

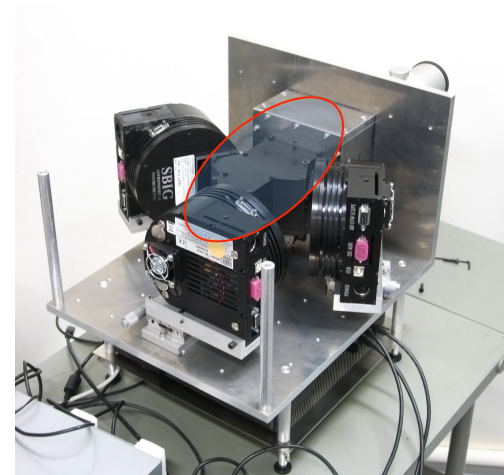
TRIPOL:3色 (g' r' i') 撮像偏光装置の性能

佐藤修二 (名大理)

Triple Range Imager and POLarimeter

特徴 手軽で安定な装置

仕様 i) 限界等級 17 mag: @ r' $\Delta T \sim 60s$ [S/N] ~ 10 @1m 望遠鏡
ii) 測光安定性 0.01mag/hour rms
iii) 偏光精度 $< 0.3\%$



国立中央大学

陳文屏
木下大輔

Wen-Ping Chen 教授
教授

2009.	2010.	2011.	2012.
<u>6月8～11日</u>	6月7～12日	2月23～27日	2月29～3月4日
12月7～10日		6月14～18日*	5月28～6月6日*
コロキウム／セミナー			

CPS

- (1) Exchange Program(3件程度、計約150万円)
- (2) 短期招へい派遣プロジェクト(1-3件、計約60万円)
- (3) その他の提案事業

3色 (g' r' i') 偏光カメラ TRIPOL
(Triple Range Imager and POLarimeter)

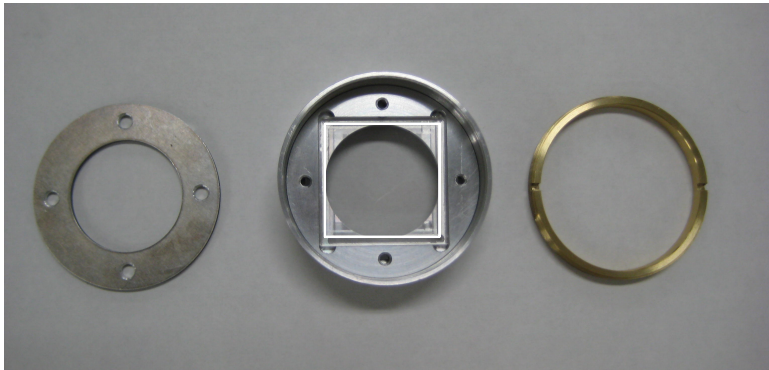
簡素、汎用、
科学的に有効、
小口径に適した

小さい、軽い、易しい、安い

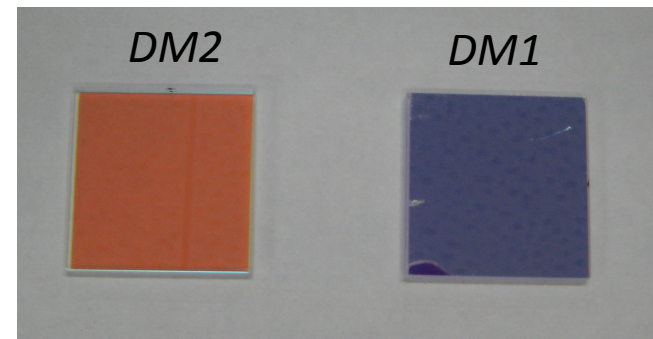
パワー0光学系とナイキスト・サンプル

flat and thin “Optics” ⇒ パワー 0

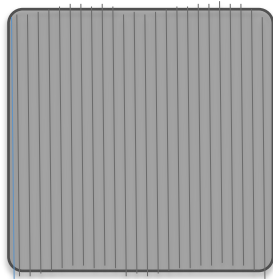
① Wave-plate



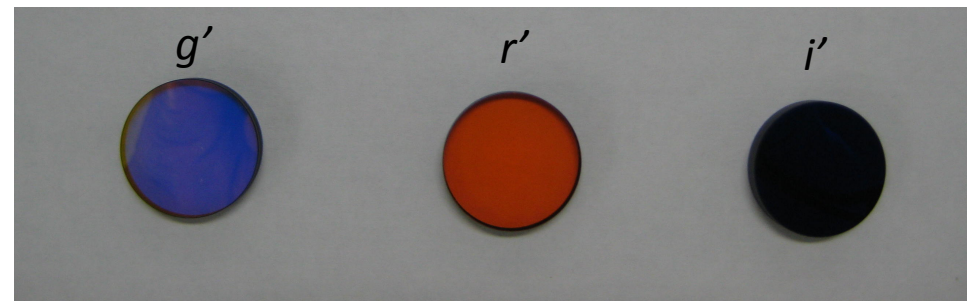
③ Dichroic Mirrors

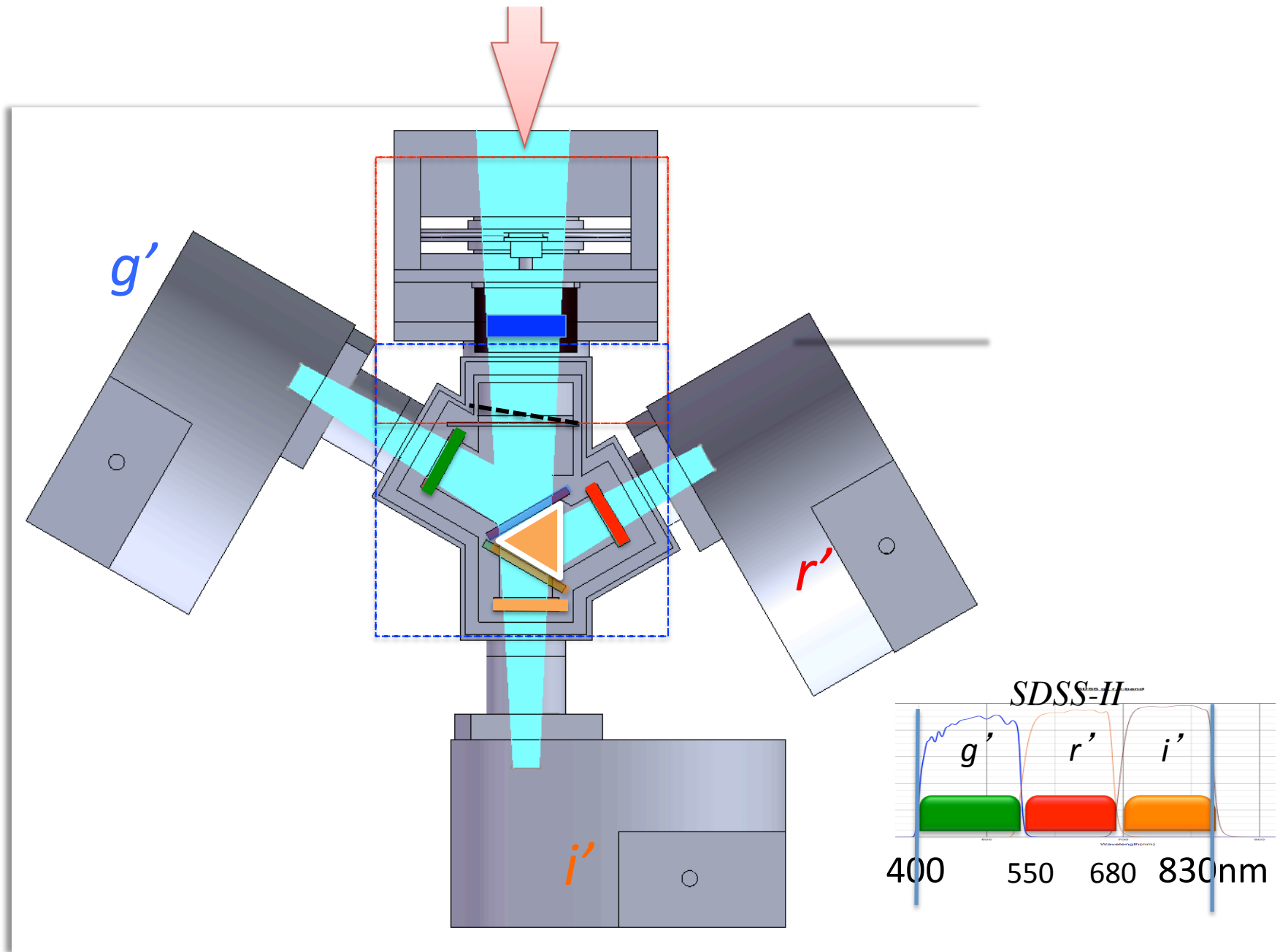


② Wire-grid



④ Bandpass Filters



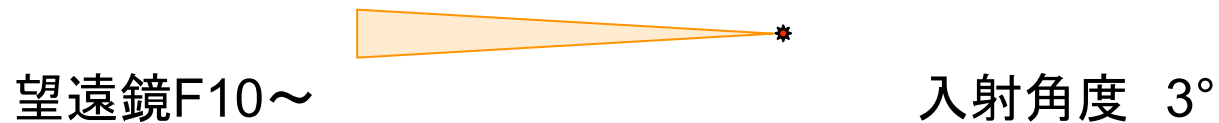


なぜ”簡易”か？

色BGR:

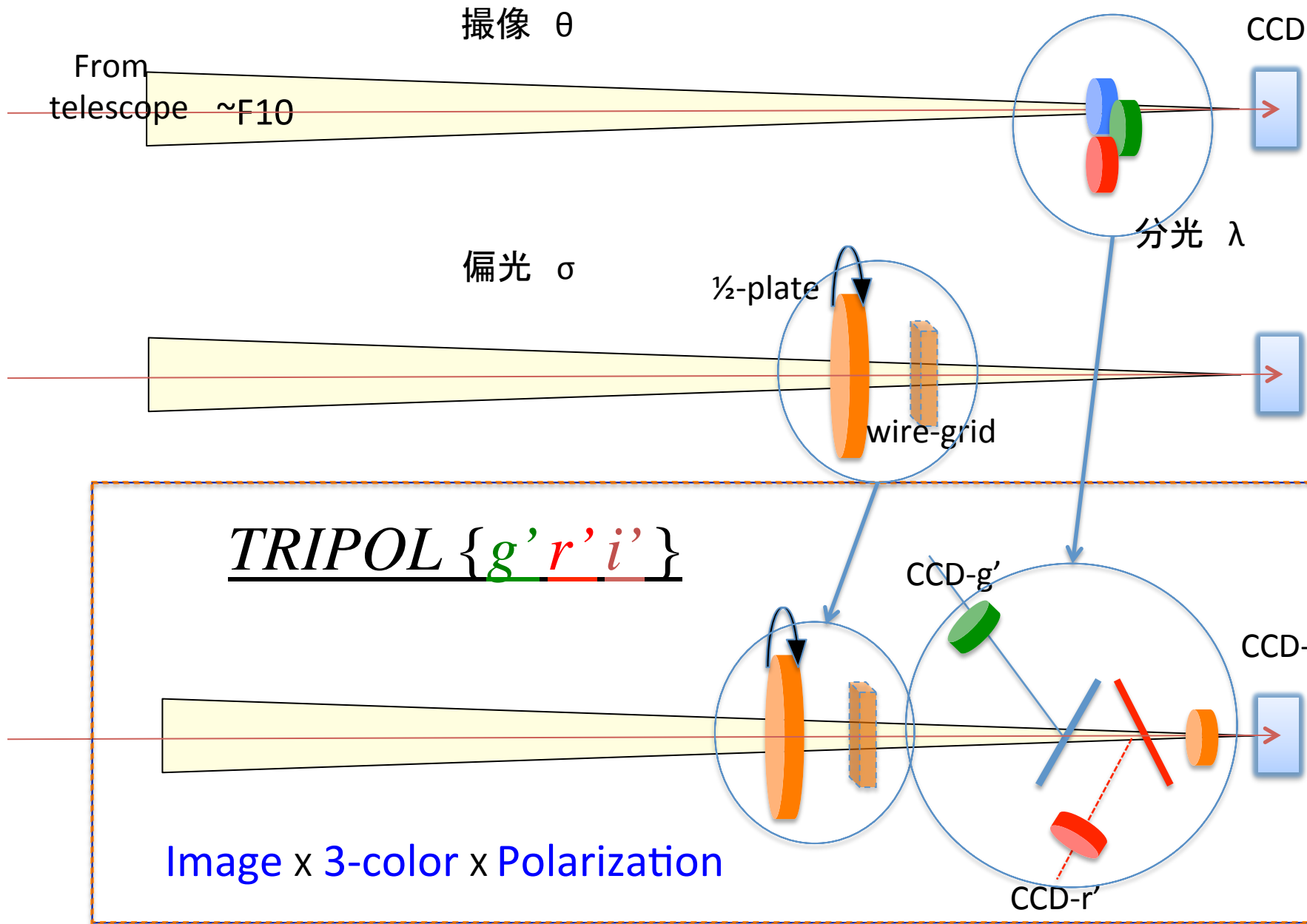
色分解	⇔	分光	波の次数mで“方向”が別
$\cos \theta$	⇔	$\sin \theta$	
膜厚干渉	⇔	回折干渉	

偏り : 実空間とは別の<内部>自由度(スピン空間)



(ダイクロイック鏡や波長板や偏光子は) “結像”にはあまり影響しない
非点収差

大気シーイング(星のまたたき) ~ 1" ⇔ CCD2~3ピクセル ⇔ 小望遠鏡-焦点距離



3色撮像偏光: *TRIPOL*

方向 θ \Leftrightarrow 焦点f: $\theta \Rightarrow (x:y)$
撮像

Spectrum λ \Leftrightarrow 色-分解
分光 “band”
多層膜干涉
3色

偏光 σ \Leftrightarrow [複屈折+格子] 偏光

性能 (限界等級、測光安定性、偏光精度)
17 mag <0.02mag <0.3%

方向=direction $\left[\begin{array}{c} \theta \\ \lambda \\ \sigma \end{array} \right]$
スペクトル =spectrum
(エネルギー／運動量)
かたより=polarization

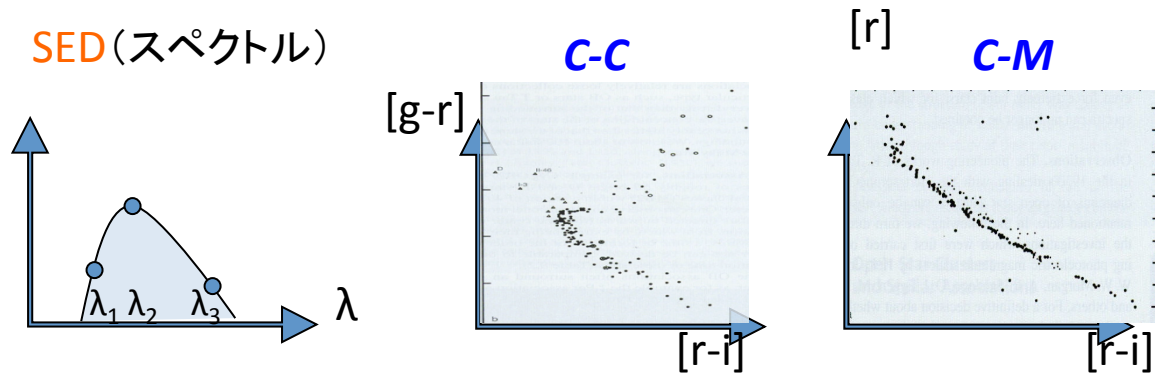
$$I(\vartheta : t) \quad I(\lambda : t) \quad I(\sigma : t)$$

$$\implies I(\vartheta \lambda \sigma : t)$$

フォトンの“すべて”を時系列として測定する

汎用さ

3色⇒温度



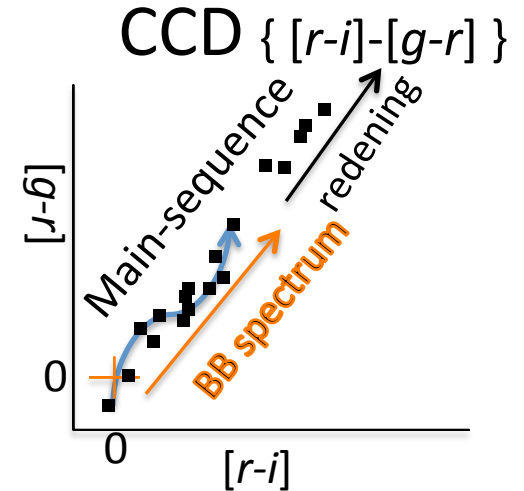
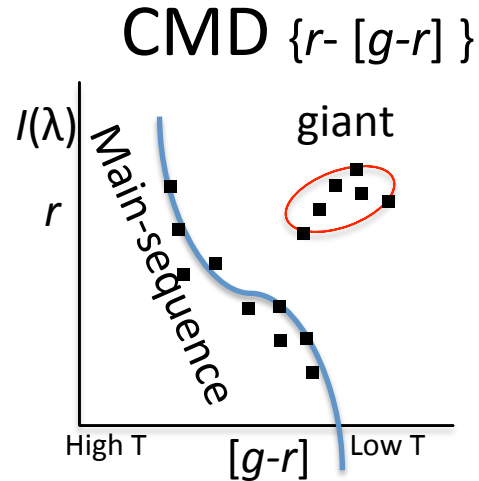
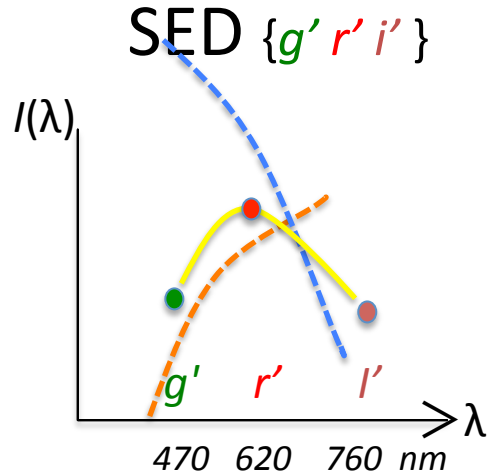
偏光⇒<非>温度

$[P_{g'} P_{r'} P_{i'}]$

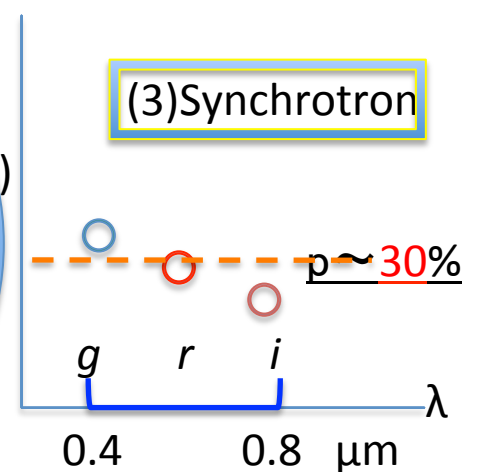
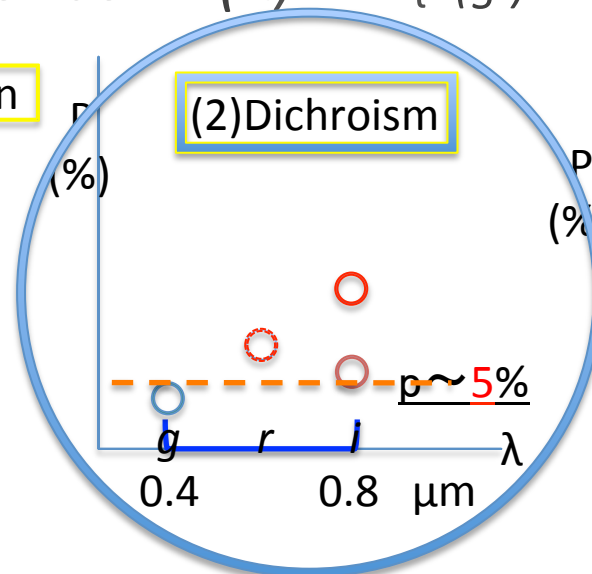
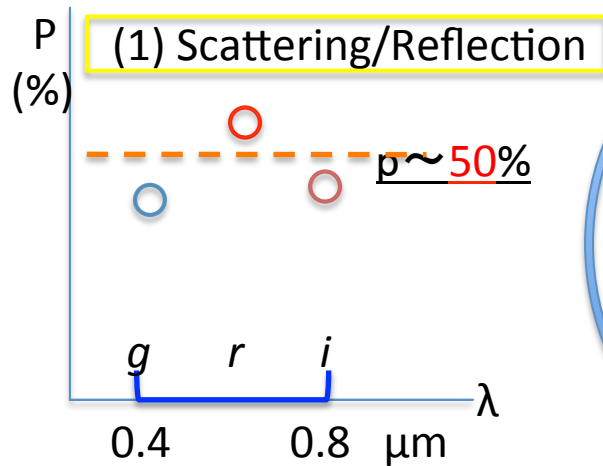
- 1. 散乱(反射) ・青空 ・水面 ・雪氷面 ・惑星面 ・星形成/進化 ・ -
- 2. 吸収 ・偏光グラス ・**星間偏光(ダイクロイズム)**
- 3. 放射 ・放射光(SOR) ・かに星雲 ・活動銀河核 ・GRB?

いかに汎用か

Combination of $\{g' r' i'\}$ $\{r-[g-r]\}$ and $\{[r-i]-[g-r]\}$



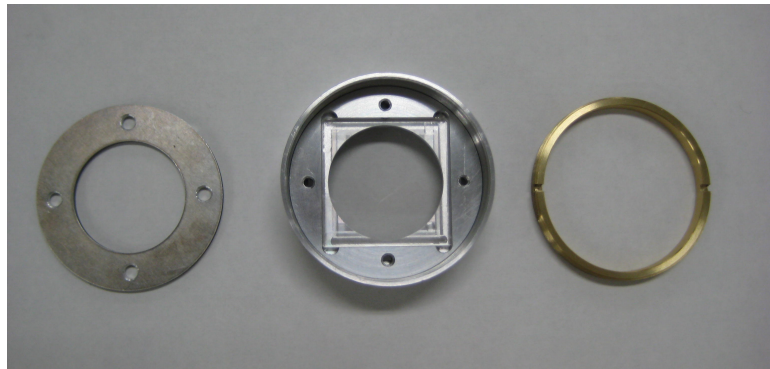
Wavelength-dependence $P(\lambda)$ $\{P(g') P(r') P(i')\}$



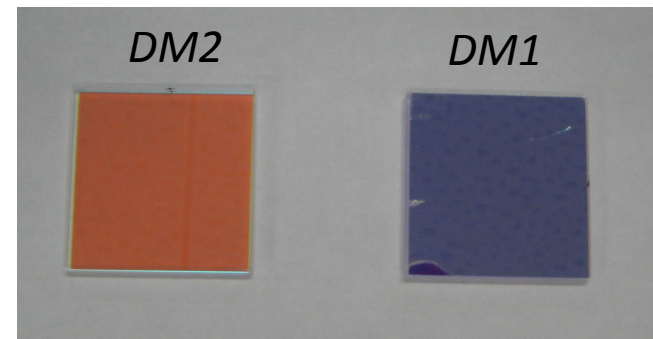
flat and thin “Optics”

4つの素子（薄いガラス板）①②③④を順に差込む

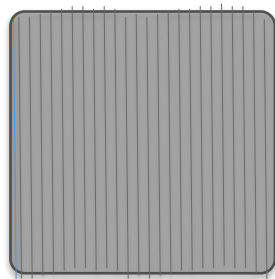
① Wave-plate



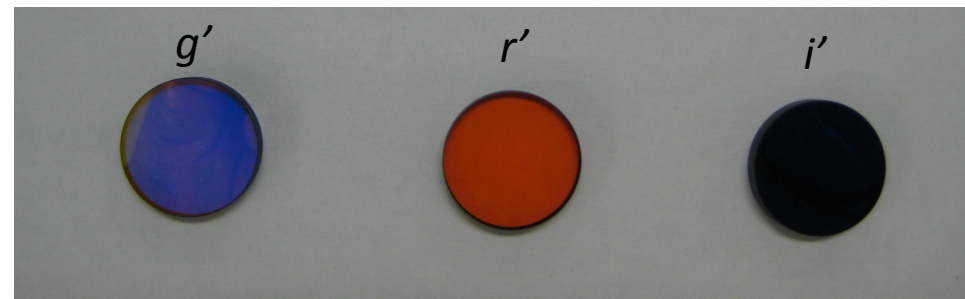
③ Dichroic Mirrors



② Wire-grid



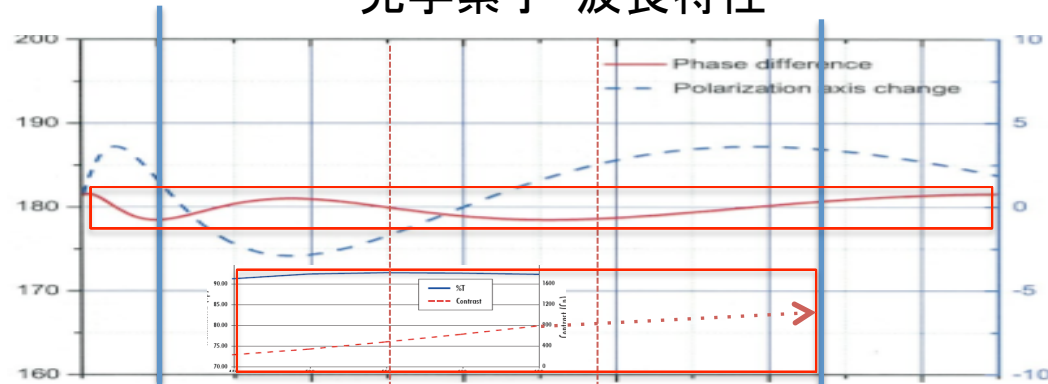
④ Bandpass Filters



光学素子・波長特性

① Wave-plate = 波長板

phase-retardance red
rotation-angle blue

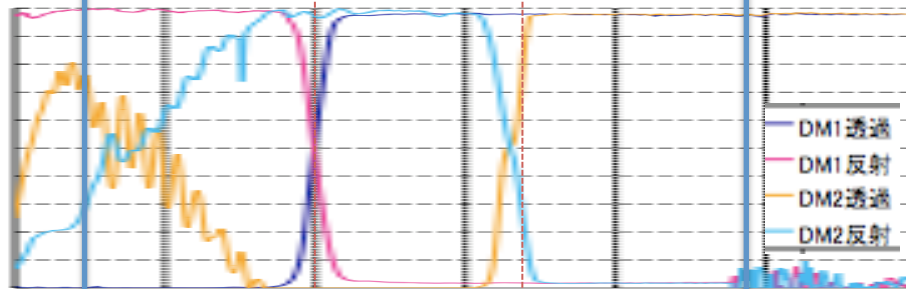


② Wire-grid = 偏光格子

contrast

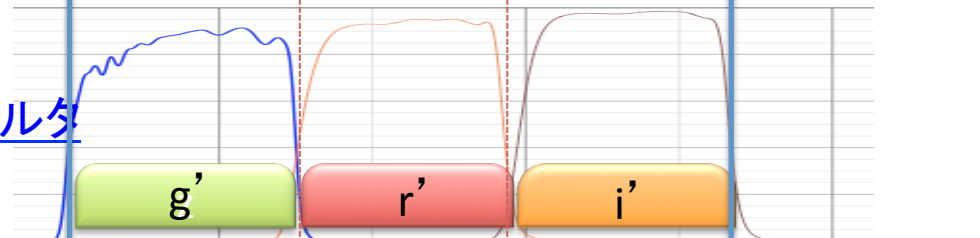
③ Dichroic mirrors 色分岐

Transmission/Reflection



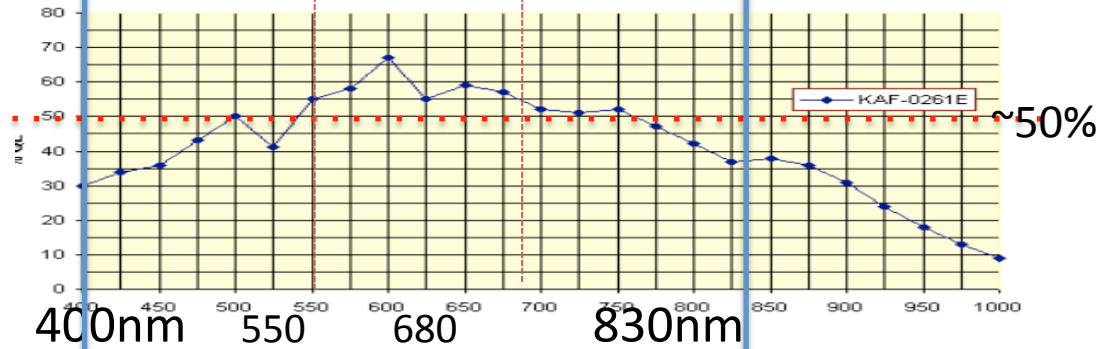
④ Bandpass filters カラーフィルタ

Transmission



⑤ CCD 量子効率

Quantum efficiency



光学技研

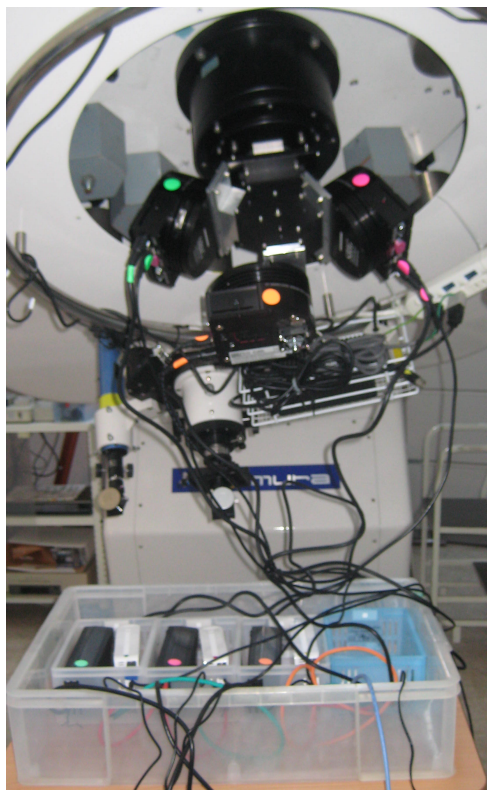
EDMONDS

東海光学

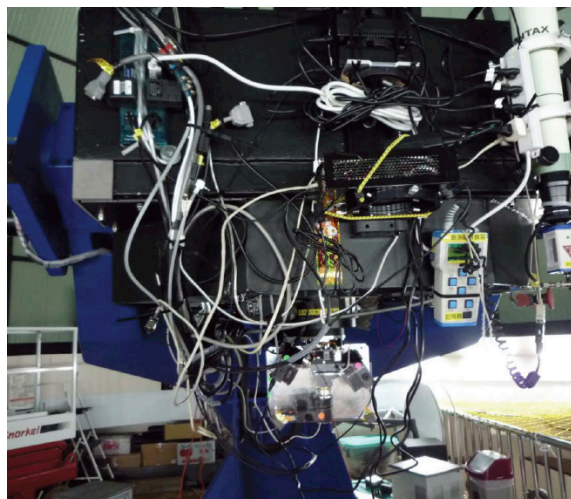
朝日分光

SBIG

TRIPOL-1,-2 の設計試作 2010 評価 2011~12



2011/01~02
岐阜・安八
70cm望遠鏡



2011/08
2012/06
2012/07~

台湾・鹿林
1m望遠鏡



2011/10
南アフリカ
75cm望遠鏡

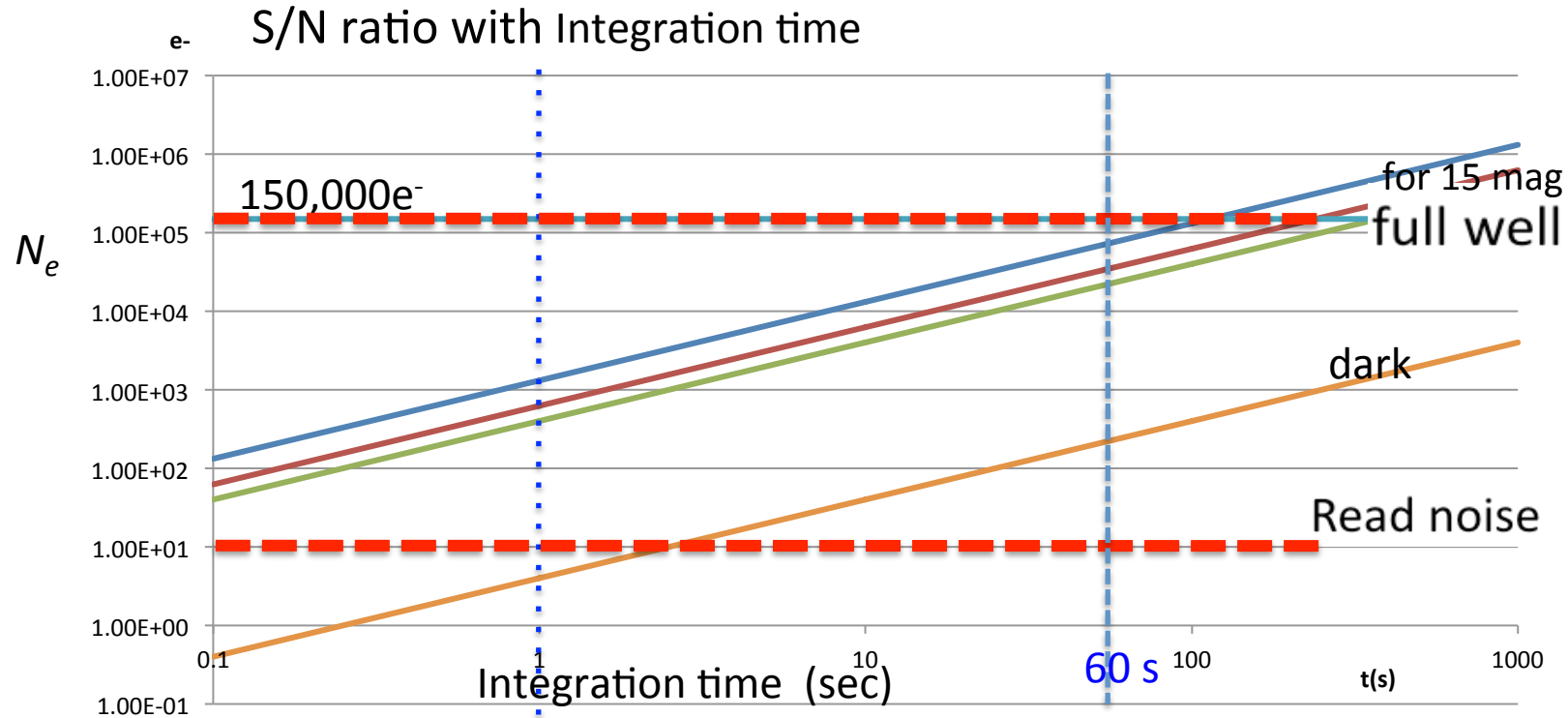
CCD



ST-9

pixes size: $20\mu\text{m}^2$, 512×512 pixels quantum efficiency: $0.3 \sim 0.6$
 full well: 150,000, Read noise: $15\text{e}^-/\text{sample}$ dark current: $4\text{e}^-/\text{s}$

$\Rightarrow SN \sim 300$ for point source with m_r 15 mag = $\Delta p \sim 0.3\%$ in 60 sec
 $SN \sim 10$ for point source with m_r 17 mag in 60 sec



信号: S
 :N ↓
 1.暗電流
 2.読み出し
 3.夜光
 4.ショット(*)

photon number $N = N_0 \times (\text{Collecting Area}) \times (\text{band-width}) \times (\text{Efficiencies})$

- $N_r = N_{15p} \times \pi D^2/4 \times \Delta\lambda \times R_1 \times R_2 \times T_w \times T_p \times R_d1 \times T_f \times T_c \times 1/5 \times QE$
- $N_g = N_{15p} \times \pi D^2/4 \times \Delta\lambda \times R_1 \times R_2 \times T_w \times T_p \times T_d1 \times R_d2 \times T_f \times T_c \times 1/5 \times QE$
- $N_i = N_{15p} \times \pi D^2/4 \times \Delta\lambda \times R_1 \times R_2 \times T_w \times T_p \times T_d1 \times T_d2 \times T_f \times T_c \times 1/5 \times QE$

Triple Range Imager and POLarimeter

手軽で安定な装置ながら

- i) 限界等級 17 mag: @ r' $\Delta T \sim 60s$ [S/N] ~ 10
- ii) 測光安定性 0.01mag/hour rms
- iii) 偏光精度 $< 0.3\%$

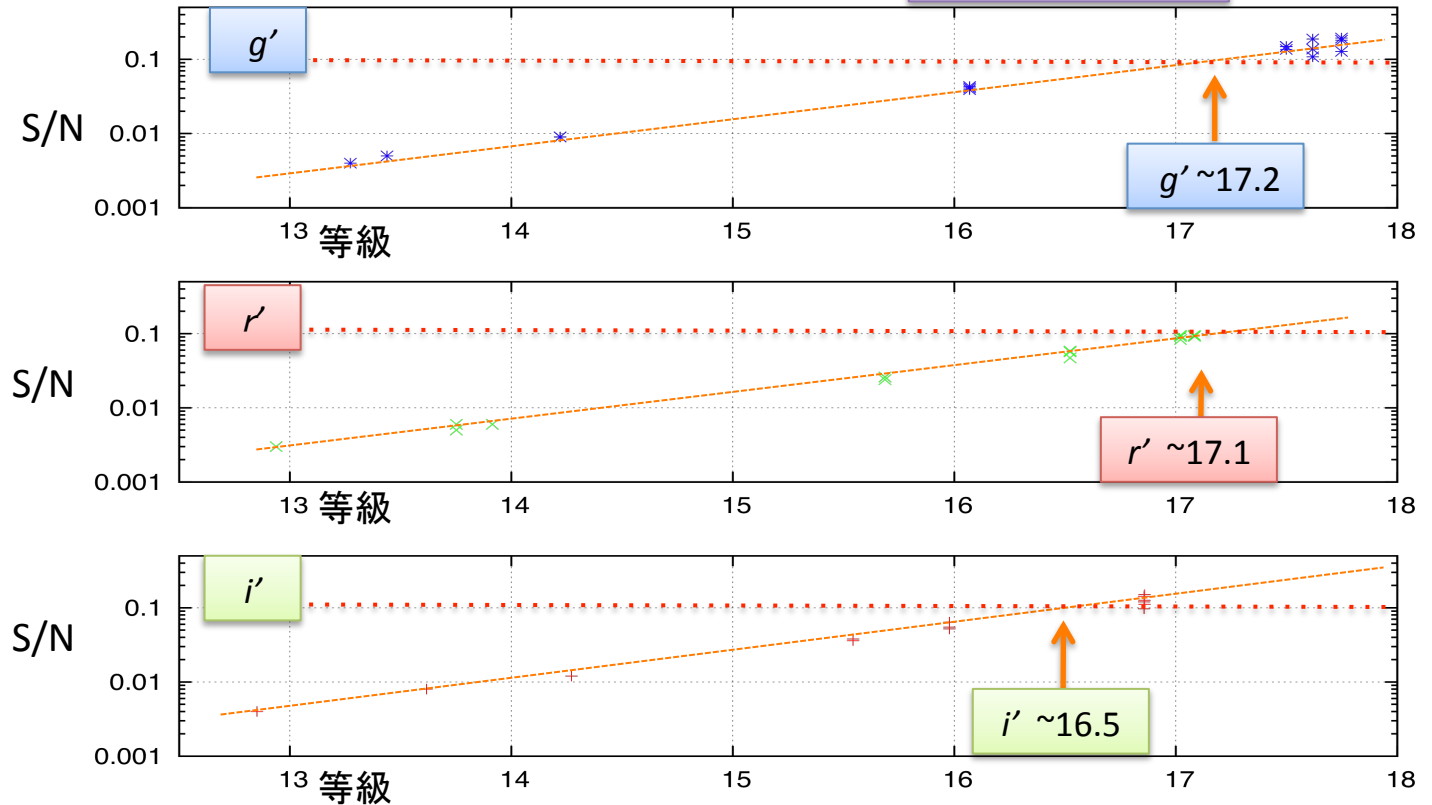
TRIPOLの評価

- 測光(撮像)

限界等級

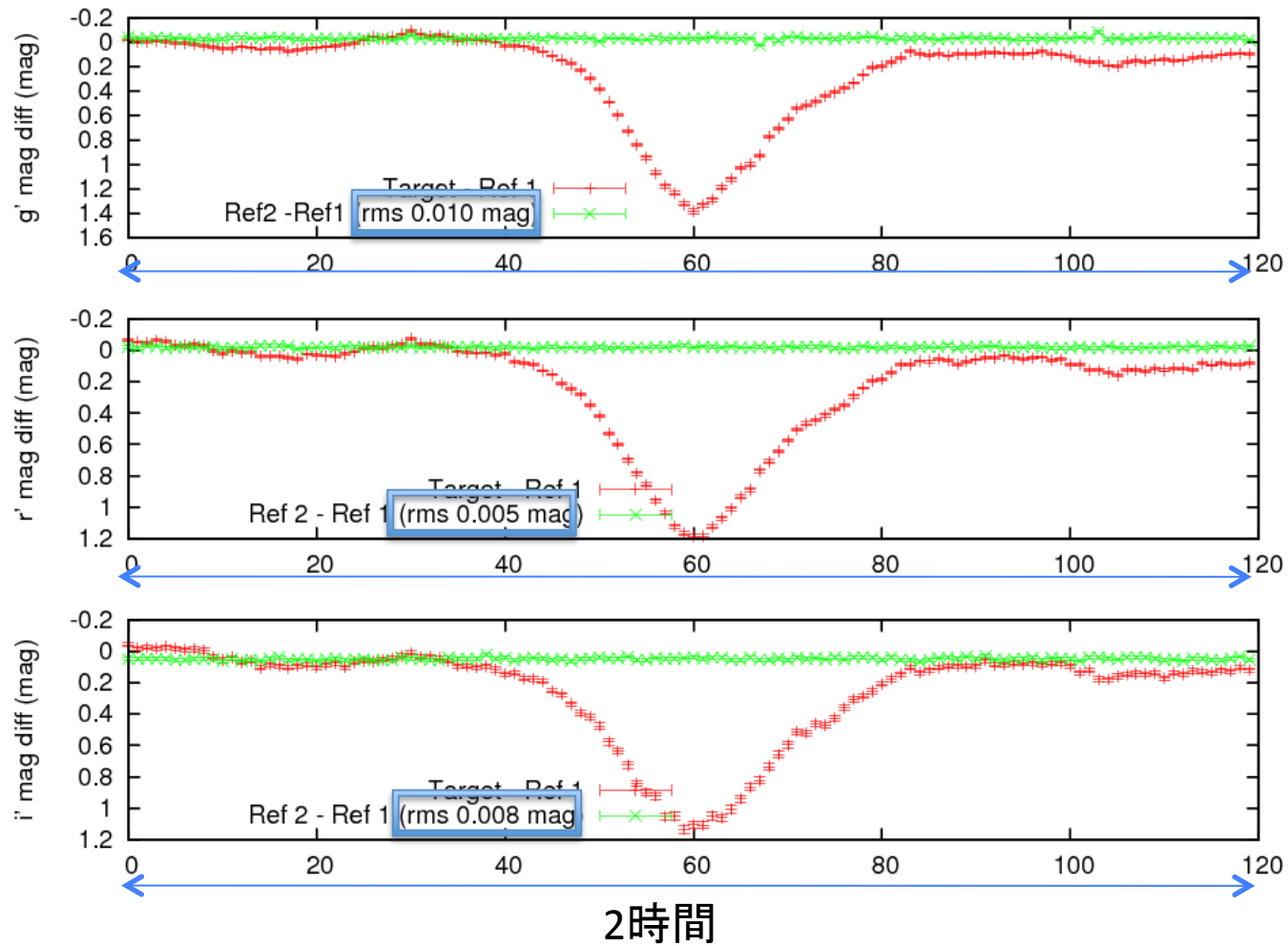
SAAO75cm望遠鏡
[S/N~10] 60sec
Field = MCT2019

$g' \sim 17.2$ 等
 $r' \sim 17.1$ 等
 $i' \sim 16.5$ 等



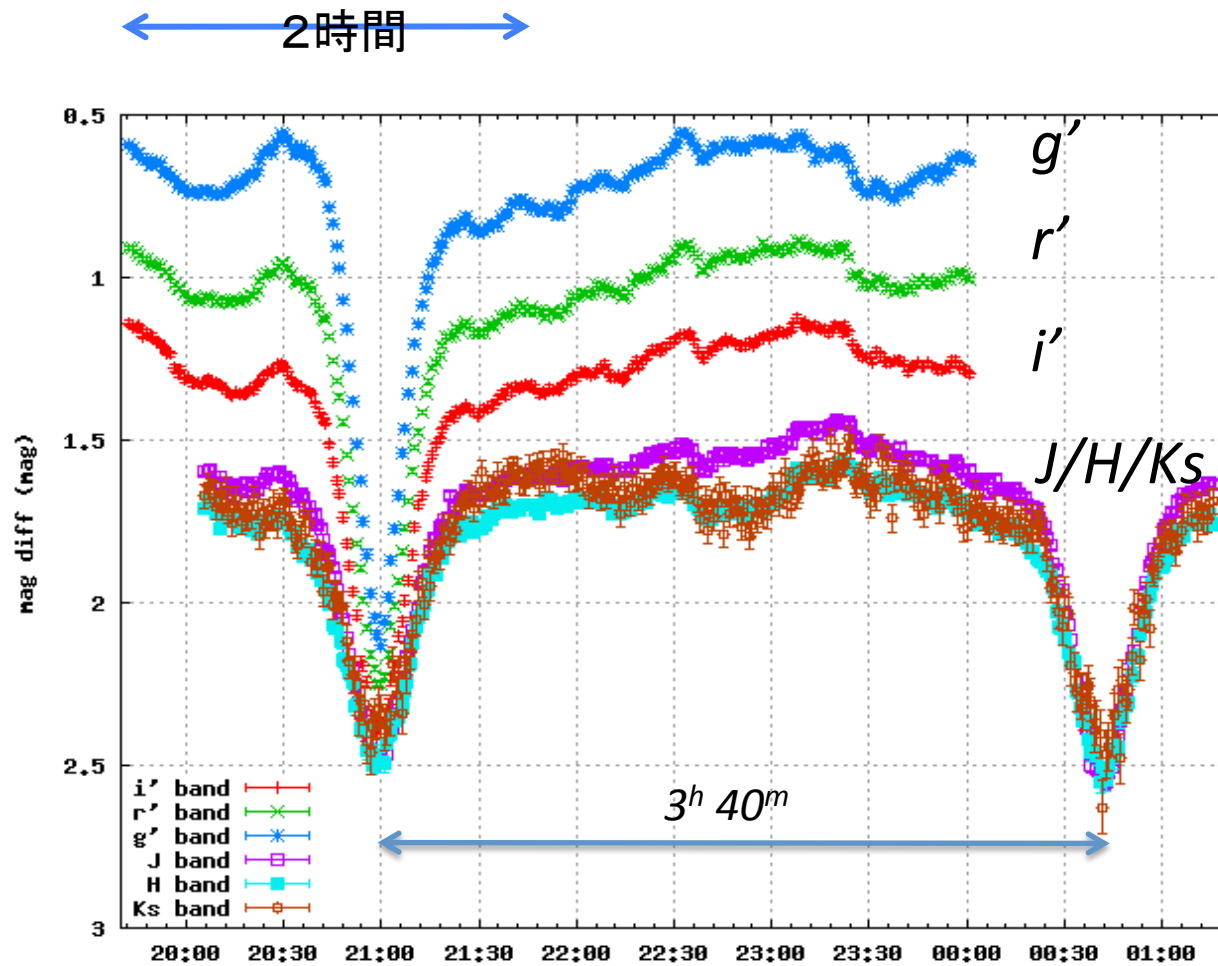
安定性 - 長時間 (~2時間)

+++ $R_2 - R_1$ +++ $R_* - R_1$



Simultaneous Six-color photometry of *EC2117*

with *TRIPOL* on SAAO 75cm + *SIRIUS* on IRSF 1.4m

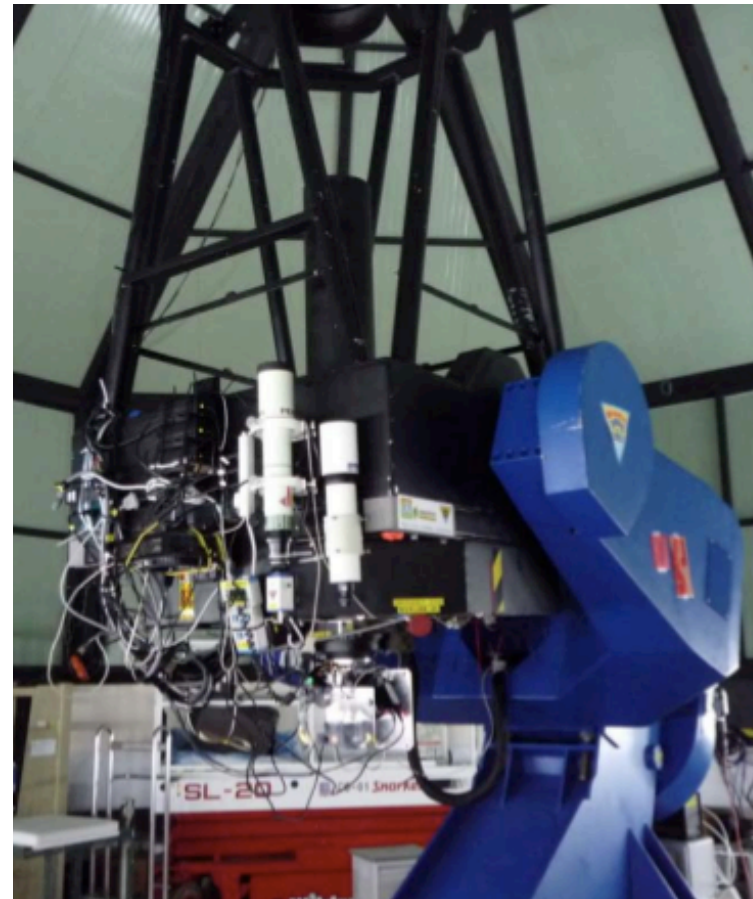


偏光 キャリブレーション

台湾 鹿林天文台 1m望遠鏡

ゼロ%偏光標準星 HD212311
BD+28_421
BD+32_373

強い偏光標準星 Hiltner 960
VI Cyg #12
HD204827
HD155197



偏光キャリブレーション

鹿林天文台 1m望遠鏡

----- I. ゼロ偏光標準星 -----

	P(V)	g'	r'	i'
HD 212311	0.034%	q/u=>P±ΔP θ±Δθ	q/u=>P±ΔP θ±Δθ	q/u=>P±ΔP θ±Δθ
BD+32373	---.----%	P±ΔP θ±Δθ	P±ΔP θ±Δθ	P±ΔP θ±Δθ
BD+28421	0.054%	P±ΔP θ±Δθ	P±ΔP θ±Δθ	P±ΔP θ±Δθ
	<u>平均</u>	<u>0.3±0.2%</u>	<u>0.4±0.2%</u>	<u>0.3±0.2%</u>

< 0.2%

“instrumental” ~10 秒積分

• -----II. 強い偏光標準星 -----

	g'		r'		i'	
1) Hiltner 960	5.82±0.21%	53°	5.38±0.11%	**°	4.49±0.14%	52°
	5.663%	55°	5.210%	55°	4.55%	54°
2) HD155197	4.18±0.08%	102°	4.38±0.04%	102°	3.69±0.03%	104°
	4.320%	103°	4.274%	103°	3.906%	103°
3) VI Cyg#12	9.46±0.05%		8.98±0.06%		7.88±0.05%	
4) HD204827	4.2	% 102°	4.4	% 103°	3.9%	103°

Schmidt et al's. data (1992) at V, R, and I-bands,

	V		R		I	
• Hiltner 960	5.663%	55°	5.210%	55°	4.55%	54°
• HD 155197	4.320%	103°	4.274%	103°	3.906%	103°

	<i>Pg'</i>	<i>Pr'</i>	<i>Pi'</i>	2011.
V374 Cep	4.79±0.04% (77°)	4.87±0.03% (81°)	4.72±0.05% (74°)	8.17
BD+55 2693	2.63±0.04% (-9°)	2.29±0.06% (-11°)	2.11% (-2°)	8.17
V1578 Cyg	0.67±0.05% (-1°)	0.67±0.05% (-1°)	0.10% (7°)	8.17
BD+56 2626	2.35±0.02% (-33°)	2.35±0.02% (-33°)	2.70±0.02% (-26°)	8.17
BD+56 563	3.89±0.01% (66°)	3.89±0.01% (66°)	3.24±0.05% (74°)	8.17
V2028 Cyg	3.16±0.09% (3°)	2.85±0.04% (*°)	1.98±0.05% (11°)	8.17
T Tau	0.70±0.14% (22°)	0.63±0.06% (22°)	0.63±0.06% (22°)	8.17
DG Tau	5.90±0.34% (17°)	5.90±0.34% (17°)	5.90±0.34% (17°)	8.17
GM Cep	5.61±0.19% (18°)	5.61±0.19% (18°)	5.61±0.19% (18°)	8.17
HL Tau	13.10±0.32% (81°)	13.10±0.32% (81°)	13.49±0.16% (*°)	8.17
PDS 581	14.01±0.26% (-4°)	15.28±0.14% (-4°)	15.28±0.14% (0°)	8.17
BL Lac	9.02±0.13% (-23°)	7.77±0.04% (-19°)	7.81±0.04% (-19°)	8.17
----	11.93±0.59% (-45°)	10.60±0.25% (-42°)	11.16±0.25% (-42°)	8.18

Be Stars

T Tauri Stars

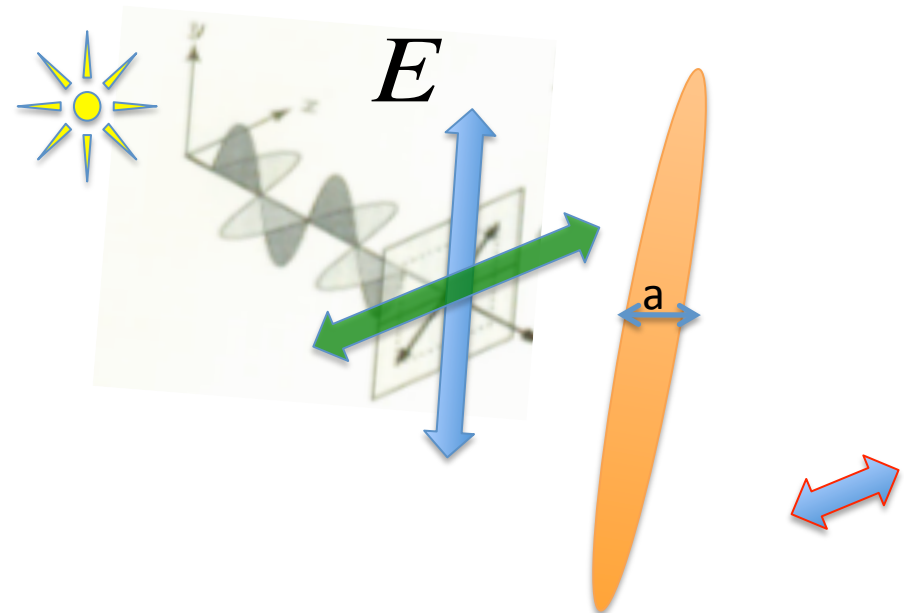
Post AGB

Blazar

3色撮像⇒温度 SED(スペクトル)

偏光	$[P_{g'}, P_{r'}, P_{i'}]$
1. Scattering	散乱(反射)
2. Absorption	選択吸収
3. Emission	制動放射

細長い微粒子
“ダイクロイック”吸収
dichroic absorption



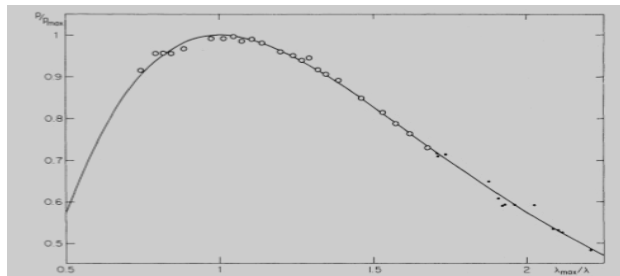
偏光- ii) *Dichroism*: “2”色性

- 1946 Chandrasekhar
- 1949 Hiltner and Hall

色との相関



Serkowsky(1975)

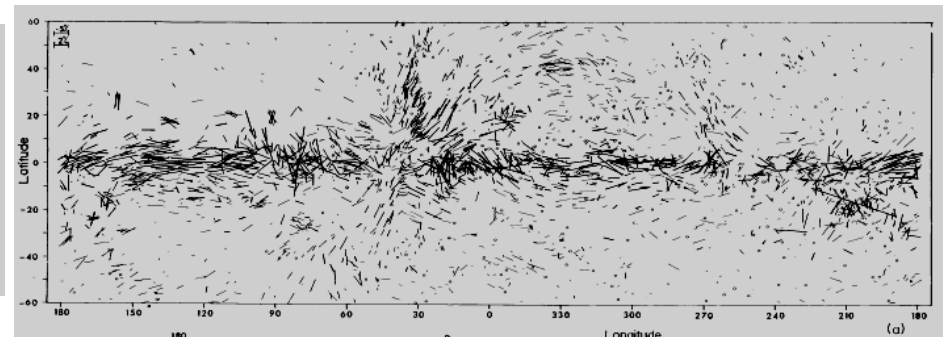


interstellar polarization

銀河面にほぼ平行

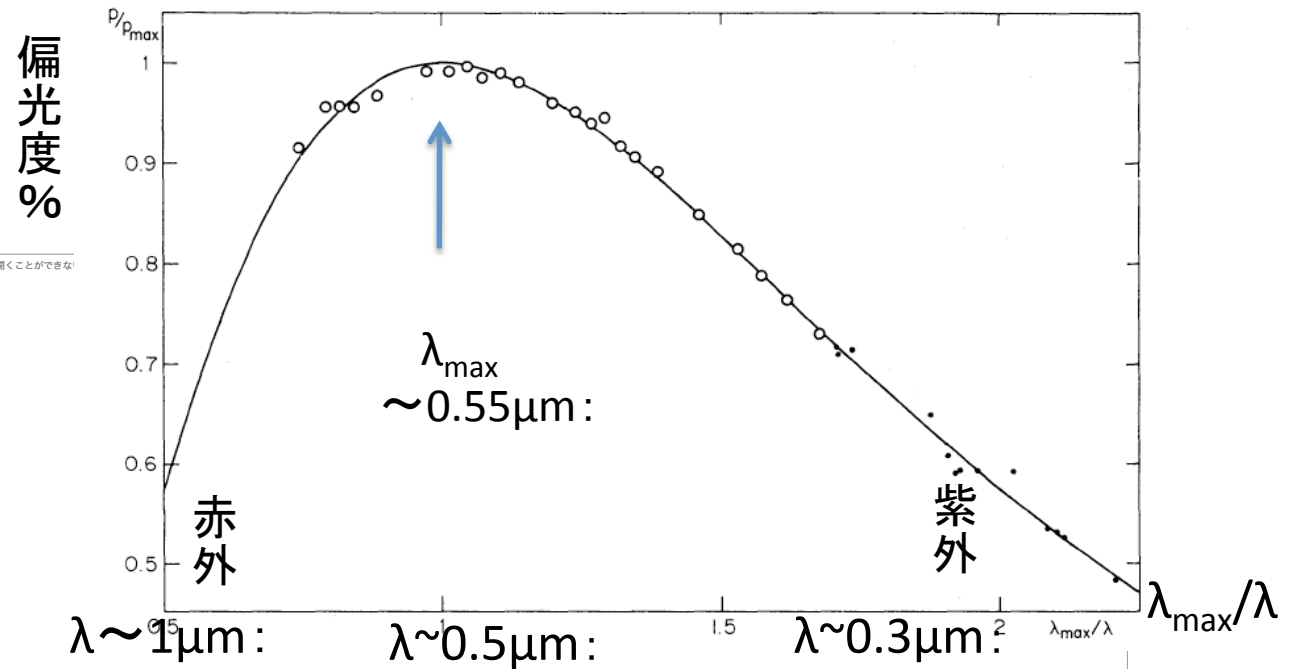


Mathewson & Ford(1970)



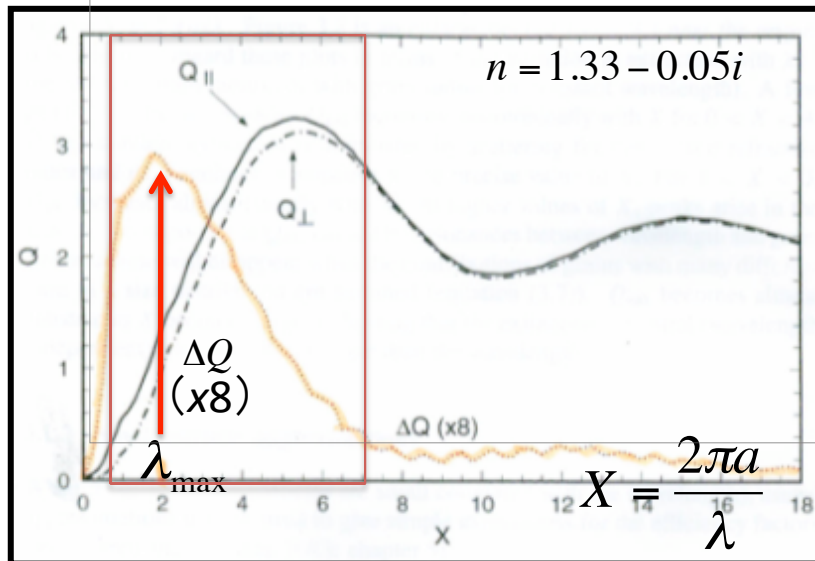
サイズ $a \sim 0.1 \mu\text{m}$ $\lambda_{p\text{max}} \sim 0.55 \mu\text{m}$ 非等方
断面積／表面積が広い
黒い
質量が大きい(小さい)
重元素 星・惑星形成・生命誕生

Davis-Greenstein整列機構
銀河磁場 \Rightarrow 星間磁場 \Rightarrow 星形成領域
幾何学



✖ イメージを表示できません。メモリ不足のためにイメージを開くことができません

断面積 Q



$$\lambda_{\max} = 2\pi a(n - 1)$$

$$a \sim \frac{0.55}{2 \times 3.14 \times (1.5 - 1)} \sim 0.2 \mu\text{m}$$

$$p = A_{\parallel} - A_{\perp} = 1.086 N_d \sigma (Q_{\parallel} - Q_{\perp})$$

微粒子の大きさ “a” について

星間微粒子 interstellar grain

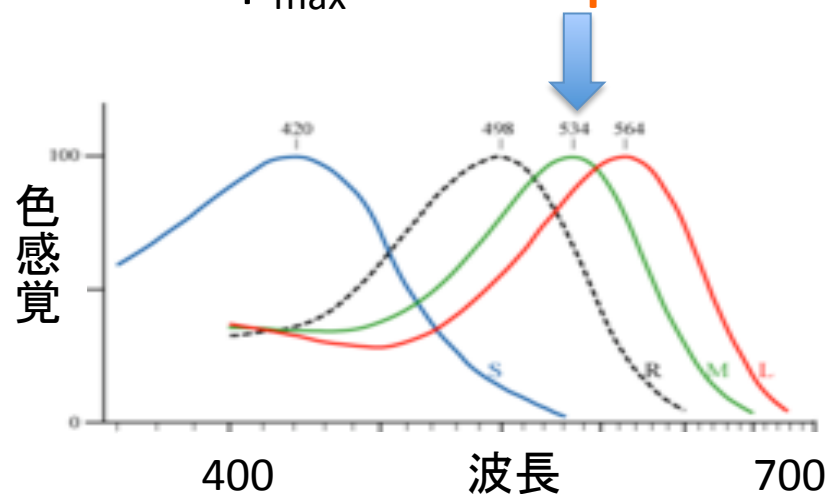
サイズ $a \sim 0.1 \mu\text{m}$ 細長 $a \times b$

減光 1) 赤化 (reddening) 2) 偏光 (polarization)

$\langle a \rangle \sim 0.1 \mu\text{m}$

$\lambda_{p_{\text{max}}} \sim 0.55 \mu\text{m}$

$$\frac{2\pi a}{\lambda} \sim 1$$



$\lambda_{p_{\max}} \sim 0.55 \mu\text{m} \rightarrow \sim 0.8 \mu\text{m}$

最大波長が存在するか? これまでのところ $0.8 \mu\text{m}$

\rightarrow 最大サイズ a_{\max} 有りや無しや?

A. ダストは成長する x印 をつけた方は下の問いへ

B. ダストは成長しない $a_{\max} \sim 2.5 \mu\text{m}$

TRIPOL (Pg' Pr' Pi')

小口径望遠鏡

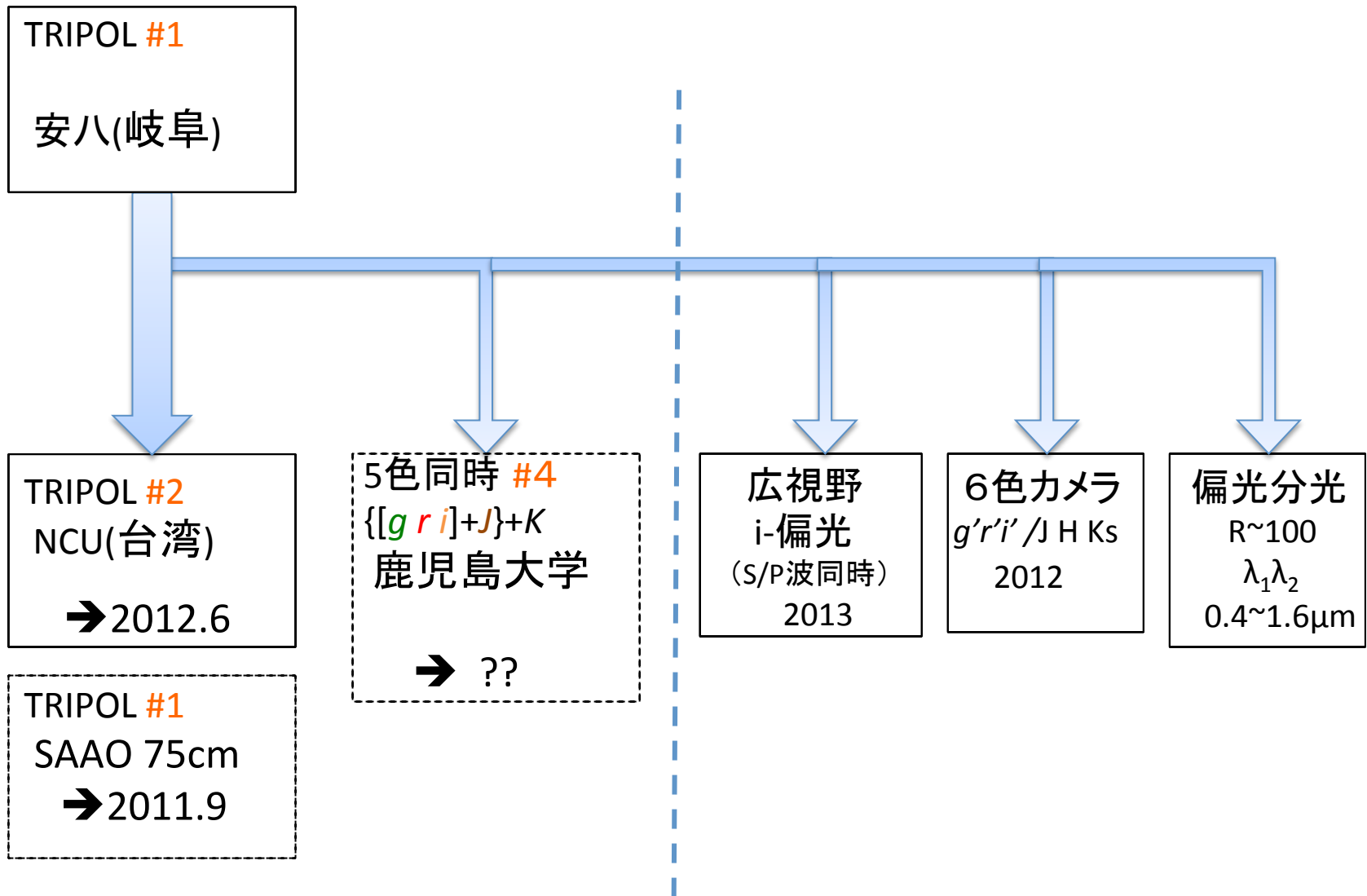
暗黒星雲の偏光掃天

波長 λ 依存 \Rightarrow
最大偏光 $p_{\max} : @\lambda$

ベクトル方向 \Rightarrow
磁場構造

これで一応終わり

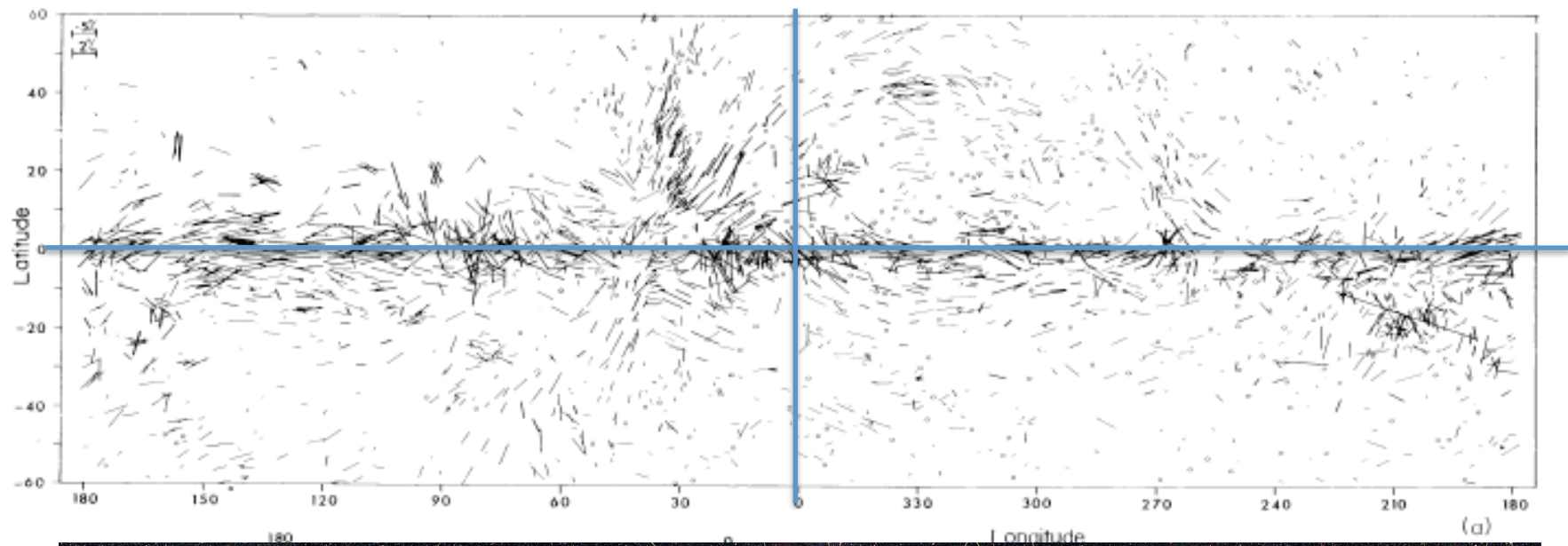
TRIPOL 展開



星間偏光⇒空間分布⇒銀河磁場

1970 Mathewson& Ford

3000個の星々 口径60cm専用望遠鏡

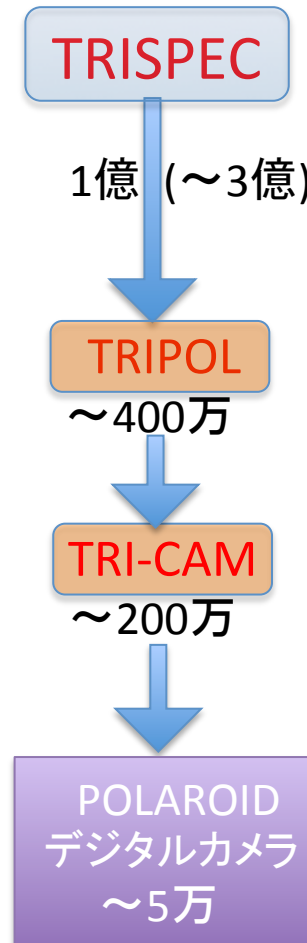


展開

- 安八:岐阜 0.7m F10 → f=7m 0.57"/pixel(=20 μ m)
- Lulin:鹿林 1.0m F8 → f=8m 0.50" /pixel
- Sobaeksan 0.6m F16 → f=9.6m 0.42" /pixel
- SAAO 0.75m F15 → f=11.25m 0.35" /pixel

次世代 富める人にも貧しい人にも一偏りなく 何よりも熱意とタイミング

形の大小を問わず 望遠鏡とよい観測装置



test run of polarization on Feb. 15,16

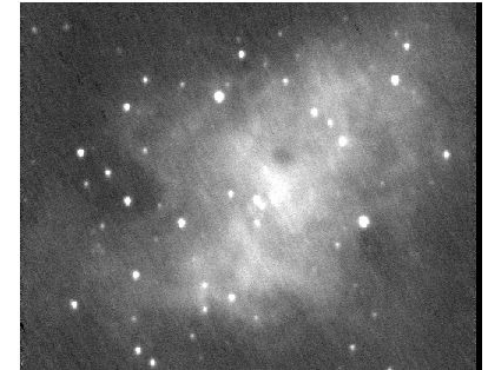
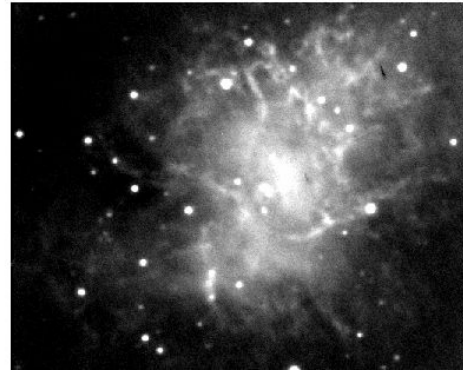
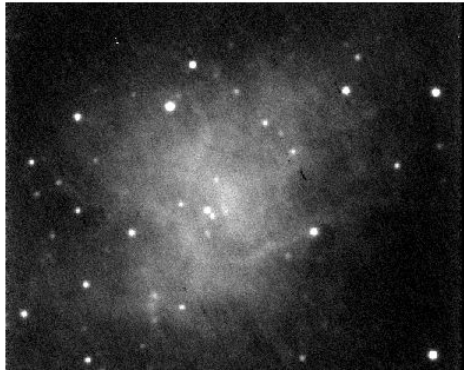
M1 Crab nebula Polarization “preliminary”

g'

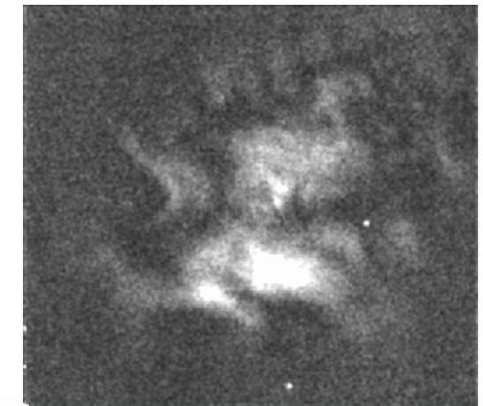
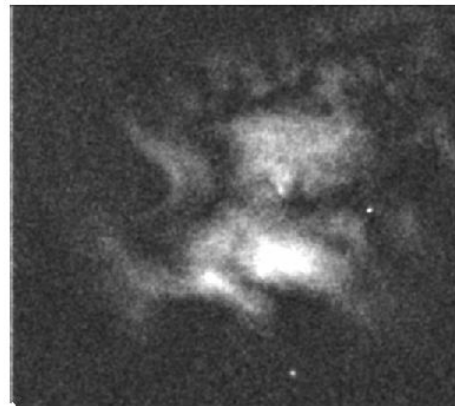
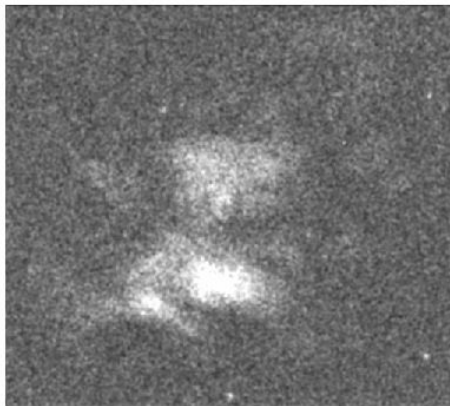
r'

i'

Intensity

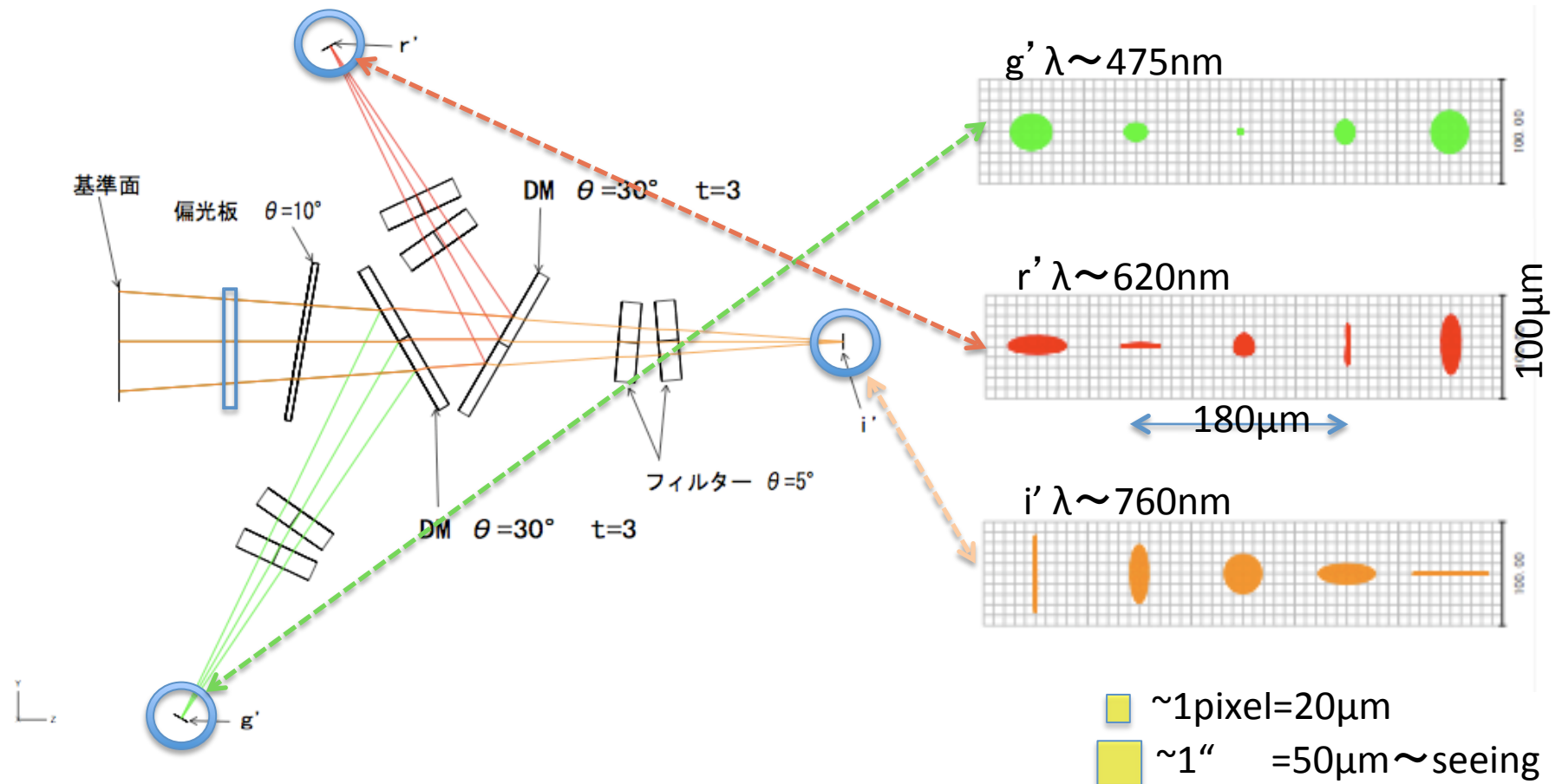


Polarization



Optical layout and the spots

in case of
 $D=1\text{m}:F=10$



How so versatile=powerful?

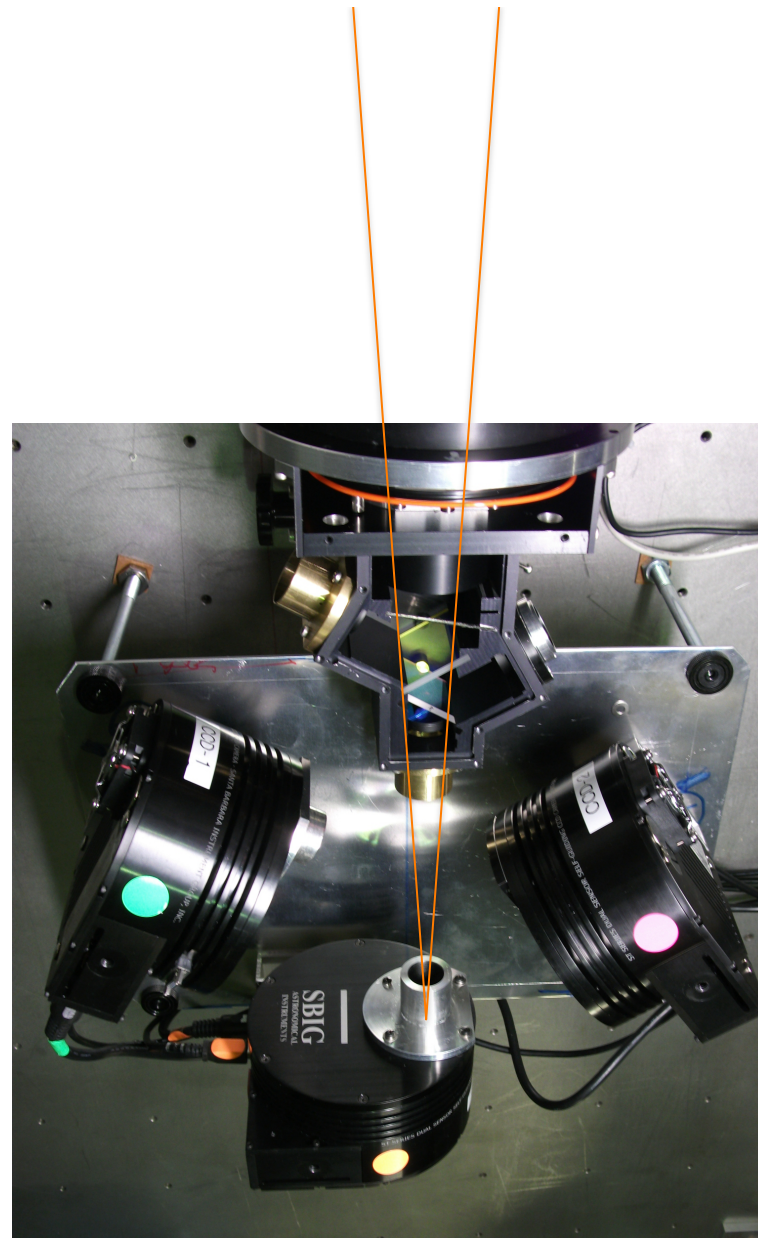
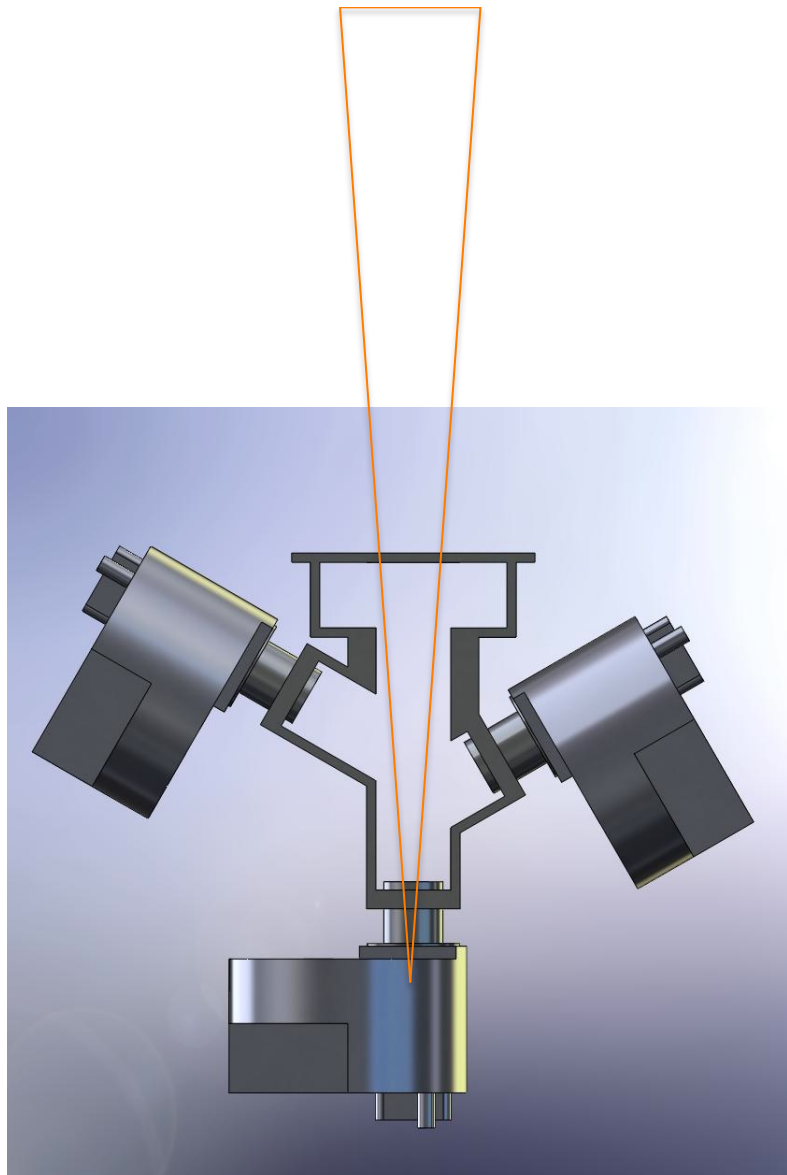
3-color Imagery {g' r' i' }

- 1) Spectral Energy Distribution SED
- 2) Color-Magnitude Diagram CM-D
- 3) Color-Color Diagram CC-D

3-color Polarimetry {P(g') P(r') P(i')}

$P(\lambda)$ \Leftrightarrow wavelength-dependence of polarization

- 1) Synchrotron Emission
 - i. Super Novae, ii. Active Galactic Nuclei (Blazar), iii. GRB
- 2) Scattering/reflection *Rayleigh *Mie(metallic) *Thomson
 - i. Planets ii. Environment around Star-formation/-death iii. Disks
- 3) Dichroic Extinction
 - i. Direction of Magnetic Field Galactic Magnetic Fields, Dark Cloud
 - ii. Wavelength-dependence grain size/growth "a" $\sim 0.1\mu\text{m}$



For calibration at Lulin 1m telescope, We measured

four high polarized standard stars (Hiltner 960, VI Cyg#12, HD155197 , HD204827) and three zero polarized standard stars (BD+28 4211, BD+32373, HD 212311).

DATA are from Bo-He (NCU)'s analysis;

----- High-polarized -----

	g'		r'		i'			
Hiltner 960	5.82±0.21%	6°	5.4±0.11%	6°	4.5±0.14%	11°	*	2011.08.17
VI Cyg#12	9.46±0.05%		8.98±0.06%		7.88±0.05%			2011.06.16
HD155197	4.18±0.08%	102°	4.38±0.04%	103°	3.69±0.03%	103°	#	2011.08.17
HD204827	4.2%	102°	4.4%	103°	3.9%	103°		

For comparison with the Schmidt et al's. data (1992) at V, R, and I-bands,

	V		R		I		
Hiltner 960	5.663%	55°	5.210%	55°	4.55%	54°	*
HD 155197	4.320%	103°	4.274%	103°	3.906%	103°	#

----- Zero-polarized -----

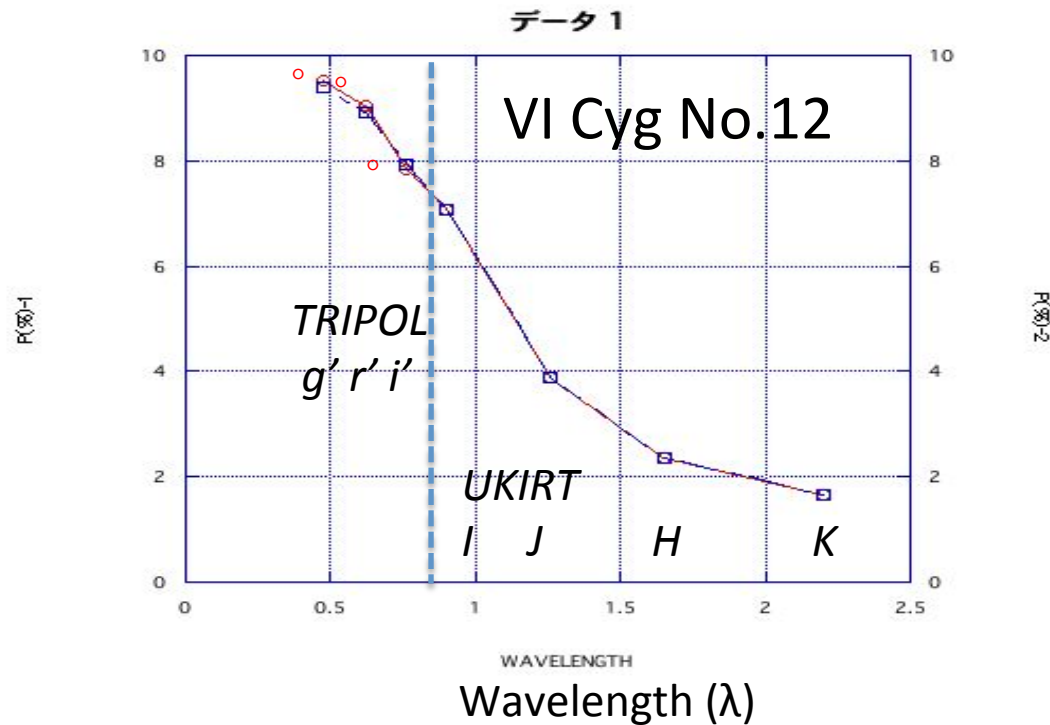
As for instrumental polarization from measurements of non-polarized standard stars, on 11, 14, 15, 17 August

	g'		r'		i'		
HD 212311	q/ u => P±ΔP θ±Δθ		q/ u => P±ΔP θ±Δθ		q/ u => P±ΔP θ±Δθ		
BD+32373,							
BD+28 4211							as
	0.3±0.2%	0.4±0.2%	0.3±0.2%				

3rd run for Standard Polarization Test

@Lulin (Taiwan) July 15, 16

- high polarization VI Cyg No.12 $p(g') \sim 9.5\%$ $p(r') \sim 9.0\%$ $p(i') \sim 7.8\%$
- zero polarization BD+28 4211/BD+32 3739 “instrumental” $P \sim 1\%$!
- detection limit $\sim ?$ mag for 60 sec integration $\Rightarrow m_r \sim 15$ mag !!



TRIPOL の発展

