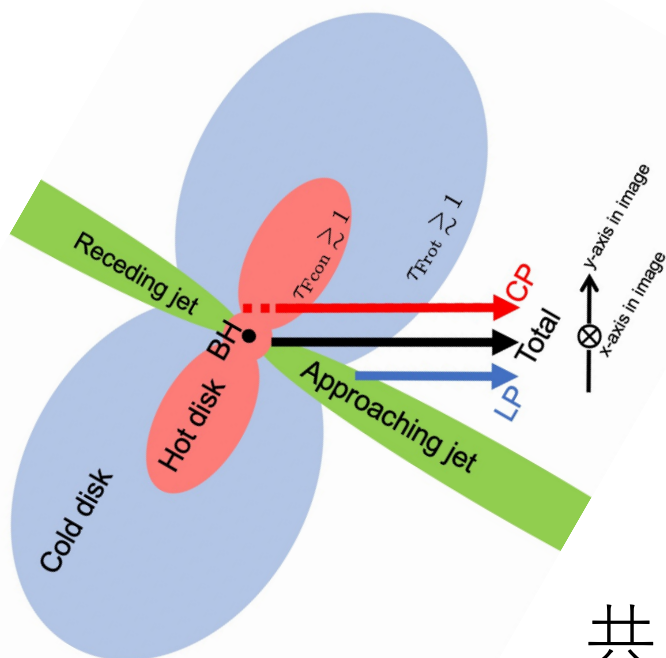


偏光画像の理論予測で探る、ブラックホール直近領域の ジェット駆動磁場ープラズマ構造

(Tsunetoe et al. 2021b in prep.)

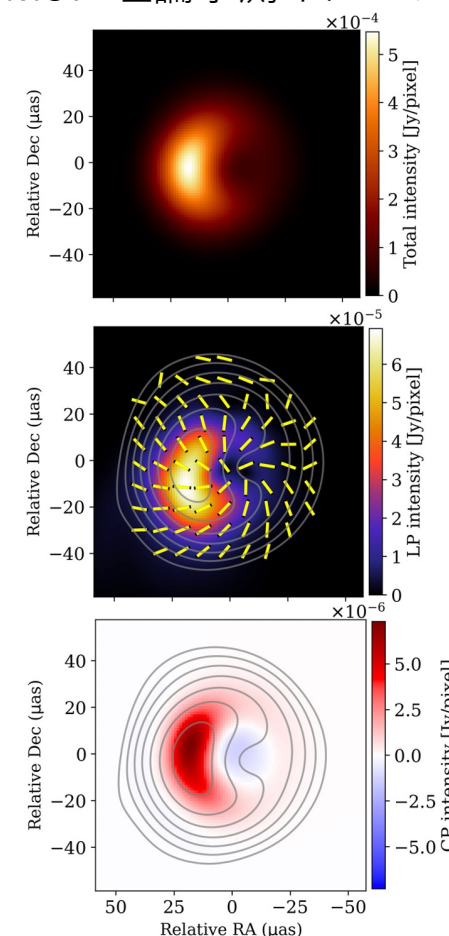


恒任 優 (京都大学)
Yuh Tsunetoe

共同研究者：嶺重 慎 (京都大)
川島 朋尚 (東京大)
大須賀 健 (筑波大)
秋山 和徳 (MIT Haystack)
高橋 博之 (駒澤大)

2021/10/19 東大宇宙線研 研究会
“高エネルギー現象で探る宇宙の多様性 I”

M87*理論予測イメージ



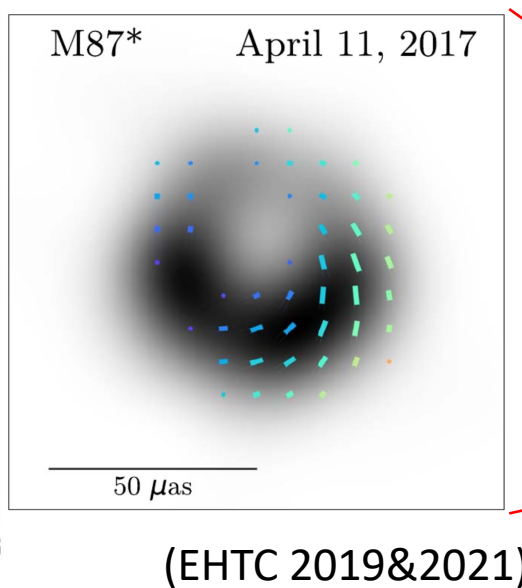
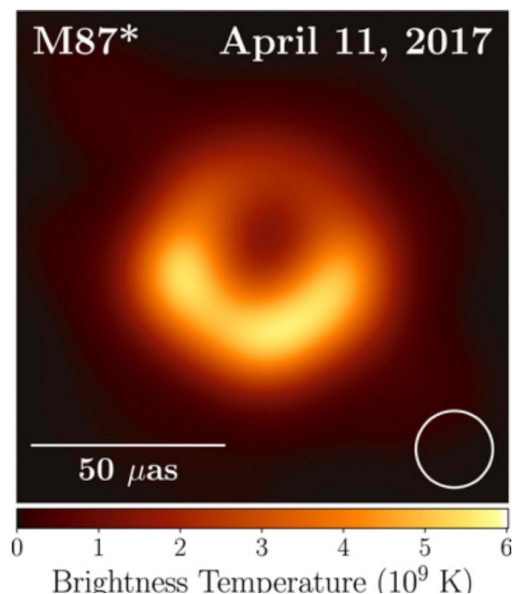
ブラックホール直近領域の観測実現

- Event Horizon Telescope (EHT): 超大質量ブラックホールM87*を初観測 (2019)
- 引き続いて、直線偏光マップを発表 (2021)
→揃ったベクトル構造：**磁場構造**を反映

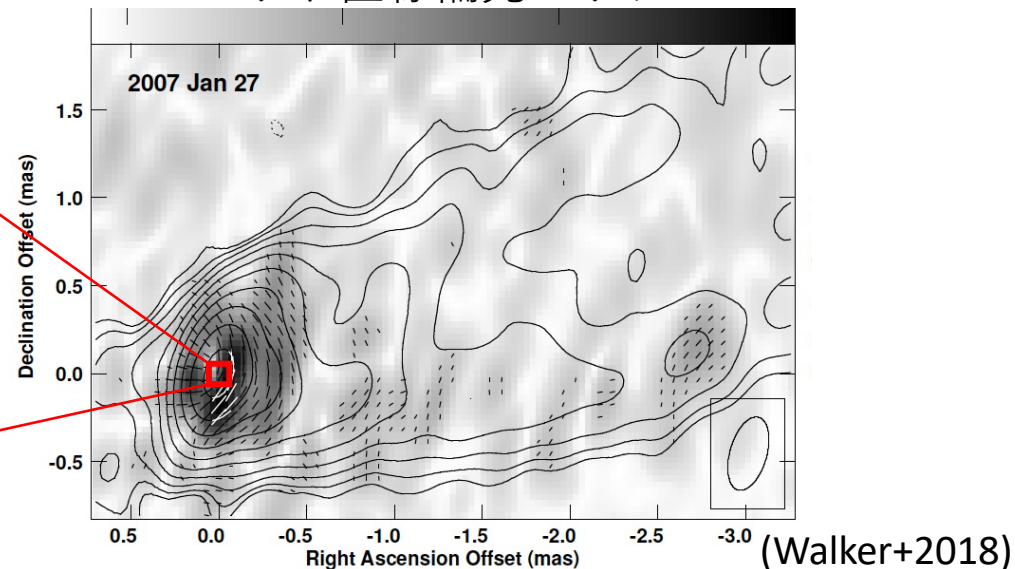
➤M87*：ブラックホール直近領域～M87ジェットの本元部分

この領域の磁場構造を詳しく調べれば、

活動銀河核ジェットの生成・駆動機構がわかる！！

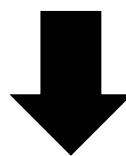


M87ジェット直線偏光マップ@43GHz



理論モデルに基づいた偏光画像予測

- 活動銀河核ジェットの詳細理論モデル：解析解／流体計算
近年では、大規模計算による一般相対論的磁気流体力学(GRMHD)モデル



ポストプロセスで…

Our work

- 偏光の一般相対論的輻射輸送計算コードを開発し、モデルを実装
- 様々なモデルパラメータに基づいた偏光イメージを予測
→実観測との比較から妥当なモデルを検証し、
ジェットを駆動する磁場構造を解明！

輻射輸送方程式：

$$\frac{d}{d\lambda} I = j - KI$$

- ストークスパラメータ I

$$I = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}$$

I ——— 輻射(全)強度
 Q ——— 直線偏光成分(LP)
 U ——— 円偏光成分 (CP)
 V ——— 円偏光成分 (CP)

- シンクロトロン放射率 j

$$j = \begin{bmatrix} j_I \\ j_Q \\ j_U \\ j_V \end{bmatrix}$$

j_Q ——— 直線偏光が支配的 (~70%)
 j_V ——— 円偏光は微弱(<1%)

- 輻射輸送行列 K

直線偏光ベクトルのFaraday回転

$$K = \begin{pmatrix} \alpha_I & \alpha_Q & \alpha_U & \alpha_V \\ \alpha_Q & \alpha_I & \rho_V & \rho_U \\ \alpha_U & -\rho_V & \alpha_I & \rho_Q \\ \alpha_V & -\rho_U & -\rho_Q & \alpha_I \end{pmatrix}$$

シンクロトロン
自己吸収

直線偏光 ↔ 円偏光の
Faraday“変換”

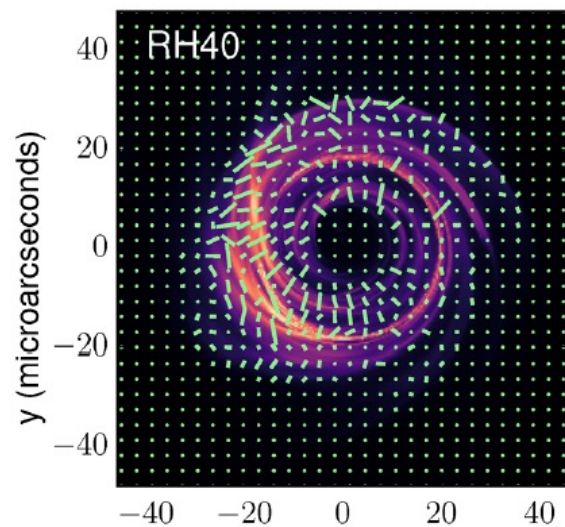
本研究の着眼点

- これまで活動銀河核ジェットについては
直線偏光だけが注目されてきたが…
- ブラックホール付近では
Faraday変換で円偏光も増幅する可能性
- これら2種類の偏光を統一的に捉え、関係を探る！

これまでの知見：Faraday回転・変換の効果

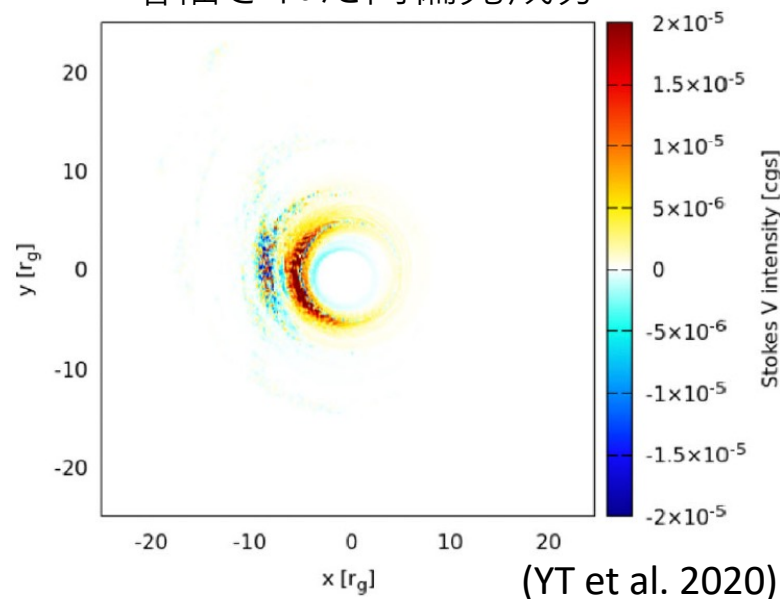
- ブラックホール付近からの偏光成分は複雑な輸送プロセスを辿る
 - 直線偏光ベクトル：降着流でFaraday回転を受け、かき乱される (e.g., Moscibrodzka+2017; YT+2020)
 - 円偏光：高温領域で直線偏光からのFaraday変換が起こり、増幅する (e.g., YT+2020,2021a; Ricarte+2021)
- 直線偏光・円偏光成分の関係から、基にある磁場ープラズマ構造を調べる

部分的に乱れた直線偏光ベクトル



(Moscibrodzka et al. 2017)

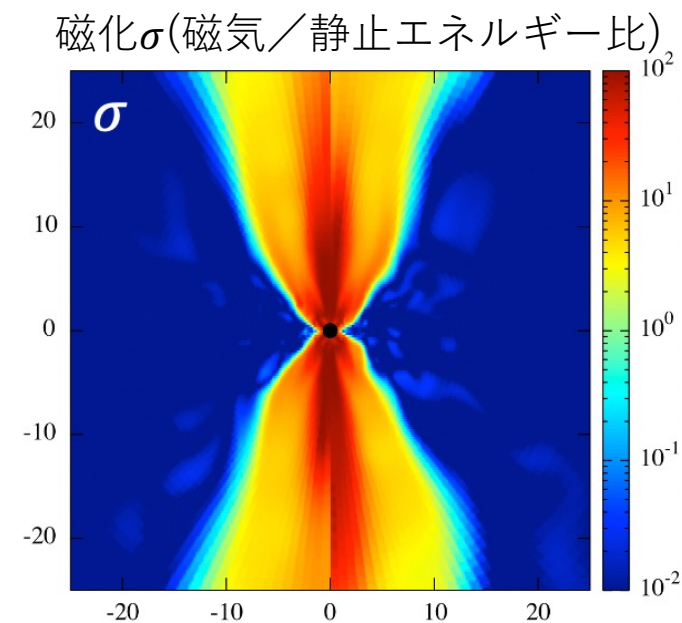
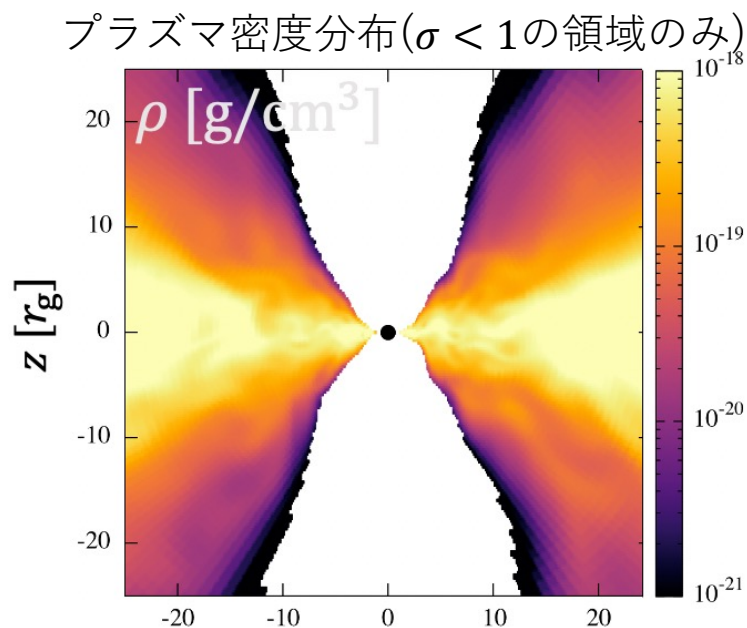
増幅された円偏光成分



(YT et al. 2020)

M87ジェットの理論モデル

- 川島朋尚氏(宇宙線研)による3D-GRMHD計算：中庸的な磁場強度とジェット
MAD(Magnetically Arrested Disk)とSANE(Standard And Normal Evolution)の中間
→ “**semi-MAD**”：EHTC2021では考えていなかった範囲のモデル

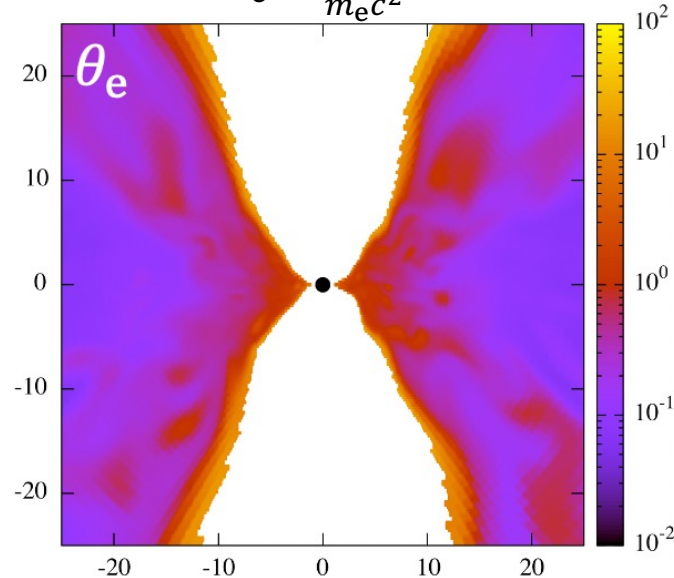


電子温度の決定式

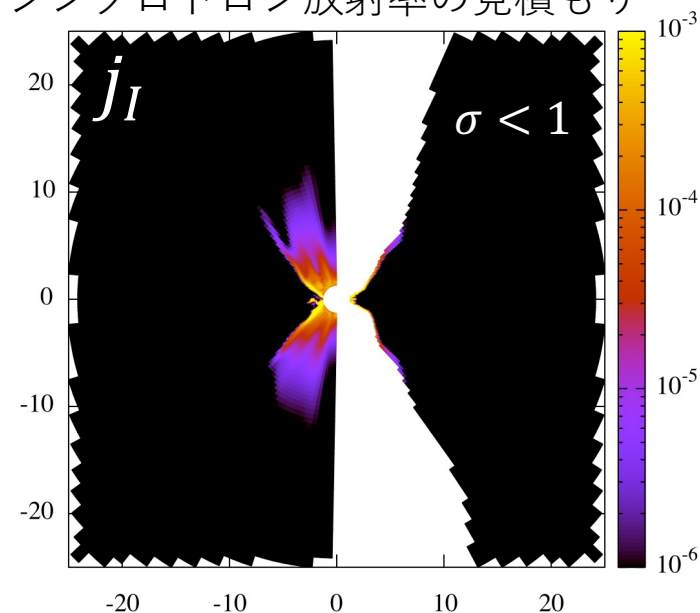
- 電子温度：陽子温度に基づいて次の式から決定：

$$\frac{T_p}{T_e} = R_{\text{high}} \frac{\beta^2}{(1 + \beta^2)} + R_{\text{low}} \frac{1}{(1 + \beta^2)}$$
 プラズマ β = ガス圧 / 磁気圧比：円盤で大 $\leftrightarrow$ ジェットで小 (Moscibrodzka et al. 2016)
- $R_{\text{high}} = 25, R_{\text{low}} = 1$ ：低温円盤と高温ジェット
 $\rightarrow$ ジェットからの放射が支配的

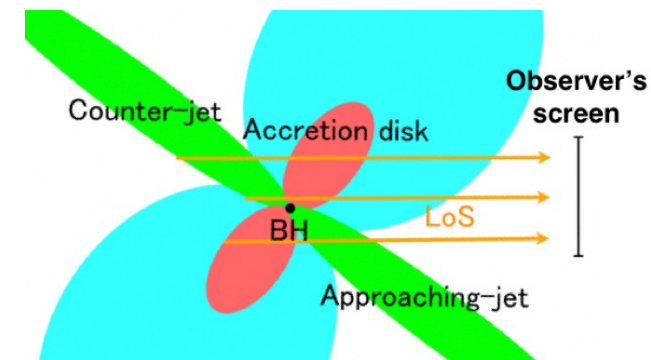
無次元電子温度 $\theta_e \equiv \frac{k_B T_e}{m_e c^2}$ ($\sigma < 1$ の領域のみ)



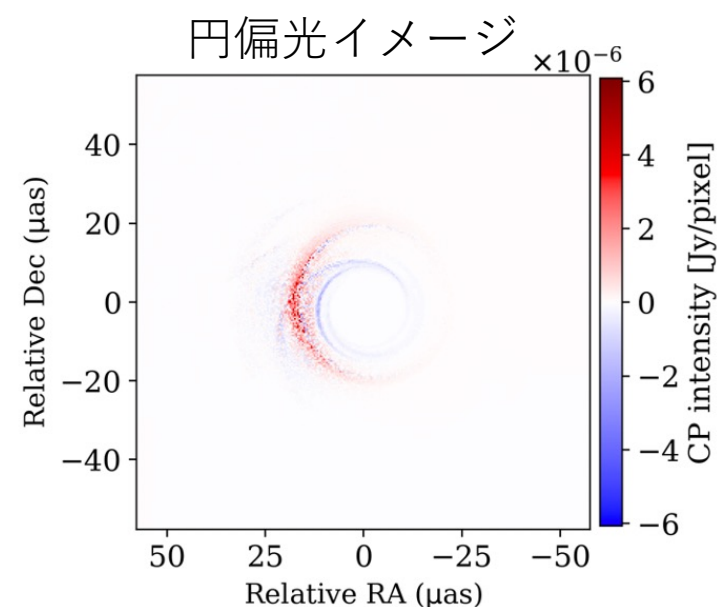
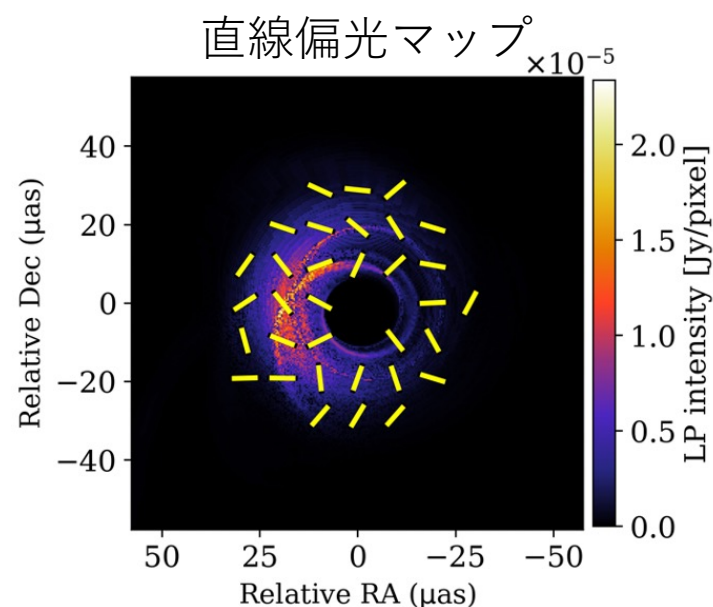
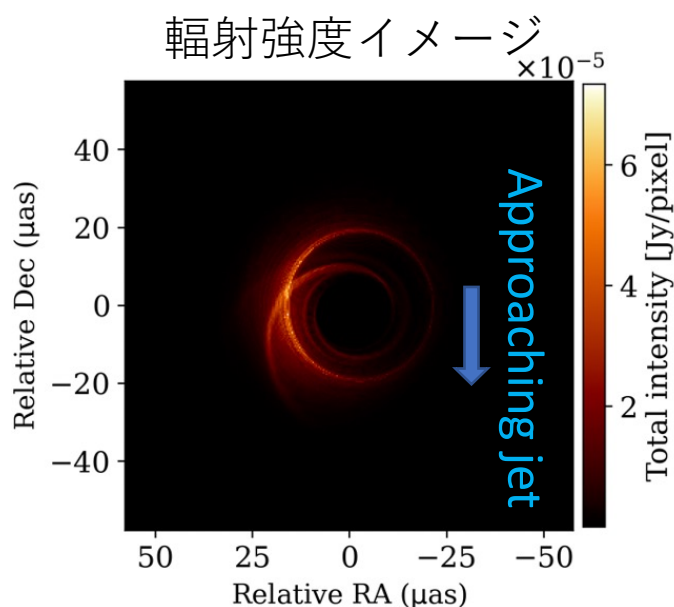
シンクロトロン放射率の見積もり



230GHz偏光イメージ

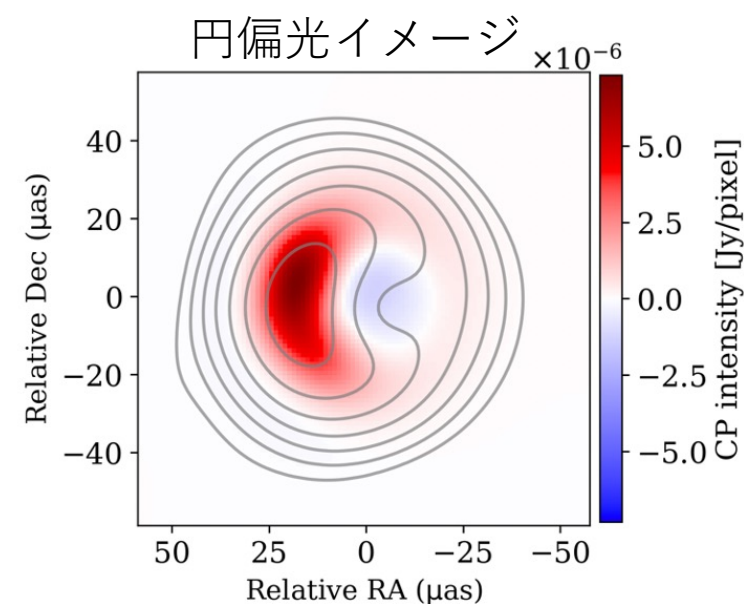
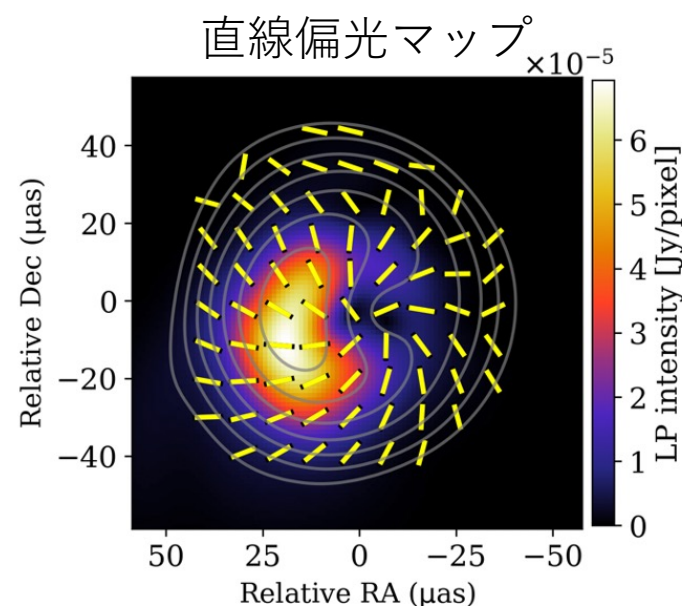
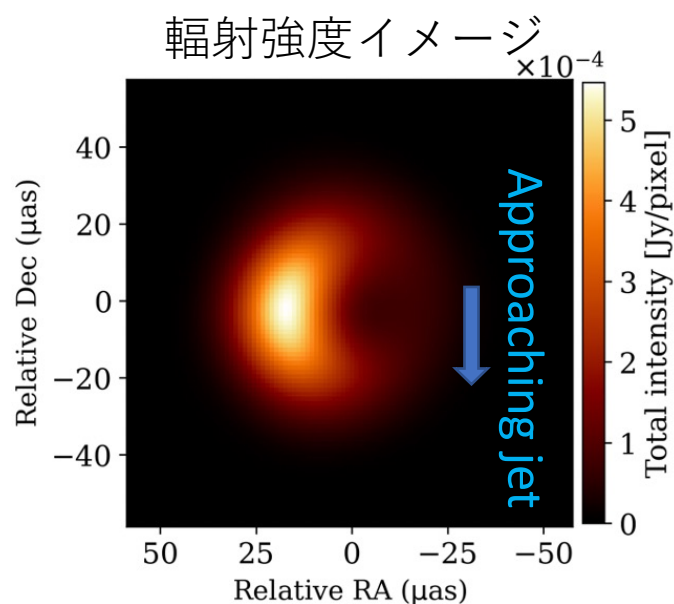


- 傾斜角 $i = 160^\circ$: 下側に延びたジェット
- 輻射強度イメージ : photon ring + 灰暗いジェット成分
- 直線偏光マップ : 乱れたベクトル分布 ← 円盤での **Faraday** 回転
- 円偏光イメージ : 増幅した正符号のリング ← 揃った磁場による **Faraday** 変換
- ✓ YT et al. 2020(軸対称モデル)とconsistentな結果



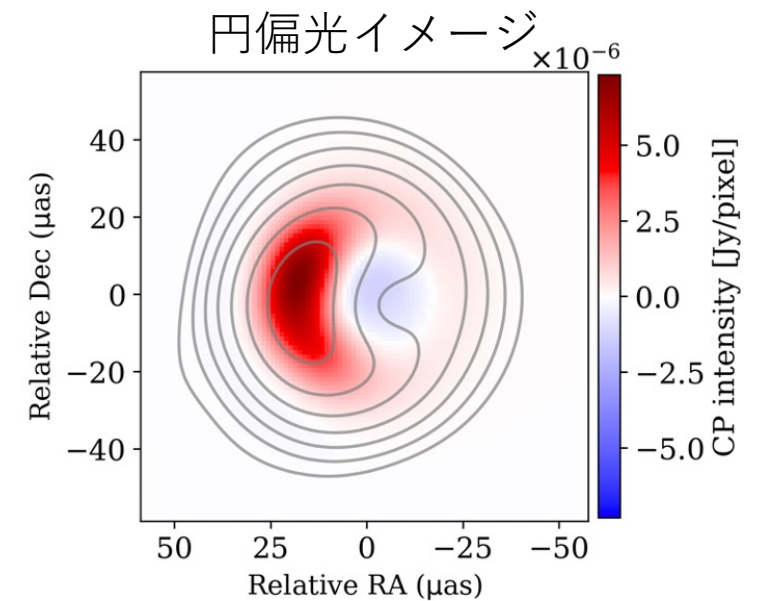
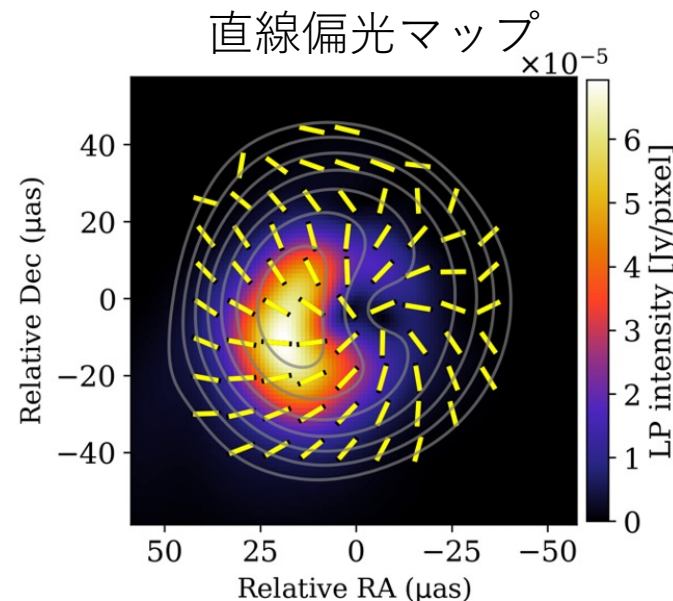
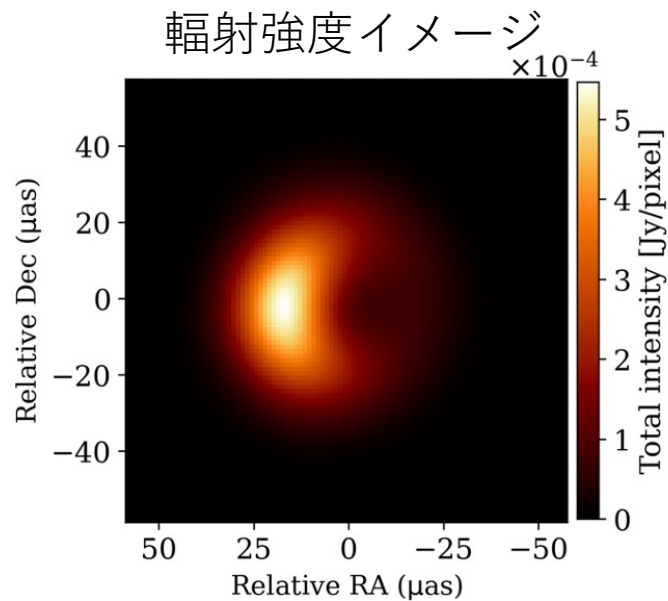
230GHz模擬観測イメージ

- EHT観測を念頭に、17 μ asのビームで模擬観測
- 輻射強度イメージ：左右非対称なリング構造、ジェットの特徴なし
- 直線偏光マップ：偏光度は低い(10 – 20%)が、**揃ったベクトル構造**
- 円偏光イメージ：やはり非対称で、**正のリング構造**



3種類の輻射の位置関係

- 3つのイメージ上の強度分布に注目する
- 直線偏光は輻射全強度に比べ**イメージの下側↓に分布する一方、**
円偏光は**イメージの上側↑に分布している**ように見える
- この傾向を定量化して詳しく調べたい



偏光イメージの相関関係解析

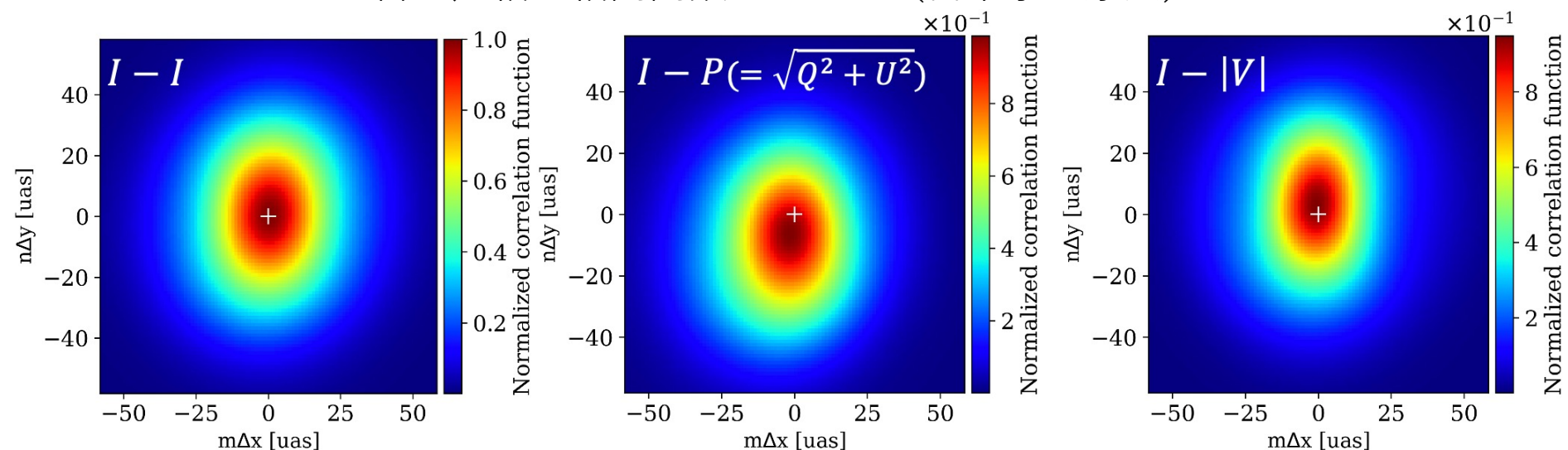
- 輻射全強度(Stokes I)との相関関数：

$$\{I - S\}(m\Delta x, n\Delta y) \equiv \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N I(x_i, y_j) S(x_{i+m}, y_{j+n})}{\sqrt{\sum_{i,j=1}^N I(x_i, y_j)^2 \sum_{i,j=1}^N S(x_i, y_j)^2}} \quad (m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots),$$

ここで (x_i, y_j) はイメージ上のピクセルで、 $S = I, P = \sqrt{Q^2 + U^2}, |V|$

- $I - I$ は輻射全強度の自己相関関数、
 $I - P$ ($I - |V|$) は全強度と直線偏光(円偏光)強度との相互相関関数

自己／相互相関関数のマップ（白十字は原点）

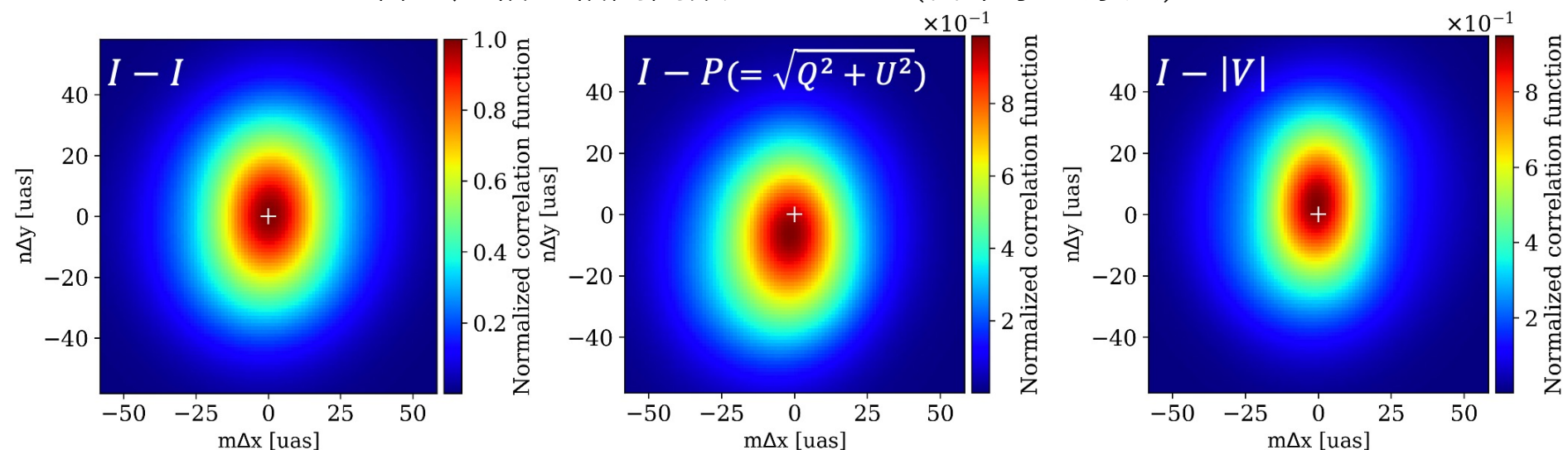


偏光イメージの相関関係解析

$$\{I - S\}(m\Delta x, n\Delta y) \equiv \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N I(x_i, y_j) S(x_{i+m}, y_{j+n})}{\sqrt{\sum_{i,j=1}^N I(x_i, y_j)^2 \sum_{i,j=1}^N S(x_i, y_j)^2}} \quad (m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots),$$

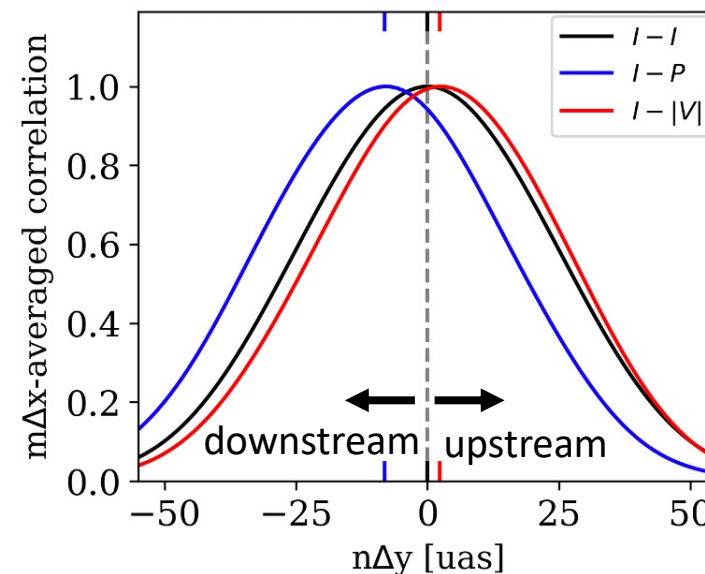
- 相関関数のピーク：2つの輻射の空間的な隔たり
- $I - I$ ：定義により(0,0)にピーク、縦に伸びた形状(~非対称なリング構造)
- $I - P$ ：下側↓にピーク → 直線偏光は全強度に比べて下側に分布
- $I - |V|$ ：上側↑にピーク → 円偏光は全強度に比べて上側に分布

自己／相互相関関数のマップ（白十字は原点）



相関関数のジェットに沿ったプロファイル

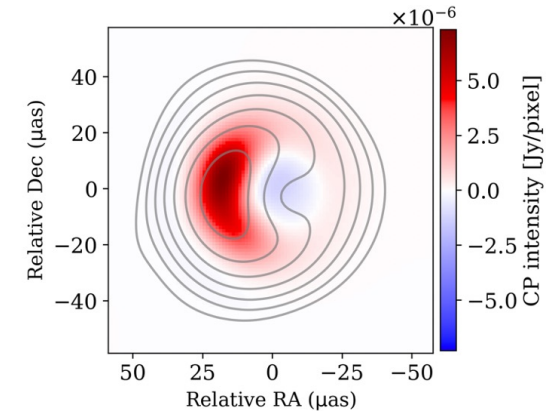
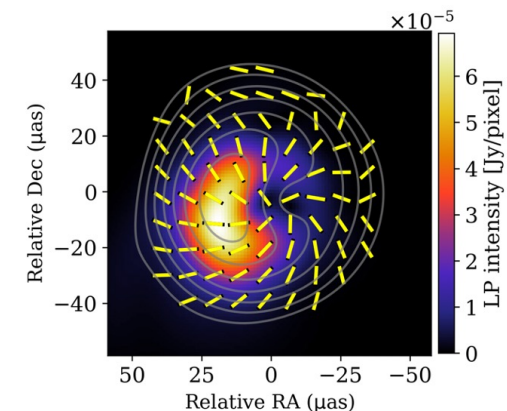
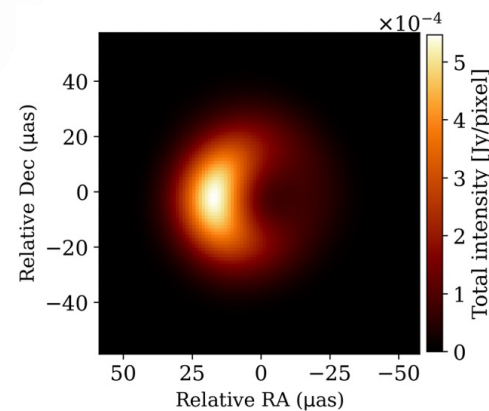
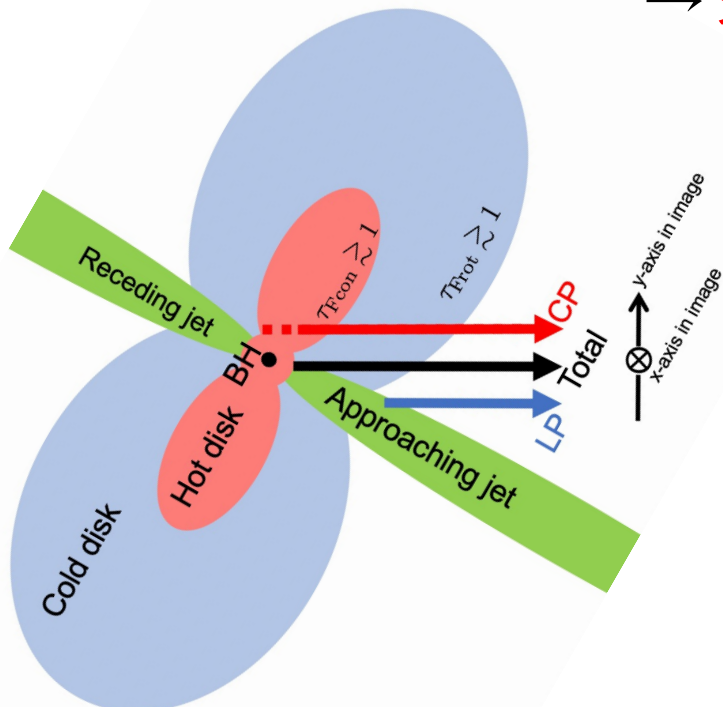
- 相関関数の Δy -(縦方向 = ジェットに沿った向きの)プロファイル
- 縦方向のピーク： $I - P$ について $-8uas$ 、 $I - |V|$ について $+2uas$
- ジェットの方向について、直線偏光は $8uas$ 下向きに、円偏光は $2uas$ 上向きに分布している



➤ ジェット下流に直線偏光 / ジェット上流に円偏光

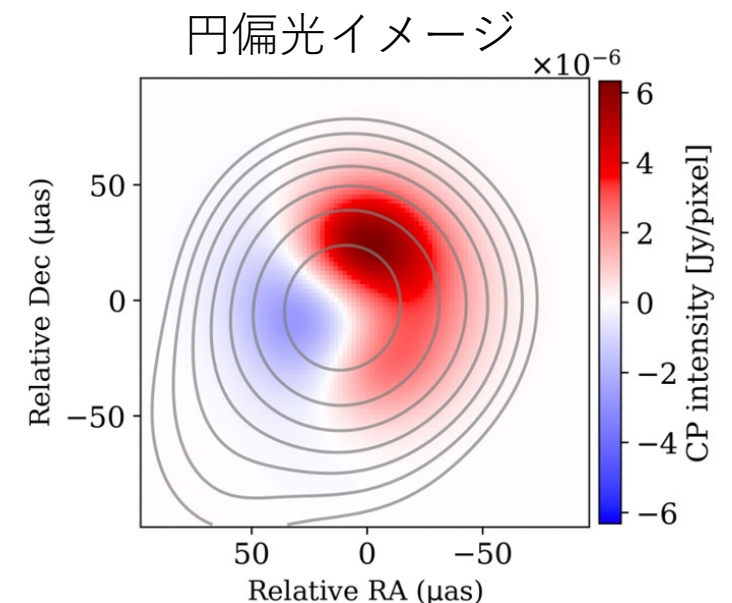
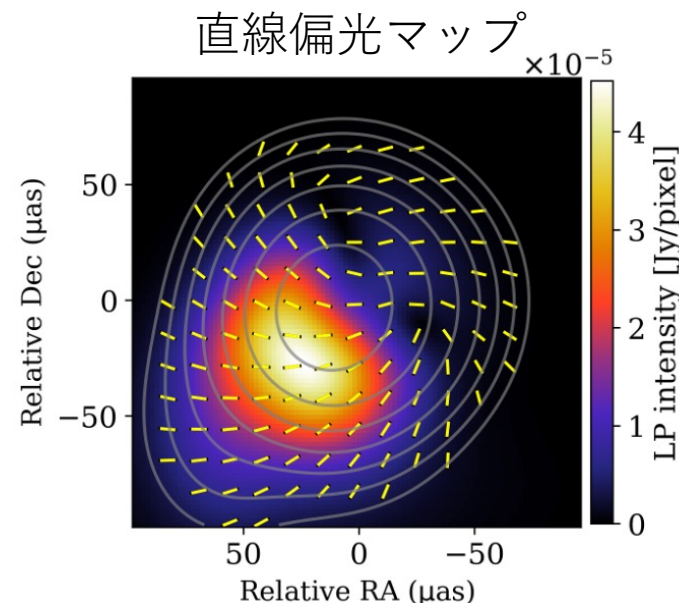
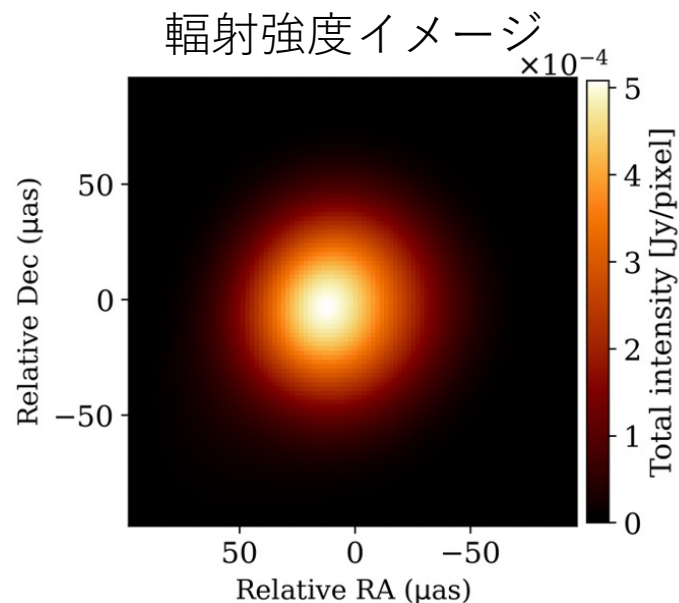
偏光成分の“分離”についての解釈

- なぜイメージ上で直線偏光・円偏光成分が分離するのか？
 ➤円盤中でのFaraday回転とFaraday変換
- 上流からの直線偏光：円盤中でFaraday回転を受け、揃った構造を失う
 →ジェット下流からの成分がイメージ上で支配的に
- 円偏光成分：ブラックホール付近でのみFaraday変換が起こる
 →ジェット上流、根元付近からの寄与が支配的



低振動数86GHzでの偏光イメージ

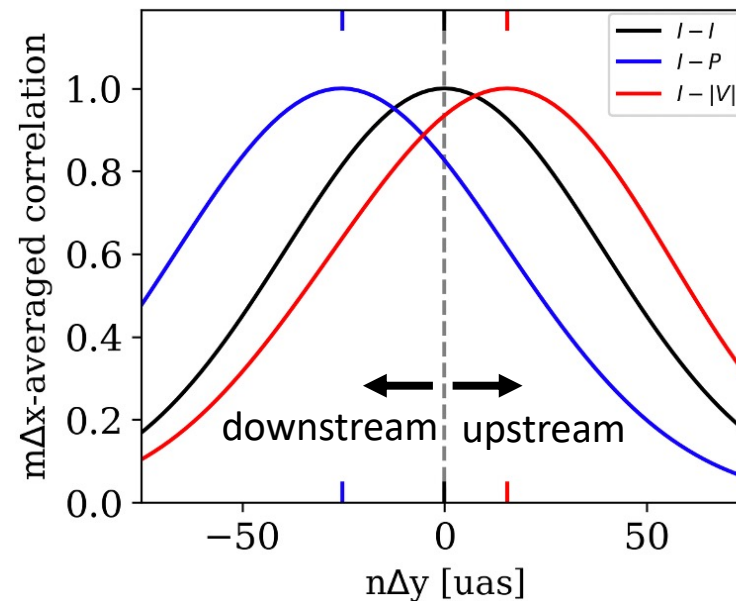
- 86GHzでの偏光イメージを、45uasのビームで模擬観測(グローバルVLBIを念頭)
- 230GHzと似た、更に顕著な傾向: 下側の直線偏光と上側の円偏光
- 円偏光イメージに横方向の符号変化: らせん形状磁場を反映(詳細はYT+2021a)



低振動数86GHzでのジェット方向の相関

- 86GHzイメージについて同様にジェットに沿った方向のプロファイル
- ピーク： $I - P$ について-25 μas 、 $I - |V|$ について+17 μas
- 直線偏光：よりジェット下流側、円偏光：よりジェット上流側に分布

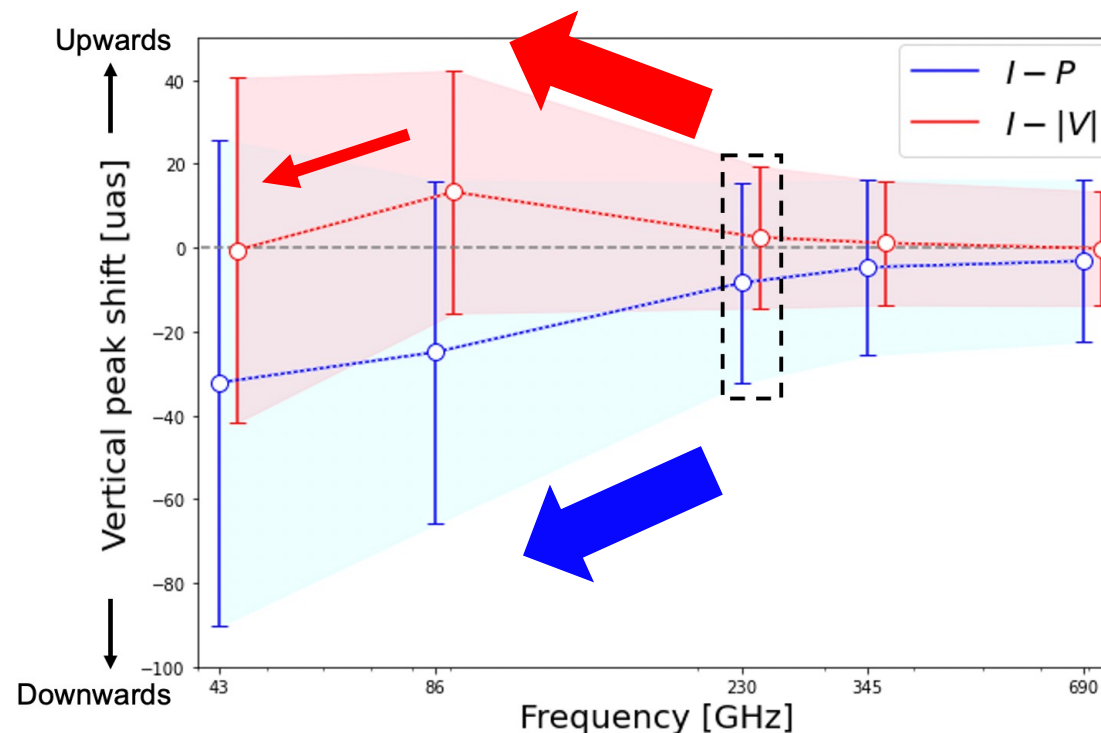
y方向(ジェット方向)の相関関数プロファイル



frequency	$I - P$ peak	$I - V $ peak
230 GHz	-8 μas	+2 μas
86 GHz	-25 μas	+17 μas

多振動数帯における偏光成分の分離

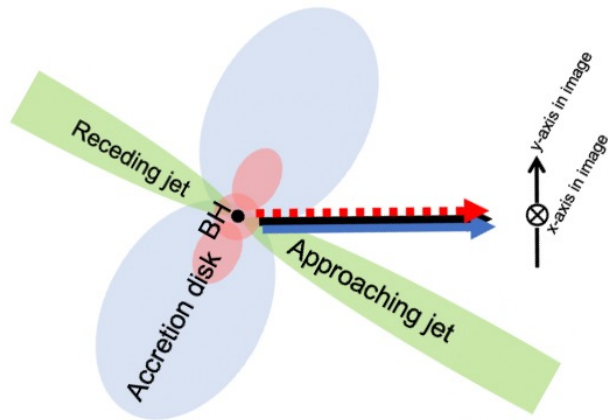
- **ジェットに沿った相関関数のピーク**の振動数依存性を見る
- 偏光成分の分離は、**低振動数になるほど大きくなる**
- ただし、43GHzでの $I - |V|$ に**例外的なふるまい**(分離が抑制)



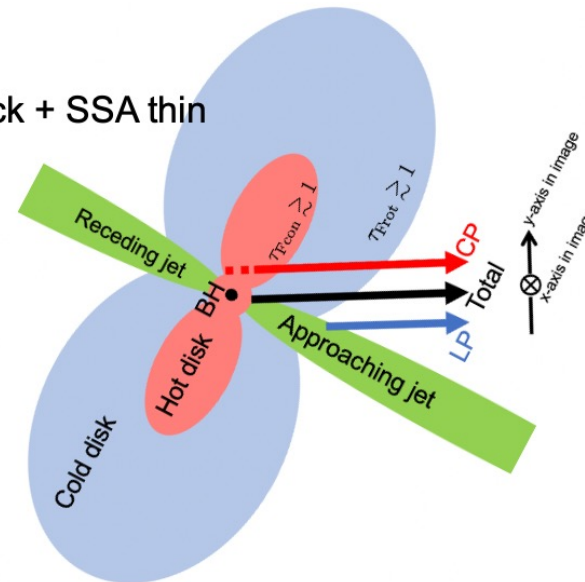
偏光成分の分離の統一描像

- 振動数依存性：低振動数でより大きく分離する
- **Faraday回転／変換：低振動数側で大きい** ($\propto \nu^{-2}, \nu^{-3}$) (Picture [A] $\rightarrow$ [B])
- では、43GHzでの例外(全強度と円偏光が接近)は？
- 更に低い振動数帯では、**シンクロトロン自己吸収**が効いてくる
→ 放射は光球面から：直線偏光は回転するが円偏光はそのまま (Picture [C])

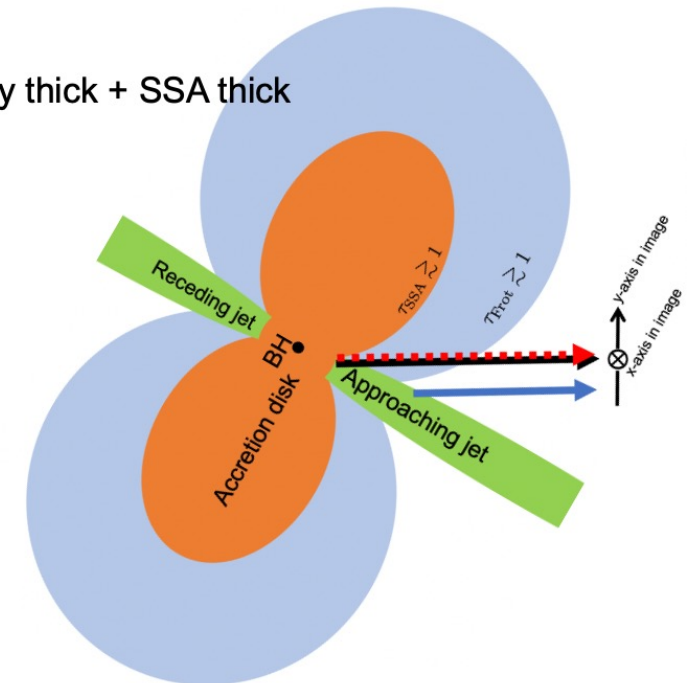
[A] Faraday thin + SSA thin



[B] Faraday thick + SSA thin



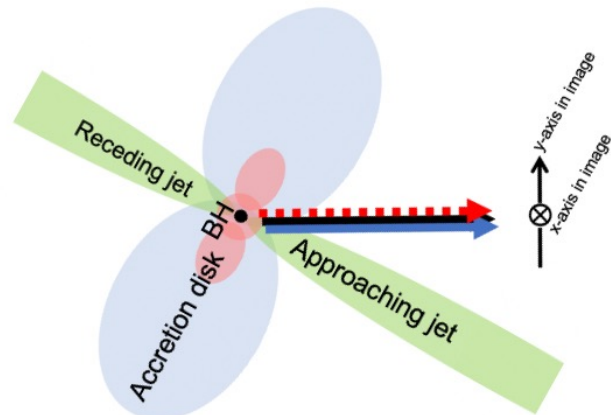
[C] Faraday thick + SSA thick



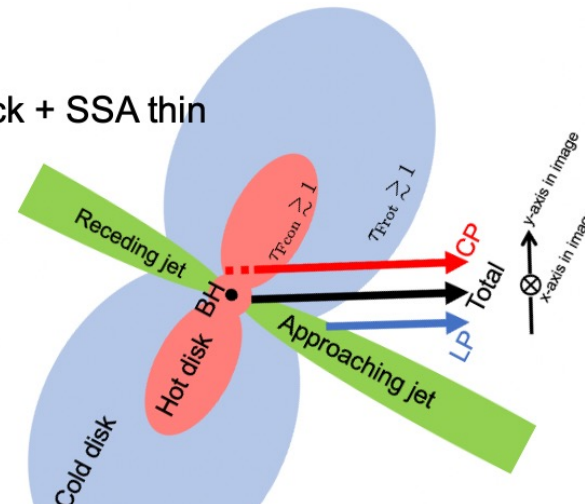
偏光成分の分離の統一描像

- 振動数依存性：低振動数でより大きく分離する
- **Faraday回転／変換**：低振動数側で大きい ($\propto \nu^{-2}, \nu^{-3}$) (Picture [A] $\rightarrow$ [B])
- では、43GHzでの例外(全強度と円偏光が接近)は？
- 更に低い振動数帯では、**シンクロトロン自己吸収**が効いてくる
→ 放射は光球面から：直線偏光は回転するが円偏光はそのまま (Picture [C])

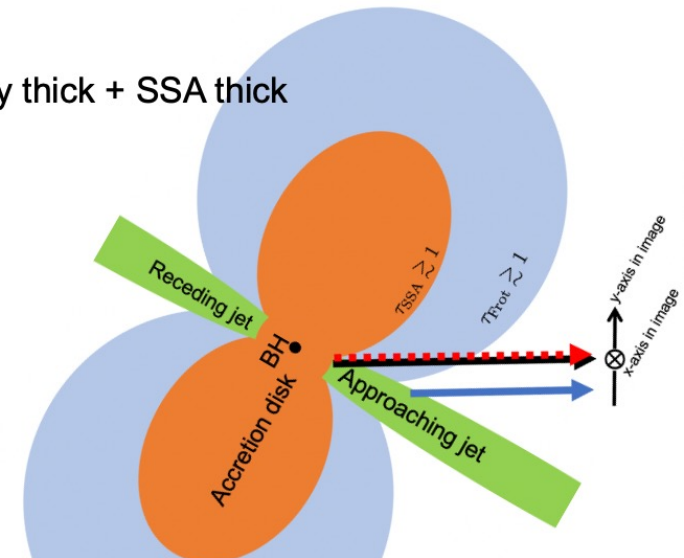
[A] Faraday thin + SSA thin



[B] Faraday thick + SSA thin



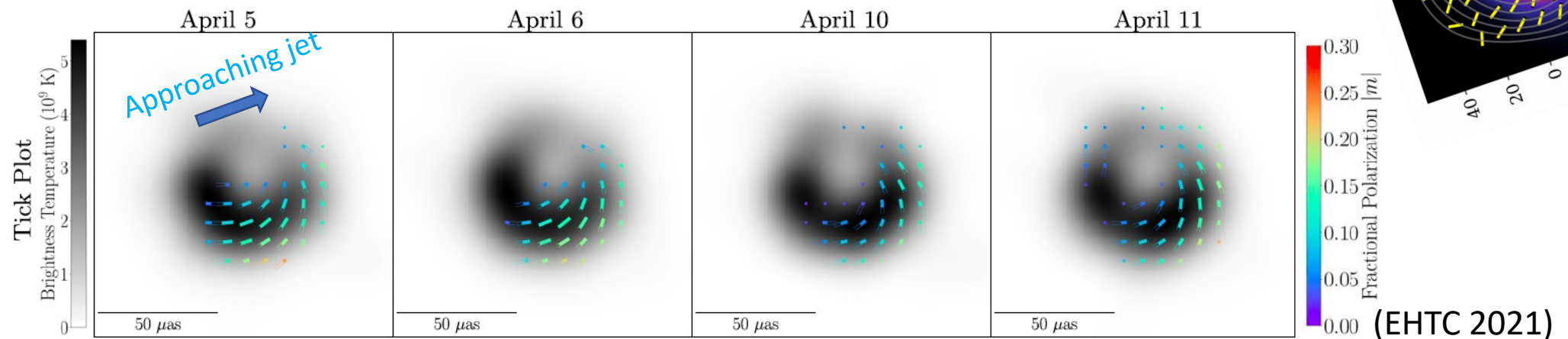
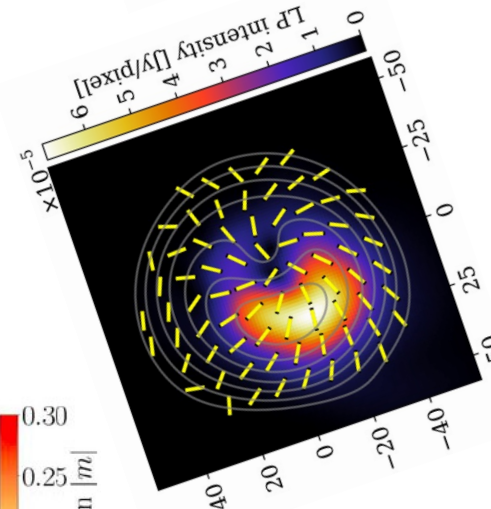
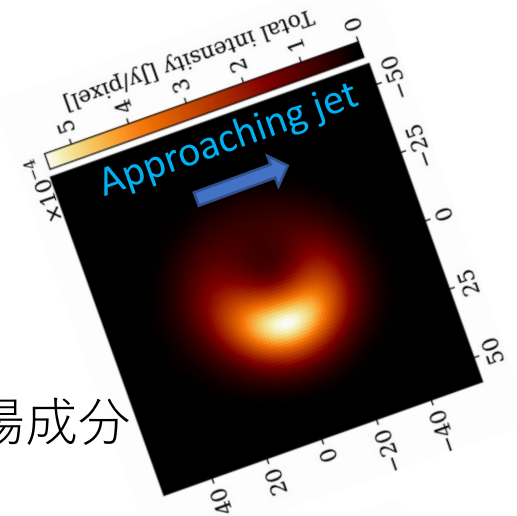
[C] Faraday thick + SSA thick



➤ **偏光成分間の分離から、プラズマ特性を探查可能！**

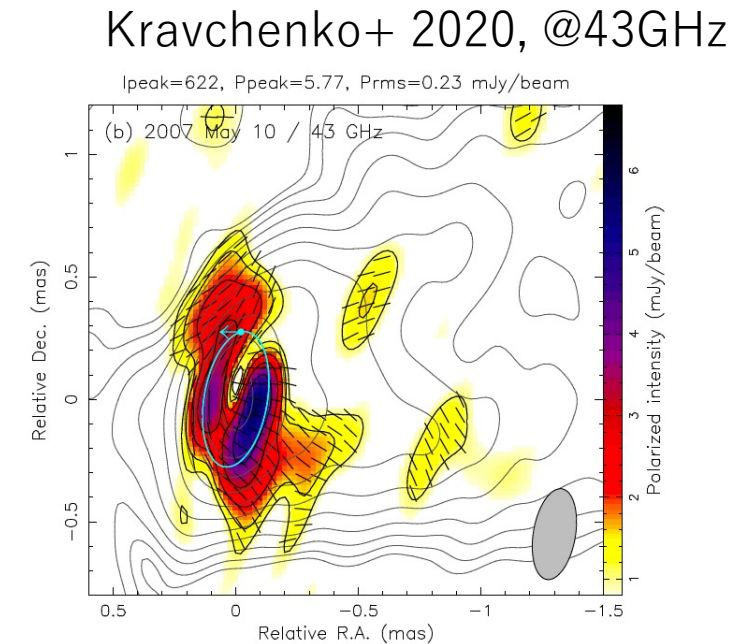
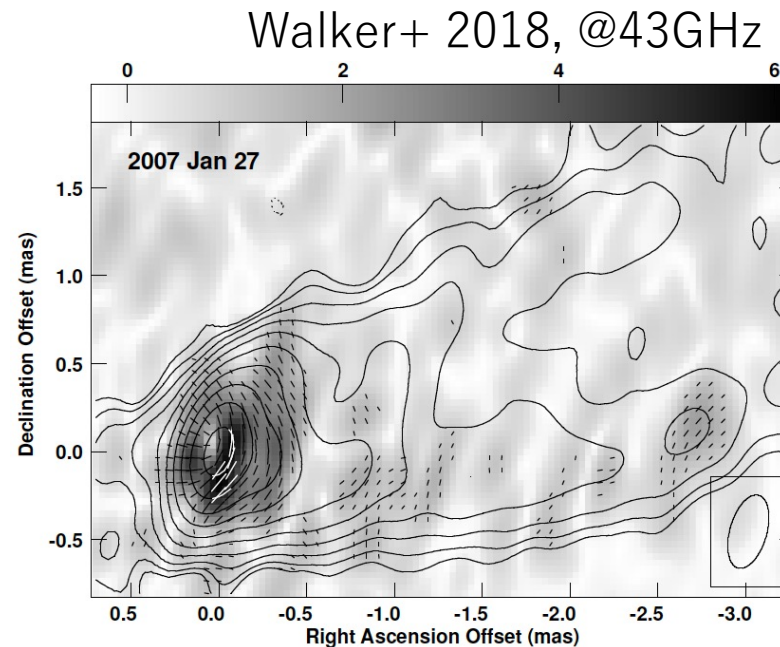
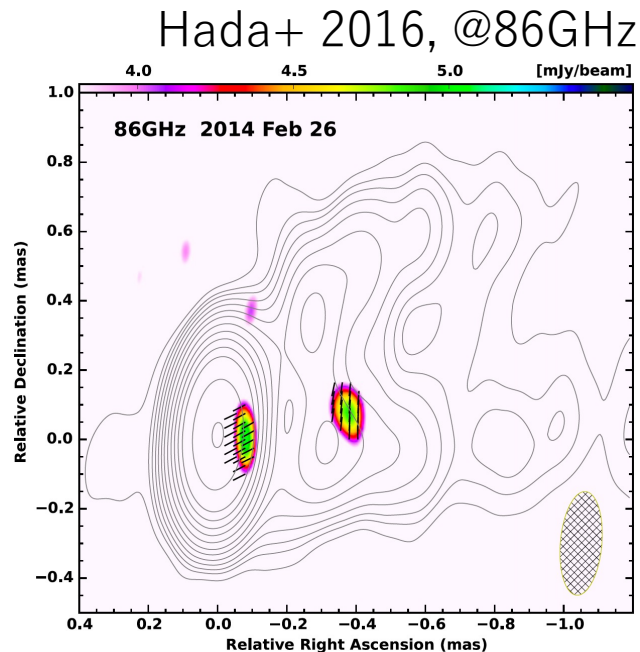
実観測との比較@230GHz

- 2017年EHT観測での直線偏光マップ(EHTC2021) :
 - ✓ 偏光度~15%、動径成分と方位角成分が混じったパターン：縦方向の磁場成分
 - ✓ 直線偏光強度は一貫してリングの右下で強い
 ⇔ リングの下半分全体で明るい輻射全強度とは対照的
- つまり、**直線偏光はジェット下流側にシフトしている**：
我々の理論予測とconsistentな結果！！



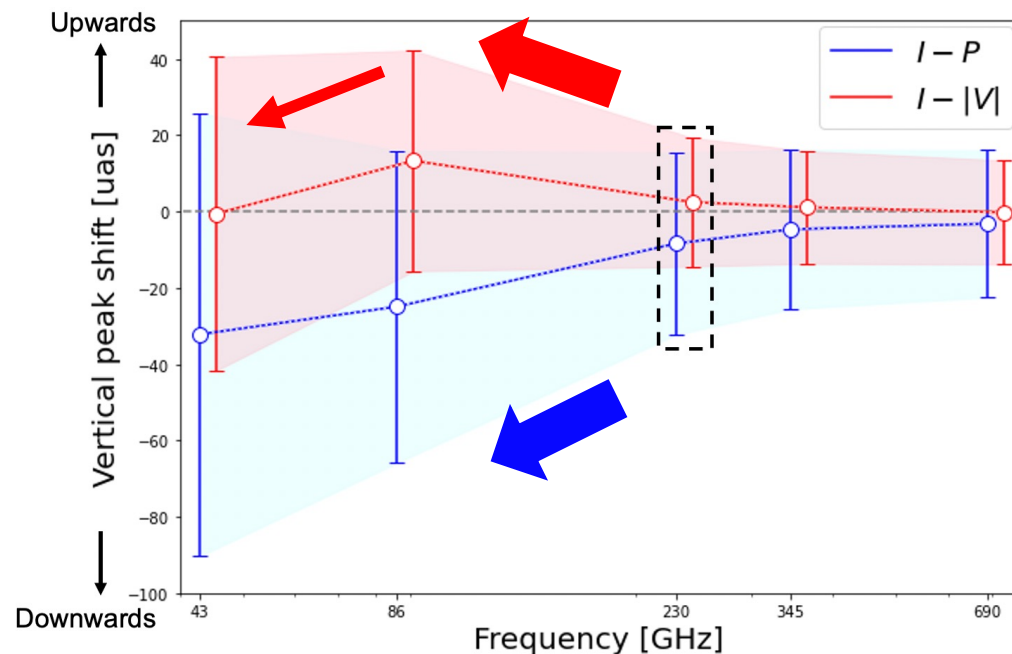
実観測との比較@低振動数側86 & 43GHz

- より外側のM87ジェットの直線偏光マップ
- 直線偏光は複数の観測で一貫してジェット下流側(画像右側)で明るい
やはり我々の予測とconsistent!
- 分離の距離は50-100uas@86GHz、100-200uas@43GHzと大きめ
- 現状の観測ビームは我々の仮定より大きい → 将来観測から制限が可能!

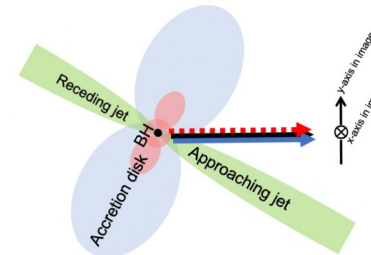


まとめ (詳細はYT et al. 2021b in prep.)

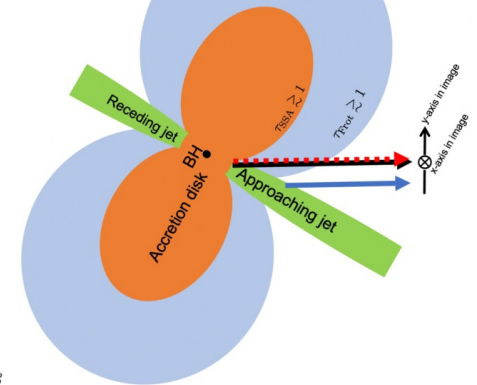
- 理論偏光イメージから、全強度と直線偏光、円偏光成分の間の分離を予測
これらはFaraday効果によるもので、低振動数側でより強くなる
- 更に低い振動数帯ではシンクロトロン自己吸収も効いてきて、
光球面により分離が抑制される
- 分離の程度はモデルのパラメータによって機微に変わるので、
ブラックホール付近／ジェット根元のプラズマ特性を探查できる



[A] Faraday thin + SSA thin



[C] Faraday thick + SSA thick



[B] Faraday thick + SSA thin

