

電波干渉計像処理の新しい試み

甲斐敬造・小杉健郎

1. はじめに

日本天文学会から東レ科学技術研究助成の候補として推薦していただいた私達の研究が幸いにも助成の対象に採択されたと知らされたときは大変感激した。およそ2年前から着実に基礎実験を重ねてきた“野心作”を実現するための財政的裏付けを探していたときだからである。研究題目は「新しい干渉計像処理装置による太陽電波の高時間分解能観測」(甲斐・渋谷・中島・平林・小杉)で、研究目的は次に述べる通りである。

太陽が放射する電波は、銀河系または銀河系外の星雲が放射する電波などと違ってきわめて激しい時間変動を示すのが特徴である。とくにメートル波帯では1秒以下の時間で激しく変動する現象がひんばんに観測されるが、これはフレアーなどの爆発現象などによって高エネルギー粒子、磁気流体衝撃波、物質の放出等大規模なコロナの擾乱が引き起される結果その物理状態が短時間に変化するためと考えられる。私達は時間変動の激しい電波現象を干渉計によって観測し、光学的に観測し難い太陽大気の中の磁場とか高エネルギー粒子などがどのように早く変化しているものか突き止めようとする。一例としてⅢ型バーストを考えてみよう。Ⅲ型バーストの動スペクトルにみられる早い周波数ドリフト(1秒間に数十MHz)は、コロナの下層で加速された高速電子が弱い磁力線に沿って上層に逃げ出すときに各層でつぎつぎにプラズマ波を励起する現象として説明されている。そこで干渉計によってⅢ型バーストの発生する場所を調べれば、加速された電子が通るみちすじ、すなわち活動領域からコロナ上層へのびる磁力線の形を推測することができるのではないかと考えられており、実際にこのような方法でコロナ磁場を推定しようとする試みはすでに行なわれている。ところが、時間分解能のよいスペクトル計(正確にはスペクトルの時間変化をみるので動スペクトル計とよばれている)で観測してみると、一つのⅢ型バーストと思われていたものが実は幾つかの細かいⅢ型バーストに分解してみえることがある。ある場合には同形のバーストの繰り返しであり、またある場合には周波数ドリフトが異なるバーストの集まりである。ある時

間間隔において加速された電子がつぎつぎに同じ道(磁力線)を通過して上層に逃げ出すのか、あるいは、異なる道を通過して上層に逃げ出すのか、スペクトル計による観測だけでは判定を下せない。もし干渉計によって細かなⅢ型バーストの各々について発生場所を観測することができるなら、磁力線の形や電子の加速などについてより詳しい情報が得られると考えられる。

ところで干渉計による観測において、われわれが興味をもっている時間変動の早い現象をいつでもとらえることができるかというそうではなくて後に述べるように雑音に対する信号の比(S-N比)でできる限界が存在する。単に記録紙を早く送っただけでは雑音によるフラツキばかり記録してしまうことになる。たとえば東京天文台野辺山太陽電波観測所にある160MHz干渉計では、1秒以下の早い現象に対して精度よく発生位置などを求めることは困難である。私達の研究では、“画的”な干渉計像処理装置の開発を行ない、それを160MHz干渉計に応用してコロナから発生する電波をより秀れた時間分解能で観測しようとする。

2. 高分解能観測におけるS-N比の問題

天体の放射する電波はきわめて微弱であるため検出しようとする信号と雑音との大小関係(S-N比)が観測上重大な問題となる。ここでいう雑音とは受信機の中で発生する熱雑音のほか、観測しようとする対象以外の空から入ってくる電波雑音の総称である。宇宙電波の観測では、雑音より何桁も弱い信号を検出することがある。この場合には、長時間観測し、積分することによって、フラツキを減らす。いま受信機の帯域幅を df とし、積分時間を τ とすると、雑音は平均値のまわりに $\sim(\text{平均値}) \times (df \cdot \tau)^{-1/2}$ 程度のフラツキをもつことになる。したがって検出しようとする信号がこのフラツキより強ければ(S-N比 $\geq (df \cdot \tau)^{-1/2}$)信号を検出することが可能となる。こうして雑音より弱い信号も時間をかけて観測することによって検出することができるのである。途方もなく遠方にある天体の微弱な電波を幾日も追いかけてやっとキャッチした例も珍らしくない。

しかし、このような統計的処方が有効であるのは、検出しようとする相手の信号が変化しない場合であって、積分時間より早い時間変化はならされて検出することができない。太陽のように時間変化の激しい場合には、私達が観測しようとする現象のタイムスケールより短い時

* 東京天文台

K. Kai, T. Kosugi

A new-method of image-processing for radio interferometer

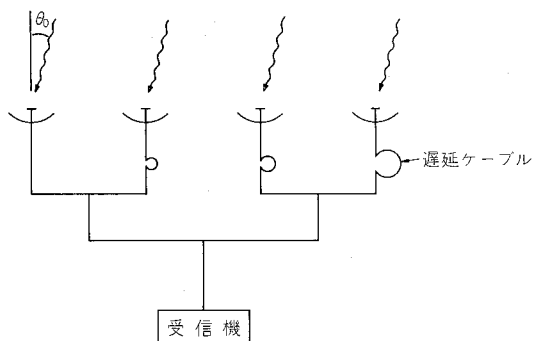


図 1 (a) 電波干渉計の原理

間の積分しか許されない。たとえば 0.1 秒程度の時間変化を観測しようとするれば、これより長い時間積分することはできないのである。宇宙電波のなかでは桁違いに強力な太陽電波でも、積分時間で稼げないとすると S-N 比の問題は重大となってくる。とくに、干渉計で空間分解能をあげて時間変化の早い現象を観測しようとするると S-N 比は厳しくなってくる。

図 1 (a) は電波干渉計の原理を示すもので簡単のため 4 個のアンテナを一方に等間隔で並べた場合を考える。もし各素子アンテナの出力を等しい長さのケーブルで共通の受信機に接続すると、4 個のアンテナに同位相で入射する電波は相強め合うので、アンテナ基線に垂直な方向に対して感度が最大となる。ところが図のように左端のアンテナからの距離に比例して増加する遅延量をもつケーブルを各アンテナの出力に挿入すると、感度が最大となる方向は、図に示すように基線に垂直な方向から右側に (角度 θ_0 だけ) ずれる。図 1 (b) は遅延ケーブルを入れたときの干渉パターン (指向性ともいう) を示すものであり、素子アンテナの指向性 (点線で描かれた包絡線) より鋭い指向性=空間分解能を有することがわかる。さて太陽の細かい構造を調べるため干渉計のビームを細くしていくと、太陽のごく限られた領域しか監視できなくなる。しかし、いつ、太陽のどこでバーストが起るかかわからないので空間的に固定したビームでは太陽をパトロールすることはできない。そこで、図 1 (a) の遅延ケーブルのところに連続的に位相を変えることのできる可変移相器を入れて、干渉ビームを積極的に掃引し、太陽のどこでバーストが発生しても逃すことなく観測することが必要である。私達がどのくらい早い現象を知りたいかによってビームを掃引する早さを決めたいのであるが、実は前に述べたように S-N 比の方からも制約を受けるのである。ビームを掃引することによってビームが太陽のある領域にかかっている時間は短くなり、したがってその領域からの信号の量もそれに比べて少なくなる。一方雑音の方は、ビームが他の領域を

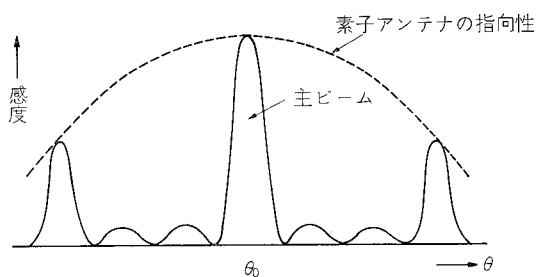


図 1 (b) (4 素子) 干渉計の干渉パターン

掃引している間も絶えず入ってくるので S-N 比が相対的に低下する (ビーム幅と掃引する幅との比だけ)。この事情を見方を変えて次のように云い表わすこともできる。各素子アンテナはつねに太陽全面からくる信号を受けているのであるが、信号を合成する過程である狭い領域 (干渉ビーム) 以外からくる信号を失ってしまうので S-N 比が低下すると、微弱な信号を検出しようとする天体観測において、これは大変もったいない話である。

それでは、S-N 比の低下をもたらすビーム掃引を行わずに、かつ鋭い分解能で太陽全面を監視する方法が無いものであろうか。各素子アンテナから入ってくる信号を合成する過程で有効な信号を失なわないようにすれば可能である。この要請に答えるものがマルチビーム方式とコリレーター (相関器) 方式である。マルチビーム方式は、天空上に多くの同等な干渉ビームを“同時”に張りめぐらすものである。図 1 (a) で各素子アンテナの出力を分割し、異なるアンテナの出力と合成する際形成されるビームの向きが天空上で少しずつ異なるように多数の異なる遅延ケーブルを挿入する。そして分割した数だけ独立な受信機を用意するが、各々の受信機の出力は天空上の異なる領域からの情報を与える。分割する数=独立な受信機の数、観測しようとする視野の広さをビームの太さ (半値幅) で割った数の約 2 倍となる。たとえば前記の 160 MHz 干渉計の東西系を考えると、視野の幅は 64', ビーム幅は $\sim 2'$ であるから、約 64 個の受信機を必要とする。これが S-N 比を改善するための代償である。一方コリレーター方式は、必要なすべてのアンテナの間で相関 (振幅と位相) をとり、干渉計像を合成するものである。高い分解能を必要とする宇宙電波の観測ではよく用いられている方式であり、アンテナを移動して、種々の異なる間隔で相関を測り、後に像を合成する“口径合成法”は常とう手段となっている。しかし太陽電波の観測では、相手の時間変動が早いのでアンテナを動かしては一組の相関をとる悠長なやり方は適用できなくて、像を合成するに必要なフーリエ成分を瞬時にとらなければならない。したがって必要とするフ

ーリエ成分の数の2倍の相関器を必要とする。160 MHz 干渉計の場合には 48 個の相関器が必要となる。

マルチビーム方式および、コリレーター方式ともすでに幾つかの干渉計で採用されている。S-N 比を大幅によくするためには、数多くの独立な受信機や相関器を作ることともいわないのである。しかし現実問題としては受信機などの数が極端に増えることは、製作上はともかく保守の面で決して好ましいことではない。装置をつねに最良の状態に働かせるためにいかに多くの労力を注ぎ込まなければならないか過去の経験からよくわかっている。そこで上に述べたような大掛りな方法でなくもっと簡単なシステムでしかも上の方式と同程度に S-N 比を改善する方法はないであろうか？ 私達が今回の研究で試みようとする光学的結像処理法こそこの要請に答え得るものではないだろうか、と私達は秘かに考えている。

3. 光学的結像処理法

われわれが仮に名付けた電波干渉計の光学的結像処理法の原理を模式的に示したのが図2である。各素子アンテナの出力は遅延ケーブルとか移相器を通らず直接振動子に送られる。ここに振動子は、加えられた電気信号の

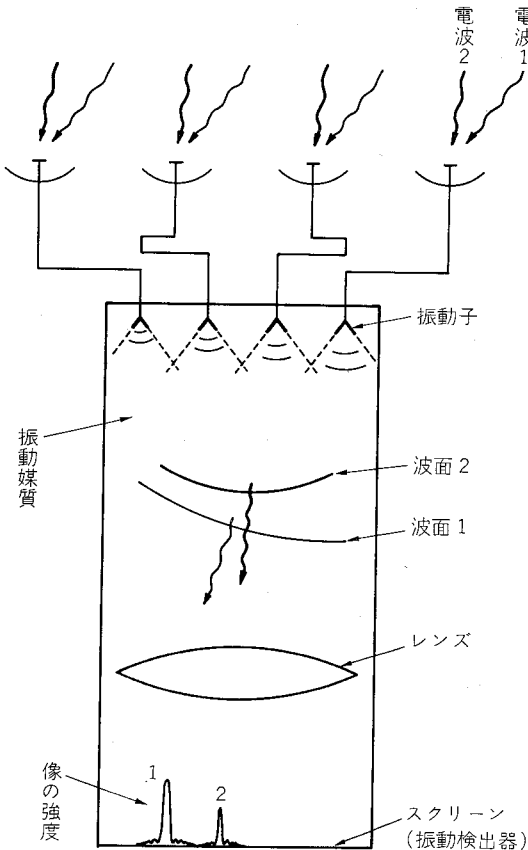


図 2 電波干渉計における光学的結像処理方式の原理

位相と振幅とを保持した波を発生する。波は媒質の中を広がりつつ伝播していくが、他の振動子から出てくる波と干渉して特定の方向に進む波だけが強められる。この波を有限の距離で結像させるために、光の場合のレンズに相当するものを通してやれば、その後方に置かれたスクリーン上に波の像を結ばせることができる。いま二つの異なる方向から電波が同時にアンテナに入射したとすると、振動子から発生した二つの波は、スクリーン上の異なる二つの場所に結像される。

さて、図2と前に述べた図1(a)とを比較してみると、この方式は一種のマルチビーム方式であることに気がつく。図1(a)では、アンテナの出力は遅延ケーブルによってある特定の方向から入射する電波だけが“強制的”に干渉し強められる。マルチビーム方式では複数の異なる遅延ケーブルの組が用意されていて、ある方向から入射する電波は1番目の受信機に、また別の方向から入射する電波は5番目の受信機にと云った具合に強制的に送り込まれるのである。しかし、光学的結像処理法では電気信号は波に変換されて媒質中を“あらゆる”方向に伝播する。遅延ケーブルに相当するものはここでは異なるアンテナから出る波の間の光路差であるが、遅延ケーブルの場合と違って連続的に変わる量である。したがって無限に多いチャンネル数をもったマルチビーム方式と同等であるということもできよう。

光学的結像処理法——物理的な類推からわれわれが仮に名付けたものであるが——が電波干渉計の像処理において、きわめて有効な方法であることを最初に提唱したのは、米国コロンビア大学応用光学研究室のランバート達であった。彼らは当初レーダーのためのフェーズド・アレイの一つの可能な、しかも斬新な像処理方法としてつぎのようなもの考えた。素子アンテナの出力信号を変換器によって同じ振動数をもつ超音波に変換する(音波を電気信号に変換するマイクロフォンと逆のプロセス)。超音波がセルの中の媒質を一方向に進むよう変換器の反対側には吸音体を貼りつける。さて、このセルにコヒーレントな光(レーザー光)を照射すると、セルの中に生じた密度の濃淡、すなわち屈折率の周期的な変化によって光の一部はそこで回折される(図3参照)。回

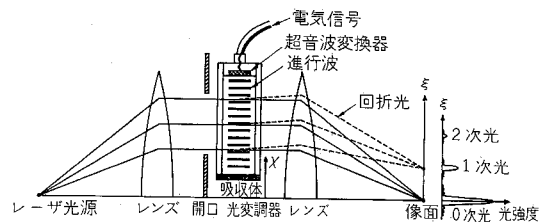


図 3 音響光学効果によるレーザー光の変調

折された光の振幅は超音波の振幅、すなわち入力電気信号の振幅に比例し、かつ位相も入力信号の位相を保っている。いわばアンテナに入射する電気信号を、レーザー光という搬送波に乗せるのである。このように、アンテナの数に等しい超音波変調素子を、アンテナ配列をシミュレートして配置し、変調素子全体に平行なレーザー光線を照射する。各素子で回折された光をレンズを通してスクリーン上に結像させる。この像こそアンテナ群によって映し出される空の輝度（電波の強度）分布に他ならないのである。

レーダー用のフェーズド・アレイは電波天文学用の干渉計と全く同じものである。ランバート達は、オーストラリアのカルグラ観測所にある 80 MHz ラジオヘリオグラフ（1967 年完成）の像処理装置の一つの可能な方式として上に述べたものと同様なシステムを提案している。しかし実際には、当時秀れた変調素子が手頃な価格で得られなかったなどの理由で実現されず、その代わりに南北方向に約 50 個のマルチビームを作り、東西方向にこれらのビームを掃引する折衷案が採用された。実はその後も現在に至るまでこの像処理方式を取り入れた干渉計は現われていない。推察するに性能の秀れた変調素子が手軽に得られないこと、また光学系の安定性に対する危惧等によるのかも知れない。

ランバート達が提唱した新しい像処理方式は光と超音波との相互作用を利用したもので音響光学効果として古くから（1930 年頃）よく知られていた。約 10 年前から

音響光学効果がいろいろな方面でクローズアップされてきたのは、コヒーレントな光源、レーザー光が得られるようになったからであろう。ランバート達の案が発表されたのも、レーザー光源がこの世に出廻り始めてからであった。

4. 160 MHz 複合干渉計への応用

野辺山太陽電波観測所の 160 MHz 干渉計は東西方向および南北方向にそれぞれ $\sim 2'$ 、 $\sim 3'$ の分解能をもつ独立な二つの一次元干渉計から構成されている（詳しくは天文月報 63 巻 12 号参照）。東西系、南北系ともビーム掃引を毎秒 10 回の割合で行なっている。しかし余程強いバーストでない限り、1 秒より早い現象を充分な S-N 比で観測することはできないのが現状である。一方スペクトル計はマルチチャンネル（40 チャンネル）方式を採用した結果 S-N 比が秀れているので 0.1 秒より早い現象を余裕をもって観測することができる。動スペクトルにみられる微細な構造に対応して発生場所が変わっているかどうか知るためには干渉計の方も S-N 比をひき上げなければならない。この要求に答えるためにビーム掃引をやめて、前節で述べた光学的結像処理方式に改めようとするが、まず今回は東西系について改修を行う計画である。

システムは図 4 に示すように、干渉計を構成するアンテナの数に等しい 11 個の超音波変調素子列と、コヒーレント光源である He-Ne レーザー、ビーム拡大器、コリメーター、および変調素子で回折された一次回折光を

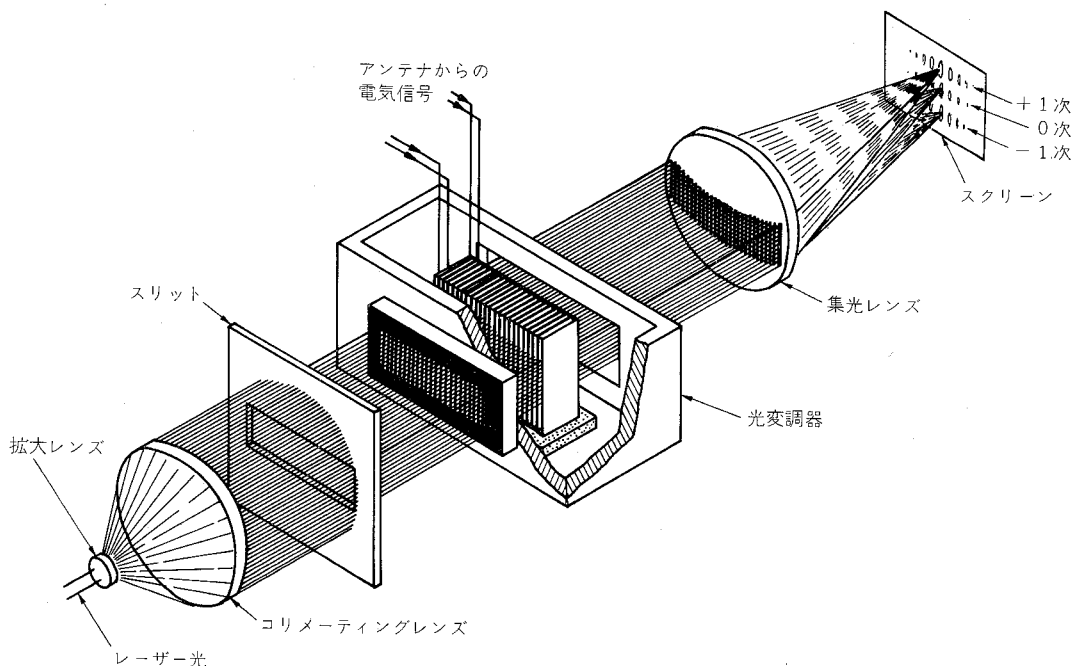


図 4 電波干渉計の光学的結像処理システム

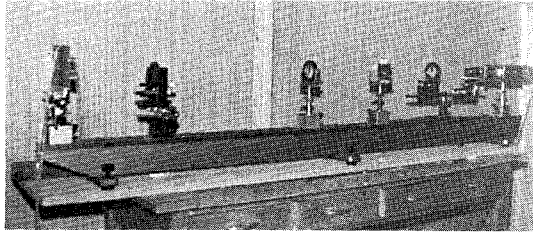


図 5 2素子干渉計の実験。右から、レーザー、ビーム拡大器、超音波変調器(2素子)、集光レンズ、拡大レンズ、フォトダイオード・アレイ

合成し結像させる集光レンズと像を検出する光感光子素子列などから成る。超音波変調素子列は最も重要な部分である。電波強度の変動幅の大きいパーストを観測するのであるから謂ゆるダイナミックレンジの広いこと、位相特性がよいことなど、通常の音響光学効果の応用では問題にされないような厳しい特性も要求される。幸いわが国ではこの方面の秀れた研究・技術開発が早くから積極的に進められてきている。光感光子素子列としては数百個のフォトダイオードを数ミリの長さに納めたものが市販されている。最近では暗電流、スイッチング雑音が少なく、ダイナミックレンジの広いものが開発されている。フォトダイオードの出力は AD 変換して計算機に送り込む。

ここでシステムの較正について触れておこう。とくに、このシステムの中で安定性が一番懸念されるのは、光学系である。外部から加えられる振動によるものと加熱などによるもっと長時間の変化などが考えられる。周期の短い振動については除振台などを使って除去するしか対策がないのであるが、かなり長時間の変動であれば較正をひんぱんに行うことによって救うことができよう。そのために変調素子列に振幅、位相の知れた内部信号を一定の時間間隔で加え、それによってシステムの不安定による強度、位相の変動を知り、システムの較正をしようとするものである。実は現在製作中である音響光学効果を利用したスペクトル計においても光学系の変動に対処するために同様な較正法をとり入れている。

5. 2素子干渉計のシミュレーション

160 MHz 干渉計への応用の可能性を調べる目的でこれまで最も簡単な2素子干渉計に対して光学的結像処理方式をテストしてきた。ここでは実験の結果と実験を通じて分かった幾つかの問題点について触れてみたい。

超音波変調素子は松下技研製である。新聞ファグシムル用に開発されていた変調素子と類似のものであって、一枚の光学ガラスに二つの変換素子(トランスデューサー)を貼りつけて二つの変調素子としている(図5参照)。図6は、これら二つの変調素子に模擬信号を加えたとき

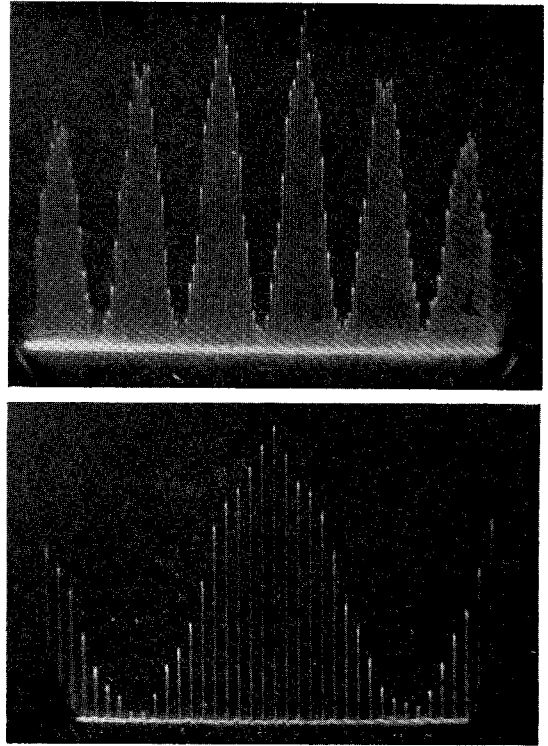


図 6 2素子干渉計の実験結果

にできた像をフォトダイオード・アレイで検出し、シンクロスコープに出したものである。上図は“2素子干渉計”の干渉パターンを示すものである。2素子間の距離で決まるパターン(正弦波の2乗)と各素子の指向性を表わす包絡線が明瞭に出ている。下図は、上図のパターンの一つを拡大したものである。フォトダイオードの感度と直流分のバラツキがあるため滑らかな曲線になっていないが、これらのバラツキを補正すれば正弦波の2乗になる筈である。

変調素子の片方に移相器を入れ、位相を変えていくと干渉パターンはそれにつれて移動する。ピークが移動する量と位相の変化量とは比例する。当然の結果であるがレーザー光に電気信号の位相が正しく乗っていることが確かめられた。

入力電気信号に対する出力の直線性の範囲(ダイナミックレンジ)は20 dB(1:100)以上確保できる。入力の上限は、変調器内で超音波の散逸による熱の発生で決まるようである。一方入力の下限はフォトダイオードの雑音で決まってしまったが、ダイオードを冷却するなどによってもっと低いレベルに下げることが可能である。

次に安定性であるが、光学系はとかく振動に弱いと聞かされていたので実験台は床面から浮かし直接地中に杭を打ったのであるが、外を通る自動車の振動をまともに受けてしまう。現在除振装置について調査中である。し

かし、われわれの実験よりずっと厳しい振動対策を必要とする装置が現に作られているので、適当な対応策は必ず見付かるであろう。

以上の実験から推して、今後現実に 160 MHz 干渉計に応用するにはなお幾つかの技術上の困難に出合うと思われるが、時間をかけて一つ一つ克服して行けるものと確信している。なお上に述べた光学的結像処理方式では“多周波同時観測”へ拡張するのが比較的容易であると思われる。変調素子に加えられる異なる周波数の信号に対して、レーザー光は異なる方向に回折されるからである。したがって、一次元干渉計ではスペクトルの機能を兼ねそなえることが容易にできるのである。私達は将来の拡張として 160 MHz の他に ~300 MHz での同時観測を考えている。

基礎実験を行うに当たって、特殊な変調素子を心よく試作し実験に借して下さった松下技研画像処理研究室の速水氏および福本氏に、この紙面を借りて厚く感謝する。両氏の御協力なしには基礎実験を行うことは事実上できなかったであろうし、この実験を踏み台にした応用へ踏み切れることもできなかったであろう。また、東工大像情報工学研究施設の辻内教授および上羽氏からは多くの有益な助言をいただいた。実験の間、装置の製作など塩見氏（東京天文台太陽電波部）に協力していただいた。

掲 示 板

教 官 公 募

此度当教室では次の要領で教官 1 名を公募します。

記

1. 公募人員 助手 1名
2. 専攻分野 宇宙物理学 (広い意味の恒星物理学)
3. 着任時期 おそくとも昭和 51 年 10 月 1 日
4. 応募資格 修士課程終了以上
5. 提出書類 (イ) 履歴書 1 通
(ロ) 業績リスト (著書, 論文) 1 部
(ハ) 主要著書・論文別刷 各 1 部
(ニ) 今後の研究計画 1 通
6. 締 切 昭和 51 年 7 月末日 (必着)
7. 提出先および問合せ先

〒 310 水戸市文京 2-1-1

茨城大学理学部物理教室 小暮 智一
(電話 0292-26-1621 内線 485)

訂 正

本誌 69 巻 5 号 (5 月号) 148 頁に掲載いたしました訂正記事中の電波放射束の単位の一部に誤りがありました。Wm⁻²Hz⁻¹ が正しい単位です。

わが国唯一の天体観測雑誌

天文ガイド

定価 240 円 (〒 45 円) 76 — 8 月号・毎月 5 日発売!

● 8 月号のおもな内容

★夏休みむけの楽しい記事が、「テンドームの作り方」を紹介しつづけます。テンはテントのテン、つまりテントで作る移動型の観測用丸屋根です。

★夏休みむけ第二弾。長野県榑池にある星の家の紹介。涼しい高原、降るような星空、そして 20cm 級の望遠鏡も備えてあります。

★暑い最中のことなので、気軽な読み物を。地球と月の間の両方の引力がちょうど釣合っている所に、宇宙ステーションを作ろうという話です。

★夏の名物ペルセウス座流星群の観測は？

彗星ガイドブック

日本は数十年前から、新彗星発見で世界のトップに立っています。しかもその発見が、若いアマチュア天文家によるものだったために、後に続く若者の数は最近ますます多くなりつつあります。そうした若い人々の手引きとなることを目指して、戦後 6 個の新彗星を発見した著者が、熱意をこめて書いた本です。

● 関 勉著 / A5 変型・258 ページ・1,300 円好評発売中

新版 天体観測ハンドブック

1965 年 9 月に初版を発行以来、天体観測ハンドブックは 12 版を重ねました。天文ファンの毎年の観測方針を決定する天文年鑑の内容をより理解し、十分に活用するために、天文ファン必携です。今回新版として新たに 1 章を追加し、例題を改め、全ページ新組とし、読みやすいスタイルで刊行されます。

● 鈴木敬信著 / B6・192 ページ・500 円好評発売中

誠文堂新光社 東京都千代田区神田錦町 1-5
振替東京 7-6294 電話 03(292)1211