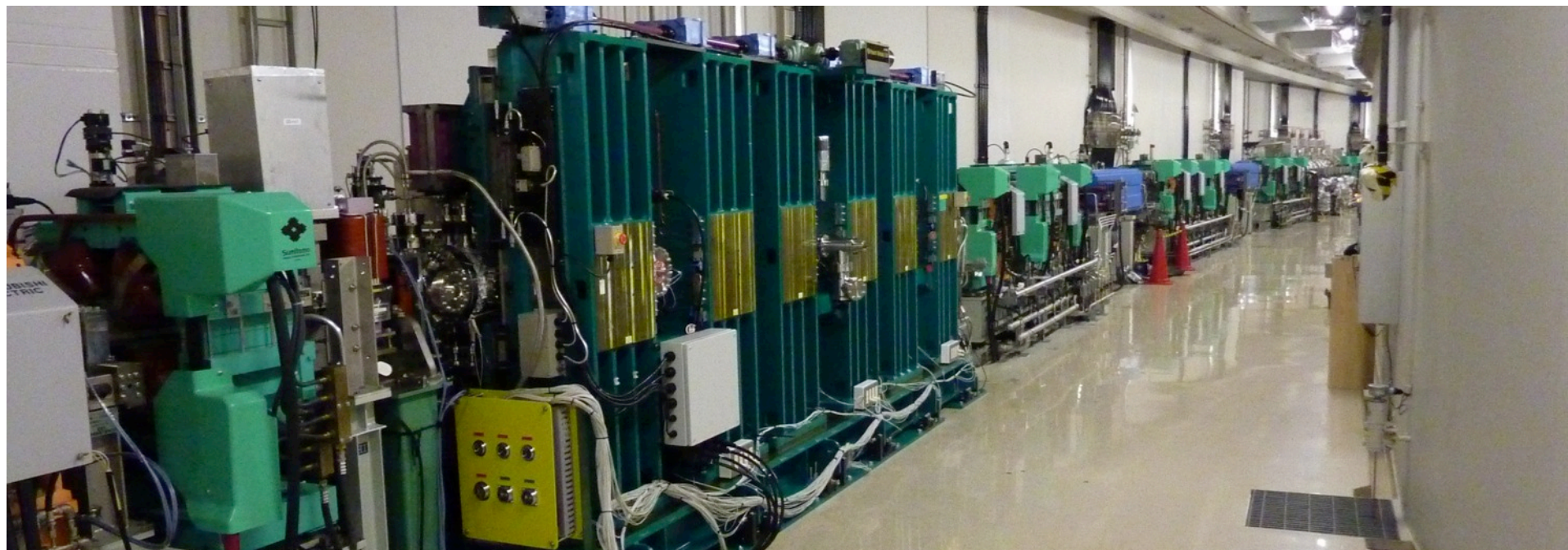


SPring-8 での弱結合未知粒子の探索



稲田聡明, 難波俊雄^A, 浅井祥仁, 小林富雄^A,
玉作賢治^B, 田中義人^B, 澤田桂^B, 石川哲也^B

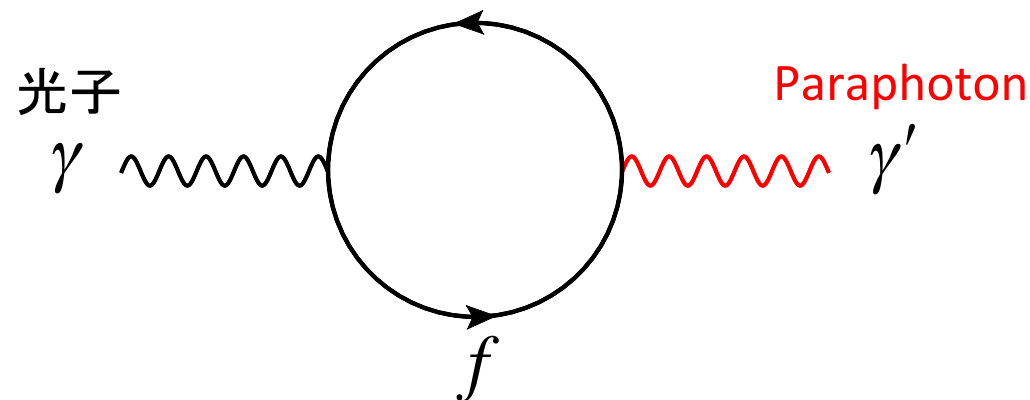
東大理, 東大素セ^A, 理研/SPring-8^B

平成24年9月14日 日本物理学会2012年秋季大会 @ 京都産業大学

光子と弱く結合する未知粒子 Paraphoton

Paraphoton (Hidden photon)

- 多くの SM 拡張理論と、ほとんどの String 理論で
Extra U(1) Gauge Boson
- 光子と paraphoton の両方と結合するフェルミオンが存在すると、光子が paraphoton へ入れ替わる(逆も同様)

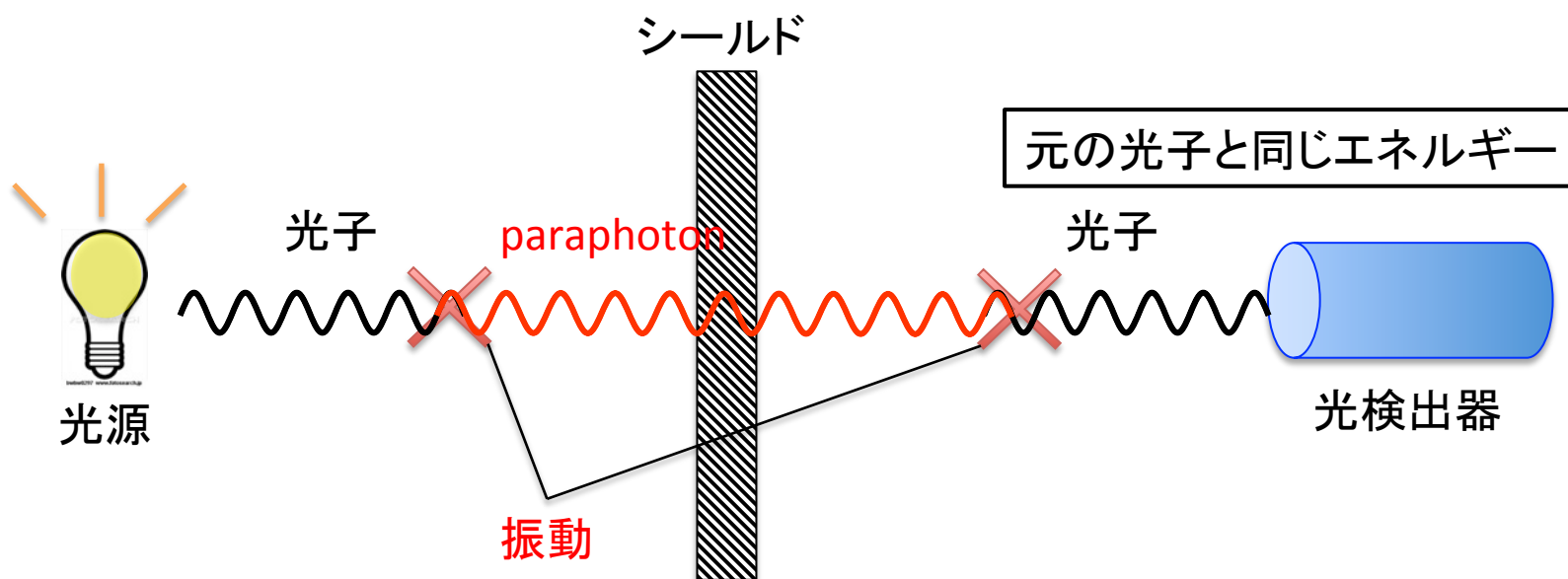


両方の charge を持つ
重いフェルミオン

- SM を超える new particle 探索
- DM の候補, Hidden CMB など

探し方

Paraphoton の性質 : 物質との相互作用が極めて小さい



Paraphoton を介してシールドを通り抜けてくる光子を検出

光子 - Paraphoton 振動

- 光子と paraphoton が量子力学的に微小に混合する現象 (Mixing)
- ニュートリノ振動と類似: 確率 $\gamma \rightarrow \gamma'$ が振動 ($\gamma' \rightarrow \gamma$ も同様)

$$P_{\gamma \rightarrow \gamma'} = 4\chi^2 \sin^2 \left(\frac{m_{\gamma'}^2}{4E_{\gamma}} L \right)$$

paraphoton の質量 (未知量)

変換領域の長さ (セットアップで固定)

光子のエネルギー

χ : 混合パラメータ (未知量), 振動の振幅を決める

質量の値によっては変換があまり起こらない.

→ 光子のエネルギーを**変えた**測定を繰り返し, 変換率の低下を**埋め合わせる**

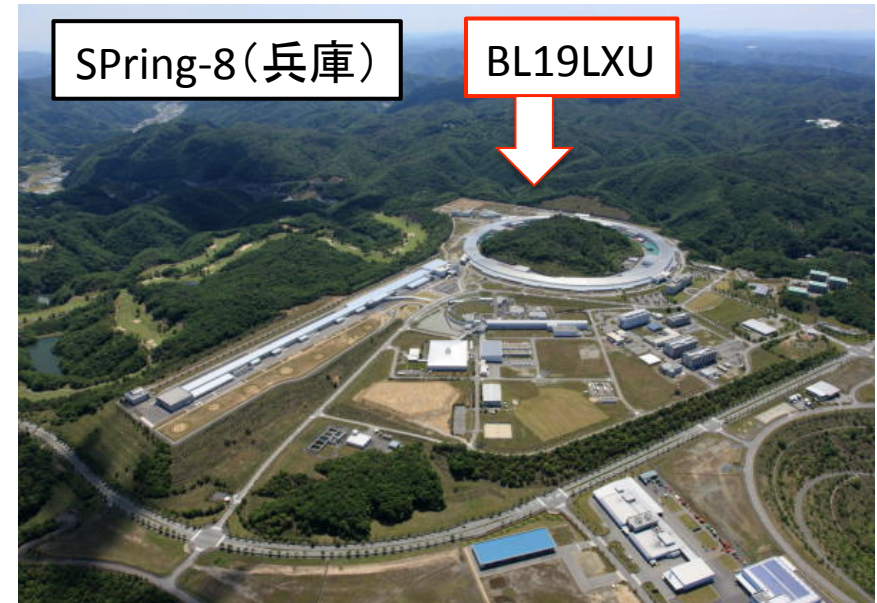
大強度X線ビームで、重い Paraphoton を高感度に狙う

1. Paraphoton の質量

- 探索できる質量の上限は、光子エネルギーEのルートで決まる($\sqrt{E}$)
(SPring-8 X線光源は、従来の可視光源よりエネルギーが4桁高いので、2桁重い粒子を探索できる)

2. 入射光子の母数を増やして、検出感度を上げる

- 約60本のビームライン中で最高強度の **BL19LXU** を使用
(時間平均強度は世界一)
- 標準的な BL より3-4 倍の強度

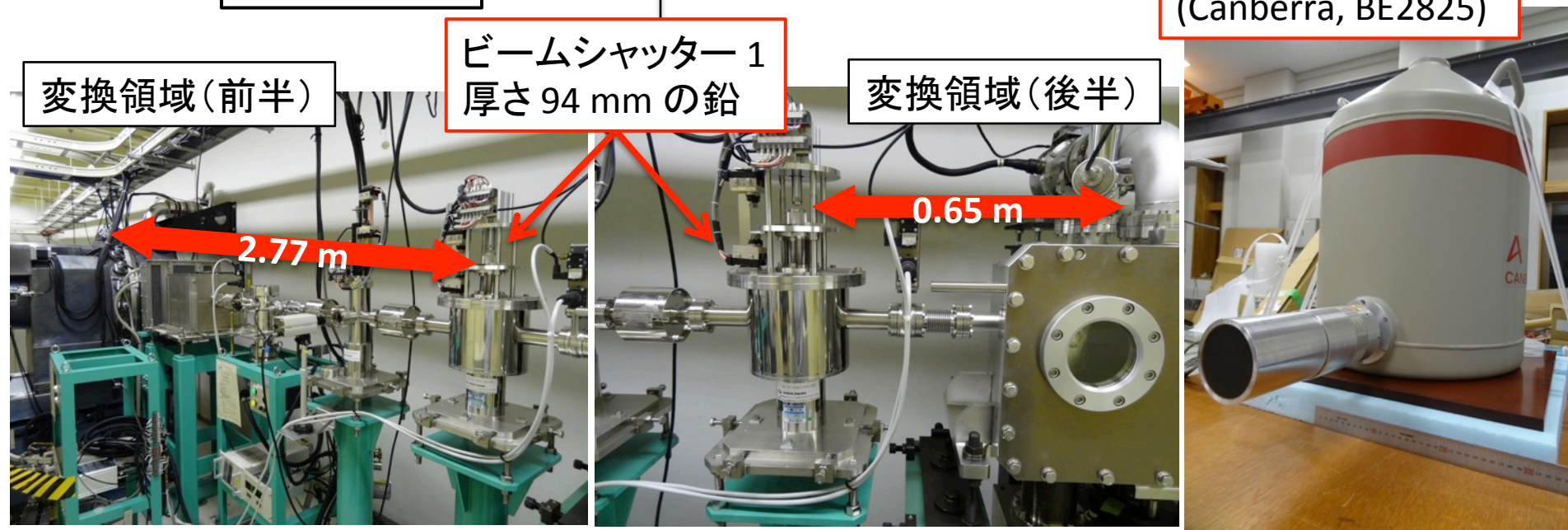
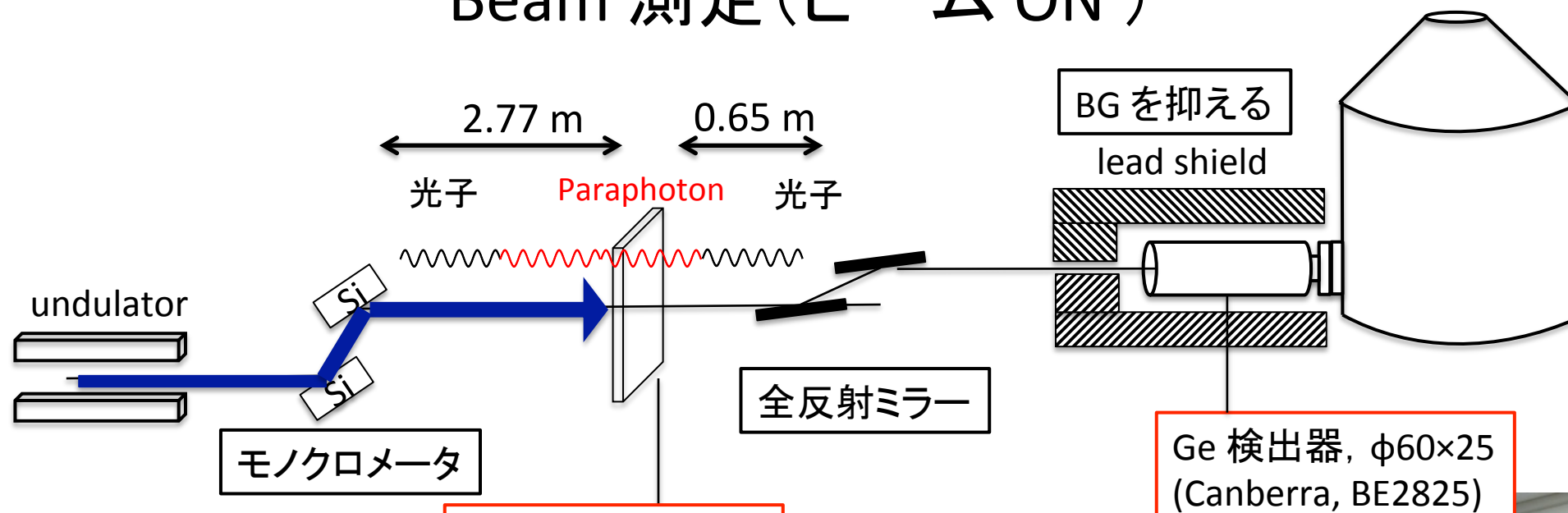


BL19LXU

- エネルギー領域:
7.2 – 51 keV (連続スペクトル)
- ビーム強度:
 $10^{13} - 10^{14}$ photon/s @ 7.2 – 30 keV
- 線幅: 数 eV
- ビームサイズ: 1 mm 程度

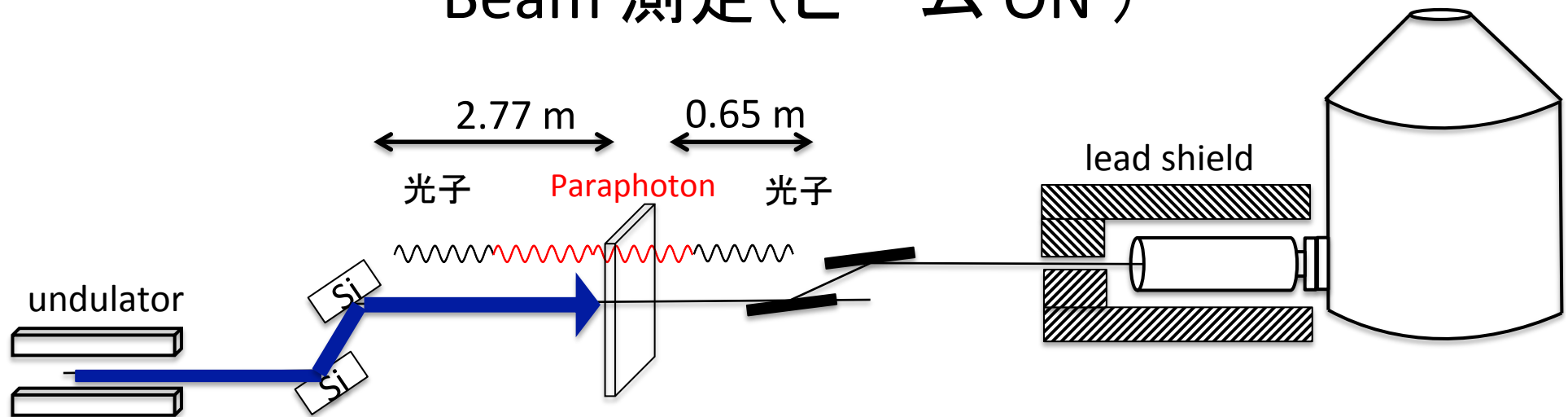
実験のセットアップ 1/2

Beam 測定 (ビーム ON)



実験のセットアップ 1/2

Beam 測定 (ビーム ON)

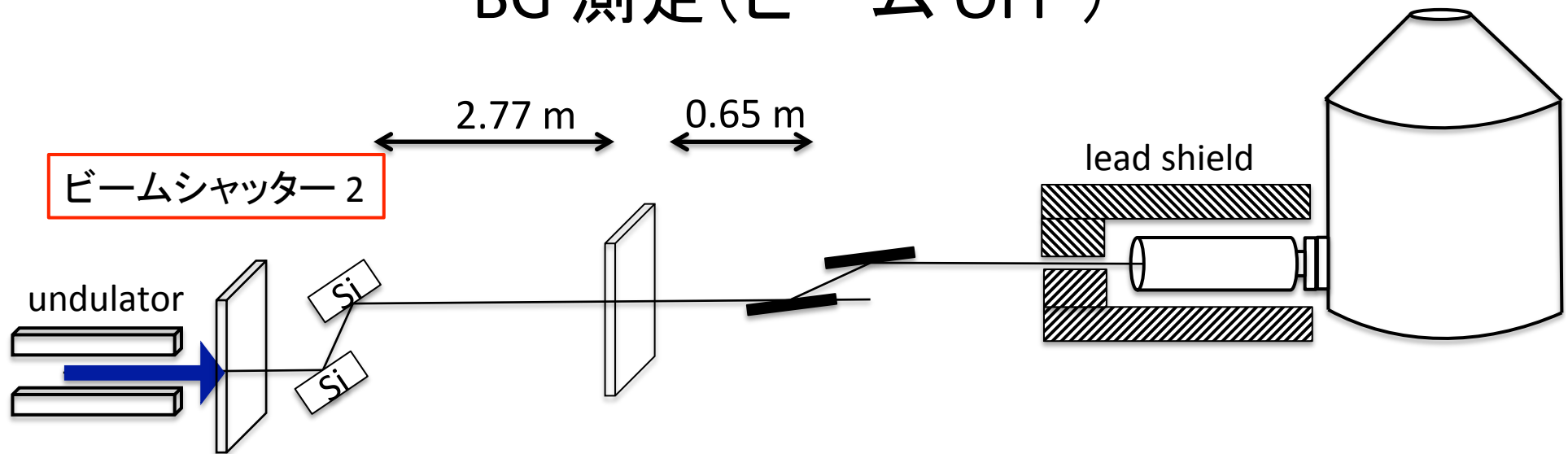


Beam 測定 (ビーム ON)

- ビームエネルギーを変えて9回測定 (各エネルギー 6-8 時間)
- エネルギーは 1 keV 刻みに9種類
 - 1次光: 7.27 (min), 8, 9, 15, 16, 17 keV
 - 中間は鉛のX線と, Ge のK端のため除く
 - 3次光: 21.83, 23, 26 keV

実験のセットアップ 2/2

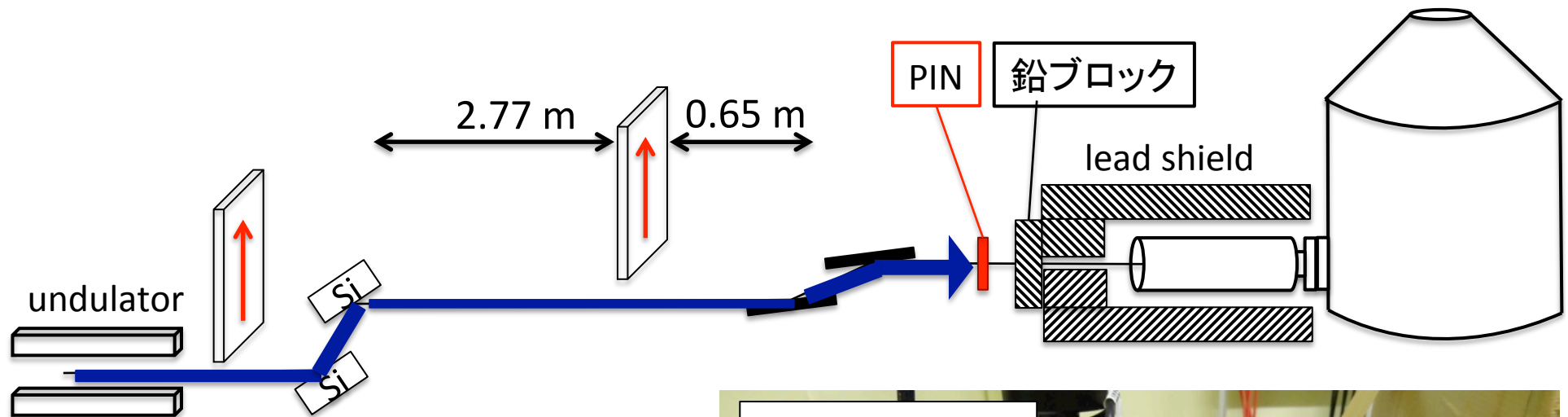
BG 測定(ビーム OFF)



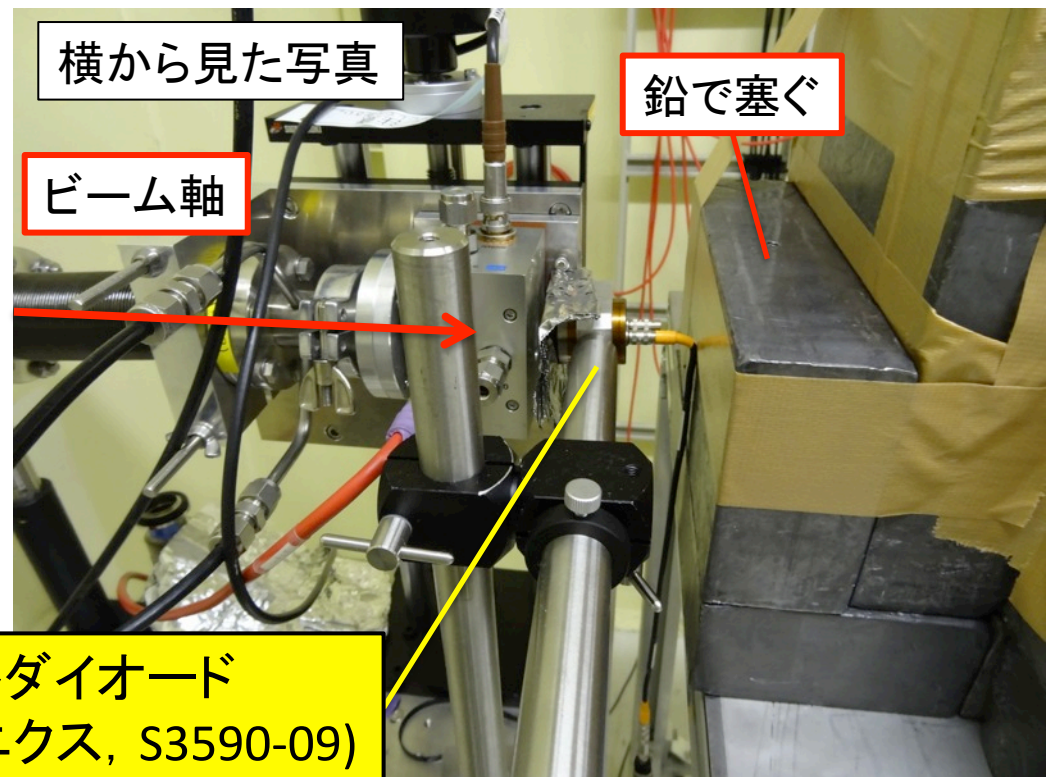
BG 測定(ビーム OFF)

- ビームを OFF にする以外, セットアップは Beam 測定と全く同じ(2日間測定)
- Beam 測定と BG 測定のカウント数に統計的有意な差があれば paraphoton の検出となる

ビーム強度の測定 1/2

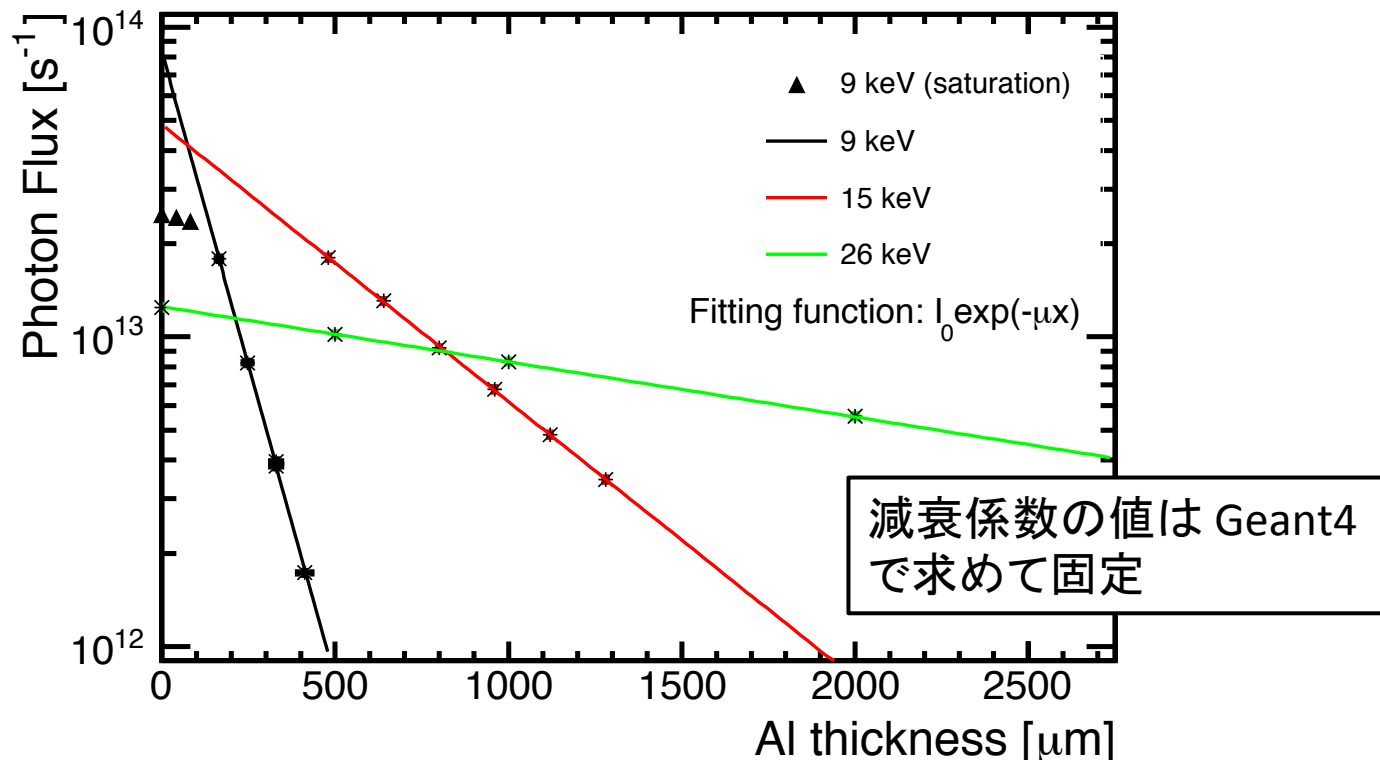


1. ビーム軸上に PIN フォトダイオードを挿入する
 2. シャッターを開け, ビームを通す. (検出器に散乱光が入射しないように, 鉛ブロックで塞ぐ)
- ビーム強度の測定は測定の前後及び, 測定中は数時間毎に行う.



ビーム強度の測定 2/2

- PIN にビームを入射し, 厚さ 300 μm の Si 内に落ちたエネルギーにより生成される e/h ペアの数(カレント)を, ピコアンメータで読んでビーム強度に換算する
- ただし直接ビームを当てると, 強度が強すぎて PIN のカレントがサチるので, Al 箔で減衰させてから入射させる
- Al の厚みを変えて何点か測定し, 厚みゼロの強度を外挿して求める

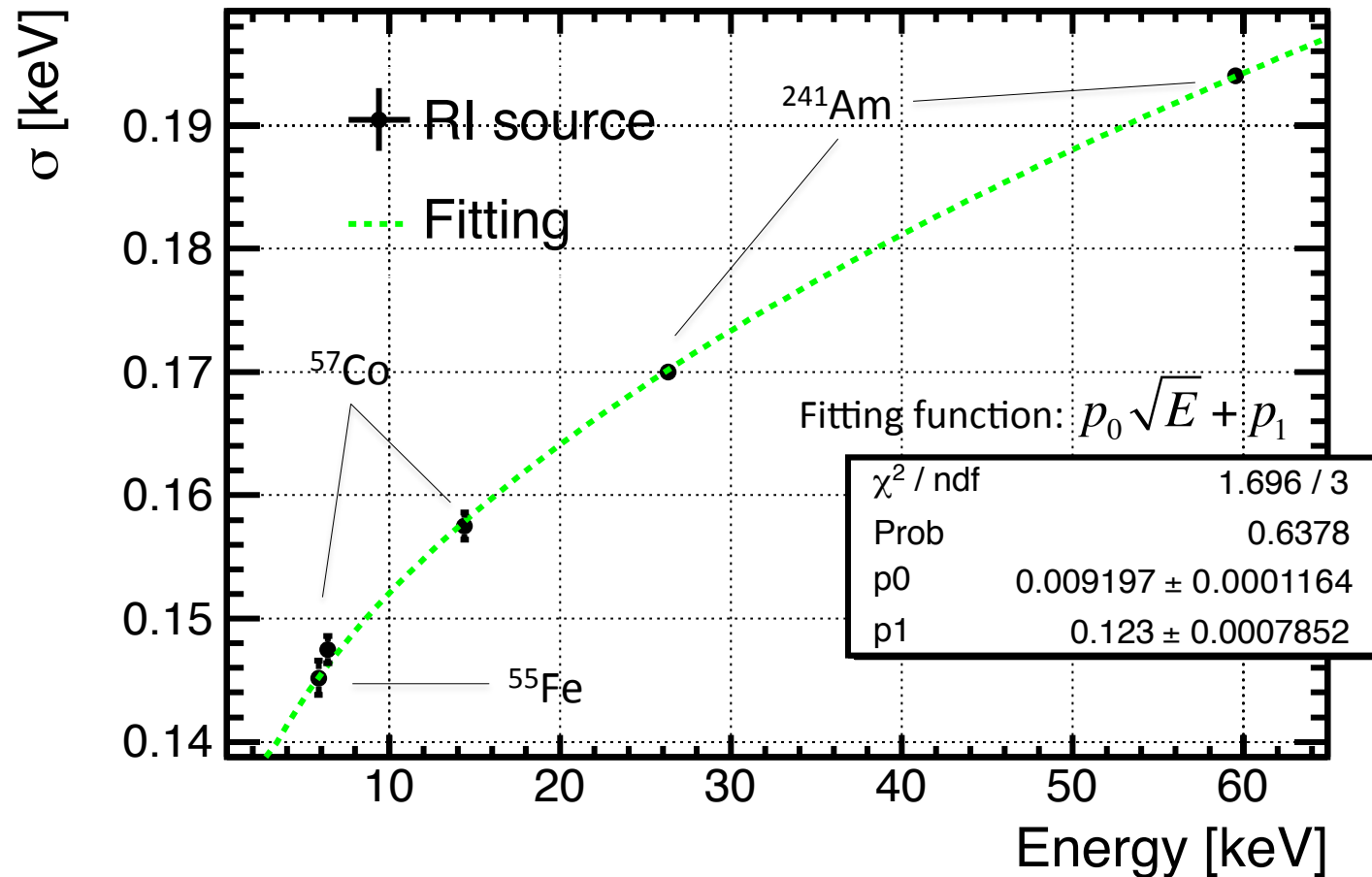


ビーム強度の安定性は 1 - 5% で, ドリフトしたものは保守的に最悪値を用いた.

Ge 検出器の性能 1/2

エネルギー分解能

標準線源からの γ 線, X線を用いて評価

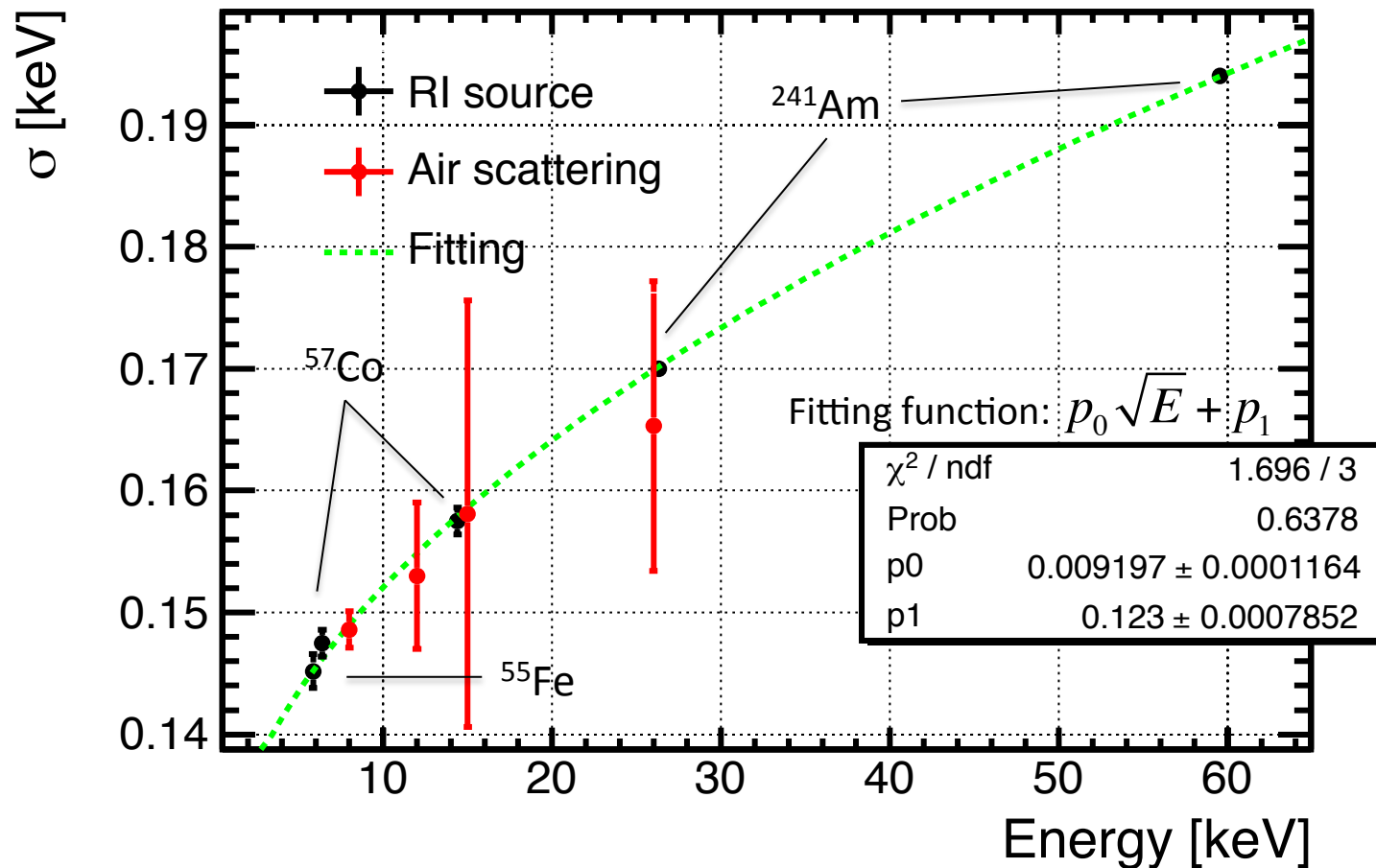


ビームエネルギーから $\pm 2\sigma$ を signal region にとる

Ge 検出器の性能 1/2

エネルギー分解能

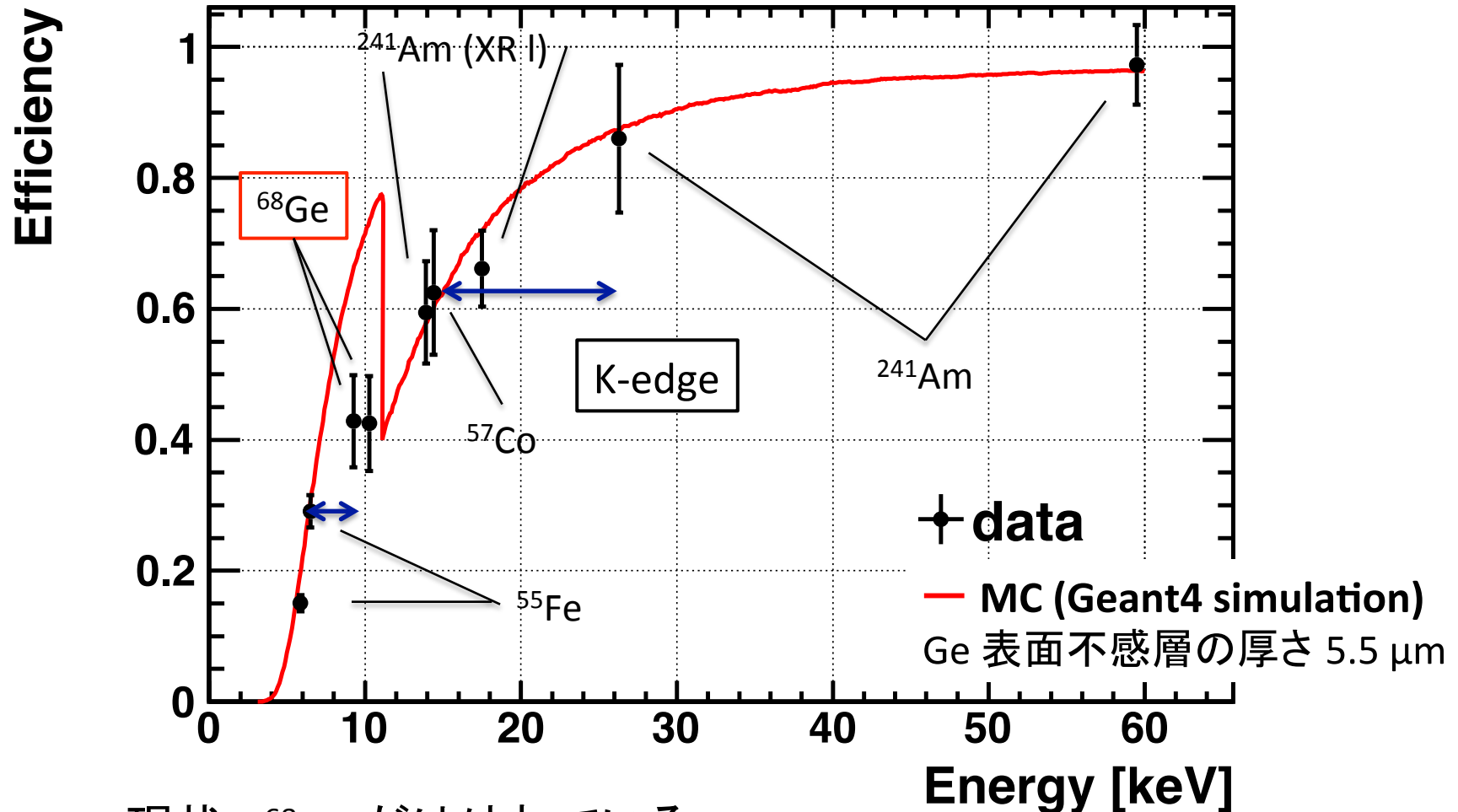
X線ビームの測定点(赤)がフィットに乗ることを確認



Ge 検出器の性能 1/2

検出効率の実測と MC

炭素窓や空気による減衰も含む

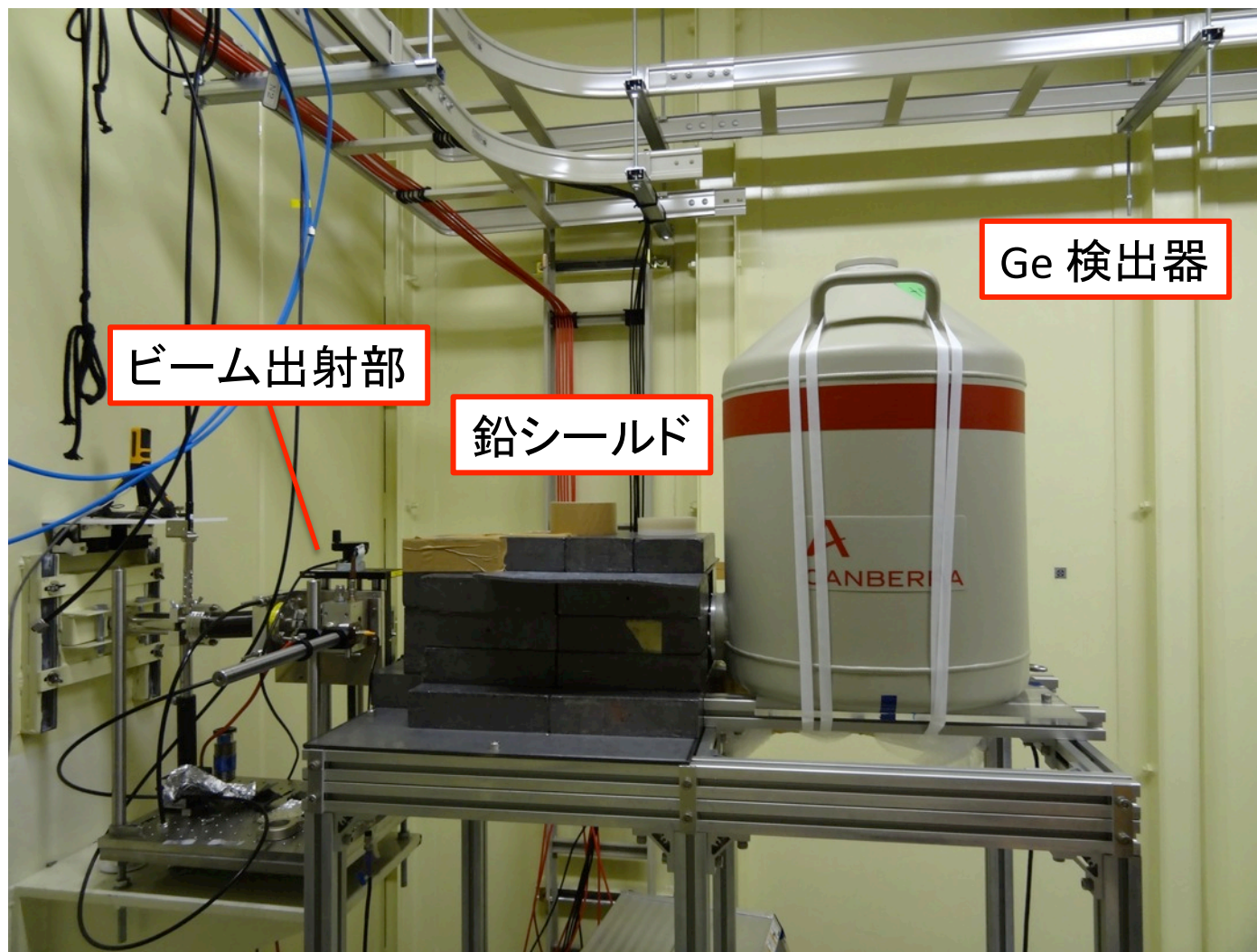


現状: ^{68}Ge だけ外れている

MC カーブ(赤)は使用せず, 実測値(青)で保守的に見積もる

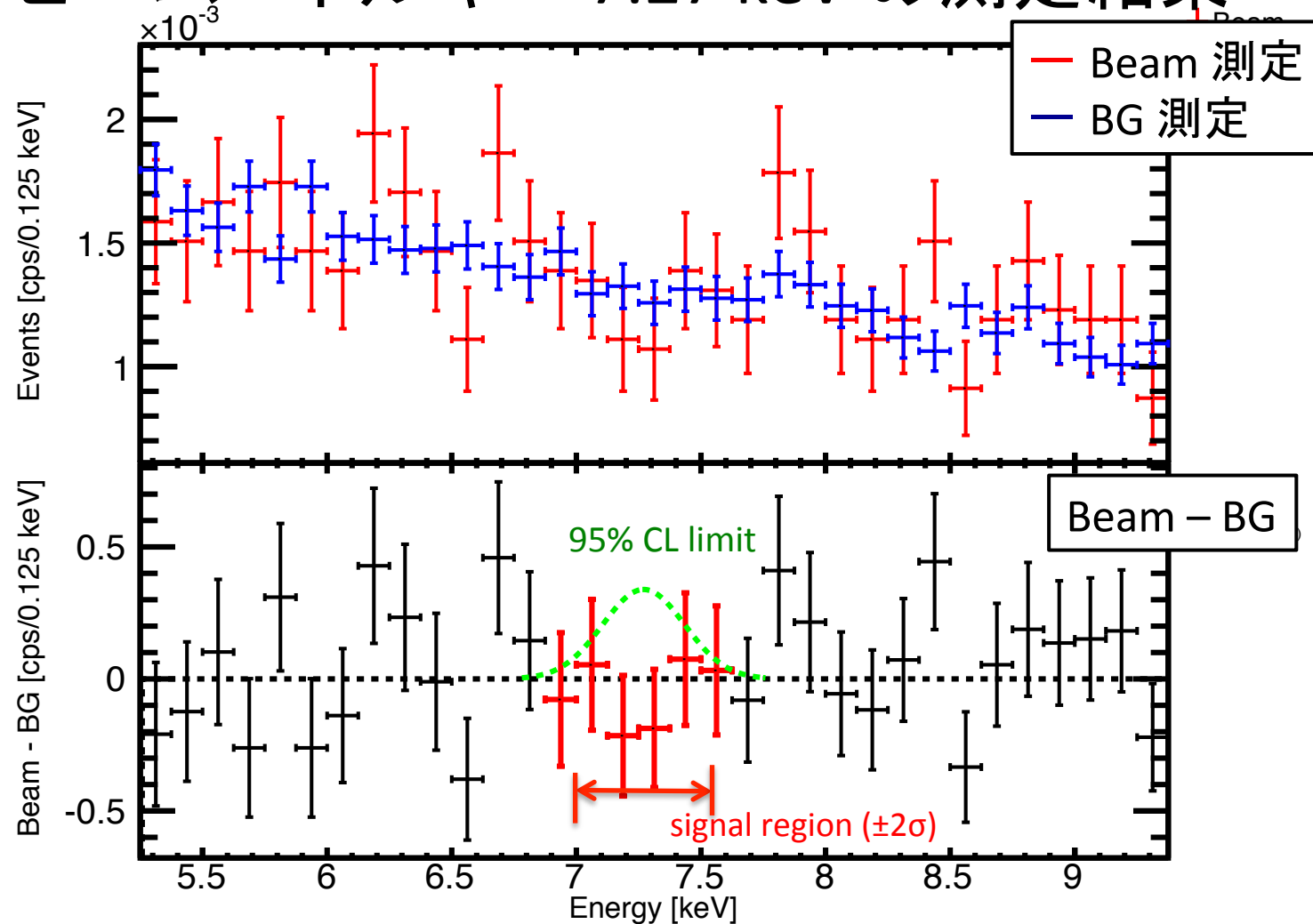
測定 @ BL19 実験ハッチ

2012/06/14 ~ 06/20



Beam 測定と BG 測定のエネルギースペクトル

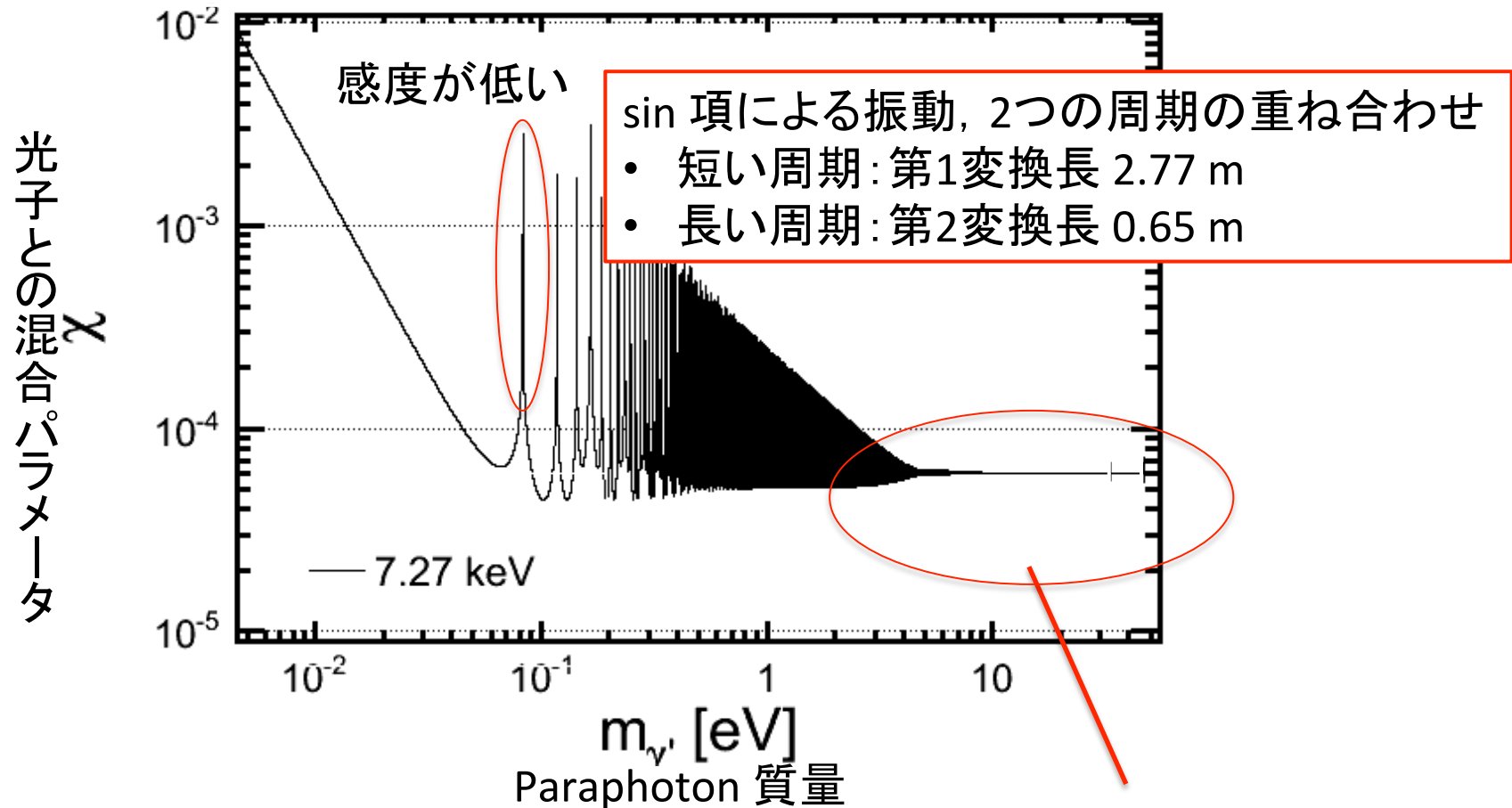
ビームエネルギー 7.27 keV の測定結果



残念ながら、9つの全測定において BG を有意に上回る Signal は検出されなかった。
→ 混合パラメータに対してリミットをつける

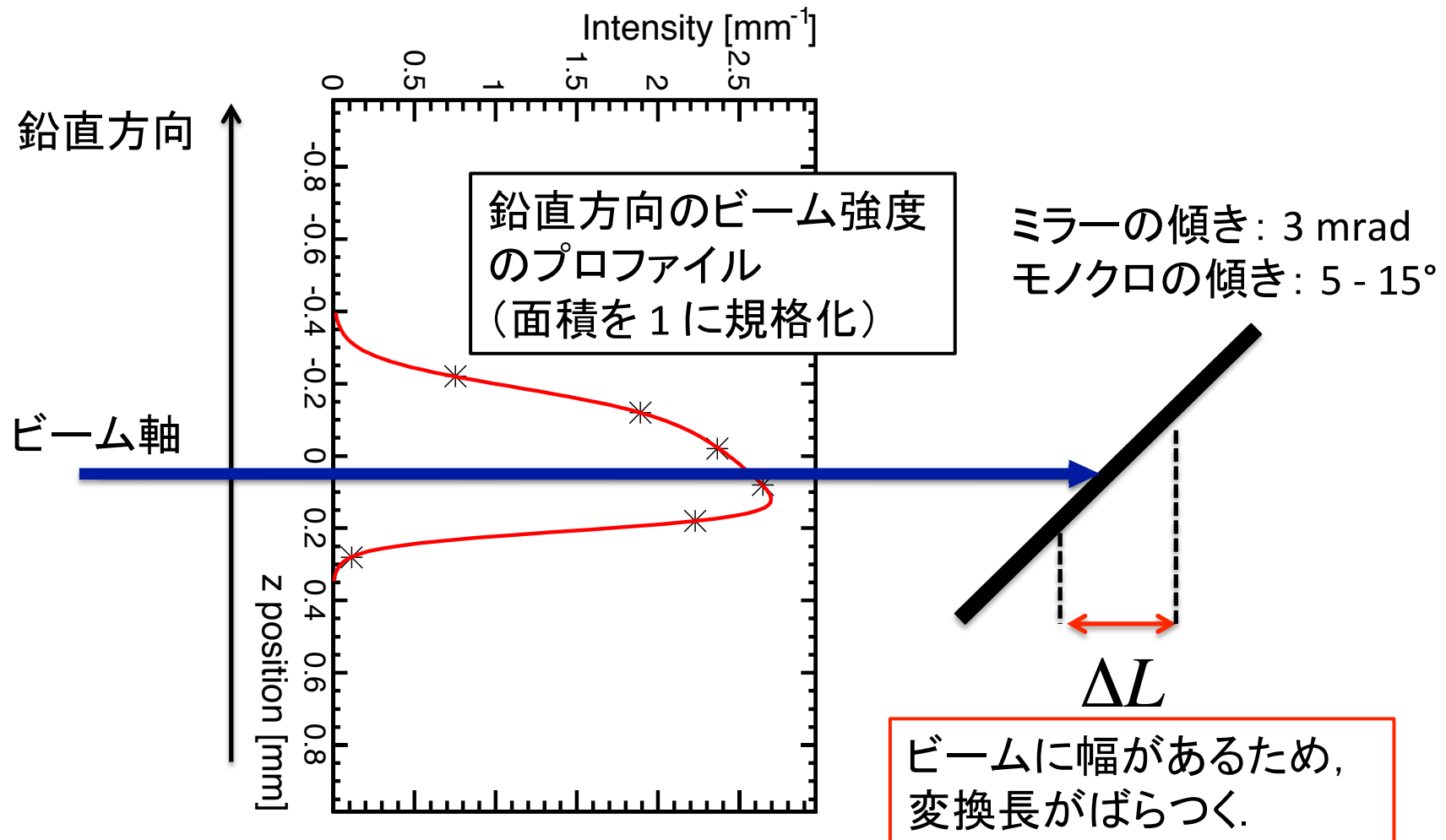
本実験での探索領域とリミット 1/3

ビームエネルギー 7.27 keV の測定のみによって
制限された領域は線の上側 (95% C.L.)



重い paraphoton は光子との振動周期が短く, ビーム幅の効果で振動が平均化される (次ページ)

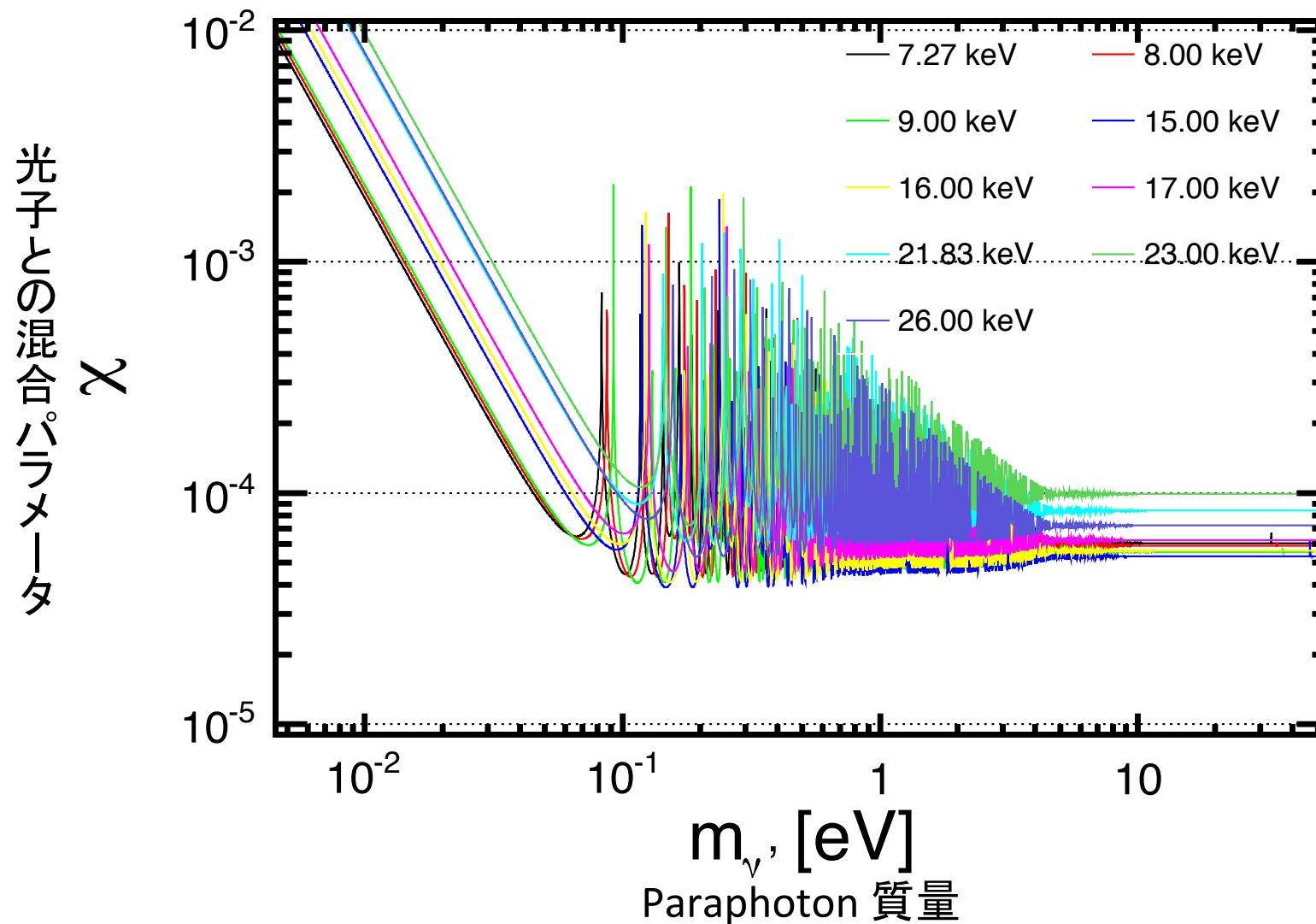
ビーム幅による、短い振動の平均化



- 変換領域の両端にあるミラーやモノクロの傾きが浅いため、変換領域の長さにビーム幅分の不定性が生じる
- 変換長の不定性は前半で数 mm, 後半で 10 cm

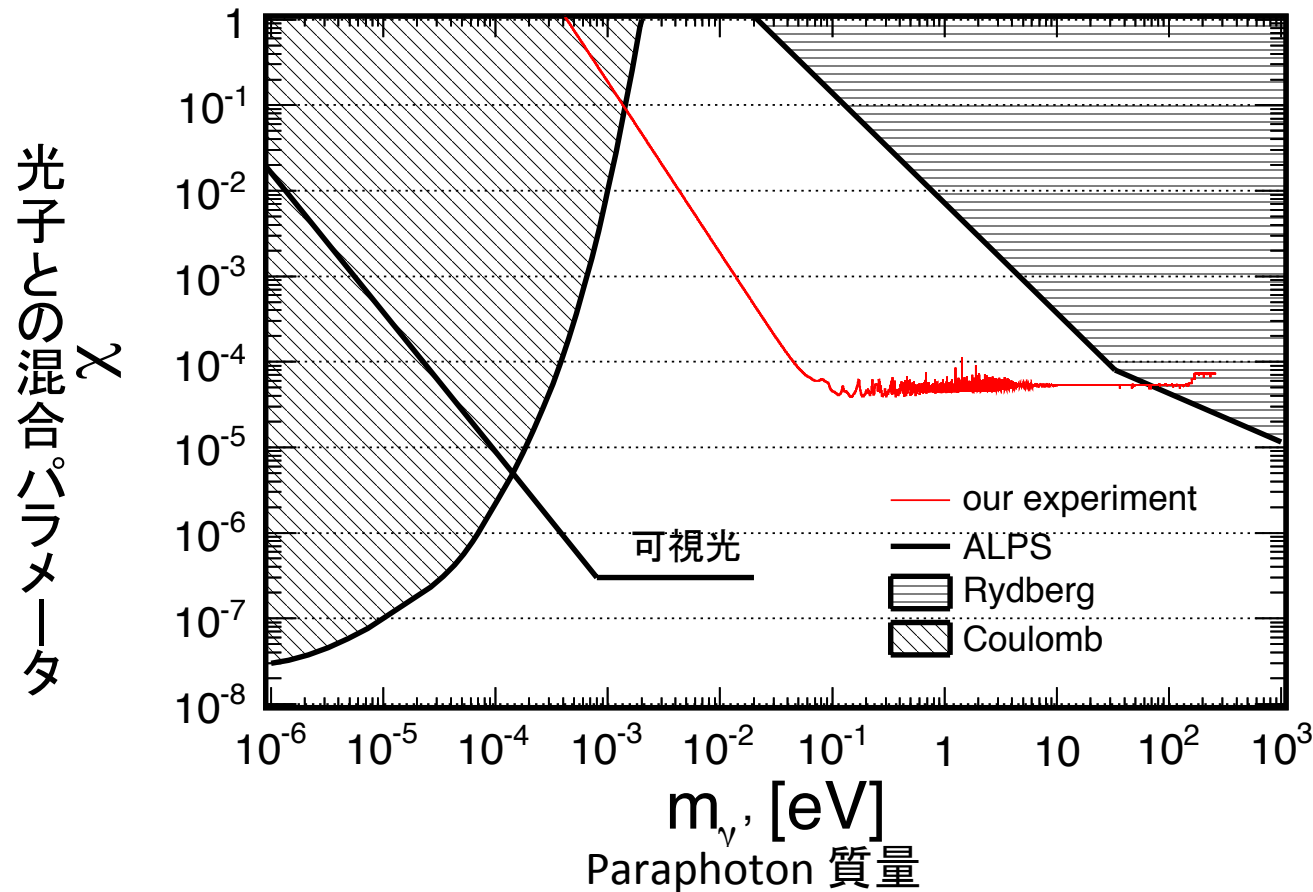
本実験での探索領域とリミット 2/3

各測定によるリミットを重ね書き(9種類のエネルギー)



本実験での探索領域とリミット 3/3

実験全体のリミット = 9つの測定のリミットの和集合

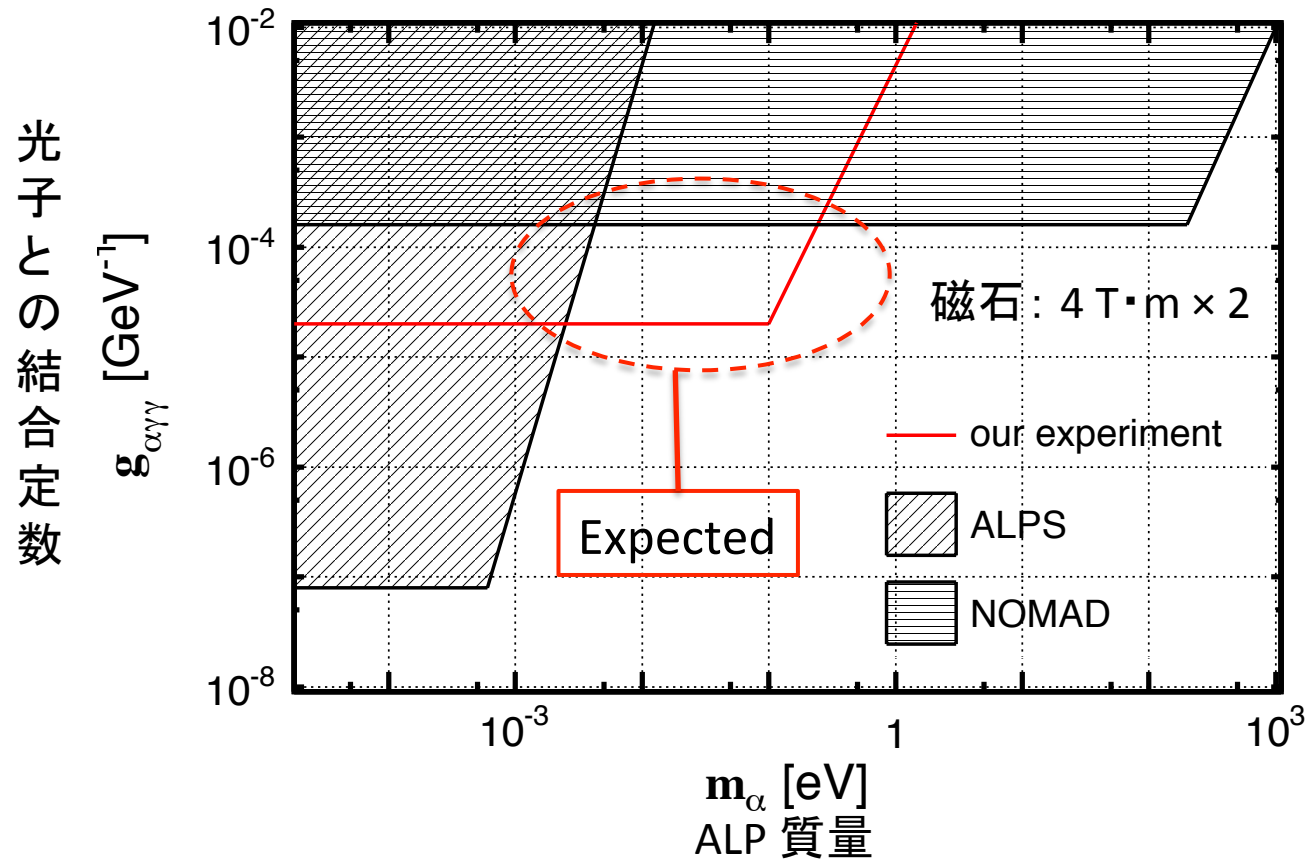


エネルギーを変えた測定を繰り返すことでリミットの振動部分を埋め合わせ、過去の探索領域の谷間にあたる、**可視光実験より 2-3 桁重い領域**にリミットをつけた

$$\chi < 1.2 \times 10^{-4} \quad (95\% \text{ CL @ } 0.1 - 100 \text{ eV})$$

将来計画

- 光子と弱結合する未発見粒子には, paraphoton の他に Axion や Dilaton といった, **ALP** (Axion-like particle) がある.
- ALP は**強力な磁場中**で光子と変換する. そのため探索には磁石が必要となる.
- 変換用電磁石の調整を行い, ビームタイムを申請して, ALP 探索実験を行う



ALP の探索でも, 地上実験で最高の感度を実現する.

まとめ

- SPring-8 BL19LXUの**大強度**X線ビームを光源に用い、光子と弱く結合する未発見粒子 **paraphoton** の探索を行った.
- 可視光レーザー実験より 2-3 桁まで重い質量領域においてシグナルは検出されず、**0.1 – 100 eV** の paraphoton 質量に対して、混合パラメータ **$X < 1.2 \times 10^{-4}$** (95% CL) の制限を与えた..