

日本天文学会2024年度秋季年会(2024 9.12)@関西学院大学

# IXPE衛星による「かに星雲・パルサー」の 長時間観測とその偏光解析

呉屋和保(広島大),

水野恒史, S.Zhang, 深沢泰司, 高橋弘充(広島大), 玉川徹, 北口貴雄(理研), 郡司修一, 渡邊瑛里, 柴田晋平, 管佑真, 上小林柁, 森愛斗(山形大), 大野寛(東北文教大), 内山慶祐, 武田朋志(東京理科大), 三石郁之, 田原譲(名古屋大), 岩切渉(千葉大), 林田清(大阪大), 榎戸輝揚(京都大), W. Josephine(Stanford Univ.), P. Kaaret, S. Ehlert, S.

O'Dell(NASA/MSFC), I. Donnarumma(ASI), P. Soffitta(IAPS), L.Baldini(INFN),

他 IXPE 衛星チーム

## 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

## 粒子加速や放射では磁場が重要な役割を果たす

- PSRでは誘導起電力による加速、曲率放射・シンクロトン放射
- PWNは終端衝撃波による加速、シンクロトン放射
- どちらも赤外からガンマ線まで幅広い波長帯で放射

高エネルギー電子がつくるX線の偏光撮像観測で  
粒子加速が起きている領域付近の**磁場構造**が理解できる

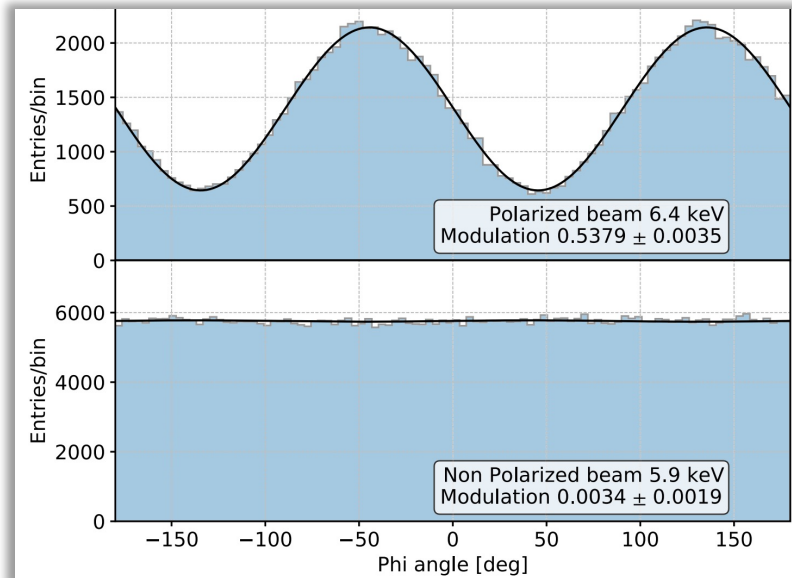


かに星雲 (X-ray; Chandra)

([https://chandra.si.edu/press/23\\_releases/press\\_041023.html](https://chandra.si.edu/press/23_releases/press_041023.html))

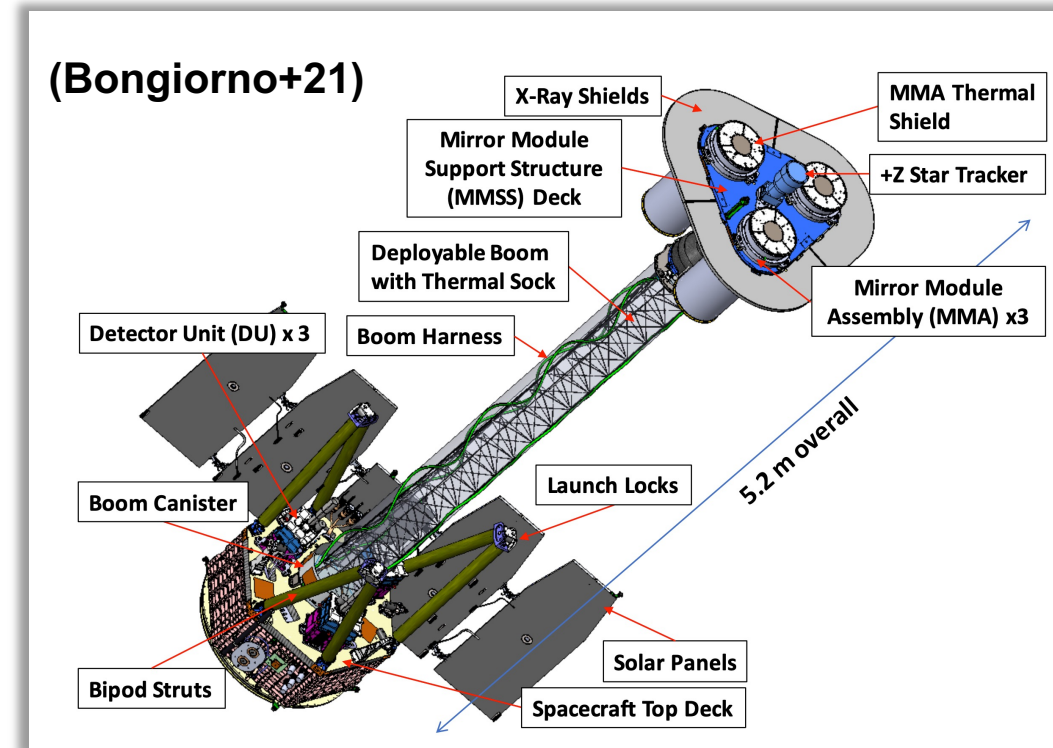
## 世界初のX線偏光撮像観測を行う

- NASAのSMEXとして2021年9月に打ち上げられた
- 3つの(望遠鏡+検出器)により 2-8 keV (軟X線領域)を観測
- 視野=12.9' x 12.9', HPD=25"
- $m_{100}$  : 0.15(@ 2keV) ~ 0.5(@ 6keV)
- イベントごとにストークスパラメータを評価 (Kislat+15, Vink&Zhou+18)



2024.09.12

モジュレーションカーブ(Baldini+21)



K. Goya

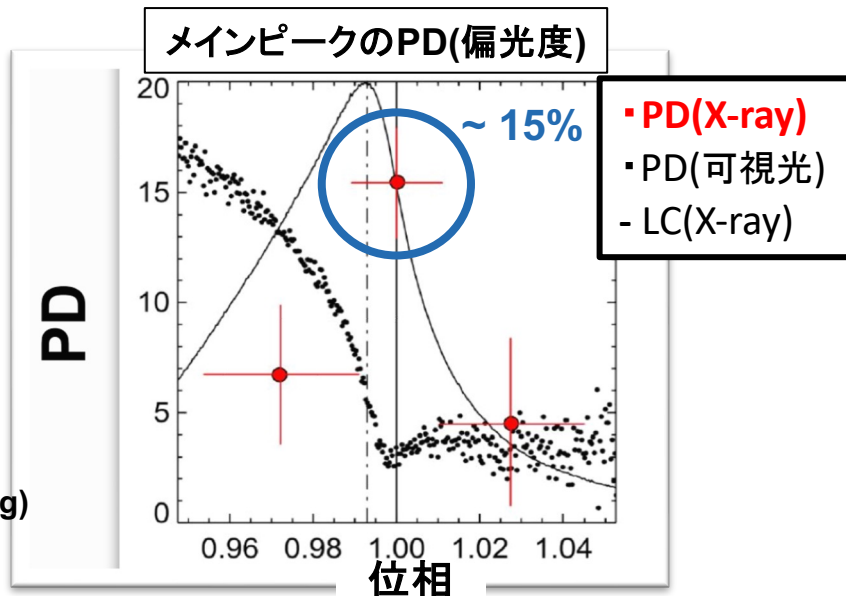
3

# IXPEによる初期観測と研究目的

2022年、IXPEによる最初の観測(観測時間=85 ks)

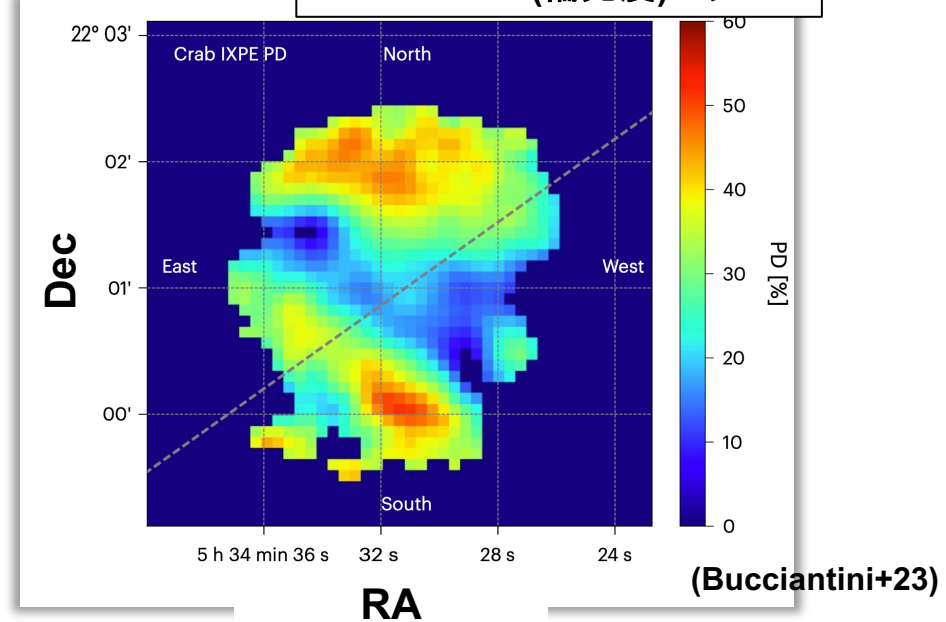
- PSRはメインピークの中央部のみ有意な偏光
  - 有意な偏光が確認された位相で、PD ~ 15%, PA ~ 105 deg
  - 他の位相は誤差が大きく偏光の位相依存性は議論できていない
- PWN...偏光度マップを初めて取得
  - 回転軸に非対称な磁場構造を発見
  - スペクトル解析、詳細な偏光解析は未着手

**目的:** 2022年に加えて2023年2月・10月の観測もあわせた全データ(観測時間=280 ks)を詳細に解析し、かに星雲・パルサーについて理解を深める



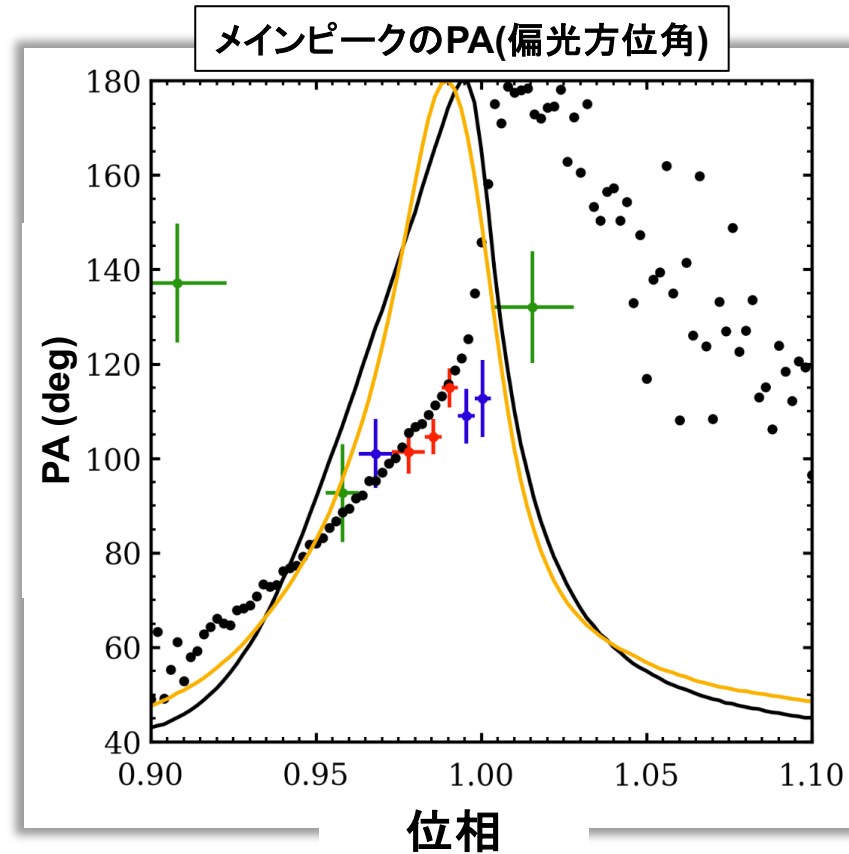
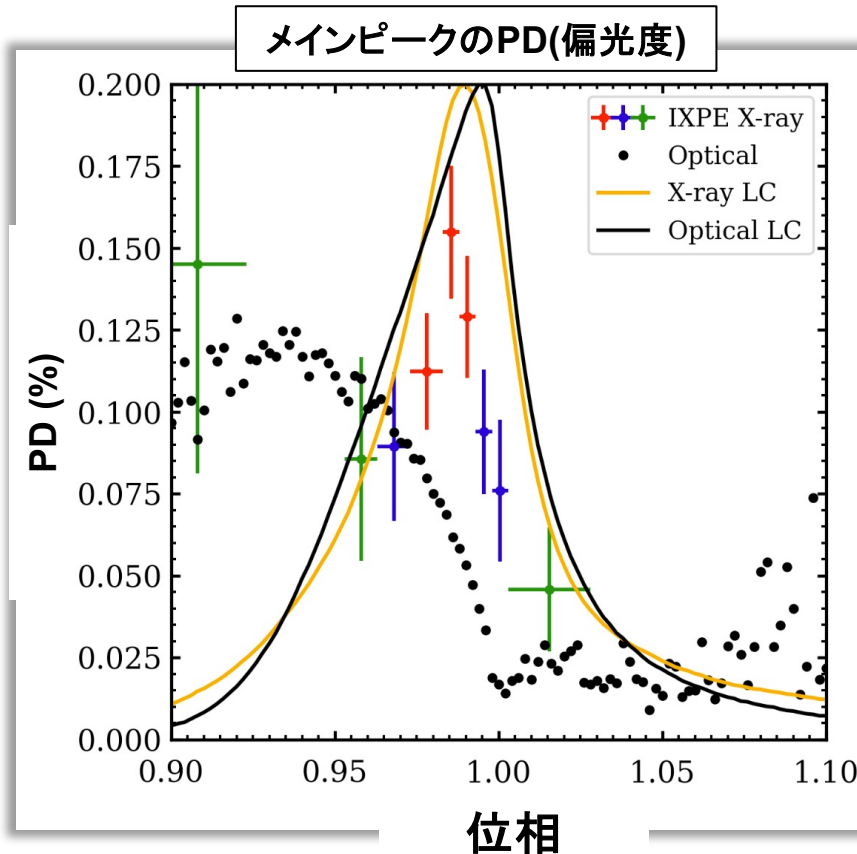
(Slowikowska+09;  
Gunji+22@JPS meeting)

PWNのPD(偏光度)マップ



パルサー部分(パルサーから直径40"の領域)のメインピークを3ビンより細かく分割して偏光解析

- メインピークの中央部に有意な偏光が見られ、直後に偏光度(PD)が有意に下がる
- 偏光方位角(PA)は位相が進むにつれて徐々に大きくなる傾向にある



Wong+24



# トーラス(PWN)のスペクトル・偏光同時解析(Wong+24; accepted)

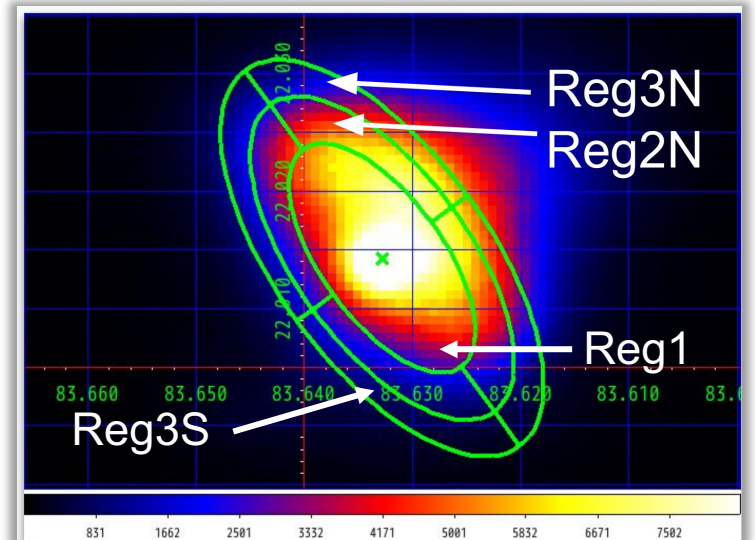
トーラスを内側から3領域に分け、各々を東西南北(E, W, S, N)4つの領域に分けて、偏光漏れ(Bucciantini+23)を補正してXspecで解析

● モデル関数は power-law(\*TBabs\*polconst)

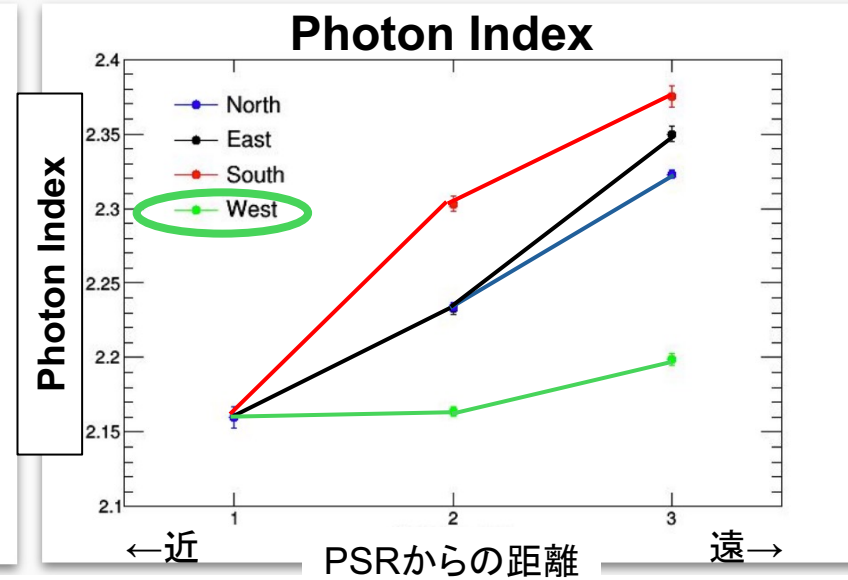
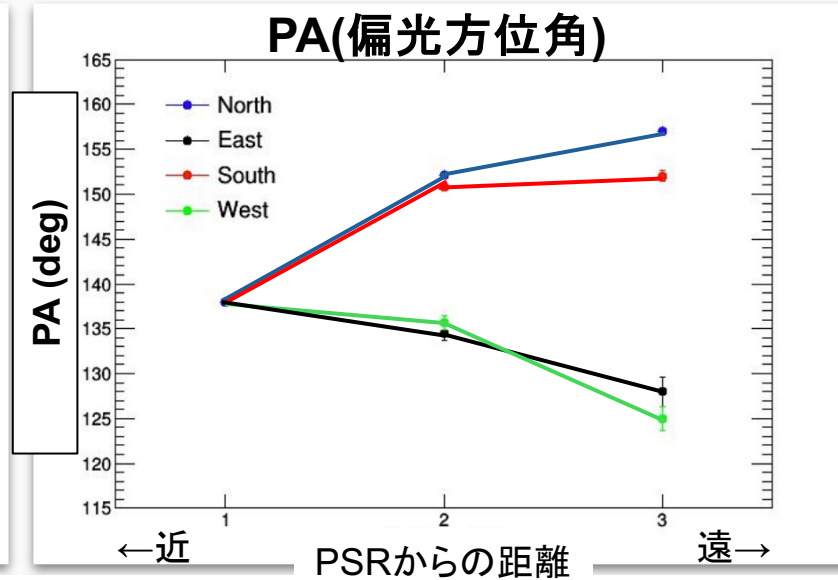
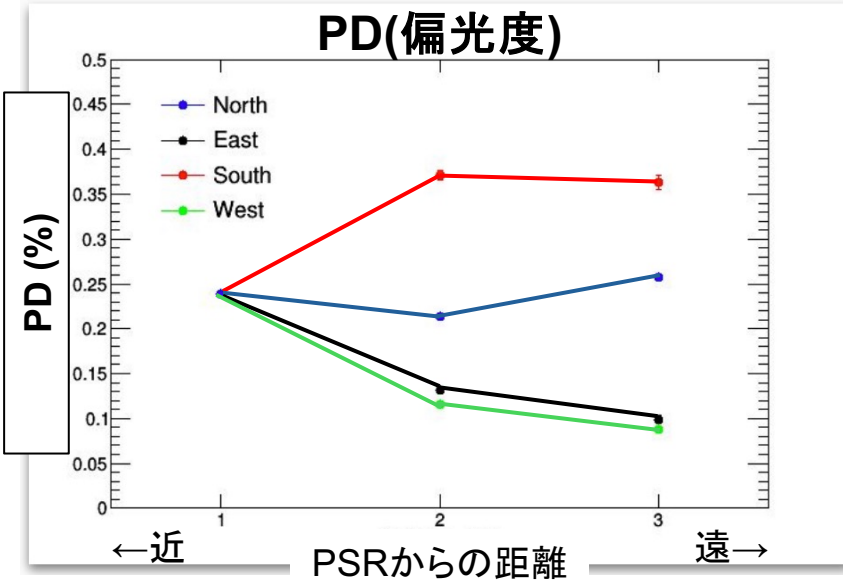
- 偏光度はN&Sで高く、E&Wで低い
- 偏光方位角はN&E、S&Wで反対の方向に変化
- スペクトルは星雲の外側ほどソフトだが、

**西側はハードなままかつ偏光度が最も低い**

→ 西側についてのさらに詳細な解析を現在行っている(次スライドから紹介)



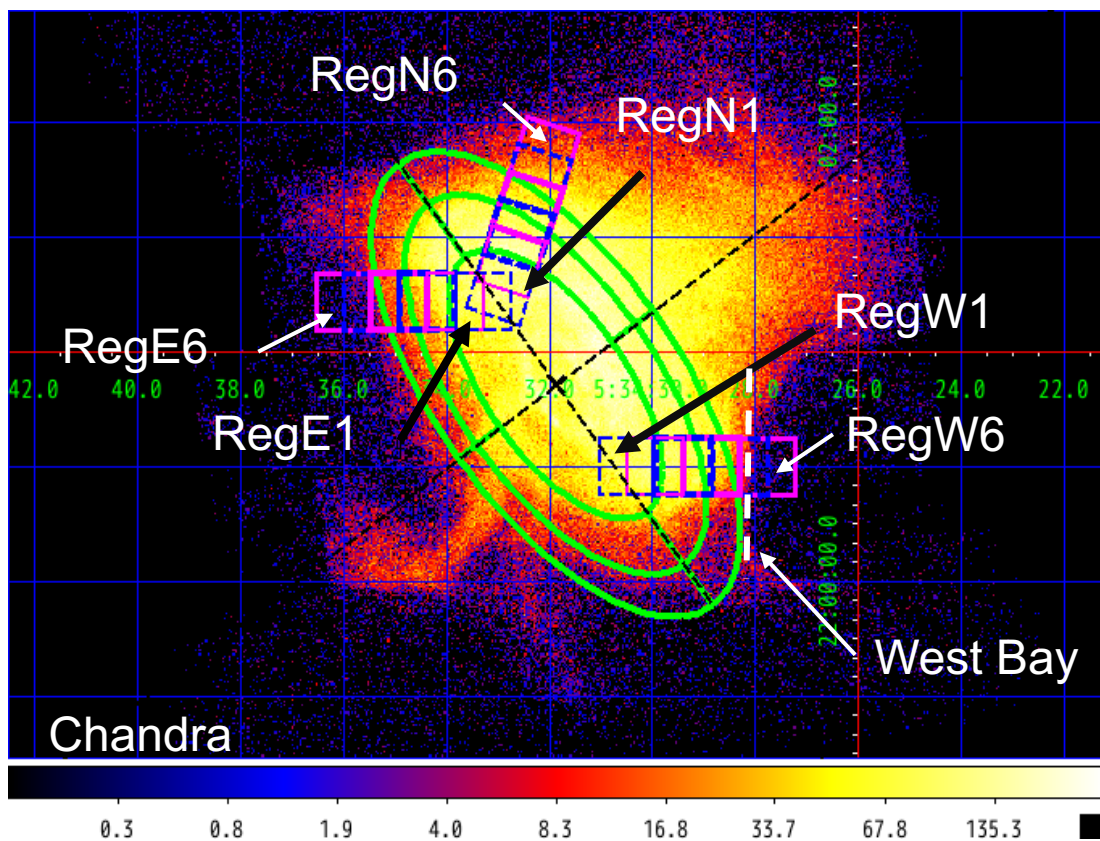
トーラスの領域の定義



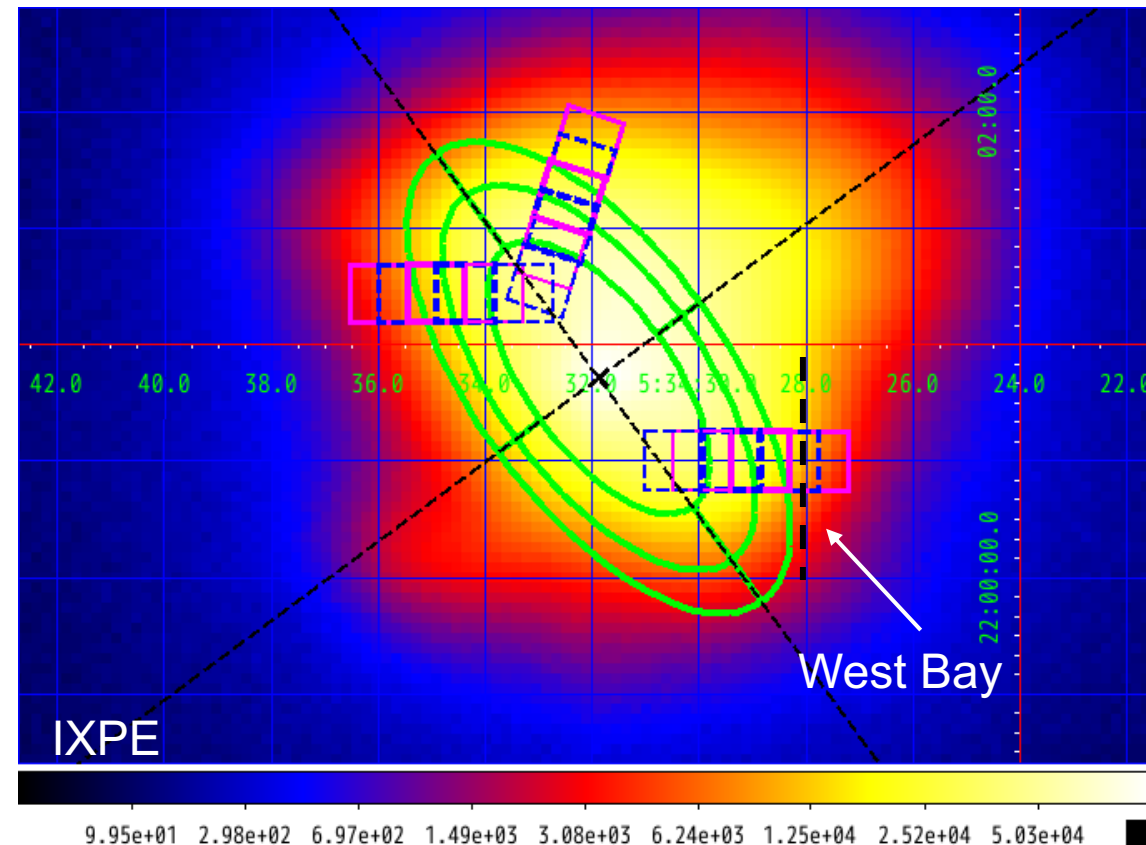
# “West Bay”のスペクトル・偏光同時解析;領域の定義

”West Bay”(Seward+06)付近のスペクトルがハードなのはMori+04でも見えていた。そのスペクトルと偏光の性質を調べるためにRA軸に沿った6領域を定義し、トーラスと同様に解析。比較のため東・北側に6x2の領域も同様に定義。

- パルサーに対して西側と点对称な位置(東側)、回転軸に対して線対称な位置(北側)
- 北、東、西のそれぞれの6領域(15”×15”)の中心をずらした



2024.09.12

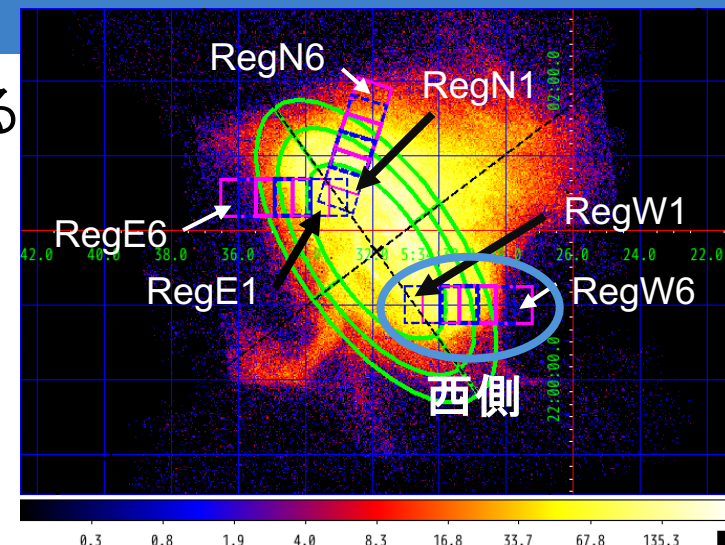


K. Goya

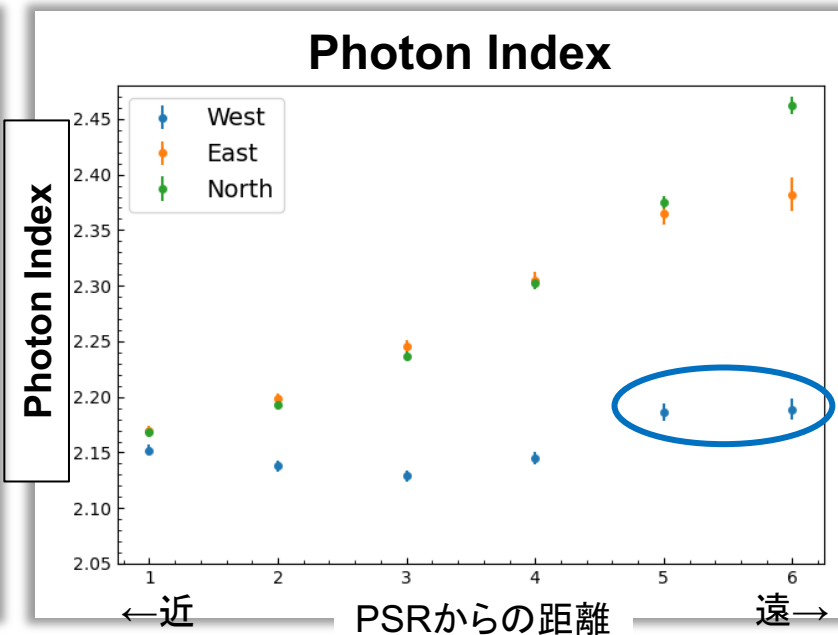
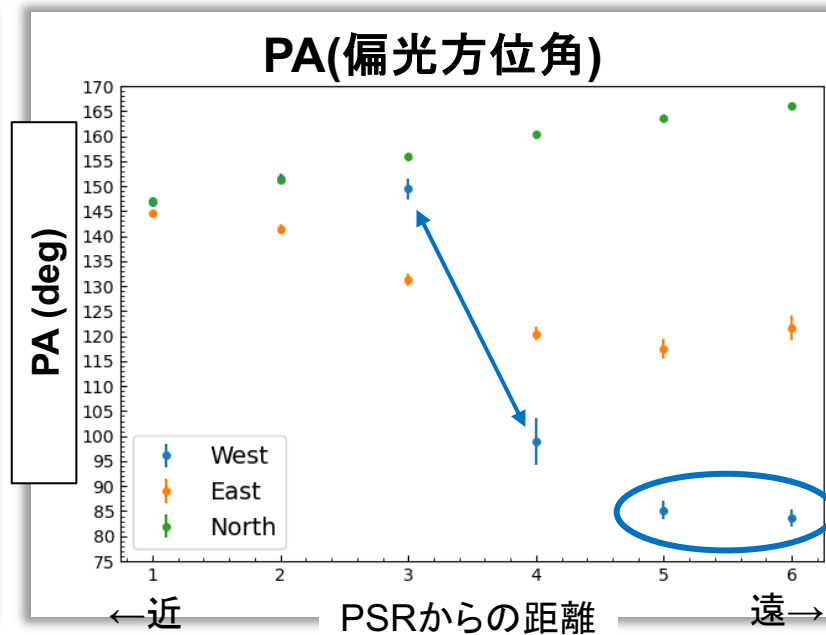
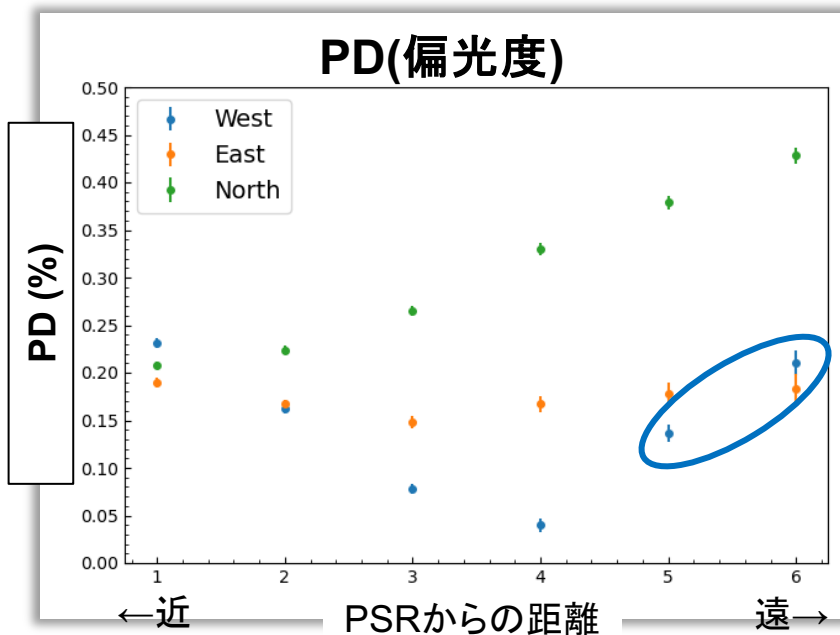
7

# “West Bay”のスペクトル・偏光同時解析; 解析結果

- PSFのためregs5・6でみている光子は、主にwest bay付近の星雲から来ている
- インデックス, PD, PAにおいて、西側は他の領域と異なる特徴
  - (左) PDはreg4までは徐々に下がり、regs5・6では10%以上にまた戻る
  - (真ん中) regs5・6で、南北もしくはwest bay に沿った磁場の方向
  - (右) スペクトルは西に行ってもハードなまま(シンクロトン冷却があまり効かない)



➡ West bay 付近で磁場の向きが急激に変化している。  
 これが、regs 3と4でPDが下がり、また西側においてシンクロトン冷却がそこまで厳しくない原因？





## IXPEチームのCrab第二論文における長時間観測の解析:

- PSRのパルス放射に対して
  - メインピークの中央部の前後で有意に偏光度が下がり、偏光方位角が徐々に変化
- PWNに対して
  - PDはN&Sで高く、E&Wで低い。PAはN&E、S&Wで反対の方向に変化
  - 西側のみ外側でもスペクトルがハードで偏光度が最も低い

## 現在行っているトーラス西側の詳細な解析:

- 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
    - 西側はシンクロトロン冷却が厳しくない
    - PDは West Bay 付近で徐々に下がりまた戻る
- 星雲からWest BayにかけてPD自体は一定だが、PAが急激に変化?

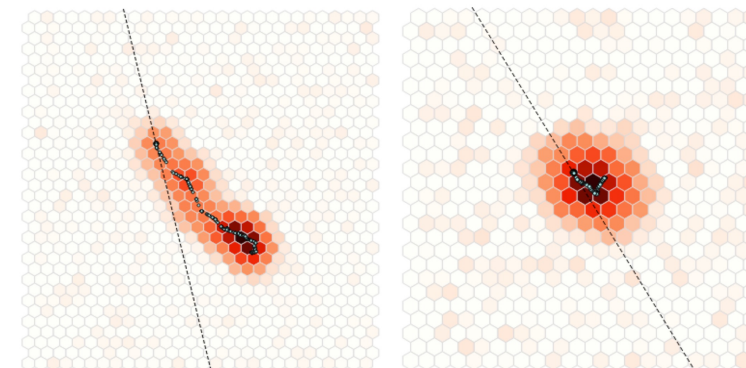
## 今後

- 結果の物理的な議論
- 上記仮説をChandraのイメージを用いてシミュレーションで検証
- 南北のJetについて、偏光漏れを考慮して偏光・スペクトル同時解析を行う

# 補足資料

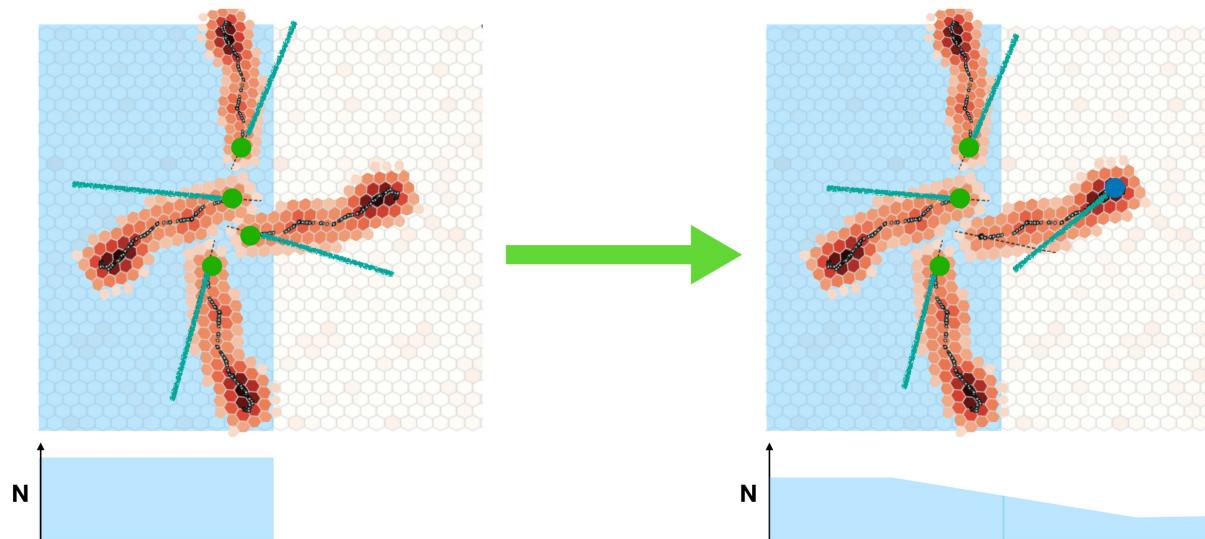
# 偏光漏れ:原理

- IXPEの検出器ではイベントの再構成によってX線の入射位置と光電子の射出方向を推定している。  
イベント構成に失敗すると、ソースの周りに本来存在しない「疑似偏光」ができてしまう→偏光漏れ
- 明るい点源の周りや広がった天体の周辺で補正する必要がある
- 低エネルギー光子は飛跡が円形になって再構成が難しい



7 keV(左)と3.5 keV(右)の再構成の模式図  
(Bucciantini+23)

ソースの端の鋭いエッジをもつ無偏光光源の偏光漏れ(Bucciantini+23)



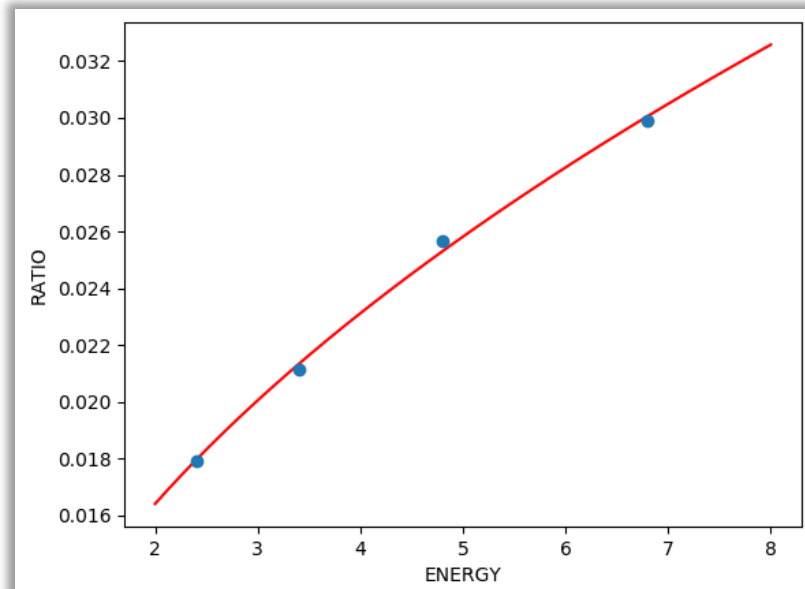
- 左図では全てのイベントが正しく再構成されており、全体として無偏光である
- 右図では再構成に失敗して疑似偏光ができています

# 偏光漏れ:補正手順

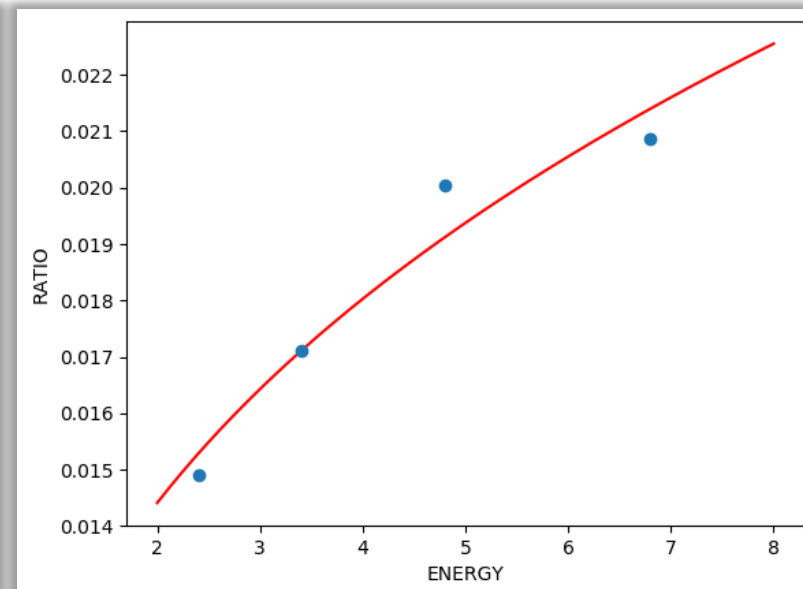
装置の応答を考慮して作成した4つのエネルギー(2, 2.6, 4, 5.6, 8 keV)における偏光漏れマップから各ストークスパラメータのリークスペクトルを作り、もとのスペクトルから差し引くことで偏光漏れを補正する

- ストークスパラメータ I/Q/U の偏光漏れの割合をエネルギーの関数でフィットしてエネルギーに依存した偏光漏れの関数を決める
- フィットした関数と観測データから得たスペクトルをかけてリークスペクトルを作る
- もとのスペクトルからリークスペクトルを差し引いて偏光漏れを補正する

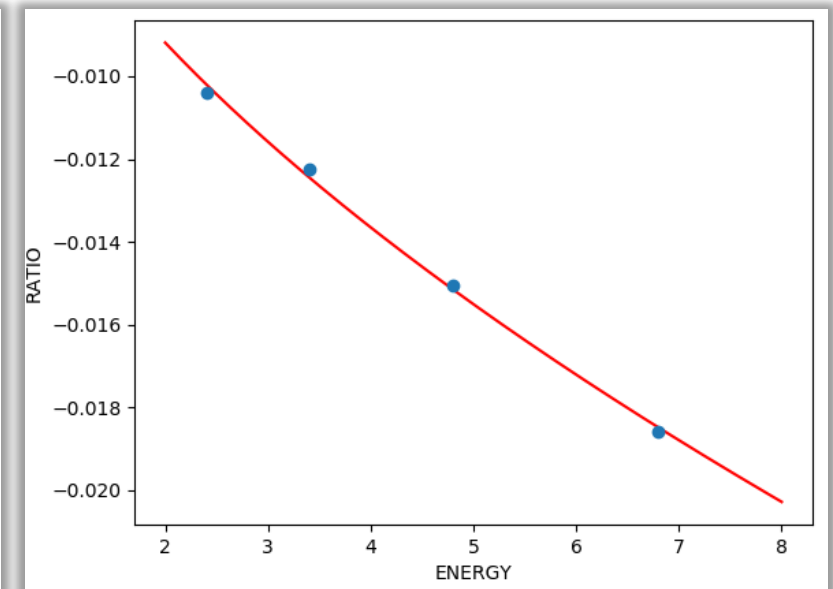
$I_{\text{leak}}/I(\text{Torus3-S})$



$Q_{\text{leak}}/I(\text{Torus3-S})$

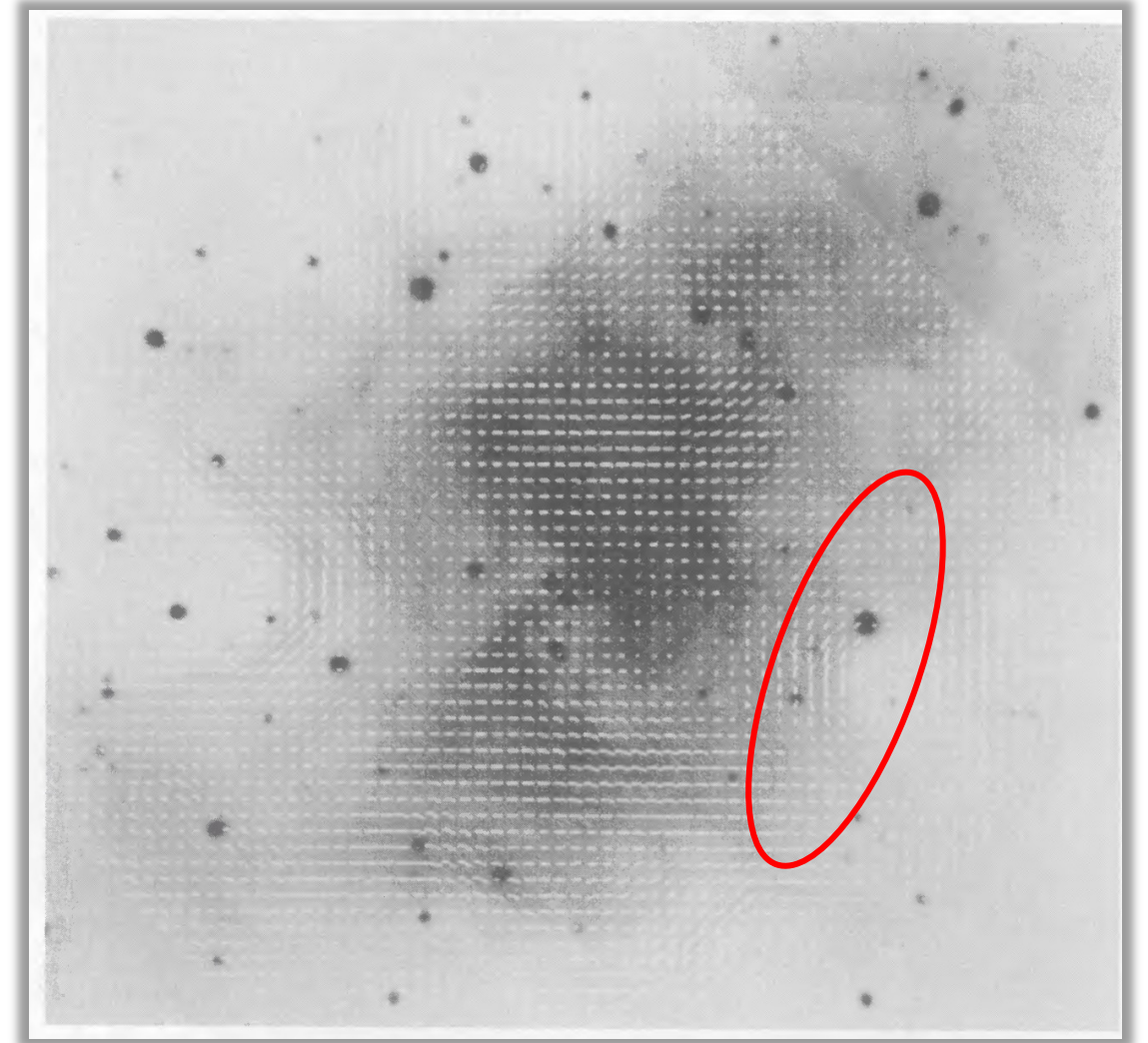


$U_{\text{leak}}/I(\text{Torus3-S})$



# West Bay の可視光での過去の偏光観測(Hickson+90)

- Hickson+90 では可視光によるCrabの解析が行われている
  - 白い線は、向きが磁場方向、長さが偏光度を表す
  - 各グリッドは2" x 2" の領域で、グリッドと同じ長さの線は50%偏光を表す
  - 磁場の向きは West Bay に沿った磁場構造を報告しており、今回の解析結果と同じ傾向



可視光での磁場方向と偏光度マップ(Hickson+90)



# 光子の検出とストークスパラメータの評価

- 光電子の射出方向と検出器のX軸のなす角を $\phi_k$

$$i_k \equiv 1, q_k \equiv 2 \cos 2\phi_k, u_k \equiv 2 \sin 2\phi_k$$

(k番目光子のストークスパラメータ)

$$I = \sum_{k=1}^N i_k = N, Q = \sum_{k=1}^N \frac{q_k}{\mu}, U = \sum_{k=1}^N \frac{u_k}{\mu}$$

(全光子のストークスパラメータ)

$$PD = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, PA = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right)$$

(PD: 偏光度、PA: 偏光方位角)

## 電子飛跡の図

