

SEIT(Second Earth Imager for TMT)

実現に向けた要素技術の開発

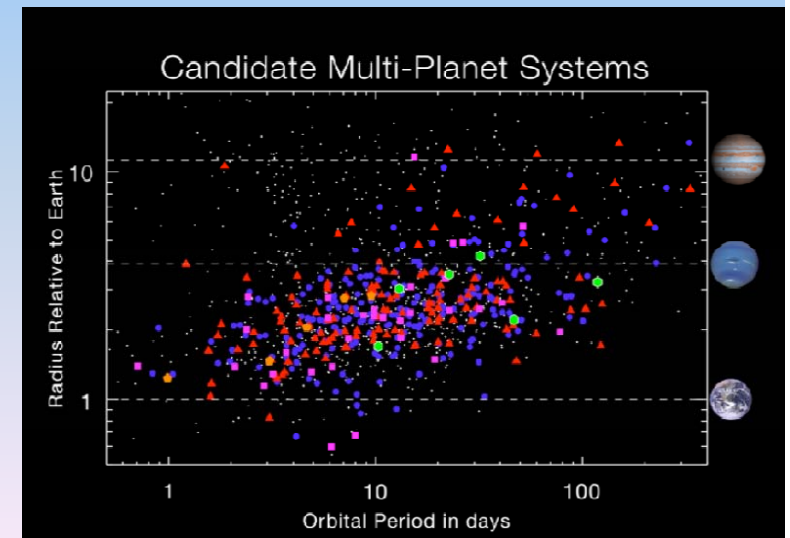
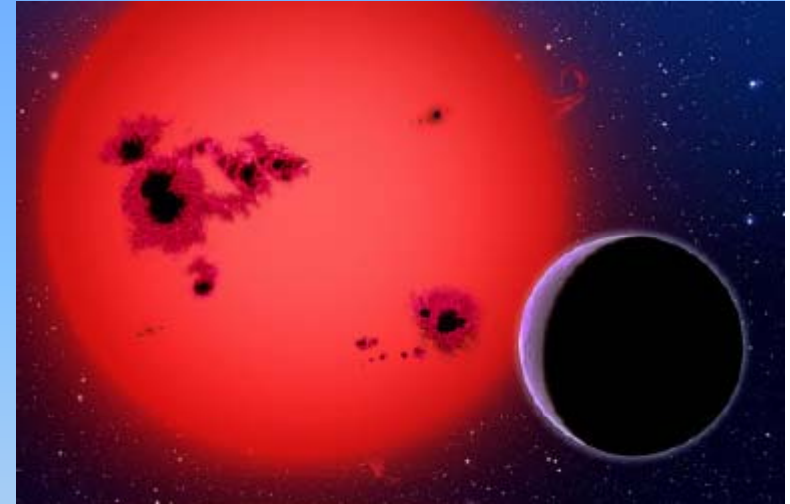
～Null型コロナグラフ+干渉計撮像法について～



小谷隆行 (ISAS/JAXA)、松尾太郎 (京大)、村上尚史 (北大)、田村元秀 (NAOJ)

SEIT (Second Earth Imager)

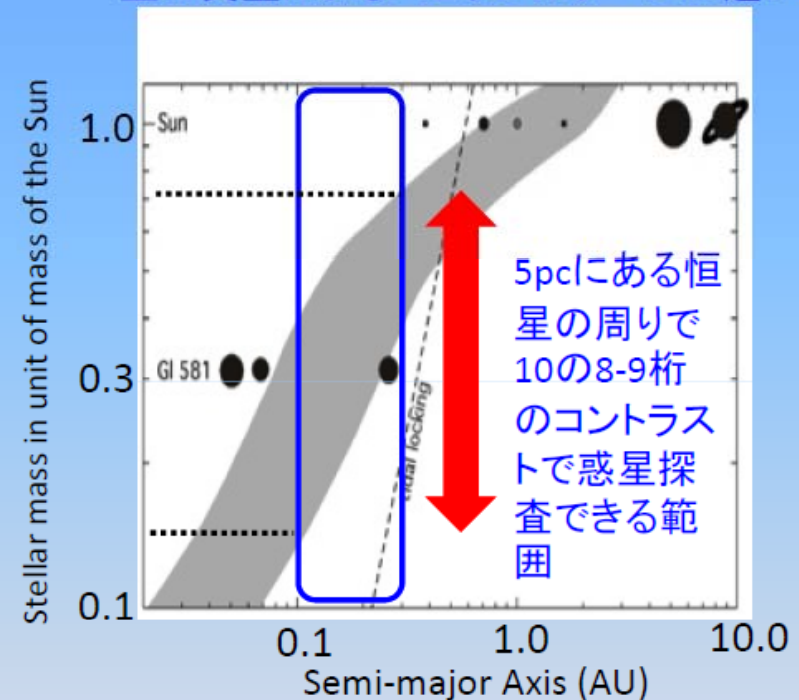
- 背景: Keplerにより、既に100個近くの地球型惑星候補が発見されている(いくつかはおそらくハビタブルゾーンに存在)
- 目的: **K,M型星のハビタブルゾーンに存在する地球型惑星の直接撮像・分光**
- 従来手法では検出不可能⇒全く新しい観測手法を考案
- TMT第二期観測装置として提案中
- 日本TMTオフィスに“SEIT白書”を提出(松尾・小谷・村上・田村・馬場, 2011)



TMT/SEITで狙う惑星

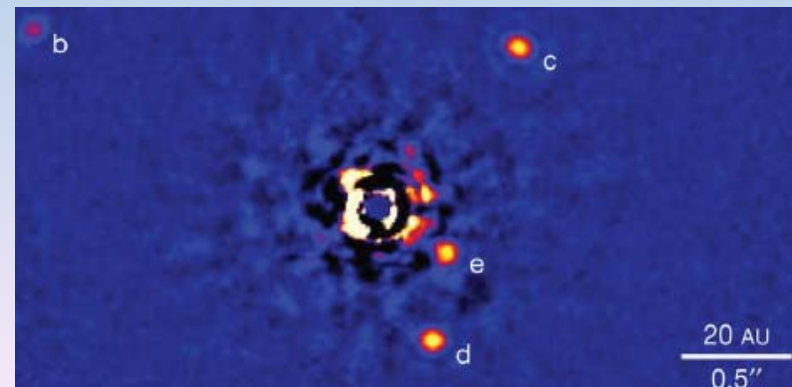
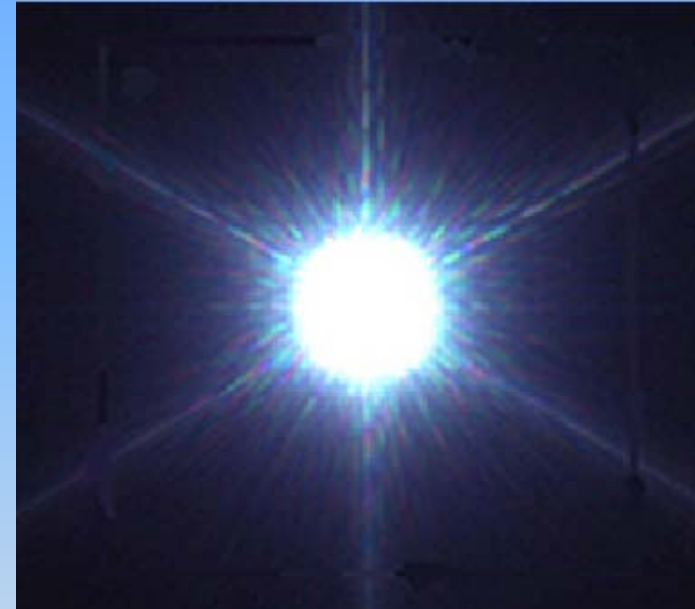
- ・ **ハビタブルゾーンにある地球型惑星の検出** ⇒ 近傍のK, M型星が最適
- ・ 近傍にターゲット星が豊富 (>100)
- ・ ハビタブルゾーンが主星に近い (0.1-0.3AU)
- ・ 惑星は主星からの反射光により輝くので、主星に近づくほど明るい
- ・ 内側の惑星ほど、感度とコントラストの面で検出が有利

星の質量によるハビタブルゾーンの違い



SEITの要求仕様

- 10pcの主星周りでの「1」地球質量の惑星検出には、
「0".01で8桁コントラスト@J-band」が必要
- これまでに提案されている装置に比べて、
より主星近傍を高コントラストで見ることが
できる装置が必要
- 「高い角分解能観測が得意な干渉計イ
メージング」と、「主星の光を弱めるナル干
渉計」を組み合わせた新手法を提案



SEIT コンセプト

From TMT

①ナル干渉計
(SPLINE)

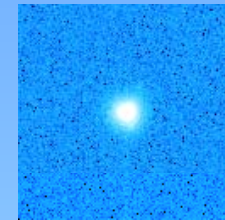


②干渉計
イメージング
(Pupil Remapping)



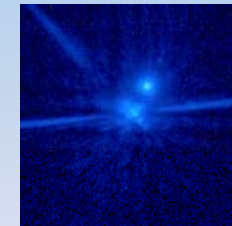
②波面センシング

干渉計を用いた波面センシングにより、**波面乱れを高精度に測定**



③像再生

②での波面情報を用いて、元の**天体像を高コントラストで復元(5桁)**

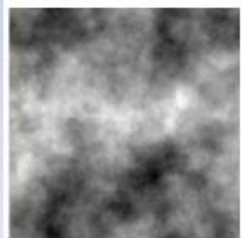
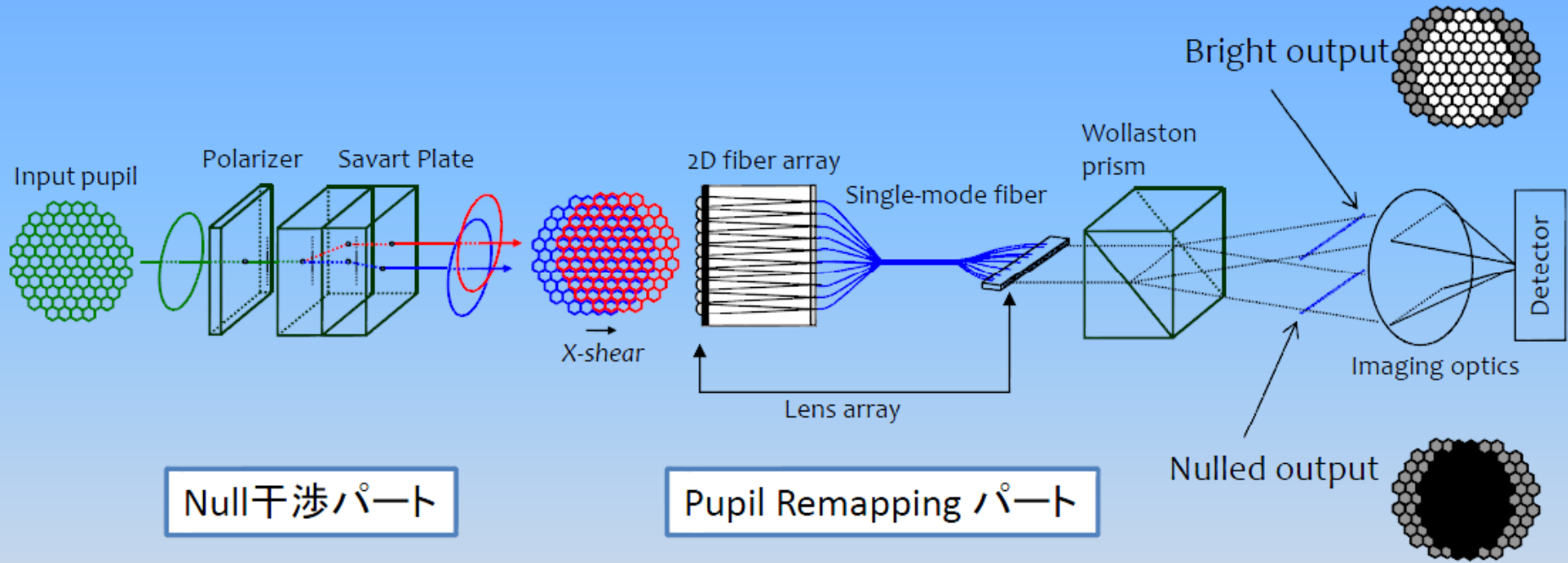


①主星の光を弱める

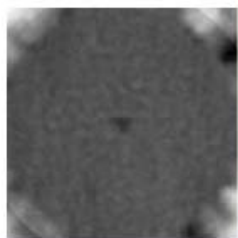
打ち消し合う干渉の効果を用いて、主星の光を**3桁**弱める

Null干渉計3桁 + 干渉計撮像5桁 = 8桁コントラスト

SEIT コンセプト



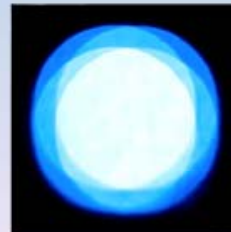
Atmospheric
Phase Screen



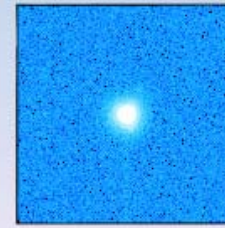
Phase screen
corrected
by PFI AO



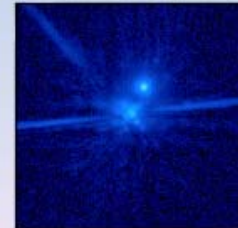
Dark interference
light (E1-E2)



Bright interference
light (E1+E2)



Reference
(To measure WF)



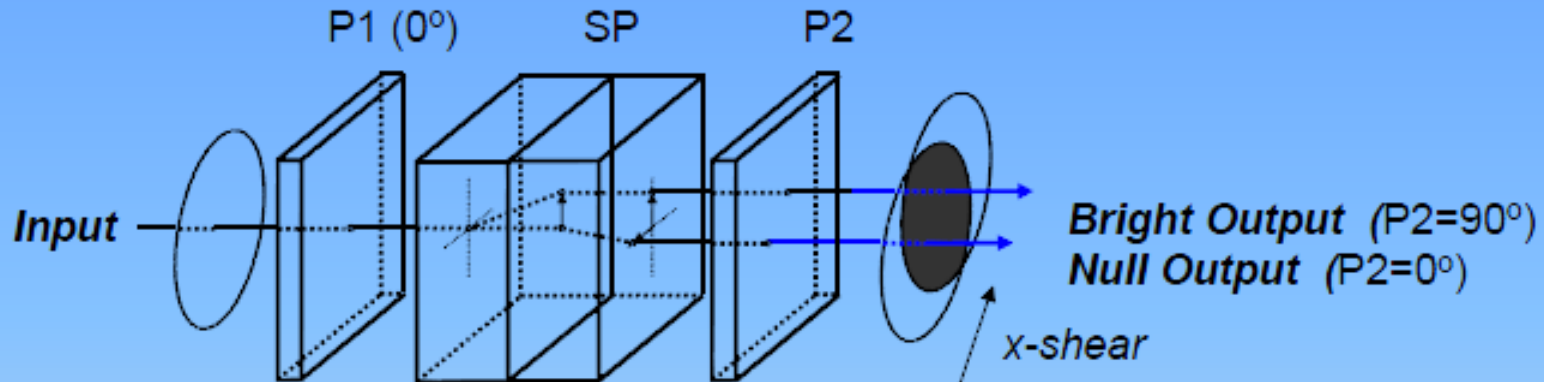
Science
(To reconstruct
source on sky)

SPLINE

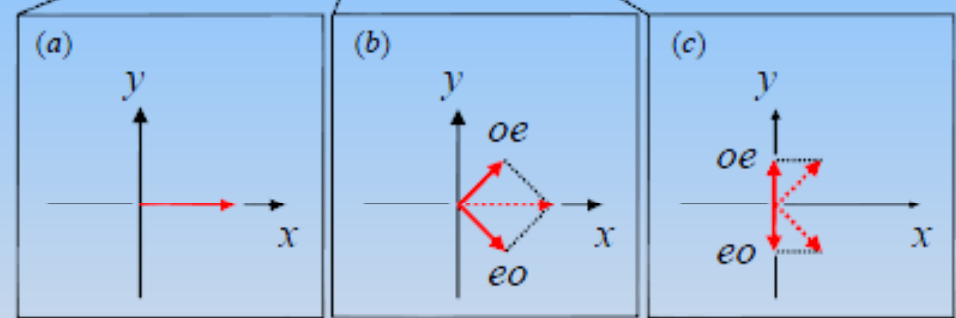
～光の干渉により恒星の光を弱める
サバール板を用いたシェアリングナル干渉計～

SPLINE ~サバール板を用いたシェアリング干渉計~

- ・恒星の光を2つに振幅分離、相対的な位相差 π を与えて打ち消し合う干渉を起こす
- ・Off-axisの惑星光は強めあう干渉を起こす

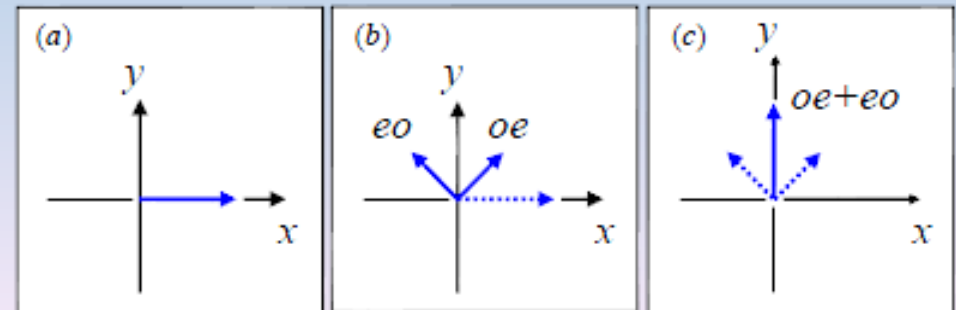


各ステップにおける
偏光状態の変化
恒星光
@central null



oe, eo光線の
偏光ベクトルの和が0
→ ナル干渉
(アクロマティック)

惑星光
@bright fringe

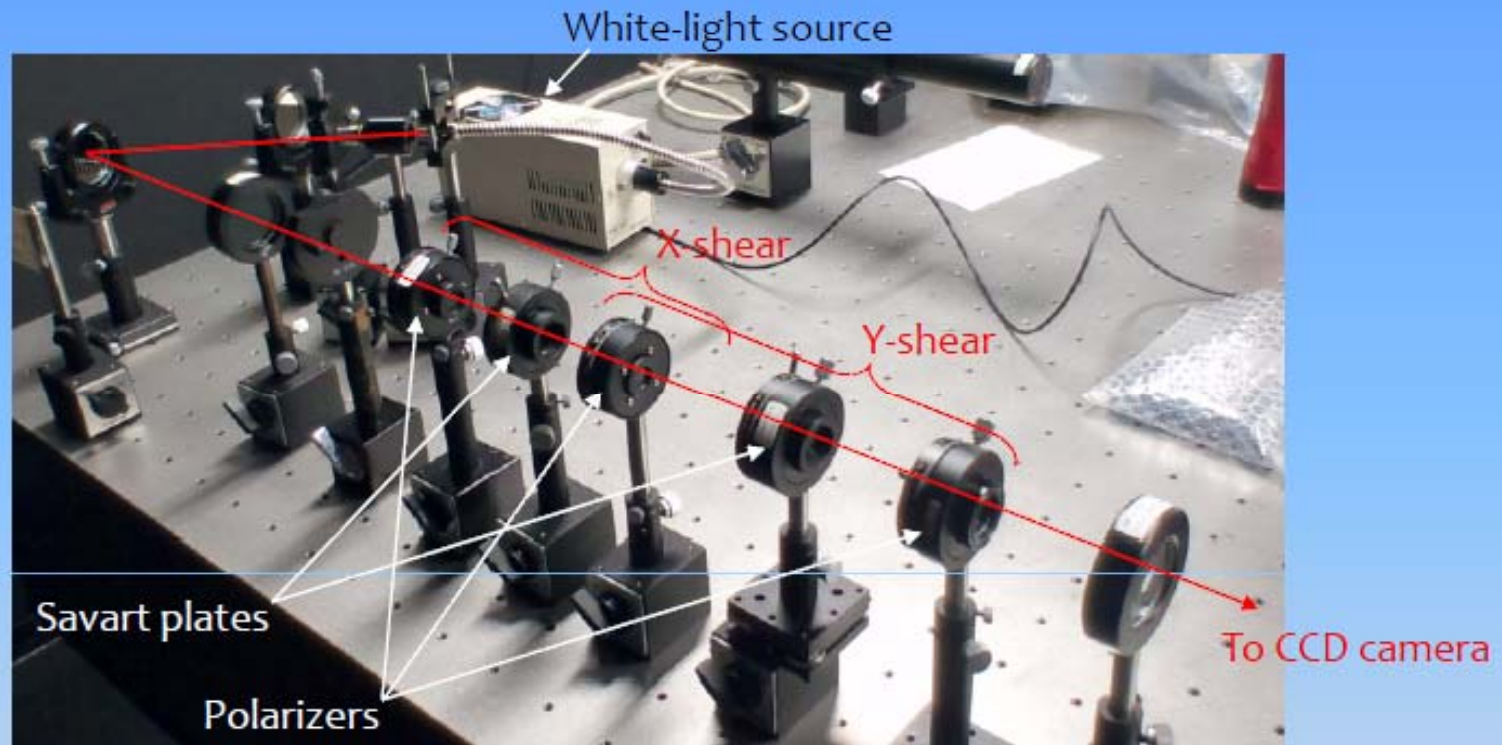


oe, eo光線の
偏光ベクトルの和が
入射ベクトルと同じ長さ
→ 強度損失なし
(P1での損失のみ)

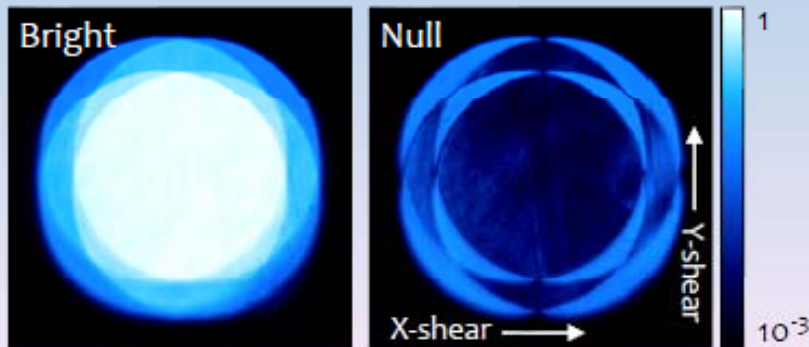
- ・可動部がないため非常に安定
- ・ほぼアクロマティック

Laboratory demonstration of SPLINE

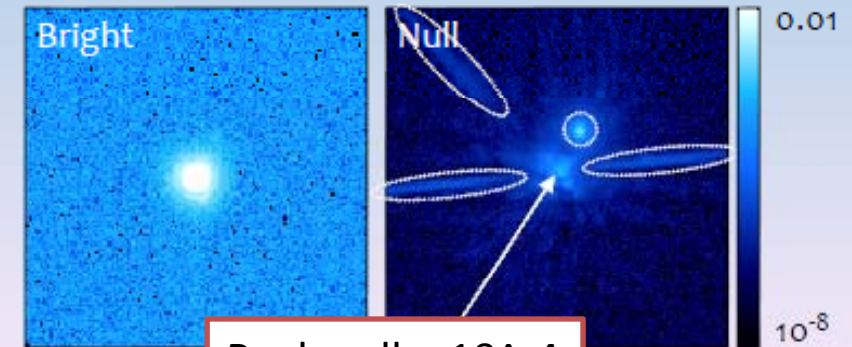
N. Murakami, Y. Konno, N. Baba et al., in prep. (2011)



@Pupil plane



@Image plane



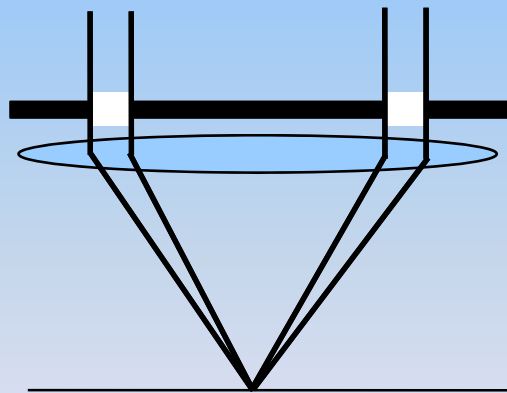
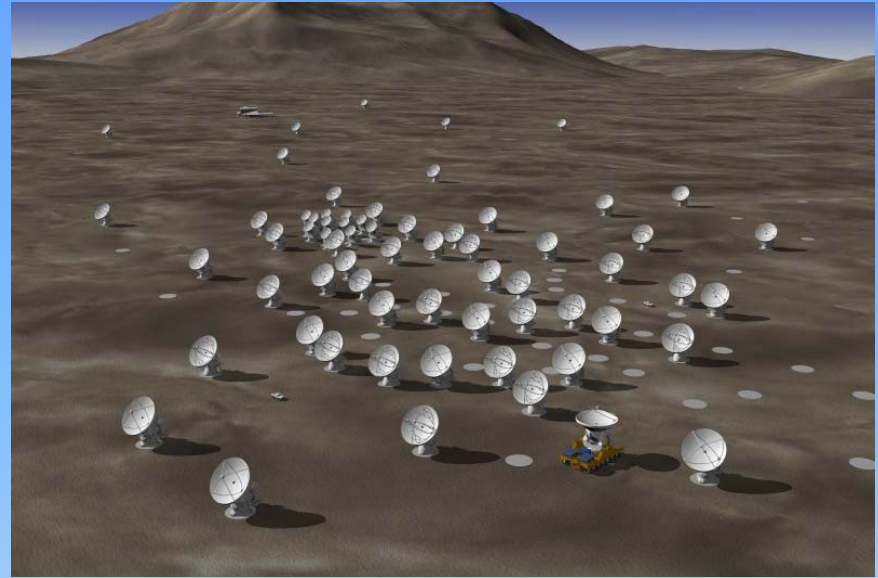
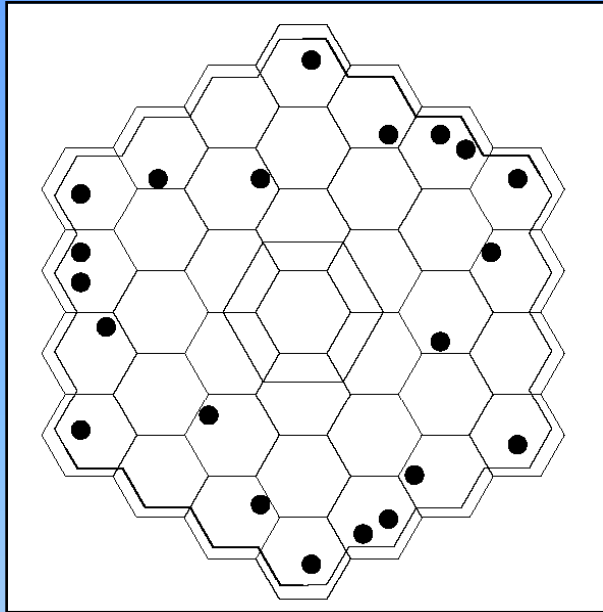
○: Ghosts

(Bandwidth > 30% @ $\lambda_0 = 600\text{nm}$)

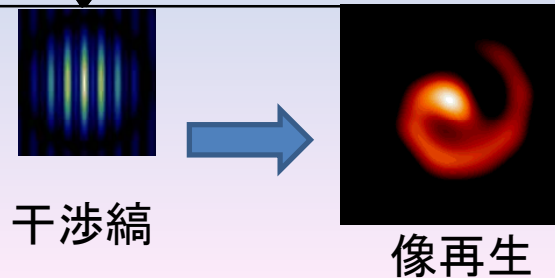
Pupil Remapping

波面センシング + 高コントラスト干渉計イメージング

瞳再配置 (Pupil Remapping) とは？



- 干渉計撮像技術を用いた高コントラスト撮像方法
- 天体のVisibilityを測定し、元の像を再生
- 高角分解能観測に優れる
= 小さなInner Working Angle ($\sim \lambda/D$)

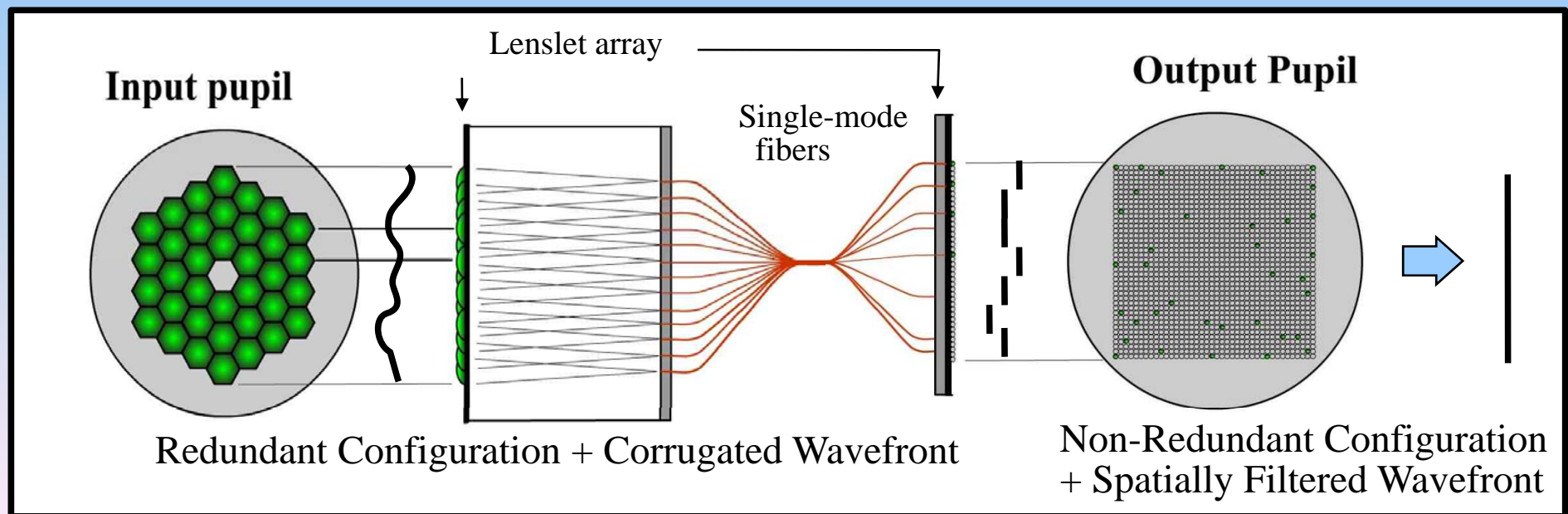


瞳再配置 (Pupil Remapping)とは？

■ シングルモード光ファイバーを利用した瞳再配置

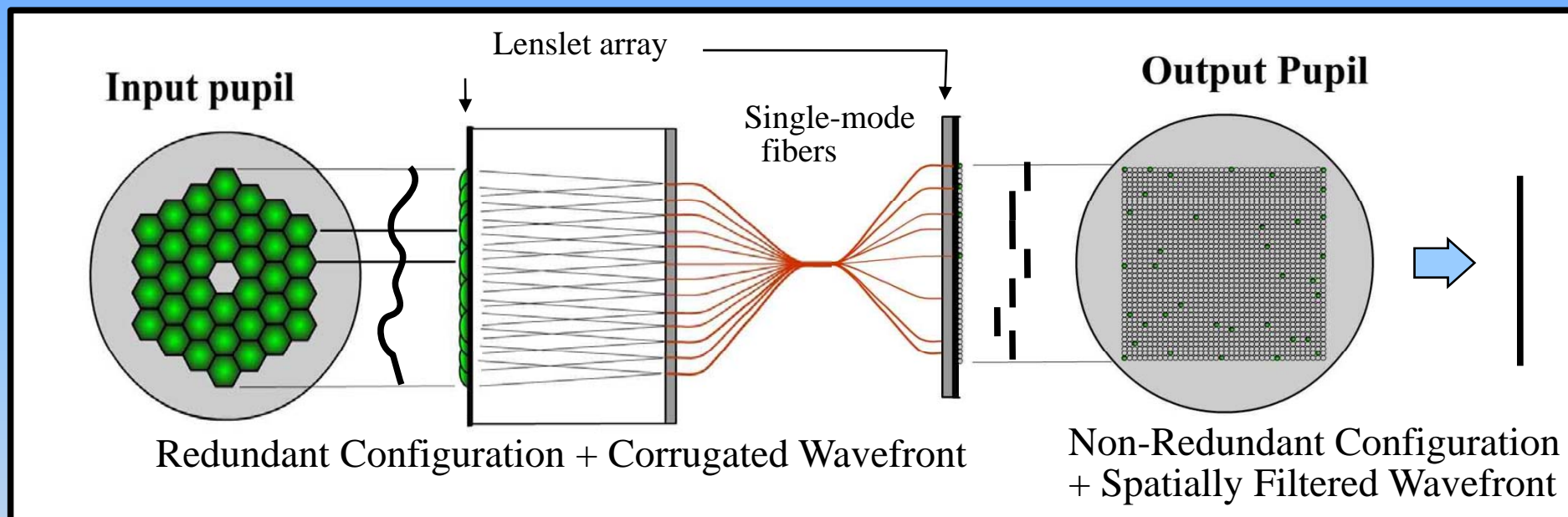
■ 瞳再配置により

- 望遠鏡瞳を複数に分割して、それぞれを干渉計用の望遠鏡として用いる
- 全開口を利用可能⇒高感度＋基線数の飛躍的な増加
- シングルモードファイバーによる波面乱れの除去
- 基線数が劇的に増加、Redundantな基線多数 ⇒ 高コントラスト
 - 観測量の数(全ての基線の数) > 未知数の数(ユニークな基線の数＋大気位相誤差)



瞳再配置法の改良

これまでの瞳再配置法の問題点

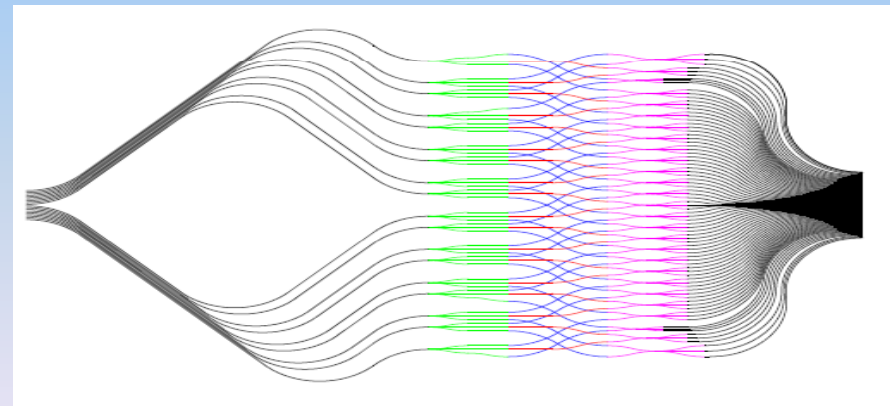
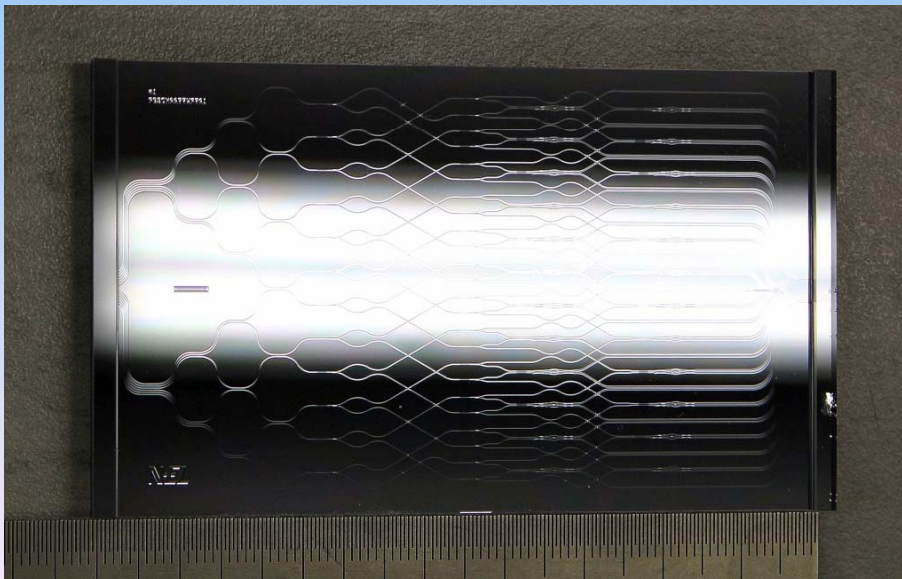


- 多くの開口からの光を効率よく干渉させることがポイント
- ファイバーアレイでは、SEITに必要な100近い瞳分割数への対応が困難
 - 現在では18分割が限界、100分割への目途が立たない
- 複雑かつ大規模な光学系

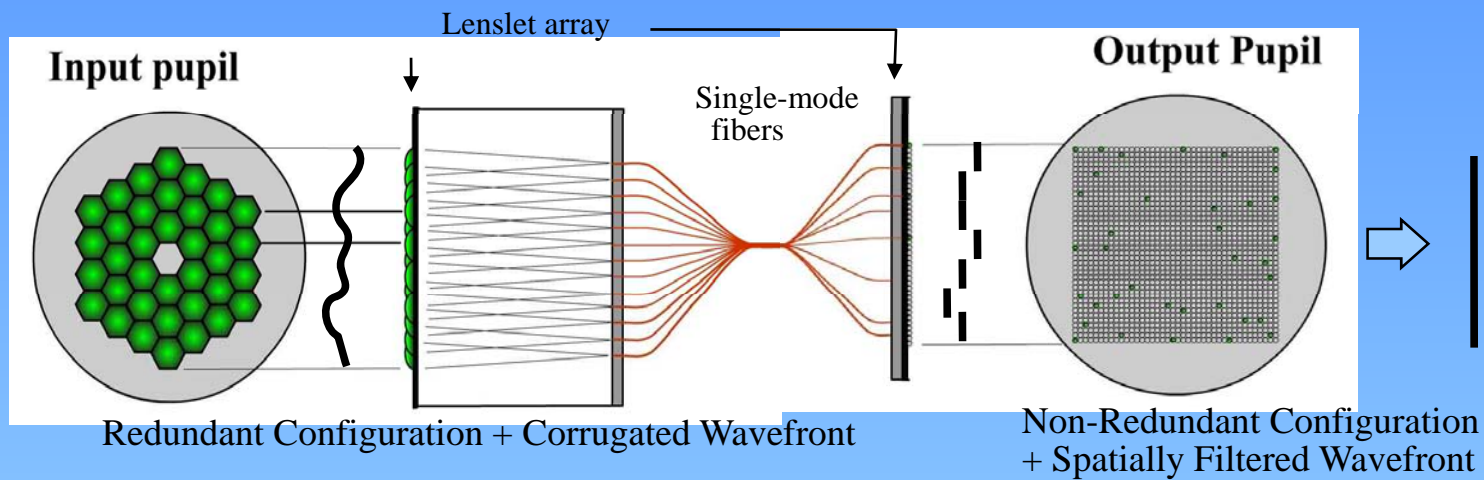
新しい瞳再配置法: 1

Integrated Optics

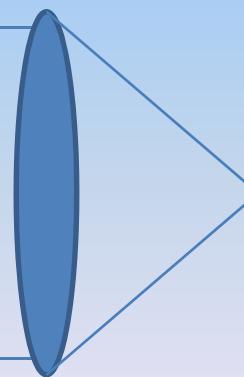
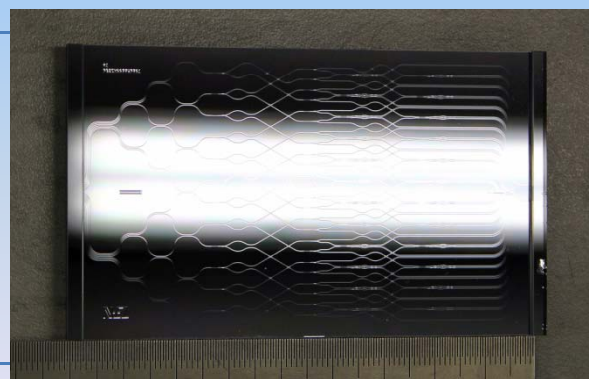
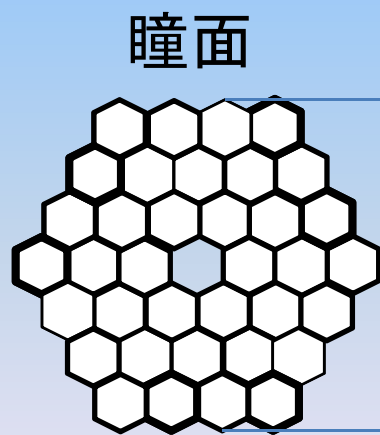
- 光通信で用いられる**光集積回路**を用いて、干渉計光学系（ビーム分岐・結合・位相シフトなど）をone-chipで実現
- シリコン基板上に導波路回路を形成
- コンパクト・複雑な光学系への対応が容易
- 可動部がなく、光が干渉した状態が出てくるので極めて安定



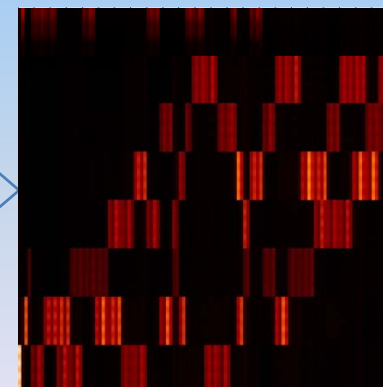
NTTエレクトロニクス社製18ビームコンバイナー



旧方式



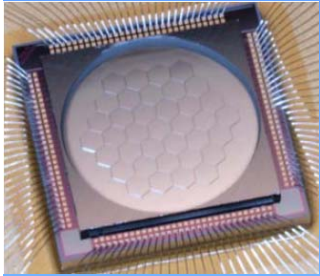
焦点面



新方式

劇的にシンプルな光学系

光は全て干渉した状態で出力される

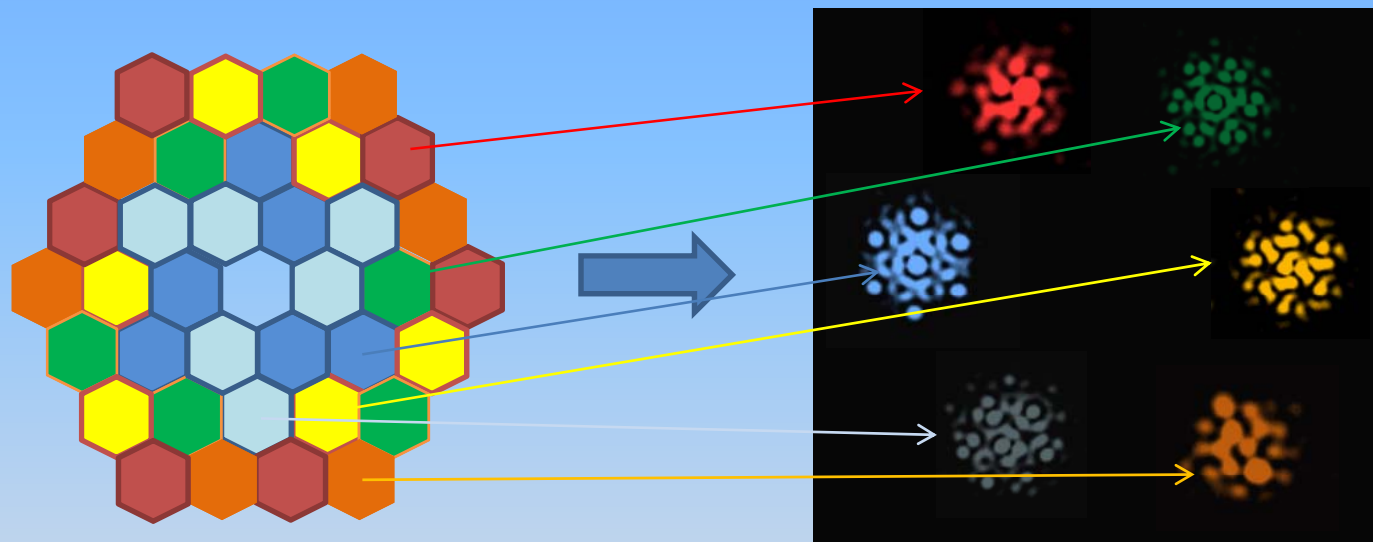


新しい瞳再配置法2

Smart Pupil Remapping

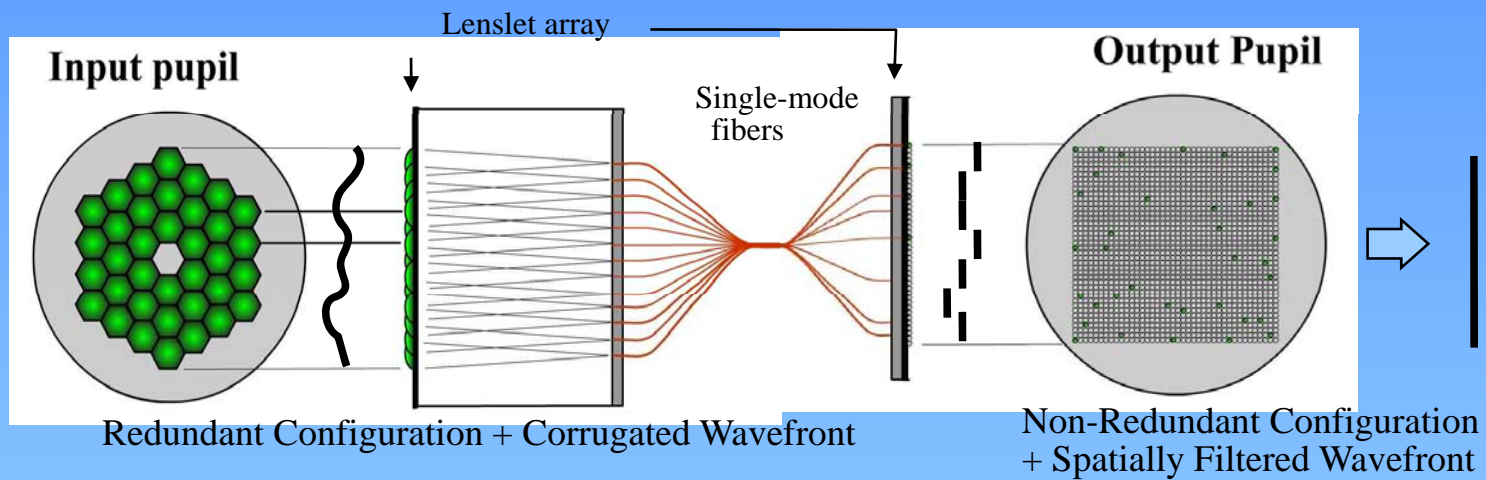
瞳面

焦点面

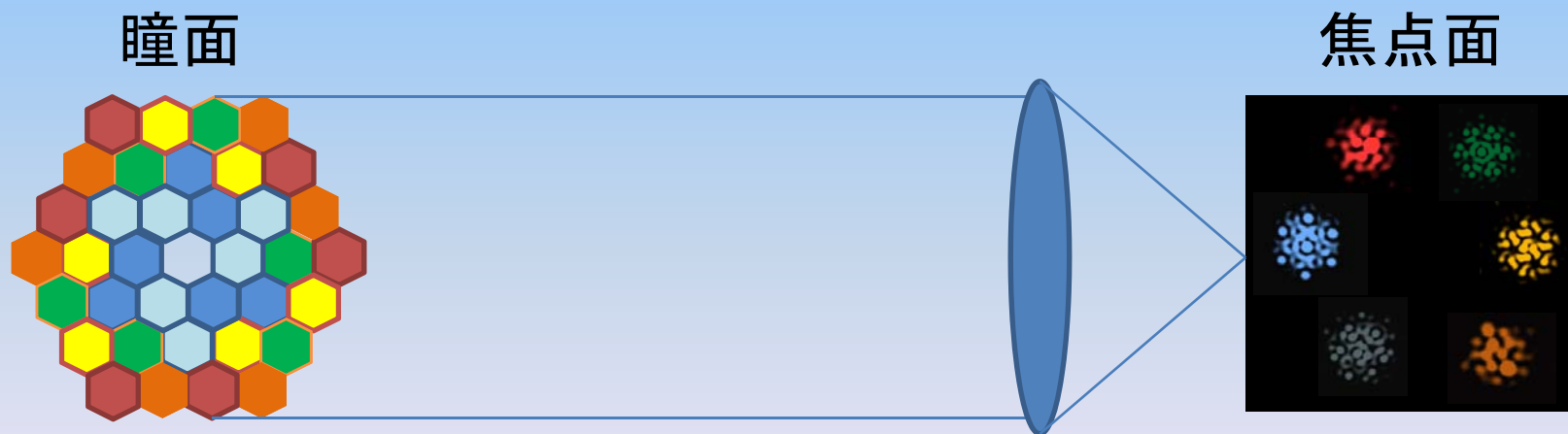


6x6 Non-redundant array
Segment型DMにより各色で異なる
傾きを持たせる

- Segment型Deformable Mirrorを用いることで、光学系が劇的にシンプルに
- 多分割への対応が容易(既に36分割を実現、100分割以上も可能)
- 90個の観測量 > 75個の未知数 = 39個のVisibility + 36個の位相誤差



旧方式



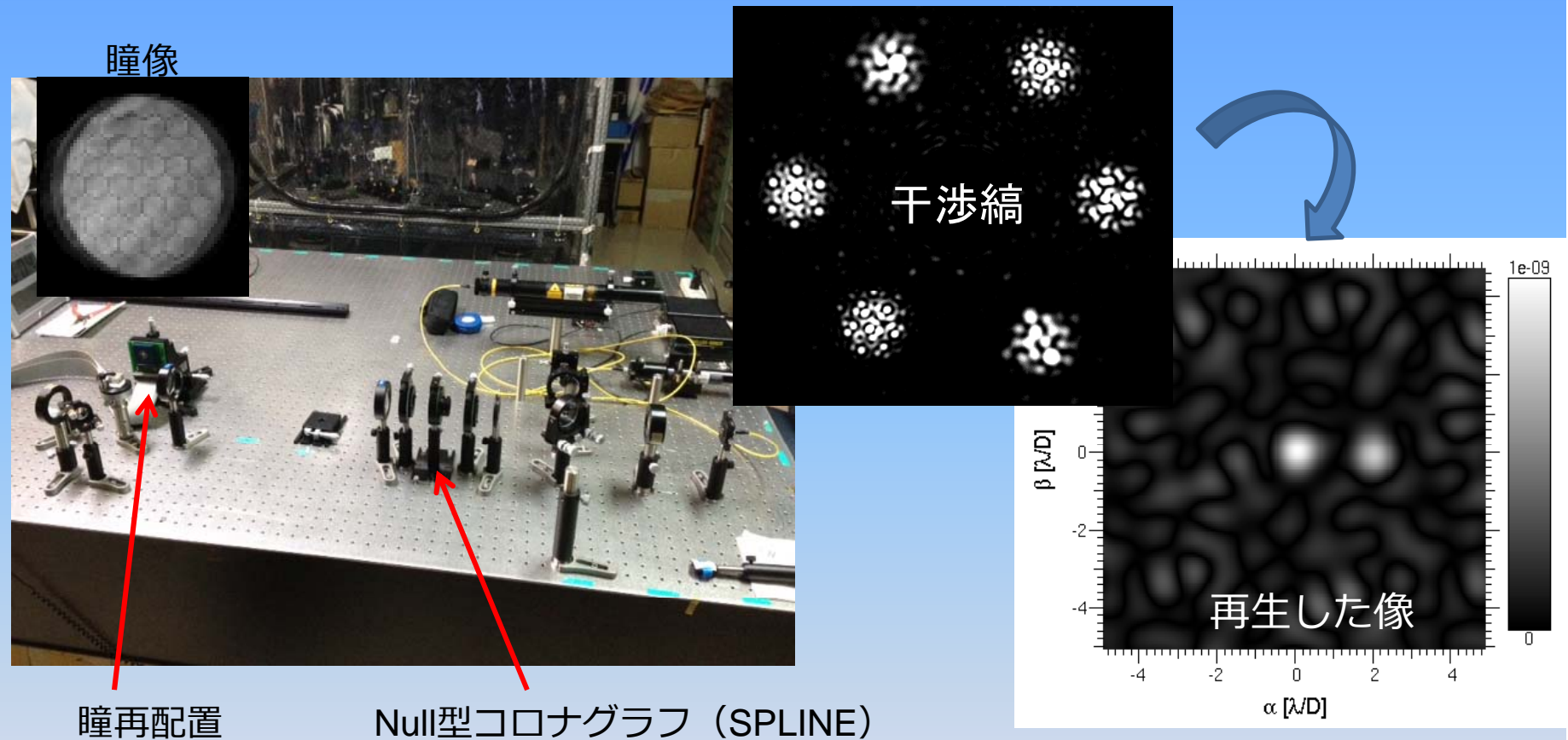
新方式

劇的にシンプルな光学系で、100分割システムの実現が可能

実験進捗

ナル干渉計＋瞳再配置法による
像再生のデモンストレーション

実験進捗 像再生のデモンストレーション



- SEITの観測方式実証光学系を構築
- 人工光源 + Null型コロナグラフ(SPLINE) + 瞳再配置 (37素子)
- 主星：惑星光のコントラスト10:1 (人工光源の強度比)
- 主星、伴星の位置・コントラストを正確に再生できることを示した

今後の実験計画

- 赤外線波長での実証 (He-Ne \Rightarrow J,H-band)
 - 赤外線検出器
 - 赤外線用光学系(偏光子、SPLINE)の導入
- 広帯域化 (He-Ne \Rightarrow バンド幅200nm程度へ)
 - 光路長補償用DMの導入
 - 反射光学系の導入
- 高コントラスト化
 - 最適化したLyot stop (DMセグメントギャップを避けるなど)
 - 空間フィルターの使用で波面をクリアに (SMファイバー or ピンホールアレイ)
 - ビーム分割数を増やす (37素子 \Rightarrow 128素子DM)

終