

# X線自由電子レーザー施設SACLAでの 真空回折の探索

清野 結大

東京大学理学系研究科

2016/03/02

# 高強度電磁場の物理(strong QED)

量子場の理論は、標準理論を始め自然を記述するのに大成功  
しかし、高強度場下では十分な検証はなされていない

**strong QED**：高強度電磁場下の物理(を記述する理論)

- 荷電粒子の相対論的運動
  - ・ Unruh 効果
- 仮想粒子が分極・磁化することによる、真空の屈折率変化
  - ・ **真空回折** ← このトーク
  - ・ 真空複屈折
- 仮想粒子の実粒子化
  - ・ schwinger limit

high powerレーザーの高強度電磁場によって  
ようやく検証可能になってきた

# 真空の屈折率勾配による真空回折

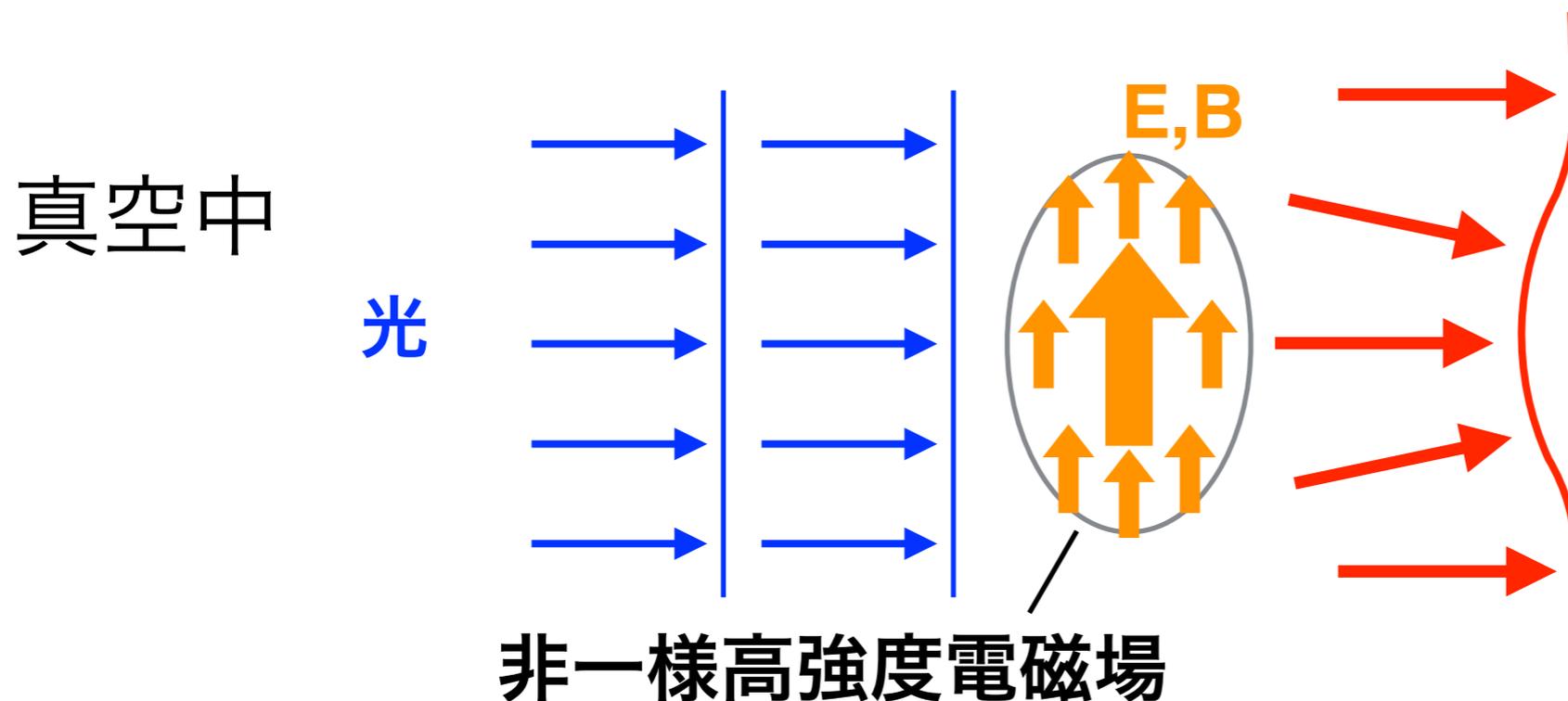
高強度電磁場によって真空は屈折率が1からずれる(仮想粒子の分極・磁化)

ex) 磁場があるとき  $n = 1 + 9 \times 10^{-24} B^2$  ← とても小さい

・ 高強度電磁場が非一様するとき

→ 真空の屈折率に空間的な勾配が発生!!

→ 屈折率勾配のある真空に光を入射すると回折がおきる → **真空回折**



真空回折の観測のカギはコレをどう作るか!

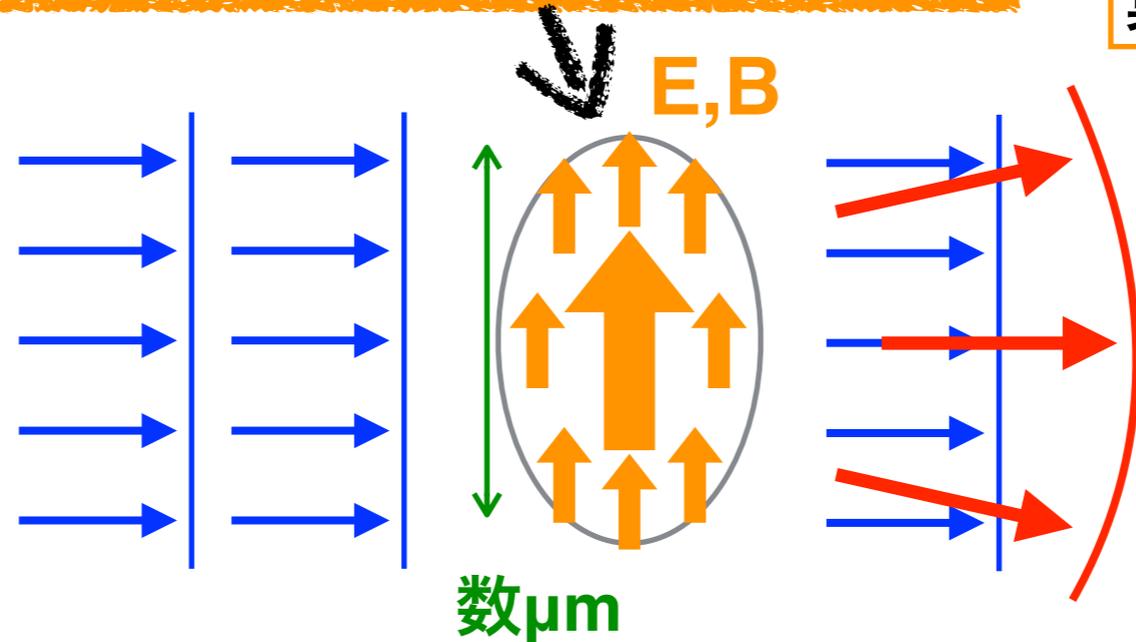
→ high power レーザー

# high powerレーザーによる真空回折

✓  $\mu\text{m}$ サイズに集光したhigh powerレーザーで  
非一様な高強度電磁場を作り出す

high powerレーザー  
パルスエネルギー： $W$   
集光点でのビームサイズ： $w_0$

入射光(平面波)  
光子数： $N$   
光子フラックス： $J$   
光子エネルギー： $E$



もとの光  
+  
回折した光  
衝突点からの角度： $\theta$

※ 高強度電磁場を通過した後の光を

もとの光 + 回折した光 と分けて考える

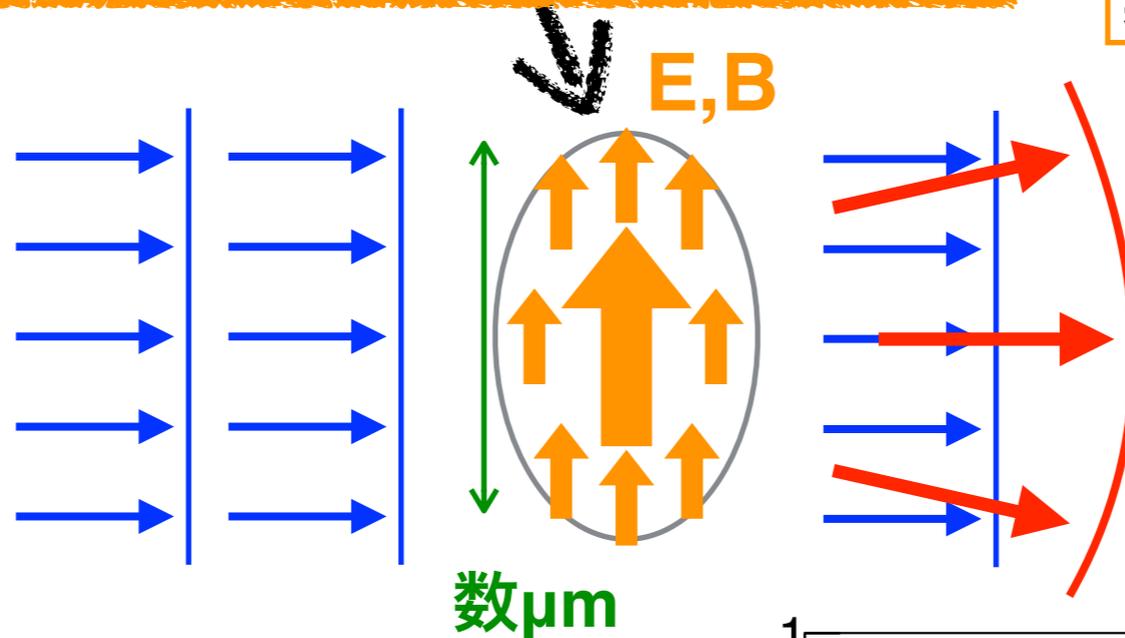
回折しなかった光  
実際はこれがほとんど

# high powerレーザーによる真空回折

✓  $\mu\text{m}$ サイズに集光したhigh powerレーザーで  
非一様な高強度電磁場を作り出す

high powerレーザー  
パルスエネルギー： $W$   
集光点でのビームサイズ： $w_0$

入射光(平面波)  
光子数： $N$   
光子フラックス： $J$   
光子エネルギー： $E$

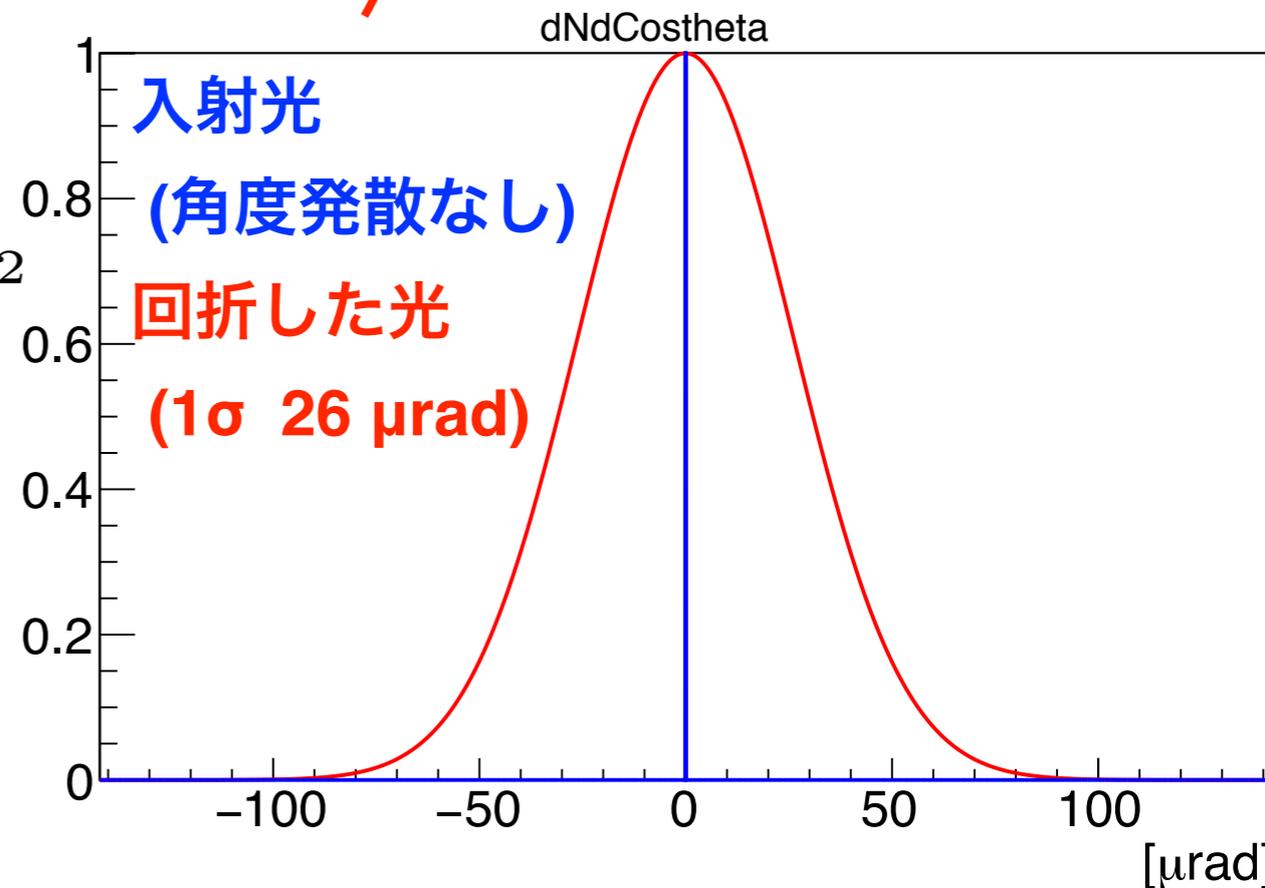


もとの光  
+  
回折した光  
衝突点からの角度： $\theta$

回折した光の衝突点での角度分布

$$\frac{dN_{\text{回折}}}{d \cos \theta} \sim E^3 J \cdot W^2 \frac{1}{w_0} e^{-\frac{1}{4} (w_0 E \theta)^2}$$

入射光 : 10 keV  
レーザー : 1  $\mu\text{m}$

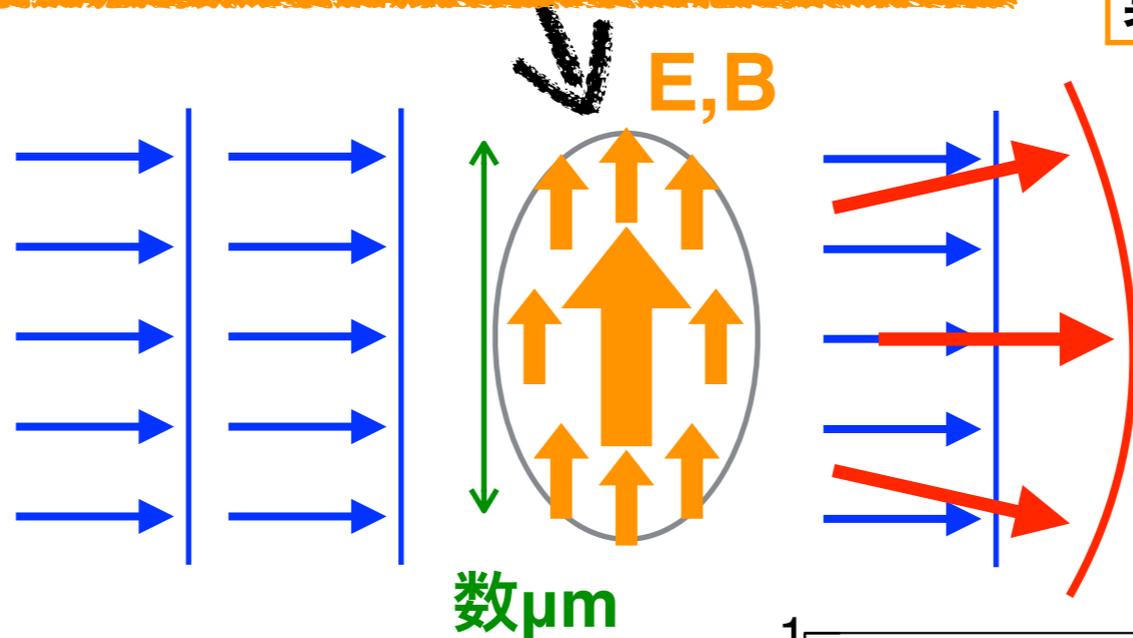


# high powerレーザーによる真空回折

✓  $\mu\text{m}$ サイズに集光したhigh powerレーザーで  
非一様な高強度電磁場を作り出す

high powerレーザー  
パルスエネルギー： $W$   
集光点でのビームサイズ： $w_0$

入射光(平面波)  
光子数： $N$   
光子フラックス： $J$   
光子エネルギー： $E$

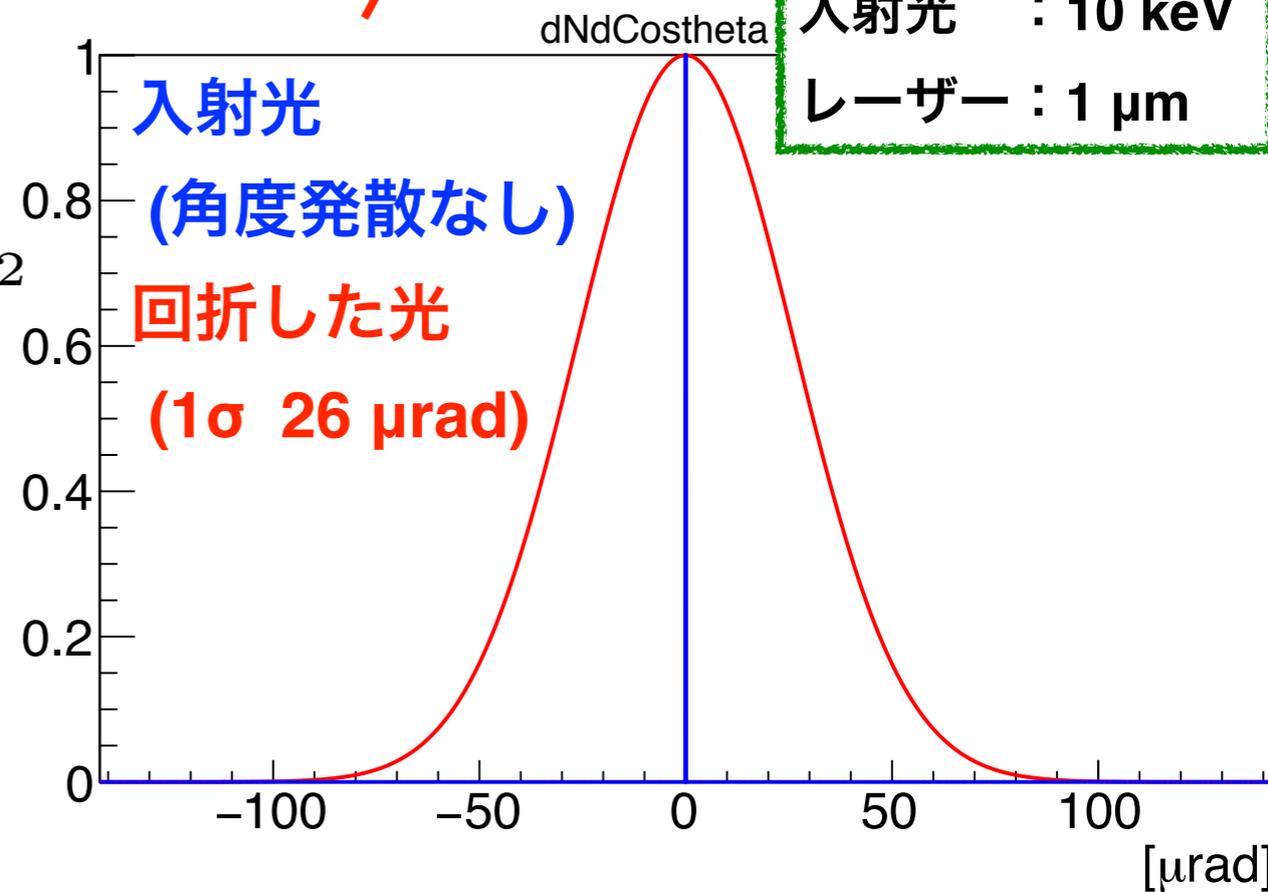


もとの光  
+  
回折した光  
衝突点からの角度： $\theta$

回折した光の衝突点での角度分布

$$\frac{dN_{\text{回折}}}{d \cos \theta} \sim \frac{E^3 J \cdot W^2}{w_0} e^{-\frac{1}{4} (w_0 E \theta)^2}$$

入射光は高エネルギー&高フラックスが良い  
→ X線 & コヒーレント集光

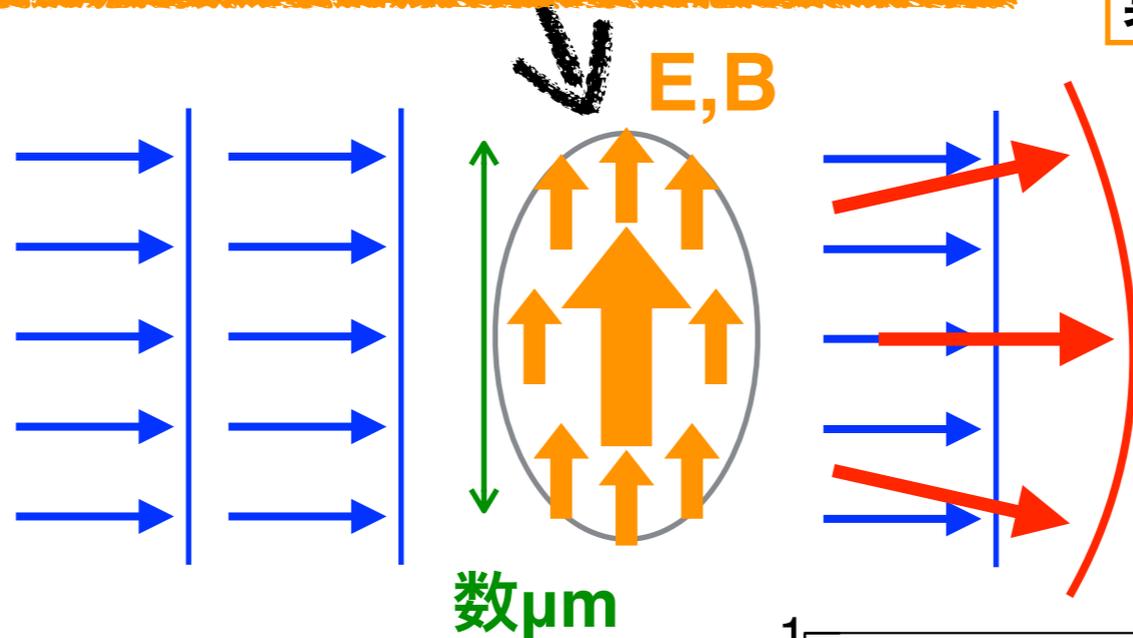


# high powerレーザーによる真空回折

✓  $\mu\text{m}$ サイズに集光したhigh powerレーザーで  
非一様な高強度電磁場を作り出す

high powerレーザー  
パルスエネルギー： $W$   
集光点でのビームサイズ： $w_0$

入射光(平面波)  
光子数： $N$   
光子フラックス： $J$   
光子エネルギー： $E$

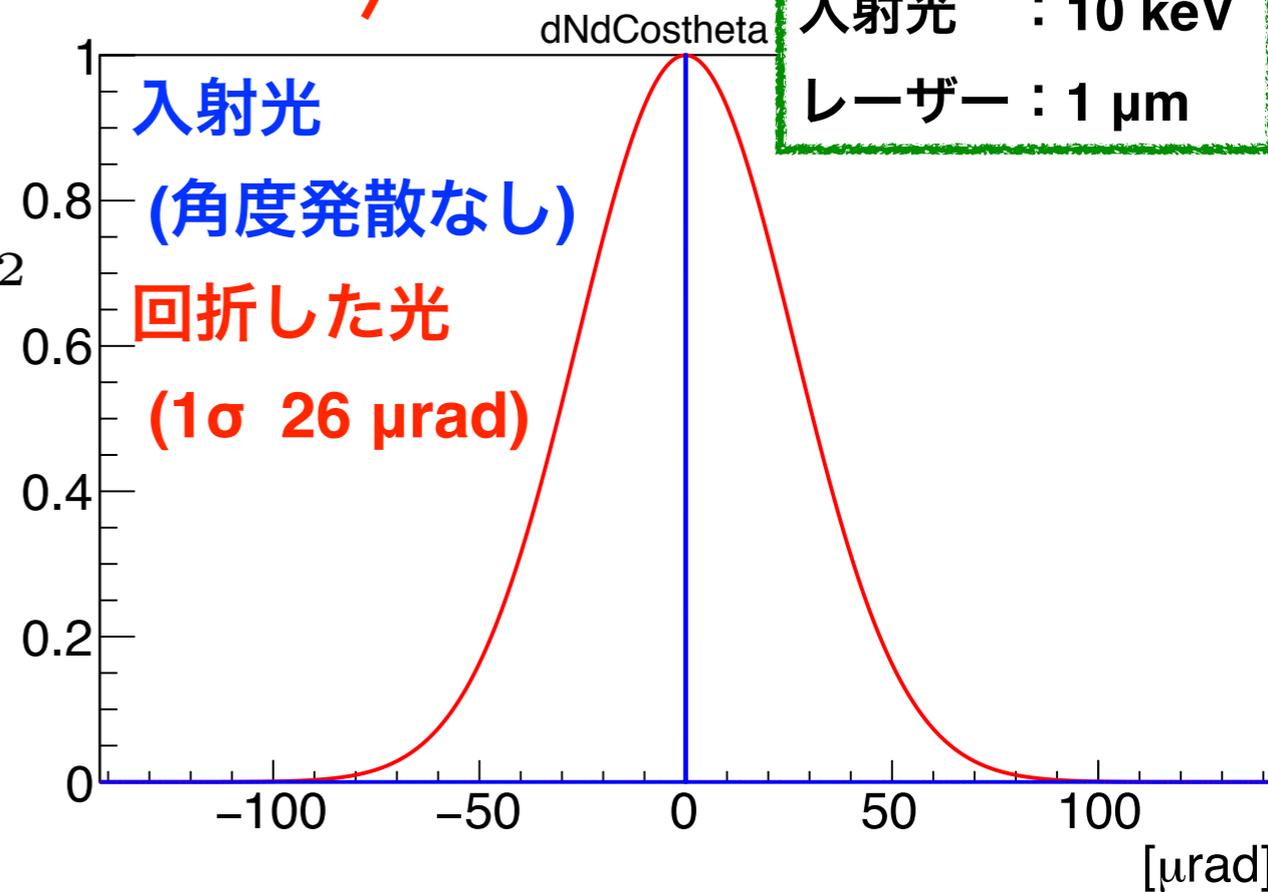


もとの光  
+  
回折した光  
衝突点からの角度： $\theta$

回折した光の衝突点での角度分布

$$\frac{dN_{\text{回折}}}{d \cos \theta} \sim E^3 J \cdot W^2 \frac{1}{w_0} e^{-\frac{1}{4} \left( \frac{w_0 E \theta}{\dots} \right)^2}$$

レーザーは集光するほど  
回折光が広がる



# X線自由電子レーザー(XFEL)施設SACLA



回折させる光は、SACLAの世界最高強度の**XFELビーム**(X線)

## SACLAのXFELビーム性能

- 光子数 :  $5 \times 10^{11}$  photons/pulse @ 10 keV
- パルス幅 :  $< 10$  fs
- ビームサイズ :  $\sim 200 \mu\text{m}$  → コヒーレント集光  $\sim 2 \mu\text{m}$
- 角度発散 :  $\sim 1 \mu\text{rad}$  → コヒーレント集光時  $\sim 50 \mu\text{rad}$

# high powerレーザー

- SACLAには、XFELビームに同期した近赤外フェムト秒レーザーシステムがあり、これで高強度場を作り出す
- 現在500 TWのレーザーをインストール中(1年以内に利用可能)
- 500 TWのレーザーを1  $\mu\text{m}$ に集光出来れば、  
 **$1.3 \times 10^6$  [T] &  $3.9 \times 10^{12}$  [V/cm]**の高強度電磁場を作り出すことが出来る  
→屈折率  **$n = 1 + 5 \times 10^{-11}$**

## レーザー性能

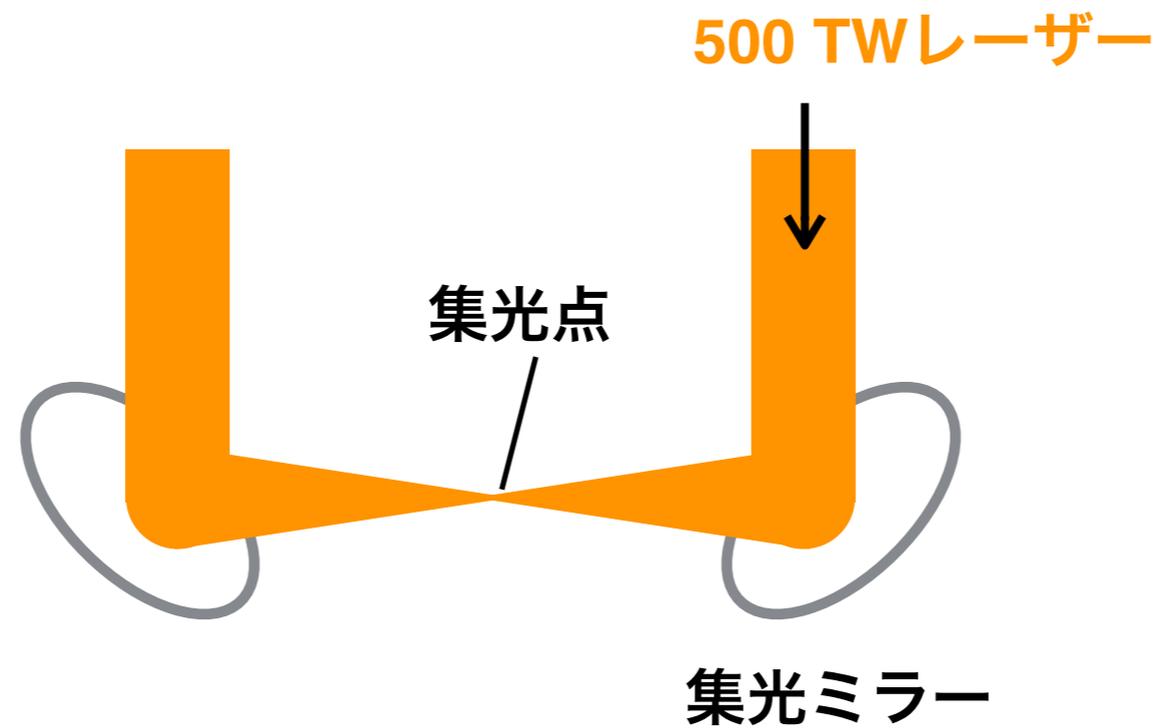
- 波長 : 800 nm
- パルスエネルギー : 12.5 J
- パルス幅 : 25 fs
- 繰り返しレート : 1 Hz

現在インストール中の500 TWレーザー



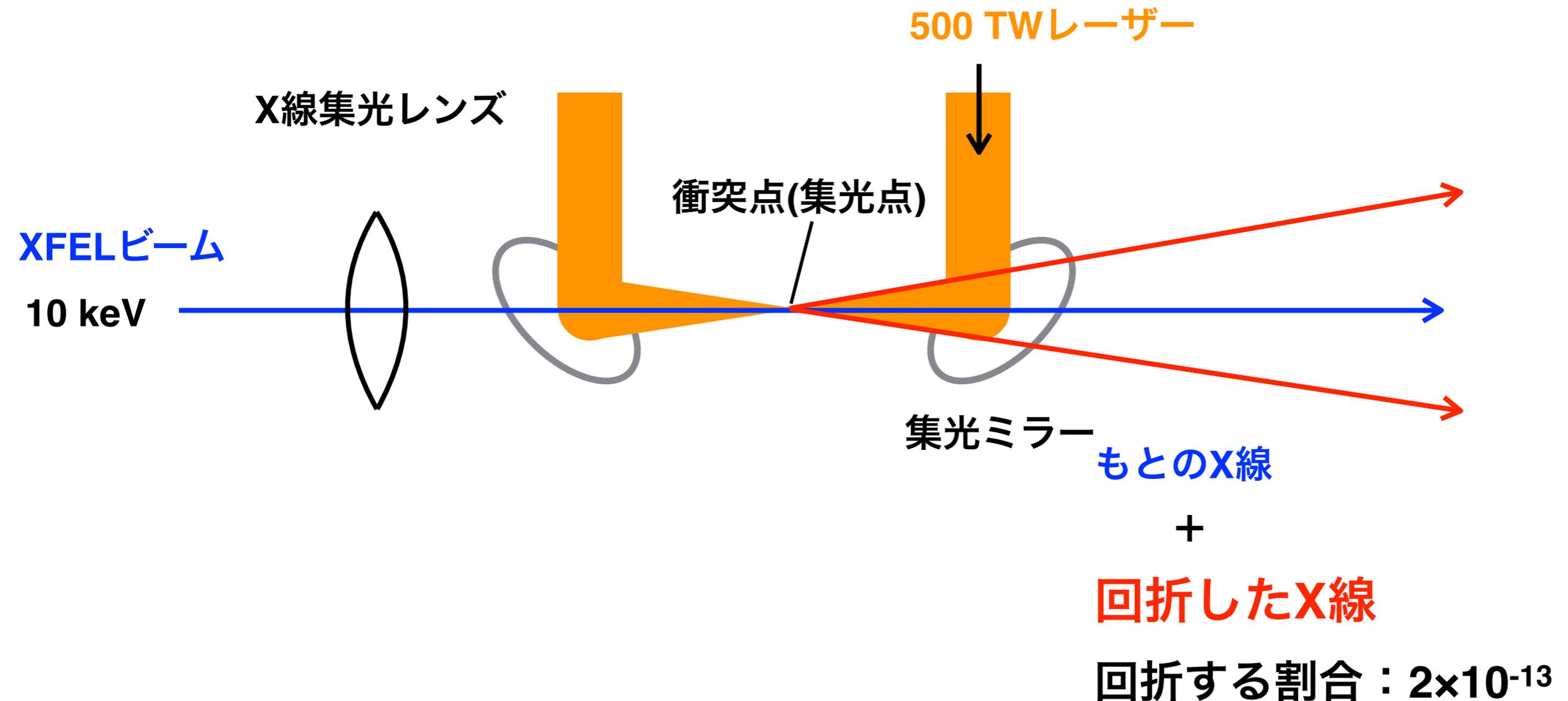
# 実験セットアップ

① 500 TWレーザーを1  $\mu\text{m}$ に集光する



# 実験セットアップ

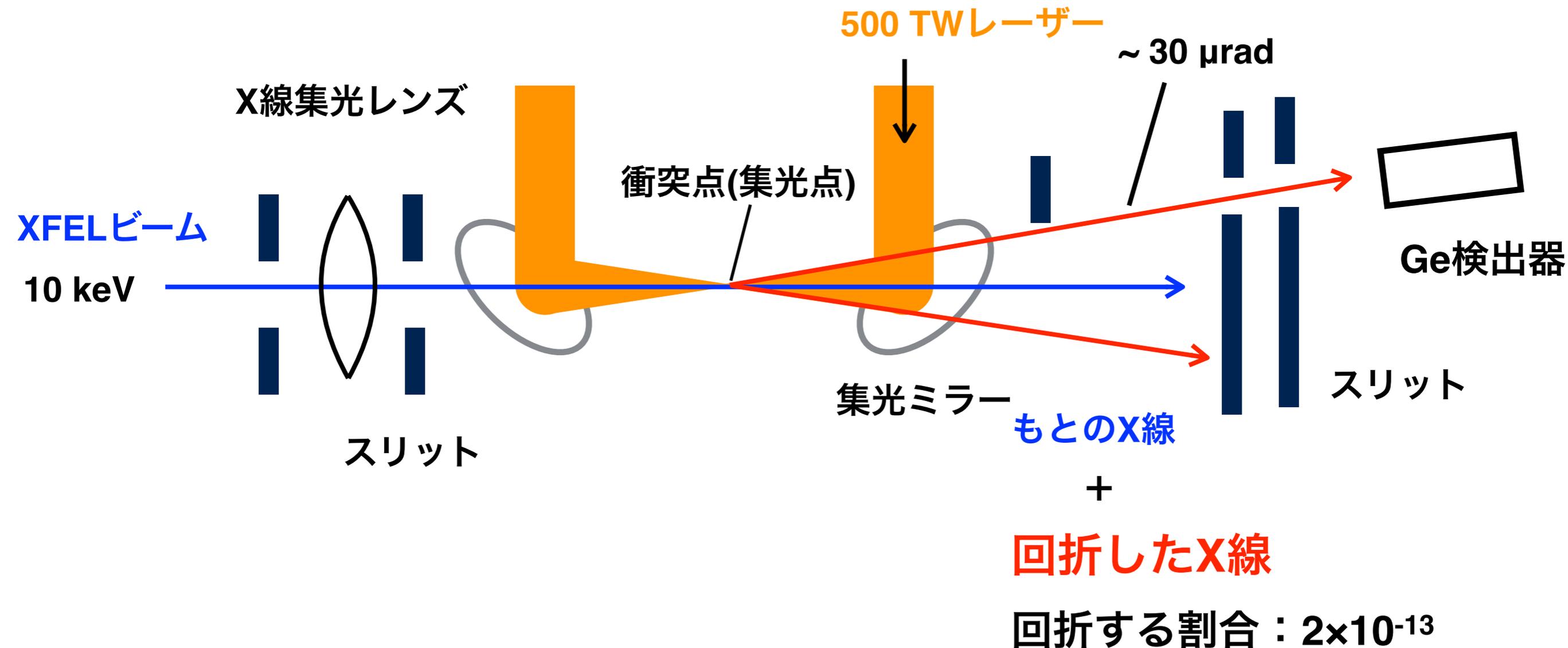
- ① **500 TWレーザー**を1  $\mu\text{m}$ に集光する
- ② **集光したXFELのパルス**と**500 TWレーザーのパルス**を集光点で衝突させる



# 実験セットアップ

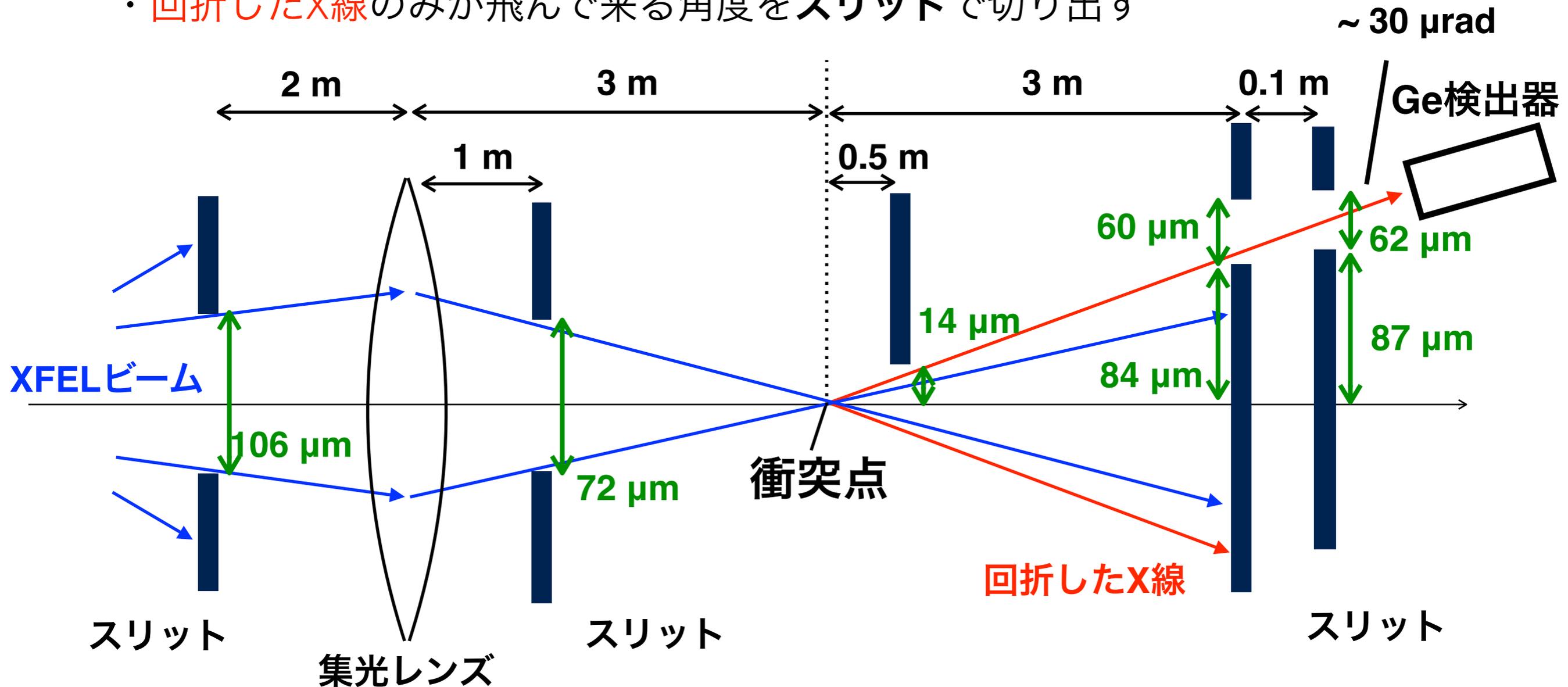
- ① **500 TWレーザー**を1  $\mu\text{m}$ に集光する
- ② **集光したXFELのパルス**と**500 TWレーザーのパルス**を集光点で衝突させる
- ③ 30  $\mu\text{rad}$ 程度広がってきた**回折光**を検出する

その際、スリットで検出器に入ってくる**XFELビーム**をカットする



# スリットとシグナル領域

- XFELビームの角度発散を抑えるために、スリットを置く
- 回折したX線のみが飛んで来る角度をスリットで切り出す



XFELビームの通過する割合

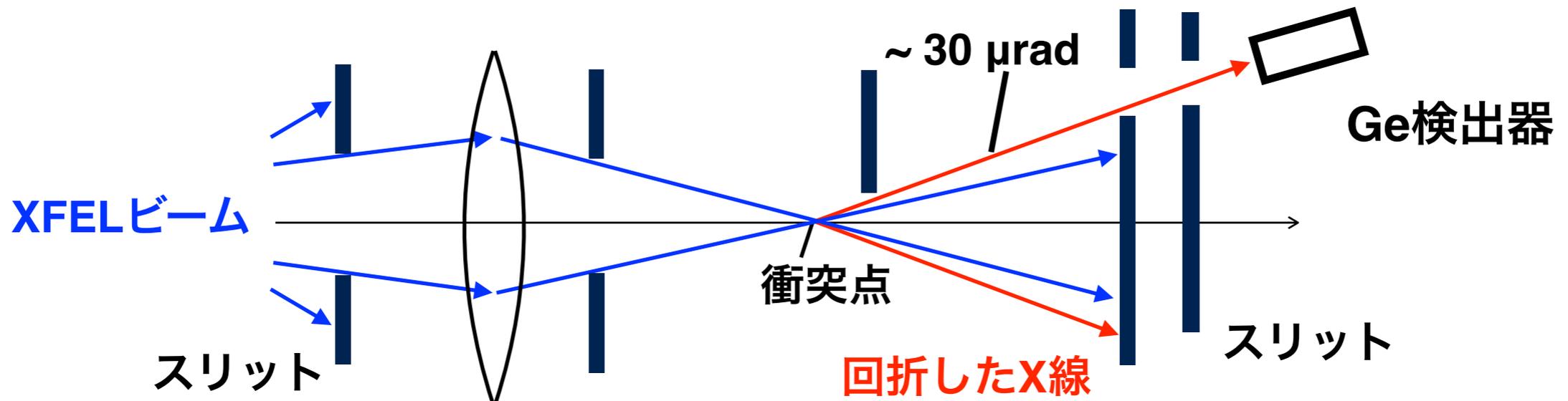
0.30

回折したX線の通過する割合

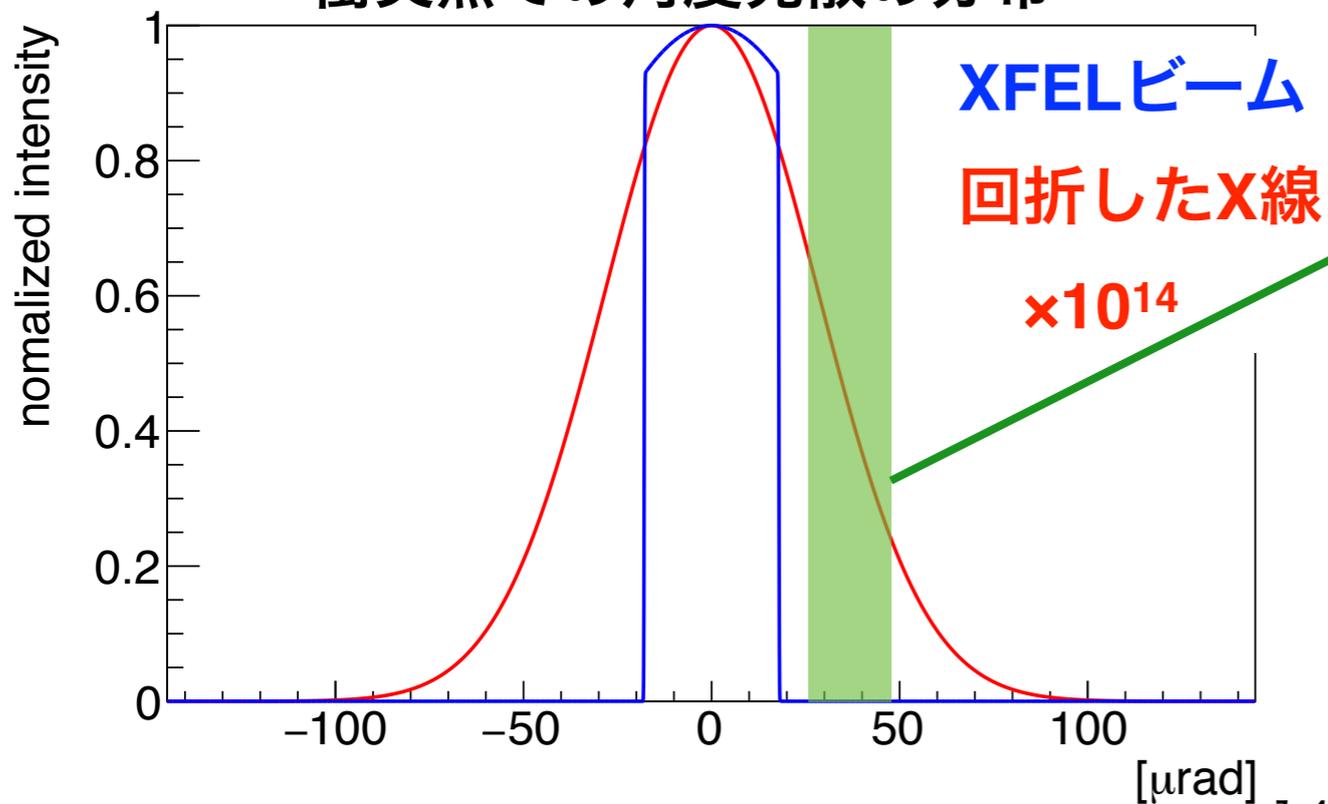
0.11

# スリットとシグナル領域

- XFELビームの角度発散を抑えるために、スリットを置く
- 回折したX線のみが飛んで来る角度をスリットで切り出す



衝突点での角度発散の分布



スリットによる統計量の減少

- XFELビームが通過する割合 : 0.30
- 回折光が通過する割合 : 0.11

# 真空回折の感度

## 各パラメータ

### 近赤外レーザー

THALES 500 TW

ビームウエスト : 1  $\mu\text{m}$

繰り返しレート : 1 Hz

パルスエネルギー : 12.5 J

### XFELビーム

ビームウエスト : 2  $\mu\text{m}$

光子エネルギー : 10 keV

光子数 :  $5 \times 10^{11}$  photon/pulse

### 検出

Ge検出器 : 検出効率 0.85

### BG抑制

XFELビームに対して  $10^{-19}$  (手計算)

strong QED理論値では

1 pulse あたり  **$2 \times 10^{-3}$  photon**

1.5日の計測で**26 photon**

strong QEDで予言される

真空回折を **$5\sigma$** で初観測

→ 高強度場下の新しい理論である

strong QEDの検証

# 今後の予定

## ・6月(SACLAビームタイム)

既に利用可能な2.5 TWレーザーでの予備実験

現在実験デザイン中

### 課題

- レーザーの1  $\mu\text{m}$ 集光(現在10  $\mu\text{m}$ )

- XFELビームとレーザーを衝突させる

時間(fs)&空間( $\mu\text{m}$ )のアライメント技術の確立 **レーザー性能**

- BGの洗い出し

## ・1年以内

500 TWレーザーを用いて本実験

真空回折の初観測

	Hidra 2.5 TW	THALES 500 TW
波長	800 nm	800 nm
パルスエネルギー	0.1 J	12.5 J
パルス幅	40 fs	25 fs
繰り返しレート	10 Hz	1 Hz

# まとめ

- 量子場の理論の検証は、高強度場下では十分に検証されていないが high powerレーザーの高強度電磁場によって検証可能になってきた
- 高強度電磁場は真空中に屈折率勾配を引きおこし、その真空中を通過した光は真空回折を起こす
- 高強度電磁場を500 TWレーザーで生成し、SACLAのXFELビームを入射させて真空回折を観測する
- 500 TWレーザー1.5日の計測で**26** photonのシグナルが得られ、 $5\sigma$ の感度でstrong QEDの予言する真空回折を初観測する  
→高強度場の新しい理論であるstrong QEDを検証
- 6月のSACLAビームタイムに向け、2.5 TWレーザーで実験デザイン中