

宇宙電波分光学の「新しい波」

——音響光学型電波分光器の試作——

海部 宣男*, 浮田 信治*, 近田 義広**, 宮地 竹史**

はじめに

「甲斐さんは今度、オプトエレクトロニクスを太陽電波観測に応用する実験を始められるそうですね。その同じ原理を、ミリ波の宇宙電波スペクトルの観測にも応用できないものでしょうか？」

「太陽電波と宇宙電波では、用途や必要な性能もずいぶん違うだろうけど、使えないことはないと思いますよ。どんなことを考えているの？」

丁度今から2年前、アメリカ国立電波天文台(NRAO)での1年半の滞在を終えて帰ってきたばかりの海部と、東京天文台野辺山太陽電波観測所の甲斐さんとのこんな会話から、私達のこの仕事が始まった。それから約1年後の1976年6月には、私達は東京天文台の6mミリ波望遠鏡に接続された、新しいタイプの宇宙電波分光器——音響光学型電波分光器——によって、ミラ型変光星からのSiOメーザスペクトル線の受信に成功した。システム総合の周波数分解能57kHz、ミリ波帯では世界一の高分散分光器である。

そればかりでなく、この実験を通じて、超音波によるレーザ光の回折(音響光学効果)の応用によって宇宙電波分光学の画期的前進がもたれるにちがいないという見通しを持つことができた。けれども2年前の私達は、もっとさし迫った必要に迫られていたのであって、そこまでは思いも及ばなかったのはもちろんのことである。

宇宙電波分光観測と電波分光器

当時私達が必要としていたのは、“高分散”即ち周波数分解能の高い電波分光器であった。1970年頃からめざましく発展し、みるみるうちに大きな学問分野となった星間分子スペクトル線を中心とする電波分光観測(宇宙電波分光学)において、東京天文台の6mミリ波望遠鏡は、アメリカ国立電波天文台の11mミリ波望遠鏡に大きく水をあげられながらも、この分野の開拓に一役かかってきた。星間分子の電波スペクトルを観測するための私達の電波分光器は、最初の11チャンネル分光器、次のコンパクト化した30チャンネル分光器(これを使って、メチルアミンなどいくつかの新しい発見をすることができた)の手作りの装置を経て、当時、第三世代である本格

的な256チャンネル分光器がやっと働き始めていた(本誌1975年8月号、森本雅樹「256奮戦記」)。これらの分光器はいずれも、コイルとコンデンサによる同調フィルタを並べた「フィルタ・バンク型式」で、周波数分解能1MHzになるように作られていた。それは、宇宙電波分光学の初期においては、「新しい分子・新しいスペクトル線の発見」が最大の課題であったからで、受信機雑音に埋もれた弱いスペクトル線を検出するためには、“低分散”即ち周波数分解能の低い(とはいっても、 $4f/f \approx 1\text{MHz}/100\text{GHz} \approx 10^{-5}$)だから、光の分光学の常識からは、“高分散”である)電波分光器が必要だった。

しかし、星間分子の観測が進むにつれて、情況は変わり、精密な観測が必要となった。例えば、SiO(一酸化ケイ素)分子のメーザ輝線(波長3.4mm)の発見がある。SiOスペクトルは、メーザの特徴である極めて鋭いピークをもち、その線幅は100kHz(ドップラー効果による速度幅になおして0.35km/sec)以下のものもまれではない。海部はNRAO滞在中に、キット・ピークの11m鏡を用いて、SiOメーザ源のほとんどがミラ型変光星か赤色超巨星であり、またその強度も時によって激しく変化していることなどを見出した。これらSiOメーザの発振機構や晩期型変光星の質量放出過程などの問題を解いてゆくには、SiOメーザのプロファイルの時間変化を追ってゆくことが有効にちがいない。三鷹の6m鏡は運用面からはこのようなモニタ観測には有利であるが、残念ながら256チャンネル・フィルタバンク型分光器の1MHzという周波数分解能では、とても詳しいプロファイルの変化を追いかけることはできないのである。

もう一つ、高分散観測が必要な例をあげよう。銀河系の中には、暗黒星雲と呼ばれる。冷たく密度の高い($T=3\sim 20\text{K}$, $N_{\text{H}_2}=10^2\sim 10^4\text{cm}^{-3}$)領域がある。重力収縮からやがて星を生みだし、発光星雲へと変わってゆく「星の母体」である。暗黒星雲の多くは、重力的には完全に収縮(自由落下)すべき条件下にあるが、CO分子の電波スペクトル線(波長2.6mm)などのこれまでの観測では、系統だった収縮運動はあらわには観測されていない。暗黒星雲の温度を10Kとすると、CO分子の熱運動による線幅は約0.05km/secである。これは周波数幅にして約20kHzに相当する。従来この種の観測は、数百kHzの分解能で行なわれていたが、100kHz以下の高分散観測によって、暗黒星雲中のわずかな回転運動や部分的に始まったばかりの収縮運動をみつめることが

* 東大理 N. Kaifu, N. Ukita

** 東京天文台 T. Miyaji, Y. Chikada

A New Instrument for Cosmic Radio Spectroscopy

できるかもしれない。

このようなわけで、私達は少なくとも 100 kHz よりも周波数分解能の高い電波分光器を急いで作ることが必要であった。しかし私達にはお金もなく、大型宇宙電波望遠鏡計画の推進などに追われて、人手もなかった。フィルタ・バンク型の電波分光器を作るためには、その両方が必要である。そこで、いっそ思いきって新しい方法を試してみてはどうだろうということ、冒頭の会話となったわけである。

当時音響光学効果を用いた分光器は、オーストラリアで先進的な研究が進められており、甲斐さんはオーストラリア滞在中にカルグーラの太陽電波動スペクトル用の装置の実験をつぶさに見てこられ、野辺山での実用化に着手されたところであった。宇宙電波への応用では、パークスの 64 m 鏡のために、コール達によってマイクロ波用の装置のテストが行なわれていた。

いろいろと検討した結果、どうやらいけそうだとということになった。第一の問題は、装置の中心となる「超音波光変調器」であった。この方面でトップレベルの研究を進めておられた電々公社武蔵野通信研究所の内田直也氏のところに何度もお邪魔しては相談に乗っていただき、内田氏が開発された TeO_2 (二酸化テルル) のすぐれた音響光学特性を応用した高性能の変調器をテスト用に借用できることになった。勇躍、実験室作りに取りかかったのは、夏も終わりに近い頃であった。

天文台の事務員さん達の指揮のもと、500 kg もある一量敷の鉄定盤がミリ波観測室に据え付けられた。まわりをベニヤ板で仕切って急ごしらえの暗室を作り、昔太陽分光用に使われていたという光学レールを借用して、またこれも借りものの He-Ne レーザを据え付けるなどして、ともかくも私達の実験はスタートした。

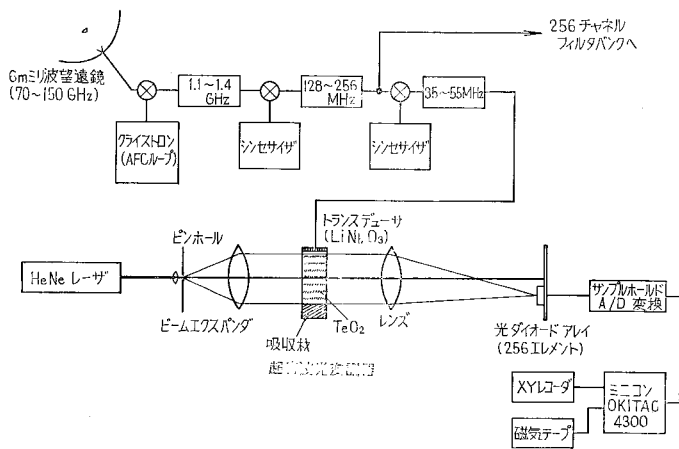


図 1 東京天文台 6 m ミリ波望遠鏡用 256 チャンネル音響光学型分光器のブロック・ダイアグラム。

音響光学型電波分光器の試作

システム全体のブロック・ダイアグラムは図 1 に示すとおりである。望遠鏡に入った電波信号は、3 段階の周波数混合によって必要な周波数帯に変換される。この信号は TeO_2 結晶にはりつけられた圧電素子をとおして、同じ周波数スペクトラムをもつ超音波として TeO_2 結晶内部へ伝えられる。超音波は、高周波信号の振幅に応じた光の屈折率変化を伴う、一種の回折格子とみなすことができる。即ち、これに単色のレーザ光を入射させると、レーザ光は超音波によって回折される。この光をレンズで集めてやれば、その焦点面には干渉によって生じた光の強弱のパターン（電波の周波数スペクトラム）が生じることになる。回折角は超音波の波長に反比例（つまり電波信号の周波数に比例する）し、回折光の強さは超音波による媒質の屈折率変化分の自乗に比例（つまり電波信号の電力に比例）する。以上の動作原理は、従来光の分光観測に用いられてきた回折格子と光の役割が、逆転しているだけであるといえる。つまり、回折分光器における望遠鏡で集めた光（スペクトル情報を含む）のかわりに単色のレーザ光を用い、等間隔の回折格子のかわりに電波望遠鏡からの電波信号のスペクトル情報を含む超音波を用いるのである。

ただし、結像面におくのは写真フィルムではない。宇宙電波、特にミリ波観測の常として、検出すべき信号はそれよりも桁ちがいに大きな受信機雑音の中に埋もれているからである。得られた像をみても、そのままではスペクトル信号を検出することは不可能である。そこで、256 個の光ダイオードを約 6 mm の長さの中に並べた、光ダイオード・アレイ（イメージ・センサ）をおいて、これで回折光を検出する。各々の光ダイオードに入る光の量に比例する 256 個の電圧出力を 40 ミリ秒毎に取り出し、A/D 変換してからミニコンに送り込む。望遠鏡にはチョップがついていて、目的の天体からの電波と、そのすぐ近傍の“カラッポの空”からの電波とを交互に受信できるようになっている。ミニコンによりこの 2 つの差を計算して、受信機雑音をとりさった“天体からの電波”だけを取り出す。これを繰り返し行かないデータの蓄積を続けてゆくと、ランダムな雑音は平均化され、目的のスペクトルが姿を現らわしてくる。これを適時 X-Y レコーダに書かせてやるのである。（以上のプロセスについては、本誌冒頭のアルバムを参照されたい。）

さてこのシステムの周波数分解能 Δf は、

表 1 主な音響光学材料の特性

材 料	音 速 (m/sec)	音波吸収係数 (db/cm·GHz)
水	1,490	2,400
フリントガラス	~3,600	1,200
溶 融 水 晶	5,968	12
LiNbO ₃ [001]	3,590	2.6
TeO ₂ [001]	4,200	15
TeO ₂ [110]	616	290

$\Delta f = 1/\tau = v/l$ で与えられる。ここで v は超音波媒質 (TeO₂ 結晶) の音速, l は超音波進行方向の媒質の大きさ, 従って τ は超音波面が素子を通りぬけるに要する時間である。私達の用いた TeO₂ 結晶の [110] 方向の音速は 616 m/sec と, ガラスや水晶 (~数 km/sec) と比べて非常に小さく, 従って小さな Δf がとれる (第 1 表参照)。素子の大きさ $l=18\text{mm}$ であるから, 理論的には 34 kHz という高い周波数分解能が得られることになる。TeO₂ 結晶は, この他異常ブリッグ回折を応用して広い帯域幅をとれること, 光学活性が大きいこと, 超音波の減衰が小さいこと等極めて優れた音響光学的特性を備えており, 通研の内田さんたちのグループがその研究に取り組んで世界の最先端をゆく音響光学素子を開発され

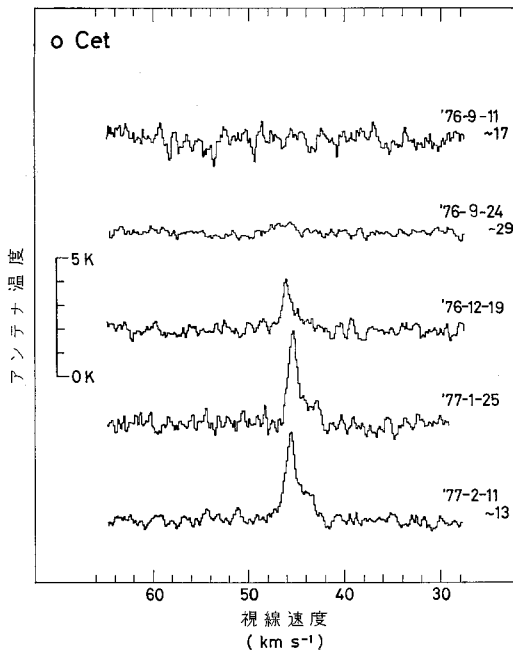


図 2 クジラ座のミラ星 (オミクロン-セチ) からの SiO₂ メーザスペクトルの時間変化。半年たらずの間に, いちじるしい変化を示している。電波強度の変化は, 赤外線強度の変化とほぼ一致している。

たことは, 私達にとっては本当に幸いなことであった。

なれない光学系の調整にとまどいながら, 内田さんからお借りした TeO₂ 「超音波変調器」(私達にとっては回折格子である) の性能テストを進めた結果, 素子としての周波数分解能は理論どおり約 34 kHz, 周波数帯域幅は 20 MHz 以上と, 私達の当初の目標を上まわる素晴らしいものであることがわかった。早期実用化への期待をもって, 私達は電波分光器としてのシステム化と 6m ミリ波鏡へのつなぎこみにとりかかった。光学部分・高周波部分を海部が, データ転送部・チョッパー駆動装置を浮田・宮地が, 観測用プログラムを近田・浮田がそれぞれ主として担当した。最後のツメの段階では, この分光器を作って SiO₂ メーザの観測を行ない, 修士論文を書こうという浮田が大いにガンパって, 76年5月には, 受信機ノイズを X-Y レコーダにかかせるところまでこぎつけた。ここまでくれば, あと一息である。

さあテスト観測! 梅雨空を気にしながら, 6m 鏡をオリオンAに向ける。しかし雑音温度は予測されたよりも1桁も大きく, 信号らしいものは見えてこない。「どうもスイッチングノイズらしい」「いや, キャリブレーションが変なのでは?」……電源や回路の各所にノイズ対策を施したり, ミクサを調整したり, アンプの直線性を測ったりといった繰り返しが続いた。

6月6日, 日曜日。ミリ波の電話が鳴って, 緊張した声が, 入院中の井口さんの容体が急に悪化したことを告げた。そしてわずか数時間後の電話は, 井口さんが亡くなったことを知らせた。病院にかけつけた私達は, 冷たくなった井口さんと, 眼を赤く泣きはらした奥さん, お母さんに対面できただけであった。

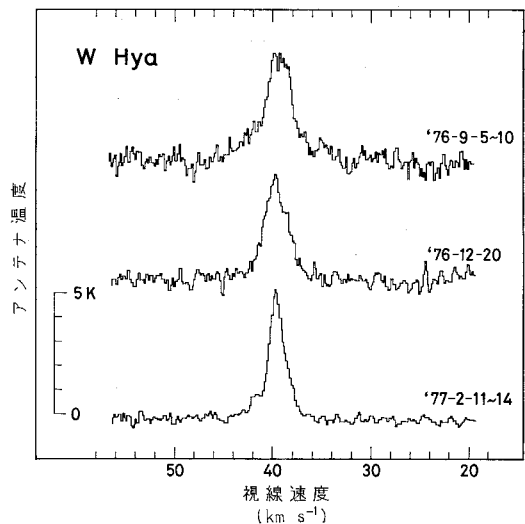


図 3 ミラ型変光星海蛇座 W 星からの SiO₂ メーザスペクトルの時間変化。スペクトルの幅, その広がりなどの変化が目立つ。

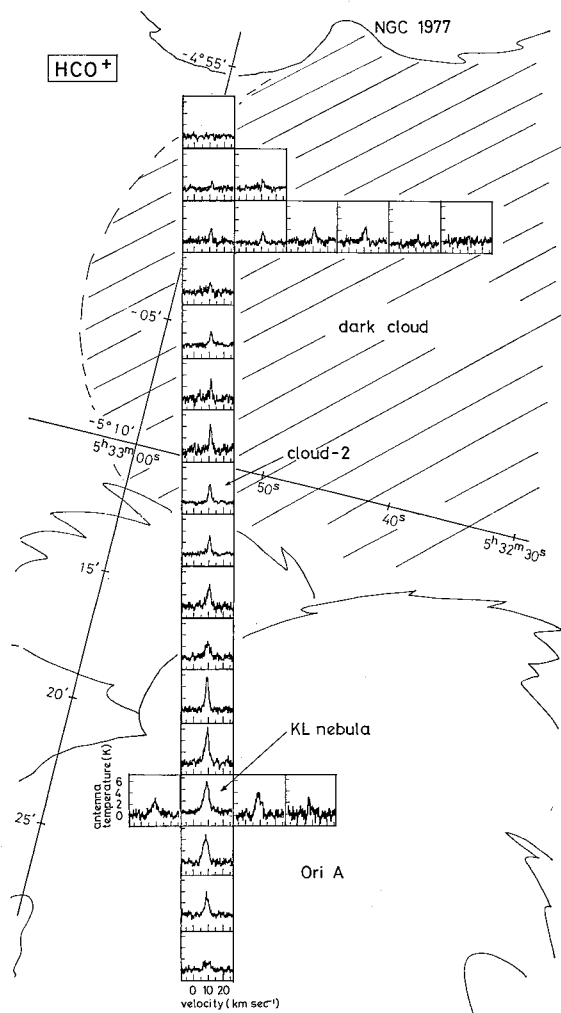


図2 オリオン大星雲付近の HCO^+ イオンの電波スペクトル観測 (波長 3.3 mm)。2分角おきに26点のプロファイルを示す。発光星雲のみでなく、暗黒星雲の部分にまで分子雲が広がっていることがわかる。

まだまだこれからやりたいことがたくさんあった井口さん。将来計画の進み具合や、私達の実験の話聞いて、早くよくなって一緒にやりたいといっていた井口さん。井口さんの病が不治のものとうすうす知ってはいたものの、元気で愉快的仲間だった井口さんの死を、私達はなかなか現実のものとして受け入れることができなかった。

試験観測

一週間後の6月13日、私達はオリオンAのHCN輝線をこの分光器を用いて初めて検出することに成功したのであった。

一度うまくゆけばしめたものである。得られたデータから、装置の特性や問題点がはっきりしてくる。どうも

アンテナ面で反射がたっているようだ、データとりこみのタイミングに問題がある。これらに対して次々と改善を加えて、9月からはほぼ満足できるデータが得られるようになった。周波数分解能、心配された光学系の安定性、周波数の安定性なども実用上満足すべきものであることが確認された。さらにこの分光器がシステム全体として極めて安定なことから、従来のフィルタ・バンク型分光器では2重のチョッピングが必要であったものを、1つだけに減らすことができることもわかり、このため受信感度は2倍に向上した。一方、分光器の極めて高い周波数分解能に第1局部発振器の周波数安定度が追いつかず、局部発振器のAFCループの強化などの対応策も必要になった。

図2～図4は、この分光器によって得られた試験観測データの一部である。SiOメーザ源の連続観測(図2, 図3)は、強度だけでなく線の形(プロファイル)が変化していく様子をハッキリ示している。図4は、 HCO^+ イオンのスペクトル(X-gen)を、オリオン分子雲全体について、角度の2分おきに観測したものである。スペクトルの幅、速度が場所によって異なる様子から、この大きな暗黒星雲の中で、部分的な収縮と雲の分裂が起きているらしいことがわかる。私達は、地上では安定に存在しえないために実験室ではまだ十分に研究されていない“分子”であるHNCラジカルと、前記 HCO^+ や HCN のオリオン分子雲中での分布のちがいを調べているところである。さらに、近く6m鏡で観測が始まるCO分子のスペクトルによる暗黒星雲の詳しい観測にも、この分光器の高分解能は威力を発揮するはずである。

このような観測をつづける一方、私達は、「実験用装置」から、「本格的な試験観測用分光器」へと、現在の装置のグレード・アップを計画している。第1に、倉田奨励金(国産技術振興会)の援助を得て、現在の超音波変調器の能力をフルに発揮できるように、受光部を512チャンネルのイメージセンサにとりかえ、帯域幅20MHz以上をとれるよう作業中である。(現在は10MHz)。第2に、やはり TeO_2 結晶を用いて、帯域幅200~250MHz、チャンネル数1,000以上の広帯域分光器の製作準備を進めている。さらに、装置を現在の暗室から大型暗箱に移して、観測調整を容易にするための作業を行っている。180cm×60cm×45cmの暗箱や光学系の一部を東京天文台の工場の方々に協力をいただいて目下製作中であり、この夏の間には、観測室内にすえつけた暗箱の中で512チャンネルの分光器が動きはじめるだろう。チャンネル数の増大に備えて、ミニコンの補強やソフトの改善にも追われている。

宇宙電波分光学の新時代

音響光学効果の応用が今後の電波天文学に及ぼす影響は、非常に大きなものであらうと思われる。少なくともそれは宇宙電波分光の観測法を質的に変えるに違いないし、また電波干渉計の像処理能力を飛躍的に増大させ、干渉計のシステム設計を大きく変えることになるだろう。この双方を、当面する大型宇宙電波望遠鏡計画において実現すべく、私達は準備を進めている。

第一の宇宙電波分光については、何といってもチャンネル数（情報量）が一気に増えることが重要である。従来のフィルタ・バンク型では 100~250 チャンネルがせいーばいで、これ以上の多チャンネル化は、システムが複雑になりすぎる。自己相関型の電波分光器では、1024 チャンネルのものがあるが、バンド幅が広くとれないため、ミリ波では使えない。これに対して、音響光学型分光器では、TeO₂ 超音波素子を用いることによって、何等システムの複雑化なしで、1,000~2,000 チャンネルの実現が可能である。周波数分解能・帯域幅ともに、現在のミリ波用フィルタ・バンク分光器以上のものを作ることができる。

私達が 45 m 電波望遠鏡のために設計している分光計は、帯域幅 2,000 MHz、チャンネル数 14,000 という、従来の電波分光器の常識を破るもので、これはコンパクト化した音響光学分光システム 4 系列から成り、各々を独立な 3,500 チャンネル分光器として使うこともできる。2,000 MHz という帯域幅は、現在の常識より 1 桁大きく、ヘテロダイン受信器の帯域幅をフルにカバーできる。これによって、一時に数本~数10本の分子スペクトル線を観測することができるので、受信器を特定のスペクトル線に合わせて 1 本ずつ観測していくという現在の宇宙電波分光観測の方法にかわって、「天体ごとに」スペクトル群を観測してゆくようになるだろう。この点では、電波分光も、やっと「光の分光学なみ」に近づくことになる（表 2）。これ以上帯域幅を広げるためには、ヘテロダイン検波自体をやめねばならないが、ヘテロダイン検波によって極めて高い周波数分解能を

図 5 音響光学効果を使った 5 素子電波干渉計用分光相関システムの概念図。2 次元ダイオードアレイと多電極超音波変調器によって、空間スペクトル 20×周波数スペクトル 400=8,000 の独立な情報をリアル・タイムでとりだす（本文参照）。

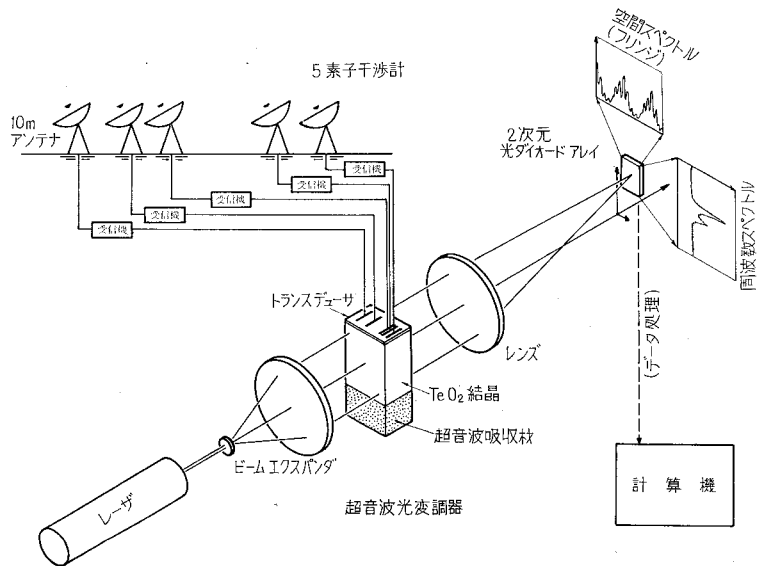


表 2 各波長域における分光計の能力の比較

	分光器	分解能		帯域幅 B/f	分解点数	
		$f/\Delta f$	ΔVr (km/sec)			
光学	グレーティング	$\sim 5 \times 10^5$	~ 4	~ 1	$\sim 10^5$	
赤 外	フーリエ分光器	近赤外	$\sim 10^6$	~ 0.3	1-10	10^6-10^7
		中赤外	$\sim 10^5$	~ 3	1-10	10^5-10^6
		遠赤外	$\sim 10^4$	~ 3.0	1-10	10^4-10^5
電 波	自己相関型 (マイクロ波)	$\sim 10^7$	~ 0.03	$\leq 10^{-2}$	$\leq 10^8$	
	フィルタ・バンク型 (ミリ波)	$\sim 10^6$	~ 0.3	$\leq 10^{-3}$	≤ 300	
	音響光学型 (ミリ波)	10^6-10^7	0.3-0.03	$\leq 10^{-1}$	10^3-10^4	

得られるという利点があるので、このあたりが一応の限界と考えられる。この点は、45 m 電波望遠鏡では、クーデ焦点の採用によって可能になる「多周波同時観測」である程度はカバーされる。この新しい分光器と、クーデ焦点の採用によって、45 m 望遠鏡は、電波分光観測に画期的性能をもつユニークな電波望遠鏡になるだろう。

次に干渉計では、1つの超音波素子の上にたくさんの電極をはりつけ、これに各アンテナからの信号を入力し、レーザ光で照らして相互の相関（干渉縞）を光のパターンとしてとりだす方法がいくつか試みられている（たとえば本誌1976年7月号、甲斐造・小杉健郎、ここで、受光面に 2次元のイメージ・センサを用いると、干渉計のスペクトルのデータを一時にとることができる（図 5）。たとえば 45 m 鏡と同時建設が予定されている 10 m × 5 基開口合成望遠鏡（電波干渉計）の場合、もし 100

チャンネルの分光計においてスペクトル観測をしようとすると、2,000個の相関器を必要とし、価格・システム等の面でゆきづまってしまう。しかし、図に示しれように、5つの電極をはりつけた TeO_2 超音波素子と、 300×400 画素の2次元イメージ・センサを用いれば、価格面・システム面ともに格段に容易に、400チャンネル分光観測ができることになる。このシステムを用いることによって、「5素子望遠鏡」は、世界で初めての、本格的な分光観測のできる電波干渉計になるだろう。原始星、系外銀河などの観測に、“角分解能3秒の分子スペクトル写真”は大活躍するにちがいない。

そればかりでなく、同じシステムによって、干渉計の各アンテナ間のディレイの補正が可能である。この方法をうまく使うと、干渉計にはつきものだった恒温・恒湿の地下室とぼう大なディレイ・ケーブルの列が不要になるだけでなく、色収差現象のために制限されていた帯域幅を、数倍以上に拡げることができ、連続波の観測では感度が2-3倍向上するだろう。

このように、音響光学効果と光学的な像処理法が電波観測に一時代を画することはまちがいないであろう。私達の三鷹でのささやかな実験が、そのための一歩を進め得るよう、さらに努力したいと思っている。

この実験を進めるにあたり、通研の内田さん、齋藤さん、

皆方さん、宇都宮大の田原さん、甲斐さんほか野辺山観測所の方、安藤さんほか天文台の工場の方、そして宇宙電波グループのすべての方など、多くの方々に御助力を頂いた。厚くお礼を申しあげる。この原稿を書きおえた今日6月6日は、井口さんの一周忌である。

=====

掲 示 板 I

=====

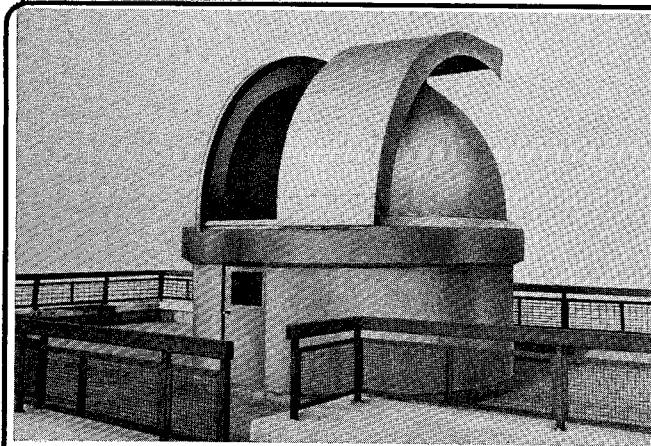
東レ科学技術賞および研究助成候補者募集

上記について東レ科学振興会より本会あて推薦依頼が来ています。希望者は**10月30日**までに、学会庶務理事まで御連絡下さい。募集の要項はつぎのとおりです。

科学技術賞……(1) 学術上の業績が顕著なもの (2) 学術上重要な発見をしたもの (3) 重要な発明をしてその効果が大きいもの (4) 技術上重要な問題を解決して技術界への貢献が大きいもの、に対し金メダルと副賞250万円。

研究助成……科学技術の基礎的な研究に従事し、その研究の成果が科学技術の進歩、発展に貢献するところが大きいと考えられる研究を行なっている研究者、またはそのグループに対し1,000万円程度。

贈呈期日は両方とも昭和53年3月の予定。



営業品目

- ★天体望遠鏡ならびに双眼鏡
- ★天体写真撮影用品及び部品
- ★望遠鏡各種アクセサリ
- ★観測室ドームの設計・施工



★総合カタログ
ご希望の方は切
手300円同封お
申込みください

ASTRO 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