

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

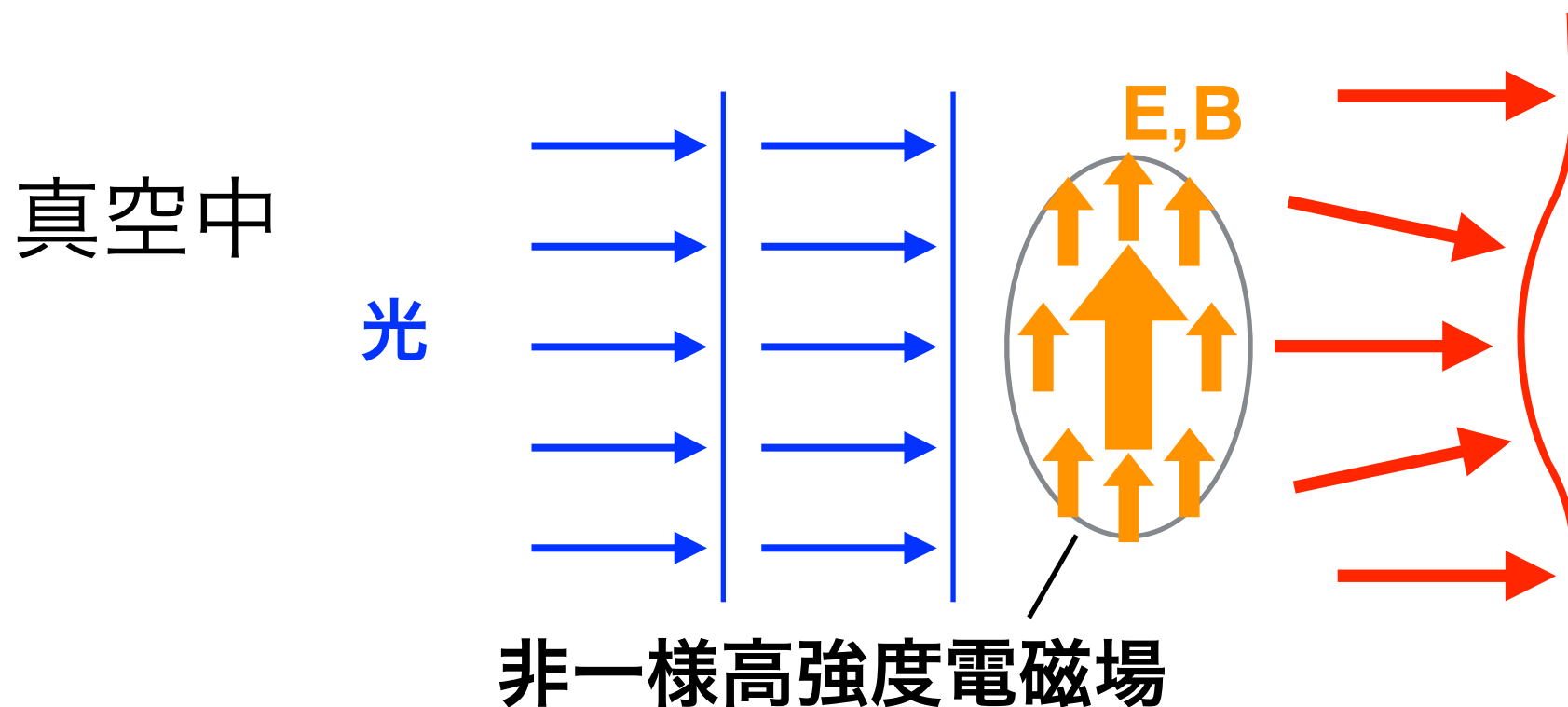
高強度電磁場によって真空は屈折率が1からずれる(仮想粒子の分極・磁化)

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**



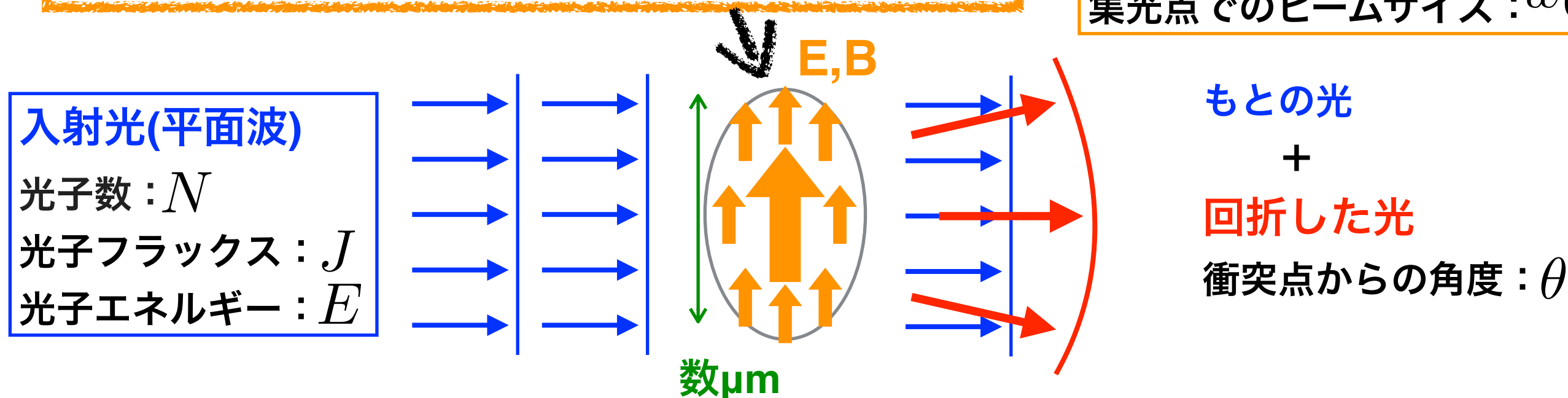
真空回折の観測のカギはコレをどう作るか！

→ high powerレーザー

high powerレーザーによる真空回折

✓ μm 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



※ 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

✓ μm 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

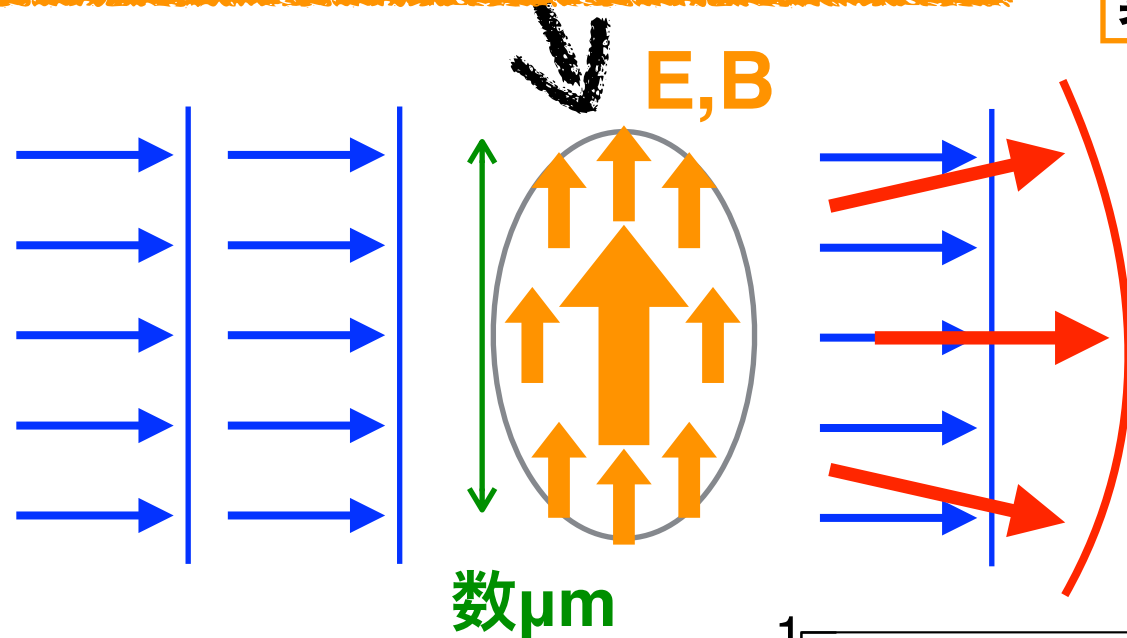
high powerレーザー
パルスエネルギー： W
集光点でのビームサイズ： w_0

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

+

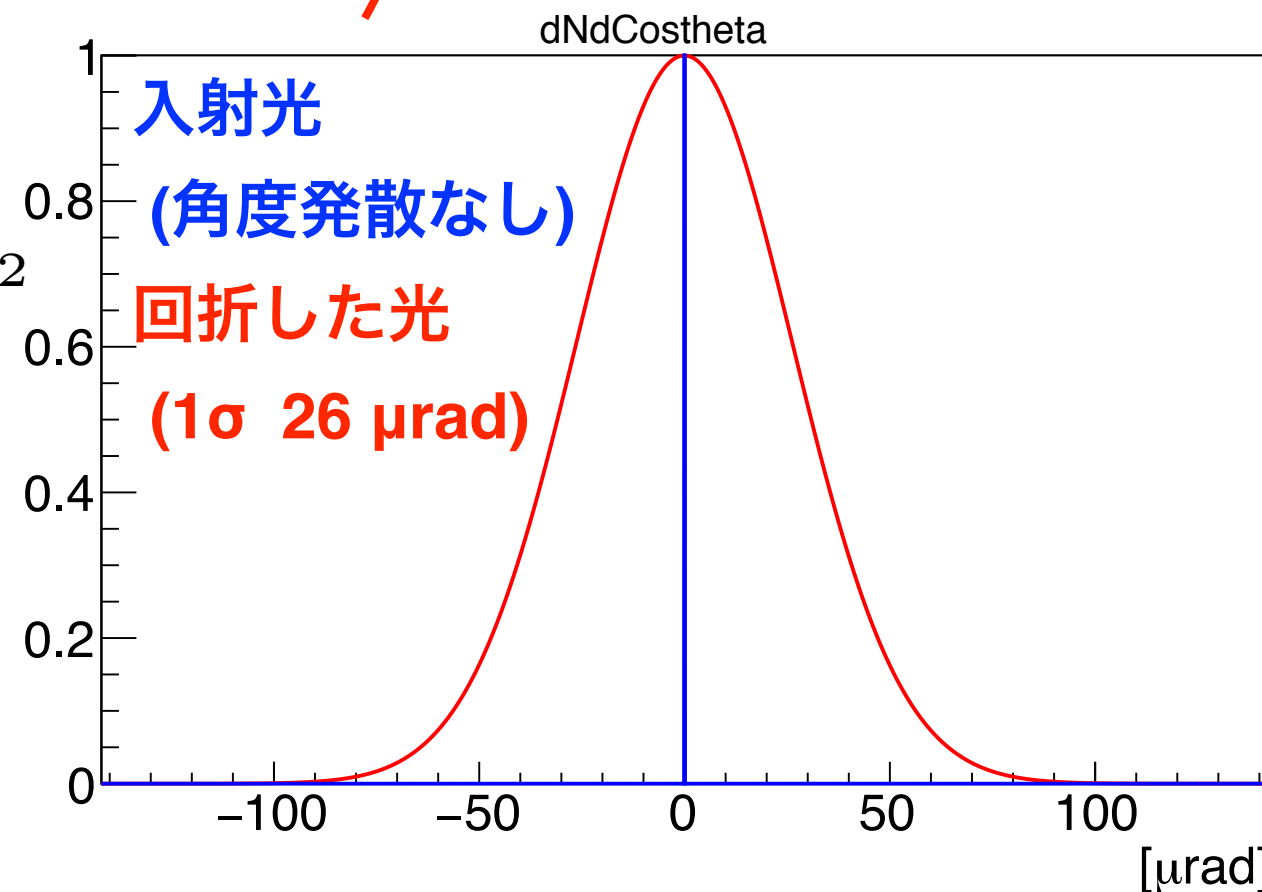
回折した光

衝突点からの角度： θ

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 μm



high powerレーザーによる真空回折

✓ μm 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

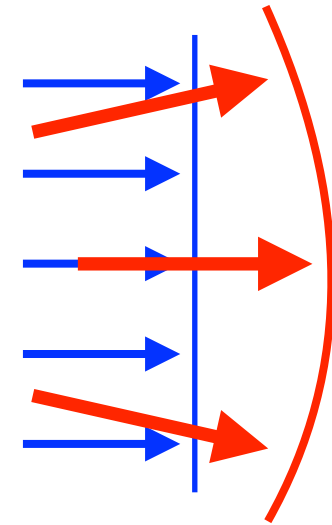
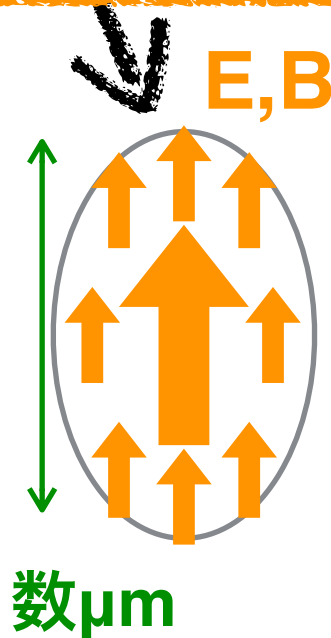
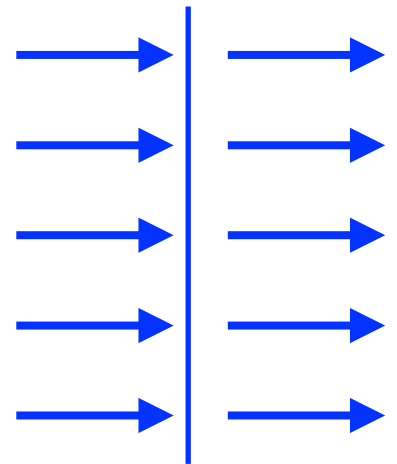
high powerレーザー
パルスエネルギー： W
集光点でのビームサイズ： w_0

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

+

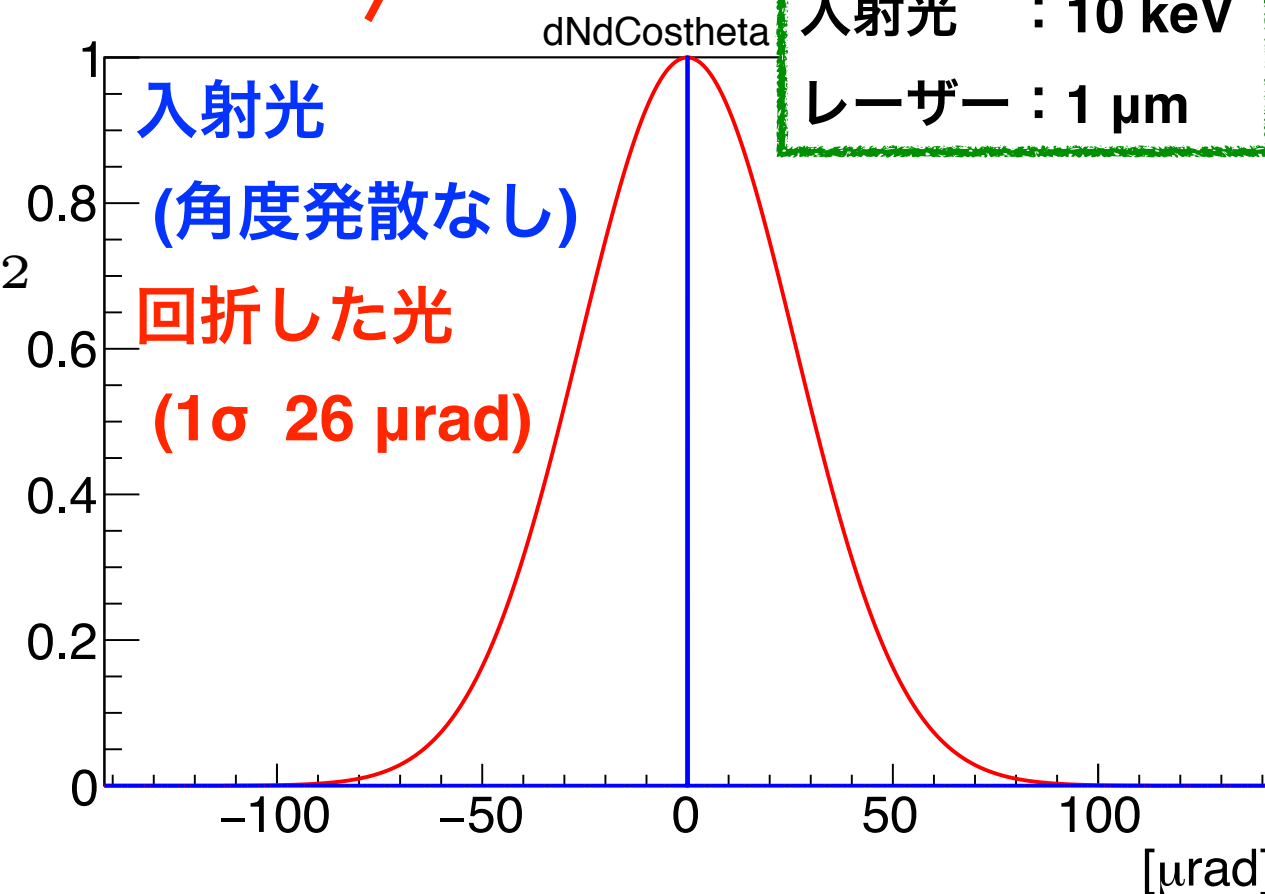
回折した光

衝突点からの角度： θ

回折した光の衝突点での角度分布

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

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

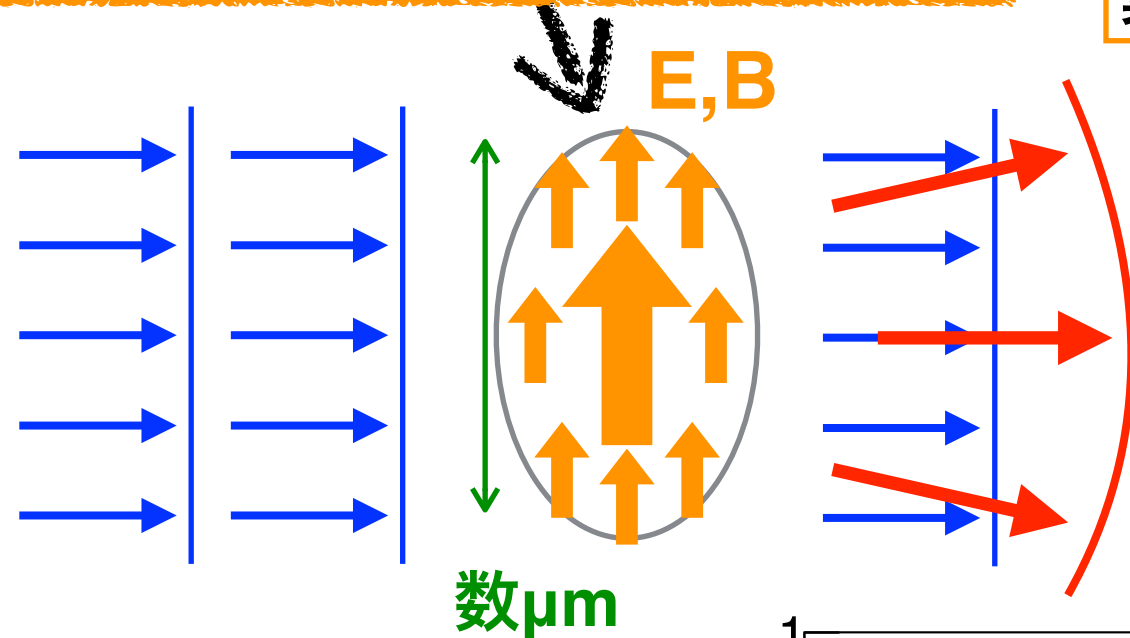


high powerレーザーによる真空回折

✓ μm 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

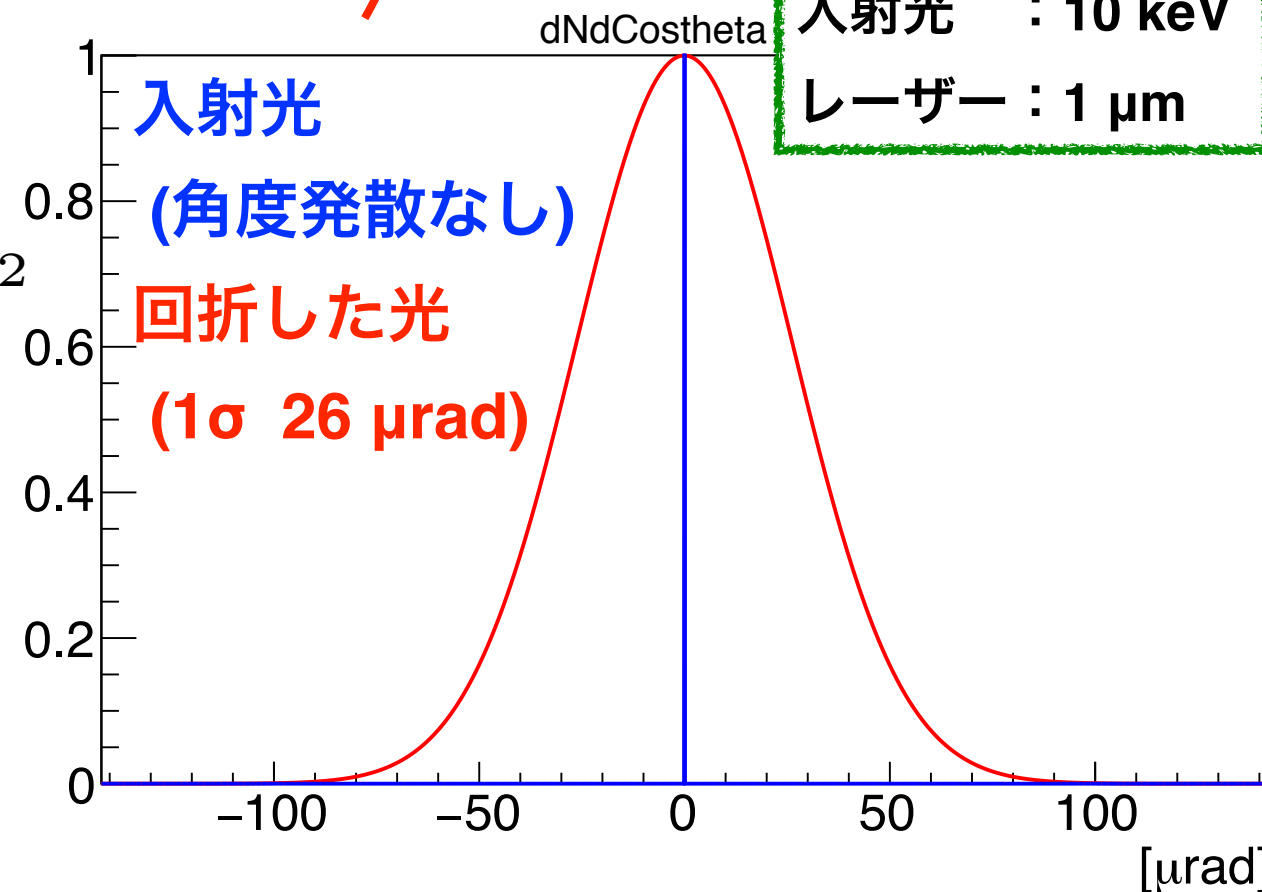


もとの光
+
回折した光
衝突点からの角度： θ

回折した光の衝突点での角度分布

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

レーザー是集光するほど
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 : 5×10^{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 μm に集光出来れば、
 1.3×10^6 [T] & 3.9×10^{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

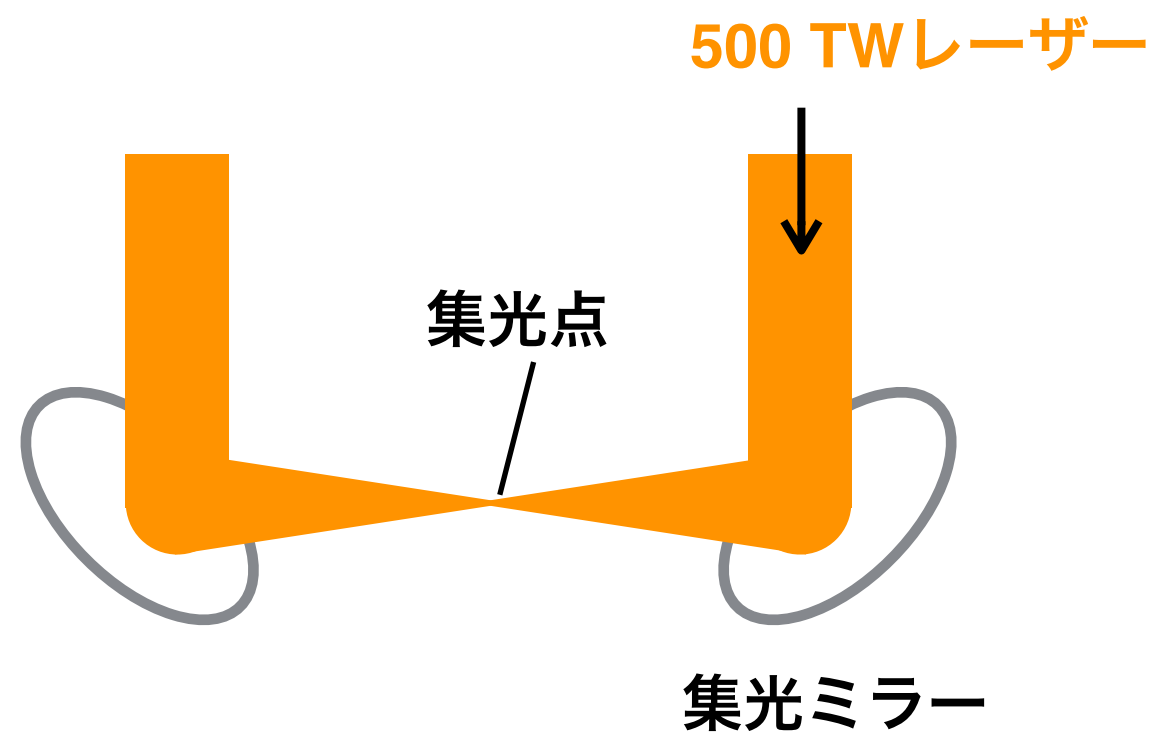
- 波長 : 800 nm
- パルスエネルギー : 12.5 J
- パルス幅 : 25 fs
- 繰り返しレート : 1 Hz

現在インストール中の500 TWレーザー



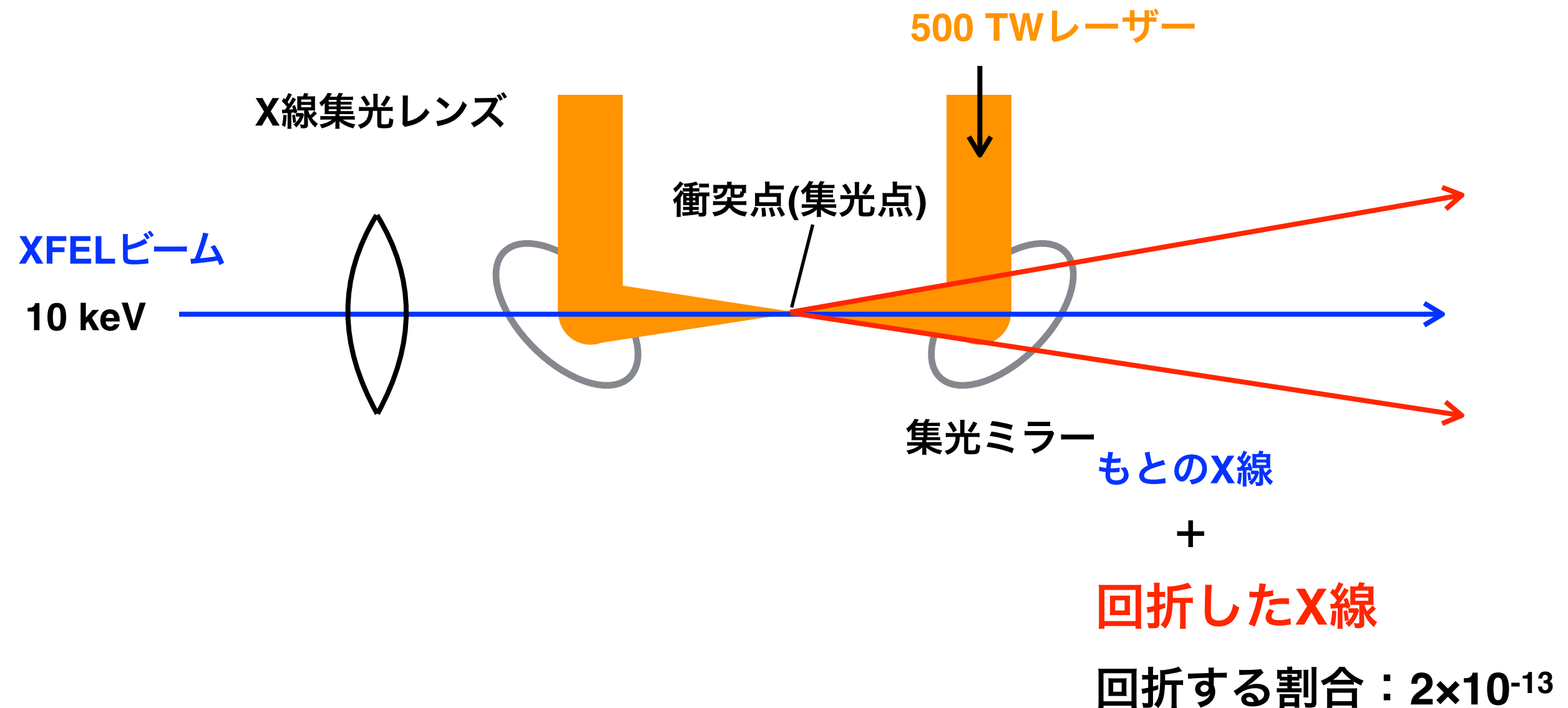
実験セッティング

① 500 TWレーザーを1 μm に集光する



実験セツトアップ

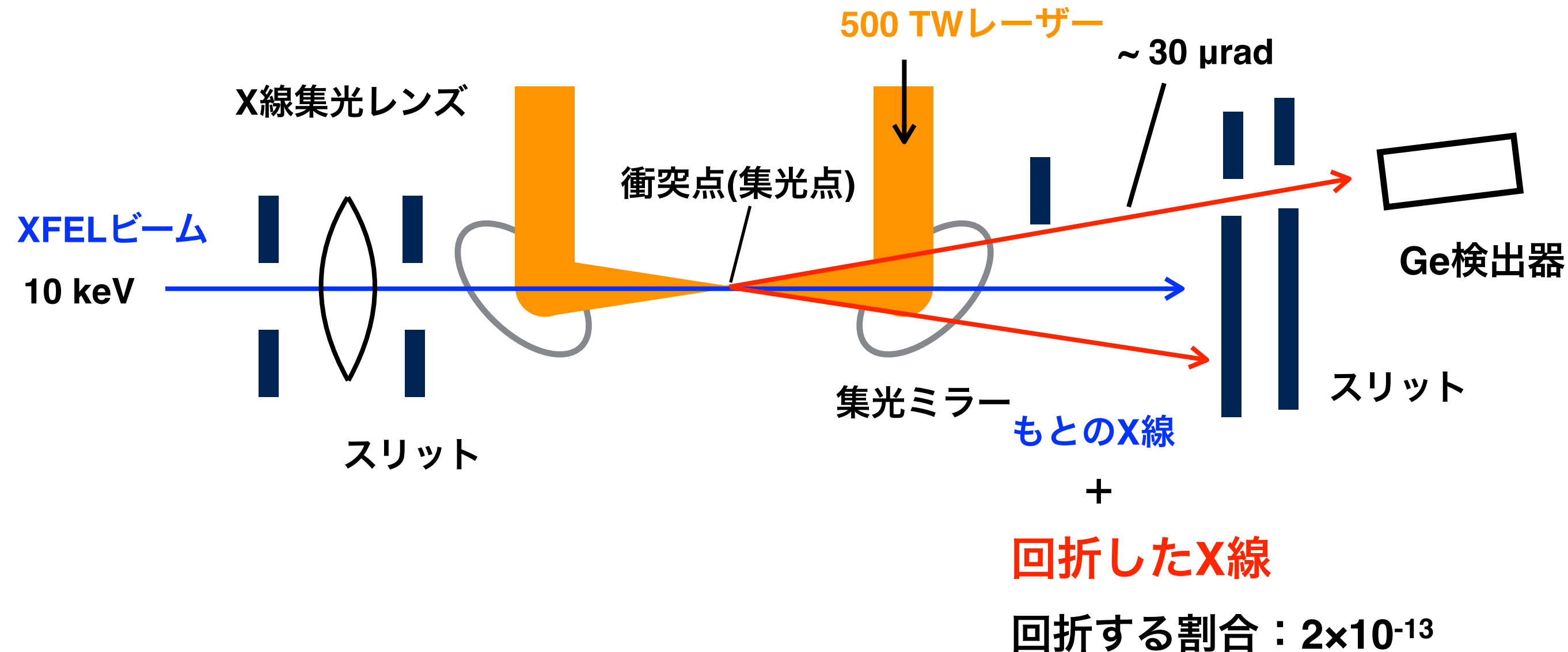
- ① **500 TWレーザー**を1 μm に集光する
- ② **集光したXFELのパルス**と**500 TWレーザーのパルス**を集光点で衝突させる



実験セットアップ

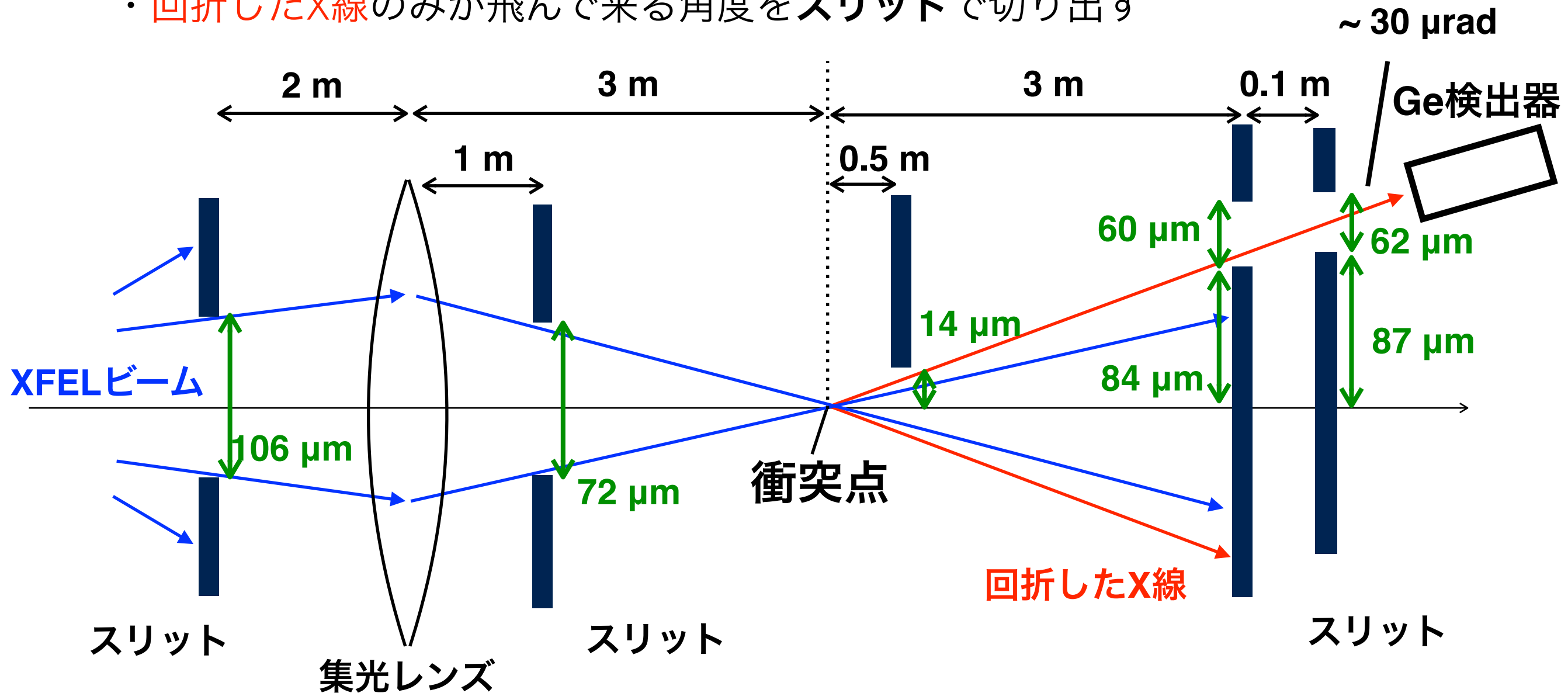
- ① **500 TWレーザー**を1 μm に集光する
- ② **集光したXFELのパルス**と**500 TWレーザーのパルス**を集光点で衝突させる
- ③ 30 μrad 程度広がってきた**回折光**を検出する

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

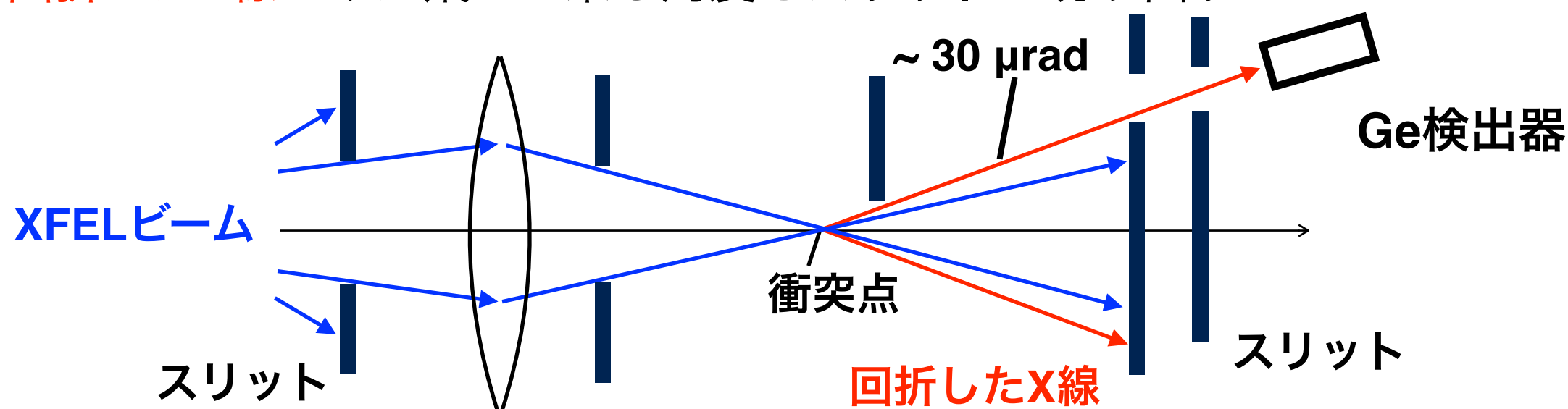
0.30

回折したX線の通過する割合

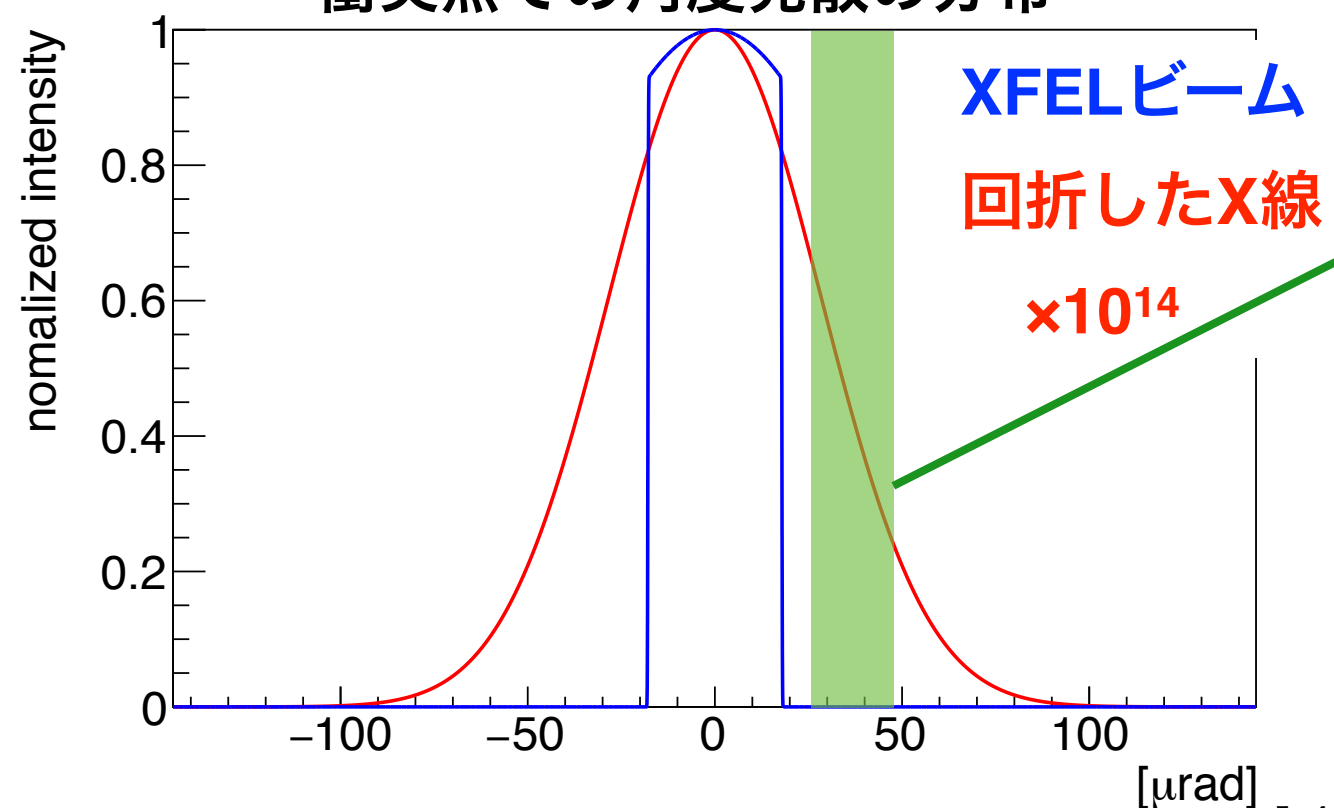
0.11

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



シグナル領域

- 28~48 μrad

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 μm
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 μm
光子エネルギー : 10 keV
光子数 : 5×10^{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 **2×10^{-3} photon**
1.5日の計測で**26 photon**

strong QEDで予言される
真空回折を **5σ** 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 μm 集光(現在10 μm)
- XFELビームとレーザーを衝突させる

時間(fs)&空間(μm)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、 5σ 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

Back Up

高強度電磁場下での各物理量

電束密度

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 A_e \left[4 \left(\frac{E^2}{c^2} - B^2 \right) \vec{E} + 14 \left(\vec{E} \cdot \vec{B} \right) \vec{B} \right]$$

磁場

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} + \frac{A_e}{\mu_0} \left[4 \left(\frac{E^2}{c^2} - B^2 \right) \vec{B} - 14 \left(\frac{\vec{E}}{c} \cdot \vec{B} \right) \frac{\vec{E}}{c} \right]$$

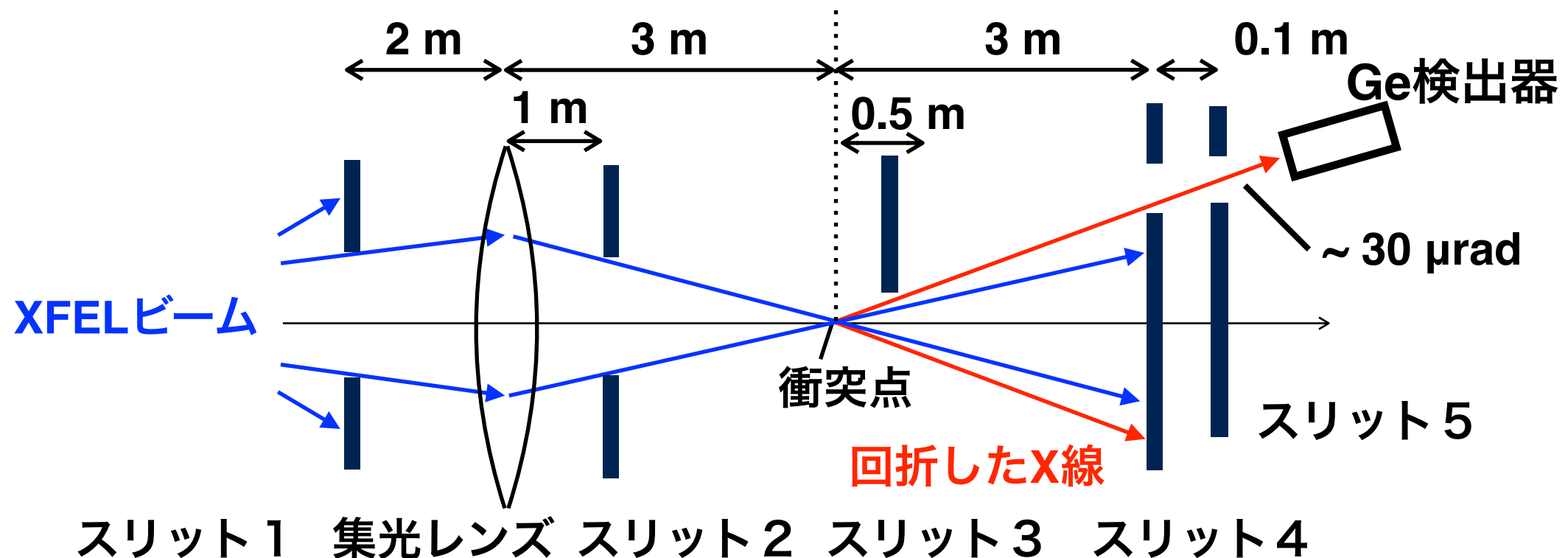
$$A_e = 1.32 \times 10^{-24} \quad [T^{-2}]$$

レーザー中の屈折率

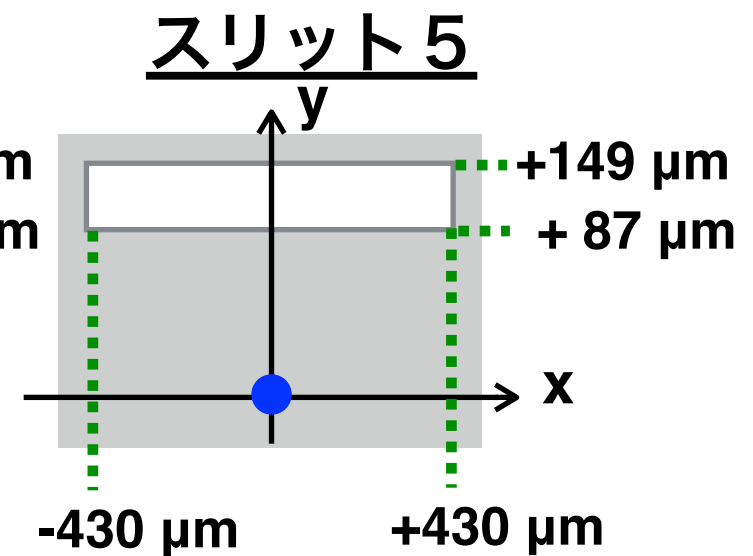
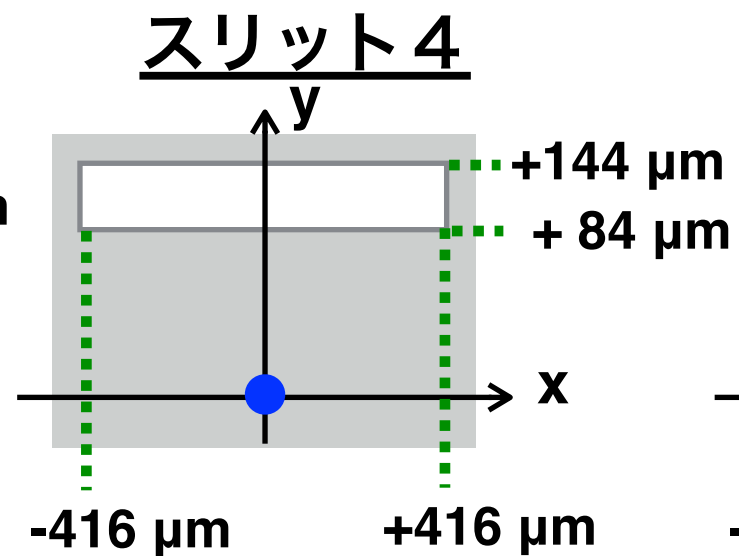
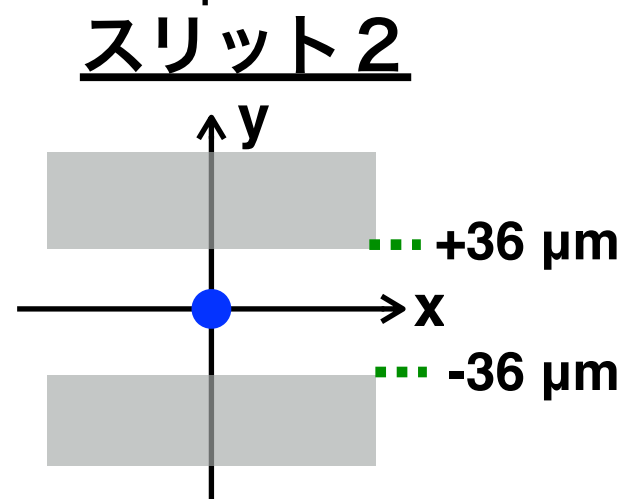
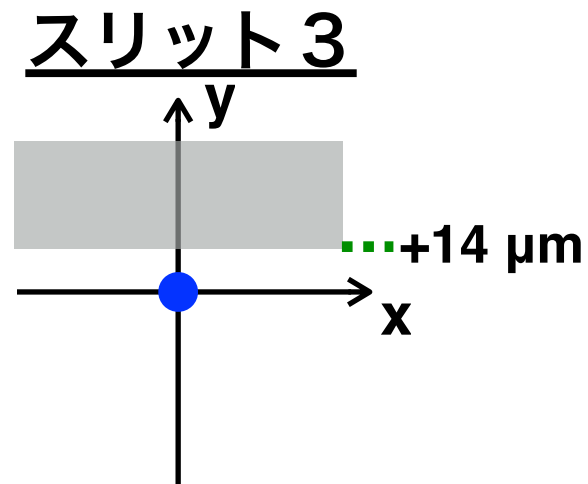
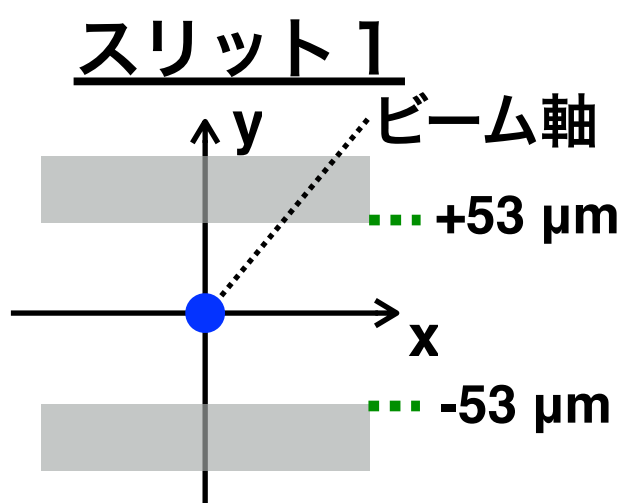
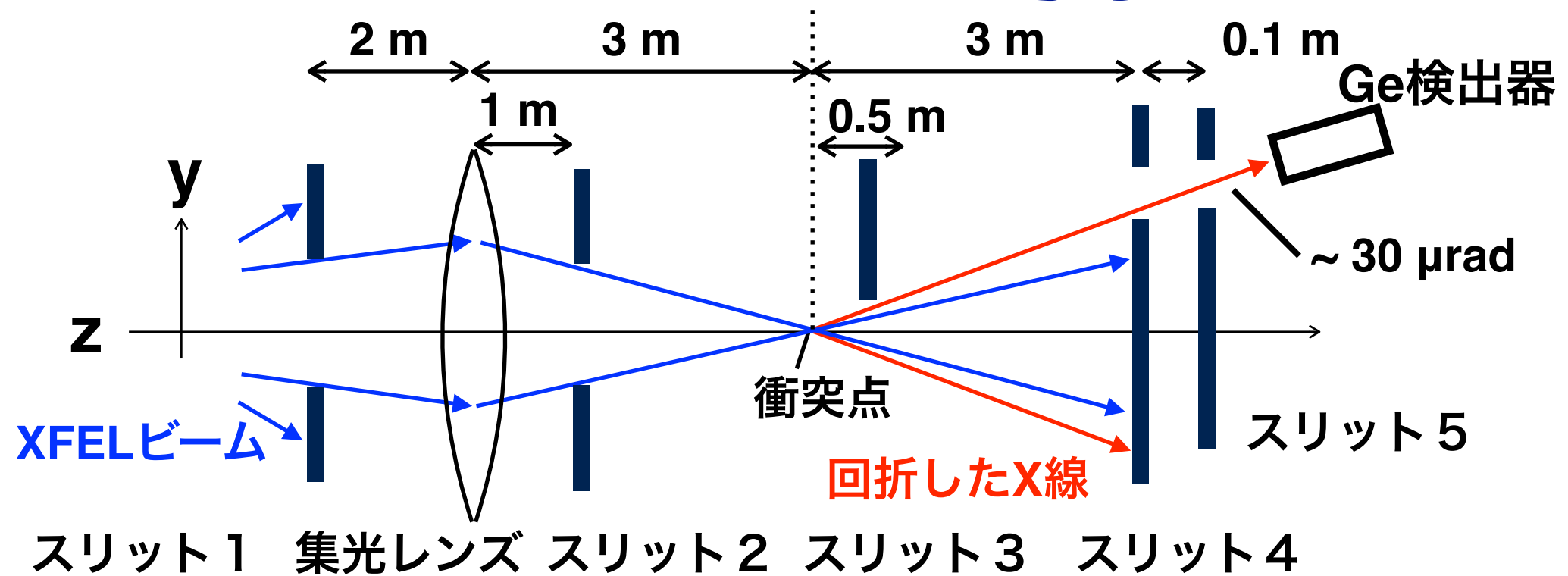
$$n = 1 + 28 A_e B^2$$

BGについての考察

- スリット 1 からスリット 5 までは 1 つの真空である
- スリットは全て、タンタルの厚み 5 mm のものを想定する。
- レーザー由来の BG はないと考える。
- 高次光については考えない。
- 環境 BG については考えない。
- BG として散乱した回数が 2 回以内の X 線 (ガウシアンビーム) を考える



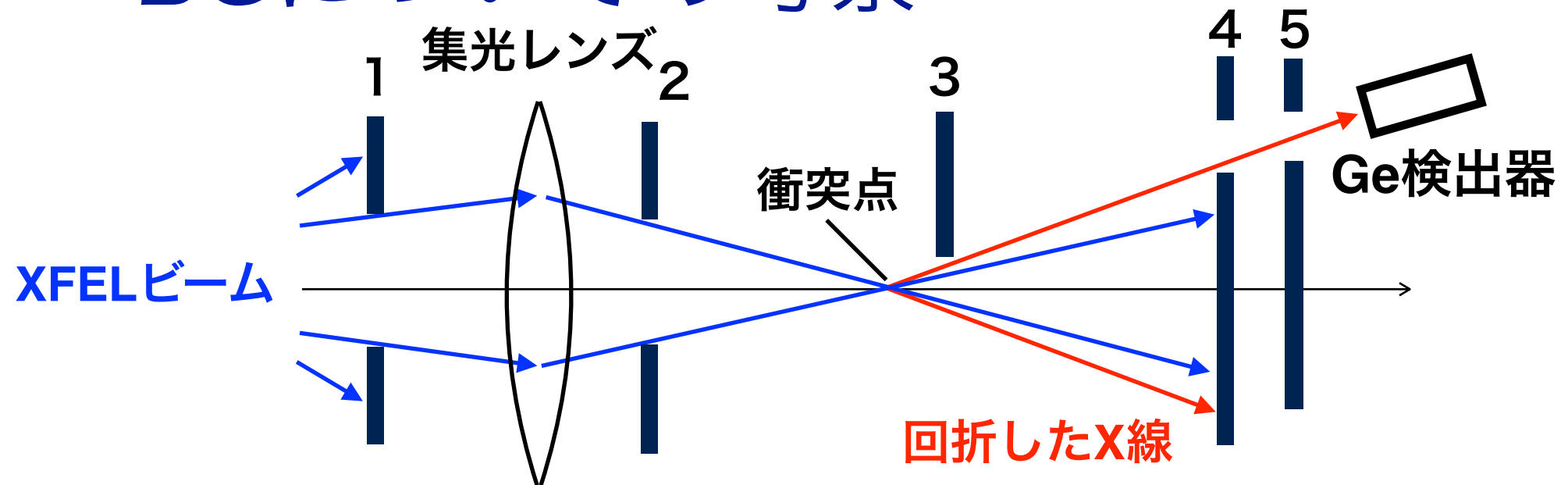
BGについての考察



スリット 4, 5 の
衝突点からのアクセプタンス

$$4.4 \times 10^{-10}$$

BGについての考察



BGの抑制率

- 一度も散乱しないX線(0)

検出器までのパスはスリット 3 とスリット 4 で全て切られる

- どこかで 1 回散乱したX線(0)

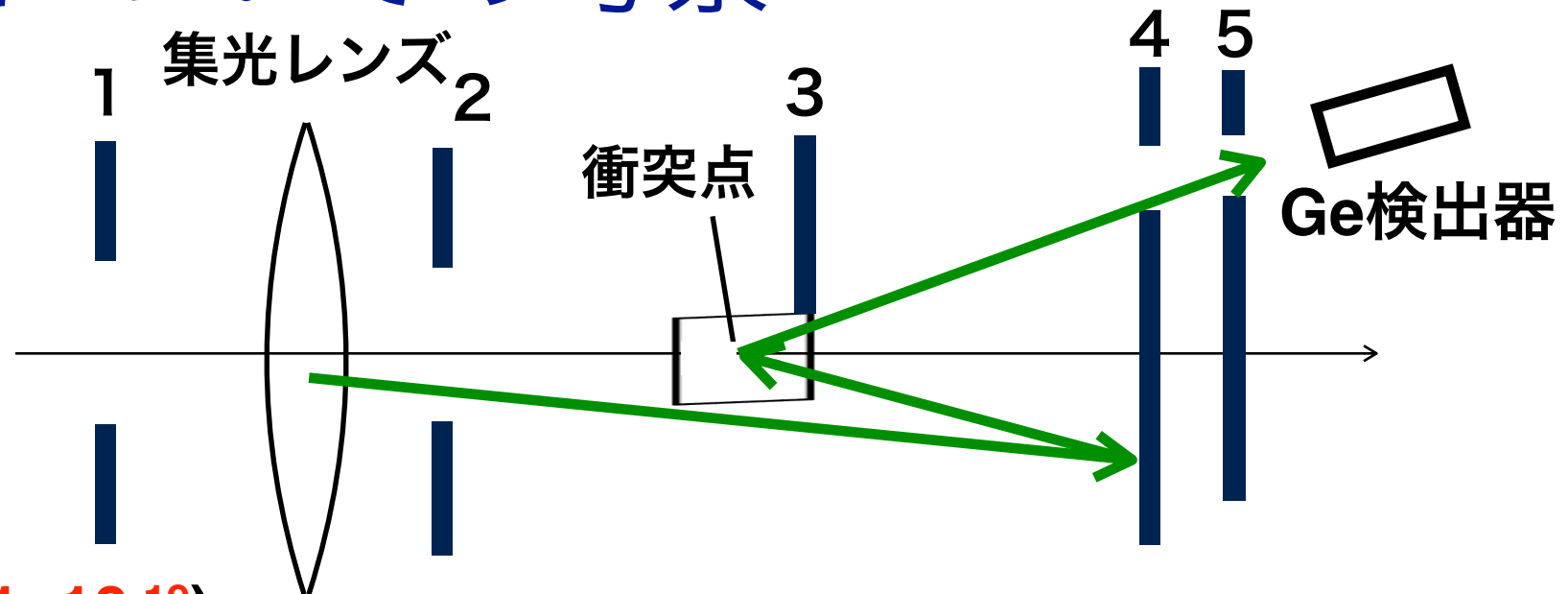
検出器までのパスはスリット 2 とスリット 3 で全て切られる

- 残留ガスによる 1 回散乱(5.7×10^{-20})

残留ガスが 10^{-3} Pa のとき、衝突点の前後 0.5 m 程度で散乱したX線

- スリット 1 を通過するX線の割合 : 0.30
- 散乱確率 : 4.3×10^{-10}
- スリット 5 のアクセプタンス : 4.4×10^{-10}

BGについての考察



BGの抑制率

- どこかで2回散乱したX線(1.1×10^{-19})

パス：スリット4で散乱(Ta)→衝突点で散乱(AI)→検出器

- スリット1を通過するX線の割合 : 0.30
- スリット4から下記の面積をみたときの立体角 : 1.8×10^{-6}
(スリット5から衝突点方向を見たときの面積 : $2.0 \times 10^{-4} \text{ [m}^2\text{])}$
- 衝突点からスリット5を見たときの立体角 : 4.4×10^{-10}
- Taの反応断面積比 何とか散乱 / 光電吸収 : 1.9×10^{-2}
- Alの反応断面積比 何とか散乱 / 光電吸収 : 2.5×10^{-2}

1.1×10^{-19}

よって2回散乱したX線のみ考えると、BGの抑制率は 10^{-19} レベルまで可能