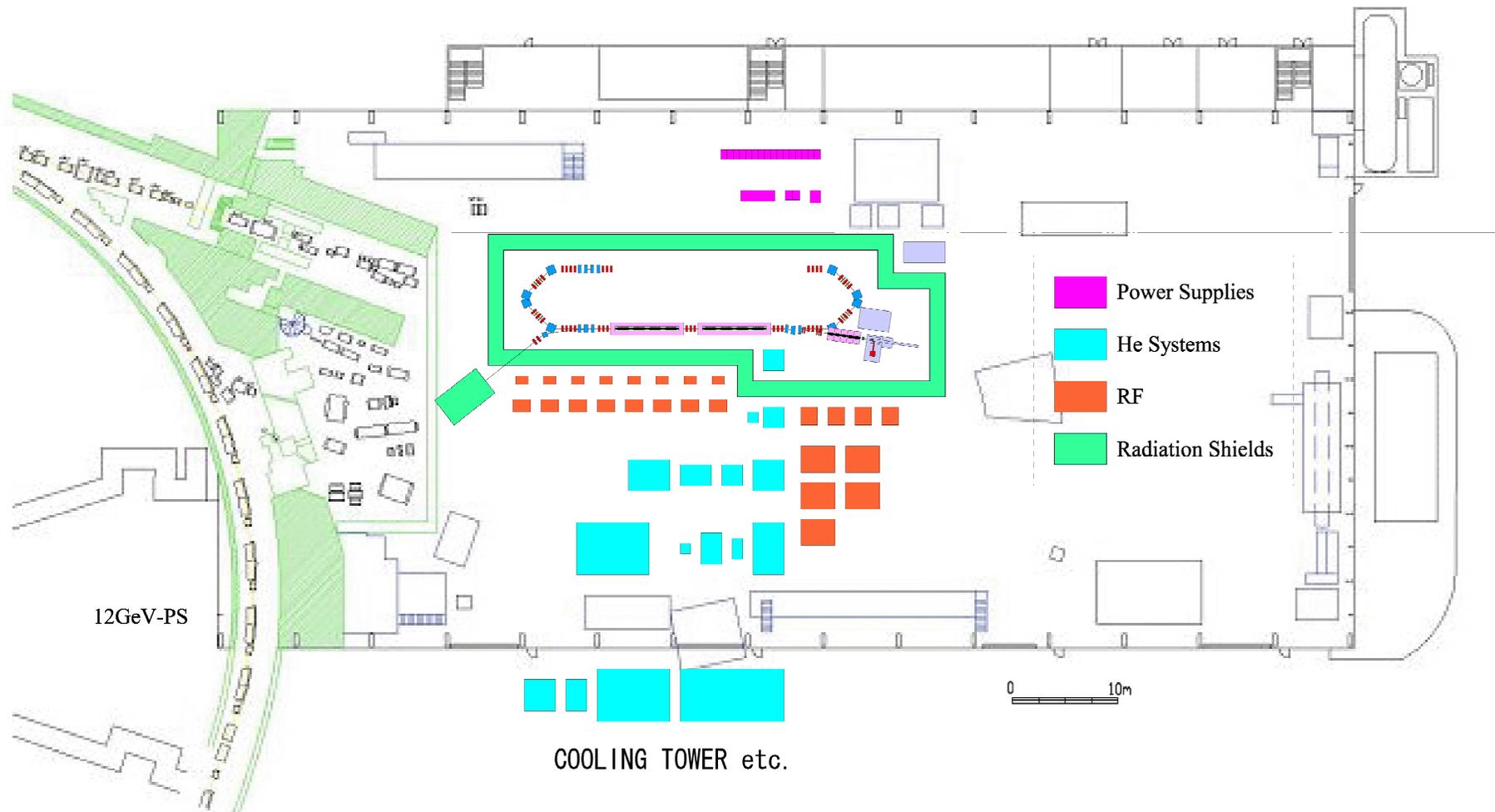


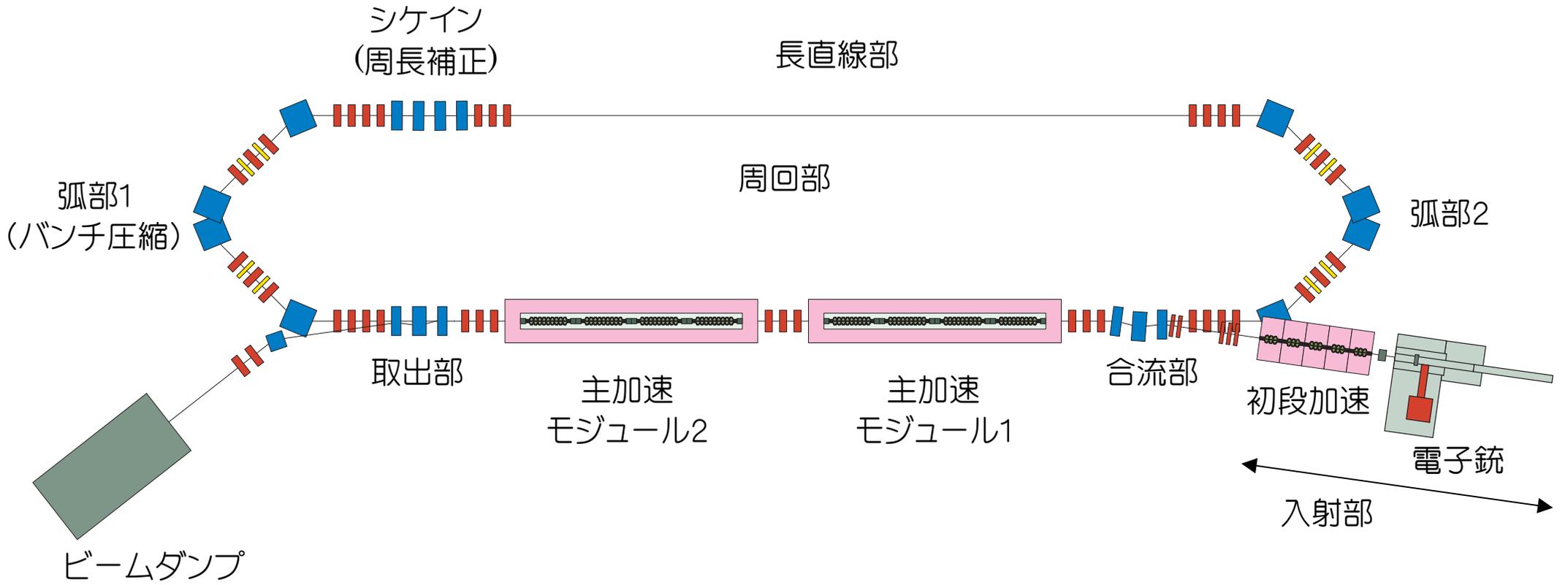
コンパクト ERL における  
CSR によるテラヘルツ光と  
レーザーコンプトン散乱による  
パルスX線の見積もり

# コンパクト ERL の概要



PS 東カウンターホールに建設予定。

# コンパクト ERL の構成



## Compact ERLのパラメータ

		初期目標	最終目標
周回部周長	m	69	
周回部ラティス		DBA	
入射ビームエネルギー	MeV	5	10~15
入射(=ダンプ)ビームパワー	kW	500	1000~
周回部のビームエネルギー	MeV	60	160~200
主加速空洞 (1 module = 9cell x 4本)	modules	1	2
規格化エミッタンス	mm·mrad	1	0.1
ビーム電流	mA	10	100

(本発表で実際に光の見積もりに用いたビームパラメータは、ビームダイナミクスグループミーティングにおいて実現可能性が議論され、ユーザー側に公表してよいと合意したパラメータである。)

リングとの違いは？

- 入射部のビームパラメータが保存する。
  - 電子銃でよりよいビームが作れば、それだけで性能が上がる。
- エミッタンスは入射部+断熱減衰で決まる。
  - リングでは加速するとエミッタンスが大きくなるが、ERL では断熱減衰により小さくなる。ビームサイズを小さくしたければ、より加速するのも方法の一つ。
- 常に新しいビームが周回する。
  - ビームパラメータが平衡状態で決まらない。
  - ビームロスが起こった場合、電子銃を止めない限りロスし続け、放射線も止まらない。放射線遮蔽、ビームダンプが非常に大きな問題。
  - 平均電流 100mA の為には、空洞の性能(特に入射部)は勿論だが、放射線遮蔽の問題も大きい。また、 $5\text{MeV} \times 100\text{mA} = 500\text{kW}$  のビームダンプもかなりの大きさが必要であり、現段階では難しいかもしれない。

実機と実証器のビームパラメータの違いは？

- ビームエネルギー : 実機 5GeV、実証器 60MeV
- 周長 : 実機約 1.2km、実証器 70m
- バンチ長、(規格化)エミッタンス、繰り返し、平均電流(最終目標)は実機と実証器で同じ。

CSR と逆コンプトンX線利用には、実証器が有利

- CSR の強度はバンチ電荷、波長域はバンチ長に依存する。(これらは実機も実証器も同じ。)
- 60MeV は、テラヘルツ領域の(インコヒーレント)放射光を十分にカバーするエネルギーである。それより高いビームエネルギーでも、テラヘルツ領域の放射光の様子は変わらない。(実機でも実証器でも、テラヘルツ領域の様子は同じ。スペクトルが高エネルギーに伸びない実証器の方が、テラヘルツ領域の利用には都合がよい。)
- 90° 逆コンプトン散乱で発生する光のエネルギーは、入射光のエネルギーの $2\gamma^2$ 倍。60MeV の時、800nm のレーザーが 42keV になる。硬X線発生のためには、ビームのエネルギーは 60MeV くらいがちょうどよい。
- (実機ではほぼすべてのビームラインにおける、挿入光源からの硬X線が短パルスである。逆コンプトンによる硬X線とは光子数が 10 桁以上多くなる。)

## CSRに関するパラメータのまとめ

- 放射光の強度(バンチ長が短いと  $N^2$  に比例する様になる。)

$$P_{total}(\lambda) = P_{incoh}(\lambda)(1 + (N-1)f(\lambda)), \quad f(\lambda) = e^{-\left(\frac{2\pi\sigma_z}{\lambda}\right)^2}$$

- 通常の放射光の臨界振動数(テラヘルツ領域は 60MeV ビームでは十分にカバーされる。)

$$\omega_c = \frac{3c\gamma^3}{2\rho}$$

- CSR 放射の臨界振動数(バンチ長が短くないと、必要なエネルギーの光が出ない。)

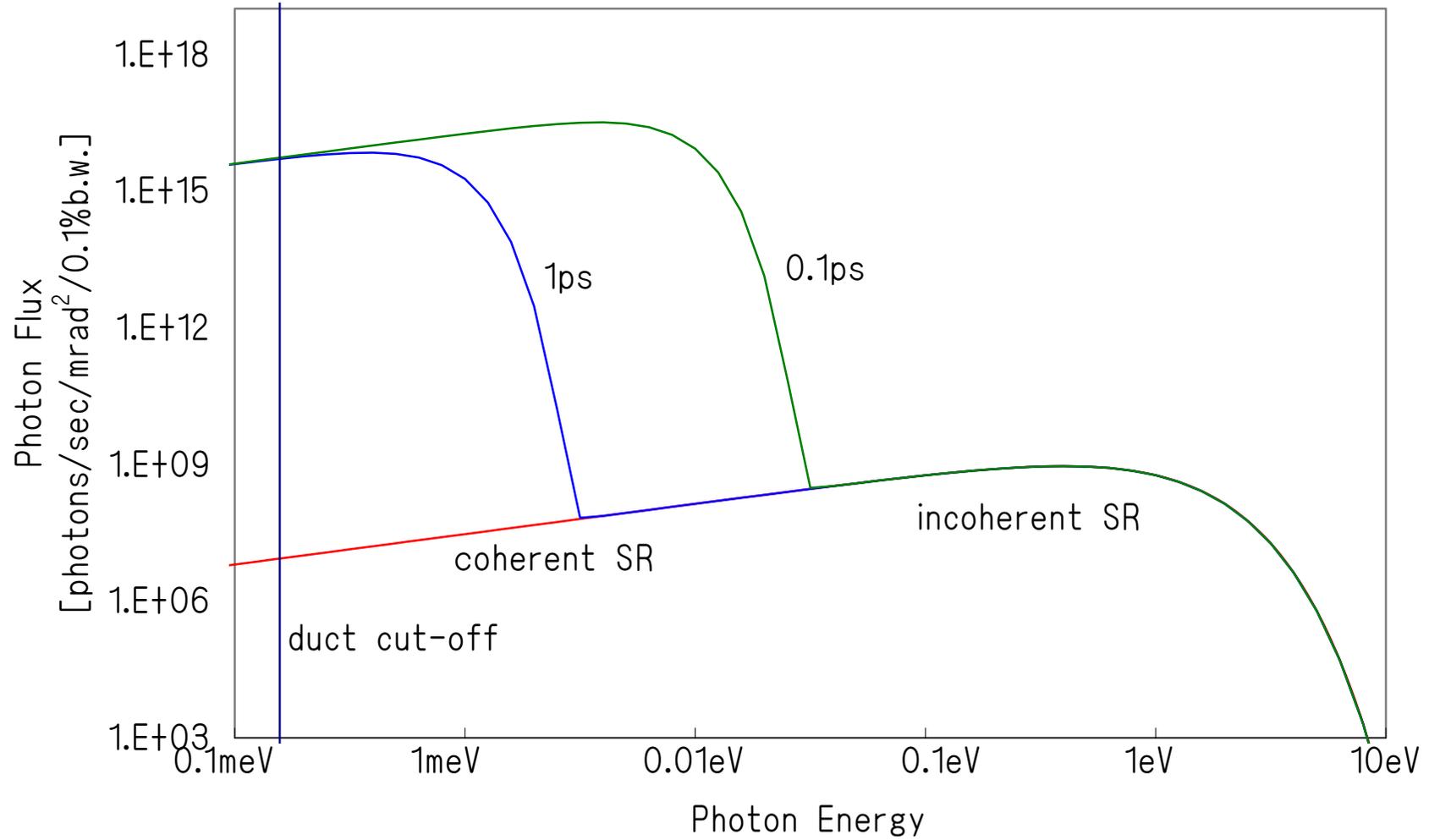
$$\omega_{c-csr} = \frac{\pi c}{\sigma_z} \quad (\lambda_{c-csr} = 2\sigma_z)$$

- CSR 放射の遮蔽振動数(ダクトが大きい方が低エネルギー光まで発生。)

$$\omega_{cut-off} = \pi c \sqrt{\frac{\rho}{h^3}} \quad \left( \lambda_{cut-off} = 2\sqrt{\frac{h^3}{\rho}} \right)$$

- 従って CSR は  $\omega_{cut-off} < \omega < \omega_{c-csr} (< \omega_c)$  の範囲で発生。

CSRの強さ 100pC,130MHz,60MeV, $\rho=1\text{m}$ , $\Phi 50\text{mm}$



## 放射光の角度広がりと円偏光の利用

$$\frac{d^2 P_{incoh}}{d\omega d\Omega} = \frac{3e^2 \gamma^2}{16\pi^3 \varepsilon_0 c} \left( \frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \left( 1 + \gamma^2 \theta^2 \right) \left( \text{Bessel}K_{\frac{2}{3}}(\xi)^2 + \frac{\gamma^2 \theta^2}{1 + \gamma^2 \theta^2} \text{Bessel}K_{\frac{1}{3}}(\xi)^2 \right)$$

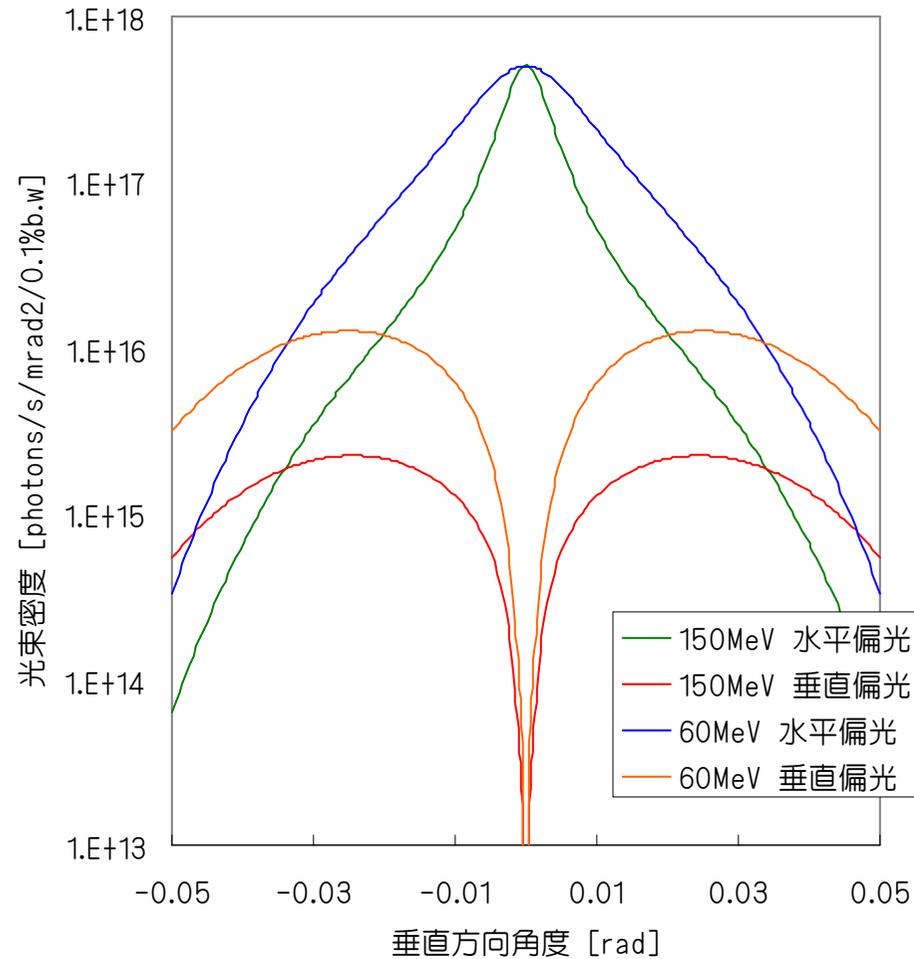
水平偏光

垂直偏光

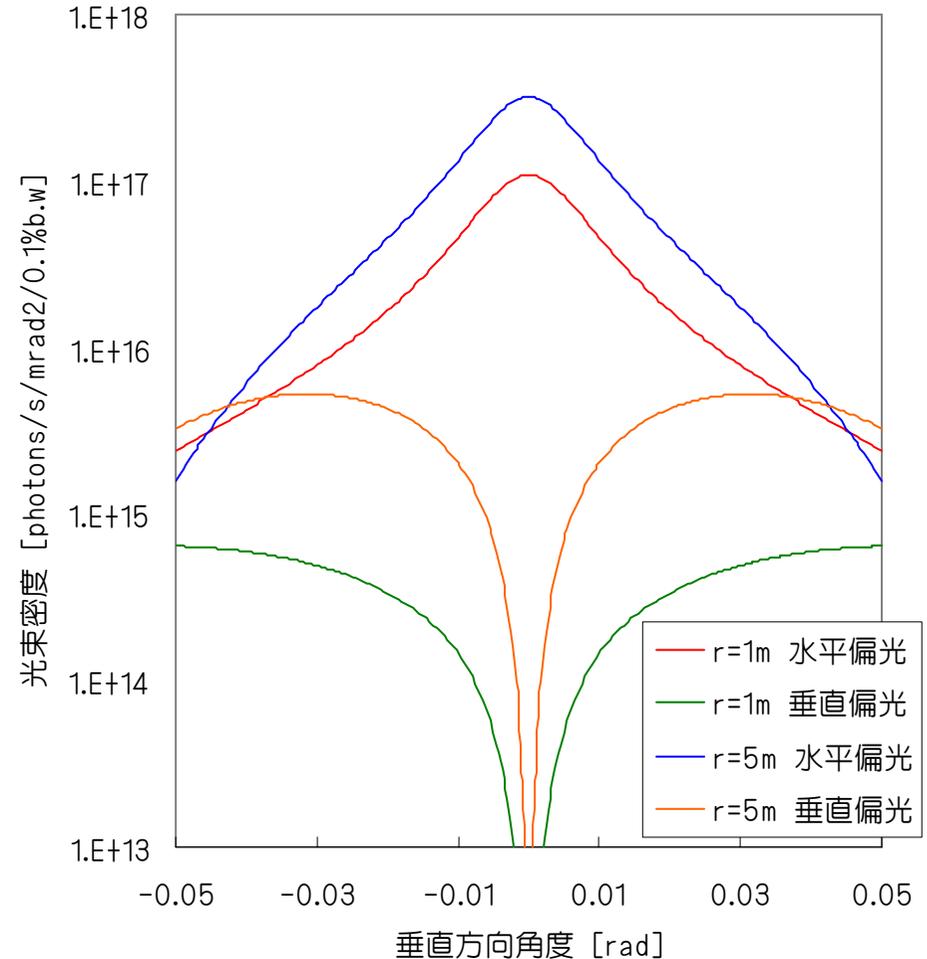
- 光のエネルギーが低いため、縦方向の光の広がりが大きい。
- 光軸からずれた垂直偏光成分が十分な大きさを持ち、楕円偏光・円偏光として利用可能。

## 縦方向の発散角と偏光度

発散角と偏光度 77pC,1.3GHz  
r=1m,光のエネルギー0.01eV



発散角と偏光度 77pC,1.3GHz  
60MeV,光のエネルギー1meV



- 図中で  $r$  は偏向電磁石の曲率半径  $\rho$ 。
- 1meV で円偏光を使いたい場合、偏向電磁石の曲率半径を、例えば 5m にすれば、40mrad 付近で円偏光となる。(その角度でフロントエンドやビームラインができるかどうかは別。)

## 90° レーザー逆コンプトン散乱に関するパラメータのまとめ

- 散乱光のエネルギー

$$\varepsilon_{ph} \approx 2\gamma^2 \varepsilon_{laser} \frac{1}{1 + \gamma^2 \theta^2}、\text{ビーム進行方向には } \varepsilon_{ph} \approx 2\gamma^2 \varepsilon_{laser}$$

ただし、 $\gamma \gg 1$  の場合の近軸 ( $\theta \ll 1$ ) に対する近似。

- 散乱光の強度

$$F_c = \frac{N_p N_e}{w_e h_e} \frac{L_{eff}}{L_b} \sigma_c$$

ただし、一様な直方体ビームに対する近似で、 $N_e$  はバンチ中の電子数、 $N_p$  はレーザーの中の光子数、 $w_e$  と  $h_e$  は電子ビームの幅と高さ(全幅)、 $L_b$  はバンチ長、 $L_{eff}$  は実質的に衝突に関わる電子バンチの長さ(ここでは  $\approx L_b$ )、 $\sigma_c$  はコンプトン散乱の散乱断面積で、ここでは  $r_0$  を古典電子半径として  $4\pi r_0^2$ 。

- 散乱光のパルス幅

$$\tau_c = \frac{1}{c} \sqrt{w_e^2 + w_p^2 + L_p^2}$$

ただし、バンチ長がレーザーのパルス幅やスポットサイズより長い場合の近似で、ここで  $w_p$  はレーザーのビームサイズ、 $L_p$  はレーザーのパルス長。

もう少し正確な式(トムソン散乱に対する式)

- 散乱光のエネルギー

$$\varepsilon_{ph} = \frac{1 - \beta \cos \theta_t}{1 - \beta \cos \theta} \varepsilon_{laser} \approx 2\gamma^2 (1 - \beta \cos \theta_t) \varepsilon_{laser}$$

ただし、 $\theta_t$ は入射光と電子ビームのなす角度。

- 散乱光の強度

$$F_c = \frac{N_p N_e}{2\pi} \frac{\sigma_c}{\sqrt{h_e^2 + h_p^2} \sqrt{w_e^2 + w_p^2 + L_e^2 + L_p^2}}$$

ただし、ガウス分布に対する式で幅や高さ、バンチ長とパルス長はシグマである。

- 散乱光のパルス幅

$$\tau_c = \frac{1}{c} \frac{L_b \sqrt{w_e^2 + w_p^2 + L_p^2}}{\sqrt{w_e^2 + w_p^2 + L_b^2 + L_p^2}}$$

萬 雅史「レーザーコンプトン散乱法による極端パルスX線発生に関する研究」  
(FESTA に在籍した住重研究者のD論(早稲田大学,2005))

90° レーザー逆コンプトン散乱の光子数とパルス幅の見積もり

- ビームエネルギー  $60MeV$ 、レーザーの波長  $800nm$

$$\gamma = 117.4, \epsilon_{laser} = 1.55eV$$

- 散乱光の最大エネルギー

$$\epsilon_{ph} \approx 42.7keV$$

- 散乱光の強度

電子バンチ電荷  $100pC$ 、 $N_e = 6.24 \times 10^8$  個、レーザー  $10mJ$ 、 $N_p = 4.03 \times 10^{16}$  個、

電子ビームサイズ  $w_e = h_e = 50\mu m$ 、バンチ長  $L_b = 300\mu m = 1ps$ 、

レーザービームサイズ  $w_p = 50\mu m$ 、レーザーパルス幅  $L_p = 30\mu m = 100fs$ 、

$$\sigma_c = 4\pi r_0^2 = 1.00 \times 10^{-28} m^2, \text{レーザー繰り返し } f_p = 1kHz$$

$$F_c = 1.00 \times 10^6 [photons / pulse]$$

$$F_c = 1.00 \times 10^9 [photons / sec]$$

- 散乱光のパルス幅

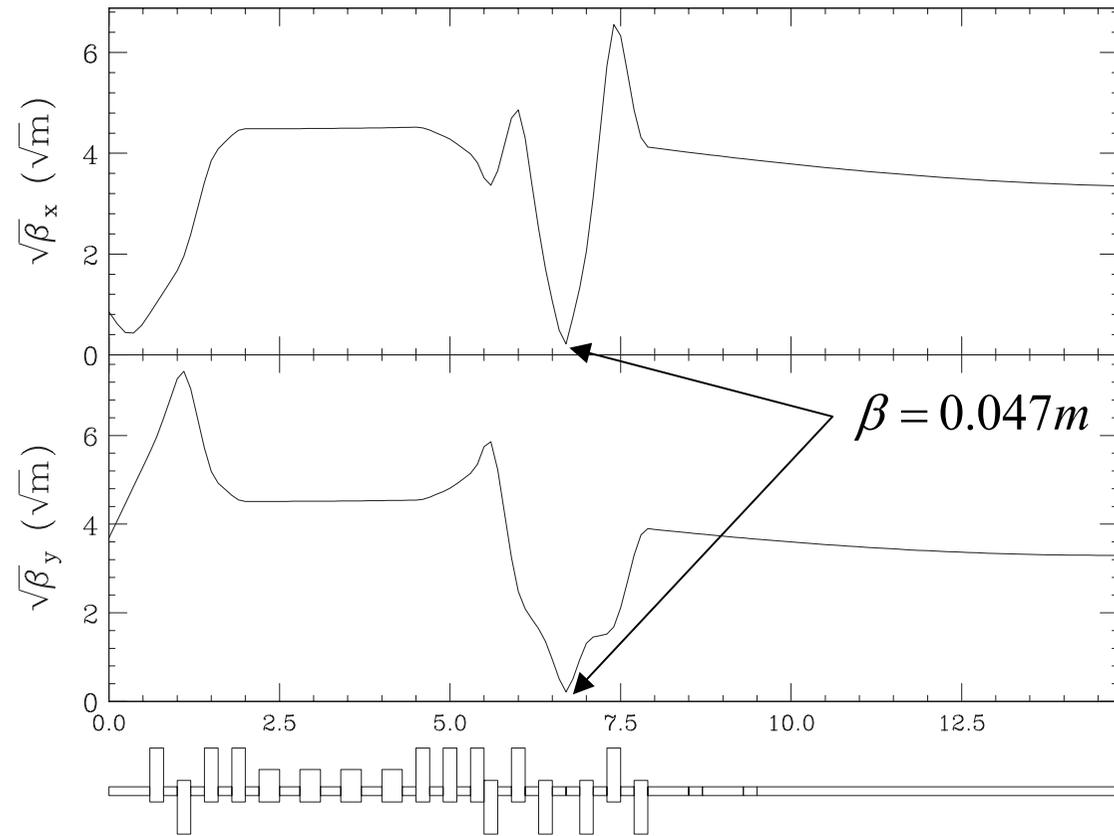
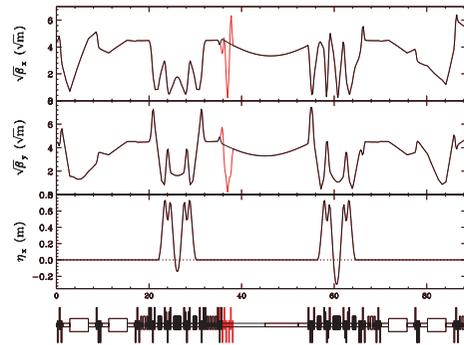
$$\tau_c = 256fs$$

(注:このパラメータは一様な直方体ビームの「全幅」)

電子ビーム全幅  $w_e = h_e = 50\mu m$  は？

全幅  $50\mu m \rightarrow$  RMS で  $\sigma = 20\mu m$  とする。

$60MeV$ 、 $\varepsilon_n = 1mm \cdot mrad \rightarrow \varepsilon = 8.5nm \cdot rad \rightarrow \beta = 0.047m$



MIT で似たような計画がある (PAC07 ポスター、坂中さんより)

“MIT Compact X-ray source”

# The MIT Compact X-ray Source Project

TUPMS009

W.S. Graves, F. X. Kärtner, D.E. Moncton - Massachusetts Institute of Technology

W. Brown, T.Y. Fan - MIT/Lincoln Laboratory

LINCOLN LABORATORY  
MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Massachusetts Institute of Technology

## Performance Optimization

Assuming a transverse emittance dominated x-ray spectrum:

$$B_{\text{max}}(\lambda_e) = \frac{1.5 \times 10^{21}}{(2\pi)^2} \gamma_e^2 \frac{N_e N_p}{\epsilon_e^2 \Delta t_e \lambda_e^2} \quad B_{\text{ax}}(\lambda_e) = \frac{1.5 \times 10^{21}}{(2\pi)^2} \gamma_e^2 \frac{N_e N_p}{\epsilon_e^2 \lambda_e^2} F$$

$$B = 5.05 \times 10^{19} \gamma_e^2 \frac{\lambda(\mu\text{m}) Q_e (\text{nC}) W_e (\text{Joules})}{\Delta t_e (\text{ps}) \epsilon_e^2 (\text{mm-mrad}) \lambda_e^2 (\mu\text{m})} \quad B = 1.27 \times 10^{17} \gamma_e^2 \frac{\lambda(\mu\text{m}) Q_e (\text{nC}) W_e (\text{Joules}) F}{\epsilon_e^2 (\text{mm-mrad}) \lambda_e^2 (\mu\text{m})}$$

To maximize the interaction, the pulse duration should not exceed the Rayleigh range:

$$c \Delta t_e < z_R = \frac{4\pi x_e^2}{\lambda} \rightarrow x_e|_{\text{min}} \approx 4.88 \mu\text{m} \times \sqrt{\lambda(\mu\text{m}) \Delta t_e (\text{ps})}$$

Applying this constraint, the optimum brightness for a given electron beam pulse duration can be derived (units = photons/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/is/0.1%b.w.):

$$B_{\text{max}}|_{\text{opt}} \approx 2.1 \times 10^{17} \gamma_e^2 \frac{Q_e (\text{nC}) W_e (\text{Joules})}{\Delta t_e^2 (\text{ps}) \epsilon_e^2 (\text{mm-mrad})} \quad B_{\text{ax}}|_{\text{opt}} \approx 5.3 \times 10^{17} \gamma_e^2 \frac{Q_e (\text{nC}) W_e (\text{Joules}) F}{\epsilon_e^2 (\text{mm-mrad}) \Delta t_e (\text{ps})}$$

Shorter Electron Bunches Higher Average Brightness X-rays

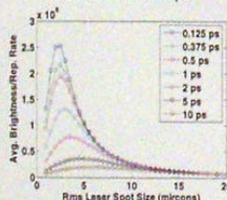
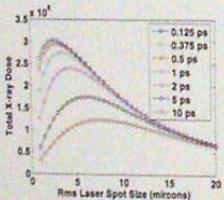
### Numerical Calculations

#### Electron Beam Parameters

- $\epsilon_e = 1 \text{ mm-mrad}$  (25 MeV)
- Rms spot size = 10  $\mu\text{m}$
- $Q = 0.1 \text{ nC}$

#### Laser Parameters

- $\lambda = 1 \mu\text{m}$
- $W = 10 \text{ mJ}$
- Pulse duration = 0.5 ps



Constraints must also be placed on the electron beam focus and energy spread for optimal results to be obtained:

Energy spread can degrade obtainable brightness:  $\frac{\Delta \gamma_e}{\gamma_e} < \frac{\epsilon_e^2}{4x_e^2}$

Electron beta function (diffraction length) must be greater than pulse duration:

$$c \Delta t_e < \beta_e = \frac{\gamma_e x_e^2}{E_{\text{ax}}} \rightarrow x_e|_{\text{min}} = 17.3 \mu\text{m} \times \sqrt{\frac{E_{\text{ax}} (\mu\text{m}) \Delta t_e (\text{ps})}{\gamma_e}}$$

Assuming the minimum focal spot size is obtainable, the maximum acceptable energy spread for a given pulse duration,  $\Delta t_e$ , is given by:

$$\frac{\Delta \gamma_e}{\gamma_e}|_{\text{max}} = \frac{\gamma_e E_{\text{ax}}}{4c \Delta t_e} = 8.3 \times 10^{-4} \gamma_e \frac{E_{\text{ax}} (\text{mm-mrad})}{\Delta t_e (\text{ps})}$$

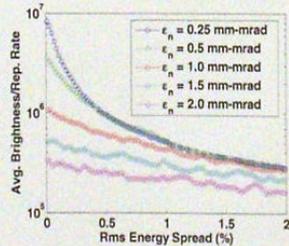
### Numerical Calculations

#### Electron Beam Parameters (25 MeV)

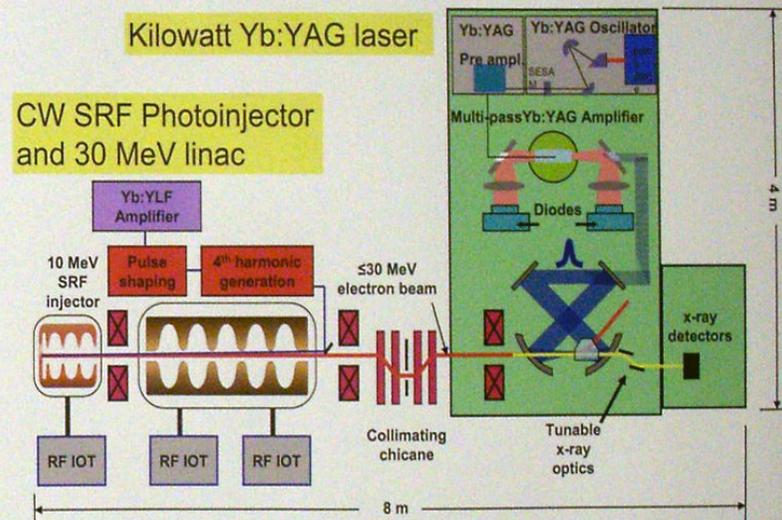
- Rms spot size = 10  $\mu\text{m}$
- $Q = 0.1 \text{ nC}$
- Rms Duration = 0.5 ps

#### Laser Parameters

- Rms spot size = 5  $\mu\text{m}$
- $W = 10 \text{ mJ}$
- Rms Duration = 0.5 ps

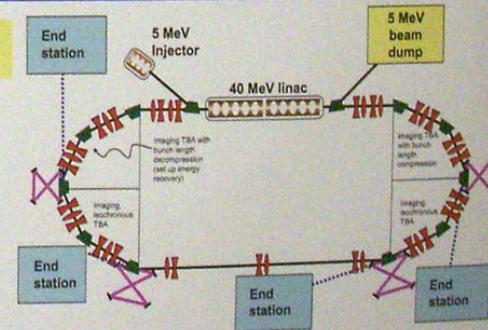


## Single Beamline Layout



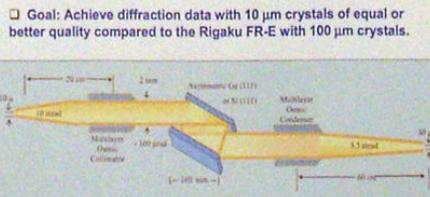
## ERL Multiple Beamline Layout

with ideas from D. Douglas (Jlab)



Average current	1	mA
Charge per bunch	100	pC
Bunch length	1.0	ps
Emittance	0.6	$\mu\text{m}$
Final energy	30	MeV
Laser amplifier power	1000	W
Laser rep rate	10	MHz
Coherent cavity gain	100	

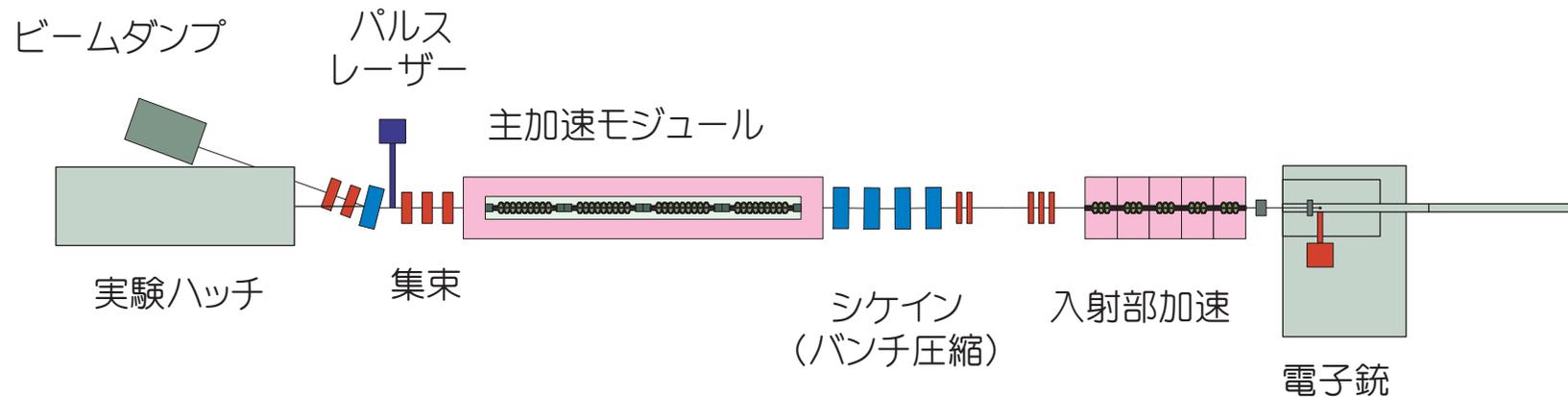
	SZE	Ideal
Photon energy [keV]	12	
Total x-ray flux per pulse (5% bw rms)	5.8e6	1.6e7
Maximum spectral density per pulse (photons/0.1% bw)	8.4e3	2.3e4
Repetition rate [MHz]	10	
Time average total x-ray flux @ 10 MHz	5.8e13	
Average x-ray flux @ 10 MHz (0.1% BW)	8.4e10	
On-axis spectral width FWHM [keV]	0.1	
Spectral width FWHM [keV]	0.6 (5%)	
Avg on-axis brilliance [photons / (mm <sup>2</sup> mrad <sup>2</sup> sec 0.1%)]	2e13	1.6e14
Peak on-axis brilliance [photons / (mm <sup>2</sup> mrad <sup>2</sup> sec 0.1%)]	1e18	4e19
RMS Pulse length [ps]	2.1	0.5
RMS size of source [ $\mu\text{m}$ ]	3.2	2.2
RMS opening angle [mrad]	3.5	



Fixed Wavelength: Ge(111);  $\Delta E = 16 \text{ eV}$ ;  $R = 67\%$   
MAD: Si(111);  $\Delta E = 7 \text{ eV}$ ;  $R = 80\%$

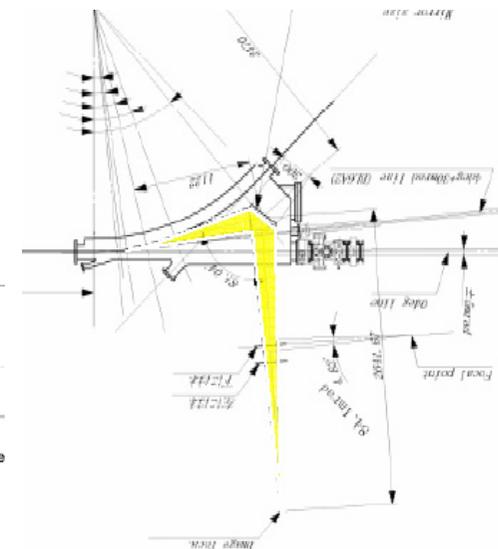
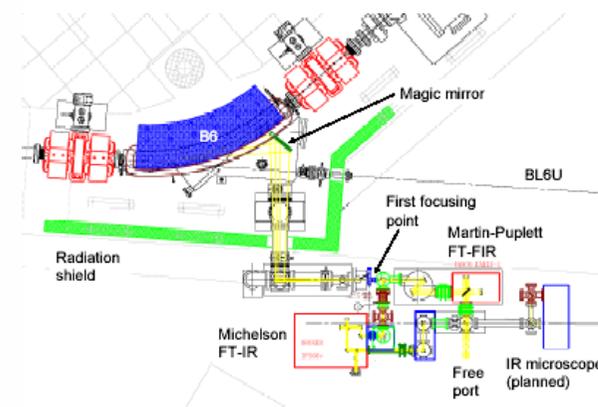
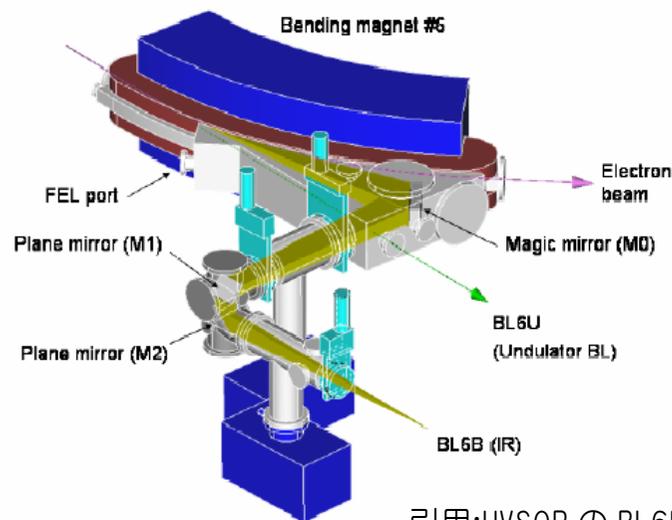
MIT のポスターに啓発されるまでもなく……

- 繰り返し 1kHz や 10kHz なので、エネルギー回収の必要はない。
- 従って、入射器と加速モジュール1本でレーザーコンプトン実験は可能。ERL の R&D のハイライトも入射器と主加速モジュールなので、予算によってはそのようなオプションもあり得るか。(その場合、大電流試験(これも重要)ができない。) 多くの大学・研究機関で「電子源+加速管」という小型加速器を構成しての実験が既にされている。
- レーザーのスポットサイズとパルス幅にも依るが、ERL 入射器の性能からはパルスあたり  $10^6 \sim 10^7$  の光子が発生する。



## 光の取り込み角

- $\gamma$ が小さいため、CSR、レーザーコンプトン(最初はエネルギー幅 10%を想定)ともに光の取り込み角度が重要である。
- 例えば、UVSOR のテラヘルツビームラインでは、B のダクトとミラーが一体化しており、ビームのすぐ脇にミラーがある。光子数を増やすためにはこのような構成は必須である。
- レーザーコンプトン実験についても衝突点にできるだけ近い部分に最初の集光要素を設置することが望ましい。光と電子ビームの軌道を分け、色収差を補正する意味でも、シケインやソートウーす的なラティスでレーザーと衝突させる案もある。
- 特に航跡場の影響についても検討する必要がある。



引用:UVSOR の BL6B の紹介 pdf (左の2図)、分子研研究会「赤外放射光の現状と将来計画」の木村先生発表資料(右)

## まとめ

- コンパクト ERL (ERL 実証器)における、CSR によるテラヘルツ光とレーザーコンプトン散乱による硬 X 線の見積もりを行った。
- CSR では通常の偏向電磁石 ( $\sim 10^8$ ) の光の二乗 ( $\sim 10^{16}$ ) の光束が得られる。ただし CSR が発生するのはバンチ全長と光の波長が等しくなるあたりまで。光のエネルギーおよそ 10meV を CSR でカバーするためには、バンチ長は 0.1ps まで短くする必要がある。
- CSR の利用のためには、ビームパラメータの目標がある程度達成されている必要があり、さらにビームの安定性も確保されている必要がある。
- レーザーコンプトンで 40keV の X 線を発生させるためには、レーザーを 800nm とすると電子ビームのエネルギーは 60MeV。また、レーザーの繰り返しは kHz だが、電子ビームも kHz とするなら、エネルギー回収は不要。
- レーザーコンプトン利用は入射器と主加速モジュール1本で可能。放射線的にも難しいことはない。ERL 用のビームパラメータを使うと、衝突あたりの光子数は  $10^5 \sim 10^7$  となる。これは既存の施設よりも1桁～2桁高い値である。さらに常伝導で kHz は困難であり、平均光子数はさらに有利な値となる。
- かなり初期の段階から利用が可能であり、運転とともに性能向上が可能。