

南極テラヘルツ望遠鏡用の 新しい鏡面形状測定法

1. 南極テラヘルツ望遠鏡の概要
2. 鏡面形状測定の目的と方法
3. 点回折干渉計(PDI)の概要
4. 電波点回折干渉計(RPDI)の構成
5. RPDIの原理
6. RPDIのシミュレーション
7. まとめ

宇宙観測研究室
博士後期課程2年
奥村 大志

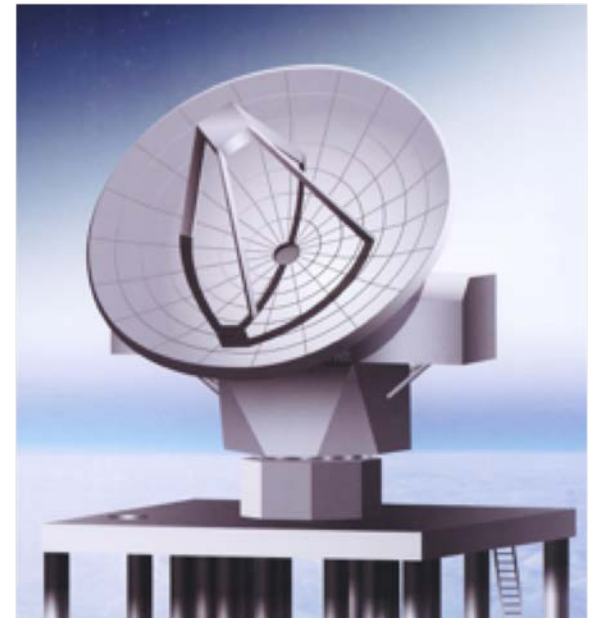
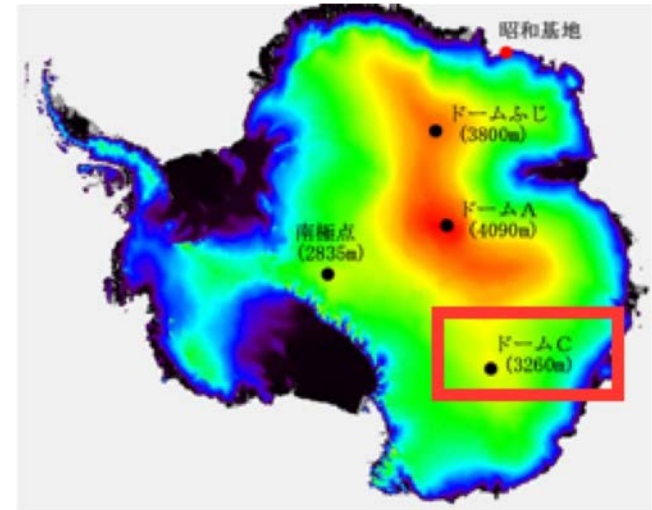
南極テラヘルツ望遠鏡の概要

- ・南極内陸高原地帯に電波望遠鏡を建設し、テラヘルツ波を用いた銀河の走査観測を行う。

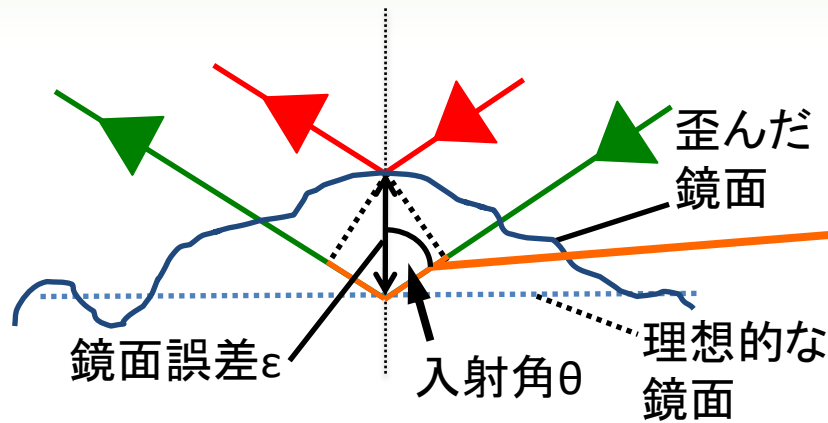
- ・建設予定地：南極内陸部高原地帯(標高3000m以上)、ドームC(コンコルディア基地、フランス・イタリア)

- ・望遠鏡基本設計：口径10 [m]、視野1度(走査観測)、周波数200[GHz]-1.5[THz]

- ・観測対象：初期銀河、近傍銀河、銀河団、銀河系内の構造



鏡面形状測定の方法と目的

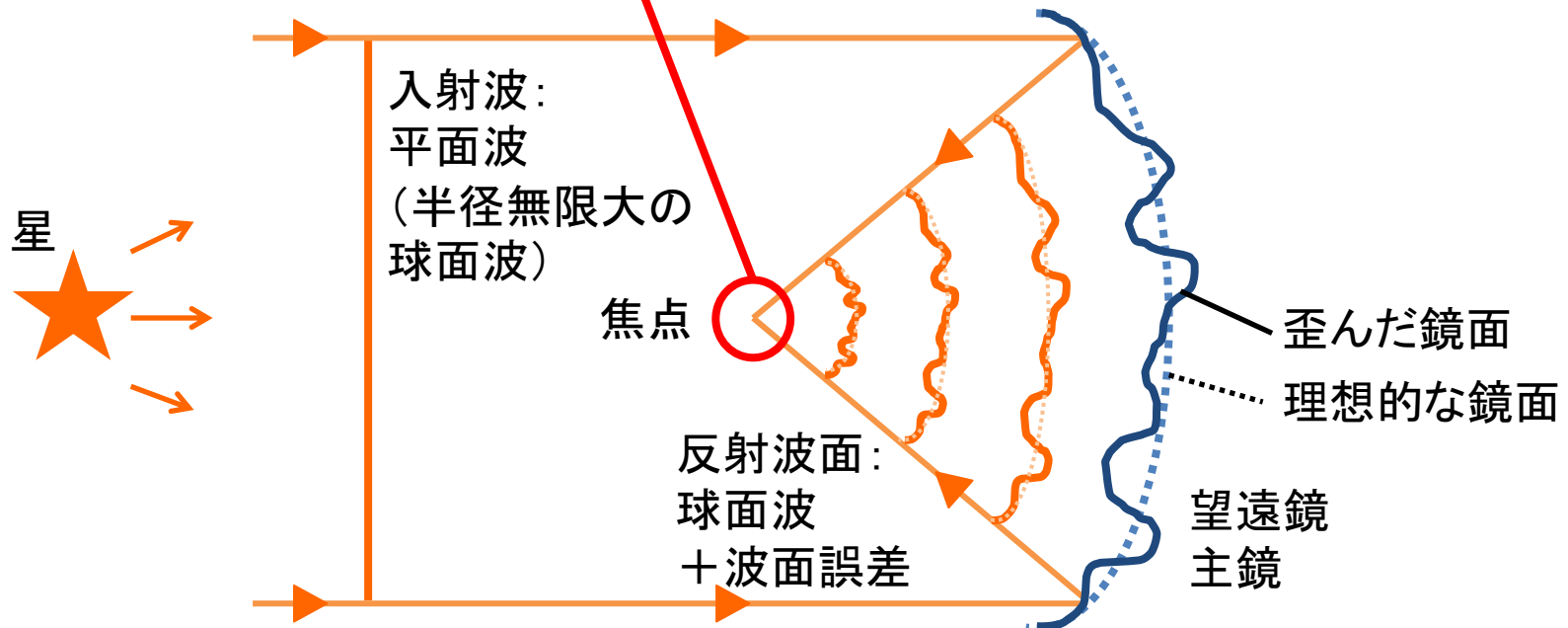


鏡面誤差 $\varepsilon \rightarrow$ 光路長の違い
 \rightarrow 位相のずれ $\delta\phi$

$$\delta\phi = 4\pi\varepsilon \cos\theta / \lambda$$

焦点で位相の違う波が重なる
= 波の打ち消しにより強度が落ちる

開口が小さくなることに相当し、
望遠鏡の開口能率の低下



鏡面形状測定の方法と目的

ルッツの式：能率に対する鏡面誤差と波長の関係

$$\eta = \eta_0 \exp \left[- \left(\frac{4\pi\epsilon}{\lambda} \right)^2 \right]$$

↑ ↑ ↑ ↑
開口能率 η 鏡面誤差がない場合の開口能率 $\eta_0 \leq 0.8$ 波長 λ 鏡面誤差 ϵ

開口能率 η :

望遠鏡主鏡の開口面積のうち電波を反射するのに使われた割合を表す

鏡面誤差 ϵ :

鏡面がどれだけ理想的な状態からずれているかを表す

➡ $\eta/\eta_0 \geq 0.5$ → 鏡面誤差: 波長の 1/15 以下 ($\epsilon \leq \lambda/15$)

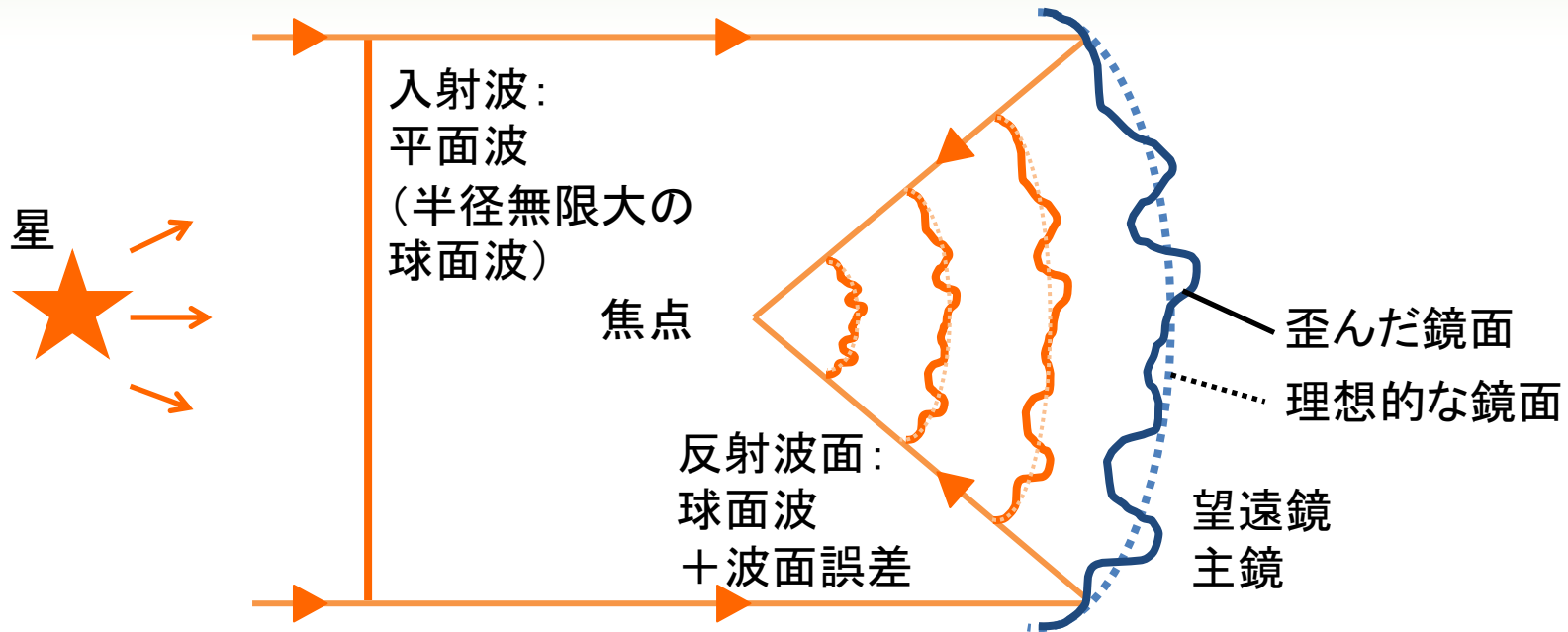
南極テラヘルツ望遠鏡の

最短観測波長 $\lambda = 200 \mu\text{m}$ (: 1.5 THz) → 鏡面誤差 $\epsilon = 13 \mu\text{m}$ 以下

➡ 鏡面測定が必要

→ 13 μm を 10 m に渡って直接機械的に測定するのは困難

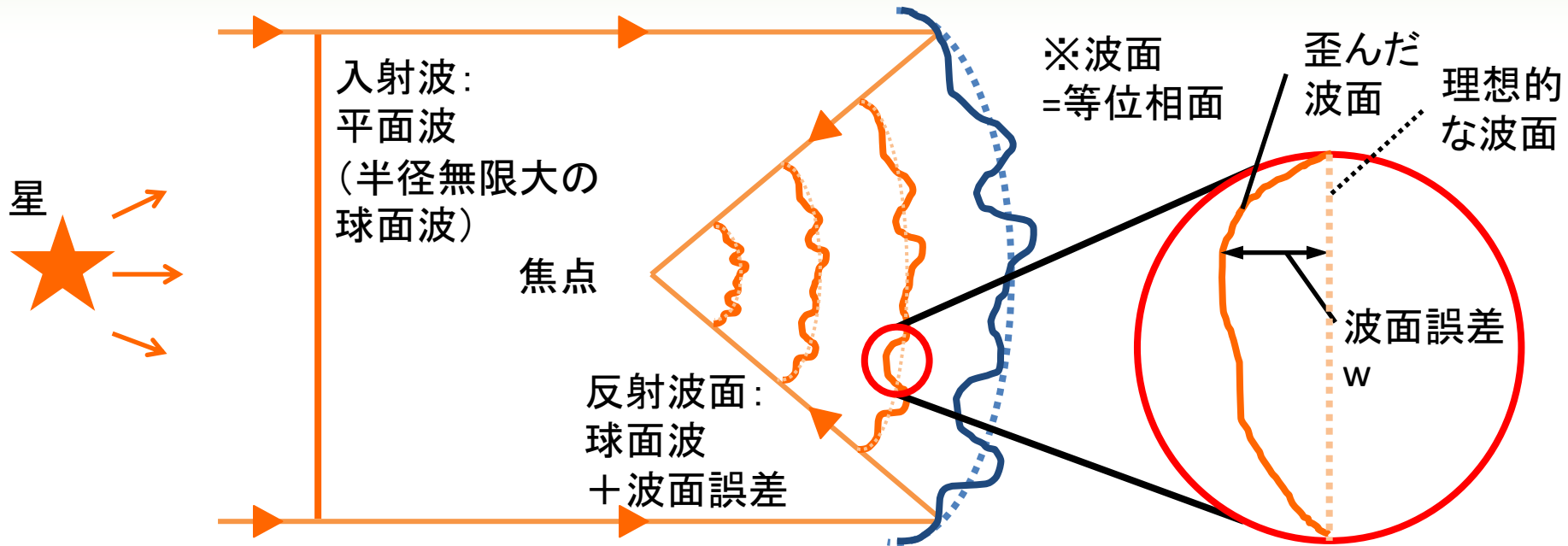
鏡面形状測定の方法と目的



本研究の目的:

南極テラヘルツ望遠鏡に
実装する、**十分な精度で**
鏡面測定を行える**測定方**
法の開発

鏡面形状測定の方法と目的



本研究の目的:

南極テラヘルツ望遠鏡に
実装する、**十分な精度で
鏡面測定**を行える**測定方
法の開発**

★波面測定法:

波面誤差を測定する方法

鏡面誤差 ε → 波面誤差 w
→ 位相のずれ $\delta\phi$

$$\delta\phi = 2\pi w / \lambda$$

点回折干渉計(PDI)の概要

波面を測定したい→直接『位相』を測定するのは難しい

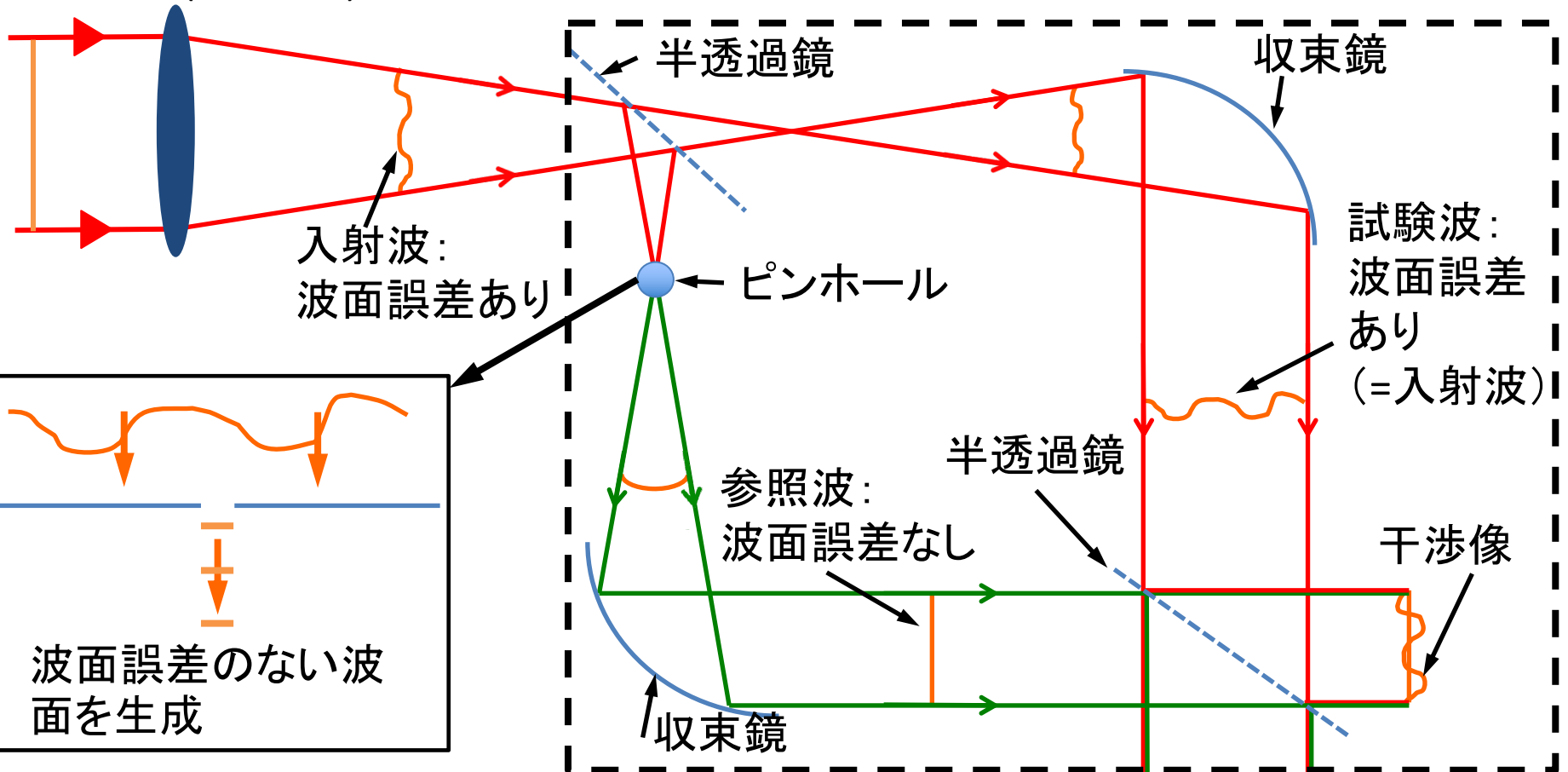
→干渉像を測定し、その干渉像の演算
結果として、波面を推定する



点回折干渉計

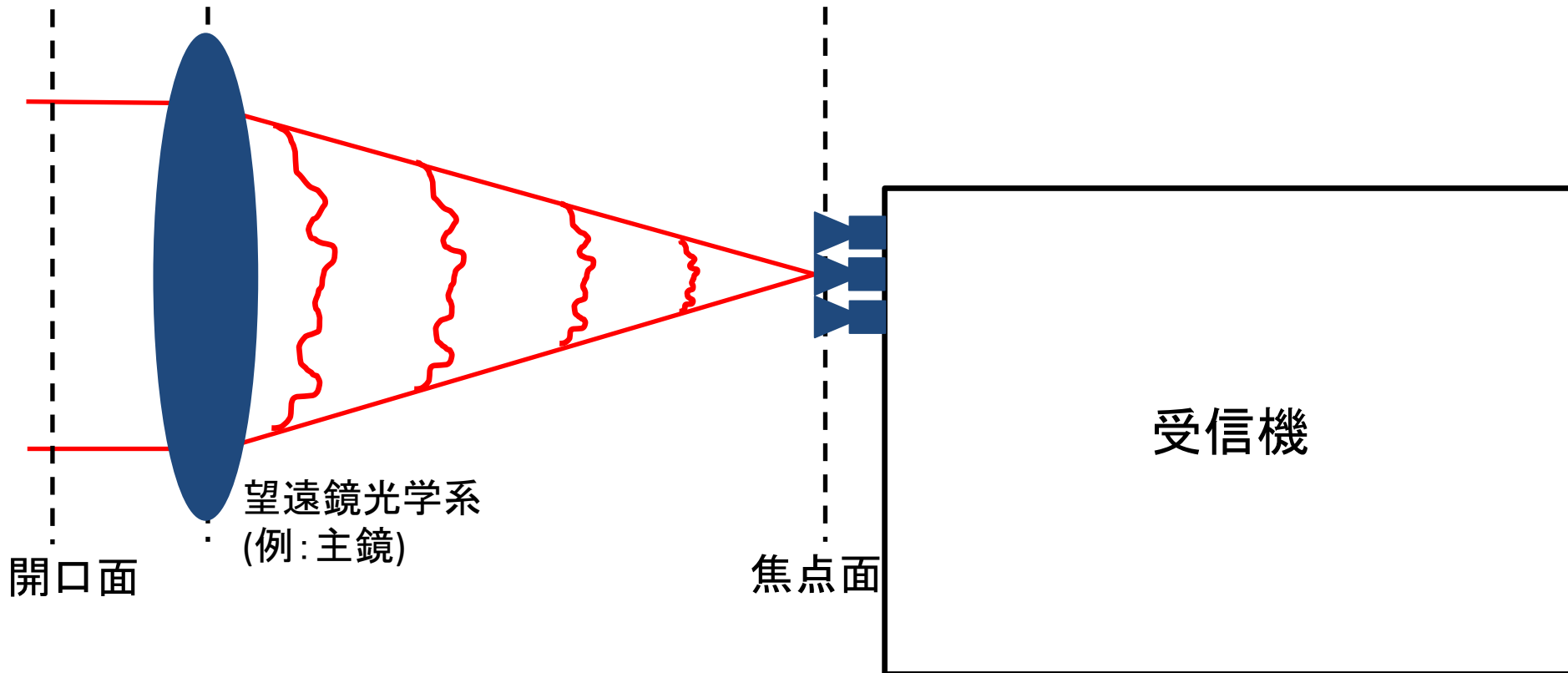
可視光・赤外線分野で提案・研究されている

鏡(歪みあり)



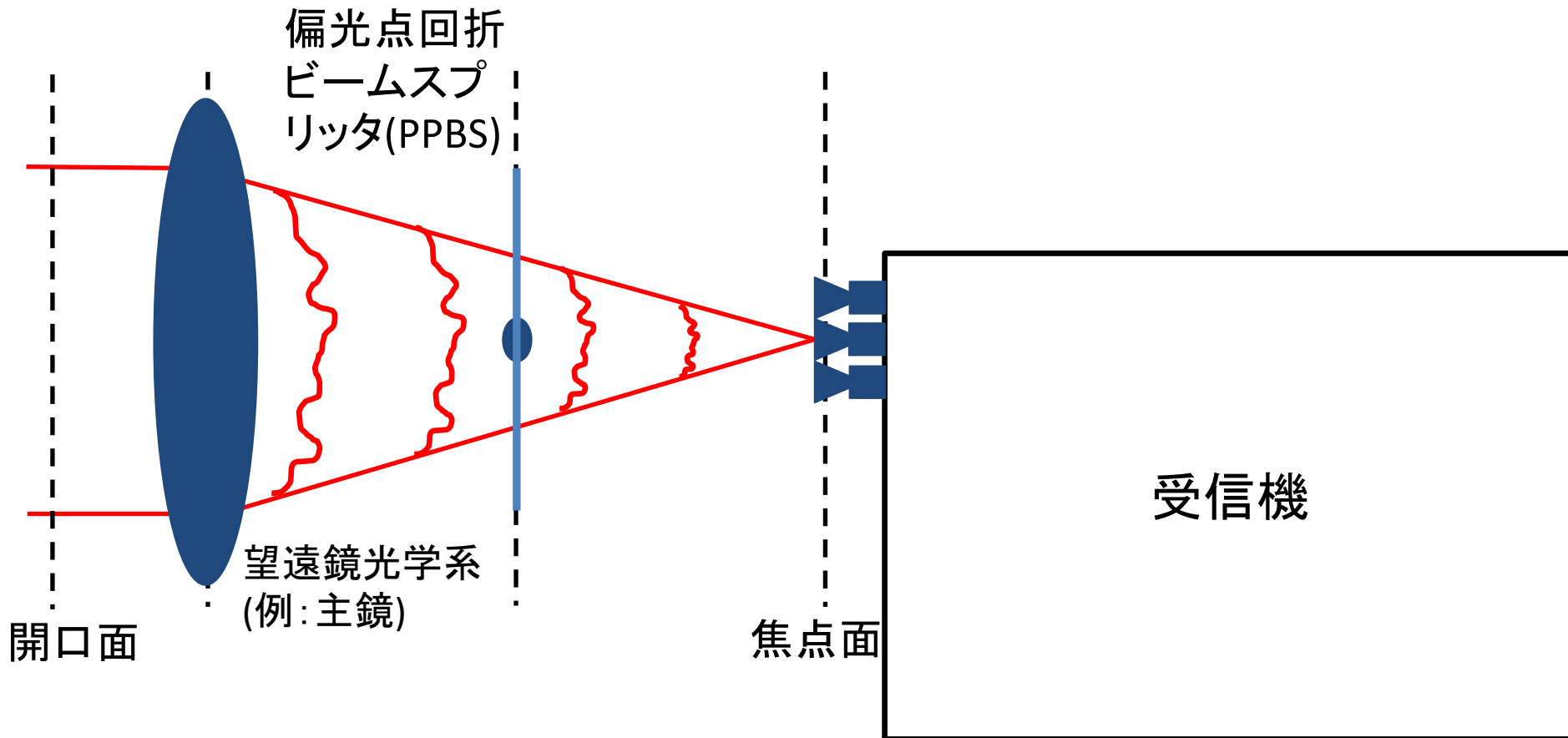
電波点回折干涉計(RPDI)の構成

本研究で考案する測定方法: 電波点回折干涉計(RPDI)



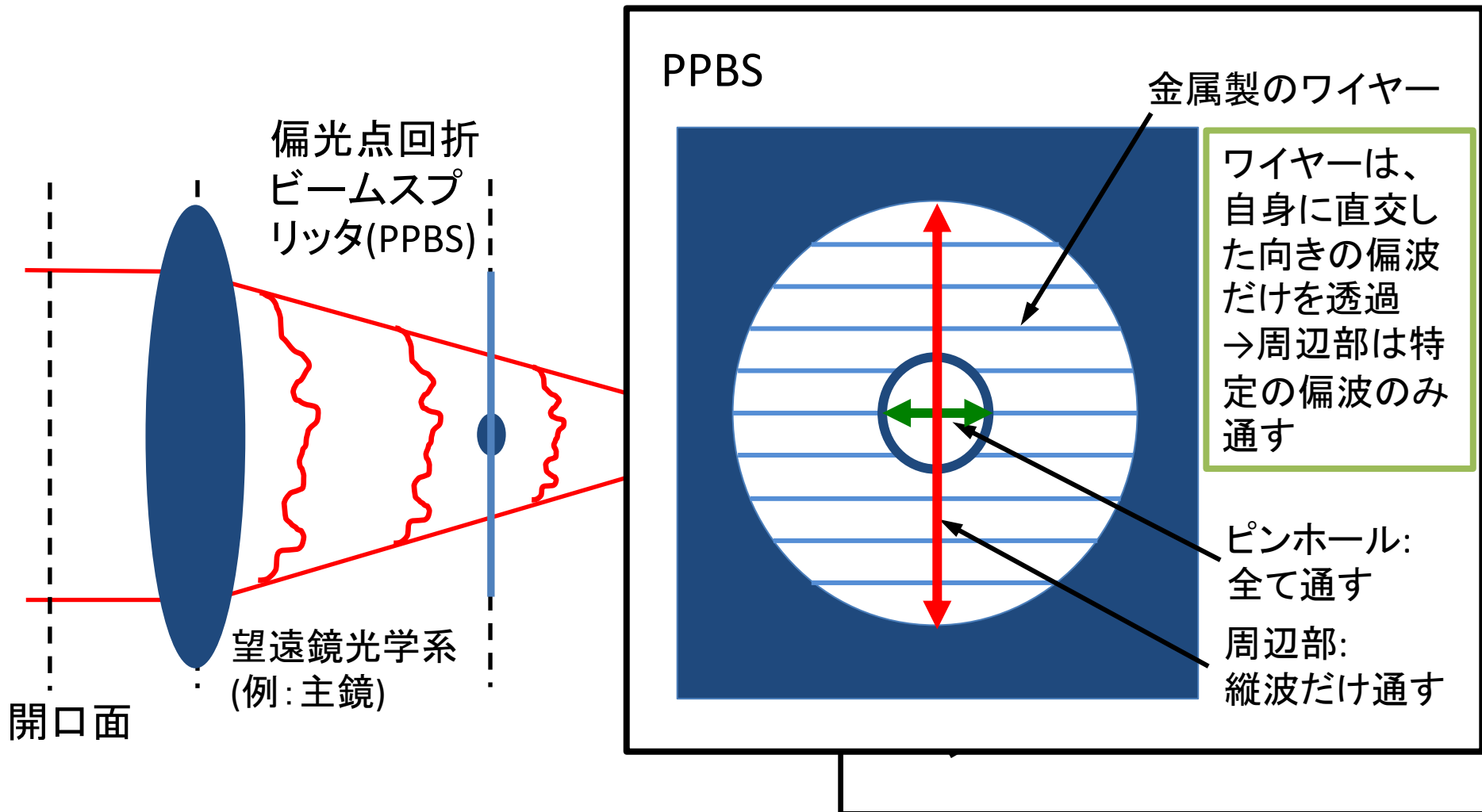
電波点回折干渉計(RPDI)の構成

本研究で考案する測定方法: 電波点回折干渉計(RPDI)



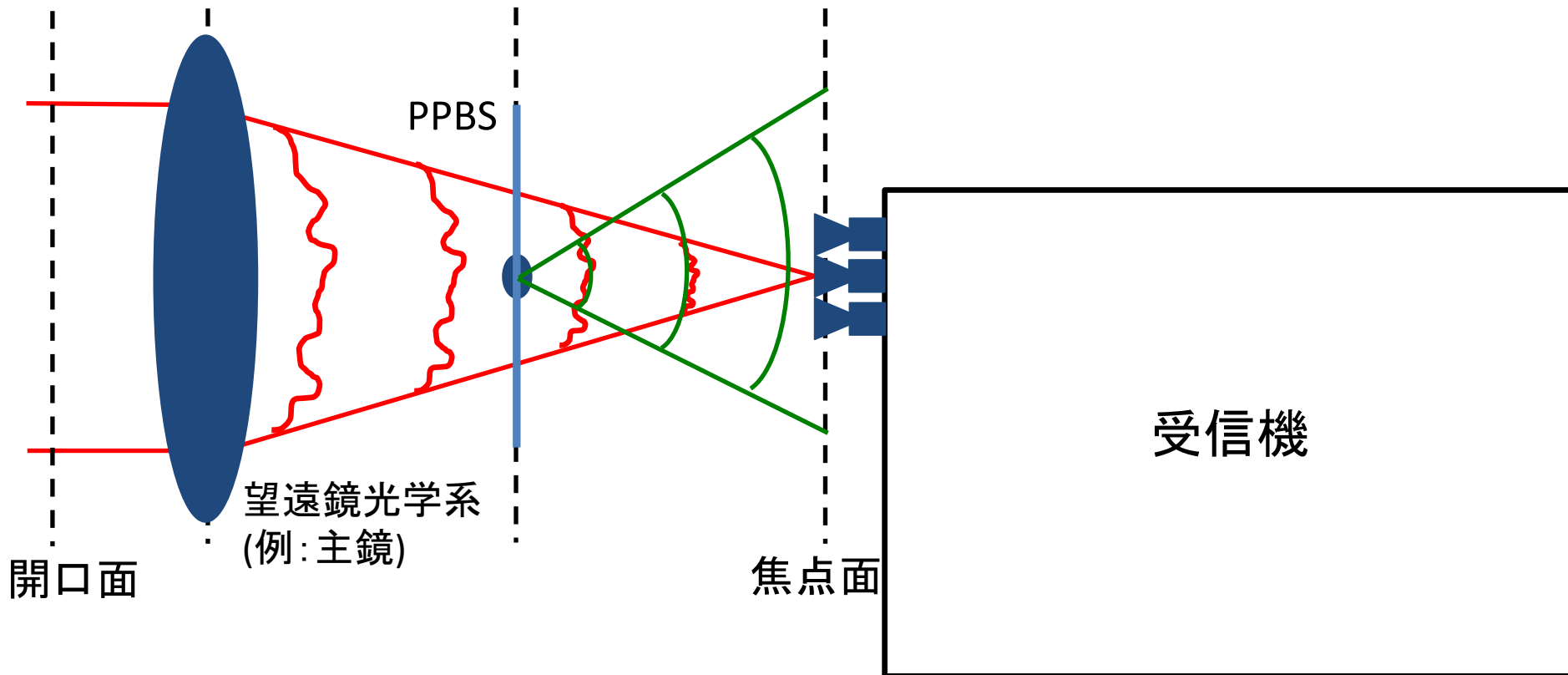
電波点回折干渉計(RPDI)の構成

本研究で考案する測定方法: 電波点回折干渉計(RPDI)



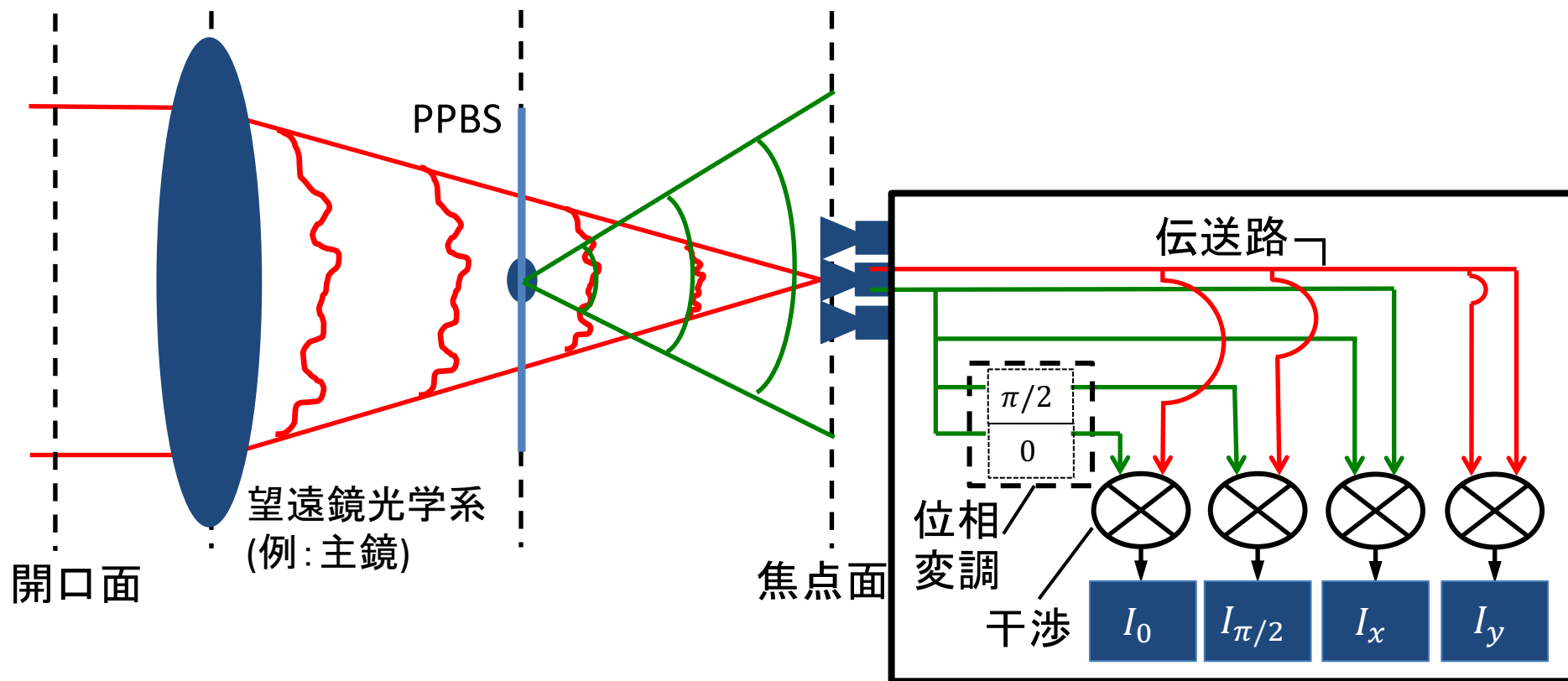
電波点回折干涉計(RPDI)の構成

本研究で考案する測定方法: 電波点回折干涉計(RPDI)



電波点回折干涉計(RPDI)の構成

本研究で考案する測定方法: 電波点回折干涉計(RPDI)

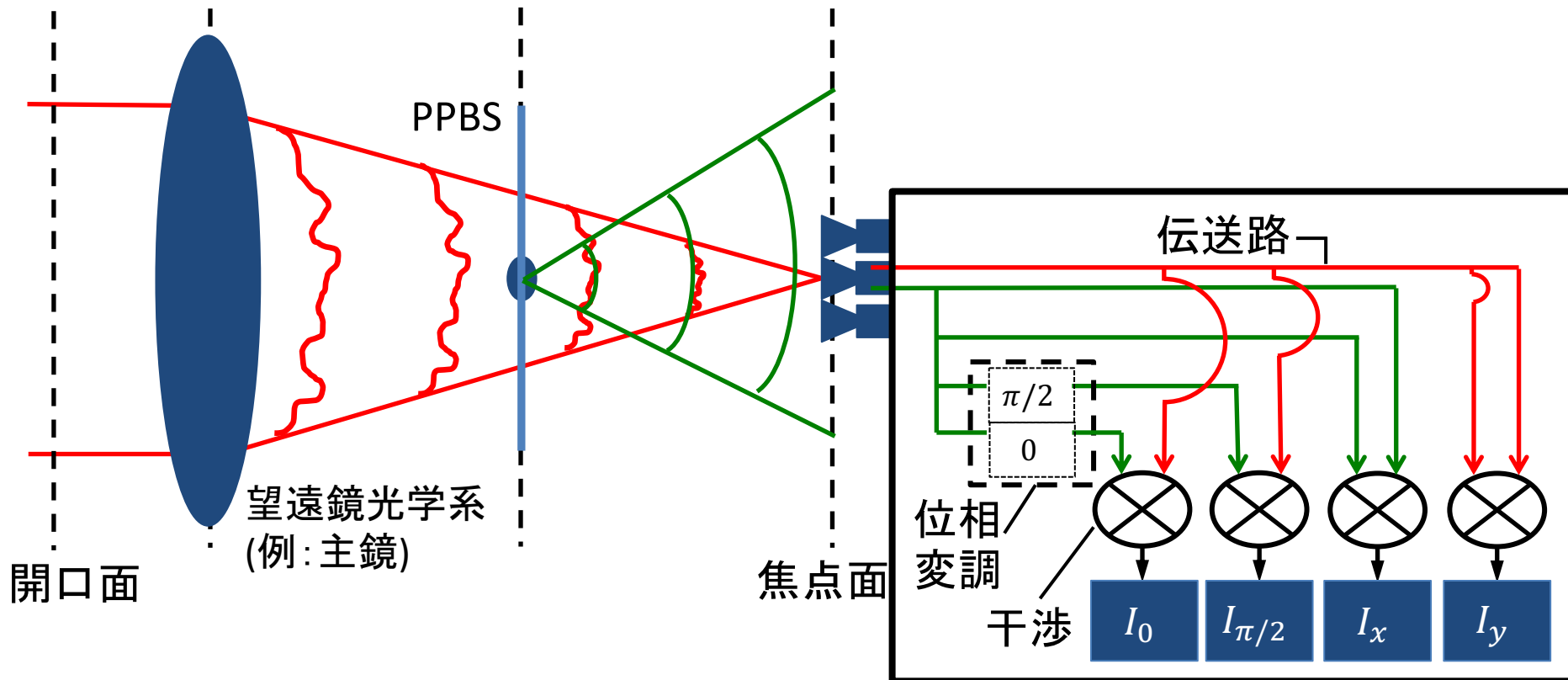


電波点回折干渉計(RPDI)の構成

本研究で考案する測定方法: 電波点回折干渉計(RPDI)

特徴

1. 偏波を利用: 同一光学系内に試験波と参照波の伝搬が可能

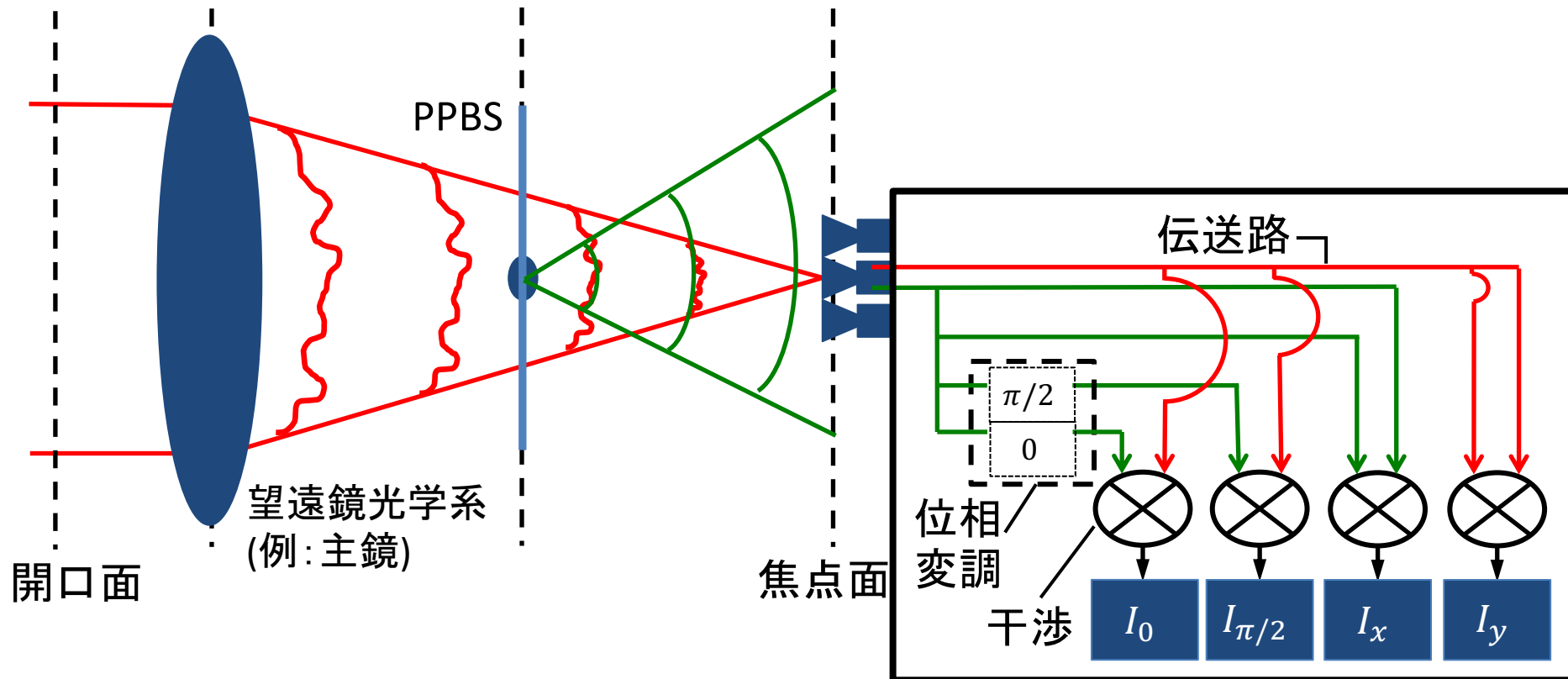


電波点回折干涉計(RPDI)の構成

本研究で考案する測定方法: 電波点回折干涉計(RPDI)

特徴

2. 電波の受信機の特徴を利用: 伝送路上で位相変調と干渉が可能

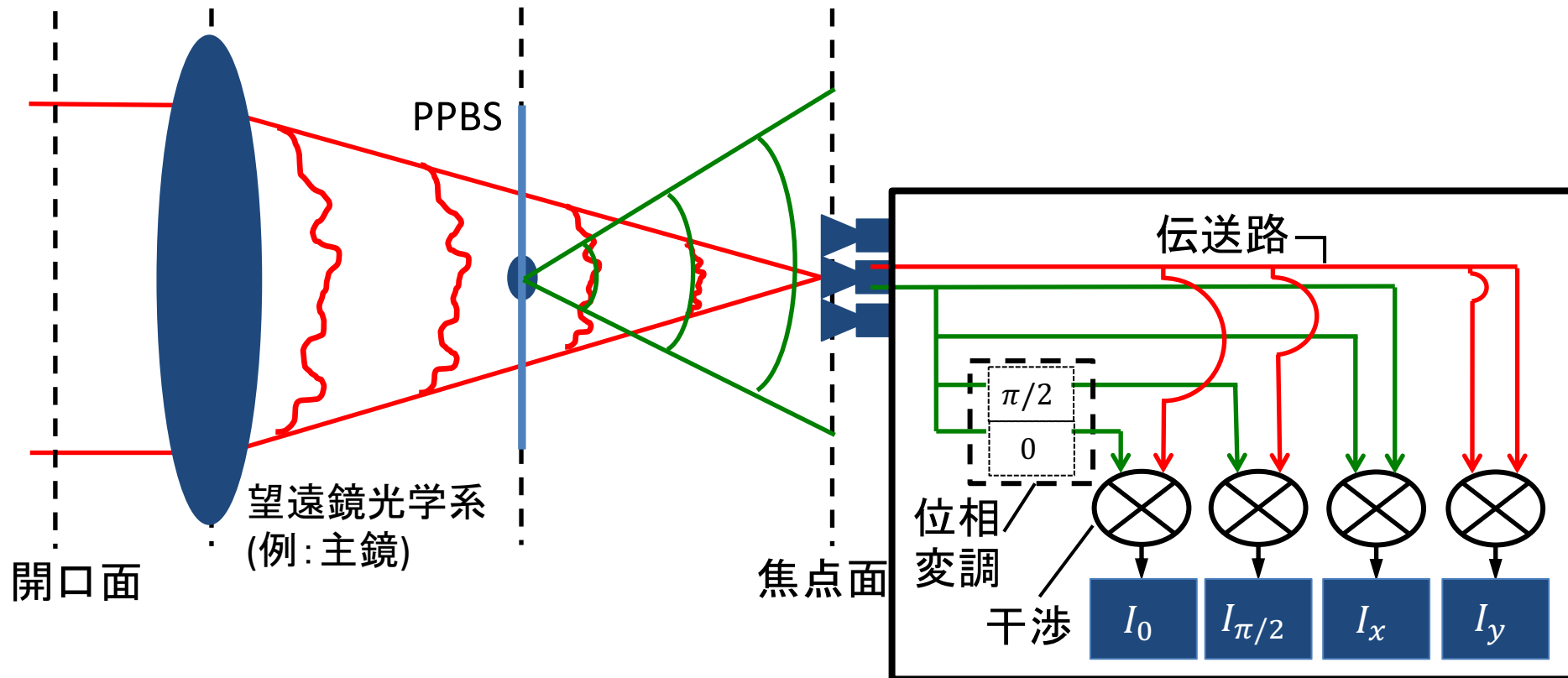


電波点回折干渉計(RPDI)の構成

本研究で考案する測定方法: 電波点回折干渉計(RPDI)

特徴

3. 焦点面での測定: 観測時と光学系が(PPBSの出し入れのみで)一致

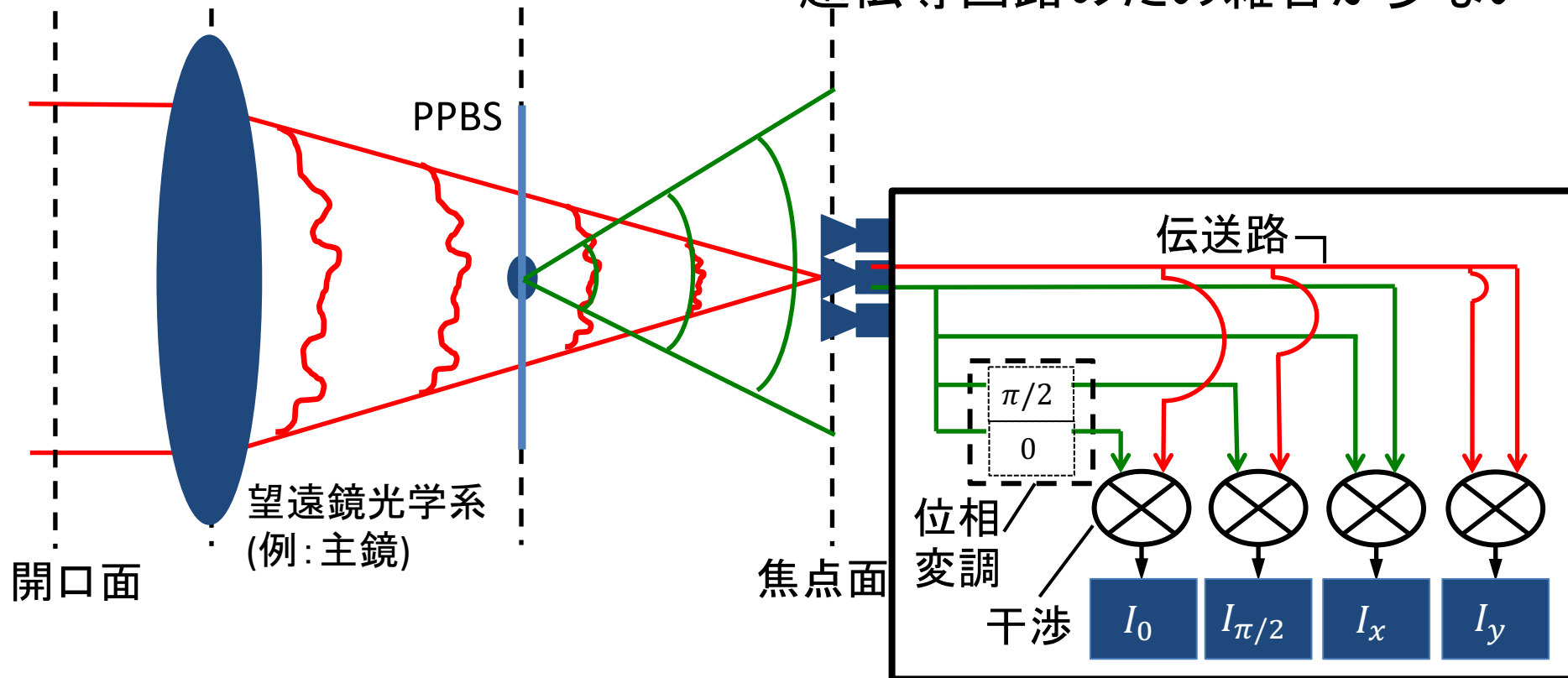


電波点回折干渉計(RPDI)の構成

本研究で考案する測定方法: 電波点回折干渉計(RPDI)

特徴

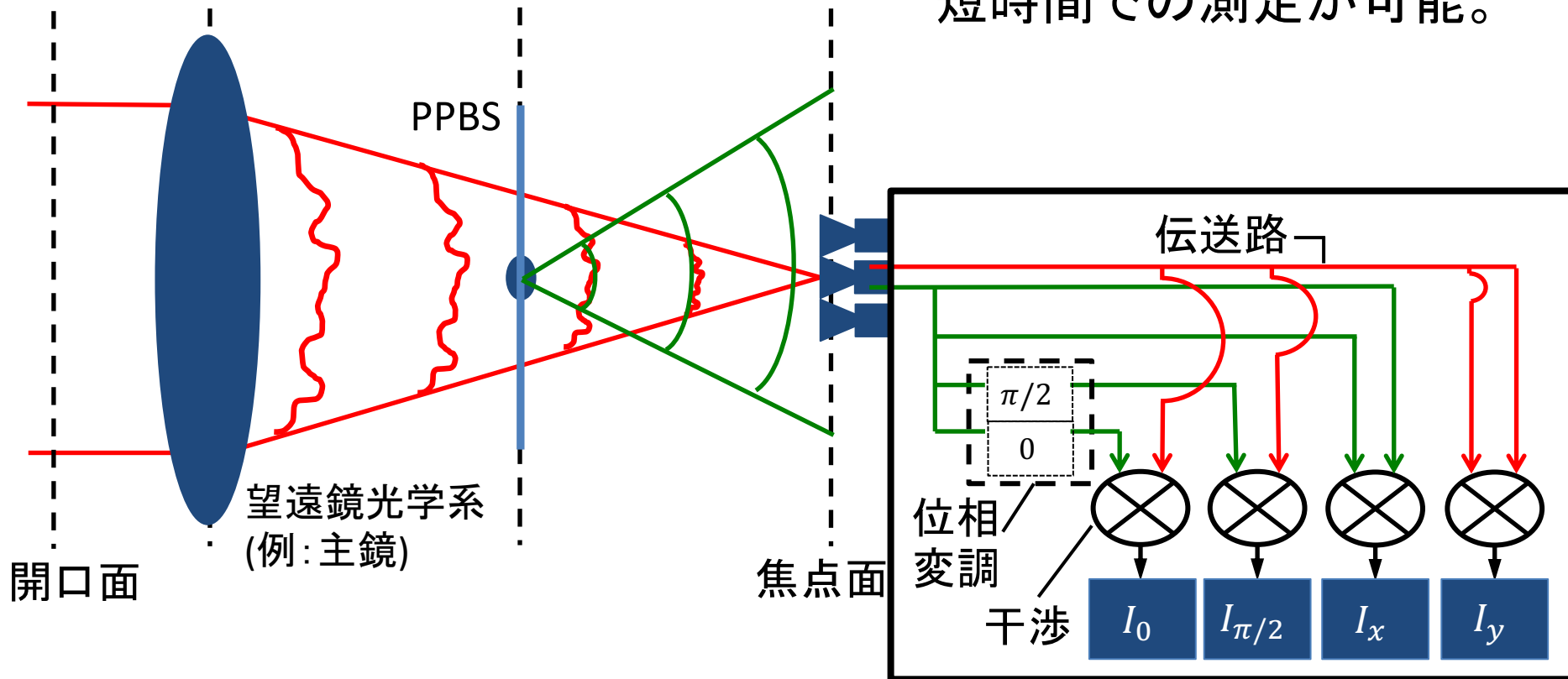
4. MKIDsを使った測定: 多素子化による短時間での測定が可能、
超伝導回路のため雑音が少ない



電波点回折干渉計(RPDI)の構成

本研究で考案する測定方法: 電波点回折干渉計(RPDI)

RPDIを用いることで、PPBSの出し入れのみで、観測と鏡面測定を入れ替えることができ、同一の光学系を利用した、精度の良い短時間での測定が可能。



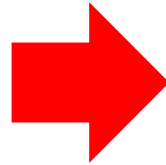
RPDIの原理

求めたい値:

開口面での位相

測定した値:

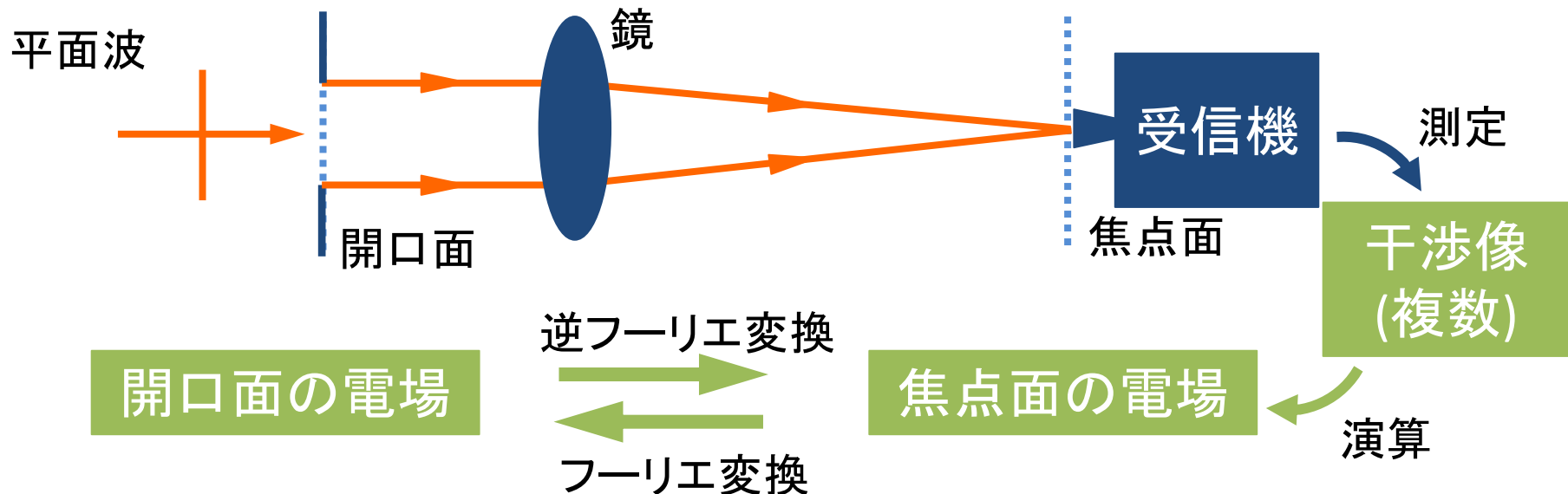
焦点面での干渉像



焦点面での干渉像から開口面の位相を推定する必要がある

フラウンホーファー回折

※開口面と鏡面(ここではレンズ)は
一対一対応すると考える



RPDIの原理

焦点面の電場分布をフーリエ変換し、開口面の電場分布を推定

→焦点面の複素(振幅と位相)電場分布が必要

→干渉像と複素電場分布の関係

=ストークスパラメータを複数の干渉像から求める

干渉像:

焦点面の各偏波の複素分布を $E_{f,x}$, $E_{f,y}$ 、振幅分布を $|E_{f,x}|$, $|E_{f,y}|$ 、位相差の分布を $\delta\phi_f$ とする。(下付き添え字は位相のずれを表し、

0を基準に参照波が $\pi/2$ ずれている。)

$$I_x = \frac{1}{2} |E_{f,x} + E_{f,x}|^2, I_y = \frac{1}{2} |E_{f,y} + E_{f,y}|^2$$

$$I_0 = \frac{1}{2} |E_{f,x} + E_{f,y}|^2, I_{\pi/2} = \frac{1}{2} |iE_{f,x} + E_{f,y}|^2$$

RPDIの原理

ストークスパラメータと干渉像の関係

焦点面の各偏波の強度分布を $E_{f,x}$, $E_{f,y}$ 、位相差の分布を $\delta\phi_f$ とする

$$S_0 = |E_{f,x}|^2 + |E_{f,y}|^2 = (I_x + I_y)/2 : \text{強度}$$

$$S_1 = |E_{f,x}|^2 - |E_{f,y}|^2 = (I_x - I_y)/2$$

: 水平/垂直成分の差

$$S_2 = |E_{f,x}| |E_{f,y}| \cos \delta\phi_f = (4I_0 - I_x - I_y)/2$$

: 45/-45度成分の差

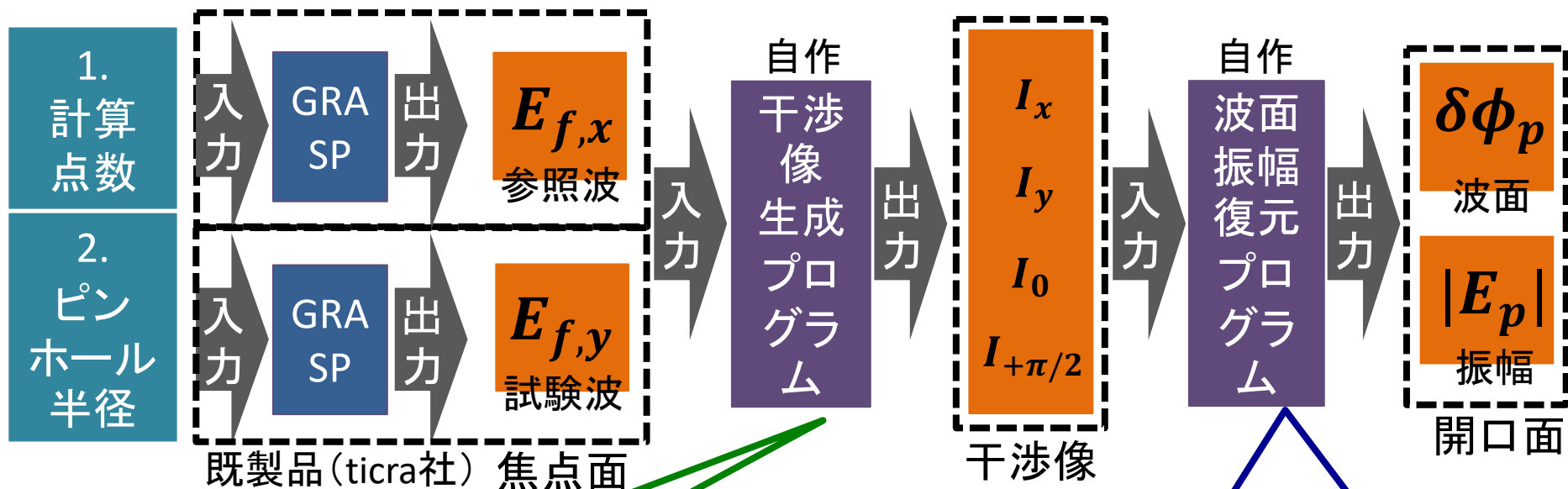
$$S_3 = |E_{f,x}| |E_{f,y}| \sin \delta\phi_f = (4I_{90} - I_x - I_y)/2$$

: 右/左回り円偏光成分の差

→4つの干渉像からストークスパラメータが計算できる
= 焦点面の複素電場分布が求まる。
= 開口面の波面が求まる。

RPDIのシミュレーション

★今回は推定精度の検証 → 入射波に波面誤差のない場合を検討



物理光学シミュレーション
ソフト“GRASP”

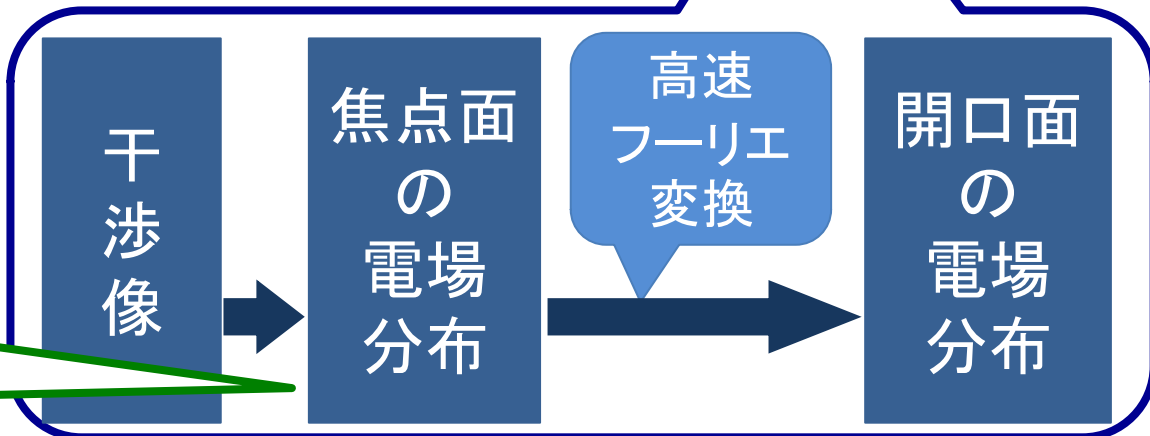
$$I_x = \frac{1}{2} |E_{f,x} + E_{f,x}|^2, I_y = \frac{1}{2} |E_{f,y} + E_{f,y}|^2$$

$$I_0 = \frac{1}{2} |E_{f,x} + E_{f,y}|^2, I_{\pi/2} = \frac{1}{2} |iE_{f,x} + E_{f,y}|^2$$

$$S_0 = I_x + I_y, S_1 = I_x + I_y$$

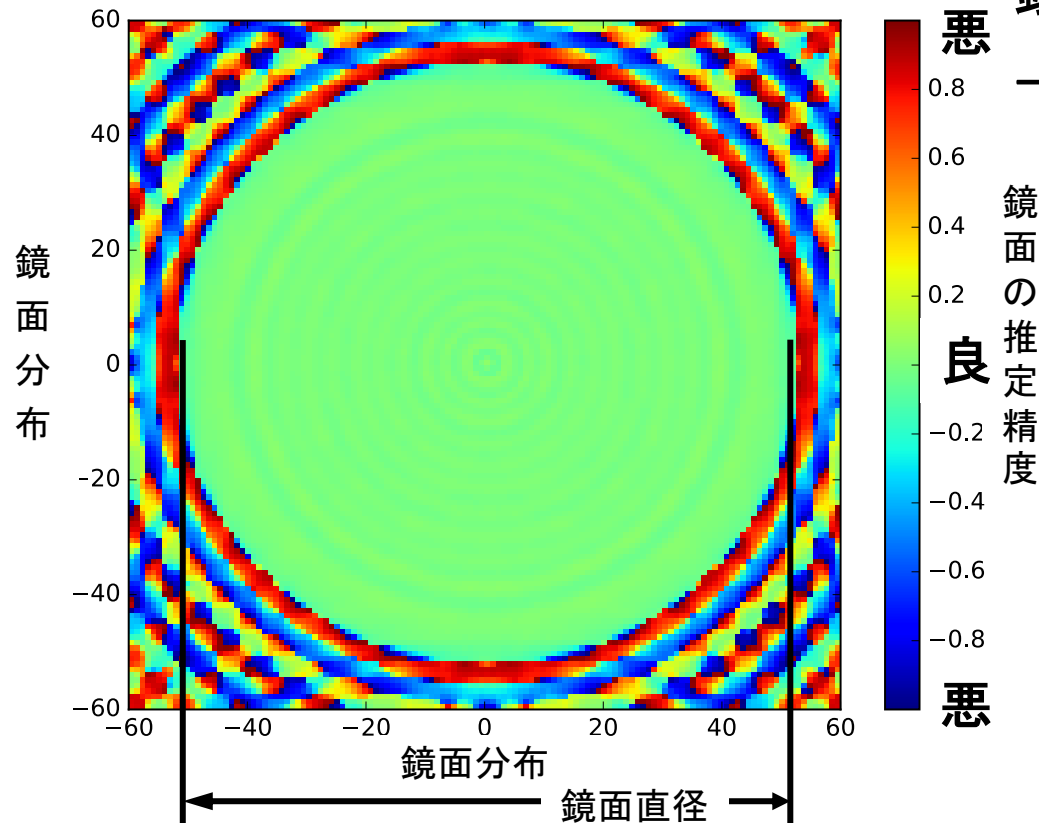
$$S_2 = 4I_0 - I_x - I_y$$

$$S_3 = 4I_{90} - I_x - I_y$$



RPDIのシミュレーション

★物理光学手法によるシミュレーション結果



鏡面形状推定精度

→ 推定誤差のRMS

$$= 4.71 \times 10^{-2} [\text{rad}]$$

$$= \lambda/133 \text{ @空間分解能 } 0.48 [\text{mm}^2] \\ (\text{半径 } 50 [\text{mm}], 128^2 \text{ 点})$$

★南極テラヘルツ望遠鏡 の鏡面形状測定としての 目標

@空間分解能 $3.0 \times 10^5 [\text{mm}^2]$
: $\lambda/15$ (半径 $5.0 \times 10^3 [\text{mm}]$, 約270点)

→ 目標精度を十分に達成

RPDIは南極テラヘルツ電波望遠鏡の鏡面測定法として実装し、鏡面形状を必要な精度で推定できる可能性がある

まとめ

- 南極テラヘルツ望遠鏡の鏡面測定法の開発
- 電波の特徴を取り入れたPDI、電波点回折干渉計 (RPDI)の考案
- RPDIの原理を解析的に計算
- 物理光学手法を用いた、シミュレーションによる鏡面の推定精度の検証
- 波長の100分の1の精度で位相の推定が可能
- 南極テラヘルツ望遠鏡の鏡面測定法として可能性

ご清聴ありがとうございました

今後の課題

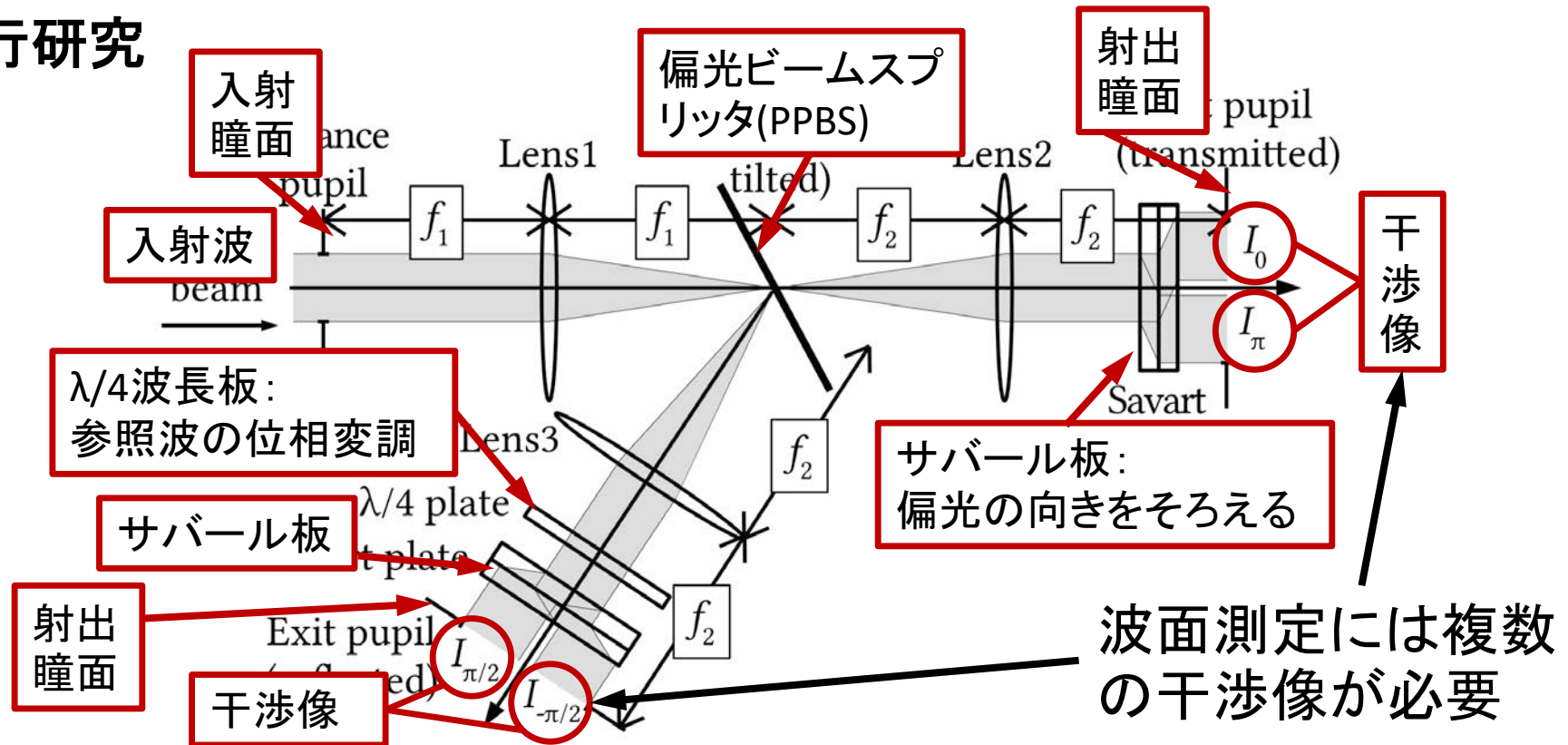
- 入射波に波面誤差がある場合
ピンホールの大きさによる位相の推定精度の影響
- 干渉像の数と種類

電波点回折干渉計実装に向けて

- 偏光ビームスプリッタと受信機の開発
- 光源の選定
- 南極テラヘルツ望遠鏡に合わせた系の検討

点回折干渉計(PDI)の概要

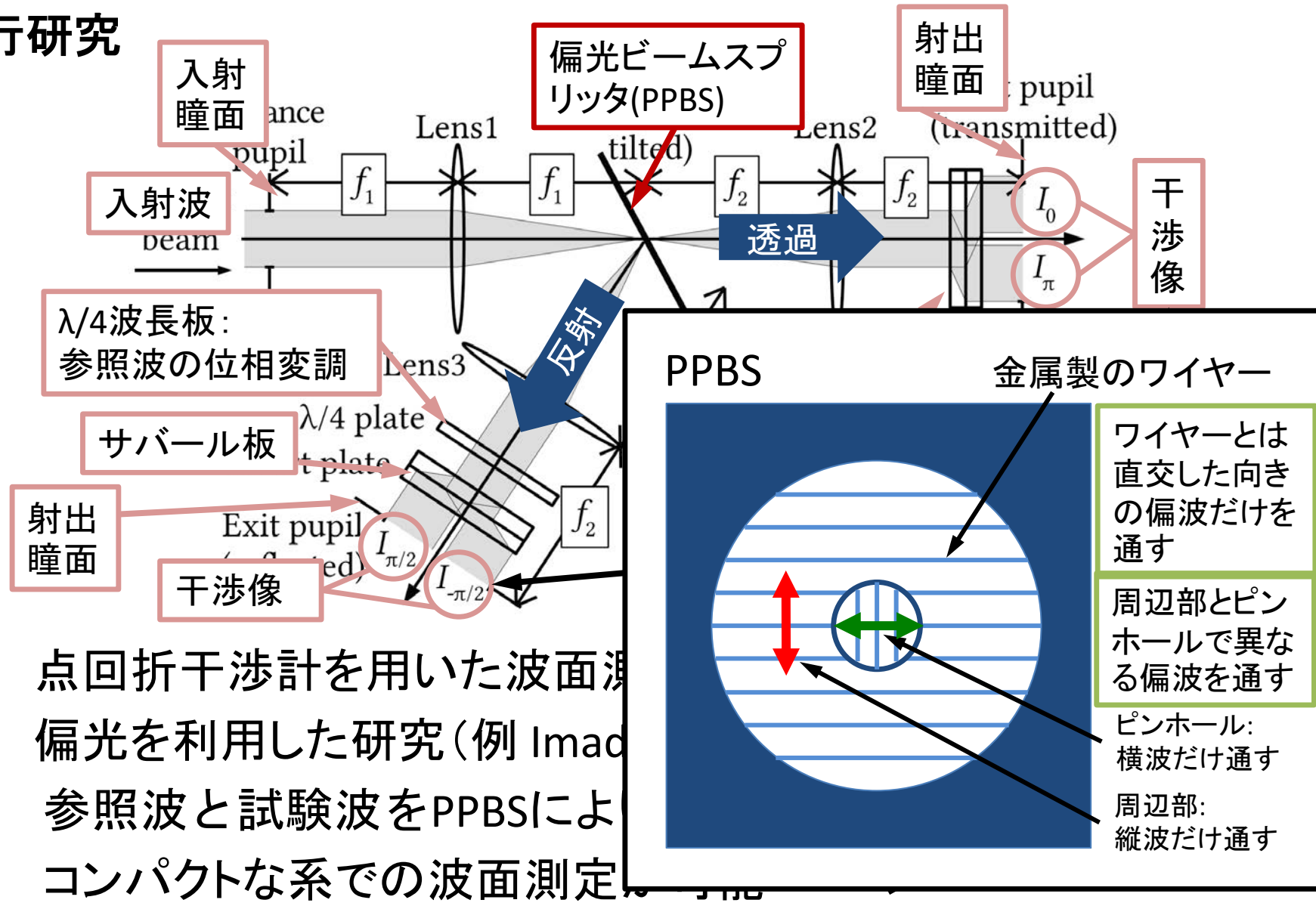
先行研究



- 点回折干渉計を用いた波面測定法: 可視・赤外線領域で活発
- 偏光を利用した研究 (例 Imada et al. 2015 上図):
参照波と試験波をPPBSにより直交した偏波に分ける
コンパクトな系での波面測定が可能

点回折干渉計(PDI)の概要

先行研究



- 点回折干渉計を用いた波面測
- 偏光を利用した研究 (例 Imad 参照波と試験波をPPBSによ
- コンパクトな系での波面測定

鏡面形状測定の方法と目的

鏡面測定の
空間分解能が粗い
→パネル間の
ずれがわからない

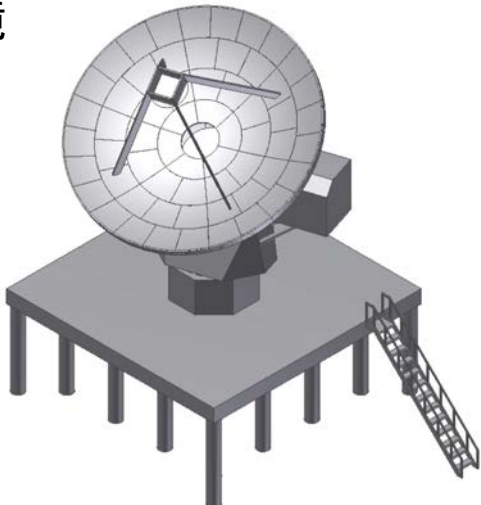
?

パネル面の
精度は数 μm

鏡面測定の
空間分解能が細かい
→パネル間の
ずれが測定できる

南極テラヘルツ
望遠鏡の主鏡
のパネル: 90枚
(直径1.3 m)
→これより細かく

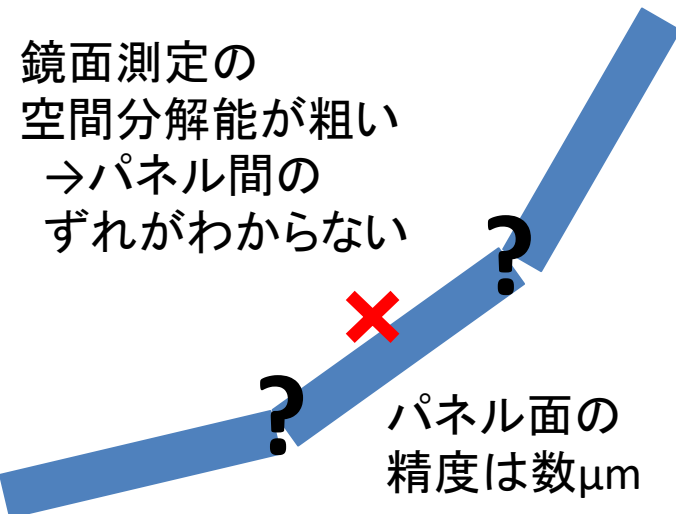
望遠鏡
主鏡



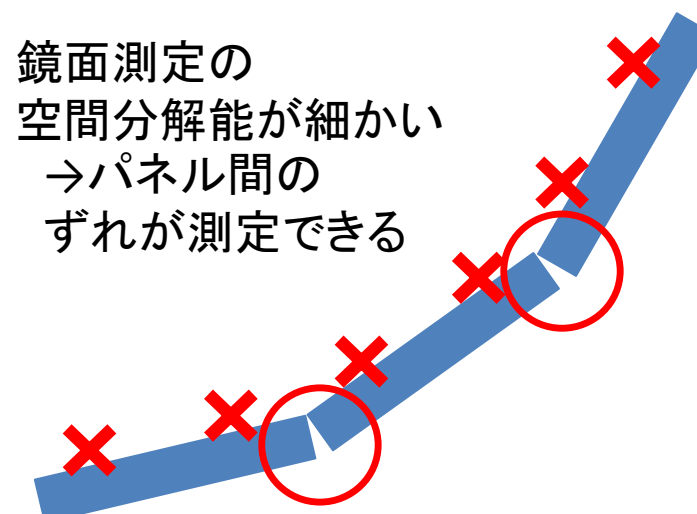
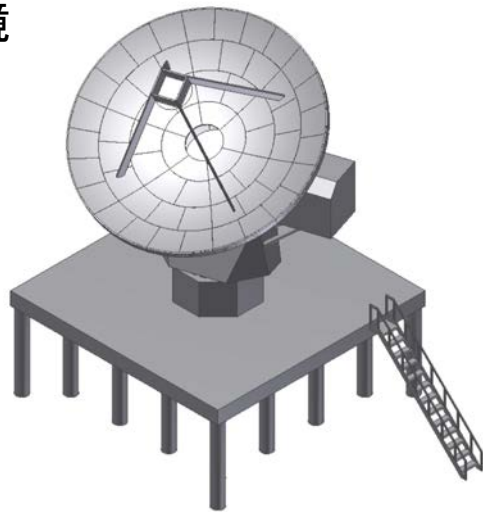
★MKID受信機:
焦点面での多素子化に有利

10 mの南極テラヘルツ望遠鏡では1万素子
→そのうちの数百素子を借りる

鏡面形状測定の方法と目的



望遠鏡
主鏡



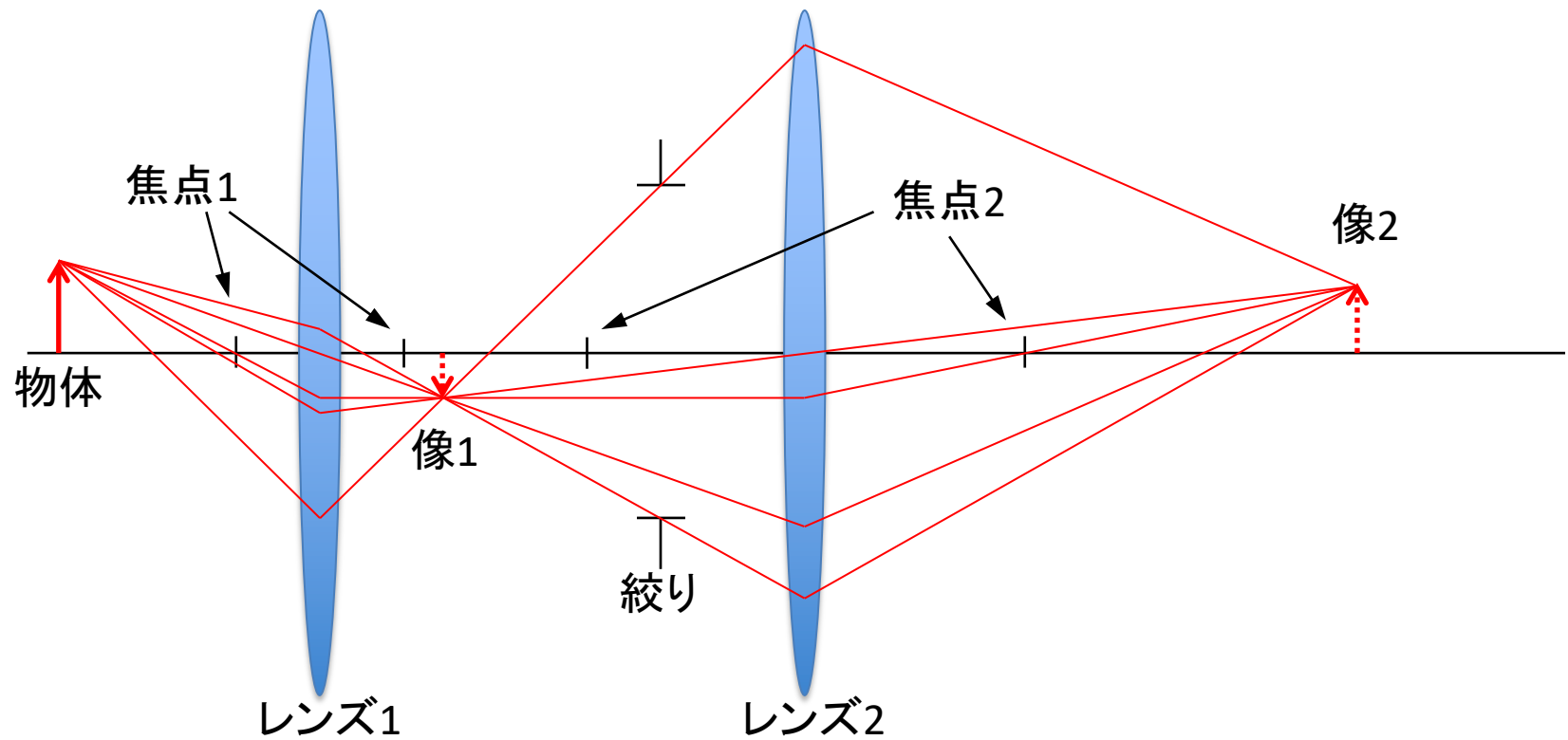
★MKID受信機:
焦点面での多素子化に有利

10 mの南極テラヘルツ望遠鏡では1万素子
→そのうちの数百素子を借りる

ただし、MKID受信機はボロメーターの一種
であり、波面の直接測定はできない

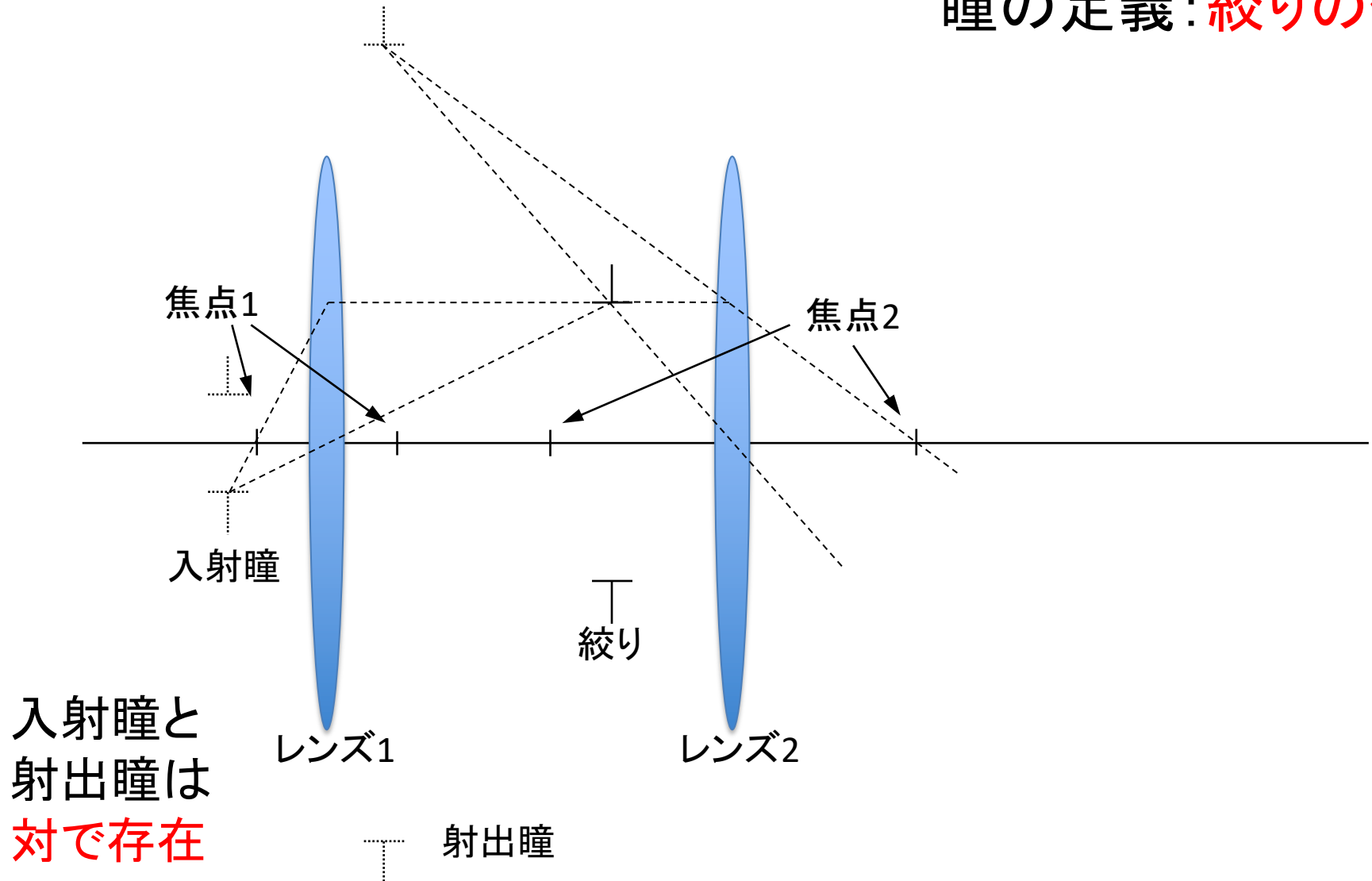
瞳

瞳の定義: 絞りの像



瞳

瞳の定義: 絞りの像

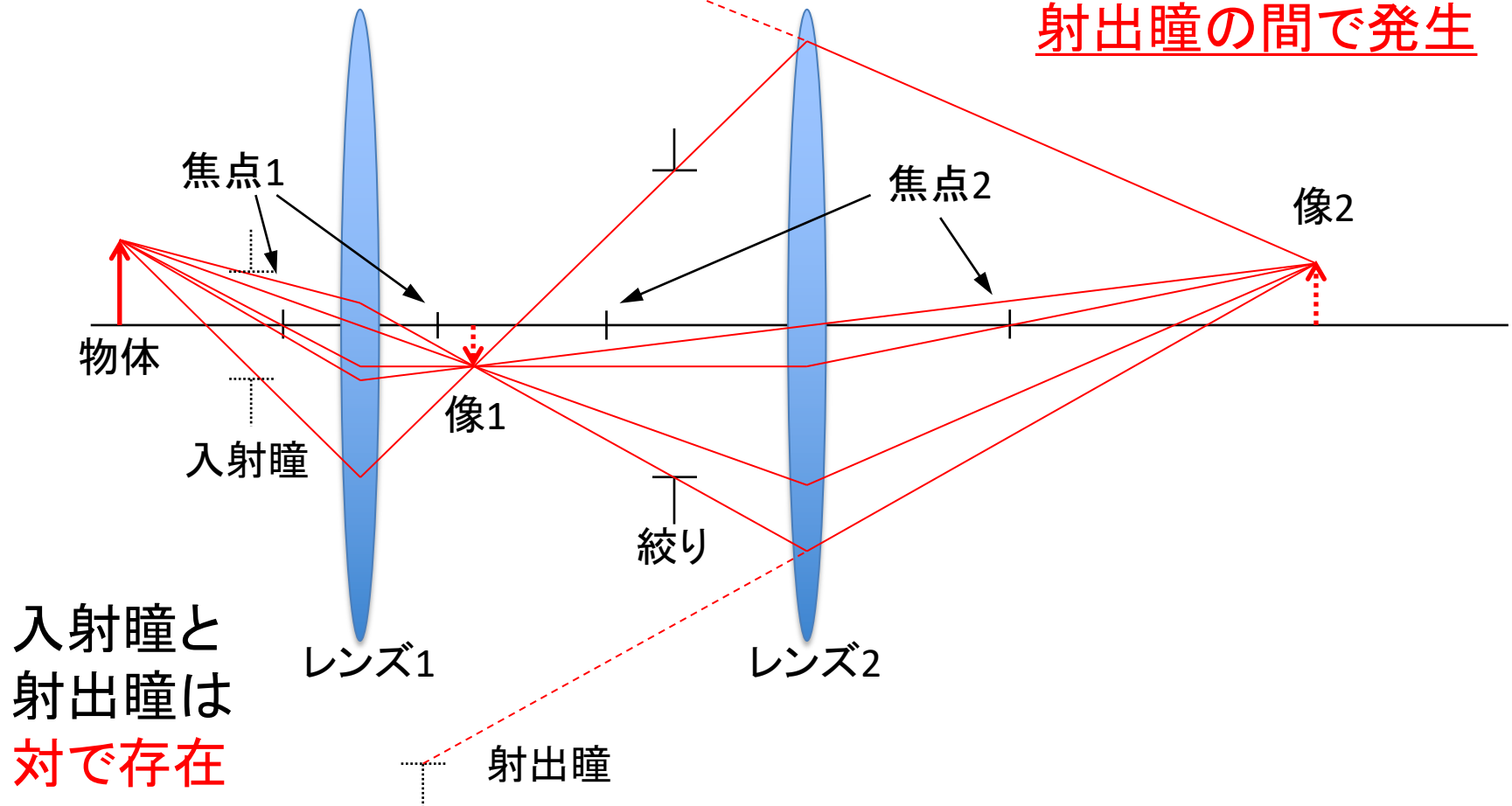


瞳

入射瞳を通った
光は必ず射出瞳
から出る

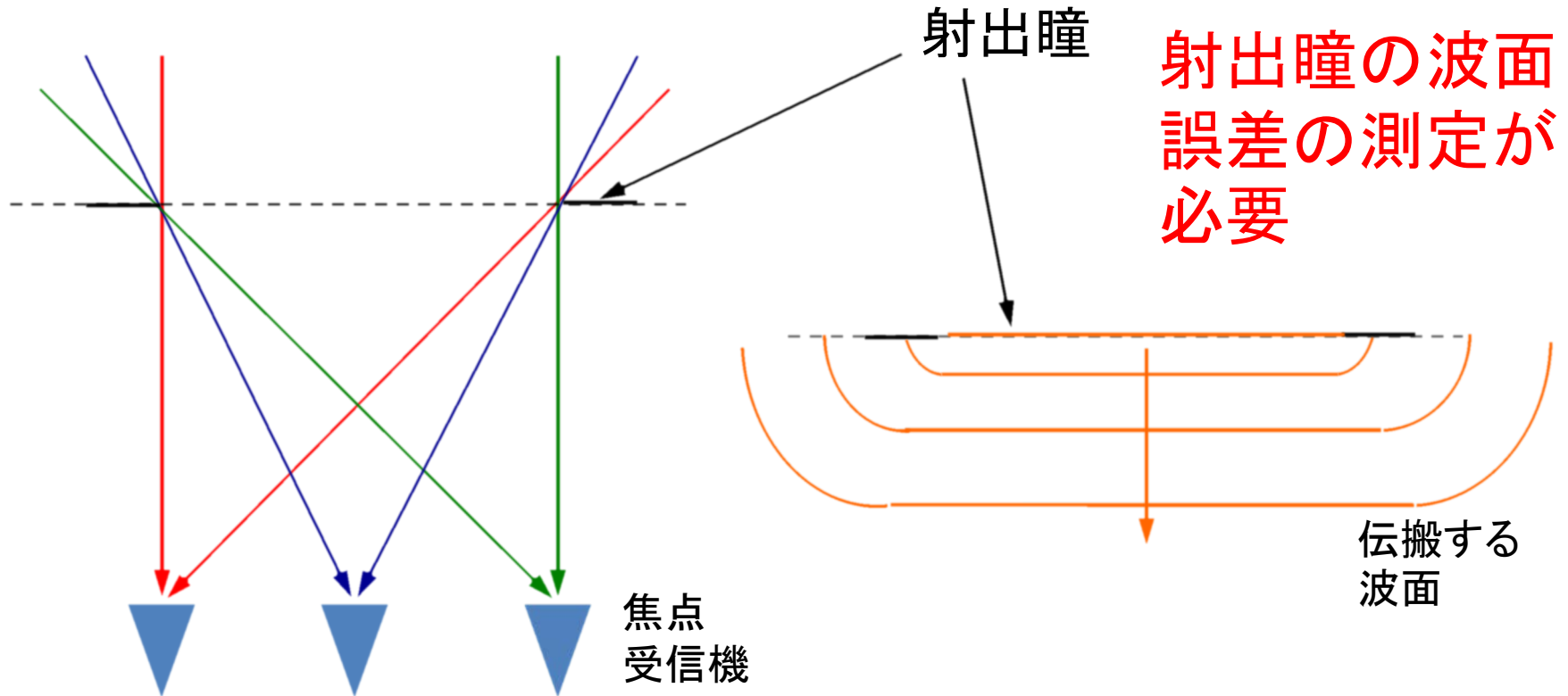
瞳の定義：**絞りの像**

波面誤差は入射瞳と
射出瞳の間で発生



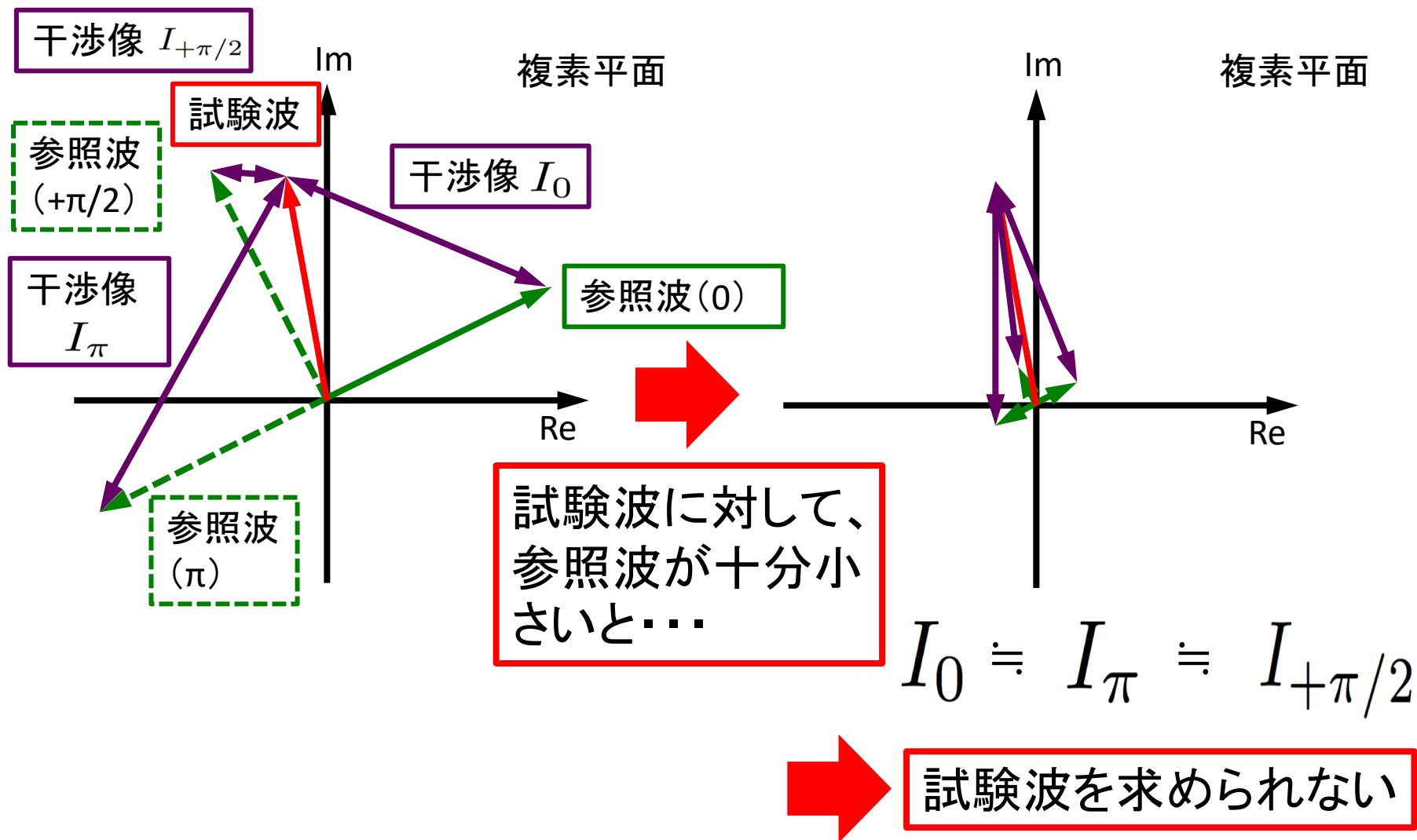
入射瞳と
射出瞳は
対で存在

瞳

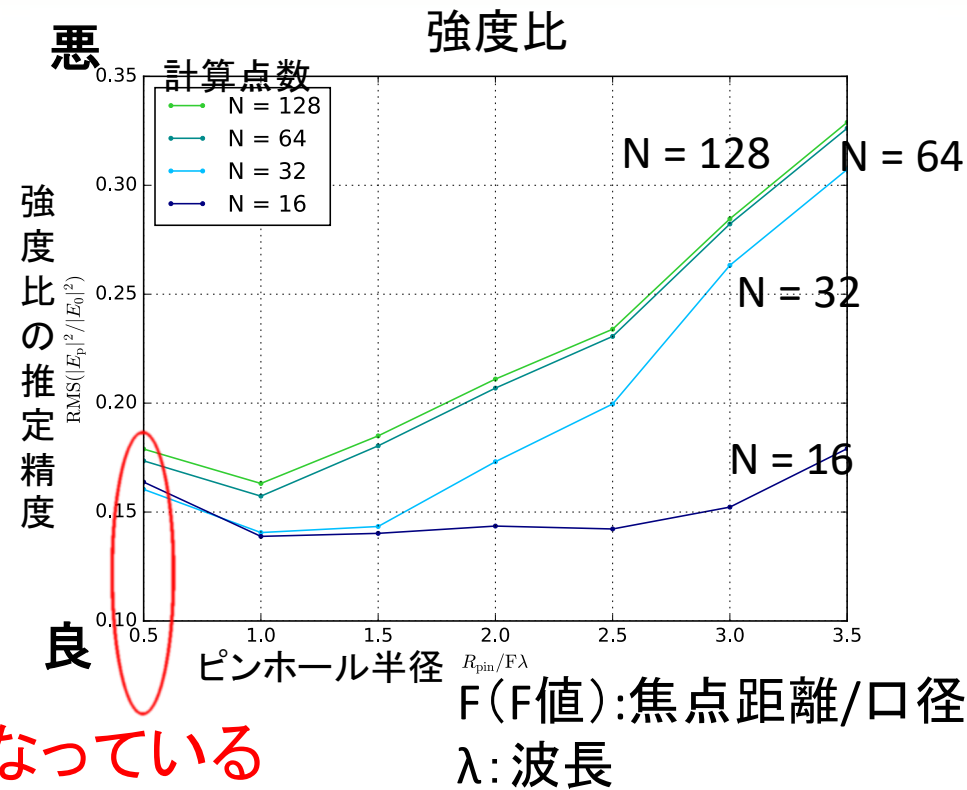
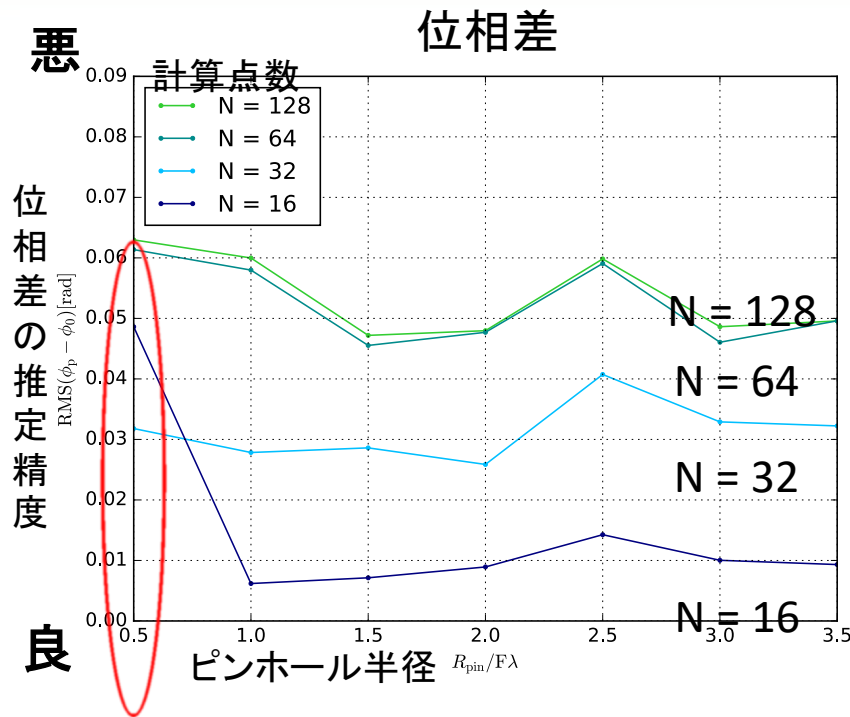


複数の光線を通す場合、
瞳では必ず**全ての光線が**
同じ位置を通る。

一般に伝搬する光は無限
の広がりを持つが、瞳では
有限の大きさに**しぼられる。**



復元した結果の考察



- $R_{pin} = 0.5F\lambda$ で推定精度が悪くなっている



参照波にピンホールの縁からの影響

ピンホールが小さすぎる

→縁の影響が大きい

ピンホール半径は、 $R_{pin} = 0.5F\lambda$ より大きい必要がある

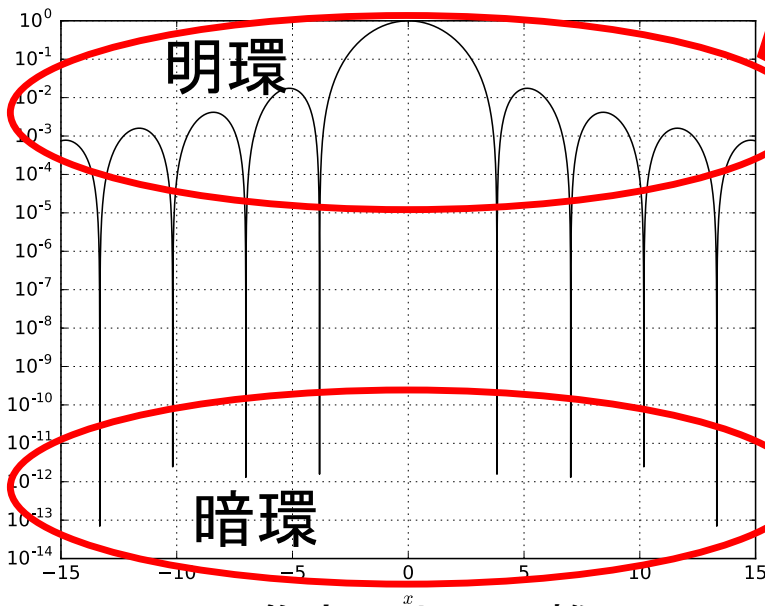
復元した結果(強度比)の考察

- 強度比はピンホール的大小と計算点数の両方による。

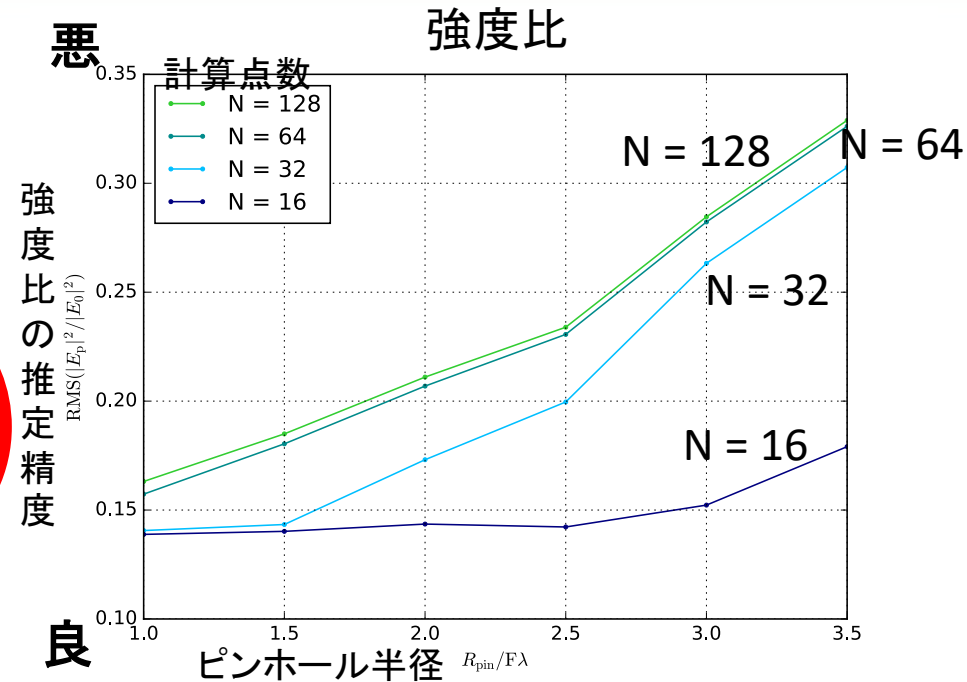
焦点面の電場分布は明暗の環 → エアリーパターン

暗環: 強度0になる点

光の強度



焦点面上の距離
(0が中心)



復元した結果(強度比)の考察

- 強度比はピンホールの大きさと計算点数の両方による。

焦点面の電場分布は明暗の環→エアリーパターン

暗環: 強度0になる点

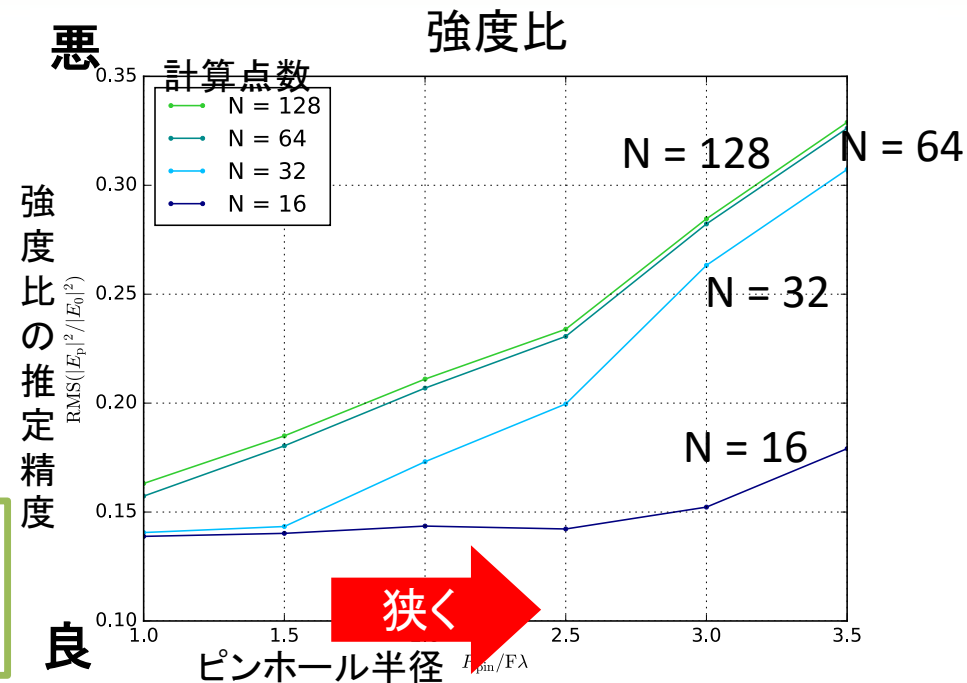
明暗の間隔:

ピンホール半径に反比

例

焦点面の測定範囲: 計算点数に比例

点回折干渉計: 参照波を基準とした干渉像を作る



復元した結果(強度比^算)の考察

- 強度比はピンホールの大きさと計算点数の両方による。

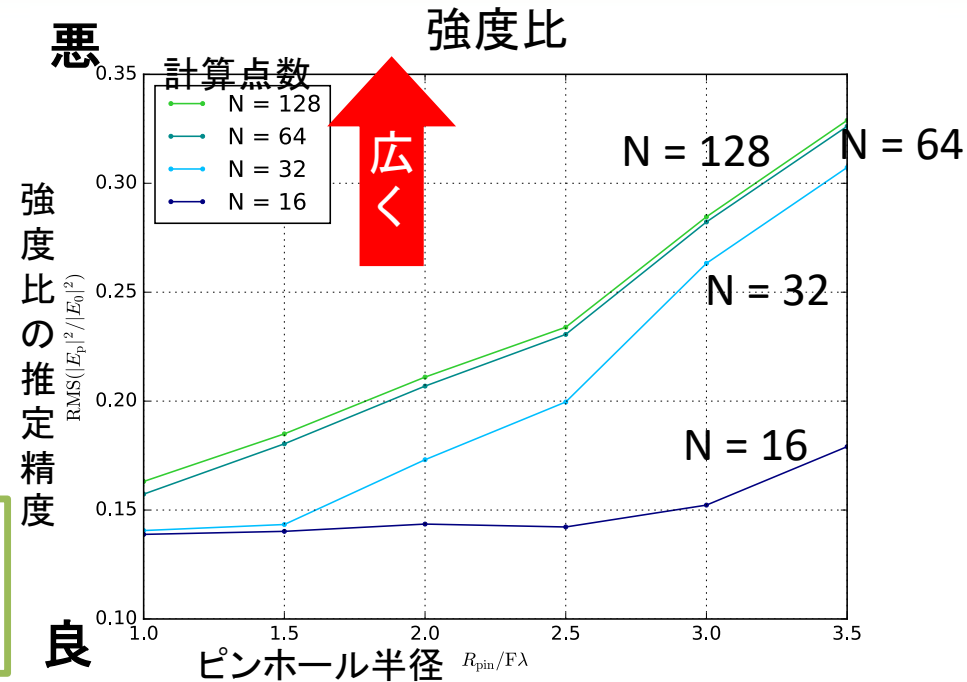
焦点面の電場分布は明暗の環→エアリーパターン

暗環: 強度0になる点

明暗の間隔:
ピンホール半径に反比

例
焦点面の測定範囲: 計算点数に比例

点回折干渉計: 参照波を基準とした干渉像を作る



復元した結果(強度比^算)の考察

- 強度比はピンホールの大きさと計算点数の両方による。

焦点面の電場分布は明暗の環→エアリーパターン

暗環: 強度0になる点

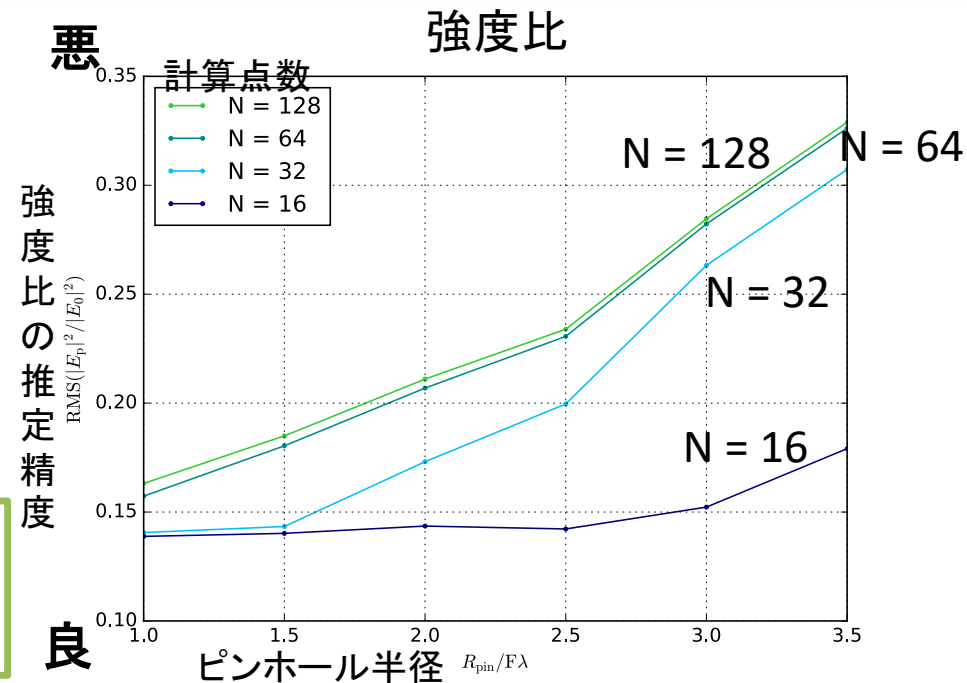
明暗の間隔:
ピンホール半径に反比

例
焦点面の測定範囲: 計算点数に比例

点回折干渉計: 参照波を基準とした干渉像を作る

参照波の強度が0では正しい基準となれない

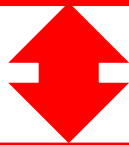
強度が0となる点を含まないように測定する



干渉像が
正しく作れ
ない

復元した結果(強度比^算)の考察

参照波の強度が0では正しい基準となれない
→推定精度の悪化

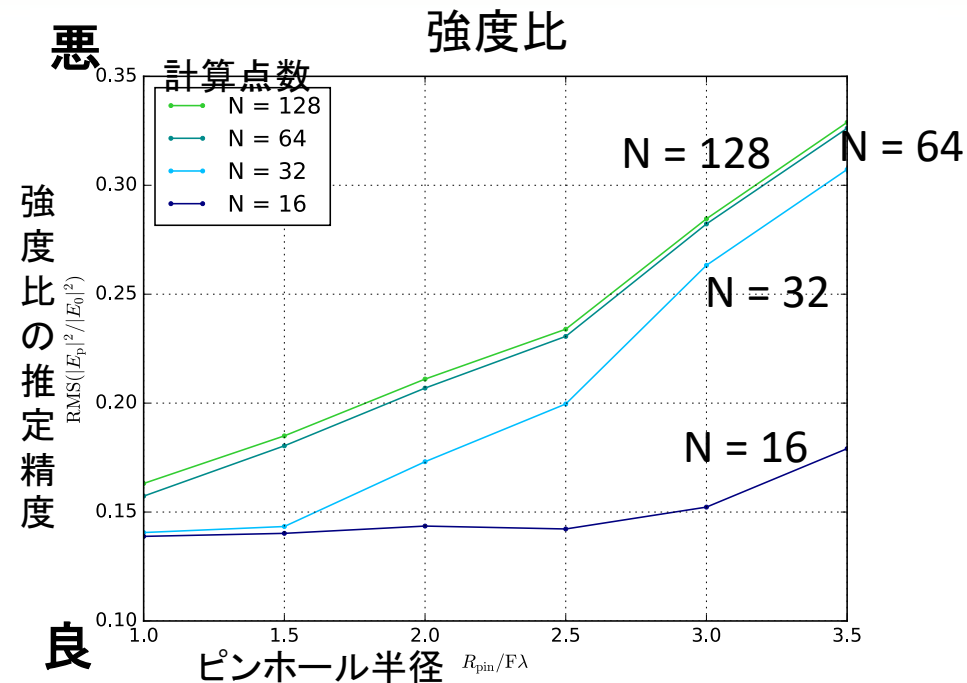


参照波が強度0をとらない
測定範囲内では、推定精度は変わらない

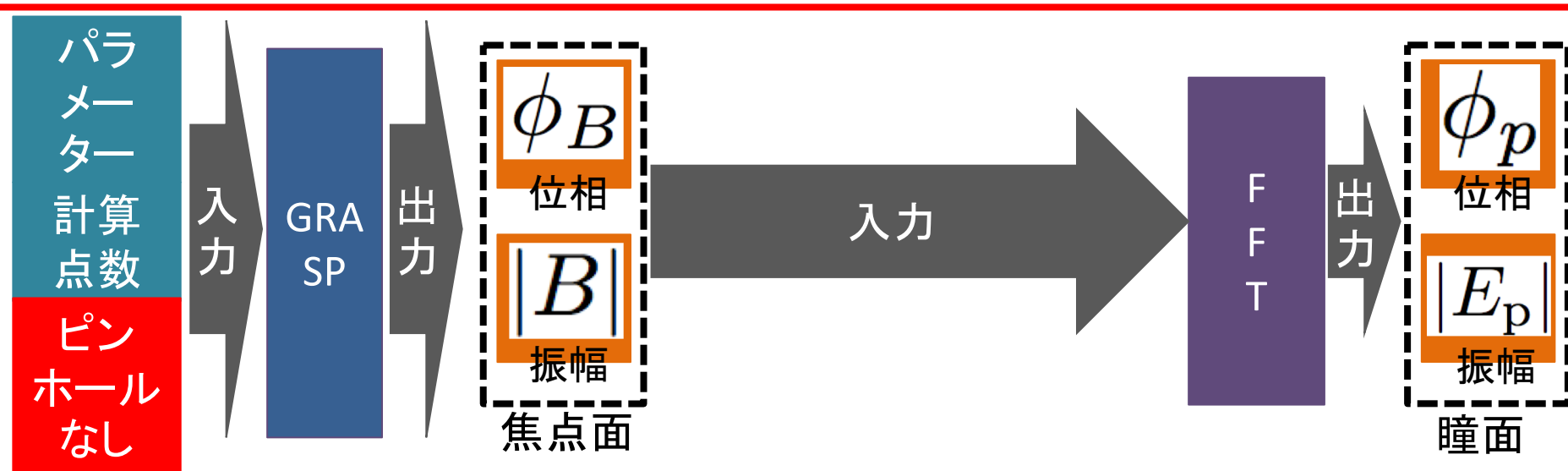
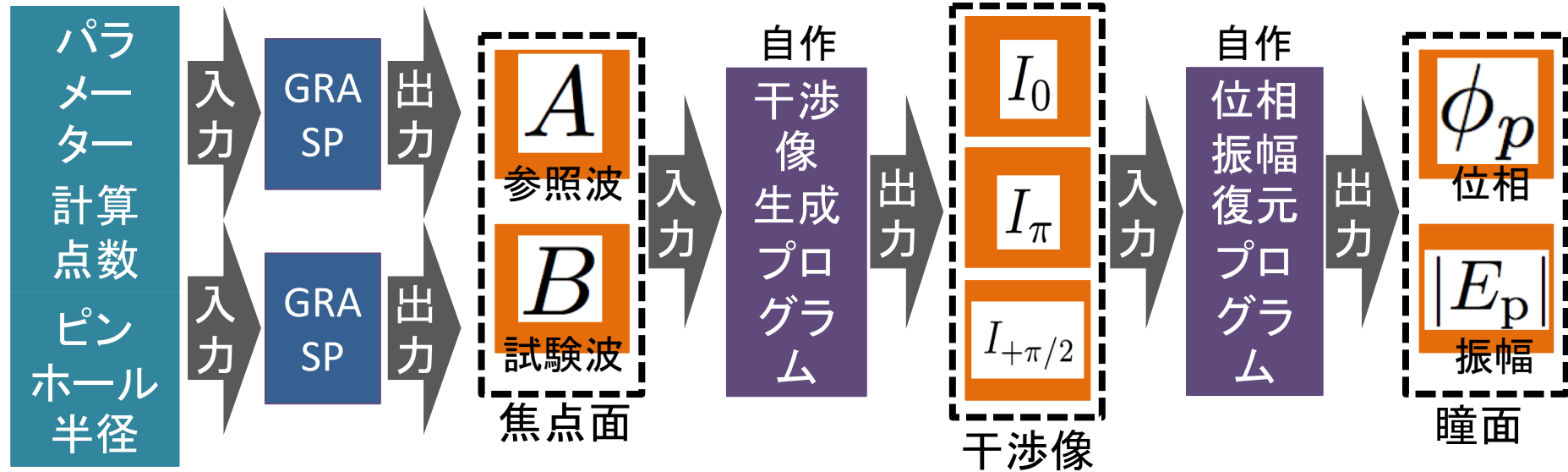
強度0の間隔はピンホール
の大きさによる

予想:

ピンホールがない場合と推定精度に変化はないはず

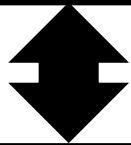


復元した結果(強度比)の考察



復元した結果(強度比^算)の考察

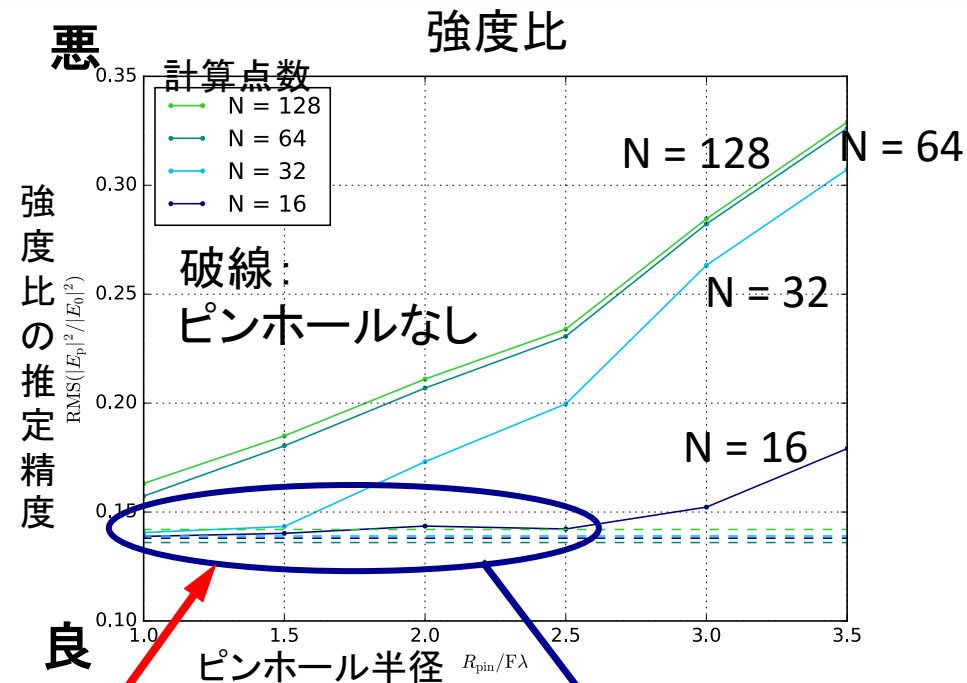
参照波の強度が0では正しい基準となれない
→推定精度の悪化



参照波が強度0をとらない
測定範囲内では、推定精度は変わらない

強度0の間隔はピンホール
の大きさによる

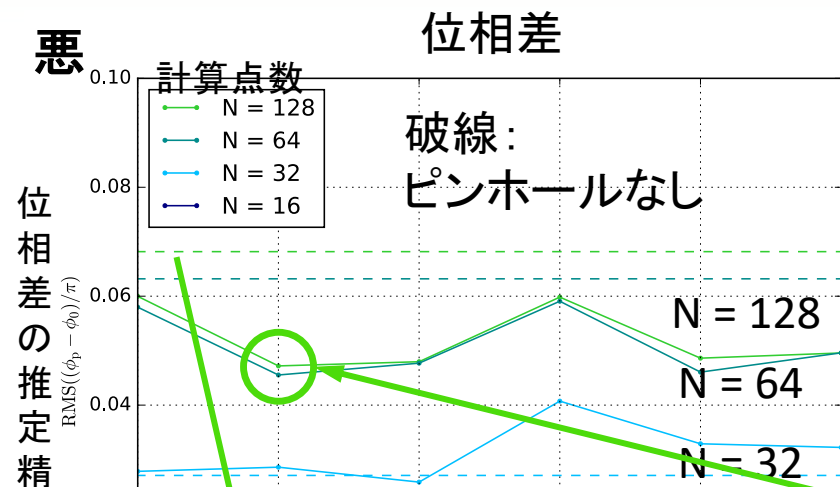
ピンホールがない場合と
推定精度に変化はない



焦点面の測定範囲内に
参照波0の点を含まない

ピンホールがない場合とピン
ホールが十分小さい場合は
同程度の推定精度

復元した結果(位相差)の考察



瞳の縁による波面の乱れが発生

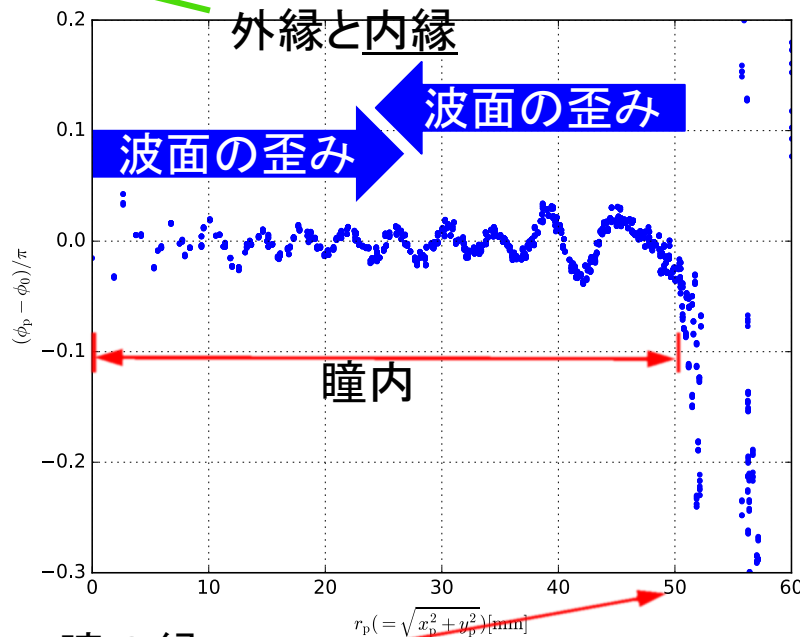
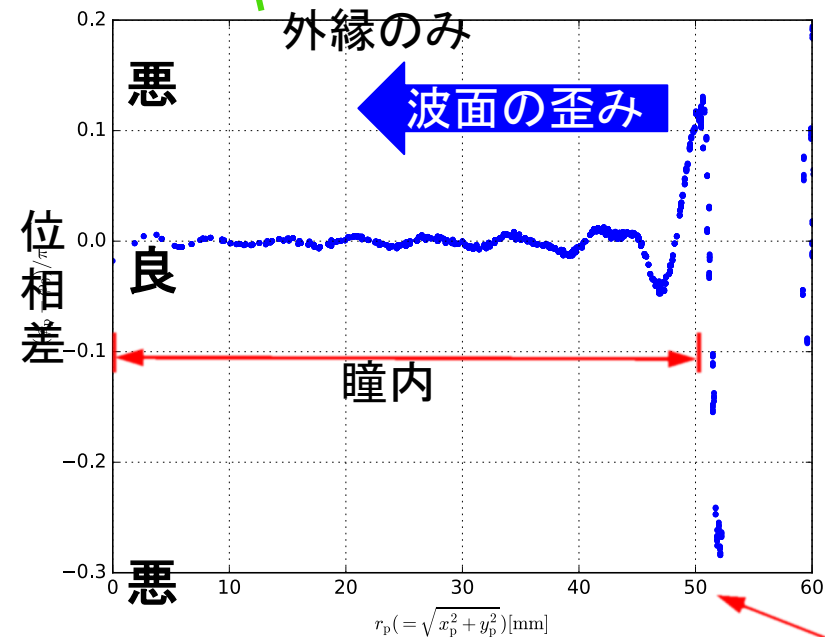


干渉

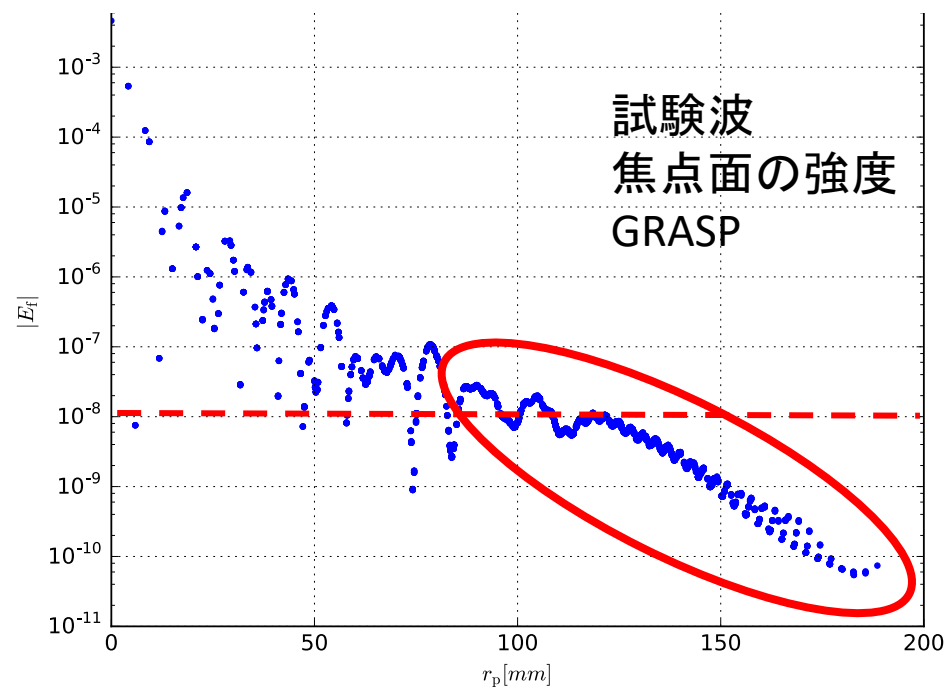
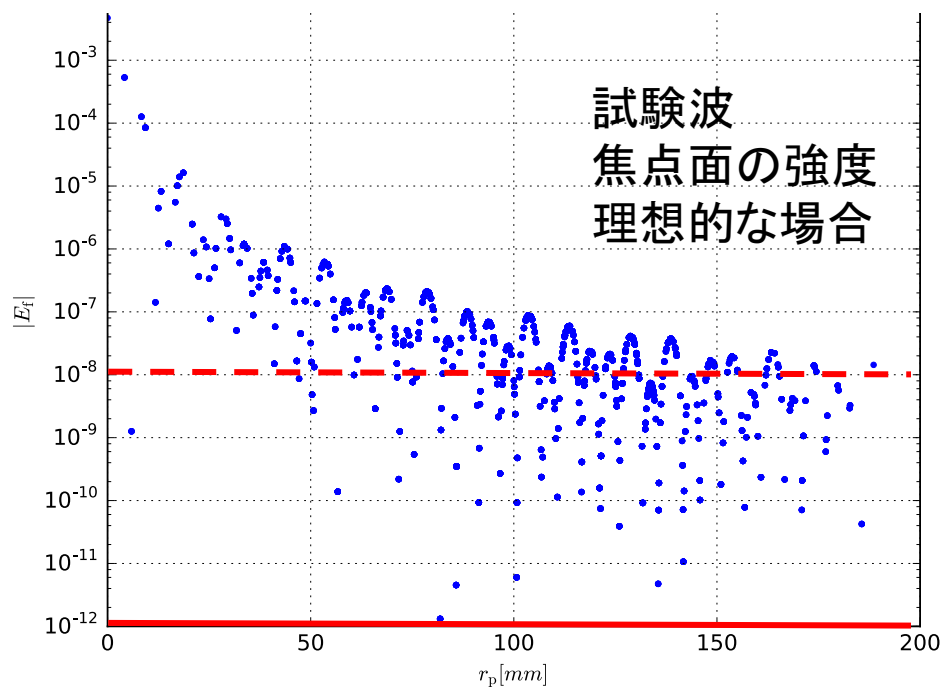
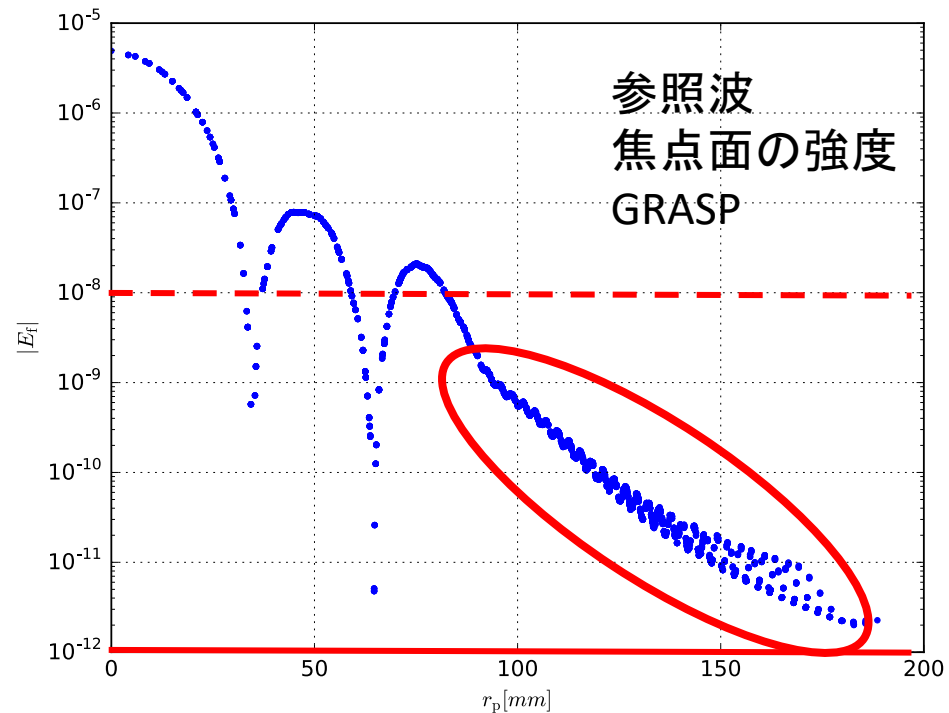
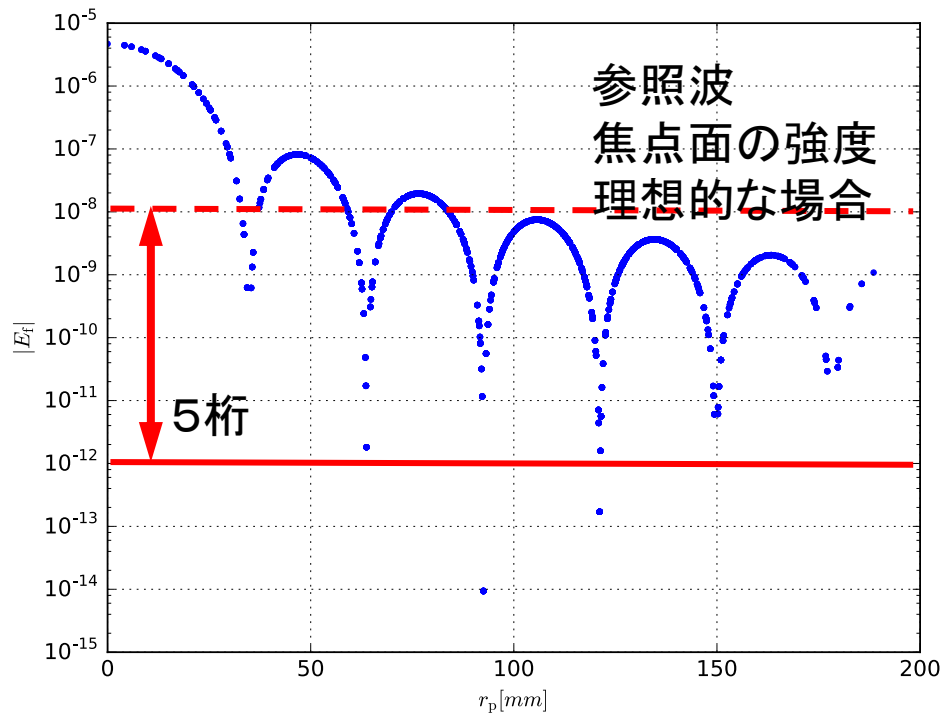
ピンホールの縁による波面の乱れが発生

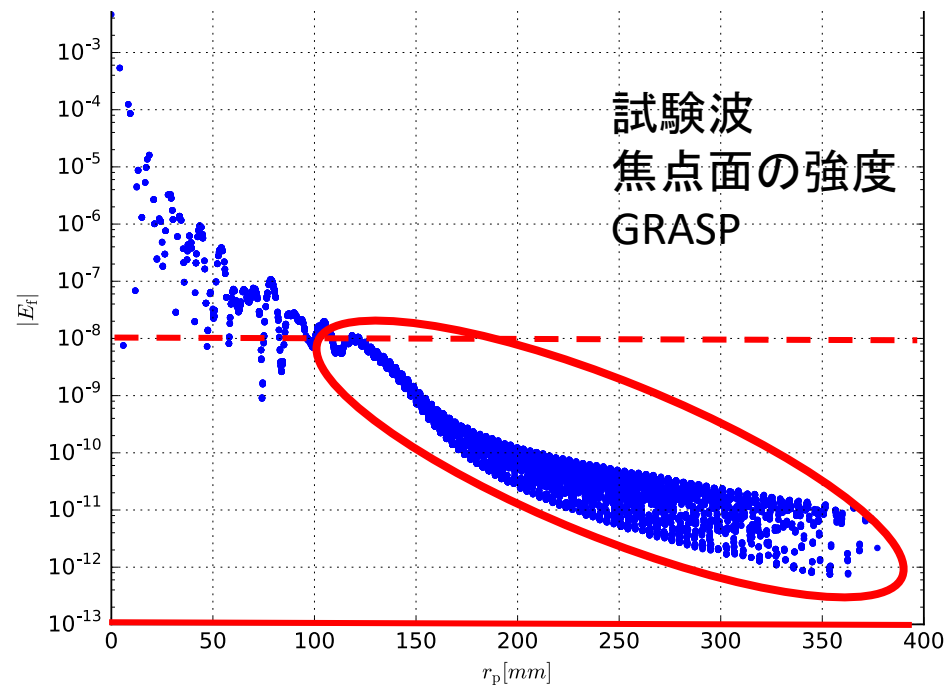
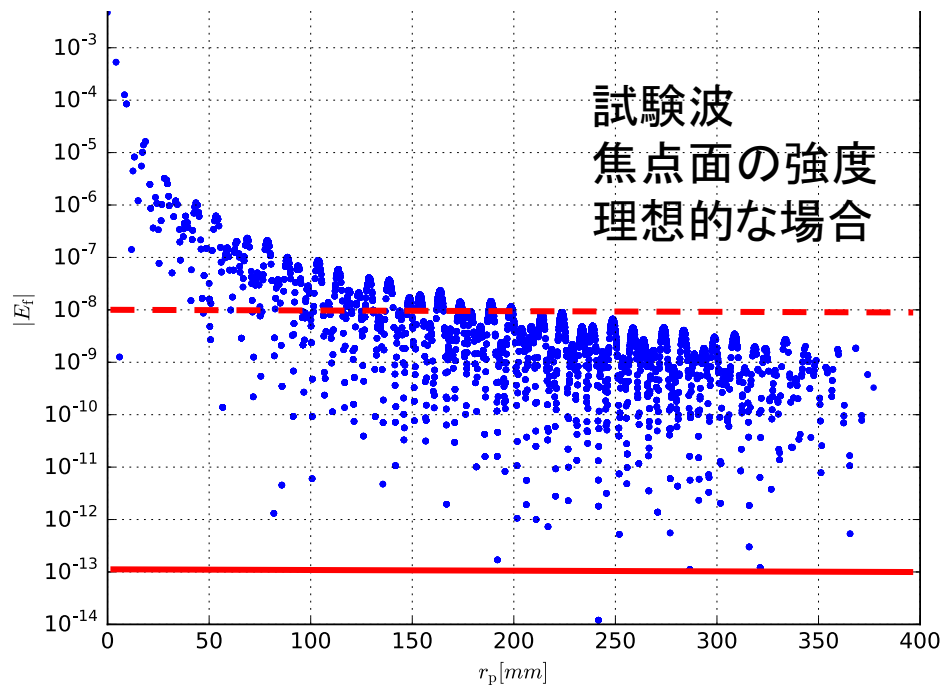
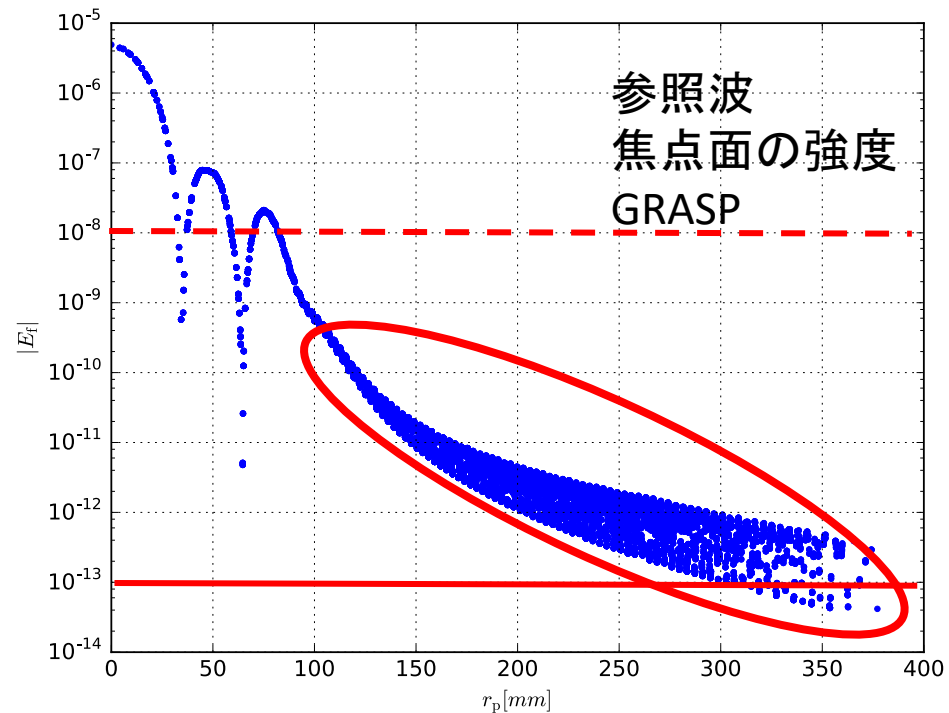
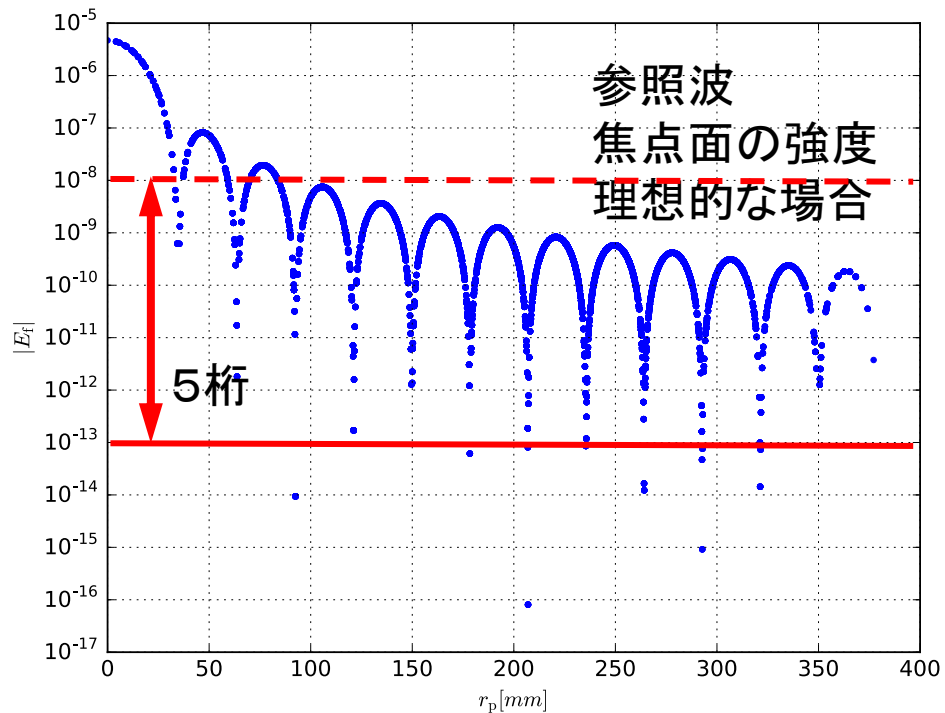
ピンホールなし:
外縁のみ

ピンホールあり:
外縁と内縁



瞳面内
全体での
推定精度
が向上





南極電波望遠鏡

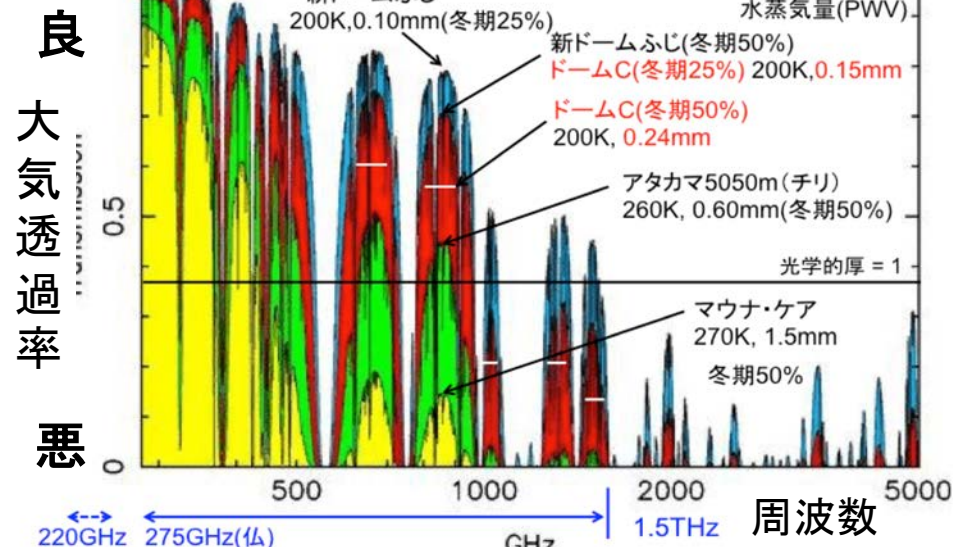
南極電波望遠鏡計画:

南極内陸部高原地帯に口径10 m
の南極電波望遠鏡を建設し、暗黒
銀河の掃天探査を行う

サブミリ波やテラヘルツ波

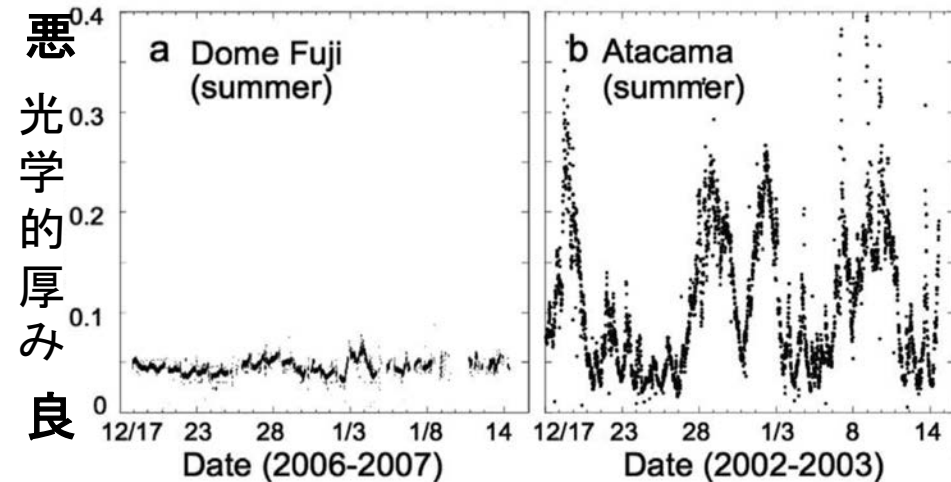
→水蒸気によって吸収されやすい

サブミリ波: 地上で**最高** テラヘルツ波: 地上で**唯一**



暗黒銀河: 可視光で見えない
→ サブミリ波やテラヘルツ波で
は観測可能

高地 (標高3000 m以上) かつ
極低温 (最低-80°C) の南極内
陸部高原地帯は水蒸気が少
なく、大気が安定している



南極(左)とアタカマ(右)の大気
の安定度の比較

シミュレーションと位相の推定

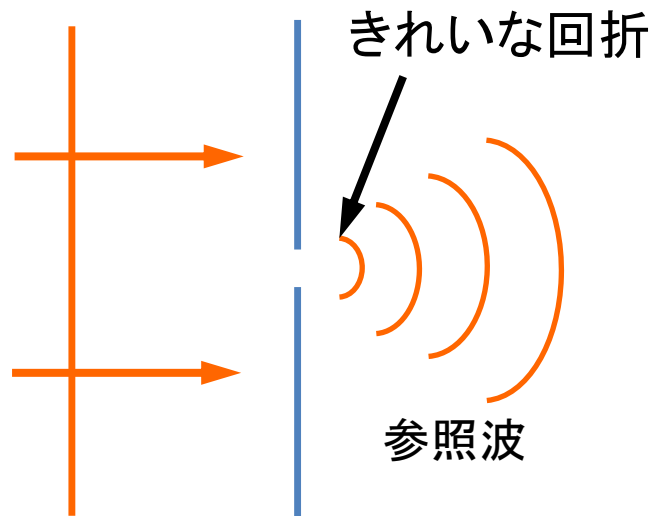
数値計算：物理光学手法

物理光学：

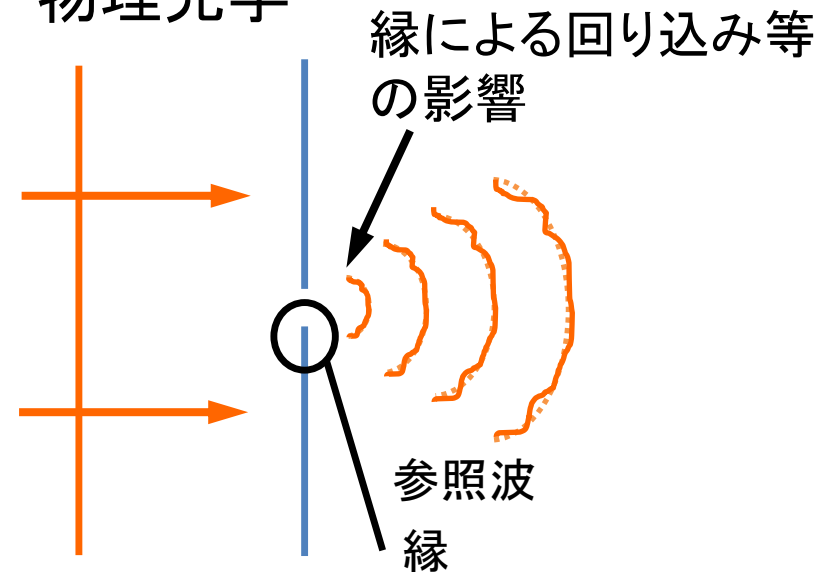
回折や干渉といった光の波動性を精度よく計算できる

電波領域：波長が長い
→他波長に比べて光の波
としての性質が顕著

偏波点回折干渉計の原理：
フラウンホーファー回折



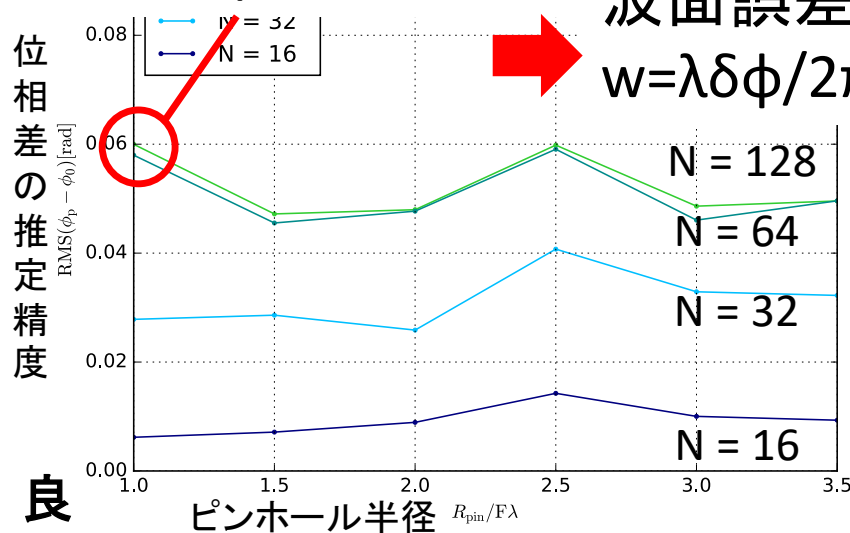
数値計算の原理：
物理光学



物理光学とフラウンホーファー回折のずれと波面誤差による
ずれの区別がつかない→波面誤差のない場合を検討

推定した結果の考察

悪 位相差の推定精度 $\delta\phi=0.061[\text{rad}]$



★南極電波望遠鏡の鏡面測定法として

- 最も悪い位相差の精度でも波長の1/100の精度 ($N=128$)
- 空間分解能

計算点数:
128点

主鏡の空間分解能: $10 \text{ m}/128 \text{ 点} \doteq 0.08 \text{ m}$

偏波点回折干渉計は南極電波望遠鏡の鏡面測定法として十分な空間分解能で測定できる

主鏡のパネル:
直径1.3 m

偏波点回折干渉計は南極電波望遠鏡の鏡面測定法として実装できる可能性がある