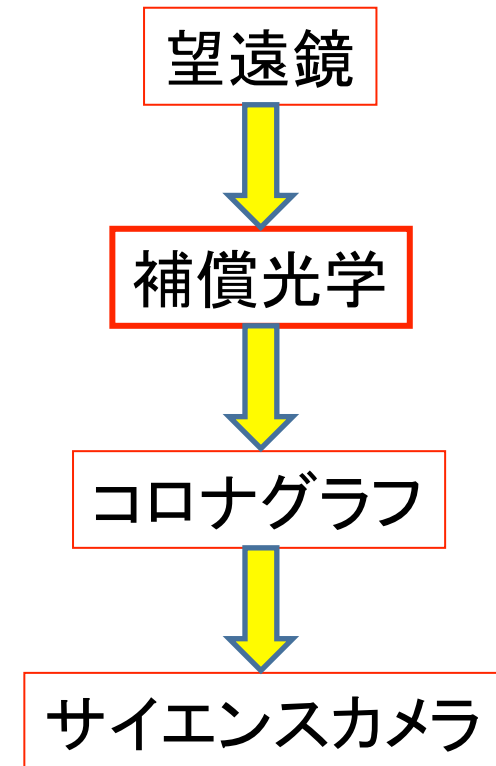


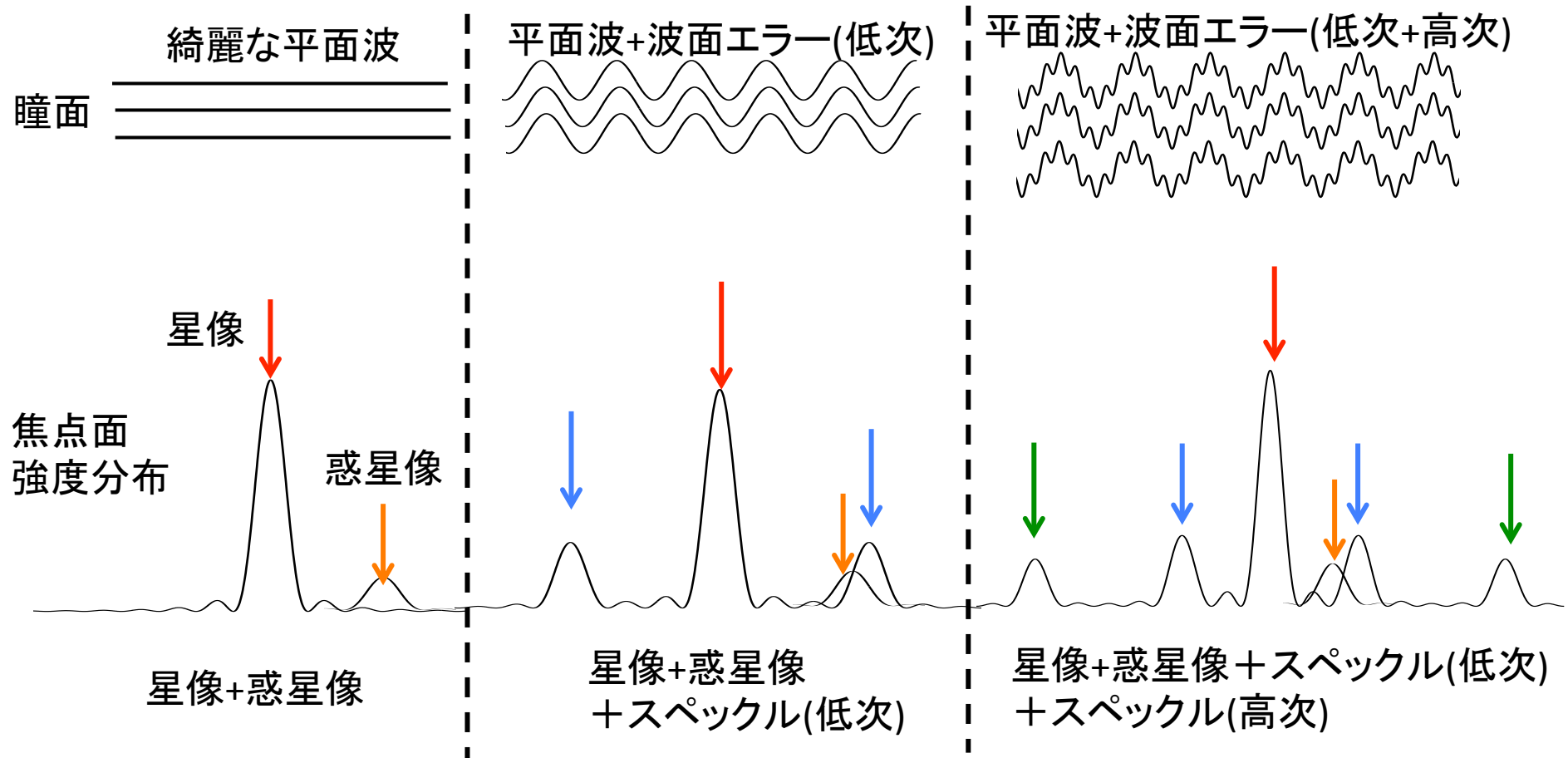
補償光学波面センサの比較検討

- 補償光学とは
- 極限補償光学とは
- ピラミッド波面センサ
- 点回折干渉計波面センサ
- 両センサの比較
 - 測定できる波面情報
 - ダイナミックレンジ
 - 計測を妨げるもの



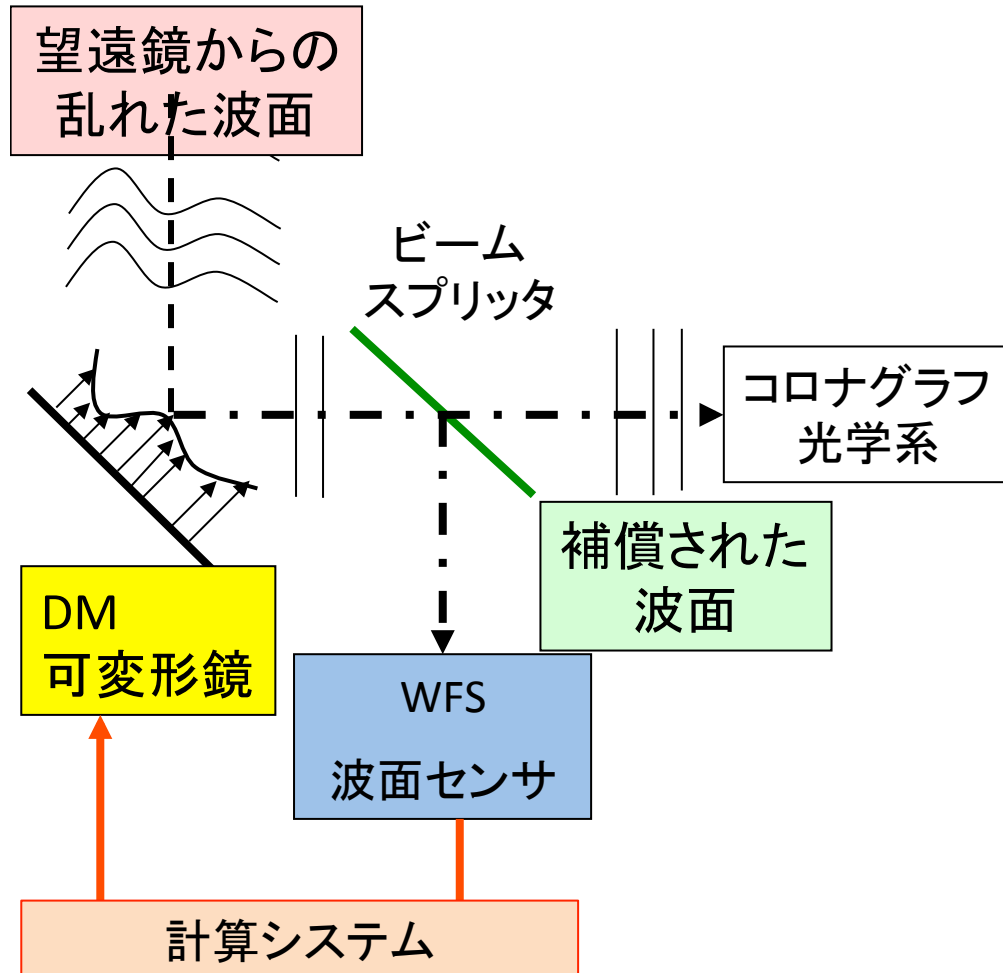
補償光学とは(1/2)

- 平面波は綺麗なPSFに結像。
- 波面エラーが入るとスペックルが形成される。
- スペックルが惑星検出の邪魔をする。



補償光学とは(2/2)

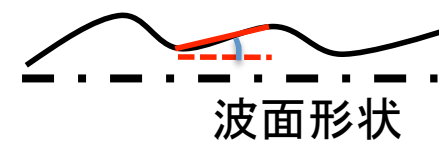
- (主に大気による)波面の乱れを能動的に補正する光学系。



WFS (波面センサ)による波面エラーの計測

A. 形状計測

計測対象の波面
理想的な波面

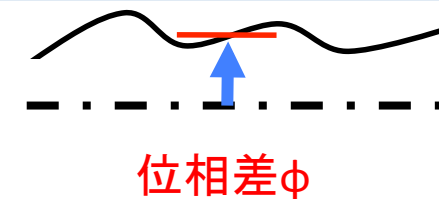


理想的な波面に対する形状を計測
形状は直接計測できないので

- 傾斜は形状の1次微分 → 計算量が多い
- 曲率は形状の2次微分 → 多い

B. 位相計測

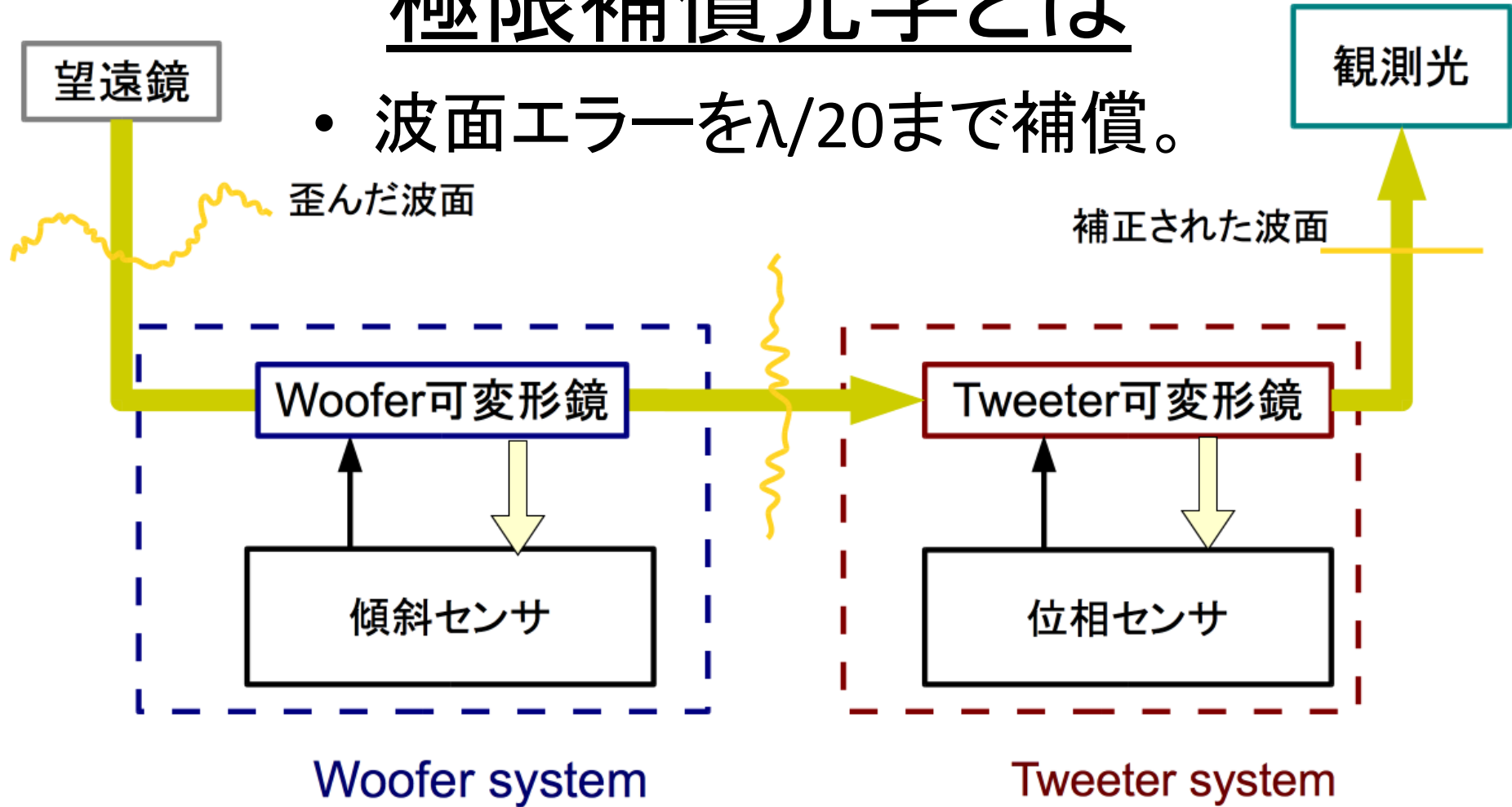
計測対象の波面
理想的な波面



理想的な波面に対する
波面の進み/遅れ(位相差)の計測

極限補償光学とは

- 波面エラーを $\lambda/20$ まで補償。



前段:低周波成分。
高ダイナミックレンジ。
 $\lambda/4$ 程度まで補正。

後段:高周波成分。
低ダイナミックレンジ。
 $\lambda/20$ 程度まで補正！！

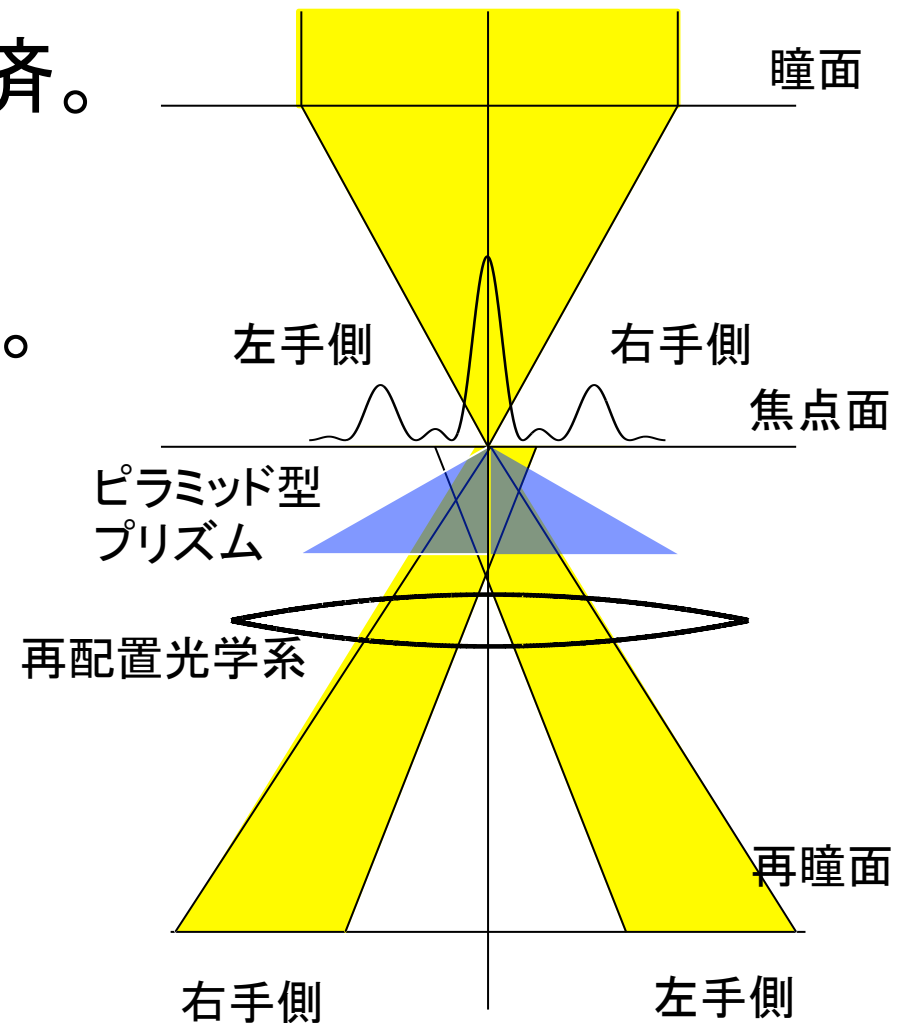
ピラミッド波面センサ(PWFS)1/2

- Subaru/SCEXAOで採用FL済。
(E-ELT等でも搭載予定)
傾斜センサ型だけど位相も。



ピラミッド型プリズム

http://www.ing.iac.es/PR/wht_info/whtpwfs.html



ピラミッド型プリズムで焦点面の像を左右に分割して瞳再結像する。

ピラミッド波面センサ(PWFS)2/2

入射光の波面エラー@瞳面

$$\phi_1(x_1) = a \exp\left(\frac{2\pi x_1}{x_0} + \alpha\right) + ib \cos\left(\frac{2\pi x_1}{x_0} + \beta\right)$$

FT

位相エラー

振幅エラー

入射光の複素振幅@焦点面

$$A_2(\theta) = A_0(\theta) + \frac{1}{2} (iae^{i\alpha} - be^{i\beta}) A_0\left(\theta + \frac{\lambda}{x_0}\right)$$

星像

右手側スペckル

$$+ \frac{1}{2} (iae^{-i\alpha} - be^{-i\beta}) A_0\left(\theta - \frac{\lambda}{x_0}\right)$$

左手側スペckル

入射光の強度@右手

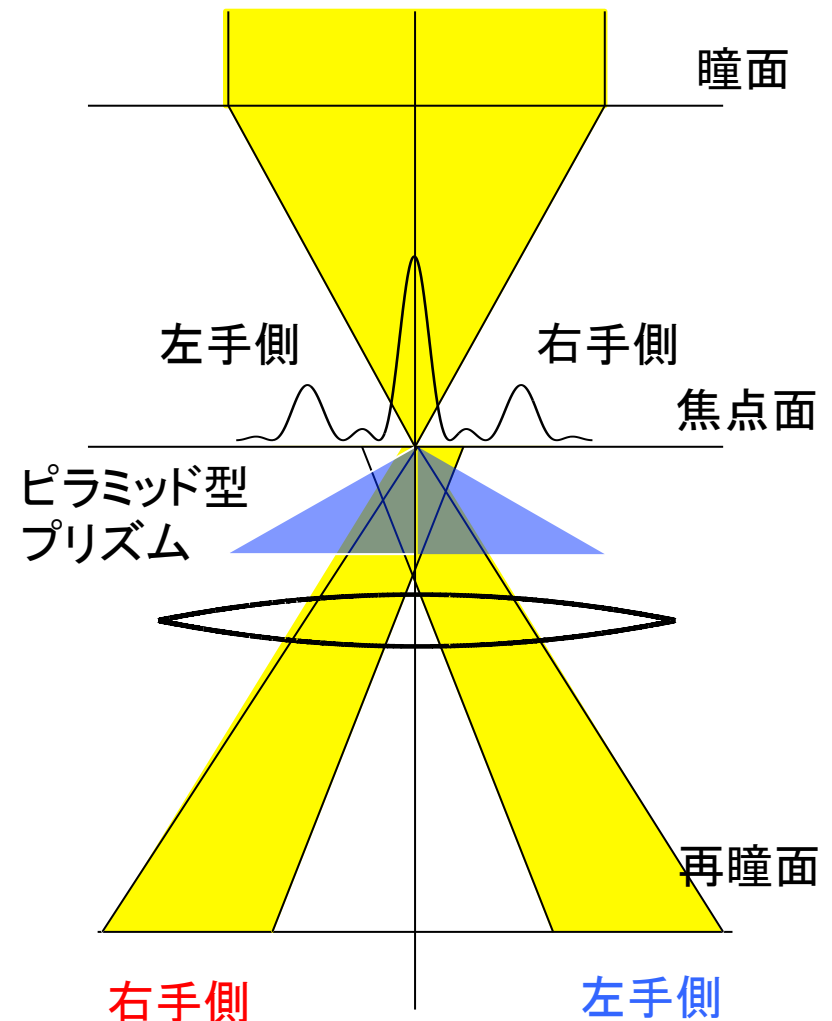
$$P_R(x_3) = P_R^0 + (-a \sin\left(\frac{2\pi x_3}{x_0} + \alpha\right) - b \cos\left(\frac{2\pi x_3}{x_0} + \beta\right)) \sqrt{P_R^0 P_{\text{ref},R}}$$

入射光の強度@左手

$$P_L(x_3) = P_L^0 + (a \sin\left(\frac{2\pi x_3}{x_0} + \alpha\right) - b \cos\left(\frac{2\pi x_3}{x_0} + \beta\right)) \sqrt{P_L^0 P_{\text{ref},L}}$$

右手-左手

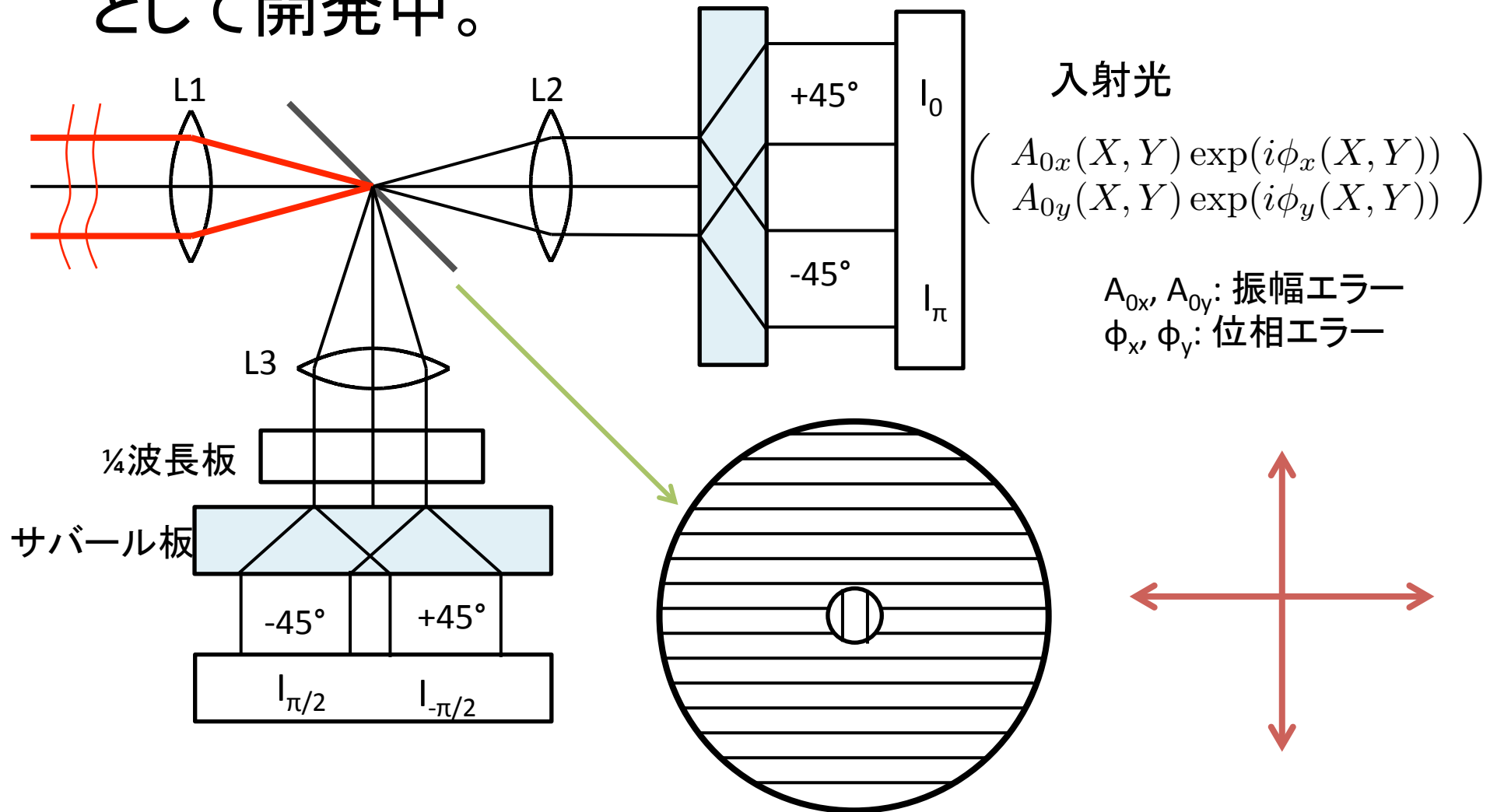
$$P_R(x_3) - P_L(x_3) = -(\sqrt{P_{\text{ref},R}} + \sqrt{P_{\text{ref},L}}) \sqrt{P^0} a \sin\left(\frac{2\pi x_3}{x_0} + \alpha\right)$$



位相エラーのみが取り出せた！！！！

点回折干渉計波面センサ(PDIWFS)

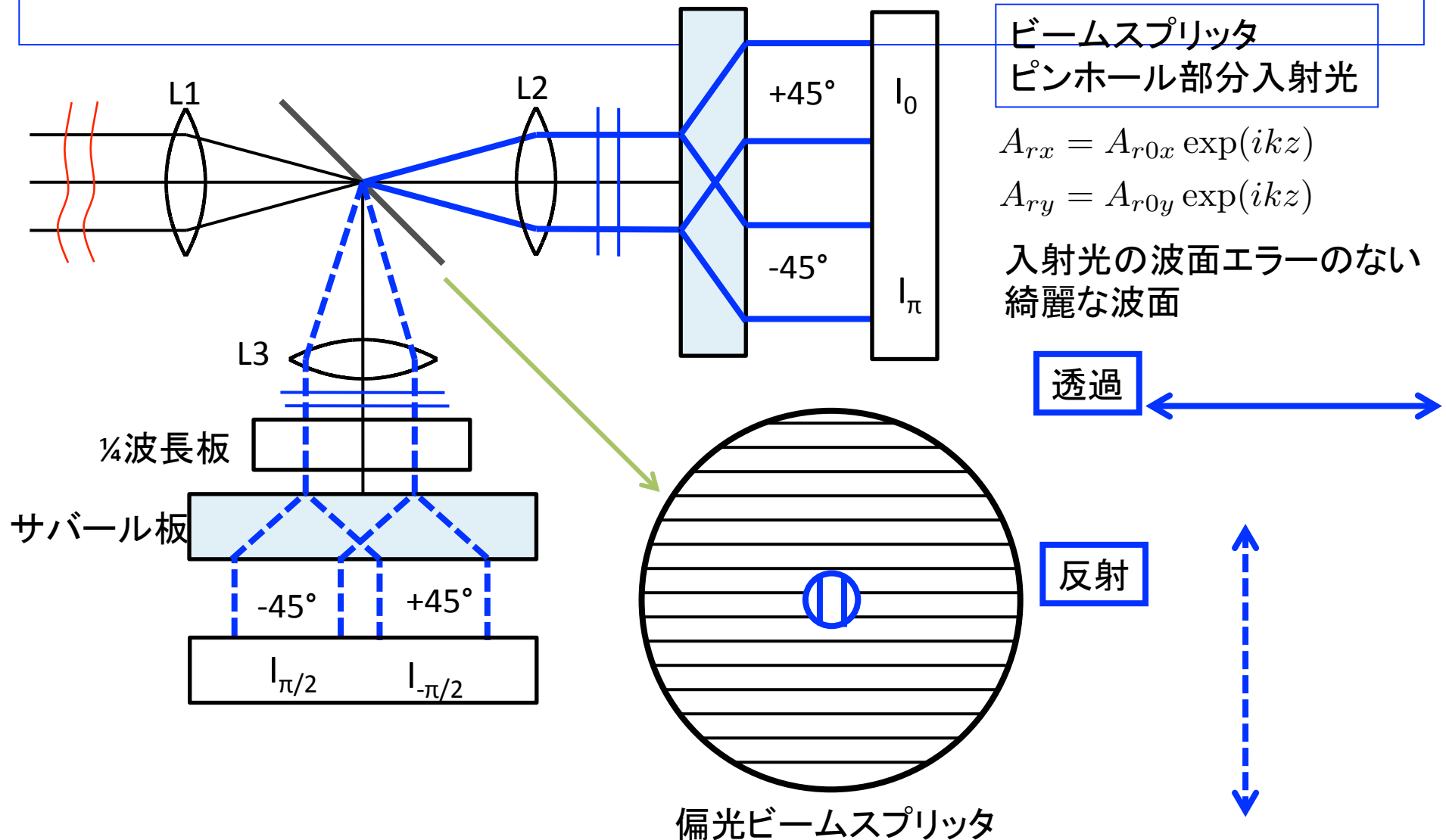
- 3.8m京大岡山望遠鏡補償光学Tweeter用センサとして開発中。



偏光ビームスプリッタ外形φ20, 内径56μ

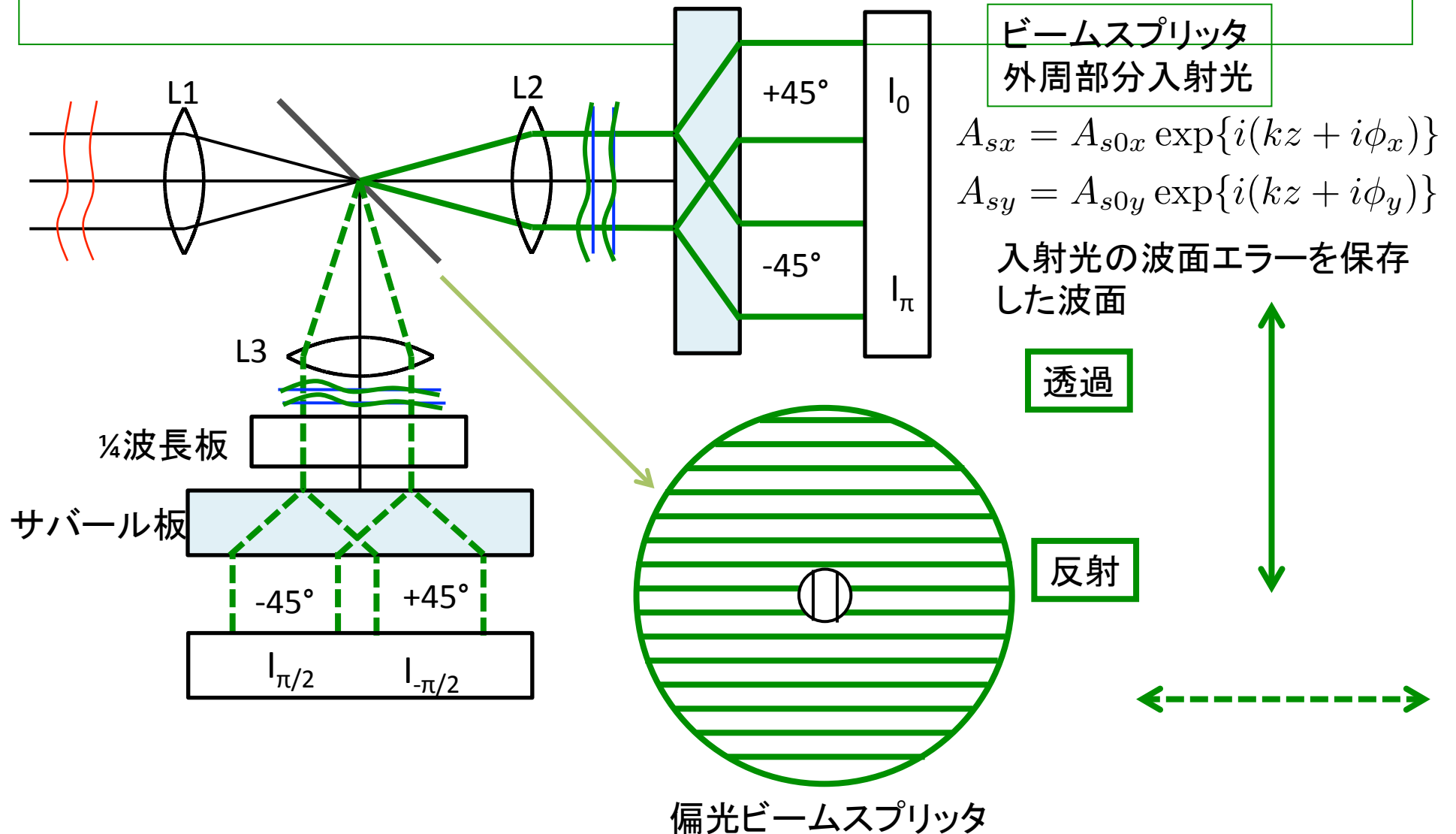
点回折干渉計波面センサ(PDIWFS)

- ビームスプリッタのピンホールに入射する光



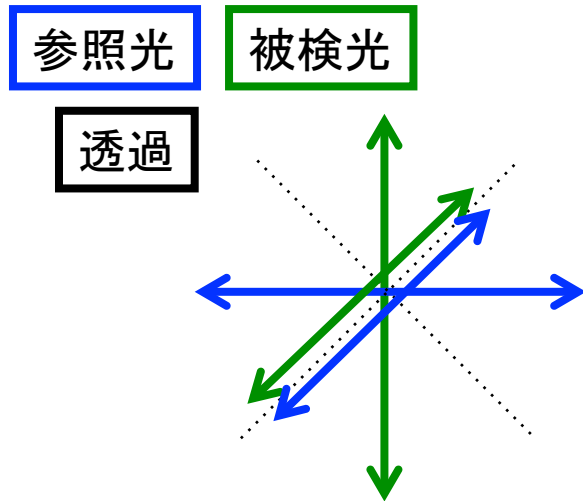
点回折干渉計波面センサ(PDIWFS)

- ビームスプリッタの外周部分に入射する光



点回折干渉計波面センサ(PDIWFS)

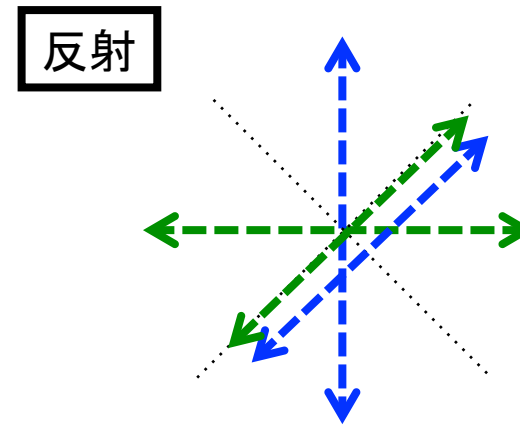
- 透過/反射の+45°, -45°成分を抜き出すと、参照光/被検光の干渉が起こる。**光路毎に位相差が異なる**



例) +45度成分 (位相差 0)

$$I_0 = \frac{1}{2} (|A_{r0x}|^2 + |A_{s0y}|^2) + A_{r0x} A_{s0y} \cos \phi_y$$

$$I_\pi = \frac{1}{2} (|A_{r0x}|^2 + |A_{s0y}|^2) - A_{r0x} A_{s0y} \cos \phi_y$$



例) +45度成分 (位相差 $-\pi/2$)

$$I_{\pi/2} = \frac{1}{2} (|A_{s0x}|^2 + |A_{r0y}|^2) + A_{s0x} A_{r0y} \sin \phi_x$$

$$I_{-\pi/2} = \frac{1}{2} (|A_{s0x}|^2 + |A_{r0y}|^2) - A_{s0x} A_{r0y} \sin \phi_x$$

各チャンネルでの強度差の比

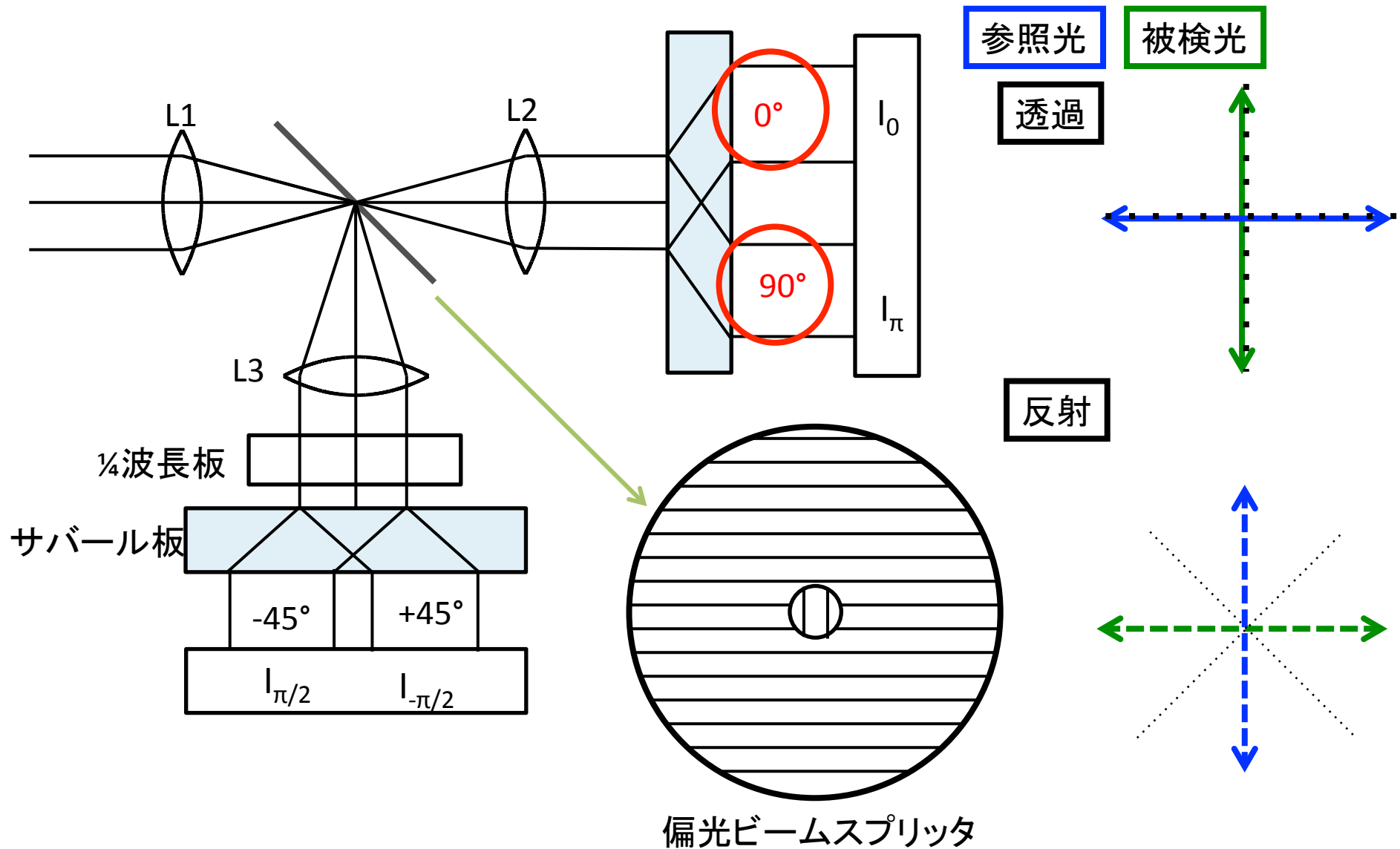
$$\frac{I_{\pi/2} - I_{-\pi/2}}{I_0 - I_\pi} = \frac{2A_{s0x} A_{r0y} \sin \phi_x}{2A_{r0x} A_{s0y} \cos \phi_y} = \tan \phi \quad \text{から位相}\phi\text{が一意に求まる!!!!}$$

ピラミッドとPDIの比較

	ピラミッド方式	PDI
直接測定量	右手/左手瞳面強度分布 P_R, P_L	位相差 $0, \pi, \pi/2, -\pi/2$ の干渉光強度分布
得られる物理量	位相エラー	位相エラー
測定の前提	<ul style="list-style-type: none"> 振幅誤差 \ll 位相誤差 星像のStrehl比が十分高い。 	<ul style="list-style-type: none"> 観測天体/大気による偏光がない。
測定可能範囲	$[-\lambda/4:\lambda/4], \lambda/2$ (P-V)	$[-\lambda/2:\lambda/2], \lambda$ (P-V)
測定を妨げるもの	<ul style="list-style-type: none"> 波面誤差がないときの星像の形状/位置誤差。 Strehl比 波面誤差振幅成分 	<ul style="list-style-type: none"> 参照光強度分布のフラット性。 入射光の偏光の大きさ。

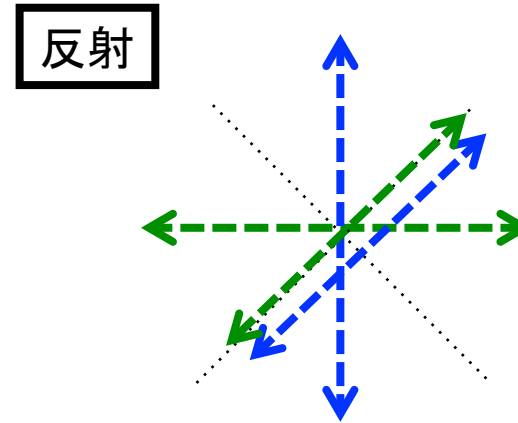
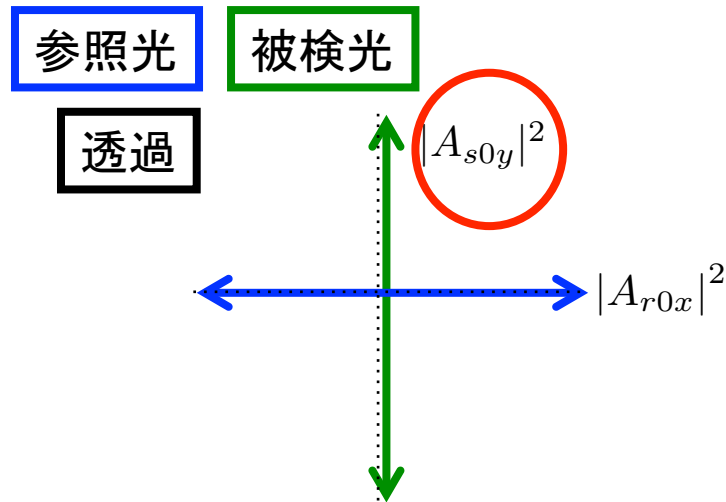
点回折干渉計波面センサ(PDIWFS)

- 透過側の光路だけサバール板の角度を変更



点回折干渉計波面センサ(PDIWFS)

- 透過側で被検光y成分



例) 0度成分 (参照光のみ)

$$A_{s0x}A_{r0y} = \frac{R_{pinhole}R_{out}}{T_{pinhole}T_{out}} \sqrt{|A_{r0x}|^2|A_{s0y}|^2}$$

$T_{pinhole}, R_{pinhole}, T_{out}, R_{out}$ はBSの特性
(キャリブレーション可能)

例) +45度成分 (位相差 $-\pi/2$)

$$I_{\pi/2} = \frac{1}{2} (|A_{s0x}|^2 + |A_{r0y}|^2) + A_{s0x}A_{r0y} \sin \phi_x$$

$$I_{-\pi/2} = \frac{1}{2} (|A_{s0x}|^2 + |A_{r0y}|^2) - A_{s0x}A_{r0y} \sin \phi_x$$

$$I_{\pi/2} - I_{-\pi/2} = 2A_{s0x}A_{r0y} \sin \phi_x$$

振幅情報も取得可能!!!!

$$I_{\pi/2} + I_{-\pi/2} - |A_{r0x}|^2 + |A_{s0y}|^2 = |A_{s0x}|^2 + |A_{s0y}|^2 + (-|A_{r0x}|^2 + |A_{r0y}|^2)$$

PDIの測定方法の変更でなにが変わる

	高ダイナミックレンジ (従来方式)	高コントラストモード (新方式)
直接測定量	位相差 $0, \pi, \pi/2, -\pi/2$ の干渉光強度分布	$\pi/2, -\pi/2$ の干渉光強度分布、参照光 0° 、被検光 90° 強度分布
得られる物理量	位相エラー	位相/ 振幅エラー
測定の前提	<ul style="list-style-type: none">観測天体/大気による偏光がない。	
測定可能範囲	$[-\lambda/2:\lambda/2], \lambda$ (P-V)	$[-\lambda/4:\lambda/4], \lambda/2$ (P-V)
測定を妨げるもの	<ul style="list-style-type: none">参照光強度分布のフラット性。入射光の偏光の大きさ。	<ul style="list-style-type: none">参照光強度分布のフラット性。

まとめ

- PDI波面センサはピラミッド波面センサにくらべてダイナミックレンジ、取得可能な物理量ともに性能が良い。
- PDI方式の測定方法を少し変更するだけで波面情報がより多く(位相+振幅)取得できるようになる
- 他の波面センサとの比較(ツェルニケWFSなど)
- 実機の組み立て・性能評価