



SuperKEKB加速器におけるビーム バックグラウンドの研究

2017年1月30日 修士論文発表会

素粒子実験研究室

博士課程前期2年 牛木 至

目次

- 導入
 - SuperKEKB
 - ビームバックグラウンドとコリメータによる抑制
 - BEAST II実験
- 研究内容
 - シミュレーションの概要
 - シミュレーションの調整
 - SuperKEKB Phase1シミュレーションの結果
 - SuperKEKB Phase3シミュレーションの結果
- まとめ

SuperKEKB加速器

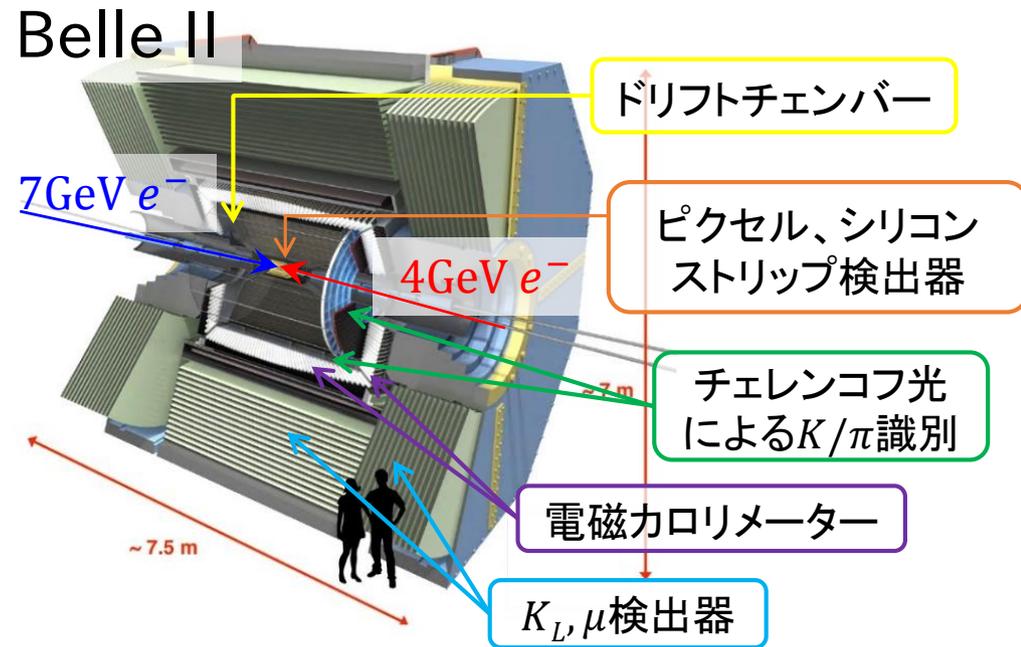
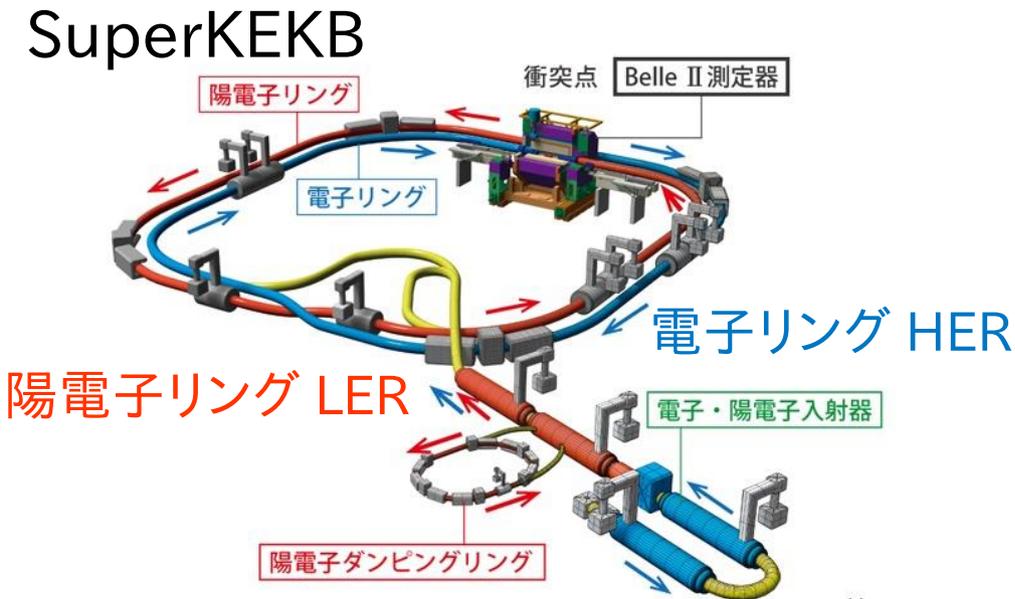


- BファクトリーのKEKBをアップグレード
- $7\text{GeV } e^-, 4\text{GeV } e^+ \rightarrow 10.58\text{ GeV } \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$
- Belle II検出器: 崩壊過程から**物質・反物質の違い** (CP 対称性の破れ)などを調べる
- 設計ルミノシティはKEKBの**40倍**の $80 \times 10^{34}\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$

$$L = \frac{\gamma_{\pm}}{2er_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*} \right) \frac{I_{\pm} \xi_{y\pm}}{\beta_{y\pm}^*} \frac{R_L}{R_{\xi_y}}$$

2倍の電流値
20分の1のベータ関数

$$\sigma_y^* = \sqrt{\varepsilon_y \beta_y^*}$$

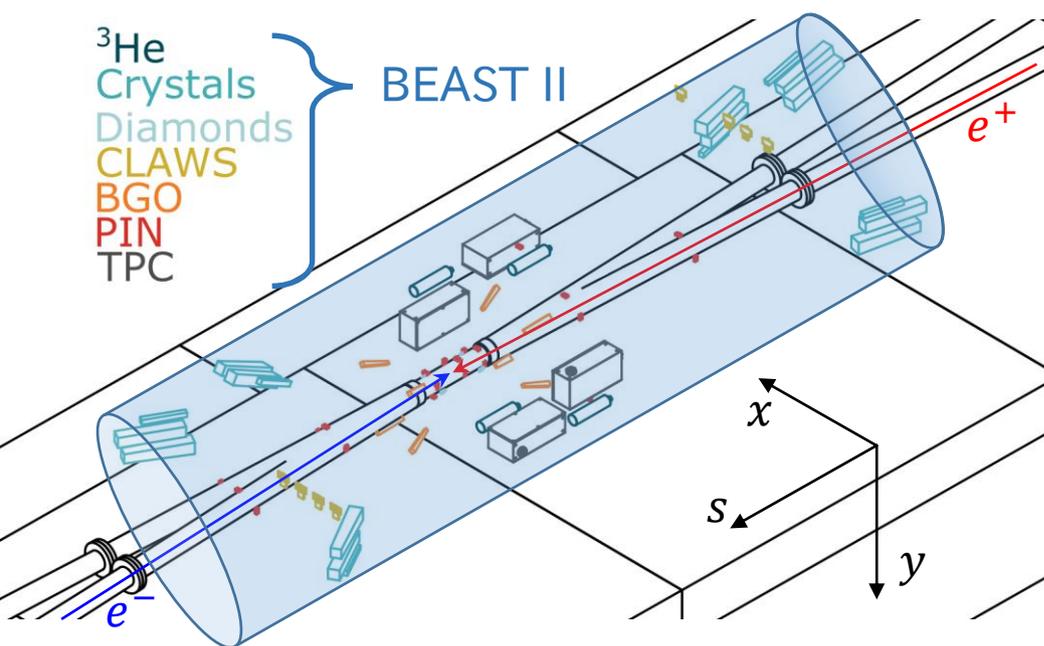


SuperKEKBの運転Phase

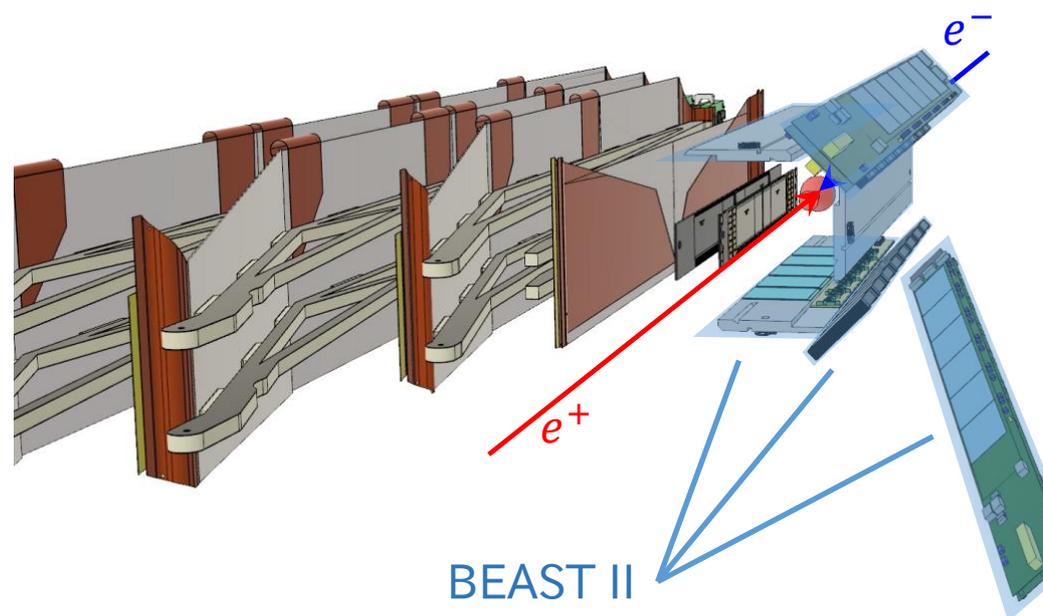
Phase	期間	主な目的	Belle II	最終収束系	目標ルミノシティ
1	'16/02 – '16/06	真空改善	なし	なし	衝突なし
2	'17/10 – '18/03	ビーム衝突の調整	ほぼ全て	あり	$1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
3	'18/10 –	物理Run	全て	あり	$80 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Phase1、Phase2のBelle II検出器がないスペースにBEAST IIを入れる。

Phase1

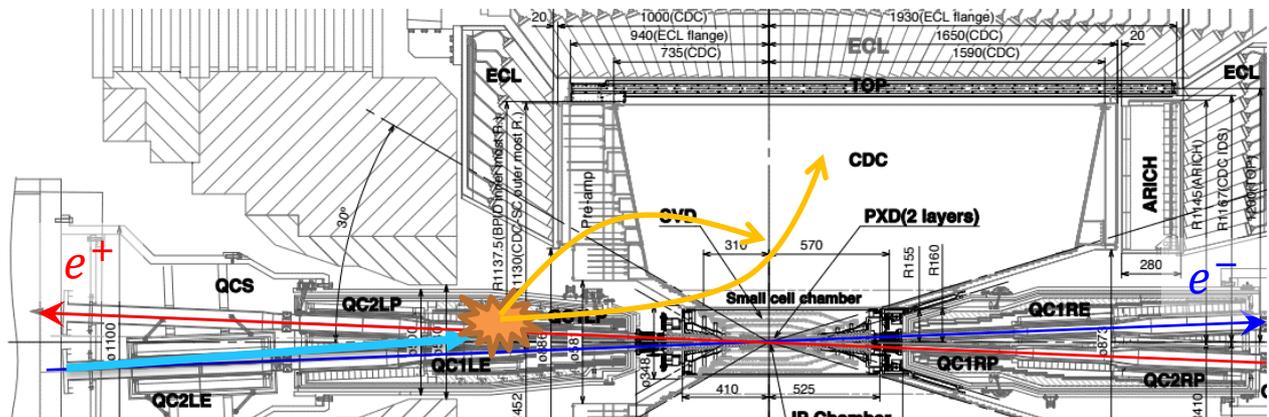


Phase2



ビームバックグラウンド

- ビームパイプからビーム粒子が飛び出し、電磁シャワーや中性子を生成したものの。
- 検出器SN比の低下や検出器寿命の低下を招く。



- ビーム粒子が散乱を受けてエネルギーや運動方向がずれる。
- 散乱原因

- **Touschek効果**

- **Brems(strahlung)**

- **Coulomb散乱**

} 単ビームがリング周回中に発生。
KEKBの経験から重要。

- Radiative Bhabha散乱

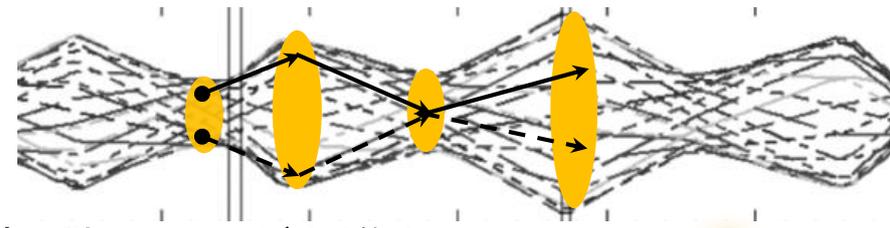
- 2光子過程による低運動量の電子陽電子

} ルミノシティに比例する。

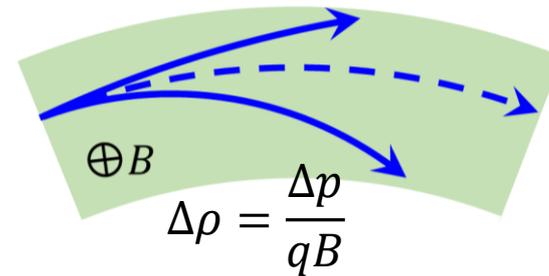
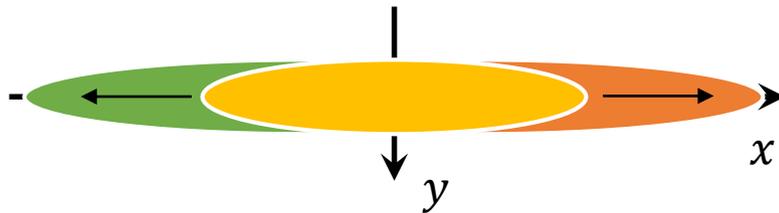
- シンクロトロン放射による放射光

- ビームビーム相互作用と連続入射によるバンチ形状の乱れ

Touschek効果



- ビーム粒子はビーム軸に垂直方向にベータトロン振動をしながら進む。
- 散乱によって縦方向の運動量が軸方向に変わる。
- 一方はエネルギーを**得て**、他方は**失う**。
→ 偏向磁石中で内側と外側、両方に膨らむ。



- エネルギーのずれは γ に比例する。
- 散乱角は $1/\gamma$ に比例し無視できる。
- 散乱確率は**(ビーム電流 I_{beam})²(ビームサイズ σ_y)⁻¹**に比例する。

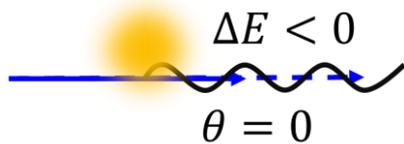
↑ 振動による変化が水平方向の方が大きい
↑ バンチ内の粒子数の2乗

ビーム-ガス散乱

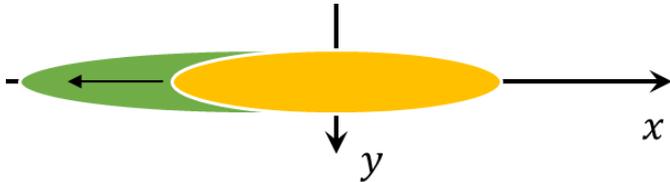
- 残留ガスの原子核のもつ電場によって散乱を受ける。

- Brems(strahlung)

- 制動輻射でエネルギーを失う。



- 偏向磁石中では内側にずれる。

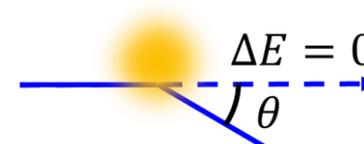


- 散乱確率は $Z^2 I_{\text{beam}} P$ に比例する。

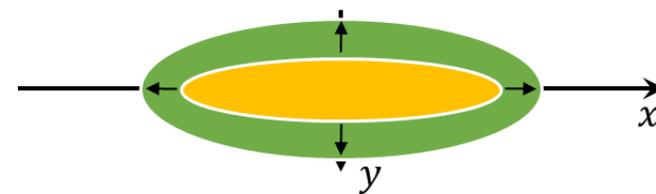
↑ 原子核の数に比例
↑ バンチ内の粒子数に比例

- Coulomb散乱

- 弾性散乱だが角度が変わる。

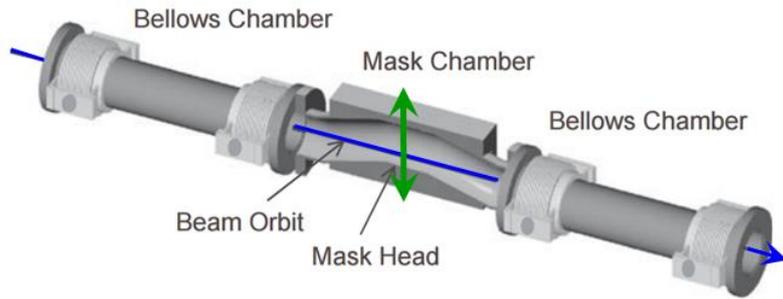


- 全体的が等方的に広がる。

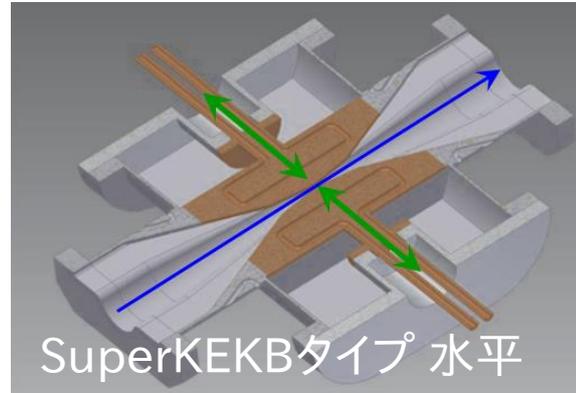


コリメータによるバックグラウンドの抑制

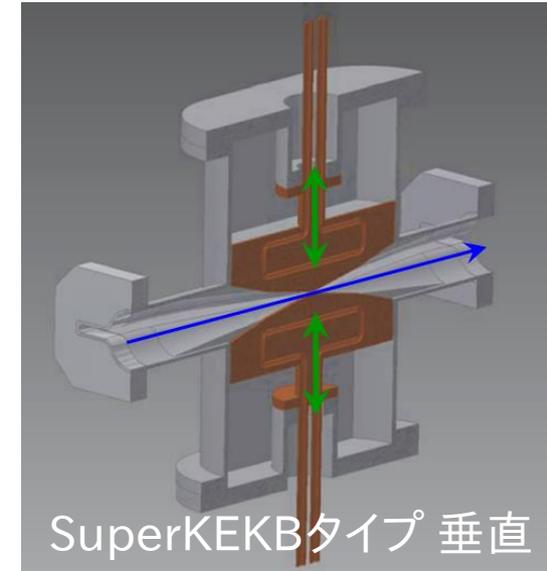
- 散乱された粒子が衝突点領域IRに到達する前に削る。
- コリメータにはKEKBタイプとSuperKEKBタイプの2種類がある。



KEKBタイプ

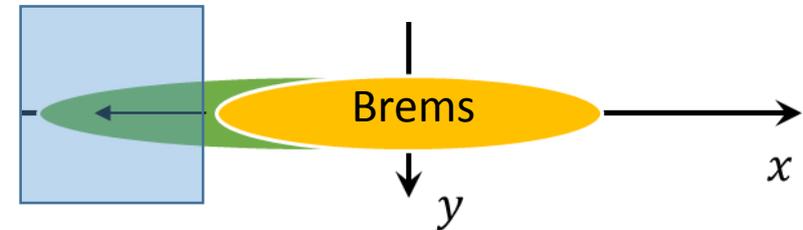
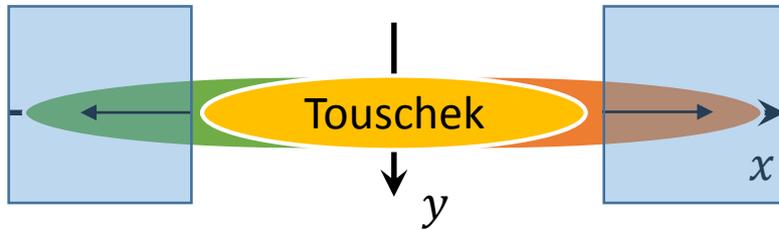


SuperKEKBタイプ 水平

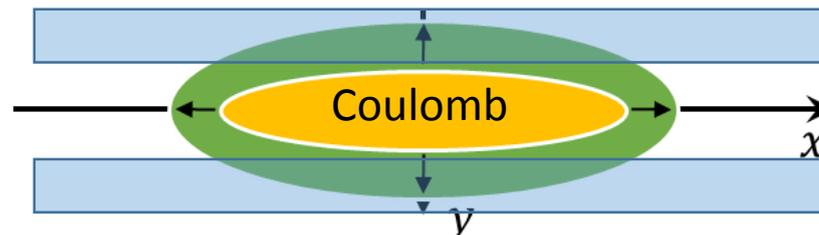


SuperKEKBタイプ 垂直

- Touschek、Bremsで水平に膨らんだ部分を削る。



- 扁平なビームがCoulombによって等方的に膨らむことで、垂直から削りやすい。



BEAST II 実験



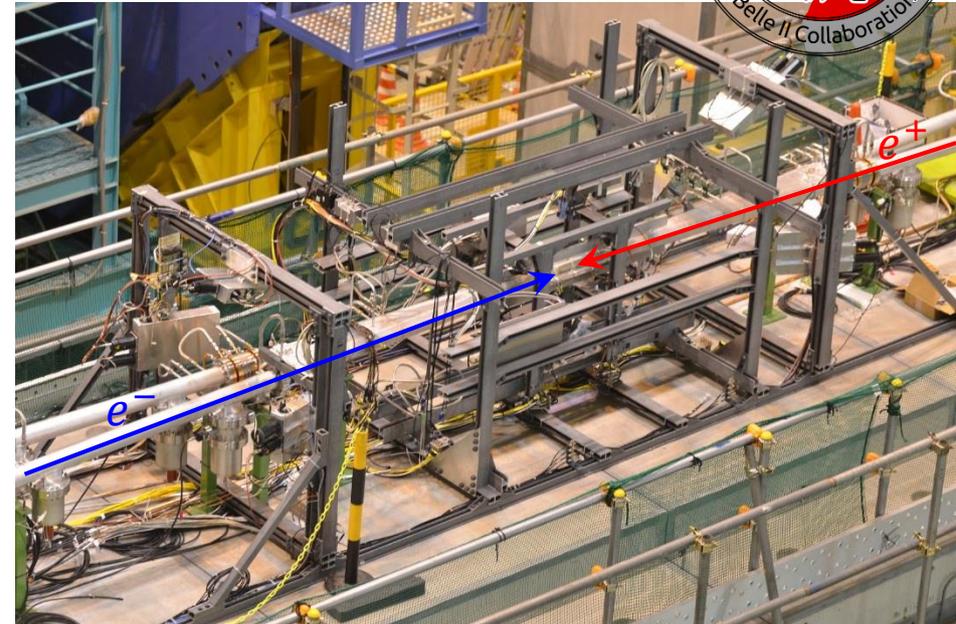
目的

ビームバックグラウンドを測定し、

- Belle II検出器にとって**十分少ない**ことを確認。
- 加速器パラメータに対する**依存性**を理解。
- **シミュレーションの検証**。

方法

- Touschekスタディ
Touschekの頻度が $1/\sigma_y$ に比例する。
→他の成分から分離して測定。
- Vacuumスタディ
ビーム-ガスの頻度が PI に比例する。
→他の成分から分離して測定。



- Injectionスタディ
バンチ入射のパラメータを変える。
→バックグラウンドの変化を見る。
- コリメータスタディ
コリメータ幅を変える。
→バックグラウンドの変化を見る。

シミュレーションの概要

パラメータ	シンボル	Phase1	Phase3		単位
		LER・HER	LER	HER	
ビーム電流	I_{beam}	1.0	3.6	2.6	A
粒子数/バンチ	N_b	6.28	9.04	6.53	10^{10}
バンチ数	n_b	1000	2500		
バンチ電流	I_b	1.0	1.44	1.04	mA
エミッタンス比	$\varepsilon_y/\varepsilon_x$	0.1	0.0027	0.0028	
バンチ長	σ_z	6	6		mm
圧力	P	10	1		nTorr
温度	T	300	300		K

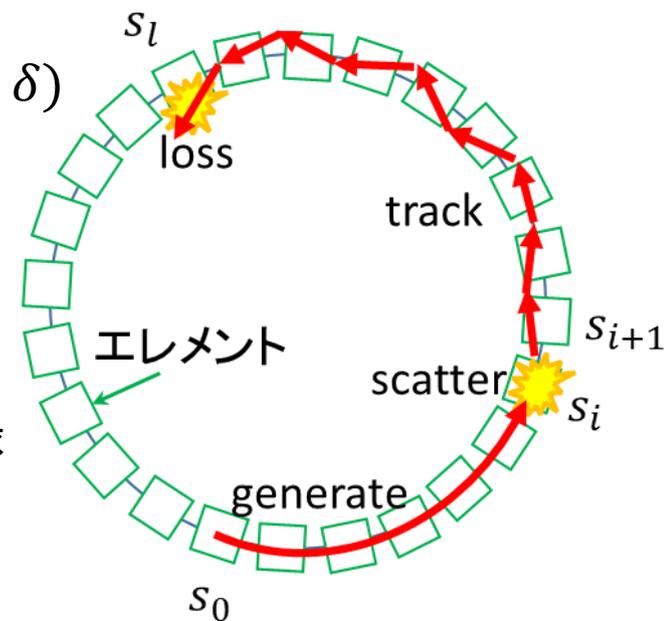
トラッキング計算

- Touschek効果・ビーム-ガス散乱のシミュレーションを行った。

↳ リング周回中に発生→トラッキング計算が必要

- トラッキング計算

1. エlementを並べてビームラインを定義
2. s_0 でビーム粒子の分布を生成 $X(s_0) = (x, x', y, y', z, \delta)$
3. 転送行列 $M(s_i, s_0)$ を掛けて s_i でのビーム分布を得る
4. 乱数を用いて散乱によるずれを計算する
5. 転送行列を1Element分掛けてロス判定
ロスするか最大ターン数に達するまで行う
6. 散乱位置 s_i 、ロス位置 s_l 、ターン数、4元運動量を記録
7. 3-6をリングの全ての s_i で行う



ロスレートとビーム寿命の計算

- ロスレート R : 散乱の結果、単位時間にビームパイプを飛び出す粒子数
 - ビーム-ガス

単位時間あたりロスする確率

$$R_{B,C} = N_{\text{beam}} \sum_i \frac{L_i}{L_{\text{circ}}} \overbrace{c n_g \sigma_{B,C}(s_i)}$$

$$R_{B,C} \propto Z^2 I_{\text{beam}} P$$

ロスイベントからモンテカルロ積分 $\propto Z^2$

単位体積あたりの原子核数 $n_g = \frac{2P}{k_B T}$

- Touschek

$$R_T \propto I_{\text{beam}}^2 \sigma_y^{-1}$$

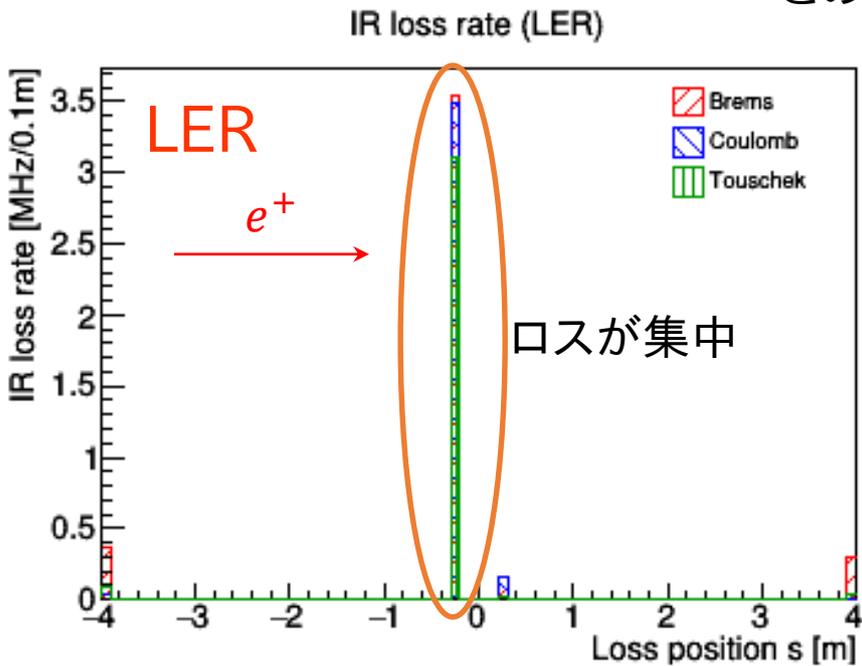
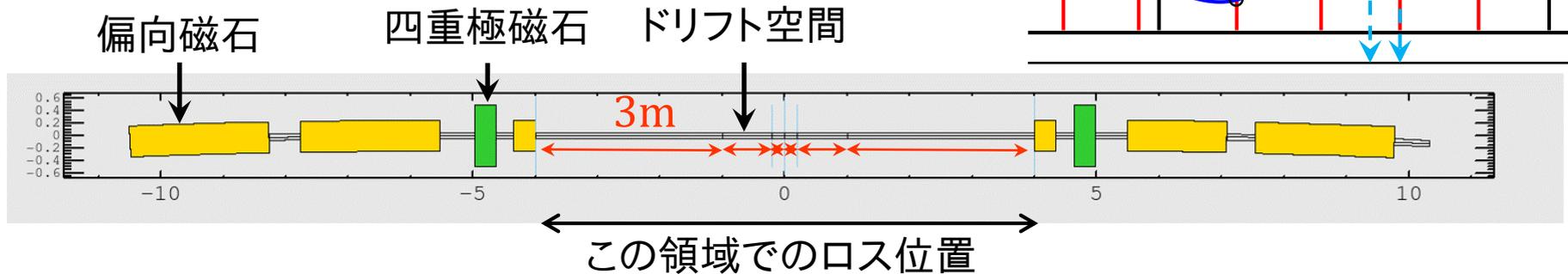
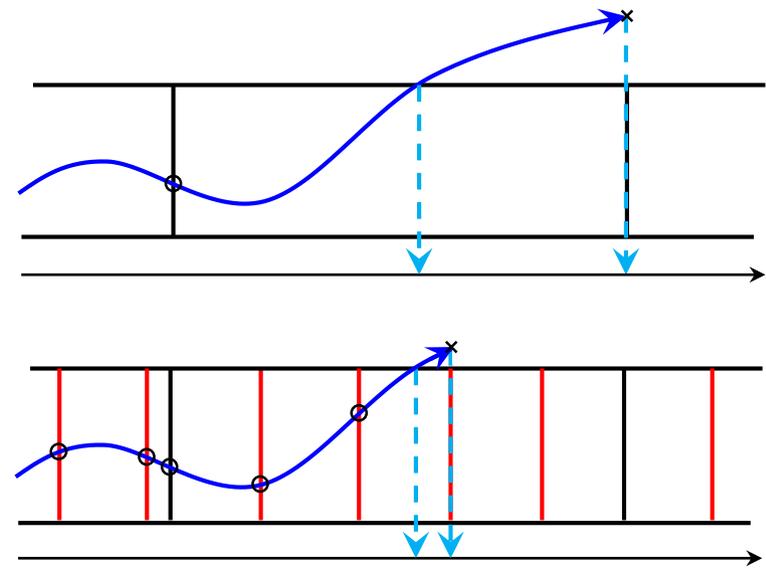
- ビーム寿命 τ : ビームが全てロスするまでの時間

$$\tau = \frac{N_{\text{beam}}}{R}$$

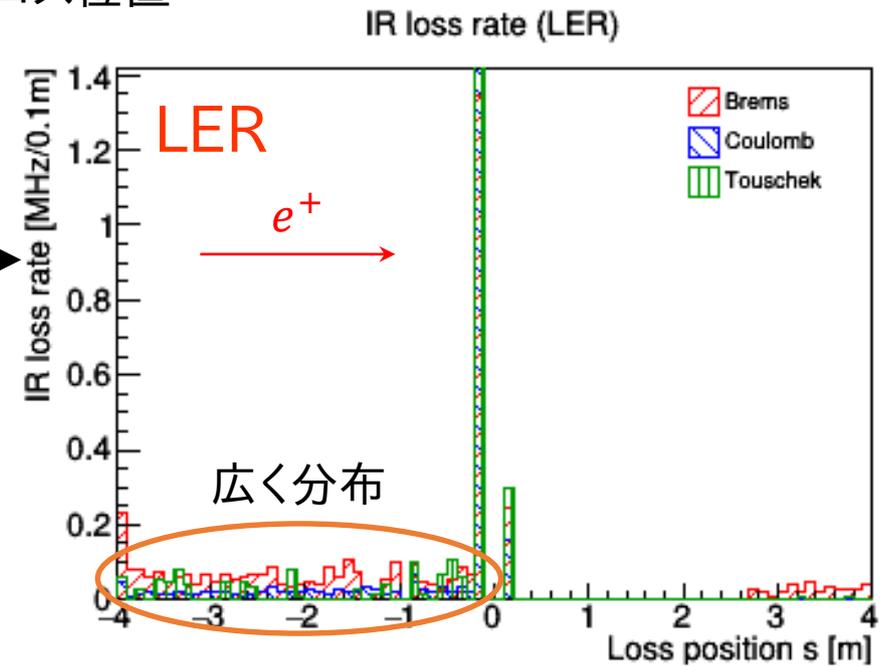
シミュレーションの調整

IR周辺のエレメントの分割

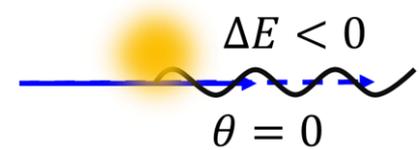
- ロス判定はエレメントの境界で行う。
- 0.1mより長いドリフト空間を分割した。



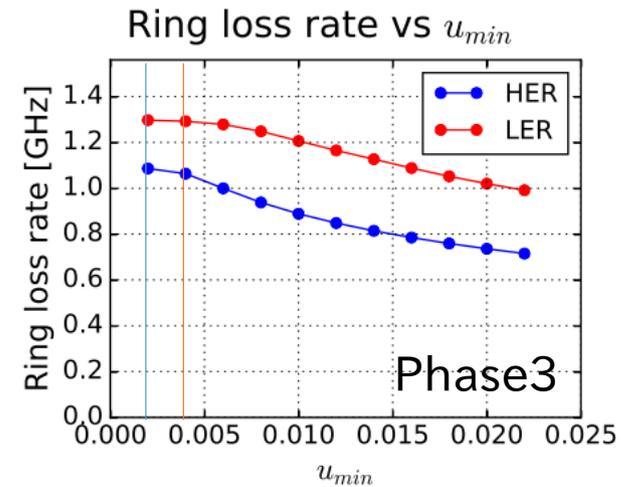
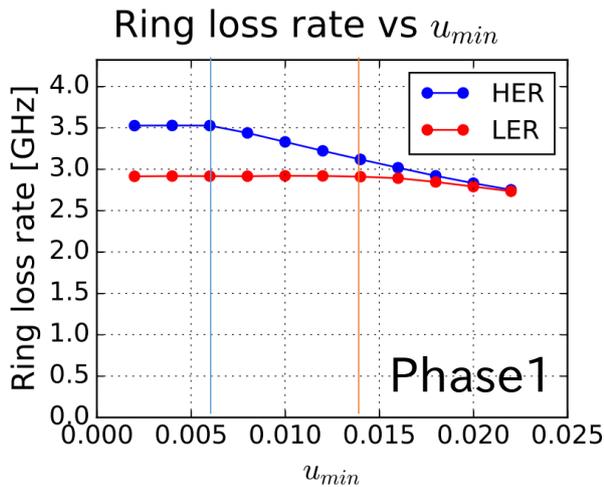
分割



Bremsstrahlungのカットオフ u_{\min}



- エネルギーのずれ $u = \Delta E / E$ を $[u_{\min}, 1]$ で生成した。
- u_{\min} を変えたときの全周ロスレートの変化を見た。



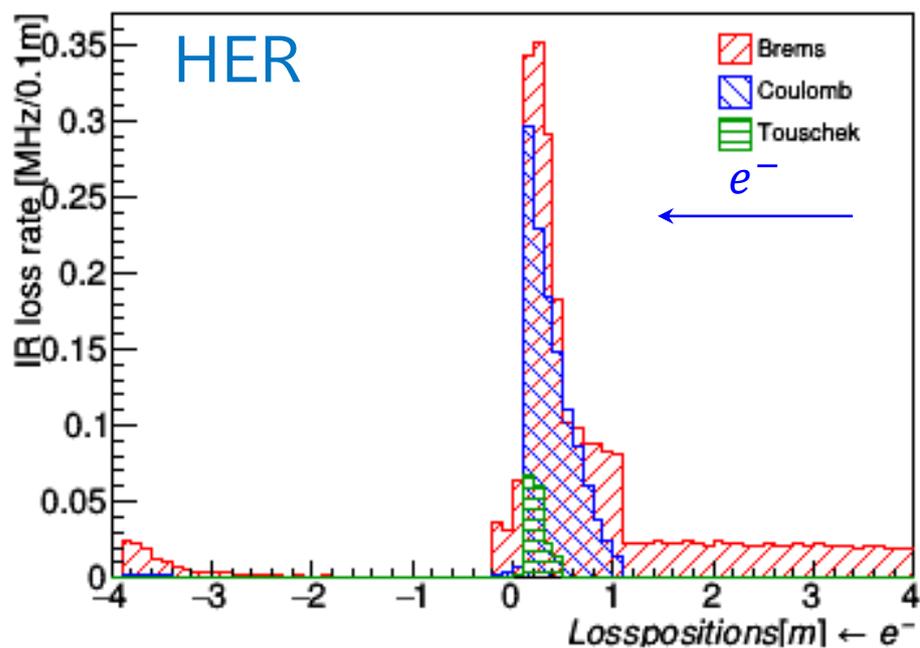
- ある値以下では上昇がなくなる。それ以下のエネルギーのずれではロスを起こさない。
- 大きすぎる u_{\min} → ロスレートの過小評価。
小さすぎる u_{\min} → トラッキング計算の無駄。
- $u_{\min} = 0.002$ に設定する。

BEAST II Phase1 検出器 シミュレーションに用いる データセットのIRロス分布

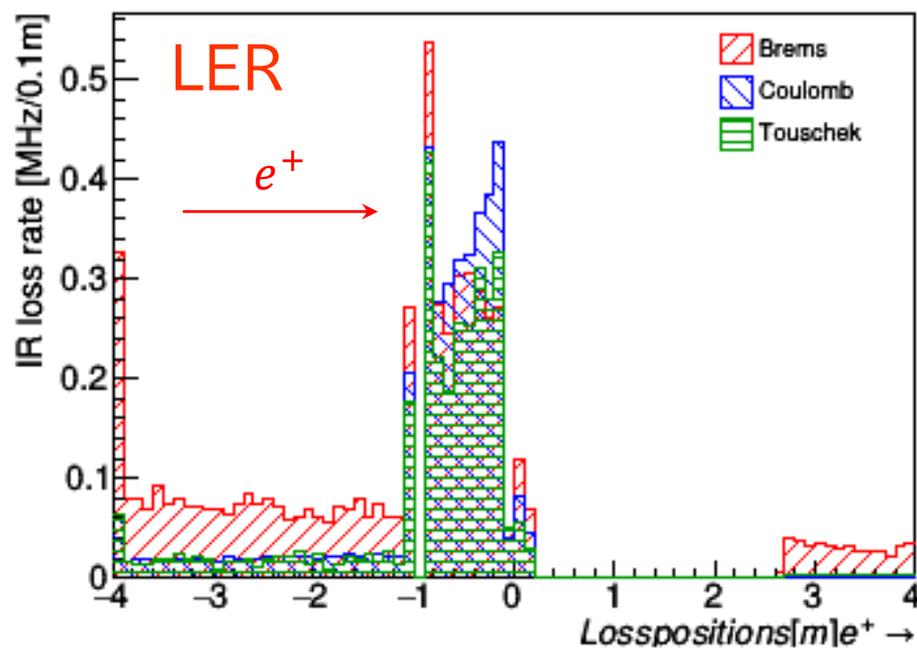
IRの定義は衝突点の前後4m: $|s| < 4\text{m}$

ビーム軸方向の分布

IR loss rate (HER)



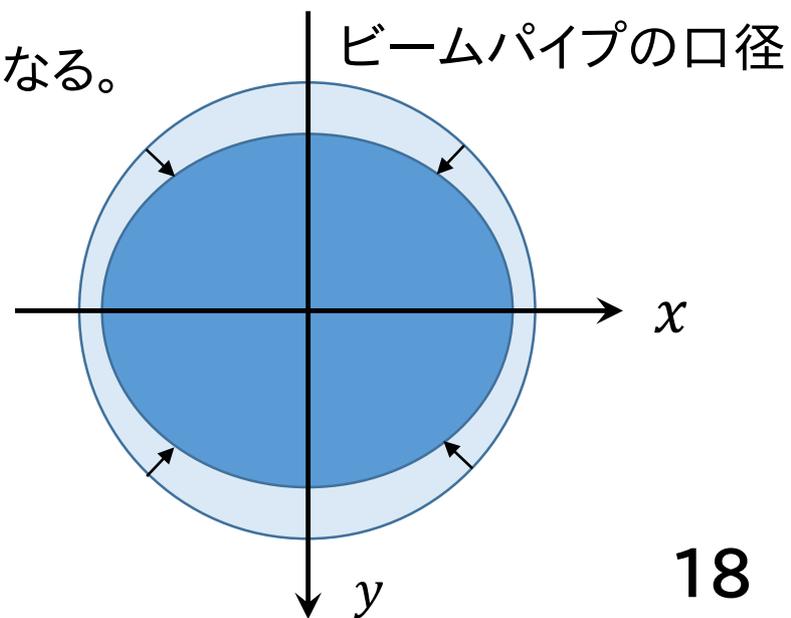
IR loss rate (LER)



ビームパイプは $s = \pm 1.2$ m から $s = \pm 0.2$ m にかけて細くなる。

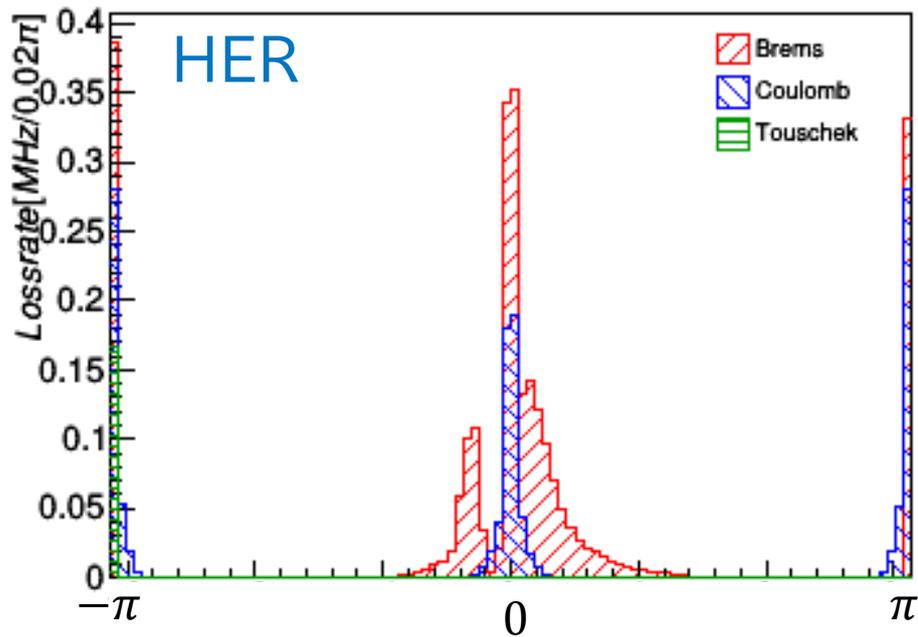
(AX, AY) = (40mm, 40mm) → (31mm, 36mm)

→ロスが増える。

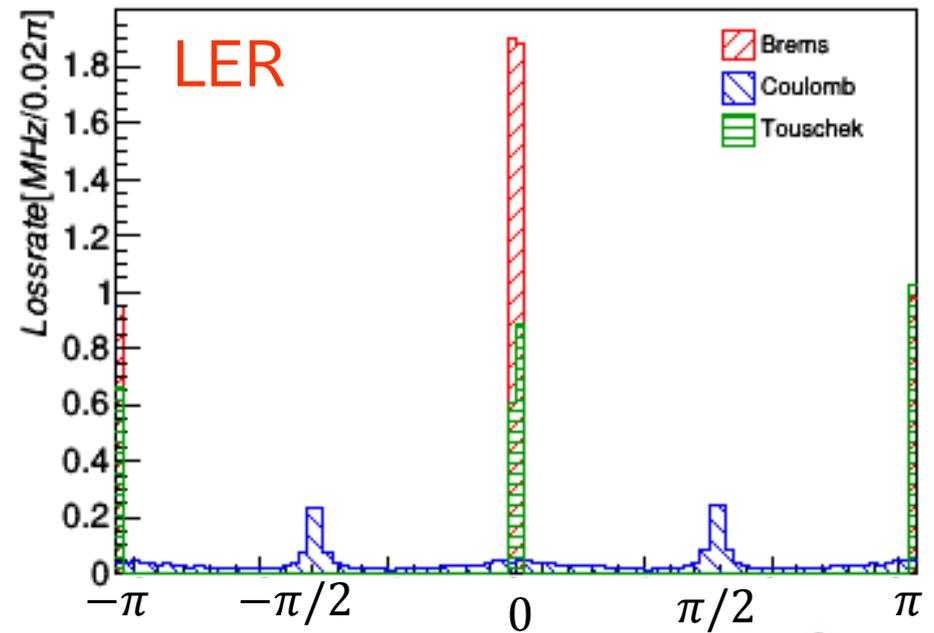


垂直面内での分布 - 方位角

Azimuthal angle of IR loss (HER)



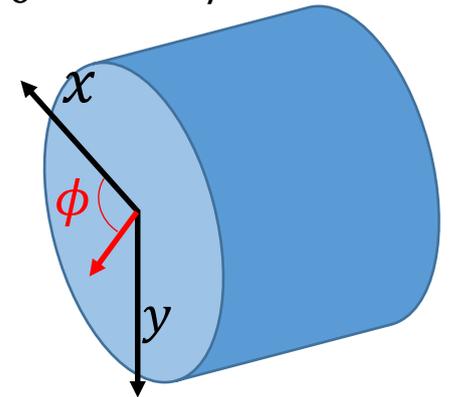
Azimuthal angle of IR loss (LER)



- BremsとTouschekは水平にロスが主。
↑ エネルギーのずれによる。

- Coulombは

- HERは水平ロス ← $(\sigma_x^*, \sigma_y^*) = (420\mu m, 49\mu m)$
- LERは垂直ロス ← $(\sigma_x^*, \sigma_y^*) = (220\mu m, 69\mu m)$
詳細な光学計算が必要。



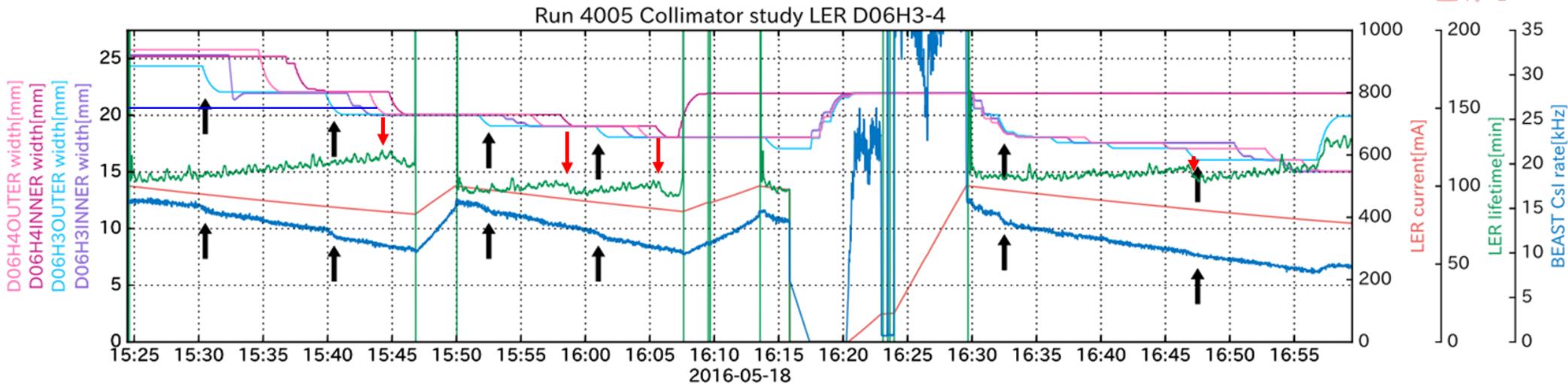
BEAST II Phase1 コリメータスタディとの比較

コリメータスタディの測定データ LER D06H3-4

- 1度に4つのコリメータを交互に狭めていく。

- Csレート
 - ビーム寿命
- を測定。

— Csレート
— ビーム寿命
— ビーム電流

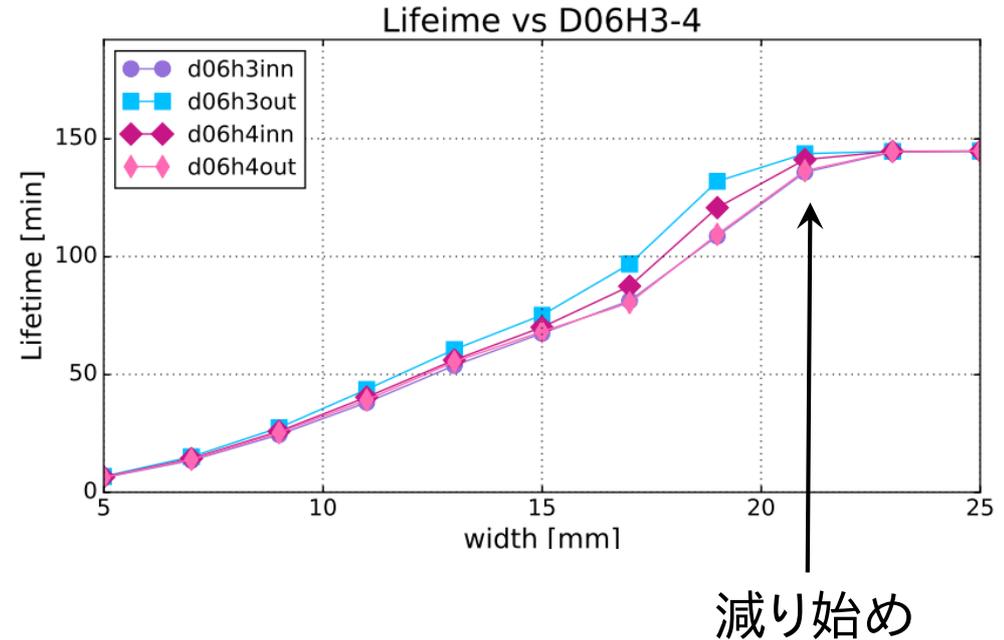


- D06H3 OUTERを狭める度にCsIのヒットレートに減少が見られる。
- D06H4 OUTERを22mmより狭めるとビーム寿命が減っている。

シミュレーション結果

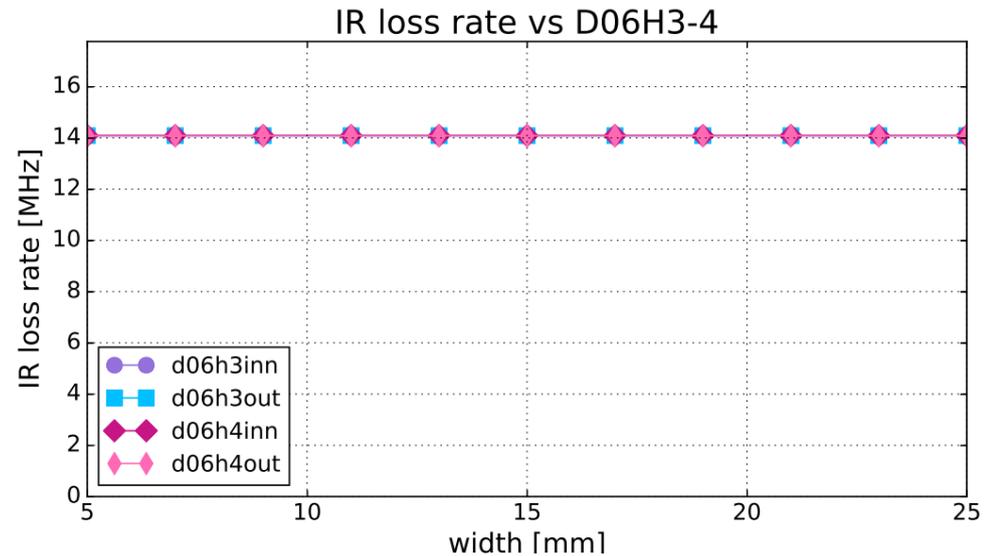
ビーム寿命

- 22mmから寿命を削っている。
↑ 測定データと一致している。
- D06H4 OUTER だけでなく他のコリメータも同等の効果がある。



IRロスレート

- IRロスレートはコリメータ幅によらない。
↑ 測定データを再現しない。



Phase3コリメータの最適化

Phase3コリメータの最適化

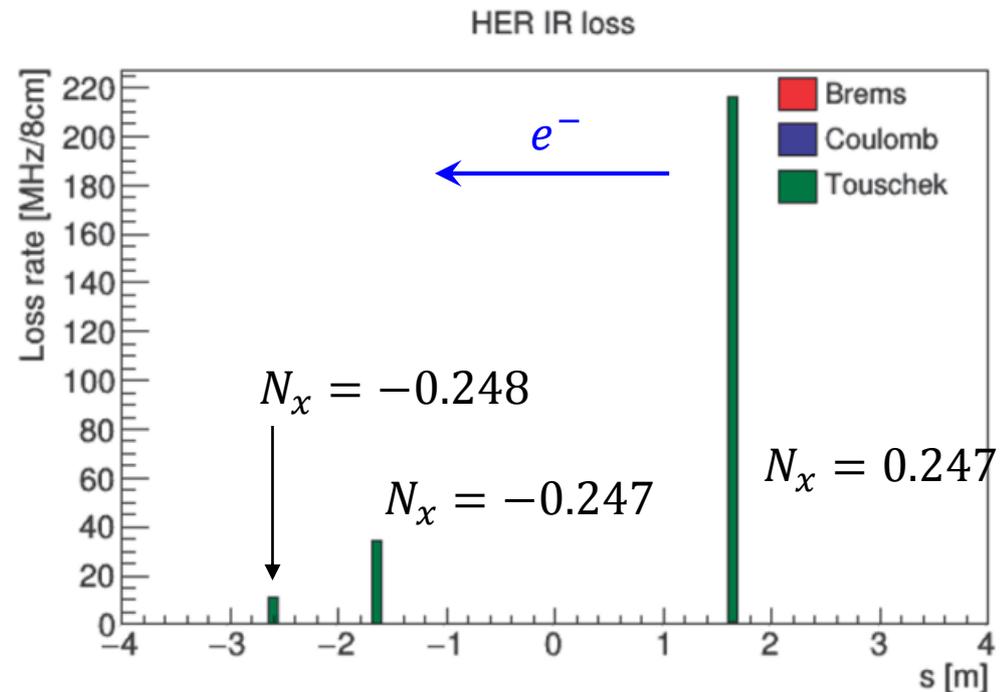
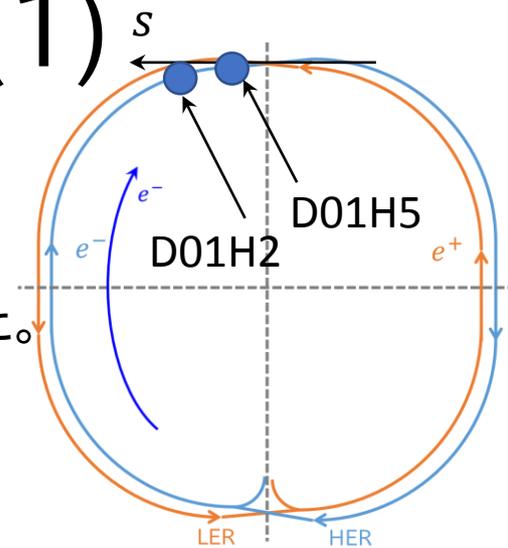
- ラティスファイルのアップデートで新たに最適化が必要。 最適化前のロスレート

	全周ロスレート [GHz]		IR ロスレート [MHz]	
	HER	LER	HER	LER
Brems	1.09	1.30	2.95	4.93
Coulomb	107	161	1.08	403
Touschek	235	528	260	4750

- 理想的なバンチの連続入射で、
 - HERへは1600 GHz
 - LERへは1300 GHz } で入射可能。
- これが全てのバックグラウンド源による全周ロスの上限值。
- Touschekとビーム-ガスによるロスは800GHzまで。
- IRロスの許容値は検出器の寿命・占有率を考慮して数MHzまで。
- ただし、垂直コリメータはTransverse Mode Coupling(TMC)により、これ以上は近づけられない。

Phase3 HER コリメータの最適化(1)

- 水平コリメータ幅26個を一つづつ0.5, 0.2mm狭め変化を見る。
- この変化幅ではD01H5 OUTER、D01H2 OUTERが効果的だった。
- 2点のベータatronチューン N の差が半整数に近い
→一方の振幅が大きいと他方も大きい
- IR口スのピーク $N_x = 0.247, -0.247, -0.248$
- D01H5 $N_x = 0.260$
- D01H2 $N_x = 1.245$



Phase3 HER コリメータの最適化(2)

D01H2 OUTER

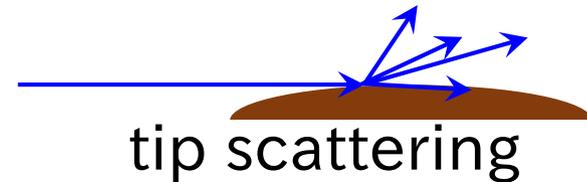
	Width		Total [GHz]			IR [MHz]		
	[mm]	$[\sigma_x]$	B	C	T	B	C	T
closing	9.5	12.2	1.09	107	235	2.95	1.08	260
	9.0	11.5	1.09	70.2	232	2.41	1.04	227
	8.5	10.9	1.09	70.3	232	2.46	0.984	200
	8.0	10.2	1.09	70.3	232	2.45	0.950	131
	7.5	9.6	1.09	70.3	232	2.34	0.950	98.8
	6.5	8.3	1.09	7.05	235	2.34	0.926	94.3
	6.3	8.1	1.10	7.06	243	2.34	0.926	73.7
	6.0	7.7	1.10	7.07	257	2.34	0.926	70.5
	5.5	7.0	1.09	71.3	271	2.34	0.926	70.5

D01H5 OUTER

	Width		Total [GHz]			IR [MHz]		
	[mm]	$[\sigma_x]$	B	C	T	B	C	T
closing	10.0	17.4	1.09	107	235	2.95	1.08	260
	9.5	16.6	1.09	70.2	232	2.31	0.915	200
	9.0	15.7	1.09	70.2	232	2.20	0.890	156
	8.5	14.8	1.09	70.2	232	2.11	0.877	128
	8.0	13.9	1.09	70.2	232	2.02	0.860	120
	6.0	10.5	1.09	70.3	232	1.88	0.695	12.9
	5.5	9.6	1.09	70.3	232	1.88	0.661	0.128
	5.0	8.7	1.09	70.4	232	1.88	0.632	0.0153
	4.5	7.8	1.10	70.6	248	1.88	0.620	0.0153

全周ロスレート [GHz] IR ロスレート [MHz]

Brems	1.10	1.88
Coulomb	70.5	0.632
Touschek	237	0.0153



- IRロス改善されたが、D01H5でのロスが14.9GHz(全体の6.3%)と多い。IPの上流16.8mと近いので、tip scatteringの2次粒子がIRに到達しうる。
- より上流のコリメータを閉める。D09H1が $s = 954\text{m}$ 、 $N_x = 14.242$ 。

Phase3 HER コリメータの最適化(3)

D09H1 INNER を狭めていった際の HER ロス変化

Width [mm]	$[\sigma_x]$	Total [GHz]			IR [MHz]			D01H5 [GHz]
		B	C	T	B	C	T	T
16.0	37.8	1.10	70.5	237	1.88	0.632	0.0153	14.9
15.0	35.4	1.10	70.5	237	1.88	0.632	0.0153	14.9
11.0	26.0	1.10	70.5	237	1.84	0.632	0.0153	14.7
8.5	20.1	1.10	70.5	237	1.84	0.632	0.0153	13.4
6.0	14.2	1.10	70.5	240	1.84	0.632	0.0153	7.51

closing

D01H5 OUTER を広げていった際の HER ロスの変化

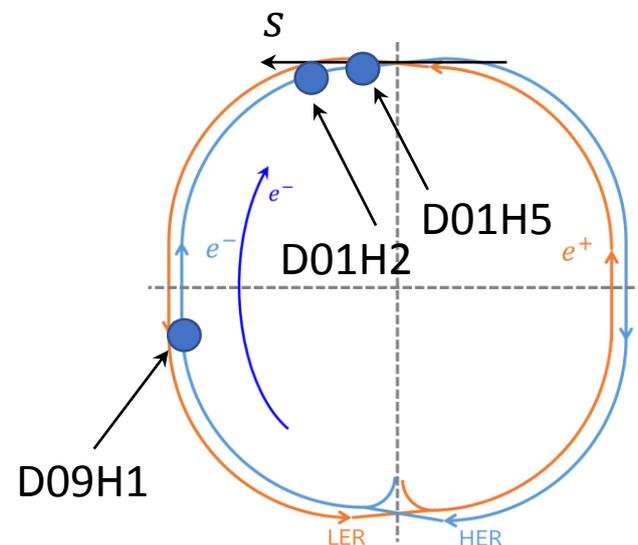
Width [mm]	$[\sigma_x]$	Total [GHz]			IR [MHz]			D01H5 [GHz]
		B	C	T	B	C	T	T
5.0	8.7	1.10	70.5	240	1.84	0.632	0.0153	7.51
6.0	10.5	1.10	70.5	240	1.84	0.663	0.0153	1.89
6.5	11.3	1.10	70.5	240	1.84	0.685	0.0153	0.990
7.0	12.2	1.10	70.5	240	1.84	0.726	0.0153	0.767
7.5	13.1	1.10	70.5	240	1.84	0.735	4.93	0.600

opening

HER コリメータの最適化前後でのロスの変化

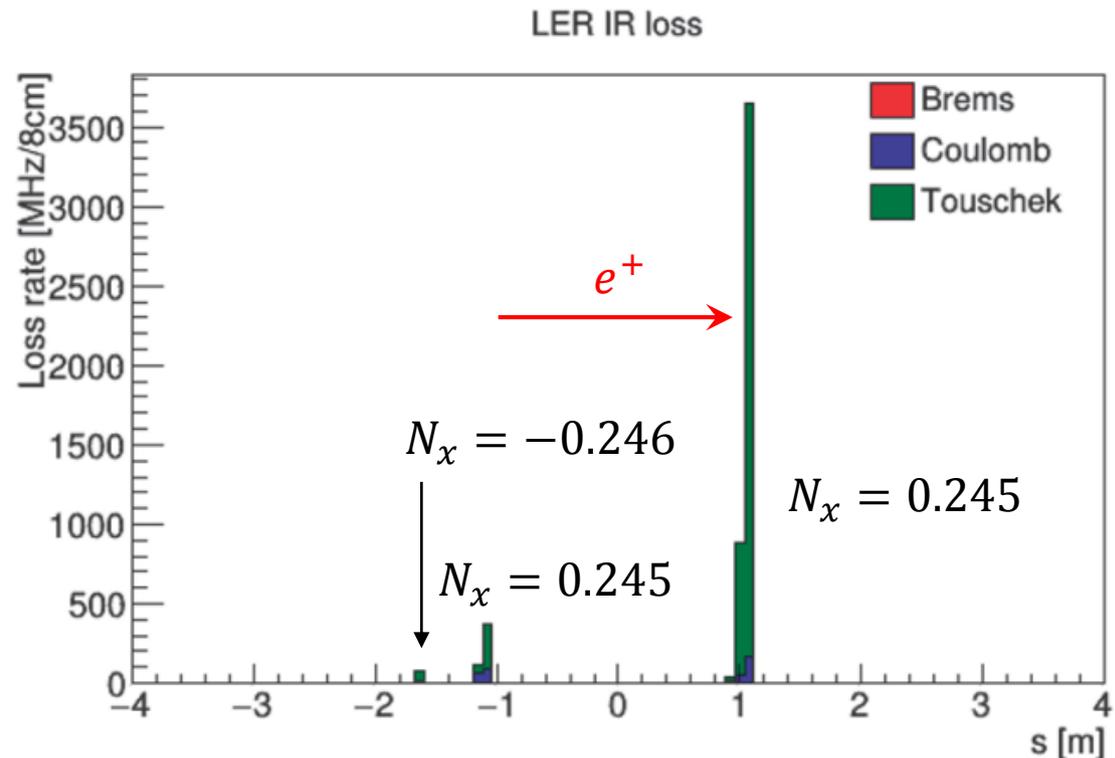
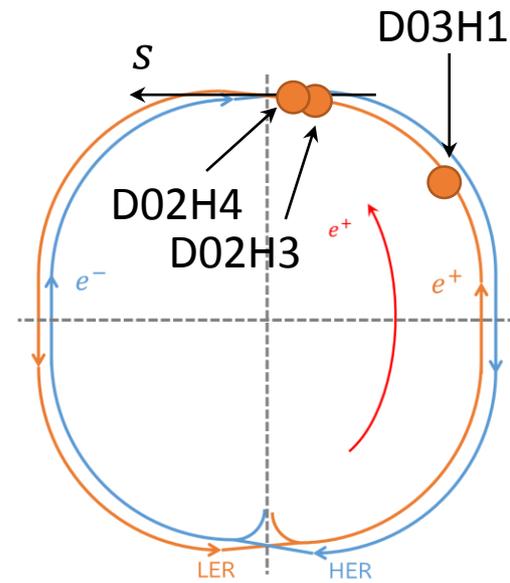
最適化	全周ロス [GHz]			IR ロス [MHz]		
	B	C	T	B	C	T
前	1.09	107	235	2.95	1.08	260
後	1.10	70.5	240	1.84	0.726	0.0153

- D09H1を狭めてD01H5でのロスを減らす。
- 全周ロスが増えるところまで行う。
- D01H5を広げてD01H5でのロスを減らす。
- IRロスが増えるところまで行う。



Phase3 LER コリメータ最適化(1)

- IRロスのピーク $N_x = 0.245$ が大きい。
- D02H4が $N_x = -0.266$ と差が半整数に近い。
- 18個の水平コリメータ幅を一つづつ0.5mm狭めて変化を見る。
- この変化幅ではD02H3OUTER、D03H1 INNERも効果があった。



Phase3 LER コリメータ最適化(2)

- 3つのコリメータの幅を全周ロスが増えるまで狭めていった。

D03H1 INNER								D02H3 OUTER								D02H4 OUTER									
Width		Total [GHz]			IR [MHz]			closing	Width		Total [GHz]			IR [MHz]			closing	Width		Total [GHz]			IR [MHz]		
[mm]	$[\sigma_x]$	B	C	T	B	C	T		[mm]	$[\sigma_x]$	B	C	T	B	C	T		[mm]	$[\sigma_x]$	B	C	T	B	C	T
18.8	62.5	1.30	161	528	4.93	403	4748	21.5	69.0	1.30	161	528	4.93	403	4748	10.0	26.5	1.30	161	528	4.93	403	4748		
18.3	60.9	1.30	161	528	4.87	403	4516	19.5	62.6	1.30	161	528	4.42	403	4046	9.0	23.9	1.30	161	528	4.93	402	4736		
17.8	59.2	1.30	160	529	4.70	403	4004	18.0	57.8	1.30	161	531	4.04	401	2931	8.0	21.2	1.30	161	528	4.06	335	3812		
16.8	55.9	1.30	161	532	4.46	401	3482	17.5	56.2	1.30	161	539	3.90	400	2724	7.0	18.6	1.30	161	531	3.12	219	2113		
																6.0	15.9	1.34	161	728	2.68	127	117		

.12: LER コリメータの最適化前後でのロスの変化

最適化	全周ロス [GHz]			IRロス [MHz]		
	B	C	T	B	C	T
前	1.30	161	528	4.93	403	4748
後	1.34	161	728	2.68	126	179

- IRロスのCoulombとTouschekがまだ100MHz台のため、より良い最適化が必要。
- HERもLERも一定の幅を動かして効果のあったものだけを狭めた
その場所でのビームサイズによっては、その幅は不十分
全てのコリメータを全周ロスが増えるところまで狭めるべきだった。

まとめ

- SuperKEKBがKEKBの40倍のルミノシティを達成するために、2倍の電流値と1/20のベータ関数が要求される。それに伴い、ビームバックグラウンドの増加が予想される。
- トラッキング計算を用いて、Touschek効果とビーム-ガス散乱によるビームバックグラウンドシミュレーションを行った。
- シミュレーションを行うにあたって、IRのドリフト空間の分割とBremsstrahlungのカットオフを決めた。
- SuperKEKB Phase1のセットアップでは、BEAST II検出器のバックグラウンドシミュレーションを行うためのデータセットの生成を行った。また、BEAST IIで測定されたコリメータスタディとの比較をした。
- SuperKEKB Phase3のセットアップではコリメータ幅を最適化して、IRロスの抑制に取り組んだ。HERは目標通り行えたが、LERはさらなる最適化が必要となる。

Backup Slide

SuperKEKBの加速器パラメータ

パラメータ	シンボル	LER (e^+)	HER (e^-)	単位
ビームエネルギー	E	4.000	7.007	GeV
リング周長	L_{circ}	3016.315		m
半交差角	ϕ	41.5		mrad
水平エミッタンス	ε_x	3.2	4.6	nm
垂直エミッタンス	ε_y	8.64	11.5	pm
IP 水平ベータ関数	β_x^*	32	25	mm
IP 垂直ベータ関数	β_y^*	0.270	0.300	mm
IP 水平ビームサイズ	σ_x^*	10.2	7.75	μm
IP 垂直ビームサイズ	σ_y^*	59	59	nm
水平ベータトロンチューン	ν_x	44.53	45.53	
垂直ベータトロンチューン	ν_y	44.57	43.57	
モーメントム圧縮	α_c	3.25	4.55	10^{-4}
エネルギー偏差	σ_δ	8.08	6.37	10^{-4}
ビーム電流	I_{beam}	3.6	2.6	A
バンチ数/リング	n_b	2500		
エネルギーロス/ターン	U_0	2.15	2.50	MeV
キャビティ電圧	V_c	9.4	15.0	MV
シンクロトロンチューン	ν_s	-0.0247	-0.0280	
バンチ長	σ_z	6	5	mm
ビーム-ビームパラメータ	ξ_y	0.0881	0.0807	
ルミノシティ	L	800		$\text{nb}^{-1}\text{s}^{-1}$

その他のバックグラウンド源

- Radiative Bhabha

- 衝突点で発生した光子がビーム軸に沿って進む。磁石の鉄に衝突し大量の中性子が生成される。バックスキャタリングされてきたものが、エンドキャップ部分のKLMのバックグラウンドとなる。中性子遮蔽壁が設置された。
- 光子を出しエネルギーを失った電子・陽電子が磁石によって曲げられすぎ、構造物にぶつかり電磁シャワーを起こす。最終収束磁石をHER/LERで別にした。

- 2光子過程

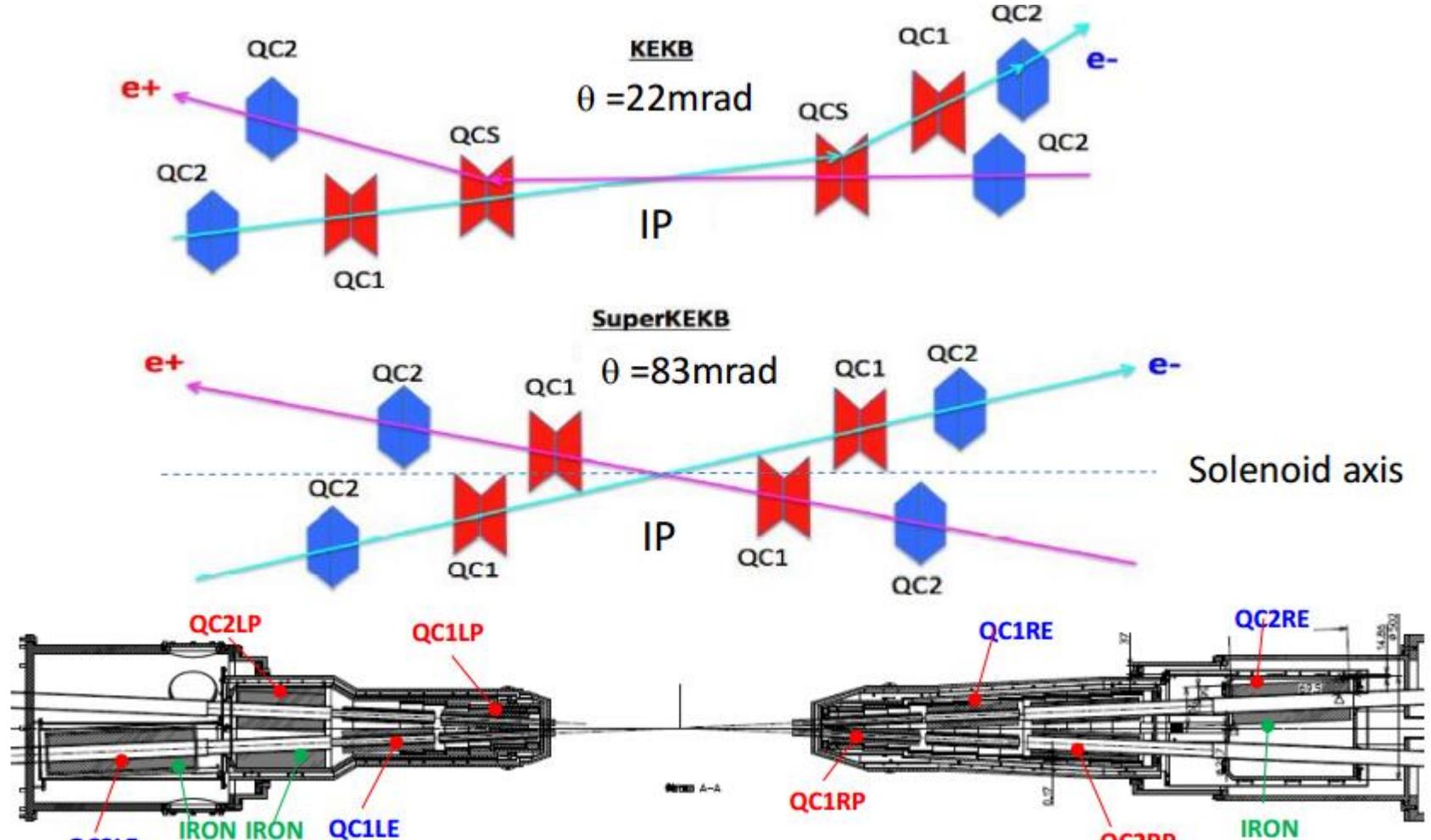
- $1/r^2$ に比例し、内径の小さくなった崩壊点検出器にとっては影響は増えるが、シミュレーションによれば安全な範囲内。

- シンクロトロン放射

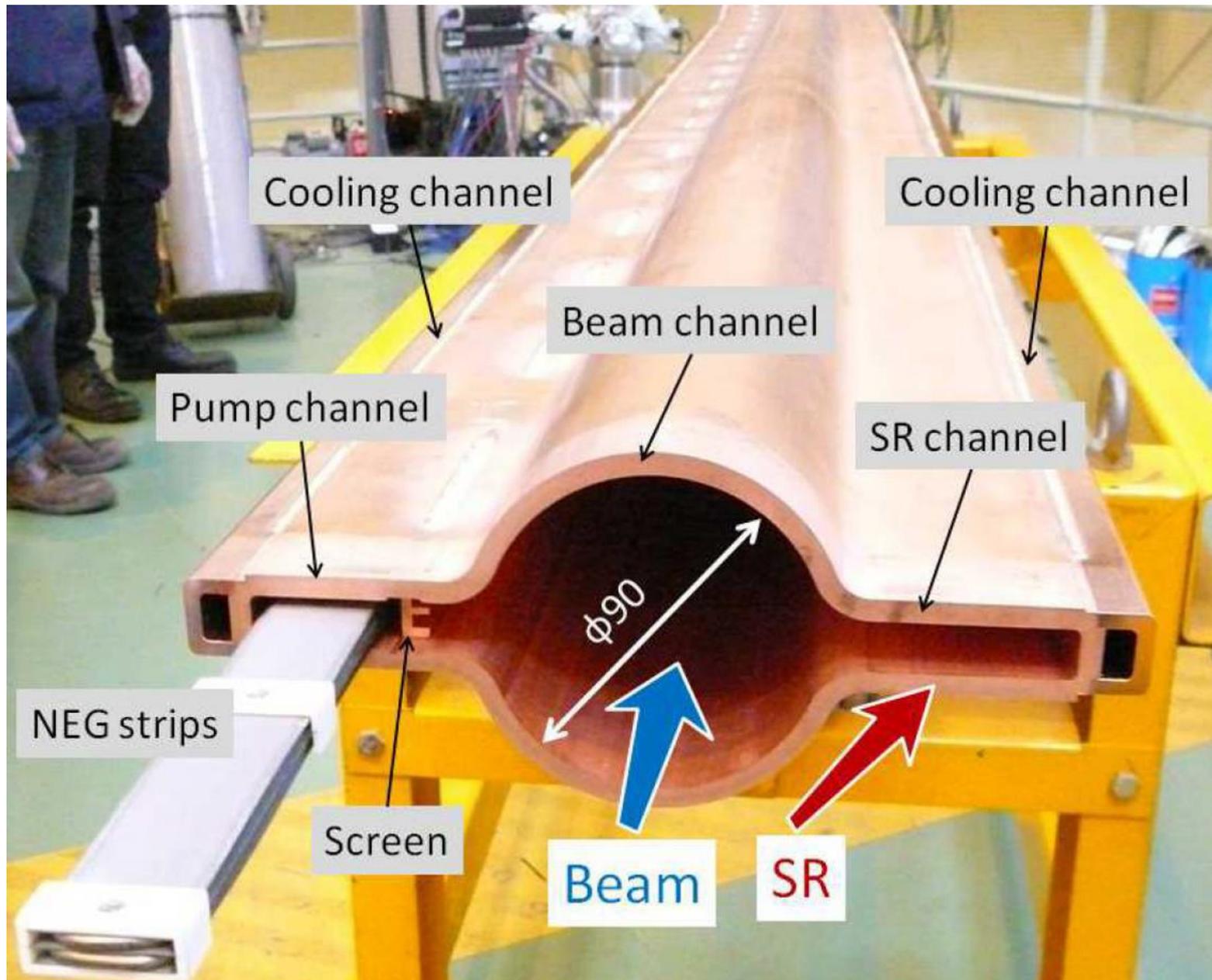
- シンクロトロン放射によって失ったエネルギーは加速空洞で補われるので、それは問題にならない。数keVの放射光が崩壊点検出器に当たることでダメージを受ける。ビームパイプを細くしたり、溝を彫ることで、直接IPに侵入できないようにした。またベリリウムのビームパイプ内面に金メッキを施し、吸収させる。

KEKBとSuperKEKBの最終収束磁石

- KEBBでは最終収束磁石をHERとLERで共有していた。衝突後のビームは4重極磁石の端を通すことで、偏向磁石のように使っていた。それだと、Radiative Bhabhaなどでエネルギーを失った粒子が曲げられすぎてビームパイプに当たる。
- 交差角を大きくすることで、IRの空間が大きくなり、個別に4重極磁石を持てる。

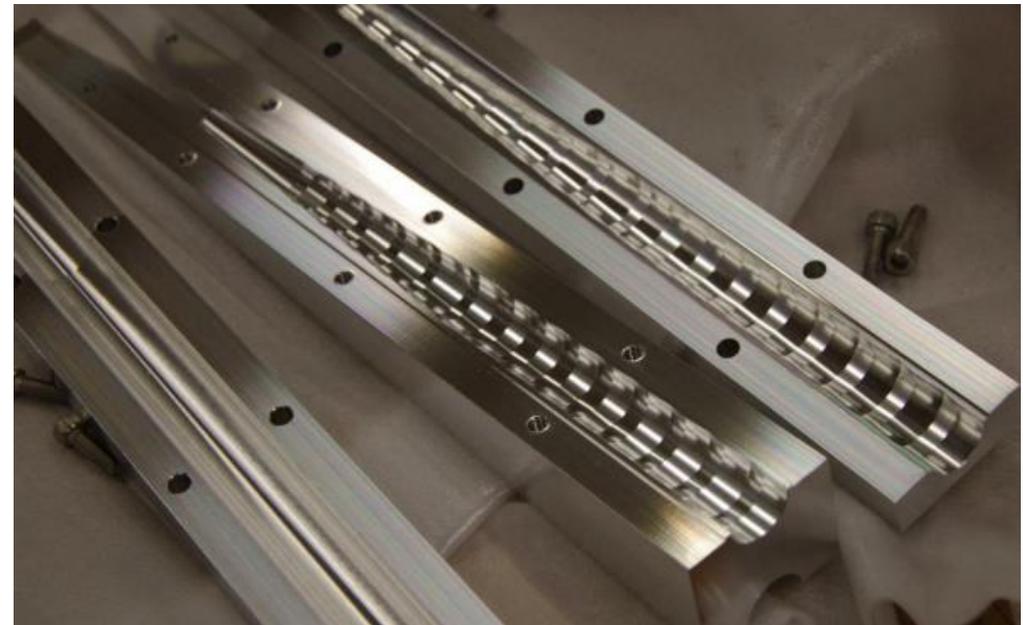
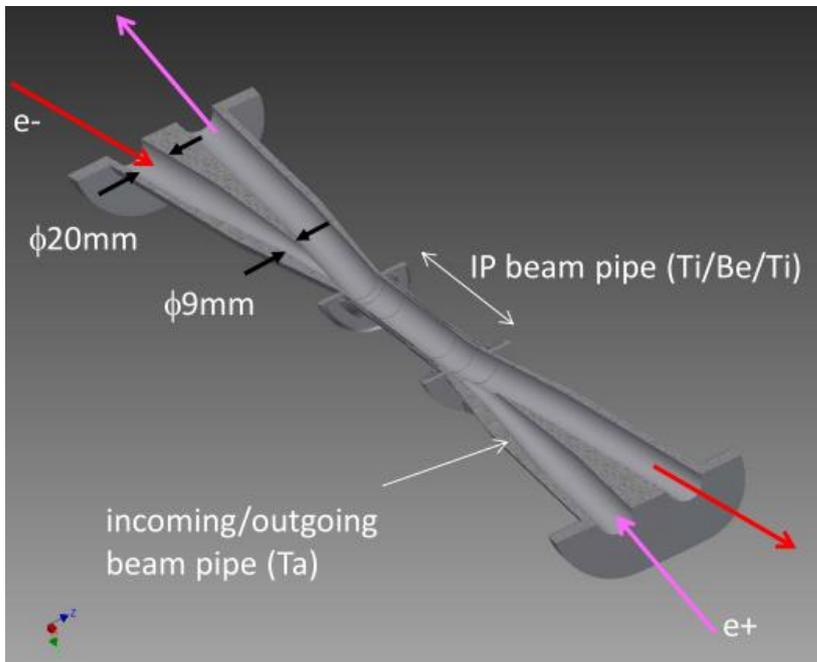


アンテチェンバー方式



IRビームパイプ

- IPに向かって細くなるテーパ構造。
- 溝が掘ってある。



BEAST II Phase1センサー

検出システム	大学・研究所	チャンネル数	測定量
PIN ダイオード	Wayne State U.	64	瞬時線量
Time Projection Chamber	U. Hawaii	4	高速中性子のフラックスと方向
ダイヤモンド結晶	INFN Trieste	4	衝突点付近の線量
He3 比例計数管	U. Victoria	4	熱中性子の頻度
CsI(Tl)、CsI、LYSO 結晶	U. Victoria, INFN Frascati	6 × 3	電磁エネルギーと入射バックグラウンド
BGO 結晶	National Taiwan U.	8	電子・光子の線量とルミノシティ
プラスチックシンチレータ	MPI Munich	8	入射バックグラウンド

ビーム-ガス散乱の散乱断面積

- Bremsstrahlung

$$\frac{d\sigma_B}{du} = \frac{16\alpha r_e^2 Z^2}{3u} \left[\left(1 - u + \frac{3}{4}u^2\right) \log \frac{183}{Z^{1/3}} + \frac{1-u}{12} \right], \quad u = \frac{\Delta E}{E}$$

- Coulomb散乱

$$\frac{d\sigma_C}{d\theta} = \frac{8\pi Z^2 r_e^2 \sin \theta}{\gamma^2 (\theta^2 + \theta_0^2)^2}, \quad \theta_0 = \frac{\alpha Z^{1/3}}{\gamma}$$

Touchek効果によるロスレート

- 重心系座標におけるMoller散乱の散乱断面積

$$d\sigma = \frac{8\pi r_e^2}{(v/c)^4} \left(\frac{2}{\cos^3 \chi} - \frac{1}{\cos \chi} \right) \sin \chi d\chi$$

- エネルギー移行

$$q = \frac{x'_2 - x'_1}{2} = \frac{v}{2\gamma c} = \frac{p_x}{\gamma mc}$$

$$\delta = \gamma q \cos \chi$$

- ロスレート

$$R_T = \frac{2}{\gamma^2 L_{\text{circ}}} \int ds \int dx_1 dy_1 dz_1 \int dx'_1 dy'_1 d\delta_1 \int dx'_2 dy'_2 d\delta_2 2vd\sigma \sin \chi d\chi \rho_1 \rho_2$$

$$R_T = \sum_i \frac{L_i}{L_{\text{circ}}} \frac{c N_{\text{beam}}^2}{2\pi^2 \sigma_{x',i} \sigma_{x,i} \sigma_{y,i} \sigma_z} \sum_j \sigma(q_j) q_j \exp \left[- (q_j / \sigma_{x',j})^2 \right] \frac{V_j}{n}$$

$$\sigma_x = \sqrt{\varepsilon_x \beta_x + (\eta_x \sigma_\delta)^2}, \sigma_y = \sqrt{\varepsilon_y \beta_y}, \sigma_{x'} = \sqrt{\frac{\varepsilon_x}{\beta_x} \left(1 + \frac{H_x}{\varepsilon_x} \sigma_\delta^2 \right)}$$

$$H_x = \gamma_x \eta_x^2 + 2\alpha_x \eta_x \eta'_x + \beta_x \eta_x'^2$$

シミュレーションのスケール

- ビーム-ガスとTouschekによるロスレート R は

$$R_{\text{Beam-gas}} \propto Z^2 I_{\text{beam}} P \qquad R_{\text{Touschek}} \propto \frac{I_{\text{beam}}^2}{\sigma_y}$$

- シミュレーションと測定データを比較するには、次の係数をシミュレーション結果に掛ける

$$S_{\text{Beam-gas}}^R = \frac{Z_{\text{data}}^2 P_{\text{data}} I_{\text{beam,data}}}{Z_{\text{simu}}^2 P_{\text{simu}} I_{\text{beam,simu}}} \qquad S_{\text{Touschek}}^R = \frac{\sigma_{y,\text{simu}} I_{\text{beam,data}}^2}{\sigma_{y,\text{data}} I_{\text{beam,simu}}^2}$$

- ビーム寿命は $\tau = \frac{N_{\text{beam}}}{R} = \frac{L_{\text{circ}} I_{\text{beam}}}{ec} \frac{1}{R}$ のため

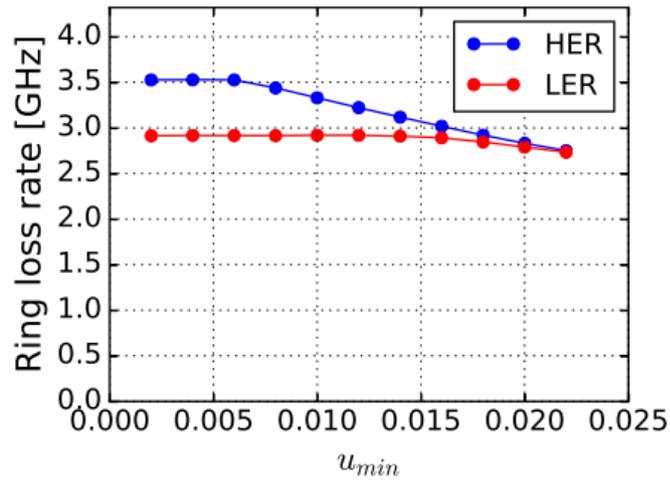
$$\tau_{\text{Beam-gas}} = \frac{I_{\text{beam}} L_{\text{circ}}}{ec} \frac{1}{R_{\text{Beam-gas}}} \propto \frac{1}{Z^2 P} \qquad \tau_{\text{Touschek}} = \frac{I_{\text{beam}} L_{\text{circ}}}{ec} \frac{1}{R_{\text{Touschek}}} \propto \frac{\sigma_y}{I_{\text{beam}}}$$

- シミュレーションと測定データを比較するには、次の係数をシミュレーション結果に掛ける

$$S_{\text{Beam-gas}}^\tau = \frac{Z_{\text{simu}}^2 P_{\text{simu}}}{Z_{\text{data}}^2 P_{\text{data}}} \qquad S_{\text{Touschek}}^\tau = \frac{\sigma_{y,\text{data}} I_{\text{beam,simu}}}{\sigma_{y,\text{simu}} I_{\text{beam,data}}}$$

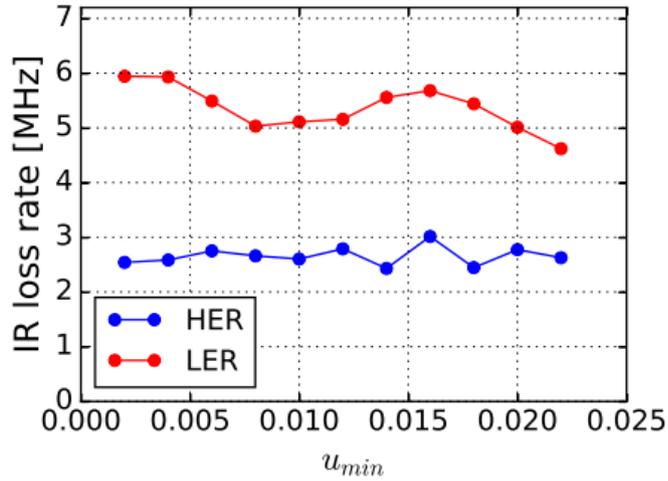
Bremsstarhlungのカットオフ u_{min} Phase 1

Ring loss rate vs u_{min}



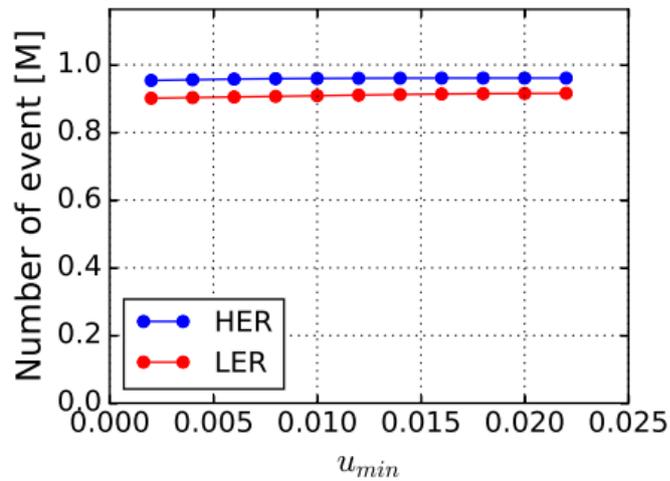
(a) 全周ロス

IR loss rate vs u_{min}



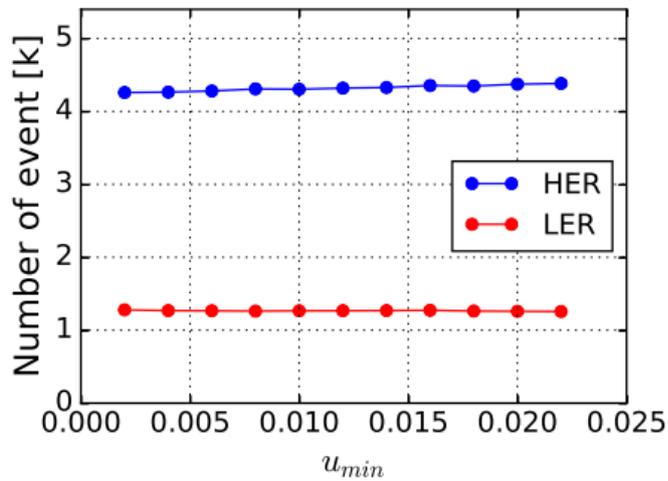
(b) IR ロス

Ring loss event vs u_{min}



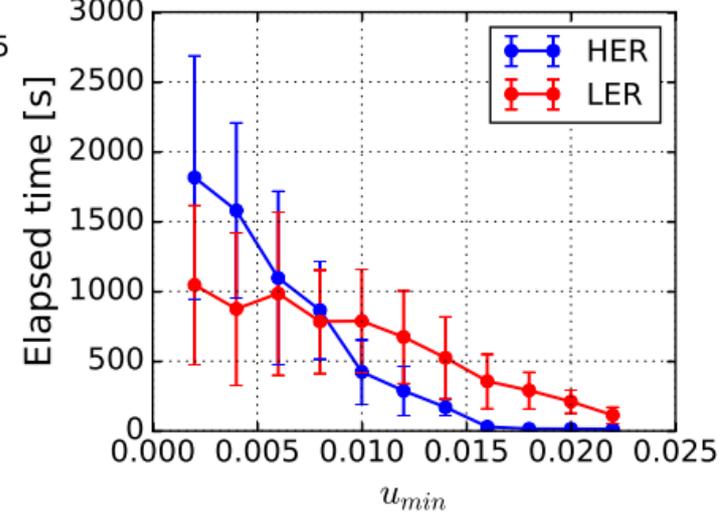
(c) 全周ロスイベント

IR loss event vs u_{min}



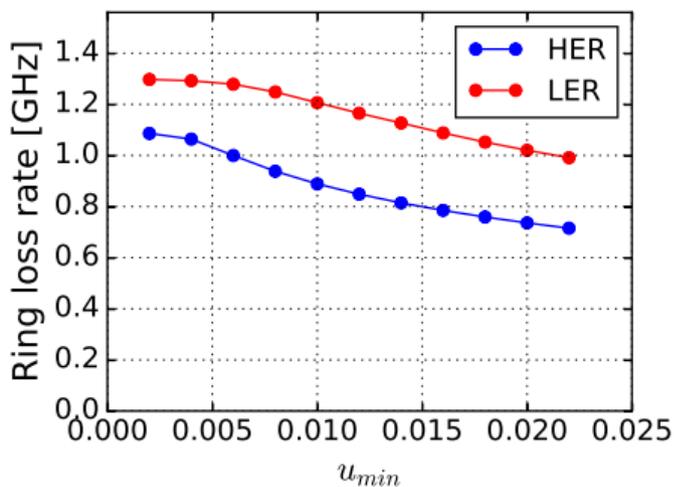
(d) IR ロスイベント

Elapsed time vs u_{min}



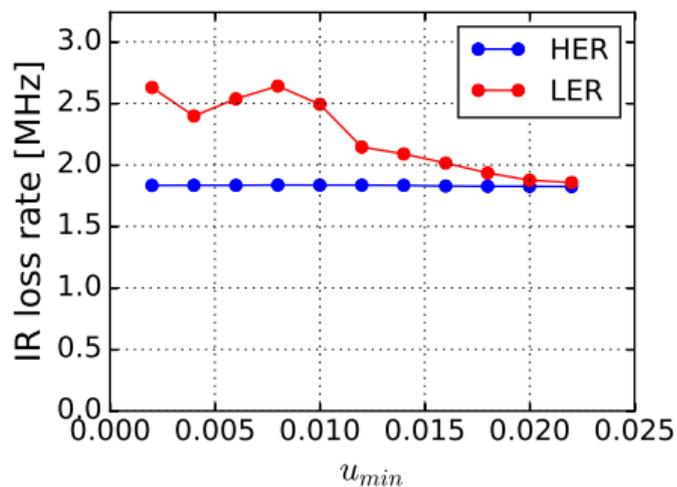
Bremsstrahlungのカットオフ u_{min} Phase3

Ring loss rate vs u_{min}



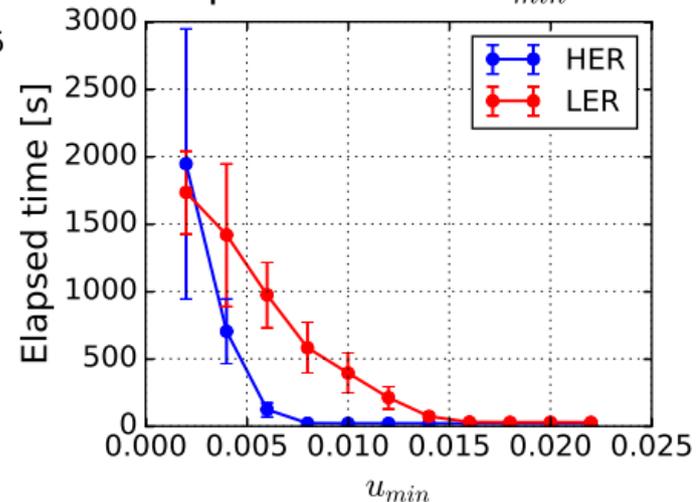
(a) 全周ロス

IR loss rate vs u_{min}

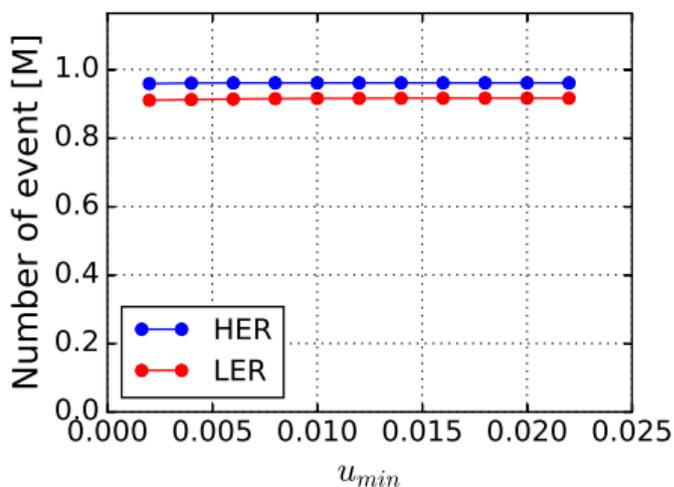


(b) IR ロス

Elapsed time vs u_{min}

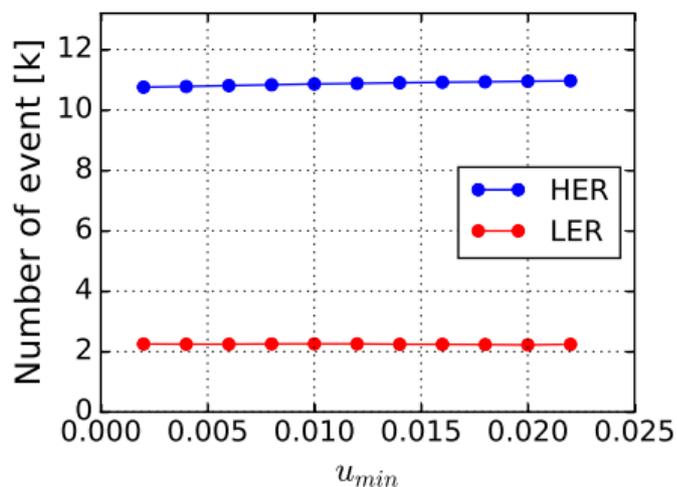


Ring loss event vs u_{min}



(c) 全周ロスイベント

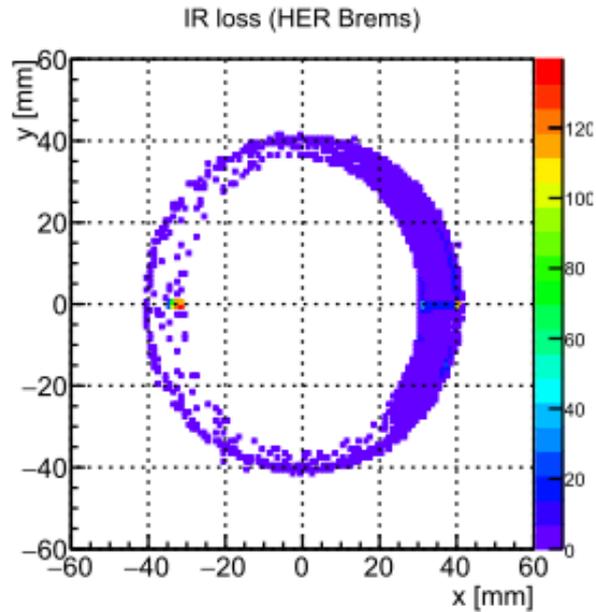
IR loss event vs u_{min}



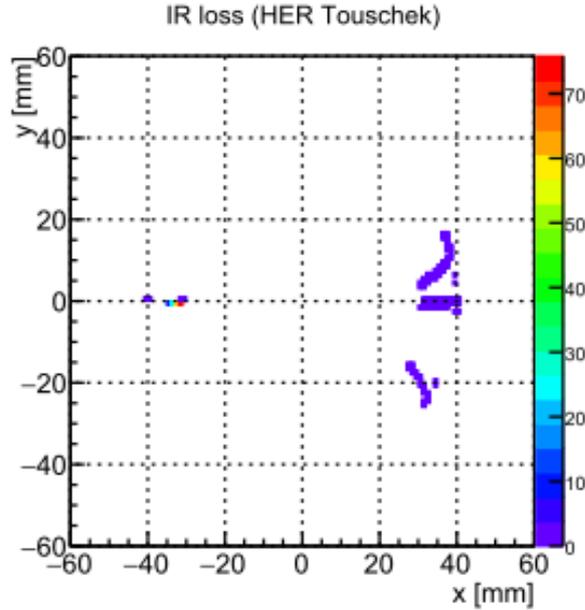
(d) IR ロスイベント

垂直面内での分布 - xy 平面

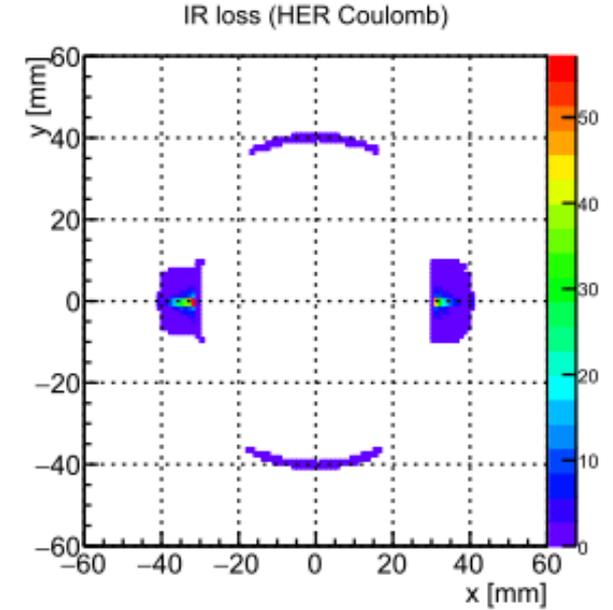
HER



Brems

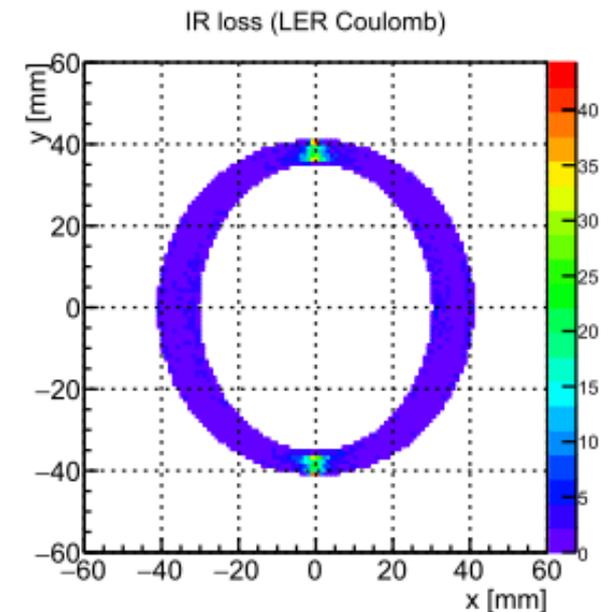
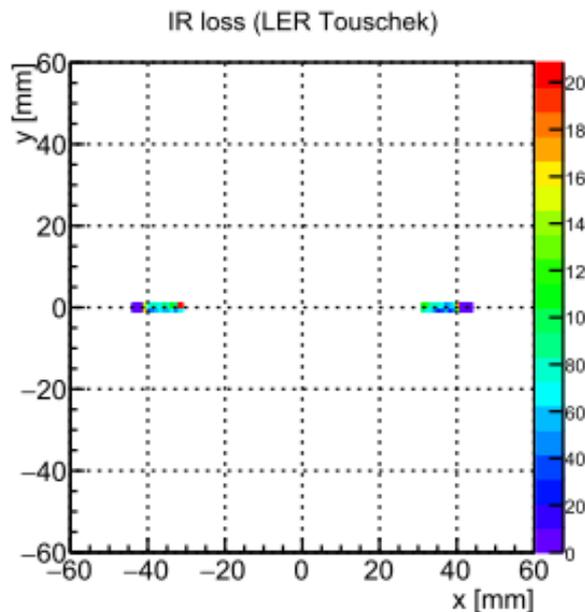
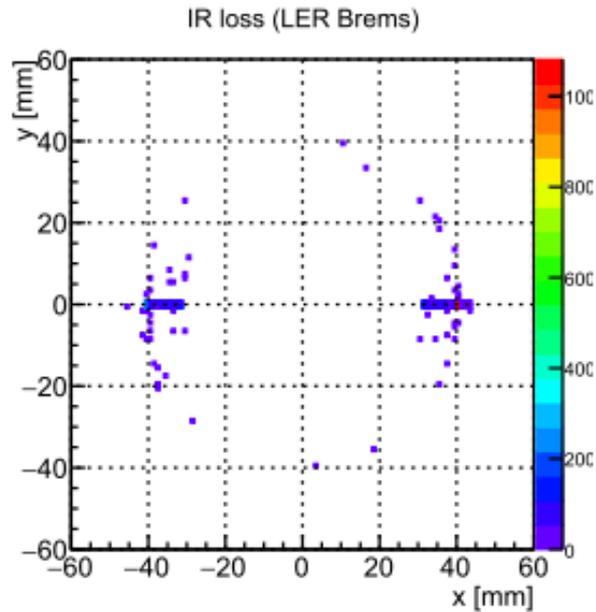


Touschek

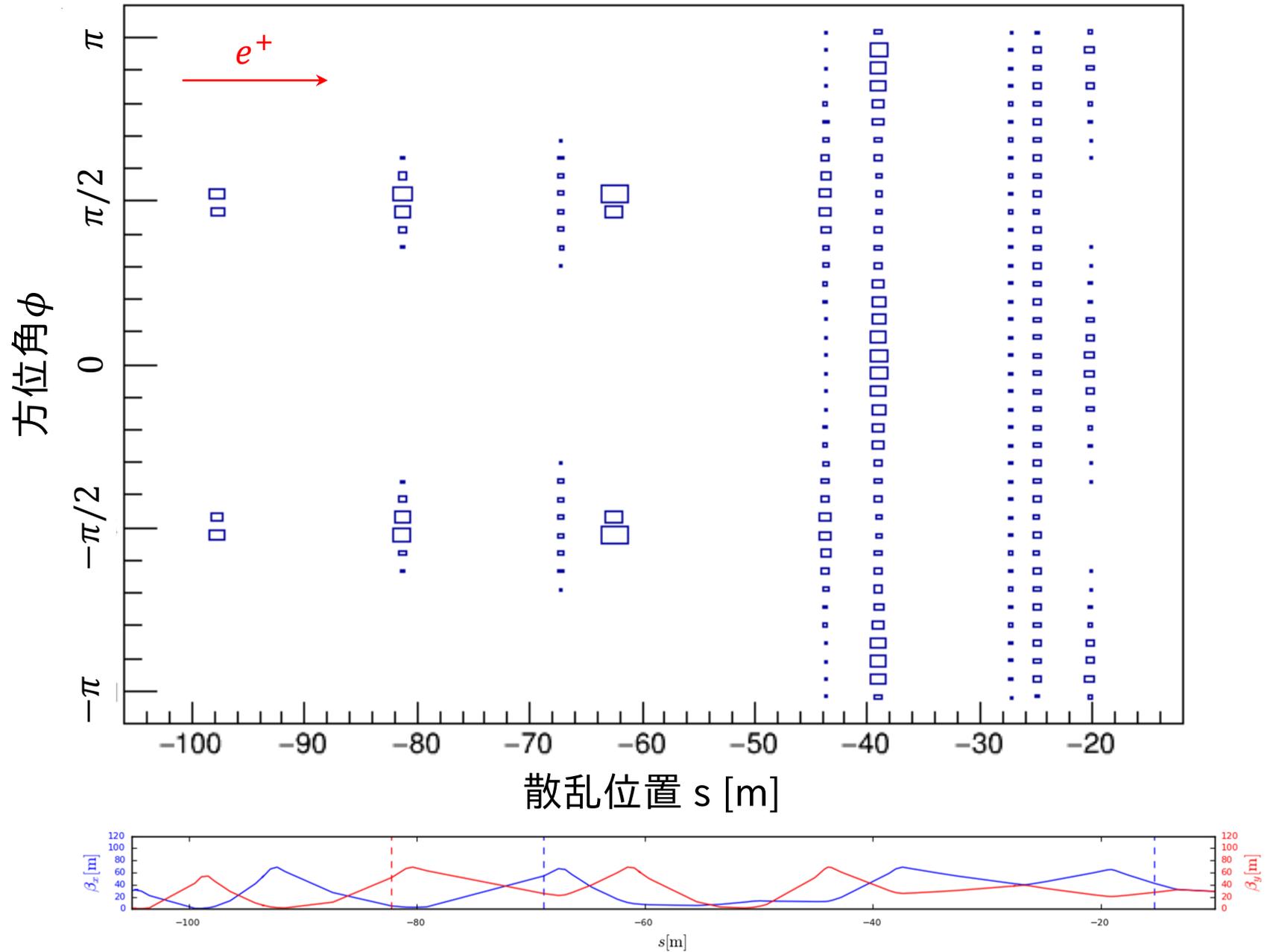


Coulomb

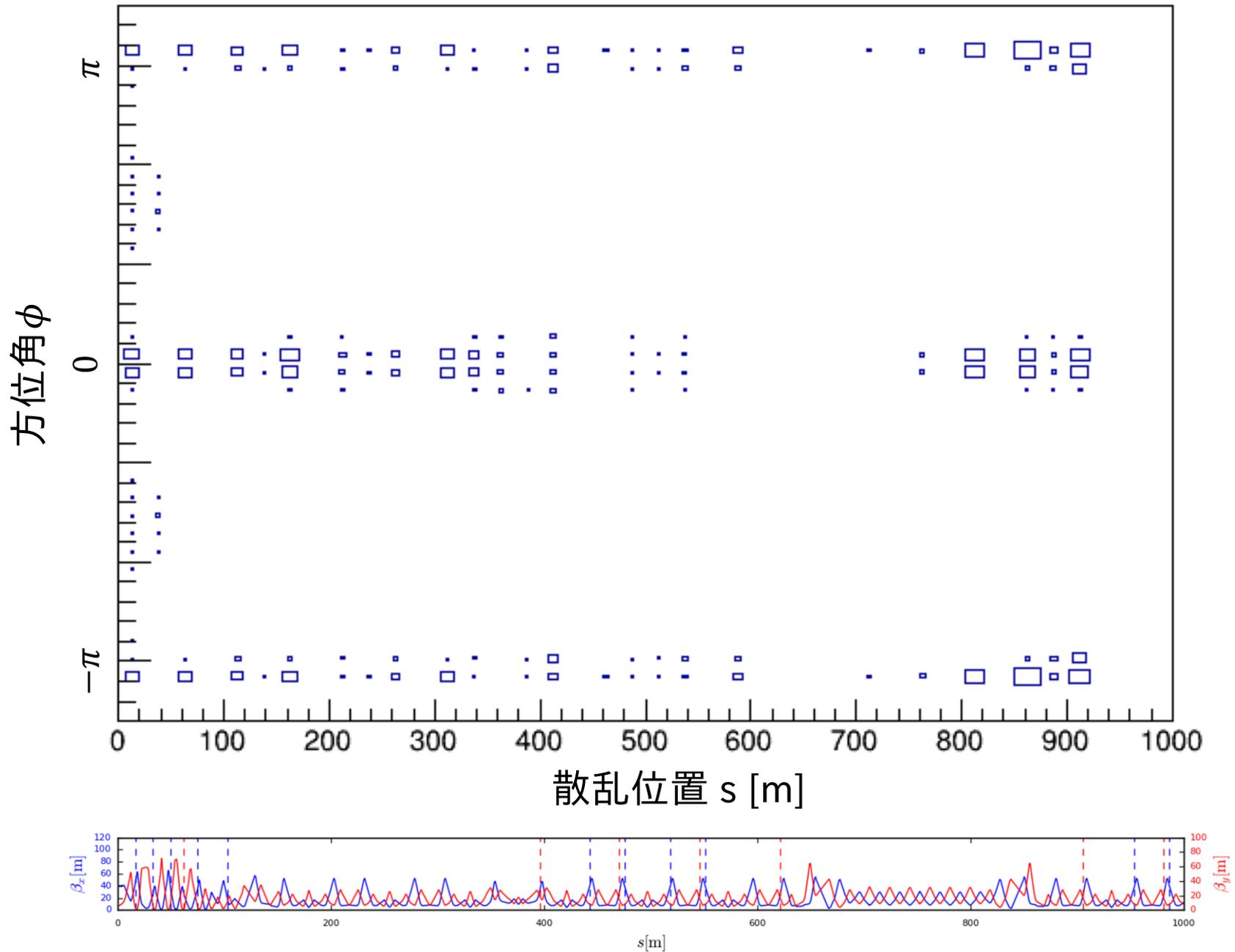
LER



LER Coulomb IR口の散乱位置と角度



HER Coulomb IR口スの散乱位置と角度



Colomb散乱によるずれ

- <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2012/papers/TUOBC02.PDF>より、 $s = s_1$ で散乱されたビーム粒子の $s = s_2$ における垂直方向のずれは、

$$y_2 = \theta_y \sqrt{\beta_{y,1}\beta_{y,2}} \sin(\psi_{y,2} - \psi_{y,1})$$

で表される。

- $\mathbf{x}(s) = (x(s), x'(s))^T$ に対して、 $\mathbf{x}(s) = M(s)\mathbf{x}(0)$ となる転送行列は、

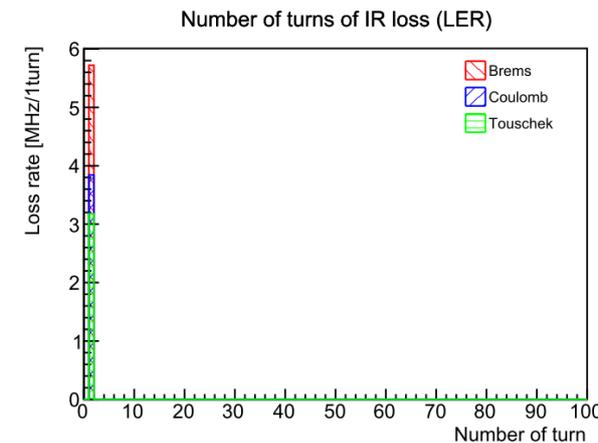
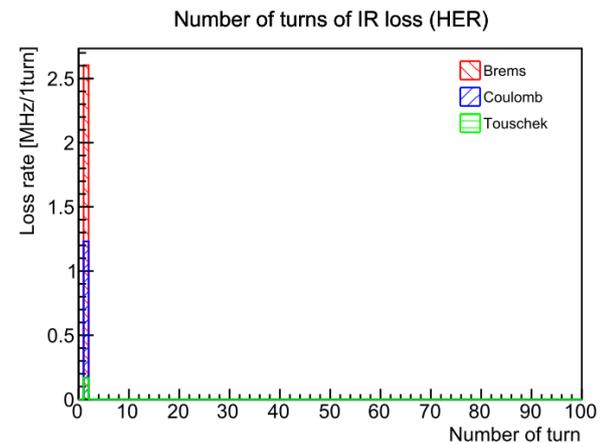
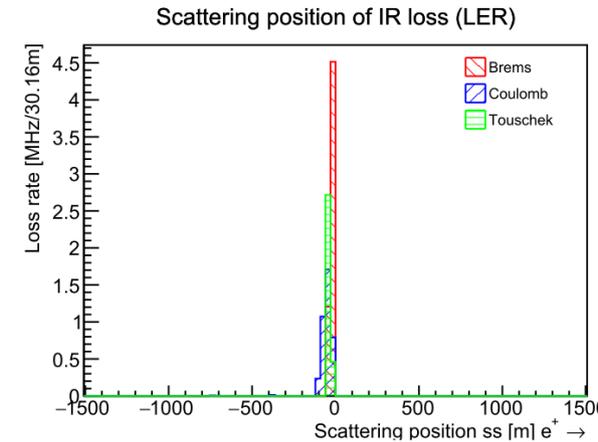
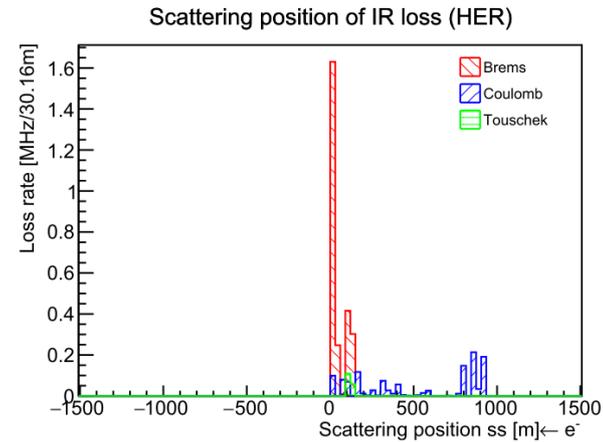
$$M(s) = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{\beta(s)}{\beta_0}} [\cos \mu(s) + \alpha_0 \sin \mu(s)] & \sqrt{\beta_0 \beta(s)} \sin \mu(s) \\ -\frac{(\alpha(s) - \alpha_0) \cos \mu(s) + (1 + \alpha_0 \alpha(s)) \sin \mu(s)}{\sqrt{\beta_0 \beta(s)}} & \sqrt{\frac{\beta_0}{\beta(s)}} [\cos \mu(s) - \alpha(s) \sin \mu(s)] \end{pmatrix}$$

- $\mathbf{y}_1 = (0, \theta_y)^T$ とすると、 $y_2 = \theta_y \sqrt{\beta_{y,1}\beta_{y,2}} \sin(\psi_{y,2} - \psi_{y,1})$ になる。

データセットの調査 - IRロス散乱位置

IRでロスした粒子がどこで散乱されたか

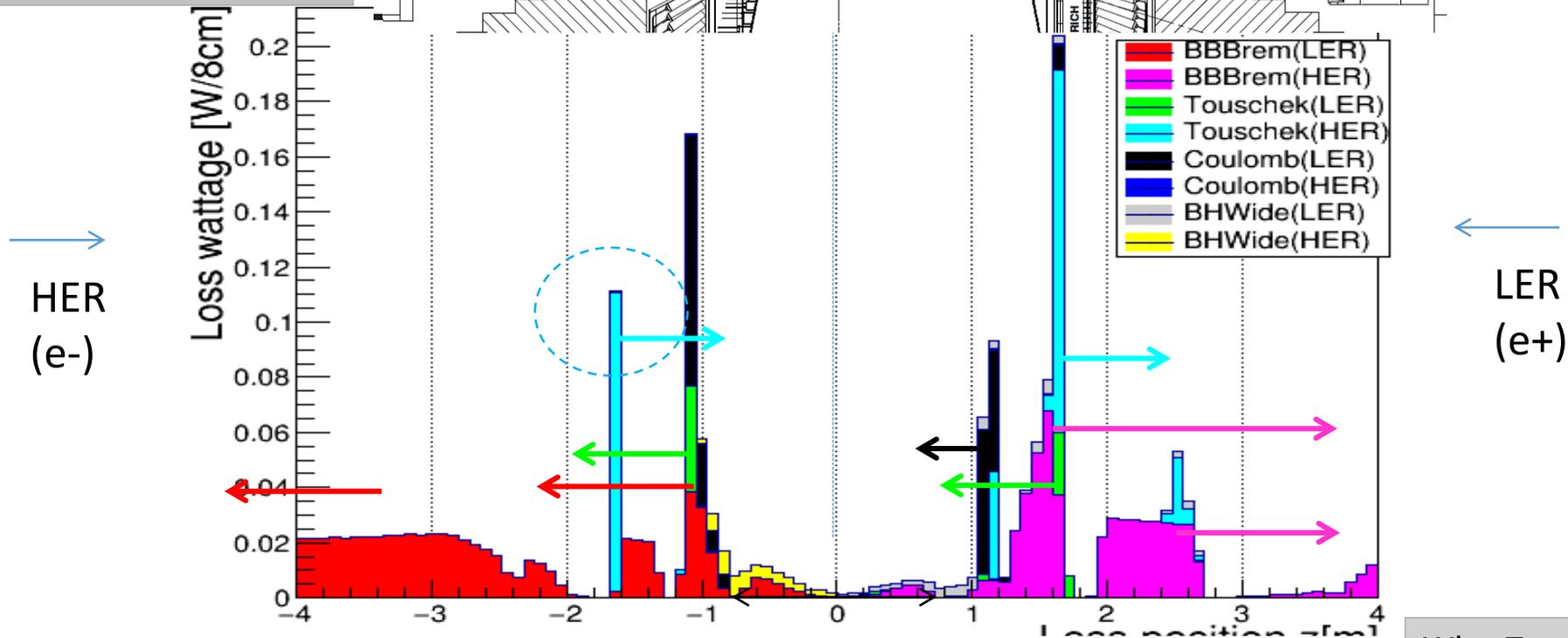
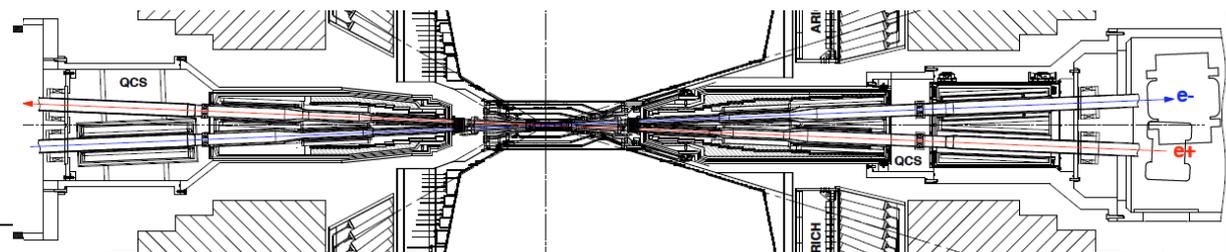
- 全てが1周目でロスしている。
- HERは上流900mより近くから。
- LERは上流100mより近くから来る。



(14th campaign)

BG loss distribution

Loss wattage
= loss rate
* energy of loss particle



	LER (4GeV e+)	HER (7GeV e-)
Rad. Bhabha (BHWide)	0.06 W (eff. 0.09GHz)	0.05 W (eff. 0.05GHz)
Rad. Bhabha (BBBrem)	0.67 W (eff. 1.0GHz)	0.56 W (eff. 0.50GHz)
Touschek	0.07 W (0.12GHz)	0.32 W (0.29GHz)
Coulomb	0.24 W (0.37Hz)	0.00 W (0.001GHz)

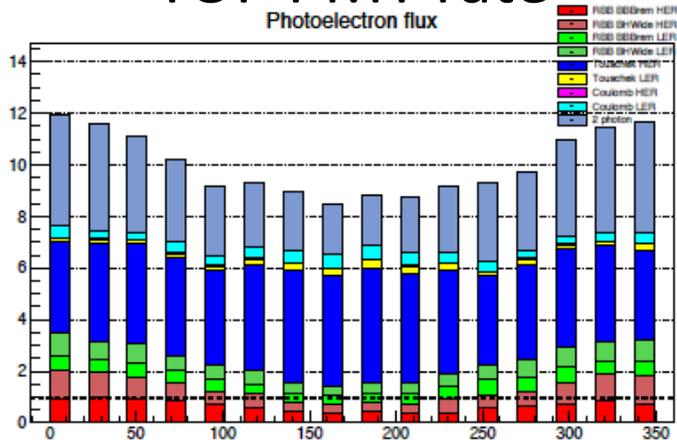
Why Touschek and Coulomb increased?
→ Collimator widths are not optimized yet for new SAD

Sub-Detector BG levels

TOP PMT rate

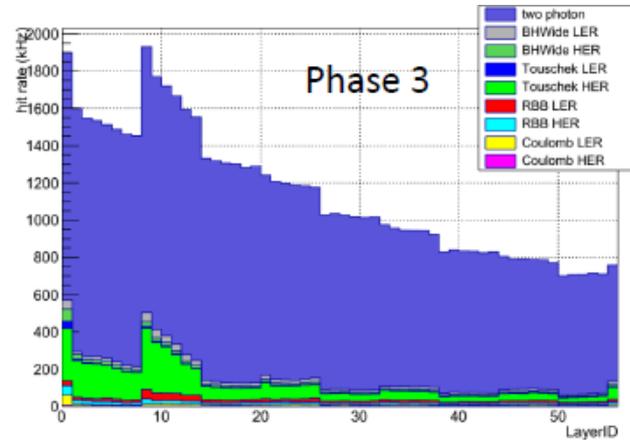
Photoelectron flux

MHz/PMT

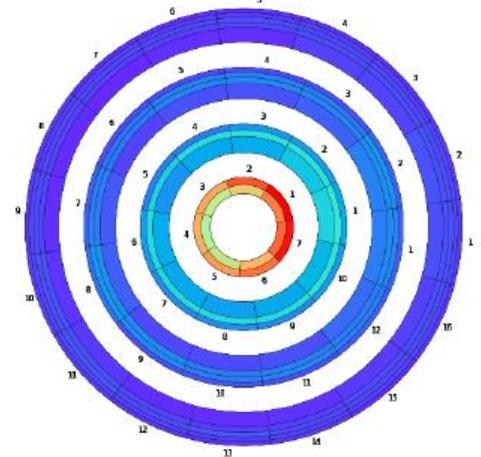


CDC wire rate

Phase 3

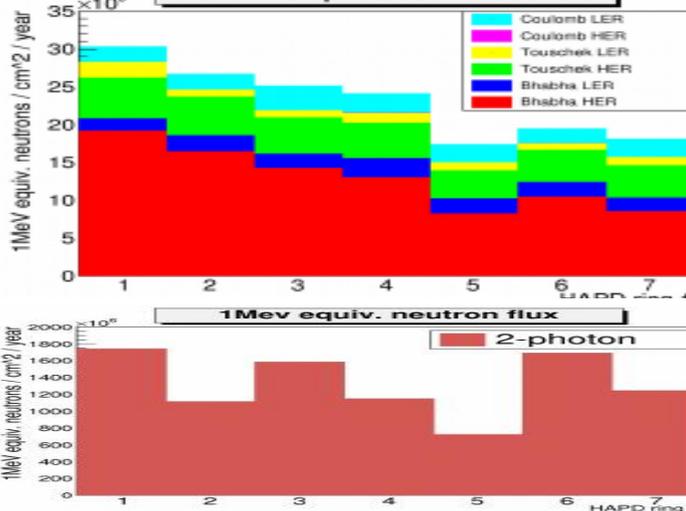


SVD occupancy



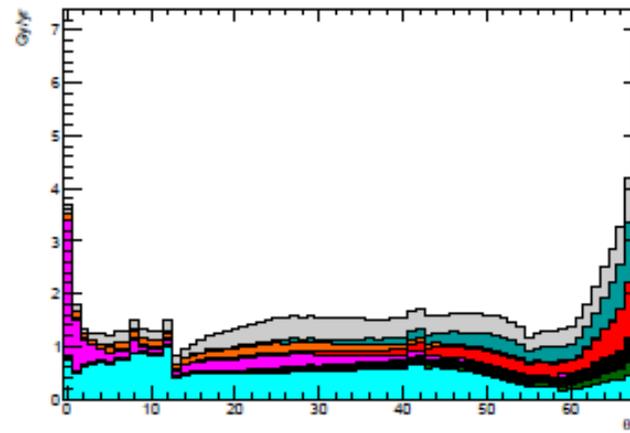
ARICH neutrons

1Mev equiv. neutron flux



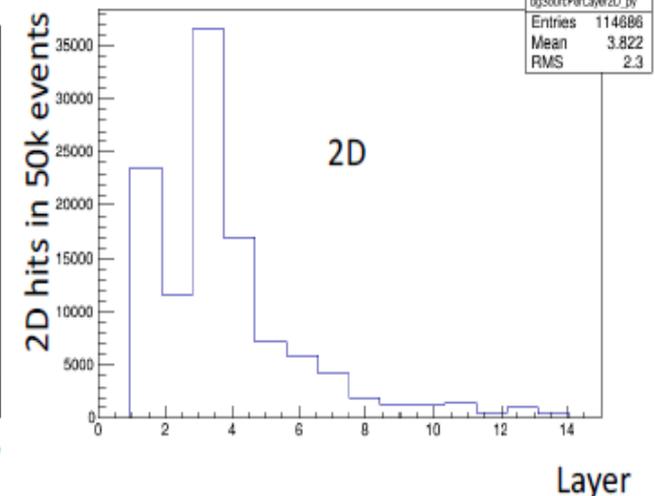
ECL crystal dose

Crystal Radiation Dose vs θ_{ID}



BKLM hits

bgSourcePerLayer2D



See more details in Background parallel session

<https://kds.kek.jp/indico/event/22581/session/27/?slotId=0#20161019>

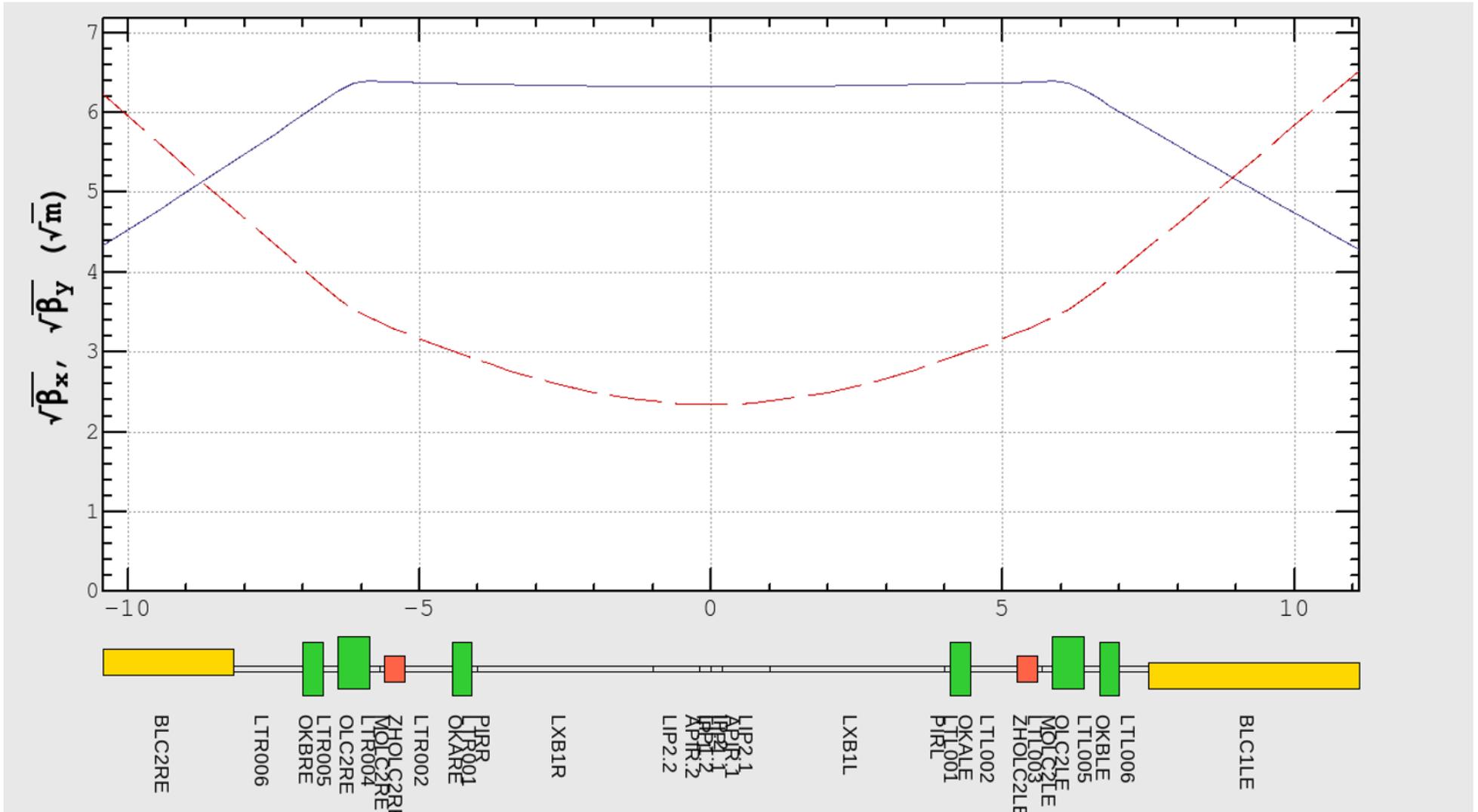
HER コリメータ

mask	B_tot	C_tot	T_tot	sum_tot	B_ir	C_ir	T_ir	sum_ir
d01h1_d1_00.5mm	2.79E-08	4.13E-03	-1.59E-05	4.12E-03			-9.87E+00	-9.87E+00
d01h1_d1_02.0mm	1.04E-03	2.02E-01	3.60E+00	3.80E+00	-8.06E-01	-2.26E-01	-1.21E+01	-1.31E+01
d01h1_d2_00.5mm	1.40E-08	1.26E-05	-1.65E-05	-3.96E-06		-4.14E-01		-4.14E-01
d01h1_d2_02.0mm	2.98E-08	1.00E-01	1.05E-04	1.00E-01	-5.27E-01	-2.12E-01		-7.39E-01
d01h2_d1_00.5mm	-1.49E-08	1.41E-05	-1.05E-05	3.55E-06				
d01h2_d1_02.0mm	6.52E-09	4.40E-03	9.11E-06	4.41E-03		-2.12E-01	-3.14E-02	-2.44E-01
d01h2_d2_00.5mm	2.42E-08	9.52E-04	-1.57E-05	9.36E-04	-3.95E-01	-1.45E-01	-4.21E+01	-4.26E+01
d01h2_d2_02.0mm	3.63E-08	7.10E-02	1.81E-04	7.12E-02	-5.27E-01	-2.26E-01		-7.52E-01
d01h3_d1_00.5mm		-7.38E-07	-1.97E-05	-2.04E-05				
d01h3_d1_02.0mm	-1.02E-08	-7.25E-06	-4.06E-05	-4.78E-05				
d01h3_d2_00.5mm	1.91E-08	-1.84E-05	1.81E-05	-2.19E-07	-2.14E-01	-8.29E-03		-2.22E-01
d01h3_d2_02.0mm	-5.36E-08	4.40E-03	1.35E-01	1.40E-01		-3.68E-02	-3.14E-02	-6.82E-02
d01h4_d1_00.5mm	2.79E-09	-1.90E-06	-2.82E-05	-3.01E-05				
d01h4_d1_02.0mm	1.70E-08	-9.40E-06	-6.85E-06	-1.62E-05	-2.79E-01	-1.65E-03	-1.21E+01	-1.24E+01
d01h4_d2_00.5mm		6.16E-06	-1.10E-06	5.06E-06				
d01h4_d2_02.0mm	5.12E-09	-7.20E-06	-6.20E-06	-1.34E-05		-4.94E-04		-4.94E-04
d01h5_d1_00.5mm	-6.05E-09	-1.05E-09	4.22E-06	4.22E-06	-3.84E-01	-3.32E-02		-4.17E-01
d01h5_d1_02.0mm	-1.86E-09	-4.68E-08	-8.00E-06	-8.05E-06	-5.27E-01	-5.84E-02		-5.85E-01
d01h5_d2_00.5mm	-3.73E-09	-5.24E-10	4.44E-06	4.43E-06		-1.12E-01	-7.70E+01	-7.71E+01
d01h5_d2_02.0mm	2.51E-08	-2.51E-08	-1.21E-05	-1.21E-05	-1.05E+00	-1.62E-01	-1.50E+00	-2.72E+00
d09h1_d1_00.5mm	-7.45E-09	3.03E-09	1.85E-06	1.84E-06				
d09h1_d1_02.0mm	1.86E-09	-3.81E-08	2.98E-07	2.62E-07				
d09h1_d2_00.5mm			1.19E-07	1.19E-07				
d09h1_d2_02.0mm		-2.33E-10	-1.79E-07	-1.79E-07				
d09h2_d1_00.5mm	-1.86E-09	3.57E-08	4.77E-07	5.11E-07				
d09h2_d1_02.0mm	1.68E-08	-5.37E-08	8.34E-07	7.97E-07				
d09h2_d2_00.5mm								
d09h2_d2_02.0mm								
d09h3_d1_00.5mm	9.31E-09	-2.82E-08	-6.18E-06	-6.20E-06				
d09h3_d1_02.0mm	2.89E-08	-9.24E-08	-1.23E-05	-1.24E-05				
d09h3_d2_00.5mm								
d09h3_d2_02.0mm		2.33E-10		2.33E-10				
d09h4_d1_00.5mm	1.12E-08	3.43E-08	-6.70E-06	-6.65E-06				
d09h4_d1_02.0mm	3.49E-08	-9.15E-08	-1.76E-05	-1.76E-05				
d09h4_d2_00.5mm								
d09h4_d2_02.0mm		-5.59E-09		-5.59E-09				
d12h1_d1_00.5mm	1.58E-08	-1.48E-06	-8.72E-06	-1.02E-05				
d12h1_d1_02.0mm	1.26E-07	5.54E-04	5.75E-05	6.12E-04			-3.14E-02	-3.14E-02
d12h1_d2_00.5mm								
d12h1_d2_02.0mm								
d12h2_d1_00.5mm	-1.63E-08	-2.28E-06	-1.82E-08	-2.31E-06				
d12h2_d1_02.0mm	2.89E-08	4.88E-05	1.17E-04	1.66E-04		-1.63E-02	-3.14E-02	-4.77E-02
d12h2_d2_00.5mm								
d12h2_d2_02.0mm								
d12h3_d1_00.5mm		-3.70E-08		-3.70E-08				
d12h3_d1_02.0mm	-4.66E-09	-2.79E-06	-2.46E-06	-5.25E-06				
d12h3_d2_00.5mm								
d12h3_d2_02.0mm								
d12h4_d1_00.5mm		5.84E-06	-1.86E-08	5.82E-06				
d12h4_d1_02.0mm	1.02E-08	-2.94E-06	1.14E-06	-1.79E-06				
d12h4_d2_00.5mm								
d12h4_d2_02.0mm								

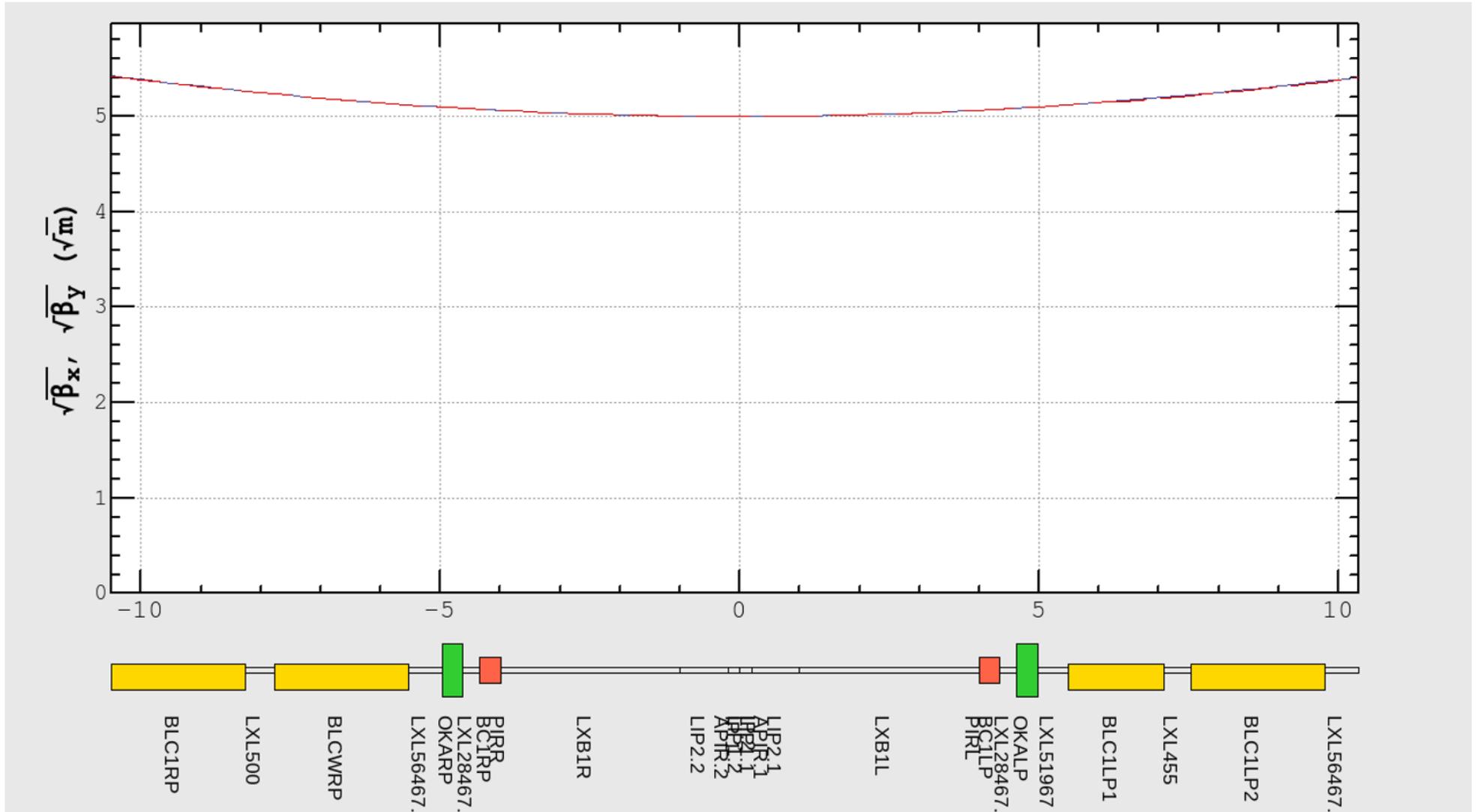
LER コリメータ

mask	B_tot	C_tot	T_tot	sum_tot	B_ir	C_ir	T_ir	sum_ir
d02h1_d1_00.5mm	-1.86E-08	1.19E-06	-1.69E-05	-1.58E-05		-2.96E-01		-2.96E-01
d02h1_d2_00.5mm		-2.09E-07	-2.38E-06	-2.59E-06				
d02h2_d1_00.5mm	-3.73E-09	1.18E-04	-8.11E-06	1.10E-04		-2.15E+01		-2.15E+01
d02h2_d2_00.5mm	1.12E-02	1.71E-02	5.83E+01	5.83E+01		-2.66E+01		-2.66E+01
d02h3_d1_00.5mm		-1.91E-05	-3.43E-05	-5.34E-05		-1.85E-02		-1.85E-02
d02h3_d2_00.5mm	-1.02E-08	4.82E-07	-2.22E-05	-2.17E-05	-2.96E-01		-5.23E+01	-5.26E+01
d02h4_d1_00.5mm	3.98E-04	-3.73E-09	5.17E+00	5.17E+00		-3.84E-01	-2.49E+01	-2.53E+01
d02h4_d2_00.5mm	9.31E-09	-4.19E-09	-7.15E-06	-7.15E-06		-1.28E-01	-2.18E+01	-2.19E+01
d03h1_d1_00.5mm	-2.37E-08	2.65E-05	3.25E-02	3.25E-02	-2.85E-01	-3.67E-02	-2.29E+02	-2.29E+02
d03h1_d2_00.5mm	-5.59E-08	6.92E-05	1.61E-04	2.30E-04		-3.71E+00		-3.71E+00
d03h2_d1_00.5mm	-2.24E-08	-5.36E-06	9.54E-07	-4.43E-06				
d03h2_d2_00.5mm		1.75E-10	-3.43E-06	-3.43E-06				
d06h1_d1_00.5mm	2.42E-08	1.30E-08	2.41E-06	2.45E-06				
d06h1_d2_00.5mm		7.97E-09	-3.34E-06	-3.33E-06				
d06h3_d1_00.5mm		7.96E-08	6.79E-06	6.87E-06				
d06h3_d2_00.5mm		1.59E-08	5.72E-06	5.74E-06				
d06h4_d1_00.5mm	-5.59E-09	3.32E-08	-2.06E-06	-2.04E-06				
d06h4_d2_00.5mm		3.74E-08	4.26E-06	4.30E-06				

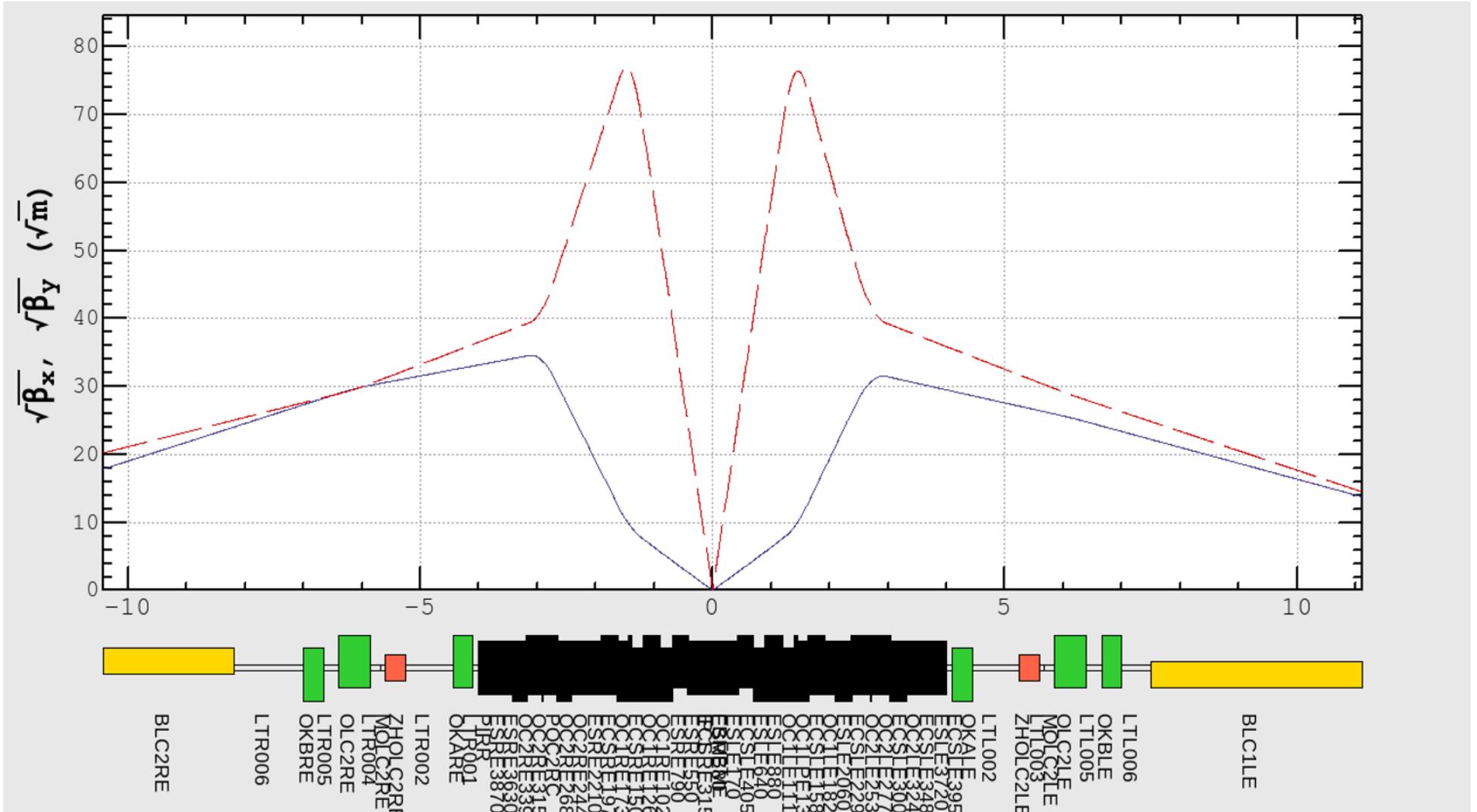
Phase1 HER ベータ関数



Phase1 LER ベータ関数



Phase3 HER ベータ関数



Phase3 LER ベータ関数

