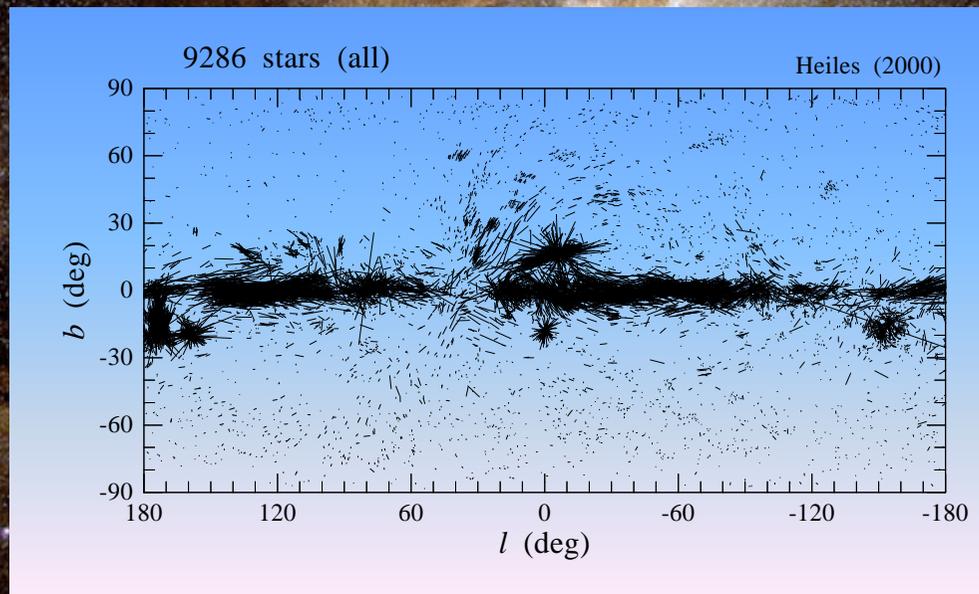


SGMAP: 広島大可視偏光サーベイ 計画とCMB偏光観測への貢献

広島大学宇宙科学センター 川端弘治
吉田道利、植村誠、秋田谷洋、内海洋輔、森谷友由希、
観山正見、大杉節、ほかSGMAP協カグループ



2m広視野タイプの望遠鏡＋偏光観測装置・・・専用化
～14等より明るい恒星 数百万個の可視3バンド偏光サーベイ
初の全(半)天偏光サーベイ → カタログ化

- 天の川銀河の詳細な三次元磁場構造(円盘面、ハロー)
 - Gaia, JASMINE衛星による恒星の高精度距離計測との融合
 - 低周波の全天偏波マップやALMAの超精細偏光マッピングとも相補的
 - 星周域・SNRにおける磁場の圧縮・乱れ、外縁部の磁場、磁場の起源...
- 新しい偏光天体の発見(連星系、AGN等)
- 恒星の光球形状や活動性・質量放出の統計的研究
 - SDSSのスペクトルカタログなどとの相乗効果
- 星間ダストの統計的性質
- 前景 星間偏光の高精度見積もり(CMB、系外銀河・超新星)ほか)
- 前景 星間吸収の高精度見積もり(R_V の位置依存性)

∴ ∴ ∴

建設計画

MAGNUM 2m telescope
(Univ. of Tokyo)



Low cost, quick construction,
and quick start of observation



Dismantled and
back to Japan
In 2009

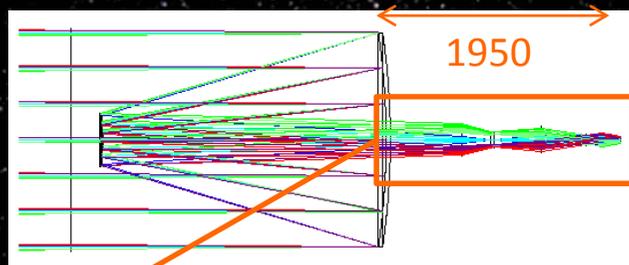


MAGNUM was operated atop
Haleakala from 2000 to 2008

Move to
our observatory



広視野光学系と観測装置（概念）



FOCAS波長板
直径~12cm

HONIR波長板
直径~10cm



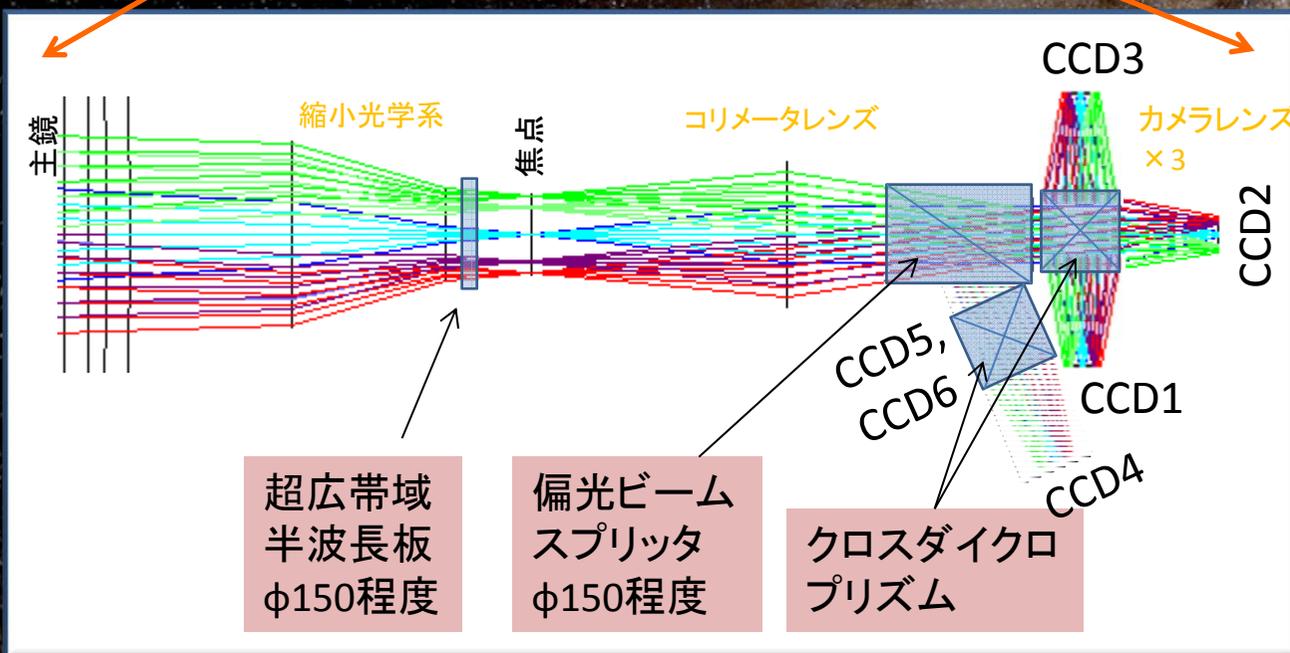
FOCASビームスプリッタ
~12cm立方



クロスダイクロプリズム



©(有)ハイメック



- 副鏡サイズアップ
- 縮小光学系 + 再結像光学系

視野33→50分角φへ

サーベイ計画 (50分角 ϕ での案)

- (40秒 \times 4露出)で $V=14.0$ 等に $\Delta p=0.2\%$ 、 $V=13.0$ 等に $\Delta p=0.1\%$ を達成
シーイング1.8秒角、スカイ18等/平方秒角、総合効率20%という余裕をみた見積もり
- 1セットの観測(オーバーヘッド込み)に4.6分間、一晩8時間に100セット取得
- 実効視野 0.44平方度 (視野50分角 ϕ で漏れなくカバーする場合)

1. 銀河面サーベイ

- $|b| < 30^\circ$, $l = 0-220^\circ$ (12000平方度)
- $12000/0.44=27272$ 露出でカバー、273晩で完了
- 晴天率0.333なら819晩=2.3年で完了

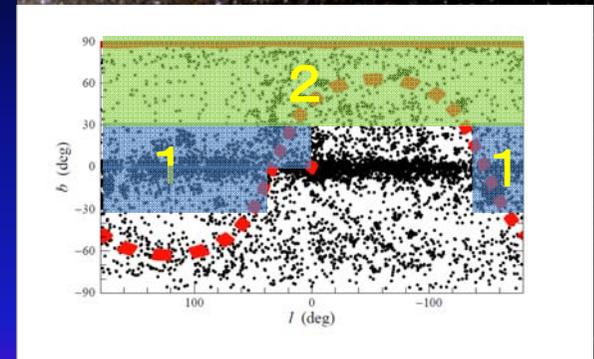
2. 中高銀緯サーベイ

- $b = +30 - +90^\circ$, $l = 0-360^\circ$ (10313平方度)
- $10313/0.44=23439$ 露出でカバー、235晩で完了
- 晴天率0.333なら706晩=1.9年で完了

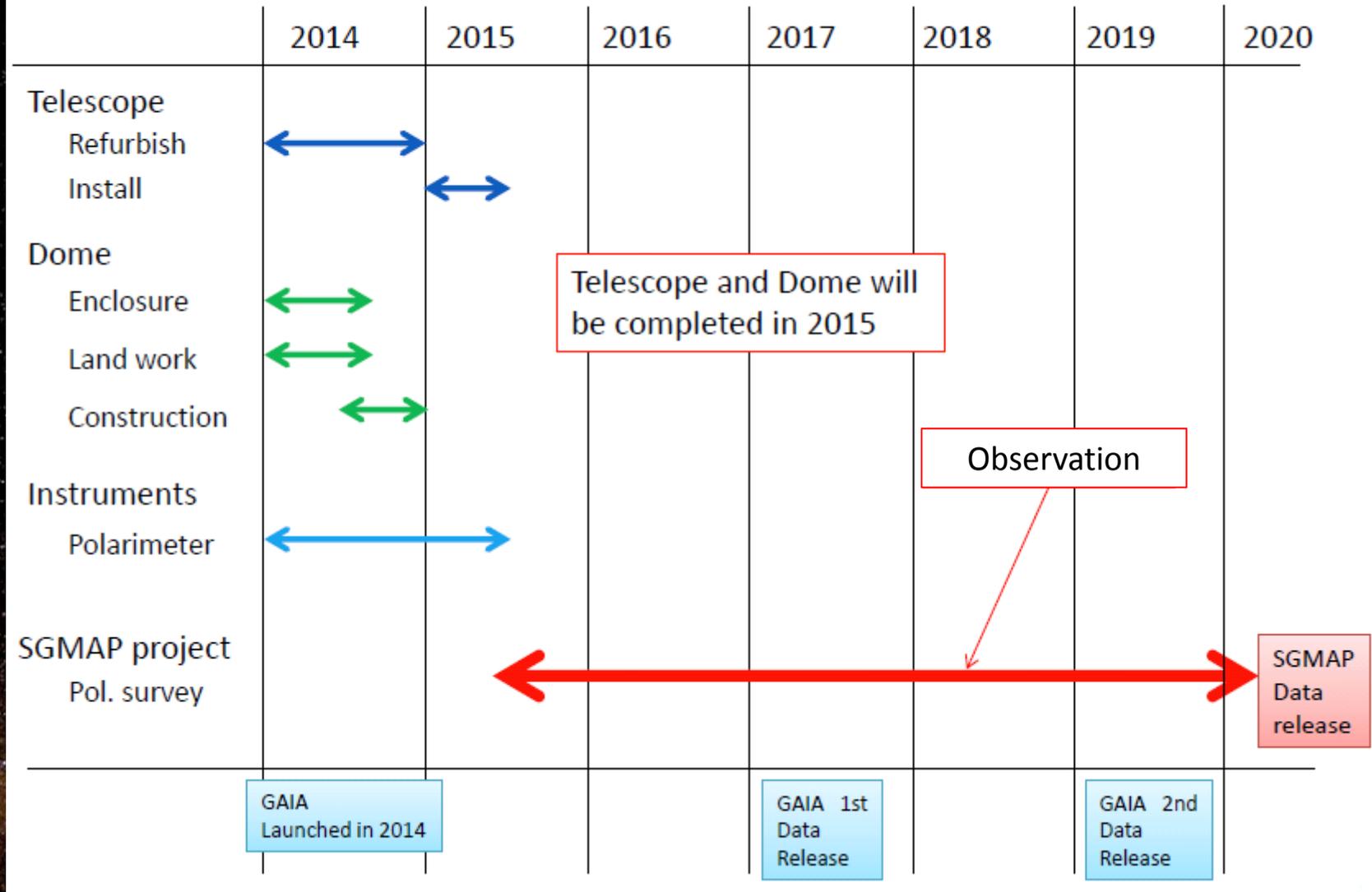
両サーベイは 4年余りで完了

(並行して一部、時間変動天体サーベイも検討)

日本天文学会2013年秋季年会 超高精度CMB偏光全天観測時代の天文学



SGMAP ROADMAP (Optimistic...)



競合する海外の計画



- SOUTH POL (PI: A. M. Magalhaes@Univ de Sao Paulo)

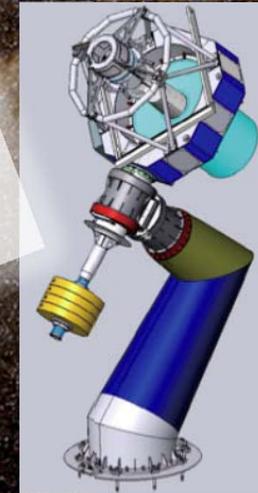
広視野0.84mロボット望遠鏡 (CTIO) + EEV 9k9kCCD

視野 2.0deg^2 を一度にカバー

可視1バンド(広帯域)のみの観測

南天 赤緯 $\delta < -15^\circ$ をサーベイ

2013年に望遠鏡設置予定

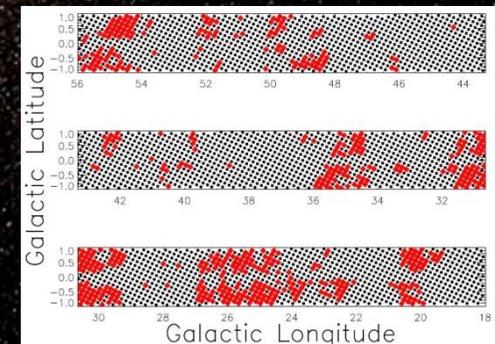


- GPIPS: Galactic Plane Infrared Polarization Survey (PI: Dan Clemens@Boston Univ)

1.8m望遠鏡 (CTIO) + 10分角視野 1k1k InSb array

近赤Hバンドのみ (より遠くまで見通す)

銀河面のみのサーベイ ($|銀緯 b| \leq 1^\circ$)



GPIPS DR1 ($l=18-56^\circ$ $-1 < b < 1^\circ$)

(広域)銀河磁場の観測法：視線に垂直な磁場

電波(cm連続波)のシンクロトン放射

星間磁場と宇宙線電子との相互作用

全放射強度から $B_{\text{total},\perp}$ 、偏波成分強度から $B_{\text{reg},\perp}$ 、偏波の向きから磁場の向き

ビームサイズに応じた大局的な磁場の強度と向きの測定

距離情報は縮退する(系外銀河の大局磁場には有効)

低周波数帯／銀河面ではファラデー回転(FR)によって偏光方位角＝磁場の向きの情報は失われてしまう

可視近赤外域における背景星の星間偏光

遠赤外線における星間ダストの熱放射の偏光

非等方な星間ダストが星間磁場との相互作用で整列。選択吸収ないし放射

偏光の向きから磁場の向き

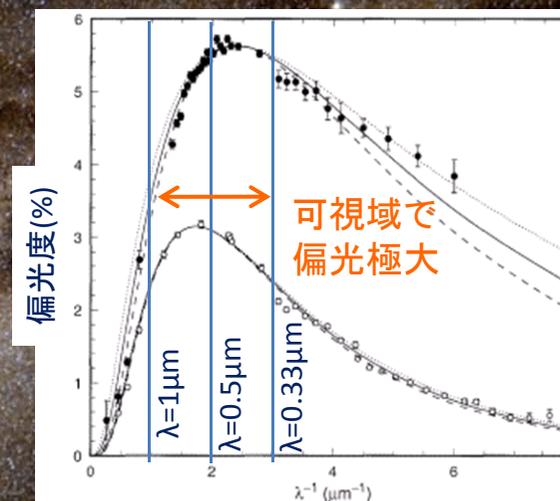
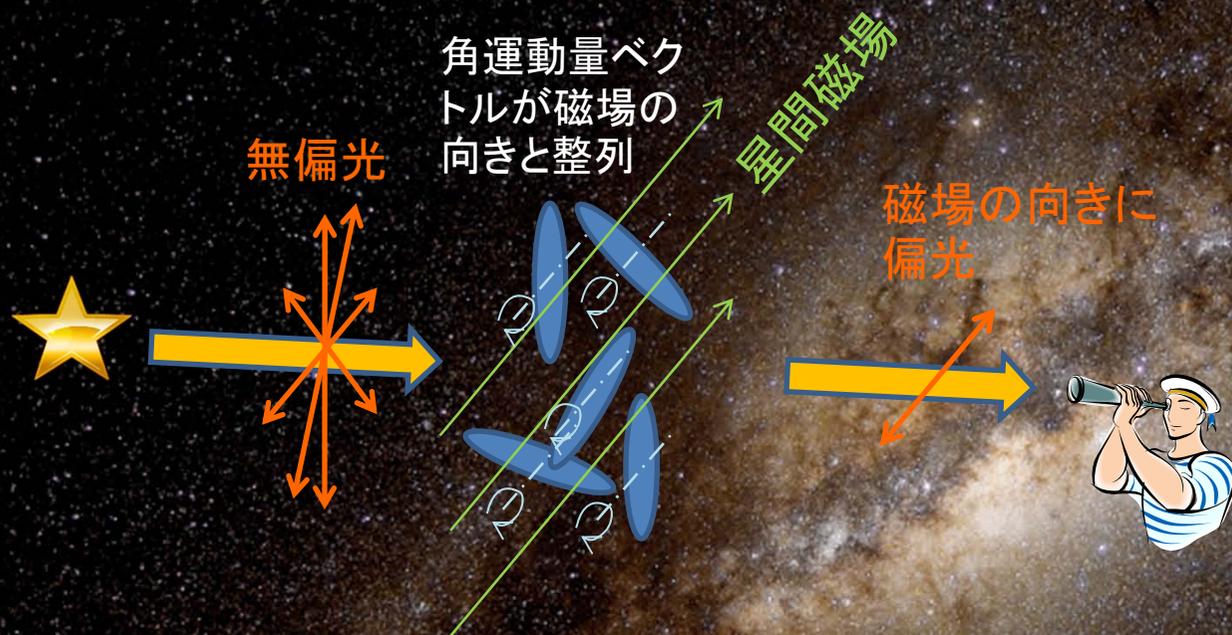
高い空間分解能での磁場の向きの測定(但し磁場強度は判らず)

距離情報は縮退するが、個々の星の距離が判れば分離可能

Cf. 視線に平行な磁場：系外電波源やパルサーのFR

星間偏光 ～天の川銀河の磁場

整列した非等方ダスト(固体微粒子)による選択吸収による偏光



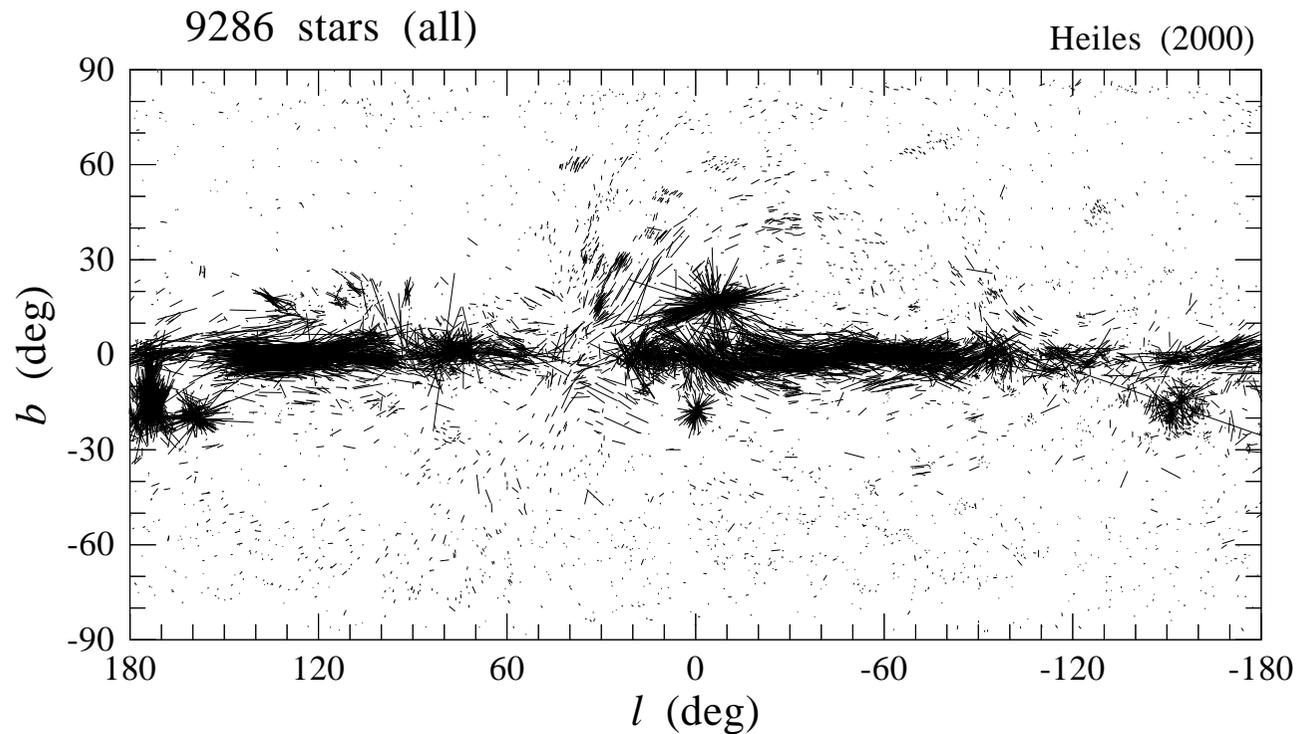
2つの恒星の偏光度の波長依存性とSercowski curve

遠方の星の多くは「星間吸収」・「星間偏光」
星間偏光の向きは、(距離積分した)銀河磁場の向きを表す
銀河磁場は一様成分とランダム成分の合成 (Heiles 1987, 1996)
ランダム成分のスケール長 ～100pc (diffuse) or 数百pc (all)

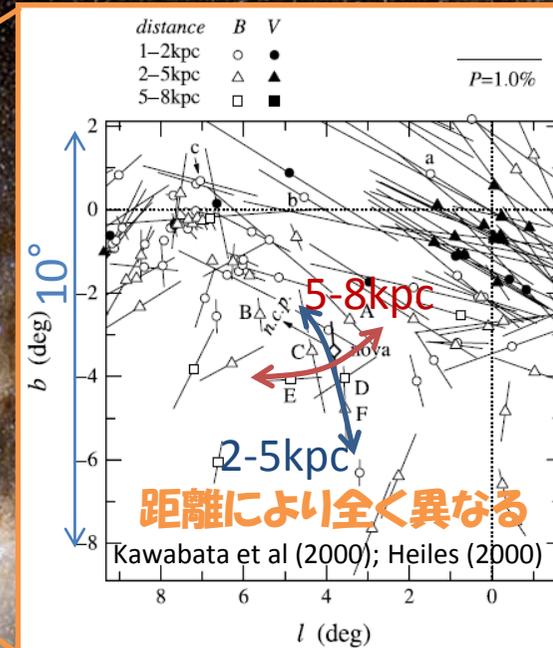
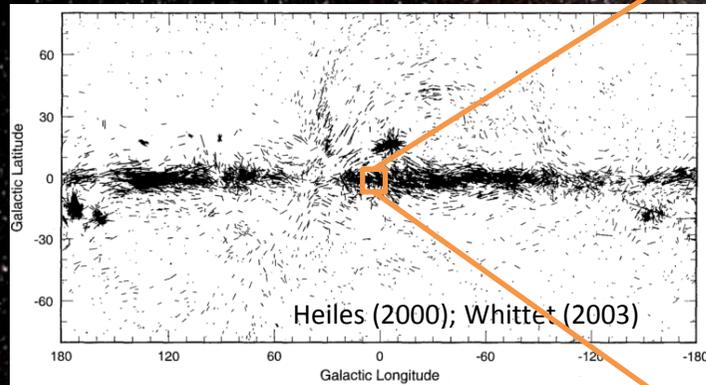
可視偏光サーベイの現状1

既存カタログ: 9286星 単バンド (Heiles 2000) 過去観測のコンパイル
個数では、全天の6等より明るい星(8600個)と同じ位しか無い!

偏光ベクトルの全天マップ (棒の長さ5° が偏光度1%に対応)



星間偏光の非一様性と磁場構造への寄与



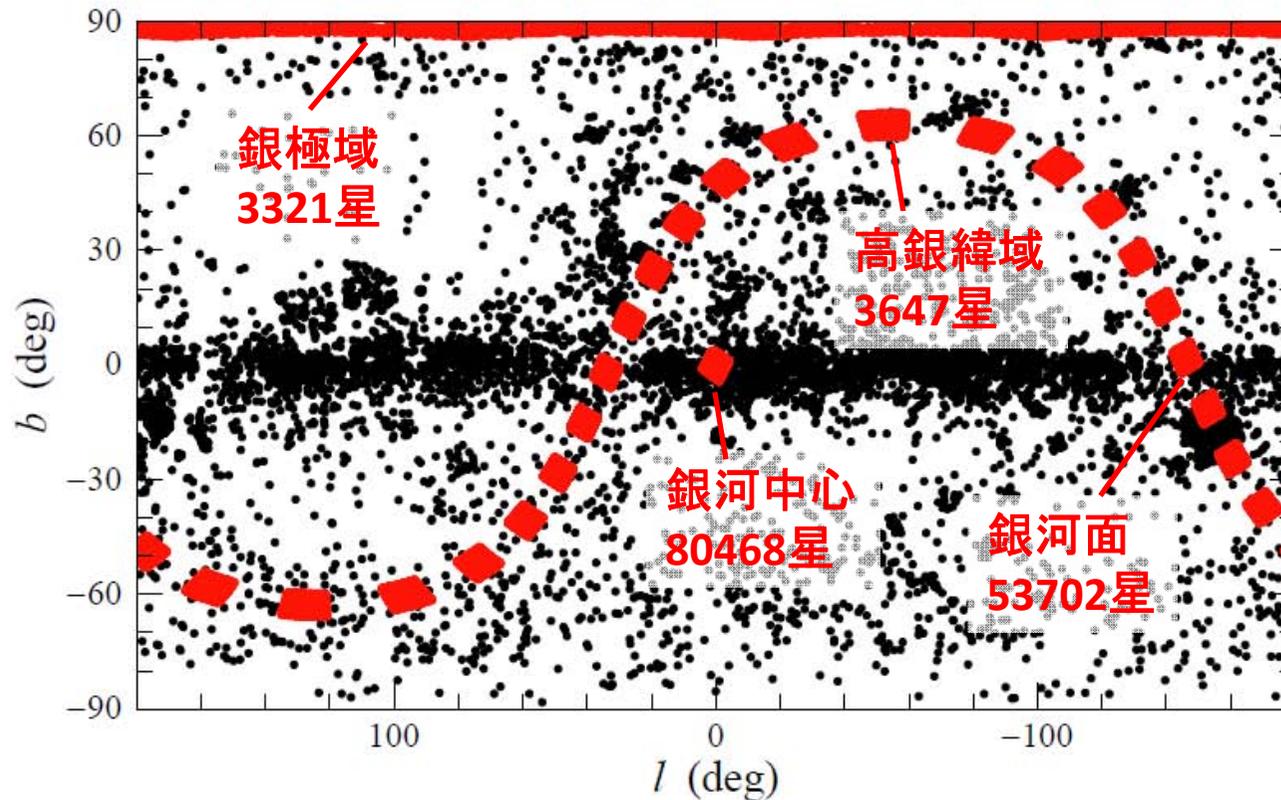
偏光方向＝磁場の向き は100pcスケールで変化

→ 偏光観測全般: 前景偏光の見積もりには、より遠くまで、高空間分解能、高距離分解能でのサーベイ観測が必須

→ 銀河磁場研究: 星形成領域や超新星残骸周辺の~10pcスケールの磁場構造から、銀河全体の磁場構造まで

SGMAPでどれだけサンプルが増える1

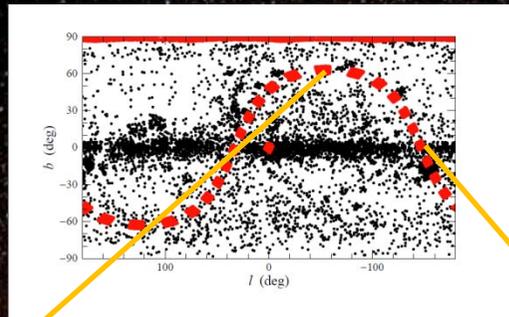
・(黒丸) 既存の全天偏光カタログ 9286星 Heiles (2000)



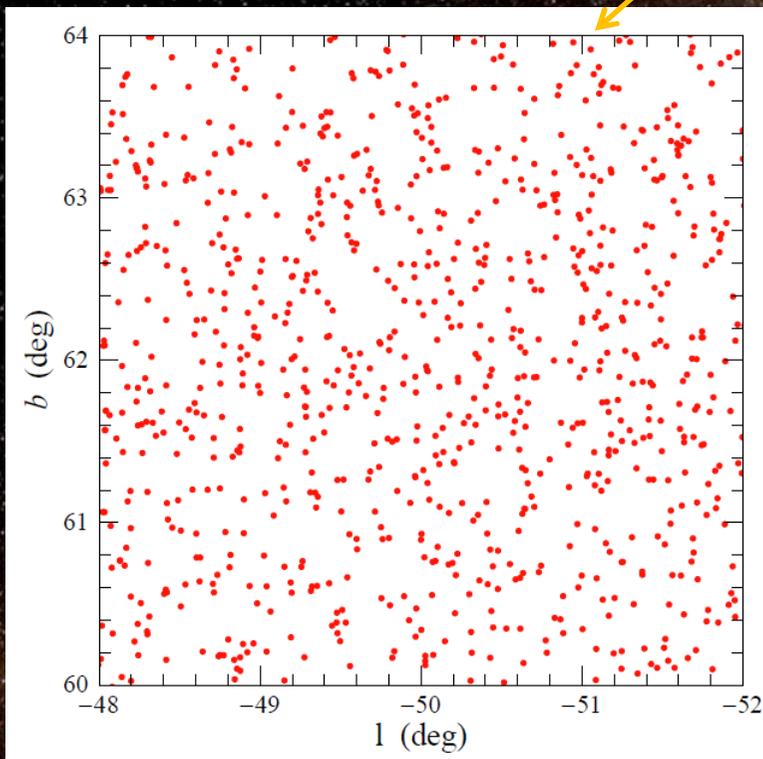
・(赤丸) $6 \times 6^\circ$ 26領域のV=14等より明るい星 32万星(NOMAD)

SGMAPでどれだけサンプルが増えるか2

高銀緯領域
 $4^\circ \times 4^\circ$

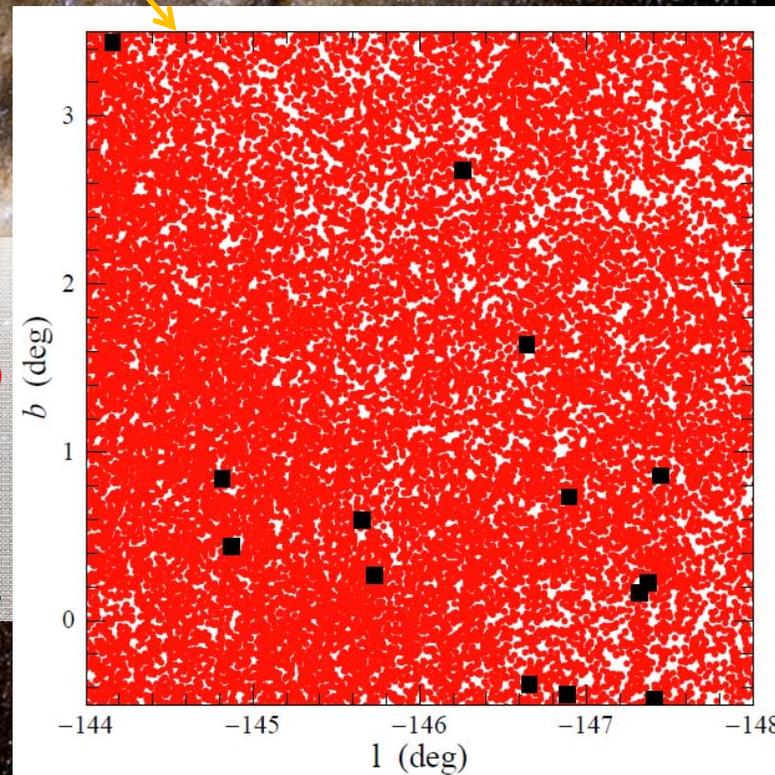


銀河面領域
 $4^\circ \times 4^\circ$



赤丸: V=14等
より明るい星
(SGMAPで観測)

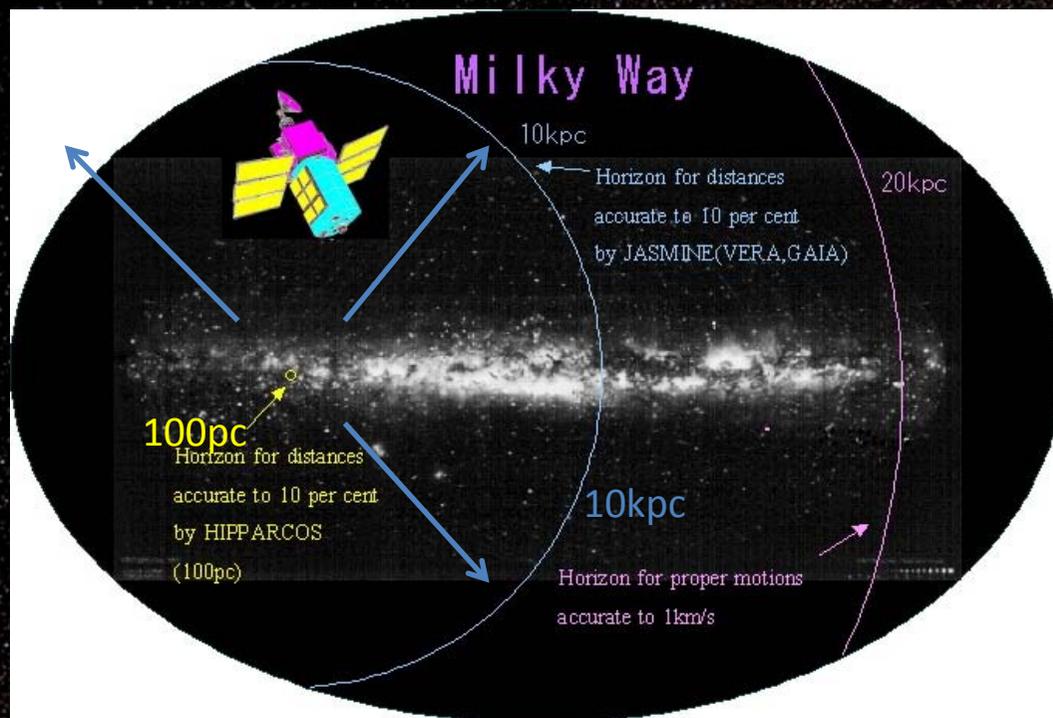
黒四角: 既存
カタログにエン
トリされている星



既存カタログの星はゼロ

既存カタログの星は14個のみ

次世代位置天文衛星とのシナジー



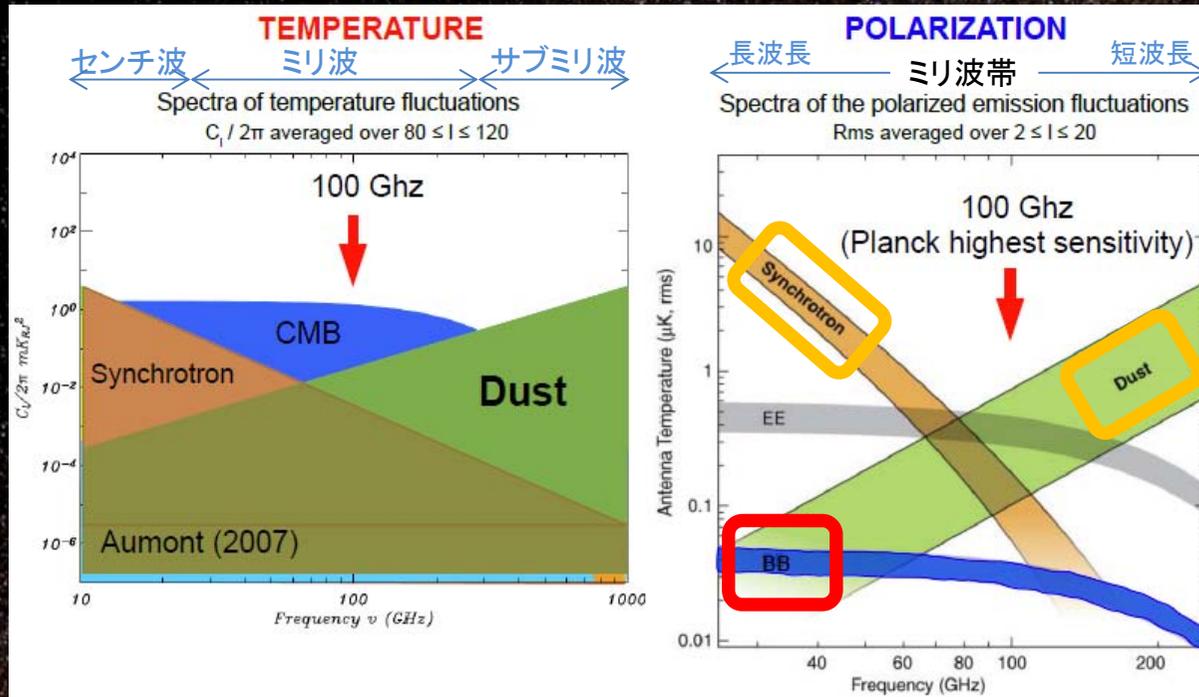
©JASMINE検討室@NAOJ

Gaia/JASMINEにより10kpc/15等までの星の距離を10%精度で測定(20等までカタログ化)

SGMAPの偏光サーベイと付き合わせて天の川銀河全体の磁場構造を精密に決定

高精度CMB偏光観測への寄与1

Aumont (2007); Guillet+(2011)



星間磁場のシンクロトン放射
 整列した星間塵の遠赤外偏光

桁で弱い
 ↓
 Bモード偏光

CMBのBモード偏光(原始重力波~インフレーションの証拠)は、前景の星間偏光(シンクロトン放射+星間ダスト)に比べて弱い

→ 観測値に対し、精度の良い差し引き/マスキングが必要

(e.g., Bouchet+ 1999; Kogut & Hinshaw 2000; Tegmark+ 2000)

高精度CMB偏光観測への寄与2

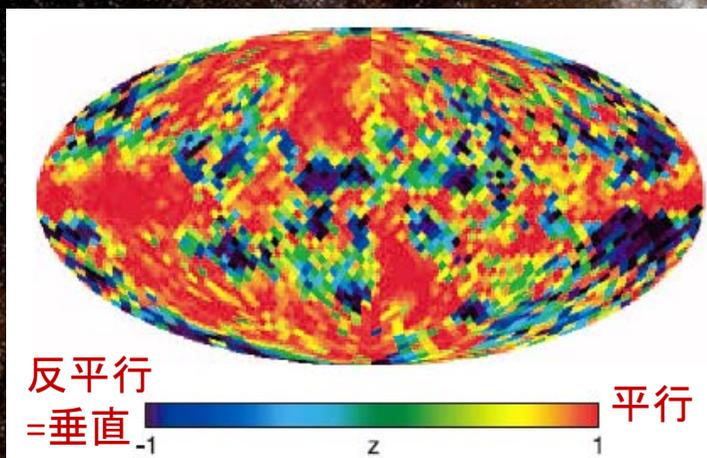
WMAP論文(3yr-WMAP: Polarization Analysis, Page+ 2007, ApJS, 170)

§ 4 The Foreground Emission Model

§ 4.1 WMAPの偏光データを説明し得る天の川銀河のマイクロ波偏光モデル

§ 4.1.2 Starlight Polarization and Polarized Dust Emission

$d > 500 \text{ pc}$ & $|b| > 10^\circ$ (~ダスト円盤層の外側)にある 1578個 の星をサンプル
偏光の向き(PA)を、 9.2° FWHM(円内に3個程度)のガウシアン窓でスムージング
(簡単なモデルの割に)可視偏光角とWMAP Kバンド偏波角はよく相関している



可視偏光カタログの偏光角(1578星)とWMAP Kバンド(23GHz)偏光角との相関
オリオン領域などで反相関を示すものの、
全体として良く一致している(典型的に $< 20^\circ$)

Fig. 11 in Page+ (2007)

※平行とは、可視偏光から予想される磁場の向きと
偏波から予想される磁場の向きが平行という意味

高精度CMB偏光観測への寄与3

WMAP論文

§ 4 The Foreground Emission Model (つづき)

§ 4.1.3 Thermal Dust Emission

Archaeopsの353GHzの熱輻射データと、先の可視データのスムージングで求めた偏光角を使って、簡易的に**ダスト偏光マップを合成**

(簡単なモデルの割に) $|b| > 10^\circ$ ではQ, Uともそれなりに似通った分布を示す

§ 4.1.4 Spinning Dust Emission?

§ 4.2 「偏光マスク」の定義

§ 4.3 背景偏光の差し引き方

「KD3Pol」モデルのベース

シンクトロン - Kバンドのマップ

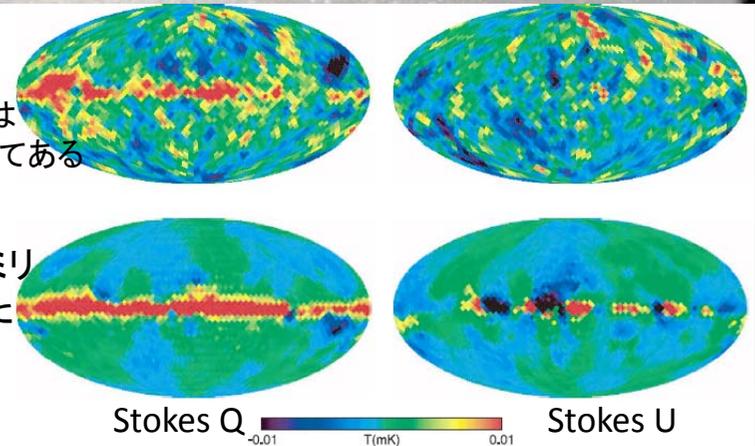
ダスト - FDS dust model 8 (Finkbeiner+99)

と可視偏光角(空間平均)の合成

WMAP 94GHz

シンクロtron成分は
見積もって差し引いてある

可視偏光とサブミリ
輻射から合成した
ダスト偏光マップ

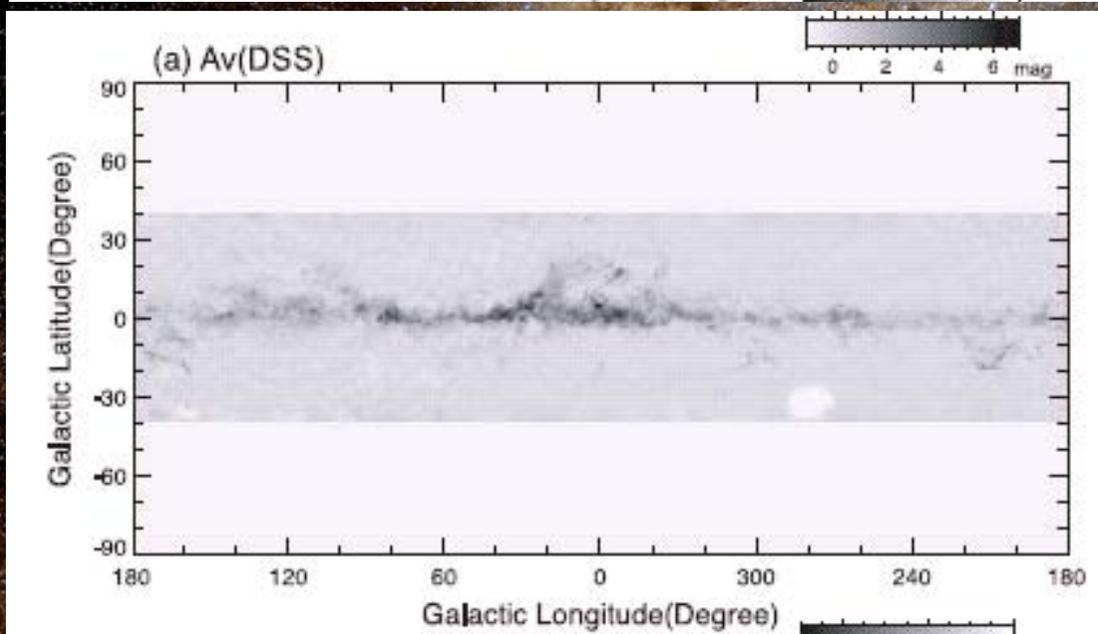
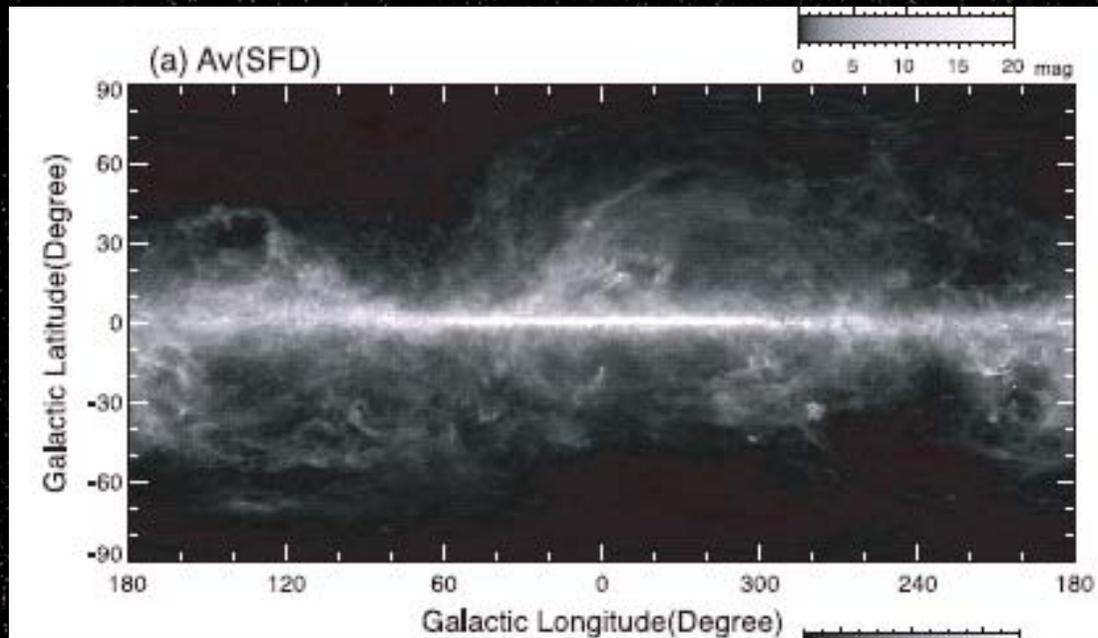


可視の星間偏光(の偏光方位角PA)がモデル化に寄与

高柱密度・距離分解した星間偏光の情報で、より高い精度の補正へ

SGMAP まとめ

**広島大 可視3バンド偏光サーベイ計画
MAGNUM望遠鏡の広視野化+専用装置
4年余りで北天+ α をカバー
現カタログの100倍以上の個数に
バンド数も複数に（偏光機構のサイエンス）
天の川銀河磁場の構造、他多彩なサイエンス
CMB偏光の高精度補正にも寄与できる、かも**



Dobashi (2011;
Dobashi+ 2005;
Schlegel+ 1998

全天の星の数

視等級	星数	星比	星明り
-1	2	-	1.2
0	7	(3.5)	1.7
1	12	(1.7)	1.2
2	67	(5.6)	2.6
3	190	2.8	2.9
4	710	3.7	4.3
5	2000	2.8	4.8
6	5600	2.8	5.4
7	1.6×10^4	2.8	6.1
8	4.3×10^4	2.7	6.5
9	1.2×10^5	2.8	7.2
10	3.5×10^5	3.0	8.4
11	8.7×10^5	2.5	8.4
12	2.3×10^6	2.7	9.0
13	5.6×10^6	2.4	8.6
14	1.3×10^7	2.4	8.2
15	3.2×10^7	2.4	7.9
16	6.9×10^7	2.1	6.7
17	1.4×10^8	2.0	5.3
18	2.8×10^8	2.0	4.2
19	4.2×10^8	1.5	2.5
20	7.1×10^8	1.7	1.7
21	1.3×10^9	1.8	1.2
>21.5	-	-	1.5
合計	2.9×10^9	-	118

1000立方パーセクの空間中の星の数

M_v	O	B	A	F	G	K	M
-7	2×10^{-7}	5×10^{-7}	3×10^{-7}	3×10^{-7}	3×10^{-7}		
-6	5×10^{-7}	2.5×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-6}	4×10^{-7}	4×10^{-7}
-5	1×10^{-6}	2.5×10^{-5}	1×10^{-5}	6×10^{-6}	8×10^{-6}	4×10^{-6}	1×10^{-5}
-4	3×10^{-6}	1.6×10^{-4}	1×10^{-5}	1.6×10^{-5}	2.5×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.3×10^{-5}
-3	1×10^{-5}	5×10^{-4}	5×10^{-6}	8×10^{-6}	8×10^{-6}	1×10^{-4}	6×10^{-5}
-2	1×10^{-5}	2.5×10^{-3}	8×10^{-6}	2×10^{-4}	3×10^{-4}	6×10^{-4}	4×10^{-4}
-1	1×10^{-5}	1.3×10^{-2}	1×10^{-3}	1.6×10^{-3}	1×10^{-3}	2.5×10^{-3}	3×10^{-3}
0	1×10^{-6}	2×10^{-2}	2×10^{-2}	2×10^{-2}	8×10^{-3}	2.5×10^{-2}	1×10^{-2}
1		3×10^{-2}	1×10^{-1}	3×10^{-2}	3×10^{-2}	1.2×10^{-1}	1×10^{-2}
2		2×10^{-2}	2×10^{-1}	1.6×10^{-1}	5×10^{-2}	1.1×10^{-1}	
3		1×10^{-2}	8×10^{-2}	7×10^{-1}	1.5×10^{-1}	1×10^{-1}	
4			3×10^{-2}	1.2	7×10^{-1}	1×10^{-1}	
5				6×10^{-1}	2	3×10^{-1}	
6				2×10^{-1}	1.5	1.5	1×10^{-2}
7				1×10^{-1}	8×10^{-1}	3	1×10^{-1}
8				1×10^{-2}	4×10^{-1}	2.5	1
9					2×10^{-1}	1.5	3
10		1×10^{-2}				4×10^{-1}	8
11		1×10^{-1}	3×10^{-2}	1×10^{-2}		2×10^{-1}	9
12		2×10^{-1}	4×10^{-1}	1×10^{-1}		1×10^{-1}	1×10
13		4×10^{-1}	6×10^{-1}	3×10^{-1}	1×10^{-1}	4×10^{-1}	1×10
14		8×10^{-1}	1	1	6×10^{-1}	8×10^{-1}	1×10
15		1.5	2	1	1.5	1.2	8
16		3	5	3	3		6

観測される星のスペクトル型の頻度

スペクトル型	O	B	A	F	G	K	M
星の数の%	1	10	22	19	14	31	3

1平方度あたりに観測される星の数

写真等級	銀緯=0°	±5°	±10°	±20°	±30°	±40°	±50°	±60°	±90°	平均
5	0.052	0.044	0.037	0.028	0.020	0.017	0.016	0.015	0.013	0.023
10	9.3	7.6	6.3	4.6	3.5	2.9	2.5	2.2	1.9	4.2
15	1200	1000	760	450	290	200	160	130	93	420
20	50000	50000	40000	16000	6000	4000	2500	2000	1300	15000

銀河磁場

渦巻き銀河では普遍的に存在 数 $\sim 10\mu\text{G}$

星間物質のエネルギー密度

天の川銀河の太陽系近傍 (Boulares & Cox 1990)

磁場、星間乱流、宇宙線がそれぞれ同程度

銀河全体 (NGC 6946; Beck 2004)

磁場 ($B^2/8\pi$)

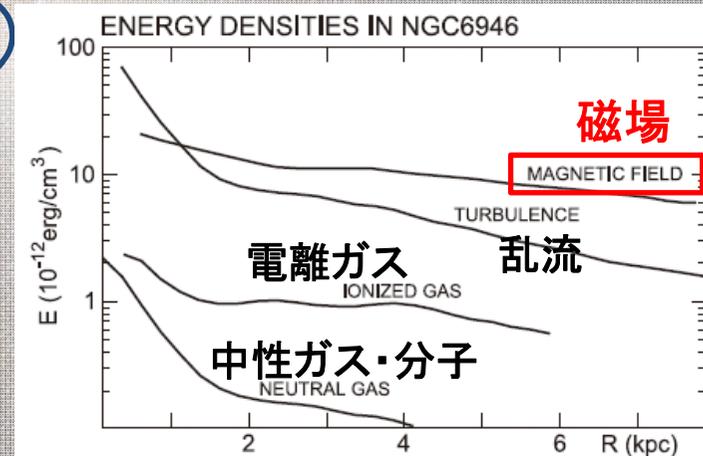
星間乱流 ($1/2\rho v^2$, $v\sim 7\text{km/s}$)

電離ガス ($3/2n_e kT$, $T\sim 10^4\text{K}$)

中性ガス・分子 ($3/2n_H kT$, $T\sim 50\text{K}$)

宇宙線 ($C\int E^{-2\alpha}dE$) \sim 磁場と同程度

参考: 銀河回転 ($1/2\rho v_{\text{rot}}^2$, $v\sim 170\text{km/s}$) \sim 乱流の500倍 (だが外縁部では磁場エネルギーが匹敵している)

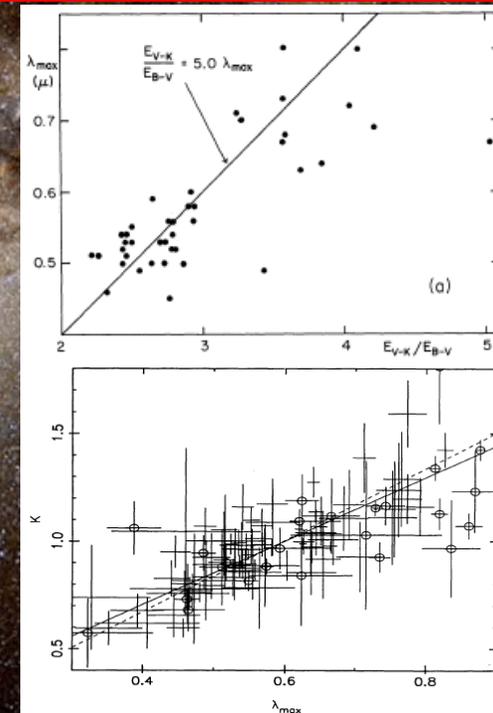
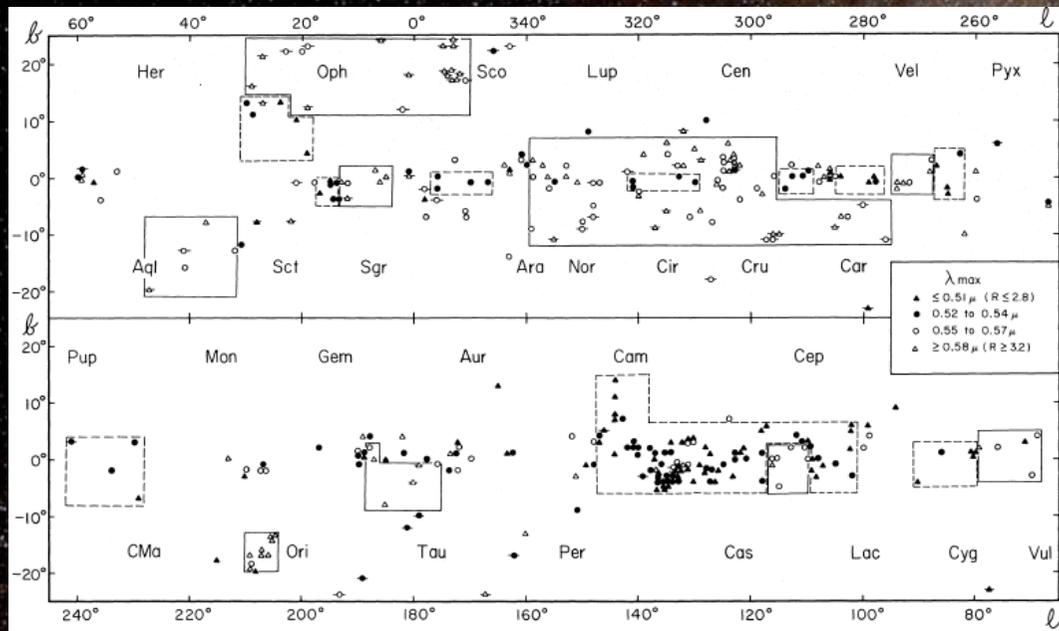


バルジより外側では磁場のエネルギーが卓越

可視偏光サーベイの現状2

複数バンドの偏光カタログ:

- Serkowski+ (1975) UBVR 180星(主に南天)
- Whittet+ (1992) UBVR-I-JHK 105星



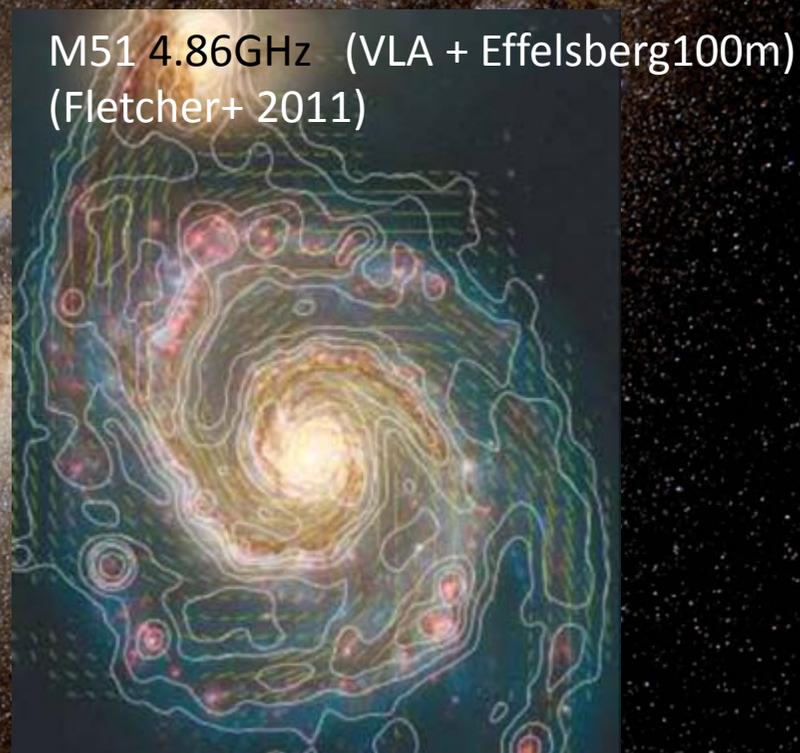
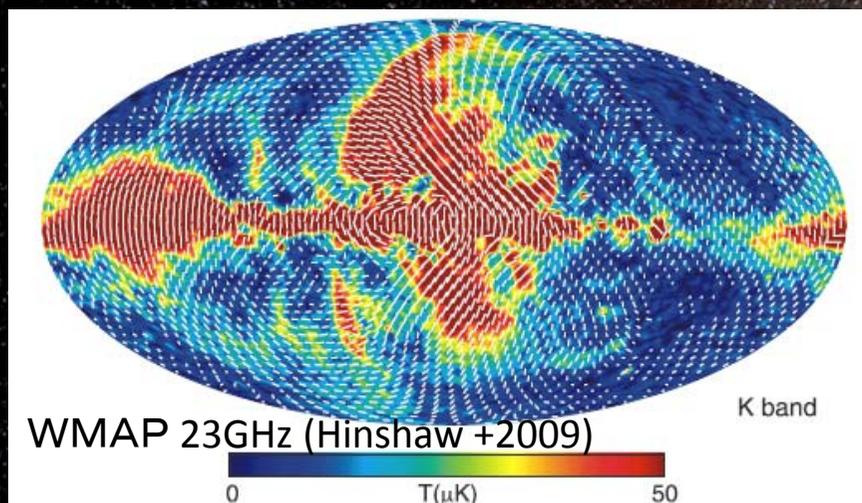
偏光度が極大となる波長 (λ_{\max} ~ 星間ダストのサイズを反映?) の銀河スケールでのムラ? (Serkowski+ 1975)

λ_{\max} と $R_V (=A_V/E(B-V))$ との相関?
 λ_{\max} と K (Serkowski curve) との相関
 (Serkowski+ 1975; Whittet+ 1992)

→ 広帯域・高精度の星間吸収補正へ応用

(広域)銀河磁場の観測例

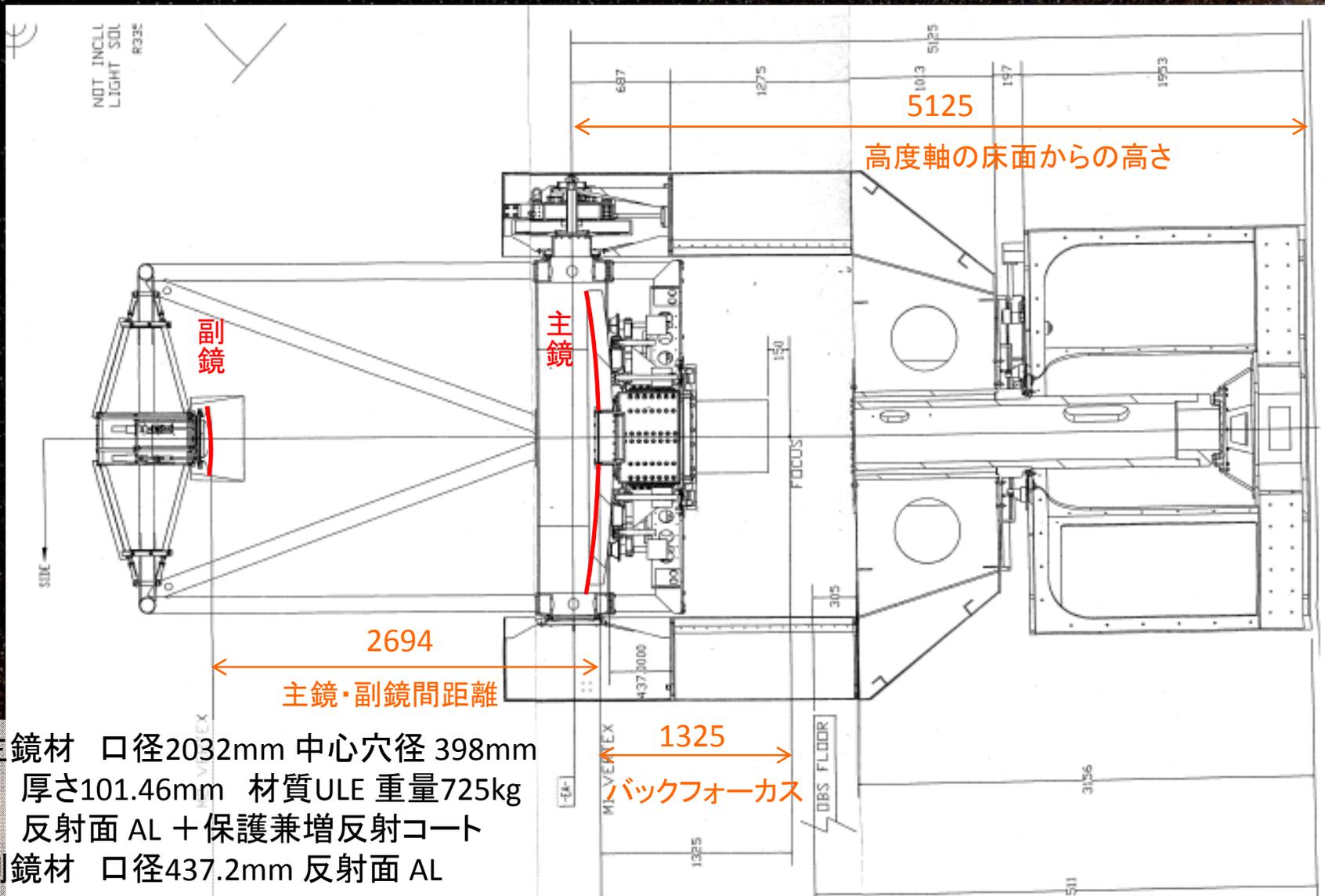
電波域でのシンクロトン放射の偏波マッピング



低周波だけでなく、FRの影響を受けにくい高周波(>5GHz)でも全天偏波サーベイが行われてきている。しかし距離情報は得にくい。

系外銀河では大局磁場は捕えやすいが、分解能が不足

MAGNUM望遠鏡 (東京大)



主鏡材 口径2032mm 中心穴径 398mm
厚さ101.46mm 材質ULE 重量725kg
反射面 AL + 保護兼増反射コート
副鏡材 口径437.2mm 反射面 AL

視野

直径 33.3 arcmin (Corrector要)

- SOUTH POL (ブラジルのグループ PI: A. M. Magalhaes)

広視野**0.84m**ロボット望遠鏡 (CTIO) + EEV 9k9kCCD

視野 **2.0deg²**を一度にカバー(但し、1 broad band)

2013年に望遠鏡設置予定

偏光ユニット: 半波長板+方解石プリズム

南天 $\delta < -15^\circ$ を1バンド $\Delta p \sim 0.1\%$ でサーベイ

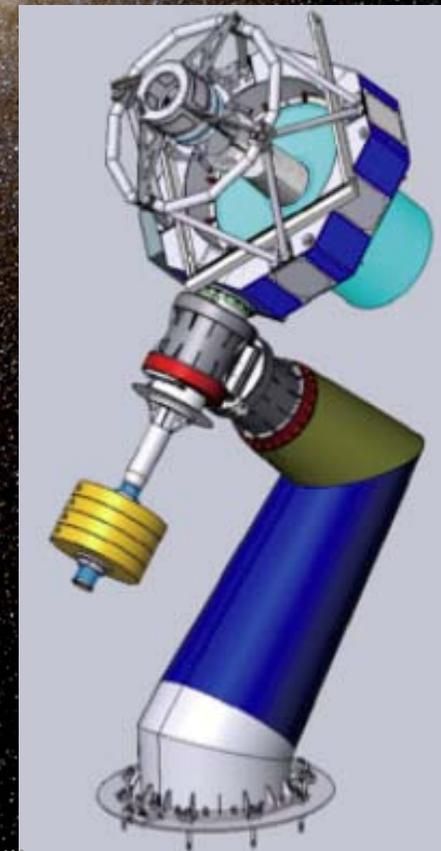


Table 1: Summary of the performance of the T80 design

Performances of design	
Aperture	0.840 m diameter
Plate scale	55.56 arcsec/mm = 0.83arcsec/15 μ m
Focal length	3712 mm
Field of view	110 mm (1.7 $^\circ$) with optimized image quality 155 mm (2.4 $^\circ$) with limited performances
Image Quality	50% EE = 5 μ m / 0.28 arcsec (diameter) 80% EE = 13 μ m / 0.72 arcsec (diameter)
Distortion	0.6%

Magalhaes (2012) ESO Surveys

SGMAPサイエンスミニWSを開催しました

2013年7月17-18日 (広島大)

長波長電波観測で探る天の川銀河の電離物質

--- 赤堀 卓也 (シドニー大)

大学VLBI連携及び日韓VLBI観測網の偏波観測モードの現状について

--- 新沼 浩太郎 (山口大)

CMB偏光観測

--- 羽澄 昌史 (KEK)

可視域での星間偏光データからの星間構造

--- 松村 雅文 (香川大)

偏光/多色掃天についての考察

--- 佐藤 修二 (名古屋大)

位置天文観測衛星計画について ~GaiaとJASMINE~

--- 郷田 直輝 (国立天文台)

Synergy with SGMAP and current and future high-energy missions

--- 田中 康之 (広島大)

<http://1601-031.a.hiroshima-u.ac.jp/sgmap/workshop/201307/miniws.html>