

低温度星における固体粒子

上 条 文 夫*

だいたいにおいてあまり進んでいない、低温度星の研究の中でも、一番わかっていないのがこの固体（液体を含む）粒子の話だろう。文字どおり雲を掴むようであるが、現在知られていることを記述してみよう。若干、筆者の主観が入っている部分もあることに注意してほしい。

I. 固体によって説明されたことのある観測的事実

1) さそり座アルファ星

だいぶ昔の話になるが、1950年と1952年の、月によるこの星の「えんべい」の時に、Evansは光電観測から次のような結果を得た。この星の表面の輝度は一様でなく場所により10%~20%変わる。しかも、1950年には視直径が0'25であったが1952年には0'50になった。

だれでも、これは、地球の大気「ゆらぎ」等による観測の誤差と思うだろうが、Evans (South African Journal of Science, September 1952, p. 41)によると、光電測光の誤差は星の直径の1/8程度であるし、又、PretoriaとCapeという十分に離れた二地点での観測が、月の「ふち」の地形の違いや、光の回折の影響を差し引けば大体同じ結果になるという。

この星は赤色超巨星(M1 Ib)でB型の星と連星をなし、全体がScorpio-Centaurusの反射星雲の群の中にある。そのB型星のスペクトルにはFeIIの禁制線が輝線で見えるが、水素の輝線は見えない。赤色巨星としては少し変わっているともしえる。

Struve, O'Keefe等はこれ等の現象を説明するのに固体粒子を導入した。O'Keefe (Coll. Liège, 15, 1955)の説によると、星の表面からプロミネンスのようにガスが吹き出し、やがてその中のSiO₂のような沸点の高い分子が固体に変わり、星の光を散乱している。適当な状態量を仮定して簡単に推測すると、約40日で1ミクロン

に成長するという。つまり彼は、気体よりも固体の方が吸収係数が大きく、そのため少しの量で観測が説明できることに目をつけたのである。

2) かんむり座R星

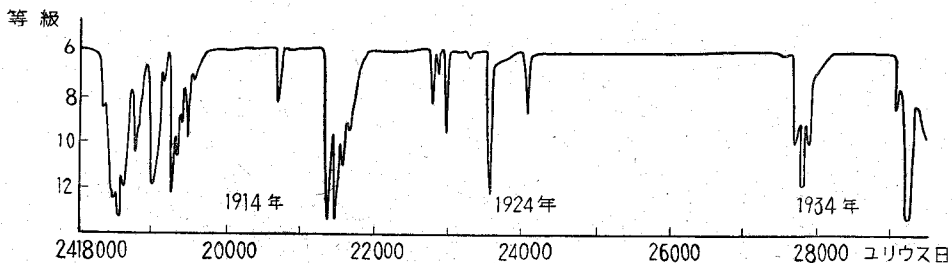
この星は第1図のように、普通はいつも6等くらいの同じ明るさで、数年~10年に一度、急激に暗くなる。1~2月の間に14等くらいまで落ちることもある。回復するのはおそく数カ月~数年かかる。そして、この急激な減光はまったく不規則でいつ起るかはや予測できない。このような不規則でしかも激しい変光は脈動などの普通の原因からは起りそうもない。

この星はF型の巨星であるが、その化学組成も全く普通と変っている。Searle (Ap. J., 133, 531, 1961)によると、H:He:(重元素)が0.0005:0.91:0.09で(重元素のうち75%は炭素である)ある。つまり、ほとんど全部はヘリウムで、残りの大部分は炭素からなる。

O'Keefe (Ap. J. 90, 294, 1939)はここでも固体により説明しようとしている。星の表面からガスが吹出すと断熱膨脹によって温度が下り、グラファイト(固体炭素)の粒子が析出する。これが可視域の光を吸収して急激な減光を起す。そして、その雲が星の外の空間に次第にうすれながら拡がって行くと、ちょうど霧がだんだん晴れていくように、星は次第に明るさをとりもどす。しかし、変光は8等にも達するので、ただ吸収しているだけでは毛布効果により輻射がたまって温度が上ってしまうはずである。そこで、一度吸収された光は、赤外域で放出されていると考える。星の半径の数十倍外で固体ができたとして、その固体が1000°Kぐらいの黒体輻射をしていると考えると、話がうまくあう。

つまり、O'Keefeのこの考えによると、この星は全輻射光度では全く変光しないことになる。将来、赤外域の観測が行なわれれば、正しいかどうかすぐわかるだろう。この星の場合星の化学組成が異常で、飽和蒸気圧が

小さく、光の吸収係数の大きいグラファイトができやすいことからこのような説が生れたのであろう。



第1図 かんむり座R星の変光曲線

* 東大理学部

F. Kamijo; Solid Particles in Late Type Stars.

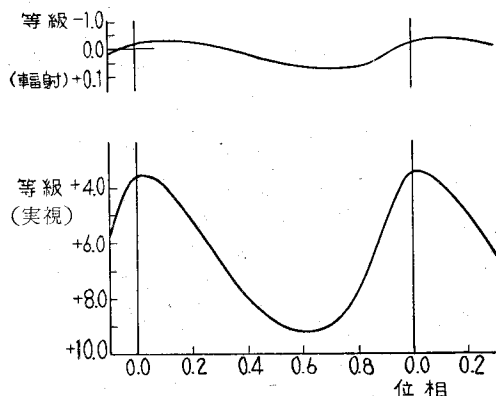
3) ぎょしゃ座イプシロン星

この星は、F2型超巨星の主星とK5型超巨星の伴星からなる食連星で、約27年に一度食を起す。この星には他の食連星にはない妙なことがいくつかある。その一つに、黄色の光と、青い光とで食の時の変光量が変らないということがある。(普通はこの種類の連星では青の方が大きい。)したがって手前にあるK型星の大気の吸収が波長によらず一定でなければならない。そのようなものには、自由電子のトムソン散乱と光の波長より大きい固体の吸収や散乱がある。Struve等はこの連星の大気中に固体の存在を仮定することにより観測を説明しようとした。しかし、この説は現在あまり有力でないらしいので(Struve, Sky & Telescope, 23, 129, 1926), 詳しいことは省略する。

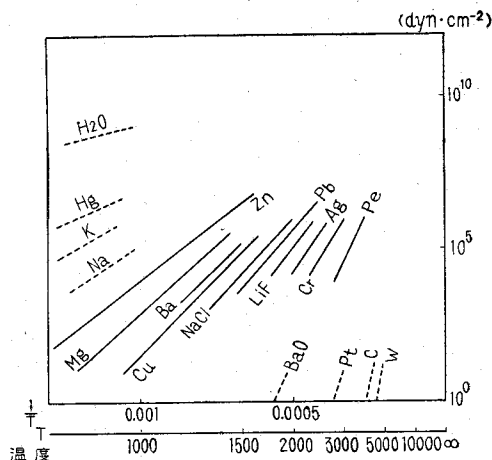
4) ミラ型変光星

以上の三つの星は非常に特殊な例であるが、やや一般的な例はMerrill (Spectra of Long-Period Variable Stars, Univ. of Chicago Press, 1940; Stellar Atmosphere, Univ. of Chicago Press, 1961) のミラ型変光星の話である。

ミラ型変光星には光度変化の非常に大きな星がある。白鳥座 χ 星では9等も実視等級が変わるが、これは明るさが4000倍変わることを意味する。しかし全輻射エネルギーの変化ははるかに小さい。この種の星は低温度であるため輻射エネルギーのほとんど全部は波長 $1\mu\sim 2\mu$ というような赤外域で出る。この波長域の測光は大昔にPettitとNicholsonによって行なわれた。これと実視等級の変化を並べて第2図に示す。全輻射等級の位相による変化は非常にわずかである。白鳥座 χ 星で、この観測から極大光度と極小光度の時の温度差を出す 600° になる。これから黒体輻射の式を使って、6000Aでの光度変化を計算してみると、4.3等になり、上記の9等よりはるかに小さい。したがって可視域の光だけさ



第2図 ミラ型変光星の実視光度曲線と輻射光度曲線



第3図

えぎるものを考えなければならない。第1に考えられるのは分子帯の吸収である。温度が下ると分子は増すので、極小光度の時の吸収は強くなり、光度変化は誇張される。そして、第2にMerrillは低温度の位相での雲の出現を考えた。彼は1等ぐらいいはこれによるかもしれないと書いている。

この問題には後でまたふれる。

5) N型星(低温炭素星)

HoyleとWickramasinghe (M. N. 124, 417, 1962)は半径 10^{-5} cm以下のグラファイトの粒子の吸収の波長変化が観測される星間物質の吸収曲線によく一致することから、炭素星の大気でできたグラファイトが星の輻射圧で星間空間に飛ばされ星間物質となっているといった。さらにその後Wickramasinghe (M. N. 126, 99, 1963)は反射星雲の反射率もより良く合わせるために、このようにしてできたグラファイトの周囲に星間空間で水がくっついて星間物質を作っているとした。

この問題についても後で述べることにする。

II. 固体ができるための条件

ある種類の気体が固体(液体を含む)になるためには、気体の圧力が、その温度での固体の飽和蒸気圧以上に増さなければならない。2種類以上の分子の混合気体の場合も、ある種類の分子の分圧とその飽和蒸気圧を比較すればよい。一般に飽和蒸気圧 P と温度 T の間にはClausius-Clapeyronの式 $\log P = A - \frac{B}{T}$ (A, B は物質によって違う定数)という関係がある。いくつかの例を第3図に示す。第3図に示されるように、温度が無限大に近づくとき全ての物質の飽和蒸気圧は経験的に $10^{12.5}$ dyn \cdot cm $^{-2}$ 附近に近づく。(Zwicker: Physical Properties of Solid Materials, Pergamon Press p. 168, 1954)

さて、気圧が飽和蒸気圧を越えればすぐに核化(nucleation)が始まるかという、必ずしもそうではない。

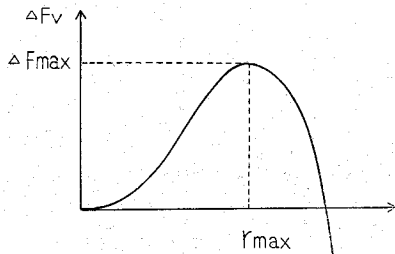
よく知られているように、何か“しん”が必要である。気象学者の話によると雲の水滴又は氷滴は塩や硫酸イオンを核として作られるそうである。十分に大きな核があれば、飽和に達したほとんど直後から、分子運動によってそれに衝突した気体分子の何割かは、普通固体（又は液体）になってそれにくっつく。このようにして固体粒子は急激に成長する。しかし、星の場合このような“しん”は期待できないかもしれない。

“しん”のない場合、固体粒子の生成はおくれるが決してできないわけではない。自分で“しん”を作ってそれを中心に成長していく。(Homogeneous Nucleation という)これを推定する方法に、VWBD の理論がある。(Seitz and Turnbull, Solid State Physics, 3, Academic Press, p. 256, 1956)これは、ウィルソンの霧箱の実験などで、かなり実際とよく合うことが確認されている。

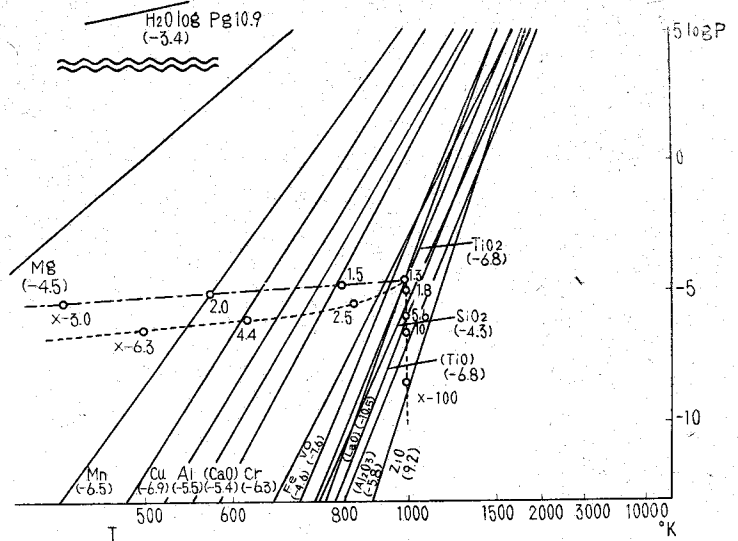
この理論では、気体状態では原子が集ってできた“かたまり”が蒸気と平衡にあり、これが固相の核になり、しかも固相と同じ自由エネルギー・表面エネルギーを持つとする。この核みたいなものの自由エネルギーが、気体の時とくらべて ΔF だけ変化しているとすると、

$$\Delta F = \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \Delta F_r + 4\pi r^2 \cdot \sigma$$

と書ける。ここで、 ΔF_r は気体と固体の自由エネルギーの差で、圧力が飽和蒸気圧に等しい時 0 で、それをこえとさらにへる。 σ は単位面積あたりの表面エネルギー（正の量）である。したがってこの式を定性的に図に書くと第 4 図のようになる。 r が r_{max} になったとき ΔF は最大値をとる。さて、化学反応は自由エネルギーを小さくする方向に進むから、 $r < r_{max}$ の粒は成長して固体粒子となり、 $r > r_{max}$ のものは平均として消滅する。すなわち、 $r \leq r_{max}$ のものが固体粒子を作るときの“しん”になる。その数は熱平衡を仮定すれば Boltzmann の式から $n_{max} = n \cdot \exp(-\Delta F_{max}/kT)$ で与えられる。これで“しん”の大きさや数が定まった。あとは



第 4 図



第 5 図

異分子の核の時と同様である。(この場合は、平衡状態からのずれを表す補正項をいれることがあるが)。固体を生ずることによる圧力の減少や、粒子の表面の曲率による飽和蒸気圧の変化などを同時に入れた式を作れば、粒子の半径の時間的変化を追跡することができる。

III. 一般の低温度星に固体があるか

1) M型星

M型星の化学組成は太陽とあまり変わらないと考えられている。Yamashita (P.A.S.J. 14, 390, 1962) はM型星での分子の解離平衡を計算した。これから、金属の酸化物など飽和蒸気圧の小さい分子の分圧を簡単に求めることができる。

一方、M型星にある分子の飽和蒸気圧の実験値は比較的知られている。(Goldsmith, et al., Handbook of Thermophysical Properties of Solid Materials, Macmillian Company, 1961; Washburn, ed., International Critical Table, 3, McGraw-Hill, 1928.)

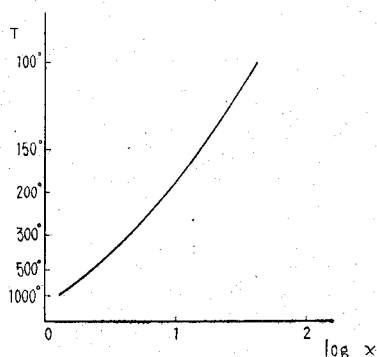
この二つを比較すれば、その分子が固体になる可能性があるかどうかすぐわかる。これを第 5 図に示す。ただしこの図で各分子の飽和蒸気圧はそれぞれの分圧に対してでなく、全圧力に対して与えてある。つまり、ある $(T, \log p)$ の点をグラフ上に考えた時、その点の右下側にある直線で表わされている分子は固体になり得る。ただし、星の外では星の輻射による原子の電離や分子の解離を計算に入れなければならない。たとえば鉄の原子ではこのグラフの約 1 割にへる。このグラフを眺めると、 2000°K のとき $p < 10^4 \text{ dyn}\cdot\text{cm}^{-2}$ ならばどの分子も気体であることがわかる。すなわち、M 型の巨星や超巨星の大気中では固体はできない。ただし、主系列星の大気には固体があるかもしれない。

次に星の周辺 (Circumstellar Envelope) を考えよう。M型超巨星のオリオン座アルファ星のスペクトルに出る Circumstellar line の成長曲線から Weymann (Ap. J., 136, 844, 1962) は原子の励起温度・圧力・各原子の量等を求めた。低温の超巨星では星からガスが常に流れ出していると考えられているが、Circumstellar line が細いことから、星からの距離に関係なくそれが様な速さとする、表面から星の半径の3割ぐらい離れたところを主に見ていることになる。この点の ($\log p, T$) は第5図の黒丸のところにくる。つまり、いくつかの分子は固体になる可能性がある。このうち、 SiO_2 などをもっとも多い。つまり、I-1 の O'Keefe の話のようなことが、いつも様におこっていることになる。

この場合の固体の生成に VWBD の理論は使えない。気体分子のうち、 SiO_2 等のごくわずかなので、温度が急激に下る間に衝突の数が少なく、定常状態を仮定することができないからである。やむをえず、分子が衝突すれば必ずくっつくという近似を使って計算する。結果は約 10^8 個の分子を含む固体が $10^{-4} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ いつもあることになる。可視域での光の吸収を推定すると、(このように小さな ($r \sim 2 \cdot 10^{-7} \text{ cm}$) 粒子に古典的なレーリー散乱の式を使うのは危険であるが) 光学的深さは 10^{-5} 程度になる。ガスが様でなく condensation があつたり、 SiO_2 等の表面に後に Fe 等の金属分子がついたりするとこれはもっと大きくなるが、観測にかかる程度にはならない。

これは、前に述べたミラ型変光星での Merrill の仮説とまったく相反する。

次にこれ等の粒子の温度を推定する。星の周辺空間で固体粒子を温める原因は、気体分子の衝突と固体分子の格子振動による星の輻射の吸収であり、冷すのは同じく格子振動による光の放出である。これらをつり合わせると固体の温度の変化がわかる。これを第6図に示す。また、これに相当する線を第5図に鎖線で表わす。星の半径の50倍~100倍の距離のところ、この固体の温度に相当する飽和蒸気圧はその点での水蒸気分圧より小



第 6 図

さくなる。つまり、 SiO_2 等からできている粒子の周囲に氷が附着しはじめる。(このように低圧なところではこのような古典的な扱いをするのはよくないが、一応の見当は

温度 ($^{\circ}\text{K}$)	飽和蒸気圧 ($\text{dyn}\cdot\text{cm}^{-2}$)
1950	10^{-5}
2060	10^{-4}
2180	10^{-3}
2320	10^{-2}
2650	10^0

つく)。星間空間のダストをM型巨星が供給しているのである。さらに乱暴な話になるが、 5×10^9 年間現在とM型巨星の数が変わらず、ダストがたまつたとすると、約 $10^{-27} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ になり、氷が附着しないとしても観測される量の約 1/10 となる。星間空間の固体粒子の生因の一つにはなりそうである。この節の話は：(Kamijo, P.A.S.J., 15, 440, 1963) による。

2) 炭素星

炭素星は化学組成がまだほとんどわかっていない。したがって第5図のような図を書くことはできない。しかし、炭素が酸素より多いため TiO などの金属酸化物はなく、炭素と $\text{H}_2\text{N}_2\text{O}$ との化合物が重要になってくる。たくさんあるこれらの化合物のうち、炭素星の大気や周辺空間で固体になる可能性のあるのはグラファイト(固体炭素)だけである。その飽和蒸気圧を上表に示す。

炭素星では大気圧力さえもよくわかっていないが、Fujita, Tsuji (in preparation) はりょうけん座Y星のスペクトル分析から、 $\text{Pg} \sim 10^3$ を得た。この星の温度は $2500^{\circ}\text{K} \sim 2700^{\circ}\text{K}$ であることがやはりスペクトルからわかっている。(Utsumi, P.A.S.J. 15, 482, 1963; etc), この圧力と温度のとき炭素の組成を適当に仮定すると分子の解離平衡の計算から (Tsuji, in preparation) 炭素の分圧は約 $10^{-1} \text{ dyn}\cdot\text{cm}^{-2}$ になる。これを上の表と比較すると、固体ができるかできないかのさかいぐらいになる。成長曲線に寄与する点より少し外では固体ができる可能性がある。りょうけん座Y星より低温の炭素星もあるから、これらの星の大気ではグラファイトが存在する可能性は強い。

ミラ型変光星の炭素星で、変光の位相にしたがって固体が作られたり消えたりできるかどうかを VWBD の理論で調べると、温度が 2000°K 周期が 300 日温度の振幅が 200°K の変光星の場合、炭素の分圧が $10^{-5} \text{ dyn}\cdot\text{cm}^{-2}$ という小さな値の場合でも飽和蒸気圧を越えてから約 20 日で生成を終る。また、炭素の分圧が $10^{-1} \text{ dyn}\cdot\text{cm}^{-2}$ の場合は 0.2 日程度である。もちろん、なにか異分子の核があればもっと速い。(Kamijo, 天文学会 秋期年会, 1963) 故に星の大気では過飽和の状態はほとんど存在しない、実際の星では、グラファイトができると毛布効果により温度が上るので、固体の生成は妨げられる。詳しいことは、このことも同時に考えに入れて粒子の成長を

追跡してみないとわからないが、大体的見当では、可視域でのグラファイトの吸収は 0.5 等以下になる。

前に述べた Hoyle と Wickramasinghe の話では、変光星が脹らんで大気の温度が下がった時に生成され、縮んで温度が上がる前に星の輻射圧により星間空間に吹飛ばされるグラファイト粒子のみが取扱われている。グラファイトを作っている場所でグラファイトの吸収による光学的深さが 1 スケールハイトで 1 になり、(その場所が星の表面である条件) 又、大気の粘性抵抗にさからって変光の半周期の間に輻射圧で外に飛ばされるという二つの条件を満たすには、炭素星の物理量を適当に仮定すれば、①炭素の分圧は $10^{-3} \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-2}$ より小さく②炭素のうち 10^{-2} 程度が固体になればよい。2300°K 以下の炭素星でこの条件は満たされるから、炭素星から星間物質が供給されていることになる。グラファイトの大きさは約 10^{-5} cm で、全ての N 型星からの放出を計算すると 3×10^9 年で

現在観測されている星間空間のダストの量を作り出せる。

IV. 結び

多数のミラ型変光星で、周期・変光の振幅・不規則性等が M 型と C 型で統計的に違うかどうかを調べてみたがはっきりした差を発見できなかった。脈動には星の構造その他いろいろなものが関係してくるのでこのことから固体についての結論を出すことはできないが、変光星の性質に重要な影響をおよぼしていることはなさそうである。しかし将来、位相差の問題をミラ型変光星でも取扱えるようになれば意味を持つてくるかもしれない。

低温度星における固体粒子は現在星間物質の供給源としてももっとも興味がある。

最後に、いろいろ教えて下さった白鳥紀一氏(東京大学物性研究所)に深く感謝する。

研究室だより

空電研電波天文研究室

空電研究所は名古屋大学の附置研究所で、空電観測法、空電のスペクトル、空電の統計的性質、ホイッスラー空電、VLF 放射、ELF 電波、雷等空電に関する研究室が大部分ですが、その外に天体電波の研究室があります。空電とは御存知のように雷から発生する電波で、天体電波と空電とは直接関係はありません。よくここに来る方が、どうして空電研究所で天体電波(といっても主に太陽電波ですが)の研究をしているのかといわれますが、空電の伝播—超高層—太陽—太陽電波というようなことになっています。

研究所はお稲荷さんで有名な愛知県豊川市にありません。最近周囲に工場が沢山つくられ少しにぎやかになりましたが、昔は狐が住んでいた草深い淋しいところで、とても人の住めるようなところではありませんでした。今でも野兎、きじ、いたち等を時々見かけます。今から約 13 年前 T 教授により 3750 Mc/s の太陽電波の観測がここではじめられました。それ以来この観測はずっと続けられカナダのコヴィングトンの 2800 Mc/s の観測について歴史の古いものになっています。続いて 10 年前にビーム幅 4.5 分(角)の 4000 Mc/s 干渉計がつくら

れ、I.G.Y のはじめからは 1000, 2000, 9400 Mc/s の観測も加えられました。お稲荷さんの悪口をいうわけではありませんが、T 教授の信心ことのほか厚いにも拘わらず、お金にあまり縁がなく、仕方なしに装置のほとんどを部品を買って来て自作(人はこれをたたくというようです)しなければなりません。時には研究室全員で穴を掘り、コンクリートをこねると云うわけです。最近京都から Y 助手が来て、T 教授も驚く程のたつきようで、とうとう 10 米パラボラアンテナも自作してしまいました。ここでコマーシャルを一つ。

パラボラ建設に限らず土木建築一切、設計施行。

T 工務店。

というのをテレビに出せばよいという口の悪い人がいます。しかし T 教授設計による観測装置、観測精度のよいことは次第に認めて頂けるようになりました。

現在やっている観測は、1000, 2000, 3750, 9400 Mc/s における太陽電波の強度と偏波、4000 Mc/s と 9400 Mc/s の太陽面上輝度分布(強度と偏波) 2000—4000 Mc/s 太陽電波バーストの強度偏波動スペクトル、3750 Mc/s 銀河電波の観測です。昨年つくった 9400 Mc/s 複合干渉計は分解能 0.7 分(角)というものですが、感度がやや不足でしたので、今 16 個のアンテナを直径 1.2 米から直径 2 米にかえ、伝送線路も矩形導波管をやめて円形導波管にして伝送損失をへらすなど大改造をやっています。(99 頁へ続く)