

# 高輝度X線光源を用いた 光子光子散乱実験の考察

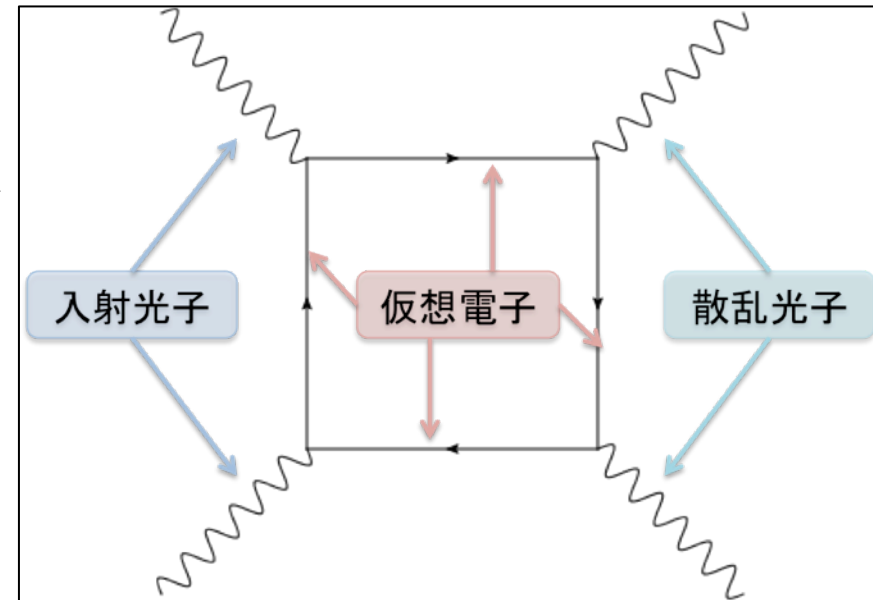


山道智博、安達俊介、稲田聡明、難波俊雄<sup>A</sup>、浅井祥仁、小林富雄<sup>A</sup>  
玉作賢治<sup>B</sup>、田中義人<sup>B</sup>、澤田桂<sup>B</sup>、犬伏雄一<sup>B</sup>、石川哲也<sup>B</sup>  
東大理, 東大素セ<sup>A</sup>, 理研/SPring-8<sup>B</sup>

日本物理学会第68回年次大会@広島大学 2013/03/27

# 光子光子散乱(photon-photon scattering)

- ◆量子電磁力学(QED)の予言(1936年)
  - ・光子同士が、仮想電子を介して散乱
  - ・非常に強く抑制されており、  
可視/赤外光を用いた探索では未観測  
→QEDの検証として意義
  - ・未知の素粒子現象が有る場合、  
断面積が増大  
→ new physics



## ◆先行実験

- D. Bernard et al., Eur. Phys. J. D 10, 141 (2000)
  - ・高強度赤外レーザーを用いた実験
  - ・断面積のlimit: $1.5 \times 10^{-52} [\text{m}^2]$ @0.8eV  
QEDの予言する断面積: $1.8 \times 10^{-70} [\text{m}^2]$   
→18桁足りない
  - ・感度はBackgroundにより制限

観測に近づく為には、**新しいidea**と**強力な光源**が必要

# X線を用いた新しい光子光子散乱実験

- ◆光子光子散乱・CM系での平均微分散乱断面積/全散乱断面積(QEDの予言)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{139\alpha^4}{(180\pi)^2} \frac{\omega^6}{m^8} (3 + \cos^2\theta)^2$$
$$\sigma = 7.3 \times 10^{-70} (\omega[eV])^6 [m^2]$$

$\omega$ :入射光子の  
エネルギー(CM系)

入射光子エネルギーの**6乗**に比例( $\omega < 700\text{keV}$ )

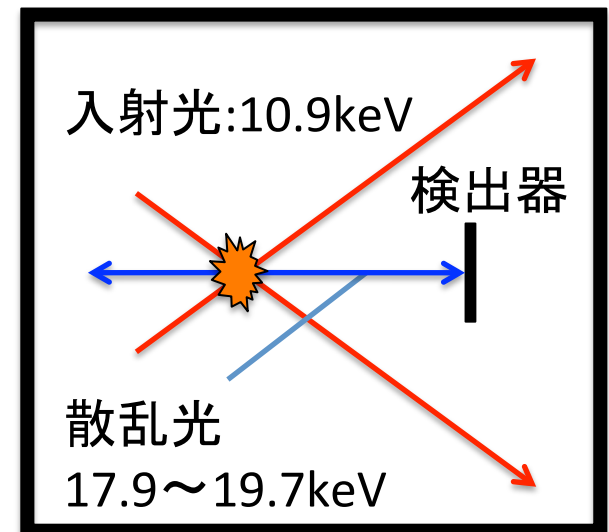
X線光源は可視光より4桁エネルギーが高いため、断面積が**24桁**大きくなる

- ◆バックグラウンド(BG)抑制

- ・1光子エネルギーを測定出来る  
→エネルギー測定によるBG排除
- ・Boost系で実験し、  
BG/散乱光のエネルギーに区別を付ける  
本実験の場合:10.9/17.9~19.7keV(方角依存)

- ◆高輝度X線光源

X線自由電子レーザー(XFEL)施設**SACLA**



# X線自由電子レーザー(XFEL)施設 SACLA

## ◆SACLA

- ・世界最高強度のXFELを発振する施設
- ・光子数 $8 \times 10^{10}$ photons/pulse@10keV, パルス幅10fs  
1パルス当たりの光子数が大きく、パルスが短い  
→散乱実験に適している



- ◆1 $\mu$ mコヒーレント集光によりルミノシティを上げられるEH3を使用
  - ・ビームタイム:7月に48h取得
  - ・使用光子エネルギー:10.9keV( $5.72 \times 10^{10}$ photons/pulse)

# ビーム交差の方法

光源からのXFEL(分光・偏光方向のみ1 $\mu\text{m}$ 集光)を、**ビームスプリッター**を用いて交差

## ◆ビームスプリッター( $\times 2$ )

- ・二枚の歯(t0.6)を削り出したシリコン単結晶  
→一体物なので歯の格子面は平行

## ◆交差の保証

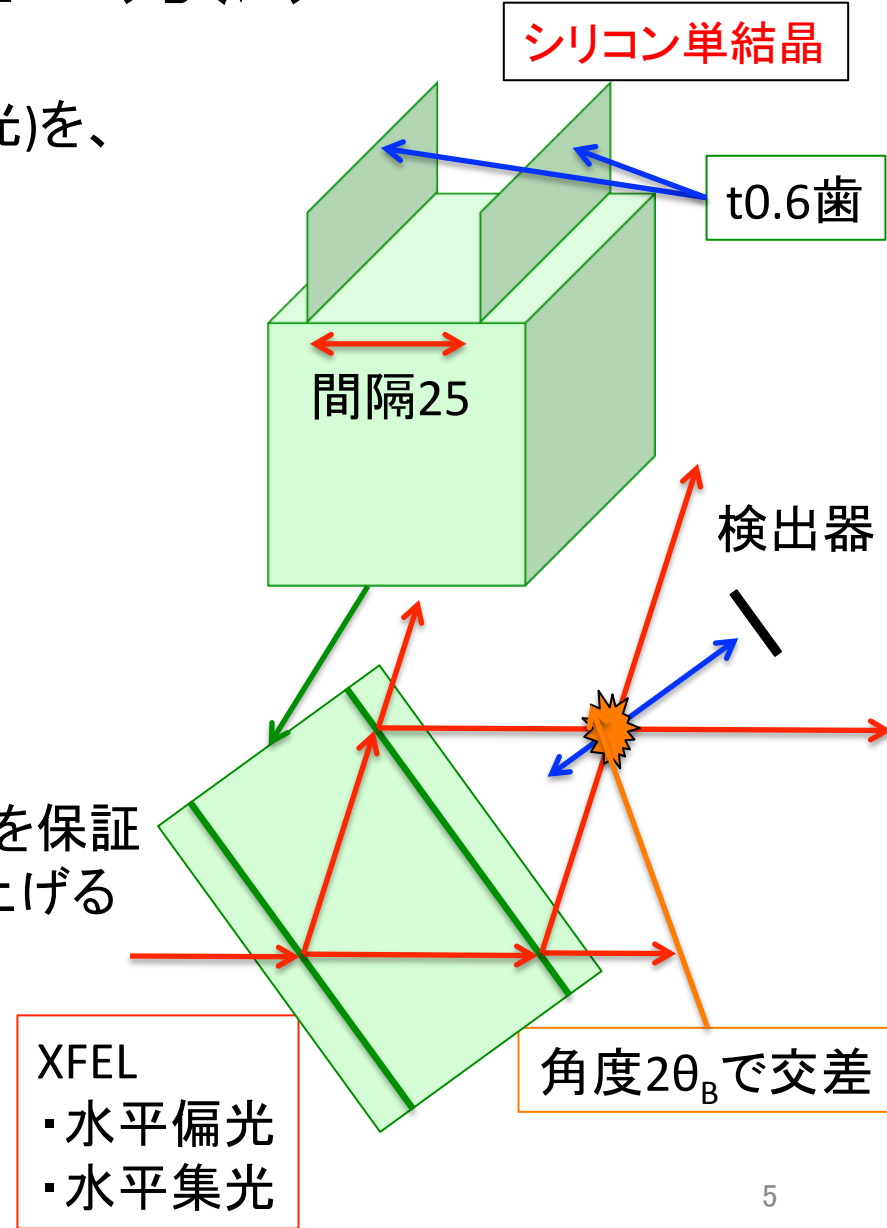
- ・二枚の歯でXFELが4本のビームに分かれる  
→内側の2本が角度 $2\theta_B$ で交差
- ・光路が左右全く同じなので、交差は保証
- ・偏光方向に垂直な方向に回折し、回折強度を保証  
→SACLAは水平偏光なので、ビームを跳ね上げる

## ◆光子の重心系エネルギー

高次の格子面で大

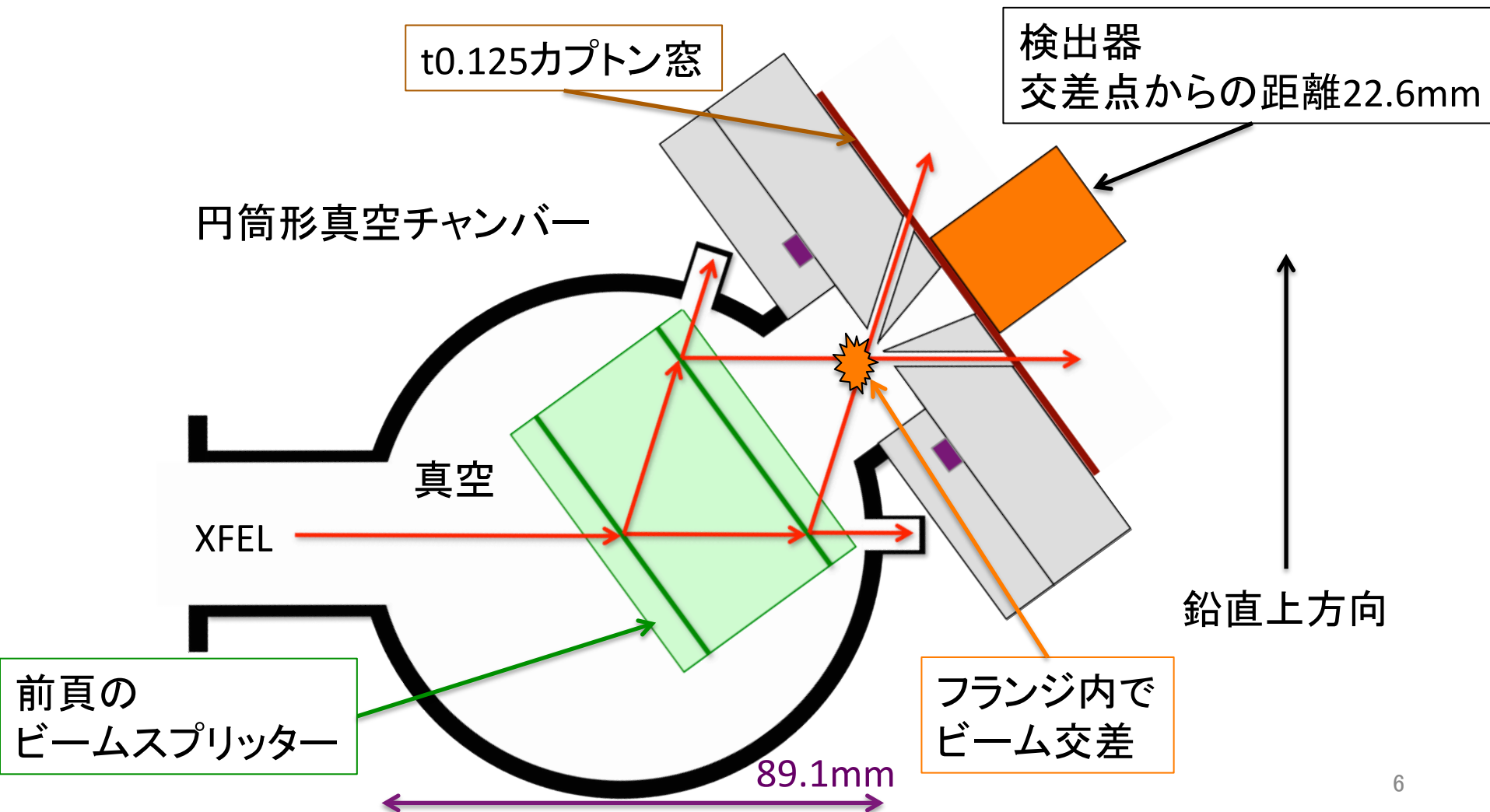
→(4,4,0)格子面を用いる  $\omega_{\text{CM}} = 6.46\text{keV}$

$\omega = 10.9\text{keV}$ でのBragg角 $\theta_B$ : $36.33^\circ$



# 実験セットアップ

- ・XFELを真空チャンバー内で回折・交差し、散乱光をチャンバー外の検出器で検出
- ・検出器側フランジの窓材にカプトンを用い、検出器を直近に設置する

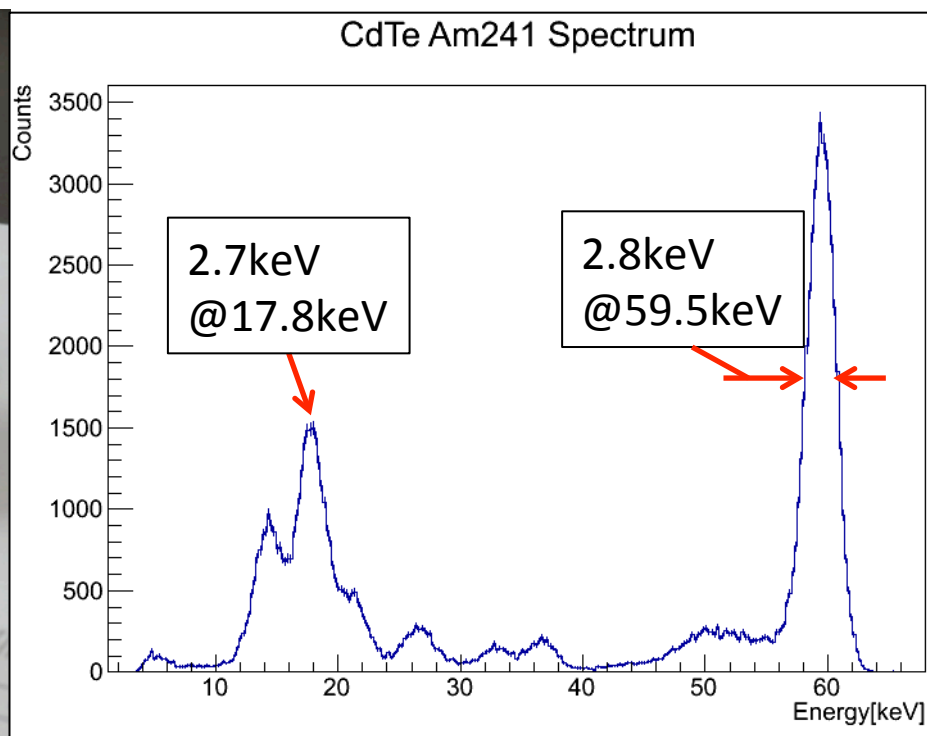


# X線検出器: CdTe半導体検出器

コンパクトかつ、硬X線領域での高エネルギー分解能

- ・結晶寸法10×10×t1
- ・ハウジング寸法30(W)×20(H)×27(D)
- ・ショットキー型
- ・22°でのエネルギー分解能(FWHM): 2.8keV@59.5keV  
2.7keV@17.8keV

現在、パフォーマンスの評価を行っている段階



# バックグラウンドとその対策

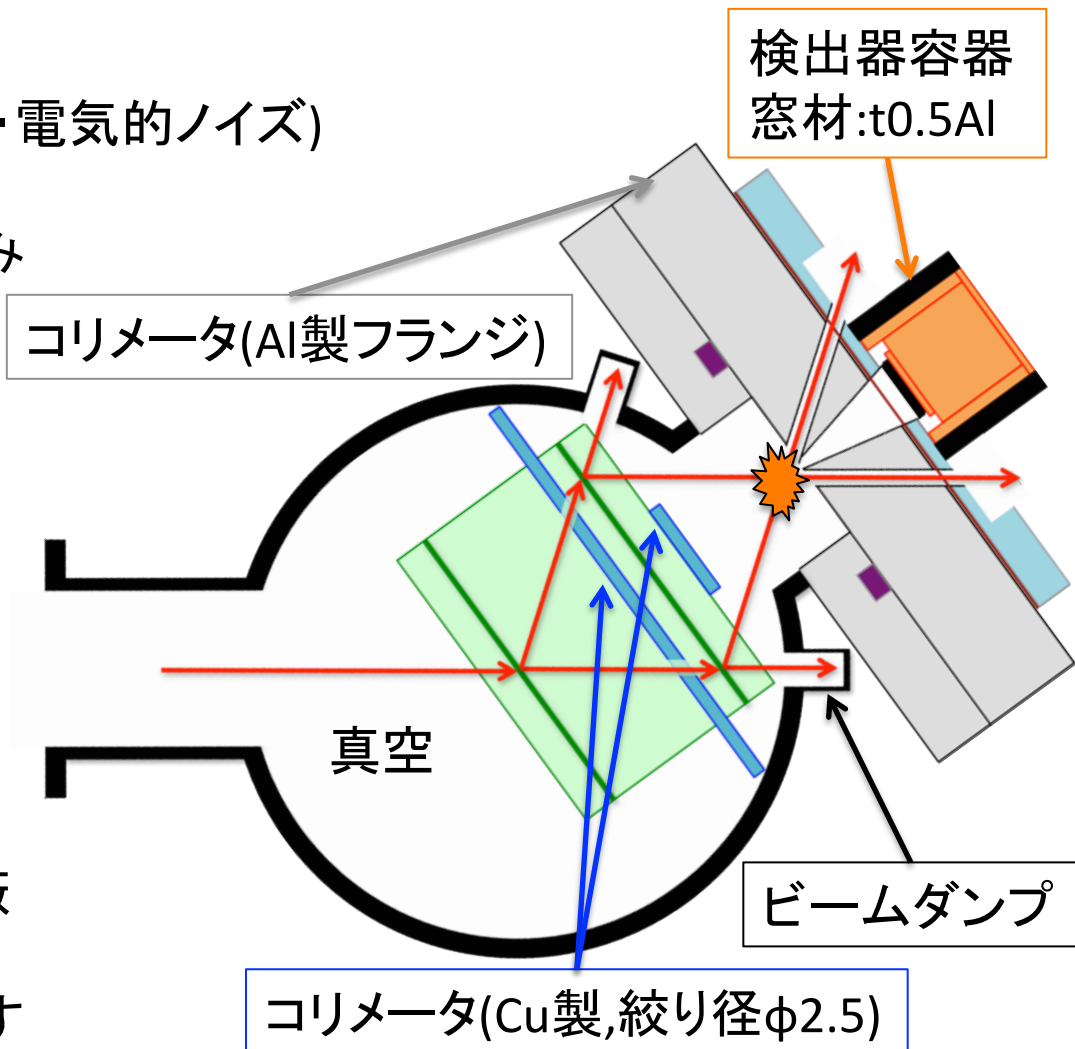
## 主要なバックグラウンド(BG)

### ◆XFELに同期しないBG(環境放射線・電氣的ノイズ)

- ・XFELに同期したトリガー
- ・フラッシュADCによる波形読み込み

### ◆XFELに同期するBG

- ① 大気分子による**レイリー散乱**
  - ・真空中でXFELを回折・交差
- ② マテリアルからの**レイリー/コンプトン散乱・蛍光**
  - ・コリメータ・ビームダンプで遮蔽
  - ・検出器はコリメータで覆い、窓材にt0.5Alを用いBGを減らす





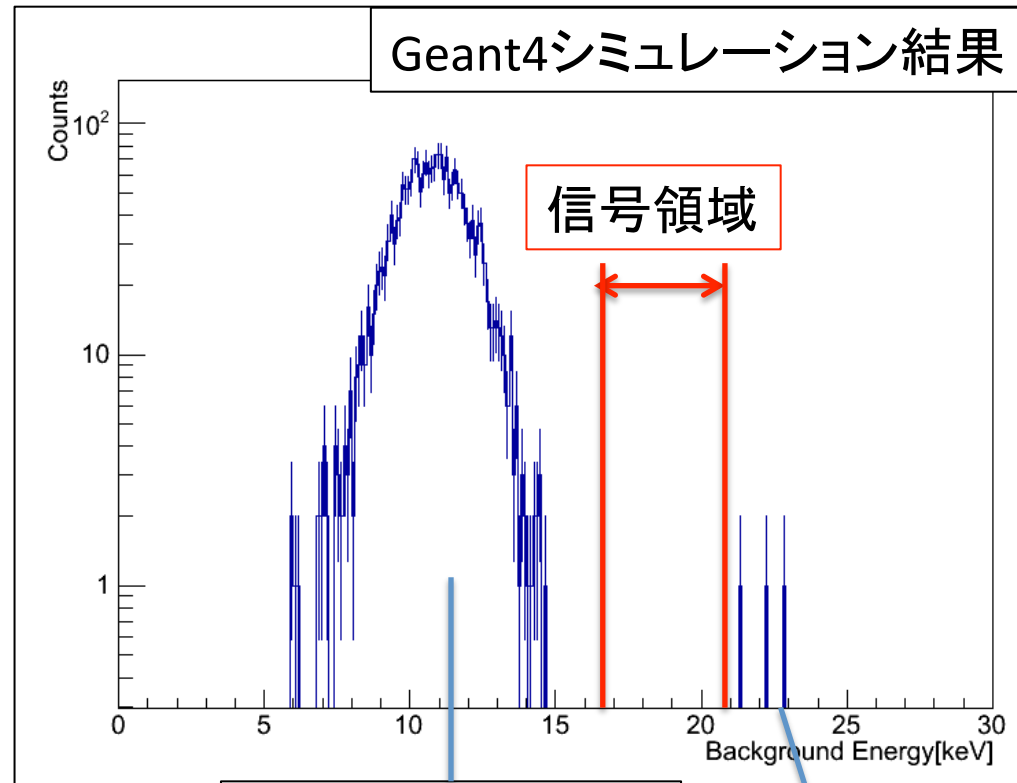
# XFEL同期バックグラウンドの評価 モンテカルロシミュレーション

- ◆シグナル(散乱光)のエネルギー
  - ・17.9~19.7keVのほぼ一様分布
  - ・実測の検出器分解能( $1\sigma$ )を含めて、16.7~20.9keVを信号領域とする

- ◆バックグラウンド(BG)のエネルギー
  - ・レイリー/コンプトン散乱光  
:10.8~10.9keV
  - ・蛍光X線:5.4keV~8.9keV  
→**パイルアップ**したイベントのみが、信号領域に入りうる

- ◆Geant4.9.4シミュレーション結果  
一日run( $1.7 \times 10^6$  pulse)でのBG数 $\sim 0.8$  /day  
→BGを抑制した測定が可能

- ・今後のスタディでCdTeの分解能を向上(ベルチェ素子冷却等)
- ・6月にSPring-8でBGの事前研究を行う予定



レイリー/コンプトン  
蛍光X線  
信号領域の $4.8\sigma$ 下

パイルアップ  
 $\sim 2$  event/day  
信号領域の  
 $0.6\sigma$ 上

# 期待される感度

◆7月に行う実験の期待感度  
EH3での24h測定  
→積分ルミノシティ: $2.0 \times 10^{30} [\text{m}^{-2}]$

・期待感度  
検出器のアクセプタンスを考慮すると、  
断面積のリミット: $5.9 \times 10^{-30} [\text{m}^2]$   
→先行実験を上回る相対的感度

実験パラメータ	
光子エネルギー	10.9keV
光子数	$5.7 \times 10^{10} / \text{pulse}$
衝突ビーム幅(FWHM)	$1 \mu\text{m} \times 230 \mu\text{m}$
分光効率	0.02
集光効率	0.98
回折効率(1回)	0.15
パルス繰り返し	20Hz

	断面積リミット	QED理論計算	theory/ limit
本実験	$5.9 \times 10^{-30} [\text{m}^2]$	$2.5 \times 10^{-47} [\text{m}^2]$	$4.2 \times 10^{-18}$
先行実験	$1.5 \times 10^{-52} [\text{m}^2]$	$1.8 \times 10^{-70} [\text{m}^2]$	$1.2 \times 10^{-18}$

◆一年後における感度

- ・2013年末:SACLAの性能向上により分光効率が100%近くになる  
→断面積探索領域が3桁下まで広がる
- ・back-to-backコインシデンスを取る等、更なるBG除去をした実験を行う

# まとめ

- X線を用いた、新しい光子光子散乱実験のセットアップを提案
- X線光源を用いる事により散乱断面積が24桁エンハンスし、BG除去が容易となる
- XFELをビームスプリッターを用いて回折・交差させ、散乱光をCdTe検出器で検出する
- SACLA BL3 EH3で実験を行い、先行実験を上回る感度で実験を行う予定
- 一年後には、性能の向上したSACLAにて更なるBG除去(back-to-back coincidence等)をした実験を行い、更に3桁下の領域まで探索を行う事が可能