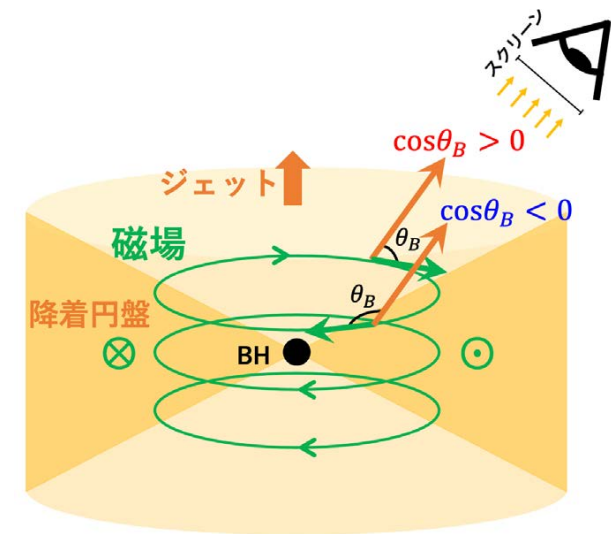
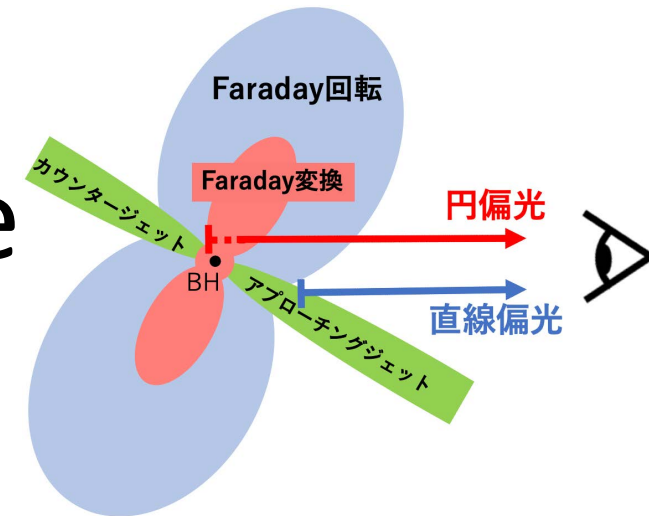


偏光画像で探る超大質量ブラックホールの 降着円盤—ジェット構造



恒任 優 / Yuh Tsunetoe

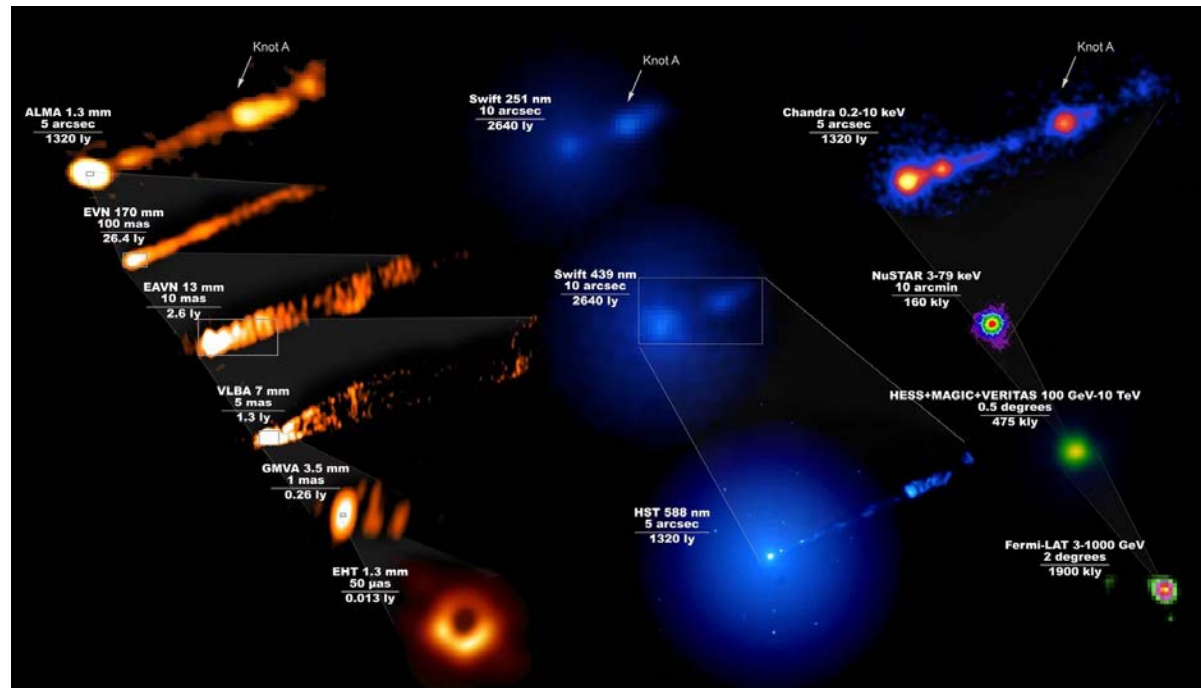
計算科学研究センター (CCS) 研究員



共同研究者：大須賀健（筑波大）、
嶺重慎（京都大）、川島朋尚（東京大）、
秋山和徳（MIT Haystack）、高橋博之（駒澤大）

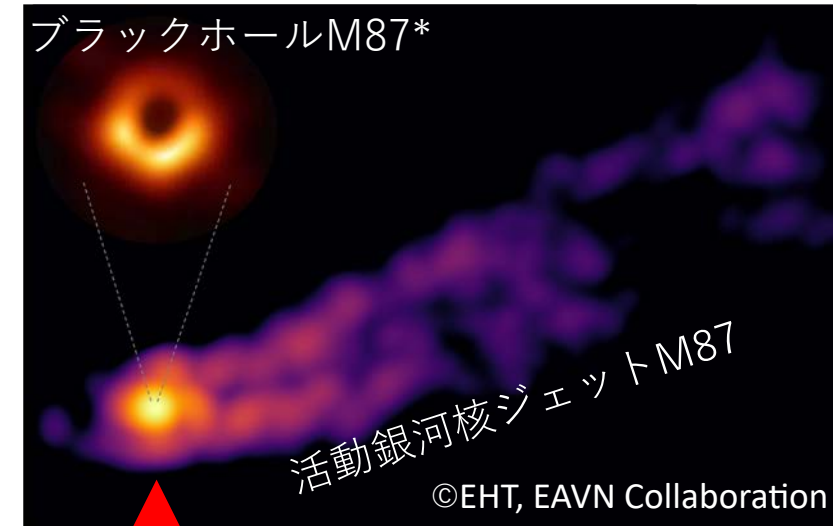
活動銀河核とジェット

- 活動銀河核：銀河の中心から強力な放射
→ 超大質量ブラックホール(SMBH)と降着円盤
- **活動銀河核ジェット**：細く絞られた相対論的プラズマ流 (>銀河スケール)
その駆動機構は長らく謎

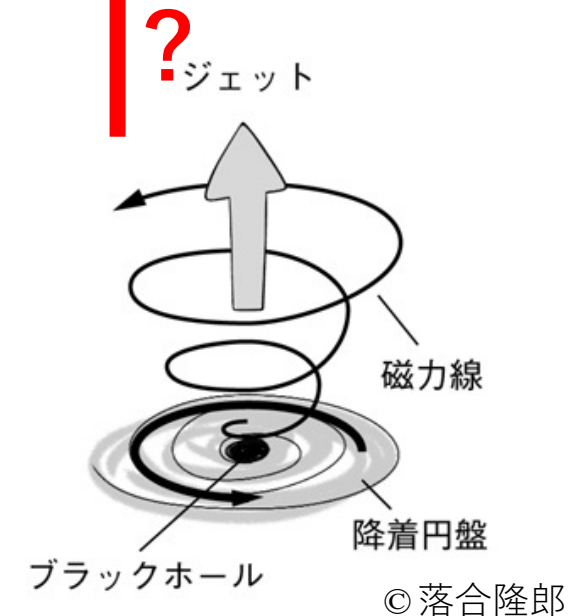


ブラックホールシャドウとジェット

- EHT(Event Horizon Telescope) 2017 :
超大質量ブラックホール(BH)の影を観測
 一般相対論の予言と無矛盾
- 次の課題 : **活動銀河核ジェットの機構** 解明
 プラズマの加速と収束

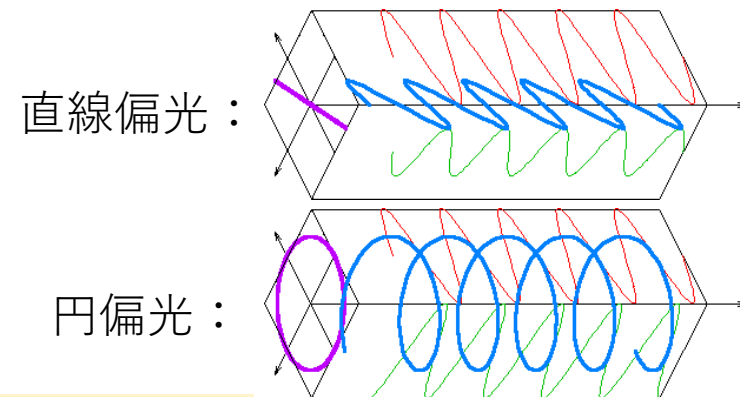


- **磁場による駆動** が有力視 :
 探査 & 検証手段は ?

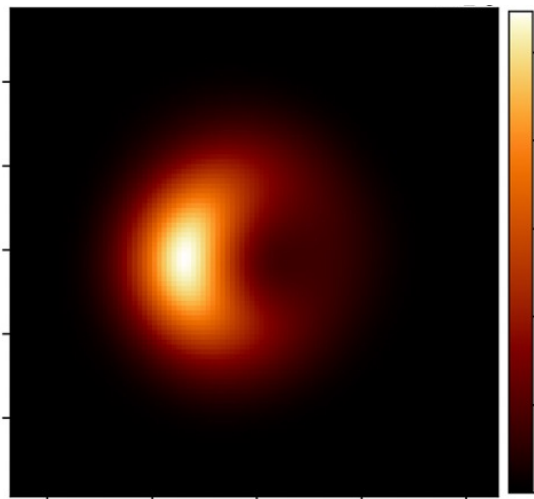


本研究：偏光画像から磁場構造を探る

- 偏光成分：磁場構造を敏感に反映
- 直線偏光画像：強い(明るい)成分、これまで盛んに調査
- 本研究：**円偏光成分**まで踏まえた画像解釈で、
降着円盤—ジェット構造を探る！



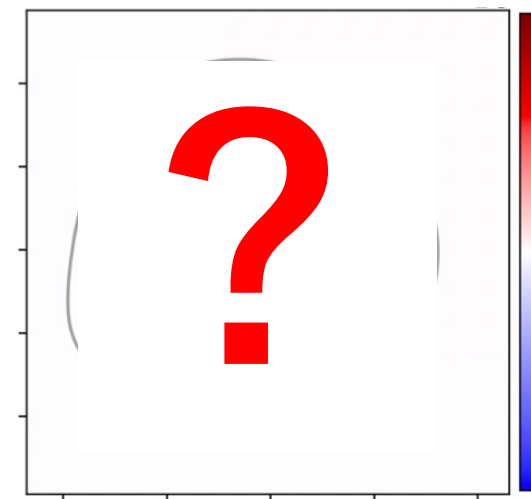
輻射全強度



直線偏光

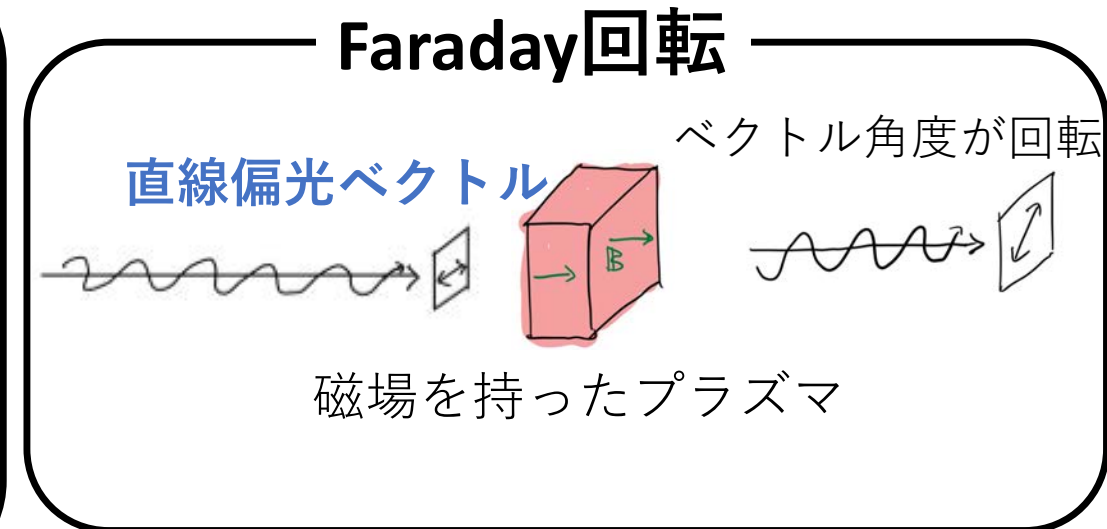
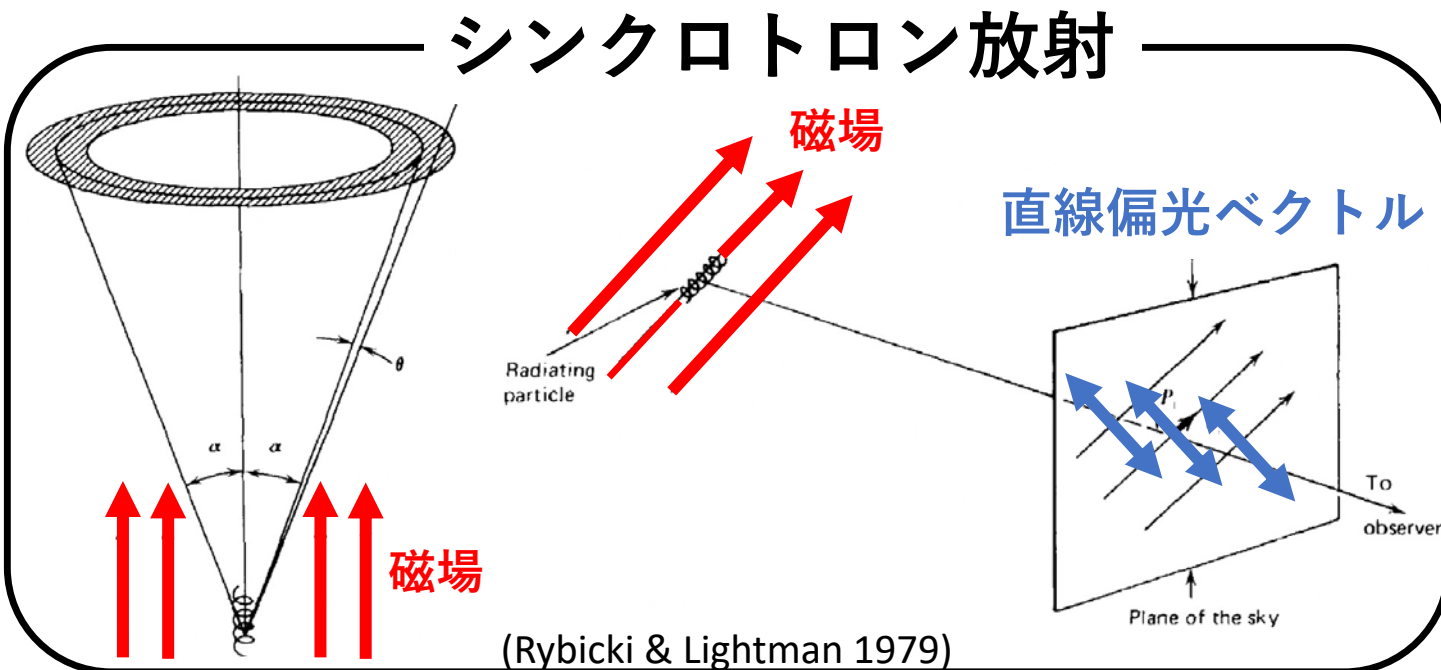


円偏光



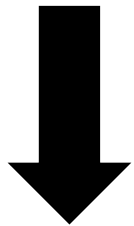
偏光成分と磁場構造

- シンクロトロン放射：強い直線偏光ベクトル成分が磁場の向きを反映
+ 微弱な円偏光成分
- プラズマ通過中にFaraday効果（回転・変換）や吸収を受け偏光成分が変化



偏光の輻射輸送計算→磁場構造との関係

- 活動銀河核ジェット流体モデル：
一般相対論的磁気流体力学(GRMHD)計算 (Takahashi+2018)



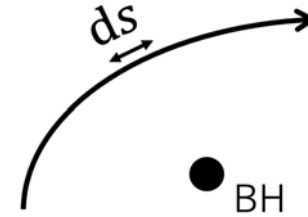
流体モデルに対し、ポストプロセスで

- 偏光の一般相対論的輻射輸送計算 (YT+2020で計算コード開発)
- 偏光画像を提示→実観測と比較・照合！

➤ 磁場構造を決定！！

輻射輸送方程式：円偏光に注目！

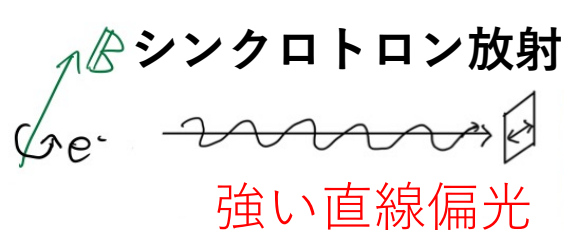
$$\frac{d}{ds} I = j - KI$$



I : Stokesパラメータ、 j : シンクロトロン放射率 (強い直線偏光)

K : 輸送行列 (Faraday回転、Faraday変換 : 直線偏光 ↔ 円偏光)

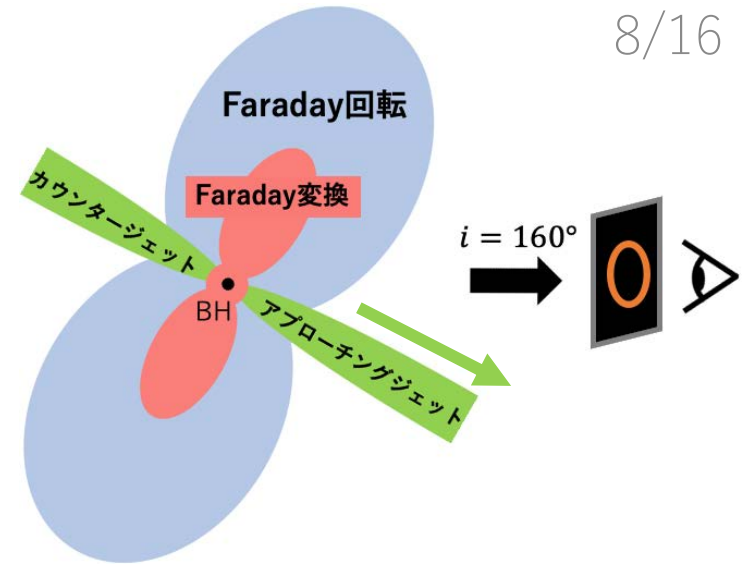
BH付近：
高温 + 強磁場



(Rotation-induced conversion; YT+2020;2021)

➤ ブラックホール付近では円偏光成分が増幅！

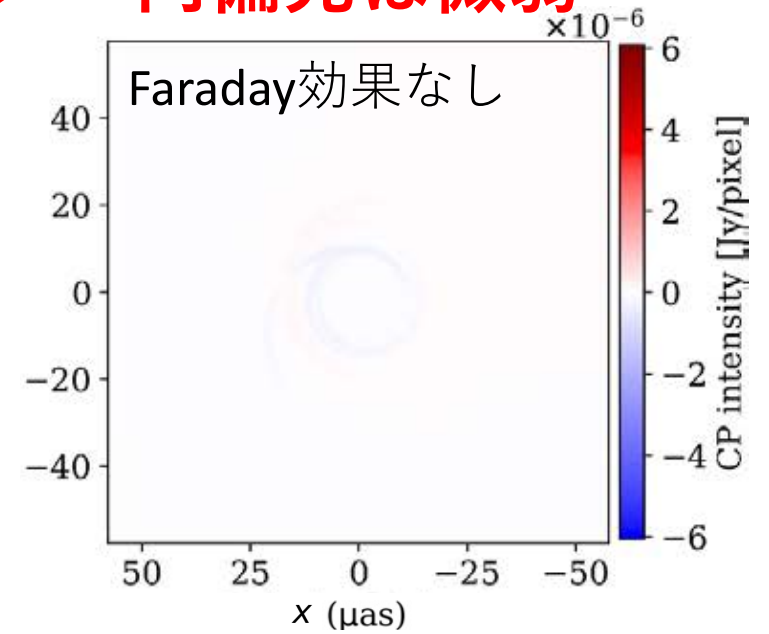
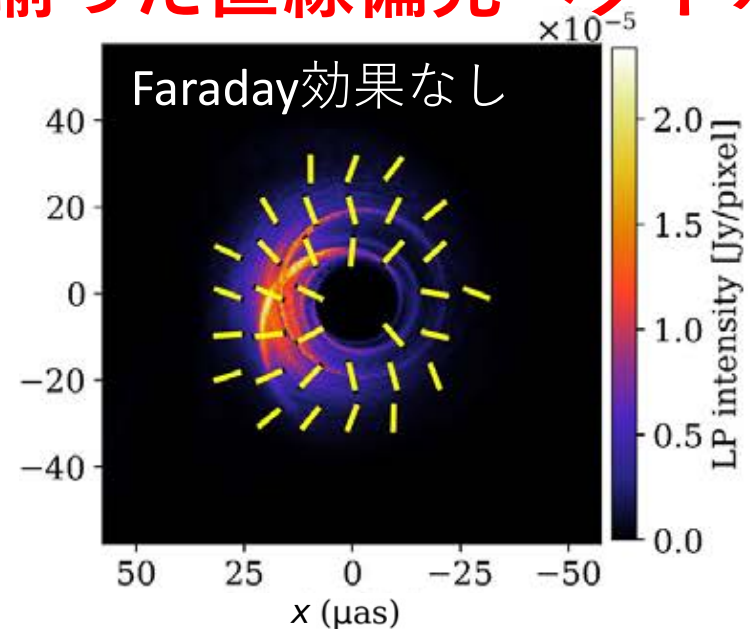
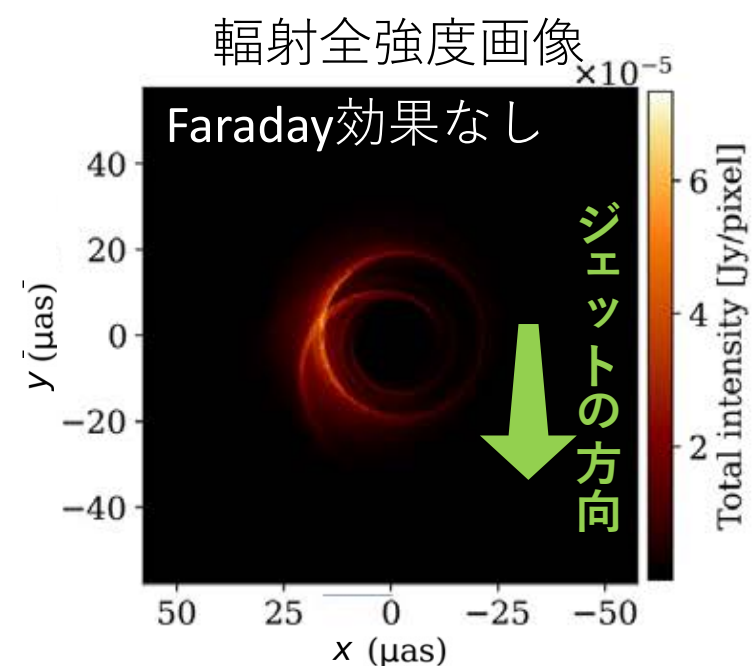
230GHz画像：Faraday効果オフ



- ◆観測者の傾斜角 $i = 160^\circ$ ：
アプローチジェットは画像下向き

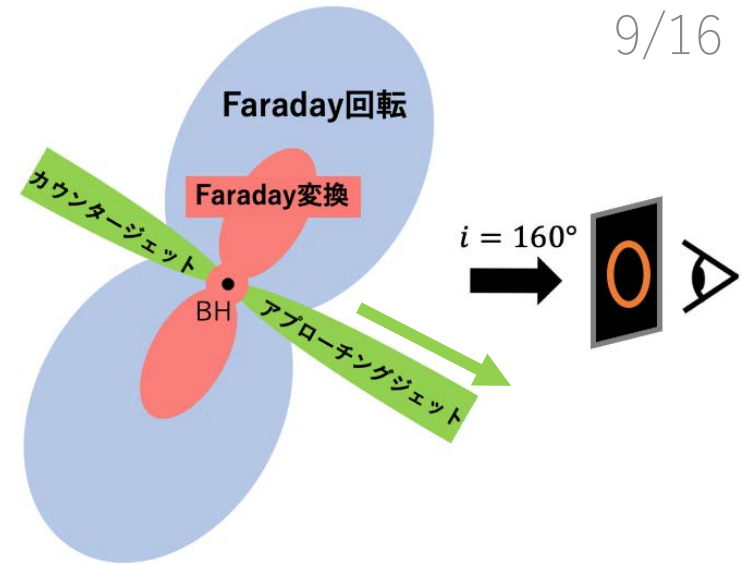
揃った直線偏光ベクトル

円偏光は微弱

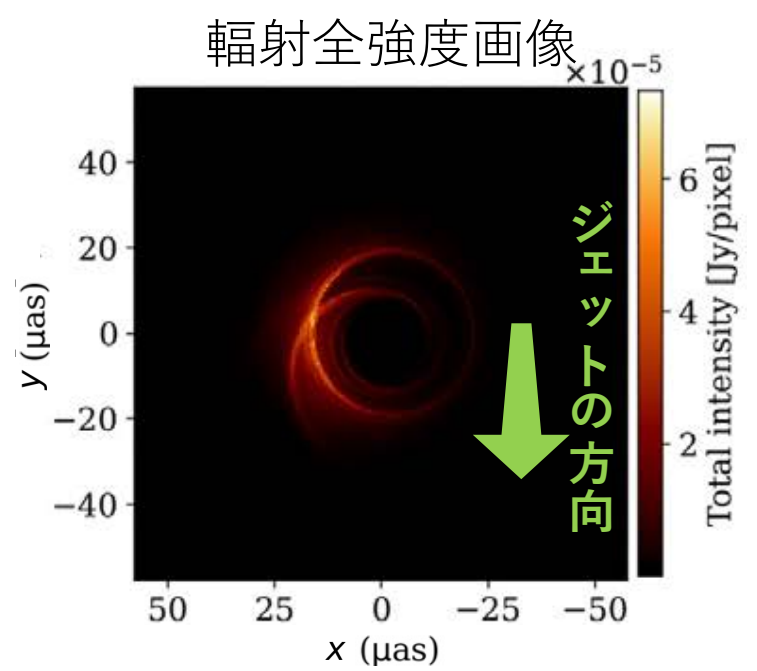


BH重力による光子リング
+ 灰暗いジェット成分

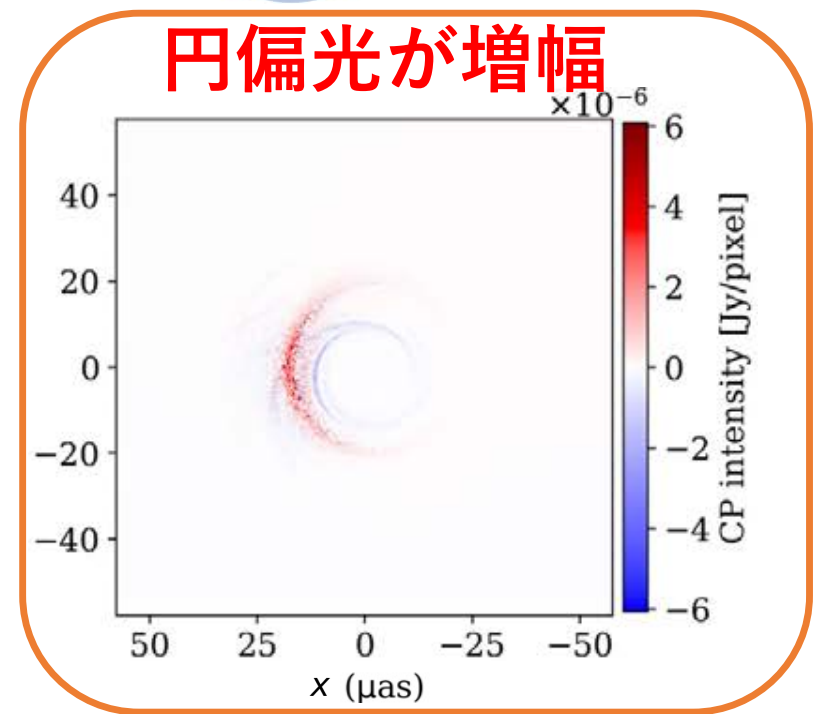
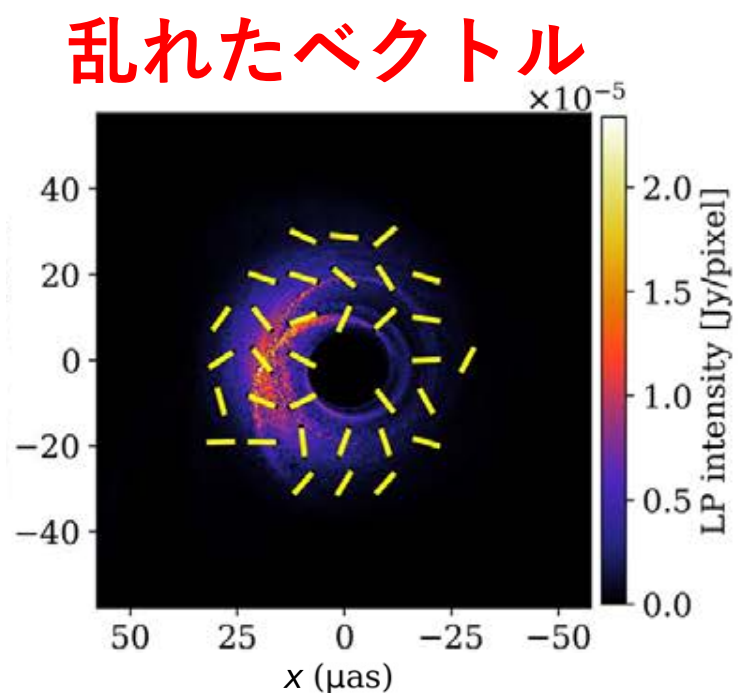
230GHz画像：Faraday効果オン



◆Faraday回転・変換込みの画像

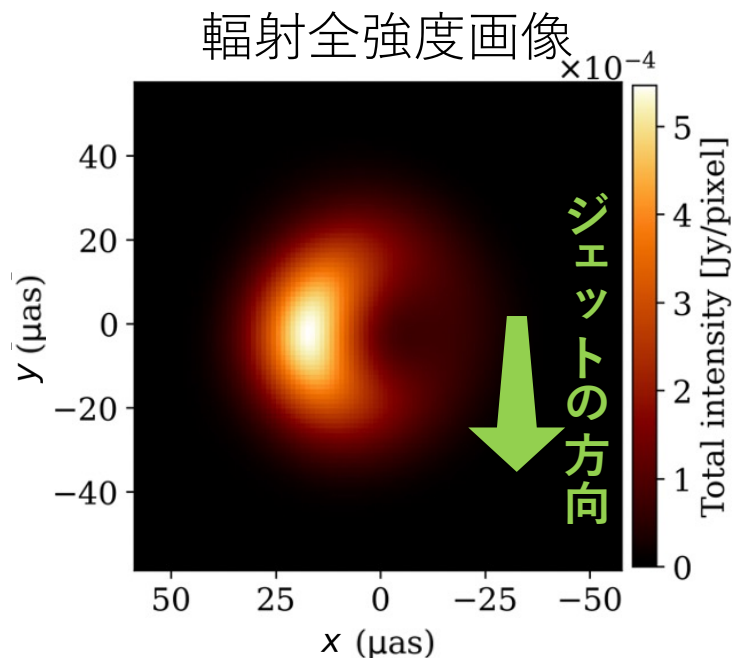


全強度は大きな変化なし

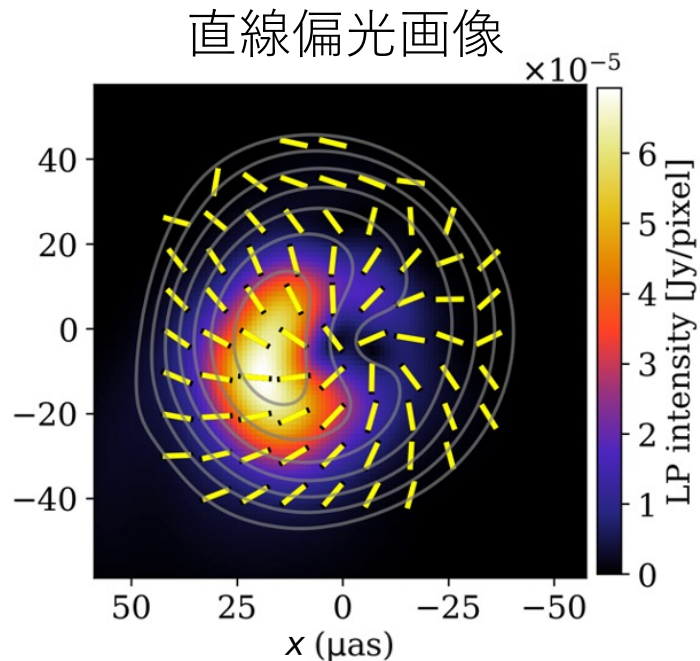


230GHz 模擬観測画像 (実際に観測されうる画像)

◆ EHT観測の分解能：17マイクロ秒角

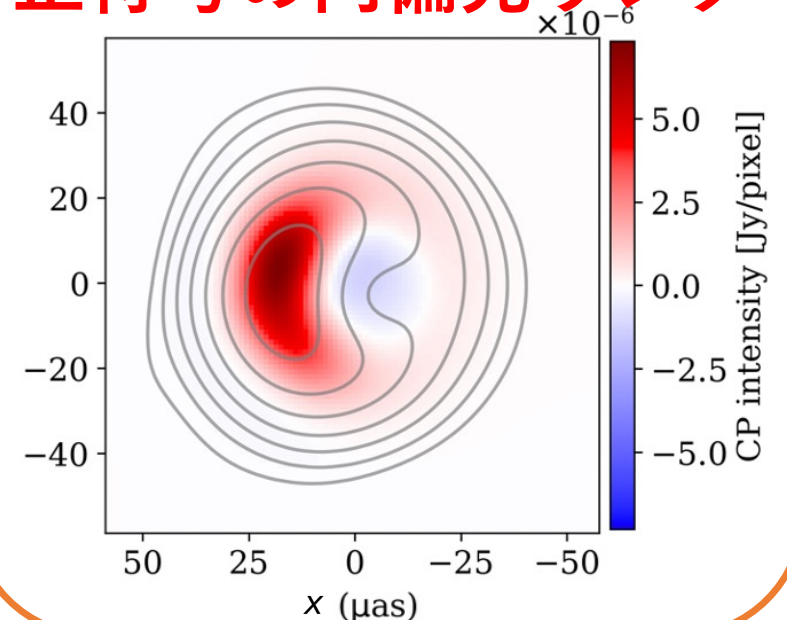


非対称なリング特徴



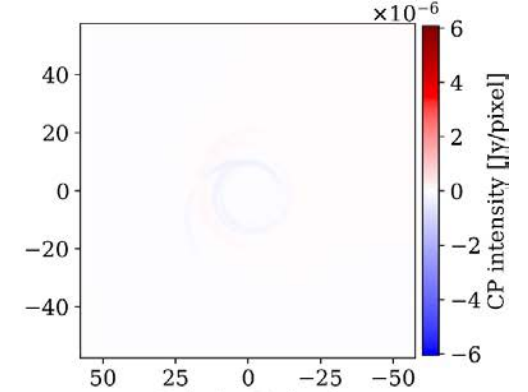
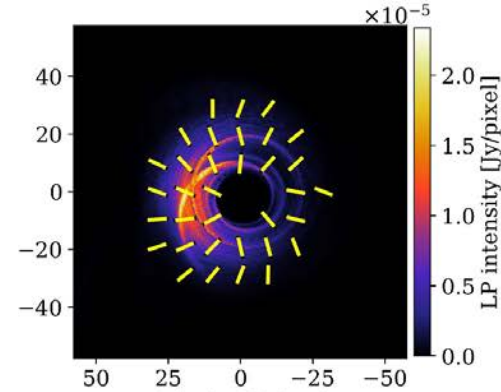
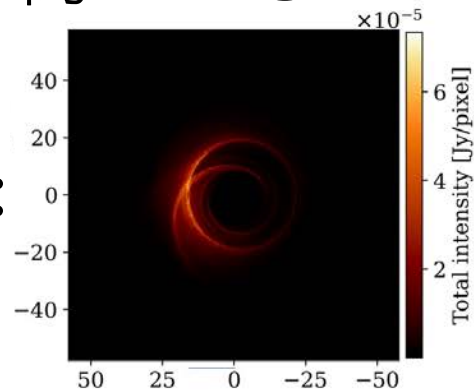
乱れたベクトルを合成し強度低下

正符号の円偏光リング

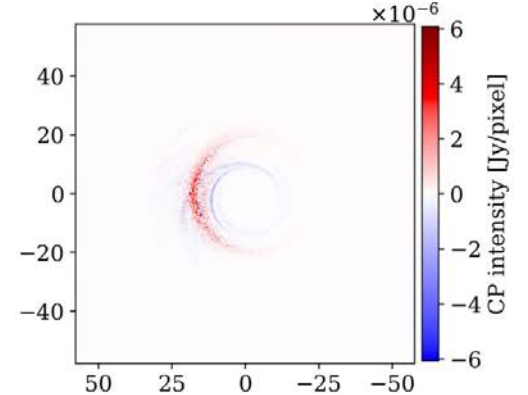
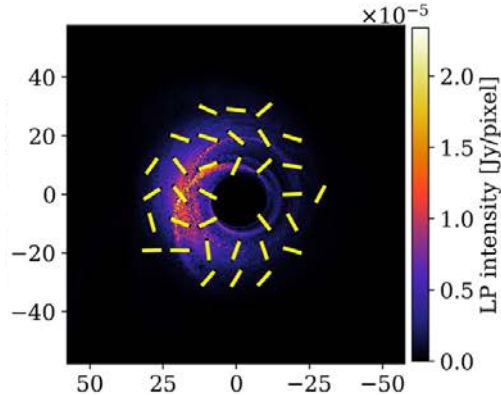
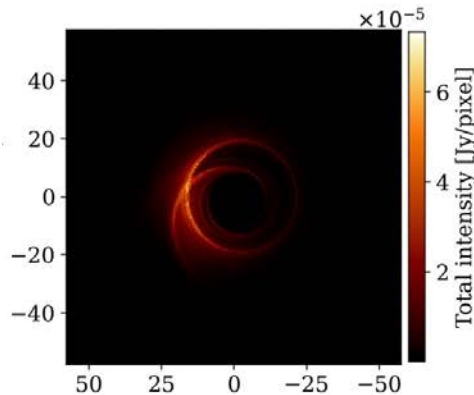


230GHz偏光画像のまとめ

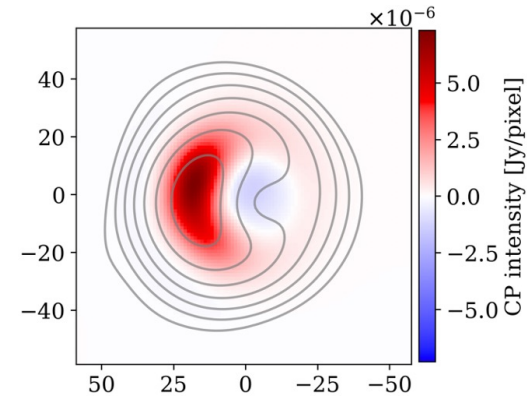
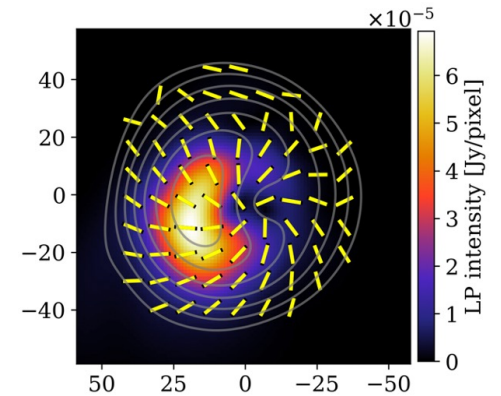
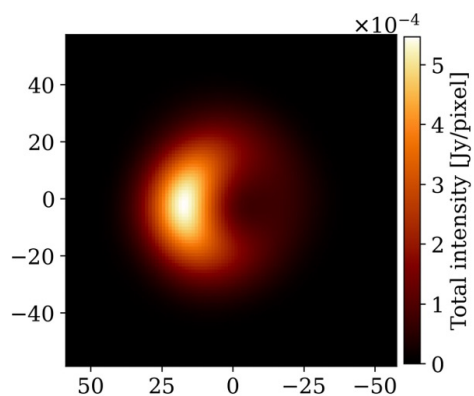
シンクロトロン放射そのまま：
(Faraday効果オフ)



Faraday回転・変換オン：



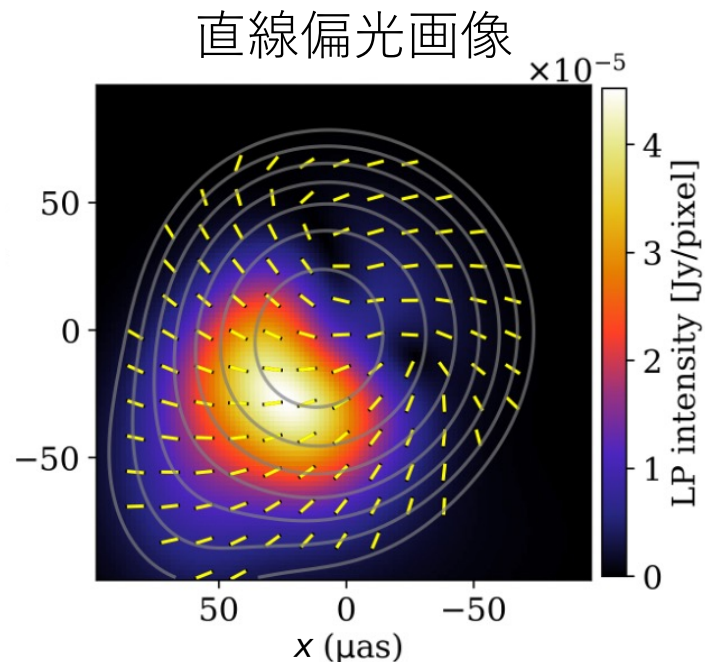
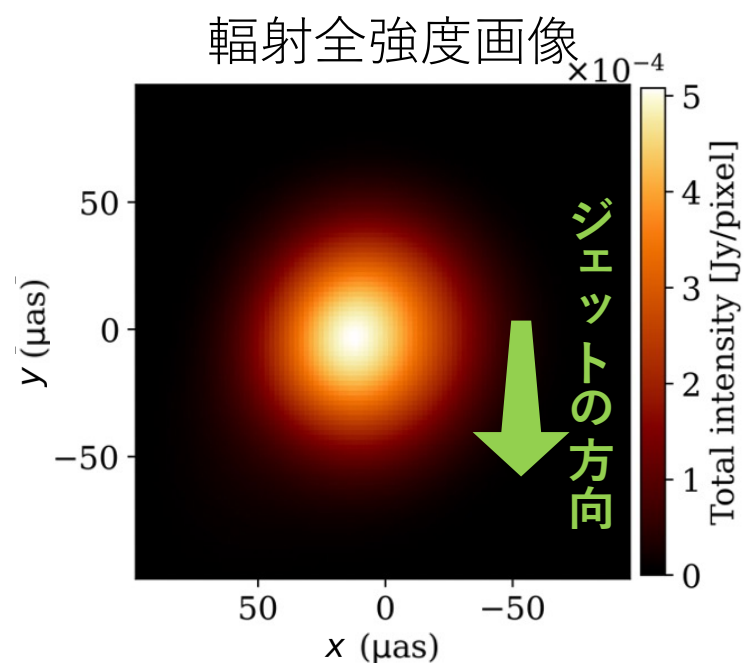
EHT模擬観測：



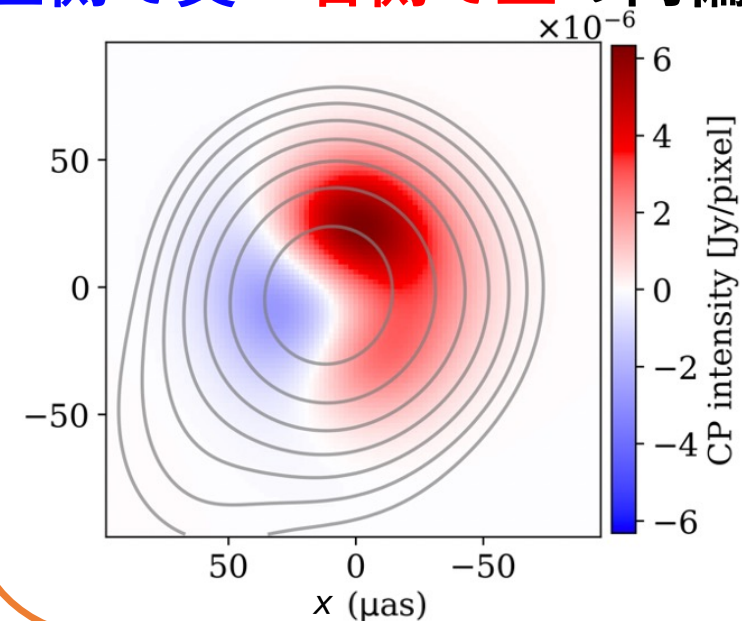
(低振動数画像)

86GHz 模擬観測画像

- ◆ 86GHz観測：分解能45マイクロ秒角を仮定
- ◆ 先ほどの単色リングと異なる円偏光



左側で負・右側で正の円偏光



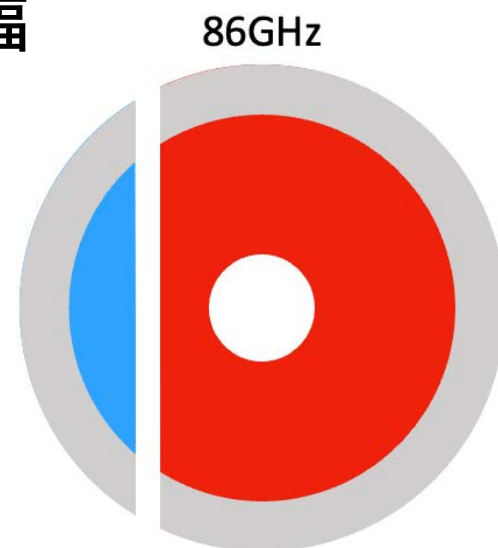
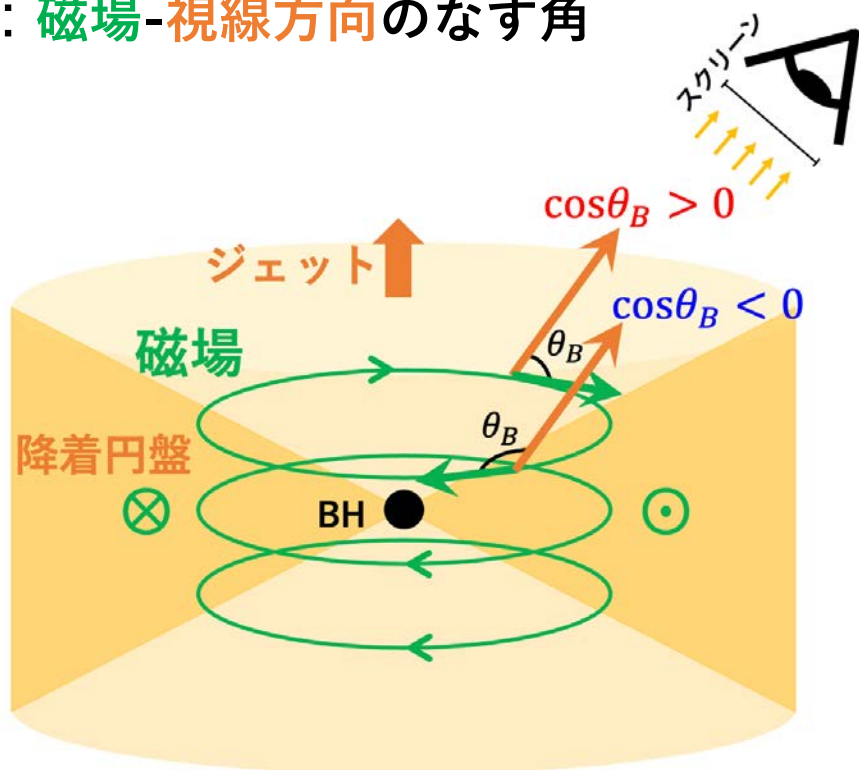
なぜ振動数ごとに円偏光が変化？

→ **ジェット根元のらせん状に揃った磁場** (YT+2021)

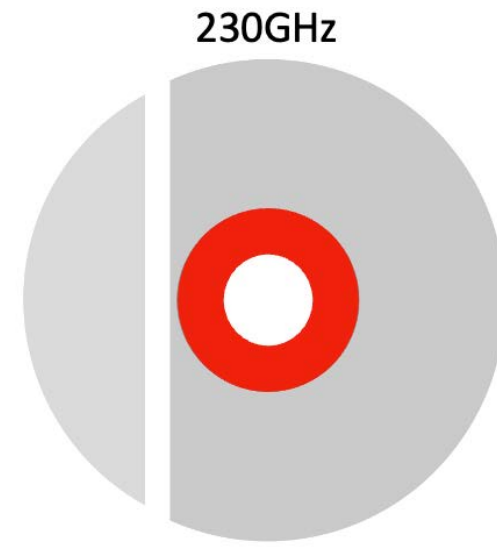
• 円偏光は「放射→Faraday回転→変換」で増幅

∴ **円偏光成分** $\propto \cos\theta_B$: 磁場の視線方向成分

θ_B : 磁場-視線方向のなす角



広い領域からの放射で
符号が反転



狭い放射で
単色のリング

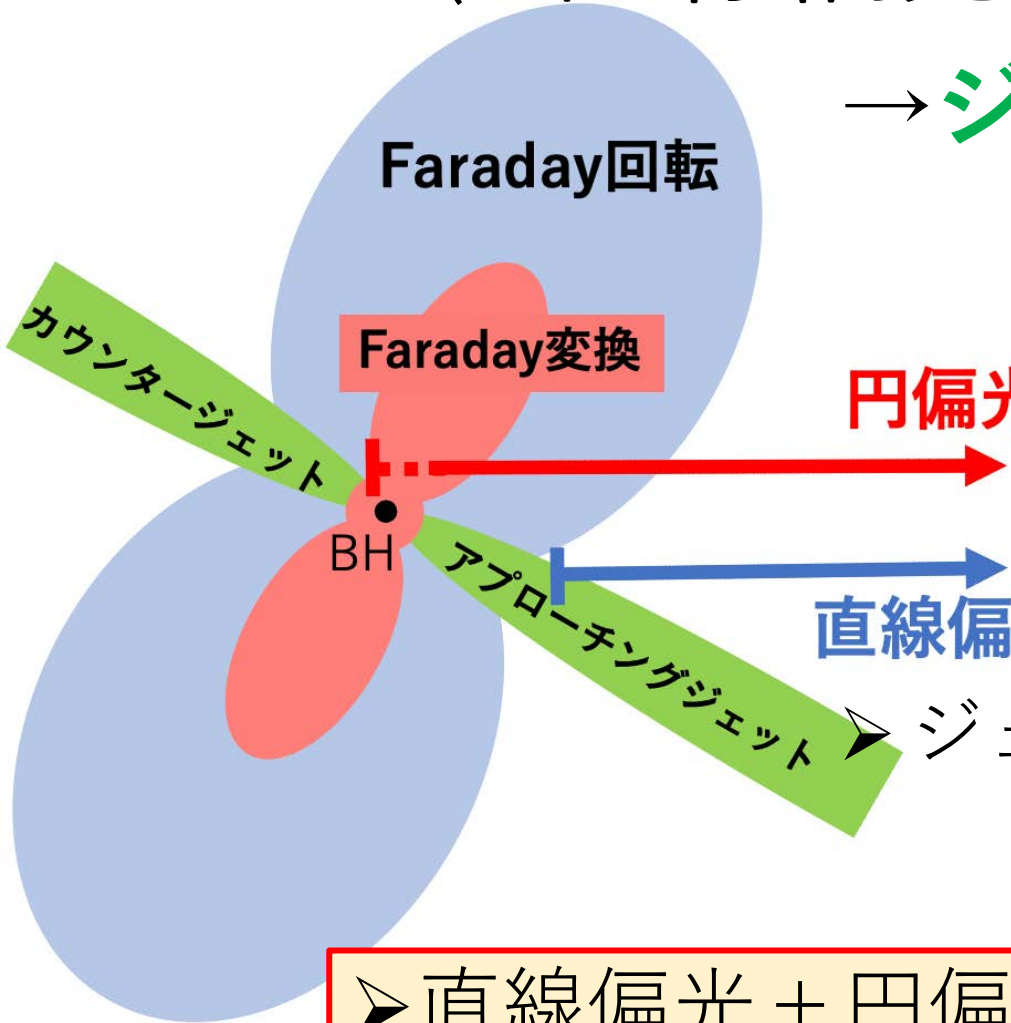
振動数ごとに観測範囲が異なる

(境界線は相対論的視差効果で左にズレる)

では、直線偏光画像からは？

→ **ジェット下流(外側)の縦方向磁場**

(YT+2022a,b)



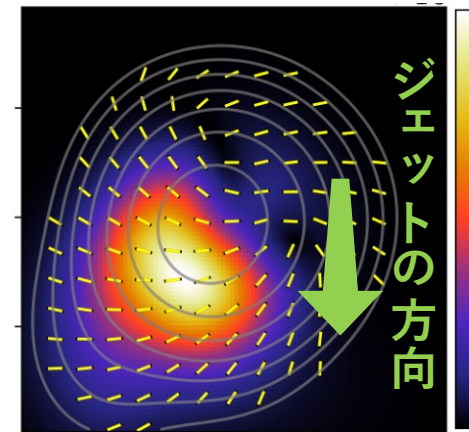
円偏光：ジェット根元のらせん磁場（前述）

直線偏光：ジェット下流からの成分は強い放射のまま

ジェット特有の**縦方向**（ジェットに平行な）**磁場**

実際、画像でも下流側に分布→

➤ **直線偏光 + 円偏光：相補的に磁場を探查！**

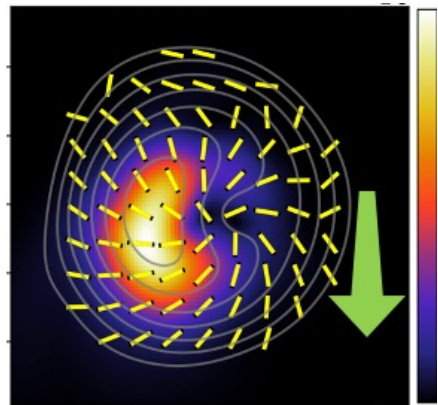
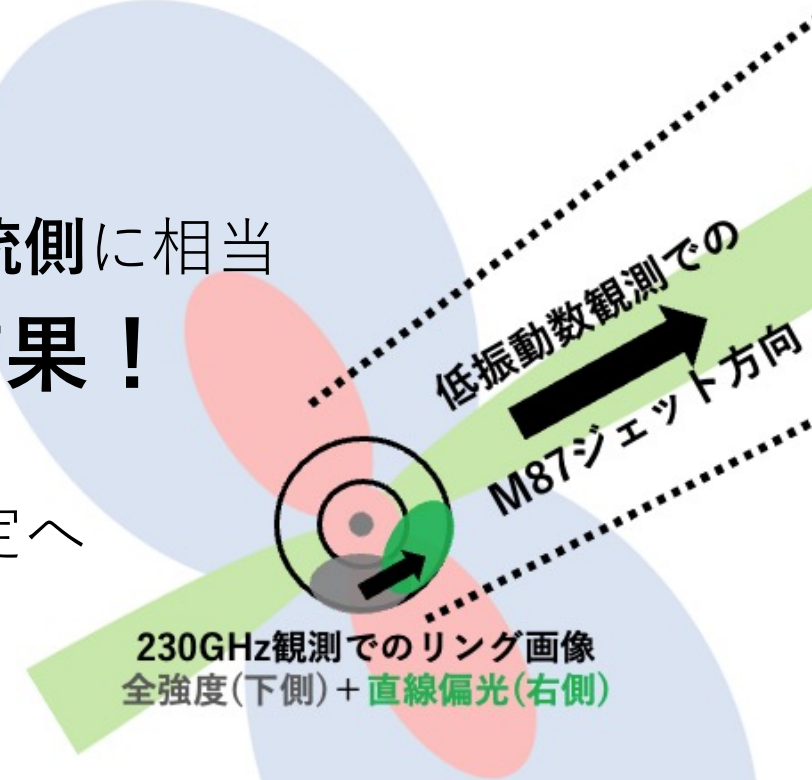


M87*直線偏光画像との照合

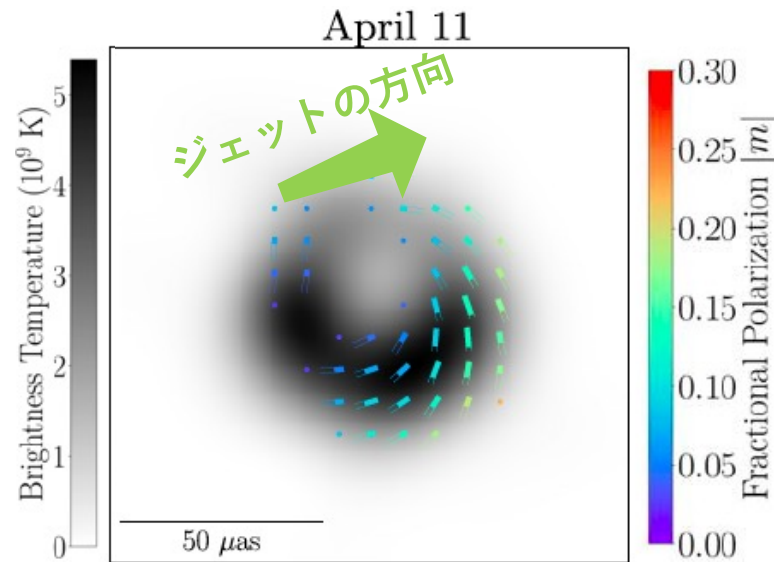
- 画像分布：輻射全強度で明るいリング下部分に対し
直線偏光強度で明るい**右部分**は、ジェットの下流側に相当

→今回のモデルとconsistentな結果！

- 将来の**円偏光観測**や**多波長(振動数)観測**で
電子温度分布やブラックホールスピン決定へ
(frame-dragging効果の検証も)



↑ 直線偏光画像 →



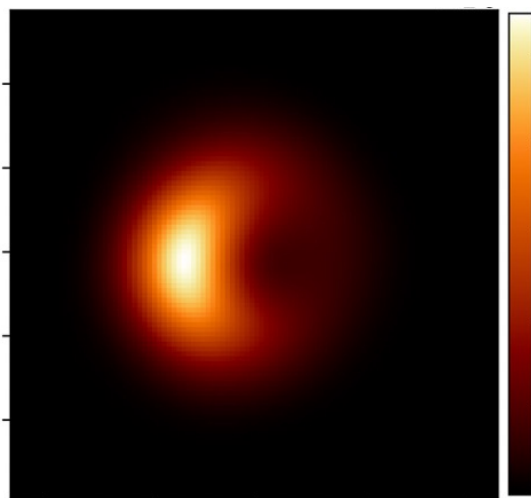
(EHTC 2021)

まとめ：直線偏光 + 円偏光 → 磁場構造を推定！

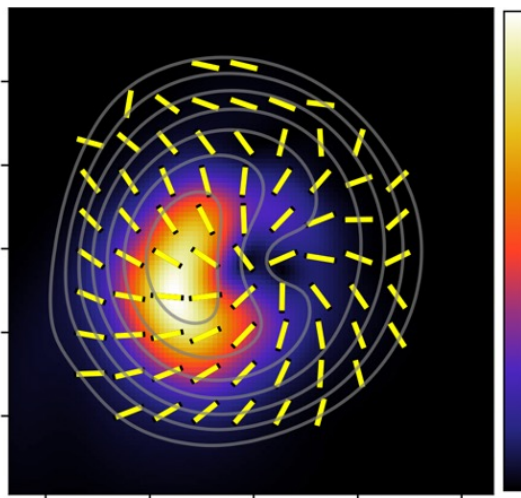
- 直線偏光 + **円偏光画像**の輻射輸送過程を計算し、
超大質量ブラックホール付近の磁場や高温プラズマが探査できることを提示！
- 既存のEHT観測とconsistentな結果
- 将来観測からモデルを制限し、活動銀河核ジェット駆動機構を解明へ

(詳細はTsunetoe et al. 2022a,b)

輻射全強度



直線偏光



円偏光

