

# 簡単な電波望遠鏡による低周波電波天文学

## 3. 太陽の観測

前田 耕 一 郎\*

### 1. はじめに

太陽コロナは高温 (~10<sup>6</sup> K) のプラズマ (電離気体) である。コロナ中の電子の熱運動により、コロナからは常に電波が放射されており、“静かな太陽の成分”と呼ばれている。しかし、この成分は簡単なアンテナで受信できるほど強くはない (7月号の図2参照)。

太陽表面に磁場の強い領域が浮上して来ると、白色光では黒点が観測され、H<sub>α</sub>の光では彩層に出現するフィラメント状の様相が多数観測される。また、黒点領域の上方のコロナは電子密度、温度ともに上昇する。このような領域では磁場とプラズマの相互作用により様々な活動現象が起こるので、活動領域と呼ばれる。活動領域では、活動現象に伴って電子が加速され、“太陽電波バースト” (以下では、バーストと略す) と呼ばれる突発的な電波放射が頻繁に起こる。バーストは非常に強いので、簡単なアンテナにより容易に受信することができる。特に、フレアと呼ばれる爆発的なエネルギー解放現象に際しては、成因の異なる何種類もの強いバーストが発生する。

フレアから放射されるX線により地球電離層下部に異常電離が生じ、そのために、電離層による銀河電波の吸収が増大する。今回は、簡単な電波望遠鏡によるバーストの観測およびフレア時に起こる銀河電波の吸収の観測について述べる。なお、静かな太陽の成分については、干渉計による観測のところで述べる。

### 2. バーストのダイナミックスペクトル

簡単な電波望遠鏡による観測について述べる前に、バーストについて概観しておこう。

一般に、バーストの放射周波数は時間と共に変化する。したがって、バーストの全容を捕らえるには、放射周波数の変化を時間的に追う必要がある。横軸を時間、縦軸を周波数とした面上に電波強度を黒みで表示した図をダイナミックスペクトルと呼ぶ。電波バーストはダイナミックスペクトルの上で描く模様の特徴により、成因の異なる成分に分類されている。20~50 MHz の範囲で考えた場合、主に、I型、II型、III型、IV型、V型と呼ばれるバーストが観測される。この内、強度が高く、し

かも頻繁に観測されるのはIII型バーストである。V型バーストは、III型バーストに付随して現れる。I型バーストは活動領域が現れると頻繁に観測され、個々のバーストの継続時間は短いが集合同なって長時間 (数時間から数日) 続く。II型やIV型バーストは、かなり大きなフレアの場合に観測される。

我々は、三重県柘植町で広帯域アンテナ (コンカルログスパイラルアンテナ) 8素子から成るアレイを用いて、木星デカメータ波のダイナミックスペクトルの観測を行っている。図1および図2は、この装置により観測されたバーストのダイナミックスペクトルである。図1はフレアに伴って観測されたIII型およびII型バーストであ

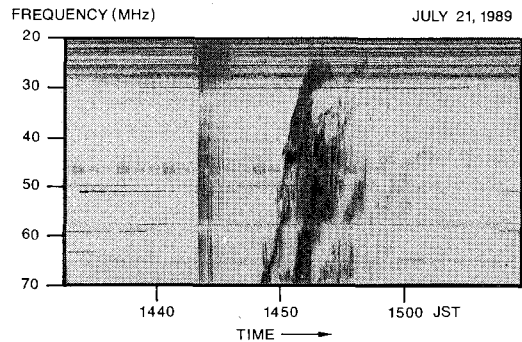


図1 太陽電波バーストのダイナミックスペクトル。1443 JST 頃に縦線の集合のように見えるのがIII型バースト、1448 JST 頃から後に見られるのがII型バーストである。

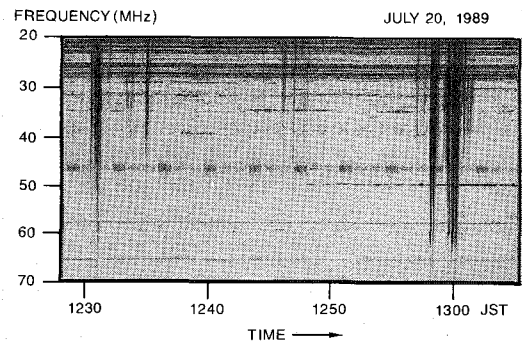


図2 太陽電波バーストのダイナミックスペクトル。縦線状に見えるのがIII型バーストである。低周波数側でぼやけて太くなっているように見えるのは、III型バーストの直後に起こったV型バーストのためである。

\* 兵庫医大 Koitiro Maeda: Low Frequency Radio Astronomy with Simple Radio Telescopes 3. Observations of the Sun

る。14時43分 JST (日本標準時) あたりで縦線の集合のように見えるのがⅢ型バーストであり、フレアはこの頃に始まったと考えられる。14時48分 JST 頃から後に現れているのがⅡ型バーストである。Ⅱ型バーストでは放射周波数が時間と共に高周波数から低周波数へと移動(負の周波数ドリフト)していく模様が見られる。時間分解能の悪い図1では分かりにくいですが、Ⅲ型バーストも負の周波数ドリフトを示す。大きなフレアの場合、Ⅱ型バーストの後にⅣ型バースト(広い周波数範囲にわたって連続的な電波放射)が現れることがある。

Ⅲ型バーストは、フレアのような大規模な爆発現象がなくとも頻繁に観測される。図2はフレアとは直接関連を持たずに出現したⅢ型バーストの例である。Ⅲ型バーストは図2に見られるようにグループとなって現れることが多い。低周波数側でぼやけたように太くなって見えるのは、Ⅲ型バーストの直後に起こったⅤ型バーストのためである。

バーストについてより詳しくは“電波でみた太陽”(森本・甲斐, 出光科学叢書12)を参照されるとよい。

### 3. バーストの発生する高さ

プラズマ中の電子はイオンとの間に働く静電力を復元力として振動(プラズマ振動)することができる。ある場所でプラズマ振動が励起されると、プラズマ中を縦波となって伝わる。これをプラズマ波と呼び、その周波数(プラズマ周波数  $f_p$  [MHz])は、電子密度 ( $N_e$  [ $\text{cm}^{-3}$ ])により次式で表される。

$$f_p = 0.009\sqrt{N_e} \quad (1)$$

Ⅲ型バーストは、コロナ中を高速(光速の1/2から1/3)で運動する電子ビームにより励起されるプラズマ波が原因と考えられている。太陽から遠ざかるにつれて電子密度が減少するので、電子ビームはそれぞれの高さで周波数の異なるプラズマ波を励起しながらコロナの中を進む。励起されたプラズマ波が、密度の不均一によって散乱されて電磁波に変換され、地球まで到達するのがⅢ型バーストと考えられている。したがって、発生する電波の基本周波数は、発生領域でのプラズマ周波数である。電子のビームが外側に向かって進むにしたがい、バーストの周波数はより低くなる。

図3は、Ⅲ型バーストにおいて30 MHzの電波が発生する様子を示す概念図である。電子ビームがある場所(×印)より打ち出される。プラズマ周波数が30 MHzとなる高さ(図3の点線)を30 MHzのプラズマレベルと呼ぶ。電子ビームが30 MHzのプラズマレベルを横切ると30 MHzの電波放射が起こる。

プラズマ波の仮説に立つと、受信される電波の周波数は(1)式により電子密度に変換できる。干渉計により色々な周波数でⅢ型バーストの電波源の位置観測を行う

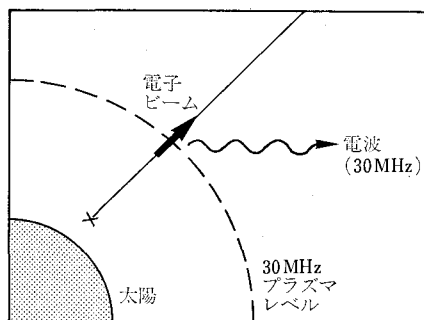


図3 Ⅲ型バーストにおいて、30 MHzのバーストの発生を示す概念図。

と、バースト発生領域での電子密度と高さの関係が求められる。その結果によると、発生領域での電子密度は同じ高さでの平均電子密度に比べてかなり高い。太陽中心から  $2.5R_\odot$  以内のコロナでは、電波観測と合う電子密度分布  $N_e(r)$  はバウンバハ・アレンによる平均コロナに対する式で求めた値の10倍(次式)で近似できる。

$$N_e(r) = 10^9(1.55r^{-6} + 2.99r^{-16}) \quad (2)$$

ただし、 $r$ は太陽半径( $R_\odot$ )を単位として表した太陽中心からの距離であり、 $N_e(r)$ の単位は  $\text{cm}^{-3}$  である。図4は(2)式による電子密度分布を示す。図4から、ある周波数の電波がどの程度の高さから放射されるかを知ることができる。例えば、50 MHzの電波は光球面( $r=1.0$ )から約  $0.9R_\odot$ の高さ、30 MHzの電波は約  $1.3R_\odot$ の高さと言った具合である。

Ⅴ型バーストもⅢ型バーストと同様の機構で発生すると考えられているが、Ⅲ型バーストは磁力線が開いた領域を外向きに運動する電子ビームにより励起されるのに対して、Ⅴ型バーストの場合は閉じた磁力線に沿って運動する電子ビームにより励起されると考えられている。

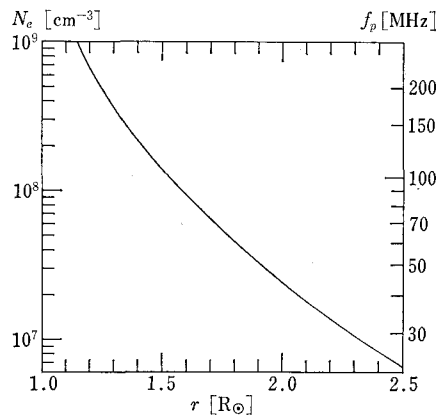


図4 電波観測と合う電子密度の高さ分布。横軸には太陽半径( $R_\odot$ )を単位とした太陽中心からの距離  $r$ を示す。縦軸には、左側に電子密度  $N_e$ 、右側に対応するプラズマ周波数  $f_p$ を示す。

II型バーストの場合、フレア等の爆発現象に伴って発生する衝撃波により励起されるプラズマ波が原因と考えられているので、電波源の高さについてはIII型バーストと同様に考えられる。

IV型バーストでは色々な周波数の電波がほぼ同じ場所から放射されているので、プラズマ波に起因する電波とは考えられない。フレアから磁場を持ったプラズマ雲が放出されることがあり、IV型バーストは、そのようなプラズマ雲の中の電子によるシンクロトロン放射と考えられている。プラズマ中の電波伝播を考えると、観測周波数のプラズマレベルより下にプラズマ雲がある時には、電波は周りのプラズマにより吸収されてしまうので観測できない。したがって、プラズマ雲が観測周波数のプラズマレベルより高く上がると観測されると考えられる。

4. 簡単な電波望遠鏡によるバーストの観測

通信型受信機を用いた簡単な電波望遠鏡(7月号参照)による 30 MHz 付近でのバーストの観測について考える。太陽バーストは非常に強いのでアンテナはダイポールアンテナでよい。したがって、観測方法は、9月号で述べたダイポールアンテナによる銀河電波の観測の場合と全く同じである。観測は、まず、強度が高く比較的固定ができるIII型バーストに注目して行うとよい。図5に示した、紙送りスピード 2.5 cm/h での記録例で観測の一般的状況について見てみよう。ゆっくりと変化する銀河レベルに混信やバーストが重畳して現れる。図5に示したバーストの強さはいずれも混信電波をはるかに凌いでいる。比較的弱いバーストの場合には、混信とバーストをいかにして見分けるかが重要な問題となる。

紙送りのスピードを 60~120 cm/h と速めにして記録をとるとバーストの時間変化の特徴が見られる。図6は 120 cm/h でのIII型バーストの記録の一例である。空電や人工雑音電波の混信の場合、個々の混信は継続時間が

短くスパイク状に現れることが多い。また、継続時間が長い混信の場合には、比較的大きく上下に振れながら、その平均レベルが変動することが多い。一方、バーストの場合には、強度の変化が概して滑らかである。比較的弱いバーストでは立ち上がりと下がりがほぼ対称的な形をしているが、強いバーストになると、急激に立ち上がりしばらく継続した後、ゆっくりと弱まって行く。III型バーストがグループとなって現れた場合には、それぞれのバーストに対応して山ができ、波打ったパターンが観測される。

音を聞くのも同定には有効である。我々の簡単な電波望遠鏡では、受信機からの音声周波数(AF)信号を検波してペンレコーダに導いているが、AF信号はスピーカあるいはヘッドホーンにより音として聞くことができる。バーストの場合、各瞬間の信号の帯域幅は受信機の帯域幅(数kHz)と比べると十分に広いので、受信機の帯域幅いっぱい広がる雑音電波として受信される。このような雑音電波の音は受信機の内部雑音のザーという音と質的に同じであるので、バーストが受信されると、ザーという背景雑音が急に強まる。比較的弱い単純なIII型バーストの場合、ザーという音が強まった後すぐに弱まり、継続時間は数秒程度である。強いバーストの場合には、急激にザーという音が強まり、しばらく継続した後ゆっくりと弱まって行く。継続時間は1分程度である。III型バーストがグループとなって現れると、各バーストに対応して音が高まりながら数分間継続する。通信や放送などによる混信の場合には、人の声や信号音などが聞こえて来る。空電や継続時間の短い人工の混信の場合、ガリッとカバリッあるいはプツツといった音がする。また、継続時間の長い人工の混信の場合には、ブー、ウーンといった音がするので、聞き慣れるとバ

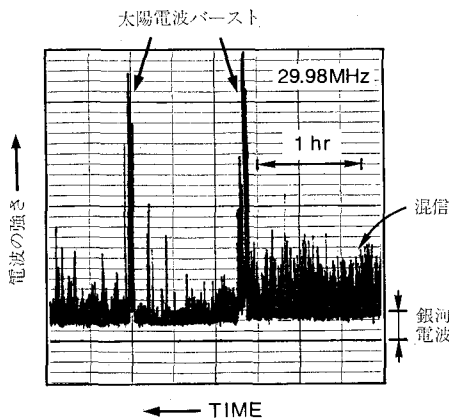


図 5 簡単な電波望遠鏡による記録。銀河電波、混信、太陽電波バーストの関係を示す。

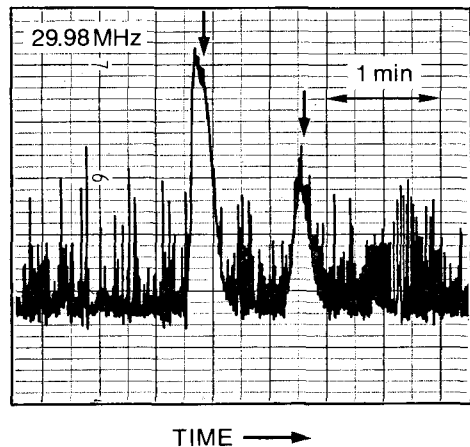


図 6 簡単な電波望遠鏡による記録。矢印で示したのが太陽電波バーストである。

ーストとはかなりはっきりと区別できる。バーストというとは荒々しい音を想像するかも知れないが、バーストの音は混信の音に比べて滑らかで柔らかさを感じる。

国立天文台野辺山太陽電波観測所では、70 MHz 以上の周波数でダイナミックスペクトルの観測が行われており、バーストの型と発生時刻のリストが公表されている。また、国立天文台豊川観測所ではマイクロ波 (1000, 2000, 3750, 9400 MHz の4周波数) で太陽観測が行われており、その観測結果も公表されている。30 MHz 付近での観測の場合、特に最初は、どうしても同定に不安が付きまとう。簡単な電波望遠鏡により得られた記録と野辺山や豊川のデータを比較して、30 MHz 付近でのバーストがどのような現れ方をするかをまず調べてみるのもよい。私の経験では、野辺山のリストで普通あるいは強いと分類されているⅢ型バーストの場合、30 MHz 付近でもほぼ 100% の確率でバーストが受信される。マイクロ波バーストはフレアと関連するので、豊川の記録と比較すると、フレアの際の 30 MHz 付近でのバーストの現れ方を見ることができる。

### 5. 電離層の異常電離と銀河電波の吸収

地球には地上 100~500 km ぐらいの高さに電離層と呼ばれる電子密度の高い層がある。銀河電波は電離層を通過する際、吸収を受ける。フレアからの X 線により電離層下部で異常電離が起これると、銀河電波の吸収量が増大し、地上で受信される銀河電波の強度が一時的に減少する (図 7)。また、短波帯で、遠距離通信障害 (デリンジャー現象) が起こる。短波帯での遠距離通信は、電波が電離層により反射されることを利用している。電離層下部の電離が増大し、電波が吸収されるためにデリンジャー現象が起これると考えられる。

図 8 は典型的な吸収の例である。29.98 MHz の記録で 10 時過ぎに一時的な銀河レベルの低下が見られる。豊川の記録ではこの時刻にマイクロ波バーストが観測されている。したがって、この吸収はフレアからの X 線により引き起こされた銀河電波の吸収と考えられる。このフレアの場合、29.98 MHz ではバーストが観測されていないので、29.98 MHz のプラズマレベルまでは擾乱が達しなかったものと考えられる。

図 8 において、吸収の起これているときには、混信も極端に小さくなっていることに注目してほしい。もし、混信電波が、混信源から直接アンテナに入射していたら、電離層の電子密度に関わりなく同じ強さで受信される筈であるが、実際にはそうはなっていない。このことは、我々の観測地点での混信の大部分は、電離層に反射された後アンテナに入射していることを示している。

### 6. フレアの観測

豊川で観測されたマイクロ波バーストと比較しながら

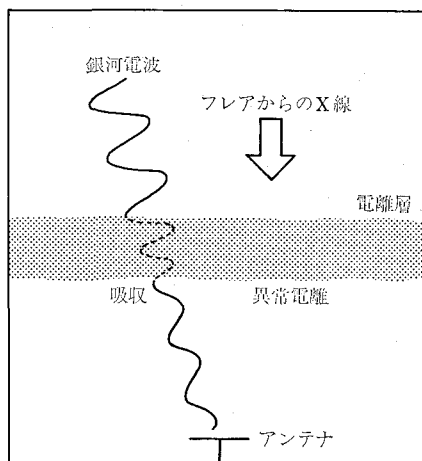


図 7 電離層下部で生じた異常電離によって起こる銀河電波の吸収。

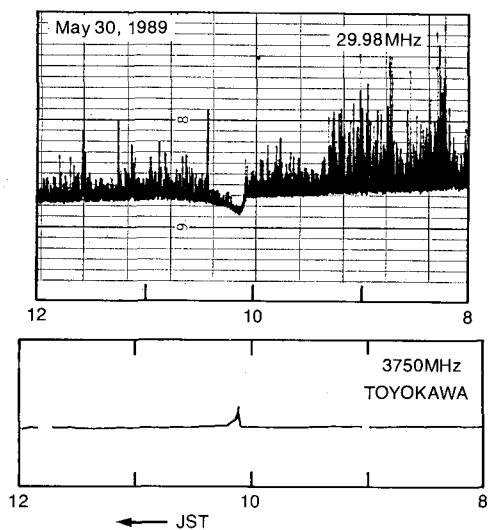
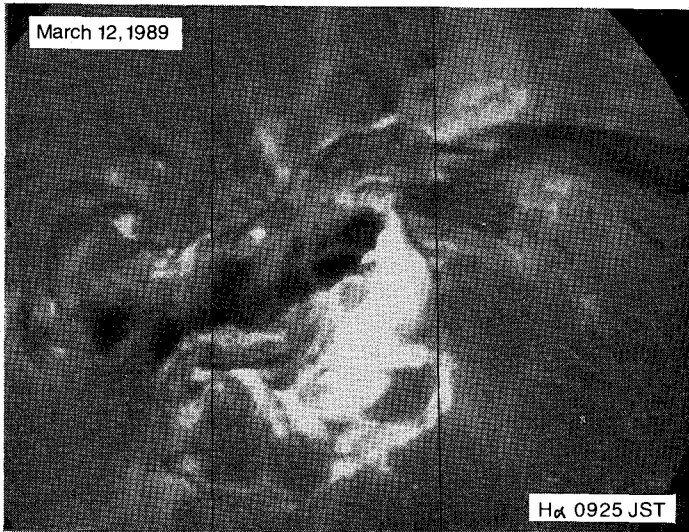


図 8 電離層の異常電離による銀河電波の吸収 (29.98 MHz). 豊川のマイクロ波バーストの記録はフレアの発生を示す。

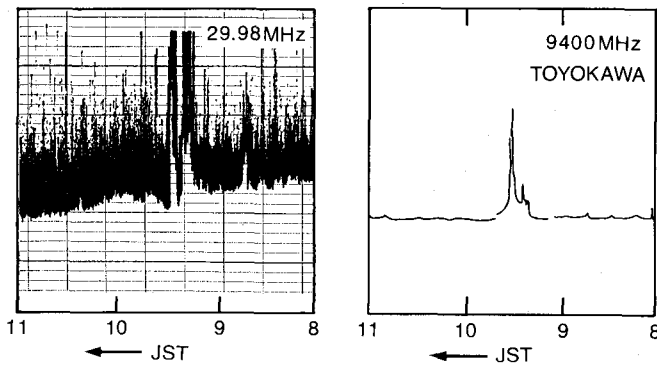
29.98 MHz での簡単な電波望遠鏡の記録を見てみよう。フレアの際、29.98 MHz では、一般にバーストと銀河電波の吸収が重なって現れる。

図 9 に  $H_{\alpha}$  でのフレアの写真、このフレアに伴われた 29.98 MHz およびマイクロ波でのバーストを示す。29.98 MHz では、バーストと重なって少し見にくい、銀河電波の吸収も起これている。

図 10 の例ではマイクロ波バーストの開始 (16 時 23 分 JST) とほぼ同時に 29.98 MHz でも強いバーストが始まっている。これは、マイクロ波バーストの発生と同時に起こったⅢ型バーストであろう。最初のバーストの直後には、明らかにバースト前の銀河レベルより下がって



◀ 図 9 太陽フレアと電波バースト.  $H_{\alpha}$  の写真 (飛騨天文台より提供), 簡単な電波望遠鏡による記録および豊川のマイクロ波の記録である.



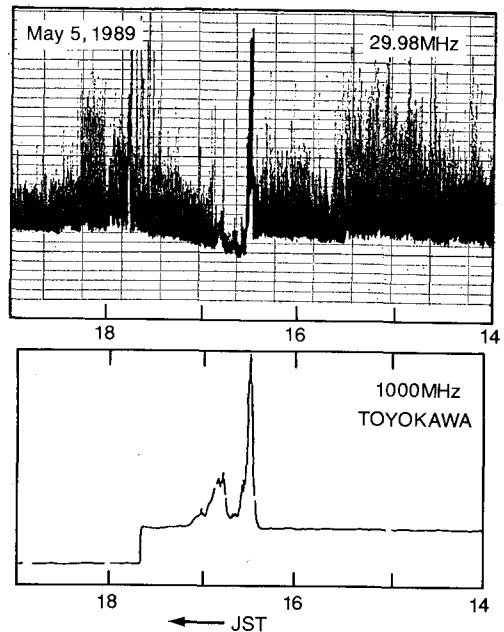
▼ 図 10 簡単な電波望遠鏡により 29.98 MHz で観測されたバーストと豊川で観測されたマイクロ波バースト.

おり, 銀河電波の吸収が起こったことを示している. このレベル低下が元のレベルまで回復するのに約 1 時間を要している.

図 11 の例は前の 2 例とかなり様相が異なる. マイクロ波バーストの開始 (9 時 18 分 JST) に対応して, 29.98 MHz では吸収が始まっている. 吸収の開始から約 15 分後に 29.98 MHz でもバーストが始まり, 3 時間余りにわたって続いている. 29.98 MHz の記録には, 同時に観測していた 50 MHz での干渉計の記録が重なっており, 規則的な干渉パターンはこの間の電波が太陽からのものであることを示している. 10 時~13 時に観測されているのは IV 型バーストかも知れない.

**7. 周波数ドリフトの観測**

受信機を 2 台用いて次のような観測を行い, III 型バーストの周波数ドリフトを検出した. 1 台は 29.98 MHz で働かせ, もう 1 台はオプションの周波数コンバータのボードを用いて 49.5 MHz で働かせた. アンテナはいずれの周波数でも自作のダイポールアンテナを用いた.



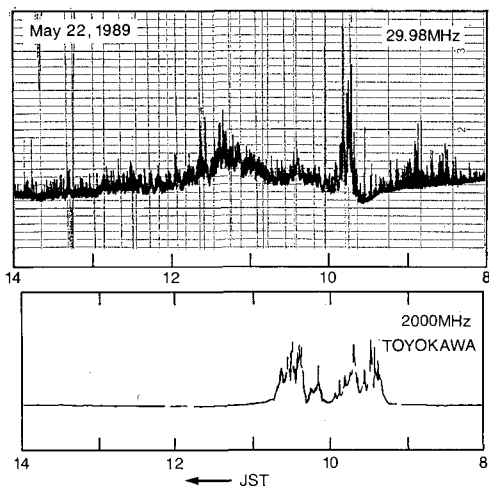


図 11 図 10 と同じ。

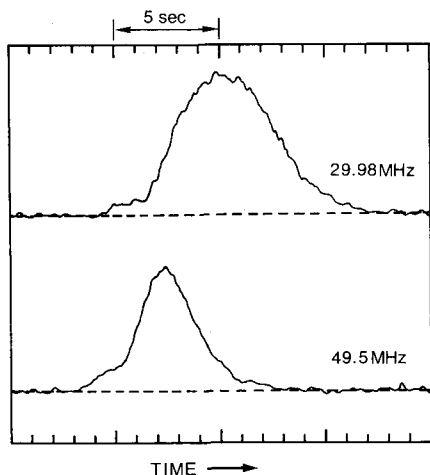


図 12 III型バーストの2周波数での同時観測。各点線は対応する周波数における銀河電波のレベルを示す。

10 MHz/s 程度の周波数ドリフトを検出するために、ペンレコーダでのモニター記録 (60 cm/h) とは別に、2台の受信機の AF 出力信号をオーディオ用の 2チャンネルのテープレコーダに記録し、後でバースト部分の AF 信号を再生し、付加回路を通してペンレコーダに 60 cm/min のスピードで書かせた。図 12 はこのようにして得られた、比較的単純な III 型バーストの 2 周波数での強度変化である。29.98 MHz でのピーク時刻は 49.5 MHz でのピーク時刻より約 3 秒遅れている。図 4 より求めた 49.5 MHz と 29.98 MHz のプラズマレベルの差 (約  $0.4R_0$ ) とピーク時刻のずれから電子ビームの速さを求めると、 $9 \times 10^4$  km/s となり、およそ光速の 1/3 である。

8. おわりに

ここでは、主に 29.98 MHz での観測データを紹介し

たが、オプションの周波数コンバータにより観測周波数を 50 MHz 程度まで上げると、混信は飛躍的に少なくなり、記録が見やすくなる。

バーストの多様性をわかりやすく示すには、ダイナミックスペクトルが一番よい。個人では予算的に難しいが、予算規模の大きな科学館等でスペクトル観測を行い展示してはどうだろう。大規模なアンテナは必要ないので、アンテナは屋上にでも設置できる。市販のスペクトラムアナライザーを受信機として用い、記録はファクシミリに書かせたり、A/D 変換してコンピュータに書かせたりすることができる。

次回は、簡単な電波望遠鏡による木星電波の観測について述べる。

訂正：9月号のダイポールアンテナで用いた木板の寸法を 90 cm × 10 cm × 1 cm と訂正します。

## ASTRO Observatory Domes

### 天文台の建設は青少年の 未来の心をはぐくみます

当社は豊富な経験と独自の製作技術により美観、耐久性、堅牢性、経済性は抜群です。ドームの屋根葺きには耐蝕性に優れたステンレススチール、銅板葺きなどがあり、優れた特長を持っております。詳しくはお問い合わせ下さい。

◆主な天体観測ドーム納入先◆

宇宙科学研究所／東京大学教養学部／宮崎大学教育学部／東京学芸大学／埼玉大学／福島大学／川崎市青少年科学館／杉並区立科学教育センター／駿台学園一心荘 (北軽井沢) 駿台学園高校(東京)／東海大学宇宙情報センター(熊本)／栃木県こども総合科学館(宇都宮)／日原天文台(島根県)／大分市コンパルホール／坂戸市中央児童館(埼玉)／山崎記念天文台(高知)／刈谷市中央児童館／宇美青少年育成センター(福岡)／船橋市立高校／都立九段高校／都立大森高校／慶応義塾高校(横浜)／高知学園等の他全国に150余基の実績。

**アストロ** 光学工業株式会社

〒170 東京都豊島区池袋本町2-38-15 ☎03(985)1321