

SPring-8/SACLAにおける 光子光子散乱の探索 II

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

日本物理学会2013年秋季大会@高知大学 2013/09/20

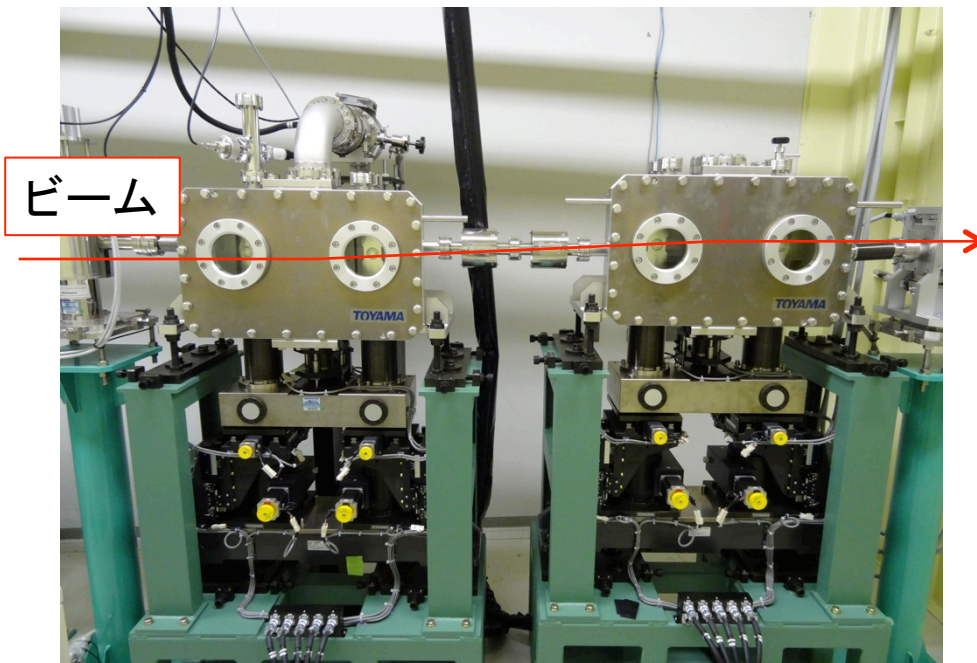
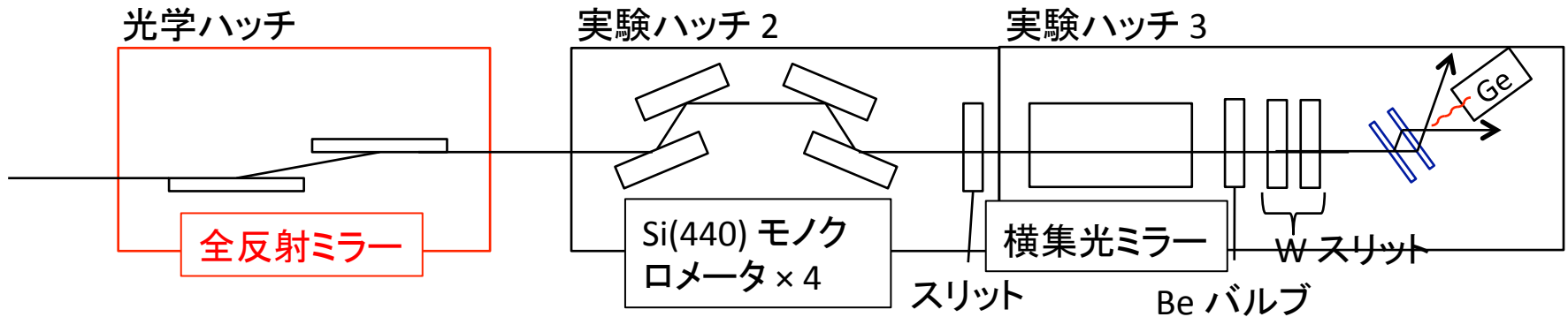
γ - γ 散乱実験(おさらい)

- 入射ビームの性質
 - エネルギー 10.985 keV
 - 繰り返し周期 20 Hz
 - パルス幅 < 10 fs
 - ビームサイズ $\sim 200 \mu\text{m}$ (σ) \rightarrow 横のみ集光して $1 \mu\text{m}$ \wedge (縦長)
 - 生スペクトルには 2 次, 3 次の高調波が含まれている
 - バンド幅 $\sim 100 \text{ eV} \rightarrow \text{Si}(440)$ では $\sim 0.1 \text{ eV}$ に単色化されるので, そのままチェンバーへ入射すると大半が BG 源に
- シグナル: ブースト軸の前方へ放出される 18-20 keV の X 線
ビームと同期したトリガーで環境 BG をカット
- ビームタイム: 2013. 7/24 - 7/25

SACLA へ追加したセットアップ 1/3

全反射ミラー

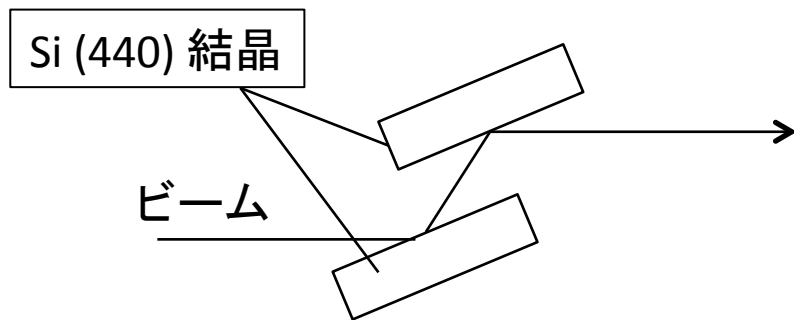
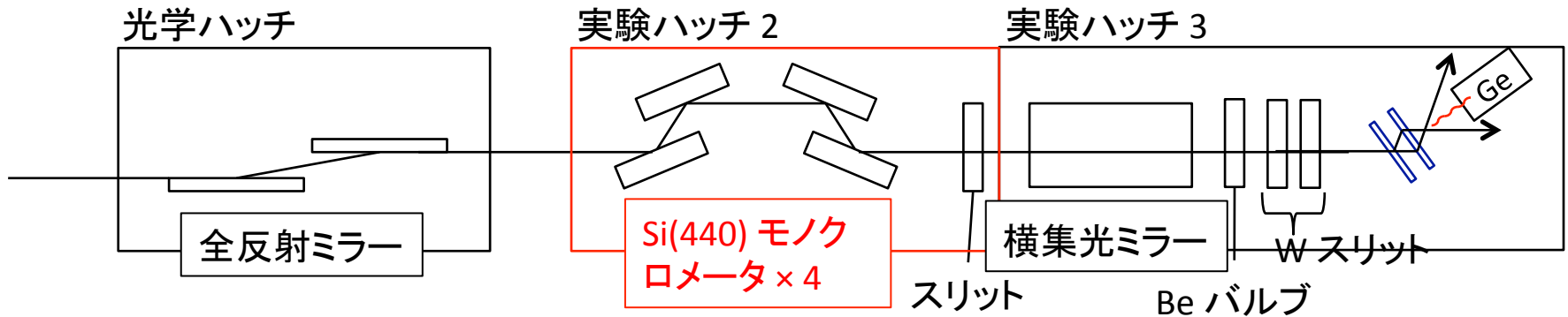
JPS 2013 Autumn
Kochi University
Sep. 20th, 2013



- ミラー表面に浅い角度でビームを入射すると、X線が全反射
⇒ 臨界面角は高エネルギーほど浅い
- 1 mrad 程度のはね角にすると 11 keV 以上のX線は全反射されない
⇒ **高調波のカット**
- 平行なミラー 2 枚を組み合わせて、ビームの水平性を保つ

SACLA へ追加したセットアップ 2/3 モノクロメータ

JPS 2013 Autumn
Kochi University
Sep. 20th, 2013

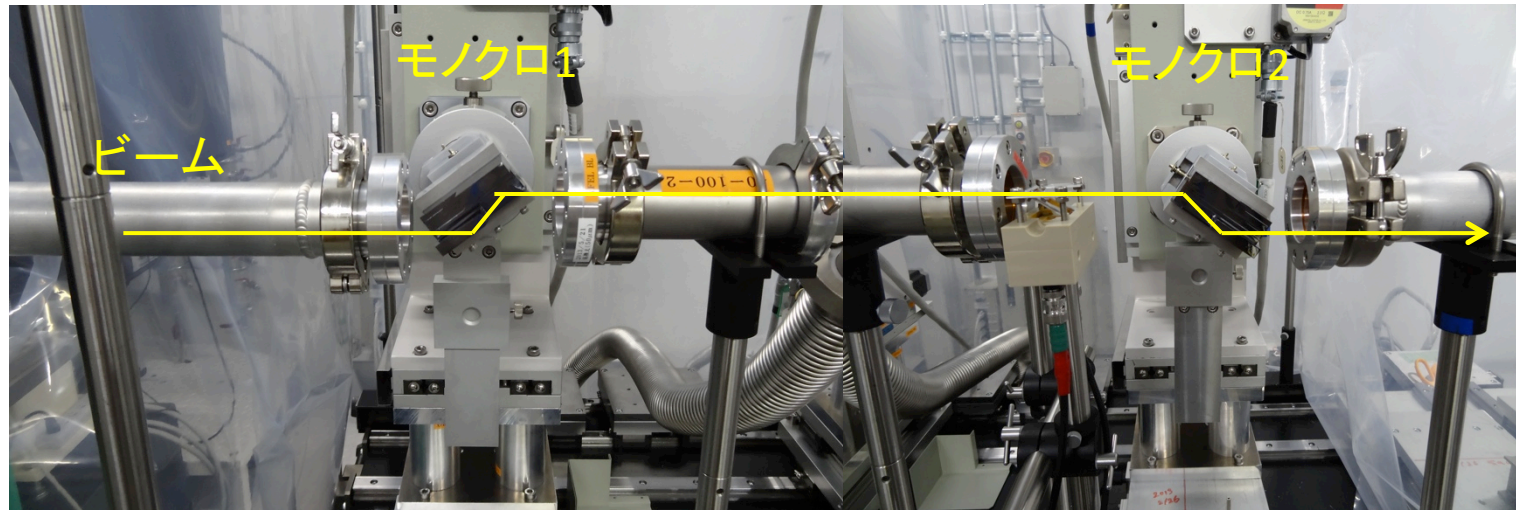
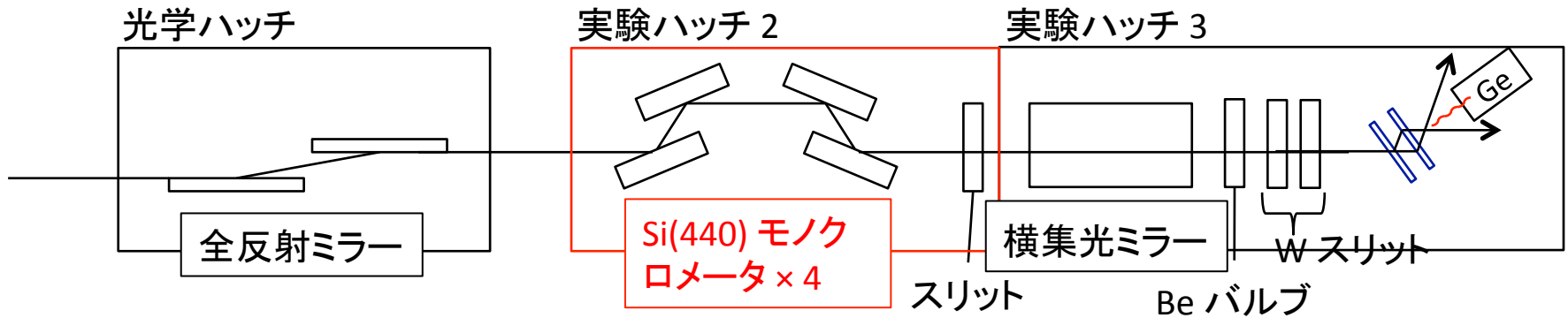


- スプリッタに対する単色性が悪いと
 - 非回折 1 次光 (ラウエしない成分)
 - チェンバーからの SUS 蛍光
- による BG が増加
- ⇒ スプリッタと同じ Si(440) 結晶を上流に配置して先に単色性を上げておく

- 結晶表面でブラッグ反射, 2つの結晶でビームの軸を平行に保つ
- 2セット組み合わせてビーム軸のオフセットを戻す

SACLA へ追加したセットアップ 2/3 モノクロメータ

JPS 2013 Autumn
Kochi University
Sep. 20th, 2013

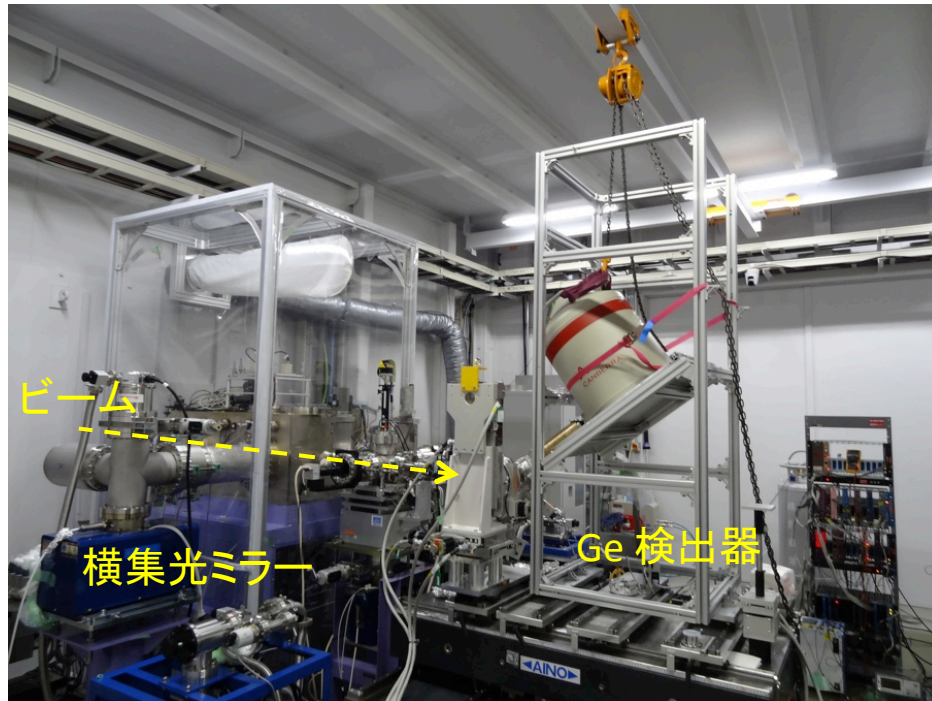
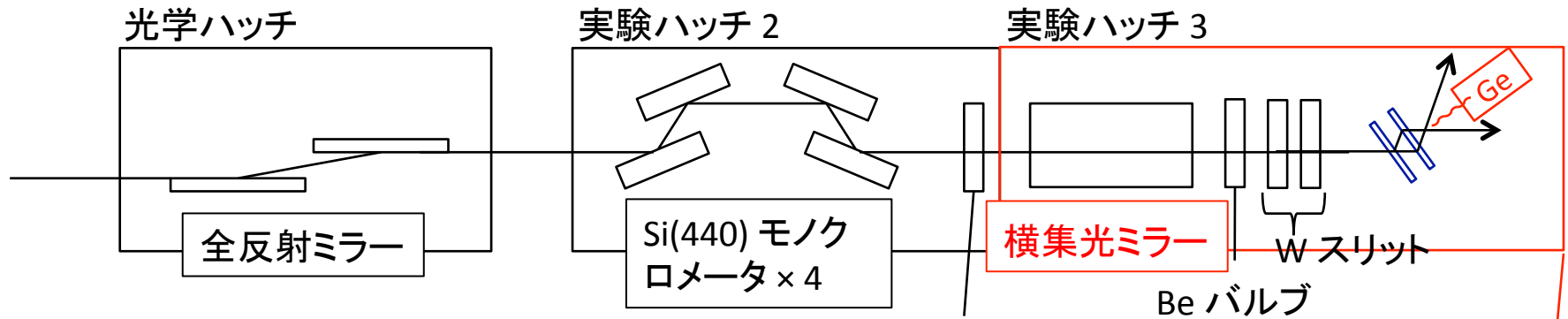


- 結晶表面でブラッグ反射，2つの結晶でビームの軸を平行に保つ
- 2セット組み合わせてビーム軸のオフセットを戻す

SACLA へ追加したセットアップ 3/3

集光ミラーと検出器

JPS 2013 Autumn
Kochi University
Sep. 20th, 2013



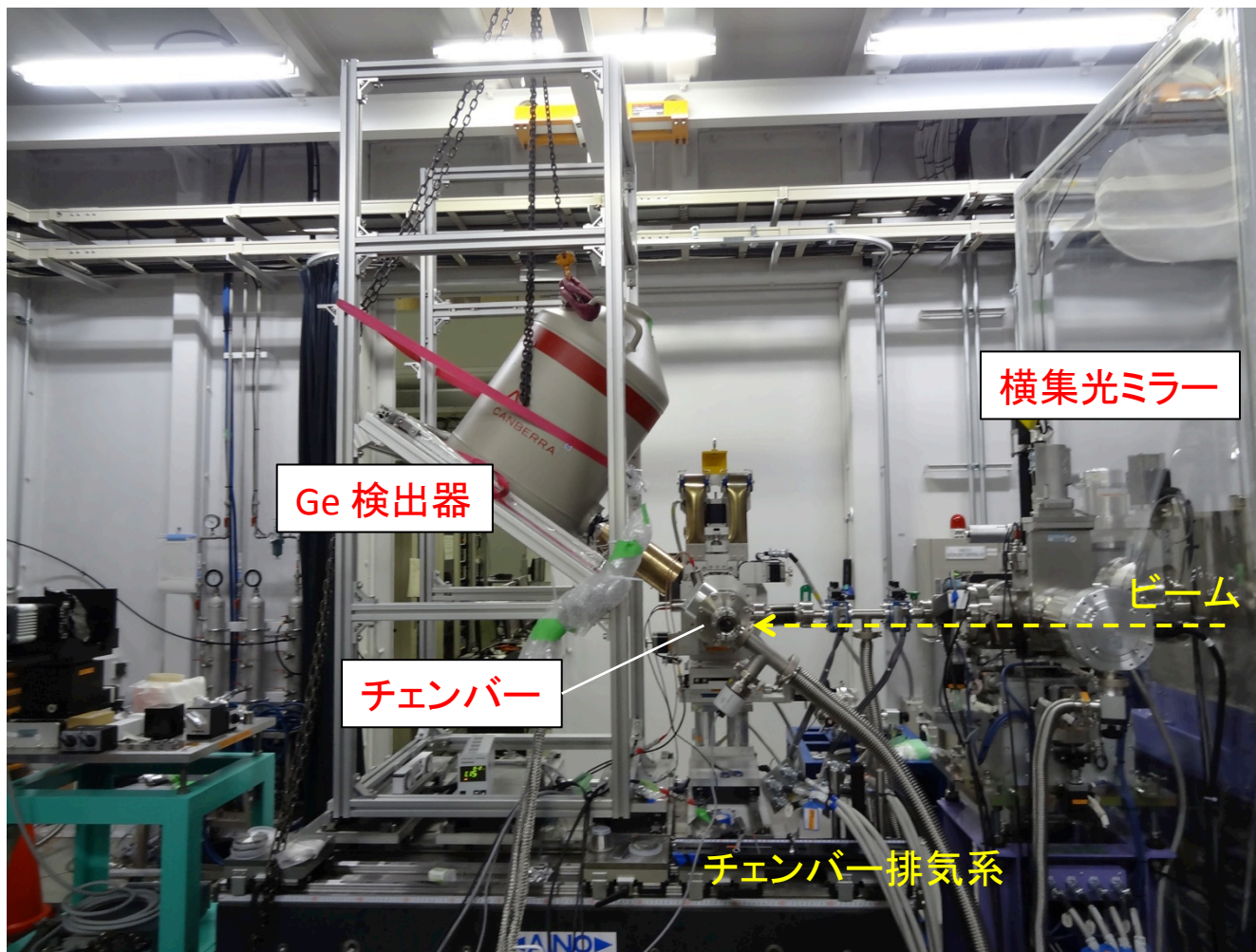
スリット

- $1 \mu\text{m}$ 集光ミラーで横方向を2桁絞る
- ⇒ ルミノシティの増加
- Ge 検出器をビーム軸から 36° 傾けてシグナルのテーパー穴と同じ軸上に Ge 結晶を配置

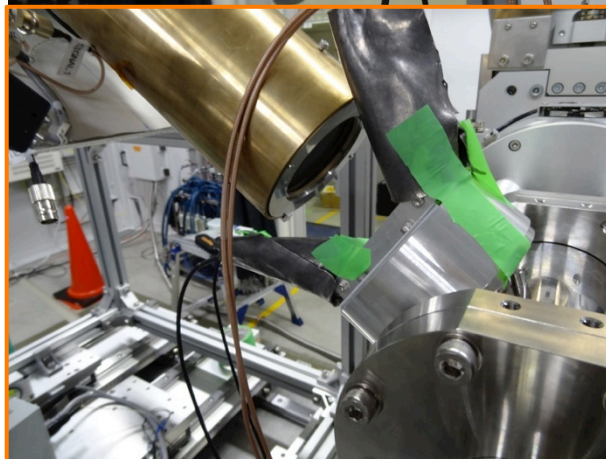
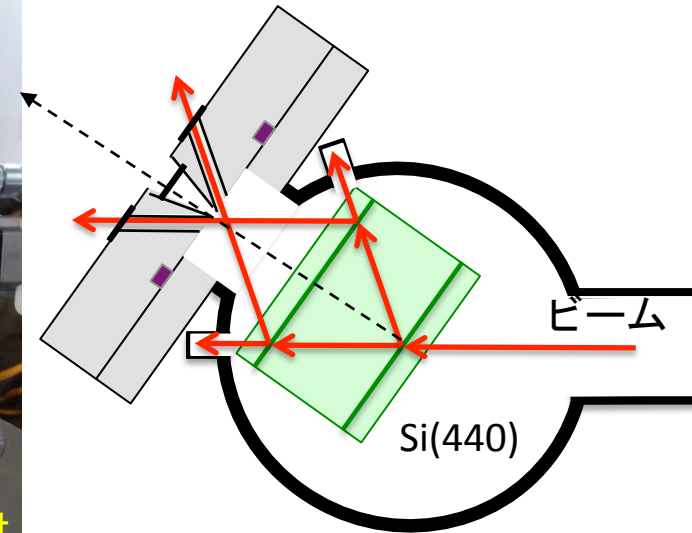
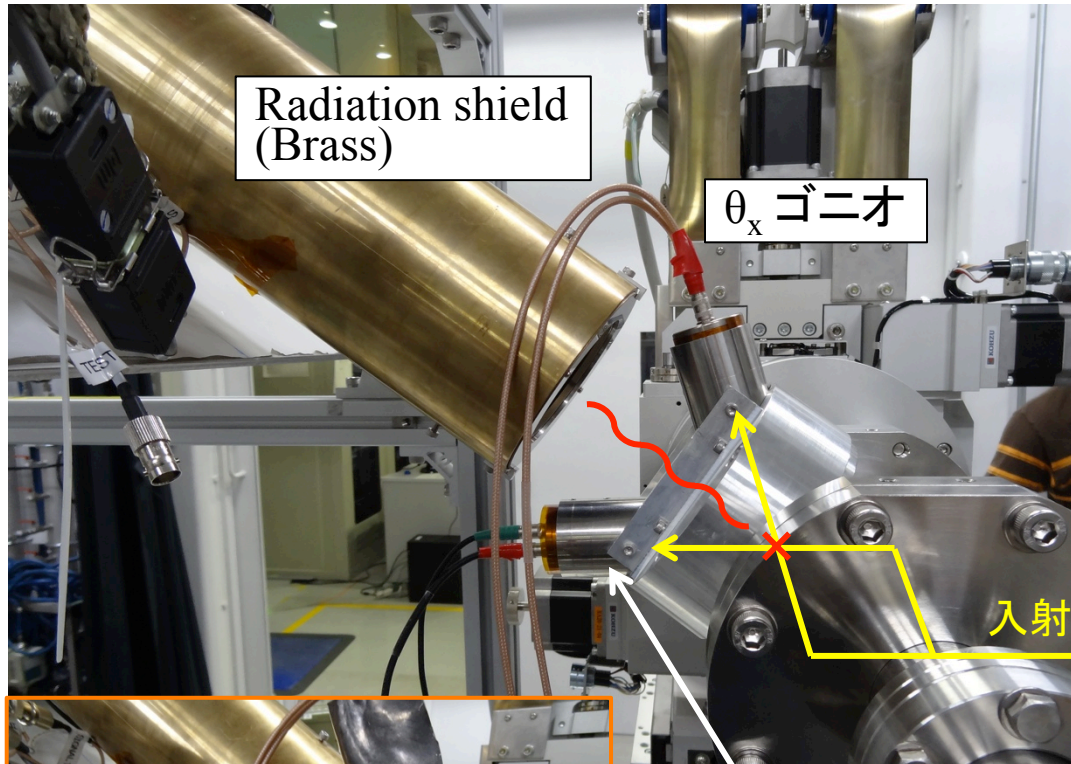
実験ハッチ 3 全体の様子

JPS 2013 Autumn
Kochi University
Sep. 20th, 2013

ハッチ奥側からみて



チェンバー周り



ビームダンプ兼
強度モニタ用 PD × 2
⇒ パルス毎に強度を記録

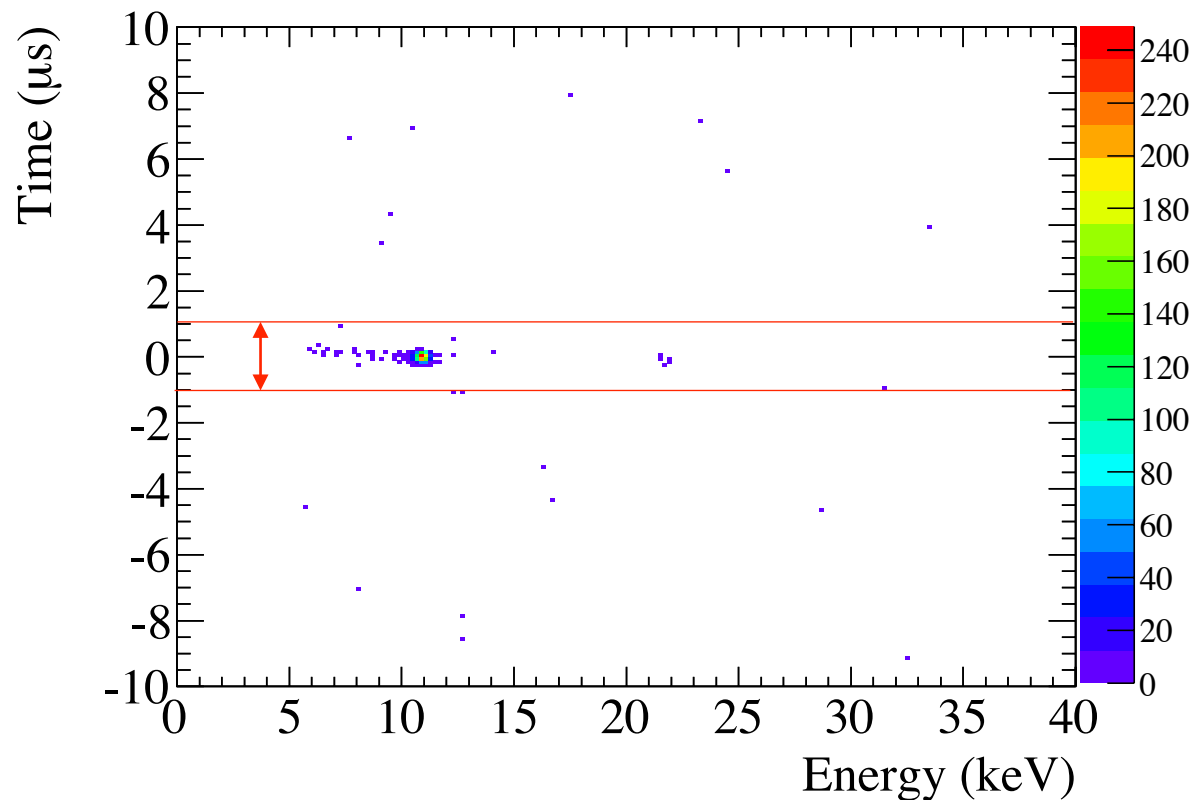
測定中は PD を鉛で巻いて漏れ光を遮断

測定結果 1/2

タイミングエネルギー分布

JPS 2013 Autumn
Kochi University
Sep. 20th, 2013

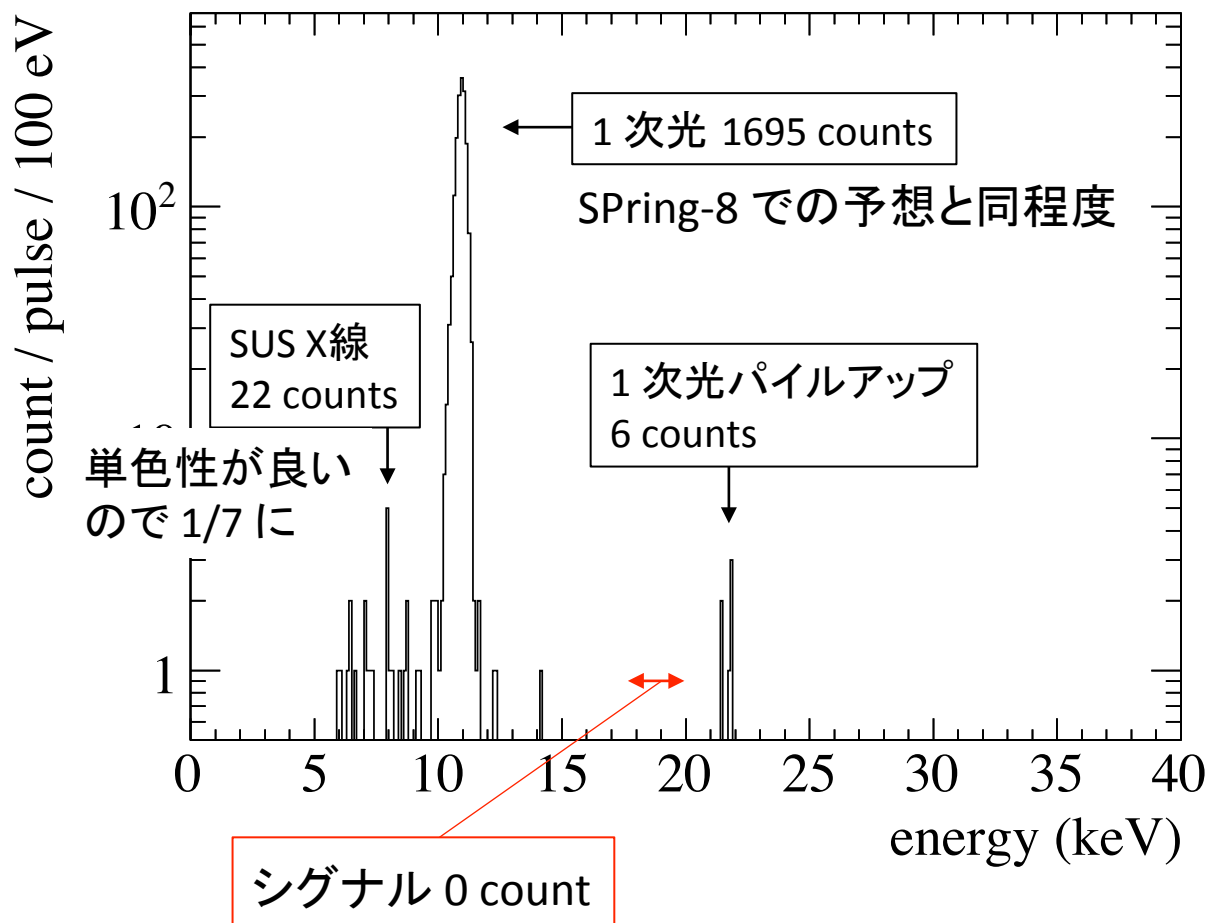
- 9 時間 DAQ して, 合計
9 時間 \times 20 Hz = 6.5×10^5 pulse を入射



- ビーム周りに time window $\pm 1 \mu\text{s}$
- ビームと同期しない環境 BG (16 counts) をカット

測定結果 2/2

Ge スペクトル, timing cut 後

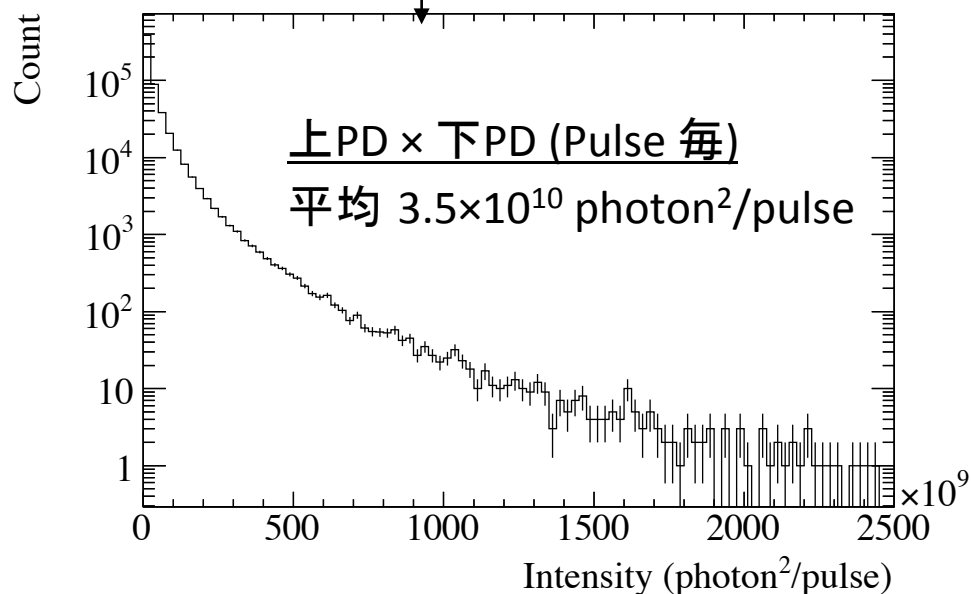
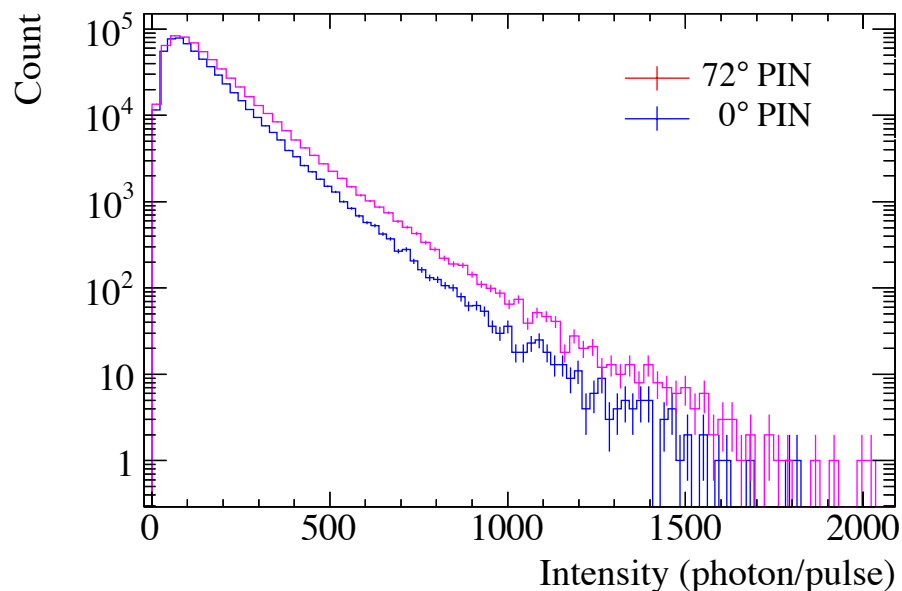


- 有意なシグナルは観測されず

強度分布 干渉計後のビームを pulse 毎にモニタ

- 上 PIN: 平均 1.6×10^5 photon/pulse
- 下 PIN: 平均 1.4×10^5 photon/pulse

二光子散乱の観測イベント数は
2本の**ビーム強度の積**に比例

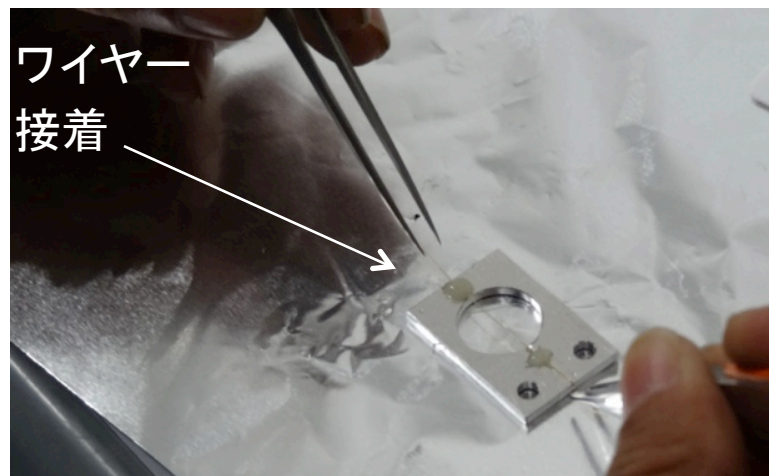


- 各 PIN での Si 300 μm の吸収率 83%, 空気・カプトン窓での減衰 3% を考慮して, 平均 5.5×10^{10} photon²/pulse

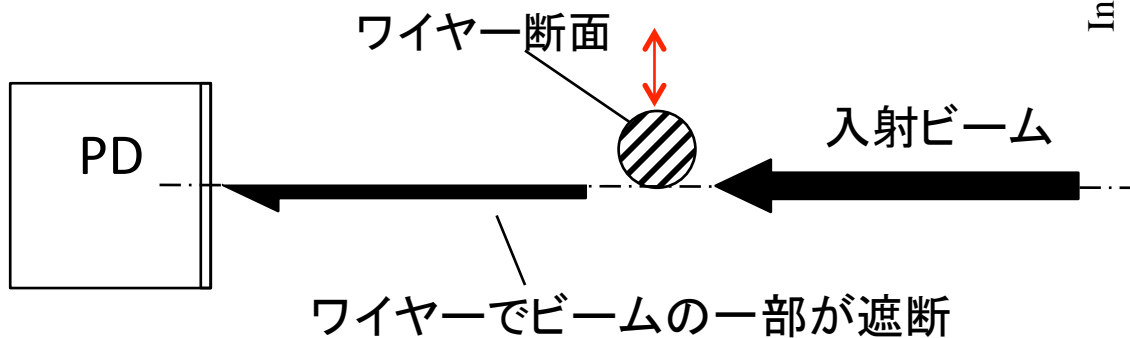
ビーム幅測定, 横 1/2 セットアップ

JPS 2013 Autumn
Kochi University
Sep. 20th, 2013

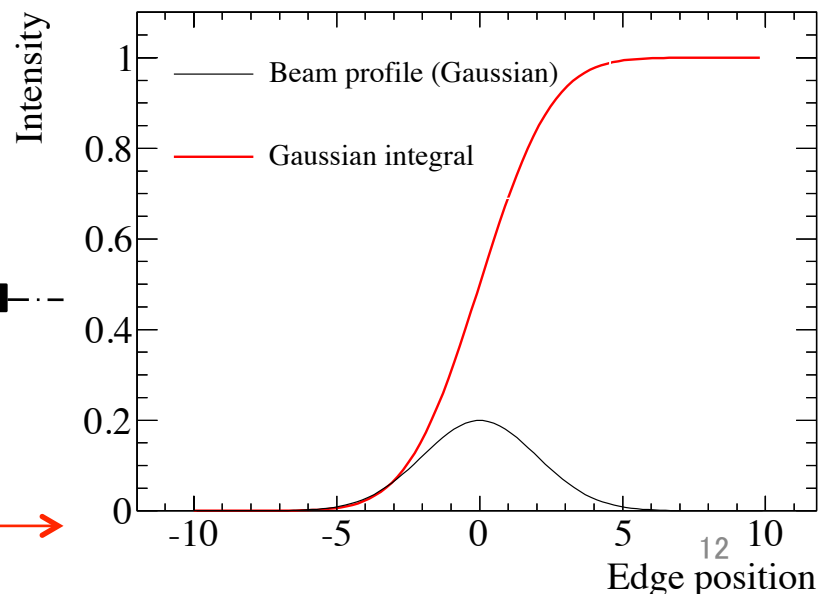
- $\phi 200 \mu\text{m}$ の金ワイヤーをジグに接着
- ジグをのせたステージを動かしてビームをエッジスキャン
- 透過光を後ろから PD で測定



ワイヤーを鉛直に張る場合(横方向のスキャン)
上から見て



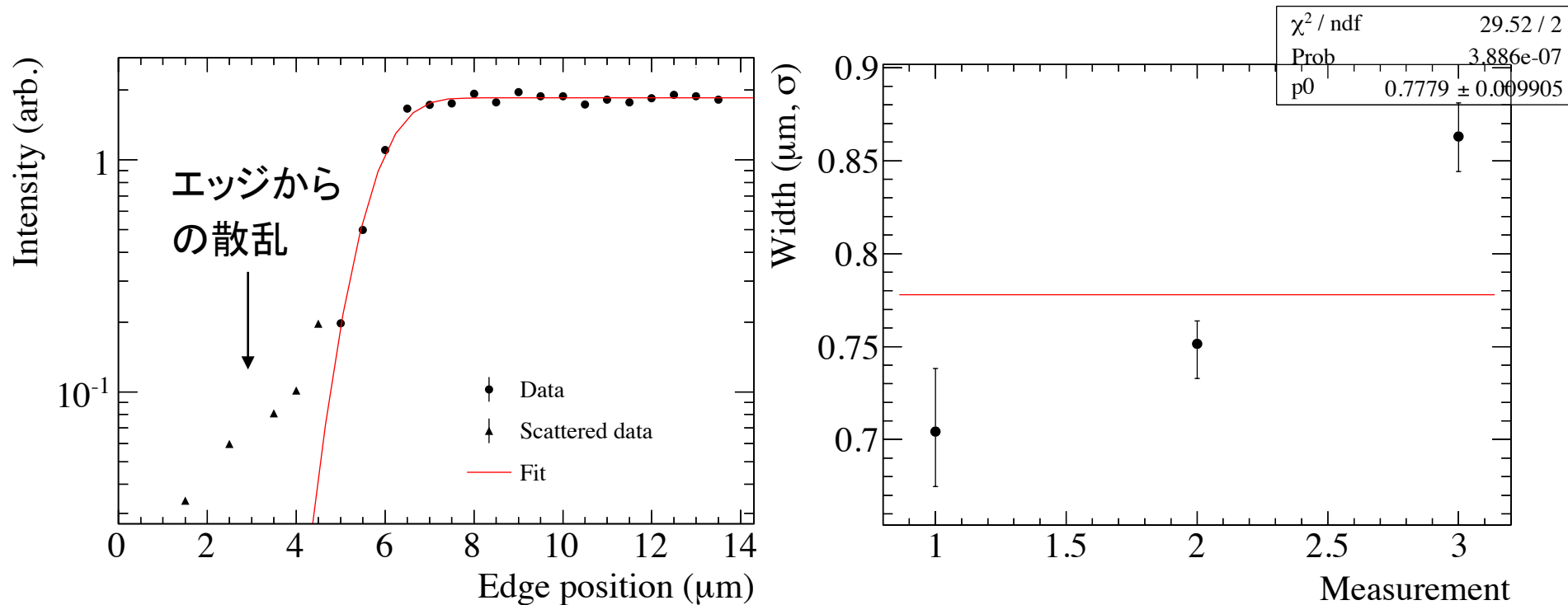
透過光の強度はガウシアンビームの積分



ビーム幅測定, 横 2/2

フィット

- Gaussian の積分 (エラー関数) で生データをそのままフィット

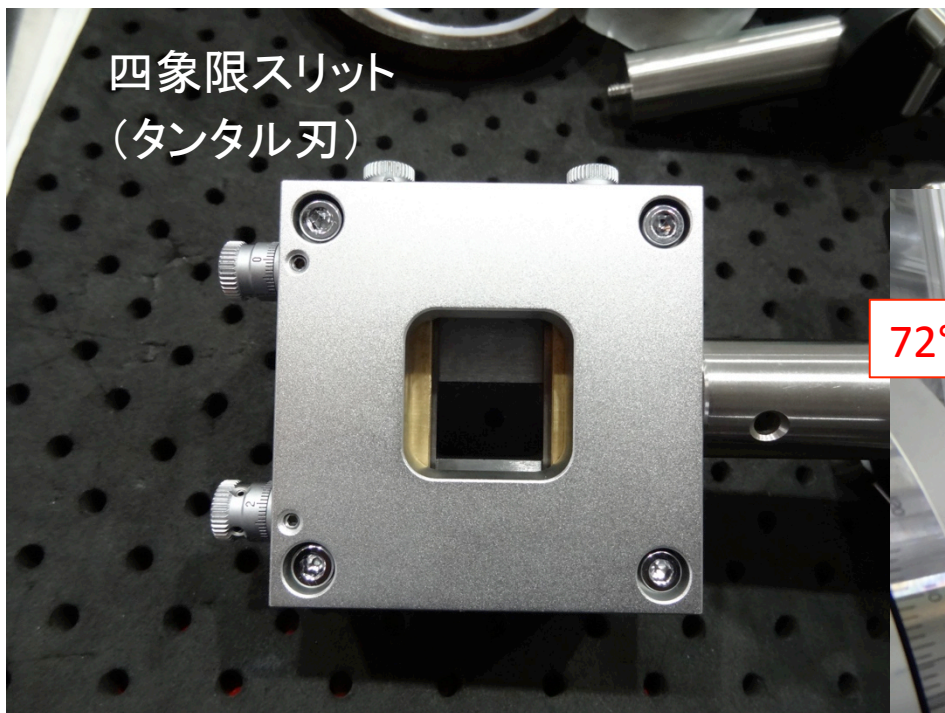


3回の測定のばらつきを系統誤差として計上
 $\Rightarrow \sigma = 0.78 \pm 0.08$ (sys.) μm

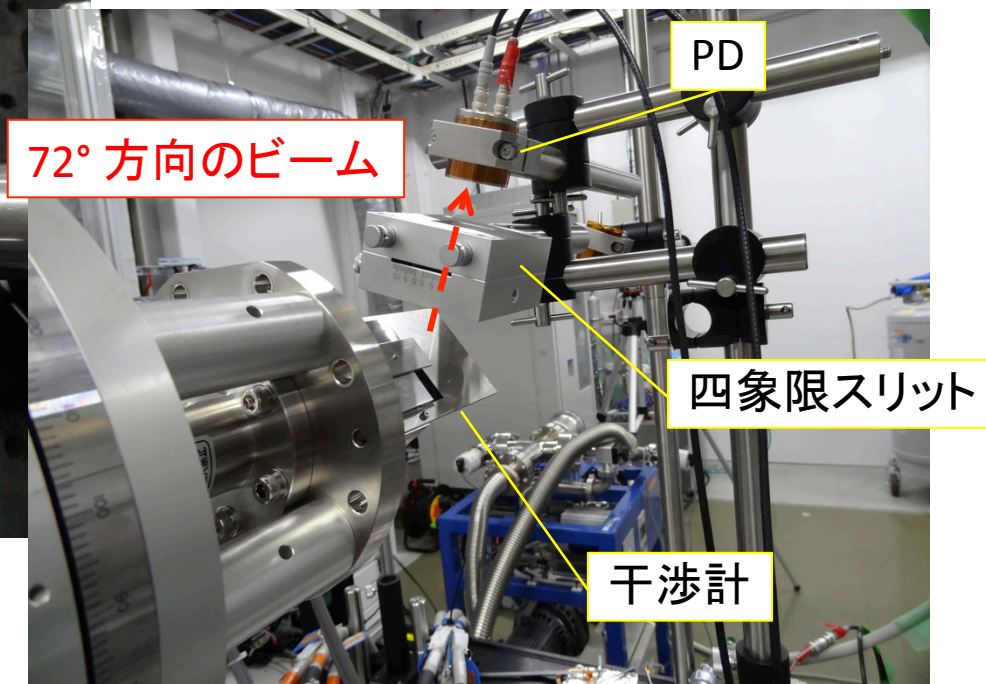
ビーム幅測定, 縦 1/2 セットアップ

JPS 2013 Autumn
Kochi University
Sep. 20th, 2013

- 四象限スリットの刃をエッジとして同様にスキャン
- 干渉計後の 0° 方向, 72° 方向をそれぞれ測定



72° 方向の測定

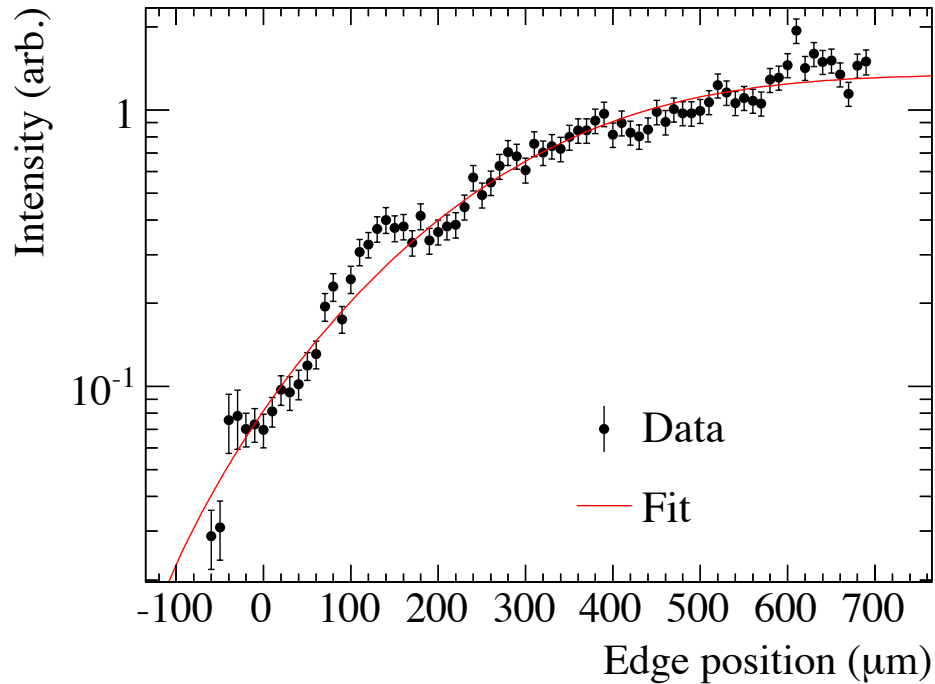


ビーム幅測定, 縦 2/2 フィット

JPS 2013 Autumn
Kochi University
Sep. 20th, 2013

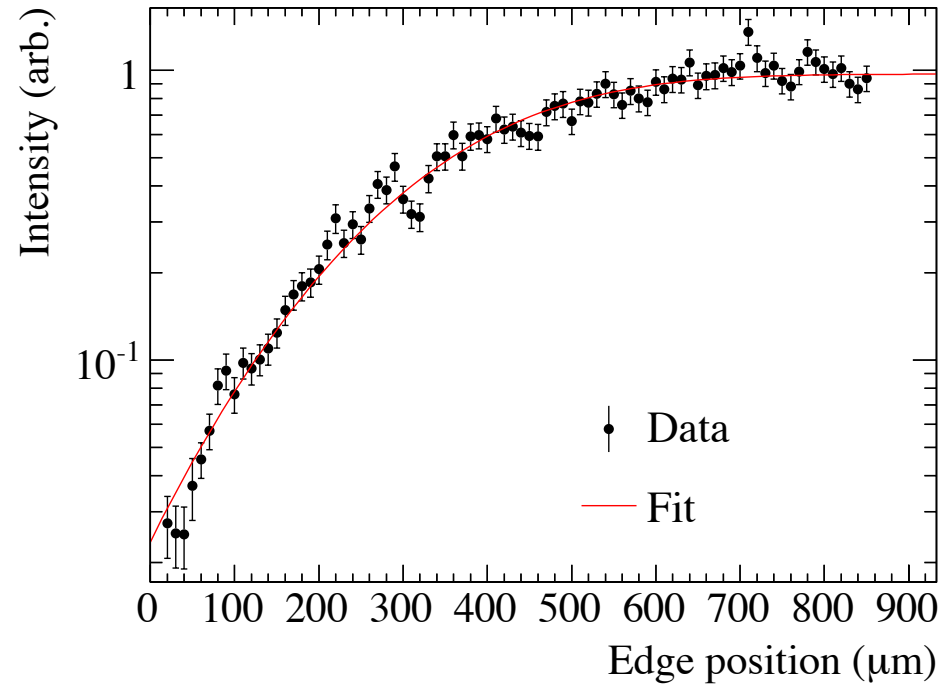
上ビーム(透過反射)

$$\sigma = 215 \pm 8 \mu\text{m}$$



下ビーム(反射反射)

$$\sigma = 200 \pm 4 \mu\text{m}$$



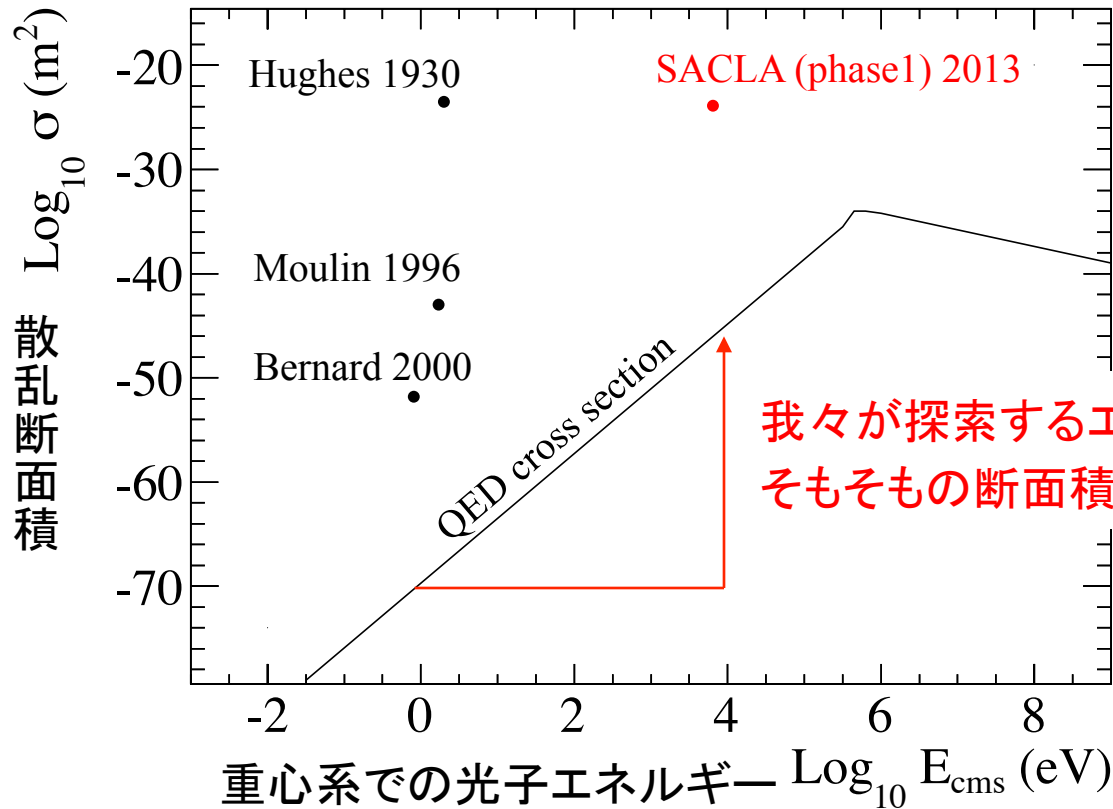
数字まとめ

ビームサイズ Gaussian (σ)	縦 215 $\mu\text{m} \pm 3.5\%$ (TR), 200 $\mu\text{m} \pm 2.0\%$ (RR) 横 0.778 $\mu\text{m} \pm 10.9\%$
強度 $N_1 \times N_2$	5.46×10^{10} (photon ² /pulse) $\pm 0.3\%$
パルス幅	< 10 fs
ルミノシティ	2.07×10^{19} (m ² ·pulse ⁻¹) @95% C.L.
イベント数	6.49×10^5 pulse => 0 count => 4.6×10^{-6} count/pulse @95%
Ge 検出効率	0.67
QED 全断面積へのリミット	1.9×10^{-24} m ² @95% (QED の 7.6×10^{22} 倍)

$$\begin{array}{ccc}
 \text{検出効率} & \begin{array}{c} \epsilon \sigma \\ \underbrace{4\pi\sigma_x\sigma_y}_{\text{散乱断面積}} \end{array} & \frac{N_1 N_2}{} = N_{obs} \\
 & \text{ルミノシティ (pulse}^{-1}\text{)} & \text{観測イベント数 (pulse}^{-1}\text{)}
 \end{array}$$

過去の実験とリミットの比較

- X線領域に最初のリミット



- まだまだ 1st phase です

Phase 2 来年のゲイン

- SACLA 自体の単色性が design value に(バンド幅 < eV へ向上)
⇒ 入射強度の母数は変わらず, **単色性で3桁半**

	今年	来年
モノクロ後	3×10^7 photon/pulse	10^{11} photon/pulse

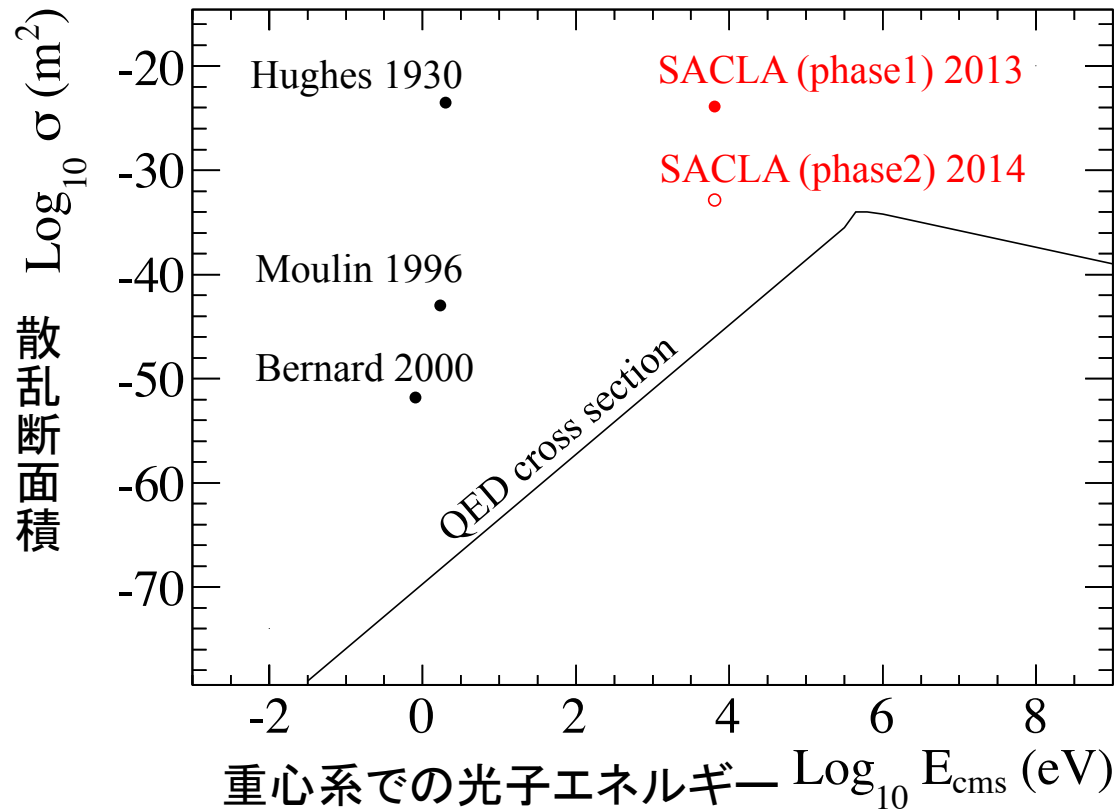
断面積へは強度の2乗で効くので, **7桁**のゲイン

- 総パルス数で更に 1 桁

	今年	来年
総パルス数	9 時間 × 20 Hz	27 時間 × 60 Hz

Phase 2 来年

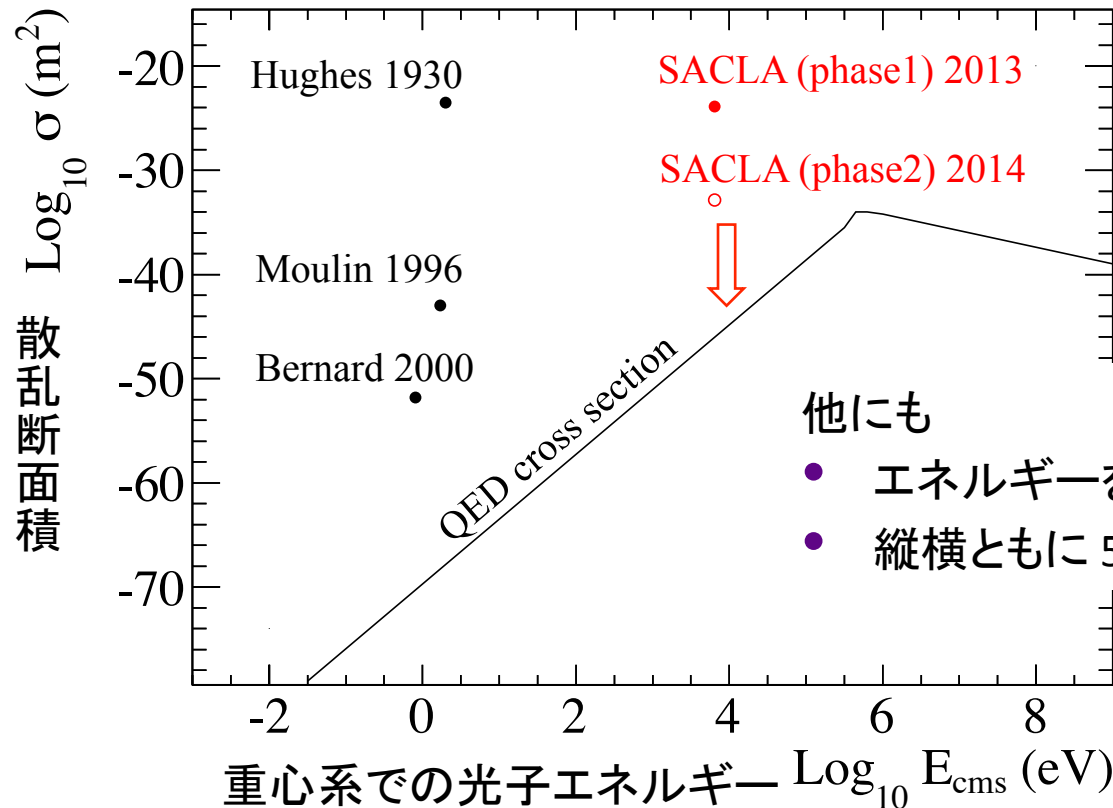
- Phase 2: 来年, **SACLA のスペックアップ**により 今と同じセットアップでも 7-8 桁のゲイン



- 可視光実験も含めて過去最高の感度となる

Phase 3 初観測へ向けて

- 残された伸びしろ
- スプリッタでの回折効率(現状 10%)の4乗のロス
- SACLA と SPring-8 の2ビームの直接衝突で4桁のゲイン → 相互利用施設



他にも

- エネルギーを少し上げる
- 縦横ともに 50 nm 集光など

- もう一本ビームが入射できればビーム3本で induce → 4桁のゲイン

γ - γ 散乱まとめ

- 世界最高輝度のX線パルスレーザー **SACLA** において、干渉計を応用した全く**新しいビーム衝突システム**を考案し、**X線領域で初めて γ - γ 散乱の測定を行った**.
- γ - γ 散乱の有意なシグナルは検出されず、全散乱断面積に対して、
 $1.9 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ @ 95% C.L. (QED の 7.6×10^{22} 倍)
以上大きい断面積を除外した.
- 本結果は第一段階であり、来年以降の光源の性能向上やセットアップの改良などで結果の大幅な更新が見込まれる.