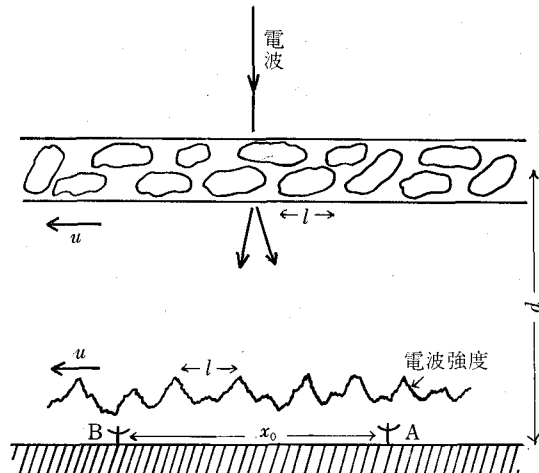


電波星のまたたき

惑星間空間シンチレーション

柿 沼 隆 清*

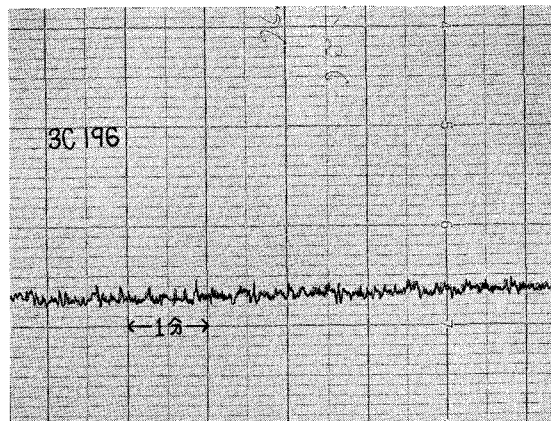
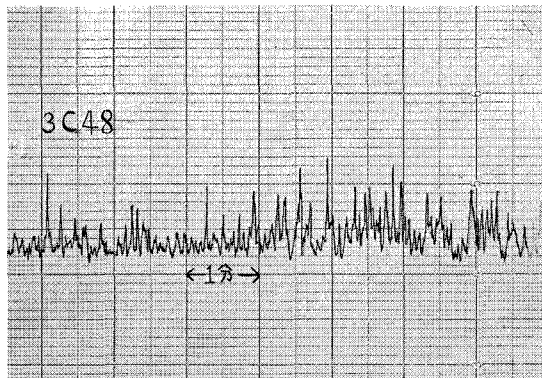
惑星間空間の電子密度のゆらぎにより生ずる準星 (QSS) のシンチレーション (Interplanetary Scintillation, 以下 IPS と略す) が発見されたのは 1962 年で, ケンブリッジのクラーク (夫人) が 178 MHz 大干渉計の観測で, 他の電波源ではそうではないのに, 3C 119, 3C 138, 3C 147 の電波強度が異常なふらつきを示すこと, またそれ等が非常に小さい電波源であることに気付いたのははじまるということです。その後 3C 48 などいくつかの電波源について詳しくしらべられた結果, この異常なふらつきは大きな電波源では観測されないこと, ふらつきの周期が早いことなどからそれまで知られていた電離層によるシンチレーションではないことが明らかになってきました。第 1 図で電子密度が一様でない層に電波が入射すると電波は散乱され, そのために地上には回折模様が生じて電波が強くなるところと弱くなるところが出来ます。もしこの層が水平方向に動くと同折模様も同じ速さで動くので, ある点で電波強度を観測していると, 時間的に強度がふらつくこととなります。このとき電子密度の濃淡模様の平均の大きさを l_0 とすると, (電子密度変化の相関がなくなるような距離で, 第一図のように回折模様の平均の大きさ l とほぼ等しい) 電波源の大きさが l_0/d をこえるとシンチレーションがなくなることはよく知られています。今前記の異常なシンチレーションが電離層によると考え $d \sim 200 \text{ km}$ とすると $10''$ 以上の大きさの電波源でシンチレーションがないためには l_0 は 10 m 程度となりますが, そうすると回折理論から分る



第 1 図 電子密度のゆらぎにより生ずる電波のシンチレーション

ように散乱のひろがりは $\sim 10^\circ$ (波長/ l) となり, どの電波源も $< 178 \text{ MHz}$ で 10° 以上の大きさに見えなければならなくなります。このようなことから Hewish 等は $d \sim 1 \text{ A.U.}$ すなわち惑星間空間 (太陽風) の電子密度のゆらぎによってこのシンチレーションが生ずると結論したわけですが, 実際このような電子密度のゆらぎのあることは 1952 年頃から行なわれていたかに星雲の掩蔽の観測で, かに星雲が太陽の近くで大きく見えることから分っていました。

一方 Hewish 等と同じ頃木星電波バーストを観測していた Douglas 等はデカメートル波帯の $1 \sim 10$ 秒の周期を



* 名古屋大学空電研究所
Takakiyo Kakinuma: Interplanetary Scintillation

シンチレーションする星 (3C 48) としない星 (3C 196)

もついわゆる L パーストが惑星間空間シンチレーションによるものであることを見つけています。

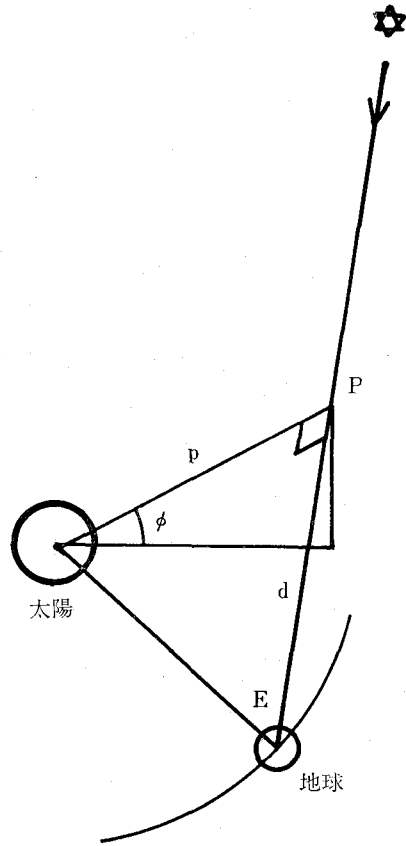
さて準星のシンチレーションが惑星間空間の電子密度のゆらぎによるもので、非常に小さい電波源に特有のものであることが分ると、直ちに2つの応用が考えられました。一つはこれを利用して電波源の大きさ、構造をしらべること、もう一つは太陽から惑星間空間に流れ出している荷電粒子流すなわち太陽風の立体構造をしらべることです。これからこの2つのことについて、これまで行なわれた観測を簡単に紹介し、最後に我々のはじめた観測についてのべたいと思います。

1. 電波源の大きさの観測

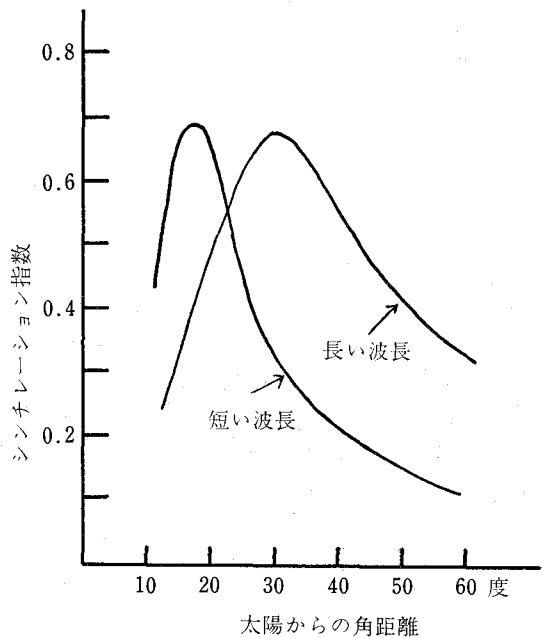
シンチレーションする電波源をシンチレーターと呼びますが、どの電波源がシンチレーターであるかをしらべその大きさをきめる観測は、Hewish 等、米国コーネル大学の Cohen 等、オーストラリアパークスの Ekers 等によって行なわれました。Hewish 等ははじめ 178MHz で観測を行ない、続いて 81.5MHz で行ないました。81.5MHz の観測結果はまだ発表されていないようですが、この観測の途中で Miss Bell によってパルサーが発見されたのは有名な話です。Cohen 等は Arecibo の大アンテナを使って 195, 430, 611 MHz で観測をしています。両グループの観測によると銀河系外電波源の約半分位が IPS をするようで、それらは大きさが大体 $0''.5$ 以下のものです。

シンチレーションの観測から電波源の大きさを求めるには、シンチレーションが電波源の大きさと共に減少してゆくことを利用します。電波源が点源であるときは、第1図のようにある一つの方向から電波が来るので、電子密度のゆらぎに応じて一つの回折模様ができます。しかし電波源にひろがりがあると異なった方向からの電波が互いに少しづつずれた回折模様をつくるので結局点源のときに比べて回折模様がぼけることになります。Hewish と Little はシンチレーションの程度をシンチレーション指数 ((電波強度のふらつきの標準偏差)/(強度平均値)) という量で表わし、これを用いて電波源の大きさと輝度分布とを求めています。その方法はまず理想的な点源の場合の指数を第2図の太陽に対する位置 p, ϕ の関数として求めます。

それには太陽の近くで散乱が強くなると点源であれば指数が1になるはずであるので、指数の大きい 3C 119, 3C 138, 3C 237 を点源と仮定し、これらの観測値を使います。次に実測した電波源の指数の点源の指数に対する比 V (シンチレーション・ヴィジビリティ) を p, ϕ の関数として求めます。そしてこの V を理論値と比較して電波源の大きさ θ と輝度分布とをきめるのです。 V は



第2図 電波源の座標



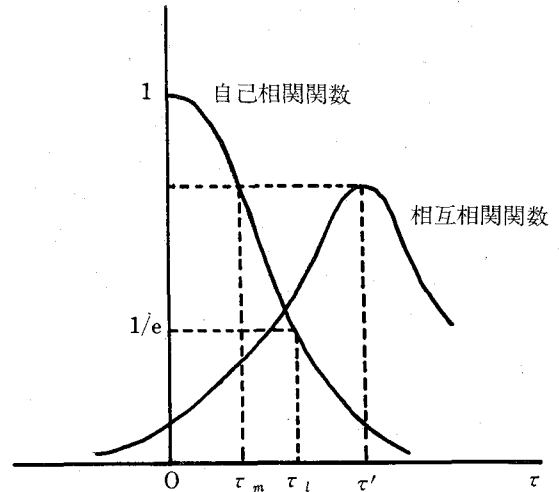
第3図 シンチレーション指数の変化

$\theta d/l$ の関数で、この値が大きいくほど減少し、同時に電波源の輝度分布によって値が大きいくちがってきます。V の理論値を計算するとき d として第2図の EP をとります。それは惑星間空間の電子密度とそのゆらぎは太陽からの距離の自乗に逆比例して減少し、弱い散乱の場合はシンチレーションはゆらぎの自乗に比例しますので、結局シンチレーションに最も寄与しているのは電波の通路で太陽に一番近い P 点付近の密度のゆらぎと考えられるからです。次に l ですが、これが p, ϕ でどのように変わるかはまだよく分っていません。これを求めるには後に述べる多点観測によらなければなりません。Hewish 等は 1953 年以来行なっていたかに星雲の掩蔽観測などから一つのモデルをつくりました。

シンチレーション指数がどのように太陽からの距離によって変化するかを第3図に示します。一つの波長では太陽に近づくにしたがって電子密度のゆらぎが増加するため、はじめは指数が増えてゆきますが、 l が次第に減少してゆくので $\theta d/l$ が大きくなりある距離から逆に減少しはじめます。また指数は波長に比例しますので、波長が短かいと太陽の近くでしかシンチレーションしなくなります。指数の減少がおこるところが波長によって異なるのは太陽に近づいてゆくと長波長の方が早く散乱が強くなりそのために l が l_0 より (l_0 も太陽に近づくにへりますが) 小さくなるためと考えられています。

一方 Cohen 等は別の方法を使っています。回折模様が電波源のひろがりと共にぼけてゆくときは、細かい模様が先に消えてゆきます。すなわち電波強度の時間変化でいえば高い周波数成分が先に消えてゆきます。ある電波源のシンチレーションのパワースペクトルの幅 f_2 (正確にはスペクトルの二次モーメント)、と点源の場合の値 f_0 との比はやはり $\theta d/l$ の関数で、この値が大きくなると減少してゆきます。Cohen 等は f_0 も l もよく分らないとし θ の値の上限を与える式 $\theta \leq \frac{u}{f_2 d}$ を導きました。ここで u は太陽風の速さで Parker の理論値 (~ 400 km) を使います。

Cohen は IPS で求めた電波源の大きさと、大陸間干渉計のような VLB 干渉計で求めた大きさとを比較していますが、両者は大体よく合っていて IPS による方法の分解能は ~ 0.002 であるといっています。しかし上に述べたような方法で求めた値は惑星間空間のモデルによりますので、まず太陽風の構造をよく知ることが重要であると考えられます。また電波を散乱する層は第2図の P 点付近であると考え、薄い層の散乱の理論を使っていますが、この理論だけではうまく説明出来ない場合があるようで、例えばシンチレーション指数が減少するのに f_2 がへらない場合があるとか、非常に小さいと思



第4図 自己相関関数と相互相関関数

われる電波源でも、指数が0.7をこえるものがないとかいうことです。特に太陽の近くでは平均値の数倍にもおよぶスパイクが観測されるなど面白い現象があることが報告されています。層の厚さを考慮して多重散乱の理論でやればどうなるかをしらべることは次にのべる太陽風の観測でも重要な問題であるように思われます。

2. 太陽風の観測

IPS のもう一つの応用として惑星間空間すなわち太陽風の観測があります。この方法はロケット観測のように直接測定ではありませんが、現在ロケットが飛んでいないところすなわち黄道面からはなれたところや、黄道面内でも太陽に近いところの様子を知ることができるという特徴があります。現在宇宙線の異方性の観測、彗星の尾の観測と共に、地上で出来る惑星間空間の研究手段として重要視されています。

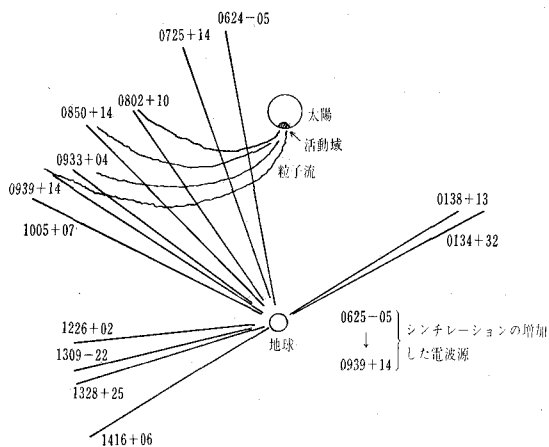
太陽風についての基本的な量として、速度、密度、磁場がありますが、IPS で知ることが出来るのは速度と電子密度のゆらぎです。さらに後者の異方性から磁場の方向を、またそれぞれがなにによって生ずるかが分れば、太陽風内部でどのようなことが起こっているかを推定できると考えられます。

太陽風の速度をはかる方法は昔から行なわれてきた電離層シンチレーションで電離層の風をはかるのと同じ統計的方法です。簡単のために一次元で考えますと、第1図で回折模様が太陽風と同じ速さ u で動くために B 点では A 点より $\tau = x_0/x$ だけおくれで同じ電波強度のふらつきが観測されます。そこで2点で同時に電波強度の観測をはじめた時間測定し、それぞれの時間自己相関関数と相互相関関数を計算しますと、第4図のように相互相関関数の最大が時間的にずれますので、このず

れから u を求めます。また自己相関関数が $1/e$ になる時間から回折模様の平均の大きさが分ります。

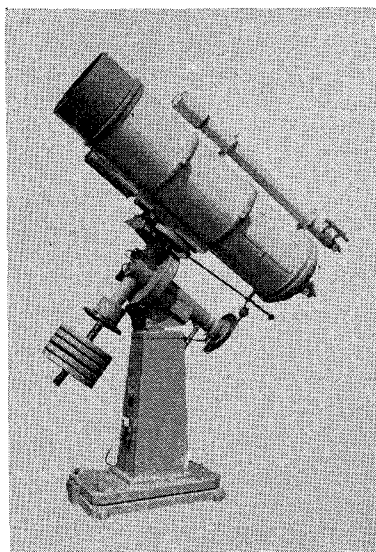
しかし実際には太陽風内の電子密度の濃淡模様は時間的に一定ではありませんので、A から B へ動いてゆく間に回折模様は変化してしまいます。したがって第4図の τ' から出て来るのは見掛けの速さで、実際の速さ u を求めるためには少し複雑な計算を必要とします。詳しいことは省略しますが、 τ' 、 τ_m 、 τ_l から u 、 l および回折模様の寿命 τ_0 が分ります。太陽風の方角を知るためには3点で観測しなければなりません、そのときは3点での自己相関および3つの相互相関関数を計算し同様な方法で、速さ u 、方向 l 、回折模様の平均の形 τ_0 、などを求めます。

これまでケンブリッジの Dennison 等が1966年に波長3.68 m で、互に50~80 km はなれた3点で、またソ連の Vitkevitch 等が1966~67年に波長3.5 m と7 m で互に約220 km はなれた3点で太陽風の観測を行ないました。両者とも3C 48 のシンチレーションを観測していますが、Dennison 等の観測結果によると、黄道面付近すなわち太陽の赤道近くから吹き出す風の速さ300 km/s 位に比べて極の近くからの風は420 km/s と速く、風の向きはほとんど放射状で、平均的回折模様の大きさは150 km、その寿命は1~3秒、形は風の方角にわずか



第5図 太陽活動領域から出る荷電粒子流

このびて軸比2:1位の楕円になっているということで、Vitkevitch 等の観測では太陽の低中緯度から出た風は次第に黄道面の方へ曲り、高緯度から出た風は極の方へ曲っていて Dennison 等の結果と違っています。シンチレーションで太陽風をしらべるとき惑星間空間のどこを見ているかということですが、前にのべたように第2図のP点付近であると思ってよいと考えられます。したがって一つの電波源の観測でも相当広い範囲をしら



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・ジェゴ大学 (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

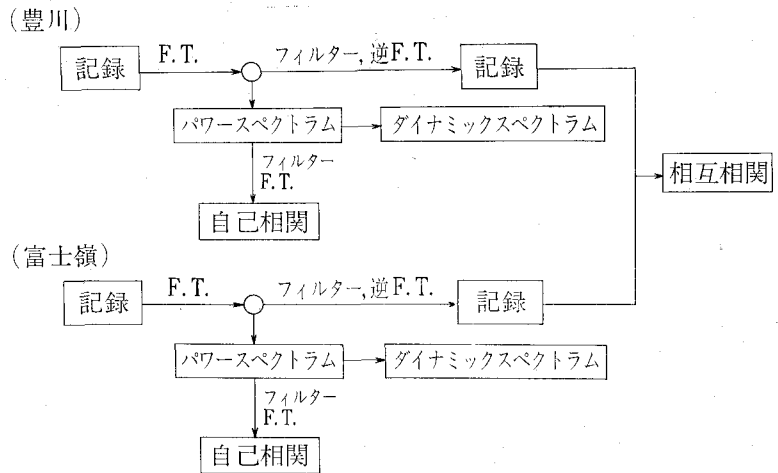
べられますが、太陽風の立体的構造を知るにはいくつかの電波源を同時に観測する必要があります。

太陽活動に伴って、太陽風の速度などがどのように変わるかというような観測はまだないようですが、フレアの後でシンチレーション指数が増加するらしいという報告があります。最近 Dennison はオーストラリア、カルグーラの大干渉計を使って多くの電波源のシンチレーションを毎日観測し、フレアの際に放出される荷電粒子流だけでなく、太陽活動域からでていると考えられる粒子流によってシンチレーション指数が変化することを見つけました。そして毎日の観測から第5図のように粒子流のひろがりを探求しています。もし多数の独立なビームをもったアンテナで、同時に太陽の周りに見える多くのシンチレーターを観測していれば、シンチレーション指数やスペクトルの変化から、フレアの際に波や粒子がどの方向にどの位の速さで、またどの位のひろがりをもって出て行くかが分ると考えられます。

3. 豊川における観測

上に述べたように IPS 観測は太陽風をしらべる有力な手段で、現在オーストラリア、米国などでも多点観測の準備中ですが、われわれも IASY (国際太陽活動期観測年) 事業として、太陽活動期における惑星間空間の状態をしらべるために3点観測を計画しました。そして豊川と富士山麓の富士嶺にアルバム写真のような256(東西16,南北16)エレメントのダイポールアレイをつくり2点で本年6月から試験観測をはじめました。周波数は69.3 MHz 受信帯域幅 1 MHz でダイポール間の間隔は0.6波長、ダイポールの下4分の1波長のところに金網の反射板をしいてあります。このアレイを東西方向に半分に分け位相切換式干渉計として使用し、銀河雑音を記録に出ないようにしています。ビームの半値幅は南北6°,東西約3°で、南北方向に±30°位ビームをふる事が出来ます。受信機は普通の位相切換式で出力は同期整流をする前にテープレコーダーに録音します。このとき2点での同時刻の記録を得るために JJY 時刻信号でゲートを開き 1 KHz の水晶発振器(周波数安定度 10^{-8}) の出力を同時に録音しておきます。

観測結果を解析するときは、このテープを再生し同期整流して電波強度をだしますが、上にのべた 1 KHz の信号を周波数カウンターで数え、50回ごとに同期整流出



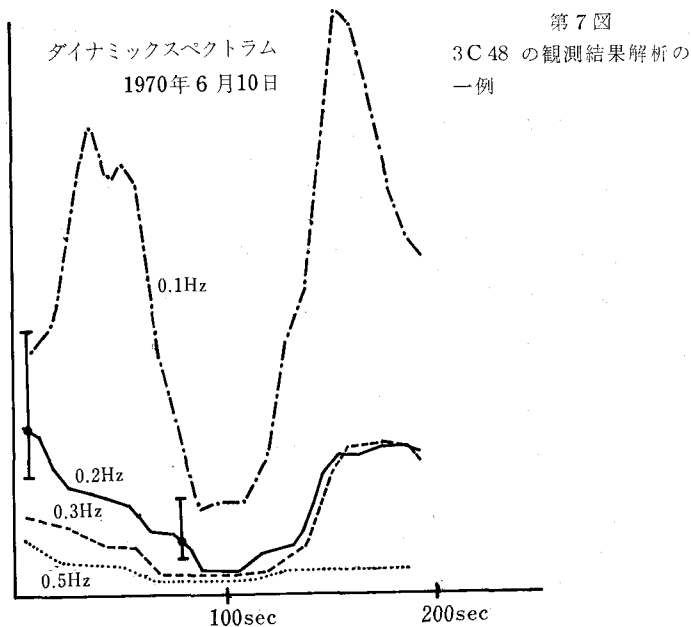
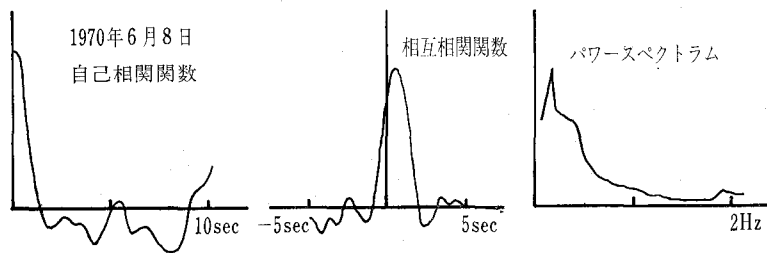
第6図 観測結果の解析

力電圧をサンプリングして数値化し紙テープにさし孔します。そして電子計算機で、パワースペクトル、自己相関関数、相互相関関数を計算します。計算の方法は(第6図)、まず豊川と富士の約100秒間(2048サンプリング)のデータを読み込み、フーリエ変換して振幅、位相の周波数スペクトルを求め、それからパワースペクトルを計算します。これはシンチレーションのパワースペクトルと雑音との和ですから雑音分を差し引かなければなりません。それには雑音は平坦なスペクトルを、また通常シンチレーションは1 Hz以上の成分をほとんど含まないことを利用して、雑音分を推定します。次にシンチレーションのパワースペクトルをフーリエ変換して自己相関関数を求めます。また別に振幅位相スペクトルから雑音による高い周波数成分と電離層シンチレーションによると考えられる低い周波数成分とを除き、逆フーリエ変換してこれらの影響のないデータをつくり、相互相関関数を計算します。そしてこのようなことを3回くりかえし平均をとります。

これまでに 3C 48, 3C 147, 3C 196, 3C 286, 3C 298 を観測しました。2点であることと、経済的な理由でアンテナの大きさを必要最小限にしているため S/N 比がよくないこととのために 3C 147, 3C 196 ではよい結果が得られていませんが、3C 48 について第7, 8図のような結果が得られました。

第7図で、ダイナミックスペクトルというのはパワースペクトルの時間変化で、まだどこでも調べられていませんが、磁気圏プラズマの中にホイッスラーや VLF 波などがあるように太陽風の中に何か見つかるのでしょうか？

第8図でフレアの2~3日位あとに太陽風の速さが増加していて、磁気嵐などに対応しています。



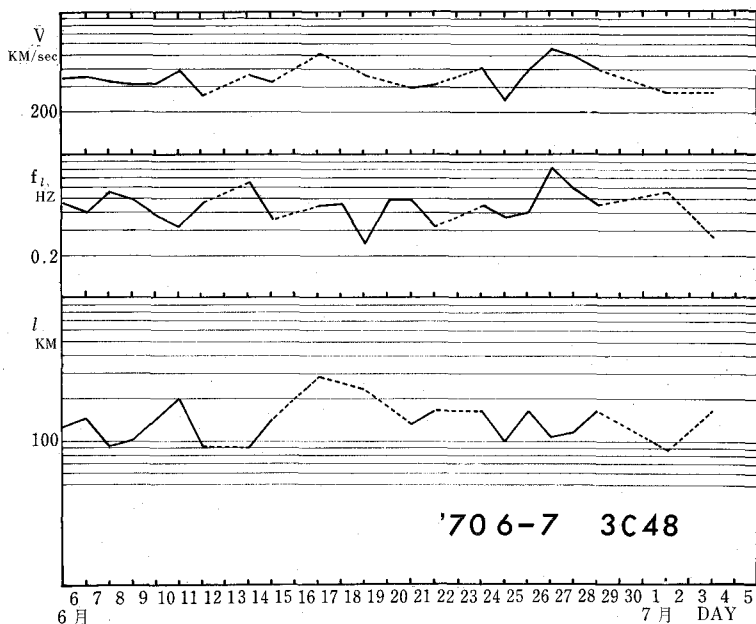
第7図

3C 48 の観測結果解析の一例

最後にわれわれの近い将来計画ですが、まず第1に木曾御岳山の東側開田高原に第3点をつくることです。予算次第ですが、順調にゆけば来年夏には3点観測ができていると思っています。

もう一つは現在豊川のアンテナを東西方向に2倍にする拡張工事をしていますが、このビームを自由にふれるようにすることです。シンチレーションの観測結果の解析は統計的なものですから、あまり観測時間が短かいと求めた結果が果して統計的に意味のあるものかどうか問題になります。一方QSSは皆非常に弱い電波源ですからアンテナは大きくしなければなりません。それで自然に分解能が上り固定ビームでは観測時間が短かくなります。できれば多数の独立なビームをもった八方にらみのアンテナにしたいと考えています。

この他木星電波シンチレーションと電波強度でなく位相のシンチレーションも観測したいと思っています。



第8図 3C 48 の観測かめ求めた太陽風の速さ