

赤外線観測と星周塵輻射

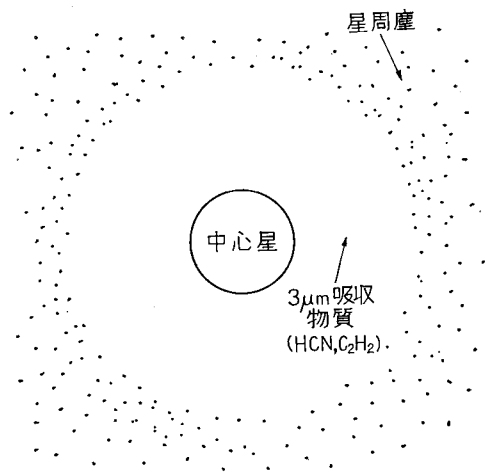
野 口 邦 男*

1. はじめに

現在に至るまでに数多くの仕事が赤外線天文学の発展に貢献してきている。ノイゲバウアーとレイトンは、 $2.2\ \mu\text{m}$ の近赤外の波長で北天の掃天観測を行ない、1969年には5000個以上の赤外線天体のカタログを発表したが、これも重要な貢献をした仕事のひとつといえるだろう。これまでにこのカタログの中の天体の90%以上が既知の星に同定されているが、カタログの中には可視域の観測からは予想できなかった程の強い赤外線輻射を出している特異な天体も発見され、赤外線星として赤外線天文学の興味ある観測対象のひとつとなってきた。これらの天体の中でも、NML Cyg, IRC+10216等は赤外域での色温度が1000 K以下という、星としては極めて低い温度に対応するエネルギースペクトルを示している。みかけの温度がこのように低い星のエネルギースペクトルは中心星をとり囲んで分布する塵(星周塵とよぶことにしよう)が中心星の輻射で暖められて放出する熱輻射によって説明される事がわかってきた。その後中間赤外波長域での観測が進んだ結果、低温度M型星には波長 $10\ \mu\text{m}$ に星のまわりに存在するいわゆるシリケート微粒子(塵)による輻射として知られる輻射のピークがみられる事がわかってきた。一方M型星に比べて星の大気中の炭素量が多い炭素星のスペクトルの波長 $11\ \mu\text{m}$ にもSiCの塵に帰因するといわれる輻射のピークが観測され、塵からの熱輻射は必ずしも特異な赤外線星に限られたものではなく、量的な差こそあれ、低温度の星にはかなり一般的に存在している事がわかってきた。このような最近の観測結果をみると、低温度星を系統的に観測する事によって、星周塵輻射の寄与の少ない星から、赤外線星のように濃い塵に包まれた天体をむすぶ一連の星を橋わたし、星周塵の輻射の寄与を系統的に調べる事ができそうである。本稿では筆者達が京都大学の赤外線望遠鏡を用いて観測した低温度星のエネルギースペクトルによってわかってきた星周塵輻射のふるまいについて述べてみよう。

2. 星周塵からの輻射

中心星をとりまいて分布している星周塵は、中心星からの輻射に暖められて熱輻射する。そのエネルギースペ



クトルは塵の物性、形状、温度等に依存しているが、大まかにみると黒体輻射に近い連続輻射である。したがって、星周塵からの輻射を伴った星のエネルギースペクトルは、中心星のスペクトルと星周塵輻射スペクトルの重ねあわさった合成スペクトルとして観測されることになる。近赤外域から中間赤外域の輻射に寄与している星周塵の温度はおおよそ千数百度Kから数百度Kにあるものと推定される。この星周塵の温度は星の表面大気温度より低いので、星周塵の層が厚くなって中心星が隠されるほど、星周塵の輻射の寄与が大きくなって星全体からのエネルギースペクトルは長波長へずれる事になる。このように星をとりまく塵の量の増加と共に星全体からの輻射のピークは長波長にずれるが、星自身の表面温度の低下によっても類似のエネルギースペクトルの変化を生ずるので、観測されたエネルギースペクトルのみから星周塵輻射のふるまいを区別して議論するのはなかなか難しい事である。星の表面温度の変化によるエネルギースペクトルの変化と、星周塵輻射の増加によるエネルギースペクトルの変化とを何らかの方法で区別できるか否かが星周塵輻射のふるまいを知る上では重要なかぎとなってくる。

3. 炭素星に着目

星間塵の成分として星間空間に広く存在すると予想されていた H_2O の水の塵は波長 $3\ \mu\text{m}$ に特徴的な強い吸収特性を示している。近赤外波長域における低分散のスペクトル観測は、この星間塵中の H_2O の水の探索というテーマに触発されて推進された。このような観測の結

* 名大理 Kunio Noguchi: Infrared Observation and Circumstellar Emission

果, H_2O の水の吸収とよく似た $3\mu m$ 吸収帯がいくつかの星のスペクトル中に見つけられた。しかしこれらの星の中には、星間に存在する H_2O の氷による吸収とは考えにくい星が存在した。なぜなら、星間吸収をほとんどうけていないと思われる星にも $3\mu m$ 吸収のみられる星があったからである。そのような一連の星の中に炭素星が含まれていた。本来この波長 $3\mu m$ の領域は、地上から観測する場合に地表大気中の水蒸気による吸収の為に、得られたスペクトルに誤差を生じやすい波長域である。この為報告されたスペクトルの中には大気吸収補正の誤りによって、本来星には存在しないスペクトルの凹凸が報告された例もいくつかあり、この $3\mu m$ 吸収を同定するにあたっては事情をより一層複雑にしていた。我々はサーキュラー・パリアブル・フィルターと呼ばれる一種の干渉フィルターを用いた波長分解能が約 2% のスペクトル観測を低温度星に対して系統的に行なった。その結果、炭素星には H_2O の氷による吸収とは無関係の固有の $3\mu m$ 吸収のみられる事を見出した (図 1)。そしてこの吸収の成因となっている物質については、炭素星の大気中で特に豊富に存在し、 $3\mu m$ に強い吸収の性質を示す HCN , C_2H_2 , NH_3 等の多原子分子が候補としてあげられた。低温度星のモデル大気の理論計算によると、これらの分子は星の大気の温度が減少するに従って存在量が増加する事が期待される。すなわち $3\mu m$ 吸収がこれらの多原子分子によるのであれば、星の温度の低下と共に、吸収の強度が増加する事が期待されるわけである。

ここで IRC+10216 として知られる濃い星周塵におおわれた炭素星が再び登場する。中心星はかなり低温度の炭素星と考えられ強い $3\mu m$ 吸収を伴っている事が期待される。ところが観測された IRC+10216 のスペクトルは図 2 に示すように炭素星全体の中ではそれほど強い吸収を示しているとはいえない。むしろ弱い吸収帯といえる。これはどのように考えれば理解できるのであるか。もちろん IRC+10216 の中心星自身が $3\mu m$ 吸収が弱い可能性もある……。一つの考えとして次のような説明が考えられる。 $3\mu m$ 吸収を生ずる吸収物質は星周塵放射を放出している塵の層より内側の星に近い領域に存在していて、この為星周塵放射は $3\mu m$ 吸収をうけず、星自身の放射のみが $3\mu m$ の強い吸収をうけると考える。このように考えると、吸収を伴わない星周塵放射の寄与が大きい星ほど星全体の放射スペクトルにみられる $3\mu m$ 吸収はうすめられて弱くなっていく事が期待される。IRC+10216 のように星周塵放射の寄与の大きい星では、このような $3\mu m$ 吸収の希釈効果でみかけの吸収が弱められているのではないだろうか。星周塵による熱放射が $3\mu m$ 吸収を希釈しているとの考えを想起させる炭素星は

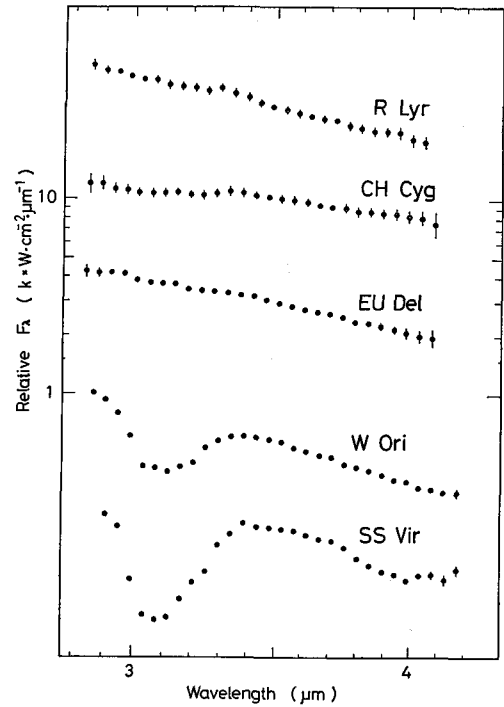


図 1 M 型星と炭素星の波長域 $3\sim 4\mu m$ のスペクトル。上の 3 つが M 型星、下の 2 つが炭素星で、炭素星には特徴的な強い $3\mu m$ 吸収がみられる。

IRC+10216 の他にもいくつかあった。これらの推論が正しければ炭素星の全体的なエネルギースペクトルと $3\mu m$ 吸収の強度とを同時に観測する事により、星周塵の寄与はエネルギースペクトルの赤化と $3\mu m$ 吸収強度の希釈として現われてくる事が期待される。我々にはできるだけ多くの炭素星に対して $3\mu m$ 吸収強度とエネルギースペクトルを得る為に測光観測を推進した。ちょうどこの頃、リッジウェイ達による高分散スペクトル観測によって炭素星の $3\mu m$ 吸収には、実際に HCN , C_2H_2 が吸収物質として主要な寄与をしている事が明らかにされたのであった (1978)。

4. 観測された $3\mu m$ 吸収の希釈効果

近赤外波長域で明るい炭素星の内の約 140 個の炭素星が I , J , H , K , L の各測光帯と $3\mu m$ 吸収を評価する為に用意された $3\mu m$ 帯の 6 つの測光帯で観測された。これらの内特に赤い星のスペクトルの例を図 3 に示す。 $3\mu m$ の測光データが吸収の為にへこみとなって現われているのがわかる。この $3\mu m$ 吸収の強度を $3\mu m$ インデックス (インデックスが大きい程吸収が強い) で評価する事により星のエネルギースペクトルと $3\mu m$ 吸収強度の相関を調べたのが図 4 である。星の全体的なエネルギー

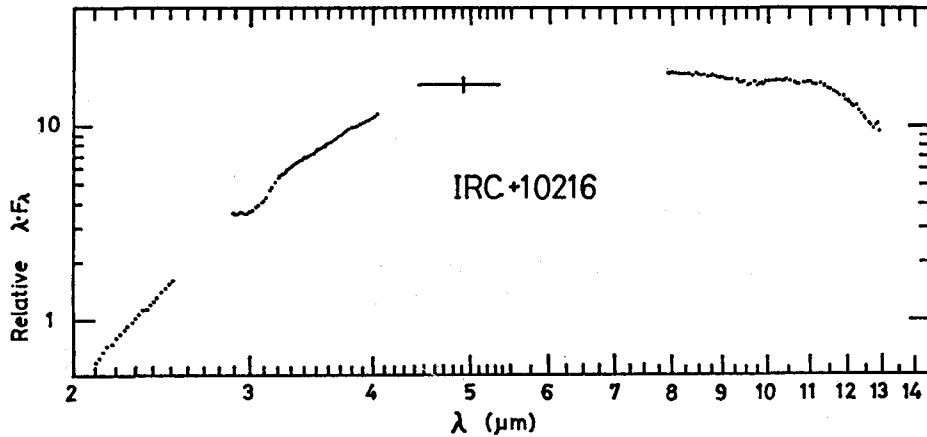


図2 濃い塵を伴った炭素星 IRC+10216 のスペクトル。メリルとスタイン (1976) の観測結果による。

ギースペクトルを代表するものとして横軸には $I-L$ を採用している。 $I-L \leq 3.5 \text{ mag}$ の領域では $I-L$ が増加する程 $3 \mu\text{m}$ 吸収が強くなっていくのがみられる。 $I-L \geq 3.5 \text{ mag}$ の領域では逆に $I-L$ が増加するにつれて $3 \mu\text{m}$ 吸収は減少する傾向がみられる。 $3 \mu\text{m}$ 吸収強度の $I-L \approx 3.5 \text{ mag}$ を境としたこのふるまいの差こそ $3 \mu\text{m}$ 吸収が低温の星になるほど強くなる事実 ($I-L \leq 3.5 \mu\text{m}$ の領域) と、 $I-L \geq 3.5 \text{ mag}$ の領域で星周塵放射の寄与による希釈効果が顕著になってくる事を示唆していると思われる。

5. 色 - 色図

測光の結果を用いて色 - 色図を描いたのが第 5, 6 図である。 図中には黒体放射スペクトルに対応する関係が実線で描かれている。 $I-L \leq 3.5 \text{ mag}$ では観測された星の色 - 色図上の位置は黒体放射に比較的近い領域に分布しているのに対し、 $I-L \geq 3.5 \text{ mag}$ では黒体からのずれが顕著になっている。 この結果と第 4 図における $3 \mu\text{m}$ 吸収のふるまいとを合わせて考えると $I-L \leq 3.5 \text{ mag}$ の星のエネルギースペクトルでは、星周塵からの熱放射の寄与が少ない為黒体放射に近い星自身のスペクトルが観測されるのに対して、 $I-L \geq 3.5 \text{ mag}$ の星では星周塵の放射の寄与が著しくなっている事を示していると考えられる。

6. 簡単なモデル

星周塵放射を伴った星全体の放射を次のように近似的に評価して観測と比較し、議論をさらに進めよう。 星周塵放射は、それぞれ光学的厚さが τ_i^0 で温度 T_i の放射を放出するいくつかの層から出ているものとし、その外側には低温で吸収にのみ寄与する光学的厚さ τ_i^0 の層が

とりまいているモデルを考える。 星全体からの放射スペクトルは次のように与えられるだろう。

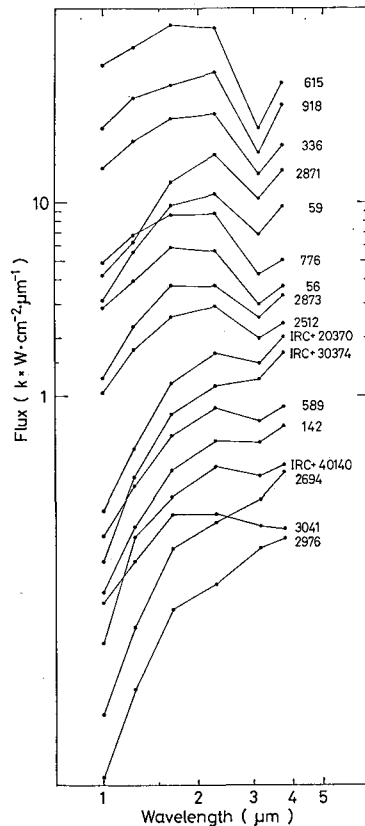


図3 特に赤い炭素星 ($I-L < 4.5 \text{ mag}$) のスペクトル。 上から下へ $3 \mu\text{m}$ 吸収の強い星から弱い星へと並べられている。 $3 \mu\text{m}$ 吸収の弱い星ほど長波長側で強い放射を出している。 星周塵放射による $3 \mu\text{m}$ 吸収の希釈を想起させる。

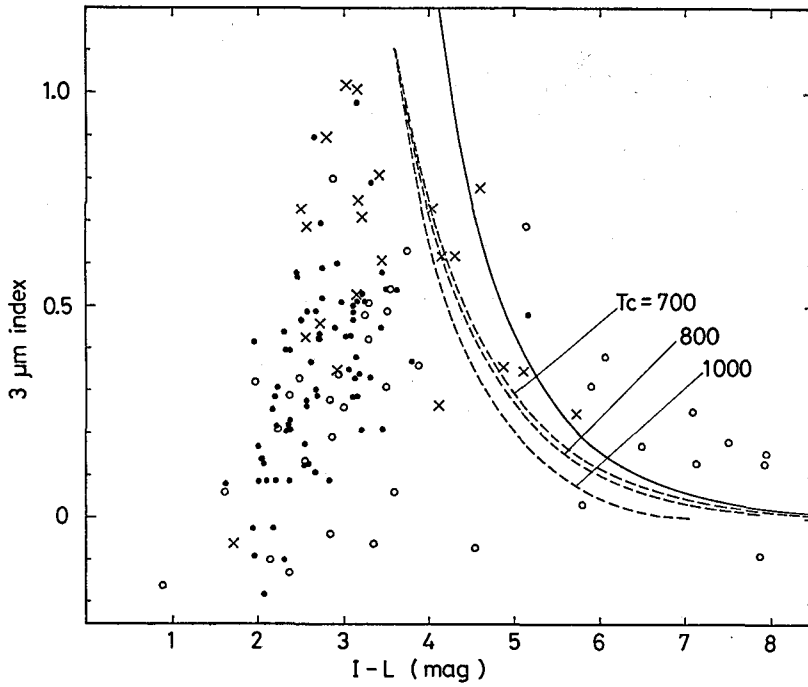


図4 星の色 ($I-L$) と $3\mu\text{m}$ 吸収強度の関係. 3本の鎖線は本文中のモデルに従って $3\mu\text{m}$ 吸収の希釈効果を計算したものである. $T_s=2000\text{K}$ の星に対して $3\mu\text{m}$ インデックス=1.1と仮定している. 実線は $3\mu\text{m}$ インデックス=10と仮定した場合.

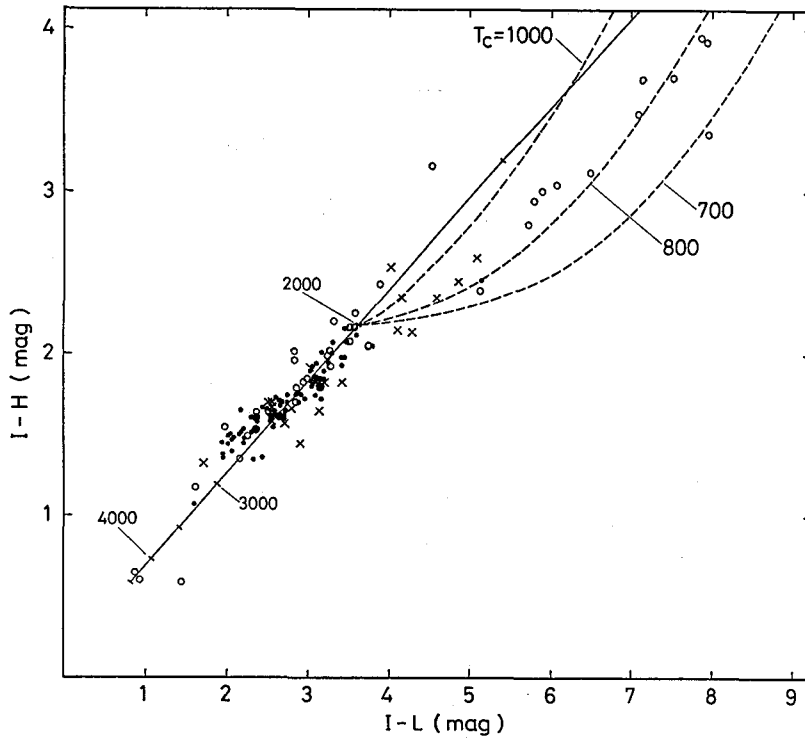


図5 $I-L$ と $I-H$ の関係. 実線は黒体放射スペクトルに対応している. 1000 K 毎に黒体の温度が記されている. 鎖線は本文中のモデルにより計算された星周塵放射を考慮した場合のスペクトルに対する関係を示す.

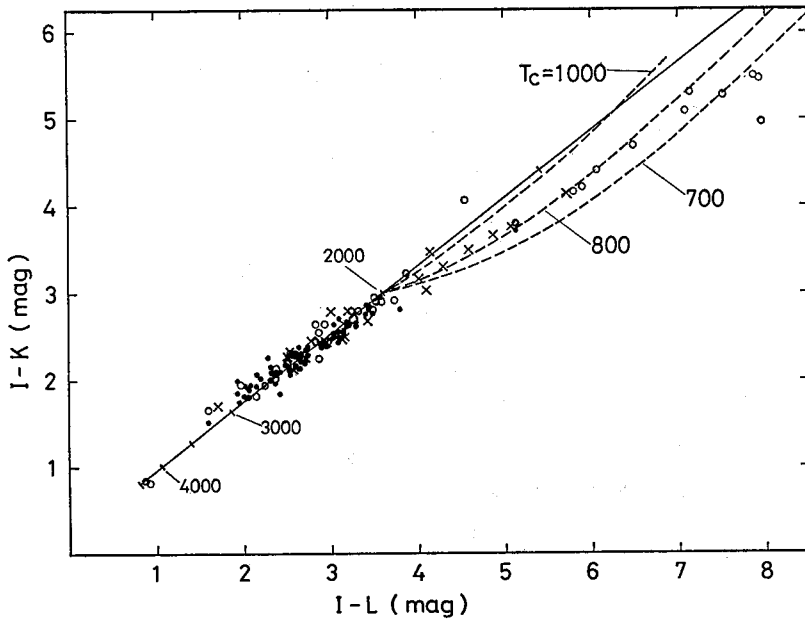


図 6 $I-L$ と $I-K$ の関係。実線及び鎖線の意味は図 5 に同じ。

$$F_{\lambda}^0 = [F_{\lambda}^s \cdot \sum_i \exp(-\tau_i^{\lambda}) + \sum_i k_i \cdot (1 - \exp(-\tau_i^{\lambda})) \cdot \text{B.B.}(T_i)] \cdot \exp(-\tau_{\lambda}^0)$$

ここで F_{λ}^s は星の輻射， $\text{B.B.}(T_i)$ は温度 T_i の黒体輻射， F_{λ}^0 は観測される星全体の輻射を表わす。今 τ_i^{λ} ， $\tau_{\lambda}^0 \ll 1$ の場合を考え、 F_{λ}^s として黒体を仮定し、

$$\sum_i k_i \cdot \tau_i^{\lambda} \cdot \text{B.B.}(T_i) \approx \tau_{\lambda} \cdot \text{B.B.}(T_0)$$

と近似すると

$$F_{\lambda}^0 \approx K \cdot \text{B.B.}(T_s) + \tau_{\lambda} \cdot \text{B.B.}(T_0) \quad (1)$$

を得る。吸収の希釈効果の始まる $I-L \approx 3.5 \text{ mag}$ に対応する黒体の温度である 2000 K を T_s の値として採用し、 $T_0 = 700, 800, 1000 \text{ K}$ の 3 つの場合について (1) 式のスペクトルのふるまいを示したのが図 5, 6 の 3 本の鎖線である。星自身からの輻射と星周塵輻射の割合が変化するにつれて (1) 式で表わされるスペクトルは鎖線上を移動する。ここで τ_{λ} は星間吸収の波長依存性と同じものを採用している。観測点の多くは $T_s = 2000 \text{ K}$ ， $T_0 = 800 \text{ K}$ に対して得られた鎖線の付近に分布している。星周塵輻射を導入する事によって、 $I-L \geq 3.5 \text{ mag}$ の領域で黒体輻射からのずれの大きい一連の星のエネルギー・スペクトルの色-色図上における一連の変化の傾向を説明できる事がわかる。 $I-L$ が大きい星に対しては $\tau \ll 1$ の近似があてはまらない為に、用いられたパラメーターの値自身はある程度不定性を含むものではあるが、星周塵のふるまいに関する議論の本質的な部分に大きな変化をもたらすものではない。

(1) 式によって、星周塵輻射による $3 \mu\text{m}$ 吸収の希釈

効果についても評価する事ができる。ここでは $3 \mu\text{m}$ 吸収は星自身の輻射にのみ伴っており星周塵輻射には $3 \mu\text{m}$ 吸収はないものと仮定する。今 $T_s = 2000 \text{ K}$ ($I-L \sim 3.5 \text{ mag}$) の星の吸収強度を $3 \mu\text{m}$ インデックス = 1.1 と仮定して希釈のようすを計算したのが図 4 の 3 本の鎖線である。 $I-L \geq 3.5 \text{ mag}$ の領域での吸収の減少は定性的には星周塵による $3 \mu\text{m}$ 吸収の希釈効果で説明される。しかし特に赤い星では観測された吸収強度の方が計算結果よりやや大きい。このように (1) 式に基づいて評価した $3 \mu\text{m}$ 吸収の希釈効果が $I-L$ の増加に伴って急速に効きすぎるのは、光学的に薄い星周塵の層の仮定のもとに導いた (1) 式が特に赤い星では近似が悪くなる結果にもよるであろう。しかしこの他に星周塵輻射は $3 \mu\text{m}$ 吸収を伴っていないとした仮定にも原因がありそうである。 $3 \mu\text{m}$ 吸収の成因となっている多原子分子の一部は星周塵の存在する領域まで広がっており、星周塵輻射も一部は $3 \mu\text{m}$ 吸収を伴っている可能性はもっともらしい。この場合には星周塵輻射の増加による吸収の希釈効果はもっとゆるやかなものになって、観測との一致は改善されるだろう。一方、 $T_s < 2000 \text{ K}$ に相当する極めて低温の星で強い $3 \mu\text{m}$ 吸収を伴った星が存在する可能性も否定されたわけではない。

まだまだこのような簡単なモデルでは説明が十分でない点が多い。しかし炭素星に対する測光観測の結果は簡単なモデルと比較する事によって、塵の輻射の寄与の少ない星から赤外線星のように濃い星周塵に包まれた赤い星に至る一連の星が星周塵の量をパラメーターの一つと

して連らなつた一つの系列をなして存在している事実を明らかにしつつあるといえるだろう。星の大気組成が炭素星とは異なる M 型や S 型の低温度星にも同様な星周塵輻射が知られている。今後はこれらの星についても広範な測光観測を行なえば星周塵のふるまいを低温度星全体についてより系統的に明らかにできるものと期待される。

☆ ☆ ☆

学会だより

今秋の年会は京都市の京大会館で、10月13日(火)~15日(木)の3日間開催の予定です。講演申し込み締切りは8月17日(月)となります。なお今回から講演申し込み用紙が、新しいものに改訂されますので御注意下さい。詳しくは、来月号学会だよりを御覧下さい。

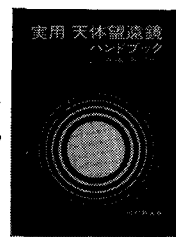
わが国唯一の天体観測雑誌

天文ガイド

定価 390円(〒70円) '81- 8 月号・7月5日発売!

- 8月号のおもな内容
- ★日食特集/200号記念星図つき
- ★観測ガイドは、日食観測ガイドとペルセウス座流星群の観測です。ペルセ群は、今年は月が明るいのですが、それでも月没後充分観測できます。
- ★日食の写真の撮影は、おなじみの藤井旭さん。連続写真、部分食の写し方などのやさしいガイド。また、日食のときに見られるおもしろい地上現象の写真は石橋力さん。
- ★あなたも日食の予報をしてみませんか? 日食の始まる時刻、どれだけ欠けるか、あなたの住んでいる町の予報を出しましょう。……………ほか

実用
天体望遠鏡
ハンドブック



■買う前、買ってから

天体望遠鏡の実用的な解説と、選び方の具体的なポイントについて、望遠鏡製作の現場技術者がまとめたもの。これから買う人、部品を揃えようとしている人に最適。

定価880円・最新刊発売中

川村幹夫の天体望遠鏡書

定価1800円・好評発売中

■小口径から観測小屋まで
天体望遠鏡
製作ハンドブック

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5
振替東京6294 電話03(292)1211