

KEKB, SuperKEKB 加速器と 衝突点付近の構造

東北大学 D1

中野浩至

目次

加速器

加速器について

現在、 $e+e^-$ 衝突器で世界最高のルミノシティを誇る KEKB 加速器について

- ・KEKB 加速器
- ・いかにルミノシティを上げてきたか
- ・SuperKEKB へのアップグレード

IR

衝突点付近 (IR) の構造

- ・各部分の説明
- ・アップグレードで変わること

加速器について

KEKB 加速器の目的

目的:

B中間子をたくさんつくり、崩壊をBelle検出器で測定すること

重心エネルギー $2\sqrt{E_+ E_-} = 10.58 \text{ GeV}$ でBB対がたくさん作られる

E_+ : e^+ ビームのエネルギー
 E_- : e^- ビームのエネルギー

BBペアの崩壊の時間差を知る事が、
物理の理解に重要。

時間差 → 崩壊位置の差

これを測定するため、エネルギーが非対称。



$$E_+ = 3.5 \text{ GeV}$$

$$E_- = 8.0 \text{ GeV}$$

このために KEKB/Belle が作られた

あと、PEP-II/Babar も

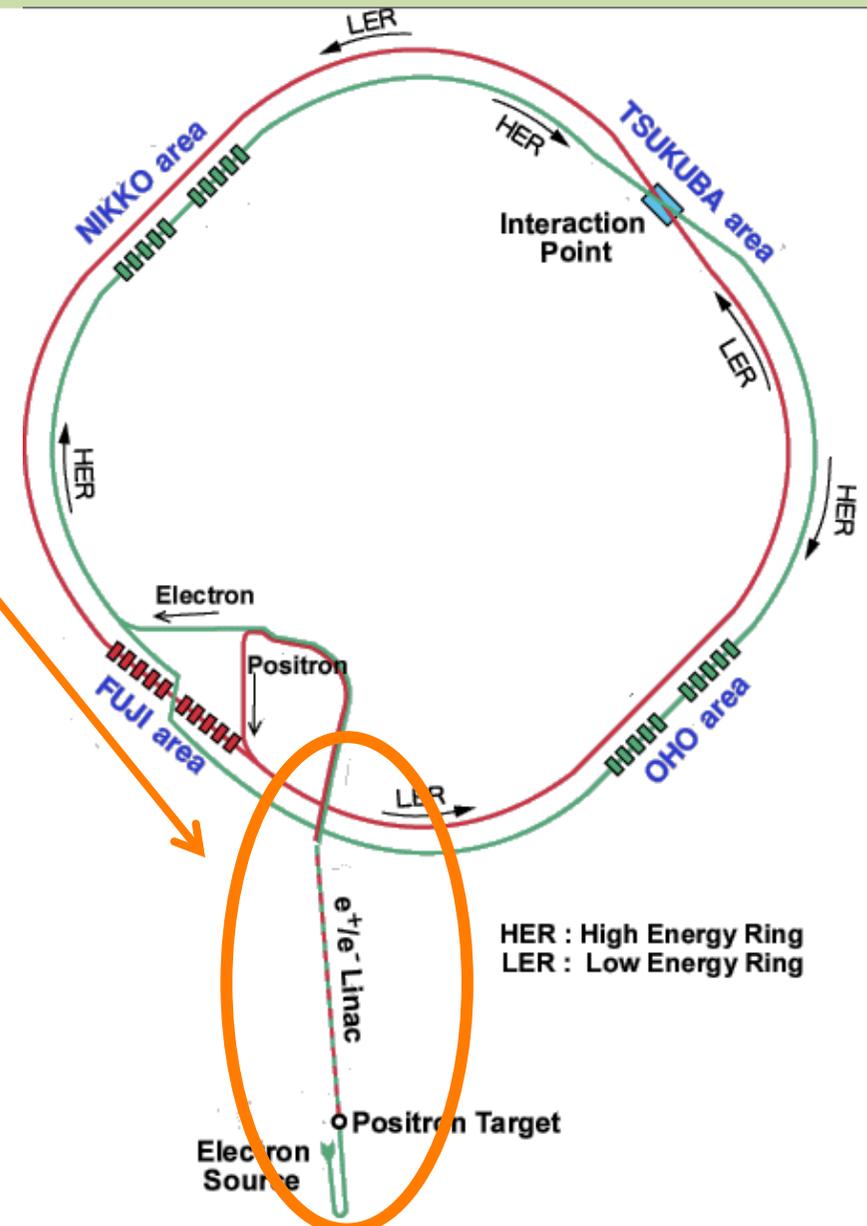
各部分の説明

Linac

ここで e^+ を生成し、加速する。

e^+ : 3.5 GeV, e^- : 8.0 GeV

長さ 600m



各部分の説明

Linac

ここで e^+ を生成し、加速する。

e^+ : 3.5 GeV, e^- : 8.0 GeV

長さ 600m

蓄積リング

ビームを蓄積し、ぐるぐるまわす。

e^+ → LER (Lower Energy Ring)

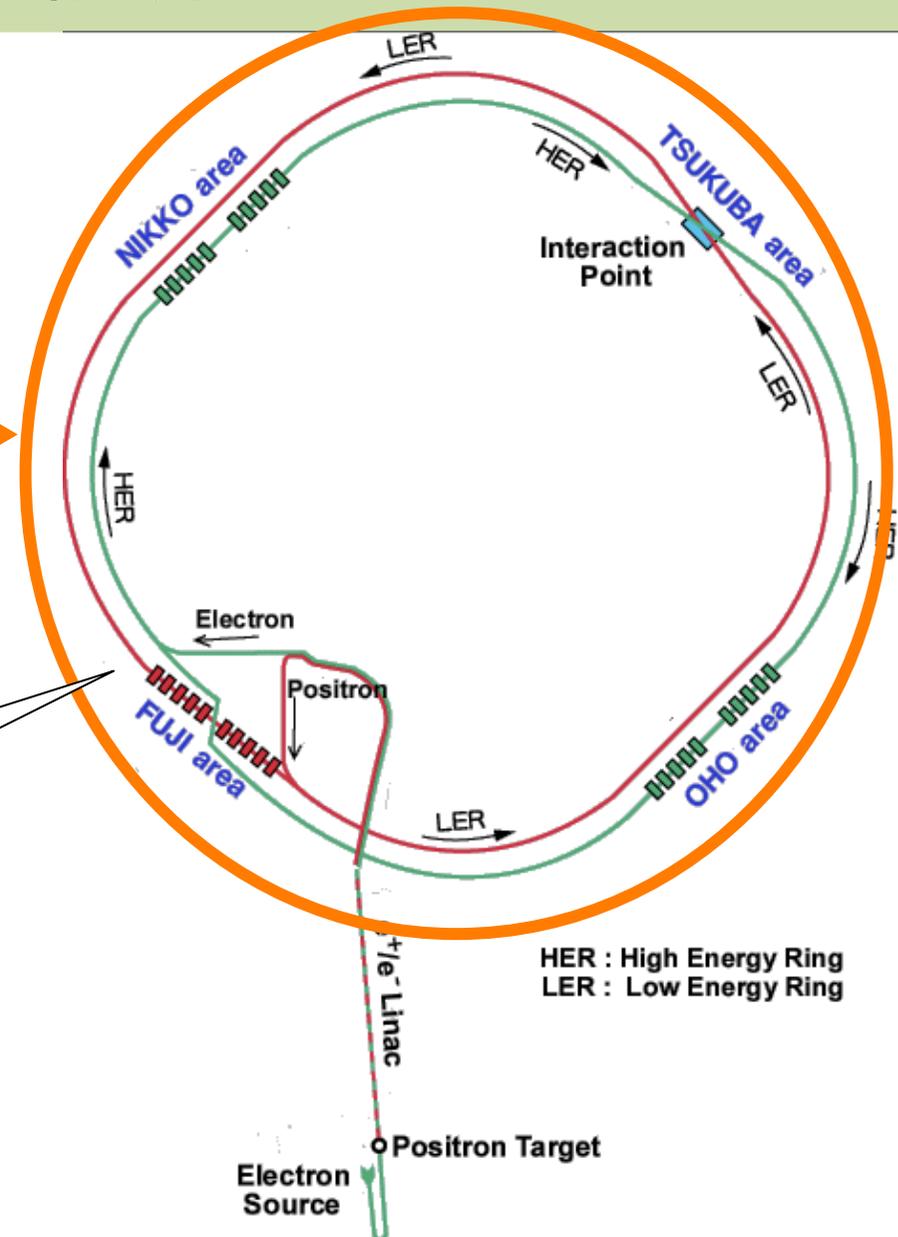
e^- → HER (Higher Energy Ring)

長さ 3016m

ビームのイメージ



“バンチ”となって周回



HER : High Energy Ring
LER : Low Energy Ring

各部分の説明

Linac

ここで e^\pm を生成し、加速する。

e^+ : 3.5 GeV, e^- : 8.0 GeV

長さ 600m

蓄積リング

ビームを蓄積し、ぐるぐるまわす。

e^+ → LER (Lower Energy Ring)

e^- → HER (Higher Energy Ring)

長さ 3016m

ビームのイメージ

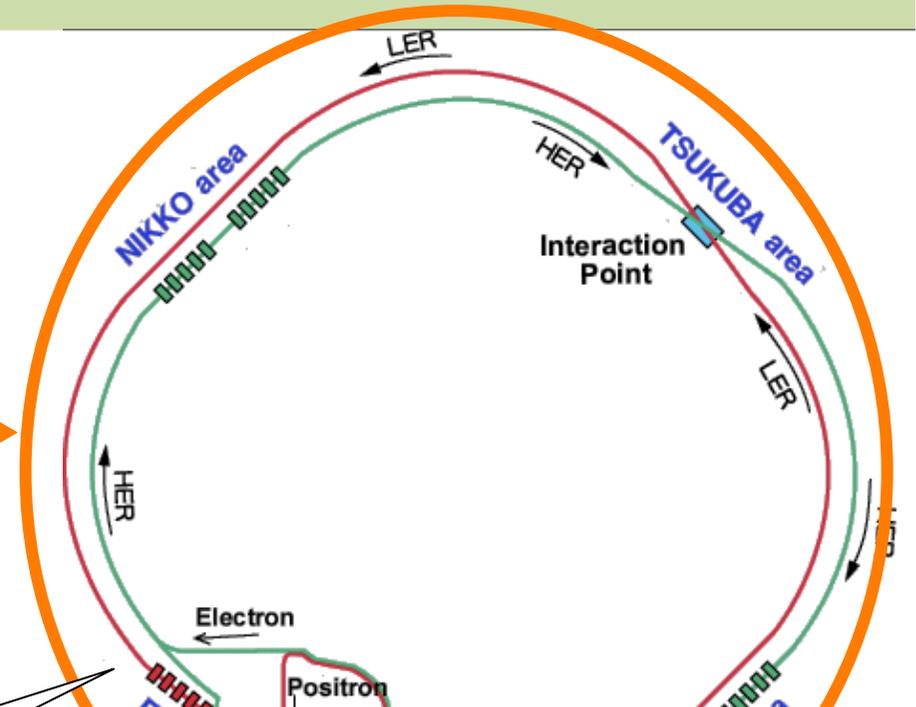


“バンチ”となって周回

例えるなら、

米 → e^\pm

すし → バンチ



各部分の説明

Linac

ここで e^+ を生成し、加速する。

e^+ : 3.5 GeV, e^- : 8.0 GeV

長さ 600m

蓄積リング

ビームを蓄積し、ぐるぐるまわす。

e^+ → LER (Lower Energy Ring)

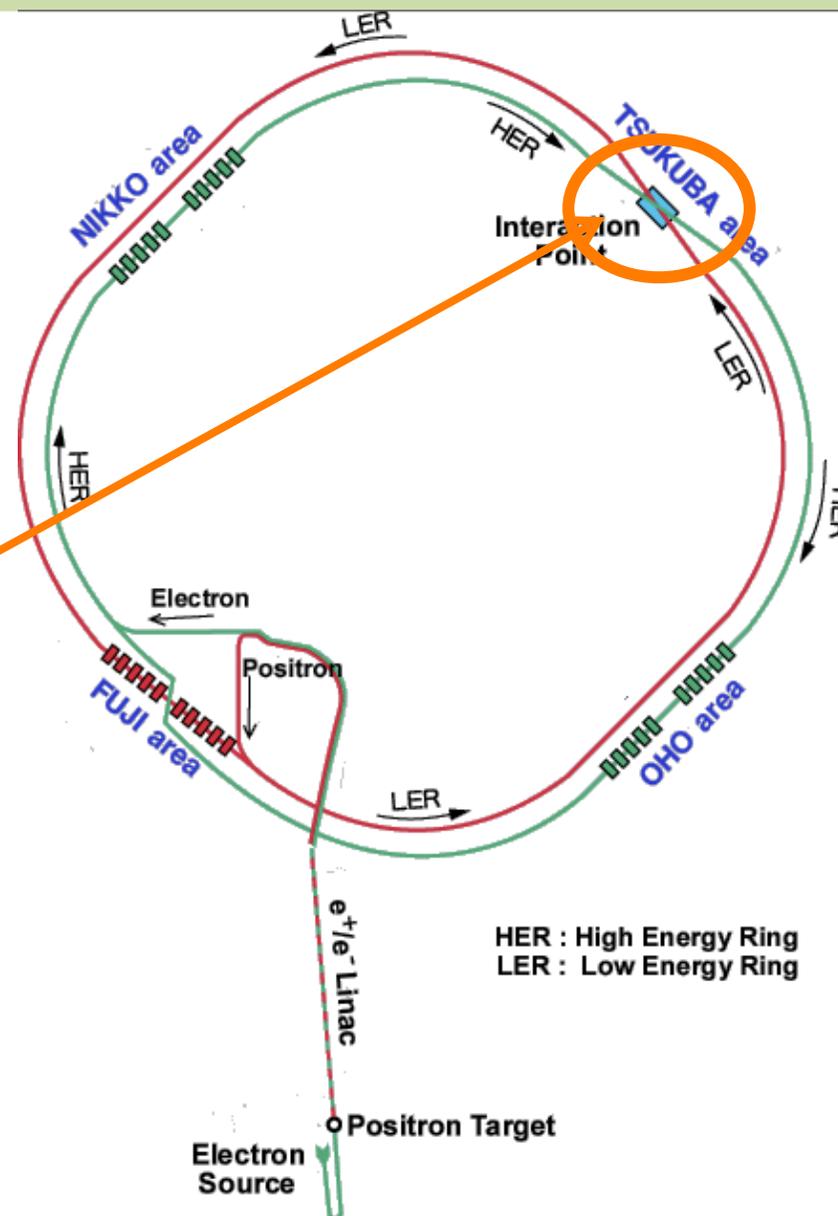
e^- → HER (Higher Energy Ring)

長さ 3016m

衝突点付近(IR)

ビームが衝突する部分。

Belle検出器がある。



各部分の説明

Linac

ここで e^+ を生成し、加速する。

e^+ : 3.5 GeV, e^- : 8.0 GeV

長さ 600m

蓄積リング

ビームを蓄積し、ぐるぐるまわす。

e^+ → LER (Lower Energy Ring)

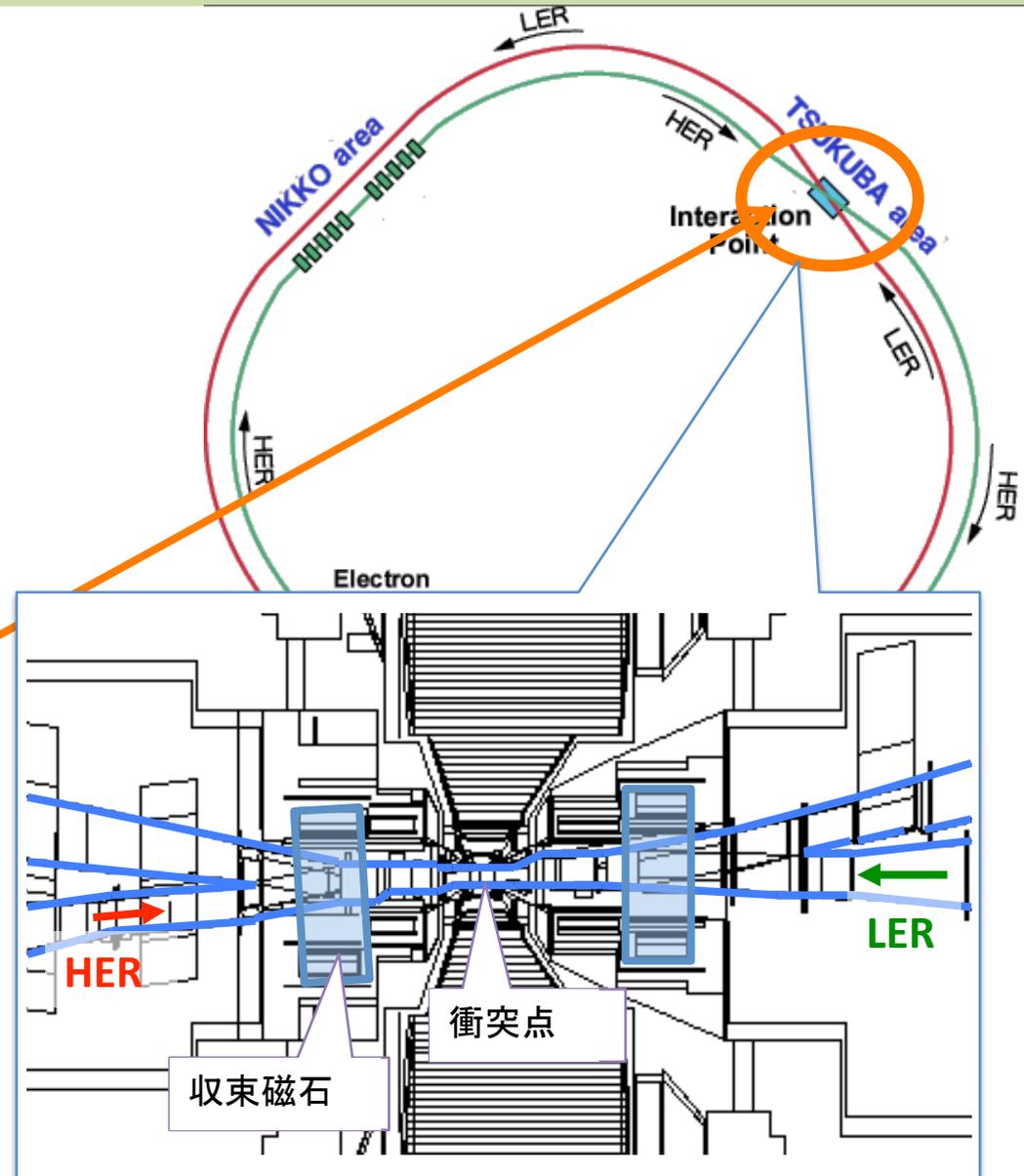
e^- → HER (Higher Energy Ring)

長さ 3016m

衝突点付近(IR)

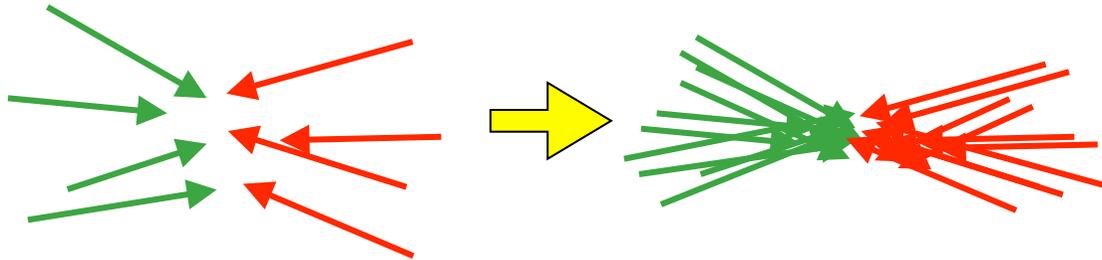
ビームが衝突する部分。

Belle検出器がある。



たくさんBBペアを作るには？

ビーム粒子の数を増やして、より小さく絞るとよい。



(ルミノシティ)[nb⁻¹] x (反応断面積)[nb] = (イベント数)

重心エネルギー 10.58 GeV での BB ペアの作られる断面積 ~1.09 nb

ルミノシティ $21 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}/\text{s} = 21 \text{ nb}^{-1}/\text{s}$

→ 1秒あたり、~23のBBペアが作られる。

$$1 \text{ nb}^{-1} = 10^{33} \text{ cm}^{-2}$$

これがアップグレードでは ~800 nb⁻¹/s になる

→ 1秒あたり、~870のBBペアが作られる。

ルミノシティ

N_{\pm} : バンチ当たりの e^{\pm} の数 $\sim 10^{10\sim 11}$

f : 1秒あたりのバンチ交差頻度 $= (3 \times 10^8 [\text{m/s}] / 3000 [\text{m}]) * 1600 [\text{個}] = 1.6 \times 10^8 [\text{/s}]$

$$\mathcal{L} = \frac{N_+ N_- f}{4\pi\sigma_x\sigma_y} R_L$$

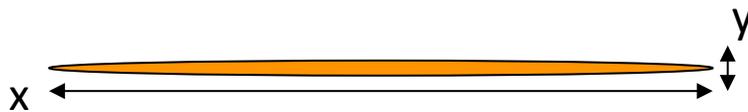
ルミノシティ

N_{\pm} : バンチ当たりの e^{\pm} の数 $\sim 10^{10\sim 11}$

f : 1秒あたりのバンチ交差頻度 $= (3 \times 10^8 [\text{m/s}] / 3000 [\text{m}]) * 1600 [\text{個}] = 1.6 \times 10^8 [\text{/s}]$

$$\mathcal{L} = \frac{N_+ N_- f}{4\pi \sigma_x \sigma_y} R_L$$

$\sigma_{x,y}$: 水平、垂直方向のビームサイズ



170um x 0.94um (LER)

147um x 0.94um (HER)

円形加速器で
世界最小のサイズ！

ルミノシティ

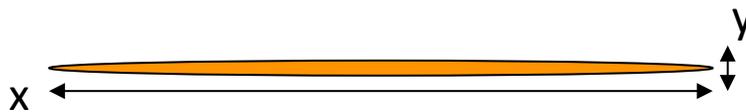
N_{\pm} : バンチ当たりの e^{\pm} の数 $\sim 10^{10\sim 11}$

f : 1秒あたりのバンチ交差頻度 $= (3 \times 10^8 [\text{m/s}] / 3000 [\text{m}]) * 1600 [\text{個}] = 1.6 \times 10^8 [\text{/s}]$

$$\mathcal{L} = \frac{N_+ N_- f}{4\pi \sigma_x \sigma_y} R_L$$

ビームを衝突させる方法
に依存する係数 ($0 < R_L < 1$)

$\sigma_{x,y}$: 水平、垂直方向のビームサイズ



170um x 0.94um (LER)

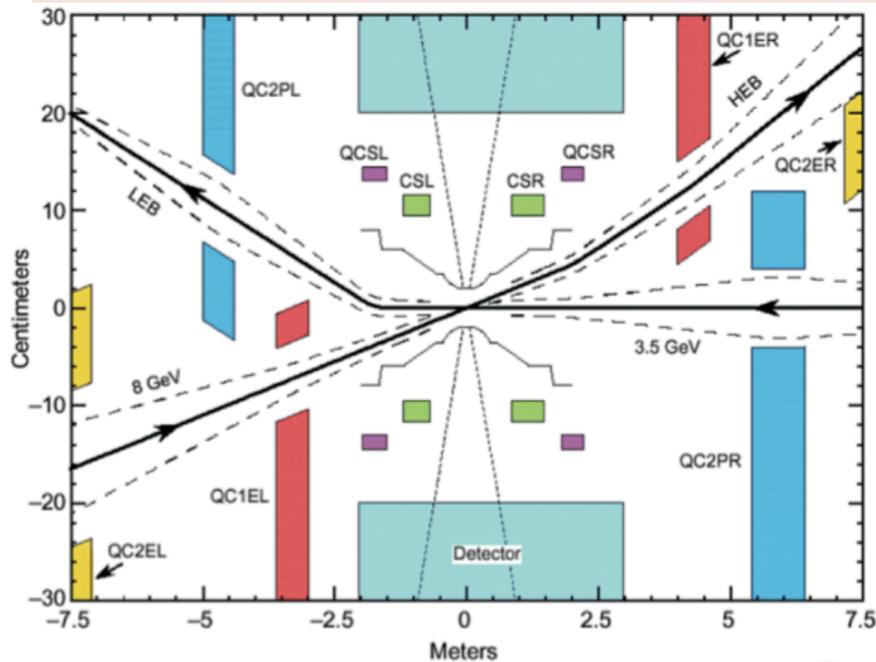
147um x 0.94um (HER)

円形加速器で
世界最小のサイズ!

ビームを衝突させる方法

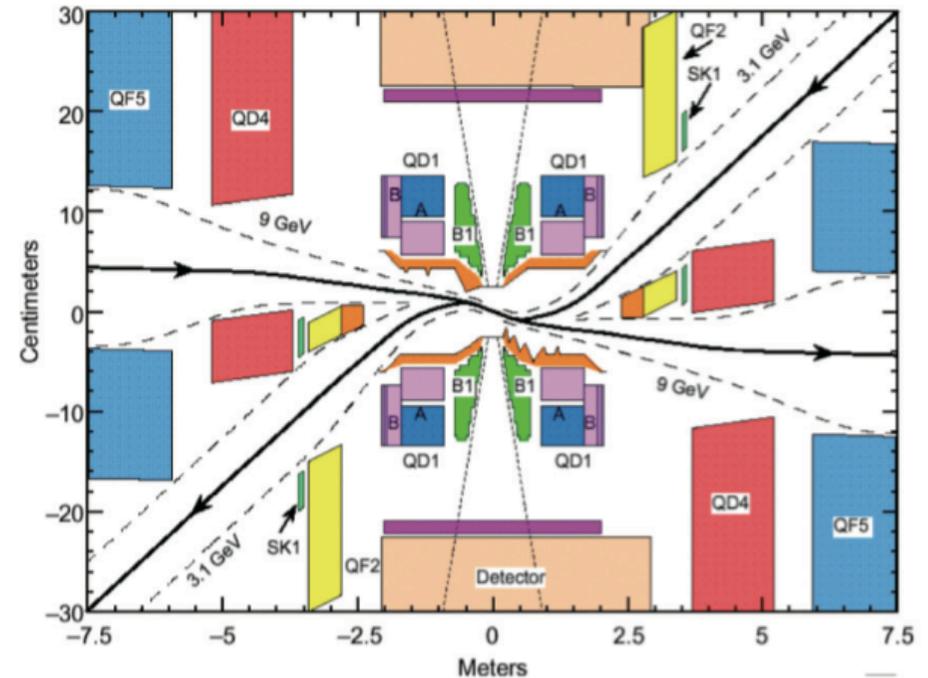
KEKB (Belle 実験)

22 mrad (1.3°) の交差角を持たせて衝突



PEP-II (Babar 実験)

正面衝突の方式を採用



長所

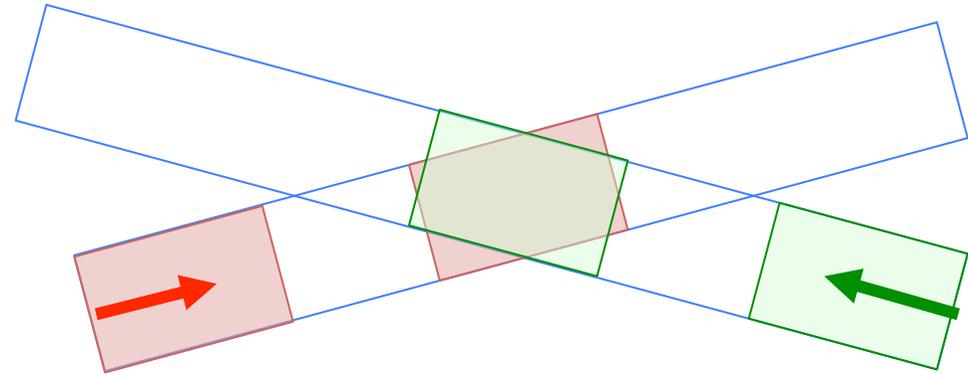
- ・ビームの分離が楽 (→不要な磁石を削減)
- ・交差する点以外での衝突を回避 (→不要な反応を抑制)

当時は冒険と考える人もいた。また、 R_L も少し減る。

有限交差角

バンチがななめに交差するので、完全に重ならない。

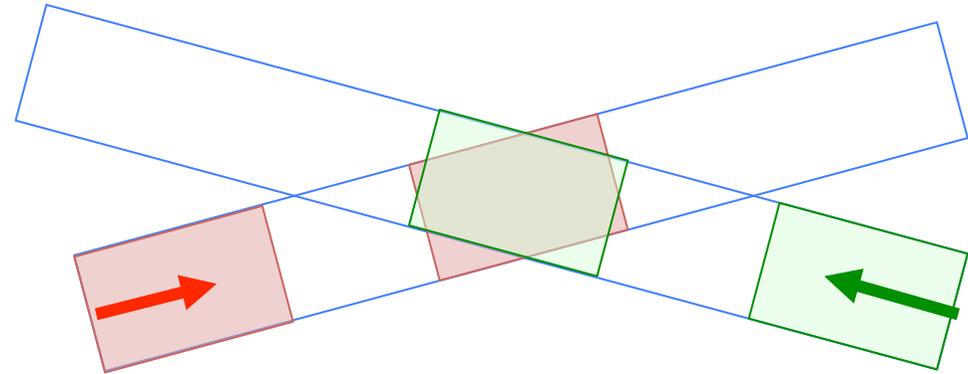
→正面衝突の場合よりも
ルミノシティが減少。
(R_L が小さい)



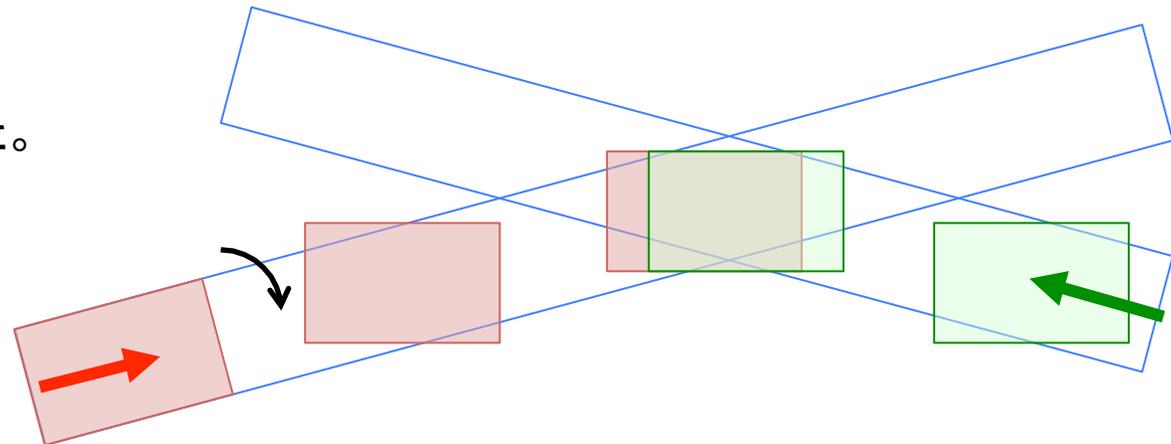
有限交差角

バンチがななめに交差するので、
完全に重ならない。

→正面衝突の場合よりも
ルミノシティが減少。
(R_L が小さい)



そこで、2007年に
「クラブ衝突」が導入された。

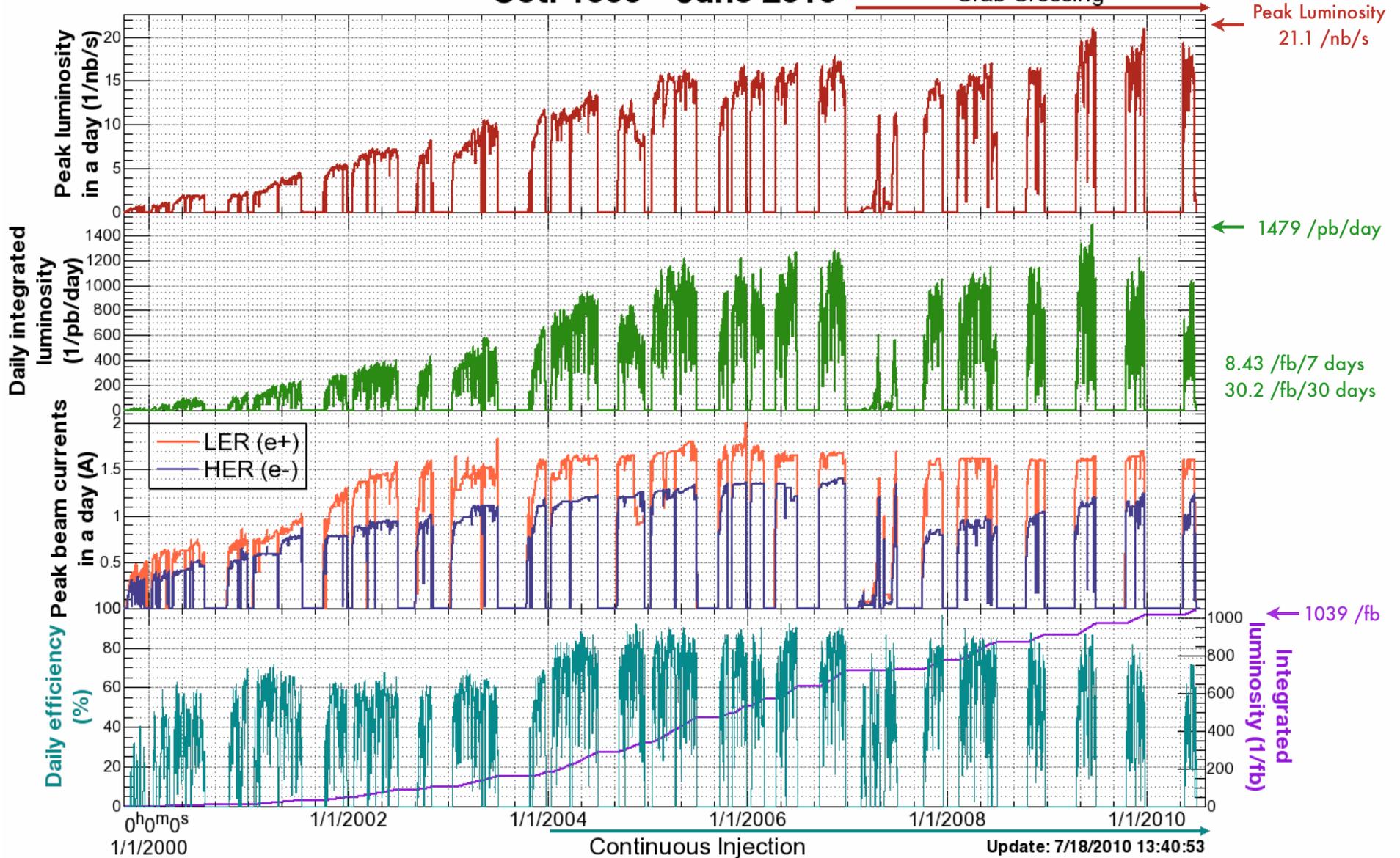


バンチを傾けることで、正面衝突を実現！

ルミノシティの歴史

Oct. 1999 - June 2010

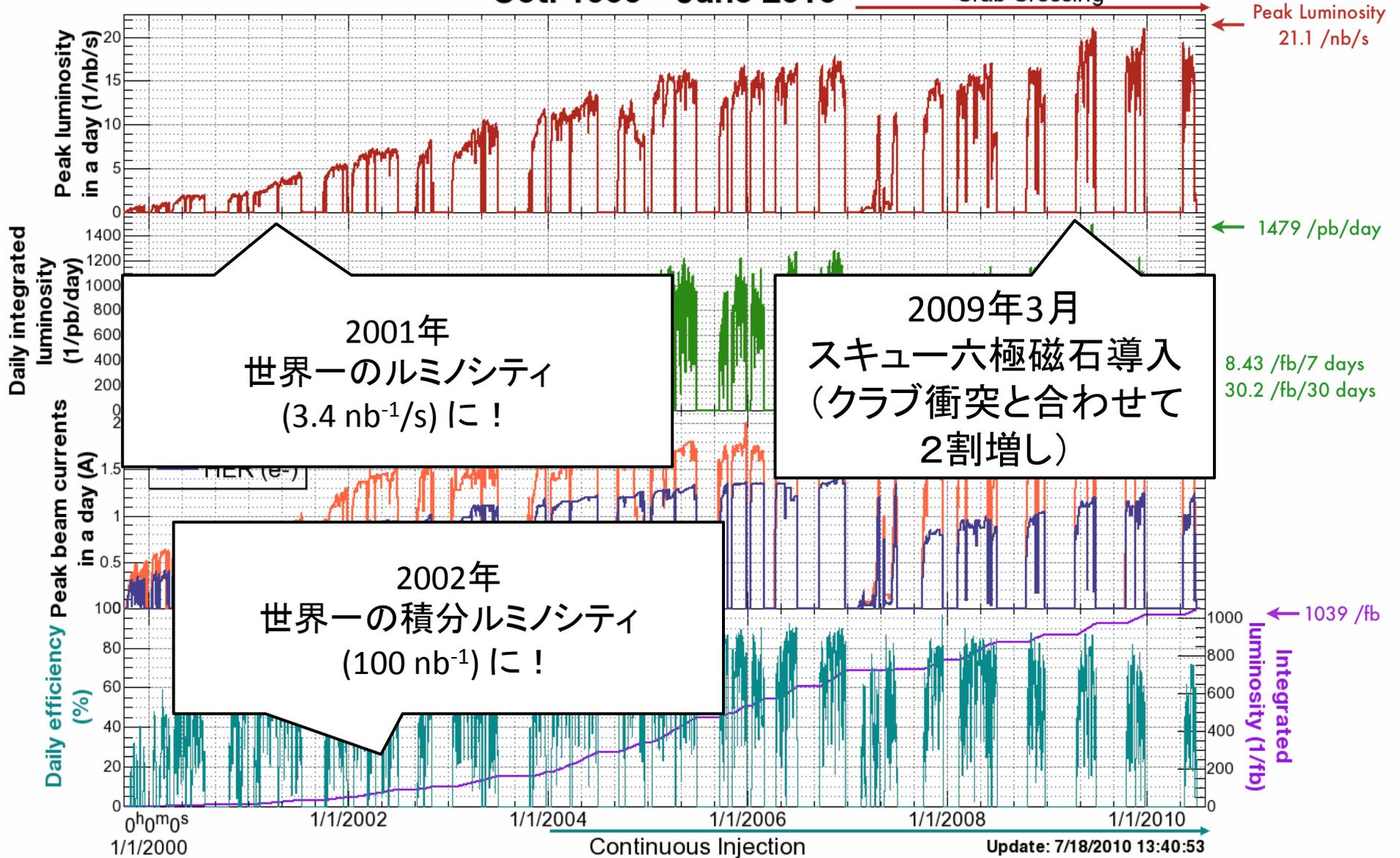
Crab Crossing



ルミノシティの歴史

Oct. 1999 - June 2010

Crab Crossing



加速器のアップグレード

要点:

目的はB中間子をさらにたくさん作れるようになること。
加速器の能力が

~20 BBペア/s から ~800 BBペア/s

になる。

ルミノシティをあげるために
ビーム粒子数を増やし、
ビームサイズを小さくする。
交差方法も変わる。

ビーム粒子の数

$$\mathcal{L} = \frac{N_+ N_- f}{4\pi\sigma_x\sigma_y} R_L$$

N_{\pm} : バンチ当たりの e^{\pm} の数

f : 単位時間当たりのバンチ交差数

アップグレードで、

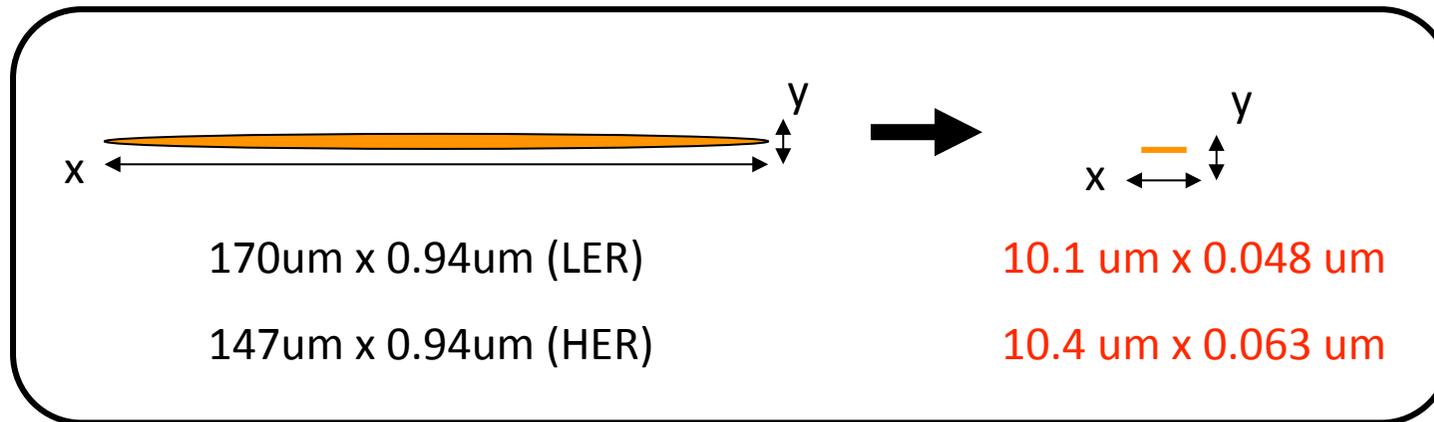
バンチ当たりの e^{\pm} の数 \rightarrow それぞれ **約1.5倍**

蓄積リング1周当たりの **バンチの数** \rightarrow **約1.5倍**

ビームサイズ

$$\mathcal{L} = \frac{N_+ N_- f}{4\pi\sigma_x\sigma_y} R_L$$

$\sigma_{x,y}$: 衝突点でのビームの
水平方向、垂直方向のサイズ



アップグレードで 衝突点でのビームサイズが
x,y 方向それぞれ **1/10 以下**になる！

ナノビーム

ナノビーム

83 mrad (4.8°) という大きな交差角をつけて、衝突点でビームをものすごく絞る方法。

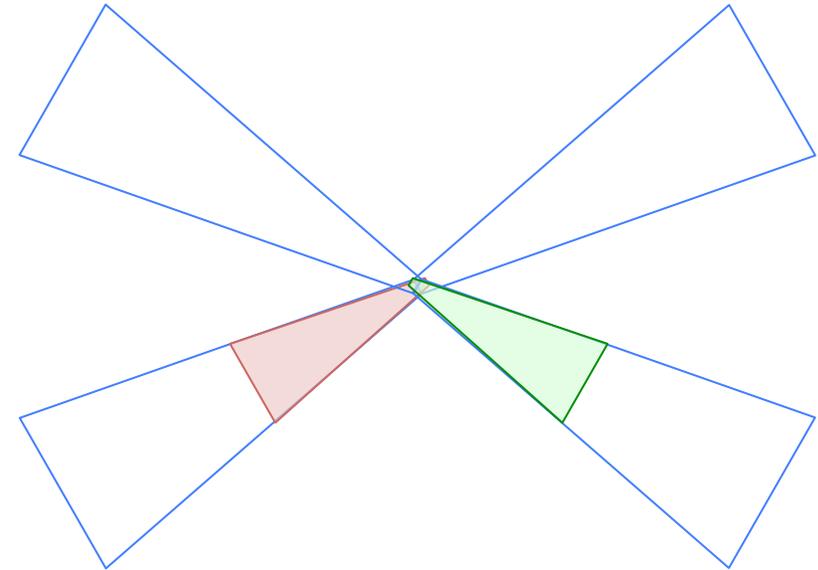
$$\mathcal{L} = \frac{N_+ N_- f}{4\pi\sigma_x\sigma_y} R_L$$

すごく増える

減るが、
あえて交差角をつける事で、
逆に減り方が軽減。

結果的に40倍になる！

20 nb⁻¹/s → 800 nb⁻¹/s



まとめ

KEKB は $e^+ e^-$ を加速し、衝突させ、
B中間子を大量に作っている。

ルミノシティの世界記録を更新してきた。

アップグレードによって、
ルミノシティが $20\text{nb}^{-1}/\text{s}$ から $800\text{nb}^{-1}/\text{s}$ になる。

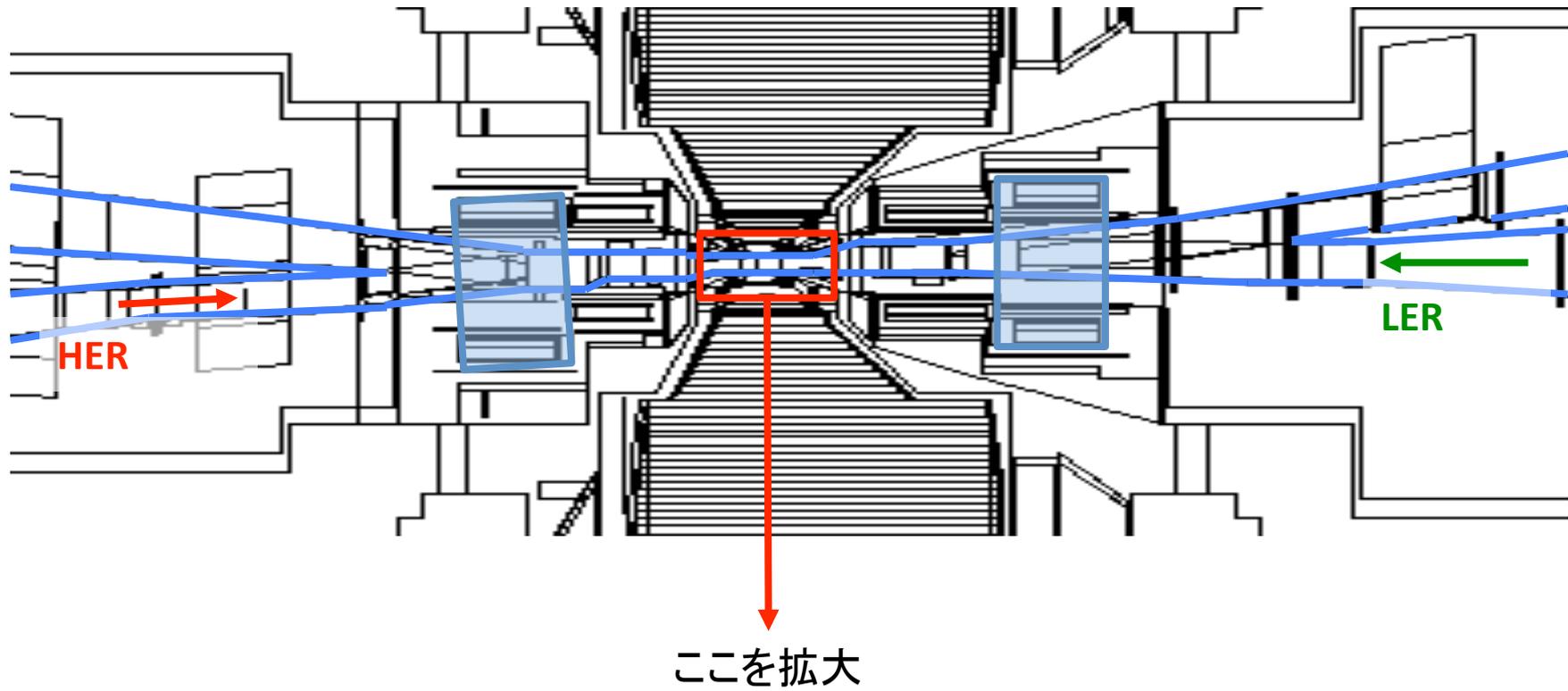
- ・衝突点でのビームサイズが小さくなる。
- ・電流が増加。

ビームをぶつける方法は
アップグレード前後で別の方法。

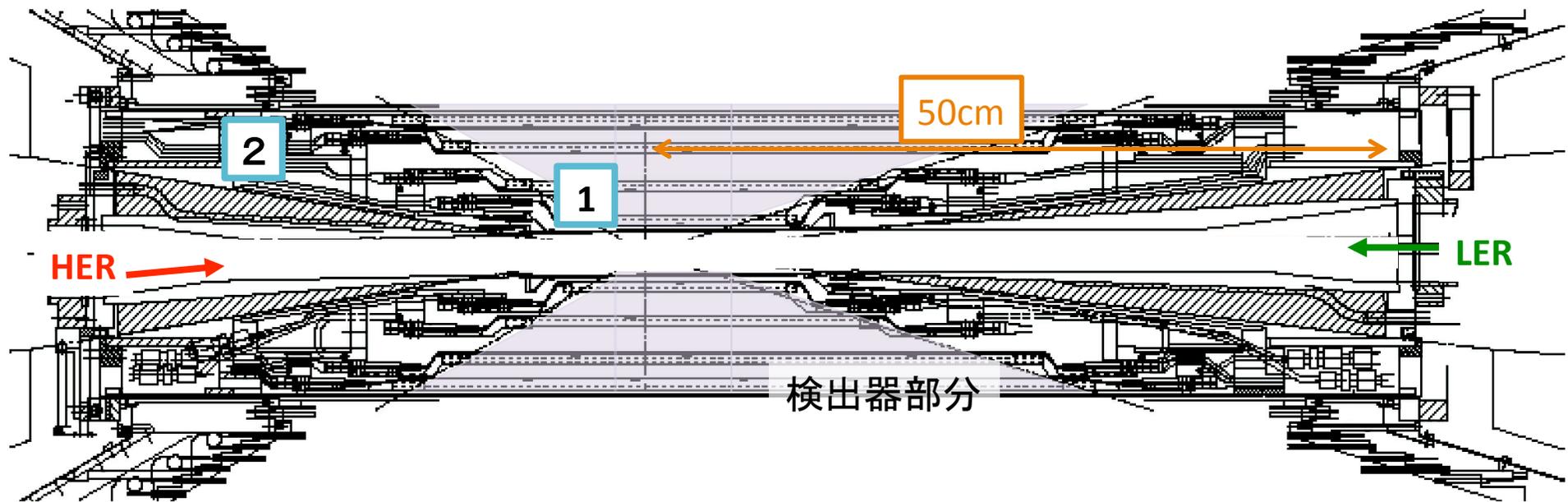
交差角が大きくなる

衝突点付近 (IR) の構造

KEKB の IR



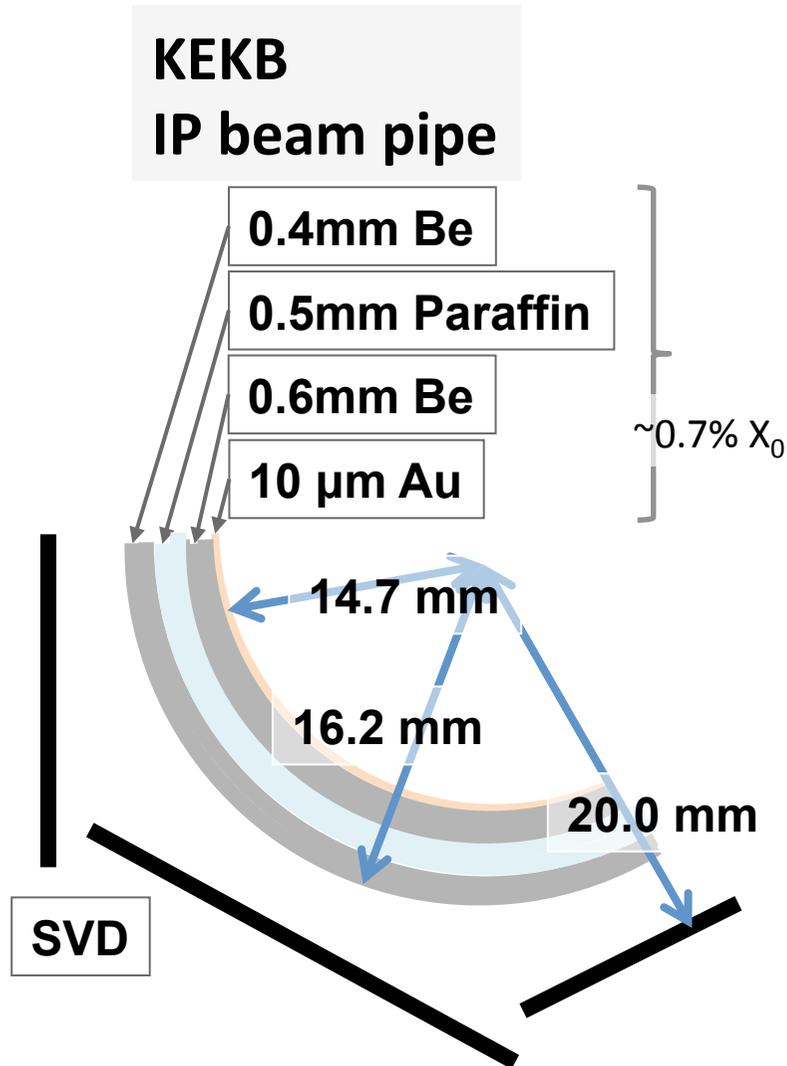
KEKB の IR



1 衝突点のまわりの部分について

2 その周りについて

1 衝突点のまわり

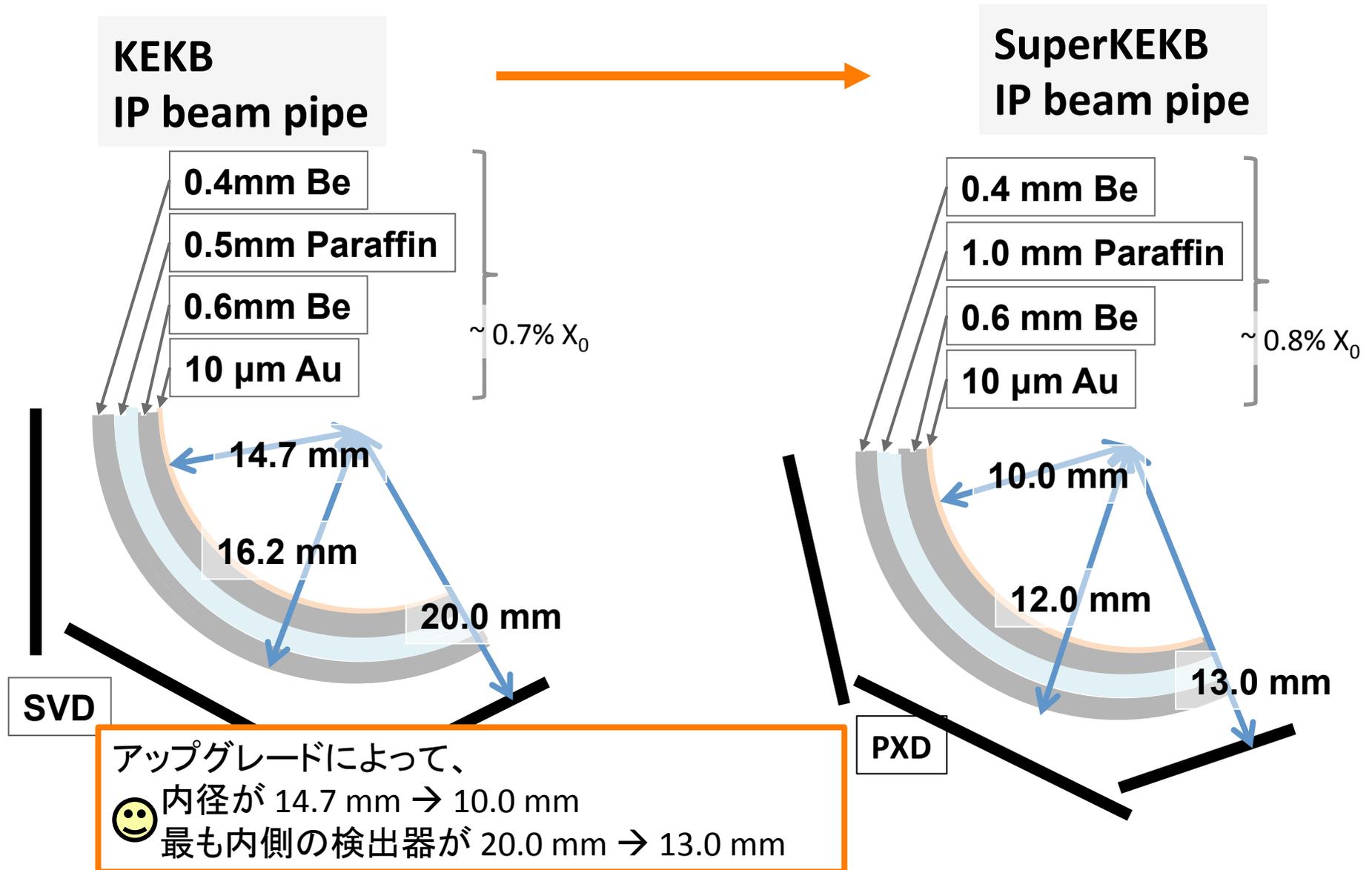


検出したい粒子達への影響が小さいように Be を使用し、さらにできるだけ薄くしている。

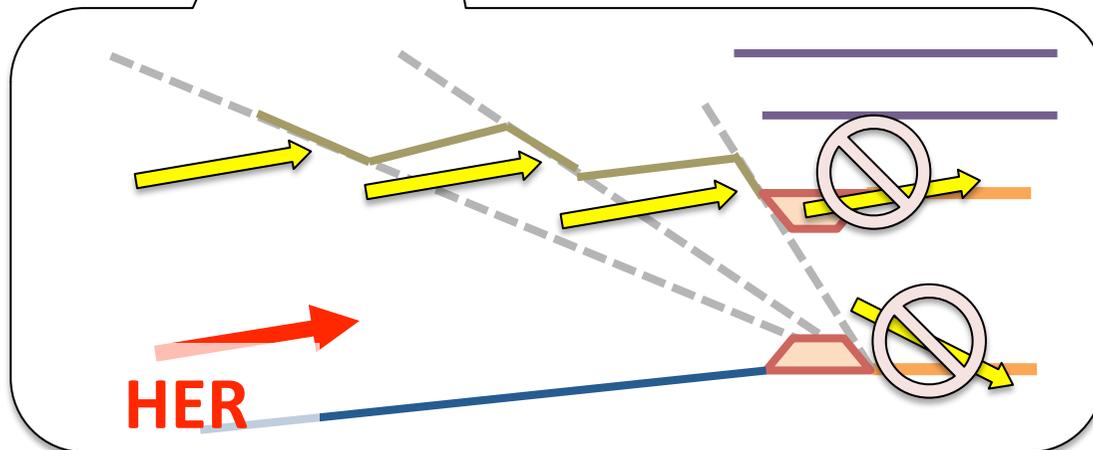
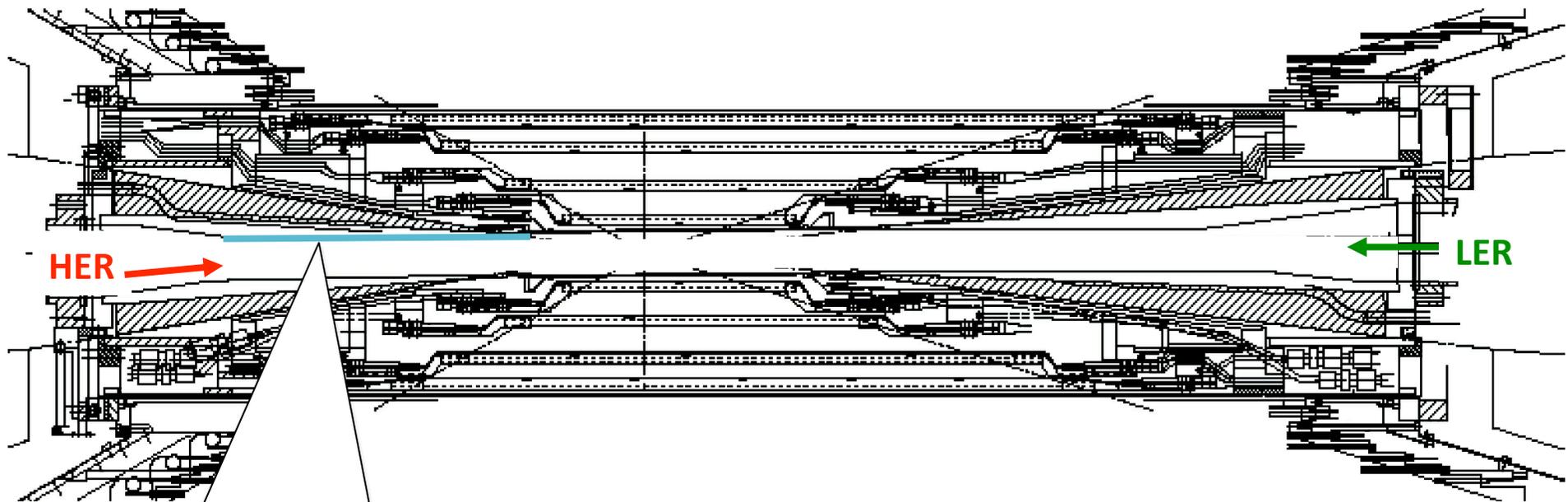
シンクロトロン放射のバックグラウンドがはいつてくることを減らすために、金メッキがされている。

ビームパイプを冷却するために、Be の2重間の中にパラフィン进行流している。

1 アップグレードによる変化

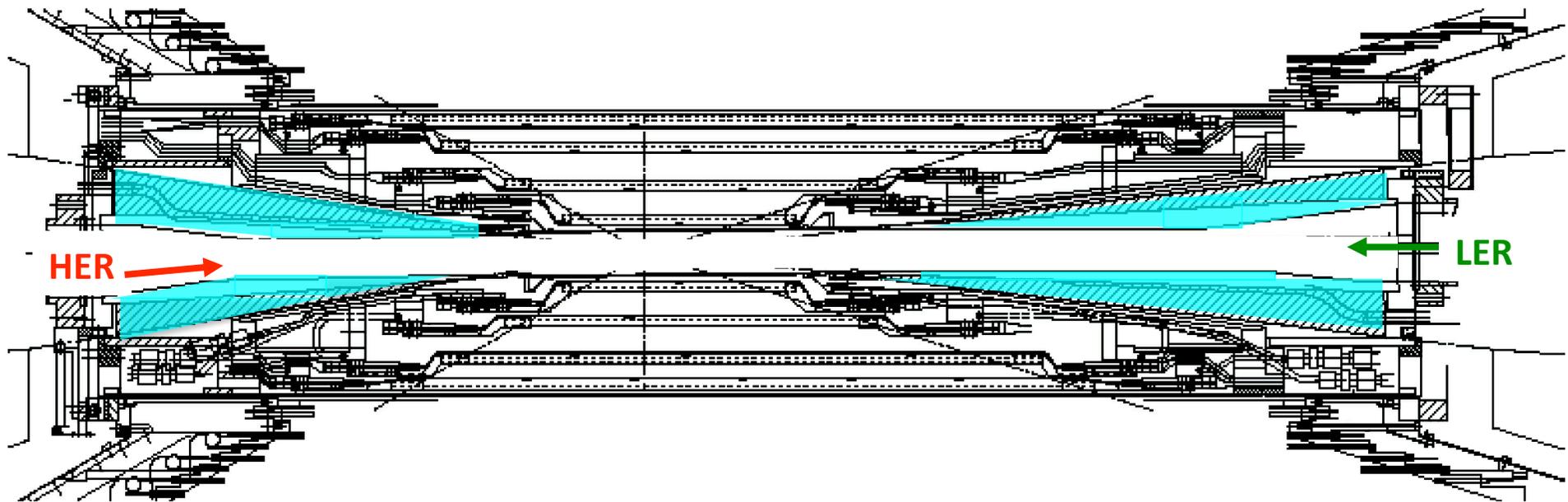


2 KEKB の IR



HER 上流からの
シンクロトン放射光
が入ってくることを防いでいる。

2 KEKB の IR



■ 重金属マスク

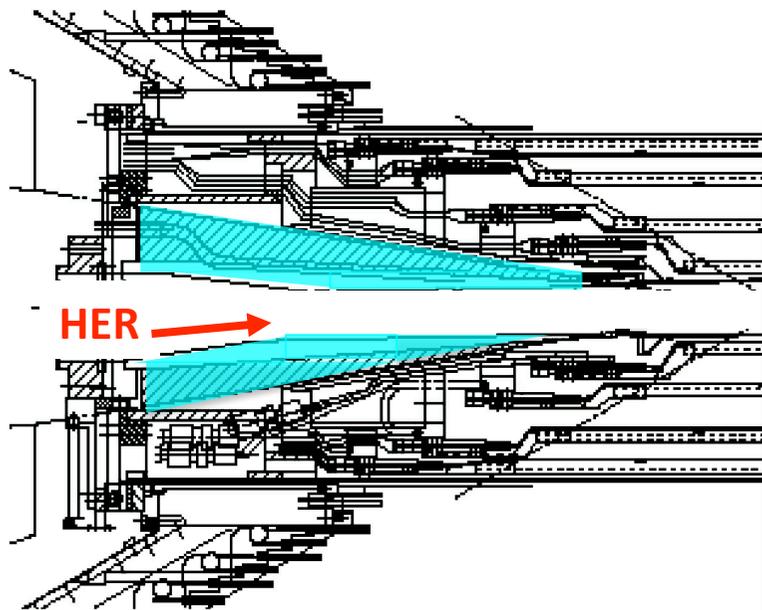
軌道をそれたビーム粒子が検出器に入ってこないように、厚い壁を用意している。

→電磁シャワーを防ぐ事ができる。

しかし、中性子を止める事はできない

2

KEKB の IR



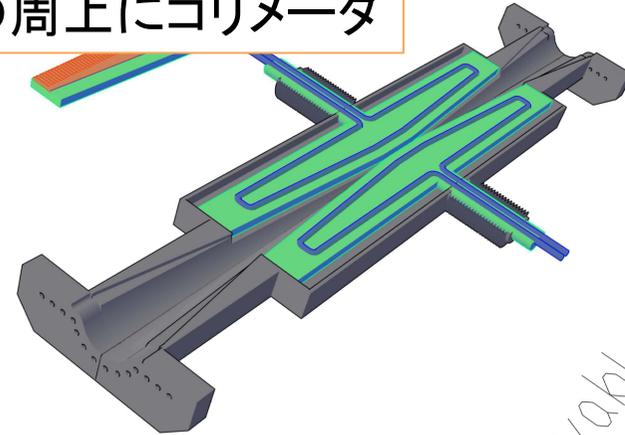
■ 重金属マスク

軌道をそれたビーム粒子が検出器に入らないように、厚い壁を用意している。

→電磁シャワーを防ぐ事ができる。

IR 周辺以外の場所で止めればよい

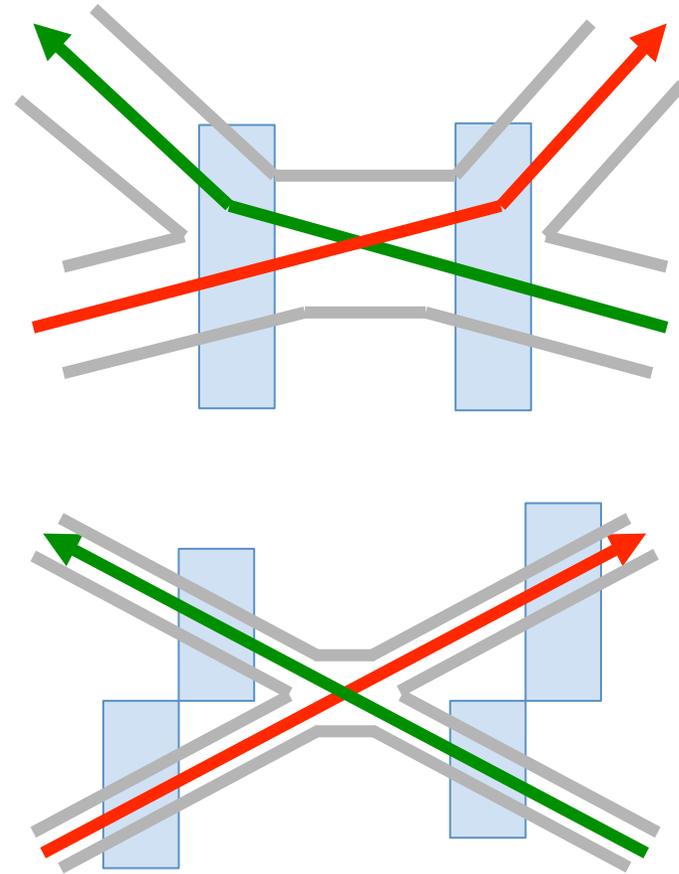
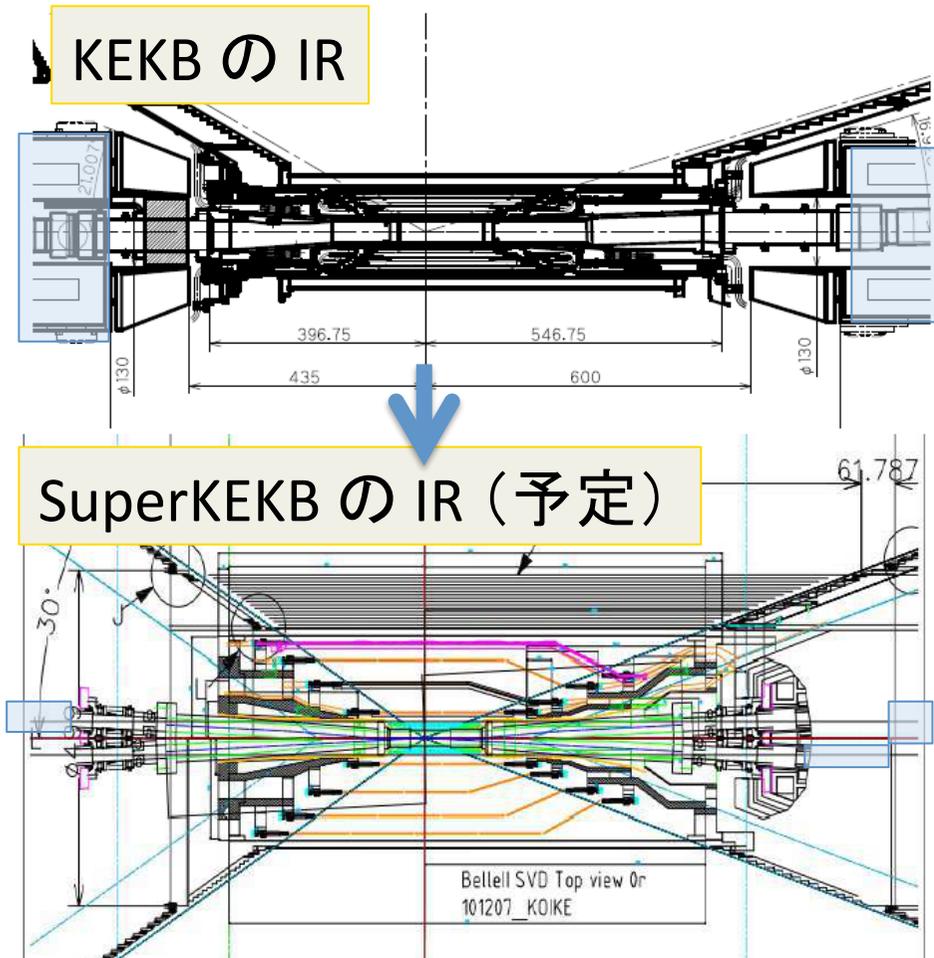
↓
LER, HER の周上にコリメータ



Movable_Mask_H

しかし、中性子を止める事はできない

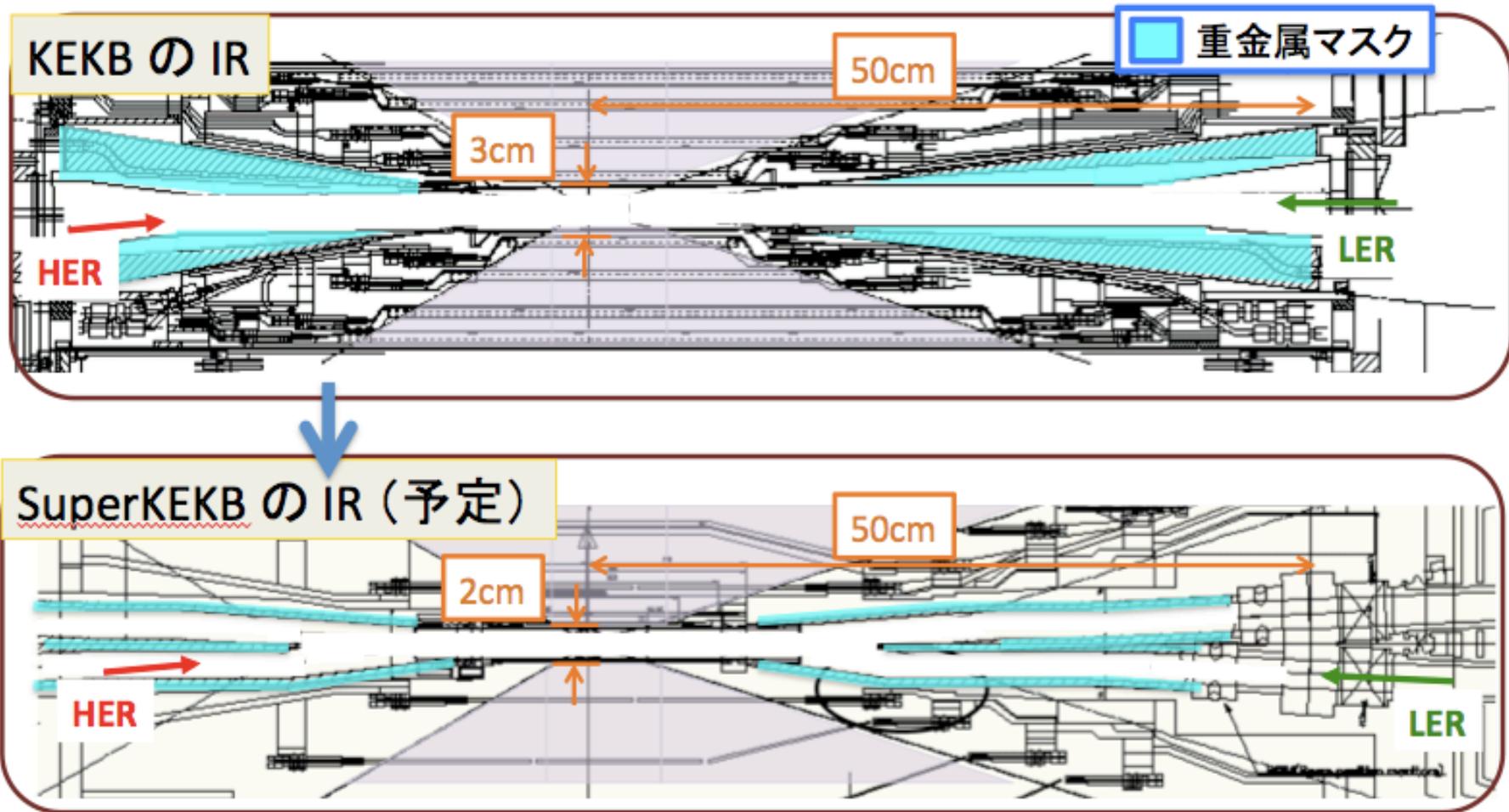
2 アップグレードによる変化



交差角が大きくなることで

収束させる磁石を LER, HER 別々に用意できる

2 アップグレードによる変化



交差角が大きくなることで

スペースの制限がより厳しくなる

まとめ

IR のビームパイプは、
バックグラウンドとなる粒子を検出器に
いれないような工夫がされている。

アップグレードによって、

- ・衝突点ビームパイプ半径が小さくなる (1.5 cm → 1.0 cm)
- ・交差角が大きくなる (22mrad → 83mrad)
- ☺ 収束させる磁石を LER, HER 別々に用意できる
- ☹ スペースが狭くなる

まとめ

KEKB は $e^+ e^-$ 加速器の
ルミノシティの世界記録を更新してきた。

さらにSuperKEKB にアップグレードすることで
ルミノシティが40倍になる。

アップグレードによって、
IR の形状も変化する。

Back up slides

検出器に対する脅威 まとめ

ビームバックグラウンドの増加

どこから？

何が飛んでくる？ : 中性子、シャワー

バックグラウンドとは？ どのような悪さをする？

いらない信号をだす(解析の邪魔)。

検出器を消耗させる(寿命が縮む)。

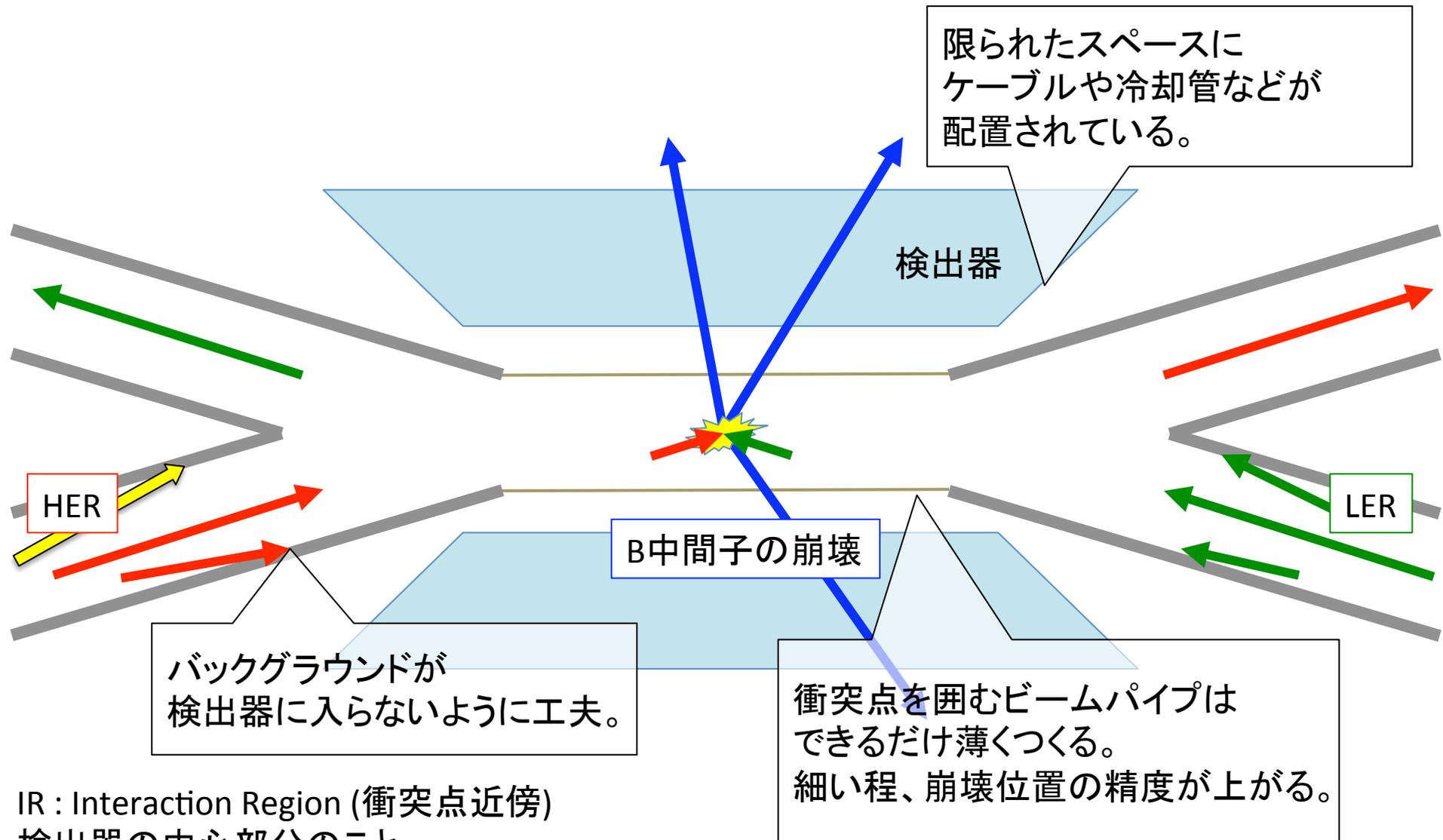
ビーム寿命の減少

インジェクションの頻度が増える(連続入射)。

life 600s

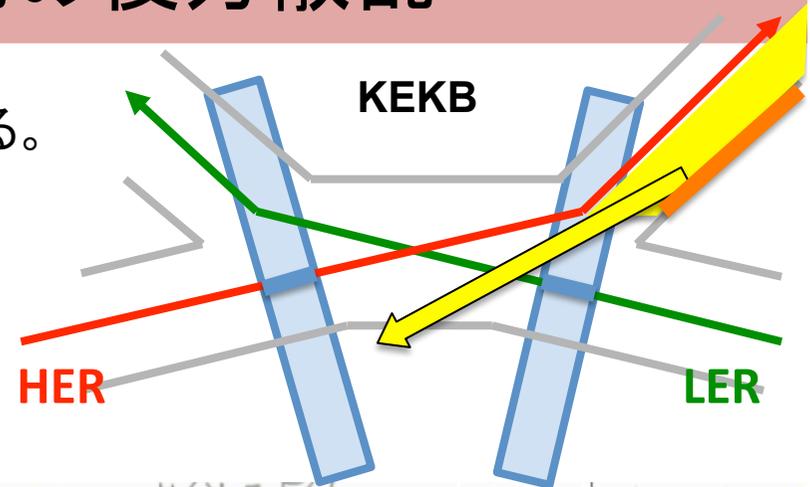
インジェクションの直後は(瞬間的に)検出器が使えなくなる。

衝突点付近 (IR) の構造



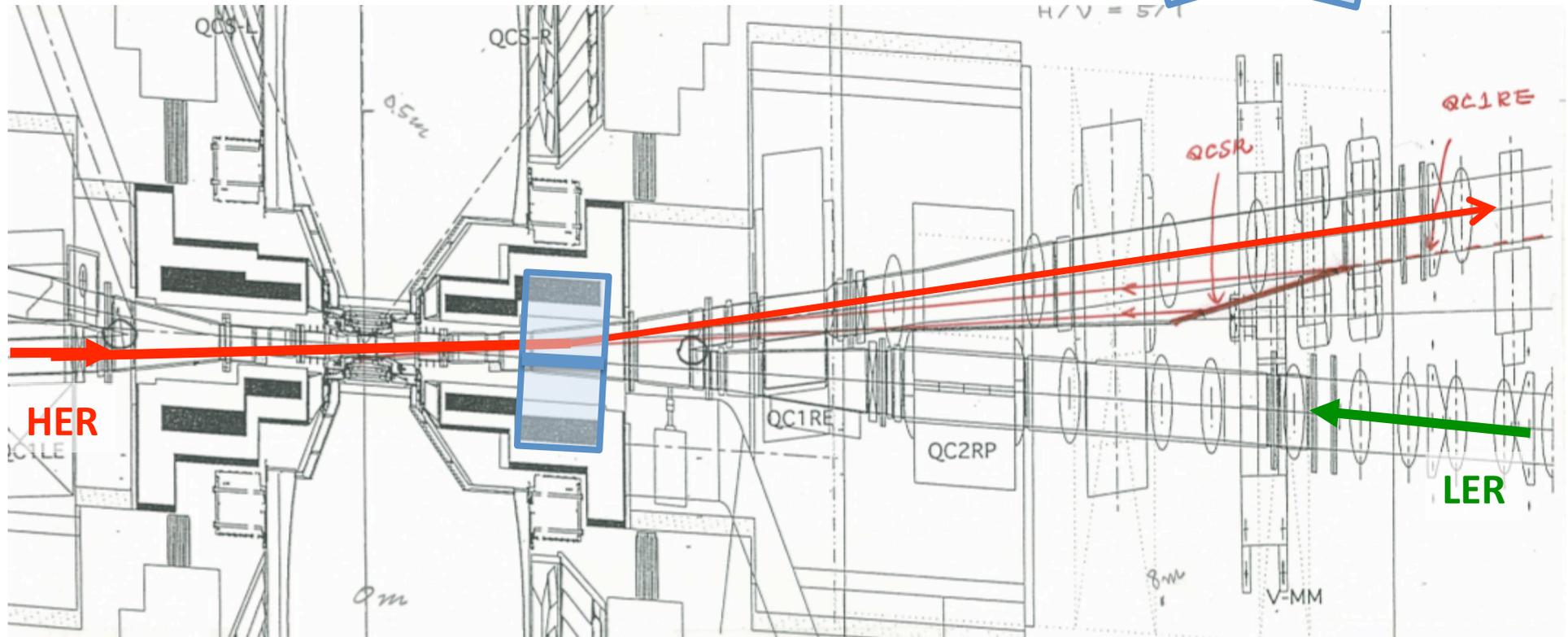
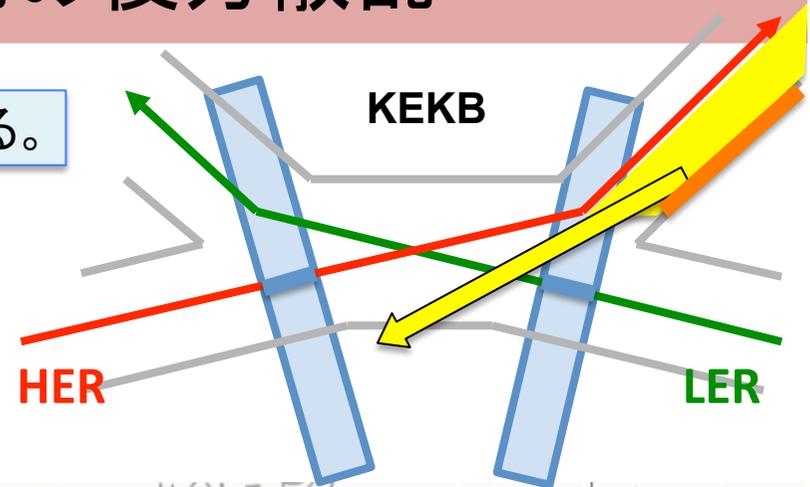
シンクロトン放射光の後方散乱

- 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。



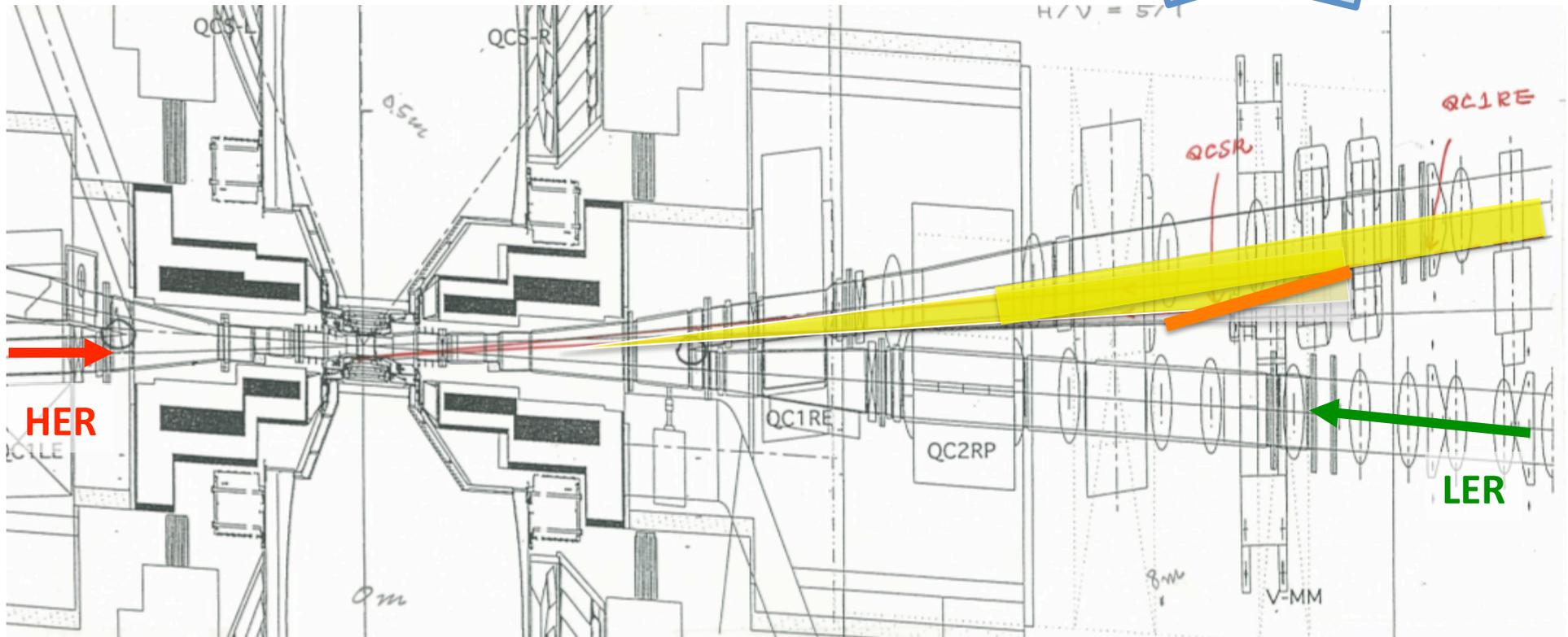
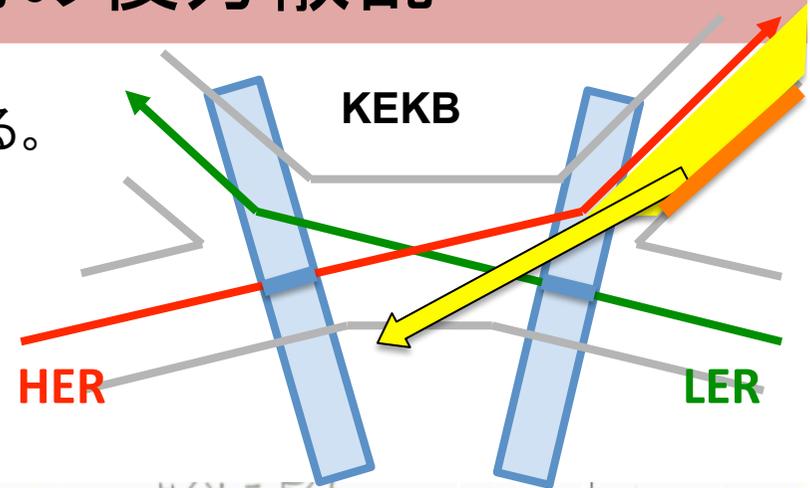
シンクロトン放射光の後方散乱

- 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。



シンクロトン放射光の後方散乱

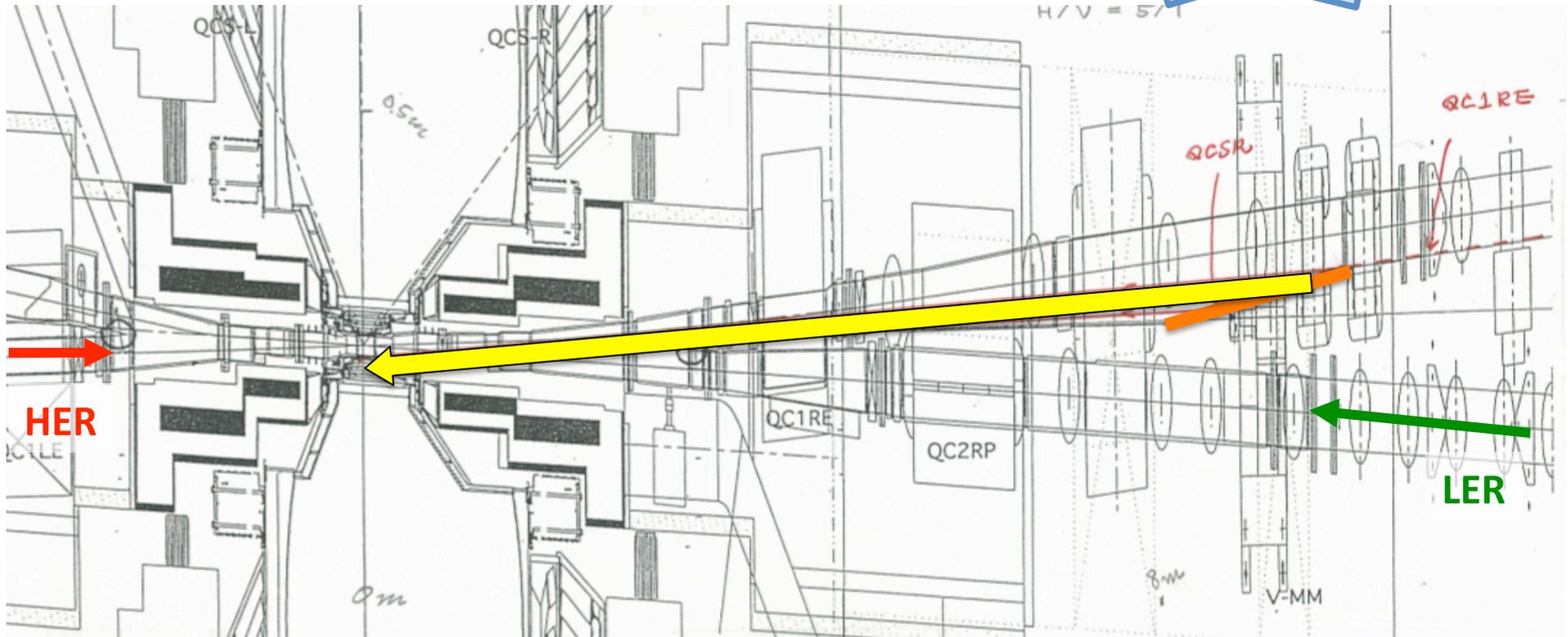
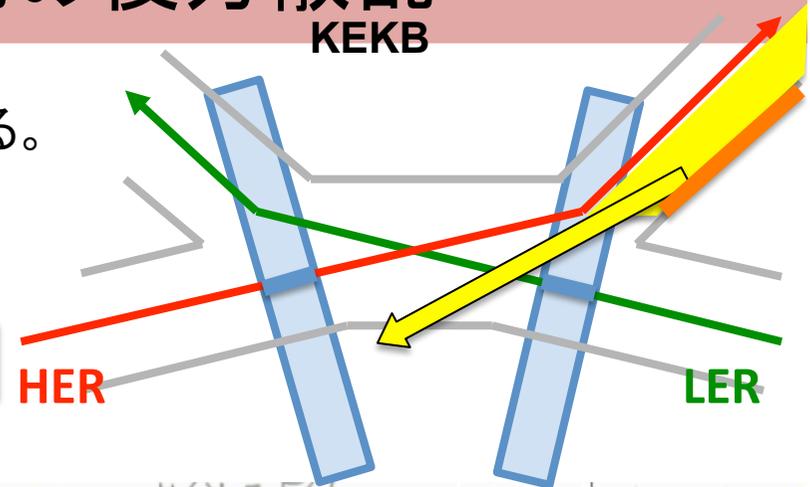
- 1) 最終四極磁石は IR から出て行くビームをキックする。
- 2) キックされたビームはシンクロトン光を出す。
- 3) シンクロトン光が下流で反射し、IR に戻ってくる。



シンクロトン放射光の後方散乱

KEKB

- 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。



3つのリングへの同時入射

<http://www.kek.jp/newskek/2009/mayjun/kekb4.html>

クラブ空洞、六極

<http://www.kek.jp/newskek/2009/mayjun/kekb5.html>

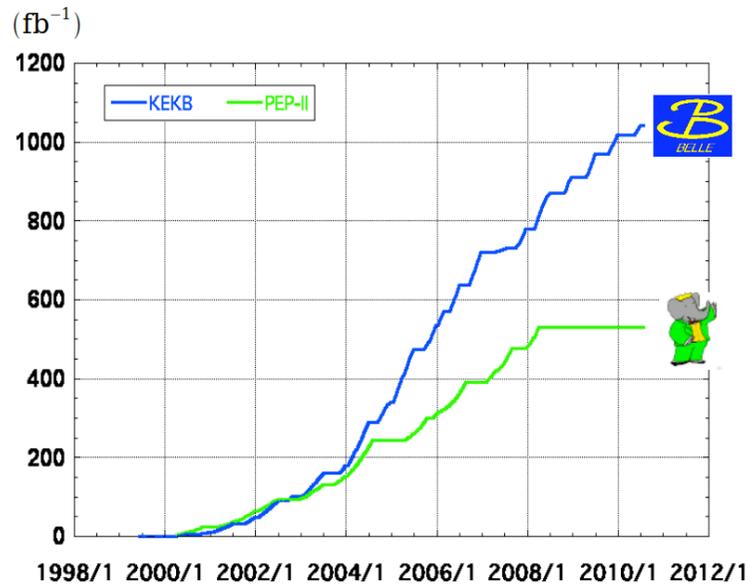
ナノビーム

<http://www.kek.jp/newskek/2010/marapr/SuperKEKB.html>

加速器

http://www-acc.kek.jp/KEKB/publication/Kyoto_2010_Oide.pdf

Integrated luminosity of B factories



> 1 ab⁻¹
On resonance:
 Y(5S): 121 fb⁻¹
 Y(4S): 711 fb⁻¹
 Y(3S): 3 fb⁻¹
 Y(2S): 25 fb⁻¹
 Y(1S): 6 fb⁻¹
Off reson./scan:
 ~ 100 fb⁻¹

~ 550 fb⁻¹
On resonance:
 Y(4S): 433 fb⁻¹
 Y(3S): 30 fb⁻¹
 Y(2S): 14 fb⁻¹
Off resonance:
 ~ 54 fb⁻¹

PEP-II



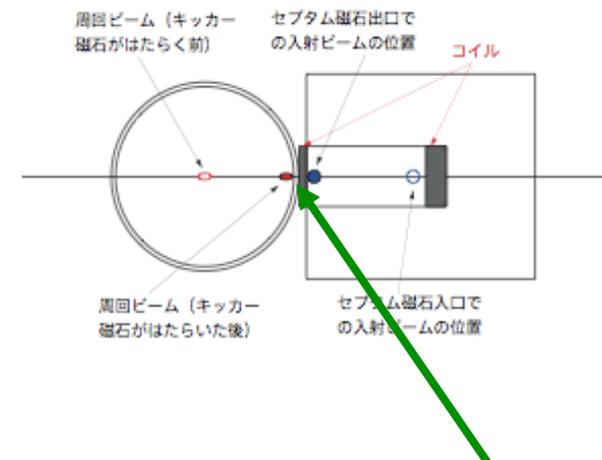
<http://www-acc.kek.jp/KEKB/0922KEKB.pdf>

ん。入射バンチはリングに入った後、周回バンチの周りを振動し続けるわけですが、この振動はリング固有の減衰時間(約0.05秒)がたつとおさまって周回バンチに一体化し、「合流」が完成します。この減衰はリングを周回する間に電子あるいは陽電子が放射光を出してエネルギーを失うこと、およびその失ったエネルギーを加速空洞による加速によって回復する、という過程で生じます。

50 ms → 5000 周
(10 ns/周)

キッカーとセプタム

では入射振幅は何によって決まるのでしょうか。次の図は入射ビームと周回ビームが合流する付近の断面図です。ビームは紙面に垂直にやって来るとして下さい。

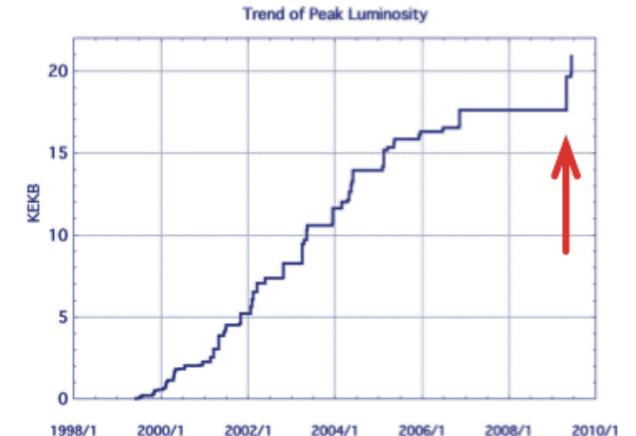


幅を最小にします。以上見てきたように、入射振幅はセプタムの厚さで決まります。セプタムには大きな電磁力がかかるのでこれに打ち勝ってできる限り薄いセプタムを作るのが「腕の見せ所」となります。

ビーム内の粒子の水平方向と垂直方向の運動は、互いに相関しないように設計されていますが、現実の加速器では誤差によって発生する水平垂直結合(X-Yカップリング)を補正する必要があります。

2009年3月、KEKBではスキュー六極電磁石(六極磁石を30度回転したもの)を導入し、この水平垂直結合の補正をエネルギーがずれたビーム粒子にまで適用しました。

これが突破口となって、KEKBの性能が飛躍的にアップし(右図↑)設計値の2倍を超えるピークルミノシティ20/nb/sを達成しました。



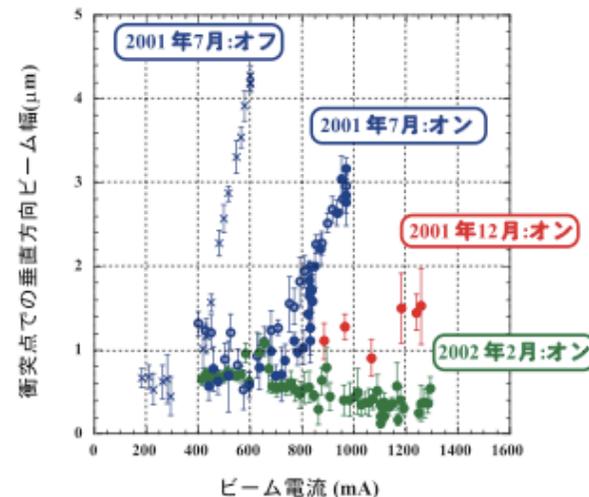
ピークルミノシティ (縦軸：単位は/nb/s)の変遷

ソレノイド磁場があるとビーム近くの電子密度が下がるため、ビームが太らなくなります。

ソレノイド磁石は運転休止期間の度に数を増やしていき、今は約1万個設置されています。右の図は、垂直方向ビーム幅とビーム電流の関係を経年的に示したものです。ソレノイド磁石の数が増えるにつれて、ビーム幅が増加する(ビームが太る)現象がおさまっていくことがわかります。

ソレノイド磁石はKEKBのルミノシティを上げるために重要な役割を果たしています。

オン(オフ): ソレノイド磁場あり(なし)

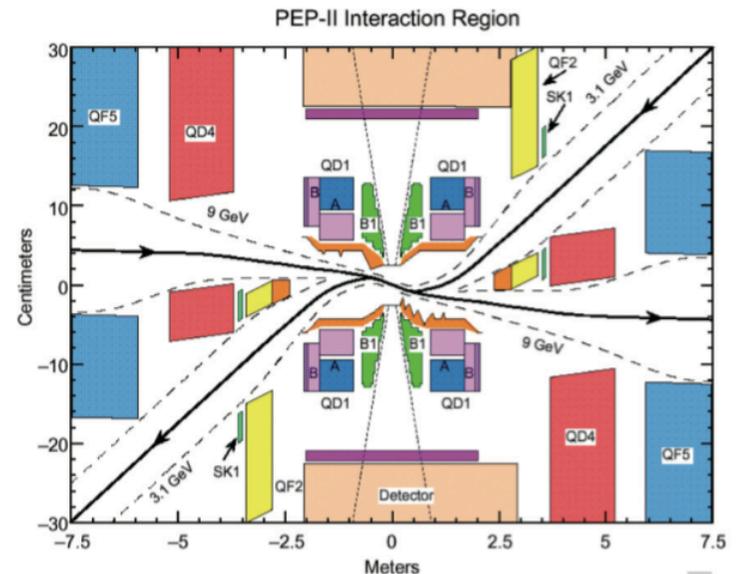
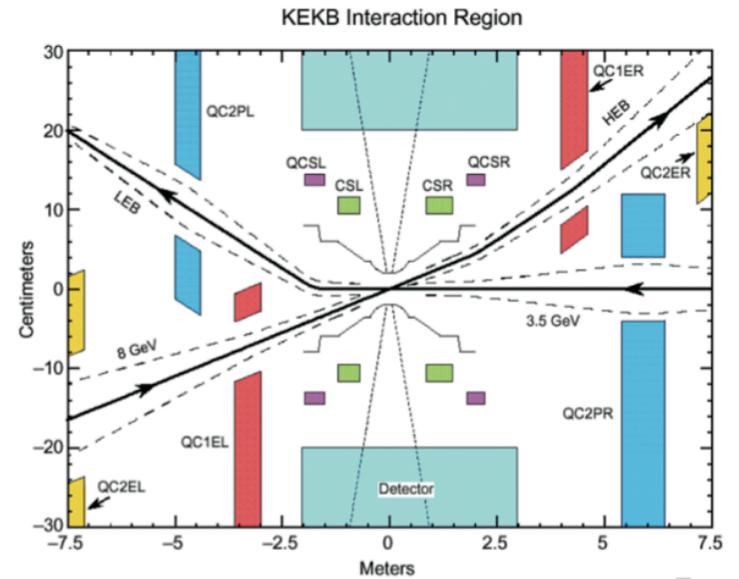


有限交差角衝突とは？

KEKBでは、電子と陽電子が正面衝突ではなく、水平方向に少し角度を付けて衝突しています。衝突角度は22mrad(約1.3度)です。このような衝突方式を、有限交差角衝突と呼びます。

有限交差角衝突の長所は？

KEKBで有限交差角衝突を採用した理由は二つあります。(1)衝突点付近の設計が簡単になること、(2)寄生衝突(すれ違い衝突)の影響を小さくできること、の二つです。右下の二つの図は、KEKB(有限角度衝突)とPEP-II(正面衝突)の衝突点付近の設計図です。どちらの加速器も電子と陽電子が別のリングを走るの、衝突前後で二つのビームを分ける必要がありますが、有限角度衝突の場合の方が簡単です。正面衝突の場合は、衝突点の前後に偏向電磁石(右下の図では緑色のB1)を設置しエネルギーの違いによる曲げ角の違いを利用して分離が行われます。このなくてもすむ電磁石を設置したために、衝突点でのビームを十分小さく絞れなくなりルミノシティが下がってしまう可能性もありますし、また分離用の電磁石の中でビームが放出する光が検出器の動作の邪魔をする可能性もあります。もう一つのすれ違い衝突の問題もこのビームの分離と関係があります。電子や陽電子は、リングの中を一樣ビームとして運動しているのではなくて、パンチと呼ばれる塊で運動していますが、パンチとパンチの間隔はKEKBの設計値で約60cm(現在のKEKBではその3~4倍)です。この場合、ある電子のパンチと陽電子のパンチが衝突点でぶつかった後(または前)に次のパンチと約30cm離れた場所ですれ違うこととなります。有限角衝突の場合は、このすれ違い点での相手のパンチとの距離が大きく、このすれ違い衝突の影響を受けにくいという長所があるのです。



クラブ空洞を用いたビームテスト

KEKで開発されたクラブ空洞は、2007年の冬にKEKBリングに設置され、その後このクラブ空洞のためのビームテストが行われました。このビームテストは、2007年の2月中旬から6月の終わりまでの約4ヶ月半

シティに注目しているわけです。図3から分かるように、バンチの電流が低い時には、クラブ空洞を用いた衝突(クラブ衝突)の方が、クラブ空洞を用いない場合(交差衝突)より高いルミノシティを与えます。一つの問題は、計算機シミュレーションでは、クラブ衝突では交差衝突より約2倍高いルミノシティが得られることが予言されているのですが、そこまで到達できませんでした。また、クラブ衝突ではバンチの電流を上げていくと、ビームの寿命が短くなって、交差衝突ほど高い電流に到達できないという問題があることも分かりました。

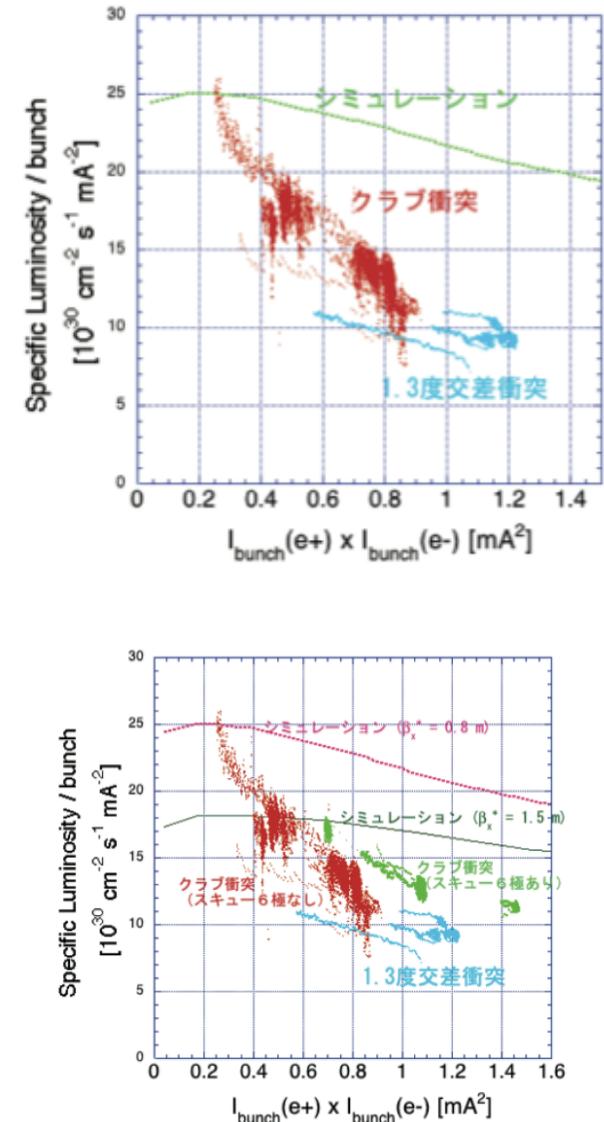


図5. スキュー6極電磁石を用いた場合と用いない場合のスペシフィックルミノシティの比較

1

ルミノシティとは

具体例をふまえて

(ルミノシティ)[nb⁻¹] x (反応断面積)[nb] = (イベント数)

重心エネルギー 10.58 GeV での BB ペアの作られる断面積 ~1.09 nb

ルミノシティ $21 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}/\text{s} = 21 \text{ nb}^{-1}/\text{s}$

→ 1秒あたり、~23のBBペアが作られる。

$$1 \text{ nb}^{-1} = 10^{33} \text{ cm}^{-2}$$

これがアップグレードでは ~800 nb⁻¹/s になる

→ 1秒あたり、~870のBBペアが作られる。

例えるなら、

土を掘るはやさ → ルミノシティ
土に含まれる鉱物の割合 → 断面積



2

ビーム粒子の数

ビームのイメージ



e^\pm の集団 = バンチ
バンチあたり $10^{10\sim 11}$ 個

一周3016mのリングに、
約2mおきに長さ6mmのバンチが
約1600個。



例えるなら、

米 $\rightarrow e^\pm$
すし \rightarrow バンチ

2

ビーム粒子の数

アップグレードで、

バンチ当たりの e^\pm の数 \rightarrow 約1.5倍

蓄積リング1周当たりのバンチの数 \rightarrow 約1.5倍

$$\mathcal{L} = \frac{N_+ N_- f}{4\pi\sigma_x\sigma_y} R_L$$

N_\pm : バンチ当たりの e^\pm の数
 f : 単位時間当たりのバンチ交差数

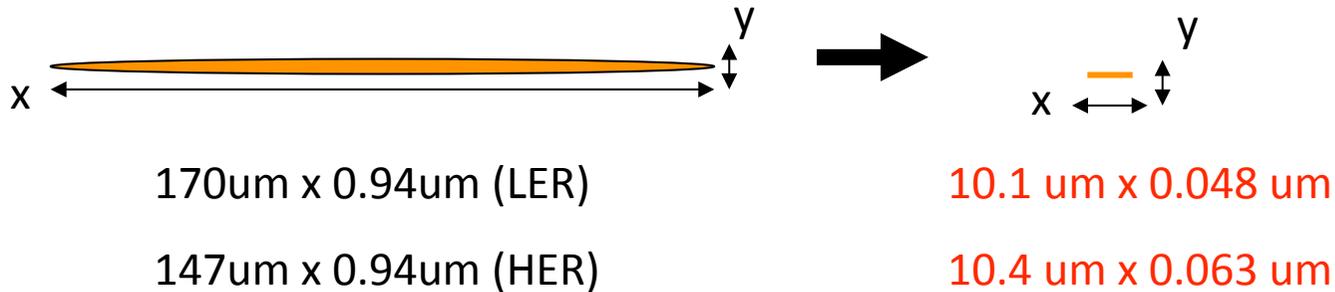
N_\pm と f から、蓄積リングを何 [C] の電子が回っているか計算できる。
 これをビーム電流という。

(LER) 1.6 [A] \rightarrow 3.6 [A]

(HER) 1.2 [A] \rightarrow 2.6 [A]

3

ビームサイズ



円形加速器で
世界最小のサイズ！

アップグレードで 衝突点でのビームサイズが
x,y 方向それぞれ 1/10 以下になる！

$$\mathcal{L} = \frac{N_+ N_- f}{4\pi\sigma_x\sigma_y} R_L$$

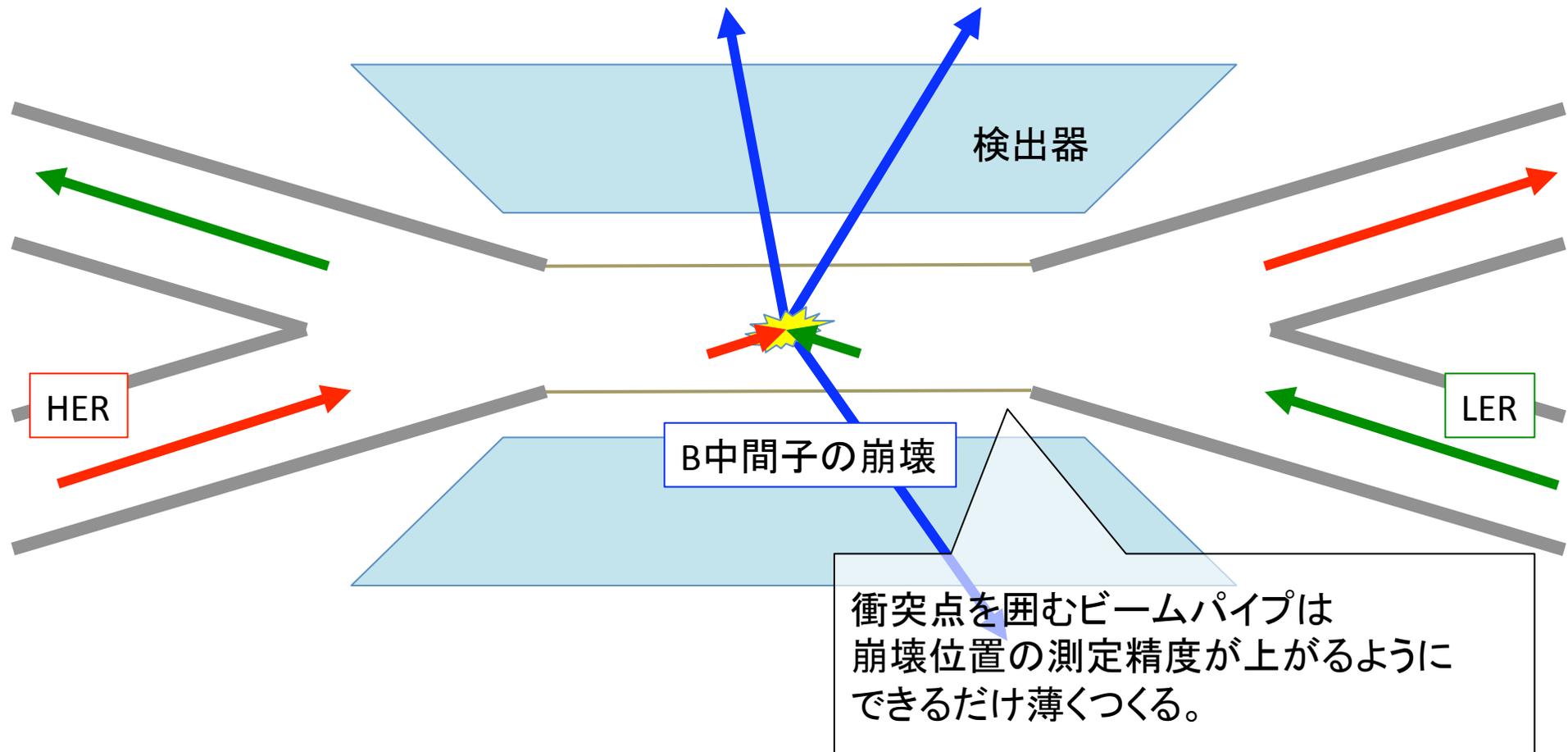
$\sigma_{x,y}$: 衝突点でのビームの
水平方向、垂直方向のサイズ

2

衝突点付近 (IR) の概要

IR : Interaction Region (衝突点近傍)

写真か、設計図



1

バックグラウンドとは

見たいイベント:

B中間子の崩壊

見たくないイベント:

他のクォークやレプトンの対生成

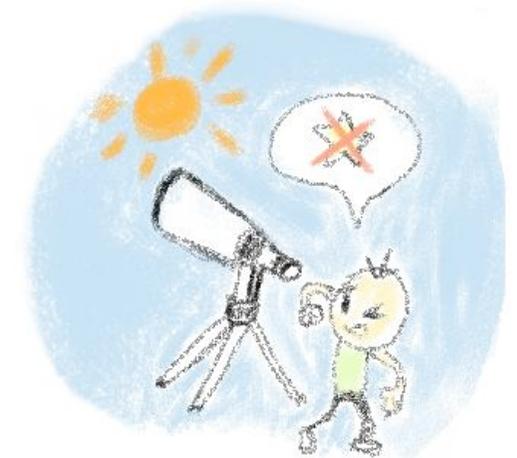
イベントではない粒子の検出:

ビーム由来のシンクロトン放射

軌道をそれたビーム粒子



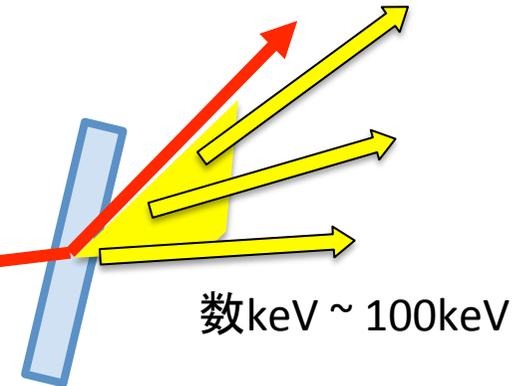
夜は星が見られるが、
ひるは太陽が邪魔で見られない。
(むしろ、目がやけどする)



シンクロトロン放射

磁石にて、ビームが曲げられた時放射される。

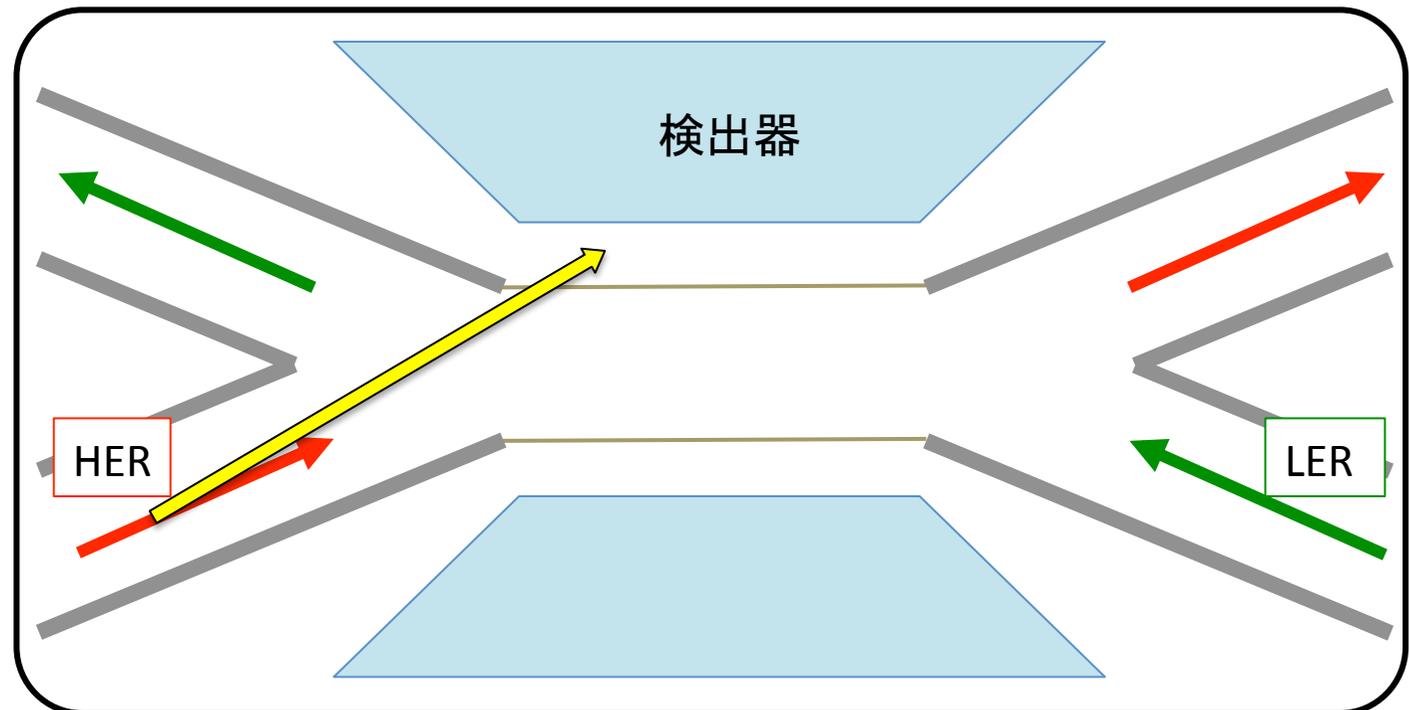
$$(\text{熱量}) \propto (\text{電流}) \times (\text{ビームエネルギー})^4$$



エネルギーの高い e^- ビームで重要

BG になる過程

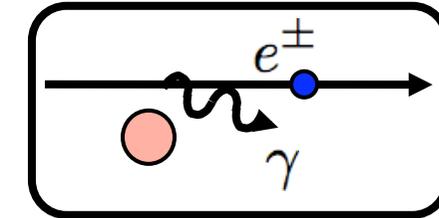
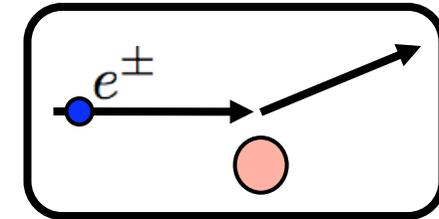
ビームパイプが薄い部分を通り抜けて検出器に入る。



ビーム粒子の散乱

残留ガスによる散乱

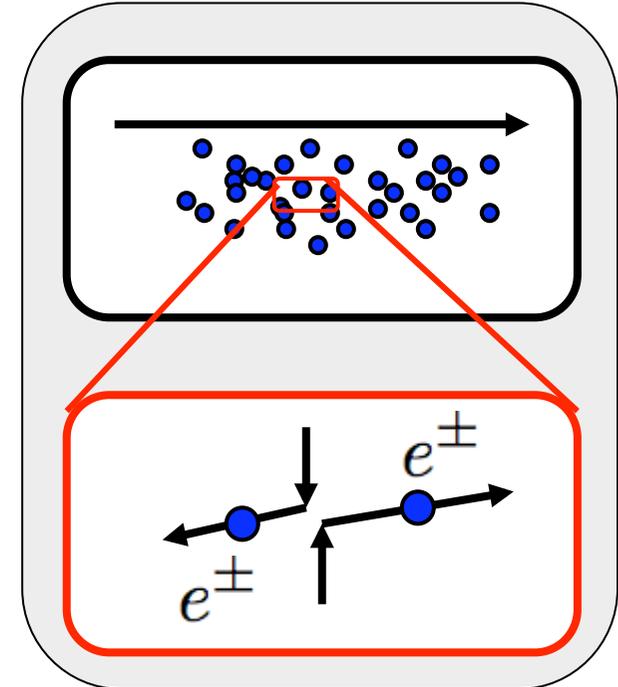
(散乱率) \propto (電流) \cdot (ガスの圧力)



バンチ内のビーム粒子どうしの衝突

(散乱率) \propto (バンチ数) \cdot (バンチ密度) / (エネルギー)³

アップグレードによって、散乱率がかなり増加。
LER のビーム寿命が極端に短くなることを防ぐため
LER のビームエネルギーを 3.5 \rightarrow 4.0 GeV に変更。



BG になる過程

散乱される

→ ビーム軌道を外れる

→ ビームパイプにあたる

ビームパイプに当たり、
電磁シャワーや中性子を作る。

