

JASMINEの銀河中心核バルジ探索における 星像中心推定精度

Star center estimation errors on galactic nuclear bulge survey of JASMINE

著者名: ○ 辰巳 大輔 (国立天文台)、
赤外線位置天文観測衛星(小型JASMINE)プリプロジェクト候補チーム

アブストラクト: JASMINEによる位置天文観測における星像中心推定精度についての検討結果を報告する。概念検討の段階で、星像中心推定精度に割り振られた誤差配分値は5.50 mas (ミリ秒角) である。正確には、約7秒間露光の近赤外撮像 (1.1-1.7ミクロン波長) で12.5等級の星に対して、達成すべき精度である。データシミュレーションを行い、望遠鏡パラメータ (口径、中心遮蔽率)、赤外カメラ (ピクセルサイズ、暗電流、読み出しノイズ) などについて要求値をまとめた。

本研究の目的

JASMINEは、銀河中心周辺の構造と成り立ちを解明するために、高精度位置天文観測を行うことを目的とする。

この様な高精度観測を実現するためのキーポイントは、近赤外波長と宇宙空間からの観測である。

地球から 8 kpc の距離にある銀河中心では、年周視差が 125 マイクロ秒角 と小さい。

そのため、銀河形成論などの天文学的な議論を行うため 必要な測定精度 は、

年周視差 **25 マイクロ秒角 以下**

固有運動 **25 マイクロ秒角／年 以下**

であると見積もられている。

本研究の目的

このような高精度な天体位置測定を実現するための条件設定。

近赤外観測

可視光での銀河中心方向の観測では、星間ガスによる吸収散乱過程により測定精度が上がらない。そこで **1.1 – 1.7 um の近赤外波長 (中心波長 1.4 um)** での観測を行う。

宇宙空間での観測

大気揺らぎによる不定性を低減するために宇宙空間からの観測を目指す。小型衛星による低軌道（高度550km）の太陽同期軌道より観測を行う。このため **望遠鏡口径を 0.3 m** としている。

多数回の撮像

探査領域内の星を多数回撮像することにより、統計的に観測精度を向上する。**3年間で 約15,000回** の探査領域撮像を行います。

近赤外カメラ

本研究では、Teledyne 社の開発した **Hawaii 4RG-10** と云う近赤外線 CMOS カメラを使用することを前提とします。

本研究の目的

以上の条件設定下で、本研究に求められたことは

1回の撮像で 5.50 マイクロ秒角 (mas) の星像中心決定精度 を得るために

必要な望遠鏡やカメラへの性能要求値を得ることである。

	Parameter	Value	Unit	
	Wavelength	1.4e-6	meter	
Telescope	Aperture	0.3	meter	
	Focal length		meter	*
	Obscured ratio			*
Camera	Pixel size	10.0e-6	meter	
	Window size	9 x 9	pixels	
	Effective number of electrons	24,000	e-	*
	Gaussian noise		e ⁻²	*
	Offset noise		e-	*

Table 1: Fixed and interested parameters

Fundamental Limits

回折限界とショット雑音限界

本研究の本題に入る前に、星像中心決定精度に関する原理的限界について
まとめておく。

1. 星像の大きさは、望遠鏡の回折限界に依って決まっている。
2. 星像がガウス分布に従うプロファイルを持つ場合、星像中心決定精度は
(星像中心決定精度) = (星像の大きさ) / $\sqrt{\text{有効な電子数}}$
これを「ショット雑音限界」と呼ぶ。
3. 円形開口での回折像の場合、ガウス分布と比して tail 部分を持つため (図 2 参照)

有効な電子数 < 総電子数

「星像中心決定精度」 > ショット雑音限界

となる。

Diffraction image

An obscured Airy diffraction pattern can be expressed in

$$I(\theta) = \frac{I_0}{(1 - \epsilon^2)^2} \left\{ \frac{2 J_1(R)}{R} - \frac{2\epsilon J_1(\epsilon R)}{R} \right\}^2 \quad (1)$$

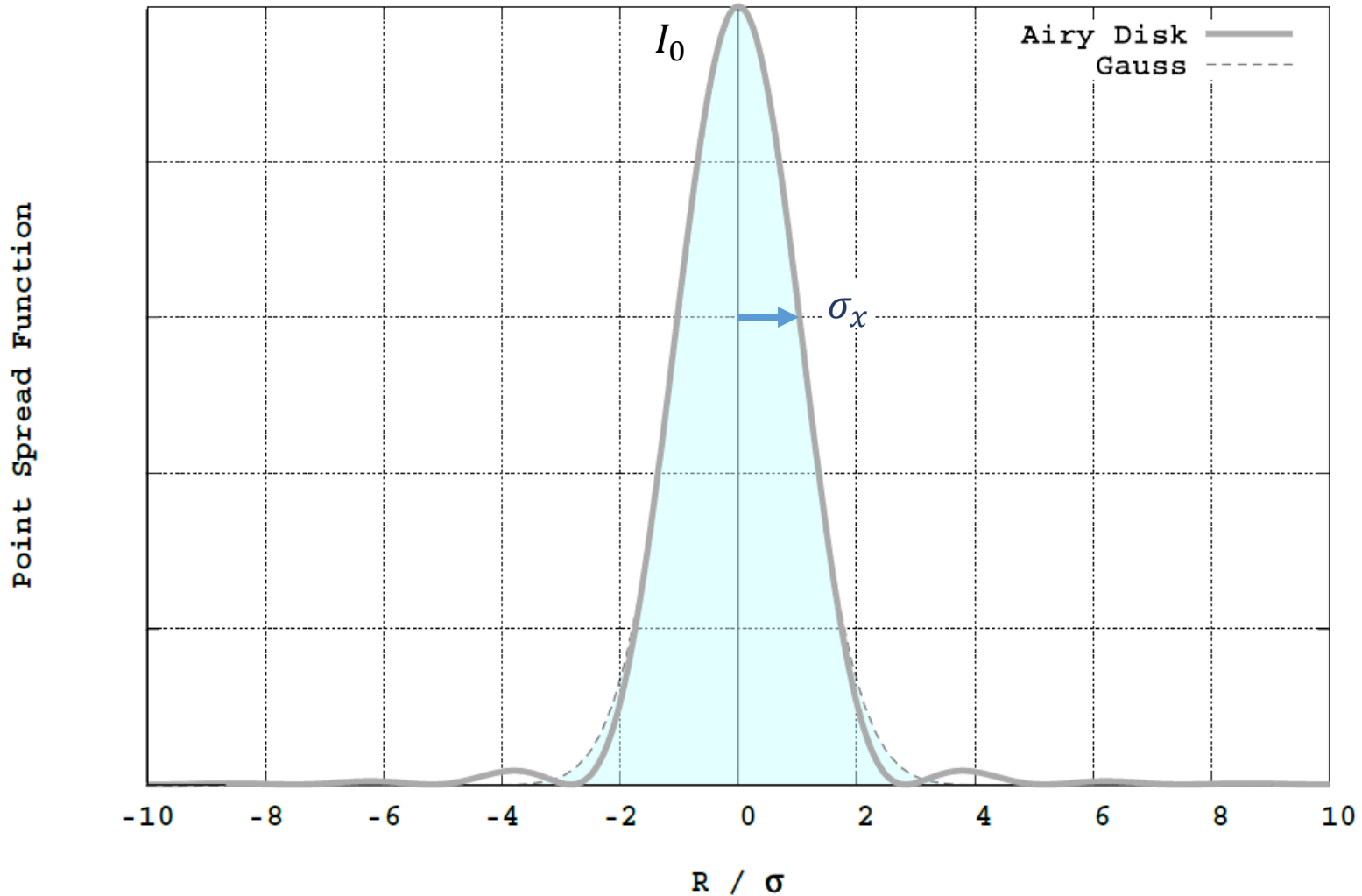
$$R = \frac{\pi D}{\lambda} \theta$$

$$\epsilon = \frac{D_2}{D} \quad \text{obscured ratio}$$

D	Telescope aperture	0.3 m
λ	Wavelength	1.4 μm [1.1:1.7] μm
D_2	Secondary mirror diameter	(中心遮蔽がある場合)

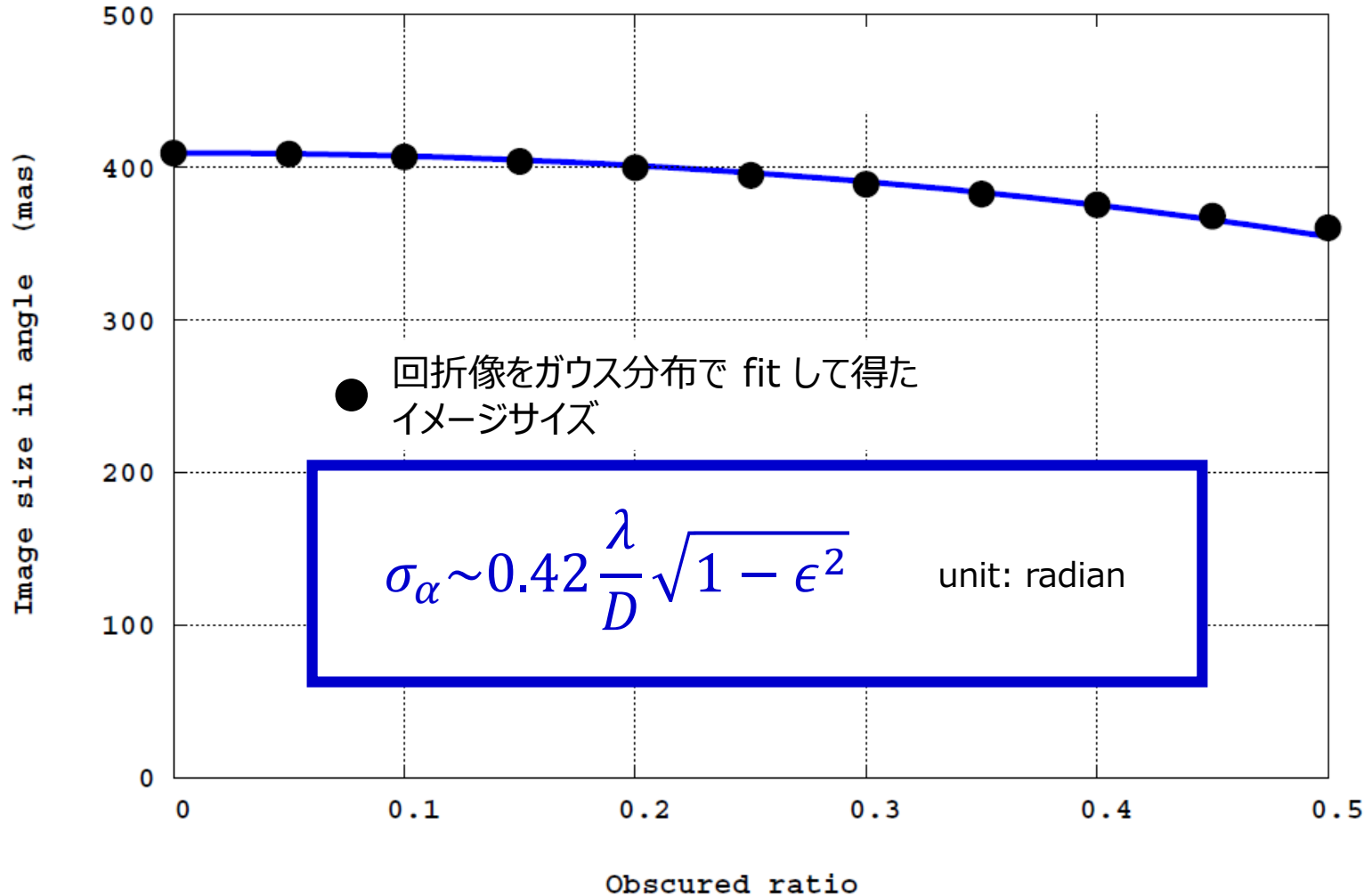
Diffraction image and gaussian distribution

Figure 1: Diffraction image and Gaussian distribution



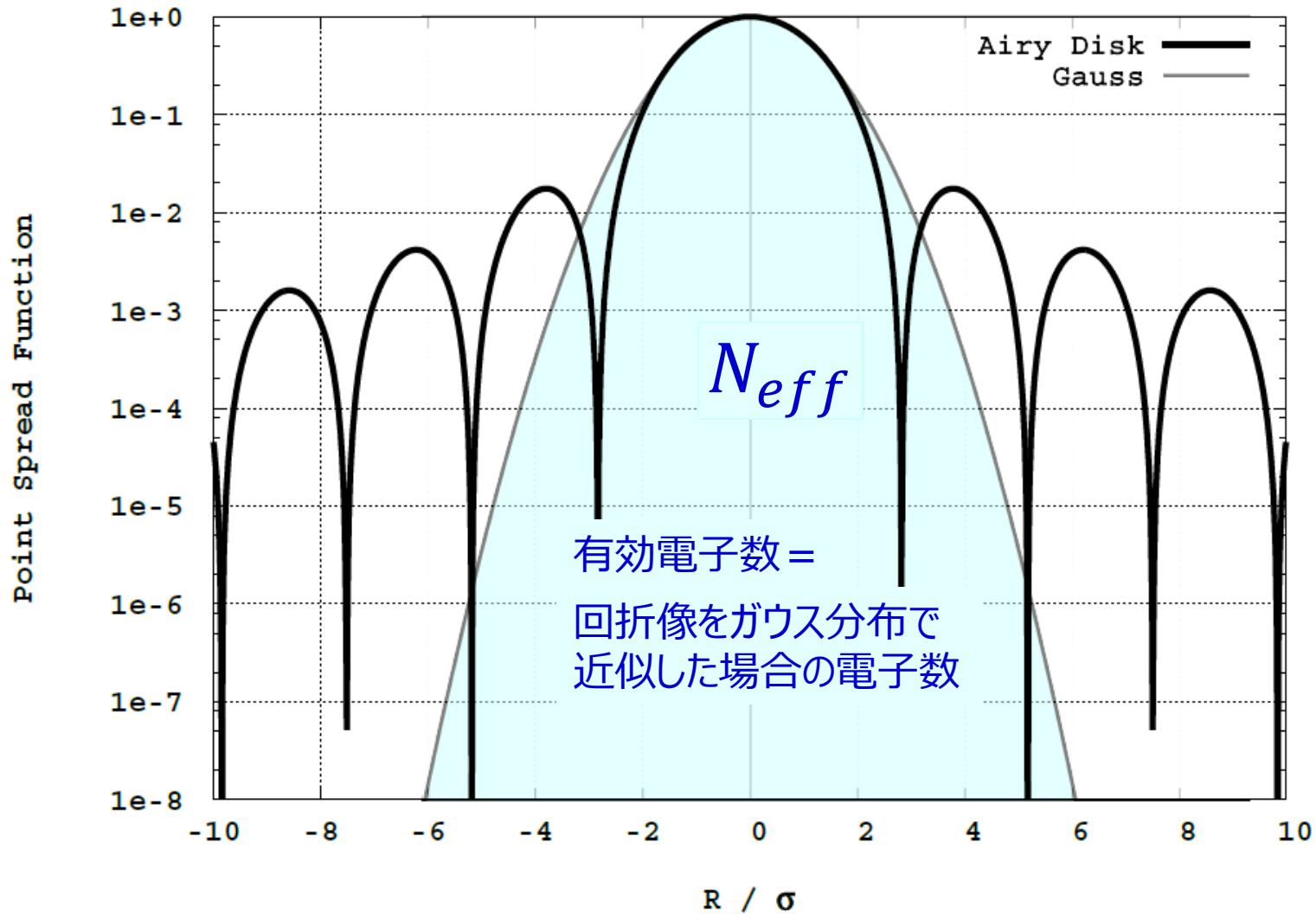
Diffraction limits

Figure 2: Obscured ratio and diffraction image size



Effective number of photons

Figure 3: Diffraction image and Gausssian distribution (Log plot)



Number of photons

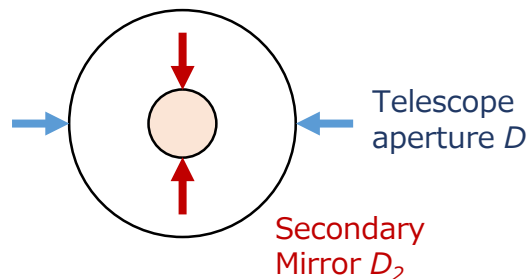
$$\text{Effective number of photons} \quad P_{eff} = N_{eff} / \varepsilon \quad (2)$$

$$\sigma_x \sim 0.42 \frac{\lambda f}{D} \sqrt{1 - \epsilon^2} \quad \varepsilon \quad \text{カメラの量子効率}$$

$$I_0 = \frac{\pi N_{fp} D^2}{4 \lambda^2 f^2} (1 - \epsilon^2) \quad N_{eff} = 2\pi I_0 \sigma_x^2$$

$$\frac{N_{eff}}{N_{fp}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi D}{\lambda f} \right)^2 (1 - \epsilon^2) \sigma_x^2 = \frac{\pi^2 \times 0.42^2}{2} (1 - \epsilon^2)^2 = 87.3\% \times (1 - \epsilon^2)^2$$

$$\text{On focal plane} \quad P_{fp} = \frac{N_{eff}}{0.873(1 - \epsilon^2)^2} / \varepsilon \quad (3)$$



$$\text{Area ratio} = (1 - \epsilon^2) \quad \epsilon = \frac{D_2}{D}$$

$$\text{At aperture} \quad P_{ap} = \frac{N_{fp}}{1 - \epsilon^2} = \frac{N_{eff}}{0.873(1 - \epsilon^2)^3} / \varepsilon \quad (4)$$

Number of photons

Table 2: Number of photons at each telescope position

At aperture	$P_{ap} = \frac{N_{eff}}{0.873(1 - \epsilon^2)^3} / \epsilon = P_{ap}$
On focal plane	$P_{fp} = \frac{N_{eff}}{0.873(1 - \epsilon^2)^2} / \epsilon = (1 - \epsilon^2)^2 P_{ap}$
Effective number of photons	$P_{eff} = N_{eff} / \epsilon = 0.873 (1 - \epsilon^2)^3 P_{ap}$

Shot noise Limits

Diffraction limit	$\sigma_\alpha \sim 0.42 \frac{\lambda}{D}$	404 mas
	$\sigma_x \sim 0.42 \frac{\lambda f}{D}$	7.12e-6 m
Effective number of e-	N_{eff}	32,000
	$N_{fp} = \frac{N_{eff}}{0.873}$	36,500
	$N_{ap} = \frac{N_{eff}}{0.873}$	<u>36,500</u>
Peak intensity	$I_0 = \frac{\pi N_{fp} D^2}{4 \lambda^2 f^2} (1 - \epsilon^2)$	9.12e+13
Shot noise limit	σ_α / \sqrt{N}	2.26 mas

Parameter		Value	Unit
Wavelength	λ	1.4e-6	meter
Telescope aperture	D	0.3	meter
Focal length	f	3.8	meter
Obscured ratio	ϵ	0.0	
Effective # of photons	N	24,000	

Shot noise Limits

Diffraction limit

$$\sigma_{\alpha} \sim 0.42 \frac{\lambda}{D} \sqrt{1 - \epsilon^2}$$

386 mas

$$\sigma_x \sim 0.42 \frac{\lambda f}{D} \sqrt{1 - \epsilon^2}$$

7.12e-6 m

Effective number of e-

$$N_{eff}$$

24,000

$$N_{fp} = \frac{N_{eff}}{0.873(1 - \epsilon^2)^2}$$

33,200

$$N_{ap} = \frac{N_{eff}}{0.873(1 - \epsilon^2)^3}$$

36,500

Peak intensity

$$I_0 = \frac{\pi N_{fp} D^2}{4 \lambda^2 f^2} (1 - \epsilon^2)$$

7.55e+13

Shot noise limit

$$\sigma_{\alpha} / \sqrt{N}$$

2.49 mas

Parameter		Value	Unit
Wavelength	λ	1.4e-6	meter
Telescope aperture	D	0.3	meter
Focal length	f	3.8	meter
Obscured ratio	ϵ	0.3	
Effective # of photons	N	24,000	

9x9 pixels simulation

9x9 pixels simulation

原理的限界が分かったので、

ここからはカメラから得られる星像イメージを simulation により生成して (図 3 参照)

実際の解析プロセスにおける星像中心決定精度について議論を始める。

	Parameter	Value	Unit	
	Wavelength	1.4e-6	meter	
Telescope	Aperture	0.3	meter	
	Focal length		meter	*
	Obscured ratio			*
Camera	Pixel size	10.0e-6	meter	
	Window size	9 x 9	pixels	
	Effective number of electrons		e-	*
	Gaussian noise		e ⁻²	*
	Offset noise		e-	*

Table 1: Fixed and [interested](#) parameters

Star Image on 9 x 9 pixels

Figure 4: Camera image of a star

star center = (0, 0) μm pixel size = 10 μm								
0.01%	0.02%	0.02%	0.08%	0.14%	0.08%	0.02%	0.02%	0.01%
0.02%	0.05%	0.43%	0.81%	0.88%	0.81%	0.43%	0.05%	0.02%
0.02%	0.43%	0.87%	0.40%	0.41%	0.40%	0.87%	0.43%	0.02%
0.08%	0.81%	0.40%	3.35%	8.55%	3.35%	0.40%	0.81%	0.08%
0.14%	0.88%	0.41%	8.55%	19.21%	8.55%	0.41%	0.88%	0.14%
0.08%	0.81%	0.40%	3.35%	8.55%	3.35%	0.40%	0.81%	0.08%
0.02%	0.43%	0.87%	0.40%	0.41%	0.40%	0.87%	0.43%	0.02%
0.02%	0.05%	0.43%	0.81%	0.88%	0.81%	0.43%	0.05%	0.02%
0.01%	0.02%	0.02%	0.08%	0.14%	0.08%	0.02%	0.02%	0.01%

$$\lambda = 1.4 \mu\text{m}, D = 0.3 \text{ m}, \varepsilon = 0.3, f = 3.8 \text{ m}$$

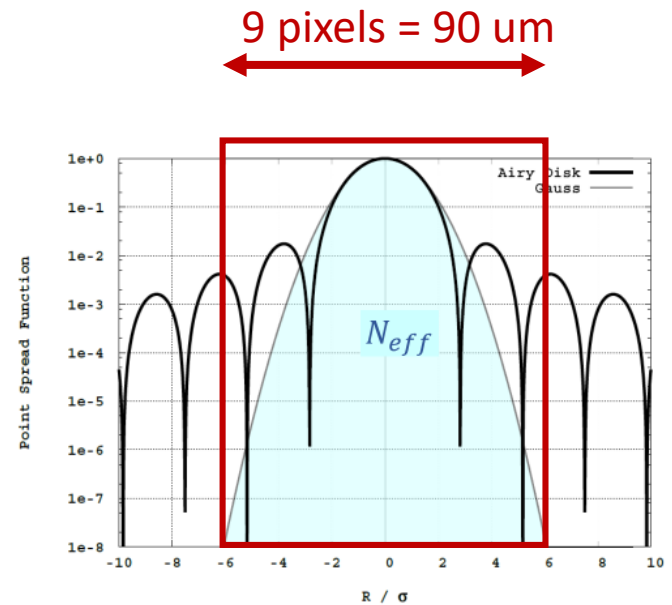
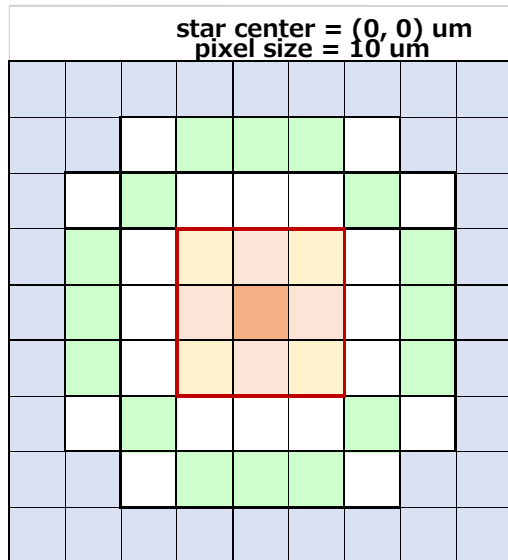


Figure 3: Diffraction image (Log plot)

Star Image on 9 x 9 pixels

Figure 4: Camera image of a star



各ピクセルに、 $I(x, y)$ の電子が

生ずるとき、光子の発生及び検出の過程で

統計的揺らぎが生じる

これをショット雑音と呼ぶ。

simulation でも、ショット雑音を生成する。

また、星像中心 (x_c, y_c) は中心ピクセル内でランダムに

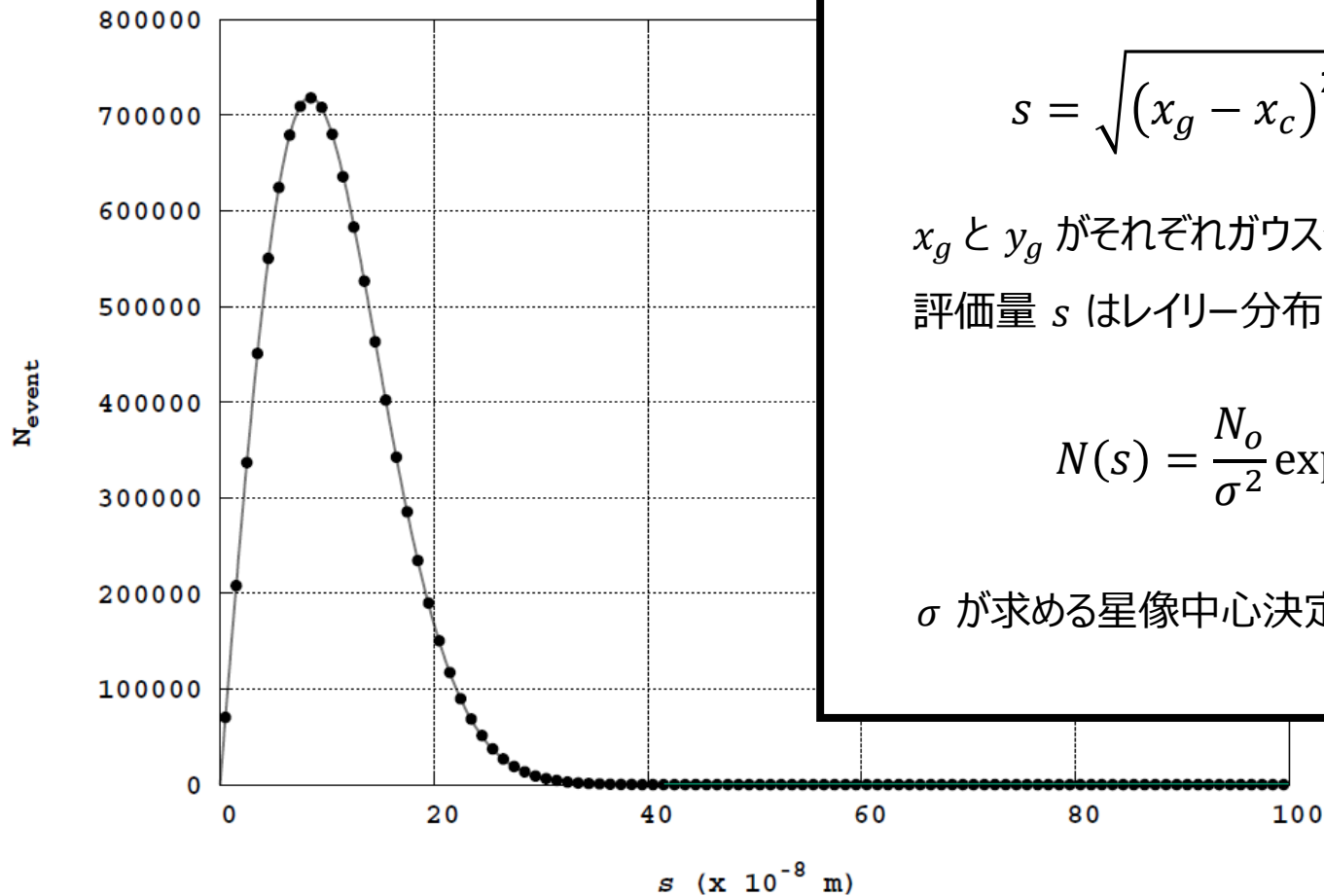
配置する。

このような画像データを1000万画像作成して

各星像中心 (x_g, y_g) を推定する。

星像中心決定精度

Figure 5: Rayleigh distribution and star center estimation error



Estimation method of star image center

星像中心推定法

ガウス分布の場合、得られた画像の重心を求めることで精度よく星像中心を決めることができる。

しかし、回折像の場合にはガウス分布 + 広がった tail 分布を持つため、単純に重心を求める

と tail 部分の寄与により原理的限界より悪い精度しか得られない。

しかも、どの範囲の画像データを使って重心を求めるか (Window size) にも

精度が大きく依存する。

そこで、本研究では下記の様な 改良重心法 を用いて星像中心を求めた。

$$\begin{aligned} x_g &= \sum \frac{x_i \times p_{ij}^2}{p_{ij}^2} \\ y_g &= \sum \frac{y_j \times p_{ij}^2}{p_{ij}^2} \end{aligned} \quad (6)$$

(x_i, y_j)

各ピクセルの中心座標

p_{ij}

各ピクセルでの観測電子数

星像中心推定法と精度

Table 3: Star center estimation methods and their errors

	原理的限界	重心法	改良重心法
Gauss			
σ_x / \sqrt{N}	4.17e-8	4.21e-8	5.51e-8
σ_α / \sqrt{N}	2.26 mas	2.28 mas	2.99 mas
Airy Disk ($\varepsilon=0.0$)			
σ_x / \sqrt{N}	3.91e-8	9.45e-8	5.98e-8
σ_α / \sqrt{N}	2.26 mas	5.13 mas	3.25 mas

- * ガウス分布の場合、重心法により原理的限界値に近い精度が得られる。
- * 回折像の場合、重心法では良好な精度が得られないので
本研究では上述の [改良重心法](#) を用いた。
- * この手法では、[原理的限界が 2.26 mas に対して 3.25 mas の精度しか得られない。](#)

改良重心法について

様々な先行研究において星像中心を求める方法が提案されているが

ここでは、望遠鏡やカメラへの性能要求値を決めることが主眼であるので

簡易だが、推定方法のチューニングを必要としない改良重心法を採用した。

JASMINE 計画の概念検討報告書にある [「effective point spread function」法](#)

（予めカメラのピクセルサイズより細かな分割の PSF template を作って置き、ある種の fitting により星像中心を求める方法）を実際の解析プロセスで使用することが想定されているが、どのような星のスペクトラムや回折像がどの程度理想的なイメージから乖離しているかなどの設定条件に依る部分があるので、前述の通り最良な星像中心決定精度が必ずしも得られないが、簡易で手法のチューニングを要しない方法を採用した。

[JASMINEの実解析プロセスでは、ここでの推定精度より良い精度が得られるものと考えられる。](#)

Ratio of image size and pixel size

Ratio of image size and pixel size

単純に、星像中心を精度良く求めたければ、望遠鏡の [焦点距離を長く](#) してピクセルサイズに比して十分大きな星像を作るのが望ましい。

しかし、JASMINE プロジェクトのように銀河中心方向のなるべく多くの星（ターゲット10万个）の位置天文観測が行いたい場合、望遠鏡の視野角も同時に重要である。（広視野にするには [焦点距離を短く](#) する）

[ピクセルサイズが十分に小さければ、角度分解能に対する原理的限界は焦点距離に依存しない](#)。しかし実際に上記のトレードオフを考えないといけないような状況では星像中心決定精度は焦点距離に依存する。

[他の関連パラメーターは波長、カメラのピクセルサイズ、中心遮光率](#)である。

ここでは、ピクセルサイズを 10 um に固定して simulation を行った。

Image size / Pixel size

Table 4: Ratio of image size and pixel size ($\varepsilon=0.3$, $\lambda=1.4$ μm)

focal length	$\sigma_x / 10\mu\text{m}$	$\sigma_\alpha / \text{sqrt}(N)$ ($\times 10^{-8}$ m)	$\sigma_\alpha / \text{sqrt}(N)$ (mas)
3.40	0.636	33.43	20.28
3.60	0.673	15.44	8.85
3.70	0.692	9.02	5.03
3.75	0.701	7.77	4.27
3.80	0.710	6.99	3.80
3.85	0.720	6.58	3.53
3.90	0.729	6.40	3.39
4.00	0.748	6.40	3.30
4.50	0.842	7.23	3.31
5.00	0.935	8.14	3.36
6.00	1.122	12.45	4.28

Neff=24,000 Nap=36,500

Image size / Pixel size

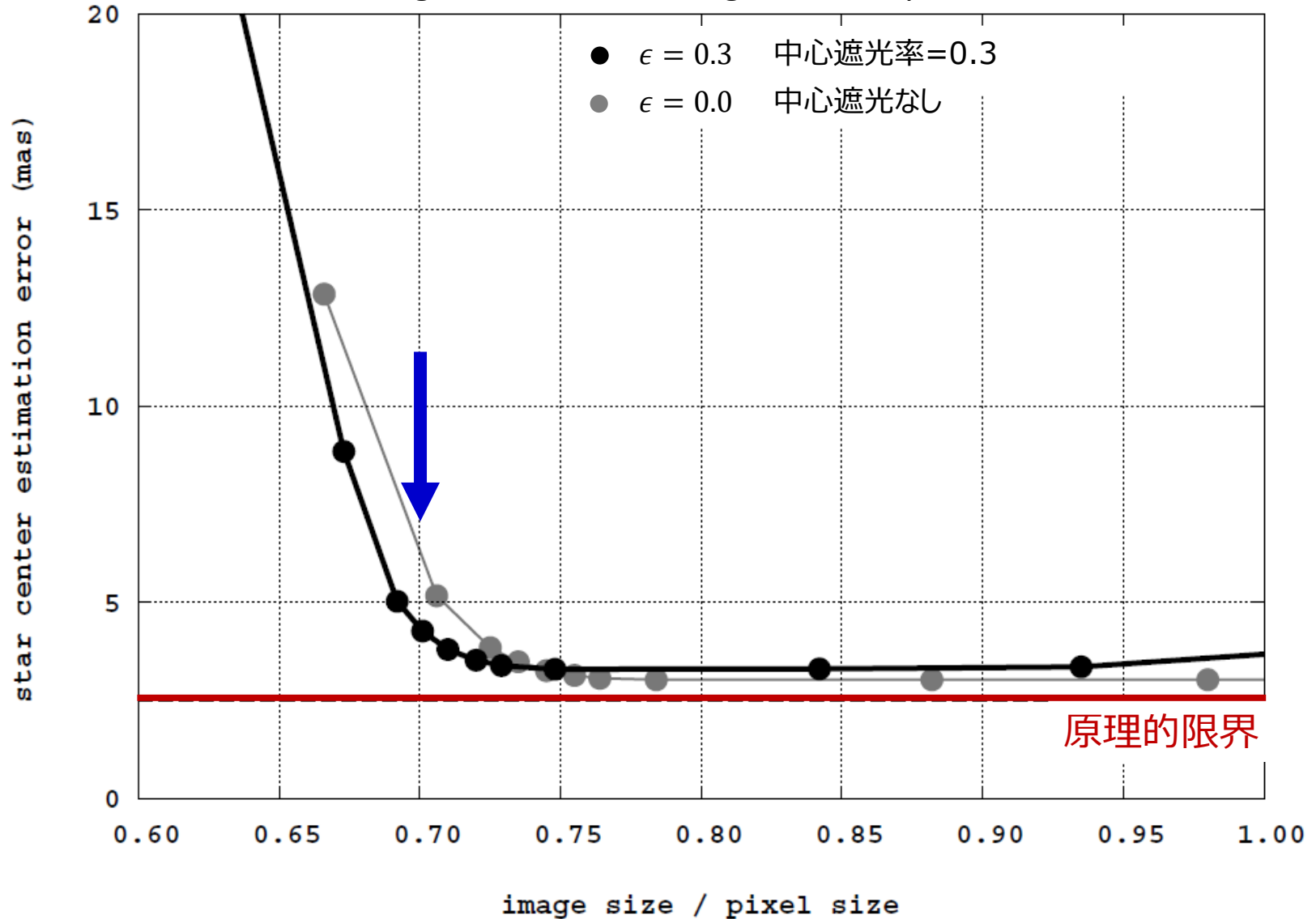
Table 5: Ratio of image size and pixel size ($\epsilon=0.0$, $\lambda=1.4 \mu\text{m}$)

focal length	$\sigma_x / 10\mu\text{m}$	$\sigma_x / \text{sqrt}(N)$ ($\times 10^{-8} \text{ m}$)	$\sigma_\alpha / \text{sqrt}(N)$ (mas)
3.40	0.666	21.21	12.86
3.50	0.688	14.91	8.79
3.60	0.706	9.02	5.17
3.65	0.717	7.79	4.40
3.70	0.725	6.90	3.85
3.75	0.735	6.34	3.49
3.80	0.745	6.01	3.26
3.85	0.755	5.86	3.14
3.90	0.764	5.81	3.07
4.00	0.784	5.88	3.03
4.50	0.882	6.62	3.03
5.00	0.980	7.35	3.03
6.00	1.176	8.87	3.05

Neff=32,000 Nap=36,500

Image size / Pixel size

Figure 6: Ratio of image size and pixel size



焦点距離

simulation の結果、(image size) / (pixel size) < 0.7 で急速に精度が悪化することが分かった。

$$\sigma_x \sim 0.42 \frac{\lambda f}{D} \sqrt{1 - \epsilon^2} \quad \text{image size in meter}$$

$$\frac{0.42 \frac{\lambda}{D} \sqrt{1 - \epsilon^2}}{10^{-5}} \times f > 0.7$$

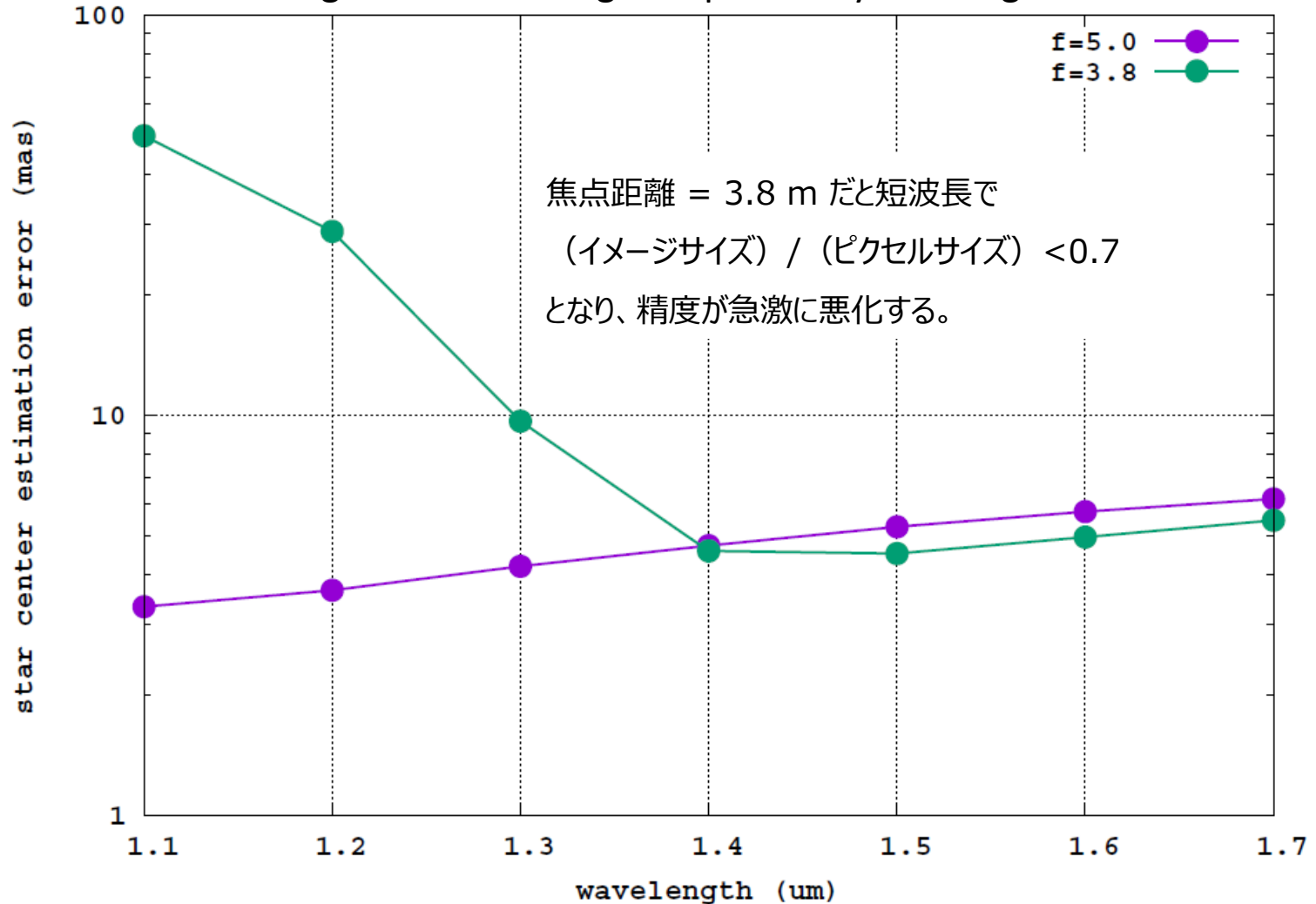
最悪値を求めたいので

$D=0.3 \text{ m}$, $\epsilon=0.3$, $\lambda=1.1 \text{ um}$ を代入すると

$$f > 4.8 \text{ m} \quad (7)$$

波長依存性

Figure 7: Wavelength dependency via image size



Telescope obscured ratio

中心遮光率

一般的な反射望遠鏡の場合、

副鏡などにより遮光により

1) 回折像の変化

2) 有効な光子数（電子数）の変化

が起こる。

これらの効果は、既に「原理的限界」の議論に織り込み済みであるが

ここでは simulation により各設定パラメーターとの依存性を検証する。

Obscured ratio

Table 6: Obscured ratio dependency (focal length = 5.0 m)

中心遮蔽率	σ_x / \sqrt{N} ($\times 10^{-8}$ m)	σ_α / \sqrt{N} (mas)
ideal	5.48	2.26
0.00	7.35	3.03
0.05	7.37	3.04
0.10	7.42	3.06
0.15	7.51	3.10
0.20	7.64	3.15
0.25	7.84	3.24
0.30	8.13	3.35
0.35	8.54	3.52
0.40	9.05	3.73
0.45	9.64	3.98
0.50	10.36	4.27

dx=dy=10.0e-6
npx=ncpy=9

Obscured ratio

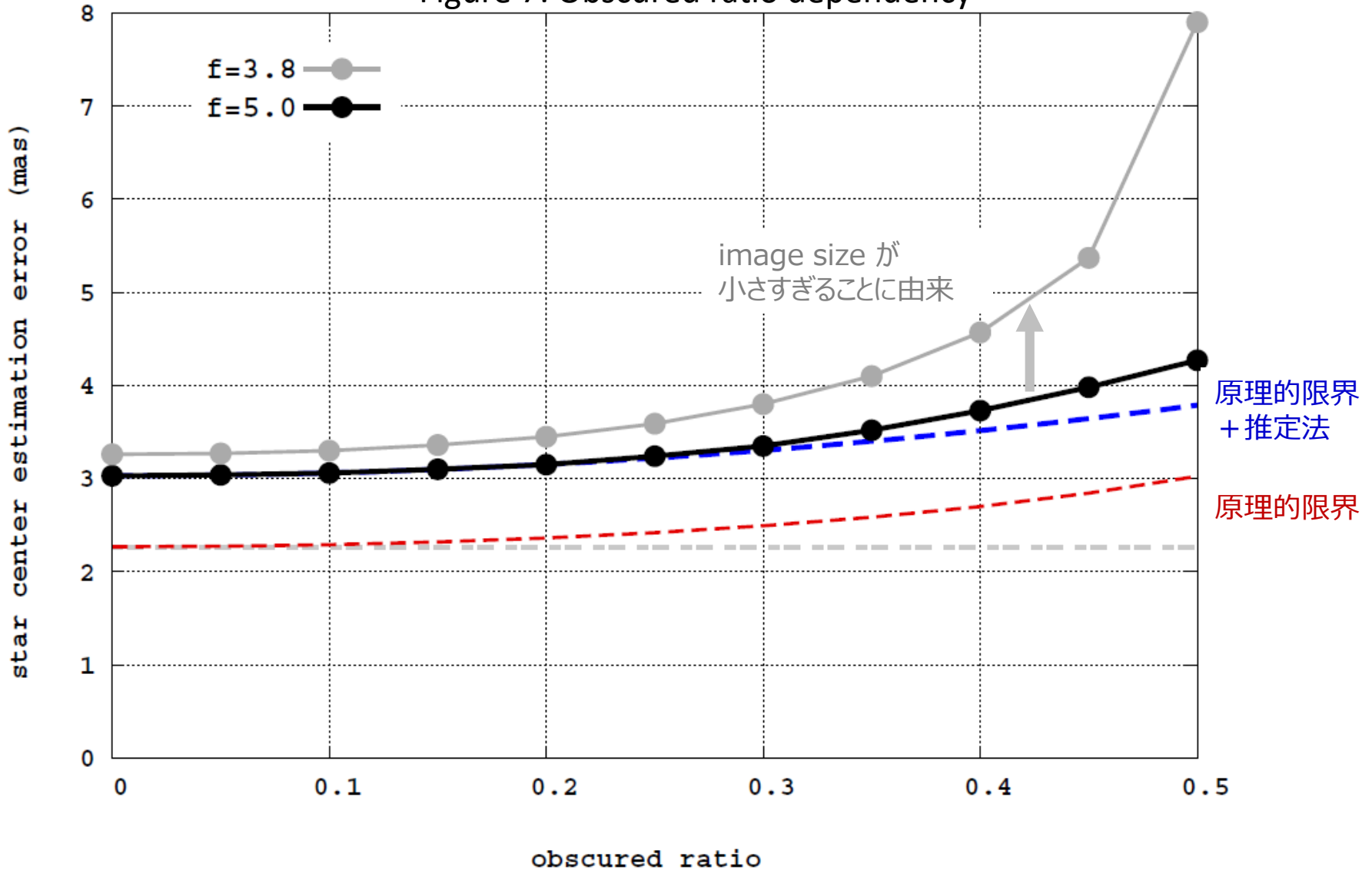
Table 6: Obscured ratio dependency (focal length = 3.8 m)

中心遮蔽率	σ_x / \sqrt{N} ($\times 10^{-8}$ m)	σ_α / \sqrt{N} (mas)
ideal	5.48	2.26
0.00	6.01	3.26
0.05	6.03	3.27
0.10	6.09	3.30
0.15	6.19	3.36
0.20	6.36	3.45
0.25	6.62	3.59
0.30	6.99	3.80
0.35	7.55	4.10
0.40	8.43	4.57
0.45	9.89	5.37
0.50	14.56	7.90

dx=dy=10.0e-6
npx=npy=9

Obscured ratio

Figure 7: Obscured ratio dependency



Obscured ratio

simulation の結果、 $\varepsilon > 0.3$ の領域で原理的限界により予想される精度悪化との乖離が見られる。この領域では有限なピクセルサイズであることなどの複合要因で非線形な精度悪化が生じたものと推測される。

($f=3.8$ m の simulation 結果から)

よって、中心遮蔽率への要求として

$$\varepsilon \leq 0.3 \quad (8)$$

Camera Noises

カメラノイズ

カメラに起因する雑音は大きく分けて2種類

1. オフセット雑音 (Camera Offset Noise)

暗電流や迷光により全ピクセル共通で観測電子数にオフセットが生ずる成分。

※迷光については、全ピクセル共通ではないがここでは簡単のため共通とした。

バッフル検討に於いて迷光分布や時間変動など更なる詳細検討を行う。

2. ガウス性雑音 (Camera Gaussian Noise)

各ピクセルに独立にガウス分布に従う成分。

Offset subtraction

Figure 8: Estimation of an offset noise

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	9	10	11	12	13	14	15	16	17
2	18	19	20	21	22	23	24	25	26
3	27	28	29	30	31	32	33	34	35
4	36	37	38	39	40	41	42	43	44
5	45	46	47	48	49	50	51	52	53
6	54	55	56	57	58	59	60	61	62
7	63	64	65	66	67	68	69	70	71
8	72	73	74	75	76	77	78	79	80

offset 成分を除くために
9x9 pixels のエッジ部分（青色のマス）
を使ってオフセット量を推定する。

offset =
average of

 32 pixels

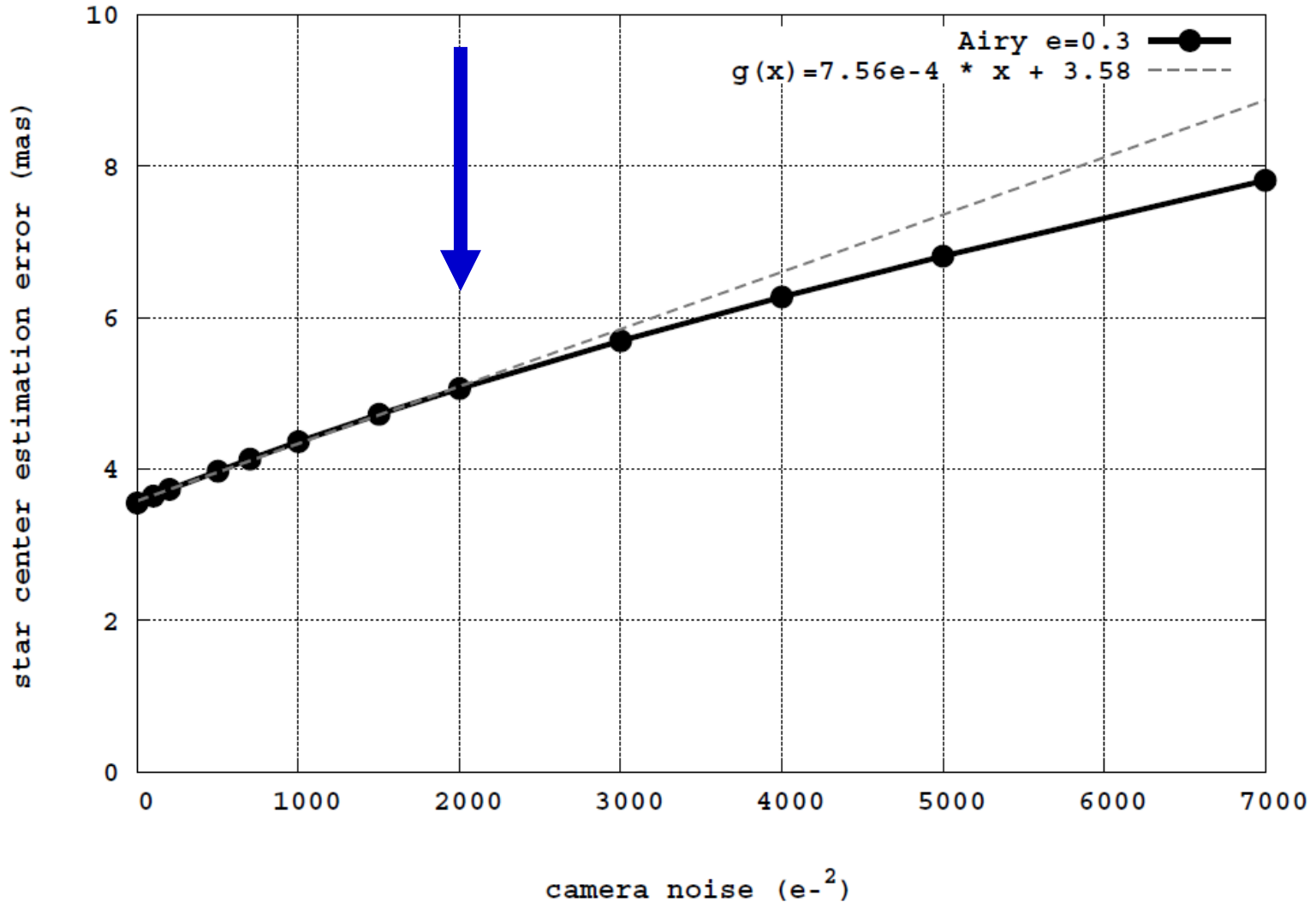
Camera Gaussian noises w/ offset subtraction

Table 8: Camera Gaussian noise dependency with offset subtraction

focal length	obscured ratio	c-noise (e ⁻²)	c-offset (e-)	$\sigma_x / \text{sqrt}(N)$ x10 ⁻⁸ m	$\sigma_a / \text{sqrt}(N)$ (mas)
f=5.0	$\epsilon=0.3$	0	430	8.61	3.55
f=5.0	$\epsilon=0.3$	100	430	8.82	3.64
f=5.0	$\epsilon=0.3$	200	430	9.04	3.73
f=5.0	$\epsilon=0.3$	500	430	9.63	3.97
f=5.0	$\epsilon=0.3$	700	430	10.02	4.13
f=5.0	$\epsilon=0.3$	1,000	430	10.58	4.36
f=5.0	$\epsilon=0.3$	1,500	430	11.45	4.72
f=5.0	$\epsilon=0.3$	2,000	430	12.26	5.06
f=5.0	$\epsilon=0.3$	3,000	430	13.79	5.69
f=5.0	$\epsilon=0.3$	4,000	430	15.19	6.27
f=5.0	$\epsilon=0.3$	5,000	430	16.50	6.81
f=5.0	$\epsilon=0.3$	7,000	430	18.93	7.81

Camera Gaussian noises w/ offset subtraction

Figure 9: Camera Gaussian noise dependency with offset subtraction



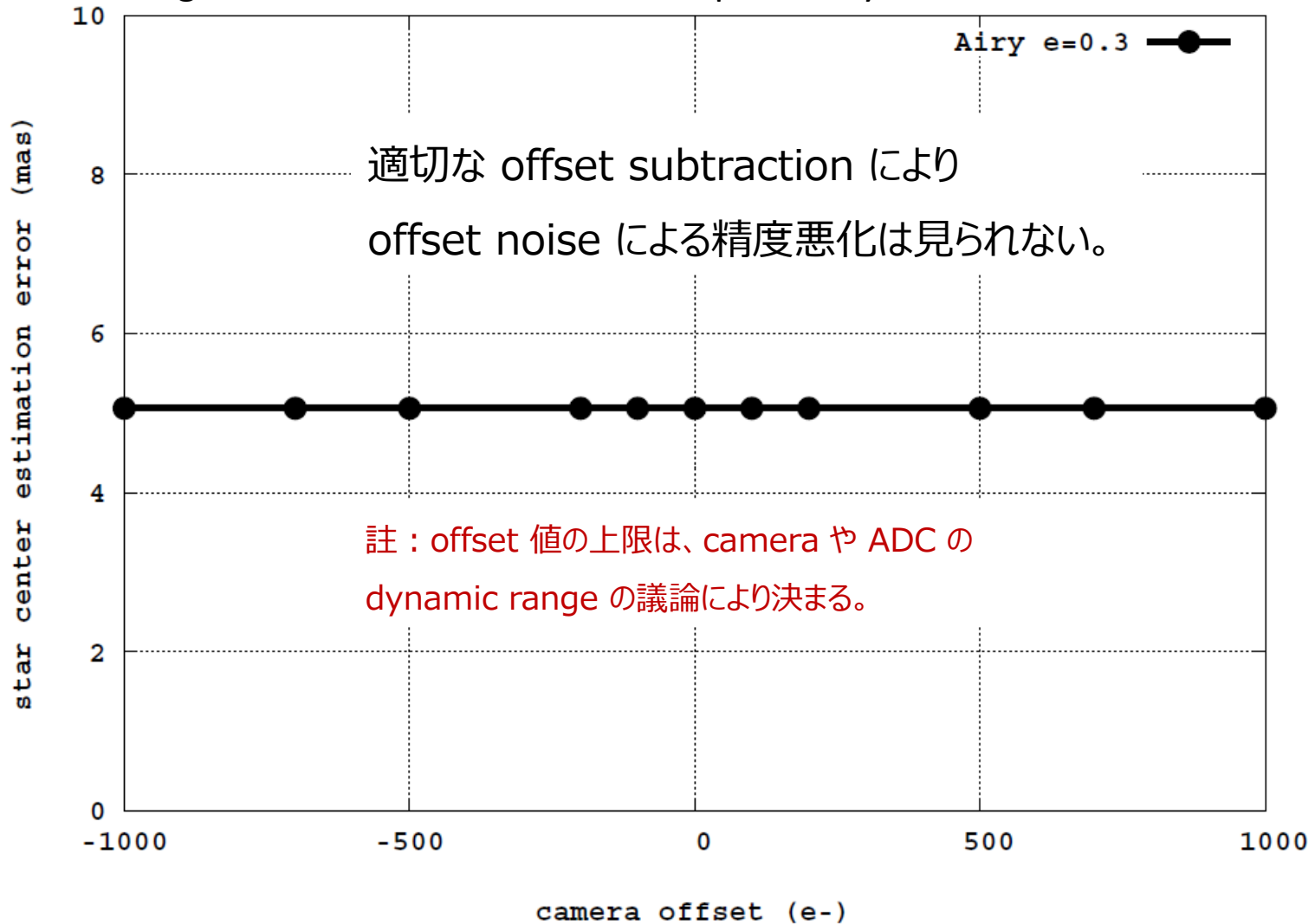
Camera offset w/ offset subtraction

Table 9: Camera offset noise dependency with offset subtraction

focal length	obscured ratio	c-noise (e⁻²)	c-offset (e-)	σ_x / \sqrt{N} x10⁻⁸ m	σ_a / \sqrt{N} (mas)
f=5.0	$\varepsilon=0.3$	2,000	-1000	12.27	5.06
f=5.0	$\varepsilon=0.3$	2,000	-700	12.27	5.06
f=5.0	$\varepsilon=0.3$	2,000	-500	12.27	5.06
f=5.0	$\varepsilon=0.3$	2,000	-200	12.27	5.06
f=5.0	$\varepsilon=0.3$	2,000	-100	12.27	5.06
f=5.0	$\varepsilon=0.3$	2,000	0	12.27	5.06
f=5.0	$\varepsilon=0.3$	2,000	+100	12.27	5.06
f=5.0	$\varepsilon=0.3$	2,000	+200	12.27	5.06
f=5.0	$\varepsilon=0.3$	2,000	+500	12.27	5.06
f=5.0	$\varepsilon=0.3$	2,000	+700	12.27	5.06
f=5.0	$\varepsilon=0.3$	2,000	+1000	12.26	5.06

Camera offset w/ offset subtraction

Figure 10: Camera offset noise dependency with offset subtraction



Teledyne H4RG-10 の性能

この表より、宇宙環境での稼働実績のある近赤外線 CMOS カメラ

Teledyne H4RG-10 は我々の要求スペックを満たしていることが分かる。

$$P_{\text{cgn}}^2 = e_{\text{ro}}^2 + (i_{\text{dark}} + \epsilon_{\text{camera}} p_{\text{stray}}) t_{\text{exposure}} \quad \text{camera gaussian noise}$$

$$P_{\text{con}} = (i_{\text{dark}} + \epsilon_{\text{camera}} i_{\text{stray}}) t_{\text{exposure}} \quad \text{camera offset noise}$$

Table 10: Teledyne H4RG-10 カメラの性能表

			Unit	t_{exposure} = 7.1	ϵ_{camera} = 0.7	Gaussian noise	Offset
readout noise	e_{ro}	30.0	e-			900	
dark noise	i_{dark}	57.0	e-/sec	405		405	405
stray light	p_{stray}	5.0	photons /sec	36	25	25	25
Camera Gaussian Noise	P_{cgn}^2		e ⁻²			1,330	
Camera Offset Noise	P_{con}		e-				430

Summary

星像中心決定精度 (mas)

Parameter	σ_α / \sqrt{N}	$N=N_{eff}$	focal length	obscured ratio	camera noise
原理的境界	2.26	32,000		e=0.0	
原理的境界	2.49	24,000		e=0.3	
推定方法 (改良重心法)	3.25	32,000	f=5.0	e=0.0	
中心遮光率	3.55	24,000	f=5.0	e=0.3	
ガウス性 カメラノイズ	5.06	24,000	f=5.0	e=0.3	2,000 e ⁻²

Summary Table

	Parameter	Value	Unit	
	Wavelength	1.4e-6	meter	
Telescope	Aperture	0.3	meter	
	Focal length	>4.8	meter	*
	Obscured ratio	<0.35		*
Camera	Pixel size	10.0e-6	meter	
	Window size	9 x 9	pixels	
	Effective number of electrons	>24,000	e-	
	Gaussian noise	<2,000	e ⁻²	*
	Offset noise	---	e-	*

Table ? : Fixed and interested parameters with restrictions

Wavelength dependency

Wavelength (um)	focal length	obscured ratio	c-noise (e ⁻²)	c-offset (e-)	S_x /sqrt(N) x10 ⁻⁸ m	S_a /sqrt(N) (mas)	%
1.1	f=5.0	e=0.3	2,000	430	8.52	3.52	70
1.2	f=5.0	e=0.3	2,000	430	9.54	3.93	78
1.3	f=5.0	e=0.3	2,000	430	10.85	4.48	89
1.4	f=5.0	e=0.3	2,000	430	12.27	5.06	100
1.5	f=5.0	e=0.3	2,000	430	13.72	5.66	112
1.6	f=5.0	e=0.3	2,000	430	15.03	6.20	123
1.7	f=5.0	e=0.3	2,000	430	16.26	6.71	133

$N_{ap}=36,500$

$N_{eff}=24,000$

Wavelength dependency

