

SuperKEKBとバックグラウンドシミュレーション



東北大学 博士課程後期1年
中野浩至

M1の秋からD1の夏まで
2年ほどやりました。

目次

SuperKEKB加速器について

基本から述べていきます。

ビームロス とそれに伴う バックグラウンド

原理と特徴を説明します。

バックグラウンドシミュレーション

これまで自分がやったこと中心に話します。

SuperKEKB 加速器について

[要点]

KEKB の能力を知る

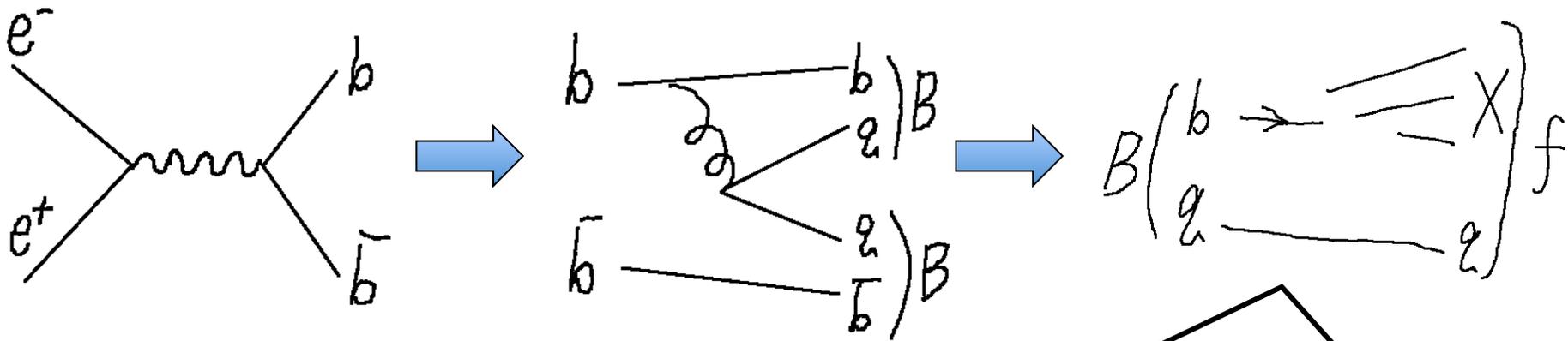
SuperKEKB でどれほどアップグレードされるか知る

KEKB 加速器の目的

B中間子がある終状態 f になる確率を調べることで
物理の探索を行う。

例) $f = K_S \eta \gamma$
※最近解析を始めました

KEKBでは電子、陽電子をぶつけてB中間子ペアを生成している。



実験にとってはB中間子を作った数が多いほど良い。
なるべくたくさんのB中間子を作りたい。

→ たくさん $e^+ e^-$ をぶつけない

KEKB の概要

まずは KEKB についておさらい

1周3kmのリングで
 e^+ 、 e^- を衝突させる。

1998年 から 2010年 まで運転。
現在、アップグレードに向け運転終了。

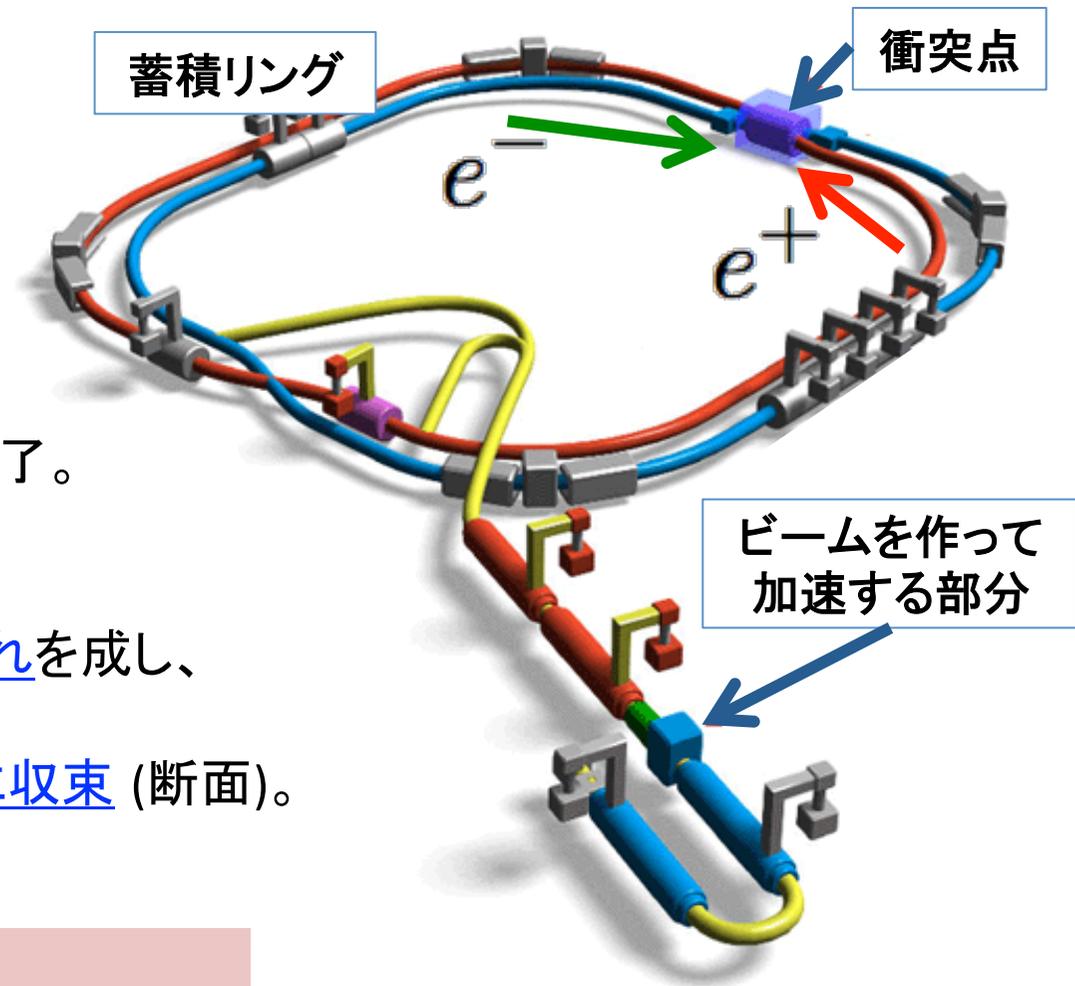
[最終的な能力]

e^\pm は **バンチ** という $10^{10} \sim 10^{11}$ 個の群れを成し、
 $\sim 1600 \times 10^5$ [回/s] 交差する。

衝突点では ~ 100 [μm] x 1 [μm] に収束 (断面)。

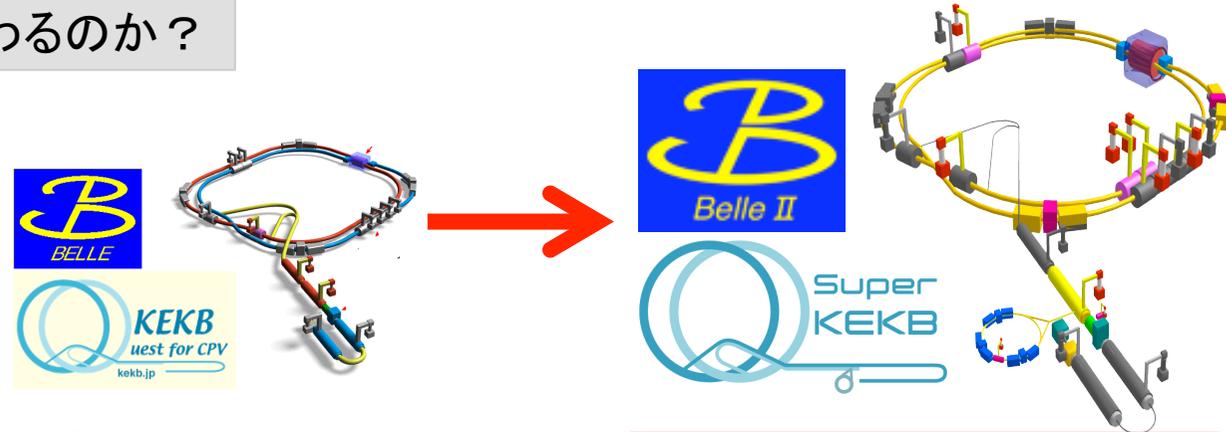
($e^+ e^-$ 衝突器で**世界一の性能**)

KEKB では1秒あたり
20 のBBペアが作ることができた。



SuperKEKB へのアップグレード

アップグレードでどのように変わるのか？



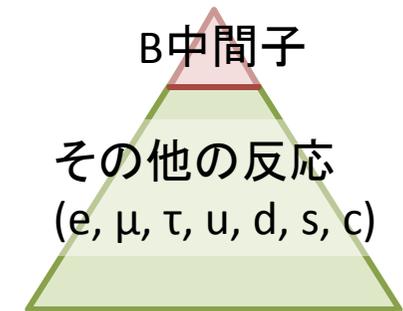
	<u>KEKB</u>	<u>SuperKEKB</u>
バンチあたりの e 数 [個]	$10^{10\sim 11}$	$\sim 10^{11}$ (~1.4倍)
交差回数 [回/s]	$\sim 1600 \times 10^5$	$\sim 2500 \times 10^5$
衝突点でのビームサイズ	$\sim 100 [\mu\text{m}] \times 1 [\mu\text{m}]$	$\sim 10 [\mu\text{m}] \times 0.05 [\mu\text{m}]$
BBペア生成数 [ペア/s]	20	800

能力が**40倍の 800 [ペア/s]**に！
 1年分のデータが丸3日で取得可！
 (1年分 = 10^7 [s] を仮定)

ビームの寿命

実は、ビーム粒子の大半は B 中間子になれないのです。

BBペアの作られる量	800 [個/s]
その他の反応	
・ $q q$ jet (b以外のクォーク)	~2,400 [個/s]
・ $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$ 生成	~1,600 [個/s]
・ e^+e^- 散乱	~10,000 [個/s]



ビームの寿命

実は、ビーム粒子の大半はB中間子になれないのです。

BBペアの作られる量 800 [個/s]

その他の反応

・ qq jet (b以外のクォーク) ~2,400 [個/s]

・ $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$ 生成 800 [個/s]

・ e^+e^- 散乱 ~10,000 [個/s]

ビームロス

(周回軌道をそれ、壁に当たる)

~ 100,000,000,000 [個/s]

比率 $\sim 10^8$
(cf. ジャンボ宝くじの
1等当選確率 10^{-7})

ちよこーん

桁違いの
ビームロス！
(原因については次ページ以降)

ビームの寿命

実は、ビーム粒子の大半は B 中間子になれないのです。

BBペアの作られる量	800 [個/s]
その他の反応	
・ qq jet (b以外のクォーク)	~2,400 [個/s]
・ $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$ 生成	800 [個/s]
・ e^+e^- 散乱	~10,000 [個/s]

ビームロス

(周回軌道をそれ、壁に当たる)

~ 100,000,000,000 [個/s]

→ **6 [min]** でビームは無くなってしまう！
(KEKBでは e^+ / e^- それぞれ ~2 [h] / ~20 [h])

アップグレードによって、B中間子を作る能力があがるが、ビームの寿命が短くなってしまふ。

比率 $\sim 10^8$
(cf. ジャンボ宝くじの
1等当選確率 10^{-7})

ちこーん

桁違いの
ビームロス！
(原因については次ページ以降)

ビームロス

[要点]

ビームロスの原理 (3種類) を知る。

アップグレードに伴いなぜ増えるかを理解する。

ビームロスの原因

原因は主に3種類

多い順に...

- 1)
周回している間にバンチ内で
ビーム粒子どうしが衝突し、エネルギーが変わる。
- 2)
ビームが交差する際に光子を放出し、
エネルギーが減少。
- 3)
リング内にわずかに残っているガス(主にCO)
によって散乱され、向きが変わる。

4GeV e⁺ ビーム
Total 625 [GHz]

400 [GHz]

125 [GHz]

100 [GHz]

7GeV e⁻ ビーム
Total 435 [GHz]

260 [GHz]

125 [GHz]

50 [GHz]

向きやエネルギーが変わると、
軌道を回れなくなりロスする。

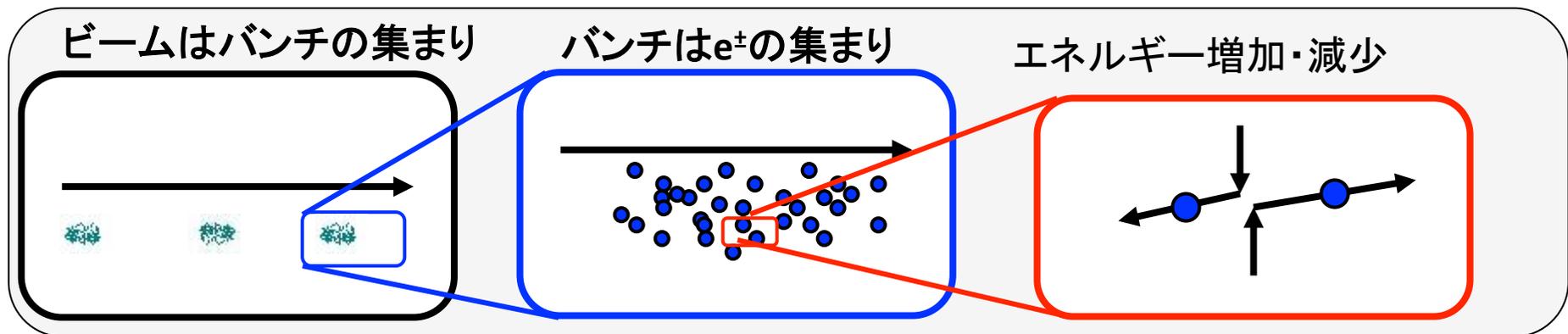
値:森田さん
@10th B2GM (11/19)

→順に1つずつ説明します

ビームロスの原因

原因は主に3種類

- 1) 周回している間にバンチ内でビーム粒子どうしが衝突し、エネルギーが変わる。
- 2) ビームが交差する際に光子を放出し、エネルギーを落とす。
- 3) リング内にわずかに残っているガス(主にCO)によって散乱され、向きが変わる。



増える理由:

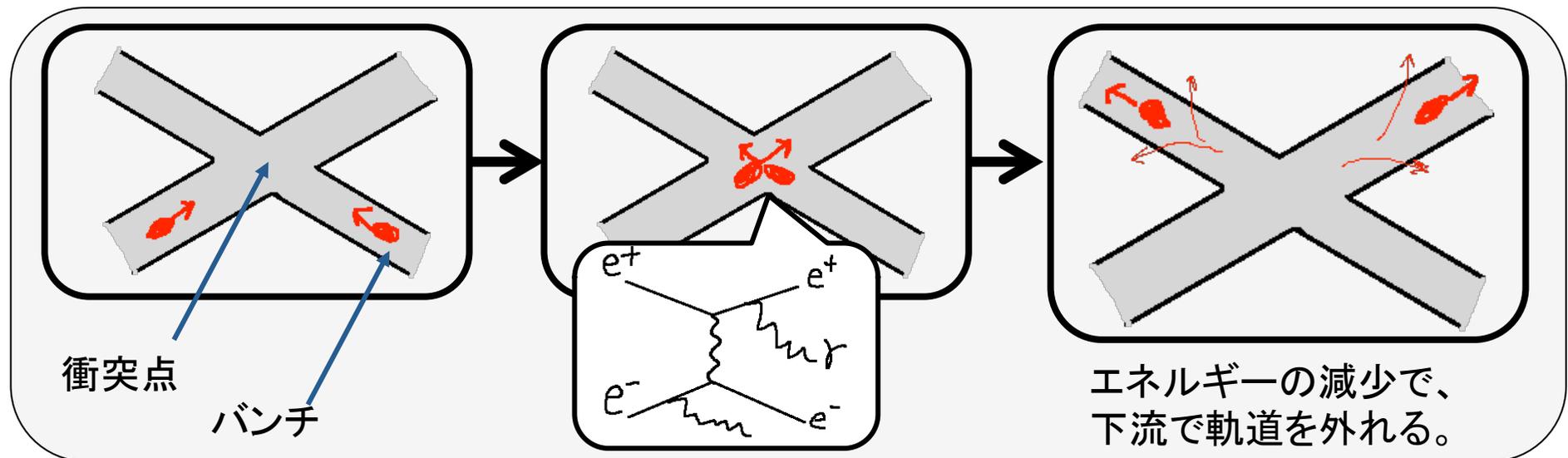
- ・ ビームの大きさが小さくなるから。
- ・ バンチあたりの粒子数がふえるから。

散乱率は30倍くらい

ビームロスの原因

原因は主に3種類

- 1) 周回している間にバンチ内でビーム粒子どうしが衝突し、エネルギーが変わる。
- 2) ビームが交差する際に光子を放出し、エネルギーを落とす。
- 3) リング内にわずかに残っているガス(主にCO)によって散乱され、向きが変わる。



増える理由:

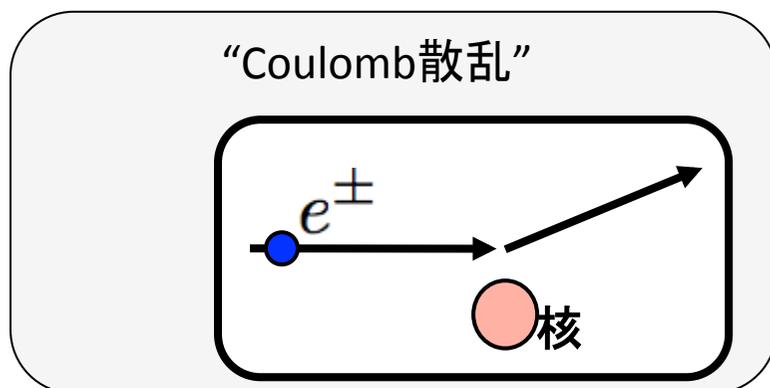
- ・ビームの衝突頻度が上がるから。

散乱率は40倍くらい

ビームロスの原因

原因は主に3種類

- 1) 周回している間にバンチ内でビーム粒子どうしが衝突し、エネルギーが変わる。
- 2) ビームが交差する際に光子を放出し、エネルギーを落とす。
- 3) リング内にわずかに残っているガス(主にCO)によって散乱され、向きが変わる。



散乱頻度は
リング内の粒子数や圧力に比例。

→ 増えてもたかだか2倍程度

ロスが増える理由は後ほど述べます。

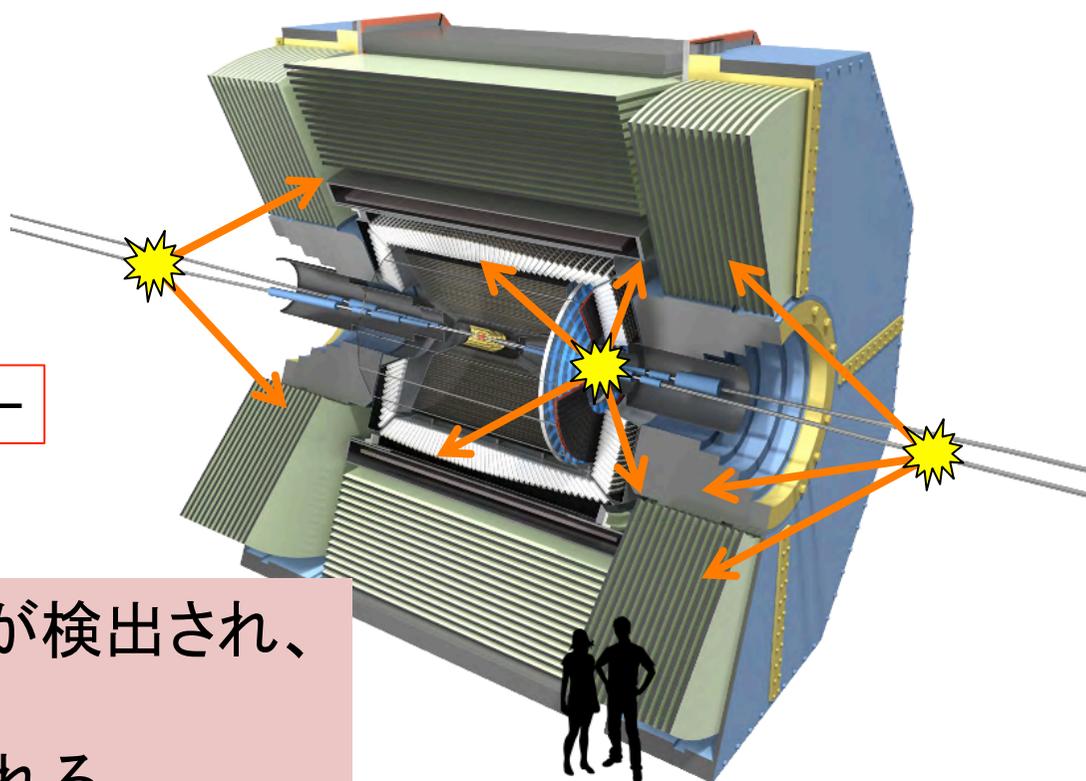
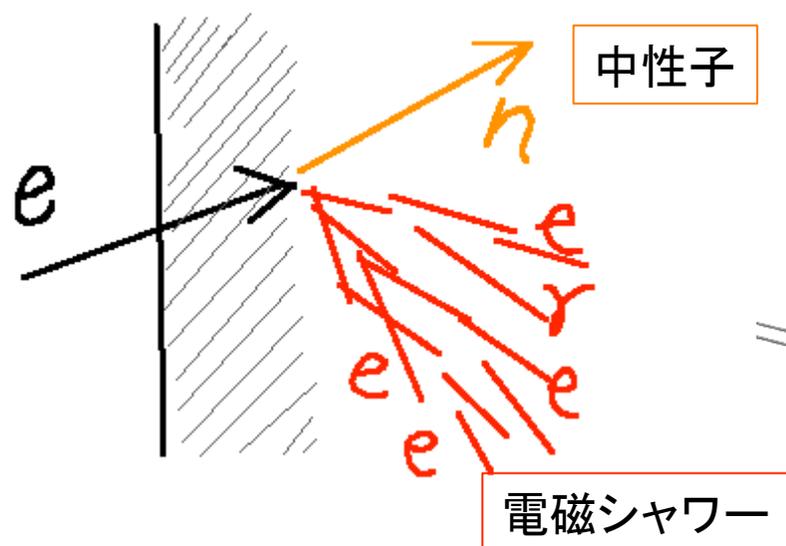
検出器へのバックグラウンド

[要点]

検出器への影響とその対策を知る。

検出器へのバックグラウンド

Belle II 検出器の内側や近くでビームがロスすると、そこから電磁シャワーや中性子が発生。

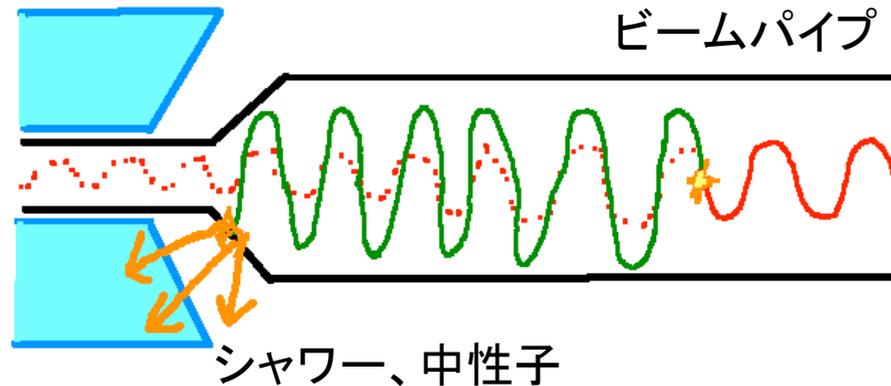


B 中間子の崩壊以外のものが検出され、
実験にとってよくない。
→ひどい場合は検出器が壊れる。

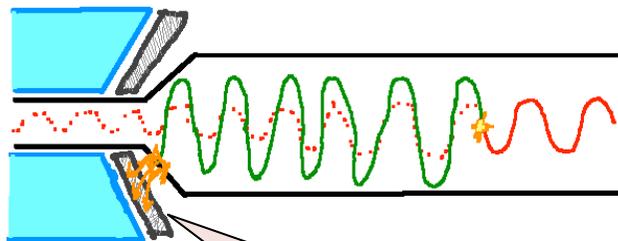
バックグラウンドの発生過程と止め方

どのようにビーム由来のバックグラウンドが生じるのか？

- 1) 軌道をそれる
- 2) 検出器付近でロスする
- 3) シャワー、中性子を生成

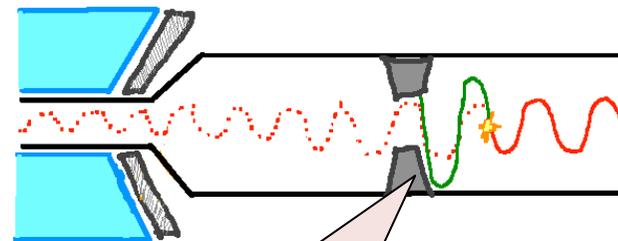


いかにしてBGを低減するか？



重金属シールド

十分な厚さで電磁シャワーを止める。



コリメータ

軌道を外れてしまったものを、
検出器より上流で止める。

バックグラウンドシミュレーション

いろいろあるのですが、自分が貢献した部分中心に内容を絞ります

[要点]

バンチ内で衝突する散乱過程について
どのように解決したか？

残留ガスによる散乱
なぜ深刻か？
どのように解決したか？

検出器付近でのロスに対する認識

バックグラウンドシミュレーション

いろいろあるのですが、自分が貢献した部分中心に内容を絞ります

[要点]

バンチ内で衝突する散乱過程について
どのように解決したか？

残留ガスによる散乱
なぜ深刻か？
どのように解決したか？

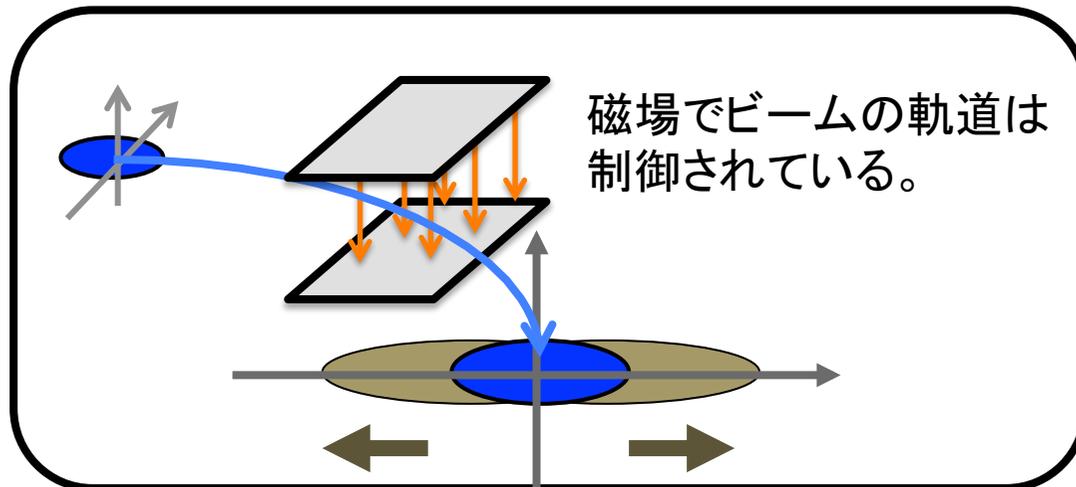
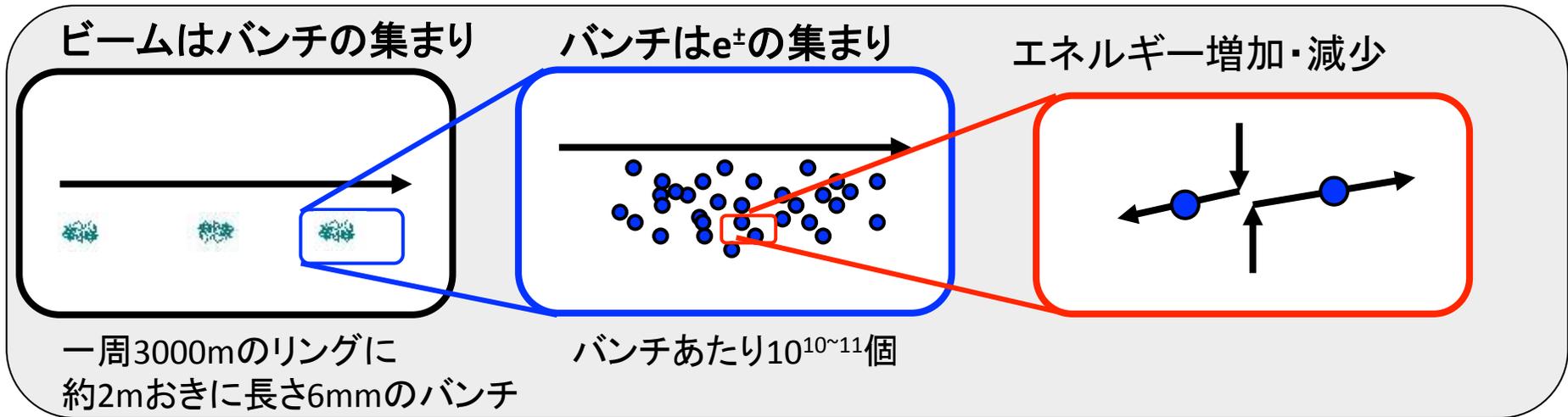
検出器付近でのロスに対する認識
かなりざっくりいうと

~ 10 [GHz] 以上 → やばい
~ 1 [GHz] 以下 → なんとか大丈夫

※もちろん、
ロスの位置
検出器の種類
によって異なる。

バンチ内で衝突する散乱過程 [1/3]

最も深刻なビームバックグラウンドの原因をおさらい



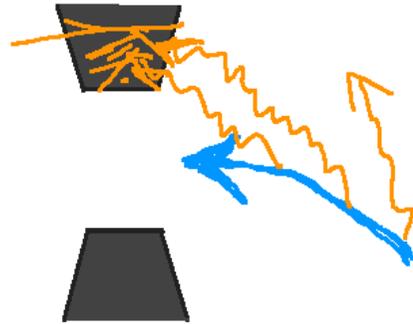
エネルギーが変化すると、水平方向に軌道がずれる。

シミュレーションで再現されたし、物理的にも理解できる。

バンチ内で衝突する散乱過程 [2/3]

さて、KEKB では水平方向のコリメータは内側にしかついていませんでした。

外側にコリメータを置くと、
シンクロトン放射が当たるので良くない。

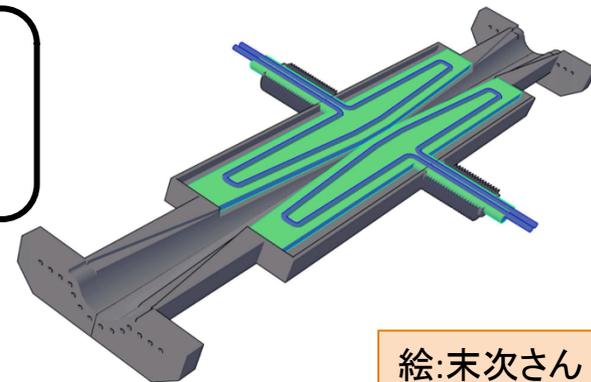


※シンクロトン放射:
荷電粒子が曲がる時に
接線方向に放射される光。

外側にもコリメータが必要と主張。

SuperKEKBにとって最も深刻なものは
「バンチ内衝突の散乱」だ。

両側コリメータがデザインされた。



絵:末次さん

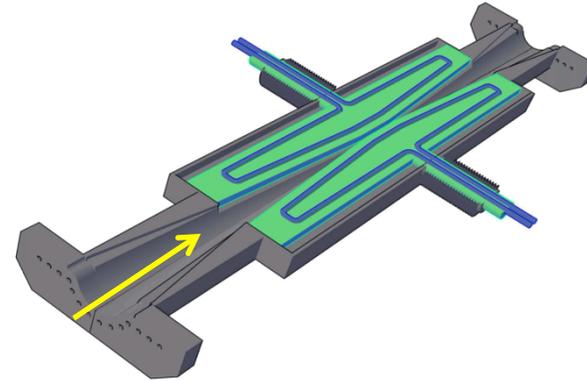
バンチ内で衝突する散乱過程 [3/3]

リング周上にコリメータを設置

コリメータの位置は
軌道のずれ 又は
ビームサイズ が
大きい位置を8ヶ所を選択。

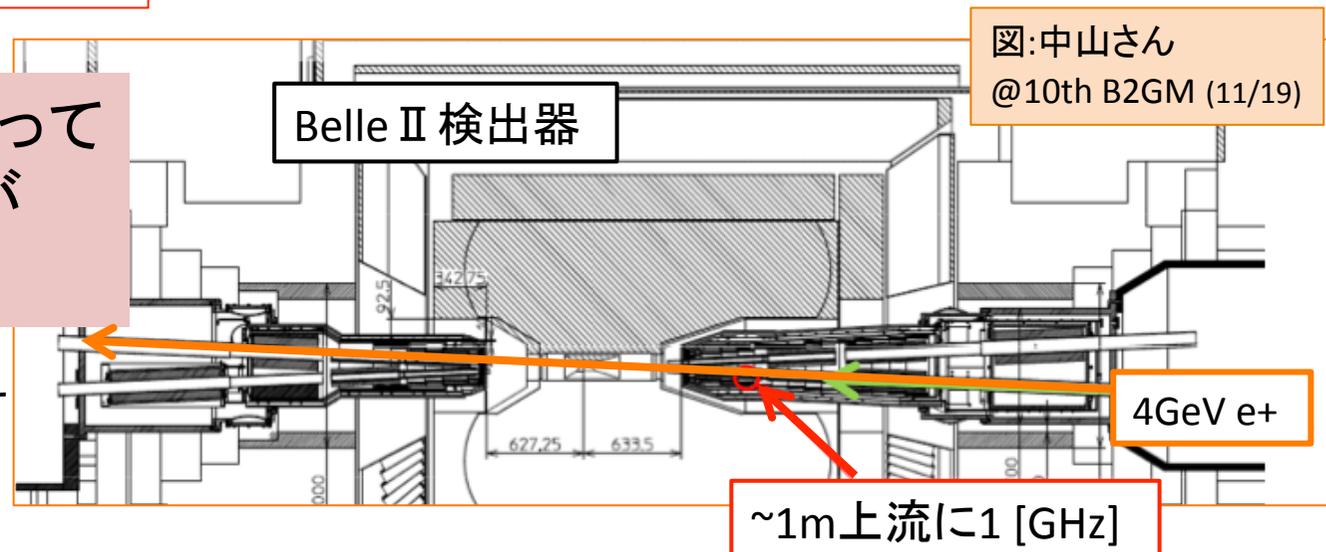
深さはビーム寿命を
縮めないように設定。

水平方向に軌道をずれたやつを止める



水平コリメータによって
> 10 [GHz] のロスが
~ 1 [GHz] に減少！

😊 検出器の要求を満たす



残留ガスによる散乱過程 [1/2]

散乱率はビーム粒子数に比例しおよそ2倍。
(他の散乱率は数十倍になる。真空度が変わらないと仮定。)

なので、こいつはあまりたいしたことないと思われていたのだが...

シミュレーションで計算すると、
検出器付近に **~10 GHz** のロスをするのがわかった！

研究グループ内で議論

残留ガスによる散乱過程 [1/2]

散乱率はビーム粒子数に比例しおよそ2倍。
(他の散乱率は数十倍になる。真空度が変わらないと仮定。)

なので、こいつはあまりたいしたことないと思われていたのだが...

シミュレーションで計算すると、
検出器付近に **~10 GHz** のロスをするのがわかった！

研究グループ内で議論

中野君の使ってる式が
間違ってるんじゃないか？

じゃあ、中野君のシミュレーションが
バグってるんだらう。

どうやら式はあってるらしい。

手計算で概算してみよう...
あれ、シミュレーション結果は
正しいのでは？

シミュレーションの妥当性が、物理的に理解された。

→次のページで説明

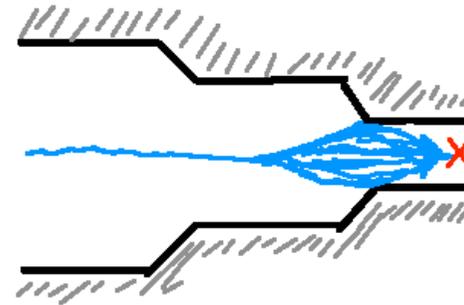
残留ガスによる散乱過程 [2/2]

なぜ、散乱率が大して増えないのにロス率が深刻な値を出すのか？

衝突点直前の磁石(1m手前)で、
垂直方向にビームはいったん大きくなる。

衝突点でのビームパイプ半径は
Belleの頃より細い(1.5 [cm] → 1 [cm])

→ 今まで以上にロスしやすくなっていた！



4GeV e⁺ ビーム

165 [GHz]

7GeV e⁻ ビーム

77 [GHz]

値:中山さん
@10th B2GM (11/19)

残留ガスによる散乱過程 [2/2]

なぜ、散乱率が大きして増えないのにロス率が深刻な値を出すのか？

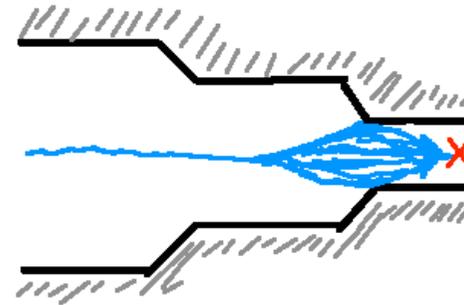
衝突点直前の磁石(1m手前)で、
垂直方向にビームはいったん大きくなる。

衝突点でのビームパイプ半径は
Belleの頃より細い(1.5 [cm] → 1 [cm])

→ 今まで以上にロスしやすくなっていた！

→ だったら、ビームパイプを太くしよう。

1.5 ~ 2倍ほどロス率が減り、
10ページ目で述べた値になった。



4GeV e⁺ ビーム

165 [GHz]

→ 100 [GHz]

7GeV e⁻ ビーム

77 [GHz]

→ 50 [GHz]

値:中山さん
@10th B2GM (11/19)

残留ガスによる散乱過程 [2/2]

なぜ、散乱率が大して増えないのにロス率が深刻な値を出すのか？

衝突点直前の磁石(1m手前)で、
垂直方向にビームはいったん大きくなる。

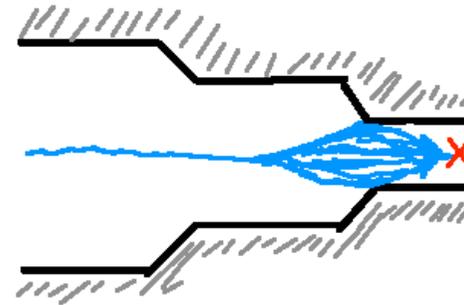
衝突点でのビームパイプ半径は
Belleの頃より細い(1.5 [cm] → 1 [cm])

➔ 今まで以上にロスしやすくなっていた！

➔ だったら、ビームパイプを太くしよう。

1.5 ~ 2倍ほどロス率が減り、
10ページ目で述べた値になった。

さらに垂直方向のコリメータで検出器付近のロス は ~1 [GHz] に！



4GeV e⁺ ビーム

165 [GHz]

→ 100 [GHz]

7GeV e⁻ ビーム

77 [GHz]

→ 50 [GHz]

値:中山さん
@10th B2GM (11/19)

まとめ

SuperKEKB にアップグレードすることで、
B中間子対を作る能力がこれまでの **40倍** の **800 [個/s]** になる。

アップグレードに伴い、
ビーム由来の**バックグラウンドも増加**する。

現在シミュレーションを用いてバックグラウンドを見積もり、
できるだけ減らすための努力がなされている。



[やったこと]

粒子同士の散乱には**両側**のコリメータが必要と主張。
残留ガス散乱が深刻であると発見。 ...等

バックアップ

何が違うのか？

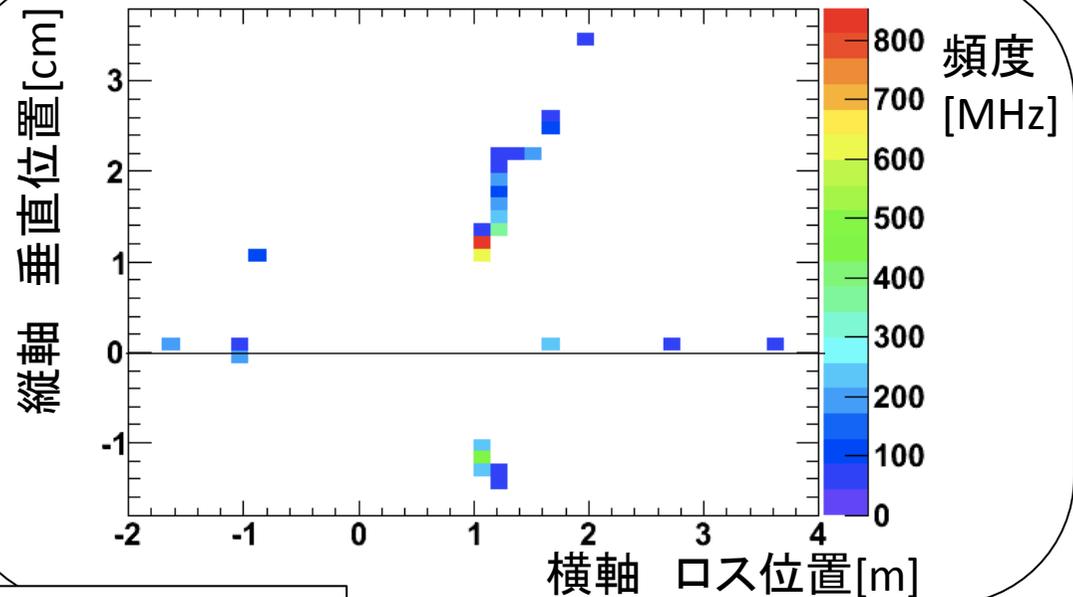
KEKB, SuperKEKBの違い

要点3つ

- 1) 大きな交差角を採用したことでビームをさらに絞れるようになった。
- 2) LER の電子雲対策によって、ビーム電流の増加が可能になった。
- 3) LER Bend と HER, LER の光学を変えることでエミッタンスを向上。

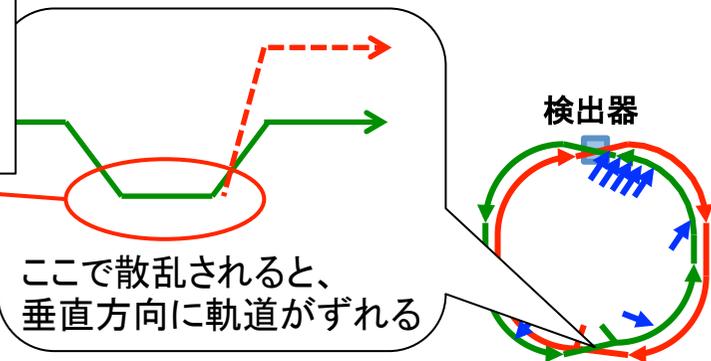
コリメータで止められなかったロスについて調べた

ロス位置に関して、
ビーム進行方向 vs
垂直方向の座標
をプロットすると、
大半のロスが垂直方向
であることがわかった。



ロスした粒子が散乱された位置を
調べると、e-リングと交差するために
唯一**垂直方向の bend がある場所**であった。

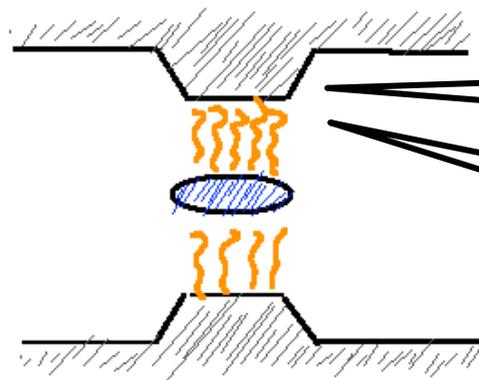
垂直方向のコリメータを置く場合**TMC**
(径の絞め過ぎでビームが不安定になる効果)
の影響を考慮する必要がある。



残留ガスによる散乱過程[1/2]

一方、残留ガス散乱によるバックグラウンドに対しては
垂直方向のコリメータがすごく欲しいことがわかった。

➔ しかし、垂直方向のコリメータを置く場合
"TMCI" (径の絞め過ぎでビームが不安定になる効果)
の影響を考慮する必要がある。



ビーム不安定の解消のため、
コリメータを広くしないとイケない。

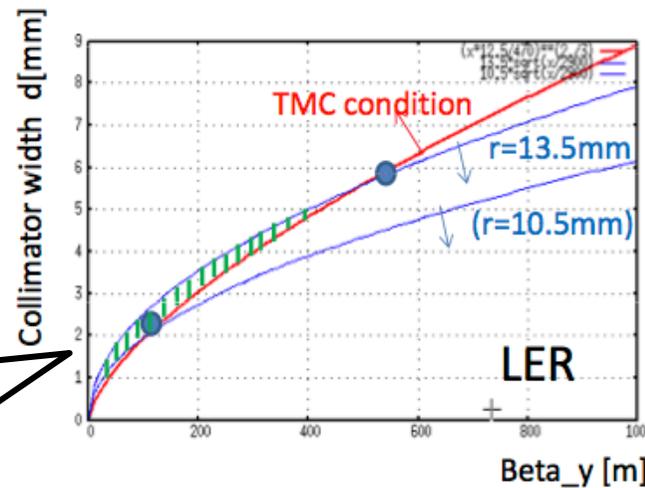
しかし、コリメータを狭めないと、
バックグラウンドが減らせない。

垂直方向のコリメータは
置きたいけど事情により難しい

残留ガスによる散乱過程[2/2]

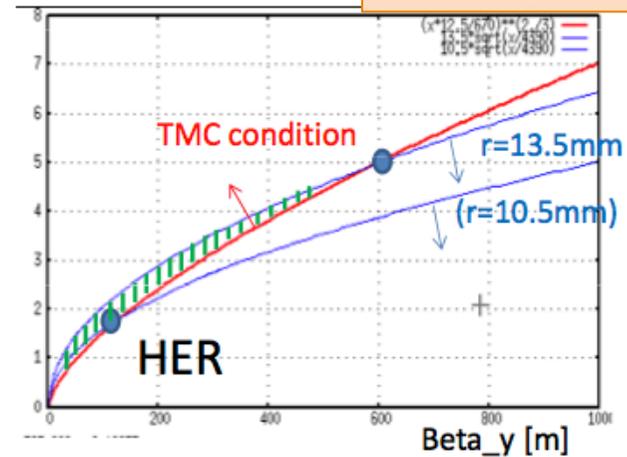
“TMCI”の悪影響を回避しつつ、
垂直方向のコリメータを置く解がある！

ビームサイズが
小さい位置に
コリメータを置く
ことができる。



collimator @ LLB3R
s \sim -80m, $\beta_y\sim$ 94m,
d \sim 2.42mm

➡ IR loss : \sim 1GHz



Collimator @ LIPL4A
s \sim -19.5m, $\beta_y\sim$ 508m,
d \sim 4.59mm

➡ IR loss : \sim 1GHz

中山さん@B2GM

垂直コリメータを置くことができ、
ロスは \sim 1 [GHz] に減少！

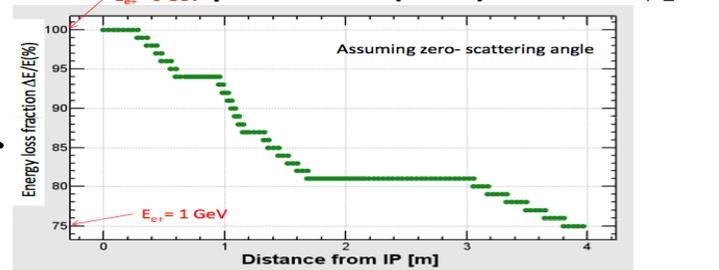
光子を放出し、エネルギーを落とす過程

最近、どのくらい検出器付近でロスするか計算された。

中山さん@B2GM
(船越さん)

$\Delta E/E > 75\%$ のやつは衝突点のすぐ近くでロスする。

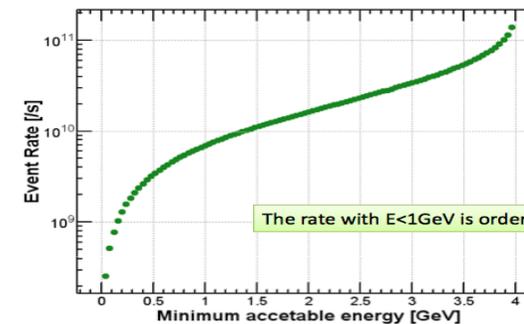
Loss position simulation of spent positron (LER)



Positrons with < 1 GeV are lost inside detector !

$\Delta E/E > 75\%$ のやつは数 GHz の頻度で生じる。

Beam Loss Rate near IP dependent on minimum acceptable energy in IR



The rate with $E < 1\text{ GeV}$ is order of few GHz!

数GHz が検出器付近でロスする。
出た光子が検出器から10m下流で中性子を作るのも厄介。