

# VLBI・単一鏡モニター観測による 活動銀河核ジェットの 高エネルギー放射領域の探査

永井 洋  
(国立天文台)

On behalf of GENJI Programme and  
Japan-Italy Collaboration\*

\*) Italian Ministry of Foreign Affairs and University and Research for the collaboration project between Italy and Japan

# トークの内容

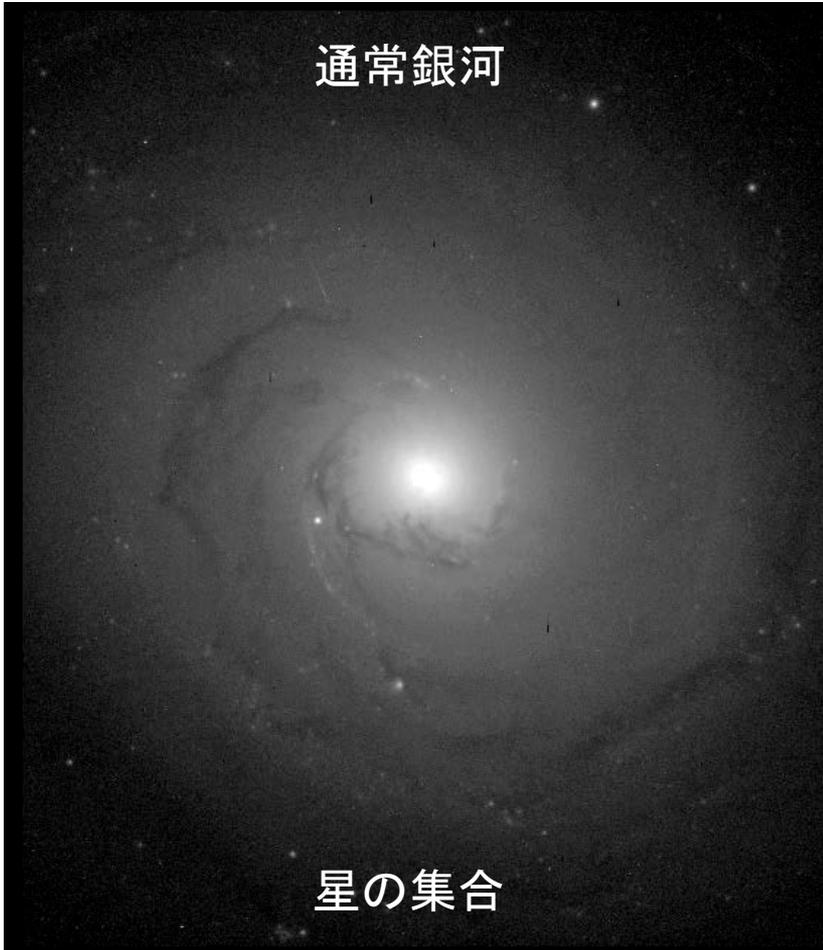
VLBI(特にVERA)+単一鏡をもちいた高頻度モニター観測によって、活動銀河核ジェットの高エネルギー放射(ガンマ線放射)領域を探查する研究について紹介

1. イントロダクション
2. 「GENJIプログラム+ $\alpha$ 」による成果
3. 関連研究の紹介

# 1. イントロダクション

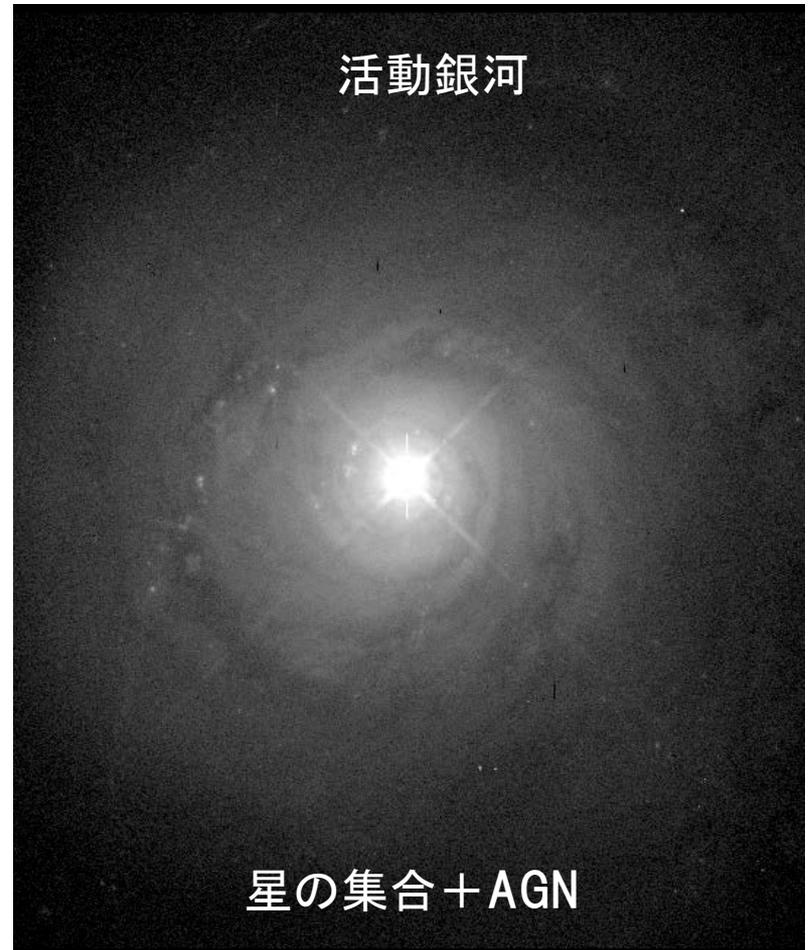
# 活動銀河

通常銀河



星の集合

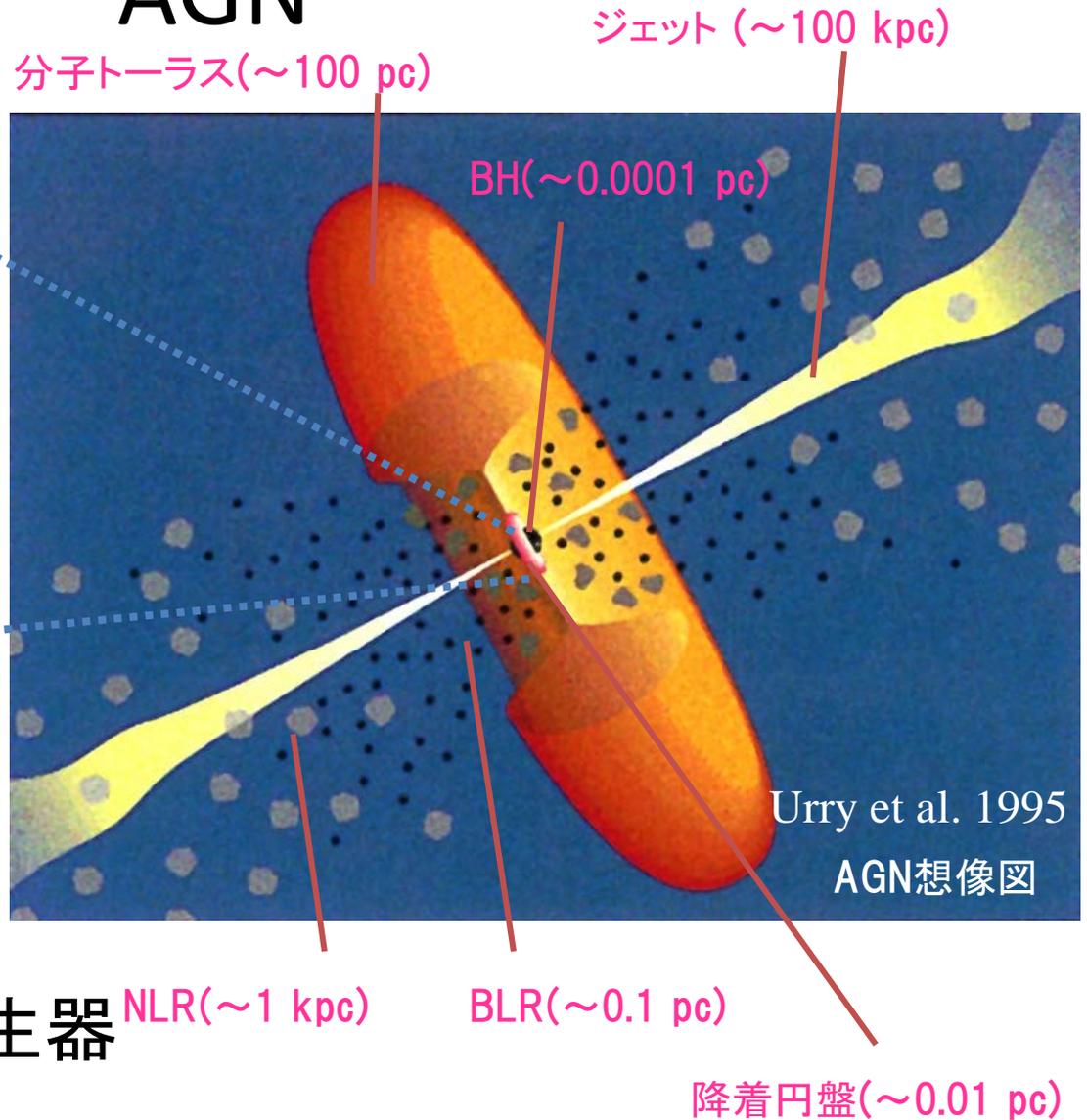
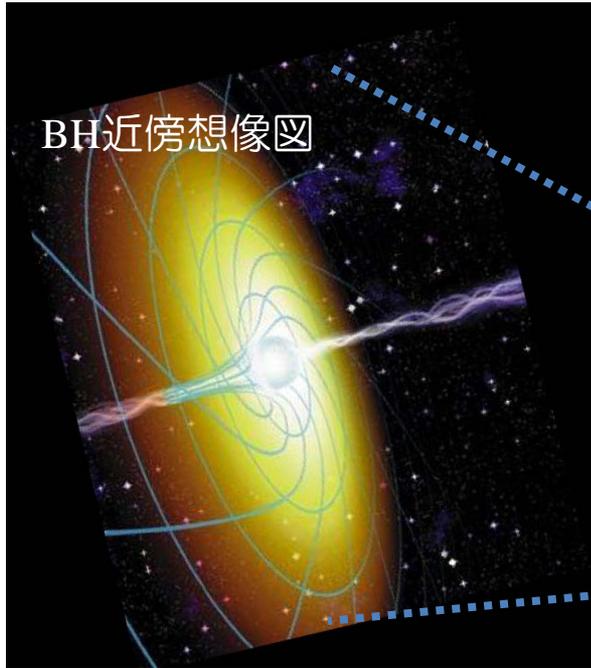
活動銀河



星の集合 + AGN

活動銀河 = 銀河 + 活動銀河核 (AGN)

# AGN



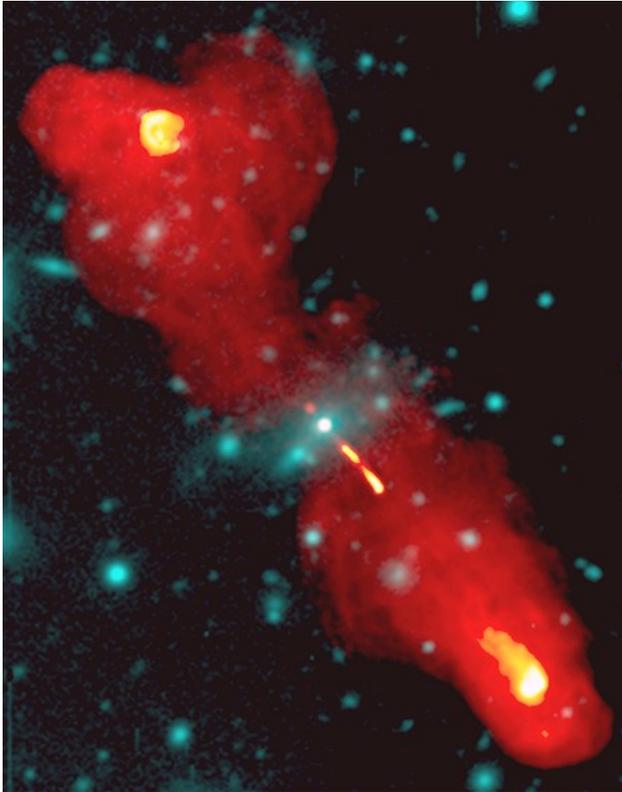
- 超巨大BHのホスト

$$M_{\text{BH}} \sim 10^6 - 10^9 M_{\text{sun}}$$

- 巨大なエネルギー発生器

$$L_{\text{中心核}} \sim 10^{33} - 10^{41} \text{ W}$$

# ジェット



## VLBA 22 GHz Observations of 3C120

*José-Luis Gómez*

*IAA (Spain)*

*Alan P. Marscher*

*BU (USA)*

*Antonio Alberdi*

*IAA (Spain)*

*Svetlana Marchenko-Jorstad*

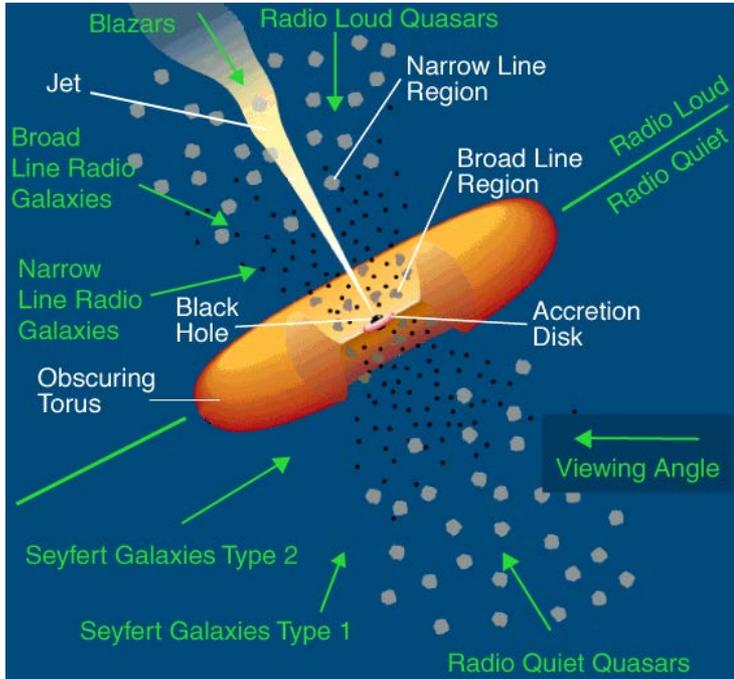
*BU (USA)*

*Cristina García-Miró*

*IAA (Spain)*

- 約10%の割合のAGNがradio-loudで、強力なジェットを持つ
- サイズ $\sim 100\text{kpc}$ , 速度 $>0.99c$

# Radio-loud AGN



- Radio-loud AGN

- 視線角小: blazars

- BL Lacs, FSRQs

- 視線角大: 電波銀河 (misaligned blazars)

- FRI, FRII

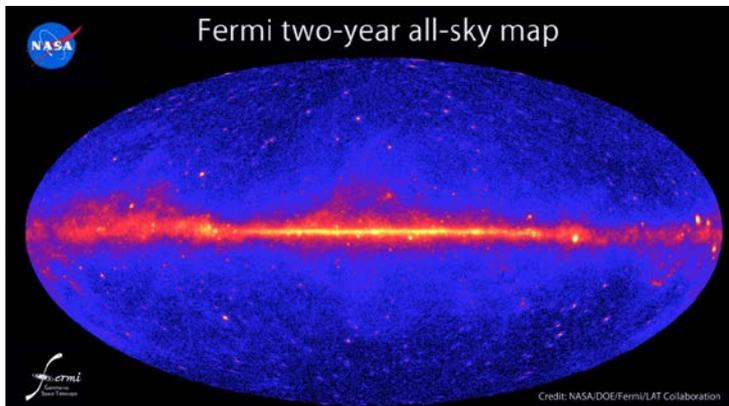
- $\gamma$ 線 (Fermi 2-year) うち40天体はTeV源

- FSRQs: 360天体

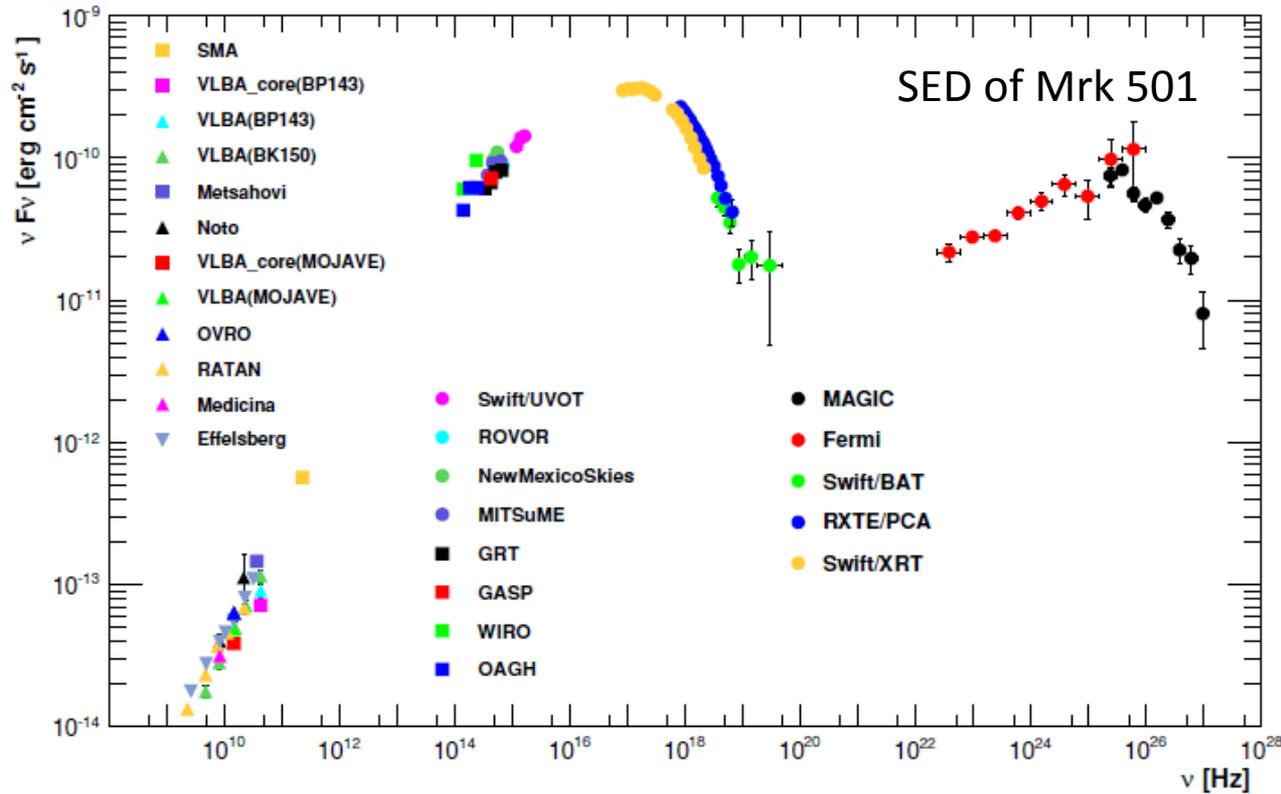
- BL Lacs: 420天体

- unknown type: 160天体

- 電波銀河、その他: ~20天体



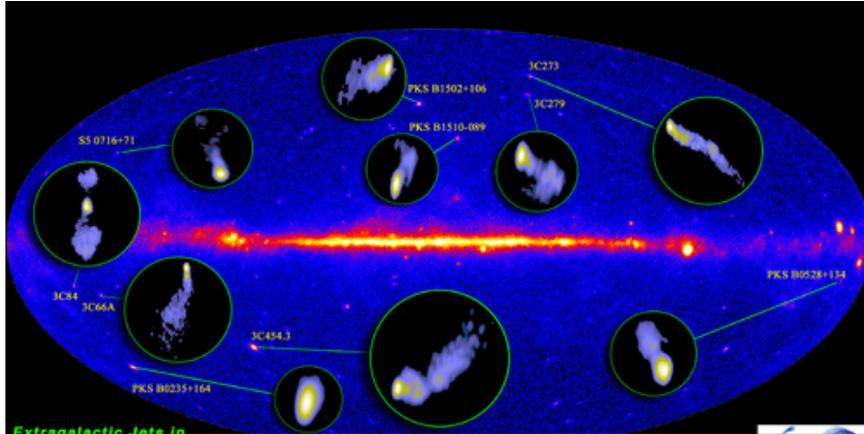
# 高エネルギー放射



Paneque+

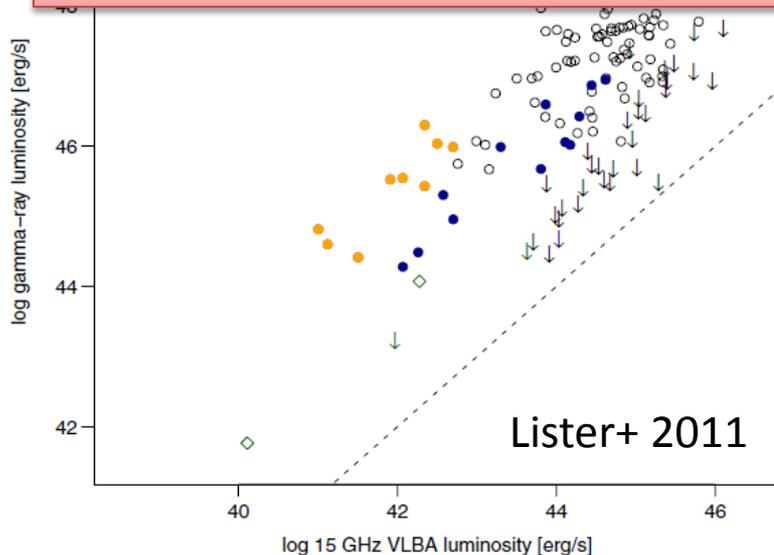
- シンクロトン光子または外部光子を叩き上げる逆コンプトン過程で高エネルギー放射が生まれる
- どこで高エネルギー放射が生まれるかは研究途上

# $\gamma$ 線光度 vs. 電波光度



- VLBIで抽出した電波光度(≡ジェットの本元付近の光度)と $\gamma$ 線光度はよく相関

密なVLBIモニター観測によって、 $\gamma$ 線変動と相関する成分を抽出できることが期待できる



射はジェットの本元付近(sub-pcからpc領域)と関連していると考えて良さそう

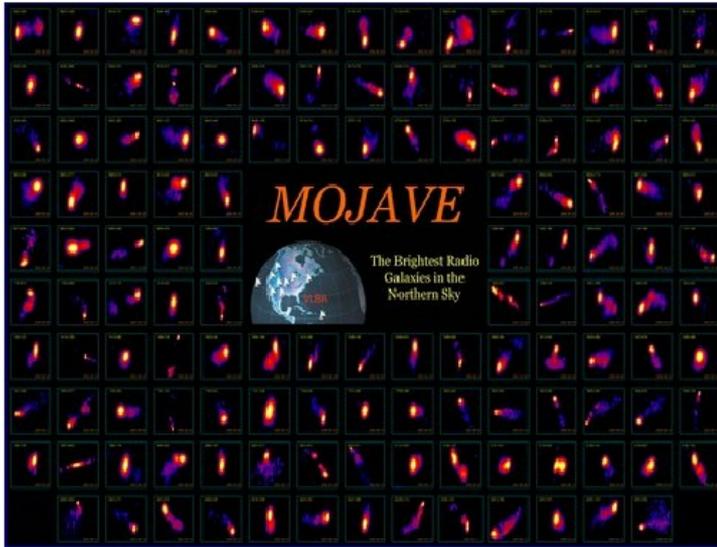
## Ten Challenges

1. Locate the sites of radio,  $\gamma$  emission
2. Map jet velocity fields
3. Identify the emission mechanism
4. Understand the changing composition
5. Measure jet pressures
6. Deduce jet confinement mechanism
7. Infer jet powers, thrusts
8. Test and apply central hypothesis
9. BHGRMHD capability
10. Quantify role in clusters



R. Blandford  
(Stanford/KIPAC)

# VLBIモニターによる $\gamma$ 線放射領域の探査

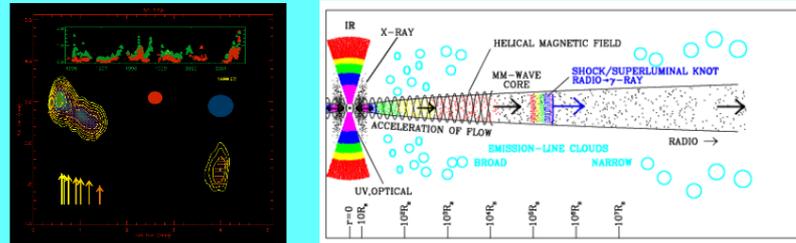


## MOJAVE

- 望遠鏡: VLBA
- 周波数: 15GHz
- 空間分解能:  $\sim 0.7$  mas
- サンプリング頻度:  $\sim 3$  カ月
- 天体数:  $> 100$  天体

## Boston University Blazar Group

Large VLBA Project: Total & Polarized Intensity Images of Gamma-Ray Bright Blazars at 43 GHz



Monthly Images of Gamma-Ray Blazars with the VLBA at 43 GHz

Data products available: Individual images in total intensity and polarized intensity, CLEAN model files, and calibrated visibility (*uv*) data files. Click on the source of interest to connect to the images and data files.

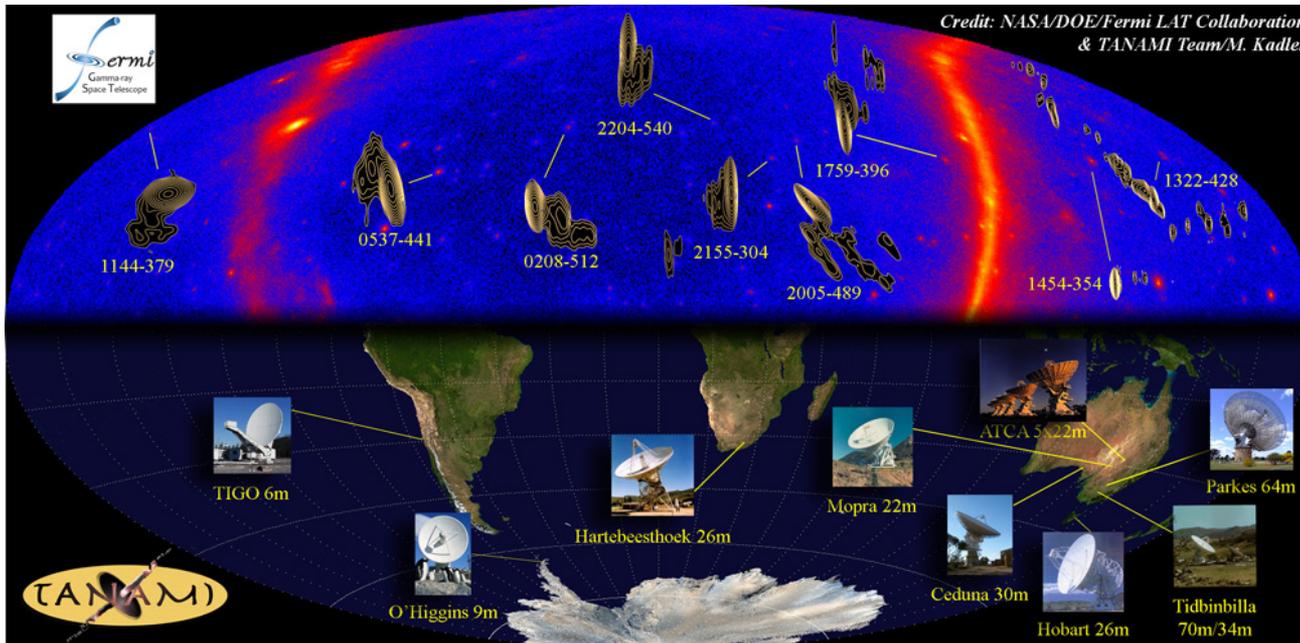
Note: If you use any of these images or data in a publication, please acknowledge via the statement:

This study makes use of 43 GHz VLBA data from the Boston University gamma-ray blazar monitoring program (<http://www.bu.edu/blazars/VLBAproject.html>), funded by NASA through the Fermi Guest Investigator Program.

## Boston Univ. Blazar Project

- 望遠鏡: VLBA (レガシープロジェクト)
- 周波数: 43GHz
- 空間分解能:  $\sim 0.3$  mas
- サンプリング頻度:  $\sim 1$  カ月
- 天体数: 36天体

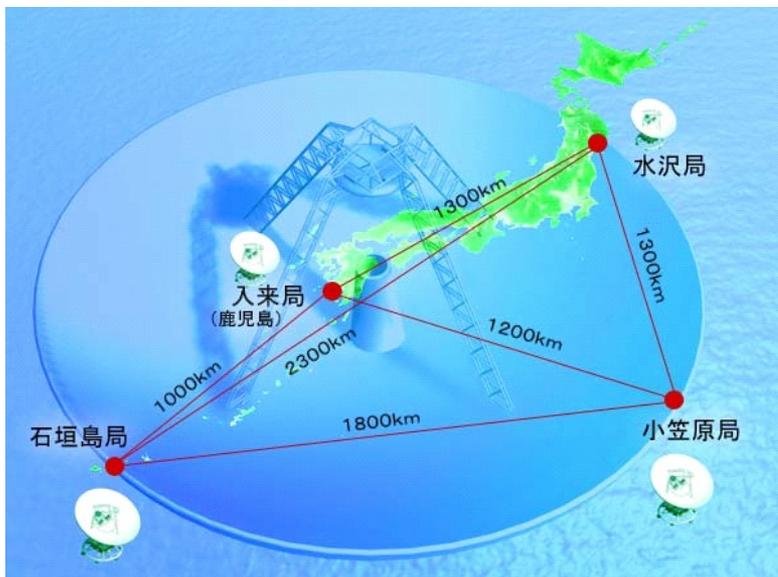
# VLBIモニターによる $\gamma$ 線放射領域の探査



## TANAMI

- 望遠鏡: LBA++
- 周波数: 8, 22GHz
- 空間分解能:  $\sim 1$  mas
- サンプリング頻度:  $\sim 2$  カ月
- 天体数: 46天体

# VLBIモニターによる $\gamma$ 線放射領域の探査



## GENJI

- 望遠鏡: VERA
- 周波数: 22GHz
- 空間分解能:  $\sim 1$  mas
- サンプリング頻度:  $\sim 2$  週間
- 天体数:  $\sim 10$  天体

PASJ: Publ. Astron. Soc. Japan, 1-??,  
© 2012. Astronomical Society of Japan.

Nagai et al. 2013

## GENJI Programme: Gamma-ray Emitting Notable AGN Monitoring by Japanese VLBI

Hiroshi NAGAI,<sup>1</sup> \* Motoki KINO,<sup>1</sup> Kotaro NIINUMA,<sup>2</sup> Kazunori AKIYAMA,<sup>3,1,8</sup> Kazuhiro HADA,<sup>4</sup> Shoko KOYAMA,<sup>3,1</sup> Monica ORIENTI,<sup>4,5</sup> Koichiro HIURA,<sup>6</sup> Satoko SAWADA-SATOH,<sup>7</sup> Mareki HONMA,<sup>1</sup> Gabriele GIOVANNINI,<sup>4,5</sup> Marcello GIROLETTI,<sup>4</sup> Katsunori SHIBATA,<sup>1</sup> & Kazuo SORAI<sup>6</sup>

<sup>1</sup>National Astronomical Observatory of Japan, Osawa 2-21-1, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

<sup>2</sup>Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University, Yamaguchi 753-8512, Japan

<sup>3</sup>Department of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

<sup>4</sup>INAF Istituto di Radioastronomia, via Gobetti 101, 40129, Bologna, Italy

<sup>5</sup>Dipartimento di Astronomia, Università di Bologna, via Ranzani 1, I-40127, Bologna, Italy

<sup>6</sup>Department of Cosmosciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, Kita 10, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan

<sup>7</sup>Mizusawa VLBI Observatory, NAOJ, Hoshigaokacho 2-12, Mizusawa, Oshu, Iwate, 023-0861 Japan

<sup>8</sup>Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS)

(Received : accepted )

## VERA で探る活動銀河核ジェット のガンマ線フレア現象 — GENJI プログラム —



新沼 浩太郎<sup>1</sup>      新沼      永井      紀

新沼 浩太郎<sup>1</sup>  
永井 洋<sup>2</sup>  
紀 基樹<sup>3</sup>

### 他 GENJI プログラムメンバー

(<sup>1</sup> 山口大学理工学研究所 〒753-8512 山口県山口市大文台ナリ観測所 〒181-8588 三鷹市大沢 2-21-1, <sup>3</sup> ISAS/JAXA 〒252-5210 千葉県佐原市山崎 3-1-1)  
e-mail: <sup>1</sup> niinuma@yamaguchi-u.ac.jp, <sup>2</sup> yamao@vso.isas.jaxa.jp, <sup>3</sup> kino@vsop.isas.jaxa.jp

近々発行

活動銀河中心核の巨大ブラックホールから噴出する相対論的プラズマジェット流は、電波から高エネルギーガンマ線にわたる広波長帯において非熱的放射で観測されている。しかし、特に高エネルギーガンマ線がいったいジェット中のどこで生成されるのか？という基本的な問いの答はまだ得られていない。この問題に観測的に取り組むため、われわれは国内の超長基線電波干渉計 (VLBI) である VERA を用いた活動銀河核ジェットの高频度モニタープログラム "GENJI" を開始した。本稿では GENJI プログラムを開始するに至った経緯および初期成果について紹介する。

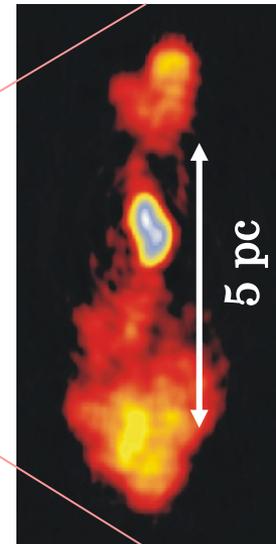
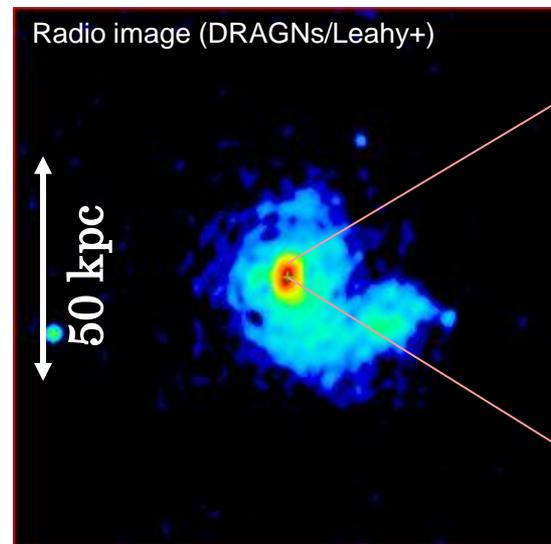
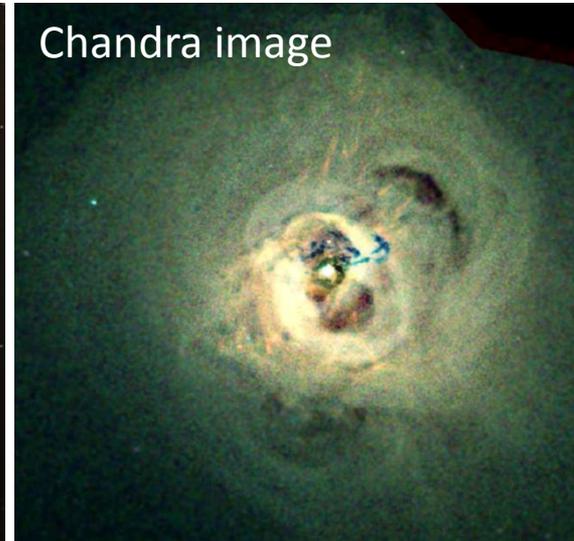
## 2. GENJI+ $\alpha$ の成果

海外のプロジェクトによるエキサイティングな成果も多くあるのですが、茨城大の望遠鏡との関係を考慮して、国内の成果を中心に紹介します

## 2.1 電波銀河3C84

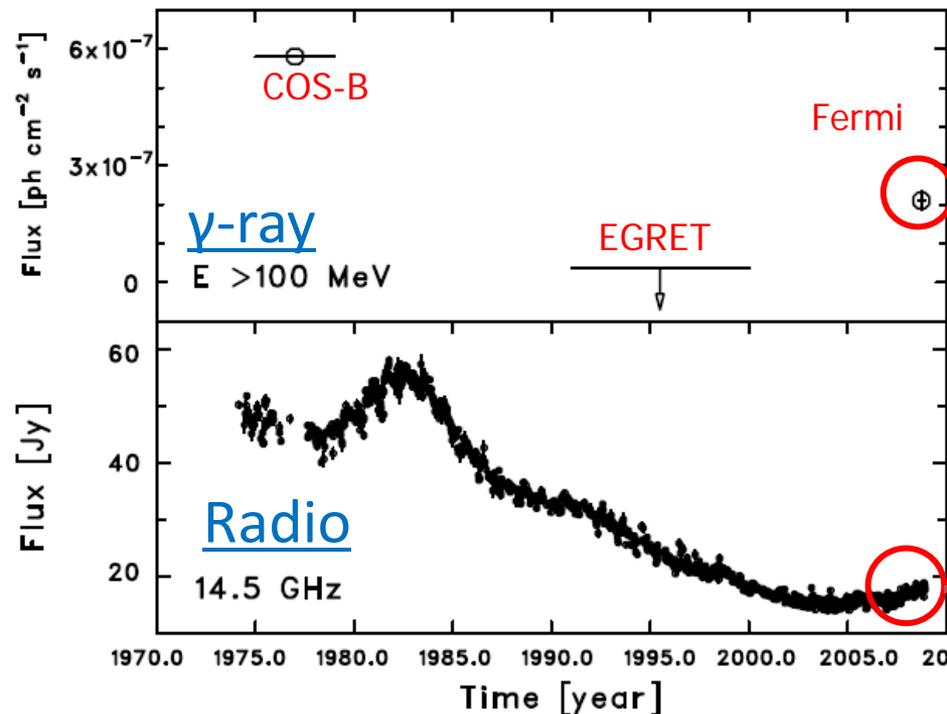
# 電波銀河3C84

- NGC1275/Perseus A
- $z=0.00176$  (70 Mpc)
- “Cooling-core” cluster
- $1 \text{ mas} = 0.35 \text{ pc}$
- Two-sided radio jet
- Fermiによって検出された最初の $\gamma$ 線電波銀河 (Centaurus Aも)



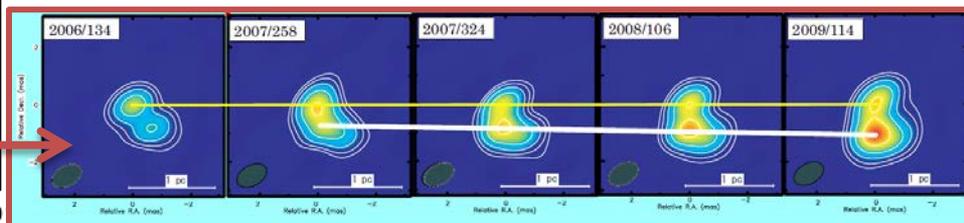
# 電波銀河3C84: GENJIの着想に至った研究

Abdo+2009



- 2008年にFermiによって $\gamma$ 線放射が検出される
- 90年代に比べて7倍以上の明るさに

Nagai+ 2010

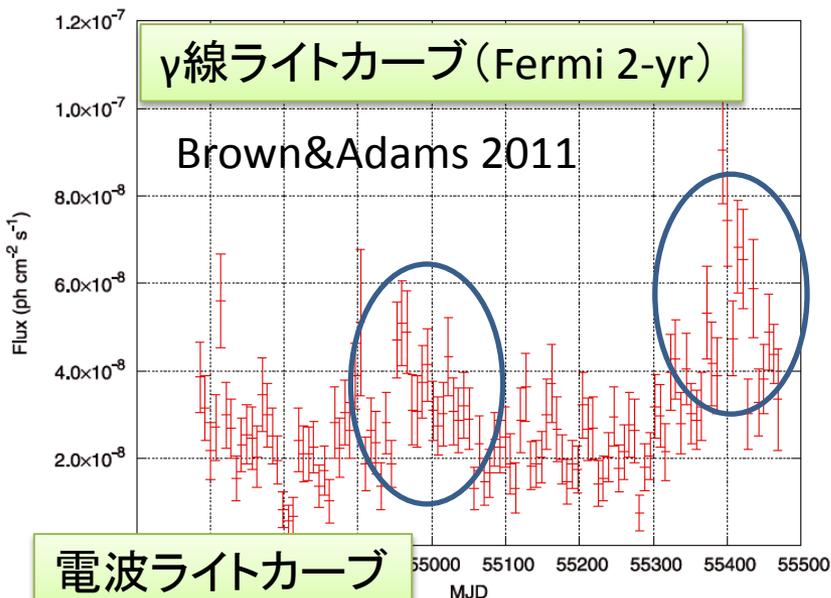


- VLBI観測によって同時期に中心核から新たなジェット成分が放出されたことを確認
- $\gamma$ 線放射は中心1 pc以内に起源か？

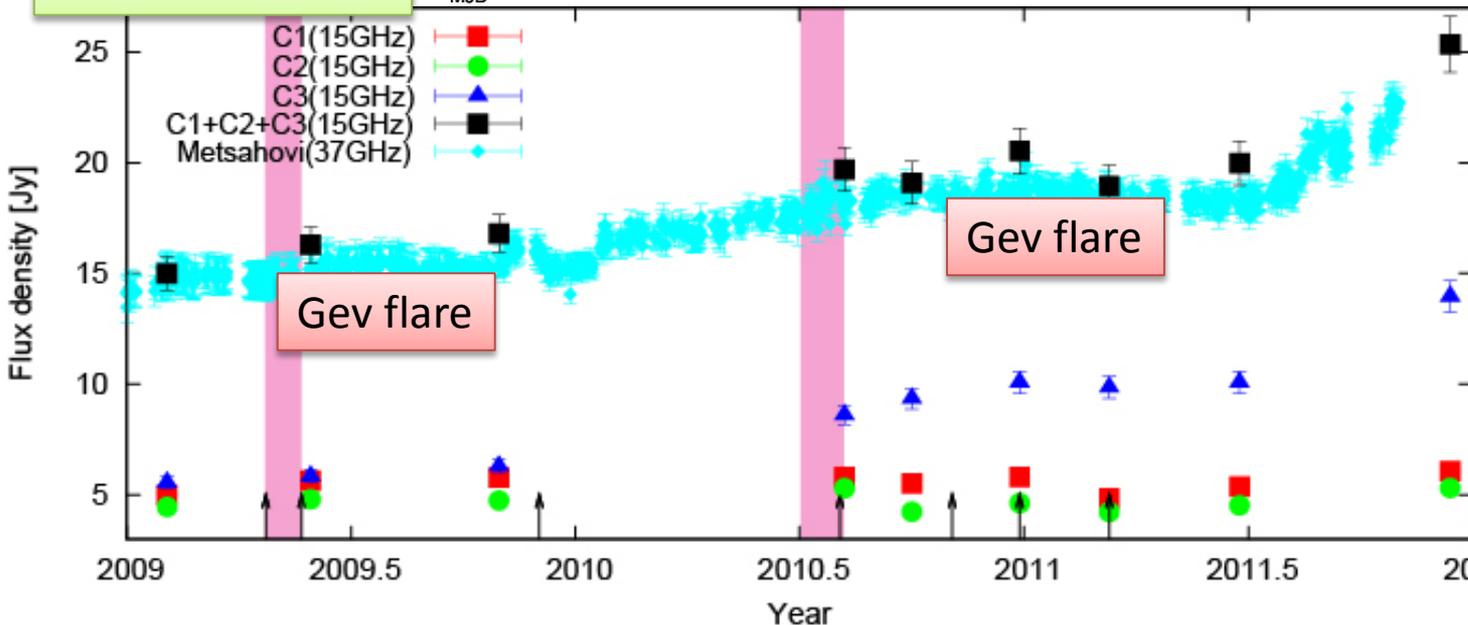
# そう単純ではなかった

- 2回の顕著なガンマ線増光
  - ~days-weeksスケールの変動
- これに対応した電波変動は、単一鏡ライトカーブからは発見できなかった

※単一鏡ライトカーブとVLBIライトカーブのトレンドはよく一致しているので、単一鏡で見られる増光成分はVLBIスケールに起因していると考えてよい

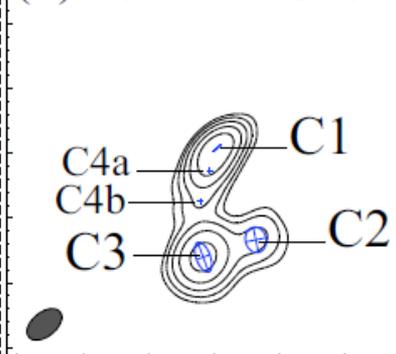


## 電波ライトカーブ



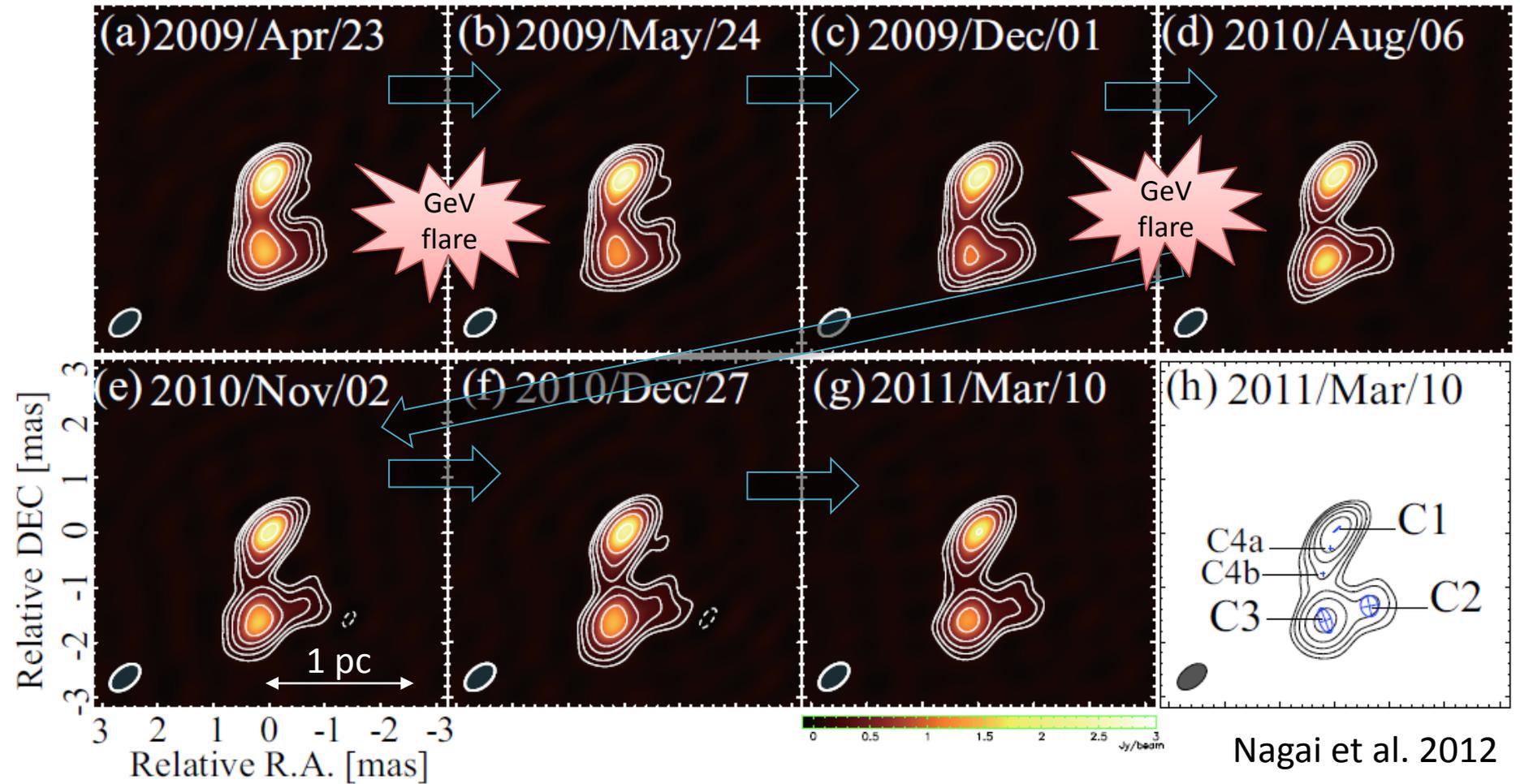
## VLBIイメージ

(h) 2011/Mar/10



Nagai et al. 2012

# VLBIスケールの構造変化



- 顕著な構造の変化は見られなかった

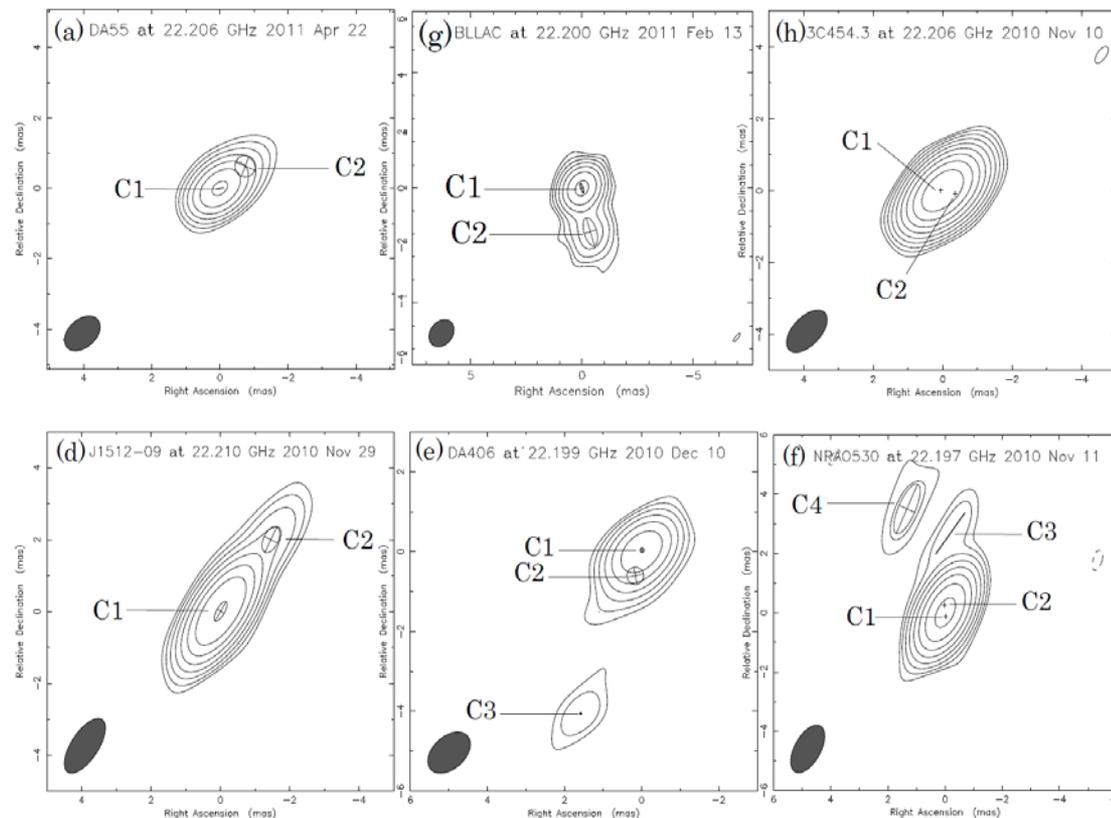
# 電波銀河3C84のまとめ

- 単一鏡＋VLBIモニターによって、ガンマ線変動に関連した電波カウンターパート探査を行った
- 大局的には中心核付近の電波変動とガンマ線変動に関係があるので、ガンマ線増光の起源は中心核付近にある可能性が高い
- 一方で、どの成分が明確な電波カウンターパートなのかは不明

## 2.2 ブレーザー

# Blazars monitored by GENJI

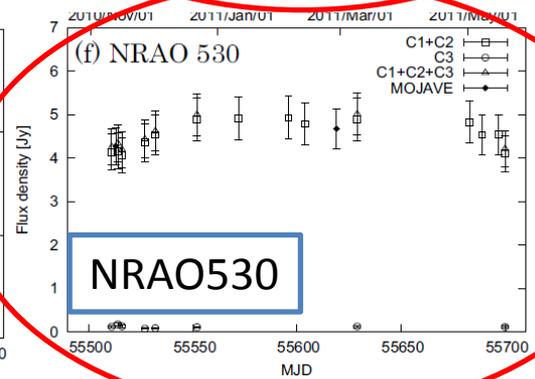
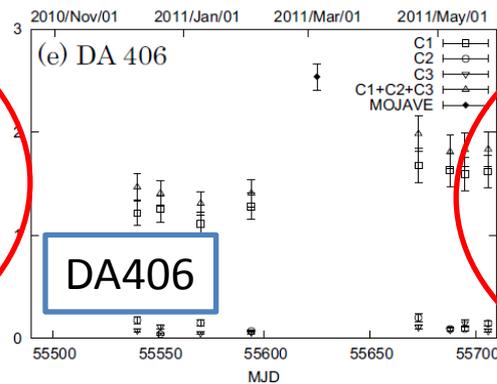
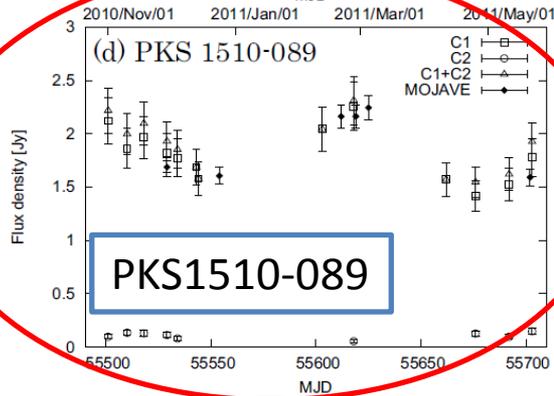
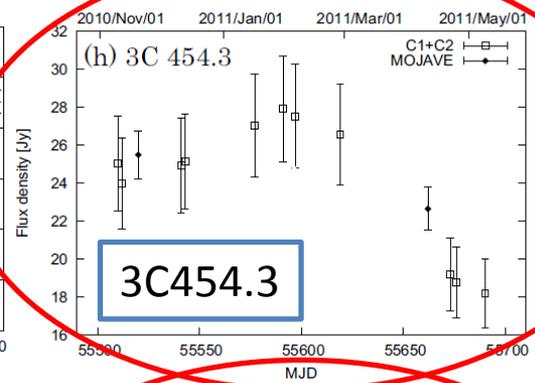
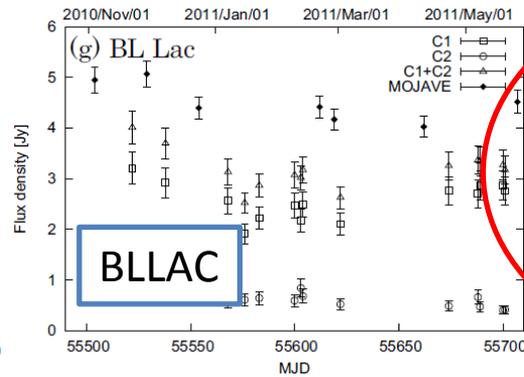
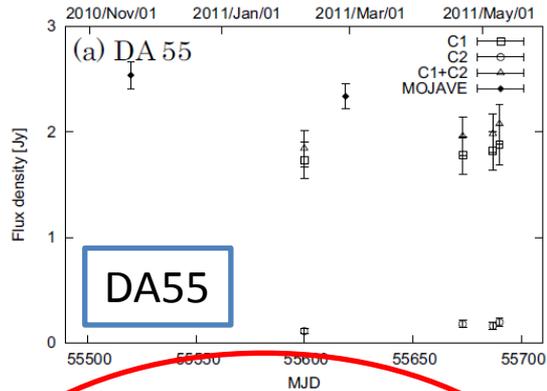
- 7天体をモニター
  - DA55, BLLAC, 3C454.3, NRAO530, PKS1510-089, DA406, OJ287
- これまで3天体でガンマ線フレアに同期したVLBIモニター観測に成功



+ 1天体 (OJ287)

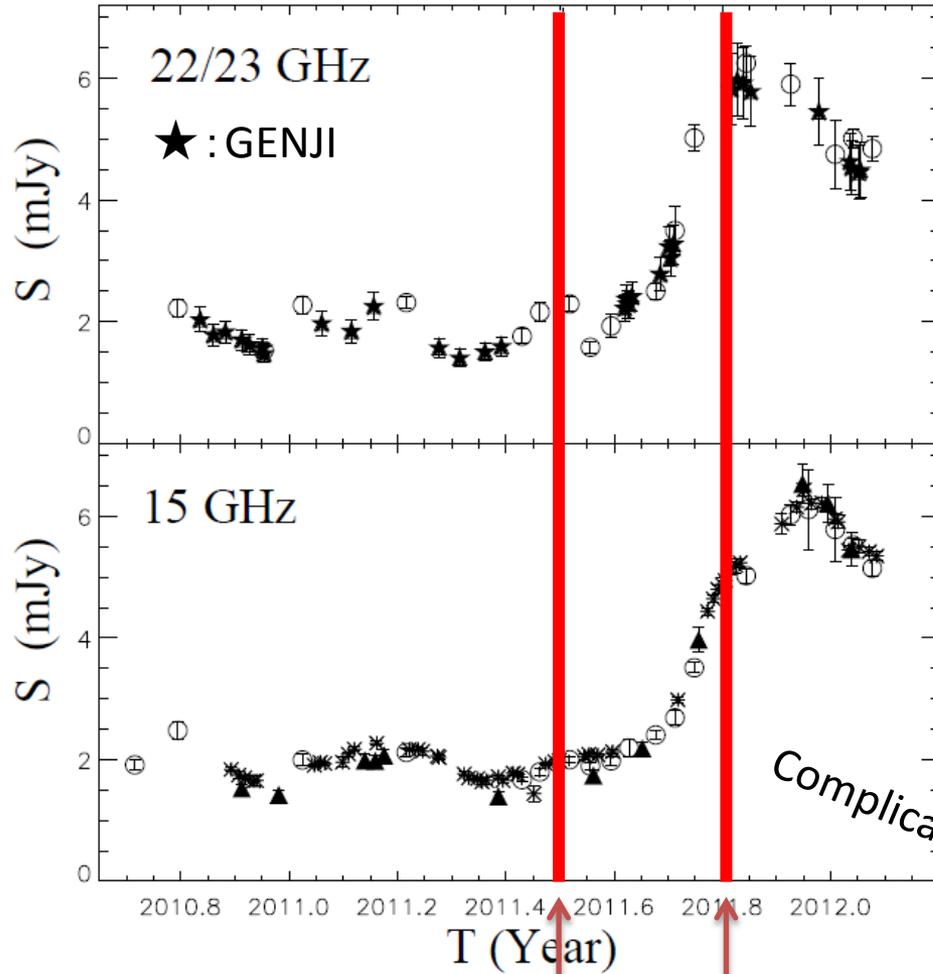
Nagai et al. 2013 (arXiv:1210.2496)

# Light curve "Gallery"

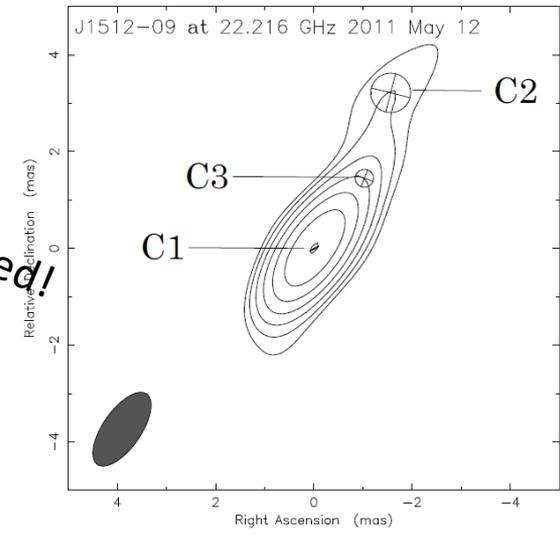
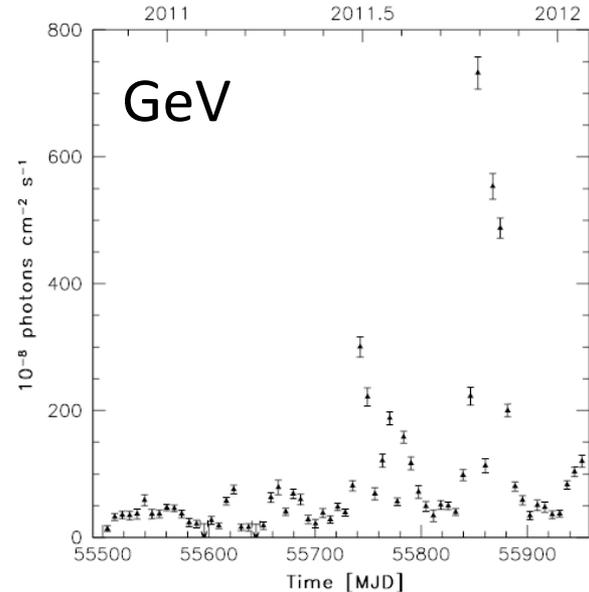


# PKS1510-089 (FSRQ)

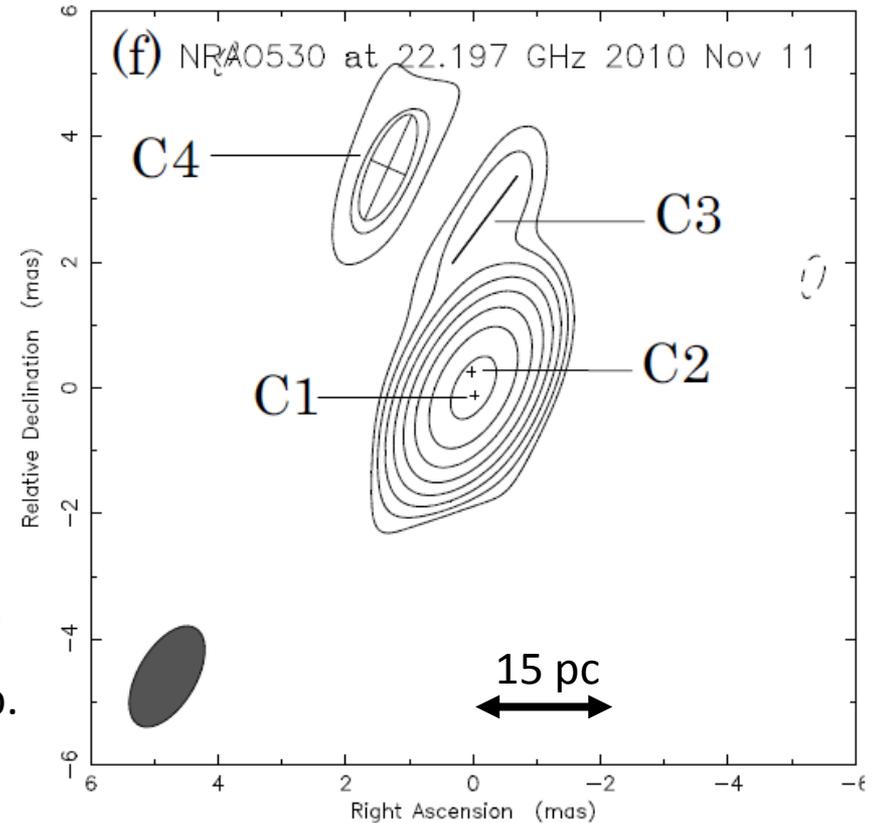
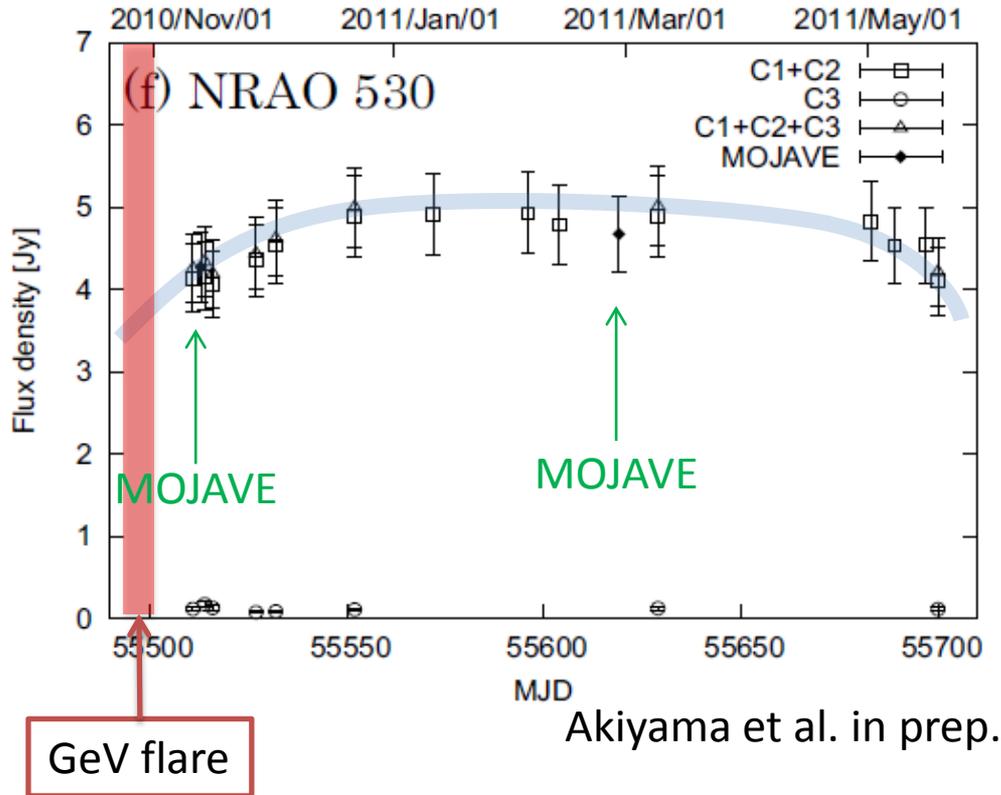
Orienti, Koyama, Nagai et al. 2012



GeV flare



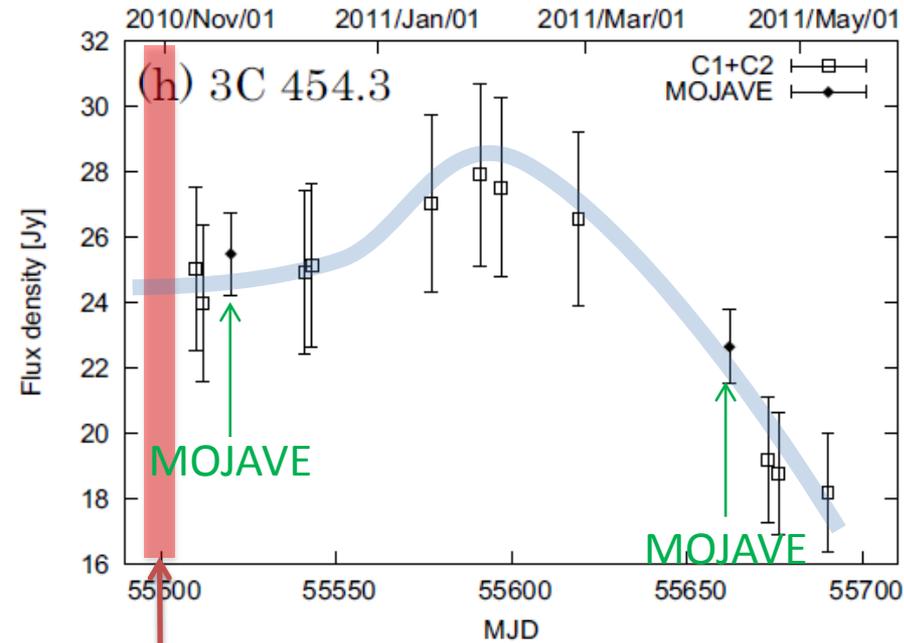
# NRAO 530 (FSRQ)



Akiyama, Nagai et al. in preparation

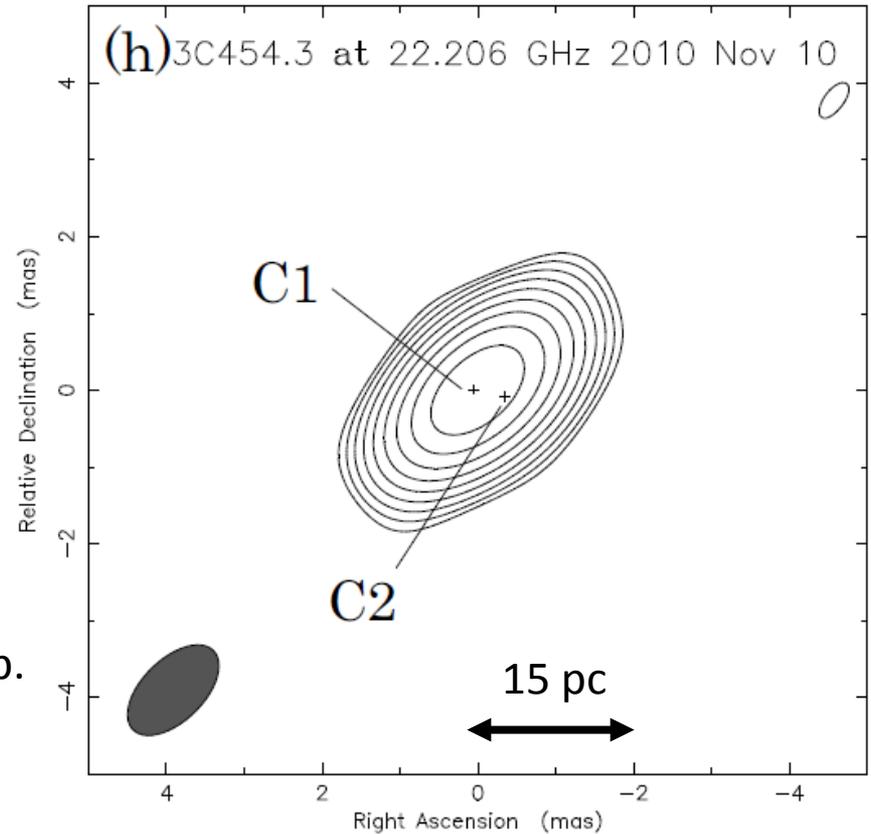
- ガンマ線フレア後、徐々に電波コアが明るくなり、1か月後にピークを迎える

# 3C 454.3 (FSRQ)



Akiyama et al. in prep.

GeV flare



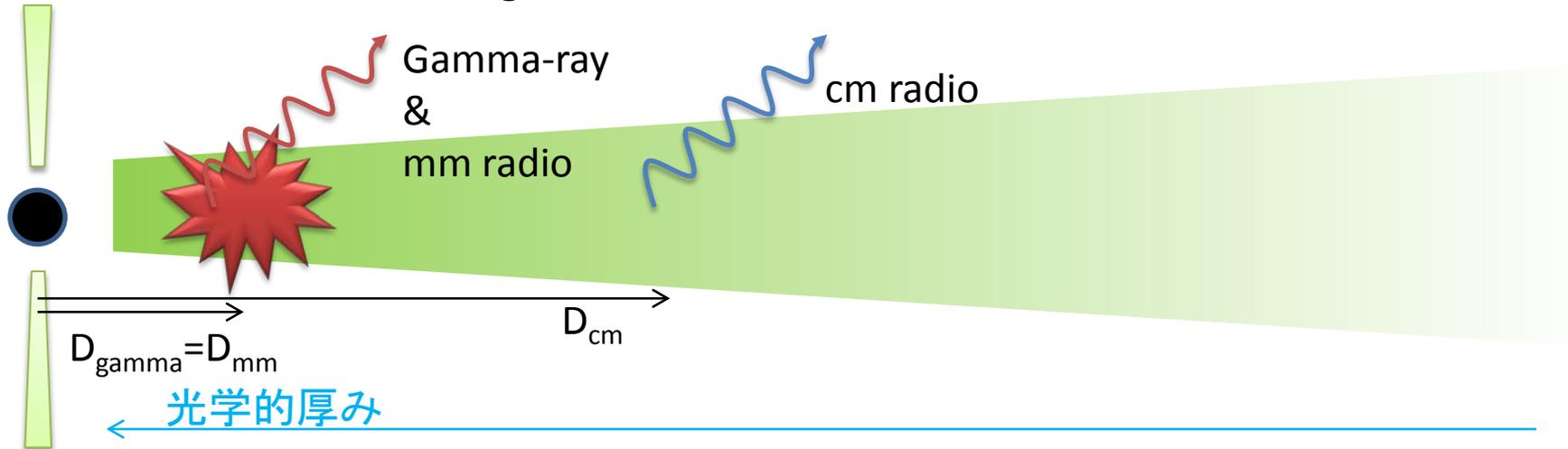
- ガンマ線フレアから1か月程度遅れて電波コアが明るくなる

# 3C454.3 多周波ライトカーブ

# 変動遅延の解釈

Optical depth  $D_{\text{gamma}} = D_{\text{mm}} < D_{\text{cm}}$

e.g., Kudryavtseva+ 2011

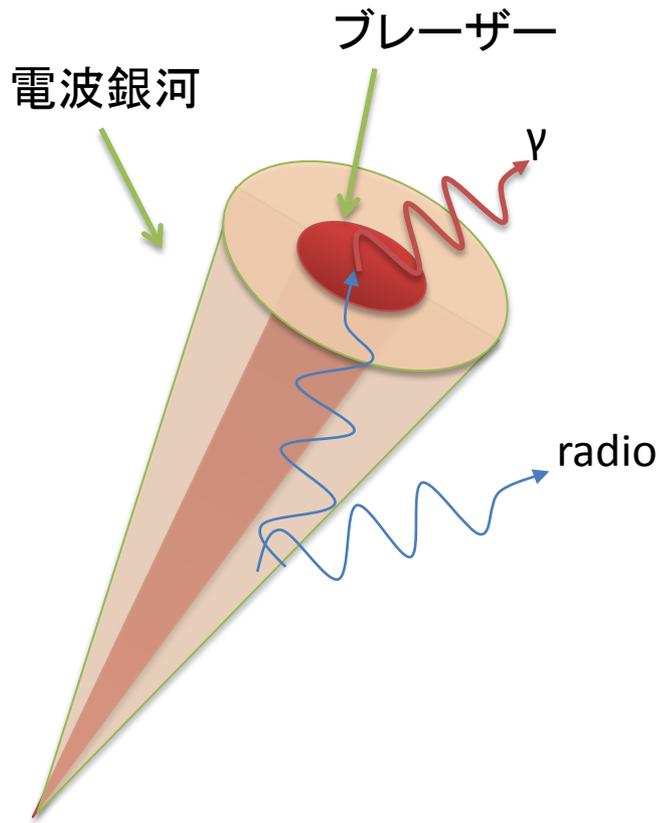


- 変動の遅延は光学的厚みが原因と考えられる
- ガンマ線放射領域の情報を電波で抽出するにはミリ波・サブミリ波観測が本質的 -> ALMA観測(後述)

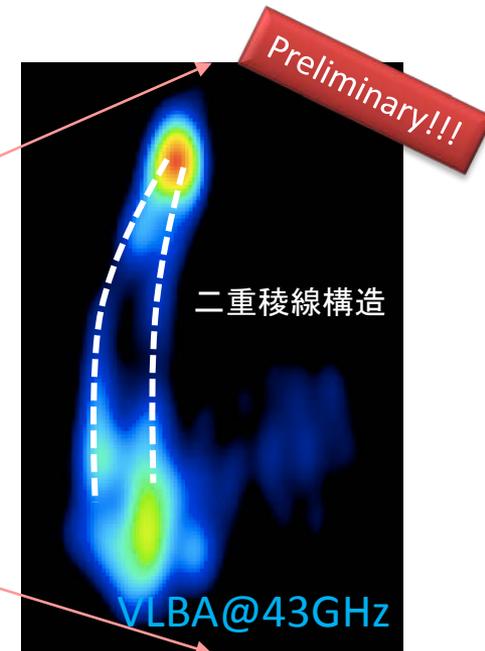
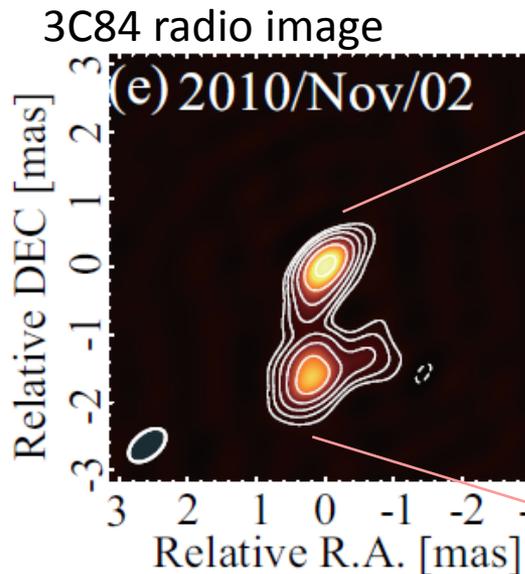
# 電波カウンターパートの有無の解釈

- 2層構造

- Slow sheathにおけるシンクロトロン -> 電波放射
- Slow sheathからの光子をfast spineが逆コンプトン -> ガンマ線



Fast spine + Slow sheath  
(e.g., Ghisellini+ 2005)



### 3. 関連研究の紹介

# un-ID Fermiソースの電波観測 (PI:新沼浩太郎)

- Fermi2LACカタログ中575天体はカウンターパートが未発見
- 光結合VLBIで電波カウンターパート探し
- 将来的にはこれらの天体の多波長変動観測によってガンマ線放射機構を探り、すでにIDされている天体との違いの有無を探る研究に期待

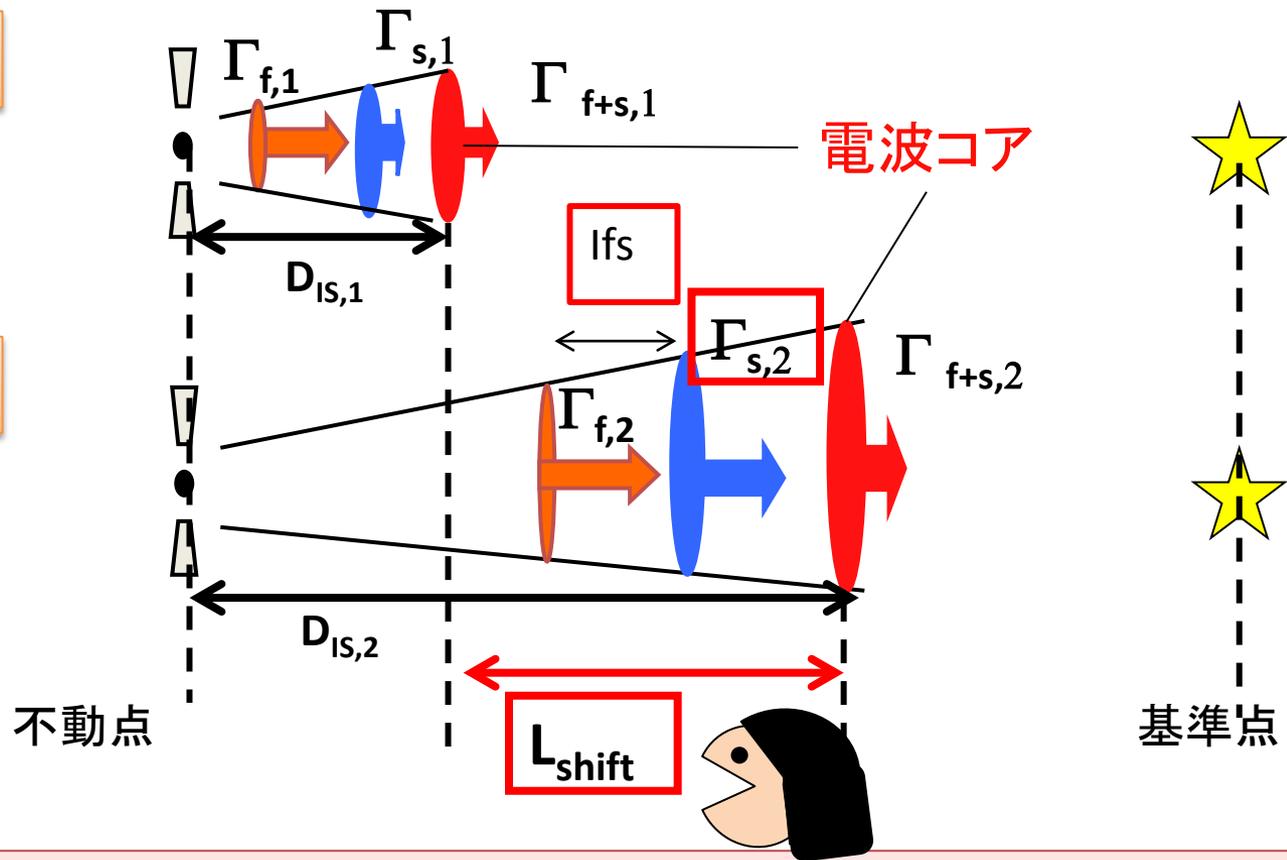


茨城大の高エネルギーグループとのコラボが期待できるテーマ

# 内部衝撃波モデルの検証 (PI: 小山翔子)

シーズン1

シーズン2



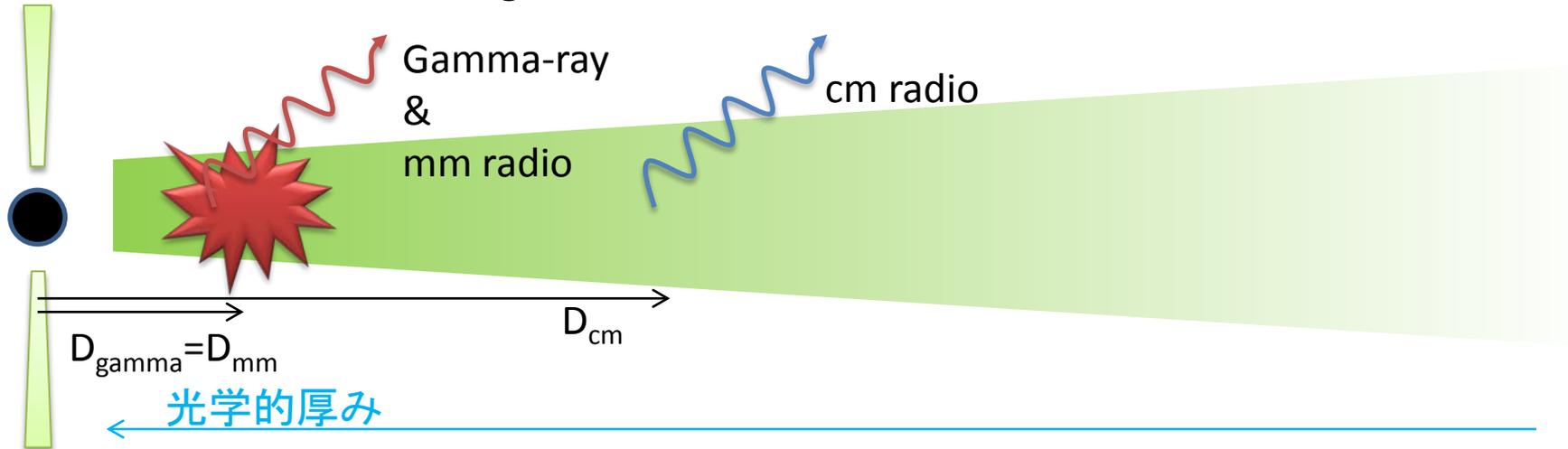
「異なる状態(時期)」に「基準点に対するブレーザー電波コアの位置」を直接測定してふらつき量  $L_{shift}$  を調べる  
 →  $\Gamma_s, l_{fs}$  の取りうる範囲に制限を付ける

# 内部衝撃波モデルの検証 (PI: 小山翔子)

# ALMAによるミリ波サブミリ波スペクトル

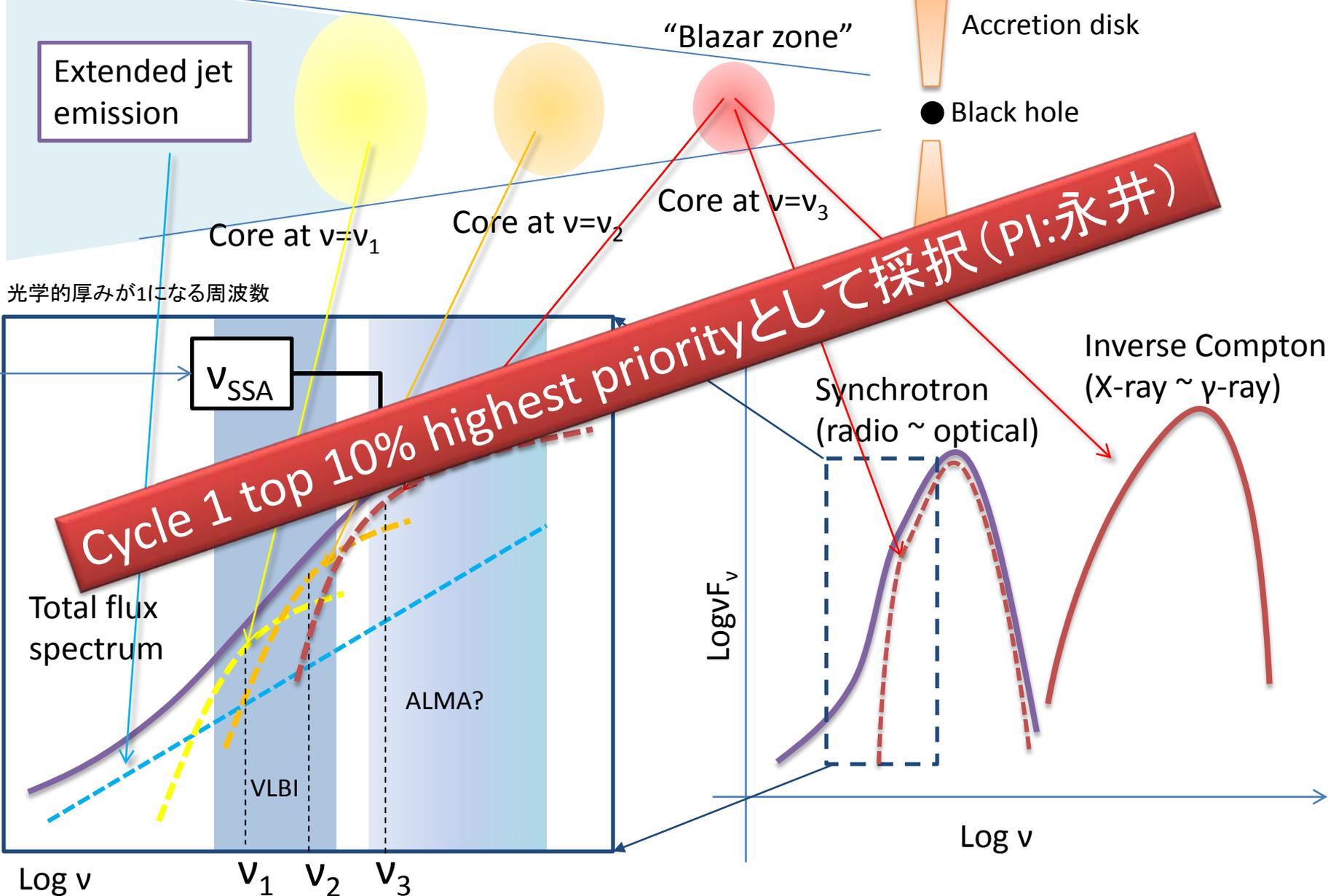
Optical depth  $D_{\text{gamma}} = D_{\text{mm}} < D_{\text{cm}}$

e.g., Kudryavtseva+ 2011



- ブレーザーの $\gamma$ 線放射領域に迫るためにはミリ波サブミリ波観測が本質的

# ALMAによるミリ波サブミリ波スペクトル



# まとめ

- VLBIと単一鏡の密なモニター観測から、AGN ジェットの $\gamma$ 線放射領域を探る研究を紹介した
  - 電波銀河3C84では明確な電波カウンターパートが見つからなかった
  - ブレーザーではガンマ線変動から遅れて電波コアが明るくなる現象を確認
  - これらは、光学的厚みの効果 + 多層構造で説明できるかもしれない
- 関連研究として、光結合VLBI、ALMA、位相補償VLBIを使った研究を紹介