

# 宇宙ジェットとその周辺の磁場構造

酒見 はる香 (鹿児島大学)



# 自己紹介

## Haruka Sakemi (酒見 はる香) :

2018-2021. 九州大学大学院理学府物理学専攻博士課程

指導教員：町田真美さん (現在NAOJ)

← **MHDシミュレーション**の専門家

~2021 Sep. 国立天文台ALMAプロジェクト (学振DC2)

指導教員：永井さん (NAOJ)

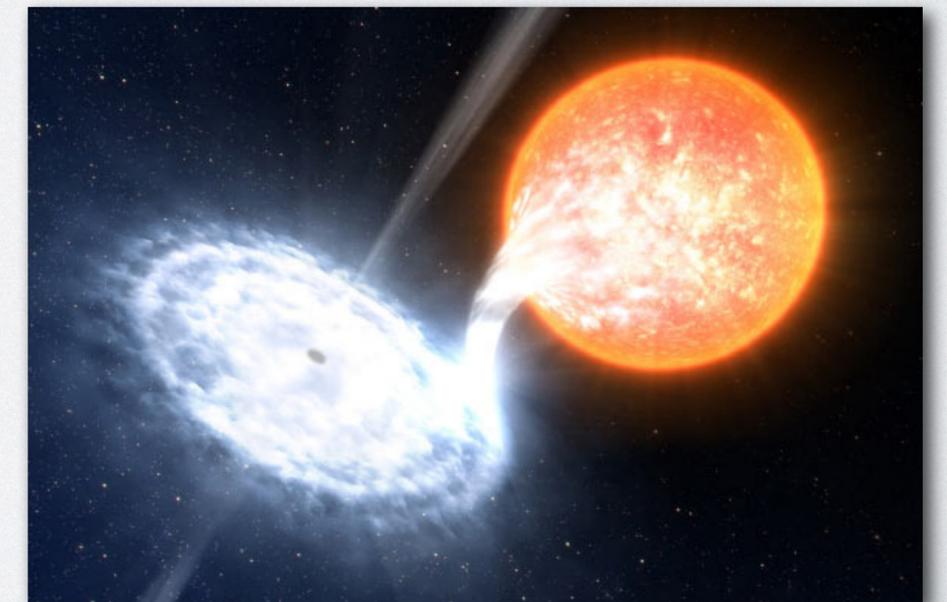
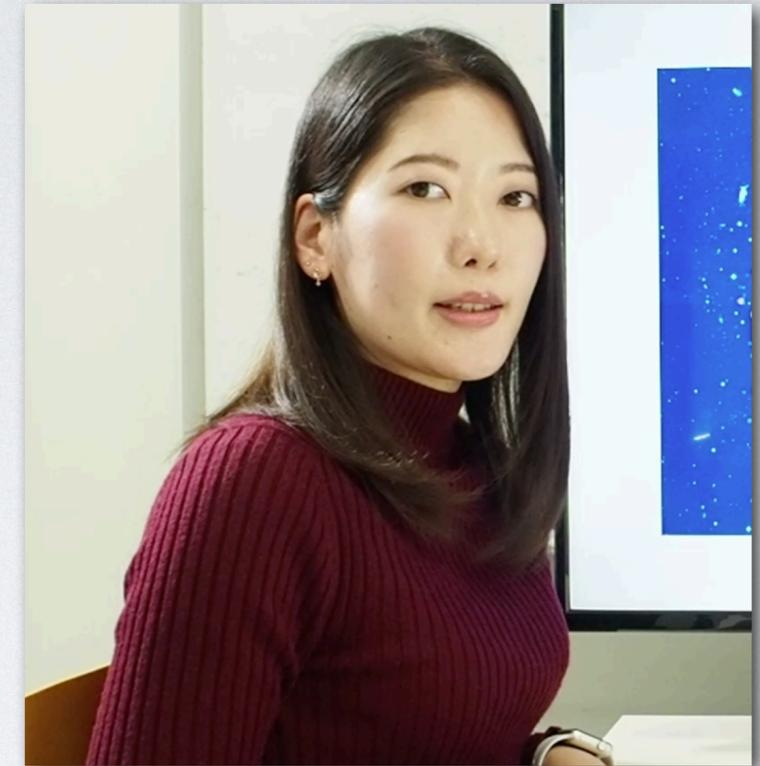
2021 Oct.~ 鹿児島大学理工学研究科プロジェクト研究員

(自分の研究に集中)

## 専門：

電波天文学 (VLA, ATCA, ALMA, MeerKAT, GBT, 野辺山, ASTE, ...).

ターゲットは**宇宙ジェット** (X線連星, AGN)



# 誰？

## 大学院時代：

数値計算の研究室へ.

しかし観測がやりたかったので指導教員にお願い.

→ 色々な大学(鹿児島, 熊本, 名古屋, ...)に出張・修行.

指導教員からの教え

「できることを増やさない」

→ 電波観測に関することは色々挑戦

→ 天体も**X線連星ジェット**に限らず, 発展させられそうな分野にはアンテナを (ULX, **AGN**, ...)



2018年 LOFARのサマースクールにて

2019年 VLAのワークショップにて



# 夏学講演の理由？

縁あってAGNジェットの観測データを解析、  
周辺の磁場によってジェットが不自然な方向に  
曲げられていることを発見。  
シミュレーションと協働し論文に。

## Article

### Jets from MRC 0600-399 bent by magnetic fields in the cluster Abell 3376

<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03434-1>

Received: 21 September 2020

Accepted: 8 March 2021

Published online: 5 May 2021

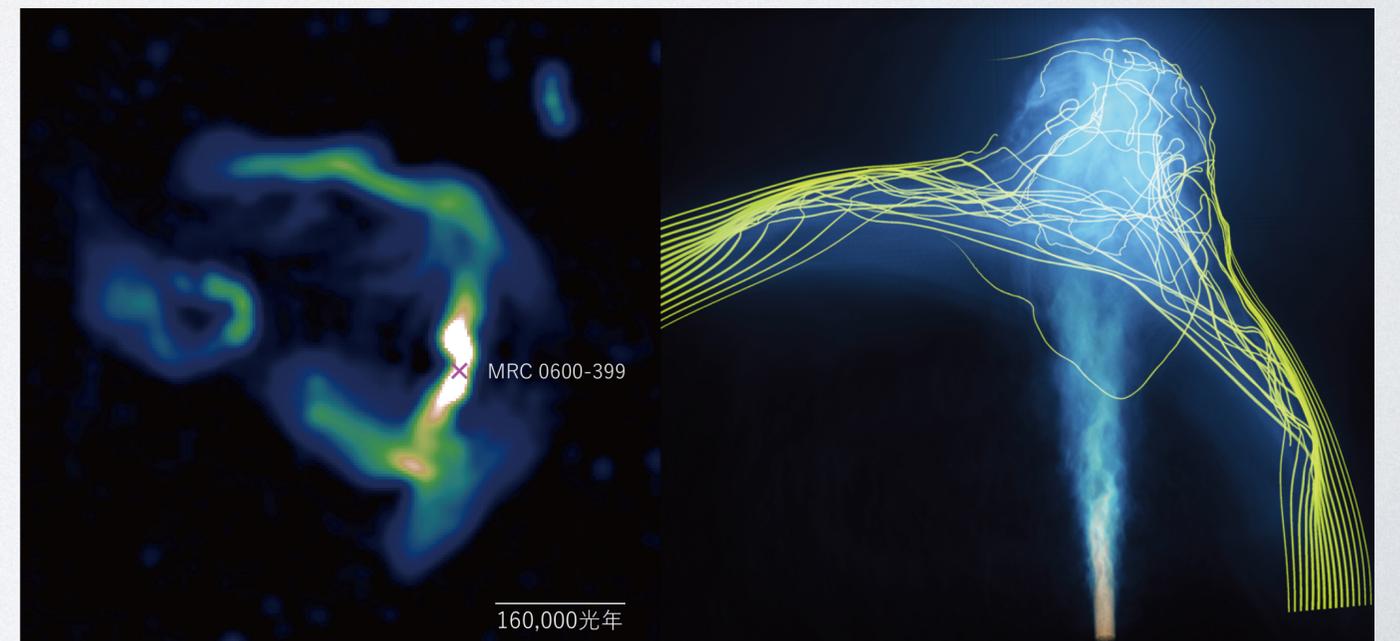
 Check for updates

James O. Chibueze<sup>1,2,14</sup>, Haruka Sakemi<sup>3,14</sup>, Takumi Ohmura<sup>3,12,14</sup>, Mami Machida<sup>4</sup>, Hiroki Akamatsu<sup>5</sup>, Takuya Akahori<sup>6,13</sup>, Hiroyuki Nakanishi<sup>7</sup>, Viral Parekh<sup>8,9</sup>, Ruby van Rooyen<sup>8</sup> & Tsutomu T. Takeuchi<sup>10,11</sup>

Galaxy clusters are known to harbour magnetic fields, the nature of which remains unresolved. Intra-cluster magnetic fields can be observed at the density contact discontinuity formed by cool and dense plasma running into hot ambient plasma<sup>1,2</sup>, and the discontinuity exists<sup>3</sup> near the second-brightest galaxy<sup>4</sup>, MRC 0600-399, in the merging galaxy cluster Abell 3376 (redshift 0.0461). Elongated X-ray emission in the east–west direction shows a comet-like structure that reaches the megaparsec scale<sup>5</sup>. Previous radio observations<sup>6,7</sup> detected the bent jets from MRC 0600-399, moving in same direction as the sub-cluster, against ram pressure. Here we report radio<sup>8,9</sup> observations of MRC 0600-399 that have 3.4 and 11 times higher resolution and sensitivity, respectively, than the previous results<sup>6</sup>. In contrast to typical jets<sup>10,11</sup>, MRC 0600-399 shows a 90-degree bend at the contact discontinuity, and the collimated jets extend over 100 kiloparsecs from the point of the bend. We see diffuse, elongated emission that we name ‘double-scythe’ structures. The spectral index flattens downstream of the bend point, indicating cosmic-ray reacceleration. High-resolution numerical simulations reveal that the ordered magnetic field along the discontinuity has an important role in the change of jet direction. The morphology of the double-scythe jets is consistent with the simulations. Our results provide insights into the effect of magnetic fields on the evolution of the member galaxies and intra-cluster medium of galaxy clusters.



Credit: Takumi Ohmura, Mami Machida, Hirotaka Nakayama, 4D2U Project, NAOJ



# 今日のトピック

## 1. 宇宙ジェットと磁場

- なぜ宇宙ジェットに磁場が重要??
- 磁場を観測する方法
- 観測例

## 2. 磁場を観測する手段としての宇宙ジェット

- (・背景光源としてのジェット)
- ジェットの形態から探る周辺環境

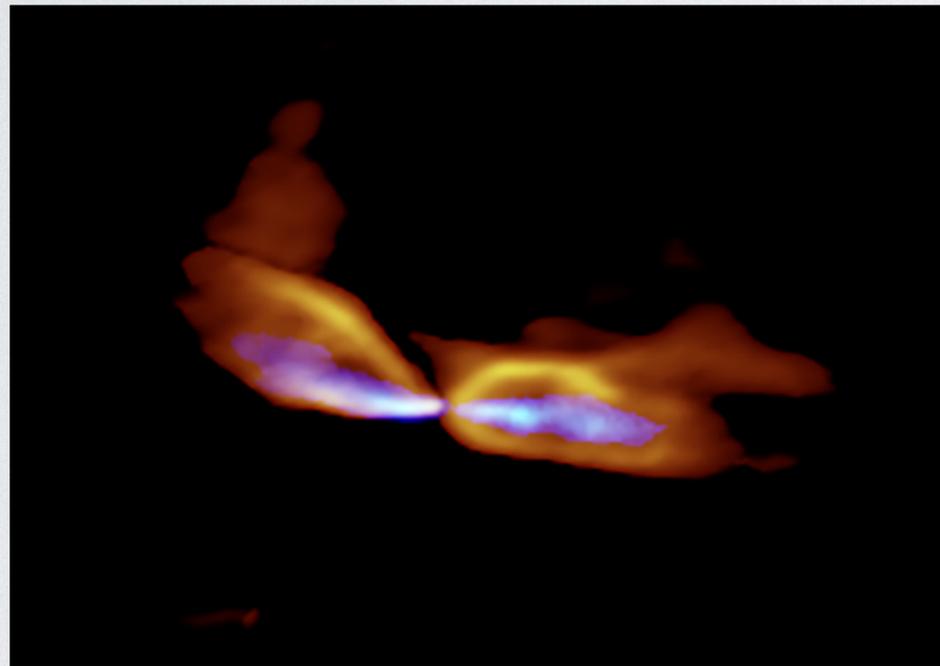
\*全体的にトピックを簡単にさらっていく形式.  
詳細は各論文や教科書をご参照ください.

# 宇宙ジェットと磁場

# 宇宙ジェットとは？

天体に周囲から降着するガスの一部が細く絞られて一方向または双方向に噴出するもの  
(種類) 原始星ジェット, X線連星ジェット, 活動銀河核(AGN)ジェット

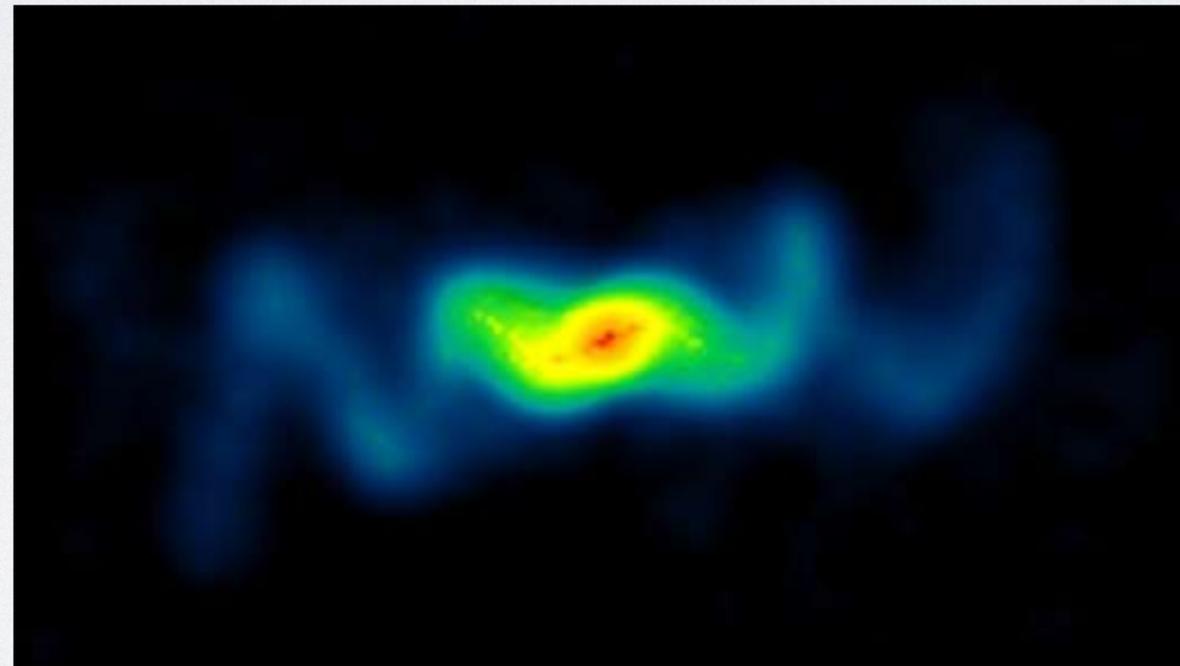
原始星 MMS5/OMC-3



提供 : ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Matsushita et al.

中心天体 : 原始星  
スケール : 数 pc  
ジェット速度 : 数十~数百 km/s

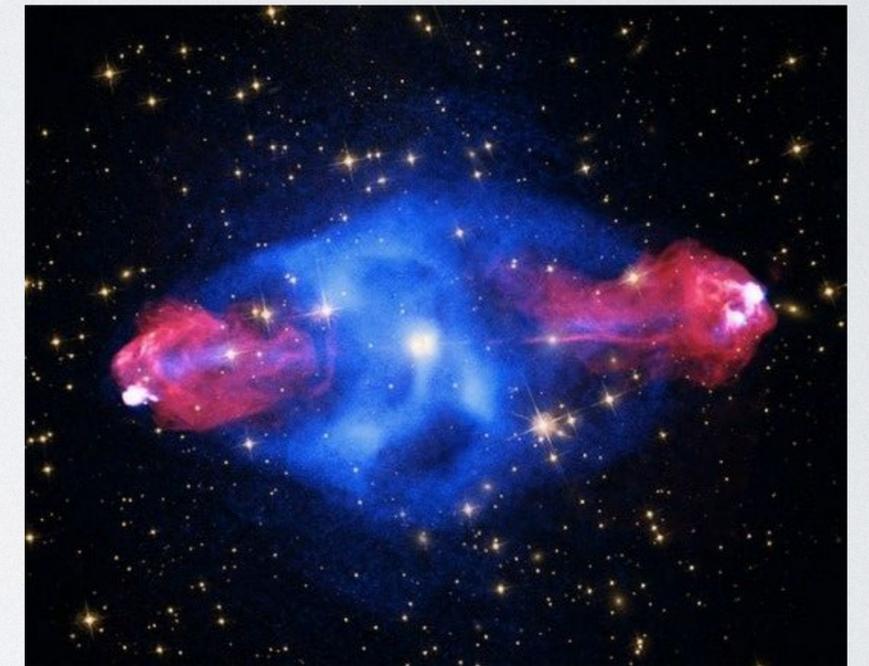
X線連星(マイクロクエーサー) SS433



<https://public.nrao.edu/radio-astronomy/black-holes/>

中心天体 : コンパクト天体  
スケール : 数~数十 pc  
ジェット速度 : ~相対論的

電波銀河 Cygnus A

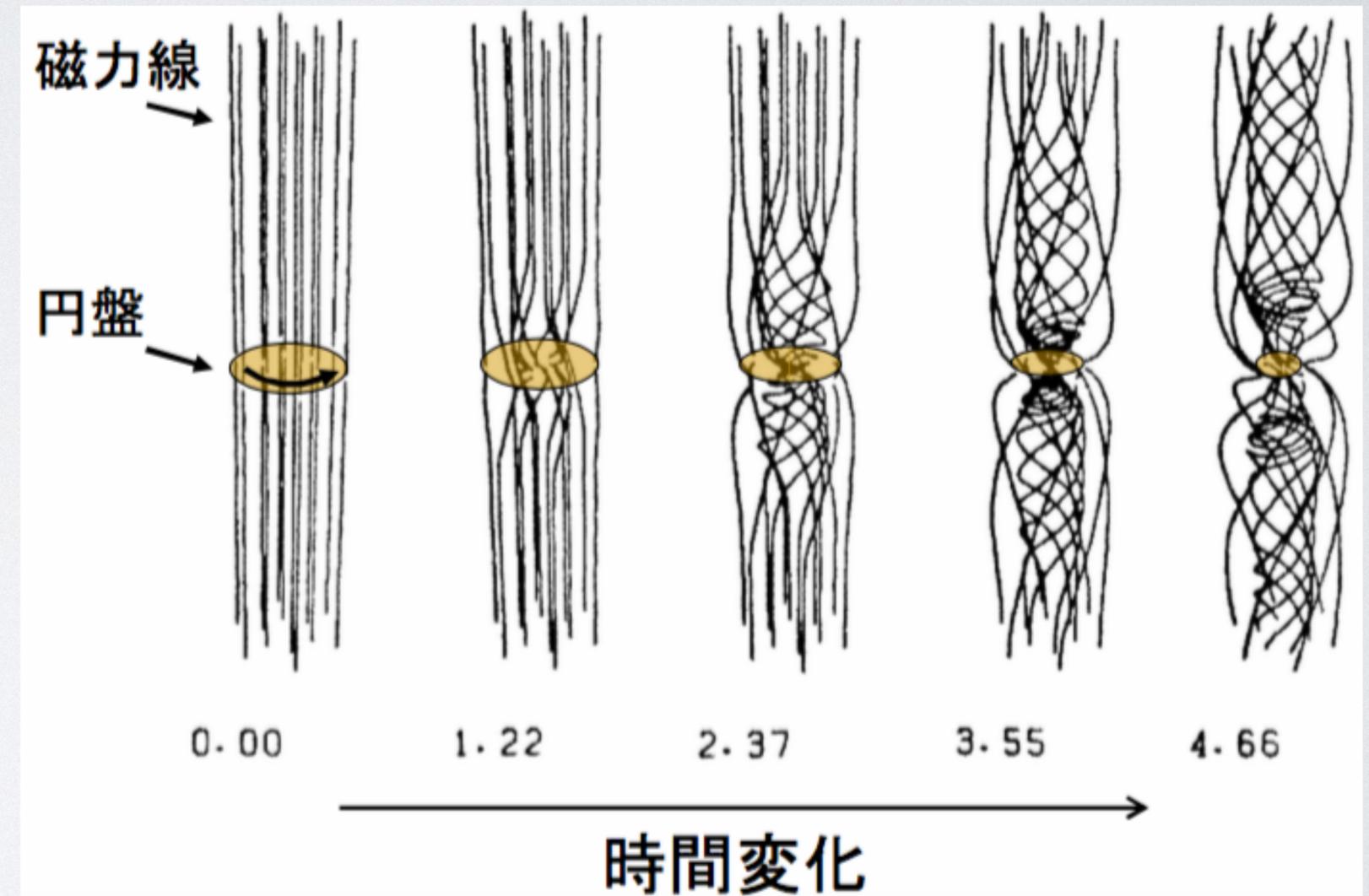


[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cygnus\\_A\\_composite.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cygnus_A_composite.jpg)

中心天体 : 大質量ブラックホール  
スケール : 数 kpc~数 Mpc  
ジェット速度 : 相対論的

# 宇宙ジェットと磁場

- 宇宙ジェットを駆動するには**磁場**が必要  
(**磁気遠心力, 磁気圧による磁気駆動型ジェット**)
  - ジェットの収束にも**磁場**が必要?  
(**磁気張力** or 周辺物質からの外圧)
- 観測的証拠を探す必要がある
- らせん状の磁場構造
  - ジェットの回転運動



Shibata & Uchida (1990)

# 磁場を観測する方法

# 磁場の測定法

磁場を観測する=偏波を観測する

偏波とは？

→電場の振動が特定の方向に偏っている電磁波

種類：直線偏波, 円偏波 (右回りor左回り), 楕円偏波

偏波を記述するストークスパラメータ：

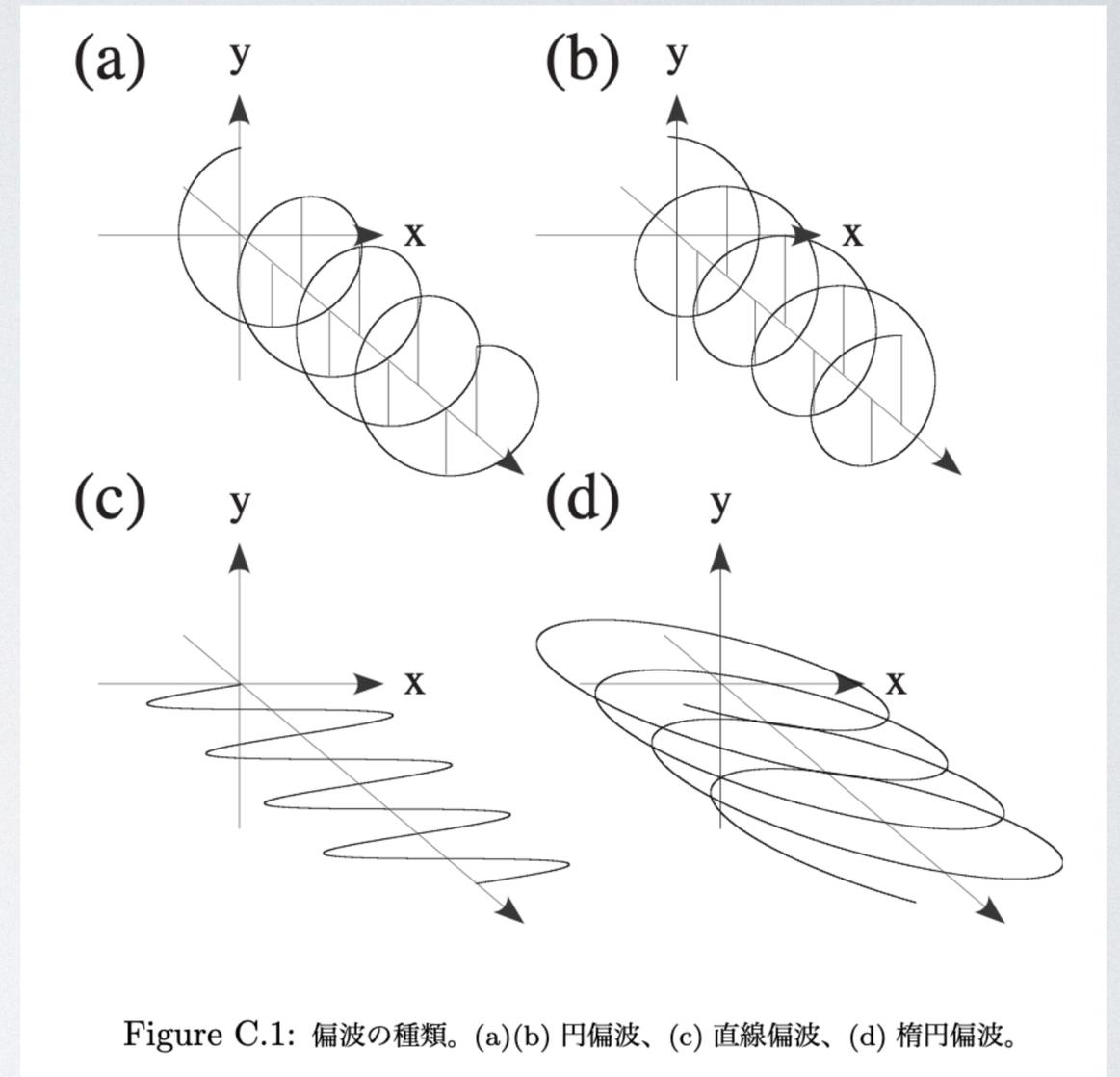
$I$ ：偏波成分と無偏波成分を合わせた全放射強度,

$Q$  &  $U$ ：直線偏波,  $V$ ：円偏波

(以下直線偏波のみを考慮)

偏波放射強度： $P = \sqrt{Q^2 + U^2}$

偏波角： $\chi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{U}{Q} \right)$



教科書：Radiative Processes in Astrophysics (Rybicki & Lightman)  
Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy (Thompson)

# シンクロトロン放射

高エネルギーな電子が磁場にトラップされて  
磁場周りをらせん運動する際に放出する放射。  
**偏波振動方向に垂直 = 磁場の方向。**

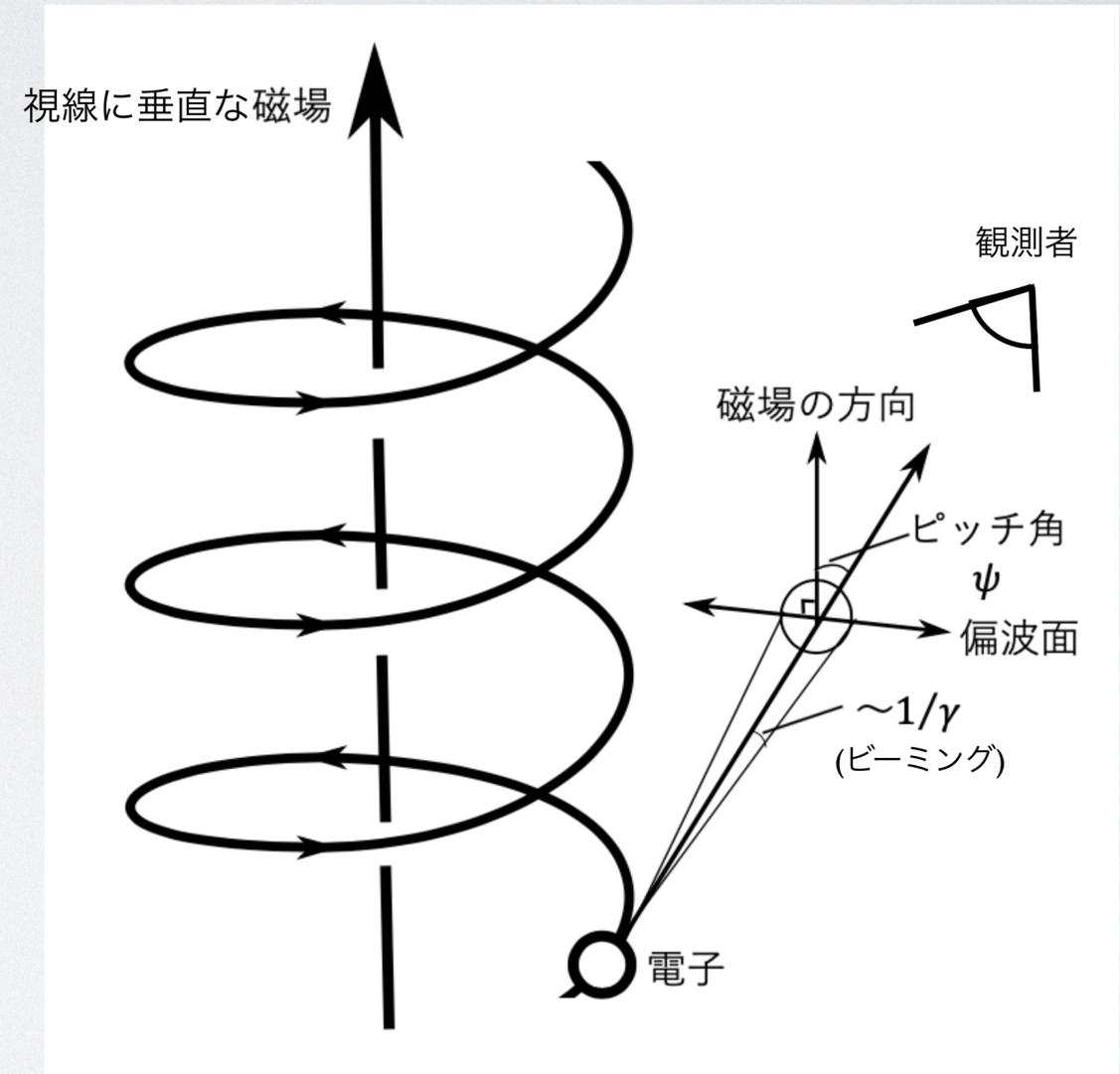
また、電子数密度の情報が他の観測から得られれば放射領域  
の磁場強度がわかる

$$I(\nu) = \int P_{\text{tot}}(\nu) dr = \int A(p) n_e(r) B_{\perp}^{\frac{1+p}{2}}(r) \nu^{\frac{1-p}{2}} dr$$

$$A(p) = \frac{1}{4\pi} \frac{\sqrt{3} e^3}{8\pi m_e c^2} \frac{1}{1+p} 2^{\frac{1+p}{2}} \left( \frac{2m_e c}{3e} \right)^{\frac{1-p}{2}} \Gamma\left(\frac{p}{4} + \frac{19}{12}\right) \Gamma\left(\frac{p}{4} - \frac{11}{12}\right)$$

$n_e(r)$ : 位置  $r$  での電子数密度

$B_{\perp}(r)$ : 位置  $r$  での視線垂直磁場



# シンクロトロン放射とストークスパラメータ

シンクロトロン放射を観測しI,Q,Uを導出→磁場の空間構造がわかる？  
 →**実際にはファラデー偏波回転の効果を考える必要有り**

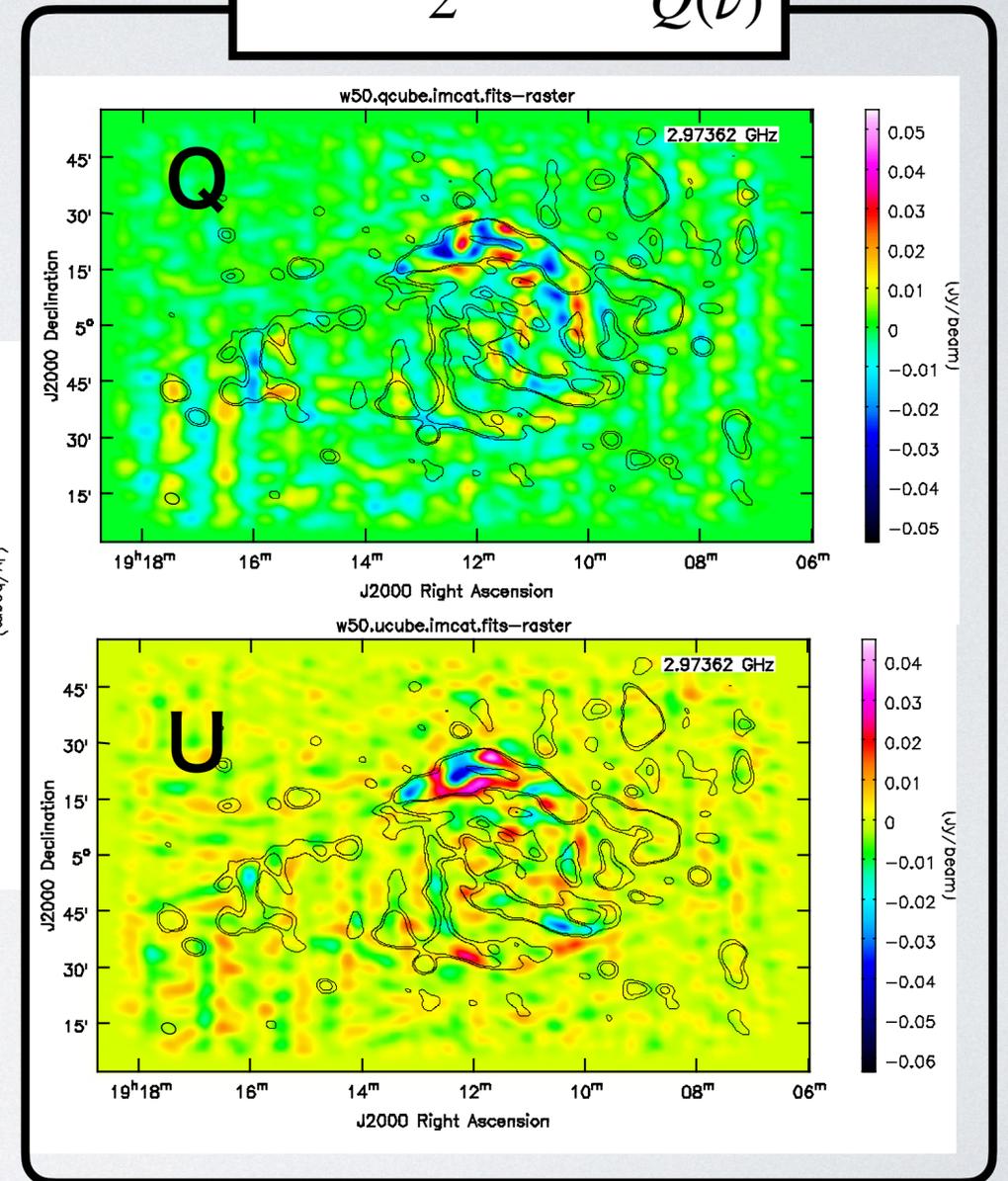
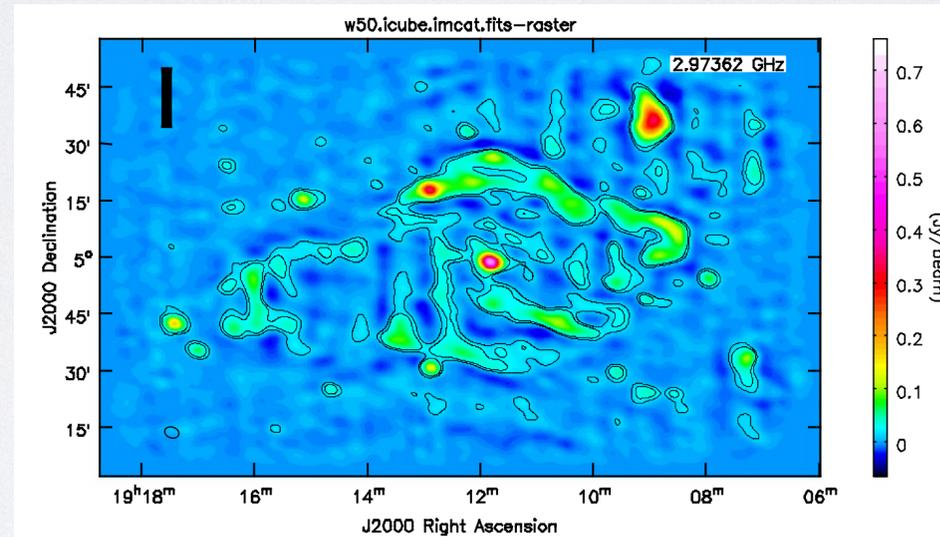
$$\chi(\nu) = \frac{1}{2} \arctan \frac{U(\nu)}{Q(\nu)}$$

視線に垂直な磁場の方向

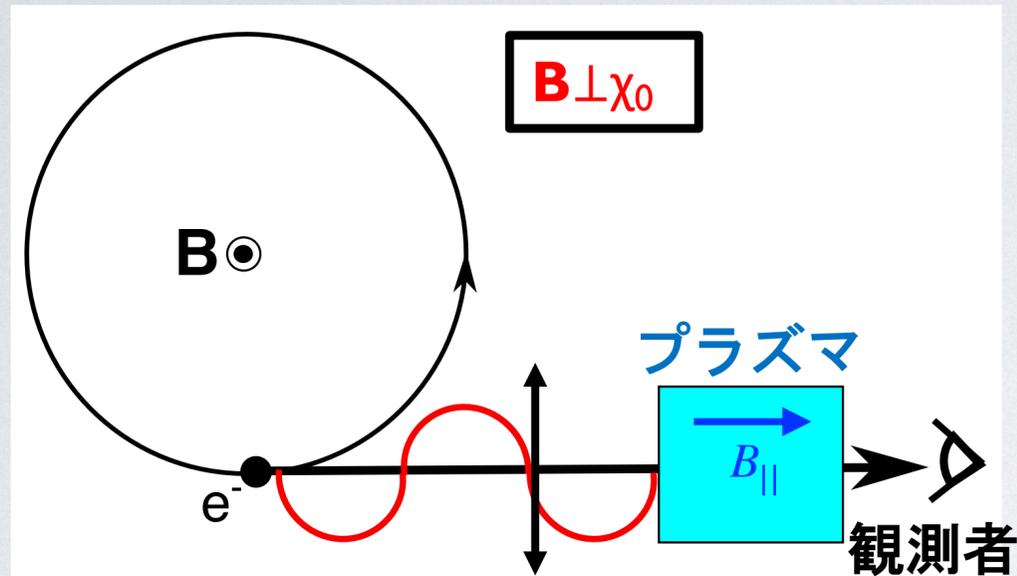
偏波の伝搬方向

偏波の振動方向

ATCAで観測した電波星雲W50 @2.97 GHz

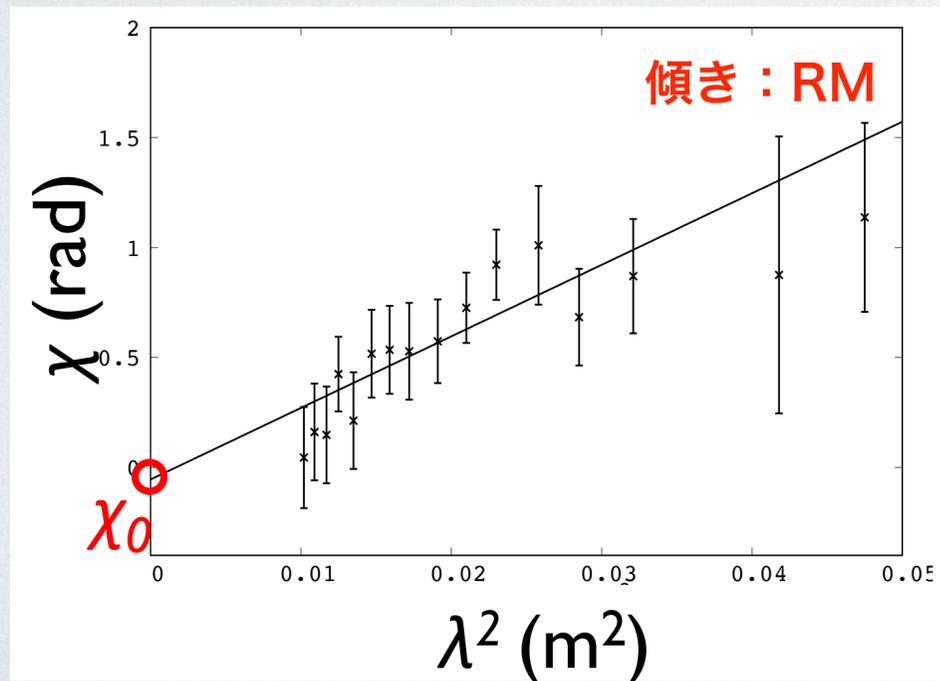


# ファラデー偏波回転



天体から放射されたシンクロトロン放射（偏波）は  
**視線上のプラズマ領域を通過**して観測される  
 →放射がプラズマと相互作用する→**ファラデー偏波回転**  
**(観測波長に依存した大きさに偏波面が回転)**

$$\chi = \text{RM} \lambda^2 + \chi_0$$



$\chi = \frac{1}{2} \arctan \frac{U(\lambda)}{Q(\lambda)}$  : 観測される偏波角 (rad)

$\chi_0$  : 回転を受けていない真の偏波角 (rad)

$\lambda$  : 観測波長 (m)

$n_e$  : プラズマ中の熱的電子数密度

$B_{||}$  : 視線平行磁場

(正 : 観測者の方向, 負 : 観測者から遠ざかる方向)

$z$  : 視線方向距離

$$\text{RM} = 0.81 \int_{-\infty}^0 \left( \frac{n_e}{\text{cm}^{-3}} \right) \left( \frac{B_{||}}{\mu\text{G}} \right) dz \left( \frac{z}{\text{pc}} \right)$$

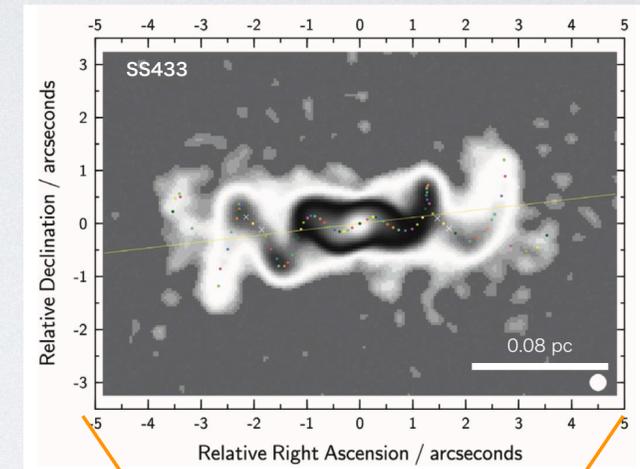
: 回転量度 rotation measure (rad/m<sup>2</sup>)

$$\rightarrow \chi_0 + \frac{\pi}{2} = \text{視線に垂直な磁場の方向 } B_{\perp}$$

# ジェットの磁場の観測例

# マイクロクエーサーSS433の場合

マイクロクエーサーSS433から噴出するジェット  
(@5 GHz, Blundell & Bowler 2004)



## マイクロクエーサー：

銀河内に存在する相対論的ジェット天体

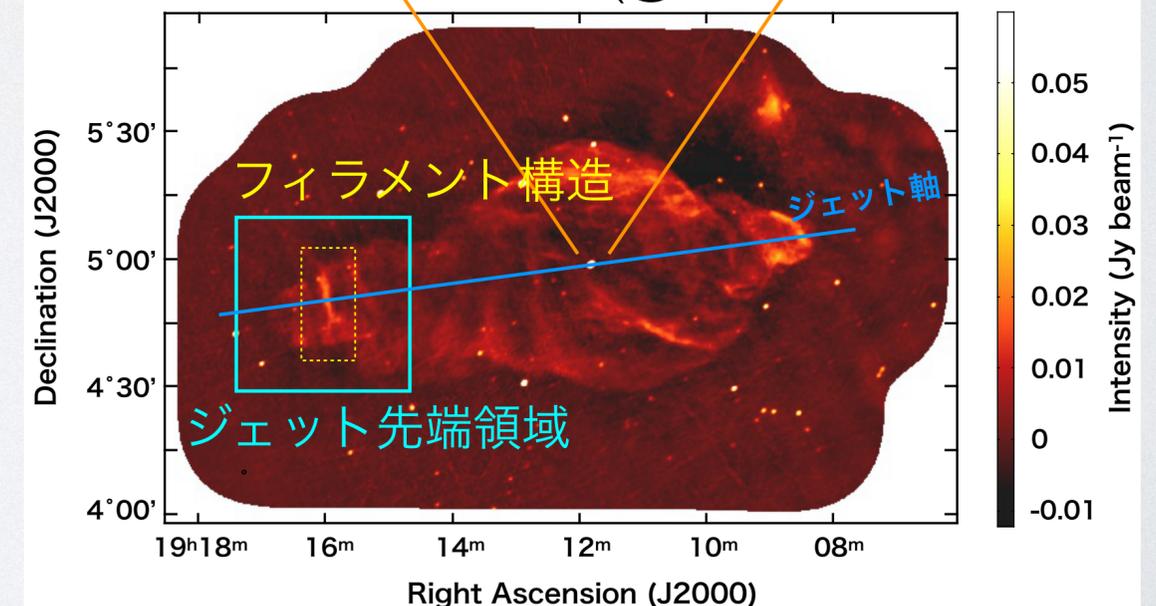
## SS433：

- らせん状のジェットを0.26cで噴出
- 電波星雲W50の東西に突き出た構造を形成

## ジェット先端領域：

偏波を検出, 特に南北に伸びたフィラメント構造

SS433を取り囲む電波星雲W50 (@1.4 GHz, Sakemi et al. 2021)

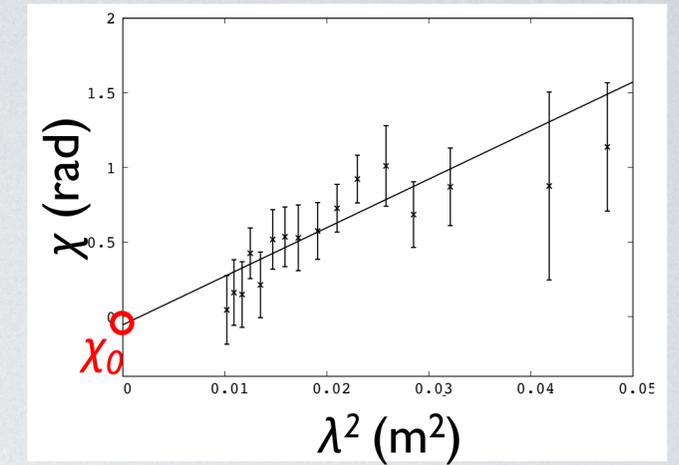


# 偏波解析結果

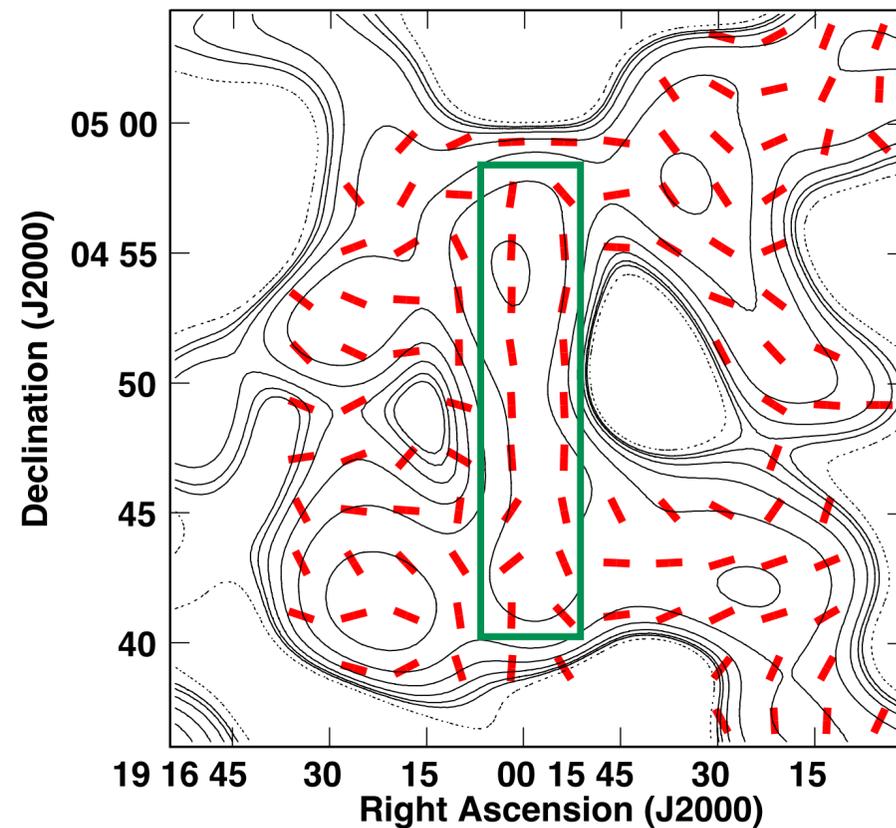
**Sakemi et al. (2018a; in prep)** :

ジェット軸に垂直なフィラメント構造に沿う揃った磁場.

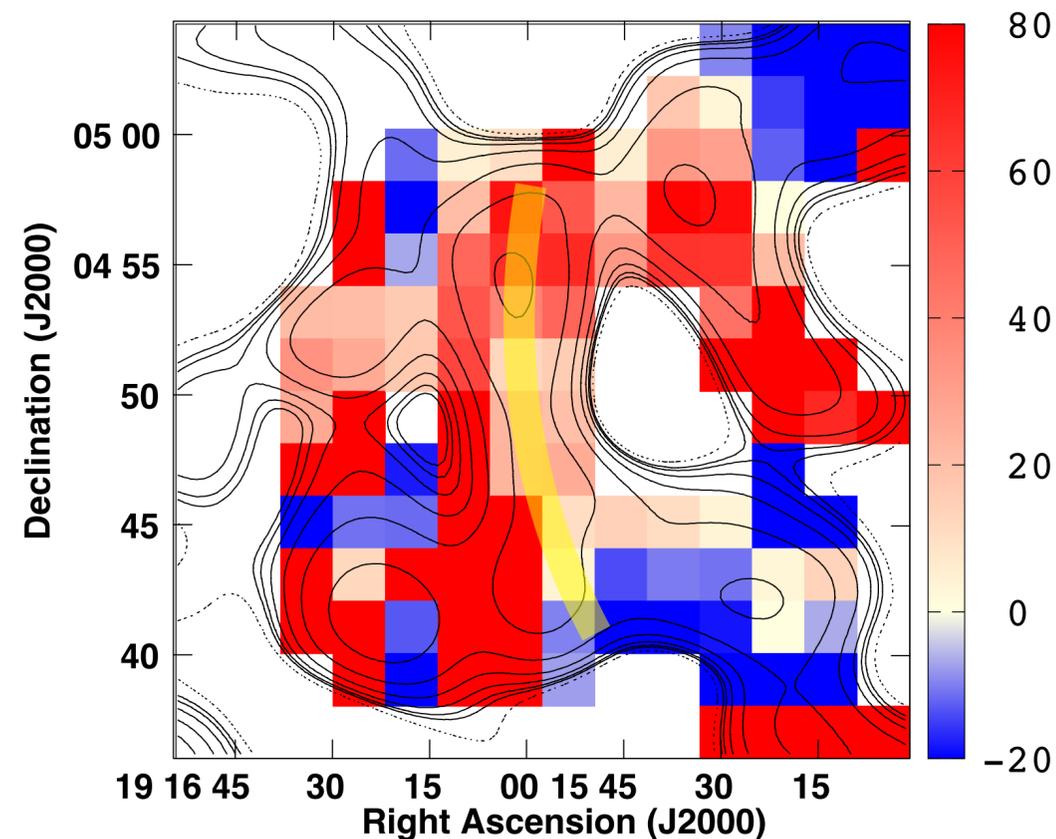
RMの傾向から円環状磁場が存在?? **ただし解釈には注意が必要**



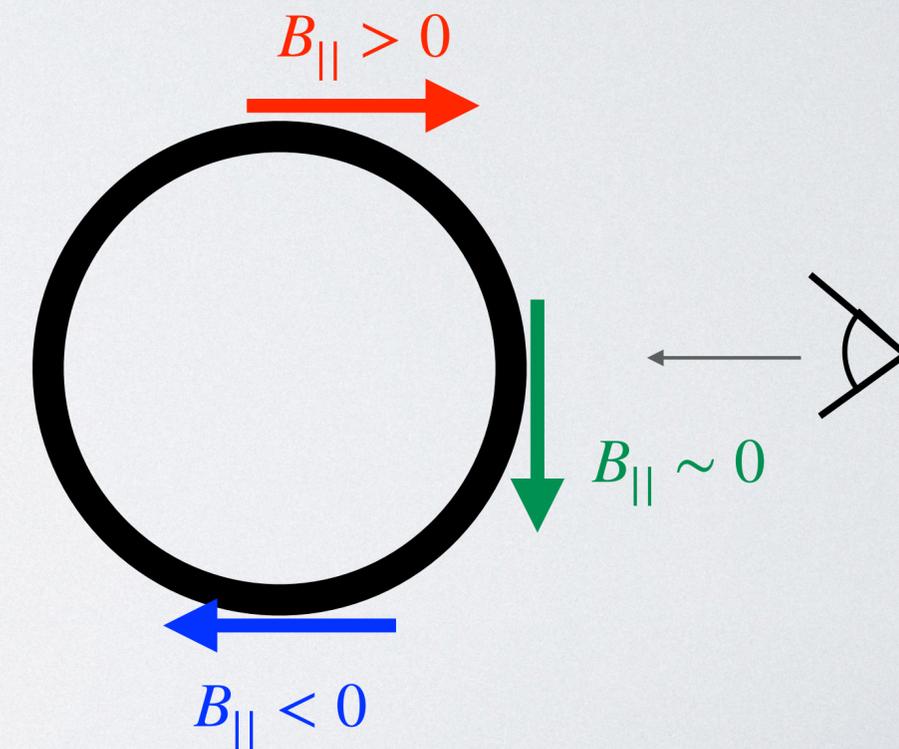
回転を補正した視線垂直磁場分布



RM分布



イメージ



# RMの解釈

## RM分布の解釈の困難さ:

ファラデー回転が視線上のどこで起こっているのか見極めるのが難しい!

ターゲット天体自身の構造で回転? 前景の構造?

→方法1: **RMの時間変動**などから回転を起こす起源を調べる

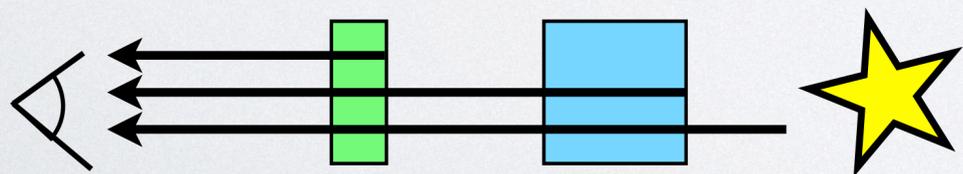
(Asada et al. 2004; Hobatta et al. 2012 → 円環状の磁場を発見)

方法2: **ファラデートモグラフィ**で視線上の偏波源を分離する

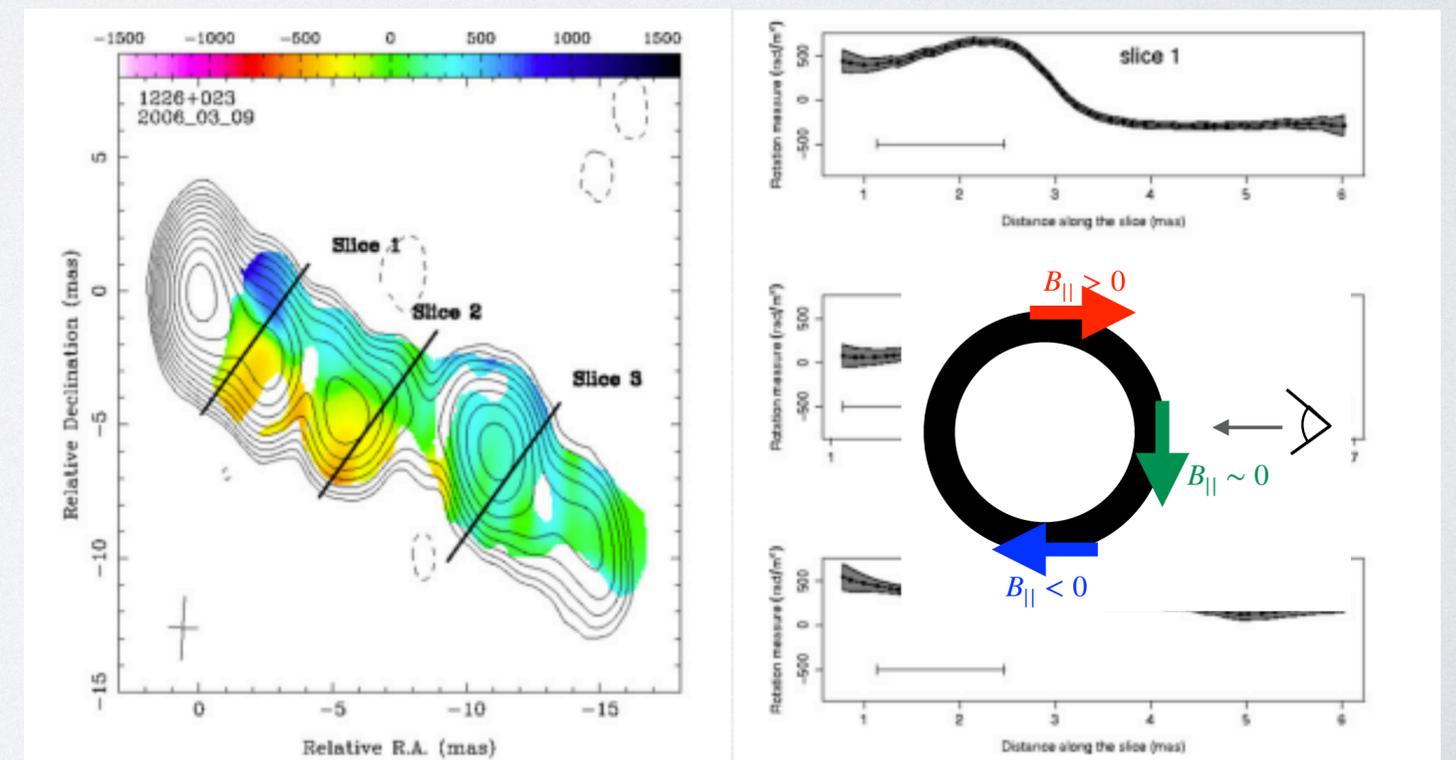
理想



現実

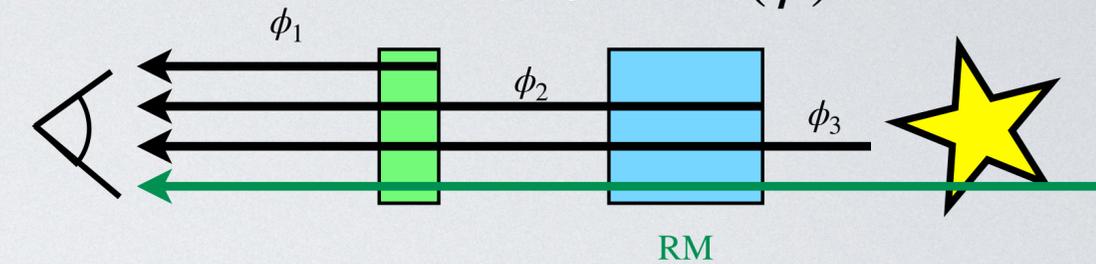


Hovatta et al. (2012)



# 方法2：ファラデートモグラフィ

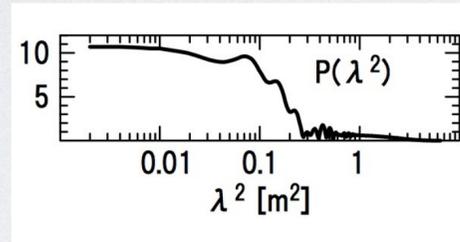
原理：観測量である偏波放射強度 $P(\lambda^2)$ とフーリエ変換の関係にあるファラデー分散関数 $F(\phi)$ を求め、 $\phi$ と $F(\phi)$ の大きさから偏波源の構造を明らかにする



## 観測量

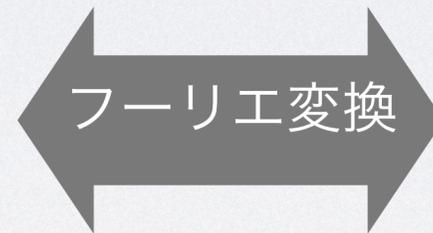
$$P(\lambda^2) = Q + iU$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} F(\phi) d^2 i \phi \lambda^2 d\phi$$



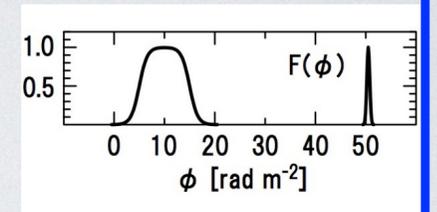
$P(\lambda^2)$ ：偏波放射強度

$Q, U$ ：ストークスパラメータ



## 未知量

$$F(\phi) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda^2) e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2$$



$F(\phi)$ ：ファラデー分散関数

$\phi$ ：ファラデーデプス

$$\text{ファラデーデプス } \phi = 0.81 \int_{z'}^0 \left( \frac{n_e}{\text{cm}^{-3}} \right) \left( \frac{B_{\parallel}}{\mu\text{G}} \right) d \left( \frac{z}{\text{pc}} \right) \quad * \text{RM} = 0.81 \int_{\infty}^0 \left( \frac{n_e}{\text{cm}^{-3}} \right) \left( \frac{B_{\parallel}}{\mu\text{G}} \right) d \left( \frac{z}{\text{pc}} \right)$$

参照：Brentjens & Bruyn (2005)

→ RMと同じ次元を持ち、無限遠ではなく偏波源までの距離で積分した量

Heald (2009)

Ideguchi et al. (2014)

Miyashita et al. (2019)

# 方法2：ファラデートモグラフィ

例：SS433ジェット先端領域 (Sakemi et al. 2018b)：

ファラデートモグラフィによりジェット先端領域方向の視線上の偏波構造を分離

→前景成分を同定, それ以外のジェット自体に付随する成分の解析はfuture work

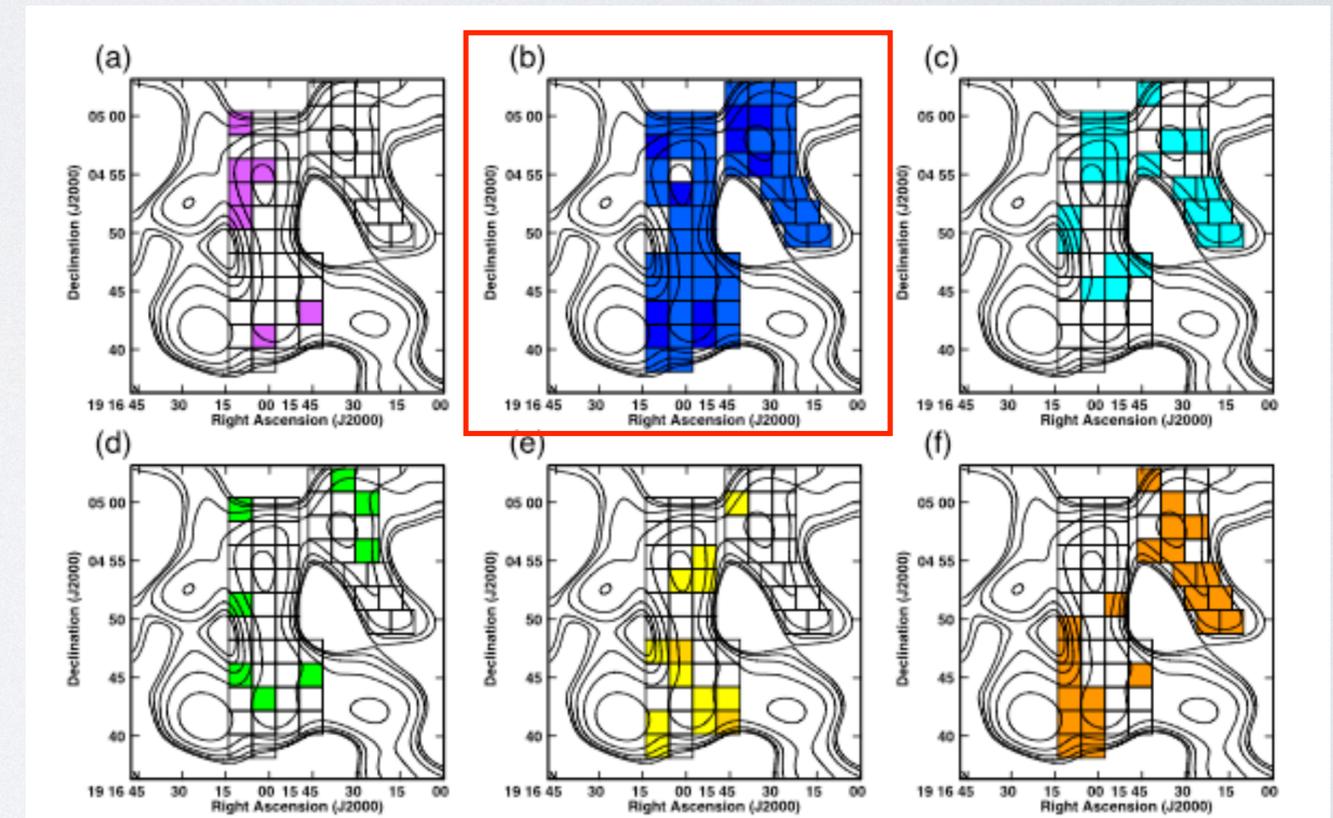
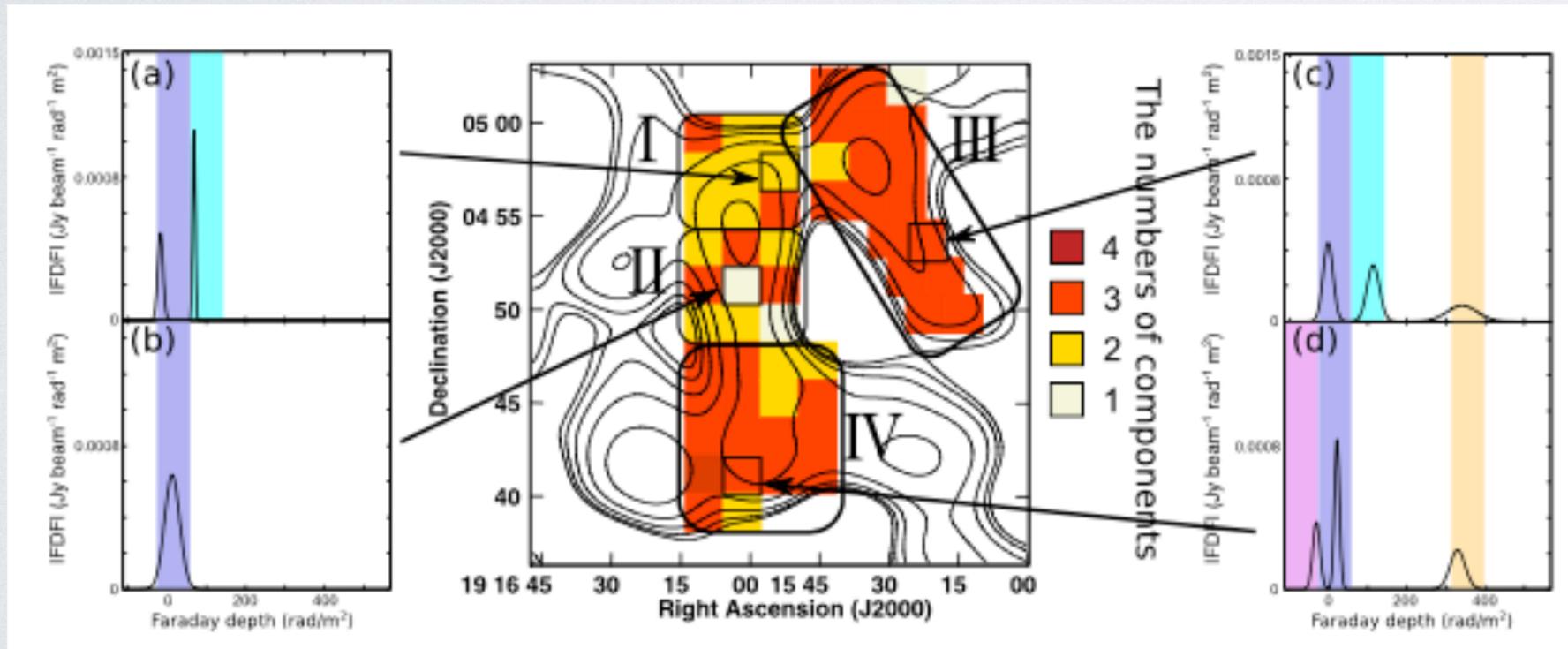


Figure 4. Spatial distribution of the Faraday Dispersion Function (FDF) components in the (a) purple ( $\varphi = -112$  to  $-57$   $\text{rad m}^{-2}$ ), (b) blue ( $\varphi = -26$  to  $58$   $\text{rad m}^{-2}$ ), (c) cyan ( $\varphi = 59$  to  $143$   $\text{rad m}^{-2}$ ), (d) green ( $\varphi = 144$  to  $228$   $\text{rad m}^{-2}$ ), (e) yellow ( $\varphi = -229$  to  $313$   $\text{rad m}^{-2}$ ), and (f) orange ( $\varphi = 314$  to  $398$   $\text{rad m}^{-2}$ ) ranges of Faraday depth. In (b,e), there are deep colored pixels. There are two FDF components in these pixels.

# 今日のトピック

## 1. 宇宙ジェットと磁場

- ・なぜ宇宙ジェットに磁場が重要??
- ・磁場を観測する方法
- ・観測例

## 2. 磁場を観測する手段としての宇宙ジェット

(・背景光源としてのジェット)

- ・ジェットの形態から探る周辺環境

\*全体的にトピックを簡単にさらっていく形式.  
詳細は各論文や教科書をご参照ください.

# 磁場を観測する手法としての宇宙ジェット

# ジェットで周辺磁場の観測？

(ここからのテーマ)

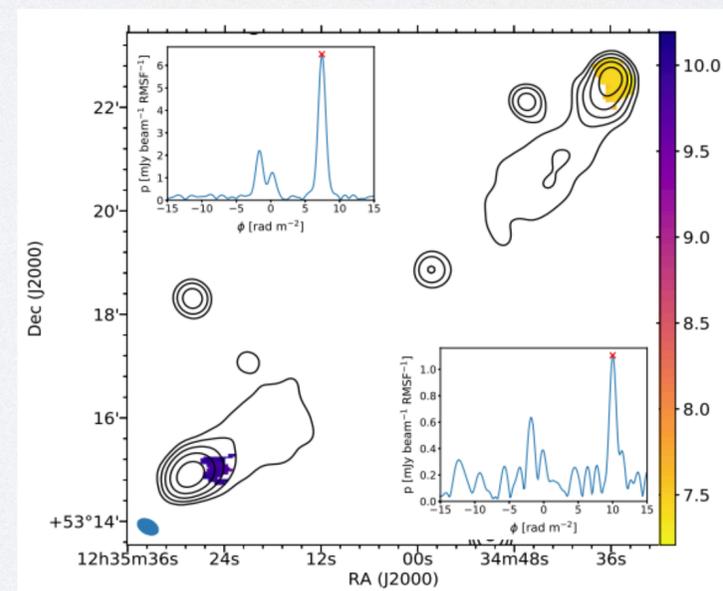
ジェットの観測でその前景や周辺環境を明らかにすることができる。

**Ex.** 星間空間, 銀河間空間, 銀河団内部...

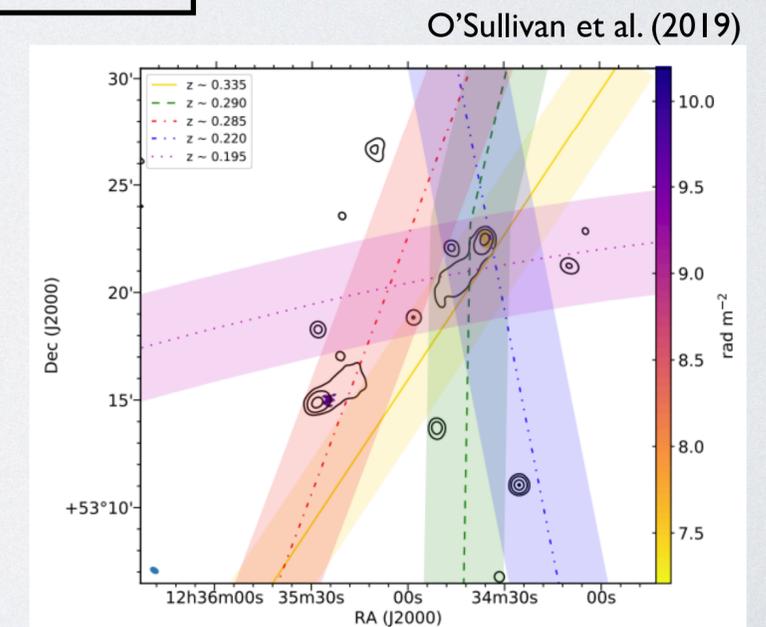
方法:

1. ジェットを背景光源として偏波観測し前景の磁場情報を得る(O'Sullivan et al. 2019)

2. ジェットの形態から周辺のガス分布や**磁場分布**を明らかにする ← **NEW!!**



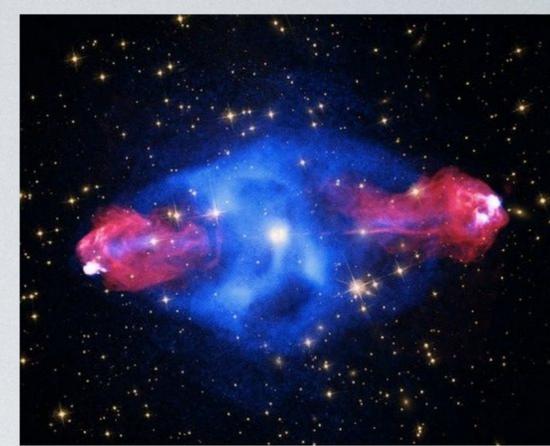
Faraday depth分布



ジェット前景にあると思われる大規模構造

# 宇宙ジェットの状態から探る周辺環境

# 折れ曲がったジェット

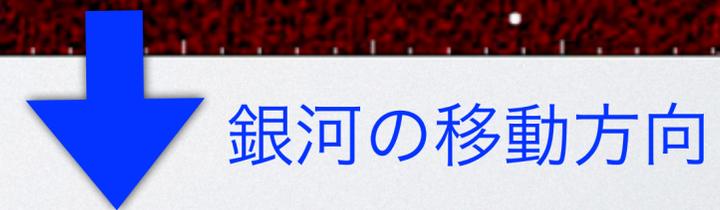
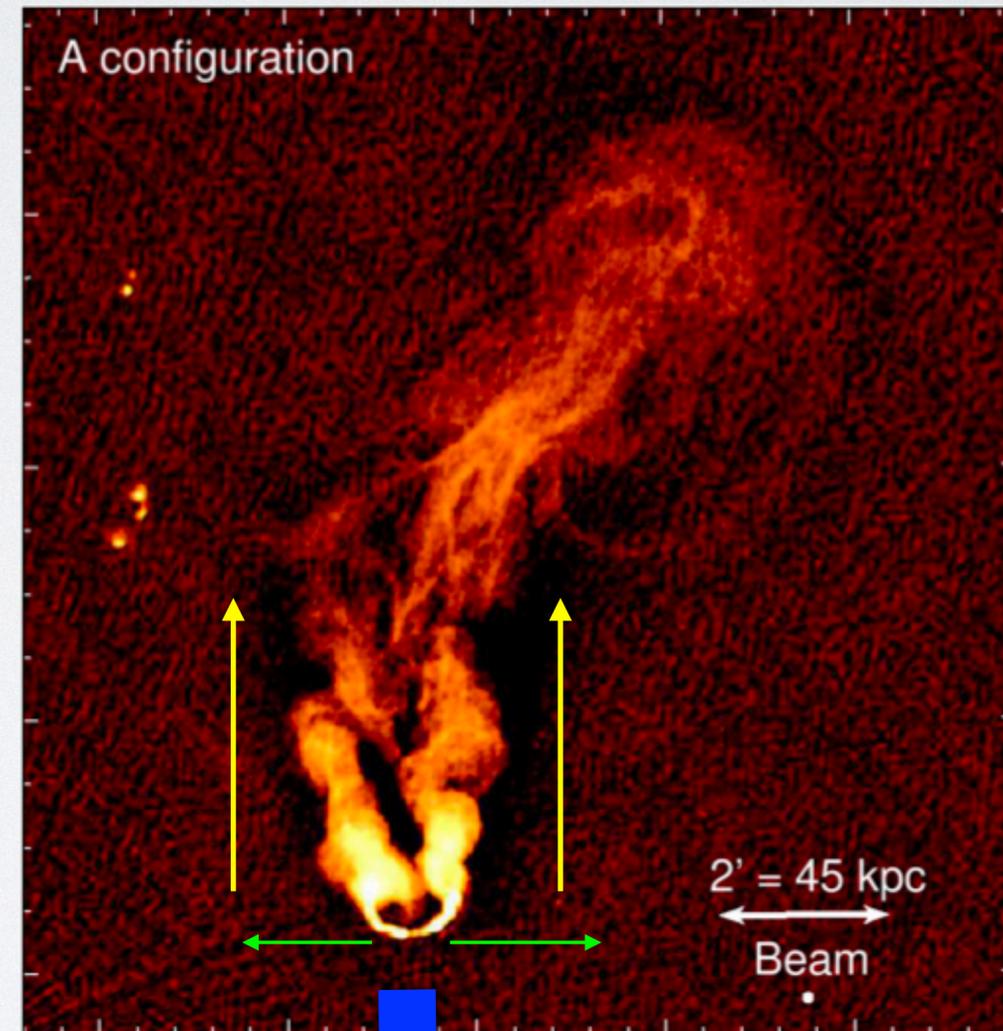
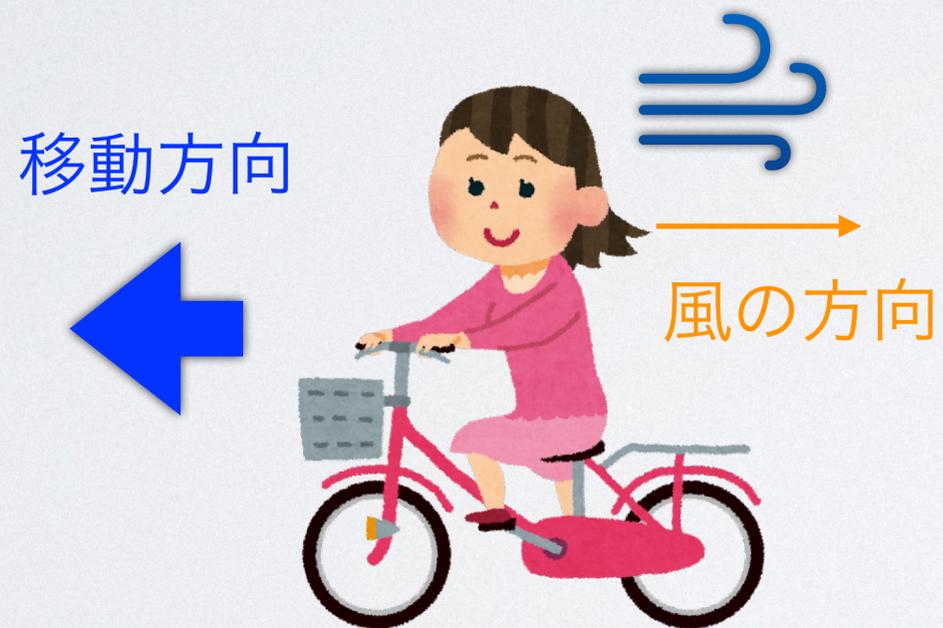


## 銀河団中の折れ曲がったAGNジェット：

Head-Tail Radio Galaxy (NAT, WAT)

銀河の運動に伴って受ける風によってジェットが折れ曲がる

Gendron-Marsolais et al. (2020)



# 衝突銀河団Abell 3376の場合

## **Abell 3376 :**

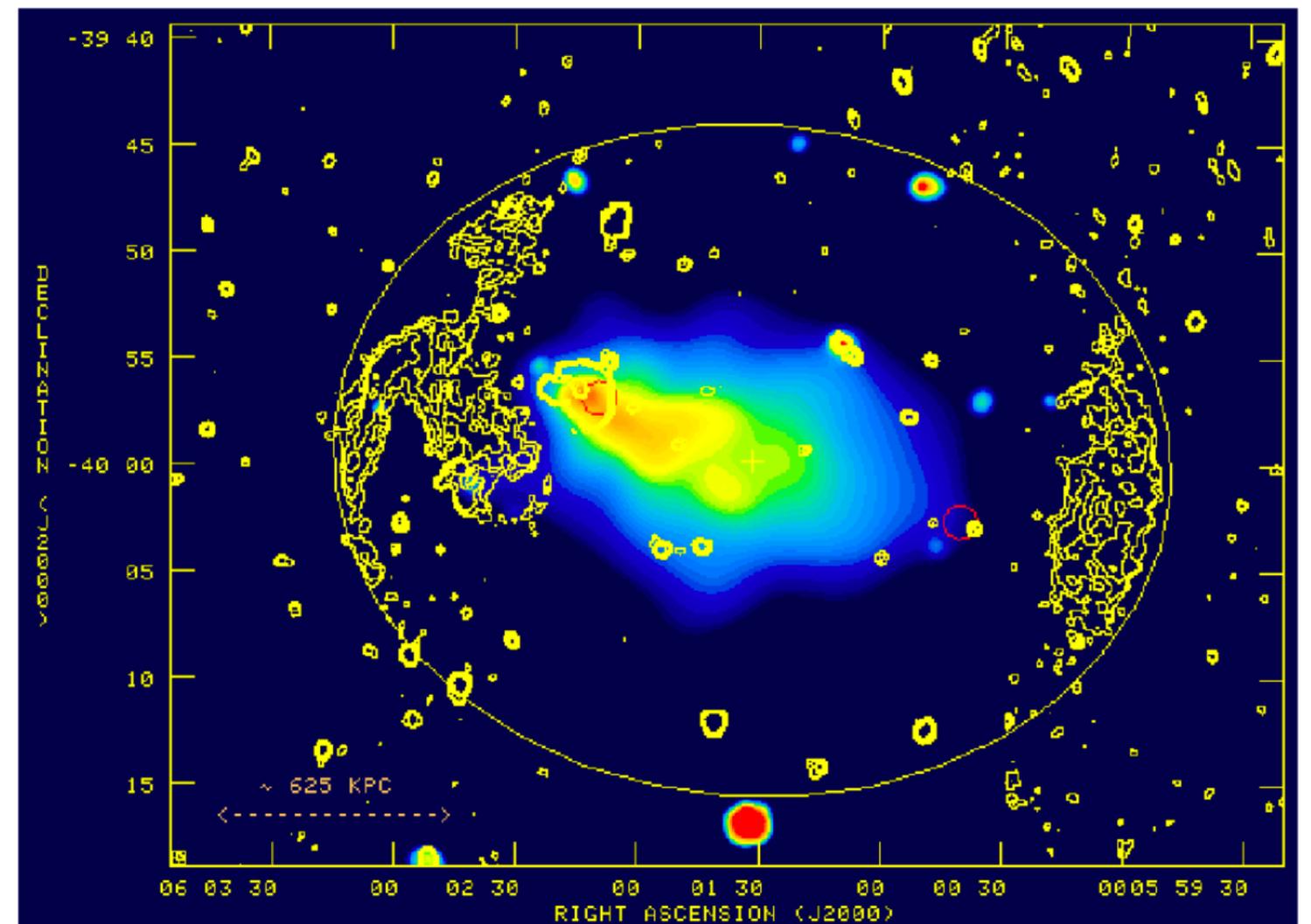
大小2つの銀河団同士が衝突している現場  
小さい銀河団Bが大きい銀河団Aに突っ込んで  
いるような状況

東西に電波レリックが形成

**(問) 銀河団Bに付随する銀河から噴出する  
ジェットが曲がる方向は??**

カラー：ROSAT (0.14-2.0 keV), コントア：VLA@1.4 GHz

Bagchi et al. (2006)



(Credits: X-ray: NASA/CXC/SAO/A. Vikhlinin; ROSAT Optical: DSS Radio: NSF/NRAO/VLA/  
IUCAA/J.Bagchi)

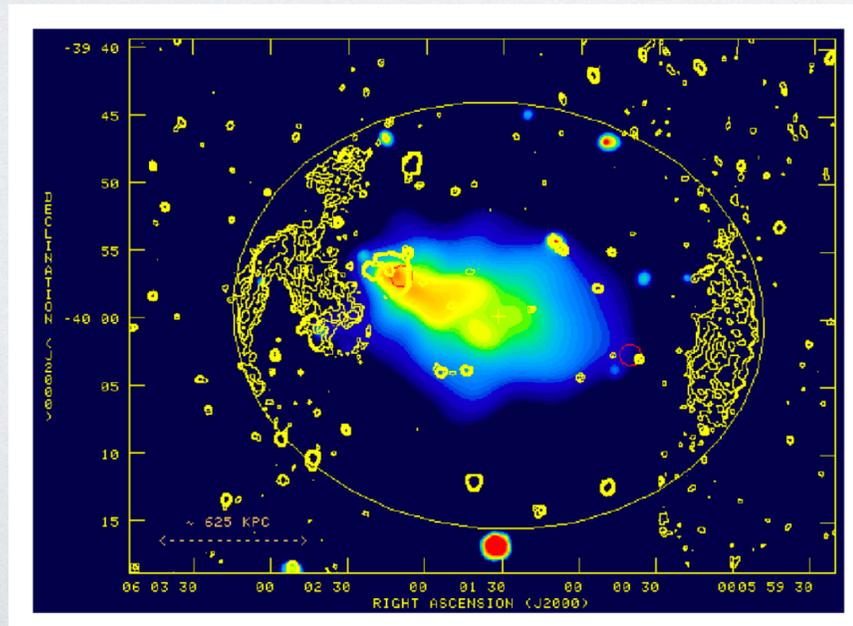
# 衝突銀河団Abell 3376の場合

## Abell 3376 :

大小2つの銀河団同士が衝突している現場  
小さい銀河団Bが大きい銀河団Aに突っ込んで  
いるような状況

東西に電波レリックが形成

**(問) 銀河団Bに付随する銀河から噴出する  
ジェットが曲がる方向は??**

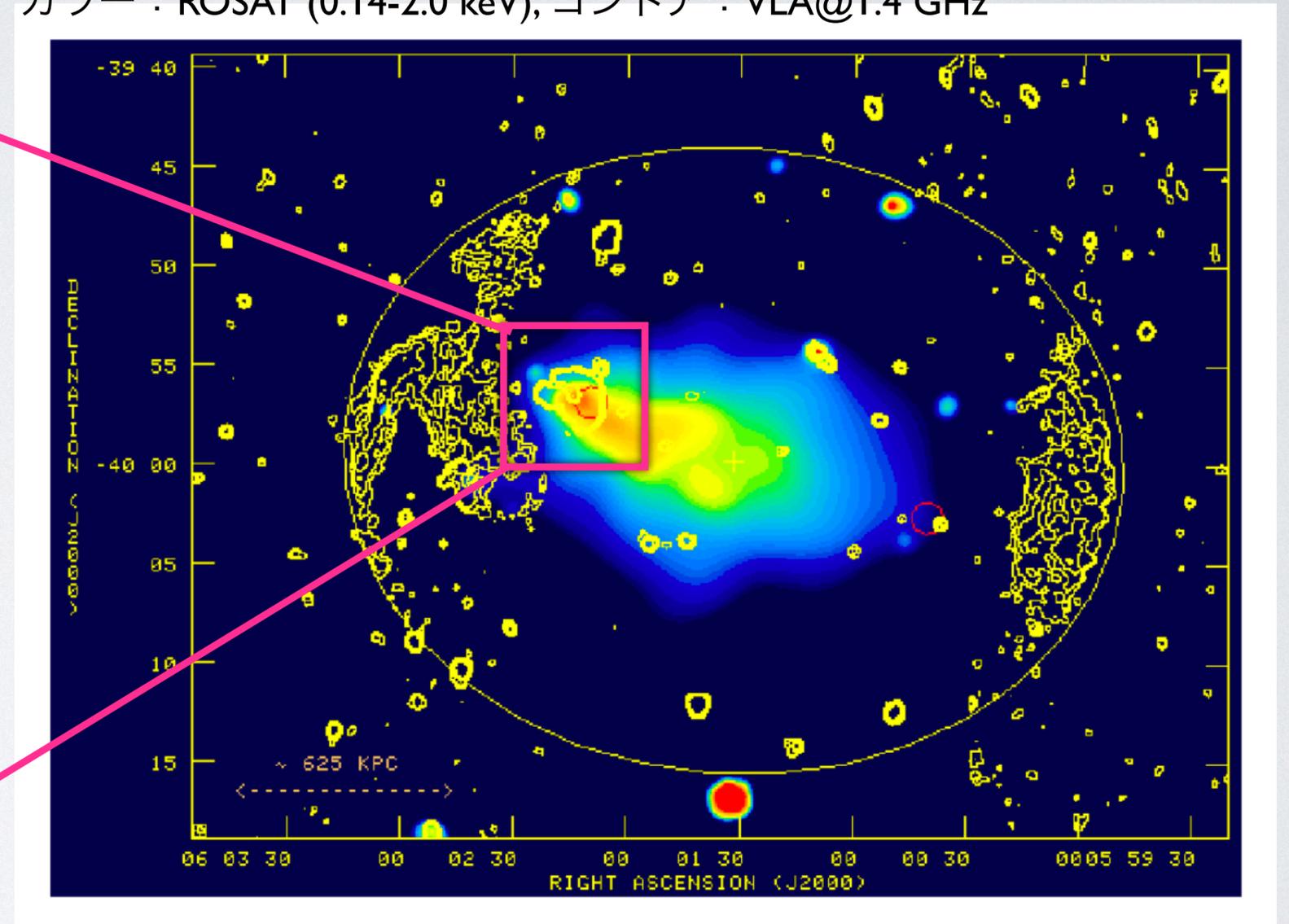
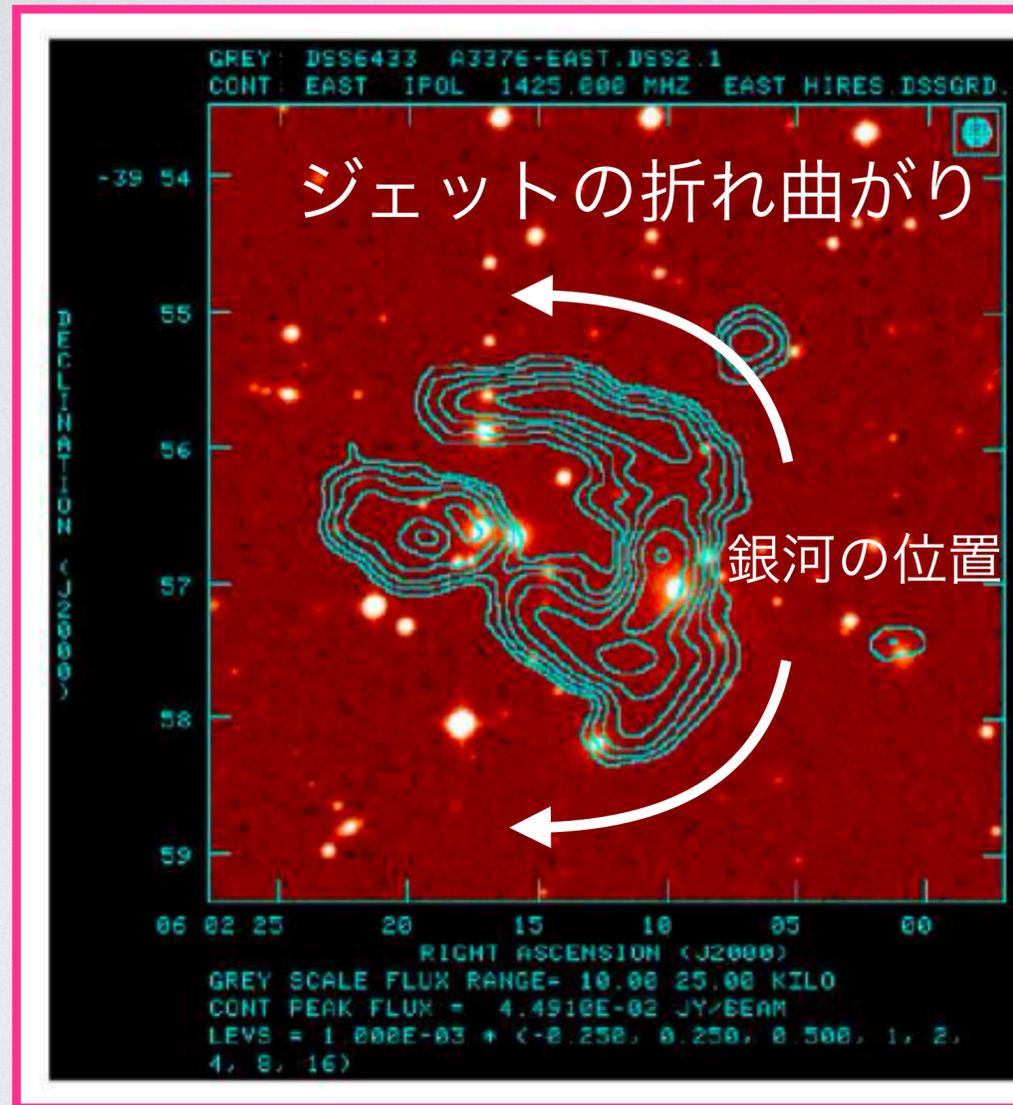


# MRC 0600-399

Bagchi et al. (2006)

カラー：DSS (r-band), コントア：VLA@1.4 GHz

カラー：ROSAT (0.14-2.0 keV), コントア：VLA@1.4 GHz



(Credits: X-ray: NASA/CXC/SAO/A. Vikhlinin; ROSAT Optical: DSS Radio: NSF/NRAO/VLA/ IUCAA/J.Bagchi)

**MeerKATで見える折れ曲がったジェット**

# 電波干渉計 MeerKAT



次世代大型電波干渉計計画SKAの先行機

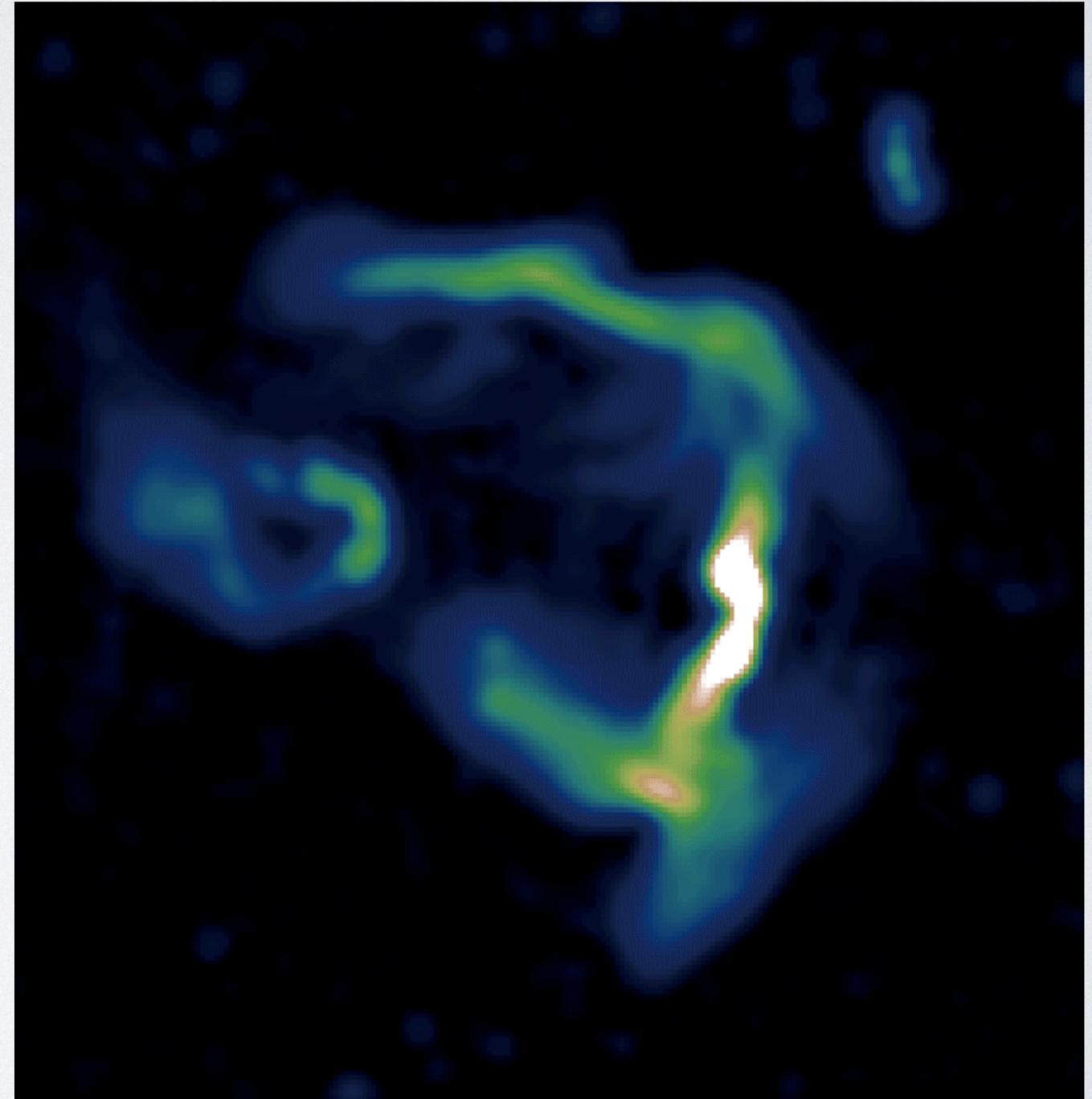
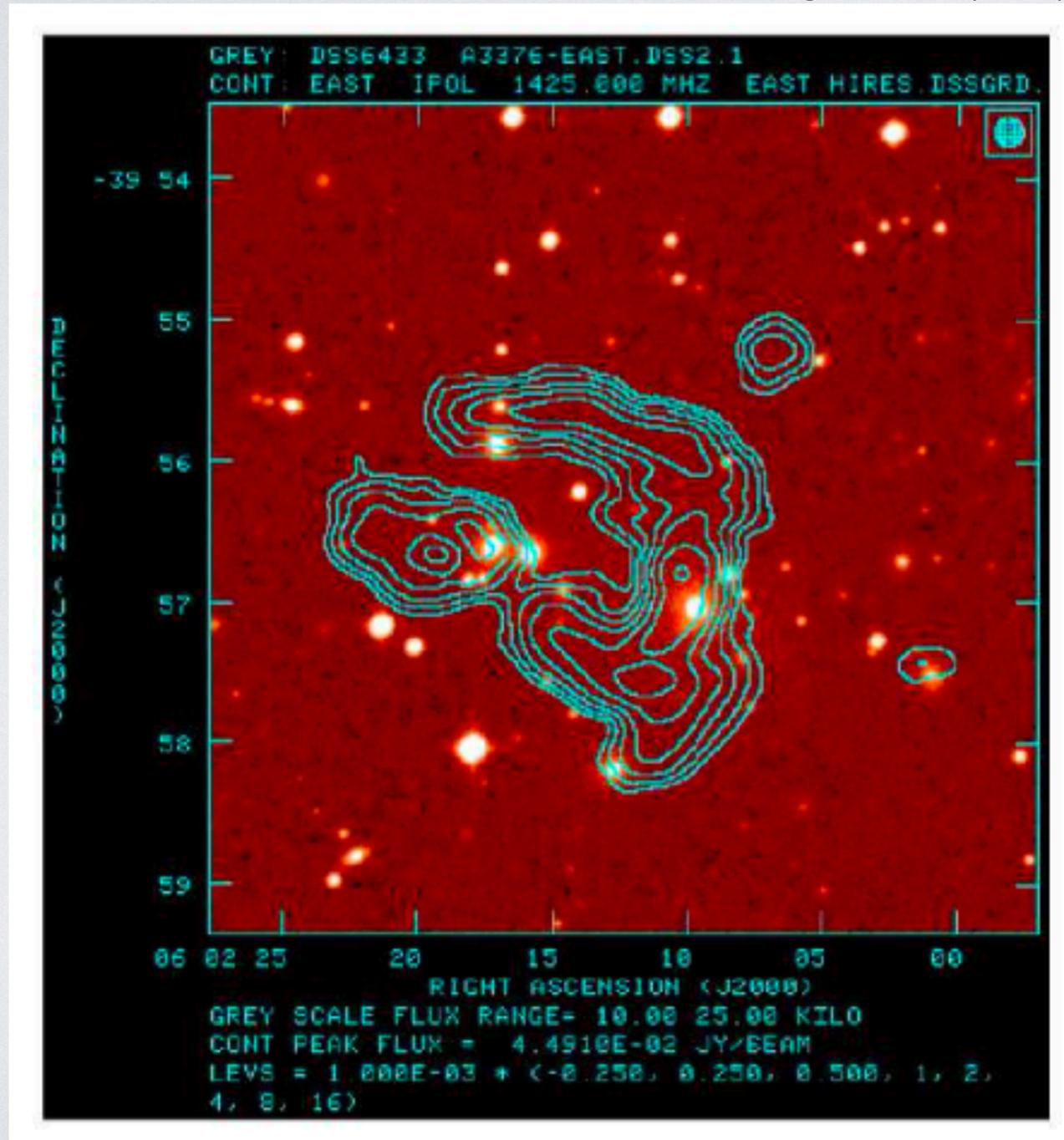
- ・ 13.5m アンテナ64台で構成
- ・ 周波数帯域 544-1088 MHz, 856-1712 MHz
- ・ 分解能 a few arcsec @ L-band
- ・ 感度 a few  $\mu\text{Jy}/\text{beam}$  @ L-band

→南半球の空を高分解能・高感度で観測できる  
貴重な干渉計！

(MeerKATでの観測に興味がある人はお声がけ  
ください。)

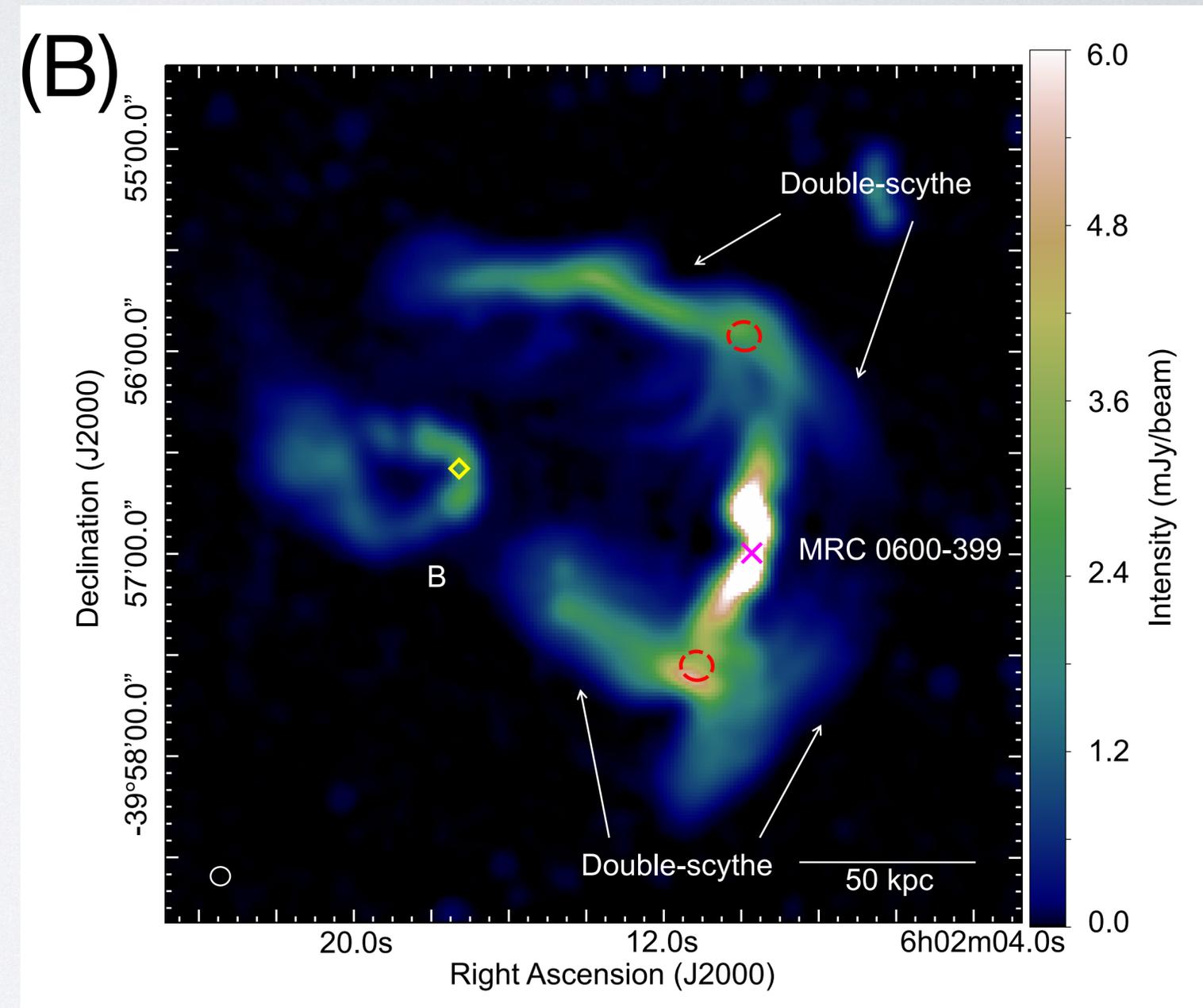
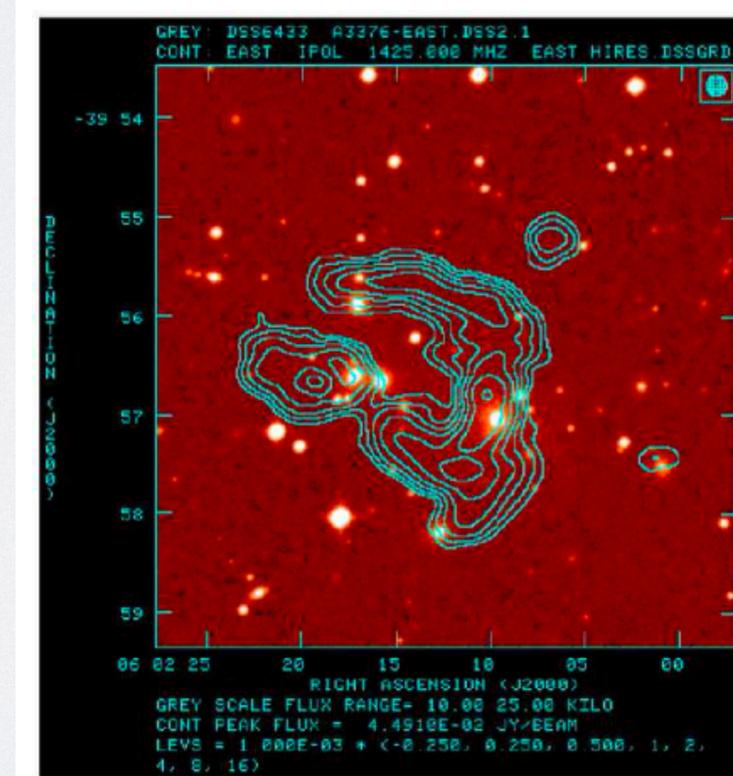
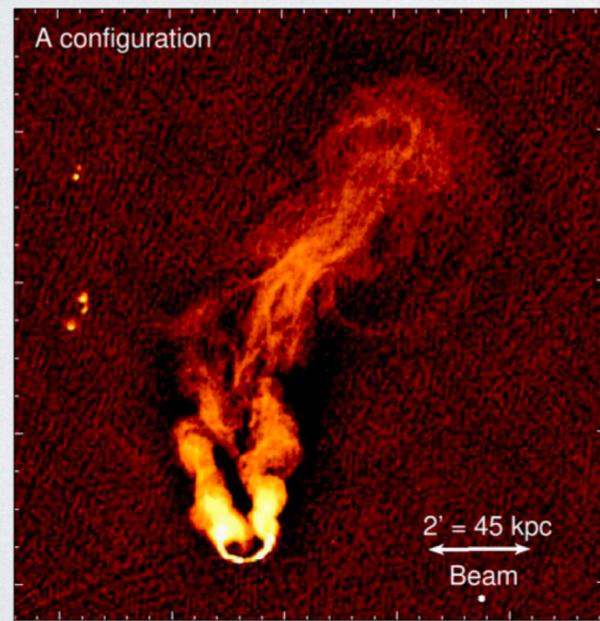
# MeerKATで見たMRC 0600-399

Bagchi et al. (2006)



# MeerKATで見たMRC 0600-399

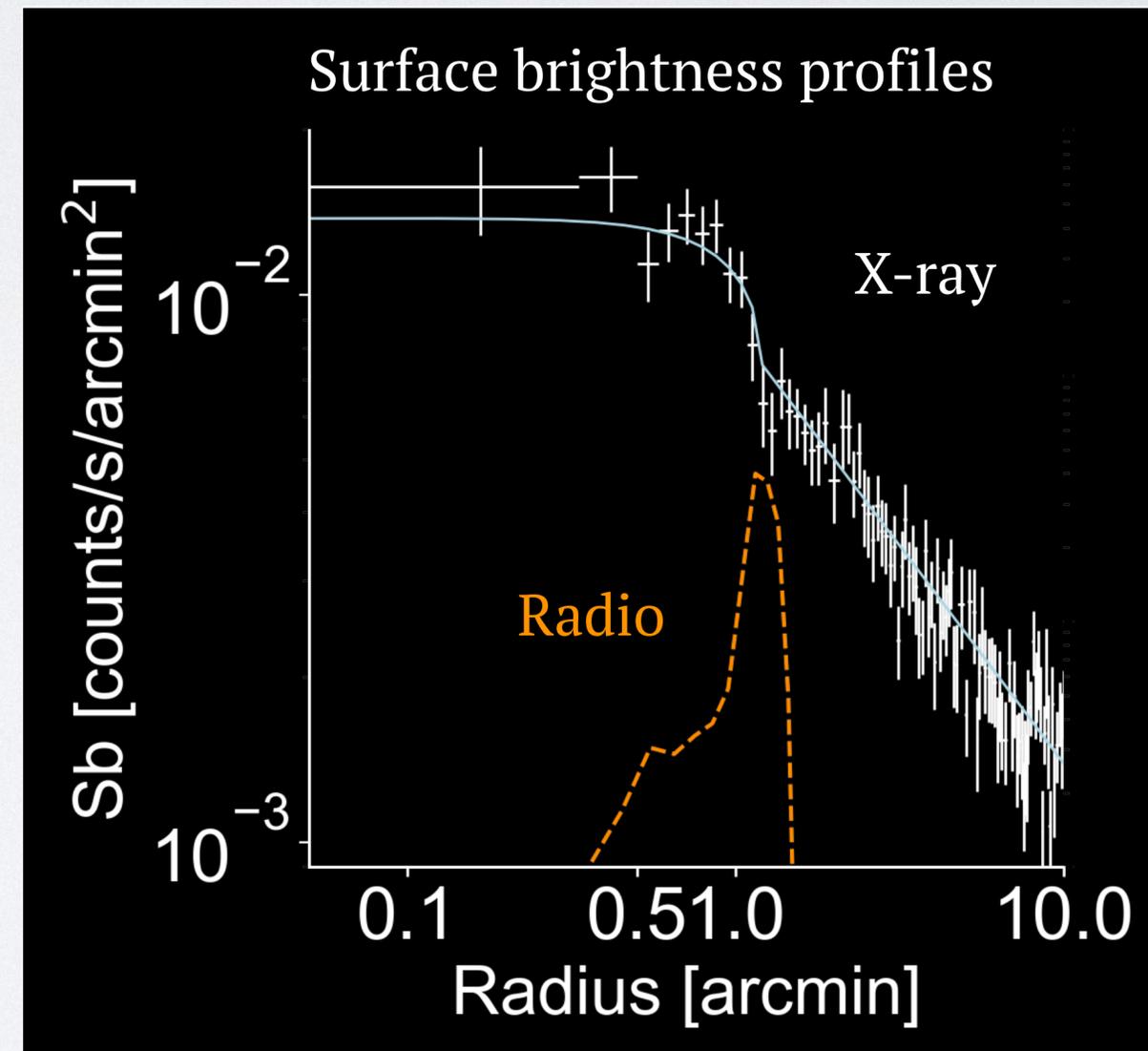
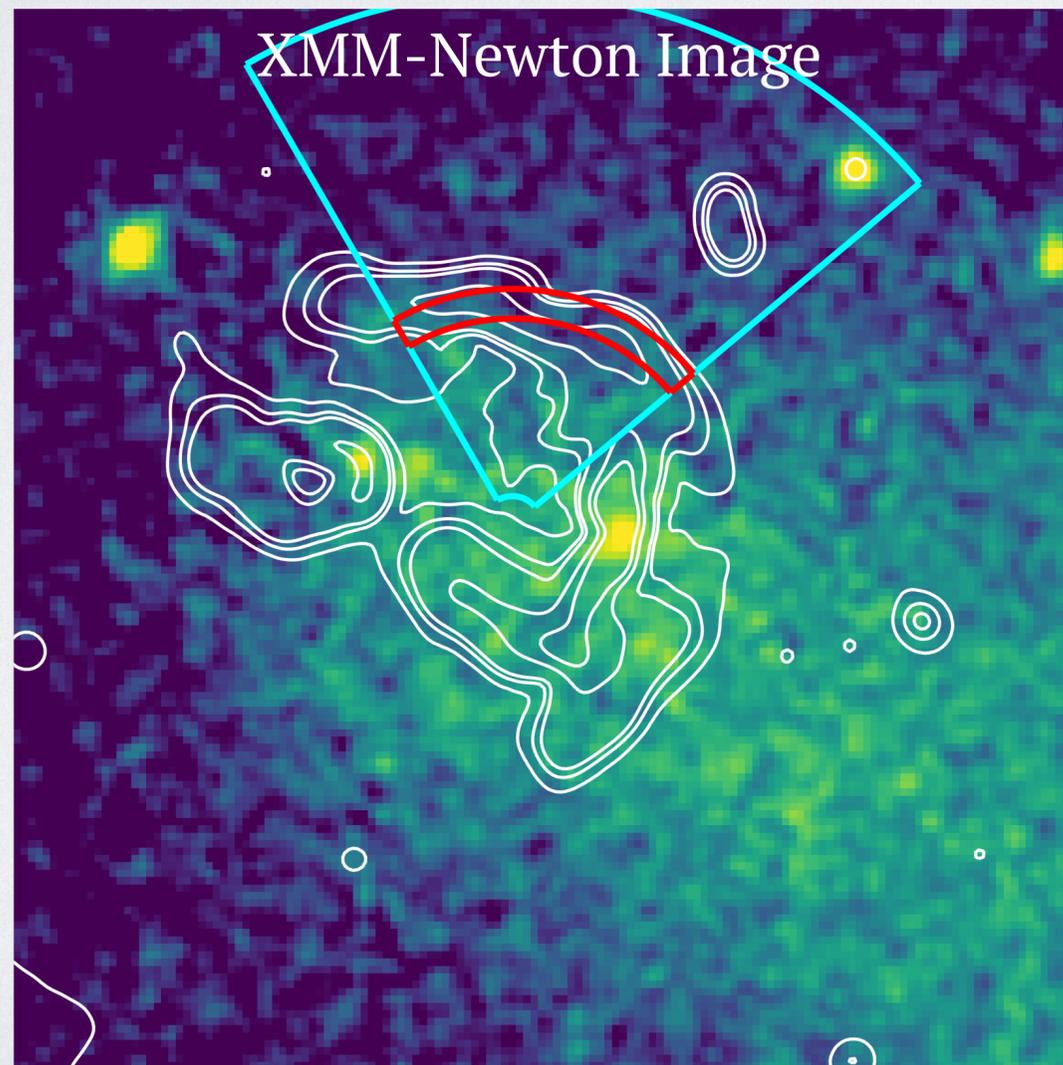
- 90度の極端な折れ曲がり
- 折れ曲がった後も細い構造を維持
- 左側だけではなく右側にも伸びた構造  
→ 両鎌構造 (**Double-Scythe Structure**)



# MRC 0600-399の周辺環境

折れ曲がった後のジェット：

コールドフロント(接触不連続面)に沿うように伝搬している。

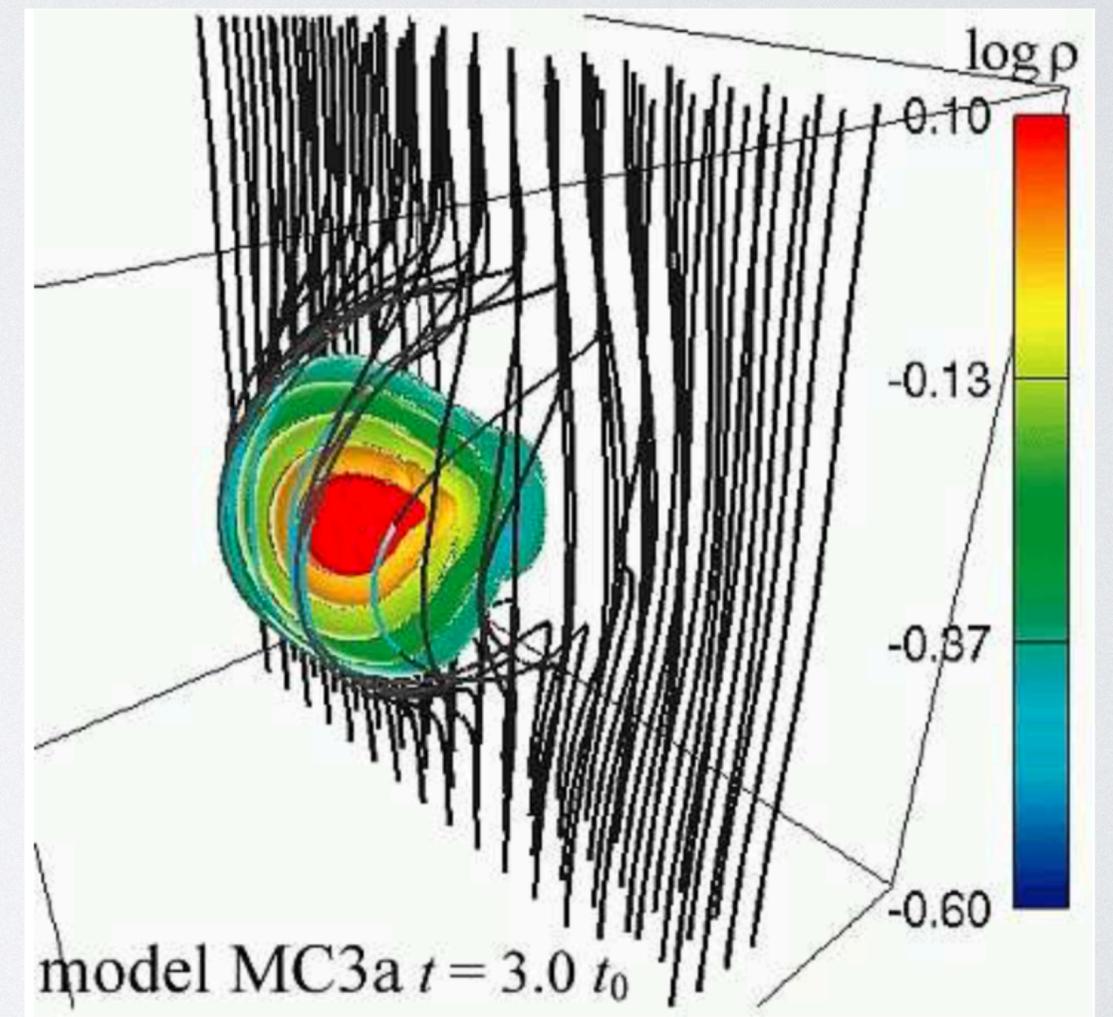


# MRC 0600-399の周辺環境

## 折れ曲がった後のジェット：

- コールドフロント(接触不連続面)に沿うように伝搬している。  
コールドフロントには揃った磁場が存在するとの理論的示唆。  
→揃った磁場があったら観測の特徴を説明可能??  
→**MHDシミュレーション (ICRR 大村さん)**

Asai et al. 2005



# シミュレーションで探るMRC 0600-399の形成



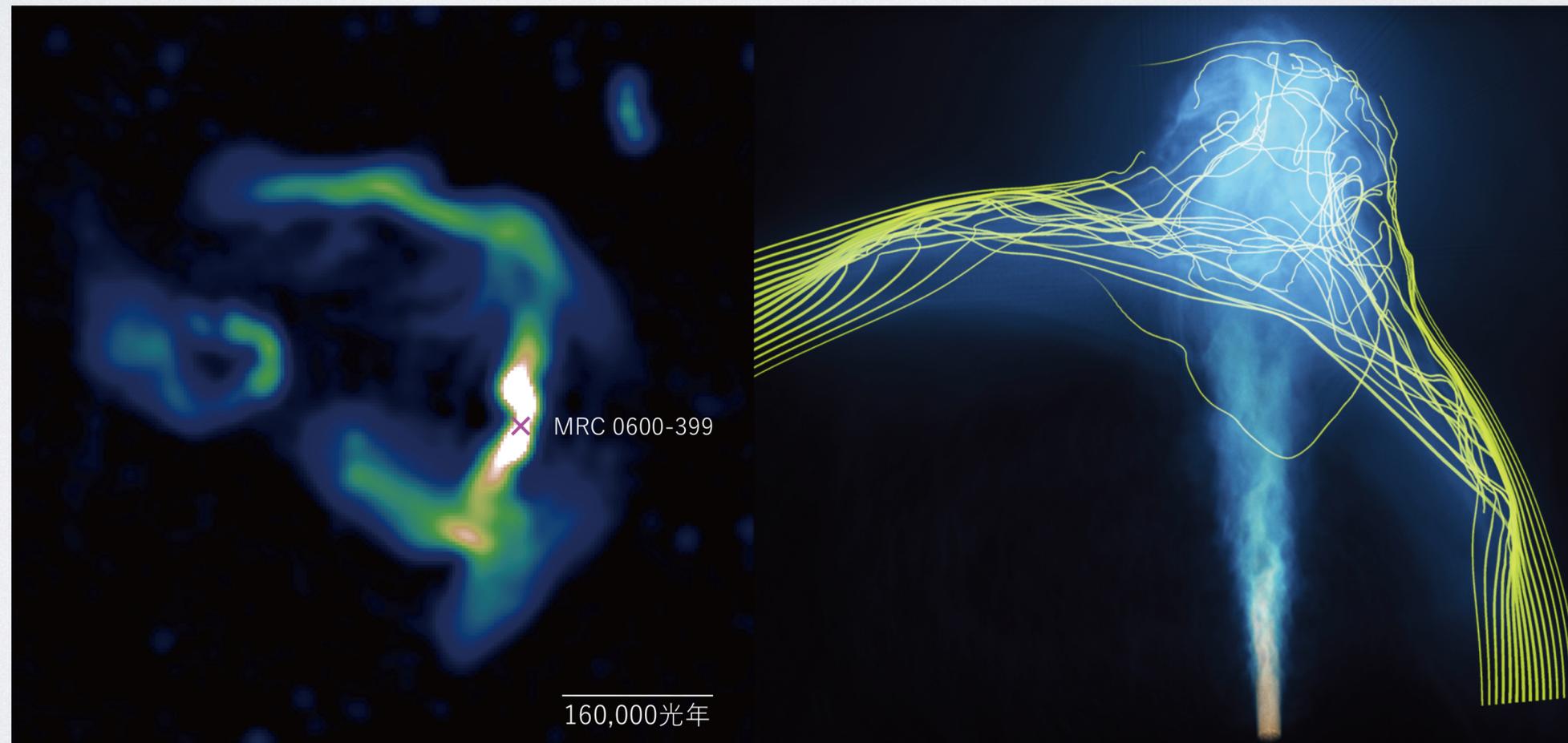
Credit: Takumi Ohmura, Mami Machida, Hirotaka Nakayama, 4D2U Project, NAOJ

# 観測 v.s シミュレーション

コールドフロントの磁場を仮定 ( $10\mu\text{G}$ )

→ 両鎌構造, 折れ曲がった後の細かい構造など観測を良く再現

→ **初めて銀河団内磁場とジェットとの相互作用の現場を捉えた**



# 将来的に似たようなケースが見つかるか??

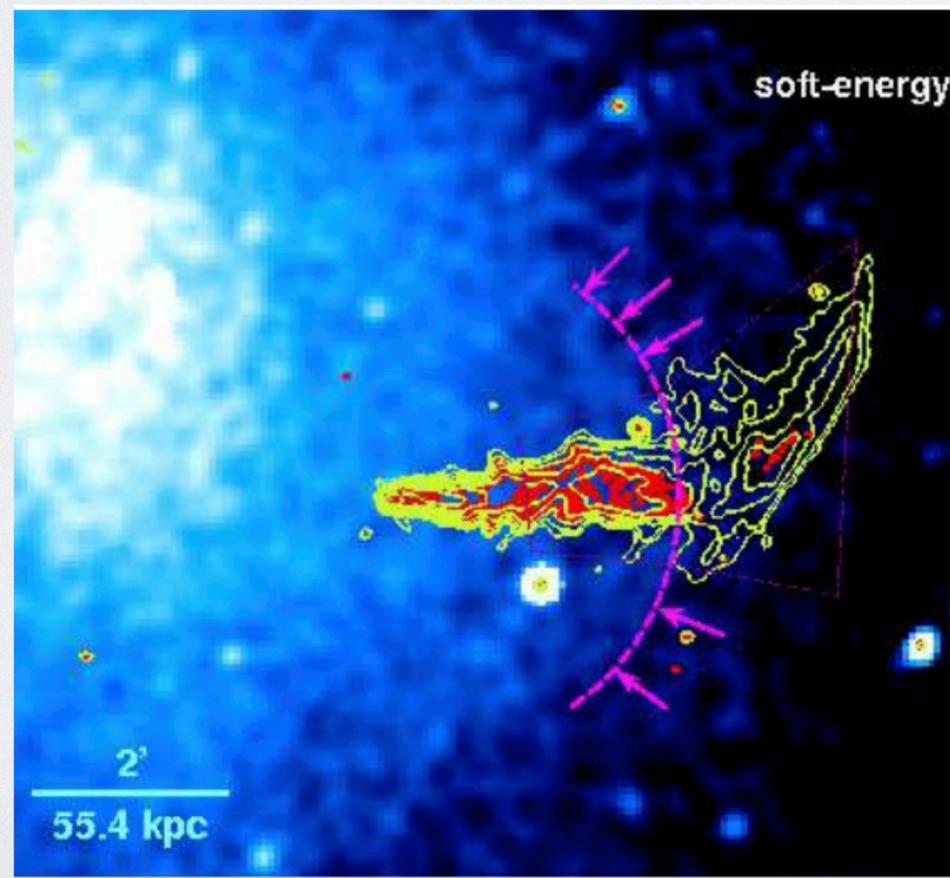
今回のようなケースはレアなのでは??

→ 現段階で似たような天体が2 (or 3)個見つかった

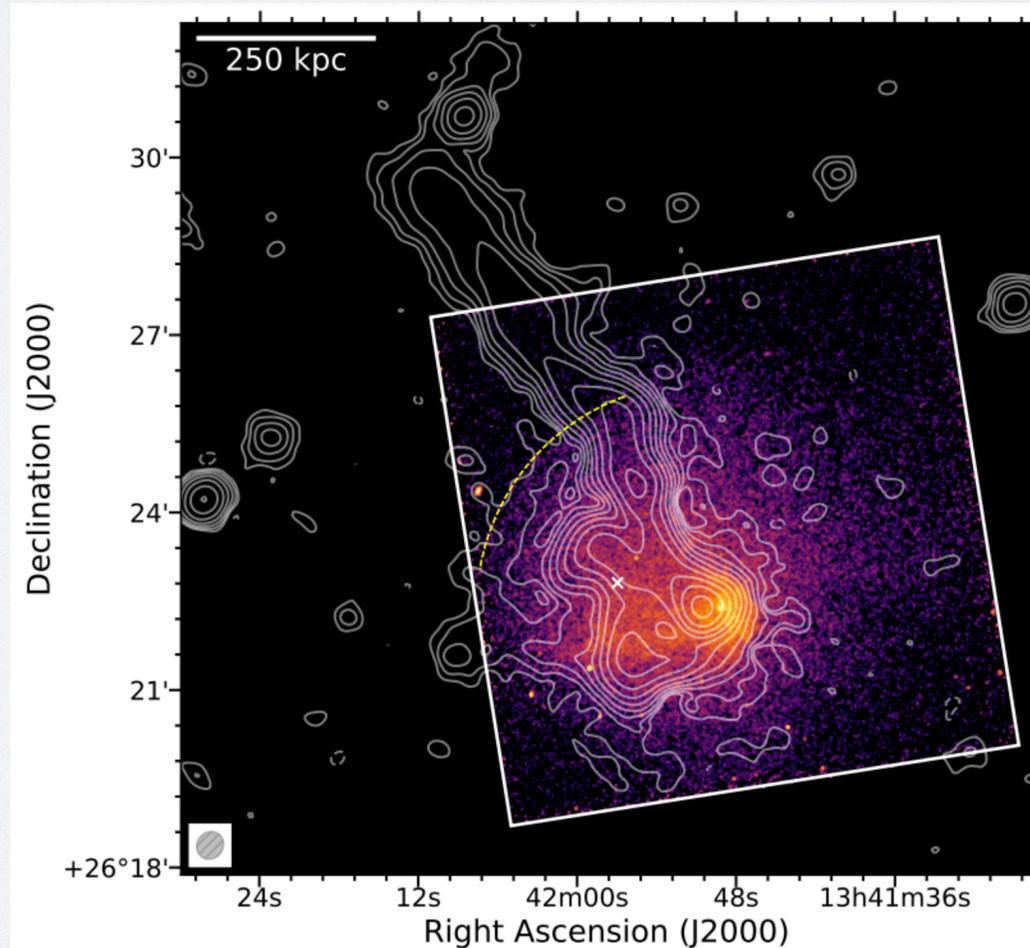
またSKAの先行機のサーベイ観測で特殊な形態のジェットが多数見つかりつつある.

次世代の高感度干渉計観測により星間・銀河間空間の磁場構造を解明できる

Lal 2020: NGC4869 in the Coma cluster



Botteon et al.: Abell 1775



# まとめ

## 本講演では・・・

1. 宇宙ジェットに付随する磁場の観測について
2. 宇宙ジェットを利用した周辺に存在する磁場の観測について  
をお話しました。

興味がある方は是非ともお声がけください。

## 最後に学生生活のアドバイス・・・？

- 今のうちに自分に適した生活リズムや研究スタイルを試行錯誤しておくといいかも
- 無理をしないといけないタイミングは絶対あるけれどもちゃんと寝ましょう
- 本業の研究が疎かにならない程度に, 興味のあることには積極的に

ご清聴ありがとうございました