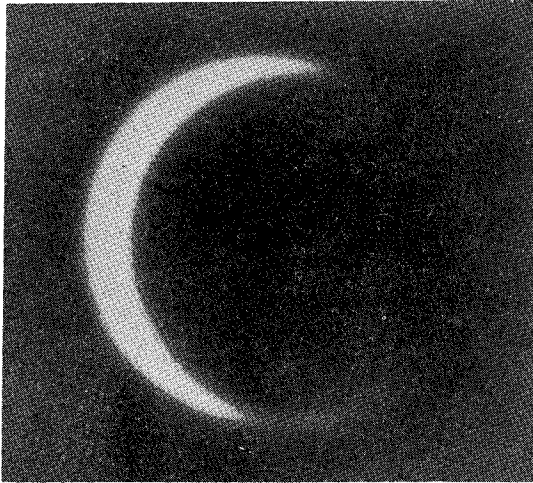
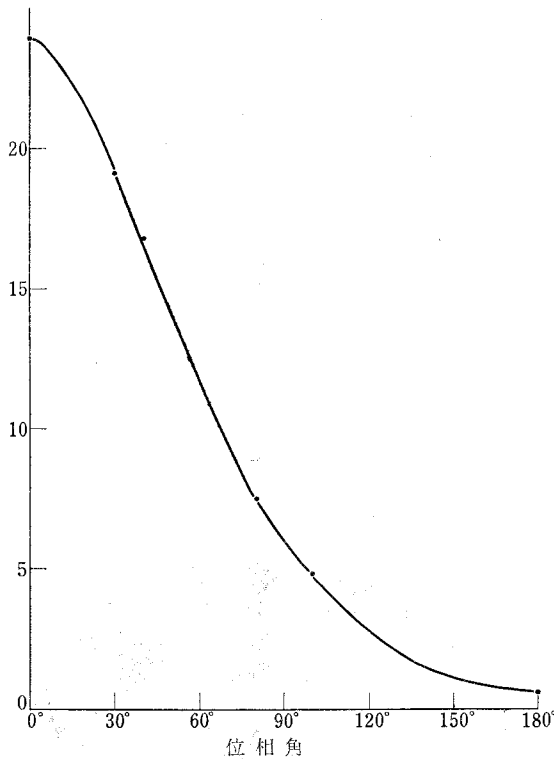


金星の物理的観測

小平 桂 一*



赤色光で見た内合近くの金星

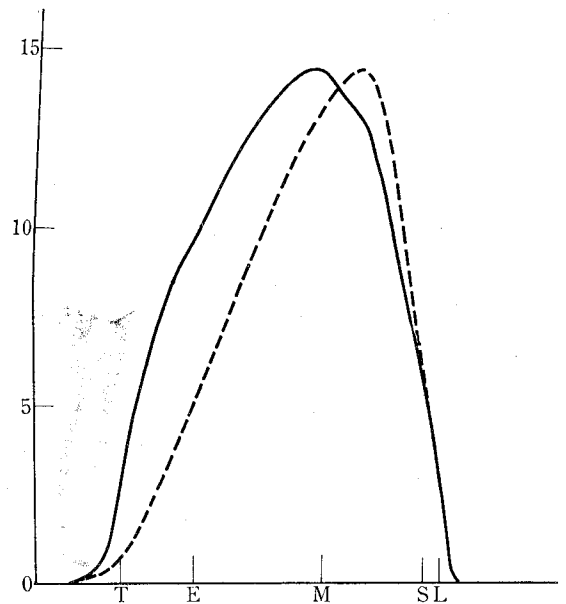


第1図 金星光度の位相による変化. 縦軸は光束の相対的な大きさ, 1948年のダンジョンの測定による.

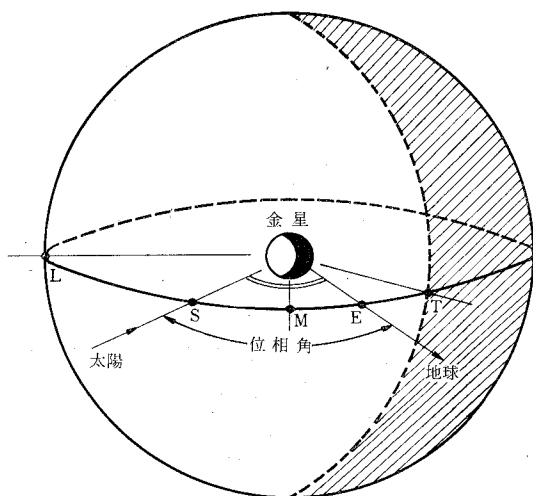
* 東京天文台
Keiichi Kodaira: Physical Observations of Venus

はじめに 今世紀初め頃には、金星は地球の石炭紀に近い状態にあると思われていた。望遠鏡に映る黄色い密雲状の層の内側は、湿潤で暖く、雨雲が垂れこめて、かつて古生代に地球上に存在したような生物が生棲していると思われていた。その後 70 年経つた今日でも、金星表面のモデルについては、砂漠だ、いや海だと、いまだに決着がついていない。金星は地球に一番近い惑星であって、しかも内惑星であるために、その明るさと位相変化は、古くから注意を惹いてきたが、地理図形の詳細な研究は、表面を覆う雲によってはばまれてきた。表層の物理的性質を探る試みは、金星によって反射される太陽光を手懸りに前世紀末に始まり、1930年代には、近赤外のスペクトルから、金星大気中の炭酸ガスの存在が知られた。観測の波長は更に長い方に伸び、金星自身が輻射する赤外から、近年では、雲の層の中にまで達する電波領域へと進んでいる。ここでは、今日に至る金星の物理的観測の経緯を探ってみた。

I. 可視領域 金星の古典的観測は、光度と位相の関係を調べることに始まった。1897年にドイツのミュラ



第2図 金星面上の輝度分布. 縦軸は光束の相対的な大きさ, 横軸は金星面上の見かけの位置 (図3. 参照). 実線は1966年岡山での測定, $\lambda 4500 \text{ \AA}$, 位相角 73° . 鎖線は従来モデルによる理論値の傾向を定性的に示す.



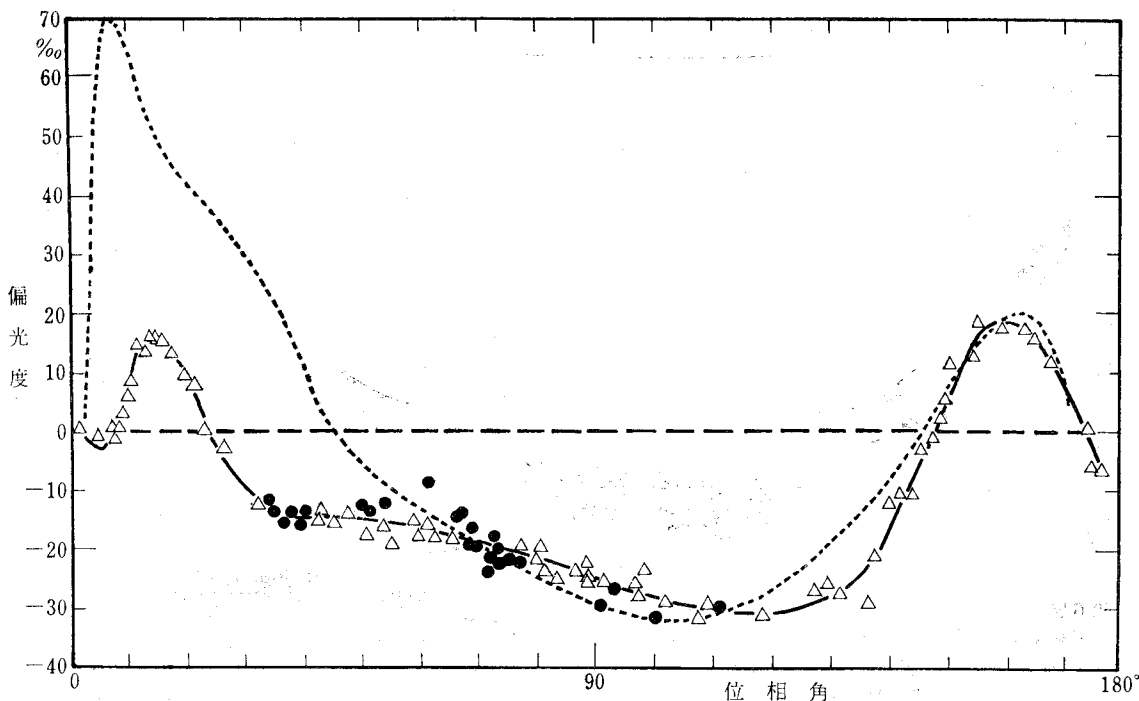
第3図 太陽・金星・地球の位相関係。
位相角が約 50° の場合。

第1表 金星の色 (太陽の光を1単位とすると)

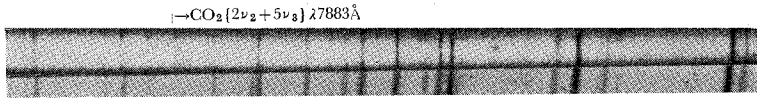
写真領域	0,67
赤色領域	0,93
赤外領域	0,95

太陽光の中の青い光が吸収され、黄色っぽくなっている。
1954年のパーシンの測定による。

一が眼視測光, 1920年頃にハーバードのキングが写真測光を行い, 1948年にはダンジョンが眼視測光を行っている。一見簡単そうであるが, 太陽に近いために, 一位相周期584日にわたる測光は, 多くの困難を伴う。第1図にダンジョンの結果を示すが, 位相が 180° 即ち内合に近づいてもかなり明るいのは, 主として縁が円弧状に光るためで, 金星の大気によるものと考えられている。次に行われたのは, 金星面上の輝度分布の測定で, 1931年にシェーンベルクが眼視測光を, 1935年にはバラバシエフとセメージュキンが写真測光を行った, 更に1950年代になって, ソ連でこの種の測定が何度も繰り返されている。面上の相対的な明るさを出すという点では, 積分光度の絶対測定よりも容易であるが, 金星が10秒程の見かけなので, 像の揺ぎや光学系の散乱によって, 異なる点の光が混ざってしまうという困難がある。第2図には, 岡山の188cm望遠鏡のクーデ焦点を利用して得られた輝度分布を示す。こうした測定にかかる可視光線は第3図のように, 太陽からの光が金星面, あるいは大気で反射散乱されたものなので, 測定曲線をもとに, 作用している散乱過程を調べることができる。例えば, ダンジョンは1949年に自分の資料から, 金星大気中ではレイリー散乱が利くと結論し, 1950年には, ホラクが, バラバシエフ等の測定を一樣散乱で説明している。惑星大気での散乱過程では, 多数回散乱を考慮に入れなければならないが, 原理的なことは, ファンデルフ



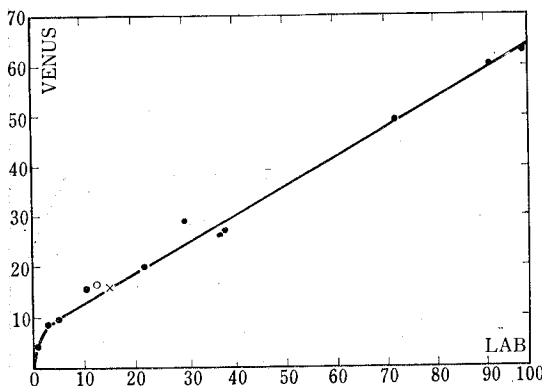
第4図 金星の偏光度の位相による変化, 実線は金星, 鎖線は 2.5μ の水滴層, 1929年のリオの測定による



第5図 金星の近赤外スペクトル(一部分)。上は金星,下は比較の爲の太陽のスペクトルで,金星にだけ見えているのが炭酸ガスの吸収帯 $\lambda 7883 \text{ \AA}$, 1966年岡山で撮影,位相角 73°

スト, チャンドラセカルなどによって解決済みで, 計算に便利な近似を探す仕事が残っているだけである。また, 初めは一様大気という簡単なモデルを採っていたが, 近頃では, チェンバレンや京都の上野氏のように, 高さによって密度の変る大気中での散乱が研究されている。ところが, 1950年代のタシケントや, 1966年の岡山での測定結果を総合すると, この程度のモデルでは, 観測と合わせられないことが判る。ミネルトは早くも1946年に, ハルムホルツの相反定理から導かれる輝度分布が, 観測結果と定性的に合わないことに気付いたが, 観測の精度をも疑った。観測を正しいとするならば, これ迄のモデルやミネルトの考察で仮定されている「金星面上の各点の同格性」を捨てなければならない。即ち, 金星大気の構造や組成は, 面上のどの地点でも同じという訳ではなく, 系統的不均一性, たとえば日周変化のようなものがあることになる。

もう1つの手懸りは偏光現象である。金星の偏光については, まず1929年にリオが観測し, その後をドルフェス等が引継いで, 1948年から本格的な測定を行っている。第4図にその結果と, 2.5μ の水滴の偏光の様子を示す。極値の位置や全体の形がよく似ているので, 水蒸気雲説を採る人もいるが, 水蒸気の吸収線が弱いこと, 雲の色が黄色いことなどに難点がある。最近では, 数 μ 位の結晶体粒子の雲も, 似たような偏光を起すこ

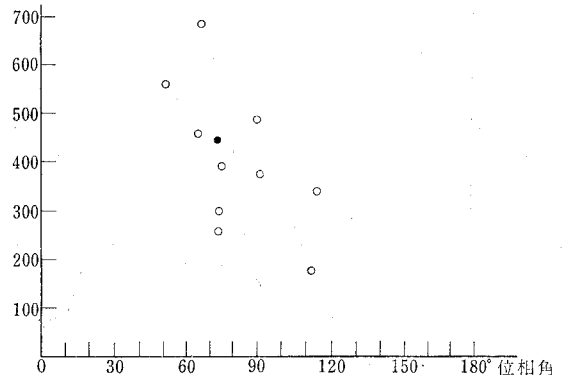


第6図 金星の炭酸ガス吸収帯の強さ。縦軸は金星, 横軸は実験室スペクトルでの相対的な吸収帯強度。黒丸は各吸収帯を表し, 特に白丸は $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ を, バツは $^{13}\text{CO}_2$ の吸収帯を表す。カイバーの1963年の報告による。

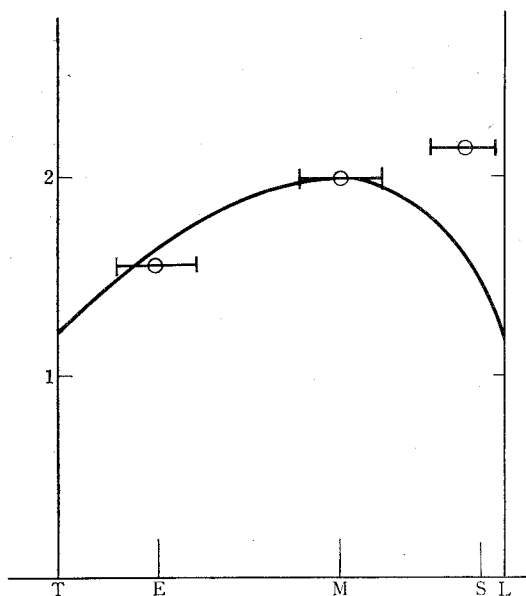
とが明らかにされている。ちなみに, 金星からの光は, クリミヤのパーシンの観測によると, 表1.のような色をしている。一方, 1953年のドルフェスの観測によると, 金星面上の偏光度合の強弱模様が, 紫外光で見

える大ざっぱな明暗模様と違って, 偏光の作用する層と, 散乱の作用する層とが同一でないと考えられるふしもあるが, 結論は出ていない。

II. 近赤外領域 金星の可視領域のスペクトルを撮ってみると, がっかりすることに, 太陽のスペクトルと同じなのを見出す。測光が行われていた1930年代初めに, アダムスとダンハムは, 100インチ望遠鏡を使って, 金星の近赤外領域の高分散スペクトルを撮ることに成功した。これに先立ち, 1922年にはセント・ジョンとニコルソンが近赤外の観測を行い, ほとんど太陽スペクトルと同じで, 期待されていた水蒸気や酸素の吸収帯の見えないことを報告している。しかしながら, こうした分子は, 地球大気にも豊富にあるので, その吸収が強く, 僅かなドップラー効果を利用して金星の吸収を分離するには, 良質のスペクトルを必要とする。この問題は1963年にもクリミヤのプロコフィエフとペトロヴァによって論ぜられ, 金星の酸素吸収線がかすかながら見えると報告されているが, 最終的には大気外の観測に頼らねばならない。1964年には, ボッチャ等によって, 無人望遠鏡をのせた気球が27kmの上空に上げられ, 水蒸気の吸収帯については, ついに充分精度の良い観測結果が得られた。それによると, 金星の雲の上の水蒸気の量は, 地球の成層圏と同じ程度である。アダムス, ダンハムのスペクトルでも, 水蒸気や酸素に関しては新しい結果は得られなかったが, 7820A, 7883A, 8689Aの近

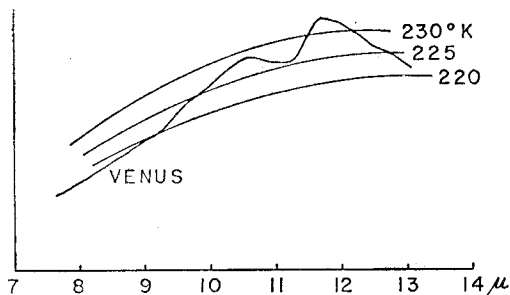


第7図 金星の炭酸ガスの吸収帯の位相による変化。縦軸は吸収帯 $\lambda 7820 \text{ \AA}$ の等価幅に相当するもの。1962年のスピラートの報告による。黒丸は1966年岡山の観測。



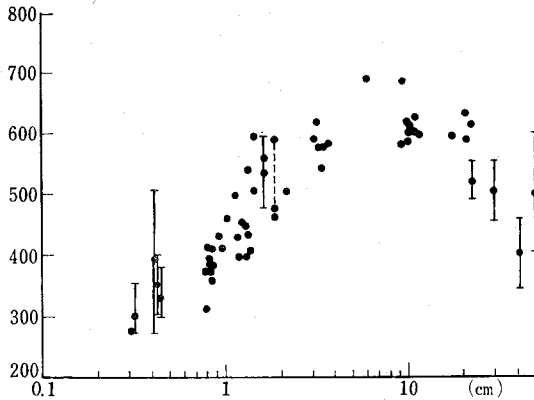
第8図 金星面上での吸収帯の強度変化。縦軸は相対強度、横軸は金星面上の見かけの位置（第3図参照）。実線はチェンパレンの計算、白丸は1966年岡山の観測、位相角 73° 。

くに新しい吸収帯が見つかった。吸収帯の様子から知れる分子の対称性と、惑星大気に有りそうな分子ということで、彼等はこれ等の吸収を金星大気中の炭酸ガスによるものと判定した。まもなく実験室で観測・同定され、金星大気中には、地球大気に較べるとずっと多量の炭酸ガスのあることが知れた。第5図に岡山188cm望遠鏡で得られたスペクトルの一部を示す。これ等吸収の分子論的基礎が明らかになると、1937年にはアデルが、一番強い吸収線の位置から、分子温度 323°K を導いた。その後、吸収の強度分布をもとに、分子温度を出すことが、多くの人々によって行われたが、いずれもアデルの値と大差ないものであった。こうした従来の計算では、



第9図 金星の赤外輻射のスペクトル。縦軸は相対輻射強度、横軸は波長。1960年のシントン・ストロングの測定と、各温度に対応する熱輻射スペクトルの比較。

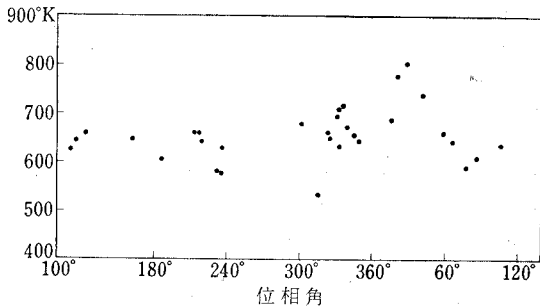
吸収は雲の上の光学的に薄い層で起ると仮定していたが、1956年になって、チェンパレンとカイパーは、散乱と吸収が同じ層で起っていると考えた方が事実に近いと主張した。このモデルに従うならば、分子温度は 280°K 程度になる。1962年にはスピラートがこの考えに批判を加え、1965年には、チェンパレンが再び総合的な検討を行っているが、結論は出ていない。金星の雲の上にある炭酸ガスの量は、従来のモデルでは 10^5 atm-cm、チェンパレン・モデルでは 6×10^5 atm-cm と大きな差が出、地球に較べて非常に多いという以外に確かな数字はない。炭酸ガス/酸素比が大きいことから、金星には植物が存在しないとか、炭酸ガスが岩石と化合しないように、全面海で覆われているといった推測も生れている。吸収線の幅の広がり具合から、吸収の起る層での気体圧を出せるが、スピラートのモデルでは1.5気圧～5.6気圧、チェンパレンのモデルでは1気圧～1.5気圧を得、金星表面では10気圧には達すると思われる。実験と較べると、いずれにせよ、観測されている程度の炭酸ガスだけではこの値を説明できず、窒素のような不活性で多量にありそうな気体が、金星大気の大部分を占めていると思われる。金星は太陽に近いので、オーロラのような現象が甚しいだろうという予想から、1953年にはクリミヤのコズレフが、金星の縁辺のスペクトルを詳しく解析し、3914Å, 4278Å 近くに、実際 N_2^+ の輝線帯の痕跡を見出している。更に、ウーレイとブリュワーは、1957年になって、コズレフのスペクトル中の痕跡に CO^+ や CO_2^+ もあると発表している。観測は波長の長い側に伸び、カイパー等は1948年以来キットピーク、マクドナルドなどで、シントン等は1958年からローエルでスキャンを行い、波長 $1\mu \sim 2.5\mu$ の領域のスペクトルに、数多くの炭酸ガスの吸収帯を同定している。最近では、ゲビー等が干渉計を利用する方法も採用している。この領域では、炭素や酸素の同位元素を含む炭酸ガスの吸収線が見つかり、第6図に示すように、これ等の線の強さに特に異状が認められないことから、金星上の同位元素組成は地球上と同じと結論される。残念なことに、炭酸ガス以外の吸収帯は見つかっていない。吸収帯強度の位相による変化は、1956年にチェンパレンとカイパーによって初めて報告された。スペクトルを撮るとなると、露出時間が長くなるので、内合外合近くの観測は困難で、良質の観測資料は、もっぱら半月に近い位相に集中していた。図7は変化の様子を示し、これを良く説明するものとして、チェンパレン等は大気を見る角度の違いによる、見透しの効果を挙げている。以上は、金星面上をならしたスペクトルについてであるが、これからは、面上の各点でのスペクトルを較べることになる。この種の観測は、大きな望遠鏡と、良いシーイング



第10図 金星の電波スペクトル。縦軸は輻射温度、横軸は cm で表わした波長の対数。1965 年迄の資料による。

を絶対に必要とする。第8図には、チエンパレン等のモデルから予想される面上の吸収帯強度分布と、岡山での観測結果を較べてみたが、こうした比較においては、前に述べた表面での系統的不均一性を含むモデルが欲しい。

III. 赤外領域 近赤外のスペクトルから推定されるように、金星の雲の近くが 300°K 位だとすると、金星自身の出す熱輻射は 10μ 前後で最大となる。この波長域では、太陽からの散乱光も弱くなり、 $8\mu\sim 13\mu$ の間は地球大気の吸収も少ないので、金星の温度をじかに測れることになる。こうした試みは、既に1924年にプチとニコルソンが、適当なフィルターと熱電対を組合わせて行っている。彼等が1955年、60年に、新しい結果を報告した他、1963年のムーレイ等の仕事もあるが、よく使われるのは、100インチ、200インチ及びローエルの42インチ望遠鏡を使って、分光器と熱電対の組合せでスキャンもしたシントンとストロングの1960年の結果である。観測結果を見て一番妙に思われるのは、わずかな局所的な差を除くと、昼の部分と夜の部分、満月の時と新月の時の温度が、測定精度内で全く同じことで



第11図 金星の電波輻射の位相による変化。縦軸は輻射温度、横軸は位相角、 $\lambda 3.75\text{ cm}$ 。1966年のディッケルの報告による。

ある。第9図のようにして、熱輻射のスペクトルから導くと、その温度は約 230°K となる。この現象は、かつては、速い自転や激しい乱流を仮定して説明がなされたが、この領域に期待される顕著な炭酸ガスの吸収帯が観測されないことなども考え合せて、 10μ 辺では、雲よりずっと上の層を見ているらしいというのがシントンの考えである。赤外領域の観測では、緑で強度の落ちる縁辺効果が見られる。これを適当なモデルで説明しようとして、1956年にキング、1961年にシントンがそれぞれ輻射平衡にあるグレイあるいはノン・グレイの大気を計算し、1964年にはグッディが等温散乱大気を、1965年にはチエンパレンがポリトロブ散乱大気を扱っている。また、1964年のサガンとボラックの考察では、マリナー2号の測定結果も使っているが、どの場合も、パラメーターの取り方次第で、あまり無理のない説明ができるように見受けられる。

IV. 電波領域 赤外領域の熱輻射が雲の上から来ているとすると、以上に述べた波長域の観測では、金星の地表の様子を直接に知ることはできない。そこで、マイクロウェーブ領域の電波観測が可能になると、大きな期待をもって、望遠鏡は金星に向けられた。太陽電波が邪魔をする内合のごく近くを除くと、金星は地球に一番近づく惑星なので、観測は割合に楽とされている。1956年のメイヤー、マックロー、スロネイカーの 3.15 cm での観測を初めとして、ドレイク、クツミン、バレット他多くの人達の観測が続き、現在迄には、 3.2 mm から 40 cm に及ぶマイクロウェーブ領域の資料が集まっている。第10図は、内合近くでの観測から得られた金星の輻射温度を波長に対して記したものである。このようなスペクトルは、金星のヴァン・アレン帯から出るシンクロトロン輻射としては説明し難い、また、 600°K 位の電離層での自由-自由遷移輻射とすると、電子密度が地球の場合の千倍にも達し、説明できない。実際、1962年の金星大接近に飛んだマリナー2号の測定では、金星の外縁では、かえって電波が弱くなることが示されている。今日一般に行われている解釈では、マイクロウェーブ領域での吸収が小さいことから、第10図は金星地面近くの温度分布を示すものとし、 3 cm より短いところでは、吸収が次第に強くなるので、雲の影響が入ってくると考える。雲の層に較べて、地表面の温度が著しく高いことになるが、これは「温室効果」と呼ばれるもので、火山などの地熱を考えない場合は、入ってくる太陽輻射に対する吸収より、出て行く金星の熱輻射に対する吸収が大きいと考えると説明される。「温室効果」については、今迄は定性的にしか論ぜられなかったが、1966年になってウィルトが簡単なモデルについて輻射方程式を解いている。

外合近くの観測は、金星までの距離が大きくなるので困難であったが、レーザ技術が取り入れられて、電波測定之感度が上るにつれ可能となった。金星の全ての位相についての観測は、初めて 1966 年にディッケルによって報告されている。この波長 3.75 cm の観測は、ミシガン大学の 85 フィート電波望遠鏡を使って、1962 年の 9 月から 64 年の 5 月まで行われ、アンテナの歪みを含む様々な補正ののち、第 11 図のような結果が得られた。これを見ると、太陽に照らされている外合近くと、その裏面を見ることになる内合近くで、温度差のあることに気付く。他の波長での測定は全位相を覆っていないが、このような傾向は明らかで、しかも短波長のもの程差が大きい。もっと詳しく観察すると、温度が極値をとる位相は、内合外合、即ち 180° 、 360° よりも僅かに遅れている。これ等の事実は、前に触れた系統的不均一性につながるもので、1965 年にポラックとサガンは、金星の自転と、地殻の熱特性をもとに説明を試みている。自転や地殻物質についての情報は、レーダーで電波を送り、金星面からの反射を受けて分析することによっても、直接に調べることができる。1964 年のカーペンター及びゴールドシュタインの報告では、ドップラー効果から、金星の自転軸と公転軸が 10° と違ってないこと、自転は 250 日周期の逆回りであることなどを明らかにしているが、これ等の結果は他種の電波観測の結果と定性的によく合う。カーペンターは更に、金星地殻による散乱を解析し、表面は乾燥した岩地か砂地であると結論している。

レーダー観測では、大気の影響が少いように、例えば 10 cm というような波長を選ぶが、逆に、大気の影響が利きだす 3~4 cm 近くを利用して、金星大気中の分子による吸収線を見つけることができれば、雲の下の濃い大気について、多くの資料を得ることができる。1963 年には、バレットによって、惑星大気で考えられるマイクロウェーブ領域の吸収線が論ぜられたが、金星で面白いと思われる炭酸ガスや窒素の分子は、双極子モーメントが無いために、普通の状態では吸収線を作らない。ステーリンとバレットは、1966 年に、予想された 1.3 cm の水蒸気の吸収線らしいものを観測したと報告しているが、レーダーで送る波長が連続的でないので、精度が悪い。

電波観測とつき合わせるような雲の下の大気モデルと

しては、地表近くで 10~30 気圧 (75% の炭酸ガス、22~25% の窒素、3~0% の水蒸気)、 580°K の対流大気を考える、1961 年のバレットのものの他いくつかあるが、まだ任意性が大きいように思われる。

おわりに これ程様々な方法で物理的観測の行える対象も少いだけに、それぞれの結果をどう関連づけて、統一された金星表層のモデルを作りあげるかは、誠に興味深い、そろそろそうした仕事の機が熟してきたようである。上に触れた研究の論文を全て紹介するスペースがないので、関心のある方々のために、鍵となる文献を挙げておく。詳しくは、更にそこに引用されている文献を芋蔓式にたどって頂きたい。

一般参考書: Handbuch der Physik LII (1959);

G. P. Kuiper and B.M. Middlehurst: Planets and Satellites (1961);

XI^e Liège Symposium: La physique des Planètes (1963); IAU Symposium No. 23: Astronom. Observation from Space Vehicles (1964);

I: V.V. Sharonov: The Nature of Planets (1958);

II: J.W. Chamberlain: Ap. J., 141, 1184 (1965);

III: W.M. Sinton and J. Strong: Ap. J., 131, 470 (1960);

B.C. Murray, et al: J. Geophys. Res., 68, 4813 (1963);

IV: A.H. Barrett and D.H. Staelin: Space Sci. Rev., 3, 109 (1964);

J.B. Pollack and C. Sagan: Icarus, 4, 62 (1965);

マリナー 2 号: F.T. Barathetal: A.J., 69, 49 (1964);

レーダー: R.L. Carpenter 他: A.J., 69, 1~71 (1964);

線マイクロウェーブ: D.H. Staelin and A.H. Barrett: Ap. J., 144, 352 (1966);

電波全位相: J.R. Dickel: Icarus, 5, 305 (1966);

温室効果: R. Wildt: Icarus, 5, 24 (1966).

なお、ここでは触れなかった 1957 年 7 月 7 日の金星によるレグスの掩蔽については G. de Vaucouleurs and D.H. Menzel; Nature, 188, 28 (1960) を、また、種々の波長で撮った金星の写真を眺めたい方は E.G. Slipher: A Photographic Study of the Brighter Planets (1964) を参照されたい。

雑 報

月の予報位置の精度 E.W. ブラウンの月の理論はも

ともと直角座標について求められ、それを極座標 (経度、緯度、視差) に変換し、さらにブラウンは予報計算に便利のように月行表を作った。この過程においてブラウンはだんだんに精度を落しているのであるが、それは