

35 GHz 太陽電波干渉計

小川 英夫・河 緒公昭・鈴木 育郎・祖父江義明・藤下 光身*

1. はじめに

太陽電波の連続観測は戦後始まった。そのなかでも太陽表面における突発的爆発現象—バーストの観測が興味中心である。バーストが太陽面のどこから、どのようにして放射されるのかを解明するため、鋭い分解能をもつ電波干渉計が建設されている。

日本においてもセンチメートル波領域における干渉計として空電研究所の 3750 MHz, 9400 MHz, 及び東京天文台 17 GHz, メートル波領域の干渉計としては東京天文台の 160 MHz のものが現在稼動中である。

(空電研究所の干渉計については本誌1968年10月号に、東京天文台 160 MHz 干渉計については同じく1970年12月号に解説記事があるので参照されたい。)

名古屋大学理学部には1970年 IASY 特別事業の一つとして 35 GHz (8.6 ミリメートル) における8素子加算型干渉計が設置された。ここではこの干渉計の特徴及び観測例について述べてみよう。

この8素子干渉計はより簡単な方法でもって、角分解能をあげ、同時に時間分解能をもあげ、又長時間観測できるように、そして、多少の雨には影響されにくいように設計されている。世界的にいってミリ波における高角分解能観測は大きなパラボラアンテナ以外行われていない。又大パラボラによる観測は常時行われていない。現在この干渉計は、角及び時間分解能をさらにあげるように16素子に延長する工事に今年の8月より取りかかっており来年(1975年)には稼動の予定である。

2. アンテナ系

アンテナ系は固定したカセグレン方式のパラボラアンテナ及び赤道儀方式にマウントした反射鏡よりなる。

パラボラアンテナは直径 40 cm, 焦点距離 10 cm である。副鏡の直径は 5 cm である。アルバム写真よりわかるようにパラボラアンテナは軸が極軸に沿って下向きにとりつけられている。この方式の特徴はパラボラを回転する必要がなく、したがって導波管のロータリージョイントを用いることなく1日中観測できる点である。ロータリージョイントを用いる場合は2個必要となり、それ自身によるミリ波での挿入損失もあり、又導波管も長く

なるためこれによる通過損失もあり全体としての損失が大きくなる。又反射鏡方式は毎日もどす必要がなく1日中駆動させておけばよく機構的に簡単となる。もう1つの特徴は雨に対して影響をうけにくい構造となっている点である。ミリ波になると雨による水滴がアンテナや副鏡に付着することにより少しの雨でも観測精度が悪くなる。しかしこのアンテナの場合、下向きのためアンテナ鏡面及び副鏡は少しの雨ならぬれることはない。又反射鏡は平面では比較的均等にぬれるからむらが少い。図1の下段のパターンが降雨時を含むデータを、上段には翌日の晴天の日のパターンを示す。10月17日14時45分頃より小雨が降り出し数分間続いてやんだわけである。これよりわかるように雨による減衰はさけられないが、干渉パターンそのものは消えることなく雨がやめばすぐに元のパターンにもどる。この時の雨のふり方は名古屋地方気象台(干渉計と約2kmの距離にある)のデータによれば5mm/時間であった。

3. 受信器

干渉計全体のブロックダイアグラムを図2に示す。8素子の加算干渉計であるから2個ずつをトーナメント方式に加えて干渉させるわけである。その場合、4素子ずつまとめたものを干渉させる最終段では導波管が長くなり35 GHz では通過損失が大きくなる。よって我々はここで中間周波数 130 MHz に変換してこれでもって干渉させるようにした。受信器はディッケ型としフェライトスイッチでもって常温の抵抗終端と切り変える。干渉計故にイメージバンドをおとす必要があり阻止フィルターでカットするようにしたミクサーはバランスド・ミクサーを用いた。データはペンレコーダーには常時出力し A/D コンバーターをへて紙テープにも出力できるようにした。

装置全体としての最少検出強度は太陽面上をビームが1回の通過でもって約10フラックスである。

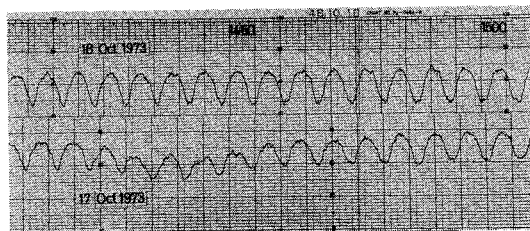


図1 雨の日(下段)と晴天の日(上段)の干渉パターン

* 名古屋大学理学部物理学教室

Hideo Ogawa, K. Kawabata, I. Suzuki, Y. Sofue, M. Fujishita: 35 GHz solar interferometer.

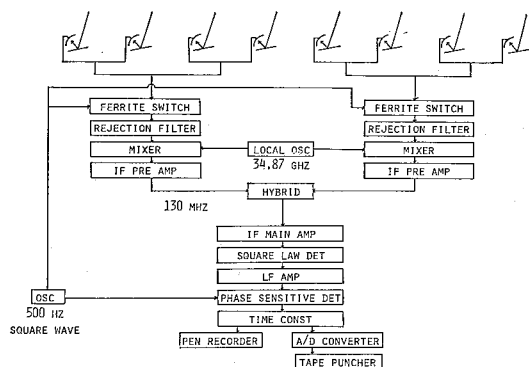


図2 干渉計のブロックダイアグラム

4. アンテナ間隔のきめ方

この干渉計は東西に沿って間隔 234 cm (273 波長) であって 8 個のアンテナが全長 16.38 m (1913 波長) にわたって設置されている (表紙写真参照)。

多くの太陽電波干渉計において普通干渉によって出来るビームが十分離れていて、太陽がビームのいずれにもかからない瞬間が存在するようにアンテナ間隔が 90 波長以下に設計してある。我々の場合はこれと違って 273 波長に選んだ、これは以下の理由による。

1) 特にミリ波領域においては受信器の雑音温度がセンチ波領域に比べて高くそのため受信感度を上げるためにはアンテナを大きくする必要にせまられる。それ故 90 波長以下のようにアンテナ間隔をとつた時は南中後すぐアンテナの影が隣のアンテナにはいり観測不可能となる。ミリ波領域におけるバーストは数少なく観測時間を出来るだけ長くとることが必要である。

我々の場合、上述の 273 波長のアンテナ間隔でもって 4 月より 9 月までは 1 日につき約 10 時間、冬期でも約 7 時間観測続行可能となった。もちろんこのように長い観測時間をとることによって受信器の帯域幅が制限を受ける。この干渉計の場合、帯域幅を 8 MHz とした。

これでも朝夕は少し影響を受けるがデータ処理の段階で補正するようにした。

2) もう 1 つの理由は移相器等を用いることなく時間分解能を上げることができる点である。我々のようなアンテナ間隔をとった場合、ビーム間隔が 12.6' (南中時) になり太陽面に最高で 3 本のビームが太陽面上を横切ることになる。その結果約 50 秒 (南中時) 毎に情報を得ることが出来る。又太陽面上を朝夕を除いて複数のビームが横切ることになり位置決定の際の任意性が残るが以下の理由でこれは特に問題ない。太陽面上のバースト源を 1 回しかビームが横切らなければ確かに任意性は残る。しかしながら 30 分も継続するバーストならば、バースト源はユニークにきまる。即ち他のバースト源は太陽面を

大きく動いてしまうからである。非常に短時間しか継続しないバーストについても黒点のスケッチと比較することより大抵の場合位置をきめることができる。

この干渉計で「静かな太陽」の午前中の干渉パターンを図 3 に示す。(このデータは 1972 年 8 月 31 日のものである) 図からみてわかるように日の出後しばらくの間は 1 本のビームのみが太陽面上を横切り、従って太陽面の輝度分布そのままをうる。このパターンは 7 時 40 分頃消え、これからは太陽面上を 2 本、1 本のビームが交互に存在し 2 本が対称に存在する時がピークとなる。このパターンも 10 時頃には消え、これからは太陽面を 2 本と 3 本が交互に横切る時間帯となる。この時間はビームが太陽の中心を通過する時にピークとなる。この半日のパターンより Visibility と呼ぶものが求まる。これを空間周波数の関数として図 4 に示す。空間周波数とは実効アンテナ間隔を波長で割ったものである。そしてアンテナが 8 個あるわけであるからこの空間周波数は基本波より第 7 高調波までとることができる。これでもってパターンをフーリエ分解した時の振幅が Visibility である。基本波 (即ち隣り合せのアンテナ間) の南中時の空間周波数は前に述べたように 273 であってこの付近は Visibility が正の極値となっていることがわかる。この位置にきめた理由は南中の頃、位相合せを行った場合振幅が大きく出るようにしたことである。

5. 位相合せ

電波干渉計において位相合せは最も大切な仕事である。アンテナ、一次放射器、受信器全体の位相を測定するには無限遠にある点電波源を用いるのが最もよい。しかし我々のアンテナで受信できるような点源は存在しない。我々は太陽を光源として行った。位相合せはまず 2 つの隣接するアンテナを 2 つの干渉計と働かせる。全アンテナの位相を合せるためこれを次々で行う。この例を図 5 に示す。これは西側より 1 番目と 2 番目、次に 2 番目と 3 番目、次に 3 番目と 4 番目の位相合せの時のパターンを示す。位相が完全に合っていれば南中した時刻を中心に完全に対称なサイン波状になるはずであり、位相差があれば対称でなくなる。これより位相差を検出する。もちろん太陽は点光源ではなく完全一様でもない。35 GHz で静かな様な太陽は約 2000 フラックス、“ゆるやかに変わる成分” (S-成分) は約 3 フラックス程度である。この S-成分が 10 個太陽面上にランダムに存在する時は一様だと仮定した時に比較して約 10° の位相差が生じるはずである。しかし現実には毎日の位相差のふらつきは 10° 以下であり、加算干渉計に必要とされるに十分な精度をもっている。

図 6 に 1 日中における位相差の例を示す。ビームナン

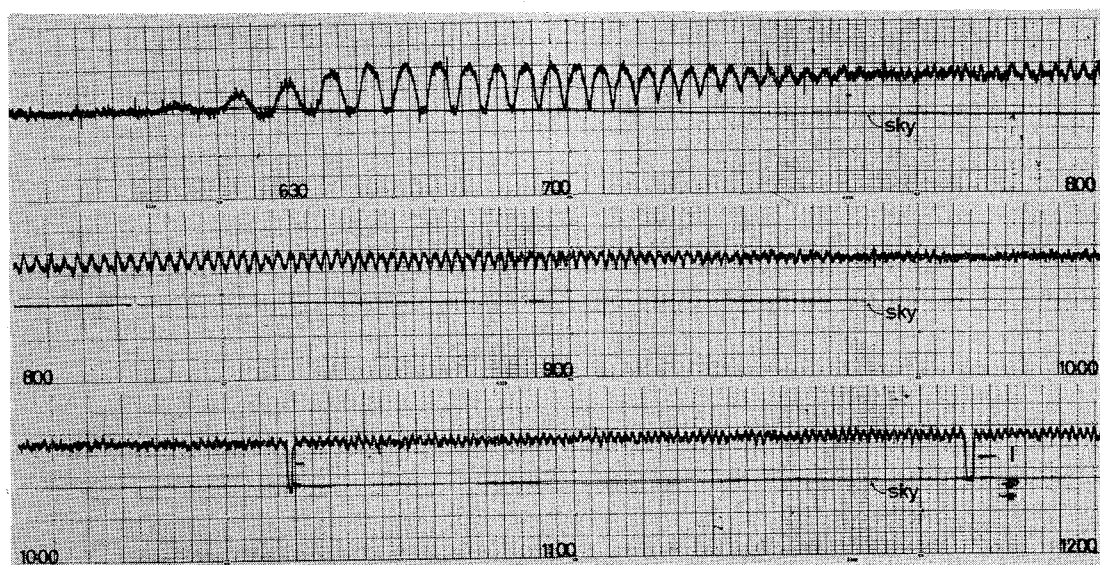


図 3 「静かな太陽」の午前中の干渉パターン（時間は日本標準時）

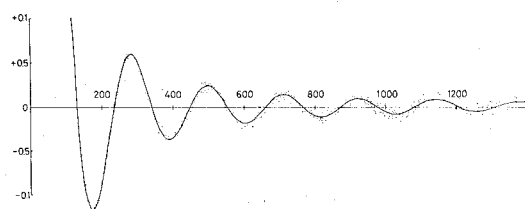


図 4 「静かな太陽」の Visibility (横軸は空間周波数)

パーは南中時のビームを 0 とした時、これより何番目かを示したものであり午前中を負、午後を正で表わす。この図からわかるように南中から大きくはずれた所にほぼ対称に約 5° のシステムチックな誤差がある。これらはデータ処理の段階で補正することができる。結果的に位相差のランダムなゆらぎは $\pm 5^\circ$ 以内におさまる。我々はバースト等の太陽面上の位置決定は「静かな太陽」のパターンと比較することによってきめる。上のような位相差のゆらぎが存在する時は南中時は約 $15''$ 朝夕は約 $30''$ の精度でもって位置をきめることができる。

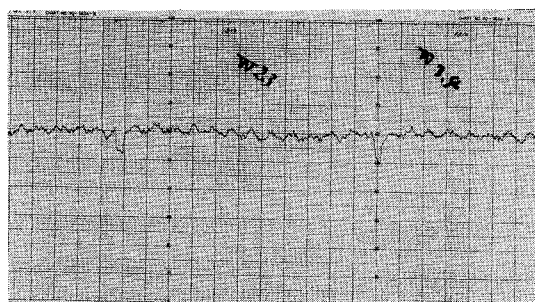


図 5 位相合せの時の 2 アンテナの干渉パターン

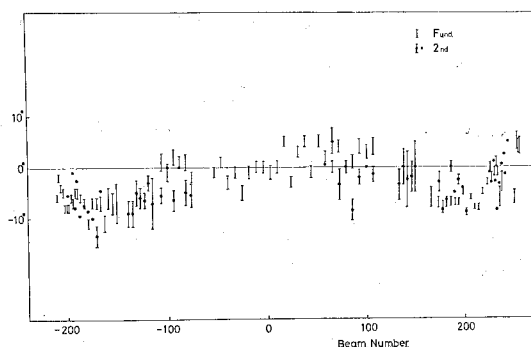


図 6 基本波(I), 第 2 高調波(I, ·) (空間周波数) の位相のずれ

6. 観測例

1971 年 4 月 20 日のバーストの場合をみてみよう。図 7 に実際の記録を示す。この時のビーム幅は $1.9'$ ビーム間隔は $15.5'$ である。この図において周期的変化は「静かな太陽」であり、突起部分がバースト成分である。これらの 1 周期の面積を比較すれば「静かな太陽」に相対的な強度が求まる。今「静かな太陽」を 2000 フラックスとした時のバースト強度の時間変化を図 8 に示す。図 9 には 5 時 19 分、5 時 25 分、5 時 32 分（日本時間 14 時 19 分、25 分、32 分）のビームが記入されている。この時間はビームが太陽面上 2 本存在する時間であり、この 2 本の線上がバースト候補地となる。東側の 3 本のビームは太陽面を動いている。短かい時間にこれほど動くことは考えられない。これに反し西側のビームはよく収束している。もちろんこれらの線上ならどこでもよいわけであるが黒点と位置を考えて西のへりをかすめている黒

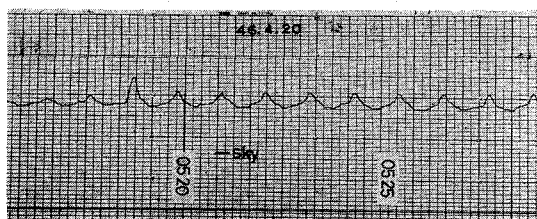


図 7 バースト時の記録 (1971年4月21日)

点と考えられる。(この黒点の図は同日の朝9時にスケッチされたものをバーストの時間に合うように回転させてある。) 事実この時間にこの活動領域で $H\alpha$ フレアーが起っている。バーストの中心は視線方向を考えに入れると黒点の半暗部付近と推定される、又そのあたりはマグネトグラフのデータをみると2000ガウス近くあり磁場が強いことがわかる。

1972年8月の中旬は太陽活動が近來にない活動的な時期であった。8月2日の2つのバーストの例を示す。表紙図に干渉パターンを示す。表紙の下左の図の上段のバーストから求めたビームの位置を表紙の下右上の図に示す。4時4分及び5時41分(日本時間13時4分、14時41分)の2本のビームが記入してある。西側のビームは大きく動いてにせのものであり東側のビームの交叉する所がバースト発生源である。この干渉は一次元干渉計であるが、このように長時間持続する場合、割に正確に位置を求めることができる。これはビーム即ち干渉の東西線が地球の日周運動に従って天球に対して回転することによるものである。

バーストが長時間継続しても大きく位置がかわるようでは正確には位置を求めることはできない。

太陽に対するビームの回転は朝夕がはげしい。この例が8月2日のもう1つのバーストでこれは日本時間で8月3日の朝となる。図(表紙の下右下の図)に21時57分、22時38分、23時27分(日本時間8月3日6時57分、7時38分、8時27分)の3本のビームを示す、この時間帯は太陽には1本のビームしかかからない。この例

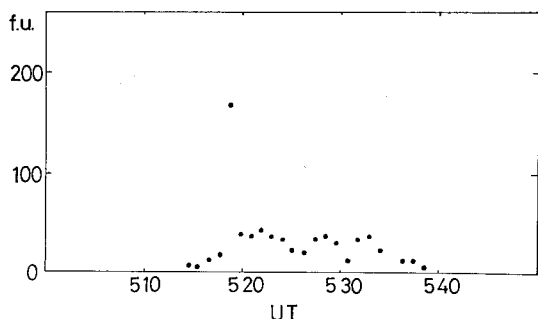


図 8 バーストの強度の時間変化 (1971年4月21日縦軸はフラックス)

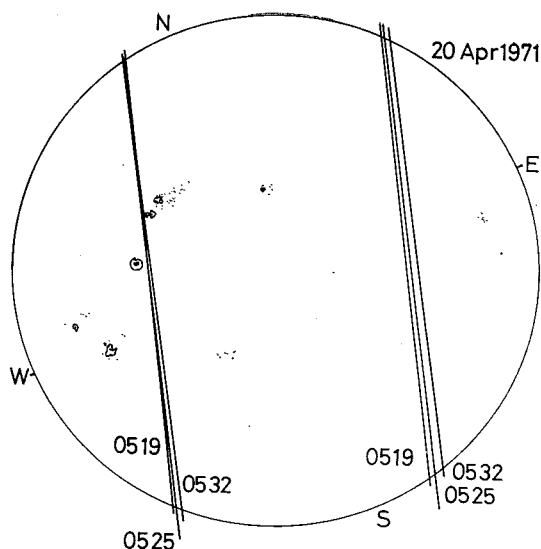


図 9 バースト時のビームの位置 (1971年4月20日、時間は世界時)

を特に拡大したのが図 10 である。3本のビームに点線で示してある。この黒点の図は、東京天文台によるもので朝9時にスケッチされているから、それに合わせるように回転させたものが実線で示してある。交叉している所は、点線では黒点群とはずれているが実線ではその一部に一致しこの領域でバーストが起ったと考えられる。田中、Zirin によれば、この時間、この黒点付近が $H\alpha$,

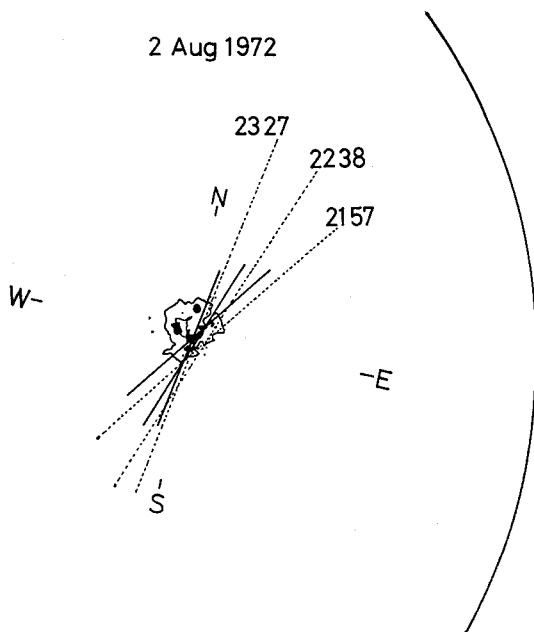


図 10 1972年8月2日のバースト時のビームの位置 (表紙右下の下図のバースト 時間は世界時)

3835 Å で明るくなっているということである。人工衛星 OSO-7 によると硬X線領域でこの電波バーストの初期の時間にX線バーストが観測されている。ということはこのバーストの初期において黒点の上層部において加速された電子が彩層に流れ込み、その上層でミリ波、その下でX線、光学現象が起きているのではないかと考えられる。

こうした描象をえがくには多くの観測と同時に精度をあげることが必要となる。

7. 干渉計の拡張計画

現在の干渉計の精度ではバースト源は分解できているとは考えられない。光学的にはバースト時に秒程度の明るくなる点が見つけられている。もちろん、そこまでゆくことはできないが黒点の構造と位置関係を明確にさせ

ることができるようにしたい。そのため現在の8素子より16素子に拡張する工事を進めている。アンテナの構造は基本的には同じであるが、アンテナ間隔は大幅に変更する。現在、アンテナ間隔は273波長234cmであるがこれを390波長—334cmにする予定である。これは図5のVisibilityにおいて現在の隣りの極値に合せてある。これによって南中にかかるビームが最高3本から4本になる。よって時間分解能は約36秒にあがる。16素子になると同時に間隔も広げるためビーム幅は大幅に小さくなり、現在1.4' (南中時) が33" (南中時) になる。データ処理の段階で20' 近くまで分解することを目ざしている。もちろん精度が上ると同時にそれにみあった位相の精度が要求される。位相合せについては今までの方式に加えて新しい位相調整法を開発中である。

新刊紹介

星

(上) その構造 (下) その進化

R. J. Tayler 著
中沢 清・池内 了訳
(共立出版)

(1) 都会に住むようになってから満天の星など見る機会は全く失なわれてしまった。それでもたまに地方へ旅行した折など、天の川の見える夜空の美しさ、ふと幼い頃見上げた夜空を想い出す。

小学生の当時、天の川は星の集まりであると本で読んで、じっと夜空をにらんでいたことがある。どうしても天の川は天の川であり、点の集まりには見えなかった。しかしこれは望遠鏡でのぞけば点に分解されて見える。

ところが星(恒星)はそうはいかない。いかなる巨大な望遠鏡を使ってみても、あくまで星は点源にすぎない。そんなことは天文学を専攻している現在となっては口に出してわざわざ言うのが恥ずかしくなるほど当然のことなのではあるが、巨大望遠鏡を使いながら物が大きく見ええないということが、その当時は何ともおかしく感じられた。

色や明るさには差があるけれども、本質的に点にしかすぎない夜空の星——中学生の頃、題名は忘れたが鈴木敬信先生の本を読んだ、夜空の星について人間はこんなに沢山のことを知っているのか、と感激したことがあった。

(2) さて、本書は題名の示す如く、星(恒星)の構造と進化について、恐らく大学初年級程度の人を対象として書かれた教科書である。点源にすぎない星の物理的諸性質(質量・光度・表面温度・半径・化学組成等)を人間が知る為には、天文屋の永年の観測的努力と最新の物理学の成果とのカップリングが必要であった。そして更に観測的にはどうしても知ることのできそうにない内部構造・進化の問題を天文学者がいかに解決していったか、これは恐らく自然科学をこれから本格的に学ぼうと思っている人達には興味深いテーマだと思われるが、本書はこうした関心に必要かつ充分に応える内容となっている。

著者は本書の序論で「われわれは星の構造と進化に関して一般的な理解をもっているように思われ、今後の発展は問題の質的な飛躍というより、量的な厳密化という方向に進むと考えられる」と主張している。まことにその通りであり、星の内部構造及び進化論は天文学の中では比較的足が地についた体系ならびに発展を有している数少ない分野のひとつである。これは、ニュートン以来の近代自然科学の特徴である「問題の分解(分析)から総合へ」という一般的方法に、この問題がなじみ易い性質を有しているということと無関係ではないのであるが、これはともかく、読者は本書によって、複雑な問題を諸段階に分解し、各段階を決定づける本質的諸要因を適切に選び出すことによって、複雑な現象がその本質的要素を保存したまま単純な法則で理解可能であるという自然科学ならではの醍醐味を味わうことができるであろう。

他方、本書が取り扱っている問題が、いまだ発展途上にある研究分野の問題であるということから、とりわけ