

日本の大型宇宙電波望遠鏡計画における超合成電波望遠鏡

石 黒 正 人*

1. はじめに

天文学の飛躍的發展はガリレオの望遠鏡の発明によってもたらされたが、電波天文学の現状もまさにそのような時期に来ていると言えよう。人間の眼に見える星空はひっそりとして静かである。しかし電波で見えるのは星の誕生と死、銀河の爆発といった激しく荒々しい宇宙の姿なのである。このような宇宙に関する新しい知識を得ようと、光学望遠鏡の分解能をものぐ巨大な電波望遠鏡が、世界のあちこちで次々と作られている。

わが国においても全国の電波天文学者の総力を結集して短波長高分解能の大型宇宙電波望遠鏡を建設する計画を推進している。(天文月報 1964年8月号, 科学1970年12月号参照)。この装置は高精度の45mパラボラと基線長約900m, 10mパラボラ5基の超合成電波望遠鏡より構成されており、現在その具体的設計が宇宙電波懇談会の大型宇宙望遠鏡建設準備ワーキンググループを中心として進められている。

ここでは一般になじみの薄い超合成電波望遠鏡の概念について説明し、我が国の計画の内容について紹介したい。

2. 超合成とは

見ている電磁波の波長の違いのほか、光学望遠鏡と電波望遠鏡には本質的な違いは無いと言ってよい。一般に望遠鏡の分解能は波長に対する口径の比で決まるので、電波望遠鏡の分解能を上げるには、光学望遠鏡と同様、口径を大きくするか、波長を短くしなければならない。可視光線の波長(約 5×10^{-5} cm)における人間の目は約1分角の分解能をもっている。しかし普通電波天文学で観測する電波の波長は光に比べ、 $10^4 \sim 10^8$ 倍にもなるので、電波望遠鏡は人間の目の分解能を得るのにさえ巨大な物になることがわかる。

例えば、1秒角の分解能を得ようと思うと、光学望遠鏡ではわずか10cmの口径で実現できるのに対し、波長10cmの電波望遠鏡では、なんと20kmの口径が必要となる。直径20kmの可動パラボラを建設するなどということは、宇宙空間でなら考えられない話でもないが、地上では到底不可能である。小さなアンテナを沢山並べ

てその代用とすることができるが、それにしてもその数はぼう大(例えば、直径10mのパラボラなら100万个!)になる。

長い間電波天文学者はこの電波望遠鏡の分解能という壁に苦しみ、光学写真と直接比較し得る電波写真を手にすることができなかった。ところが天体の明るさの分布が観測中に変化しないときは、すべてのアンテナが同時に存在しなくても済む方法が考え出された。たった2個のアンテナでも一方のアンテナをあちこちに持ち運んで(図1)、各アンテナに到来する電波の振幅と位相を記録すれば、時間と手間は掛るが、あたかもすべてのアンテナが同時に存在する望遠鏡で見た像が再現できるのである。この方法は小さな口径のアンテナで大口径アンテナに匹敵する開口を合成できるので、開口合成法(Aperture Synthesis)と呼ばれた。

この原理は、既に今世紀初の結晶学の分野で結晶構造を調べるのに使われていたが、電波天文学では1950年に静かな太陽の明るさの分布を観測するために初めて導入された。そして1960年には、このほど天文学分野で初めてノーベル物理学賞を受けたケンブリッジ大学のライルとヒューウィッシュらによって、この開口合成法の精確な体系づけが行われ、今日の世界の大型開口合成望遠鏡の発展の大きな礎となったのである。

初期の開口合成は図2のような2アンテナ干渉計を使い、一方を他方に対して移動させることによって行われた。2つのアンテナからの信号は遅れの補正がされた後、相関がとられ、その振幅と位相が記録される。マイケルソンの干渉計と同様、天体から2つのアンテナに到る光路差が電波の波長の整数倍になる方向からの信号は、波の山と山が重なって強め合い、その中間の方向では逆に山と谷が重なって弱め合うことになる。そこで天空にそ

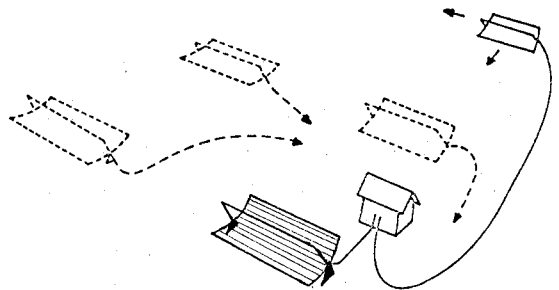


図1 初期の開口合成法(ケンブリッジ大学)

* 名古屋大学空電研究所

M. Ishiguro: A Synthesis Radio Telescope in Large Radio Telescope Project of Japan

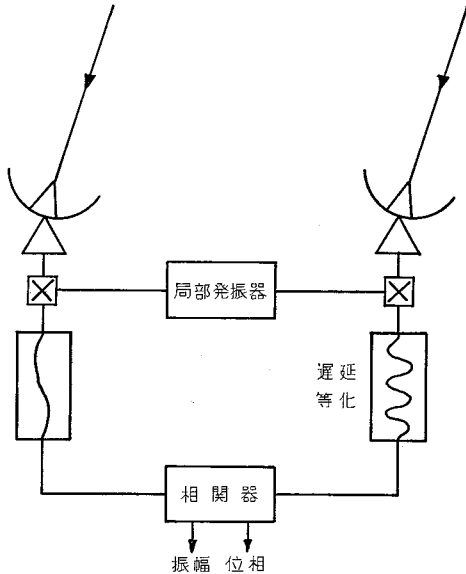


図 2 アンテナ電波干渉計の基本原理図

のような濃淡の縞模様（これをフーリエ成分と呼ぶ）の指向性ができて、その間隔に比べて小さな構造があると、干渉計の出力に正弦波状の反応が現われる。これはとりもなおさず干渉縞である。アンテナ間隔を大きくすると、天空の明るさの分布の中の細かい構造に反応が現われる。

干渉縞の振幅は、天空の明るさの分布におけるそのような縞模様が存在する割合を、また位相はある基準点からのずれを示している。そこで2つのアンテナを結ぶ基線の方向と長さを適当に変えて、天空の色々な方向で色々な細かさの縞模様があるかないか、あるとすればその振幅と位相はどのくらいかを調べれば天体の明るさの分布が再現できる。実際にはフーリエ成分の振幅と位相をフーリエ変換という処理（即ち現像）を経て電波写真が得られる。ところで我々は地球が廻っていることを知っている。つまり、アンテナを移動させなくても地球が自転しているので天体から見ると、図3のように2アンテナ干渉計の見かけ上の方向と間隔が時々刻々変化して見えるのである。この事をうまく使えばアンテナを移動させる手間を大幅に省くことができる。しかしこの地球の自転による変化は干渉計の基線のあき方、星の赤緯、土地の緯度等によって制限がある。そこでアンテナの間隔を適当に変えては地球が廻ってくれるのを待ち、何日も観測を続けて、天空の明るさの分布を再現するのに必要な各フーリエ成分をすべて測定しなければならない。

このように地球の回転を利用する開口合成法を超合成 (Super Synthesis) または地球回転開口合成法 (Earth-Rotation Aperture Synthesis) と呼んでいる。普通の望

遠鏡では分解能を上げると、視野が狭くなるというイヤなことがある。開口合成望遠鏡では分解能が最大のアンテナ間隔で決まるのに対し、視野は素子アンテナの視野で決まる。従って広い視野を高分解能で観測できるので、サーベイにはもってこいの望遠鏡と言える。

このように超合成電波望遠鏡は数々の利点を持っているが、電波写真をとるのに時間が掛る（即ち露出時間が長い）こと、受信システムが複雑なこと、アンテナを移動するのがやっかいなこと等の欠点がある。しかし、たった2個の小さなアンテナで直径何 km もの電波望遠鏡が実現できることはなんと言っても大きな魅力であり、これらの欠点を補って余りあるものと言えよう。露出時間が長い、即ちシャッタースピードが遅いという事は、時間変化のある天体を観測するには致命的となるので、表1に示す世界の超合成電波望遠鏡の例では沢山のアンテナが使われている。N個のアンテナがあれば、 $N(N-1)/2$ 通りの組み合わせができて、同時にとれるフーリエ成分が一挙に増えるので観測時間を大幅に短縮することができる。将来の高分解能電波望遠鏡は、すべてこの超合成の原理に基づくものになると言っても過言ではなからう。

3. アンテナの配列と動かし方

2.で述べたように、アンテナの配列のしかたは超合成望遠鏡にとって非常に重要な要素である。表1にあげた超合成望遠鏡のうちいくつかのものを除いては、アンテナを直線状に配列したものが多い。これは主に土地が狭くて済むこと、移動方法が簡単などのためによる。2次元配列として採用されているものには、オーウェンズバレーのL字型、フルースの十字型(クリスコロス)、ハ

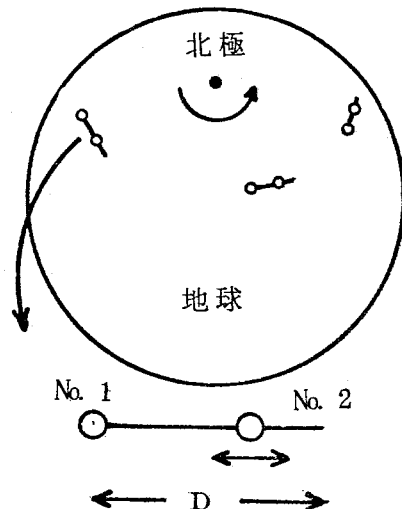


図 3 2アンテナ干渉計による超合成

表 1 世界の超合成望遠鏡

場 所	全体の大きさ	アンテナの数	アンテナの大きさ	波 長	分解能
ケンブリッジ (イギリス)	4560 m	8(固定 4, 移動 4)	12.8 m	6 cm	2"
	1550 m	3(固定 2, 移動 1)	18 m	74 cm	80"
				21 cm	23"
ウェスターボーク (オランダ)	1600 m	12(固定10, 移動 2)	25 m	49 cm	56"
				21 cm	24"
				6 cm	68"
ボルドー (フランス)	64 m	2(固定)	2.5 m	8 mm	26"
フルース (オーストラリア)	800 m 十字	68(固定)	5.7 m×64, 13.6 m×4	21 cm	40"
オーウェンズバレー (アメリカ)	1080 m T字	3(移動)	27 m×2, 40 m×1	21 cm	49"
				3 cm	7"
グリーンバンク (アメリカ)	2700 m	3(固定 1, 移動 2)	26 m	11 cm	8"
				3.7 cm	3"
スタンフォード (アメリカ)	206 m	5(固定)	18 m	2.8 cm	19"
ドミニオン (カナダ)	615 m	4(固定 2, 移動 2)	8.6 m	21 cm	70"
ハットクリーク (アメリカ)	265 m	2(固定)	6.5 m, 3.2 m	1.6~1.2 cm	10"
	300×200 T字*	2	6 m	~2 mm	2"
VLA (アメリカ)*	一辺 21 km Y字	27(移動)	26 m	21 cm	2"
				6.3 cm	0.6"
				2.0 cm	0.2"
				1.3 cm	0.1"
日 本**	900 m	5(移動)	10 m	1 cm 以下	2"

* 印は建設中, ** 印は計画中のものを示す

ットクリークのT字型, VLA (Very Large Array) のY字型等がある。フルース, VLA ではアンテナの数が十分あるので1回の地球の自転(実際は8~12時間)で, 必要なフーリエ成分を埋めつくすことができる。いずれの場合もなるべく同じフーリエ成分を何度も取ることがないように, アンテナの配列と動かし方を工夫しなければならない。もちろん同じフーリエ成分をとることが全く無駄というわけでもない。それは超合成望遠鏡が安定して働いているかどうかという較正にも使えるからである。しかし前に述べたように望遠鏡の露出時間を極力短くするという意味においても最短時間で最大のフーリエ成分数がとれる最適配列を捜す必要がある。

さらに直線状の配列では, 全体のアンテナのうち何個かが固定され, 残りがレールの上を移動する G.C. (Grating Compound) 合成方式と, すべてのアンテナがレール上を移動する M.R.A. (Minimum Redundancy Array) 合成方式がある。G.C. 合成方式はイギリスの1マイル望遠鏡, 5 km 望遠鏡, オランダの1.6 km 望遠鏡で使われているが, 移動するアンテナが少ないという利点がある半面無駄が多い。M.R.A. 合成方式はアメリカ国立電波天文台の2.7 km 望遠鏡, スタンフォード大学の1110001001配列(1はアンテナのあるところ, 0は無いところを示す, 1~9までの間隔が同時にとれる。)

に使われている。アンテナの数が少ないときは特に能率よくフーリエ成分をとれることが要求されるので, 日本の5素子超合成望遠鏡ではこの方式を採用している。

図4にはアンテナを5個使用した, G.C., M.R.A. 両合成方式のアンテナ及びステーション(アンテナをおく場所, レールの途中にあるのでこう呼ぶ)の配列を示す。アンテナ間隔の最小単位は通常素子アンテナの口径の2/3にとる。この図では最大の間隔は最小単位の128倍までとれるようになっている。従ってステーションが129点あればすべて間隔(即ちフーリエ成分)をとることができるが, これは大変な無駄である。そこである与えられた最大のフーリエ成分を抜けること無くとることのできる最小のステーションの個数を求めるという問題を解かなくてはならない。フーリエ成分の数が少い時は, 紙とエンピツを用意してちょっと考えればすぐ見つけられるが, 数が多くなると考えられるすべての組み合わせはぼう大となり(例えば129の点に20個のステーションを置く置き方は 10^{28} 通りもある!)それをすべて吟味していたのでは電子計算機を使っても何億年とかかってしまう。何か特別な工夫が必要である。

その方法の一つにまぐれ当りを狙う方法がある。筆者の試みてみたものは電子計算機で乱数を発生させて行う方法で, ランダムに5個の配列を作ってすべてのフーリ

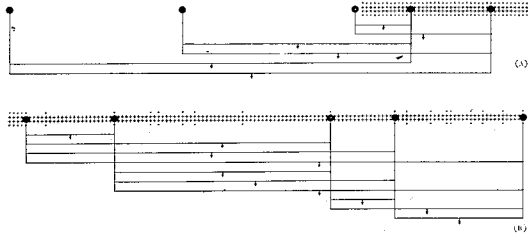


図4 アンテナの配置, (A) G.C. 合成方式
(B) M.R.A. 合成方式

エ成分がなるべく重複なく埋まるまで続ける方法, 始め129の座席をいっぱいにしておいて1個ずつランダムに空席にしてゆきフーリエ成分に抜けができたならやめる方法, その場合なるべく端の方から先にテストするような確率分布をもった乱数を発生させる方法, 比較的良い配列が見つかったらそれを順次左右にずらしてみる等, 色々やってみた. 図4の(B)に示したものは2番目の方法で見つけたものだがまだ約2倍の無駄がある(22個のステーションでは重複しているものを含めて231のフーリエ成分ができる). 図5にはその結果の頻度分布を示す.

さてアンテナは5個しかないので, 今度はこの5個をどうまく配列していったら能率よくフーリエ成分がとれるかという問題にぶつかる. これも前と同様なランダムな試行で見つけた. 5個のアンテナでは最大10個のフーリエ成分がとれるので, それが前にとったものとなるべく重複しないような配列の順序を約100回捜した結果, 19日が最短な解として得られた(図6(A)では重複度を調べるのに開口合成の1日あたり500個, (B)では1000個の異なる配列をチェックしている). 図7には別の例として, 最大フーリエ成分が最小単位の64倍の場合のアンテナの動かし方を示す.

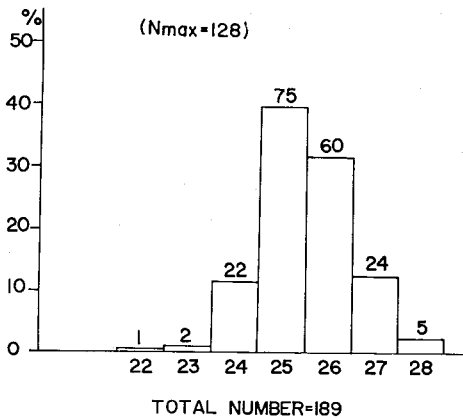


図5 M.R.A. の配列を電子計算機で捜した結果 (横軸はステーションの数, 縦軸はその頻度).

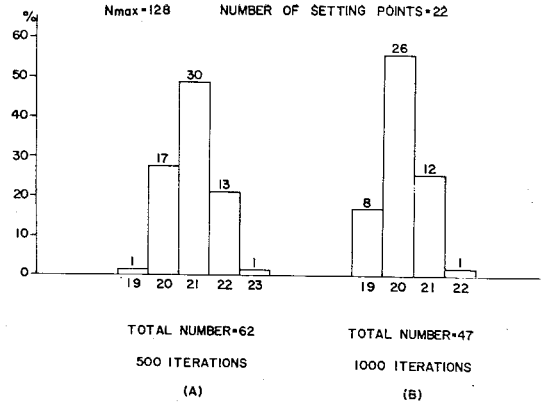
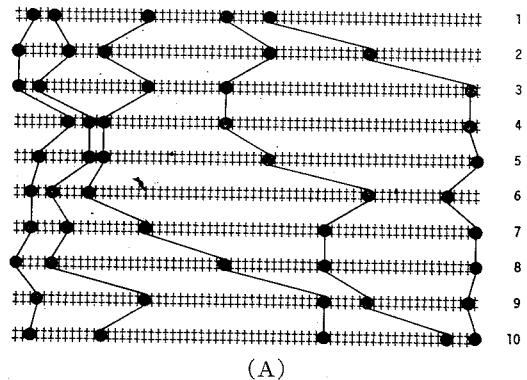


図6 5個のアンテナによる M.R.A. 超合成の観測日数を最小にする組合わせを計算機で捜した結果 (横軸は観測日数, 縦軸はその頻度).

開口合成による電波望遠鏡の形は, 基線長の方角で決まる. そして, 干渉計の設置される土地の形, 地盤の安定度が望遠鏡の性能を大きく支配する. 特にこの計画のように, 波長1cm以下という短波長干渉計では, 最低限1kmにつき0.5mmの安定度という大変厳しい条件を満たさなくてはならない. アンテナの構造はもちろんのこと, アンテナを据えつけるステーションは深くパイプを打ちこむなどして構造を相当頑丈なものにする必要がある. このような状況ではステーションの数が少ない

* M.R.A. - SYNTHESIS BY 5 ANTENNA ELEMENTS (MAXIMUM SPACING = 64).



* GRATING OPERATION.

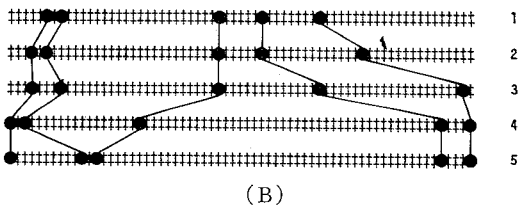


図7 アンテナの動かし方. (A) 完全な開口合成 (B) グレーティング開口合成

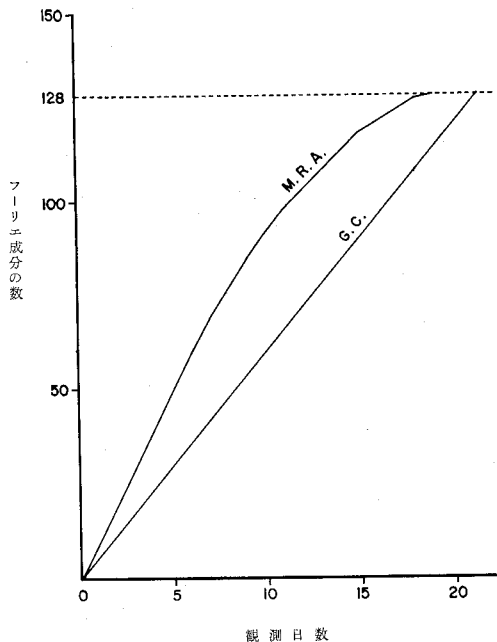


図 8 M.R.A. 方式と G.C. 方式におけるフーリエ成分のとれ方の比較。

M.R.A. 方式の方が有利といえる。

さらに M.R.A. 合成方式では、図 8 に示すように初期の短期間ではフーリエ成分をとってゆくスピードが G.C. 方式に比べ速いという利点がある。従って変動する電波源の観測とか、天候などの理由で、観測日数をできるだけ減らして不十分な開口合成で間に合わず場合には、M.R.A. 合成方式が有利となる。一般にフーリエ成

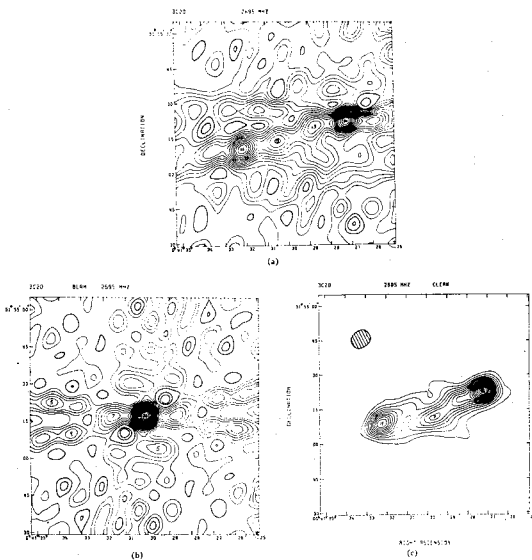


図 9 電波源 3C20 の電波地図。(a) 生の観測結果、(b) 超合成望遠鏡の指向性パターン (c) CLEAN の結果

分のとれ方が不十分な場合には、望遠鏡の合成指向性パターンが図 9 (b) のように劣下し、電波写真が (a) のように不明瞭となるが、最近注目をあびている CLEAN という手法を使えばかなり明瞭な写真に復元できる。これは次のような順序で行われる。(a) の中でピークを捜し出し、その高さに比例した (b) の指向性パターンを (a) から取り除き、その場所と高さを記憶する。この操作を何度も繰り返して、最後に残ったデコボコが雑音のレベルまでになったらストップする。そして、記憶されていたすべての場所に、記憶されていた高さできれいな指向性パターンをあてはめてゆくと、(c) のように明瞭な像が得られる。

4. 超合成電波望遠鏡の指向性

今、簡単のため、2 アンテナの干渉計基線が水平で、東西方向を向いているとする。天の北極 (赤緯 90°) からそのような干渉計を見ていると、図 3 のように地球の自転に従って、基線の向きが回転して見える。一方のアンテナを固定して考えると、もう一方のアンテナはそのまわりを 1 回転することになる。アンテナ間隔を D とすると半径 D の円を描くことになる。赤緯が 90° 以下の星から見るとその軌跡は楕円となり、赤緯 0° では直線となってしまふ。図 10 には東西基線、南北基線、東西から 30° 傾いた基線のそれぞれについて、上に述べたような軌跡が図示してある。これは干渉計で取り得る 2 次元的なフーリエ成分の分布を表わしており、専門用語では $u-v$ 平面 (u 軸、 v 軸をそれぞれ赤経、赤緯の方向にとる) と呼んでいる。アンテナが沢山あって多くのアンテナ間隔が存在する時には、平面は同心の楕円の集まりとなる。

開口合成で得られるデータは、 $u-v$ 平面上の各フーリエ成分の振幅と位相であるので、これから電波で見た景色を現像するためには、フーリエ変換という処理が必要である。その前に、アンテナの据え付け、基線方向の狂い、アンテナ間の位相誤差等の補正を施してやらない

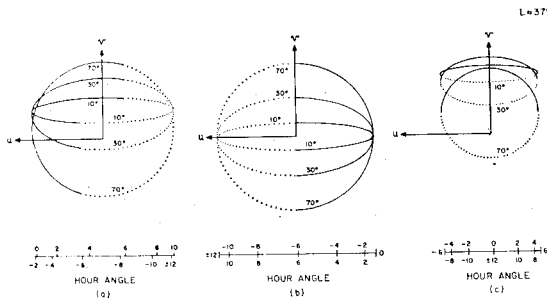


図 10 $u-v$ 平面上での干渉計基線の軌跡の例。(a) 東西から 30° 傾いた基線 (b) 東西基線 (c) 南北基線

ときれいな像が得られない。

超合成望遠鏡の指向性は、分解能に比べて十分小さな点電波源の観測から求められる。しかし、実際に観測しなくても計算機の中で真似することができる。理想的な点電波源（大きさが無限に小さい）のフーリエ成分の振幅はすべて等しく、位相もすべて 0° となることがわかっている。従って $u-v$ 平面上で干渉計の取り得るすべてのフーリエ成分について、すべて振幅 1、位相 0° とすれば合成指向性パターンを計算することができる。図 10 に示したように、電波源の赤緯によって $u-v$ 平面の形が異なるので、その方向での合成指向性パターンも当然異なったものになる。そこで、観測から得られた電波写真を見る場合には、それがどのような指向性で描かれたものか知っておくことが大事である。

図 11 には、5 個のアンテナを図 7 (B) の順序で動かした時に、超合成がどのように進んでゆくのかを追って表現してある。ただし、 $u-v$ 平面は計算機の印字装置の都合で、縦のスケールは横の約 1.7 倍になっており、又一部端が切れているものもある。フーリエ成分を 1 つおきに埋めてゆくグレーティング開口合成では、この例に見られるように指向性パターンのメインローブのまわりにグレーティングローブという余分の指向性が現われる。このグレーティングローブが引っ掛ってしまうような広がった電波源を観測する時には、正しい結果を与えないので、フーリエ成分を完全に埋めるように図 7 (A) の順序で動かさなければならない。

グレーティングの動作には、上に述べた以外に 2 つおき、3 つおき……という具合に、フーリエ成分の間びきの方法がいろいろと可能である。どの方法が良いかは観測しようとする電波源の拡がりによって決まる。もしフーリエ成分が l/λ (l はアンテナ間隔のステップ、 λ は波長) ごとにあるとすると、グレーティングローブはメインローブのまわりに $\theta = \lambda/l$ (ラジアン) ごとの角距離にできる。従って、電波源の拡がり θ に比べて小さいときは、グレーティング超合成の方が、メインローブの分解能を落とすことなく観測時間を大幅に短縮できるので大変有利である。ウェスターボークの超合成望遠鏡で行なったグレーティング超合成観測の一例を図 12 に示す。

星の赤緯が低くなると、超合成望遠鏡の性能がしだいに低下する。東西基線の場合は、赤緯 0° に対する $u-v$ 平面が $v=0$ の直線になってしまうので、もはや電波源を 2 次元的に分解できなくなる。これを救うためには基線方向を東西より少し傾けるか、南北基線を併用してはならない。図 13 は、干渉計基線の方向を東西から 30° 傾けた時の赤緯 30° , 0° , -30° に対する $u-v$ 平面と合成指向性パターンを示す。必要なフーリエ成分が相当抜けているので、満足の指向性となっていない。

赤緯が低くなると、上に述べた以外にも指向性を悪くする原因がつけ加わる。それは星が地平線下に沈むために見えている時間が限られ、フーリエ成分の変化に限界があるからである。特に我々が計画しているような短波

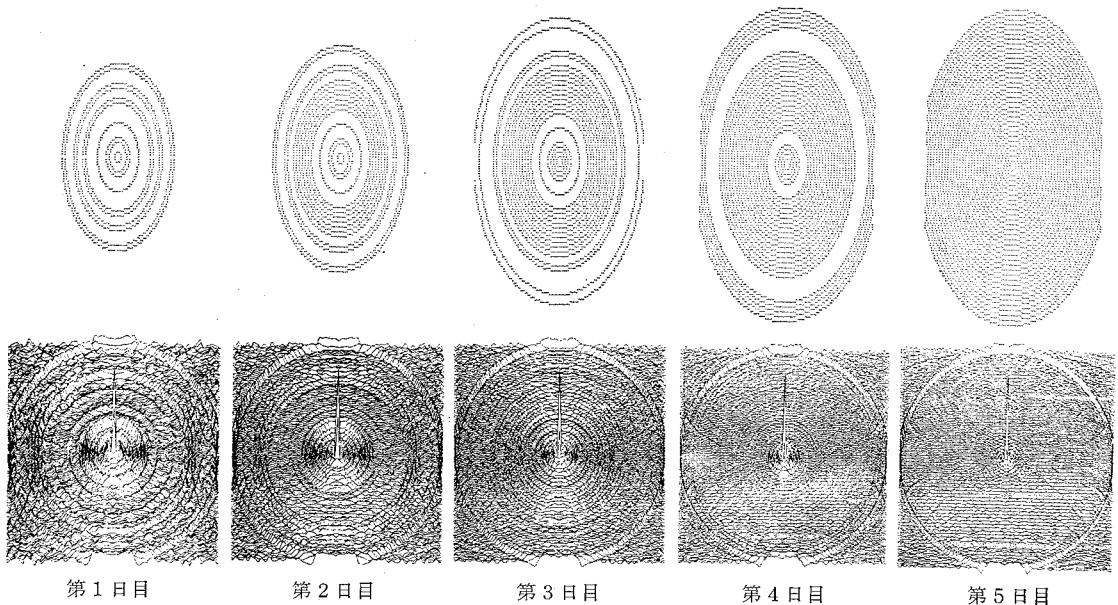


図 11 5 個のアンテナで超合成が進んでゆく様子 (基線方向は東西, 星の赤緯は 90°)。

上は $u-v$ 平面, 下は指向性パターン (図の縦は赤緯方向, 横は赤経方向) を表わす。

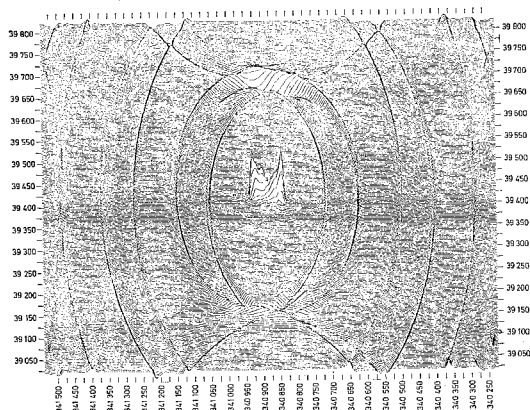


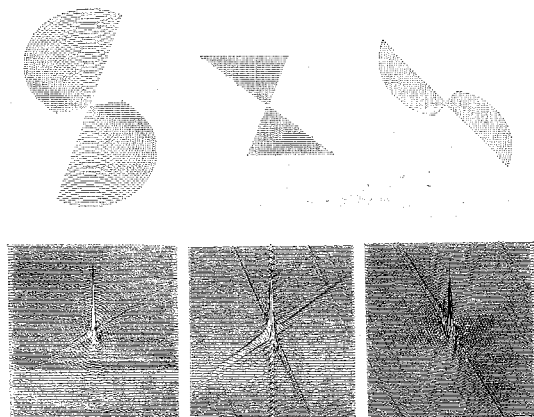
図 12 グレーティング超合成観測の 1 例。ウェスターボークで観測された電波源 3C452 の電波地図 (1415 MHz) である。

長の望遠鏡では、低仰角における大気吸収が大きくなるので、さらに観測時間の制限を受ける。図 13 の例では仰角の限界を 10° としているので、観測できる時間は赤緯 0° 、 -30° に対しそれぞれ約 10 時間、7 時間となっている。

銀河中心方向の観測は、宇宙電波分光学の分野では特に重要なので、南北方向の基線をとることが是非とも必要になる。

5. 装置の概略

アンテナは直径 10 m のパラボラで、光学系はカレグレン型 (図 14)。主鏡の鏡面精度は 0.3 mm rms 、中心部 5 m は将来 3 mm ぐらいの波長で観測できるように、 0.1 mm rms を目標としている。マウントは一般には赤道儀の方が便利であるが、短波長で精度を出すために経緯



赤緯 30° 赤緯 0° 赤緯 -30°
 図 13 星の赤緯が低い時の指向性パターン (基線方向は東西より 30° 傾いている)。上は $u-v$ 平面, 下は指向性パターンを表わす。

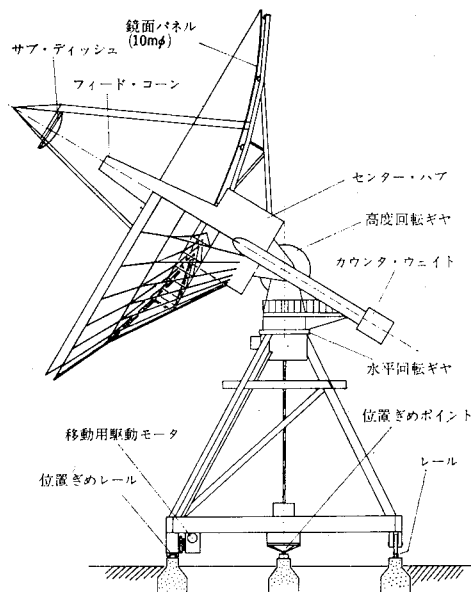


図 14 移動型 10 m パラボラの側面図

儀方式を採用している。指向精度は $5/1000$ 度以内、再現性は $1/1000$ 度以内が要求される。アンテナフィードは直線偏波で、計算機制御で回転する。

受信周波数としては、初めは 22 GHz 附近の予定。この周波数帯には H_2O 、 NH_3 、 HNCO 等の分子線スペクトルがある。連続スペクトル観測時のバンド幅は約 100 MHz 。線スペクトル観測時は、分解能 22 kHz (速度にして 0.3 km/s) で 64 チャンネルと分解能 220 kHz (速度にして 3 km/s) で 64 チャンネルの 2 組のフィルターバンクを、目的に応じて切り換えて使用する。

全体のシステム雑音温度は 500 K 以下を目標としている。1 日の観測では 20 ミリジャンスキー (1 ジャンスキー は $10^{-26} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$) の点電波源まで検出できる。又 $3''$ の分解能で完全な開口合成をすれば、 0.5 K の輝度温度の分布まで検出できる。しかし線スペクトル観測時には当然バンド幅が狭くなるので、約 2 ケタ感度が低下する。

比較的分解能が悪くても観測時間を短縮することに重点がおかれる場合には、表紙の絵にあるように 45 m 主望遠鏡と組み合わせた超合成望遠鏡として、一日で完全な開口合成を完成できる。

6. 将来の展望

電波天文学における新しい発見が、主に観測技術上の発展に大きく依存するのは疑いのない事実である。QSO (準星)、電波銀河、 3 K 黒体放射、パルサー・星間分子等の発見が、すべて時間、空間、周波数軸上の情報量の増加、感度の向上に伴っていることは誰もが認めるとこ

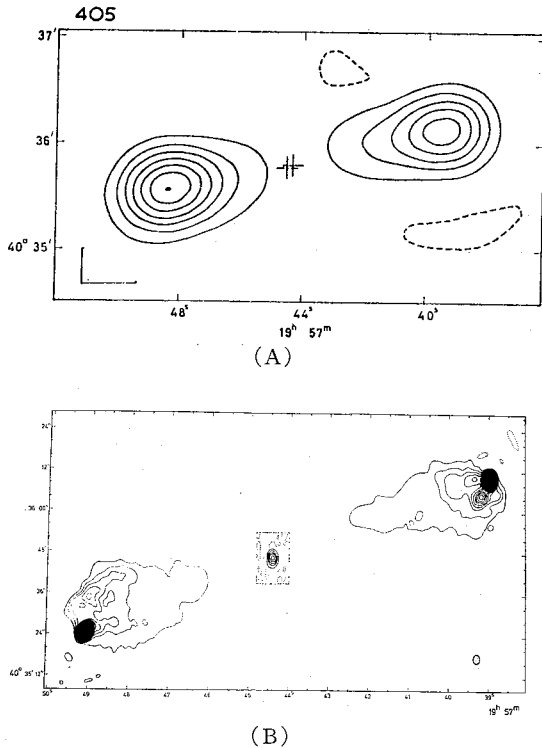


図 15 Cyg A の電波地図。(A) 1マイル望遠鏡で観測した結果 (1407 MHz, 分解能 23") (B) 5 km 望遠鏡で観測した結果 (5 GHz, 分解能 2")

ろである。

1969年の「宇宙電波将来計画総合シンポジウム」では、将来の宇宙電波観測の主流は、高分解能観測による微細構造の解明と短波長観測による激しい現象の追求にあることが集約された。5年たった現在、世界の電波天文学の流れを見てみると、まさに我々の予見が正しいものであったと言える。

特に分解能の向上には目ざましいものである。全天で2番目に明るい電波源 Cyg A を例にとってみよう。図 15 の (A) はケンブリッジ大学の1マイル望遠鏡で観測された 1407 MHz での電波地図 (分解能 23")、(B) は 5 km 望遠鏡で観測された 5 GHz での電波地図 (分解能 2") である。分解能が1ケタ上るとこんなにもはっきりと微細な構造が見えてくるのである。2つ目玉の間にある電波源はパーデとシンコウスキーによって同定された銀河の中心に一致している。中心から飛びだしている電波源の頭部には、かなりシャープな境界線があり、何か銀河間ガスとの間の相互作用があるのかもしれないと言われている。ライル達の比較的長波長の観測では強度変化のない、QSO や電波銀河の多くはこのような2つ目玉構造をもっていることが明らかにされている。しかし、

短波長では激しく変化する成分が見えてくる。一連の爆発があったのなら、2つ目玉の中にさらに細かい構造が認められるであろう。又、爆発をおこしつつある銀河の中に強力な電波を放射している中心核が見つけれられるかもしれない。短波長高分解能 mapping は VLB の超高分解能観測と共に、これら QSO、電波銀河の構造、爆発のエネルギー源そのメカニズムなどに確実な情報を提供し、銀河構造及びその進化の研究を大いに進展させることになるであろう。

我々の銀河系に目を移してみよう。宇宙電波分光の初期の状態はいわゆる新空間分子捜し競争の段階であったが、最近はこちらの分子雲と H II 領域内の小さくて高密度の領域とか赤外線源との関連において、分子生成の過程が詳しく研究され始めている。

計画している 22 GHz 帯では、 H_2O 分子が他の分子に比べかなり強い電波を放射しており、OH と同様メーザー現象と解釈されている。この H_2O 源は大きさが大変小さく、時間変化が非常に激しいので、この超合成望遠鏡による観測は、mapping よりもむしろ位置を決めることに重点をおいて行なわれることになるであろう。

さらに、超新星の残骸の短波長高分解能による偏波観測は、他の長波長での観測と比較してファラデー回転を決める意味において重要となる。

昨年 12 月に開かれた、「干渉計による天文学」シンポジウムでは、このような具体的な観測の提案を出し合っ、この超合成望遠鏡からどんな天文学が開けていくか

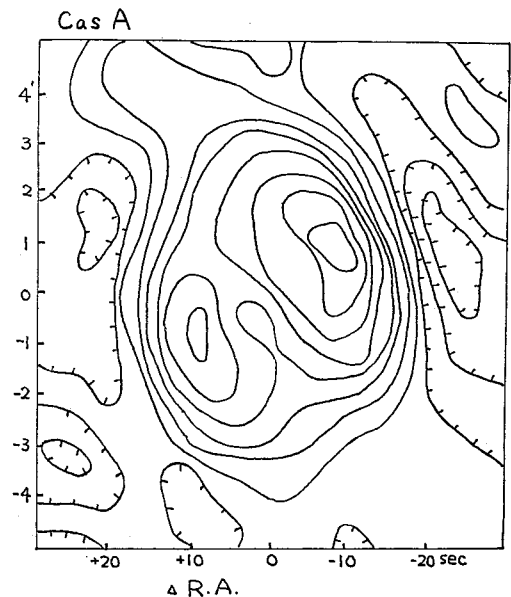


図 17 野辺山の 160 MHz 太陽電波干渉計を使って行われた Cas A の超合成観測 (平林氏の好意による)。

ということについて議論された。

日本では早くから太陽電波天文学の分野で電波干渉計が使われ、特にマイクロ波領域では世界のトップレベルに至っているが、残念ながら未だ宇宙電波用の干渉計を持ち得ておらず、世界的水準から相当立ち遅れている。しかし、ミリ波電波望遠鏡の技術は着実に積み重ねられつつあり、又既に太陽電波用の干渉計を使って実際に超

合成の実験が進められている(図 16 はその観測の 1 例の Cas A)。また我が国の電子工学の水準をもってすれば、この立ち遅れを克服することもそんなに困難ではないと確信している。

この超合成電波望遠鏡の狙うところは人類未踏の領域であり、予見できない新しい発見が得られることを期待している。

新刊紹介

宇宙論の展開

ミューニッツ編

小尾信彌 解説・高柳明夫 訳

本屋の本棚に、いかめしい装幀と難かしそうな題名を持った本の中にこのような本が挟まれてあるとつい手を出したくなる。手に取ってみると気楽に読めそうな感じの本である。これが本書に関する第一印象である。しかし表紙を開いて目次に目を通し、頁をパラパラと繰ってみるとどうもそんなに気楽に読めそうにないぞという感じが次第にしてくる。

本書の内容は、訳者あとがきを引用すれば「本書の原著は“宇宙の理論(The theories of Universe)”という題名の下に古代ギリシア、ローマの宇宙観から、カント、ガリレイ、ニュートンを経てアインシュタインに始まる現代宇宙論に至る迄の、その時代を代表する主要な論文を集めたもので、訳書では今世紀に入ってから宇宙論を収めている」とあり、空間の探求(ハッブル)、相対論と現代宇宙論(ド・ジッター)、球形の空間(エディントン)、原始原子(ルメートル)、自然哲学の基本的概念(ミルン)、物理学の一分野としての幾何学(ロバートソン)、宇宙理論(ボンジ)、宇宙論に於ける進化の過程(シアマ)という、天体物理学を専攻している人達にとってはおなじみの、宇宙論研究に大きな業績を残してきた研究者による八編の論文を収めてある。時代的には1900年代初頭より、1950年代半ば迄に書かれた論文であり、その時迄に達した観測をもとにして書かれている為、数値等には現在考えられているのとは異なったものが見られる一もつともこの点に関しては訳註によって補われているが一が全て個性豊かな論文ばかりである。ハッブルの論文は、宇宙に対する我々の認識が一步步着実に広げられていく有様をまのあたりに見せてくれる。それと共に宇宙論、いや天文学全体に観測装置の発達、そして当時その頂点としての100 inch, 200 inch 望遠鏡がどんなに多くの情報と成果をもたらしたかを如実に物語っ

てくれる。この論文を読む毎に、現在多くの人達によっておし進められている、日本で最初の大型電波望遠鏡となる45m 鏡計画の早期実現を願わずにはおれないのは筆者一人ではないであろう。曲った三次元空間に対する説明がルメートル、エディントン、ド・ジッター及びロバートソンの論文に見られる。二次元空間との類推で三次元空間のまがりを説明されるのだが、説明されればされる程判ったような判らないような中途半端な感じにおちいってしまう。その中でロバートソンの論文に見られる負の曲率を持つ金属板の場合と質量の存在による曲った物理空間とのちがいを説明している項はユニークであった。ミルンの論文は、マッハの原理や、ディッケの理論を連想させてくれる点で、非常に数学的な議論の立て方ではあるが興味深かった。最後の二つの論文は定常宇宙論者のボンジとシアマによるもので、オルバースのパラドックスに始まり進化宇宙か定常宇宙かという議論の立て方のボンジの論文は現在の宇宙論に於て進化宇宙論の方が主流をなしている事はさておいてまことに明快であり、又この二つの論文に関する限り相対論の重力方程式と空間の曲りに関する議論は殆んど出てこず想像力の乏しい筆者を最後にホッとさせてくれた。

以上本書を読んでみた時の感想を書いてみたが、そのように本書は各時代に第一線に立って研究活動をしてきた著者達によって、その時代に達し得た観測と理論の発展の上に立って書かれた論文の集成である。まさに The theories of Universe である。従って本書から現代宇宙論の華々しい展開や興味ある話題を読み取ろうとしたら、教科書的に体系づけられた知識を求めたりするのは無理である。逆に宇宙論発展の大きい流れの中で、各時代の第一線の研究者が、どのような立場でどのように宇宙をとらえてきたか、又それらが現在の理論の中にどのような形でとり入れられ受けつがれているかを考えながら読むならば興味深い本である。最後に本書は一般向の本のような体裁を持っている、比較的昔の論文を集めた論文集であるから、序にあるよりももう少し詳しい、各論文の歴史的意義や解説が付録として(例えば共立出版社の「アインシュタイン全集」のような)つけ加えられてあったらもっと読み易くなったろうと思う。

(福井 満)