

低温度星大気の諸問題

山下泰正*

1. 低温度星の分岐と分類の問題

低温度星のスペクトルの特徴は分子の吸収帯が著しく現れることである。低温度星はそのスペクトルによって M, S, C 型の3種に大別される。低分散スペクトルでみて、酸化チタン (TiO) の吸収帯がみえるものを M 型、さらに酸化ジルコニウム (ZrO) がみえるものを S 型と呼ぶ。C 型は炭素化合物 C_2 , CN などの著しいものである。

低温度星がそのスペクトルに酸化物を示すものと炭化物を示すものとに分岐することは分子の解離平衡の考えから理解できる。星の大気と同様に水素 (H), 炭素 (C), 窒素 (N), 酸素 (O) からなる混合気体を冷却あるいは圧縮していくと、最初にできる分子は CO である。これは CO 分子の解離エネルギーが 11.09 eV と非常に高く、安定にできやすいという CO 分子自身の性質による。したがって O が C より多いと C はすべて CO になり、残った O が TiO, ZrO などを形成して M 型あるいは S 型の性質を示す。逆に C が O より多いと O がすべて CO になり、残った C が C_2 , CN などを形成して C 型の特徴を示す。CO は可視域にそのスペクトルをもたないので CO の存在を分光的に直接知ることはできないけれども、このような考えにはもはや疑う余地はない。

1918 年から 1936 年にかけて出版されたヘンリー・ドレーパー (HD) カタログでは M 型は TiO の強さによって Ma, Mb, Mc に細分類された。現在用いられている M 型の細分類は 1922 年の IAU のとりきめに従ってウイルソン山天文台で確立されたものである。分類の基準は TiO 吸収帯の絶対強度である。その後にあられたヤーキス天文台の Morgan と Keenan の (MK) 分類でも M 型の温度系列にはウイルソン式分類をそのまま用いている。MK 分類の基礎は吸収線の相対強度を用いて温度と絶対光度、元素の含有量などを分離することにある。金属の吸収線の相対強度は TiO 吸収帯の絶対強度と矛盾しないようである。1962 年に Merrill などはある種の M 型星について TiO 吸収帯の振動帯間の相対強度がその絶対強度と一致しないことを見出し、TiO の相対強度による分類がより温度に忠実であることを提唱した。TiO 分子のできやすさは TiO 分子の解離エネルギー 6.8 eV でできまり、TiO 吸収帯の絶対強度は TiO 分子全体の数で大体きまる。TiO 分子の振動状態間の

エネルギー差は約 0.1 eV である。このわずかなエネルギー差による振動状態への滞在数の違いが振動帯同志の相対強度を決めている。すなわち振動帯間の相対強度はほとんど温度によらないのである。にもかかわらず絶対強度と相対強度の間にわずかではあっても認められる位の不一致があることは温度による分類という方針にとっては重要な問題であると思われる。

炭素星は HD カタログでは R 型および N 型として分類された。R, N 分類をさらに定量的に細分類したのは 1922 年のリック天文台 Shane の研究である。分類の基準は C_2 , CN の絶対強度と青の波長域の色である。R, N 分類はその後温度の系列になっていないことが指摘された。1941 年に Keenan と Morgan は C 型という名で温度と炭素含有量による二次元分類を行なった。温度のきめ手は 1) 原子線の相対強度 2) 赤から緑にかけての色 3) NaD 線の絶対強度 4) 吸収帯の相対強度で、炭素含有量のそれは C_2 吸収帯の絶対強度である。C 分類は以後の高分散スペクトルの研究によっても、より温度の系列に忠実であることが示された。問題は炭素含有量と名づけられたパラメーターの解釈と絶対光度効果である。前者はもちろん実際の炭素含有量と一対一の対応がつけられるものではない。絶対光度については数等程度のばらつきはあるものと思われているが、個々のスペクトルからそれを検出する手段は知られていない。

S 型星分類の歴史は比較的浅く、HD カタログでは最初の間は M 型特異星あるいは特異星として記述されている。S 型星を系統的に分類したのは 1954 年の Keenan の研究である。彼は TiO の絶対強度と ZrO の絶対強度とを組合わせて温度と重元素含有量による二次元分類を行なった。温度系列のきめ方は M 型星におけるウイルソン式と同じ思想である。ここでも重元素含有量というのは S 型の特徴の純粋さの程度を表わすパラメーターであって、その解釈には問題が残っている。M 型と S 型の分岐を理解することは簡単ではない。ZrO の解離エネルギーが 7.8 eV と TiO より約 1 eV 高いことに着目して、Wurm は ZrO の強いことを絶対光度効果で説明しようとした。一方 Fujita は O と C の含有量の比 O/C が M 型より 1 に近いことで説明した。すなわち CO を形成した後に残る O の量が M 型より少ないために、より安定な ZrO が TiO より強まるという考えである。S 型星の絶対光度をそのスペクトルから直接決めることはできないが、統計的に Keenan が求めた値は $M_0 \approx -1$ である。Takayanagi はミラ型変光星に対して $M_0 \approx -$

* 東大理学部
Y. Yamashita; Problems on Atmospheres of Late Type Stars.

1.3, 変光しない星で $M_v = -0.1$ と与えている。したがって S 型星は超巨星であろうという Wurm の考えは否定的となった。最近では高分散スペクトルをみると S 型星では ZrO のみでなく Zr の線も M 型より強まっていることから、S 型星では実際に Zr の含有量が多いのであろうという考えが有力となってきた。Keenan の分類もその考えに立っている。Tsuji は Fujita の考えを発展させて重元素含有量というパラメーターを O/C と Zr 含有量とで解釈しようとした。すなわち純粋の S 型では Ti の原子線はみえるのに、なぜ TiO はみえないのか、それを説明するためには O/C ~ 1 でなければならない。そして ZrO がかなりの強度をもつことから Zr の含有量は M 型の約 1000 倍でなければならない。この予想は解離平衡の考えにたつ限り正しい。しかしこのことは実際のスペクトル解析によって実証されねばならないことである。

2. 分子の解離平衡

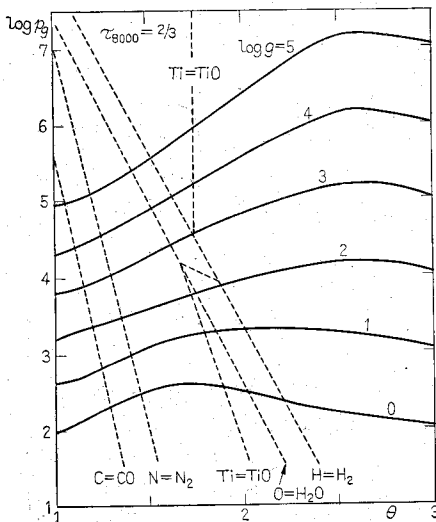
星の大気に相当する H, C, N, O の組成をもつ混合気体における分子の解離平衡は 1934 年の Russell, 1935 年およびそれに続く Fujita の研究以来多くの人達によって研究されてきた。その結果から上述のように酸素星と炭素星の分岐、さらに M 型星と S 型星の分岐が理解されてきたのである。これらの計算では H, C, N, O の組合せでできるすべての二原子分子と H_2O , CO_2 の三原子分子が考慮されている。最近, Tsuji は炭素や窒素の化合物は多原子分子に安定なものが多いことに注目して数十種にのぼる多原子分子の生成を考慮して解離平衡の計算をやり直した。結果をまとめると次の通りである。酸素型の大気 (O/C > 1) では従来の計算結果とほとんど変わらない。すなわち C の大部分は CO に、O は CO

と H_2O に、N は N_2 になり、これらの分子の成り方が他の分子の生成を支配している。炭素型の大気 (O/C < 1) では事情は大きく変わる。二原子分子だけを考えると C は CO と C_2 になり、 C_2 の量は温度が下っても減少することはない。しかし多原子分子まで考慮に入れると C は CO, C_2 とともに HCN, C_2H , C_3 などになる。 C_2 の量を温度でプロットすると $T = 2800^\circ K$ のあたりで極大をもち、より低温で減少する。これは C が C_2H などの多原子分子に食われるからである。C 型星における C_2 吸収帯の絶対強度を C 分類によってプロットすると C5 のあたりに幅広い極大を示すことは 1941 年の Keenan と Morgan の研究以来知られていた。C 分類ではこの特徴を炭素含有量というパラメーターで表していることはすでに述べた。Tsuji の計算結果は正にこの C 型星の一般的特徴を温度という一次元のパラメーターで説明したのである。残る問題はこのプロットに幅があることである。すなわち原子線の相対強度などからみて同じ温度をもつと思われる星に対しても C_2 吸収帯の絶対強度にはある程度のちらばりがあることである。

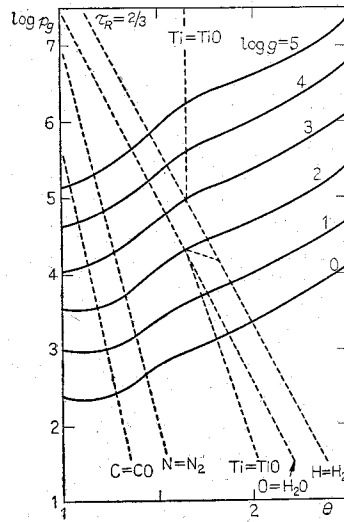
注目すべきことは二原子分子のみを考慮する限りでは N は大部分 N_2 となる。すなわち N の解離平衡はそれ自身で閉じていて N の含有量は他の O や C を含む分子の生成に比較的自由関係である。ところが多原子分子の生成が重要になると N の含有量は HCN などを通して C や O を含む分子の解離平衡に影響して行くことである。

3. 温度の問題

星の温度にはいろいろの定義があるが、最も重要な概念は有効温度である。有効温度は星の表面の単位面積から単位時間に放出される輻射エネルギーの総量で定義される。星の有効温度を定義に従って直接求めるために



第 1 図



第 2 図

第 1 図から第 6 図までで、本文 § 4 にのべた吸収源を用いて、低温度星大気の種々の物理量を推定した。星の大気は正常な化学組成をもち (M 型星大気)、星の大気中で温度、圧力は一定と仮定した。

第 1 図は波長 8000 Å に於ける光学的深さ $\tau_{8000} = 2/3$ の点に於けるガスの圧力 p_θ (ダイン/cm²) と温度との関係、第 2 図は吸収係数のロスランド平均ではなかった光学的深さ $\tau_R = 2/3$ の点に於けるガスの圧力 p_θ と温度との関係である。θ は慣用記号で温度を $T^\circ K$ とすると $\theta = 5040/T$ である。パラメーターは星の表面に於ける重力加速度 g (cm/sec²) である。O = H_2O の線は原子の状態に残っている O の数が H_2O 分子になった O の数と等しくなるような温度と圧力の軌跡である。この線の左側 (高温、低圧) では O は大部分原子の状態、右側 (低温、高圧) では大部分 H_2O 分子の状態が存在する。他の元素についても同様である。

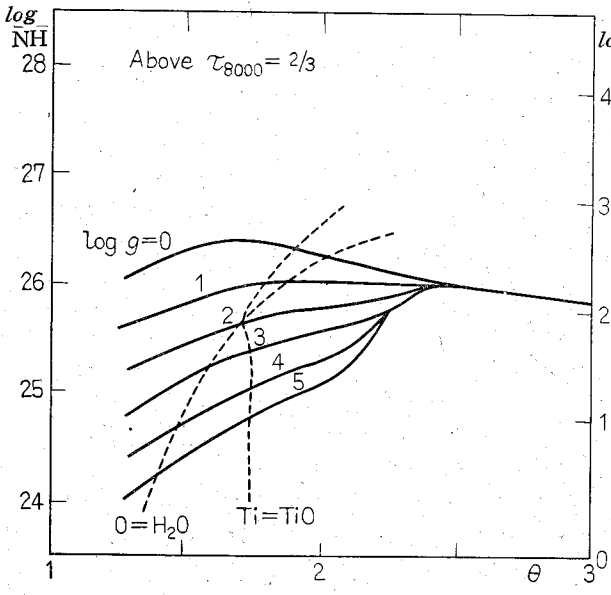
は、星から毎秒放出される輻射エネルギーの総量、すなわち全輻射絶対光度と星の直径とを観測によって決めねばならない。これらのことができるのは太陽、食変光星などごくわずかの星に限られている。他の星については、これらの少数の確実な有効温度を参照して、スペクトル型や色温度を注意深く校正する。Kuiper は 1938 年にこのような方針に従って星の温度の尺度、すなわちスペクトル型と有効温度との関係を組立てた。Morgan と Keenan はスペクトル分類をヤークス式に変えたことともなつて Kuiper の温度尺度の改訂を行なつた。最近では Harriss III の研究がある。これらの研究の基礎になっているのは 1922 年から 1927 年にかけての Pettit と Nicholson の観測である。彼らは熱電対を用いて星からくる輻射エネルギーの総量、および赤外域における色温度を測定した。熱電対は波長に対して一様な感度をもっているので、輻射の総量を測るといふような仕事には最も適している。Stebbins と Whitford は光電管を用いて約 1μ までの 6 色測光を行なつた。最近では Johnson が InSb セルを用いて 1μ から 5μ までの測光を行なつた。これらの結果をまとめると、波長の基線を相当に長くとする限りでは星からくる輻射エネルギーの波長に対する分布は黒体輻射のそれに非常に近いのである。このことから先に述べた人々は低温度星の特に巨星では色温度がそのまま有効温度に等しいと仮定している。ここで注意すべきことは低温度星のスペクトルには強い吸収線や帯が数多く存在することである。色温度を出すためにはこれ

らの吸収線によって連続スペクトルから食われただけのエネルギーを補正しなければならない。しかも波長が 1μ より長いところでの吸収線スペクトルのようすはほとんどにもわかっていない。したがつてみかけの星の輻射エネルギー分布が黒体のそれに近いからといつて、みかけの色温度をそのまま有効温度に等しいとおくことは危険だといわねばならない。

最近では星のモデル大気についての知識が正確になってきたので、この方面から温度尺度をきめることが可能であり、すでに中位の温度の星に対しては実用に供されている。低温度星でも特に巨星では距離が遠いために距離や直径の正確な測定ができないという事情がある。将来この方面から低温度星の温度尺度を決定することが望まれる。

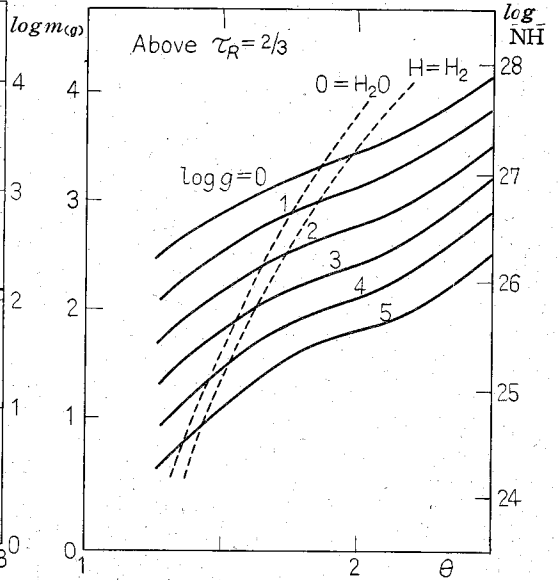
4. 大気構造の問題

この問題については話を M 型星に限つてすでに天文月報 53 巻 10 号で少し精しく述べた。低温度星大気における輻射に対する吸収源として今のところ考えられるものは、 H^- 、 H_2^- の連続吸収、 H 、 H_2 のレイリー散乱、および原子や分子の線吸収である。 H_2^- の自由-自由転移による連続吸収係数は 1964 年に Somerville によって計算された。彼の計算によると H_2^- の自由-自由転移による吸収の断面積は H^- のその約 $1/3$ にも達する。 H_2^- がこのように大きな吸収断面積をもつことは H_2 の基底状態が閉じた電子殻をもち、核の電場はほとんどシールドされているという H_2 の性質からみて注目すべ



第 3 図

$\tau_{8000}=2/3$ の点より上にある物質に含まれる原子の総数 NH (cm^{-2}) と温度との関係



第 4 図

$\tau_R=2/3$ より上の物質中の原子の総数 NH と温度との関係である。 g/cm^2 であらわしたそれぞれの物質の質量は中央の目盛で与えられる。

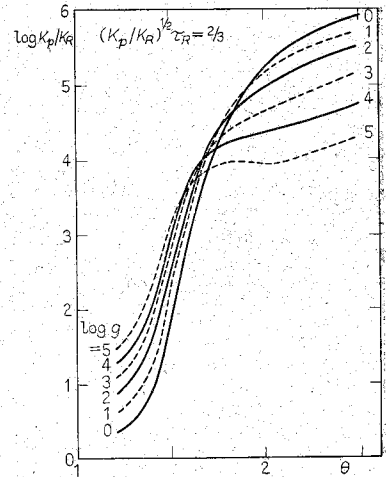
きことと思われる。ついでながら、 H_2 の電子配置は He のそれに相当するので、 He の自由-自由転移による連続吸収もかなり大きいに相違ない。Gaustad は H_2O などの吸収線の減衰部が吸収係数のロスランド平均におよぼす影響を計算し、その影響はないと結論した。しかし私が強調したいのはロスランド平均には効かなくても、吸収線ができることによる温室効果が大気構造に重要な影響を与えているであろうということである。大気構造特に表面近くでの構造を支配しているものは吸収係数のロスランド平均ではなく、むしろプランク平均なのである。

以上連続吸収源の吸収係数の値は波長によって著しく変化する。したがってこのような吸収源を用いてモデル大気を作るとそこから得られる輻射エネルギーの波長に対する分布は黒体のそれより大きくははずれるであろう。 H^- を吸収源とする低温度星のモデル大気は幾人かによって計算されたが、上述の Johnson の観測結果と合わないという理由でほとんど発表されていない。さらにもう一つ困ることは可視域における吸収線の強さである。すなわち観測から得られる吸収線の強さは以上の連続吸収源を仮定して普通の吸収線生成の理論から期待されるそれよりもずっと弱いのである。

太陽に対する 1930 年代の知識は正にこのような矛盾に満ちたものであった。当時では太陽の連続スペクトルは水素と金属の連続吸収によって作られると考えられていた。その仮定に立つとバルマー不連続から得られる水素と金属の含有量の比は $H/M=14$ であった。一方吸収線の相対強度からは $H/M=1000$ と得られた。この矛盾は太陽大気の連続吸収の大部分が H^- によることがわかって解消した。低温度星の場合にも未知の連続吸収源があるのかも知れない。Gaustad は H_2^- にそれを期待している。私は吸収線の温室効果が大気構造に大きな影響を与えている、少なくともそれによって吸収線の問題は理解できていると思っている。

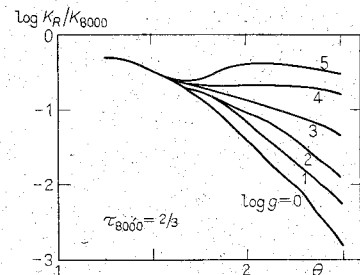
今年の1月に東大天文学教室で低温度星についての

勉強会が行なわれた(月報3月号雑報参照)。この記事はそのなかの低温度星大気についてのむしろ基礎的な問題をまとめたものである。勉強会では以上の問題の外、元素の含有量、それを作る核現象の問題などが議論された。低温度星に関してはこれらの諸問題はまだほとんどわかっていないといつて差しつかえない現状であるが、多くの示唆に富んだ発言や討論があった。これらについて言及できないのは遺憾である。



第5図

吸収係数のプランク平均 K_p とロスランド平均 K_R との比 K_p/K_R と温度との関係、プランク平均は吸収係数の算術平均で定義され、吸収係数の大きい波長域からの寄与が大きい。ロスランド平均は吸収係数の調和平均で定義され、吸収係数の小さい、すなわち輻射の通りやすい波長域からの寄与が大である。従ってこの比は吸収係数の灰色からのずれの大体のようすを表わしている。灰色大気ではこの比は勿論1である。



第6図

吸収係数のロスランド平均 K_R と波長 8000 \AA に於ける吸収係数 K_{8000} との比 K_R/K_{8000} と温度との関係。

大塚奨学金希望者募集

昭和40年度の大塚奨学金を受けることを希望される方は8月10日までに下記の事柄を記載の上、“三鷹市大沢東京天文台内社団法人日本天文学会理事長”宛御申込下さい。

- (1) 氏名・生年月日・年齢・性別
- (2) 現住所
- (3) 学歴
- (4) 職業
- (5) 研究機関
- (6) 内地留学をしたいと思う研究機関
- (7) 内地留学を希望する期間と日程の予定

(8) 奨学金として支給を希望する額

(9) これまでの主な研究経歴

註) 大塚奨学金は、日本国内の特定の研究機関で、天文学およびそれに関連する分野の研究を目的とする短期間の内地留学のための旅費および滞在費として支給されるもので、原則として毎年本会会員一名に6万円を授与いたします。なお詳細は会員名簿附録、あるいは天文月報第54巻12号241頁の“大塚奨学金に関する内規”を御参照下さい。疑問の点については日本天文学会宛に直接御質問をおよせ下さい。