

木曽30cm望遠鏡に搭載する可視光高速同時偏光観測試験機の開発

東京大学 倉島啓斗(M2)

酒向 重行, 瀧田 怜, 和田 空大(東京大学)

2024/5/16 木曽シュミットシンポジウム2024

目次

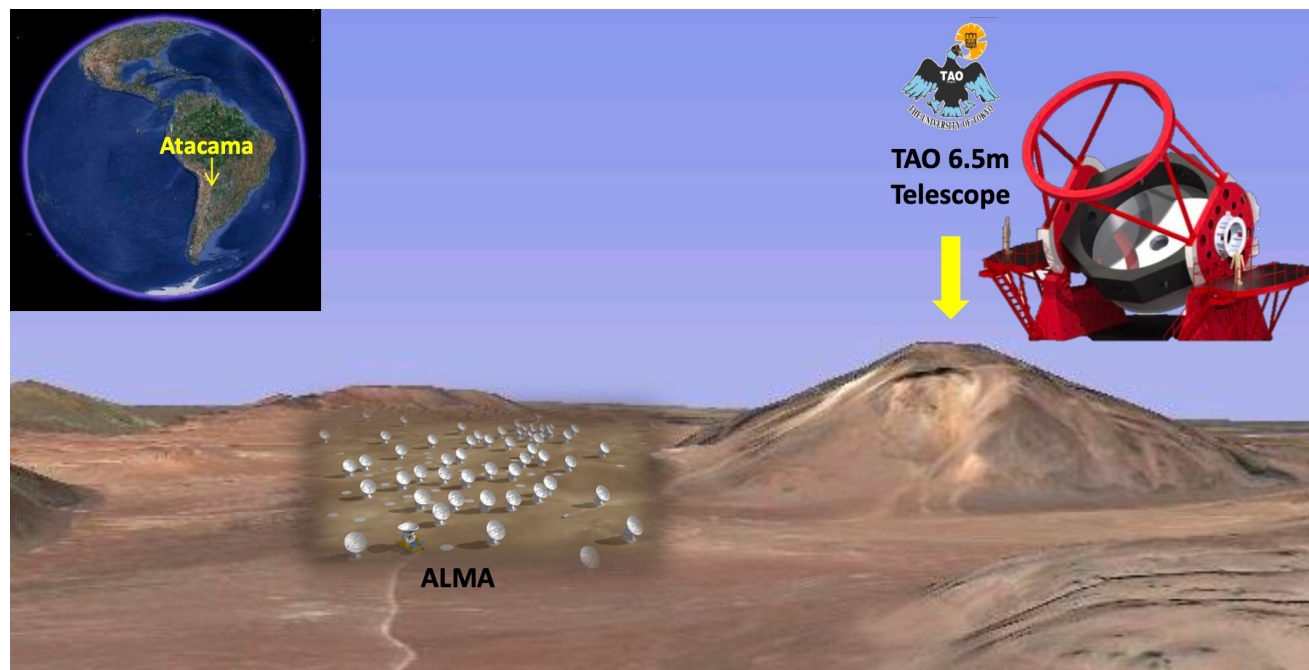
- 1. イントロダクション
- 2. 試作機設計の要件
- 3. 試作機設計
- 4. 試験機開発と試験観測の計画
- 5. まとめ

目次

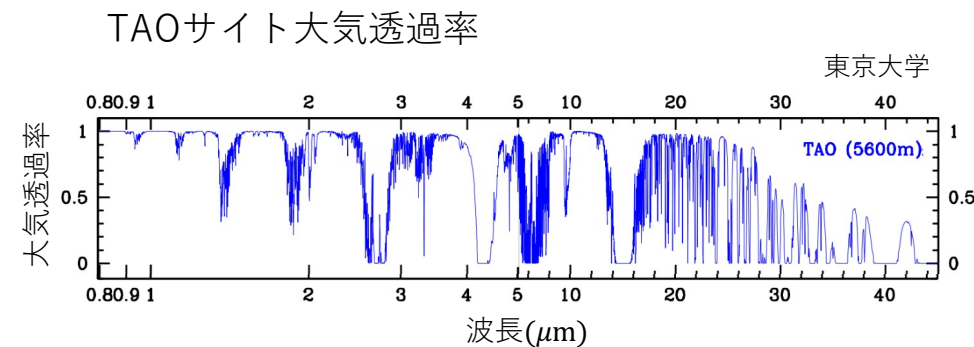
- 1. イントロダクション
- 2. 試作機設計の要件
- 3. 試作機設計
- 4. 試験機開発と試験観測の計画
- 5. まとめ

東京大学アタカマ観測所 (TAO) 6.5m望遠鏡

- 口径6.5mの光赤外線望遠鏡
- 南米チリ, アタカマ, チャナントール山山頂の世界最高地点 (標高5,640m) に建設中
 - 可視光から赤外線まで高い大気透過率が特長
- TAOベントカセグレン焦点の**可視光観測装置**を検討中



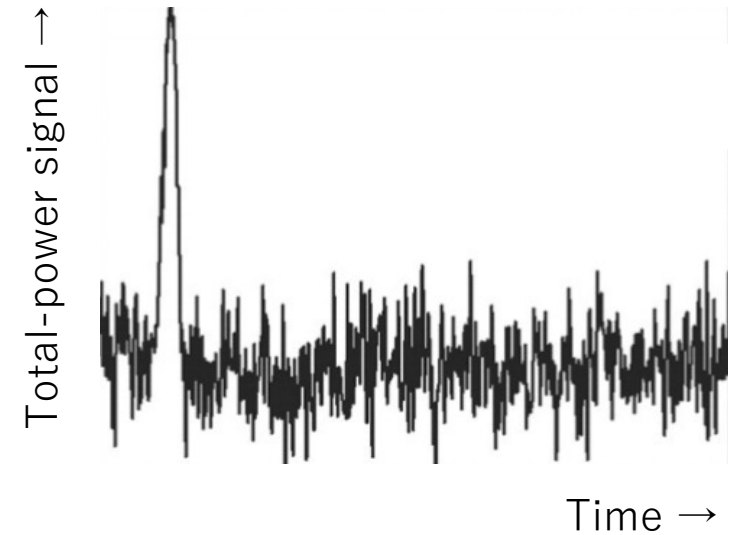
(東京大学)



高速電波バースト (FRB)

- 数ミリ秒 (1-10 msec) の短い時間スケールで電波で輝く。
- FRBの可視光カウンターパートは検出されていない。
- FRBの起源は未解明であり、マグネターやGRBの可能性が議論されている。
 - 広帯域・多波長放射であれば可視光の放射が期待される。
 - シンクロトロンメーザーの残光、磁場中の荷電粒子のコヒーレント曲率放射、逆コンプトン散乱などさまざまなモデルが考えられる。
 - これらのモデルでは可視の高速バーストが予想されている。
 - マグネターなどのモデルでは強い偏光が予想されている。
- 可視光での高速観測を電波観測と同時に行い、FRBの可視光カウンターパートの検出を目指す。
- 可視光カウンターパートを検出した場合、可視光領域で同時偏光観測を行い、FRBの起源の解明を目指す。

FRB010724 電波パルス (~1.4GHz)



Lorimer et al. 2007 抜粋

TAO可視光装置では 可視光高速観測 + 偏光観測 を目指す

可視光高速観測, 偏光観測の課題

• 可視光高速観測の課題

- 高速観測を行うとき、**露光時間が短くなり信号自体が弱い。**
- S/Nをかせぐために、検出器のノイズの大きさが重要である。
- 特に**短時間露光においては読み出しノイズ (Readout noise) が支配的**になる。
 - 背景光ノイズ (Background noise), 暗電流ノイズ (Dark current noise) は露光時間に比例するため、短時間露光では大きな影響にならない。



検出器として読み出しノイズがゼロの**SPADイメージセンサー**を使用する

• 偏光観測の課題

- 偏光情報(偏光度, 偏光方位角)を得るには**4つの偏光方向 ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$) の観測データが必要**となる。
- FRBなど短時間スケールの天体现象の場合、**同時に偏光情報を獲得する必要がある。**



4つの偏光方向の同時観測のため**ダブルウォラストンプリズム**を使用する

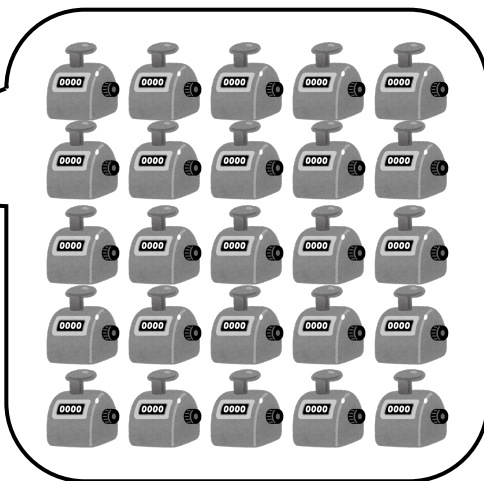
SPADイメージセンサー

- 1 光子に対する光電子を起点として発生する**雪崩電子の信号イベントを検出する。**
- 雪崩イベントの回数で光子ひとつひとつを数えることができる。(フォトンカウンター)
- 読み出しノイズがゼロ**である特長を持つ。
 - CCDでは $\sim 10[e^-]$, CMOSでは $\sim 2[e^-]$

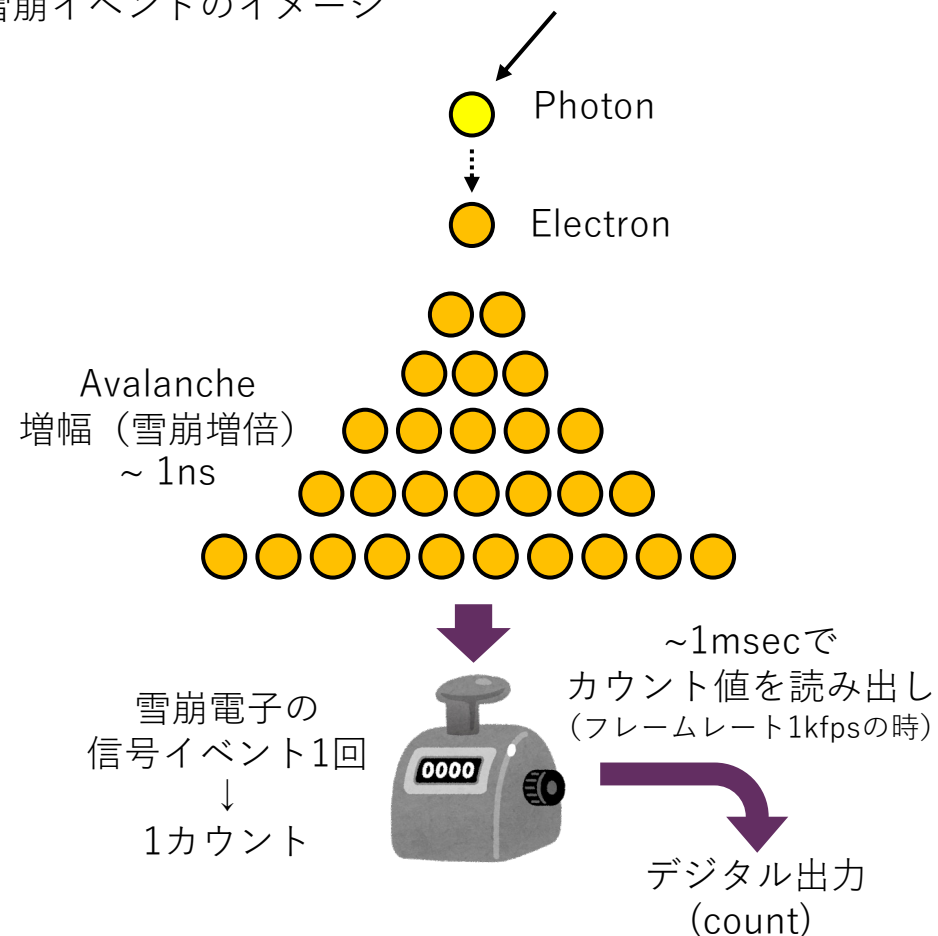
SPADイメージセンサーの概念イメージ

イメージセンサー

1画素 = 1カウンター

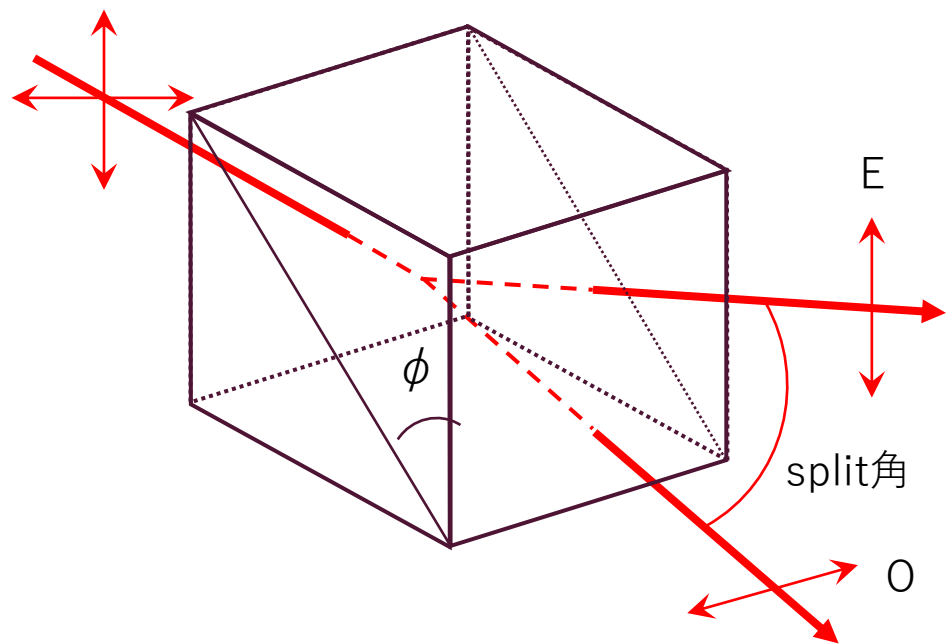


SPADイメージセンサーの1画素における雪崩イベントのイメージ



ウォラストンプリズム

- 複屈折結晶を組み合わせた光学素子
- 入射した光をお互いに直交した**2つの直線偏光状態**のビームにスプリットする
 - 組み合わせる2つの結晶の屈折率によって光の屈折角が変わる

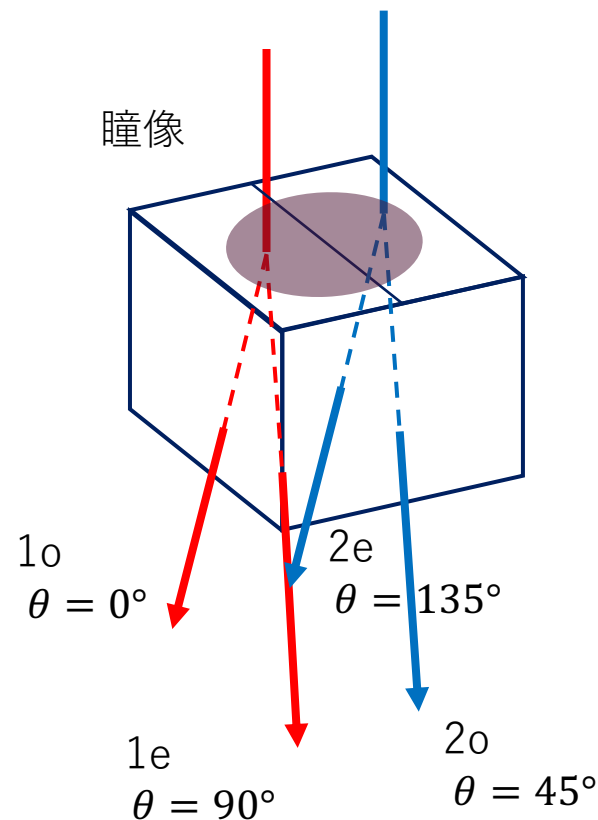


ウォラストンプリズムによって
2つの直線偏光状態のビームにスプリットする模式図

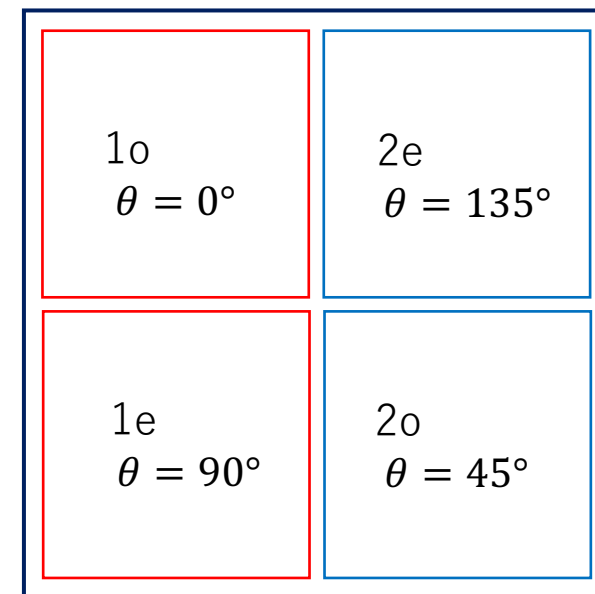
ダブルウォラストンプリズム

- 瞳位置にダブルウォラストンプリズムを設置することで、**4つの偏光状態へビームがスプリット**する。
 - それぞれのビームの光量が1/4になる点に注意する。
- **4つの偏光を同時に観測**することができるようになる。
- FRBなどタイムスケールが短いイベントに対しても偏光観測が可能になる。
 - 広島大かなた望遠鏡 HOWPolで採用されている。

ダブルウォラストンプリズムの模式図



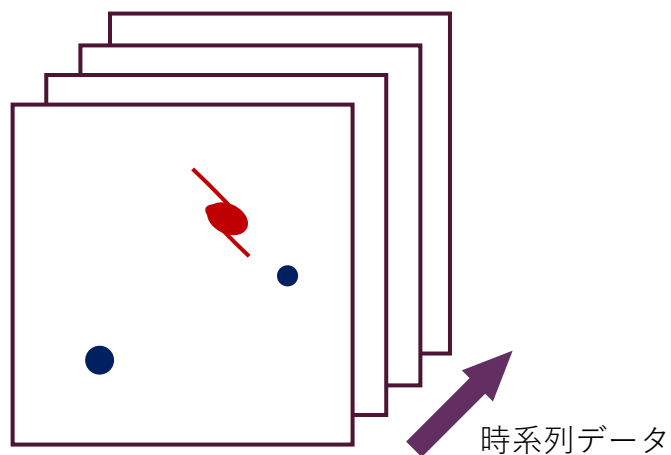
検出器上の各偏光状態の視野



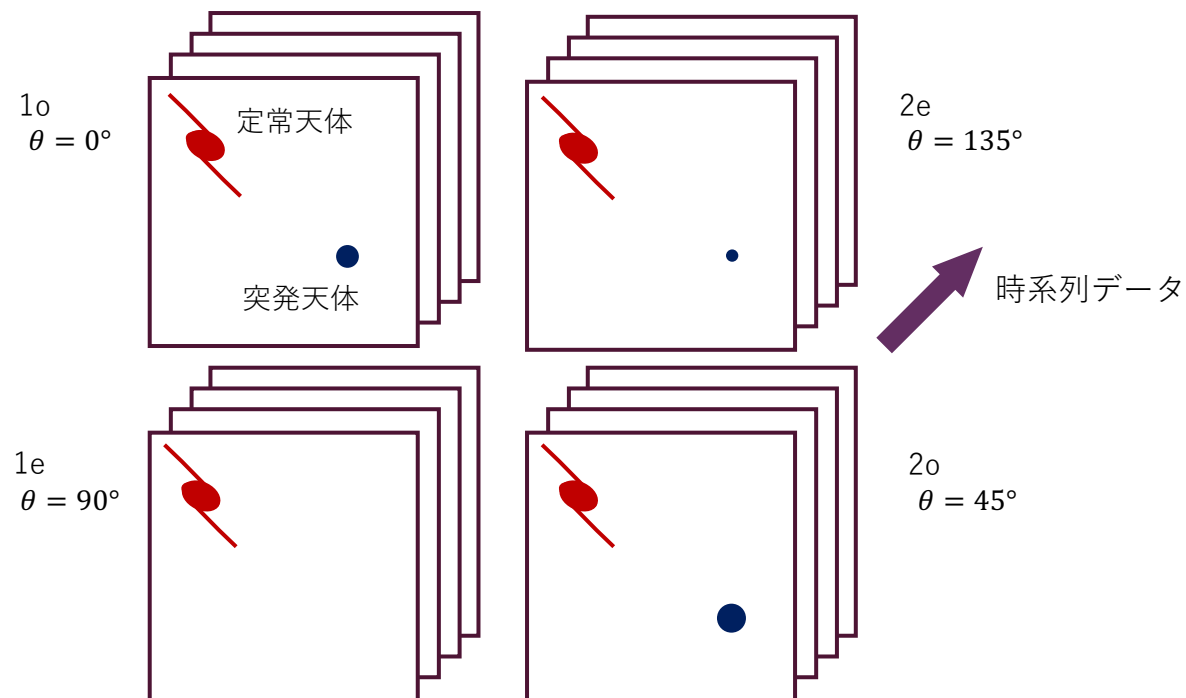
TAO可視光高速同時偏光観測装置で得られるデータ

- 短時間イベントに対して同時偏光観測を行うことができる。
- 高速撮像で時間変動を捉えられる。

撮像モード



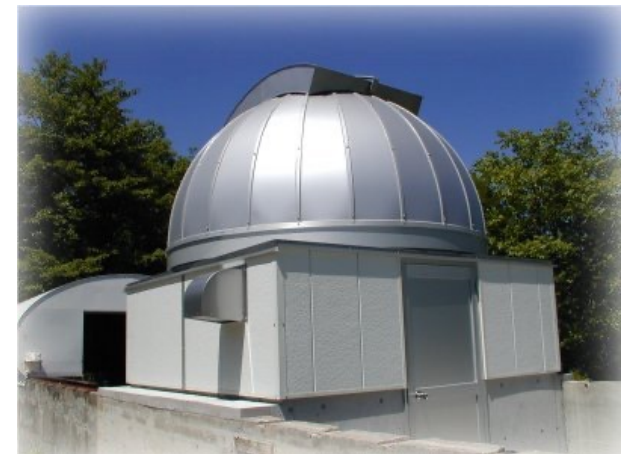
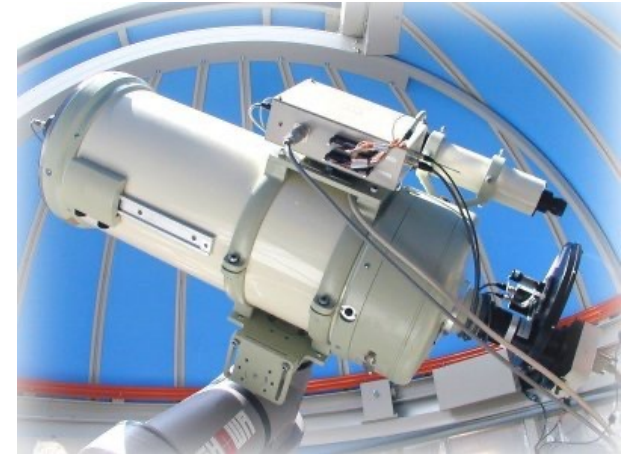
偏光観測モード



試作機の開発と木曽での試験観測の実施

- **可視光高速 + 同時偏光観測の試作機を開発**する。
 - TAO6.5m望遠鏡の可視光装置の開発を目指し、小規模の試作機を開発を行う。
 - 可視光高速観測 : SPADイメージセンサー
 - 同時偏光観測 : ウォラストンプリズム
- **木曽30cm望遠鏡 (K.3T, Kiso 0.3m Telescope) を用いて試験観測**を行う。
 - SPADイメージセンサーを用いた**世界初の天文観測**を実施し、読み出しノイズ等について評価を行う。
 - 撮像モードの観測を通して感度等について評価を行う。
 - ウォラストンプリズムを用いた同時偏光観測の評価を行う。

木曽30cm望遠鏡 (K.3T, Kiso 0.3m Telescope)



(東京大学)

目次

- 1. イントロダクション
- 2. 試作機設計の要件
- 3. 試作機設計
- 4. 試験機開発と試験観測の計画
- 5. まとめ

試作機設計の要件

- 望遠鏡

- 木曾30cm望遠鏡 (K.3T, Kiso 0.3m Telescope) に搭載する。

- 検出器

- 高速観測：SPADイメージセンサーを検出器として使用する。

- 観測モード

- 撮像モード

- 視野は $\phi \sim 10$ arcmin とする。

- 同時偏光観測モード

- ウォラストンプリズムを2つ用いて1露光で偏光観測を行う。

- 4つの偏光方向 ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$) の同時観測を行う。
 - 1つの偏光方向の視野は $\phi \sim 30$ arcsec とする。

- 試作機の規模・開発期間

- 市販のレンズ, ミラー等の光学素子を用いて、短期間（～3ヶ月）で試作機を開発し試験観測を行う。



(東京大学)

入手可能なSPADイメージセンサーとして以下のものを想定する。
ピクセル数 $\sim 1500 \text{ pix} \times 1500 \text{ pix}$
ピクセルサイズ $\sim 6 \text{ um}$

試作機設計の要件

・ ダブルウォラストンプリズム

- ・ メリット
 - ・ 光学系が単純になる。
- ・ デメリット
 - ・ 結晶構造を45°傾けて切り出した素子が必要となる。
 - ・ 特注品となるため、**納期が長く費用も大きく**なる。

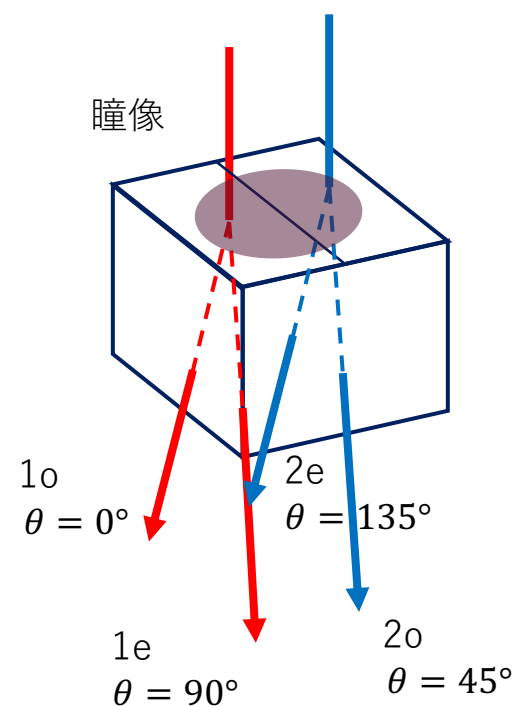


本試作機設計では
ウォラストンプリズム2個の組み合わせを採用

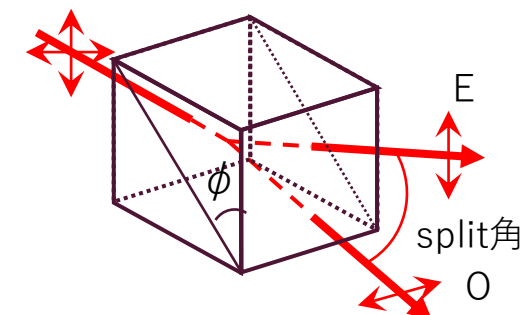
・ ウォラストンプリズム×2

- ・ メリット
 - ・ 市販されており、**入手が容易**である。
 - ・ **費用が抑えられる**。
- ・ デメリット
 - ・ 光学系が複雑になる。

ダブルウォラストンプリズム



ウォラストンプリズム

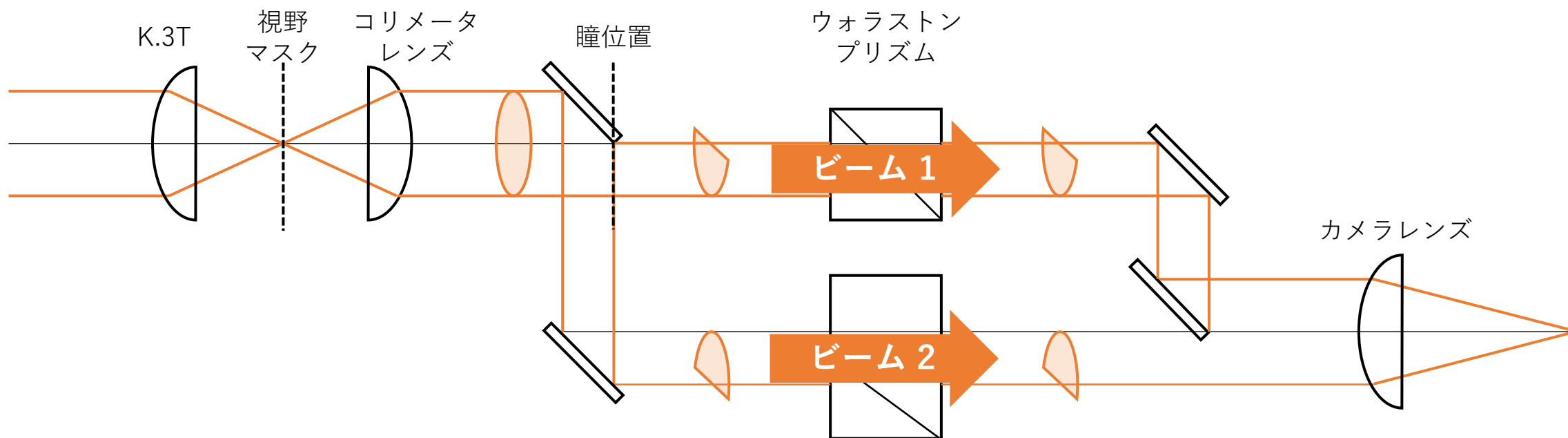


目次

- 1. イントロダクション
- 2. 試作機設計の要件
- **3. 試作機設計**
- 4. 試験機開発と試験観測の計画
- 5. まとめ

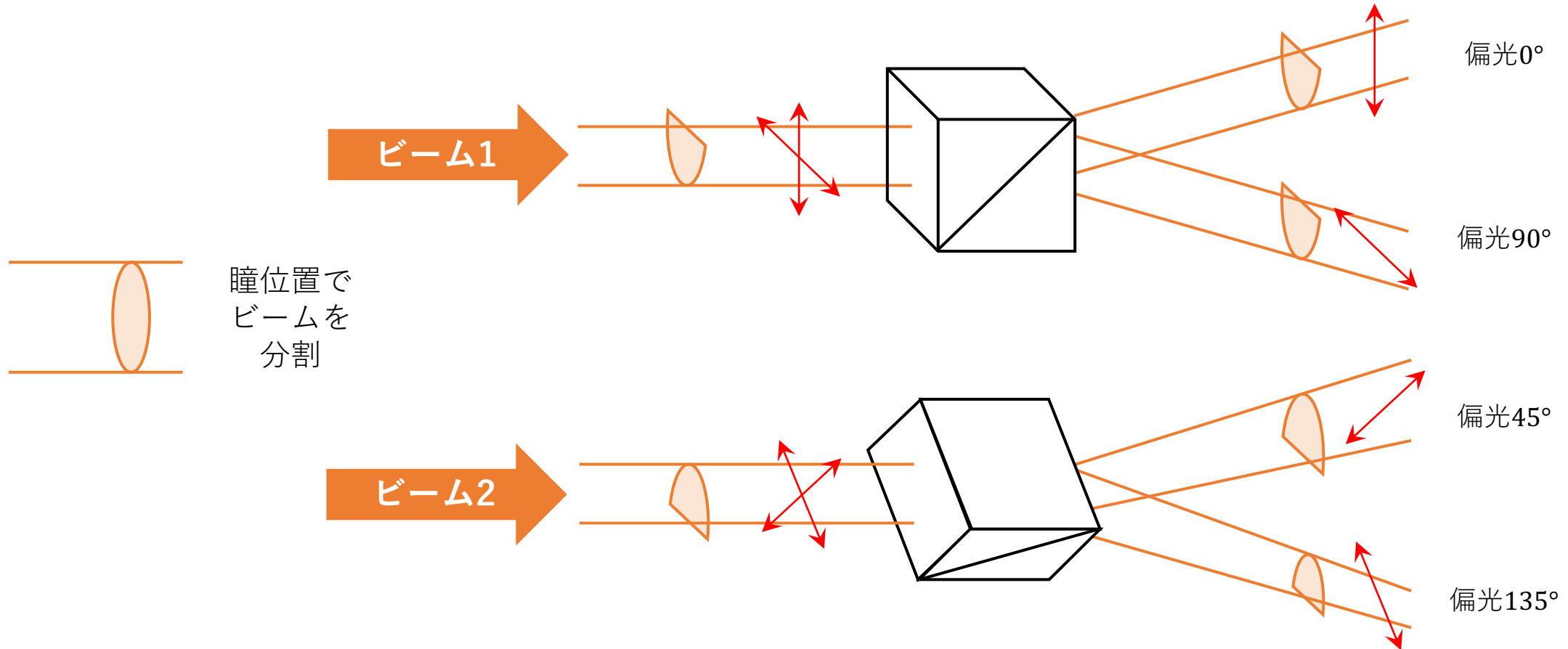
光学設計の概念図

- 瞳位置でビームの半分を取り出し、ビームを2つに分ける。
- それぞれをウォラストンプリズムに導き、4つの偏光状態を同時に得る。
- 撮像モードの場合はウォラストンプリズムを取り除く。

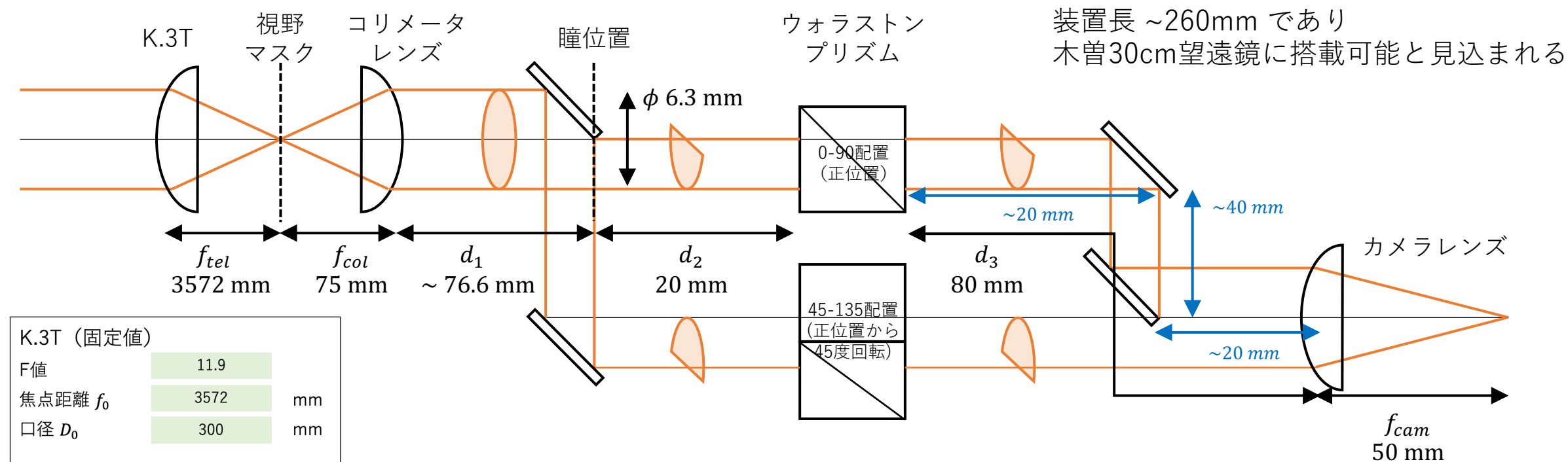


光学設計の概念図

- ウォラストンプリズム2つを45°向きに差を与えて設置し、4つの偏光状態を得る。



光学設計の概念図 ビーム1



K.3T (固定値)

F値	11.9	
焦点距離 f_0	3572	mm
口径 D_0	300	mm

Collimate light

ビーム径 ϕ	6.3025	mm
距離 d_1	76.5747	mm
距離 d_2	20.0000	mm
距離 d_3	80.0000	mm

Collimator lense

F値	11.9	
焦点距離 f_{col}	75.0000	mm
ビーム径 ϕ_{col}	6.3025	mm
必要口径 D_{col}	21.0049	mm

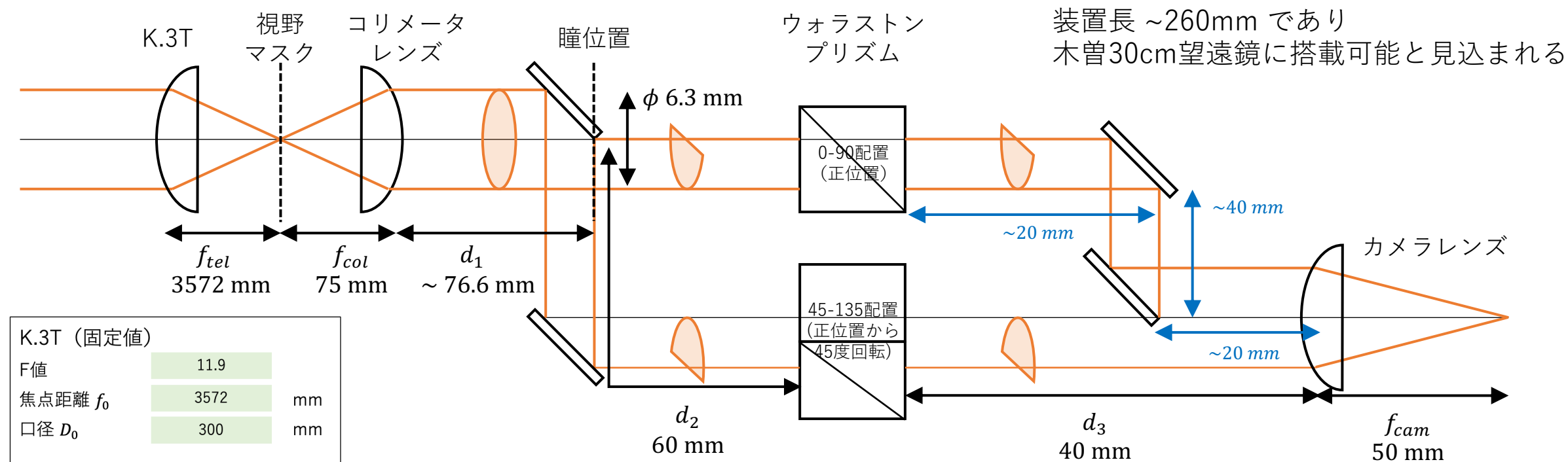
Camera lense

F値	7.933333333	
焦点距離 f_{cam}	50.0000	mm
ビーム径 ϕ_{cam}	6.3025	mm
必要口径 D_{cam}	25.5025	mm

Wollaston prism

split角 α	1.333333
-----------------	----------

光学設計の概念図 ビーム2



K.3T (固定値)

F値	11.9	
焦点距離 f_0	3572	mm
口径 D_0	300	mm

Collimate light

ビーム径 ϕ	6.3025	mm
距離 d_1	76.5747	mm
距離 d_2	60.0000	mm
距離 d_3	40.0000	mm

Collimator lense

F値	11.9	
焦点距離 f_{col}	75.0000	mm
ビーム径 ϕ_{col}	6.3025	mm
必要口径 D_{col}	21.0049	mm

Camera lense

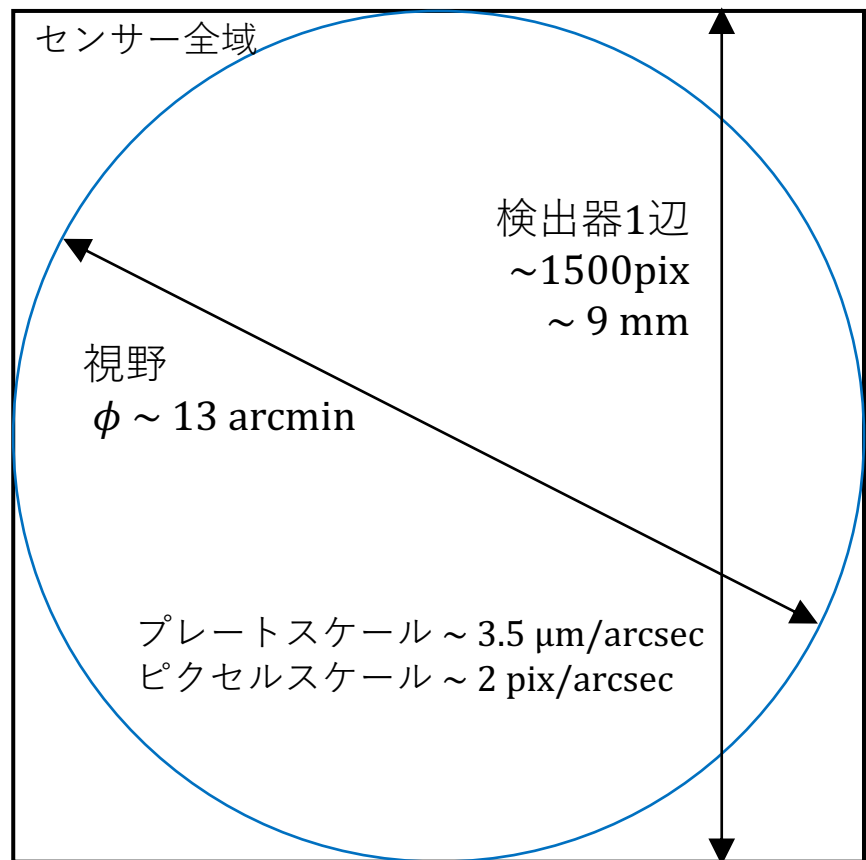
F値	7.933333333	
焦点距離 f_{cam}	50.0000	mm
ビーム径 ϕ_{cam}	6.3025	mm
必要口径 D_{cam}	25.5025	mm

Wollaston prism

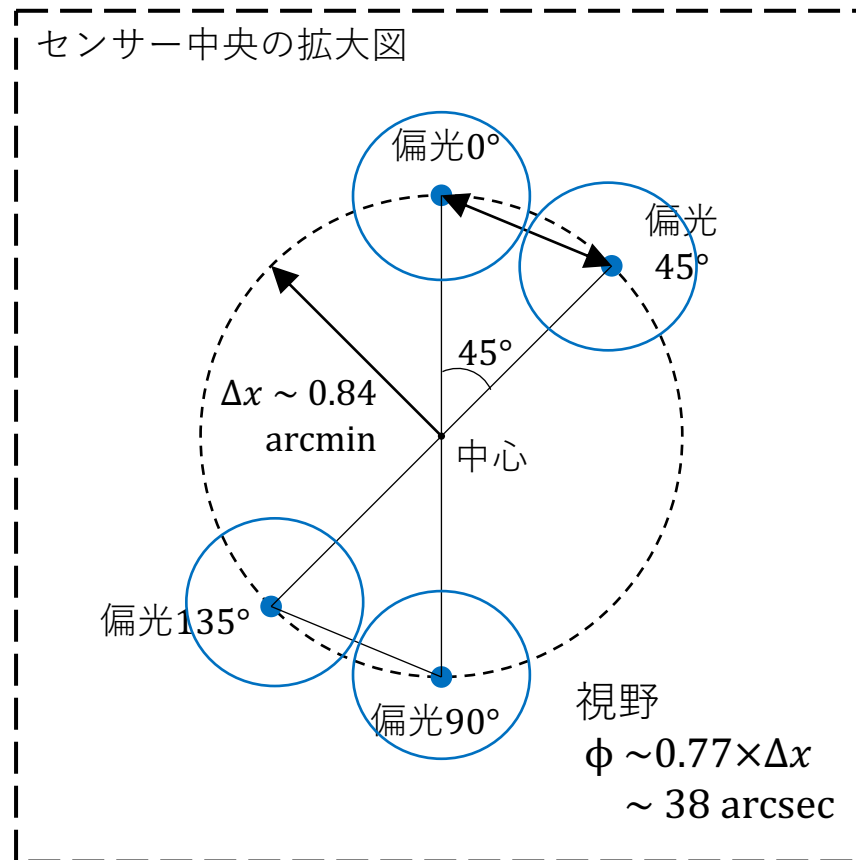
split角 α	1.333333
-----------------	----------

結像のようす

撮像モードの結像のようす



偏光観測モードの結像のようす



- 撮像モード、偏光観測モードともに、目標としていた視野要件を達成できる設計となっている。

設計時の視野要件
撮像モード
 $\phi \sim 10 \text{ arcmin}$
偏光観測モード
 $\phi \sim 30 \text{ arcsec}$

使用する市販の光学素子

- 主焦点面視野マスク



Edmund
500 μ m Aperture Diameter, Mounted,
Precision Pinhole, #56-287
<https://www.edmundoptics.jp/f/precision-pinholes/12073/#>

- コリメータレンズ



Edmund
75mm C Series Fixed Focal Length Lens
<https://www.edmundoptics.jp/f/precision-pinholes/12073/#>

- ウォラストンプリズム



Thorlabs
WPM10 - Wollaston Prism, 1° 20' Beam
Separation, 200 nm - 6.0 μ m, Uncoated
MgF2
~ 0.09kg
<https://www.thorlabs.co.jp/thorproduct.cfm?partnumber=WPM10>

- 平面ミラー



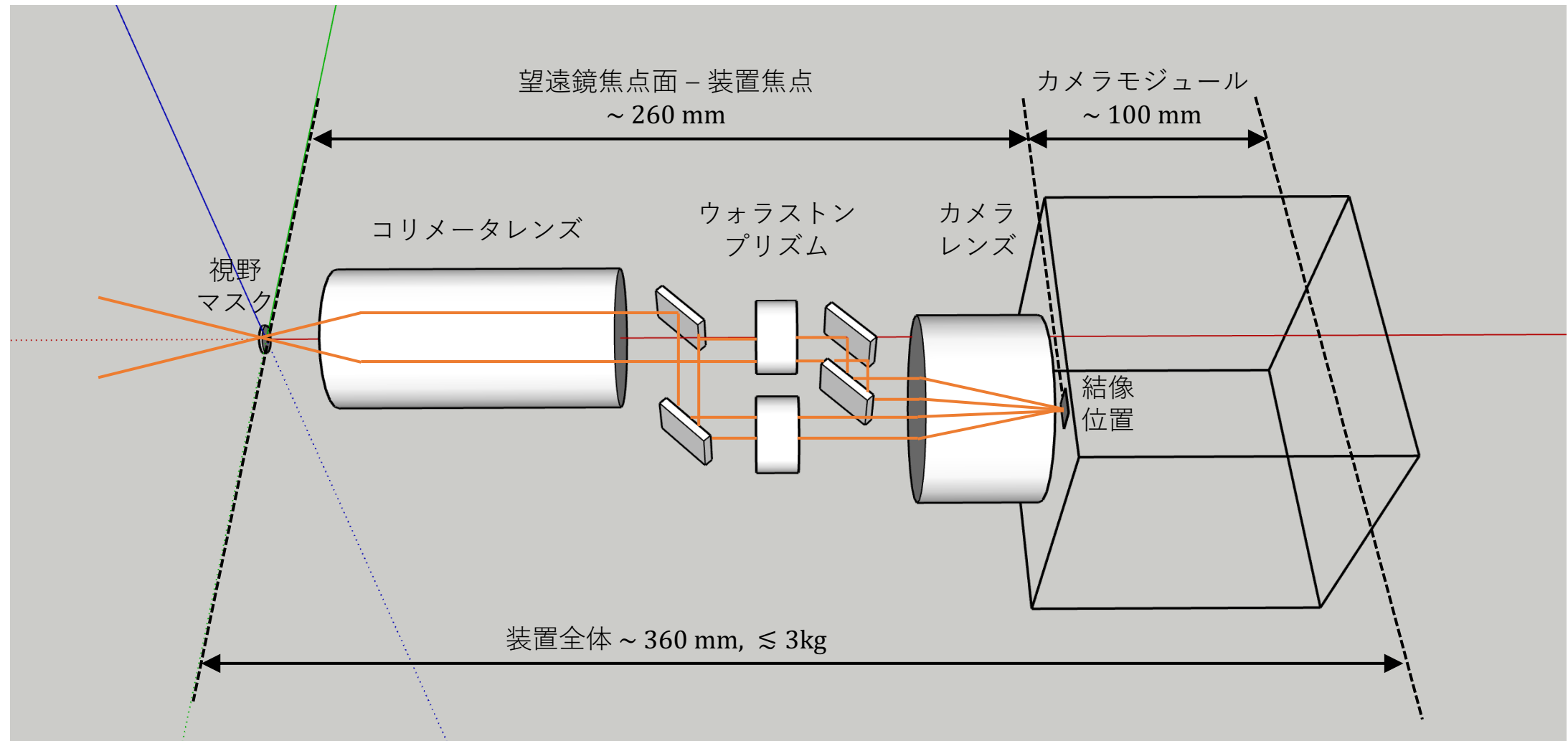
Edmund
TS 反射強化アルミコートミラー
<https://www.edmundoptics.jp/f/first-surface-mirrors/12017/>

- カメラレンズ



キャノン
マニュアルフォーカスレンズ
Canon New FD 50mm F1.4 Standard MF
Lens 100135
~ 0.24 kg
<https://global.canon/ja/c-museum/product/nfd209.html>

試作機概形



目次

- 1. イントロダクション
- 2. 試作機設計の要件
- 3. 試作機設計
- 4. 試験機開発と試験観測の計画
- 5. まとめ

試験機開発と試験観測の計画

- 2024年8月まで： 試験機の開発を行う。
- 2024年9月以降： 木曽30cm望遠鏡での試験観測を行う。

- **撮像モード**の試験観測

- 実際の天体（点源、面光源）を導入し、測光精度、感度、ノイズ、安定性、ヒステリシスなどの評価を行う。

- **同時偏光観測モード**の試験観測

- **標準偏光星**を導入し、装置全体（検出器、ウォラストンプリズムなど）の評価を行う。
- **パルサー**（クラブパルサー等）を導入し、高速同時偏光観測を行う。



TAO可視光高速同時偏光観測装置の開発

まとめ

- TAO6.5m望遠鏡に搭載する可視装置を開発中である。
- TAO6.5m望遠鏡可視装置では、FRBなどをターゲットとした**可視光高速同時偏光観測**を目指す。
- 可視光高速観測のため**SPADイメージセンサー**を、同時偏光観測のため**ダブルウォラストンプリズム**を用いる。
- SPADイメージセンサーとウォラストンプリズム2個を組み合わせた**試作機を設計**した。
- 木曽30cm望遠鏡に搭載可能なサイズとなっている。
- 撮像モード視野 $\phi \sim 13 \text{ arcmin}$, 偏光観測モード視野 $\phi \sim 38 \text{ arcsec}$ であり、目標としていた視野を達成できる設計となっている。
- 試作機を開発し、2024年中の**木曽30cm望遠鏡での試験観測**を目指す。