

# 天体物理に与えた VLBI 8年間の影響

平 林 久\*

## はじめに

私が大学院に入りたてで、東京天文台の天体電波部に入りかかっていたころ、毎週電波天文学新着文献の紹介がまわりもちでおこなわれていた。赤経はどちらむきに座標がふえるのかもわからない(ほどに西も東もわからない)学生だったので、新しい天文学のニュースにふれるとどれもはじめて聞く話ばかりであった。なかでも驚ろきであったのは VLBI の事であった。あれは 1967 年のことだった。米 NRAO (アメリカ国立電波天文台) のクラーク達が、キューサー 3C273 B のサイズを波長 18 cm で測ったところ、0.005 秒角よりも小さかったというのである。そして、それ以前にはカナダのグループにより、波長 70 cm で 0.02 秒角以下だということがわかっていったというのである。それは何でも「VLBI」とかいう干渉方式によるというのである。電波天文学の歴史も前提知識も持ちあわせなかった私には、この初期の VLBI に関する論文はひどく奇異に映った。その後なんとなく VLBI の論文があらわれた。その度に何かかわっていった。あれから 8 年たった。VLBI はいまや天文学の社会で完璧な市民権を得てしまった。

以下は VLBI によって変った天体物理の年史である。技術面については、特別な事がないかぎり土屋さん達の記事にまかせる事にする。また干渉計のデータの意味することとか、マッピングする場合の基礎知識については、石黒さんの記事を読まれておることと仮定して話をすすめたいと思う。

## 草 わ け

電波天文学者のなかでも電波干渉計を使って天体の微細構造をさぐっていた人々は、しだいに長い干渉計基線を実現して分解能をあげていった。しかしアンテナ間をケーブルでつなぐことになると、せいぜい数 km が限度というものである。そこでこれをマイクロ波中継でつなごうと考える人々がでてきた。イギリスとオーストラリアのグループはこうして 100 km をこえる基線を実現して、分解能は光学観測の限度である 1 秒角をおいぬいた。画期的なことではあったが、電波天文学者たちはこの程度では満足していなかった。

「それでは……リアルタイムで関連させずに、それぞれのアンテナの下で情報密度の高い磁気テープに信号を記

録しておいて、後で、もちよって関連させたらどうだろう……? 当然 RF 信号をそのまま磁気テープには書けないから、ゼロビートミキサで IF 信号におとそう。しかし、その場合、局発信号は両局でコヒーレントでないといけない……。それに時刻のタイミングも大変だね。タバーリシチ! しかしまくいたらオーチェニハラシヨウ。」ということ考えたのが 1961 年、ソビエトの電波天文学者たちであった。このアイディアはその後の長い国際的な技術的議論をよんだ。できると踏んだグループは実験にとりかかった。

カナダ東部にアルゴンキン電波天文台がある。この人々はテレビ用ビデオテープを使った広帯域 VLBI 実験にとり組んでいた。一方アメリカでも NRAO とコーネル大学の共同で、後の相関処理のらくなデジタルシステムを使った VLBI の実験をしていた。またアメリカの MIT (マサチューセッツ工科大学) のリンカーン研究所では波長 18 cm の OH 基の高分解観測をめざして VLBI 開発競争に加わっていた。1967 年が明けると成功は時間の問題と思われた。

1967 年 4 月の末、カナダグループは基線長 183 km で実験に成功した。直ちに余勢をかってカナダの東西すなわちアルゴンキンパーク=ペンティクトンを結ぶ 3074 km の基線でも成功した。このとき波長は 73 cm で基線長は 460 億波長に対応、分解能は 0.044 秒角に及んだ。

5 月のはじめに入ってアメリカの NRAO グループは

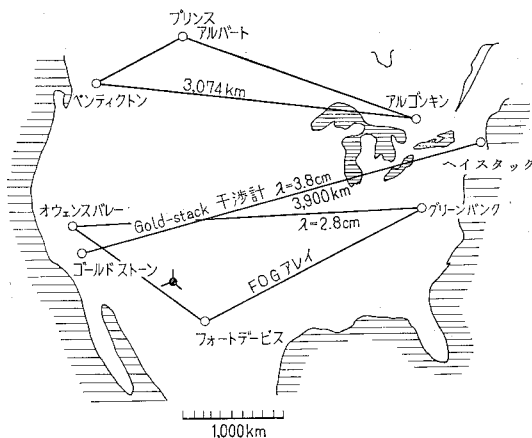


図 1 本文にひんぱんに登場する北アメリカ大陸の VLBI 干渉ベア。▲印は VLBI には関係ないがアメリカの国立電波天文台計画の VLA (超大型アレイ) の位置を示す。

\* 東京天文台 H. Hirabayashi  
Affects of VLBI in these eight years to Astrophysics

の基線で成功、すぐにひき続いて5月末には NRAO=ヘイスタック間 845 km (波長 18 cm で 470 億波長に対応)でも成功した。かくして VLBI 一番のりはカナダ勢に軍配が上がった。

その後の VLBI 観測の進展は目をみはるものがあった。高分解能を求めて干渉計基線はどんどんのびて、ペアは外国間になったり、大陸間になったり、一方では波長はだんだんに短波長にむかった。また各グループの固有の干渉相関システムもしだいに洗練され、ある程度の標準化もおこなわれてきている。そして VLBI の多忙な発展に一段落がついたところで 1970 年 2 月、米 NARO のあるシャロツビルで VLBI に関する国際会議が開催され、41 の報告がおこなわれた。

### 超微細構造を追って

1965 年にデントは、クェーサー 3C273 からの電波の強さが時間的に変化していることを発見した。電波は数ヶ月から一年のタイムスケールでかわっているのである。これは驚きであった。ある大きさの電波源からの電波が全体でいっしょに変化したとしても、近い方からの電波と遠い方からの電波との到来時間の差があるために見かけ上、ならされてしまう。この結果、ある電波源からの電波は、その電波源の大きさだけの距離を光が走るだけの時間程度以上に激しく変化することはない。すなわち、3C273 の時間変化している成分は一光年程度以下であるということになる。3C273 の赤方変位を宇宙論的であるとすると、距離は 15 億光年、地球からみると 0.001 秒以下となるわけである。

電波天文学をはじめ長波長からはじまって、技術の進歩とおいたずさえてしだいに短波長側にもものびてきた。すると、宇宙には短波長側で強い電波源がたくさんあることがわかってきた。これらはクェーサーやラジオ銀河の中心核に関連していた。同定できないものはもっとたくさんわかってきた。コンパクトな電波源がシンクロトロン放射をしていると、シンクロトロン自己吸収のため長波長側で光学的に不透明になるからであると解釈された。したがって不透明になりかかる波長がわかると、あとの諸物理量に妥当な値をいれてやると、これからこのような電波源のサイズを予想することができる。このようにして計算すると、このようなコンパクトな電波源は地球からみてやはり 0.01 秒角とか 0.001 秒角とかになると予想された。

1967 年のカナダ、アメリカの一連の VLBI 観測の結果はこのような予想をうらぎらなかつた。このときの分解能は 0.01 秒角程度であったが、いままで分解されなかつたいくつかの電波源は分解された。これでも分解されないクェーサーやラジオ銀河もやはりあった。

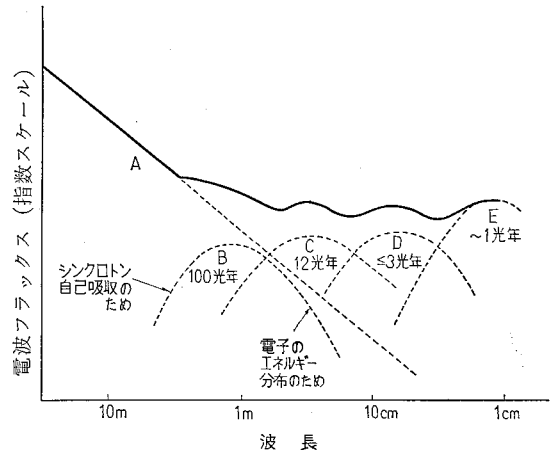


図 2 クェーサー 3c 273 のスペクトル。成分 A, B, C, D, E, に分離され、この順序で広がった成分からコンパクトな成分に対応する。

1968 年から 1969 年にかけては基線は海をわたって大陸間にのびた。アメリカ、オーストラリア、スウェーデンの間でおこなわれた一連の大陸間干渉計観測がこれである。VLBI 観測の打ちあわせに、また時刻あわせにと電波天文学者も原子時計も世界を駆けめぐった。ある原子時計は待ちこがれる電波天文学者たちを尻目に、ある手ちがいから地球の反対側の飛行場の倉庫で眠っていた(これは目覚まし時計ではなかつた!)という。波長も 6 cm まで短かくして、分解能は 0.001 秒角をきった。しかしやはり分解されないものがあつた。1969 年暮からは米ソ共同の VLBI 観測がおこなわれた。米 NRAO の 42m アンテナとクリミアの黒海沿岸はカラチ ョフ設計による 22m アンテナである。両者とも短波長に重きをおいた新鋭の高精度電波望遠鏡である。波長は 6 cm と 2.8 cm であつたが、2.8 cm の場合には 0.0004 秒角の構造がみえてきた。さらに NASA (米航空宇宙局) のゴールドストーンの 64m 高感度アンテナもこれに加わつた。

このようにして 3C273 のジェットであるとか、M87 星雲の中心核の構造などが明らかにされていった。またあるものは、コンパクトなコア(核)とハローに分解された。あるものはコア=ハロー構造が階層的になっていて(それらは実直径にして、1 光年から 10 万光年のものがある)それが、短波長スペクトルに見えた成分に対応づけられもした。

サイズが確定してさらに、スペクトル上での不透明になる波長がわかると逆に磁場も推定できる。ほぼ  $10^{-4}$  ガウス程度であつた。人々はせっせと論文を書いた。しかし、これらの放射をする電子がどのようにして加速されたのか? その源は? そのメカニズムは? という問題はやはり手がつけられなかつた。一年程度以内のあいだに

このようにコンパクトな領域で電子が有効に相対論的電子に加速されなければならないのである。フェルミ加速ではだめだろうということは前から考えられていた。それでは、コンパクトな領域に相対論的電子があったとしよう。すると逆コンプトン散乱によって電子はたちどころにエネルギーを失い、赤外、光、X線領域にエネルギーがうつってしまう。このようにして、膨大なエネルギー源や加速などの問題はそのまま残されたが、ケンブリッジ大学の理論家リースは「超光速度理論」なるものを唱えてこれのひとつの説明をしようとしていた。

観測的には CIT (カリフォルニア工科大学) のコーエン達はフォートデービス (F), オーウェンスパレー (O), グリーンバンク (G) のアンテナで三素子 VLBI を合成し、地球の自転を利用しながら多くのフーリエ成分を観測してコンパクトな電波源のモデルをさぐっている。これは FOG アレイと呼ばれ、波長 2.8cm で活躍をつづけている。一方、カナダグループは国内のアルゴンキンパーク、ペンティクトンにプリンスアルバートを加え、さらに英ジョドレルバンクの 76m アンテナを加えての 4 局で北極圏 VLBI を構成、400 MHz 帯で活躍している。

電波源の位置ぎめについていうと、現在のところ、主に帯域幅遅延効果によりフリッジのみ見えなくなることから測られ、ほぼ 0.1 秒角で定められている。

ところで、われわれは、銀河系外のクェーサーやコンパクト電波源だけにつきあっているわけにはゆかない。銀河系内あり、太陽系あり、それに線スペクトル観測ありなのだから。私達はしばらく、こちらの方に目をむけることにしよう。そのあいだに銀河系外の謎にからむ重大な観測事実がでてこないとは限らないのだから。

**VLBI による線スペクトル観測**

銀河系内の特別な天体からはとくに強い線スペクトルが観測される。それは Ori A, W 49, W 3, VYCMa, などの H II 領域。とくに星の誕生にかかわりのある領域である。なかでも OH 基 (波長 18cm), H<sub>2</sub>O (波長 1.35cm) は強く、それらは特別な領域での星間レーザー機構ででてくるものと思われる。観測事実としては、これらの電波は時間変化が激しく、大きな円偏波をしており、しかも放射領域は非常に小さい。したがって、こう

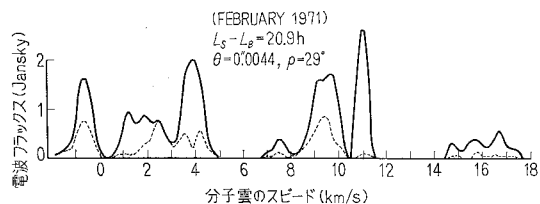


図 3 Ori A の H<sub>2</sub>O 分子雲のスペクトル

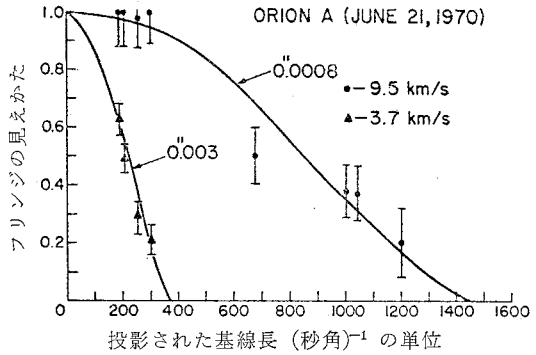


図 4 Ori A の分子雲はこうして分解された。

いう領域を超高分解能でさぐることは、はじめから VLBI の目的であった。線スペクトルの観測は、二局の観測テープをもちよって相関させてクロスコリレーション (相互相関) を求め、これをフーリエ変換してクロスパワースペクトルを得るという方法をとる。これは、磁気テープ記録方式の VLBI には最も適したやりかたである。

線スペクトル観測はスミソニアン天文台のモランをはじめとして多くの人々によっておこなわれている。ひとつの例として、モラン達がヘイスタック (37m), NRAO (43m, 11m), NRL (米海軍研究所, 26m) のアンテナを動員しておこなった、H II 領域の H<sub>2</sub>O 線スペクトル観測をあげてみよう。

まず、ヘイスタック=NRAO 間である時角に測ったクロスパワースペクトルをみよう (図 3)。以下の話はすべて Ori A に限ることにして。いろいろな速度成分の雲があるのがわかる。実線はひとつの電波望遠鏡で測ったスペクトル (オートパワースペクトル)、破線が VLBI によるクロスパワースペクトル、つまりコンパクトな部分である。実をいうと、このスペクトルが一年以内のあいだにかなりかわっているのである。紙面の都合で載せるわけにはいかないが、それはオートパワースペクトルについてもクロスパワースペクトルについてもい

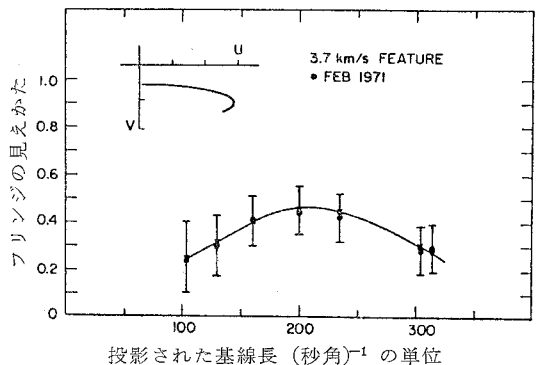


図 5 Ori A の 3.7 km/s 成分の構造変化

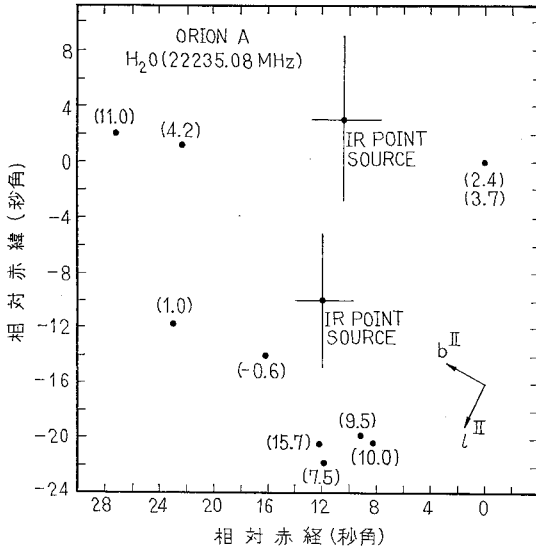


図6 Ori A のなかのコンパクトな  $H_2O$  雲の分布

えることであり、また、変化のしかたは、速度が変わるというよりも速度に対応する成分の強さがかわるという感じである。

次に注目のひとつひとつの速度成分の雲のサイズをみよう。図4は基線の広がりに対してフリッジが小さくなってゆく、つまり電波源が分解されてゆく様子を示す。つまり 3.7 km/s の成分は 0.003 秒角、9.5 km/s の成分は 0.0008 秒角というわけである。ところがその構造は簡単かという、半年たつて同じ基線をもとにしたものは図5のように変化している。つまり構造そのものの変化がみられるのである。

これらの速度成分の雲は空間的にはどのように存在するのであろうか？ Ori A の  $H_2O$  雲の場合、全体の領域は 20 秒角程度のなかにある。そして、それぞれの速度成分は特定のフリッジレートをもちて観測される。フリッジレートは星の座標に関係するので、相互の精密なフリッジレートのちがいがから、これらの速度成分の空間的相対位置はかなり正確に決められる。このようなことから導き出したマップが図6である。赤外線をだす点源とは一致しない。

モラン達のグループはまた、フリッジレートの情報に位相の情報までをいれて超精密な測定をおこなった。この結果彼らは W3(OH) の中の成分の相対位置を 0.0003 秒角の精度で出した。W3 までの距離は 2.5 kpc あるので、もはや彼らは 1 km/s の固有運動を一年おいた観測で検出できる。すなわち、ドップラー速度と、天球上の動きとの両方がわかるのである。

VLBI の分子雲の観測は他の分子線スペクトルの情報といっしょになってこの方面での重要なデータを提供している。

## キューサーの超光速膨張!? その時間変化

アインシュタインの一般相対性理論によると電磁波は重力場で曲げられる。それによると太陽のリムを通る電磁波では屈折角が 1.76 秒角になる。コンパクトで強いキューサー 3C279 は毎年 10 月 8 日に太陽に近づく。それに近い有名なキューサー 3C273 は較正用電波源として重力理論の検証が行なわれたが、どの重力理論が良いかは未解決のままである。しかしこの観測は予期せぬ事実をもたらしたのである。

アメリカの西部ゴールドストーン (Goldstone) には NASA の地上局用の 64 m アンテナがある。また東岸のヘイスタック (Haystack) 天文台には 18.5 m のアンテナがある。どちらも高精度アンテナで、受信機の雑音温度の小ささと良い周波数標準にめぐまれており、この高精度コンビがつくる VLBI はゴールドスタック (Goldstack) 干渉計の名で有名である。ヘイスタックのアンテナは、本文で VLBI の草分けにも登場したが、その後もせっせと草を刈りこみ、ゴールドストーンと組んでからのゴールドラッシュぶりはまたまたはなばなしのものがある。

さて 1970 年 10 月、ゴールドスタック干渉計はキューサー 3C279 と 3C273 を観測していた。重力理論の検証のためである。ところが 3C279 も 3C273 もおもしろい構造を示してきたのである。「サイエンス」誌にあらわれた論文「キューサー：VLBI によって明らかにされた 1/1000 秒角の構造」はこれからのべる問題の発端となった。観測の時間の経過と共に地球が回転して、星空から見た干渉計基線がかわってゆき、電波源の輝度分布のフーリエ成分が得られる。この VLBI 観測で得られるのは、フーリエ成分の振幅のみで、位相はわからない。このようにして観測時角とともにフリッジの振幅のかわってゆく様子をみたゴールドスタックグループは、3C279 についてはとくに、電波源が「二つ目玉」であると思うと、データの説明がうまくつけられることをみつけた。実はこのような事情は電波天文学において干渉計の草分け時代に二つ目玉の電波源 Cyg A で経験したことであったのである。しかも図7での振幅曲線のおり返し点でフリッジ振幅がほとんどゼロになっているということは、その時角では二つの点電波源のフリッジの位相がちょうど 180 度ちがって打ち消しあっている。つまり二つの点電波源の強さはほぼ同じなのである。このような事から、3C279 は二つ目玉の間隔が  $(1.55 \pm 0.05) \times 10^{-8}$  秒角。天球での傾き角が  $(36 \pm 1)$  度という構造がわかった。キューサー 3C279 の距離を赤方変位とハッブルの法則でもとめると 30 億光年となり二つ目玉の間隔は 20 光年となる。そして二つの成分はこれよりもかなり小さい。3C273 についてもやはり有意な構造が

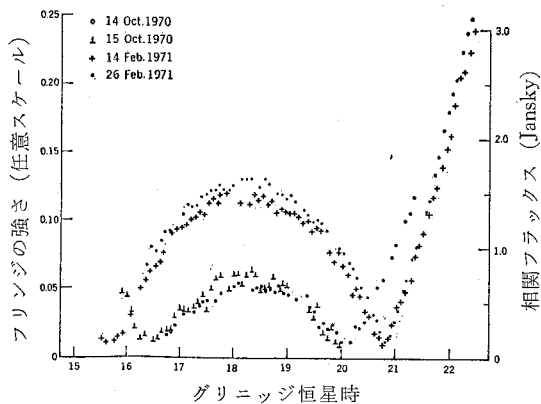


図7 ゴールドスタック干渉計による 3C279 の フリンジ振幅のデータ。これが超光速膨張問題をひきおこした。

みえた。論文はこのような事を意気さかんに述べたあと、「もし二つ目玉の相対運動が光速の半分もあれば、一年の期間をおけば検出できる」と述べている。ところが論文の最後には校正刷りの際につけ加えられた8行がある。いわく、「最近の観測によると、この二つのクェーサーの構造に時間変化が見られた。二つ目玉のモデルでみると 3C279 の間隔が4ヶ月の間に10%ふえた。」これはおどろき！読者も試みられたい。相対速度は光速をはるかに超える！こんな事は許そうとも相対性理論が許さない。

それから待望の論文がでるまでに100日かかった。「サイエンス」にあらわれた続編。題して「クェーサー再訪: VLBI によって観測された急激な時間変化」。3C273 の二つ目玉の距離が10月に  $(1.55 \pm 0.03) \times 10^{-3}$  秒角だったのが、翌年の2月に測ってみると、 $(1.69 \pm 0.22) \times 10^{-6}$  秒角になっており、しかもそのあいだ、天球での傾き角は、かわっていなかったというのである。赤方変位を宇宙論的であるとみなすと、このスピードは光速の10倍である。

逆に二つ目玉の相対運動をもとにもどしてやると、 $(1967.4 \pm 0.9)$  年に同じ点にあったことにある。そのころ 3C279 には何がおこったのであろうか？ 3C279 の強度モニター観測は1965年から始まっている。それによると1966年末に光で強度が異常に高くなり、以後、電波で波長が長くなるほどおくれ、しかもなだらかな強まりがみられた。波長が長い程バーストのピークがおそいという事情は膨張している電波源からの放射としてつじつまのあうものである。

この奇妙な事実に対してゴールドスタックグループはいろいろな説明を考えた。①不十分なフーリエ成分による振幅からだけによる二つ目玉モデルの妥当性、②光速以上で動いているのではなく、そういうパターンが見えた

のではないか？ ③独立なきらめく部分があるのではないか？ ④二つ目玉の動きの方向によってはみかけ光速以上に見える。⑤星間物質によるシンチレーション、⑥3C279 の赤方変位は宇宙論的ではなく、もっと近い、⑦ハッブルの定数がほんとは10倍大きいのではないか、⑧宇宙がかなり奇妙なのでは？ ⑨二つ目玉はやはり超光速タキオンでできている。これらの多くは今でも可能性がある。

ケンブリッジ大学のリースの「超光速度理論」はいちはやく注目をあびた。しかし、これでも説明しにくい事も残った。ゴールドスタック干渉計はセイファート銀河である 3C120 についても超光速膨張らしいものを観測した。この時は、二つ目玉モデルも均一リングモデルもよく観測データにフィットして、それぞれの膨張スピードはそれぞれ光速の2倍と3倍とでた。このような解釈だけが妥当であるかは別にしてもやはりこのセイファート銀河はなんらかの激しい変化にみまわれたのであろう。

電波源のフラックスの時間変化の研究で有名なミシガン大学のデントは、3.8cmでのフラックス変化をもとに 3C120 の構造の変化は空間的に独立な点でのバーストというモデルでも説明できると言っている。当のゴール

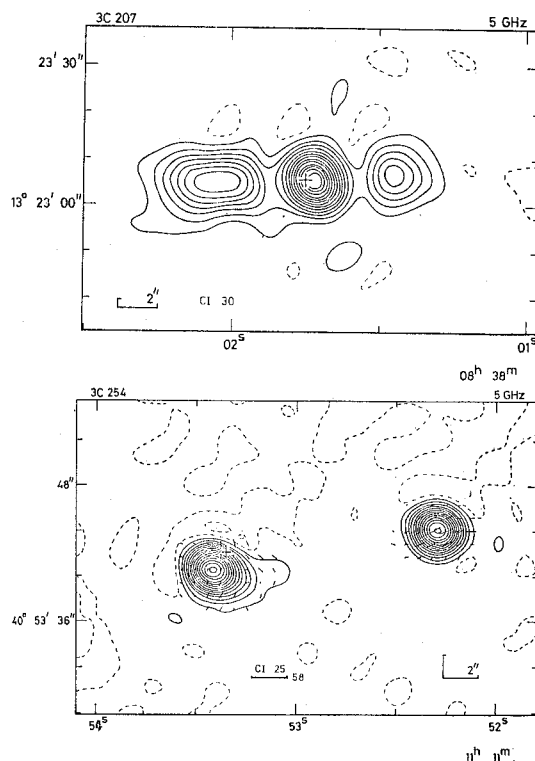


図9 ケンブリッジ大学の新鋭の5km電波望遠鏡によるクェーサー 3C207 と 3C254. 波長は5cm, 分解能は光のそれに近い2秒角である。たいていのクェーサーは、このような構造をしている。+マークは光でみたクェーサーの位置を示す。

ドスタックグループはその後本格的に 3C279 と 3C273 を観測している。最近のこのグループの結果は、昨年のエイプリルフルに出版された Ap.J. (米天体物理誌) に報告されている。それによると、二つの電波源はその後激しく構造変化を続けている。やはり超光速膨張の可能性を残しながらも、彼らは、直線上にならんだ三つの電波源の時間変動という考えも提唱している。正しいモデルに到達するためにはもっと多くの基線による情報が必要で、ゴールドスタックグループは他のグループを巻き込んでいまま 3C279 と 3C273 を追っているはずである。

### VLBI で位相は測れないのか

今までの話は VLBI で測った相関の絶対値すなわちフーリエ成分の振幅のみにもとづくものであった。それでは VLBI で位相は測れないのであろうか？ 初期の VLBI ではタブーであったこの問題は変わりつつある。位相が測れると、ありがたい事はたくさん考えられるが、なかでも、電波源のモデルを仮定してそれにあわせてパラメータを決めるというやりかたから、マッピング観測への道を拓けることは重要である。実際、地球の回転までを入れると多局 VLBI では、観測できるフーリエ成分の数はかなりの数にのぼるからである。

VLBI で位相を狂わすものとしては次のものが考えられる。①電波伝播、すなわち短波長側での対流層、長波長側での電離層、②原子標準、これから生み出される局発信号と時刻のタイミング、③②を除く、受信機の初段からバックエンドまでの安定性、④テープレコーダの不完全さ、⑤基線の不確かさ地球の局部運動 etc..

①については土屋氏たちによって述べられているようにかなりの事がわかってきているとはいえ、位相がわかるまでにするには、ちょっと無理である。③はいまの技術ではたいした問題にならない。④についてはいい磁気テープを使って、巧妙な記録書式を考えてやればよい。⑤についてはいくつかの電波源の系統的観測により分離してやればよい。①については位相安定性がよく、雑音の少ない周波数標準を使うことに尽きる。現在の最高のものは水素メーザー発振器で、これだと位相が狂ってゆくタイムスケール(コヒーレンス時間と呼ぼう)は波長 13 cm で 30 分ぐらいという実験結果がある。ルビジウム発振器は値段は安いが性能はかなりおちる。そこで、高性能水晶発振器をルビジウム発振器とゆるく位相ロックしたものは、それぞれの短時間および長時間安定度がカバーしあって、値段のわりに秀れたものになる。これは波長 3cm でコヒーレンス時間 1 分という結果があるが、13 cm では水素メーザーにおとるとはいえ近づいてくる。これらを総合すると位相を決めてやるのは、とくに

①②の理由でとても無理のようであるが、うまい相対較正をすると位相が観測されたことになるはずである。

#### 1. スイッチ法

いま天空上で比較的近い場所に観測したい星空と、位置と構造のわかった(点電波源だともっとよい)較正用電波源があったとする。そして VLBI ペアは二つの方向を交互に観測したとする。すると較正用電波源については観測されるべき位相はわかっている。そこでアンテナを交互に観測する星空にむける時間(たとえば 1 分)を、位相の狂ってしまうタイムスケール(たとえば 20 分)に較べて充分小さくすれば、位相の狂いの 2 局間での差は交互の観測のあいだにあまりかわらないはずである。このようにして、二局間の受信系の位相の差と観測したい位相とがわかる。これはゴールドスタック干渉ペアーで水素メーザー発振器を使用して波長 3.8 cm で成功した。この場合、二つの電波源の方向が近ければ近いほどよい。電波伝播の影響は同じようになるし、切り換え時間が早くできるからである。二つの電波源の方向が同じアンテナビームのなかにあれば(たとえば 10 分角以内)もはやアンテナの切り換えはいらす、遅延の切り換えをあとでやればよい。

#### 2. 四アンテナ法

スイッチ法では較正用電波源と観測したい電波源とを時分割で観測するのであるが、各局で二アンテナずつをもって、それぞれをコヒーレントに結合しておいて、二つの電波源をうけもたせることでかなり改善できる。これは「四アンテナ法」として、すでに土屋さん達の記事で紹介された。

#### 3. 六アンテナ法

各局に三アンテナがあった場合、二つの冗長な基線によって得られた位相から伝播の影響を見ることができ。こういう局どうしてペアーを構成すると伝播の位相差を取り除くことができる。これは「六アンテナ法」と呼ばれており、「四アンテナ法」と同じく、NRAO、オウエンスバレー電波天文台、ヘイスタック天文台の間で実験され成功をおさめている。

#### 4. 冗長なフーリエ成分観測による較正

地球の回転とともに星からみた干渉計は方向も基線長もかわってゆく。別の干渉計ペアもこのようにかわってゆくので、ある時間のある干渉計ペアの基線と別の時間の別の干渉ペアの基線が全く同じになることがある。このとき測られる相関値の振幅も位相も同じであるべきである。ということを使うとデータの較正がおこなえるわけである。(ただし、これで位相が絶対的にわかると言っているのではない。)局がふえて干渉ペアがふえるとこのような場合がどんどんふえてゆく。これを二次元フーリエ成分のとれ具合ということであらわすと、観測時

間に対する軌跡が図上のひとつひとつの楕円の一部となる。楕円どうしの交点が、冗長なフーリエ成分のとれたところである。一方干渉ペアはある時間のあいだ（たとえば 20 分間）は位相が狂わないとみなせるので、この時間帯の情報は互いの関連が保たれているとみなせる。そして、もし、更にこれらの交点の代表的な時間間隔が干渉計コヒーレンス時間よりも短い場合には、この平面上のいくつかの領域にわたって全体のかなりの部分の位相が相互の関連で結びあわされる。局が 10 局もあるとペアは 45 対もあるので、このような条件は満足される。

5. “CLOSURE PHASE” による位相較正

VLBI で 3 局あると、基線は 3 本あるが、これによって観測される三つの位相のサイクリックな和を考えてやると 3 局の位相の狂いが足されて相殺され、実用上観測したいフーリエ成分の位相の和 (CLOSURE PHASE) に帰着する。したがって時々刻々三つの振幅と一つの自由度の位相がわかることになる。ロジャース達はゴールドスタックにスウェーデンのオンサラを加えた 3 局で、CLOSURE PHASE に着目して 3C273 B と 3C84 の観測をおこなった。もちろんこのままでは位相そのものはわからないのであるが、彼等は 3C273 B も 3C84 も実用上、輝度分布が直線上にのっていることを利用して、この直線上でのフーリエ成分の振幅、位相のそれぞれの最適化をおこなって決定した。これによりこの方向に対する一次元輝度分布を出した。これは単なるモデルフィッティングからマッピングを指向したものとして重要であると思う。

一般に N 局になるとどうなるか？ N 局での相対的な位相誤差が (N-1) 個あり、一方 N(N-1)/2 ペアから位相の観測量がわかる。したがって (N-1)(N-2)/2 の自

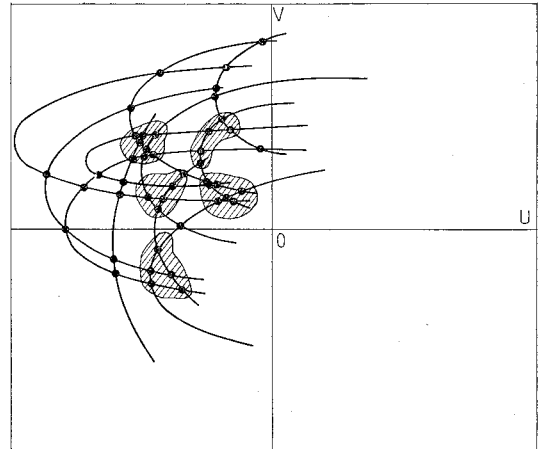


図 10 冗長なフーリエ成分の観測による較正。5 局あったばあいの 10 組の基線の回転はそれぞれの楕円の一部であらわされる。コヒーレンス時間 10 分として局が 10 局もあると、サンプルされたほぼ全域でコヒーレントに較正できる。原点 O に対して対称なものは冗長になるので省いた。

由度分だけの位相情報がわかる。よって観測したい位相情報量に対してわかる情報の自由度の割合は  $N-2/N$  となって、局の増大とともに 100% に漸近する。(N=10 局で 80%!) 振幅については当然のことながら常に 100% 測れる。

これは「冗長なフーリエ成分観測較正」とは本質的に異なる。したがってこれらは併用できるものである。そしてどちらも局の増大に対して有利になってゆく。

日本列島干渉計再訪。そして VLBI のゆくさき

私達は数年まえ「日本列島干渉計」なる VLBI 網を提案した。たとえサンプルされた情報が不充分でも、またたとえ位相がきちりとわからなくとも、天体物理の要請を考えるならば必然的にマッピングに進んでいくであろうという考えが出发点であった。ハードウェア面では人工衛星を使う方法を考えたり、「四アンテナ法」を考えたり、ソフトウェア一面では、サンプルされるフーリエ成分からどの程度の絵がでるか考えたり、そのためによい局のならばを考えたり、マッピングの手法に思いをはせたりした。現在、状態はかわっているように私には見える。アメリカでの実験もいろいろある。不充分なフーリエ成分によるマッピングということでは、「CLEAN」とか「マクシマムエントロピー法」とか、「プロレイト=スウェロイダル関数」とかいうやり方が電波天文学のなかに浸透してきている。

電波天文学の歴史をふりかえると、1950 年代は二アンテナ干渉計から複合的な電波干渉計への進展期であっ

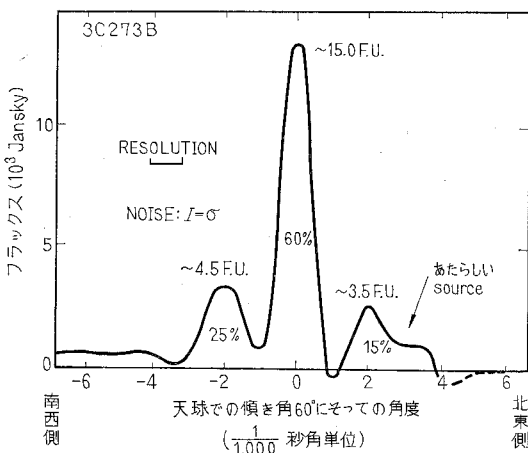


図 9 CLOSURE PHASE 観測によって明らかにされた 3C273 B の超微細構造

た。そしていまや電波望遠鏡の像処理技術は進歩してきたので、「電波望遠鏡をのぞくと何かが見えるのですか?」などという昔からの質問に対しては「そう言ってもいいようなタイプの電波望遠鏡はふえていますね。それにあった! 遠いクエーサーなんか見ようという日には、光の大望遠鏡をそのままのぞいたって見えるもんじゃありませんよ。」とはぐらかした答えができるようになってきた。これは技術の進歩もさることながら天体物理の要請によるためである。VLBIはこのどちらの面を考慮しても、まだのびなければならぬ運命にあるといえよう。

問題もある。10局からのVLBI網があったとして(これを組織するのも大変であるが!)きちんと振幅も位相も測れるようになったとして、45からのペアに対して相関をとるということはけっこう大変なことである。VLBIにまだまだ発展の未来があるとはいえ、いまのテープ記録形式が続くともいいきれない。ある日、VLBI用静止電波天文衛星なるものが打ち上がって、それから局発と時刻の参照信号が発射され、各局ではこれをもとにIFの信号を人工衛星に送り返すと、人工衛星はこれを地上のセンターに伝送する。こんな方式の方が、帯域幅もとれ、後処理の手間も少なくなる。各局が受けとった参照信号をまた送り返すと、これは遅延(もっと細かくは位相)の較正用としても使える。したがってこれは趣味の問題ではあるが、「VLBIを磁気テープ記録干渉計」

であると定義した土屋さんたちの考えに対して、私は「VLBIとは、超高分解能を志向した干渉計」という天体物理オリエンティドな定義をしてもいいのではないかと考えている。

VLBIの基線(あるいは分解能)はどこまでのびるのであろうか?すでに地球規模で基線が達成されているので、あとは人工衛星・月・人工惑星などの宇宙空間へのびることになる。宇宙空間に浮かんだ可変基線干渉システムは、さまざまな楽しい空想をよぶのであるが、米NRAOのVLBIリーダーのひとりケラーマンは「惑星間や星間の電子の散乱のために、波長10cm程度より長い電波では、これ以上の基線は不適當である。またシンクロトロン放射をするコンパクト電波源を分解するには波長によらず、地球の直径程度の基線長でよい。」という見解をしている。これはシンクロトロン放射源では、電波を出す領域は波長に比例して大きくなり、したがって分解能が比例して悪くてもよいのであるが、これは基線長一定ということになるからである。

おわりに

そういうわけで8年が過ぎてしまった。日本でも電波天文用高精度アンテナができ、いつの日か日本グループの活躍する「VLBI解説記事」が「天文月報」に載ることを強く期待したい。日本の地位も重要である。

★★★★★★★★★★★★★★★★

— わが国唯一の天体観測雑誌 —

# 天文ガイド

毎月5日発売! 定価240円(〒32)



天文ファンの人たちに毎月の天文現象の案内や、ニュースの紹介をするとともに、望遠鏡の作り方、観測ガイド、天体写真の写し方など実用記事も掲載。  
また、読者の写した天体写真、星座写真等たくさん作品や望遠鏡の自作レポートも網羅。

誠文堂新光社 東京・神田錦町一—五 振替・東京六二九四

★★★★★★★★★★★★★★★★

天文に興味を持ちはじめた小学校上級生から中学校1年生ぐらいの子供たちのための天文入門書

# 星空の12ヵ月

古畑正秋著 / A4判 / 定価 900円

12枚の毎月の星図を中心に、星座の話、星の明るさ、金星や火星の動き、流星、月のこと、天の川、変光星のことなど、はじめて星に心をうばわれた少年たちにわかるようにやさしく説明してあります  
■おもな内容——星座のさがしかた / 星座の歴史 / 星座の表 / 星の明るさ / 日出、日入の薄明 / 1月の空 / 冬のおもな星座 / 2月の空 / 星雲と星団 / 3月の空 / 金星のうごき / 4月の空 / 春のおもな星座 / 5月の空 / 火星の動き / 6月の空 / 7月の星座 / その他