

# 大気構造 — 星から褐色矮星へ

辻 隆

〈東京大学理学部天文学教育研究センター 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉  
ttsuji@mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp

恒星（その最小質量は約  $0.08M_{\odot}$ ）と惑星（最も大きい木星で  $10^3M_{\oplus}$ ）の間の質量にして2桁の空隙を埋める新しい天体—褐色矮星—が遂に発見された。これは我々の宇宙を構成する基本的な天体—恒星、褐色矮星、惑星—がすべて観測的研究の対象となったことを意味する。これらの天体で宇宙のバリオン量を担うことが可能か、また、始源的元素合成から推定されるバリオン密度は何を意味するか、などの問題に答えるには、これらの天体の基本特性を観測から正しく導き出すことが前提となる。このためには、我々が直接観測できるこれら天体の表面、即ち、大気構造の理解が不可欠である。ここでは、恒星の大気構造における問題点を概観し、ダスト形成などの問題を含めて褐色矮星の場合への展望を示す。

## 1. はじめに

恒星は星間物質と共に宇宙を構成する基本要素と考えられていたが、最近ではこれ以外の見えない物質—暗黒物質—がむしろ宇宙の質量の大部分を占めているのではないかとされている。現在この暗黒物質の正体は全く判っていないが、これがバリオンのなものとするとその有力候補の一つが褐色矮星である。この天体は、質量が太陽の8%以下であるため自らの核エネルギーで光り輝く星にはなれず、重力エネルギーで輝いている。したがって、重力エネルギーを使い果たして、やがて暗黒天体になってしまうと考えられている。この天体は永らく幻の天体であったが、1995年末になってようやく確実に褐色矮星でと思われる天体 GJ 229B が中島紀氏<sup>1)</sup>らパロマー天文台のグループにより発見された。これはコロナグラフの原理を応用した系統的探査のみごとな成果である。これについて詳しくはこの発見前に書かれた中島氏の解説<sup>2)</sup>を参照されたい。

しかし、これで暗黒物質の問題が解決したわけでは毛頭なく、これは長く困難な研究の始まりに

すぎないであろう。即ち、現在の観測限界ぎりぎりの暗い天体について、様々の選択効果を考慮してその天体が宇宙全体でどれだけあり、暗黒物質にどれだけ寄与するかを解決するには、当然このような天体の基本的な性質をよく理解しなければならない。正真正銘の褐色矮星の発見により、その性質を観測にもとづいて明かにすることが原理的には可能になったが、一般に観測データを眺めて直接解することは限られている。何故ならば、天体は複雑な構造をしており、我々が手にする観測量（例えばスペクトル）はそのような複雑な構造の効果が積分されたものだからである。これら観測結果の解読にあたっては、観測はできても実験のできない天文学では、モデルの方法が重要である。我々が直接観測できる天体の表面、即ちその大気の構造を如何にモデル化し、その妥当性を如何に検証するかが重要な問題となってくる。

## 2. 恒星大気

褐色矮星の大気構造を論ずる前に、恒星大気構造のモデル（略してモデル大気）がどのような意味を持つかを考えてみよう。具体的に、モデル大気

とは大気の深さの関数として基本的な物理量、例えば温度とガス圧を与えたものであり、他の物理量や観測量はこれから計算で求めることができる。一時は、経験的モデルが容易に得られる太陽の大気モデルを異なる有効温度にスケールして恒星に適用することが広く行われた。しかし、1960年以後には高速電子計算機の出現や新しい観測技術による高精度で多様な観測データを解析するための実際上の要求から、与えられた任意のパラメータについて非経験的モデルの構築、即ち計算のみでモデルを作ることが試みられるようになった。モデル大気の計算で最も重要な点は大気の各点で輻射平衡が成り立つようにすることである。このためには全スペクトル領域にわたり輻射輸達の方程式を解き、各点での全輻射流量が保存されると云う要請を満たす必要がある。更に、局所的熱力学平衡、静水圧平衡、均質平行平面大気などを仮定した場合を古典的モデル大気と呼んでいる。

ここで問題になるのは、多数の線スペクトルの輻射輸達に及ぼす効果を如何にしてモデル計算に取り込むかである。Kurucz<sup>3)</sup>はこれを直接膨大なスペクトルデータを取り扱う方向で徹底的に追求し、O型からK型までのあらゆる有効温度、表面重力加速度、金属量、乱流速度などの恒星について、原子・分子併せて約6千万本のスペクトル線データを考慮した系統的なモデル大気の計算を完成した。これらの結果は、論文として出版するにはあまりに膨大であるため、計算に用いたプログラムやスペクトルデータも含めて現在までに23枚のCD-ROMにより公表されている。これらのモデルがどの程度現実の星に対応するかは、個々の場合について観測による検証を十分行う必要がある。一つの検証として、非経験的モデルにより太陽の経験的モデルはどの程度再現できるであろうか? このテスト<sup>4)</sup>は150 K程度の不一致があることを示している。太陽の経験モデルにもこの程度の不確かさはあるので、これも非経験的モデルのテストと言うよりは、この両者がほぼ同じ程度のレベルにあることを示すもの

と考えるべきであろう。

このように大部分の星についてはモデル大気はすでにデータベースの一種として利用でき、事実 Kurucz のモデルは多くの人々により様々な観測の解析に広く利用されている。しかし、このようなモデル大気を過信して無批判に使用する傾向に警告を発したのは Kurucz<sup>5)</sup>自身である。特に、これらのモデルの重要な応用の一つは、スペクトルの定量解析から化学組成を決定することにあるが、大気構造を最も敏感に反映するのは電離平衡である。例えば、準矮星など古い星のリシウムは宇宙初期の元素合成の結果を保存しているとされているが、電離ポテンシャルが小さなリシウムはこれら有効温度6,000 K程度の準矮星では99.999...%電離しており、残ったわずか0.001%以下の中性リシウムの観測から全リシウム量を推定しているのである。1を知って10を知るところか、天文学者はごく僅かの中性リシウムの観測から全リシウム量がその $10^5$ 倍にも達する何倍であるかを正確に知らなければならない。このことは決して易しいことではない。例えば、太陽でも大気モデルがなお不完全で鉄の電離の補正が誤っていたため、鉄組成が50%も誤っていたことが判ったのは極く最近のことである<sup>6)</sup>。

更に、古典的モデル大気が現実の天体の大気構造を正しく表すものとは限らず、とくに Kurucz<sup>5)</sup>は対流層の扱いに問題があることを指摘している。即ち、対流により上昇する高温領域と下降する低温領域が共存すれば、高温領域からの強い紫外輻射によりリシウムの電離はさらに進む可能性がある。この場合、これらの星のリシウム量は現在求められている値 ( $\text{Li}/\text{H} \approx 2 \times 10^{10}$ ) よりも一桁以上増大する可能性がある。即ち、宇宙初期のリシウム量は現在の銀河デスクのリシウム量 ( $\text{Li}/\text{H} \approx 2 \times 10^9$ ) とほとんど変わらない可能性も否定できない。この場合、現在の標準的ビッグバンモデルは成り立たず、また暗黒物質の存在の根拠の一つである始源的リシウム量に基づく宇宙のバリオン密度に対する制約も意味を失う。恒星の大気構造が正し

く理解されない限り、現在のビッグバン宇宙論の観測的基礎も以外に脆いものであることが分かるであろう。

### 3. 赤色矮星の大気

恒星大気構造の研究は古典的モデル大気の範囲では一応完成に近づきつつあるとも言えるが、古典的モデルが現実の星の大気構造を正しく反映しているか否かは上の例でも分るように明らかではない。低温の赤色矮星、赤色巨星・超巨星、炭素星などでは古典的モデル大気の範囲内でも問題が多く、さすがの Kurucz も手をつけていない。その理由の一つは、これら低温では原子のみならず多数の分子のスペクトル線が現れ、これらに関するデータが不十分であることである。それでは、これらの分子について完璧なデータベースができれば、問題は解決するであろうか？ 答えはおそらく否であろう。ここでは、太陽やより高温の星ですでに顕在していた古典的モデル大気の問題点がより深刻な効果をもたらしている可能性がある。事実、すでに多様な観測が行われた赤色巨星・超巨星、炭素星などの低温度星については、大気構造の研究も比較的長い歴史があるが、これらの星の豊富な観測データを明解に説明できるモデルはいままでのところ存在しない。しかし、本稿ではこれら進化した低温度星の問題にはこれ以上触れないで、褐色矮星に限りなく近い天体として、最近の観測技術の進歩と相まってようやく観測も盛んになったM型矮星を取り上げることにしよう。

星の大気では長い間物質はすべて気体で存在するとされてきたが、M型矮星や褐色矮星のような低温・高圧の大気では新しい問題として固体・液体への相転移の可能性がある。図1に示すように、低温・高圧の大気では、H, C, N, O などからなる揮発性の物質はメタン, 水, アンモニアなどの分子ガスの形で存在するが、Fe, Si, Mg, Al などからなる難溶性の物質は大部分コランダム( $Al_2O_3$ ), 鉄(Fe), シリケート( $MgSiO_3$ )などのダストになって

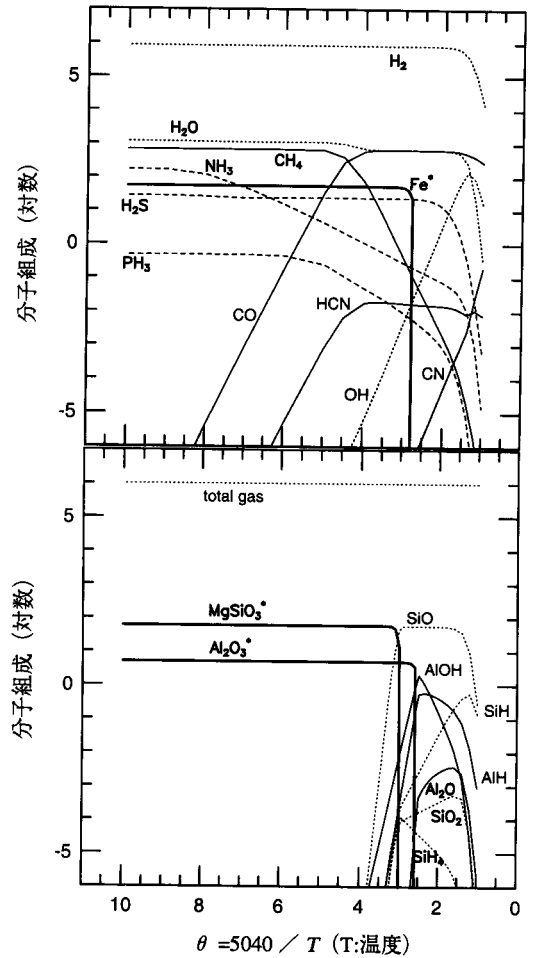


図1 1気圧に於ける分子及びダスト(\*印をつけたもの)の熱化学平衡(太陽組成). 横軸  $\theta = 5040/T$  に対し分子の分圧  $P_{mol}(\text{dyn/cm}^2)$  を対数で示す. 上図は鉄以外は主として揮発性分子ガス, 下図は難溶性物質を示す. 太陽組成即ち酸素過多 ( $O > C$ ) の大気でも, 1気圧程度で温度が1,000 k 以下になると, CO は大幅に減少し,  $CH_4$  にとってかわる.

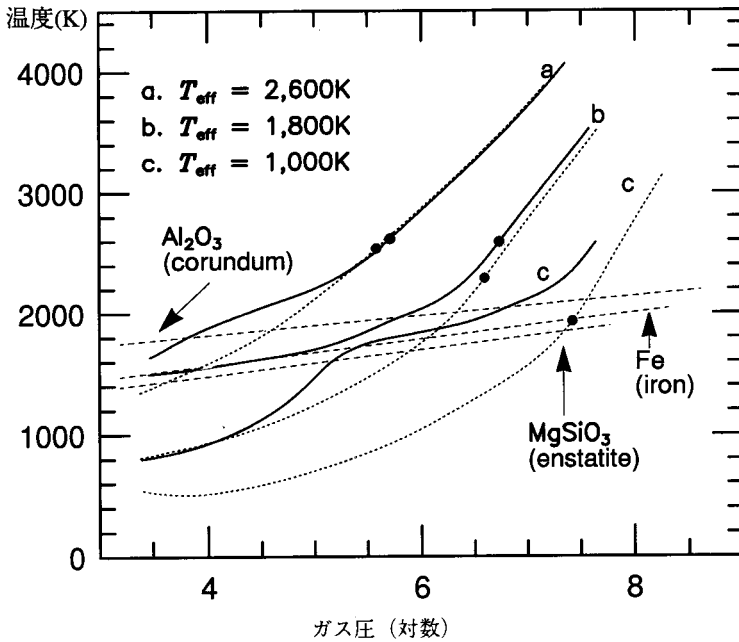


図2 有効温度 2,600, 1,800, 及び 1,000 K(太陽組成)のダストありモデル(黒線)及びダストなしモデル(青線). 斜線は熱化学平衡に於て, 酸化アルミニウム( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 鉄(Fe), シリケート( $\text{MgSiO}_3$ )などのダストが形成される線を示す. 黒丸は対流層の始まる点を示す.

いる. しかし, 熱力学的平衡ではダストが存在し得るとしても, 星の大気で具体的にどのような形で存在するのであろうか? 我々は最も簡単なモデルとして, 微小なダストがガスと均一によく混合した状態で形成されると仮定して出発することにする.

吸収源としてはこれらダストのほか, 種々の揮発性の分子も依然として重要である(図1). 即ち, CO, OH, SiO等の回転振動遷移, TiO, VO, FeH等の電子遷移のほか, 低温になるに従い種々の多原子分子, 即ち  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ のほか  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{PH}_3$ などの回転振動遷移が重要となる. これらの分子吸収を正確に取り入れるるに必要なスペクトル線データベースを作成する試みもなされているが, 中途半端なものではあまり意味がない. また, モデルとは一般的に言えばもともと複雑な対象を簡単にモデル化することにより, 複雑な現象の本質を理解するための方法としての意味があるのであり, やたらと膨大なデータベースを使用すれば良いと言うものでもない. このような観点から我々は分子吸収を

バンドモデルの方法により近似的に取り入れるる方法を採用している<sup>7)</sup>. また, 普通は問題とならない  $\text{H}_2$ の衝突により誘導された二重極遷移による赤外吸収が高圧では重要となる.

このようなダスト及び分子による吸収源を考慮して, 放射対流平衡にある非灰色モデルの計算を行う. 一般に, 分子のみを考慮したモデルでは分子吸収の強い非灰色性により星の表面温度は極めて低くなる(図2の青線). しかし, 有効温度 2,600 K以下ではダストが星大気の上層部に形成され, そのためほぼ連続的で分子吸収よりも桁違いに強い吸収が大気上層を覆うため大気温度は大幅に上昇する. このためダストの形成はダスト自身により抑えられるが, それでも形成される少量のダストにより大気構造は大きく変化する(図2の黒線). このような大気構造の変化に対応して, 予測されるスペクトルも図3-4に示すように大きく変化する.

さて, このようなモデルの妥当性は観測と比較して初めて決まる. 我々のモデルではダストができると, まず表面の温度が上昇するため分子は解離

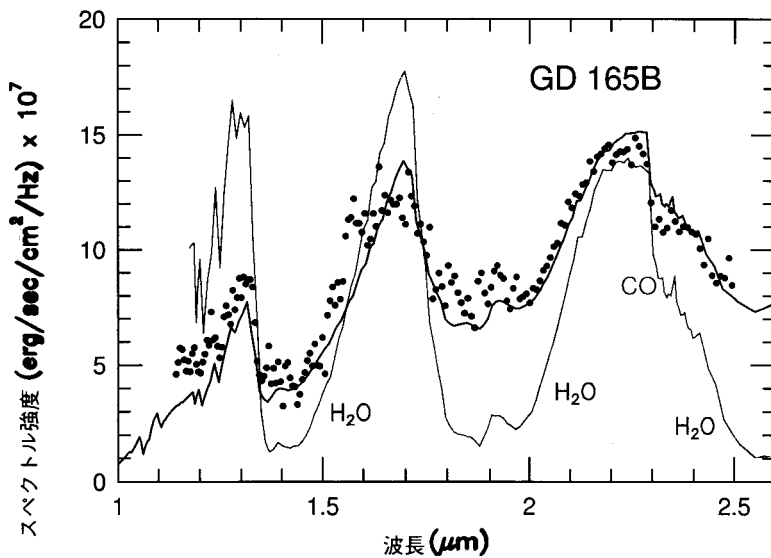


図3 褐色矮星候補 GD 165B の測光的に較正されたスペクトル<sup>11)</sup> (黒丸)と、 $T_{\text{eff}} = 1,800$  K のダストありモデル (黒線) 及びダストなしモデル (青線) によるスペクトルの予測値の比較。ダストありモデル (黒線) は観測をよく説明するが、ダストなしモデル (青線) が予測するような強い分子帯 (主に  $\text{H}_2\text{O}$ ) は観測されず、また輻射エネルギー分布の形も全く合わない。この天体の大気にはダストが存在することはほぼ確実である。

しさらにダストは吸収にも寄与するので、 $\text{H}_2\text{O}$  などの分子帯スペクトルは弱くなる。この観測的効果は晩期 M 型矮星で確かめられたが<sup>8)</sup>、このことを最も明確に示したのは褐色矮星候補 GD 165B という天体である<sup>9)</sup>。これは正真正銘の褐色矮星が発見される数年前に、白色矮星の付近を赤外線カメラで系統的に捜して発見された天体である<sup>10)</sup>。図3に示すように、この天体の測光的較正のされたスペクトル<sup>11)</sup>(黒丸)を、有効温度 1,800K のモデルから予測される輻射エネルギー分布 (SED) の予測値との比較してみると、黒線で示したダストありのモデルの予測と観測は非常によく一致するが、青線で示したダストなしのモデルでは全く観測と合わない。このことから、褐色矮星候補 GD 165B にはダストが存在することはほぼ確実であろう。

我々のモデルは、主系列最下端の星の大気にダストが存在することを初めて明確に示したが、更に、これらの星の有効温度 (または半径)、表面重力加速度 (または質量)、化学組成など個々の天体の基本特性を決定することに役立つであろうか? 例えば、これらの星の有効温度に関しては、幾つか

のモデル解析が行われているが、それらの結果にはなお 500 K もの不一致がある<sup>8)</sup>。このような解析では一般に観測される SED を説明できるようにモデルのパラメータとして含まれている有効温度を決めている。モデルのパラメータを調整することで観測を説明することは一般に可能ではあるが、そのように決めたパラメータが常に正しいとは限らないことは、天文学で広く用いられているモデル解析一般と同様である。赤色巨星などでは視直径の実測から経験的に有効温度が独立に決定できるので、このようなモデル解析から逆にモデルの妥当性を検証することができる。しかし、現在の観測技術をもってしても M 型矮星の視直径の測定は困難であり、他の多くの観測データを用いてモデルの妥当性の検証を多角的に行う必要がある。

現在問題となっている宇宙の暗黒物質の問題を解決するにも、例えば、褐色矮星候補 GD 165B のような天体の基本特性を正しく決定し、この天体が褐色矮星なのか、又は星なのかを決定することが重要である。何故ならば、この違いによって GD 165B の寿命が大幅に異なることになり、小質量星

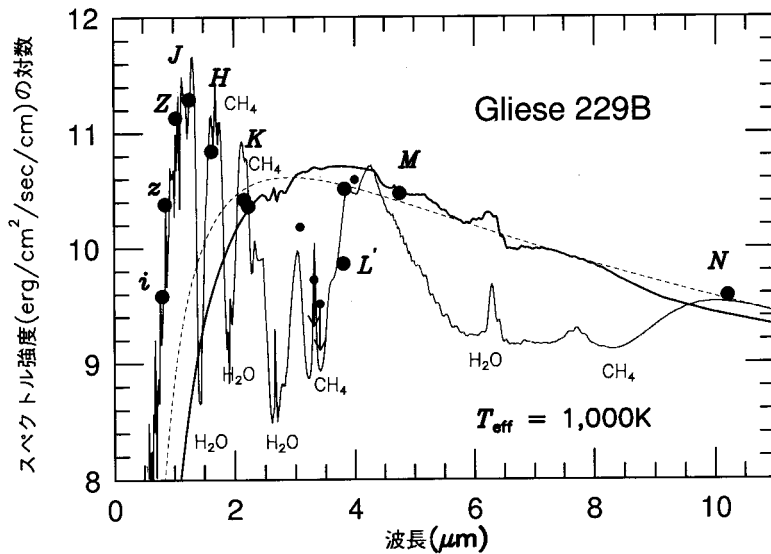


図4 褐色矮星 Gl 229B の観測データ (黒丸) と  $T_{\text{eff}} = 1,000 \text{ K}$  のモデルのダストありモデル (黒線) 及びダストなしモデル (青線) による放射エネルギー分布予測値の比較. 図3に示した GD 165B とは逆に, ダストなしのモデル (青線) は観測をよく説明するが, ダストありのモデル (黒線) は観測と全く合わない. 斜線は  $1,000 \text{ km}$  黒体放射を示す.

の初期質量関数に大きく影響するからである. 褐色矮星が暗黒物質にどれだけの寄与をするかについても, 問題は基本的には全く同じであり, 観測からこれら天体の基本特性, 特に年齢, 質量などが正しく決定されない限り, 暗黒物質の問題は解決しない.

#### 4. 褐色矮星の大気

さて, ようやく我々がダストを取り込んだモデル大気の計算を完成した頃, 中島氏らが遂に正真正銘の褐色矮星を発見された<sup>11)</sup>. この星は距離の分かった M 型矮星 Gl 229 の伴星なので, 光度は  $6 \times 10^{-6} L_{\odot}$  であることが分かるが, これは確実に主系列星の限界光度よりも暗い. さらに, この天体のスペクトルにはメタン ( $\text{CH}_4$ ) のバンドがはっきりと確認された<sup>12)</sup>. メタンは温度が  $1,000 \text{ K}$  以下の高密度でのみ存在できる (図1参照) ので, この天体の有効温度は  $1,000 \text{ K}$  前後と推定された. これらのことから, この天体が正真正銘の褐色矮星であることはほぼ確実である.

しかし, 皮肉なことにこの Gl 229B のスペクトル

はようやく我々が完成したダストを考慮したモデルとは全く合わず, むしろ我々が以前に計算したダストを無視したモデルとよく合うことが明らかとなった. 図4に褐色矮星 Gl 229B の観測データ (黒丸) と有効温度  $1,000 \text{ K}$  のモデルによる SED の予測値との比較を示す<sup>9)</sup>. 明らかに黒線で示したダストありのモデルの予測と観測は全く一致せず, 青線で示したダストなしのモデルの予測と観測は非常に良く合っている. ここでダストなしのモデルでは, メタン, 水蒸気のみならず,  $\text{H}_2$  の衝突誘導遷移により, 赤外領域は極めて不透明となっている. そのため赤外放射は相対的に弱く, 有効温度が  $1,000 \text{ K}$  のモデルでも大部分の放射は  $1 \text{ ミクロン}$  領域に集中している.  $1,000 \text{ K}$  の黒体放射 (斜線) は本来ほぼ  $3 \text{ ミクロン}$  にピークを持つので, これは著しく異常な放射エネルギー分布であることが分る. 我々はダストを無視したこのモデルに十分な確信があったわけではなかったが, もっと低温の木星なども決して氷 (即ちダスト) で雪ダルマのようになっているわけではなく, メタンやアンモニアのガスが支配的であることから, このようなモデルの可能



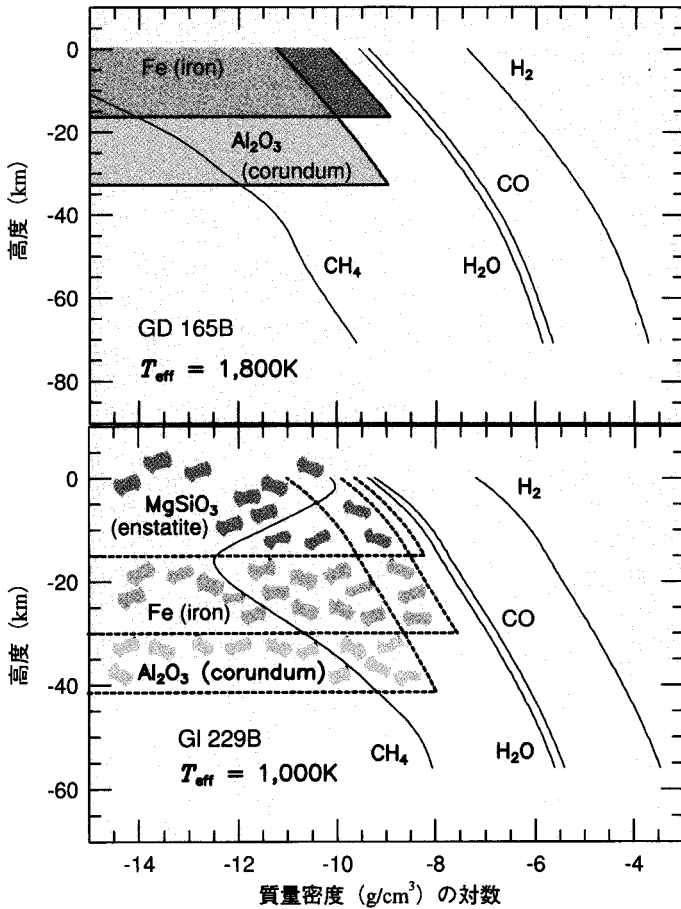


図5 モデル大気におけるダスト及び分子の高度分布. 褐色矮星候補 GD 165B に対応する  $T_{\text{eff}}=1,800\text{K}$  のモデルでは、ダストは分子ガスと熱平衡にあり、ガスと共に均質一様に分布する (上図). そのため、大気上層全体がダストに覆われ、ダストの吸収・散乱がスペクトルに大きく影響する (図3). 褐色矮星 Gl 229B に対応する  $T_{\text{eff}}=1,000\text{K}$  のモデルでは、ダストは雲となってガスから分離する (下図). そのため分子ガスはダスト雲の間隙から大気上層に浸透することができるため、分子ガスの吸収がスペクトルで支配的となる (図4).

非経験的モデル大気の手法が重要な役割を果たすだろう. これらの巨大惑星は褐色矮星と共通点も多く、褐色矮星とともにこれら太陽系外の惑星の大気構造を明らかにすることは、惑星系の形成や宇宙における生命誕生の一般的条件を明らかにするなどの極めて興味ある問題に繋がっている.

## 5. おわりに

現在の恒星大気構造論は、すでに1世紀近い歴史を持っているが、基本的にはガス相における輻射輸達を扱うだけでよいと云う点では比較的簡単であるとも言える. そのため、HR 図上に広く分布する多種多様な恒星の大気構造を統一的に扱う方法も一応確立されている. これは、相転移とそれに伴う気象学的現象までが関与する惑星大気の複雑さとは対照的である. 恒星大気でもダストが形成される可能性は考えられてはいたが、具体的にダストがどのように形成されるかは明らかではなく、そのため恒星大気構造にダストの形成を考慮する試みは今まであまり行われていない. しかし、最近、晩期 M 型矮星や特に2つの微光天体 Gl 229B と GD 165B で、天体大気でダストが如何にして形成されるかについて初めて明確な観測の手掛かり

が得られた. これらを基礎として気相・液相・固相間の相転移と輻射との相互作用をとり入れた大気構造論を確立する道も開けるであろう. 褐色矮星のモデル大気の試みはようやく始まったばかりであるが、ひとたび、このようなダストの形成を取り入れたモデル大気の方法が確立され

れば、恒星、褐色矮星、そして惑星の大気までをある程度統一的に扱うことも夢ではない. 最近、恒星大気についての非経験的モデルの計算は盛んに行われ、古典的なモデル大気のを越えたより高次のモデル化の研究も進みつつある. しかし、すでに見たように、現在の恒星モデル大気にはダストの問題以外にも未解決の問題は多く、



また、高精度の観測が可能な太陽で明らかなようにこれら恒星大気も予想外に複雑であることが明らかにされつつある。古くから研究されてきた恒星大気と言えどもこれを究め尽くすことは容易ではなく、ある程度観測結果を積極的に取り込んだ半経験的モデルが当面有用であることも考えられる。今後、これらの天体に対する高精度の観測の要求は益々高くなるが、現在、我が国で建設及び計画中の新鋭観測装置により、地上、スペースを含めてこれらの天体に関する観測は質・量ともに飛躍的に増大することが期待される。これらの新しい観測と大気構造の研究の有機的連携により、我々の宇宙を構成する基本的な天体である恒星、褐色矮星、惑星などの研究が大きく進展し、現代宇宙論の根本問題の一つ — 我々の宇宙のバリオン密度はいくらで、その担い手は何か? — についても明確な答えが得られる日の近いことを期待したい。

ここで述べた結果は東京大学大学院の大仲圭一、青木和光両君、及びカルフォルニア工科大学の中島紀氏との共同研究によるところが大きく、又、浜辺勝、田辺俊彦両氏には計算を進めるうえでソフト・ハード両面に関し多くのご教示を頂いた。イギリス・リバプール大学より来日・滞在中のHugh Jones氏には図3に用いたスペクトルをデジタルデータの形で提供して頂いた。この機会にこれらの方々に深く感謝の意を表したいと思います。

### 参考文献

- 1) Nakajima T., et al., 1995 Nature, 378, 463
- 2) 中島紀, 1995, 天文月報, 88, 349
- 3) Kurucz R. L., 1993-1995, KURUCZ CD-ROM (Cambridge, Smithsonian Astroph. Obs.), Vols. 1-23,
- 4) Gustafsson B., Bell R. A., Erikson, K., Nordlund Å., 1975, A & A 42, 407

- 5) Kurucz R. L. 1995, ApJ 452, 102
- 6) Biémont E., et al., 1991, A & A 249, 539
- 7) Tsuji T., 1994, in Molecules in Stellar Environment, ed. U. G. Jørgensen (Berlin, Springer), p.79
- 8) Tsuji, T., Ohnaka K., Aoki W., 1996, A & A Lett., 305, L1
- 9) Tsuji T., Ohnaka K., Aoki W., Nakajima T., 1996, A & A Lett., 308, L29
- 10) Becklin E. E., Zuckerman B., 1988, Nature 336, 656
- 11) Jones H. R. A., Longmore A. J., Jameson R. F., Mountain C. M., 1994, MNRAS 267, 413
- 12) Oppenheimer B. R., Kulkarni S.R., Matthews K., Nakajima T., 1995, Science 270, 1478
- 13) Tsuji T., Ohnaka K., 1995, in Elementary Processes in Dense Plasmas, ed. S. Ichimaru and S. Ogata (Reading, Addison-Wesley), p.193  
Tsuji T., Ohnaka K., Aoki W., 1995, in The bottom of the Main Sequence And Beyond, ed. C. G. Tinney (Berlin, Springer), p.45
- 14) Marcy G. W., Butler R. P., 1996, ApJ Lett., 464, L147, Butler R. P., Marcy G. W., 1996 ApJ Lett., 464, L153

### Atmospheric Structure - from star to brown dwarf

Takashi Tsuji

*Institute of Astronomy, The University of Tokyo, Mitaka, Tokyo, 181 Japan*

Abstract:

A new object - brown dwarf - that fills in the gap between stars and planets is finally discovered. Now, the basic constituents of the Universe - stars, brown dwarfs, and planets - can all be studied on observational basis, and we may answer the questions if the baryon density of the Universe can be accounted for by these objects or what the the constraint imposed by the primordial nucleosynthesis means. For this purpose, however, proper interpretation of observations is indispensable and this requires through understanding of the atmospheric structure of brown dwarfs as well as of stars. After a brief review on the case of stars, we discuss an extension of modeling the atmosphere to brown dwarfs with dust formation included.