

日本物理学会第80回年次秋季年会(2025 9.17)@広島大学

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

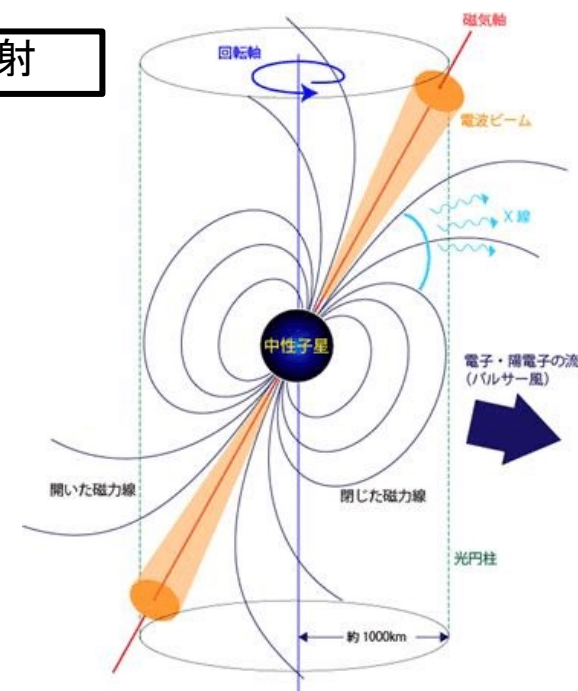
- $d=2$ kpc, $L=10^{38}$ erg/s
- 中心に「かにパルサー」、 $P=33$ ms
- PWNはPSRからエネルギーが供給

粒子加速・放射は磁場によって起こる

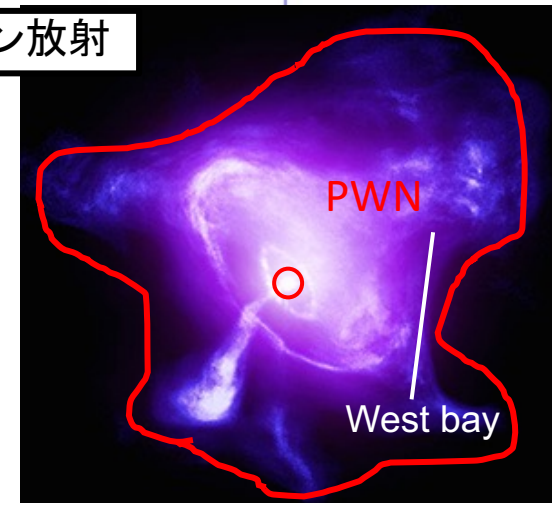
- PSR... 回転する磁場による加速、曲率放射・シンクロトロン放射
- PWN... 終端衝撃波による加速、シンクロトロン放射
- 電波ーガンマ線まで幅広い波長帯で放射

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

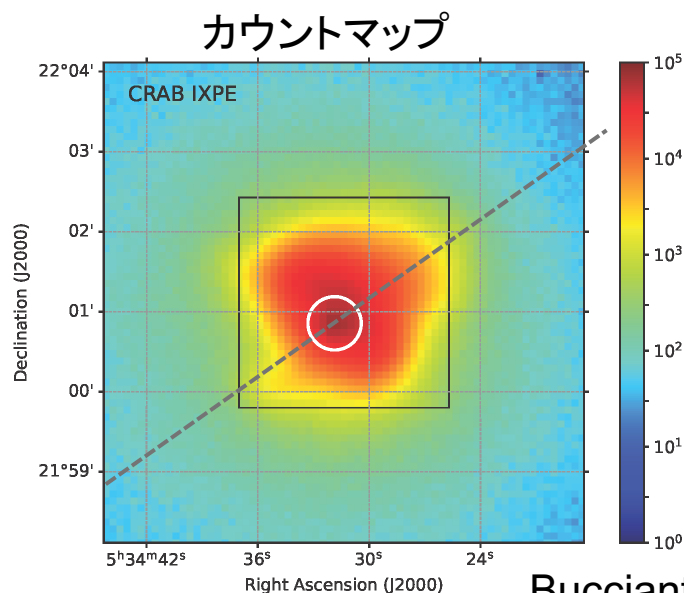
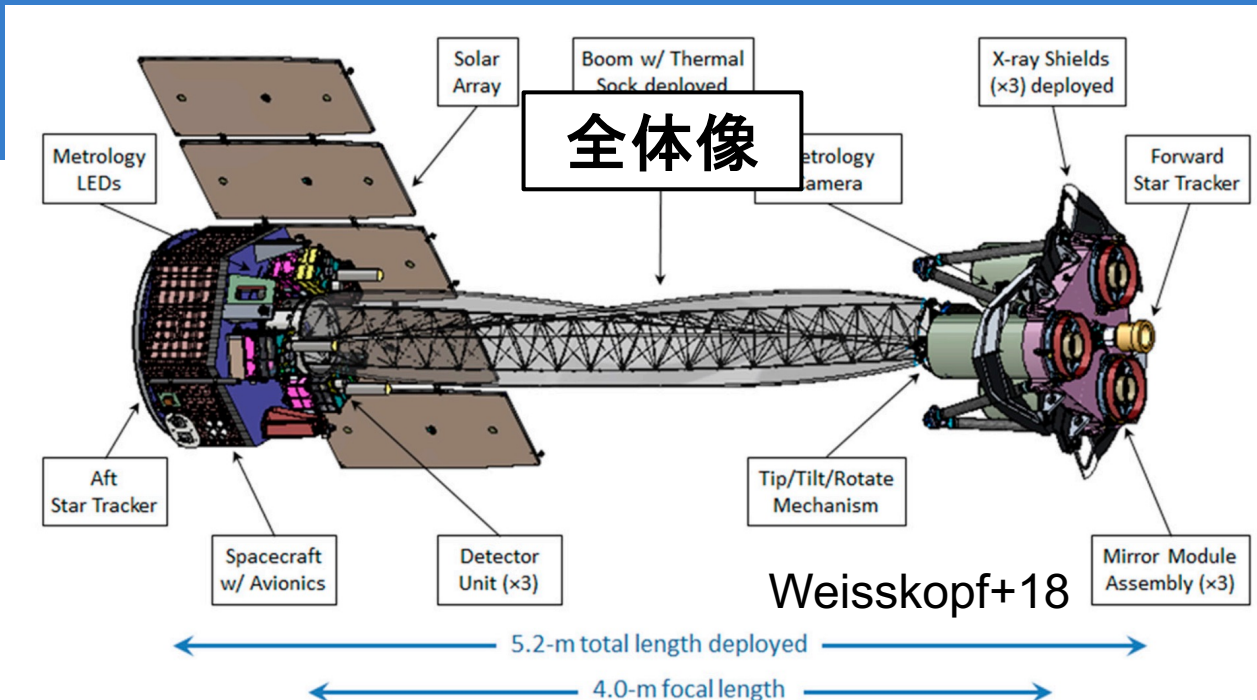


シンクロトロン放射

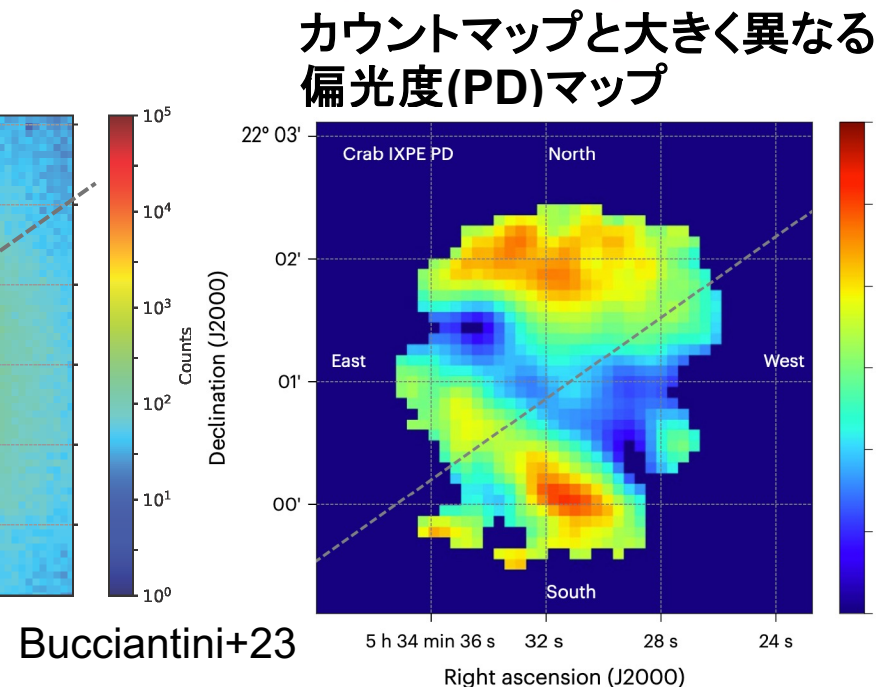


IXPE衛星

- 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

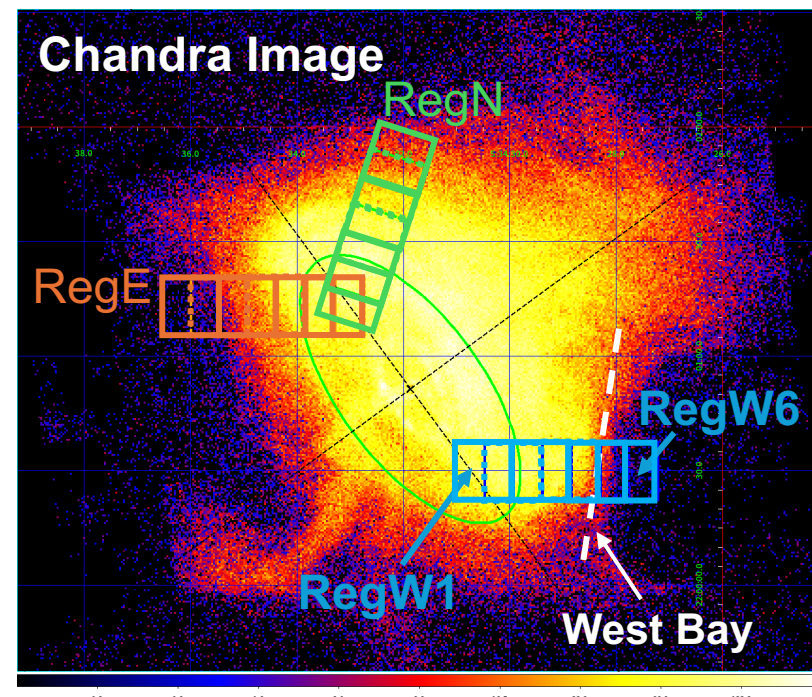
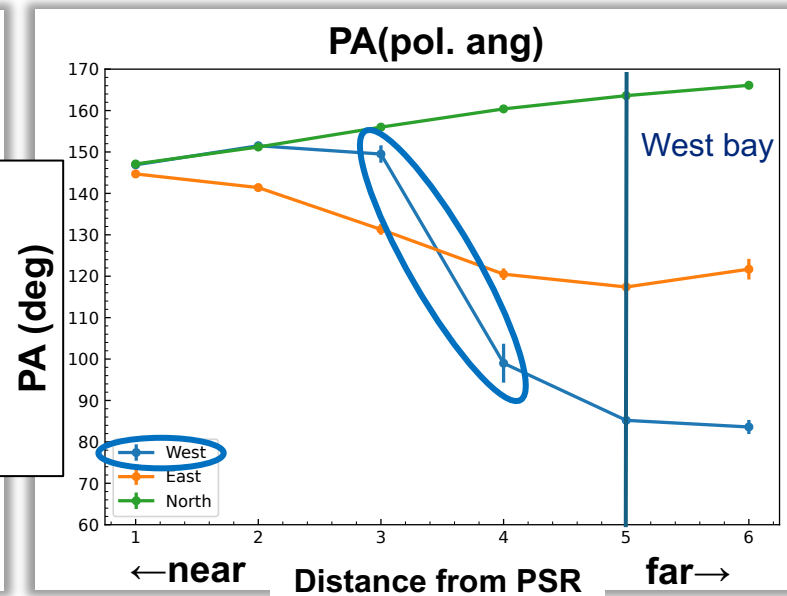
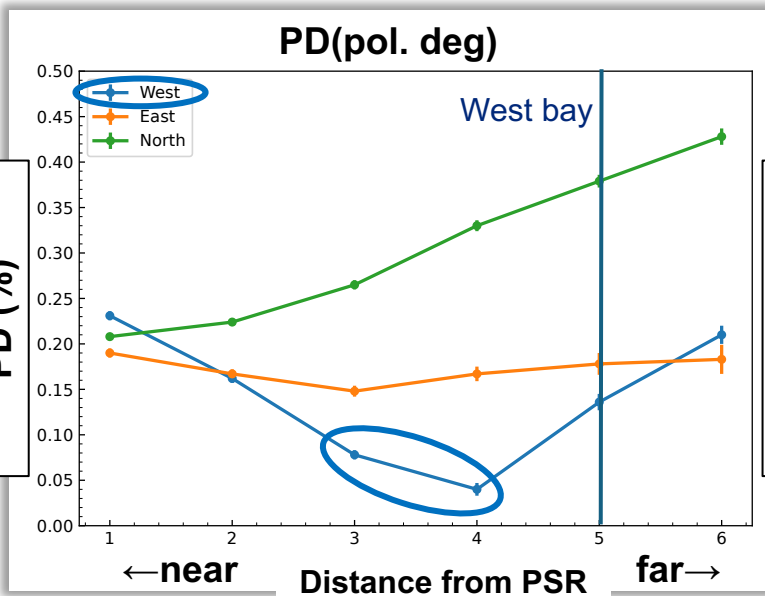
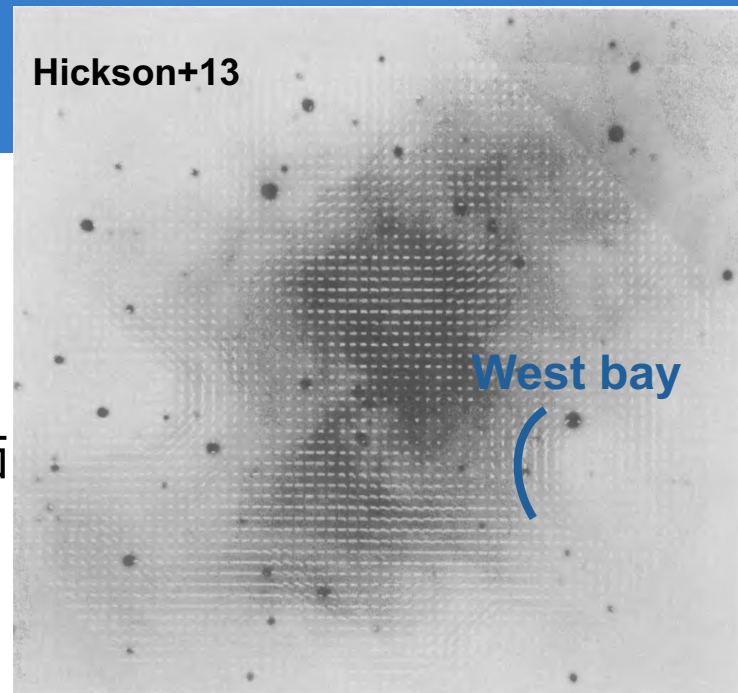
West bay について(前回の報告)

- 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

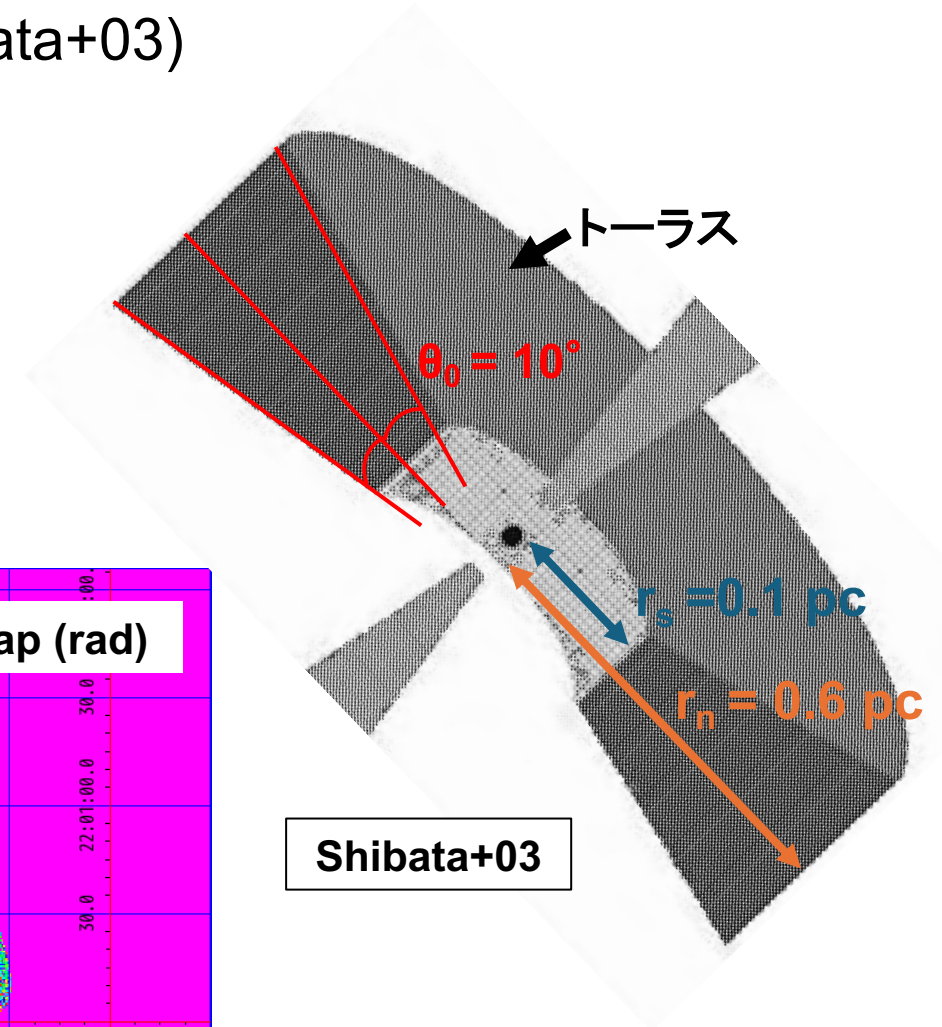
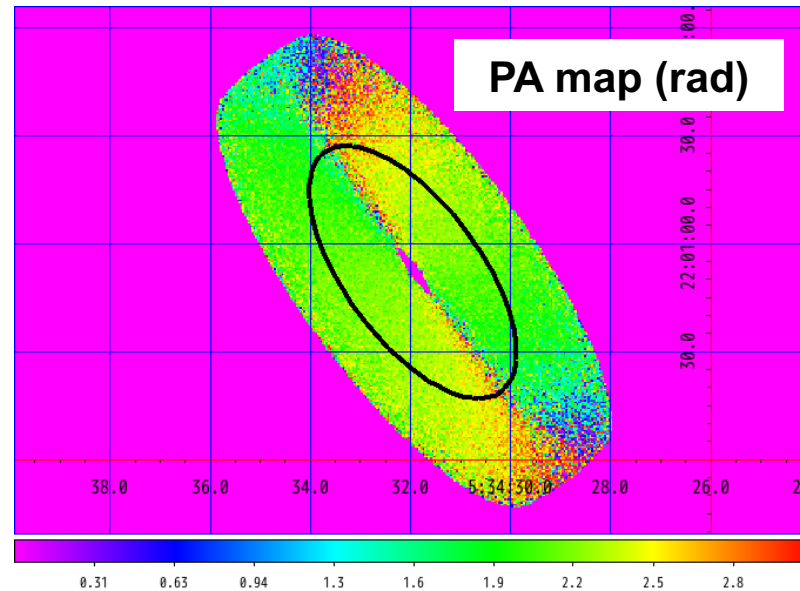
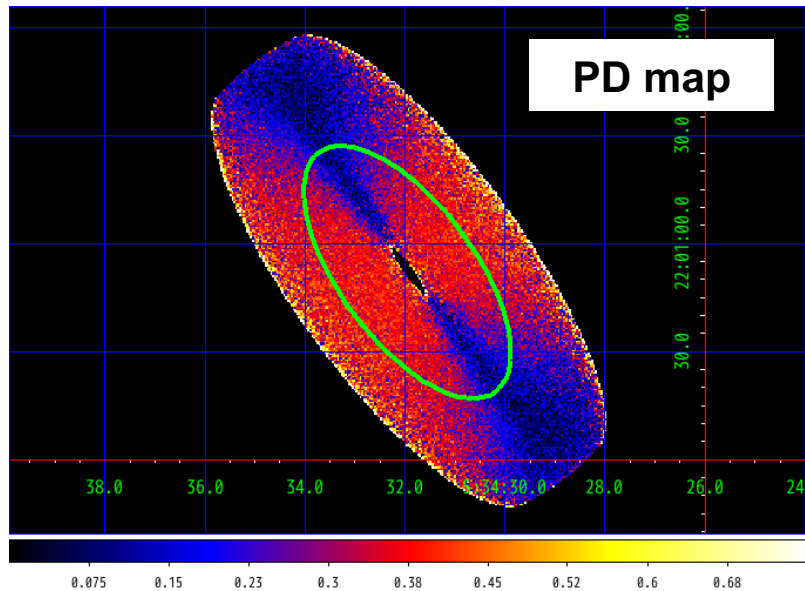
⇒ West bay が磁場構造(偏光度・偏光方位角)に影響を与えている可能性



出発したモデル

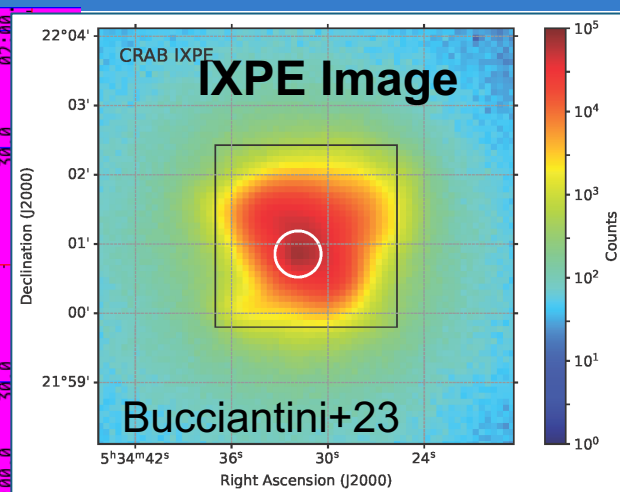
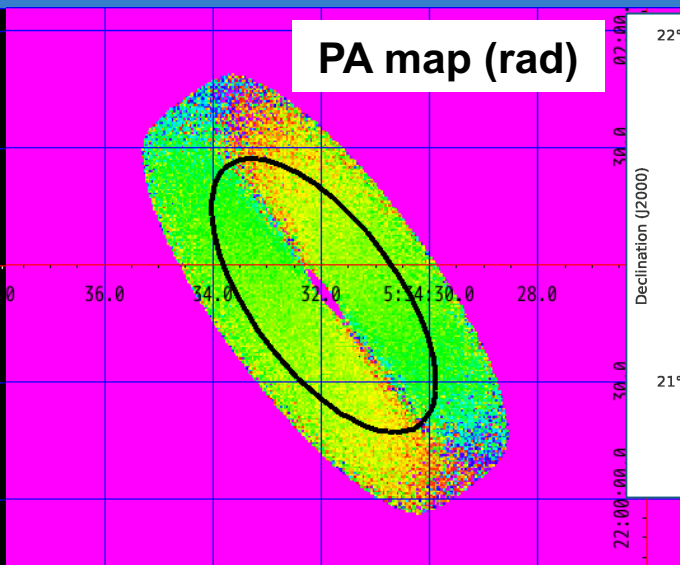
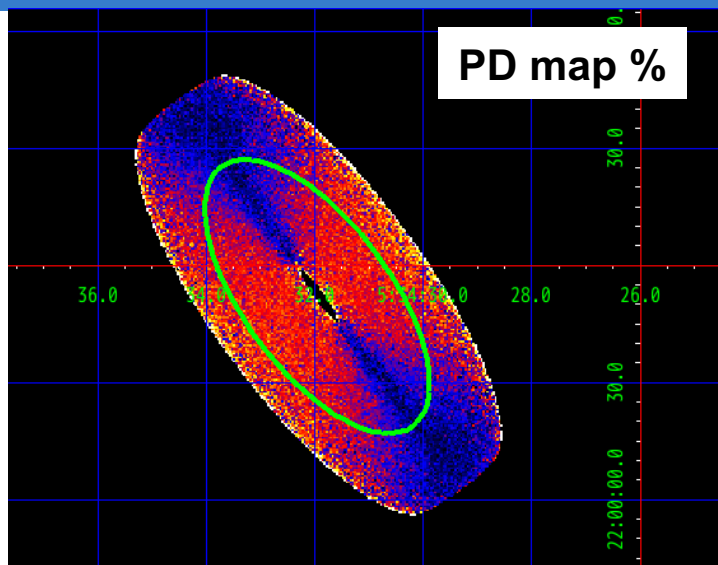
出発したモデルはX線トーラスの幾何学的モデル(Shibata+03)

- 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 $b = 0.6$)



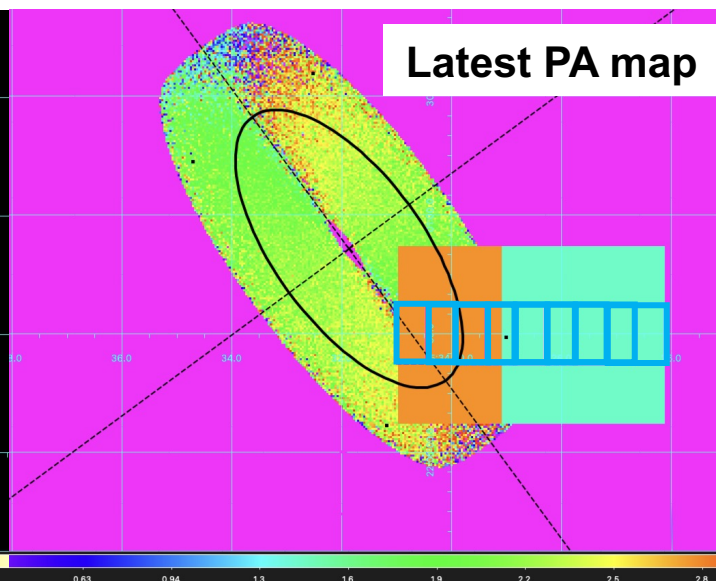
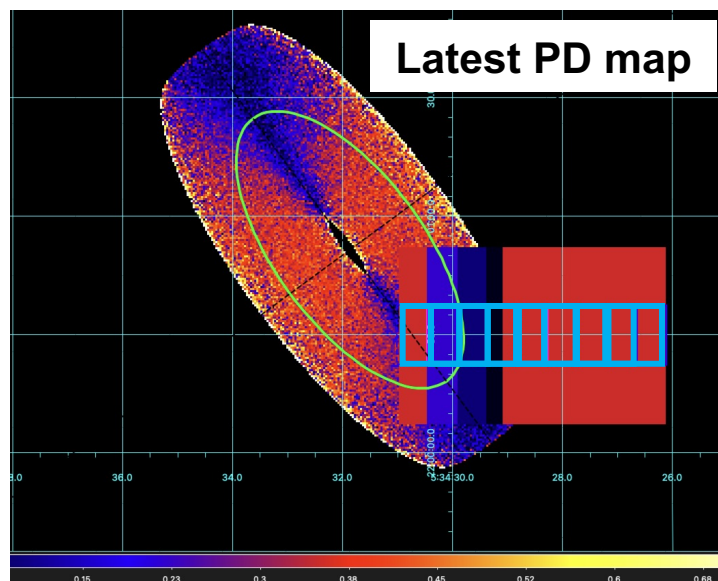
今回構築した偏光モデル

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->

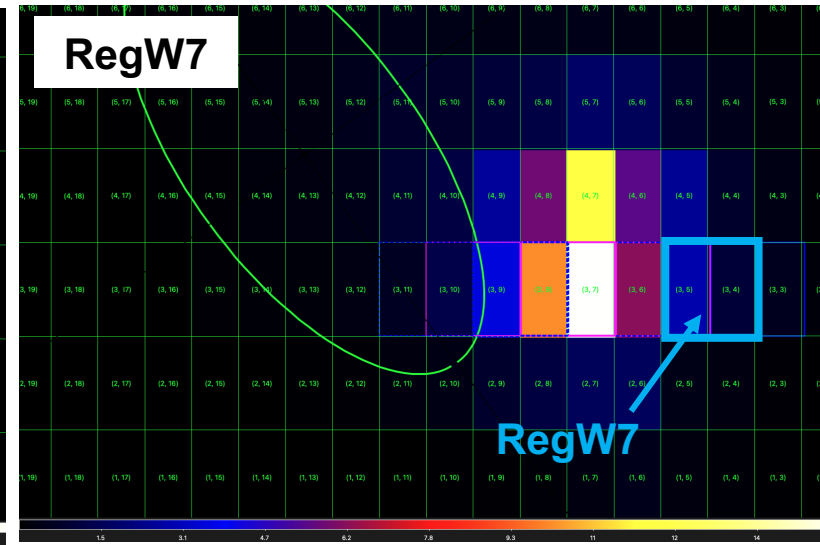
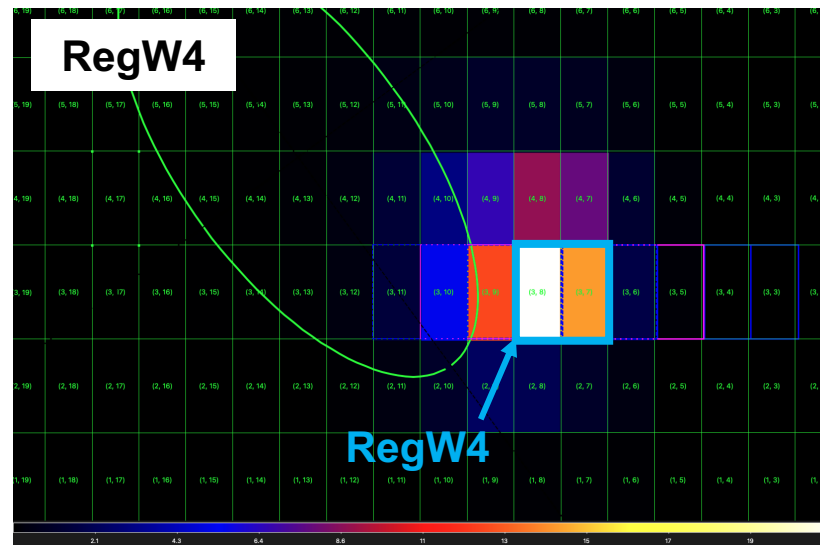
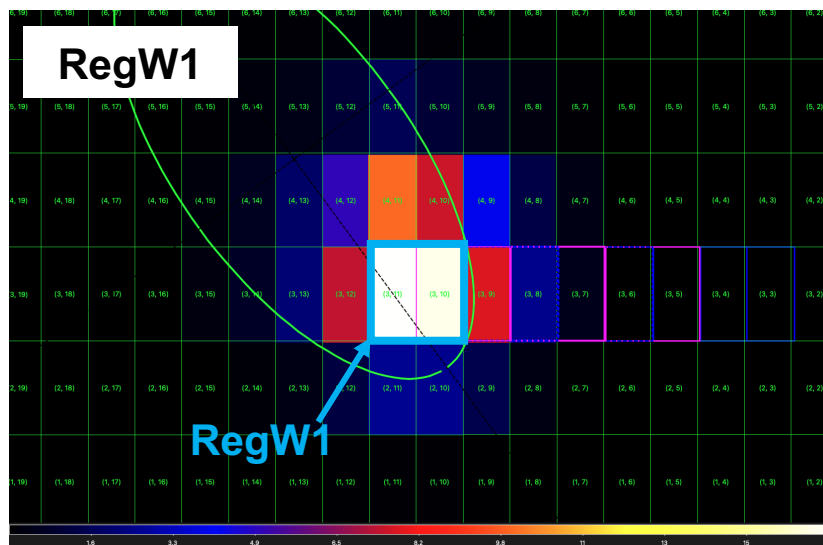
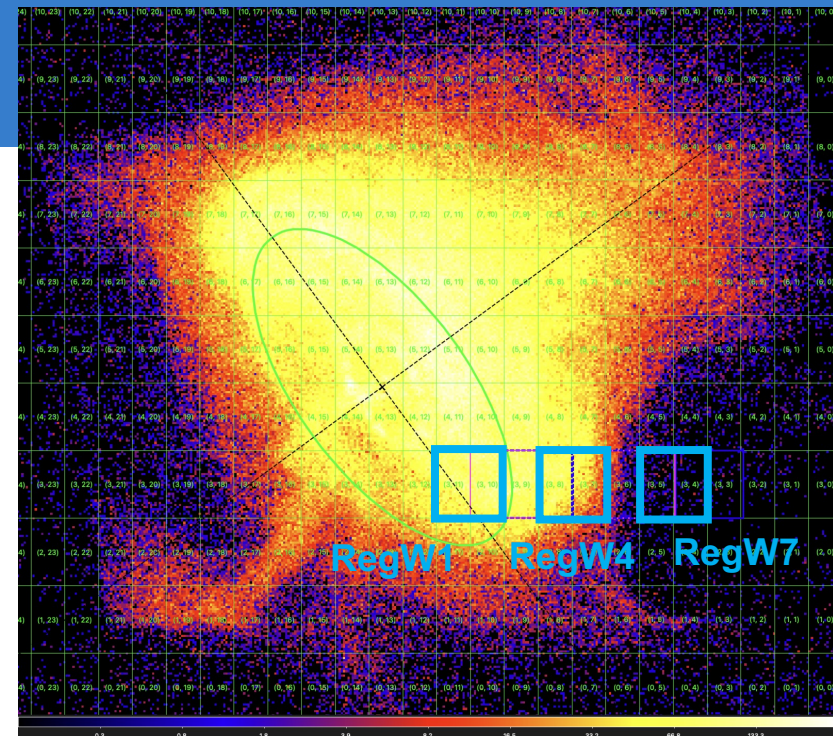


モデルの構築: ①漏れこみ評価

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)

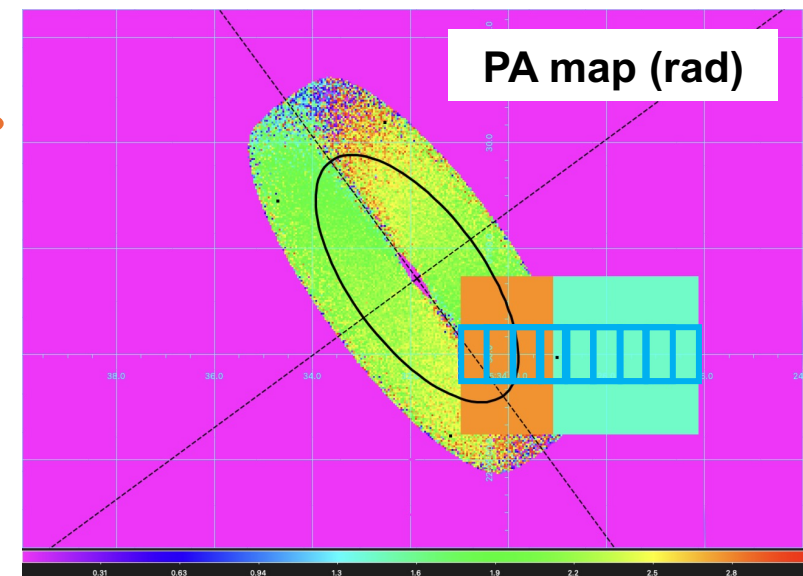
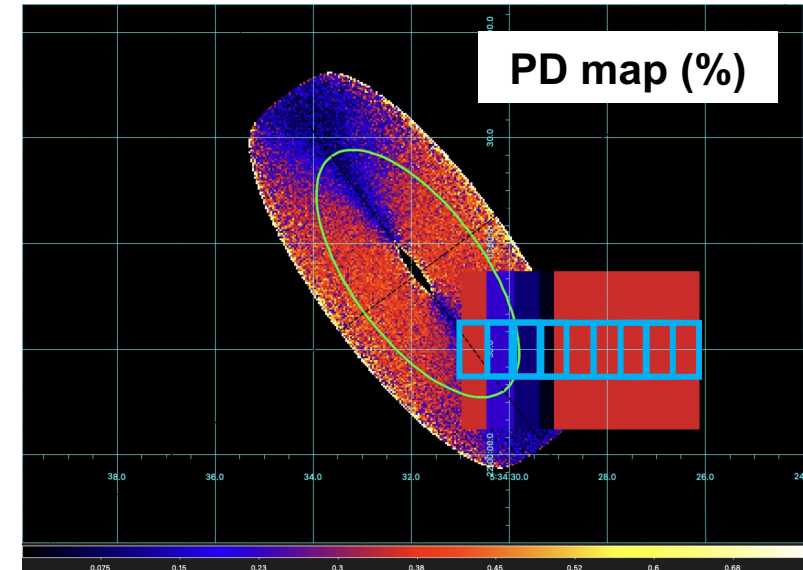
- 偏光度はreg1-4にかけて徐々に下がる
- 偏光方位角はreg4ですでに変わっている



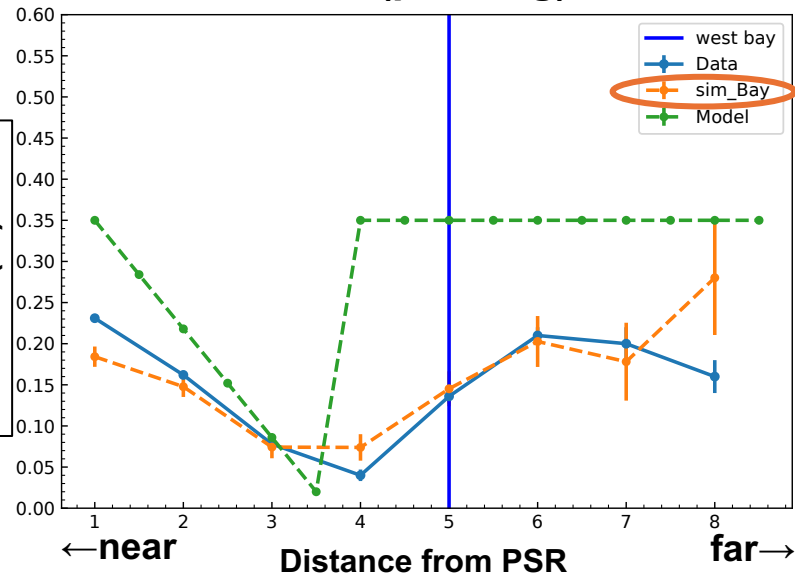
モデルの構築: ②bay構造を追加

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

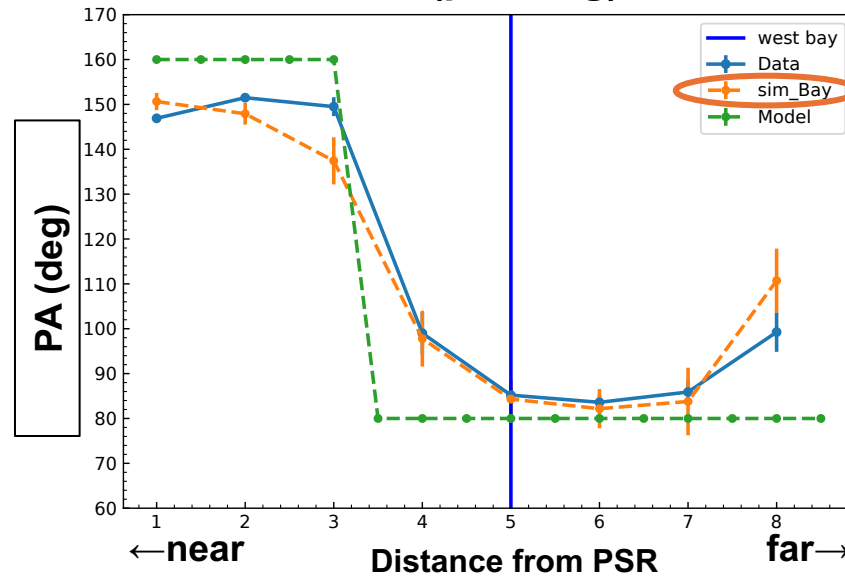
- PD/PAの変化は**シミュレーション結果(橙点線)**と**観測データ(青実線)**でよく合っている
 - PDはbayに向かって35%から2%まで直線的に下がる
 - PAはreg3&4で160度->80度に急激に変化
 - PAはreg4以降**bayの向きになる**



PD(pol. deg)



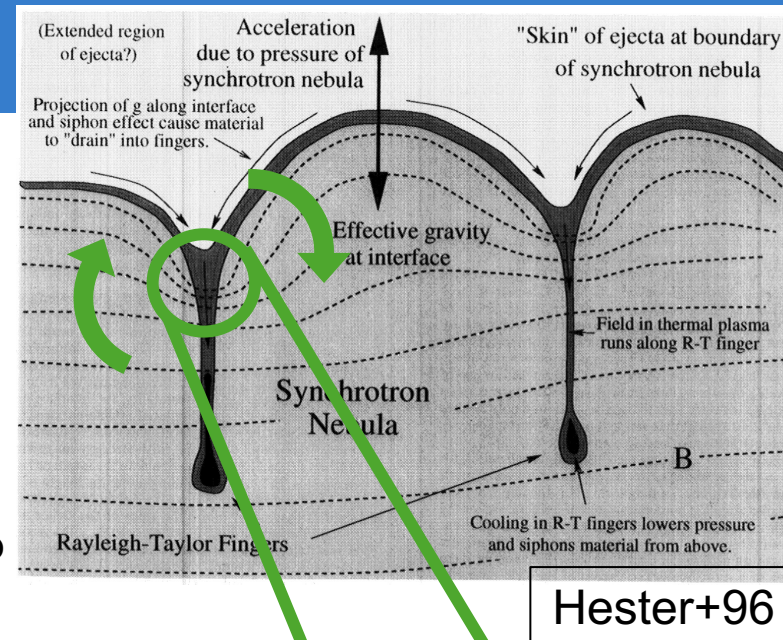
PA(pol. ang)



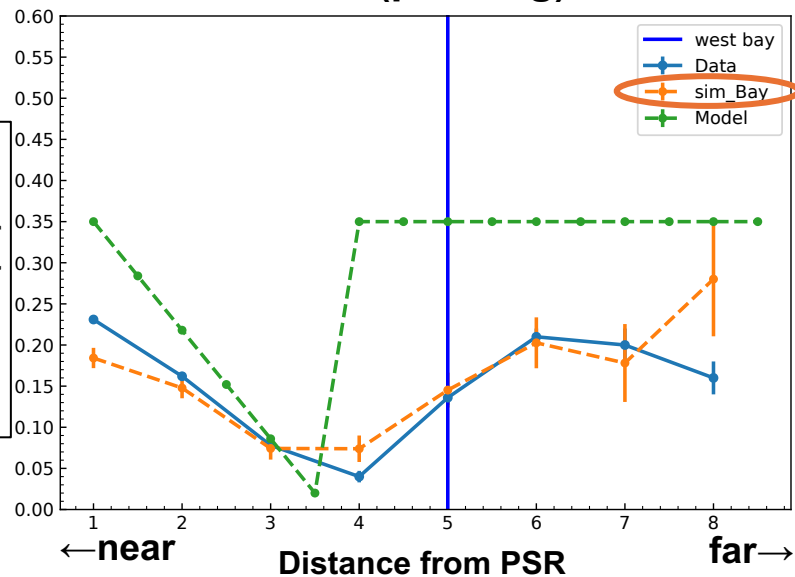
まとめ

シミュレーションによるWest bay付近の磁場評価

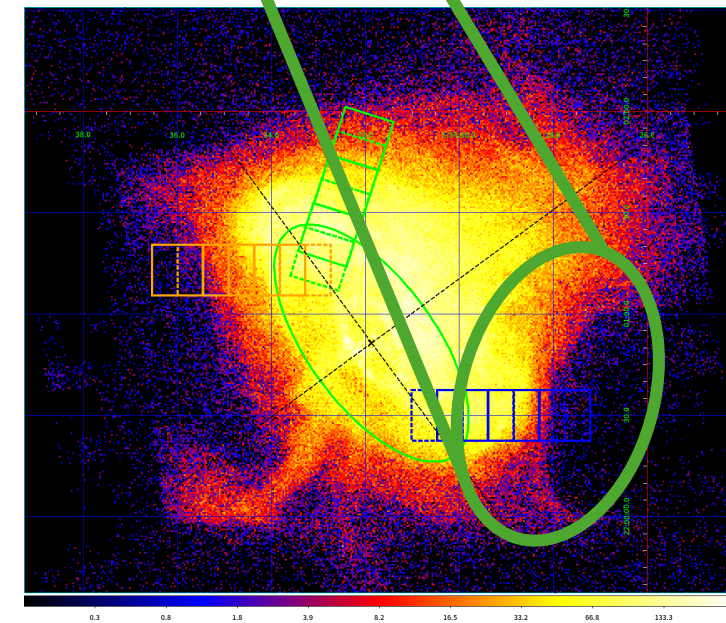
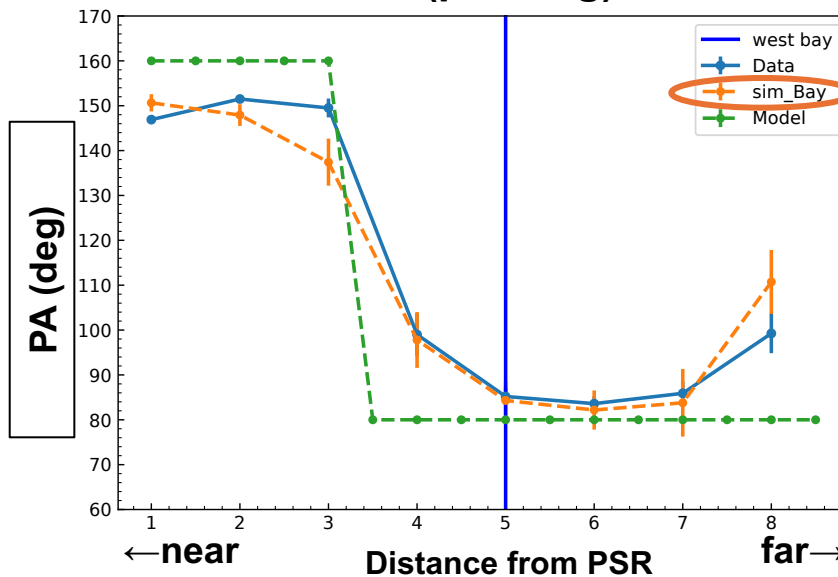
- Reg1- 8までの領域についてヒートマップを作成
- ヒートマップをもとに観測データと再現する偏光モデルを構築
 - PDは直線的に35%から2%まで下がる
 - PAは160度から80度に急激に変化し、変化後の磁場はbayの向きに沿う
 - RT不安定性だと磁場方向がbayの境界面に沿っていることを説明できる



PD(pol. deg)

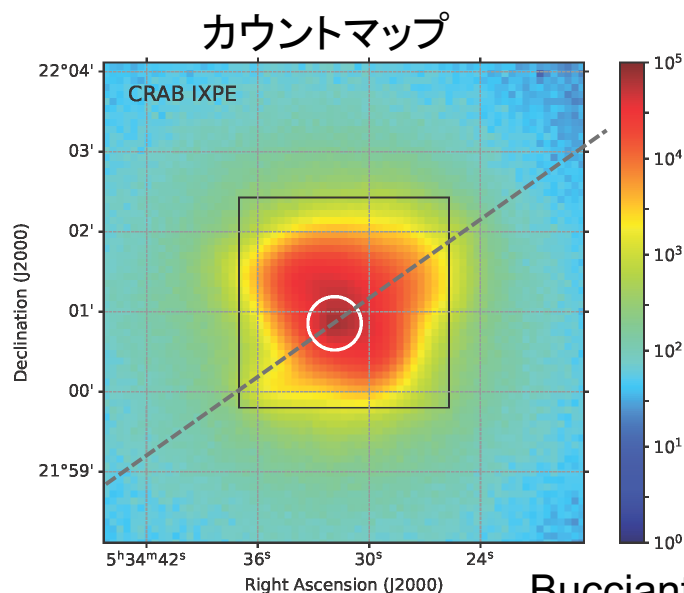
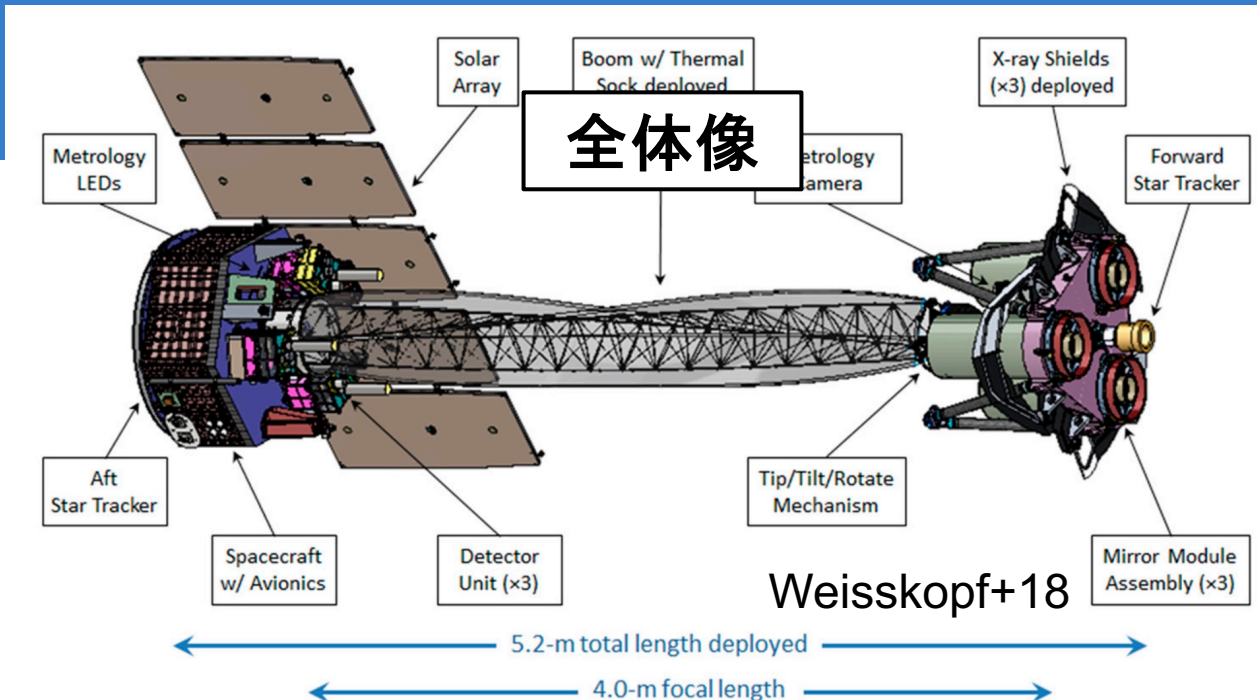


PA(pol. ang)

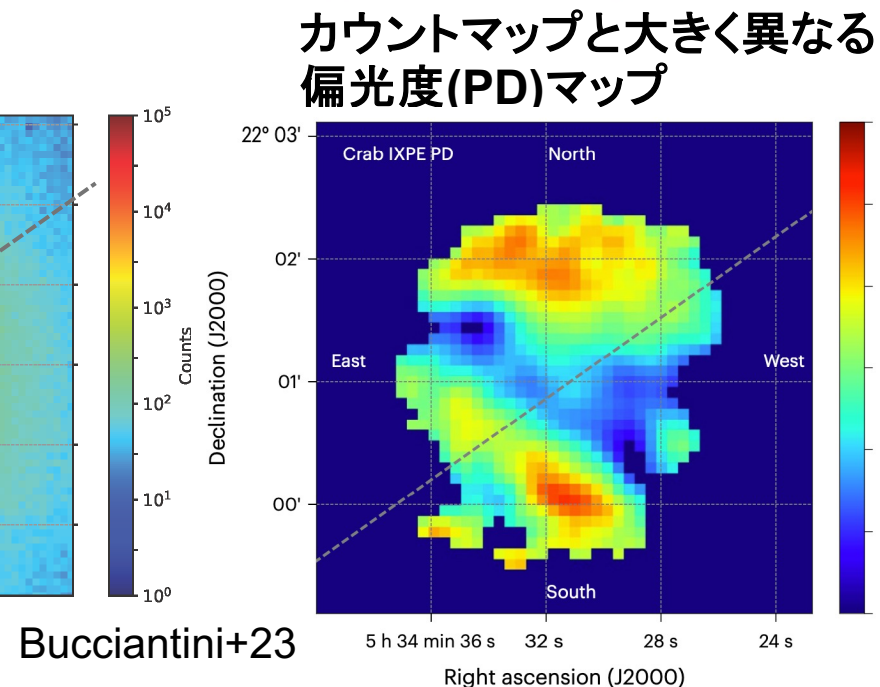


IXPE衛星

- 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

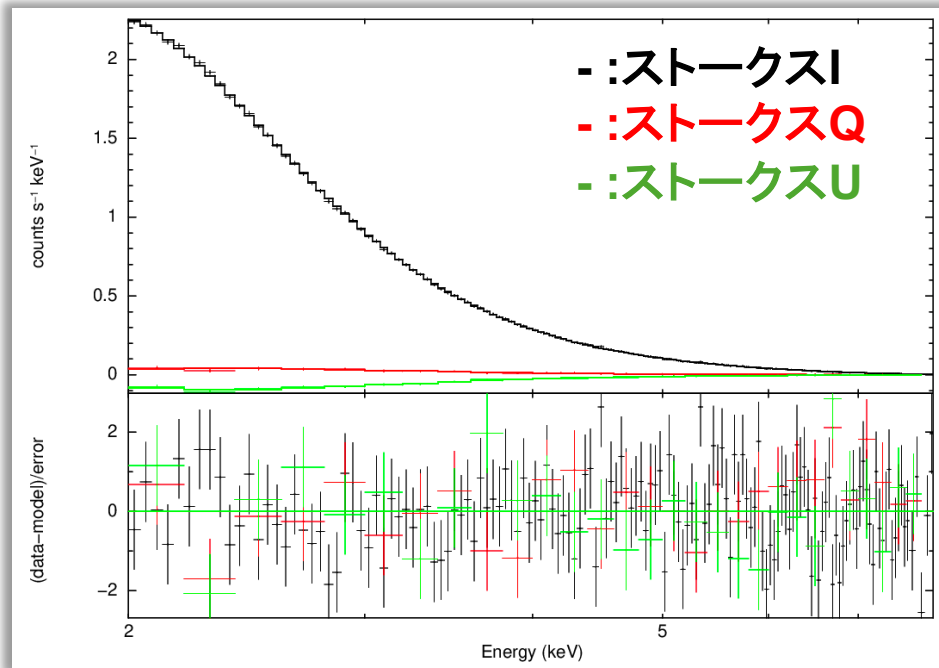
Xspecによる偏光・スペクトル同時解析

- ストークスパラメータ I/Q/Uのスペクトルに対して
model = TBabs*(powerlaw*polconst)でフィッティング

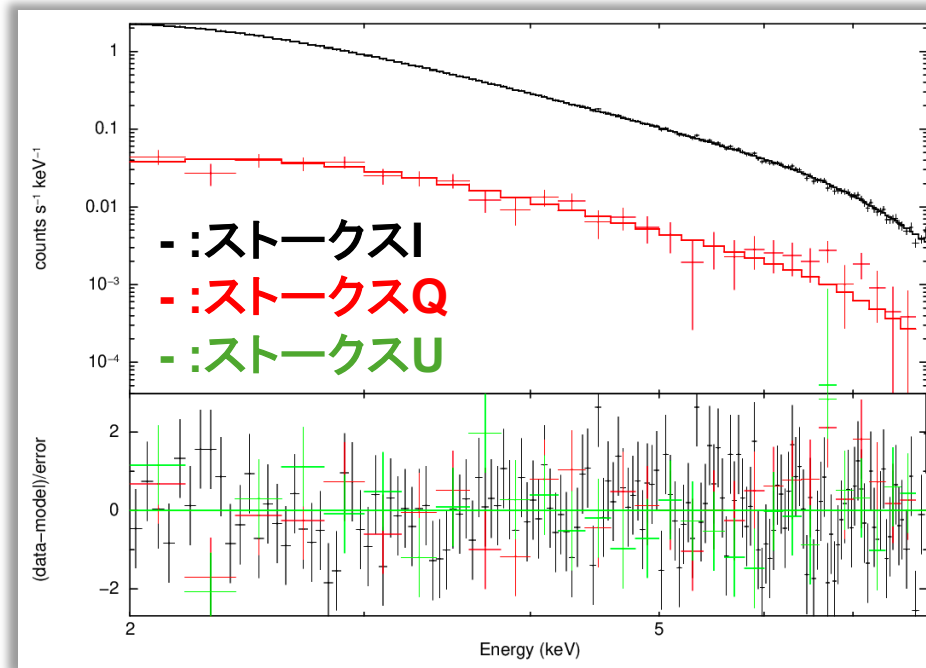
- **polconst** ...エネルギーに依存しない偏光モデル

$$\begin{cases} Q = A * \cos(2 * \text{psirad}) \\ U = A * \sin(2 * \text{psirad}) \end{cases} ; A \dots \text{偏光度、psirad} \dots \text{偏光方位角(rad)}$$

線形グラフ



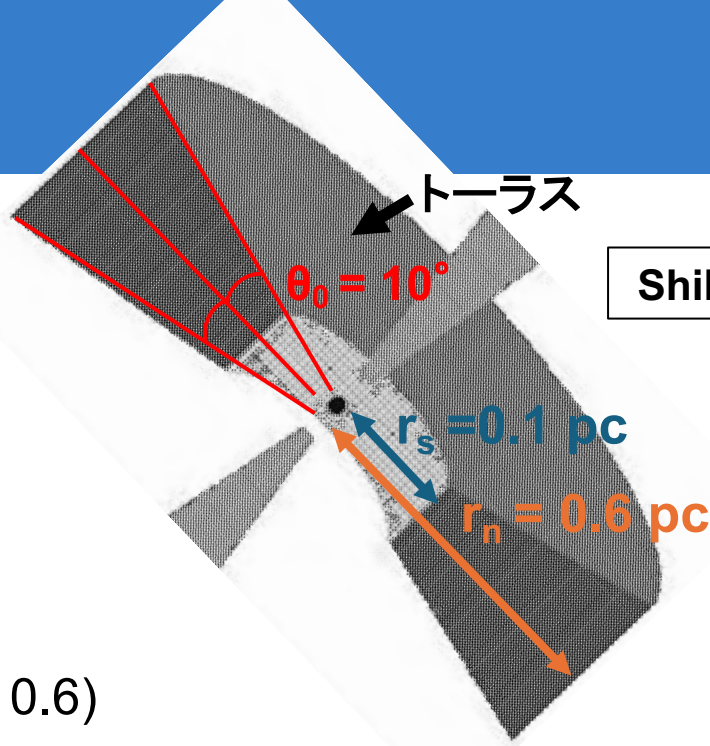
対数グラフ



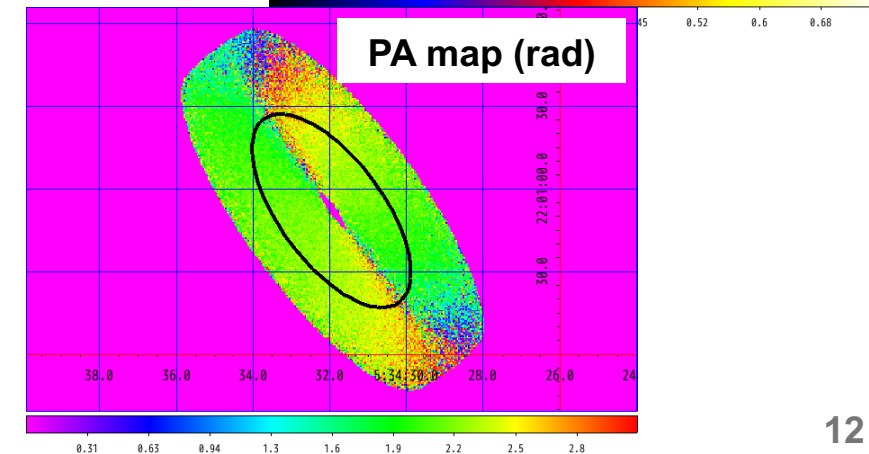
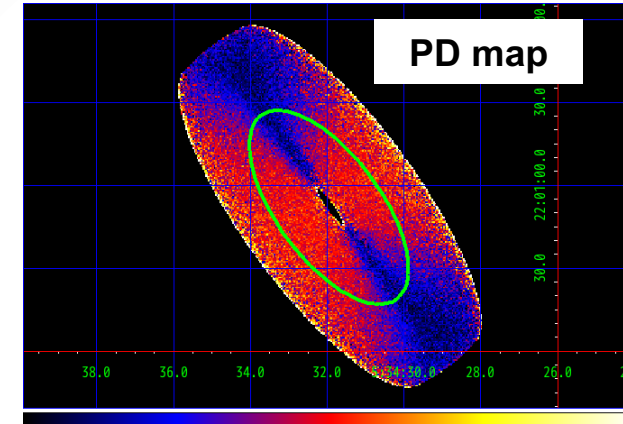
出発したモデル

出発したモデルはX線トーラスの幾何学的モデル

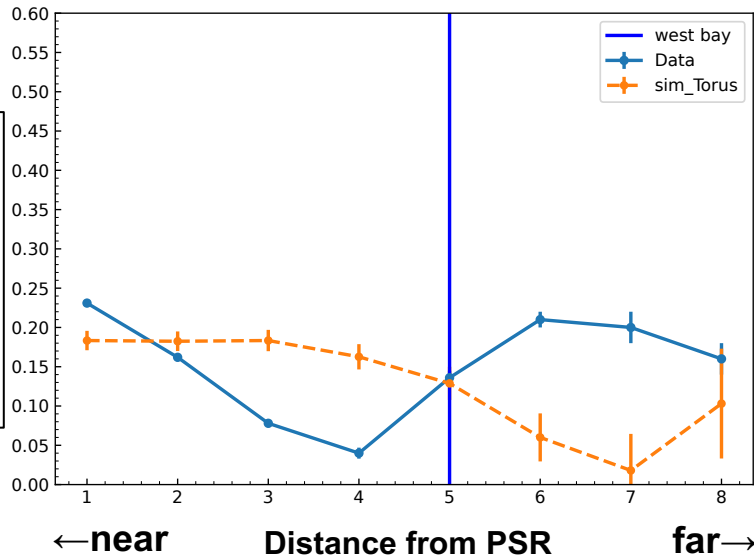
- PWN は単純なequatorial wedge モデル
- $r_s = 0.1 \text{ pc}$, $r_n = 0.6 \text{ pc}$, $\theta_0 = \pm 10^\circ$
 - 流速 $v = 0.2c$ (c: 光速)
 - トーラス軸の向き: 126.3° 、見込み角: 63.0°
- 動径方向の磁場分布はKCモデル ($\sigma = 0.003$)
- トロイダル磁場とランダム磁場を仮定 (ランダム度 $b = 0.6$)



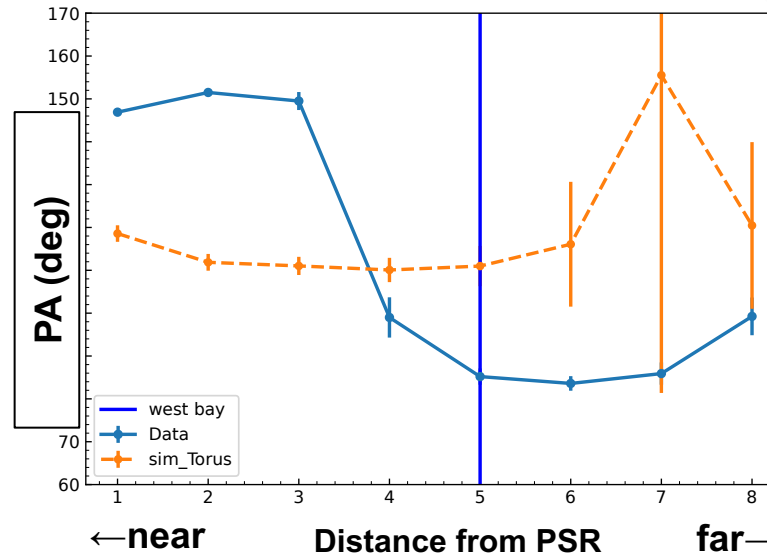
Shibata+03



PD(pol. deg)

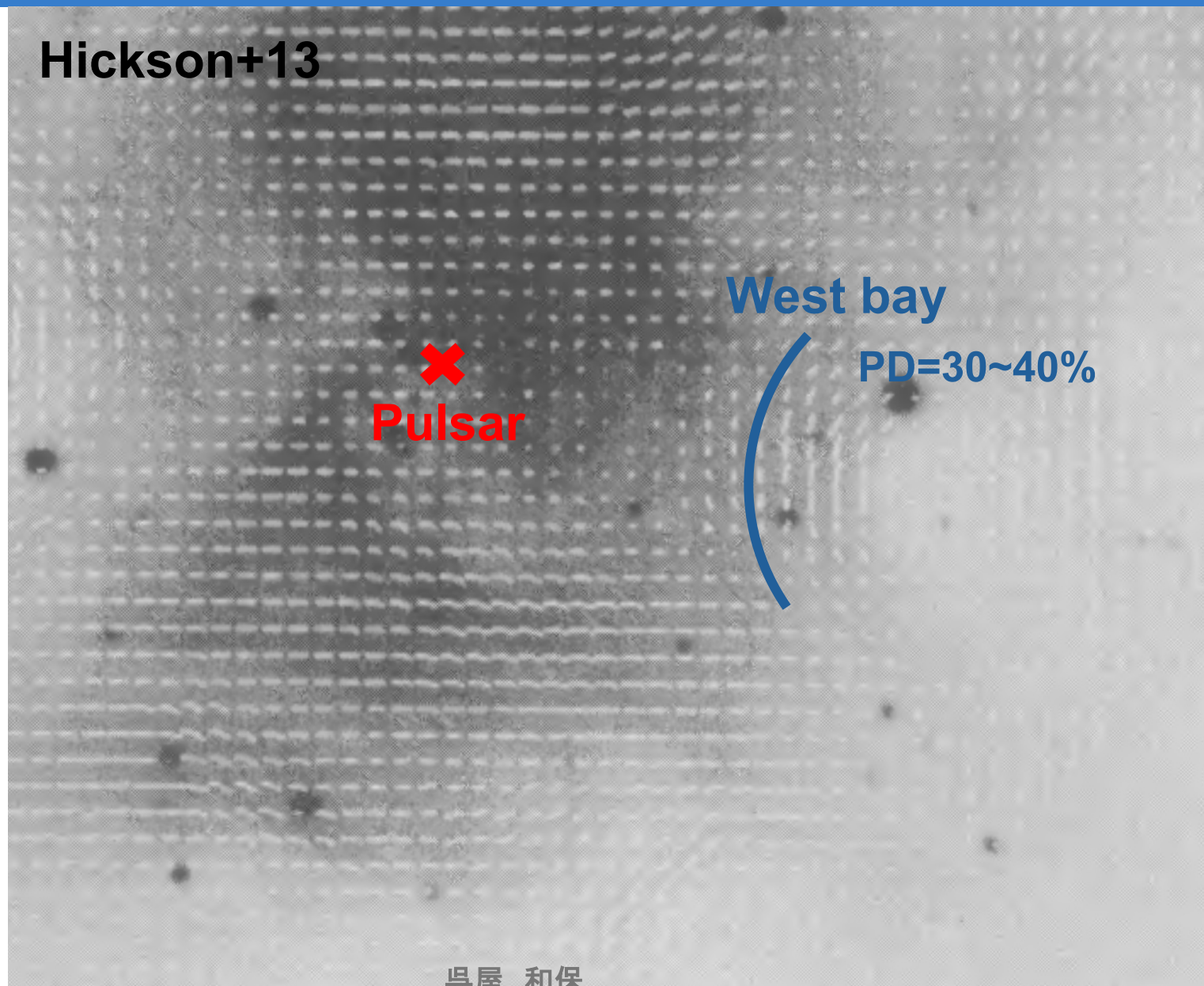


PA(pol. ang)



Hickson+13

- 白線が偏光情報
- 長さ... 偏光度
 - 向き... 偏光方位角



West Bay の簡易偏光モデル

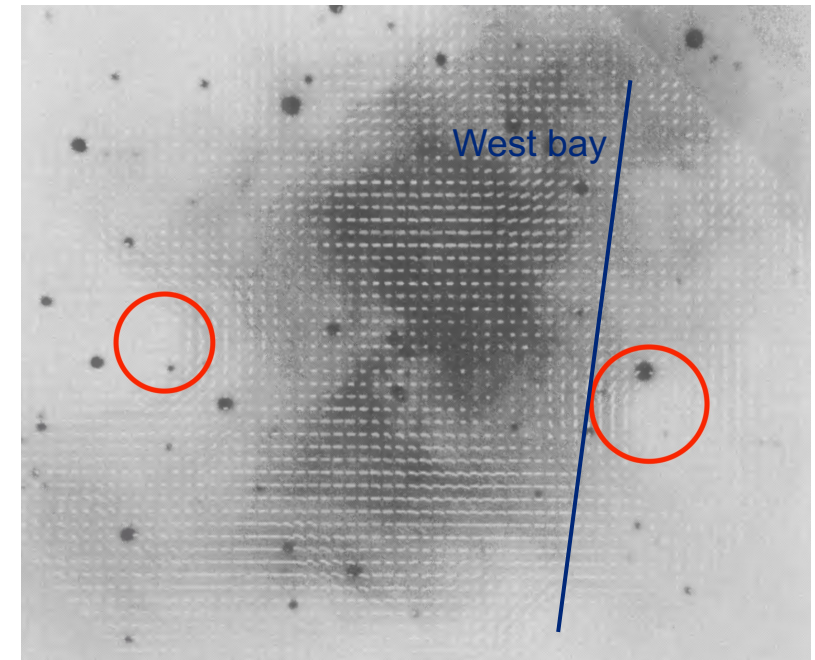
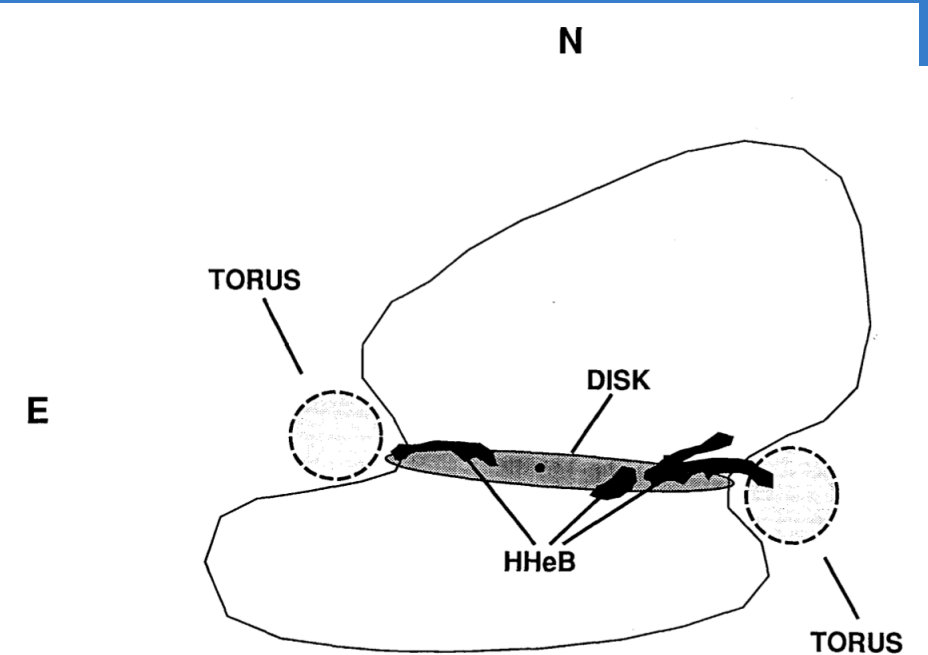
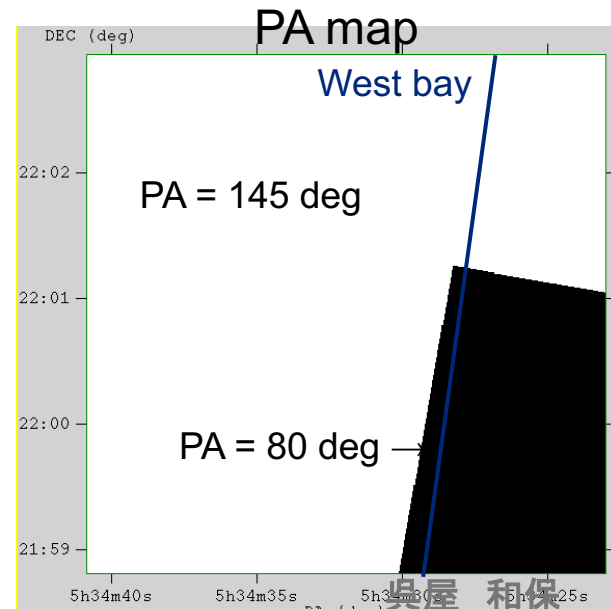
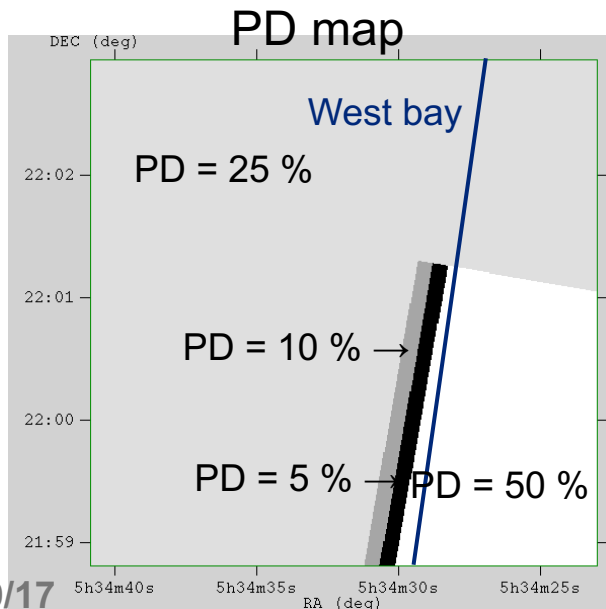
Fesen+ 92 はループ電流が East/West Bay を作っていると主張 (右上図)

- 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

