

極低温デフォーマブルミラー の開発

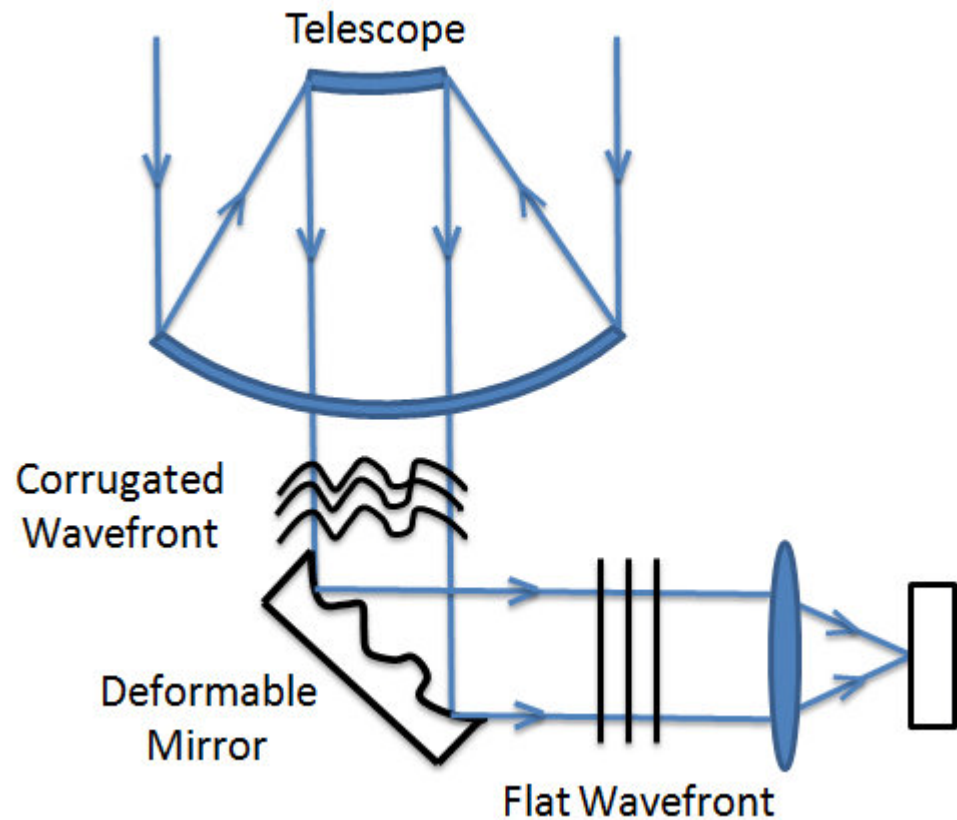
2012/02/23

天文台ワークショップ

塩谷圭吾、青野和也、小谷隆行、櫛香奈恵、片ざ宏一、
和田武彦、川田光伸、中川貴雄、松原英雄 (ISAS/JAXA)、
岡田則夫、福嶋さん、三ツ井さん (NAOJ/ATC)、
Boston Micromachining CO. 山室智康 (オプトクラフト)

イントロダクション

波面補償とは？ デフォーマブルミ ラーとは？



本申請でいう波面補償とは、観測装置内の小型の可変形鏡(デフォーマブルミラー: DM)によって望遠鏡の形状誤差に起因する波面誤差を補正し、結像性能を飛躍的に高めること。

DMによる波面補償の用途は多彩



ハッブル望遠鏡も当初はピンぼけ
行って直して来れたから良かったが...

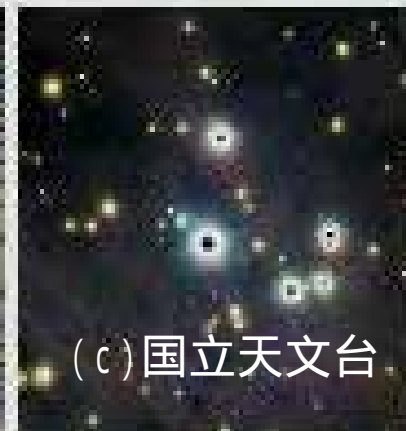
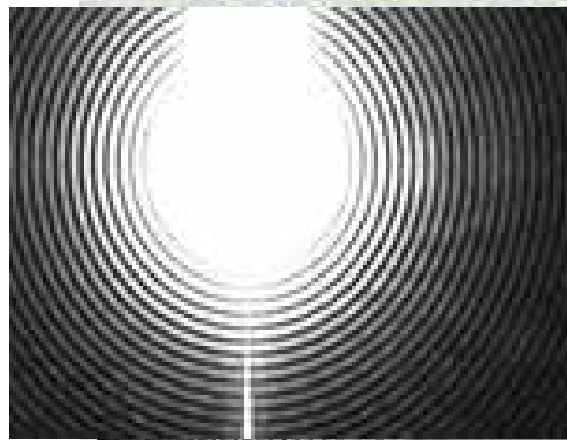
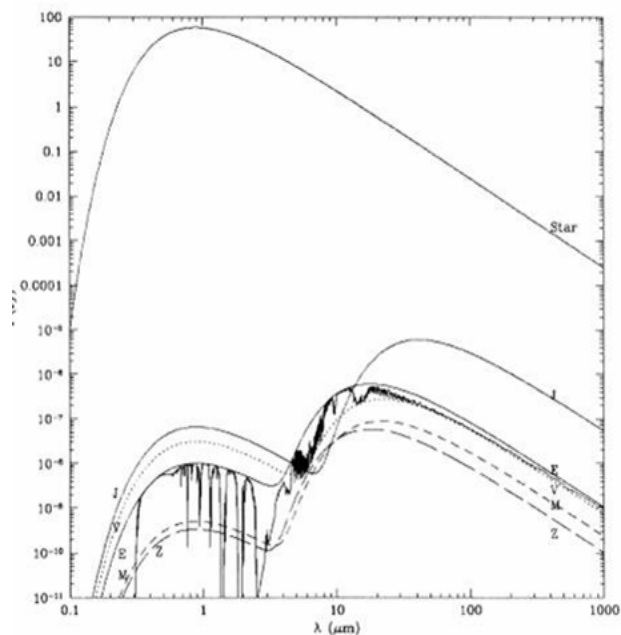


JWSTは主鏡で波面調整。
Is this always the best way?

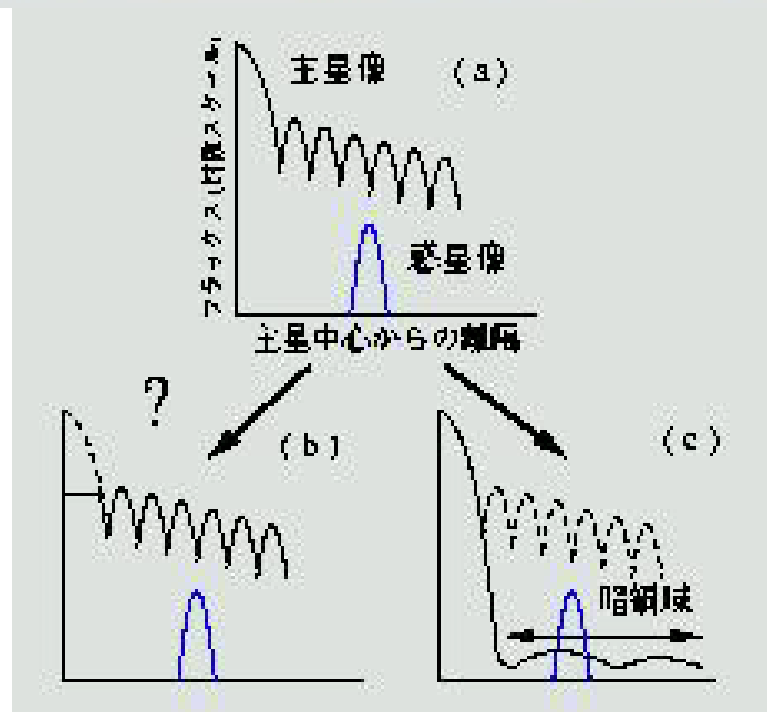
- 望遠鏡の結像性能を向上させる
- 同じ結像性能を、より安価に
- 同じコストで、より大口径の望遠鏡を
- 信頼性の向上
- 用途は多岐(汎用望遠鏡も、コロナグラフ用途にも)

重要な用途:

系外惑星観測のためのコロナグラフ



- 望遠鏡本体では非現実的なほどの波面精度を実現



なぜ冷却？

Table 1. Space telescopes for infrared astronomy, currently in orbit or planned for future missions.

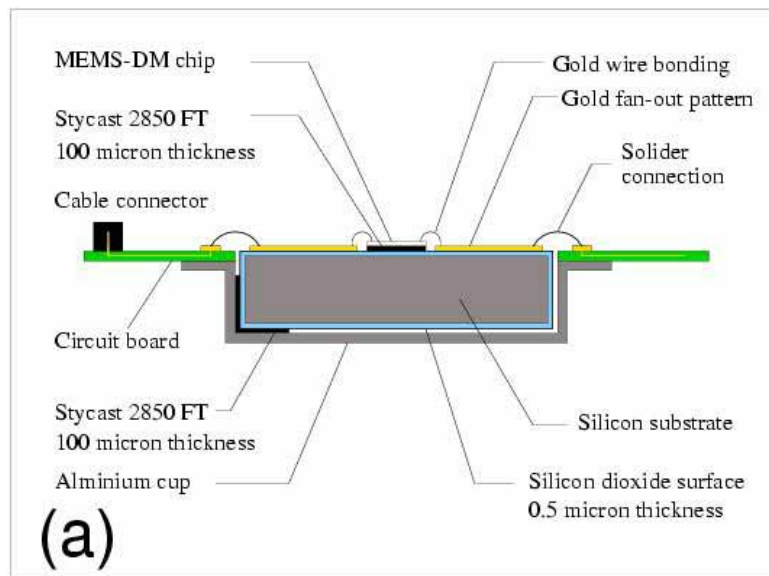
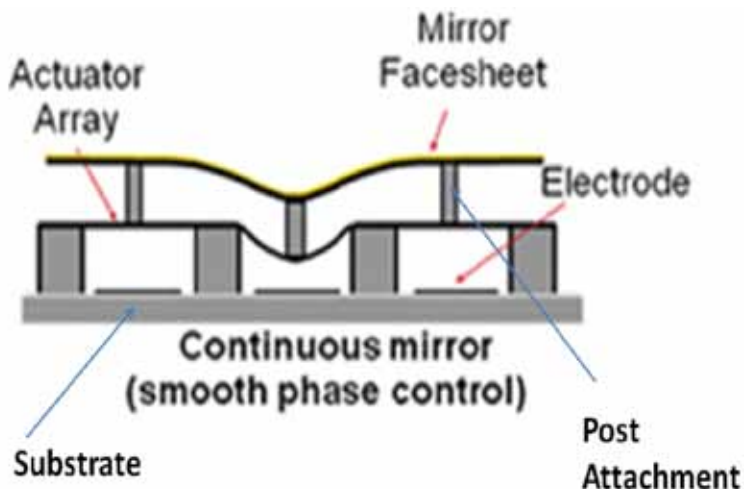
(1) Telescope	(2) Launch	(3) $D(\text{m})$	(4) $\lambda(\mu\text{m})$	(5) $T(\text{K})$
Spitzer Space Telescope	2003	0.85	3-180	~5.5
AKARI	2006	0.7	1.7-180	~6
Herschel Space Observatory	(2008)	3.5	60-670	~80
JWST [6]	(2013)	6.5	0.6-27	~50
SPICA	(2017)	3.5	5-200	~5

(2) Launch year for the Spitzer Space Telescope and AKARI, and the planned launch year for the others. (3) Entrance pupil diameter. (4) Core wavelength of observation. (5) Temperature of telescope before running out of cryogen.

- 赤外域に多くの重要なサイエンスターゲット
- 多くの赤外線宇宙望遠鏡は低温
望遠鏡設計思想を革新？
- 地上用も含めて、多くの赤外線観測装置は低温
装置内波面補償への道？

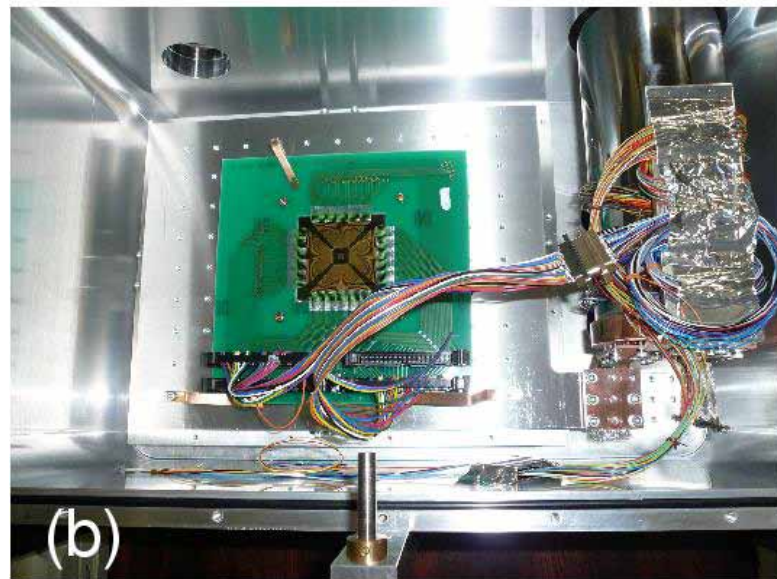
低温MEMS-DM の開発

32素子プロトタイプ

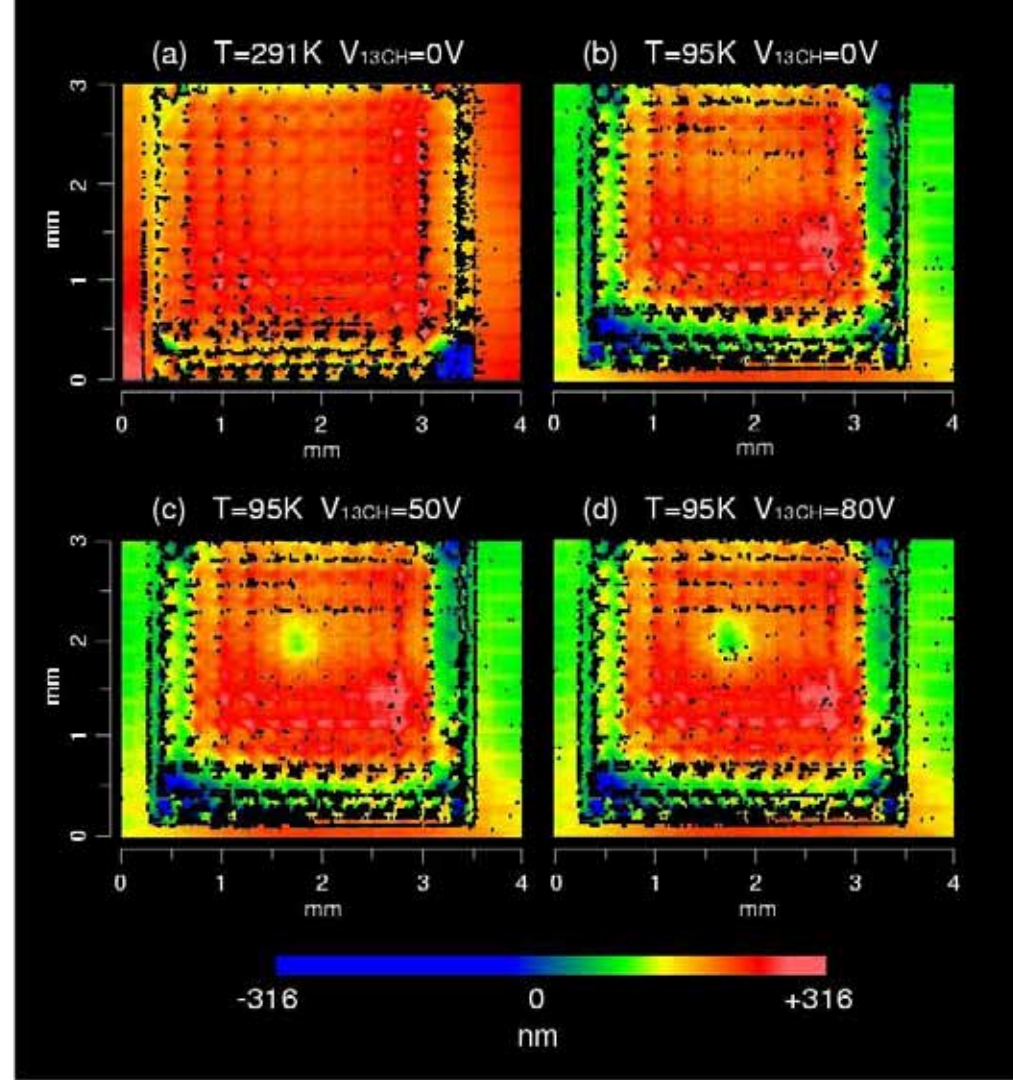
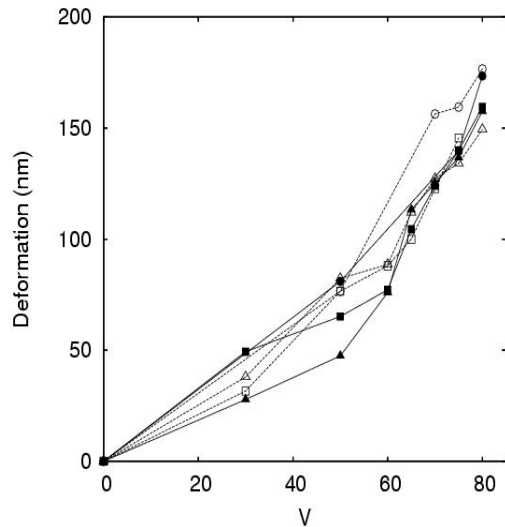


- MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)
- コンパクトに多素子を実現
- クーロン力で駆動: 低温対策に有望
- 低発熱

6x6-4素子プロトタイプを開発・試験

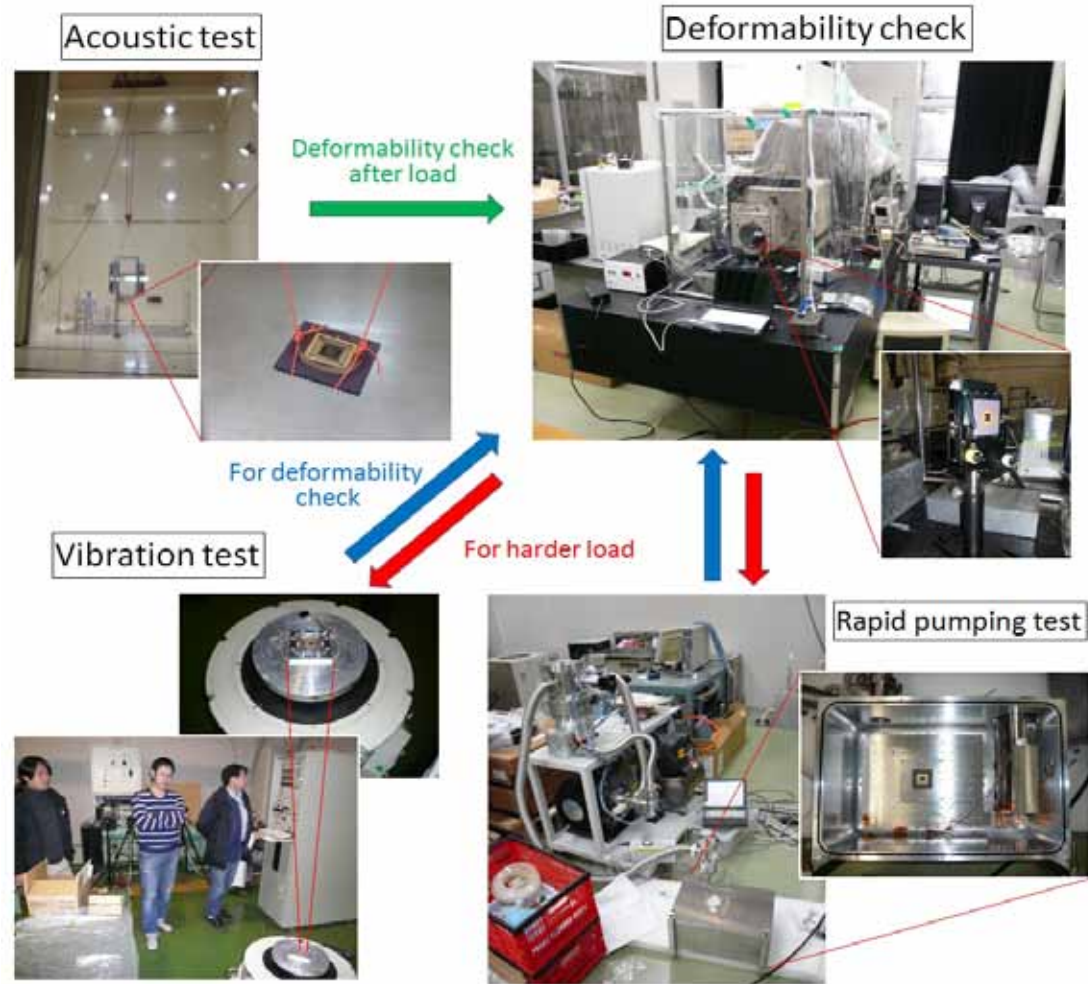
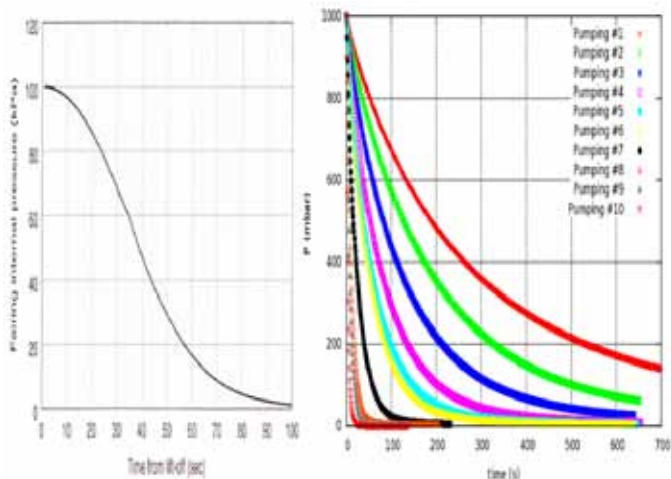


冷却動作試験 の結果



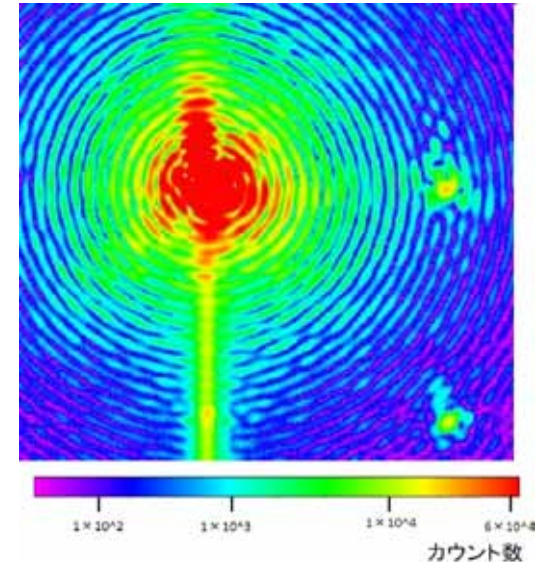
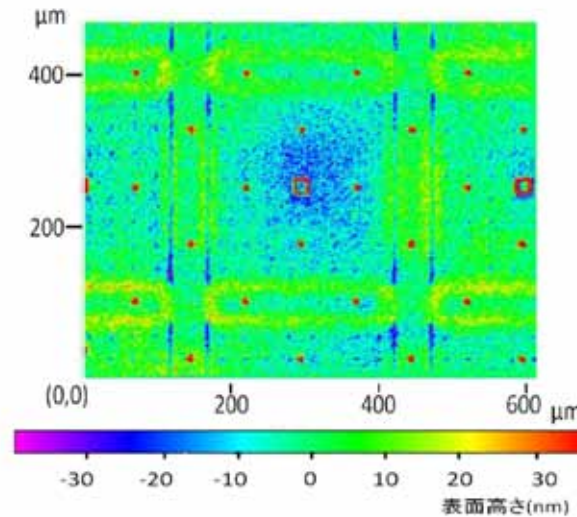
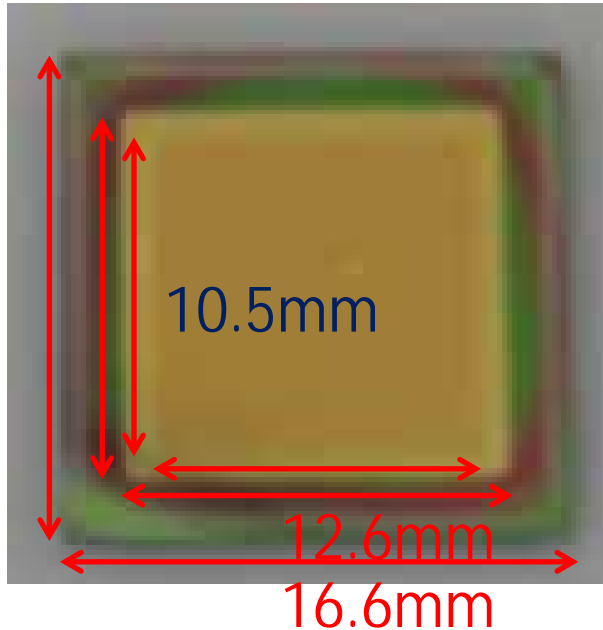
- 95K にて初の動作に成功
- 発熱: 1000素子換算で 1mW未満

打ち上げ耐性試験



- MEMS DM を利用
- H II-A ロケット相当以上の振動試験 (JAXA相模原)、音響試験 (JAXA筑波)、急速減圧試験 (JAXA 相模原) をクリア

1000素子 MEMS DM の開発

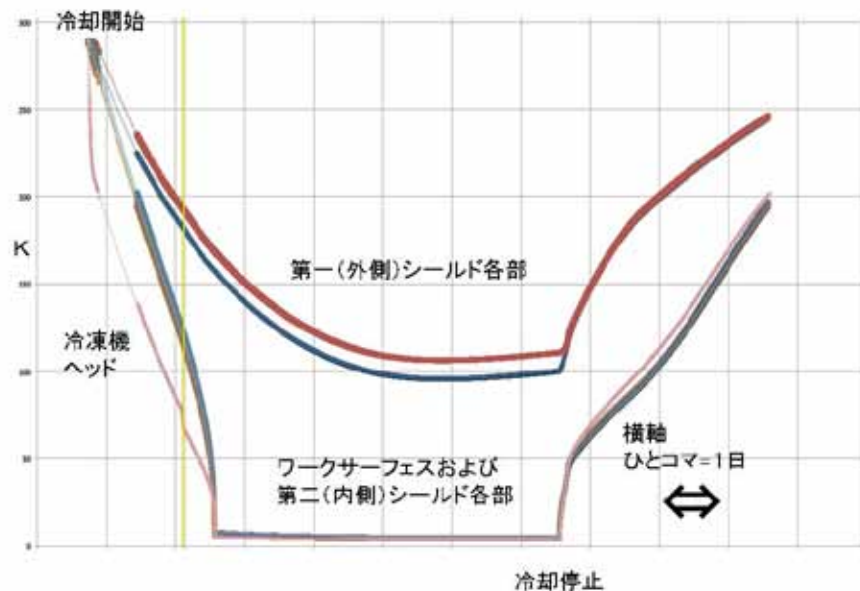


- 電気的不活性なサンプルで、表面微細構造を精査
- 低温用可動サンプルの制作が進行中(米国BMC社との共同開発)

機械式DM の開発

試験環境：
極低温大型赤外チャン
バーの開発

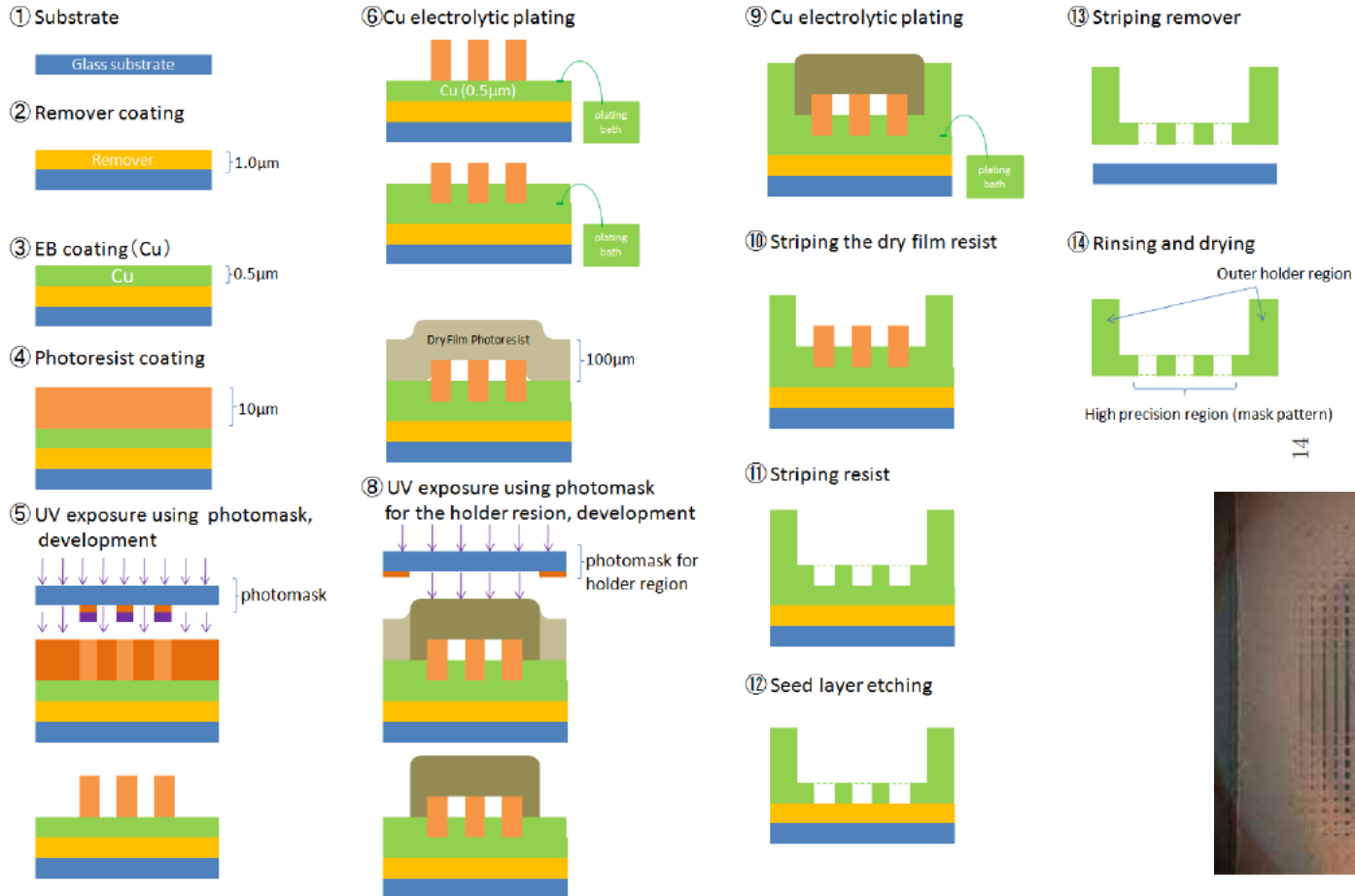
Prototype-testbed for Infrared Optics and Coronagraph (PINOCO)



- 機械式冷凍機2発: 電力供給だけで5 Kに到達
- 真空・冷却試験に成功
- 大型WS: ~1m x ~1m x ~30cm (0.5m x 1m なら2セット収納)
- 光学ポートx1 (干渉計ステージ)、エレキポート他数
- 金属鏡軸外し光学系の制作が進行中、コロナグラフマスク準備OK
- 利用希望についてはご相談 (enya@ir.isas.jaxa.jp)

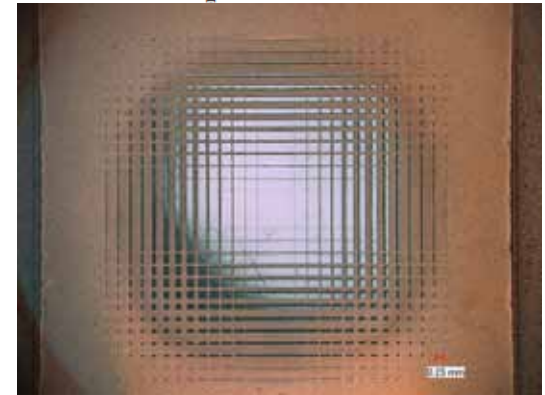
新しいバイナリ瞳マスク：
製造・デザイン

自立型マスクの制作



process of the free-standing mask.

14



- 複雑な製法だが、確立。基盤上に構築、剥離がポイント
- 7桁のコントラストを実証 (櫛の発表を参照)

系統的マスク制作実験

ガラス基板上

Ge基板上

Si基板上

Cu 自立型

Ni自立型



新しいデザインへ： 瞳遮蔽の有害性

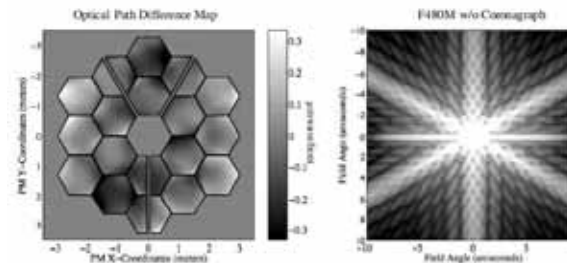
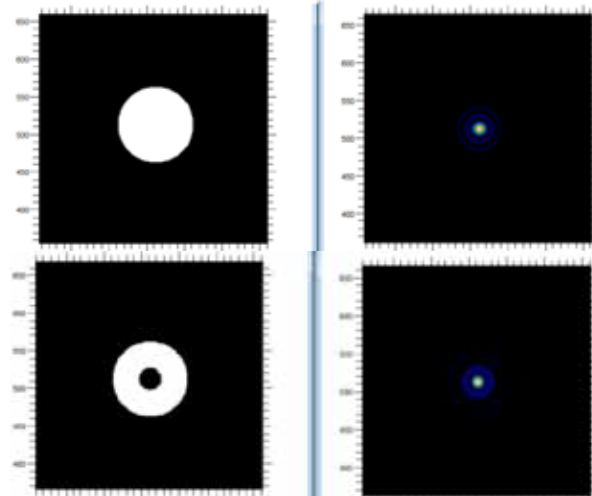
ÿ 中心遮蔽

- IWAが悪化

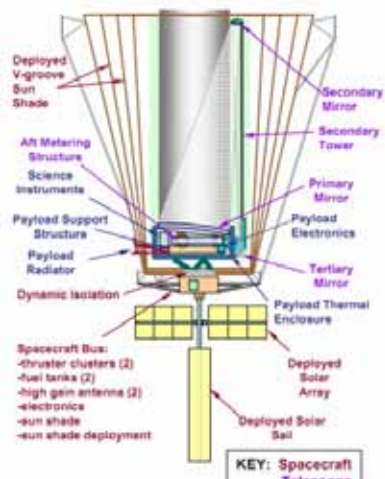
ÿ 副鏡支持機構、主鏡継ぎ目など

- 主星像の尾っぽ (Diffraction Tail: DT) が発生

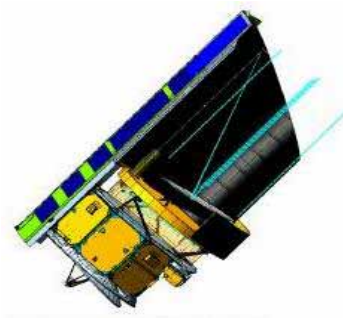
ÿ そのためコロナグラフ専用衛星の望遠鏡で提案されているのは軸外シタイプ



Green et al.(2006)



TPF



PECO



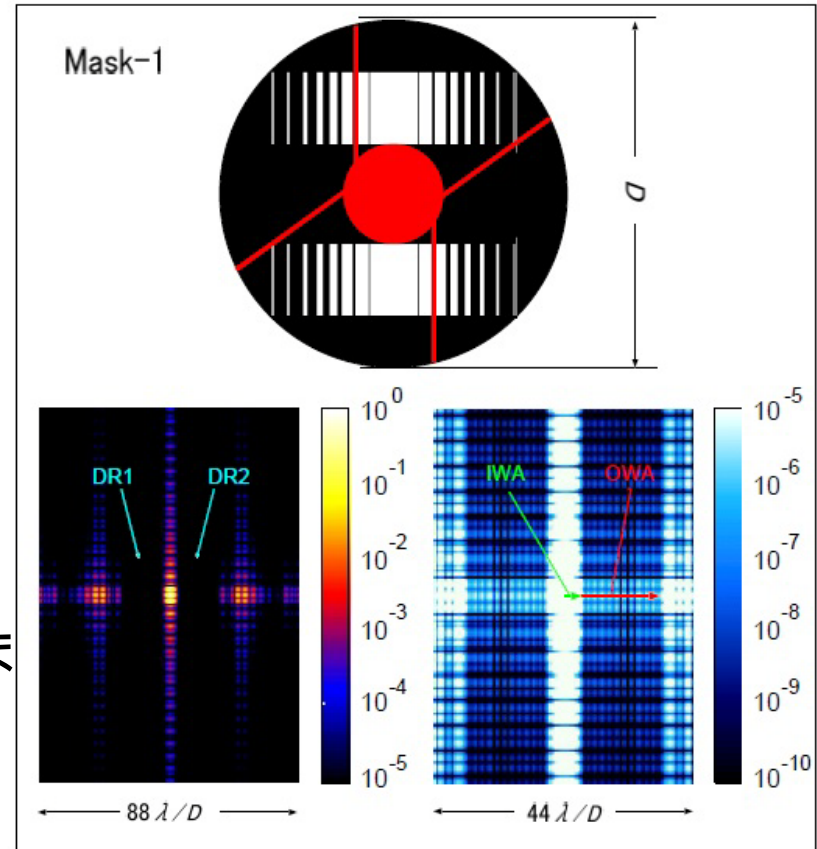
SEE-COAST



JTPF

多重1次元バーコード マスクのコンセプト

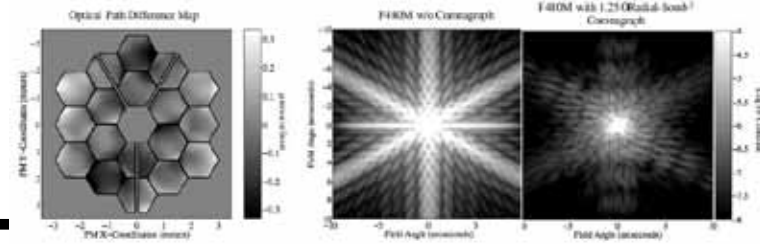
- すばる型の瞳を例として示す
- 2重のバーコード型マスクによる1Dコロナグラフ
- ご利益
 - 瞳遮蔽を skip over できる
→ small IWA
 - DTは2方向のみ
→ large discovery angle
 - バイナリ瞳マスクの長所はそのまま
- 暗領域の暗さは一様でない



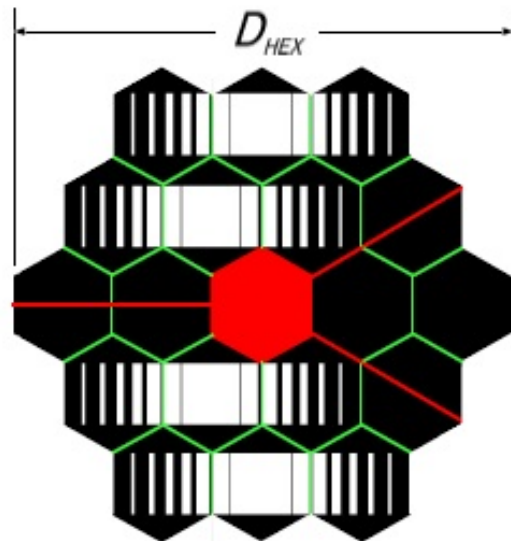
IWA=3.0λ/D
OWA=16λ/D
C₀=5.0
Throughput=24%

Fig. 1. Top: double barcode masks(white area) applied to the pupil of a telescope with mirror(corresponding to black circle) with obscuration(red area). Transmissivity of the areas(black and white) is 100%respectively. Bottom: PSF derived from simulation using

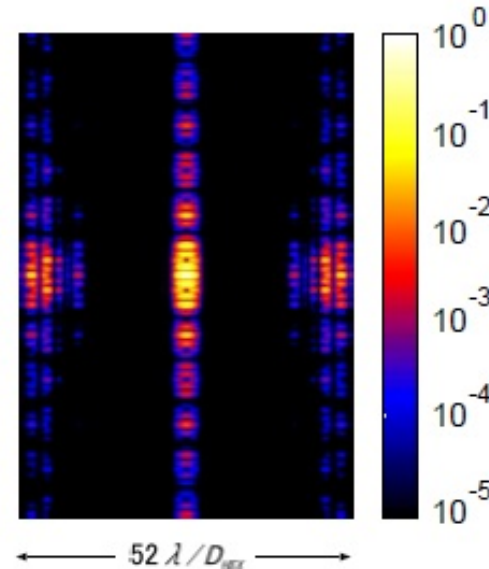
JWST型瞳への適用例



Mask-2



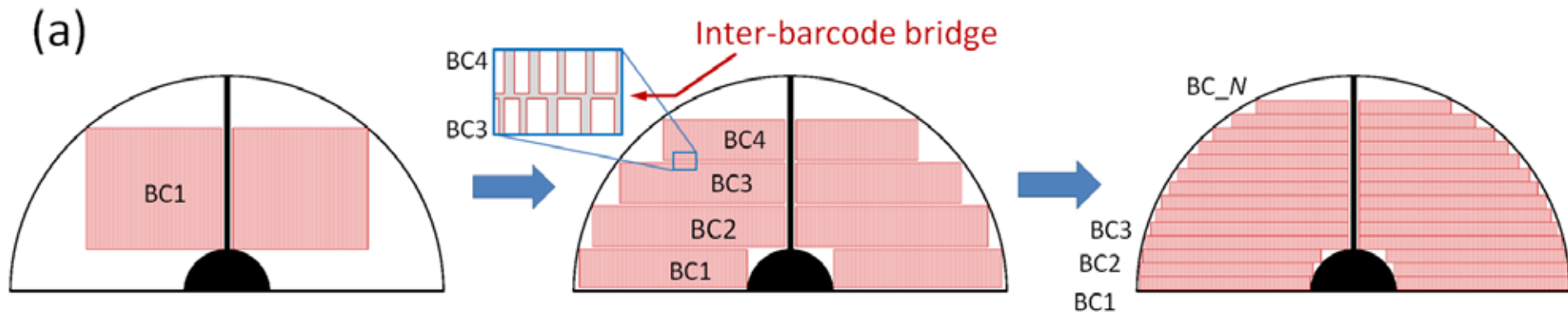
参考: Green et al.(2006)



- 4重バーコードマスク
 - 個々のバーコードは段違いになっていても良い
- DTは8本から2本にまで低減

What's new? (1)

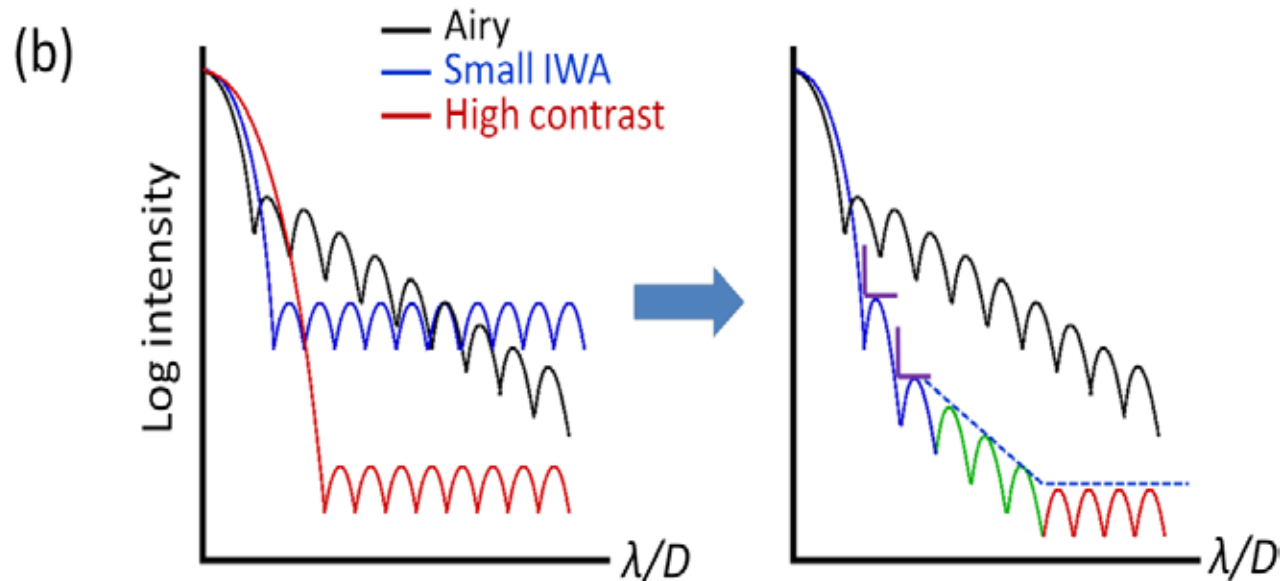
Integral barcode mask



- Optimization of each barcodes is possible independently
 - à Higher throughput
- Giving arbitral "inter-barcode bridge" is essentially possible
- All holes are rectangle. No acute angle corner
 - à good for manufacture of free standing mask

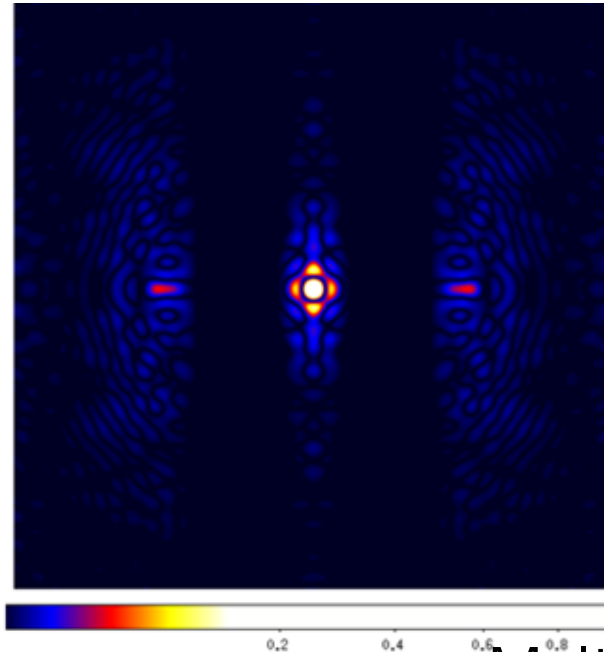
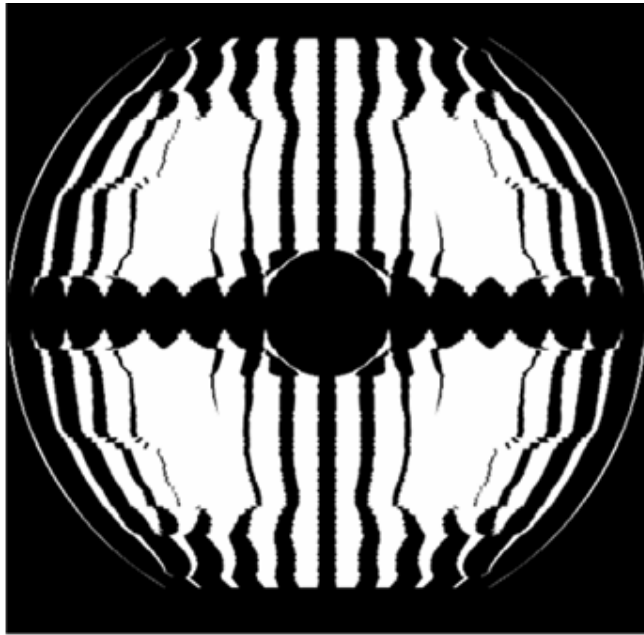
What's new? (2)

Generalized darkness constraints

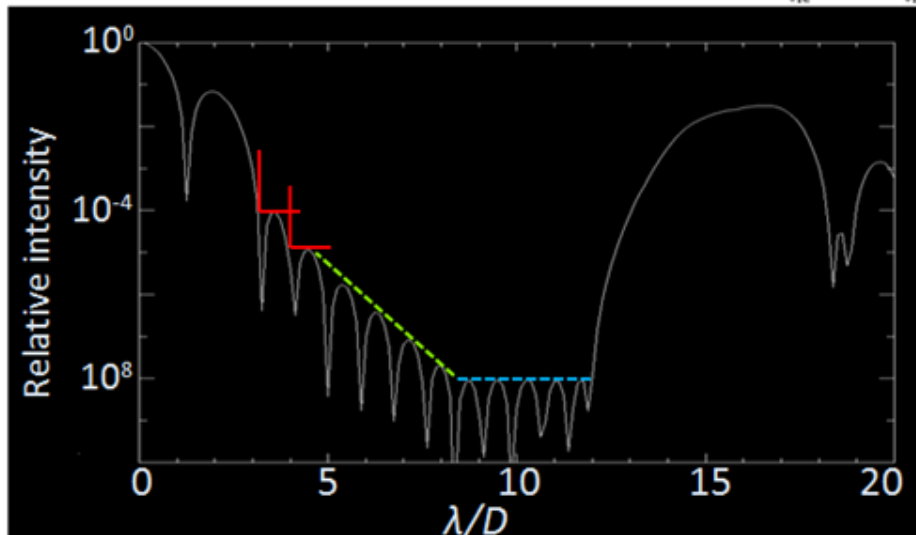


- IWA, OWA, Contrast, ... such parameters are in trade-off relation
- Especially trade-off between IWA and Contrast “at close area to IWA” is serious
- Old: Flat constraint of contrast \rightarrow New: More flexible constraint

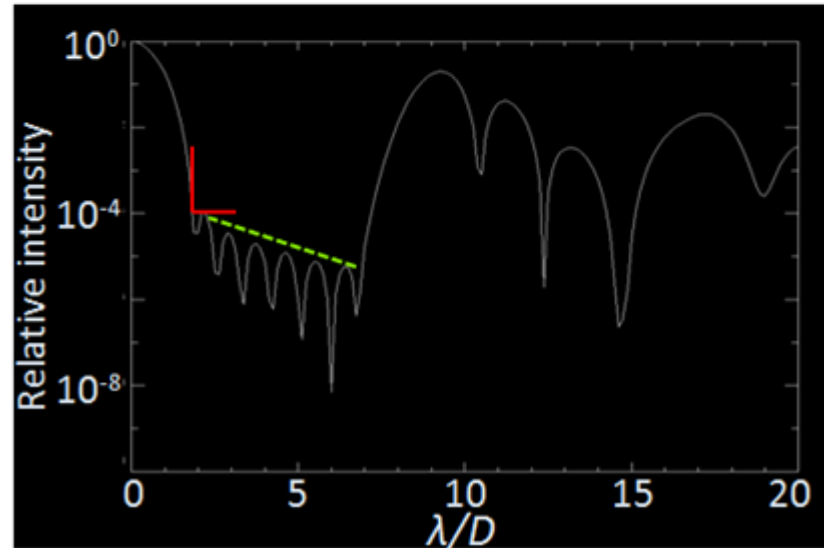
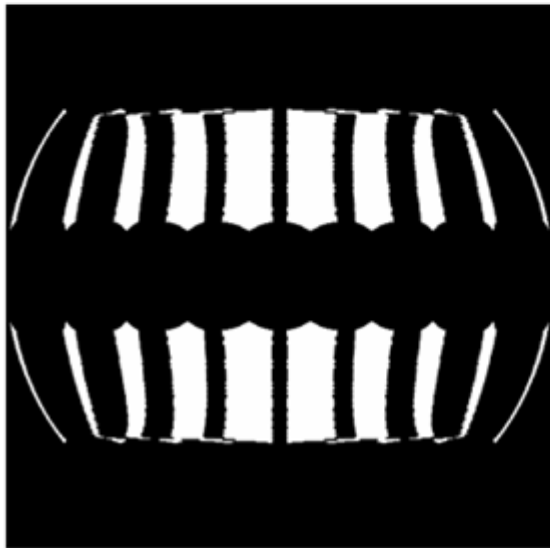
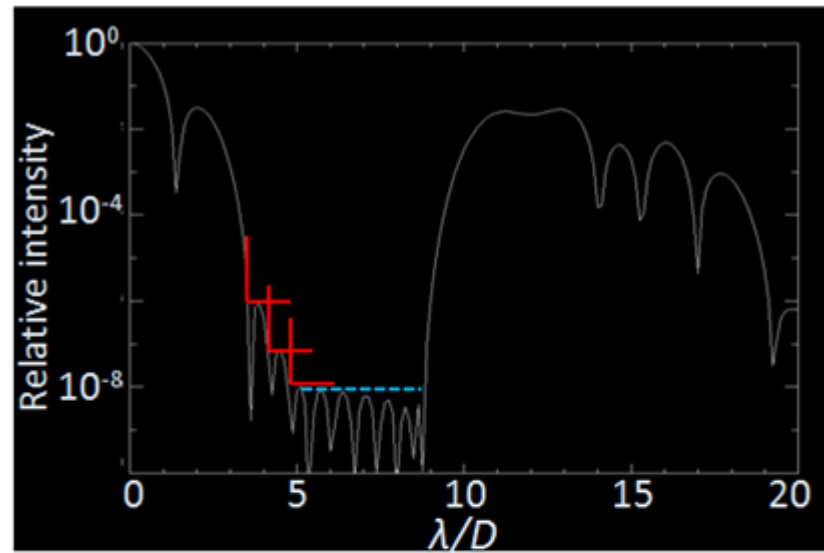
Trial design: This is new!



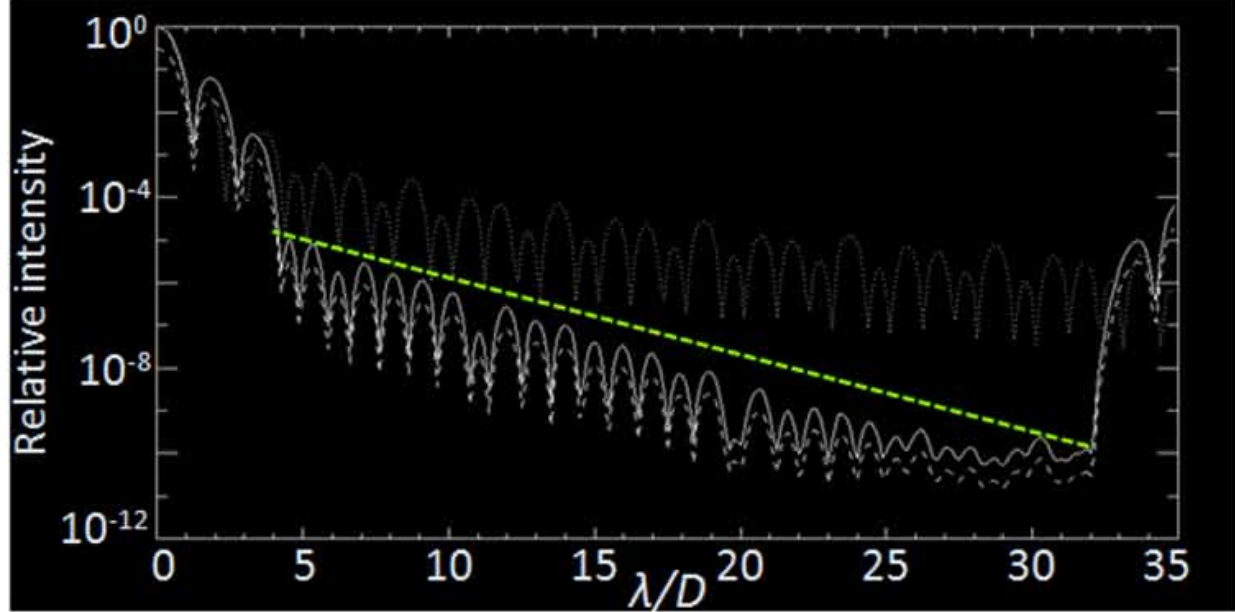
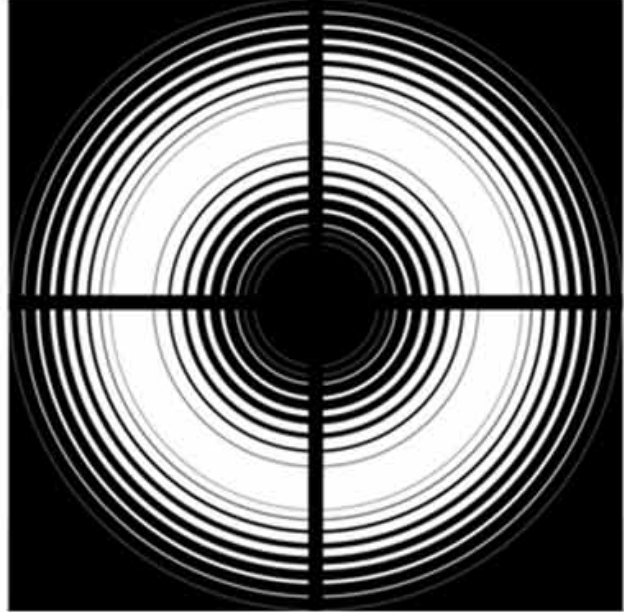
Simple barcode mask:
Kasdin et al 2005
LOQO software :
(Vanderbei 1999) was
used for all solutions
in this talk



- Multi-IWA
 - 10^{-4} @ $3.2\lambda/D$
 - 10^{-5} @ $3.8\lambda/D$
- Slope constraint
- Flat constraint
 - 10^{-8} @ $8.5-12\lambda/D$
- $N=512$ over pupil, $Th=51\%$



- Top: High contrast design (to reach 10^{-8})
- Bottom: Small IWA design (IWA=1.9)



- Ring mask for wide field survey
 - 10^{-5} @ $4\lambda/D$, 10^{-10} @ $32\lambda/D$, Th=50%
- Optimization
 - with the central obscuration using slope darkness constraints.
 - Support structures are added later
- Number of DT is 4. Complementary to 1D coronagraph masks.
- Requirement of high contrast at outer area of PSF is really not demanding.
- Spider structures work as “inter-ring bridge”
- All designs presented here are example. Trade-off study considering science and manufacturing are needed, finally.

まとめ

- 波面誤差を補償する小型のデフォーマブルミラーを開発している。
 - 望遠鏡開発思想の革新?
 - 装置内AO?
- 極低温デフォーマブルミラー (Low-temperature Deformable Mirror: **LODEM**) の開発
 - MEMS 32x32 プロトタイプ: 95Kでの実証試験に成功
 - MEMS 打ち上げ耐性試験: 振動、音響、急速減圧試験に成功
 - MEMS 1000素子5Kモデル: 制作進行中
 - 機械式 DM: NAOJ/ATC との共同開発が進行中
- 試験環境 PINOCO を開発、真空・冷却試験に成功