

日本天文学会2025年度秋季年会(2025 3.17)@水戸市民会館

「かに星雲・パルサー」の“West bay”とジェット における偏光スペクトル同時解析

呉屋和保(広島大),

水野恒史(広島大) 柴田晋平, 郡司修一, 渡邊瑛里(山形大), 大野寛(東北文教大),
J. Wong(Stanford Univ.), N. Bucciantini (INAF), 他IXPE 衛星チーム

かに星雲・パルサー

かに星雲(PWN)とパルサー(PSR)はSN 1054の超新星残骸

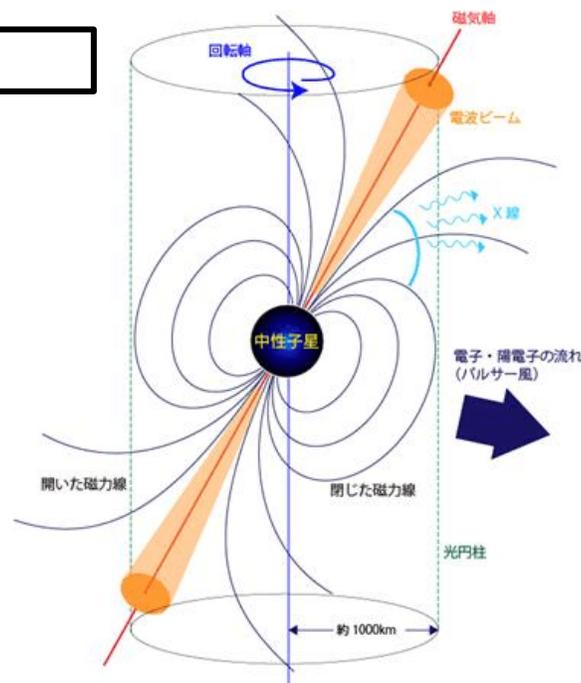
- $d=2 \text{ kpc}$, $L=10^{38} \text{ erg/s}$
- 中心に「かにパルサー」、 $P=33 \text{ ms}$
- PWNはPSRからエネルギーが供給

粒子加速・放射は磁場によって起こる

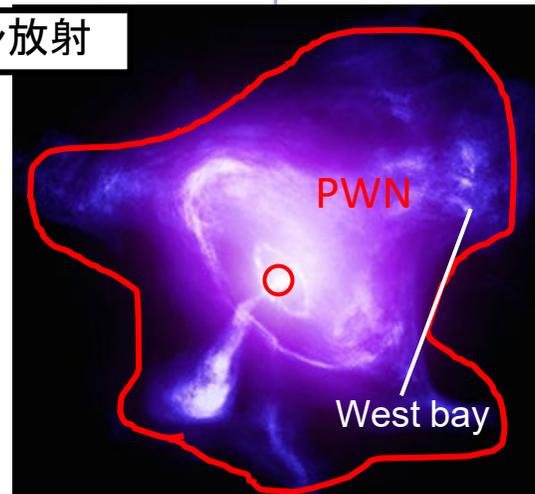
- PSR... 回転する磁場による加速、曲率放射・シンクロトロン放射
- PWN... 終端衝撃波による加速、シンクロトロン放射
- 赤外ーガンマ線まで幅広い波長帯で放射

X線はより高エネルギーの荷電粒子から放射
→X線の偏光撮像観測で星雲において加速が
起きる領域の磁場構造を理解する

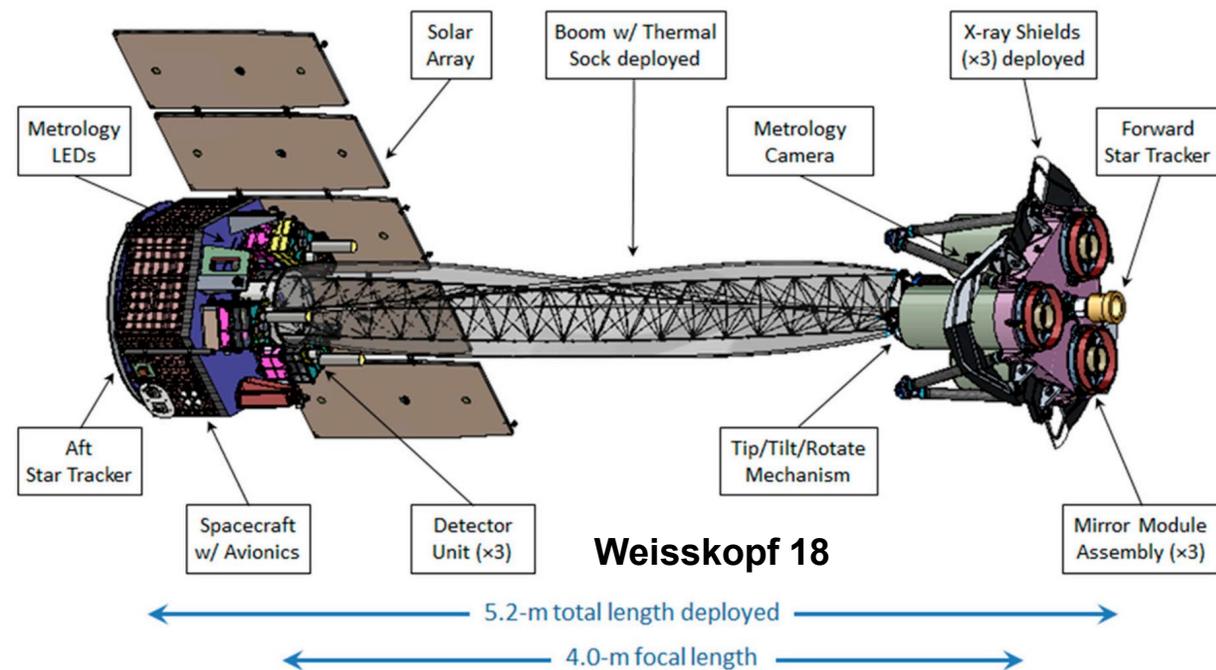
パルス放射



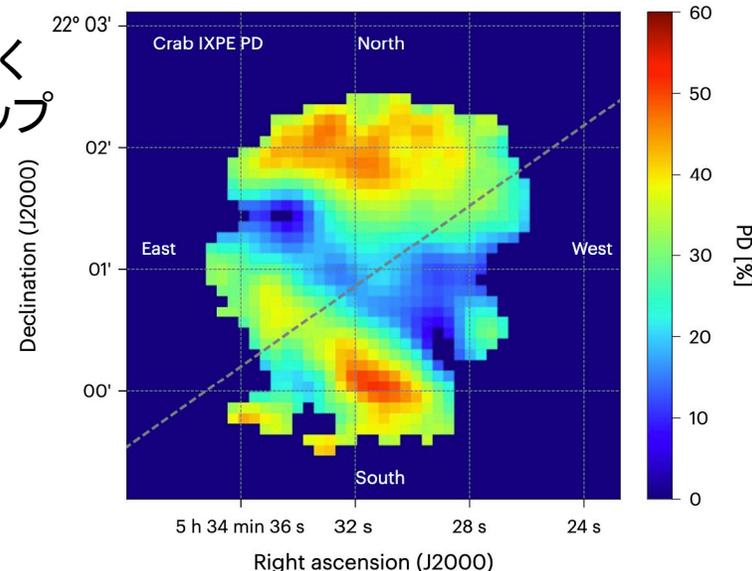
シンクロトロン放射



- 2021年12月に打ち上げ
- 世界初の軟X線帯での偏光撮像観測
 - 3 x (望遠鏡 + 検出器)
 - 観測帯域: 2 - 8 keV
 - 視野: 12.9' x 12.9'
 - 角度分解能(HPD): 26秒角
 - モジュレーションファクター:
0.15 (@2 keV)~ 0.5 (@8 keV)
- 2022年から毎年「かに星雲・パルサー」
を観測



一見強度マップと大きく異なる偏光度(PD)マップ



これまでのWest bayと南ジェット解析

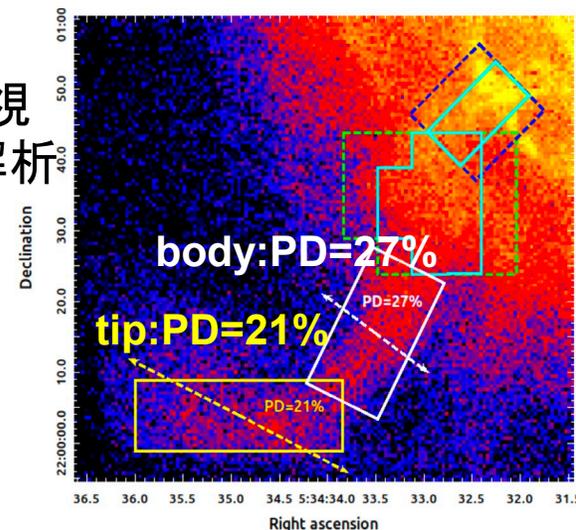
West bay について(前回の報告)

- 星雲からWest Bayにかけて6つの領域を定義し、偏光・スペクトルの変化を調査
 - (左)PDは West Bay 付近で徐々に下がりまた戻る
 - (真ん中)PAは West Bay 付近で急激に変化

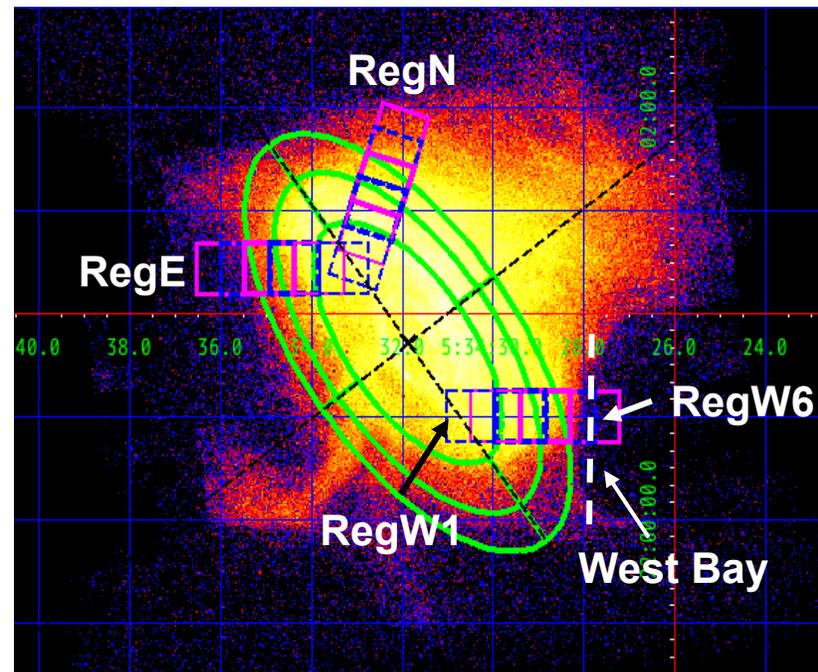
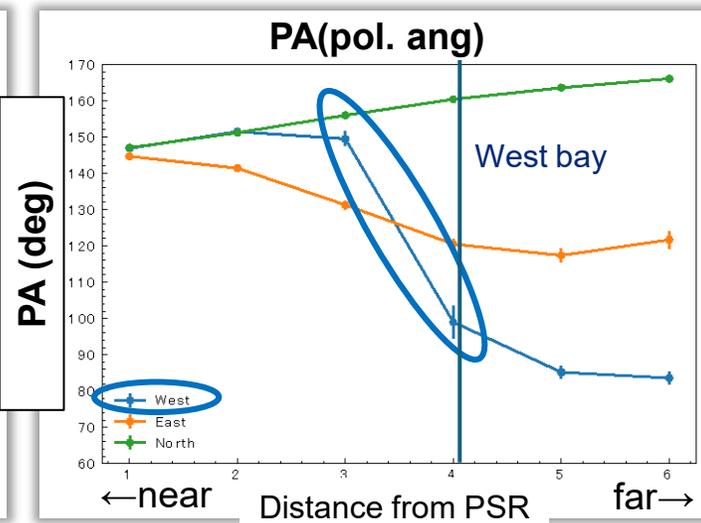
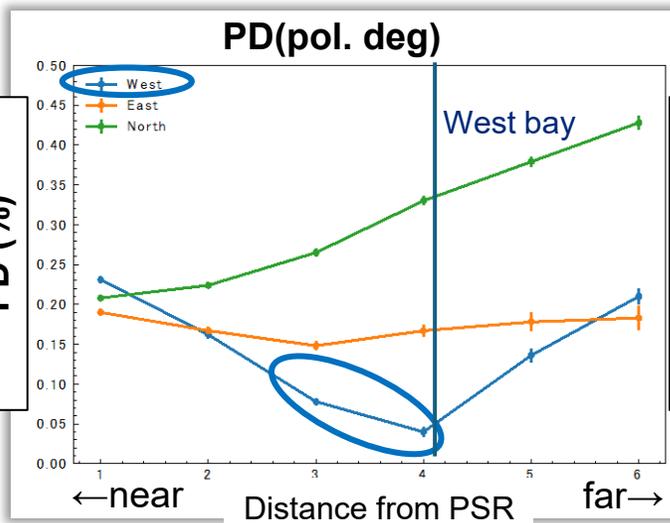
南ジェットについて(Wong+24)

- 2つの領域に分けて漏れ込みを無視できるとして偏光・スペクトル同時解析

折れ曲がる前: ジェット軸に垂直
折れ曲がり後: ジェット軸に並行



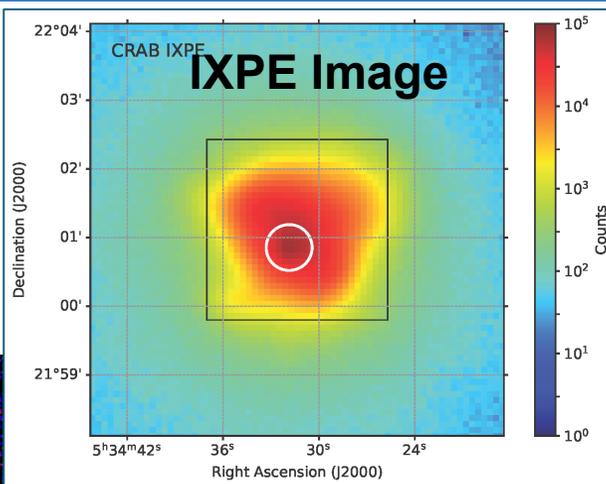
➡ West bay が偏光度・方位角(磁場構造)に影響を与えている可能性



今回の解析

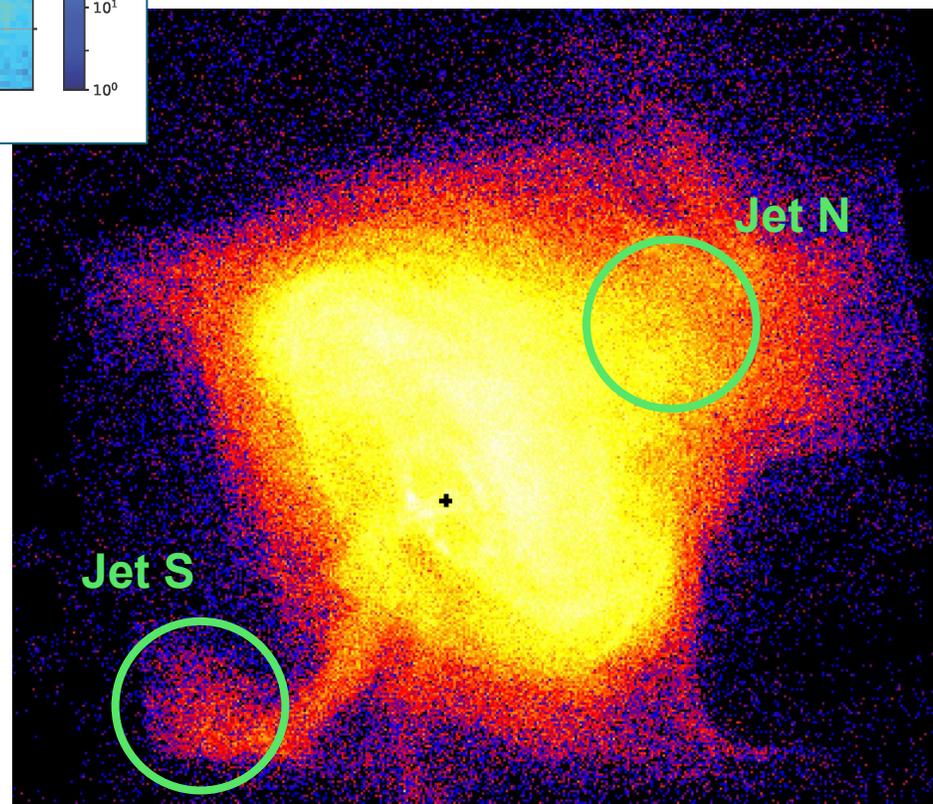
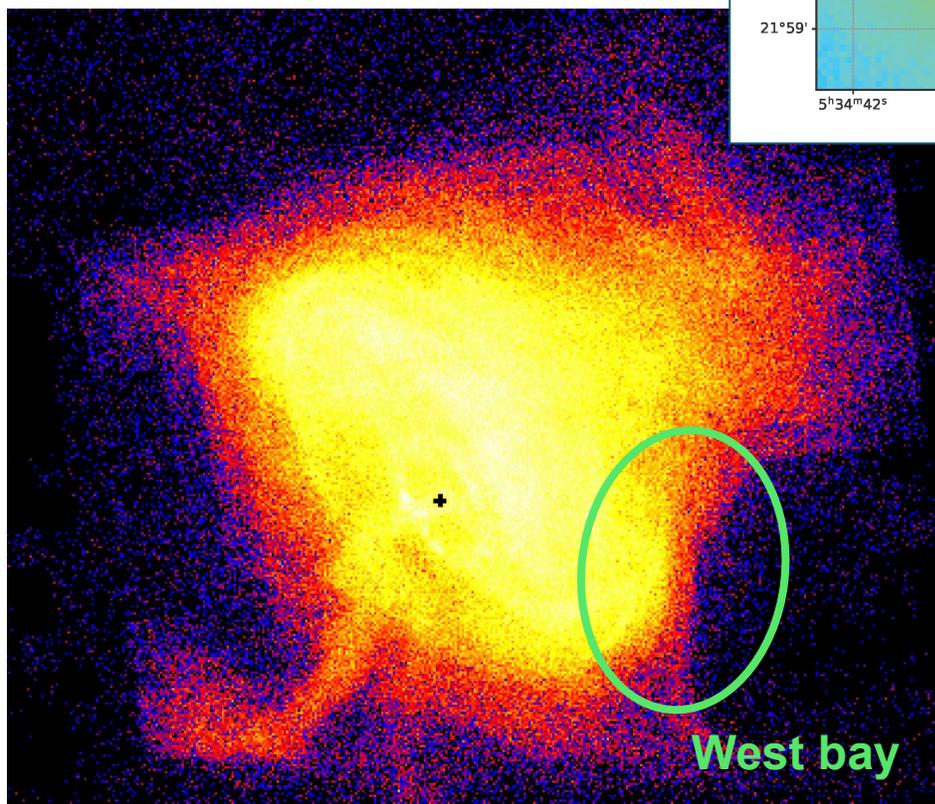
West Bay

- シミュレーション(ixpeobssim)を用いて磁場構造を評価



北/南ジェット

- トーラスからの漏れ込みを考慮し偏光・スペクトル解析



West Bay の可視観測

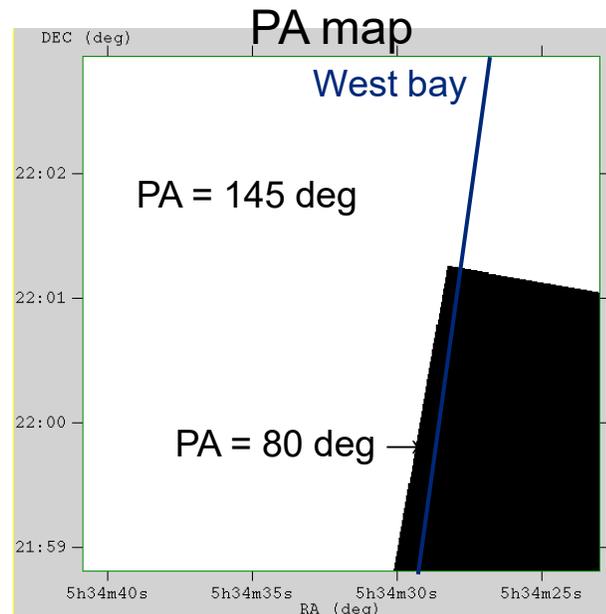
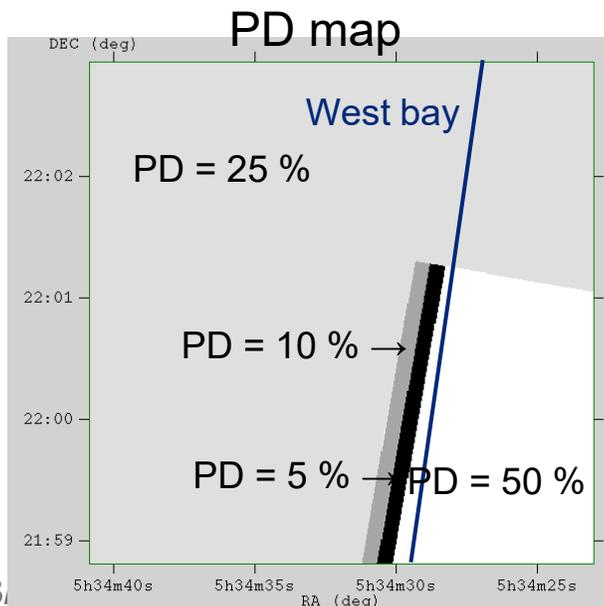
Fesen+ 92 はループ電流が East/West Bay を作っていると主張 (右上図)

- East/West Bay 付近の磁場の向きは Bay を結ぶ線に垂直

Hickson+ 90 は可視で偏光観測を行い、偏光度・磁場方向のマップを得た(右下図)

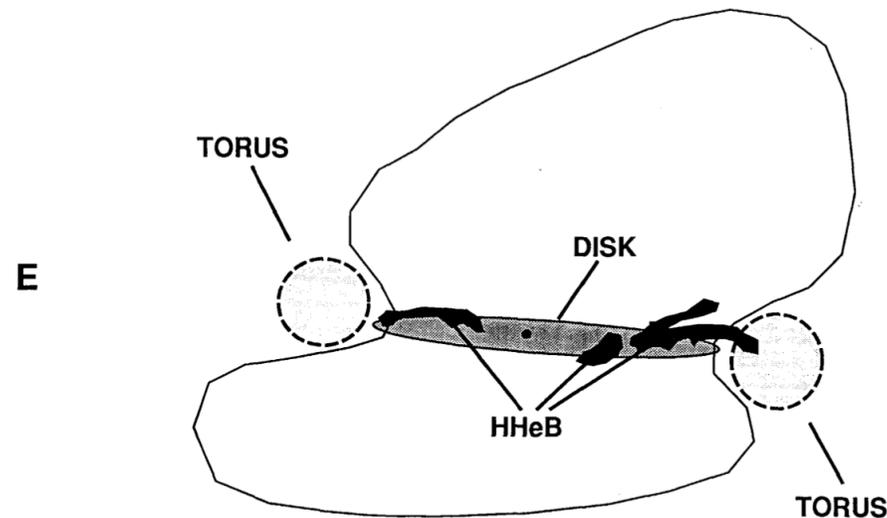
- 磁場は East/West Bay 付近で急激に変化し円形 (赤円)

これらをもとに**磁場のトイモデル(PD&PA マップ)**を作りシミュレーションを行った



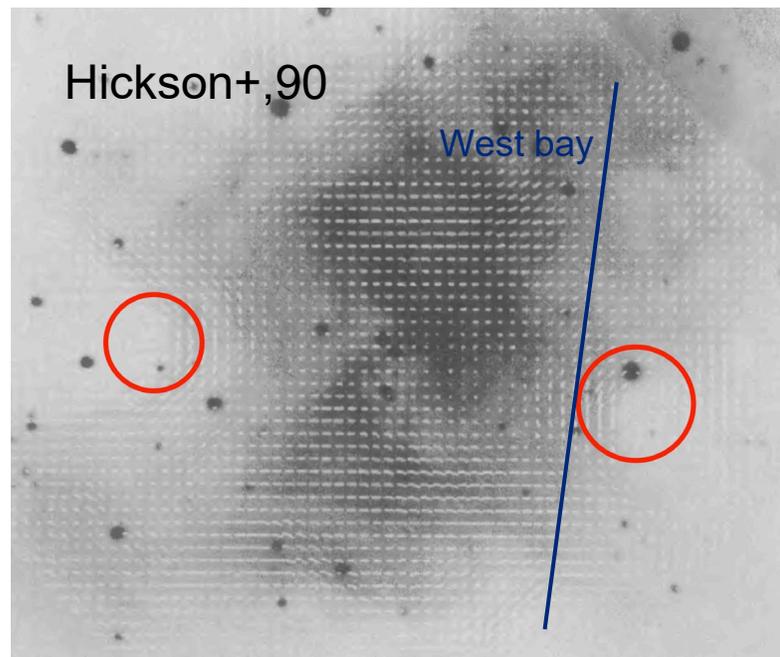
Fesen+92

N



Hickson+,90

West bay

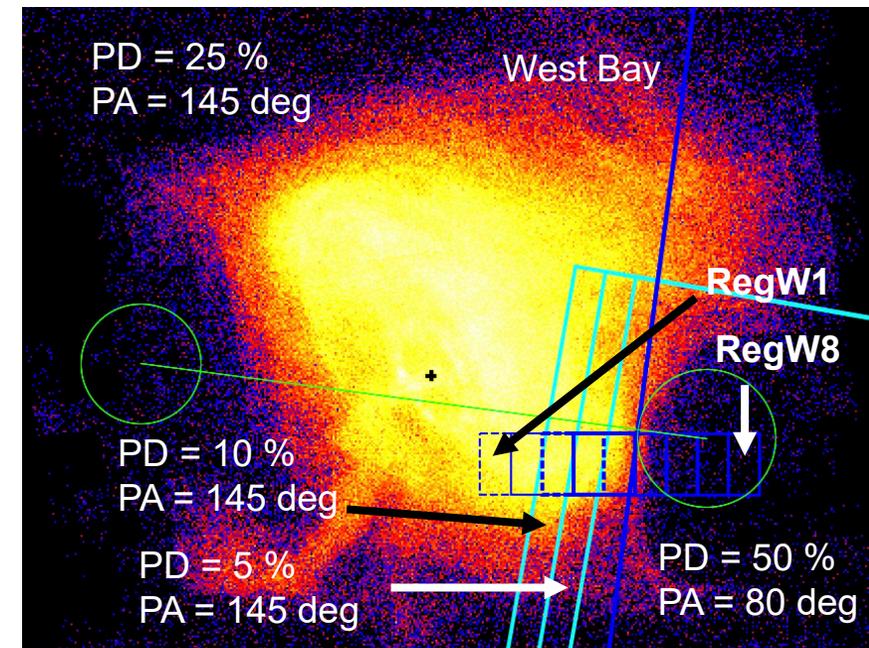
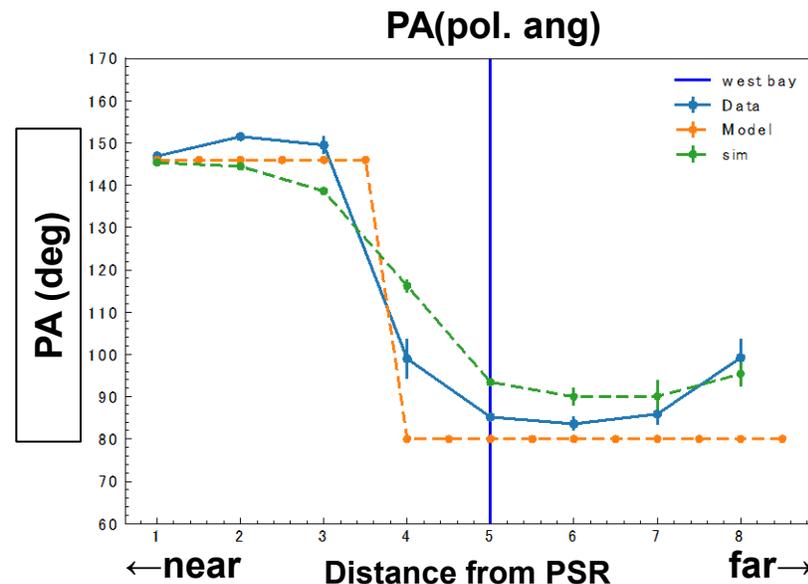
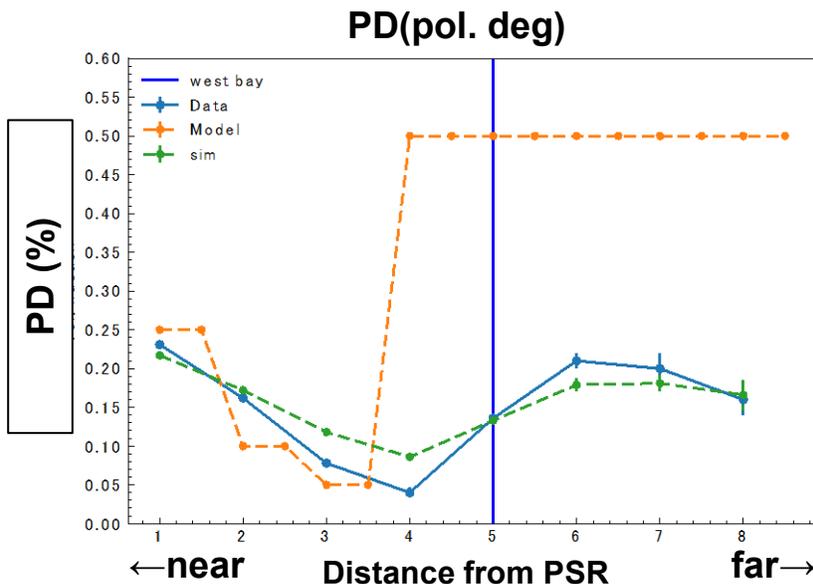


シミュレーション結果

- シミュレーションによるPD/PAグラフ(緑点線)が実データ(水色実線)と概ね一致

- Regs 2&3 ではトーラスの偏光自体が下がっている
- Reg 4 でPAが急激に変化する → PSFのためRegs3と4偏光が下がって見える
- Reg 4&5 で高い偏光度 → Regs 5と6で偏光度が上がって見える

West Bay 付近の偏光の挙動(PDの低下、PAの急激な変化)は磁気乱流でなくWest bay構造を作る特殊な環境(e.g. ループ電流、レイリーテイラー不安定性)の影響だということを示唆



北/南ジェット(Jet N/S)の漏れこみを考慮した偏光・スペクトル解析

- IXPEのPSFのため、トーラスからの漏れ込みを考慮した解析
- トーラスの形状とフラックスをもとにバックグラウンドを定義
 - ・ 北側はトーラスからの漏れ込みが強いため、面積を半分
 - ・ 南側は領域の直径を角度分解能と同程度

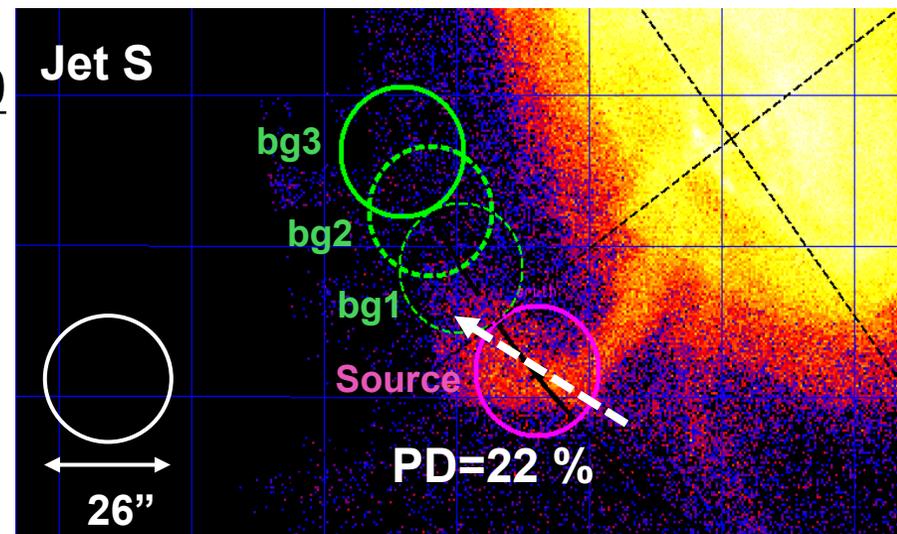
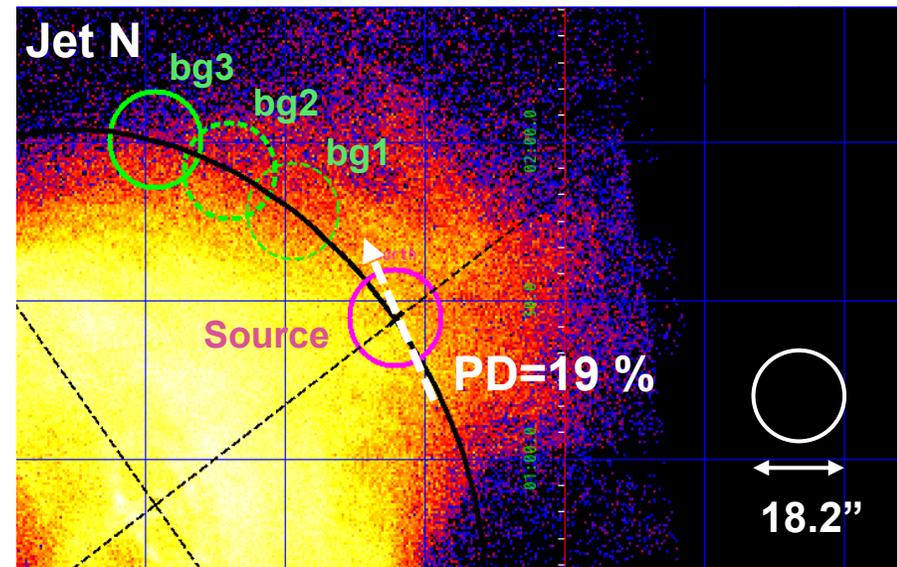


- 北側：初めて有意な偏光を確認。磁場はジェット軸に垂直(126 deg)
- 南側：磁場はジェットの折れ曲がった先に沿う

➡ 北側ジェットについて、PA(~130 deg)がトーラスの北側(~150 deg)と異なり、それによって偏光度が下がっている

BG2でのベストフィット値

| | Nh(10^{22} cm $^{-2}$) | PD(%) | PA(deg) | Photon Index | Flux(ergs/cm 2 /s) |
|-------|----------------------------|------------|-------------|-----------------|-----------------------|
| Jet N | 0.3 (fix) | 19 ± 2 | 130 ± 2 | 2.77 ± 0.02 | 7.5×10^{-11} |
| Jet S | 0.3 (fix) | 22 ± 3 | 169 ± 4 | 2.75 ± 0.03 | 2.9×10^{-11} |



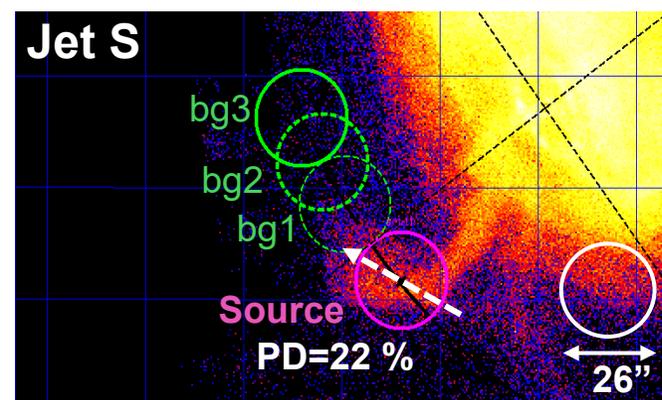
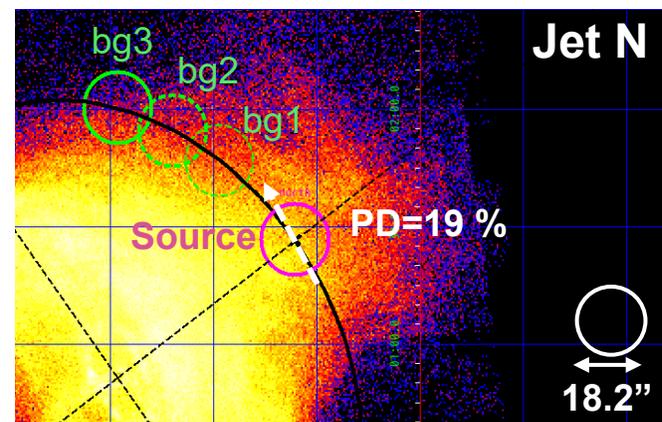
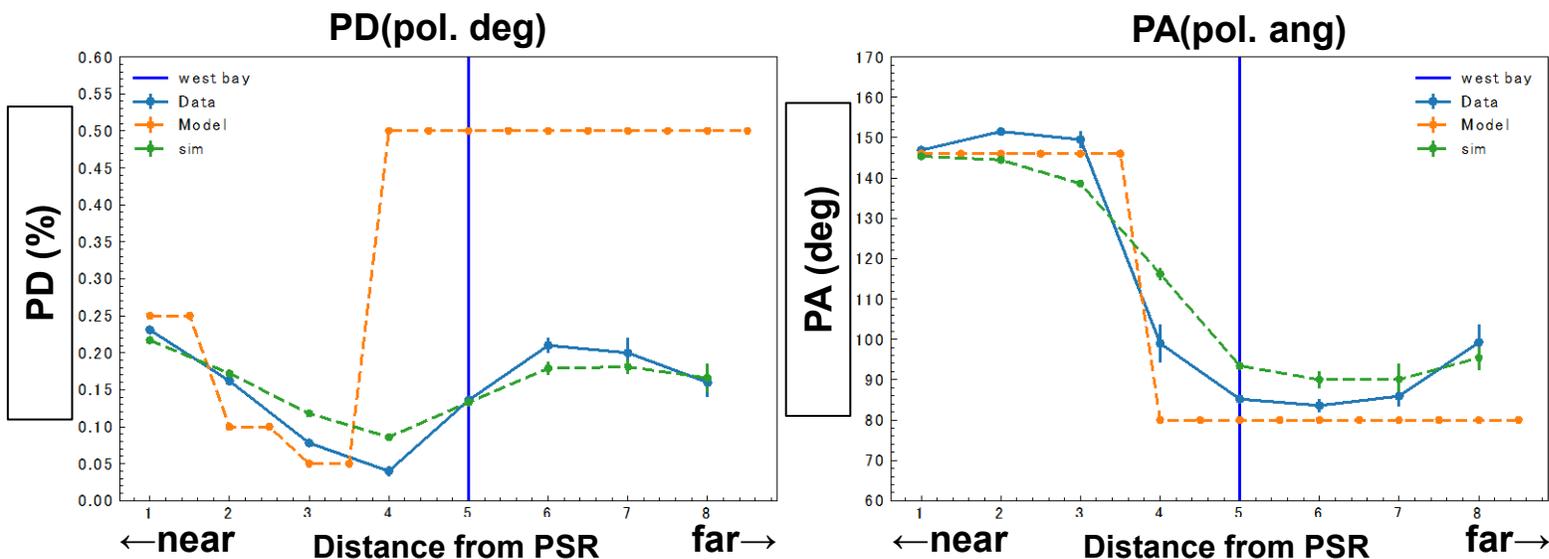
まとめ

シミュレーションによるWest Bay付近の磁場の評価

- 過去の可視観測をもとに磁場のトイモデルを作り、シミュレーションとIXPEの観測データと比較
 - PD/PAの変化は観測データとよく一致
→ PAが急激に変化し、PDが高くなることを示唆
 - 観測されたPD/PAは特殊な環境(e.g.ループ電流)によるものだと考えられる

南北ジェットの詳細な解析

- トーラスからの漏れ込みを評価して解析
 - どちらも磁場はジェット軸に垂直
 - 南側ジェットは、折れ曲がった先では磁場がジェット軸に並行になる



これまでのWest bayと南ジェット解析

West bay について(前回の報告)

- 星雲からWest Bayにかけて6つの領域を定義し、偏光・スペクトルの変化を調査
 - (左)PDは West Bay 付近で徐々に下がりまた戻る
 - (真ん中)PAは West Bay 付近で急激に変化

West bay 付近でPAが大きく変わり、IXPEのPSFのためトラス内側とWest bayの光子が見えて Regs3と4で偏光が下がっている

南ジェットについて(Wong+24)

- 2つの領域に分けて漏れ込みを無視できるとして偏光・スペクトル同時解析

磁場の向き:

- body : ジェット軸に**垂直**
- tip : ジェット軸に**並行**

折れ曲がる前: ジェット軸に**垂直**
折れ曲がり後: ジェット軸に**並行**

