

赤色巨星の掃天観測

浜 島 清 利*

1. はじめに

銀河系の構造を調べようとする時、光学望遠鏡にとつての悩みは何と言っても銀河面に横たわる多量の星間塵である。このため大局的な構造を探る研究は電波天文学の独壇場の観さえあった。しかし、電波で見えるのは星間物質である。星の分布を知るために依然として光学観測が重要であることに変わりはない。厚い星間吸収の壁を少しでも貫こうとすれば、明るい天体を用いることになる。OB型星を用いて銀河面上での渦状腕の形状が論じられてきたのはその一例である。これら極端な種族Iの星に対して、種族IIでは球状星団の分布がよく調べられている。これからお話しする赤色巨星の掃天は、この二つの種族の間に位置する星の分布を探ろうとするものである。最近では、星間吸収の影響が少ない近赤外領域での観測も進んでいる（月報 1977年4月号、松本敏雄氏の稿参照）。そこで見ている星もかなりの部分が赤色巨星なのである。

銀河系構造の研究にはシュミット望遠鏡が大きな役割をはたして来ている。それは撮影写野の広さに加えて、対物プリズムという武器があったからであろう。望遠鏡先端に取り付けられたプリズムは写野すべての星をスペクトル分解し、星の分別を可能にしてくれるのである。遠方の情報を得るために用いられる星の種類にはいくつかの条件が課せられる。まず、星本体が明ることであり、次に銀河系構造に関われる程数が多いことがあげられる。観測上からは検出しやすくなればいい。赤色巨星はこうした条件を満たす星である。

ここでは、この分野の現状を簡単に解説し、木曾観測所 105 cm 口径シュミットによる銀河面掃天観測の意義について考えてみたい。赤色巨星と言ってもここで取扱うのは、ハーバード分類で……Kiss Me Right Now Sweetheart (あるいは Smack とも) の M型以下の星々である。R型とN型はまとめて C型(炭素星)ともよばれる。

2. 赤色巨星

主系列星は中心部の水素を燃やし切ると表面温度は低く半径は急激に増大していく赤色巨星段階に入る。やがて内部で発生するエネルギーが増加すると、その明るさ

は、もし星間吸収がなければ、銀河中心を越えて向う側にあるものさえ検出できる程となる。この様な赤色巨星は銀河面上数 10 pc の間隔を置いて分布している。表面温度は $3000^{\circ}\sim 4000^{\circ}\text{K}$ と低く、星の大気中では分子が形成されている。分子と言っても H_2 など主に二原子のもので、これらが波長 $1\mu\text{m}$ あたりにピークをもつエネルギースペクトルに種々の吸収バンドを与える。これに応じて写真乾板としては写真赤外に感度をもつ I-N 乳剤が使われ、波長 6800\AA から 8800\AA でのスペクトルが撮られる。検出される赤色巨星は M型、C型それに S型である。普通の星がのっぴらぼうな様相であるのに對し、これらは図1に示す様にかなり特徴的なスペクトルを示す。分子として多い H_2 や CO はそれぞれ紫外域や赤外域で顔を出すので、図1に見られるのは酸化金属やシアン CN などである。

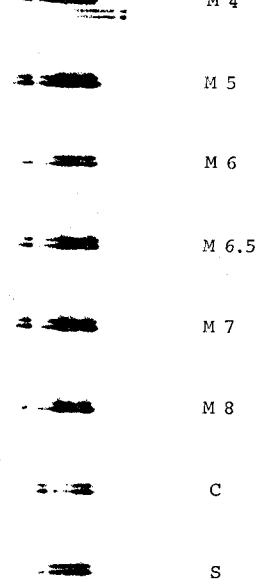


図1 対物プリズムによる波長 $6800\text{\AA}\sim 8800\text{\AA}$ での赤色巨星のスペクトル。右端が長波長側。M型星は TiO と VO 、C型星は CN 、S型星は LaO の吸収バンドを呈する。一番上の星は比較のためのもので赤色巨星でない星。波長 7600\AA での吸収は地球大気の O_2 分子による。スペクトルが二本になっているのは対物プリズムのゆがみによる。

* 東京天文台 Kiyotoshi Hamajima: Survey of Red Giant Stars

M 型星は温度の高い星から低い星に向かって、M 0 から M 10 まで、酸化チタン TiO や酸化バナジウム VO の吸収バンドを利用して細分類される。超巨星・巨星・矮星の区別はできないが、空間密度と明るさから推して銀河面上で観測されるのは殆ど巨星と思ってよい。C, S 型の細分類は難しい。C 型のうちでは温度の低い N 型が主に見つかる。S 型はこの波長域では一部のものしか検出できないので波長 6000 Å あたりの赤色域で掃天が行われている。

写真赤外域で検出できることはもう一つの利点をもっている。それは星間吸収量が可視域の半分で済み、掃天の空間的奥行きを拡げてくれることである。さて、ある種類の星の分布を調べることは、銀河系構造の研究であると同時にその種族——質量、年令、進化の段階について明らかにするという一面も兼ねていることに注意したい。たとえば、銀河面内の渦状腕との関係や銀河面に垂直な方向での分布の厚みなどは種族に関しての重要な判定要素となる。次に今までの掃天観測による結果を概観してみよう。

3. 赤色巨星の分布

銀河面での赤色巨星の掃天を精力的に行なったのはアメリカのウォーナー・スエージー天文台であった。今から 30 年も前のことである。60 cm 口径シュミットを用いて、限界等級 10 等 (写真赤外) で見かけの分布が調べられ、他の天体、特に渦状腕に属する天体の分布との比較が行われた。いくつかの領域では精密な観測が、同天文台その他で行なわれて来ている。この場合、限界等級は 12~13 等になり、直接写真を同時に撮って等級を測り、スペクトル型と組み合せて星の距離についての情報が加わっている点でデータとして質が高い。こうして得られた結果を簡単にまとめると、① 早期 M 型である M 2, M 3, M 4 の分布は渦状腕との相関が見られる、② 晩期 M 型 (M 5 から M 10) は銀河円盤一般に分布する、③ C, S 型は渦状腕に多い、④ M 型は銀河中心方向に

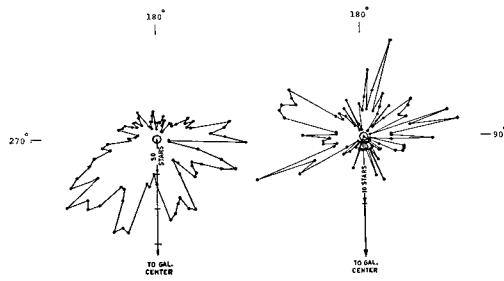


図 2 M 型星、C 型星の銀経分布。左は晩期 M 型星 (M 5~M 10)。右は C 型星。数の細かい変化は主に星間吸収による。Blanco (1965)

多いが、C 型はその反対方向に多く分布する (図 2)，などである。空間密度は 100 pc 立方当たり早期 M 型で数個、晩期 M 型はその 5 分の 1 位、C 型では更に少なくて 100 分の 1 になる。S 型は最も少ない。銀河面に垂直な方向での分布の厚みについてはデータが不充分であるが 600~1300 pc と言われている。

105 cm シュミットによる掃天は、精密観測を遍く銀河面にゆきわたせようというものである。ウォーナー・スエージーの限界等級を約 3 等上まわり、したがって距離的には、星間吸収の少ない方向なら 4 倍の範囲を覆えることになる。平均的には 5 kpc、吸収の少ない方向では 10 kpc に達しよう。加えて、データの高精度化がある。これまで分類は肉眼でなされ、観測者の習熟度に負う所が大きかった。そこで、スペクトルは測定機で測って相対強度スケールとしてから標準と比較して分類している。こうして星の等級による系統誤差をなくし、また、測定者間の個人差をなくす様にしている。直接写真上での等級測定についても V と I バンド、二色で測光するから、スペクトル型と合わせての距離決定の際に星間吸収の補正も可能となっている。

4. M, C, S 型の差異

スペクトルの見かけ上では大いに異なる M, C, S 型であるが、差異は星の大気内に含まれる炭素と酸素の原子数比によることが分かっている。まず、炭素は酸素と結びついて CO 分子をつくる。炭素が少なければ、残った酸素は金属元素と結びついて TiO など M 型に特有な分子ができ、一方、炭素の方が多いければ CN, C₂ など C 型を特徴づける分子が作られていく。図 3 は炭素 C 対酸素 O の比によってどんな分子スペクトルが観測されるかを示す。炭素と酸素が同程度の時、S 型が現れる。星の空間密度は M 型が最も多く、S 型が少ない。これは図 3 の C/O の範囲と合っている。炭素は星内部でヘリウムが燃えて合成され、対流によって表面に汲み

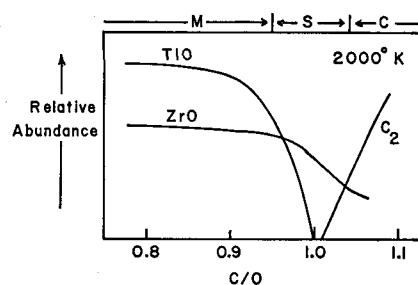


図 3 炭素・酸素比 C/O によるスペクトルの見え方の違い。C₂, ZrO はそれぞれ C 型星、S 型星を可視域で特徴づける分子。ちなみに太陽は C/O=0.6. Wyckoff (1979)

出されて、酸素に対する比が変わっていくと考えるのが有力な説である。あるいは、表面からの質量放出も C/O 变化に一役買っているのかもしれない。

HR 図上でみると、C 型は M 型より低温で、明るい側にある。即ち、進化的にはより後の段階に対応しているように見える。また、M と S, S と C 型の間には中間的タイプの星が存在することも含めて図 3 を見直すと、 $M \rightarrow S \rightarrow C$ といった進化経路が頭に浮かぶが、実際には、質量により進化はかなり異なったふるまいをする。たとえば、M, C, S それぞれにミラ型と呼ばれる、多分、質量は小さな星があって、これは次に惑星状星雲を星の周りに作って自身は白色矮星になっていくと考えられている。ともあれ、現状では M, C, S 型の進化論的位置づけは分っていないと言ふべきで、掃天観測の目的の一つもここにある。前項の ④ でとりあげた M 型、C 型の分布の違いは手掛かりの一つで、データの定量化が望まれている。

5. 質量はどれくらいか

赤色巨星の質量はどの程度のものであろうか、これは星の年令に対する問いかけでもある。星の質量を決める最善の方法は、連星系を調べることである。しかし、空間的にはまばらな赤色巨星では、我々の近くにあって充

分な精度で観測できるものはあまりない。ミラ型星の名の元になった M 型巨星、くじら座のミラは白色矮星との連星系で、質量は約 $1 M_{\odot}$ と求められているが、こうした数少ない例で一般的の赤色巨星の質量を推測するのは危険である。赤色巨星段階にはいろいろな質量の星が進化してくるからである。そこで、(a) HR 図上で散開星団の巨星分枝と比べる、(b) 銀河面に垂直な方向での分布の厚み $\langle z \rangle$ 、及び空間運動の大きさ σ_r から推定するといった統計的手法が用いられる。(a) については図 4 に示した。G, K 型巨星が多いが $B-V \geq 1.5$ の領域が M 型である。古い星団 M 67 などの巨星分枝と合っている。主系列上の数字は質量を示す。これから M 型は $1 M_{\odot}$ を少し越える程度と判断される。寿命から言っても、銀河系の初期に主系列星としておそらく数多くできたであろうこの位の質量の星は、今巨星となっていておかしくない。赤色巨星になってからの進化は早いから $\langle z \rangle$ や σ_r は主系列の時と変わらない。そこでこれらの値を主系列星のものと比較すれば質量の推察ができる。M, C, S 型とも $1 \sim 1.5 M_{\odot}$ の範囲には入ると言える。

しかし、以上は平均的な話であって、赤色巨星のなかには重い星も混ざっていることは確かである。視線速度から連星系と思われる星で、早期型主系列星と対をなすものがいくつかある。巨星は相手の主系列星より早く進化

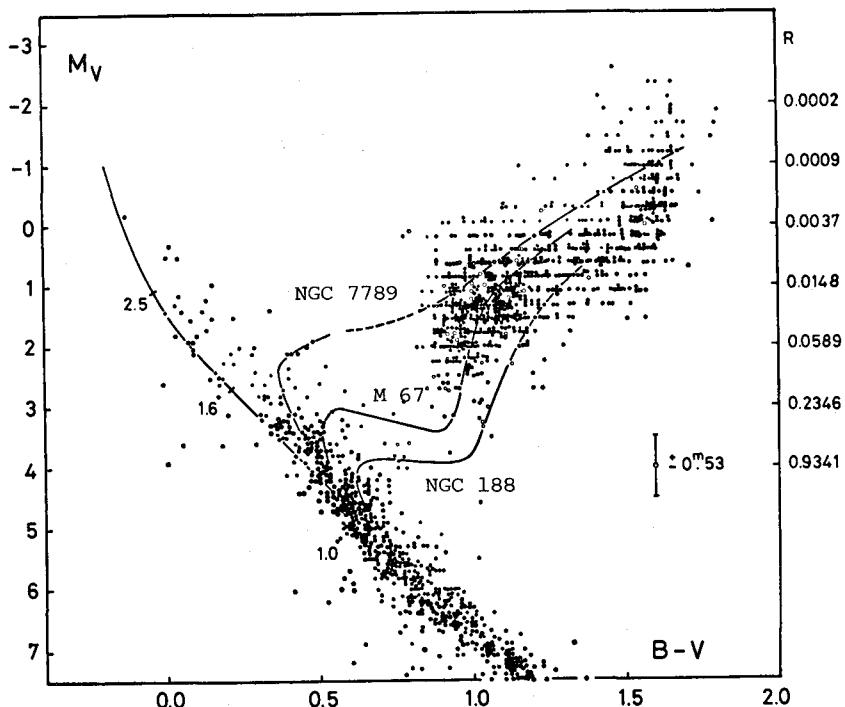


図 4 HR 図（色・等級図）上での赤色巨星と散開星団の巨星分枝（実線）。星団の年令は NGC 7789: 2.9×10^9 年、M 67: 6.0×10^9 年、NGC 188: 10.0×10^9 年。主系列上の数値は質量 (M_{\odot}) を示す。Neckel (1975)

している、つまり重いので、スペクトルから決められた主系列星の質量は巨星質量の下限でもある。C 型の場合、 $2\sim4 M_{\odot}$ の主系列星が相棒として観測されている。

ここで、3 項でまとめたウォーナー・スエージーその他の結果を見直してみるといくつか理解しがたい所がある。まず、M 型は $1 M_{\odot}$ に近く、したがって比較的古い星 ($1 M_{\odot}$ なら主系列上の寿命は 10^{10} 年, $1.5 M_{\odot}$ で 2×10^9 年) であるのに何故早期 M 型は渦状腕との相関を示すのか、銀河面を上から見た時、渦状腕構造を示すのは B3 型より早期の星と言われる。B3 型は実に $10 M_{\odot}$ の質量で、寿命はわずか 2×10^7 年である。同様の疑問は C, S 型についても起こる。S 型の方は最近観測が進み、統計精度が上がって渦状腕との相関は否定され、銀河円盤一般に分布しているということでおさまった。我々の掃天の課題の一つは早期 M 型と C 型の位置づけにあろう。S 型の場合と同じく、より精度の高い統計は以前の結果を書き換えるかもしれない。京都大学の市川隆氏はペルセウス腕を見る銀径 120° 方向を大宇宙観測所 40 cm 口径シュミットを用いて M 型の観測を行なっている。その結果、この渦状腕上で M 型の空間密度が早期型、晚期型とも増しているだけでなく、厚み $\langle z \rangle$ は 400 pc よりかなり小さいと見積られた。腕の中では円盤種族に属するものと数的に同程度の、若い重い ($\sim 7 M_{\odot}$) 星が存在しているという結論である。この $\langle z \rangle$ が 3 項でみた値と大きく異なることから、これがペルセウス腕一般で見られる現象なのか、それとも局所的なものかが興味ある所である。

HR 図の縦軸を光度に、横軸を有効温度にとると（いずれも対数スケール）、進化の理論計算と直接比較できる。M 型の観測値は赤外観測が進んでかなりよく決まって来ている。この図の上で、計算された赤色巨星の進化経路は直線的で、質量の違いによって平行にずれる。観測値も M 型の早期から晚期にかけてこの進化の流れに沿って分布している。ところが観測値に合う質量を求めてみると、どの人の計算結果を用いるかで異なるが、 $2\sim3 M_{\odot}$ あたりになる。重い星を計算している人の結果をみると $7 M_{\odot}$ でも観測値が説明できる。こうした値そのものに重きを置くことはまだできないだろう。星の大気中の金属量によって大きく結果が変わることに加えて、表面対流層の取扱い、質量放出などやっかいな問題が解決されていないからである。進化の計算が進んでくれば、観測との比較には、HR 図上の位置だけでなく、各段階での寿命と空間密度が合うかどうかが重要である。赤色巨星領域には広い範囲の質量の星が集積していくので、これは星の生まれる時の質量分布や、銀河年令にわたる生成率の変化が複合してくる問題である。渦状腕内外における M 型の各細分類毎での空間密度のデータを改善していく必要がある。

6. マゼラン雲からの情報

ある種の星と渦状腕との関連があるかどうかという問題は、銀河を外から眺めれば一挙に解決することであるが、残念ながら渦状星雲での M, C 型の観測はまだできていない。一方、不規則星雲ではあるが、我々に最も近いマゼラン雲では観測は着々と進行しているという印象を受ける。ウォーナー・スエージーで活躍したプランコは、今度はセロ・トロロ 4 m 口径反射望遠鏡の主焦点近くに、回折格子とプリズムを組み合わせた分光器を置き限界等級を 18.5 等に上げて大・小のマゼラン雲に挑んだ。C 型の、晚期 M 型に対する数の比を各銀河の中心部でみると、銀河系では 0.003 に過ぎないのに対し、大マゼラン雲では C 型の方が上回って値は 2.1 となり、小マゼラン雲に至っては 26.7 と見えている殆んどが C 型になっている。M, C 型の進化論的位置づけに関する我々を悩ませる結果である。

系外星雲に属する星は、我々からの距離が皆等しいと見なせるので見かけの明るさからすぐ HR 図が作れる点でも便利である。マゼラン雲では明るい C 型について観測がなされ、最も温度が低く、光度が高い領域にミラ型がくること、つまりこれが C 型としての最後の状態であるといったデータも出始めている。

7. 再び我々の掃天に戻って

赤色巨星の分布は銀河系の星成分の構造について我々の知識を広げてくれると同時に、各種の分類、とくに M, C 型星の進化論的位置づけという目的をもっていたわけであるが、この他にもいくつかの成果が期待される。近赤外観測（主に波長 $2 \mu\text{m}$ ）との関係では、点源の同定に加えて、銀河面の輝度分布観測で見出されたいつかの特徴的な構造に距離尺度を与えることがある。近赤外輝度に赤色巨星がどれだけ寄与しているかも重要な問題である。ただ、我々の掃天の限界距離は星間吸収の強い方向では近赤外観測に及ばないのがつらいところではある。この様に我々の目を覆い隠すやっかいな吸収物質も、星間空間では星の誕生とも結びついて重要な役をなっている。赤色巨星の色超過からはこの吸収物質の分布が求まる。これは今まで主に OB 型星など早期型星から求められていたものであるが、赤色巨星を用いればより遠くまで、更にはより細かい分解能で調べができる。空の単位面積当たりの数が多いからである。木曾の乾板の一例を図 5 (表紙) に示そう。図の丸印は $6^\circ \times 6^\circ$ 写野の一枚の乾板上に写っている赤色巨星を示す。銀河中心方向に近づくと星の数はこの 10 倍以上にも増えていく。

木曾での掃天の範囲は、銀経については 30° 間隔で銀緯 $\pm 10^{\circ}$ を覆うのを第一段階とし、次に銀緯は $\pm 2^{\circ}$ に絞って銀河面を埋めていくことにした。それぞれ約60の撮影天域となる。現在は第一段階をほぼ終えた所である。観測上の問題点は、赤色巨星には変光星が多いのでスペクトル写真とV, I二色での直接写真を短期日のうちに撮る必要があることである。対物プリズムの付けはずしはそれほど頻繁に行うわけではないので、天候に恵まれず一部の写真しか得られないこともよくある。この様なロスを除けば一天域あたりの撮影時間の合計は4時間程度である。これに比して、はるかに大変なのは整約であって、図5(表紙)の様な星の数の多さは研究上の利点であっても整約上では負担以外の何物でもない。通常の整約——検出・分類・位置測定・等級測定をそれぞれ専用の測定機で行っていると観測時間の数百倍の時間を要してしまう。そこで測定の自動化がどうしても望まれる。木曾観測所のアイソホトメーターは汎用の高速測定機としてこの要望に答え得るものであり、ソフト面での開発を手のつけやすい部分から始めようとしている段階である。

お知らせ

“太陽系内の小天体”研究集会

日 時： 1980年11月5～7日

場 所： 埼玉県越生町大字古池

埼玉厚生年金休暇センター

(Tel. 049292-6111)

内容： 小惑星・彗星・衛星、流星など太陽系内の微小天体の観測・実験の面からの研究の現状、将来の見通し等の情報交換、討論を行ない、これらの諸天体の相互関係を明らかにする一助としたいと思います。

(古在由秀)

研究発表、参加御希望の方は下名宛御連絡下さい。

〒181 東京都三鷹市大沢東京天文台

斎藤馨児

畠田弘一郎

わが国唯一の天体観測雑誌 天文ガイド

定価350円(税込49円) 80-11月号・10月5日発売!

●11月号のおもな内容

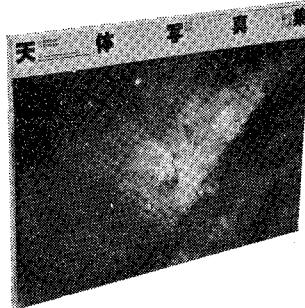
- ★初冬の星空の紹介を秋田勲さんにしていただきます。
にぎやかな冬の空がいよいよ始まります。
- ★この夏各地で開かれた星を見る会を記事ページで紹介。
『星空への招待』はグラビアで案内。
- ★ニューデリー郊外のインド古代天文台にある見なれない機器などを豊富な写真で解説。
- ★京都大学上松観測所の赤外線望遠鏡が大改修され、鏡面も作りかえられました……。
- ★ほかに、エンケ彗星とおうし座流星群の観測、ボタ赤の作り方、H II領域めぐり、私の愛機、同好会だより、11月の星空など。

月刊 天文ガイド 別冊 スペシャル 天体写真集

*Kitt Peak National Observatory
Cerro Tololo Inter-American
Observatory*

これだけまとめて紹介した写真集は

日本ではじめて。ファン待望の書!



A4変型判・84ページ・定価1700円・好評発売中

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5
振替東京7-6294 電話03(292)1211