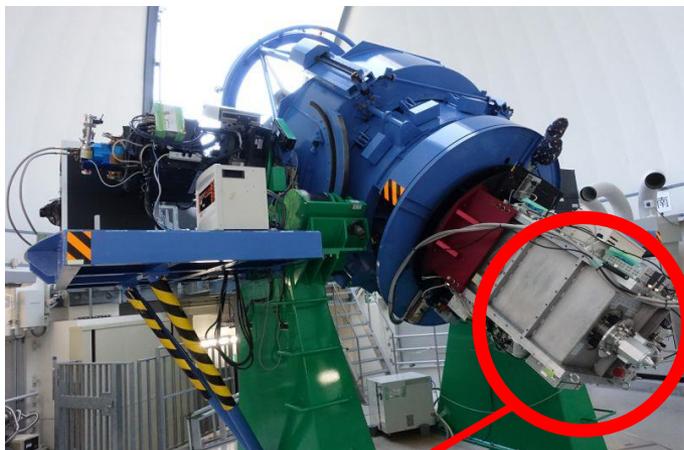


可視近赤外線偏光観測による銀河磁場探査

中村謙吾, 川端弘治, 森文樹, 中岡竜也, 今澤遼 (広島大学),
土井靖生 (東京大学), 松村雅文 (香川大学), 笹田真人 (東京工業大学)



可視光・近赤外線同時偏光観測



広島大学宇宙科学センター

- かなた望遠鏡

広島大学が所有する光学赤外線望遠鏡

- Ritchey-Chretien 光学系
- 主鏡の有効半径：1.5 m

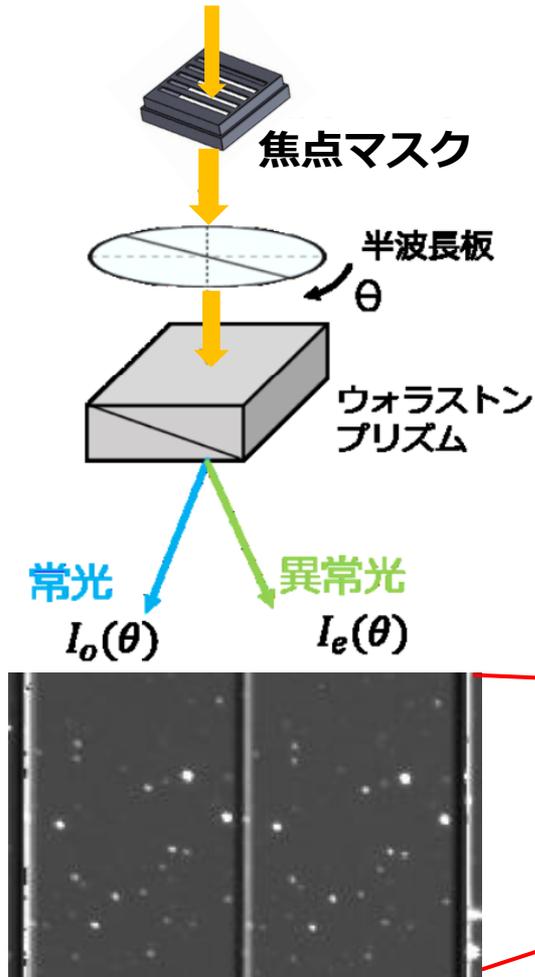
HONIR (Hiroshima Optical Near-InfraRed camera)

観測モード	撮像、分光、偏光撮像、偏光分光
視野	10' × 10'
フィルター	B, V, Rc, Ic, Y, J, H, Ks

可視1チャンネル、近赤外1チャンネルの同時観測が可能
(世界的にも稀)

HONIRの偏光撮像モード

天体からの光



- 焦点マスク

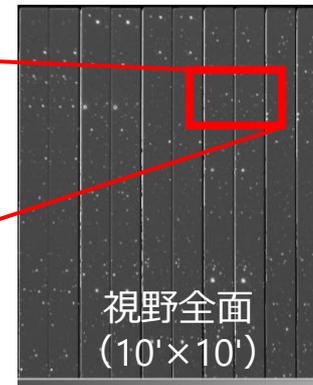
常光・異常光の重なりを防ぐ。

- 半波長板

4方位 (0° 、 22.5° 、 45° 、 67.5°)回転させる。

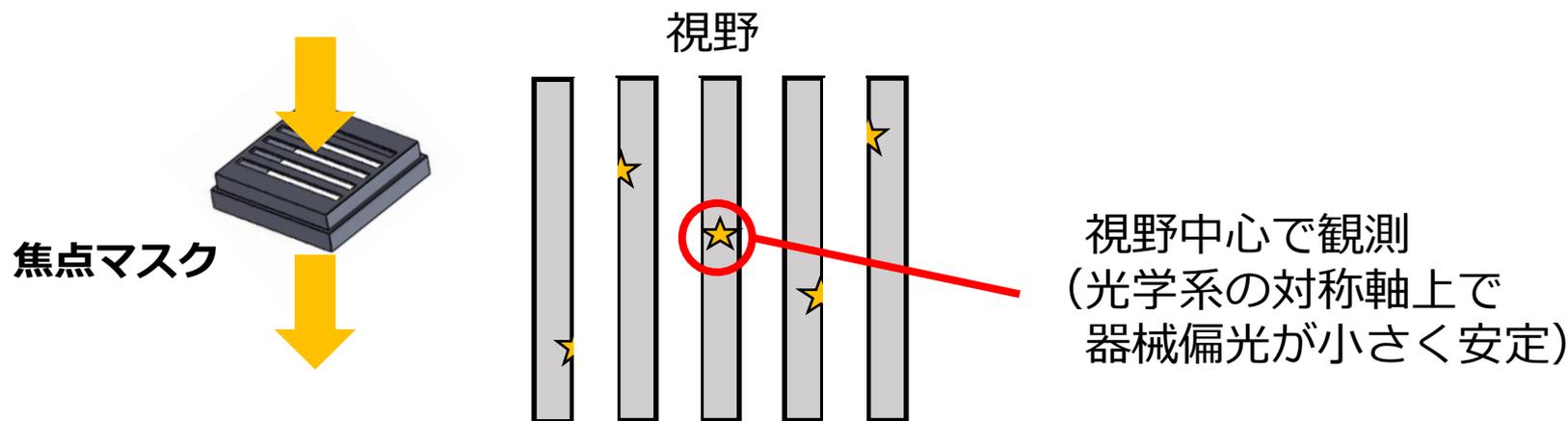
- ウォラストンプリズム

入射光は、偏光面が互いに直交する常光・異常光の2成分に分離される。



常光・異常光の同時測定 → 高い偏光測定精度

HONIRの偏光モードを用いた研究例



- 小惑星Ryuguの高い偏光が示す表面状態 (Kuroda et al. 2021)
- 強い偏光を示した明るいII型超新星 SN 2017hcc(Kumar et al. 2019)
- ニュートリノイベント IceCube-170922Aの電磁波対応天体(Morokuma et al. 2021)
- 様々なブレイザーの可視近赤外線偏光とガンマ線フラックス(Itoh et al. 2021)
- 母銀河で強い吸収を受けたIa型超新星SN 2014Jの偏光(Kawabata et al. 2014)

：
ほぼすべて、**視野中心での単一天体のみの観測**

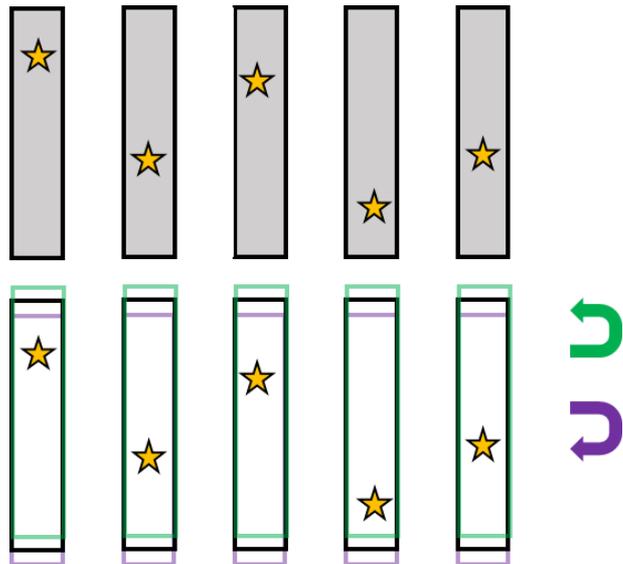
広めの視野を活かした星間偏光マッピングへの期待

目的： 視野全面での偏光撮像モードの実用化

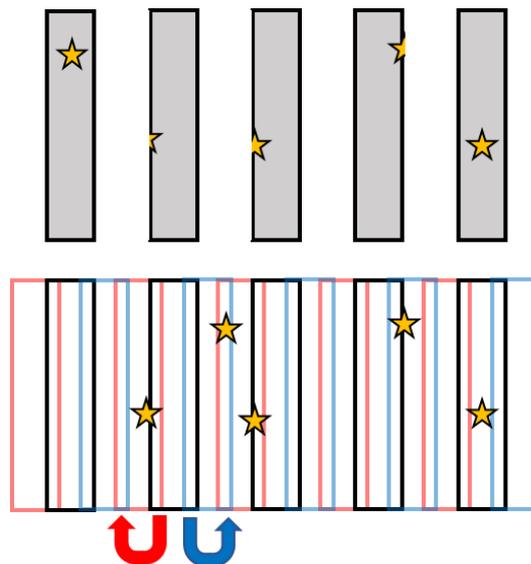
→リダクションパイプラインの整備と評価、
モザイク観測の扱いと評価

ディザリング+モザイク観測

欠陥ピクセル対策のため、
各視野で縦方向に3視野ずらして観測。



領域内を全体をカバーするため、
横にずらしながら3視野で観測。



つまり各領域で、3×3ディザ×4波長板方位 = 36露出

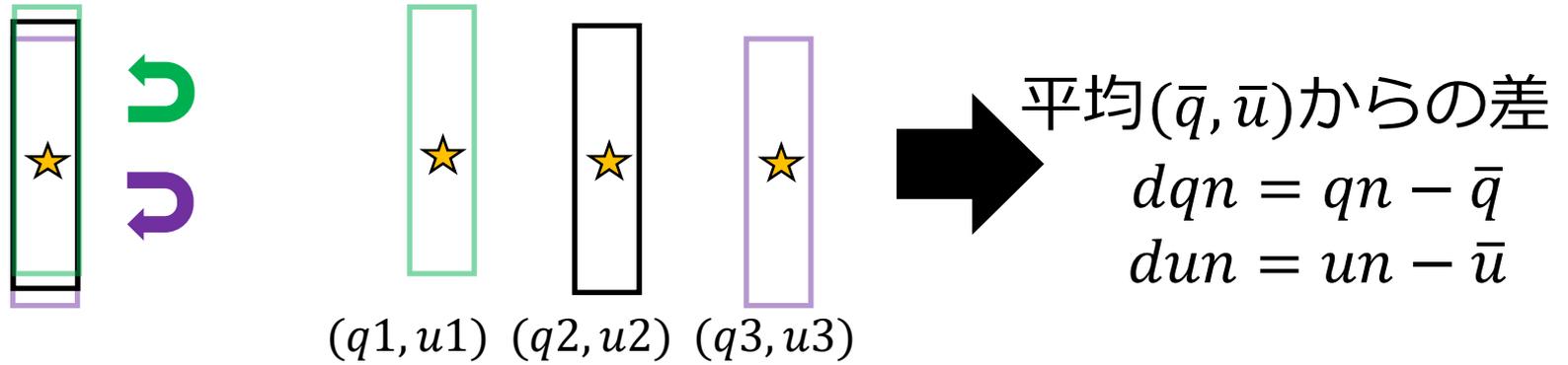
バンド	露光時間[s]	半波長板方位角[deg]	ディザ
R	75	0, 45, 22.5, 67.5	3x3
H	60	0, 45, 22.5, 67.5	3x3

7.8' × 9.0'内の
すべての天体を
3回以上偏光測定

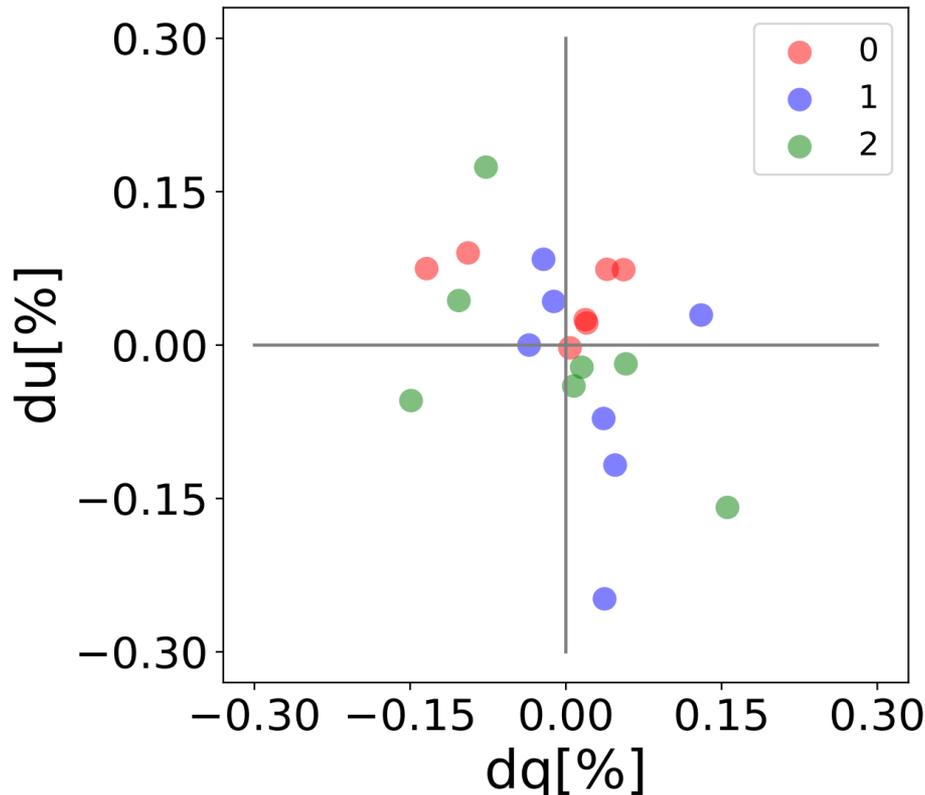
解析は、パイプライン
(Pythonベース; 笹田、森) を使用。

目標 : $q_err, u_err \leq 0.2\%$

ディザリング間の安定性

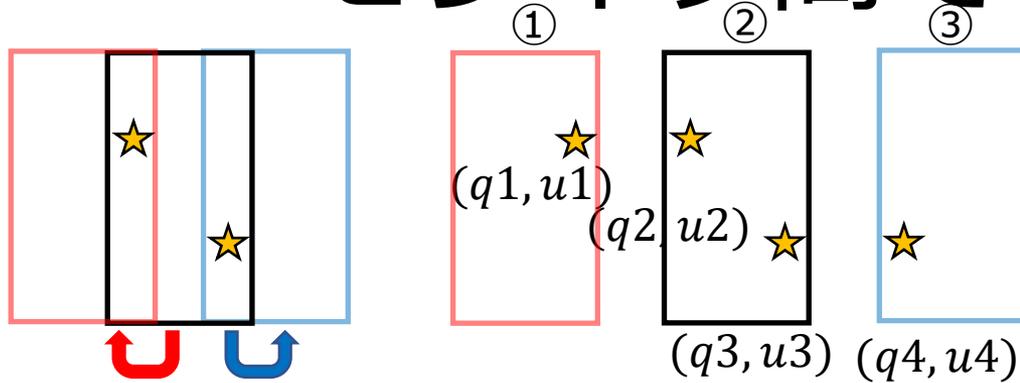


縦3方向ディザ間の観測値の安定度 (Rバンド, 明るいサンプル星 $\sigma_{\text{FLUX}} \leq 0.05\%$)



$\sigma_q, \sigma_u \lesssim 0.15\%$

モザイク間での安定性



平均(\bar{q}, \bar{u})からの差

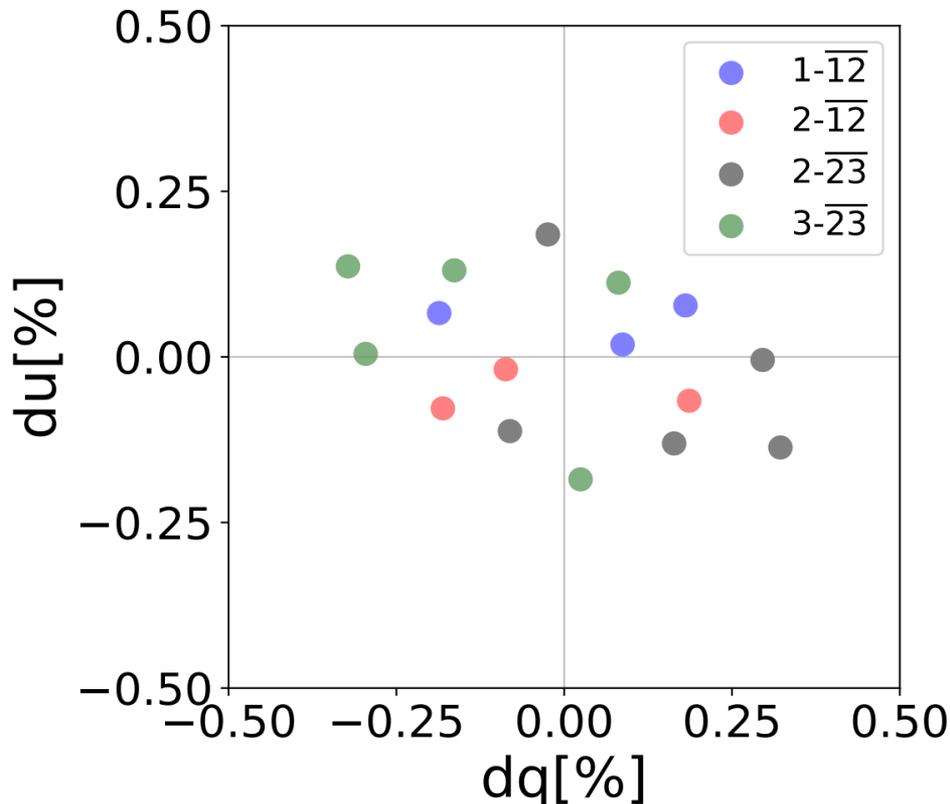
$$dq = q - \bar{q} \quad (①, ②)$$

$$du = u - \bar{u} \quad (①, ②)$$

$$dq = q - \bar{q} \quad (②, ③)$$

$$du = u - \bar{u} \quad (②, ③)$$

横(RA)方向ディザ間での観測値の安定度



両側13秒角ずつ他のモザイクと重複し、
重複部分の同じ星のq,uの差は、

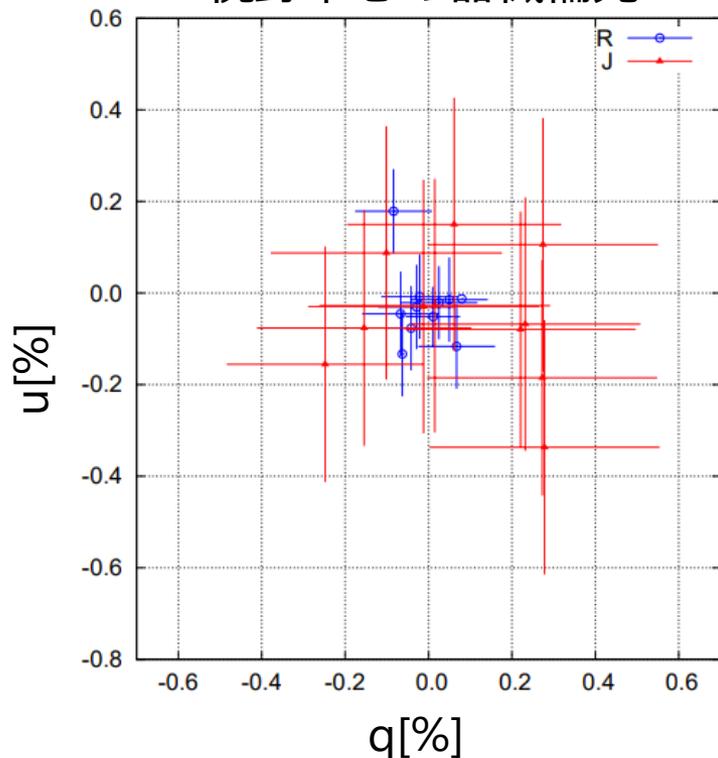
$$|dq, du| \lesssim 0.3\%$$

視野端付近のマスクによる
ケラレの影響が残っている

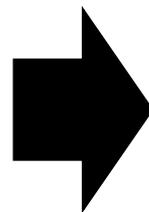
ディザ、モザイク共に
安定した結果が得られつつある

器械偏光

視野中心の器械偏光



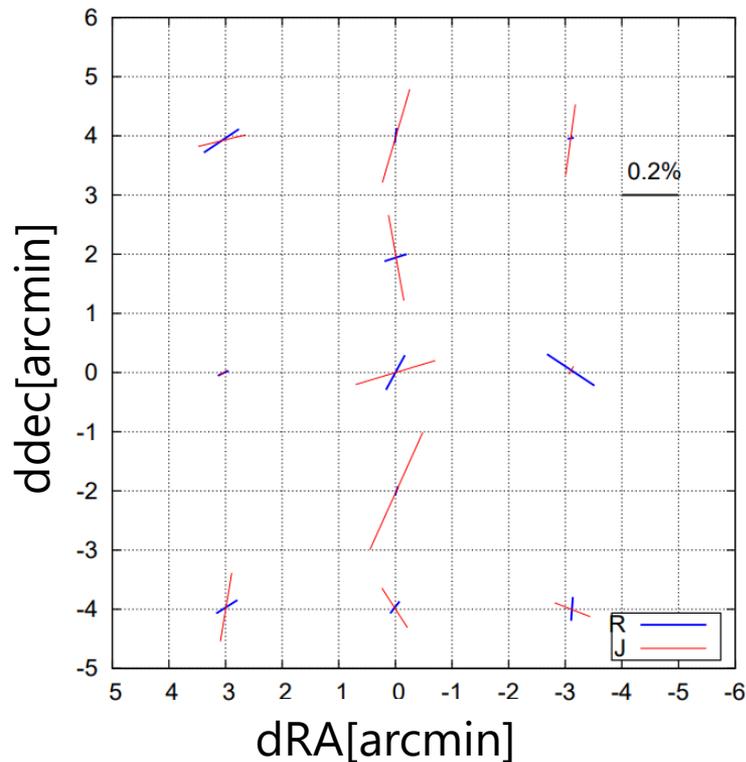
中心以外では？



Akitaya+ 2014

器械偏光は十分に小さい
(可視 $\leq 0.1\%$ 近赤外 $\leq 0.2\%$)

視野内の器械偏光ベクトル(R,Jバンド)

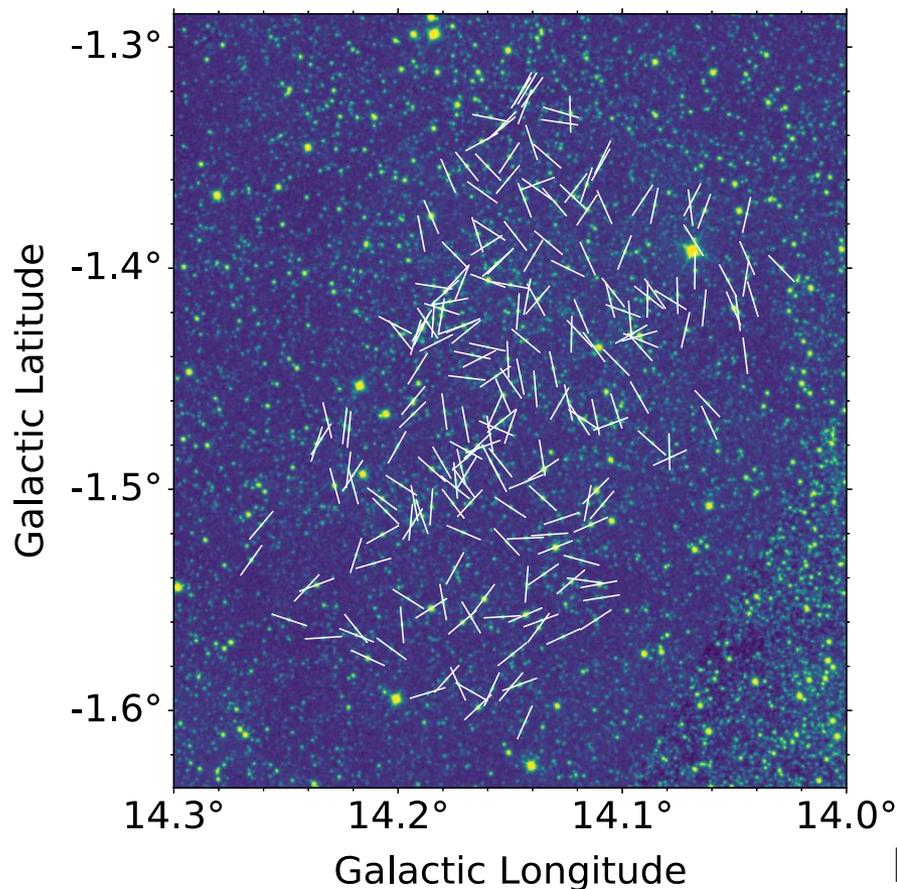


縦 ± 4 分角、横 ± 3 分角以内の
器械偏光は小さい

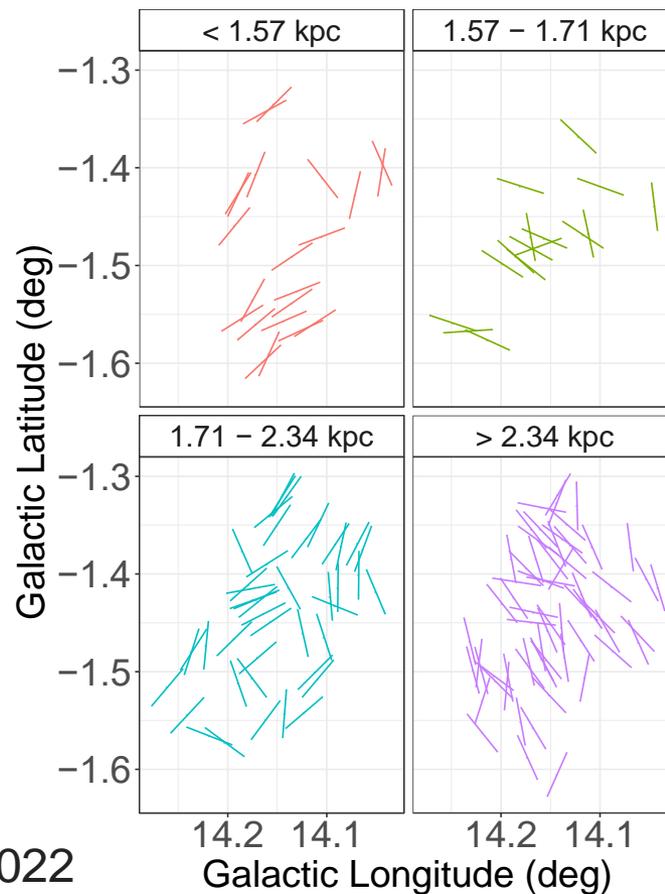
- 視野中心の器械偏光は2014年以降十分に小さいまま
- 視野内の器械偏光も総じて小さい。
視野全面の密な調査は進行中

偏光観測による三次元磁場構造

偏光ベクトルマップ



距離ごとの偏光ベクトルマップ



初のHONIR視野全面を使った偏光観測において、十分な精度の結果が出始めている。

まとめ

- HONIRでの視野全面にわたる偏光観測とリダクションパイプラインの実用化
十分な偏光精度が得られている（明るい星で $\sigma_q, \sigma_u \leq 0.3\%$ ）
- 銀河面中のいくつかの領域の偏光マップを作成
距離ごとの銀河磁場構造の違いが捉えられつつある

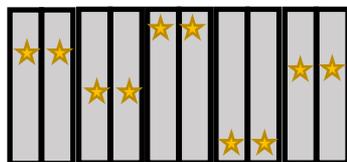
今後

- 視野全面にわたる器械偏光の詳細確認
- 近赤外Hバンドの測定精度向上（スカイ引き等キャリブの見直し）
- パイプラインの高耐性化
- 三次元磁場構造の解明のための未観測領域の観測

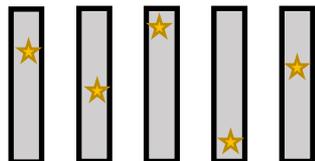
補足スライド

本パイプラインの流れ

視野全面の偏光観測用に改良したパイプライン
(Pythonベース; 笹田、森) を補修しながら使用。

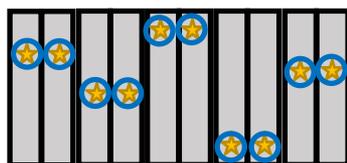


一次処理済み画像



スタッキング画像の作成、
天体位置検出(SExtractorを使用)

0° - 67.5° の
常光・異常光
計8枚をcombine



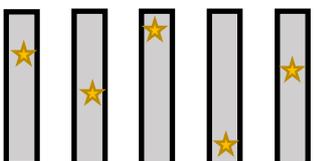
測光(SExtractorを使用)

検出した位置をもとに
測光を行う。

位置 偏光方位角 偏光度

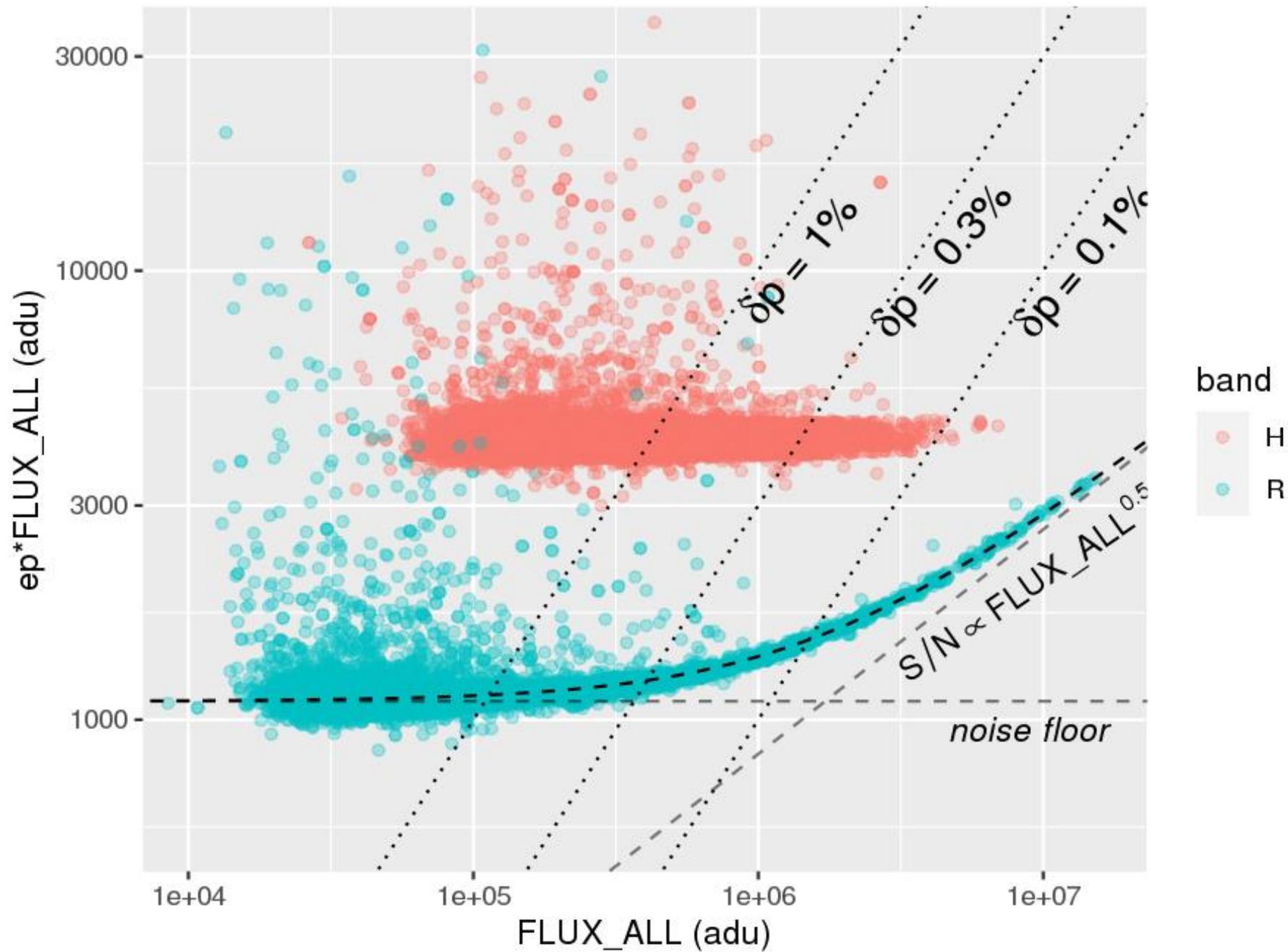
	位置	偏光方位角	偏光度
星A	(x_a, y_a)	PA_a	P_a
星B	(x_b, y_b)	PA_b	P_b
星C	(x_c, y_c)	PA_c	P_c

偏光方位角、偏光度を算出



ディザリング・モザイク処理

WCS張り + Gaia恒星カタログとのマージング

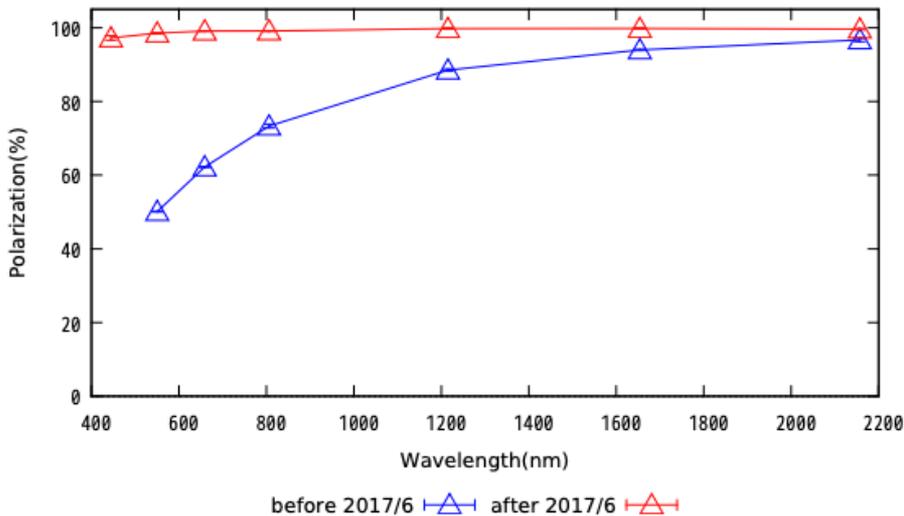


偏光キャリアレーション

• 器械消偏光

直線偏光の一部が円偏光に変換されることによる
直線偏光度の減少

偏光度の波長依存性
(偏光度100%の人工光を入射)

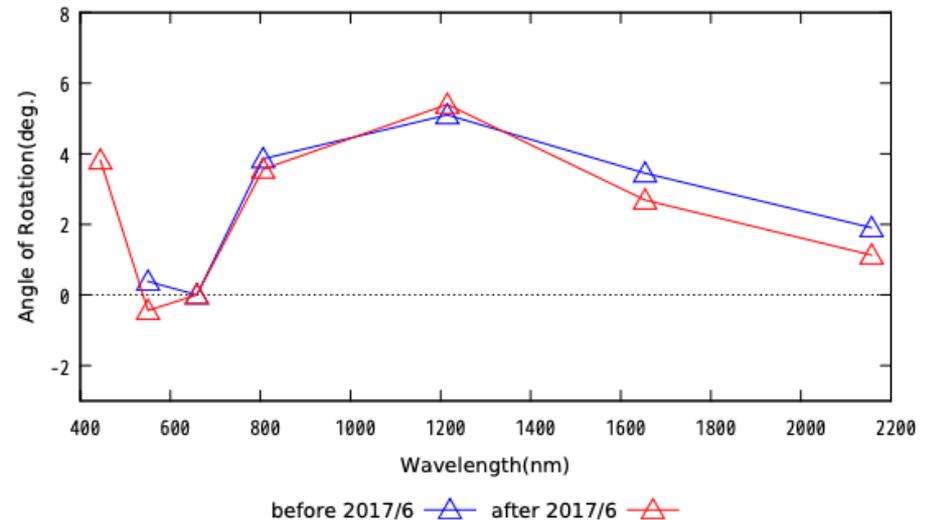


消偏光は充分小さい ($\leq 2\%$)

• 偏光方位角の原点補正

半波長板の広帯域化のため
等価光学軸が波長により回転

偏光方位角の波長依存性
(Rバンドを0°に設定)



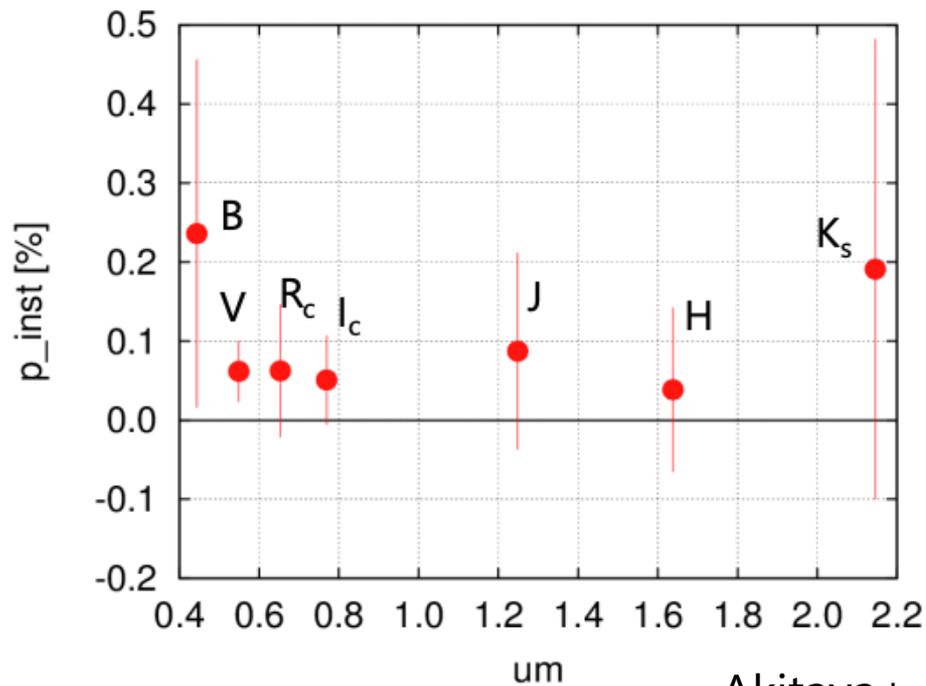
波長により±数度ずれる

長木 (広島大学修士論文2018)

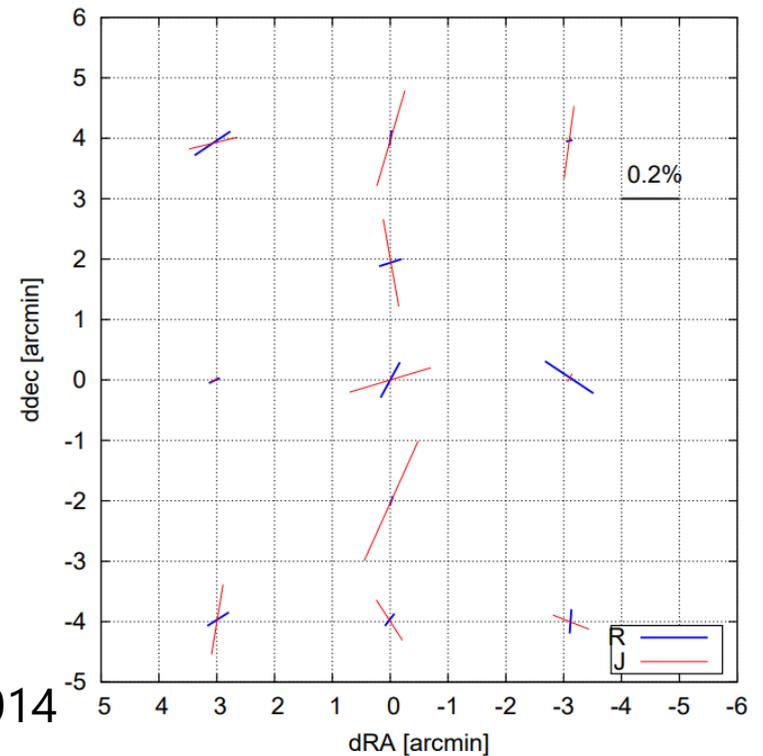
偏光キャリブレーション

- 器械偏光 望遠鏡の鏡や観測装置の光学素子で生じる偏光

視野中心の器械偏光



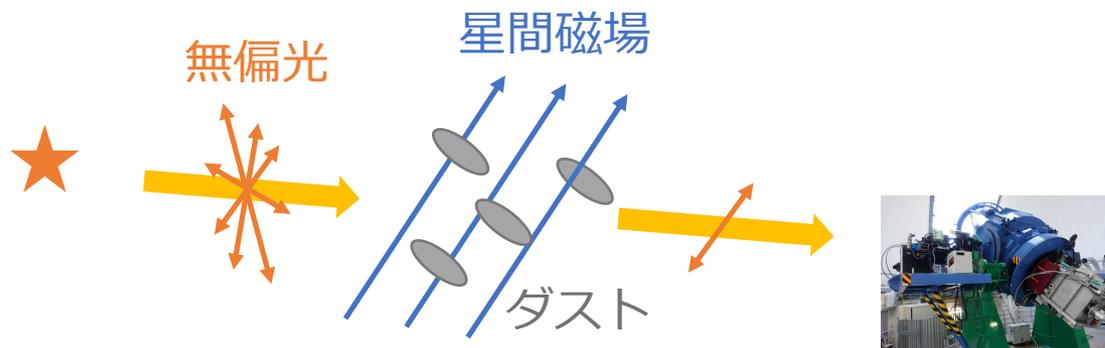
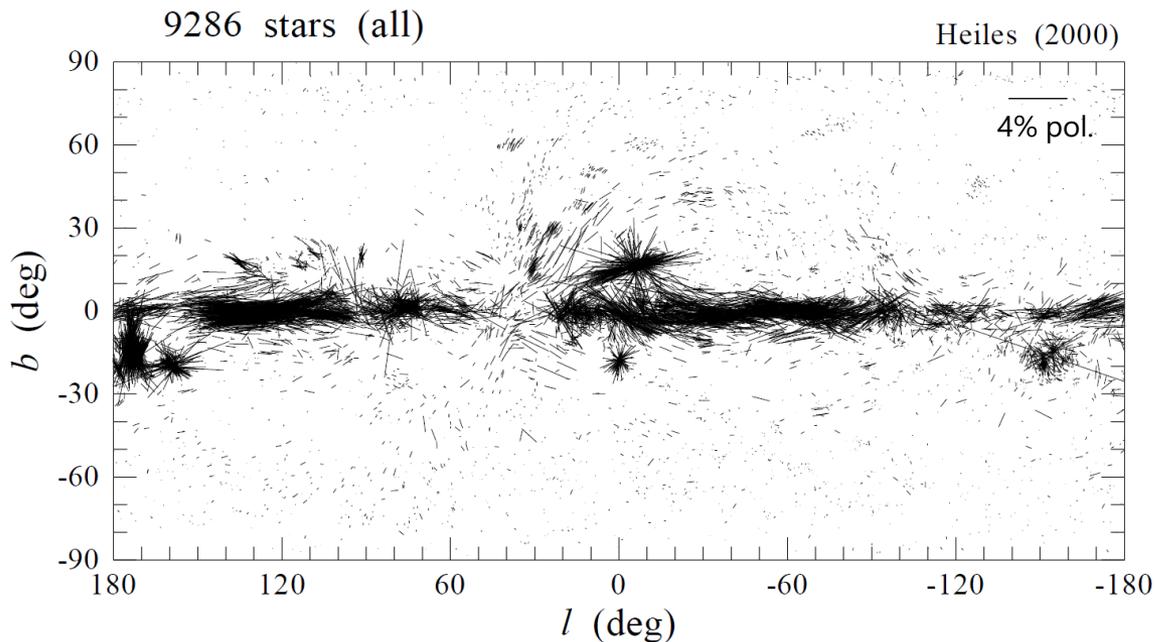
視野内の器械偏光ベクトル(R,Jバンド)



十分に小さい (可視 $\leq 0.1\%$ 近赤外 $\leq 0.2\%$)

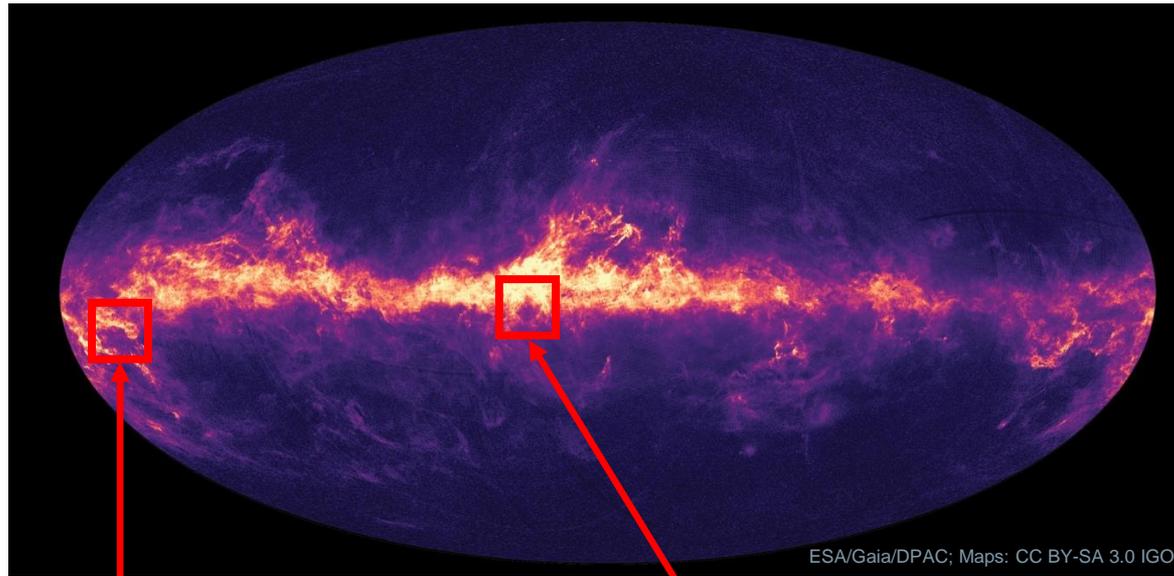
左右両端スロットのの器械偏光は確認中

星間偏光



銀河磁場によって整列した星間ダストによって偏光
つまり、星間偏光の向きは銀河磁場の向き

観測天域



観測領域 #1 (おうし座付近)

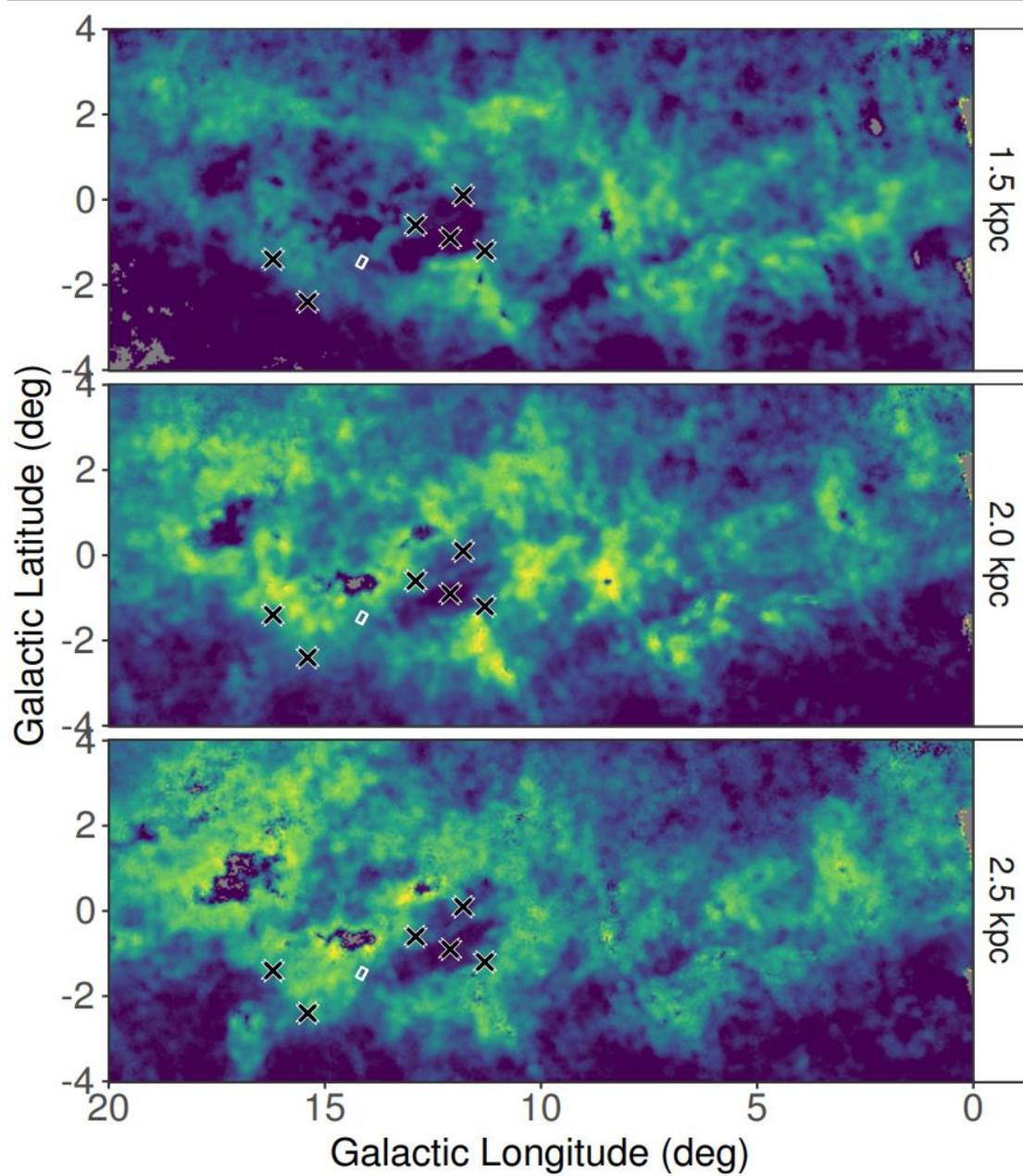
観測領域 #2 (いて座付近)

- 反銀河中心方向

- 銀河中心方向

距離が異なる2つの星間雲
(TaurusとPerseus)の端が重なる領域。

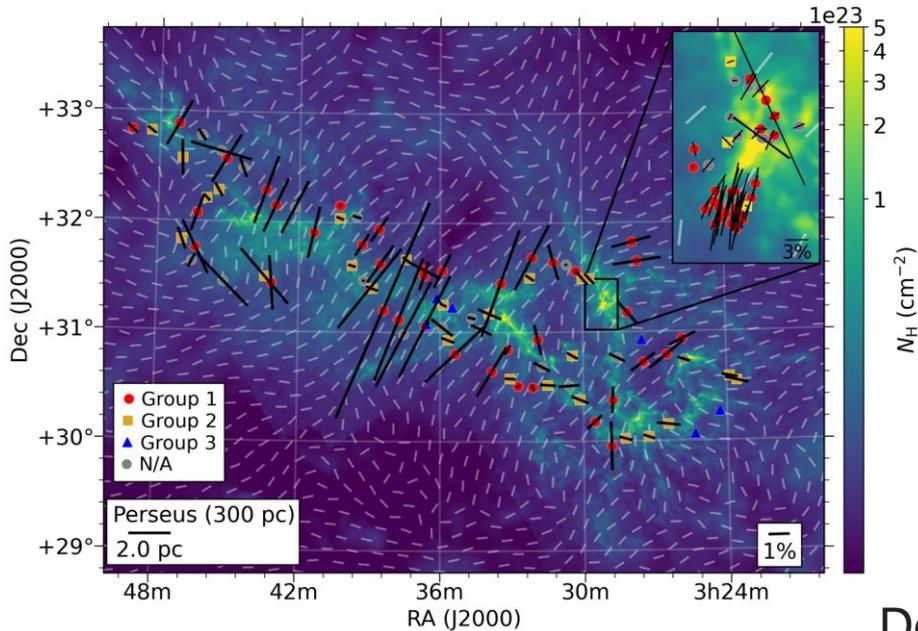
- PlanckのXXGHzの偏光マップで赤道方向から大きくずれた偏光方向を持つ。
- Gaiaカタログで様々な距離のサンプル星が得られる。
(星間吸収が濃すぎず薄すぎもしない)



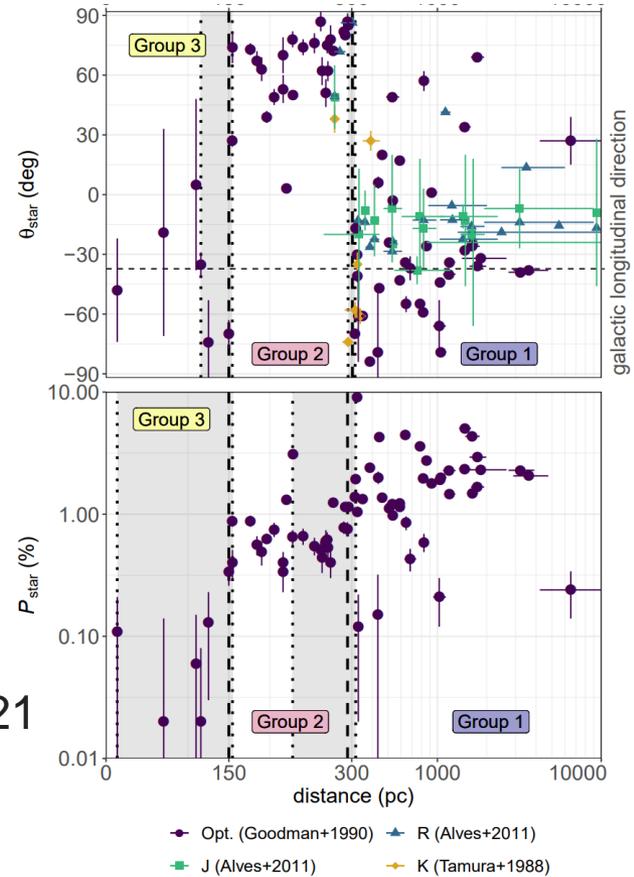
A_G (mag / 500 pc) 0.3 1.0 3.0

Gaia衛星と銀河磁場の距離分解

磁場の視線方向の積分値を観測。



Doi+ 2021



距離ごとの偏光を明らかにできる

• Gaia衛星



視差の精度

7 μas : G=10等級;

26 μas : G = 15等級;

600 μas : G = 20等級

Credit: Gaia, esa, Science Performance

偏光データ



ガイアの位置・距離データ



三次元的な磁場構造