

系外銀河中の AGB 星の研究は 何がおもしろいのか？



松浦美香子

〈国立天文台光赤外研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: mikako@optik.mtk.nao.ac.jp

宇宙が生まれて以来、星の中で炭素などの（天文学で定義する）金属が作られ、その金属が次世代の星を作るのに使われるということを繰り返して、宇宙空間にある金属の量がしだいに増加していったと考えられている。その金属の増加に貢献している天体の一つが AGB（エイジービー）星で、おもに炭素などを星の内部で合成している。

近傍銀河の多くはわれわれの銀河系よりも金属量が低い。そこで金属量が少ないという環境が及ぼすさまざまな影響を調べるのには好都合な観測対象である。鉄の存在量と他の原子の存在量にはある程度の相関関係があるとされている。一般的な仮定は、低金属な銀河に属する AGB 星の大気も金属量が少なく、金属を組成とする分子、例えば一酸化炭素、アセチレン C_2H_2 などの存在量も少ないというのがこれまでの予想だった。ところが、赤外線のスเปクトルを得て解析したところ、低金属量の銀河中の AGB 星のほうがアセチレンの存在量が多いという結果が得られた。言われてみると何ということはないが、AGB 星自身の内部で合成されている炭素の量に問題解決の方法があった。低金属量な条件下で生まれた星ほど、星内部で合成される炭素の量にアセチレンなど炭素を含む分子の量が敏感に反応することが、多量のアセチレンの原因であったのである。

1. AGB 星とは何？

身の回りのもの、あるいは自分自身の体を作っている原子は、そもそもいつ、どこでできたのであろうか？ 宇宙が最初に生まれたばかりのときは水素とヘリウムが成分であった。そのあと、星の内部で他の原子が作られて、しだいに「(天文学で定義する) 金属」つまりヘリウムよりも重い原子の数が増えていったのである。こういった原子の供給源の一つが AGB（エイジービー）星である。AGB 星は主に炭素の供給源であるが、ほかに酸素や窒素といった軽「金属」、テクニチウム (Tc) やスカンジウム (Sc) なども作っている。

そもそも、AGB 星とは何？ であるが、漸近赤色巨星分枝 (Asymptotic Giant Branch Stars) のことで、略して AGB 星である。漢字で書くと画数が多いし、読むのには舌を噛みそうに長いので、略称の AGB 星を使うことが多い。代表的な AGB 星はというと、脈動型変光星であるミラ (クジラ座 α (オミクロン) 星) や、IRC+10216 という赤外線 2 ミクロンにて全天で最も明るい天体が挙げられる。こういった天体は、星の有効温度が 3,000 度 (ケルビン) 以下と低く、エネルギーの多くを赤外線で出す。低温度星なので、大気表面では分子が作られ、イオンは比較的少ない。さらに、星の周りに塵をもつ星が多く、この塵が星の光を

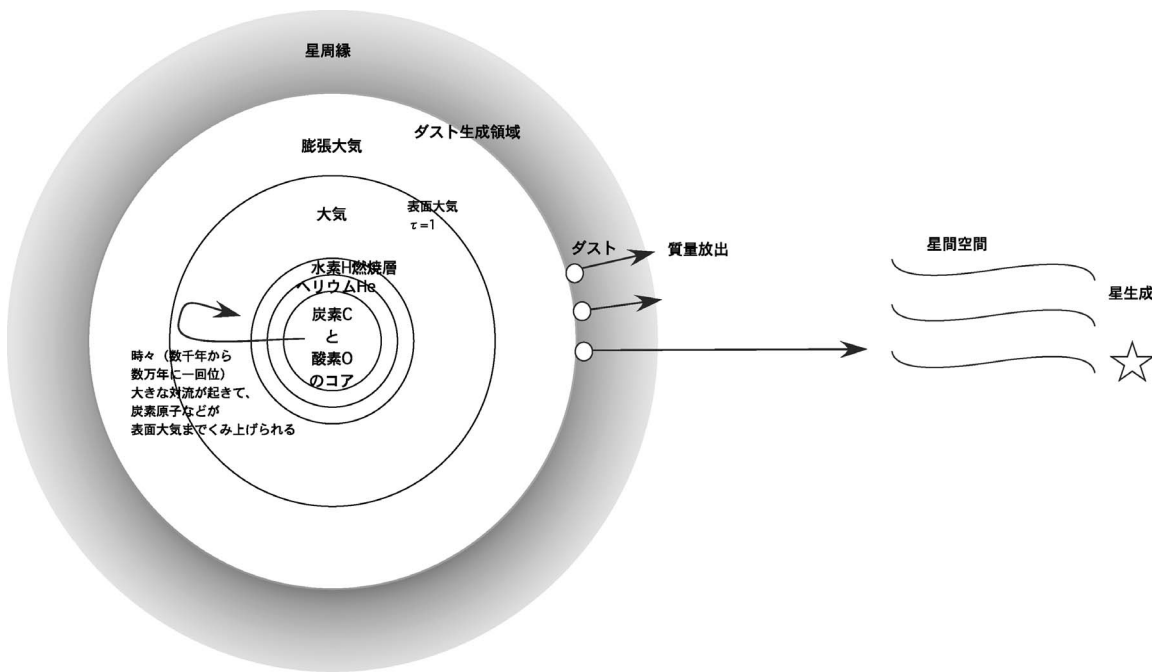


図1 AGB星の大気構造と、質量放出と星間空間の金属量の増加を説明する模式図。図上の大きさは実際の大きさの比とは一致していない。AGB星の中心核は炭素と酸素でできている。時々、炭素と酸素が星の表層にくみ上げられ、大気の詳細の組成が変化する。これによって、星によっては酸素過剰星から炭素星へと変化することがありえる。また星の脈動によって、表面大気の周りに膨張大気がつくられる。膨張大気のどこか適当に温度が低くなった領域でダストが生成される。このダストが星の放射圧を受けて、質量放出が起きる。質量放出によって作られた、ダスト生成領域の外側の領域を星周縁と呼び、ダストとガスからできている。このガスやダストが星間空間へと還元されていく。

一度吸収して赤外線でものを再放出するので、はたから見ると赤外線でもよく輝いているように見える。

星の周りには塵は、AGB星の星本体から次々に物が流れ出て失われて（「質量放出」と呼ぶ）できた結果である。星が脈動し、大気が膨張してガスの温度が下がると、大気の一部が凝縮して塵（ダスト）を生成する（図1）。塵が星からの放射圧を受けて、外に向かって動き出す。塵が周りのガスを巻き込み、星風が発生する。この星風が質量放出の本質であると考えられている。この質量放出の過程で、AGB星は星の内部で作った炭素などの元素を星間空間に還元していくのである¹⁾。

2. ではなぜ系外銀河の AGB 星か？

さて、遠回りをしてきたが、なぜ近傍銀河にある AGB 星をわざわざ研究しているのでしょうか。近傍銀河の多くは金属量が少ない、つまり水素、ヘリウム以外の原子の存在比が少ないと考えられている。こういった環境下で生まれ育った天体は、われわれの銀河系で生まれ育った天体と同じ性質をもつのでしょうか？ というのが疑問の原点である。単純に、星が生まれたときの金属量、原子の存在比をもち続けるのであれば、金属量が少ない環境で生まれた AGB 星の大気は、水素分子以外の分子の存在量が少なくなるはずである。さらに、塵の主成分であるケイ素、鉄、マグネシウム、酸素や炭素なども「金属」であるので、金

属量が少なければ塵の量も少なくなるはずである²⁾。こういった予想が正しいか、というのを観測で試すために始めた研究のはずであった。ところが観測結果から、ことはそう単純ではない、ということが判明したのである。その観測結果を少しずつ記述していこう。

3. たくさんのアセチレンが見つかる

まず、最初に行ったのが、われわれの銀河系のすぐ近くにある大マゼラン星雲にある AGB 星の観測である。AGB 星には大きく分けて二つのタイプがあり、一つは酸素過多星、もう一つは炭素星である。二つの分類の根拠の詳しくは後で記述する。もともとの狙いは炭素星の特徴的なバンドとされる、3.1 ミクロンのアセチレン C_2H_2 とシアン化水素 HCN の非常に強い吸収であった。この吸収が検出されることを期待して、ヨーロッパ南天文台の 8 メートル望遠鏡に搭載された赤外線カメラ・ISAAC (アイザック: Infrared Spectrometer And Array Camera) を用いて、七つの炭素星の 3 から 4 ミクロンのスペクトルをとってみ

た。そうしたところ、確かに 3.1 ミクロンの吸収が検出されたのであるが、もう一つ 3.8 ミクロンに吸収が見られた (図 2)。観測した七つの天体すべてにこの吸収が見つかったのである。筆者は、1996 年に打ち上げられた衛星、赤外線宇宙天文台 (ISO: Infrared Space Observatory) のスペクトルをいくつか見てきた。しかし、われわれの銀河系の星の場合、全部の炭素星にこのような強い吸収があった覚えはなかった。この波長に吸収を作り得るのは、主な分子では C_2H_2 と CH である。強く幅が広い吸収を作るのが C_2H_2 で、CH は ISAAC の波長分解能ではいくつかの線のような吸収を作るはずである。おそらくこの観測された 3.8 ミクロンの吸収は C_2H_2 であろうと思われた。

さて、大マゼラン星雲の七つの AGB 星を観測したところ、すべての天体から 3.8 ミクロンの C_2H_2 の吸収が検出された。ところが、われわれの銀河系にある AGB 星からは、それほど高い確率でこの吸収が観測されたはずではなかったと記憶していた。そこで、アセチレンの吸収が見つかる吸収強度と母体となっている銀河の金属量を系

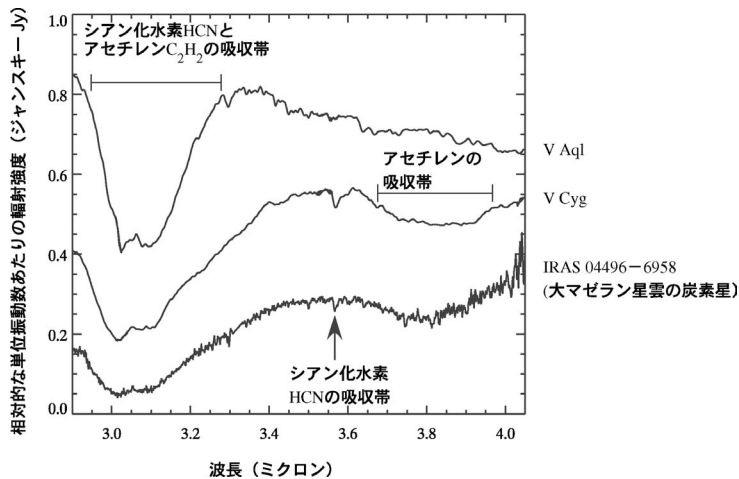


図 2 ISAAC で得た大マゼラン星雲の炭素星 IRAS 04496-6958 のスペクトル。3.8 ミクロンのあたりに広がった弱い吸収がある。われわれの銀河系の炭素星、V Aql と V Cyg のスペクトルを比較対象として載せる。V Cyg と IRAS 04496-6958 には 3.8 ミクロンに弱い吸収があるが、V Aql には見当たらない。われわれの銀河系の炭素星の多くは V Aql のように 3.8 ミクロンの吸収がないスペクトルを示す。3.8 ミクロンの吸収はおそらくはアセチレンによる。

統だって調べることにした。

先ほど話に出てきた 1996 年に打ち上げられた赤外線宇宙天文台を使って、世界中のさまざまな研究者がわれわれの銀河系にある炭素星を観測した。そのデータは一般に公開されている³⁾。赤外線宇宙天文台で得たスペクトルの多くは、幸いにして 3.1 ミクロンや 3.8 ミクロンの波長をカバーしている。そこで、われわれの銀河系にある炭素星と、大マゼラン星雲にある炭素星のアセチレンの吸収の等価幅を測定してみることにした。さらに、大マゼラン星雲を観測した約半年後に、小マゼラン星雲と、いて座矮小銀河にある AGB 星のスペクトルを得る機会があったので、等価幅の解析には合計四つの銀河に属する炭素星を使うことができた。AGB 星くらいの年齢（1 億から 10 億年くらい）の星の金属量（鉄の量に換算して）は、大マゼラン星雲でおおよそ太陽の半分、小マゼラン星雲で四分の 1、いて座矮小銀河は十分の 1 から半分程度である。

アセチレン分子は炭素星の温度がある程度以下

まで低くなると急激にできる。またアセチレンの生成量も温度に対しての依存性がある。そこで、測定した等価幅を赤外線の色等級に対してプロットしたものが図 3 である⁴⁾。こうしてみると、温度が相対的に高い青い星（色等級が小さい）はほとんどアセチレンがない。色等級が 1 等よりも大きくなった時点で、急激にアセチレンができたし、等価幅が大きくなる。ただ、そのときに到達しうる等価幅に、大マゼラン星雲とわれわれの銀河系の炭素星で大きな差が出た。同じ程度の色等級をもつ天体にたいして、大マゼラン星雲の星のほうがわれわれの銀河系の星の 2 倍くらいの等価幅があるようである。大マゼラン星雲の炭素星は、どうも系統的に大気表層のアセチレンの量が多いようである。ただ、赤い星になってくると、ダストの放射によってアセチレンの吸収が埋められてしまうので、赤い星ほど無限に等価幅が増えていく、ということにはならず、赤い星では等価幅が減少してしまう。

その後、さらにほかの波長にあるアセチレンの

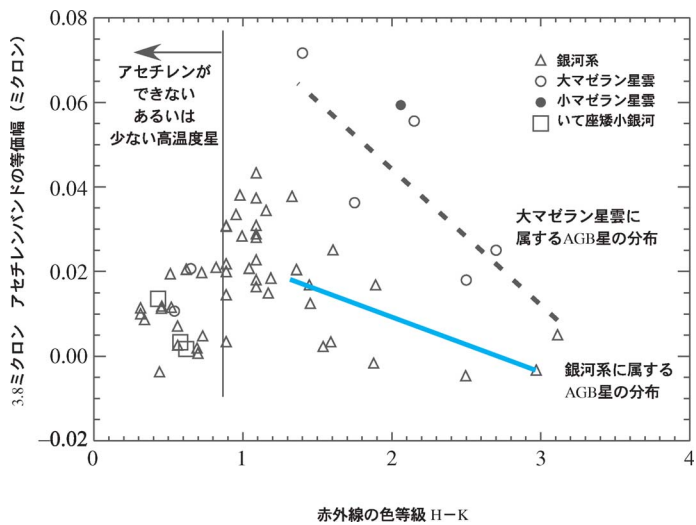


図 3 3.8 ミクロンの吸収の等価幅。恒星の温度の指標となる赤外線の色等級に対してプロットした。一般的に、等価幅が大きいほど、分子の吸収が強く、分子の量も多くなっていると解釈できる。ある程度恒星が低温度になるとアセチレンの吸収が卓越してくる。大マゼラン星雲の炭素星のほうが、銀河系の炭素星よりも系統的にアセチレンの吸収が強いことがわかる。

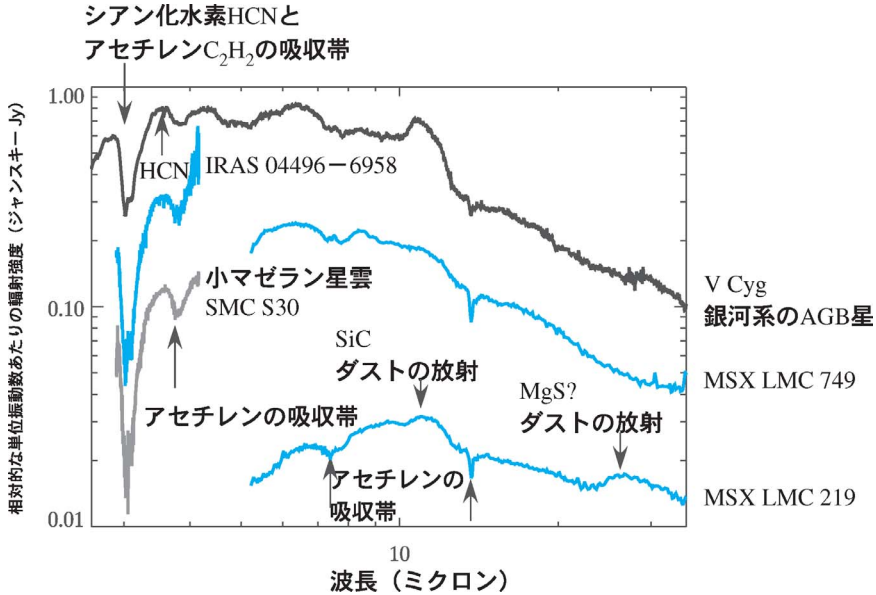


図4 ISAAC と IRS で得た大マゼラン星雲 (LMC) と小マゼラン星雲 (SMC) にある炭素星のスペクトル. 比較対象として, 銀河系の炭素星 V Cyg のスペクトル (宇宙赤外線天文台によって得た) も載せる. 3.1, 3.8, 7.5, 1.3 ミクロンにアセチレンの吸収が見受けられる.

吸収帯を観測する機会を得た. アメリカ合衆国の航空宇宙局 NASA が 2003 年 8 月にスピッツァー宇宙望遠鏡 (Spitzer Space Telescope) を打ち上げた. この望遠鏡には, 三つの装置が搭載されているが, そのうちの一つが赤外線分光装置 IRS (アイアールエス: InfraRed Spectrometer) である. IRS を使えば, 5 ミクロンから 35 ミクロンまでのスペクトルを得ることができる (図 4). この波長の範囲には, 7.5 ミクロンと 13 ミクロンの 2 カ所にアセチレンの吸収帯がある⁵⁾. そこでこの吸収に対しても等価幅を測定した. 今度は, 小マゼラン星雲のサンプルの数が大マゼラン星雲のサンプルの数と同じくらいまで得られた⁶⁾⁻⁸⁾. さらに, ろ座矮小銀河にある炭素星のスペクトルまで得ることができた. ろ座矮小銀河の金属量は太陽の約十分の 1 である. 今まで IRS で観測した AGB 星の中では最も金属量が低い. 先ほどの ISAAC の場合と同様に, それぞれの吸収帯の等価幅を測定して, 赤外線の色等級に対してプロットしてみた.

今度の色等級は, 一般的に使われているフィルターではなく, IRS のスペクトルから分子の吸収が少ない波長帯を 2 カ所選び, 色等級を計算した.

7.5 ミクロンと 13 ミクロンの二つの吸収帯においても, やはり銀河系の炭素星が最も小さい等価幅を示し, 小マゼラン星雲の炭素星が大きい等価幅を示す傾向がでる. 図 5 に 13 ミクロンの吸収の等価幅を載せた⁹⁾. ろ座矮小銀河の炭素星は小マゼラン星雲と同じあたりに分布している. ただし, 13 ミクロンの吸収は弱く, ノイズの影響を強く受けてしまう. そのため大きめの誤差は生じているであろう. また, この辺りの波長では表面大気のほか星周縁のアセチレンも吸収を生じるので, 色等級に対する関係が 3.8 ミクロンとは同一にはならない. しかしながら, 金属量が低い銀河にある炭素星でアセチレンの吸収が強くなるという結果には矛盾はない.

アセチレンと言えば, 化学物質を合成するうえ

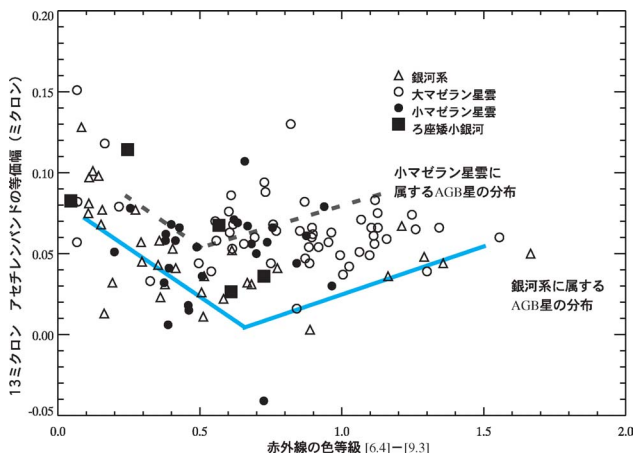


図5 スピッツァー宇宙望遠鏡で測定した13ミクロンアセチレン吸収バンドの等価幅。赤外線の色等級に対してプロットした。大マゼラン星雲の炭素星のほうが銀河系の炭素星よりもアセチレンの等価幅が系統的に大きい。小マゼラン星雲やろ座矮小銀河の炭素星の等価幅は分散が大きいが、等価幅が大きな天体が見受けられるのが特徴である。この13ミクロンの吸収帯は表面大気起源と星周縁起源の両方のアセチレンに影響される。そのため色等級に対する13ミクロンのアセチレンの等価幅の振舞いは図3の3.8ミクロンのアセチレンの等価幅に比べると複雑になる。

とても重要な物質で、化学工場では有機化合物を作る原材料としてよく使われる。ベンゼン環などの合成にはなくてはならない物質がアセチレンである。天文学で言えば、多環式芳香族炭化水素(PAH)の原料になると考えられている¹⁰⁾。そういったアセチレンが炭素星の周りにはたくさんあるのである。しかも金属量が低い銀河にある炭素星にいけばいくほど(観測すれば観測するほど、と言うべきであろうか)アセチレンの量が増えるようだ。

4. 多量のアセチレンの謎

ただ、そもそもの予測は、大マゼラン星雲のAGB星の分子の吸収は、全体に弱くなると思って観測したはずであった。そう、筆者も観測の提案書に「大マゼラン星雲の炭素星は銀河系の炭素星よりもアセチレンが少ないことを検証する」と書いたのである。大マゼラン星雲の金属量は太陽の約半分である。ここでいう金属量とは鉄の量、あるいは鉄の量に換算して使っている指標であ

る。AGB星の大気に含まれる炭素の量が単純に金属量と比例するのであれば、大マゼラン星雲では炭素の量が太陽の半分で、炭素の量が少なければ C_2H_2 の量も少ないはずである。ではなぜ観測結果は逆になってしまったのか。

アセチレン分子の数を増やすには二つの方法があって、一つは恒星の大気の温度を下げることである。もう一つは、大気中の炭素の酸素に対する存在比(C/O比)を上げることである。大気中では、まず炭素と酸素が結合し一酸化炭素が生成される。残った炭素が他の炭素を含む分子、例えばアセチレンの合成に使われる(余談であるが、AGB星の炭素星と酸素過多星の二つの分類の由来は、一酸化炭素合成後に炭素と酸素のどちらの原子が残るかによっている)。であるので、一酸化炭素を合成した後に、より多くの炭素が残っていれば、より多くのアセチレンが作られる可能性が高い。

大気の温度は、炭素星の色温度から推測しても、大小マゼラン星雲のAGB星のほうが極端に

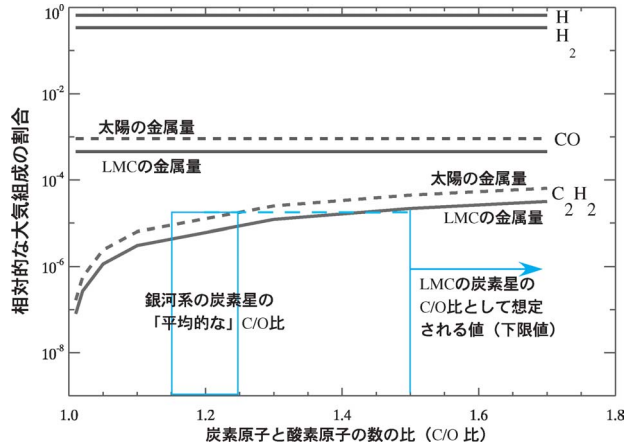


図6 炭素星の大気組成のモデルから計算した、アセチレンその他分子の組成の割合⁴⁾。これを炭素と酸素の数の比 (C/O 比) に対して示す。アセチレンの割合は炭素と酸素の比に応じて変化する。ある一定の炭素と酸素の比で見た場合、大マゼラン星雲 (Large Magellanic Cloud: LMC) の金属量では、太陽の金属量に比べてアセチレンが少ない。しかしながら、もし大マゼラン星雲の炭素星の炭素と酸素原子の比が銀河系よりもかなり大きければ (1.5 以上)、アセチレンの存在量はむしろ大マゼラン星雲で多くなりうる。

温度が低いということはありません。むしろ金属量が低いと、大気の透過率がよくなるので、温度が高くなりやすいはずである。ということは、アセチレン分子の数が増えているのは、大気の温度の影響ではなく、むしろ大小マゼラン星雲、ろ座矮小銀河では大気中の炭素と酸素の比が高いためであろうと憶測することができる。

近傍銀河でより多量のアセチレンが検出されたという問題を解決するには、炭素と酸素の比を高くすればよいということはわかった。もし星が生まれたときの原子の存在比を AGB 星になっても持ち続けるのであれば、大小マゼラン星雲のほうが炭素と酸素の比は低いはずである。しかしながら、ここで忘れてならないのは、AGB 星の内部で炭素が合成されているということである。実際、炭素星自体がそうしてできている。もともと星ができたばかりのころは炭素原子の数が酸素原子の数よりも少ない、「酸素過多」の状態である。ところが、AGB 星の内部で炭素が合成されて、その炭素が時々起こる Third dredge-up という過程で内部から大気の上層までくみ上げられて、大気中の

炭素が増加していく。こうして炭素原子の数が酸素原子の数を上回ると、炭素星となる。炭素と酸素の比は AGB 期に変化する値である。

では、どのくらいの炭素と酸素の比で、アセチレンの量はどの程度変化するのであろうか。化学平衡計算から見積もった炭素と酸素の比 (C/O 比) とアセチレンの量の関係を示したのが図6である。大マゼラン星雲を想定したモデルでは、水素とヘリウム以外の原子の存在量を太陽の値の半分にした。ただし炭素原子の存在量だけは自由に変えて、炭素と酸素の比を変化させてみた。確かに、炭素と酸素の比が上昇するにつれ、アセチレンの存在量は増加する。われわれの銀河系の炭素星の炭素と酸素の比は、測定できる範囲ではだいたい 1.2 から 1.4 程度のもが多い^{11), 12)}。そうすると、大マゼラン星雲では 1.5 から 1.6 程度あれば、アセチレンの量が銀河系よりも大マゼラン星雲で多いことがありうる。わずかな C/O 比の変化でアセチレンの量を変えてしまうことができるのである。

大マゼラン星雲などにある炭素星のほうが銀

河系中の炭素星よりも C/O 比が高いということが、本当にありうるのでしょうか？ Lattanzio と Forestini の星の進化モデル¹³⁾は金属量が低いほど最終的に到達する C/O 比が高くなる可能性があることを理論的に示していた。これを観測から検証してみよう。AGB 星の次の進化段階に相当する post-AGB 星（直訳すると「AGB 星後」であるが、「AGB 期を卒業（終了）した星」というべきであろうか）については、最近、大マゼラン星雲中の一つの星に対して炭素と酸素の比が測定された。結果は 2 くらいであった¹⁴⁾。さらに、post-AGB 星から進化して惑星状星雲になってくると、炭素と酸素の比が 2 前後の天体が大小マゼラン星雲から見つかってくる¹⁵⁾。われわれの銀河系の惑星状星雲の平均的な比は 1 前後が多く、2 前後の天体は少ない。この観測から得られた C/O 比は大気モデルから想定した「大マゼラン星雲の炭素星の炭素と酸素の比が 1.5 以上」という条件を十分満たしている。また、炭素星と酸素星の数の比は、われわれの銀河系、大マゼラン星雲、小マゼラン星雲の順に増加してくる。これは、金属量が低い銀河ほど、炭素星の割合が高いことを示している。C/O 比が銀河の金属量に応じて変化している、おかしくないことと解釈できる。こういった観測結果を考え合わせると、金属量が低い条件下で生まれた星のほうが炭素と酸素の比が系統的に高くなる可能性が十分ありうる。金属量が低い条件下で生まれた炭素星ほどアセチレンの量が多い現象は、炭素と酸素の比と関連しているとわれわれは結論づけた。

金属量が低い条件下で生まれた星のほうが炭素と酸素の比が高くなる理由については、二つの可能性がある。そもそも最初の酸素の存在量が少ないほうが、同じ量の炭素を星の中で作っても炭素と酸素の比が高くなりやすいためのものか、それとも、金属量が少ないほうがそもそも星の中で炭素が効率よくできてしまうのか、そのどちらか、あるいは両方であろう。

5. 今後の期待

さて、低金属量の環境で生まれた AGB 星で大量のアセチレンが見つかる原因が炭素と酸素の比にあるのであれば、こういった星からは他の炭素を含む分子の存在量も高いはずである。それだけではなく、アセチレンは PAH の合成に欠かせない分子である。であるので、低金属量の星でも PAH が生成される可能性があることを示唆している。また、炭素は単体でアモルファス（非結晶）な塵を作ることができる。こういった塵は低金属量下でも十分にできてくるかもしれない。ただし、結晶質な炭素の塵であるダイヤモンドが系外銀河の AGB 星で見つかることはまだ期待していない。また、最終的には炭素や酸素など原子の存在量を近傍銀河の AGB 星にて直接測定することが重要である。

謝 辞

この研究の多くは、筆者がイギリスのマンチェスターにいたときに行ったもので、特に Albert A. Zijlstra, Jacco Th. van Loon 両氏とはいろいろと議論させていただきました。

参 考 文 献

- 1) Dwek E., 1998, ApJ 501, 643
- 1) Bowen G. H., Willson L. A., 1991, ApJ, 375, L53
- 3) <http://www.iso.vilspa.esa.es/ida/>
- 4) Matsuura M., Zijlstra A. A., van Loon J. Th., et al., 2005, A&A, 434, 691
- 5) Aoki W., Tsuji T., Ohnaka K., 1998, A&A 340, 222
- 6) Sloan G. C., Kraemer K. E., Matsuura M., Wood P. R., Price S. D., Egan M. P., 2006, ApJ 645, 1118
- 7) Zijlstra A. A., Matsuura M., Wood P. R., et al., 2006, MNRAS 370, 1961
- 8) Lagadec E., Zijlstra A. A., Sloan G. C., submitted to MNRAS (astro-ph/0611071)
- 9) Matsuura M., Wood P., Sloan G. C., et al., 2006, MNRAS 371, 415
- 10) Tielens A. G. G. M., 1997, Ap&SS 255, 1
- 11) Lambert D. L., Gustafsson B., Eriksson K., Hinkle K.

H., 1986, ApJS 62, 373
 12) Ohnaka K., Tsuji T., Aoki W., 2000, A&A 353, 528
 13) Lattanzio J., Forestini M., 1999, Asymptotic Giant Branch Stars, IAU Symp. 191, ed. by T. Le Bertre, A. Lebre, C. Waelkens, p. 31
 14) Reyniers M., Abia C., Van Winckel H., Lloyd Evans T., Decin L., Eriksson K., Pollard K. R., 2007, A&A 461, 641
 15) Leisy P., Dennefeld M., 1996, A&AS 116, 95

Infrared Spectral Survey of AGB Stars in Galaxies at Different Metallicities

Mikako MATSUURA

Division of Optical and IR Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan, Osawa 2-21-1, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Infrared spectra of extra-galactic AGB stars have been obtained, covering the acetylene bands in carbon-rich stars. We found that acetylene is more abundant at lower metallicities among the sample in the Large Magellanic Cloud, the Small Magellanic Cloud, the Sagittarius dwarf Spheroidal (dSph) Galaxy, and the Fornax dSph Galaxy. At lower metallicities initial oxygen abundance is lower, and carbon atoms are synthesized in AGB stars resulting in higher carbon-to-oxygen ratios at lower metallicities. Chemical models show that acetylene is abundant at higher carbon-to-oxygen ratio despite low metallicities. Our observations demonstrate that the composition of stellar atmospheres is more sensitive to the elements synthesized inside the star at lower metallicity.