

# モニタリング観測から探る 電波銀河3C 111の pcスケールの物理状態

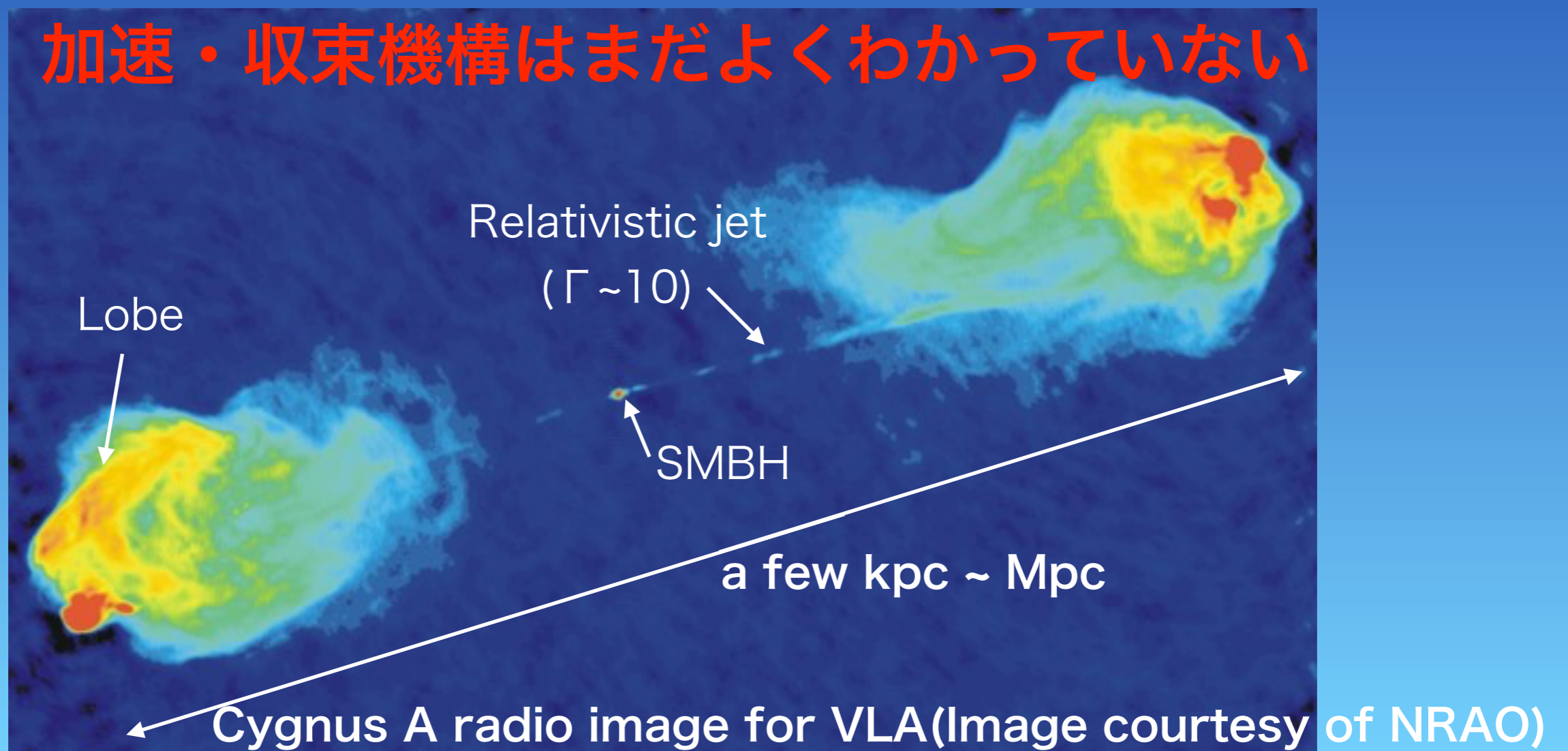
VLBI懇談会 2018年12月1日

山口大学 修士2年 塩谷康允

指導教官：藤沢健太・新沼浩太郎

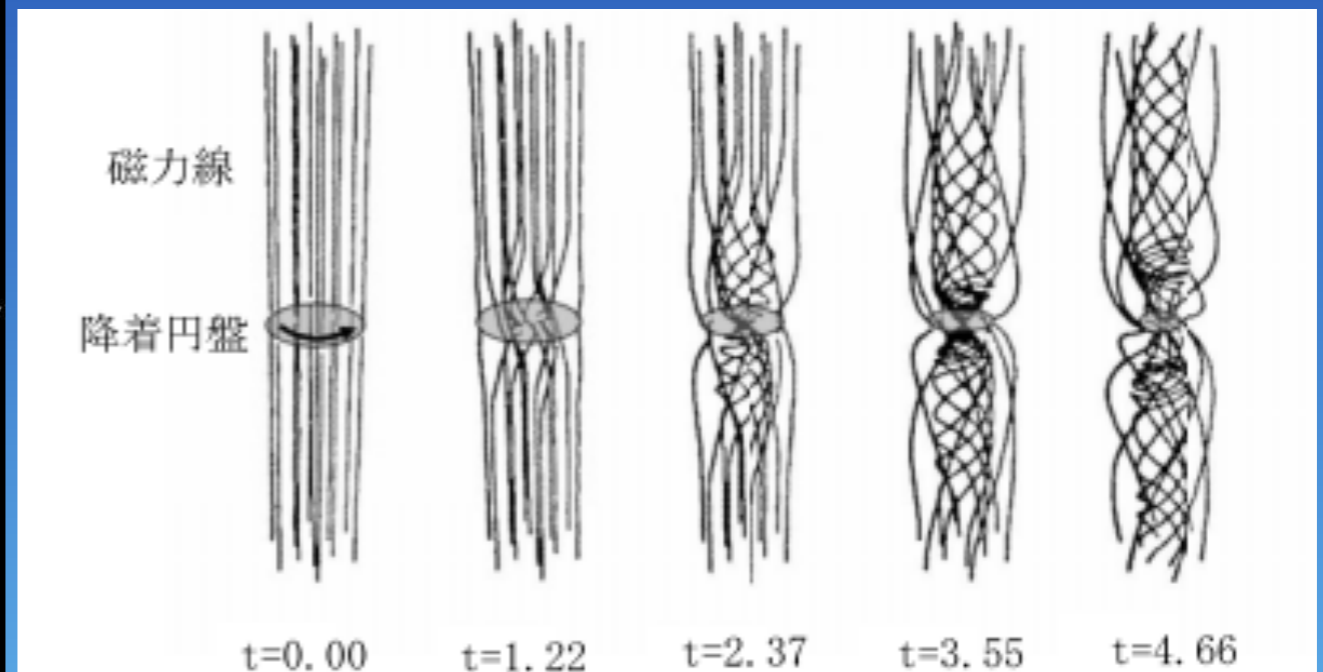
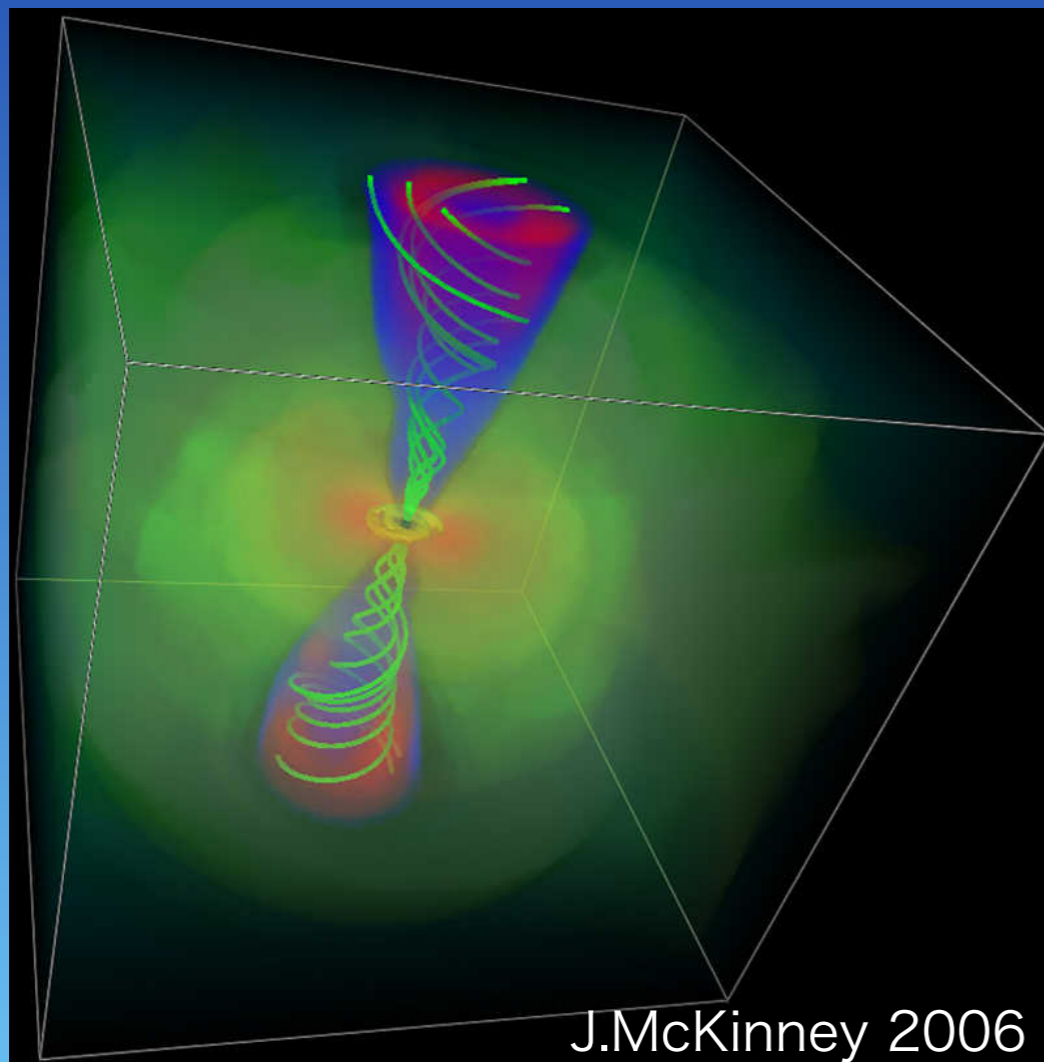
# AGN Jet

- 非常にコンパクトな領域から莫大な( $\sim 10^{40}\text{W}$ )エネルギー放射
- 幅広い電磁放射 ; シンクロトロン放射 + 逆コンプトン散乱
- 相対論的速度の細く絞られたプラズマ流



# Theoretical models

- 螺旋磁場・シンクロトロン放射・相対論的速度なジェット  
⇒磁気駆動モデル (magnetically driven model) が最も有力視

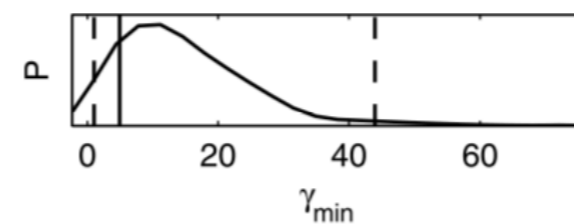
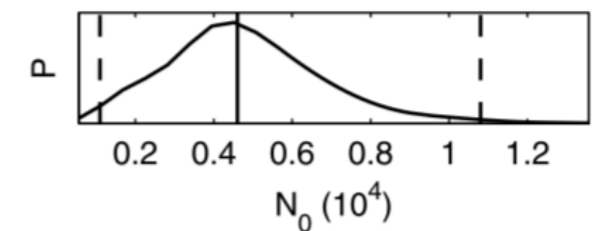
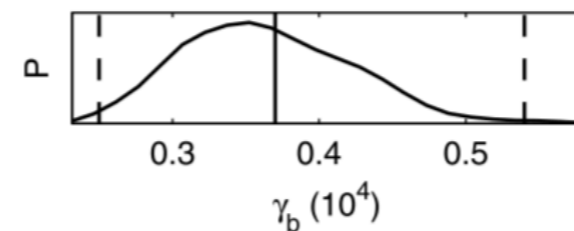
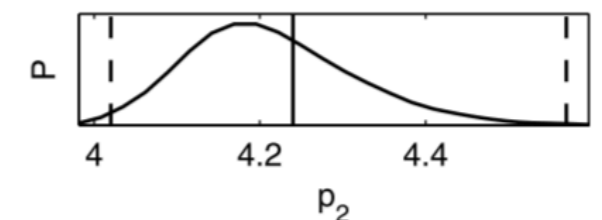
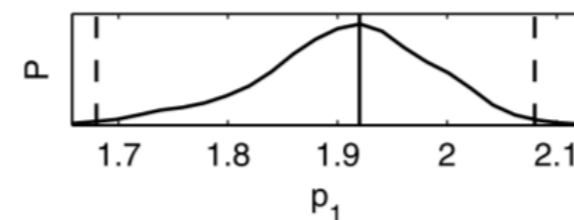
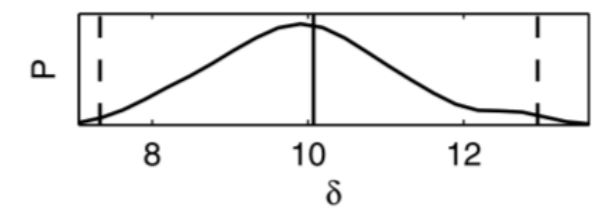
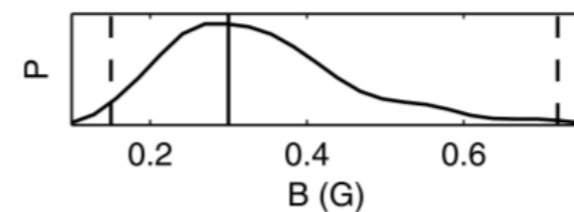
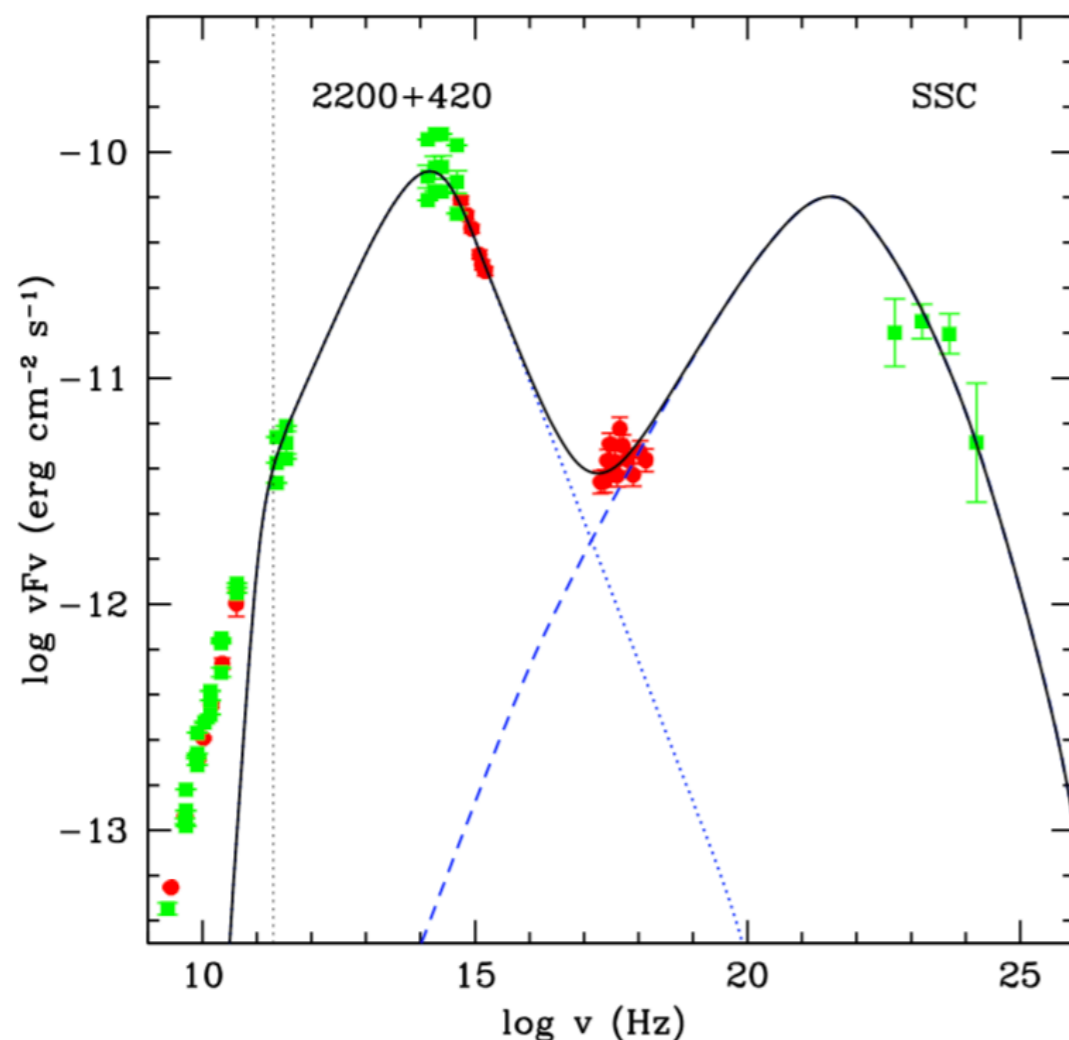


宇宙ジェットの磁気駆動モデルのコンピュータシミュレーション  
(<http://home.hiroshima-u.ac.jp/hasc/news/3c279/index.html>  
, Shibata and Uchida 1986)

より詳細な理論モデルのためには、BHからpcスケール以下の  
ジェットの磁場などの物理状態を知ることが必要！

# Estimation of magnetic field

- SED(spectral energy distribution)にSynchrotron放射+逆コンプトン散乱を仮定し、fitting parameterから導出
- 放射領域の違い・時間変動がわからない等が問題点



# Estimation of magnetic field

- 問題点を解決するために・・・

見通している放射領域の違い

磁場の時間変動がわからない



比較的近い周波数のみを使う



観測回数を増やし比較する

この条件で磁場を推定できる方法

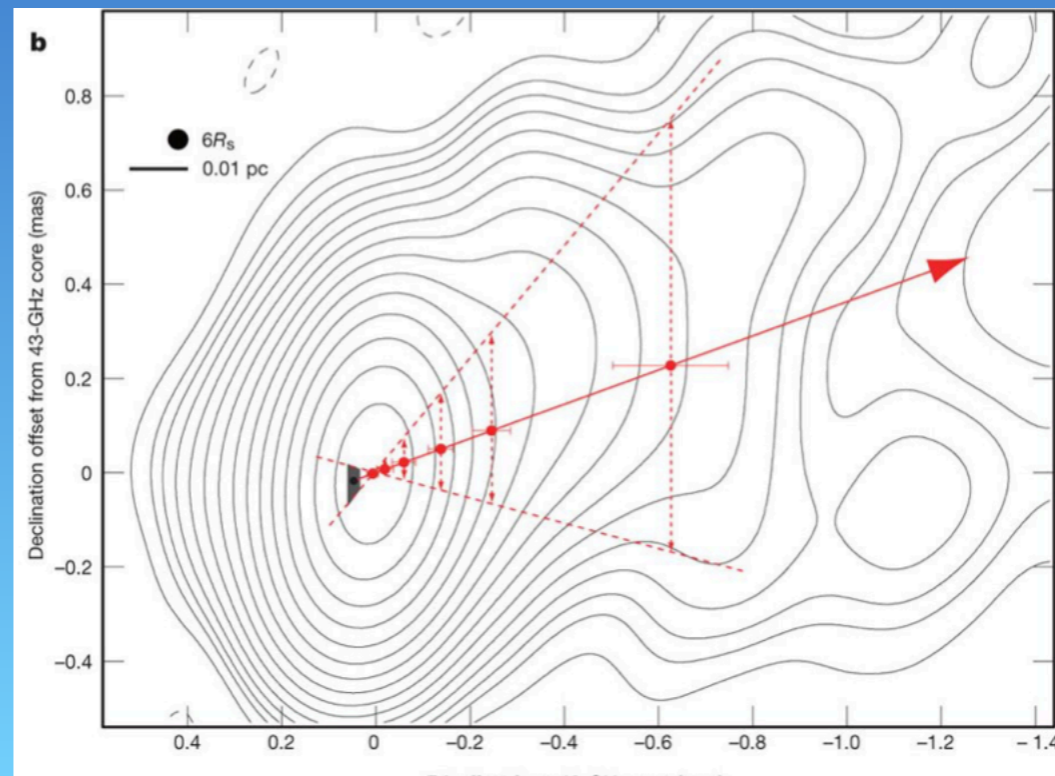
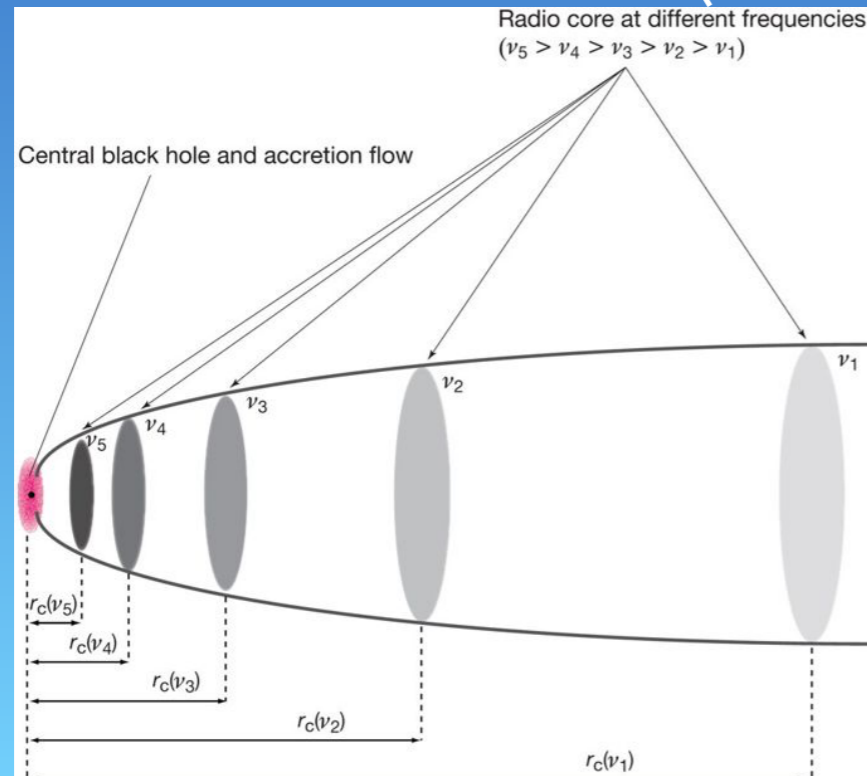
**コアシフト現象を用いた磁場の推定  
+ モニタリング観測**

# Core Shift

- コアシフト現象

高周波の電波コアほどよりジェットの上流にシフトする現象  
 コアの位置と周波数に以下の関係(Lobanov 1998)

$$r_{\text{core}} \propto \nu^{-\frac{1}{k}} \left( \begin{array}{l} k = \frac{(3 - 2\alpha)m + 2n - 2}{5 - 2\alpha} \quad B = B_{1\text{pc}} r^{-m} \\ N = N_{1\text{pc}} r^{-n} \end{array} \right)$$



# Estimation of B using core shift

- エネルギー等分配を仮定したコニカルなジェットの場合  
BHから1pcの位置での磁場を以下のように推定できる(Hirovani+05)

$$B_{1\text{pc}} = 1.45 \times 10^{-8} \left( \frac{\Delta r_{\text{core}} D_L \nu_1 \nu_2}{\nu_2 - \nu_1} \right)^{\frac{3}{4}} \left( \frac{1}{(1+z)^4 \delta^2 \phi \sin^2 \theta} \right)$$

$\Delta r_{\text{core}}$ : displacement radio core at difference frequency

$\nu_1, \nu_2$ : frequency       $D_L$ : luminosity distance

$z$ : redshift       $\delta$ : doppler factor       $\phi$ : jet opening angle

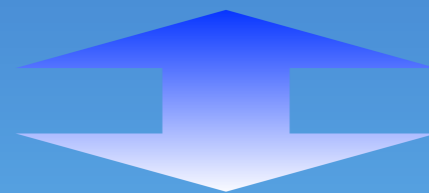
$\theta$ : the angle between the jet and the line of sight

**2周波VLBI観測を行い、コアのシフト量を  
測定するだけで磁場がわかる！！**

# Estimation of B using core shift

- これまでのcore shift現象を用いて磁場を研究した例

Author	Frequency [GHz]	Source sample	Number of observations
Kovalev+08	2.3, 8.6	29	$\leq 3/a$ source
O'sullivan+09	4.6, 5.1, 7.9, 8.9, 12.9, 15.4, 22.2, 43.1	6	1/a source
Pushkarev+12	8.1, 8.4, 12.1, 15.4	191	12/a source



## Our observation

- High frequency
- **Single source**/Monitoring

&

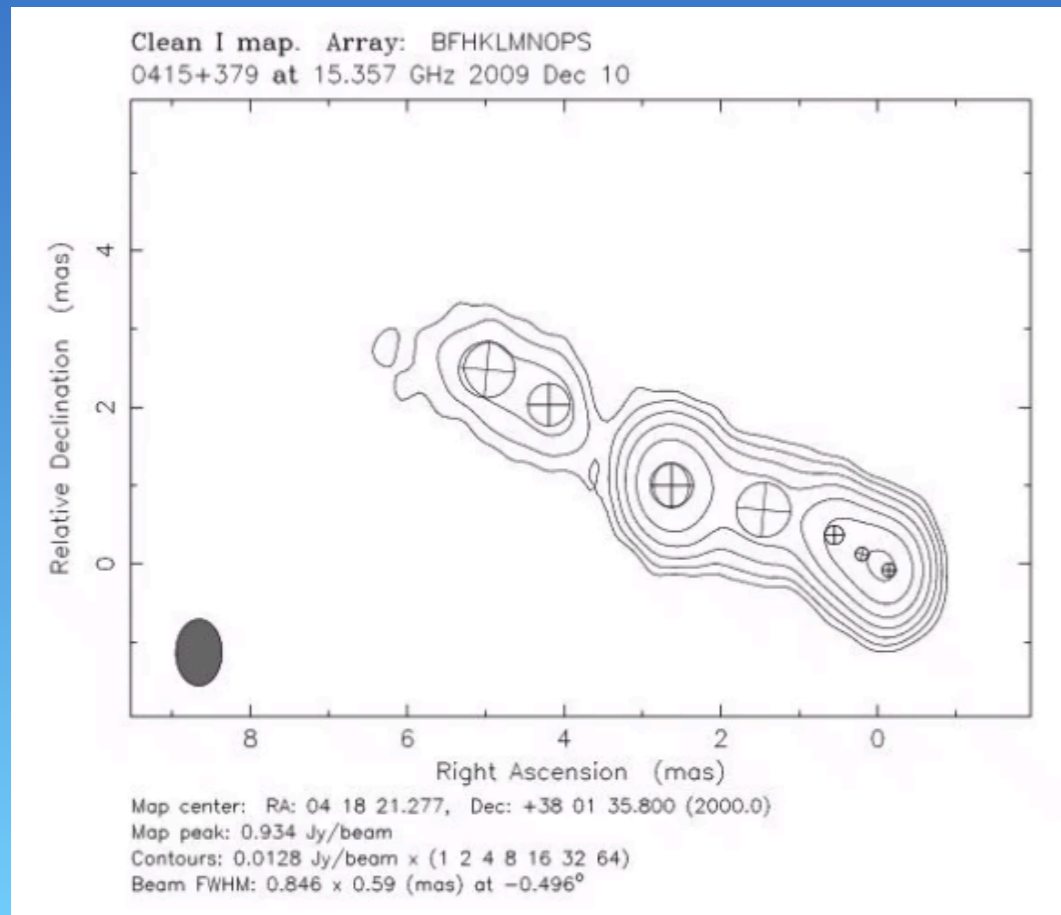
- **天体までの距離が近い**
- **viewing angle**が大きい
- **フレア段階**である



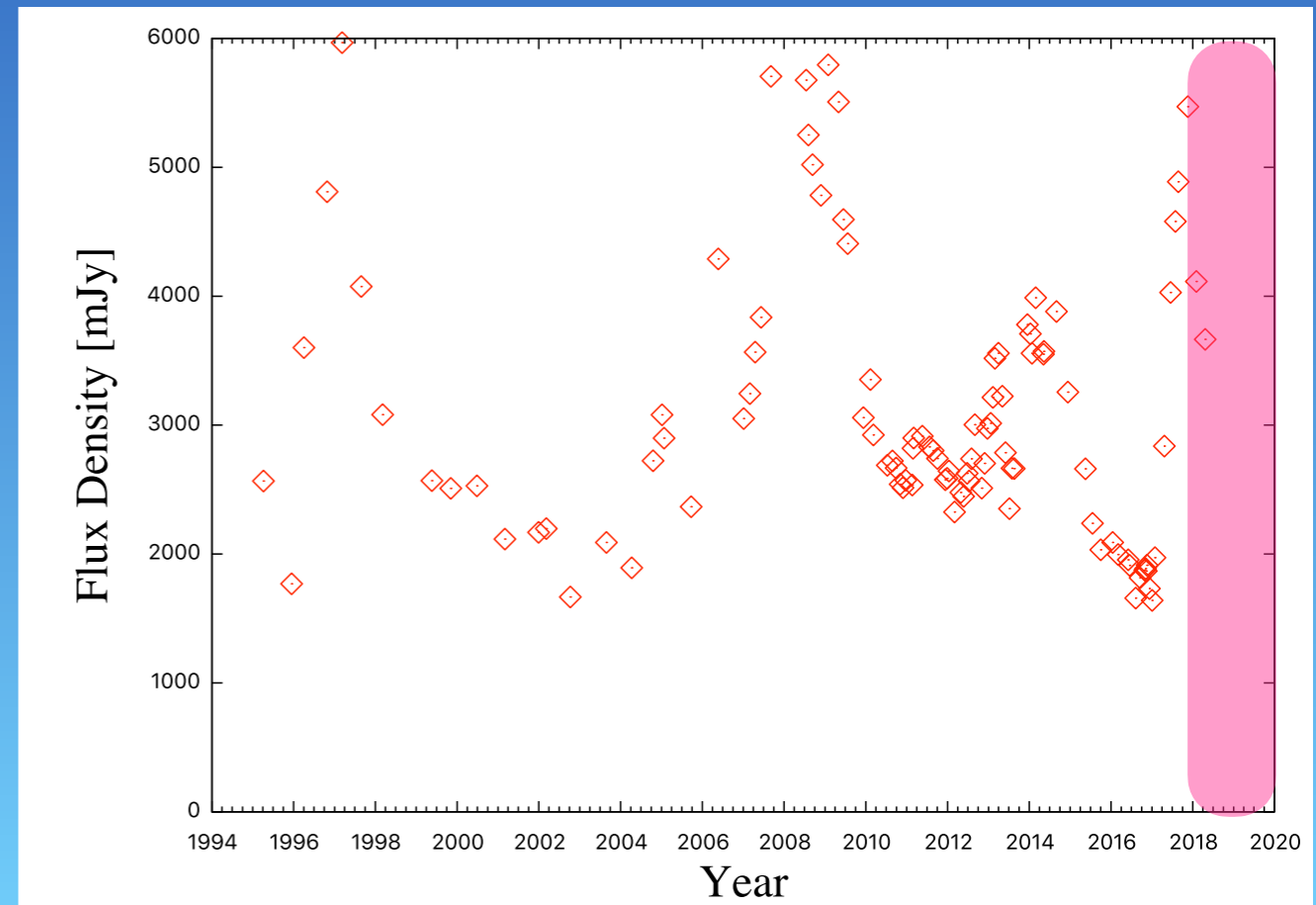
# Target source

- 電波銀河3C 111

- 比較的距離が近い ( $z = 0.049$ ,  $D_L = 196$  Mpc ; Grandi+12)
- FR II型電波銀河, viewing angle  $\theta = 18^\circ$ ; Jorstad+05
- ジェットが活動的でフレア段階



VLBA 15GHz Radio Image (MOJAVE project)



VLBA 15GHz 電波イメージピークの光度曲線

# Purpose

高周波でモニタリング観測を行い  
コアシフト現象を用いて磁場を推定し  
pcスケールの物理状態の変動を調べる

近い &  $\theta$  大きい  
& フレア中

高周波 &  
高イメージクオリティ

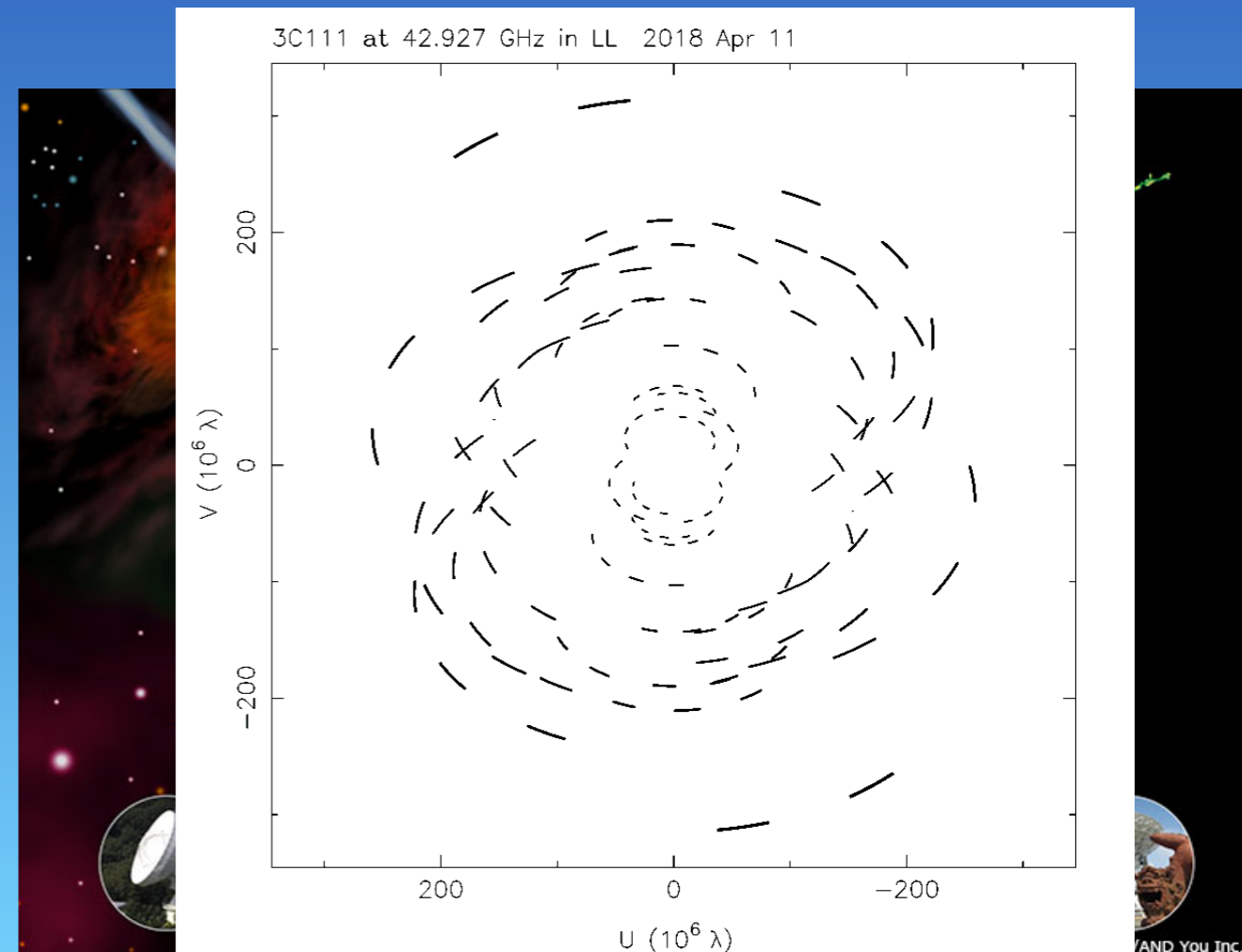
Target : 3C 111

Array : KaVA

# Observation

- Array : KaVA LHCP (code : k18ks01)
  - 観測時間 : 8時間/1 Epoch × 3 Epochs
  - 周波数 : 22 / 43 GHz
- & 1時間毎の周波数スイッチング観測

Epoch	Date	備考
1	2018/01/23	水沢,TAMNAなし
2	2018/04/11	—
3	2018/06/03	—
4	2018/10/21	偏波記録ミス
5	2018/12/04	観測前



# Results

- 22 GHz 電波イメージ

## Epoch1

Peak Flux = 2.06 [Jy/beam]  
 $I_{\text{rms}} = 8.4$  [mJy/beam]

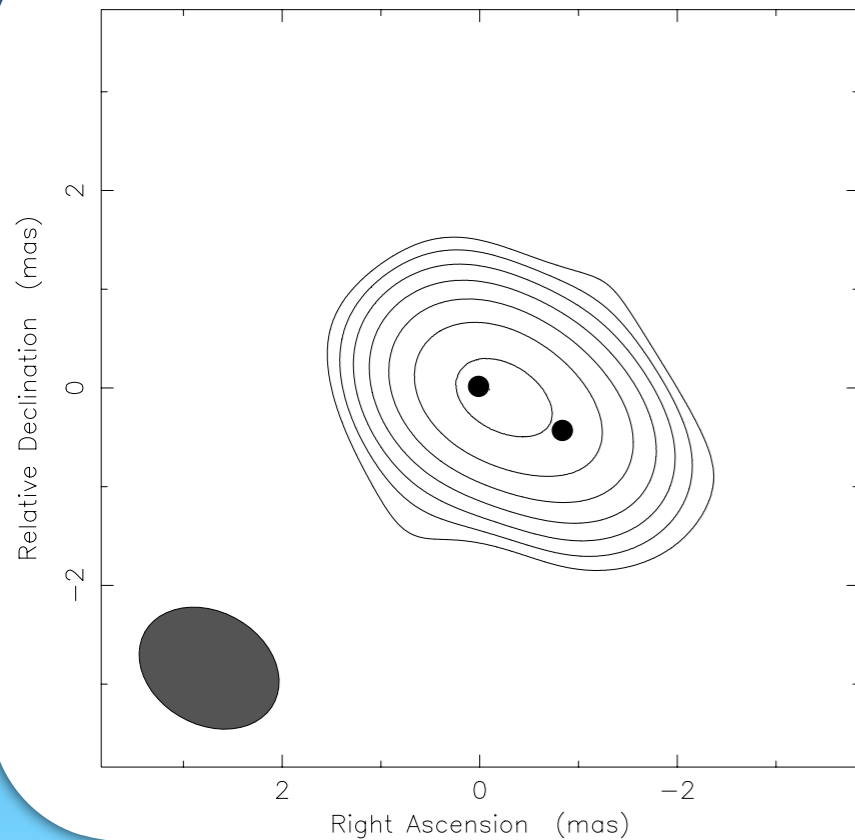
## Epoch2

Peak Flux = 1.30 [Jy/beam]  
 $I_{\text{rms}} = 6.5$  [mJy/beam]

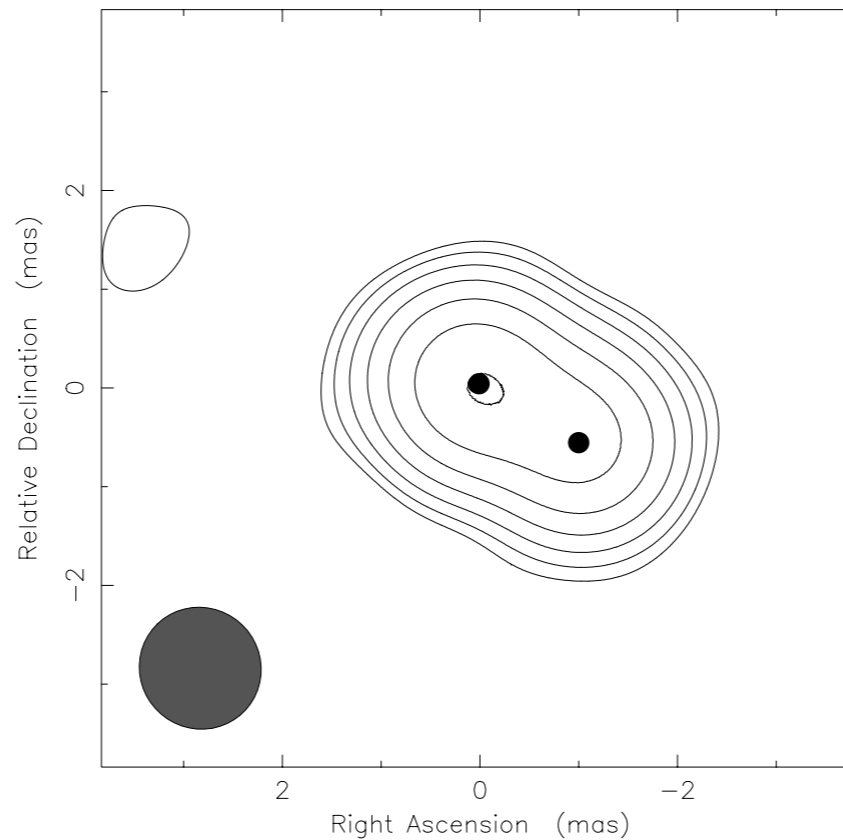
## Epoch3

Peak Flux = 1.07 [Jy/beam]  
 $I_{\text{rms}} = 7.4$  [mJy/beam]

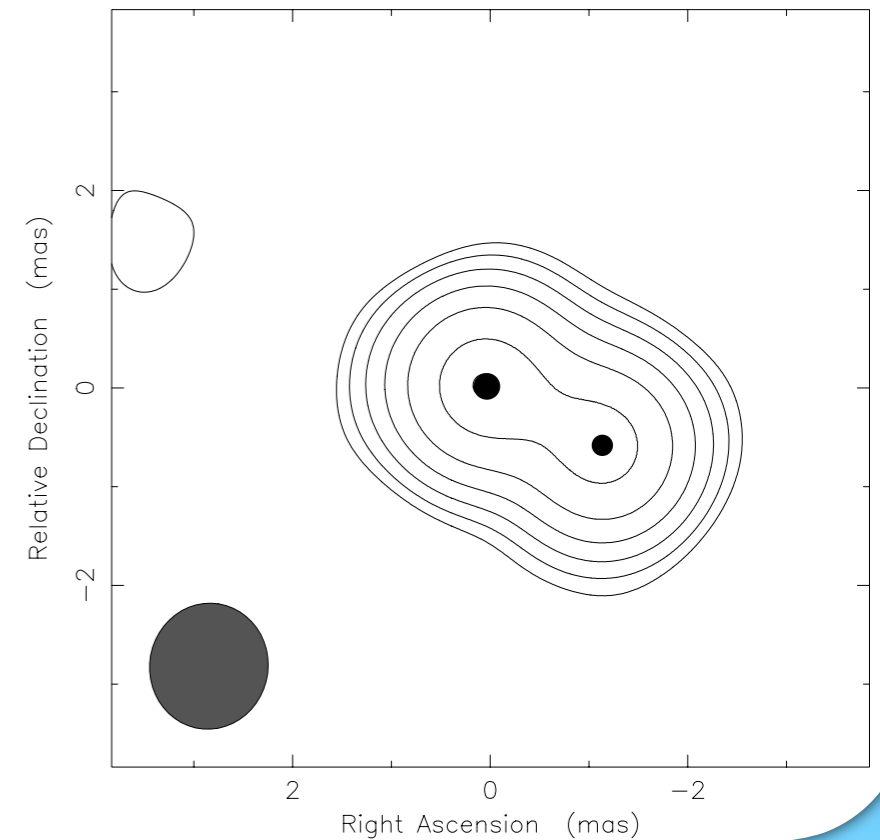
Clean LL map. Array: KVN  
3C111 at 22.227 GHz 2018 Jan 23



Clean LL map. Array: KVN  
3C111 at 22.227 GHz 2018 Apr 11



Clean LL map. Array: KVN  
3C111 at 22.227 GHz 2018 Jun 03



# Results

- 22 GHz 電波イメージ (red: core, blue: K1)

Epoch1

Peak Flux = 2.06 [Jy/beam]  
 $I_{\text{rms}} = 8.4$  [mJy/beam]

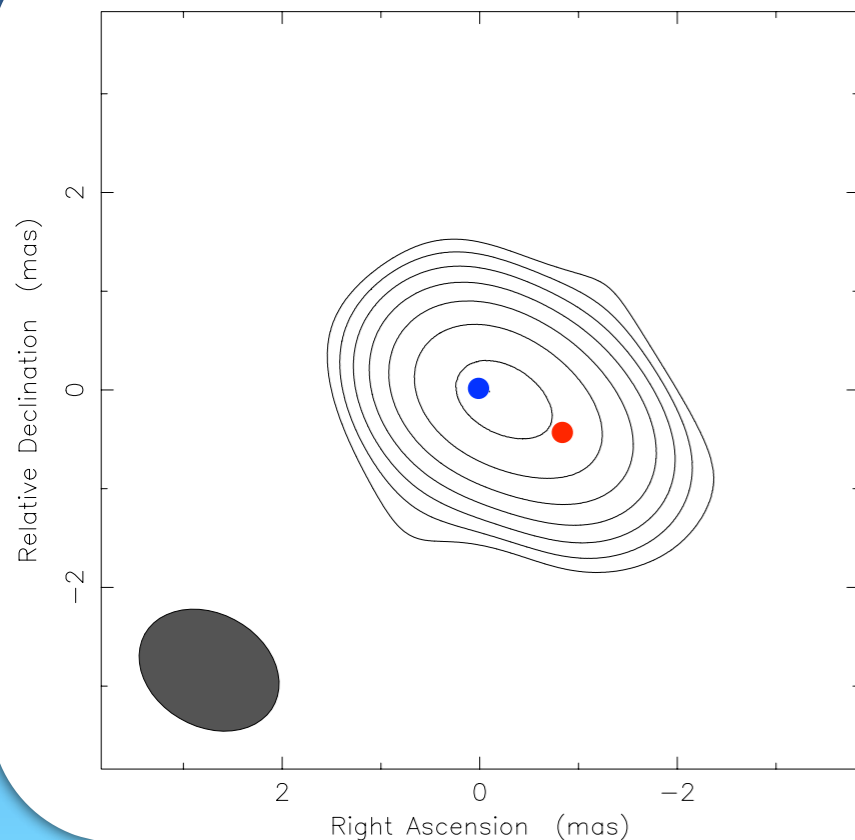
Epoch2

Peak Flux = 1.30 [Jy/beam]  
 $I_{\text{rms}} = 6.5$  [mJy/beam]

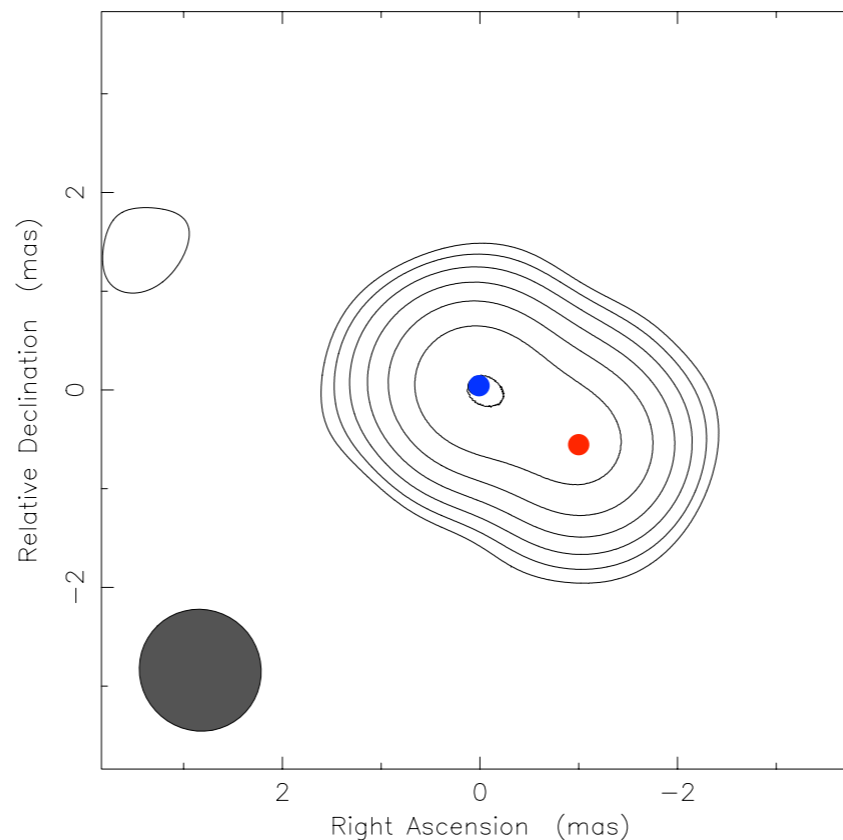
Epoch3

Peak Flux = 1.07 [Jy/beam]  
 $I_{\text{rms}} = 7.4$  [mJy/beam]

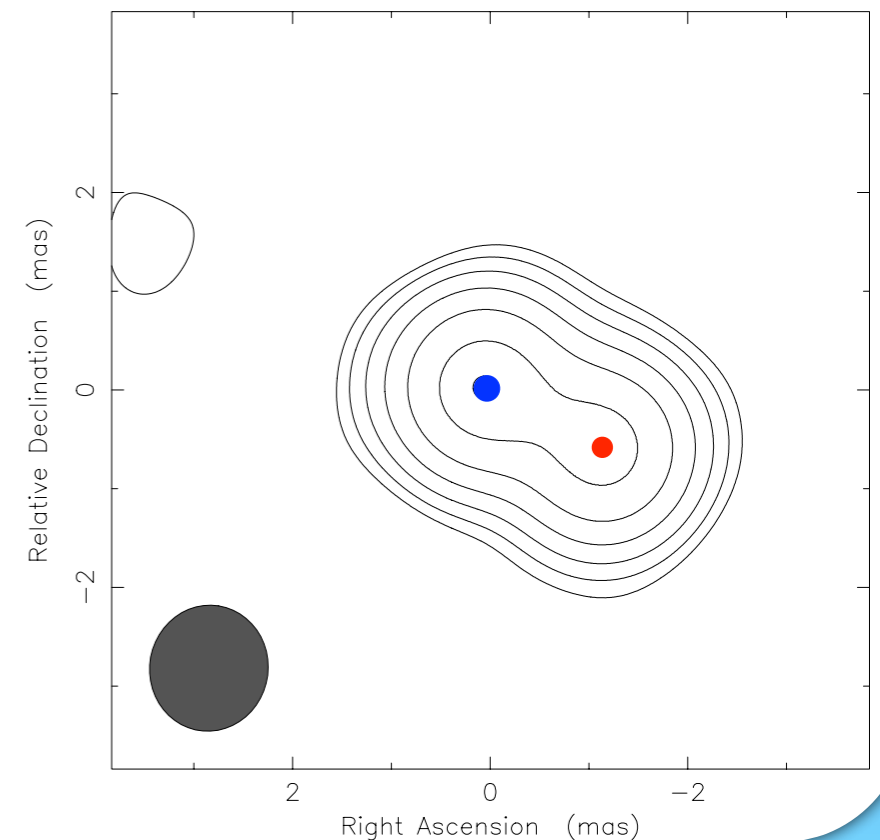
Clean LL map. Array: KVN  
3C111 at 22.227 GHz 2018 Jan 23



Clean LL map. Array: KVN  
3C111 at 22.227 GHz 2018 Apr 11



Clean LL map. Array: KVN  
3C111 at 22.227 GHz 2018 Jun 03



# Results

- 43 GHz 電波イメージ

## Epoch1

Peak Flux = 1.01 [Jy/beam]  
 $I_{\text{rms}} = 4.1$  [mJy/beam]

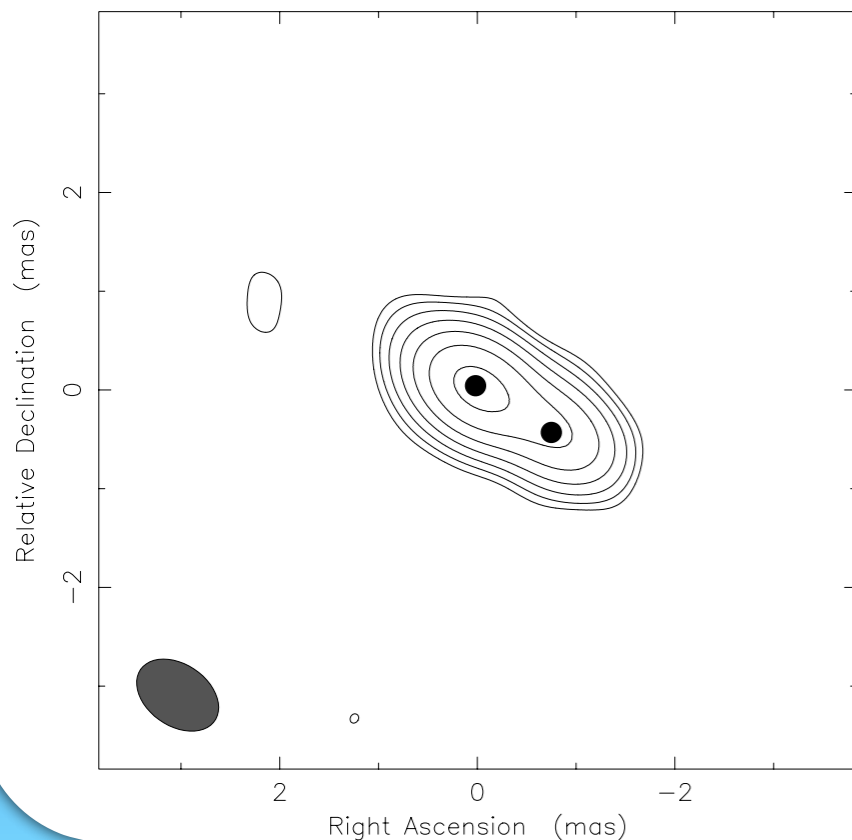
## Epoch2

Peak Flux = 0.61 [Jy/beam]  
 $I_{\text{rms}} = 4.9$  [mJy/beam]

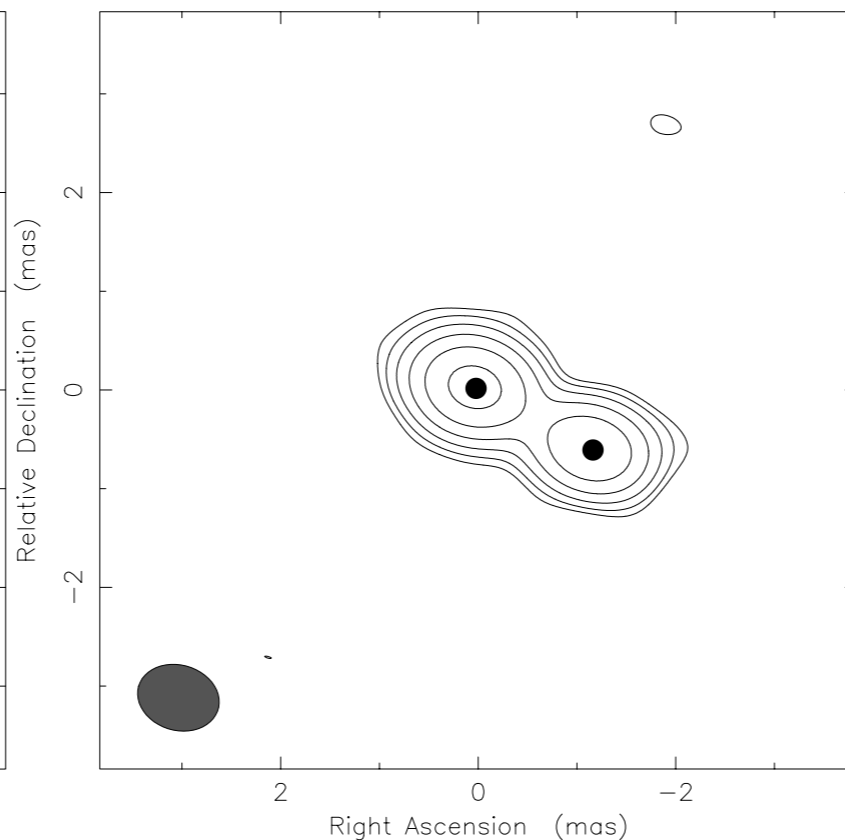
## Epoch3

Peak Flux = 0.58 [Jy/beam]  
 $I_{\text{rms}} = 6.1$  [mJy/beam]

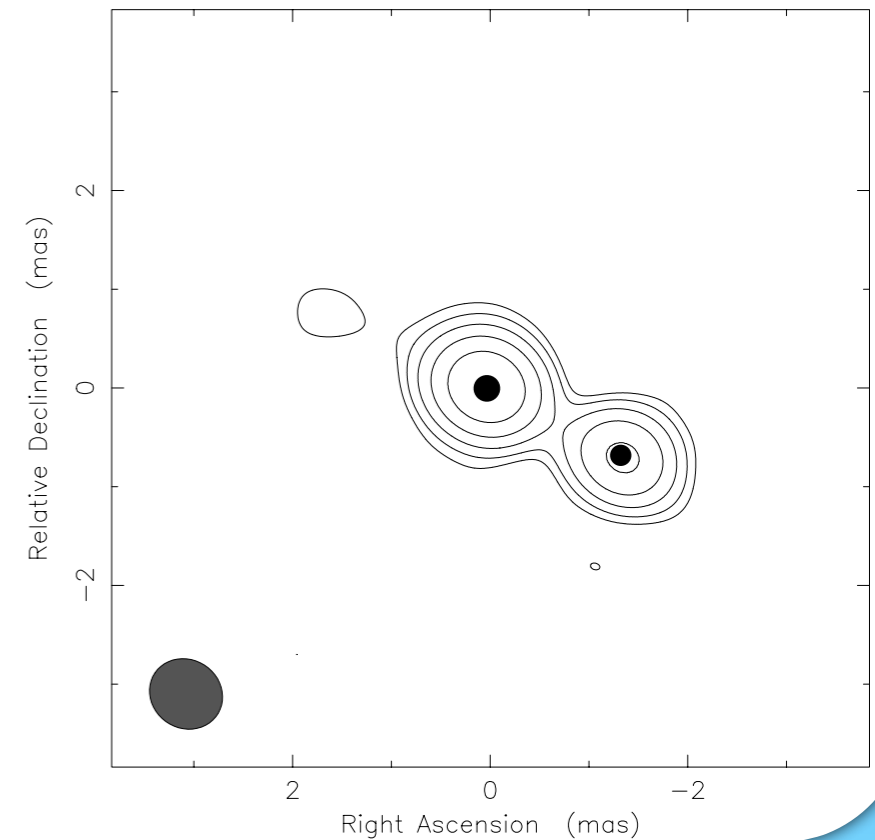
Clean LL map. Array: KVN  
3C111 at 42.927 GHz 2018 Jan 23



Clean LL map. Array: KVN  
3C111 at 42.927 GHz 2018 Apr 11



Clean LL map. Array: KVN  
3C111 at 42.927 GHz 2018 Jun 04



# Results

- 43 GHz 電波イメージ (red: core, blue: K1)

Epoch1

Peak Flux = 1.01 [Jy/beam]  
 $I_{\text{rms}} = 4.1$  [mJy/beam]

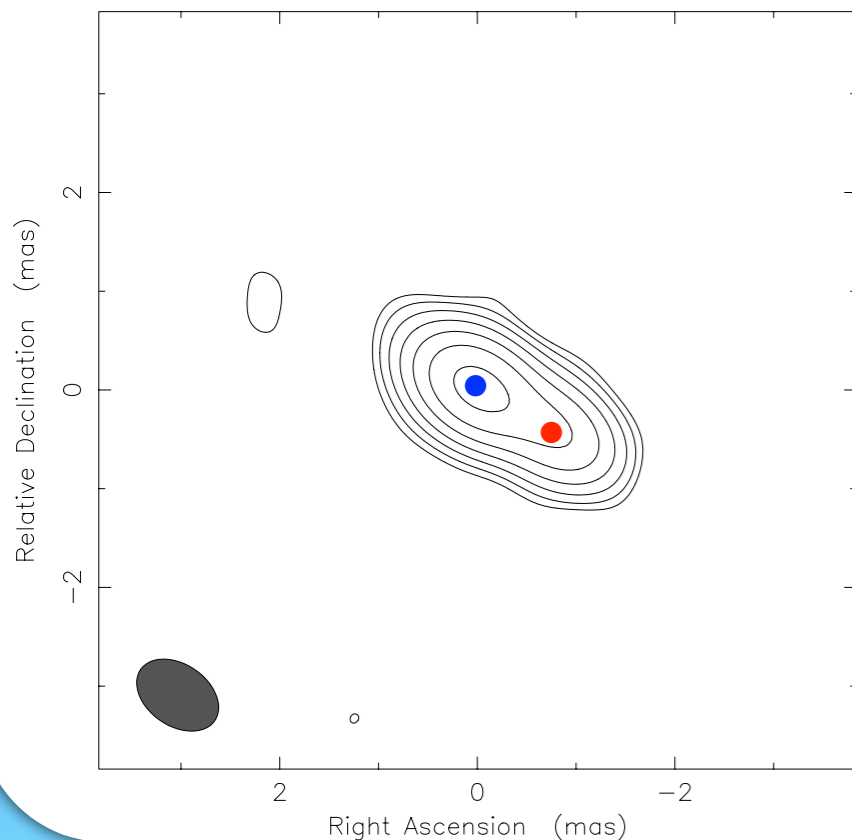
Epoch2

Peak Flux = 0.61 [Jy/beam]  
 $I_{\text{rms}} = 4.9$  [mJy/beam]

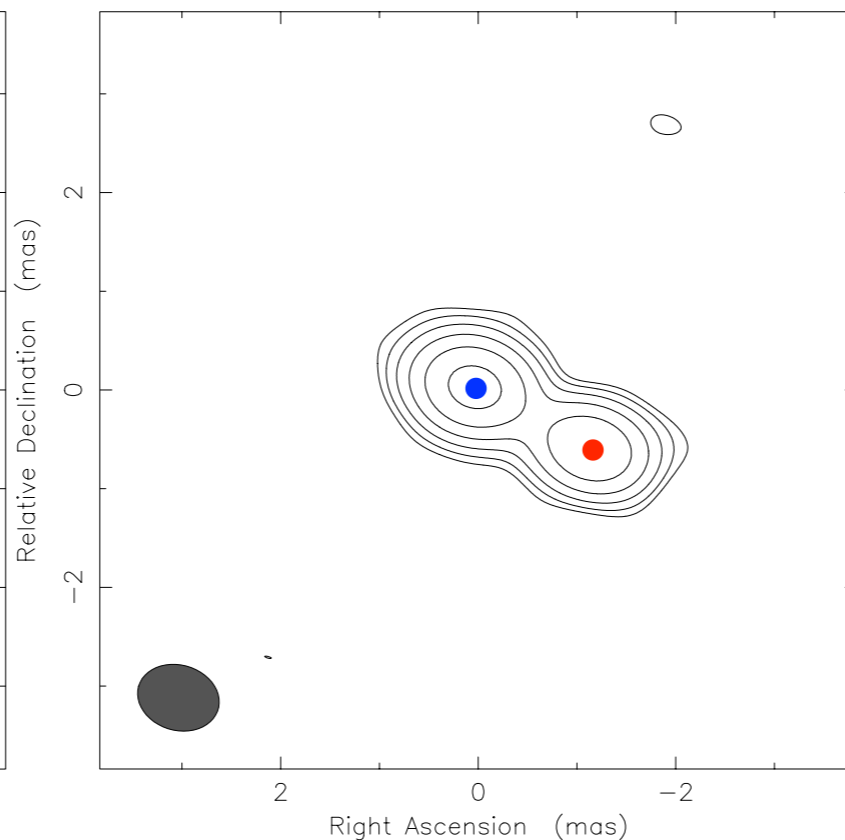
Epoch3

Peak Flux = 0.58 [Jy/beam]  
 $I_{\text{rms}} = 6.1$  [mJy/beam]

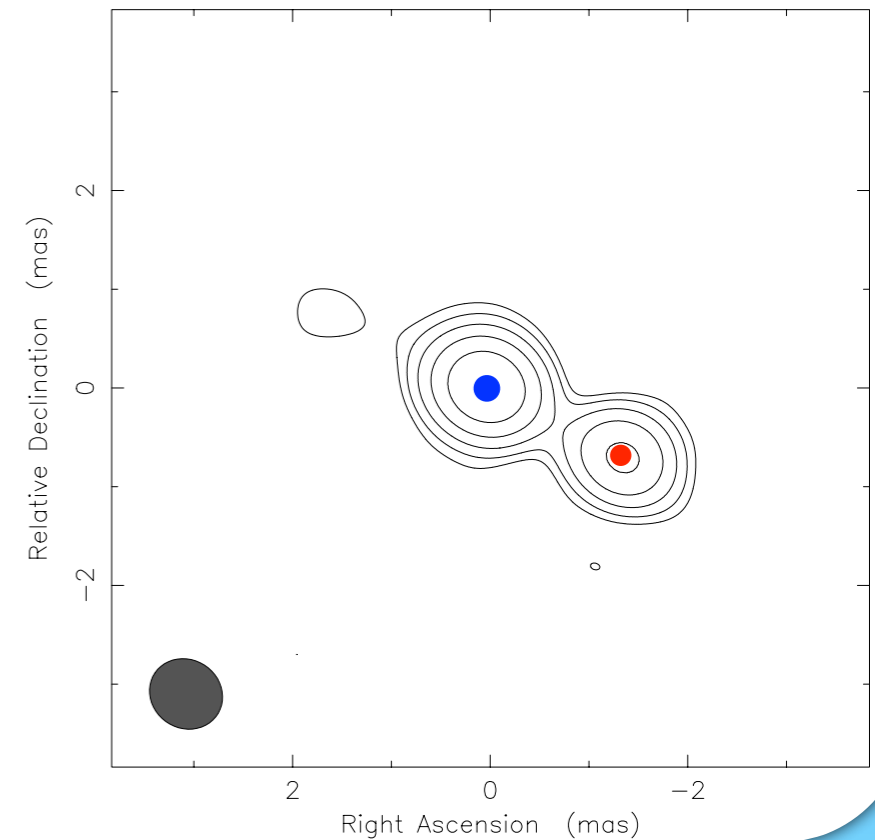
Clean LL map. Array: KVN  
3C111 at 42.927 GHz 2018 Jan 23



Clean LL map. Array: KVN  
3C111 at 42.927 GHz 2018 Apr 11

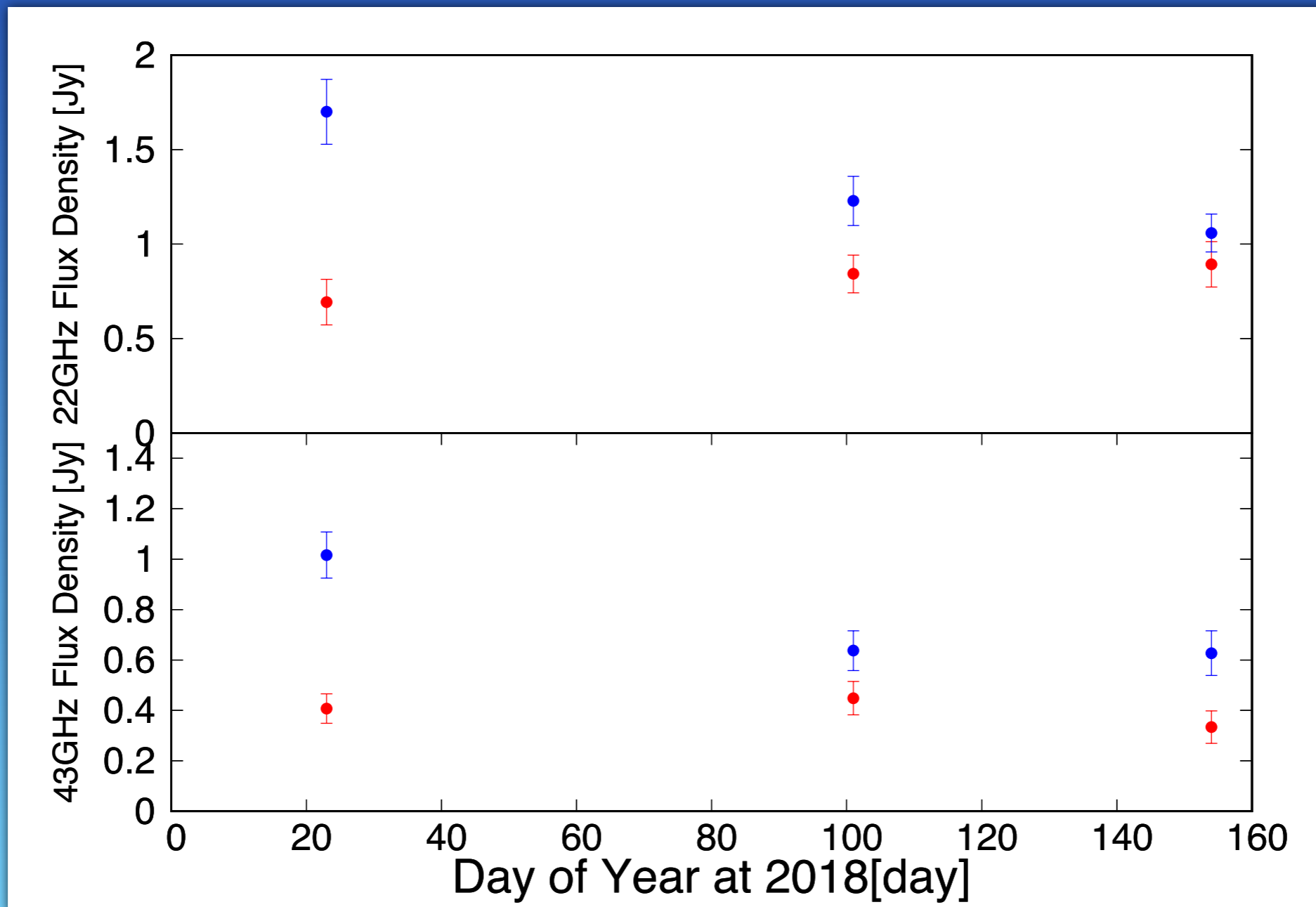


Clean LL map. Array: KVN  
3C111 at 42.927 GHz 2018 Jun 04



# Results

- 光度曲線 (red: core, blue: K1)





# Core offset measurement

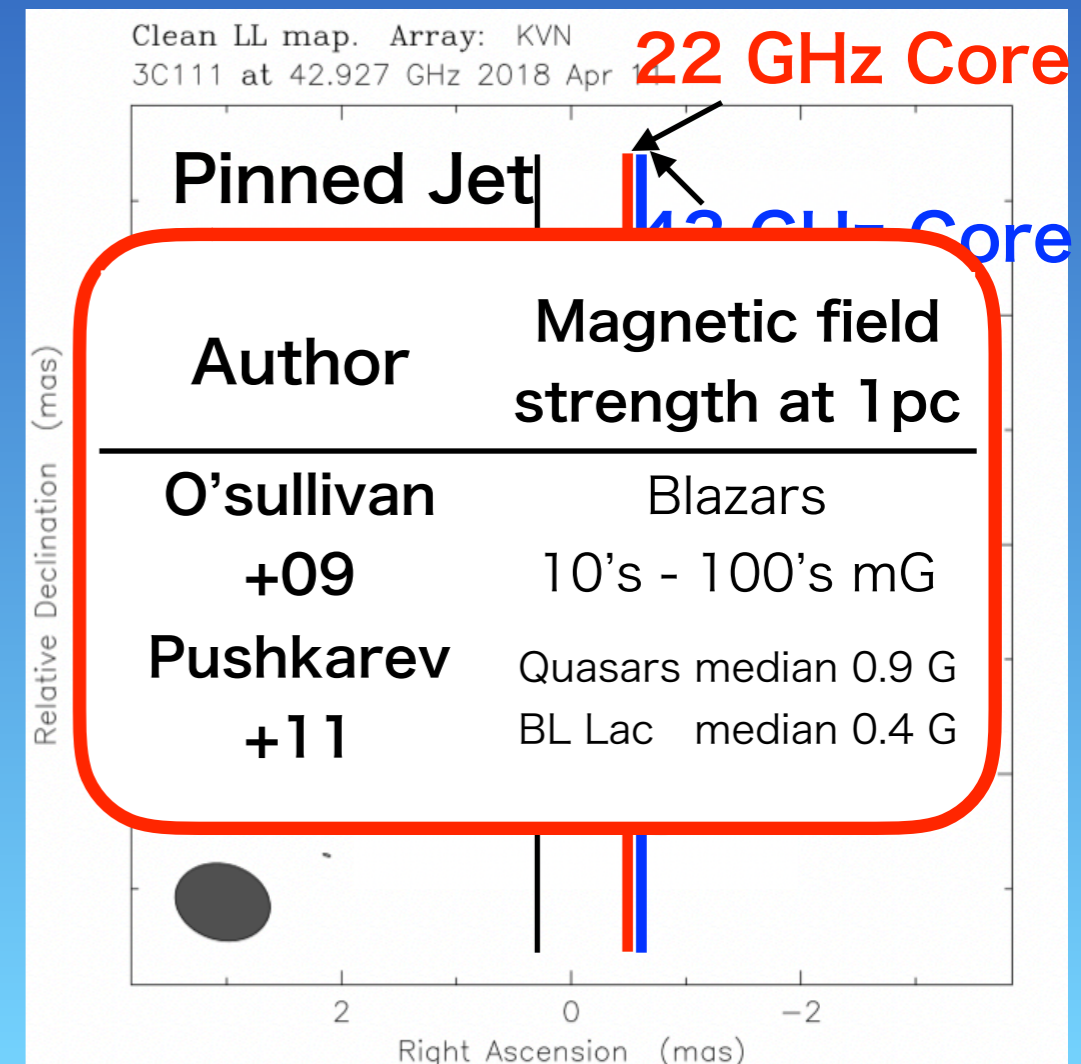
- $\Delta r_{\text{core}}$  をそれぞれのジェット成分からの距離の差で測定

$$B_{1\text{pc}} = 1.45 \times 10^{-8} \left( \frac{\Delta r_{\text{core}} D_L \nu_1 \nu_2}{\nu_2 - \nu_1} \right)^{\frac{3}{4}} \left( \frac{1}{(1+z)^4 \delta^2 \phi \sin^2 \theta} \right)$$

本解析で得られた物理パラメータ

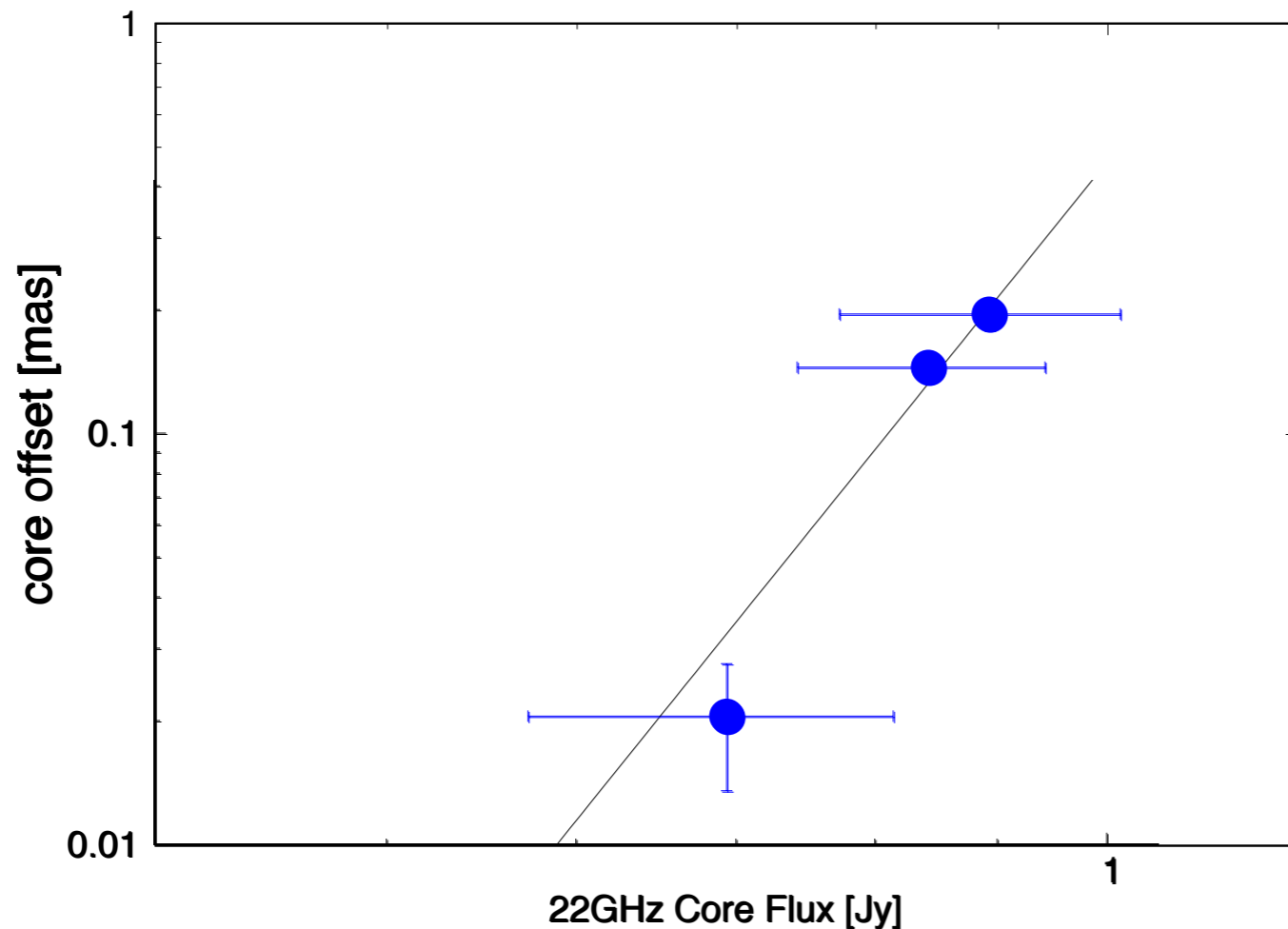
DOY	22GHz core flux [Jy]	43GHz core flux [Jy]	$\Delta r_{\text{core}}$ [mas]	$B_{1\text{pc}}$ [G]
23	0.69±0.12	0.41±0.06	0.02±0.01	0.10±0.05
101	0.84±0.10	0.45±0.07	0.15±0.01	0.45±0.06
154	0.89±0.12	0.33±0.06	0.20±0.02	0.57±0.09

$$\delta = 4.4 \quad \phi = 11.06^\circ \quad \theta = 13.5^\circ$$



# B variation $\propto$ only core flux variation?

- 推定したBの変動はコアのフラックスの変動だけに依るのか？
- Bと1対1の関係である  $\Delta r_{\text{core}}$  とフラックスの関係を調査



理論的予想は

$$\Delta r_{\text{core}} \propto S_{\text{core}}^{2/3}$$

(Lobanov+98)

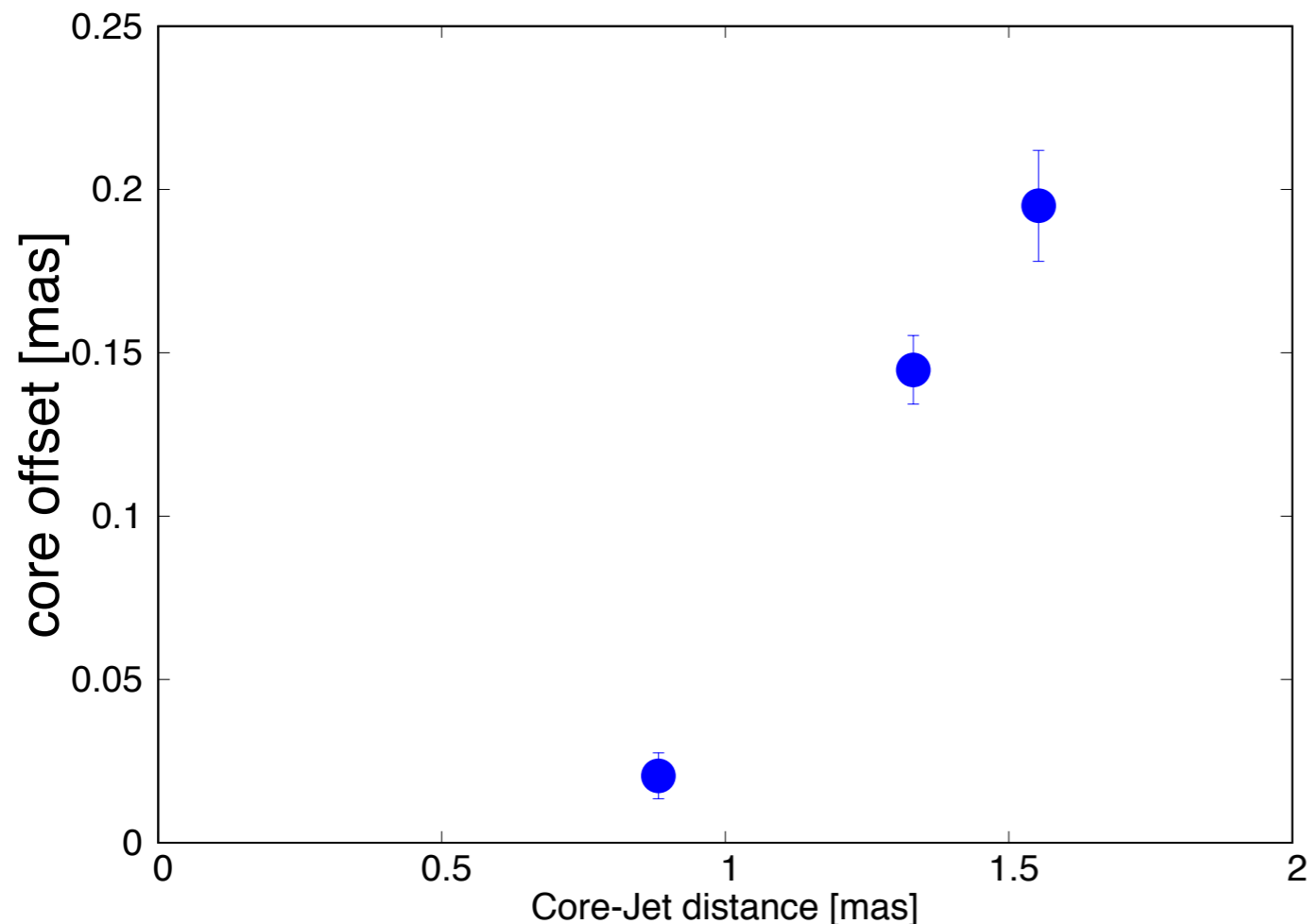
本解析で得られた結果は

$$\Delta r_{\text{core}} \propto S_{\text{core}}^{7.22}$$

**何か違う物理が  
働いている可能性**

# B variation $\propto$ only core flux variation?

- 推定したBの変動はコアのフラックスの変動だけに依るのか？
- ピン留めしたジェットとの距離とコアオフセットを検証



距離が離れるにつれて

or

時間経過につれて

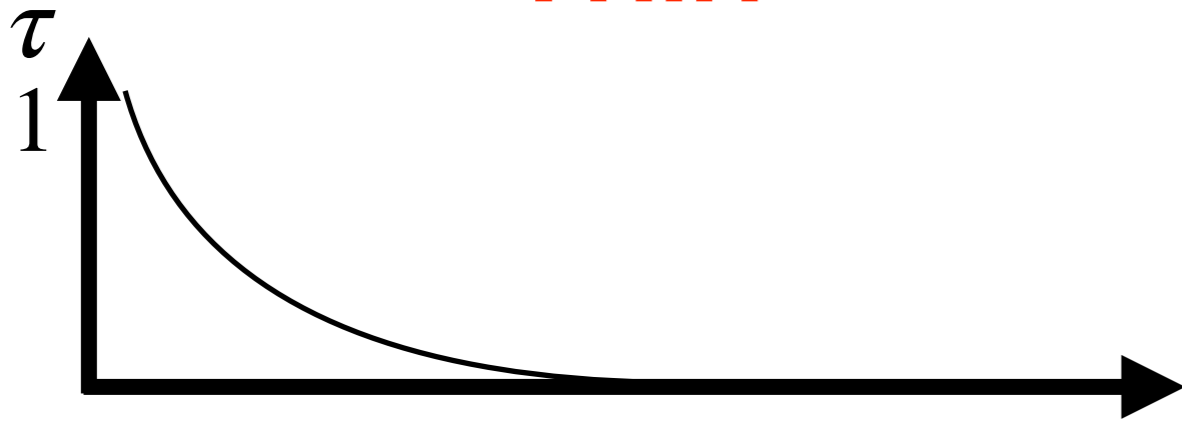
コアオフセットが増加？

**ジェット成分が光学的に  
厚い可能性を示唆**

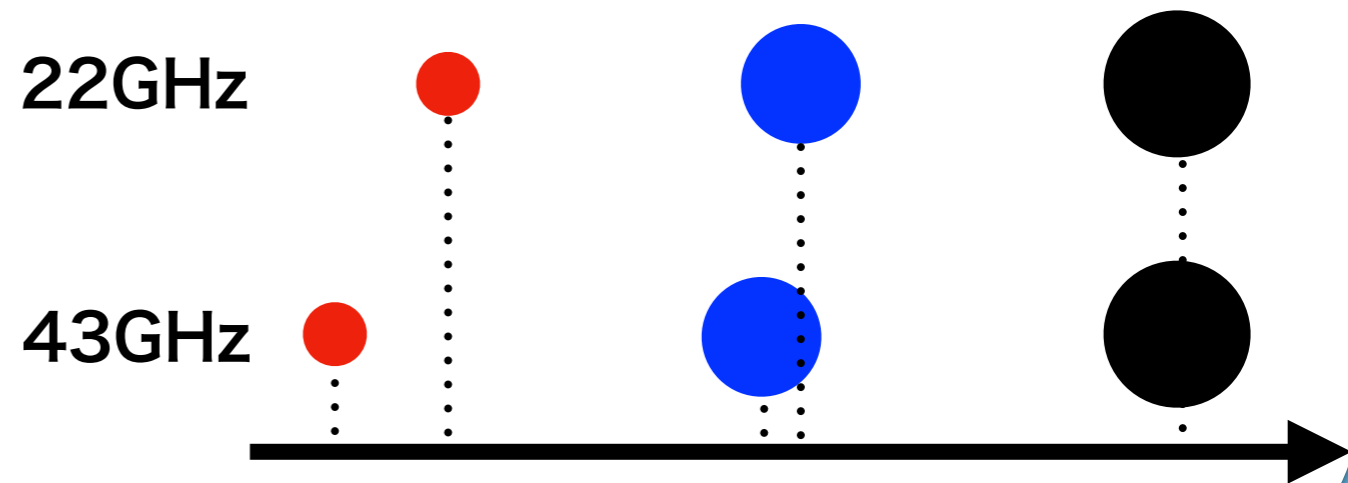
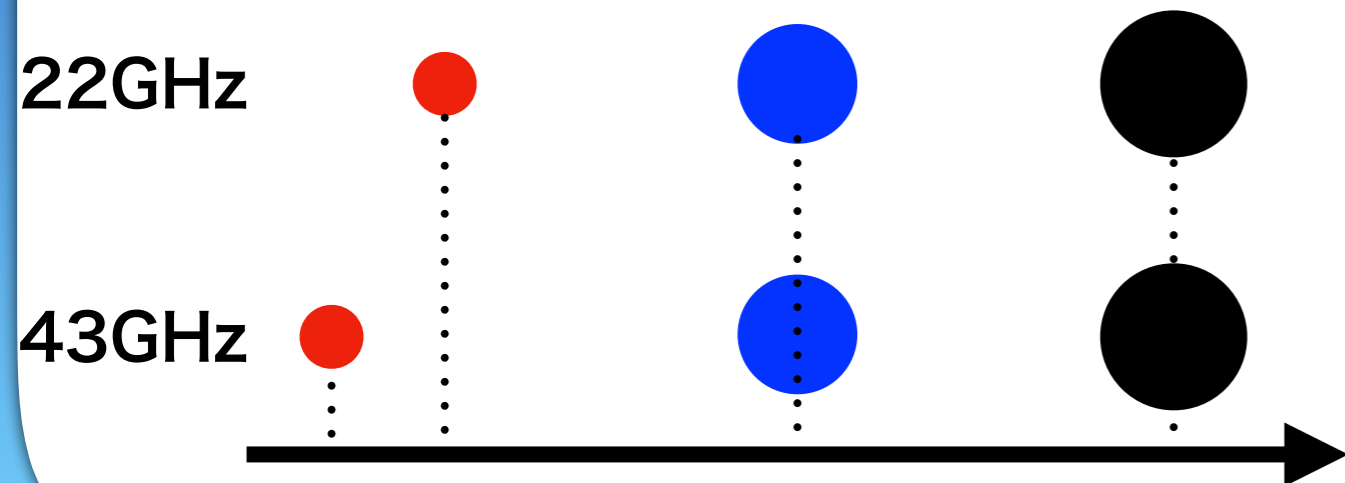
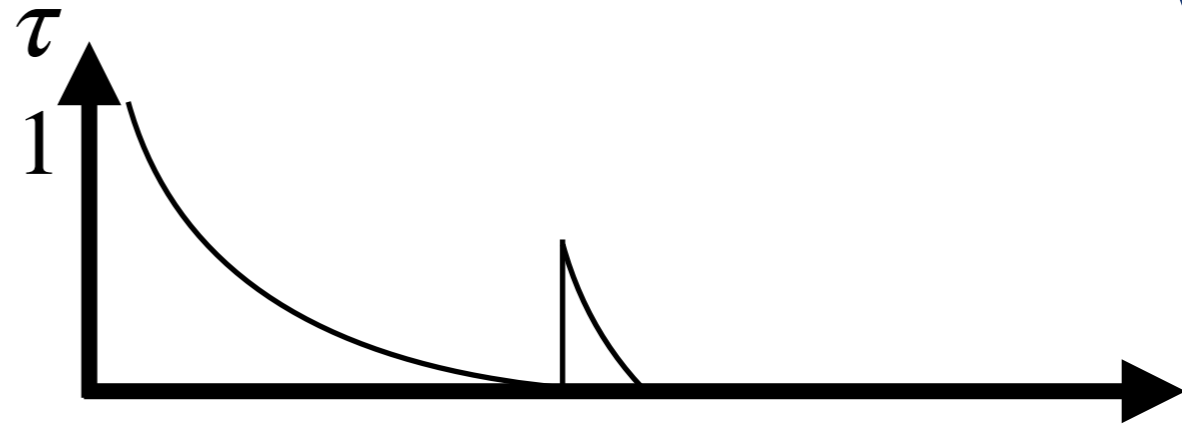
# B variation $\propto$ only core flux variation?

- ジェット成分は光学的に厚い？薄い？

**Thin**



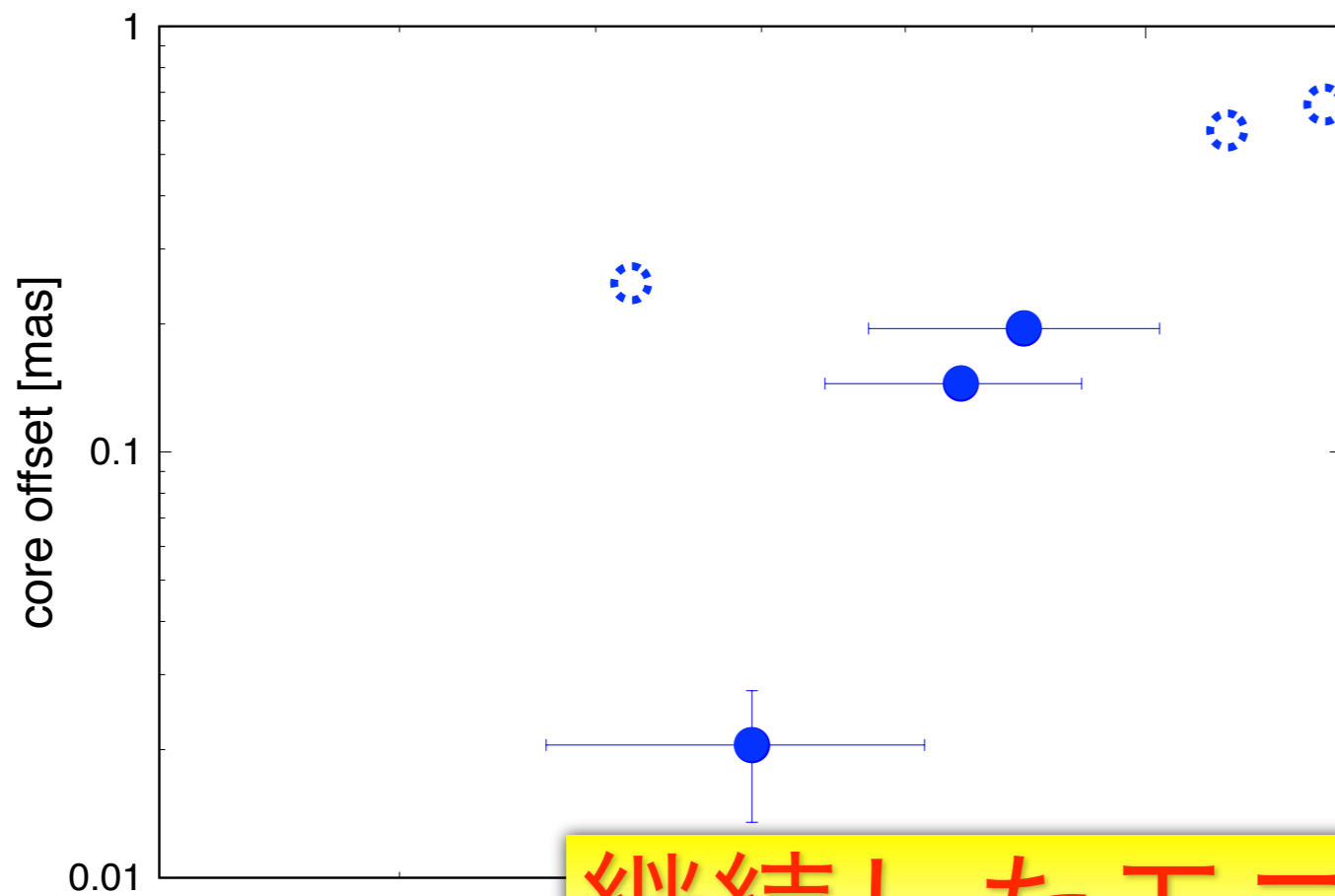
**Thick**



ジェットが光学的に厚いと本来よりも  $\Delta r_{\text{core}}$  が小さく見える

# B variation $\propto$ only core flux variation?

- ジェット成分の位置は中心エンジンから $\sim 10^5 r_g$
- re-collimationが起き、そのshockで光学的に厚い可能性  
それらを考慮すると $\dots \Delta r_{\text{core}} \propto S_{\text{core}}^{2/3}$ に近づく可能性



現在、ジェット成分が少しずつ  
光学的に薄くなっていると見られる

コアオフセットの変動が  
フラックスの変動を直に  
反映するようになる！

継続したモニターが必要！！

# Summary

- 磁気駆動モデルに制限をつけるために、コアシフトを用いて物理状態、特に磁場の変動を推定した
- 3C 111に対してKaVA 22/43 GHzでモニタリング観測を行い、コアシフト現象を確認し、磁場を推定した
- 中心エンジンから1pcの位置での磁場は $B_{1\text{pc}} = 0.1 - 0.57$  [G]と推定された
- この磁場の変動はコアのフラックスの変動のみの影響ではなく、ピン留めしたジェットが光学的に厚いための影響がある可能性を示唆した
- ジェットの光学的厚みは減少傾向にあると見られ、コアのフラックスに対する磁場の正確な変動を確認するため継続してKaVAを用いた観測を行う

