

ます。1997年6月には「はるか」と地上電波望遠鏡群の撮像実験に成功しました。

今では、大規模な国際協力を展開して、連日の科学観測が行われています。

衛星「はるか」は軌道上を運動し、世界中のアンテナ群と最長3万kmの巨大な瞳を合成します。3万kmの瞳は、1609年のガリレオの望遠鏡の十億倍、人の目の瞳の百億倍の大きさです。「はるか」を中心にすえたスペースVLBI観測計画をVSOP計画といいます。

VSOPは波長18cmと6cmで観測を続けています。解像度は、波長18cmで0.001秒角、波長6cmで0.0003秒角です。ハッブル宇宙望遠鏡(HST)の解像度は最高で0.05秒角なので、波長6cmでは150倍の解像度、あるいは、ハッブルの画像の1ピクセルを2万2千ピクセルに分解するという、圧倒的な解像度です。

2. 究極の解像度を追求した電波望遠鏡

望遠鏡の解像度は、観測波長を λ 、瞳のさしわたしをDとすると、 λ/D ラジアン程度で制限され、「回折限界」といわれています。波長の長い電波は、光やエックス線などの望遠鏡に較べて圧倒的に不利です。電波望遠鏡では、アンテナを組み合わせ「電波干渉計」をつくる努力が重ねられ、見事に進化したのが、解像度と撮像感度とをそなえた「開口合成法」といわれるタイプです。現在もっとも活躍している例が、アメリカのVLA(Very Large Array)です。

ソ連のMatveyenkoたちの考えたVLBI(Very Long Baseline Interferometry)は、1967年にカナダとアメリカのグループで成功しました。VLBI観測では、それぞれのアンテナで観測された信号を磁気テープに記録します。これらの信号が後で時間的にそろるように、精密な時計を備え、時刻も磁気テープに記録します。電波望遠鏡の高感度受信機では、周波数を低い周波数に変換しながらスーパーヘテロダイン増幅をします。このステップのすべてに安定

な「局部発振信号」が必要で、VLBIではこの基準として、水素メーザー発振器などの原子発振器を使います。観測後、テープを集め、相互の位置の情報をもとにテープの再生の時刻をずらして天体からの電波をあわせ、天体の映像をつくりだす事ができます。

地球規模にひろがったVLBIの解像度は、他の電磁波帯の望遠鏡をはるかに圧倒します。電磁波の中でも最も波長の長く、解像度で劣るはずの電波が、こんなにすごい解像度を手にしたのは、おもしろいことです。波長が長く(装置の配位精度の容易さ)、周波数が低い(受信干渉の容易さ)からこそ、まじめに技術をつみあげれば、地球サイズのようなところでも、ひとつの電波望遠鏡にすることができるのです。逆説的で、「兎と亀の競争」を思わせませう。

今では、世界の多くの電波望遠鏡が一緒になってVLBI共同観測をしています。ヨーロッパVLBI網(EVN)等は、その例です。アメリカでは、専用のVLBI網(VLBA, 8000kmに分散する25mアンテナ10局)が、連日の観測を続けています。

VLBIの解像度を更に向上させるには、地球の大きさを超えて宇宙にでて“スペースVLBI”を行うことです。宇宙を高速で運行する電波天文台を干渉計の一部とすることが鍵でした。

3. 銀河中心は限りなく「クロ」

VLBIに至る電波天文学の解像度の追求は、電波銀河、クエーサー等の中心領域でおこる活動的なエネルギー現象があったからです。1960年代に発見され、天文学上の大きな謎とされてきたクエーサーは、何億光年、何十億光年も遠くの銀河の中心でとてつもなく激しい現象が起こっている天体です。また、電波銀河では、銀河を突き抜ける数十万光年にも及ぶジェットが見えることがあります。この活動銀河核(AGN, Active Galactic Nuclei)をみつめた世界のVLBI観測家たちの見たものは、それでもやはり分解されない芯と、その芯からとび



だす、細く鋭いジェットでした。

活動銀河核にも、私たちの銀河のような穏やかな銀河にも、中心に巨大なブラックホールがあると考えられる根拠が増えてきました。私たちの銀河の中心を遠赤外線で見ると、銀河の回転中心を高速でとびまわる星が見えます。中心に大変な質量が存在しなければ、このような星をつなぎとめておくとはできません。こうして計算すると、私たちの銀河の中心には、太陽の260万倍の質量があるらしいのです。また、VLBI観測によって、私たちの銀河の中心の狭い電波の源は1光年以内の範囲にあることがわかっています。

NGC4258という銀河では、日米のグループが、中心を秒速約1000 kmで直径1光年ほどをケプラー運動する水メーザー天体を発見し、それから、中心の質量を太陽の3900万倍と導出しています(三好他, 1995)。これは、最も質量の確かな巨大ブラックホールとっていいでしょう。

宇宙科学研究所のX線観測衛星「あすか」は、銀河MCG-6-30-15の中心に、ブラックホールの数倍の回転円盤からでていると解釈されるX線を発見しています(田中他, 1995)。

鉄原子の出すX線スペクトルを観ると、相対論的なドップラー効果によって、円盤の向こうにまわっているところは波長が長くずれて暗く、こちらに近づいているところは波長が短くずれて明るく見えます。そして、ブラックホールの重力場により、全体として波長の長い方にずれます。

このような領域に映像で迫るために、スペースVLBIの実現が期待されていたのです。

4. M 87のジェットの正体

乙女座、かみのけ座の方向、約5千万光年の距離を中心として、約2500個の銀河が群れています。この銀河群の中心部に位置する最大級の楕円銀河M 87には、中心から、1万光年ほどの長さのジェットが出ているのが知られています。

光のジェットによく似た電波のジェットがみえま

す。さらにジェットの外に、さらに遠くに広がっていく電波の遠大な姿がみえます(図2=表紙)。1999年1月、アメリカ国立電波天文台のOwen博士のグループは、VLA (Very Large Array) に新しく加わった観測波長90 cmの電波で見ると、さらにさしわたし40万光年にわたって電波の放射が周辺宇宙空間に蔓延していることを発表しました。このように波長の長い電波は、シンクロトロン放射をして徐々にエネルギーを失った太古の電子によるもの、すなわち、過去の活動の名残と思われます。いいかえると、M87は太古の昔から、このようなジェットを吹き出してきたことがわかります。

また、ハッブル宇宙望遠鏡によるM 87中心部の光のスペクトルの解析によって、ジェット方向を軸として回転する様子をつきとめ、これから、太陽の24億倍の重さの質量が集中すると計算しています。これがブラックホールだとすると、その半径(シュワルツシルド半径)は70億km、冥王星、海王星軌道をすっぽり入れる程度の大きさです。

「はるか」とVLBAが共同して、M 87のジェットの付け根に着目して、波長18 cmで観測をおこないました。観測の解像度は千分の1秒角で、この天体を0.25光年のサイズで見分けることに相当します。中心のブラックホールの大きさ(シュワルツシルド半径)が70億kmと思えば、ブラックホールの直径の300倍のサイズまで迫っています。

驚くことに、ジェットは緩やかな1光年程度のピッチの螺旋を描いています。中心から次第に暗くなり、10光年ほど先までこの模様がみとれます。この緩やかな螺旋がひろがらずに、数千光年にもわたる細いジェットをつくりだしているのは、とても興味深いことです。

この現象には、磁場が密接に関与していると考えられます。巨大ブラックホールに回転しながら落ち込む渦とジェットは、磁場を媒介にして相互作用し、加速された高速電子が磁場に巻き付きながらシンクロトロン放射をだしていると考えられます。プラズマ的動力学に相対論を取り入れてのシ



ミュレーションが、積極的におこなわれていますが、観測とシミュレーションとが噛み合い始めるようになりました。

VSOPでは、引き続き観測をしています。この螺旋状の様子がどのように移動あるいは変化していくかは、たいへん興味のあるところです。観測波長6 cmでは、更に解像度を3倍あげられます。これによって、ブラックホールの100倍の解像度になります。ハッブル宇宙望遠鏡は、ジェットが見かけ上、光速の6倍の速さで外に吹き出しているような変化をとらえています。

最新のミリ波VLBI観測でも、ジェットの付け根はひろがっています。私たちは、ジェットの付け根の姿を見始めているのかも知れません。

5. ジェットの姿、そして

スペクトルからわかる事

ジェットのあるクェーサーとして有名な3C273のジェットがVSOPで綺麗に描き出されています。これまでの映像に較べて、ジェットがひとつの山脈のようではなくて、ひろがりをもつジェットとして見えはじめています。

いくつかの周波数で観測して、スペクトルによる姿の違いが研究されています。加速されたジェットにそって荷電粒子がシンクロトロン放射でエネルギーを失い、高周波側で暗くなっていく傾向がみられます。始めにみかけの「超光速」現象が発見された3C279では、まずはじめに中心核が光学的に厚くて長波長側で暗いのですが、核からちょっと離れるとフラットなスペクトルに変わり、後はジェットにそってエネルギーを失ってスペクトルが急になっていく様子が綺麗に見えています。広がった電波源3C84では、いったんは中心から吹きだし、バックローブとして戻ってくる様子が見えています。

GHz帯にスペクトルのピークをもつ天体(GPS)も、多くのひとによって研究されています。VSOPのもっとも低い周波数1.6GHzは、このようなとき

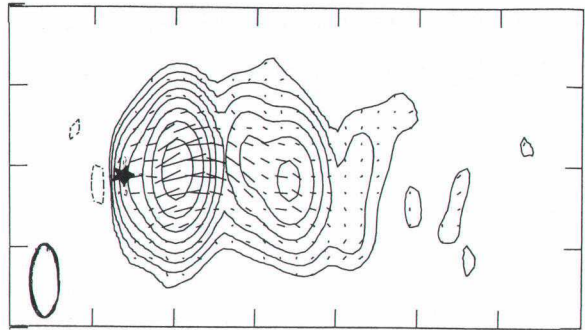


図3：電波源1803+784の偏波観測 (Gabuzda et al). 等高線は明るさを表し、線の向きと長さは偏波の電界ベクトルを示す。磁場の向きはこれと垂直である。スケールは0.001度。

に、大事な観測データとなっています。

6. 磁場もわかる VSOP

電磁波は、互いに直行する磁場と電場の波の伝わりです。ふつうは、この振動面がいろいろのものが混ざっているのですが、磁力線のまわりを高速螺旋運動する荷電粒子がだす「シンクロトロン放射」では、できた電磁波の振動面がそろってきます。そこで、この振動面を区別して観測(偏波観測)すると、宇宙の中の磁力線(磁場)の向きが推定できます。

VSOPで、このような観測により、1803+784という活動銀河核で、磁場の向きが、ジェットに垂直、すなわち、磁力線はジェットにたいして螺旋状に巻き付いているように向いているらしいという事がわかりました。

このような観測をするには、それぞれ独立な偏波をうける受信器を2つもって観測をするといいのですが、「はるか」の厳しい重量制限から、左回りの偏波の受信器しか搭載することができませんでした。それでも、地上のアンテナが両偏波で観測してくれると、感度は落ちてでも偏波観測は可能です。



7. シャープにみえる VSOP では、姿の変化が追える

VSOP の解像度でみると、時間とともに天体の姿が変わっていくのがみえます。反対に解像度が悪いと、姿が変わっていてもぼんやりしたものがぼんやりしてみえるだけで、変化が見えません。

始めに、VSOP の画像と、「はるか」を除いた画像とで較べてみましょう。図4 (=表紙) の四角の中がズームアップされて、上のような細部が見えます。

見かけ上、光速を超える変化(超光速!)現象が、活動銀河核でも銀河系内天体でも知られていますが、VSOP もこのような変化をとらえています。図5 (=表紙) は、このようなことを意識して、すでに4期の観測をおこなったクェーサーの例での予備的な形状変化を示します。観測ビームは季節とともに変化しますので、この画像では丸いビームにそろえて画像をつくっています。左右に並べていますが、それぞれの一番上の部分が、ジェット付け根であると考えています。

8. ジェットの真正面から十兆度の輝きを観る

電波でみたクェーサーの芯の輝きは、磁力線のまわりをまわる高速電子によるシンクロトロン輻射と考えられます。これがもし、一千億から一兆度の輝きに至ると、この輝きの電波(光)が充満するので、まわりの電子がこれにぶつかって(逆コンプトン効果)、それ以上の輝きを作り出せないことが予想されます。

クェーサー 1921-293 は、射手座方向 37 億光年の距離にあります。「はるか」打ち上げ以前に VSOP

チームで 141 個の天体に対して系統的におこなわれた観測で、この天体がするどい輝きをもっていることがわかっていました。

VSOP は、電波がどれくらい狭い領域から出ているかを調べることができるので、この問題には最適の観測装置です。こうして、クェーサー 1921-293 の観測がおこなわれました。観測波長 6 cm で、十兆度というおどろくべき結果でした。これで、理論の限界の十倍以上を超えることがはっきりと示されました。

観測者の方向をむいて光速に近いジェットが飛び出していると、相対論的ドップラー効果によって、これを説明することができます。つまり、クェーサー 1921-293 の場合、私たちは、クェーサーからでるジェットの真正面から観ているのです。高エネルギーのガンマ線をも放出しているブレーザーと言われる一群の天体は、このようなものと考えられます。

銀河核の輝度を系統的に調べることが、30 ほどの天体でおこなわれています。その分布例を図6に示します。1兆度を超える電波源が半数を占めるのが見て取れます。また、300 を超えるサーベイによっても統計的に調べようとしています。

ジェット現象を、宇宙の中の特別にエキゾチックな現象と考えてはいけません。最近、銀河系の中でも、スケールは遥かに小さいのですが、ジェット現象が発見されており、ジェットの速さはほとんど光速で、マイクロクェーサーと呼ばれています。

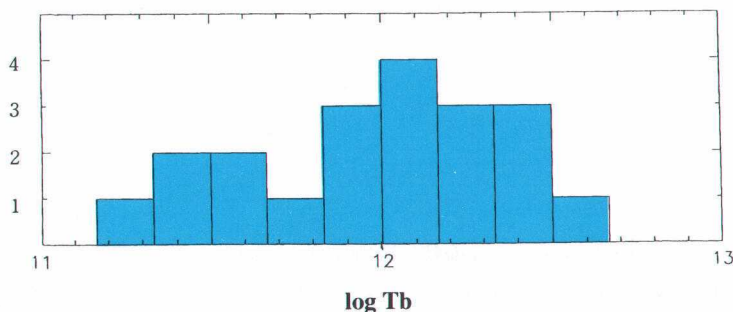


図6: クェーサーの輝度の分布 (Preston, et al). 輝度は宇宙論補正をしてクェーサー固有の値に変換してある。横軸は対数スケール。



また、星が生まれる時には、ガスや塵があつまってきて円盤を形成します。そして、円盤の両側にジェットを噴き出すことが普遍的に観測されるのです。重力中心に集まってきて渦ができる、そこから両方向にジェットができることは、銀河のスケールでも、星のスケールでもおこっています。

9. 宇宙の地平近くのクェーサー像

強力な電波銀河では、宇宙論的な遠方からの電波がとどきます。VSOPでは、超遠方で輝く、このようなクェーサーをいくつも撮像しています。ビッグバンから1, 2割しかたっていない昔の、言い替えれば、そんな遠方の天体を、ハッブル宇宙望遠鏡やスバル望遠鏡でも微かにとらえられていますが、VSOPでは、こんな遠方のこんな時期の天体をリアルに映像化しています。このような遠方になると、宇宙の膨張のため、波長は4-5倍に伸びて見えます。図7に、そのような例を示します。

10. VSOP サーベイ観測

VSOPの公開観測とは独立に、300を超えるコンパクトな活動銀河核のサーベイ観測をミッション主導でおこなっています。これによって、電波源のサイズは、輝度は、距離による違いは、等々、さまざまな統計的手法で研究が行われます。

ビッグバンの後30万年ほどで、宇宙は中性化して晴れ上がったとされています。その後、星ができて始めたり、超巨大ブラックホールができたはずですが。そのまわりには、またプラズマ化された空間ができて始めました。いったい、超巨大ブラックホールはいつ頃からでき始め、そのまわりの加速、ジェット現象は何時からどのような規模で始まったのでしょうか。それは、宇宙にどのような影響を与えたのでしょうか。

サーベイ観測では、将来の高感度スペースVLBIが解いていく、こんな謎にもヒントを与えるでしょう。

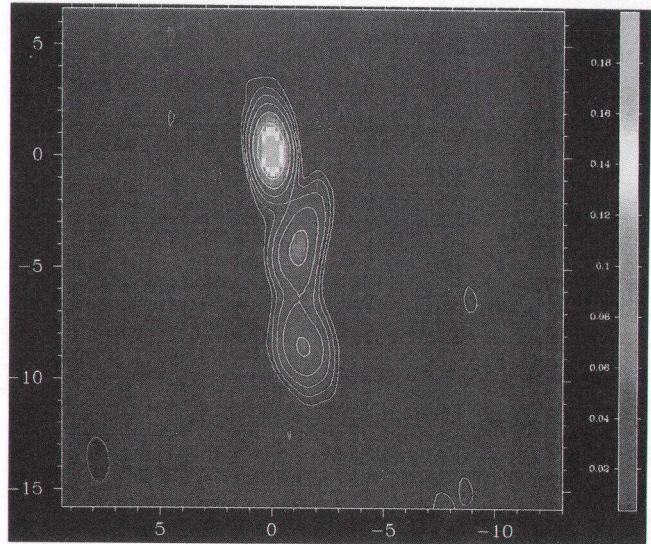


図7：136億光年遠方のクェーサー 0014+813 の VSOP 像 (Hirabayashi et al.)

11. チャンドラがあがった!

1999年夏には本格的X線観測衛星Chandraがあがり、転正観測として、点源のクェーサーPKS0637-752と拡がった超新星残骸Cas Aを観測すると報じられました。PKS0637-752はすでに1万分の2秒の解像度の波長6 cmで、Tingay博士をPIとするVSOP観測がおこなわれ、ジェットが見えていました。活動銀河核での電波からX線にわたる放射メカニズムは、いわゆるSynchrotron-Self-Comptonモデルでつないで考えることができ、X線と電波の同時観測により、物理モデルに制限を与えることができます。こうして、VSOPは2回目の観測のスケジュールを変更して、Chandraとの同時観測をしました。ところが、なんと、Chandraグループが点源だと思っていたX線でもジェットがあったのです。分解能はまったく違うのですが、VSOPがすでに描いていたジェットと同じ方向を示していました。

回転するブラックホールについてはKerrによって調べられ、回転していないブラックホール(シュワルツシルド型)とは違う興味ある性質が知られています。一般相対論の効果によって、シュワルツシ

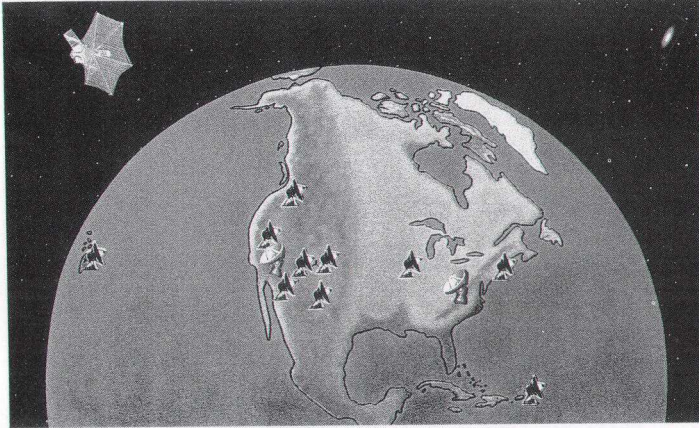


図8：「はるか」をサポートする米国本土のトラッキング局とアメリカ VLBA (Very Long Baseline Array) のイラスト図

ルト半径の外側のエルゴ領域からエネルギーを取り出せるというものです。これは純粹に相対論的力学によるものですが、私たちがみているジェットはこれとはちがって、これよりちょっと外側の複雑なプラズマ力学的現象がもとになっていると思われます。

X線の鉄輝線のスペクトルの形が正確にわかると、シュワルツシルド型か Kerr 型かもわかるはずです。降着円盤の落下に伴うのでしょうか、時間変化もあるようです。「あすか」は、スペクトルの形からだけで、これだけの姿を想像できますが、スペース VLBI は、ブラックホール周辺の姿を直接的に描き出していきます。

12. VSOP が経験した国際性

スペース VLBI では、衛星と地上とは特別な信号のやりとりで結びつく必要があります。衛星「はるか」の受信機の基準となる周波数と位相の信号は地上から伝送します。「はるか」が受けた天体からの電波信号は、128 Mbps の大容量で地上に伝送されて磁気テープに記録されます。衛星の位置を正確に追跡することも必要です。このため、「はるか」専用追跡局網が、世界の5ヶ所に作られました。宇宙研臼田の新設10m局のみならず、NASAの深宇宙ネットワーク(DSN)を構成する米国ゴールドストーン、オーストラリア・キャンベラ、スペイン・

マドリードの3局(各局11m)と、アメリカ国立電波天文台のグリーンバンク局(13m)を含めて5局です。打ち上げ前からのトラッキング局の設計、互換性テスト、打ち上げ後の試験、多くの努力が費やされました。

相関器は、観測局から送られた磁気テープを同時に再生して、時間差、周波数差をいろいろに仮定し、並列処理で電波をつきあわせて、干渉縞の強さと位相を計算する専用コンピューターです。相関局が、国立天文台三鷹、カナダ・ペンティクトン電波天文台、ア

メリカ国立電波天文台に用意されました。三鷹の相関器は宇宙研予算で製作され、天文台で運用されています。これにも多大な努力がすぎ込まれました。

VSOPの瞳をつくるために、公開科学観測に参加する局数は世界の電波望遠鏡群のうち34局、アンテナ数にして88基が、スケジュールに従って参加しています。平均10局前後が参加し、一つの局からみると、平均15パーセント前後の時間参加率です。

VSOP計画では、科学観測を国際連携のもとで行うために、科学運用方針を決める国際委員会VISCを作っています。また、宇宙科学研究所、国立天文台、等の研究者が中心となった実行作業グループVSOGを設け、スケジューリング、衛星運用、相関局運用、地上望遠鏡対応、ユーザー・サポート等に関する幅広い科学運用を世界に向けて行っています。

世界の多くの機関や天文台と協力し、10年にも及ぶ準備と打ち上げ後の努力によって、新しいタイプの観測装置が実現しました。初めてのVLBI観測が成功したのが1967年です。それから30年の進歩によってスペースVLBIが今世紀中に実現できたのです。国が違い、文化が違う多くの機関が協力して、「はるか」とともに共通の瞳をつくって、宇宙の姿をとらえています。これは、人類がつくっ



た、もっとも有機的で大きな拡がりをもった観測装置と言えるでしょう。これも、「はるか」が切り拓かなければならなかった事です。

13. VSOP ができなかったこと

VSOP がめざした最高周波数は 22 GHz ですが、「はるか」のフィードと受信機との間におおきな減衰が発生しています。これは打ち上げ時の影響かと考えています。したがって、VSOP では、22 GHz を通常観測には使用していません。

しかし、Orion KL の水蒸気メーザー源がバーストしたことにより、みごとに干渉実験に成功、マップを得ることができました(図9)。ただし、メーザー源はあまりコンパクトでなかったため、学問的には大事な貢献はできませんでした。スペース VLBI が軌道の不確定、コヒーレンシーの困難などを乗り越え、22 GHz で成功したのは、将来のためにもたいへん心強いことです。

14. さらに未来へ

VSOP は、世界初の試みとしておこなわれましたが、これで終わりではありません。チームは次の計画のニックネームを VSOP-2 として、未来を考えています。

活動銀河核については、更に高エネルギー粒子の加速、ジェット形成と加速、さらには、ブラックホール近傍にも迫らなければなりません。そのためには、もっと解像度が必要です。また興味ある天体を観測したくても、感度が足りないと観測すらできません。また活動銀河核では、短い波長、ミリ波で観測すると、ほんとうの中心まで見やすい事がわかっています。ミリ波で観測すると、おなじひろがりの観測システムでも、波長が短くなっただけ細かな解像度が得られます。

活動銀河核以外にもおもしろい科学が行われます。銀河系内の光速ジェット現象、超新星爆発、パルサーなどです。メーザー源による銀河系内外の、星形成領域と晩期星周辺の物理と距離測定も重要

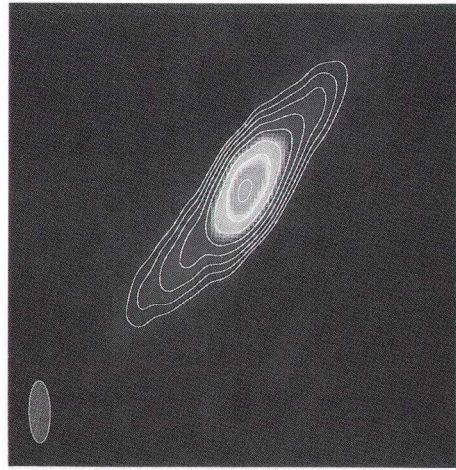


図9：VSOP で得られた Orion KL 天体の 22 GHz メーザー源のマップ(左下は合成ビーム)

ターゲットです。

高感度にするためには、アンテナを大きくする、受信機を高感度にするという2つの方法がとられます。ミリ波まで受信できるためには、アンテナの面の精度が波長の1割以下である必要があります。受信機を高感度にするには、受信機を冷凍器に入れて冷やし、発生する熱雑音を抑える必要があります。

最後に、感度をよくする奥の手は、観測する受信幅をふやす事です。「はるか」は、毎秒1億ビット以上のデータを地上に送ってきていますが、これを毎秒10億ビット以上にしたいと考えています。しかし、この方法は、スペクトル線観測ではメリットがありません。

観測をミリ波まですすめると、軌道決定精度をよくすること、電波の位相をしっかりと把握することなど、いろいろな要素が重なって、加速的に難しくなります。

観測波長 6 cm, 1.3 cm, 7 mm, アンテナ口径 10-15 m, 軌道は「はるか」よりほんのちょっと高め、そして受信機は冷凍器で冷やし、観測バンド幅は 1 GHz 前後にしたとします。これで、感度も解像度も、VSOP の 10 倍が達成されます。M87 で

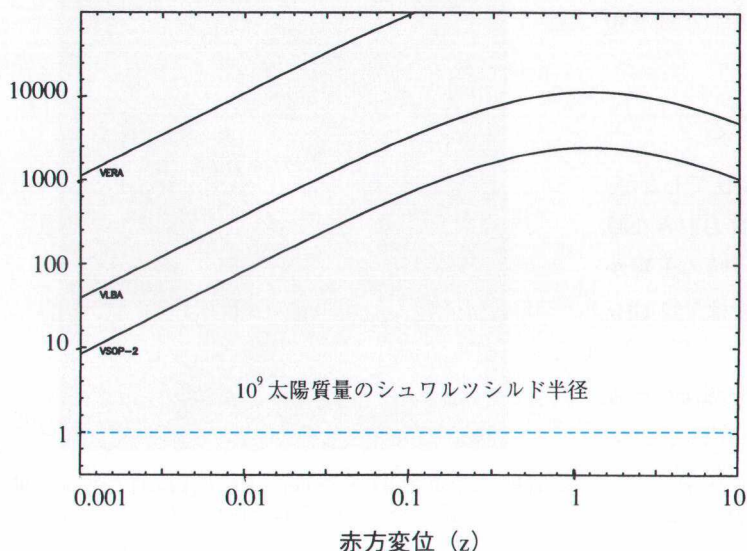


図 10：天体に対する、VSOP-2, VLBA, VERA の解像度を、宇宙距離（赤方変位）に対して周波数 43 GHz で比較。解像度を、10 億太陽質量のシュワルツシルド半径を単位として観測周波数 43 GHz で示している。

いと、そのブラックホールの大きさの 5 倍に迫る解像度です。

天体に対する解像度を、宇宙距離（赤方変位）に対して比較したものが図 10 です。解像度を、10 億太陽質量のシュワルツシルド半径を単位として示しています。おもしろいことに、宇宙論的影響によって、赤方変位が 1 以上の遠い天体では、遠くなくても小さくは見えません。将来の高感度スペース VLBI の期待したいメリットです。

複数のアンテナを宇宙にあげると撮像能力が格段にあがります。しかし、2 個あるいは 3 個の衛星をあげるコミュニティのサイズが問題です。まずは、1 機で最善の科学計画を、次次期の計画で複数の衛星計画を国際協力でしあげるのが、いいのかも知れません。スペース VLBI では、NASA, ESA との協力をどう展開するかも重要です。VSOP-2 では、NASA のみならず、ESA との協力があると、真に全地球的なミッションになるでしょう。

こうして、21 世紀に入って、更なる観測の旅に発ち、観測の地平を切り拓けることを願っています。

参考文献

VSOP のミッションと各種結果については、以下の web サイトを訪ねてください。

<http://www.vsop.isas.ac.jp/>

個別の論文はあげません。以下のミッション論文と上記 web を参照ください。

Hirabayashi et al, Overview and Initial Results of the Very Long Baseline Interferometry Space Observatory Programme, Science, vol.281, pp1825-1829,1998.

A New Horizon Which The Radioastronomy Satellite HALCA Is Pioneering.

Hisashi HIRABAYASHI

The Institute of Space and Astronautical Science

Abstract: The radioastronomy satellite HALCA which was launched in February 1997 is now pioneering the new field of Space-VLBI with the grand new technique. The VSOP program by HALCA with a very big international collaboration has been observing active galactic nuclei and other compact energetic objects. Distant quasar images, jet motion, phenomena surrounding super-massive black holes, etc. are being imaged. The future prospects for space-VLBI are discussed as well.