

VSOP のサイエンスターゲット

平林 久・井上 允*

VSOP Science Targets

By

H. HIRABAYASHI, M. INOUE

Abstract: The VLBI Space Observatory Programme (VSOP) started in 1989, and the observations will start in 1995. VSOP Science targets are reviewed in relation to Japanese VLBI activities. Regions surrounding accreting disks and jets of Active Galactic Nuclei (AGN) will be the most important targets. The physics and distances to water vapor masing regions in and outside the Galaxy can be studied in more detail. VSOP can cover various objects like young supernova and gravitational lensing objects.

概 要

Muses-B 衛星を使用する VSOP 計画は、1989年よりスタートし、1995年より観測が開始される。現在の VLBI 研究との関連から、VSOP 計画におけるサイエンスターゲットについて、特に日本の活動とからめてレビューした。AGN では、地上の短波長 VLBI と共同して、降着円盤周辺からジェットに及ぶ活動をとらえる。水蒸気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は、22GHz 帯の重要ターゲットである。特殊天体として、若い超新星、重力レンズなど、VSOP では多くの分野でユニークな活躍が期待できる。

1. VLBI による宇宙の観測

電波領域では、全電磁波領域の中でもっともエレガントな観測ができる領域ではないだろうか。すなわち、電磁波の振動のコヒーレントなスーパーヘテロダイン増幅、合成、干渉、

* 国立天文台

あるいは記録、再生すらも可能である。これらの技術をくみあわせた先端に VLBI 観測がある。TDRS 衛星を使ったスペース VLBI 実験により、VLBI は宇宙空間を含めても可能であることが具体的に証明された。宇宙研が準備をすすめているスペース VLBI 計画 (VSOP 計画) の概要、観測の仕方、観測対象についてのべる。

2. VSOP 計画の概要

VSOP (VLBI Space Observatory Programme) は、1995年1月打ち上げ予定の電波天文衛星 (Muses-B) と地上の電波天文台群と結合してスペース VLBI 観測を行うものである。

電波天文用アンテナは直径10mで面精度0.5mm, 22GHz帯, 5GHz帯, 1.6GHz帯を受信周波数帯とする。特に感度の厳しい22GHz帯は、スターリングサイクル方式の冷凍器により80Kまで冷却する。最大観測バンド幅は64MHz。

打ち上げには、宇宙研の新しいロケットM-Vを用いる。衛星の軌道は、遠地点高度20,000km, 近地点高度1,000km, 軌道傾斜角 46.4° (周期約6時間) である。この軌道上のVSOP衛星と地球上のアンテナとを組み合わせると直径3万kmの開口が合成され、地上のVLBIに比べて、3~5倍の分解能でクリアな電波像が得られる。これは、点電波源に対する10~30倍の感度の向上になる。地上の受信アンテナ群と衛星とは、相互に位置をかえてゆくので、UV-coverageのサンプル具合がよく、地上VLBIにくらべて遙かに高画質の電波像が得られる。

VSOP衛星は、地上からの位相リンク、IF信号の広帯域ダウンリンク、高精度ドップラートラッキングのために、地上テレメトリ局の連続的な支援が必要である。そのため、鹿児島20m局と、NASA/JPLの深宇宙ネットワーク (DSN: Deep Space Network) の三局などでテレメトリ網をつくる。協同観測網として、1993年完成予定のVLBA, ヨーロッパやオーストラリアなどのVLBI網 (EVN: European VLBI Network, AT: The Australia Telescope) や、個別の望遠鏡群を想定している。地球の自転とともに地上の電波望遠鏡群は、統一のとれたスケジュールに従って共同観測をする。観測後、記録テープを持ち寄って、配置を考慮しながら干渉させ、天体の映像をつくり出す。

世界の多くの機関や天文台と協力したプロジェクトであるので、観測テーマは国際的に評価される。衛星システムの製作と併行して、国際的な取り組みも進められている。観測運用は衛星寿命の続く限り、3~5年程度を想定している。

3. AGN の観測

VSOPによる分解能の向上により、もっとも近いAGNであるCen Aでは、一光日にもおよび構造に迫れる。もっと遠いAGNでも、降着円盤から直接ドライブされる領域に迫ることが可能になろう。VSOPの画質の向上により、分解された芯の領域とジェットと関連や、ジェットの加速・放射機構を明らかにする。観測的にはすでに北天の地上VLBIで観測されている3C84, 3C273, 3C279, 3C345など、充分明るいVLBI源から観測をする。南天では未開拓の電波源が多い。また、我々の銀河中心は赤緯が低いので、VSOPの出現によりきちんとした観測が可能となる。南北のアンテナと結んで5cm, 1.3cmでのマッピングは大いに期待できる。

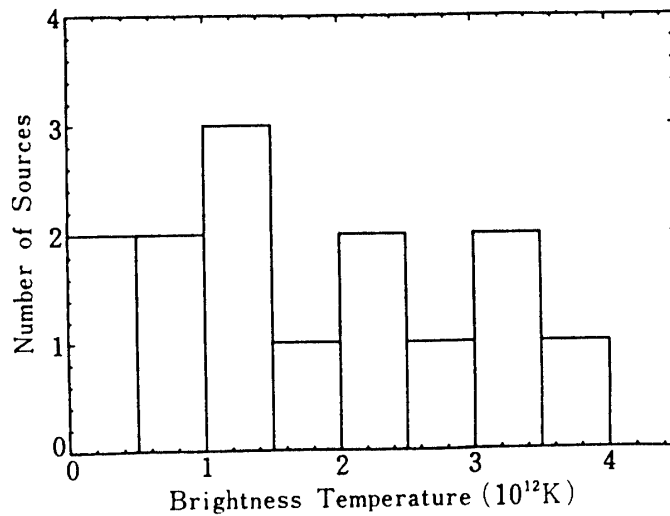


図1. TDRS衛星の実験によってえられた輝度温度のプロット (s-bandの例). 横軸は逆コンプトンリミットと考えられる一兆度を単位とする.

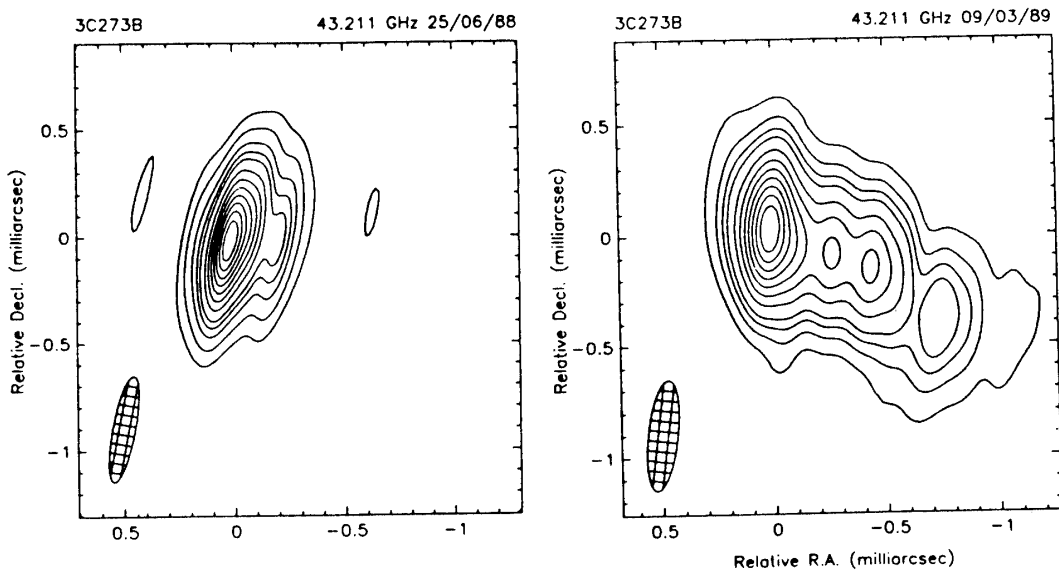


図2. 3C273Bの7mmでのVLBIマップ. フレア後の6.5ヶ月間の違いが見える.

TDRS衛星を使ったスペースVLBI実験では、スペースVLBIが可能であることを具体的に示しただけでなく、重要な科学的結果がえられた。シンクロトロン放射の理論によれば、逆コンプトンリミットにより、 10^{12}K で急激に emissivity が落ちる。TDRS実験の不十分なサンプリングデータから、モデルフィッティングでサイズを求め輝度をはかると、大半が 10^{12}K を超えていることがわかった。(図1) これはTDRS実験の分解能ではじめてわかったことである。これらの放射領域が、観測者に向かって高速で飛び出しているために相対

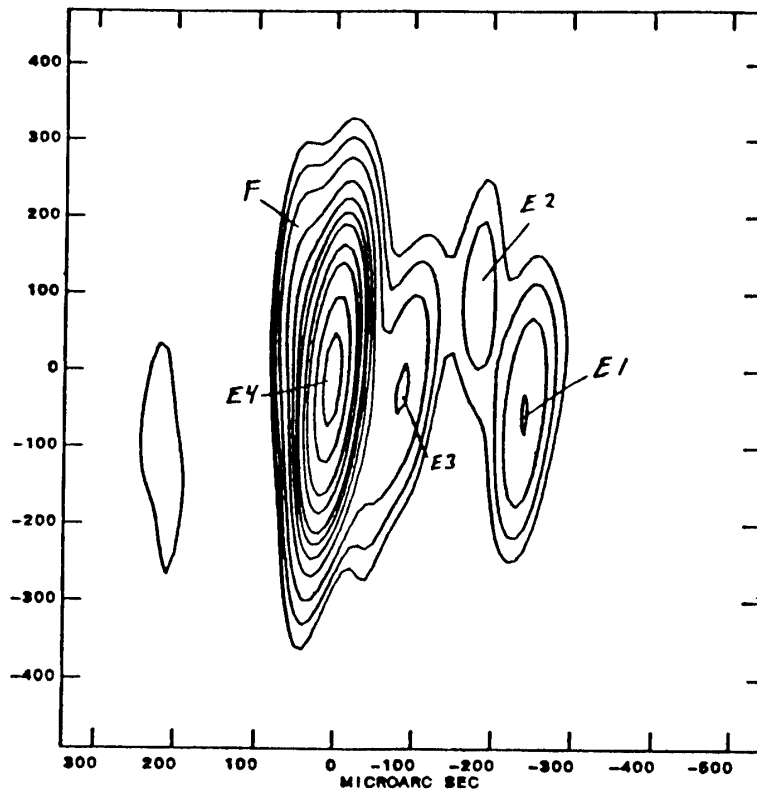


図3. 3C273B のフレアー中の超微細構造マップ (3 mm). 分解能は50マイクロ秒角.

論的ビーミングの影響を受けているためと解釈できる. TDRS 実験と VSOP では, 最大基線長はほぼ同じ 3 万 km である. VSOP では, モデルフィッティングに依らず, マッピングにより, AGN の各部の輝度をはかることができる.

野辺山をふくめた世界のミリ波局によるミリ波 VLBI が, 7 mm, 3 mm で可能となってきた. ミリ波 VLBI では, VSOP の 1.3cm とほぼ同じ分解能で, AGN の観測ができる. 波長が違うことで, ミリ波 VLBI はより芯の方を, VSOP は芯からジェットにかけての情報を与え, 両者は相補的な関係にある. ミリ波 VLBI も VSOP も感度では他の地上 VLBI に劣るので, 両者は共通の強みと弱みをもっている.

図2と図3に, 3C273についての3mmと7mmの興味あるVLBIマップを示す. ちょうどこの時フレアーがあったので, それにともなう6.5ヶ月間の成分の動きが2枚の7mmマップに見える. 図2の初期に飛び出している成分は半年後に図2右の一番外側まですすんでいる. すなわち, その後2回の小規模フレアーにともなう飛び出しが見える. 図3の3mmマップは図2のもとになったフレアー中のものである. 3mmマップでは, 各成分は, 同じ position angle 上には並んでいない. ここで強調されるべきことは, このような超微細構造の変化を追う場合には, 週あるいは月オーダーのモニターと多周波での同時期観測が必要ということである. そうでないと, ある時期にある周波数でこんな絵ができましたというだけで, AGNに迫る広い科学を進めるのには不十分の感がある.

4. メーザー源と位置天文観測

衛星の軌道測定精度、時刻・位相の同期の精度等から考えて、基線長にみあうだけの絶対位置の精度が上げられないが、アンテナビーム内にせまく集まった電波源の相互位置は、0.1ミリ秒角あるいはそれ以上の精度で決定できる。

メーザー源（1.6GHz OH線、22GHz H₂O線）の運動と変光との関連から、星の外層大

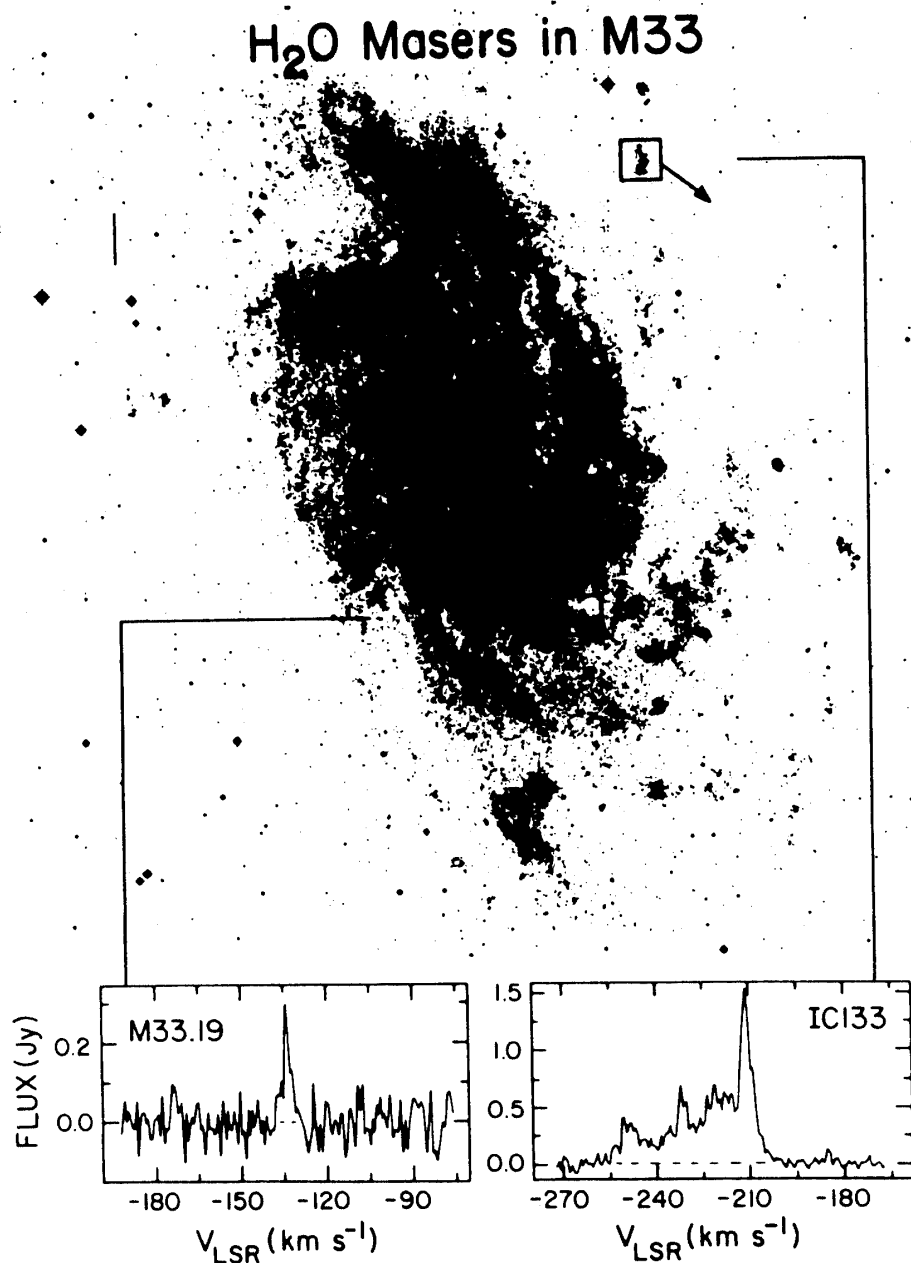


図4. M33の2つの HII 領域 IC133と M33.19と、その水蒸気メーザースペクトル。

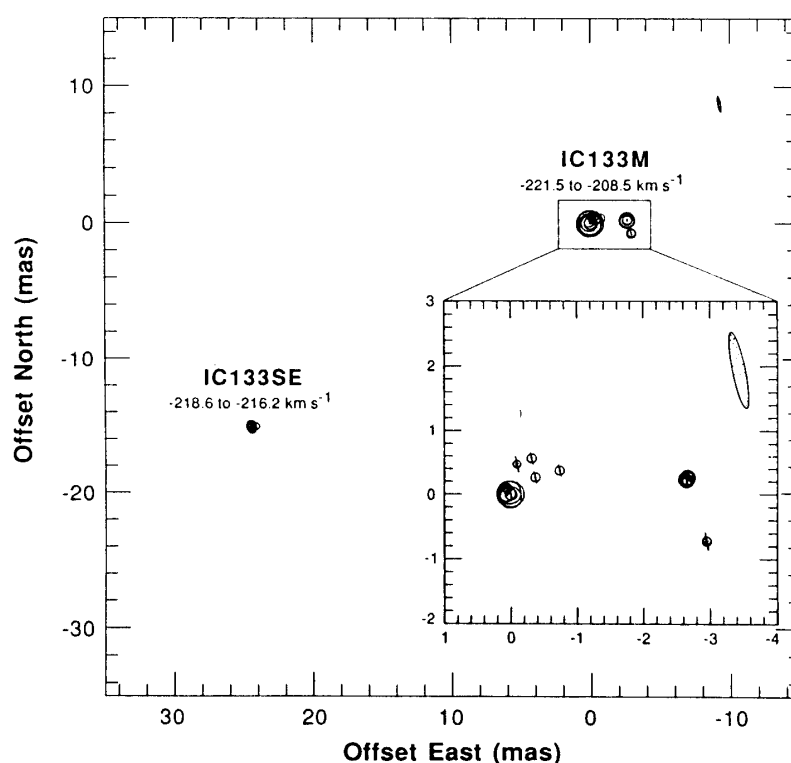


図5. M33のHII領域IC133の水蒸気メーザー源のスポットのVLBIマップ(銀河系外で初めてのマップ)。

気の運動・構造が調べられる。星生成領域の水蒸気メーザー源の運動を測定して距離を推定する方法(統計視差法)は、位置決定精度の向上にともなって、2年間隔の測定で銀河系外にまで適用できる可能性があるが、感度がきびしい。

すでに銀河系内では統計視差法により、W51, Ori A, Sgr B2, W49などで、距離がはかられているが、系外銀河M33についてその試みが始まっている。

筆者を含めた国際VLBI観測チームは、系外銀河M33の中の星生成領域の H_2O メーザー源観測に取り組んでいる。M33は750kpcの距離にあるとされており、銀河系外に距離測定をのばしてゆく際の重要な一里塚である。M33の銀河腕の反対方向に、二つの生成領域(IC133とM33/19)がある。(図4)銀河の回転によって、両者の相対位置がかすかにかわってゆくのもVLBI観測で直接測ることができる。

スポットの速度を30km/sとすると720Kpcの距離では、0.01mas/yの固有運動となり、これが測定できれば、統計視差法で距離が出せる。また、二つの対向する領域の相対位置変化は、銀河回転($\sim 300\text{km/s}$)により、0.1mas/yとなる。野辺山も含む国際VLBIによって、初の銀河系外 H_2O メーザー観測が、上記のような問題意識で始まっている。現在、M33のHII領域IC133について第1回目のマップが得られている。(図5)

さらに遠くの系外銀河の中には、メガメーザー源と呼ばれる。通常の星生成領域よりはけた違いに大きなフラックスを示すメーザー源が見つかり始めている。それらの多くは銀河中

心から放射されている。NGC3079に対してオーエンスバレイとボンで行われたVLBIの例もある。VSOPの感度で受かりうるものとして3天体があり、その中でも最も遠い距離にあるものがNGC3079である。このようなメガメーザー源では、感度的にも分解能の点でも大いに厳しいが、分解能についてより厳しく、スペースVLBIに期待される分野である。

5. 超新星、パルサーなどの星状天体

何回かのVLBI観測から、超新星のシェルの拡がり角速度を測定できる。光と電波のシェルが同じ領域からであるとすると、光のドップラー効果から決めた速度と比較して、超新星までの距離を決めることができる。銀河の赤方変位と比べて、ハッブル定数を独立に決めることもできる。これはすでに地上VLBIでSN1979Cにたいして行われている。VSOPでは感度の面できびしいが分解能がよいので、短いタイムスケールで仕事ができる。したがって、ミッションライフ中に電波の強い超新星がなければならない。もちろん、距離の測定のみならず、超新星のひろがりの姿が直接見えると、超新星と星間のショックについての研究ができる。

近年の超新星の距離と5GHzでの電波fluxを表1に示す。

表1

超新星	銀河	距離	5GHz flux
SN1979C	NGC4321	11.8 Mpc	7 mJ
SN1980K	NGC6946	7.1(10.5)Mpc	2.5 mJ(100日後)
SN1986J	NGC891	Virgo Cluster Center	128 mJy max

3年に1回ほど、この程度のもので出現する事がわかる。感度的にはVSOPでは、SN1986Jクラスであると観測可能である。VSOPのミッションライフにうまくマッチして、超新星が出現すれば、重要な貢献が期待できる。

最近、銀河NGC891中の超新星SN1986Jについて、初めてのVLBIマップがえられた(N. Bartel, private communication)。この予備的マップ(図6)によると、シェルが見えており、シェルの避け目から高速の成分が抜け出しているように見える。より本格的な、2回目の観測が、最近FIIも含めて行われた。超新星のひろがっていく姿をムービーとしてとらえられる時代に入った。

パルサーについては、直接分解は無理であるが、クェーサーなどとの相対位置観測により、固有運動・年周視差がはかれる。年周視差から距離が直接もとめられ、固有運動と組み合わせて、接線速度が直接もとめられる。感度が足りれば、球状星団中のパルサーの固有運動を背景のAGNに対して測ると、球状星団の動き、ひいては銀河の質量を出すことが可能となるが、観測的にはきびしそうである。

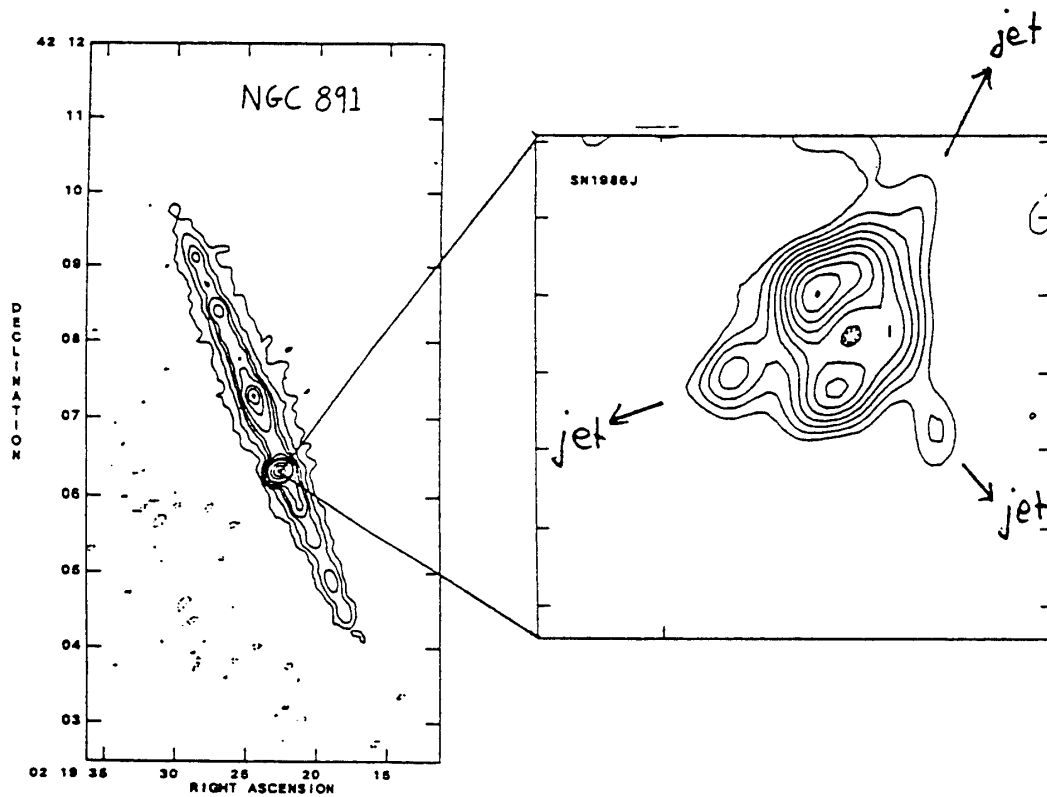


図6. NGC891中の超新星1986Jの1988.75時の8GHz VLBI マップ (N. Bartel et al による).

6. 特殊天体, 重力レンズなど

重力レンズの存在は、すでいくつかの観測例で決定的となっている。AGNと重力レンズと観測者がほぼ一直線上にあると、像はリング状に見える場合があり、これはアインシュタインリングと呼ばれている。このような天体はすでに Hewitt et al によって、北天で発見されているが、さいきん南天でべつの例がみつかった (D. Jauncey, private communication)。この天体1830-211は、北天のリング G11310456に比べて3桁も強い電波を出しており、直径が1秒とかなり見かけが大きい。北天の例と同じく、2つのコンパクト成分をもっていて、これは同一のもののイメージと思われる。図7に2つの天体のマップを示す。

最近、臼田・鹿島とオーストラリア間で、1830-211のVLBI観測を行った。直径が1秒と大きいので、ふつうの国際基線では、干渉縞が時間とともにめまぐるしくビートしてしまい、積分時間がかけられず観測が困難である。ところが、オーストラリアー日本だと、基線長は長いが南北の地球自転軸に近い基線なので、基線ベクトルは甚だしくは変化しないので観測しやすい。何回かの観測で時間変化を追い、2つのコンパクト成分の光路差が出せると、たいへんおもしろい展開となると期待している。

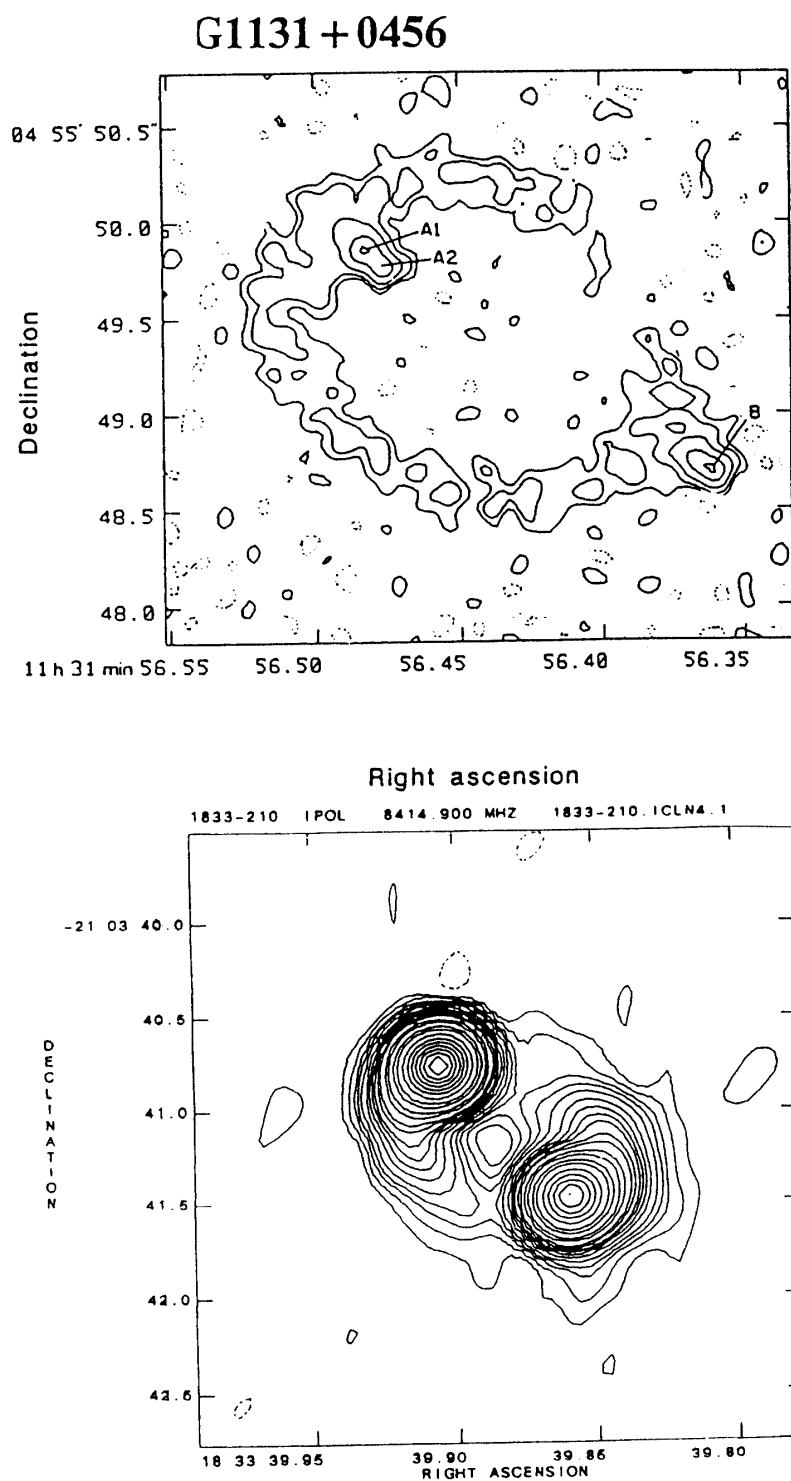


図7. 北天のアイシュタインリングMG11310456, VLAによる15GHzマップ(上図). 南天で発見されたアイシュタインリング1833-210の15GHzマップ(下図). どちらもリングと2つのコンパクト成分をもつ. 両図のスケールは同じ.

7. VSOP 観測のスケジュール

VSOP では、高空間分解能・高ダイナミックレンジの電波像を得ることを主目標とする。地上 VLBI に比べ、観測衛星は軌道がある程度自由に選べるので、効果的な軌道と観測を考えることができる。その時の軌道面の直角方向で高分解能の画像が得られるが、軌道面内に近い方向では一次元的なビームによる画像になってしまう。Muses-B は、地球の非球ポテンシャルにより、近地点引数と昇降点赤経がほぼ2年で1回転する。従って、2年間で全天方向を観測できる

また VLBI 観測では、UV-coverage が異なると、観測ビームの形や感度が異なり、観測・解釈上で困難をきたす。したがって、ある周期で軌道が回帰すると、同じ UV-coverage で同一条件の観測を行うことができ、電波源のきわめて細かな変化を検出できる。Muses-B は、軌道傾斜角を46.4度にしたことは、約2年後に軌道が回帰するようにきめられた。VSOP ではこれらの軌道変化を積極的に利用して観測をする。初期投入軌道と観測計画は、天球上の観測天体の分布と上記摂動と衛星の打ち上げ制限条件とを考慮して決める。

図8は、ひとつの観測天体の UV-coverage の推移を示すものである。すなわち、AGN の例である3C273の場合のビームのかたちの変化である。

衛星の設計寿命は1年であるが、現実的には3年の寿命があると想定して進めている。そうすると、チェックアウトの時間をいれても、全天の方向についての観測ができる。チェックアウトは、衛星単体のチェックアウトと、干渉計としてのチェックアウトがあり、通常の

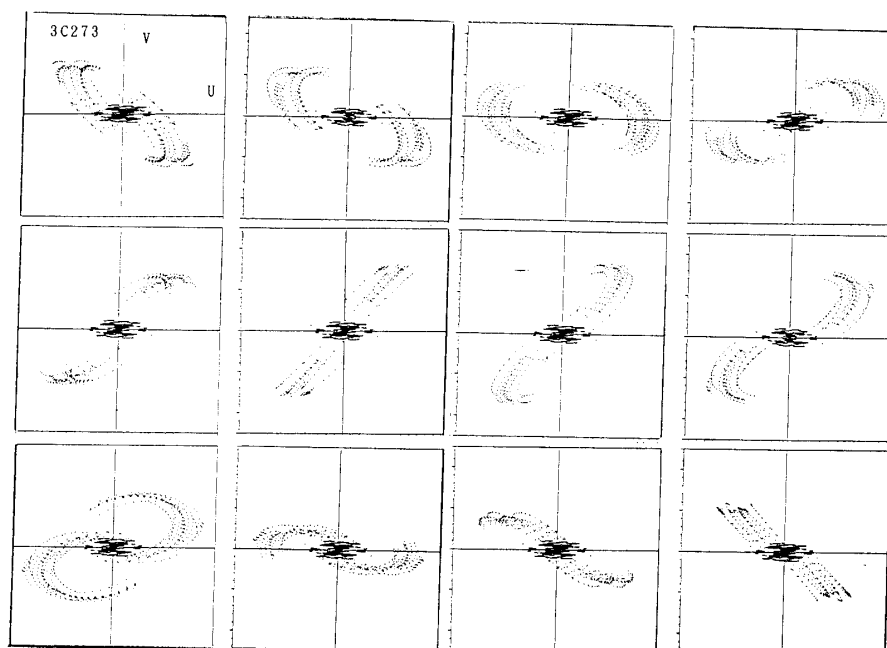


図8. VSOP の観測時期によって、その UV-coverage が異なる。図は3C273についての例を2ヶ月おきに示す。図は2年分を、左から右へ、そして上段から下段にと続く。

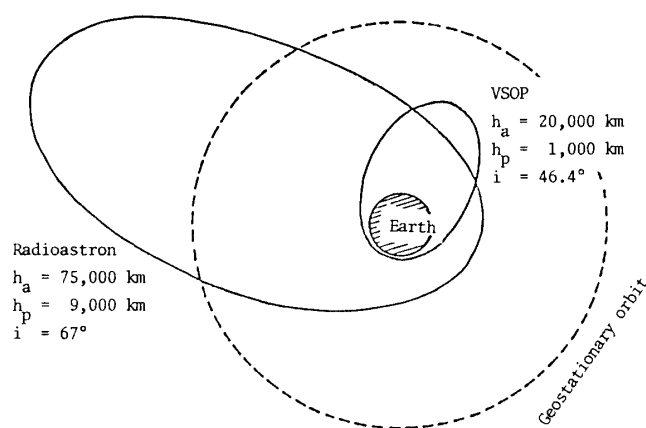


図9. ラジオアストロン衛星とVSOP衛星の軌道の比較。
(両者の軌道を赤道面上にかいてあるので、実際は軌道傾斜角(i)を考慮すること)

衛星より手間がかかると思われる。

ソ連のラジオアストロン衛星は、強力な打ち上げ能力をもとに、高い軌道による高分解能をねらい、24時間周期で北半球に遠地点を持ち、軌道面は天球に固定するという特徴をもつ。(図9) これは高分解能指向であり、画像の質を犠牲にした、検出を主としたミッションである。ラジオアストロン衛星の打ち上げ年度がはっきりせず、日本が先になることも十分考えられる。運用時期がオーバーラップした場合、観測的には、

- a) 衛星—地上間の干渉情報をマージして、よりよいマップをえる
- b) 特に強い電波源に対して、衛星—衛星干渉をさせる。

などの共同研究がありうる。

8. おわりに

Muses-B を使った VSOP 計画は、国際的に大きなひろがりを持つプロジェクトである。この計画を成功させるために努力すべき項目を列挙すると、a) 衛星の製作と打ち上げ運用、b) 地上支援施設 (相関センター、運用センターなど) の整備、c) 運用と観測の国際組織化、d) 日本の VLBI サイエンスの充実、などがある。ここでは特に、VLBI 関連の研究層の充実の重要性を指摘したい。この講演では、特に日本でのアクティビティにからめて発表した。VSOP 観測が始まる前に、宇宙研をふくめた日本で、地上 VLBI の研究がもっとすすむようでありたい。

参考文献

- [1] 平林 久, VSOP 計画—その概要と現況—, 1990年宇宙電波懇談会集録
- [2] 平林 久, 地球規模から宇宙規模への VLBI 観測, 学術月報, 42巻, 12号, pp1087-1093, 1989.
- [3] 井上, 活動銀河中心核. 宇宙ジェット, 学術月報, 43巻, 1号, pp49-58, 1990.
- [4] 平林 久, スペース VLBI 実験チーム, TDRS 衛星を使ったスペース VLBI 観測, 宇宙科学研究

- 所報告 特集, 第23号, pp95-104, 1989.
- [5] Levy, G.S. et al, VLBI Using a Telescope in Earth Orbit.
I. The Observations, *Astrophys. Jour.*, vol. 336, pp1098-1104, 1989.
- [6] Linfield, R.P., VLBI Using a Telescope in Earth Orbit
II. Brightness Temperature Exceeding Inverse Compton Limit, *Astrophys. Jour.*, vol. 336, pp1105- , 1989.
- [7] Linfield, R.P., 15GHz Space VLBI Observations Using an Antenna on a TDRSS Satellite, *Astrophys. Jour.*, vol. 358, pp350-358, 1990.
- [8] Krichbaum et al, 43 GHz-VLBI Observations of 3C273 After a Flux Density Outburst in 1988, submitted to *Astr. and Astrophys.*
- [9] Greenhill et al, VLBI Observations of H₂O Masers in the Galaxy M33, submitted to *Astrophys. Jour.*
- [10] 平林 久, VSOPによるラジオアストロメトリー, アストロメトリーと銀河系天文学研究会(国立天文台)集録, pp53-63, 1990.
- [11] 平林 久, スペースにおけるラジオアストロメトリー, 1989年度経緯度研究会(大学セミナーハウス)集録, pp281-288.
- [12] *Frontiers of VLBI*, Edited by Hirabayashi, H., Inoue, M., and Kobayashi, H., Universal Academy Press, in press