

RadioAstron スペースVLBI

朝木 義晴, 竹内 央(宇宙研), 今井 裕(鹿児島大), 輪島 清明(上海天文台),
Ed Fomalont (NRAO/JAO), Yuri Kovalev (Astro Space Center),
Maria Rioja, Richard Dodson (University of Western Australia)

概要

Astro Space Center of PN Lebedev Physics Institute (ASC, ロシア)の電波天文観測衛星「Spektr-R」と地上電波望遠鏡との同時観測によるスペースVLBIミッション「RadioAstron」が順調に進行している。Spektr-Rと地上アンテナによるスペースVLBI「RadioAstron」により最高7マイクロ秒角の空間分解能で天体の観測が可能である。2011年11月に地上望遠鏡との間のスペース VLBI機能試験の成功後、Early Science Programと移行し、活動銀河核 などのコンパクトな天体を順調に観測し続けている。2012年8月にKey Science Programの第1回公募が発行され、2013年7月より観測が開始された。宇宙科学研究所はRadioAstron International Science Committeeのメンバーとしてこの計画に参加するとともに、JAXA臼田64m電波望遠鏡による地上電波望遠鏡のパートナーとして貢献をしている。

現在進行中のスペースVLBIミッション、「RadioAstron」

2011年7月18日にカザフスタン共和国のバイコヌール宇宙基地から打ち上げられた「Spektr-R」衛星は直径10mのパラボラ反射鏡を持つ電波天文衛星であり、世界中の地上電波望遠鏡との干渉計観測により、スペースVLBI「RadioAstron」を実現している。軌道上での衛星形状の想像図を右(図1)に、観測性能諸元を下記(表1)に紹介する(詳しくは参考文献[1]を参照のこと)。

表 1: RadioAstronの観測性能諸元

観測波長	92 cm, 18 cm, 6 cm, 1.3 cm (LHCP, RHCP)
VLBI時の最高空間分解能	7.2 マイクロ秒角(波長1.3 cm, 最大基線長36万km)
Spektr-R衛星のSEFD	19000 Jy, 2300 Jy, 4600 Jy, 7200 Jy (それぞれ観測波長が92cm, 18cm, 6cm, 1.3cmにおいて)
VLBI時の観測帯域	32 MHz × 2 (LSB + USB, 波長18cm, 6cm, 1.3cm), または 16 MHz × 2 (USB + LSB, 波長92cm)
軌道	遠地点高度: 280000 – 353000 km / 近地点高度: 7000 – 81500 km



図1: 軌道上の「Spektr-R」衛星の想像図。直径10mのパラボラアンテナを天体電波望遠鏡として用い、観測波長92cm, 18cm, 6cm, 1.3cmのフィードおよび受信機がパラボラの一次焦点に設置されている。

RadioAstron Early Science Program (ESP)

RadioAstronのEarly Science Program (ESP)は、RadioAstronの特徴(超高空間分解能)を生かす科学観測の実現性の調査とともに、軌道上の衛星アンテナや受信機の性能確認、スペースVLBIデータ処理、データ解析などを実験的に実証するため2012年2月に開始された。ESPでは(1) AGNサーベイおよびイメージング、(2) パルサーと星間プラズマ、(3) メーザーの3つのワーキンググループ(WG)が設置され、各WGで選定した観測天体リストを観測していくことによりESPを推進してきた。ESPは2013年6月で終了し、同年8月より「オープン・スカイ」ポリシーに基づくKey Science Program (KSP)が開始され、RadioAstronの観測運用は実験的フェーズからルーチン運用フェーズへと移行した。

RadioAstron Early Science Program成果 (1) : AGNサーベイ

<目的>

現在のAGN/バラダイムでは、AGNコアからの電波放射は相対論的速度まで加速された電子によるシンクロトロン放射とドップラ・ブーストで説明されている。この場合、逆コンプトンの冷却過程により1日程度でAGNコアの超高エネルギー電子は冷却されるため、AGNコアそのものの輝度温度は 10^{11} – 10^{12} Kを超えることがないとされる。VLBIキネマティックからはローレンツ係数は50を超えず、よってドップラ・ブーストも増幅率として100を超えることはないと考えられた。しかし、近年のフェルミ・ガンマ線望遠鏡やTeVチェレンコフ望遠鏡の結果から、高エネルギー領域のスペクトルを説明するコンプトン・モデルは、AGNコアの輝度温度が従来通りとすればVLBIで見出されたドップラ係数よりも大きな増幅率が必要となり、このことから逆にAGNコアの輝度温度は 10^{14} Kよりも高いことが示唆されることとなった。VLBIで得られる輝度温度の上限値は、基線長と相関強度の測定精度に依存する。地上VLBIで観測された輝度温度の上限値は 10^{13} K程度であるが、一方で地球直径の3倍程度の基線長を使ったVSPでは検出感度がリミットしてほぼ地上VLBIと同様の結果となった。RadioAstronは地球直径の30倍の基線長を使うことにより、これまで観測不可能であった 10^{15} – 10^{16} Kの輝度温度の検出可能性の調査から、AGNコアの相対論的電子の物理状態に制限を与えることができる。

<結果>

MOJAVEカタログ(Monitoring Of Jets Active galactic nuclei with VLBA Experiments)から選択されたAGNに対し、地球直径の1–2倍程度の基線長から観測を始め、検出された天体については観測基線長を延伸していくことで、多くのAGNについて大まかな輝度温度の上限を把握することが可能となる。観測波長18 cmおよび6 cmでは、Spektr-R衛星-地上望遠鏡間の基線長において、3C 273、3C 279、3C 454.3、BL Lac、OJ 287、0716+714、0748+126、0823+033、1823+568が検出されている。それぞれの観測波長での検出最長基線長は、波長18cmで地球直径の13.5倍(3C 273)、波長6cmで地球直径の19倍 (BL Lac)、波長1.3cmでは地球直径の8.1倍(3C 273)となっている(図2)。今年6月までに一次解析が終わったAGNは、観測波長18cmで21天体、6cmで34天体、1.3cmで24天体となっている。

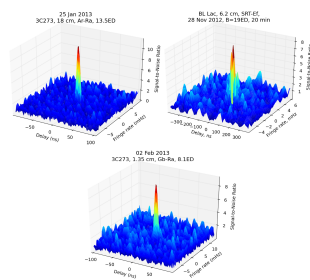


図2: 観測波長18cm, 6cm, 1.3cmにおいて、衛星-地上電波望遠鏡系統で相互相関が検出された最長基線のフリンジ。
上左: 波長18cmでの3C273, 上右: 波長6cmでのBL Lac,
下: 波長1.3cmでの3C273。

RadioAstron Early Science Program成果 (2) : AGN(イメージング)

Spektr-R衛星の軌道周期はおおよそ9日間であるが、e~0.7の長楕円軌道であるため、近地点を通過する際に高速で運動する。よって短い時間で干渉計観測における(U, V)平面上でのサンプルを多く埋めることが可能となり、イメージングに必要なジビリティデータを取得し、イメージング観測を行うことができる。

図3に波長6cmでEuropean VLBI Network (EVN)とRadioAstronとでマッピングを行った結果を示す。図中の1目盛りはミリ秒をあらわす。地上VLBIの空間分解能よりも3倍高い解像度でイメージを得ることに成功している。

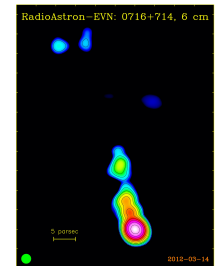


図3: Spektr-RとEVNの24時間観測によって得られた波長6cmのスペースVLBIイメージ。Spektr-R衛星が近地点を通過する際に行った観測により得られた。図の1目盛りは1ミリ秒角。右下、黄緑の円は干渉計のビームを示す。

RadioAstron Early Science Program成果 (3) : メーザー

<目的>

1.6GHzのOHメーザー源や22GHzの水メーザー減は、大質量星形成領域に付随していることが知られている。コンパクトなメーザーソース群として存在し、VLBI観測を通してスポット間相対固有運動を多数測定できれば、視線速度情報とも合わせてメーザー源内部の三次元速度場を把握することができる。これにより、生まれたての大質量星(massive young stellar object=MYSO)からの恒星風の運動を明らかにし、その運動学的モデルに含まれるパラメータである太陽系からMYSOまでの距離を直接求めることもできる。現在観測される恒星風の到達範囲と速度から、その恒星風を形成して来たMYSOの年齢も把握でき、そのMYSO周辺領域への影響を調べる上で時間的尺度を与えるだろう。例えば、恒星風外縁部に存在するOHメーザーの動きは速く(数km/s)、太陽系から数kpc以上離れると固有運動の計測に数年以上要してしまう。しかし、RadioAstronで実現する空間分解能により、メーザー源の固有運動計測が1年未満で可能になる。同時に、RadioAstronでは非常に微細なスポットの構造が分解され、星間シンチレーションを含む様々な要因により、その強度や構造が短時間で変化することも予想される。地球直径を超えた超長基線によりメーザー・スポット構造をさらに分解し星間シンチレーションの時間変化を初めて追跡する。

<結果>

メーザー天体の最初のフリンジは大質量星形成領域であるW51の水メーザー(波長1.3cm)で得られている。図4にスペース基線(基線長は地球直径の1.1倍)で得られたフリンジを示す。W51では、後に2倍の地球直径の基線でフリンジが得られた。波長18cmのOHメーザーについては、星形成領域であるW75NとOmsala 1で得られている(それぞれ地球直径の0.75倍と1.6倍)。

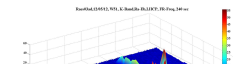


図4: 大質量星形成領域W51で検出されたスペース基線の水メーザー(波長1.3cm)。

Key Science Program (KSP)

2012年9月にKSPのAnnounce Opportunity (AO)-1が出され、RadioAstronがオープン・スカイ・ポリシーのもとで観測運用されることとなった。KSP AO-1は2013年2月に観測提案の締め切りがあり、14提案が提出された。RadioAstron Program Evaluation Committeeが提出された科学提案を審査し、技術的フィジビリティを考慮して採択された観測提案が今年8月から開始された(KSP-AO2の予定は今のところ未定)。

References

[1] Kardashev, N. S. et al., "RadioAstron – A Telescope with a Size of 300000 km: Main Parameters and First Observational Results", Astronomy Reports, 2013, 57, pp. 153-194