

# 星 間 塵 の 生 成

—物 性 天 文 学—

上 条 文 夫\*

## 1. 暗黒星雲の原因

「星間塵」(interstellar dust) というのは銀河系内の星間ガスに含まれる固体微粒子のことである。似た言葉に「宇宙塵」というのがあるが、これは惑星間空間から地球に降ってくる塵を意味し、小さな隕石のようなものである。宇宙塵は数ミクロンから数十ミクロンの大きさで鉄を多量に含むものが多いので、一般の星間空間の塵とはかなり違うと考えられる。宇宙塵については島誠(天文月報, 62, 128)を参照されたい。

星間塵の存在は古くから知られていた。天の川の中に見える黒い部分は星間塵を含む星間雲が星の光をさえぎっているからであり、「ダスト雲」(dust cloud) という。俗にいう「暗黒星雲」である。また、遠くの星の光は星間塵に吸収散乱されて 1 kpc で約 1 等暗くなり、また、夕日が赤く見えるのと同じ原理で赤くなる。星間ガス原子は 1 cc に 1~10 コあるが、星間塵は一辺 100 m のサイコロの中に 1 コ程度であり、大きさは 0.1  $\mu$  程度といわれる。

現代の天文学で星間塵は、星間ガスが収縮して星が生れる時の冷却源としてや、塵の表面での星間分子の生成等で重要であり、ダストと星間分子雲の関連も論じられている(森本雅樹:天文月報, 66, 59)。最近 は 赤外線天文学の発達による星間空間や恒星の周辺の塵に関する情報は急激に増した。

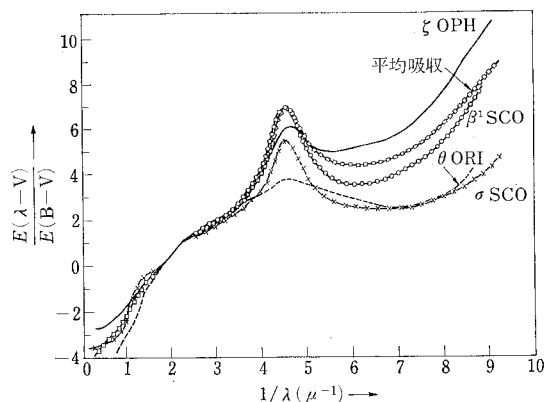
## 2. かんむり座 R 変光星

昔は気体分子の衝突により段々に複雑な分子ができ、それが塵にまで成長すると思われていた。しかし、2 MeV 程度の低エネルギー宇宙線との衝突により 10 $\text{\AA}$  以下の塵はこわれてしまうので、どこか密度の濃い所で塵の“タネ”を作らなければならない。このような場所として、星が生れつつあるような非常に濃い星間雲と、ガスを吹き出しているような星、つまり M 型超巨星や C

型星 (特にミラ型変光星)、新星、牡牛座 T 型星、かんむり座 R 型星等が考えられる。

実際、赤外線観測でこれらの星の周囲に塵があることが確認されている。さらにミラ型変光星を変光の一周期にわたり可視光線と赤外線と偏光を観測すると塵ができつつある様子がわかる。へび座新星も出現直後からだんだん減光していく過程を可視光線と赤外線と観測すると、星からはき出されたガスが次第に冷えてダストが生れていく様子が示される。かんむり座 R 星は水素がほとんど無くヘリウムと炭素を主成分とする星で、時々急に何等か暗くなり数ヶ月間かかってゆっくり元に戻る。「星からガスが吹き出し冷えて固体炭素粒子ができ、星の光を吸収してその粒子の熱輻射として赤外域で放出している」という仮説が昔作られたが、減光している時の赤外線観測が続けられた結果、この仮説が最近38年ぶりに立証された。

さて、残念なことに、星間塵の化学組成はわかっていない。気体の場合、原子のエネルギー準位の差に相当する波長の光を吸収して吸収線を生ずるので 2~3 本の吸収線からでもその元素の同定ができるが、固体では非常に難しい。紫外域に価電子帯と伝導帯の間の遷移による基礎吸収帯、励起子吸収その他があり、赤外域には結晶



第 1 図 星間吸収曲線  
(Bless, Savage: *Ap. J.*, 171 による)

\* 東京大学理学部天文学教室

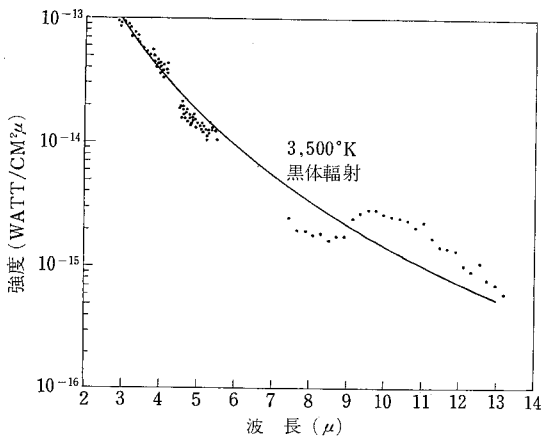
Fumio Kamijo: Nucleation of Interstellar Dust

格子の光学型振動による吸収がある。それも結晶の不完全性や不純物により変る。一般に微粒子が球形の場合は、粒子の複素屈折率を与えれば光の散乱・吸収問題は解析的に解け、ミー (Mie) 散乱とよばれる。また、光の波長よりずっと小さな金属粒子の場合、粒子の大きさに関係なく決った波長 (普通可視域) にプラズマ共鳴による吸収を生ずる。だが逆に星の光の空間赤化つまり波長による星の光の減光の違いから塵の大きさや化学組成を出すのは不可能に近い。紫外域の星間吸収のピーク (第1図参照) がグラファイトの基礎吸収帯の吸収端と一致するからグラファイト説がある。また、M型超巨星や赤外線星にある  $10\mu$  附近の輻射ピークが珪酸塩類の格子振動の振動数に相当するし、しかもこのピークは温度等の物理的条件の違う H II 領域の中や彗星にもあり、珪酸塩鉱物は地球の造岩鉱物としてありふれているからもっともらしいというのが星間塵は珪酸塩という説の根拠である (第2図参照)。星間ガスの化学組成から見て、水に不純物が混ったものだとする“汚ない水”説は紫外線や赤外線観測の無い昔からあった。

シリカやグラファイトの蒸気圧から見て、珪酸塩が M 型超巨星のまわりで、また、グラファイトが C 型星の大気中でできて不思議はない。実際 C 型星は赤外輻射の波長分布が M 型星と違い、 $19\mu$  での強度が弱い。

### 3. 物性論、ガスが固体粒子になること

さて、固体粒子ができるためには、その物質の分圧が飽和蒸気圧を越えなければいけないが、越えても過飽和の状態でも気体のままでいることも考えられる。次に過飽和蒸気中での液体・固体粒子の生成理論 (nucleation theory) について述べる。



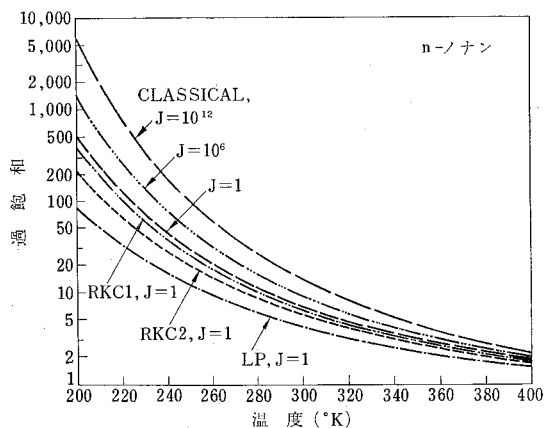
第2図 ケフェウス座  $\mu$  星の赤外スペクトル (Gillette et al.: *Ap. J.*, 154 による)

粒子生成の一番速い極限は、気体分子が衝突すれば必ずくっつき、だんだん大きな固体粒子になるとするもので、他に方法の無い時はよく使われる。逆に遅い極限は自分自身で凝結核を作り、それに気体分子が衝突して成長するとするもので homogeneous nucleation といわれる。ベッカー (Becker), デーリング (Döring) がこの種の理論の元である。

定圧力、定温度での固体と気体の自由エネルギーの差  $\Delta F$  は、その粒子の体積に比例する項 (符号は-) と表面自由エネルギーから来る表面積に比例する項 (符号は+) との和で表わされる。従って粒子の半径が0のとき自由エネルギー差は0であるが、半径が大きくなるにつれて増大し、ある半径—臨界半径  $r_{crit}$ —で最大値  $\Delta F_{crit}$  をとり、さらに半径が大きくなると今度はどんどんへる。状態変化は自由エネルギーが減少する方向に進むから、臨界半径より小さな粒子 (固体ではないが固体と同じ自由エネルギーを持つとされ、cluster とよばれる) は平均としてこわれて気体状態に戻り、臨界半径を越えた粒子は安定な固体粒子へと更に成長していく。ベッカー、デーリングは、① cluster の大きさ分布は定常的、②半径  $r$  の cluster に気体分子がくっついて太る割合は  $\exp(-c/r)$  に比例する、という二つの仮定を使って凝結核生成の速度 (単位時間、単位体積に作られる核の数)  $J$  を求めた。  $J$  は  $\exp(-\Delta F_{crit}/kT)$  の因子を含み、事実上この因子が  $J$  の大きさを決める。

Nucleation theory は工学 (ガラス工業、ポリエチレン工業等) でも重要なのだそうで、その後30年近くの間には沢山論文が出たが目立った変化は無かった。ロッチ (Lothe), パウンド (Pound) は上記の  $\Delta F$  に cluster の並進・回転の影響を加えるべきだと主張した。こうすると  $J$  は非常に大きくなる。一方リース (Reiss), カッツ (Katz) 達はこれに反対し、従来の理論に加えるべき補正因子はロッチ、パウンドの言うように並進・回転分配関数の積ではなく、回転からの寄与は無く、並進分配関数もロッチ、パウンド式の簡単なもので無いと主張した。これによると、 $J$  はベッカー、デーリングよりわずかに大きく、ロッチ、パウンドよりかなり小さい。

この論争はその後も長く続いたが、私の印象では理論家の間でも実験との比較でもリースグループの方が旗色が良い。第3図にカッツ (1970) による3つの理論の比較を示す。天文現象では普通  $1,000^\circ\text{K}$  より高温の所で nucleation が起る。このグラフを右に延ばすとその温度ではどの理論でも過飽和はほとんど1 (つまり過飽和で無い) になる。前に記したように、 $J$  は  $\exp(-\Delta F_{crit}/kT)$



第3図 いろいろな理論による限界過飽和  
(Katz: *J. Stat. Phys.*, 2 による)

のような因子を含むので温度が高くなると急激に増すからである。物理的に言えば過飽和はポテンシャルの障壁の向うの不安定な状態なので温度が高ければ容易にそれを越えてより安定な固体になれるということであろう。だからこそウィルソン霧箱は強く冷却しなければ使えないのである。

実際、前に記したミラ型変光星・新星・牡牛座 T 星型星・かんむり座 R 星型星などで塵が生成されつつあることは既に定説となっており、可視光観測と赤外線観測を比較して直接その様子を調べることがアメリカ等で行なわれつつある。書き忘れたが、イオンが霧の生成のタネになるということは有名で中学生でも知っている。しかし、理論的には良くわかっていない。私の知る限りでは、フレンケル (Frenkel) が上記の  $\Delta F$  の中に cluster 表面の電荷の静電場エネルギーを入れて古典的に説明しているだけである。つまり、イオン自身がタネになるのではなく、既にある cluster がタネになるのを助けるのである。天文の現象のようにイオンだらけの中での核の生成にはこれは使えない。なお、固体表面での薄膜成長の問題も星間塵では重要であるが、八木克道 (日本物理学会誌, 28, 108) または、中田一郎 (日本結晶学会誌, 9, 172) を参照されたい。

#### 4. 実験室で

さて、編集委員氏にこのまじい文を書くことを頼まれ、同時に月報アルバムに我々が実験室で作った“人工星間塵”の写真が載ることになった。天文月報67年の歴史始まって以来の電子顕微鏡写真である。何故こんなことをやっているのか残された紙面で説明したい。

星間塵になりそうな物質を実験室で調べる研究は多いが細かい粉を作った例は比較的少ない。ルフェーブル (Lefèvre) は紀本らが真空槽中で金属微粒子を作ったのに習って星間塵になりそうな物質の微粒子を作った。真空槽を1気圧のアルゴンで満しアークを放電させる。鉄、炭素、石英、炭化珪素等で成功した。彼の主な目的はエアロゾルの状態の時に光を当てて減光を測定し、ミー散乱の式と比較することだった。一方、私達のグループ (中田好一、井口哲夫、藤本真克、高田昌英と筆者) が同じような実験を計画した主目的は凝結核生成の様子を調べることにあつた。東大理学部物理学教室佐々木研究室の御好意で真空槽その他微粒子製造装置を使用させていただき、やや予定より時間がかかったが現在まで続いている。直径 20 cm くらいの真空槽の中の電極の間にタングステンやタンタルのヒーターを繋ぎその上に試料を載せて電流を流す。真空槽は  $10^{-5}$  トル (mmHg) くらいまでひいた後に数トルのアルゴンガスを詰めておく。ヒーターが赤熱し試料は蒸発するがアルゴンガスとの衝突で運動エネルギーを失わない、つまり冷えてガス中で再び固体の微粒子となる。これを電子顕微鏡用試料板 (直径約 3 mm の金属板に直径約 0.1 mm の窓をメッシュ状にあげ、コロジオン膜を張り、さらに炭素膜をその上に蒸着したもので普通「メッシュ」とよばれる) に付着させ、鉱物学教室の電子顕微鏡で写真を撮るというやり方である。アルゴンガスの圧力は圧力計で計り、ヒーターの温度は光温度計で計る。

温度は星間塵生成の時と同じ温度が得られるが問題は圧力である。アルゴンガスの圧力が低すぎると蒸発したガスが十分に冷えず真空槽のガラス壁にガスのまま衝突してそこで固体になり蒸着膜を作ってしまう、微粒子は得られない。これでは反射望遠鏡の主鏡をアルミニウムメッキする時と同じである。微粒子を得るには1トルの程度以上の圧力がどうしても必要である。これに対し宇宙では、炭素星大気中の炭素の分圧は  $10^{-7}$  トル、M型超巨星の周辺空間で  $\text{SiO}_2$  の分圧は  $10^{-12}$  トル、特に濃い星間雲で水素の圧力は  $10^{-13}$  トル、一般の星間空間で  $10^{-16}$  トル。微粒子の生成や成長が cluster や微粒子の気体分子の衝突だけで決まるならば、炭素星大気中の炭素粒子の1日間の変化は実験室で  $10^{-2}$  秒で、M型星のシリカの1年間は  $10^{-4}$  秒でそれぞれ実現されるはずである。気体分子運動論や前記の nucleation 理論を見る限り、次元解析の倍数の大きさに驚きさえしなければ良さそうに見える。しかし、後に結晶等を問題にしますともちろん固体内の物理のもるもるはこの倍数だけで片付くものではない。これはこの種の実験の限界である。

さて、最初我々はアルゴンガス圧をうまく加減すれば蒸着膜になる寸前に生成した粒、つまり前記の限界半径の大きさの微粒子が採取できるはずだと考えていた。だから槽中にヒーターからの距離を変えて3つのメッシュを置き、1番目のメッシュではまだ冷えず気体のまま衝突して膜になるが、2番目から3番目で生れたての奴がひっかかるのでは……とやったが駄目だった。ヒーターの温度コントロールが極めて難しく、全部膜になるかまたは予想される限界半径は  $10\text{\AA}$  の程度なのに  $100\text{\AA}$  の程度の粒ばかりなのである（今までに得られた一番小さい粒は炭素の場合の約  $40\text{\AA}$ ）。しかし、いろいろ温度・圧力を変化させると一つの傾向を得た：「温度が高いほどまた温度が同じならば圧力の高いほど大きな粒になる」。これは、この方法で金属微粒子を作っている東大・名大等の物理学者達の結果と全く同じである。これを私達は次のように単純に理解している：上に記したように得られる粒は  $10\text{\AA}$  の程度のタネに  $100\text{\AA}$  の程度まで気体分子が降り積ったものであろう。温度  $T$  の固体表面から単位時間に蒸発する気体の量は  $T^{1/2} \exp(-E/kT)$  に比例するからヒーターの温度が高いと槽内に吹出すガスの量が多くタネに衝突して太らせやすい。またアルゴンの圧力が高いと蒸発してきたガスを衝突で冷す能率が良いから凝結しやすく太る時間も長い。しかし、沢山のメッシュを使って煙の構造を詳しく調べている八谷繁樹氏（名大工）によると、固体粒子が他の固体粒子とくっついて大きな粒子を作る効果（co-agulation といい、雲の中の水滴の成長等で重要）が効くそうだし、最近では川村清氏（広大理）が詳しい理論を作られたそうなので私達はあまり自信が無い。

現在私達はアルゴンガス中でアーク放電させることにより炭素や鉄の微粒子を作り、またヒーターの物質による汚染を避けるため約  $1\text{ cm}$  離れた銅の電極の片方の上に石英ガラスを載せアルゴンガスを流した中で放電させ（プラズマ・ジェットという）シリカの微粒子を作っている。炭素粒子は  $40\text{\AA} \sim 100\text{\AA}$ 、シリカは  $200\text{\AA} \sim 1,000\text{\AA}$  の大きさ（月報アルバム参照）で電子線回折で調べると両方とも結晶構造をしていない。

前に書いたように星の光の星間吸収の紫外部にあるピーク（第1回参照）が炭素微粒子によるとすると、炭素星で作られ星間空間に吐き出された炭素粒子は生成された時からグラファイトの結晶だったのだろうか？

将来、人工衛星から炭素星の附近を通ってくるO型星

・B型星等の光の紫外線観測をする必要がある。我々の実験の際に真空槽中に石英ガラスの試料板を置き炭素粒子を付着させて分光器で紫外線吸収を計ると吸収ピークは、幅数十 $\text{\AA}$ の低い山でしかなく、全く星間吸収を説明することはできない。

我々の実験結果や一般に実験室でグラファイト結晶を作ることが難しいという事実からみて、炭素星での生成時から結晶化しているとは考えにくく、星間紫外線吸収グラファイト説は怪しくなるかもしれない。

シリカその他の微粒子がどんな姿をしているか見るのもこの実験の一つの目的である。シリカが球形なのはよく言われるように液体の状態を通っているのかもしれない。今までの経験だと金属・金属酸化物その他この実験で作った粉の全てはこのシリカの写真のようにブドウの房のように繋がっている。何故こうなるのか私にもよく理解できない。鉄のように磁気能率を持つ粒子はその相互作用で、またシリカ等は紫外線の吸収による光電離で粒子が電荷を持ち、その相互作用で房になるという説がある。どの物質でも一つ一つの粒の大きさは  $100\text{\AA}$  の程度で星間塵の大きさ  $1,000\text{\AA}$  程度より1桁小さい。実際の星間塵もこのようなブドウの房のなかかもしれない。

私達はシリカから始めてだんだん複雑な珪酸塩（輝石・カンラン石・斜長石……）の微粒子を作りたいと思っているが融点が高く難しい。プラズマ・ジェットのほかにレーザーを使用することも計画している。また、現在使える分光器は  $2,000\text{\AA} \sim 2.6\mu$  の波長域でしか計れないので、さらに遠赤外まで使える分光器を見つけて、微粒子の赤外吸収等が粒子の大きさによりどう変わるかも調べ、ミー散乱等の理論や星の観測と比較したい。

さて、あまり多くの人はやらない妙な仕事に首を突っこんでから一年以上になる。試行錯誤の連続だったが結構楽しかった。特に鉱物学教室の薄暗い地下室で電子顕微鏡で極微の世界を覗く時はある種的神秘感を感じ、岡山の山の上で大望遠鏡にかじりついて深夜星を追いかけている時と一脈相通ずる気分だった。

☆ ☆ ☆

いろいろお教えいただきまたお世話になった佐々木亘・小林俊一両氏その他佐々木研究室の皆様や川村清氏（広大理）、八谷繁樹氏（名大工）に深く感謝する。