

SPring-8/SACLAにおける 光子光子散乱の探索



山道智博、稲田聡明、山崎高幸^A、難波俊雄^A、浅井祥仁、小林富雄^A
玉作賢治^B、田中義人^C、犬伏雄一^D、澤田桂^B、矢橋牧名^B、石川哲也^B
高橋忠幸^E、渡辺伸^E、佐藤悟朗^F
東大理、東大素七^A、理研/SPring-8^B、兵庫大院物質理^C
JASRI^D、ISAS/JAXA^E、早大理工^F
日本物理学会 第70回年次大会@早稲田大学 2015/03/21

目次

- イントロダクション/これまでの実験手法, 結果
- ルミノシティの向上
- Background排除のための新しい測定系
- 期待される感度/その次のステップ

光子光子散乱

◆光子光子散乱(photon-photon scattering)

- 量子電磁力学(QED)の予言(1936年)
- 真空の非線形効果(仮想電子ループ)
- 実光子同士の散乱は未観測

→QEDの重要な検証

- 未知粒子の寄与が有る場合、
断面積がエンハンス
ex)Axion etc...

◆QEDの予言する断面積

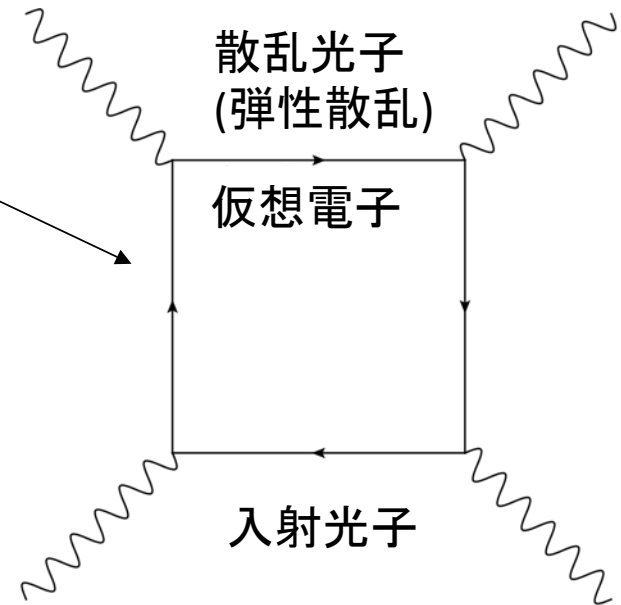
- 重心系での光子エネルギー $\omega_{cm} < 700\text{keV}$, 直線同方向偏極光子に対し

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{linear,same}} = \frac{\alpha^4 \omega_{cm}^6}{(180\pi)^2 m_e^8} (260\cos^4\theta + 328\cos^2\theta + 580)$$

$$\sigma_{\text{linear,same}} = 3.5 \times 10^{-70} (\omega_{cm}[\text{eV}])^6 [\text{m}^2]$$

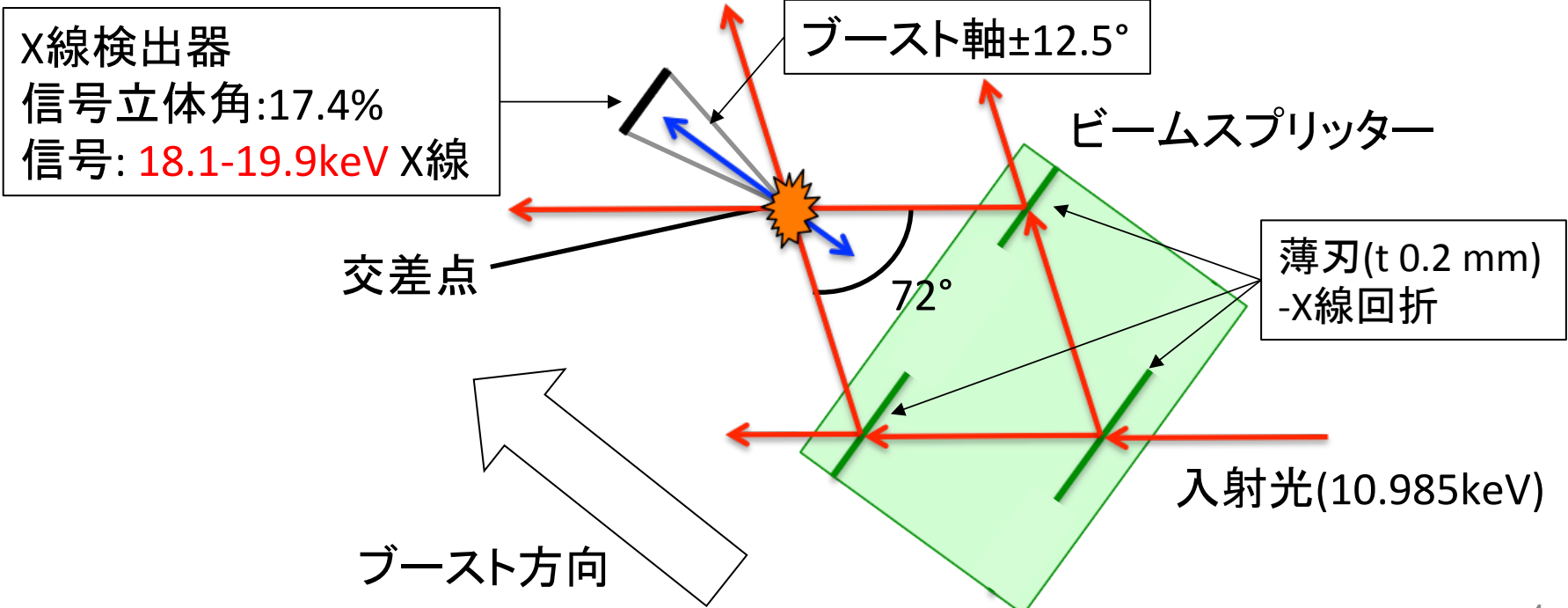
- 断面積は ω_{cm} の6乗に比例

この点に着目し, X線を利用した新しい光子光子散乱実験を行ってきた

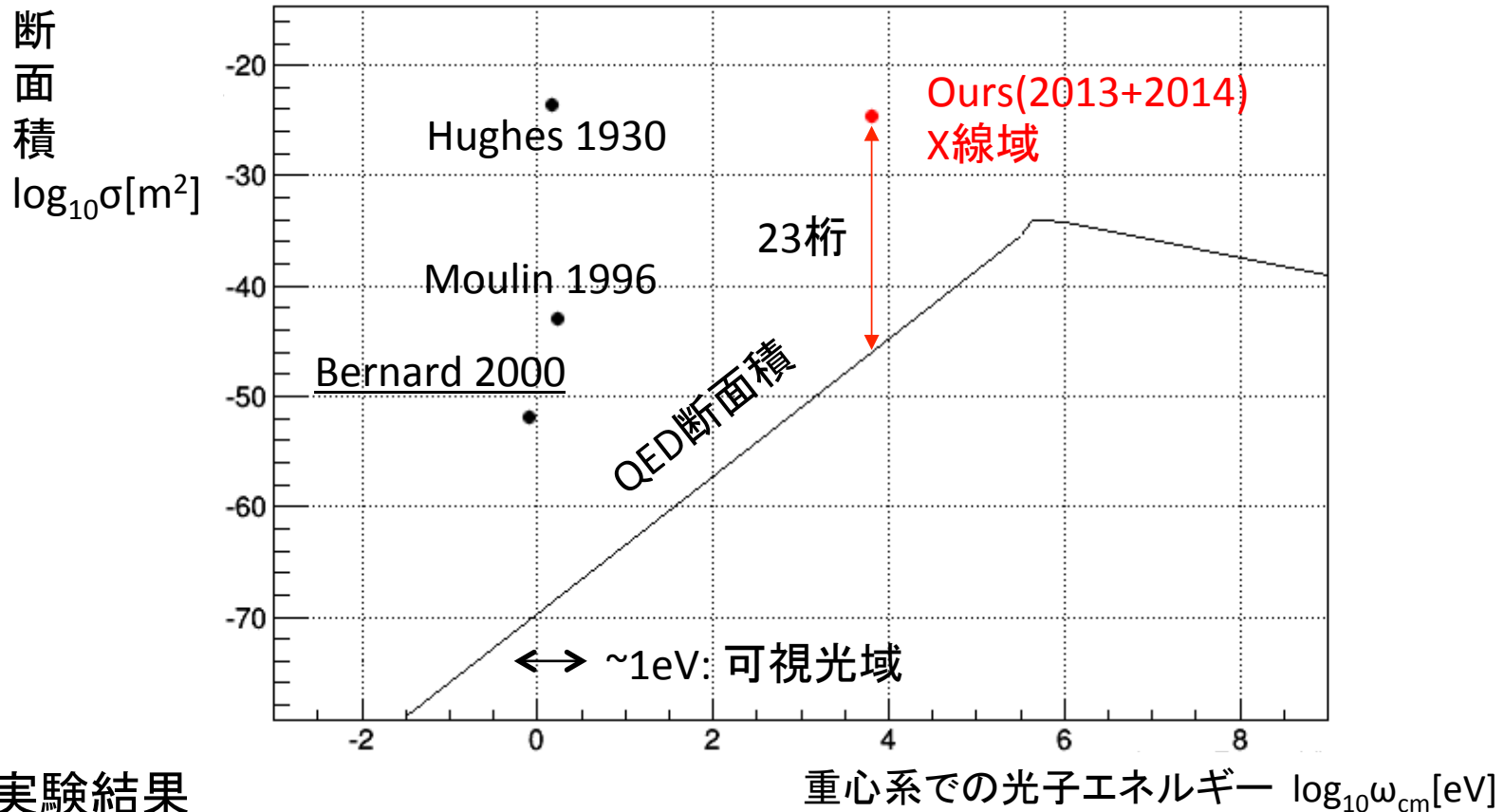


これまでの実験手法(概略)

- ◆ X線光源: SACLA (理化学研究所 播磨研究所)
 - 光子数 6×10^{10} photon/pulse @ 10.985 keV, パルス幅 10 fs, 繰り返し 30 Hz (@2014)
 - 高瞬間強度・短パルス → **高ルミノシティ**
- ◆ 衝突方法: ラウエ型 X線ビームスプリッター (X線光学分野で確立された技術)
 - 3枚の刃 (t 0.2 mm) を削り出したシリコン単結晶
 - 刃での **透過型(ラウエ型) X線回折** で X線を分割・交差 (交差効率: ~2%, 線幅 63 meV)



これまでの実験結果



◆実験結果

-2013/2014年に実験を実施

断面積リミット: $\sigma_{\gamma\gamma\rightarrow\gamma\gamma} < 3.0 \times 10^{-25} [\text{m}^2]$ (95% C. L.) @ 6.5keV (QEDの23桁上)

-X線領域で唯一の制限

-QEDに到達するには 1) **ルミノシティの増大** と 2) **BGの抑制** が必要(今回の主題)

ルミノシティ増大の方策1/2: ビームスプリッター

-現在のセットアップでは, SACLAのX線全体の 10^{-5} しか交差に寄与していない

1)回折可能な線幅: 63meV \rightarrow SACLA線幅: 80eVより, 3桁抑制

2)ラウエ型ビームスプリッターの回折効率(交差): $\sim 2\%$, 2桁抑制

-ルミノシティ \propto (交差強度) 2 なので, **10桁**損をしている

次のステップとして, これらの因子の改善によりルミノシティを向上

◆ビームスプリッターの変更

-ブラッグ型X線回折: 回折効率大

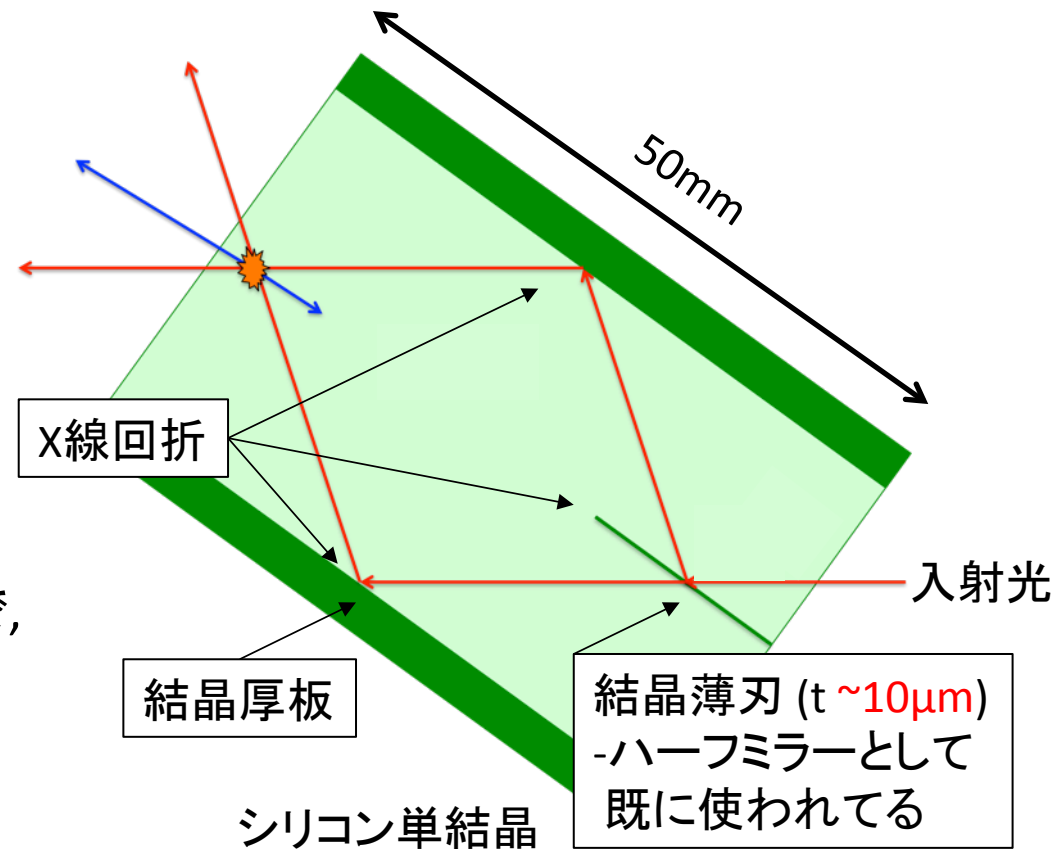
1)薄刃($t \sim 10\mu\text{m}$)による分割: $\sim 50\%$

2)厚板による反射: $\sim 100\%$

$\rightarrow \sim 50\%$ の効率で交差

-ブラッグ型回折を利用する

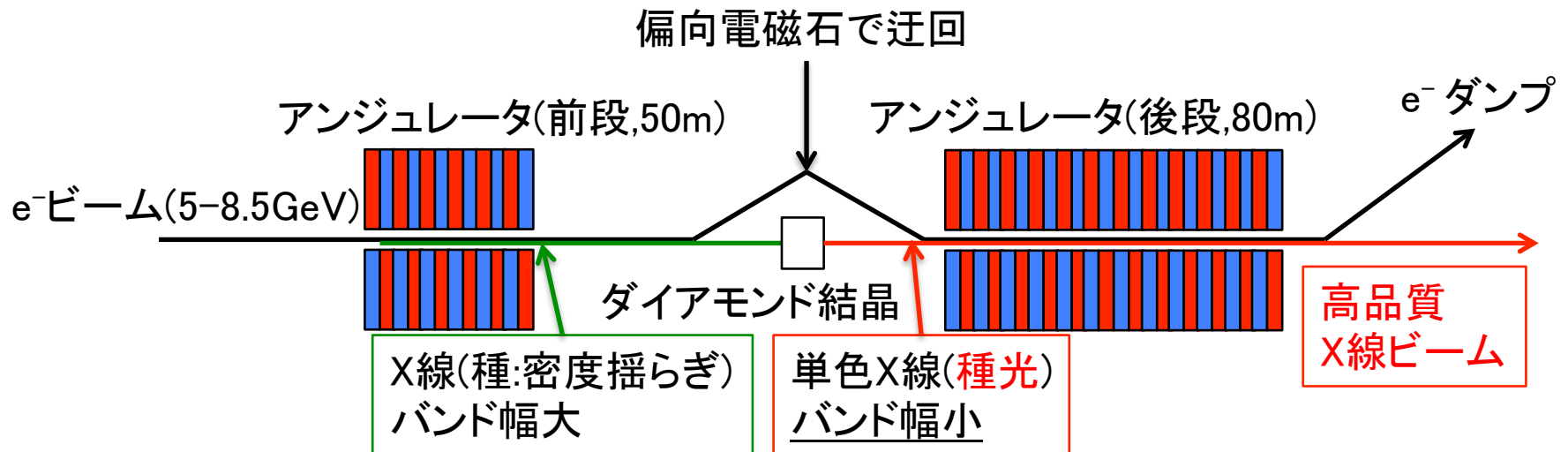
ビームスプリッターを使用することで,
3桁のルミノシティ向上が可能



ルミノシティ増大の方策2/2: SACLA

◆SACLAのアップグレード

- SACLAの線幅: 80eV @2014 → 単色化(63meV)で入射強度が3桁低下
- シード化(導入中): 線幅が~1eVに改善
単色化の効率が2桁上がり, ルミノシティが4桁向上



-ビームスプリッター(3桁)と光源(4桁)の改善から,
7桁のルミノシティの向上を目指す

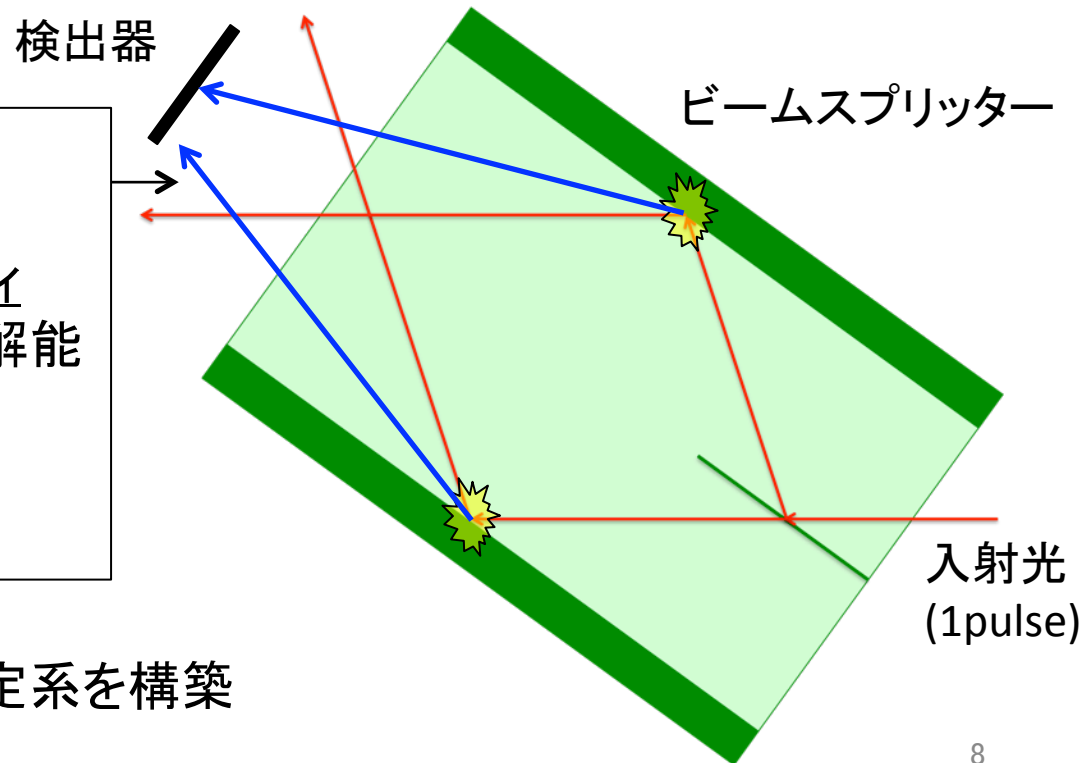
バックグラウンド(BG)

- ビームに非同期なBG(環境 γ ・宇宙線): タイミングでカット
- ビームに同期するBG(物質でのレイリー/コンプトン散乱による迷光)
:エネルギーは11keV以下 → エネルギー情報でカット

- ビーム由来成分のレート: 入射強度に比例
→高ルミノシティ環境でBG光子の**パイルアップ**が問題に

◆パイルアップ

- BG光子の同時入射
レート \propto (入射強度)² \propto ルミノシティ
- 入射間隔(<10fs) \ll 検出器時間分解能
→高エネルギー光子と誤認
- 二光子のパイルアップ: < 22keV
→信号に近く, 区別が困難



- 電極分割型の検出器を使用した測定系を構築
位置情報でパイルアップを落とす

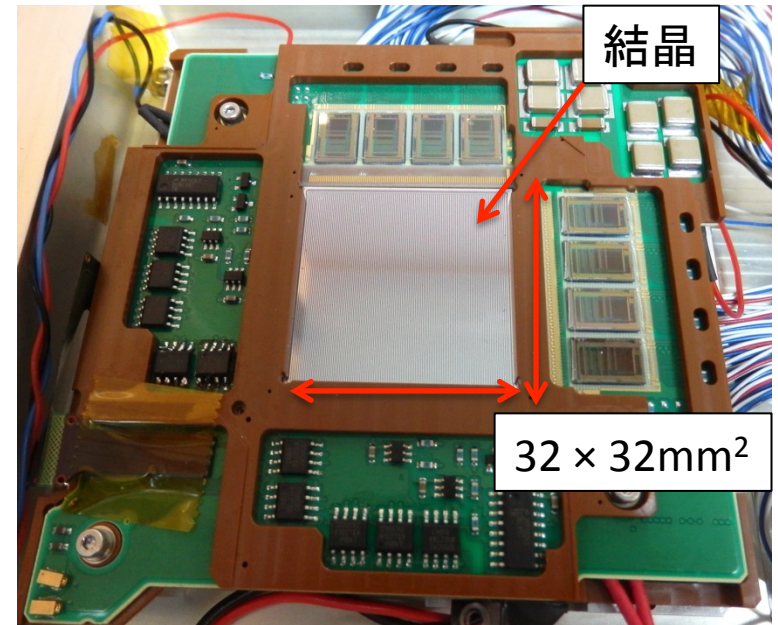
シリコン両面ストリップ検出器(DSSD)

◆ 検出器に必要な性能

- 大きな有効面積でパイルアップ光子を分離できる、電極分割型の検出器
 - エネルギー分解能 : 11keV/18keVを分離可能, $\sigma < 1\text{keV}$
- ASTRO-H衛星用に開発された**シリコン両面ストリップ検出器 (DSSD)**を使用

◆ DSSD

- 開発: JAXA 高橋研究室
 - 結晶寸法 : 32mm×32mm×t0.5mm
 - 電極ストリップ数 : 128(P側) + 128(N側)
 - ストリップ間隔 : 250 μm
- 分解能(σ): 0.55keV @ 22keV



- ストリップに誘起される電荷信号から入射光子の位置情報を取得
- パイルアップイベントを排除可能

SPring-8におけるBG評価

- SACLA 高ルミノシティ環境下でのパイルアップ排除能力を評価したい
→高強度X線光源SPring-8 BL19LXUにてBGのスペクトル・入射位置を測定
結果をスケールし, パイルアップレートの評価
- ラウエ型ビームスプリッターを使用したセットアップで測定

◆SPring-8 BL19LXU ビームライン

-SPring-8 最高強度のビームライン(水平偏光)

-平均強度がSACLA(max)より10倍大きい

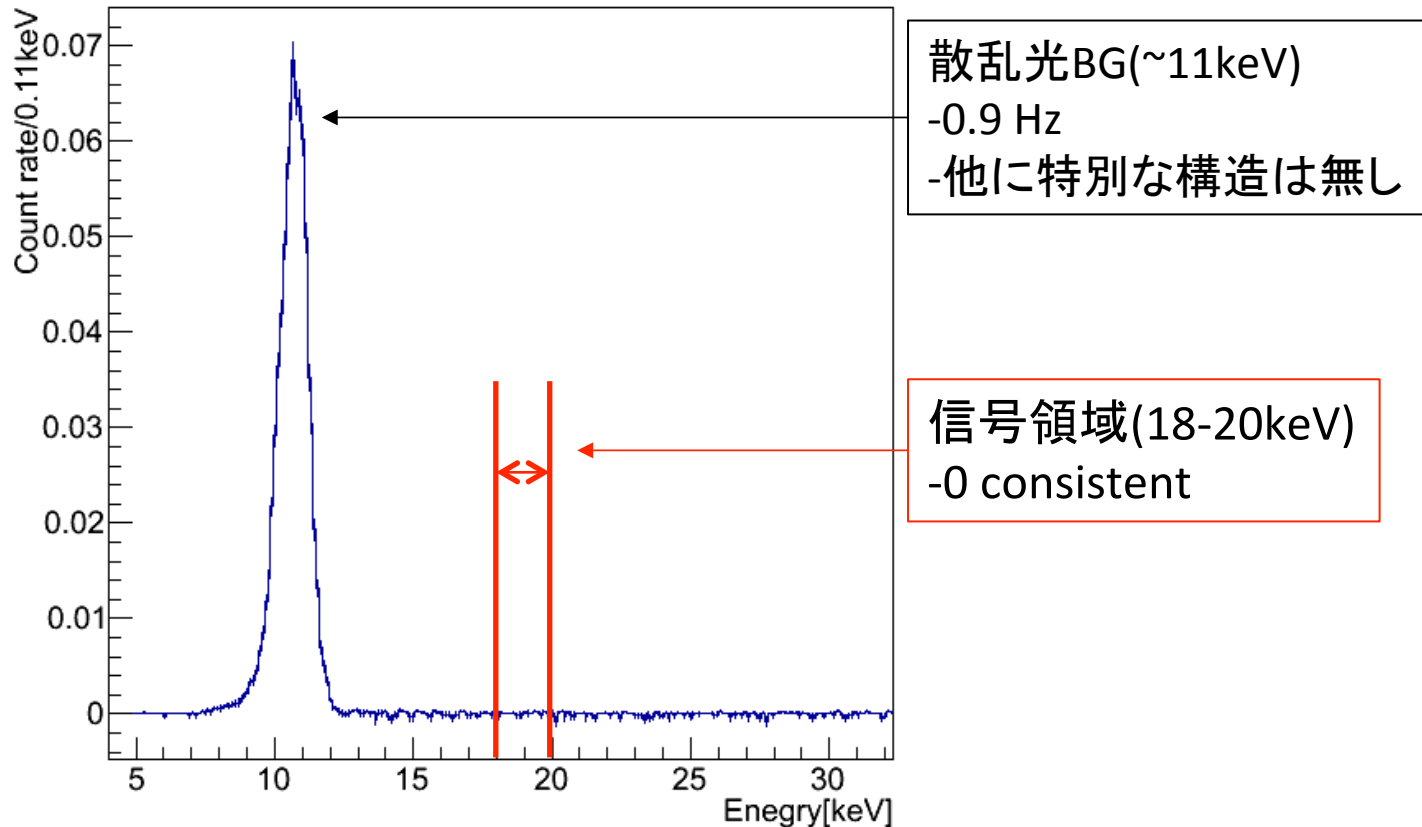
→BG(一光子)のスペクトル・位置分布を測定するのに最適な光源

光源	平均強度@10.985keV	瞬間強度	繰返し
SPring-8 BL19LXU	<u>3.4×10^{13} photon/sec</u>	8.5×10^5 photon/pulse	40 MHz
SACLA BL3(最大)	1.8×10^{12} photon/sec	6×10^{10} photon/pulse	30 Hz

↑ $\times 10$

高強度光源を用いたBG測定・評価結果1/2

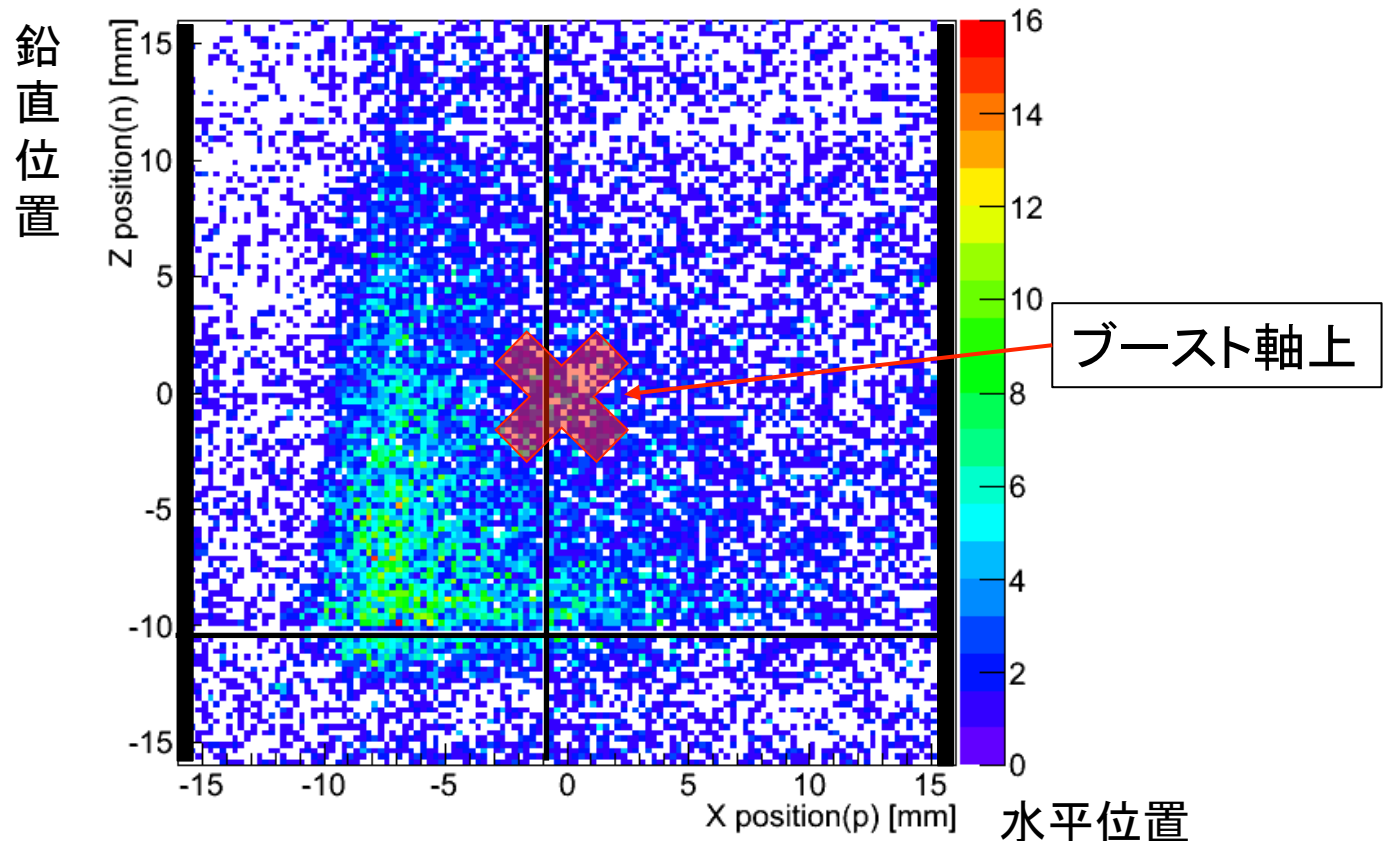
BG スペクトル(環境BG除く)



- 散乱光BGレート: 0.9Hz @ 入射強度 3.4×10^{13} photon/sec (Geant4 MCと整合)
- SACLA最大強度(6×10^{10} photon/pulse)にスケールすると,
検出器に入射するBG光子のレート $\mu = 1.6 \times 10^{-3}$ photon/pulse
→バルク検出器だと、パイルアップレート: $O(10)$ /day

高強度光源を用いたBG測定・評価結果2/2

BG光子の入射位置



- BGはDSSD全体にブロードに分布
- パイルアップするには光子が同じ位置に入る必要
- DSSDの場合、バルク検出器($\mu^2/2$)に比べ $\sim 128^{-2}$ にパイルアップが減る
- パイルアップレート: $0(10^{-3})/\text{day}$ であり十分に低い

期待感度とその次のステップ

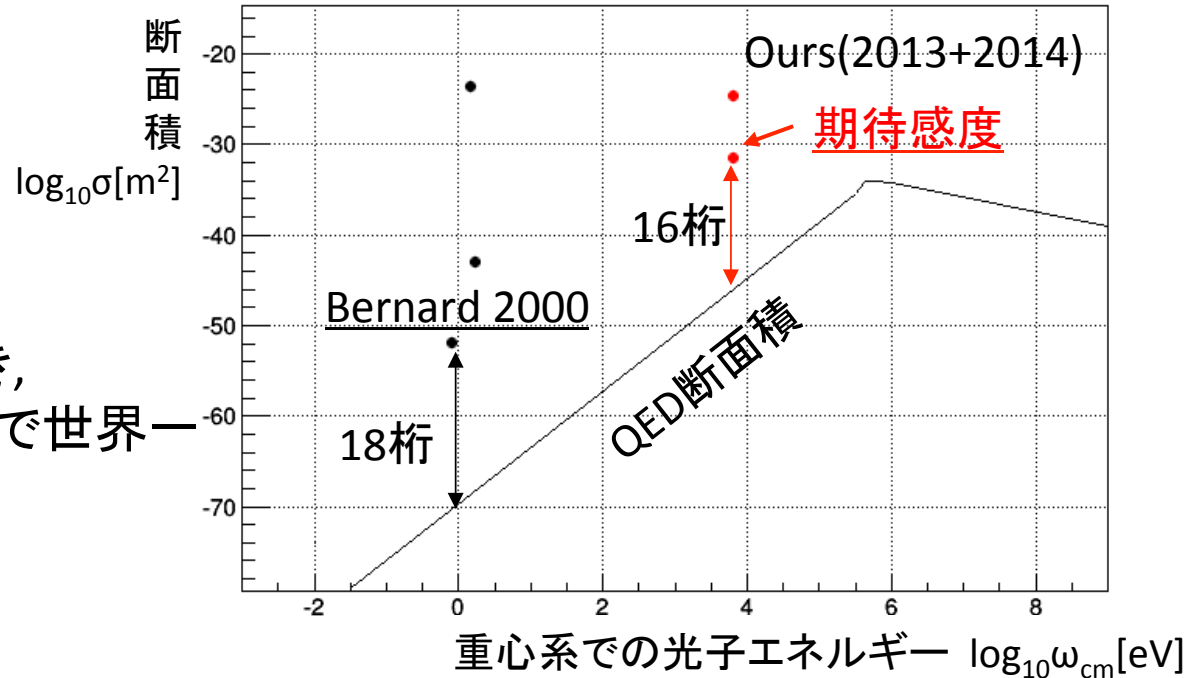
◆期待感度

-このセットアップの期待感度

$$:\sigma_{\gamma\gamma\rightarrow\gamma\gamma} = O(10^{-32}) [\text{m}^2]$$

@ 6.5keV (QEDの16桁上)

-先行実験(Bernard 2000)を抜き、
QED断面積に対する相対感度で世界一



◆その次のステップ:四光波混合(Bernard 2000で利用)

-**四光波混合**: 三本目のビーム(励起光)で散乱光を励起
励起光強度に比例した感度向上が可能

-SACLAのX線を3つに分けて交差させ, QED事象に迫る感度で実験を行う

まとめ

- 実光子の光子光子散乱は未観測:QEDの重要な検証
- X線領域での光子光子散乱実験を行っているが、現在の断面積感度はQEDの23桁上

◆次のステップ

- SACLAのシード化・Bragg型ビームスプリッターの使用により
現行セットアップで7桁感度向上した実験が可能
- 高ルミノシティ環境での散乱光同士のパイルアップを排除するために、
電極分割型の検出器を使用した測定系を構築
- SPring-8でのBG評価から、十分なBG抑制を達成

◆その次のステップ

- 四光波混合により散乱光を励起する実験を行う