

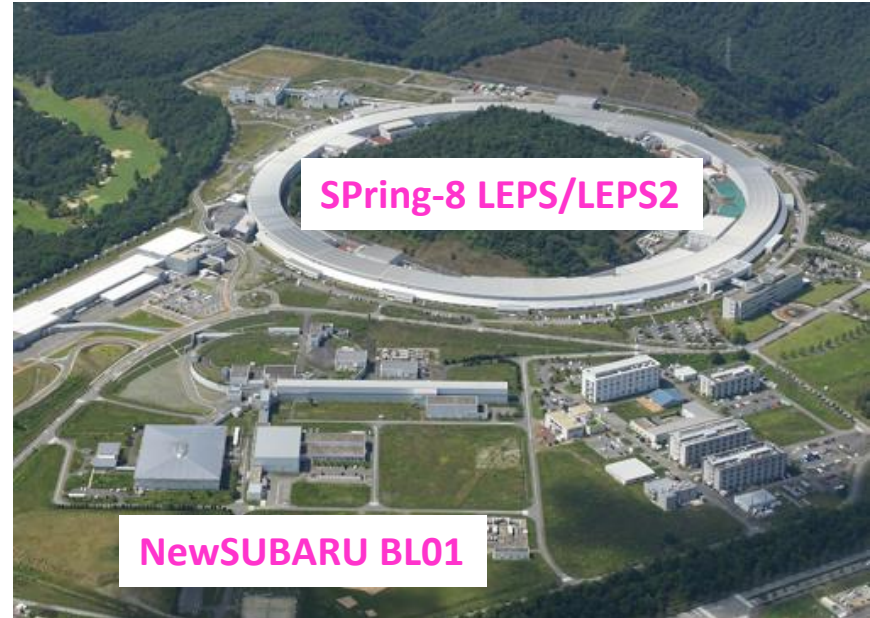
電子加速器を利用した 新しいGeVガンマ線源の 開発と展望

村松 憲仁

東北大学 電子光物理学研究センター

2019.12.18 @広島大学

電子加速器を利用した現在のガンマ線源



➤ MeVガンマ線源

光核反応、天体核、
材料非破壊検査、 etc

➤ GeVガンマ線源

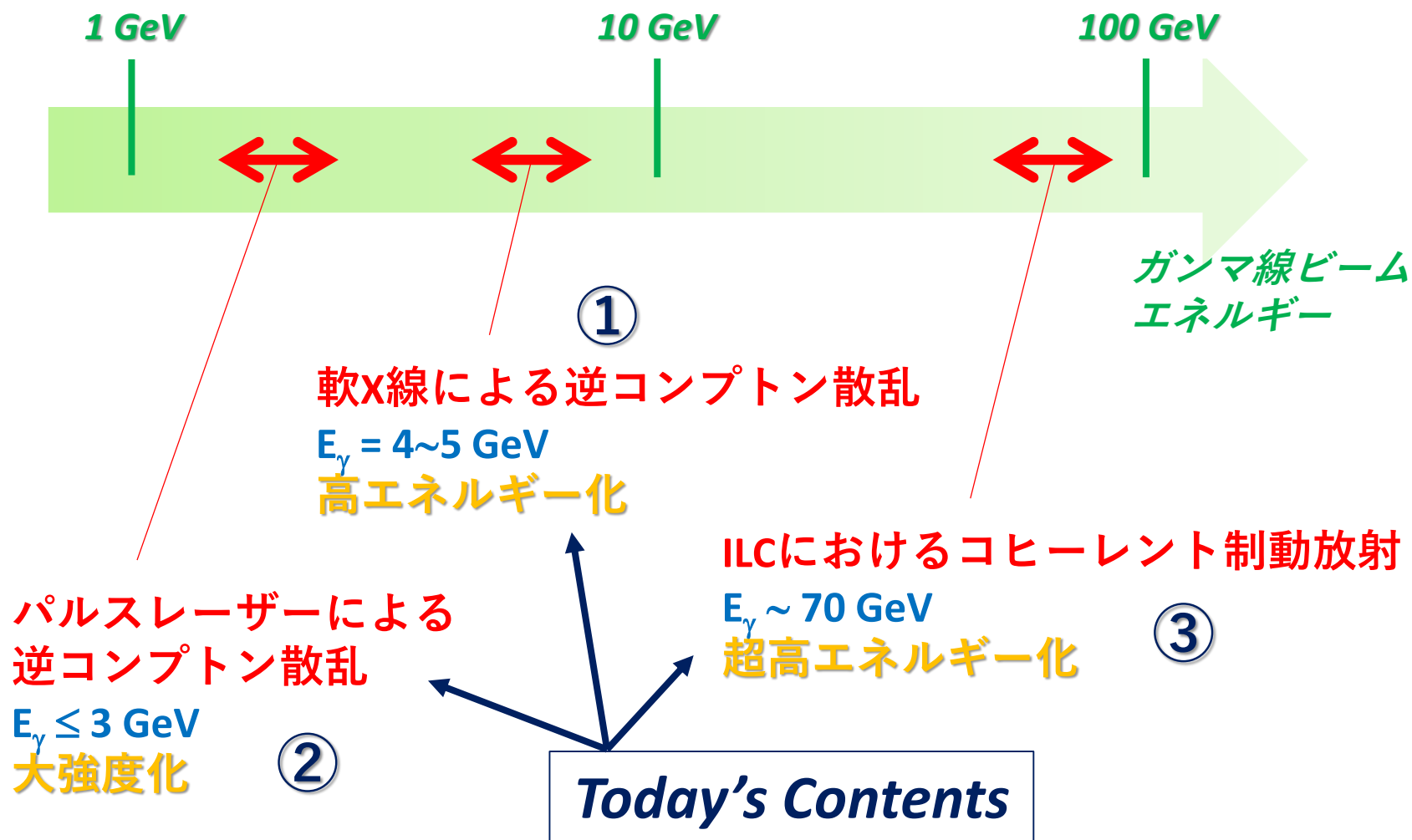
ハドロン光生成

「偏光」がキーワード

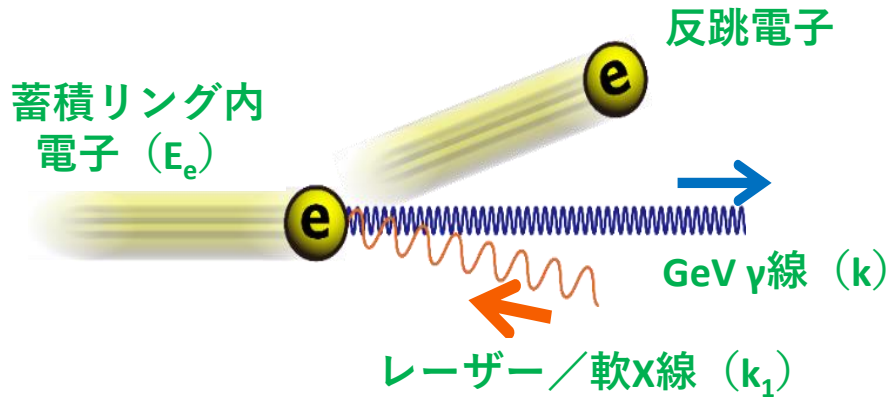


新しいGeVガンマ線源の可能性

(私が進めているプロジェクト)



軟X線の逆コンプトン散乱：動機



$$k^{max} = \frac{4k_1 E_e^2}{m_e^2 c^4 + 4k_1 E_e}$$

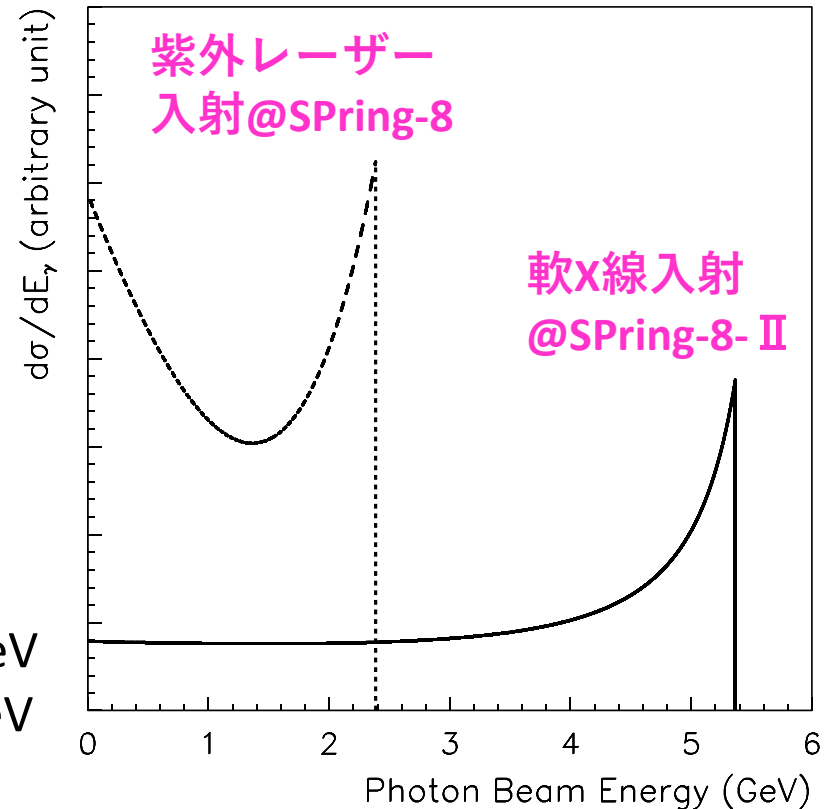
➤ ガンマ線ビームの高エネルギー化

$\gamma p \rightarrow X p$: $M_X \leq 1.4 \text{ GeV}/c^2$ for $E_\gamma < 2.4 \text{ GeV}$

$M_X \leq 2.4 \text{ GeV}/c^2$ for $E_\gamma < 5.4 \text{ GeV}$

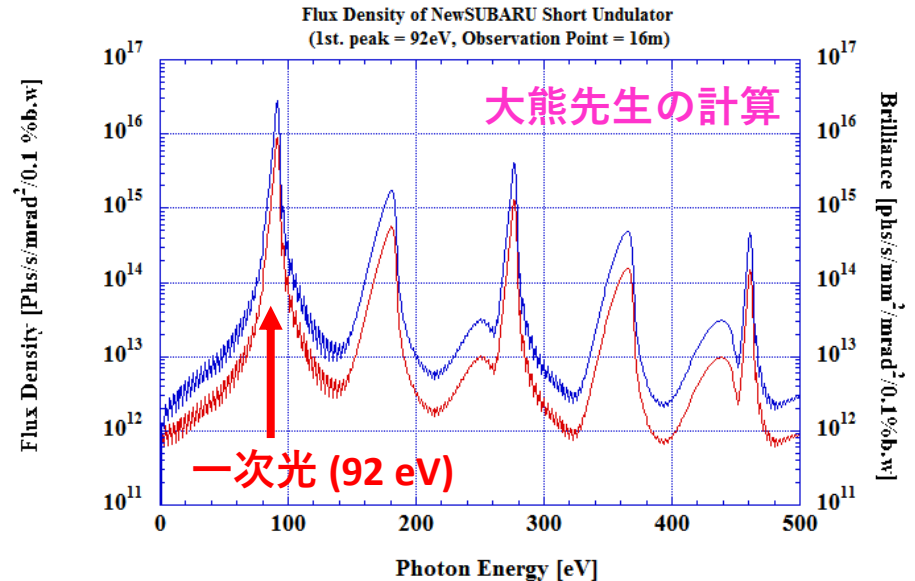
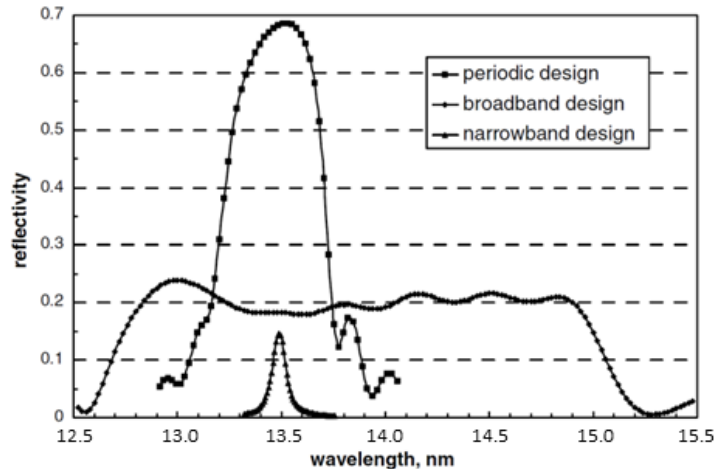
➤ 蓄積リングの低エネルギー化

SPring-8-II, 東北放射光施設, etc



軟X線を使うメリット

- 深紫外レーザーや硬X線に比べて**光学的に扱いやすい**。
- **コンプトン散乱断面積**が比較的大きい。
- アンジュレーターを使えば、蓄積リングの**ビームライン施設**として比較的安価に作れる。



NewSUBARU short undulator

- Period length : **7.6 cm**
- Number of Period: 30
- Total length : **$L = 2.28$ m**
- **$K = 0.78$**
- Gap = 53.7 [mm]
- $B = 0.1099$ [T]

ニュースバルにおける実証実験

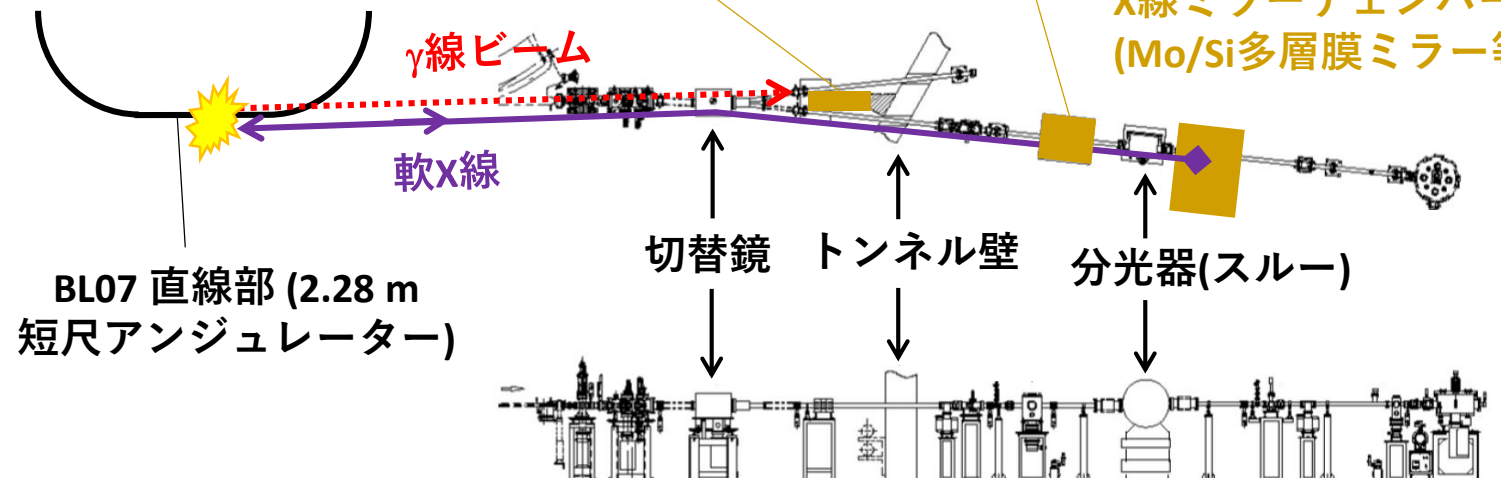
- **BL07A**で**要素技術**（軟X線の反射・集光・モニター、光学系の冷却、生成ガンマ線の検出）の開発と試験
- **アンジュレーター放射軟X線の逆コンプトン散乱**を**初観測**

γ線検出器系 (PWO電磁カロリメーター、
ビーム・プロファイル・モニター等)

X線モニターチェンバー
(ワイヤースキャナー等)

1 GeV電子蓄積リング

X線ミラーチェンバー
(Mo/Si多層膜ミラー等)



科研費 挑戦的研究（開拓）の支援で進行中（FY2018～）

話 題

軟 X 線を用いた逆コンプトン散乱による 高エネルギーガンマ線ビームの開発

村松 憲仁^{*1}・岡部 雅大^{*1}・鈴木 伸介^{*2}・伊達 伸^{*2}・清水 肇^{*1}・大熊 春夫^{*3}・
神田 一浩^{*4}・宮本 修治^{*4}・原田 哲男^{*4}・渡邊 健夫^{*4}・宮部 学^{*1}・時安 敦史^{*1}

Development of a High Energy Gamma-ray Beam via Inverse Compton Scattering of Soft X-rays

Norihito MURAMATSU^{*1}, Masahiro OKABE^{*1}, Shinsuke SUZUKI^{*2}, Schin DATÉ^{*2}, Hajime SHIMIZU^{*1},
Haruo OHKUMA^{*3}, Kazuhiro KANDA^{*4}, Shuji MIYAMOTO^{*4}, Tetsuo HARADA^{*4},
Takeo WATANABE^{*4}, Manabu MIYABE^{*1} and Atsushi TOKIYASU^{*1}

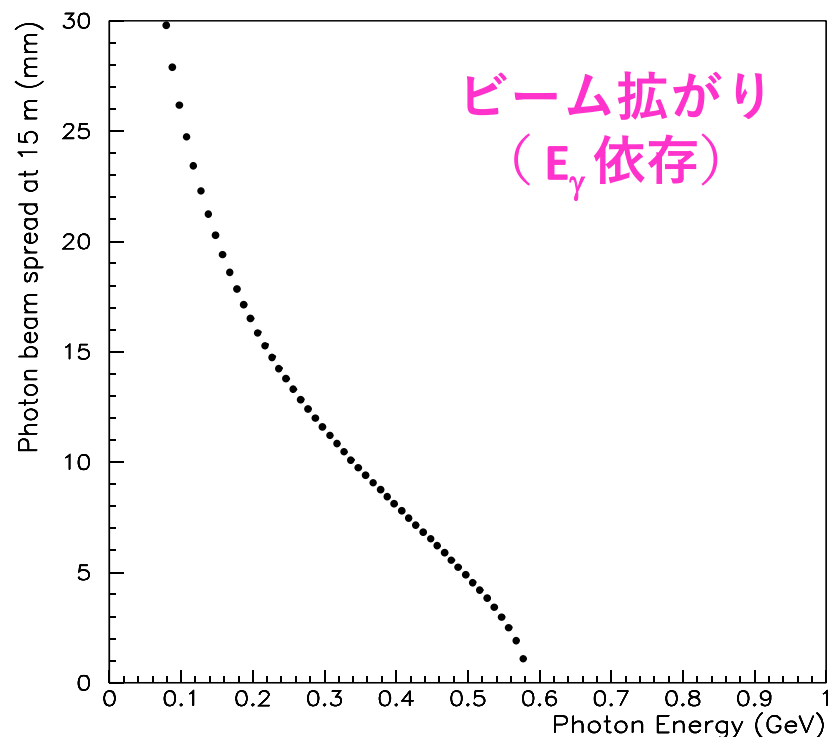
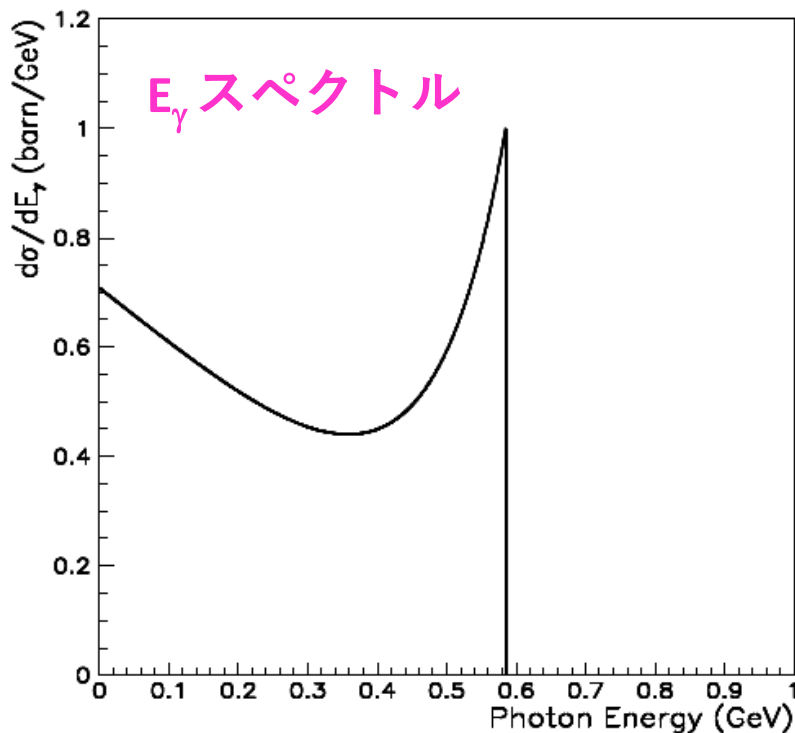
Abstract

We aim to develop a novel technique to produce a high energy γ -ray beam of several GeV by adopting inverse Compton scattering of soft X-rays at an electron storage ring. Now an experimental project to demonstrate such a beam is being advanced at NewSUBARU by using X-rays from a short undulator and reflecting it backwardly with a Mo/Si multi-layer mirror. It will open up a way to construct new γ -ray sources at the next generation rings and to carry out new photoproduction experiments for the studies of heavy hadrons.

学会誌「加速器」Vol.16, No.3, 154 (2019).

得られるガンマ線ビームの評価

- **最大エネルギー**（コンプトン端）
1 GeV電子で $E_\gamma \leq 0.58 \text{ GeV}$ （1.5 GeVで $E_\gamma \leq 1.02 \text{ GeV}$ ）
- **ビーム拡がり**： $\sim 17 \text{ mm @ } E_\gamma \sim 0.2 \text{ GeV}$



得られるガンマ線ビームの評価

- 最大エネルギー（コンプトン端）
1 GeV電子で $E_\gamma \leq 0.58 \text{ GeV}$ （1.5 GeVで $E_\gamma \leq 1.02 \text{ GeV}$ ）
- ビーム拡がり： $\sim 17 \text{ mm}$ @ $E_\gamma \sim 0.2 \text{ GeV}$
- **ビーム強度**（1 GeV e^- @ 300 mA）
X線: 1.5×10^{16} photons/sec/mm²/mrad²/0.1% bw
多層膜ミラーの反射率0.65と帯域幅2.7 eV
コンプトン散乱断面積：330 mb
⇒ **$\sim 10^4$ /sec**が期待できる。（**brems. $\sim 10^3$ /sec**）

ちなみに、**ミラーへの入熱**は

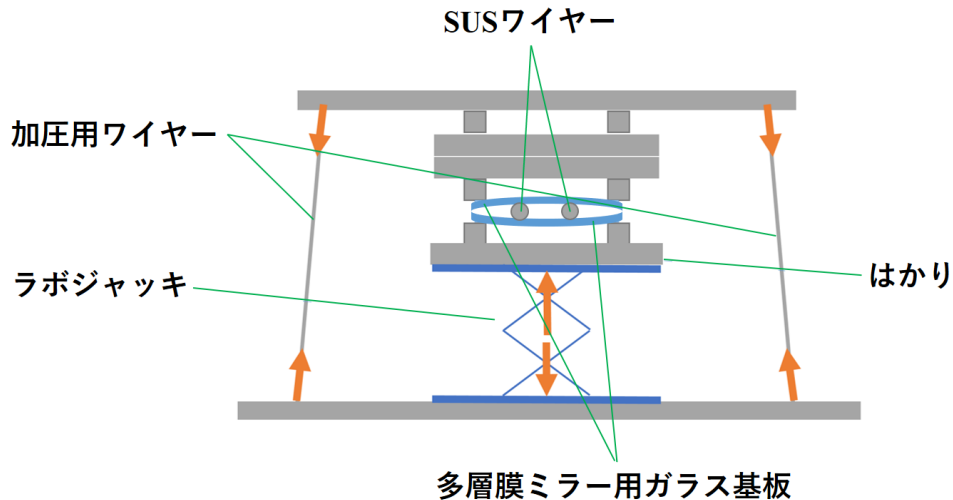
入射X線量 $\times 92 \text{ eV} \times 4.65$ （高次光まで積分）

⇒ **2~3 W**（ガラス基板で十分なはず。）

⇒ それでも冷却しないと**700°C**になる。（部家先生）

多層膜ミラーの製作

- シリンドリカル・ミラー (Zerodur) ← SHADOWにより形状決定
曲率半径16.7 mで、nmレベルの面粗さが必要。
- Mo/Si多層膜コーティング (~100層) がNTT-ATで終了。
⇒ BL10にて反射率測定：~50%



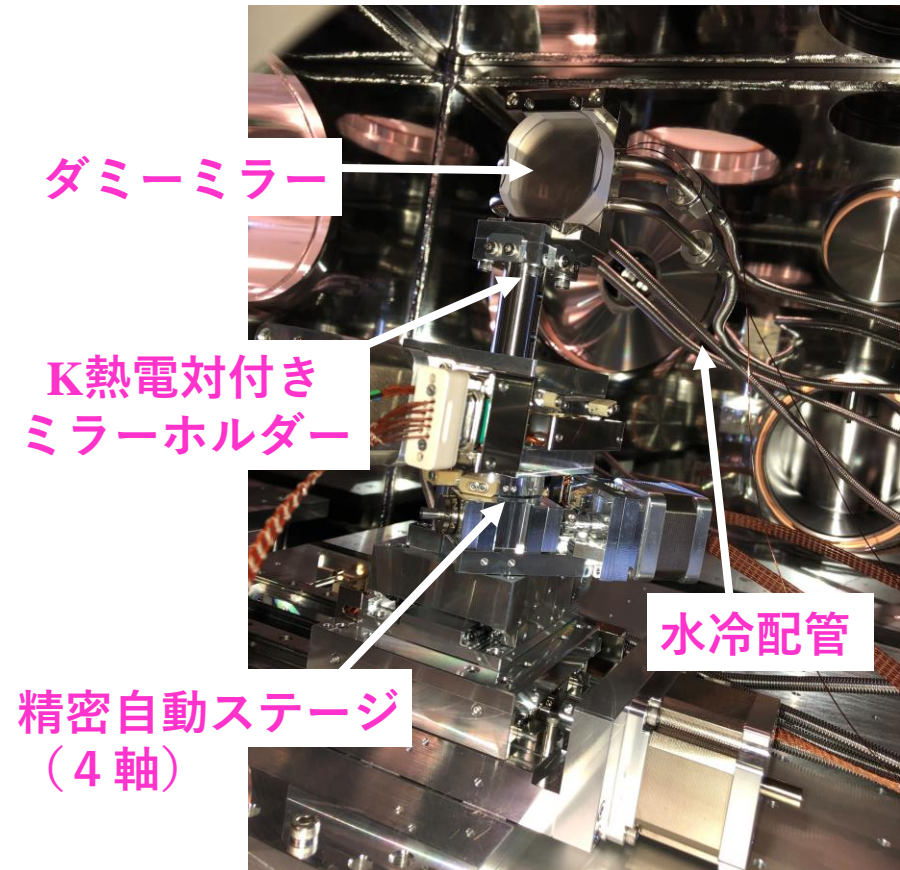
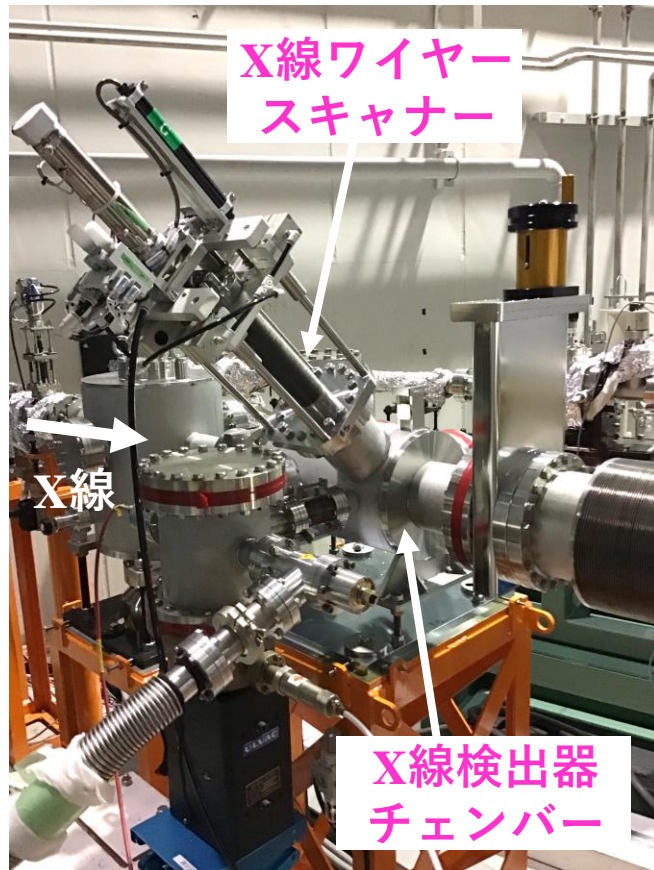
ガラス基板製作のジグ



ニュートン・フリンジ試験

実証実験の準備状況

X線検出器チェンバー、ミラーチェンバー、ガンマ線検出器系の
インストール・アラインメントは終了。**残留ガス制動放射**を用いた
動作試験・試験データ収集を今年7月に行った。

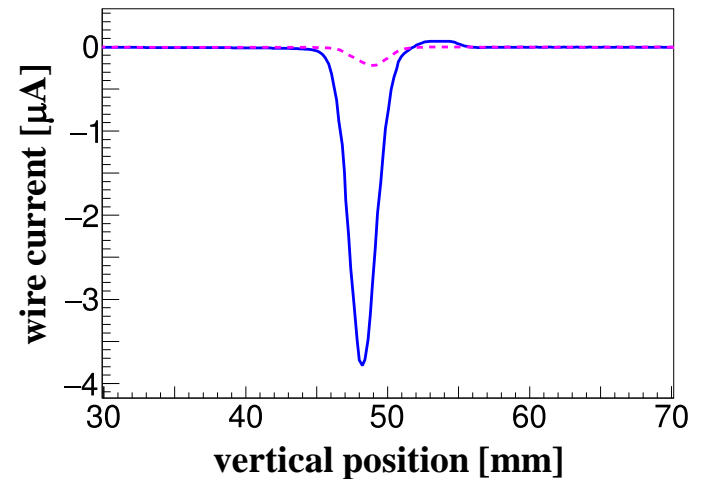
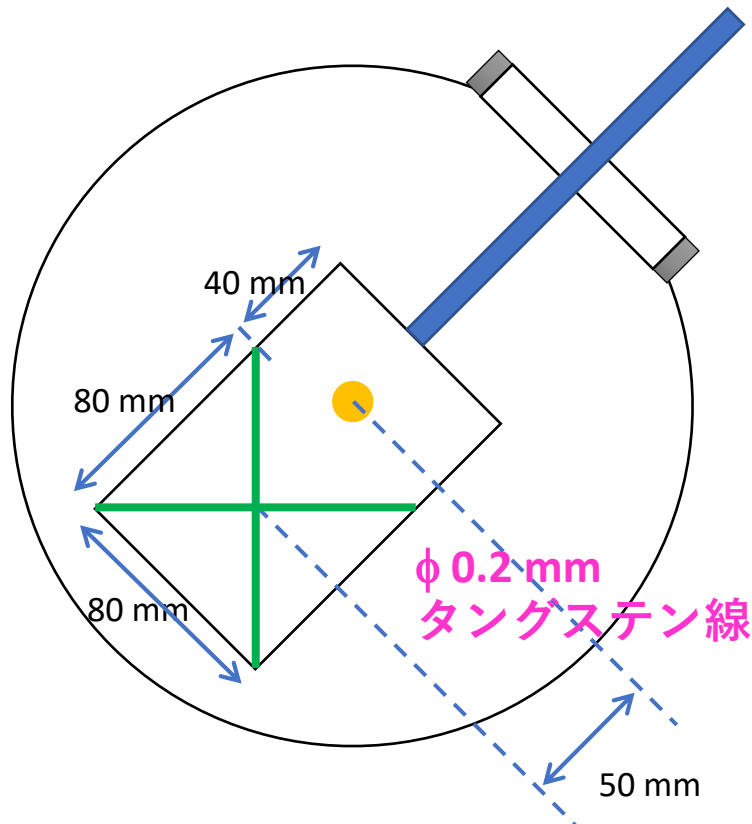


軟X線検出器系

ワイヤースキャナー：プロフィールとX線強度の測定

光電効果による微弱電流をピコアンメーターで検出する。

スキャンはポテンショメーター付きエアシリンダーで行う。



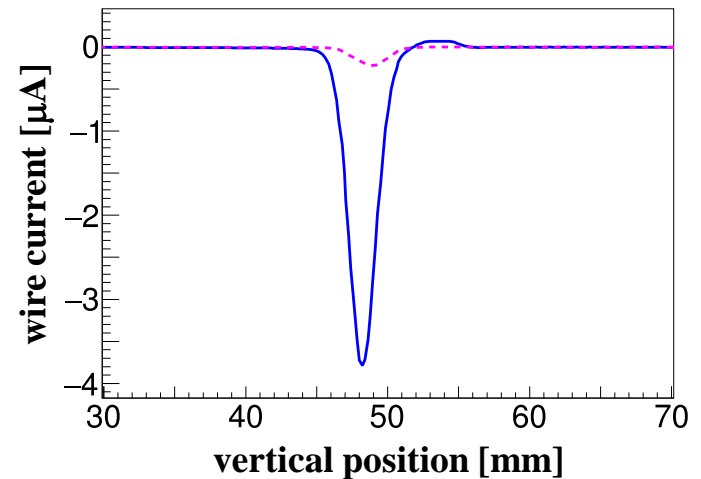
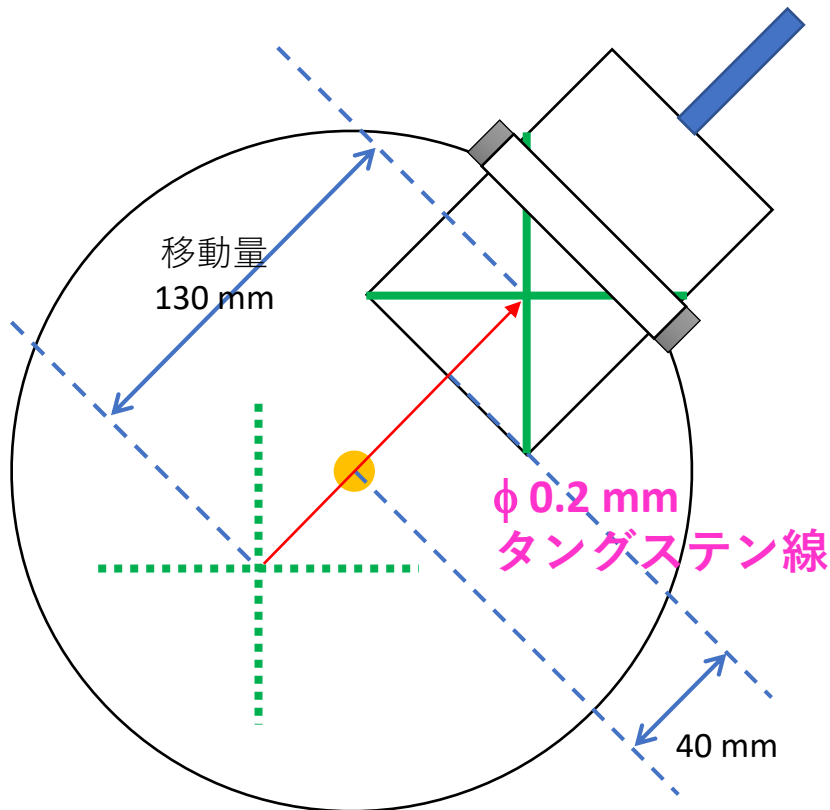
— : Gap 48 mm、- - : Gap 開放時

軟X線検出器系

ワイヤースキャナー：プロフィールとX線強度の測定

光電効果による微弱電流をピコアンメーターで検出する。

スキャンはポテンショメーター付きエアシリンダーで行う。

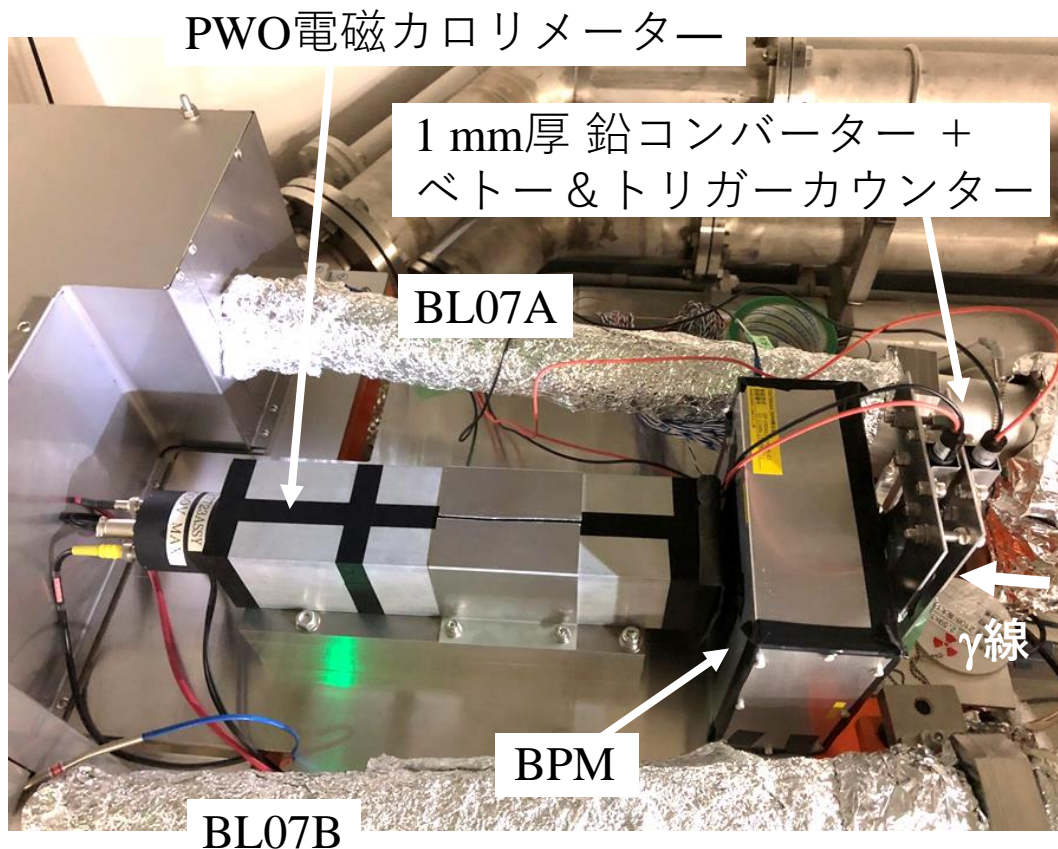


— : Gap 48 mm、 - - : Gap 開放時

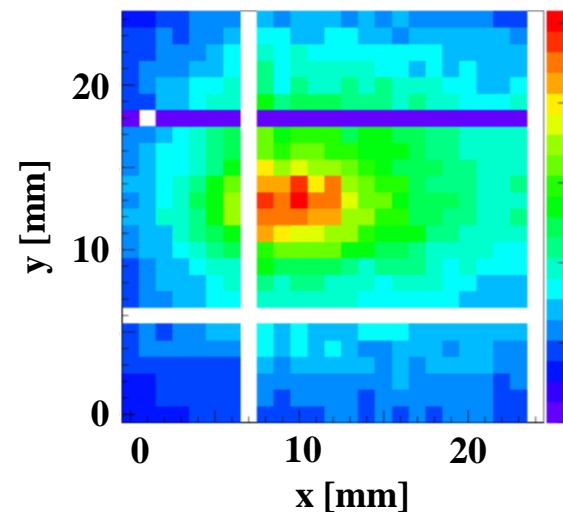
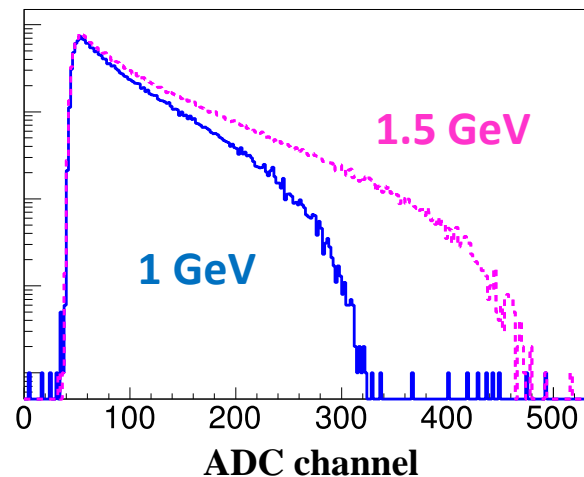
ガンマ線検出器系

PWO電磁カロリメーター： E_γ スペクトル測定

BPM：X25本+Y25本のファイバー（2 mmずつ）



残留ガス制動放射



今後の展開

実証実験のスケジュール

- 12月 多層膜ミラーのインストール、ベーキング
- 1月 ミラー**温度上昇**および**冷却**試験
- 2月 軟X線**反射・集光**試験
逆コンプトン散乱による**ガンマ線生成**

ハドロン光生成実験に向けた準備

- $\sim 10^6$ /sec.**のガンマ線ビーム強度が欲しい。
- アンジュレーター、反射ミラー等の検討が必要。
- SPring-8- II ? KEK PF-AR ?

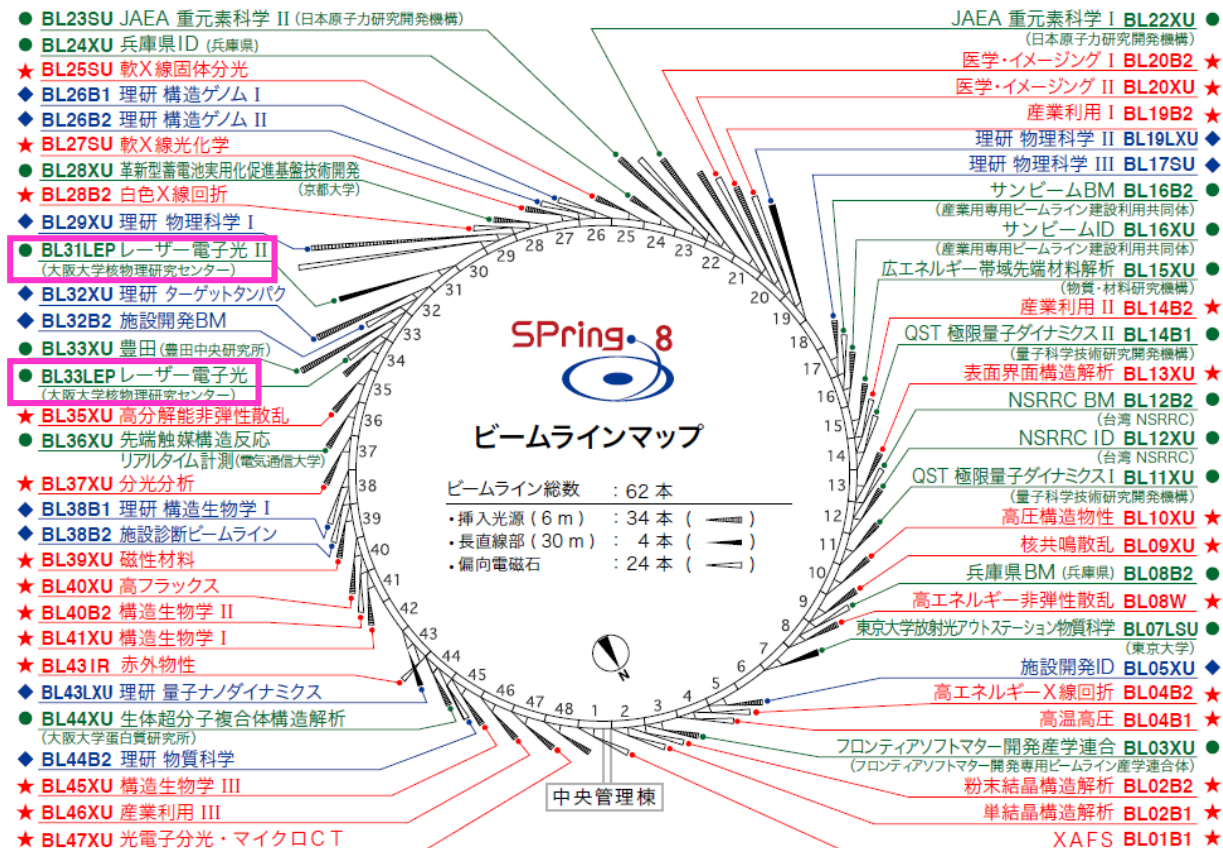
レーザー逆コンプトン散乱@SPring-8

1999~ **BL33LEP** : LEPS実験

2013~ **BL31LEP** : LEPS2/BGOegg実験, ソレノイド実験

学会誌「加速器」 Vol.10, No.3, 171 (2013).

阪大RCNPと
東北大ELPH
の共同運用

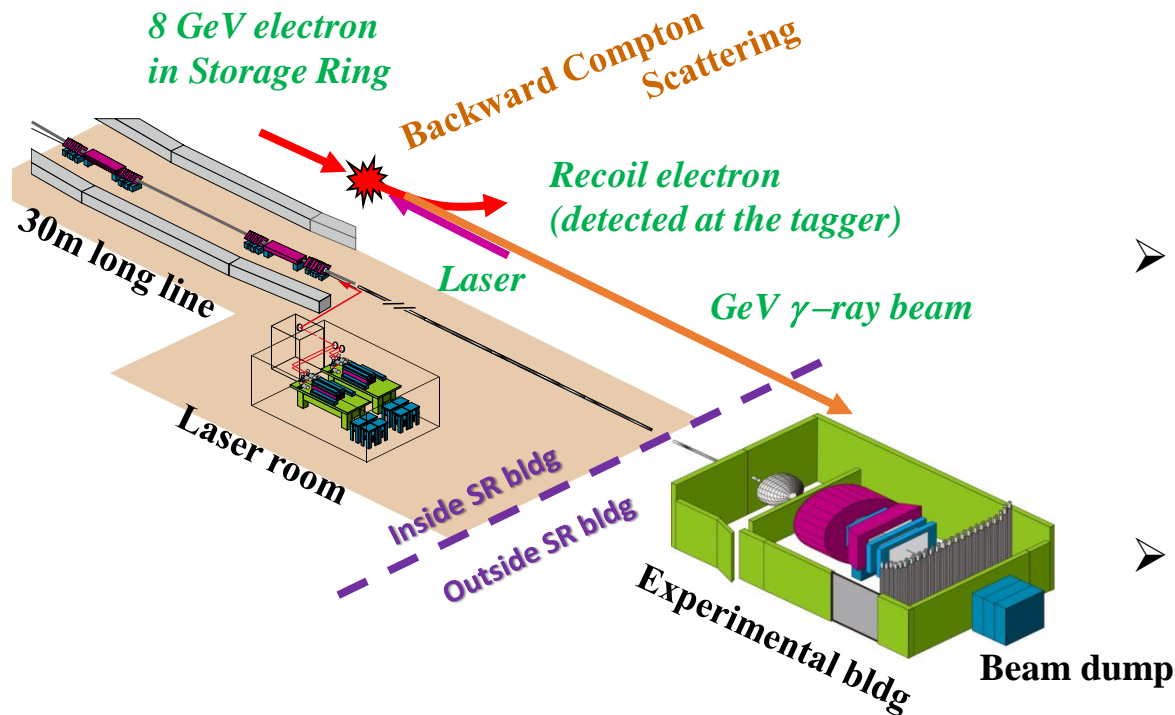


レーザー逆コンプトン散乱@SPring-8

1999~ **BL33LEP** : LEPS実験

2013~ **BL31LEP** : LEPS2/BGOegg実験, ソレノイド実験

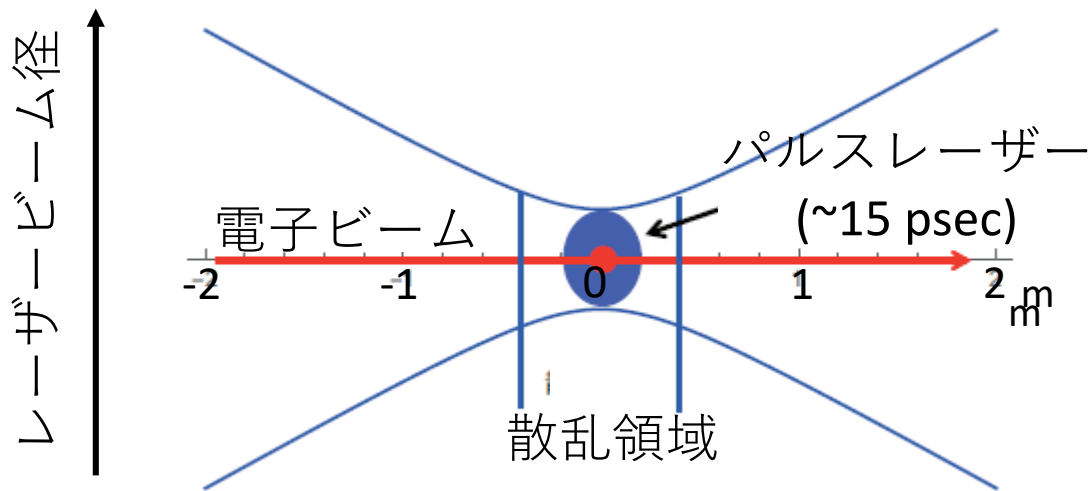
学会誌「加速器」 Vol.10, No.3, 171 (2013).



- **反跳電子**の運動量を事象ごとに測定し、 E_γ を決定。**1.3~2.4 GeV**を標識化。
- 高出力CWレーザーを使い、ビーム強度は $\sim 10^6$ /sec。 (**Top-Up 運転**のおかげ)
- γ 線の**高偏極**が売り。

パルスレーザー入射：動機

- 蓄積電子はバンチ化されているため、CWレーザーだと**空打ち**が増える。
パルスレーザーに換えると、**レーザーの高出力化**、**散乱の効率化**により
- 電子バンチのフィリングに依り、**ガンマ線の大強度化**が期待できる。
 - CWよりレーザー出力を抑えて、**光学系の熱歪み・損傷**を避けられる。

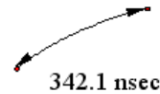


パルスレーザー入射：開発状況

科研費 挑戦的研究（萌芽）2016
基盤研究（B） 2017~2019
中野、桂川、村松、折井、伊達、大橋

昨年度の実験結果（355nmレーザー）

- フィリングパターン：F-mode
- **同期**：10 pulse / 1 cycle (~2.1 MHz)
- **非同期**：2.9 MHz



342.1 nsec

	Power [W]	Tagger rate [kcps]	μ
同期	1.1	1031.337	0.68
非同期	1.1	179.401	

F-mode :
1/14-filling+12 bunches

μ : 1回の衝突で反応する光子数

CWの場合、同じタガーレートを出すのに**数倍のパワー**が必要。

パルスレーザー入射：今後の展開

来年度、SPring-8 **LEPS2実験に投入予定**。

深紫外（**266 nm**）で**10 W以上**の機種がリリースされる予定。

今までは、せいぜい1~2 W

スペクトニクス社（折井）

高速 & 微細加工！
高精細加工



周波数変換可能。
外部トリガーで
自由に発振の
タイミングを
変えられる。



355nmレーザー発振器
LDH-V1610

(平均出力16W@200kHz)

5

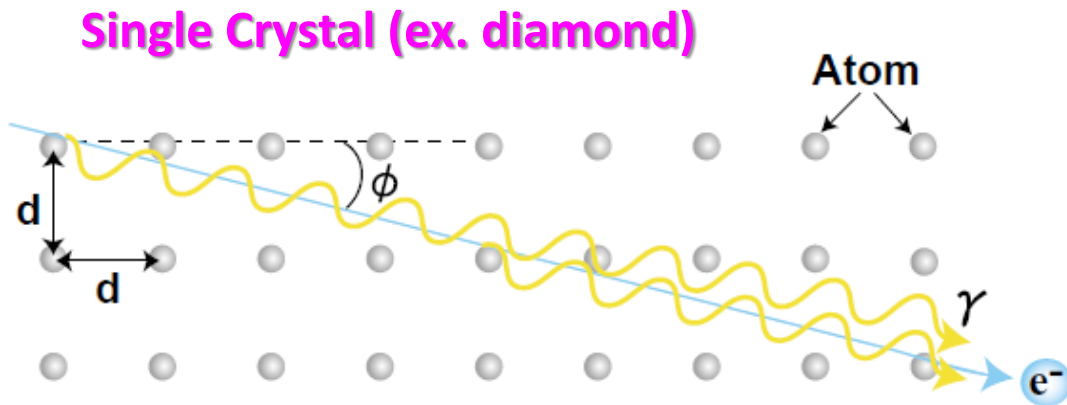
ILCにおける超高エネルギーガンマ線生成

提案：70~80 GeVの偏極ガンマ線ビーム生成

ILCの多角的活用 LCWS 2019 @仙台 (10月)

手法：コヒーレント制動放射

- 単色に近く、直線偏光している。
- 基本技術は実用化されている。(MAMI, ELSA, J-Lab, etc.)



From K. Sasahara, Master Thesis (2001)



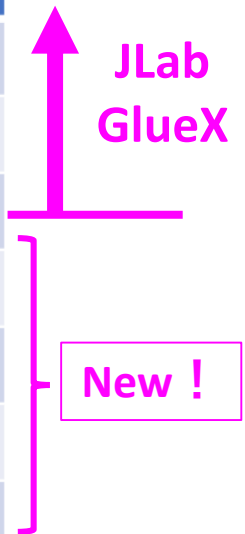
何故ILCが魅力的か？

- **高エネルギー電子/陽電子ビーム** ($E_e = 125 \text{ GeV}$)

コヒーレント制動放射の場合 E_γ は E_e の **20-80%**

- **高い電流値**により大強度のガンマ線ビームが得られる。
- **ビームエミッタンス**が良い。
 - ✓ 放射角度 $\theta = 1/\gamma \sim 4 \mu\text{rad}$
> **ビーム発散角** $\sim 1 \mu\text{rad}$
 - ✓ 放射体 ($t \leq 50 \mu\text{m}$) における多重散乱が小さい。

reaction	E_γ thr.
$\gamma p \rightarrow J/\psi p$	8.21 GeV
$\gamma p \rightarrow \bar{D}^0 \Lambda_c^+$	8.71 GeV
$\gamma p \rightarrow \bar{D}^0 \Sigma_c^+$	9.47 GeV
$\gamma p \rightarrow X(3872) p$	11.9 GeV
$\gamma p \rightarrow Z^+(4430) n$	14.9 GeV
$\gamma p \rightarrow Y(1S) p$	57.2 GeV
$\gamma p \rightarrow B^+ \Lambda_b$	62.8 GeV



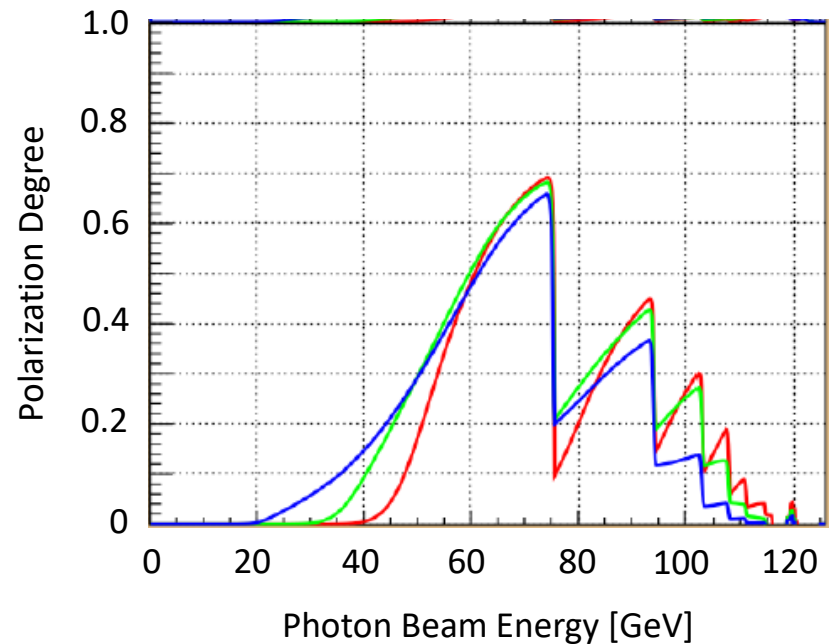
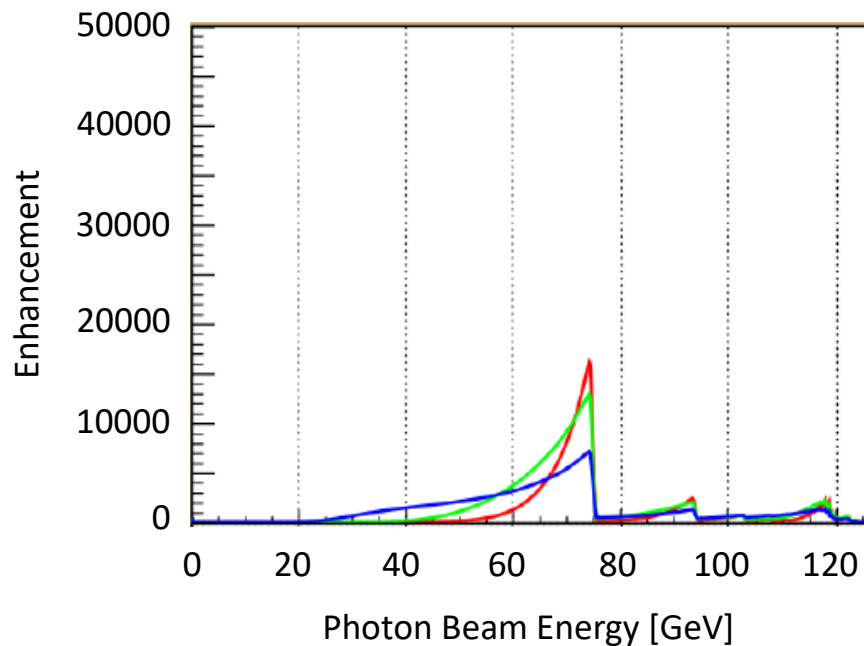
ビーム特性のシミュレーション

Ken Livingston氏 (グラスゴー大学) と共同研究

➤ ピークエネルギーは**放射体の角度**で調整できる。

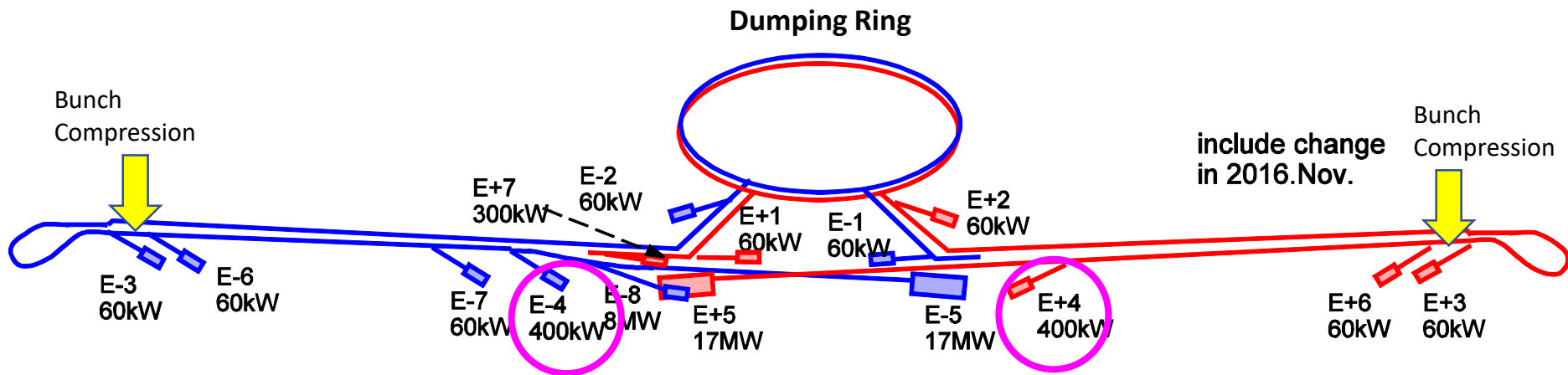
$$E_\gamma = 0.6E_e (75 \text{ GeV}) \Rightarrow P_{\text{lin}}^{\text{max}} \sim 70\%$$

➤ **コリメーター**でインコヒーレント成分を抑制。



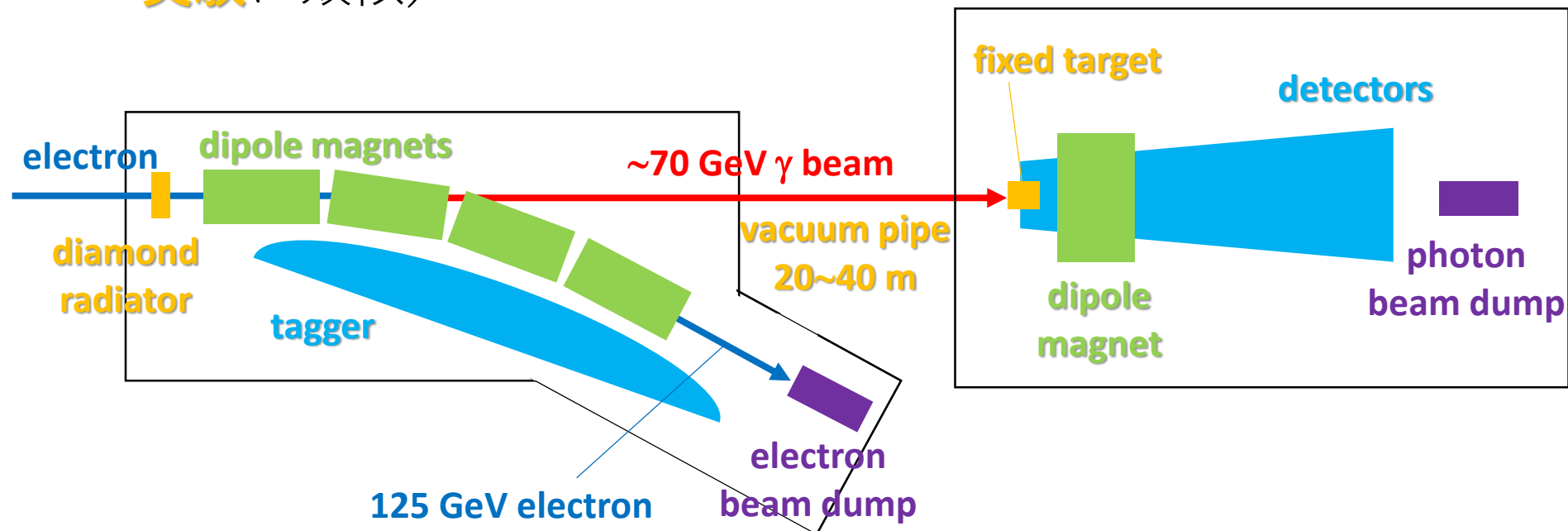
実験場所の候補

- 主linacの調整ダンプ (125 GeV) : **E-4 / E+4**
- **全バンチの10%**をもらう。(ダンプパワー : 400 kW)
⇒ $20 \mu\text{A} \times 10\% = 2 \mu\text{A}$ [大強度ガンマ線ビームが可能]
cf. J-Lab (12 GeV) Hall-D : **200 nA**で $10^7 \gamma/\text{sec}$



実験セットアップ

- **ダイヤモンド放射体** : $t=20-50 \mu\text{m}$ (ゴニオメーター上)
- **タガー** : 細分化された検出器で**反跳電子**を検出し、事象ごとに E_γ を測定する。
- **荷電スペクトロメーター** + 固定標的 (**CERN COMPASS 実験**に類似)



Summary

- ◆ 電子加速器を利用した従来のGeVガンマ線ビーム
逆コンプトン散乱, 制動放射
↳ **パルスレーザー**による効率化・大強度化
- ◆ 更なる**高エネルギー化**に向けて
軟X線の逆コンプトン散乱
↳ ハドロン光生成には**大強度化が必要**
ILCにおける**コヒーレント制動放射**