

報道関係者各位

国立大学法人 山口大学

## 超巨大ブラックホール近傍から噴出する 電波ジェット根元のふらつき現象を発見

### 【概要】

山口大学大学院理工学研究科の新沼浩太郎准教授、韓国天文学宇宙科学研究所の紀基樹特任上席研究員、宇宙航空研究開発機構の土居明広助教、国立天文台の秦和弘研究員、永井洋特任准教授、マックス・プランク電波天文学研究所の小山翔子研究員で構成される研究チームは、これまで不動とされていた電波ジェットの根元の位置が、ジェット噴流の軸に沿って大きく“ふらつく”新しい現象を発見しました。活動銀河中心から噴出する電波ジェットは長年観測されていますが、根元が大きくふらつくことを直接検出したのは世界で初めてとなります。

今回、共同研究チームは地球から約133メガパーセク（4.3億光年（注1））の位置にある活動銀河（注2）マルカリアン421（Mrk 421）の中心核付近で起こったX線大爆発現象の直後から約7ヶ月間にわたって、超長基線電波干渉計（VLBI）（注3）である国立天文台のVERA電波望遠鏡（注4）を用いて、特に「相対VLBI」（注5）と呼ばれる観測手法を駆使した高空間解像度かつ高頻度のフォローアップ観測を行うことで電波ジェット根元の大きな“ふらつき”を捉えることに成功しました。

この“ふらつき現象”は、超巨大ブラックホール近傍での活動が活発なときに噴き出すプラズマ塊の速度の違いによってプラズマ塊同士が衝突する場所が大きく変化することによって生じている、という理論モデルでよく説明されます。また、“ふらつき”の大きさは、（1）**プラズマ塊の速度が従来考えられていた速度よりも速いこと**、および（2）**電波ジェットの根元と銀河中心核の超巨大ブラックホールが30光年以上離れているときがあること**、を示唆していると考えられます。今回の新発見は、長年の謎となっている活動銀河中心核ジェットの形成メカニズムを理解する上での新たな手掛かりのひとつとなることが期待されます。

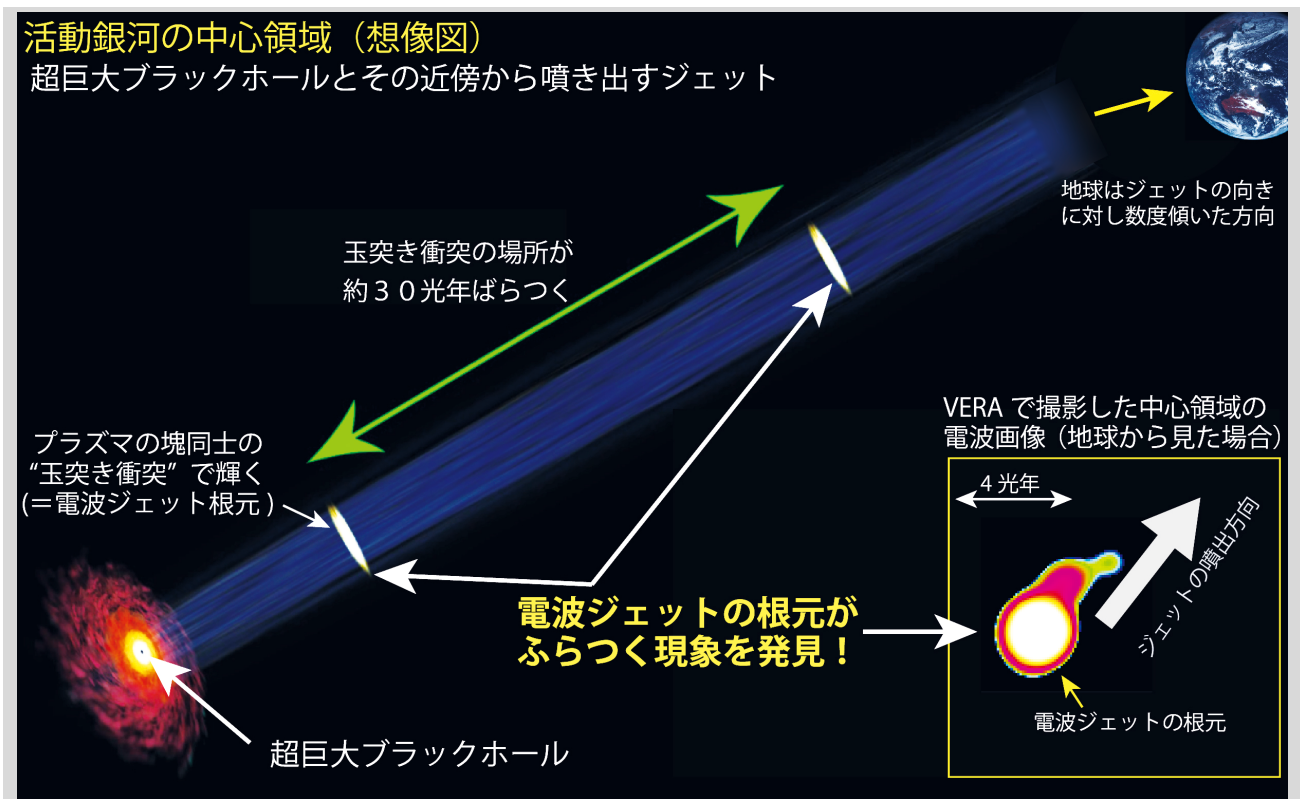


図1. 本研究成果の模式図 (地球の画像: ©気象庁ホームページ, 他の画像 ©山口大学)

## 発表のポイント

- 活動銀河マルカリアン421 (以下Mrk 421)の中心核付近で発生したX線大爆発現象の直後に国立天文台のVERA電波望遠鏡を用いて、高空間解像度・高頻度の「相対VLBI」観測を行ったところ、動かないと信じられていた電波ジェット根元の場所が、ジェット噴流の軸に沿って大きく“ふらつく”という現象を世界で初めて捉えることに成功した。
- 本研究で検出された“ふらつき現象”は、「電波ジェット根元」の動的な性質を世界で初めて示す発見となった。この結果から超巨大ブラックホールと電波ジェットの根元は30光年以上離れている時期があるということが分かった。
- 電波ジェット根元の“ふらつき現象”は、超巨大ブラックホール近傍から噴出される速度の異なるプラズマの塊同士が玉突き衝突することでその衝突場所が輝くという理論モデルの枠組みで説明できる。今回の観測結果と玉突き衝突の理論モデルの対比からX線大爆発直後には噴出されるプラズマ塊の速度が、従来考えられているよりも速い速度であることが示唆される。
- 観測と理論モデルとの対比から得られた示唆は、ジェットがどのように形成され噴出しているのか?という宇宙物理学における長年の謎を解き明かすための新たな手掛かりになることが期待される。

## 研究の背景

活動的な系外銀河の中心には宇宙最大級の超巨大ブラックホール（太陽の100万倍～100億倍の質量）が潜んでいて、その近傍から光速に近い速度で莫大なエネルギーを宇宙空間に運び出すプラズマのガス流『電波ジェット』が噴出していることがよく知られています（図2）。この活動銀河中心核ジェットは超巨大ブラックホールが「中心エンジン」の役割をして引き起こすエネルギーッシュな天体現象として長年精力的に研究されていますが、その形成メカニズムについては未だに謎のままとなっています。その理由の一つとして、銀河の中心に位置する超巨大ブラックホールや電波ジェット根元の領域は、地球から遥か彼方にあるため見かけのサイズが非常に小さくなり、詳細に観測することが難しいからです。そこでわたしたちは、このような領域を詳細に観測できる高い空間解像度を誇る VLBI 電波望遠鏡を使用しています。

しかしながら、これまでの研究では「電波ジェットの根元」の位置は動かない点であるとして扱われており、「電波ジェットの根元」の動的な性質を持つかどうか？については、ほとんど知られていませんでした。

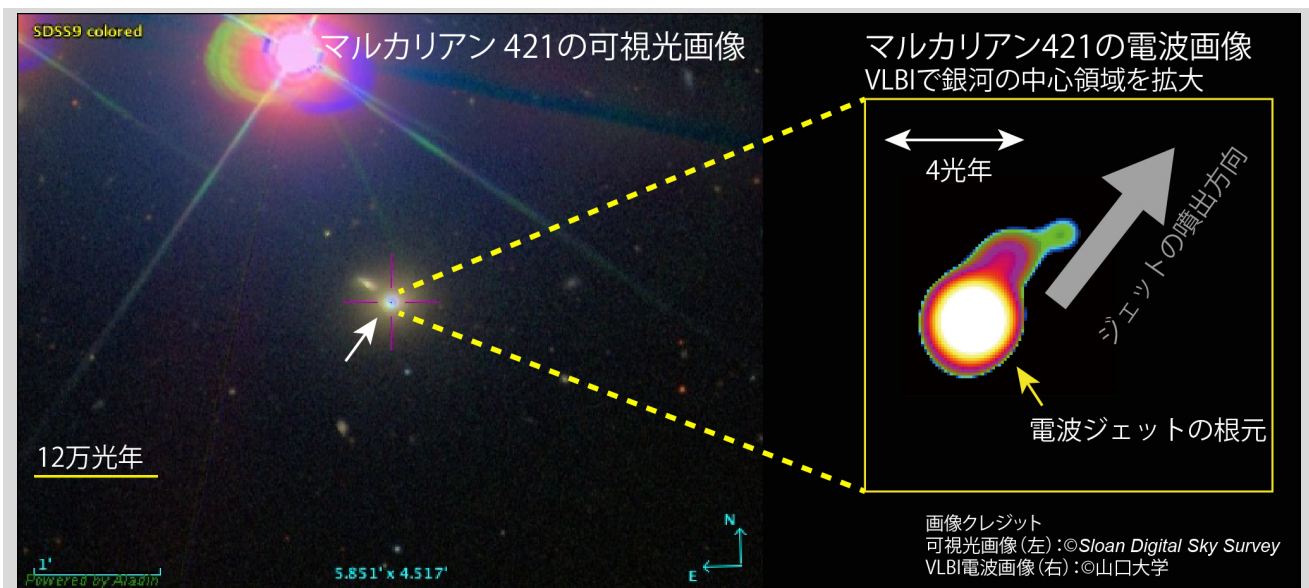


図2. 活動銀河の画像（左）と中心核付近から噴出している『電波ジェット』の拡大図（右）

## 研究成果

まず最初に私たちは「中心エンジンである超巨大ブラックホールの活動性が活発な時期にも、本当に電波ジェットの根元は不動なのだろうか？」という疑問を抱きました。なぜなら、超巨大ブラックホール近傍から噴出される速度の異なるプラズマの塊同士が“玉突き衝突することでその衝突位置が輝く”（図3）という理論モデルに基づくと、中心エンジンの活動性が活発なときには「電波ジェットの根元」の位置が変わる可能性が予想できるからです。私たちはこの疑問を解決するため、この理論モデルから予想される位置の変化を識別できるくらい地球から近い天体を探しました。

その結果、地球から約4.3億光年の位置にあり、中心領域に太陽の約3.6億倍もの質量の超巨大ブラックホールを有する活動銀河 Mrk 421 という天体が観測にはたいへん適していることに気づきました。Mrk 421 は、電波ジェットの様子がほぼ地球に向いている「ブレイザー」と呼ばれる活動銀河種族のひとつです。私たちは、中心エンジンの活動性を反映する X 線放射が活発になる時期の訪れを待ちました。

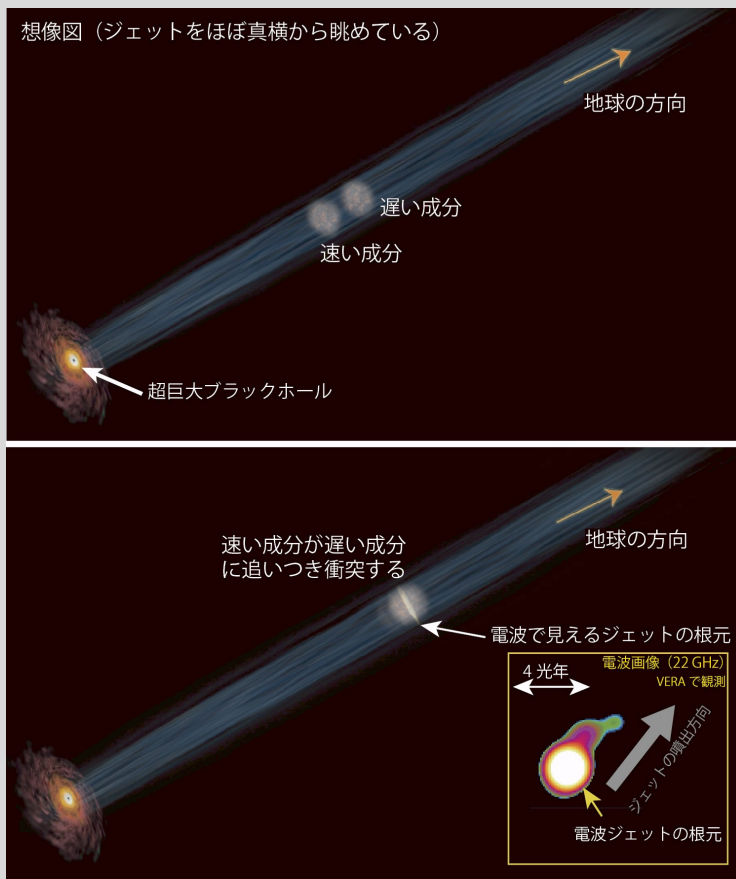


図3. 活動銀河の中心付近（超巨大ブラックホール含む）から噴き出すジェットをほぼ真横から見た想像図. 速いプラズマの塊が遅いプラズマの塊を追いかけて（上図）、玉突き衝突したとき、衝突位置が電波で明るく輝く（下図）。この電波で明るく輝く位置が電波ジェットの根元として見えておられる（下図の右下は実際の観測された電波画像）。

下図の右下の電波画像でジェットがほとんど伸びていないように見えるのは、噴き出してくるジェットを地球ではほぼ正面から眺めているため、ジェットはこのように投影されていると考えられる。

（画像クレジット：山口大学）

2011年の9月にその機会は訪れました。Mrk 421 で起こった大爆発を X 線の天体観測装置である MAXI（注6）が検出したのです。このニュースを受けた直後から、本研究チームは日本国内の VLBI 観測網である VERA を用いて Mrk 421 の観測をかつて無い程の高頻度で実施しました。この観測では VERA の特徴である相対 VLBI という観測テクニックを用いることで100マイクロ秒角（1度の36,000,000分の1）（注7）という極めて高い位置精度で「電波ジェットの根元」の位置を測定し続けることが可能となりました。

7ヶ月の間頻繁に Mrk 421 のジェットの根元を観測したところ、X 線での大爆発のひとつ月後からこの根元が大きく“ふらつき”始めたことが分かりました。このふらつきは3ヶ月程度続きましたが、驚くことにその間の根元位置の最大差はおよそ30光年近くまで達しました。これは実に Mrk 421 の中心に潜む超巨大ブラックホールの大きさ（注8）の10万倍に相当する距離です（図4）。

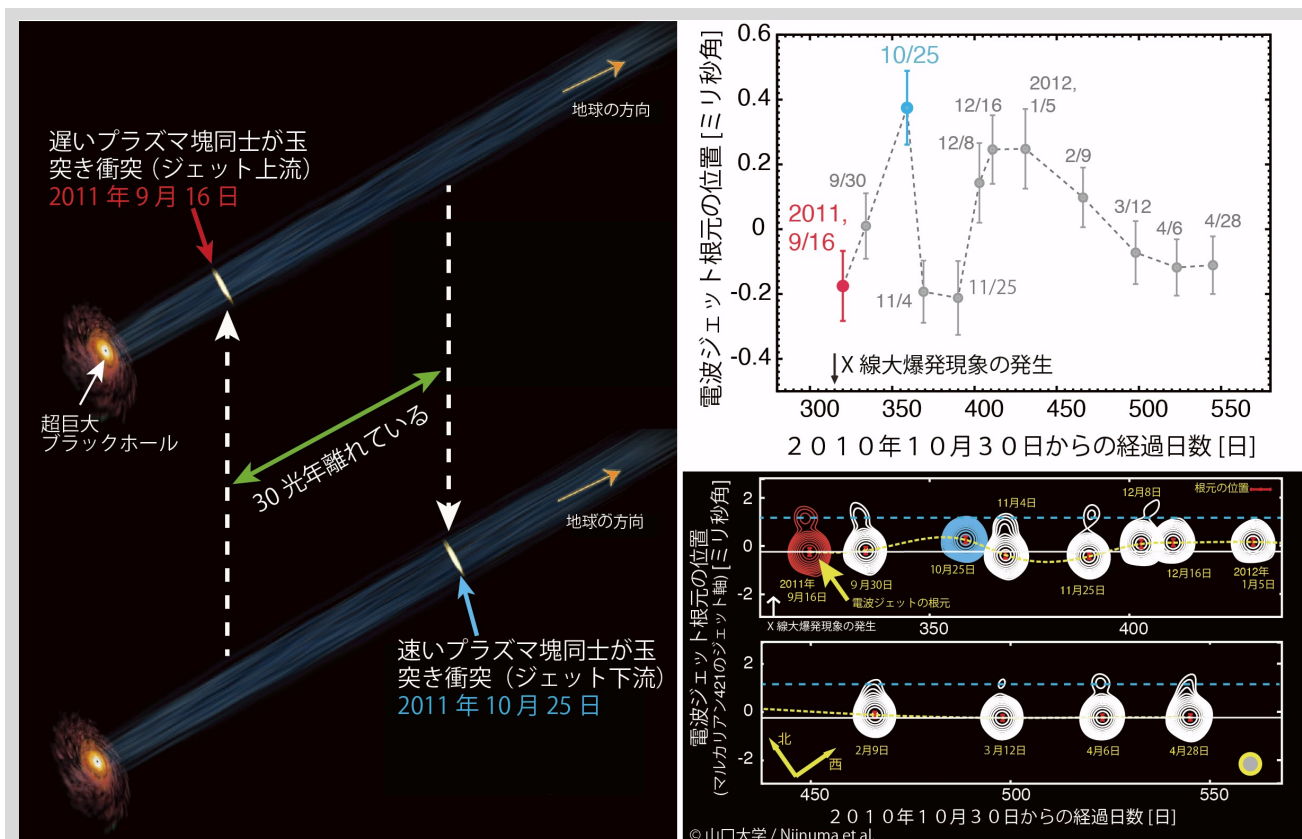


図4. プラズマ塊同士の衝突位置の変化によって電波ジェットの根元の位置が変わるようすを模式的に示した図（左）及び観測日毎のジェットの根元の位置を示した図（右上・右下）. 速度の異なるプラズマ塊同士が“玉突き衝突”をすると衝突位置が明るく輝きジェットの根元として見える. 左図上下の衝突位置を示している矢印の色（赤・水色）と観測データに見られる根元の位置（右図上下）の色は対応している. 速度の速いプラズマ塊同士は、ブラックホールからより遠く（ジェットの下流）の位置で、速度の遅いプラズマ塊同士は、ブラックホールからの近く（ジェットの下流）で衝突して輝く. ジェットの流れに沿って最も下流で衝突した場合、超巨大ブラックホールと明るく輝く電波ジェットの根元は30光年以上離れていることが予想される. (画像クレジット：山口大学)

電波ジェット根元の“ふらつき現象”は、玉突き衝突の理論モデルに基づくと、次のように説明できます. 今回のX線大爆発時のようにブラックホールエンジンが活動的な状態になると、撃ち出されたそれぞれのプラズマ塊の速度のバラつきも大きくなると考えられます. すると、それに伴って衝突の位置が大きくなります. その結果、電波ジェットの根元の位置の変化として観測されるのです.

今回検出した電波ジェット根元の“ふらつきの大きさ”や、玉突き衝突の理論モデルと観測結果の対比からは、以下の二つのことが分かりました.

1. Mrk 421 の電波ジェット根元は、ブラックホールから30光年程度離れている時期がある. これは、M87 と呼ばれる電波ジェットにおいて得られた「電波ジェット根

元はブラックホールからわずか0.02光年のところに位置する\*1」という結果とは対照的な結果である。

2. X線での活動が活発なときには極めて速度の速いプラズマ塊が放出される。この電波ジェット根元のふらつき現象を説明するためには、噴出プラズマ塊のローレンツ因子（注9）は、 $\sim 60$ \*2という、従来考えられていたよりも速い速度に達している必要がある。

## **本研究が与えるインパクト、今後の展望**

本研究で検出された”ふらつき現象”は、「電波ジェット根元は常に不動である」という従来の理解を根本からくつがえす発見となりました。この最初の発見をきっかけに、今後は世界中でこの”ふらつき現象”の直接検出を目指した多くの電波観測が提案、実行されることが予想されます。

### **科学的側面**

一体なぜ Mrk 421 と M87 とで得られた結果に、電波ジェットの根元とブラックホールとの間の距離に、これほど大きな違いが生じるのでしょうか？ひよっとする Mrk 421 と M87 の電波ジェットの根元は、実は全く異なるメカニズムで形成された、性質の異なるものなのかもしれません。また、ジェット軸を地球から見込む角度の違いも電波ジェット根元の性質の違いに影響しているののかもしれません。

今後は、こうした高速プラズマ塊を生み出す理論的メカニズムや電波ジェット根元の新しい理解に向けた研究が活発になることが期待されます。

### **技術的側面**

本研究の観測の鍵となった VERA 電波望遠鏡による「相対 VLBI」観測を、今度は韓国の VLBI 観測装置（Korean VLBI Network）を連動させた KaVA 電波望遠鏡によって行おうとする試みもはじまっています（日韓 VLBI 観測網について\*3）。この拡張によって、さらに高い位置決定精度でふらつき現象の探求が期待できます。

また、より高い周波数帯（ミリ波）で VLBI 観測を行う試みも活発化しています（国内で行われた試験観測について\*4）。より高い周波数帯で VLBI 観測を行うことによって、ジェットのさらに詳細な構造を電波撮像する進展につながっていきます。

---

\*1 <http://www2.nao.ac.jp/~m87blackhole/>

\*2 プラズマ塊同士の間典型的距離をブラックホールサイズの30倍と仮定した場合

\*3 [http://kava.kasi.re.kr/kava\\_main.php](http://kava.kasi.re.kr/kava_main.php)

\*4 [http://www.astro.sci.yamaguchi-u.ac.jp/~hachi/mmVLBI\\_web/](http://www.astro.sci.yamaguchi-u.ac.jp/~hachi/mmVLBI_web/)

## 研究論文について

本研究成果は、7月1日発行の米国の天体物理学専門雑誌『The Astrophysical Journal Letters』に掲載されました。

論文題目及び著者（所属）は以下の通りです。

“Discovery of a wandering radio jet base after a large X-ray flare in the blazar Markarian 421”

新沼浩太郎（山口大学大学院 理工学研究科 准教授）

紀 基樹（韓国天文宇宙科学研究院 特任上席研究員）

土居明広（宇宙航空研究開発機構 助教）

秦 和弘（国立天文台水沢 VLBI 観測所 研究員）

永井 洋（国立天文台チリ観測所 特任准教授）

小山翔子（ドイツマックス・プランク電波天文学研究所 研究員）

『The Astrophysical Journal Letters』, July 1, 2015, vol. 807, L14

要約版（プレプリント） URL: <http://arxiv.org/abs/1507.04082>

## 【用語解説】

### 注1 光年

光の速さ（秒速30万キロメートル）で1年かかる距離が1光年（約9.5兆キロメートル）になります。

### 注2 活動銀河

銀河の中心に超巨大ブラックホールを抱え、その周辺から太陽の1兆倍を超えるようなエネルギー放出現象ジェットを噴出しているような天体です。このジェットなどにより中心領域から放射されるエネルギーが銀河全体の放射よりも卓越しているため、星のような点源に見えるものがあります。それらは準恒星状電波源（クェーサー）とも呼ばれます。

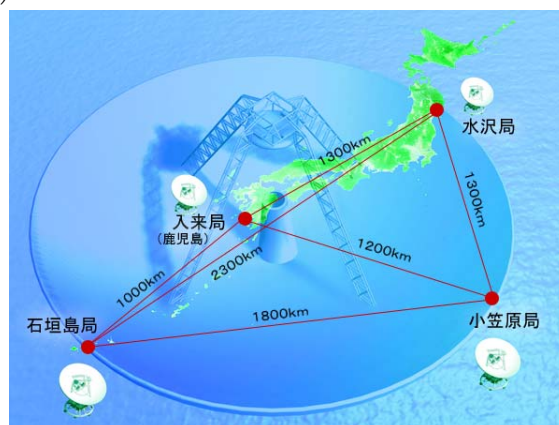
### 注3 超長基線電波干渉計（Very Long Baseline Interferometry: VLBI）

数千キロも遠く離れた電波望遠鏡を同時に用いて観測することで、電波望遠鏡間の距離を口径に持つ巨大な望遠鏡を仮想的に作り上げて天体を観測する手法です。観測装置の解像度は望遠鏡の口径が大きい程良くなります。VLBIを用いることではる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡よりも数十倍以上の高い解像度で天体を観測することが可能になります。

| 望遠鏡             | 口径       | 波長           | 解像度      | 視力      |
|-----------------|----------|--------------|----------|---------|
| ハッブル宇宙望遠鏡       | 約2.4m    | 約550nm       | 約0.05秒角  | 約1,200  |
| すばる望遠鏡          | 約8.2m    | 約2.4 $\mu$ m | 約0.06秒角  | 約1,000  |
| 日本国内のVLBI（VERA） | 約2,300km | 約1.3cm       | 約0.001秒角 | 約60,000 |

### 注4 VERA（VLBI Exploration of Radio Astrometry）

国立天文台が有する日本のVLBI観測網の1つです。日本国内4カ所（岩手県奥州市・東京都小笠原村・鹿児島県川内市・沖縄県石垣市）に直径20mの電波望遠鏡が配置されています。これら4台の電波望遠鏡を同時に使うことで実に直径2,270km（日本列島相当）の電波望遠鏡と同じ解像度を得ることができます。この「日本列島電波望遠鏡」で達成できる視力は60,000を超えますが、これは月面に立つ人間の場所を特定できるだけの解像度になります。（右図、©国立天文台）



### 注5 相対VLBI観測

相対VLBI観測とは、目標天体とは別の電波源を位置基準として利用し、目標天体の位置を精密に測定する観測手法で、VERAが最も得意とする観測手法です。

### 注6 MAXI（Monitor of All-sky X-ray Image: 全天X線監視装置）

国際宇宙ステーションにおける日本の実験棟”きぼう”に搭載されているX線天文観測装置です。宇宙ステーションとともに地球を周回するため、90分に一度全天を掃天観測することができ、X線で突発的に爆発を起こすような天体現象を捉える能力に長けています。

### 注7 100マイクロ秒角

地球から見て月面に置かれた水球ボール（直径～20センチメートル程度）のサイズに相当します。今回の観測で達成した位置精度であれば、地球から月面を見たときに水球ボール1個分の精度で“場所”の特定が可能になります。



注8 ブラックホールの大きさ

ブラックホールの大きさは、質量に比例した量として以下のように示されます（シュバルツシルド半径： $R_s$ ）。

$$R_s = 2GM_B/c^2$$

ここで、 $G$  は万有引力定数、 $M_B$  はブラックホールの質量、 $c$ は光の速さになります。

注9 ローレンツ因子

光速に近い速度で動くものの速度を表すときによく用いられる因子です。速度を  $v$  と書き表すとき、ローレンツ因子  $\Gamma$  は、

$$\Gamma = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$$

と定義されます。