共焦点を用いたトムソン散乱計測

東京大学　高瀬・江尻研究室

平塚 淳一、山口 隆史[A]、高瀬 雄一[A]、江尻 晶[A]

東大理、東大新領域[A]

目次

- Introduction
- 共焦点の光路の解析
- 数値計算･可視光実験による解析結果の検証
- 光学設計の最適化の指針
- まとめ

Introduction

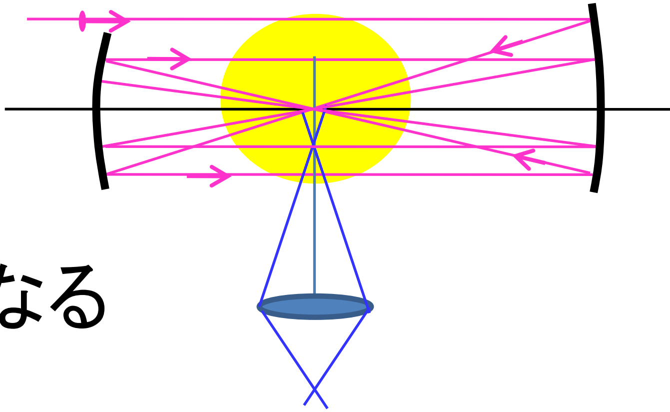
Multi-pathの利点

トムソン散乱計測においてMulti-pathを用いた測定が行われてきた

Multi-pathには以下の利点がある

- 短時間、複数回の散乱によりS/Nを大きくする
- 前方散乱、後方散乱を同時に計測できる

このため、散乱信号の弱い薄いプラズマを測る場合やco方向とcounter方向の運動量を個々に測りたい場合に非常に有用となる

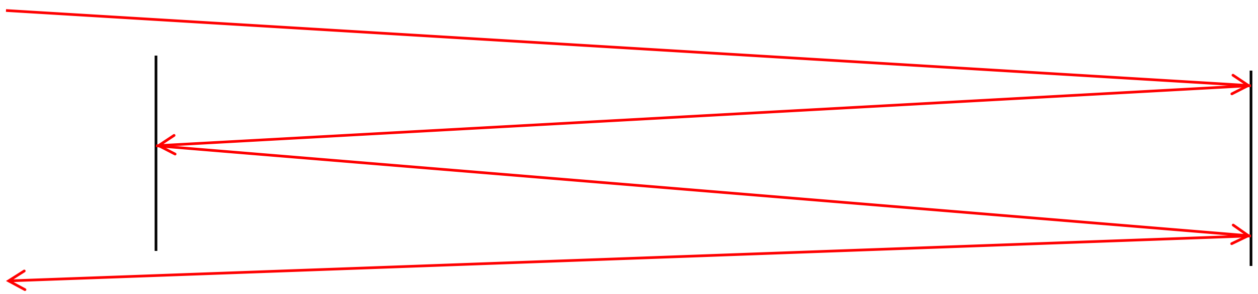


Multi-pathの実現方式

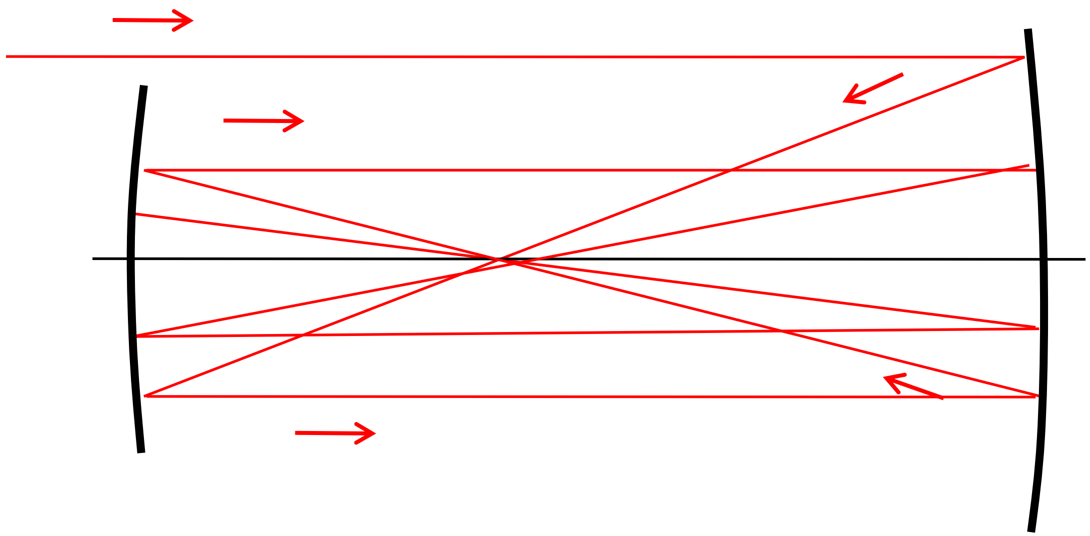
ポッケルスセルを用いた同軸閉じ込め

Multi-pathの実現方式

平行平板ミラーによる往復



共焦点のミラーを用いた往復

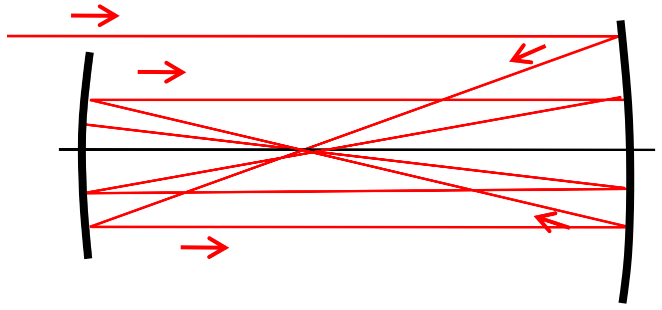


共焦点の課題と目標

共焦点の往復:
レーザーは初めミラー中心に近づいていく
しかし、ミラー収差により次第にミラーから外れていく。

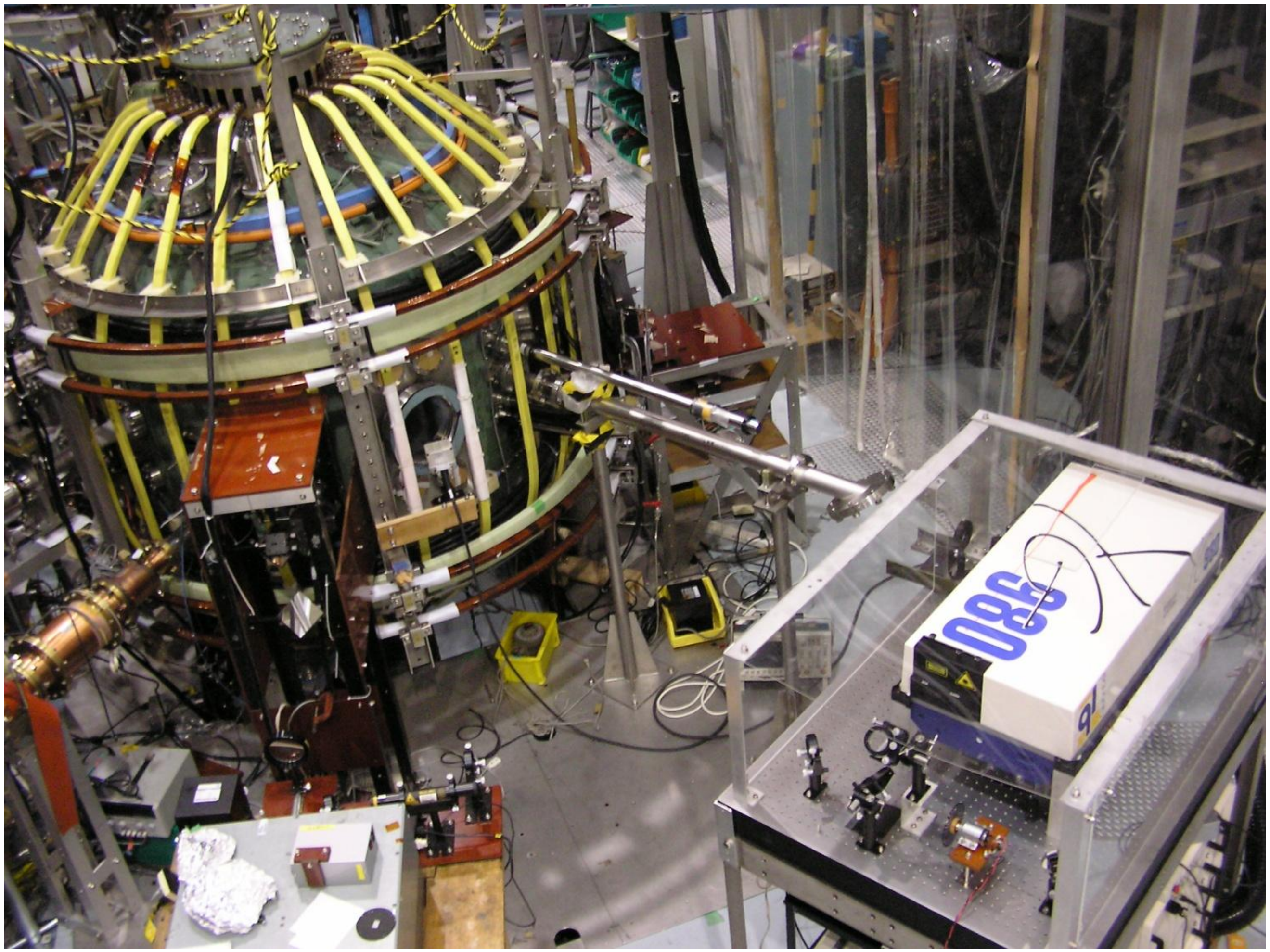
⬇

ミラー収差を含めたレーザー光路の解析
解析から、一般的な往復回数の目安を与える
往復回数を最大にする光学系設計の指針を与える



研究目的: ECHのトムソン散乱計測

球状トカマク　TST-2



大半径

R ～ 0.38 m

小半径

a ～ 0.25 m

アスペクト比

A=R/a> 1.5

トロイダル磁場

B_t ＜0.3 T

ECH放電

プラズマ電流

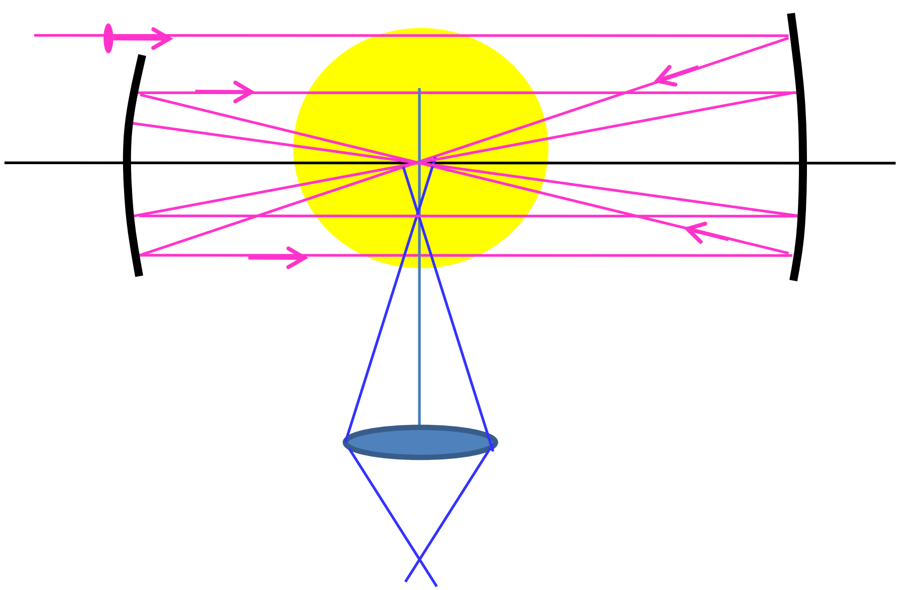
I_p ＜ 1kA

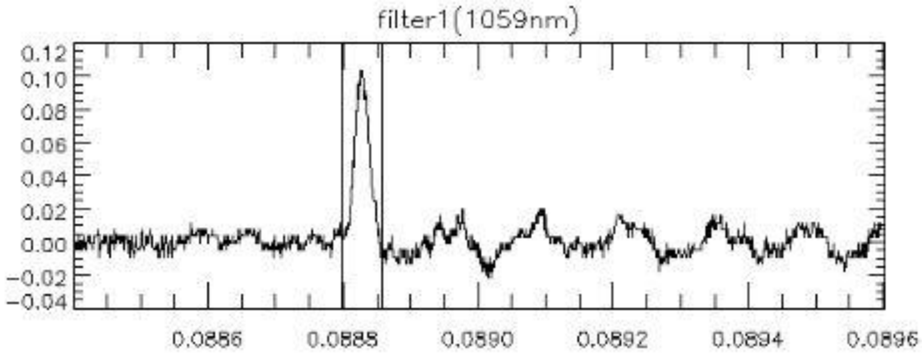
放電時間

Δt ＜ 120 ms

研究目的:ECHのトムソン散乱計測

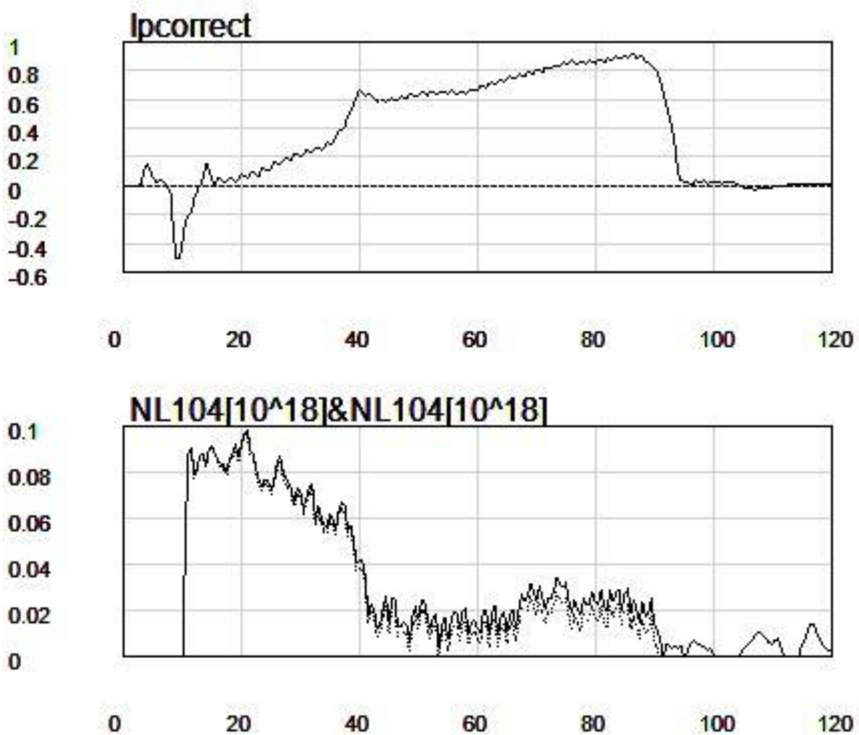
OHでのトムソン散乱信号:S/N~10
密度:OH~ECH*100
よって、ECHのトムソン散乱計測のためには
信号を数十倍にする必要がある。



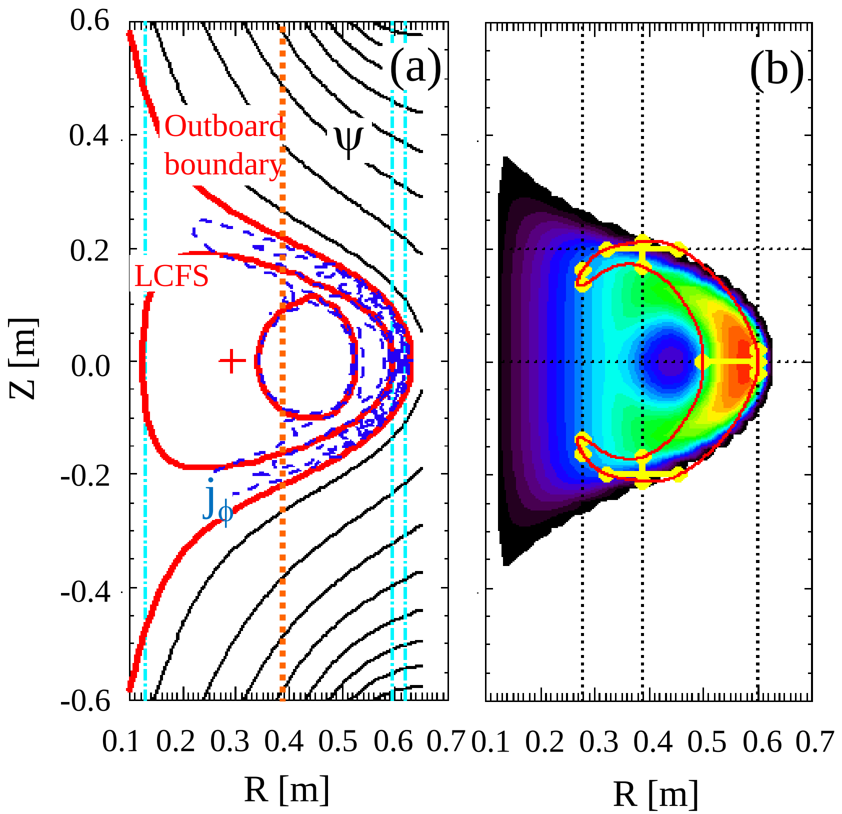


研究目的：ECHのトムソン散乱計測

n_e ～$10^{17}m^{-3}$　ECH放電

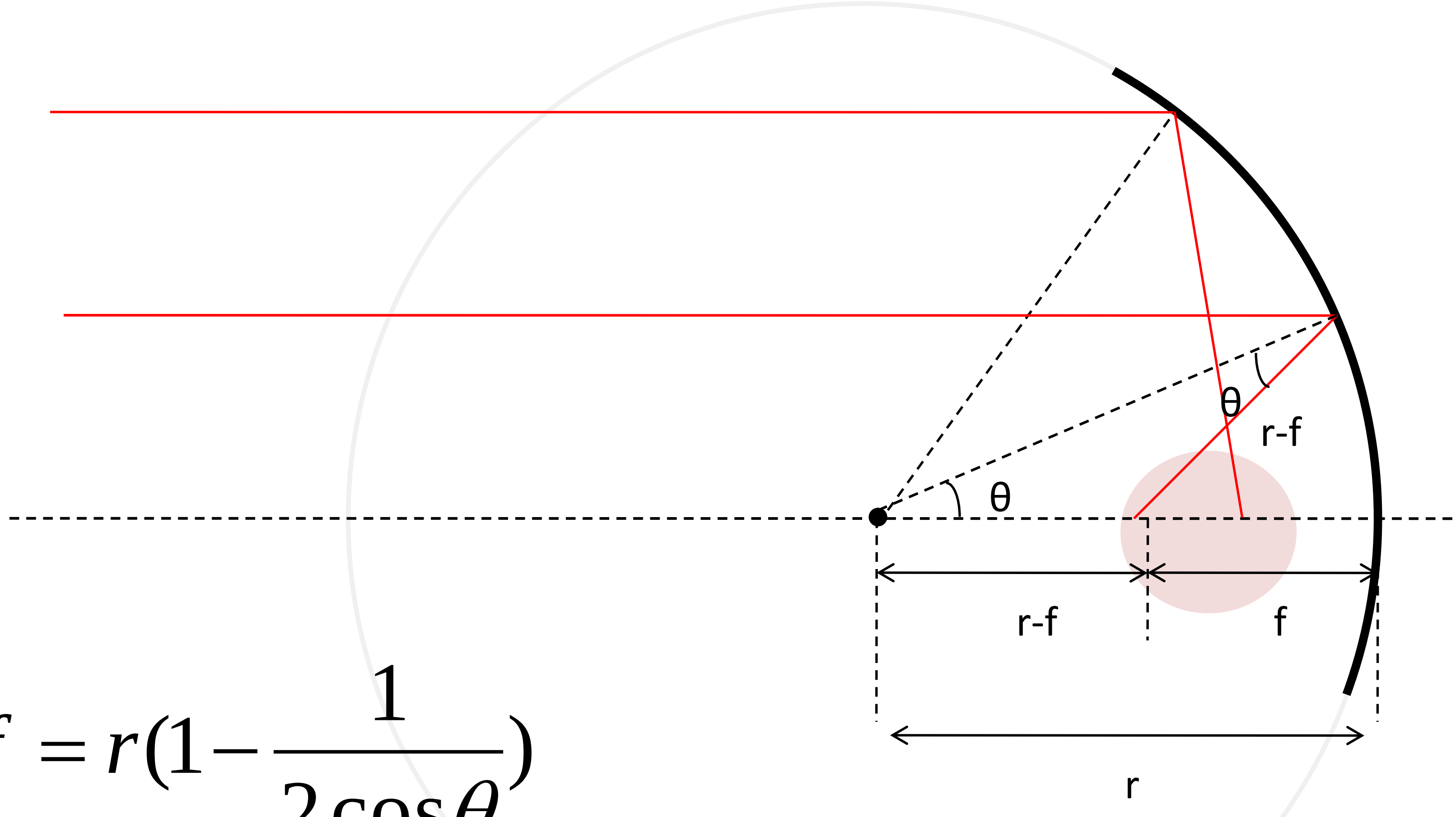


5コードNL測定に基づく
t=70msの平衡解



共焦点の光路の解析

収差の問題



$$f = r\left(1 - \frac{1}{2\cos\theta}\right)$$

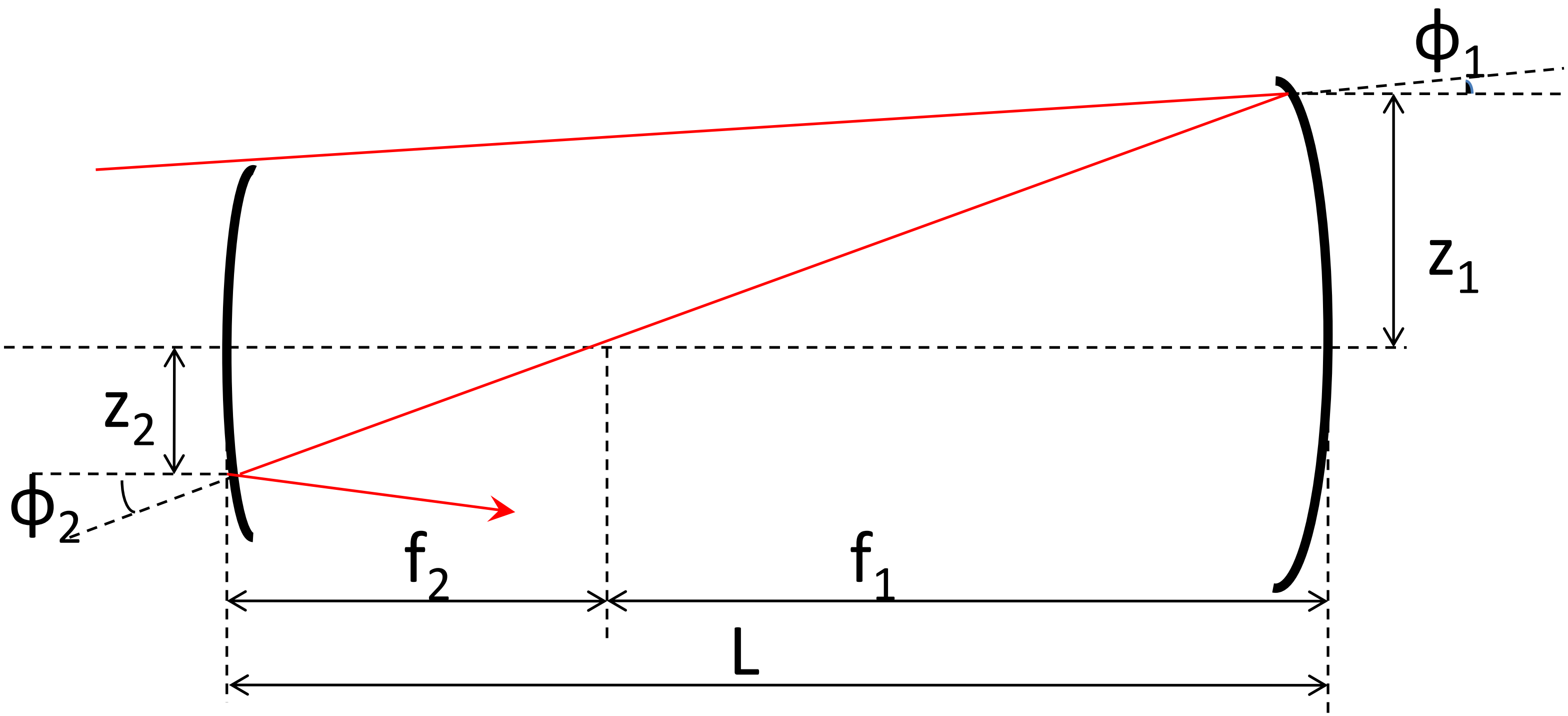
焦点距離はθ依存

焦点がぼやける
→収差

設定条件、フリーパラメータ

パラメータ:
1. 入射角 φ1 = φ
2. 入射位置 z1
3. ミラーの焦点距離 f1
4. ミラーの焦点距離 f2
5. ミラー間距離 L

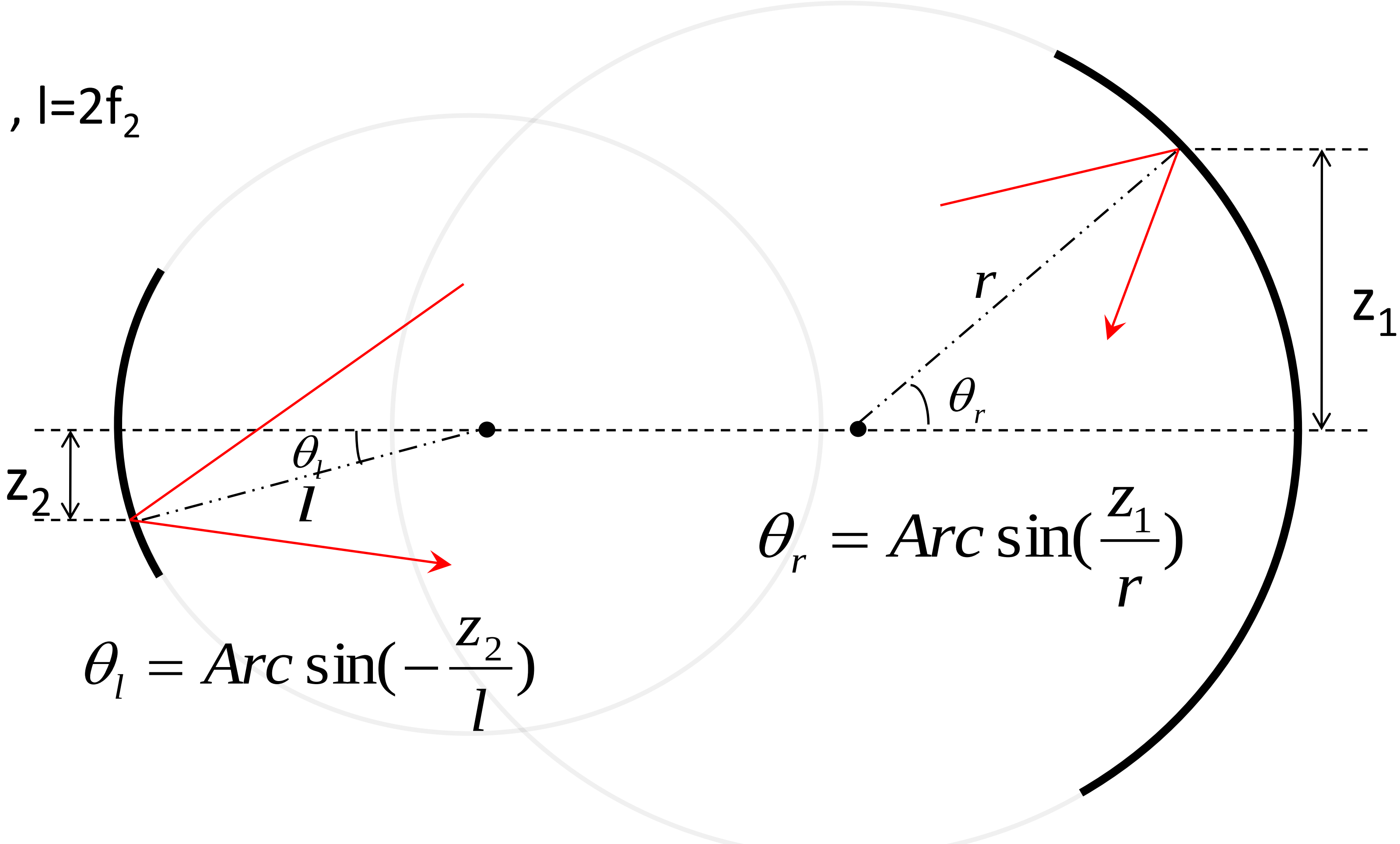
収差を考慮して、2n-1回目の右側ミラーへの
入射角度、入射位置のパラメータ依存性を求める



設定条件、フリーパラメータ

収差を与える θ_r , θ_l を $\frac{z_i}{r}$ で展開して
ϕ_3、z_3をz,ϕで表すことを考える

$r=2f_1$, $l=2f_2$



$$\theta_r = Arc\sin(\frac{z_1}{r})$$

$$\theta_l = Arc\sin(-\frac{z_2}{l})$$

重要な公式

$$\phi_{2n-1} = (-1)^n P_{2n-1}(x) z^3 + (-1)^{n-1} x^{1-n} \phi$$

$$\hat{z}_{2n-1} = (-x)^{n-1} z + \frac{1}{2}(-1)^n P_{2n-1}(x) z^3 + \frac{1}{2}(-1)^n (x^{n-1} - x^{1-n})\phi$$

求めたいn往復後の入射角、入射位置

但し

$$x = \frac{f_2}{f_1} \qquad \hat{z}_{2n-1} = \frac{z_{2n-1}}{r} \qquad z = \frac{z_1}{r} \qquad \phi = \phi_1$$

$$P_{2n-1}(x) = (x^{3n-6} + x^{3n-7}) + (x^{3n-10} + x^{3n-11}) + \cdots\cdots + (x^{2-n} + x^{1-n})$$

$$= (\sum_{i=0}^{4n-7} x^{1-n+i}) - (\sum_{i=0}^{n-3} x^{4-n+4i}) - (\sum_{i=0}^{n-3} x^{3-n+4i})$$

$$P_1(x) = 0 \quad P_3(x) = 1 + x^{-1} \quad P_5(x) = x^3 + x^2 + x^{-1} + x^{-2} \quad \cdots$$

重要な公式

往復回数 $n \to \infty$ において $\left|\hat{z}_{2n-1}\right| < z$ の条件から

$$n < 2 + \frac{\log(8 f_1^{\,2} / z_1^{\,2})}{\log(f_1 / f_2)} = n_{\max}$$:最大往復回数

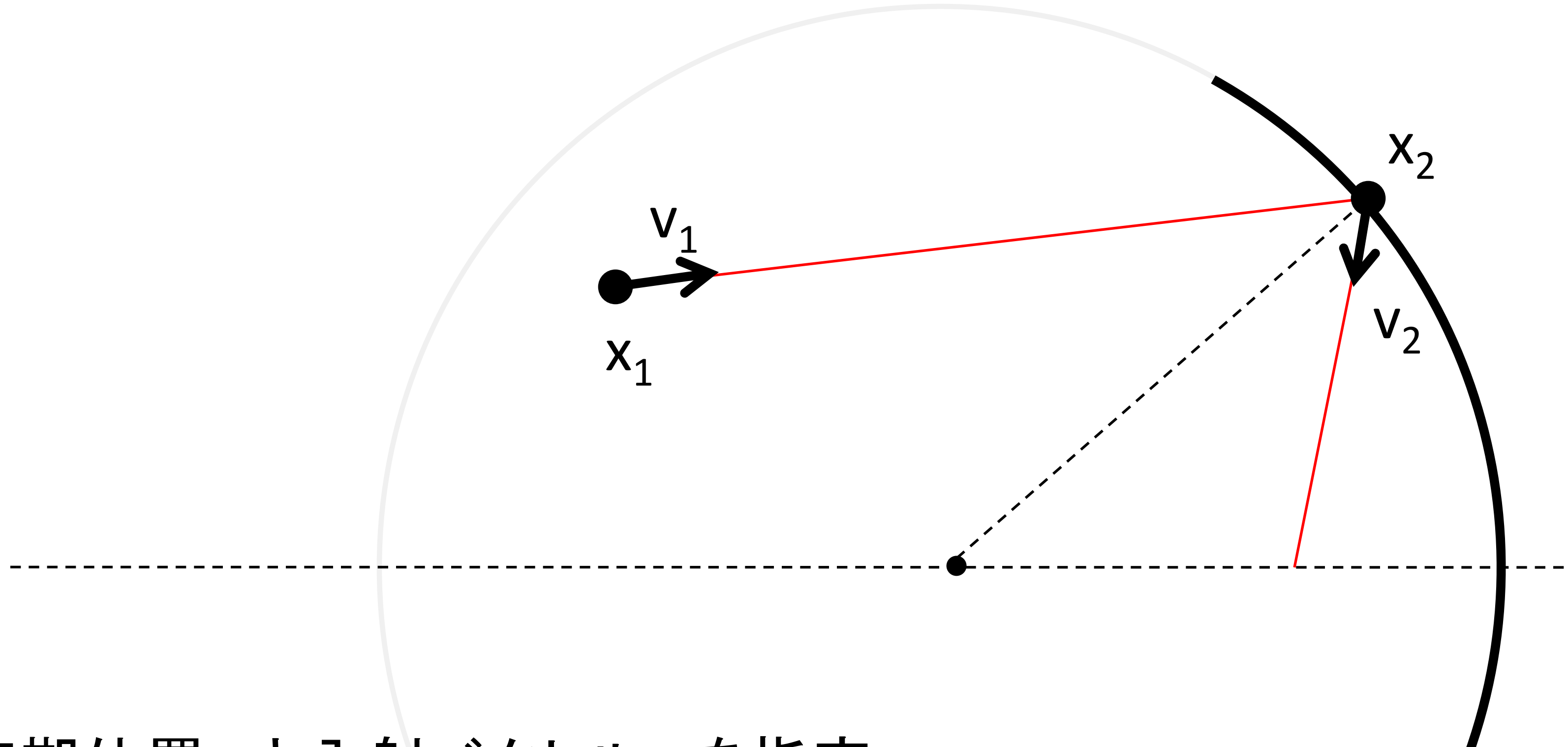
例:

f_1=762mm,f_2=508mm
D_1=76.2mm,D_2=50.8mm,z_1=35mm
→ n_{max}=22往復

f_1=3500mm,f_2=2500mm
D_1=60mm,D_2=60mm,z_1=28mm
→ n_{max}=36往復

数値計算・可視光実験による解析結果の検証

数値計算とのクロスチェック



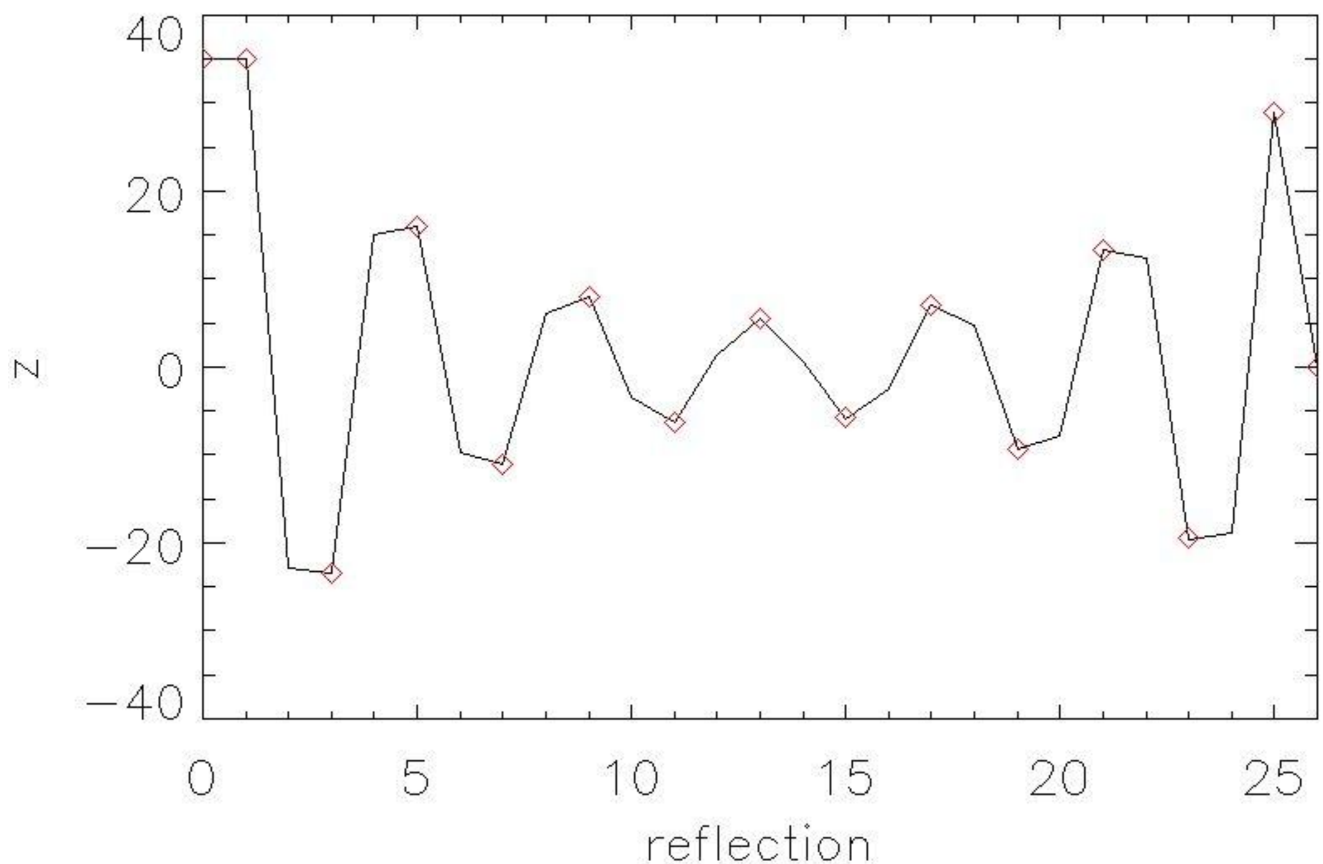
- 初期位置x_1と入射ベクトルv_1を指定。
- 入射ベクトルとミラーとの交点（二次関数の解）を求める。
- 等角度の反射から、次の初期位置x_2と入射ベクトルv_2を決める。

数値計算とのクロスチェック

設定:

f_1=762mm,f_2=508mm,D_1=76.2mm,D_2=50.8mm

ϕ=0.32mrad,z_1=35mm

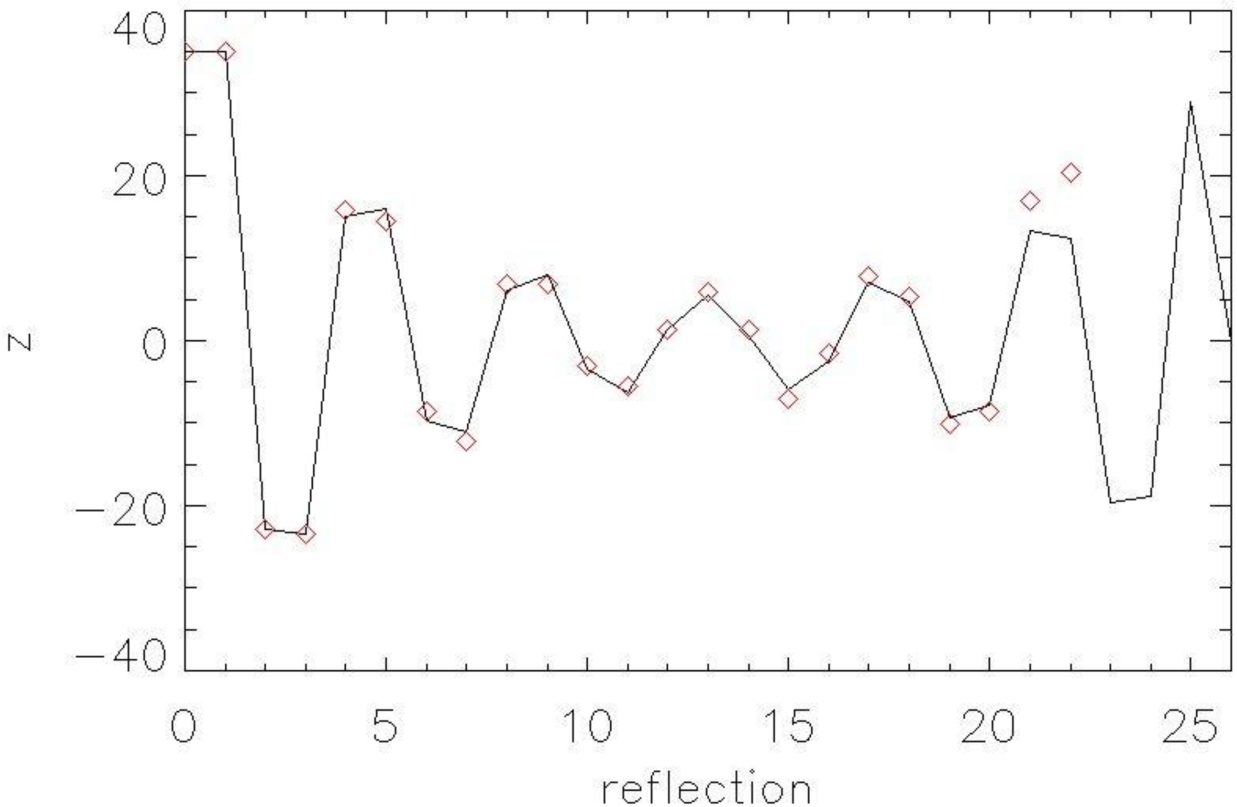


可視光実験による解析結果の確認

設定：

f_1=762mm,f_2=508mm,D_1=76.2mm,D_2=50.8mm

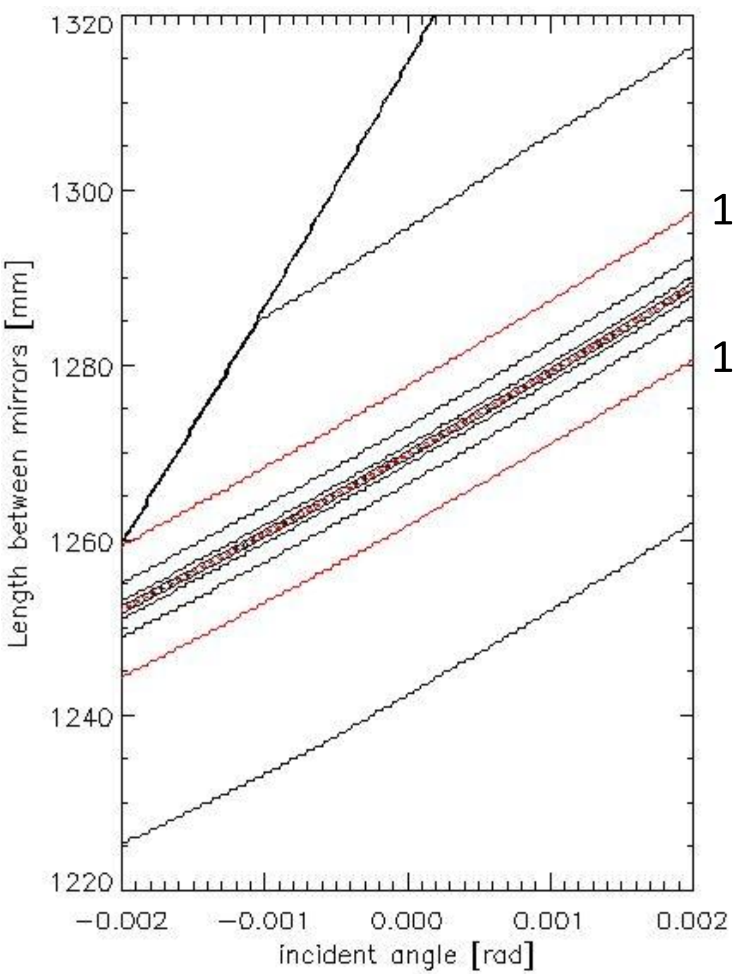
ϕ=0.32mrad,z_1=35mm



n_{max}=22往復　→　11往復：アライメント精度の問題

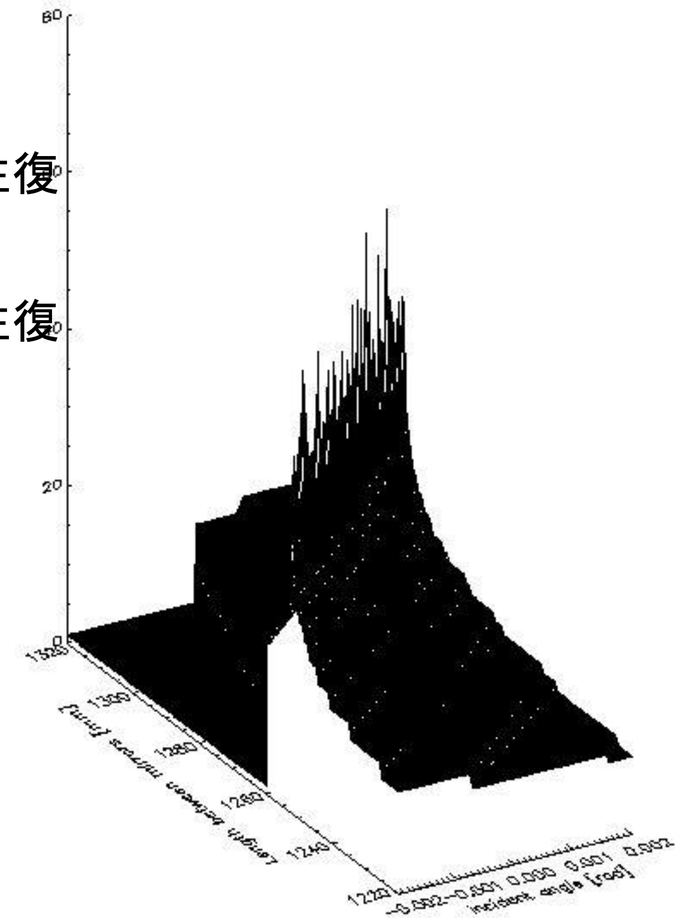
アライメント精度の問題

f_1=762mm , f_2=508mm , z_1=35mm

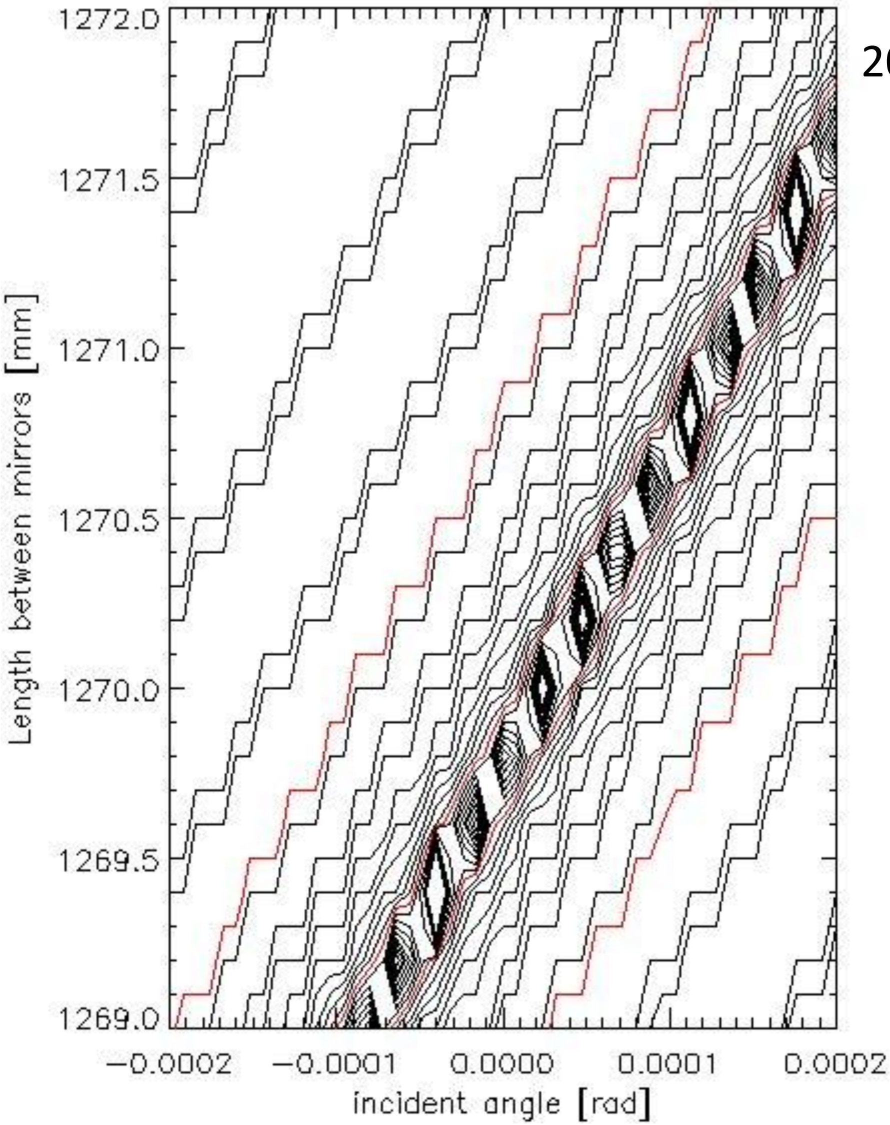


10往復

10往復



アライメント精度の問題



f_1=762mm , f_2=508mm , z_1=35mm

10往復:
入射角 ±1mrad
ミラー間距離 ±10mm

20往復:
入射角 ±0.02mrad
ミラー間距離 ±0.2mm

光学設計の最適化の指針

実際の実験環境下での最適化の指針

2ミラーの焦点距離の比を1に近づける（制限あり）

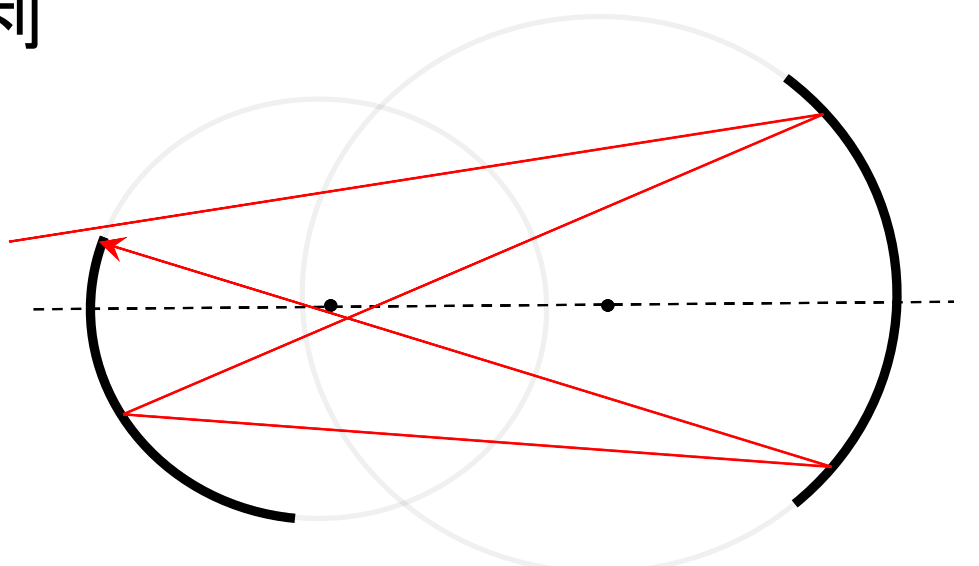
　　最大往復回数の点で有利

$L=f_1+f_2$を長くとる

　　最大往復回数の点で有利

　　アライメントの点で有利

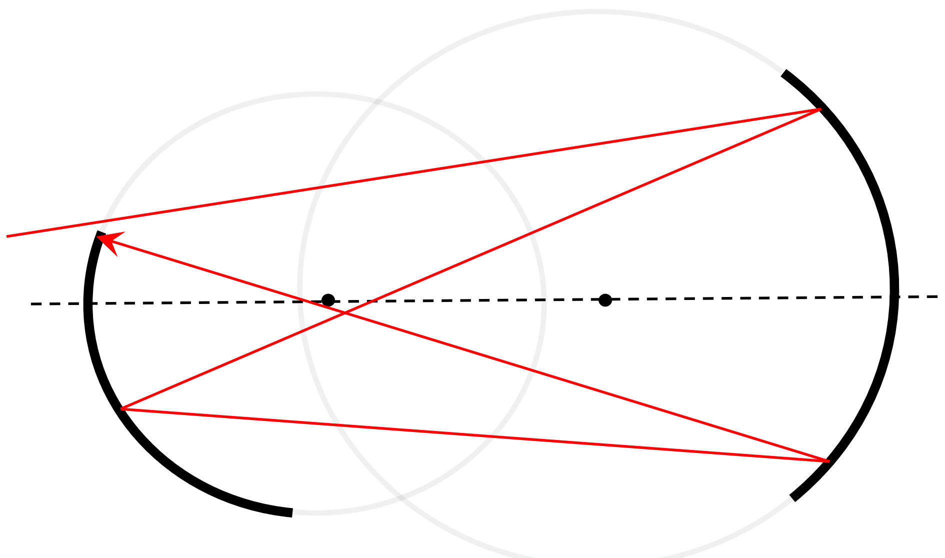
$$n_{\max} = 2 + \frac{\log(8 f_1^2 / z_1^2)}{\log(f_1 / f_2)}$$

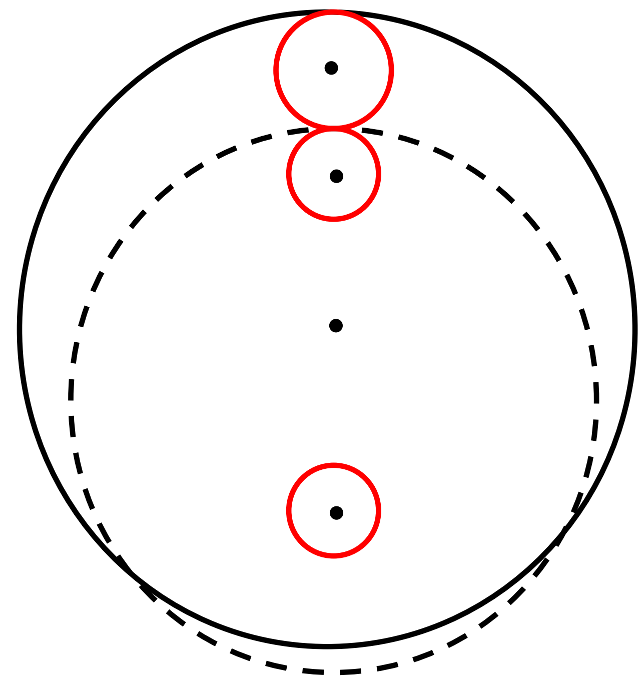


実際の実験環境下での最適化の指針

ミラー径の上限が与えられている時

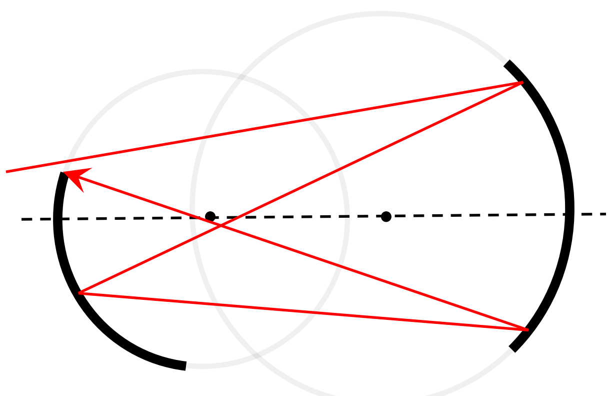
- ビーム径を考慮
- 2往復後のビーム位置を考慮
- アライメント精度を考慮

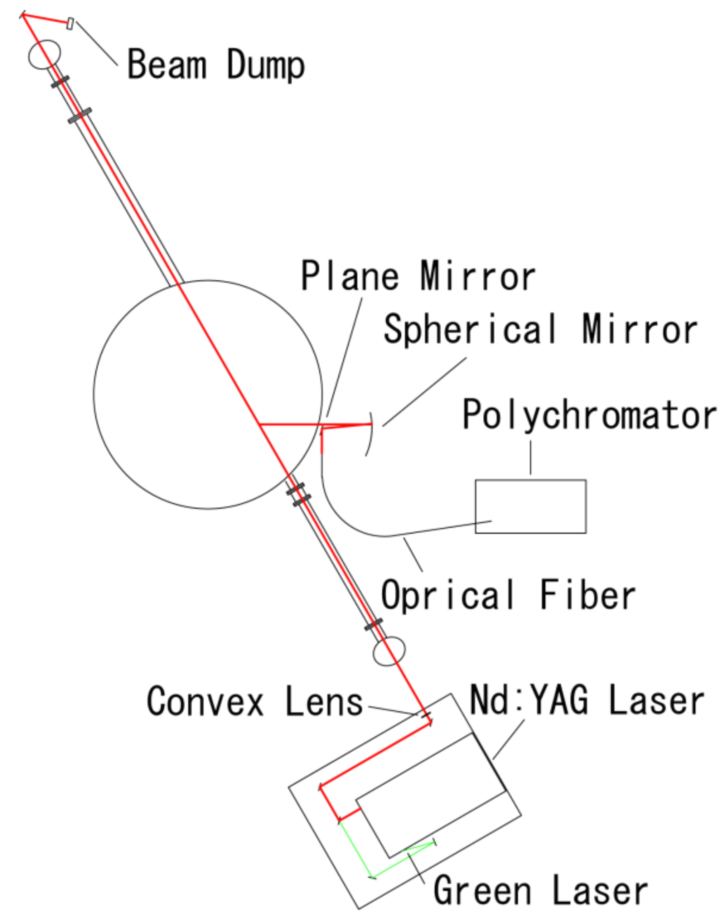




具体例の検討: TST-2のYAGレーザーへ適用する場合

レーザーの入射-出射間距離～6m
焦点距離:f_1=3500mm,f_2=2500mm
ミラー径:D1=60mm,D2=60mm
入射位置でのビーム径:6mm
入射位置:z_1=28mm
n_{max}=36往復
0.1mmのアライメント精度で20往復

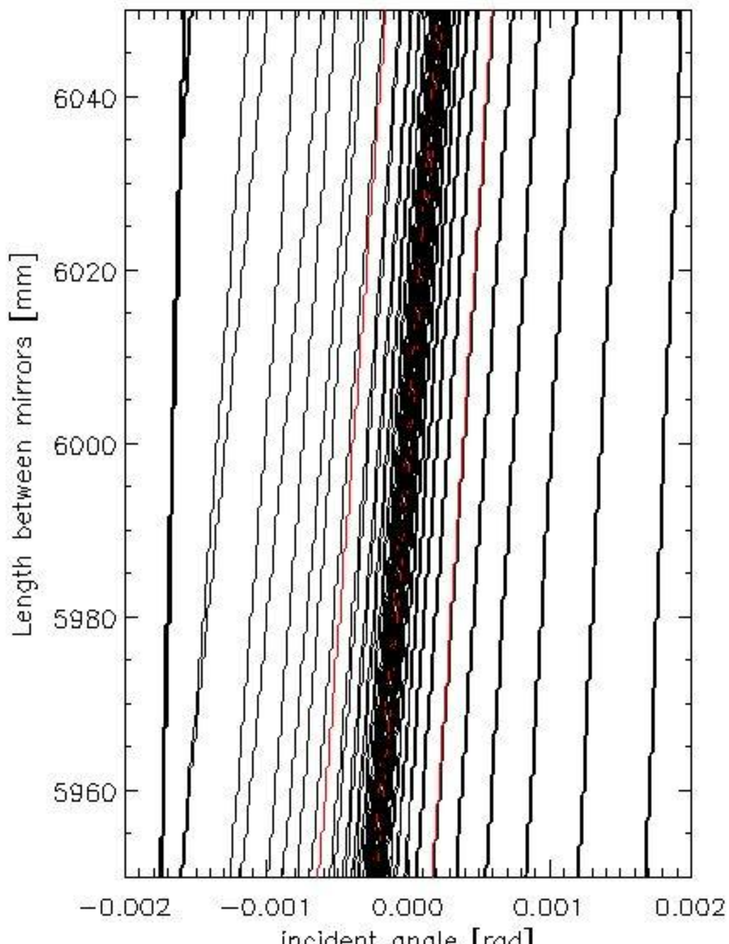


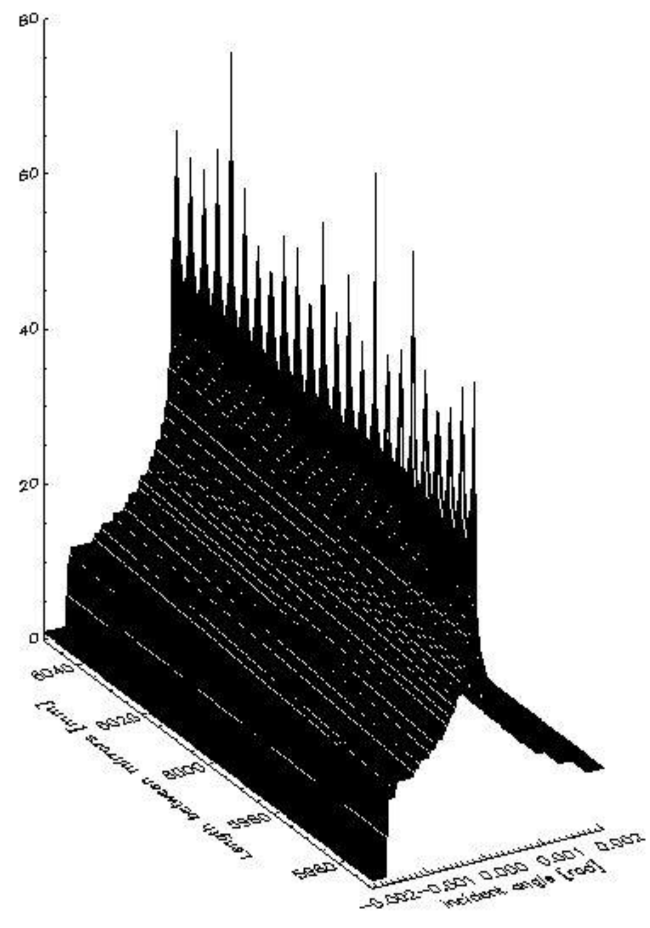


アライメント精度の問題

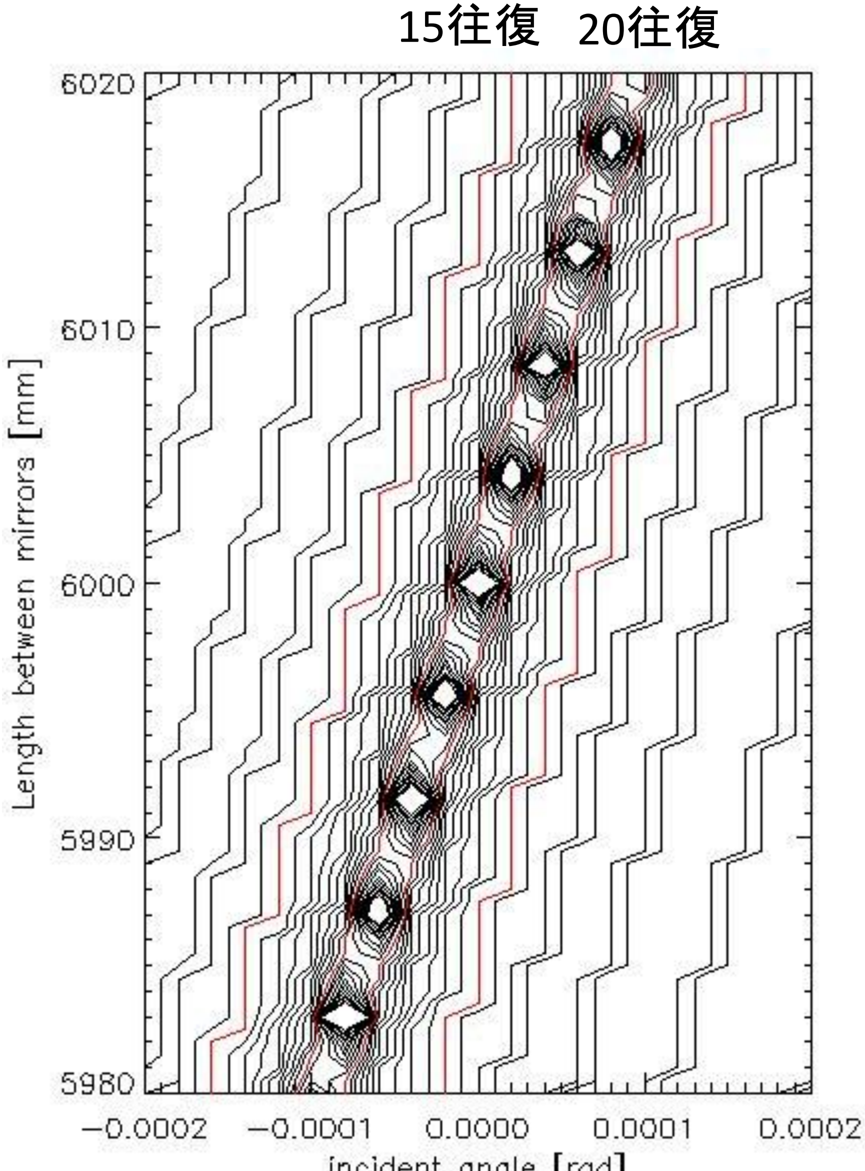
f_1=3500mm , f_2=2500mm , z_1=28mm

10往復





アライメント精度の問題



f_1=3500mm , f_2=2500mm , z_1=28mm

10往復:
入射角 ±0.5mrad
ミラー間距離 ＞±50mm

20往復:
入射角 ±0.02mrad
ミラー間距離 ±2.5mm

まとめ

- 共焦点の方法についてミラー収差を含めた解析を行った
- 解析結果は数値計算・可視光実験を概ね再現する
- 可視光による実験から14往復まで確認できた
- 解析の最大往復回数の他にアライメント精度が大きな問題になる
- 今回の可視光実験で要求されるアライメント精度は

  10往復: 入射角 ±1mrad 、ミラー間距離 ±10mm

  20往復: 入射角 ±0.02mrad、ミラー間距離 ±0.2mm
- 実際の実験環境における最適化の指針を示した
- 具体例としてTST-2における共焦点の設計を示した