



A simulation study of beam backgrounds at the KEKB and SuperKEKB colliders

KEKB 及び SuperKEKB 衝突器における ビーム背景事象のシミュレーション研究

2011年2月2日

東北大学大学院 理学研究科 物理学専攻

素粒子実験グループ

中野 浩至

Super KEKB 衝突器へのアップグレード

ビーム背景事象と衝突点近傍の設計

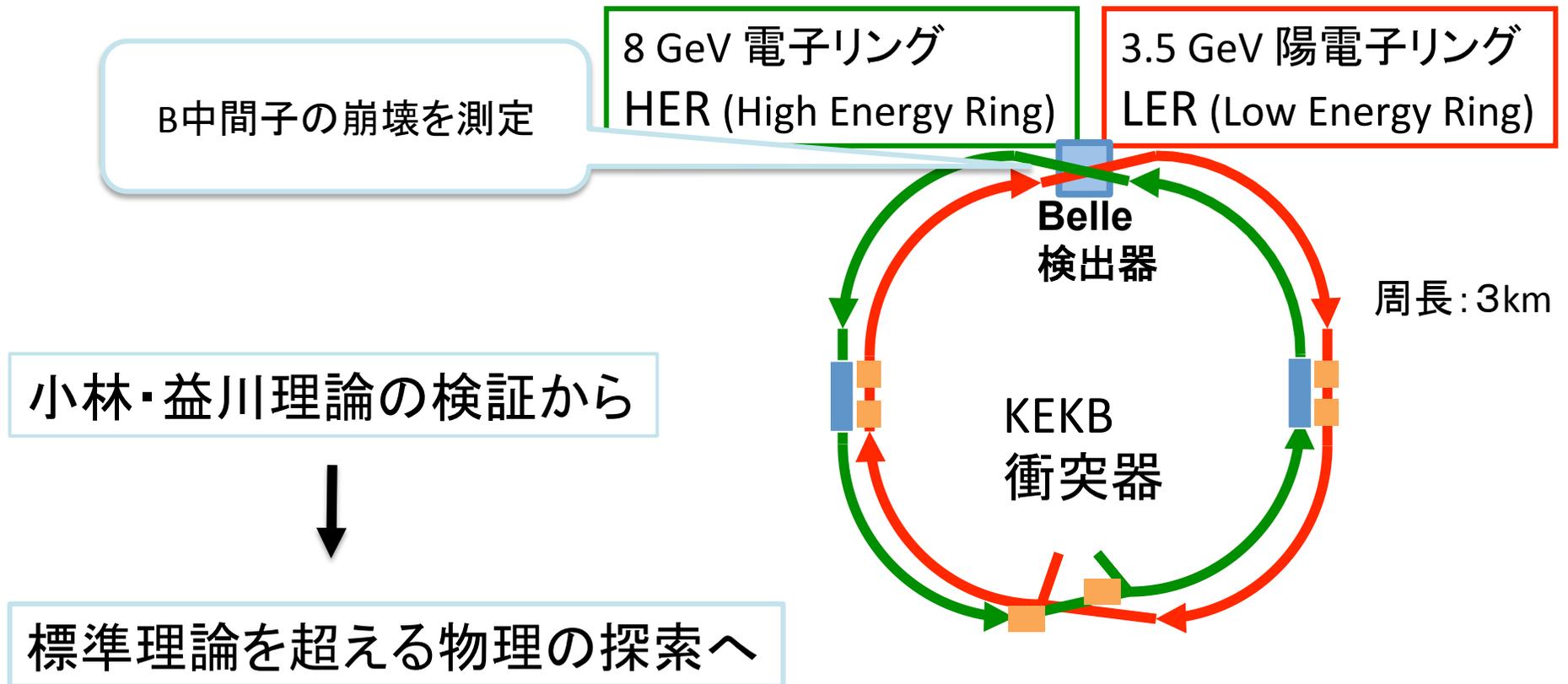
本研究の方法と条件

シミュレーション研究の結果

まとめ

KEKB :電子陽電子の非対称衝突器。

B中間子を作り、CP対称性の破れを検証するBelle実験を行っている。



ルミノシティが現在の40倍になる、
SuperKEKB へのアップグレード計画が進行中

KEKB

電流:

1.2 A (HER)

1.6 A (LER)

衝突点ビームサイズ:

170um × 0.94um (HER)

147um × 0.94um (LER)

2倍以上



SuperKEKB

電流:

2.6 A (HER)

3.6 A (LER)

衝突点ビームサイズ:

10 um × 0.063um (HER)

10 um × 0.048um (LER)

1/10以下



ビーム電流、密度が増加



ルミノシティが増加するが、

ビーム由来の背景事象も増加

最も内側にある崩壊点検出器へのビーム由来の背景事象

最も内側にある崩壊点検出器へのビーム由来の背景事象3種類

1) 散乱されたビーム粒子

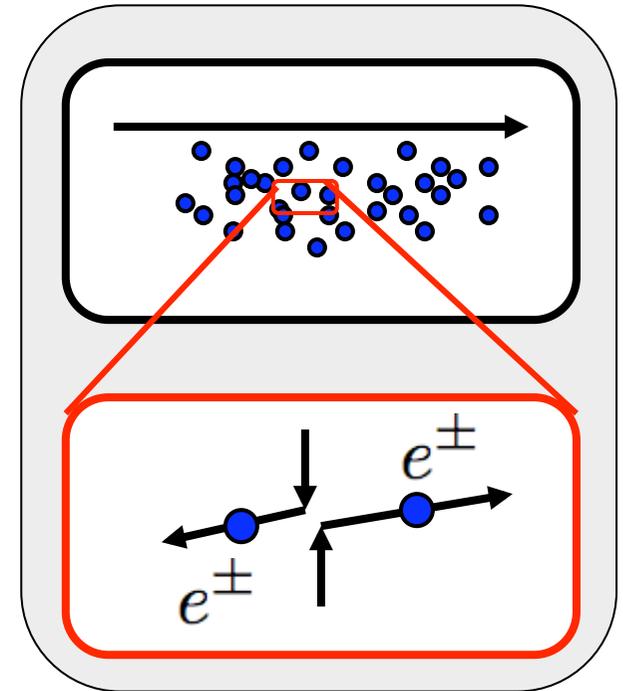
Touschek 効果

- ・リングの周上にて、バンチ内の粒子同士の散乱
- ・エネルギーが増加 or 減少

$$(\text{散乱率}) \propto (\text{電流}) \cdot (\text{密度}) / (\text{エネルギー})^3$$

SuperKEKB では特に重要

LER で重要



ガス散乱

- ・リングの周上にて、残留ガスとの散乱
- ・エネルギーが減少 or 向きが変化

$$(\text{散乱率}) \propto (\text{電流}) \cdot (\text{ガスの圧力})$$

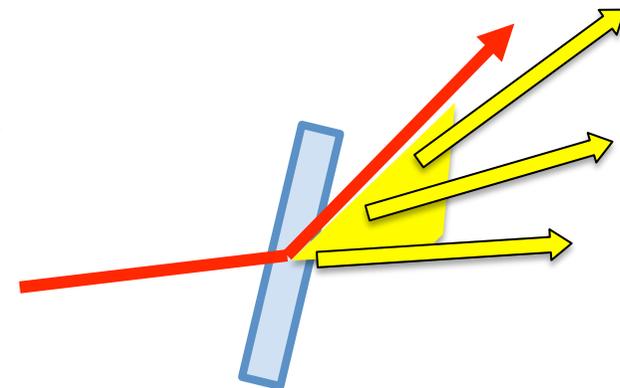
最も内側にある崩壊点検出器へのビーム由来の背景事象3種類

種類	発生場所と原因
1)散乱されたビーム粒子	
Touschek 効果	リングの周上、バンチ内の粒子同士の散乱 (散乱率) \propto (電流) \cdot (密度) / (エネルギー) ³
ガス散乱	リングの周上、残留ガスとの散乱 (散乱率) \propto (電流) \cdot (ガスの圧力)

2)シンクロトロン放射

磁石にて、ビームが曲げられた時
(熱量) \propto (エネルギー)⁴

HER で重要

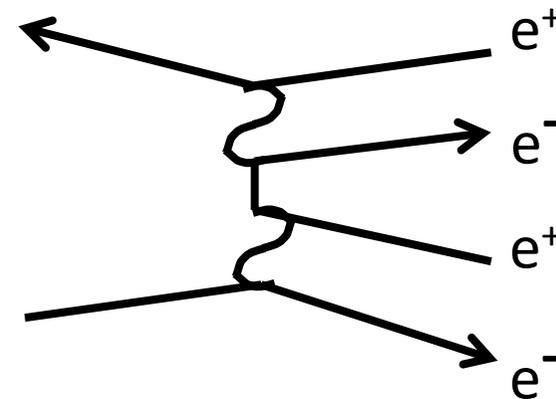


最も内側にある崩壊点検出器へのビーム由来の背景事象3種類

種類	発生場所と原因
1)散乱されたビーム粒子	
Touschek 効果	リングの周上、バンチ内の粒子同士の散乱 (散乱率) \propto (電流) \cdot (密度) / (エネルギー) ³
ガス散乱	リングの周上、残留ガスとの散乱 (散乱率) \propto (電流) \cdot (ガスの圧力)
2)シンクロトロン放射	磁石にて、ビームが曲げられた時 (熱量) \propto (エネルギー) ⁴

3) $e^+ e^-$ 対生成

衝突点にて生成される
(生成率) \propto (ルミノシティ)



最も内側にある崩壊点検出器へのビーム由来の背景事象3種類

種類	発生場所と原因	研究担当
1)散乱されたビーム粒子		 中野(東北)
Touschek 効果	リングの周上、バンチ内の粒子同士の散乱 (散乱率) \propto (電流) \cdot (密度) / (エネルギー) ³	
ガス散乱	リングの周上、残留ガスとの散乱 (散乱率) \propto (電流) \cdot (ガスの圧力)	
2)シンクロトロン放射	磁石にて、ビームが曲げられた時 (熱量) \propto (エネルギー) ⁴	 KEK
3)e ⁺ e ⁻ 対生成	衝突点にて生成される (生成率) \propto (ルミノシティ)	 MPI (ドイツ)

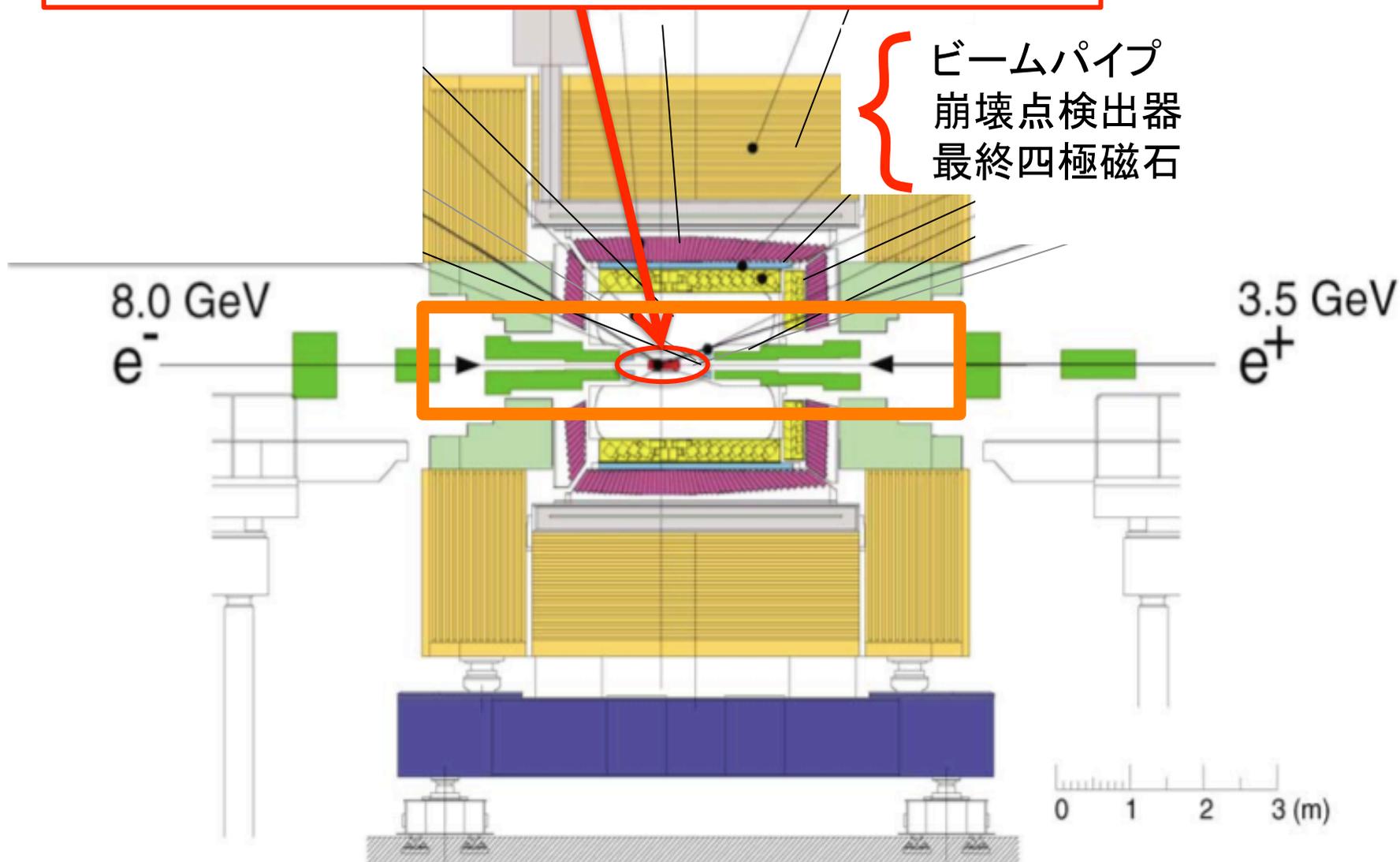
Touschek 効果 :

LER で重要。SuperKEKB では特に重要項目。

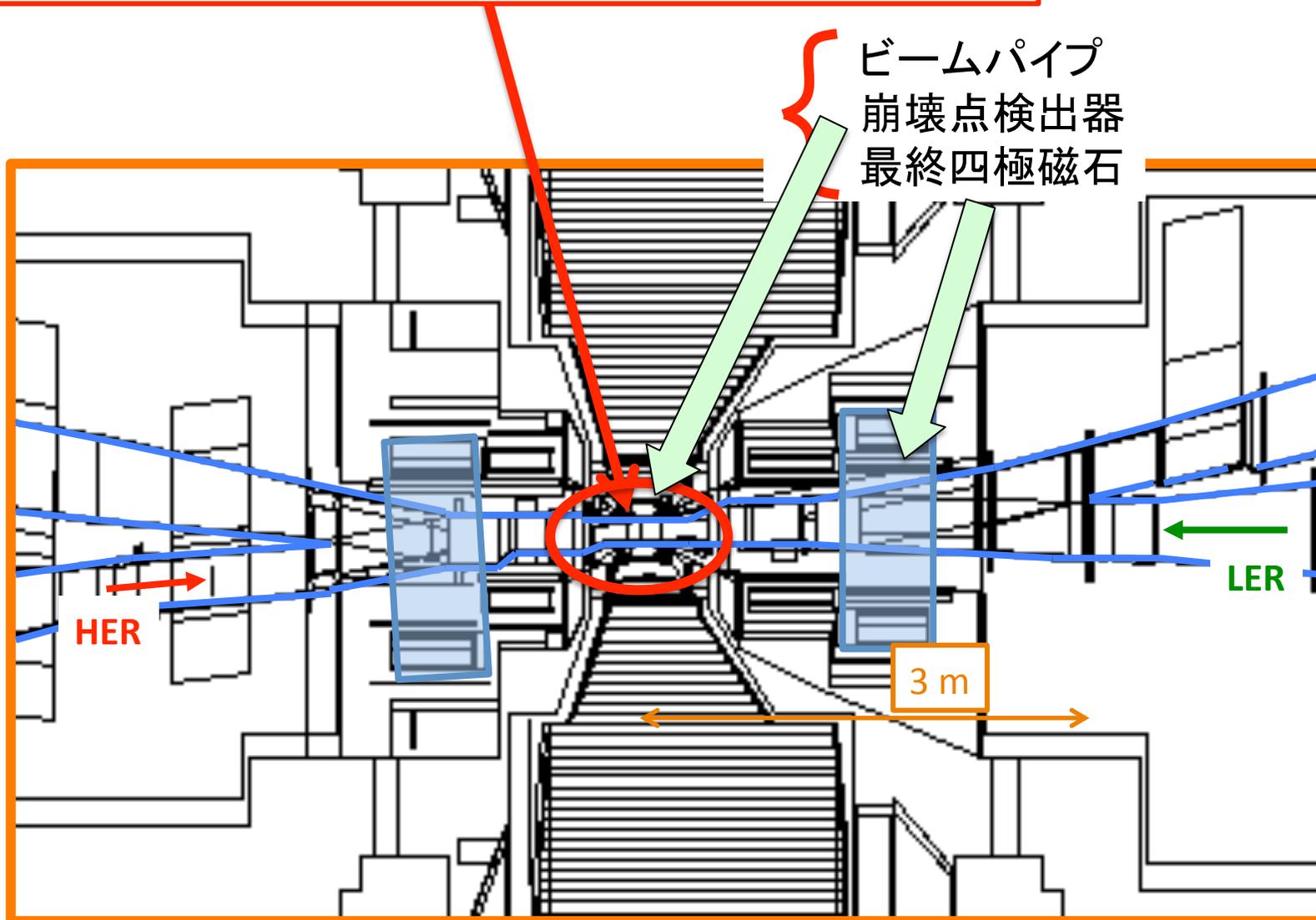
シンクロトロン放射 :

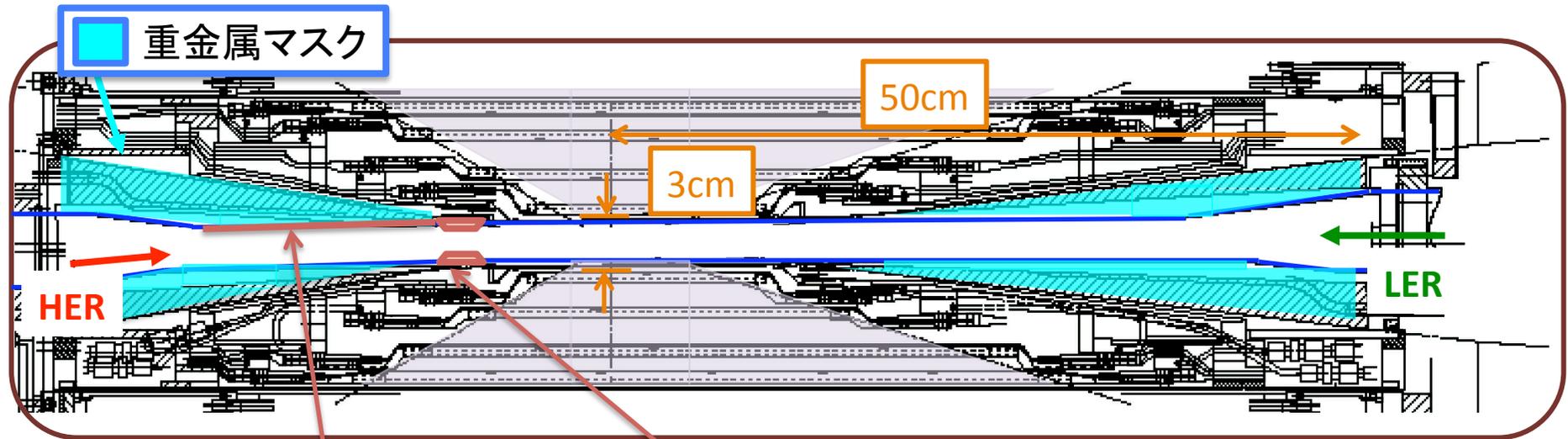
HER で重要。

衝突点近傍 : IR (Interaction Region)



衝突点近傍 : IR (Interaction Region)

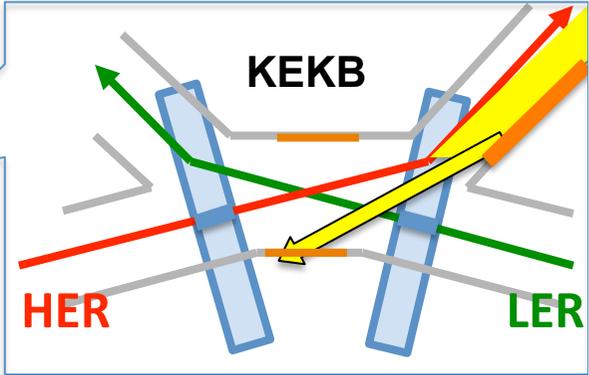




Saw tooth 構造

シンクロtron光マスク

HER のシンクロtron光	<ul style="list-style-type: none"> ・上流からの入射は阻止。 ・下流からの後方散乱が問題。
散乱ビーム粒子	<ul style="list-style-type: none"> ・重金属マスクにより、抑制。

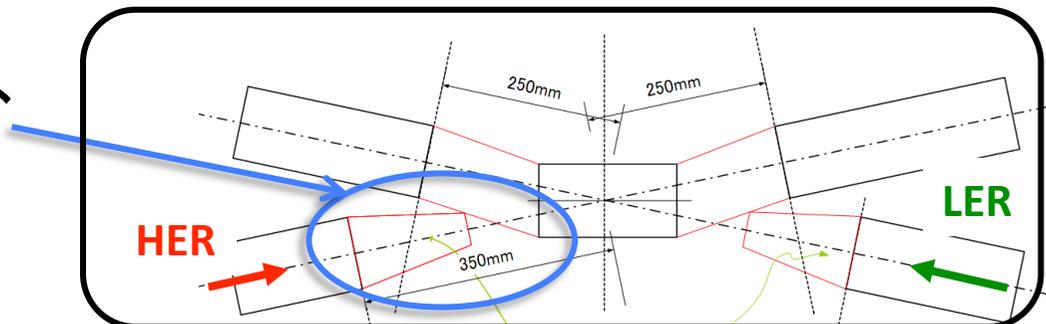


次に、SuperKEKB の IR について述べる

- ・シンクロtron光対策
- ・重金属マスク

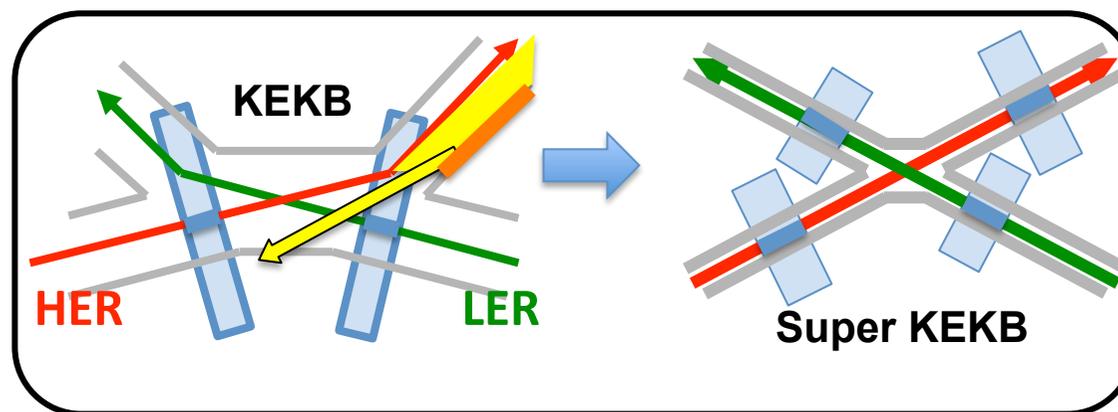
上流からのシンクロtron光

パイプを円錐状にすることで、前方からの放射光を防ぐ。



下流からのシンクロtron光

最終四極磁石が独立し、後方散乱の問題も回避。

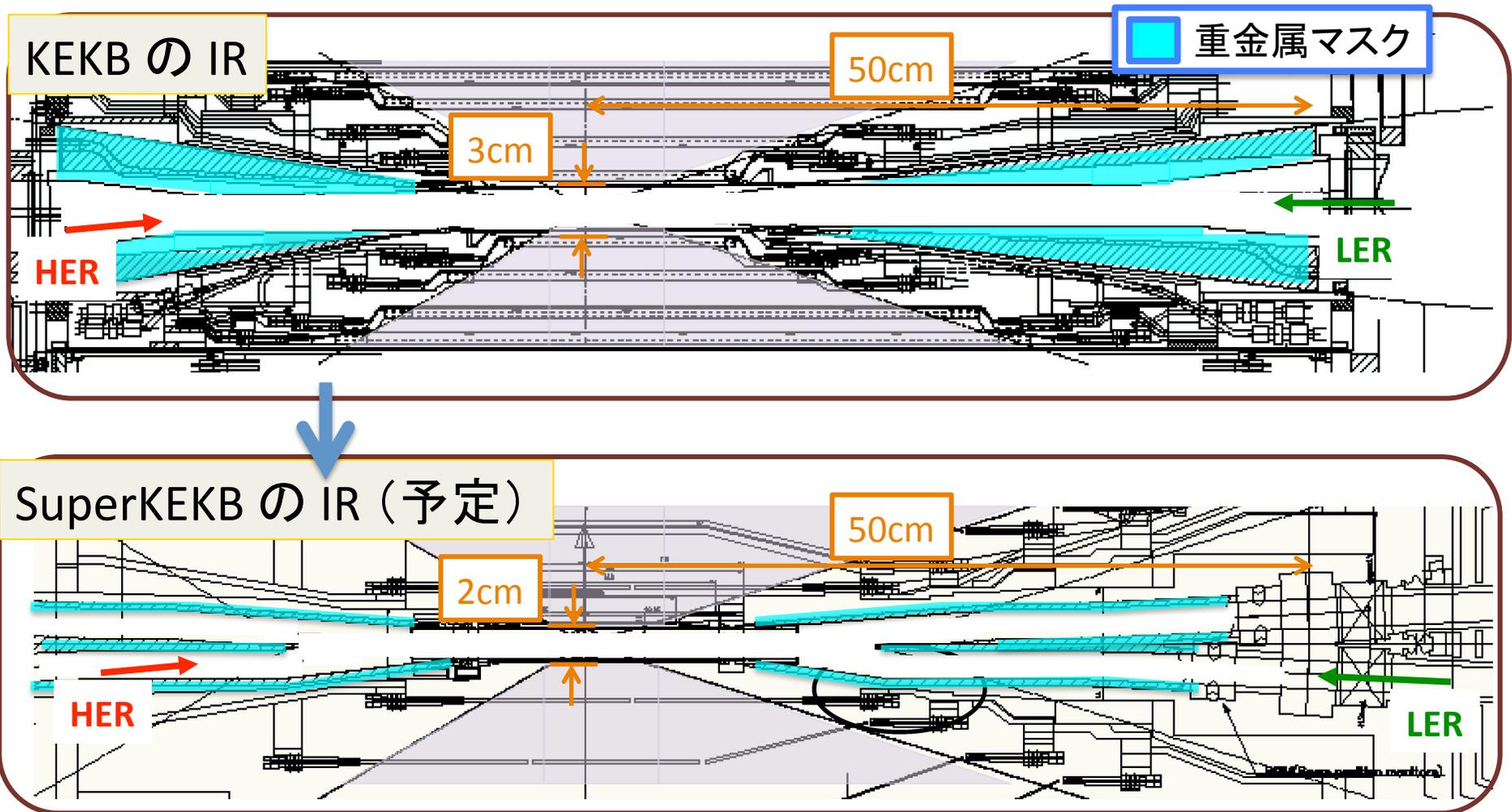


上流、下流からのシンクロtron光を両方回避できる設計を予定

SuperKEKB の 重金属マスク

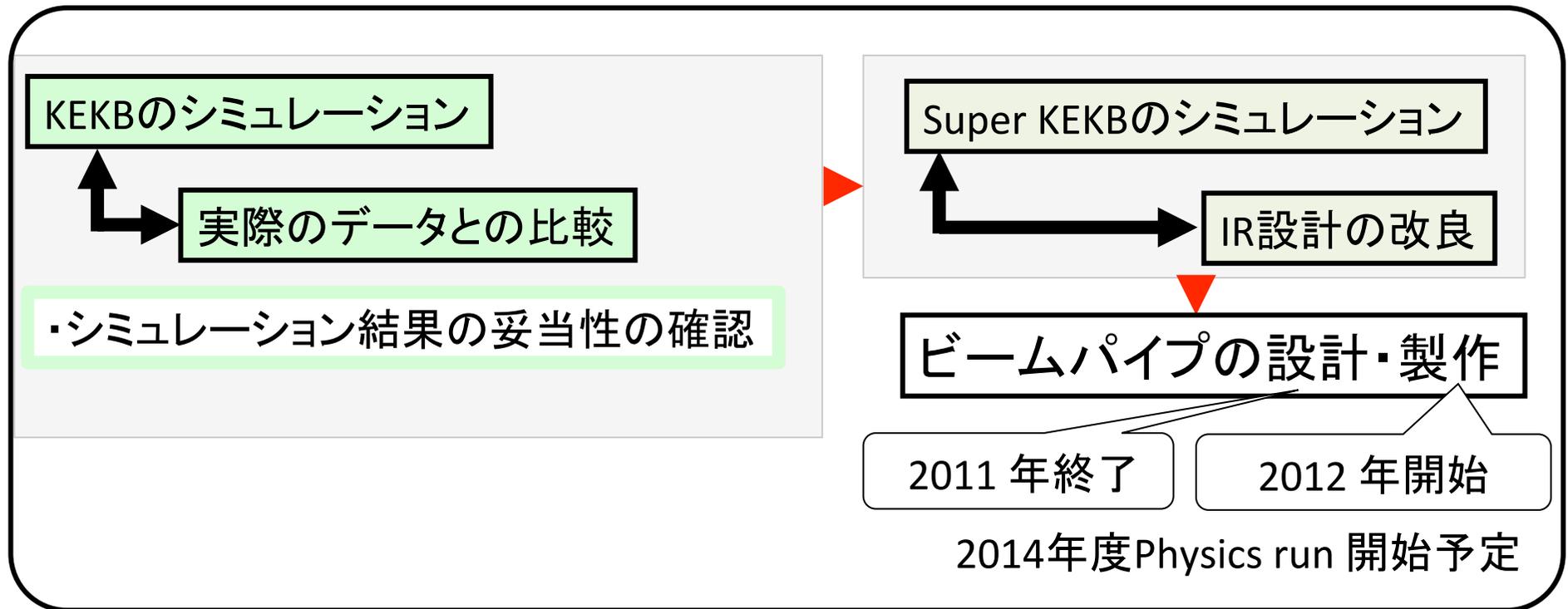
13

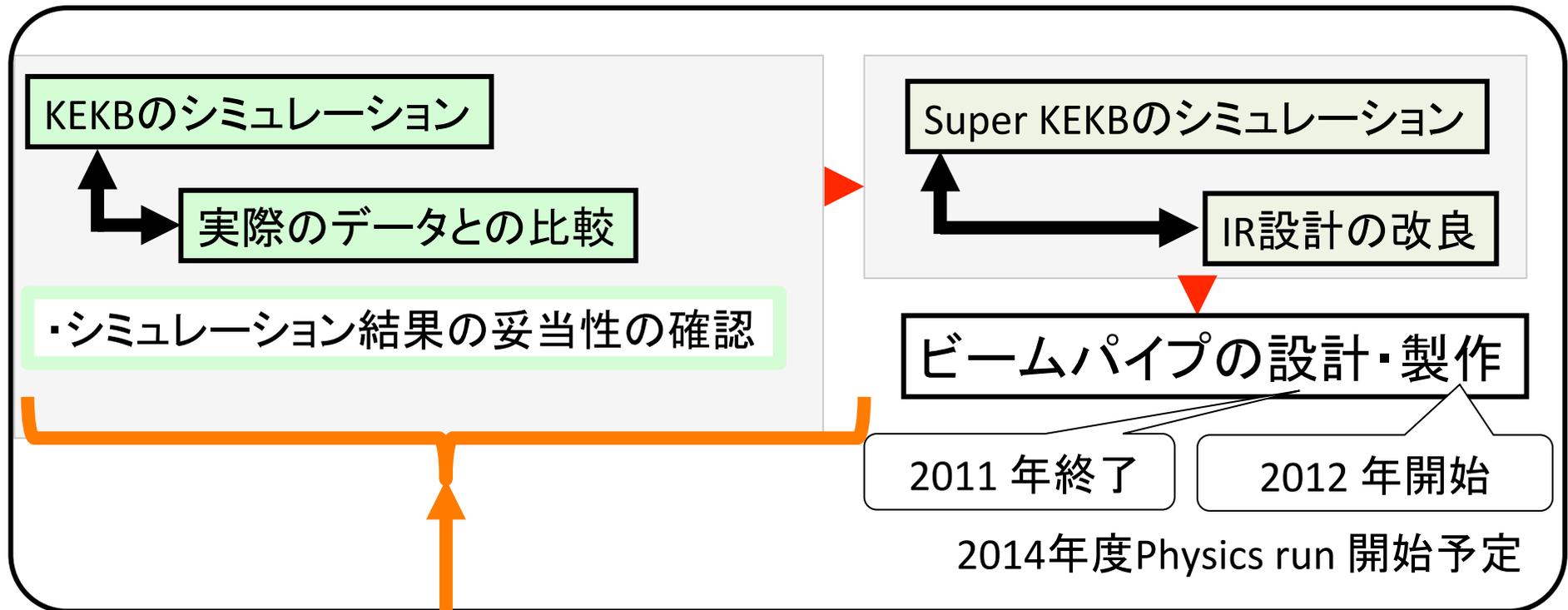
交差角が 22 mrad から 83 mrad へ。検出器の領域はそのまま確保。



ビーム交差角が大きくなり、重金属マスクのスペースが減少

→ シミュレーション研究による設計の最適化が必要





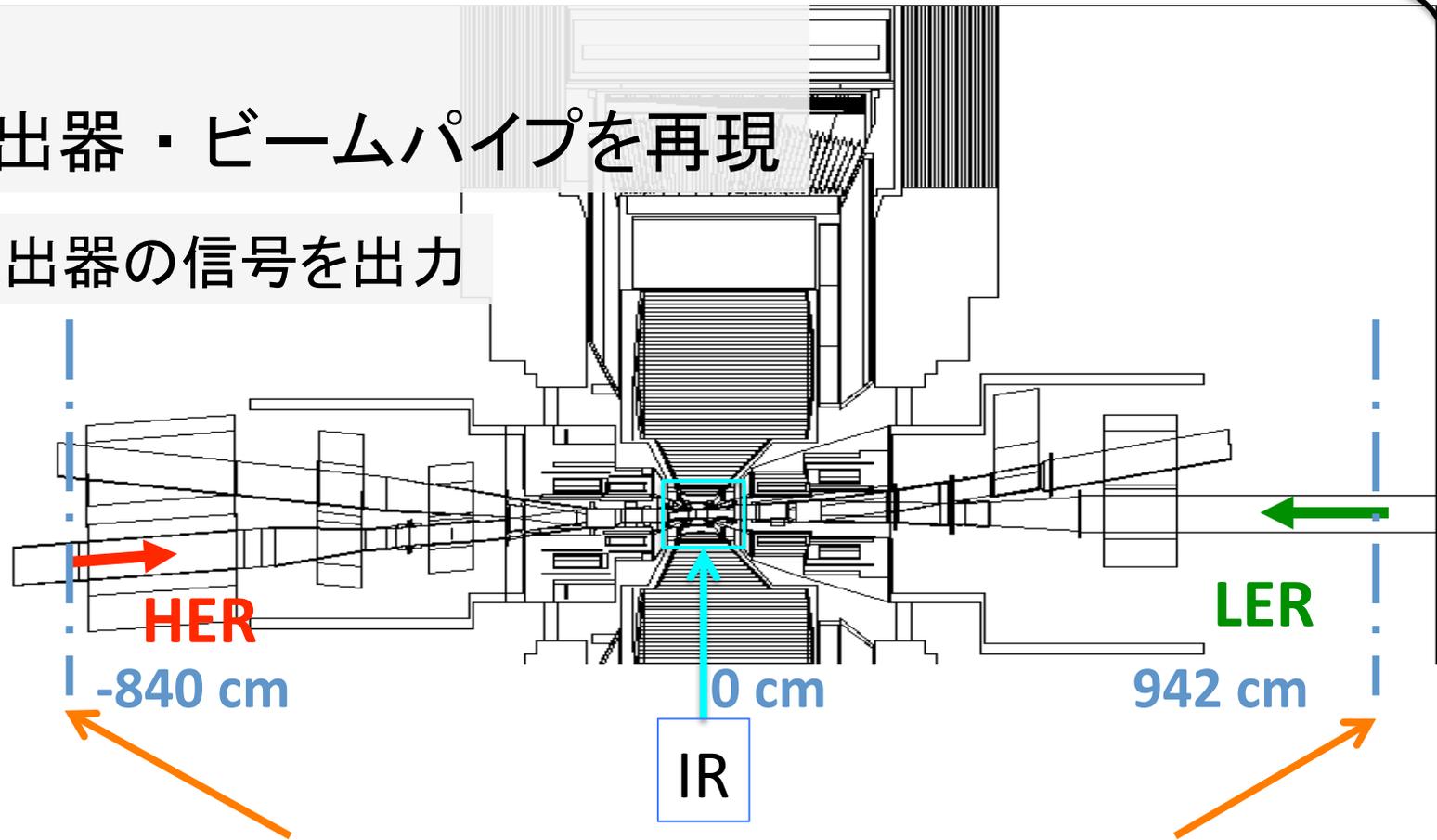
今回の研究成果

- ・KEKB の散乱ビーム粒子による背景事象のシミュレーションを実験値と比較
- ・背景事象の生成過程の理解
- ・SuperKEKB の背景事象の見積もり
- ・KEKB の可動マスクの評価

GEANT

Belle 検出器・ビームパイプを再現

崩壊点検出器の信号を出力



入射する「散乱ビーム粒子」情報は
“TURTLE” と KEKB ビーム光学データ で生成。

与えた光学(磁石配置)にそって、
KEKBリングを1周分トレース

ビームパラメータ

実験値と比較するため、
ビームテストの条件にあわせた

ビームサイズ : 衝突点で 200 [um] × 2 [um]

電流 : LER 1.45 [A] / HER 0.85 [A]

バンチ数 : 1584 [個]

比較する値

崩壊点検出器の占有率: (信号チャンネル数) / (総チャンネル数)

シミュレーションでの求め方

$$(\text{背景事象量}) = (\text{1 散乱粒子あたりの寄与}) \times (\text{散乱率})$$

シミュレーションから求めた。

ビームパラメータ等から計算

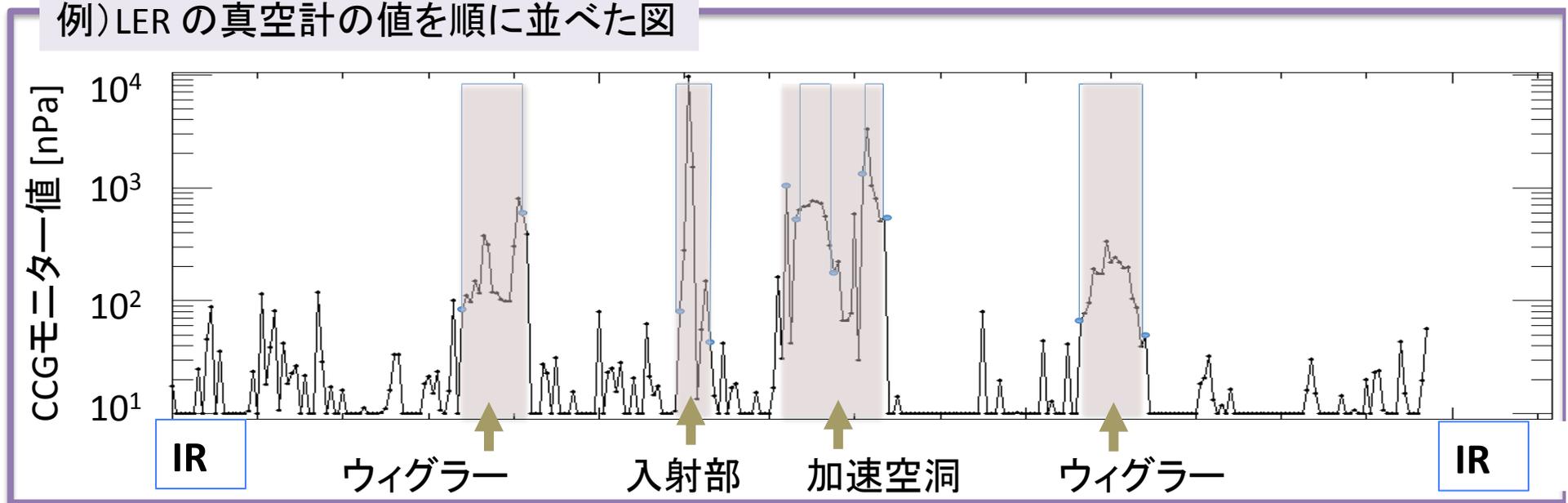
次に、ガス散乱・Touschek散乱の散乱率について述べる

散乱率

ガス散乱： $(\text{散乱率}) \propto (\text{電流}) \cdot (\text{ガスの圧力})$

ガスの圧力はビームテスト時の真空計の値を参考にした（精度はファクター2程度）

例) LER の真空計の値を順に並べた図



領域によって10~100倍圧力が異なる → 領域ごとに圧力を求めた
 同じ領域内でも、~10倍以内の変動 → ファクター10以内の誤差



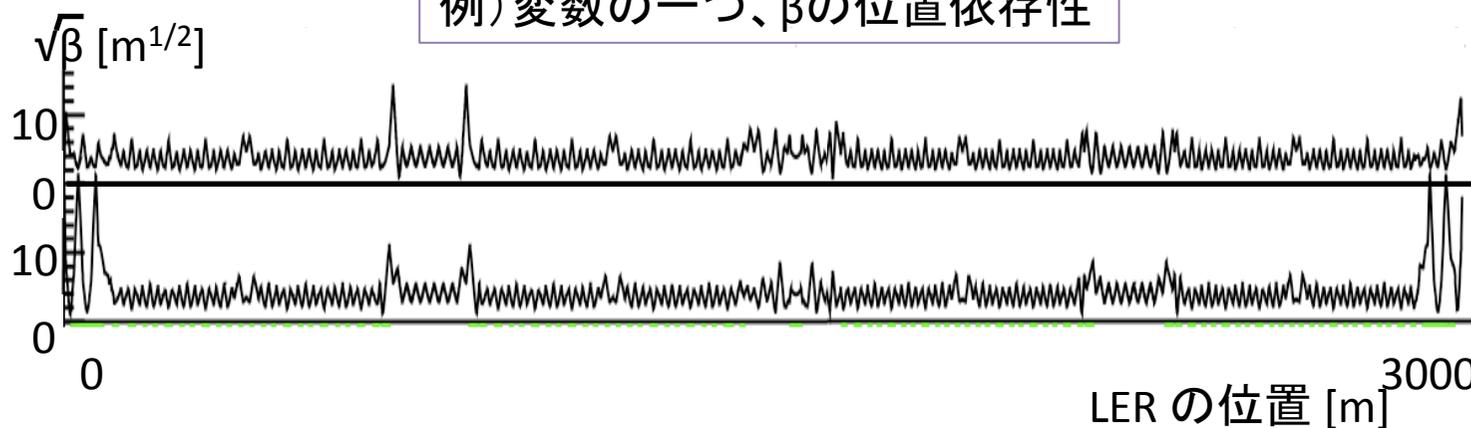
散乱率の誤差はファクター10以内

散乱率

Touschek 効果: $(\text{散乱率}) \propto (\text{電流}) \cdot (\text{密度}) / (\text{エネルギー})^3$

ビーム位置依存の変数が多く、
複雑

例) 変数の一つ、 β の位置依存性



散乱率の計算には1周の平均値を用い、
場所によらず一様とした。

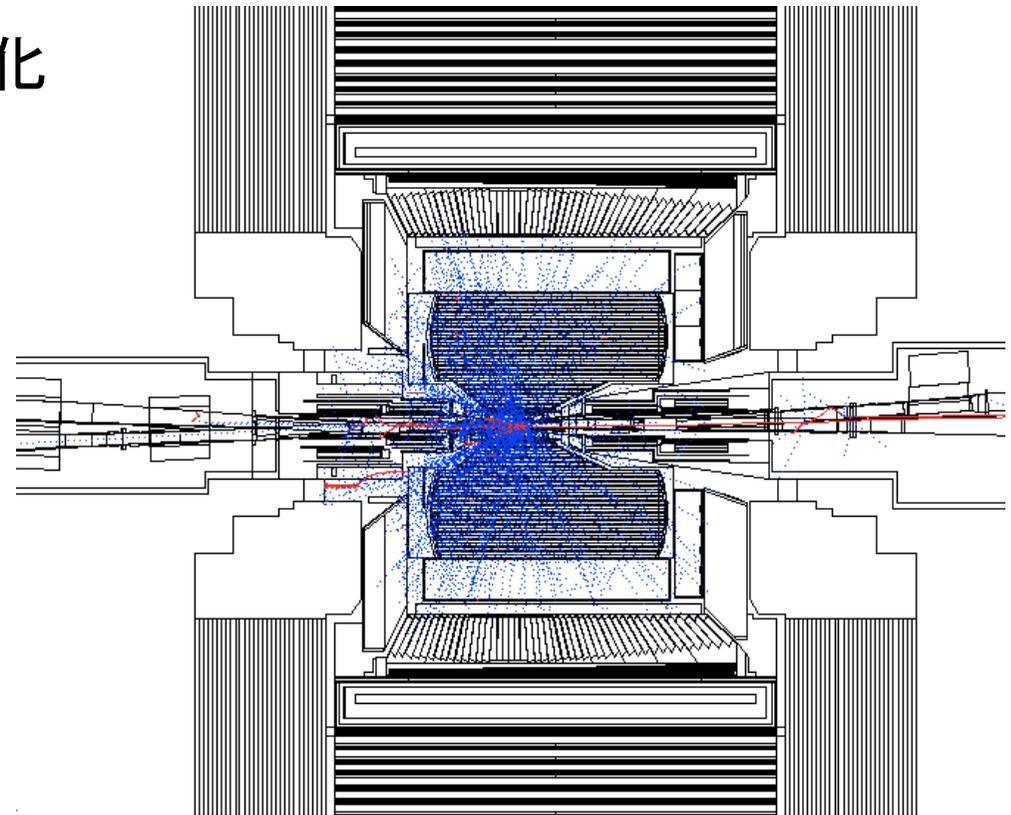
各リング、各散乱に対し1000万回のシミュレーションを行った。

Touschek 散乱

$\pm 0.9 \sim 20\%$ のエネルギー変化

ガス散乱

1 ~ 70% のエネルギー減少
or
0.1 ~ 3.0 mrad の向きの変化



結果について述べる。



シミュレーションで求めた崩壊点検出器の占有率を、ビームテストの値と比較した

※シミュレーション値の誤差は乱数の統計誤差のみ。

最内層の占有率		シミュレーション値	ビームテスト値
LER	Touschek	0.52±0.03 %	0.47±0.07 %
	ガス散乱	0.45±0.05 %	0.19±0.07 %
HER	Touschek	0.083±0.002 %	0.006±0.002 %
	ガス散乱 シンクロトロン光	0.082±0.002 %	0.49±0.003 %

後方散乱シンクロトロン
の寄与は
0.49%のうち0.1~0.4%

ビームテストのデータ解析 (by東大、杉原)

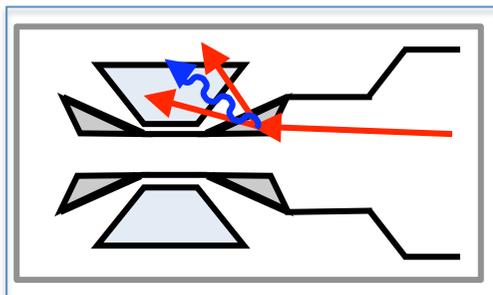
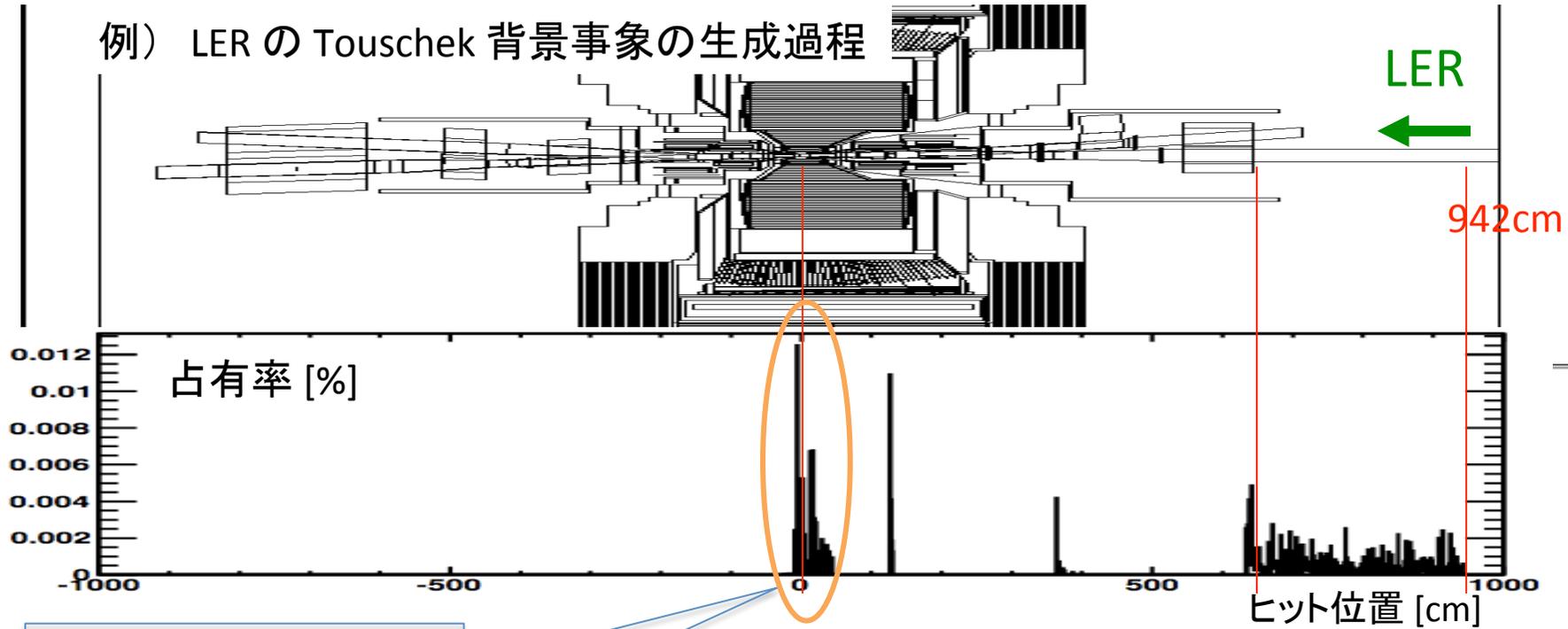
シミュレーションでの背景事象予想の妥当性が確認された

さらに、生成過程の理解を行った。



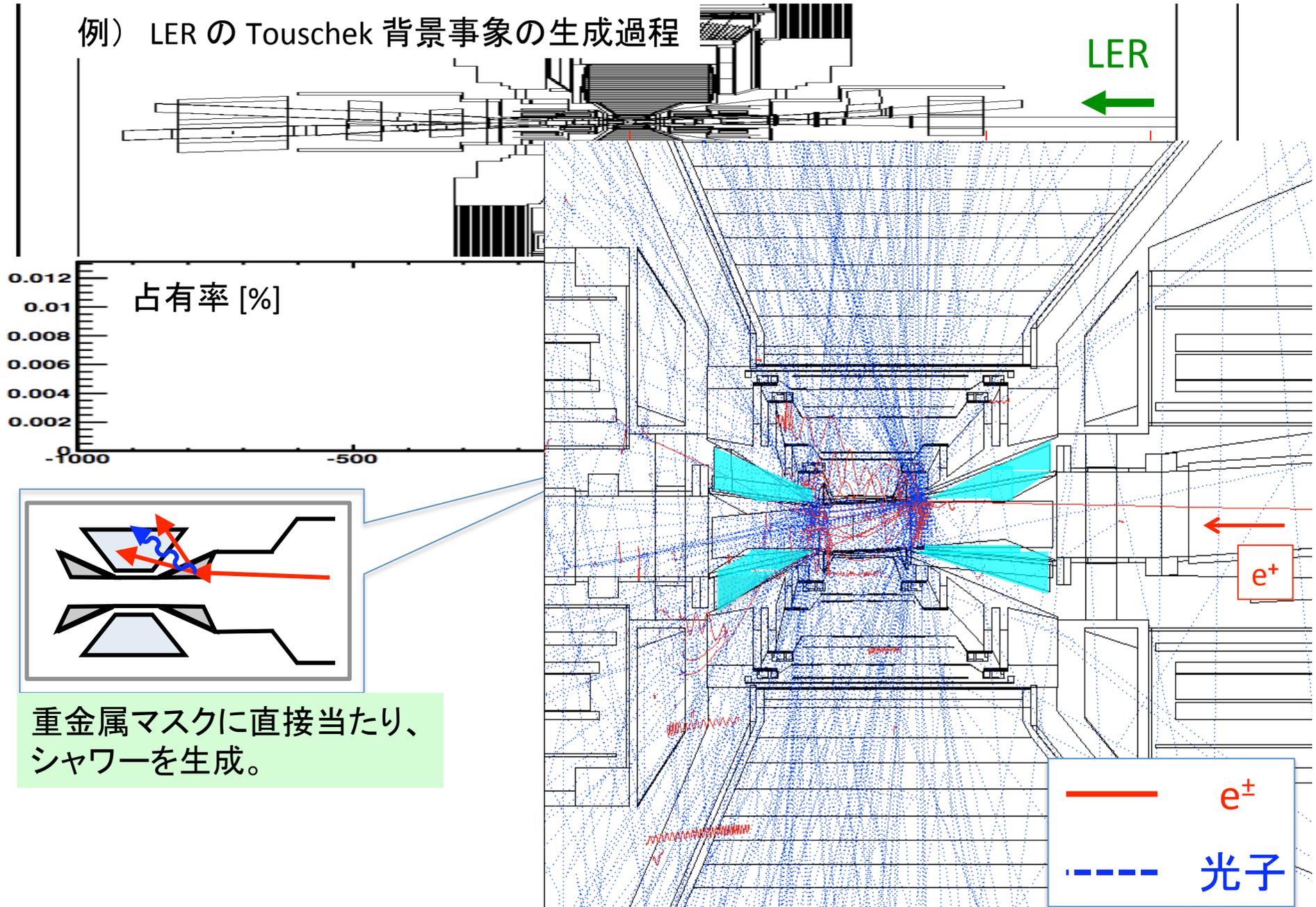
LER Touschek について述べる

例) LER の Toushek 背景事象の生成過程

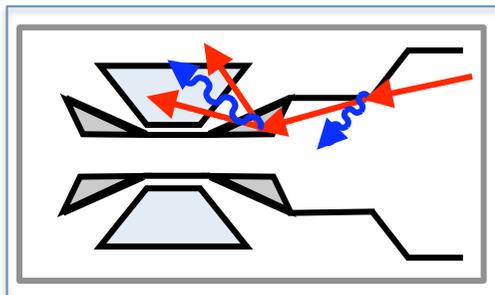
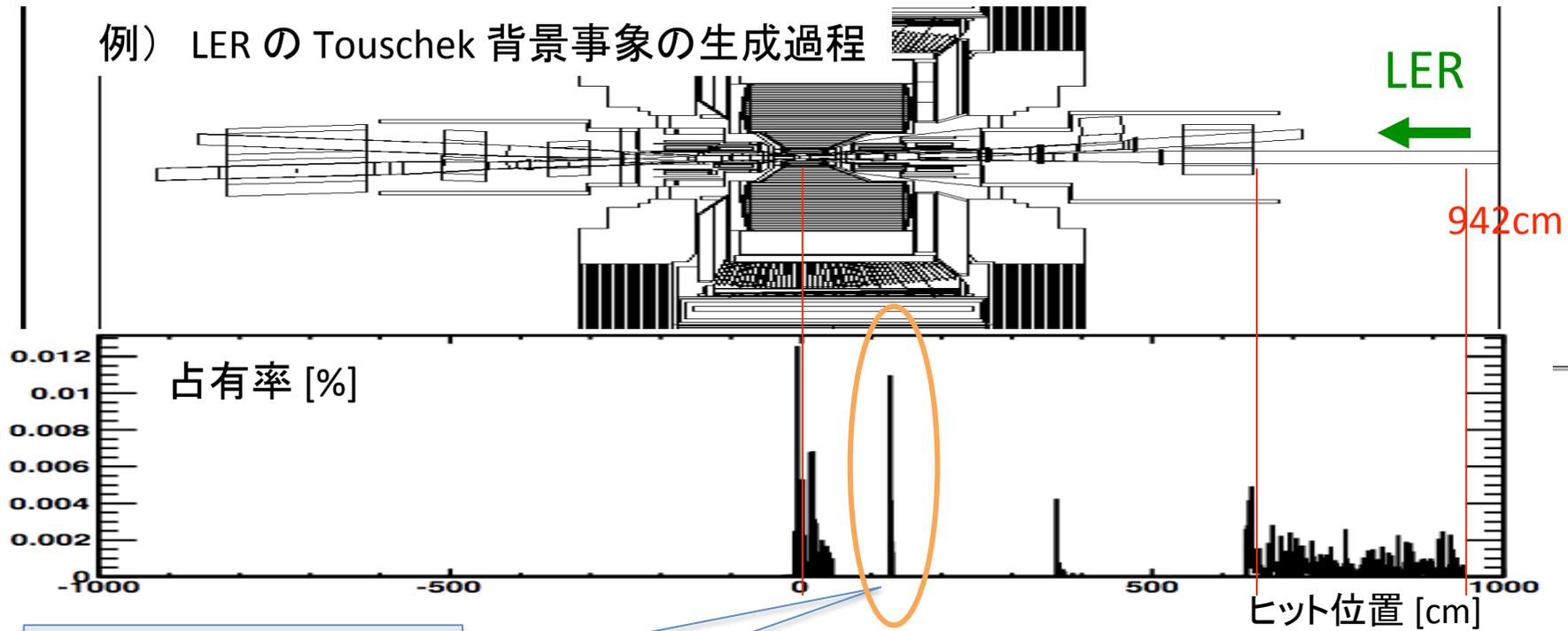


重金属マスクに直接当たり、シャワーを生成。

例) LER の Toushek 背景事象の生成過程

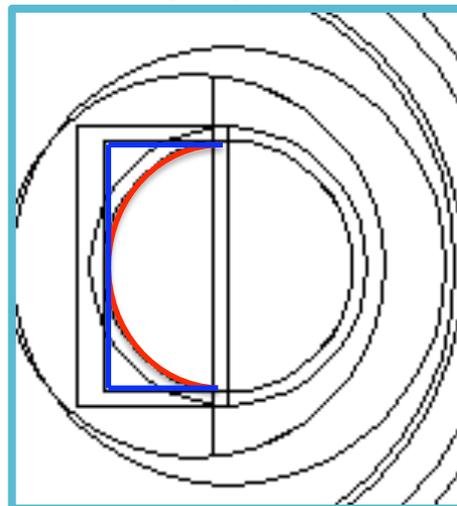


例) LER の Touschek 背景事象の生成過程

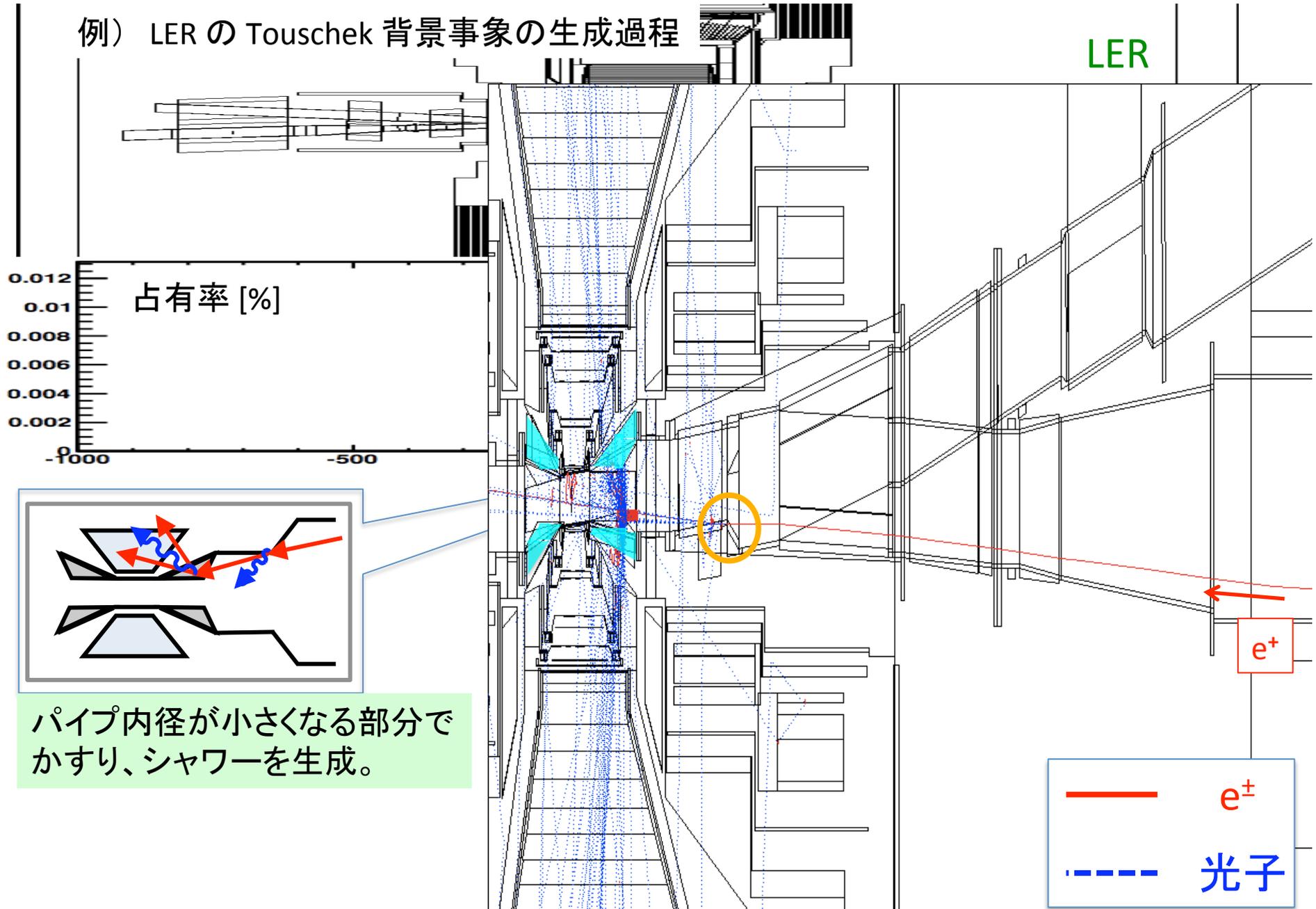


パイプ内径が小さくなる部分で
かすり、シャワーを生成。

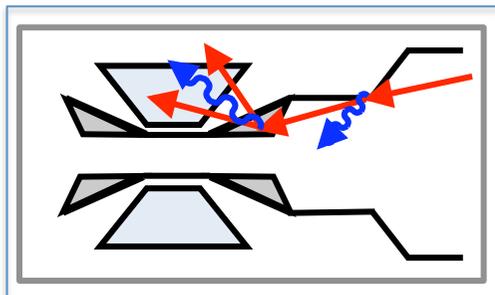
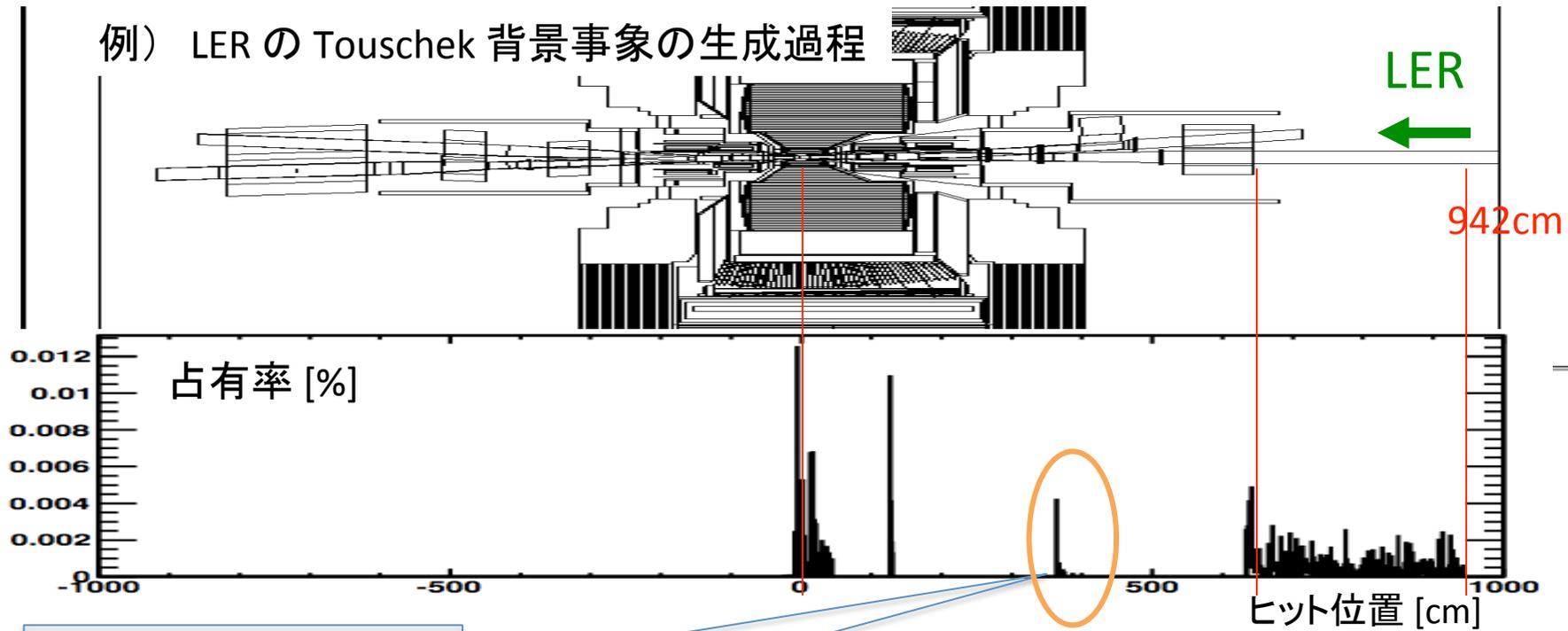
パイプ断面図



例) LER の Touschek 背景事象の生成過程

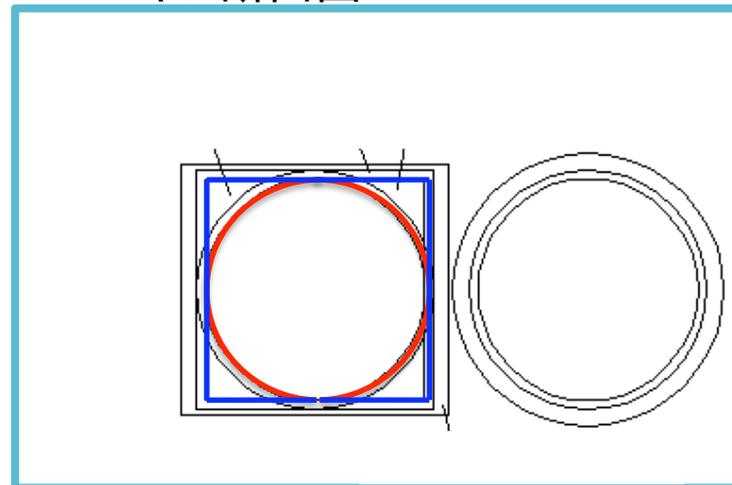


例) LER の Touschek 背景事象の生成過程

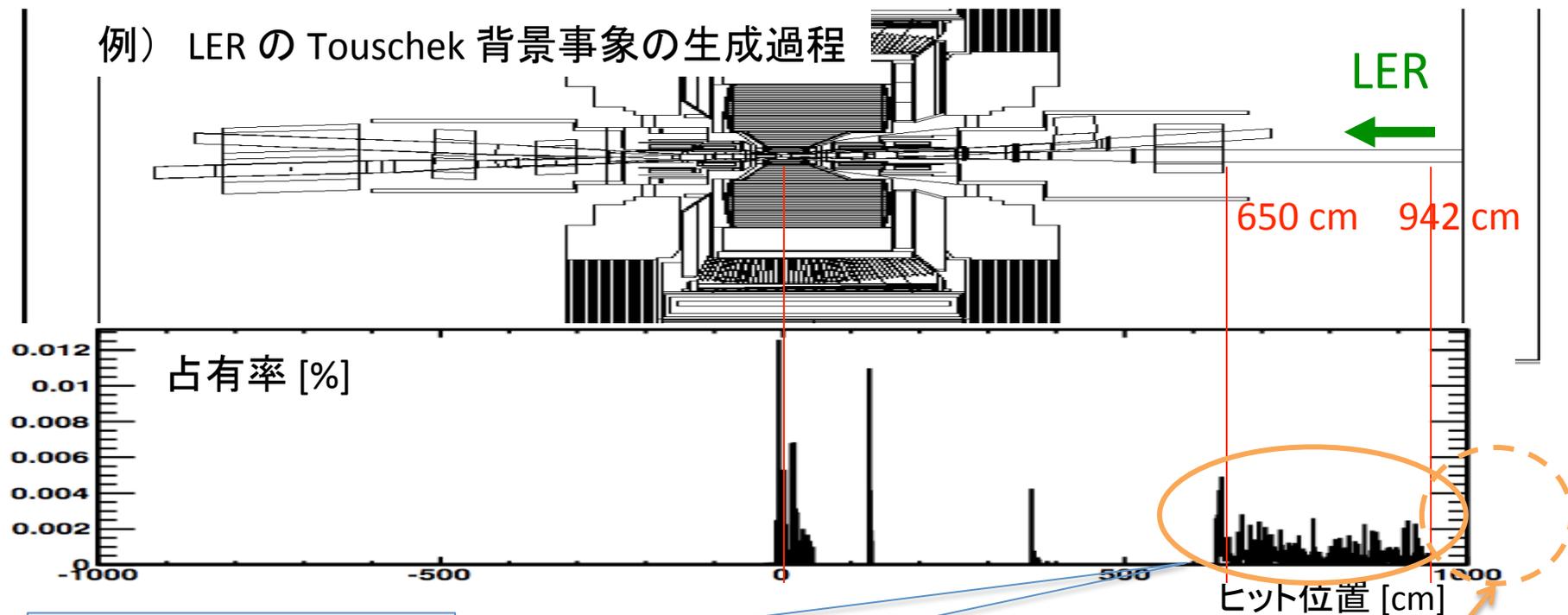


パイプ内径が小さくなる部分で
かすり、シャワーを生成。

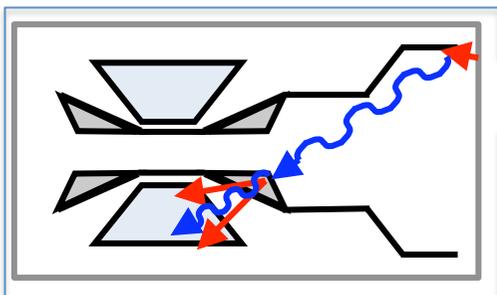
パイプ断面図



例) LER の Touschek 背景事象の生成過程



補正計算を行った。



シャワーの際生じた光子は磁石で曲げられないため、遠くからでもまっすぐ届く。

例) LER の Toushek 背景事象の生成過程

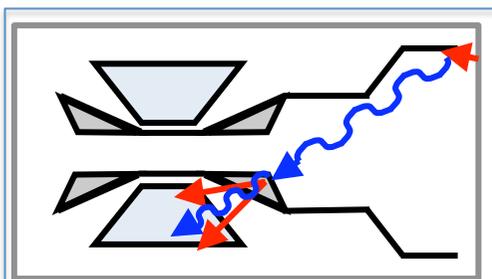
LER



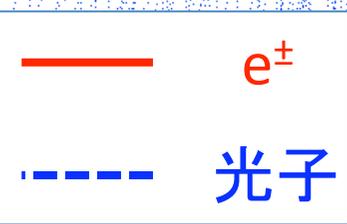
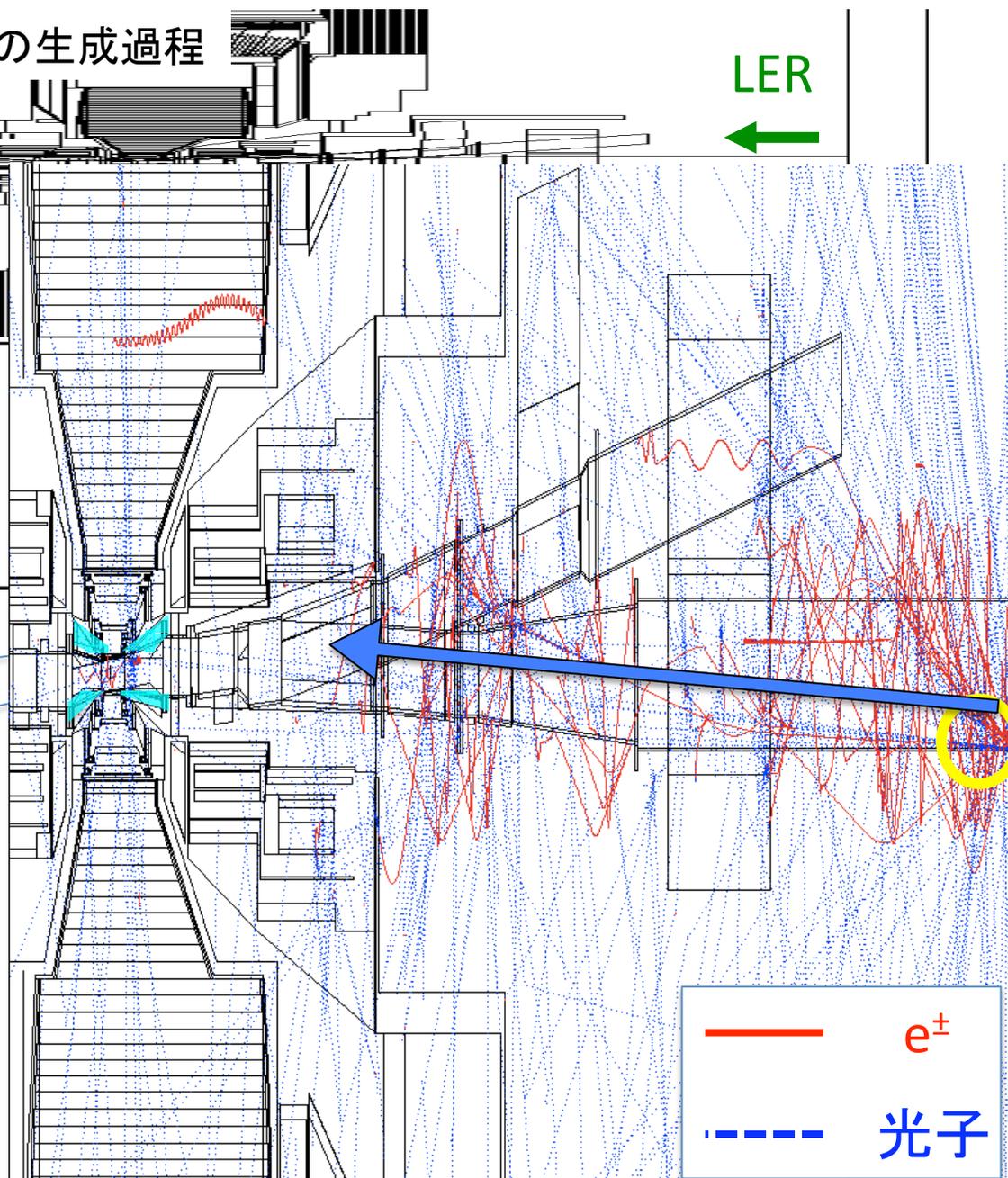
占有率 [%]

0.012
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002

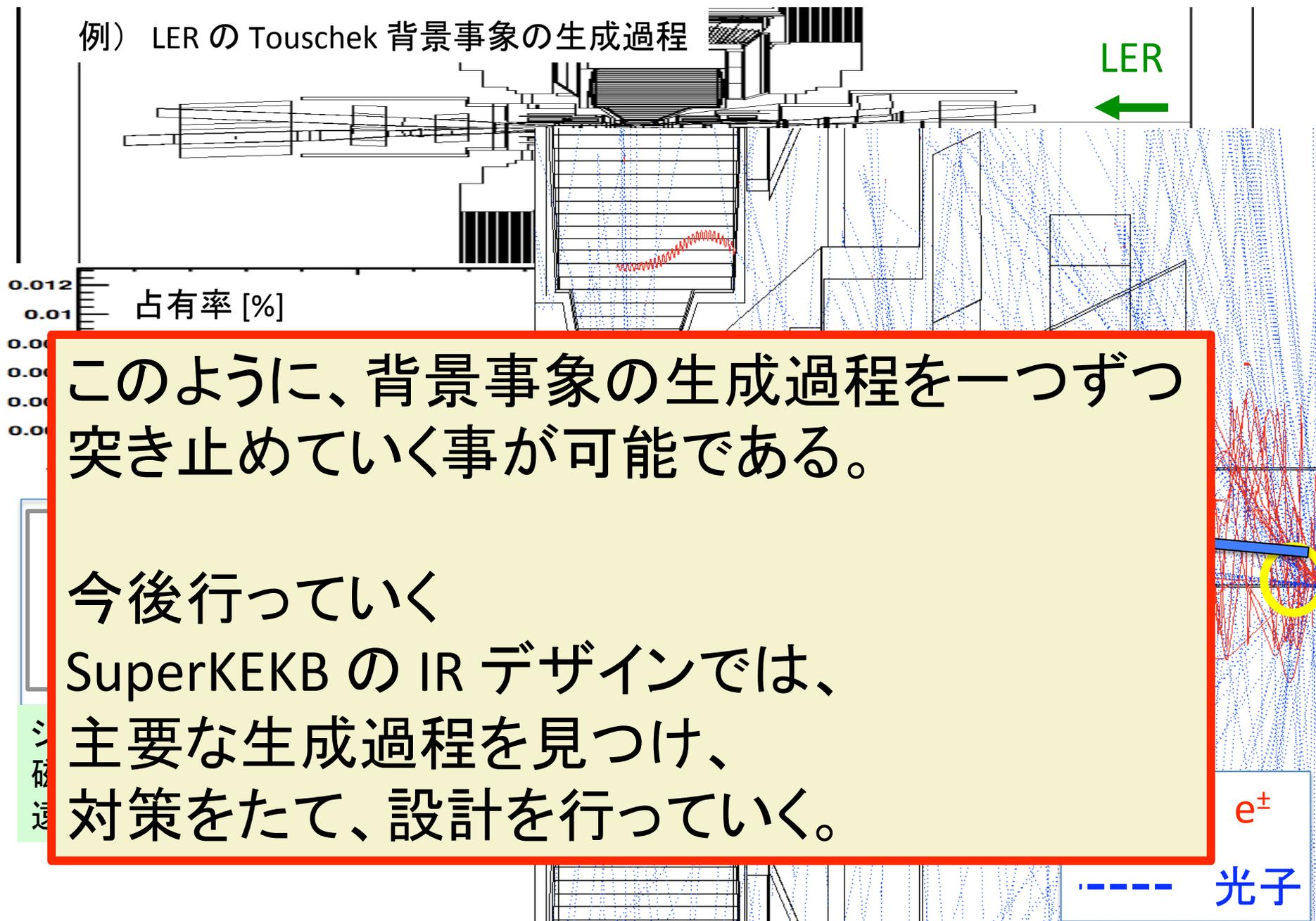
-1000 -500



シャワーの際生じた光子は磁石で曲げられないため、遠くからでもまっすぐ届く。



例) LER の Toushek 背景事象の生成過程



このように、背景事象の生成過程を一つずつ突き止めていく事が可能である。

今後行っていく

SuperKEKB の IR デザインでは、

主要な生成過程を見つけ、

対策をたて、設計を行っていく。

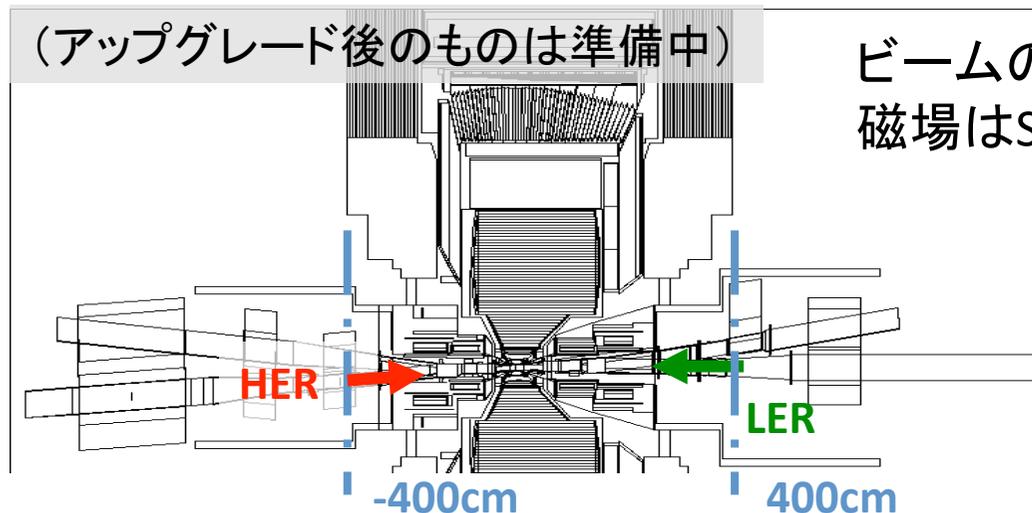
SuperKEKB の IR のシミュレーションの前段階として、
SuperKEKB の光学で作った散乱ビーム粒子を Belle に入射させた

検出器ジオメトリ

現在の Belle のまま

入射する散乱ビーム粒子情報の生成

SuperKEKB のビーム光学データで生成



ビームの入射はKEKBのビームと平行な向き。
磁場はSuperKEKB用に書き換えた。

仮定

ビームパラメータはデザイン値を使用。

リング上流 300 m 以上で散乱されたビームは理想的な可動マスクによって止められる。

圧力はデザイン値の 10^{-7} Pa を使用 (上流 300 m までは圧力の高い領域はない)。

Touschek 散乱率はビームサイズの平均値を使用。

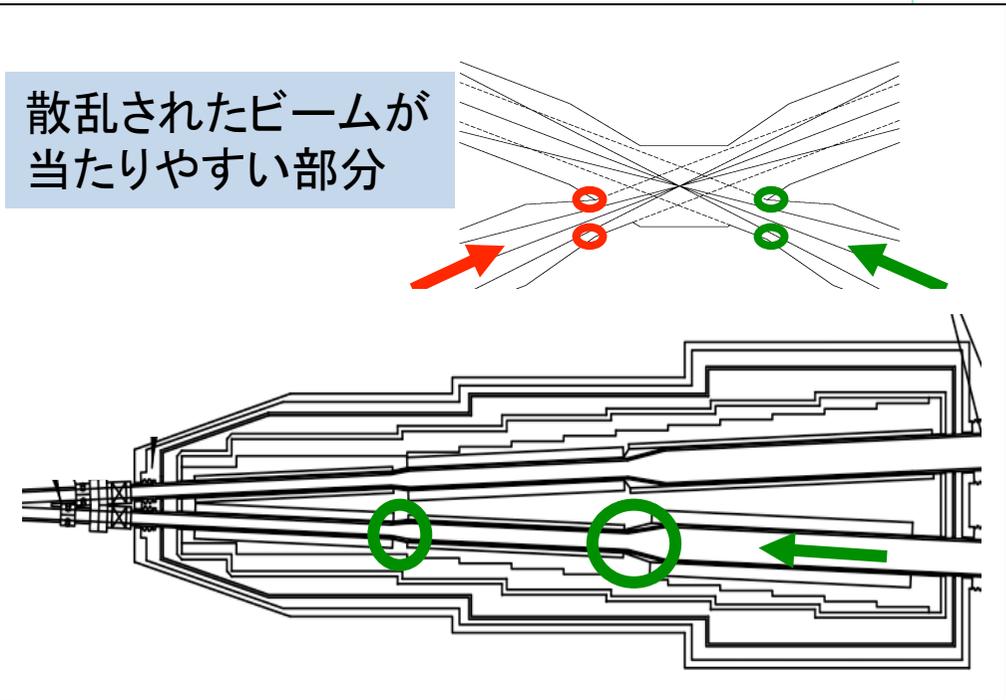
後で述べる

	SuperKEKB 光学	KEKB 光学
最内層の放射量	シミュレーション値	測定値
	1300 ± 150 [krad/yr]	~100 [krad/yr]

背景事象の放射量が
100 krad / yr から 1 Mrad/ yr のオーダーになる

仮定
 ビームパラメータはデザイン値を使用。
 リング上流 300 m 以上で散乱されたビーム
 圧力はデザイン値の 10^{-7} Pa を使用 (上流)
 Touschek 散乱率はビームサイズの平均値

SuperKEKB 光学	
最内層の放射量	シミュレーション値
	1300 ± 150



背景事象の放射量が
 100 krad / yr から 1 Mrad/ yr のオーダー

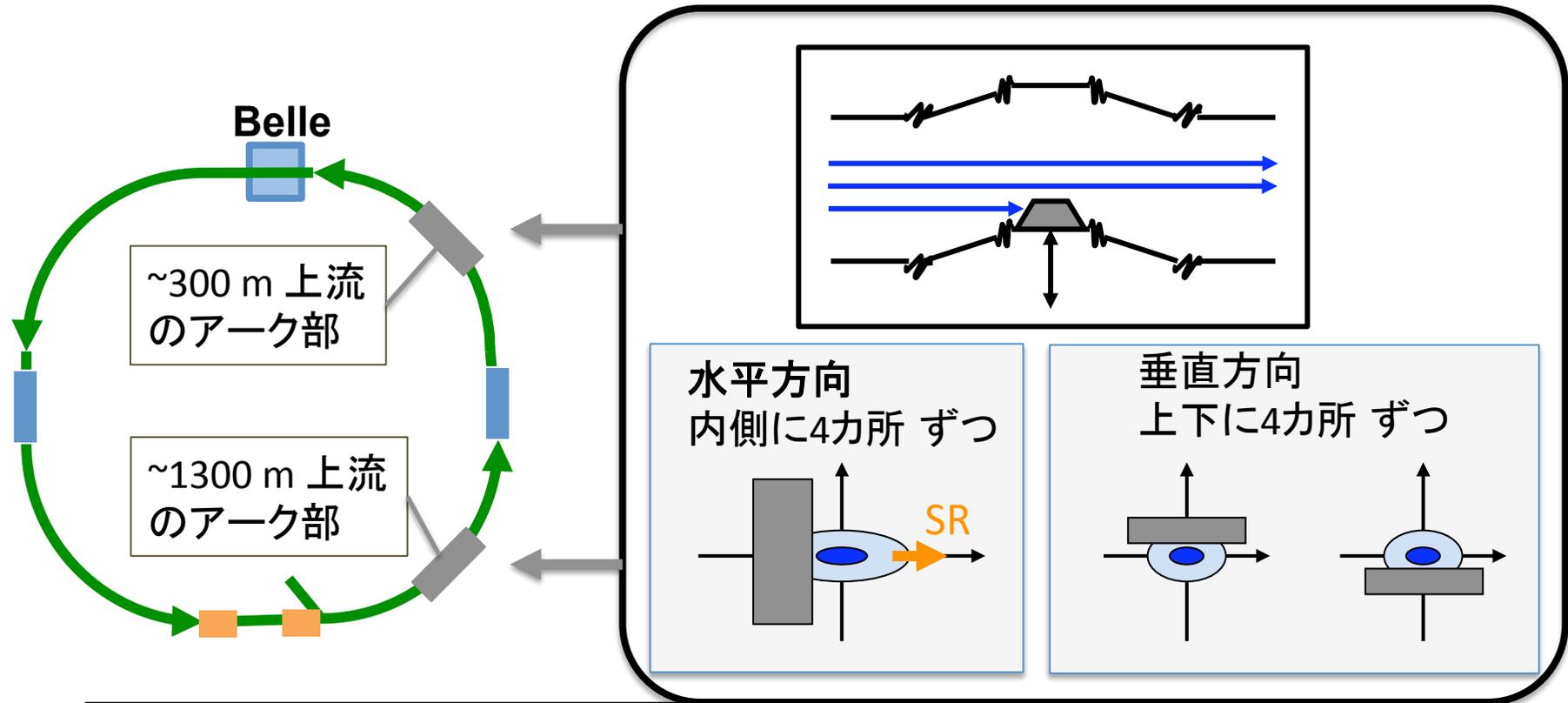
KEKB のジオメトリではなく、SuperKEKB のジオメトリにした場合どうなるか

・パイプ径が細くなる

・重金属マスクのスペースの減少

この見積もりよりも深刻な背景事象量が予想される

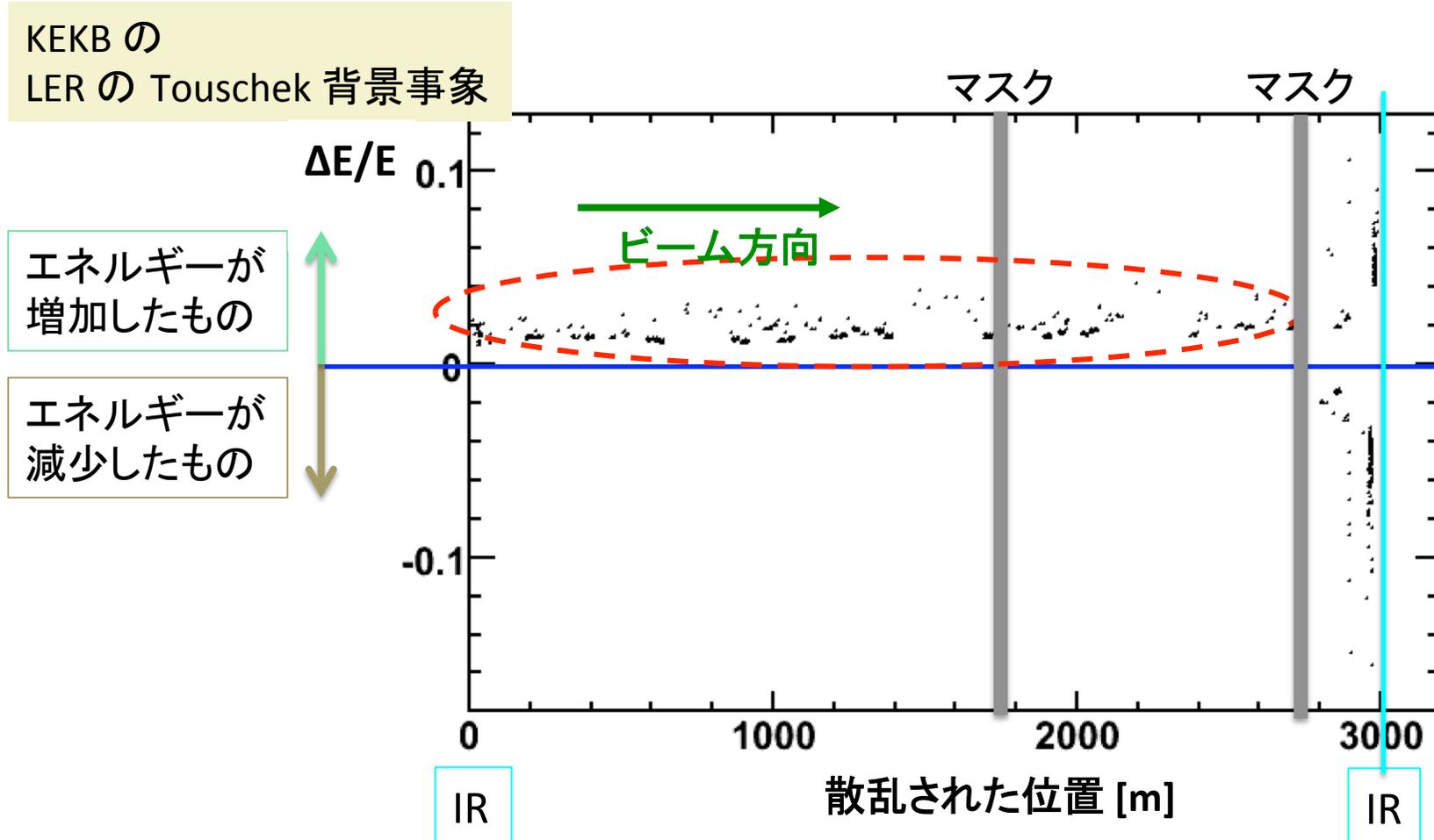
KEKB リング上には
タウシェック効果やガス散乱による背景事象を抑えるため
可動マスクが設置されている



可動マスクの働きをシミュレーションで評価した

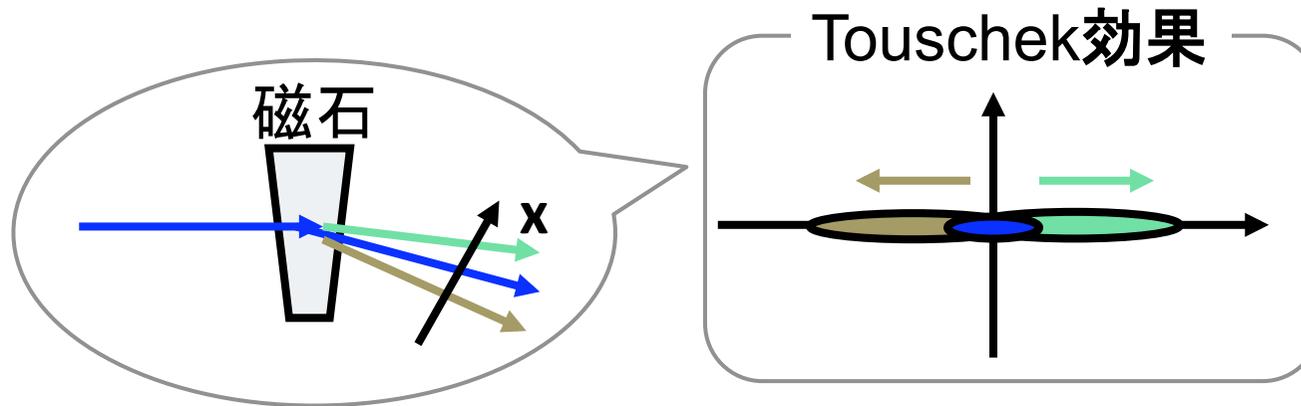
KEKBの

背景事象に寄与した粒子がどこで散乱されたのか調べた



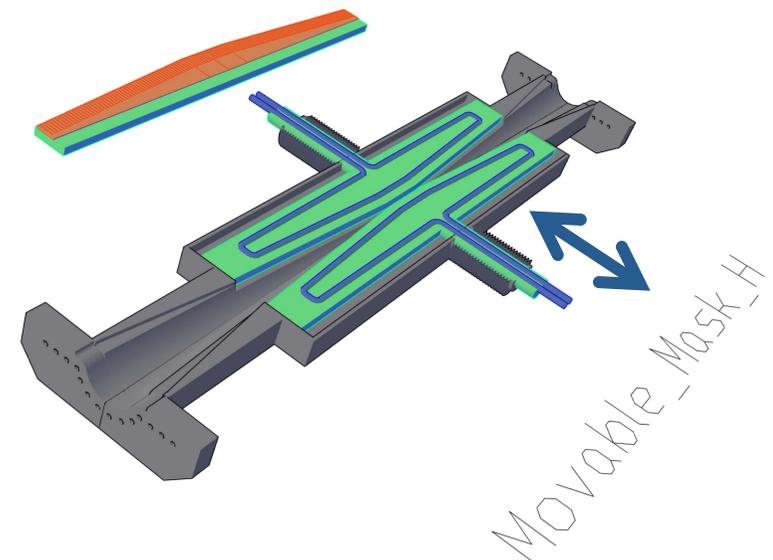
タウシェック効果でエネルギーが増加したビーム粒子は可動マスクによってとめられていない。

エネルギーが増加したビーム粒子がとめられていない理由



エネルギーの高い粒子は外側に分布する
外側にはマスクはついていない

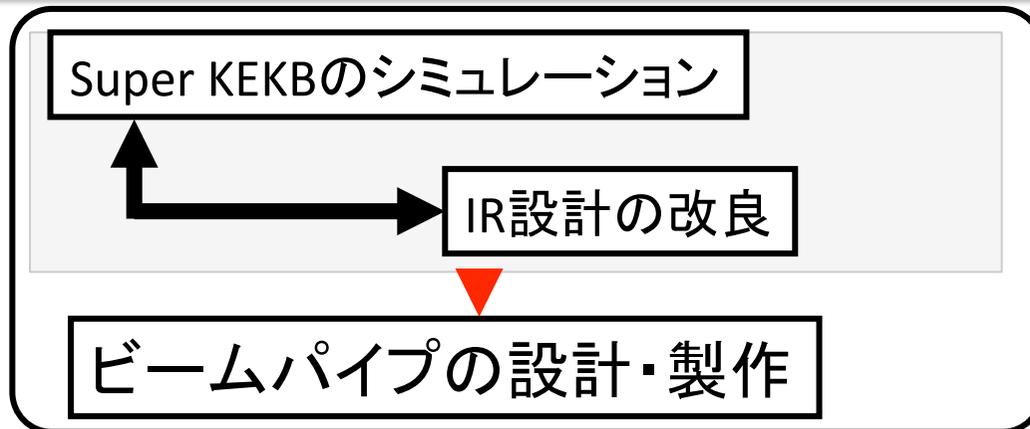
この結果に基づき、
Tauschek背景事象を抑えるため、
外側にも水平マスクを取り付けるべき
という方向で検討されている。



- ・SuperKEKB アップグレード計画が進行中
- ・電流、ビーム密度の増加により、ビーム由来の背景事象の増加が問題となる
- ・KEKBのシミュレーションを行い、ビームテスト値と比較した

シミュレーションを用いたバックグラウンドの予想の妥当性を確認
 背景事象の生成過程を理解し、対処していくことが可能

外側にも水平マスクを取り付けるべき



今後、IR設計を進めていく

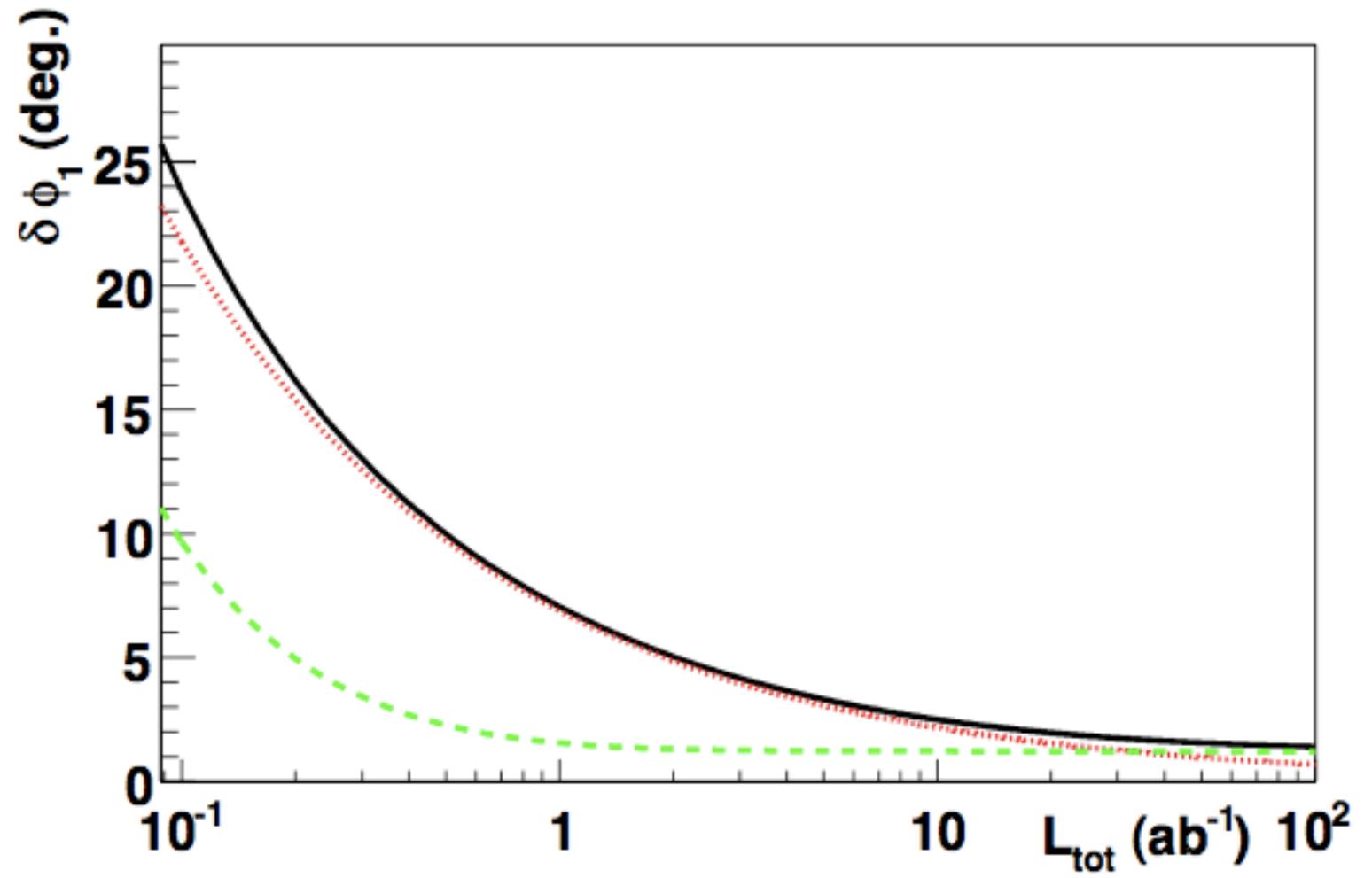
このページ以降 Back up

$$P(s) \propto \sigma_e e^{-e^{-\frac{N}{\sigma_x(s)\sigma_y(s)}\Delta s}}$$

Rにおおよそ比例する値がどの程度異なってくるか。

$$\frac{1}{\sqrt{\bar{\beta}_{xi}\bar{\beta}_{yi}}} \quad \frac{1}{\sqrt{22.93 \times 17.16}} = 0.0504$$

$$\sum \frac{L_i/3016}{\sqrt{\beta_{xi}\beta_{yi}}} \quad 0.0783$$

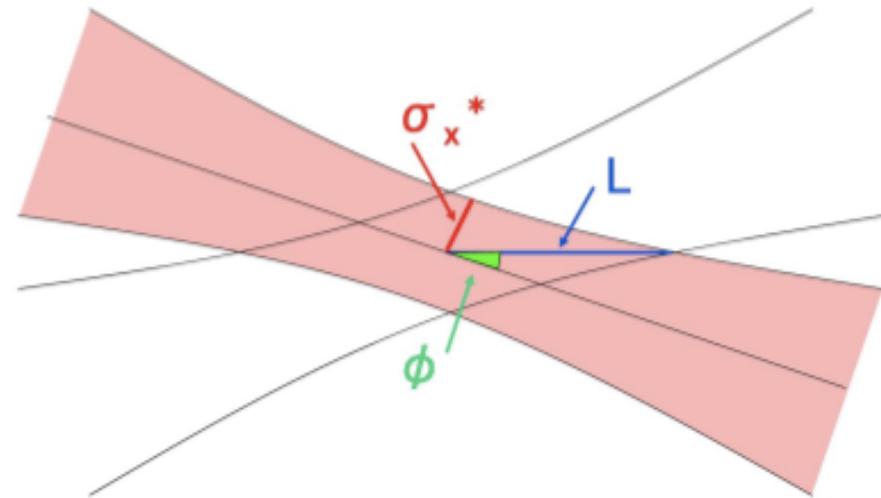


layer 1 dose [krad/yr]		simulation	data
LER	Touschek	10.5 ± 0.6	
	Coulomb	7.6 ± 1.0	
	brems	1.24 ± 0.02	
HER	Touschek	2.60 ± 0.05	
	Coulomb	0.98 ± 0.04	
	brems	1.60 ± 0.03	
Total		24.5 ± 1.2	100 ~ 200

		layer 1
LER	Touschek	1060 ± 150
	Coulomb	150 ± 10
	brems	1.6 ± 0.2
HER	Touschek	0.02 ± 0.02
	Coulomb	102 ± 6
	brems	5.8 ± 0.4
Total		1300 ± 150

$$\sigma_z \gtrsim \beta_{x,y}^*$$

で、hourglass 効果が顕著



しかし、effectiveなバンチ長 L が

$$\beta^* \gtrsim L$$

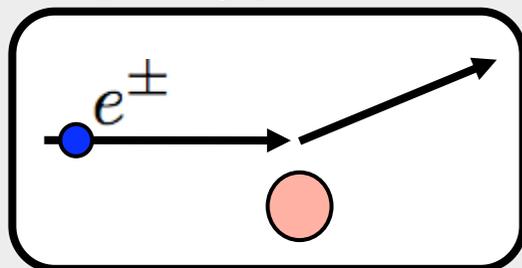
なら、OK

LER/HER	KEKB Design	KEKB with crab	SuperKEKB Nano-Beam
β_y^* (mm)	10/10	5.9/5.9	0.27/0.30
β_x^* (mm)	330/330	1200/1200	32/25
σ_z (mm)	4	~ 6	6/5
2ϕ (rad)	22	22	83

ガス散乱 (ビームパイプ内の残留ガスに散乱される)

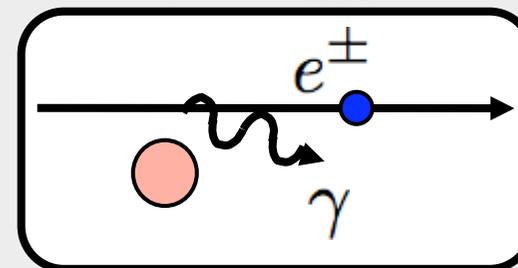
クーロン散乱

向きが変化



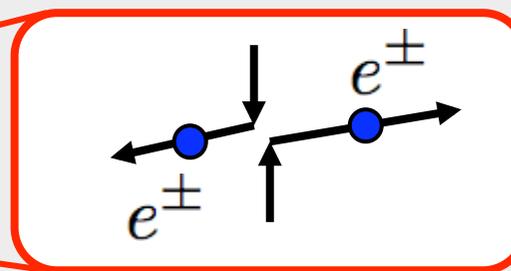
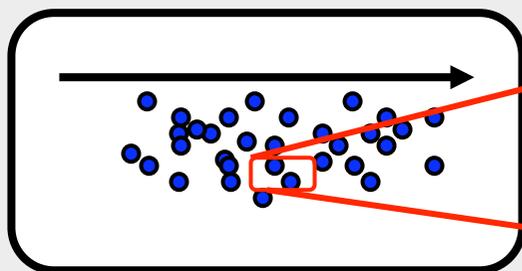
制動輻射

エネルギーが減少



Touschek 効果

エネルギーが減少するもの、
増加するもの、対で生じる



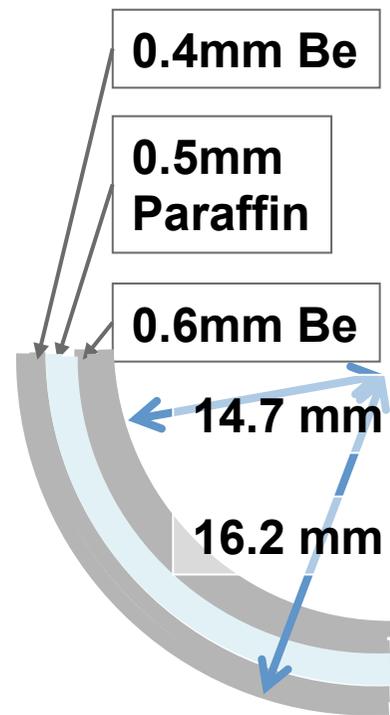
散乱

軌道を外れ

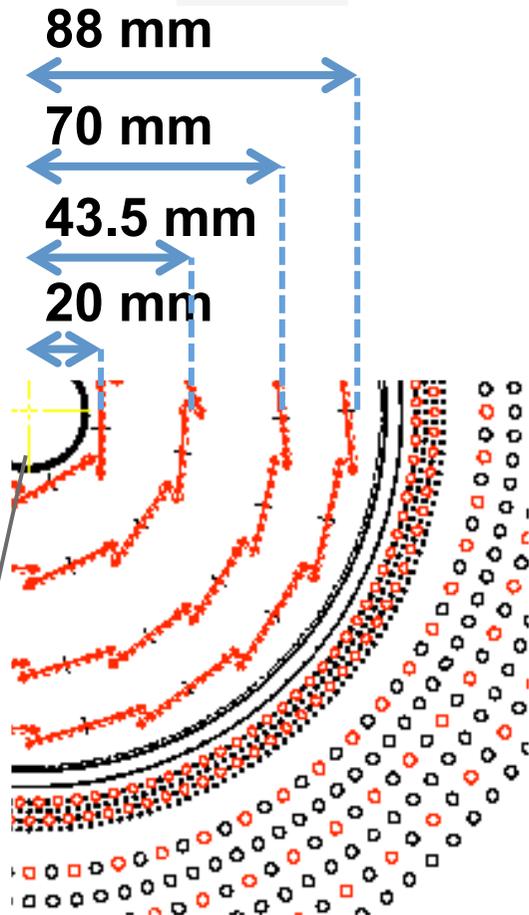
ビームパイプに当たり

背景事象になる

IP beam pipe



SVD



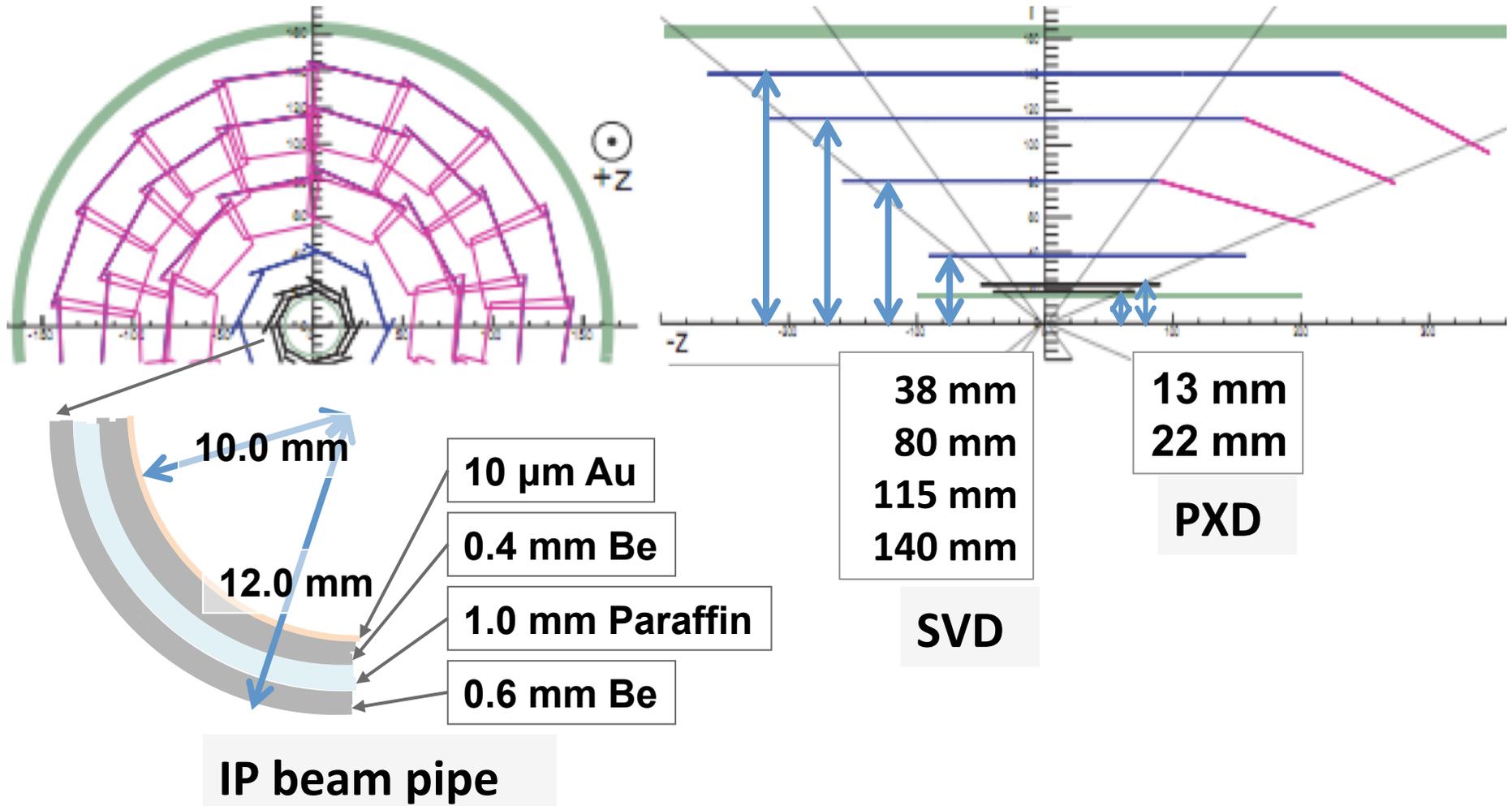
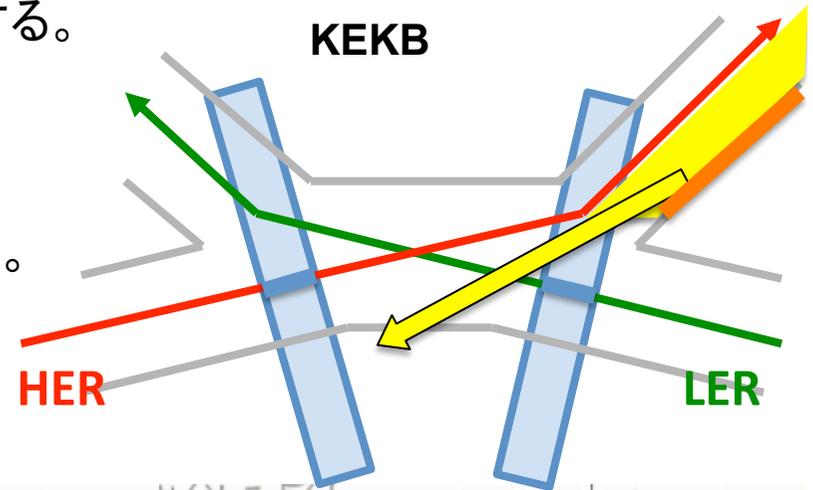


Table 3.1: Beam parameters of KEKB and SuperKEKB [7]

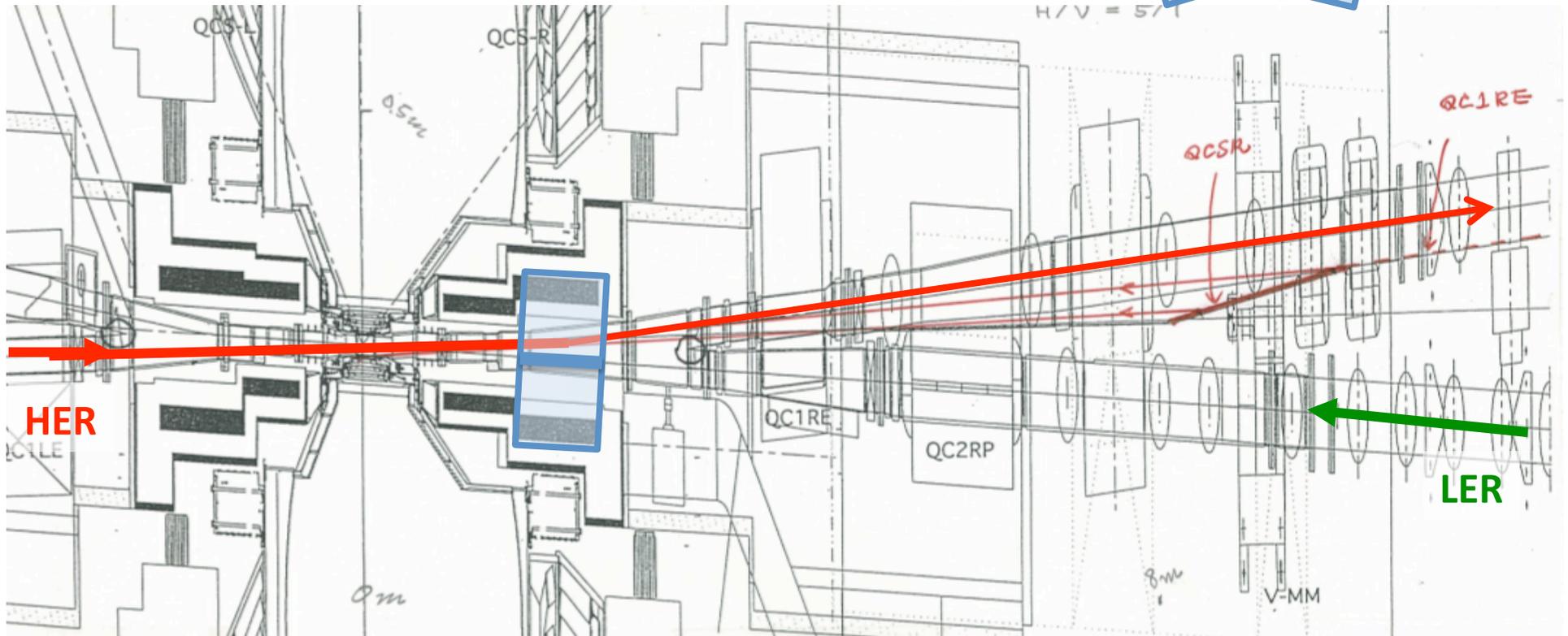
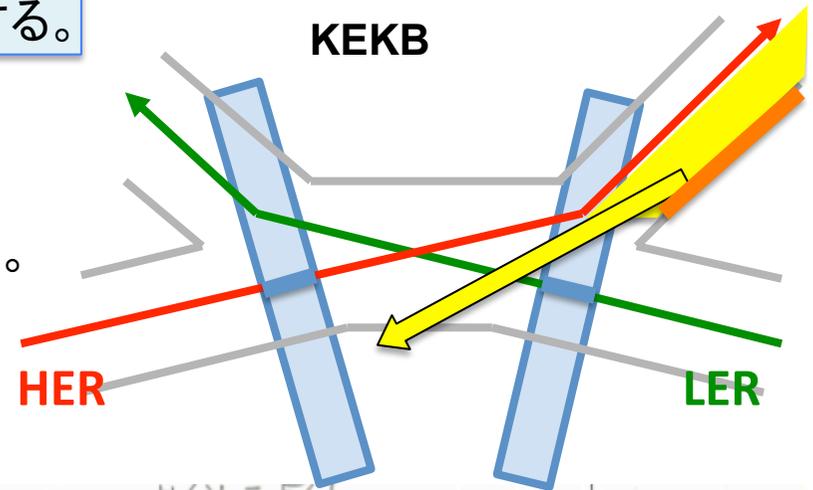
LER/HER	KEKB Design	KEKB with crab	SuperKEKB Nano-Beam
Energy (GeV)	3.5/8.0	3.5/8.0	4.000/7.007
β_y^* (mm)	10/10	5.9/5.9	0.27/0.30
β_x^* (mm)	330/330	1200/1200	32/25
ϵ_x (nm)	18/18	18/24	3.2/4.3
σ_y^* (μm)	1.9	0.94	0.048/0.063
σ_x^* (μm)	77/77	147/170	10/10
ξ_y	0.052	0.129/0.090	0.0869/0.0807
σ_z (mm)	4	~ 6	6/5
2ϕ (rad)	22	22	83
I_{beam} (A)	2.6/1.1	1.64/1.19	3.6/2.6
$N_{bunches}$	5000	1584	2500
\mathcal{L} ($10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	1	2.11	80

$$\xi_{y,+} \equiv \frac{r_e N_- \beta_{y,+}^*}{2\pi \gamma_- \sigma_{y,-}^* (\sigma_{x,-}^* + \sigma_{y,-}^*)} R_{\xi_y}$$

- 1) 最終四極磁石は IR から出て行くビームをキックする。
- 2) キックされたビームはシンクロトン光を出す。
- 3) シンクロトン光が下流で反射し、IR に戻ってくる。



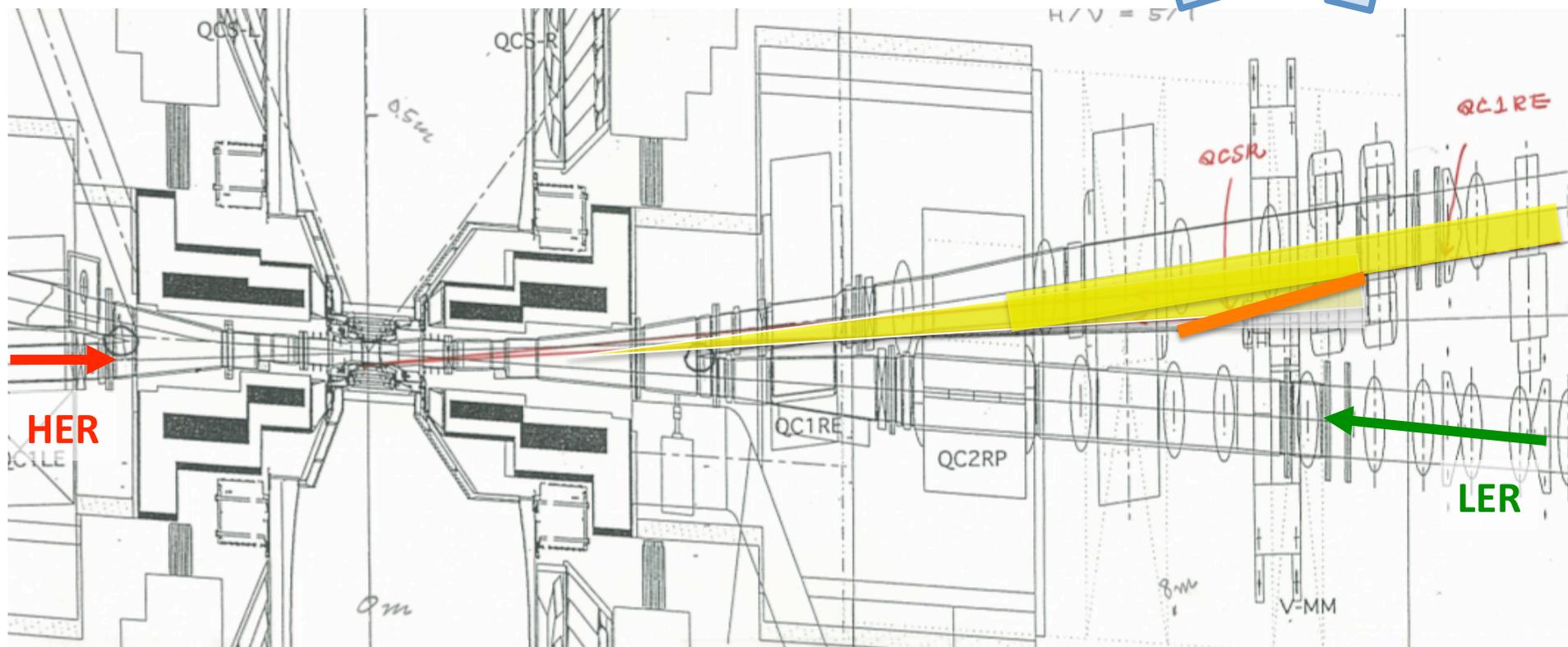
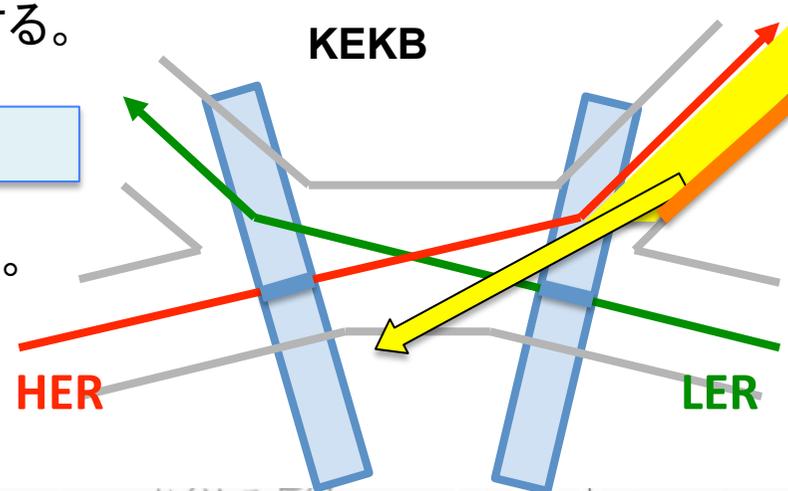
- 1) 最終四極磁石は IR から出て行くビームをキックする。
- 2) キックされたビームはシンクロトン光を出す。
- 3) シンクロトン光が下流で反射し、IR に戻ってくる。



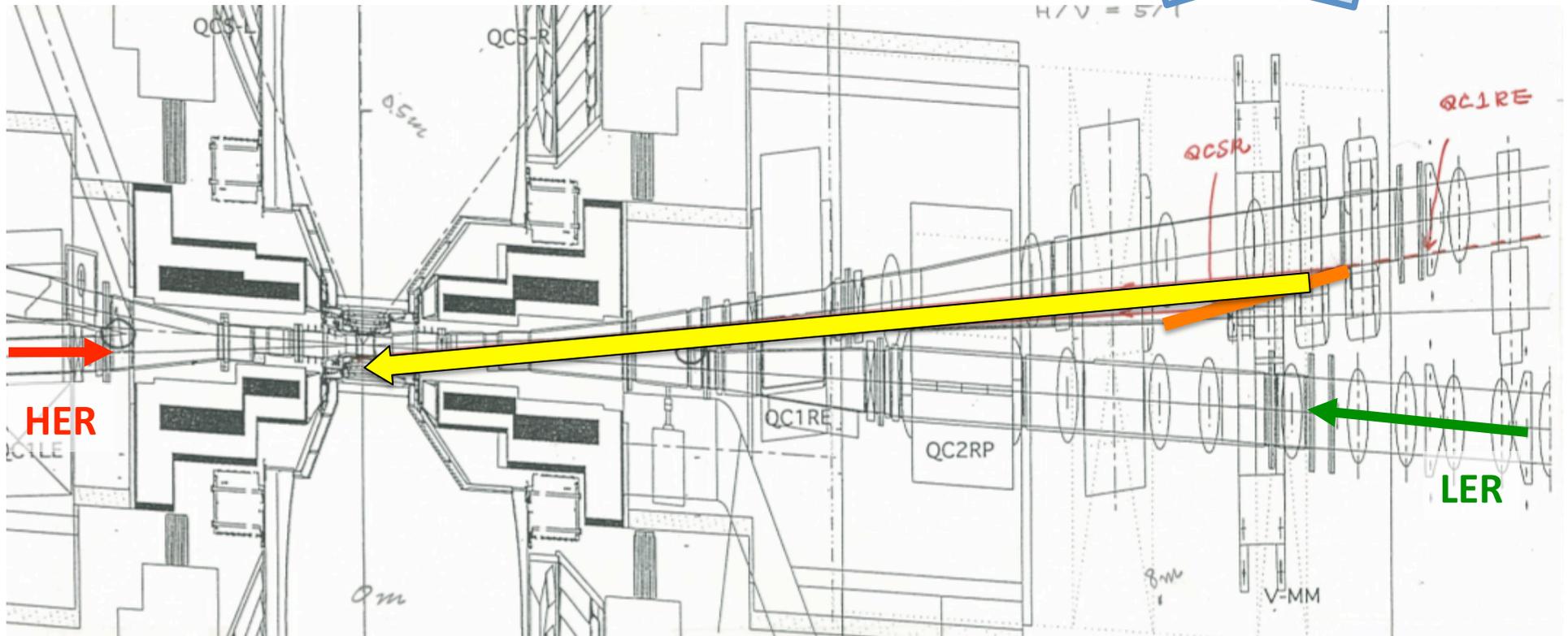
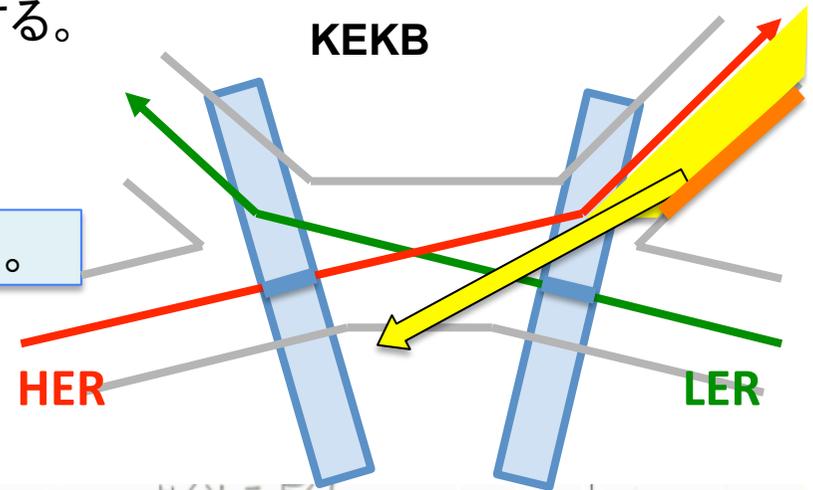
1) 最終四極磁石は IR から出て行くビームをキックする。

2) キックされたビームはシンクロトン光を出す。

3) シンクロトン光が下流で反射し、IR に戻ってくる。



- 1) 最終四極磁石は IR から出て行くビームをキックする。
- 2) キックされたビームはシンクロtron光を出す。
- 3) シンクロtron光が下流で反射し、IR に戻ってくる。



A. Piwinski. The touschek effect in strong focusing storage rings, Mar 1999.

$$R_{\text{Tous}} = \frac{r_p^2 c \beta_x \beta_y \sigma_h N_p^2}{8 \sqrt{\pi} \beta^2 \gamma^4 \sigma_x^2 \sigma_y^2 \sigma_z \sigma_p} \int_{\tau_m}^{\infty} d\tau \left\{ \left(2 + \frac{1}{\tau} \right)^2 \left(\frac{\tau/\tau_m}{1+\tau} - 1 \right) \right. \\ \left. + 1 - \sqrt{\frac{1+\tau}{\tau/\tau_m}} - \frac{1}{2\tau} \left(4 + \frac{1}{\tau} \right) \ln \frac{\tau/\tau_m}{1+\tau} \right\} e^{-B_1 \tau} I_0(B_2 \tau) \sqrt{\frac{\tau}{1+\tau}}.$$

$$\frac{1}{\sigma_h^2} = \frac{1}{\sigma_p^2} + \frac{D_x^2 + \tilde{D}_x^2}{\sigma_x^2} + \frac{D_y^2 + \tilde{D}_y^2}{\sigma_y^2}$$

$$B_1 = \frac{\beta_x^2}{2\beta^2 \gamma^2 \sigma_x^2} \left(1 + \frac{\sigma_h^2 \tilde{D}_x^2}{\sigma_x^2} \right) + \frac{\beta_y^2}{2\beta^2 \gamma^2 \sigma_y^2} \left(1 + \frac{\sigma_h^2 \tilde{D}_y^2}{\sigma_y^2} \right)$$

$$B_2 = \frac{1}{4\beta^4 \gamma^4} \left(\frac{\beta_x^2}{\sigma_x^2} \left(1 - \frac{\sigma_h^2 \tilde{D}_x^2}{\sigma_x^2} \right) - \frac{\beta_y^2}{\sigma_y^2} \left(1 - \frac{\sigma_h^2 \tilde{D}_y^2}{\sigma_y^2} \right) \right)^2 + \frac{\sigma_h^4 \beta_x^2 \beta_y^2 \tilde{D}_x^2 \tilde{D}_y^2}{\beta^4 \gamma^4 \sigma_x^4 \sigma_y^4}$$

$$\tau_m = \beta^2 \delta_m^2$$

$$\tilde{D}_{x,y} = \alpha_{x,y} D_{x,y} + \beta_{x,y} D'_{x,y}$$

S K Sahu T E Browder, editor. *Proceedings of the Second Workshop on BACK-
GROUNDS AT THE MACHINE-DETECTOR INTERFACE.* World Scientific,
(1998)

$$\frac{d\sigma_{\text{coul}}}{d\Omega} = \frac{Z^2\alpha^2}{4\beta^2|\vec{p}|^2\sin^4\frac{\theta}{2}}$$

$$\frac{d\sigma_{\text{brem}}}{d\epsilon} = \frac{r_0^2\alpha Z[Z + \xi(Z)]}{\epsilon} \left\{ [1 + (1 - \epsilon)^2][\Phi_1(\delta) - F(Z)] - \frac{2}{3}(1 - \epsilon)[\Phi_2(\delta) - F(Z)] \right\}$$

$$\delta = \frac{136m_e}{Z^{1/3}E} \cdot \frac{\epsilon}{1 - \epsilon}$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 &= 20.867 - 3.242\delta + 0.625\delta^2 \\ \Phi_2 &= 20.209 - 1.930\delta - 0.086\delta^2 \end{aligned} \right\} \text{for } \delta \leq 1$$

$$\Phi_1 = \Phi_2 = 21.12 - 4.184\ln(\delta + 0.952) \quad \text{for } \delta > 1$$

$$F(Z) = \begin{cases} 4/3\ln ZE < 0.05 \text{ GeV} \\ 4/3\ln Z + 4f_c(Z)E \geq 0.05 \text{ GeV} \end{cases}$$

$$\xi(Z) = \frac{\ln(1440/Z^{2/3})}{\ln(183/Z^{1/3}) - f_c(Z)}$$

$$f_c(Z) = Z\alpha \left\{ \frac{1}{1 + Z\alpha} + 0.20206 - 0.0369Z\alpha + 0.0083(Z\alpha)^2 - 0.002(Z\alpha)^3 \right\}$$

