

広帯域・大型・広許容入射角型の 偏光光学素子の開発に向けて

川端 弘治（広島大学宇宙科学センター）

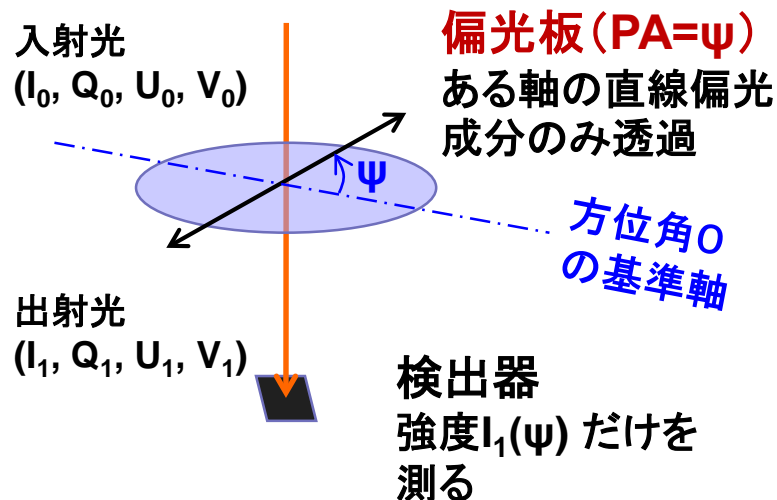
SGMAP チーム（広島大）

目次

- 可視近赤外域の偏光観測
 - 素子の大型化、より広い許容入射角
- 偏光光学素子の実際
- SGMAP計画と3バンド広視野偏光撮像器
 - 必要となる偏光光学素子の検討
 - ワイヤグリッドタイプ偏光ビームスプリッタ
 - への期待

可視赤外域における偏光観測の原理

- ストークス・パラメーター(I, Q, U, V)を光強度(の変化)から換算する



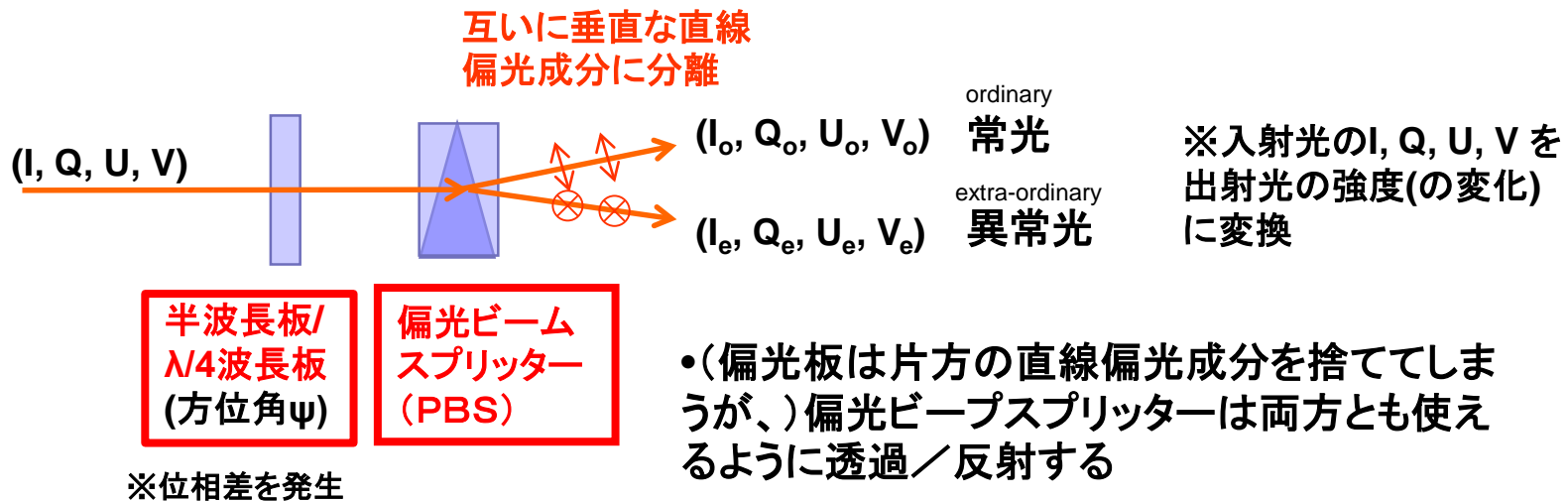
入射光の偏光と偏光板の方位角PAに応じて、透過光強度が変化

$$\frac{Q_0}{I_0} = \frac{I_1(0\text{度}) - I_1(90\text{度})}{I_1(0\text{度}) + I_1(90\text{度})}$$

$$\frac{U_0}{I_0} = \frac{I_1(45\text{度}) - I_1(135\text{度})}{I_1(45\text{度}) + I_1(135\text{度})}$$

ただ、これでは4回の露出が必要で、その間に大気の透過率が変化すれば、それによる光量の変化が、そのまま測定誤差になってしまう。

しばしば用いられる偏光測定光学系



■ 半波長板のとき →直線偏光

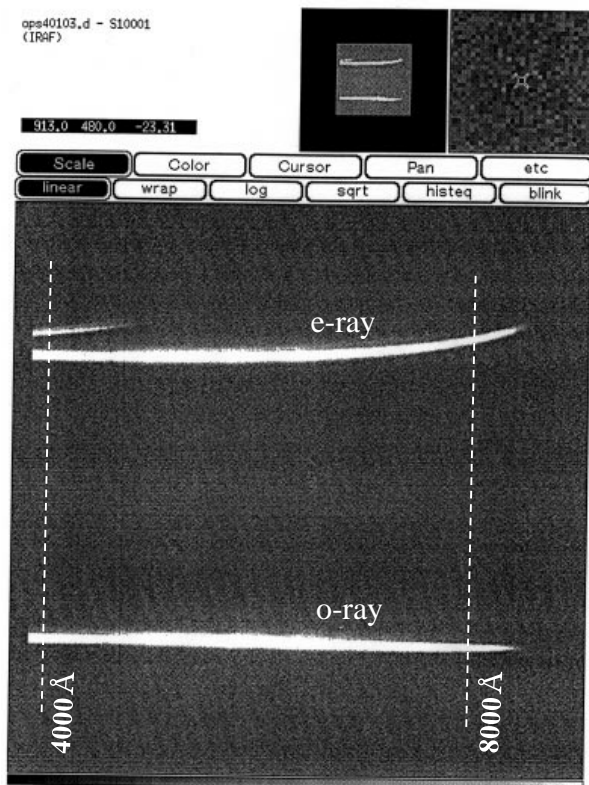
$$I_o = I/2 \cdot \{ 1 + Q/I \cos(4\psi) + U/I \sin(4\psi) \} \cdot k_o \cdot \kappa(t)$$

$$I_e = I/2 \cdot \{ 1 - Q/I \cos(4\psi) - U/I \sin(4\psi) \} \cdot k_e \cdot \kappa(t)$$

- 未知パラメータが3つ ⇒ ψの2方位の測定で直線偏光パラメータを得られる
- 透過効率 k_o , k_e や大気透過率の時間変化 $\kappa(t)$ が主な誤差要因となることが多いが、4方位以上の測定を行うことで、これらの係数を自己相殺でき、高精度の観測が可能

■ λ/4波長板のとき →円偏光

観測データ(偏光スペクトル)の例



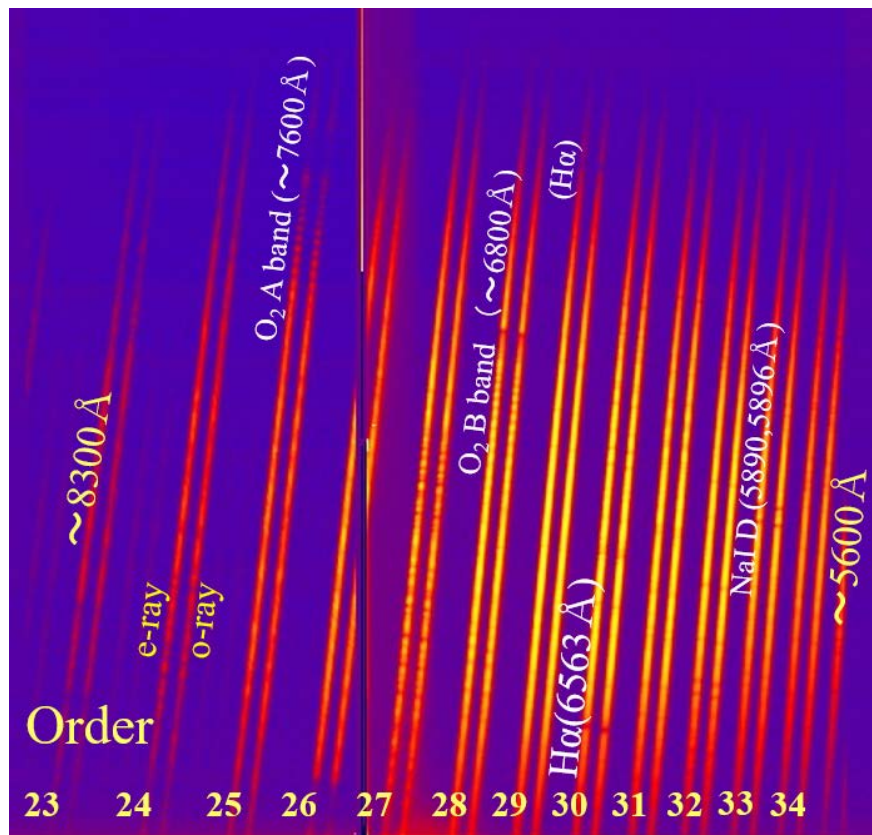
OOPS(岡山偏光分光撮像器)

佐々木(敏)ほか

ビームスプリッター: ロション・プリズム

エシェル・スペクトログラムが常光・異常光の2本ずつ

のセットで



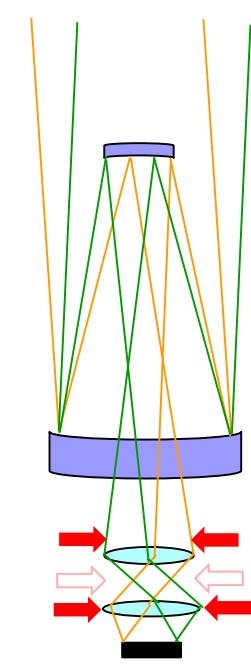
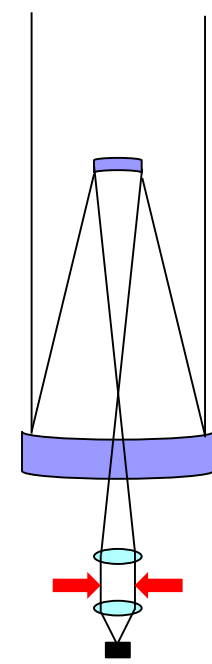
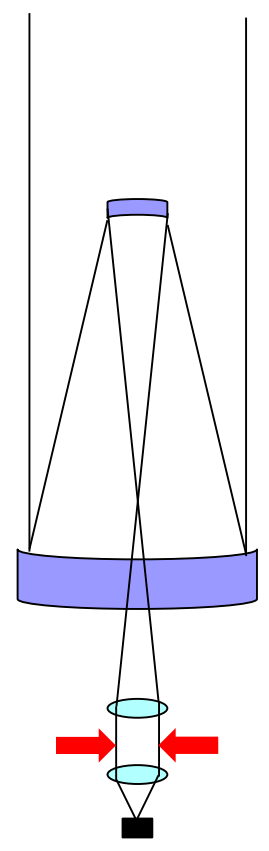
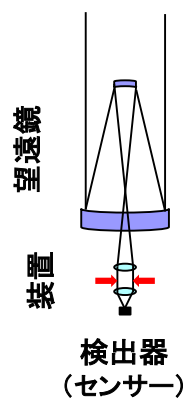
LIPS(線スペクトル偏光装置) 秋田谷、池田ほか

ビームスプリッター: ウォラストン・プリズム

エシェル・スペクトログラムが常光・異常光の2本ずつのセットで

可視赤外線装置の近年の傾向

- 望遠鏡口径の大型化
- 大フォーマット検出器による広視野化
- (多バンド化、広帯域化)



口径が大きくなると比例して
ビームサイズが大きくなる

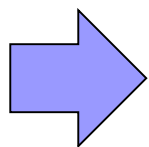
口径1m→8mで8倍
2cm立方の複屈折結晶→16cm立方へ

視野が広くなるとビームサイズが大
きくなる + 光線の傾きが大きくなる

平行光部の光線の傾きと装置の長さがトレ
ードオフの関係に
F値に反比例して開き角が大きくなる

可視赤外線装置の近年の傾向

- 望遠鏡口径の大型化
- 大フォーマット検出器による広視野化
- (多バンド化、広帯域化)



偏光光学素子も、

広帯域化、大型化・広許容入射角型化
が求められる

偏光光学素子の素材・硝材

- 複屈折性結晶　方解石、水晶など
- 誘電体多層膜（基板は光学ガラス）
- ポリビニルアルコール系　～偏光フィルム
- ワイヤーグリッド
- 液晶等

可視近赤外域でよく用いられる複屈折性結晶

| | 透過波長域 | n_o | $n_e - n_o$ | 測定波長 (μm) | V 0.6 μ | V 2.2 μ | 熱膨張率の軸 差 ($\times 10^{-6}$) |
|---------------|----------|---------|-------------|---------------------------|----------------|----------------|----------------------------------|
| 方解石 | 0.21-2.1 | 1.66 | -0.17 | 0.633 | 22 | 36 | 18.7 |
| Calcite | 0.21-2.1 | 1.66 | -0.17 | 0.633 | 22 | 36 | 18.7 |
| α -BBO | 0.19-2.1 | 1.67 | -0.12 | 0.532 | 30 | 33 | -32 |
| YVO4 | 0.45-3.4 | 1.9929 | 0.2225 | 1.55 | 11 | 547 | -6.9 |
| LiNbO3 | 0.50-3.8 | 2.146 | 0.074 | 1.3 | 8 | 67 | -14.7 |
| Rutile | 0.55-4.3 | 2.454 | 0.256 | 1.5296 | 15 | -29 | -2.7 |
| LiYF4 | 0.30-4.0 | 1.44845 | 0.02218 | 1.0 | 43 | -264 | 3 |
| MgF2 | 0.13-7.0 | 1.37713 | 0.01176 | 0.6234 | 71 | 115 | 5.2 |
| 水晶 | 0.20-2.4 | 1.54 | 0.009 | 0.633 | 31 | 45 | |
| SiO2 | 0.20-2.4 | 1.54 | 0.009 | 0.633 | 31 | 45 | |

$$V(\lambda) = \Delta n(\lambda) / (\Delta n(\lambda-0.1) - \Delta n(\lambda+0.1)) \quad \Delta n(\lambda) = n_e(\lambda) - n_o(\lambda)$$

Vが大きいほど常光・異常光の分離角の波長依存性が小さい

= 広い帯域のフィルターを使用した場合でも色収差が小さくて済む

これらの光学パラメータ以外に、大きな結晶の手に入りやすさ、価格、脆さ／硬さ、加工のし易さ、熱ショックへの耐性、など固有の特徴

透明性・有効波長域の広さ、偏光能率の高さなど、有利な点が多い
但し、脈理・気泡の無い大型の結晶は、極めて高価で入手困難

■ 誘電体多層膜

- メリット: 扱いやすく、大型化が比較的容易
- デメリット: 許容入射角が小さい、有効波長域がやや狭い

■ ポリビニルアルコール系

- メリット: 扱いやすく、大型化が容易、許容入射角が大きい
- デメリット: 一方の偏光成分を吸収(=捨てる)、有効波長域がやや狭い、面精度が悪め

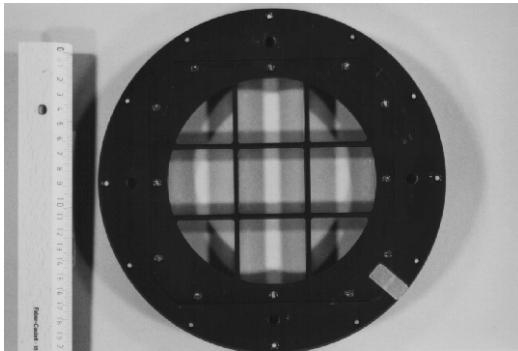
■ ワイヤーグリッド

- **メリット**: 扱いやすく、大型化が比較的容易、許容入射角が大きい
- **デメリット**: 有効波長域がやや狭い、一方の偏光成分(反射成分)は波面精度が悪く使えない(=捨てる)、(その一方で、近年、技術向上により両方の偏光成分が利用可能な製品や、有効波長域が広い製品が実用化されつつある)

■ 液晶

- **メリット**: 電場により偏光特性の高速変調が可能
- **デメリット**: 有効波長域がやや狭い、大型化がやや困難

大型波長板の例



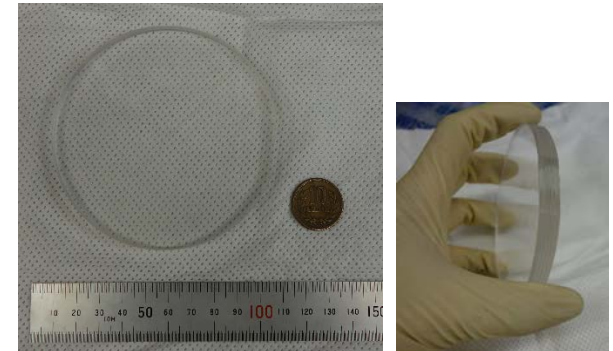
ESO VLT 8.2m/FORS2の
波長板($\lambda/2$, $\lambda/4$)

9分割(平行光部で使用)
可視域 (350-1000nm?)
有効径 $\sim 12\text{cm}$



すばる 8.2m/FOCASの
波長板($\lambda/2$, $\lambda/4$)

4分割(平行光部で使用)
可視域 (360-1200nm)
有効径 $\sim 12\text{cm}$

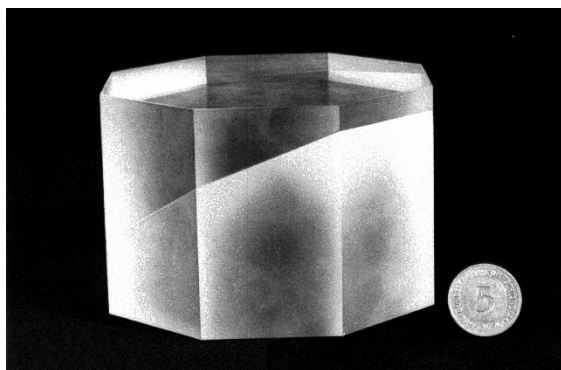


広島かなた1.5m/HONIRの
波長板($\lambda/2$)

一体もの(収束光でも使用可)
可視近赤外域 (450-2300nm)
有効径 $\sim 9.2\text{cm}$

- いずれもPancharatnum型の超広帯域(2層 \times 3組貼り合わせ)
- 有効径10cm以上は分割タイプ(平行光部でしか利用できない)
- 許容入射角 $< \sim 5^\circ$

大型偏光ビームスプリッタの例



ESO VLT 8.2m/FORS2の
ウォラストンプリズム



すばる 8.2m/FOCASの
ウォラストンプリズム
水晶製 有効径 ~11cm
厚み ~10cm

- 分割タイプは利用不可
- これほど大型の結晶で利用可能なものは水晶、フッ化マグネシウムなどごく一部

2m望遠鏡＋広視野光学系＋偏光解析撮像系・・・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)

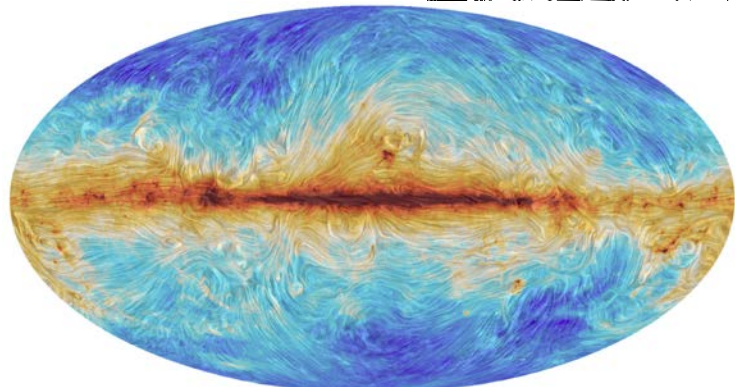
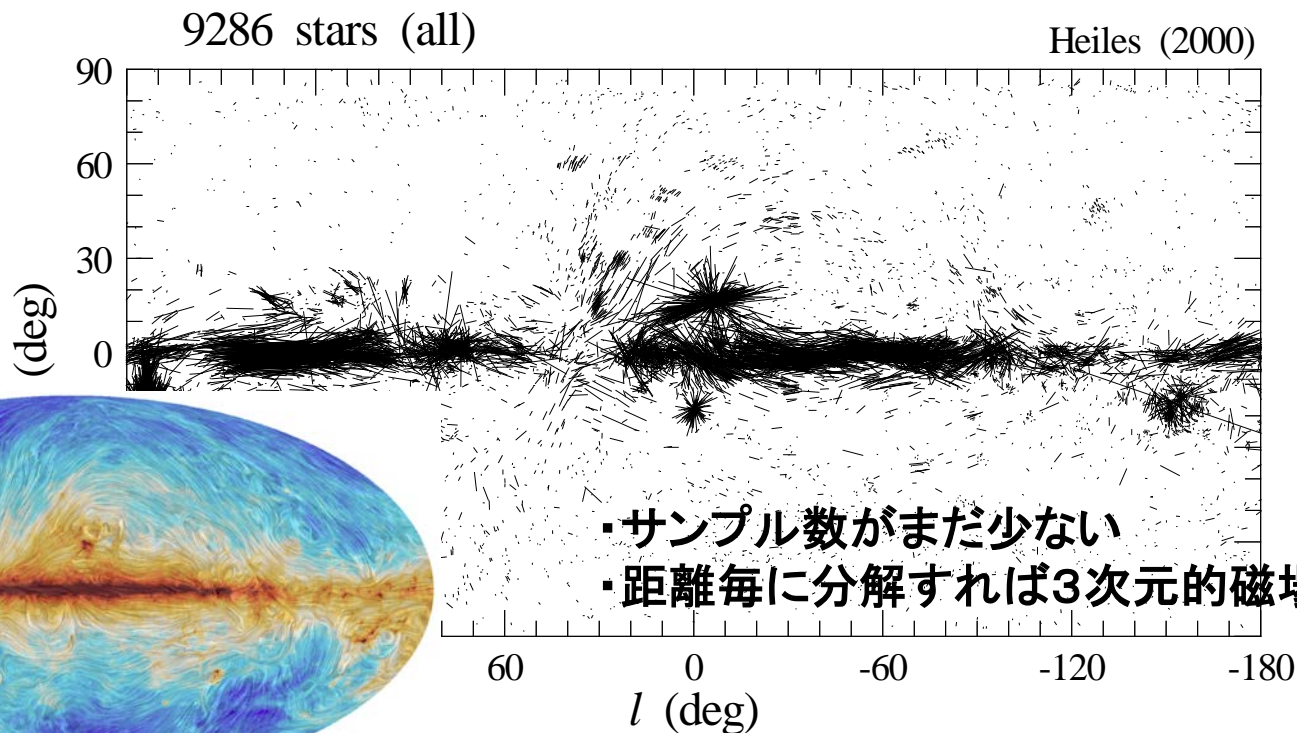
： 　　　　： 　　　　：

予算化はまだ 装置設計を進めている

可視偏光サーベイの現状1

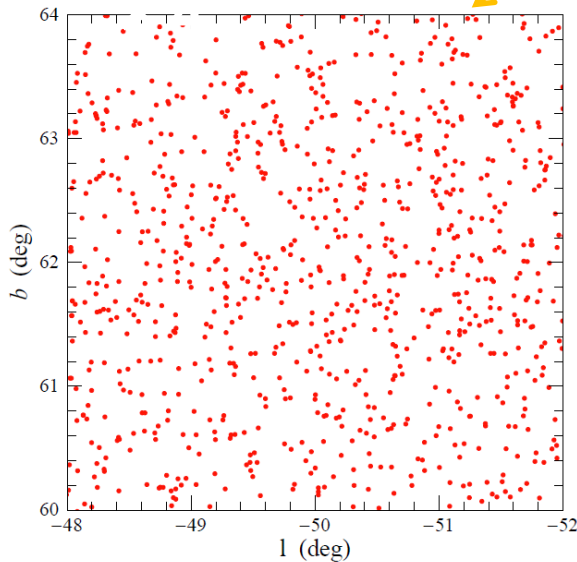
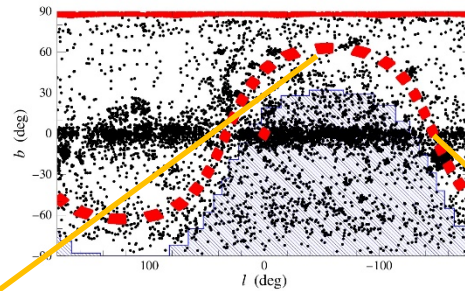
既存カタログ: 9286星 単バンド(Heiles 2000) 過去観測のコンパイル
個数では、全天の6等より明るい星(8600個)と同じ位しか無い!

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)



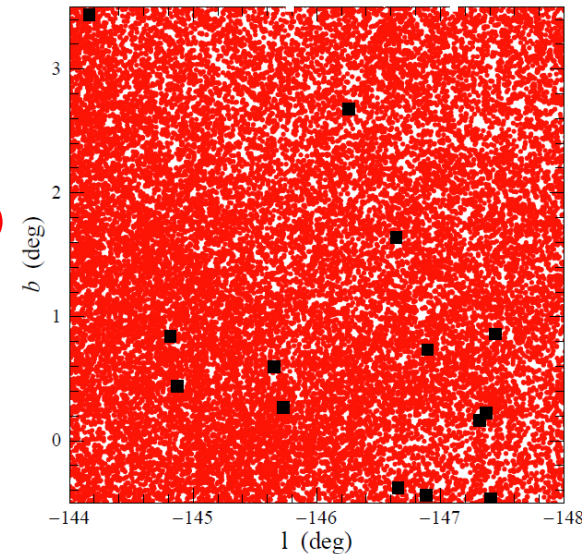
Tangential B; Planck 2015 (Planck collab.+ 2015)

SGMAPでどれだけサンプルが増えるか



赤丸: V=14等
より明るい星
(SGMAPで観測)

黒四角: 既存の
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

サンプル数が $\sim 10^4$ 個 \rightarrow $\sim 10^{6-7}$ 個 に大幅拡大

SGMAP Survey Plan

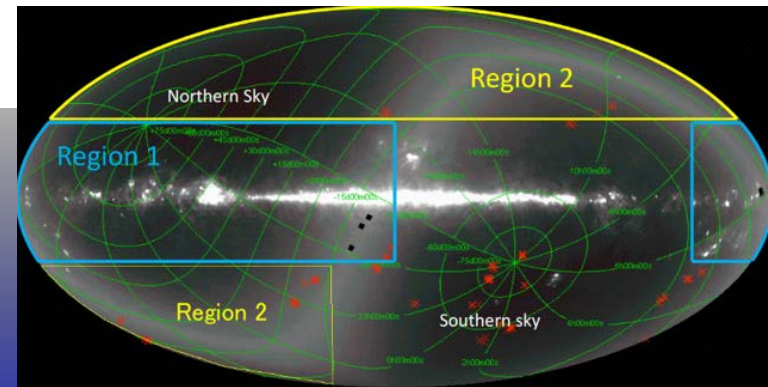
- With $40s \times 4$ exposures, $\Delta p = 0.2\%$ @ $V = 14.0\text{mag}$, $\Delta p = 0.1\%$ @ $V = 13.0\text{mag}$
Seeing $1.8''$, Sky $18\text{mag}/\text{arcsec}^2$, total efficiency 20%
- 1 set of observation takes 4.6 minutes (with overhead), 100 sets in one night
- Survey speed: $46.4 \text{ deg}^2/\text{day}$

1. Galactic plane survey

- $|b| < 30^\circ, l = 0 - 220^\circ$ (12000 deg^2)
- $12000/46.4 \rightarrow$ taking **0.71 yr**
- Weather factor **0.333** \rightarrow **2.14 yr**

2. Mid-high latitude survey

- $b = +30^\circ - +90^\circ$ at any l and $b = -90^\circ - -30^\circ$ at $+60^\circ \leq l \leq +160^\circ$ (13200 deg^2)
- Weather factor **0.333** \rightarrow **2.36 yr**



These observation will be finished within ~4.5 yr.

なぜ可視偏光サーベイは進んでいないのか

広視野 → F比小 入射角大 ビーム径大

高精度偏光測定 ($\sigma_p < \sim 0.1\%$)

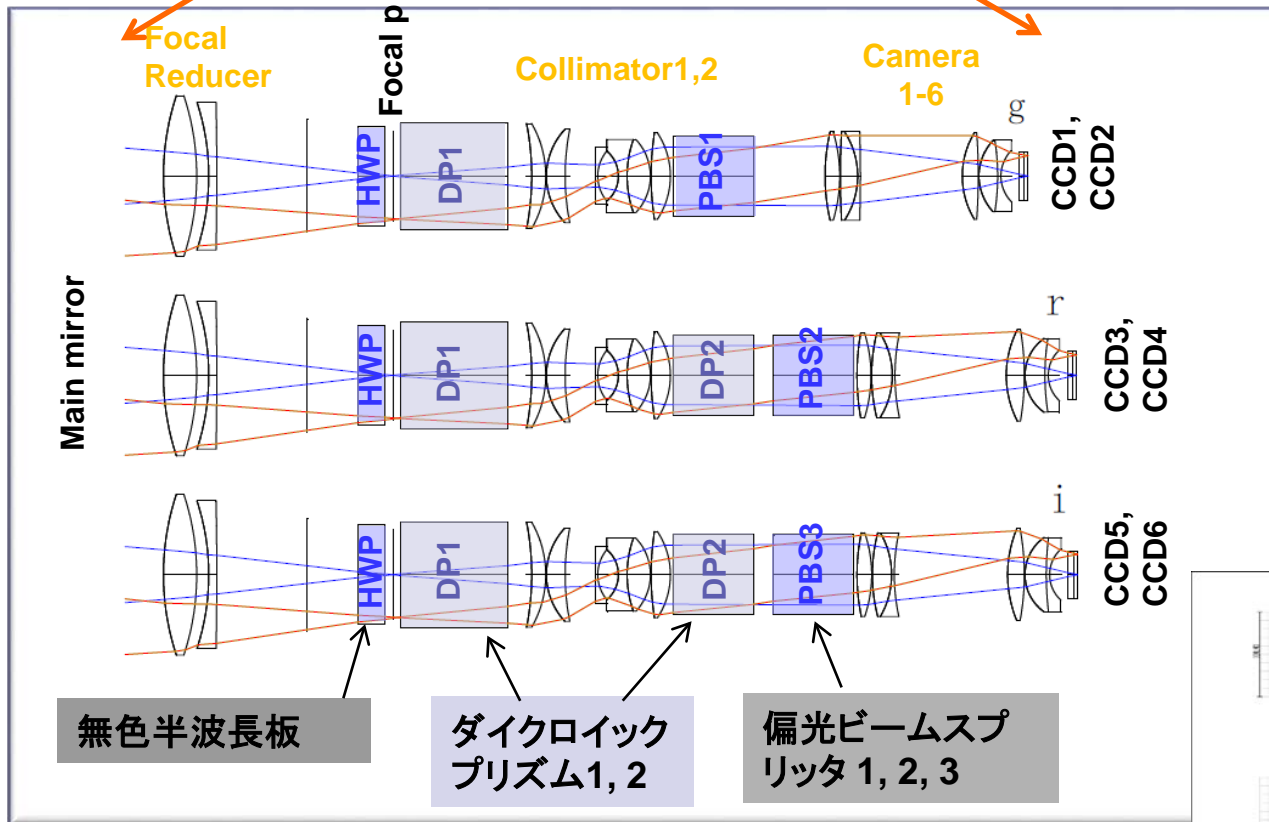
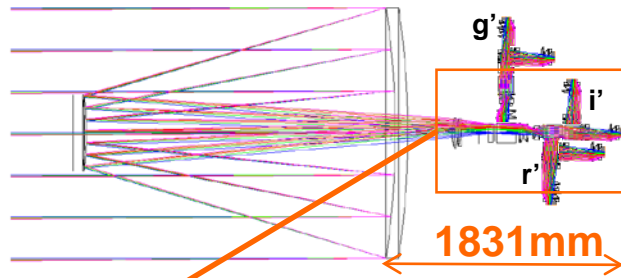
※最低3方位での直線偏光成分の光量測定が必要

地球大気の透過率変動の補償

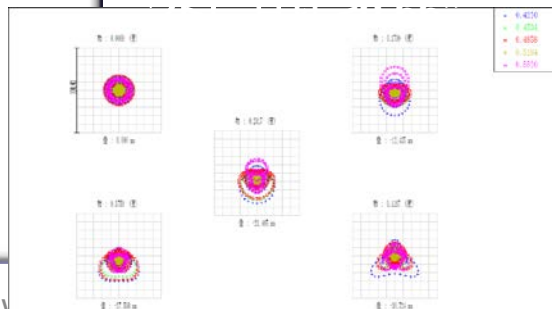
高速の測定 ($> \sim 10\text{Hz}$)、ないしは
直交偏光成分の同時測定

複屈折性素子が必要だが、
許容角が限られ、且つ大型結晶材の
手配や加工の問題があり、困難

SGMAP 光学設計



半波長板、ダイクロ、
PBSのいずれへ入射
する光線も、全視野
にわたり 10° 以内に抑
えている

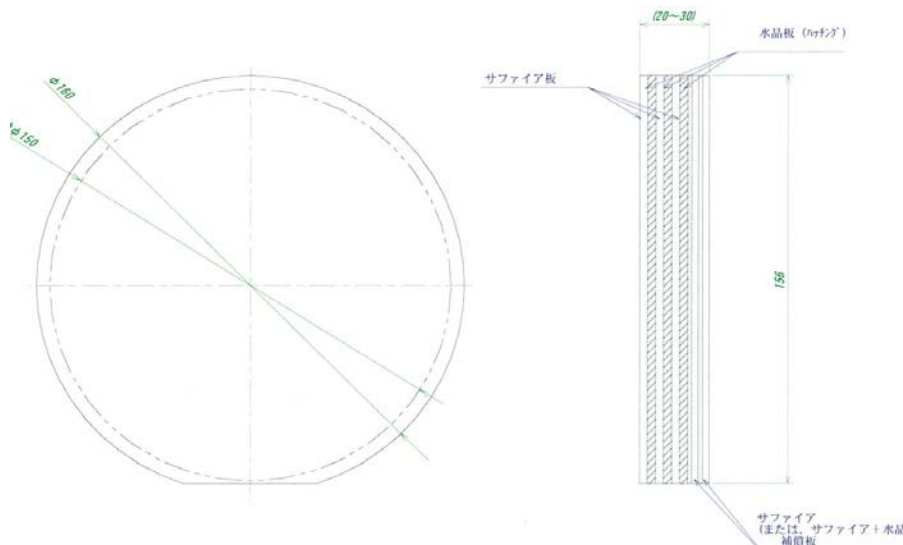


大型広帯域半波長板

要求性能

- 有効径150mmφ 許容入射角 $\pm 7^\circ$
- 分割タイプは不可、**一体もの**（収束光中に置くため）
- λ 380-900nm において位相差 $180 \pm 3^\circ$
- 透過率 80%以上 波面精度 $\lambda/2$ 以下

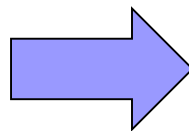
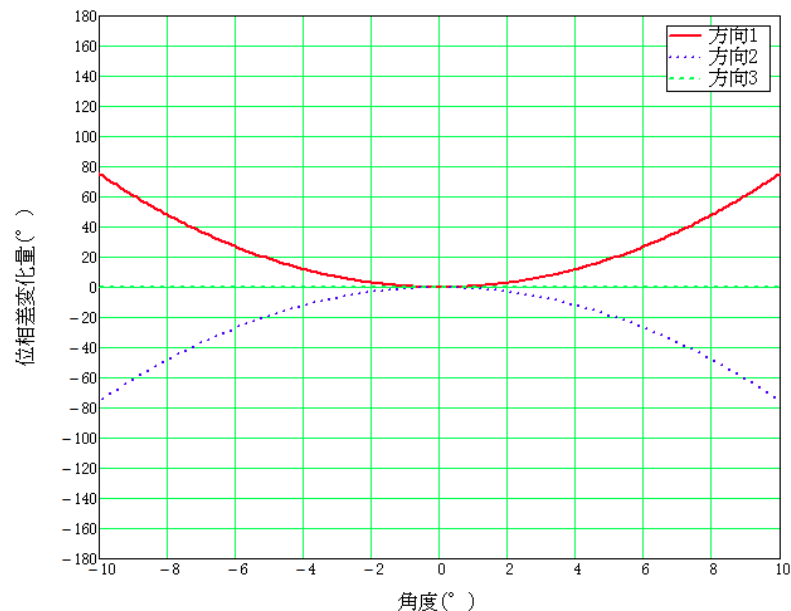
Pancharatnum型(水晶+サファイヤ×3層)+入射角依存性補償板



で十分な薄さ(<30mm)の
もので実現できるめど
が立ちつつある。

より大きなものは、平行光
部での利用を前提にモザ
イク化すれば実現化

リターダンスのずれの入射角依存性



Pancharatnum型
サファイア+水晶+補償板付き@640nm
10°でもリターダンスのずれは±3°以内

Sorry.
If you want to see, please
contact KK

HONIRで使用中の半波長板
(Pancharatnum型フッ化マグネシウム+水晶)
10°傾くと70°に達するリターダンスのずれが発生(@1000nm)

Pancharatnum型
フッ化マグ+水晶+補償板付き@640nm

Sorry.
If you want to see, please
contact KK

大型偏光ビームスプリッタ #1-3

要求性能

- S偏光とp偏光の分離角 90°
- 有効径 $120\text{mm}\phi$ 許容入射角 $\pm 10^\circ$
- 消光比 $T_{\max}/T_{\min} > 5$ (できれば >50)

→ 複屈折結晶(گران・プリズム)

均質な大型の材料は入手困難

誘電体多層膜プリズム

各バンド波長帯／許容入射角にわたって高い消光比を実現できるか？

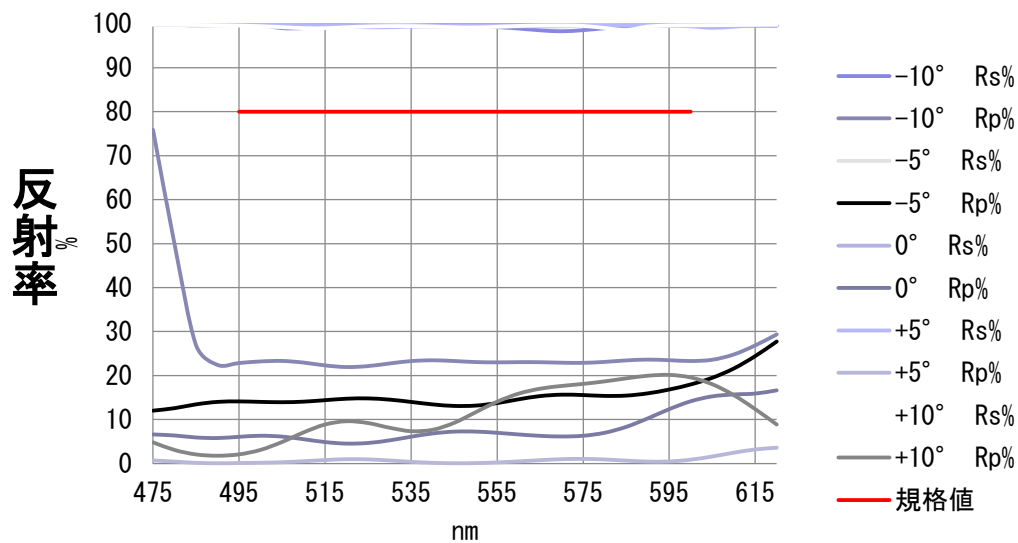
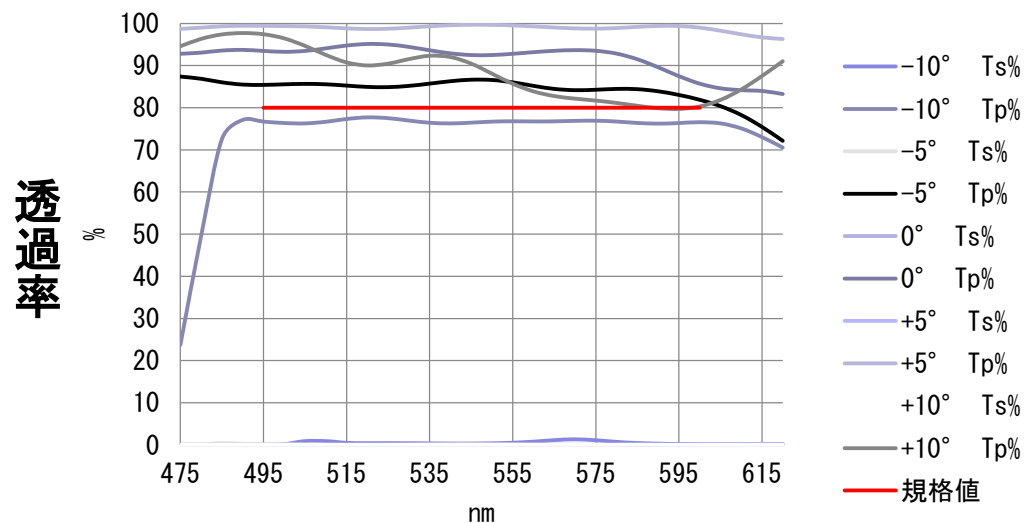
ワイヤグリッド(キューブ)

近年広帯域のものが実用化

(国内で対応可能なメーカーは？)

現状でも偏光能率80%を許容すれば
誘電体多層膜プリズムの解はあるが...

多層膜キューブビームスプリッタ#2 計算例(PBM2Y)



**入射角10° で
消光比~4**

偏光光学素子の設計の完成度

| Item | Design Completeness |
|---|---|
| 広帯域半波長板 D=150mm ϕ , Pancharatnum-type with oblique-ray compensator | OK |
| 偏光ビームスプリッタ 1, 2, 3 120mm cube type; multi-coating (or wire-grid) | Possibly OK, but low effic.; further study required |

ビームスプリッタとしてのワイヤグリッドへの期待

- 近年、反射光の波面特性を改善し、ビームスプリッタとして機能するワイヤグリッドが実用化
- 許容入射角が広く($> \sim 20^\circ$)、大型でも比較的安価であることから、アプリケーションが大きく広がる可能性がある
- キューブタイプならより広い用途で利用可能
- 比較的大型($> 20\text{mm}$)で実用化しているのはおそらく今のところ海外メーカーのみ。

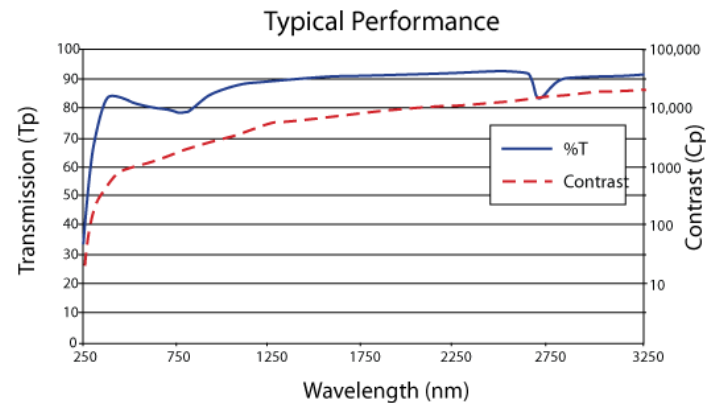
超広帯域ワイヤーグリッド偏光フィルター 50 X 50



| | |
|--------------|---------------------------------------|
| 波長域 (nm) | <u>300 - 4000</u> |
| アライメント公差 (°) | ±1.0 |
| 透過率 (%) | >75 @ 450 nm |
| 熱膨張係数 | $5.5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ |

Thin layer of alminum MicroWire

©Edmund Optics



**近赤外域に加え近紫外域まで広くカバーするものが量産化
(但し、ビームスプリッターとしては使えない)**

ワイヤーグリッド偏光ビームスプリッターキューブ

- ▶ Polarizes and Splits Wavelengths from 400 to 700 nm
- ▶ Accepts Broad Angles of Incidence and Uncollimated Light
- ▶ High Extinction Ratio: >1000:1 for Transmitted Beam



WPBS254-VIS
1" Wire Grid Polarizing
Beamsplitter Cube

©THORLABS

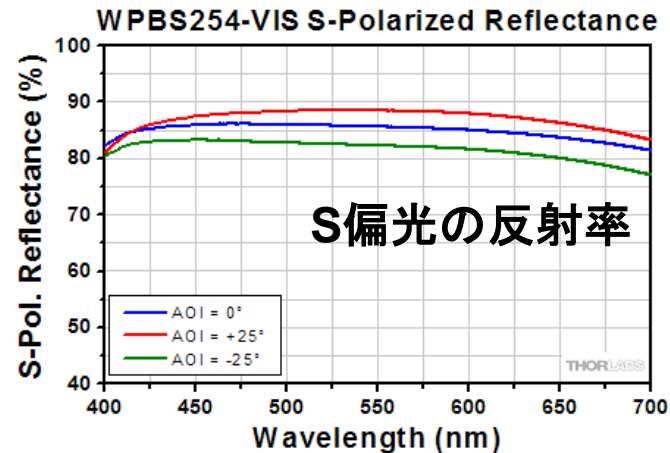
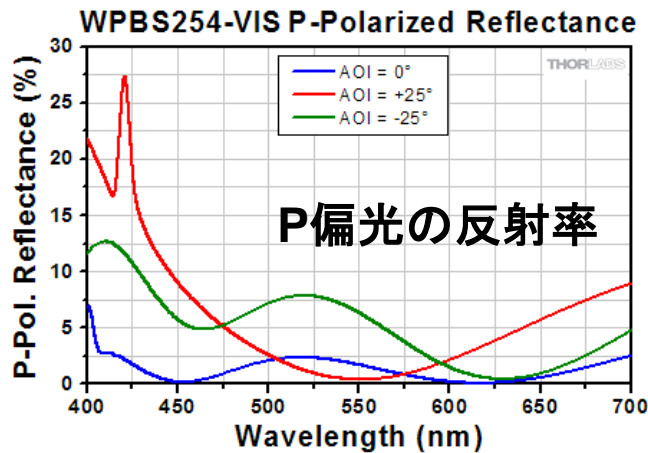
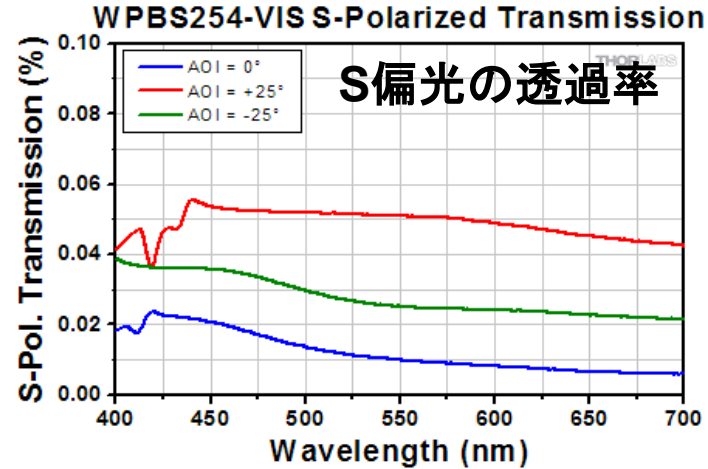
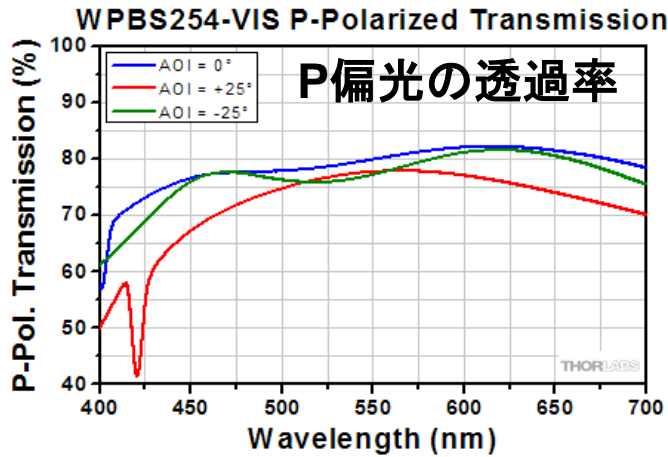


ICE Cube™

Material Type: N-BK7
Dimensions: 25.4mm x 25.4mm x 25.4mm
Operational Wavelength Range: 400-700nm (typical average for azimuthal)
AR Coating: R (avg) < 0.5% @ 400-700nm (cube faces)
Dimensional Tolerance: +0.0mm/-0.25mm
Clear Aperture: > 90%
Angle of Incidence: Up to ±25°
Maximum Temperature: 90°C

©ProFlux

波長範囲 400-700nmをカバーするものが量産化
広帯域の単バンドなら十分カバー
大型のものが製作できて、且つ波長域が自由に選べるようになればよい



Thorlab https://www.thorlabschina.cn/newgroupage9.cfm?objectgroup_id=8095

まとめ

- 近年の望遠鏡の**大型化、広視野化、多バンド化**に伴い、偏光光学素子に大型化、許容入射角の広域可が強く望まれる
- SGMAPで必要となる広帯域半波長板は、15cm直径までは実現のメドがついている
- 偏光ビームスプリッターは、複屈折性結晶や誘電体多層膜での実現性は高くはない。近年大きく進展しつつあるワイヤグリッドが理想的な解を提供してくれる可能性あり

**今後、小型版を購入(試作)・評価を進める予定
情報求む**