

星のまわりのダストの今昔物語

尾 中 敬*

昔々から星間空間には宇宙の塵、ダストと呼ばれる厄介者の固体の小さな粒が浮遊していて、遠くの天体からの光を妨げるので、なんとかならないかといわれてきた。最近では、系外銀河内でのこういった塵が、その光の大部分を吸収して実際の星の量は思っているよりずっと多いのではないかという話も出ている。どんな性質の塵がどのくらいあるのかがわかれば、話をかなり科学的に進めることができる。実際の塵の様子を観測するのが、その性質を知る最も直接的な方法であることは間違いない。残念ながら塵の特徴をよく示す吸収バンドが可視域では少なく、波長を短くしても極紫外域までいかないと出てこない。しかし波長の長い赤外域では固体の格子振動の特徴を示すバンドがよくみられ、可視域では光を吸収してしまう塵も赤外域ではその吸収したエネルギーを放射しているので、赤外域では一番よく観測される対象となっている。赤外観測による塵の研究が進んできている由縁である。最近の近代観測技術の発展に伴い、宇宙の塵のいろいろな世俗の姿が次第にはっきりなりつつあるが、まだ観測量に比べ、モデルのパラメータの数が多く、万人が認める宇宙の塵の像は得られていない。もう少し系統的に調べるためには塵ができたところの様子を知ることが、そのルーツを知り、現在の姿を理解するのに有効かもしれない。

ではいったい宇宙の塵はどこでできるのだろうか？これは一見簡単そうで実はそうではないと言う類の問題の一つなのである。一般的に言えば、星の進化の最終段階で星から吹き出されたガスが冷えてゆく時に固体の粒になるものと信じられている。天体の種類としては、低温度星、惑星状星雲、新星、超新星等が塵を出すものと考えられる。しかしどの天体が銀河系内で一番多く塵を出しているかということは諸説粉々ではっきりしておらず、さらに付け加えれば、本当に塵を出しているのかどうか疑わしいものもある。ただ低温度星についてはいろいろな観測から放出されるガス中で塵ができることは確実視されている。ここでは、最近の衛星観測から得られた話をオチに、低温度星での塵の生成について、多少歴史的にふりかえって観測・理論の両面での発展についてまとめてみたい。

ガスから固体になる過程が昇華と呼ばれることはご存じの向きも多いと思うが、まず始めのステップとして、

いわゆるクラペイロン・クラウディウスの関係を巧みに操って、化学平衡を仮定して星の周りでどんな固体ができるのか調べることが1960年代に始まった。ここで、特に『できうる』と断ったのは、平衡計算で示されるのは、固体になりえる条件が満たされているかであって、必ずしも十分条件とはなっていないためである。このことは後でまた触れる。この平衡計算が示唆した一番重要なことは、もちろん低温度星の周りでガスが流れ出れば固体ができる可能性を示したことであったが、もう一つの大きな発見は、ガス中の炭素と酸素の量の大小により固化しうる物質が大きく異なることを示したことであった。一酸化炭素が低温度星の表面温度の範囲では非常に安定な分子となるため、酸素が多い場合は酸素が余り酸化物（計算上はアルミナ及びかんらん石）が、炭素が多い場合は炭素が余り炭素系の物質（計算上はグラファイトあるいは炭化珪素）が固化することになる。

この結果は、ほぼ同時期に始まった低温度星の赤外観測の結果と一致し、理論と観測がお互いに安らかな気分になった一時期でもあった。すなわち、酸素の多いM型の星では珪酸塩の特徴とされる10ミクロンのバンドが観測され、炭素星では炭化珪素の特徴とされた11.5ミクロンのバンドが見られた(図1)。この特徴は、赤外線衛星(IRAS)による多数の星のデータで奇妙なものが観測されるまで、赤外域での星の大気の組成の分類の基準となった。

その後、平衡計算の理論的研究は特に原始太陽系での固体生成に重点が置かれ精緻を極めるに到った。しかし、平衡計算では固化しうる物質の組成と順序を予測することはできるが、どのくらいの大きさの粉ができるかまでは示すことができない。さらに、問題点として計算に考慮する物質に抜け落ちがあると、答えに信頼性がなくなることと、特に星の周りの物理条件下では密度が薄く、平衡状態が成立しているとは考えられないことが挙げられる。

この点を考慮したガスから固体あるいは液体が生ずる過程の取扱いは、従来より核生成理論という形で体系付けられ研究されてきた。核生成理論は固体の粉の成長をミクロなクラスターの成長として統計的に捉える方法で、そのエネルギーの表し方で長い間議論が続いている。このうち特によくスマートに整理されているものは“準平衡”を仮定した取扱で、平衡計算理論と平行して天体現象に応用されてきた。この取扱ではクラスターの大き

* 東大理 Takashi Onaka: Dust Grains around Stars, Latest Historical Review

さの分布が一定、あるいはクラスターの成長速度が周りの条件の変化(たとえば冷却速度)に比べて充分速いと仮定されている。この理論に基づき、できる粉の大きさも予測されるが、これらの研究の示した大きな結論は、固体が生ずる温度が、いわゆる過冷却と呼ばれる現象を伴うため平衡計算の結果より低くなることである。これは実際に粒ができるまでには有限の時間がかかるためで、例えば、珪酸塩(かんらん石)は 1000K ぐらい(平衡計算では 1200K)、炭素(グラファイト)で 1200K(平衡計算で 1500K)というのが理論の予測した値である。これは平衡計算でも同じことであるがほとんど周りの条件に依らず一定となる。というのもクラペイロン・クラウジウスの関係が温度にきわめて敏感だからである。

但し、標準の核生成理論を天体現象に適用しようとする、もうひとつ厄介なことがある。それは、特に酸素が多い場合化学変化を伴う固化(気体中に固化すると予想される固体と同じ化学組成の気体が少ない)を考えなければいけないことである。かんらん石の組成を持つ気体というのはたくさんあるとは考えられていない。こゝら辺のことを詳しくつきつめた研究も最近も行われているが、段々難しくなってしまうのでここでは触れないことにする。

ところで、その頃赤外観測の進歩もめざましく新しいデータが次々と得られてくるようになり、世の常、理論との相違点が指摘されるようになっていた。まず、観測の波長分解能をあげても珪酸塩のバンドとみられる 10 ミクロンのスペクトルはのっぺりしたままであることがわかった(図 1)。ところが理論計算に組み込まれているかんらん石ではこの中にいくつかの微細構造を示すはずである。このため 1970 年代後半には、観測されるスペクトルを示す物質を室内で合成あるいは再現する実験が次々と行われた。これらの結果は、それぞれの主張はあるものの、まとめて言ってしまうえば結晶質の珪酸塩ではなくもっと結晶性の悪い石ころをもってくると観測とよく合うというものであった。この後非晶質の珪酸塩というイメージが天体の塵として定着した。同様に炭素系の塵についても、ここでは詳しくは触れないが、遠赤外の輻射特性の研究から、どうもグラファイトというよりは非晶質の炭素の塵ではないかといわれている。この結論は、しかし、あまり面と向かっては指摘されていなかったものの、潜在的にいくつかのきつい問題を理論側に投げかけていた。

一つは非晶質の物質というものは定義付けがあいまいで、その科学的性質ももう一つ記述しにくく平衡計算や核生成の計算に組み入れにくいという点である。但し、この結論を受けて非晶質の塵の生成を核生成理論の枠内で調べた理論的研究も行われている。もう一つの問題点

は、非晶質の珪酸塩はおそらく温度を 1000K なんかにしてしまうと、結晶化スペクトルが微細構造を持つようになるだろうということである。この傾向は室内実験でも確かめられている。従って単純に素直に考えれば、大部分の珪酸塩は 1000K よりずっと低い温度で生まれなければならないことになる。一方また同時期に進んだ干渉計等の観測でも、どうやら塵のできている温度は 700~800K で、理論の予想とは少し低めになっていた。

この温度の違いは、誤差の範囲と言うには大きすぎるものであったが、これ自身は顔面どうり受け取っておけばよいことだったかもしれない。しかし、温度が低いということは星からの距離が遠いということであり、従って密度が薄いということに気が付くと、奇妙な矛盾にぶち当たる。あまり密度が薄いと気体同士の衝突が希になり、核生成が起こりにくく塵ができないかも知れないと不安になる。実際きわめてまじめに核生成理論を適用しようとする、"準平衡"の仮定が 1000K の領域でもぎりぎり満たされるかどうかであることがわかる。もちろん準平衡が崩れてもすぐに固体ができないという結論にはならないが、塵を作るのになんとなく重い気分になることは確かである。

こんな感じで理論と観測そして実験は、はじめの蜜月気分は少し薄らいでそれぞれ互いに多少の疑問を感じながらも淡々と進歩を遂げていた。ここで突然赤外線天文衛星 IRAS のデータが公開され星の周りのダストの研究は質的に新しい局面を迎えることとなった。IRAS には低分散スペクトルの装置(LRS)が搭載されており、

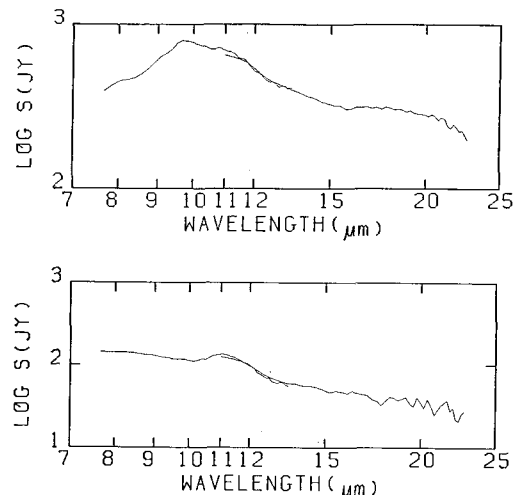


図 1 中間赤外域の低温度星のスペクトル。上が酸素の多い星(U Ori)、下が炭素の多い星(CL Mon)。酸素の多い星では珪酸塩の特徴とされる 10 ミクロンと 18 ミクロンのバンドが、炭素の多い星では炭化珪素の塵によるとされる 11.5 ミクロンのバンドがみられる(いずれも IRAS・LRS のデータ)。

5000個あまりの星に対して8~24ミクロンのスペクトルの大きなデータベースを供給したことはよく知られるところである。その結果はこれまでの常識をいくつか覆すものが含まれていた。図1のスペクトルもこのIRAS-LRSのアトラスから抜きだしたものである。

まず、珪酸塩のスペクトルを持つ炭素星が発見された。これは現在までのところ電波観測により星の光球の組成はともかくとして外側の星周ガスの組成は酸素が多いことが確認されているので、問題は塵の生成理論との矛盾ではなく、むしろどうして酸素の多い星周ガスが炭素の多い光球を持つ星の周りに存在するかということだ

と考えられている。この問題はここではこれ以上触れないが、これらの星は炭素系の塵の生成過程の発端を研究する上で面白い天体であるかも知れないということだけ付け加えておく。

一方、酸素の多い星に対しては10ミクロンのスペクトルが意外と変化に富むことがわかり、しかも10ミクロンのバンドを示さない、しかしなんらかの塵らしきものがあるM型星が多くあることがわかった。特にミラ型変光星に限ってみると、光度曲線の非対称性を示す F という量が謎のインデックスとなっていて、より非対称的($F < 0.44$)な光度曲線を持つ星のみ10ミクロンバンド

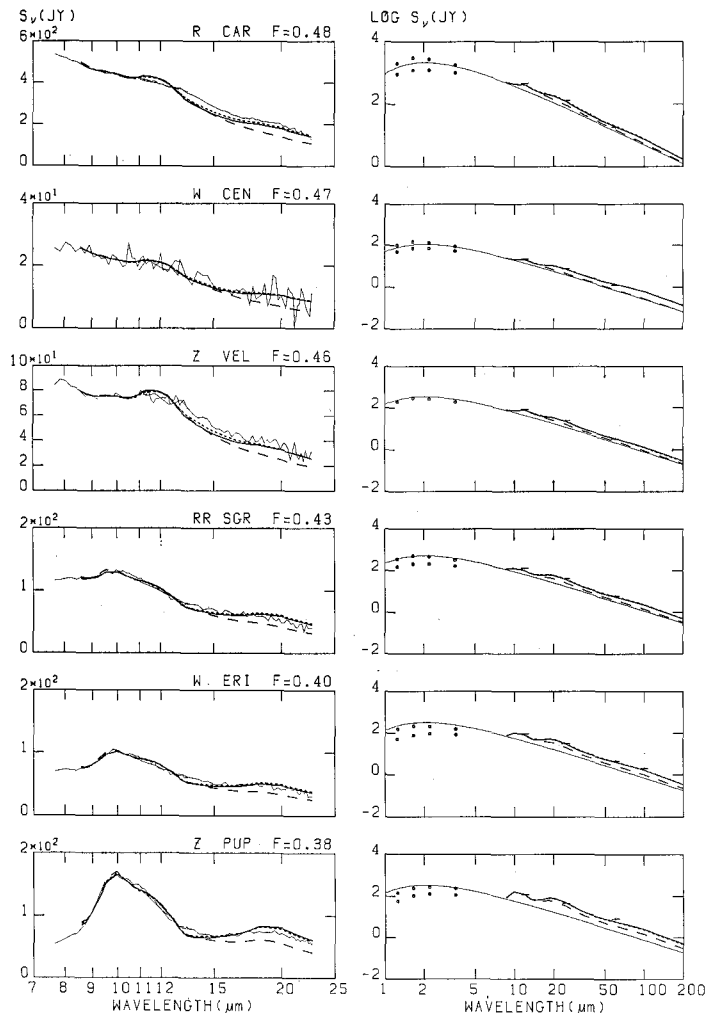


図2 光度曲線の非対称性のパラメータ F の順に並べた中間赤外域のミラ型星のスペクトル(左)と近赤外から遠赤外までのスペクトル(右)。細い実線が観測のスペクトル。太い線はモデルのスペクトルを示している。珪酸塩の塵のできる温度は300~600Kで計算されている(図5を見よ)。破線はこの温度を理論の予測値1000Kとしたモデルで観測と合わないことがわかる(Onaka et al., 1989, Astron. Astrophys. 218, 16に依る)。

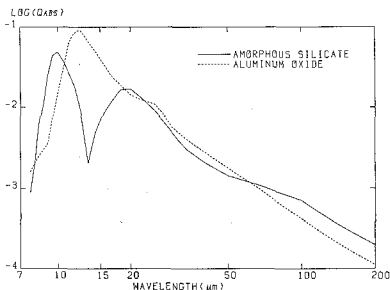


図3 採用した塵の赤外スペクトル。実線が非晶質珪酸塩、破線がアルミナの塵を示す(出典、図2と同じ)。

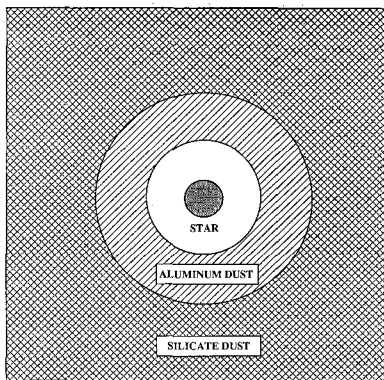


図4 提案したモデルの概念図。アルミナの塵は星の近くの高温領域で生まれ($T \sim 1500K$)、珪酸塩はその外側でできている。アルミナの塵は珪酸塩の領域にも存在する。

を示し、より対称的なもの ($F > 0.44$) ではみられないことがわかった (図2)。著者らはもう少しスペクトルを細かく調べて、これらの10ミクロン帯で観測されたスペクトルの変化が、二つの組成の異なる塵の組合せで大体説明できることを示した。図2に、この様なモデルであわせたスペクトルも太い実線で重ねて示した。図3には採用した各々の塵のスペクトルを示した。この説明では対称的な光度曲線を持つ星のスペクトルに見られる12ミクロンを中心とした幅広い盛り上がりは高温 (~1000K) のアルミナ (酸化アルミニウム) の塵によるものとし、10ミクロンバンドが見られるかどうかは、アルミナよりは低温の珪酸塩の温度 (あるいは珪酸塩のできる温度) の差によると説明した。考えている様子を漫画にすると図4のようになる。温度は F が小さくなると高くなる (図5)。

この説明が唯一無二のものであることを証明することは難しいが、かなり一貫性のあるものであることを示すことはできる。 F が大きい星でも低温の珪酸塩があるかも知れないと言うのは、じつとよくにらんでみると18ミクロンのこれも珪酸塩の特徴といわれているバンドがこれらの星にも見られることに依っている。温度が低いので10ミクロンバンドでは充分光っていないので一見わからないという説明である。また、 F の小さい星でも12ミクロンあたりの盛り上がりはなんとなく認知され、モデルを作ってあわせてみてもこのバンドを入れた方が全体としてよく観測を再現することがわかる。これがアルミナの赤外域の吸収バンドの特徴に似ており (図3)、また平衡計算でも少なくともアルミナは珪酸塩より高い温度でできることになっているので、特にひどい見当は

ずれということもない。量的にあたっては、珪酸塩と比べてもっともらしい範囲の中にある。アルミニウムは星間ガス中でも特に太陽組成と比べて目減りの目立つ元素で、大部分固体の粒に取り込まれていると考えられているのも、この話の状況証拠である。さらに図5でみると、珪酸塩の温度はかなり1000Kより低い。これは上の議論の非晶質という話、及び干渉計の観測から得られる星周のダストの一番高い温度は700~800Kという値に近い。さらに、上の問題とした低温=低密度で困難と思われる核生成のことも、もしアルミナの塵が高温領域ですでにできていれば核となりうるので、特に大変な領域で新たに核を作る必要がなくなり自然と回避できる。

と、こう書いていくとすべてバラ色に見えてくるがもちろんそんなはずはない。まずこれだけの話ではまだ謎のインデックス F がどうしてこの様な違いを生じさせることになるのか答えてはいない。一般的な感想では、 F は星の大気中の衝撃波と関係があり、 F が小さいほど衝撃波が強く、従って急激な核生成あるいはダストの生成が起こっているのではないかという。しかし、具体的に物理的な関係はよくわからない。さらに、上の説明では一見低温低密度領域での核生成の問題をアルミナへの吸着ということですませたかのような気にさせたが、実際にはアルミナの核生成という問題にすり替えたに過ぎない。希望的な観測ではアルミナはより温度の高いより密度の高い領域で生成されるはずであるから、核生成も簡単に起こるのではないかと思われるが、きちんと調べることが必要である。そして、これが一番大きな問題であるが、実はこの説明では F に対する珪酸塩ダストの温度の変化 (図5) を簡単には説明できていない。

少し落ち着いて考えればすぐわかることだが、ダストが核生成で生まれるにせよ、他の粒を核として生まれるにせよ、一般にこのような過程は上にも書いたように温度に非常に敏感なはずである。従って、他の物理条件の違いでこの過程が起こる温度が大幅に変化することを説明することはとってもし難しい。われわれは、アルミナの粒を核として珪酸塩が成長していく過程をもう少し具体的に数値計算で調べてみた。珪酸塩の成長速度は、まずアルミナの粉の大きさに依存することがわかる。小さいほど表面積が体積当りで大きくなるので成長が早くなる。 F が大きい星では急激にアルミナの核生成が進んでいるのかもしれないから、大きさのより小さな粉ができることも予想される。しかし、適当な範囲の大きさでは、やはり図5に示される温度の範囲を再現できない。我々は、一つの可能性として星周のガスが衝撃波などに依って密度の濃い薄いができ、珪酸塩の成長が促進されると考えた。この結果多少観測をよりよく再現できるようになったがまだ充分とは言える状態ではない。別の可

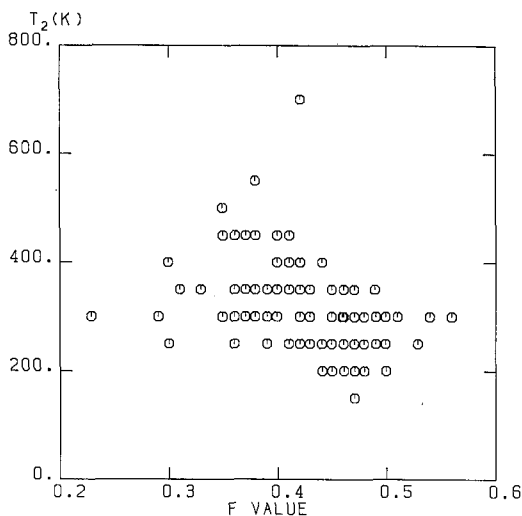


図5 光度曲線の非対称性のパラメータ F と珪酸塩のできところの温度 T_2 。 F が大きいほど温度が下がる傾向がみられる (出典、図2と同じ)。

能性として、星の周りのダストが温度の変化などの環境条件の移り変わりに依って性質を変えていくという説も考えられている。面白そうな考えだが、残念ながら現在のところ話を定量化できるまでの実験データがそろっていない。

新しい観測データの出現によりこれまでモヤモヤしていた疑問が気持ちよく整理されたのは喜ばしいことであるが、やはり話は思っていた通り簡単ではなかったということであろうか。当初よりどことされた平衡計算でも、また比較的単純な核生成理論でも、観測の一部は説明したものの、全体を充分にはしきれていない。おそらく理論面でまだ精密化されていない部分は、たくさんの種類の気体があるところからの固化（例えばアルミナの粒を核として成長するような過程も含めて）と、もう一つ、ここではあまり強調しなかったダストにとっては光子との相互作用が実験室と比べると重要で、ガスとの熱平衡というよりは輻射平衡になっている点の取扱いである。これは結果的にはガスと粒の温度が異なる状態での粒の生成、成長を考えることになっている。これらの現象を地上の実験室で再現することは大変難しく、面白そうだが手のつけにくいところでもある。逆に考えると、むしろ天体現象を、黙々と調べていくことで、クラスタ

ーサイズの物質の物理に対しても面白い話を提供できるのかもしれない。いずれにせよまだ研究しなければならない大事なことがあるというのは喜ばしいことである。

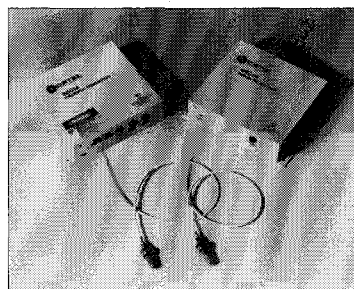
と、理論の方は新しい展開に向かって進んではいるものの、急にめざましい進展は望めそうもないかも知れない。それでは観測の方はどうであろうか？ IUE の観測により低温度星の塵の紫外域での吸収特性も調べられるようになり、いくつかの新しい情報も得られている。しかしここで問題としているような疑問に素直に答えるためには、やはり空間的にダストの様子が変わって行くところを捉えてみたいと思う。例えば図4の様に本当にアルミナがはじめにできて外側で珪酸塩ができていならば、空間的に赤外域のスペクトルが変化しているはずである。もし環境によりダストの性質が変わるならば、これも空間的な変化として赤外のスペクトルで観測されるはずである。残念ながらこれらの変化はどんなに近くの星を見ても少なくとも1"より小さなスケールで起きるようで、現時点での観測技術ではすぐには捉えられそうもない。可視域のハッブルスペースステレスコップでどこまで迫れるかは興味深いところであるが、やはりJNLTの高空間分解能(10ミクロンで0.3)に期待したいというのはできすぎたオチであろうか。

NEW LIGHTWAVE

マイクロ波アナログ光伝送の決め手

ORTEL

米国オーテル社製高性能・高品質マイクロ波アナログ光伝送用送受信機をご紹介します。電波天文学・粒子加速器プロジェクトでのタイミング供給や、アナログ方式によるデータリンク、そして移動通信中継やレーダー中継分野における活躍が期待されております。



	Transmitter	Receiver
特長	<ul style="list-style-type: none"> ・アナログ伝送 ・低ノイズ/低歪み ・50Ω SMAコネクタ ・使用温度範囲(-40℃~70℃) ・InGaAsプレーザダイオード (1300nm) 	<ul style="list-style-type: none"> ・3GHz/6GHz/ ・10GHz/12GHz ・広帯域信号用 (CATV)
仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・広帯域アナログ受信 ・50Ω SMAコネクタ ・シングルモード光ファイバ ・InGaAsフォトダイオード (1300nm) 	<ul style="list-style-type: none"> ・2GHz/3GHz/6GHz/ ・2-6GHz/ ・10GHz/12GHz ・広帯域信号用 (CATV)

輸入総代理店



住友セメント株式会社

光・電子事業推進部

TEL(03)3296-9854

〒101 東京都千代田区神田美土代町1番地

FAX(03)3295-5953