

日本天文学会2025年度秋季年会(2025 9.11)@海峡メッセ下関

軟X線偏光撮像観測衛星IXPEの観測データ及び シミュレーションを用いた「かに星雲・パルサー」 のWest Bayの磁場評価

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

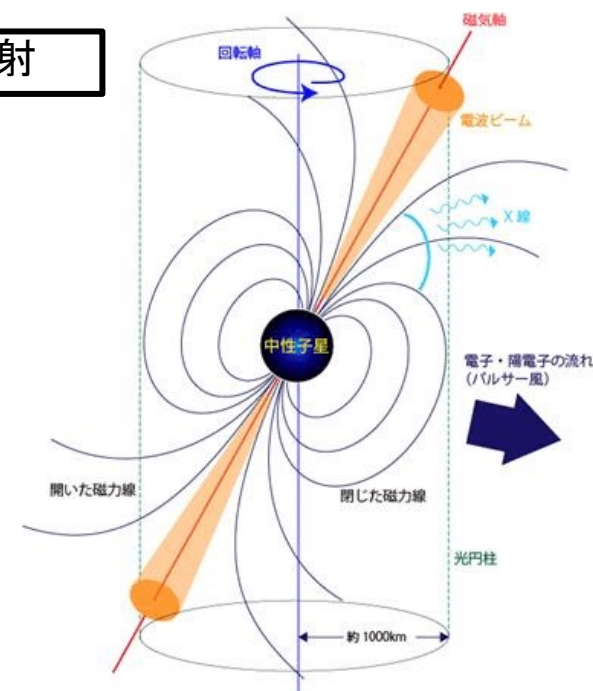
- $d=2$ kpc, $L=10^{38}$ erg/s
- 中心に「かにパルサー」、 $P=33$ ms
- PWNはPSRからエネルギーが供給

粒子加速・放射は磁場によって起こる

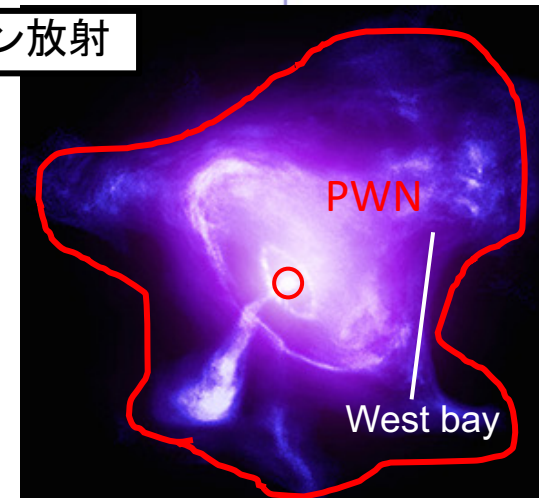
- PSR... 回転する磁場による加速、曲率放射・シンクロトン放射
- PWN... 終端衝撃波による加速、シンクロトン放射
- 電波ーガンマ線まで幅広い波長帯で放射

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

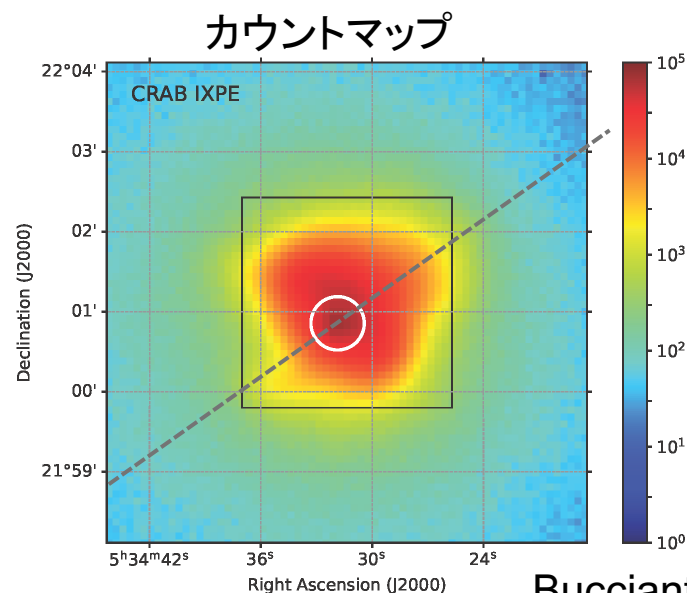
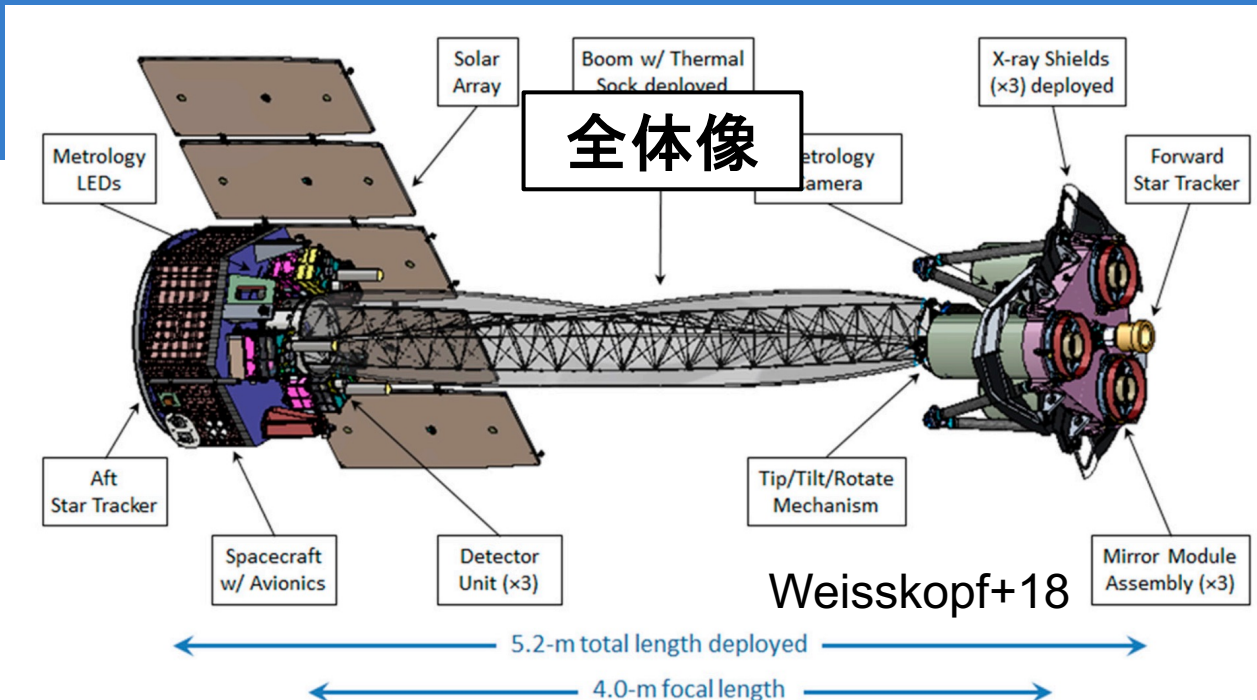


シンクロトン放射

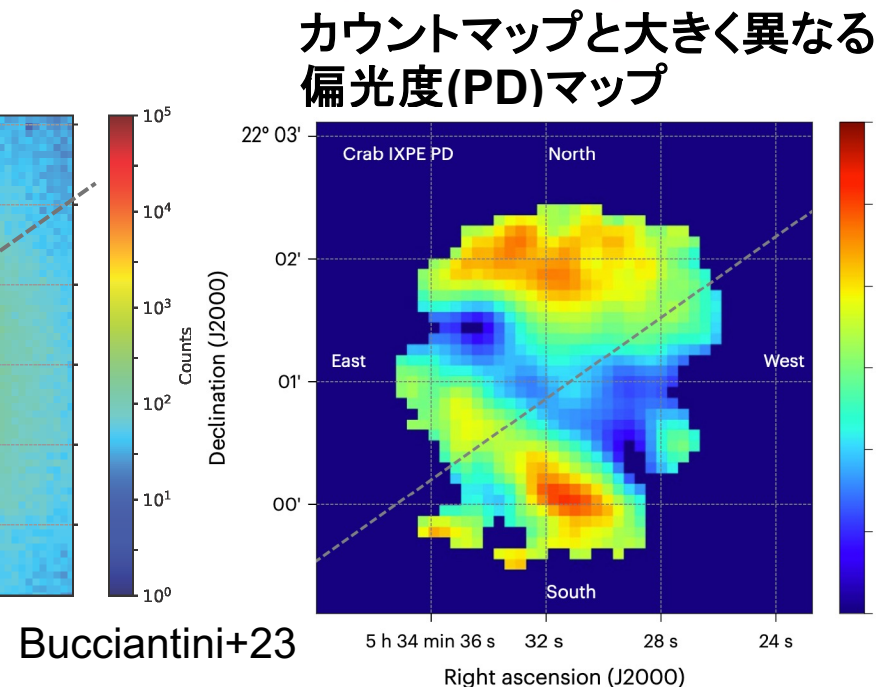


IXPE衛星

- 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



呉屋 和保



Bucciantini+23

これまでのWest bayの解析

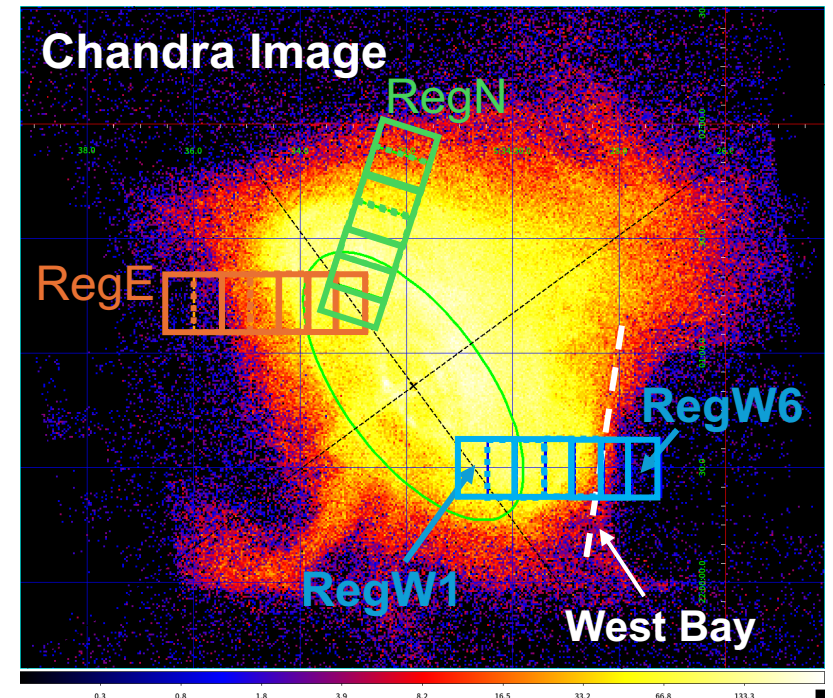
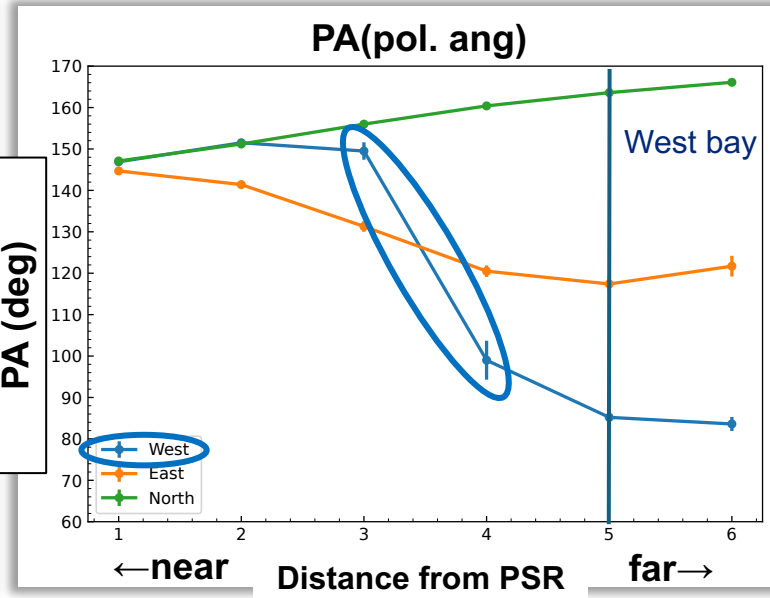
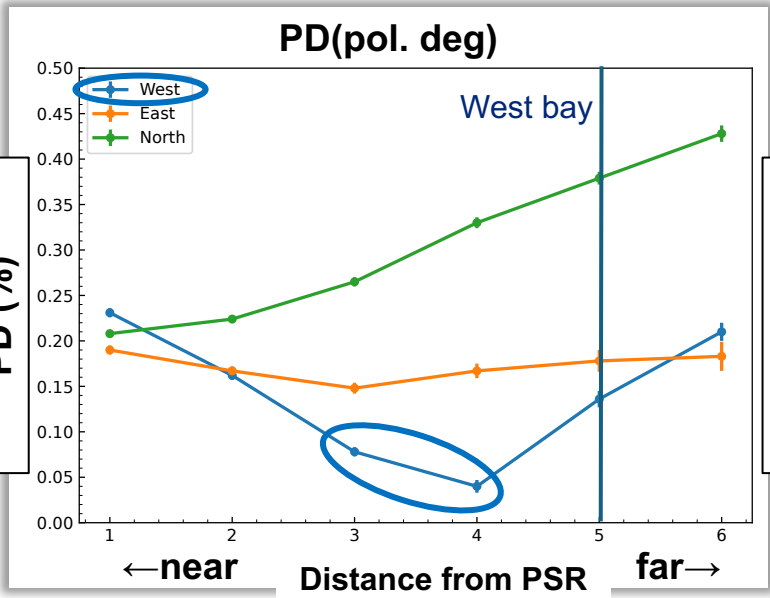
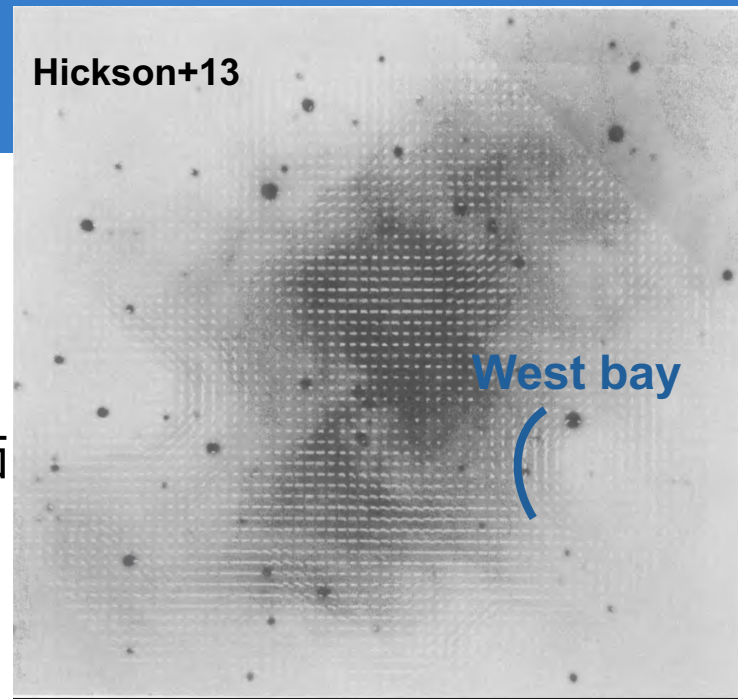
West bay について(前回の報告)

- 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
- (右)PAは West Bay 付近で急激に変化

可視偏光をもとにした簡易モデルで磁場評価

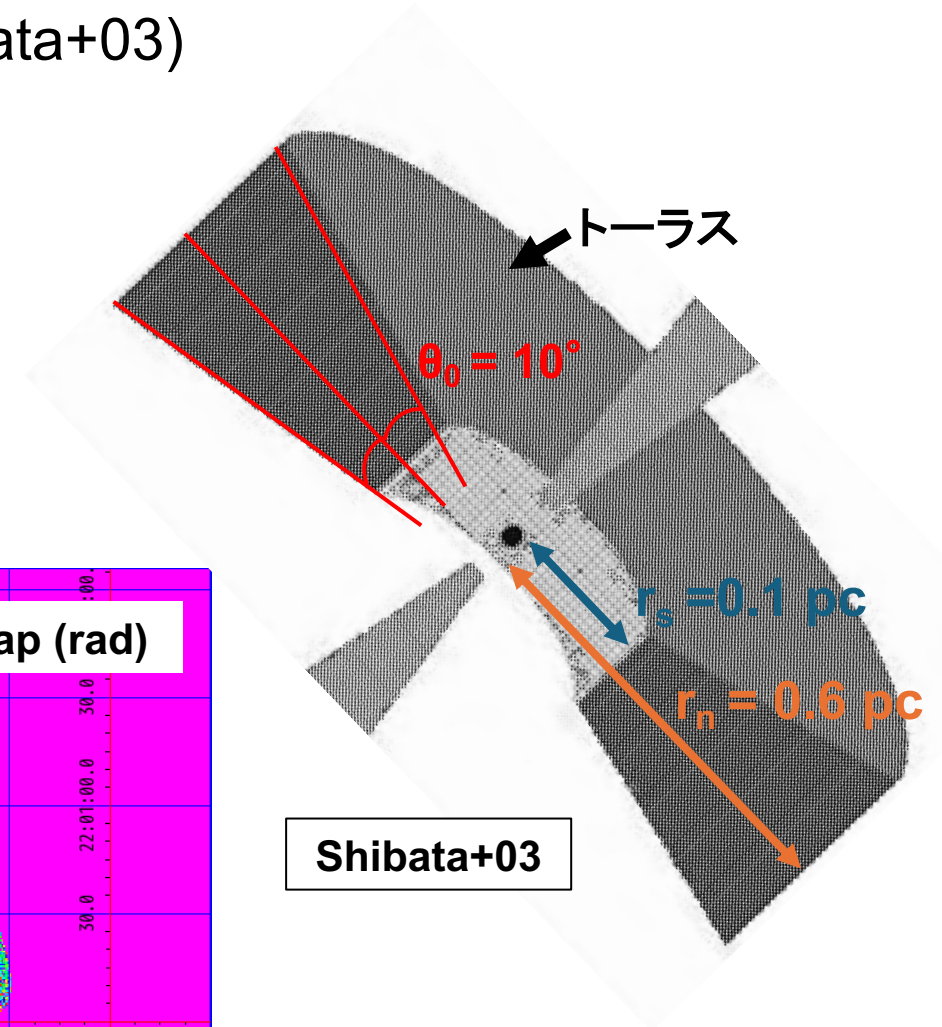
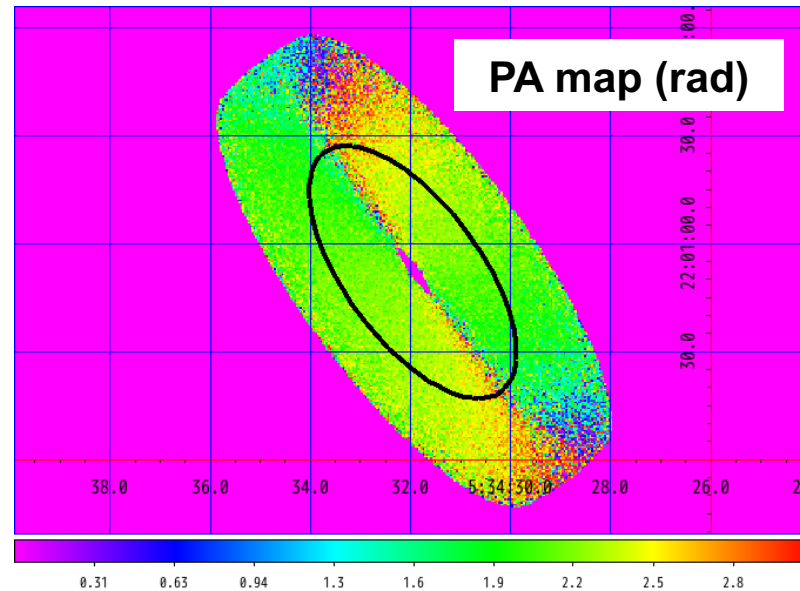
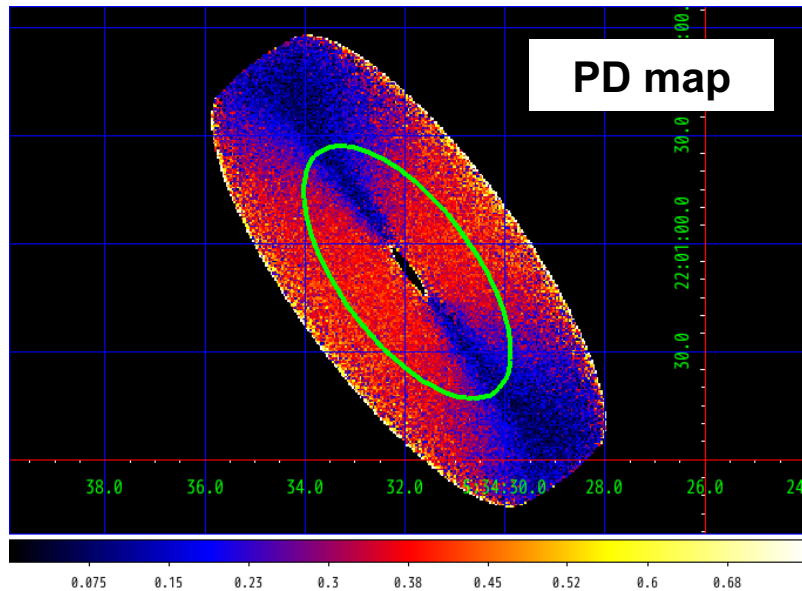
⇒ West bay が磁場構造(偏光度・偏光方位角)に影響を与えている可能性



出発したモデル

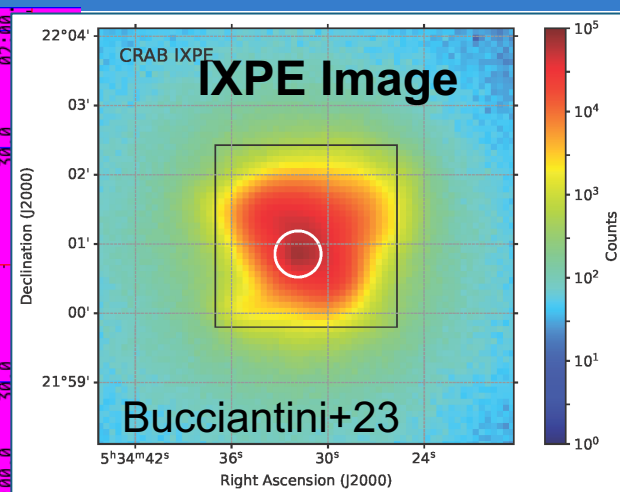
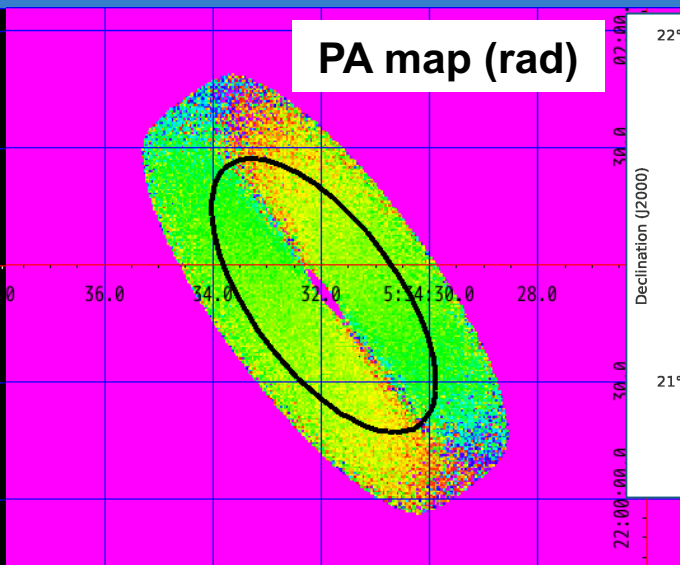
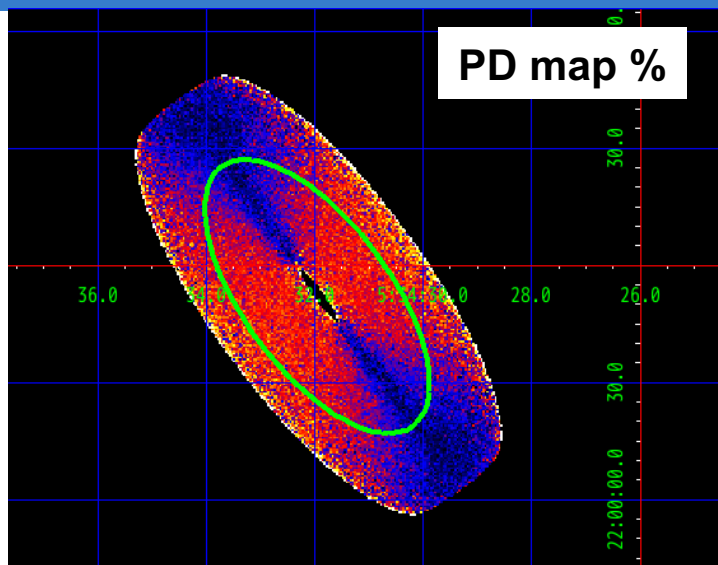
出発したモデルはX線トーラスの幾何学的モデル(Shibata+03)

- PWN は単純なequatorial wedge モデル
- $r_s = 0.1 \text{ pc}$, $r_n = 0.6 \text{ pc}$, $\theta_0 = \pm 10^\circ$
 - 流速 $v = 0.2c$ (c: 光速)
 - トーラス軸の向き: 126.3° 、見込み角: 63.0°
- 動径方向の磁場分布はKCモデル ($\sigma = 0.003$)
- トロイダル磁場とランダム磁場を仮定 (ランダム度 $b = 0.6$)



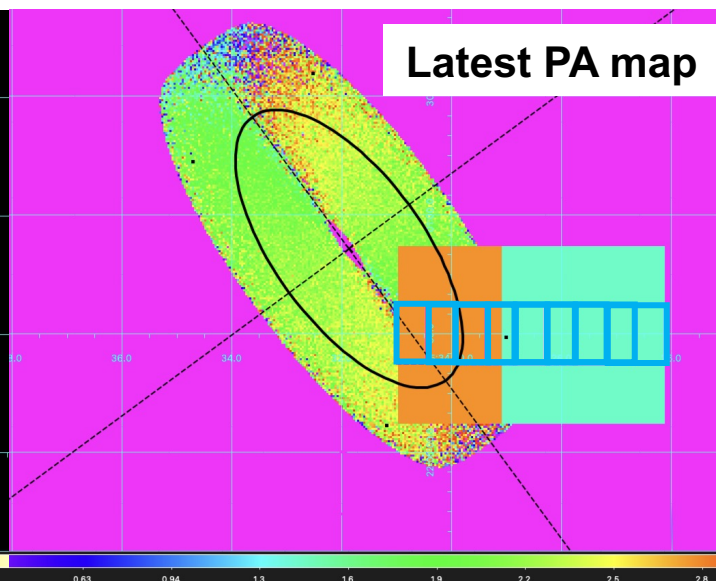
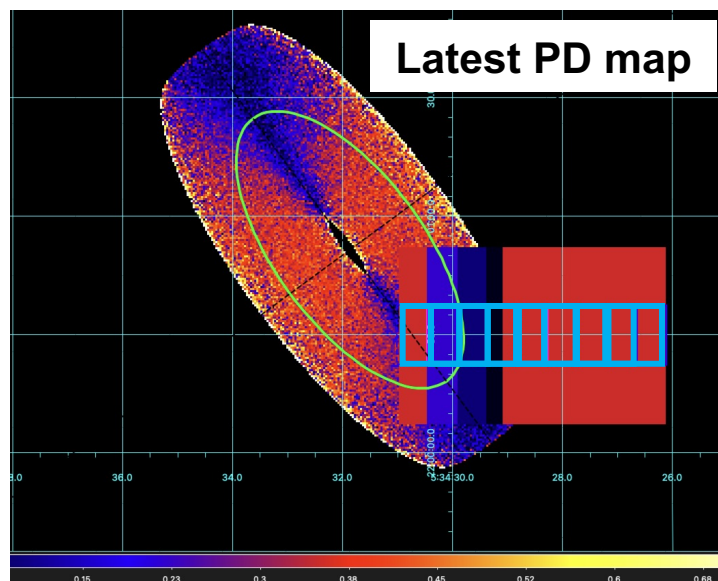
今回構築した偏光モデル

出発したモデル ->
(X線トーラス構造を持つ
幾何学的な偏光モデル)



IXPEの角度分解能による
漏れ込みを評価
->次ページ

bayの部分に外的構造
を入れた偏光モデル->

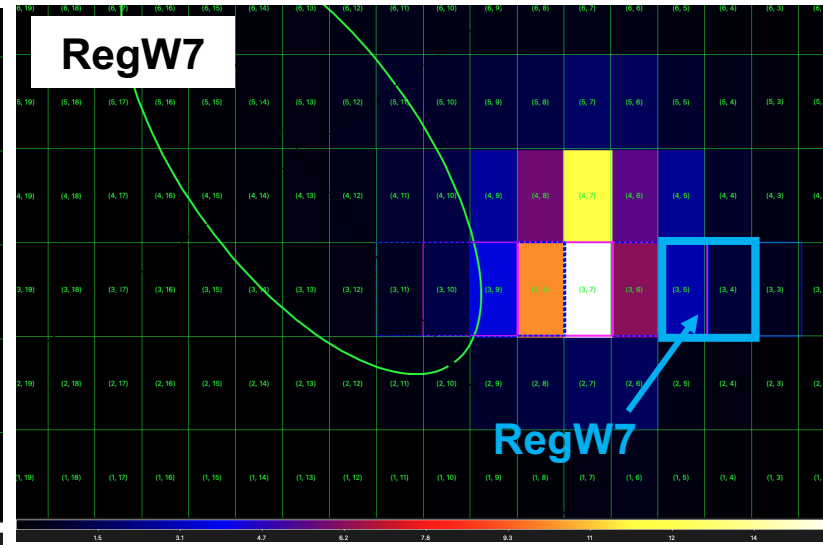
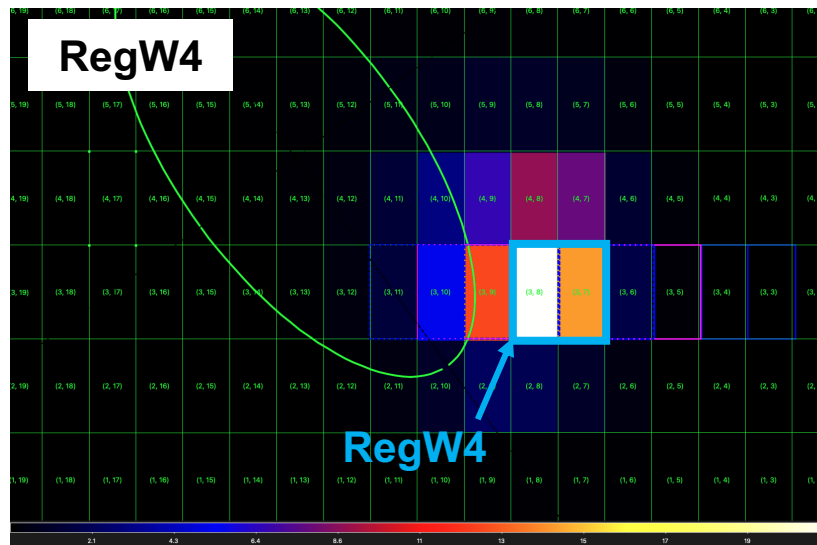
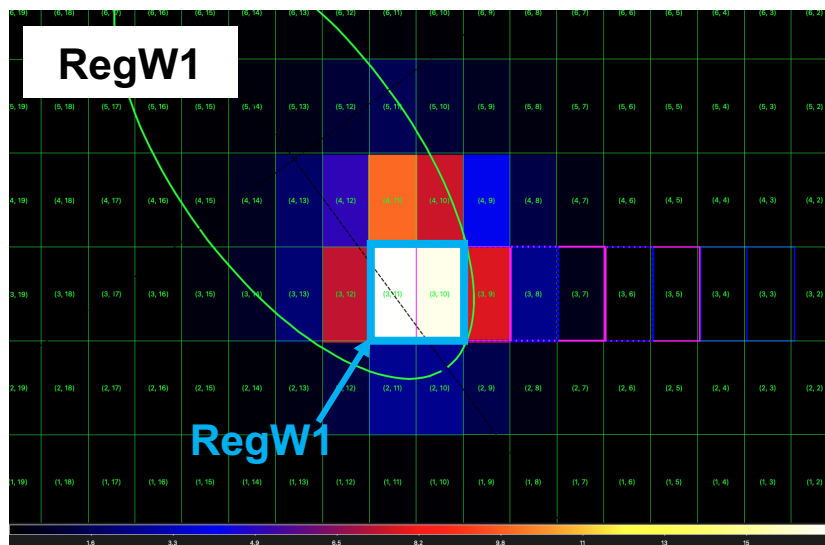
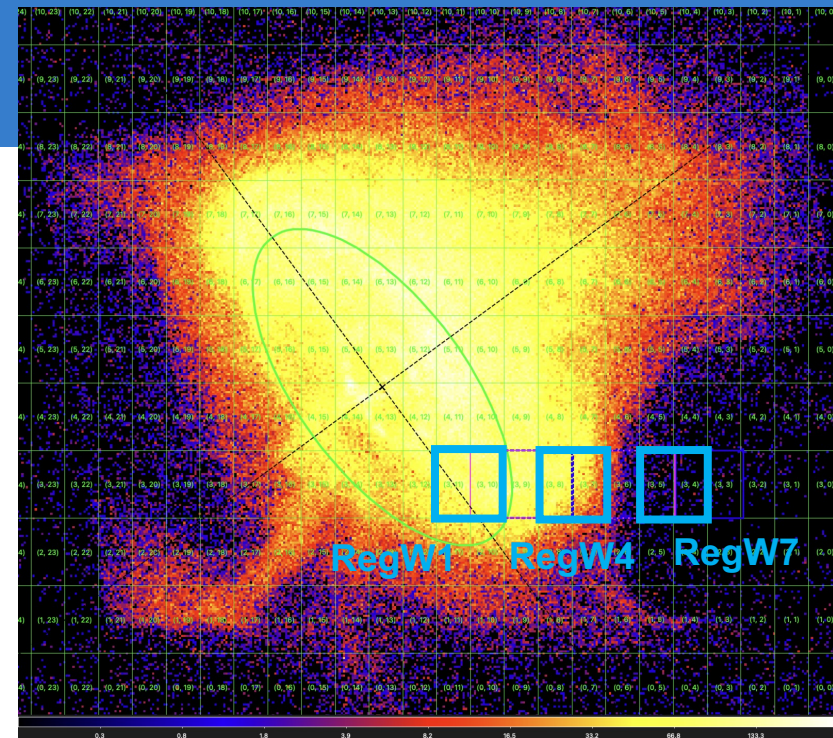


モデルの構築: ①漏れこみ評価

角度分解能によるreg1-8への漏れこみ評価のために、かに星雲を覆うように1170ピクセル(緑グリッド)を定義した

- 各ピクセルは7.5" x 15"
- 各ピクセルに対して、Chandra画像を用いて観測のシミュレーション
- Reg1-8について、光子の到来方向分布(下図)

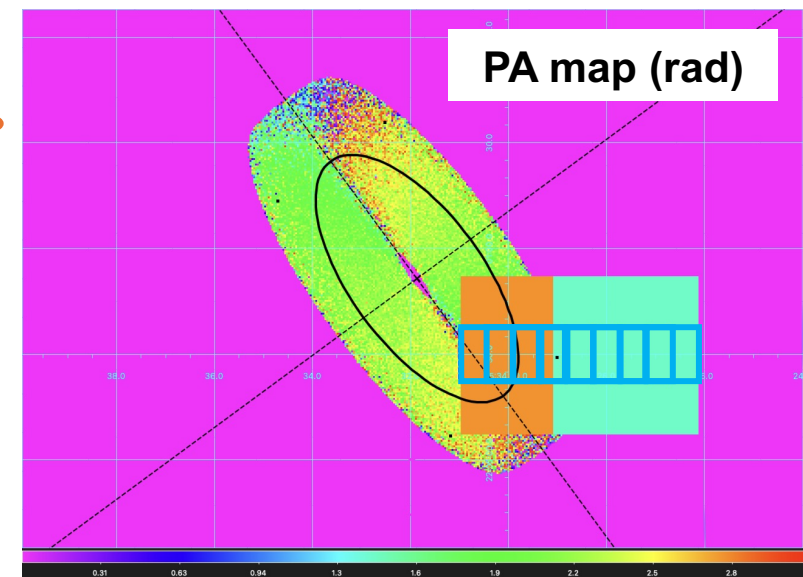
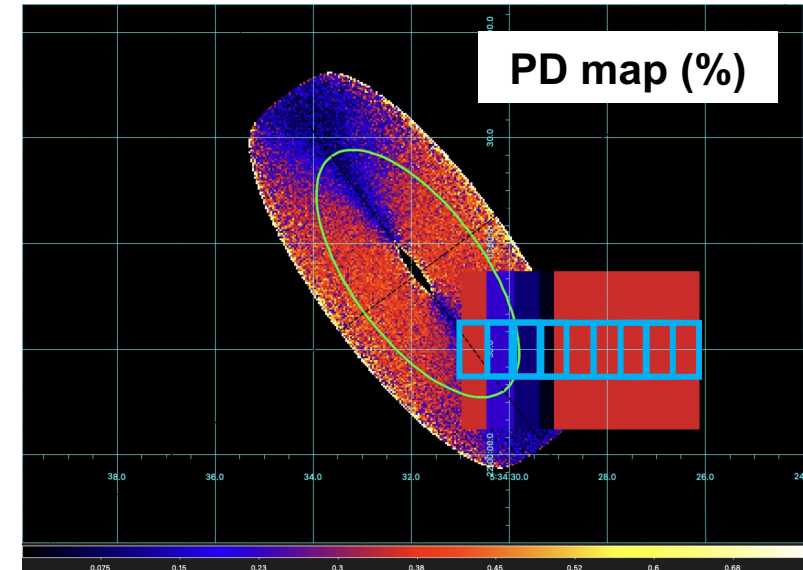
- 偏光度はreg1-4にかけて徐々に下がる
- 偏光方位角はreg4ですでに変わっている



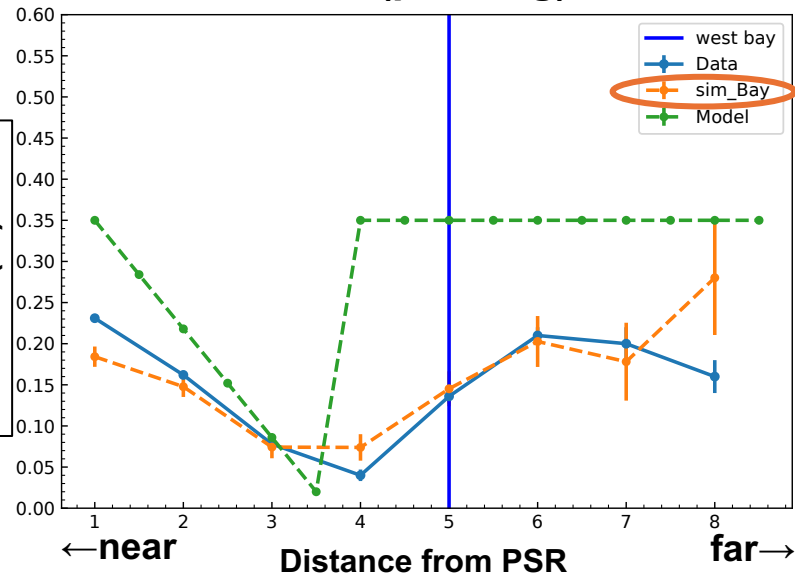
モデルの構築: ②bay構造を追加

前項でわかったPD/PAの遷移をもとに構築した**モデル(下図緑点線)**はPD/PAの変化をよく再現

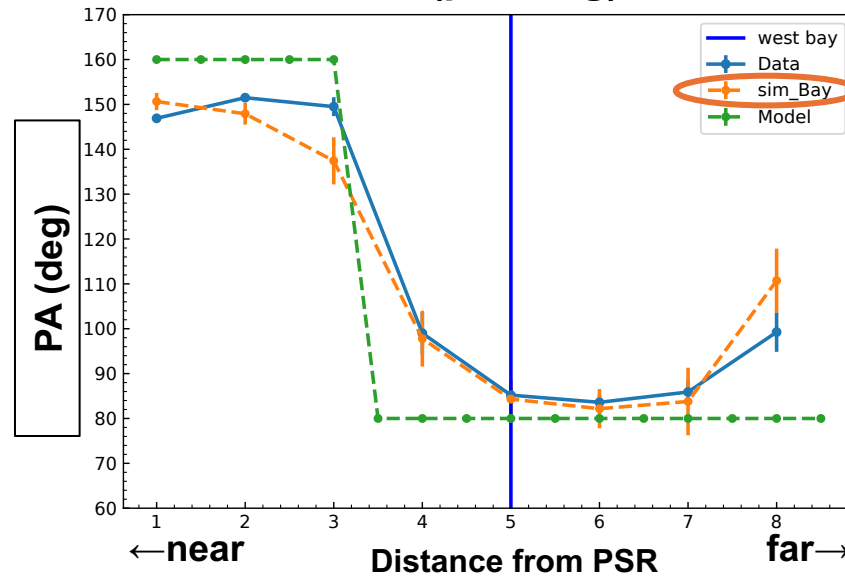
- PD/PAの変化は**シミュレーション結果(橙点線)**と**観測データ(青実線)**でよく合っている
 - PDはbayに向かって35%から2%まで直線的に下がる
 - PAはreg3&4で160度->80度に急激に変化
 - PAはreg4以降**bayの向きになる**



PD(pol. deg)



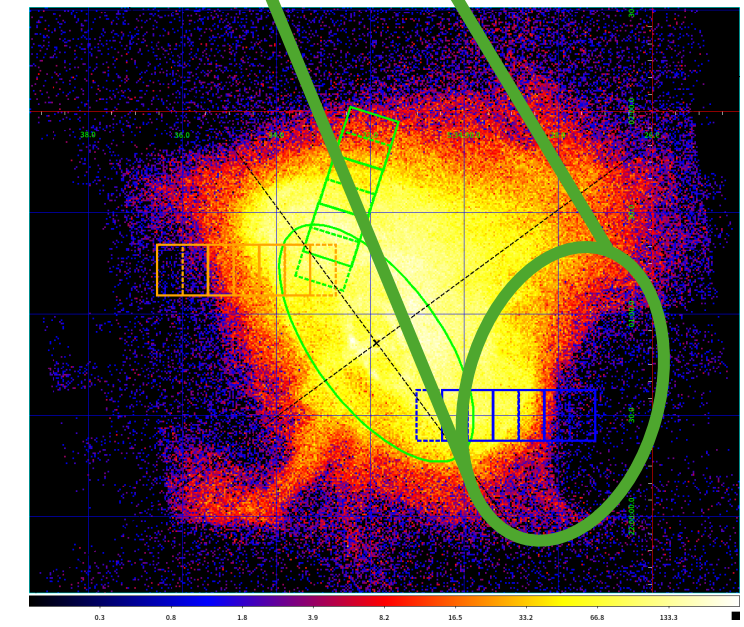
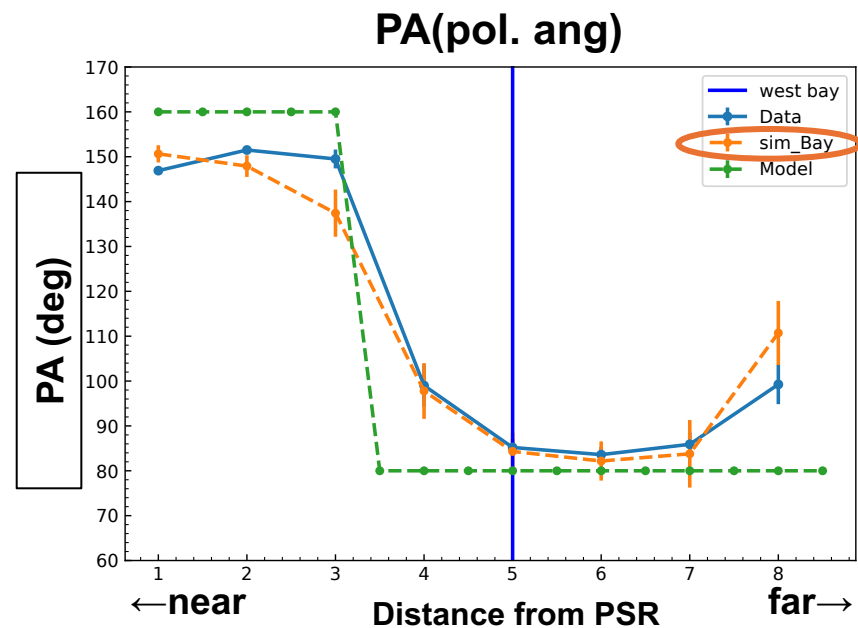
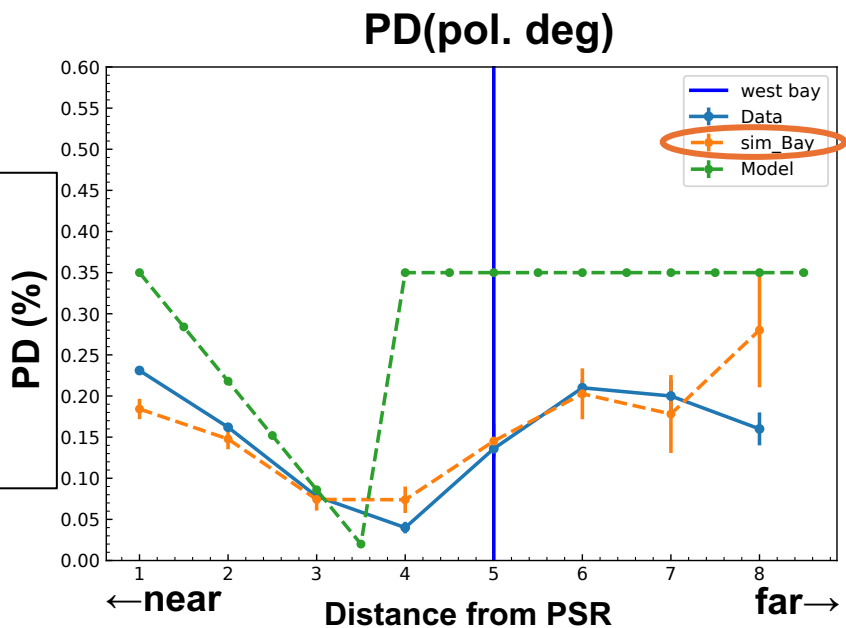
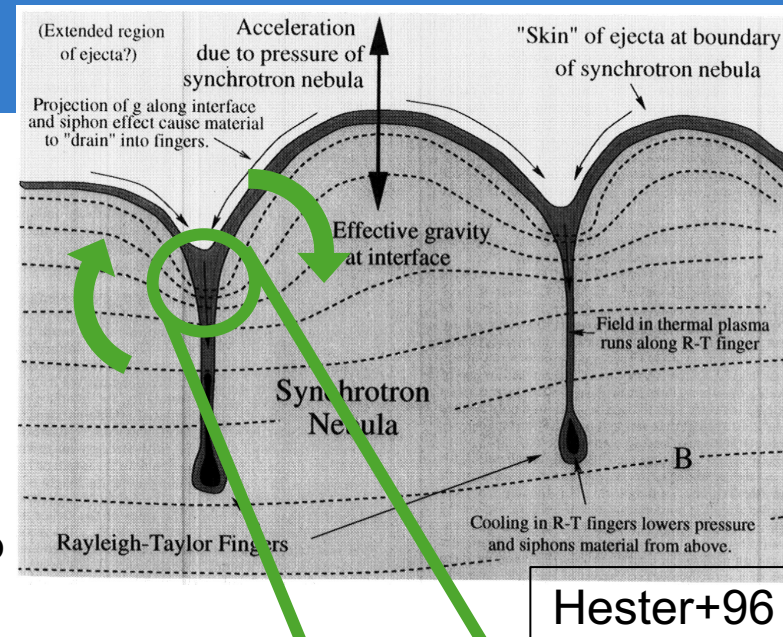
PA(pol. ang)



まとめ

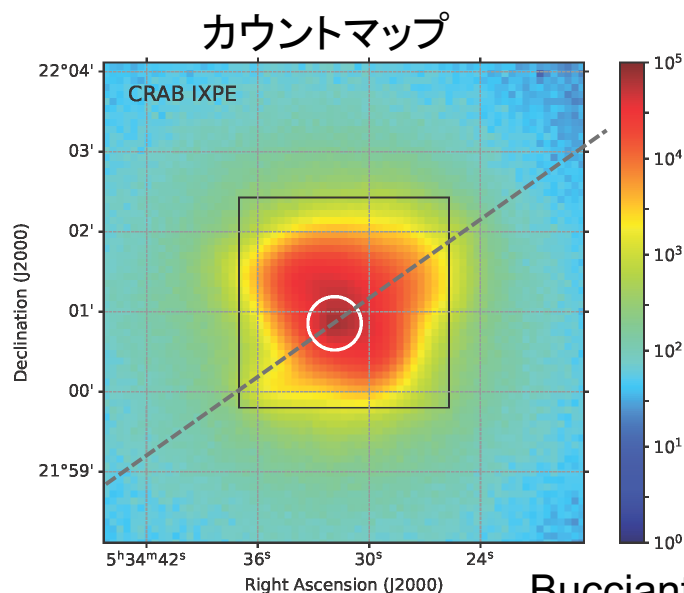
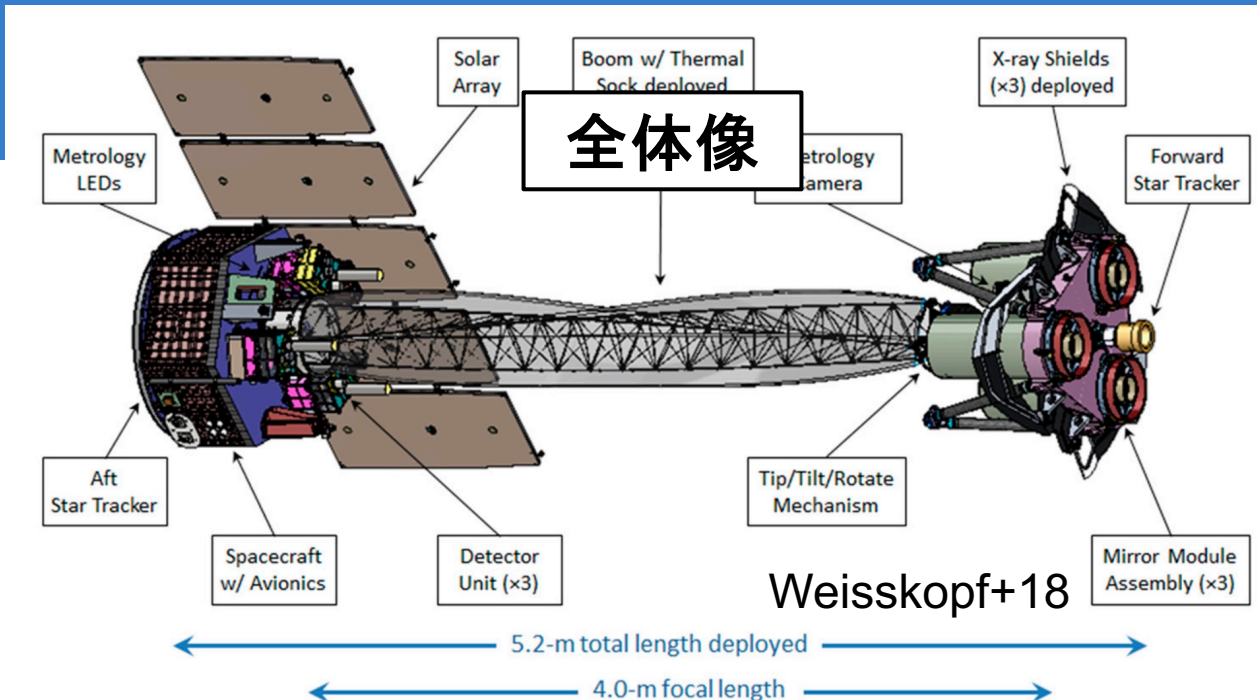
シミュレーションによるWest bay付近の磁場評価

- Reg1- 8までの領域についてヒートマップを作成
- ヒートマップをもとに観測データと再現する偏光モデルを構築
 - PDは直線的に35%から2%まで下がる
 - PAは160度から80度に急激に変化し、変化後の磁場はbayの向きに沿う
 - RT不安定性だと磁場方向がbayの境界面に沿っていることを説明できる

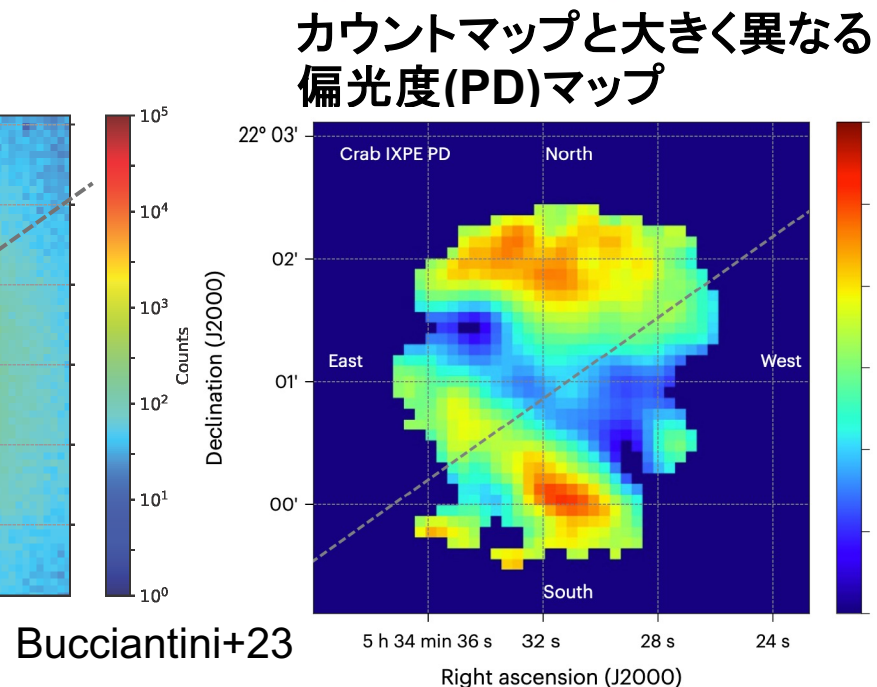


IXPE衛星

- 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



呉屋 和保



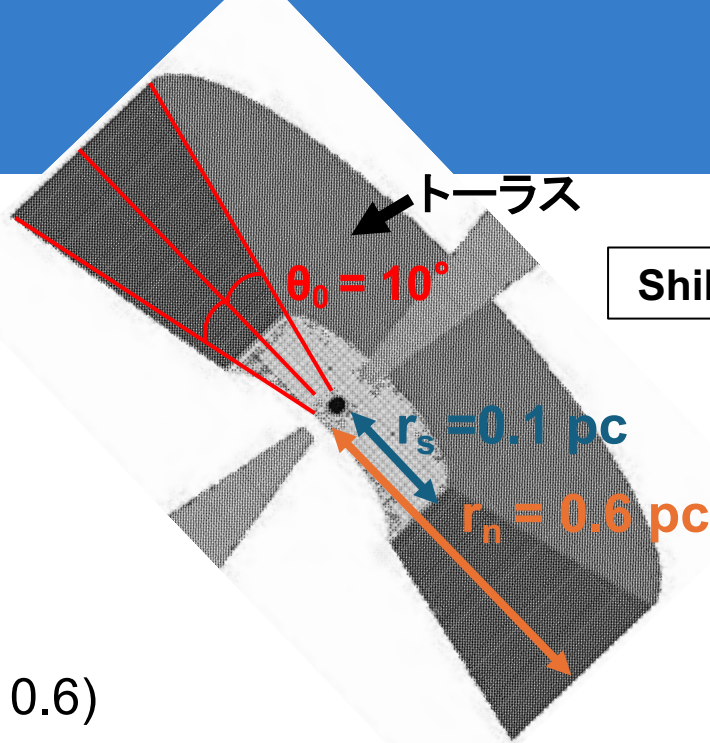
Bucciantini+23

補足

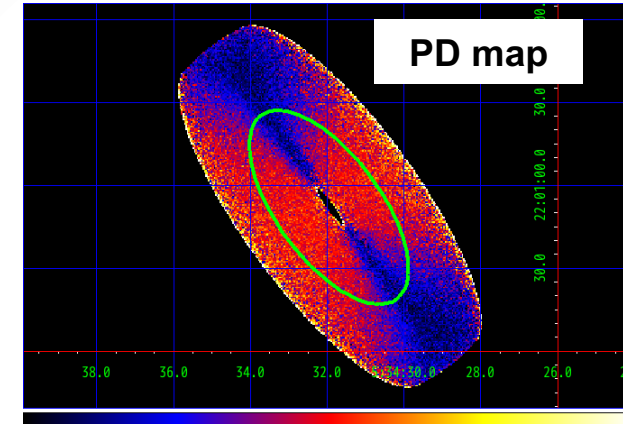
出発したモデル

出発したモデルはX線トーラスの幾何学的モデル

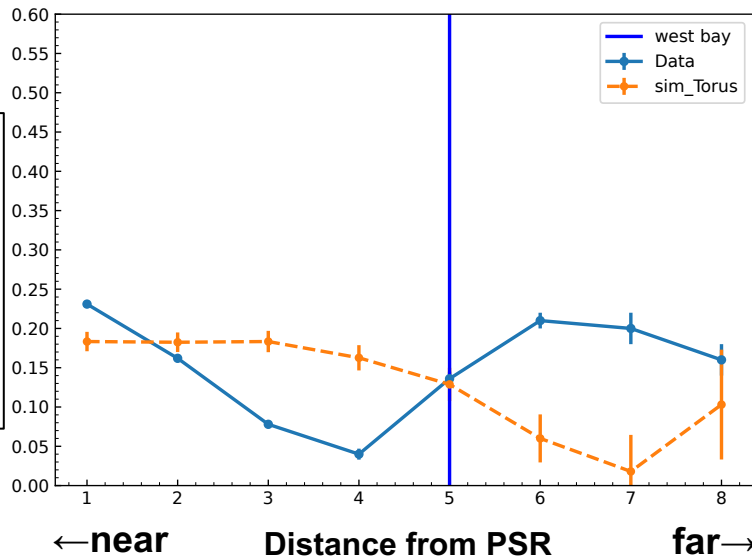
- PWN は単純なequatorial wedge モデル
- $r_s = 0.1 \text{ pc}$, $r_n = 0.6 \text{ pc}$, $\theta_0 = \pm 10^\circ$
 - 流速 $v = 0.2c$ (c: 光速)
 - トーラス軸の向き: 126.3° 、見込み角: 63.0°
- 動径方向の磁場分布はKCモデル ($\sigma = 0.003$)
- トロイダル磁場とランダム磁場を仮定 (ランダム度 $b = 0.6$)



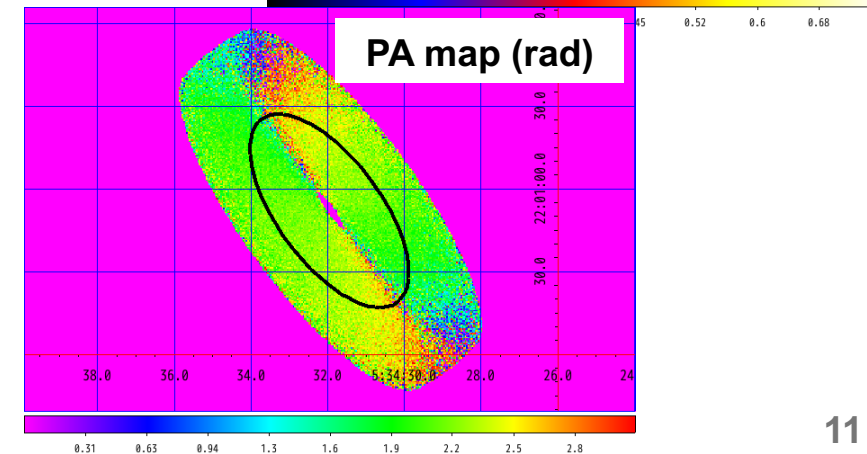
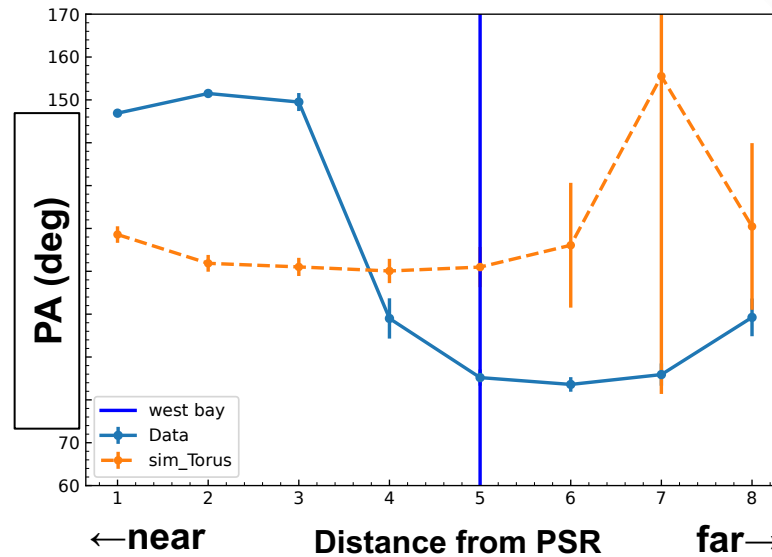
Shibata+03



PD(pol. deg)



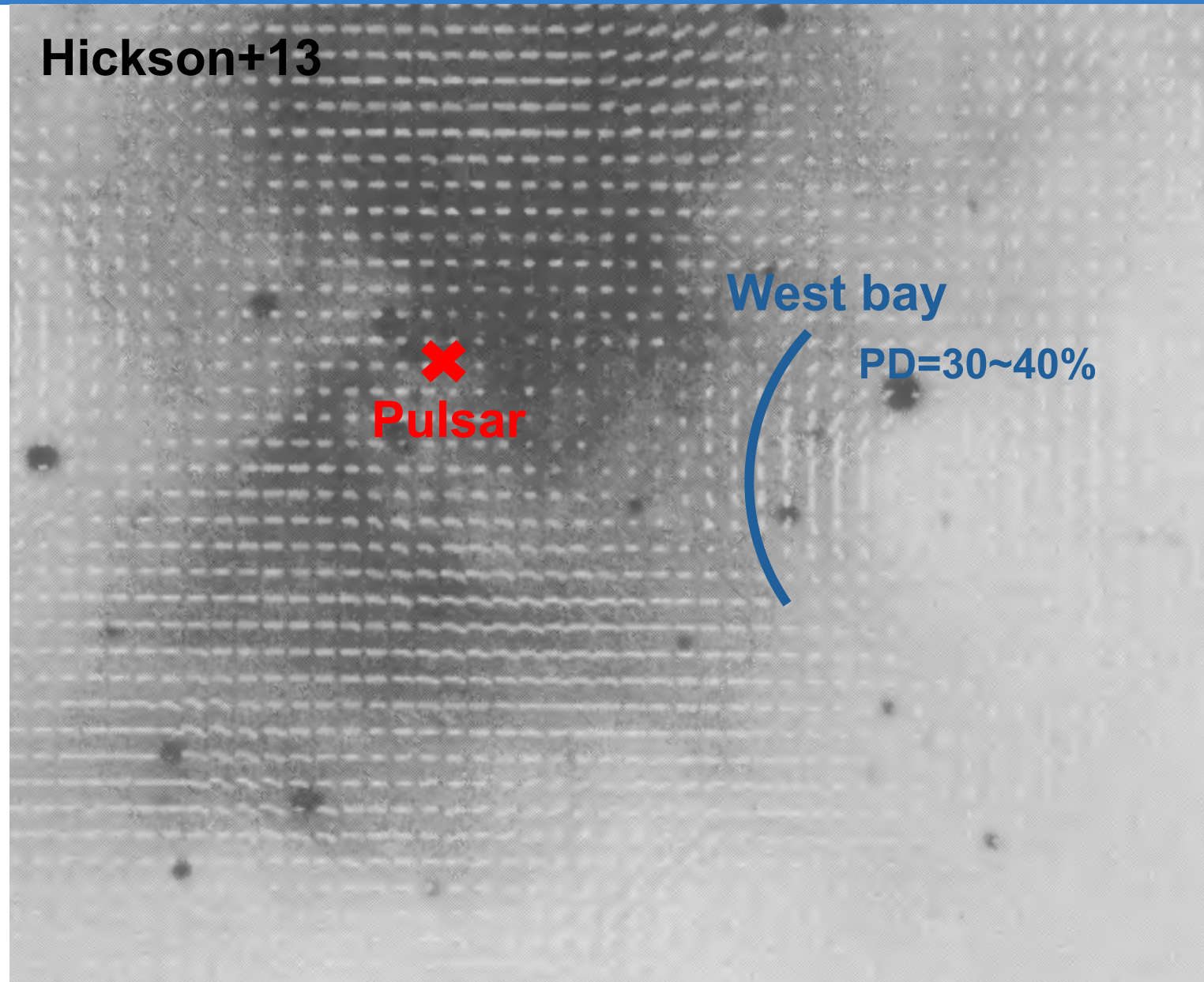
PA(pol. ang)



可視光での偏光観測

- 白線が偏光情報
- 長さ... 偏光度
 - 向き... 偏光方位角

Hickson+13



West Bay の簡易偏光モデル

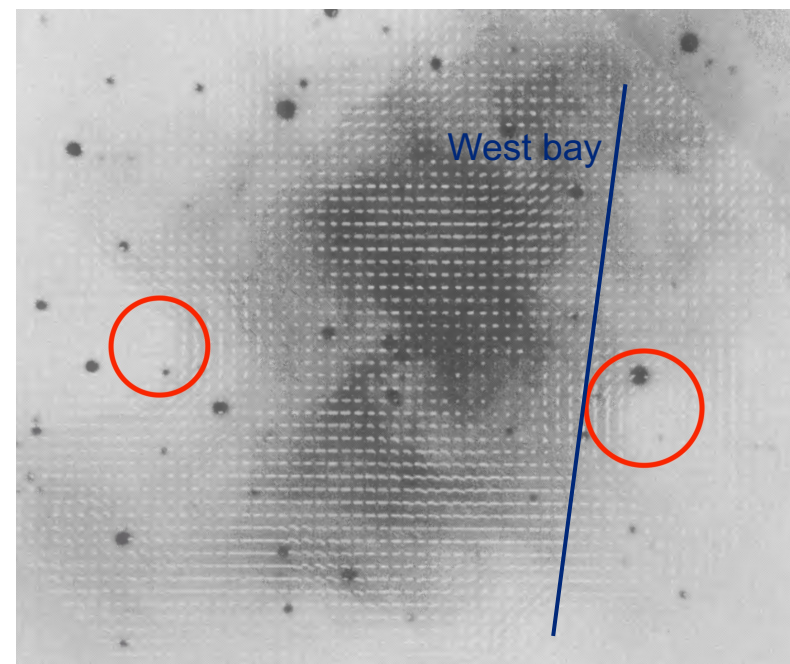
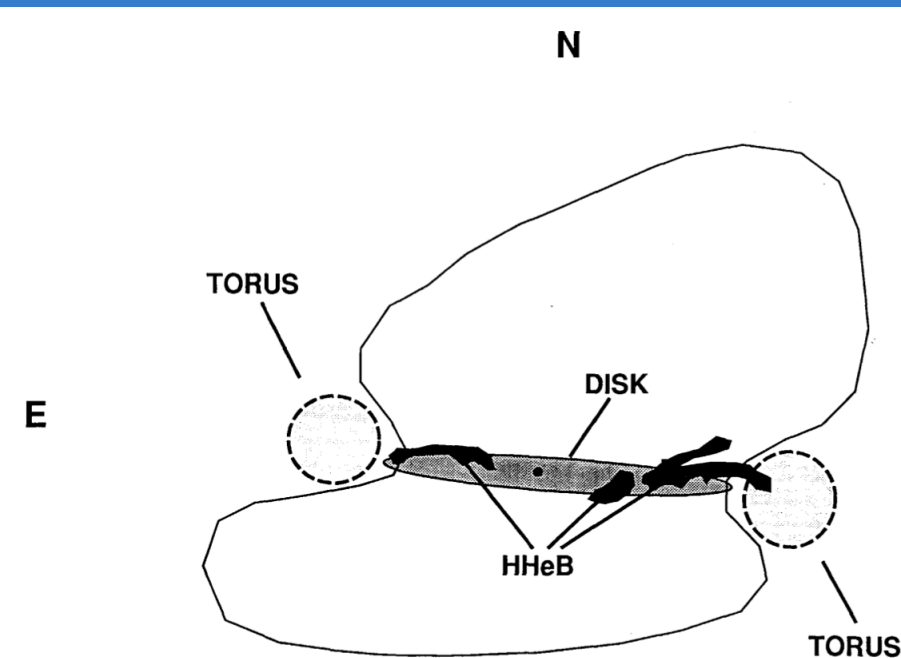
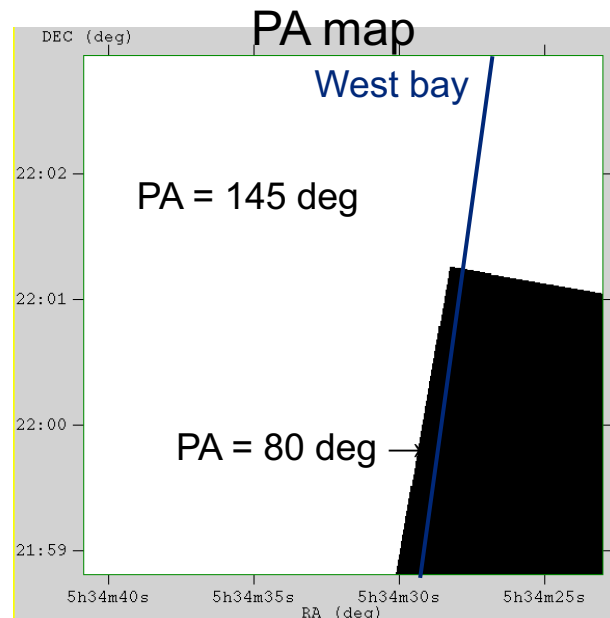
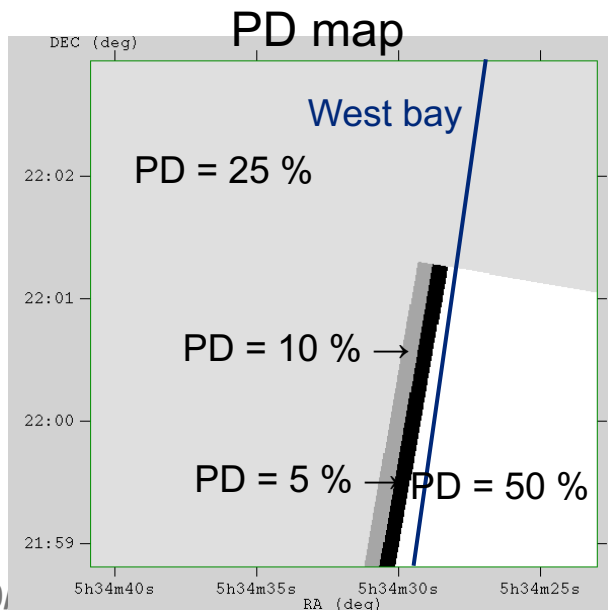
Fesen+ 92 はループ電流が East/West Bay を作っていると主張 (右上図)

- 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



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

