

# cERL用のLC空洞の検討

2012.2.16

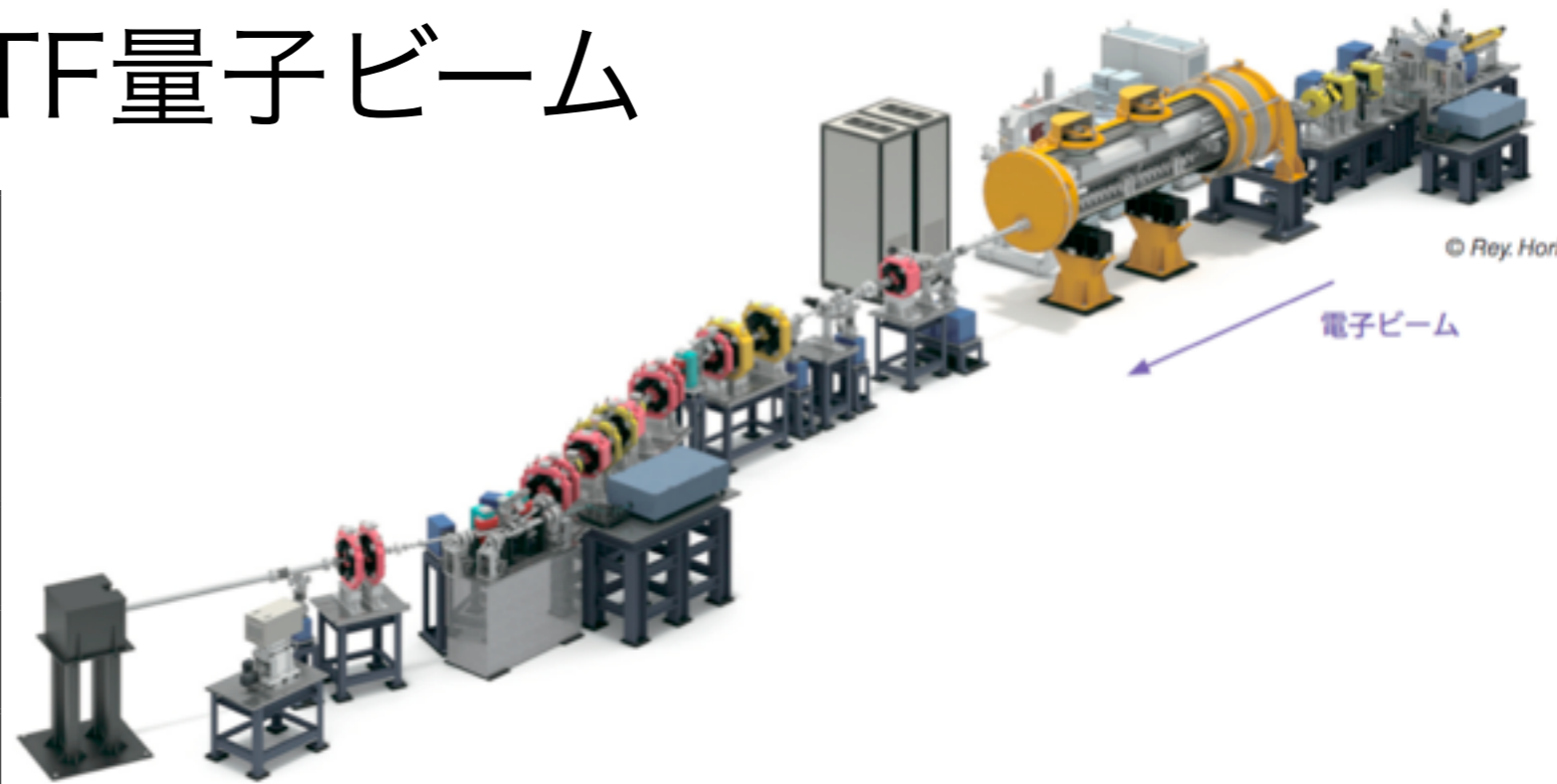
ビームダイナミクスWG

本田洋介

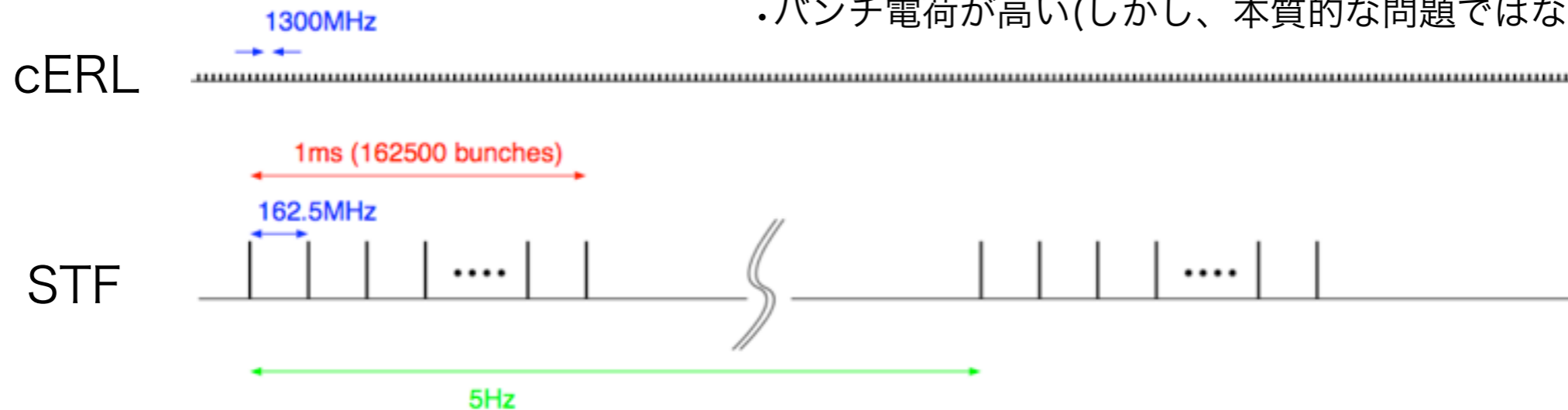
- JAEAコンプトン $\gamma$ 線核共鳴計画は、ERLがコンプトン $\gamma$ 線源として優れていることを実証する試験。
  - 何をどこまで明らかにするのか(リングより優れていることを実証できるのか)。
- 現在建設中のSTF量子ビームで開発したLC空洞をそのままcERLに移設する計画になっている。
  - STFの空洞はcERLと互換性があるのか、検討が必要。
  - STFがうまくいかなかったら、共倒れになる。そもそも、同じことをやって意義があるのか。
- STFは失敗覚悟でかなり挑戦的な設計であるのにたいして、それなりにうまく行きそうな別の設計方針を検討した。
  - 正面衝突にするか、有限角衝突にするか
  - 幅広い共振器か、細長い共振器か

# STF量子ビーム

項目	STF	cERL
マクロパルス時間幅	1 ms	CW
パルス繰り返し	5Hz	CW
バンチ繰り返し	162.5 MHz	1300 MHz
バンチ時間幅	5 ps (RMS)	3 ps (RMS)
バンチ電荷	62 pC/bunch	7.7 pC/bunch
平均電流	50 $\mu$ A	10 mA
ビームエネルギー	40 MeV	35 MeV
エネルギー拡がり	0.1%	0.02%
規格化エミッタンス	1 $\mu$ m	1 $\mu$ m
衝突点ビームサイズ	10 $\mu$ m	10 $\mu$ m
レーザー時間構造	バースト増幅(x200)	CW



- 紙の上の計算では、平均フラックスは同等
  - cERLは一様な時間構造
  - STFはビームもレーザーもバースト構造
  - (リングだと、 $\sigma_x$ が1桁大きいと電流が1桁大きい)
- STFの有利な点
  - パルス運転なのでコンパクトでエネルギーが高い。
  - 平均電流が小さく電子銃の負担が少ない。
- STFの不利な点
  - パルス内での一様性やビームローディングの補正が重要
  - バンチ電荷が高い(しかし、本質的な問題ではない。)



# 衝突点のプロファイル

・衝突点のビームラインを検討するにあたって、当然ながら、ルミノシティを出発点として考える。(強度は別問題なので、幾何学的なルミノシティだけを検討する)

## ・電子ビーム

エミッタンスとベータ関数だけで決まる理想的な場合とする。バンチ長3psとした。

標準的な場合、 $\gamma \epsilon = 1 \mu\text{m}$ で $\sigma = 10 \mu\text{m}$ 、なら衝突領域で十分細いまま。

## ・レーザー

波長1064nmで回折限界。パルス幅3psとした。

ビーム側が十分小さいなら、ルミノシティはレーザーサイズできまる。

ビーム

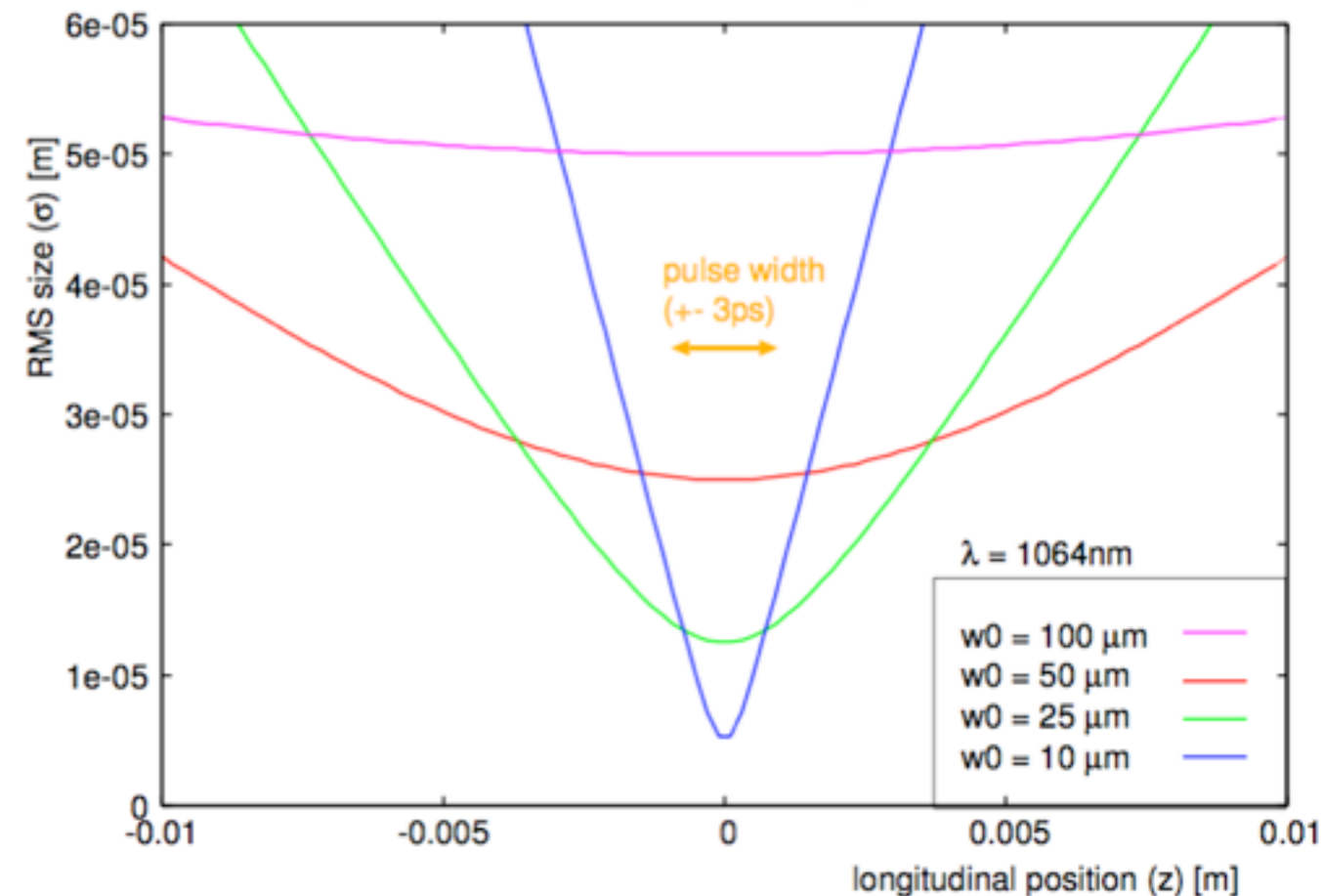
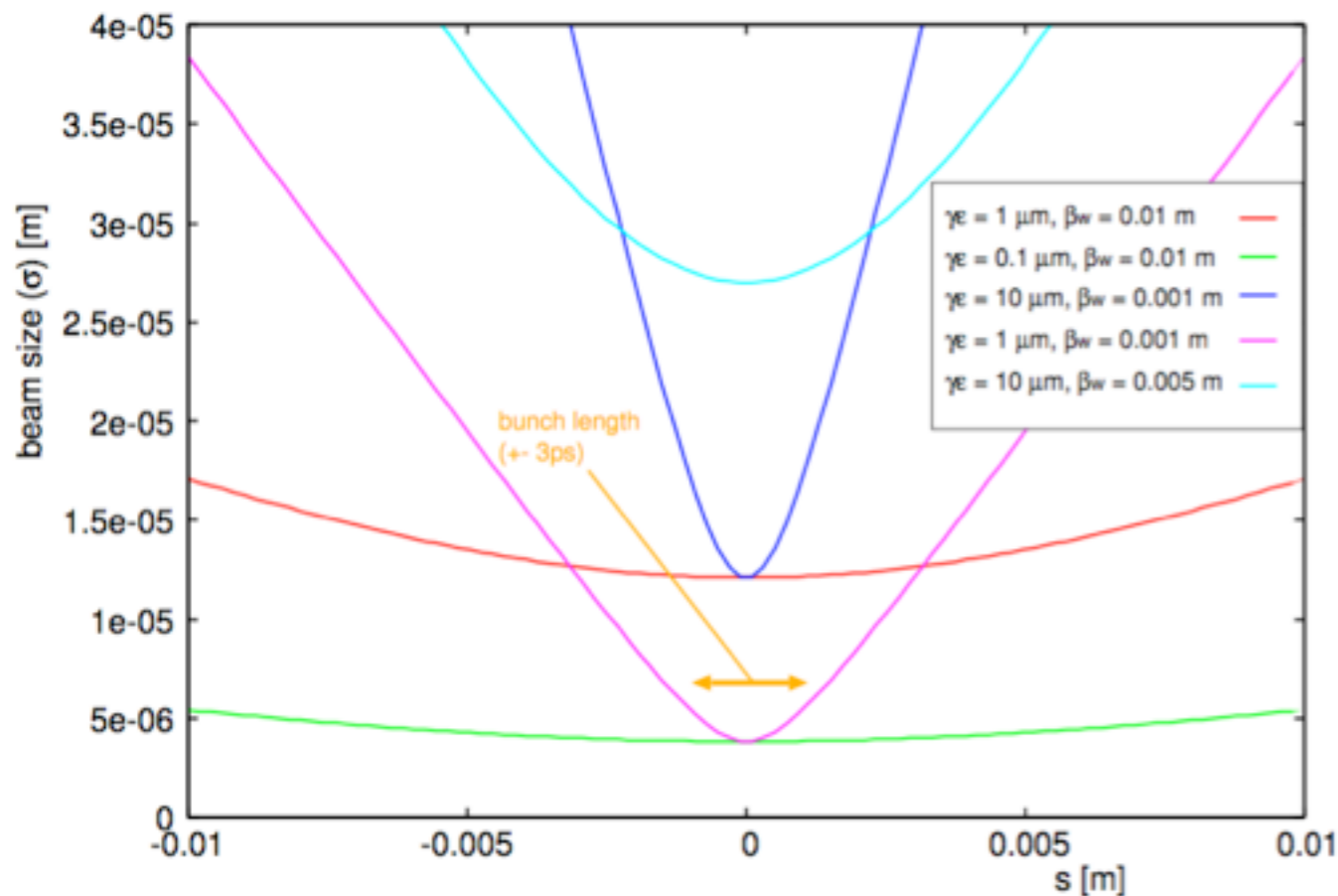
$$\sigma = \sqrt{\beta \epsilon}$$

$$\beta(s) = \beta_w + \frac{s^2}{\beta_w}$$

レーザー

$$w = 2\sigma$$

$$\sigma(z) = \frac{w_0}{2} \sqrt{1 + \frac{\lambda^2 z^2}{\pi^2 w_0^4}}$$



# ルミノシティの計算

- 単に算数。
- 衝突角  $\theta$ 、レーザーサイズ、(ビームサイズ)、ビームバンチ長、レーザーパルス長、などを変えて計算。
- 相対的にしか興味がないので、標準的な場合を1として比較する。

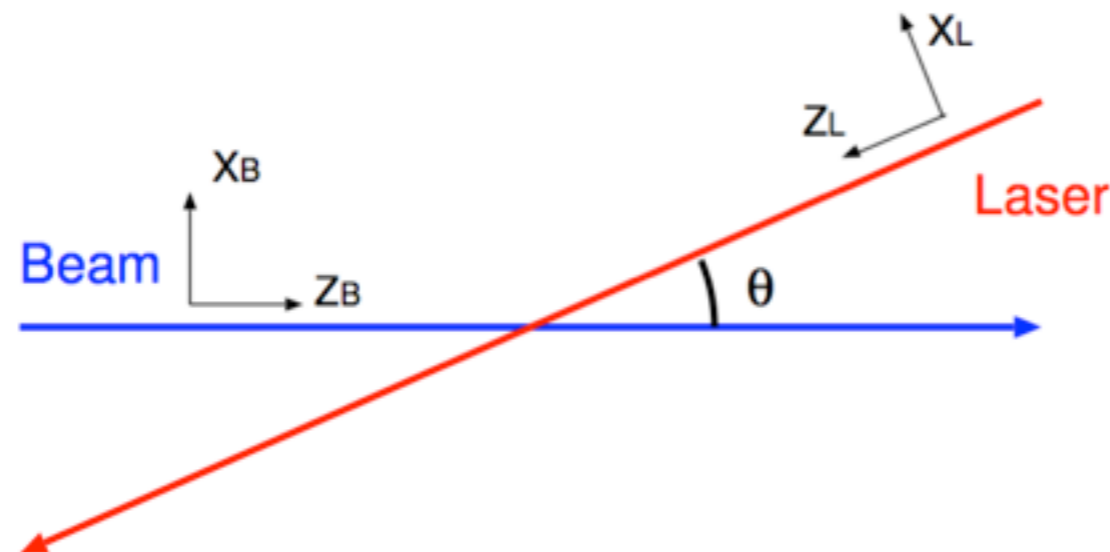
$$D_B(x_B, y_B, z_B, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Bx}(z_B)} \exp\left(-\frac{x_B^2}{2\sigma_{Bx}(z_B)^2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{By}(z_B)} \exp\left(-\frac{y_B^2}{2\sigma_{By}(z_B)^2}\right) \\ \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Bz}} \exp\left(-\frac{(z_B - ct)^2}{2\sigma_{Bz}^2}\right)$$

$$D_L(x_L, y_L, z_L, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Lx}(z_L)} \exp\left(-\frac{x_L^2}{2\sigma_{Lx}(z_L)^2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Ly}(z_L)} \exp\left(-\frac{y_L^2}{2\sigma_{Ly}(z_L)^2}\right) \\ \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Lz}} \exp\left(-\frac{(z_L - ct)^2}{2\sigma_{Lz}^2}\right)$$

$$(x_B, y_B, z_B) = (x, y, z)$$

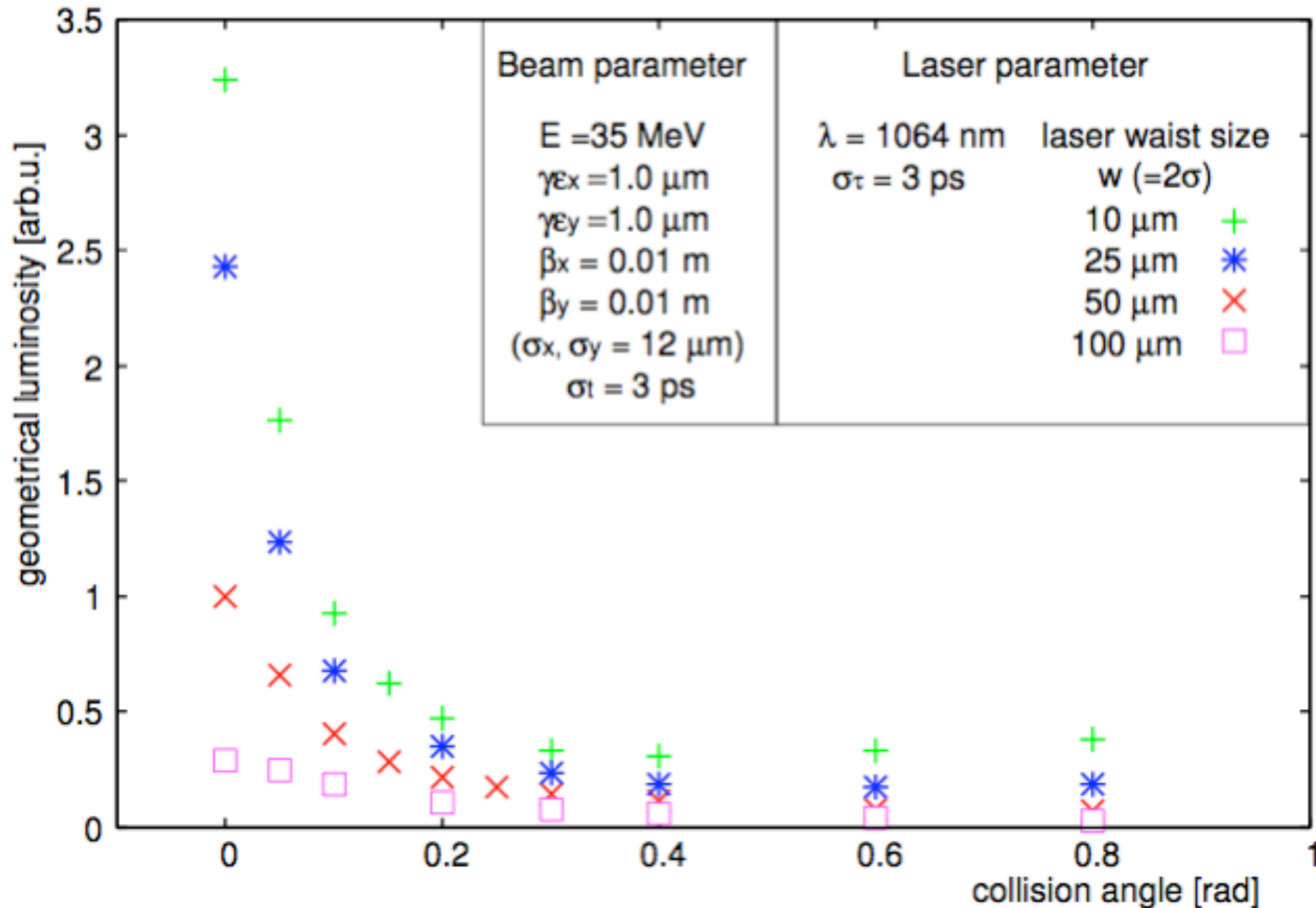
$$(x_L, y_L, z_L) = (x \cos \theta - z \sin \theta, y, -x \sin \theta - z \cos \theta)$$

$$L \propto \int_x \int_y \int_z \int_t D_B \cdot D_L dx dy dz dt$$



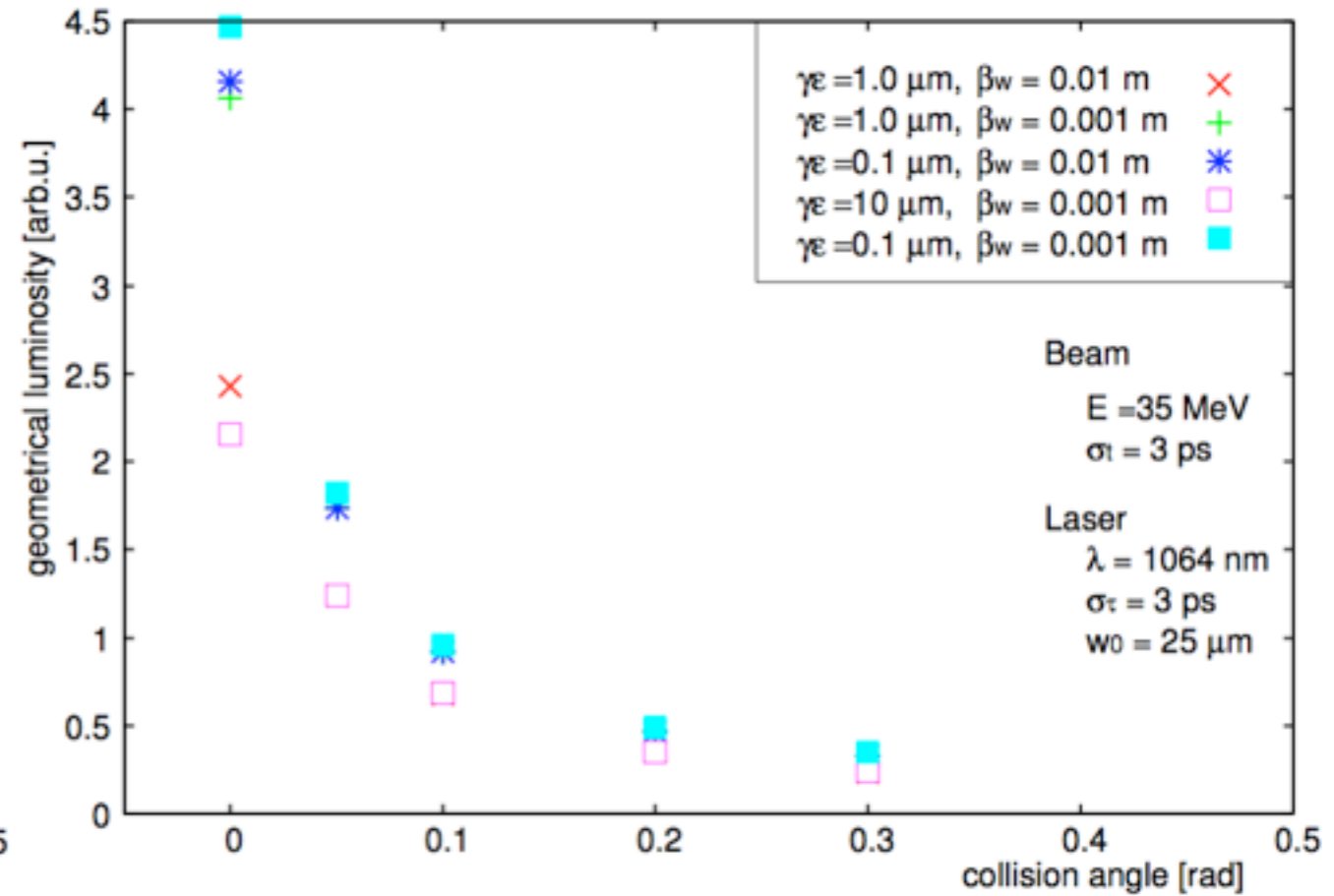
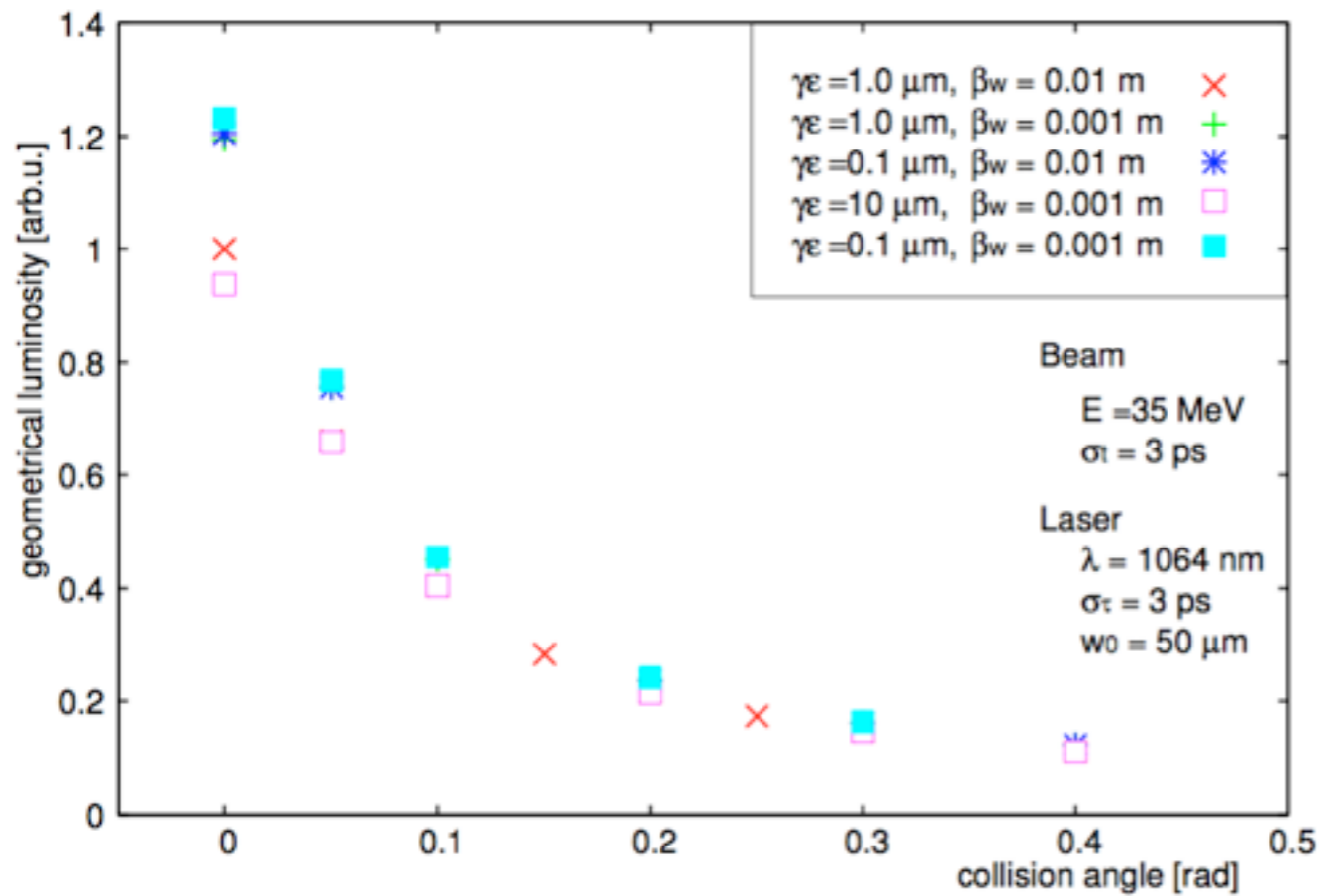
# ルミノシティの計算結果

- ・ビームパラメータは標準的な場合
- ・レーザーサイズが異なる場合について、衝突角依存性。
- ・レーザーを絞るほど、正面衝突にしたときの優位性が増す。(逆に言うと、あまり絞らないなら、わざわざ正面衝突にする意味がない。)



# ルミノシティの計算結果

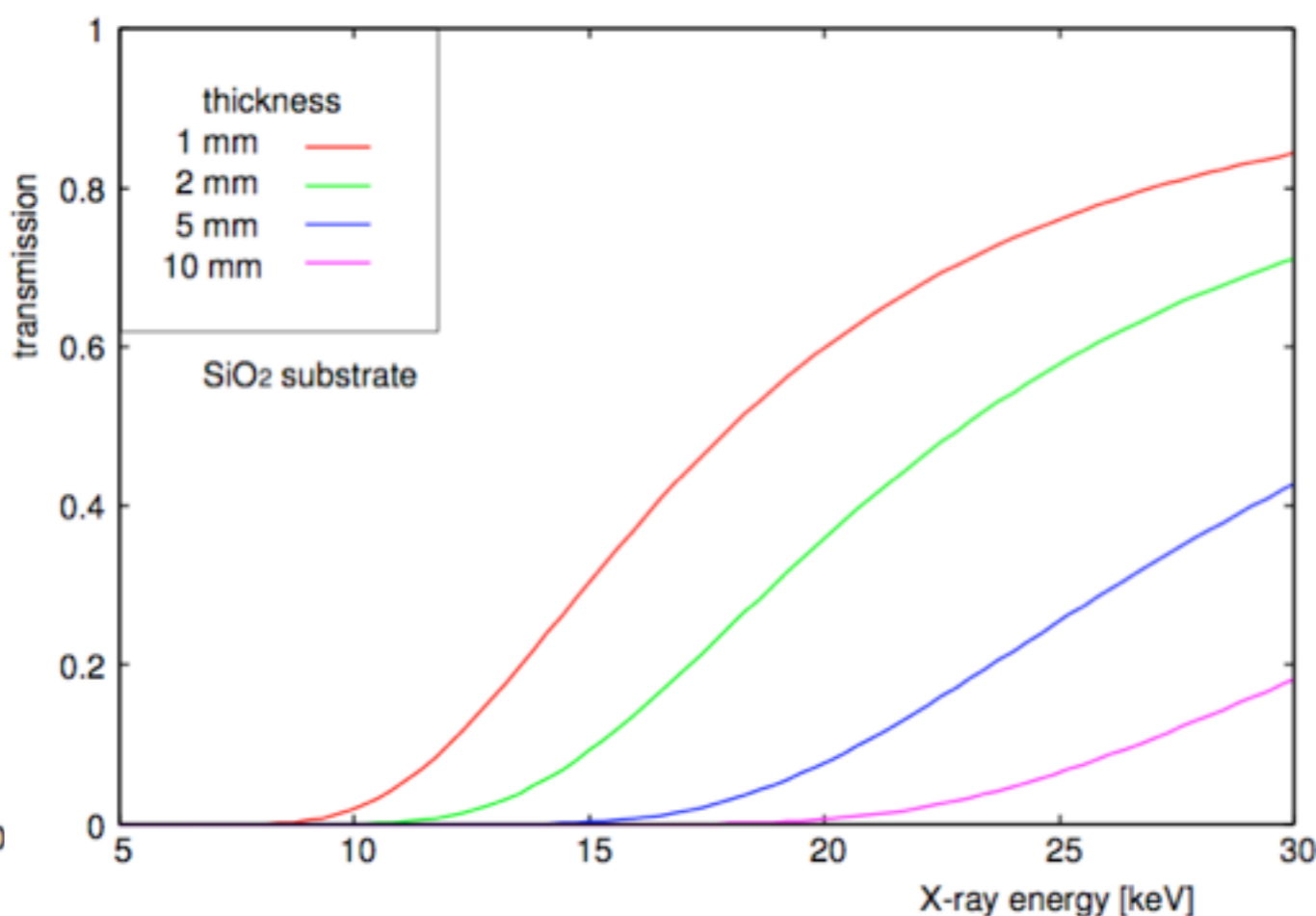
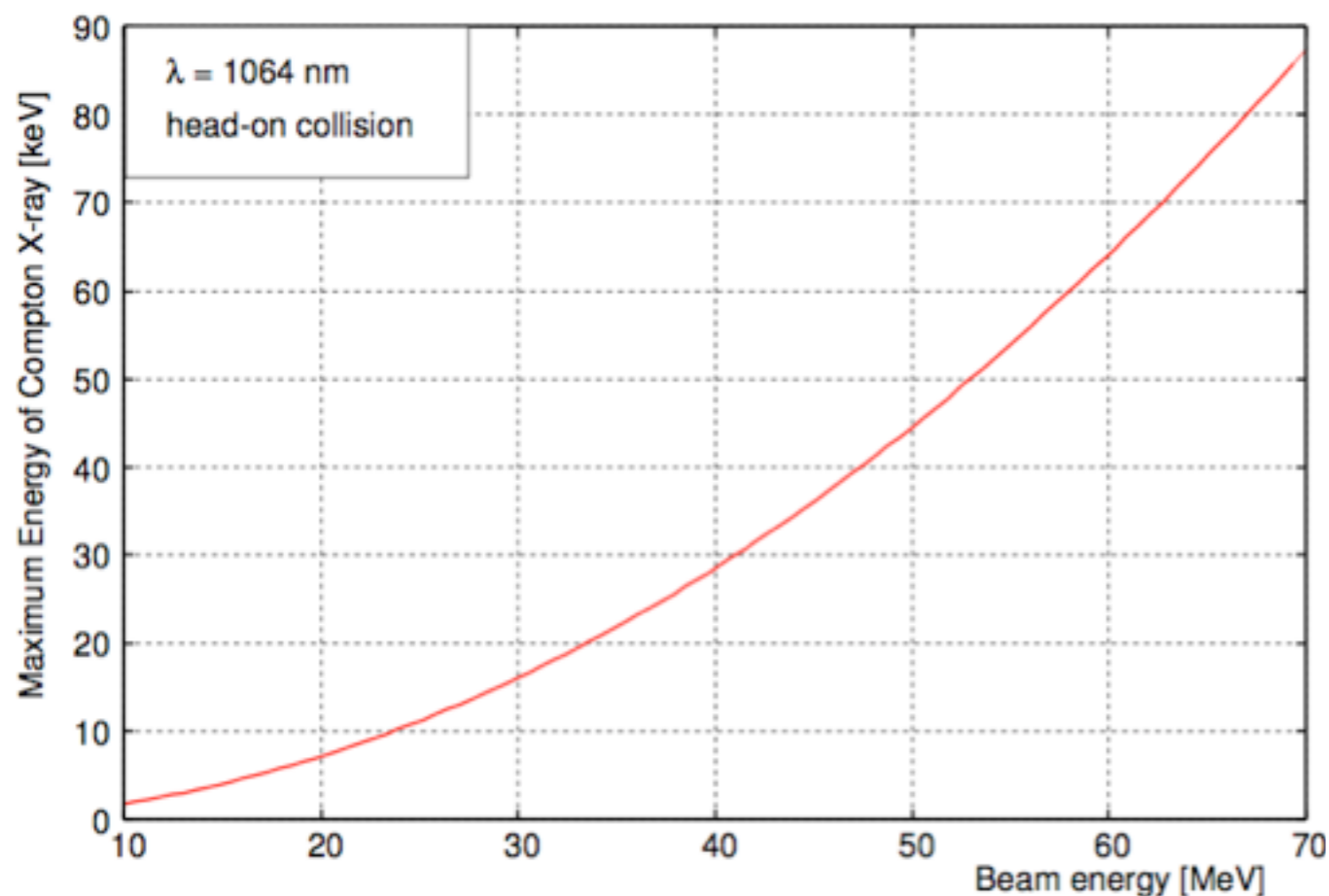
- レーザーサイズが異なる場合について、ビームのサイズを変えた効果。
  - $w_0=50\mu\text{m}$ なら、ビームをさらに絞っても伸びしろはない。
  - $w_0=25\mu\text{m}$ なら、伸びしろはある。(後から述べるように、これはレーザー側かなり困難)
- $w_0=50\mu\text{m}$ なら、有限角衝突でも極端に損はしない。



# コンプトンX線のエネルギー

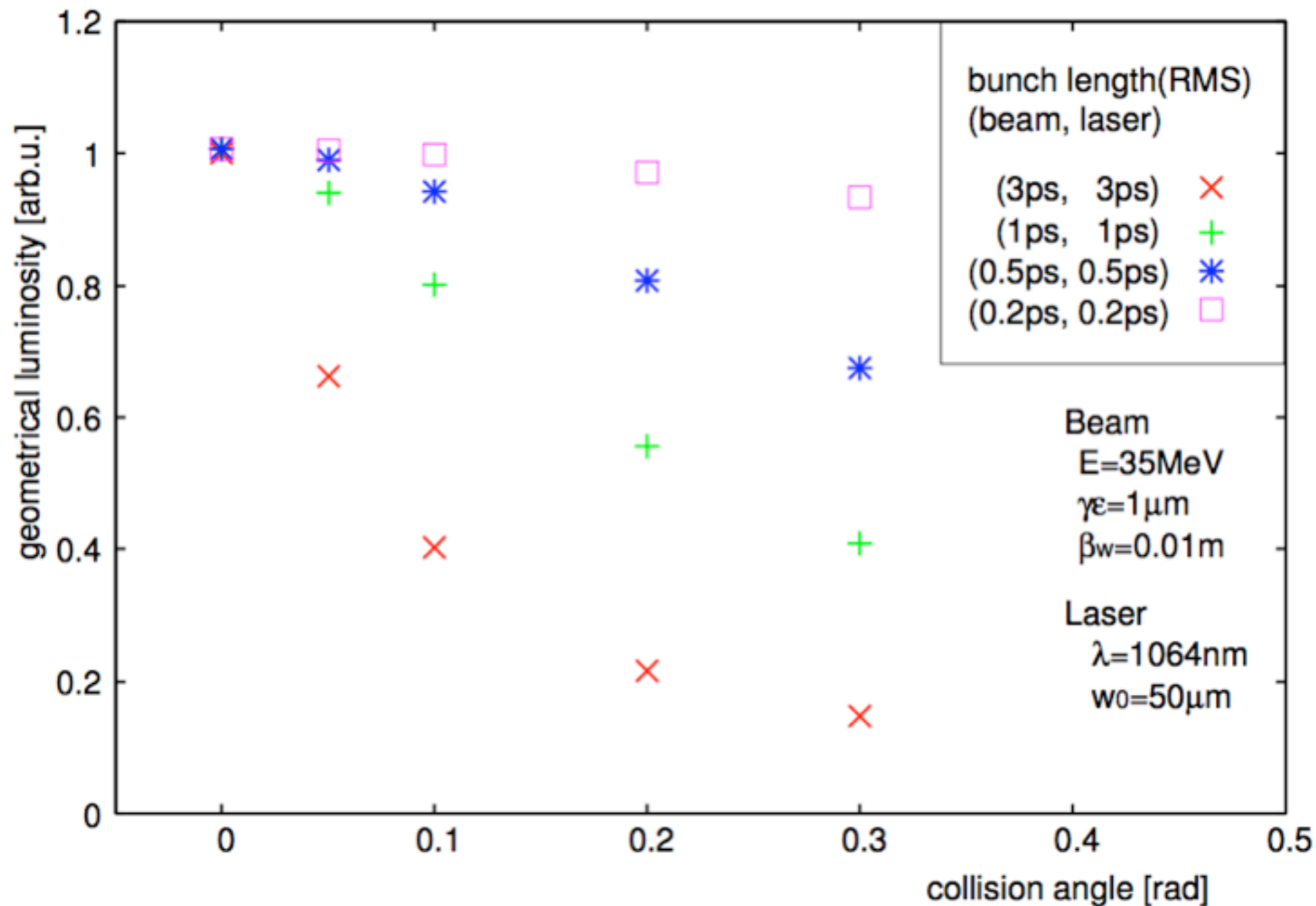
- コンプトンX線のエネルギー(最大値)について計算した。  
STFは40MeVなので、28keV  
cERLは35MeVなので、22keV
- 正面衝突だと、必然的にX線がレーザーのミラーを1枚透過する配置になることを考慮しなければならない。  
cERLだと、エネルギーが低く、X線の透過率で大きく損をする。  
5mmの石英基板だと、10%しか透過しない。2mm程度の薄い基板でないと勝負にならない。  
(後で述べるようにミラーの形状誤差に非常に敏感なので、薄いミラーで大丈夫かは自明でない。)  
有限角衝突にしたほうが、むしろ得かもしれない。

$$E_s = \frac{4\gamma^2 E_i}{1 + (\gamma\phi)^2 + 4\gamma E_i/mc^2}$$



# 短バンチ化の効果

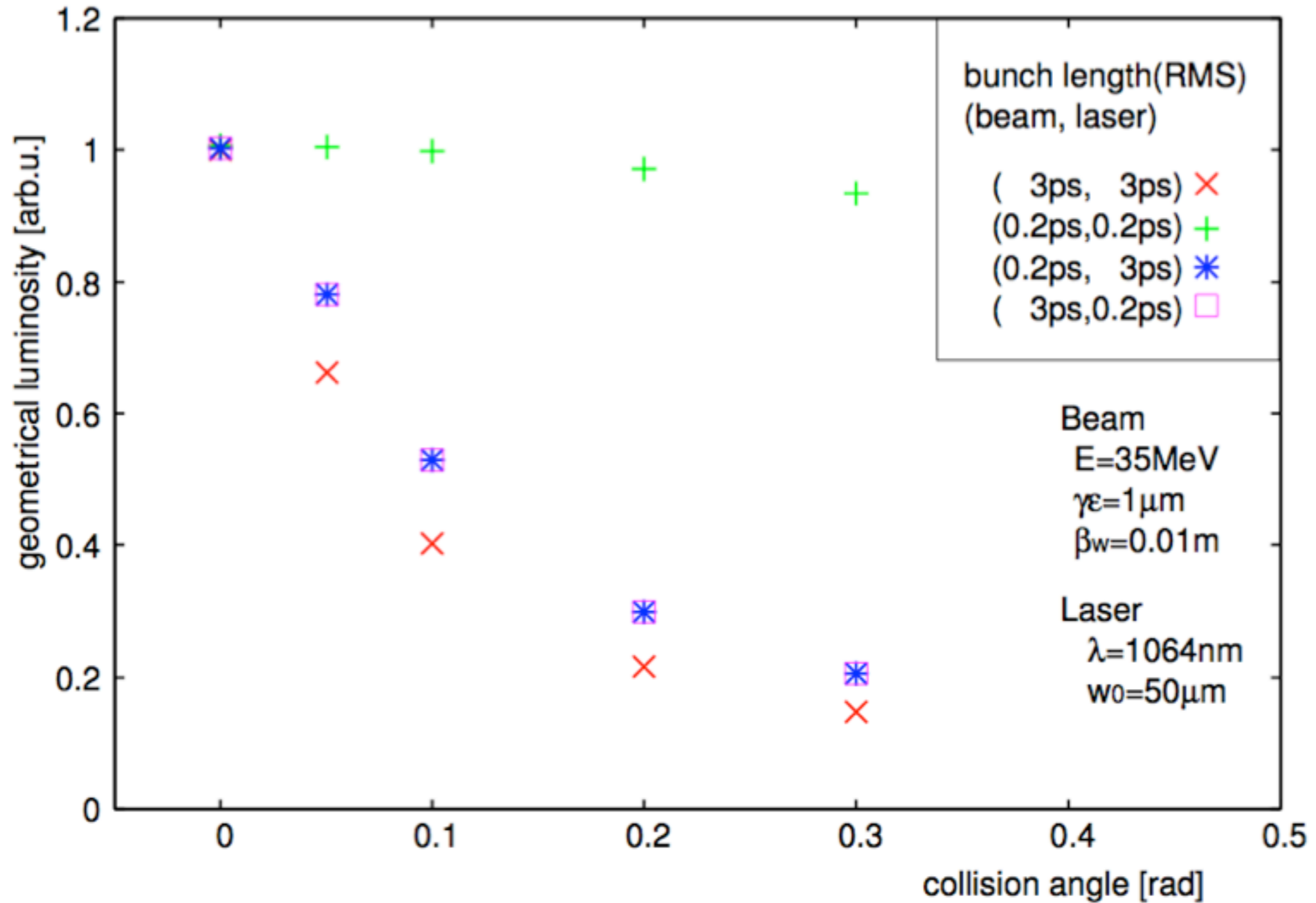
- バンチ長x衝突角がスポットサイズ以下程度なら、有限角衝突でも損しない。
- cERLの特長を生かすなら、短バンチモードも考えられる。
  - ビームは1ps以下は十分可能だろう。
  - レーザーはNd系では帯域が狭すぎる。Yb系なら可能。ただし経験が無いのでそれなりに開発が必要。
- 1ps-1psならかなり改善。





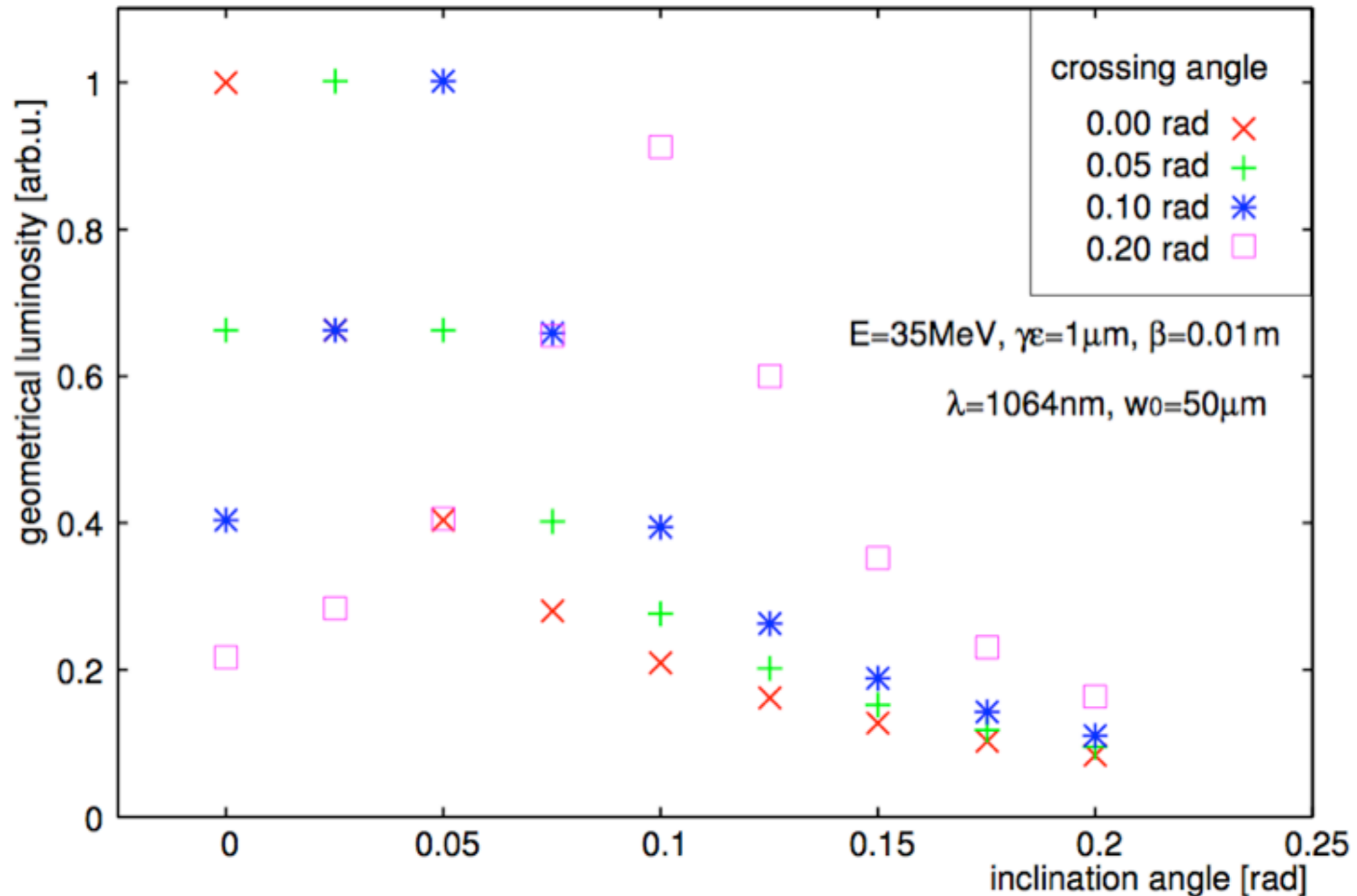
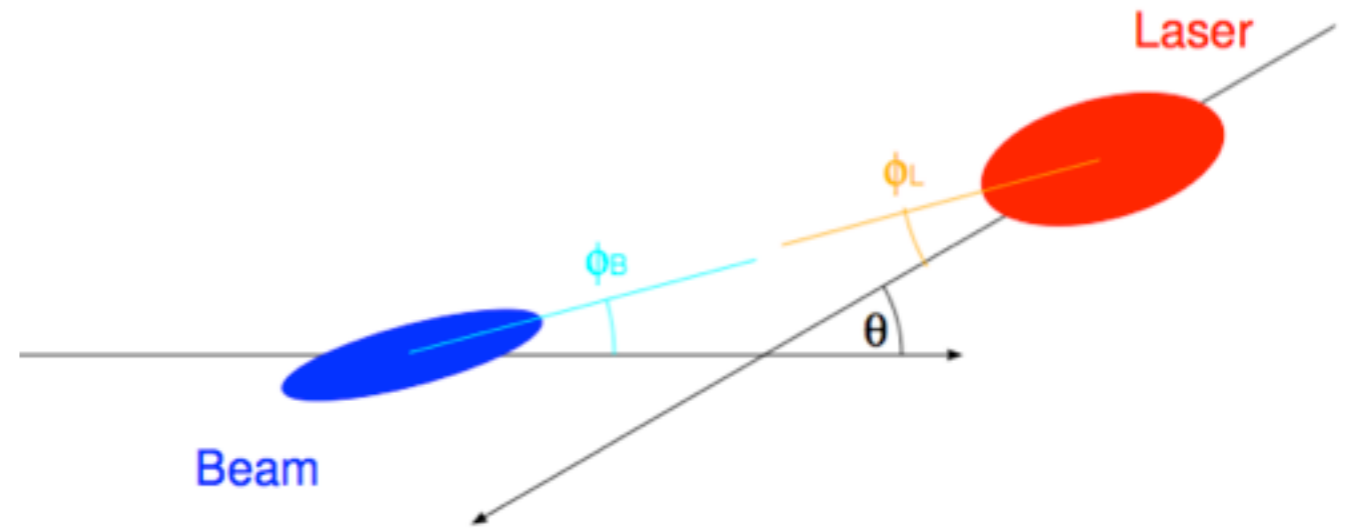
# 短バンチ化の効果

- 当然ながら、片方だけ短くても効かない。



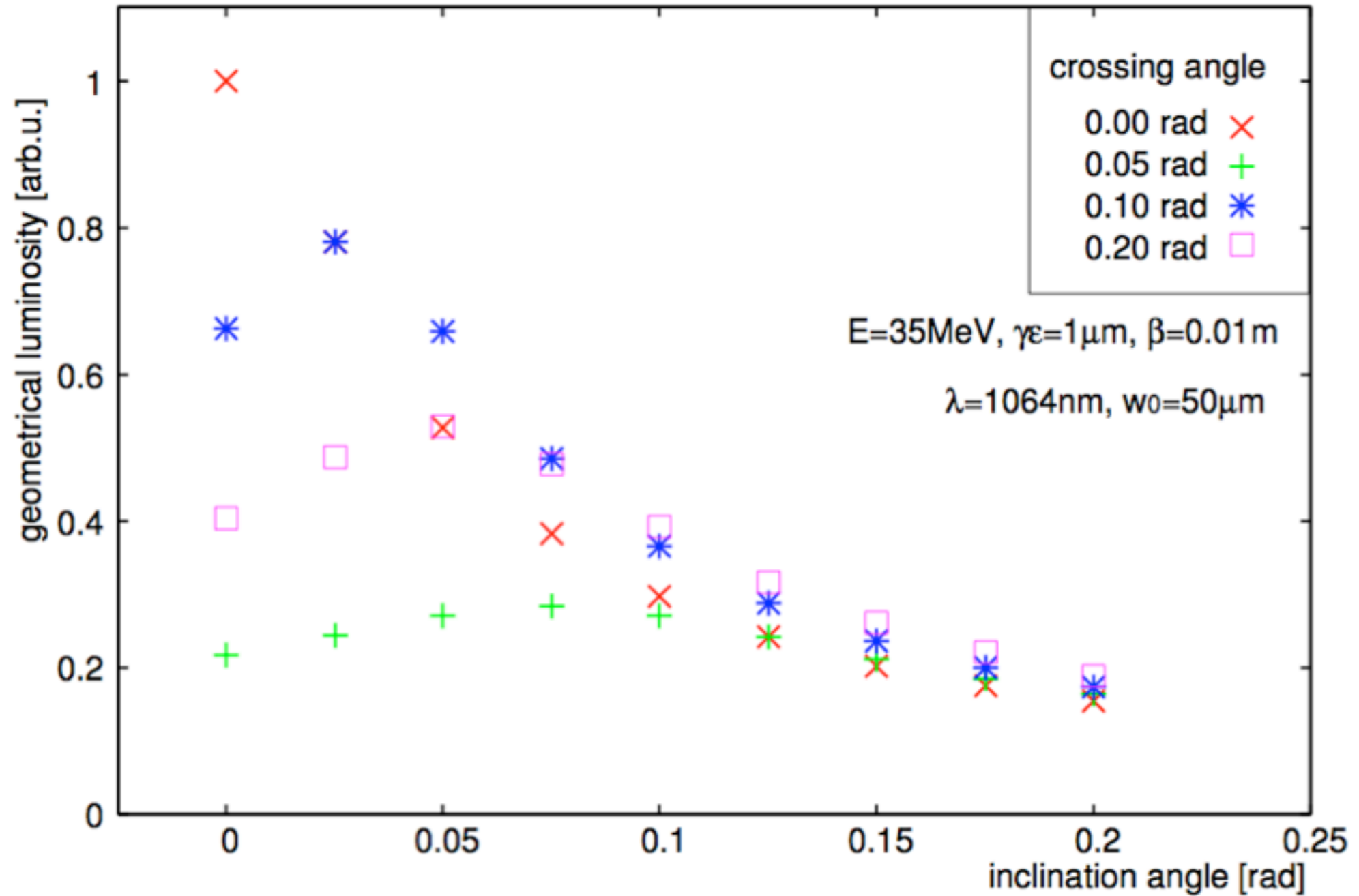
# クラブ衝突

- ついでなので計算してみた
- 具体的には  
ビームはTM110空洞で傾けられるとして  
レーザーはどうやって傾けるのか不明
- 有限角衝突でもルミノシティは回復できる。



# クラブ衝突

- ビーム側のみ傾けた場合。
- 片方だけでは少ししか効かない



# ルミノシティについてまとめると

- ビームはきつとレーザーとくらべて十分小さく絞れる。
- レーザーを $w_0=25\mu\text{m}$ まで絞るつもりなら、正面衝突でさらに大きく得する。
- レーザーが $w_0=50\mu\text{m}$ までなら、正面衝突にして得する量は少なく、X線の基板透過率を合わせるとかえって損する。
- 短バンチ化すれば、かなりの有限角衝突でも、損はしない。

# レーザー共振器の固有モード計算

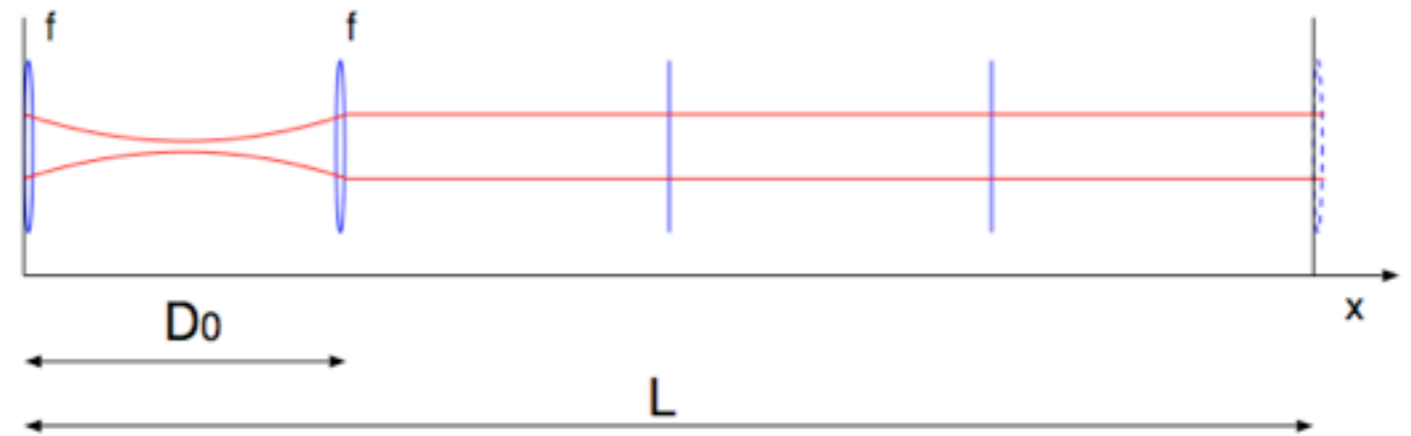
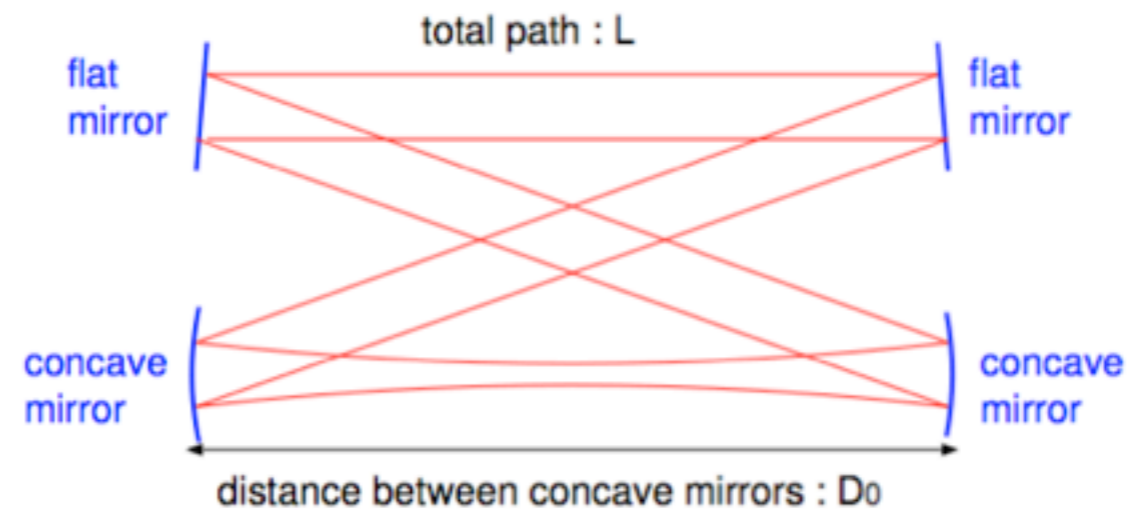
- 共振器固有モードのレーザースポットサイズ
- 行列モデルで、加速器と同じように計算
- 4枚ミラー共振器を展開してレンズとドリフトスペースの並んだものとして扱う。
- 任意の点でのサイズは、そこを起点とした周回の伝搬行列の要素から計算できる。

最も単純な4枚ミラー(平面x2, 凹面x2)で、大体それらしい大きさ

$$L=4\text{m}$$

$$D_0=1\text{m}$$

$D_0$ と $f$ の関係が重要。 $L$ は全体の周長合わせ。



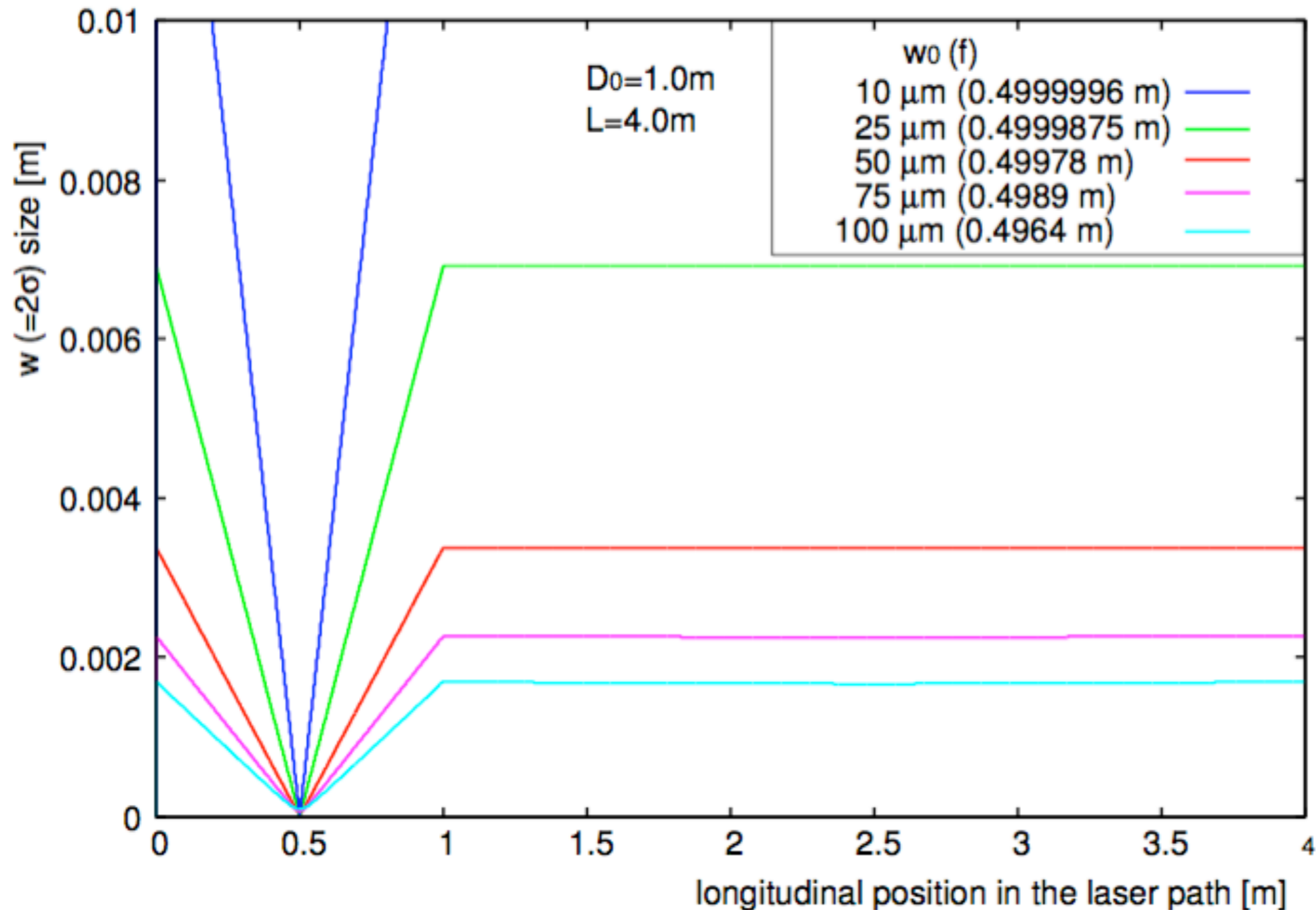
$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$$

$$w^2 = \frac{\lambda}{\pi} \frac{2|B|}{\sqrt{4 - (D + A)^2}}$$

$$D(L) = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad F(f) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}$$

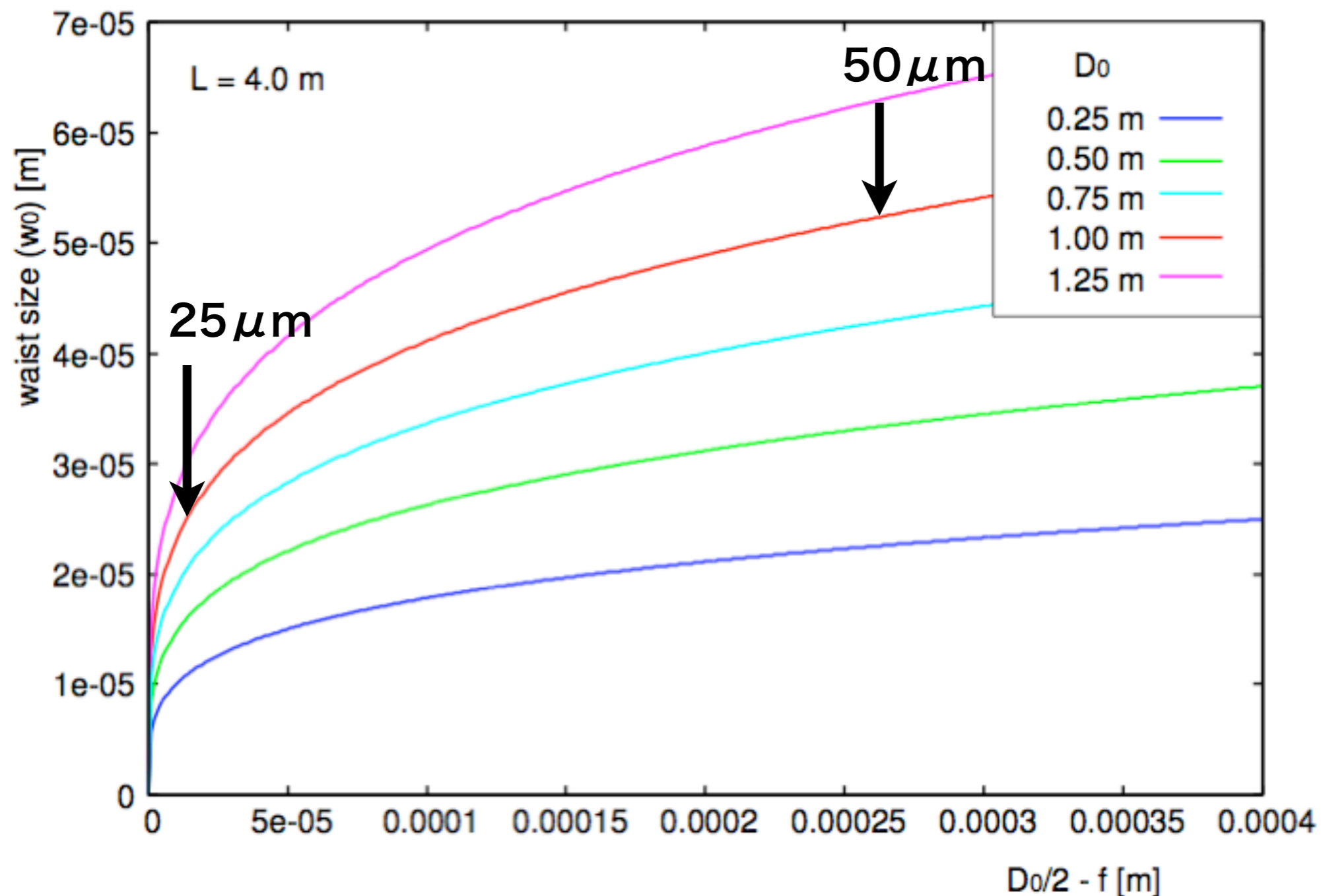
# 固有モードのスポットサイズの伝搬

- $s=0\text{m}, 1\text{m}$ の位置が凹面ミラー
- 当然ながら、絞れば広がる。
- ミラーのサイズは、半径 $5\text{-}\sigma$ 必要。(回折損失 $10\text{ppm}$ 以下とするため(但し、いい加減な見積もり))
- $w_0=50\mu\text{m}$ なら直径 $25\text{mm}$ でいけそうだが、 $w_0=25\mu\text{m}$ なら直径 $40\text{mm}$ は必要。



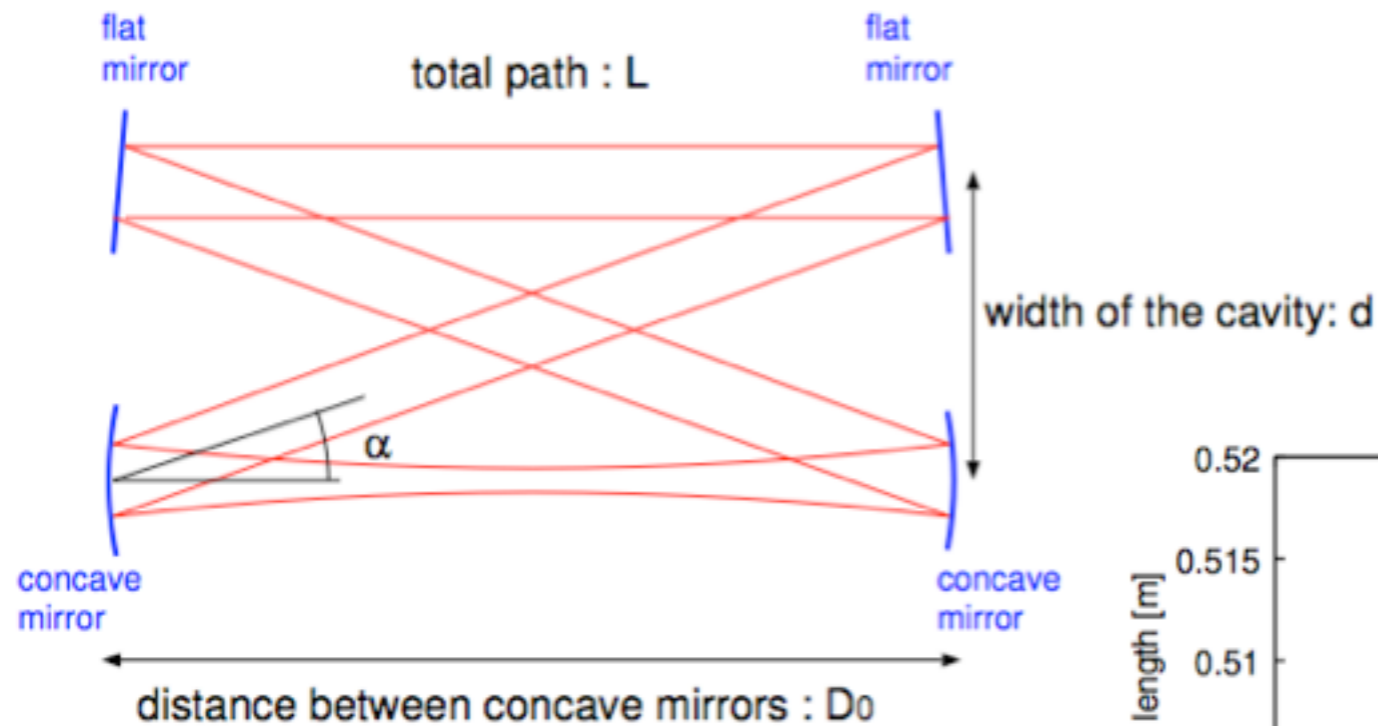
# 衝突点でのスポットサイズ

- 衝突点でのサイズは、凹面ミラーの間隔と収束力の差分( $D_0/2-f$ )で定まる。
- $w_0=50\mu\text{m}$ と $w_0=25\mu\text{m}$ では、敏感さは20倍くらい違う。
- $10\mu\text{m}$  (1mにたいして10ppm)の誤差で
  - $w_0=50\mu\text{m}$ なら、 $w_0$ の変化は1%程度なのでモード形状は変わらない。共振器の共鳴条件だけの問題にとどまる。
  - $w_0=25\mu\text{m}$ なら、 $w_0$ の変化は35%。入射系のレンズ系(入力カップラ)まで変えないといけない。



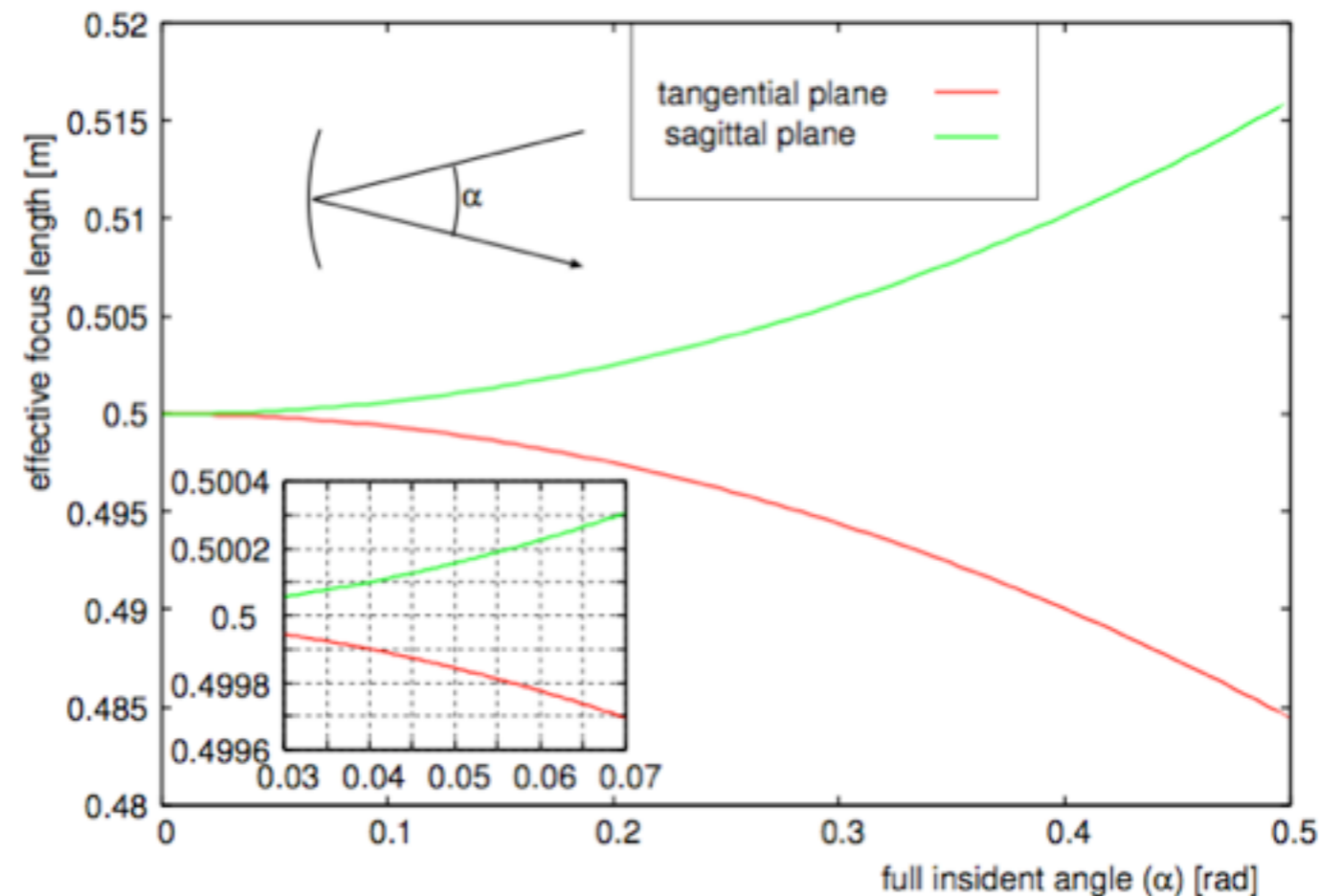
# 凹面ミラーの収差

- ここまでの計算では無視していたが、
- 4枚ミラーだと、どうしても凹面ミラーを斜め入射で使用することになる。
- 収束力が2平面で少し異なる。
- できるだけ小さな入射角で設計したいところだが、ミラー径とD0で制限される。  
D0=1m, ミラー径50mmとして、 $\alpha=0.05\text{rad}$ 程度。



$$f_t = \frac{\rho}{2} \cos(\alpha/2)$$

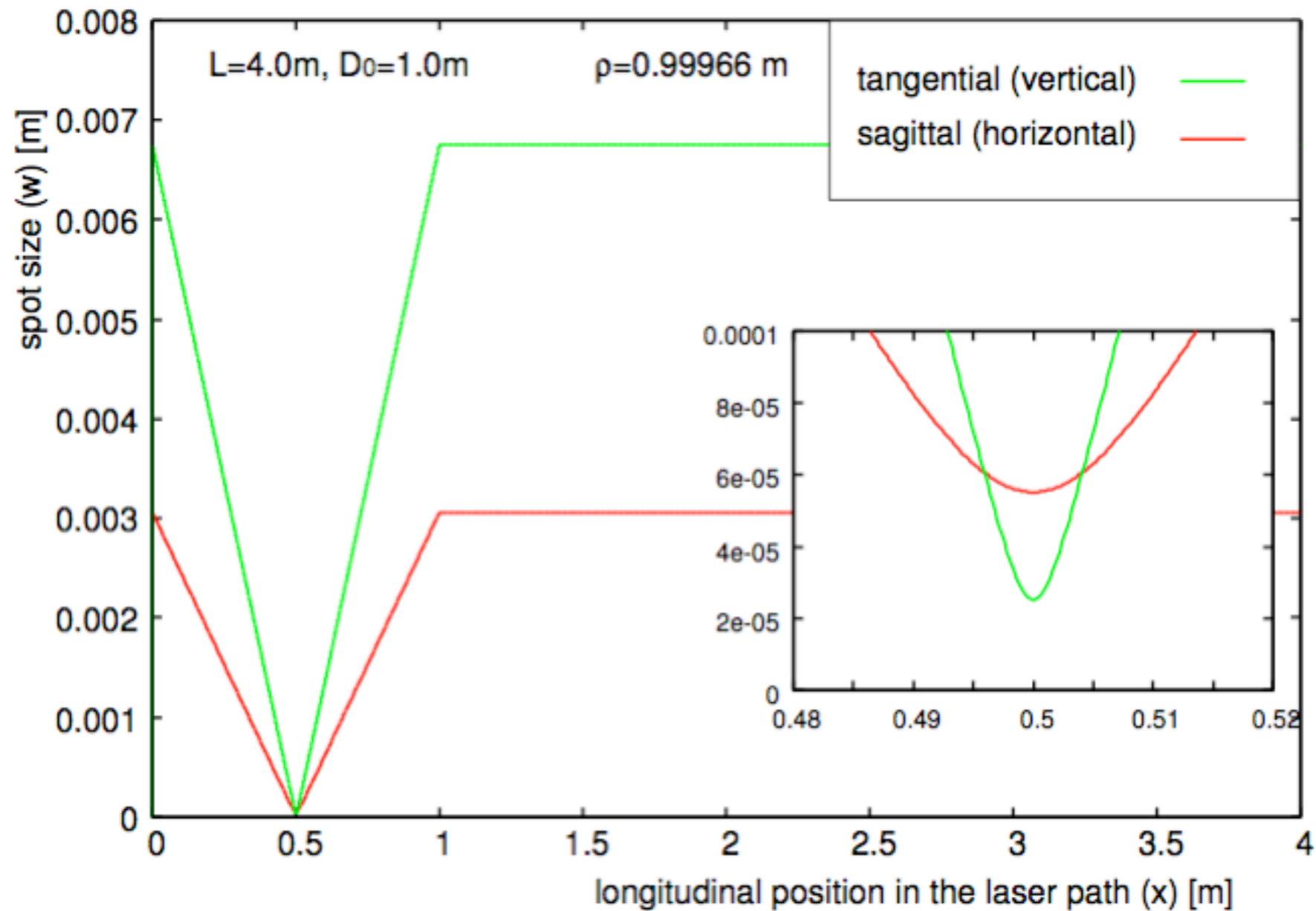
$$f_s = \frac{\rho}{2 \cos(\alpha/2)}$$





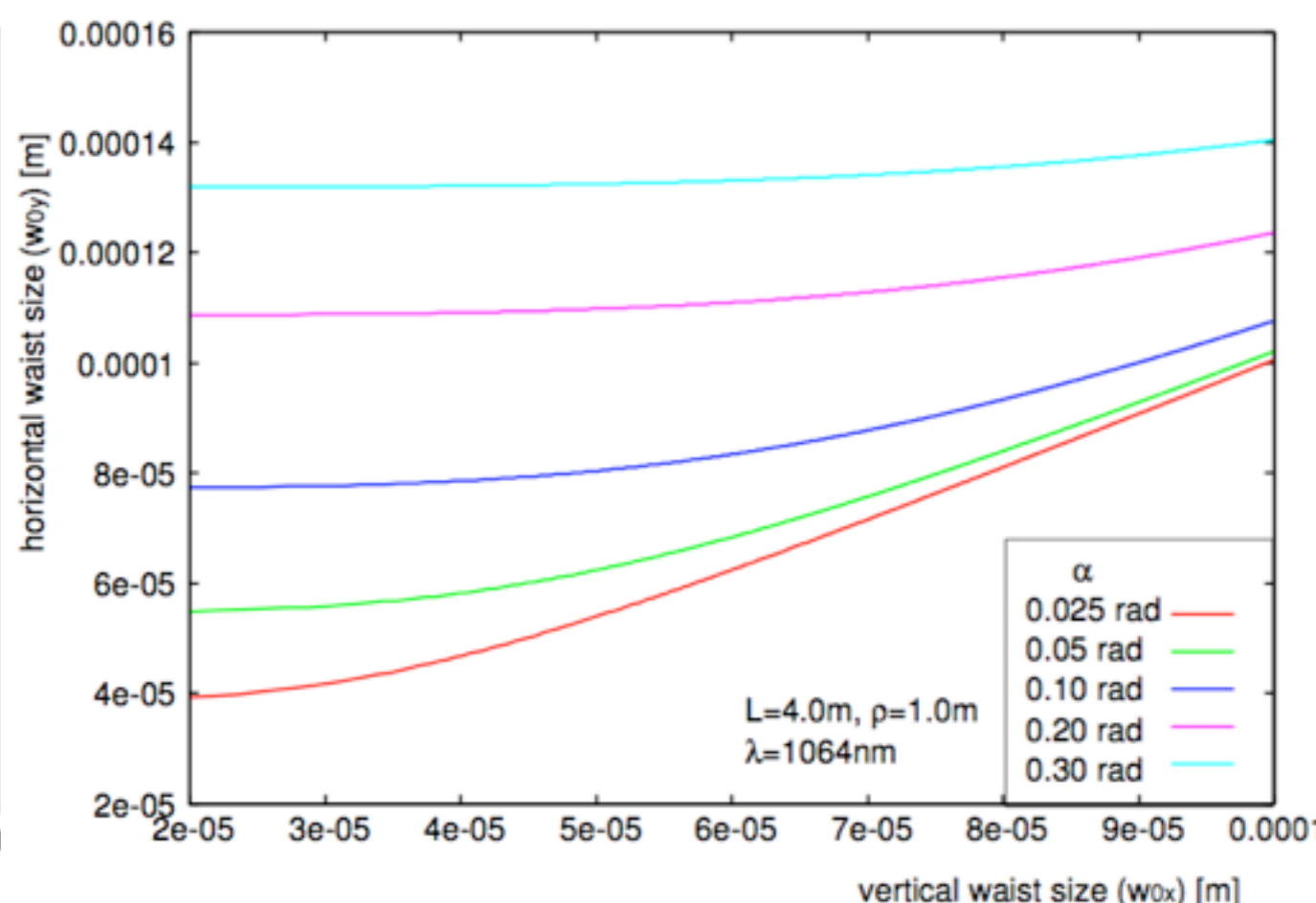
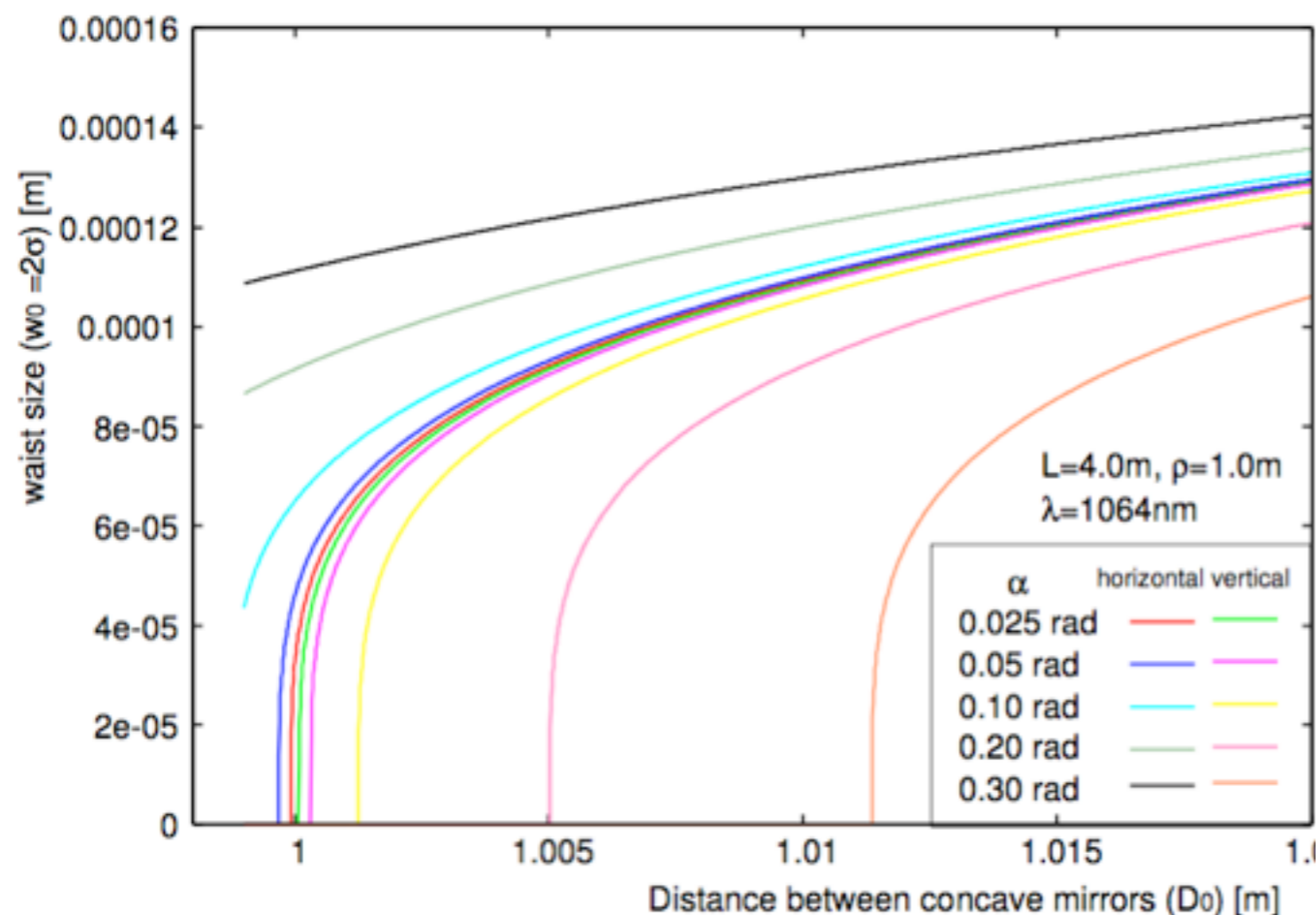
# 2平面のスポットサイズ

- $\alpha=0.05\text{rad}$ で計算。
- $w_0=25\mu\text{m}$ を狙うと、これでもかなり扁平。  $25\mu\text{m} \times 55\mu\text{m}$ くらいになる。
- $\alpha$ は2次の効き方をするので、すこしでも小さくするようにしたいところ。



# 2平面のスポットサイズ(衝突点)

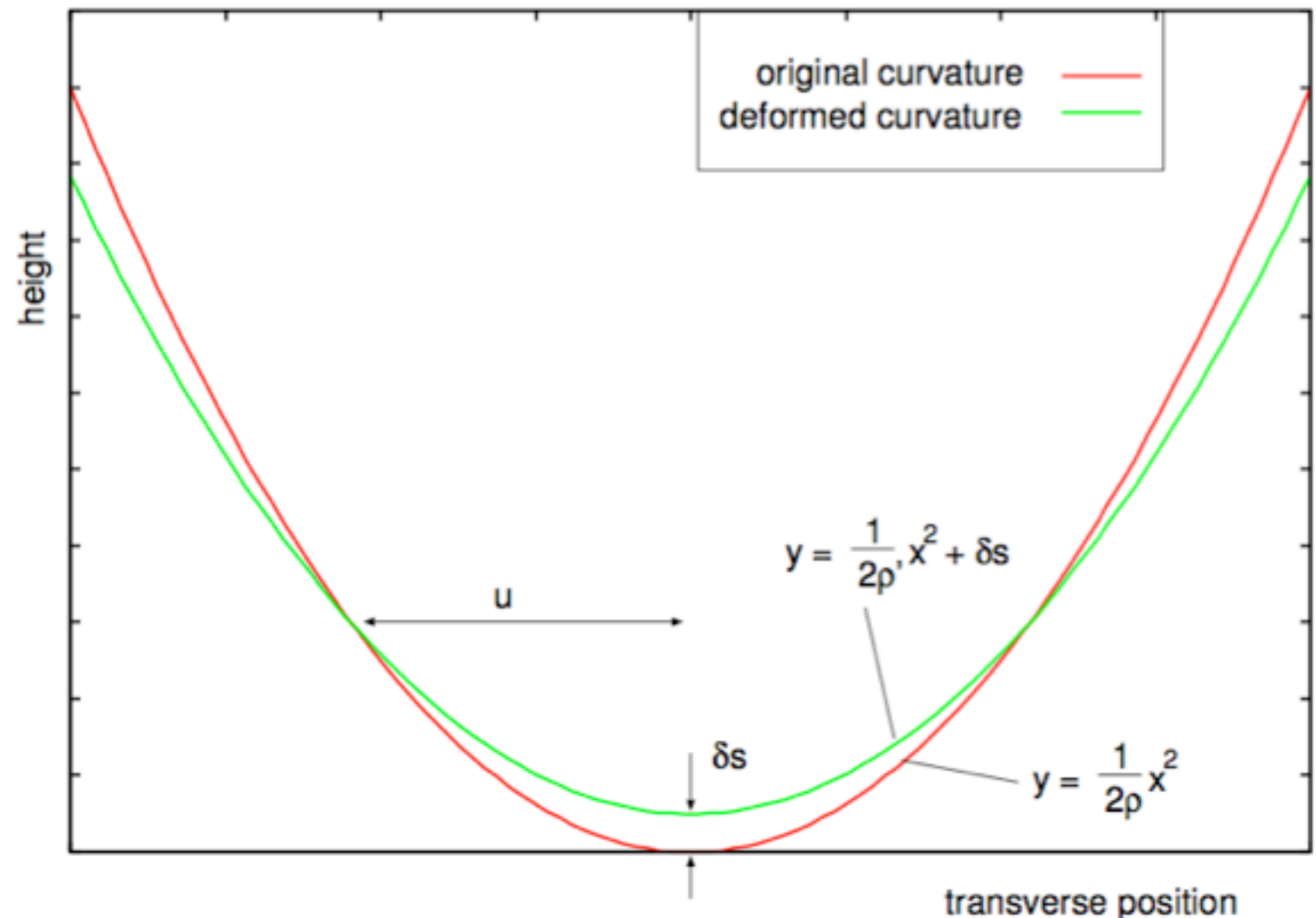
- $\alpha$ のいくつかの場合について。
- STFでは $\alpha=0.26\text{rad}$ (15度)。このままだと、 $25\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ とか。無理して $25\mu\text{m}$ まで絞った意味が無い。
- $\alpha=0.03\text{rad}$ で $w_0=50\mu\text{m}$ なら、まあまあ真円のスポットになる。  
できるだけ細長い共振器にして、そもそもの収差の発生を抑える方針が、収差の補償(案0)



# ミラーの形状精度について

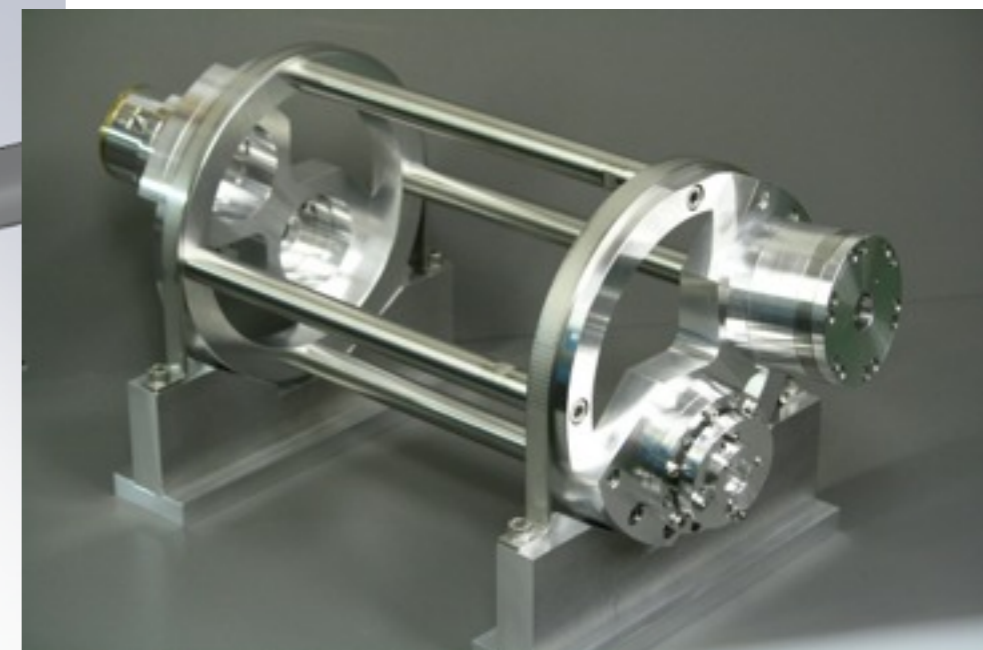
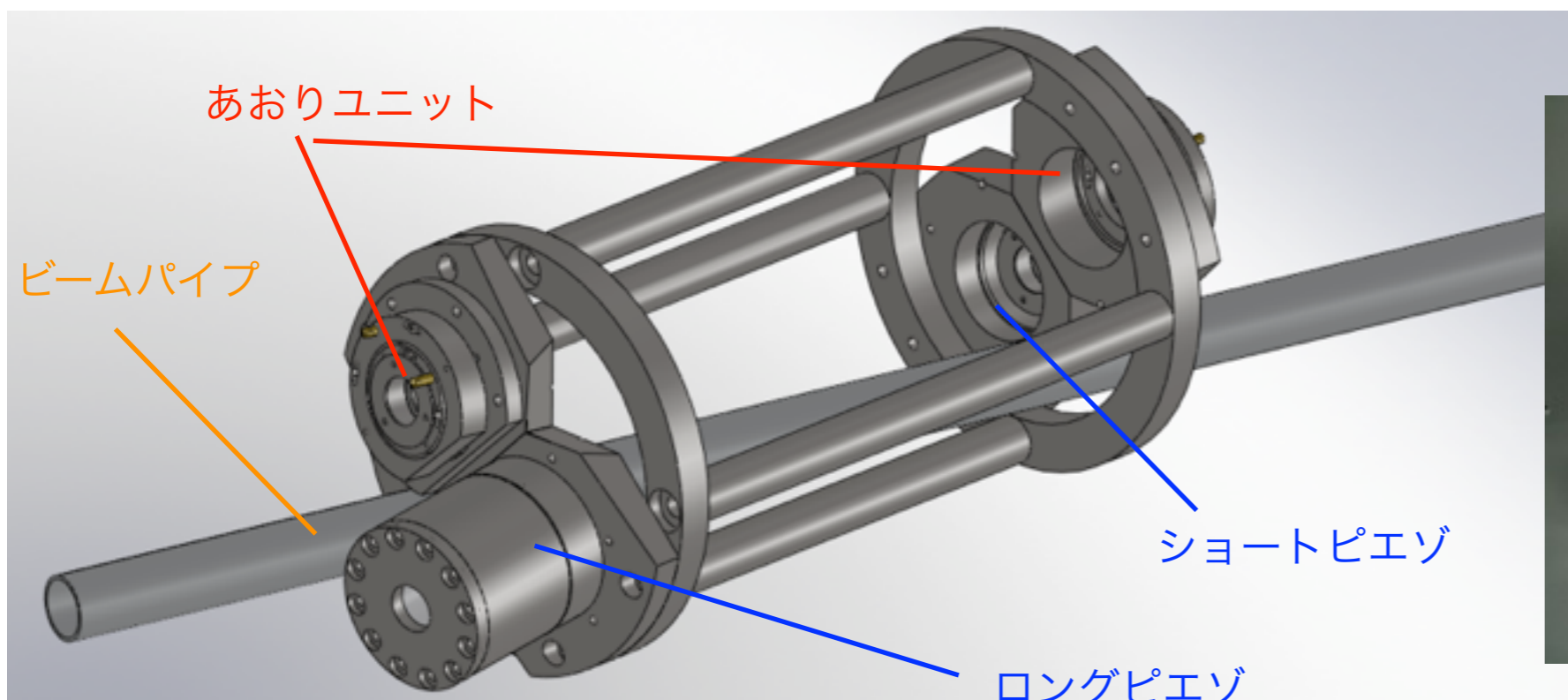
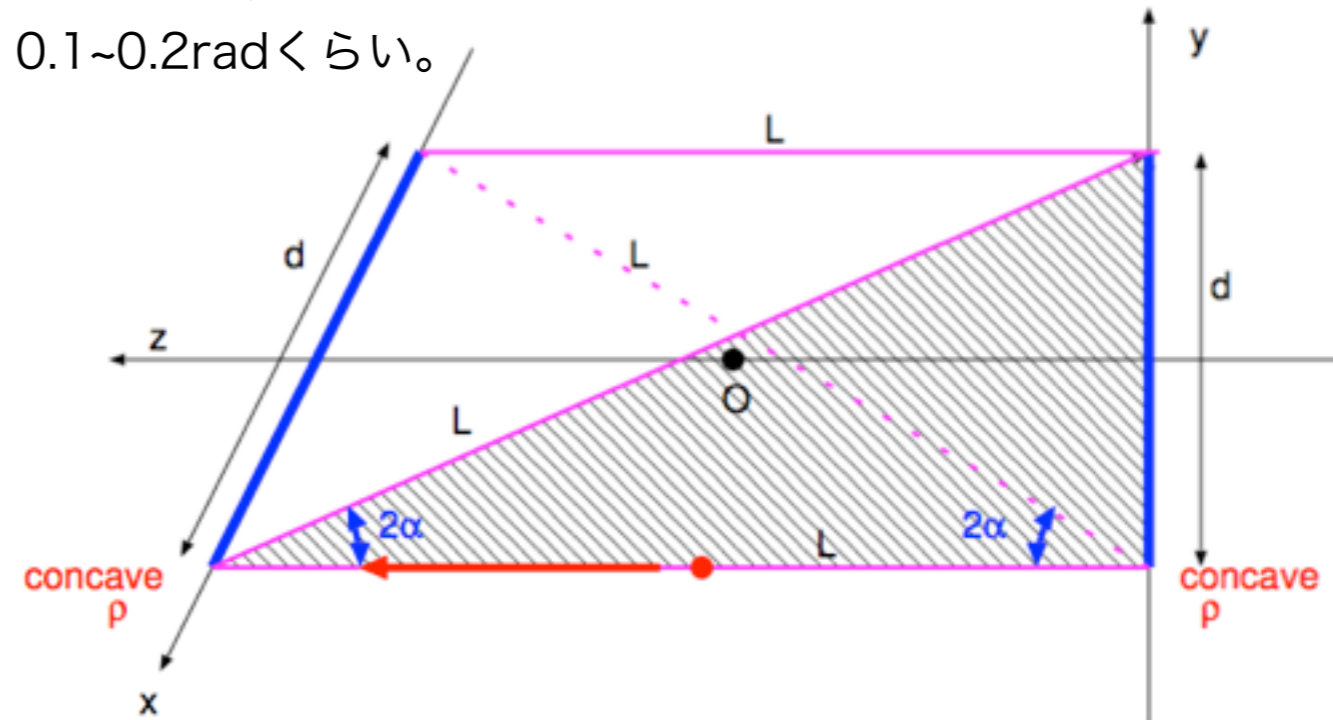
- ミラーの曲率半径の一様性にたいする要求
  - $w_0=50\mu\text{m}$ の場合、曲率半径の許容誤差 $100\mu\text{m}$
  - $w_0=25\mu\text{m}$ の場合、曲率半径の許容誤差 $10\mu\text{m}$
- ミラーの有効径の範囲で曲率半径が変動すると、モードが定義できなくなる(少なくとも線形モデルでは)。
- $u$ 程度の空間スケールで、 $\delta s$ 程度の凹凸があるときの、局所的な曲率半径の変化
  - 仮に $u=4\text{mm}$ として
  - $\delta s=\lambda/100$  ( $w_0=50\mu\text{m}$ の場合)
  - $\delta s=\lambda/1000$  ( $w_0=25\mu\text{m}$ の場合)
- メーカーの保証値以上。やってみなければ分からないレベル。
  - 最低次のずれは、単に基準とする曲率のずれと等しいので、関係ない
  - 高次のずれがどの程度か

$$\rho' \approx \rho + \frac{2\rho^2}{u^2} \delta s$$



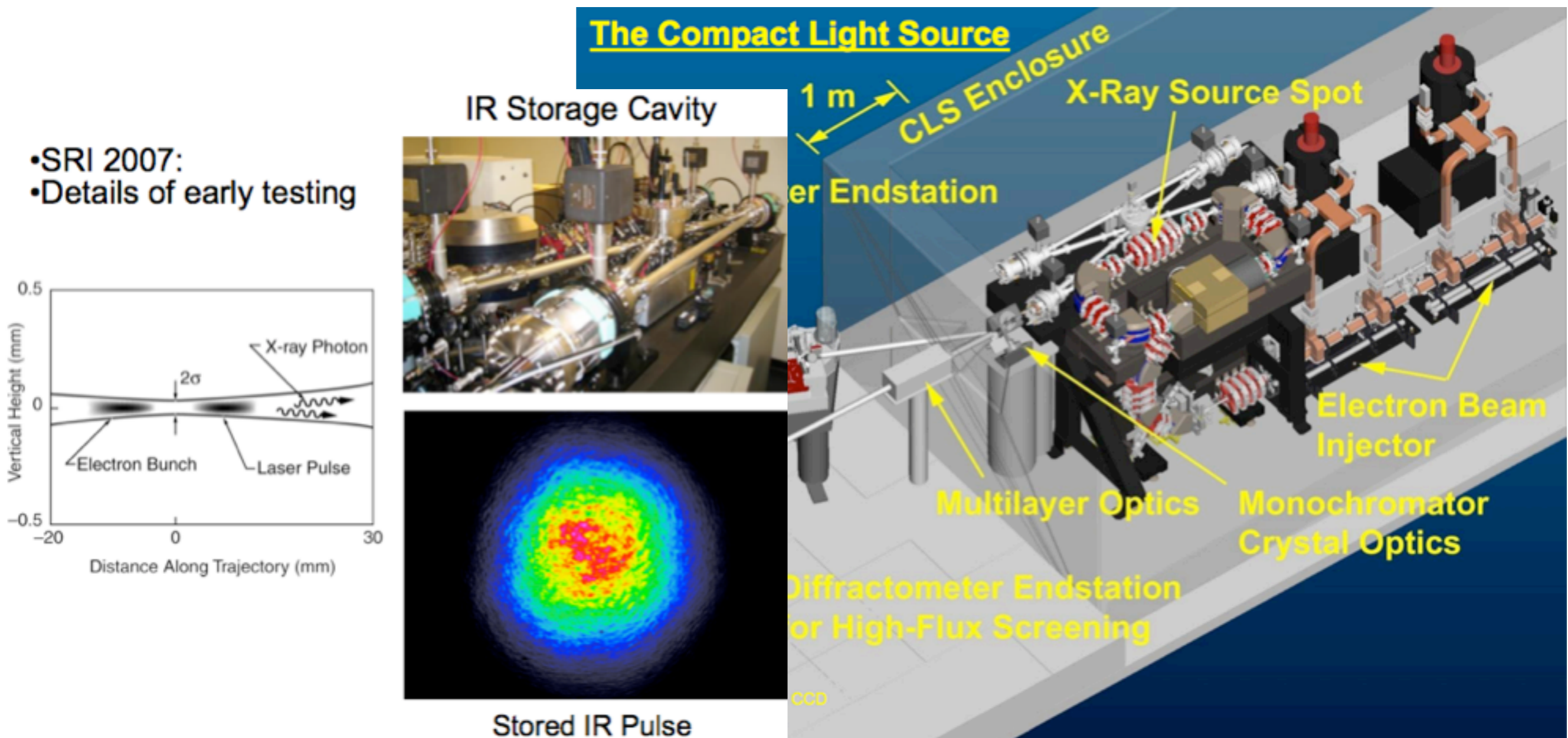
# 収差の補償(案1)

- 2平面の収差を対称にするために、共振器をひねって3次元にする。
- 厳密には、像の回転効果加わるため、少し対称からずらす。
- 横方向両方にサイズが大きくなる。今の場合ベンドの幅と干渉する。  
シケインビームラインで無く、直線部に設置するなら、これもあり。
- ビームパイプ+ミラー径があるので、衝突角が大きくなる。0.1~0.2radくらい。
- ATFでは $D0=0.42\text{m}$ 、 $w0=30\mu\text{m}$ 、衝突角0.24rad



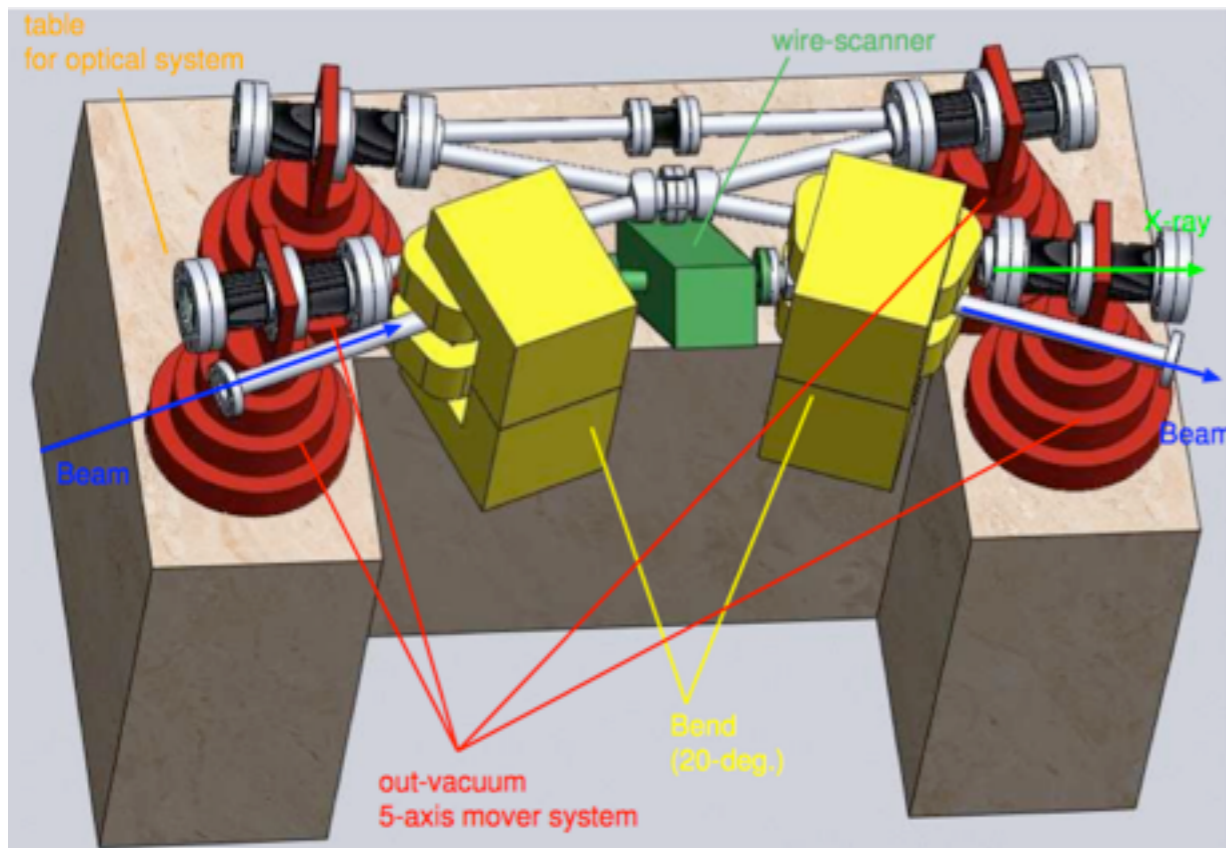
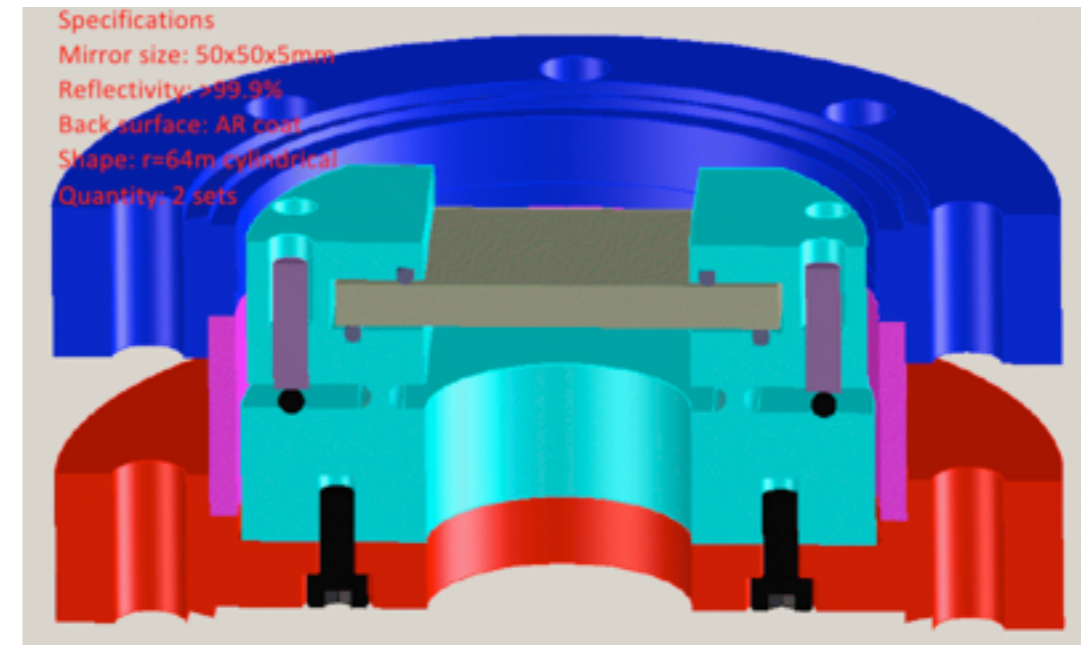
# 収差の補償(案2)

- Lyncean Tech. の絵を眺めてみると、  
 $\alpha=0.15$ くらい  
 $w_0=60\mu\text{m}$ くらいで、ほぼ真円
- 単純な(平面x2,凹面x2)の4枚ミラーではありえない。何か特殊なことをしていると思われる。



# 収差の補償(案2)

- STFでは外見上これをまねしている。
- 収差を補償するための特殊なこと  
平面ミラーを機械的に曲げてすこし円筒にするつもり。  
 $w_0=25\mu\text{m}$ に相当する精度に対応できるか



# 共振器のモードについてまとめると

- $D0/2$ と $f$ の差が重要
  - $w0=50\mu\text{m}$ なら、 $50\mu\text{m}$ 程度の精度
  - $w0=25\mu\text{m}$ なら、 $2\mu\text{m}$ 程度の精度
- スポットサイズは凹面ミラーを斜めに使用することで発生する収差で制限される。
  - そのままでは扁平プロファイルになってしまう
  - ミラーを曲げて補償する案(STF)
  - $w0=50\mu\text{m}$ なら、できるだけ平べったい共振器にすることで、特殊なことをしなくても真円に近くできる。
- mスケールの共振器で $w0=25\mu\text{m}$ は技術的には相当困難(挑戦的?)

# 誤差の感度

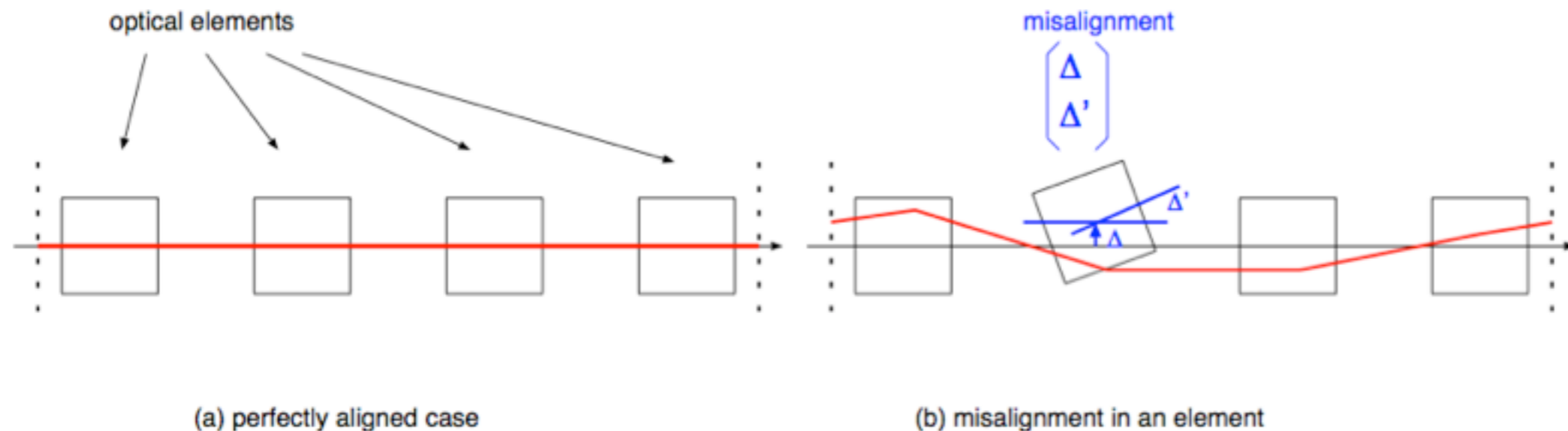
- 各ミラーの設置誤差が定常解の軌道にどう影響するか。
- 要素の位置および角度の誤差を取り入れるため3x3行列
- 周回の伝搬行列の固有ベクトルを計算すればよい

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ r_2' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B & E \\ C & D & F \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_1' \\ 1 \end{pmatrix}$$

平面ミラー  $M_p(\Delta') = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2\Delta' \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

$$r_0 = \frac{(1 - D)E + BF}{2 - A - D}$$

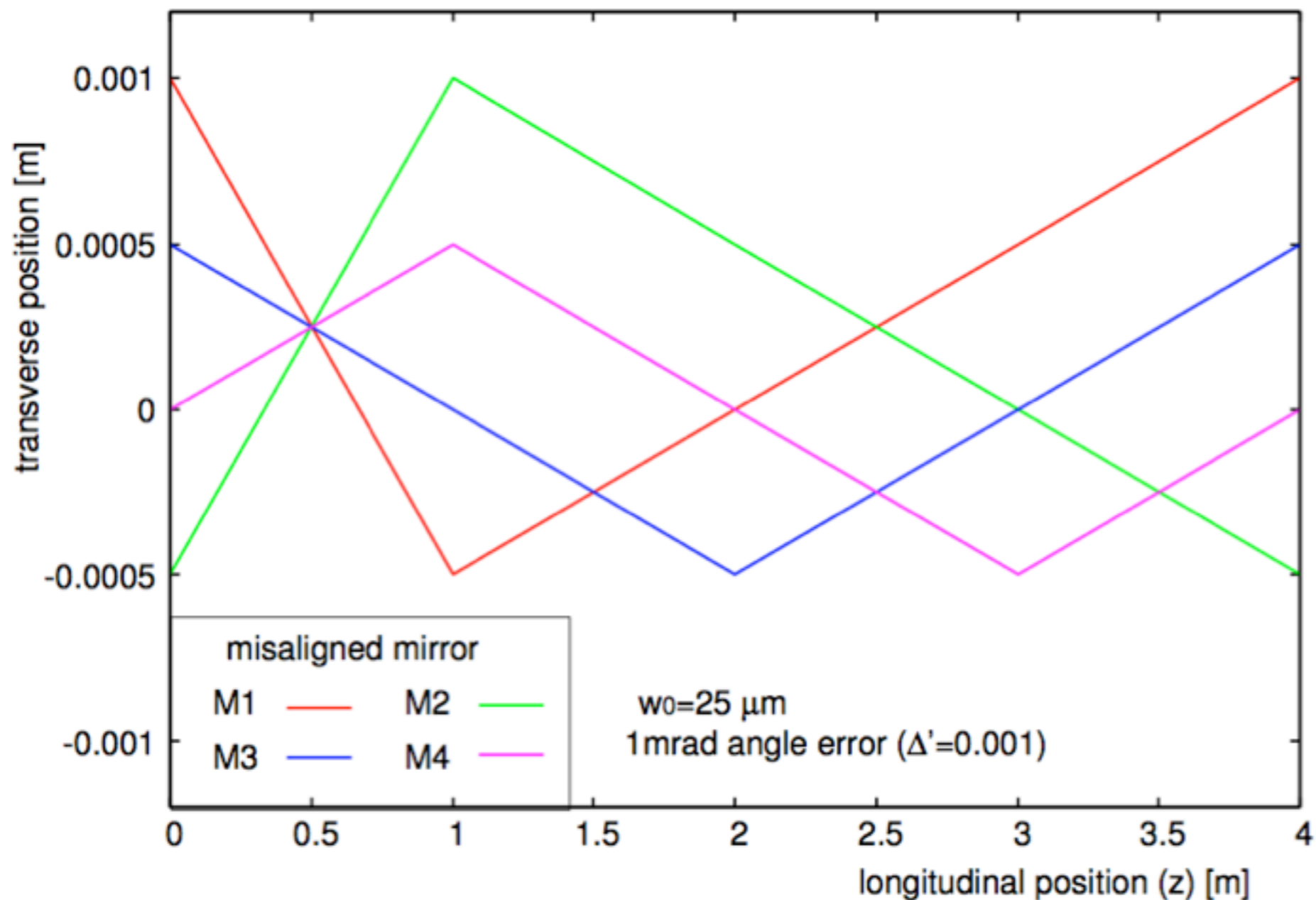
焦点距離  $f$  の凹面ミラー  $M_f(f, \Delta, \Delta') = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1/f & 1 & 2\Delta' + \Delta/f \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$





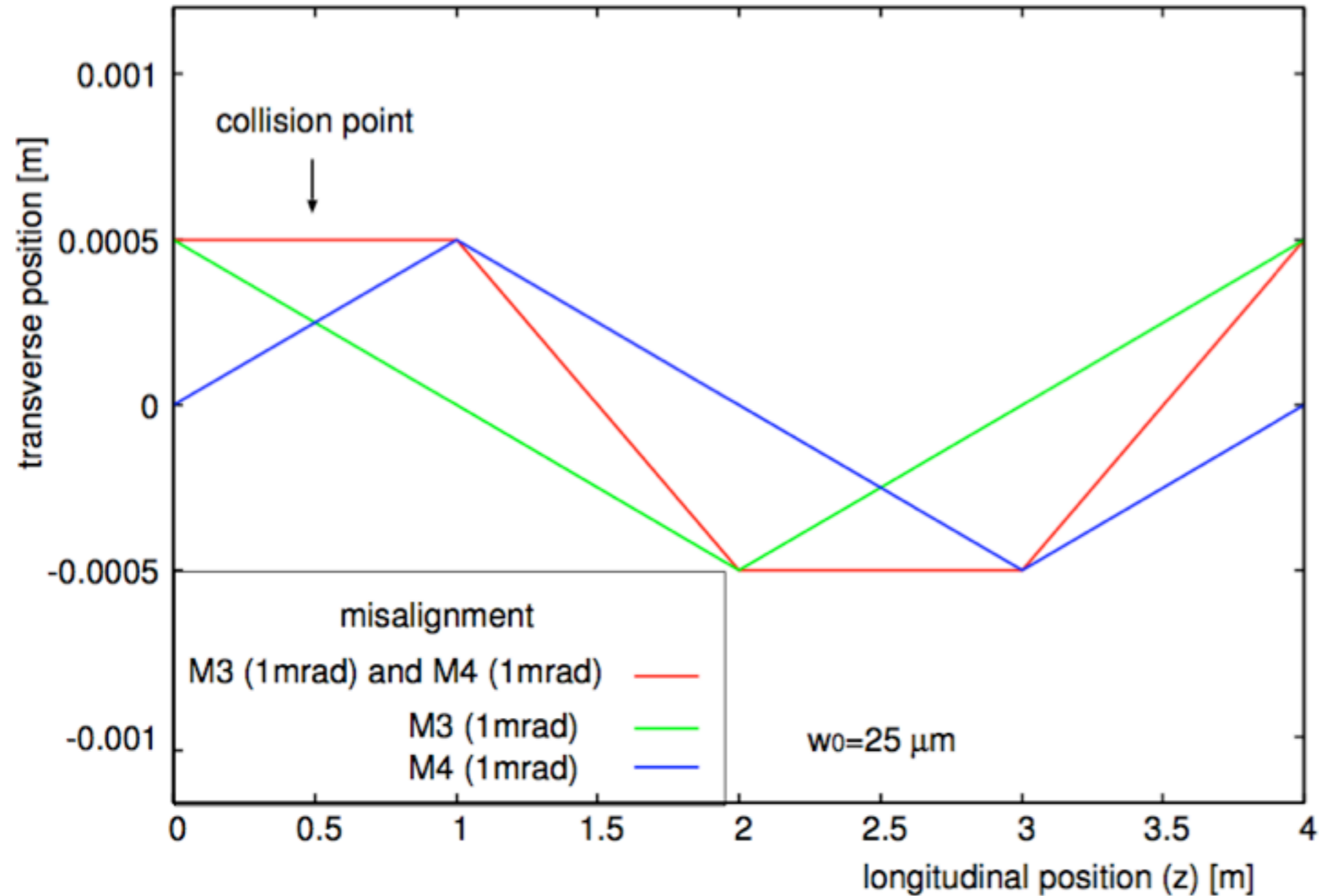
# 角度誤差

- 一つのミラーに1mrad角度誤差を与えた場合の軌道のずれを計算。
- 今の場合、横方向については安定領域なので、普通に応答するだけ。  
1mradで1mなので、1mmくらい軌道が変わる  
(仮に2枚ミラーで絞る配置にすると、不安定領域に近いので、すごく敏感に反応してしまう。)
- 組み上げた後で、1mrad程度ずれても、モードがミラーからはみ出して共鳴しなくなる(あるいはQ値が落ちる)ことは無い。



# 角度誤差の組み合わせ

- 線形なモデルなので、複数箇所に誤差がある場合は、単に重ね合わせで求まる。
- これを利用すると、衝突点のレーザー位置を平行移動できる。



# 共振器の形状と調整機構の案

## ・長手方向関係

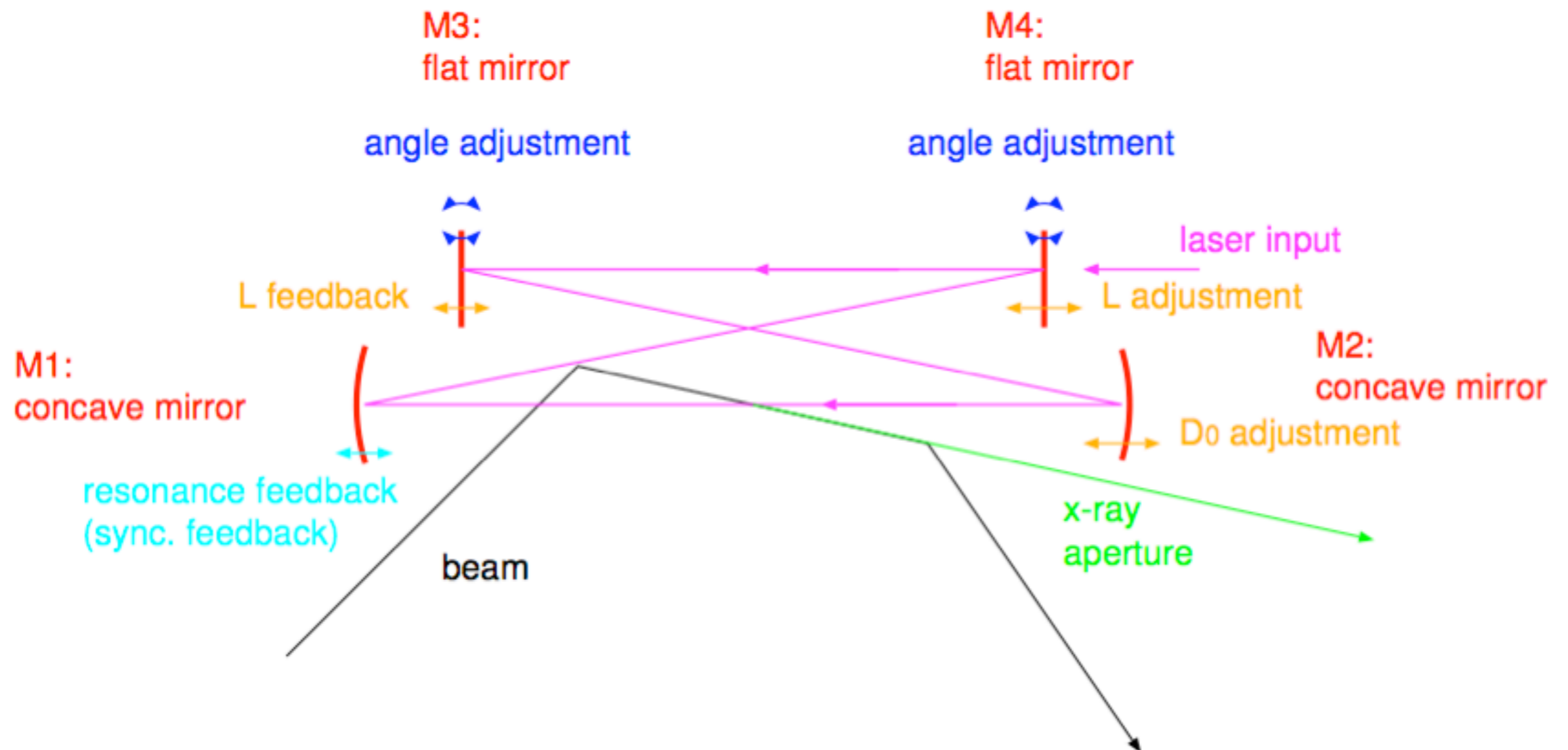
凹面ミラー間隔 $D_0$ はスポットサイズを決めるうえで重要なので、数 $\mu\text{m}$ の分解能の調整機構  
周長 $L$ は1300MHzとぴったり合わせるために必要。 $D_0$ と独立にmmの範囲で調整必要  
 $L$ のドリフトをゆっくりと補償するために100 $\mu\text{m}$ レンジの滑らかな調整機構  
共鳴をフィードバックするために、数 $\mu\text{m}$ レンジの速い動作機構

## ・横方向

モード軌道をミラー角度で制御するなら、2カ所に角度調整機構  
横方向の安定性を信じて、思い切って無し、もありえる。

## ・配置

収差を抑えるため、できるだけ平べったい共振器にする。ミラー直径は30mm。  
X線はミラーの外を通るように、有限角度衝突。



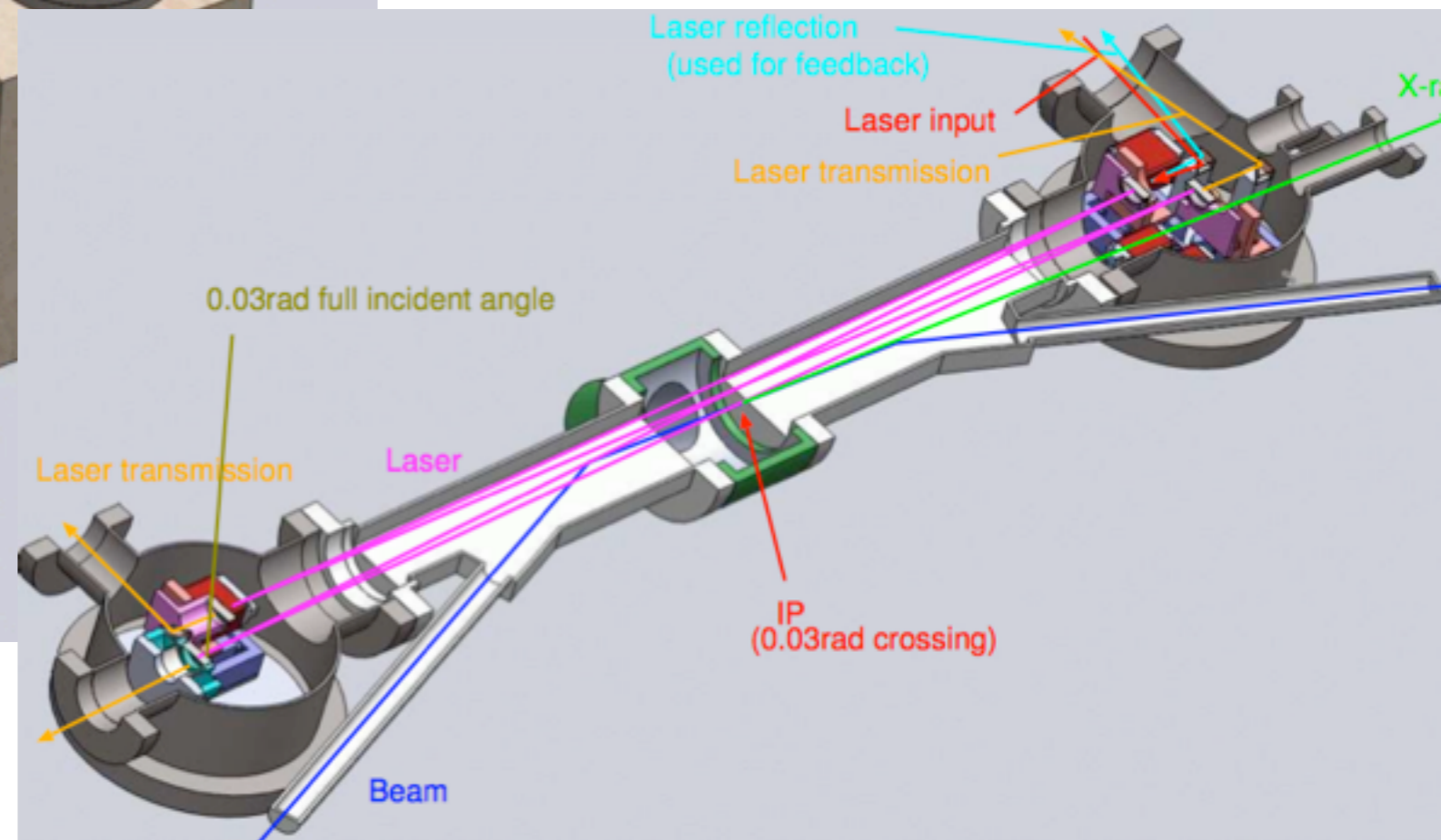
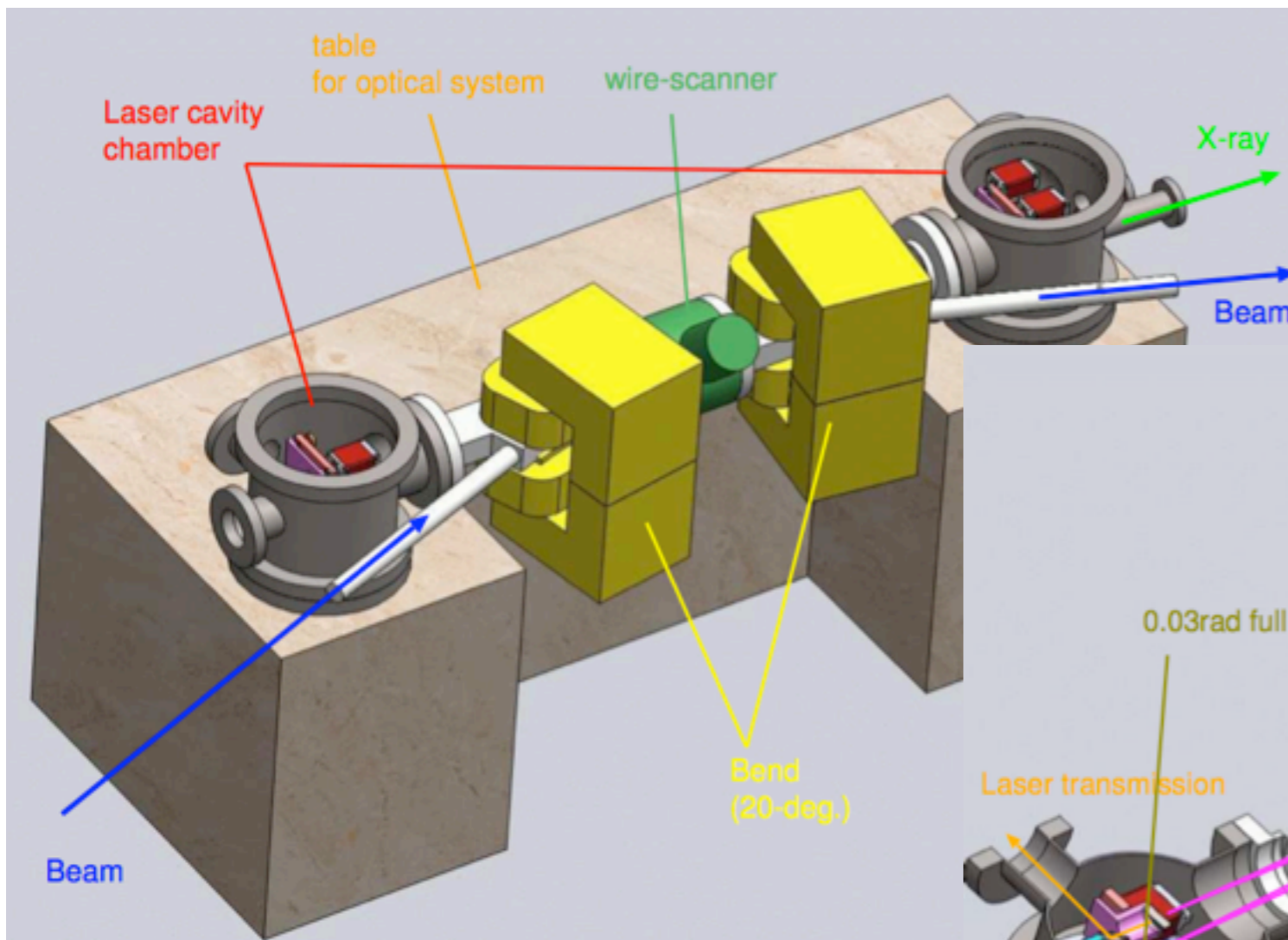
# システム全体

- ベンドチェンバを幅広にとって、4本のレーザー光路をすべて収める。
- 隣り合うミラーを出来るだけ近づけるように、一つのチェンバに2つのミラーシステムを入れる。
- 周長は1300MHzと整数倍の関係になる必要があるが、この絵ではいい加減。
- ビームとの衝突調整をどうやるか。

ビームを動かす、レーザーテーブルを動かす、レーザーミラーを動かす、などが考えられる。

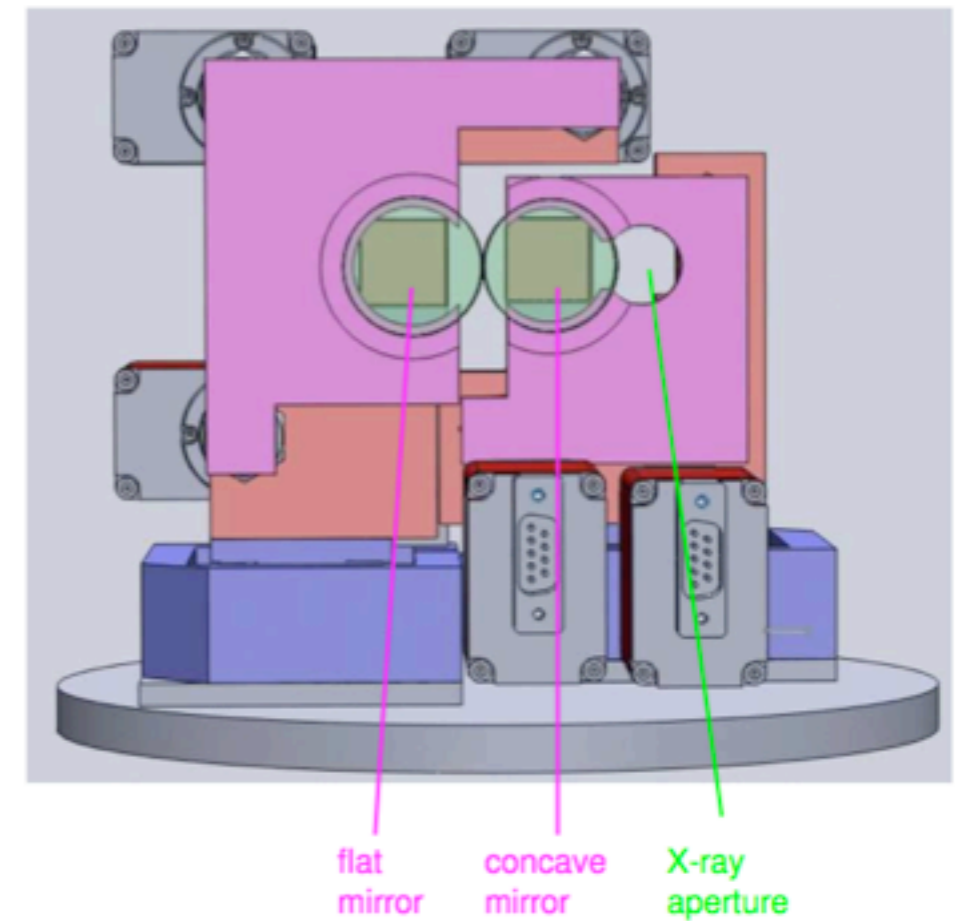
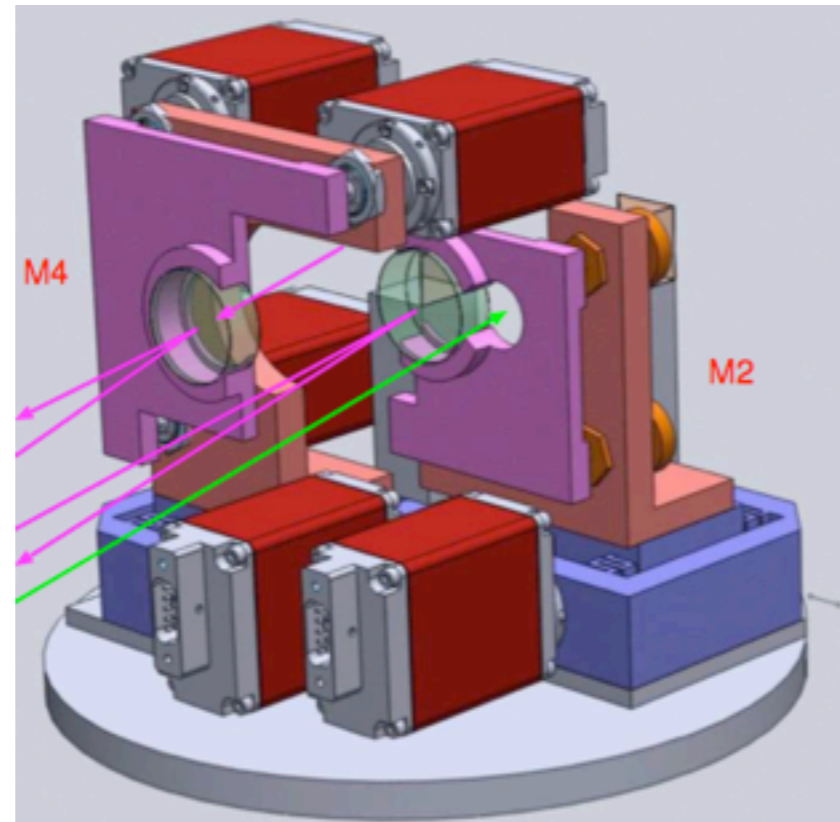
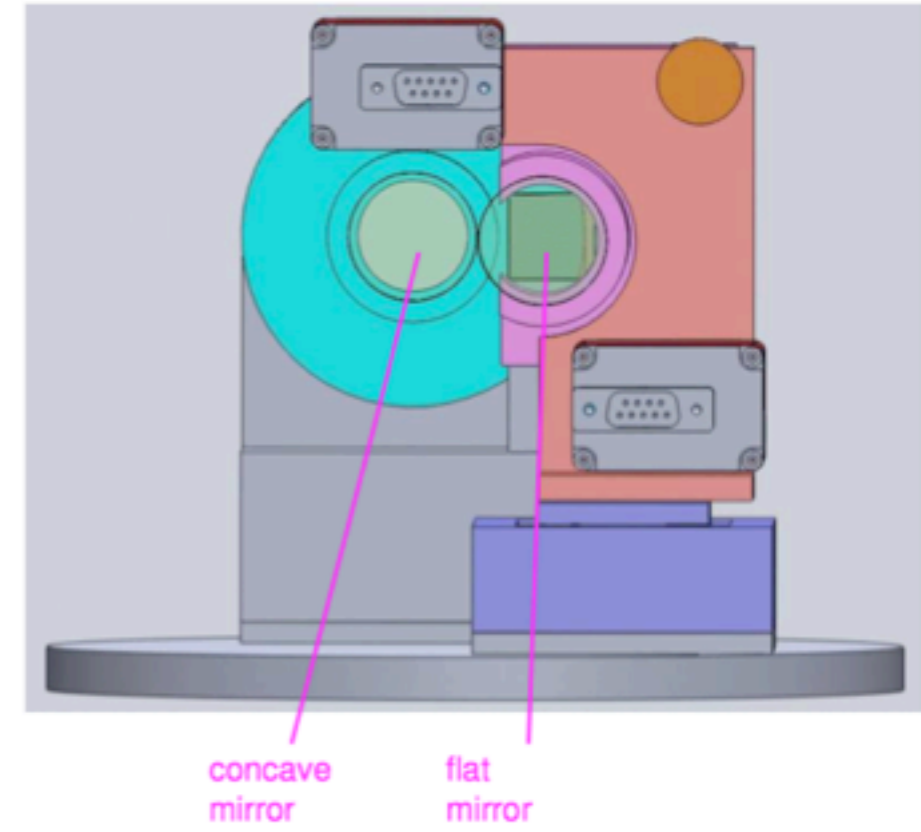
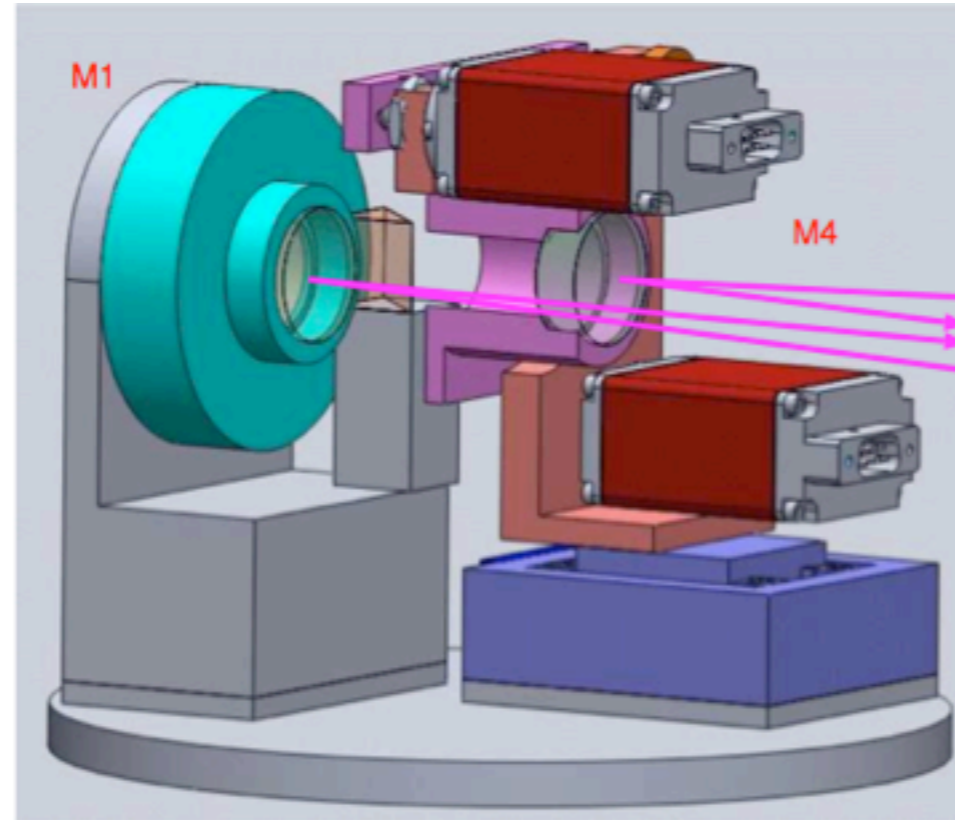
(STFでは4つのレーザーミラーを同時に平行に動かす)

(ATFではレーザーテーブルを動かす)



# ミラーの位置関係

- 正面から見て、隣り合う2枚のミラーが接するように。
- アクチュエータが干渉しないようにし、かつ、全体のチェンバーサイズを出来るだけコンパクトにする。

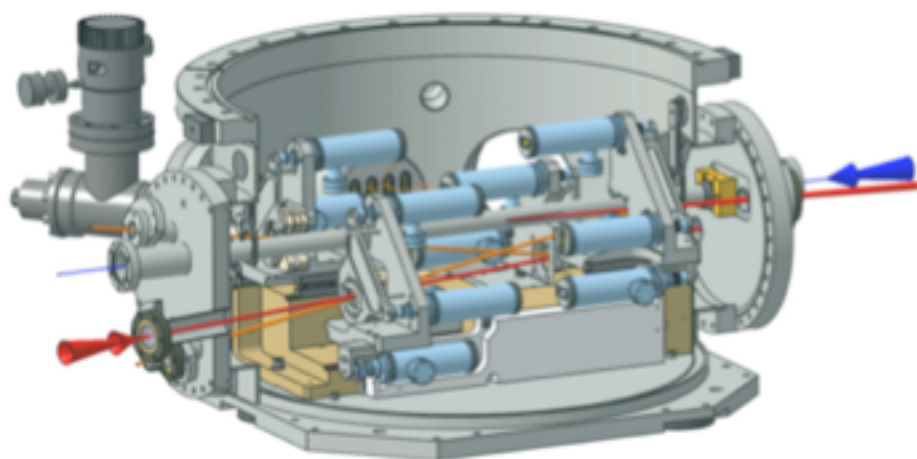
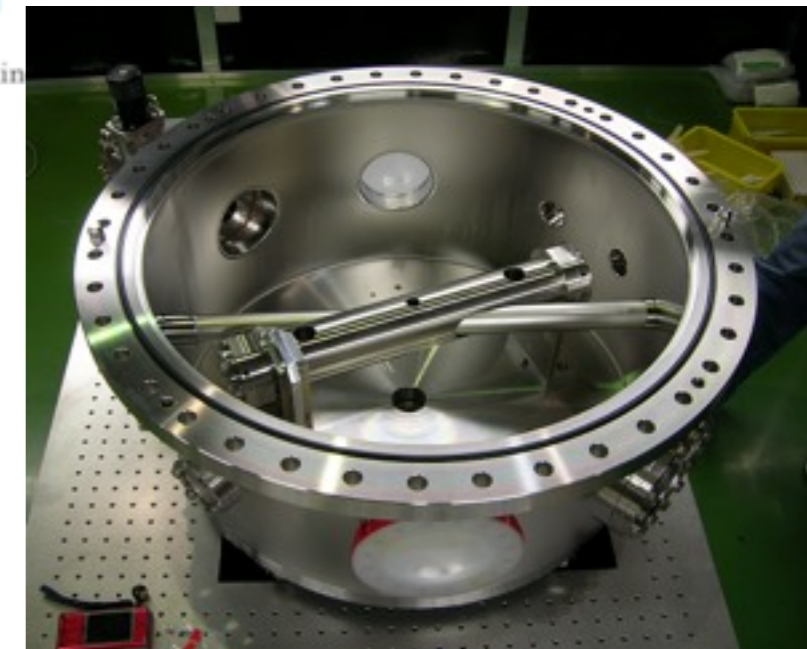
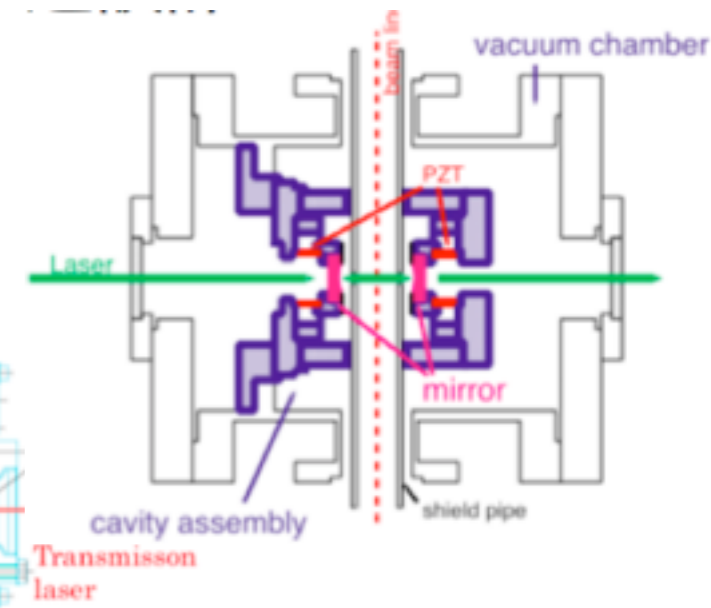
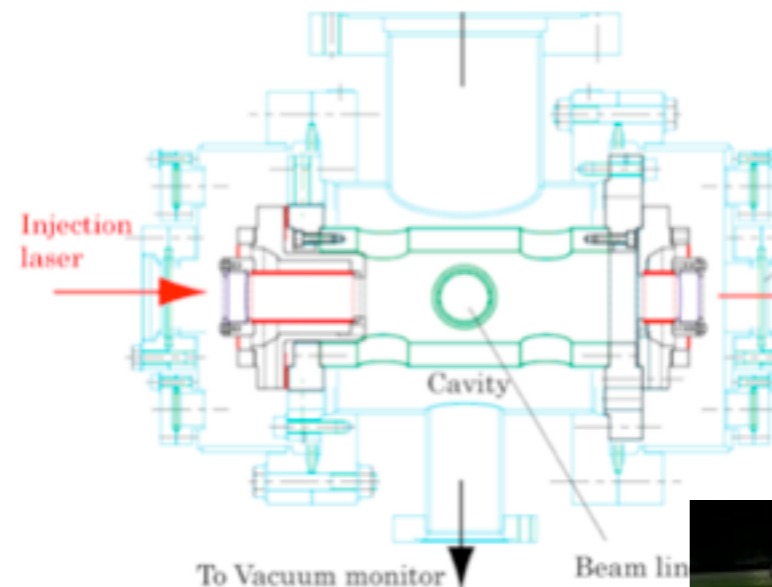


# 共振器の実装の設計についてまとめると

- 横方向には安定な共振器なので、すべてのミラーに角度調整機構が必要なわけではない。
- 縦方向(長さ方向)には調整機構必要。D0とLのそれぞれを調整。
- 細長い共振器にして、ベンドチェンバに4本の光路を通す。
- ミラー駆動機構は真空に入れる。

# これまでの空洞

- ATF 4GHz cavity (CW)  
w0=10 $\mu$ m (532nm)  
ミラーを曲げて高次モード分離
- ATF 714MHz cavity (pulse, 90度)  
パルスでの蓄積
- LUCX pulsed 357MHz cavity (pulse, 20度)  
2枚ミラーでw0=60 $\mu$ m  
バースト運転
- ATF pulsed 357MHz cavity (pulse, 12度)  
2枚ミラーでw0=60 $\mu$ m
- ATF pulsed 178.5MHz cavity (3次元4枚ミラー, 14度)  
w0=35 $\mu$ m  
ミラー調整ねじ付き  
2x10<sup>6</sup>/s/mA/W (それらしくスケールすると10<sup>10</sup>r/s相当)
- ATF pulsed 178.5MHz cavity (pulse, 8度)  
Yb発振器+CWファイバ増幅  
全ミラーにリモート調整機構



# STFの現状

- 2008年に量子ビームの開発が始まった時点での計画

Nd:YVO発振器とNd:YAG CW増幅器

3次元4枚ミラー共振器で有限角衝突

Nd:YAG結晶によるバースト増幅

- 2011年、シケインビームラインに方針転換

Ybファイバ発振器(開発をはじめ)

Ybファイバ増幅器(開発をはじめ)

平面共振器、パイプチェンバ、全軸駆動機構を大気中に

- 2012年1月

Ybファイバ増幅器(ERL電子銃用をもって、開発されたとする)

STFにベンドチェンバ設置

- 2012年4月

ファイババースト増幅(開発開始)

現時点で

- 発振器

変調をかけると何らかのパルスができる。

共振器に蓄積できるモードロックパルスかは不明。

周波数、安定性、同期機構、手つかず。

- ファイバ増幅器

ERLと同じものを並べる。今年度の予算で部品を購入した。

- 共振器

チェンバは制作。STFをつなげるために設置した。

ミラー駆動機構。1セットを用意して、動きを見た。全体設計図はまだない。

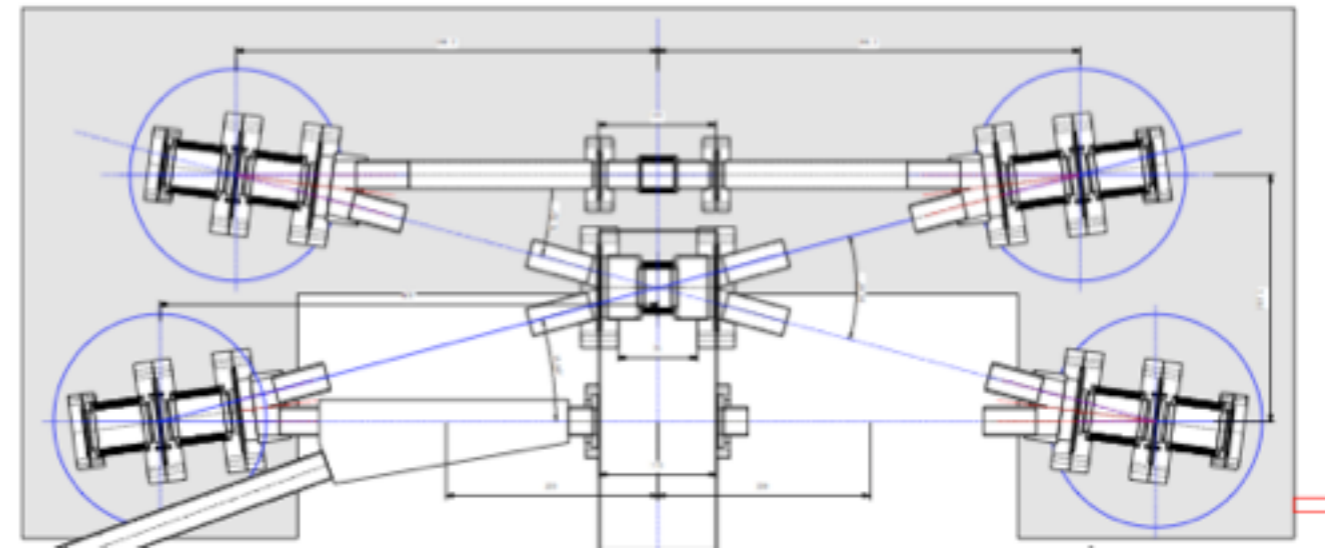
ミラーベンダーの概念設計がなされた。

共振器を形成してレーザーを入れたことはまだない。

- 当初計画については

3次元4枚ミラー共振器は実証済み

同等のものを周波数を変えて制作開始すればできていたところだが、意義がない。





# STFの現状

これまでの違い

- ・~mスケールの共振器で $w_0=25\mu\text{m}$ (モード形状の不安定性、ミラーの面精度)
- ・ミラーを精度良く曲げる
- ・真空の外からの調整機構

共振器についてやるべきこと

- ・ほとんど何も試験されていない。空間的な干渉から、ビームパイプチェンバのサイズを決めただけ。
- ・構造体はさておき、1mx4スケールの共振器でビームサイズを $w_0=25\mu\text{m}$ まで絞れることを確認する。
- ・収差補償のミラーベンダーの試験。
- ・ミラーの性能試験、共振器の増大率試験。
- ・ミラー駆動機構の整備。5軸x4 + 入射光学系
- ・共振器の自動調整手法の確立
- ・共鳴ロックのフィードバック機構、ビームとの同期機構
- ・チェンバを真空にしての動作試験(チェンバのみ既にインストールされてしまっている)
- ・ピークパワーによるダメージの検証

マンパワー

- ・1名 (むしろ発振器開発にかかりきり)

STFのスケジュール

- ・2月からビームが出る。(2月は電子銃のエージング)
- ・4月末までほぼ毎日運転、土日月以外は深夜のみ作業可
- ・6,7月が最初の衝突予定となっているが、、、
- ・7月中旬から9月中旬が設置のチャンス
- ・10月末までで終了

# 以上をふまえて

- 2012年末の段階で、完成したLC空洞がもらえるのだろうか。
- これまでの1年で進んだことは、絵を描いて形を決めただけ。実質的には今から初めても時間的ロスはない。
  - 1週間分くらいの仕事量
  - 実験による試験はほとんどなされていない。
- 共倒れになるか、2つの異なった設計で成果を比較するか。
- 新たに開発するとしたら、何を技術的に新しいものとするか
  - 短バンチ化
  - 真空での駆動機構
  - 共振器モードでの衝突調整
- リングとの比較で優位性を実証できるか
  - フラックスではない。
  - 単色性
  - 短パルス性
- 空洞用のレーザー発振器も必要。