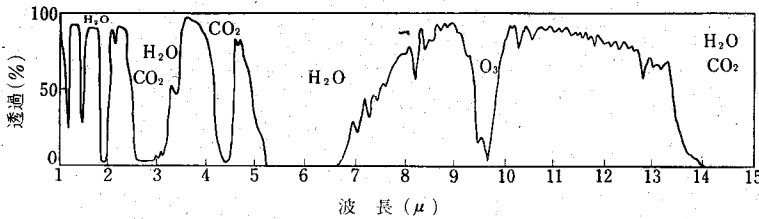


赤外線天文学

松本敏雄, 奥田治之, 杉本大一郎*



第1図 大気中における赤外線の透過

§ 1. 序

20世紀初頭まで人類は唯一の窓(可視領域)を通して天体の観測を行ってきた。それが、今世紀始めの電波天文学の初まりを契機とし、紫外線, X線, γ 線, 赤外線, 等による観測が盛んになり、従来の天文学の様相を一変するに至った。今世紀後半の天文学を特徴づけるものの一つが、この観測波長域の拡大という点であるといっても過言ではないであろう。その中で人類が未だ十分利用していない波長域の一つが赤外領域(1~100 μ)である。赤外領域にはところどころ窓があいているため地上からも測定可能であり、近年の半導体測定器の進歩を考えれば、今後この波長域から得られる知識はかなり大きなものになると思われる。

ここでは赤外領域で今までどんな仕事が行なわれているか、又これからどんな事ができるか、をまとめてみた。但し、測定器については既に大沢氏⁽¹⁾によって書かれているので、そちらの方を参照していただきたい。

§ 2. 大気の吸収

第1図に大気の吸収の様子を示す。大気の吸収はそれ自身分子の吸収の問題として興味ある問題であり、かなりの事がなされている。しかし我々の目的にとって吸収は余分のものであり、丁度あいた窓からフィルターを用いて観測しなければならない。Johnson等によって作られたフィルターのシステムは次のようなものである。

名称	波長域	有効波長
J	1.1~1.4	1.20
K	1.9~2.5	2.20
L	3.2~4.1	3.50
M	4.4~5.5	5.50
N	8~14	9.0

大気の吸収の主要なものは H_2O (1.38 μ , 1.87 μ , 3.2 μ ,

6.2 μ) CO_2 (2.7 μ , 43 μ) O_3 (9.3~10.2 μ) であり、この吸収をさけるためにはロケット, バルーン等によって上に昇らなければならない。 H_2O はほとんどが対流圏に存在しているため、 H_2O をさけるには割と低い高度でよく、10 km もあれば十分である。最近観

測データの出始めたストラトスコープ II の高度は約 25 km であり、この附近では吸収はほとんどないと考えてよいだろう。

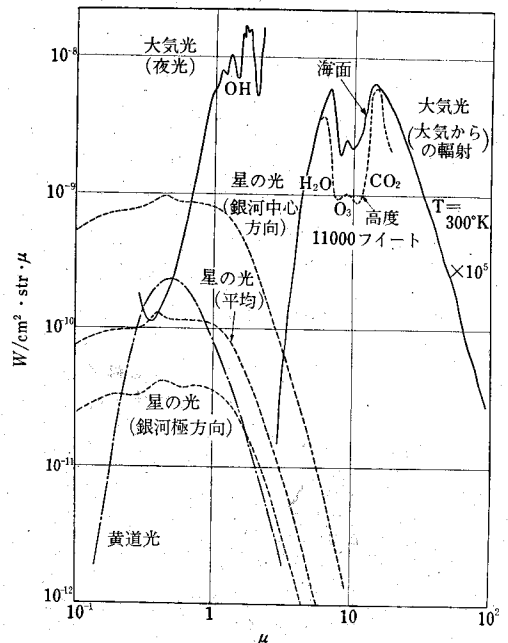
§ 3. 天空のバックグラウンド

地球上から太陽系外の天体を観測する場合考えられる天空のバックグラウンドには次のようなものが考えられる。

- 1) 星の光
- 2) 黄道光
- 3) 大気光

これらはバックグラウンドではあるが、それ自身興味ある対象であり、特に 2), 3) は赤外においても面白い結果がでると思われる。第2図はこれらを全て合せて書いたものである。

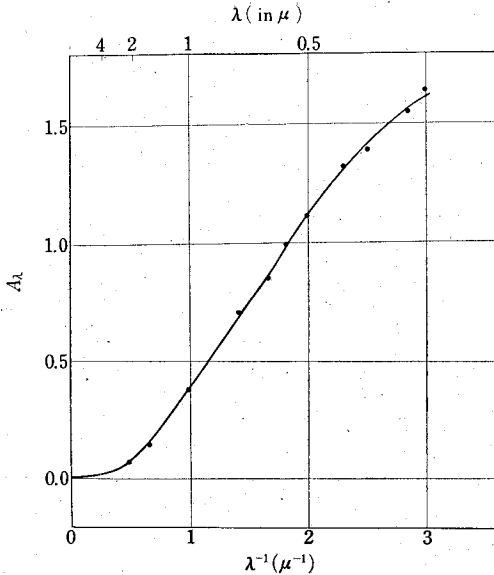
- 1) は銀河内の全ての星の和を見るわけで、これはど



第2図

* 名大理

M. [Matsumoto, H. Okuda, D. Sugimoto; Infra-Red Astronomy.



第3図 星間空間における吸収
(但し A は等級)

うしてもさげられないものである。第2図は Roach と Megill⁽²⁾ 及び Allen⁽³⁾ の表によった。図からわかるように銀河中心方向で $10^{-9} \text{ w/cm}^2 \text{ str } \mu$ の最大値を持っている。しかし、これは望遠鏡の視野を狭くしてみる場合には余り問題にならないと思われる。

2) の黄道光は太陽の光が自由電子又は dust によって散乱されて、地球に届くもので、もちろん太陽とのなす角の函数である。従って夜明け、夕暮れ時に最も明るく、強い時には $10^{-7} \text{ w/cm}^2 \text{ str } \mu$ ($\lambda=5000\text{\AA}$) に達する⁽⁴⁾。第2図の中の黄道光は平均的な強さを $2 \times 10^{-10} \text{ w/cm}^2 \text{ str } \mu$ とし、 6000°K の黒体としてスペクトルを書いたものである。赤外領域での黄道光は未だ十分はかられていないので、実際にどんな形になるのかはよくわからない。黄道光の原因が自由電子か、dust によってスペクトルも変るはずであり、それ自身興味ある問題である。

3) の大気光には比較的上層大気によって出される夜光と、地上附近の大気からの黒体輻射とがある。夜光は 3000\AA 以上の波長域で主に原子、分子の線スペクトル、帯スペクトルからなっている。原子による線スペクトルでは O I (5577\AA) O I (6300\AA , 6364\AA) Na I (5893\AA) 等が代表的なもので、分子の帯スペクトルとしては O_2 ($3000\text{\AA} \sim 12400\text{\AA}$) がある。図中の夜光の部分は連続光成分として、Allen の表と Jones, Gush⁽⁵⁾ が 1μ 以上で求めたものから引用した。赤外領域では OH によるものが顕著にあらわれているが、この OH の部分が長波長のどこまで延びているか、又実際の強さがどれほどなのか、未だよくわかっていない。

大気下層からの黒体輻射によるものは他のバックグラ

ウンドに比べて桁ちがいに大きく、特に長波長ではかなりの障害になると思われる。図は Bell et al⁽⁶⁾ によるもので大体 300°K の黒体輻射に近くなっている。この場合にはキルヒホッフの法則に従い、吸収の強い部分ほど黒体に近い。図から 10μ 附近での輻射は $10^{-8} \text{ w/cm}^2 \text{ str } \mu$ となり、ダイヤフラムを 1° 平方の程度にするとときに $10^{-10} \text{ w/cm}^2 \mu$ の flux が測定器に入ることになる。従って、 10μ での測定はこれ以上の測定は困難となる。又この大気光は天候、気温、等により著るしく変わるので、測定上面倒な問題になるであろう。

§ 4. 星間空間における吸収

この分野での観測は Whitford, Stebbins の最も初期の時代からなされているもので、かつて星の輻射が黒体輻射に十分近い事を明らかにしたものである。最近では Johnson 等によって精力的に観測が行なわれている。

星間空間における吸収として考えられるものとしては輻射の逆プロセス、Rayleigh 散乱、grain による吸収散乱等が考えられる。実際の観測によれば始めの2つの過程はほとんどきかず、吸収は 1μ 程度の大きさの grain によってなされる事が知られている。

実際に観測する場合には同じスペクトル型の星で吸収のある星とない星を比べたり、又分光観測によるデータから星の固有の等級を求め、実視等級と比べたりしてしるべし。第3図に Allen の表からとった代表的な吸収の様子を示す。図から明らかなように可視領域で吸収は波長に逆比例している。これは光の偏りと共に吸収が grain によって行なわれる事を示している。

星間空間における吸収はもちろん場所によって変化するはずで、Orion は特に吸収が大きくて有名である。最近 Johnson⁽⁶⁾ はいろいろの星団について観測を行ない、吸収が対象によってかなり異なる事、又 $R=A_V/E_{B-V}=A_V/A_B-A_V$ の値が従来思われていた値よりかなり大きい事、等を見出した。星間空間の吸収は光の偏りの観測と共に、grain の分布、量を知る上に大きな手がかりを今後与えると思われる。

§ 5. 天体から来る赤外線

i) Galactic な分布

空全体からくると考えられる赤外線にはいろいろのものが考えられるが、現在まで、未だ十分な仕事になされていない。空全体を Survey するには視野を広くとる必要があり、そのためバックグラウンドが大きくなり、測定が困難になる事が最も大きな障害であろう。空を Survey して分布をしらべたものでは Whitford, Stebbins⁽⁶⁾ による先駆的な仕事がある。彼等は銀河の中心は吸収が強く、可視光では見えないが、赤外では見える事を利用して、 1μ 附近の赤外線を用いて銀河の中心方向を探り、その位置及び大きさを明らかにした。その結果銀河の中心

方向において $2 \times 10^{-16} \text{ w/cm}^2 \mu$ ($\lambda=1 \mu$) の flux を得た。(但しダイアフラムは直径 8/6.) しかし銀河の中心からくる光が、星からくるのか、又はガスからくるのか、はっきりしていないので、今後今少し長波長域で観測する必要があると思われる。例えば 5μ 付近で観測すると、bound-free, free-free で全て光がでているとし、 λ^{-2} に比例することをを用いると、 1μ の時の値の 1.6×10^3 倍又黒体輻射として λ^{-4} に比例する事を仮定すると、 1μ の時の値の 64×10^2 倍となる。但し銀河中心までの距離を 10 kpc, $A_V=3.0 \text{ mag/kpc}$ とし § 4 の吸収曲線を用いた。

銀河の中心以外からも、H II 領域、又 H I 領域からの赤外線が期待できる。H II 領域のイオンから出される赤外線の中特に強い line として Ne^+ からの $12.8 \mu^{(9)}$ がある。これは基底準位が $2p^2 \ ^2P_{3/2}$ で $2p^2 \ ^2P_{1/2}$ に遷移するもので、その強さ $I(\text{Ne}^+)$ は次のようにして与えられる。

$$\frac{I(\text{Ne}^+)}{n_e^2} = \epsilon(\text{Ne}^+) = 2 \times 10^{-24} \text{ erg cm}^3/\text{sec}$$

但し、この時 Ne の量は Allen の cosmic abundance を用い Ne は全てイオン化しているとした。Emission measure $M \cdot E = \int n_e^2 dl$ (但し l は parsec) を用いて上の値を書くと地上へ届く flux, $F(\text{Ne}^+)$ は

$$F(\text{Ne}^+) = 4.8 \times 10^{-14} M \cdot E \text{ w/cm}^2 \text{ str}$$

となる。銀河の disk を半径 10 kpc, 厚さ 200 pc, 密度 10 cm^{-3} , disk 中の H II 領域の割合を 0.1, 電離度を 0.1 とすると disk に全体から地上へ届く flux は $4 \times 10^{-11} \text{ w/cm}^2$, 単位立体角あたりになると、 $5 \times 10^{-10} \text{ w/cm}^2 \text{ str}$ となる。この値はかなり大きく、又 12.8μ は地上からも測定可能であるため、Ne の分布、H II 領域の温度、分布、等かなり面白い情報を今後もたらすと思われる。

Ne^+ 以外のイオンでは C^+ (156.3μ), N^+ (203.6μ , 121.7μ), N^{++} (57.31μ), O^{++} (88.18μ , 51.71μ) 等の line がかなり強いが、量が少ないこと、又長波長である事のため、さしあたっては問題にならないであろう。

H I cloud からも赤外線は輻射される。その一つは水素分子による 28μ , 今一つは super thermal particle によって励起されて出る P_α 等の line である。水素分子の存在は銀河の力学的安定上その存在が確実視されているが、未だその観測はなされていない。その観測の一つの手段が水素原子との衝突により回転準位が励起されて $J=2$ に上り、又 $J=0$ に落ちる時に出す 28μ の赤外線の測定である。この過程は H I cloud の温度を説明するための cooling process として考えられたもので cooling rate $A_{\text{HH}2}$ は $T=100^\circ\text{K}$, $n(\text{H})=0$ とすると、高柳、西村⁽¹⁰⁾ によれば $A_{\text{HH}2}=2.80 \times 10^{-25} \text{ erg}$

$\text{cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$ となる。水素分子の割合を 0.1 とすると disk からくると思われる flux は $2 \times 10^{-13} \text{ w/cm}^2$ ($3 \times 10^{-12} \text{ w/cm}^2 \text{ str}$) となり、この値は現在の測定器でも測定可能である。但し 28μ は大気で吸収されるのでパルーンによって大気の上に出る必要がある。

上の値は水素分子による輻射が全て 28μ でなされる時であるが、Osterbrock⁽¹¹⁾ によれば、 $J=2$ の para H_2 から $J=1$ の ortho H_2 を経て $J=0$ para H_2 に落ちる方が早い、この場合には 42.4μ と 84.4μ の光を出す。未だどちらが正しいかはっきりしないが、H I cloud 全体として出す輻射は上の値と大してちがわないであろう。

水素分子の 28μ は H I cloud の cooling を説明するために出されたものであるが、結果として冷えすぎて困ることになった。そのために heating を考えねばならないが、その一つの試みが早川、高柳、西村⁽¹²⁾ による super thermal particle の導入である。これは 0.1 Mev から 10 Mev の陽子の flux を仮定し、これとの衝突による heating で cloud の温度を説明しようとするものである。この場合励起された電子が基底準位に落ちる時に当然 P_α 等の line が出る。彼等によれば P_α (1.8μ) の輻射は $10^{-27} n(\text{H}) \text{ erg sec}^{-1}$ で Galactic な分布としては小さく、H II 領域からのものと共にバックグラウンドとなる。しかし地球近傍に H I cloud があれば測定できる可能性はある。例えば $n(\text{H})=10 \text{ cm}^{-3}$, cloud の半径 10^{20} cm , 地球からの距離を 100 pc とすると大気上層での flux は 10^{-12} w/cm^2 となり、この程度なら測定可能である。但し P_α も大気によって吸収されるので、何らかの手段によって上に昇る必要がある。

ii) 星雲

星雲の赤外線による観測はソビエトの Moroz によってオリオン⁽¹³⁾ とカニ星雲⁽¹⁴⁾ についてなされている。

オリオンにおいて Moroz は $0.85 \sim 1.7 \mu$ の波長域で $1/4$ のダイアフラムを用いて survey を行なった。その結果、 $\theta_1 \text{Or}_1$ の近傍において最大の値 $8 \times 10^{-9} \text{ w/cm}^2 \mu \text{ str}$ を得た。この値をもたらす原因として ① free-free 及び free-bound 遷移による輻射 ② two photon emission ③ dust からの反射 ④ line としての輻射。例えば P_β (1.13μ) 等が考えられる。この中 ① の free-free 及び free-bound による輻射は $T=10^4 \text{ }^\circ\text{K}$, $n_e=n_i$, $z=1$ を仮定すると、この波長域では $6 \times 10^{-15} M \cdot E \text{ w/cm}^2 \text{ str}$ となる。ここで $M \cdot E$ は先に定義した Emission measure である。これを Moroz の観測値とくらべると $M \cdot E=1.3 \times 10^6$ となる。他方 H_α の観測から $M \cdot E=0.9 \times 10^6$ が知られているが、上に得られた値はこれとかなり近く、Moroz の測定した flux のほとんどは ① の過程によってなされると考えてよい。しかしこれは他の過程の存在を排除するものではなく、特に dust

からの反射はオリオンにおいて可視光の偏りが多い事を考え合せると、今少し考慮する必要があると思われる。Orion から来るとされる line として $P_{\alpha}(1\sim 8\mu)$ の強さを上と同じ E·M を用いて計算すると $2.9 \times 10^{-9} \text{ w/cm}^2 \text{ str}$ となり、これは ① による連続光と同程度の大きさである。今少し長波長では先に述べた Ne^+ による 12.8μ がある。同様な計算を行なうと、オリオンからくるとされる flux は $4.8 \times 10^{-8} \text{ w/cm}^2 \text{ str}$ となり、この値はかなり大きく、しかも地上から観測できるので、かなり測定は容易と思われる。

以上の話は全てオリオン星雲に限ったが、他の同様な diffuse nebula としては NGC 6618 (Omega), NGC 6514 (triangulum), NGC 6523 (Lagoon) 等が測定可能と思われる。

オリオン等の diffuse nebula とやや異なったものでカニ星雲がある。カニ星雲は数千年前に爆発した超新星の残骸で、そのスペクトルは X 線、紫外線、可視光、電波の広い範囲に渉って求められている。可視領域より長い波長の光は星雲中の相対論的電子の出すシンクロトロン輻射と考えられているが、赤外、可視領域はそのスペクトルが折れ曲る部分に対応しているので、この部分を正確に定める事はカニ星雲中の電子のエネルギースペクトル、磁場の強さを決定する重要な知識を与えてくれるものと思われる。

Moroz は $1\sim 2.5\mu$ (有効波長 2.2μ) の波長域で、1/7 のダイヤフラムを用いて観測を行い、 $8.1 \times 10^{-16} \text{ w/cm}^2 \mu$ の flux を得た。この値は従来観測されている電波、及び可視部領域をなめらかにつなぐものであり、スペクトルの折れ曲りは $3\sim 5\mu$ の間と考えられる。今後適当なフィルターを用い、さらに長波長で観測すれば興味ある結果が得られるであろう。

カニ星雲ではシンクロトロン輻射の他に free-free 及び free-bound 等の輻射も当然考えられるので、Moroz の観測値が全てシンクロトロン輻射で片づくかどうかは今後の問題であろう。

iii) 星

星を赤外線で見るとは 1940 年代の Whitford 以来、星間空間の吸収と共に UVB photometry の延長となされてきた。この分野においては星の有効温度、Bolometric correction B·C、黒体輻射からのずれ等が問題となる。

赤外による photometry は Johnson 一派によって精力的に行なわれている。彼は § 1 に述べた種々のフィルターを用いて星を観測し、 T_e , B·C を得た⁽¹⁵⁾。その結果として星からの輻射は大体において黒体輻射に従い、その源は熱的なものと考えてよいが、従来の値に比べて early Giant と M-dwarf において T_e がやや高め

であることがわかった。

その後 Johnson and Low⁽¹⁶⁾、及び Wildey and Murray⁽¹⁷⁾ によって 10μ に至るまでの photometry がなされた。Johnson は主に進化の進んだ星、炭素星などを観測し可視領域のみでは出し得ないデータを出している。Ney 及び Gould は Wildey, Murray のデータにおいて $\alpha \text{ Leo}$ (B 7), $\gamma \text{ Ori}$ (B 2) では 10μ 付近で予想されるよりはるかに大きな flux がある事を発見し、その原因を B 型星の回りの H II 領域中の Ne^+ からくる 12.8μ に帰した。その後の Low⁽¹⁶⁾ の観測では余り大きな flux は得られず、実際に Ne^+ を観測しているかどうかは、今後の問題であろう。

星の観測は地上で観測する場合、大気の吸収のためあいた窓からしか観測できないが、バルーンによって大気上層に上げれば全波長域にわたって測定する事が可能である。この試みはストラトスコープによって実際に行なわれている。ストラトスコープ II は 36' の望遠鏡をつみ、8 万フィートまで上って 0.9μ から 3.1μ の波長で赤色巨星、木星、月、等の観測を行なった。⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾ その結果、星間空間における H_2O による吸収、また星の表面における H_2O , H^- , H_2^- 等による吸収、黒体輻射からのずれ等の興味ある結果がでている。

星の表面からくる赤外線として興味あるものの一つとしては O·B 型星の回りの水素分子が、中心星の出す紫外線によって electronic state が励起され、もとにもどる時に振動、回転準位が励起された状態にもどり、さらに基底準位におちる時に出す赤外線がある。この時には $v=1, J=2$ から $v=0, J=0$ へ落ちる 2.2μ , $v=1, J=3$ から $v=0, J=1$ へ落ちる 2.12μ が出る。この波長は地上から測定可能であり、その flux は例えばオリオン星雲全体から $8.15 \times 10^{-14} \text{ w/cm}^2$ とみつもられている。(Gould による) この値はやや小さめであるが、測定器の進歩により測定可能となるかもしれない。

赤外で星を見る場合その主な対象は赤い低温度星である。その一つとして proto star が考えられる。星が星間空間のガスから生まれる時には始めは温度が低く、可視領域では見えなくても、赤外線で見える可能性がある。proto star の温度を 1000°K と仮定するとその黒体輻射は 3μ の波長において最大の輻射をし、可視部では $3\sim 4$ 桁小さい。この proto star が出す flux を J_{λ} 、地球からの距離を r 、星間空間における吸収を A_{λ} とすると地球に届く flux F_{λ} は

$$F_{\lambda} = 10^{-\frac{A_{\lambda}}{2.5}} \cdot \frac{J_{\lambda}}{4\pi r^2}$$

となる。proto star の明るさを太陽の 100 倍 ($J=6 \times 10^{35} \text{ erg sec}^{-1} \mu^{-1}$)、オリオン星雲にあると仮定 ($r=500 \text{ pc}$, $A_{\lambda}(\lambda=3\mu)=0.7$) すると地上に届く flux は $F_{\lambda}(\lambda=3\mu)=1.3 \times 10^{-15} \text{ w/cm}^2 \mu$ となる。この値はやや小さく

オリオンからの連続光と重なって測定は困難と思われるが、ダイアフラムを小さくすれば測定可能であろう。

この他に Gould は proto star が collapse する時に水素分子が出す 28μ の輻射を計算している。彼によれば、オリオンにある、 $100M_{\odot}$ 、 $100L_{\odot}$ の proto star が 10^6 年で collapse する時に地上に届く 28μ の flux は 10^{-13} w/cm^2 である。

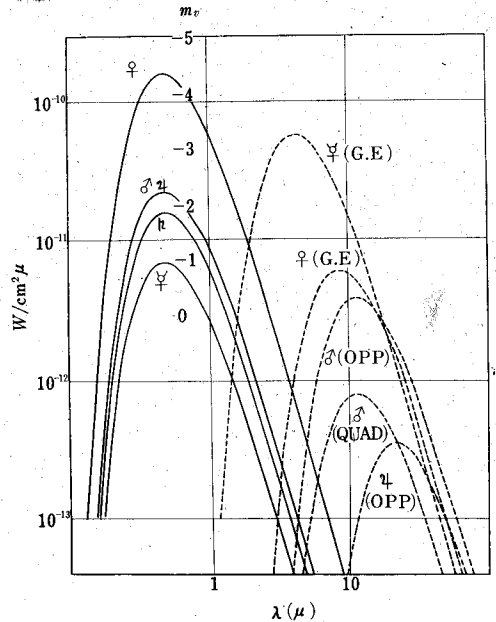
その正体ははっきりしていないが、最近発見されたもので、非常に興味あるものとして very cool star がある。(21)(22) これは赤外線ですurveyした時に発見したもので、可視領域では200時でも見にくい、赤外部で非常に強いエネルギーを出しているものである。特に強い源としては Taurus と Cygnus にあるが、Cygnus について Johnson が測定したものによれば 700°K の黒体輻射に非常に近く、その最大値における flux は $5.5 \times 10^{-14} \text{ w/cm}^2 \mu$ である(23)。残念ながら物体までの距離がわかっていないので、詳しいことがわからないが、距離を 10 pc とするとその明るさは太陽の 40 倍、半径は太陽の 430 倍となる。現在の星の内部構造の理論によれば、このような低温度星が安定に存在するという事は考えられないので、今後各方面から調べる必要があると思われる。まず、第1に距離がわからないから、何らかの手段により、例えば視差を利用したりして知る事が必要である。距離がわかれば明るさの絶対値がわかり、H-R 図上に位置がきまる事になる。第2に時間変化をしらべる事。もしこれが collapsing protostar であれば、せいぜい一月程度で変化するであろう。第3に空間分布を調べる事。これはこの very cool star が通常の星とどんな関係があるかを知るために重要である。さらに第4に本当に黒体輻射と考えてよいかどうかを詳しく調べる事が必要である。 1000°K 付近では種々の分子が存在し、opacity はかなり小さくなっているはずで、特に短波長では free-free, free-bound による光がでてくる可能性もないわけではない。現在のところ星の表面の問題は M-type の低温度星でもよくわかっていないので、今後の理論的研究が必要であろう。

iv) 衛星、惑星

惑星、特に火星、金星、木星、土星は flux はかなり強く、以前からしらべている。赤外線を用いることにより近赤外では反射能の測定、又やや長波長では惑星表面からの熱輻射を測定してその温度、及び熱伝導度を知る事ができる。又大気が存在する惑星においては、分光観測を行なってその吸収線を調べ、大気の組成、量を知る事ができる。第4図に各惑星の太陽からの反射光、及び熱輻射により、地上に届く flux の図を示す。

a) 月

月は太陽について最も強い輻射体であるため、その反



第4図 惑星からの輻射

但し：♀：金星，♂：火星，♂：木星，♂：土星，♀：水星
 実線は太陽からの反射光（最大の明るさの時）
 点線は惑星からの熱輻射。(G・E) は greatest elongation,
 (opp) は opposition, (QUAD) は quadrature, を表わす。

射能、温度はかなり前から調べられている(24)。最近の観測で面白いのはストラトスコープ II によるもの(19)と、Willey, Murray(25)による 10μ の赤外線の観測である。ストラトスコープ II では反射能しかはかれなかったが、 $1\sim 3\mu$ の間で連続的に観測を行ない、赤外領域ではその反射能が、可視領域に比べて大きい事を見出している。Willey と Murray は $8\sim 14\mu$ の波長域で、月の夜の部分の温度を測定した。その結果、海の部分と陸の部分との間に温度差はなかったが、局所的に温度が高いところがあり、それが Tycho, Copernicus に対応していることがわかった。これは月の火山活動、又表面の物質の状態等に関連して、面白い問題である。

b) 水星

太陽に非常に近い事から測定は困難であり、又質量も小さいので大気存在する可能性は少ない。Kuiper 等の観測でもはっきりした結論はでていない。

c) 金星

$8\sim 14\mu$ の窓を通して行なわれた Sinton(26)等の観測から金星の表面温度は -39°C であることが確かめられ、又暗い部分と明るい部分にあまり差がないことも判った。又彼は 10.4μ の CO_2 の吸収線も検出している。Kuiper 等の観測でも CO_2 の強い吸収を検出している。Strong(27)は $1\sim 13\mu$ 附近の水の吸収を詳しく調べ、金星大気中の水の量として $9.8 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^3$ を得た。

(87 頁に続く)