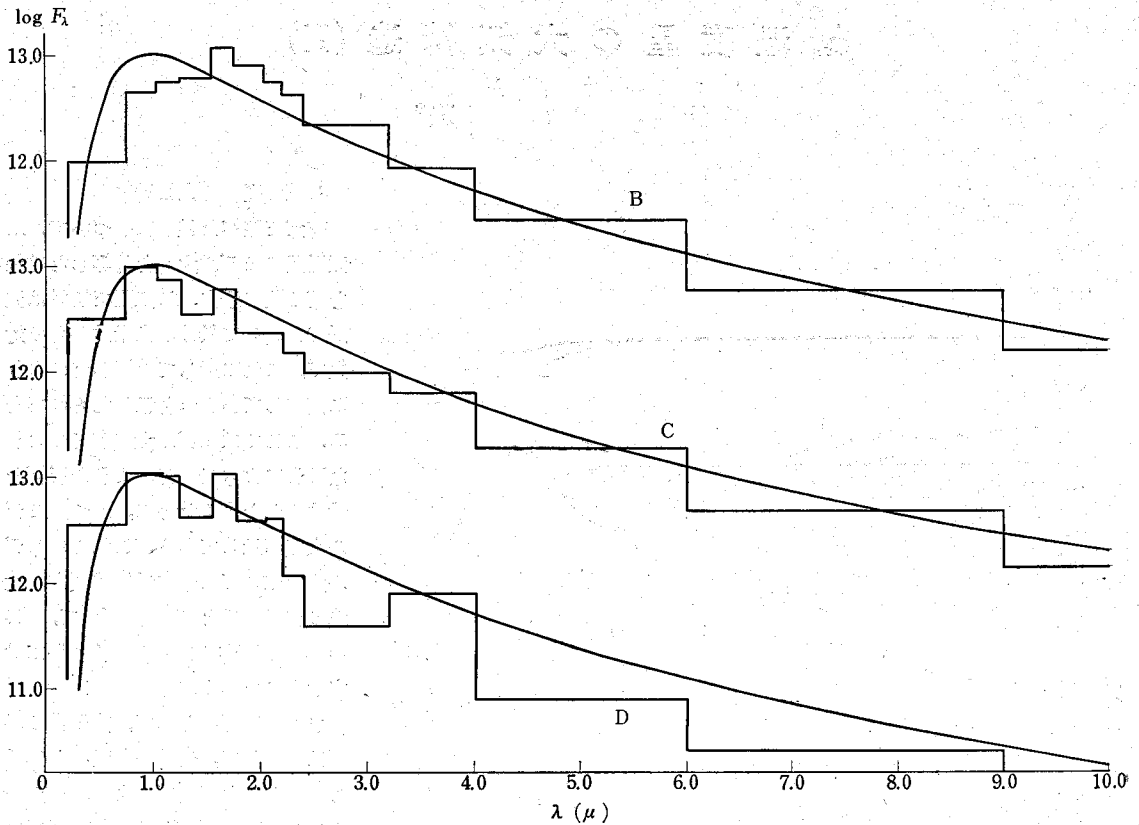
第4図 M型巨星のモデル大気（下）及びその全輻射流量（上）

- A: 連続吸収だけを考慮した灰色モデル
- B: 連続吸収だけを考慮した輻射流量一定モデル
- C: 連続吸収と分子帯吸収を考慮した灰色モデル
- D: 連続吸収と分子帯吸収を考慮した輻射流量一定モデル

待できないことで、事実このモデルに対して各深さで、各波長に対する輻射流量を計算しそれらを加えさせて全輻射流量を計算してみると、第4図の上部に示すように、正しい値 σT_e^4 に較べて30%以上も少い。そこでこのモデルを出発点として、前節で述べた方法で逐次近似を数回行って得たのがモデルBである。このモデルでは、輻射流量の値は第4図上部に示すように、ほぼあらゆる場所で正しい値の σT_e^4 になっており、ごく一部の点で2~3%の誤差を示すに過ぎない。ここで注意すべき点は、モデルBはモデルAに較べて表面附近の温度はほとんど変わらず、深い所では温度がかなり高くなって

* 東大理

T. Tsuji: Model Atmospheres of Late Type Stars.



第5図 M型巨星モデル大気表面の放射流量
(B, C, Dの意味は第4図に同じ。図に示す曲線は $T=3000^{\circ}\text{K}$ の黒体放射に対するプランク曲線)

ることである。一般に放射流量一定の非灰色大気モデルは灰色大気モデルに較べて、表面温度が著しく低いように考えられていたが、Unno はこのようなことは必ずしも正しくないことを指摘し、吸収係数とその星の放射強度極大である波長よりも長波長領域で著しく小さい場合には、第4図のモデルBのような温度分布が得られることを理論的考察により示した。

次に吸収係数に H_2O や CO 等の分子帯吸収の影響も考慮に入れたモデルを考えてみよう。まずこのような吸収係数に対する Rosseland 平均をとり、これに対する灰色温度分布を示したものがモデルCである(もしも Rosseland 平均吸収係数に対する光学的深さに対して温度分布を記せば、モデルAとモデルCは全く重なる)。予想されるように、このモデルCは、放射流量一定と云う要請を満すにはほど遠く、とうてい妥当なモデルであるとは考えられない。そこでこれを基にして、再び逐次近似を行い、モデルDを得る。このモデルでは、大部分の点で放射流量の値は σT_e^4 になっているが、尚4%程度の誤差を示す所もある。しかしこの誤差による温度の誤差はせいぜい $20\sim 30^{\circ}$ 程度と推定されるので、この程度の誤差は許すことにしよう。逐次近似をさらにくり返せ

ば、このような誤差もなくすることはできるが、このように吸収係数が波長、温度及び圧力等によって複雑に変化する場合には、逐次近似の収斂はかなり遅く、大量の計算を要する。モデルDはモデルBやCと著しく異なる構造を示すことに注意しよう。特に表面温度は 1300°K 近くにも下り、かつ温度分布は急激な変化を示す。このモデルDは Chandrasekhar によって最初論じられた Picket-Fence モデル(同じ強さ及び幅の矩形の吸収線が、全波長域にわたり一様に分布しているモデル)の一般的特徴を示すが、これは第3図に示した吸収係数の性質からみて、十分妥当な結果であると言うことができる。

次にこれらのモデルに基づいて計算できる物理量を観測結果と較べてみよう。星の大気全体の構造に最も影響を受けるものは、星の表面から放出される放射流量の値である。一般に吸収係数の小さい波長域の放射は、星の大気のかかなり深い所の構造により決り、又逆に吸収係数の大きい波長域の放射は、かなり表面近くの大気構造の影響を受ける。従って全波長域にわたる放射エネルギー分布の観測値と、モデル大気に基づく理論値を比較することによって、モデル大気の妥当性を検討することができる。第5図にはモデル B, C, D に基づいて計算した星の

表面より放出される輻射流量の値が示してある。まず第5図に示すモデルBの輻射流量と、第1図に示した観測値とを較べてみると、理論値の方は全体として輻射が 1.6μ よりも長波長側に集中していて 1μ 前後の輻射が著しく不足していること、又 Johnson の M 等級に対する輻射が何らの不足を示さないこと等の点に於て観測値と著しく矛盾している。即ち分子の吸収を考慮しないで通常の連続吸収だけを考えたのでは、たとえ多くの労力をかけて輻射流量一定のモデルを作ったとしても、それは現実の星の大気とはほど遠いものであらうと云うことができる。

そこでモデルCを見てみよう。このモデルでは分子帯の吸収は考慮されているが、輻射流量一定と云う条件はまだ満たされていない。このモデルに基づく理論値と第1図の観測値とを較べてみると、種々の分子帯の吸収が再現されており、モデルBよりはよい一致を与えているように見える。しかしよく見ると、例えば Johnson の M 等級に対応する輻射の不足は観測から要求されるほど大きくないこと、又第4図にも示されるように、このモデルの表面輻射流量は σT_e^4 に較べて大きな不足を示していること等の理由により、このモデルも妥当なモデルと考えることはできない。最後にモデルDをみてみると、このモデルは分子帯の吸収を考えた上で、あらゆる深さで輻射流量一定としたモデルであり、ここで考えたモデルの内では最もよいモデルであることが期待される。このモデルに基づく表面からの輻射流量と、観測の結果とを較べてみると、実際かなりよい一致を示している。例えば Johnson による I, J, K, L 等の等級に対応する輻射は、ほぼ黒体輻射に近い性質を示し、 α Ori 等の観測結果と極めてよい一致を示す。又 Johnson の M 等級に対応する輻射は黒体輻射から大きくはずれ著しい不足を示すや、これも丁度観測から要求される程度である。又水素負イオンの吸収が極小になる 1.6μ では、予想されるように輻射流量は過剰となり観測とよく一致する。又 H_2O や CO の吸収帯も適当な強度で現われているが、モデルに基づく計算値の方が少し強いように思われる。これは仮定されたモデルの温度が、観測のある星の温度と必ずしも同じではないこと他に、多くの原因が考えられる。例えば一つは化学組成の問題である。即ち Spinrad 等の主張するように M 型星でも O/C 比が1にかなり近ければ H_2O の量が減少し、 H_2O の吸収帯は弱くなる。又ここでのモデルの計算は前に述べたように、分子の吸収線はある吸収帯の内部では完全に重りあっていると仮定したが、もしもこの仮定が十分正しくなく、吸収線と吸収線との間にすき間があれば、ここから輻射がもれ出してくるため、この分子帯を分解能の悪い分光器で観測すれば、見かけ上この分子帯は弱くみえるであらう。

もう一つの問題は星の彩層の影響である。分子帯は主に星の表面近くで形成されるので、もしも彩層の影響により星の表面近くで温度が逆転して高くなれば、分子の吸収は一般に弱くなることが考えられる。これらの問題については将来一層の検討が望まれる。第5図でもう一つ注意すべき点は、 1μ よりも短波長側では、Johnson 等によって観測された B, V, R 等の等級に対応する輻射に比べて、モデルに基づく理論値が全て大きいことである。実は 1μ よりも短い波長域には、種々の原子の吸収線や TiO の吸収帯があって、これらによって輻射の流出が妨げられるのであるが、ここで考えたモデルにはまだこれらの吸収の効果は考慮していないので、初めから 1μ よりも短い波長域の観測結果を説明できることは期待できないことであった。 $3000^\circ K$ の黒体輻射を考えると、 1μ よりも短波長領域に含まれているエネルギーは全輻射エネルギーの30%以下なので、この領域の扱い方に多少不完全な点があっても、星の全体的大気構造にそれほど大きな影響は与えないかもしれないが、星の表面附近の構造にはこの領域の吸収がかなりの影響を与える可能性があり、我々のモデルに於て緊急に改善を要する点である。

以上によってモデルDは、これが分子帯の吸収等についてかなり簡単な扱い方に基づいているにもかかわらず、最近の赤外観測の結果をかなり合理的に説明できることが判った。特に表面温度の高いモデルBやCが、JohnsonのM等級に相当する輻射の不足をほとんど説明できないのに反し、表面温度の著しく低いモデルDでは、これがよく説明できること、その他の点についても、モデルDに関する限り観測との間に本質的な矛盾はないこと、又このモデルは今日考えられる範囲で、かなり妥当と思われる物理的仮定に基づいていること等の点を考えあわせると、第4図に示したモデルDは、実際のM型巨星の大気構造の特徴をかなりよく表わしていると考えてよいだろう。

最後にM型主系列星について簡単に述べておこう。標準化学組成で、 $T_e=3000^\circ K$ 及び $\log g=4.8$ のモデル大気を計算してみると、 H_2O や CO 等の分子帯の吸収は、M型巨星におけると同様の効果をもたらすことが判る。即ち分子帯の吸収を考慮した輻射流量一定のモデルは、表面温度が $1200^\circ K$ 程度に下り、中に向って急激に温度が上昇して行く。M型主系列星については、M型巨星に対するほどの詳しい観測はないが、今日知られている Johnson 等による観測結果を検討してみると、上に述べたM型主系列星のモデルは、スペクトル型がM6Vの星、例えば Krüger 60B 等の観測結果をかなりよく説明できるように思われる。このことは一応、スペクトル型がM6Vの星の有効温度は $3000^\circ K$ に

近いことを意味すると考えてよいであろう。さらに M 型主系列星においては、水素分子解離による対流層の効果を詳しく検討することが必要であろう。

5. 将来の問題

以上において M 型星については、現在私達の持っている物理的知識と方法に基づいて、その輻射スペクトルの特徴は、ほぼ合理的に解釈される可能性が示され、このことは又 §3 で述べた M 型星大気に関する現在の理解がそれほど誤ったものでないことを意味するものと考えてよいだろう。このような基礎の上に立って、次は具体的な観測結果の定量的解析を行って、具体的に意味のある結論を導き出す努力をしなければならないが、このためには理論についても観測についてもさらに多くの検討を加えなければならない。まず私達のモデル自身について、前節で指摘した諸点特に分子帯の吸収係数の扱い方や、原子線吸収スペクトルの効果をいかにして考慮するか等の点について一層の改良が必要である。特に低温度星の場合については、本当の意味の連続スペクトルはほとんど存在せず、大部分の波長域は線スペクトルの吸収によって乱されているため、高温の星について成功したようにモデルから予想される輻射エネルギー分布を観測と比較して有効温度や重力加速度を決定すると云うことに、どの程度の意味があるかについては慎重に検討しなければならぬ。次の問題は私達の得たモデル大気が、吸収線スペクトルの解析にも適したものであるかどうかと云うことである。即ち吸収線スペクトルは一般に星の大気のかなり上層部で形成されるが、ここで述べたような方法で作ったモデル大気、このような上層大気の構造をも正しく表すものであるかどうかについてはまだ太陽大気についてさえも十分解決されていない点であり、ここでは吸収線スペクトル自身の大気構造に与える影響の問題の他に、星の彩層の影響や、局所的熱力学平衡からのずれの問題等が複雑に影響し合おうであろう。この問題は化学組成の定量解析の問題と関連して特に重要である。この小論では化学組成の問題に触れることは、ほとんどできなかったが、低温度星の吸収線スペクトルは特に複雑であり、正しいモデルに基づいた解析を行うことが特に望ましいことである。このためには吸収線スペクトル自身の解析によって、モデル大気の妥当性を十分検討することが望ましい。

以上においては、低温度星と云っても M 型星だけに

ついて述べたが、S 型星が炭素星についてはどうであろうか？ S 型星に関しては M 型星に較べて本質的な違いはなく、おそらく化学組成特に O/C 比の僅かの違いと、ZrO 等の分子帯の影響を考慮することで、解決できるであろう。炭素星についても原理的には、束縛束縛遷移として寄与する分子の種類が違うだけで、M 型星と同じ方法で扱えるはずである。しかし M 型星に於ては分子帯として考慮すべきものは H_2O , CO , OH それに TiO 及び VO 等程度でよいであろうが、炭素星になると分子の種類が著しく増え、吸収源としては C_2 , CN , CH , C_3 等の電子遷移に伴う吸収帯、 HCN , C_2H_2 , CH_4 その他炭素を含む複雑な多くの多原子分子の回転振動遷移に伴う吸収帯、さらに $2000^\circ K$ 前後の温度で炭素蒸気分圧が、固体炭素（グラファイト）の飽和蒸気圧を越えるため、この固体炭素粒子までが吸収源にきいてくる可能性もある。このような点について十分な検討を行ってモデル大気の方法を適用することは、近い将来可能なことであり又必要なことでもあるが、その前にまずこれらの星の大気についてある程度信頼できる経験的知識を得るよう努めることが望ましい。特に上は述べた吸収源を観測的に確かめる意味からも、炭素星の赤外領域のスペクトルを地球大気圏外から、観測することが、極めて重要なことであると考えられる。

6. おわりに

低温度星と云われる星は、一般にそのスペクトルが極めて複雑であり、その定量的解析には多くの困難があるが、一方に於て、これら低温度星は恒星進化論の上では極めて重要な位置を占めるものであり、その詳しい研究は極めて興味ある問題であることと云うことができる。スペクトルの解析によって、その星の基本的特徴を示す物理的パラメーター即ち有効温度、重力加速度及び化学組成等を決定すると云う問題は、天体物理学の問題としてはむしろ古典的な問題であるが、低温度星については、今尚そのスペクトルの定量解析の方法が十分確立されたとは云い難く、観測、理論の両面にわたり今後多くの問題が残されているということが出来る。しかし最近になり、種々の方法による赤外線観測の著しい進歩や、実験室に於る原子分子過程の研究の発展によって、この分野の研究にも大きな発展が期待できるようになったことはたいへん喜ばしいことである。