宇宙じん

Cosmic Dust

日下 遼*

Takashi Kusaka

1. はじめに

星間空間（星と星との間の空間）にさまざまな種類の暗黒星雲やグロビュール（たとえば、天の川の写真をとった時、星が一面にべったり写っている領域に、暗い斑点のように写っている部分）が散在していること。すなわち、これらの雲は、その主要構成要素である微粒子（大きさ $\sim 10^{-5}\text{cm}$ で grain とか dust といわれる）によって、背後の星の光が吸収、散乱されるために暗くなる。また、星の光が星間の微粒子によって、波長の短い（青い）光が散乱されて赤みをおびる現象（星間赤化）などから、星間空間に微粒子が存在するということは疑いないものと考えられる。

さらに、最近では、赤外線観測の発展により低温度（ 2000°K 以下）の天体の情報が得られるようになり、赤外線波長域（波長 $2\mu\sim 1000\mu$ ）で強い輻射を放射する天体がいくつも見出された。それらの赤外線源は、星のまわりをとりまいていく微粒子とガスから成る雲であるものが少なくない。すなわち、雲の中心にある星の光をそのまわりの微粒子が吸収し、微粒子の熱輻射によって赤外線輻射を説明しようとするものである。低温の星のまわりにも微粒子が存在するということもまた確からしい。

また、星の光が偏光することからも、星間の微粒子の情報が得られる。偏光は銀河の磁場によって一様に並べられた微粒子に起因する。

このように、われわれの銀河系内に微粒子が存在することは疑いないことであるが、これまで、その微粒子を実際に見た人はいない。種々の観測から間接的に知られるだけである。

ここでは、ロケット、人工衛星による紫外線波長域での観測や、赤外線波長域での観測によって得られた微粒

子の特性と、微粒子の生成および微粒子の天体での役割について簡単に述べてみたいと思う。

2. 観測から得られる微粒子の情報

1) 赤化現象 (reddening または extinction)

星間にある微粒子によって青い波長の光は散乱されるが、赤い波長の光は散乱されずに透過する。そのため、星の光は赤みをおびることになる。これは、太陽が夕方、西の空にしずむ時、赤く見えるという現象と同じである。この赤化現象を利用して、星間の微粒子の情報を知ることができる。簡単にいえば、同じスペクトル型の星で、赤化している星と赤化していない星との等級の比較から決められる。ある星の波長 λ における見かけの等級（観測される等級） $m(\lambda)$ は、星までの距離 r (pc) の単位： $1\text{pc}=3.1\times 10^{18}\text{cm}$ ）と絶対等級 $M(\lambda)$ により

$$m(\lambda) = M(\lambda) + 5\log(r/10) + A(\lambda)$$

によって表わされる。ここで、 $A(\lambda)$ が等級で表わされた星間吸収の量である。もしスペクトル型の同じ星で赤化しているのとなない星との等級の差が分れば簡単に $A(\lambda)$ は決まるわけである。しかし、実際にはそう簡単には $A(\lambda)$ は決められない。どの星もわれわれから非常に遠方にあるので、程度の差はあれすべて赤化していると考えるのが自然である。

最近では、多色測光によって、星間吸収の割合を種々の波長域で測定することができるようになった。星間吸収の種々の波長域での観測結果が図1に示されている¹⁾。

図1から分るように、紫外線領域では種々の星によって変化しているが、 $4.6\mu^{-1}$ ($2175\text{\AA}$) 付近にピークがあり、 $5.5\sim 7.5\mu^{-1}$ の間で極小になる。可視領域では、 $2.3\mu^{-1}$ 付近で傾きに変化している。一方、赤外線領域でもまた星によって異なっているが、これは、星のまわりの微粒子の影響であると考えられる。

星間の微粒子の組成、大きさは、このような星間吸収

昭和51年10月30日受理

* 金沢工業大学（〒921 金沢市野々市町南が丘 7-1）

TEL 0762-48-1100

図1 星間吸収の曲線

の量から間接的に推定することができる。その方法は次のようである。ある星を波長 λ_i , λ_j で観測した時の color excess $E(\lambda_i - \lambda_j) \equiv (m(\lambda_i) - m(\lambda_j)) - (M(\lambda_i) - M(\lambda_j)) = A(\lambda_i) - A(\lambda_j)$ のように定義する。そうすると, color excess $E(\lambda_i - \lambda_j)$ は星間の吸収量のみによって表わされる。しかも, $E(\lambda_i - \lambda_j)$ は星の距離には関係なくなり, その上, $M(\lambda)$ は星のスペクトル型に対して決められているので, 観測量 $m(\lambda_i) - m(\lambda_j)$ のみで決められるという利点がある。また, 星間の輻射輸送の考えから理論的に, 星間吸収量 $A(\lambda) = 1.086 N \sigma$ によって表わされる²⁾。Nは星の視線方向の単位面積あたりの微粒子の個数, σ は吸収, 散乱の全断面積である。普通, 微粒子の半径 a を使って, $\sigma = Q \pi a^2$ と表わす。Qは efficiency factor である。Mie の散乱理論を使えば, Qが分るので, 規格化された color excess $E(\lambda - B)/E(B - V) = (Q(\lambda) - Q(V))/(Q(B) - Q(V))$ で計算できる。ここで, B, Vは青(blue), 可視(visual)の波長を表わす。もし, 微粒子に size 分布 $n(a)$ があれば

$$Q(\lambda) = \int \pi a^2 Q(a, \lambda) n(a) da$$

で計算できる。このようにして, 観測量を再現できるように, 微粒子の組成と大きさを決めるわけである。観測量に一致させる微粒子のモデルが種々の人によって計算

されている。たとえば, 氷, グラファイト, シリケートなどがある¹⁾。氷の微粒子(大きさ $\sim 0.1 \mu$)は $4 \mu^{-1}$ 以下のところまでは, 観測された吸収曲線(extinction curve)にうまく一致するが, それを越えると急に下がってしまう。グラファイト(大きさ $\sim 0.02 \mu$)は, $4.7 \mu^{-1}$ のピークとそれより短い波長域ではよいが, 長い波長域では観測された曲線にうまく一致しない。また, シリケート(たとえば, $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$ のようなもの)は, $4.7 \mu^{-1}$ ピークより長い波長域ではよいが短い波長域では駄目である。しかし, グラファイトは星間微粒子の構成要素の1つであると思われる強い証拠がある。それは, グラファイトにある $2200 \text{\AA}$ の強い吸収帯によって説明できるからである。この吸収曲線から, 星間微粒子は, 小さいグラファイトを1つの構成要素とし, 可視領域の吸収を説明できるより大きい微粒子と紫外線領域で星間吸収を増大させるような小さな微粒子の混合物であるということが予想される。

2) Diffuse Galactic Light

diffuse galactic lightは, 星の光が星間の微粒子によって散乱された光である。これは, 夜空がぼっと明るくなっている現象によって知られる。この diffuse galactic light の観測によって, 微粒子の反射率(albedo) r と phase factor g が推定される。反射率 r は, 光の散乱断面積と全断面積の比によって与えられる。微粒子に入

図2 微粒子の albedo

射した光がすべて散乱されれば $r = 1$ であり、入射光がすべて微粒子に吸収されれば $r = 0$ になる。 g は入射した光が微粒子によってどんな分布で散乱されるかを示す量で、等方に散乱される時には $g = 0$ 、前方に散乱される時には $g = 1$ である。これら g , r は物質によって異なるので、それによってもまた微粒子の性質が分る。ここでもまた、観測結果から直接 r , g が得られるのではなく、理論的な考察により間接的に得られる。

地上からの diffuse galactic light の観測は、地球大気による散乱光や黄道光の光が入るので非常に難しい。近頃では、人工衛星による観測が行なわれるようになり、地球の大気による散乱光は考えなくてすむようになった。Witt 達は、人工衛星による観測の解析結果、図2のような微粒子の albedo を得た³⁾。

それによると、大体 0.2μ のところに深いピークがある。これは、図1の 0.2μ における極大点と一致している。波長が 0.2μ より短くなると albedo は大きくなり、波長が長くなると albedo は ~ 0.5 になる。しかも、Witt 達は、 $1800\text{\AA}$ 位までは前方散乱で、それより波長が短くなると等方散乱になるということを示した。ここでもまた、 0.2μ の深いピークは、グラファイトの吸収によると考えればよいということを暗示している。 $1500\text{\AA}$ で高い albedo を示していることは、透明でかなり小さい微粒子がなければならないということを示している。このことは、図1の短い波長域で赤化現象を説明する場合と矛盾しない。

3) 赤外線星

10年程前までは、われわれは表面温度が 2000°K ~ 10000°K の星の知識を大望遠鏡を使って得て来た。しかし、表面温度が 2000°K あるいはそれ以下の温度の天体が存在しているということを知らなかった。それらの天体は、大部分のエネルギーを波長 $1\mu \sim 1000\mu$ の間の赤外線

図3 赤外線星 ((C) R Mon, (D) T Tau, (E) VY CMa, (F) NML Cyg)

として放射しており、地球大気にさえぎられて見えなかったためである。大気の透過率が50%以上の赤外線の窓は、余り多くないので、地上からの観測にはおのずから観測波長に制約がつく。最近では、非常に高空を飛ぶ飛行機や気球、ロケットを使った観測が行なわれるようになり、その結果、非常に多くの赤外線星が見つかった。赤外線星の輻射スペクトルが図3に示されている⁴⁾。これらの星は普通の星ではなく、大部分の輻射源は微粒子とガスから成る雲であることがわかって来た。ある場合には、星のまわりを微粒子とガスの雲がおおっているように見える。

図3の一角獣座のR星 (R Mon.) という星がその様子をよく表わしている。つまり、大部分の輻射は、星のまわりの微粒子による赤外線輻射であるが、 $\sim 0.5\mu$ 付近に中心星によると思われる輻射が表われている。また、赤外線星は、星の進化の最も初期の状態にある低温で希薄な微粒子とガスから成る雲であるとも解釈できる。ともかく、天体の赤外線輻射は、微粒子の熱輻射によらなければ説明がつかない。

Gillet 達は、オリオンにある Becklin-Neugebauer 赤外線星の赤外線吸収スペクトルを観測し、図4の結果を得た⁵⁾。それによると、 3.1μ と 9.7μ 付近に強い吸収帯があることが分る。 3.1μ の吸収は、 H_2O の氷の吸収帯に依るものであり、 9.7μ の吸収は、 Si-O の吸収帯に依るものである。

図 4 Becklin-Neugebauer 星のスペクトル

るものと考えられている。

また、銀河中心方向の赤外線吸収の観測からも、 $\sim 10\mu$ 付近に吸収帯があるということが分っている⁶⁾。この $\sim 10\mu$ の吸収も、Si-Oの吸収帯によると考えられている。

これまでの観測結果から、星間吸収の $4.7\mu^{-1}$ のピークと albedo の 2.2μ の深いピークを説明する比較的小さな($\sim 0.02\mu$) グラファイトの粒子と赤外線、可視領域の吸収を説明する比較的大きな($\geq 0.1\mu$) シリケート、氷の粒子は存在しているということが推定される。しかし、紫外線領域で増大する吸収量を示し、しかも非常に高い albedo を持った粒子は何であるかはまだよく分っていない。

3. 微粒子の生成

まず、星間微粒子の空間密度について考えてみたい。星間物質は、ガスと微粒子から構成されており、われわれ太陽系近傍においては $\sim 10^{-24}\text{g/cm}^3$ 、水素原子の個数にして1個/ cm^3 程度であり、ガスを構成している元素は表1に示されているように、主にH、HeそれにC、N、

表 1 宇宙の代表的な元素の組成

元素	原子番号	相対個数密度 (単位 log n)
H	1	12.00
He	2	10.93
C	6	8.52
N	7	7.96
O	8	8.82
Mg	12	7.42
Si	14	7.52
Fe	26	7.60

Oなどの重元素から成っている⁷⁾。質量比では、大体、水素70%、ヘリウム30%、重元素2%である。

星間微粒子の密度は星の赤化現象から推定される。銀河の赤道近傍で、星間吸収の量は可視領域では ~ 1 等級/kpc であるといわれている。これだけの吸収量を説明するには、 10^{-26}g/cm^3 の微粒子(10^{-5}cm)があればよい。この量は、微粒子が重元素から構成されているとすれば、星間密度に矛盾しない。もし、電子や原子、分子でその赤化現象を説明しようとする、星間の密度よりはるかに高い密度を要求する²⁾。微粒子の比重1、大きさ 10^{-5}cm であるとする、微粒子の個数密度は 10^{-12}個/cm^3 になる。この密度は平均的なもので、星間には種々の大きさ、形の暗黒星雲があるように、決して星間

空間は一様ではない。たとえば、水素にして 10^4個/cm^3 以上の高い密度のグローブールもある。標準的な星間雲の密度は、水素原子 10個/cm^3 で $\sim$ 数Km/secの乱流速度で運動している⁷⁾(表2参照)。そのような雲の中では、重元素たとえば炭素の相互の衝突時間は $\sim 10^4$ 年、つまり、 $\sim 10^4$ 年に1回衝突する。このような密度のうすいところで微粒子がつくられたということはありそうになり。

微粒子の大部分は赤外線を放射する低温度の星やそれに類似の天体の広がった密度の高い大気中で生成されたのであろう。また、ある微粒子は、新星、超新星の爆発の際の副産物として星間空間に放出されたのかもしれない。低温度の星の大気での微粒子の形成は多くの人によって考えられている。それらは古典的な nucleation の理論を使っている。nucleation が起こるためにはもちろん、過飽和状態のガスが必要である。過飽和状態での nucleation の基本的な考えは次のようである。半径 r の球形のかたまりが形成されるための自由エネルギー ΔG を考えると、 ΔG は図5のように表わされる。半径 r_* になるまで自由エネルギーは増加し、それを過ぎると減少する。いい変えれば、かたまりの大きさが r_* より小さい時には蒸発し、 r_* より大きければ安定なかたまりが

表 2 標準的な星間雲の特徴

雲の大きさ	8pc
個数密度	$8 \times 10^{-5} \text{ pc}^{-3}$
視線方向の平均2乗速度	9Km/sec
ガスの密度	8個/ cm^3
温度 (H I 領域)	100°K
(H II 領域)	10000°K

図5 半径 r の微粒子が形成されるための自由エネルギー

つくられる。 r_* 程度のかたまりに衝突した原子は、そのかたまりにくっつくであろう。その結果、安定なかたまり (nuclei) が形成される。

Donn 達は、温度の低い大気で炭素元素のほとんどがかたまりになり、 ~ 1 年位で $10^{-6}\text{cm} \sim 10^{-5}\text{cm}$ に成長するといっている²⁾。このようにして、星の大気で形成された微粒子が星の輻射圧によって星間空間に放出されたと考えるのである。

次に、そのような微粒子によって星間の微粒子の量を説明できるかを考えてみたい¹⁾。星間の微粒子の密度は $\sim 10^{-26}\text{g/cm}^3$ であるから、これはまた $\sim 10^{-4}M_{\odot}/(\text{pc})^3$ ($M_{\odot}$ は太陽の質量を表わす。 $1M_{\odot} = 2 \times 10^{33}\text{g}$) と表わされる。微粒子の寿命が 10^9 年よりは長くはないとすれば、微粒子が形成される平均の割合は $10^{-13}M_{\odot}\text{pc}^{-3}\text{y}^{-1}$ でなければならない。最近の星からの質量放出の考えから、すべての星からの質量放出は $10^{-12}M_{\odot}\text{pc}^{-3}\text{y}^{-1}$ よりは多くないということが分っている。質量放出のうち、かたまりになり得る量 (H, He より重い元素) は宇宙の元素組成より質量放出の 10^{-2} 程度である。これから、観測された微粒子の $\sim 10\%$ は星の大気で形成されたと考えられる。残りの量はどうかというと、星の大気から星間雲に放出された微粒子を“微粒子のたね”と考え、星間雲の中で原子、分子と衝突し成長したとする。しかし、一方では、星間雲相互の衝突により微粒子は蒸発するであろう。また、小さい微粒子は低エネルギーの宇宙線によっても蒸発する。このような過程の詳細についてはまだよく分っていないので、星間雲でどの程度成長したかは疑問である。

4. 微粒子の天体での役割

これまで述べて来たように、星間の微粒子の性質は非

常にあいまいではあるが、微粒子は“存在する”ということによって、かなりうまく天体現象を説明できる例を簡単に述べてみたい。

1) 星間分子の形成

多くの分子が星間で発見されている⁶⁾。しかも、ホルムアルデヒド、メチルアルコールなどの多原子分子からなる分子も多く発見されている。これらの分子は、微粒子がかなり存在している高い密度の領域で見つかっている。暗黒星雲でみつかったホルムアルデヒドなどの分子の電波観測から、暗黒星雲内部の温度は非常に低温である ($\leq 10^\circ\text{K}$) ということが分った⁴⁾。これら暗黒星雲や大きなグロービュールの内部は、分子形成に適していると考えるのはほとんど疑う余地がないようである。このような雲の中では、非常に冷たい微粒子にガスの原子が衝突、付着し微粒子の小さな表面でそれらの原子がくっついて分子を形成する。しかも都合がよいことに、微粒子があるために暗黒星雲やグロービュールの内部に入り込むかもしれない紫外線をさえぎる。分子がうまく形成されるためには、低温でしかも紫外線が当たらないことが必要だからである。とも角、分子形成には微粒子の表面における反応が関与していることは確からしい。しかし、現在のところ、微粒子の表面での反応は、微粒子の組成によるため、ほとんどが分っていない。

2) 星の形成

星は暗黒星雲自身の重力収縮によって形成されると考えられている。たとえば、グロービュールは暗黒星雲が収縮して原始星 (protostar) になる最終段階の 1 つの姿であるとも考えられている。

星間雲が十分収縮できるためには、雲の熱エネルギー (ガスの運動エネルギー) が雲の外へ運ばれねばならない。雲の重力収縮により重力エネルギーの一部が熱エネルギーに変ることによって、雲の熱エネルギーが増加する。この熱エネルギーが雲の外へ運ばれれば、雲は増々重力収縮することになる。熱を雲の外へ運ぶ役割をするのが微粒子である。微粒子は、ガスとの衝突によりそれらの運動エネルギーを得る、そして、微粒子の熱輻射 (赤外線輻射) としてエネルギーを雲の外へ運ぶというわけである。微粒子が冷却剤として最も効果的なのは水素原子 10^4 個/ cm^3 以上の雲である。もちろん、水素 10 個/ cm^3 のグロービュールは星間空間に存在している。また、赤外線星は、星が形成される初期の段階に対応しているというのはこの理由でもある。

3) 惑星系の形成

星が形成された時、星のまわりには微粒子とガスから成る雲がとりまいてはいるはずである。星 (原始太陽) の

表 3 太陽系内のかたまりの大きさ

かたまりの種類		質量 (単位 g)
微 粒 子		$\sim 10^{-12}$
隕 石		平均 $\sim 10^5$
彗 星		平均 $\sim 10^{17}$
小 惑 星		$10^{14} \sim 10^{24}$
衛 星		$10^{23} \sim 10^{26}$
惑 星		$10^{26} \sim 10^{30}$
太 陽		2×10^{33}

まわりの雲の中にある微粒子相互の衝突により、ある程度成長した微粒子は赤道面に沈殿し、赤道面付近に密度の高いうすい層ができる。この層は重力的に不安定であるため $\sim 10^{19}\text{g}$ (比較のために、地球の質量は $6 \times 10^{27}\text{g}$) の“かたまり” (planetesimal) に分裂する⁸⁾。これらのかたまりがさらに相互の衝突 (直接衝突、あるいは、かたまり相互の重力による衝突) を繰り返すことによって成長し、惑星になる。というモデルが提唱されている⁹⁾、¹⁰⁾。このモデルはかなり魅力的なものと考えられている。ここで、われわれ太陽系内にある“かたまり”の大きさの分布を表3に示しておく⁷⁾。

表3に示された種々の大きさのかたまりが、ガスと微粒子の雲からいかにして生成したかということが解明さ

れない限り、われわれ地球の起源が分ったということにならない。この例からも分るように、天体では、 $\sim \mu$ の大きさから $\sim$ 数百Kmの大きさの粒子の衝突の物理が必要である。

5. おわりに

これまで、低温度の星のまわりとか低温の星間雲にある微粒子について述べて来た。しかし、微粒子は、高温 ($\sim 10^4\text{K}$) のH II 領域 (明るい星やそれらの星団のまわりとか星間雲と星間雲の間に水素原子が電離している領域) にも存在していることが分っている⁶⁾。このことから、微粒子は能率より赤外線輻射体であることを考慮して、 $\sim 1000^\circ\text{K}$ でも蒸発しない粒子であるという情報が得られる。微粒子の情報を得る観測には、ここで述べた以外にもまだあるが、現在のところ、微粒子の組成、形、大きさの分布などについてはよく分っていない。天体とわれわれ地球上とでは、微粒子がおかれている環境が全く異なっているにしても、それらの粒子の光学的な性質や物性的な性質などの実験、理論的研究は、天体の粒子の解明にとっても非常に重要である。

参 考 文 献

- 1) Aannestad, Per A *et al.*: *Ann. Rev. Astron. Astrop.*, 11, 309 (1973)
- 2) Wickramasinghe, N.C.: *Interstellar Grain* (1967), Chapman & Hall
- 3) Witt, A. N., Lillie, C. F.: *Astron. Ap.*, 25, 397 (1973)
- 4) Lynds, B. T. ed.: *Dark Nebula, Globules and Protostars* (1971), The University of Arizona Press
- 5) Gillet, F. C., Forrest, W. J.: *Ap. J.*, 179, 483 (1973)
- 6) Greenberg, J. M., van de Hulst, H. C. ed.: *Interstellar Dust and Related Topics* (1973), D. Reidel Publishing Company
- 7) Allen, C. W.: *Astrophysical Quantities* (1973), The Athlone Press
- 8) Goldreich, P., Ward, W. D.: *Ap. J.*, 183, 1051 (1973)
- 9) Kusaka, T., Nakano, T., Hayashi, C.: *Prog. Theor. Phys.*, 44, 1580 (1970)
- 10) Hayashi, C., Adachi, I., Nakazawa, K.: *Prog. Theor. Phys.*, 55, 945 (1976)

著 者 紹 介

略 歴

昭和18年生れ

昭和41年名古屋大学理学部物理学科を卒業した後、京都大学大学院で天体核物理学を専攻する。

昭和48年より金沢工業大学計算機センターに在職。

現在、教授