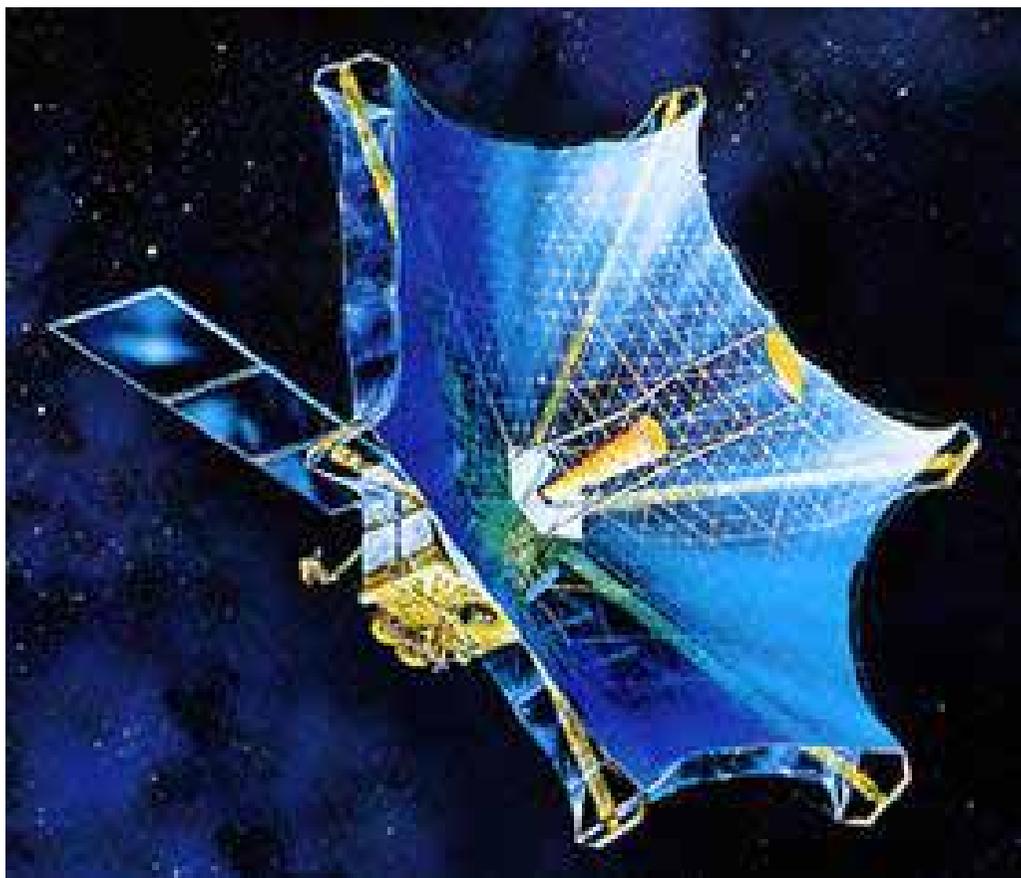


「はるか」の成果と運用終了について

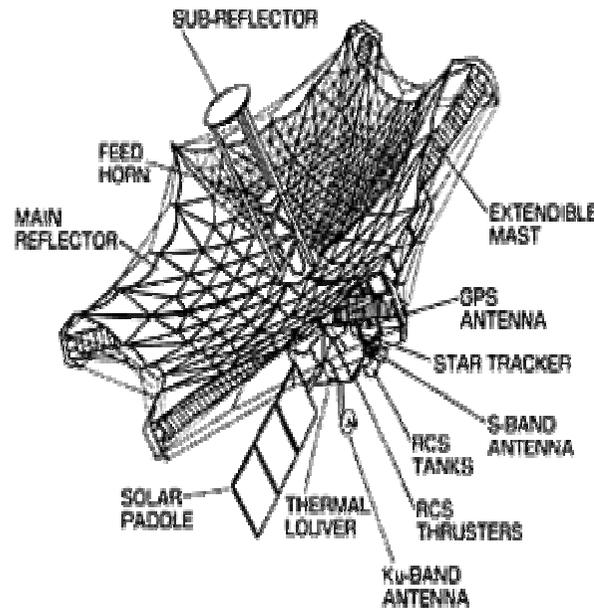


平成17年11月2日
宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究本部 教授 平林 久

「はるか」の概要

「はるか」は平成9年2月12日に、M - V初号機により打ち上げられ、地球周回の長楕円軌道(近地点高度約560km、遠地点高度約22,000km)に投入された。

「はるか」は大型パラボラアンテナの展開と精密な鏡面の形成など、スペースVLBI(世界中の地上電波望遠鏡と協力して「超長基線電波干渉法」という手法で行う観測)に必要な工学技術の実験を行い、搭載された電波天文観測装置により、スペースVLBI観測を実現し、「活動銀河核」に代表される天体の高エネルギー物理現象を解明するために、国際共同のスペースVLBI観測(VSOP計画)を行う事を目的とした衛星であり、ミッション期間3年を想定して製作された。



「はるか」緒元

軌道(現在)

遠地点高度 21,300 km

近地点高度 540 km

軌道傾斜角 31度

軌道周期 6.3時間

衛星重量 830 kg

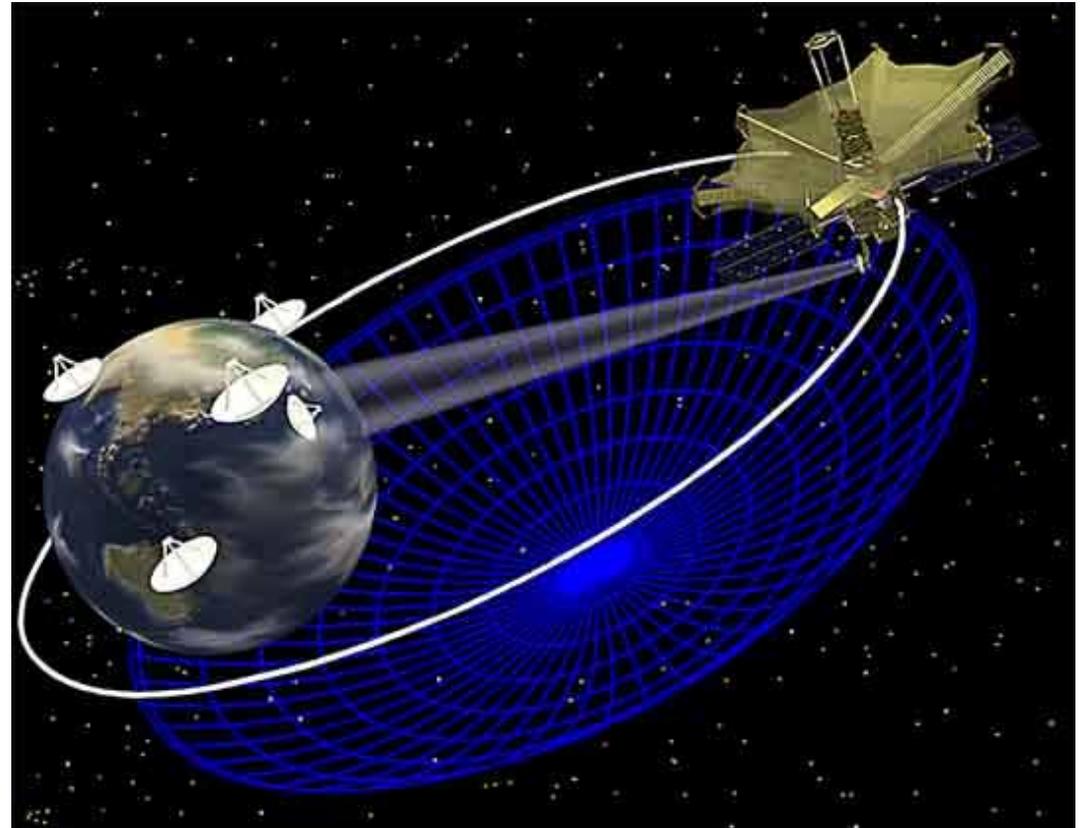
アンテナ口径 約8 m

観測帯域 1.6, 5, 22 GHz

スペースVLBIとは

離して置いた望遠鏡の観測信号を合成することにより、一つの大きな望遠鏡の代わりをなすものが干渉計である。さらに、地球規模に離れた望遠鏡の信号を合成する干渉計がVLBI (超長基線干渉計) である。

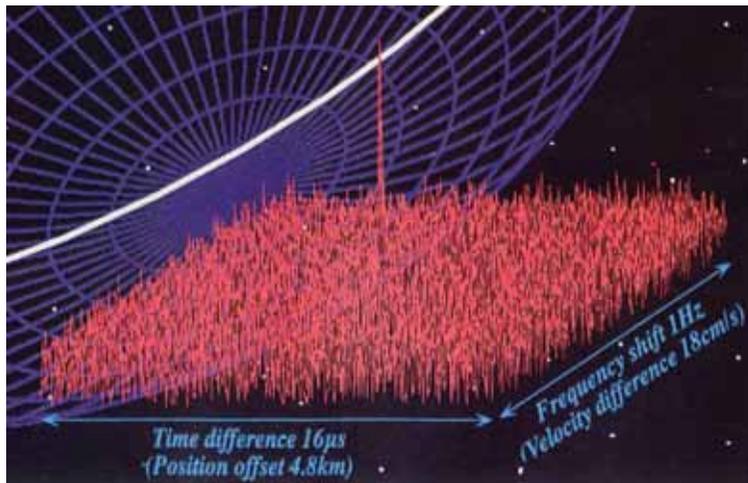
この技術をもとに、宇宙空間に望遠鏡を置くことにより、より大きな鏡面を実現し、より解像度の高い望遠鏡ができる。それがスペースVLBIである。「はるか」を使用したスペースVLBIによる観測計画をVSOP (VLBI Space Observatory Programme) 計画という。



「はるか」の工学的成果

- ・「はるか」は、世界で初めて、スペースVLBI観測を行う上で必要となる、
 - 高精度大型展開アンテナ
 - 柔軟構造物の姿勢制御
 - 位相伝送
 - 広帯域データ伝送
 - 高精度軌道決定などの工学的な技術を実証した。

- ・さらに、衛星と地上間で電波干渉実験に成功し、最高1万分の3秒角という、ハッブル宇宙望遠鏡の100倍以上の撮像観測に成功し、スペースVLBI観測の技術を確立した。

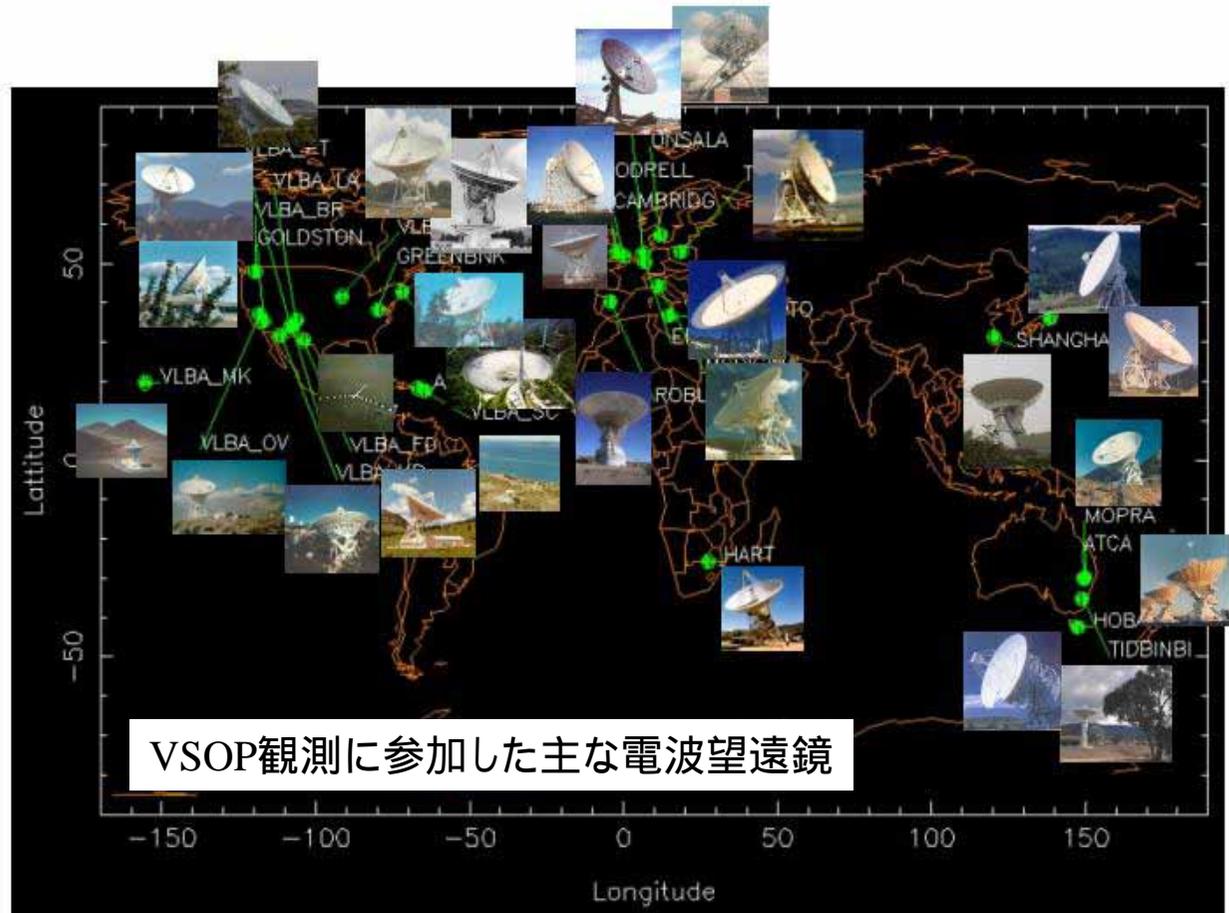


VSOPでの国際協力

- ・スペースVLBI観測ミッションとしての運用方法を確立し、衛星の定常運用と大規模な国際協力のもとにVSOP観測計画を実施した。このために衛星トラッキング及び軌道決定などで協力するNASAとは、5年間の協力を行った。

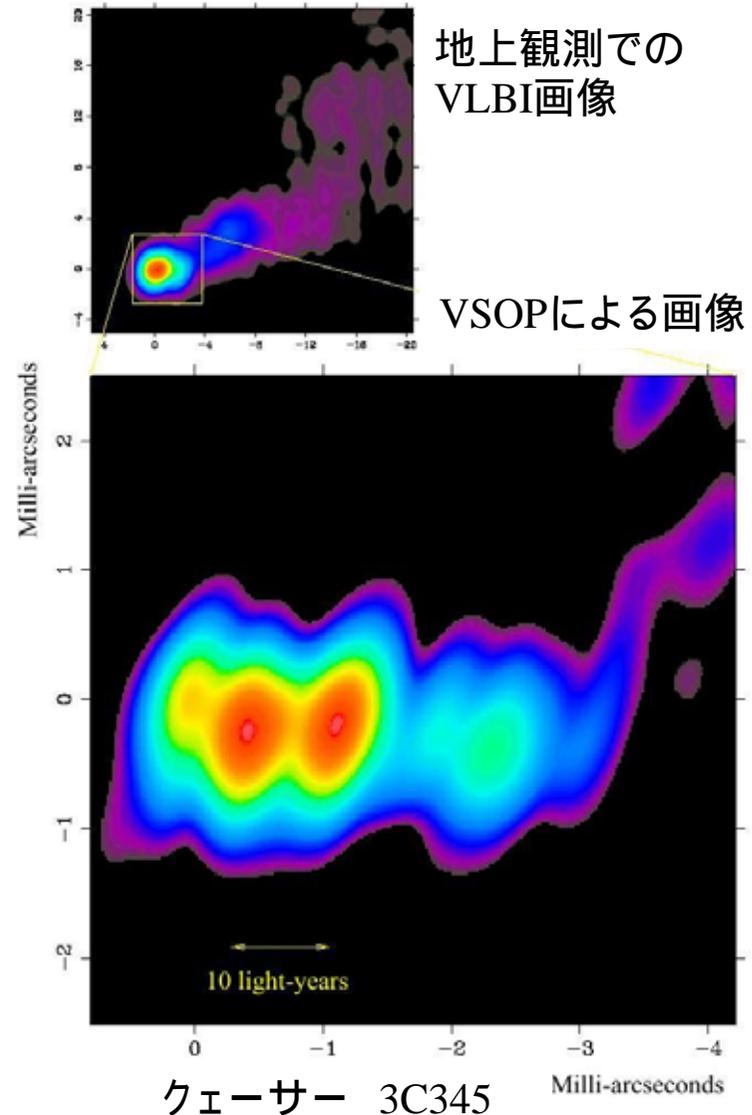
国際協力機関

- JPL/NASA
- NRAO
- DRAO/CSA
- EVN/JIVE
- ATNF
- その他の天文台、研究所
(4カ国、5局のトラッキング網)
(14カ国、32の電波望遠鏡)
(3カ国、3つの相関局)



「はるか」の観測成果

- ◆ 「はるか」は、平成9年の打上げから平成15年まで延べ約750回余りの観測を行った。観測は、公募観測とサーベイ観測に分けられており、公募観測については、5回の観測公募を行い、500回余の公募観測を行った。
- ◆ VSOP観測では、活動銀河核のジェットなどの最高解像度の画像を得ることに成功した。主な成果例をあげると以下のとおりである。
 - まっすぐに発射されると考えられていたジェットの根元が、より複雑な構造であることを明らかにした。(参考図版1参照)
 - 4年にわたるモニター観測の結果、活動銀河核からのジェットのうねり構造をとらえることに成功した(参考図版2-1、2-2参照)。
 - 活動銀河核のジェットの影を通して、超巨大ブラックホールの周りにはあるプラズマ円盤の存在と状態を明らかにした(参考図版3参照)。
 - サーベイ観測などにより、多くの高輝度温度天体を確認した(参考図版4-1、4-2参照)。



IAAチーム栄誉賞の受賞

「はるか」を中心にスペースVLBIを世界最初に実現した国際VSOP (VLBI Space Observatory Programme) チーム (宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と国立天文台及び世界の研究機関のメンバーで編成) が、IAA (International Academy of Astronautics) より今年のチーム栄誉賞 (Laurels for Team Achievement Award) を受賞した。福岡でのIAC2005の初日の10月16日 (日) に、受賞講演及び受賞式が行われた。



IAAチーム栄誉賞は2001年に創設され、宇宙航空関係の分野で科学者、工学者、マネージャー達が一体となって輝かしい成果をあげたチームに授与されている。これまでの受賞は、以下のとおりである。

- ミール宇宙ステーションチーム (2001年)
- スペースシャトルチーム (2002年)
- SOHO (太陽・太陽圏観測所) チーム (2003年)
- ハッブル宇宙望遠鏡チーム (2004年)

「はるか」の運用状況

- ・ 平成 9年 2月 「はるか」打上げ
- ・ 平成12年 2月 当初予定のミッション期間(3年)経過
- ・ 平成15年 1月 三軸姿勢制御の維持が不可能となり、観測停止
- ・ 平成15年 7月 三軸姿勢制御に復帰し、観測を再開
- ・ 平成15年10月 再び三軸姿勢制御維持が不可能となり、観測停止
- ・ 平成16年10月 運用を週6日から週1日に切り換える。

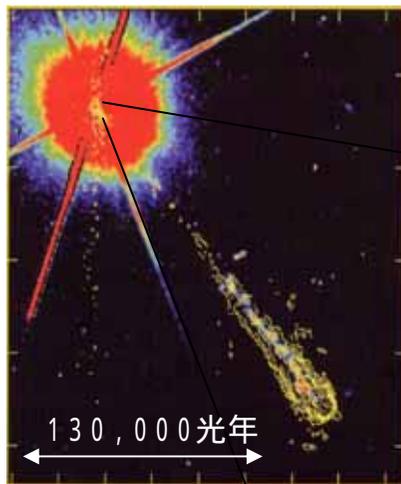
三軸姿勢制御維持が不可能となった原因は、4台のリアクションホイール(RW)のうち2台が停止したため。

現在は観測に要求される姿勢制御が行えないため観測運用を停止している。平成15年7月の経験から、温度上昇によりRWの再起動の可能性があったため、これまでに高温起動を試みるコマンドを約15,000回程送信する等復旧を試みている。

今後の措置

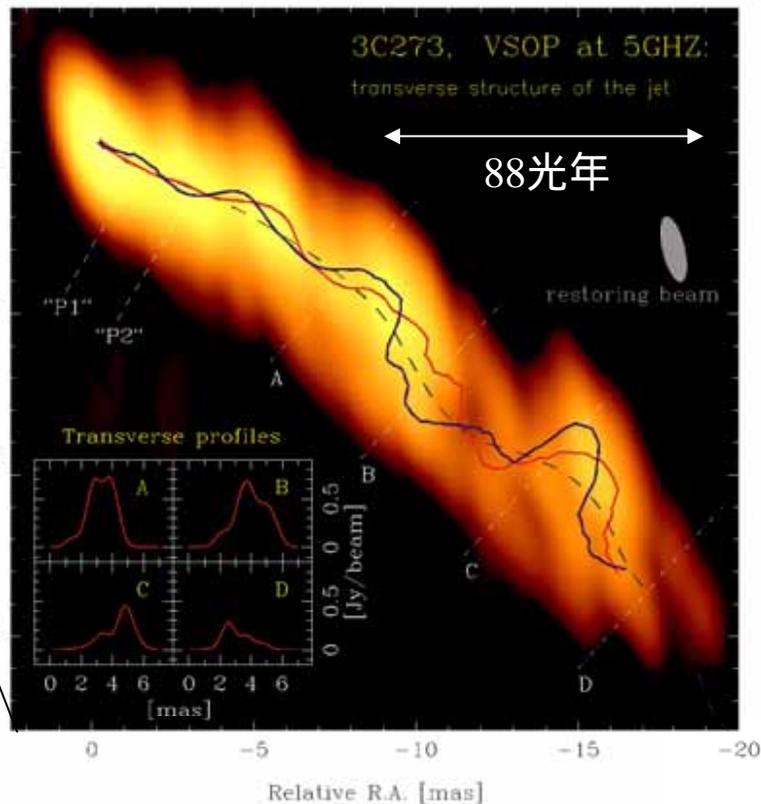
- ・ 「はるか」は、これまで設計寿命(3年)を大幅に超える運用を行い、当初の計画を十分満足させる以上の成果を挙げていることから、現在の衛星の状態に鑑み、ここで運用を終了させることについては、国際チーム内でも、宇宙科学研究本部工学委員会及び理学委員会を通じて関係者の了解は図られている。
- ・ 既にスラスター燃料もほとんど無く、これ以上の復旧作業は困難であると判断し、電波発信停止を平成17年11月中に完了させ、衛星の運用を終了させることとしたい。
- ・ なお、「はるか」の公開公募観測で取得したデータについては、相関処理後18ヶ月で観測提案者の使用権利が切れ、一般の研究者に公開される。データは、もともと各相関局(国立天文台、NRAO(米国)、DRAO(カナダ))でそれぞれアーカイブされていたが、それを宇宙科学研究本部に集中し、PLAINセンターのDARTSシステムからオンラインで公開するためデータアーカイブ作成作業を行っているが、これを継続する。また、協力機関との仕事の残務整理を行う。
- ・ このような作業を完了して、平成18年3月末をもって、「はるか」プロジェクトを終了するものとする。

参考 図版1 「螺旋状に吹き出すジェット」



HSTによる画像

VSOPによる画像

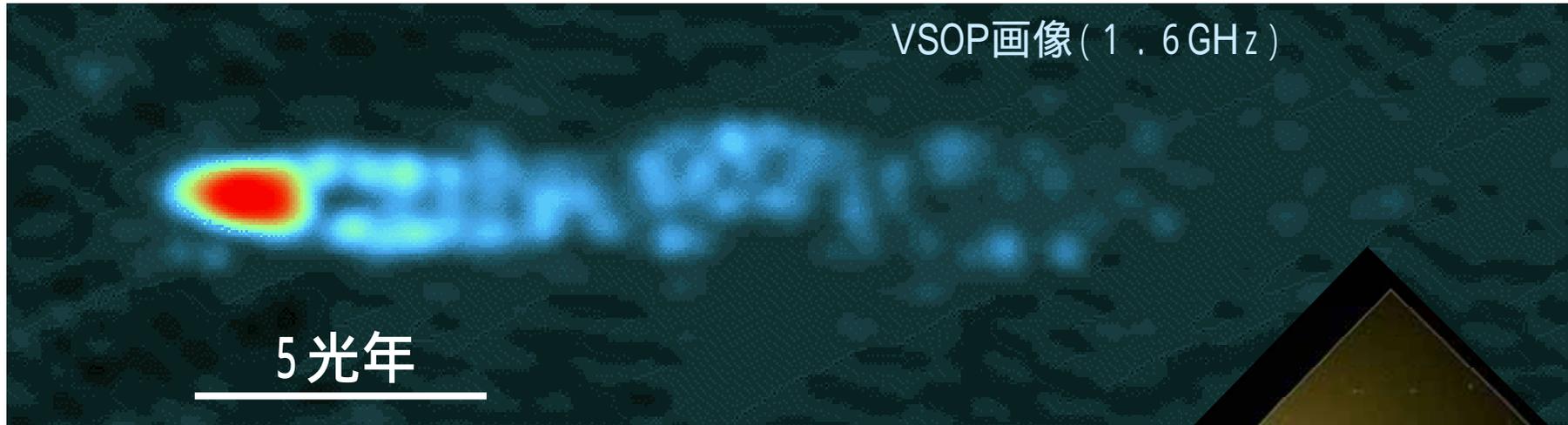


ブラックホール周辺から出るジェットの想像図

クェーサー3C 273のジェットと二重稜線構造。図の左上端が中心核で、右下方向にジェットを噴き出している。

3C 273は地球から約25億光年の距離にある銀河の中心核で、太陽の約10兆倍もの明るさで輝いているクェーサーである。VSOPの高分解能でジェットの構造を詳細に調べた結果、ジェットの明るい部分をたどっていくと、中心軸(黒い破線)にからみつくような二重螺旋状(図の赤線、青線)の構造が見える。これはジェットの中でプラズマの流れが複雑に絡み合った結果(Kelvin-Helmholtz不安定性)と考えられる。

参考 図版2 - 1 「中空円筒状で始まるジェット」

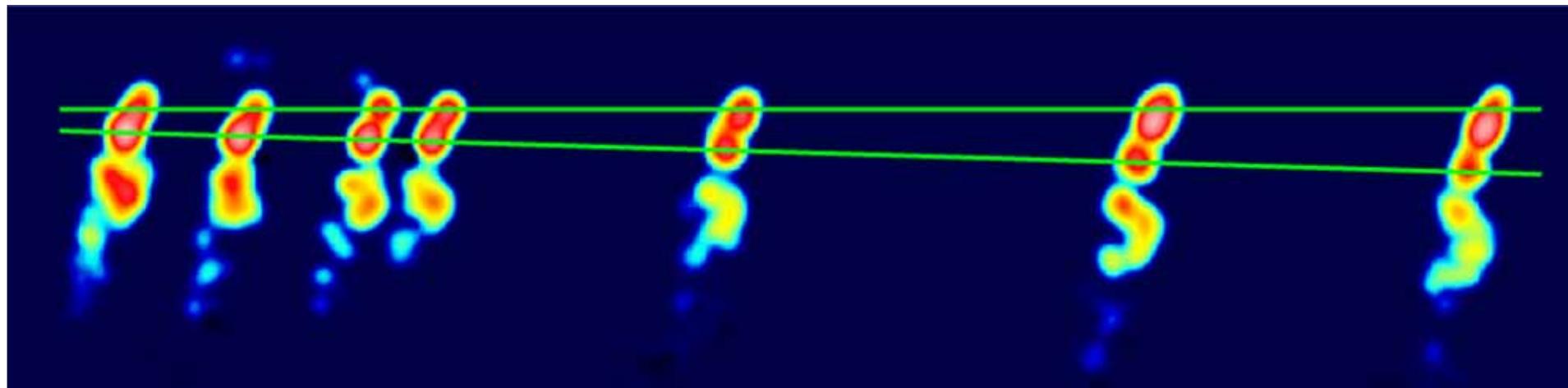


電波銀河M87のジェット噴き出し部。左端が中心核で、右方向にジェットを噴いている。活動銀河において中心のブラックホール近傍でジェットが細く絞られ光速近くまで加速されるしくみは、まだ明らかになっていない。ジェットが生成・加速される領域はシュバルツシルト半径の数十倍程度の領域で、それを解像するだけの望遠鏡はまだ実現されていないためである。しかし、距離が約5000万光年と比較的近くにある電波銀河M87をVSOPで観測すると、ブラックホールの150倍ほどの分解能が得られ、ジェットの根元の構造がみえてきた。

その結果、中心核付近では開口角 60° のジェットが細く絞り込まれ、その下流ではエッジが明るい二重稜線構造をもっている。これは、ジェットが中空円筒状であることを示している。



参考 図版2-2 「ジェットのうちねり構造」

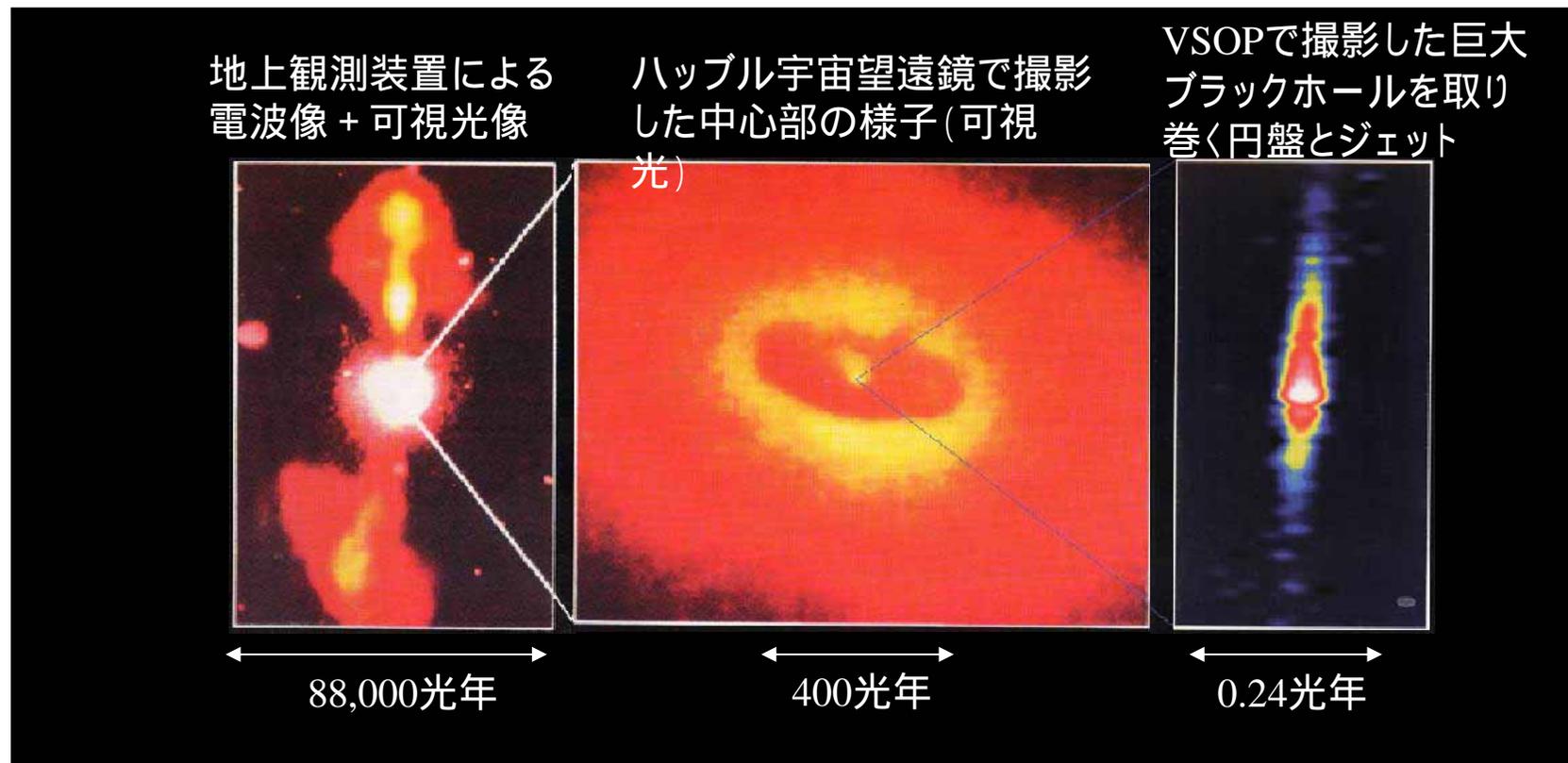


クェーサー1928+738の4年間にわたるモニター観測。
左端の1997年8月から右端の2001年9月まで、観測した時系列に沿って配置している。

ジェットの「うねり」構造の解釈は、根元が揺れるというものである。ホースで水まきするときのように、個々のジェット成分は弾道的に飛んだとしても噴き出す根元が動くと、うねったジェット形状が観測される。

クェーサー1928+738を詳細にモニターした結果、ジェットの各成分が弾道的に飛んでいることが示された。このような構造の成因は、活動銀河核中心部の2つの超巨大な天体(ブラックホール)が互いに軌道運動を行い、そのうちの一方からジェットが出ているためと考えられる。

参考 図版3 「超巨大ブラックホールを回るプラズマ円盤」



(左) 電波銀河 NGC 4261の電波像(縦に延びるジェット)と可視光像(中心部分の楕円銀河)。

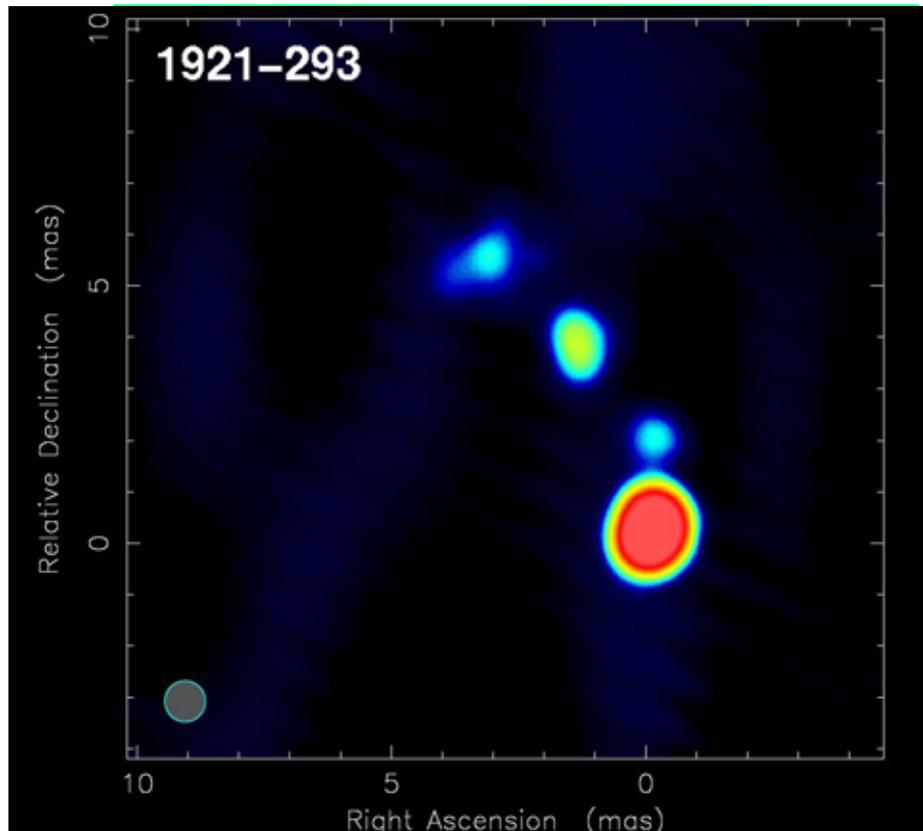
(中) ハッブル望遠鏡による銀河の中心部分。銀河の光(黄色)を円盤状の塵が隠してシルエットになっている。塵円盤の中心からは、中心核とジェットの光が北側に漏れ出している。

(右) VSOPによる電波写真。中心の明るい部分の下側にギャップがある。強い電波を出すジェットの手前に低温・高密度のプラズマが存在し、ジェットを隠している。

電波銀河NGC 4261は中心から南北双方向にジェットを噴き出している。VSOPでその根元を観測した結果、ジェットの根元がプラズマ円盤による吸収によってくびれている部分をとらえている。

参考 図版4-1 「10兆度の輝きを持つクェーサー1921-293」

Clean map. Array: FHLNPSO
1921-293 at 4.986 GHz 1997 Jul 18



Right Ascension (mas)

Map center: RA: 19 24 51.056, Dec: -29 14 30.121 (2000.0)
Map peak: 7.13 Jy/beam
Beam FWHM: 0.6 x 0.6 (mas) at 0°



クェーサー1921-293の電波像。最も明るく輝く電波核がVSOPによって詳しく調べられ、輝度温度で10兆度を超える電波放射をしていることが判った。この観測結果はVSOPの達成した角度分解能によってのみなし得る成果である。

「VSOPサーベイ」では、このクェーサーのように非常に明るい活動銀河核を数百天体について調べている。活動銀河のジェットは高エネルギー電子からのシンクロトロン放射によって輝いていると考えられているが、あまりに輝度が高くなると逆コンプトン効果によって、輝度温度が1兆度を越えることはできない。ところがVSOPサーベイの結果、54%ものサンプルが1兆度を超える輝度温度を示すことがわかった。

このことは、「相対論的ビーミング効果」によって、実際の輝度よりも明るくなっていることの証拠である。光速に近い速度でジェットが運動していると、放射される電波は運動方向に強く絞り込まれる。見かけの輝度は増幅されてみえるのである。

参考 図版4 - 2 「VSOPで観測する遠方のクェーサー」

VSOPで観測されているたくさんのクェーサーの中から代表的な画像を4例だけ示す。

今ではすべての銀河の中心に超巨大ブラックホールがあるらしいという観測事実が積み重なってきている。

宇宙の初期に銀河どのようにしてできたのか、中心のブラックホールの存在の意味は、現代天文学の大きな謎である。

