

# 日韓合同電波望遠鏡群で探る 巨大ブラックホールジェット ～見えてきた超光速噴出流の現場～

日本天文学会 春季年会 2016年3月12日

秦 和弘(研究代表者)

国立天文台 水沢VLBI観測所 助教

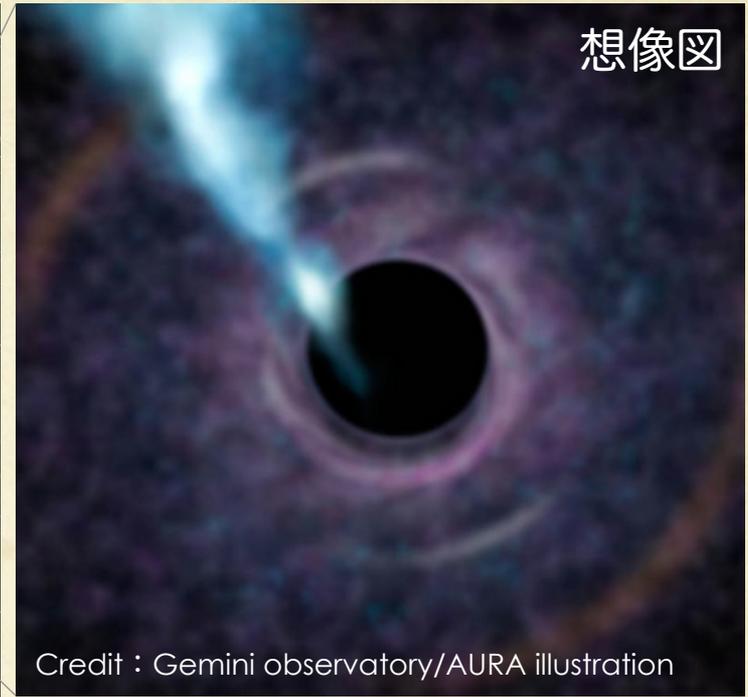
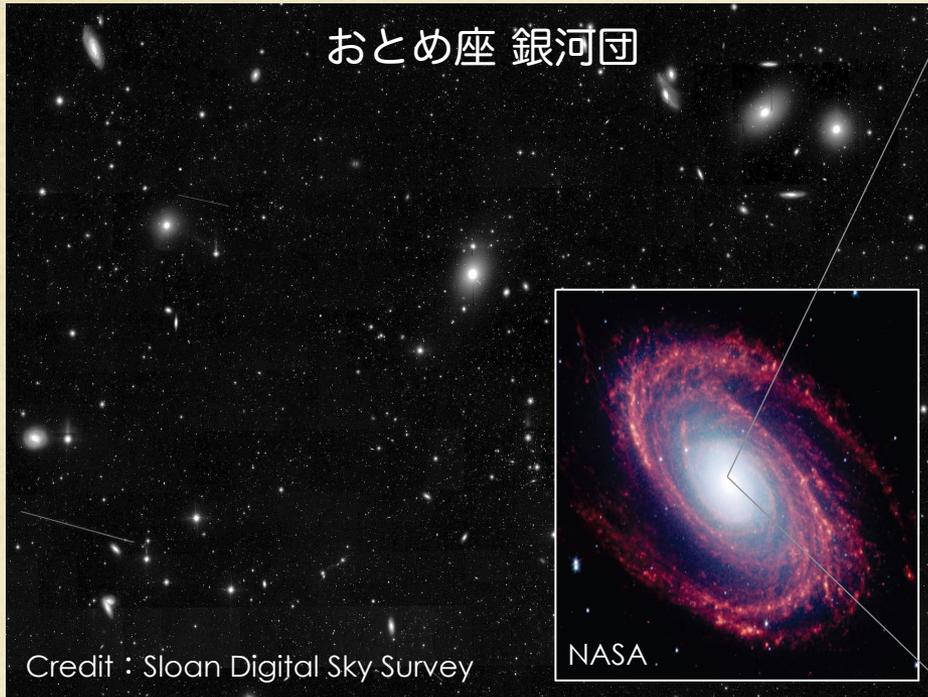
研究グループ同席者：紀 基樹 (韓国天文宇宙科学研究院 特任上席研究員)



# 本研究の概要

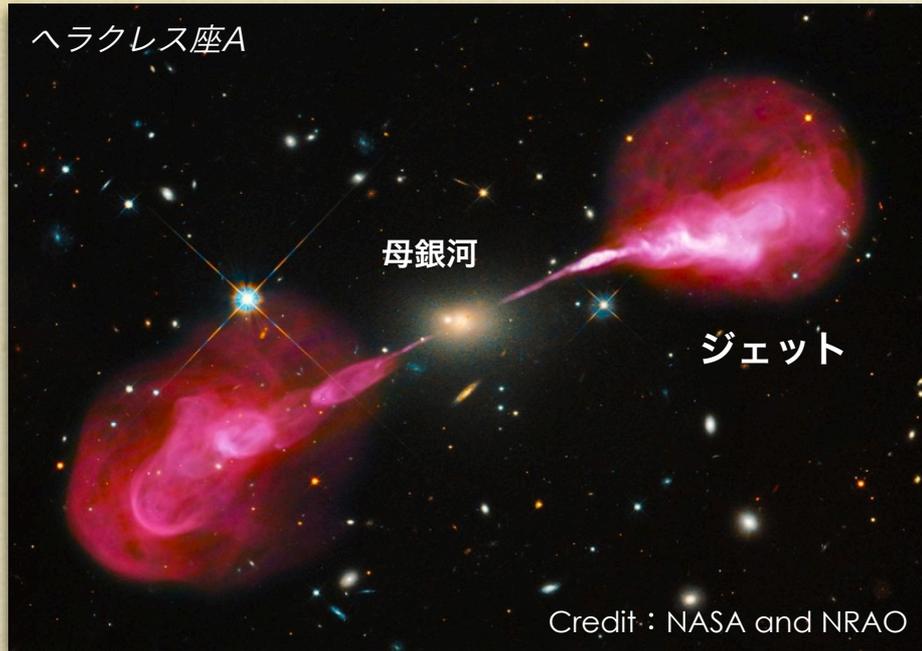
- 活動銀河M87(おとめ座A)の巨大ブラックホール(BH)から噴出する高エネルギープラズマ流「ジェット」の運動を「日韓合同VLBI観測網」を用いてかつてないほど**高頻度(約2~3週間毎)にモニター観測**
- ジェット速度が見かけ上光速を超える「超光速運動」を、BHから噴出して間もないわずか**5光年に満たない地点**において検出することに成功
- **これまで考えられていたよりも10倍以上もBHに近い位置でジェットが既に極めて速い速度に加速**されていることを示唆。BHの強い重力を振り切りジェットがいかにして噴出されるのか、という長年の難問を解明する重要な手がかり

# 巨大ブラックホール



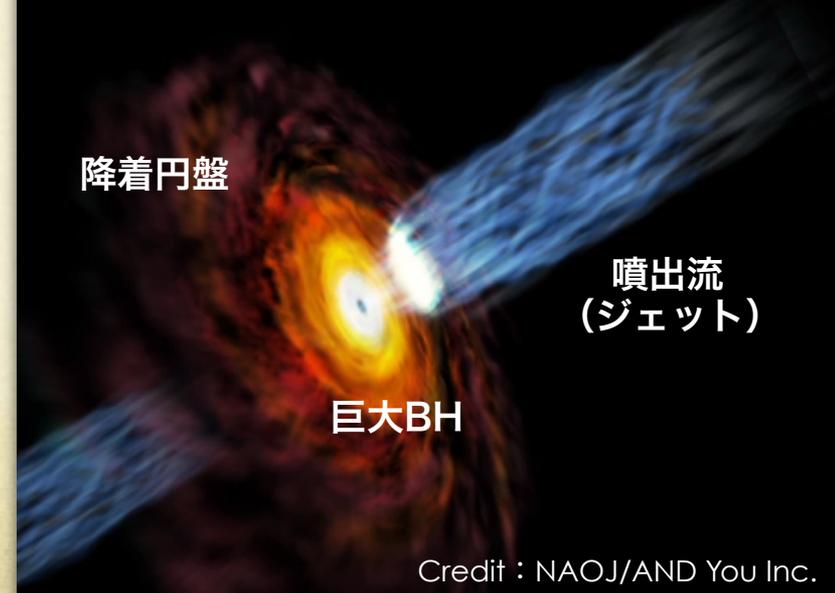
- 多くの銀河の中心部には太陽の数百万～数十億倍の質量を持つ巨大ブラックホールが存在
- 吸い込まれる物質の重力エネルギーが転化することで、その周辺では様々な活動現象
- これらの活動現場を直接観測することは巨大BHの性質や活動性解明に直結。宇宙物理学の最重要テーマの1つ

# 巨大ブラックホール「ジェット」



- 巨大BHの約1割は極めて活動的
- 強力な高エネルギープラズマ噴流「ジェット」
- 数千～数万光年の距離に渡って伝搬し、最大で光速の99%以上に加速されるケースもある

## 活動的な巨大BH周辺の想像図



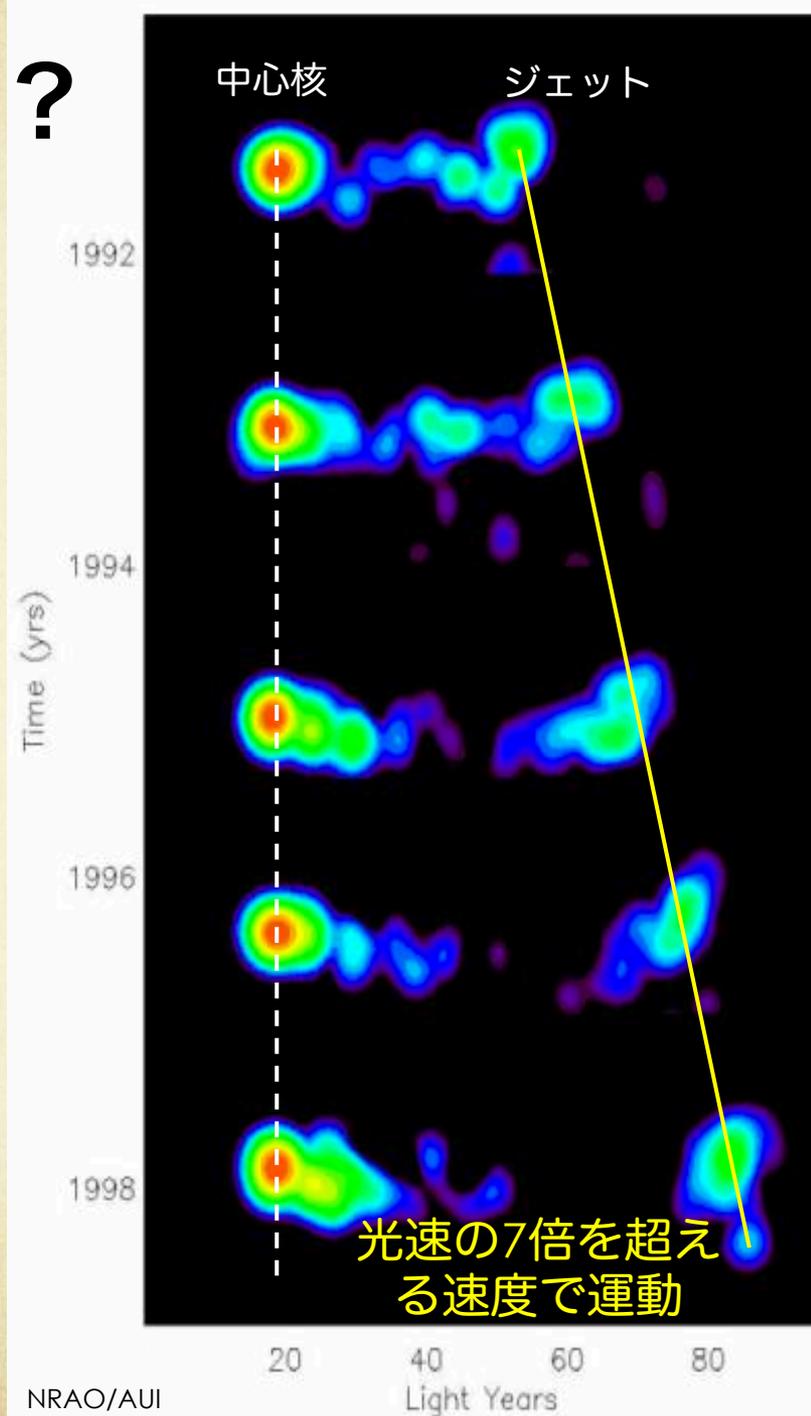
- BHの強力な重力を振り切り、いかにして光速近くにまで加速されるのか？
- 現代天文学における最難関の問題の1つとして、半世紀近くに渡り論争
- 観測から、BH近傍であるジェットが噴出されて間もない現場での運動の様子を詳しく明らかにすることが大事

# 「超光速運動」現象とは？

- 1970年代から多くのジェット天体で見つかっている
- 観測者の方向に向かって進んでくるジェットの速度が光速の約70%を超える、非常に速い速度に到達した場合のみ起こる
- 観測者から見ると「見かけ上(天球面上で)」光速を超えて運動しているように観測される現象
  - 右の例では天球面上で光速の7倍(700%)で動いているが、実際にはジェットは光速の99%で運動していることを意味
- **ジェットの加速の強弱のバロメータとなる重要な現象**

クエーサー3C279の観測例

NRAO/AUI



## 長年の議論の的の1つ：

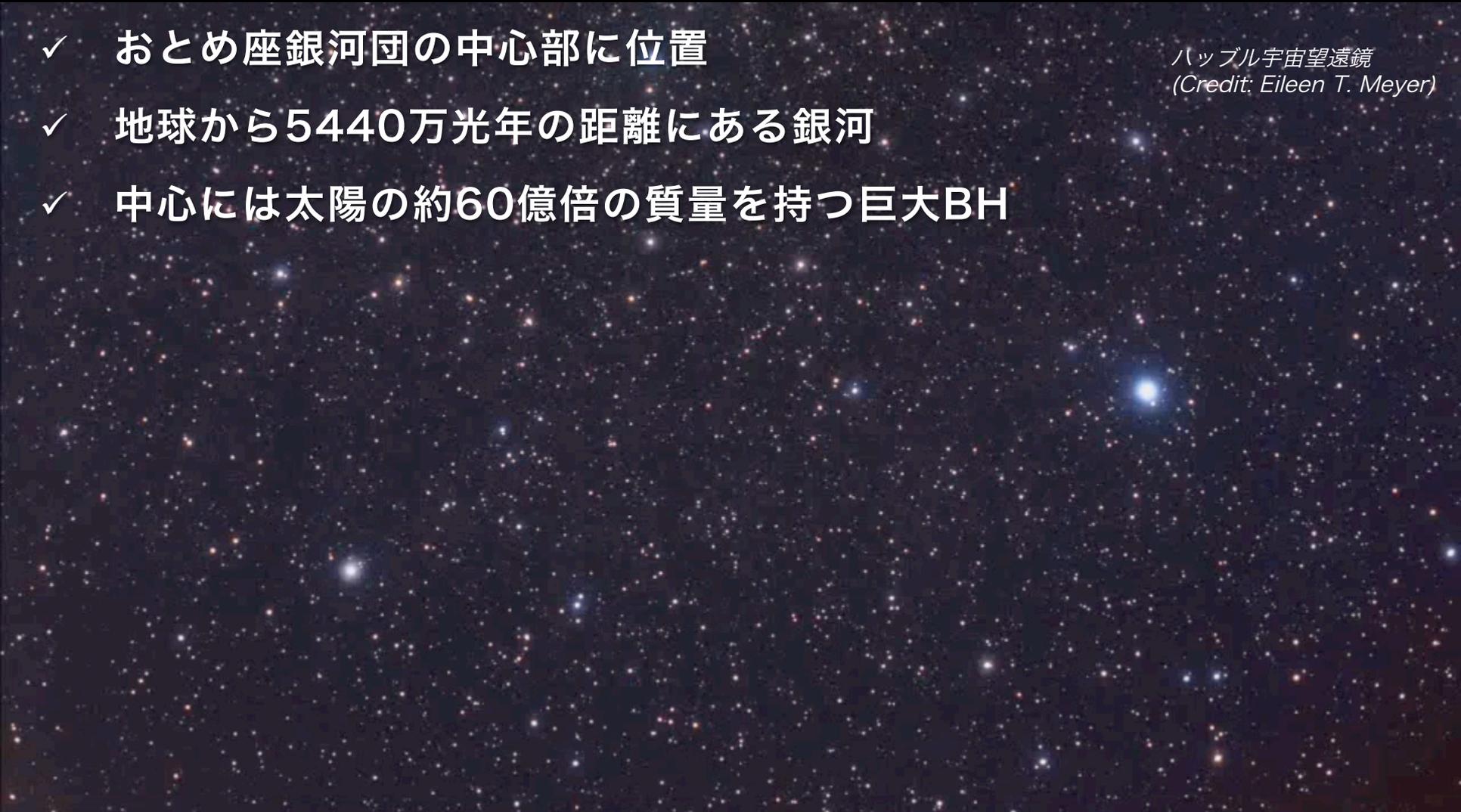
超光速運動はジェットがBHから噴出して、  
一体どの程度の地点から見え始めるのか？

- これまで見つかっている超光速運動のほぼ全てがBHから約100光年を超えるジェットの下流側
  - (但し、観測される天体の多くが地球から数億光年以上という遥か遠方天体だったため、それより内側の領域まで空間分解することが難しいという制約もあった)
- BHからジェットが噴出して間もない根元側(約10光年以内の領域)では、未だ検出されたことがなかった
- それゆえ、根元10光年以内を詳しく観測できる、地球からできるだけ近いジェット天体を徹底的に調べることが求められていた

# M87 (おとめ座A)

- ✓ おとめ座銀河団の中心部に位置
- ✓ 地球から5440万光年の距離にある銀河
- ✓ 中心には太陽の約60億倍の質量を持つ巨大BH

ハッブル宇宙望遠鏡  
(Credit: Eileen T. Meyer)



# M87 (おとめ座A)

- ✓ おとめ座銀河団の中心部に位置
- ✓ 地球から5440万光年の距離にある銀河
- ✓ 中心には太陽の約60億倍の質量を持つ巨大BH

ハッブル宇宙望遠鏡  
(Credit: Eileen T. Meyer)



# M87 (おとめ座A)

- ✓ おとめ座銀河団の中心部に位置
- ✓ 地球から5440万光年の距離にある銀河
- ✓ 中心には太陽の約60億倍の質量を持つ巨大BH

ハッブル宇宙望遠鏡  
(Credit: Eileen T. Meyer)



# M87 (おとめ座A)

- ✓ おとめ座銀河団の中心部に位置
- ✓ 地球から5440万光年の距離にある銀河
- ✓ 中心には太陽の約60億倍の質量を持つ巨大BH

ハッブル宇宙望遠鏡  
(Credit: Eileen T. Meyer)



- ✓ 地球から最も近い巨大BHジェット天体の1つであり、中心核から約5千光年の長さに渡りビーム状のジェット
- ✓ BHから100光年を超える場所では超光速運動が確認
- ✓ 近年はVLBI観測の進展により、根元の構造がBHからわずか1光年を切る解像度で空間分解

# M87 (おとめ座A)

- ✓ おとめ座銀河団の中心部に位置
- ✓ 地球から5440万光年の距離にある銀河
- ✓ 中心には太陽の約60億倍の質量を持つ巨大BH

ハッブル宇宙望遠鏡  
(Credit: Eileen T. Meyer)



ジェットの  
根元

- ✓ 地球から最も近い巨大BHジェット天体の1つであり、中心核から約5千光年の長さに渡りビーム状のジェット
- ✓ BHから100光年を超える場所では超光速運動が確認
- ✓ 近年はVLBI観測の進展により、根元の構造がBHからわずか1光年を切る解像度で空間分解

# M87 (おとめ座A)

根元の構造を詳しく調べるのに最適なターゲットとして  
世界中のBHジェット研究者が最も注目する天体の1つ

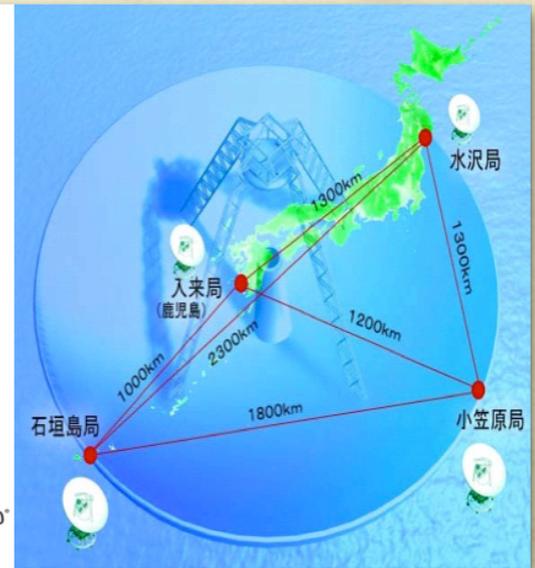
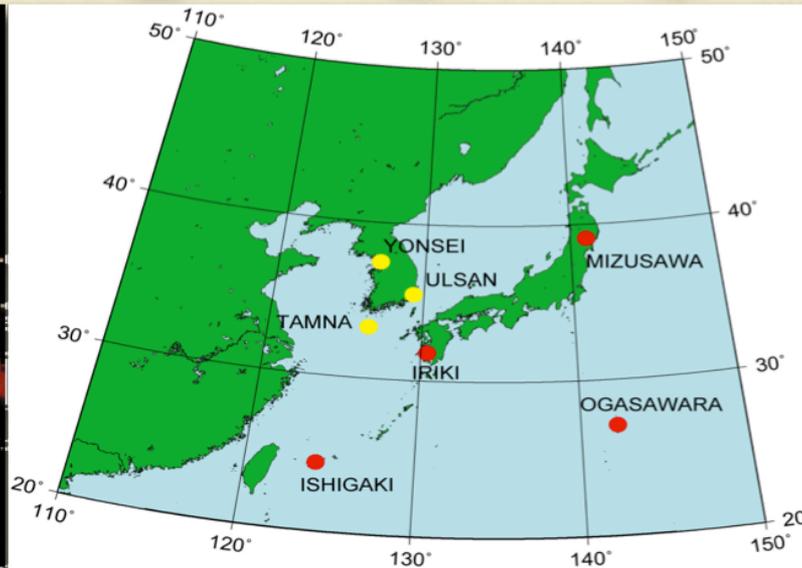
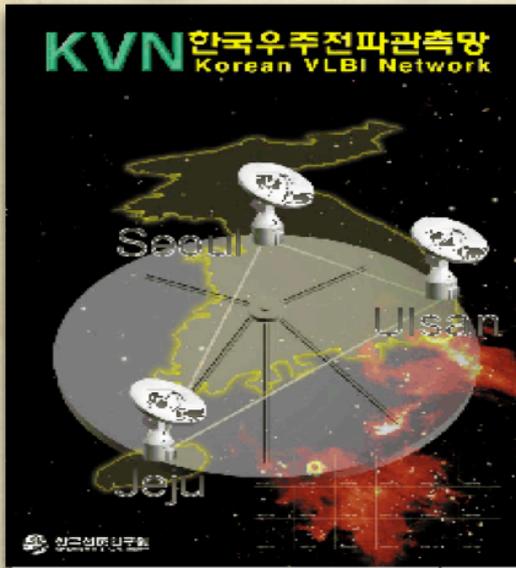
- 米国のVLBI観測網による多くの先行研究
  - 「根元10光年以内の速度は光速の10~30%以下と、下流に比べ非常に遅い」
- 我々「この結果を本当に信じて良いのだろうか？」
  - 先行研究のモニター頻度はせいぜい3ヶ月~半年に一回とすごく粗い
  - BHはその間にも新しいジェットの塊を次から次へと噴出
  - 同一のジェットの成分をきちんと追尾できていないのでは？

この問題を克服するためには、ジェットの運動をより頻繁かつ定常的にモニターできるVLBI観測が必要だった

- ✓ BHから100光年を超える場所では超光速運動が確認
- ✓ 近年はVLBI観測の進展により、根元の構造がBHからわずか1光年を切る解像度で空間分解

# 日韓合同VLBI観測網

(The *KVN and VERA Array*)



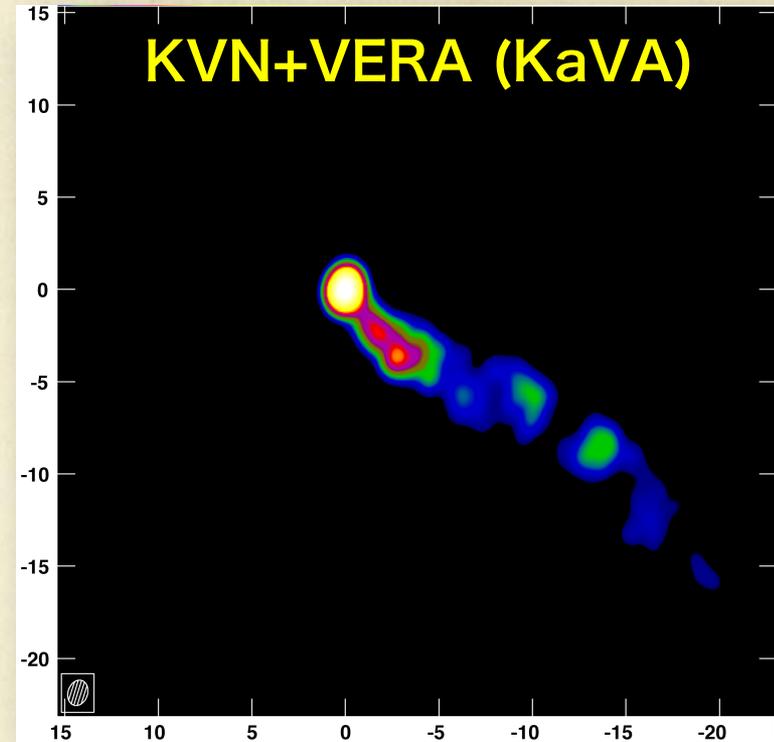
- VLBIとは、地球各地に存在する電波望遠鏡を合成し、解像度を飛躍的に高める技術
- 日韓VLBI観測網とは、日本VERAと韓国KVNを合体し、より高性能なVLBI観測網を実現する日韓共同プロジェクト（国立天文台と韓国天文宇宙科学研究所）
- 約3年に渡る日韓の研究者の緊密な連携が実り2014年から科学観測のための定常運用開始

# 日韓合同VLBI観測網の強み

明るいクエーサージェット3C273で試験

## ○ 画質の飛躍的改善

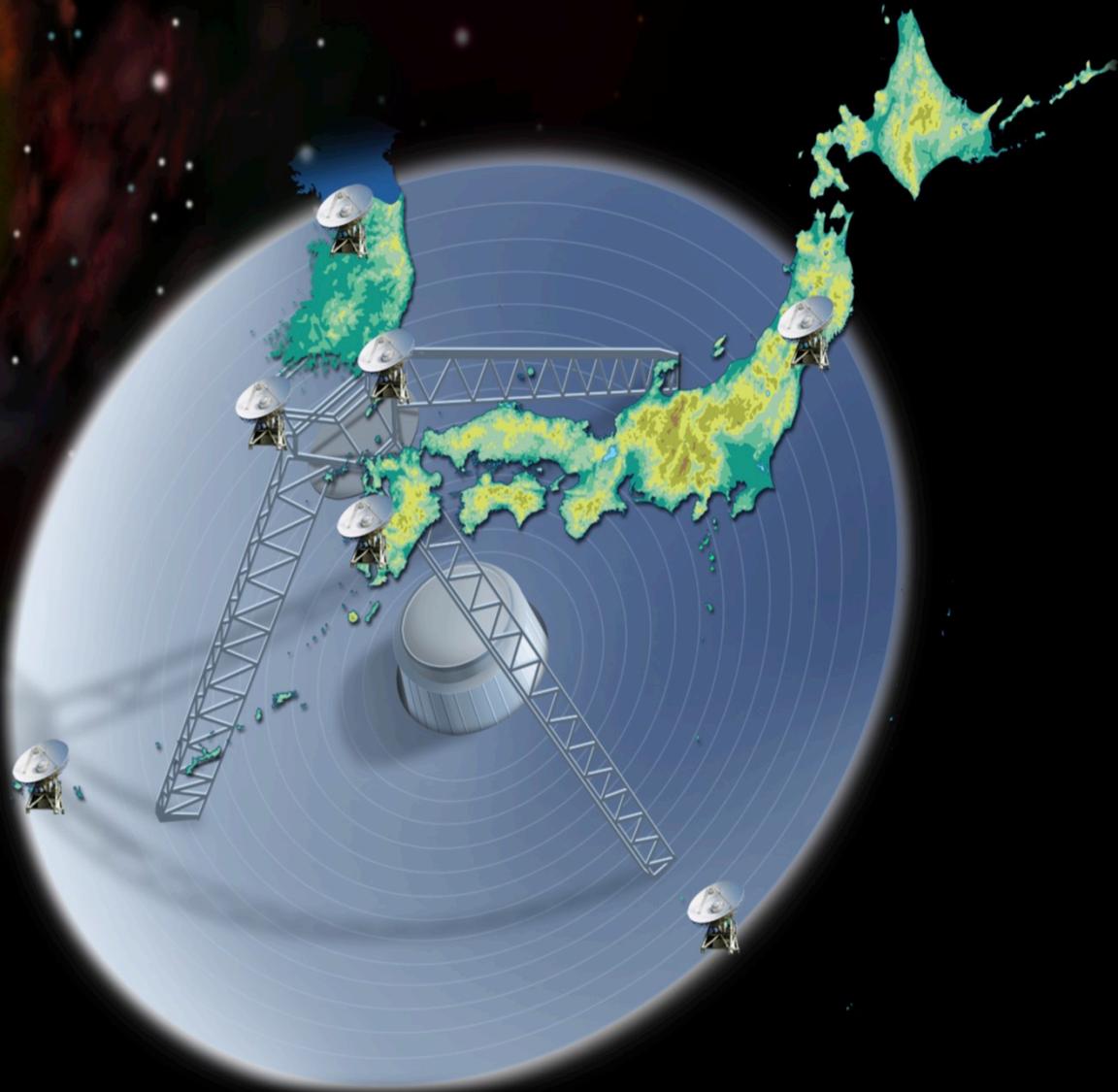
- VERA単独、KVN単独に比べ画像の雑音レベルを3倍以上も抑えることができる
- 高い解像度を維持しつつ、輝度が弱くなるジェット下流側の構造まで鮮明に撮影可能に



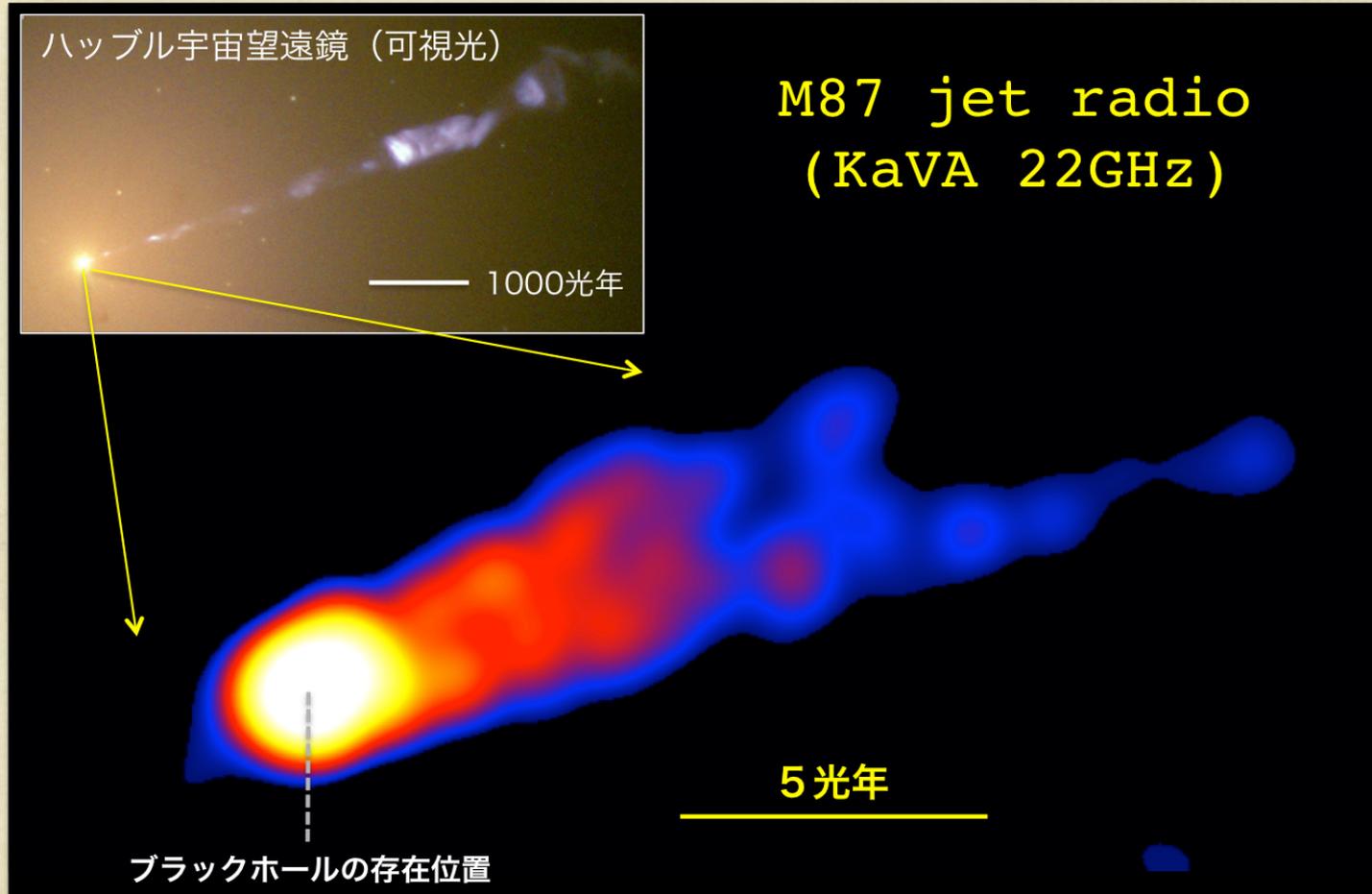
## ○ 自前の望遠鏡である

- 多くの観測時間を自分たち自身のサイエンスに集約
- 日韓の協力により組織化された運用体制
- これまでになく高頻度で定常的なモニター観測が可能な、世界でも類を見ないVLBI観測網が誕生

# 観測成果

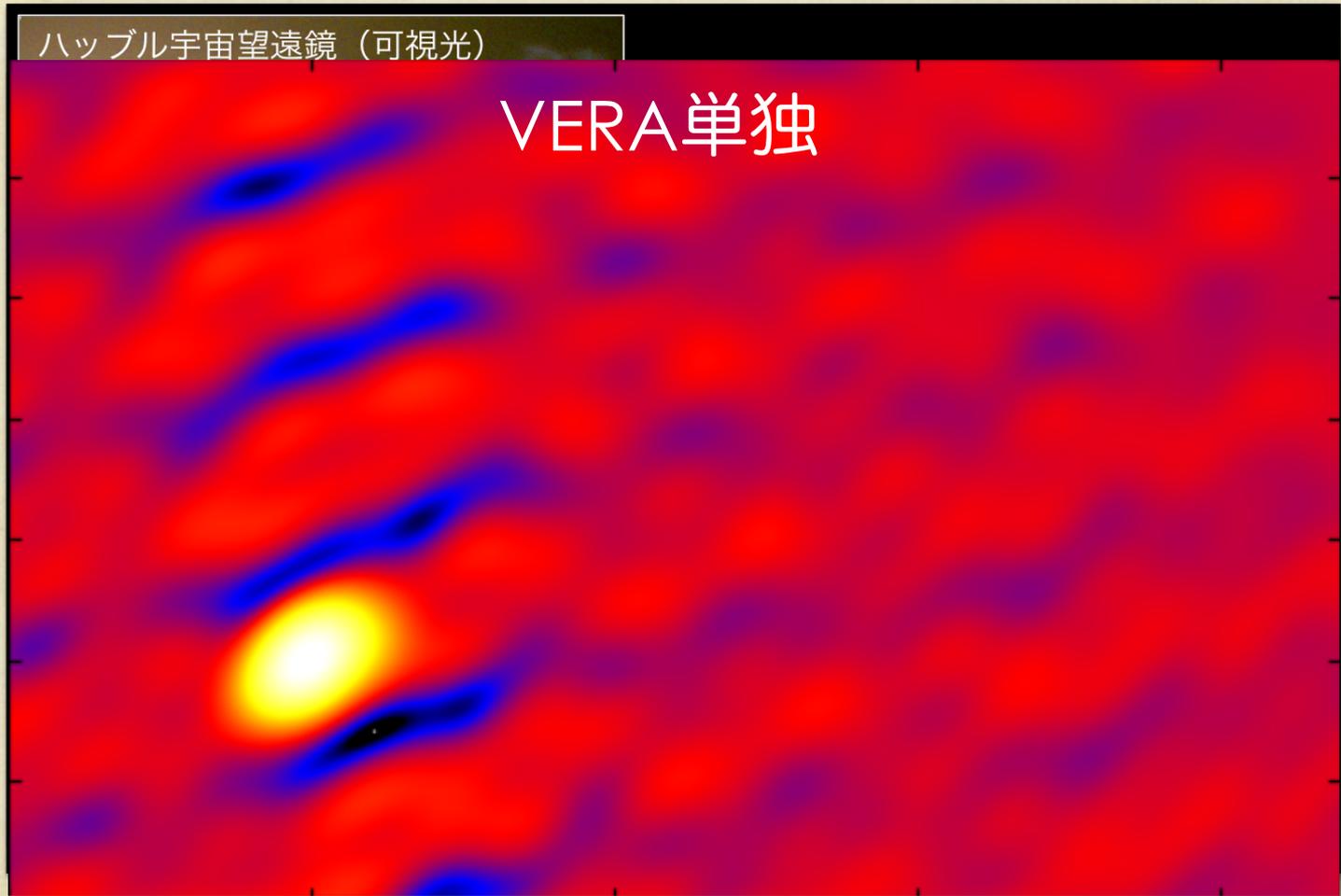


# KaVAで撮影した M87ジェット根元の電波写真



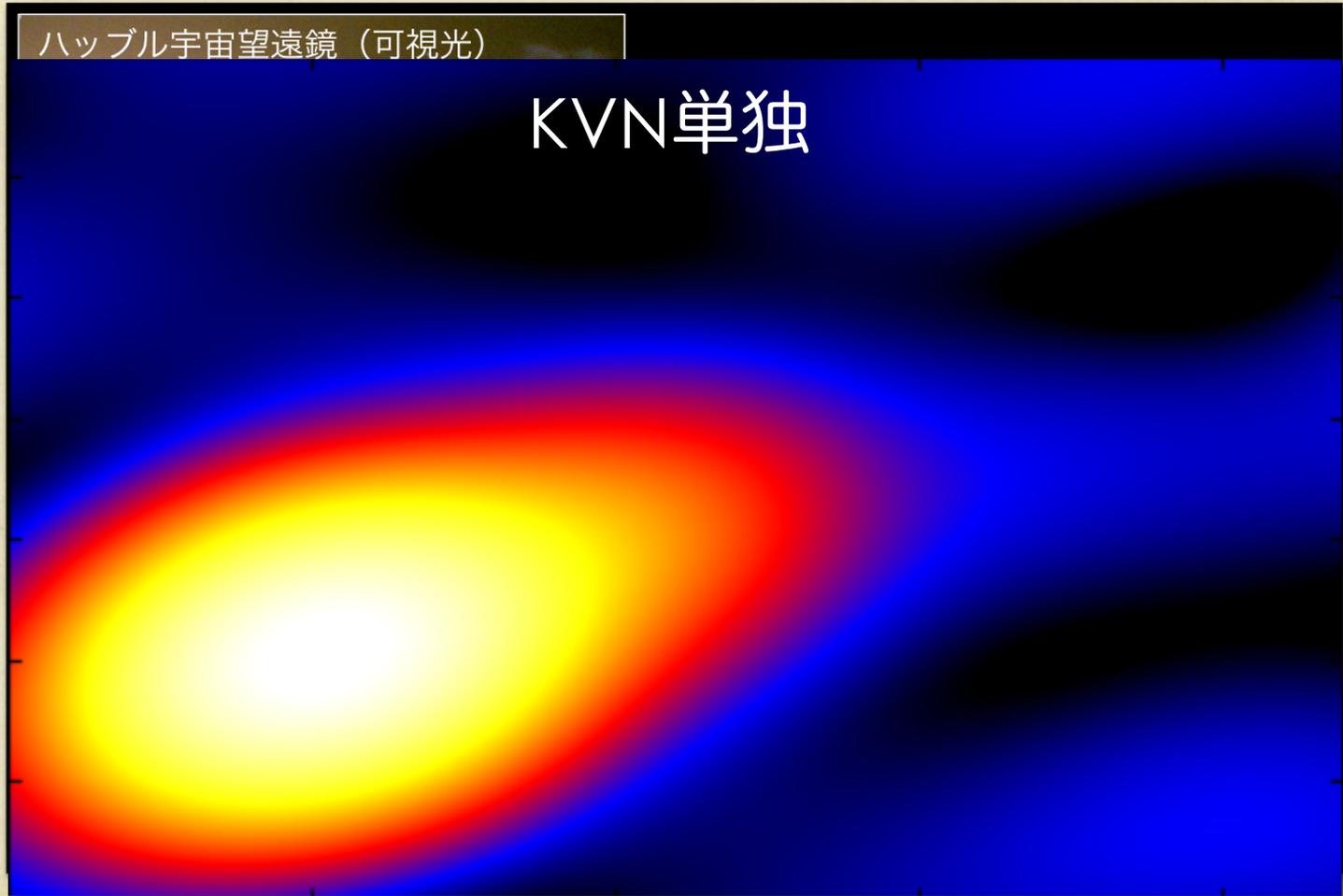
- ジェットの根元10光年以内の構造を鮮明に撮影することが可能に

# KaVAで撮影した M87ジェット根元の電波写真



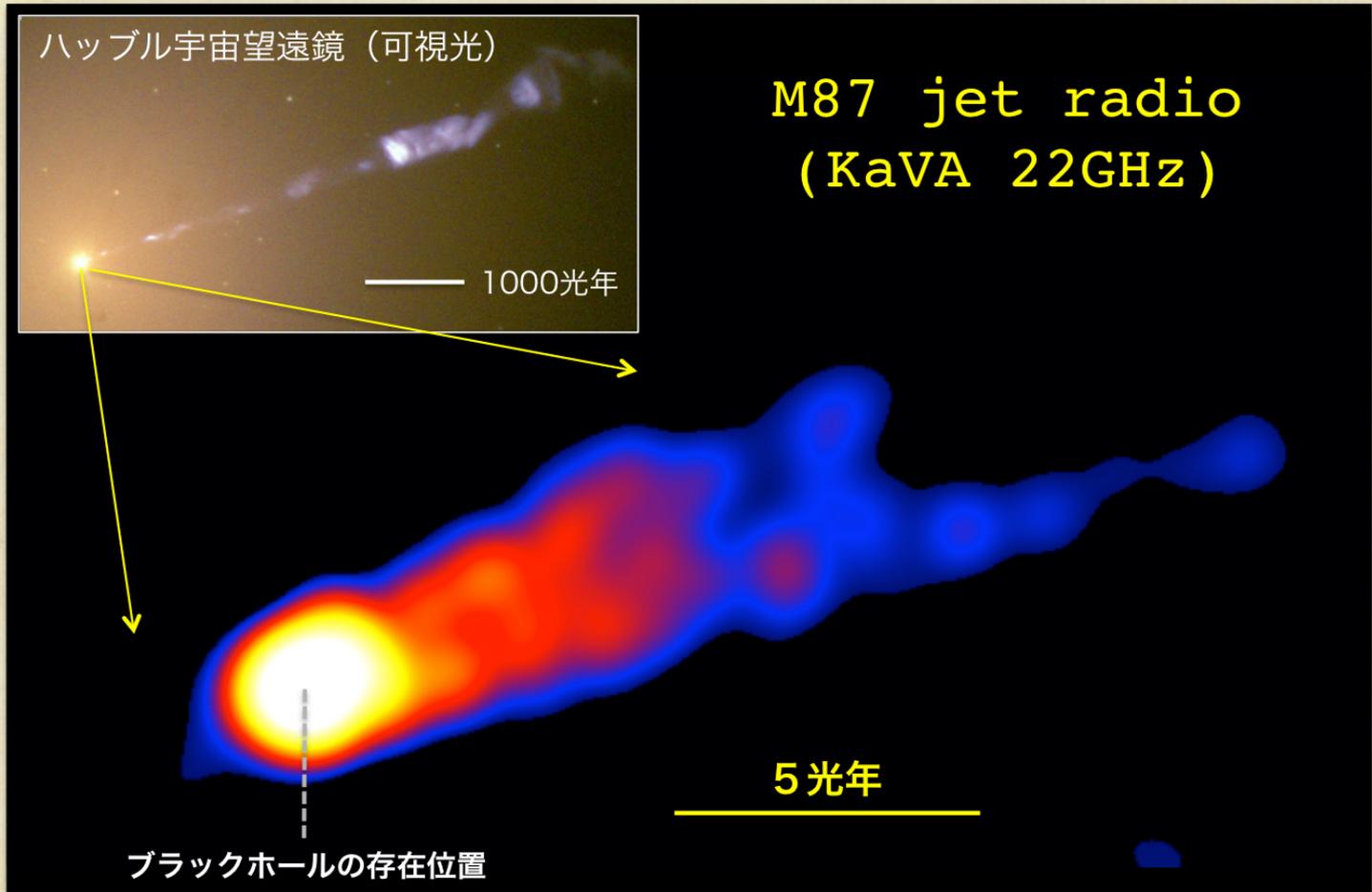
- ジェットの根元10光年以内の構造を鮮明に撮影することが可能に

# KaVAで撮影した M87ジェット根元の電波写真



- ジェットの根元10光年以内の構造を鮮明に撮影することが可能に

# KaVAで撮影した M87ジェット根元の電波写真



- ジェットの根元10光年以内の構造を鮮明に撮影することが可能に
- 2013年12月～2014年6月にかけて2~3週間に1回という高頻度で計13回撮影

# 根元で超光速 噴出流を捉えた!

- 高頻度モニターにより、これまで見落とされていた、ジェット噴出口付近の詳しい運動の様子が明らかに
- BHから噴出後わずか**5光年に満たない地点**においてジェットが超光速運動する様子を発見
- これほどまでにBHに近い根元領域でこの現象が決定的に捉えられたのは今回が初めて
- 先行研究の「根元領域では光速の10~30%以下の遅い速度」という主張とは大きく異なる結果

2013/12/05

2014/01/15

2014/03/02

2014/05/03

2014/06/14

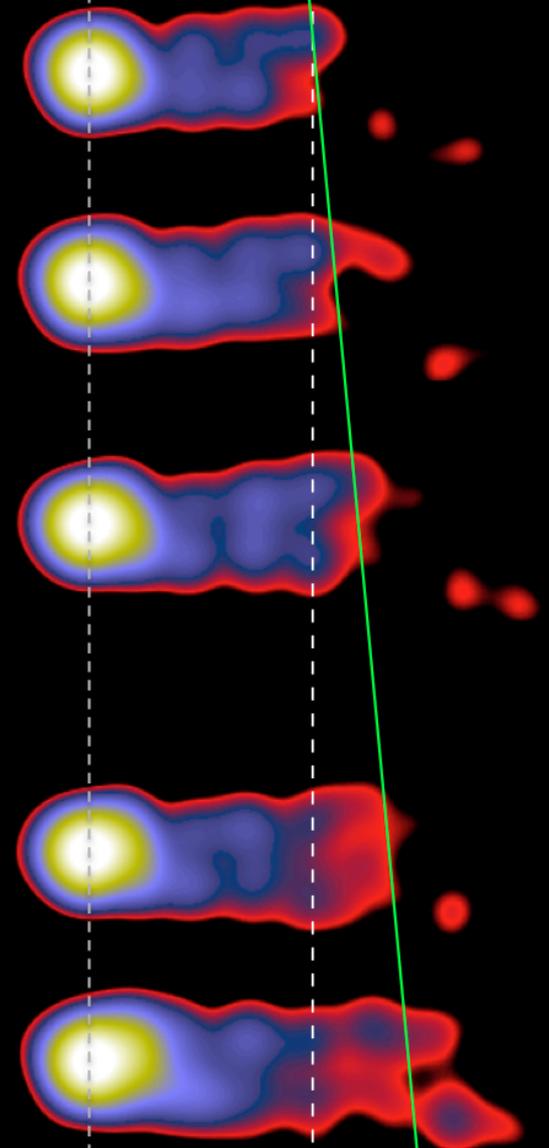
3光年

M87 jet

巨大ブラックホールの  
存在位置

$v=0$

$v=c$



# 本成果の意義

- 大きく2つ

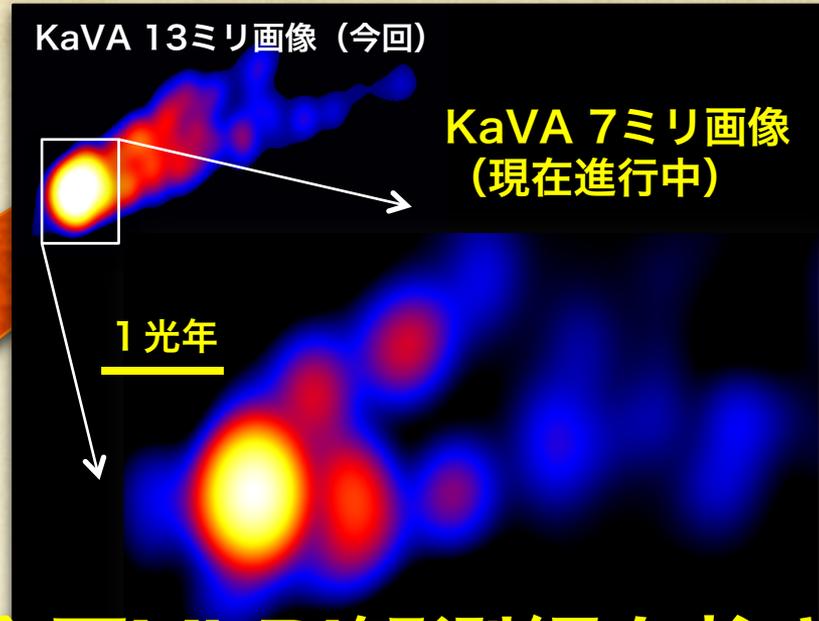
- 観測的な側面での意義

- 根元での運動を正確に測定するためには高頻度でモニター観測をすることが決定的に重要であることを示した

- 理論的な側面での意義

- これまで考えられていたよりも10倍以上もBHに近い位置でジェットを極めて速い速度に加速させる必要があることを示した。  
理論研究への新たな宿題

# 今後の 展望

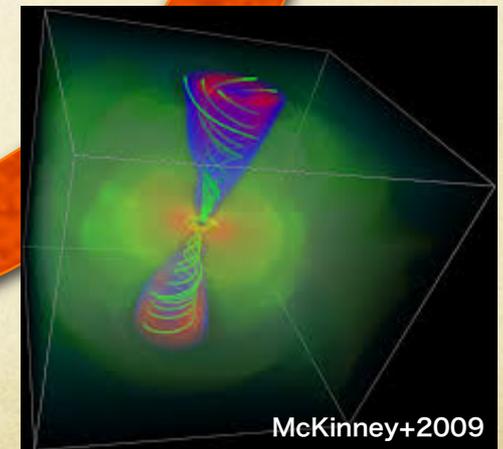


本プロジェクト  
はまさに始動し  
たばかり。  
KaVAによる根  
元の更なる詳細  
モニターを現在  
実施中

## 日韓合同VLBI観測網を柱として BHジェット形成・加速機構の決定的解明へ



「事象の地平線望遠鏡」による  
ブラックホールの観測



最新のコンピュータ  
シミュレーション

# まとめ

- 巨大BHからのジェットの生成・加速メカニズムは現代天文学における最難問の1つ
- ジェットがBHから噴出されて間もない地点での運動の様子を高い頻度でモニターできる観測が必要 - 「日韓合同VLBI観測網(KaVA)」
- 最近傍の巨大BHジェット天体であるM87を対象に、根元領域の運動をKaVAを用いてかつてないほど高頻度(約2~3週間毎)にモニター実施
- その結果、ジェットがBHから噴出直後といえる、わずか5光年に満たない地点において超光速運動を発見
- これまで考えられていたよりも10倍以上もBHに近い位置でジェットが既に極めて速い速度に加速されていることを突き止めた
- この日韓共同プロジェクトはまさに始動したばかり。今後はKaVAによる更なる詳細なモニター観測を実施し、他の望遠鏡のデータや最新の理論シミュレーションとも比較することで、ジェットの形成・加速機構の解明を目指す

**本プロジェクトの今後の進展にも是非ご注目ください！**

# 補足資料

# 超光速運動とは

- ジェットの実際の速度が光速 ( $c$ ) に非常に近い速度でほとんど観測者の方向に向かって運動する時に観測される「見かけ上」の運動です。
- 1970年代から多数の活動銀河ジェットで見つかっていますが、観測の詳細を考えると、実際のジェットの速さは光速を越えている必要はなく、相対性理論とは矛盾せずに説明ができることがわかっています。

# 超光速運動の原理

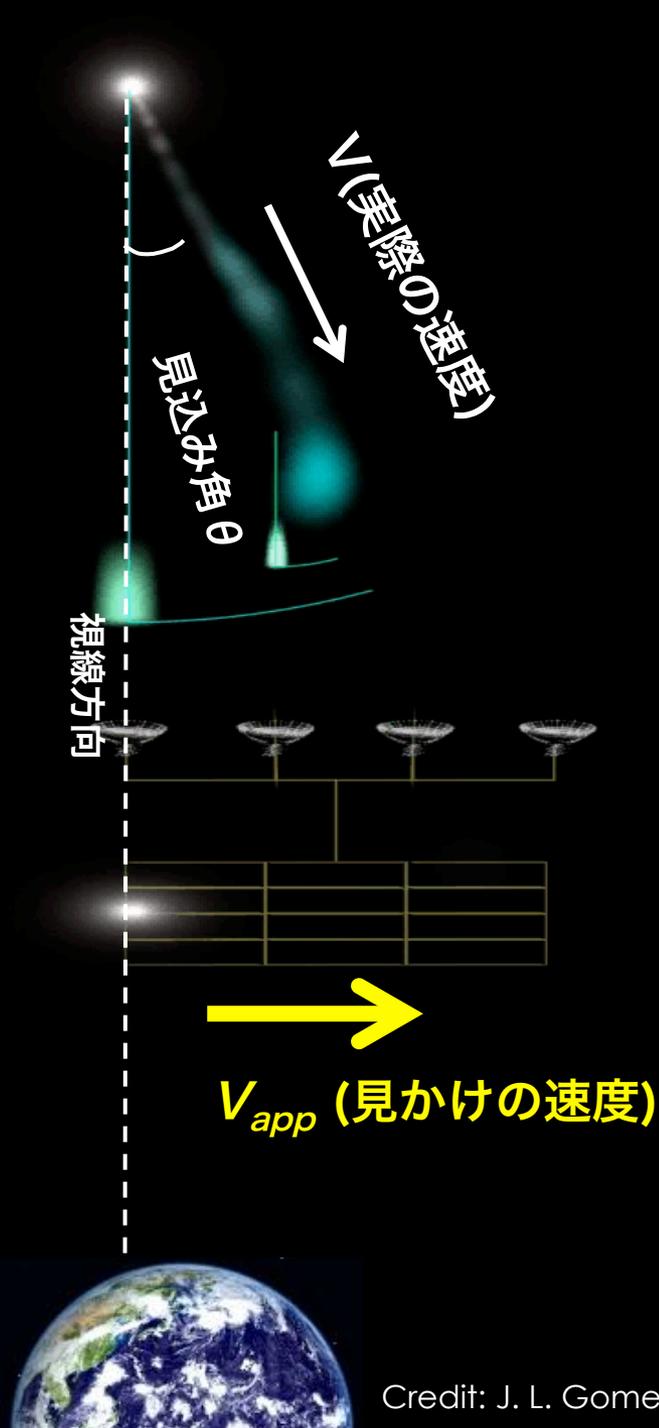
- 光速に近い速度で観測者の方向に小さな見込み角  $\theta$  をもって運動している物体から、例えば1年毎に信号(=光速で伝わる光や電波)をチカチカ発信してみる
- 観測者には、1年よりも短い周期で(図では右に動く)チカチカ点滅が観測される
- 速度 = 進んだ距離 ÷ 時間間隔

$$v_{\text{app}} = \frac{v \sin \theta}{1 - (v/c) \cos \theta}$$

$v/c \ll 1$  の極限では

$$V_{\text{app}} = V \sin \theta$$

私達の日常の世界の速度ベクトルの分解と同じ



# 超光速運動の原理

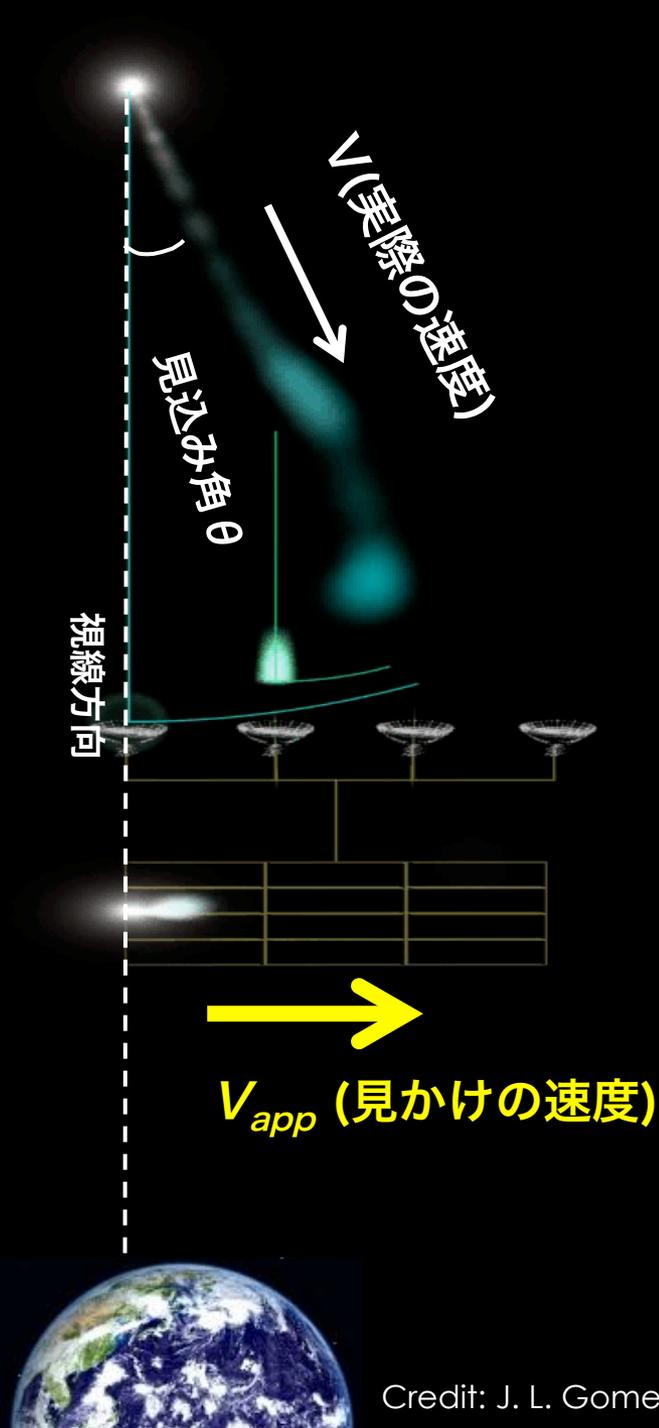
- 光速に近い速度で観測者の方向に小さな見込み角  $\theta$  をもって運動している物体から、例えば1年毎に信号(=光速で伝わる光や電波)をチカチカ発信してみる
- 観測者には、1年よりも短い周期で(図では右に動く)チカチカ点滅が観測される
- 速度 = 進んだ距離 ÷ 時間間隔

$$v_{\text{app}} = \frac{v \sin \theta}{1 - (v/c) \cos \theta}$$

$v/c \ll 1$  の極限では

$$V_{\text{app}} = V \sin \theta$$

私達の日常の世界の速度ベクトルの分解と同じ



# 超光速運動の原理

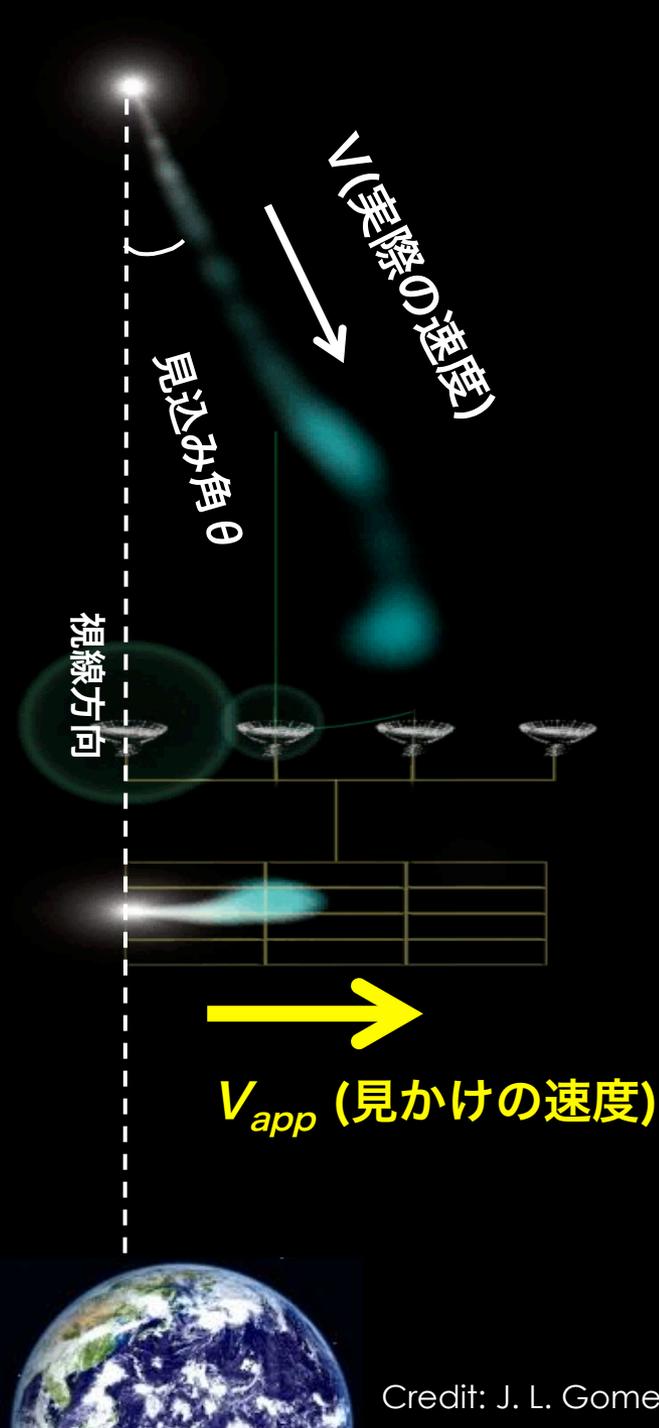
- 光速に近い速度で観測者の方向に小さな見込み角  $\theta$  をもって運動している物体から、例えば1年毎に信号(=光速で伝わる光や電波)をチカチカ発信してみる
- 観測者には、1年よりも短い周期で(図では右に動く)チカチカ点滅が観測される
- 速度 = 進んだ距離 ÷ 時間間隔

$$v_{\text{app}} = \frac{v \sin \theta}{1 - (v/c) \cos \theta}$$

$v/c \ll 1$  の極限では

$$V_{\text{app}} = V \sin \theta$$

私達の日常の世界の速度ベクトルの分解と同じ



# 超光速運動の原理

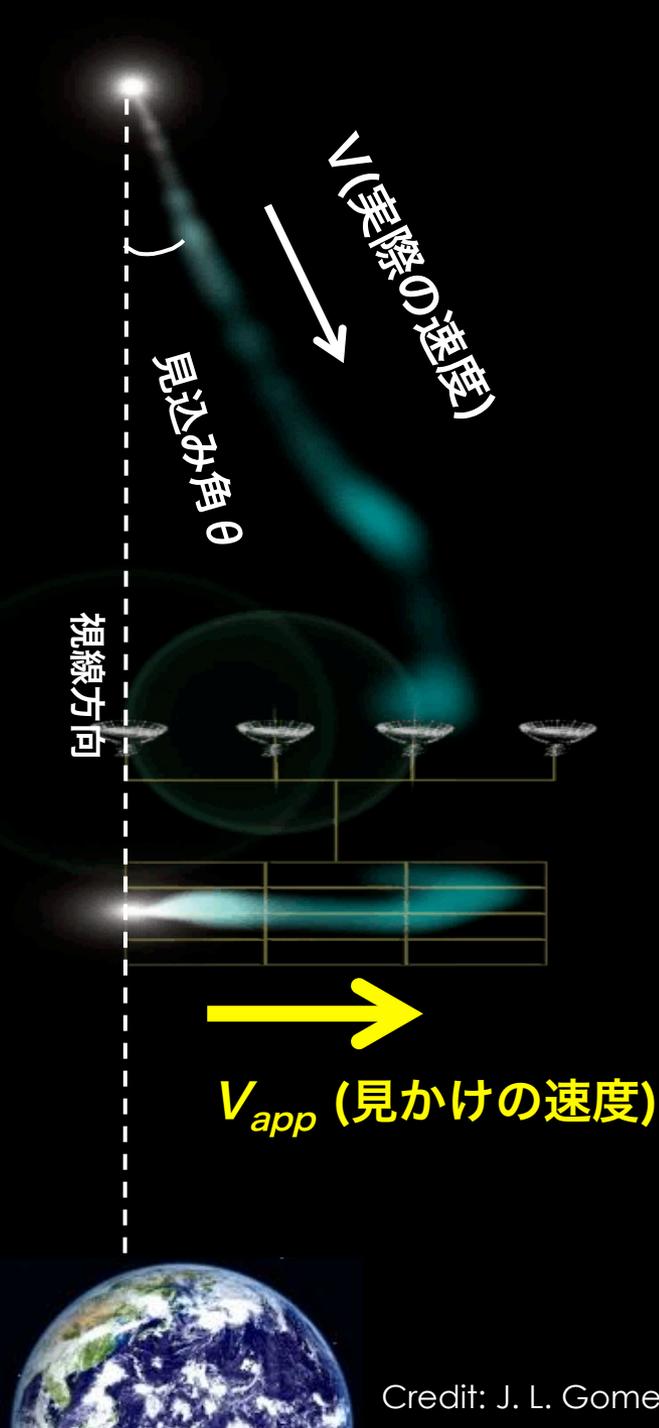
- 光速に近い速度で観測者の方向に小さな見込み角  $\theta$  をもって運動している物体から、例えば1年毎に信号(=光速で伝わる光や電波)をチカチカ発信してみる
- 観測者には、1年よりも短い周期で(図では右に動く)チカチカ点滅が観測される
- 速度 = 進んだ距離 ÷ 時間間隔

$$v_{\text{app}} = \frac{v \sin \theta}{1 - (v/c) \cos \theta}$$

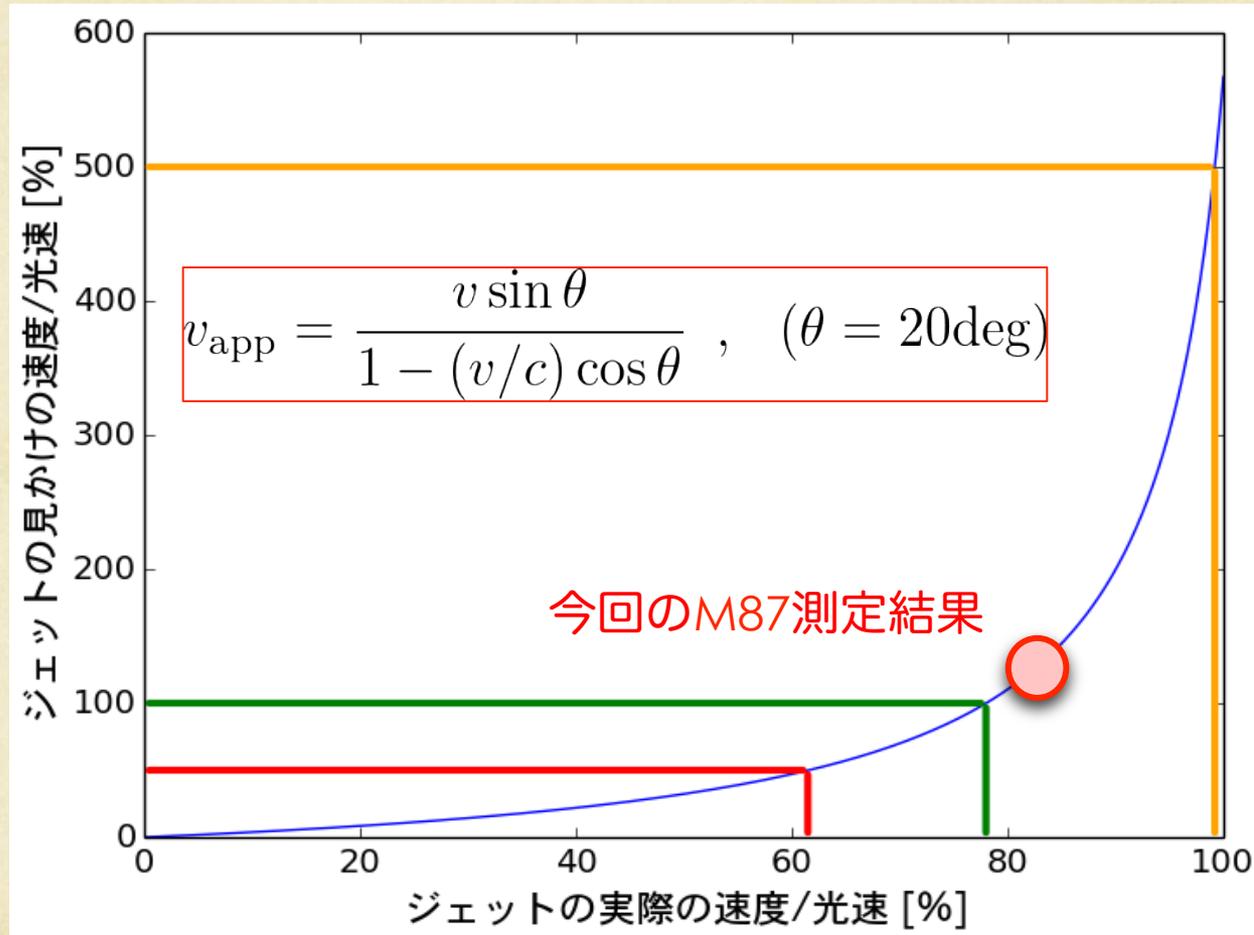
$v/c \ll 1$  の極限では

$$V_{\text{app}} = V \sin \theta$$

私達の日常の世界の速度ベクトルの分解と同じ



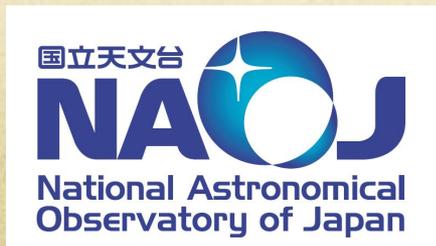
# 今回のM87ジェット根元の超光速運動結果から導出される「実際の速度」



光速の110%を超える超光速運動 => ジェットの実際の運動速度は光速の80%以上  
(但し、ジェットの視線方向からの見込み角 = 20度と仮定)

# 研究チーム

- 秦 和弘 (国立天文台 水沢VLBI観測所 助教)
- 紀 基樹 (韓国天文宇宙科学研究院 特任上席研究員)
- 朴 鐘浩 (ソウル大学校 大学院生)
- 新沼 浩太郎 (山口大学 理工学研究科 准教授)
- 孫 烽源 (韓国天文宇宙科学研究院 上席研究員)
- ほか 日韓合同VLBI観測網サイエンスワーキンググループ



# 関連webサイト

- 研究チームの過去の関連研究 記者発表資料
  - 2011年9月 国立天文台 <http://www2.nao.ac.jp/~m87blackhole/>
  - 2013年9月 東北大学 <http://www.miz.nao.ac.jp/content/pr/pr20130909/c01>
- 国立天文台水沢VLBI観測所webページ
  - <http://www.miz.nao.ac.jp/>
- 日韓合同VLBI観測網KaVA webページ
  - [http://radio.kasi.re.kr/kava/main\\_kava.php](http://radio.kasi.re.kr/kava/main_kava.php)
- 韓国KVN webページ
  - <http://radio.kasi.re.kr/kvn/kvn.php>
- サブミリ波VLBI (Event Horizon Telescope) webページ
  - <http://www.miz.nao.ac.jp/submilli/top/>
- ALMA望遠鏡 webページ
  - <http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/>

# 本学会における関連講演

- 活動銀河核 S11a
- 「日韓合同VLBI観測網KaVAによるM87ジェット加速領域の高頻度・高解像度モニター」
- 秦 和弘 (国立天文台)