



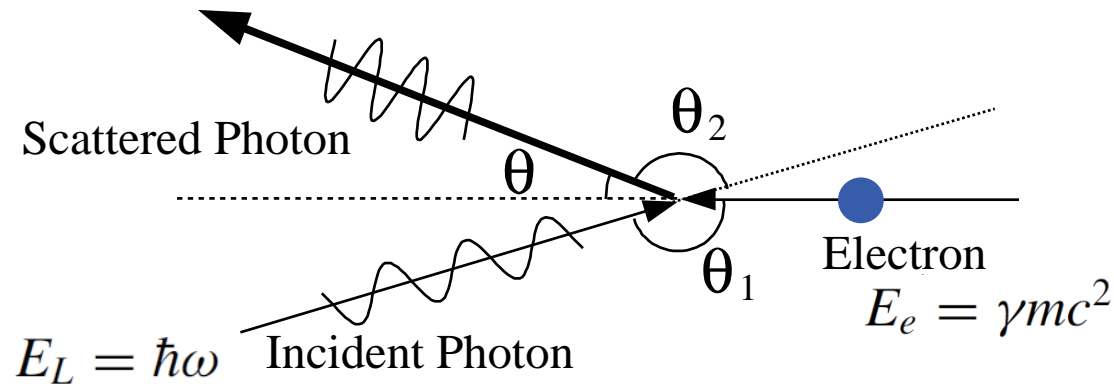
レーザー・コンプトン散乱

Laser Compton Scattered X-ray and γ -ray

羽島 良一
日本原子力研究開発機構

2012年7月30日
第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ

レーザー・コンプトン散乱による高エネルギー光子ビームの発生



$$E_X \approx \frac{4\gamma^2 E_L}{1 + (\gamma\theta)^2}$$

正面衝突の場合の近似式

- 単色(狭帯域)
- エネルギー可変
- ビーム状
- 短パルス
- 偏光(偏極)

cERL (運転開始時)のパラメータでは、

レーザー波長 = 1 μm
電子エネルギー = 35 MeV

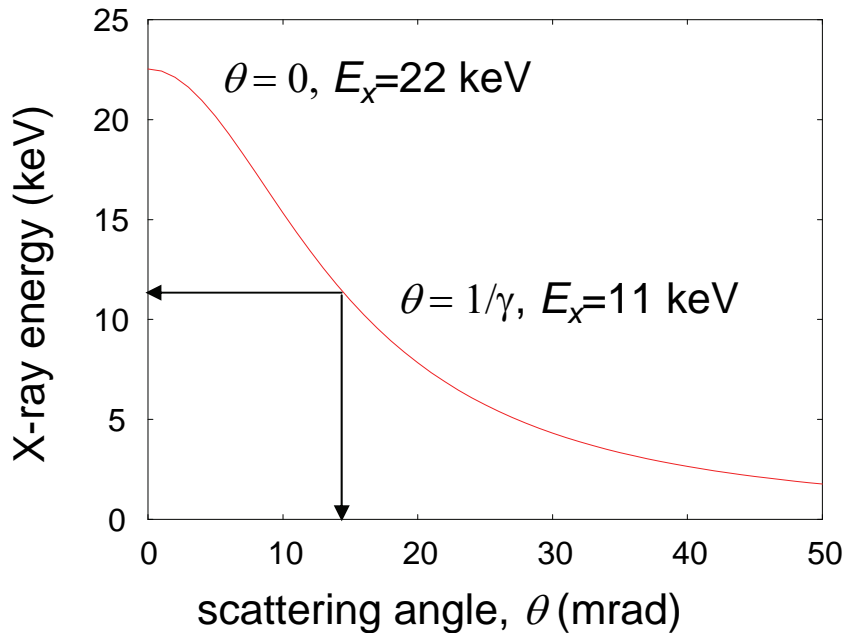
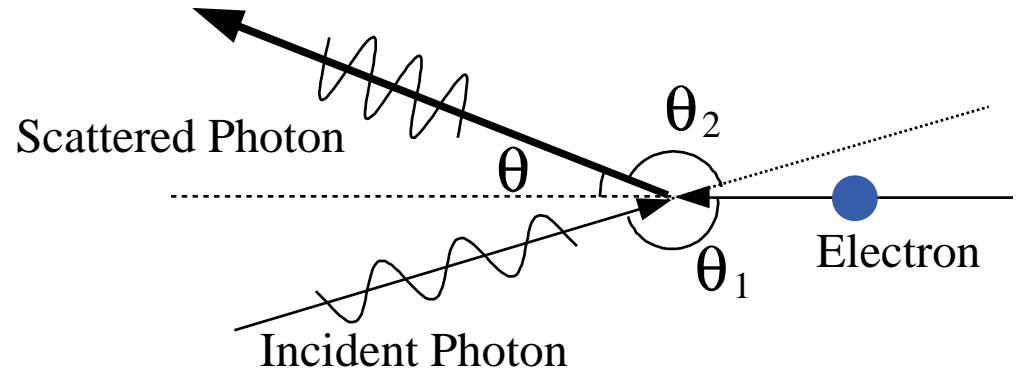


散乱光子の最大エネルギー

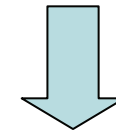
= 22.5 keV @ 正面衝突
= 11.3 keV @ 90度衝突

レーザー・コンプトンX線の単色化

$$E_X \approx \frac{4\gamma^2 E_L}{1 + (\gamma\theta)^2}$$



光子の散乱角度とエネルギーに相関

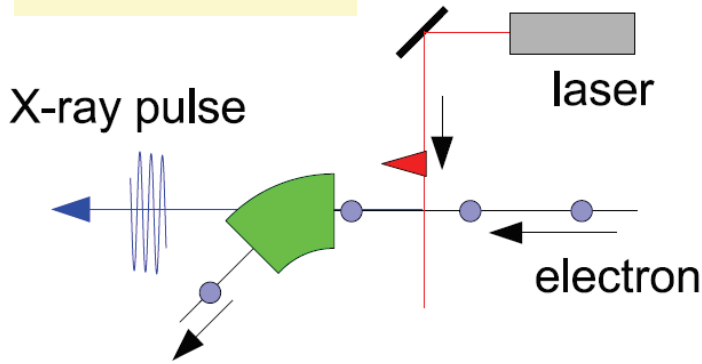


コリメータで軸上の光子を切り出せば
狭帯域(単色)のX線が得られる

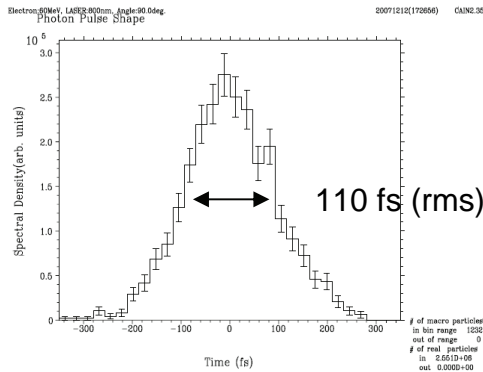
cERL におけるレーザー・コンプトン散乱

コンパクトERLの設計研究(2008)

ultrafast mode

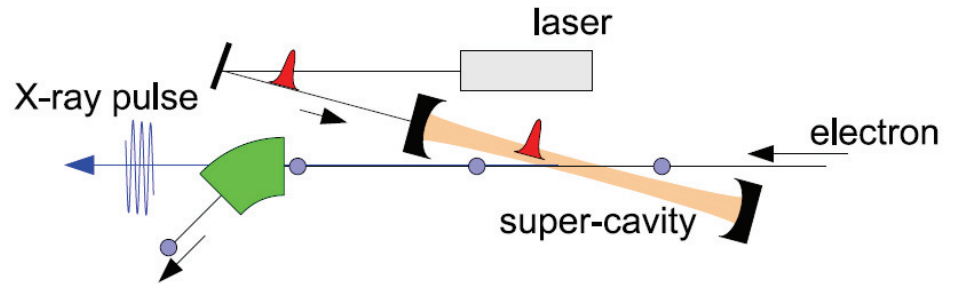


laser = 50 fs (rms), electron = 1 ps
collision spot $\sigma = 20 \mu\text{m}$
X-ray = 110 fs (rms)



laser = 100 mJ x 1 kHz
electron = 100 pC x 130 MHz
X-ray = 3.5×10^6 ph/s/3%BW

high-flux mode



レーザー光子の一部のみが散乱

レーザーを繰り返し再利用＝レーザー蓄積装置

レーザー光	電子ビーム
波長: $\lambda = 1064 \text{ nm}$	エネルギー: $E = 60 \text{ MeV}$
パワー: $E_p = 1.8 \mu\text{J}/\text{pulse}$	電荷: $q = 0.1 \text{ nC}$
繰り返し: $f = 130 \text{ MHz}$	繰り返し: $f = 130 \text{ MHz}$
パルス長 (RMS): $\sigma_L = 300 \mu\text{m} (1 \text{ ps})$	バンチ長 (RMS): $\sigma_z = 900 \mu\text{m} (3 \text{ ps})$
サイズ (RMS): $\sigma_w = 30 \mu\text{m}$	サイズ (RMS): $\sigma_e = 30 \mu\text{m}$
光蓄積増倍率: 3000	エミッタンス: $\varepsilon_n = 1 \text{ mm-mrad}$

(レーザー蓄積パワー = 700 kW)

X-ray: flux = 1.2×10^{12} ph/s/3%BW
B ~ 5×10^{14} (c.u.)

レーザー・コンプトン散乱光源の歴史

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 138, NUMBER 6B

21 JUNE 1965

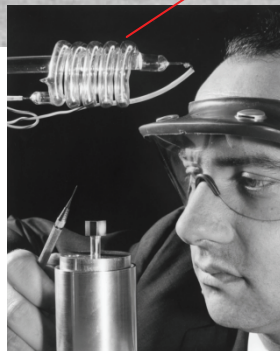
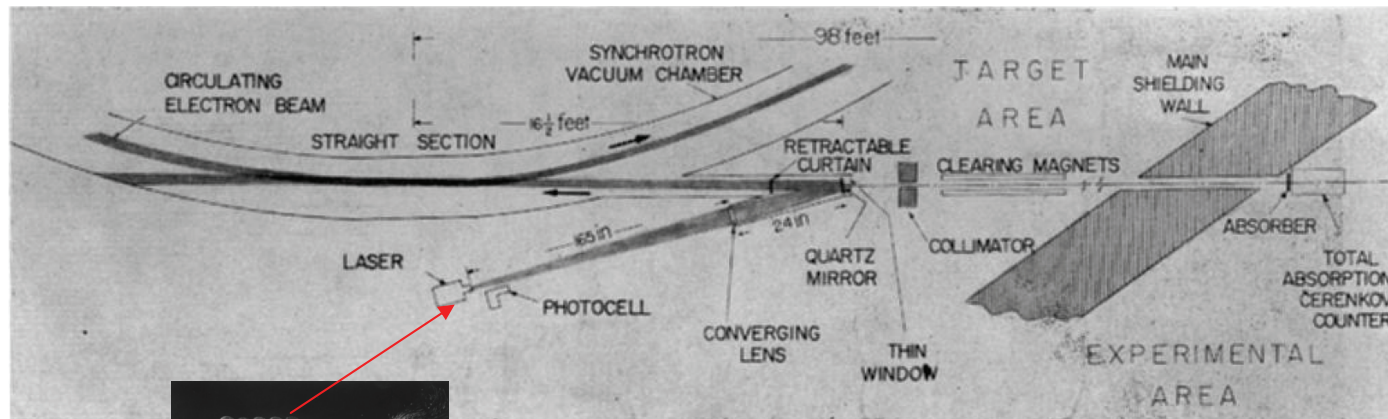
High-Energy Photons from Compton Scattering of Light on 6.0-GeV Electrons*

CARLO BEMPORAD†, RICHARD H. MILBURN, AND NOBUYUKI TANAKA
Department of Physics, Tufts University, Medford, Massachusetts

AND

MIRCEA FOTINO
Cambridge Electron Accelerator, Harvard University, Cambridge, Massachusetts
(Received 28 January 1965; revised manuscript received 1 March 1965)

Compton scattering of optical photons on 6.0-GeV electrons has been observed at the Cambridge Electron Accelerator. A giant-pulsed ruby-laser burst of 0.2 J, impinging upon a 2-mA circulating electron current, was observed to yield about 8 scattered photons per pulse. These photons acquire, through a twofold Doppler shift, energies of hundred of MeV, and are expected to retain to a high degree the polarization of the laser beam. The observed yield is compatible with predictions based upon the theory of Compton scattering.



T.H. Maiman によるルビーレーザーの発明(1960)
から5年後にレーザー・コンプトン散乱の実験

代表的なレーザー・コンプトン光源

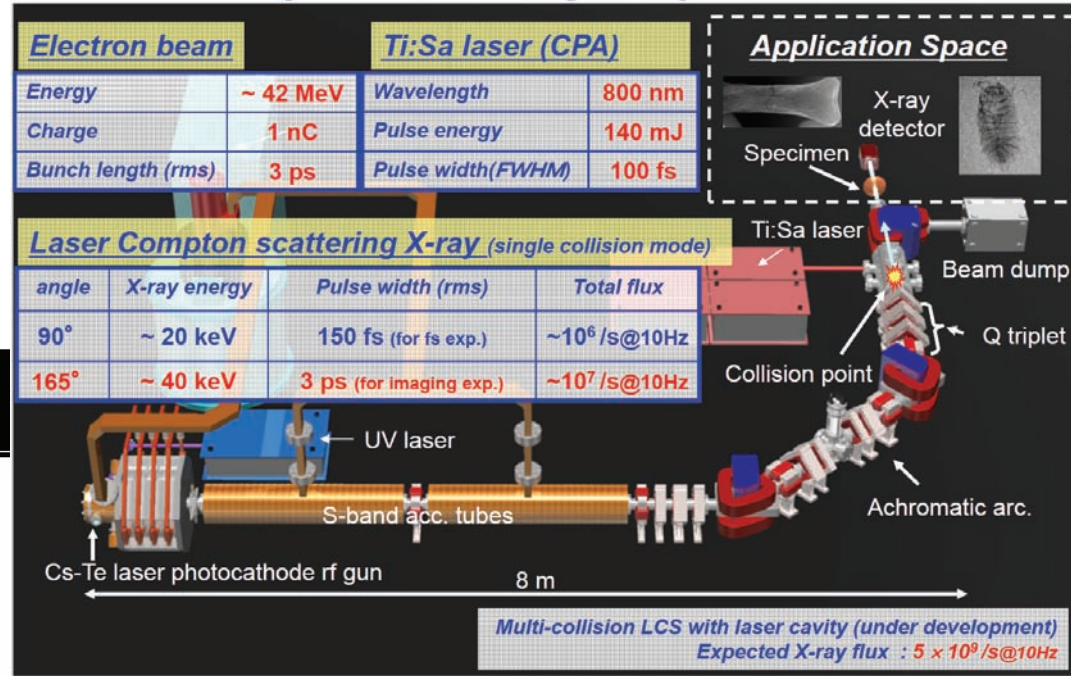
X線領域 ($E < 100 \text{ keV}$)

競合する光源との差別化

- 点光源 = 位相コントラスト
- フェムト秒光源 = 高速現象

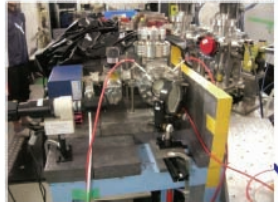
産総研 LCS-X 光源 45 MeV リニアック

Ex = 20-40 keV Courtesy of R. Kuroda

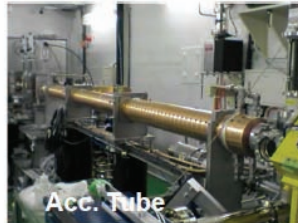


LUCX Experimental Setup

LUCX Accelerator



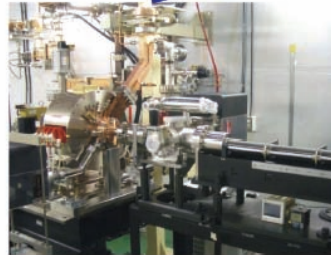
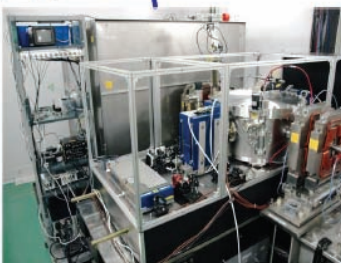
Laser Storage Cavity



X-ray Detector



Electron Beam
30/40 MeV
400 pC/bunch
100 bunch/train



KEK LUCX 30-40 MeV リニアック

Ex = 15-28 keV

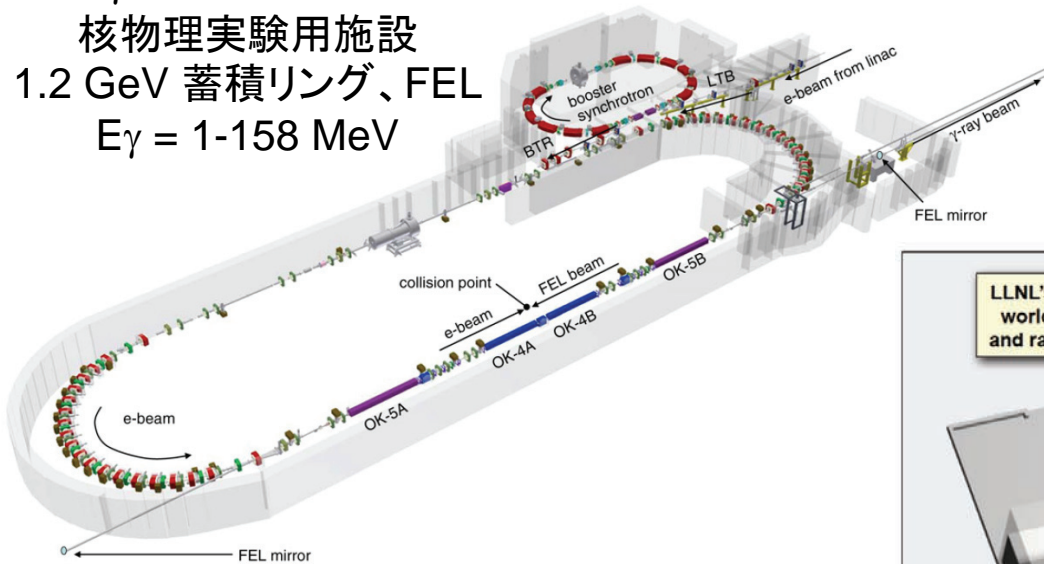
Courtesy of K. Sakaue

代表的なレーザー・コンプトン光源

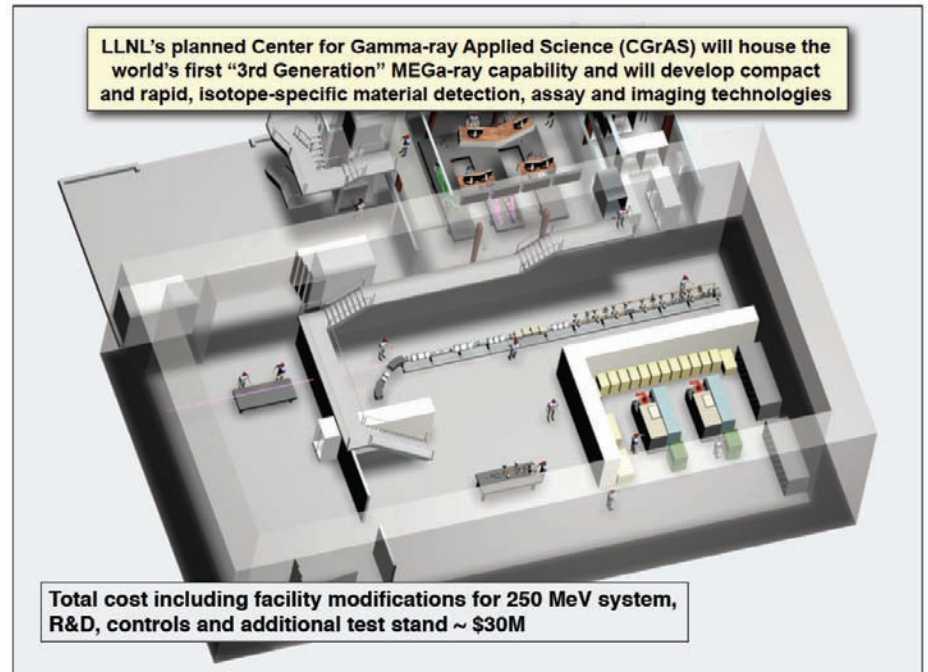
γ 線領域 ($E > 1\text{MeV}$)

エネルギー可変、単色光源として唯一の実用光源

H γ S @ Duke Univ.
核物理実験用施設
1.2 GeV 蓄積リング、FEL
 $E_\gamma = 1\text{-}158\text{ MeV}$



MEGa-ray @ Lawrence Livermore
核セキュリティ用試験機
250 MeV リニアック
 $E_\gamma = 1\text{-}2\text{ MeV}$



原子核物理、天体核物理、
核データ測定など

核物質検知など

レーザー・コンプトン光源の高輝度化

フラックス

$$F_{total} = \frac{16}{3} N_e N_L f \frac{r_0^2}{w_0^2}$$

電子数 N_e

レーザー光子数 N_L

衝突周波数 f

電子古典半径 r_0^2

衝突スポットサイズ w_0^2

輝度

$$B \approx F_{total} \frac{\gamma^2}{\varepsilon_n^2} \times 0.1\%$$

高輝度化

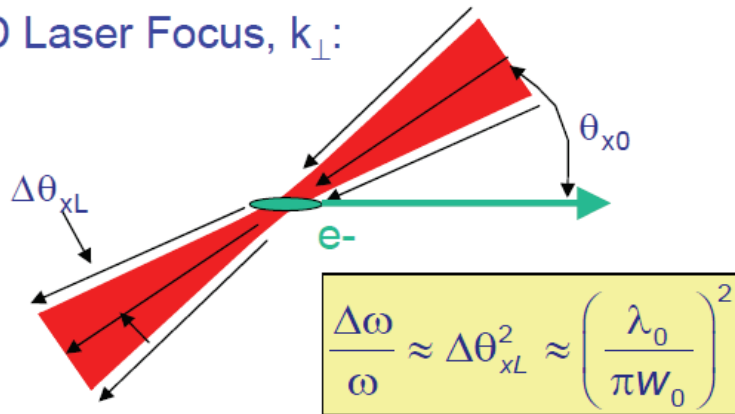
衝突密度を高くする
衝突繰り返しを増やす
エミッタンスを小さくする

レーザー・コンプトン光源の単色度を決める要因

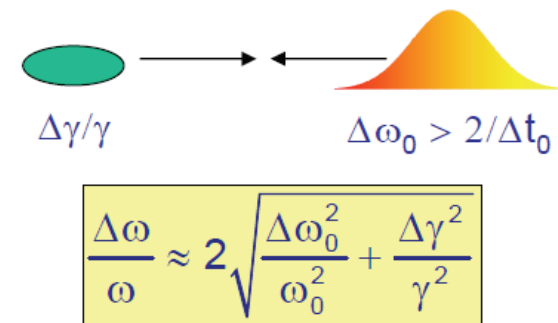
D. Moncton, FLS-2006 WS. *MIT Center for Accelerator Science and Technology*

Bandwidth and Divergence Effects

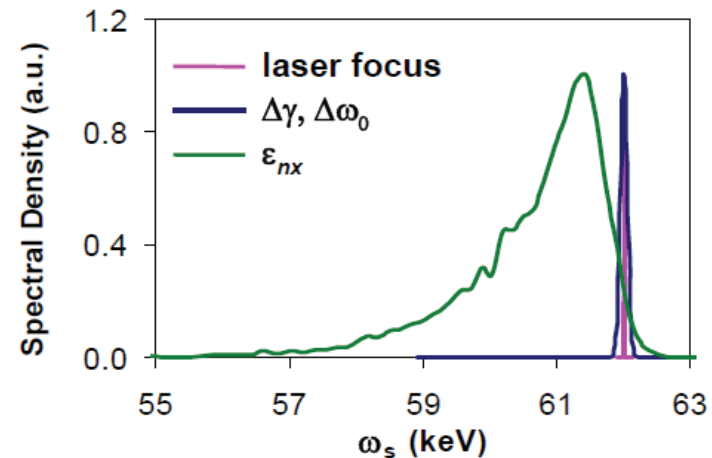
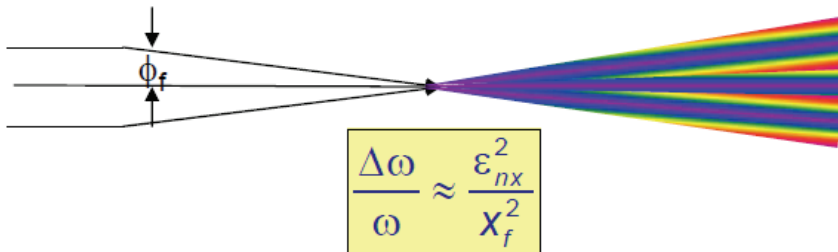
3D Laser Focus, k_{\perp} :



Laser Bandwidth/Electron Energy Spread:



Electron Emittance:



蓄積リングを用いたレーザーコンプトン光源

シンクロtron放射、アンジュレータ放射と同様に
「放射減衰」と「量子励起」の平衡状態で運転。

(光子放出は直線部で起こるので、周回軌道の設計によらない。)

Z. Huang and R. Ruth, PRL 80, 976 (1998)

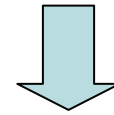
平衡エミッタンス

$$(\varepsilon_{x,y}^n)_{\min} = \frac{3}{10} \frac{\lambda_c}{\lambda_L} \beta_{x,y}^*$$

平衡エネルギー広がり

$$(\sigma_\delta)_{\min} \equiv \left(\frac{\sigma_E}{E} \right)_{\min} = \sqrt{\frac{7}{5} \frac{\lambda_c}{\lambda_L} \gamma}$$

$$\lambda_L = 1\mu\text{m}, \beta_{x,y}^* = 1\text{cm}, \gamma = 200$$



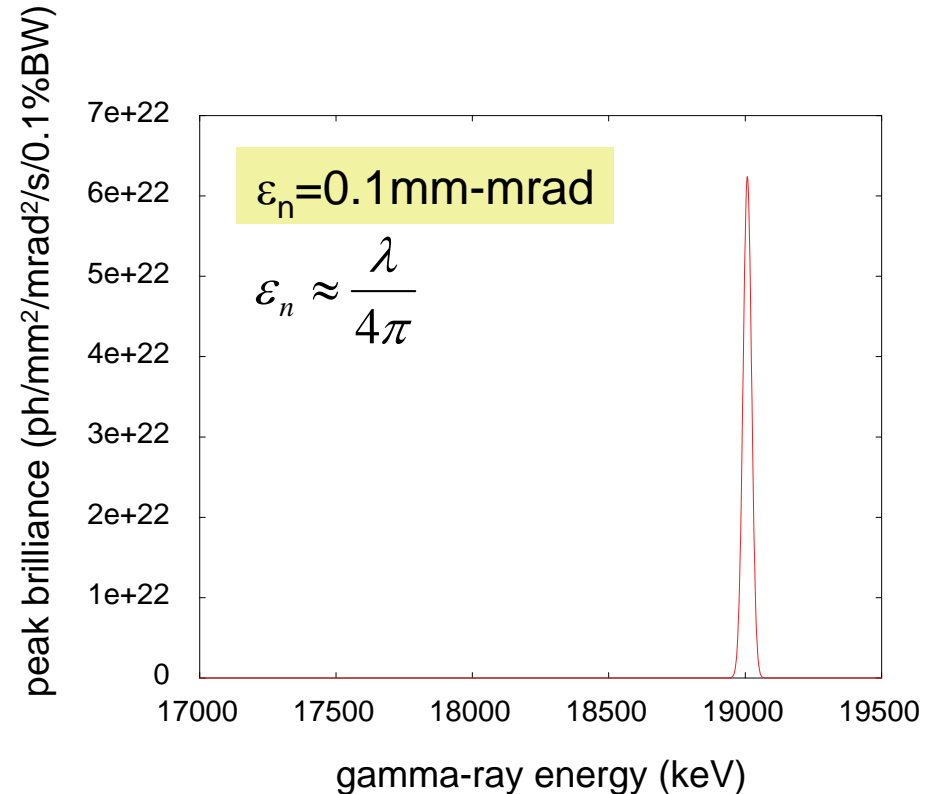
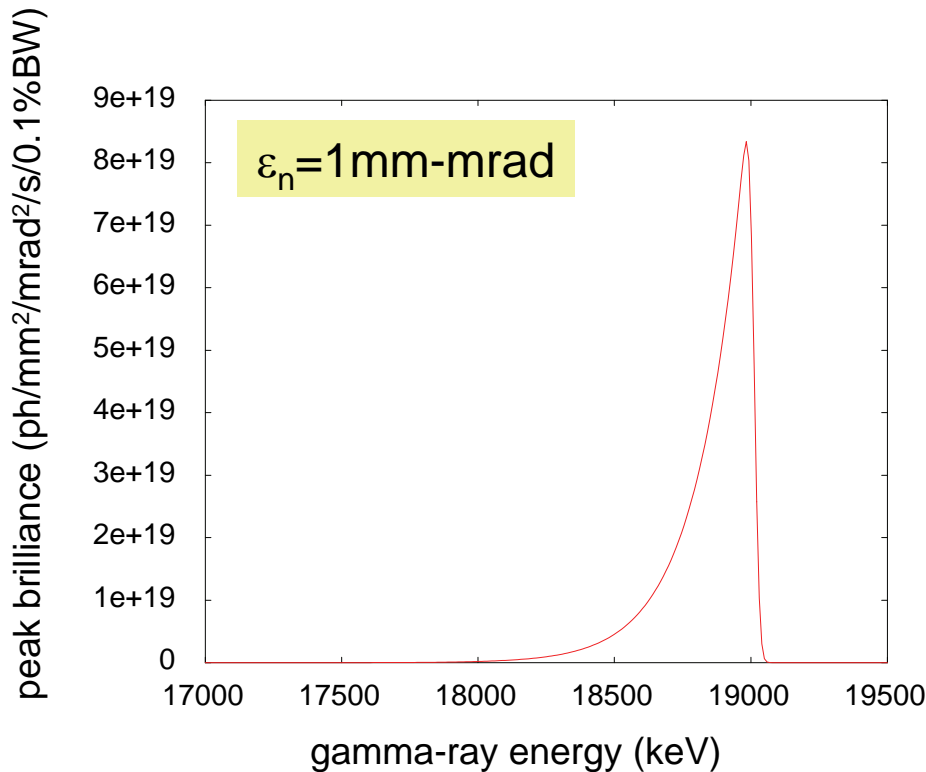
$$\varepsilon_{x,y}^n = 7 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$\frac{\sigma_E}{E} = 2.6\%$$

蓄積リング＝フラックスを大きくできるが、単色性に限界
(特に、高エネルギーほど)

エミッタンスを小さくする → レーザー・コンプトン光源の単色性向上

1-GeV ERL の軸上ガンマ線輝度の計算値(解析式)

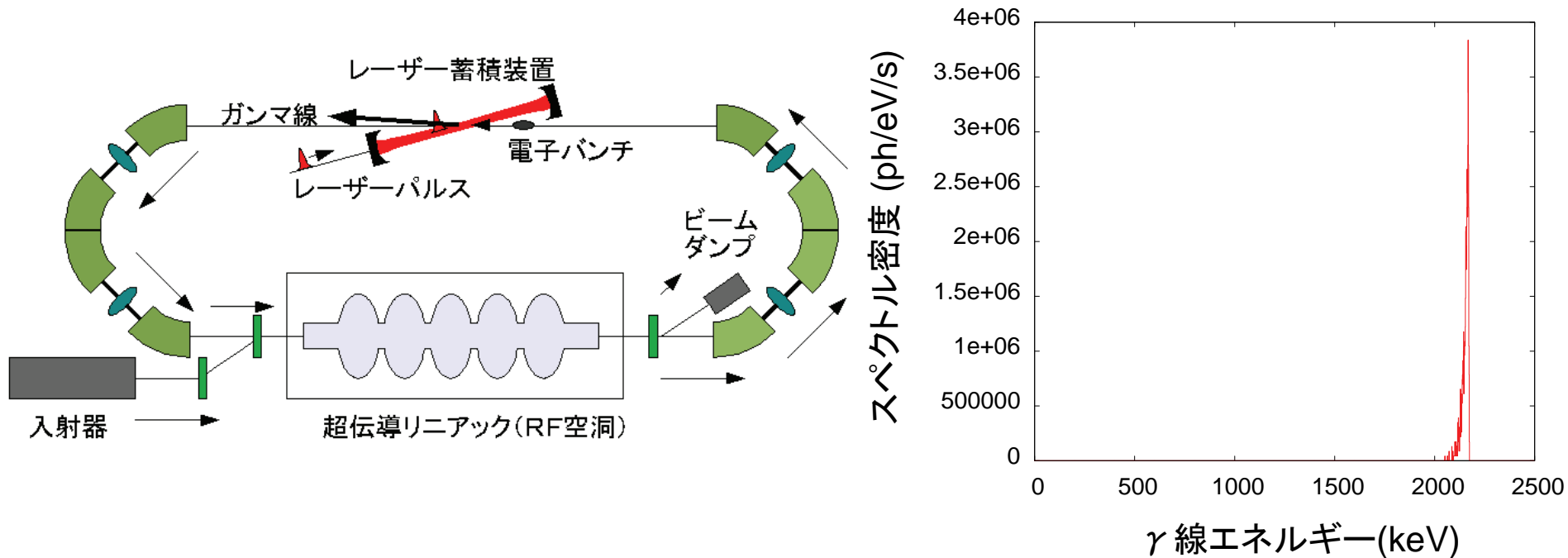


$$\hat{B}_x = \frac{4 \times 10^{-15}}{\pi^2} \frac{\gamma_0^2}{\epsilon^2} \frac{N_e N_\lambda}{\Delta \tau} \frac{r_0^2}{w_0^2} \exp\left\{ \frac{\chi - 1}{2\chi \Delta u_1^2} \left[2 + \frac{\delta \omega^2 + \delta \gamma^2 \chi^2}{2\chi(\chi - 1)\Delta u_1^2} \right] \right\} \left[1 - \Phi\left\{ \frac{\chi - 1}{\sqrt{\delta \omega^2 + \delta \gamma^2 \chi^2}} \left[1 + \frac{\delta \omega^2 + \delta \gamma^2 \chi^2}{2\chi(\chi - 1)\Delta u_1^2} \right] \right\} \right] \times \frac{\eta e^{1/\mu^2} [\Phi(1/\eta) - 1] - \mu e^{1/\mu^2} [\Phi(1/\mu) - 1]}{\mu^2 - \eta^2}, \quad (50)$$

calculation by using a formula in [1].

[1] F.V. Hartemann et al. Phys. Rev. ST AB 8, 100702 (2005).

ERLを用いたレーザー・コンプトン光源



- ✓ LCS発生に利用した電子は、減速して捨てる
- ✓ 新しい電子が常に加速するので、電子の品質劣化がない
- ✓ エネルギー回収により、大電流電子ビームが連続的に加速可能に

優れた単色性と高い輝度を併せ持つ光源

コンパクトERLにおけるレーザー・コンプトン光源の実証

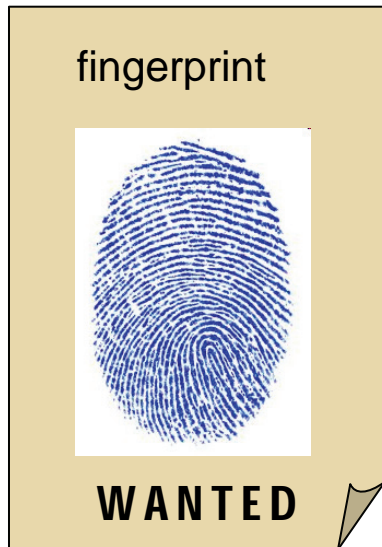
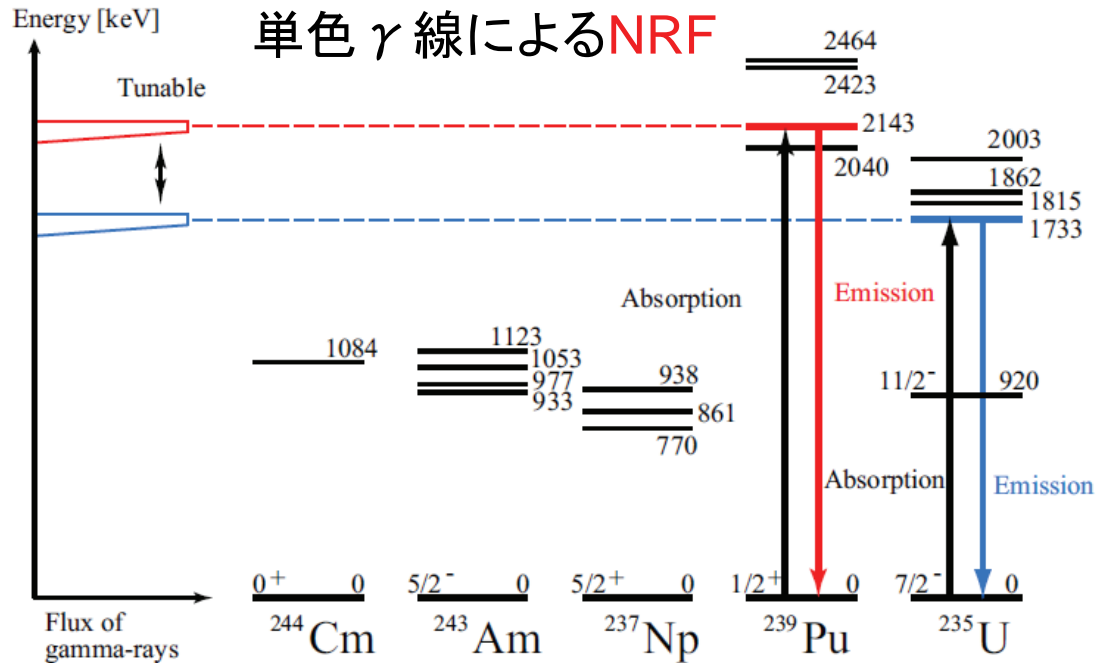
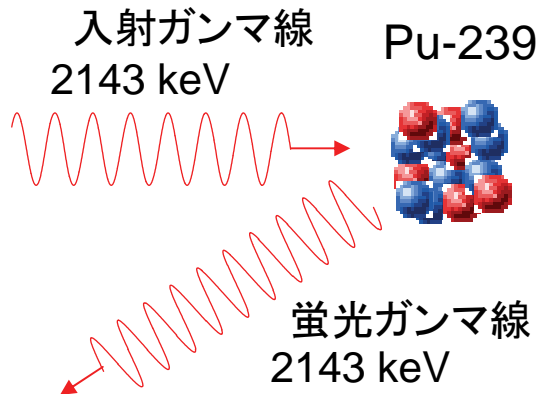
核セキュリティ強化等推進事業費
(文科省補助金、H23~H25)



ERL開発棟 (KEK つくば)

ガンマ線の利用:ガンマ線は原子核と相互作用する

同位体に固有の原子核共鳴蛍光散乱(Nuclear Resonance Fluorescence)

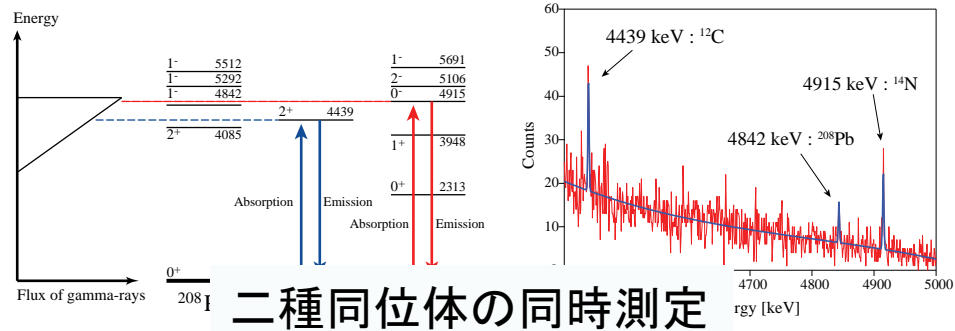
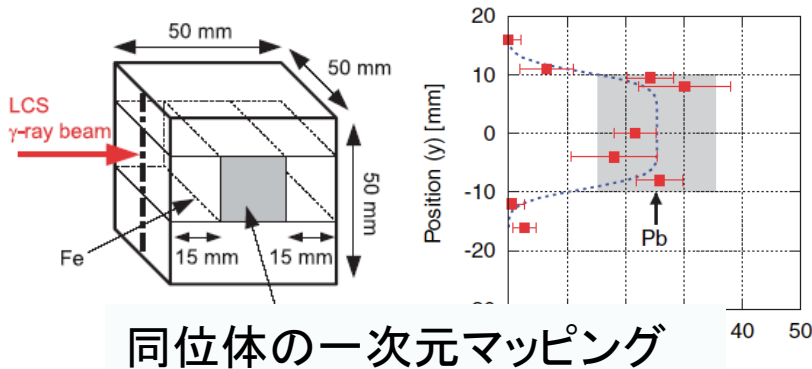


エネルギー可変、
単色ガンマ線ビーム

→

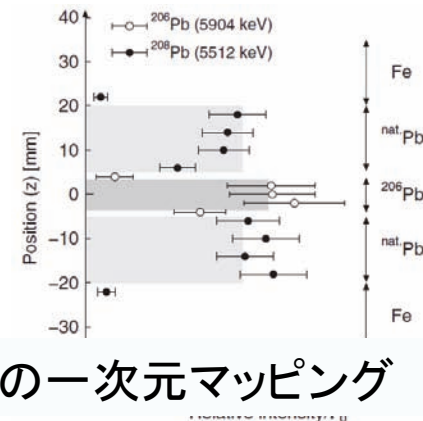
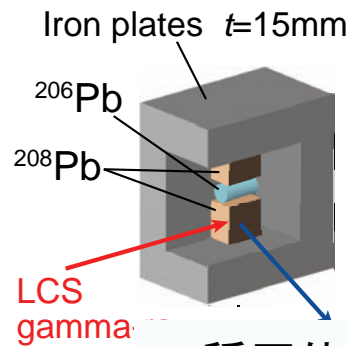
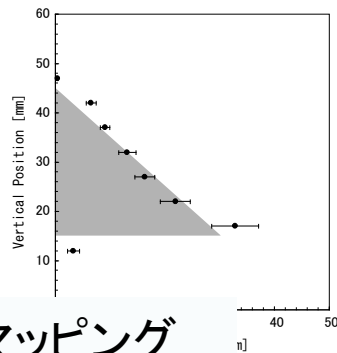
原子核反応を
選択的に実行

NRF実験- 産総研TERAS



N. Kikuzawa et al., APEX 2, 036502 (2009).

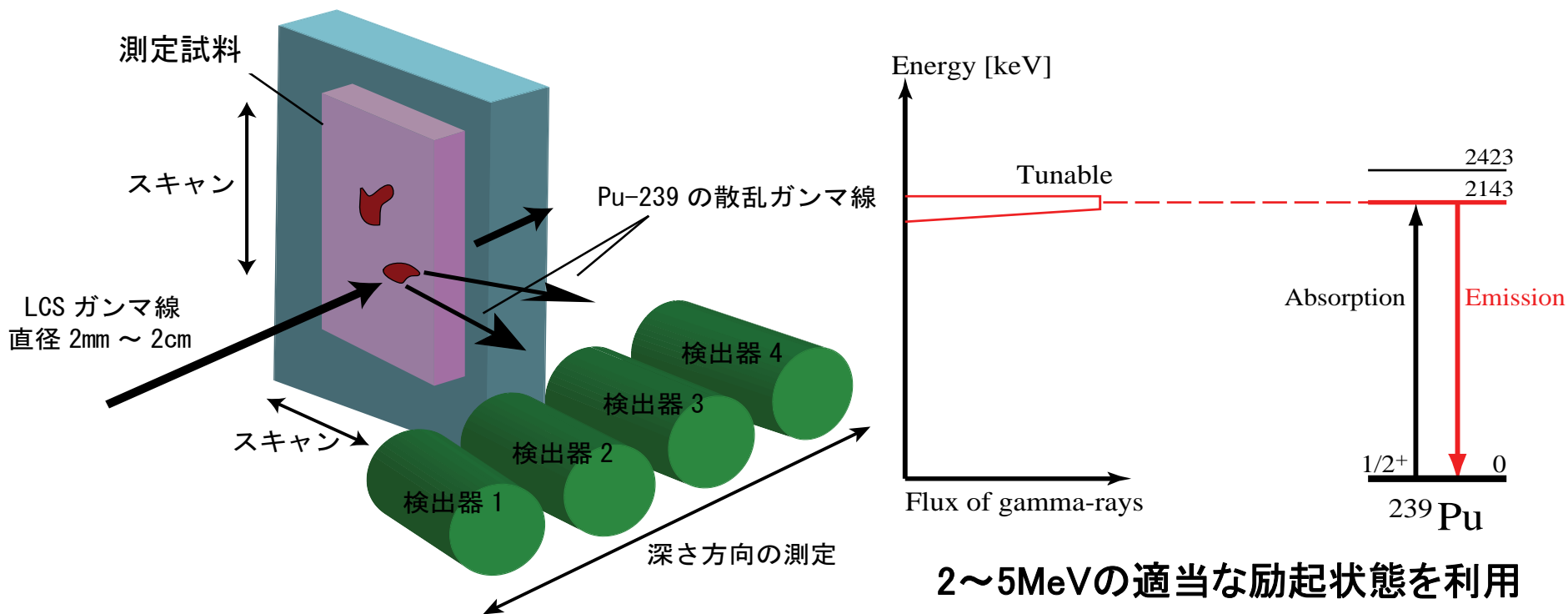
T. Hayakawa et al., RST 80, 045110 (2009).



H. Toyokawa et al., JJAP 50, 100209 (2011).

T. Shizuma et al., RSI 83, 015103 (2011).

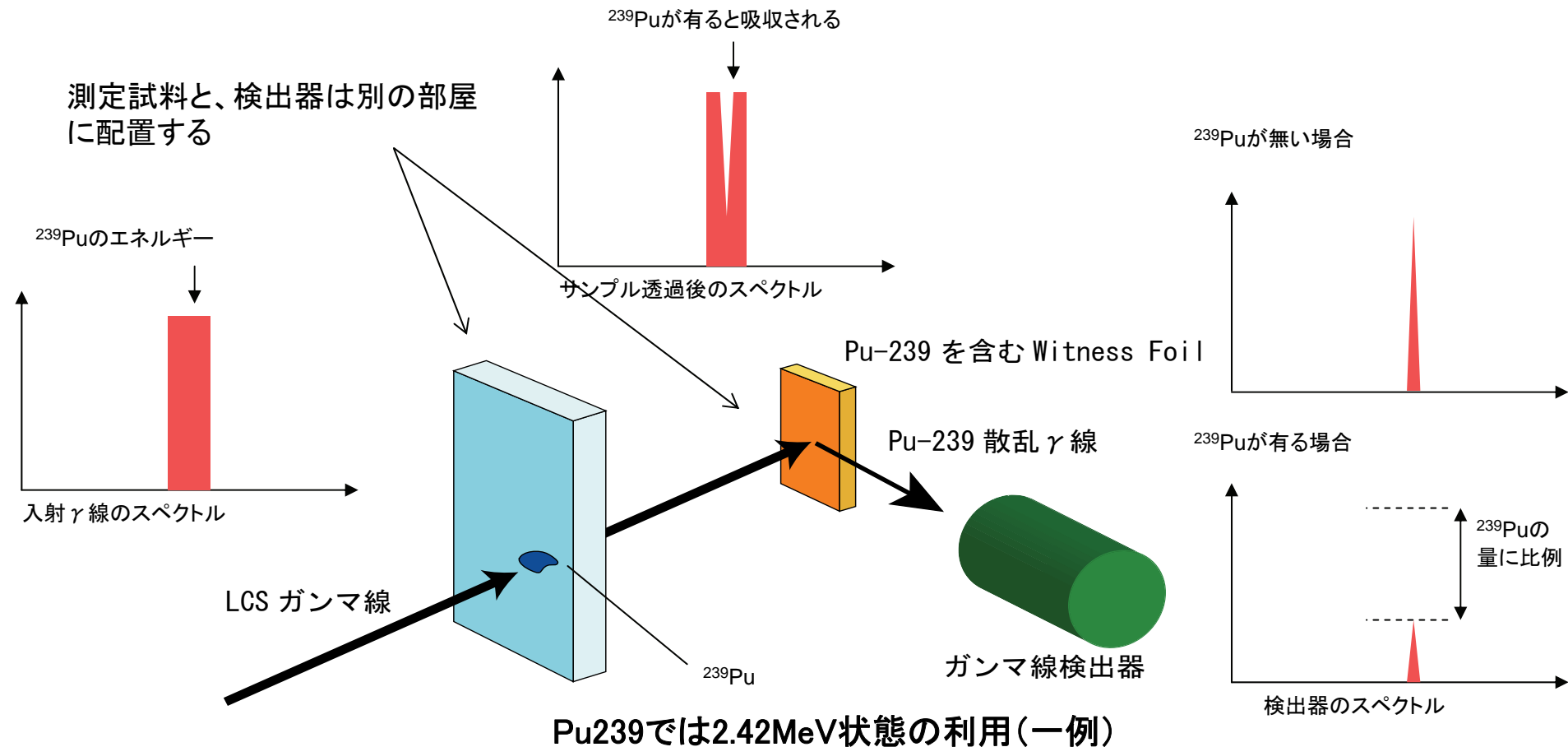
散乱法による核物質の非破壊測定



- ・試料からのバックグラウンドは鉛(アブゾーバ)で減衰させる

T. Hayakawa et al. Nucl. Instr. Meth, A 621, 695 (2010).

吸収法による核物質の非破壊測定



- ・同位体濃度が正確にわかっている標準試料を witness foil として用いる
- ・測定試料からのバックグラウンドに影響されにくい

まとめ

- **レーザー・コンプトン光源 (LCS)** :
レーザー、加速器の技術進展 → 実用化へ
- **X線領域** : 微小光源、短パルス性を生かして、他の光源との差別化
- **γ 線領域** : 波長可変かつ単色性をもつ唯一の光源
- **ERL** : 低エミッタンス大電流ビームはLCSにも有利
- **cERL** : LCS光源の実証実験、文科省補助金にて実施中 (H23~H25)