

17<sup>th</sup> ICEPPシンポジウム  
白馬

新竹モニタ

# レーザー干渉型電子ビームサイズモニタ

2011年2月20日

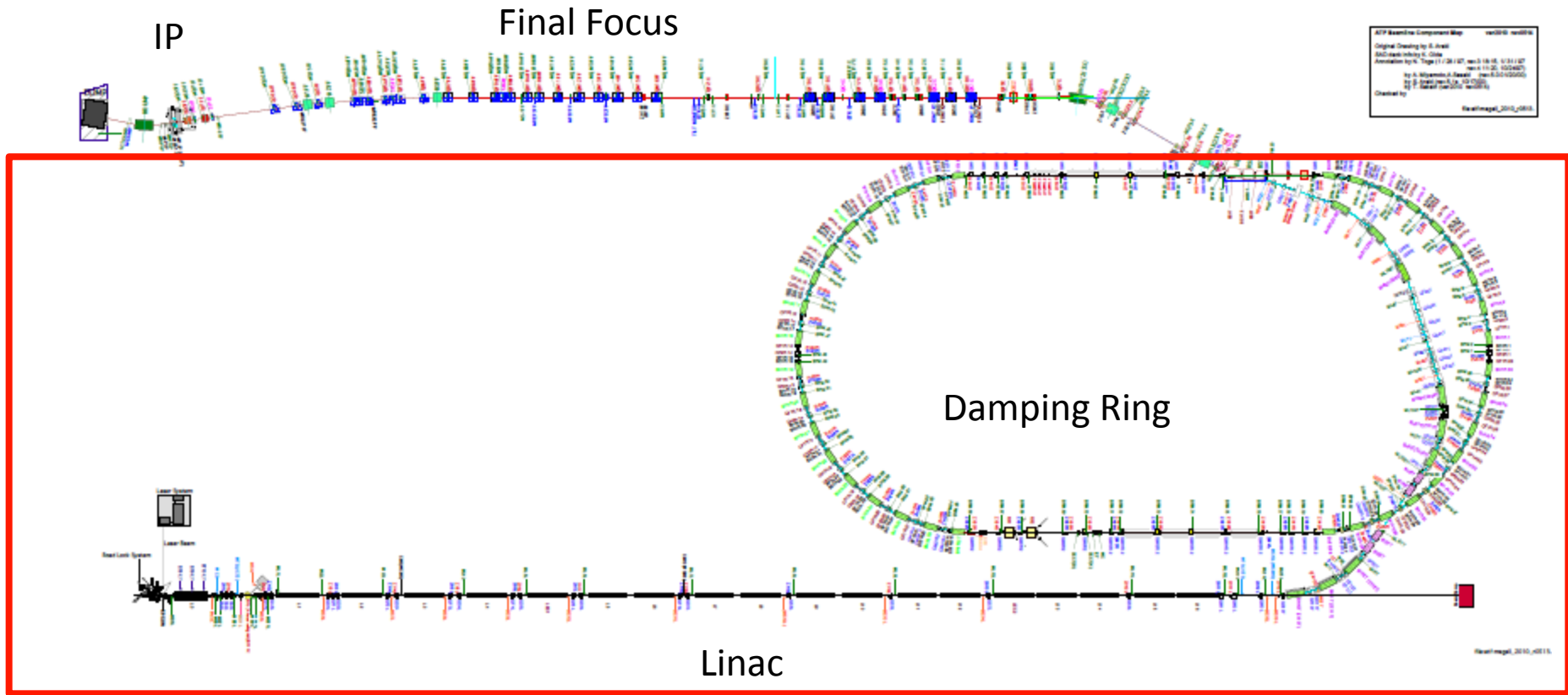
東京大学大学院 理学系研究科 駒宮研究室

山口 洋平

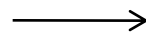
# 新竹モニタの概要

---

# ATF

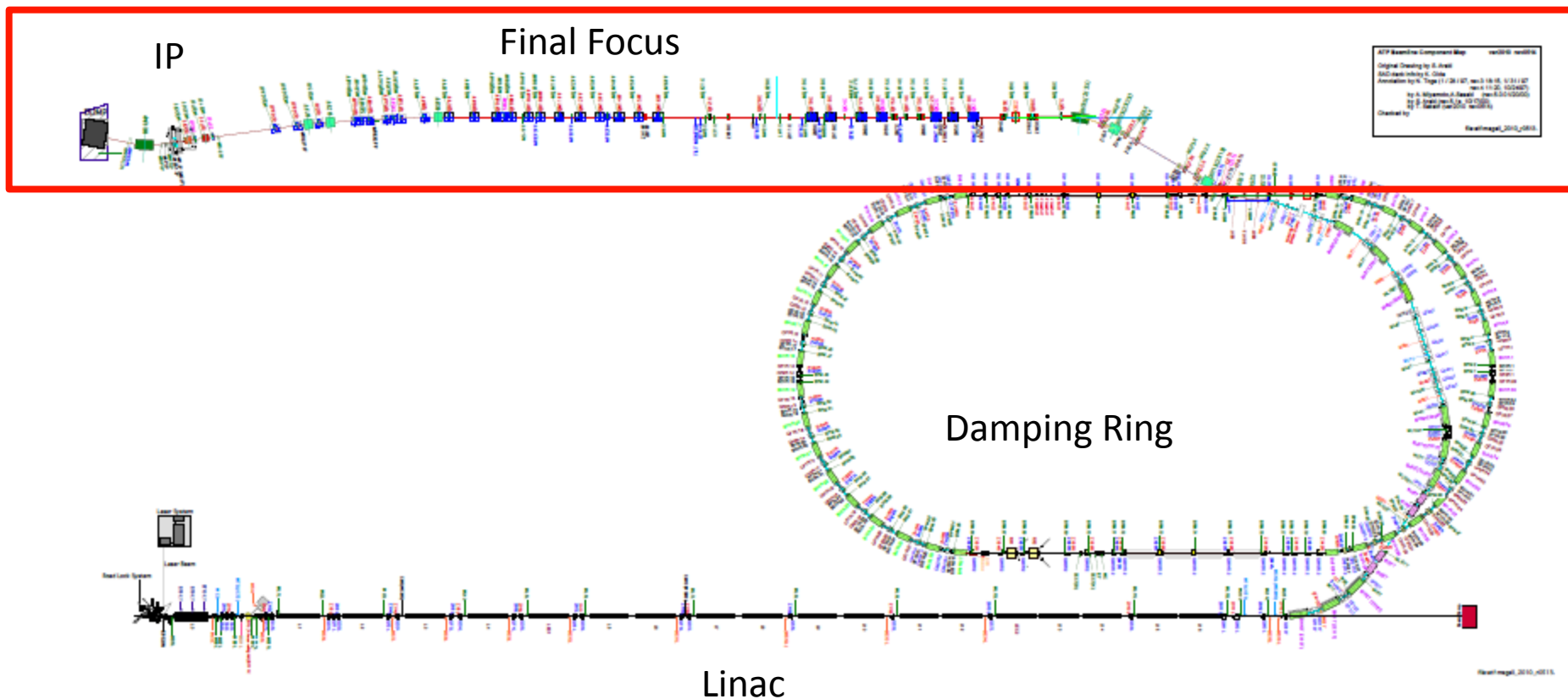


Linac: ビームエネルギー1.3 GeV  
Damping Ring: 鉛直エミッタンス11 pm·rad



規格化鉛直エミッタンス **30 nm·rad**  
ILCでの規格化エミッタンス35 nm·rad

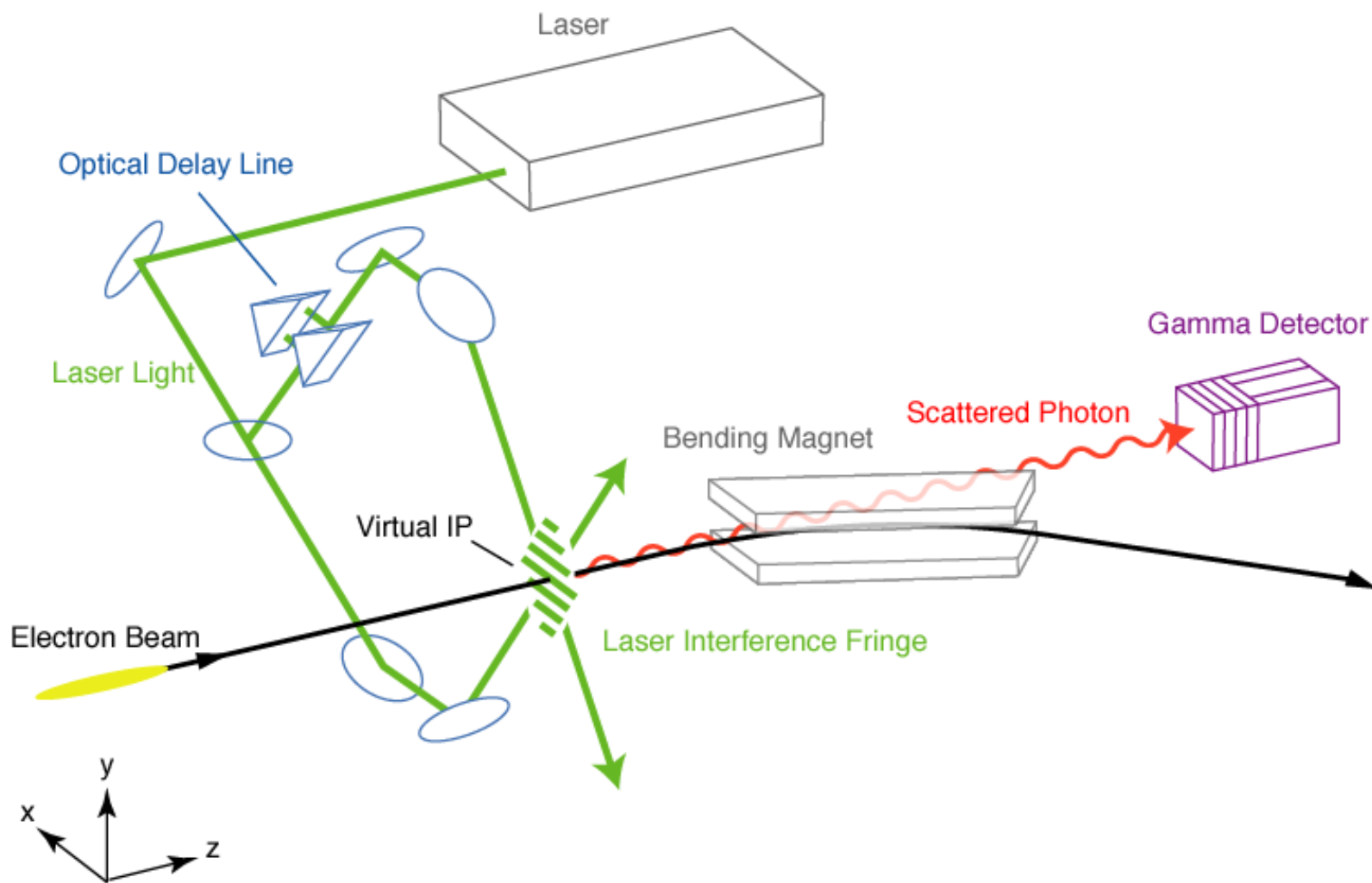
# ATF2



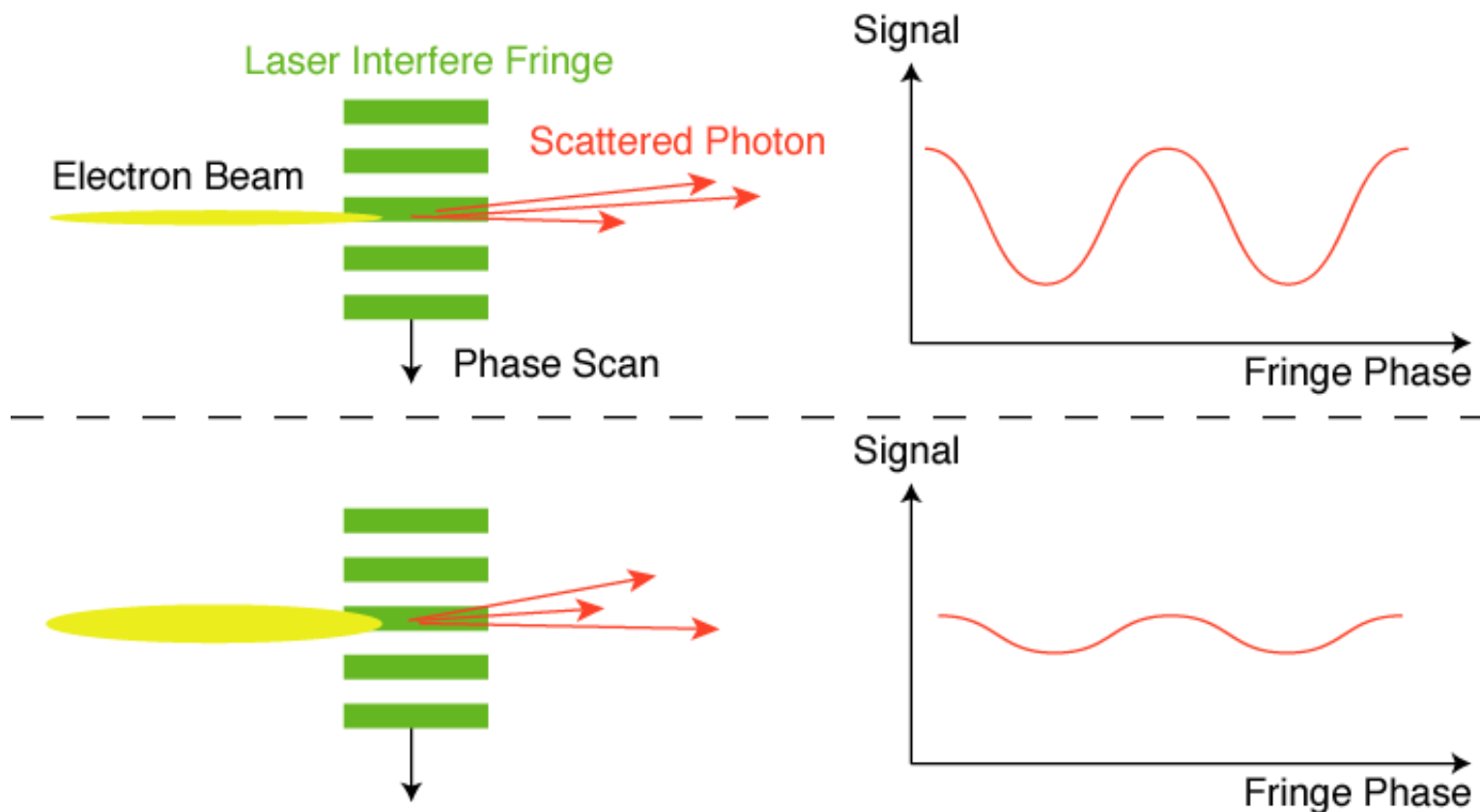
Final Focus: 局所色収差補正に基づいた設計

- ・ 37 nm の鉛直ビームサイズ → 新竹モニタで測定
- ・ nmレベルのビーム安定化 100 nm以下のビームサイズ測定に実績

# 新竹モニタ

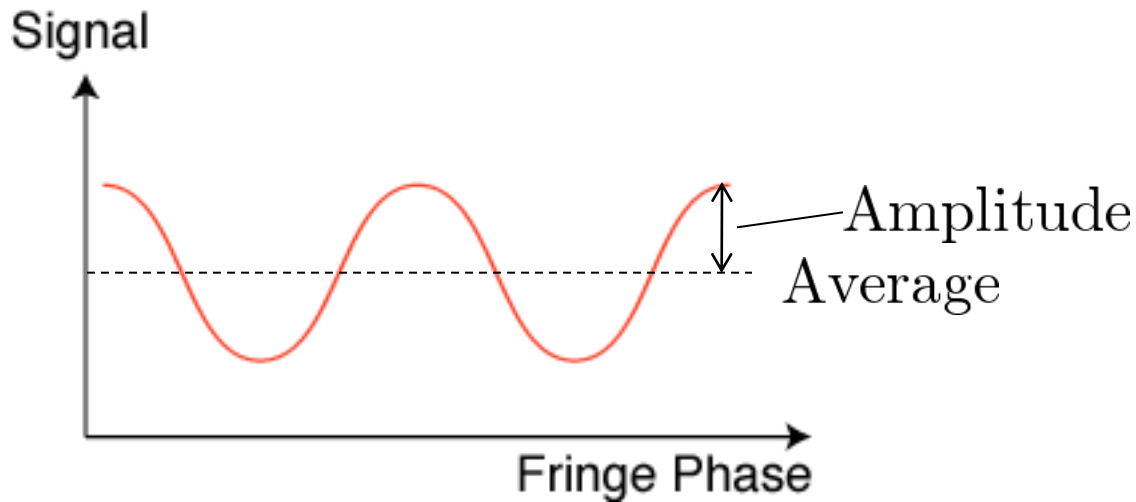


# 測定原理



1. ビームに対して干渉縞の位相をスキャン
2. 位相に対して散乱Comptonシグナルが変調
3. 変調の大きさはビームサイズに関係

# 測定原理



$$\text{Signal} = \text{Average} (1 + M \cos 2k_y y)$$

$$M \equiv \frac{\text{Amplitude}}{\text{Average}} : \text{modulation depth}$$

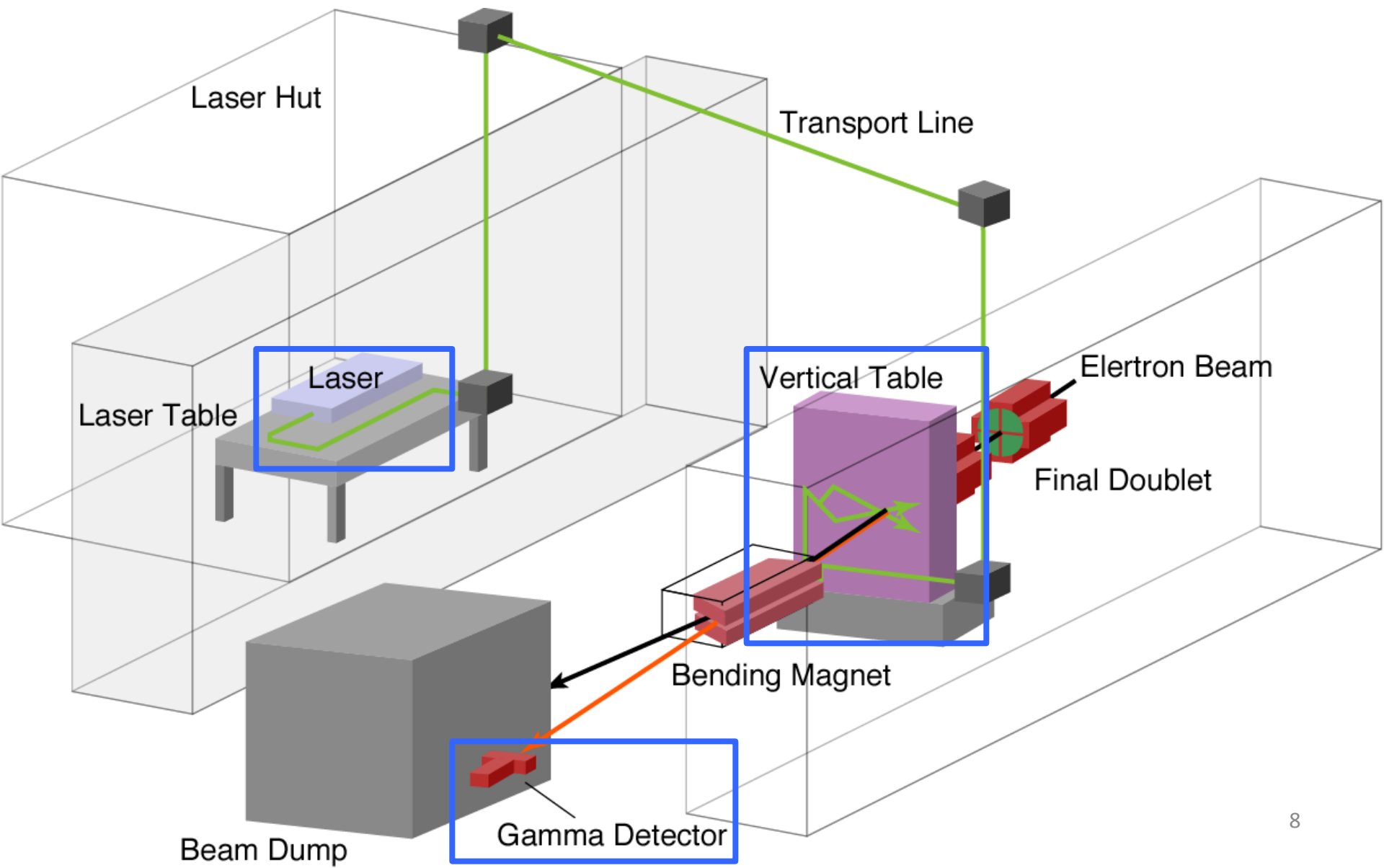
$$\sigma_y = \frac{1}{2k \sin \frac{\theta}{2}} \sqrt{2 \ln \frac{|\cos \theta|}{M}}$$

$\sigma_y$  : vertical beam size

$k$  : laser wavenumber

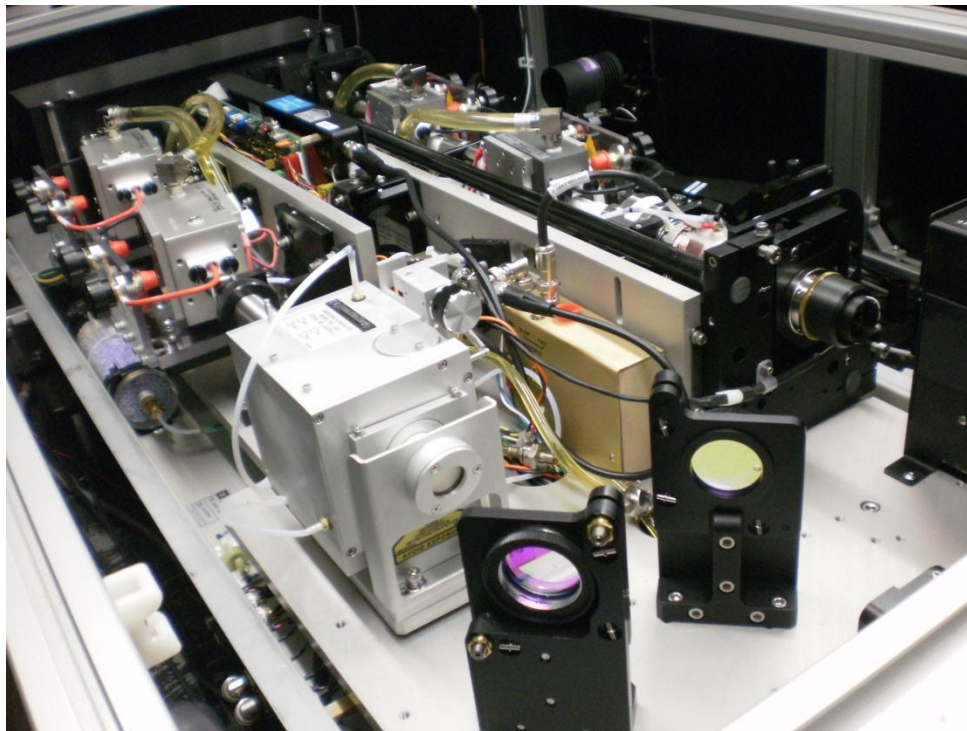
$\theta$  : laser beam crossing angle

# 新竹モニタ: セットアップ





# レーザー

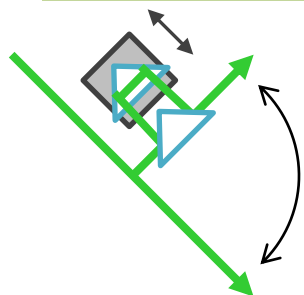


Q-switched Nd:YAG Laser	
PRO350 (Spectra Physics)	
波長	532 nm (2倍高調波)
線幅 (FWHM)	$< 0.003 \text{ cm}^{-1}$
繰り返し周波数	6.25 Hz
パルス幅 (FWHM)	8 ns
タイミングジッター (RMS)	$< 1 \text{ ns}$
ピークパワー	164 MW

# 干渉計



光学遅延回路



位相差

ピエゾステージによるサブ  
nmの位置制御

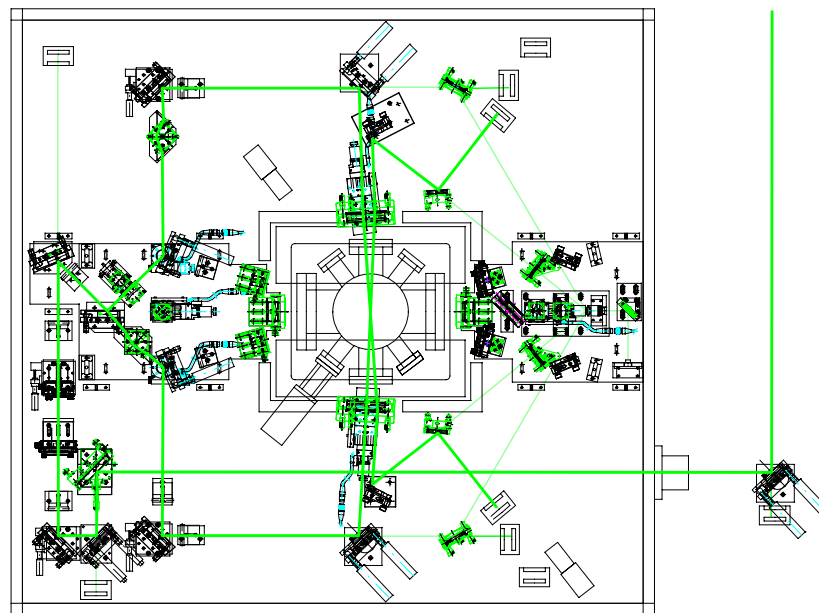
2本のレーザー光の位相差  
をつけて、干渉縞の位相を  
走査

レーザー交差角の可変性



ビームサイズ測定領域拡大

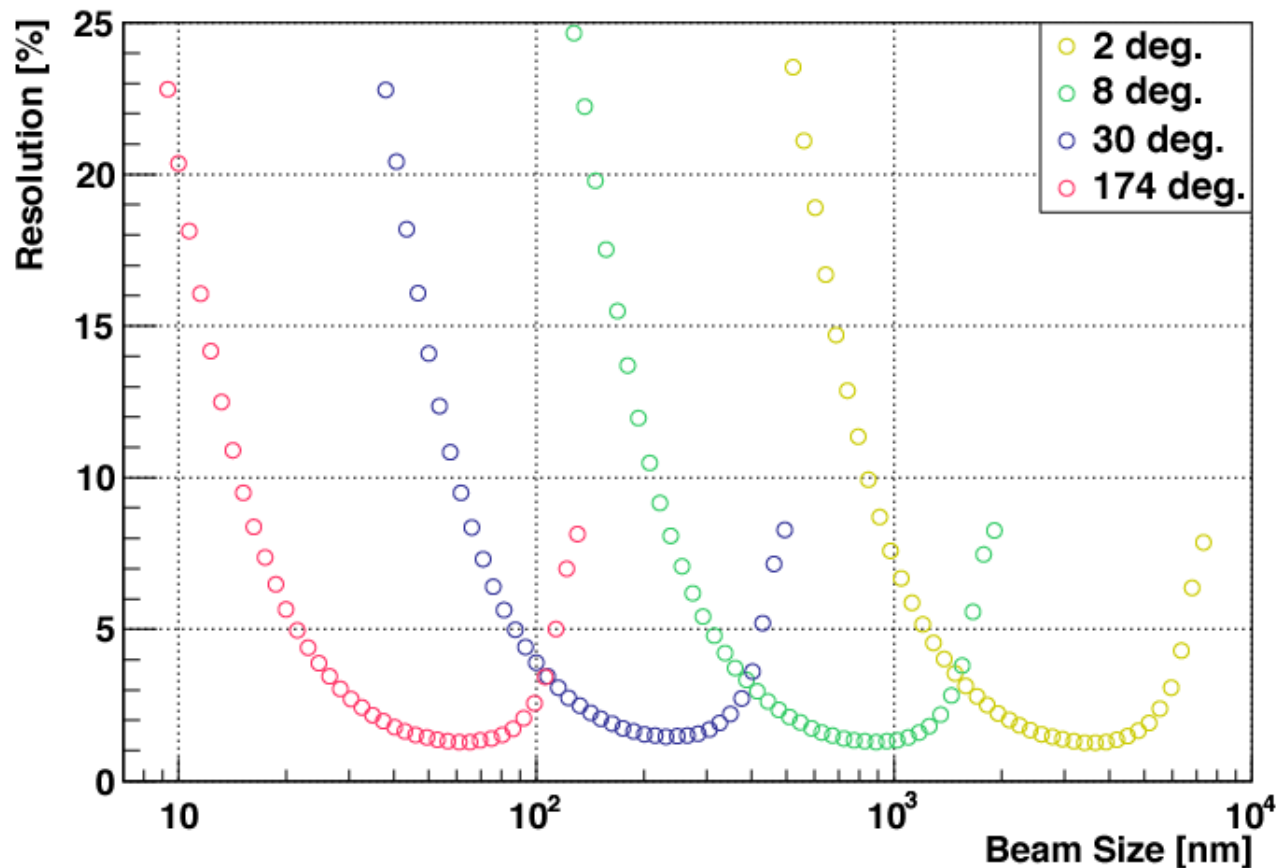
174, 30, 2-8度の交差角を用意



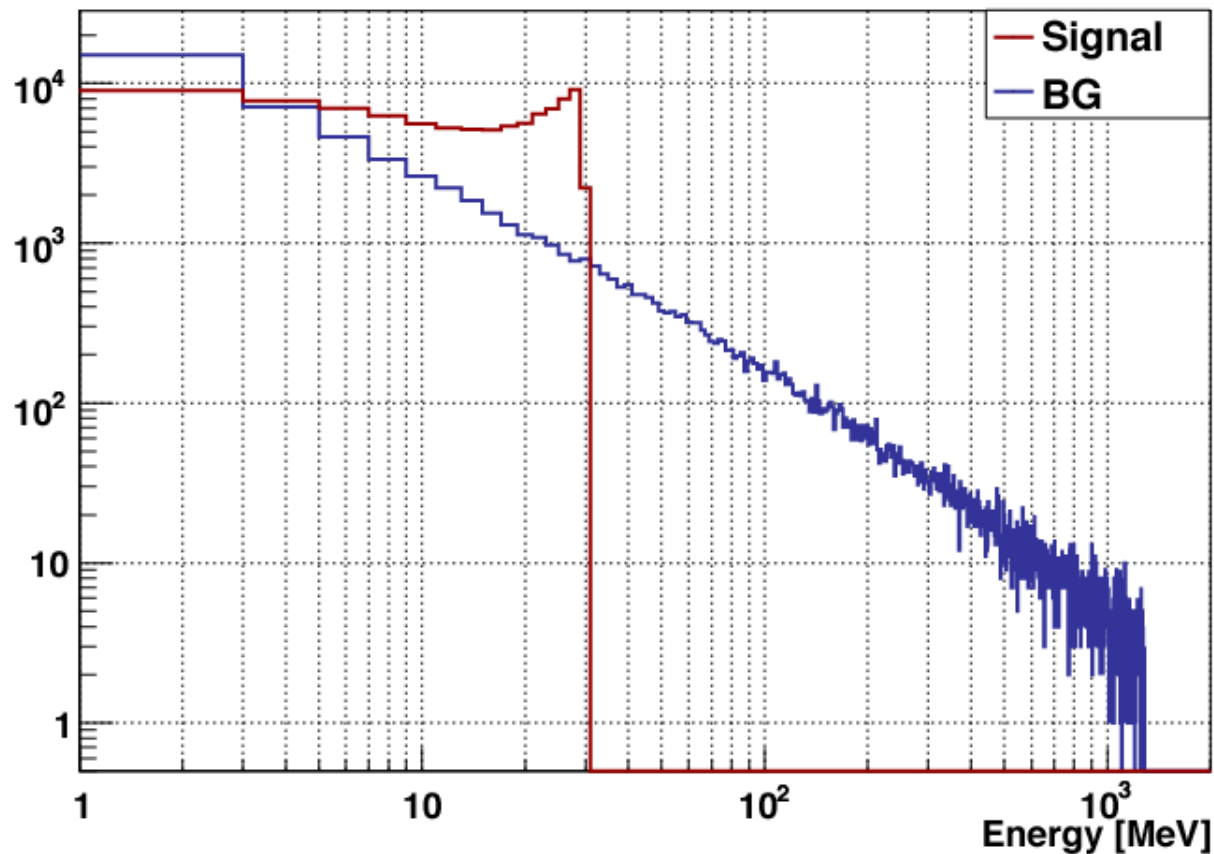
# 新竹モニタのビームサイズ分解能

## 各交差角モードでの分解能

May 2010の測定環境でシミュレーション  
ただしBG量のみ基準光学系時の値を採用



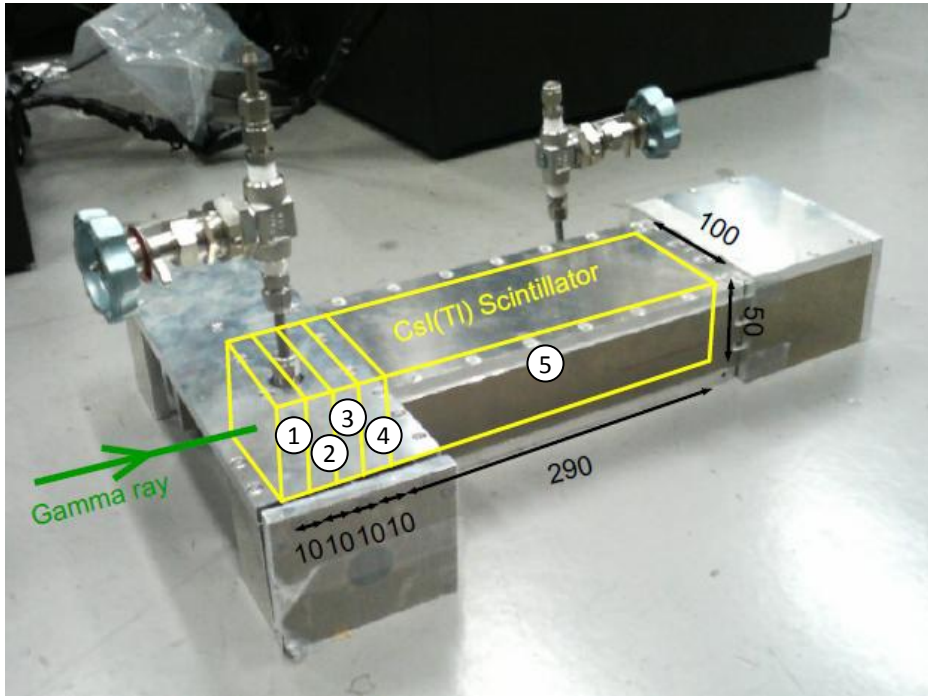
# シグナル・BGエネルギースペクトラム



シグナル: Compton散乱光子

BG: 制動放射

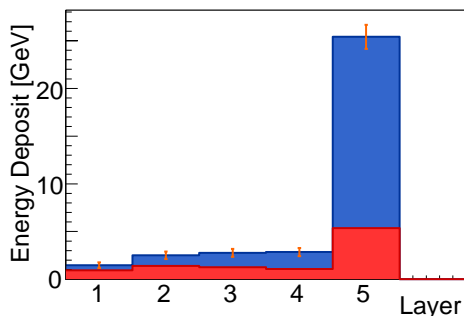
# ガンマ線検出器



- CsI(Tl)多層シンチレータ
- 薄い4 layer + 1 bulk
- シャワー発展の情報を取得

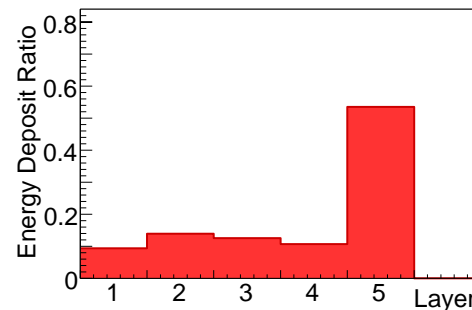
測定されたシャワー発展を、referenceのシャワー発展でFit

1. 高いシグナル・BG分離能
2. 低エネルギーシグナル・高エネルギーBGに強さを発揮
3. スキャン時間を半分に短縮



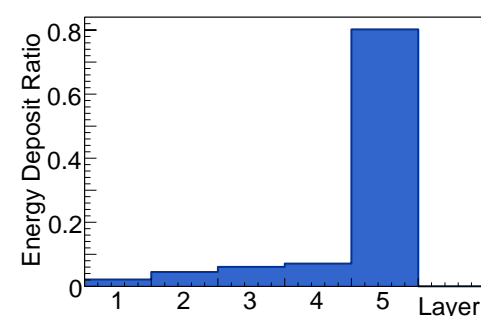
測定されたシャワー

$$= E_s \times$$



シグナルシャワー

$$+ E_b \times$$



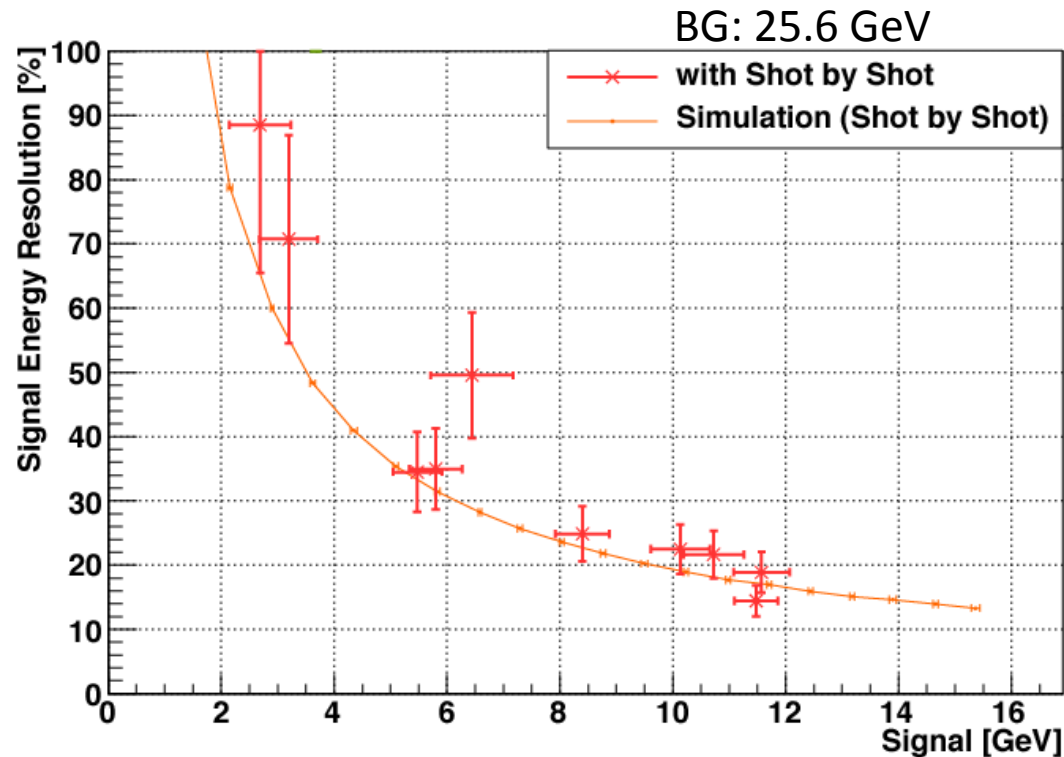
BGシャワー



# ガンマ線検出器 シグナル・BG分離能

ガンマ線検出器はエネルギー分解能は十分よいが、シャワー発展の揺らぎが大きいのでシグナルとBGの分離能が悪化する

## 実測とシミュレーションの比較



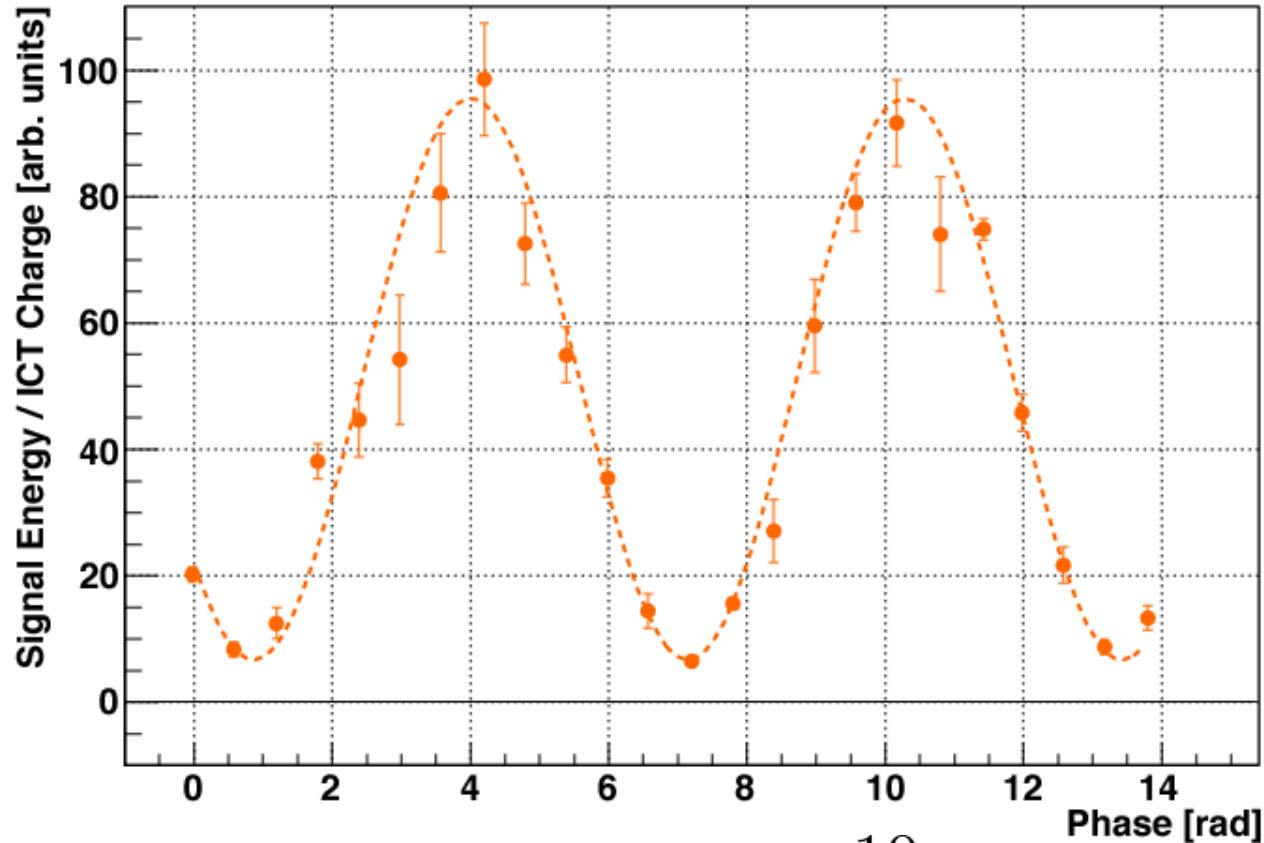
シグナルの小さいデータでのstudy

# ビーム試験結果

---

# 2010年5月のランでの到達サイズ

交差角7.79度モードでの測定

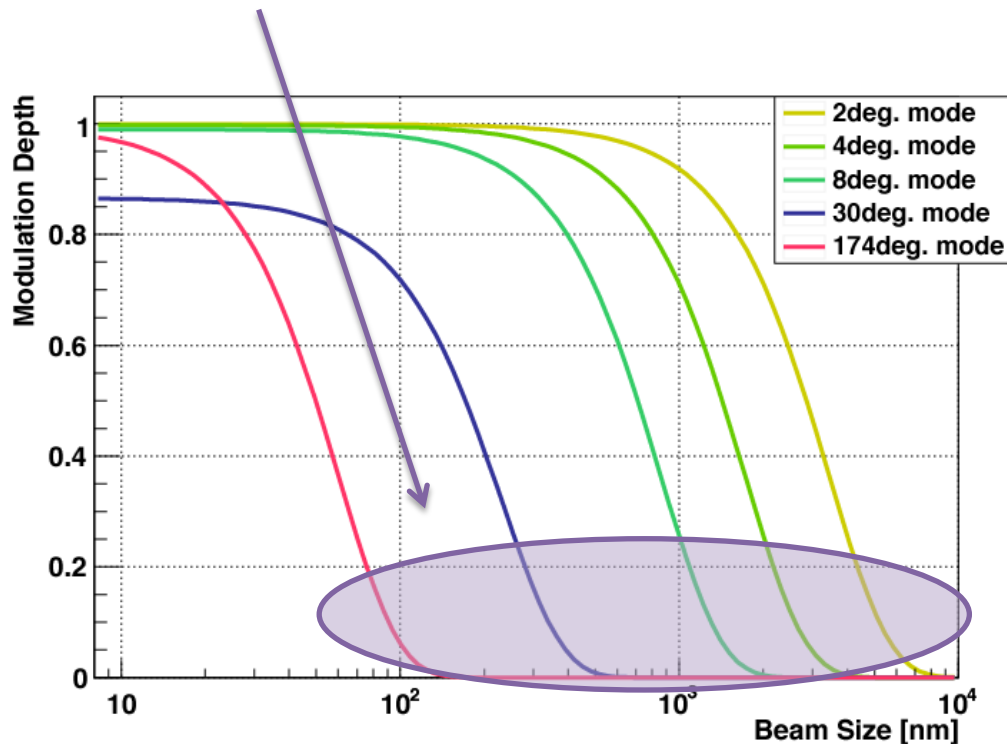


$$\sigma_y = 310 \pm 30 \text{ (stat.)} \begin{matrix} -10 \\ -70 \end{matrix} \text{ (sys.) nm}$$
$$M = 0.861 \pm 0.003 \text{ (stat.)} \begin{matrix} +0.045 \\ +0.009 \end{matrix} \text{ (sys.)}$$



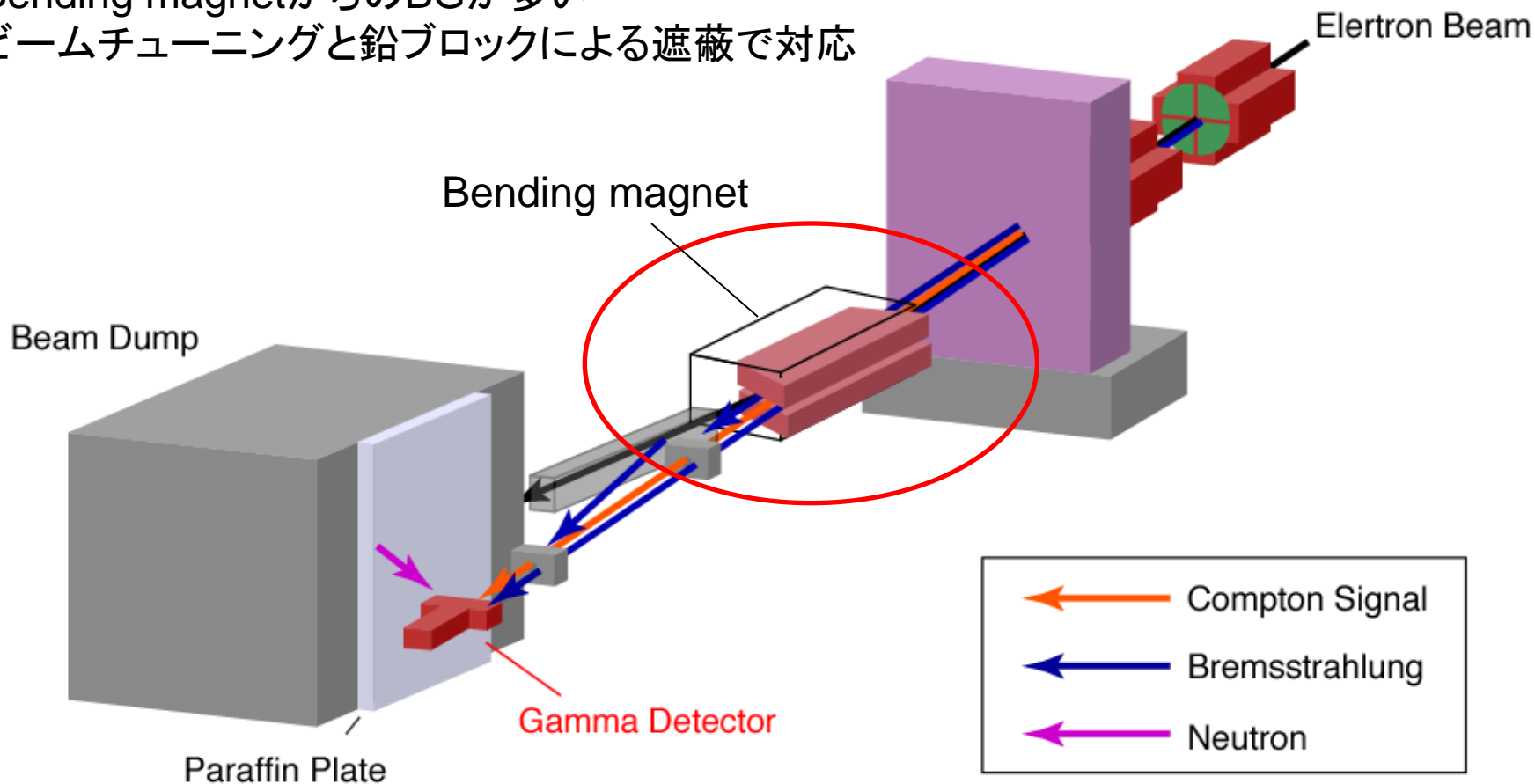
# シグナルジッターの問題

- 2010年秋のビーム運転からnominalのbeam opticsでオペレーション開始
- それに伴いBGが増大し、S/Nが20 → 0.4
- シグナルジッターが増大
- シグナル変調の小さな領域での測定が困難に



# BG対策

Bending magnetからのBGが多い  
ビームチューニングと鉛ブロックによる遮蔽で対応



# ATFでの火災 2/16

- ATF LinacのRFモジュレータ電源から火災発生
- 電源のコンデンサが破裂して発火
- 初期不良
- ビームの復旧時期は未定



# 結論

- 新竹モニタ
  - レーザー干渉型電子ビームサイズモニタ
  - 干渉縞とビームの衝突で出たガンマ線数の変調でサイズ測定
  - 現在ビームチューニングデバイスとしてR&Dを進めながら、37 nmのビームサイズ測定を目指している
- 新竹モニタの性能評価
  - low BG環境では、期待通りの性能を発揮
  - high BG環境では、シグナル変調の小さい領域で精度が悪い
  - BG studyによるS/N改善が必要

# 37 nmのビームサイズに対して 期待される性能

シグナルジッターが  
理想的になった場合

$$37 \pm 2 \text{ (stat.) } \begin{matrix} +4 \\ -0 \end{matrix} \text{ (sys.) nm}$$

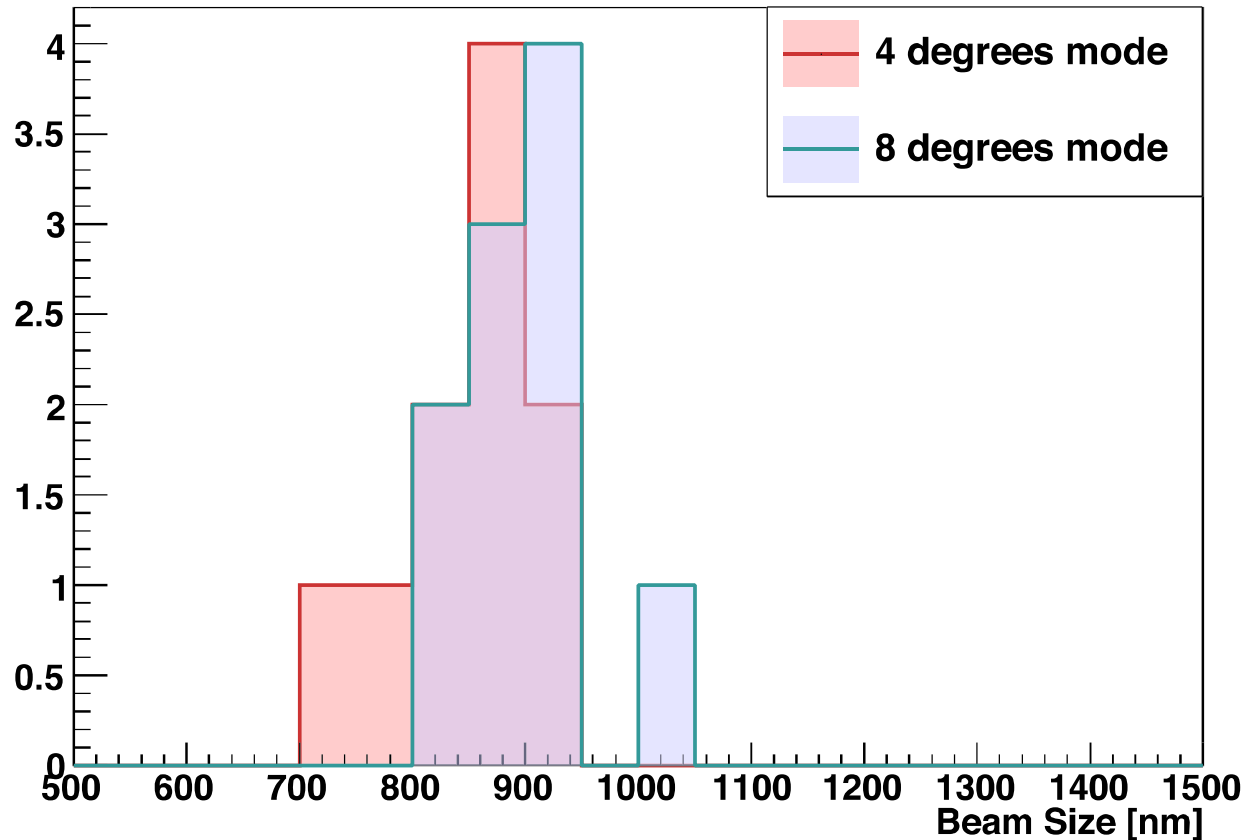
シグナルジッターが  
現状のままの場合

$$37 \pm 4 \text{ (stat.) } \begin{matrix} +4 \\ -0 \end{matrix} \text{ (sys.) nm}$$

ビームが復旧次第、37 nmの測定を目指す

backup

# 異なる交差角モード間のconsistency



$$\sigma_{y,4deg} = 840 \pm 20 \text{ nm} \quad M_{4deg} = 0.78 \pm 0.01$$

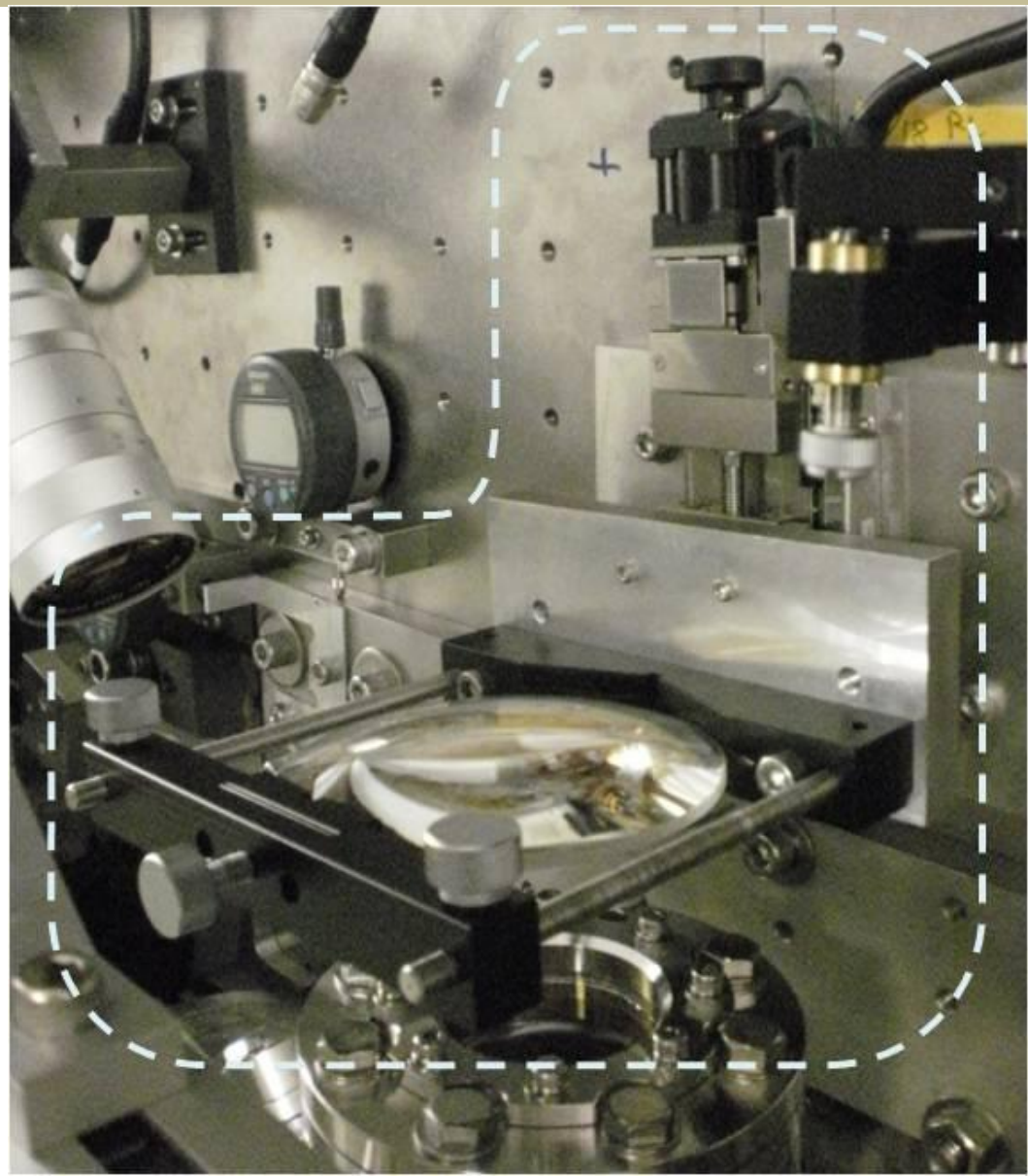
$$\sigma_{y,8deg} = 900 \pm 20 \text{ nm} \quad M_{8deg} = 0.33 \pm 0.02$$

誤差は統計誤差のみ

# 球面波対策 焦点スキャナ

球面波によるコントラスト悪化を防ぐ  
には、焦点とIPを一致させればよい

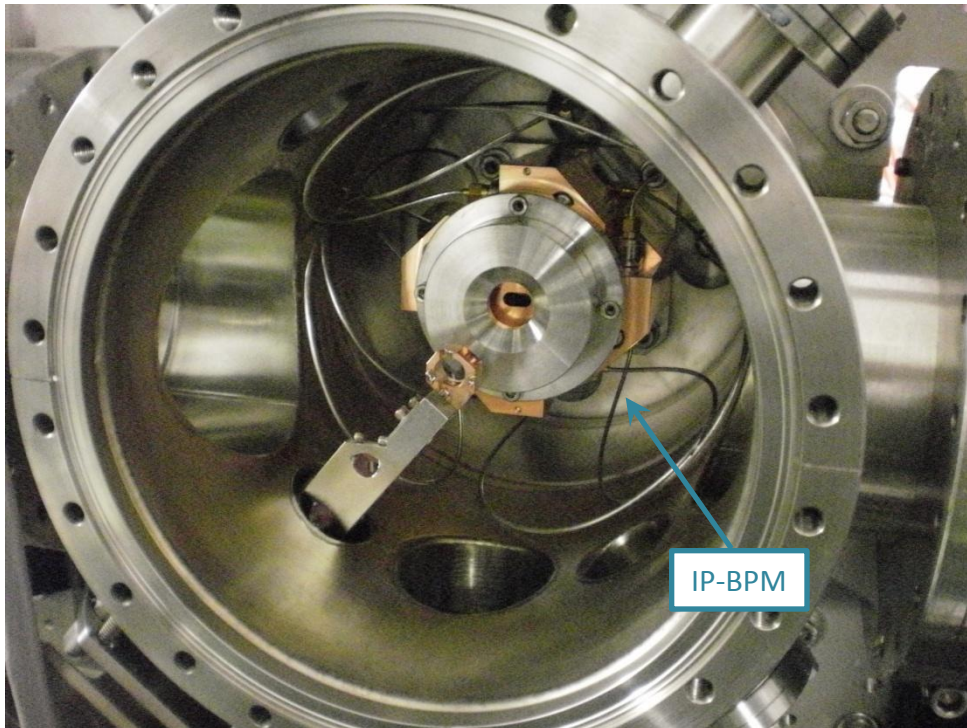
焦点スキャナ：  
レンズの位置をIPに対して制御し、  
100  $\mu\text{m}$ 精度のアライメントを予定





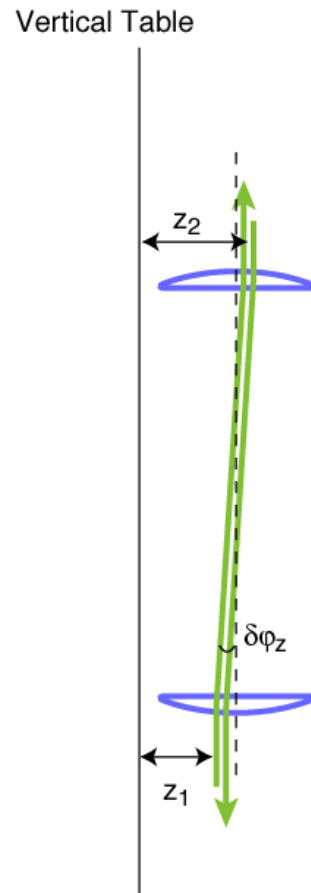
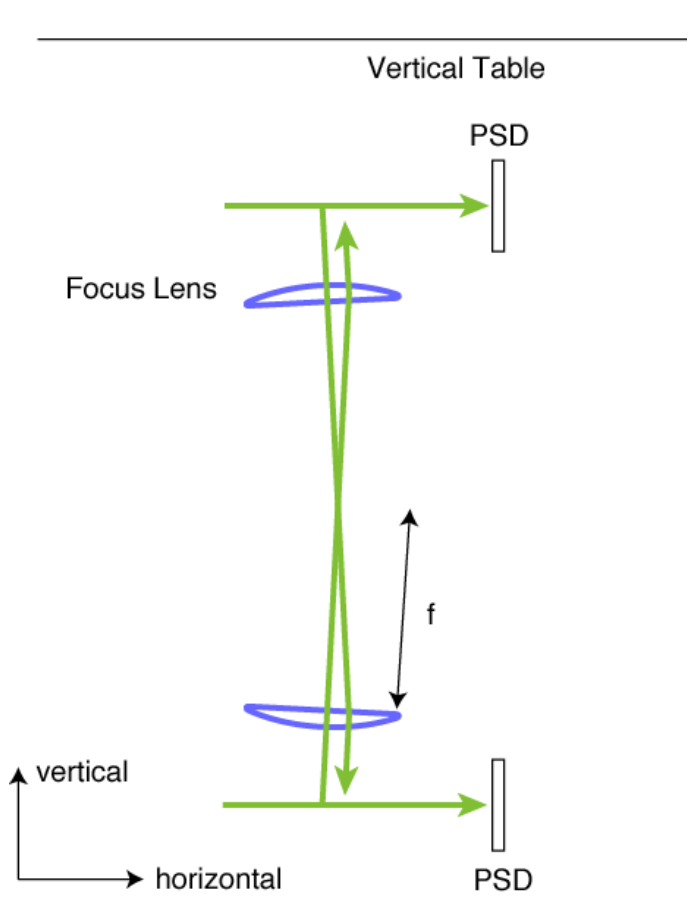
# ビームの位置ジッター

コントラスト測定によって干渉縞の安定度は十分であると確認できた  
しかしビームの位置ジッターの影響は、ビームサイズを絞るとより大きくなると予想される  
ビームの位置ジッターを評価するため、8.7 nmの分解能をもつBPMをIPにインストール

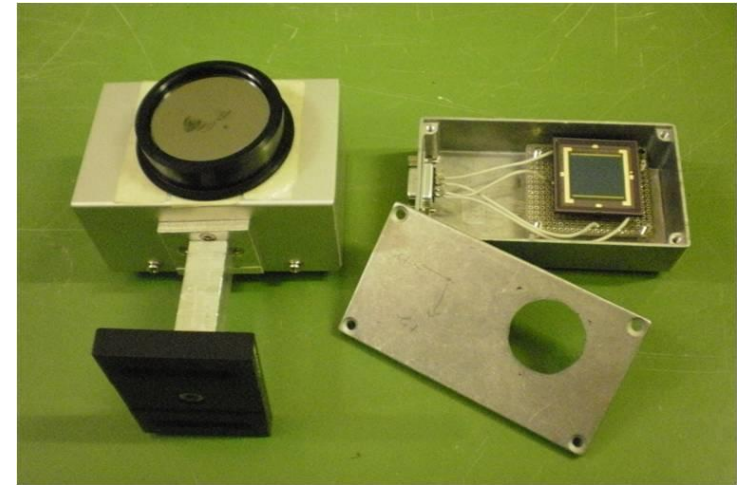


現在位置アライメント作業中

# PSDによる干渉縞のtilt測定



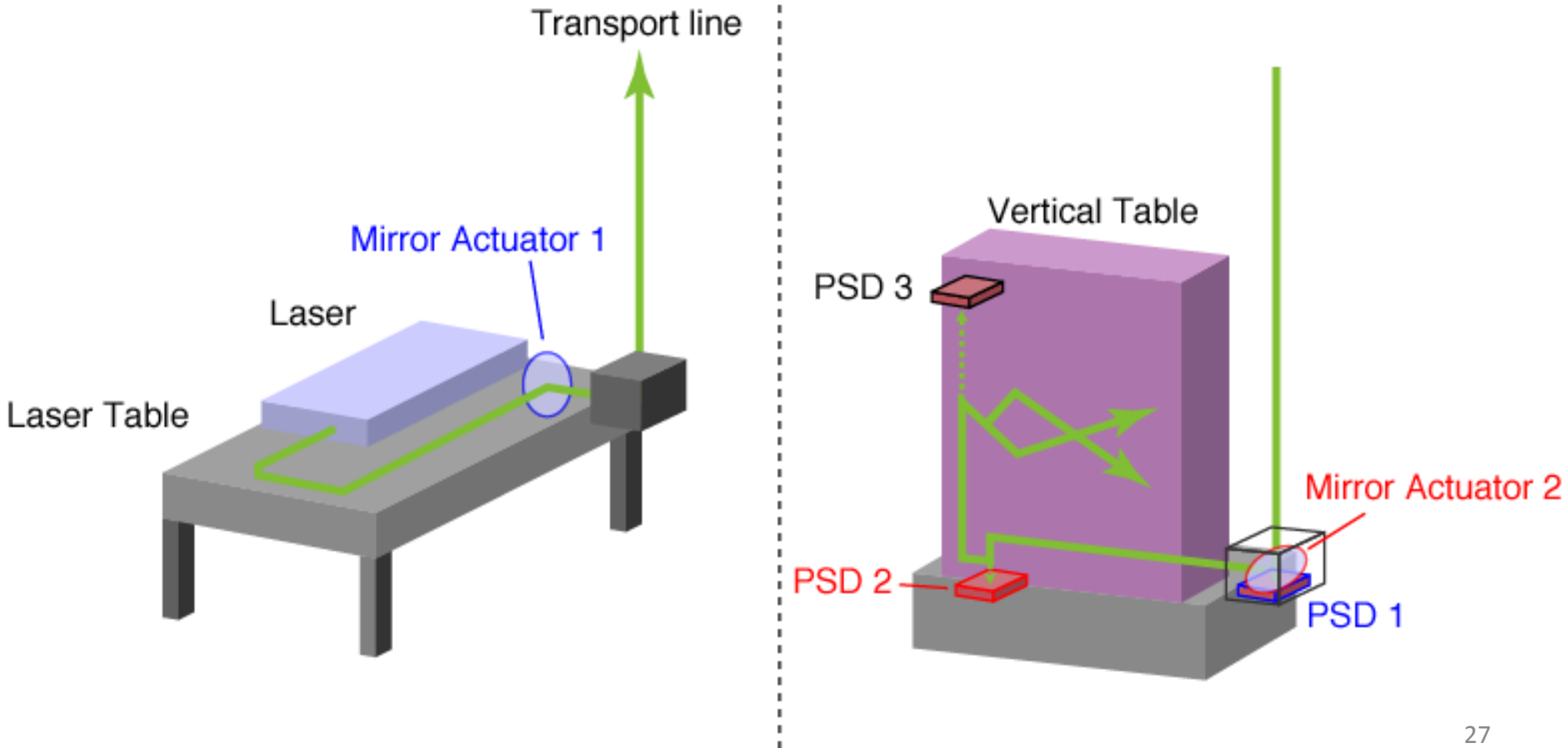
PSDs



干渉縞のtiltを測定

# レーザー光路長期安定化

PSDで測定された光路のずれをアクチュエータにフィードバック  
目標： 少なくとも1週間の光路安定性を実現

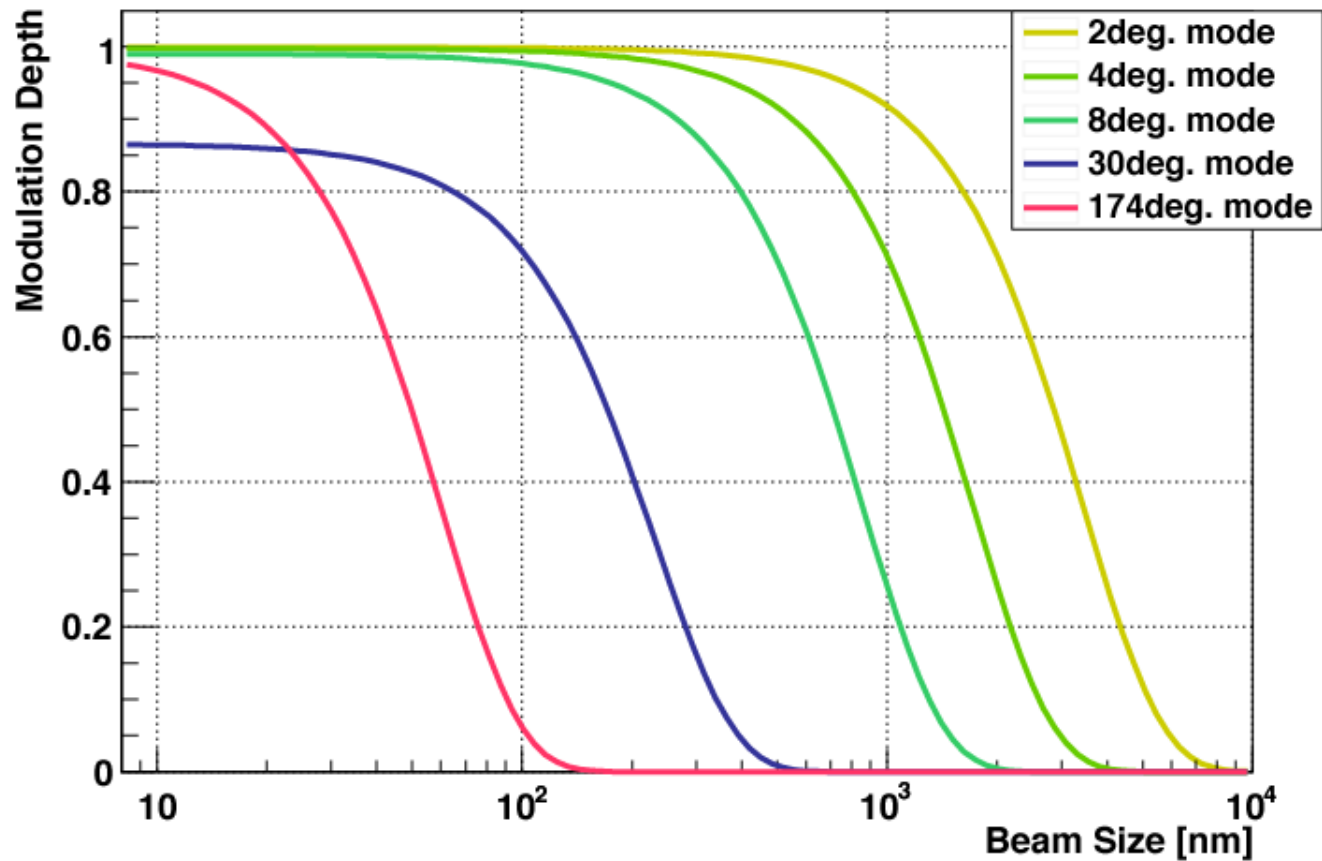


# メモ

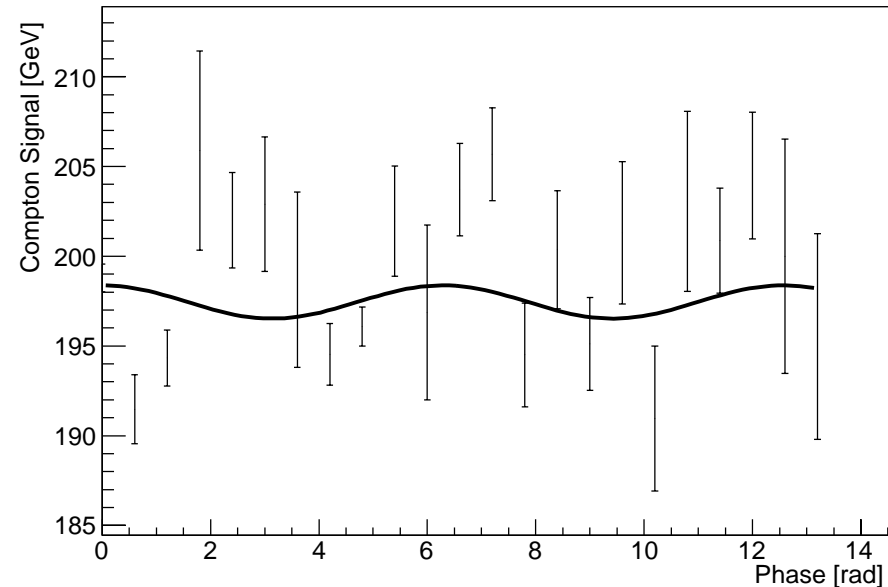
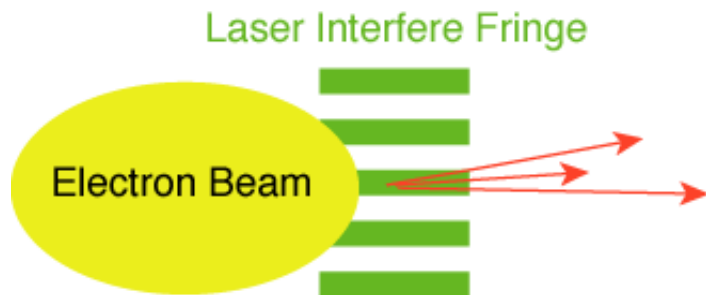
---

- ILCでのエミッタンス:  $2 \text{ pm} \cdot \text{rad}$
- FFTBでのサイズ:  $70 \text{ nm}$  (typical)

# レーザー交差角と測定領域



# シグナルジッターによる測定限界



本来シグナルモジュレーションがないはずでも、fitではモジュレーションあり



測定可能ビームサイズの上限

# ILCと極小ビーム

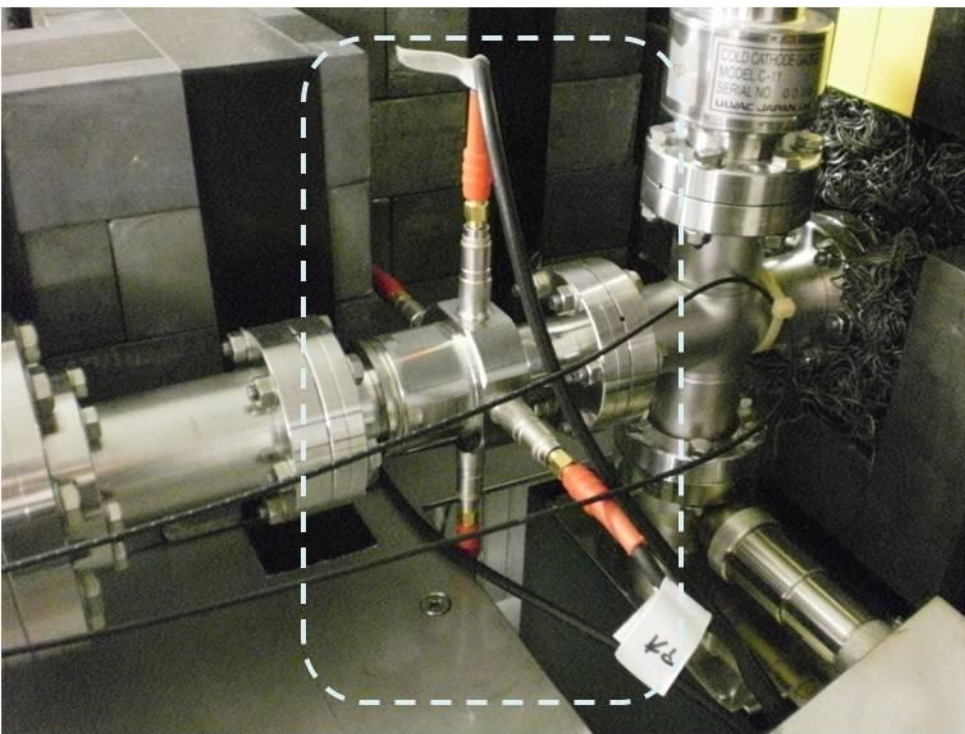
- 現在達成されている最小のビームサイズは70 nm
  - 1997年にSLACのFFTB実験で測定
- KEKのATF2では、37 nmのビームサイズを目指す

IP Parameters		ILC			ATF/ ATF2
		RDR	SB2009		
			no trav. focus	with trav. focus	
Norm. horizontal emittance	mm.mrad	10	10		3
Norm. vertical emittance	mm.mrad	0.040	0.035		0.03
horizontal $\beta^*$	mm	20	11		4
horizontal beam size	nm	640	470		2000
vertical $\beta^*$	mm	0.4	0.48	0.2	0.1
vertical beam size	nm	5.7	5.8	3.8	37

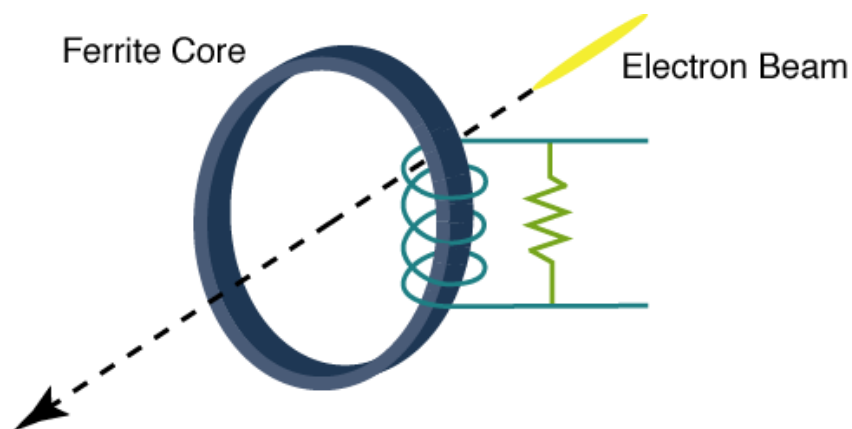
\* dispersion, エネルギーの広がり、ChromaticityはILCとATF2で同程度

# 統計誤差

最も統計誤差への寄与が大きいのは、ガンマ線検出器のシグナル・BG分離能



それと同様に、ICTモニタの分解能も統計誤差に寄与する



ICTモニタ:  
ビームによる電磁誘導信号を、積分して取り出すカレントモニタ

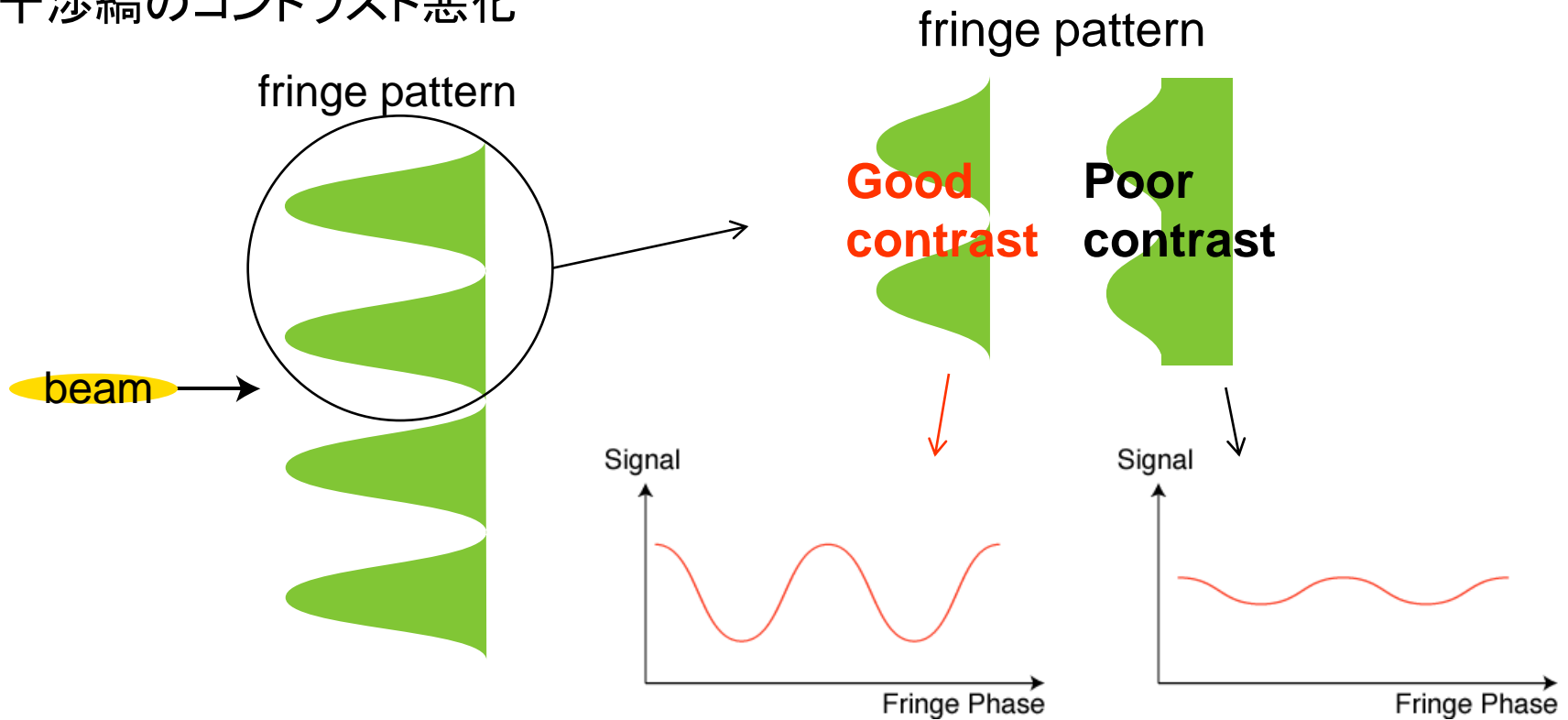
ICTモニタの分解能

$$\Delta \text{Current} = 2.5\%$$



# 系統誤差

ex.) 干渉縞のコントラスト悪化



$$M_{meas} = \left( \prod_i C_i \right) M_{ideal}$$
$$C_i < 1$$

$$\sigma_{y,meas}^2 = \sigma_{y,ideal}^2 - \frac{1}{2k_y^2} \sum_i \ln C_i$$

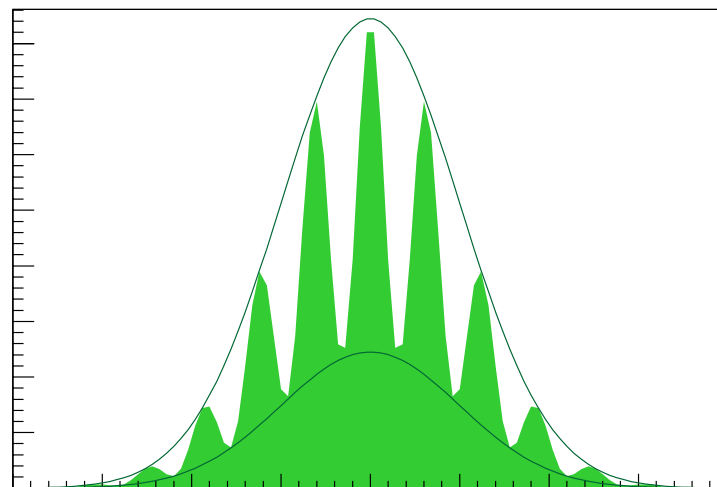
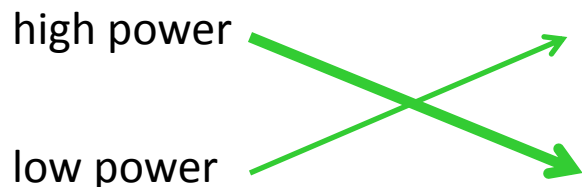
# 系統誤差要因

		コントラスト悪化	レーザー交差角に依存しない
1	偏光状態と強度の不均等	○	○
2	レーザー光路ミスアライメント	○	○
3	空間・時間コヒーレンス	○	○
4	相対位置ジッター		
5	干渉縞のtilt	○	
6	球面波	○	
7	干渉縞内でのビームサイズ変化		

以下順に詳細を説明

# 1. 偏光状態と強度の不均等

干渉縞を形成する2本のレーザーで強度の不均等が存在すると、コントラスト悪化



偏光によっても干渉度の変化

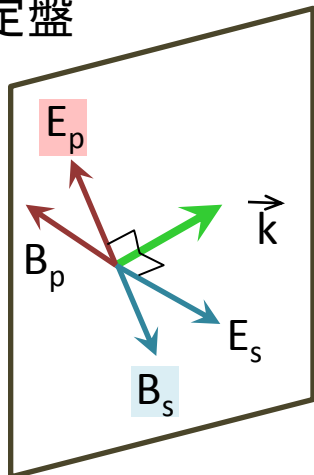
直交するs偏光とp偏光が干渉する

∴干渉縞強度 = 電子静止系での電場強度

# 偏光について

ATF2の新竹モニタでは、sの直線偏光を採用

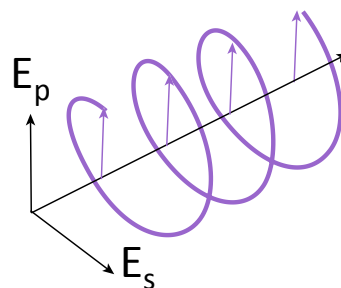
定盤



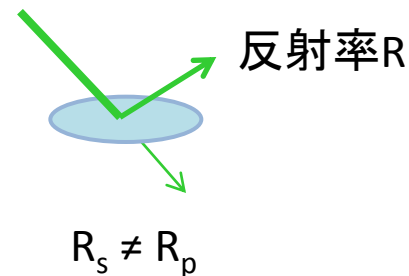
p偏光成分が存在すると、  
電子静止系へのLorentz変換により  
p偏光の電場と s偏光の磁場が干渉する

ただし次のどちらかの条件が必要

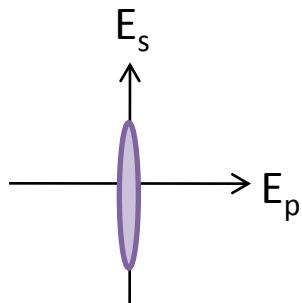
楕円偏光



ハーフミラーの反射率が  
偏光によって異なる



コントラストを下げることも、逆に上げることも可能

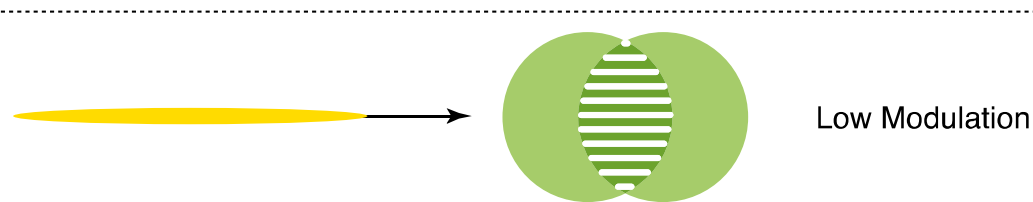
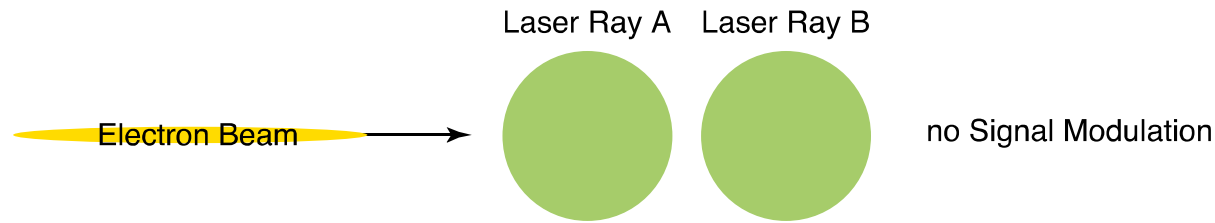


現在長軸 ( $E_s$ ) : 短軸 ( $E_p$ ) = 1 : 0.13の楕円率をもっている

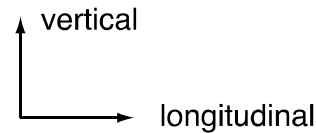
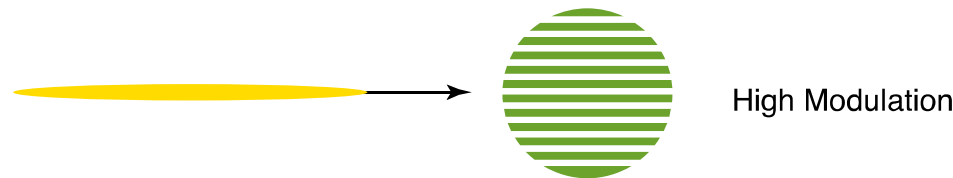
$$C_{power} = 97.8 \pm 12.8 \tan \theta \pm 0.1 \%$$

# 2. レーザー光路ミスアライメント

## longitudinalのミスアライメント

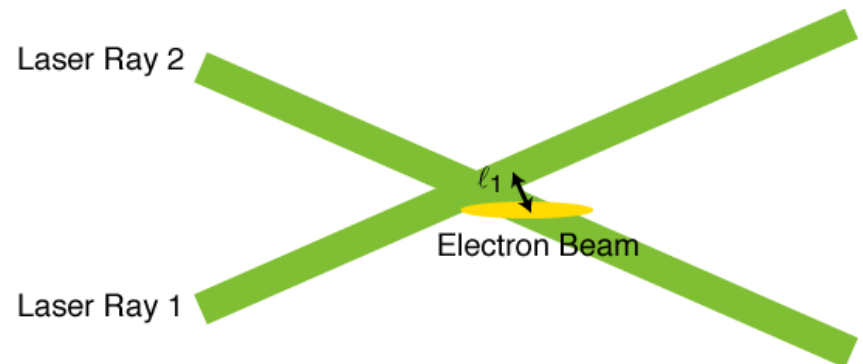


$$C_{z,pos} = \exp\left(-\frac{z_0^2}{8\sigma_{z,laser}^2}\right)$$



## transverseのミスアライメント

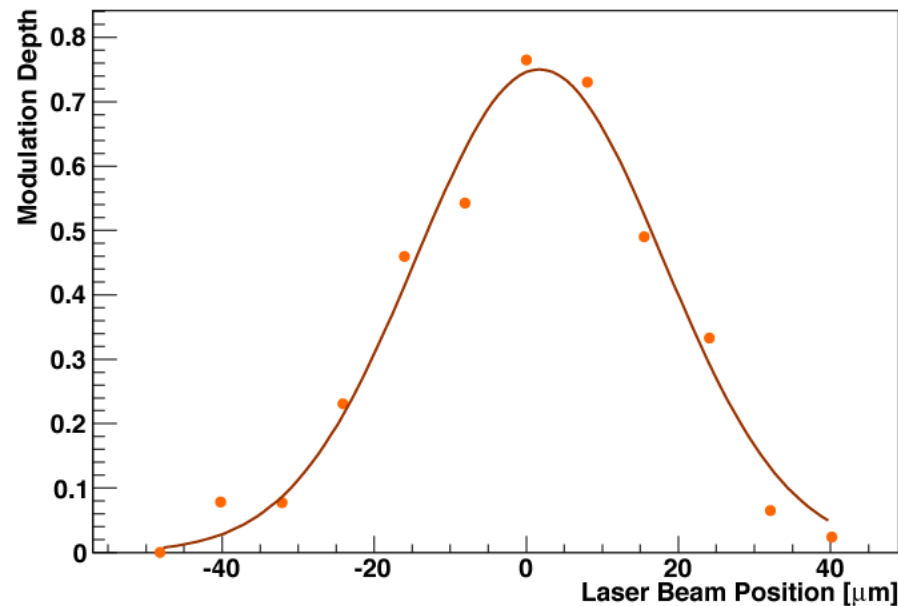
$$C_{t,pos} = \left[ \cosh\left(\frac{l_1^2}{4\sigma_{t,laser}^2}\right) \right]^{-1}$$



# レーザー光路アライメントの実際

longitudinalのアライメント

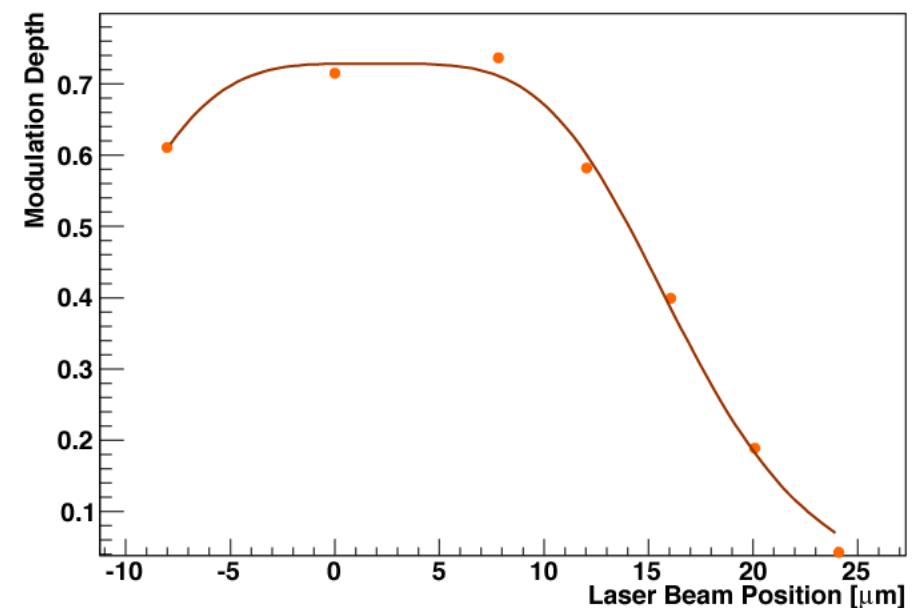
2010/05/19



$$C_{z,pos} = \exp\left(-\frac{z_0^2}{8\sigma_{z,laser}^2}\right)$$

transverseのアライメント

2010/05/20



$$C_{t,pos} = \left[ \cosh\left(\frac{l_1^2}{4\sigma_{t,laser}^2}\right) \right]^{-1}$$

# 3. 空間・時間コヒーレンス

空間コヒーレンス:

レーザー光の空間的に異なる二点間のコヒーレンス

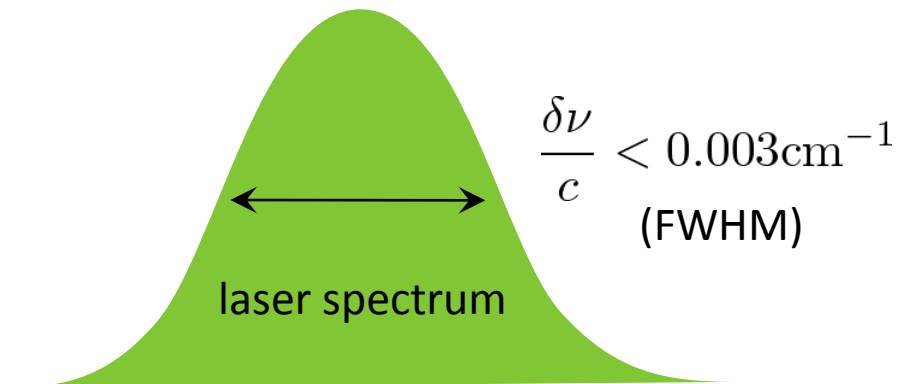
時間コヒーレンス:

時間的に異なる二点間のコヒーレンス

スペクトルに有限な広がりがあると、異なる周波数成分は異なる位相で重なり合う

$$C_{\text{t-coherence}} = \exp\left(-\frac{\pi^2}{4 \ln 2} \left(\frac{\delta\nu \Delta l}{c}\right)^2\right)$$

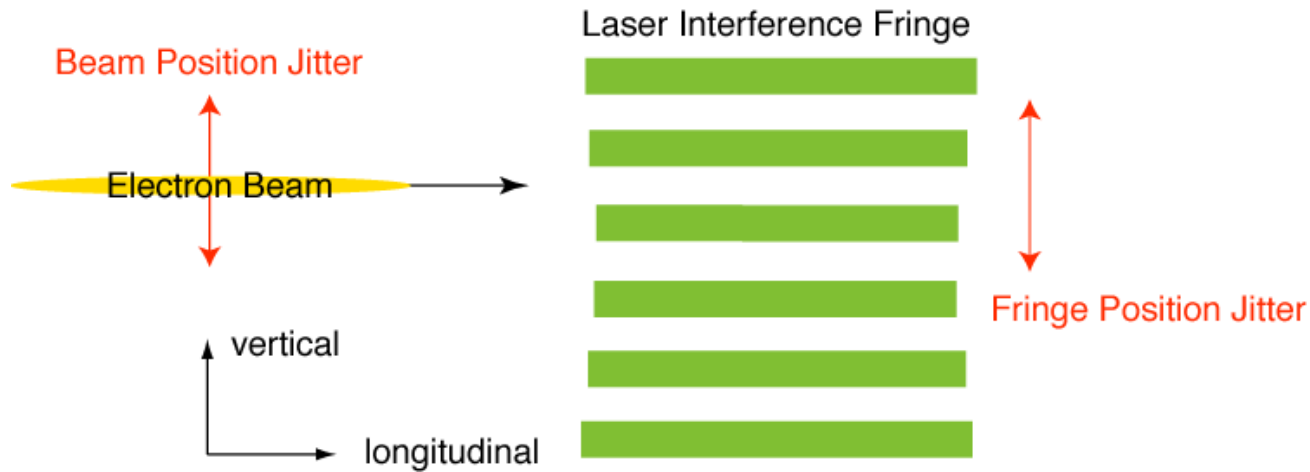
$\Delta l$  : 2本のレーザー光の光路差



$$C_{\text{t-coherence}} > 99.9\%$$

# 4. 相対位置ジッター

ビームと干渉縞のインコヒーレントなジッターがあると、ビームが実際より太って見える



$$C_{\text{phase}} = \exp\left(-\frac{\Delta\text{phase}^2}{2}\right)$$

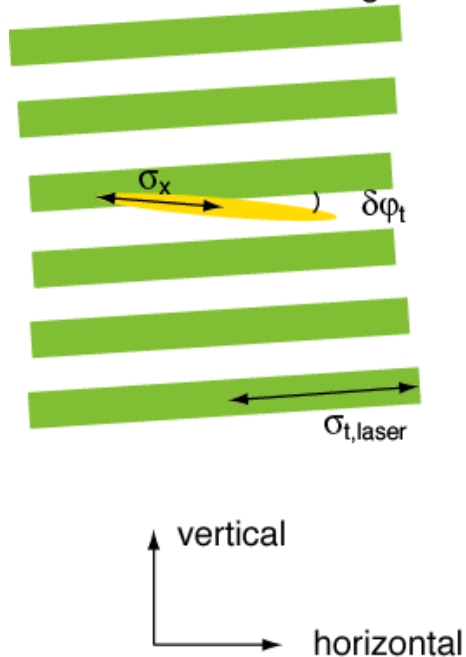
ビームサイズが小さいほど厳しい条件に



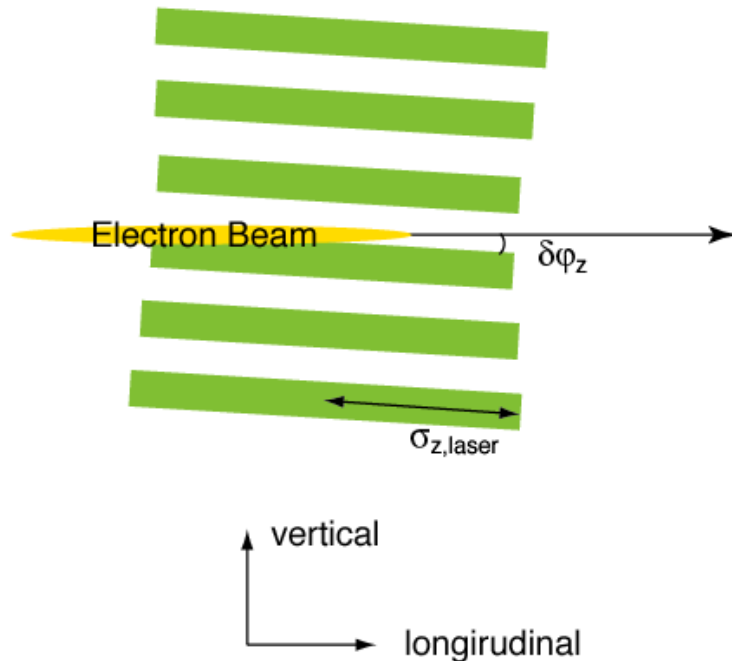
# 5. 干渉縞のtilt

transverse

Laser Interference Fringe



longitudinal



$$C_{t-tilt} = \exp \left( -2k_y^2 \frac{\sigma_x^2}{1 + \sigma_x^2 \sigma_{t,laser}^{-2} \sin^2 \phi} \delta\varphi_t^2 \right)$$

> 99.9%

$$C_{z-tilt} = \exp \left( -2k_y^2 \sigma_{z,laser}^2 \delta\varphi_z^2 \right)$$

> 98.2%

交差角が大きいほど厳しい条件に

# ビームを用いたコントラスト測定

できるだけ小さいビームで、干渉縞のピッチを大きくして干渉縞スキャン  $M=1$ に近いモジュレーションが見える

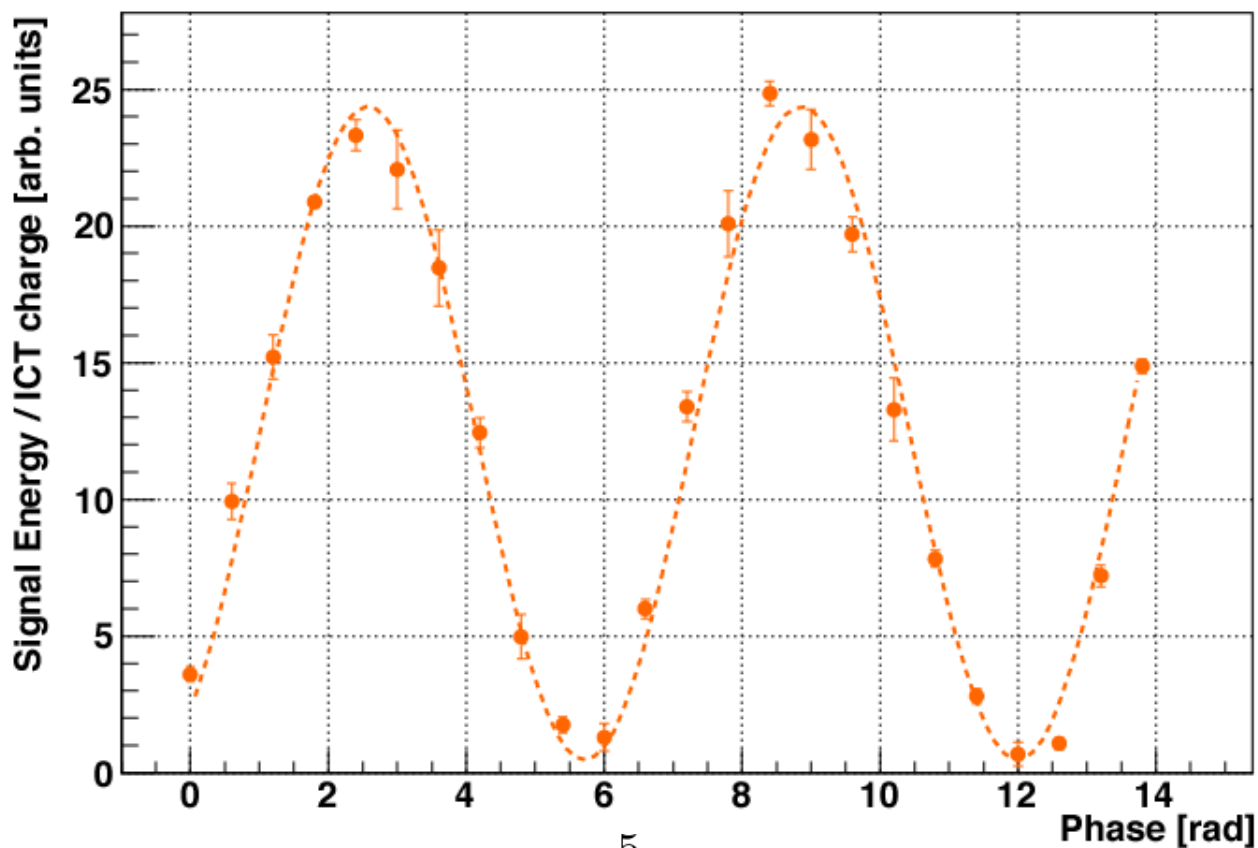
= 電子で干渉縞の構造を見る

		コントラスト悪化	レーザー交差角に依存しない
1	偏光状態と強度の不均等	○	○
2	レーザー光路ミスアライメント	○	○
3	空間・時間コヒーレンス	○	○
4	相対位置ジッター		
5	干渉縞のtilt	○	
6	球面波	○	
7	干渉縞内でのビームサイズ変化		

# コントラスト測定結果

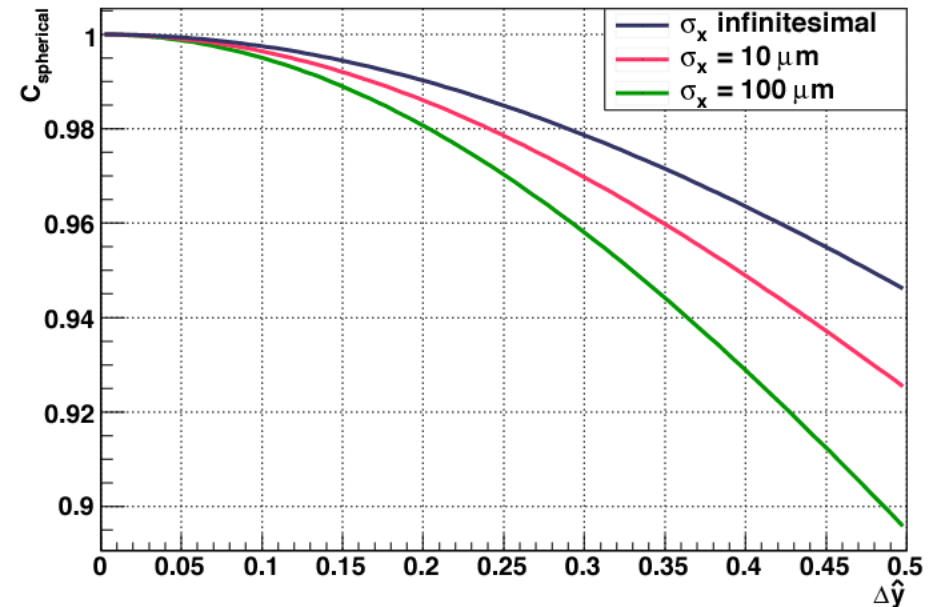
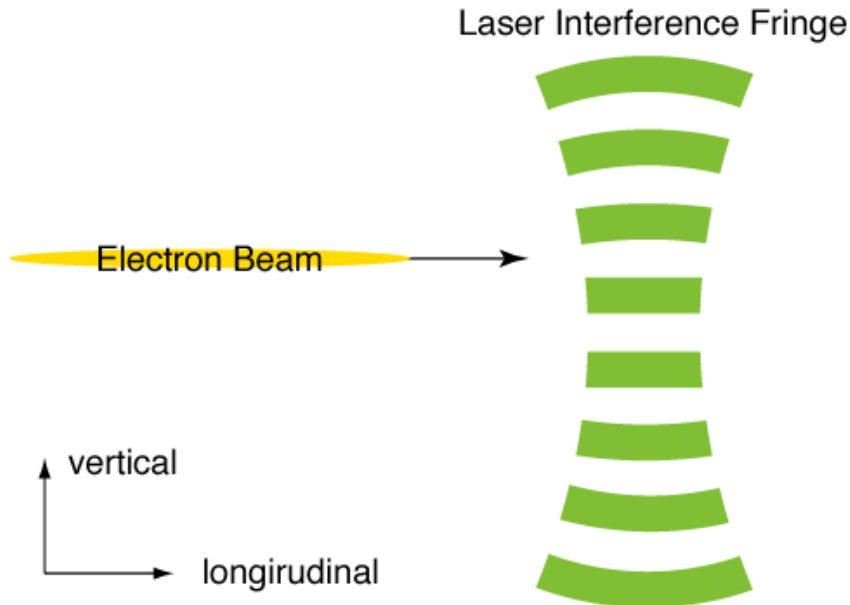
$\sigma_y < 380$  nmのビームを交差角2.29度モードで測定

理想的な場合のmodulation depth 0.98が、コントラストの悪化分だけ減少



$$\text{Contrast} = \prod_i^5 C_i = 0.98 \begin{matrix} +0.01 \\ -0.03 \end{matrix}$$

# 6. 球面波



レーザー光を基本ガウスビームとして、コントラストを計算

$$C_{spherical} = \frac{1}{(1 + \Delta \hat{y}^2)^{\frac{1}{4}}} \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{\Delta \hat{y}}{1 + z_R \frac{1 + \Delta \hat{y}^2}{2k\sigma_x^2}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{4}}}$$

> 99.7%

$$\Delta \hat{y} \equiv \frac{y_0}{z_R}$$

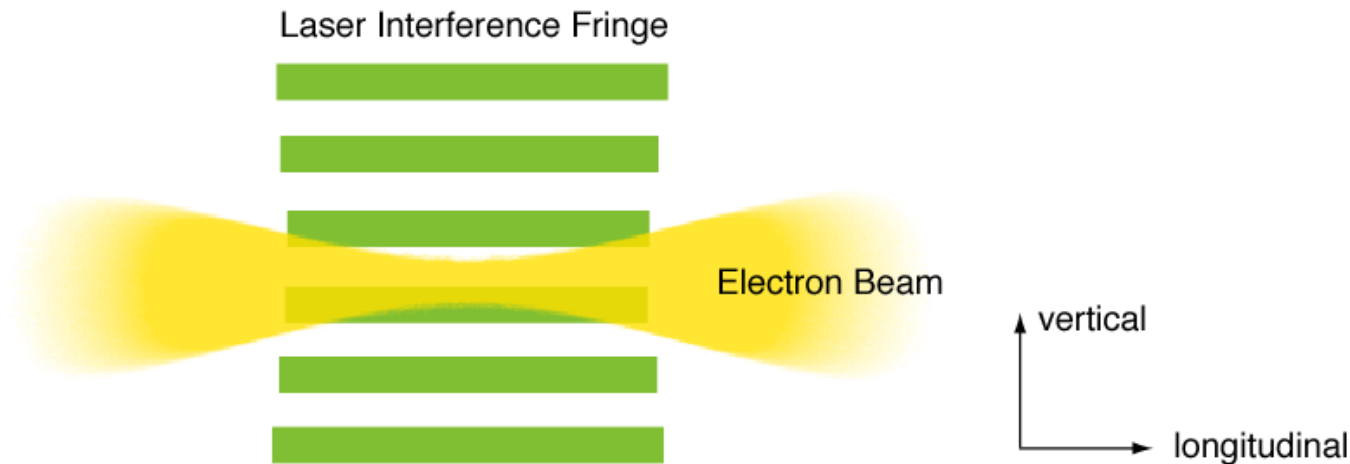
$z_R$  : Rayleigh length

# 7. 干渉縞内でのビームサイズ変化

ビームをより絞るためには強収束



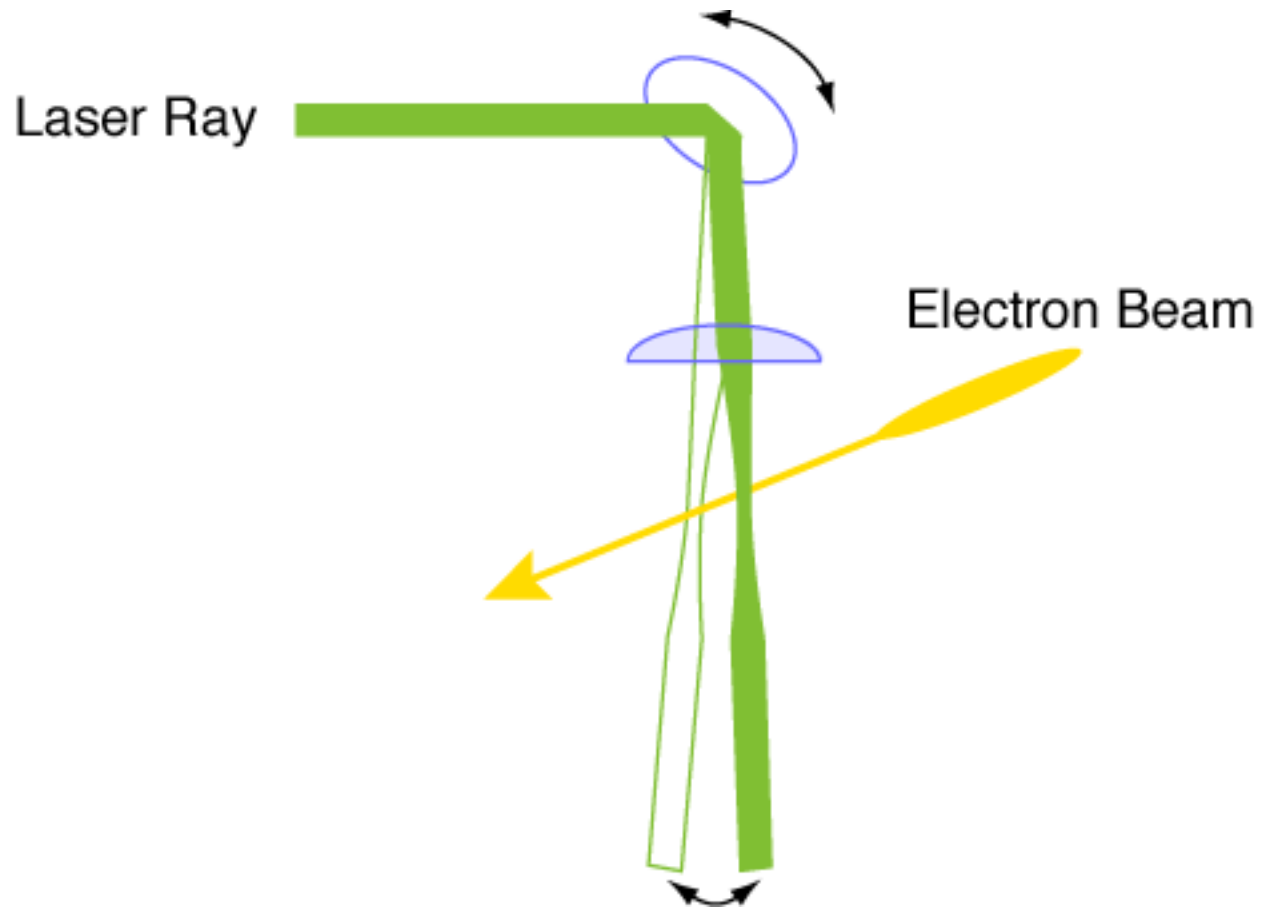
干渉縞内でのビームサイズ変化が無視できない



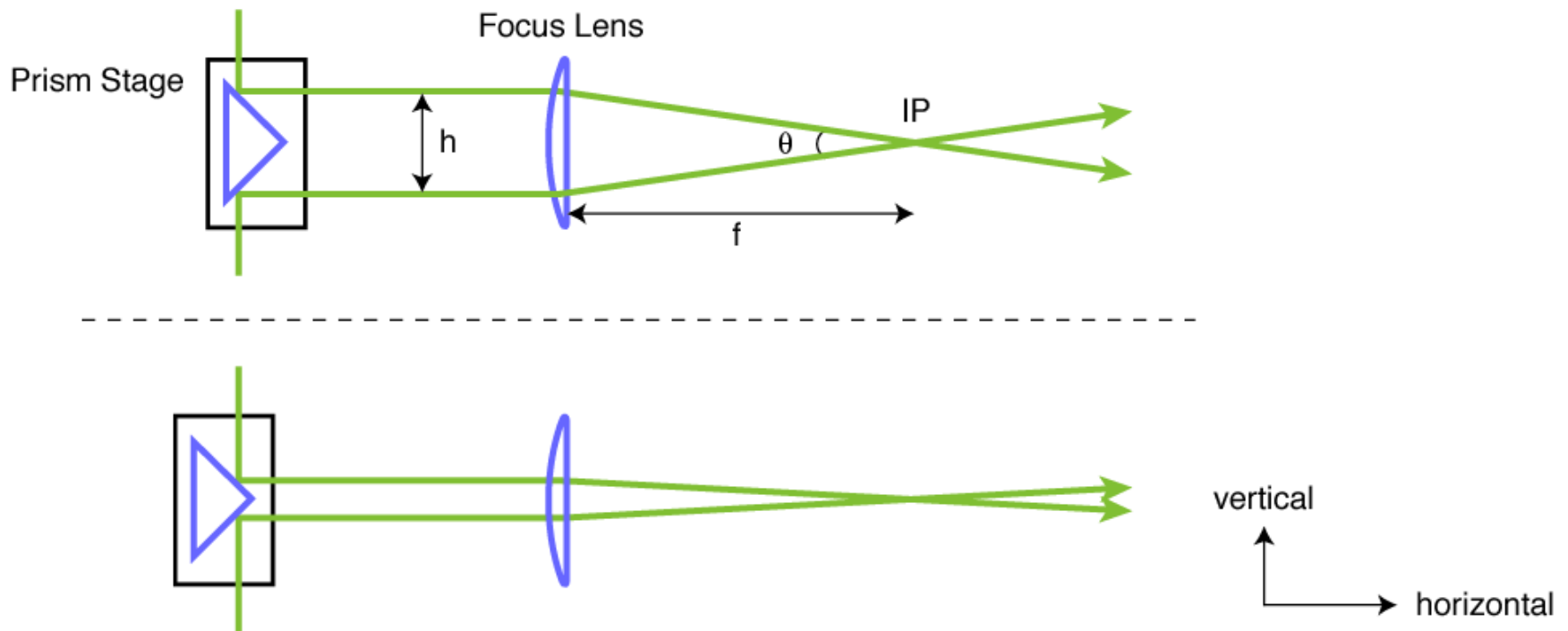
$$C_{growth} = \left( 1 + 4k_y^2 \sigma_{z,laser}^2 \frac{\epsilon}{\beta^*} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\simeq 99.7\%$$

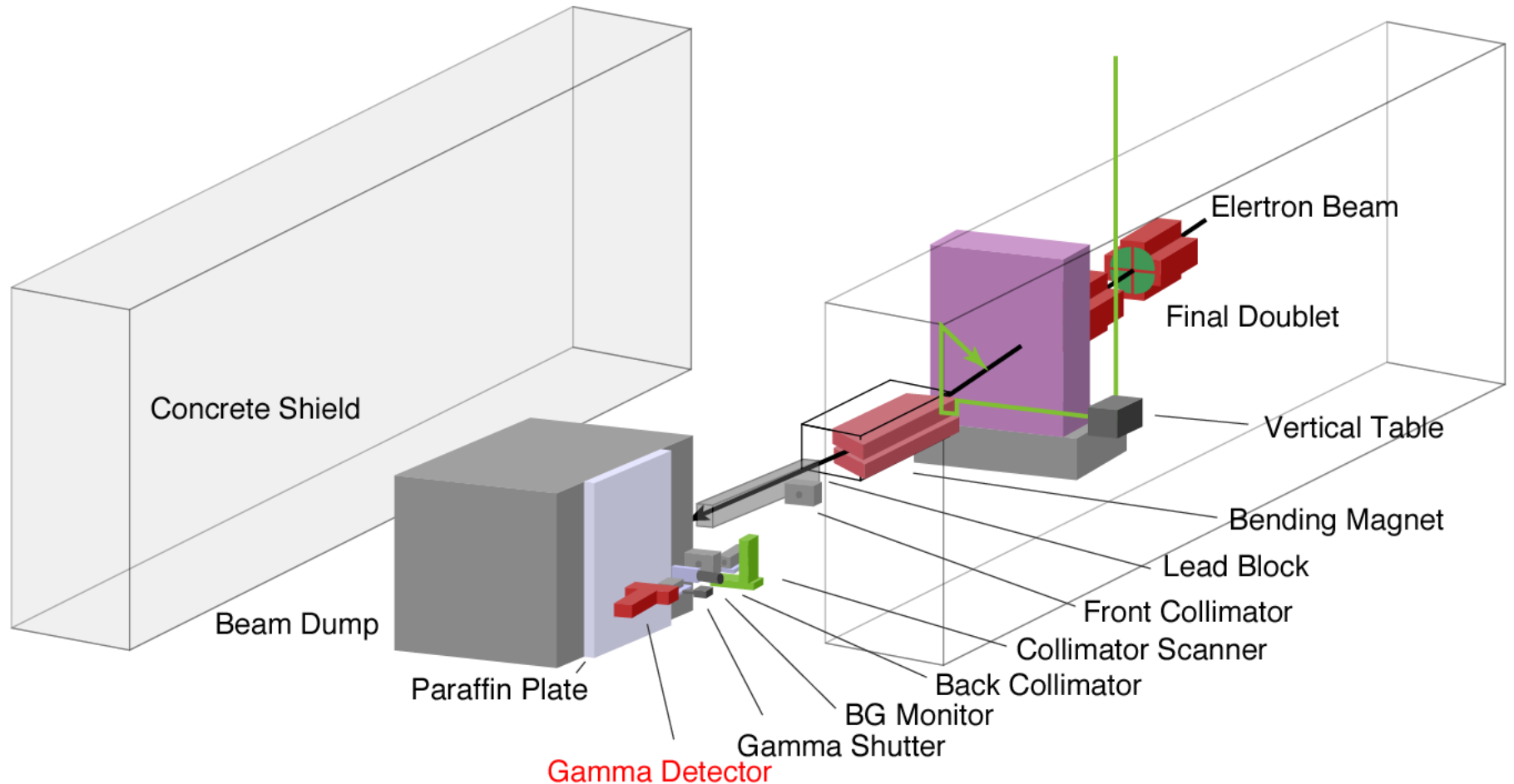
# レーザーワイヤ



# 交差角2-8度調整機構

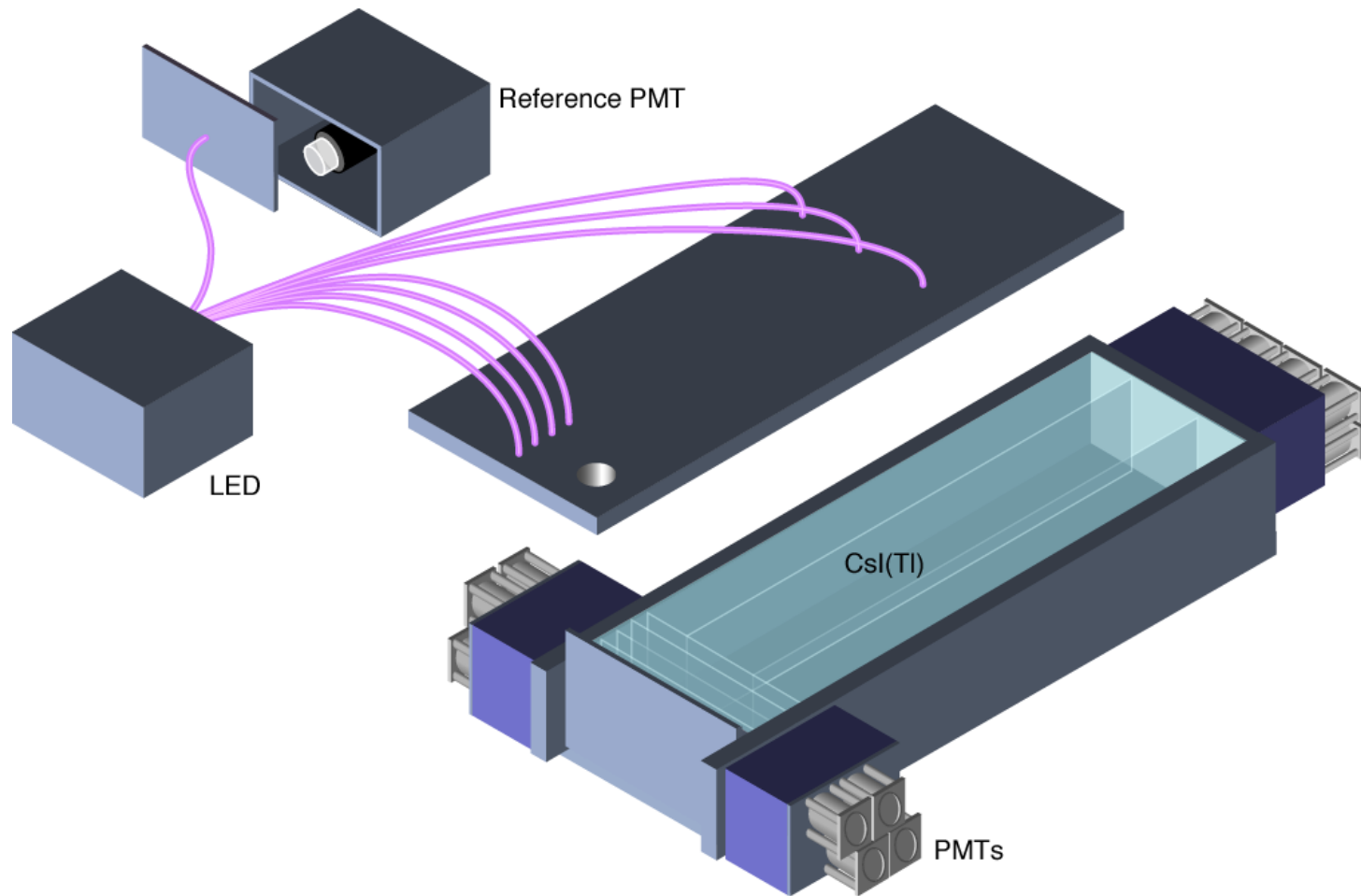


# ガンマ線検出器周り

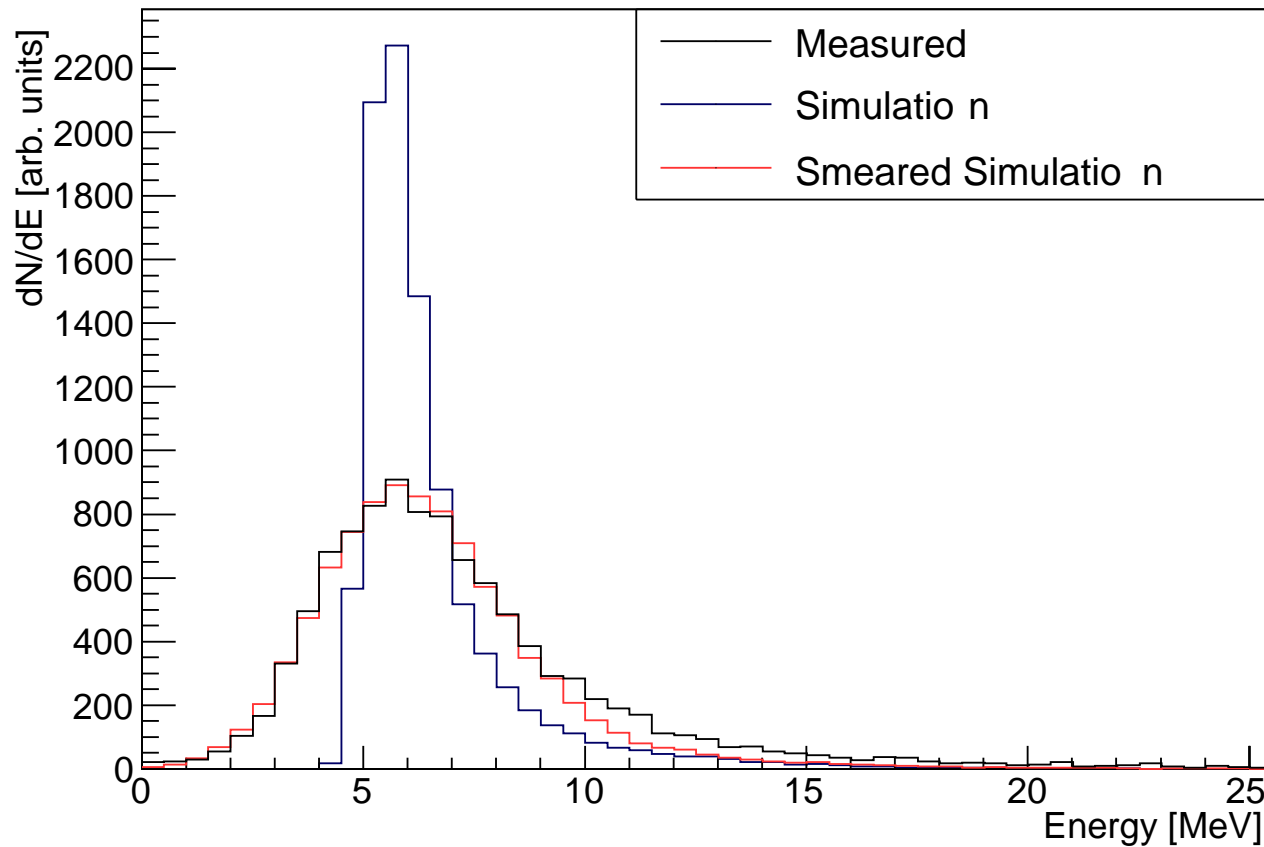




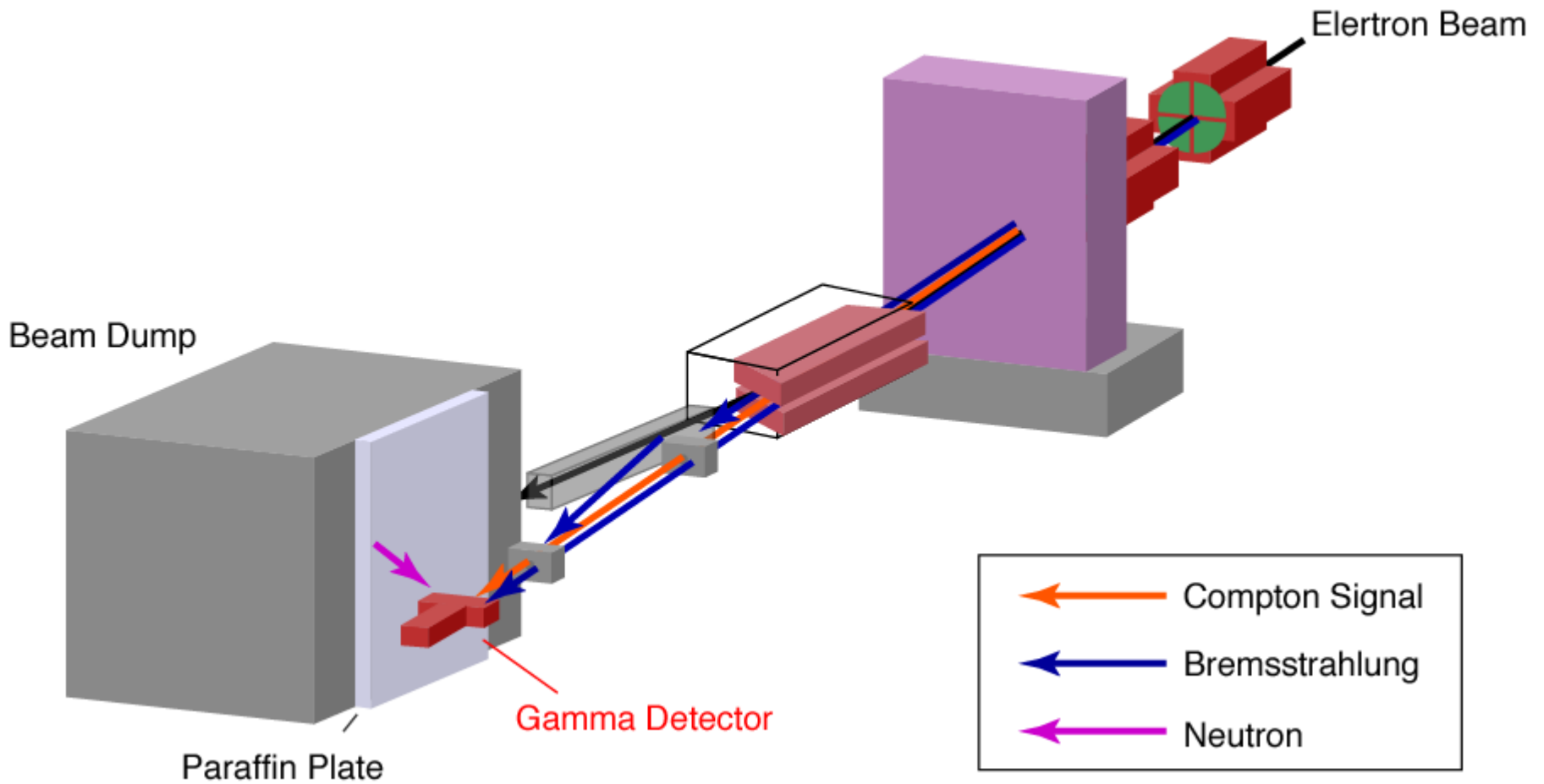
# ガンマ線検出器とゲインモニタ



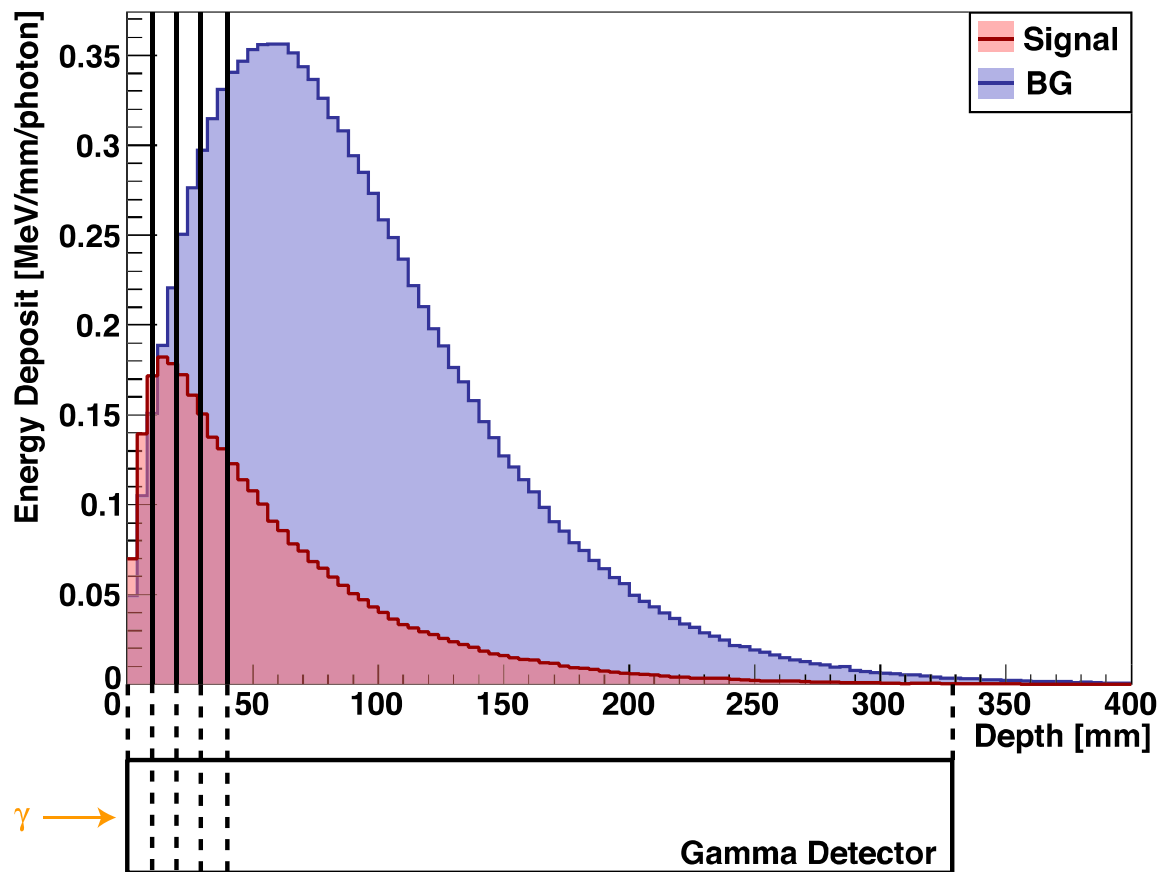
# 宇宙線試験による ガンマ線検出器のキャリブレーション



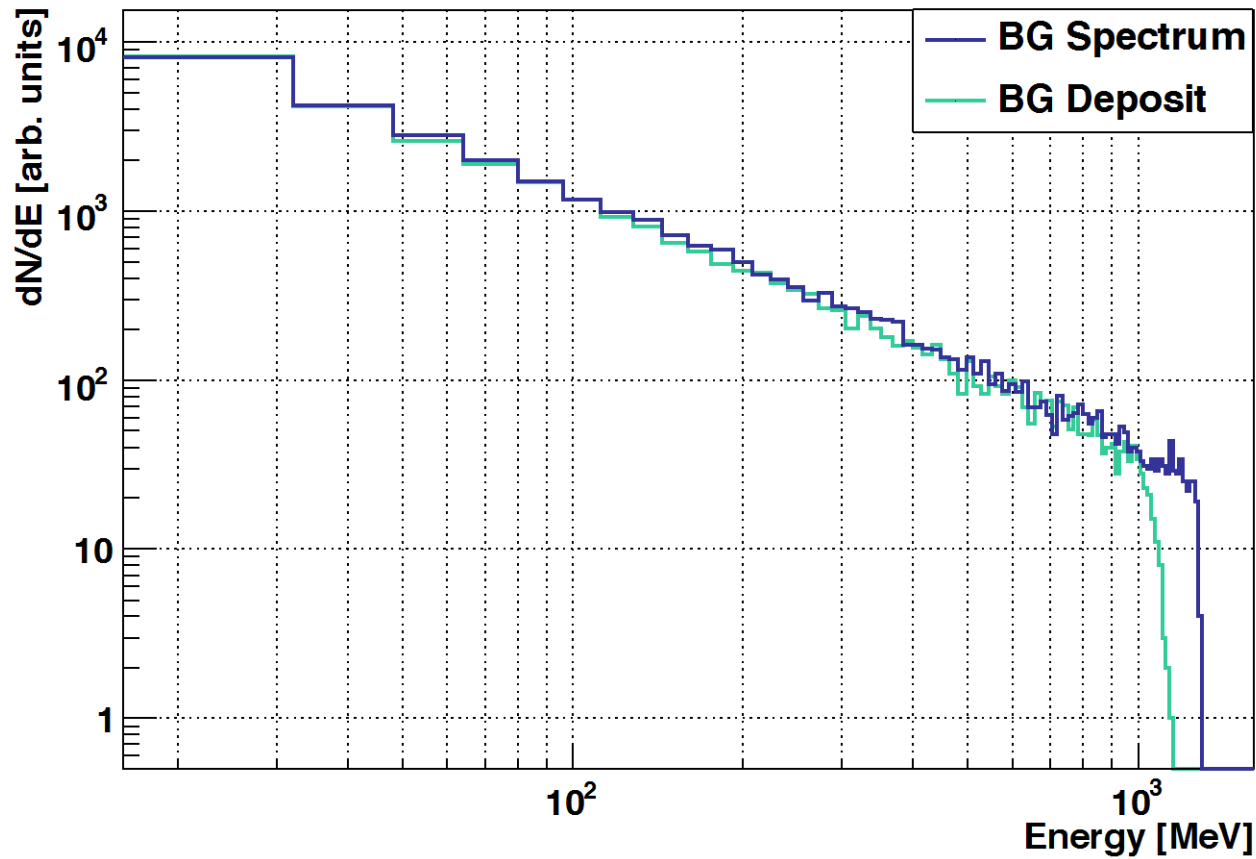
# BG源



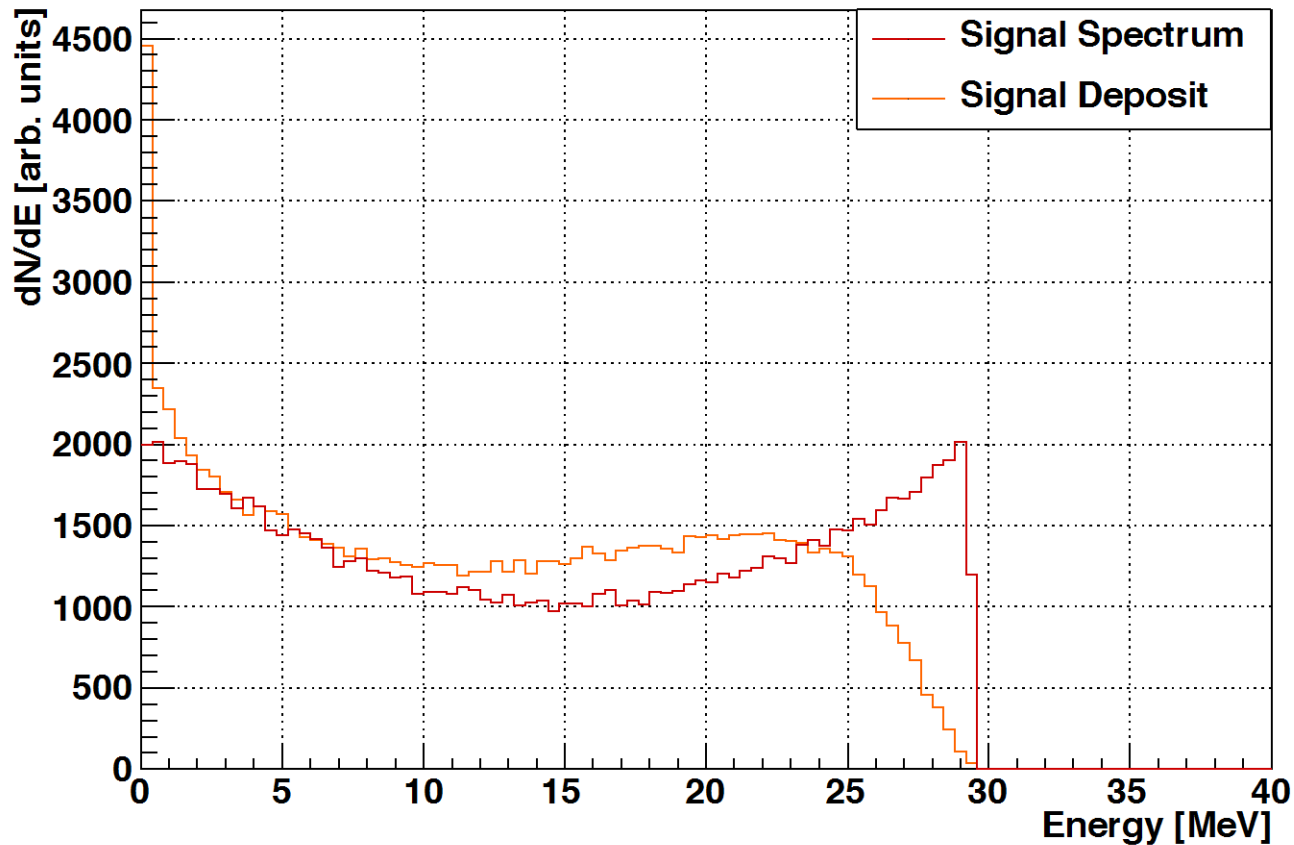
# CsI(Tl)シンチレータ内のシャワー発展



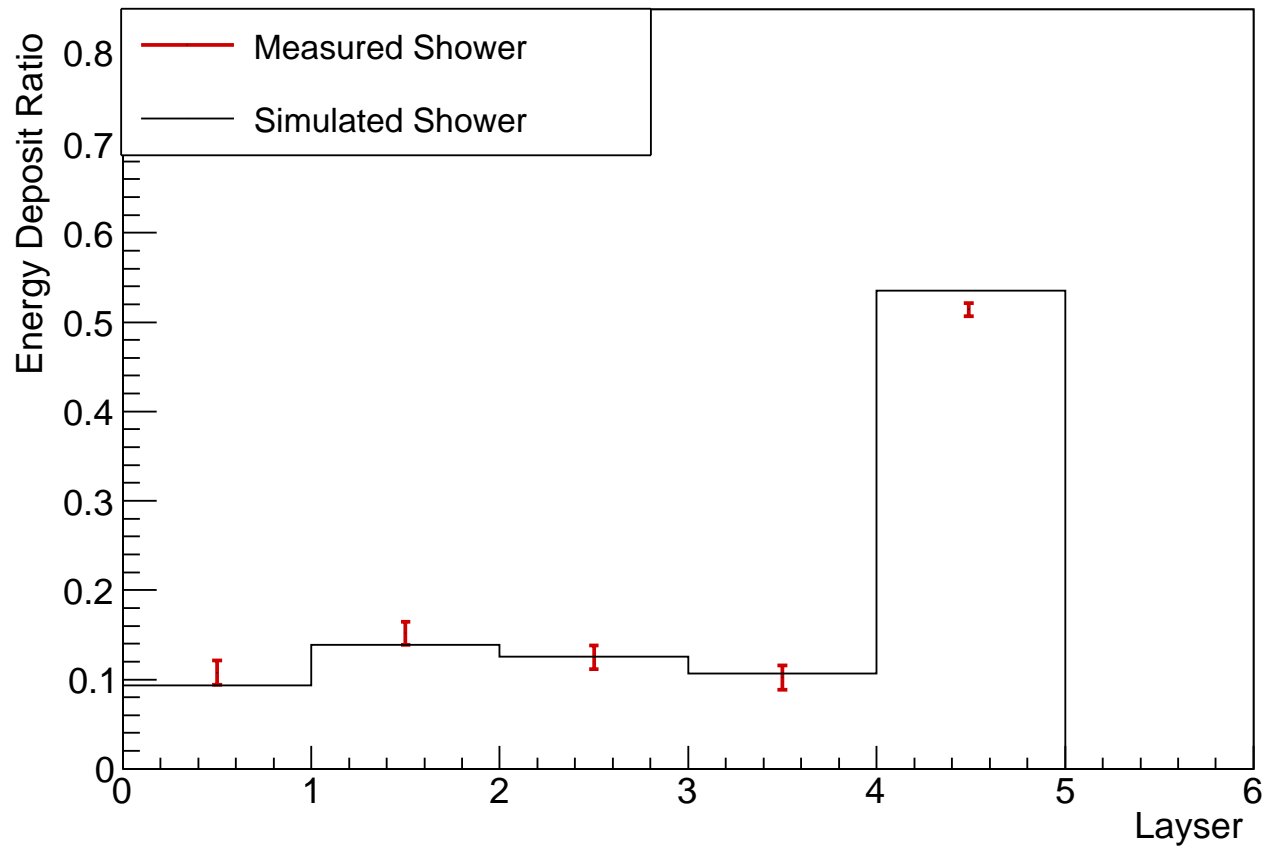
# シンチレータに落とすエネルギーのスペクトル: BG



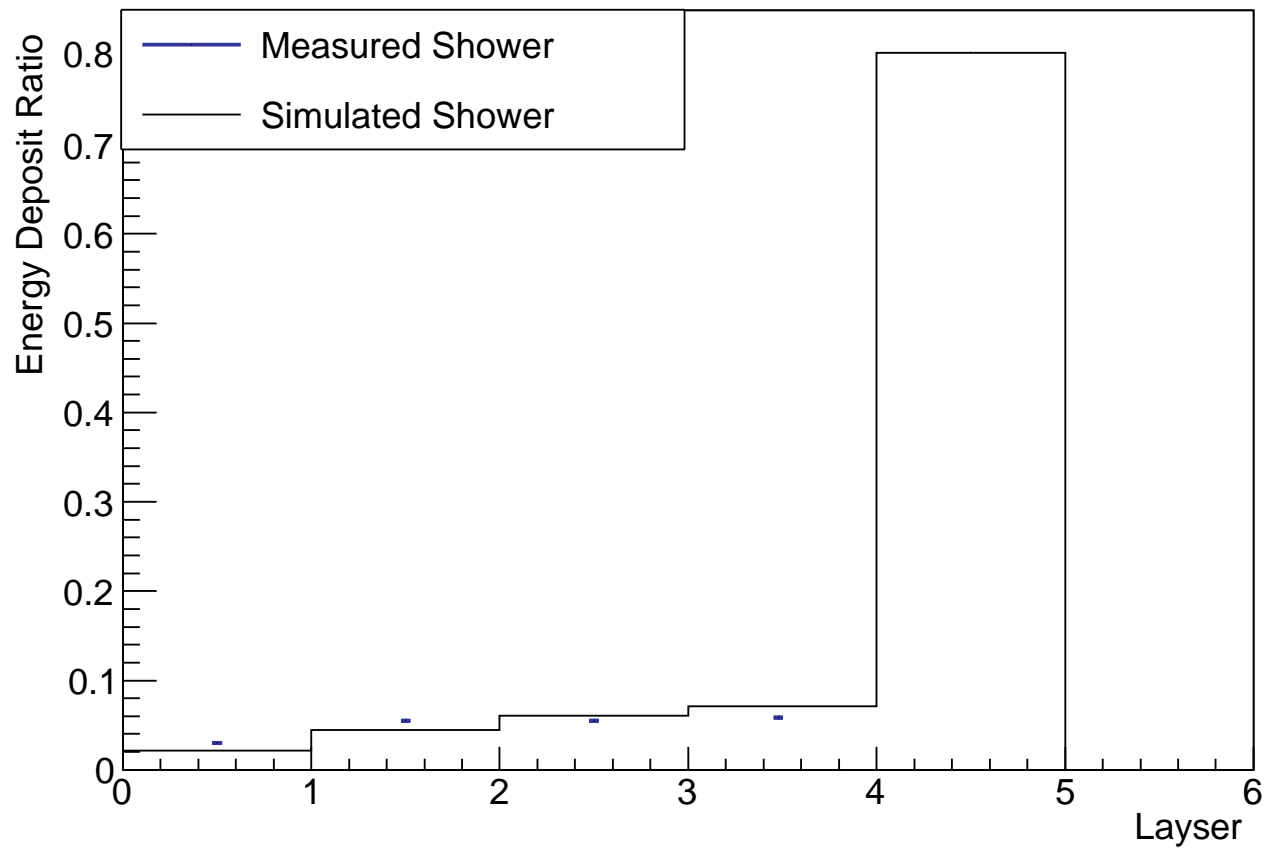
# シンチレータに落とすエネルギーのスペクトル: Comptonシグナル



# 各層でのエネルギー比:シグナル

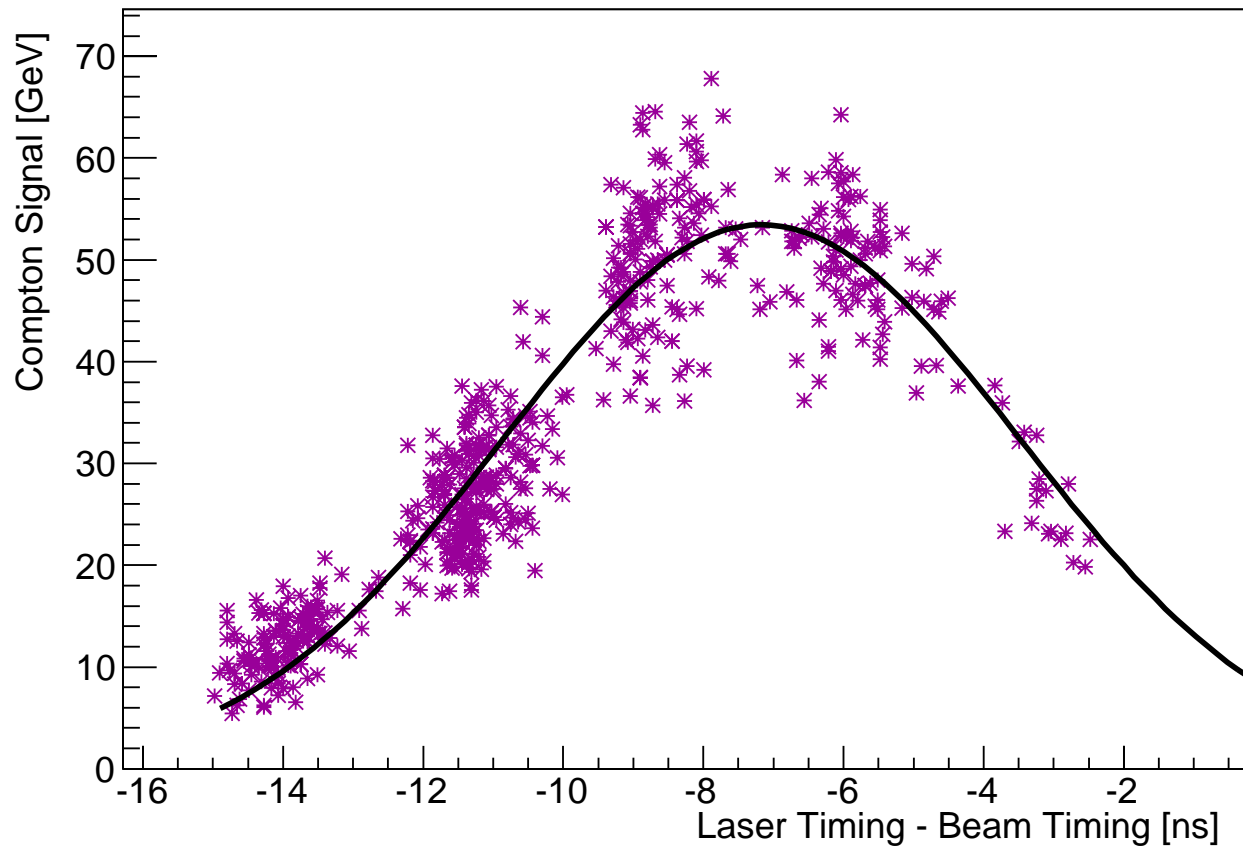


# 各層でのエネルギー比: BG



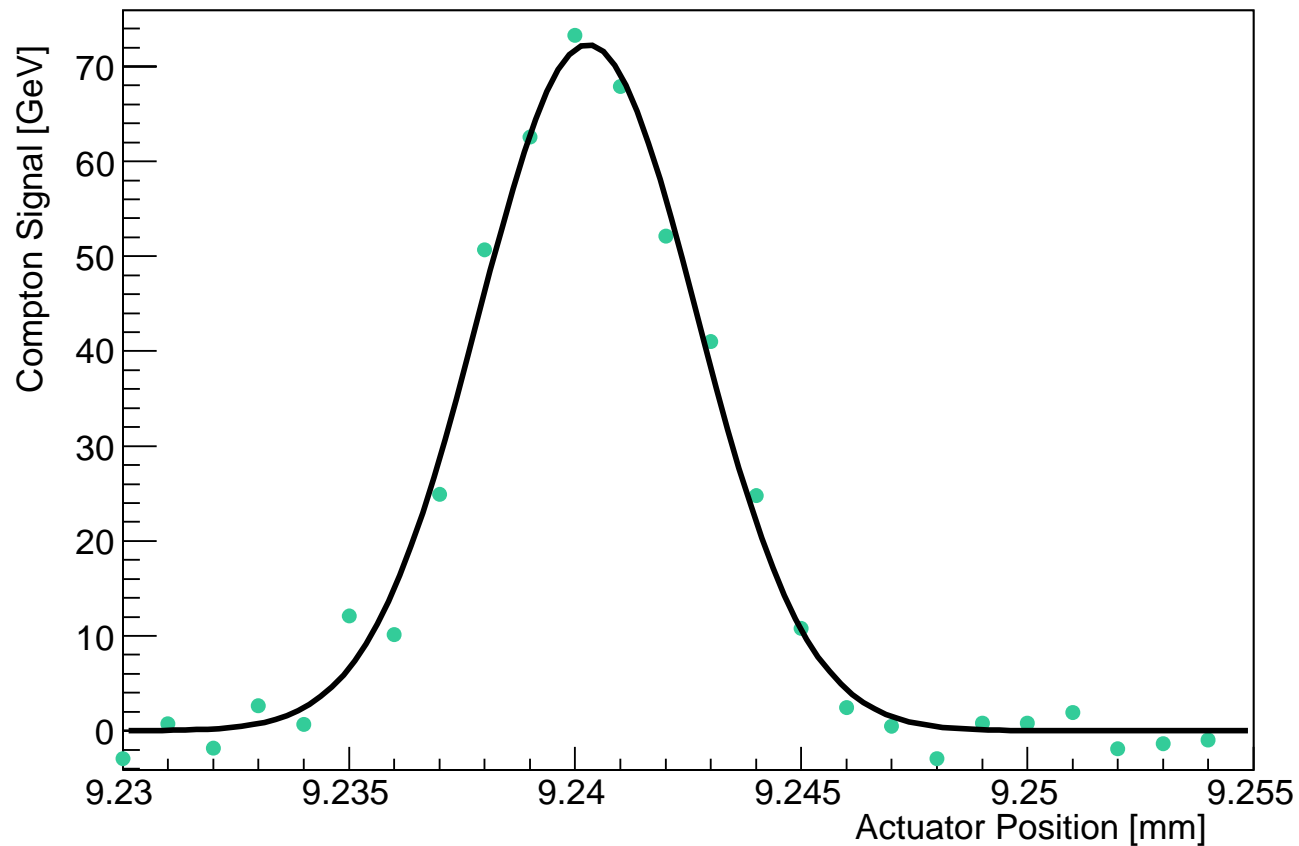


# タイミングスキャン

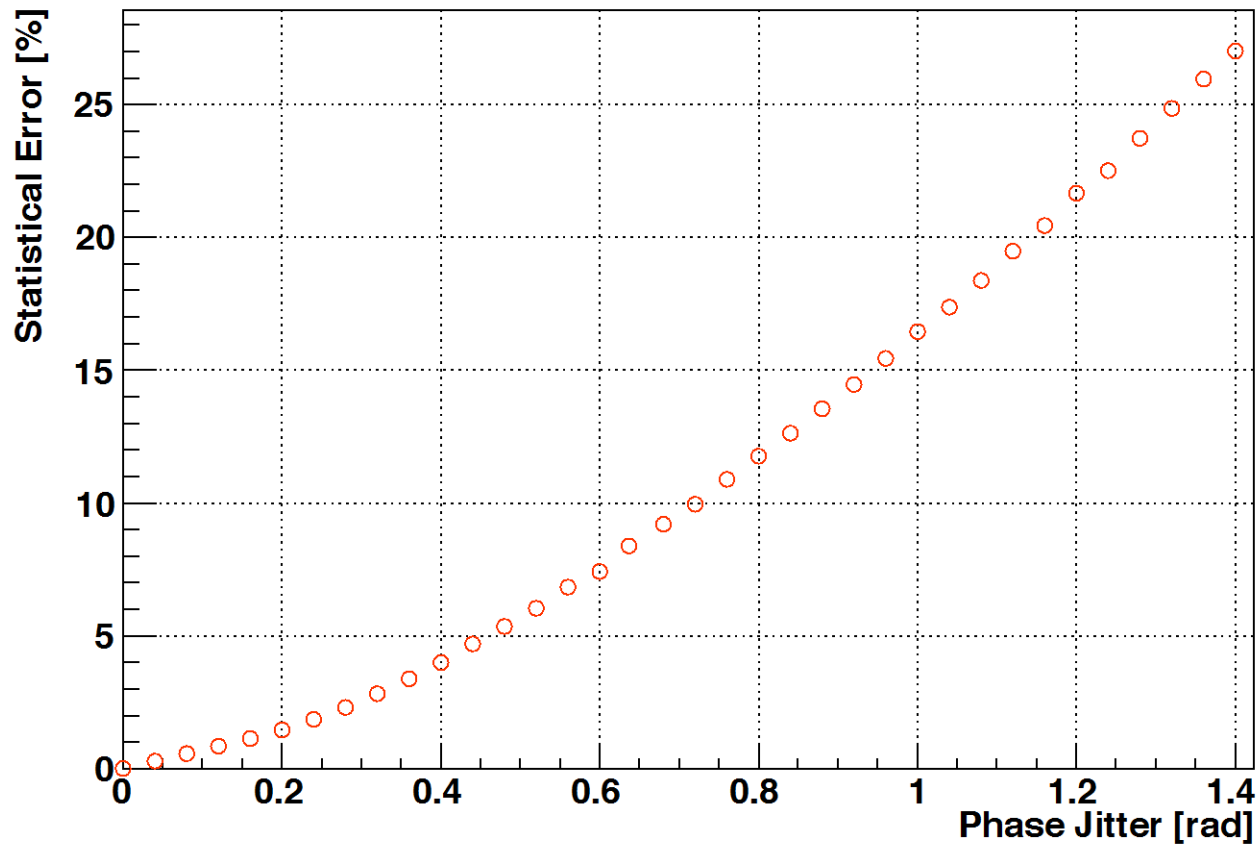


# レーザーワイヤシグナル

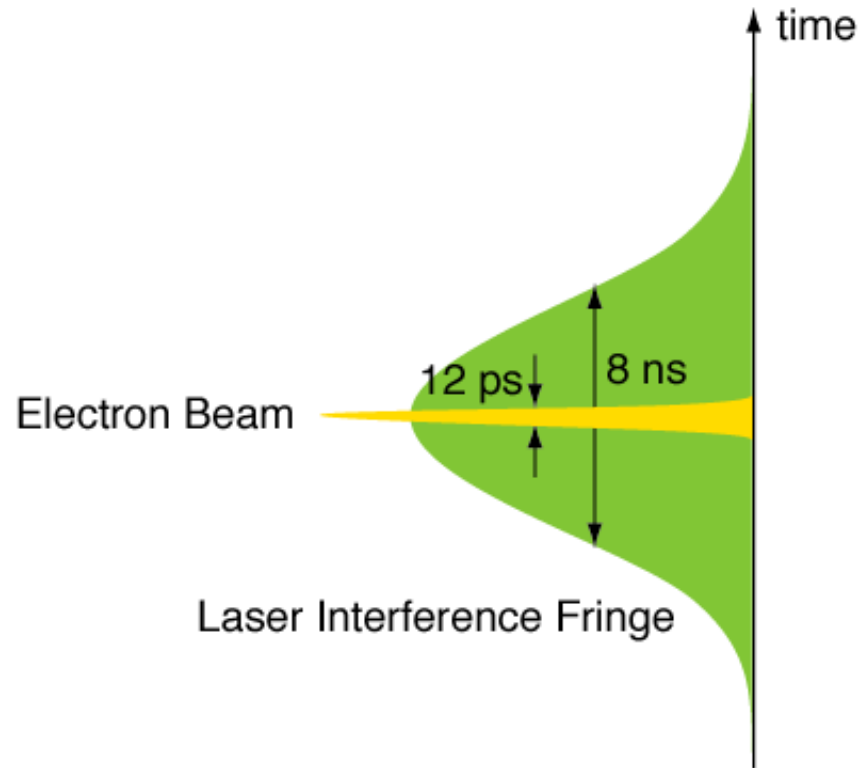
laser wire scan 2010/05/20



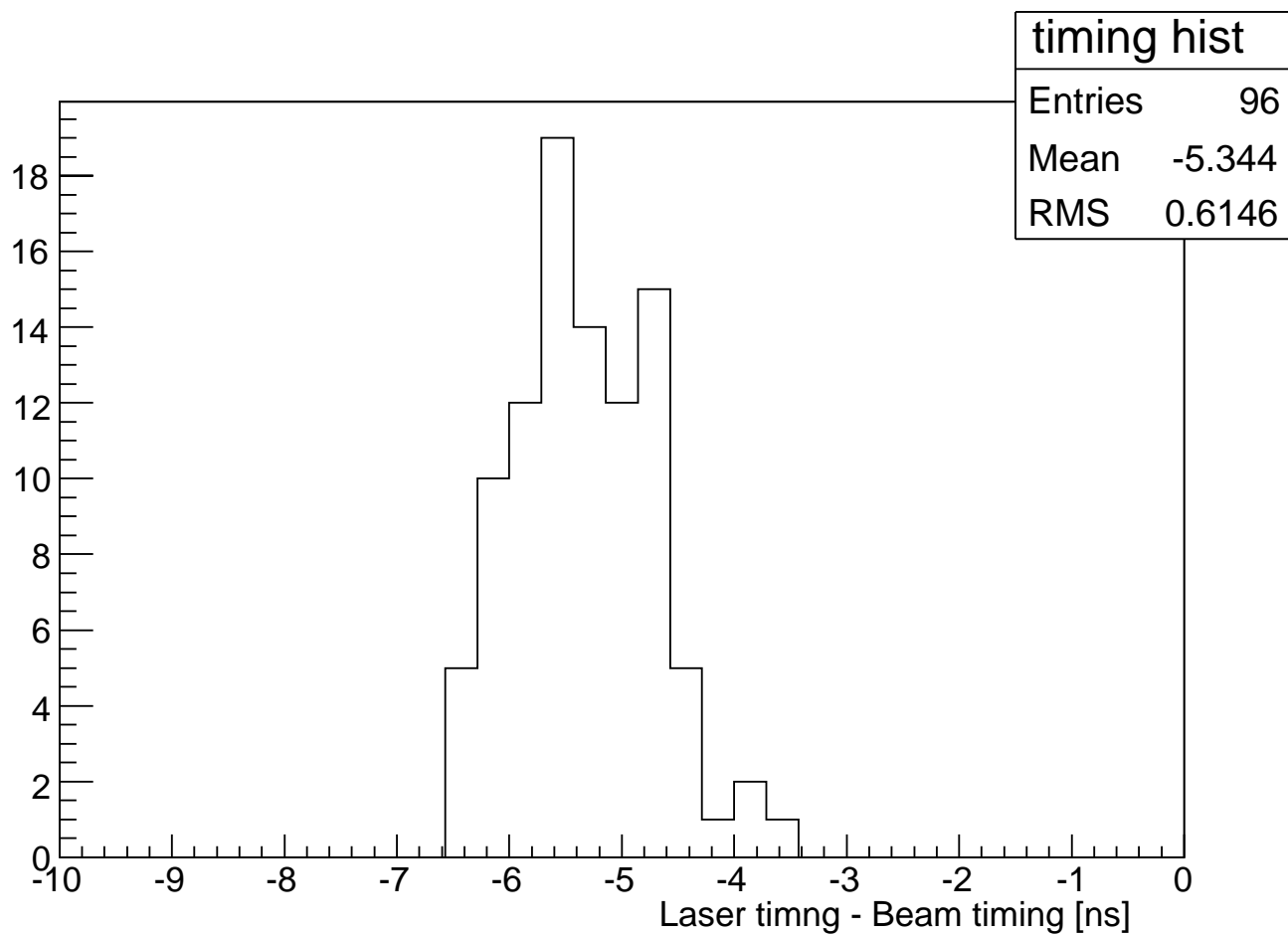
# 相対位置ジッターが測定誤差に与える影響



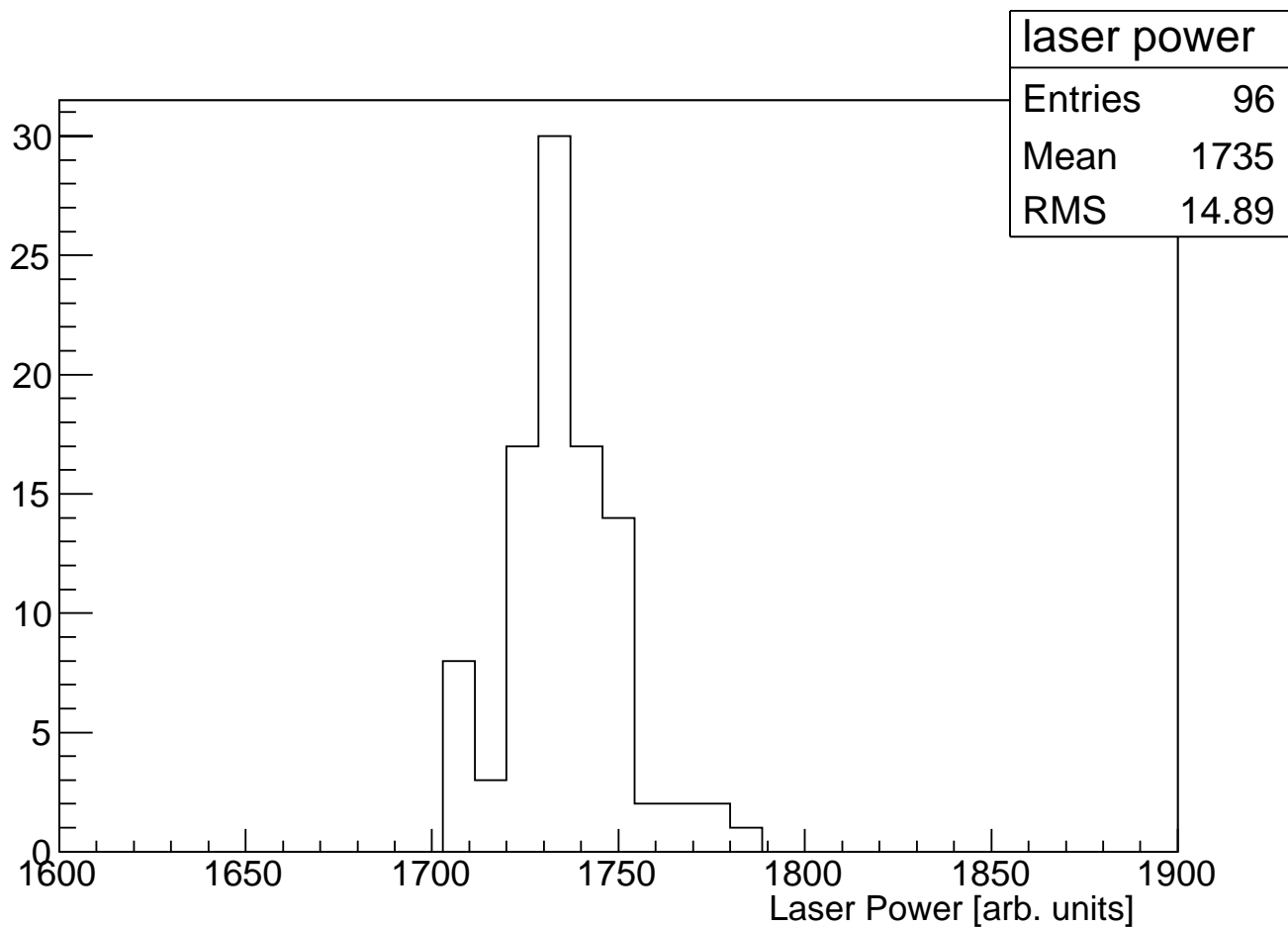
# レーザーとビームの時間関係



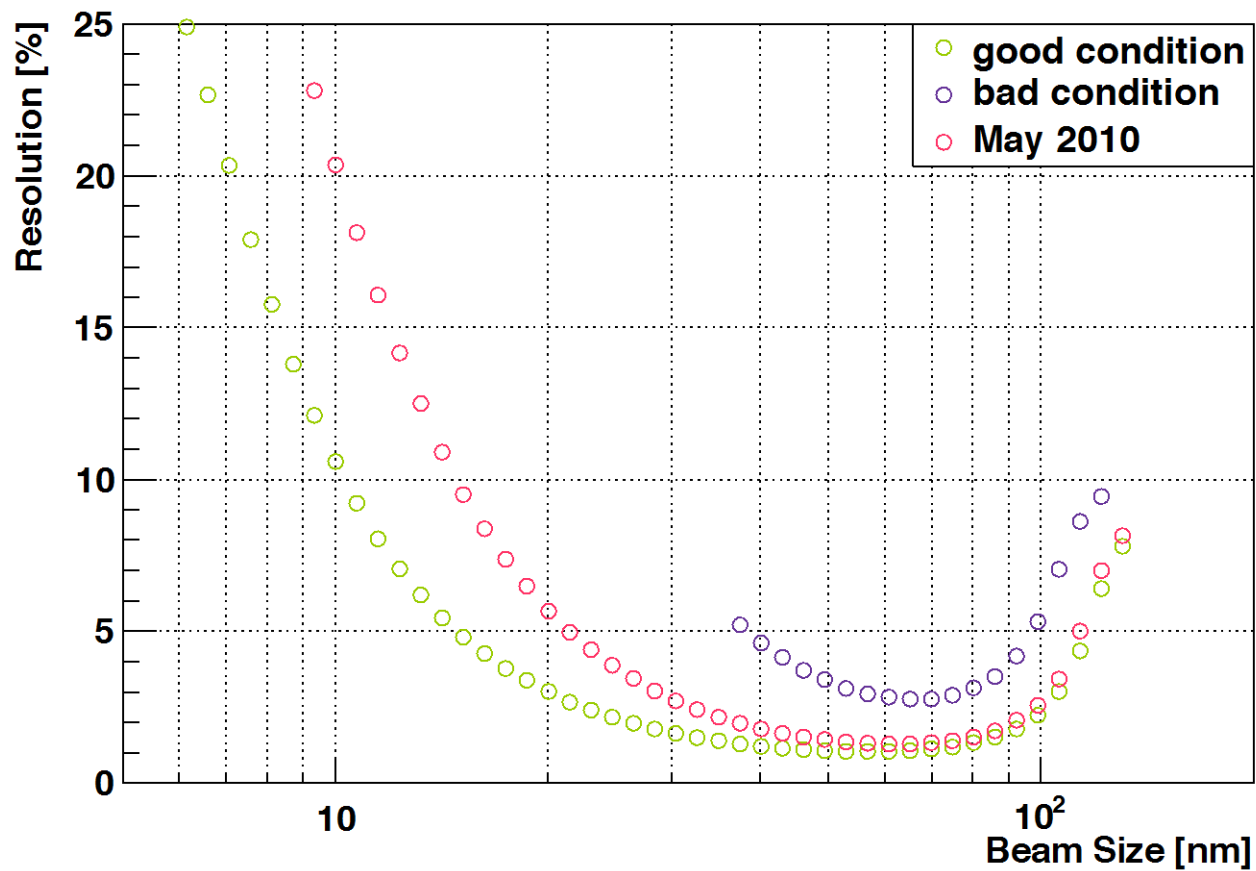
# タイミングジッター



# レーザーパワージッター



# 測定環境と分解能



# レーザー定盤

