

炭素星のスペクトル分類

山下 泰正*

1. 岡山での観測

1967 年元日、私は防寒具を携えて夜行急行「安芸」の寝台にもぐり込んだ。岡山天体物理観測所で観測するためである。観測所では正月 2 日にもかかわらず、N 氏が出迎えてくれ、直ちに 91 cm 望遠鏡のために新しく造ったカセグレイン分光器のフォーカス・テストにとりかかった。テストの結果、分光器の焦点面は大きく彎曲していることがわかった。今から考えると、これはカメラ・レンズの像面彎曲という収差であり、分光器の場合プリズムがカメラ・レンズの入射瞳になっているから、プリズムとカメラ間の距離を調節するという方法があったかも知れない。しかしその時は取締部を改造して乾板の傾き (tilt という) をもっとつけるか、あるいは乾板を焦点面に沿うよう強引に曲げるしかないと考えた。幸い焦点面は膜面側に凸である。それで乾板を裏から押し曲げることにした。ありあわせの材料で押し板と枕を作り、ノギスで測りヤスリで削りながらフォーカス・テストを繰り返すこと数日、ほぼ満足できる結果を得た。それからほぼ 10 年間この分光器を用いて炭素星のスペクトル観測を行った。乾板は曲率半径約 60 cm で曲っていて、厚さ 1 mm の乾板を 1 次元に曲げる場合、このあたりが破壊に耐える限度である。この位の曲率半径ですんだことも私達にとって非常に幸いであった。

私にとって炭素星のスペクトル分類との出会いはビクトリアで McKellar の乾板コレクションを見たときである。数週間飽かずに眺めた。炭素星はそれぞれに特徴的スペクトルを示し、極端な言い方をすると同じスペクトルを示す炭素星は 2 つとはないことを悟った。このことは M 型星のスペクトルが非常に均質で、温度系列と絶対光度効果とでほぼ完全に理解できるのに対比して印象深かった。個々の星のスペクトルの特徴を把握する努力は結局炭素星という範疇の中でスペクトル分類を行うことだと悟った。それからは積極的に分類を試みることにした。

2. スペクトル分類の歴史

ハーバード分類では炭素星は R 型、N 型に分類された。さらに R-N 型での細分類はリック天文台の Shane によって行われた。分類の基準は写真領域における色温度

であった。一般にスペクトル分類の歴史は如何にして吸収線強度の系列を色温度の系列に合わせるかという努力である。ところが Shane のスペクトル型に対して C_2 吸収帯の強さをプロットすると極大が 2 つ現れる。R-N 型の系列が真実温度系列だとすると、このことは理解に苦しむ。さらに星の色から推定される表面温度には 1000 度以下というものもあり、この温度ではあまりにも低すぎて、星は可視域で光れない。

炭素星の色が選択吸収の結果であって温度を示すものではないことを指摘したのは Wildt であった。写真領域の色は温度を反映しないから Keenan と Morgan は 1941 年 R-N 型を一緒にまとめて新しく C 型という分類を提唱した。温度の判定条件は黄 - 赤領域における色温度と温度に敏感な原子線分子帯である。 C_2 吸収帯の強さを C 型の温度系列でプロットすると単一の極大が現れるが個々の星毎にばらつきは大きい。同一温度の星にも C_2 の強さに強弱があることは炭素含有量が星毎に異なるからだと思われた。そこで分類の第 2 のパラメーターとして C_2 吸収帯の強さをとり炭素含有量階級と呼んだ。 C_2 の強さは炭素含有量のみでなく温度、表面重力、酸素窒素の含有量などの複雑な関数だが、分類の問題としてはそれらが後からでも較正できればよい。現在ではそれらの関係はほぼ正確にわかっている。現行の MK 分類では正常星を温度と絶対光度との 2 次元に分類するが、Keenan と Morgan の C 分類は温度と炭素含有量とによる 2 次元分類である。そしてこの分類は特異星スペクトルを特異元素の含有量によって分類するという考えの最初のものであった。一方、炭素星では重元素の含有量にも異常があるので、スペクトル線の絶対光度効果は未だわかっていない。

その後幾つかの分類の仕事が行われた。Bouigue はある吸収帯の強さに着目し、その吸収帯の強いものを J 型、弱くて見えないものを N 型と呼んだ。Bouigue の見つけた吸収帯はその後の研究で炭素の同位体 ^{13}C を含む ^{13}CN のバンドであることがわかっている。Gordon は原子線の強度に着目し、炭素星と正常な化学組成をもつ G、K、M 型星との比較を行った。また J 型の重要性を主張して、幾つかの J 型星を発見した。Richer は近赤外域において温度と絶対光度とによる炭素星の 2 次元分類を試みた。しかし彼のいう超巨星には真実絶対光度が明るいという証拠は他にはない。Warner は南天の炭素星の分類を行った。Rybski はやはり南天の炭素星の近赤外域を調

* 東京天文台 Y. Yamashita: Spectral Classification of Carbon Stars.

べた。私は岡山で結局 290 個の炭素星を観測し分類を行った。一方、個々の炭素星の詳細なスペクトル解析は米西海岸の大望遠鏡や岡山の 188 cm 望遠鏡を用いて行われている。これらの結果をもとにして炭素星スペクトルの特徴を以下に述べる。

3. 炭素星の種類

炭素星は種々の恒星集団にみつがっている。種族 I は勿論、種族 II にもある。散開星団、球状星団にもみつがっている。しかし主系列の炭素星は存在しない。したがって炭素星という現象は恒星進化の結果であると考えられている。炭素星は次のような種類に大別される。

バリウム星	水素欠乏型炭素星
CH 星	CH 型類似星
普通の炭素星	J 型星
リチウム星	CS 星, SC 星

CH 星は典型的種族 II であり、水素欠乏星も種族 II と考えられている。他は種族 I だが OB 星と共存する程若くはない。水素欠乏星、リチウム星、CS, SC 星および普通の炭素星の低温型のもは超巨星で、他は普通の巨星である。

4. バリウム星

G, K 型巨星で Ba II の線が著しく強くみえる。Ba II の線は超巨星で強まるという正の絶対光度効果を示す線として有名だが、バリウム星における強まり方は超巨星のそれを凌ぐ。低分散で見ると、その他に Sr II の線も強くみえる。また CH, CN の吸収帯もわずかだが確実に強まっている。その故にバリウム星も炭素星の一種だと考えられている。高分散での解析によると Sr, Zr の含有量は正常な星の約 3 倍, Ba, La は約 10 倍多いという。

5. 水素欠乏型炭素星

水素のバルマー線や CH バンドが弱いか、あるいは全く見えない。R CrB 型変光星は比較的高温のため C₂ のバンドを示さないが、この型に属する。比較的低温のものといっても F-G 型相当だが、これらには変光しないものが多い。化学組成の特徴としては、水素と炭素以外の元素（ヘリウム線は低温すぎて見えない）はほぼ正常である。窒素酸素も定量に困難を伴うがほぼ正常といわれている。すなわち、ほとんどすべての水素がヘリウムと炭素とに変換された組成を示す。水素欠乏型炭素星では例外なしに ¹³C を含むバンドが見えない。¹³C の含有量は ¹²C の 1/100 以下である。

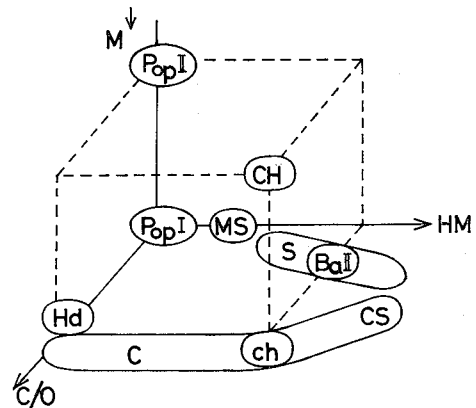
6. CH 星

典型的高速度星で種族 II に属し、比較的高温の G-K 型

にみられる。CH の線が著しく、3883-4000 Å の間では H, K 線以外のほとんど総ての線は CH だという。4215-4300 Å の間でも強い線のほとんど総ては CH である。種族 II の特徴として金属線は弱い、Ba II, Sr II など重元素の線だけは強まっている。高分散での定量によると鉄など金属の含有量は正常星の 1/5~1/30 と少なく、重元素と鉄との含有量の比は正常星の 10~20 倍多い。¹³C の含有量によって 2 種類に分けられる。岡山では 16 個の CH 星を観測したが、うち 6 星には ¹³C を含むバンドが全くみえないから、¹³C の含有量は ¹²C の 1/100 以下である。10 星には ¹³C のバンドが通常の炭素星と同じ位強く見え、¹³C 含有量は ¹²C の 1/8~1/20 である。球状星団 ω Cen に 3 個の CH 星が見つがっている。いずれも後者に属し、¹³C のバンドははっきり見える。

7. CH 型類似星

CH 星の特徴、すなわち CH が強い、Ba II, Sr II が強い、という性質を具えているが高速度の徴候を示さない星を 16 個岡山で見つけた。視線速度の統計から、これらの星は CH 星とは運動学的に異なり種族 I に属すると考えられる。¹³C の振舞でも CH 星に似ており、16 星中 4 星では ¹³C のバンドは全く見えない。10 星では通常の炭素星位強く、2 星は後述の J 型で ¹³C が著しく強い。CH 型類似星は G-早期 K 型相当のところに現れるが、この位の温度をもつ通常の炭素星では Ba II, Sr II



第 1 図 低温特異星の化学組成による分類。化学組成を特徴づける量の 1 例として炭素と酸素との含有量の比 (C/O), 重元素と鉄との含有量の比 (HM), 鉄と水素との含有量の比 (M) をそれぞれの軸にとったとき各種低温特異星の占める概略位置を示した。特徴的量はほかにも、炭素、窒素と水素との比、¹³C と ¹²C との比や温度、絶対光度なども考えられる。Pop I; 種族 I の G, K, M 型星, Pop II; 種族 II の星, MS; MS 型星, S; S 型星, Ba II; バリウム星, Hd; 水素欠乏型炭素星, CH; CH 星, ch; CH 型類似星, C; 普通の炭素星, CS; CS 星。

など重元素の線が強まることはない。CH 型類似星は種属 I における CH 星相当の星、あるいは炭素含有量の多いバリウム星と考えられる。

8. 普通の炭素星

炭素星は早期 G 型から晩期 M 型の温度範囲に存在する。比較的高温の炭素星 (C0-C3) では炭素のバンドは極く弱いものから中程度の強さのものまであり、金属線は正常にみえる。詳細な解析によると元素の化学組成としては炭素の含有量だけが異常に多く、Ca から鉄、重元素などは正常星と変らない。C₂ のバンドの著しく強い星は中位の温度の炭素星 (C4-C5) にある。前述の紫外選択吸収の強い星、メリル・サンフォード・バンドと呼ばれる SiC₂ の強い星もこのあたりにある。高分散観測によると Ba, Sr などは正常だが稀土類元素の含有量は正常星の約 100 倍位多いという。低温の炭素星 (C8-C9) では C₂ のバンドは弱まる。Ba, Sr の線は C6 のあたりから目立ち始め、C8-C9 では著しく強くみえる。くわしい解析によると Ba, Sr など重元素の含有量は正常星の 100 倍から 1000 倍も多い。

炭素のバンドの強さは星によるばらつきが大きいけれども、C0-C2 の星で弱く C4-C5 の星で著しく強い。これは C4-C5 の星では炭素の含有量が多いこと、温度が低いこと C₂ 分子が多くできていくことの相乗効果と考えられる。C₂ のバンドは C5 をすぎると弱まり、C8-C9 ではかなり弱い。これには 2通りの解釈がある。第 1 は炭素含有量が再び減るといふ考え、第 2 は低温のため炭素を含む多原子分子がたくさんできて C₂ 分子の割合が減るといふ考えである。解離平衡理論から予想される炭素を含む多原子分子には HCN, C₂H₂ などがある。これらの分子のスペクトル線は近赤外域にある。それらを探すため多大の努力が払われ、実際に見つかっている。しかし炭素の大部分が HCN や C₂H₂ になっていれば、これらの線はもっと強いはずである。さらに、後述のように低温の炭素星 (C8-C9) では炭素の含有量が減っているという証拠がある。炭素星における炭素の含有量は C4-C5 のあたりで極大になっていると私は考える。

9. J 型星

炭素星の特徴は炭素の含有量が多いだけでなく、炭素の同位体 ¹³C が多いことである。地球上の炭素は大部分が原子量 12 の炭素 ¹²C で、原子量 13 の炭素 ¹³C の割合は ¹²C の 1/90 である。太陽でもこの割合は 1/100 程度といわれている。普通の炭素星では ¹³C と ¹²C との含有量の比は 1/8 ないし 1/20 である。数字のひらきは星によるばらつきというより解析の誤差である。どのバンドから定量するかによって 2 倍以上の違いが未だある。

炭素星のなかには ¹³C を含むバンドが著しく強まっているものがある。これらの星を Bouigue は J 型、Gordon は J 星と呼んだ。くわしい測定によると ¹³C の含有量は ¹²C の 1/4~1/8 程度まで増えている。J 型星は C4-C5 および C8-C9 の範囲に現れ、C4-C5 の範囲では C₂ の強いものにみられる。しかし C₂ の強い星が総て J 型というわけではない。

10. リチウム星

リチウムの著しく強い炭素星で現在 5 個知られている。いずれも著しく低温の星 (C8-C9) で、うち 2 個は CS 星である。

11. CS 星と SC 星

低分散でみると低温にもかかわらず分子のバンドがほとんど見えない星がある。これは炭酸と酸素の含有量が等しく、総ての炭素と酸素は CO 分子を形成し、他の酸化物 (TiO, ZrO) を作る酸素も、炭素化合物 (C₂, CN) を作る炭素もほとんど残っていないからだと考えられている。比較的高い分散でみて、ZrO がわずかに見えるものを SC 星、C₂ のわずかに見えるものを CS 星という。いずれも温度の著しく低い星 (C8-C9 あるいはそれ相当) である。近赤外域では CN バンドがよく見え、可視域では CaCl が見えるものもある。Ba, Sr など重元素の線が著しく強まっているが、この特徴は C7-C9 の星、リチウム星など低温の炭素星に共通のものである。

12. 赤外色指数とスペクトル型

スペクトル分類の問題は如何にしてスペクトル線強度の系列を色温度の系列に合わせるかということだと前に述べた。写真域の色は選択吸収があるから温度ではない。最近、赤外測光技術が進歩し多くの炭素星について赤外色指数が測られている。低温度星は波長 0.8-3.5 μm のあたりでエネルギーの大部分を放出している。そしてエネルギー分布は黒体放射のそれに近いという。だから赤外色指数は星の温度を示していると考えられる。

ところが赤外色指数と C 分類のスペクトル型との相関は良くない。この問題は未だ議論のあるところで結着はついていないが、私は炭素星の赤外色指数が温度だけでなく、星間吸収 (赤化) やバンド吸収の影響を受けているからだと考える。これには銀河面に近く吸収物質の濃い領域にある星ほど、また可視域の吸収帯の強い星ほどスペクトル型に比べて色温度が低いという証拠がある。一方、C 分類の温度判定につかっている線は温度だけでなく電子圧に依存する。そして吸収線成生層の深さは大気の不透明さを表わす吸収帯の強さによるから、C 分類では温度と分子帯強度との分離が良く行われていないと

する批判がある。この効果は大気構造の問題としては重要だが、標題の不一致の原因としては星間吸収の影響が大きいと私は考える。

13. 低温度星のスペクトル分岐と低温特異星の起源

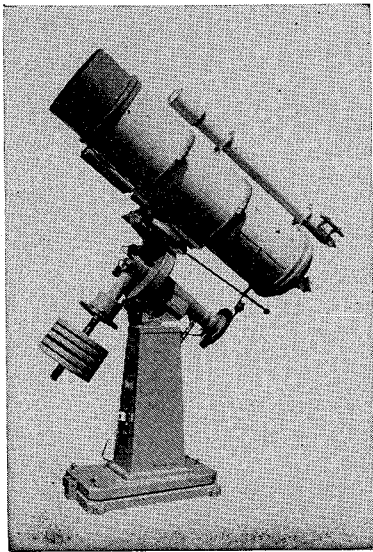
恒星のスペクトル型は低温において、M, S, C 型に分岐する。分岐については有名な Fujita 理論がある。すなわち炭素窒素酸素の混合気体の温度が下がると最も多量にできる分子は CO である。だから正常な化学組成をもつ星では炭素は CO になり、余った酸素は TiO などの酸化物を作り M 型のスペクトルを呈する。炭素の含有量が酸素より多いと酸素が CO になり余った炭素が C₂, CN などを作って炭素星になる。そして酸素の含有量が炭素にほぼ等しいと酸素の分圧が下がり絶対光度効果のように解離エネルギーの大きい ZrO の比率が大きくなって S 型になる。Fujita 理論は低温度星における分岐が大気構造の特殊性でなく化学組成そのものの特異性によることを示した最初のものであった。化学組成の異常は炭素酸素のみでなく、本稿で述べたように、リチウム、炭素同位体、s 過程元素である重元素等多岐にわたり、それらの特異性は星の温度と相関をもっている。

次の問題はなぜ化学組成に異常があるのか、すなわち低温特異星の起源の問題である。これについては恒星進

化の結果だと考えて間違いない。すなわち星の内部で合成された元素が対流によって星の表面にまで運ばれてきた結果である。具体的には 2 殻源モデルの熱不安定がこの問題と関連して研究されている。(杉本大一郎; 天文月報, 68 巻, 12 号, p. 379.)

14. S 型星のスペクトル分類

私は炭素星という範疇の中で分類の仕事をしてきたが、炭素星という現象を本当に理解するには低温特異星をもう一度同一規準で見直す必要があると思っている。分岐の問題は古くても、なお解けていない問題である。炭素星に進化する星と S 型星になる星とでは何が違うのか、炭素星から S 型へ、またはその逆の進化の道筋があるのか、何もわかっていない。この点で S 型星のスペクトル分類が一つの隘路になっていると思う。現行の S 型星分類は M 型星同様に分子の吸収帯の強度によっている。しかし岡山での予備的観測によると、温度に敏感な原子線の強度は異った振舞をする。すなわち現行の S 分類ははたして温度系列かという疑問がある。原子線によって S 型星の分類を見直し、それによって炭素星やバリウム星との関連を明らかにすることが目下の課題だと考えている。



天体望遠鏡
ドーム、製作

西村製の天体望遠鏡

40 cm 反射望遠鏡の納入先

- | | |
|--------|----------------------|
| No. 1 | 富山市立天文台 |
| No. 2 | 仙台市立天文台 |
| No. 3 | 東京大学 |
| No. 4 | ハーバート大学 (USA) |
| No. 5 | ハーバート大学 (USA) |
| No. 6 | 台北天文台 (TAIWAN) |
| No. 7 | 北イリノイズ大学 (USA) |
| No. 8 | サン・チェゴ大学 (USA) |
| No. 9 | 聖アンドリュース大学 (ENGLAND) |
| No. 10 | 新潟大学高田分校 |
| No. 11 | ソウル大学 (KOREA) |
| No. 12 | 愛知教育大学(刈谷) |
| No. 13 | 静岡大学 |

606 京都市左京区吉田二本松町 27

株式会社 西村製作所

TEL. (075) 771-1570
691-9580