

第22回宇宙科学シンポジウム

P-026: JASMINE望遠鏡光学系 3枚鏡と2枚鏡のトレードオフ検討

国立天文台

JASMINE Project

鹿島 伸悟

他 JASMINEチーム

背景

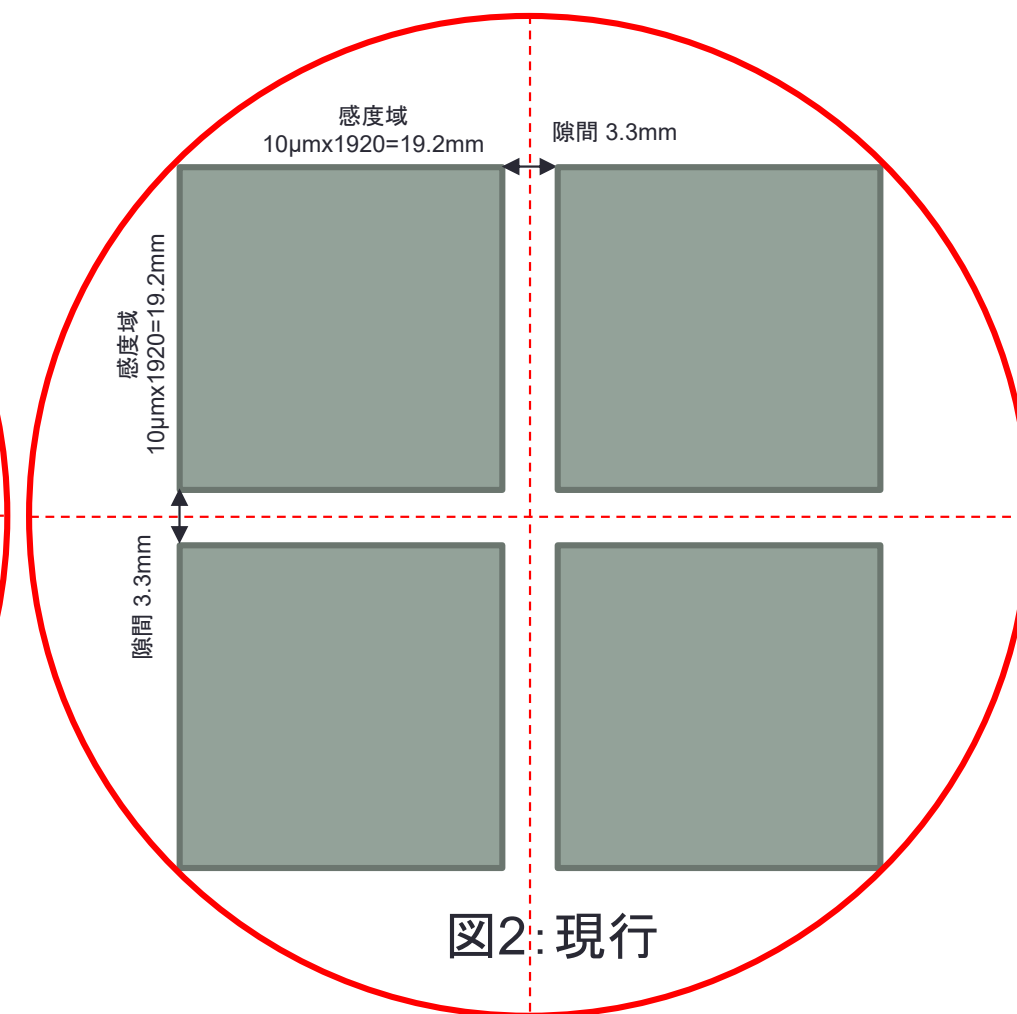
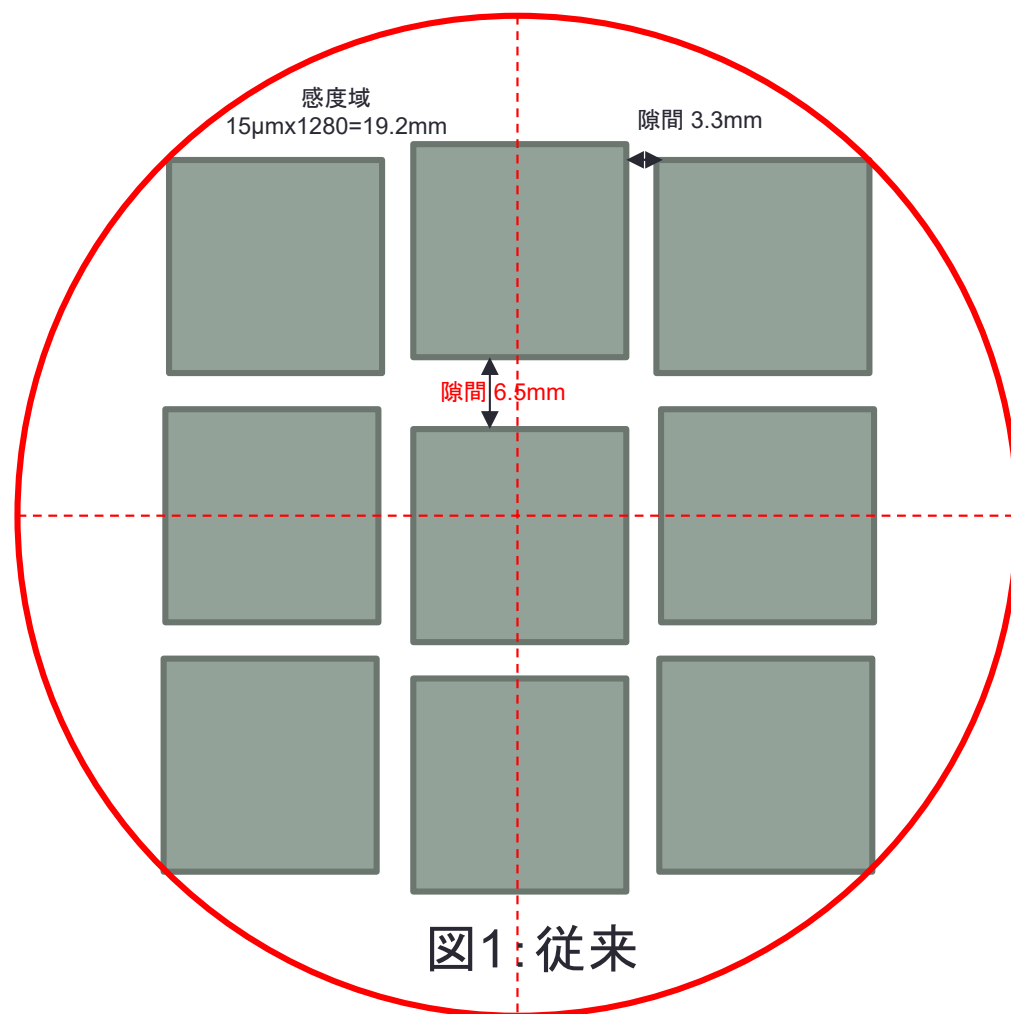
- JASMINE望遠鏡の光学系としては、これまでずっと**3枚鏡(改良型コルシェタイプ)**としてきた
- これは、カセグレンやリッチー・クレチアンに代表される2枚鏡システムでは、**原理的に像面湾曲と非点収差が補正できず、軸外の性能が著しく劣化する**からである
- JASMINEは位置天文観測を主とする望遠鏡であり、一度に撮影できる領域は広いほど良いため、画角が取れない2枚鏡は元々候補にも挙がっていなかった
- しかし、メーカーとの検討の中で**コストが最大の問題**となって来たため、**より安いであろう2枚鏡**に関しても検討し、最終的にはトレードオフ検討をして決める事となった
- もちろん、性能的には比ぶべくもないが、JASMINEの要である星像位置決定精度を、収差やノイズといった様々な要因を考慮して計算できるプログラムが開発され、総合的に比較できることが可能となったことも一員である

検出器仕様変更

- 昨年の発表で、これまで想定していた、この目的では唯一無二の Teledyne H4RG (HgCdTe) から国産の InGaAs に切り替えたことを報告したが、そのときの仕様は図1であった
- さらに高精細化できる目処が立ったため、ピクセルサイズが $15\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ へ、画素数が 1280×1280 から 1920×1920 へ変更となった
- そのため、従来は $3 \times 3 = 9$ 枚の検出器を並べていたが、それが $2 \times 2 = 4$ 枚で済むこととなった(図2)
- ピクセルサイズが変更になったため、その比で焦点距離も短くなり、望遠鏡光学系も小さく出来た
- 結果、焦点距離は 4861.5mm 、画角は xy 方向 ± 0.246 度、対角方向最大 ± 0.348 度となった
- その他、口径や副鏡による遮蔽率の仕様等は従来と同じである

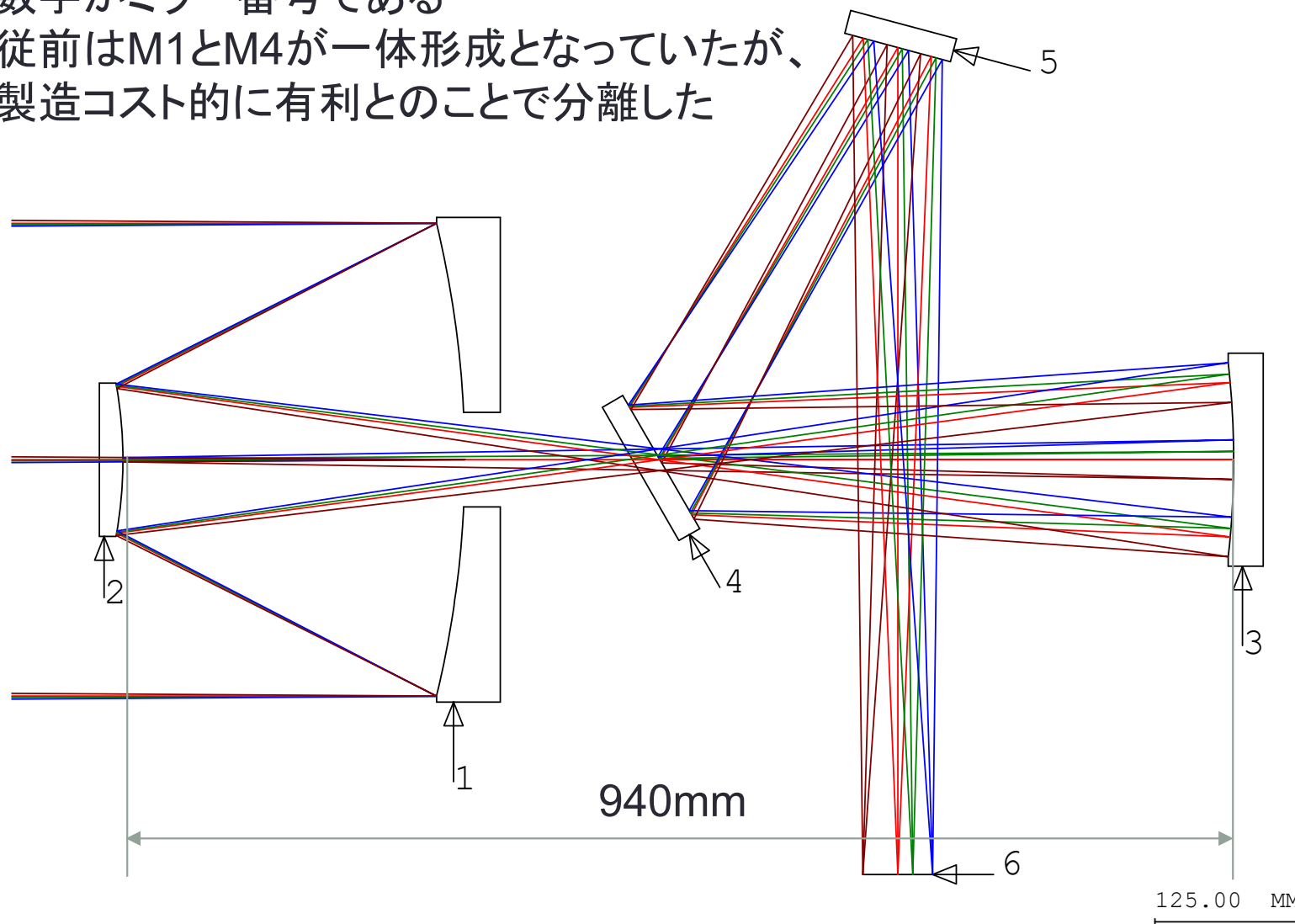
検出器レイアウト変更

- 赤丸は外接円であり、光学設計はこの円内で行っている
- 9枚モザイクでは、中央の検出器の電極の関係で1カ所だけ隙間が大きくなっているが、4枚モザイクでは、綺麗に対称に配置できる



現行ノミナル3枚鏡光学系

- 数字がミラー番号である
- 従前はM1とM4が一体形成となっていたが、製造コスト的に有利とのことで分離した



実際のレイアウト

- 図3はあくまでも光学設計時のレイアウトであり、M5と像面をほぼ入射光軸対称に配置している
- M4とM5は光路折り曲げのための平面ミラーであるため、これらを配置しなおすことで様々なレイアウトが考えられる
- また、現在国立天文台ATCで開発中の国産検出器Boxは結構フードが長いいため、それが入るようにうまくレイアウトする必要もある
- 代表的な2例を示す

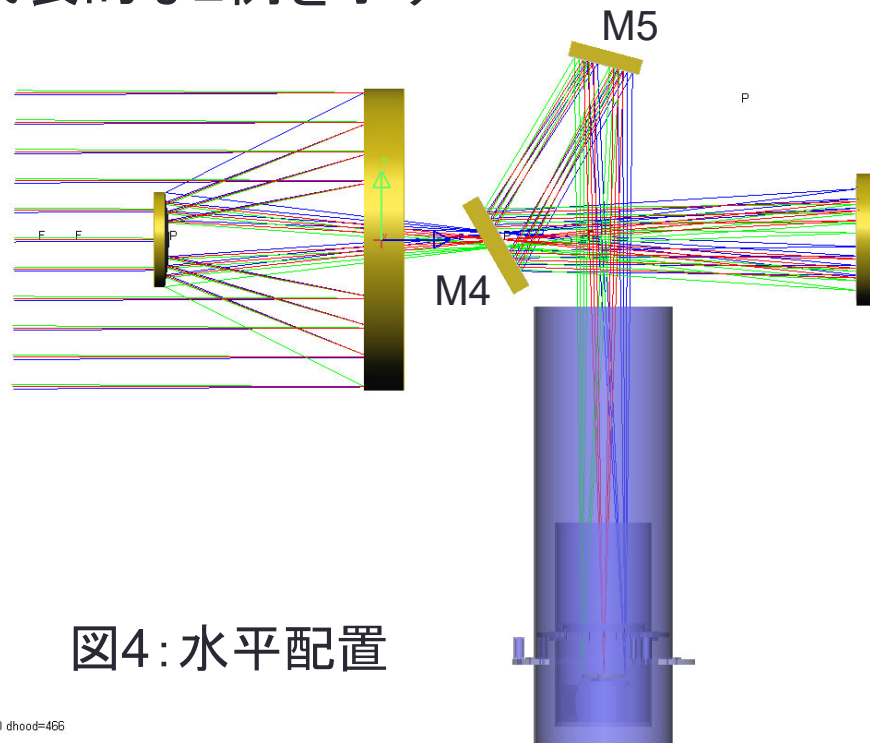


図4: 水平配置

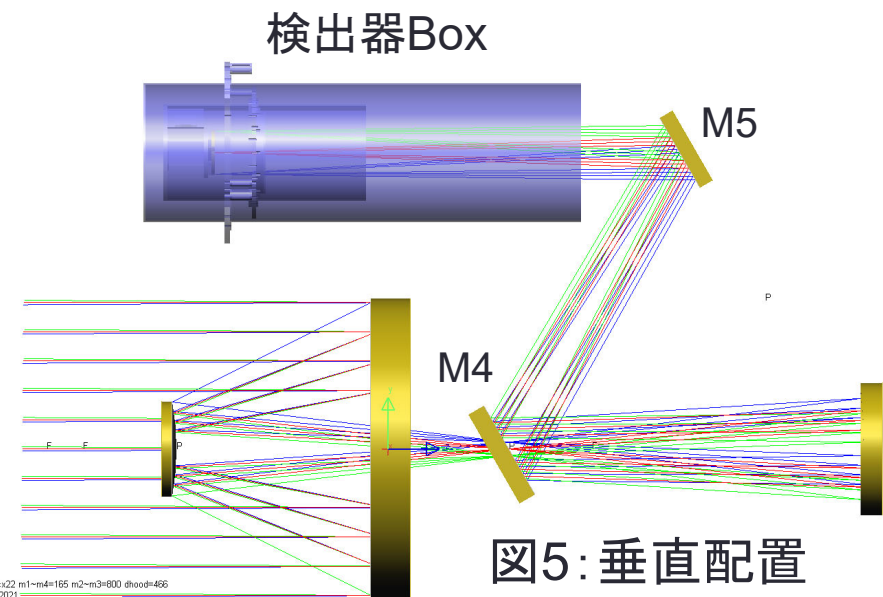


図5: 垂直配置

jae40nec22 m1-m4=165 m2-m3=800 dhood=466
Dec 15, 2021
jae40nec5v_detector.1
LightTools 9.1.1 SR1

現行ノミナル2枚鏡光学系

- 2枚鏡光学系は非常にシンプルであり、折曲げのための平面鏡も有さない図5の構成となる
- 全体が完全に光軸回転対称であるため、図示していないが、望遠鏡Boxも円筒形とする予定である
- 但し、製造時の調整や焦点位置調整に関しても、副鏡を使うしかないことが少々問題となる
- かといって、そのためにわざわざ1枚平面鏡を入れて折り曲げるのも良策とは言えないため、現状はこのsimple is bestがノミナルである
- 縦に長いが、後述するように先端フードが短くて済むこともあり、フェアリングに治まることは確認済みである

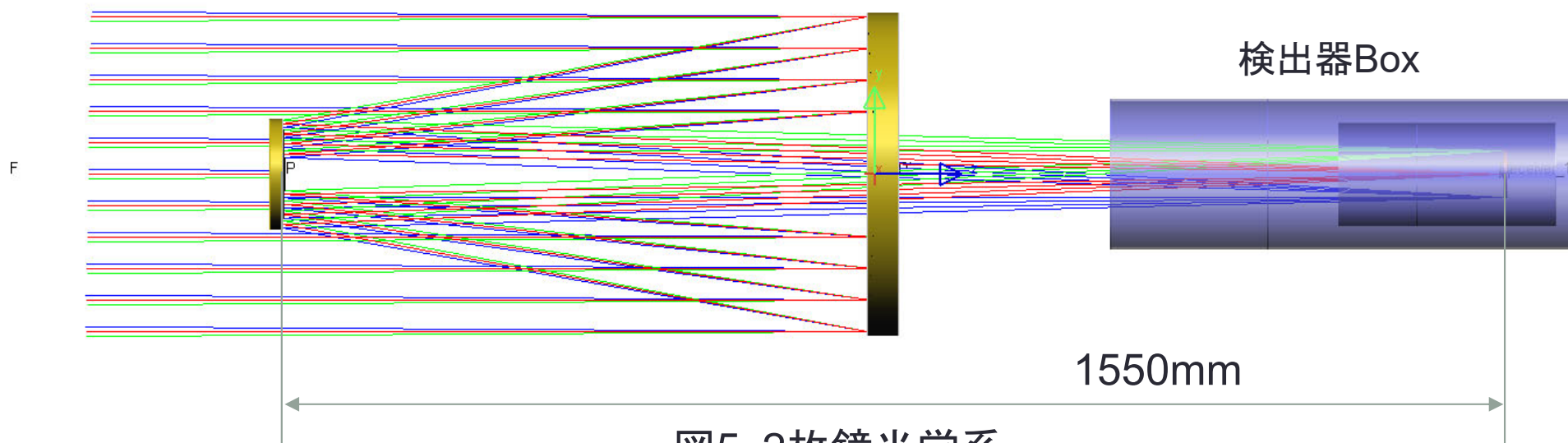


図5: 2枚鏡光学系

2枚鏡の像面

- 前述のように、2枚鏡システムでは原理的に像面湾曲が補正できないため、**4枚の検出器をピラミッド状に配置**することを考えている
- 像面湾曲は大凡球面となるため、像面を球面にできれば相殺できるが、それは不可能であるため、せめて90度対称に4個の検出器を傾け、像面湾曲に対する平均像面にするということである
- ただ、これを行っても、**非点収差と像面湾曲の残渣は残り、どうしても4隅は所望の性能にできない**ため、正8角形的な範囲で性能が出ていれば良しとした
- ピラミッド形状に関しては、CodeVのユーザ定義面という機能を用いて**4角錐面**を作成し、これを用いてモデリングした

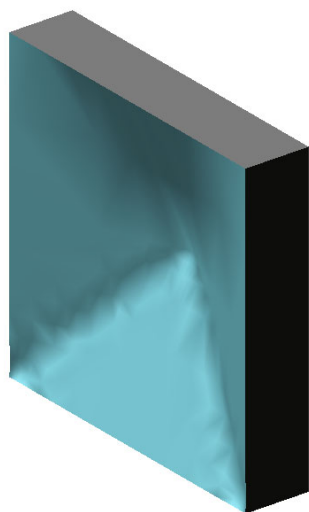


図7: 4角錐面

実際の角度は
2度程度

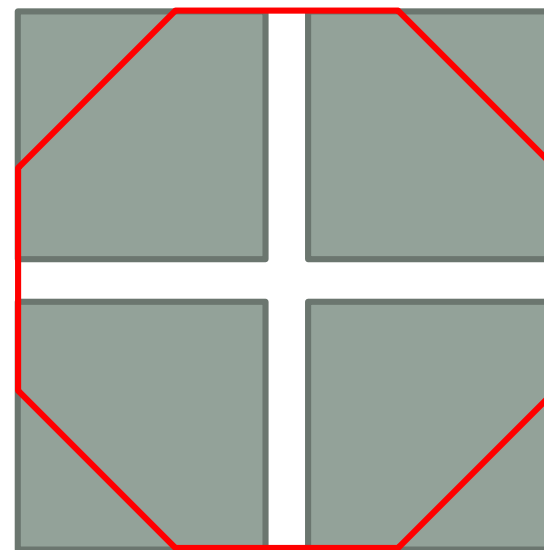
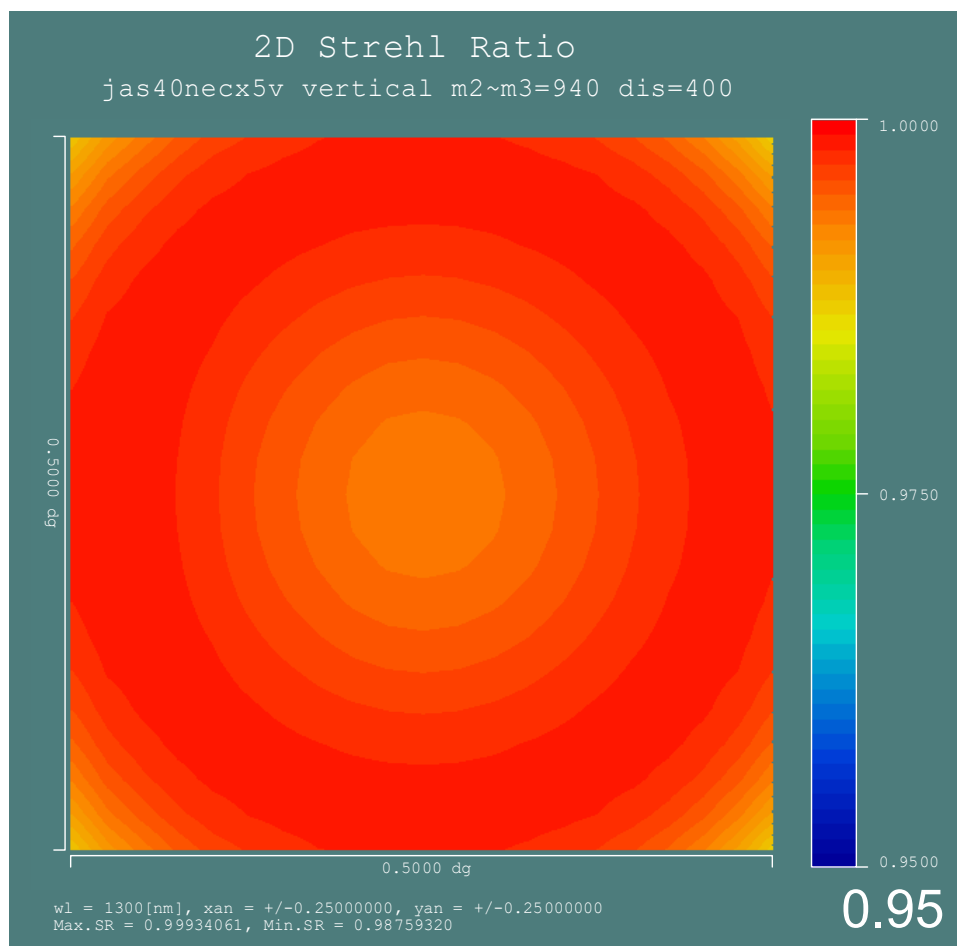


図6: 正8角形視野

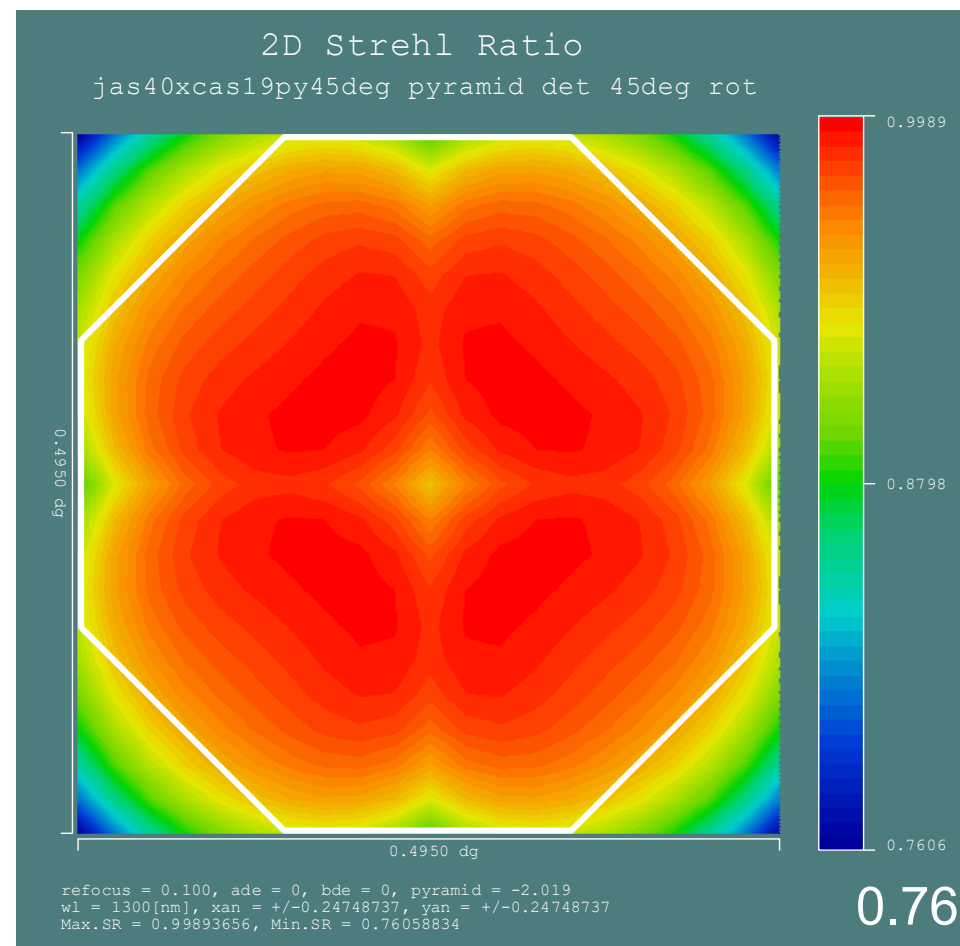
波面収差比較

3枚鏡ストレール比
検出器全面でSR \geq 0.99



設計値では回転対称

2枚鏡ストレール比
正八角形内でSR \geq 0.85
(4隅はSR0.76)

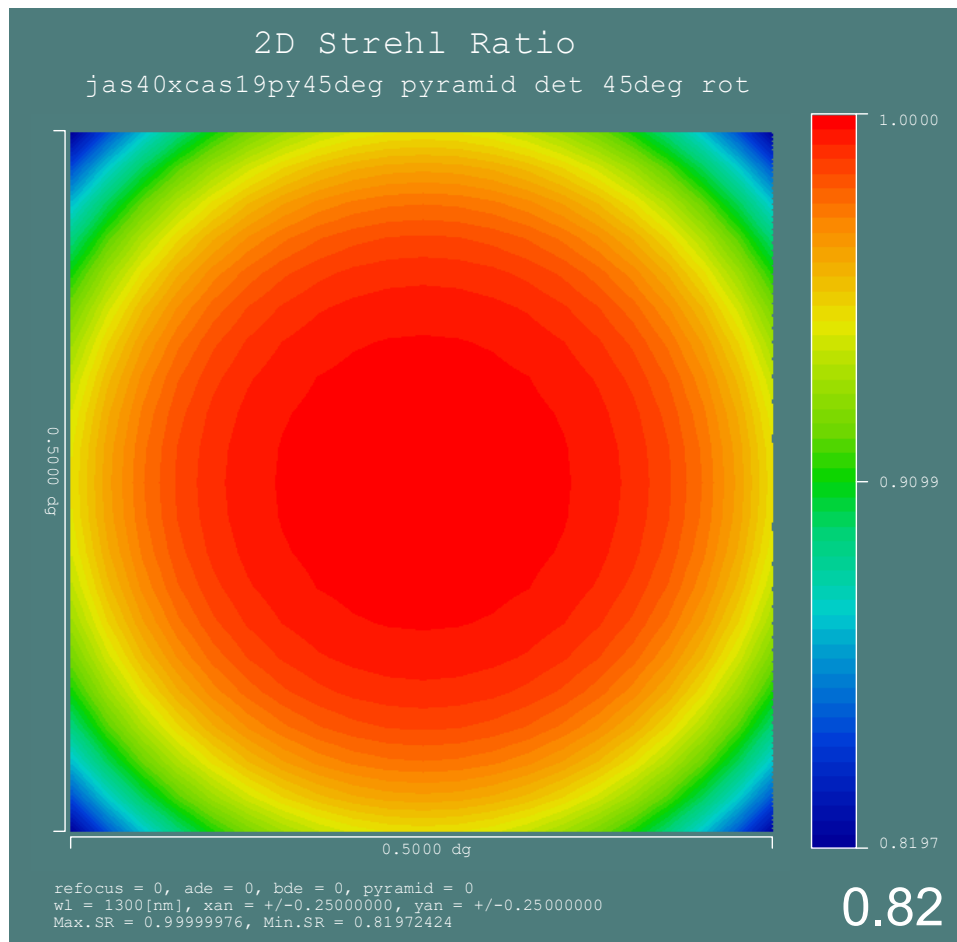


設計値でも方向性をもつ

2枚鏡像面補正効果

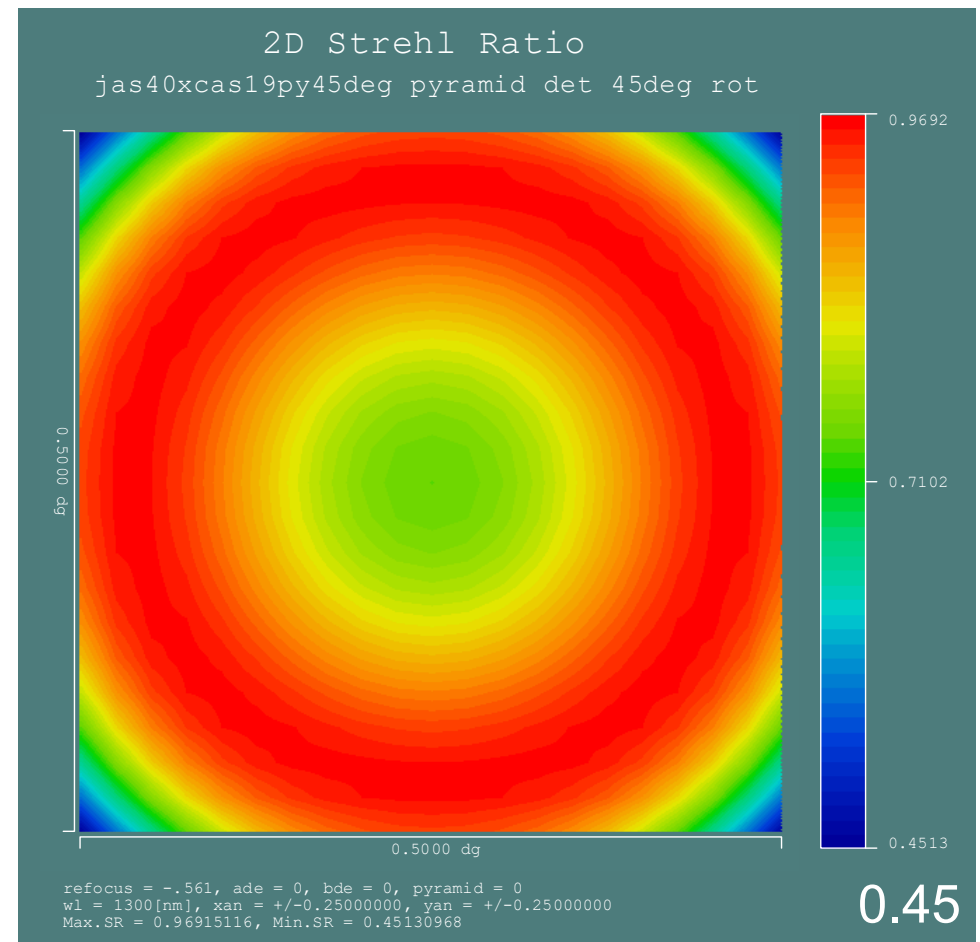
像面を球面とした場合

最悪値はそれほど向上していないが、
回転対称の綺麗なマップとなる



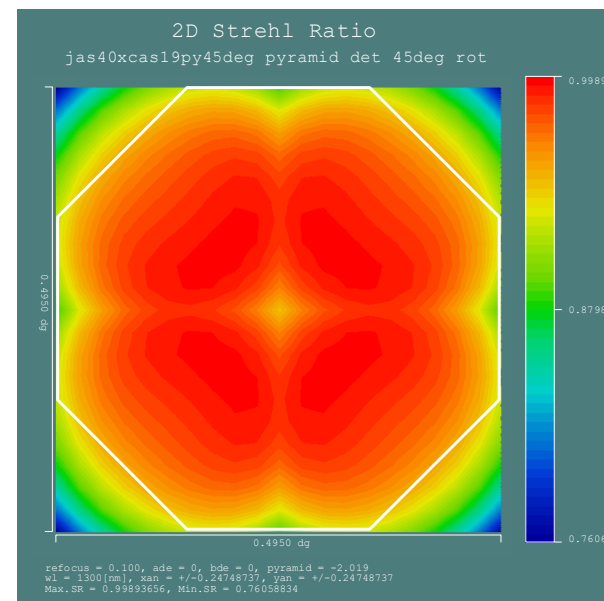
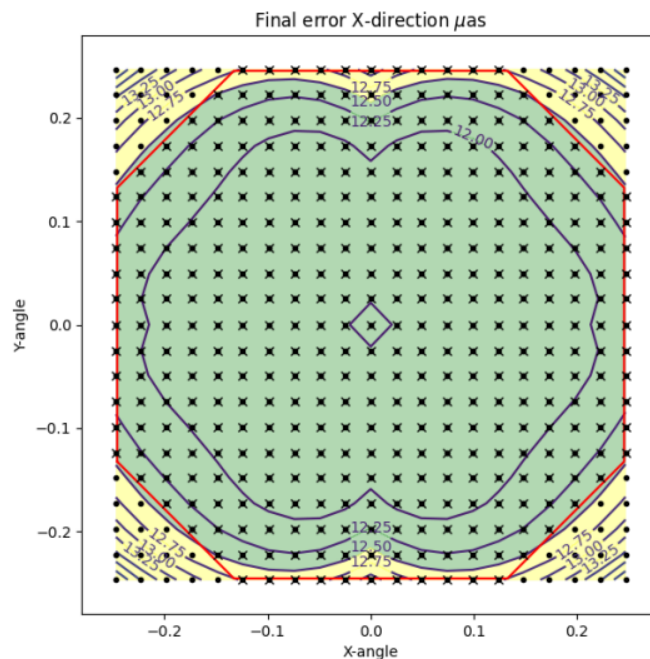
像面を平面とした場合

評価像面位置で分布は変わるが、
最悪0.45程度まで劣化する



星像中心位置決定精度計算

- 今回開発した計算プログラムは、望遠鏡の様々なパラメタとPSFのZernike係数から、星像中心を推定する際の誤差行列を計算するものである
- マップ表示のスレッシュホールドは、**要求値の $25\mu\text{as}$** に対して、以下のように決めた
 - $12.5\mu\text{as}$: 誤差は2乗和ではなく、線形和を仮定して要求値の半分を許容値とする
 - $17\mu\text{as}$: 誤差は2乗和と仮定し、要求値を $\sqrt{2}$ で割ったものを許容値とする
 - $20\mu\text{as}$: これ以上は恐らく許容されないであろうという値
- $12.5\mu\text{as}$ 以下を緑、 $12.5\sim 17\mu\text{as}$ を黄色、 $17\sim 20\mu\text{as}$ を赤で塗り分けた
- 前述の波面収差SRマップと良く一致しており、**正八角形内では問題無い**ことが分かる

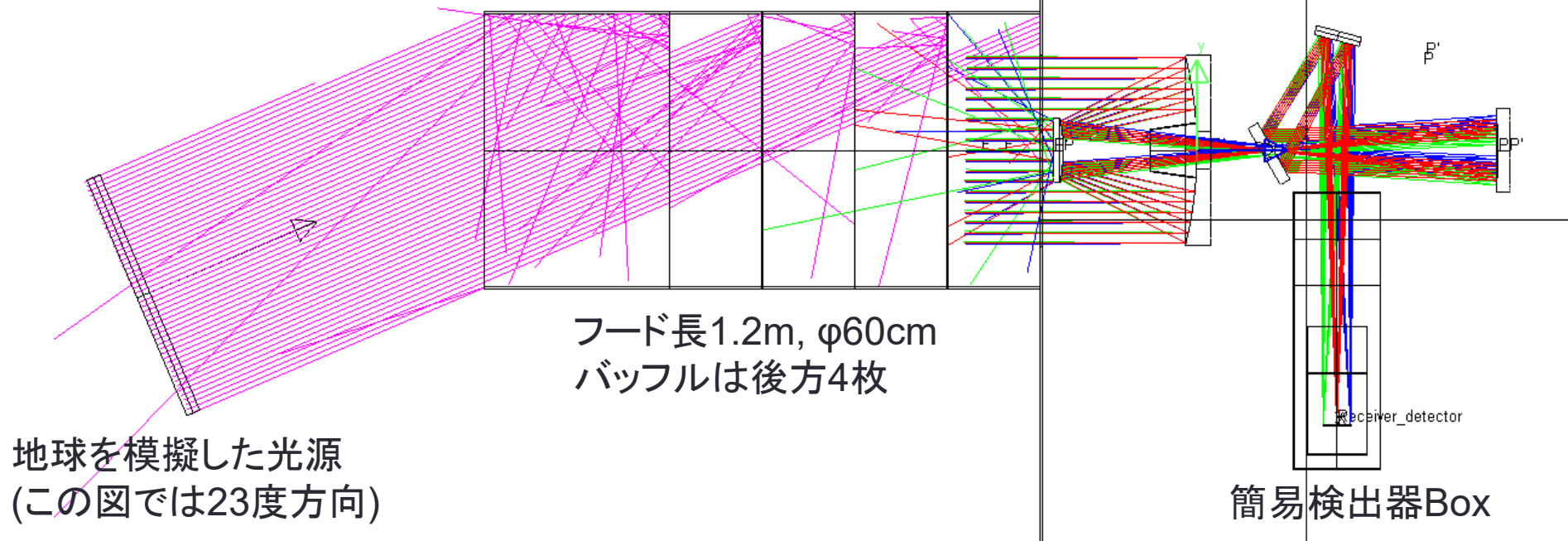


迷光解析

- 地球からの太陽光照り返しによる迷光と、観測対象の背景となるバルジ起源の迷光に関して解析し、2枚鏡と3枚鏡を比較した
- 但し、どちらもまだ最終案ではないため、配置や先端フード・望遠鏡Boxの形状等は大凡の想定である
- また、迷光解析で要となる内面処理に関しても、処理材そのものが未定、あるいは処理材は決まっているが、その特性が正確には分かっていないので、これも想定である
- 3枚鏡モデルを用いて地球迷光に関して、2枚鏡モデルを用いてバルジ迷光に関して説明する
- これまでは、dominantなのは地球迷光であろうと考えていたが、前述の星像中心位置決定精度計算プログラムを用いて詳細検討を行ったところ、むしろ背景光(バルジ迷光)がdominantであることが分かったため、こちらに関してより詳細に説明する

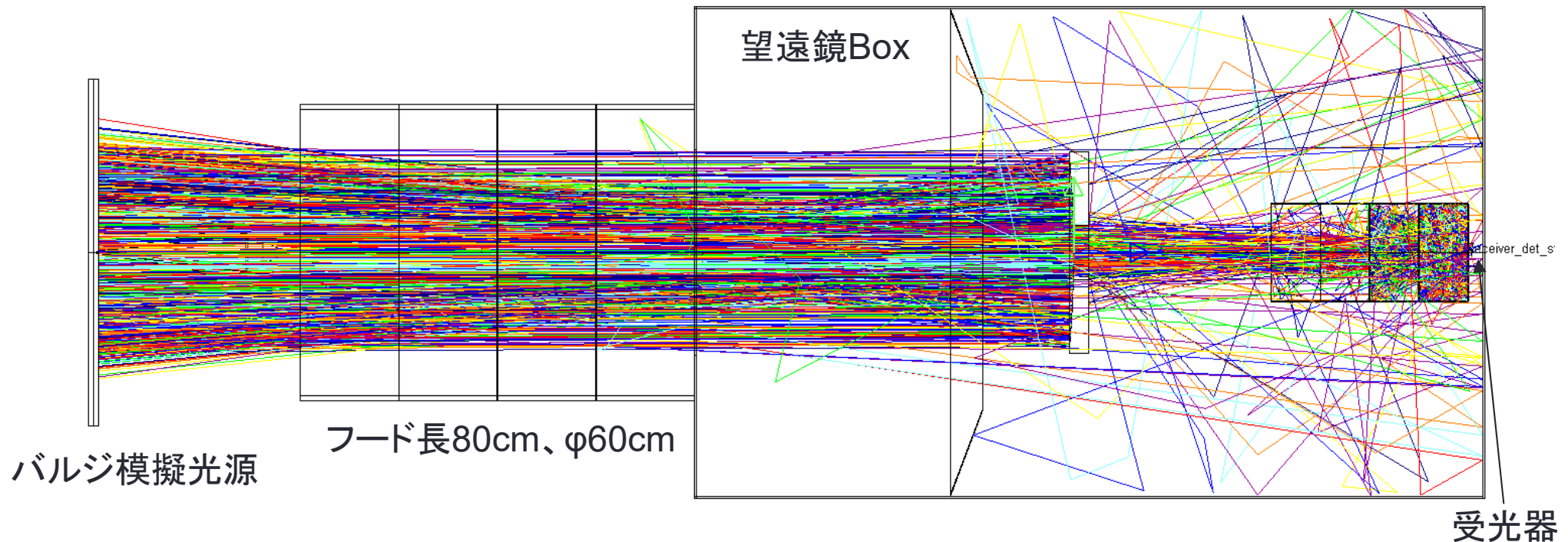
3枚鏡迷光解析モデル

- ミラー裏面や側面、穴内面はLambert 10%を想定
- フードやバッフル、Box内面はPNC
- 検出器Boxは簡略化してバッフル4枚、PNC
- フード前方にバッフルがあると、光が一部戻るなので1枚目と2枚目をなくす
- そのため、入射光束は $\phi 60\text{cm}$ に拡大(従来は $\phi 430$)
- 現状では、**最小離角23度方向に地球が見える**が、軌道高度を上げたり、観測時間を削れば、この値は大きくなり、有利となる
- **23度から83度まで計算し、軌道平均する**



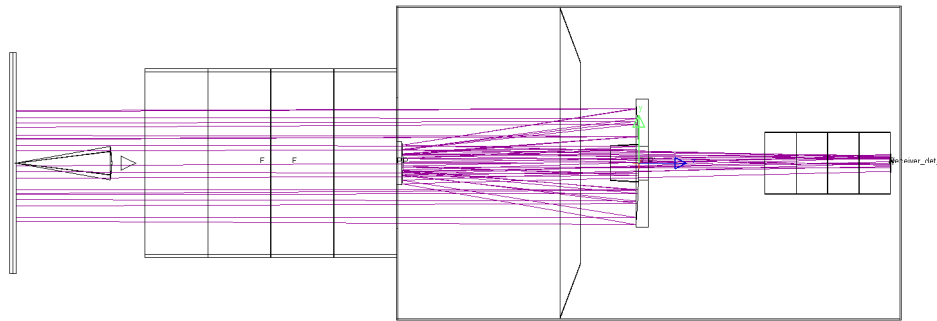
2枚鏡迷光解析モデル

- 2枚鏡モデルを用いて、バルジ迷光に関して記す
- 望遠鏡の前方真正面に光源を配置し、そこからある角度内で光線をランダムに飛ばし、像面に配した受光器にまで到達する全光線を追跡する
- 全ての光線を描画すると下図のように訳が分からなくなるが、LightToolsのRay Path機能を用いると、これらをパスごとに分離することができる
- 想像に難くないと思うが、これには高速且つメモリ容量の大きなPCが必須となるが、今期導入した24core/128GメモリのPCで実現した



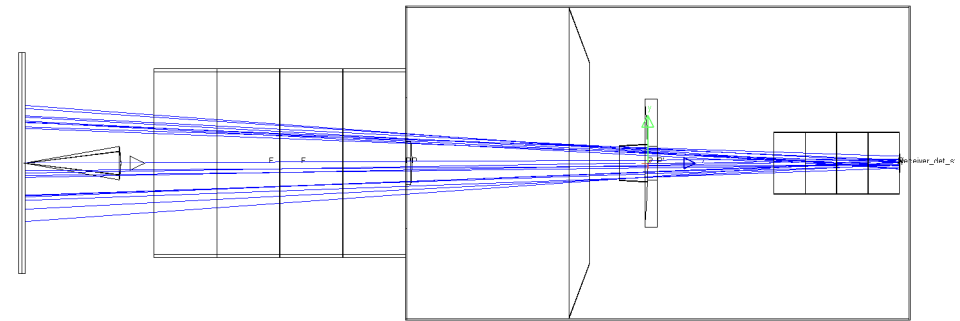
代表的なRay Path

①これは正規の像光束(背景像光束)であり、当然阻止不可能



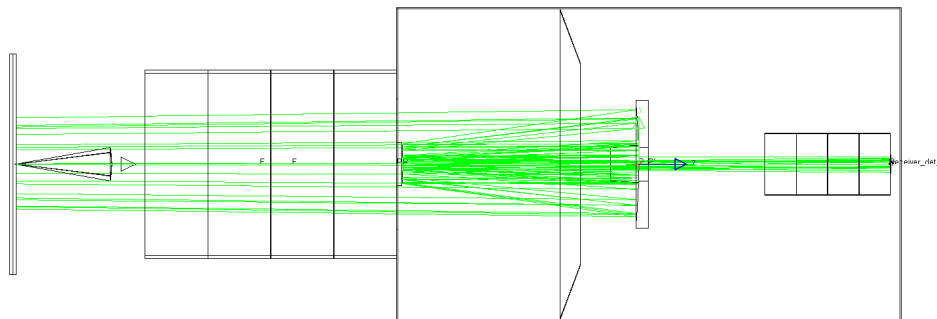
js40rc2 cas=658 ade=33 obs=0.2830.277
Dec 30, 2021
js40rcas19_fhood800_box_f1000_1_pnc_vane2622_bulge.2
LightTools 9.1.1 SR1

②光学系を一切介さず、主鏡の穴を通して検出器に直達する光束(ダイレクト迷光)



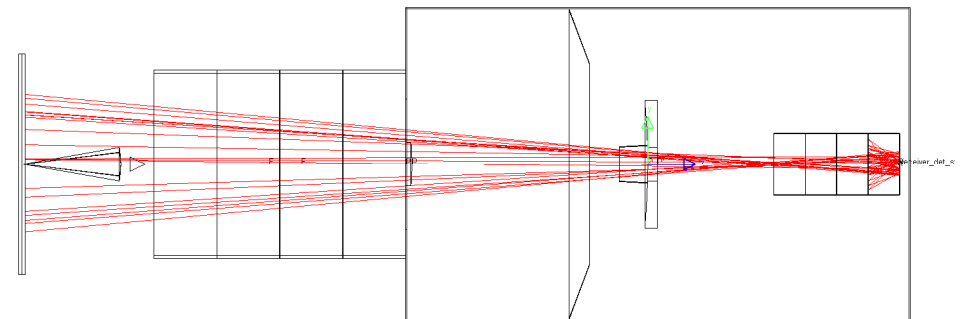
js40rc2 cas=658 ade=33 obs=0.2830.277
Dec 30, 2021
js40rcas19_fhood800_box_f1000_1_pnc_vane2622_bulge.2
LightTools 9.1.1 SR1

③主鏡副鏡間を2往復した多重反射光束



js40rc2 cas=658 ade=33 obs=0.2830.277
Dec 30, 2021
js40rcas19_fhood800_box_f1000_1_pnc_vane2622_bulge.2
LightTools 9.1.1 SR1

④検出器フード内で多重散乱された光束



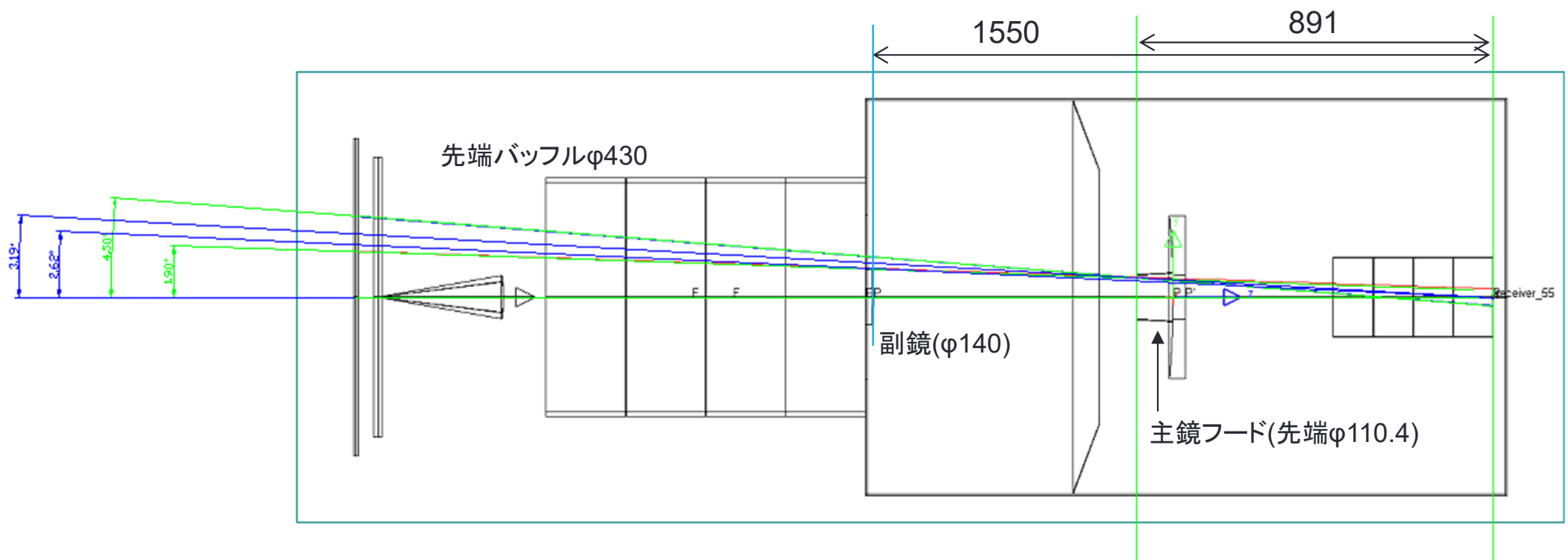
js40rc2 cas=658 ade=33 obs=0.2830.277
Dec 30, 2021
js40rcas19_fhood800_box_f1000_1_pnc_vane2622_bulge.2
LightTools 9.1.1 SR1

バルジ迷光定量評価

- 前述の①②③の迷光総量は、各々 $1.02e-3$ 、 $1.24e-3$ 、 $3.04e-5$ であったため、比で表すと大凡**1:1.2:0.03**となる
- また、④で代表される**多重散乱光の総和**、つまりP.13の光線群から①②③を引いた残りは **$2.93e-7$** となる
- ①は観測光束と完全に重なるため、いかなる光学系でも除外できず、またその値もほぼ同じである
- 結局、望遠鏡として比較すべきバルジ迷光は②ダイレクト迷光、③多重反射迷光、④散乱迷光の3種類であるが、その比は**1.2:0.03:0.00029**となるため、後者2個は桁で小さくnegligibleであり、**バルジダイレクト迷光がdominant**となる
- 2枚鏡でバルジダイレクト迷光が問題となるのは、ひとえに2枚鏡システムでは**主鏡の穴が大きくなってしま**うからある
- 詳細は割愛するが、3枚鏡システムは主鏡の穴から少し後方のM4位置に中間集光位置が来るため、主鏡及びM4の穴を小さくすることができるため、**ダイレクト迷光は存在しない**

バルジダイレクト迷光詳細

- バルジダイレクト迷光は光学系を介さないため、幾何学的に直接計算可能である
- 検出器の各ピクセルに入るダイレクト迷光の角度範囲は、検出器上の1点から副鏡端を見るところから、主鏡フード端を見るところまでとなる
- 下図に基づくと、**焦点面中心だと2.6度から3.5度の範囲**となる
- 焦点面位置に応じてこの角度は変化するので、ダイレクト迷光は視野内の位置によって変化する、つまり背景パターンを持つことになる(未計算)



バルジマップからの切り出し

- バルジからの放射分布は、DIRBE skymap及びgalaxy plane mapから作成済みであり、図8のようになる
- このマップから前頁記載の2.6~3.5度のドーナツ状領域を切り出したものが図9であり、この領域から来る放射がダイレクト迷光となる

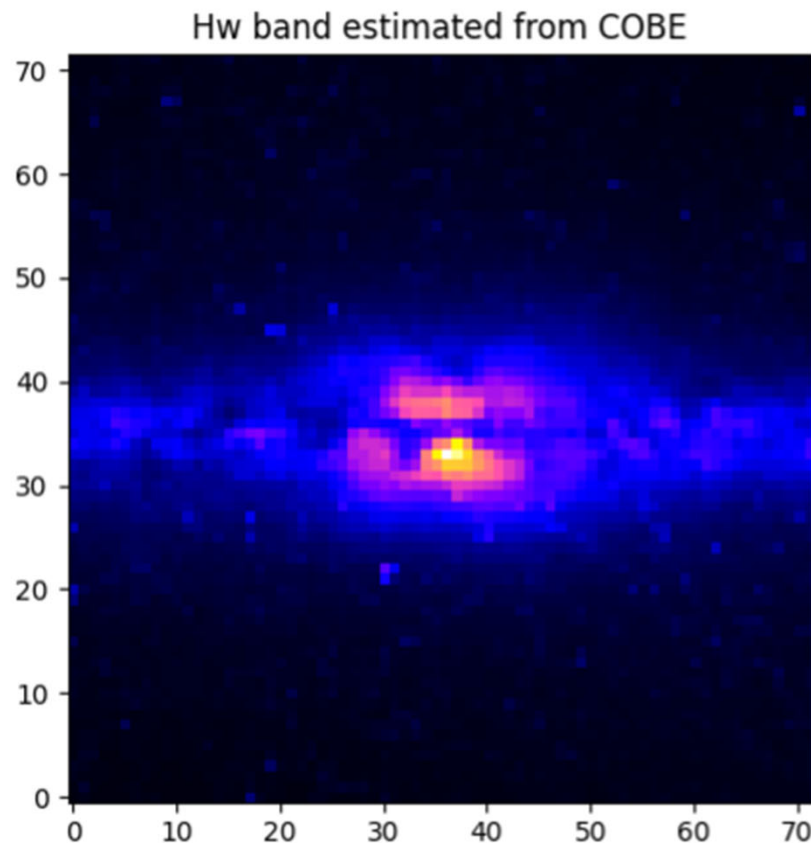


図8:バルジ放射マップ

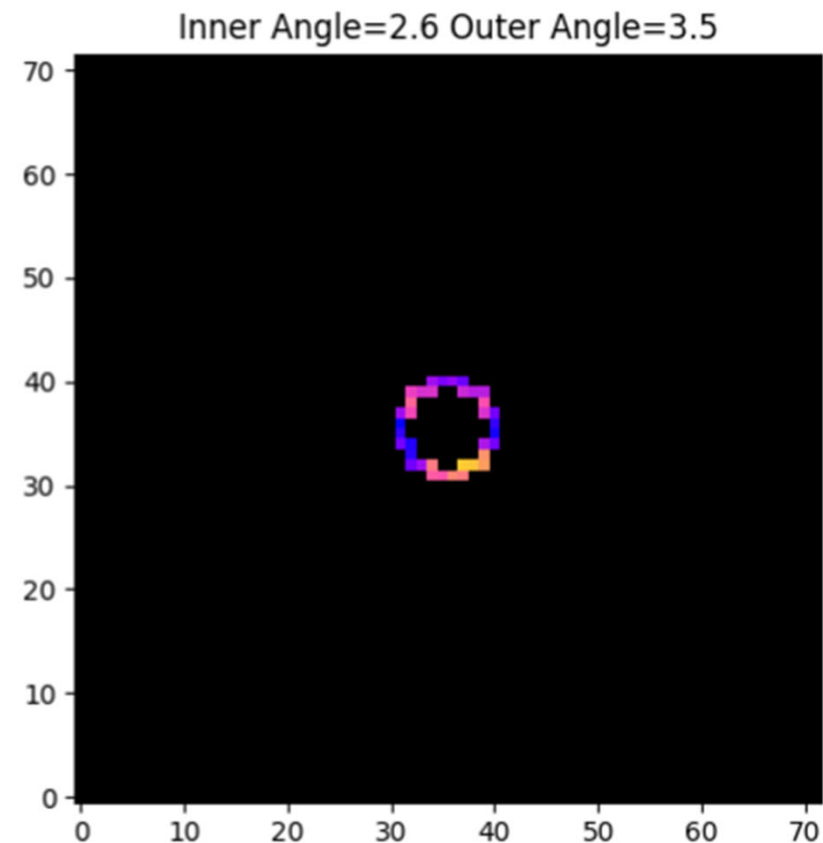
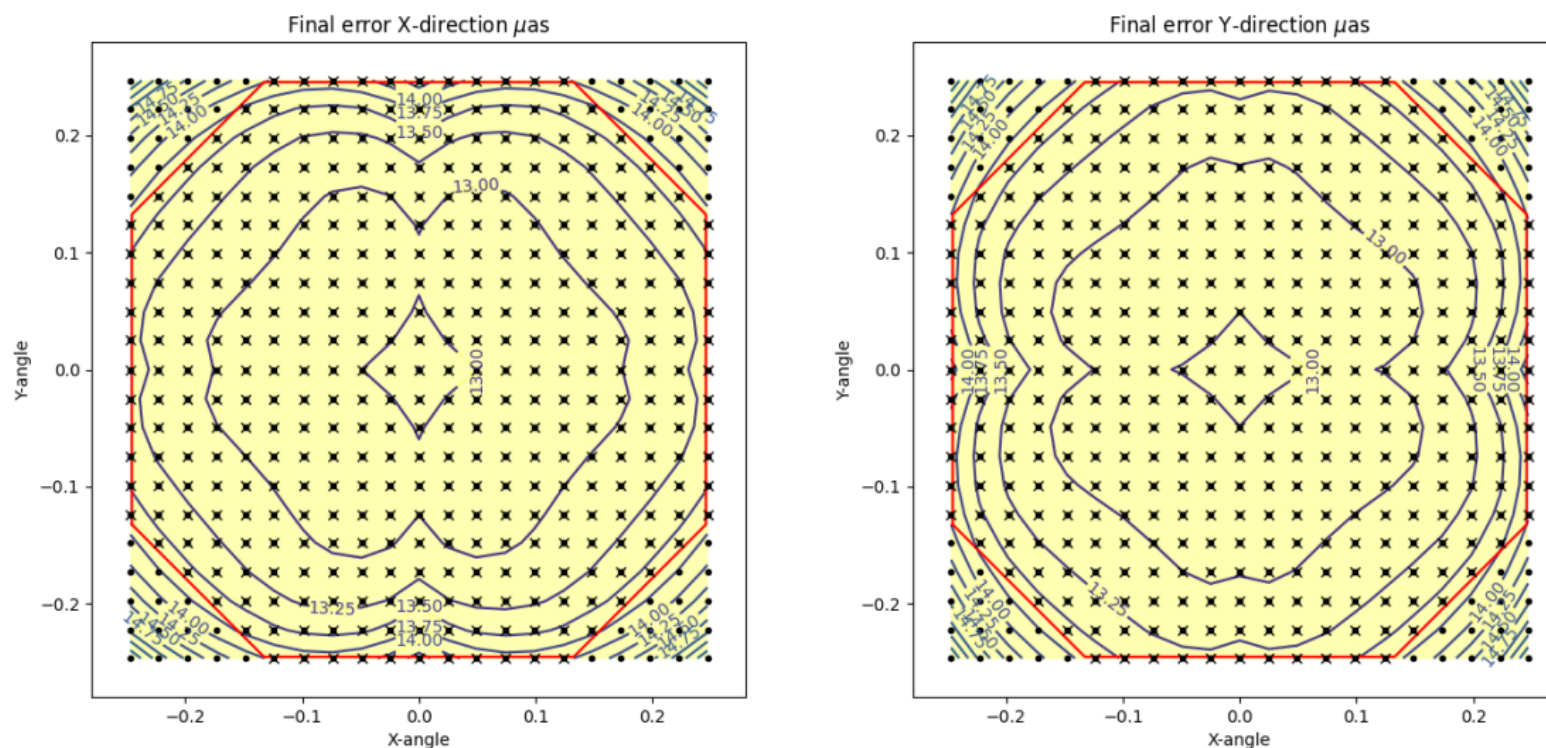


図9:ダイレクト迷光領域

バルジダイレクト迷光評価

- 図9の領域からの放射合計は、**0.061[MJy]**となる
- これを光子数に換算する式： $0.61 * 10^6 * 10^{-26} * \frac{c}{\lambda_c^2} * \frac{\lambda_c}{h_c} * \delta\lambda * (10 * 10^{-6})^2$
- 波長範囲を広めに見て0.9~1.6 μm とすると、**52[photon/sec/pix]**となる
- ダイレクト迷光はノイズとして同等の性質を持つ暗電流値に加算して見積もる
- 全面17 μas 以下の黄色になってしまい、12.5 μas 以下の緑領域がなくなりましたが、**正八角形内では14 μas 以下**となっており、恐らく問題ないと思われる



トレードオフ表

- 目的からして当然であるが、コストにかなりのメリットがないと、2枚鏡に軍配が上がることはない
- コストに直結する製造性に関しては、今後公差解析を実施して見極める
- コストはメーカ次第であるが、リスクを事前に潰す等して極力コスト低減に務める

項目	3枚鏡	2枚鏡	コメント
光学性能	◎	○	
遮蔽率	0.32~0.35	0.35	大差なし
地球迷光	○	◎	バルジダイレクト迷光に比べて桁で小さい
バルジ迷光	◎	△	3枚鏡はバルジダイレクト迷光ゼロ
製造性			公差解析未実施
大きさ・質量	○	◎	質量的には2枚鏡がかなり有利
パワー鏡面数	3	2	3枚鏡は平面鏡が2枚ある
検出器構成	○	△	ピラミッド配置は測定や軸合わせに少し難あり
焦点調整性	◎	○	3枚鏡は平面鏡、2枚鏡は副鏡で行う
コスト			はてさてどうなるか・・・？