

惑星間塵と彗星

向井 正*

宇宙にはほぼ 10^{-4} センチメートルの大きさをした固体微粒子（以下では塵と呼ぶ）が存在する。その量は地球近傍で1キロメートル立方内に数個とごくわずかではあるが、様々な天体現象においてこの塵が果す役割は大きい。その形についてはよく判っていない。ほとんどの場合、これらは滑らかな表面をした球として扱われている。しかし宇宙線にさらされた表面はざらざらだろうし、形もいびつな方が自然のように思われる。今のところ不規則な形をした物体が電磁波を吸収・散乱する様子が数学的にうまく扱えないために、近似解で話を進めている。じゃがいものように表面はでこぼこだが全体としてみると球形に近い物体が、球とほぼ同じように光を散乱することや、円筒形をしたものによる光の吸収が同じ容量の球とそれほど大きな差がない（塵を扱う者にとっては、数十パーセント位の違いなら目をつぶるのが常である）ことが知られているので、塵を球と近似することはそれ程悪くはないであろう。

塵は存在する場所によって、星周・星間・惑星間といった形容詞が頭についてくる。もっかのところ塵についての最大の関心事は、塵がどのような物質からできているかということである。ここでは黄道面に沿って存在している惑星間塵について、どんなものからできており、またどこからやってきたのかということと彗星と結びつけながら話してみたい。

F コロナ

太陽には電子が太陽光を散乱している K コロナと塵の散乱による F コロナとがある。太陽のまわりをケプラー運動している塵はポインティング・ロバートソン効果によって徐々に太陽に落ち込んでいくが（天文月報 65 巻 7 月号の斉藤馨児氏の解説参照）、地球軌道にある粒径 1 ミクロンの塵ではその寿命がおよそ 1000 年といわれている。太陽に近づいた塵は昇華作用のためにある距離より内側には入り込めない。この位置は塵の物性（光学定数・昇華温度）を反映するので、これを利用して太陽近くの塵の成分を推定することができる。暖められた塵の熱輻射を測定して‘塵が消えてしまう領域’をさがす試みが行なわれた。1966 年 11 月 12 日の皆既日食の際にアメリカのピーターソンとマクフィーンは赤外線検出器（波長 2.2 ミクロン）を使って、別々にこの測定に成

功した。図 1 に 1967 年にマクフィーンが風船にコロナ・グラフを載せて追試した結果を示す。これをみると F コロナの塵には 4 倍の太陽半径 ($4R_{\odot}$) の位置で昇華温度に達するものが含まれること、及び輻射の強さの盛りあがりから $4R_{\odot}$ 付近に塵が集っているらしいことが判ってきた。 $4R_{\odot}$ の塵の成分は何か？ どうした原因で塵が溜まっているのだろうか？

塵の温度は太陽に近づくにつれて高くなるが、その上がり方は物質によって異なる。 $4R_{\odot}$ で昇華作用が活発になることは予想できたが、そのときの塵の温度が判らなければ塵の成分は決められない。1970 年 3 月の皆既日食でピーターソンは 3 つの赤外線波長域を使って、熱輻射の強さを測り、 $4R_{\odot}$ の塵の温度を $2160 \pm 200^{\circ}\text{K}$ と推定した。しかし彼はこの測定に自信を持てなかつたのみえて、ちゃんとしたペーパーにまとめていない。その後彼自身も含めて多くの人達が皆既日食のたびに追試を狙ってきたが、一昨年（1978）のアフリカ、昨年（1979）のオーストラリアといずれも悪天候に妨げられて、未だに成功していない。以下の争点は $4R_{\odot}$ の塵の温度、即ちピーターソンの測定を信じるか否かに起因している。

我々は $4R_{\odot}$ の塵を石墨（グラファイト）だと考えている。グラファイトは星間減光を説明する星間塵の成分として古くから取りあげられてきた。これに対してアメリカのカイザーやフランスのラミー達は $4R_{\odot}$ の塵は珪酸塩鉱物（シリケート）だと主張する。シリケートは地球上の岩石の主成分であり、星周塵の有力候補でもある。

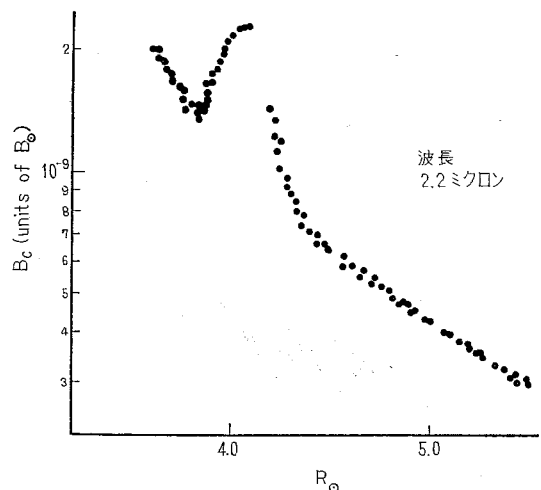


図 1

* 京都大学理学部 Tadashi Mukai
Interplanetary Dust and Comets

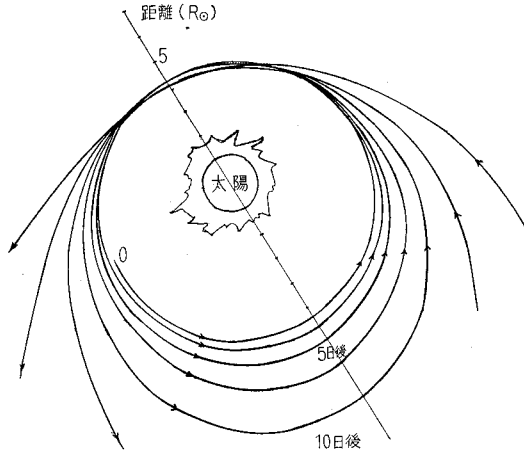


図2 グラファイトの軌跡

はたしていずれが正しいのであろうか。まず塵が‘雲’をつくる話から始めよう。太陽近くの塵の運動を追跡してみると塵の粒径が減るに従って、塵に働く輻射圧がみかけ上増加し、(これは輻射圧は粒径の2乗に、重力は3乗に比例するため)太陽への落ち込みにブレーキがかかるのが判った。図2に塵を外方向におしだそうとする輻射圧と、引き込もうとするポインティング・ロバートソン効果とが $4R_0$ 付近で釣り合いを保った後、塵の軌道がふくらみだしたところを描いている。塵の成分はグラファイトで、 $4R_0$ 付近で軌道が混みあっているのがよく判る。高速道路の出口付近が混雑するのと同じ理由で、昇華作用によってブレーキがかかる領域では塵の空間密度が増える。しかし太陽のまわりにドーナツ状の塵の‘雲’ができていたとしても、土星の輪のように華やかなものではない。塵の空間密度がまわりに比べて数倍程度増えただけのごくささやかな‘雲’にしかすぎない。

グラファイト派もシリケイト派もこれを使って塵の集積を説明しているが、そのときの塵の温度が両者で大きく違っている。計算によるとグラファイトは $4R_0$ でほぼ 2100°K となり昇華が活発となる。一方シリケイトも $4R_0$ で昇華は増すがその温度は 1000°K と低い。惑星間塵の温度は可視波長域の光の吸収率に大きく左右されるので、シリケイトよりも‘黒っぽい’グラファイトの方が高い温度となる。しかし後で述べるように、シリケイトは彗星塵として太陽系内にまき散らされていることが判っておりすこぶるうけの良い候補である。もちろんシリケイト派はピーターソンの温度を信じていない。我々の頼りはピーターソンの温度であるが、太陽系内にグラファイトが存在するという傍証に乏しく、旗色はあまり良くない。もちろん我々もFコロナの塵成分として、シリケイトが含まれていることは予想している。むしろ量的にはグラファイトの10倍以上のシリケイトが存在

していると考えている。しかし我々の計算ではシリケイトの‘雲’は $9\sim 10R_0$ 付近にできるはずで、マクティーンが風船の観測でみつけている $4R_0$ より外側の熱輻射の盛り上がり($4R_0$ 程際立っていないが、複数個の盛り上がりがあるが $8\sim 10R_0$ にかけてみつまっている)に対応すると思っている。いずれにしても $4R_0$ の塵の温度が追試されれば、この争いにも結着がつくであろう。

さてこうしたFコロナの塵がどこからやってきたのかについてはまだよく判っていない。太陽系が誕生したころに惑星になりきれずに取り残された塵が、かなり遠方まで拡っていたとしても、ポインティング・ロバートソン効果によって既に太陽に落ち込んでいる。現在の惑星間塵を供給する源としては(1)彗星、(2)小惑星帯、(3)星間塵の浸み込み、(4)太陽黒点で生成、等が考えられてきた、(4)は奇抜な説で、大気上空で塵を採集してきたアメリカのヘミングウェイ達がいだした。彼らが捕獲した塵に重元素が豊富なことと、塵の軌道を逆にたどっていくと太陽にいきつくということを根拠としているが、資料となる塵の数が少ないこともあってあまりとりあげられてはいない。最近小惑星帯を通過して木星へむかった人工惑星パイオニア10号から、惑星間塵についての興味深い情報が得られた。それによると、小惑星帯通過に際しても塵との衝突は増えず、黄道光の測定をみても4天文単位より外側にはほとんど塵が存在しないらしい。これが事実とすれば(2)や(3)の説も怪しくなってくる。以下では惑星間塵の最も信頼できる供給源として、彗星からの塵をとりあげて話をつづけよう。

彗星塵

彗星が‘プラズマの尾’と‘塵の尾’を持っていることはよく知られている。いつもこの2つがみえるとは限らないが、明かるい彗星程立派な‘塵の尾’をひいている。この塵の大きさは、散乱された太陽の連続光が少し赤味がかかることから 10^{-4} センチメートル(ミクロン)の単位だといわれてきた。彗星の頭部から塵が太陽の輻射圧やプラズマ流に運ばれて、太陽系内に拡散していく様子は力学的に説明されているが、ここでは触れないことにする。我々の興味はこの塵の成分を知ることにある。ひとつの方法として彗星の頭部でみつまっている気体分子の親を探すことが挙げられる。様々の分子が彗星大気中の化学反応によってつくられてくるが(本誌の清水幹夫氏の解説参照)、これを逆にたどっていくと、多くは水の分子にいきつく。これから彗星塵の候補として氷が登場した。アンモニアやメタンといった不純物を含んだ氷の塵が寄り集って、半径数十キロメートルの塊りとなったのが彗星の‘芯’らしい。太陽に近づくにつれて氷の塵を閉じ込めていた‘にかわ’が気化して流れだすと、

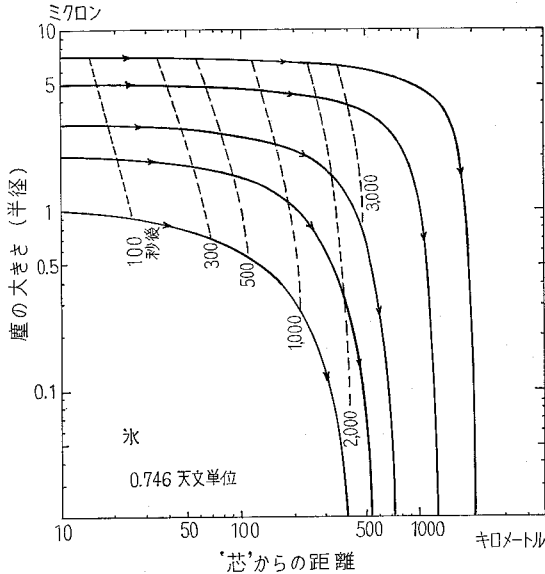


図 3 彗星大気での水の運動

水の塵も流れに乗って‘芯’から拡がり始める。これが彗星の‘見えはじめ’で彗星が太陽から2~3天文単位に近づいたところで生じる。しかし氷の昇華温度は低いので(惑星間空間では100~150°K)、彗星が地球軌道より内側に入ってくると彗星大気ではミクロン・サイズの氷の塵は生き残れそうにない。その様子を調べたのが図3である。彗星が太陽から0.75天文単位の位置にあるとき‘芯’から気体に乗って飛び出した氷の塵が時間の経過につれて、どのように振舞うかが示されている。これをみると、ミクロン・サイズの氷の塵は彗星頭部の拡がり(約1万キロメートル)を通過しないうちに昇華作用によって消えてしまう。地球軌道より内側に入った彗星の大気中にも太陽光を散乱する塵がみつまっていることから、彗星には氷よりも昇華温度の高い塵が混っていないなければならない。

赤外スペクトル

暖められた固体の熱輻射のエネルギー・スペクトルは不規則な形をしている。これは固体の結晶構造を反映して出しやすい波長の光と、出しにくい波長の光とがあるためであるが、この不規則性は物質固有の特徴的な形として現われる。シリケイトの波長10ミクロンや氷の波長3ミクロンなどはその代表例であるが、この特徴を利用して星周塵や星間塵の成分が推定されてきた。ここでひとつその例をおみせしよう。粒径1ミクロンの氷と鉄の塵が太陽光をどの程度吸収するかを図4aに示す。光を吸いやすい波長は、光を出しやすい波長でもあるので、固体の吸収特性と放射特性とは裏返しの関係にある。そういう意味ではこの図をそれぞれの塵が6000°Kに暖

められたときの熱輻射のスペクトルだとみてもよい。便宜上氷の吸収量を10倍にしてあるが、氷が可視光に対して全く透明であることがよく判る。一方鉄はなめらかな吸収を示している。波長3ミクロンに氷の鋭い吸収特性がみられるが、鉄には目立った特徴は現われない。図4bには粒径1ミクロンのグラファイトとシリケイト(ここではシリケイトとして黒耀石を使った)を示す。グラファイトのスペクトルがなめらかなのに対して、シリケイトの不規則性が対照的である。氷やシリケイトの赤外スペクトルの不規則性は塵の粒径分布を考えるとならされる。これらのスペクトル特性から彗星塵の成分を調べる試みが、1969年アメリカのマース達によって始めて成功した。この年現われたベネット彗星の赤外スペクトルに顕微的なシリケイトの10ミクロン特性がみつかったのである。彗星の熱輻射はこれより先の1965年、イケヤ・セキ彗星でアメリカのベックリンとウェストフォールとが測定していた。彼らは波長1.65ミクロンから10

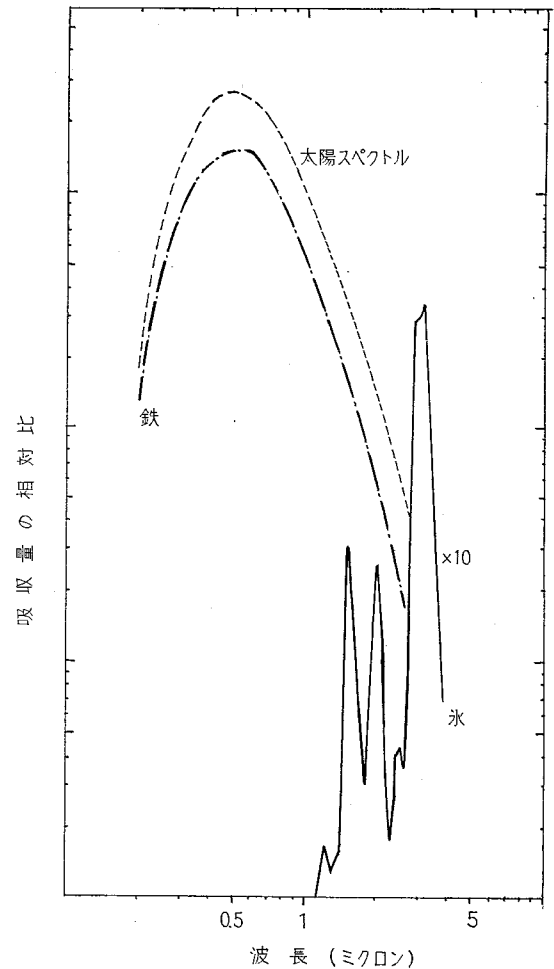


図4 a

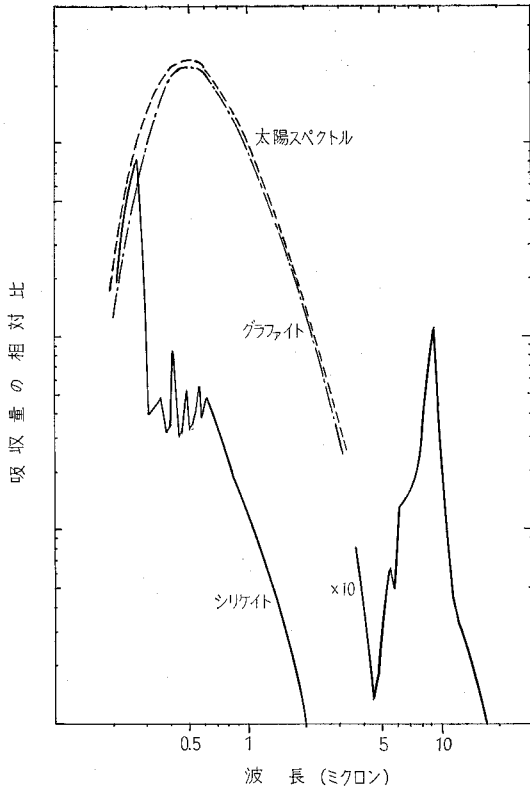


図 4b 3.5 ミクロン以上ではシリケイトの吸収量を 10 倍にしている

ミクロンにかけて、彗星が非常に‘明るくみえる’と報告している。その後彗星の赤外線観測は盛んとなり、多くの情報をもたらされた。それらをまとめてみると、

- (A) 短波長側 (波長 1.5 ミクロン以下) に散乱された太陽スペクトルがみえる。
- (B) 中間赤外波長域 (波長 2~8 ミクロン) のスペクトルは黒体 (光の吸収・放出の効率が波長に依らずに 1 となる物体) の熱輻射に似て、なめらかである。
- (C) シリケイトの 10 ミクロン特性が現われる。

これらの特徴から昇華温度の高い彗星塵の成分を推定してみよう。まず塵の候補 (シリケイト・鉄) の温度を決めてやる。この値は太陽からの距離によって変わるので、彗星の位置での塵の温度を求め、熱輻射のエネルギー・スペクトルを計算して観測と合わせる。図 5 に 1973 年の暮れから翌年にかけて話題を提供した、コホーテク彗星のエネルギー・スペクトルを掲げる。この彗星はその発見が早かったこともあって、各地で組織的な観測が取り組まれた。この図には 1974 年の元旦にアメリカのネイが測定した結果が示してある (図の○印)。このとき彗星は太陽から 0.23 天文単位にあって、近日点

通過の直後であった。上記の (A), (B), (C) の特徴がよくでている。図には計算で求めたシリケイトと鉄の熱輻射が書き込んである。これをみて判るようにシリケイト (黒耀石) は波長 10 ミクロン付近でたくさん光を出してくれるが、3~7 ミクロンといった中間赤外波長域ではほとんど光を出さない。一方鉄は中間赤外波長域では黒体輻射とよく似たなめらかなスペクトルを与える。実はここでは詳しく触れなかったが、塵の温度はその粒径によっても違ってくる。たとえば鉄の塵だと小さいもの程温度は高くなる。(図 6 参照) これは塵がその粒径とほぼ等しい波長の光をよく吸収し、またよく放出するという事に起因している。塵の温度は吸収した総エネルギーと、放出する総エネルギーが釣り合うように決まる。今太陽にさらされている塵を考えると、ほとんどのエネルギーを可視波長域で吸収し、その大部分を赤外波長域で失うことが判る。そこで塵の粒径が小さくなるとどうなるかといえば、小さな塵は長い波長の光を出しにくくなるので、赤外波長域でのエネルギー放出が悪くなりその温度が上昇することになる。この事情は塵の粒径だけに依るのではなく、たとえば可視波長域で透明に近いシリケイトが‘黒っぽい’グラファイトより吸収する熱量が少いために温度が低くなったという先の説明にも適用される。さて図 5 に戻ると、鉄の塵として粒径 5 ミクロン以上のものを考えている。これは 1 ミクロン程度の鉄の塵だと温度が高くなって熱輻射が最も強くなる波長が観測の 4.8 ミクロンよりも短かい方にずれてしまうためである。シリケイトの粒径が 1 ミクロン程度と予想されるので、彗星大気中では鉄の塵の方が大きいということになる。赤外スペクトルでみる限りでは、彗星塵の成分

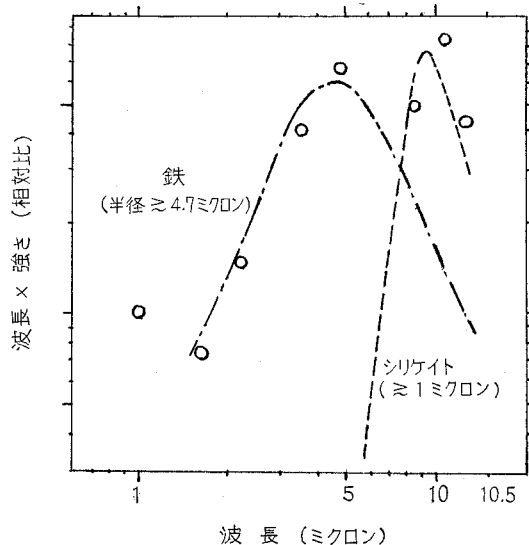


図 5 コホーテク彗星の赤外スペクトル

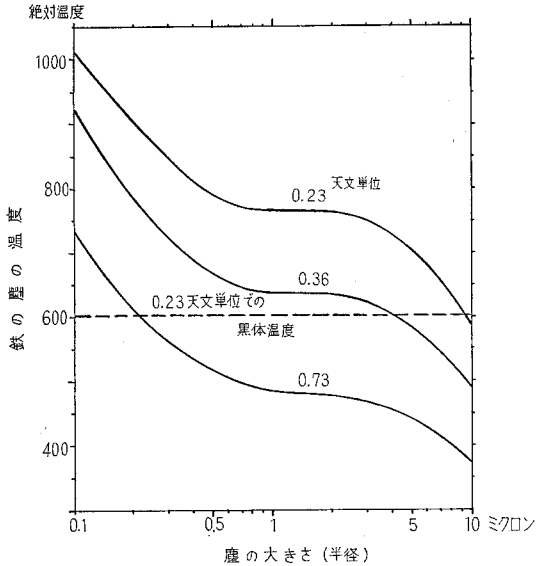


図 6

として、シリケートと鉄の組み合わせがうまくいきそうに思える。

色 温 度

次に可視波長域での塵の性質をみてみよう。2つ以上の波長で得られた熱輻射の強さから彗星の色温度が決められる。彗星の熱輻射を最初に測定したベックリン達は、この色温度がその位置におかれた黒体の温度よりも高くなることに気づいた。これはその後測られた彗星にも共通した特徴で、たとえばベネット彗星が太陽から0.64天文単位にあるときの色温度は500°Kとなっており、その位置の黒体温度350°Kよりもかなり高い値を示す。これは塵が可視光をよく吸うが、赤外域ではあまり光を出さない性質を持っていることを示唆する。塵の可視光に対する吸収率が良いことは、別の面からも予想されている。即ち可視光に対する塵の反射率(アルベド)がよくないことが次のようにして判ってきた。ふつうアルベドというのは、全入射光とあらゆる方向に反射・散乱する光との比をさすが、ここでは少し違った決め方をする。彗星の熱輻射成分が、可視波長域の吸収によってまかなわれているとすれば、測定される熱輻射の量と、可視波長域での散乱光の量とから、アルベドを推定できると考えるのである。彗星によって多少のパラッキはあるが、こうして求めたアルベドは、ほぼ0.3~0.6といった低い値をとる。これは惑星間塵について黄道光の測定から得られた値に近く、彗星を供給源とするひとつの根拠になっている。

シリケートは先にもみたように可視波長域から中間赤

外波長域にかけてほとんど光を吸わないので、アルベドは1に近い。一方鉄は可視光をよく吸収するので、アルベドも低くなる。彗星の色温度が高くなるのは、可視波長域では鉄が主役を演じていることを暗示するのかもしれない。しかしこの方法にはいくつかの問題点が含まれている。色温度を決める際に、近赤外波長域の輻射に混っている散乱光の成分を差し引く必要がある。この時塵は太陽スペクトルを波長に依らずに同じように散乱しているという仮定が入ってくる。もし近赤外波長域での塵の散乱効率が可視波長域よりも高ければ、上の話では熱輻射量を多く見積っていたことになり、塵のアルベドの値がもっと大きくなってよい。更にコホーテク彗星について、京都の赤外グループが得た結果によれば、色温度と黒体温度との差は従来いわれていた程大きくはないらしい。とすれば可視波長域での塵の吸収効率は赤外波長域と大差がないことになる。この方法は可視波長域での塵の吸収特性を調べるのに役立つが、今のところまだあいまいさが残っている。

アメリカのリーケとリーはコホーテク彗星の熱輻射を2天文単位近くから測定している。彗星の熱輻射がかすかなことや、天頂距離が大きいことからくる厚い大気の影響を考えると、たいへん難しい観測であったと思われる。彼らの結果をみると、地球軌道より内側に入った彗星には確かにシリケートの10ミクロン特性が見られるが、1.77天文単位より遠方ではこの特徴がでてこない。これは低い温度のために、彗星大気中に生き残った氷の塵によって、量の少ないシリケートの塵の存在がかすんでしまった結果らしい。これらを考え合わせると、彗星塵の成分として遠方では氷の塵が彗星大気全域に拡っており、太陽に近づくにつれてシリケートや鉄といった昇華温度の高い成分が目立ってくるといえそうである。

おわりに

ここまで読んでこられて、ではFコロナのグラファイトはどこからやってきたのかという疑問を持たれた方も多いと思う。シリケート派の批判もこの点に集中している。少し弁解がましいが、彗星にグラファイトの塵があったとしても、上のようなやり方ではみつからないのである。グラファイトの熱輻射は鉄と同じようになめらかで特徴がない。鉄の代わりにグラファイトを用いても、彗星の中間赤外波長域のスペクトルは再現できる。しかし太陽系内では、グラファイトよりも鉄の方が多くみつかっていることもあって、黒体輻射の候補として鉄が受け入れられている。際立った紫外吸収(波長2200オングストローム付近)が星間減光を説明できることから華やかに登場したグラファイトもその赤外スペクトルが平凡なためにシリケートや氷に比べてめっきりその影がう

すくなってしまった。

我々はグラファイトの存在を隕石から推定している。隕石はニッケル・鉄合金を主成分とする鉄隕石・珪酸塩鉱物を主成分とする石質隕石・両者をほぼ等量含む石鉄隕石に分けられる。この石質隕石のなかに、コンドロールとよばれる直径数ミリメートルの丸い粒を含んだコンドライトというものがある。このなかでも特に水や炭化水素などの有機物を多量に含んだものを炭素質コンドライトと名付けるが、これには重さにしてシリケートの10

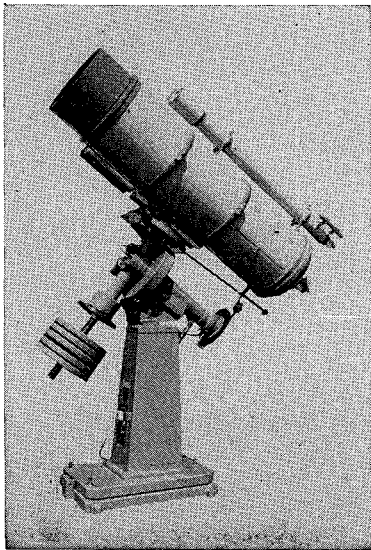
分の1の炭素がみつまっている。残念なことにこの炭素はグラファイトの形をしているわけではない。しかしこの比が隕石を産み出した原始太陽星雲の炭素量を反映しているとすれば、どこかでグラファイトができたかもしれない。これが隕石と母胎と同じくする彗星の‘芯’に水やシリケートや鉄と同じように閉じ込められているのではないだろうか。はなはだ心もとない推測ではあるが、確めるためにひとつ彗星の‘芯’を捕えたらどうだろうかと思ったりしている。

人物往来

◇アメリカのミシガン州立大学のリンネル (A. Linnel) 教授が、夫人同伴で1975年3月中旬10日間にわたり日本を訪問した。東京天文台・岡山天体物理観測所等を見学したほか、東京天文台では「Computer Control of an Observatory」と題して興味ある講演を行った。リンネル教授は食変光星の光度曲線の理論、とくにコンピューター利用のための食函数の展開理論などで精力的な論文をいくつも出している。最近講演題目の

ように変光星の光電観測を主にした望遠鏡とコンピューターの組合せによる自動化の仕事に熱意をもやしている。

◇フランスのムードン天文台のセメル (M. Semel) 博士が、3月下旬より3ヶ月間の予定で東大理学部天文学教室及び東京天文台に滞在中である。これまで彼は主として太陽黒点及び活動領域の磁場の構造の研究をしてきた。滞在中に東京天文台乗鞍コロナ観測所においてフランスより持参したポラリメーターを使用して黒点やプロミネンスの偏光を測定するべく準備をしている。



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 | 聖アンドリウス大学 (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) |

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