

第1回測定器開発・優秀修士論文賞 受賞記念講演
レーザー干渉型電子ビームサイズモニタ

山口洋平

東大理 駒宮研

2011年9月19日

極小ビーム

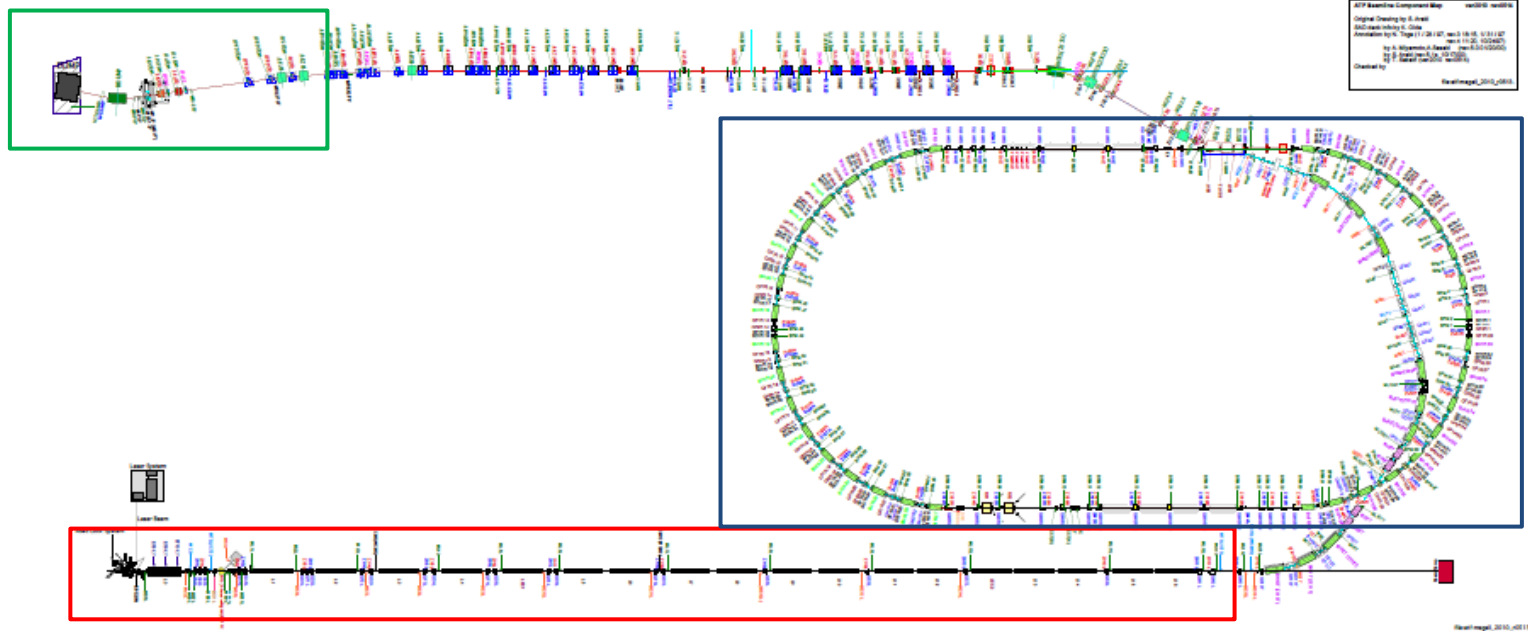
- linear colliderではluminosityを上げるために、衝突点 (IP) でビームサイズをしぼることが重要
- luminosity (L): ビームの衝突頻度

$$L = \frac{n_b N^2 f_{rep}}{4\pi\sigma_x\sigma_y} H_D$$

n_b : number of bunches
 f_{rep} : repetition rate
 N : number of particles per bunch
 σ_y : vertical beam size
 σ_x : horizontal beam size
 H_D : disruption parameter

例えばILCでは5.8 nmまで σ_y をしぼることを計画 (SB2009)
そのため規格化エミッタンス35 nm \cdot radという、高品質ビームが必要

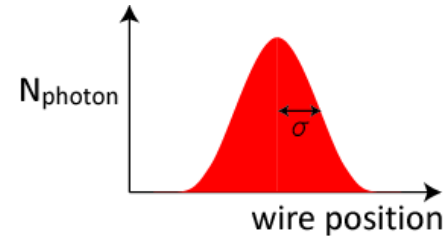
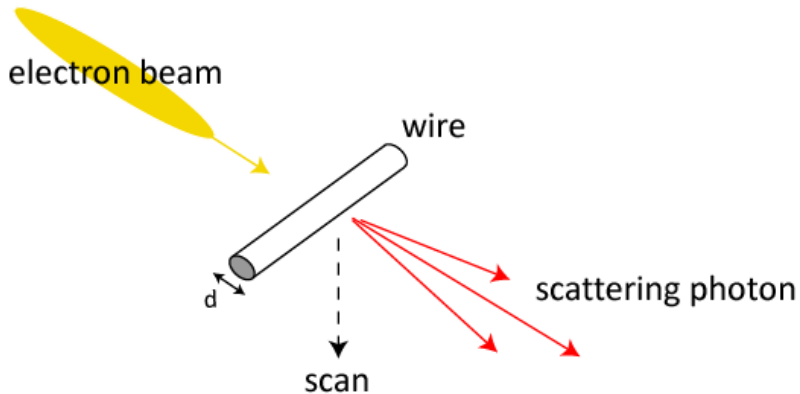
ATF / ATF2: 先端加速器実験施設



- **Linac:** 電子ビームエネルギー1.3 GeV
- **Damping Ring**
 - 規格化鉛直エミッタンス $28 \text{ nm} \cdot \text{rad}$
 - ILCでの規格化エミッタンス $35 \text{ nm} \cdot \text{rad}$
- **Final Focus**
 - 局所色収差補正
 - 37 nm の鉛直ビームサイズ
 - nmレベルのビーム安定化

ビームサイズモニタ

- 例: ワイヤスキャナ



$$\sigma^2 = \sigma_{\text{beam}}^2 + \frac{d^2}{4}$$

- 極小ビームサイズを測るには??

- ワイヤスキャナ

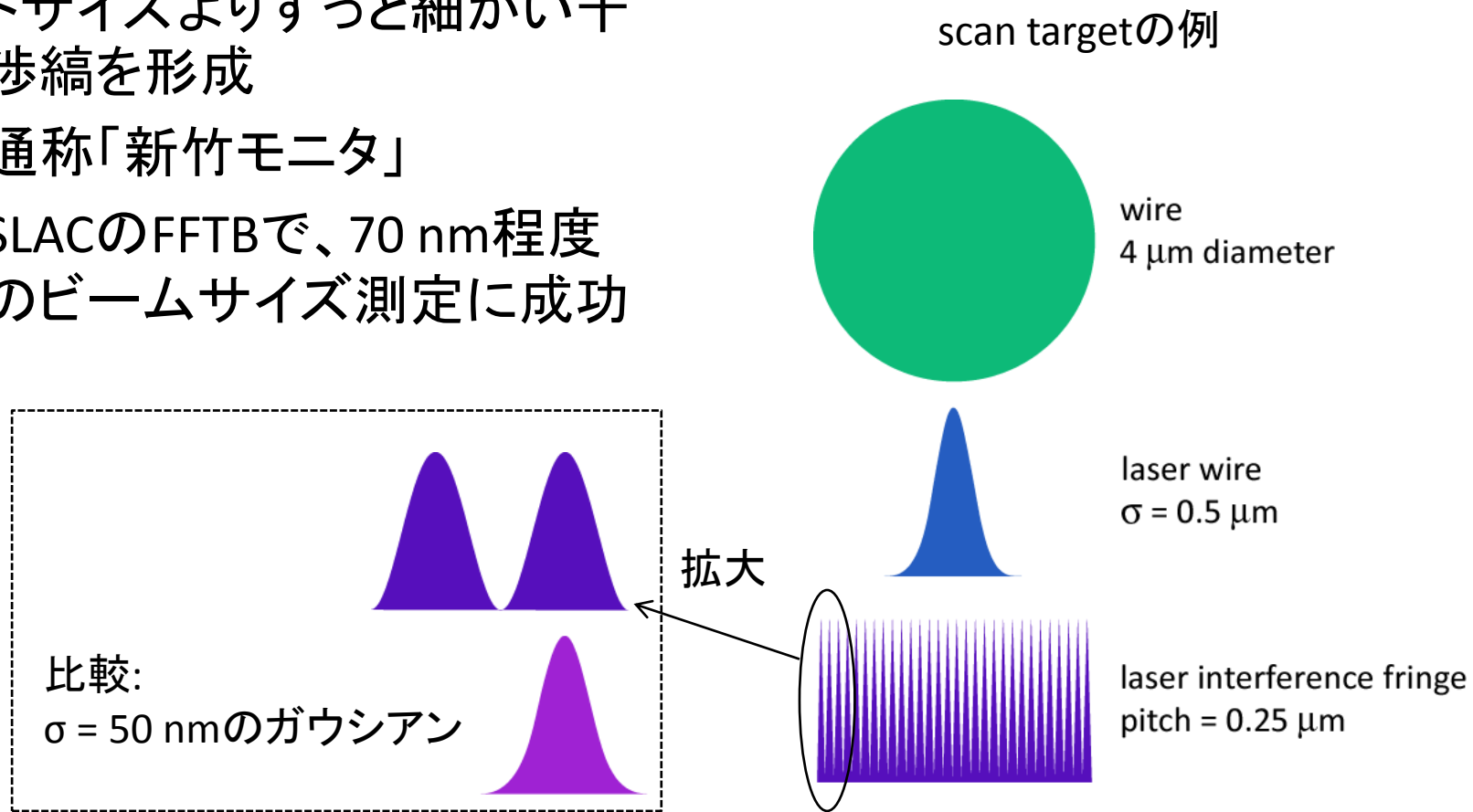
- 1 μm 程度が測定下限 焼き切れる (current $\sim 10^9$ [ptohons] を想定)

- レーザーワイヤ

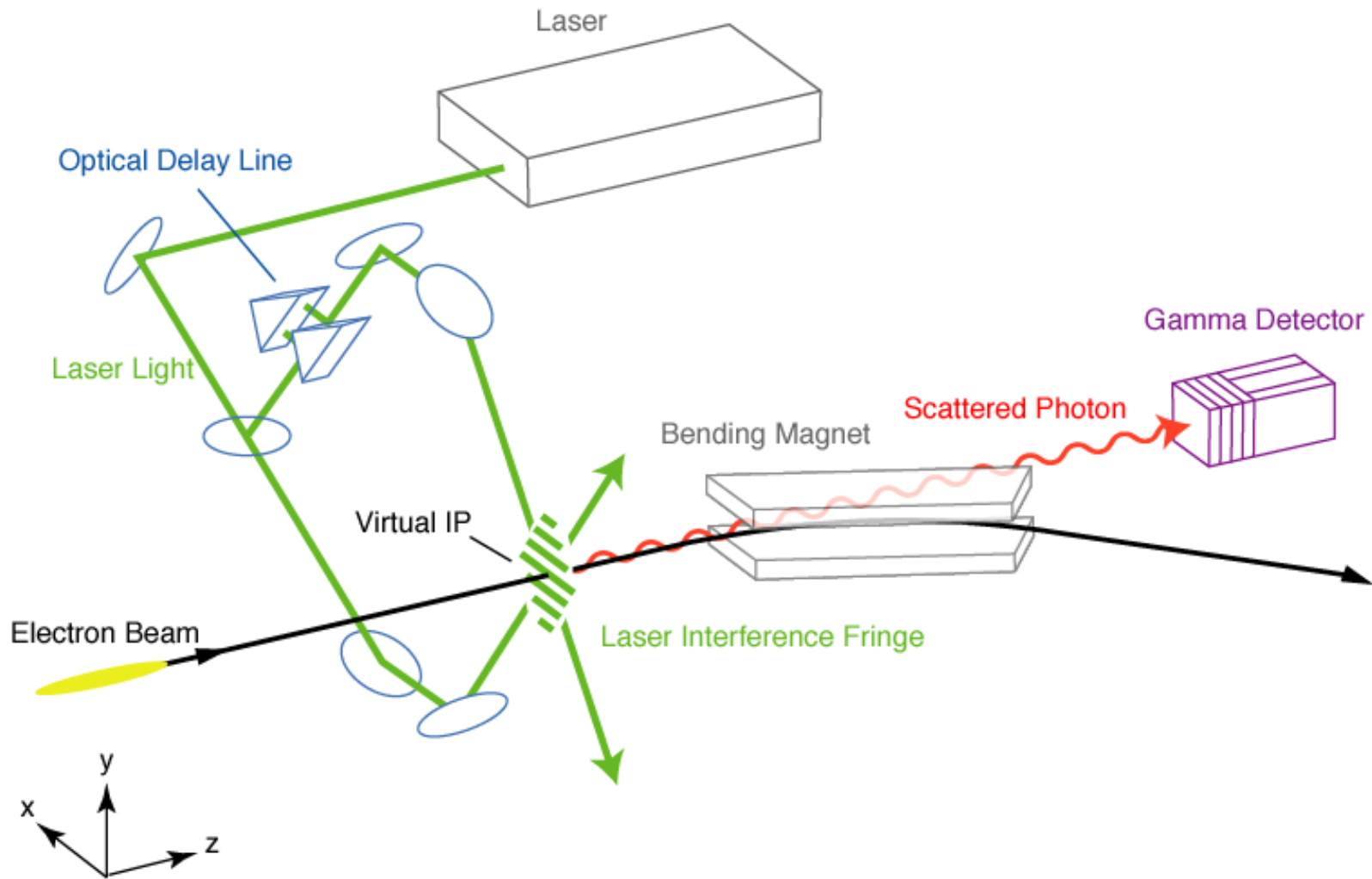
- 回折限界により、波長程度がリミット

測定下限を下げる一つの解： ターゲットの構造を小さくする

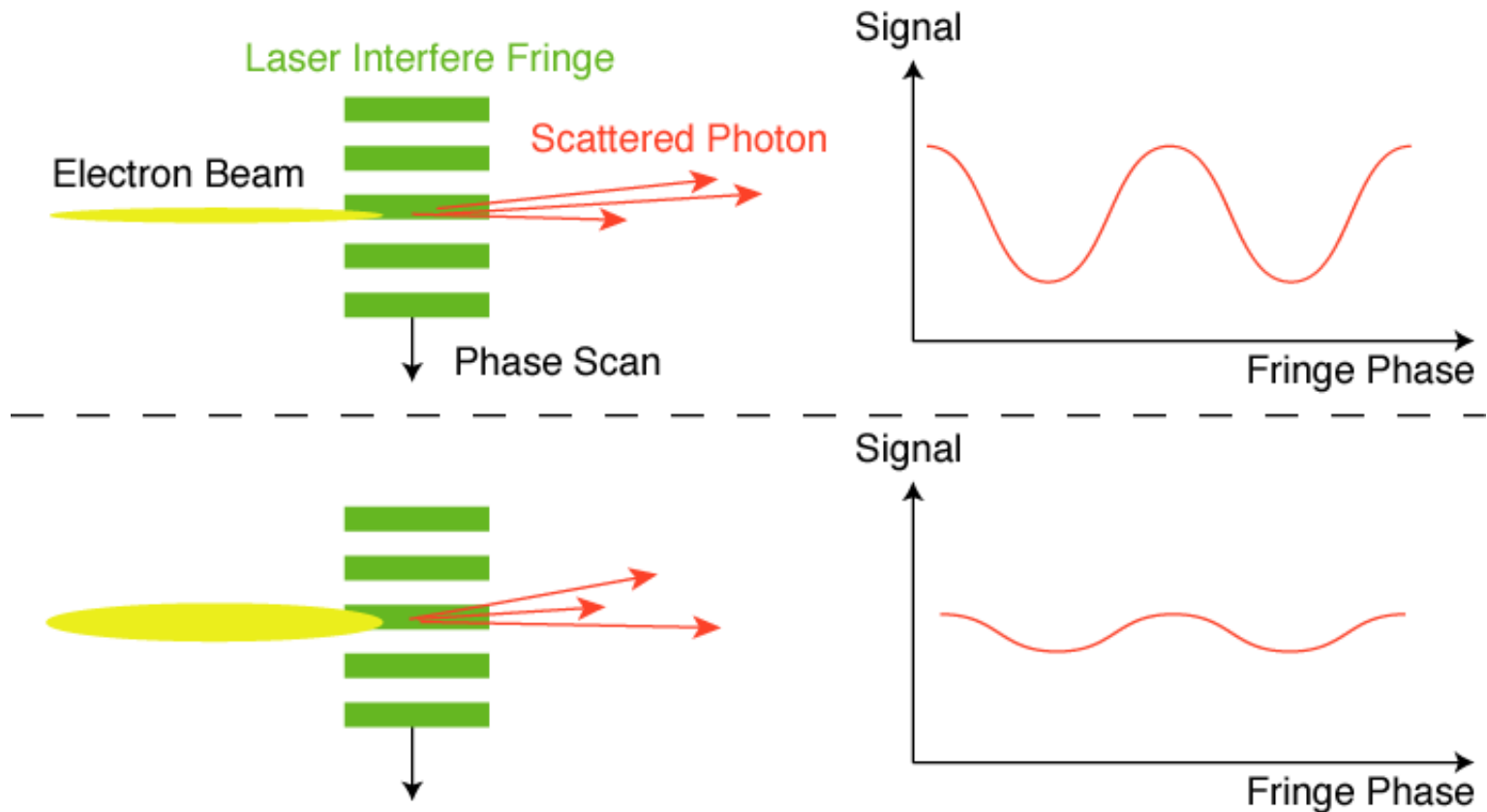
- レーザーを干渉させ、スポットサイズよりずっと細かい干渉縞を形成
- 通称「新竹モニタ」
- SLACのFFTBで、70 nm程度のビームサイズ測定に成功



新竹モ二夕@ATF2

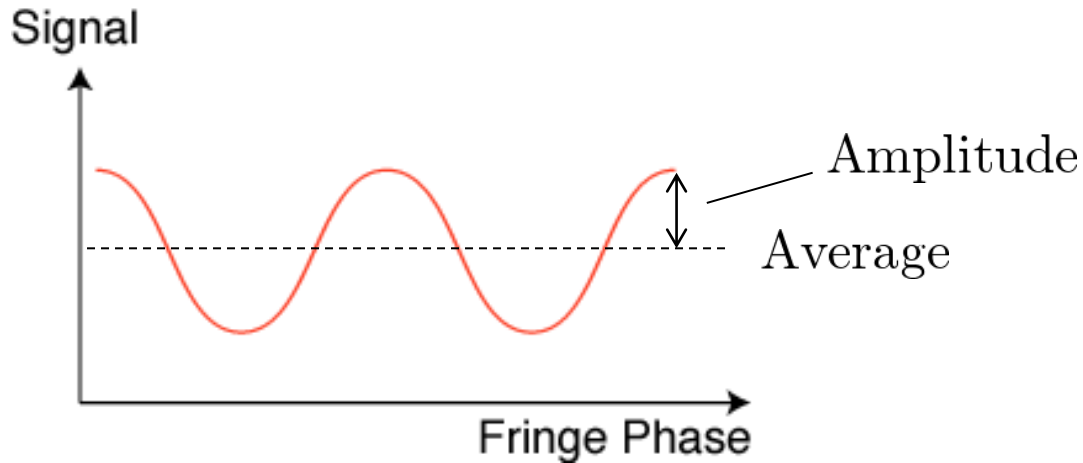


測定原理



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



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

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

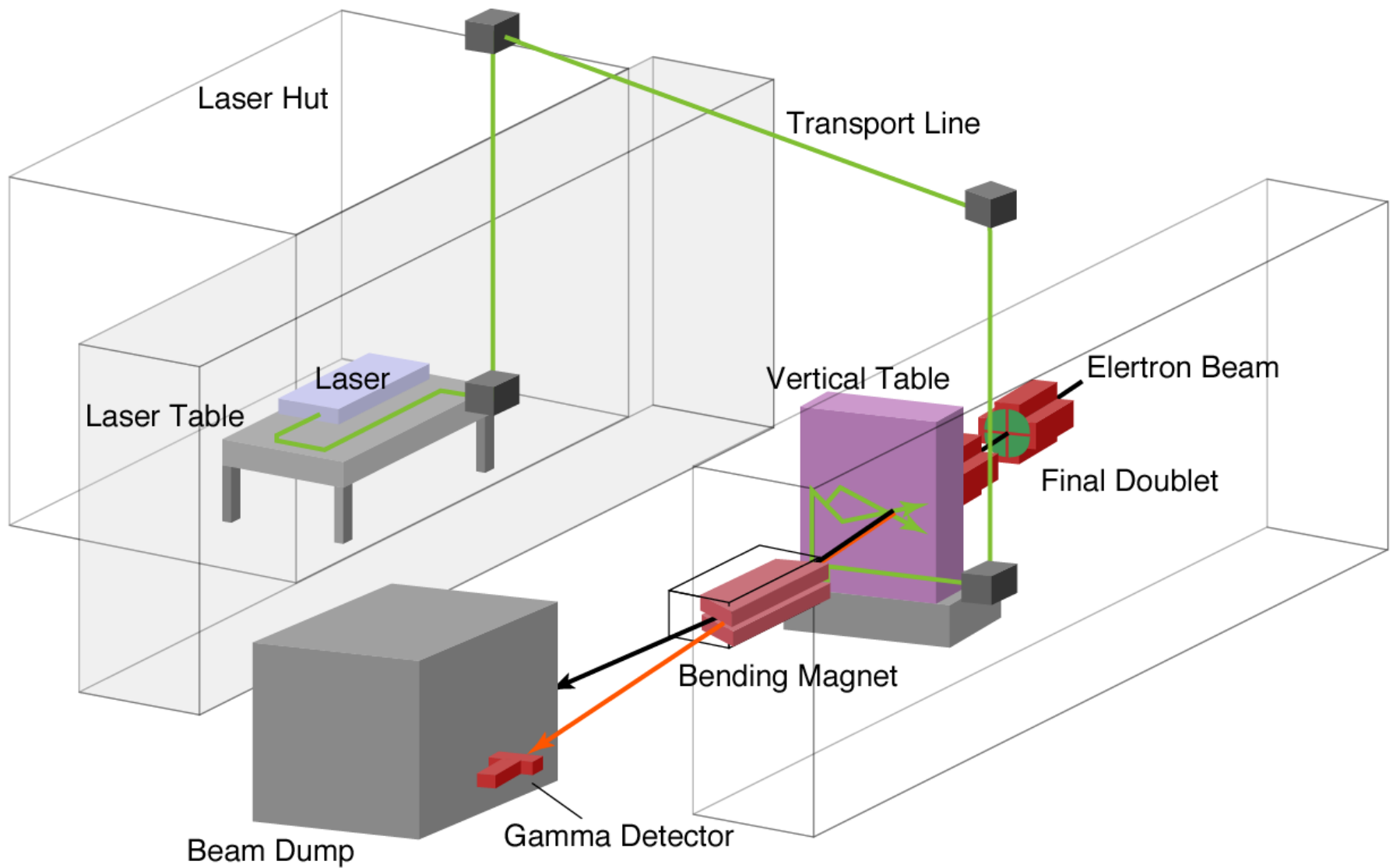
$$\sigma_y = \frac{d}{2\pi} \sqrt{2 \ln \frac{C_0}{M}}$$

σ_y : vertical beam size

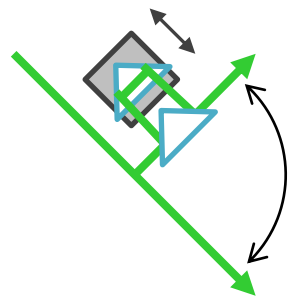
d : interference fringe pitch

C_0 : contrast of interference fringe

セットアップ



光学系



位相差

Optical Delay Line

ピエゾによるサブnmの位置制御

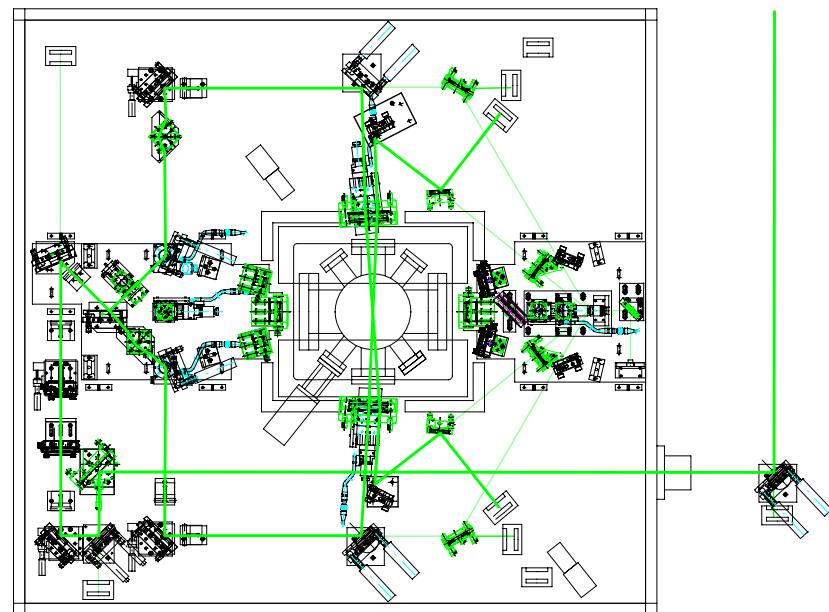
レーザー光に位相差をつけて、干渉縞の位相を走査

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



レーザー交差角と測定感度領域

レーザーの交差角を変える



干渉縞ピッチが変わる

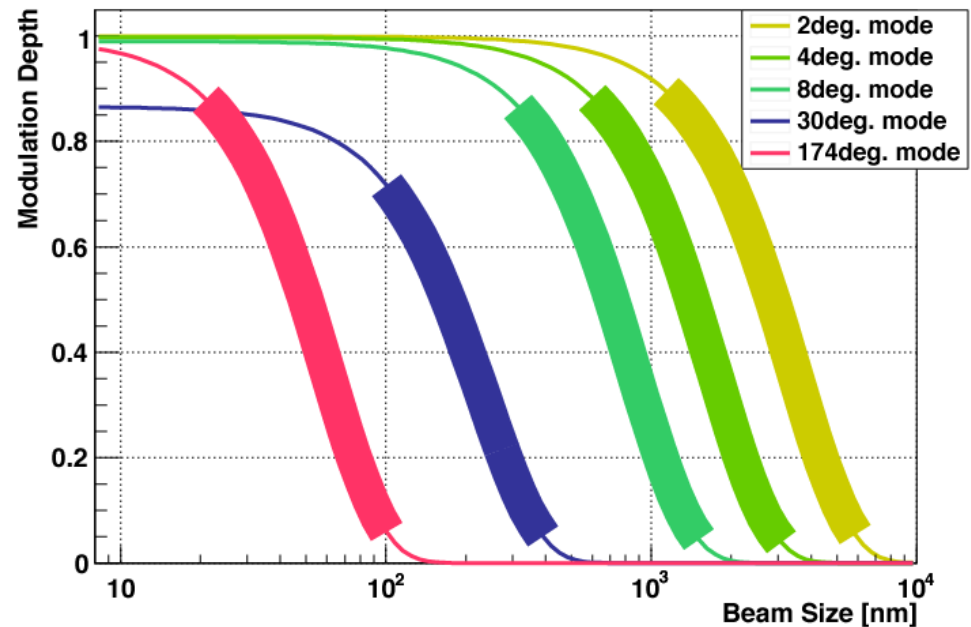


測定感度領域が変わる

交差角 [degree]	ピッチ [nm]
2	1.52×10^4
8	3.81×10^3
30	1030
174	266

最も分解能が出るのは、ビームサイズがピッチの1/5程度の場合

各交差角モードでの σ_y とMの関係

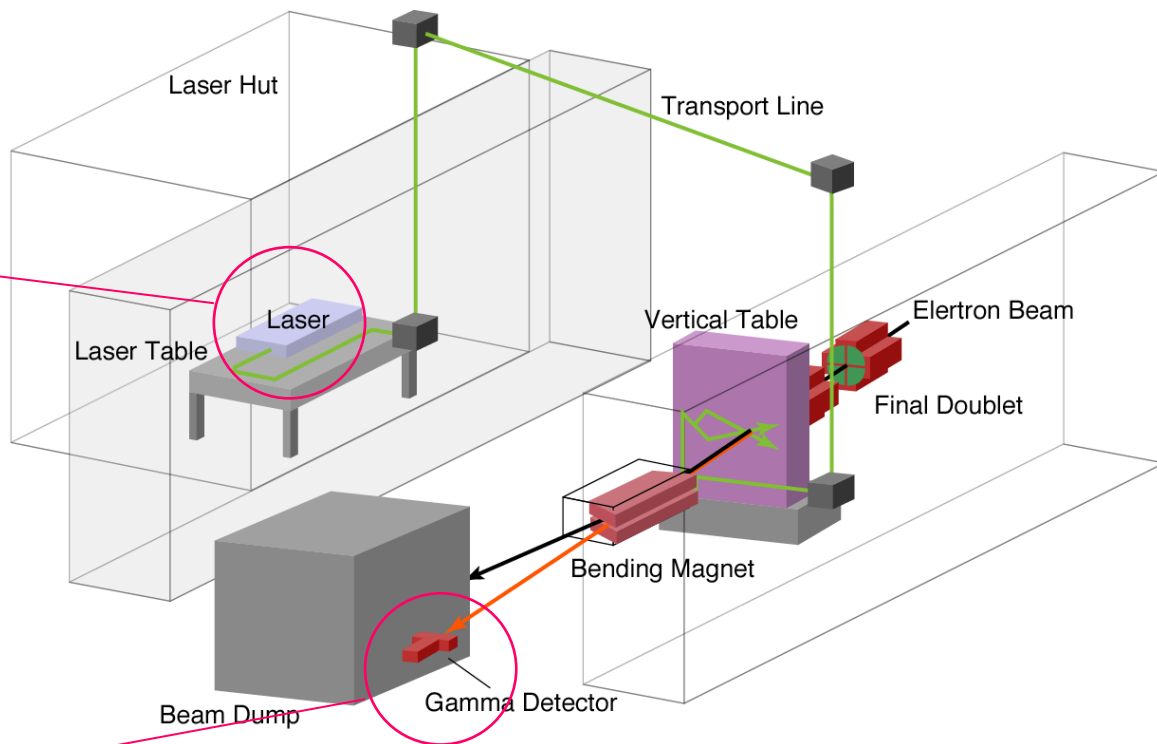
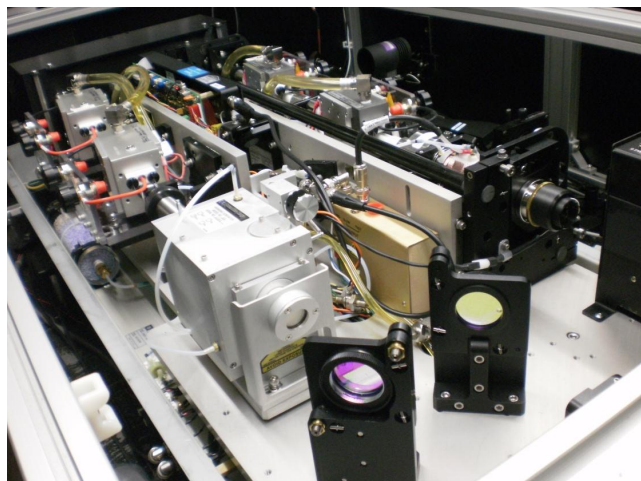


太線: 測定感度領域

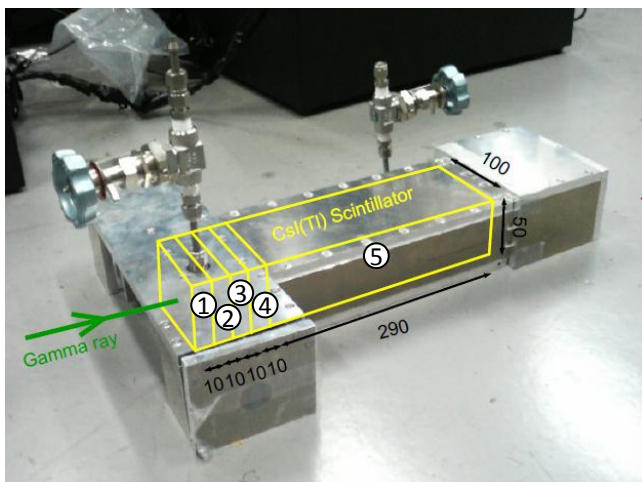
25 nm – 6 μ mまでの広い領域をカバー

レーザー、ガンマ線検出器

大強度QスイッチNd:YAGレーザー



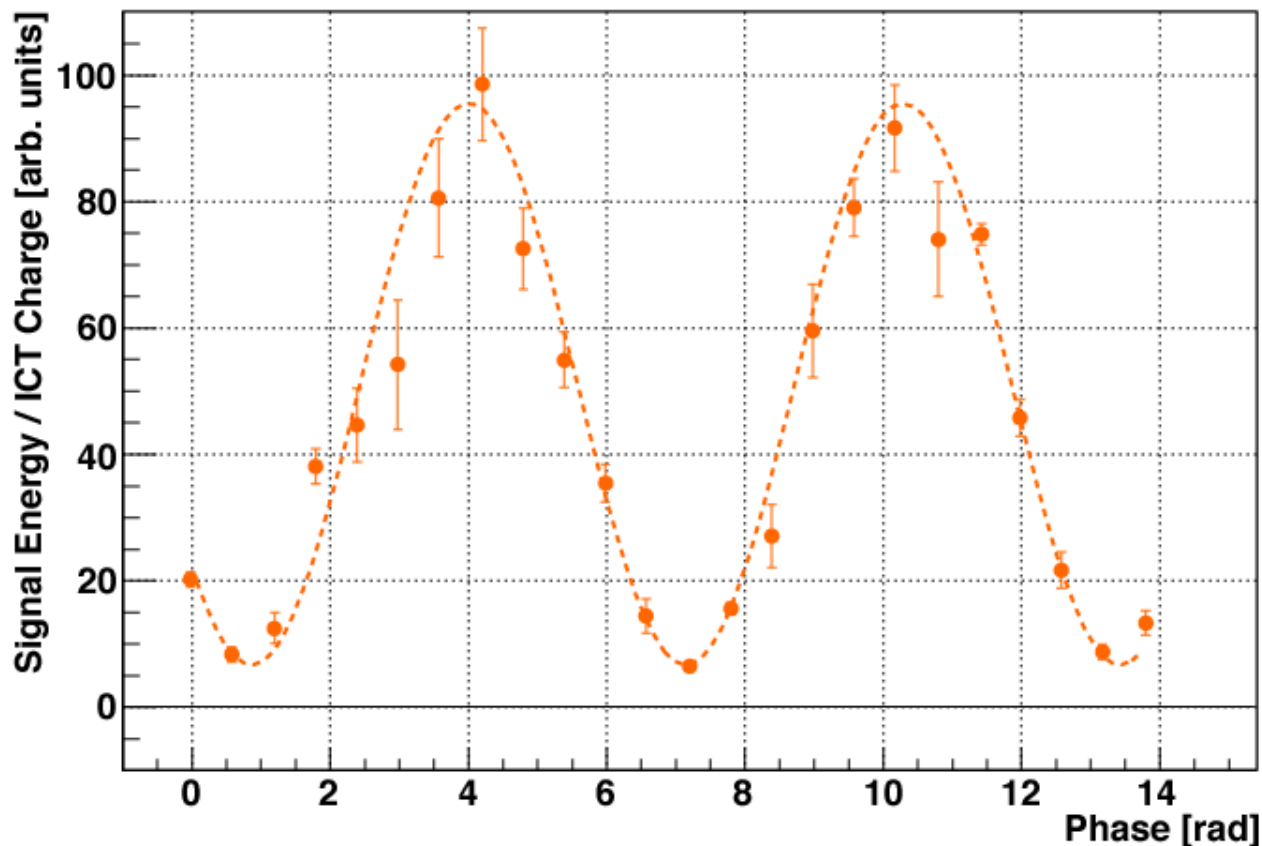
多層CsI(Tl) ガンマ線検出器



詳細はジャクリンヤン (17aSH) より

測定例

交差角7.79度モードでの測定



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

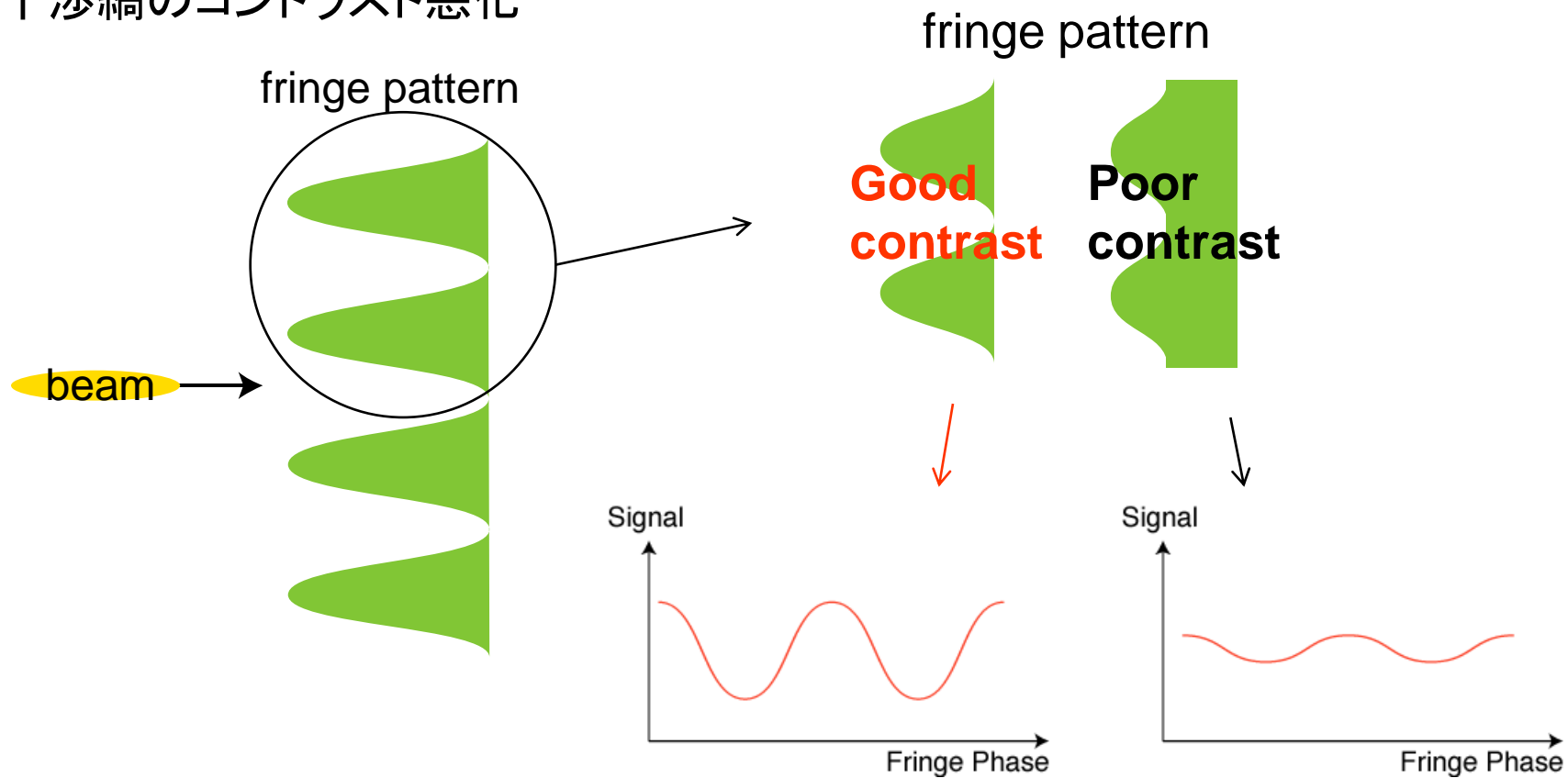
系統誤差

error source	M変化@300 nm [%]	M変化@37 nm [%]*
レーザー偏光・強度	97.8 ± 1.8	99.8 ± 0.1
レーザーアライメント (long.)	> 99.1	> 99.1
レーザーアライメント (trans.)	> 99.6	> 99.6
レーザー時間コヒーレント	> 99.9	> 99.9
相対位置ジッター	~ 100	> 98.0
干渉縞 tilt (long.)	> 99.9	> 99.9
干渉縞 tilt (trans.)	> 98.2	99.3 – 99.6
レーザー球面波	100	> 99.7
beam size growth	100	> 99.7
total	93.8 – 99.6	95.0 – 99.5

* ハードウェアアップグレード後の値

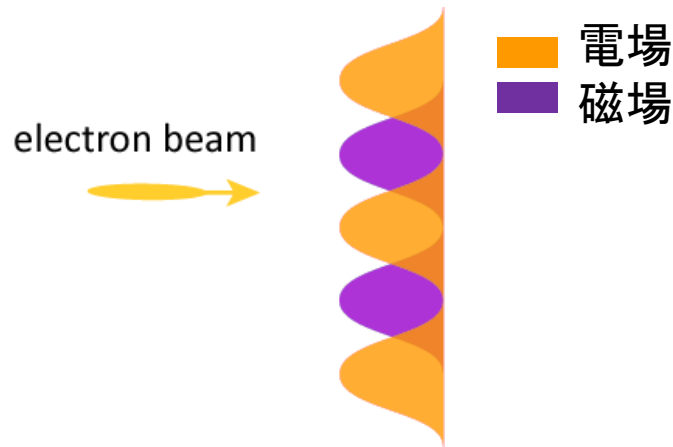
バイアス

ex.) 干渉縞のコントラスト悪化



Modulation depthが小さく評価される → ビームサイズが実際より大きく評価される

コントラスト



新竹モニタにおけるコントラストとは?

非相対論的な電子にとっては
干渉縞コントラスト = 電場強度のコントラスト

しかし、、、

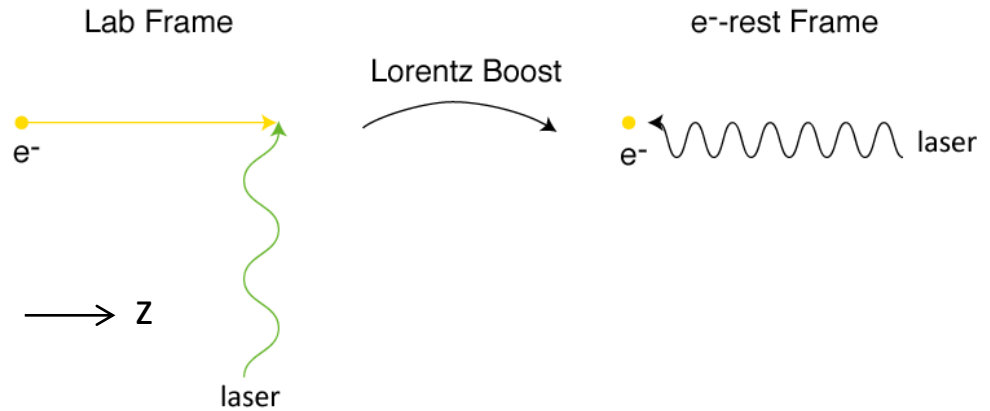
電子ビームは相対論的な速度で飛んでいるため、レーザーの磁場によるLorentz力の影響を無視できない

電子静止系にLorentz boostすれば、そこでの磁場は無視できる
したがって、

干渉縞コントラスト = (電子静止系での) 電場強度のコントラスト

偏光とコントラスト

1. Lorentz boostにより、電場と磁場が干渉する



2. レーザーが楕円偏光だと、干渉がキャンセルされない



$$\begin{pmatrix} E_x^* \\ E_y^* \\ E_z^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma E_x - \gamma \beta B_y \\ \gamma E_y + \gamma \beta B_x \\ E_z \end{pmatrix}$$

3. 実験室系で定義したコントラストとずれが生じる

$$M \text{ 変化 } \quad 97.8 \pm 12.8 \tan \theta \pm 0.1 \%$$

大強度レーザー用偏光板による改良が必要

今後重要となるバイアス要因

例: レーザー球面波

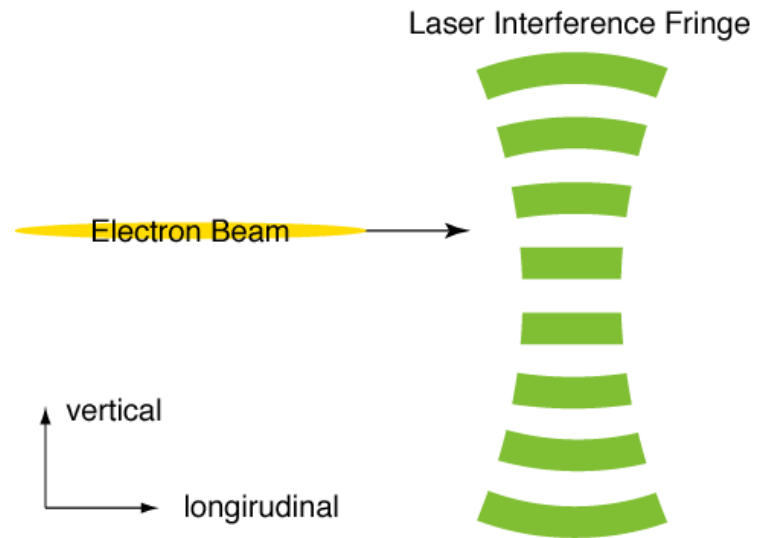
レーザーは基本ガウシアンモード

→ 波面は球面

焦点から離れると球面の曲率がきつくなり、電子ビームは「歪んだ」干渉縞を感じる

ビームサイズが小さくなるにつれ、影響大

焦点の位置を100 μm 精度でアライメントするステージをインストール



Status & Plan

- 地震からの復旧中
- Modulation depthの小さい領域の測定の改良が必要
- ハードウェアアップグレード
 - レーザー安定化
 - コリメータ追加によるBG radiationのカット
 - etc..
- 10月からのRunで地震前の状態を取り戻し、 $\sigma_y < 100 \text{ nm}$ を目指す
- 詳細はジャクリンヤン (17aSH) より

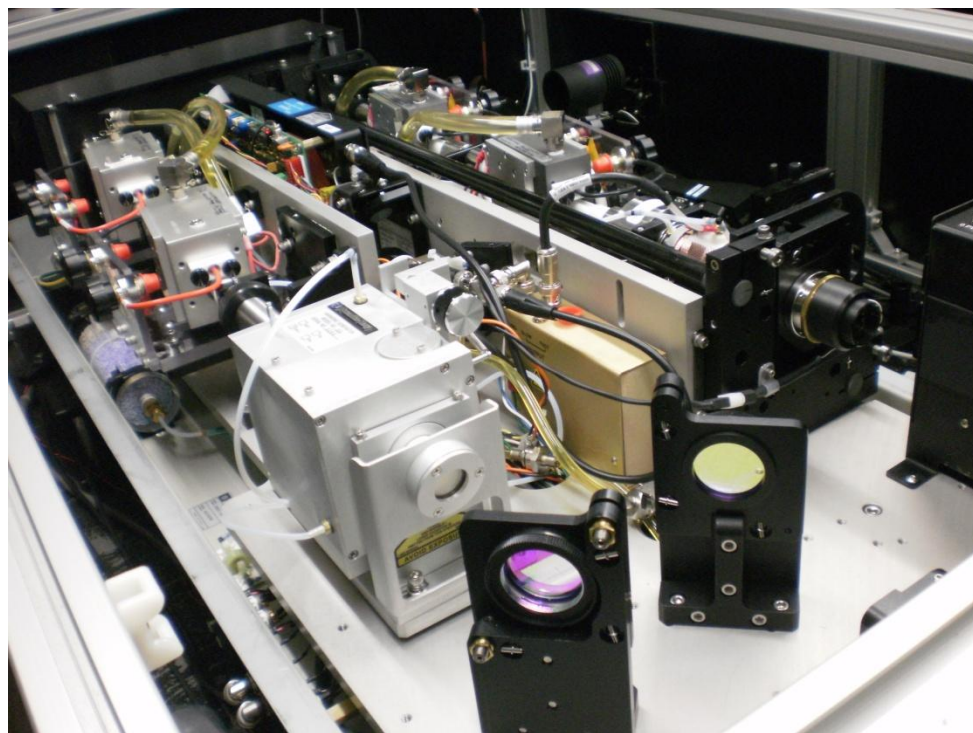
謝辞

- 研究に当たってお世話になりました、
- 駒宮幸男教授、神谷好郎助教
- KEKの田内先生、照沼先生、奥木先生、黒田先生、久保先生、荒木先生、本田さん
- 駒宮研究室の大録さん、山中さん、ジャクリンヤンさん、園田さん、市川さん、南君
- 同研究室OBの末原さん、久松さん、大川さん、川崎さん、飯山君
- に感謝いたします。

back up

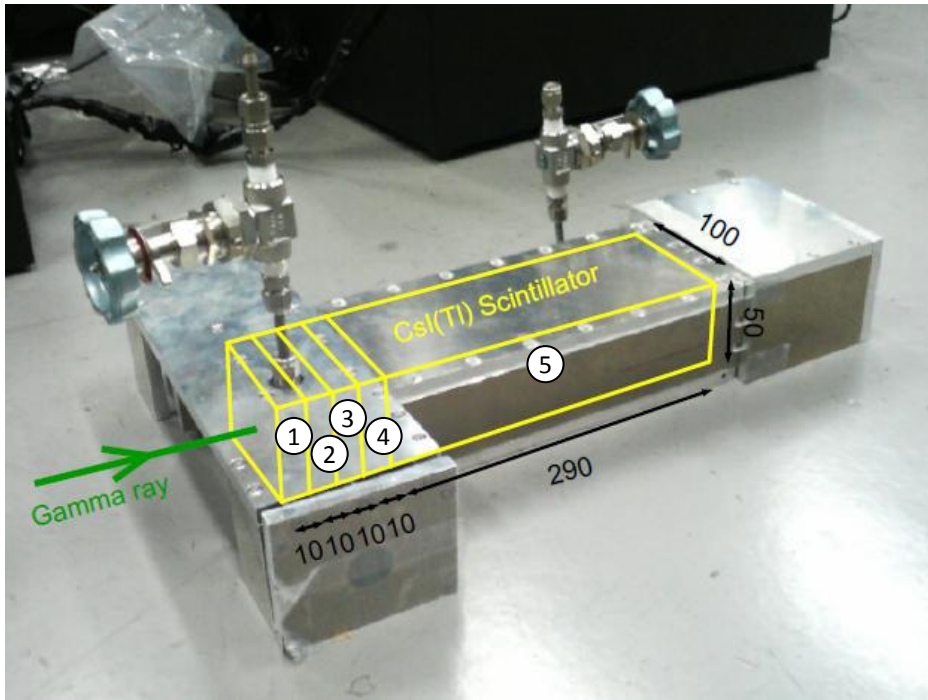
FFTBからの変更点

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

ガンマ線検出器



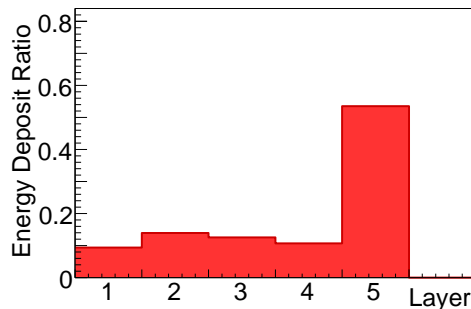
困難: 高エネルギーBG

- シグナルエネルギー
~15 MeV/photon (av.)
- BGエネルギー
~50 MeV/photon (av.)

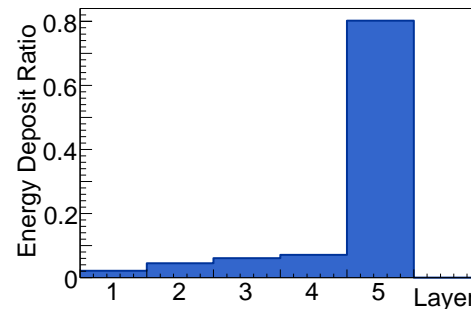
解決策

- 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

シグナルシャワー



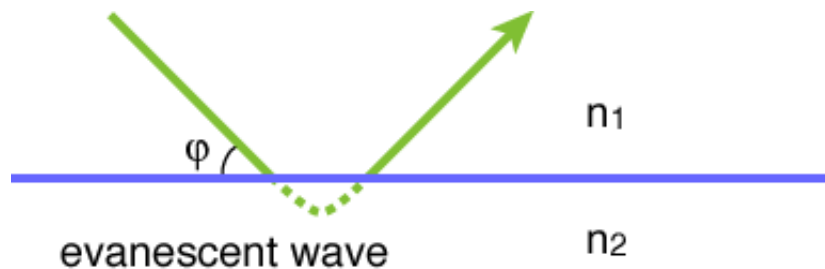
BGシャワー



1. 高いシグナル・BG分離能
2. スキャン時間を半分に短縮

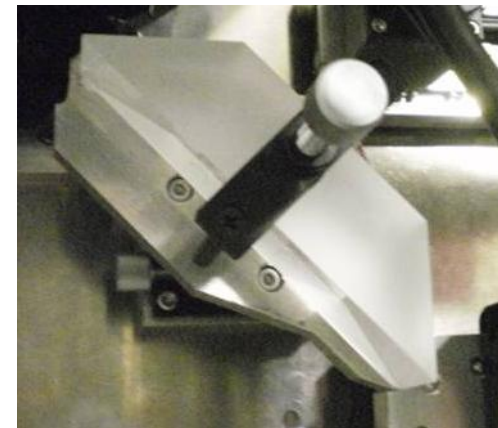
Goos-Hänchen shift

電磁波の全反射においてs偏光とp偏光の位相差が生じる現象
全反射において反射面に"潜り込む"エバネッセント波によって起きる



ATFにおける新竹モニタでは、ダブリズムという光学素子でレーザーを全反射させている

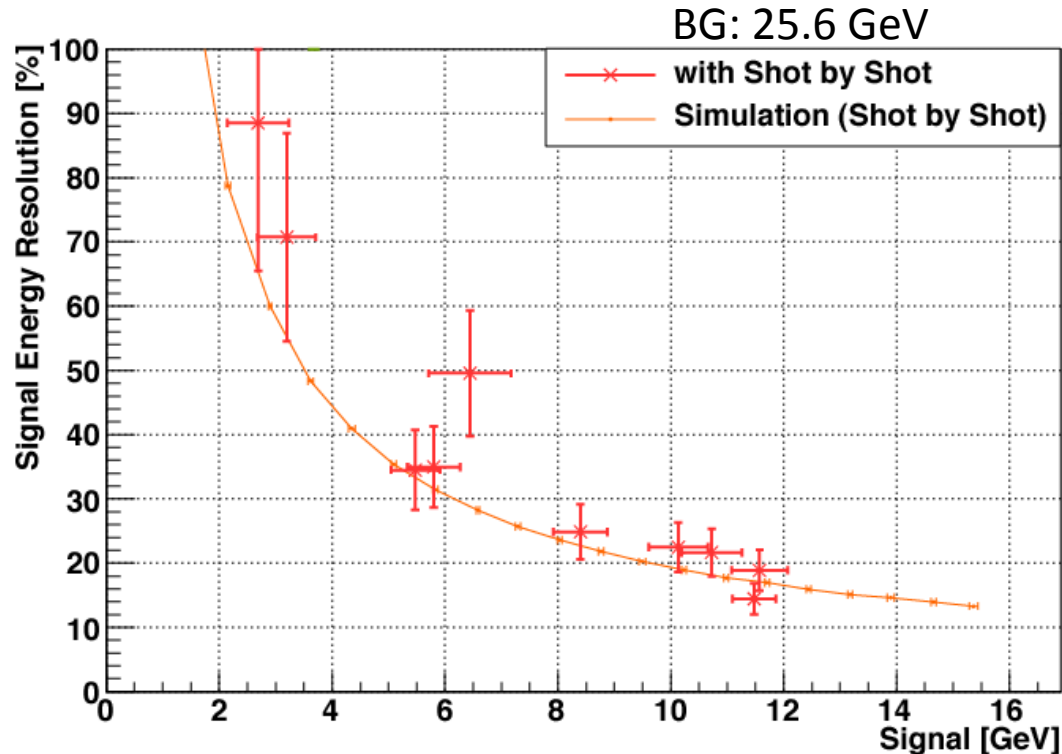
ここでGoos-Hänchen shiftが起きる



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

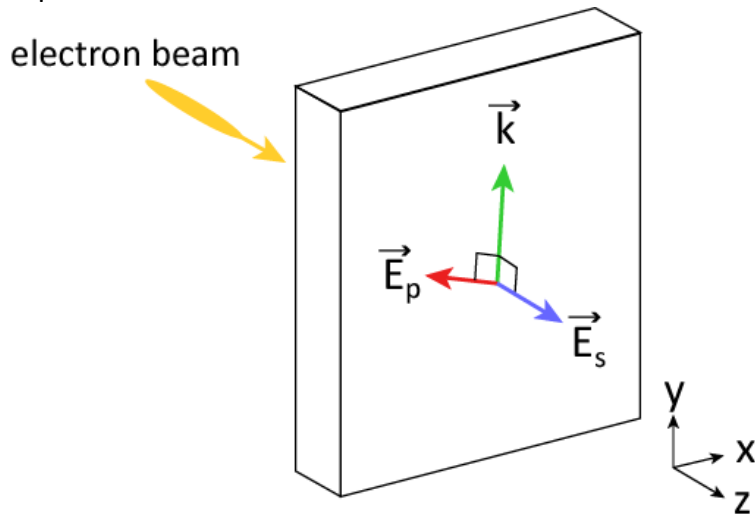


シグナルの小さいデータでのstudy

偏光とコントラスト

ATF2の新竹モニタでは、sの直線偏光を採用

E_s : z軸に平行
 E_p : z軸に垂直



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*

* 干渉項は本来打ち消し合って消えるが、
 Goos-Hänchen shiftにより消えない

e-rest frame

lab frame

$$\begin{pmatrix} E_x^* \\ E_y^* \\ E_z^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma E_p \sin \frac{\theta}{2} - \gamma \beta B_s \cos \frac{\theta}{2} \\ \gamma E_p \cos \frac{\theta}{2} + \gamma \beta B_s \sin \frac{\theta}{2} \\ E_z \end{pmatrix}$$

γ, β : boost factor

偏光状態のミスアライメントによるコントラスト変化

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

大強度レーザー用偏光板による改良が必要