

SuperKEKB電子・陽電子衝突型 加速器の第1期試験運転における ビームバックグラウンド測定

奈良女子大学大学院 人間文化研究科
物理学専攻 高エネルギー物理学研究室

横山紗依

2017/2/16 修士論文発表会



目次

- Belle II実験
- バックグラウンド検出器
 - 研究の動機
 - 検出器の概要とデータ収集系
 - 宇宙線での動作確認
- SuperKEKB加速器Phase-1におけるバックグラウンド測定
 - バックグラウンドの種類
 - 測定結果とシミュレーションとの比較
- まとめ

Belle II実験

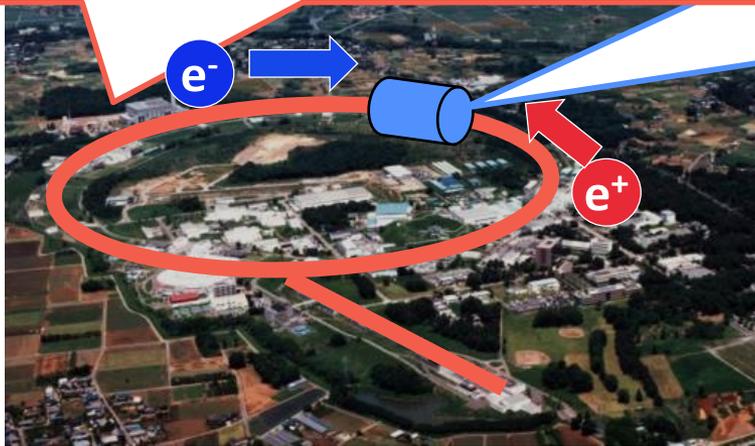
Belle II実験

SuperKEKB加速器

Belle II実験

SuperKEKB加速器

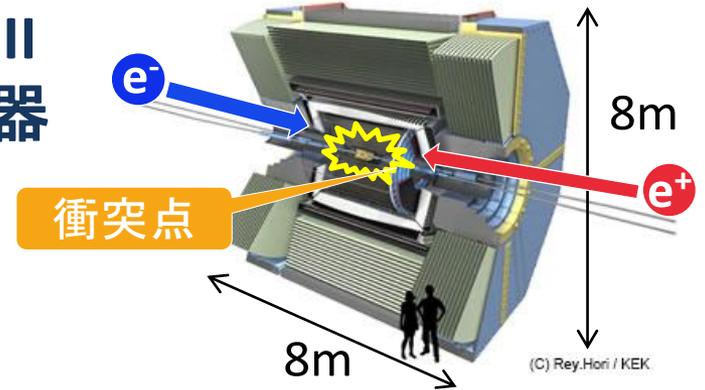
KEKBの40倍の衝突の頻度(ルミノシティ)



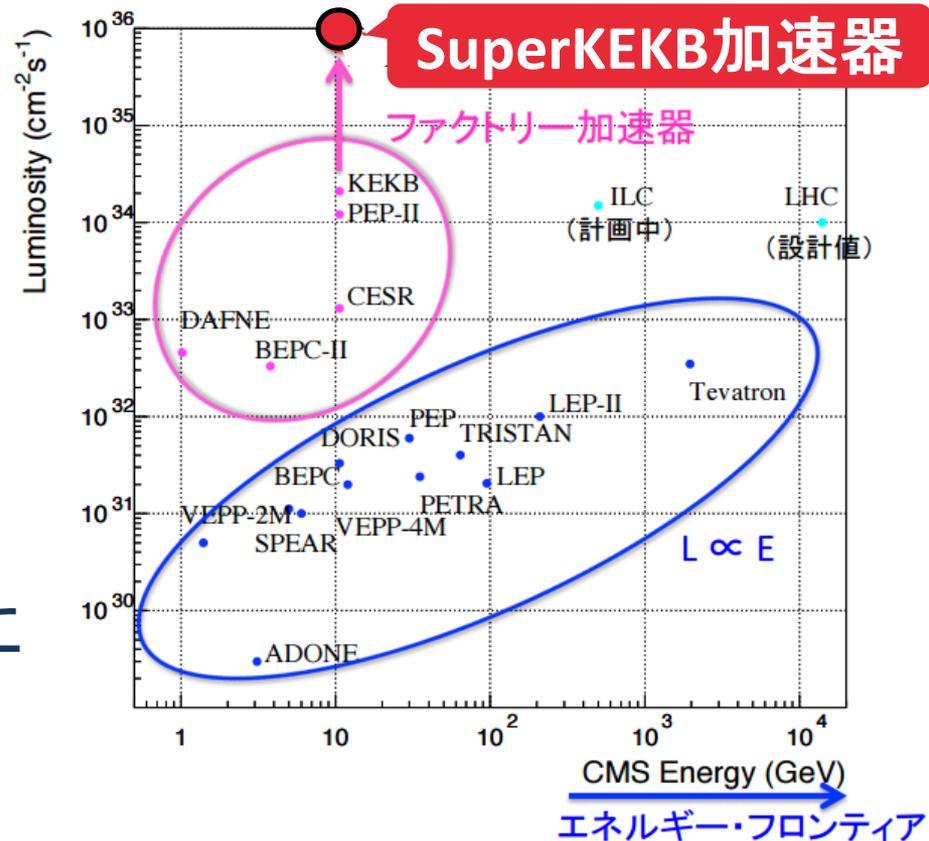
ルミノシティ・フロンティア ↑

- B中間子対を大量に生成する加速器実験
- 稀崩壊モードをより精密に Belle実験 → Belle II実験へ

Belle II 測定器



改良・新規開発 → 測定精度の向上



SuperKEKB加速器

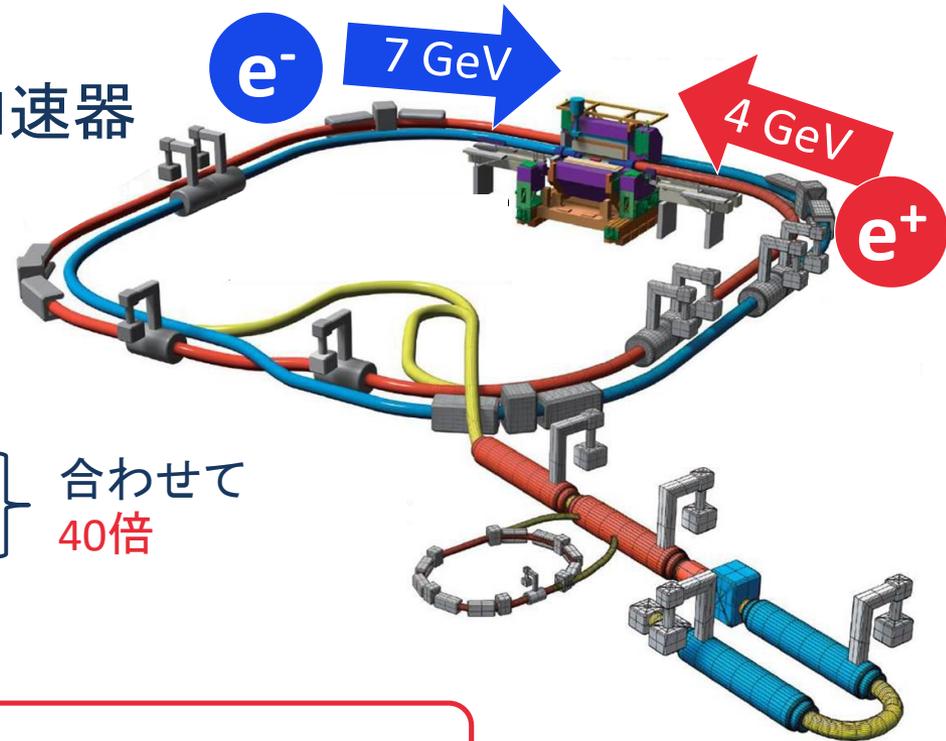
- 電子7GeV・陽電子4GeVの非対称エネルギー衝突型加速器

- 目標ルミノシティ:
KEKB加速器の40倍

- 設計値 $8.0 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - ビームサイズの絞り込み 20倍
 - ビーム電流の増加 2倍
- 合わせて 40倍

- コミッショニングが開始

- Phase1:2016年2月 - 6月
 - ビーム衝突なし、Belle II測定器なし、加速器の調整
- Phase2:2017年度後半
 - ビーム衝突あり、Belle IIロールイン(崩壊点検出器以外)
- Phase3:2018年度後半
 - Physics run開始



バックグラウンド検出器

研究の動機

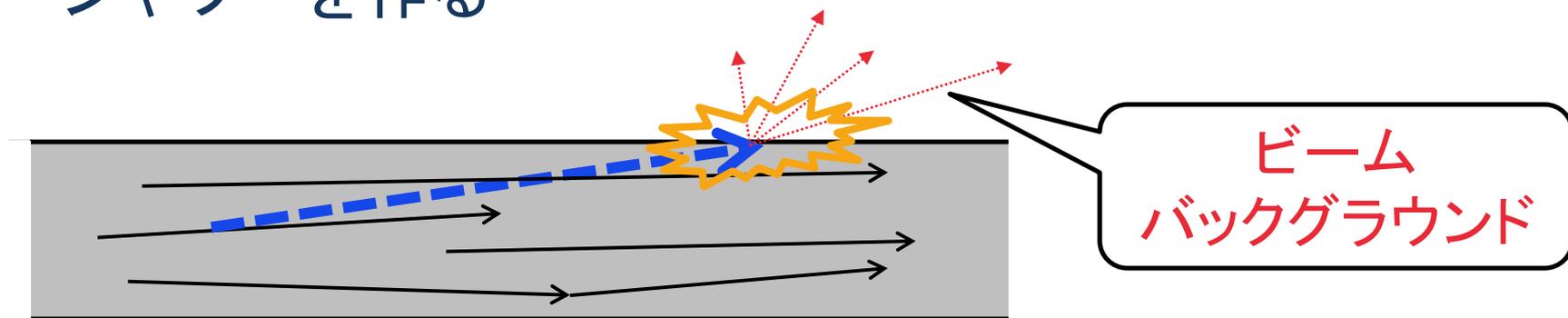
バックグラウンド検出器の概要

データ収集系

宇宙線での動作確認

研究の動機

- 軌道を逸れた粒子は、ビームパイプに衝突して電磁シャワーを作る



- ルミノシティの増加＝ビームバックグラウンドの増加
 - 粒子の検出効率の悪化、Belle IIが壊れることも
 - 原因を理解・抑制したい
 - **バックグラウンドを測定する検出器が必要**

研究の動機

- SuperKEKB加速器のコミッショニングが開始

- Phase1:2016年2月 - 6月

- ビーム衝突なし、Belle IIなし、加速器の調整

- Phase2:2017年度後半

- ビーム衝突あり、Belle IIあり(VXD以外)

- Phase3:2018年度後半

- Physics run開始



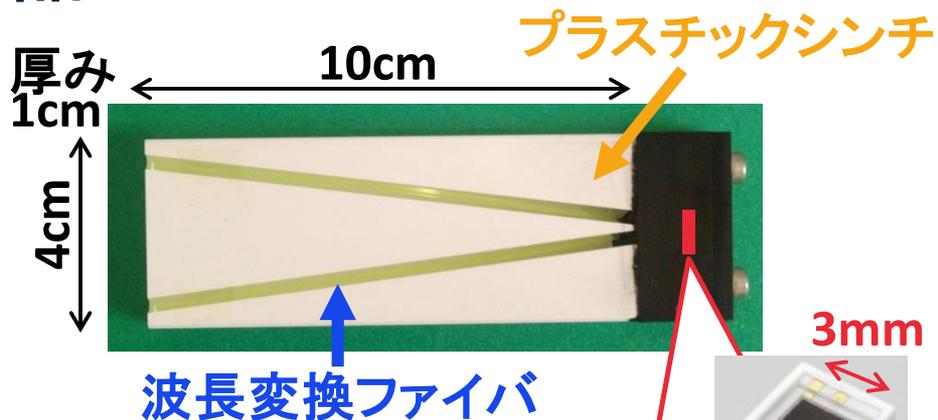
- Phase-1でバックグラウンドを測定

- Phase-2以降のシミュレーションを現実に近づける

シンチレータとMPPCを用いたバックグラウンド検出器

• 利点

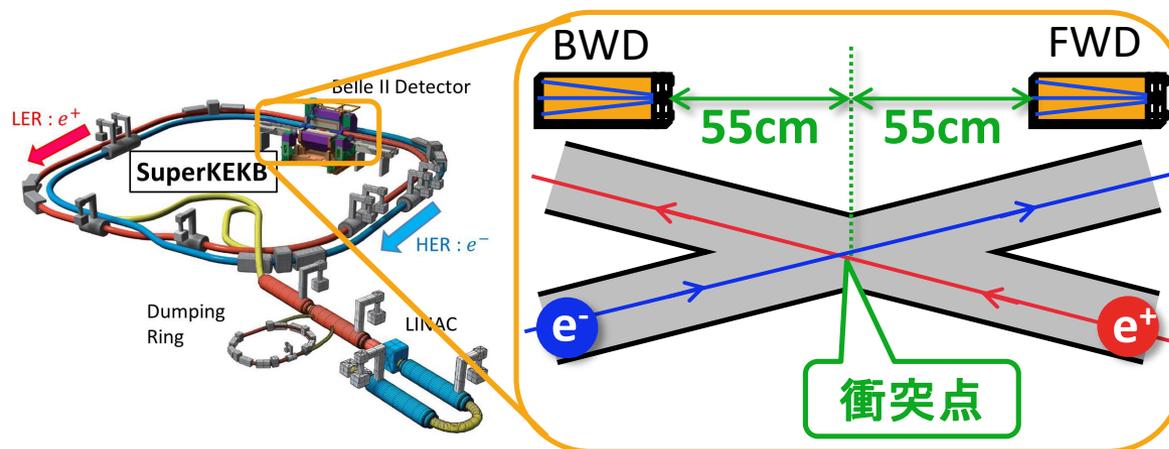
- コンパクト、簡単に設置可能
- 速い応答
- 荷電粒子に対する感度が高い



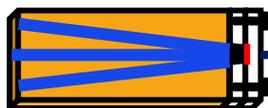
MPPC

(Multi-Pixel Photon Counter)
浜松ホトニクス社製 [S12572-050C](#)

- 電子リング(7GeV)と陽電子リング(4GeV)
それぞれの下流に1つずつ配置



データ収集系



EASIROC

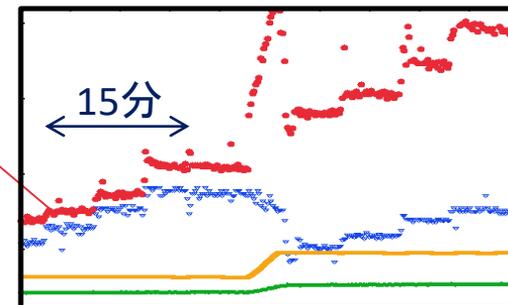
ディスクリ

スケーラ



- CONTEC
CNT24-2(USB)GY

- 計数率



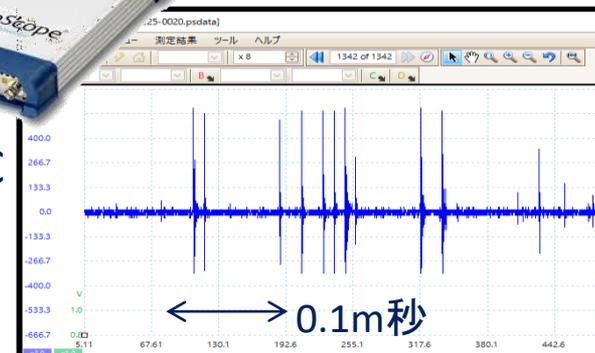
計数率
[Hz]

15分

スコープ

- PicoScope 6402C

- 波形



0.1m秒

MPPC64ch 温度計

EASIROC x2

計装用ADC

ADC

FPGA

ASIC保護回路

Ethernet by SITCP (FPGA構築)

内蔵バイアス電源(0~90V)

LVDS 出力

- MPPC64chを制御可能
- MPPCへの電圧供給とアンプとして使用

宇宙線で動作確認

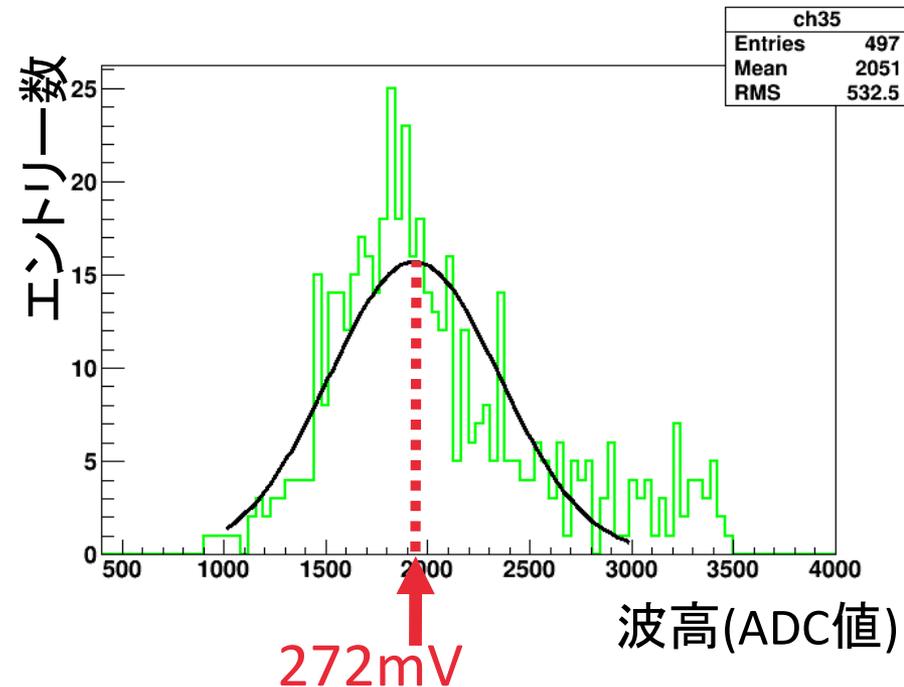


シンチ+PMT

バックグラウンド検出器

シンチ+PMT

- 三段同時に信号が通過
= 宇宙線イベント
- 荷電粒子一個の貫通
= $272 \pm 6\text{mV}$



SuperKEKB加速器Phase-1 におけるバックグラウンド測定

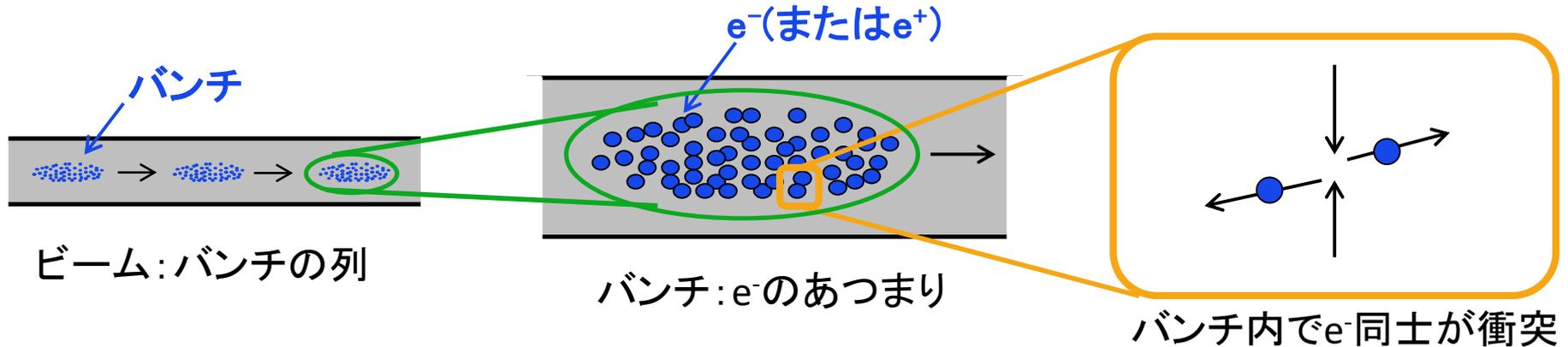
ビームバックグラウンドの種類

測定結果とシミュレーションとの比較

ビームバックグラウンドの種類

- ① タウシェック散乱
- ② ビームと残留ガスとの散乱
- ③ 入射直後のビームロス

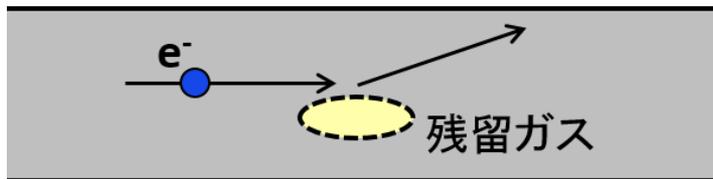
- 原因: 同一バンチ内の衝突
- 特徴: 計数率 \propto (ビーム電流)² / ビームサイズ
- 測定方法: ビーム電流値、ビームサイズを変えて計数率変化を見る



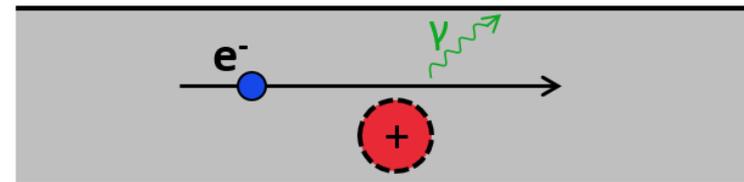
ビームバックグラウンドの種類

- ① タウシェック散乱
- ② **ビームと残留ガスとの散乱**
- ③ 入射直後のビームロス

- 原因: パイプ内の残留ガスとの衝突
- 特徴: 計数率 \propto ビーム電流 \times 残留ガスの圧力
- 測定方法: 意図的に真空度を悪くして計数率変化を見る



クーロン散乱

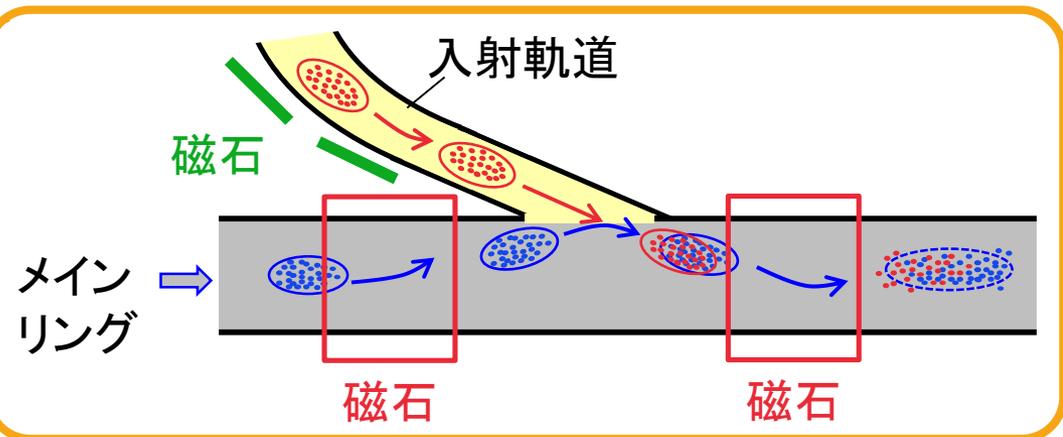
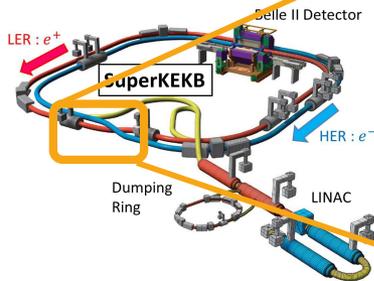


制動放射

ビームバックグラウンドの種類

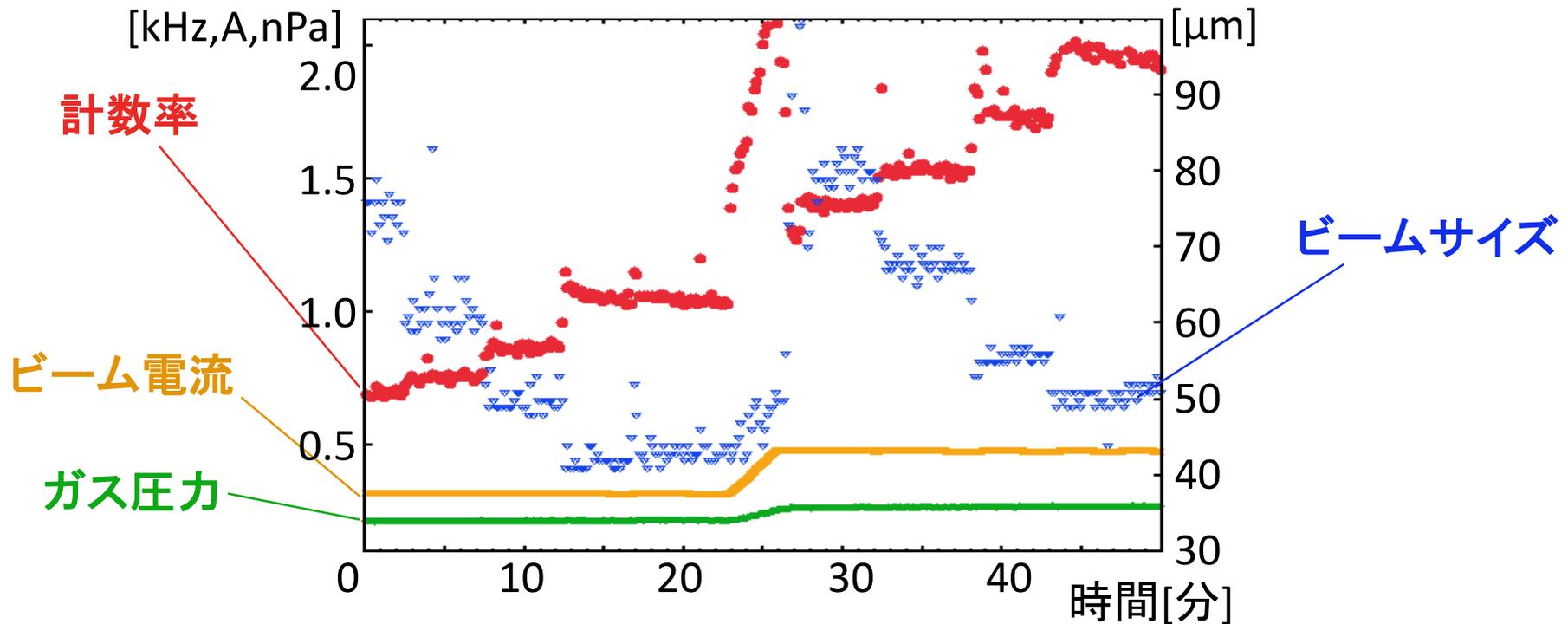
- ① タウシェック散乱
- ② ビームと残留ガスとの散乱
- ③ 入射直後のビームロス

- 原因: 入射直後のバンチからこぼれる粒子
- 特徴: 計数率増加が入射のタイミングに同期
- 測定方法: バンチ入射直後の検出器の出力波形をサンプリング



①タウシェック測定における計数率の時間変化

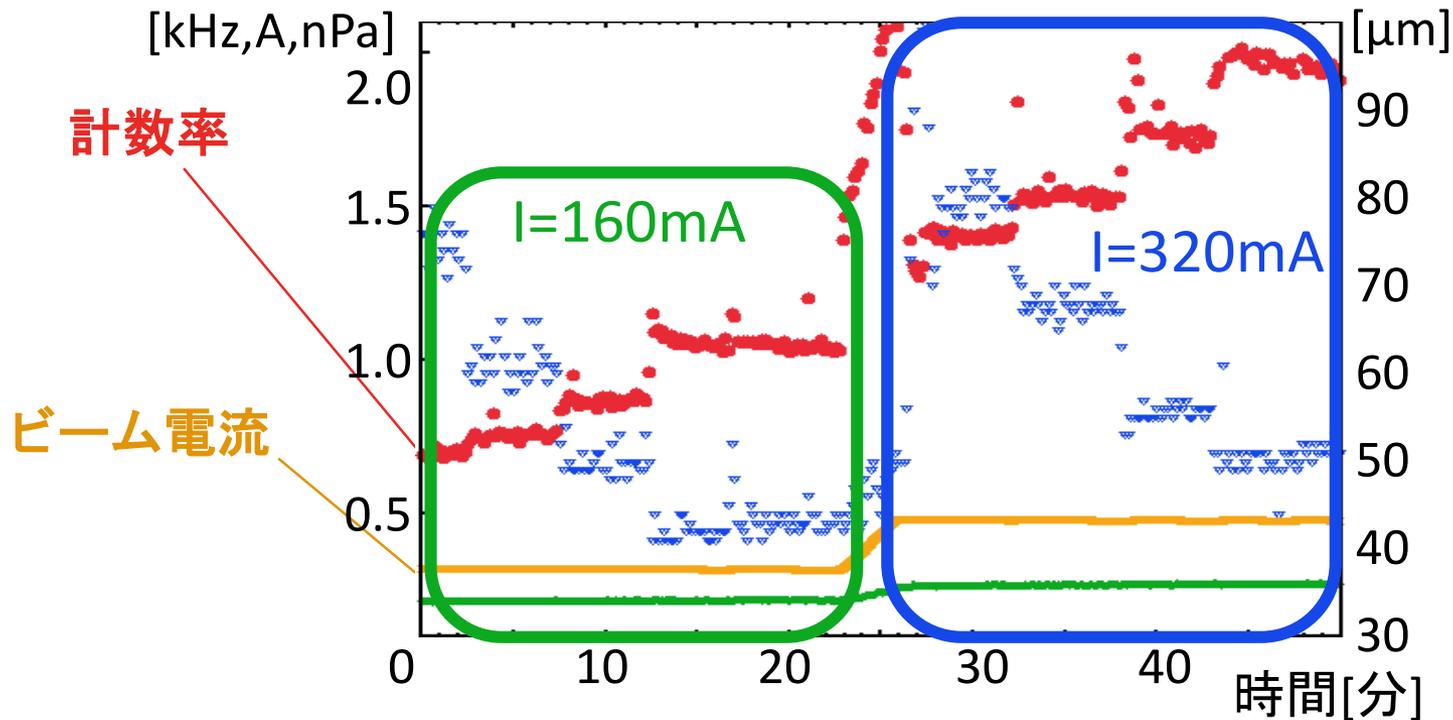
- タウシェック散乱: 計数率 \propto (ビーム電流)² / ビームサイズ
- 測定方法: 電流値、ビームサイズを変えて計数率変化を見る



- ビーム電流を大きくすると計数率が増加
- ビームサイズを絞ると計数率が増加

①タウシェック測定における計数率の時間変化

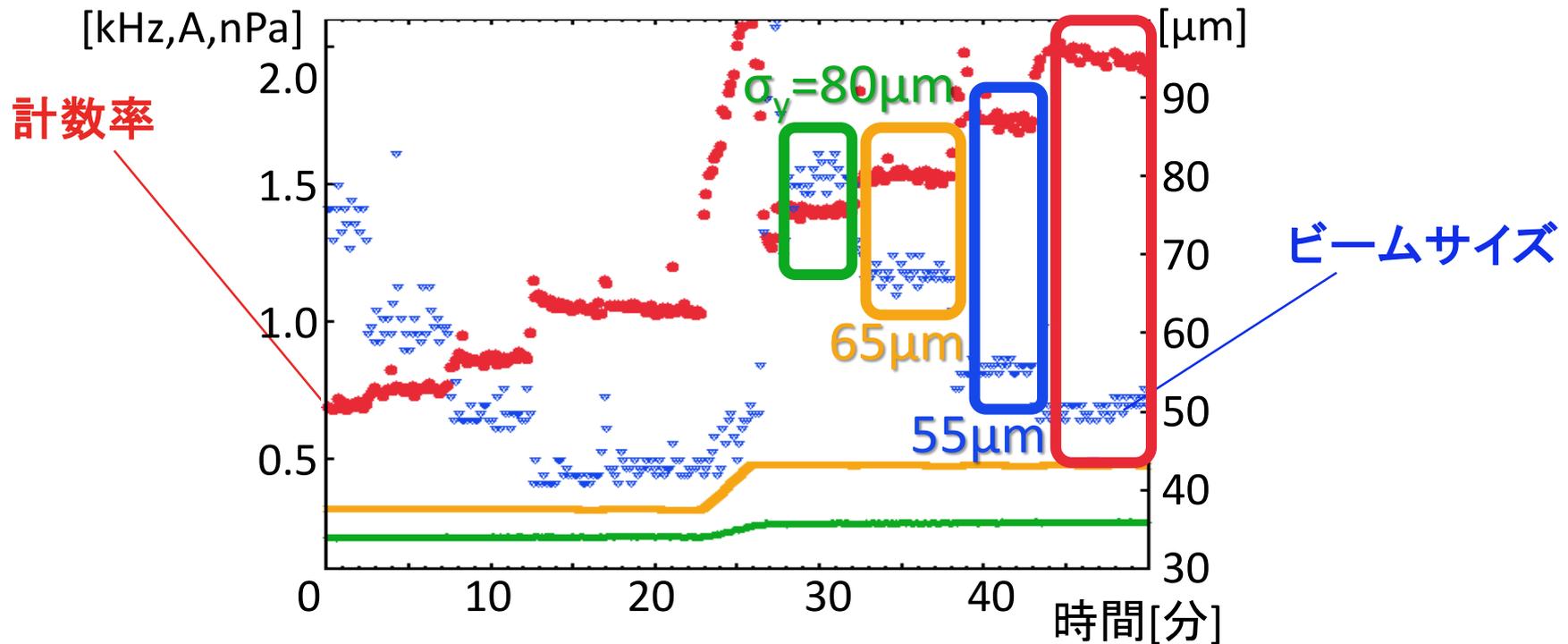
- タウシェック散乱: 計数率 \propto (ビーム電流)²/ビームサイズ
 -測定方法: 電流値、ビームサイズを変えて計数率変化を見る



- **ビーム電流を大きくすると計数率が増加**
- **ビームサイズを絞ると計数率が増加**

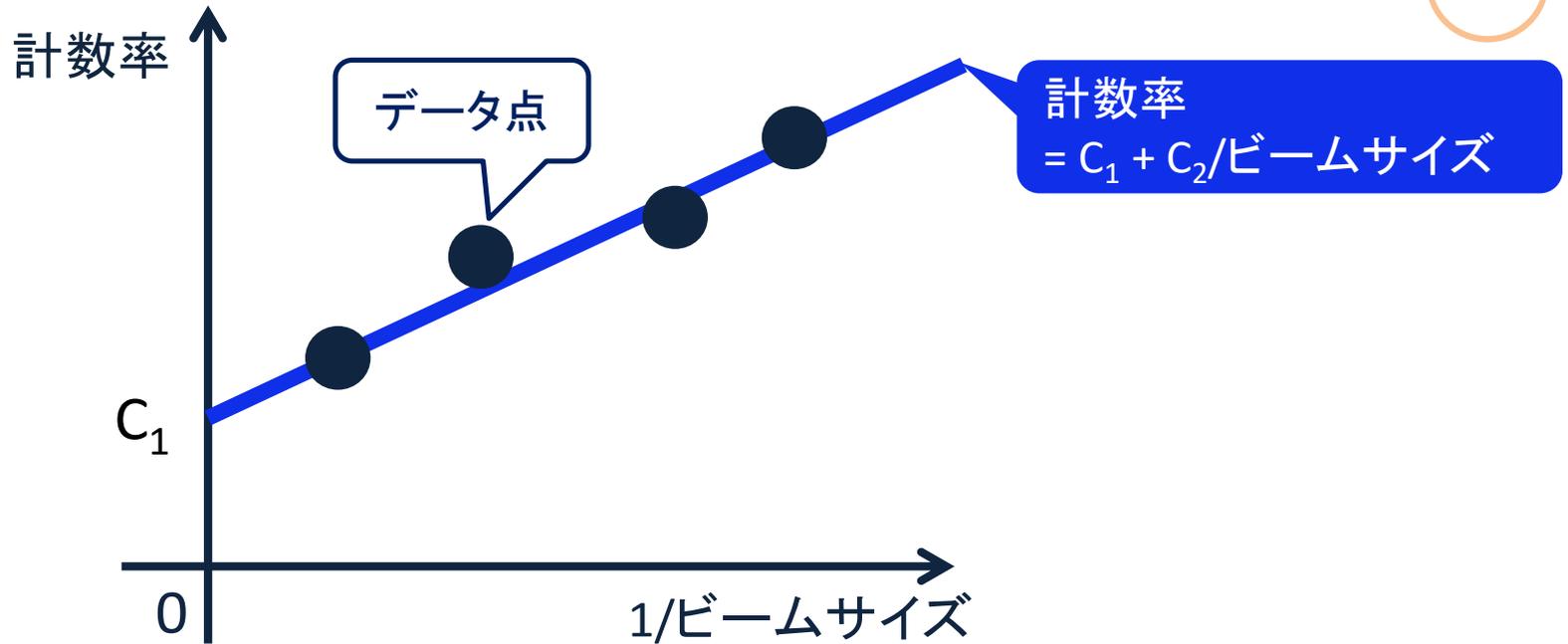
①タウシェック測定における計数率の時間変化

- タウシェック散乱: **計数率** \propto (ビーム電流)² / ビームサイズ
 -測定方法: 電流値、ビームサイズを変えて計数率変化を見る



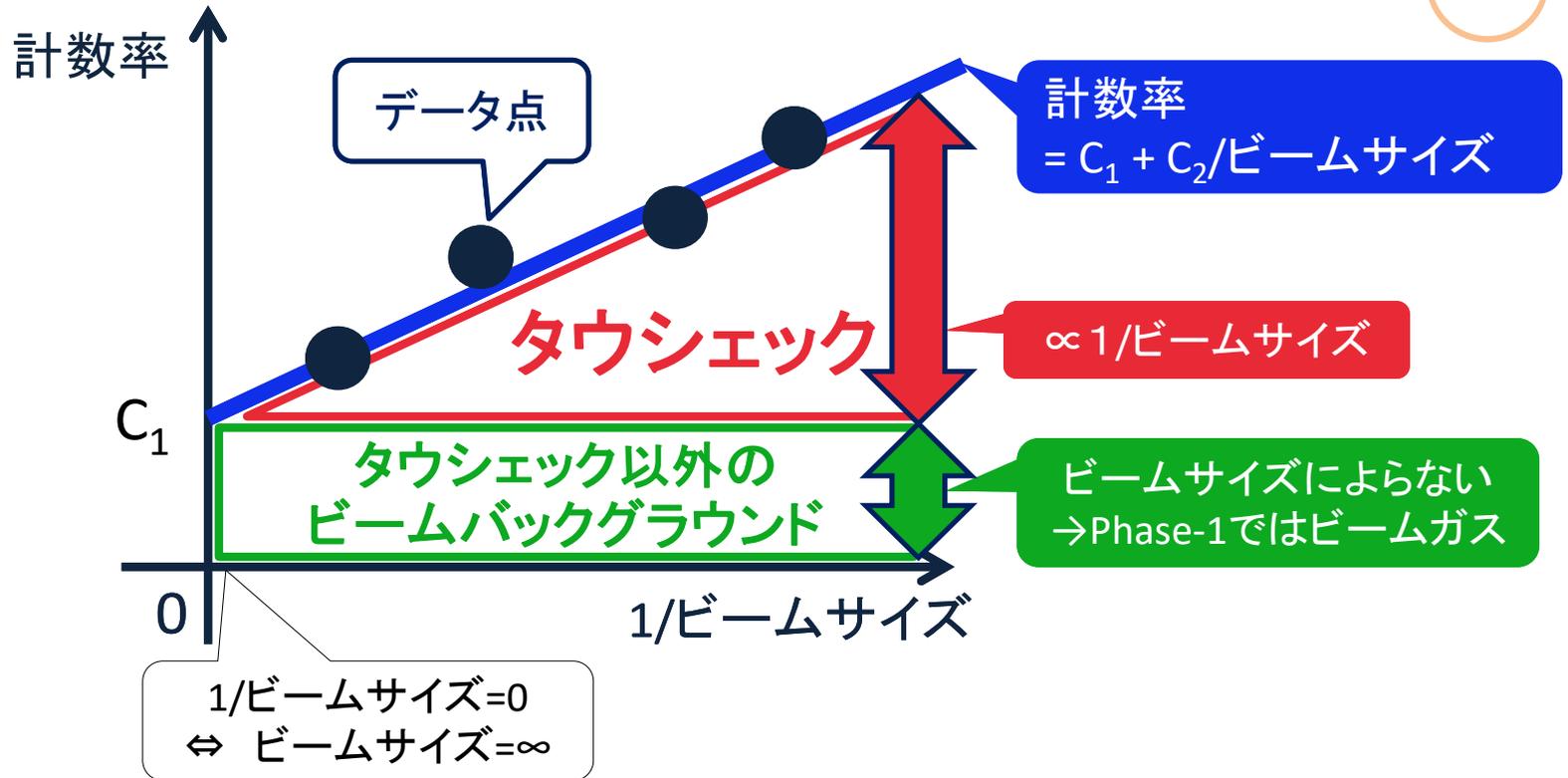
- ビーム電流を大きくすると計数率が増加
- **ビームサイズを絞ると計数率が増加**

タウチェック散乱と他のバックグラウンドの分離



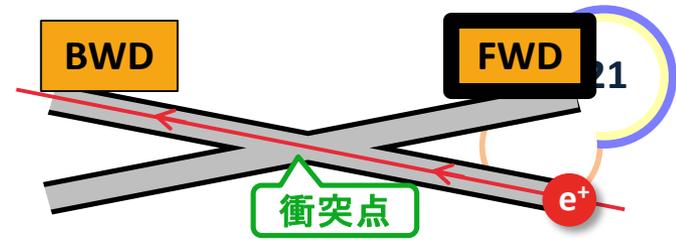
- ビーム電流が一定の時、タウチェック散乱由来のバックグラウンドは1/ビームサイズに比例するというモデルで考える

タウシェック散乱と他のバックグラウンドの分離



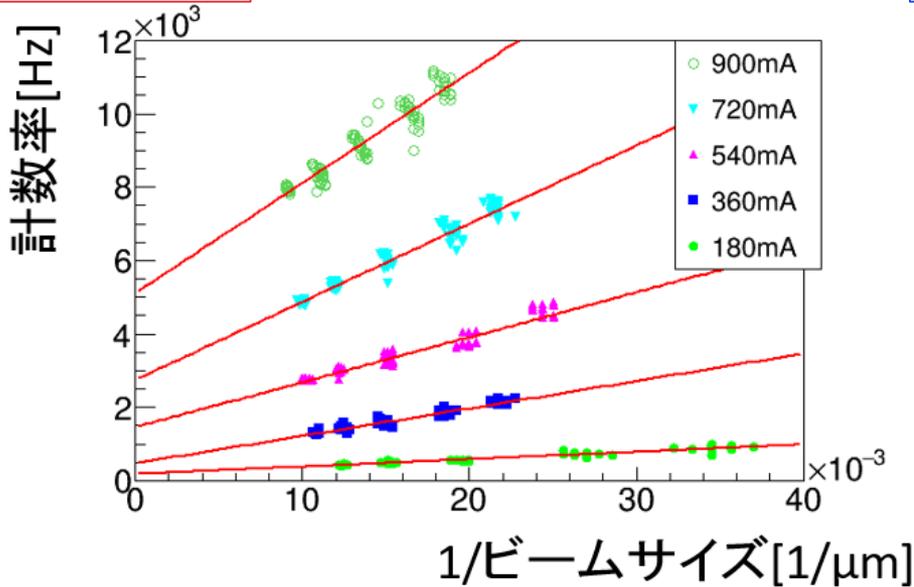
- ビーム電流が一定の時、タウシェック散乱由来のバックグラウンドは1/ビームサイズに比例するというモデルで考える
- このモデルが正しければタウシェック散乱と他のバックグラウンドは上図のように分離して議論できる

タウシェック測定 (e^+ 、FWD)

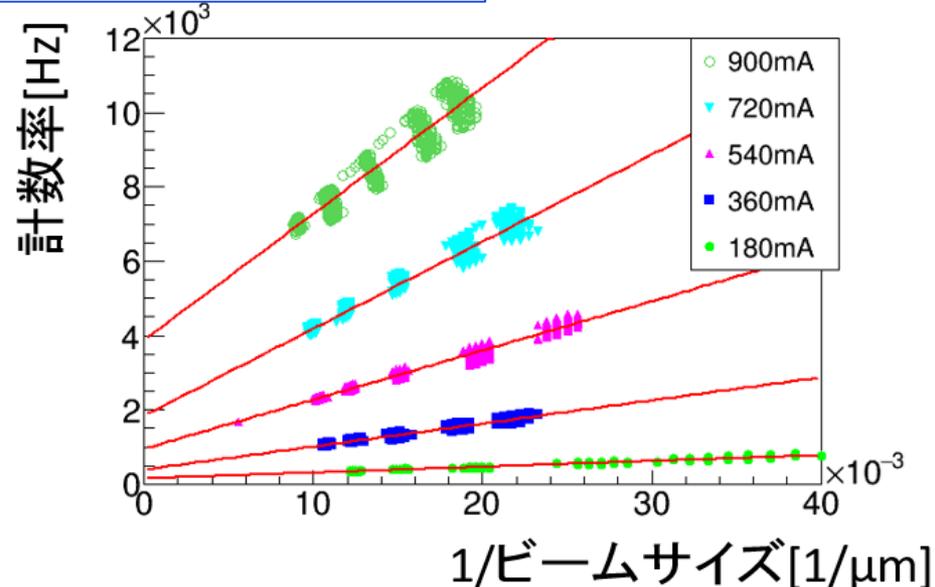


- 陽電子ビームのみ蓄積し、計数率を測定
- ビーム電流値、鉛直方向のビームサイズを変化させた

実験結果

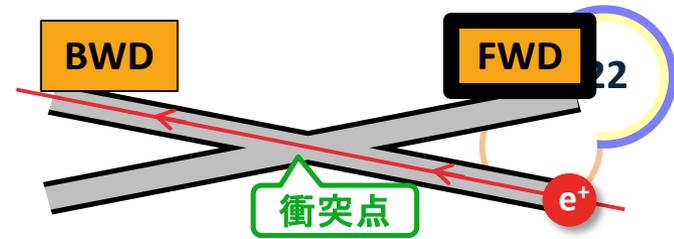


シミュレーション結果



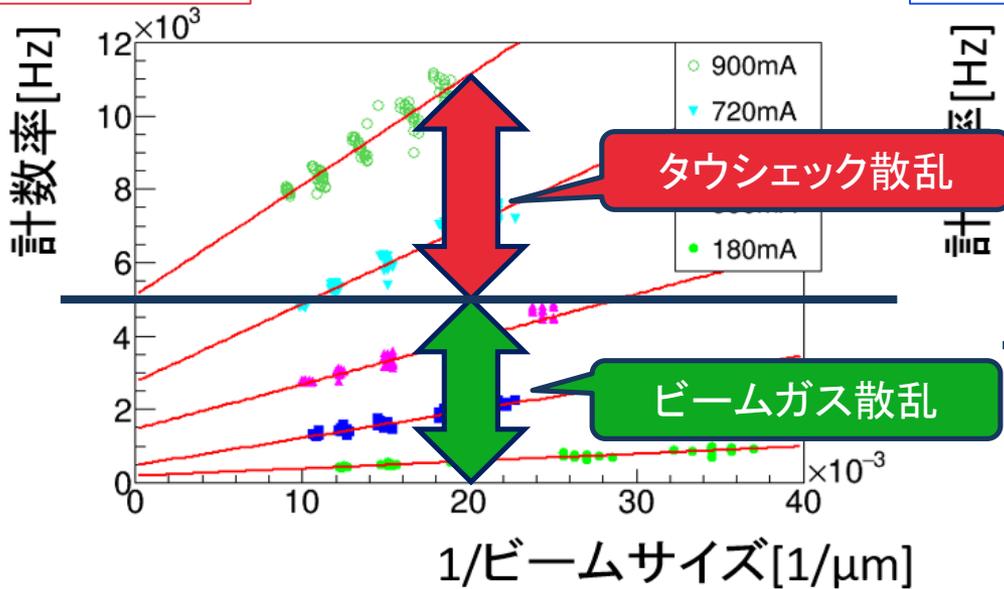
- $1/\text{ビームサイズ}$ に比例する計数率の増加がみられた
- e^-e^+ の2つ \times FWDBWD の2つ = 4パターン測定

タウシェック測定 (e⁺、FWD)

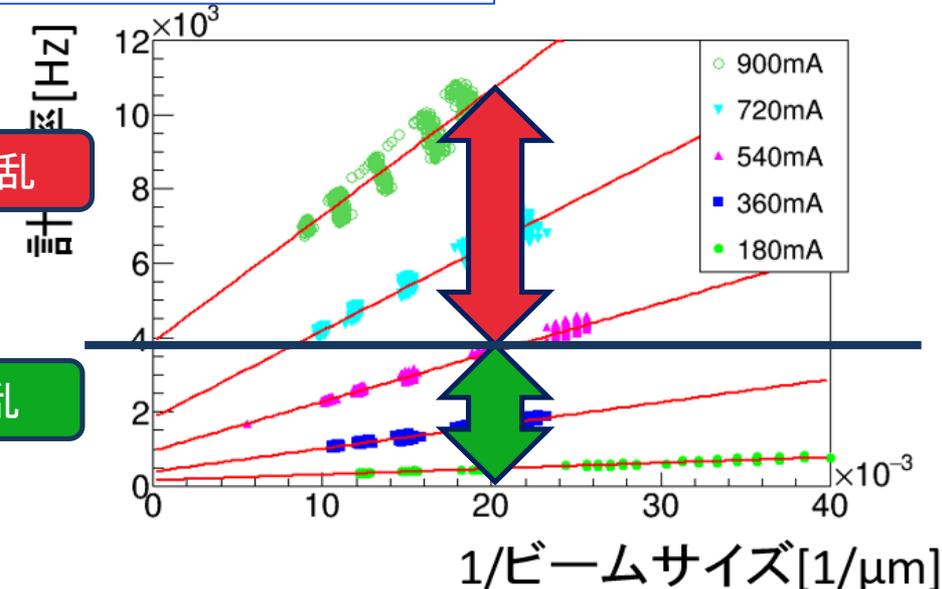


- 陽電子ビームのみ蓄積し、計数率を測定
- ビーム電流値、鉛直方向のビームサイズを変化させた

実験結果



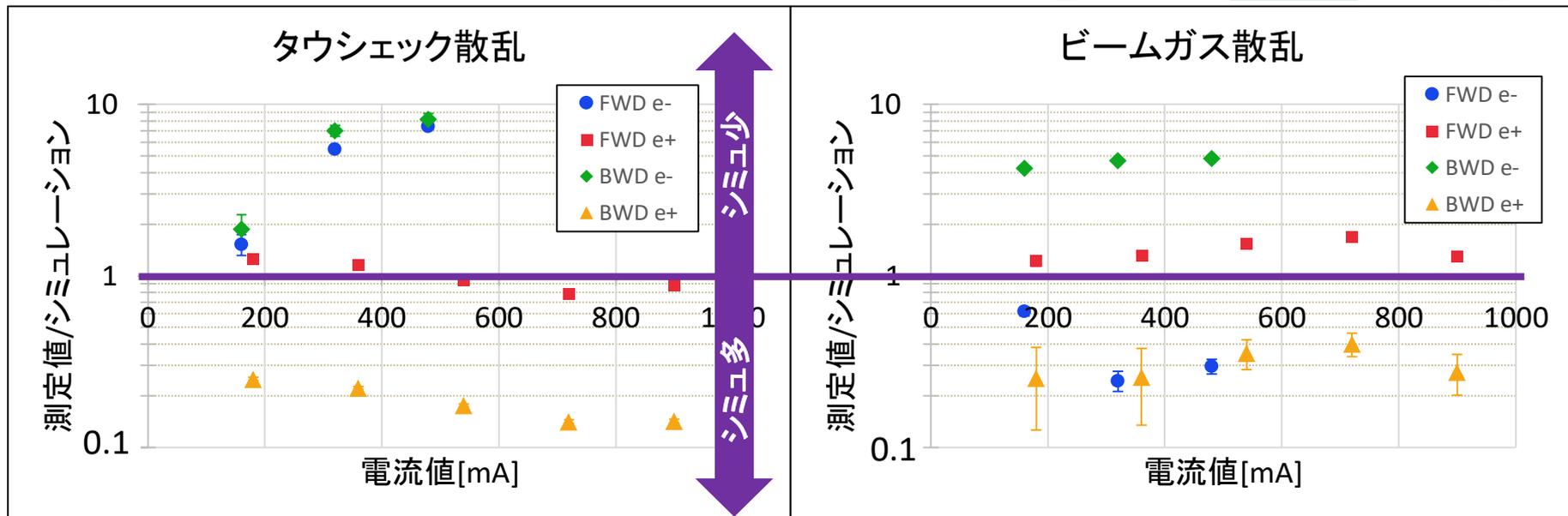
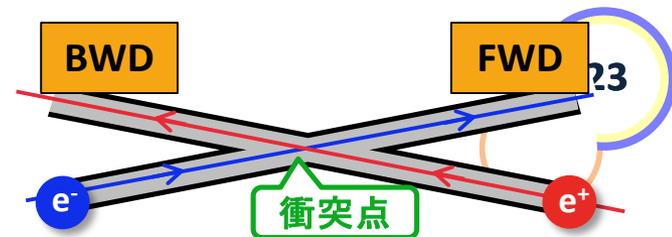
シミュレーション結果



- 1/ビームサイズに比例する計数率の増加がみられた
- e⁻e⁺の2つ × FWDBWDの2つ = 4パターン測定

$\sigma_y=50\mu\text{m}$ 、 $I=900\text{mA}$	測定値	シミュレーション
タウシェック散乱	6.0kHz	6.8kHz
ビームガス散乱	5.1kHz	3.9kHz

測定値/シミュレーション



• 差異を生む要因

- タウショック散乱: ビームサイズ測定値
- ビームガス散乱: 残留ガス圧力測定値、残留ガスの種類
- その他
 - 設置位置
 - 検出器の応答 など...

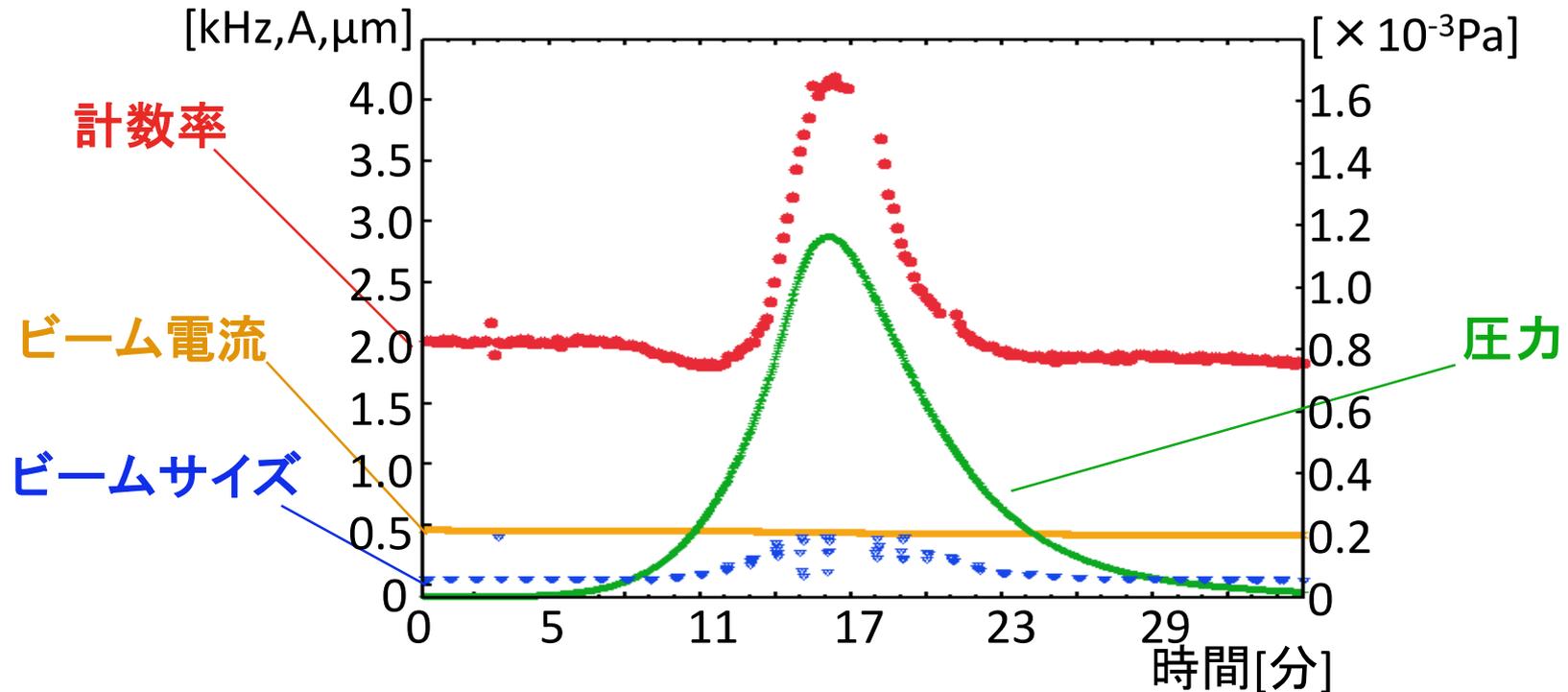
- 5倍以内で理解できている。シミュレーション改良中

②ビームガス測定における計数率の時間変化

- ビームと残留ガスとの散乱:

計数率 \propto ビーム電流 \times 残留ガスの圧力

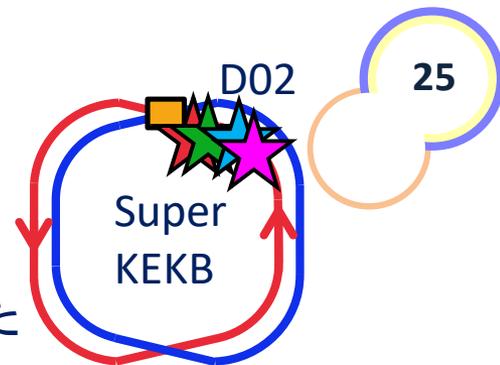
- 測定方法: 意図的に真空度を悪くして計数率変化を見る



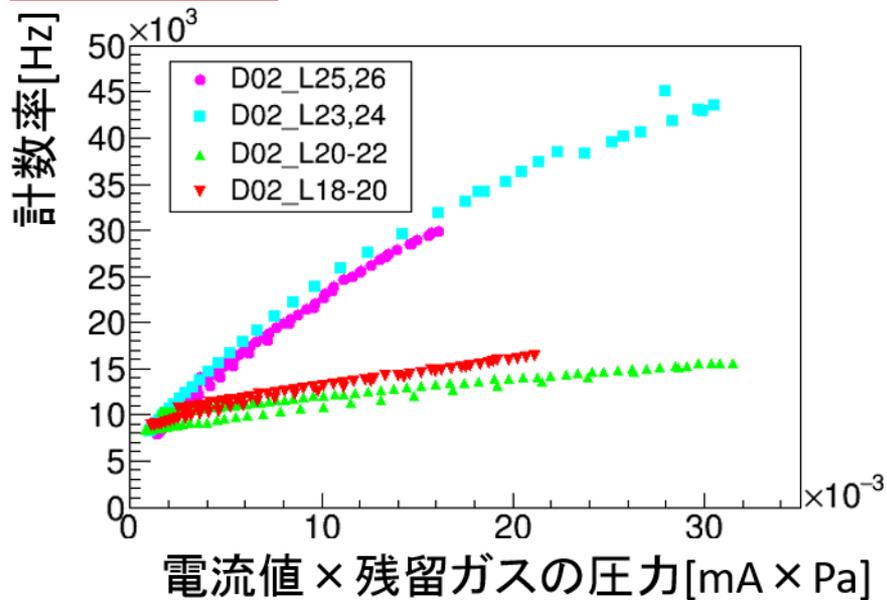
- ガスの圧力の増減に計数率が応答

ビームガス測定(e⁺、FWD)

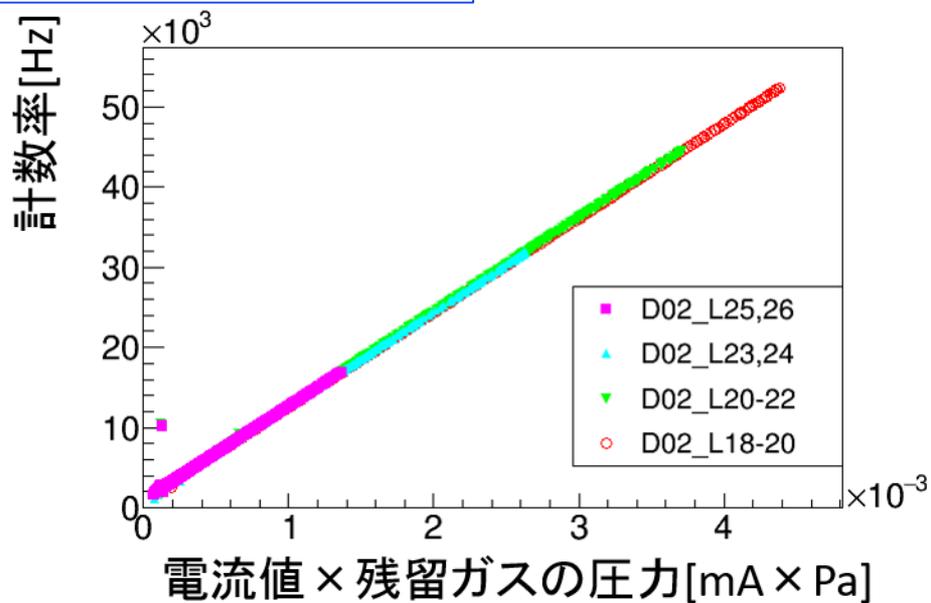
- 陽電子ビームのみ蓄積し、検出器で計数率を測定
- 右図の☆を付けた箇所の真空度を一時的に数千倍悪くした



実験結果



シミュレーション結果



実験結果

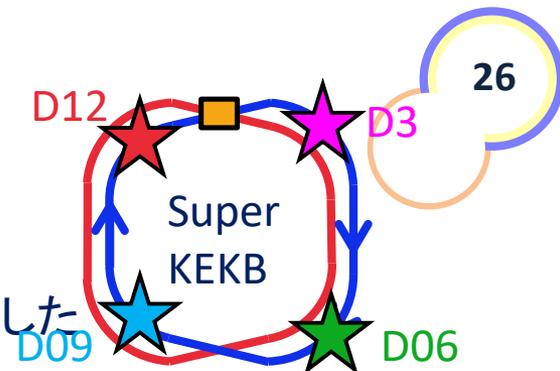
- 計数率の増加が真空が悪化した場所に強く依存

シミュレーション結果

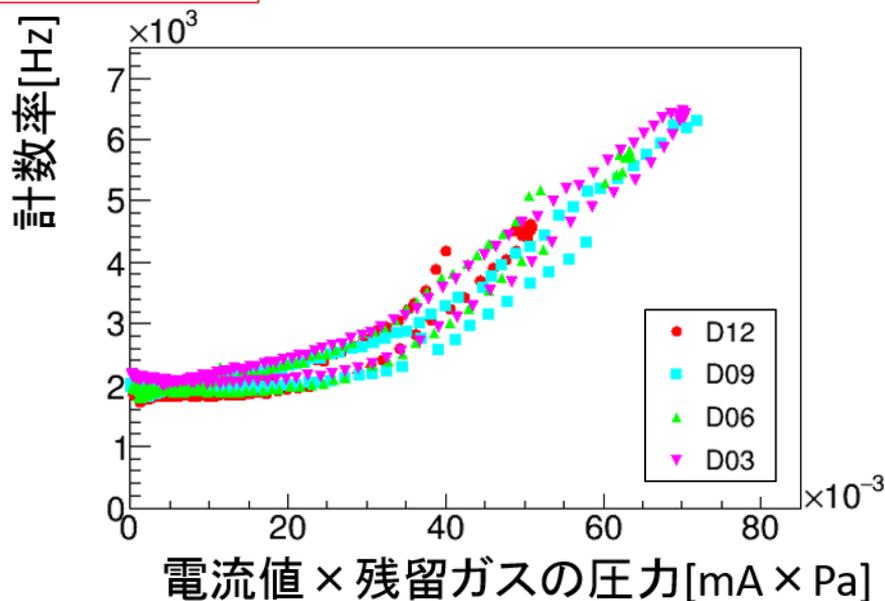
- より細かい区間でのガス圧力を用いたシミュレーションのやり直しが必要

ビームガス測定(e⁻, FWD)

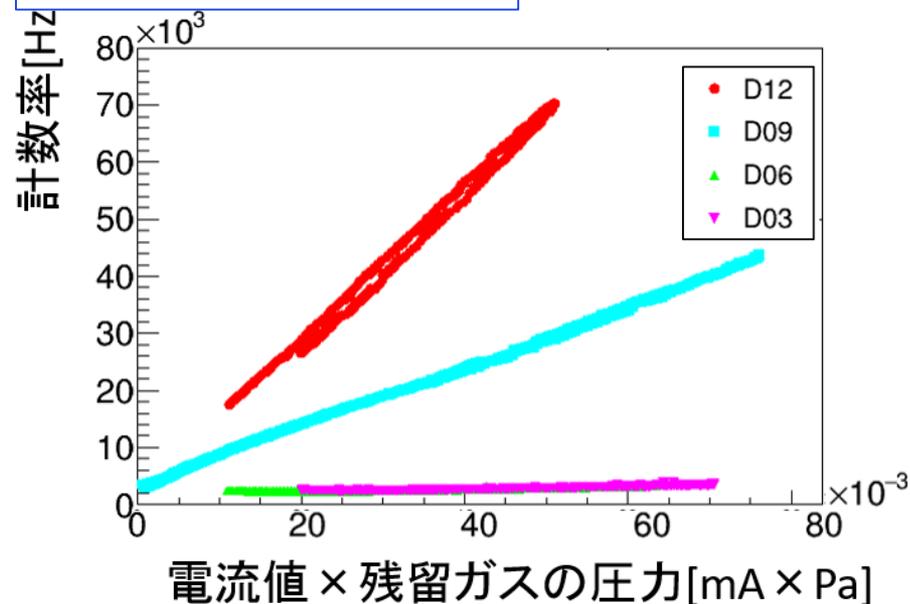
- 電子ビームのみ蓄積し、検出器で計数率を測定
- 右図の☆を付けた箇所の真空度を一時的に数千倍悪くした



実験結果



シミュレーション結果



実験結果

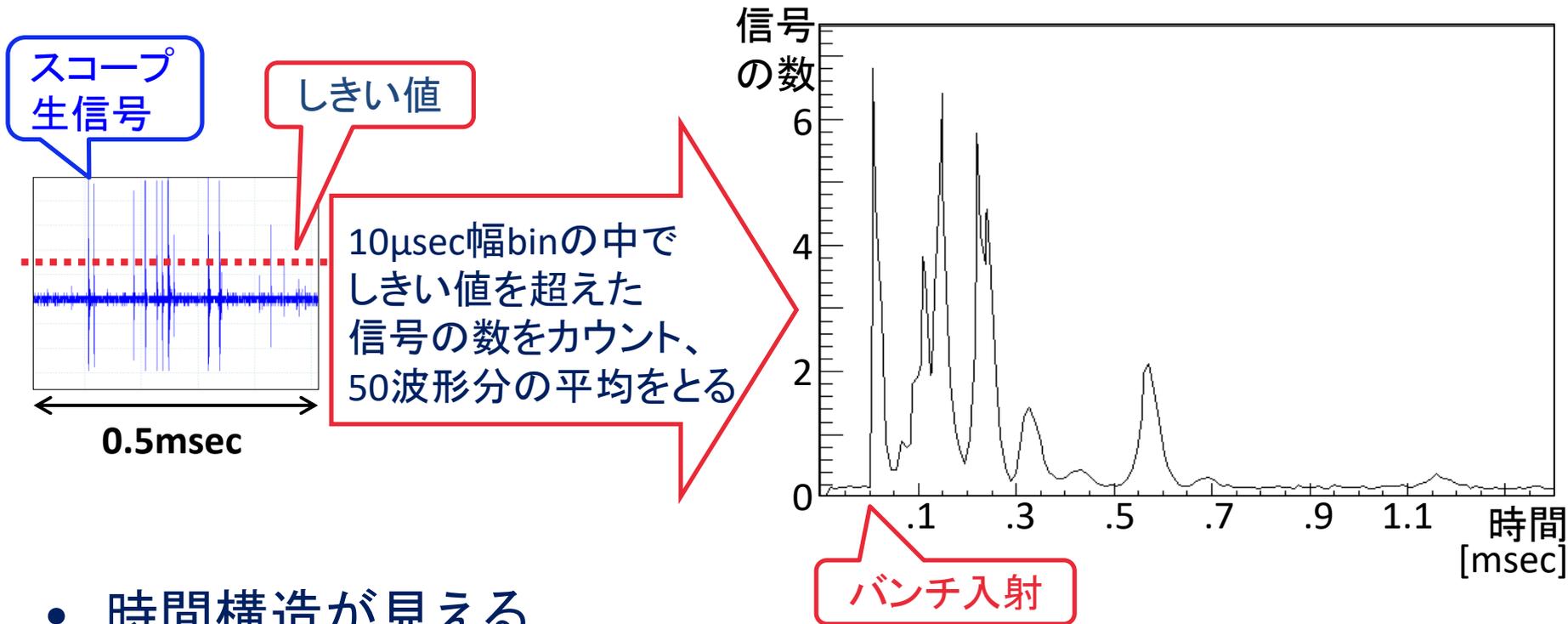
- 真空を悪くした場所と、計数率と残留ガスの圧力との関係に依存性がない

シミュレーション結果

- 真空を悪化させた場所が衝突点から近いほうが計数率が高くなる

③入射直後のビームロス

- 入射直後のバンチからこぼれる粒子
- バンチ入射直後の検出器の出力波形をサンプリング

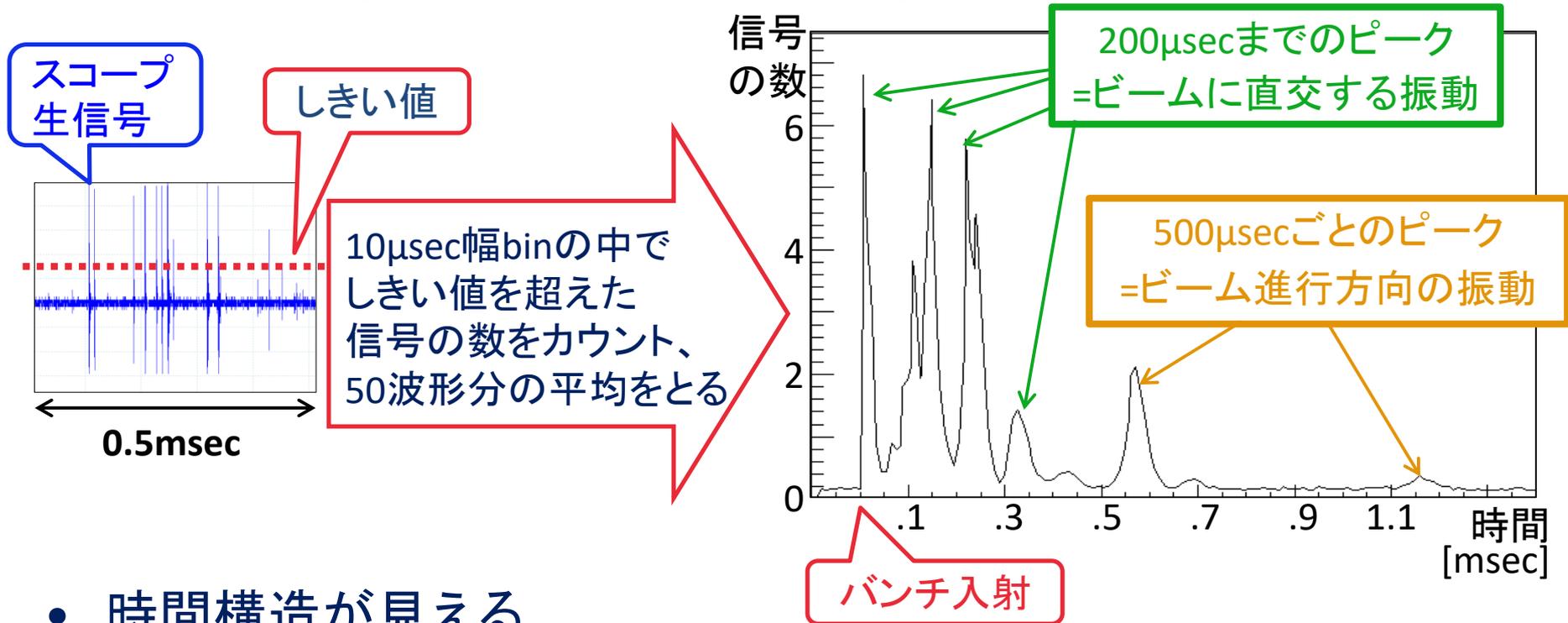


- 時間構造が見える

- リアルタイム(2秒間隔で更新)でモニタできる
- Phase2以降の運転でこのバックグラウンドをVETOする仕組みに生かす

③入射直後のビームロス

- 入射直後のバンチからこぼれる粒子
- バンチ入射直後の検出器の出力波形をサンプリング

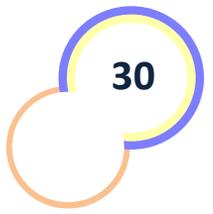


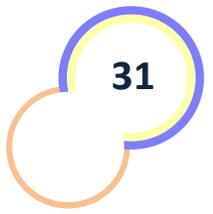
- 時間構造が見える

- リアルタイム(2秒間隔で更新)でモニタできる
- Phase2以降の運転でこのバックグラウンドをVETOする仕組みに生かす

まとめ

1. シンチレータとMPPCを用いた検出器で SuperKEKBのバックグラウンドを初めて観測
2. タウシェック散乱、ビームガス散乱、入射直後のビームロスを測定
3. この検出器がバックグラウンドの系統的理解やオンラインモニターに有効であることを確認
 - Phase-2以降でも使用される予定





ベータトロン振動

- 進行方向に直交する向きの振動



- ベータトロン振動の周期とビームの周回周期が整数倍になると振幅が拡大してしまう

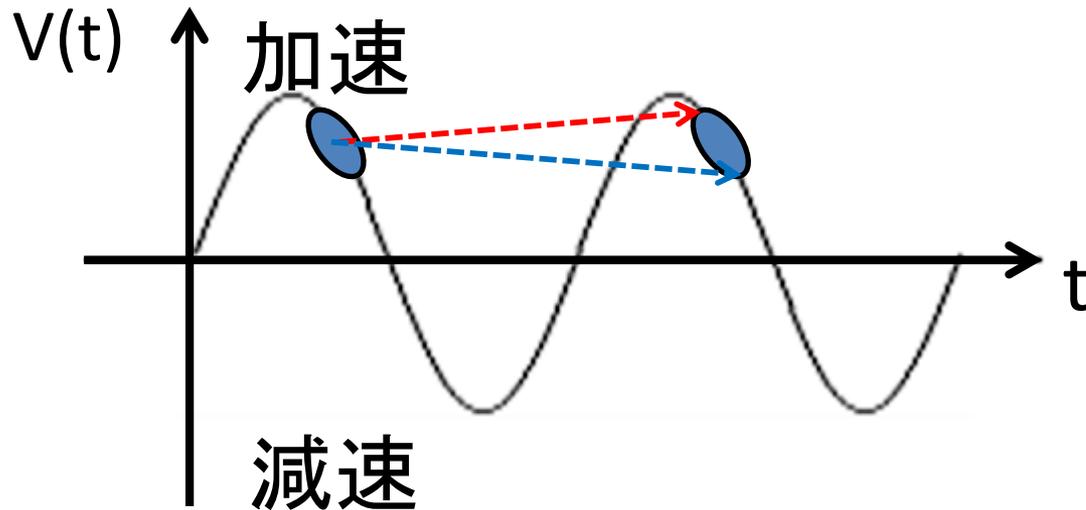
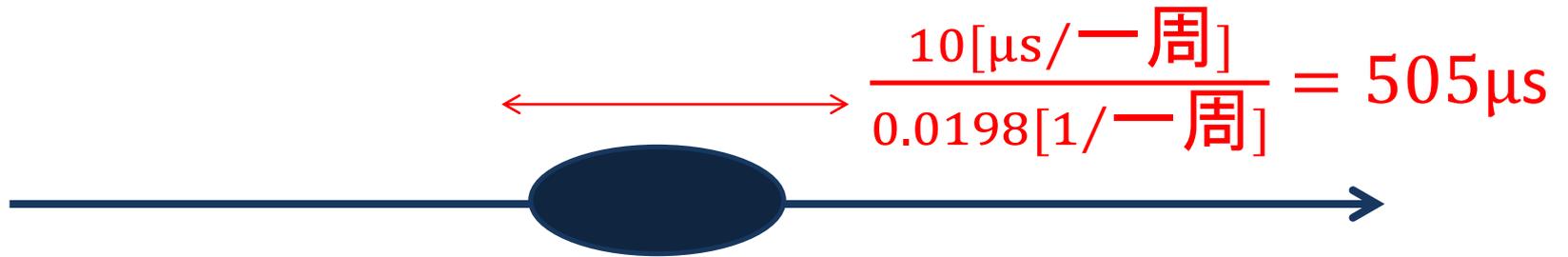
- 45.59

半整数は打ち消しあう→ok

$$\frac{10[\mu\text{s}/\text{一周}]}{0.09[1/\text{一周}]} = 111\mu\text{s}$$

シンクロトロン振動

- 進行方向の振動

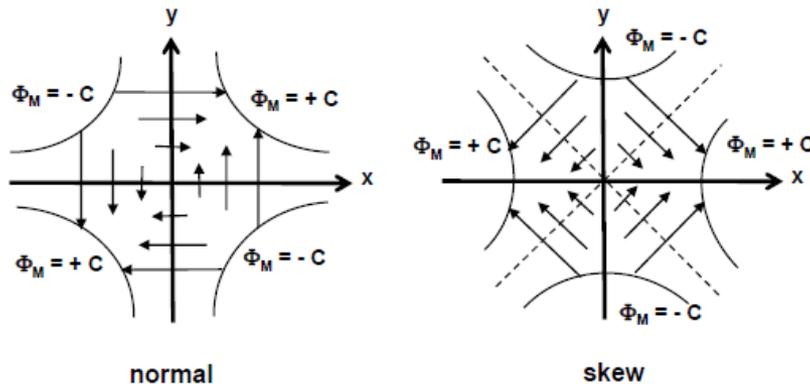


Oscillations in the ring

- Betatron oscillation (fast)
 - Frequency
 - LER: hor. 44.59 (per turn) / vert. 44.63 (per turn)
 - HER: hor. 45.57 (per turn) / vert. 43.61(per turn)
- Synchrotron oscillation (slow)
 - Frequency
 - LER: 0.0198 (per turn) ($V_c=7.6\text{MV}$) -> 1 period: 50.5 turns
 - HER: 0.0246 (per turn) ($V_c=12\text{MV}$) -> 1 period: 40.7 turns

ビームサイズのかえ方

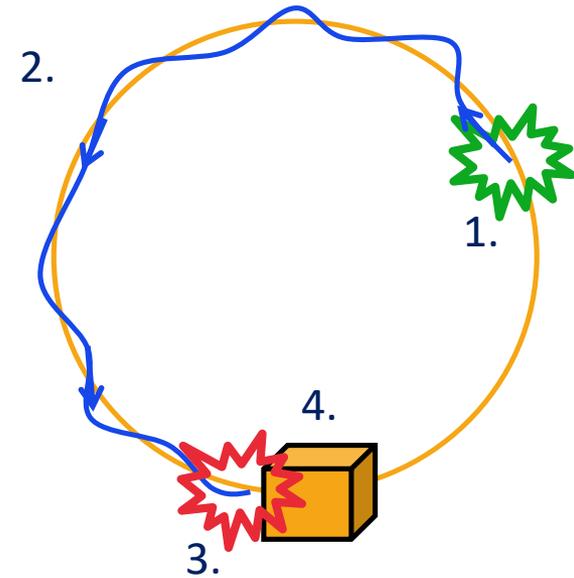
- 普段は極力y軸を絞りたい
 - 今回はタウチェック測定のためにy軸を太らせた
- 電子ビーム
 - 軌道を二極磁石(ZVQD3E_1 HER)で縦に曲げて元に戻すときのばらつきで太らせる
- 陽電子ビーム
 - 軌道を変えずに4極スキューマグネット(QKSD5TLP1)を調整



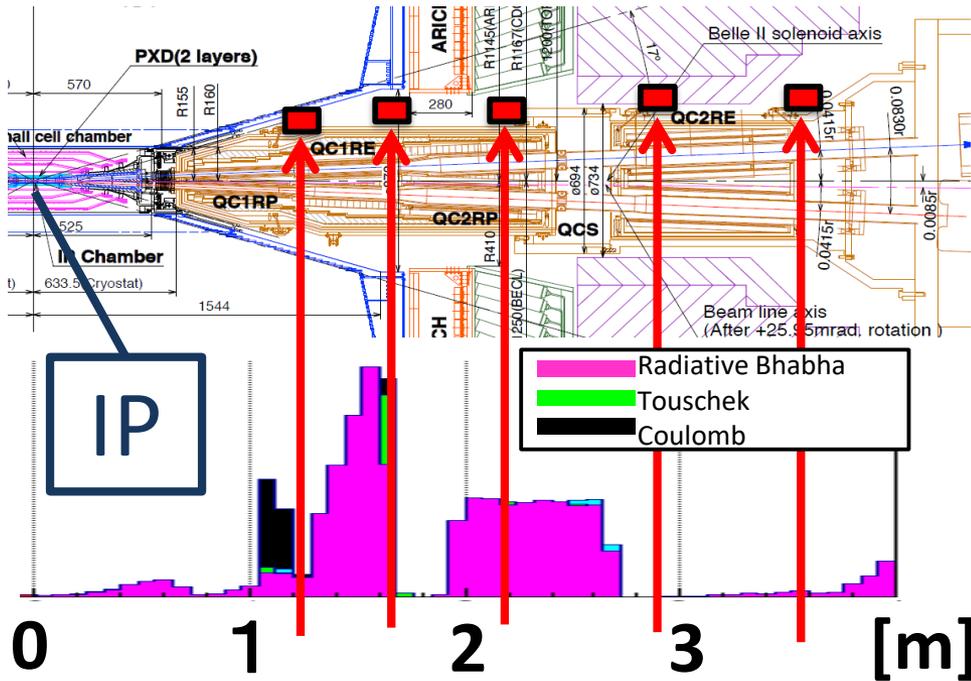
理想的にはxやyを絞る時は互いに依存性ないほうが良い
 →フリンジ効果(磁石の出入り口は磁場がきれいじゃない)の補正のため

シミュレーション方法

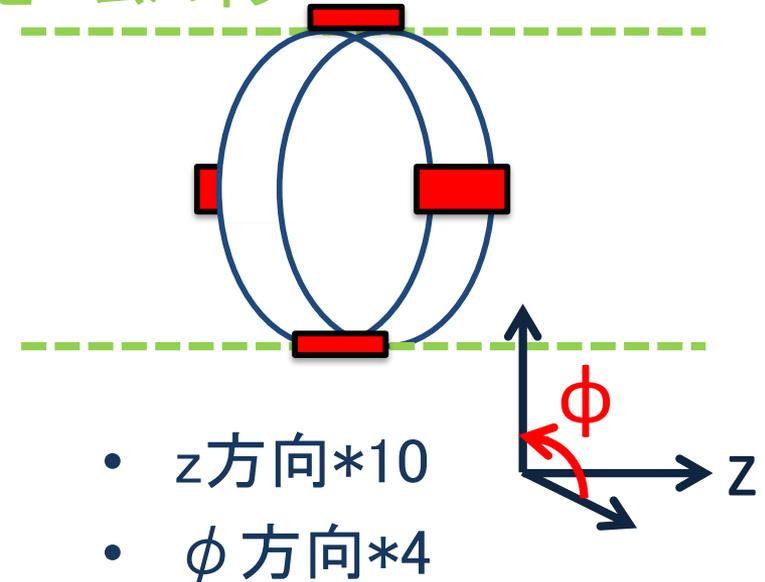
- Phase-1のジオメトリを実装
 1. リング上の各点で散乱を起こす
 2. 散乱粒子がロスするまで何周もtracking
 3. 検出器付近でロスしたもののだけ選択
 4. GEANT4でシャワー生成、検出器の応答を記録



Phase2/Phase3

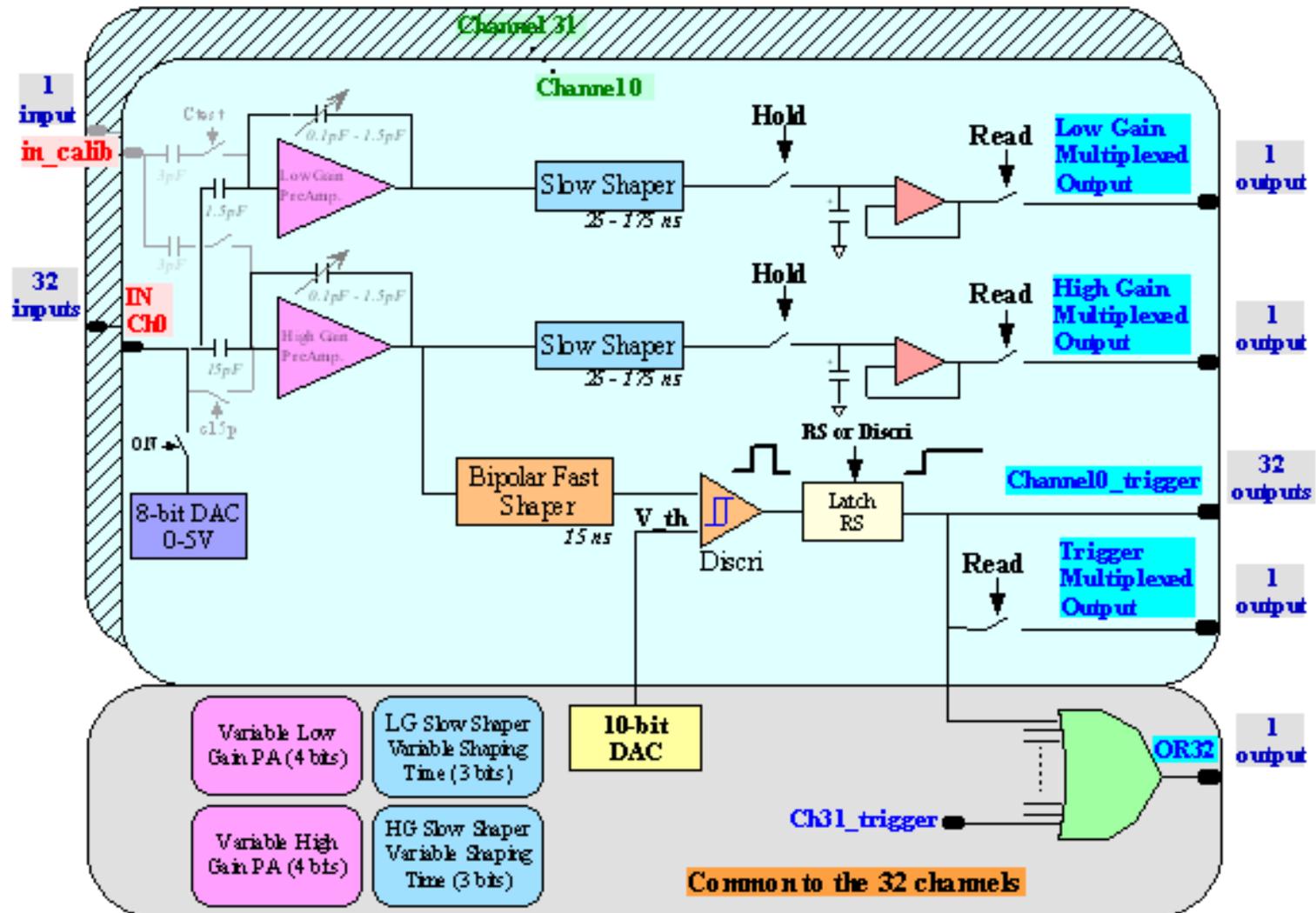


ビームパイプ

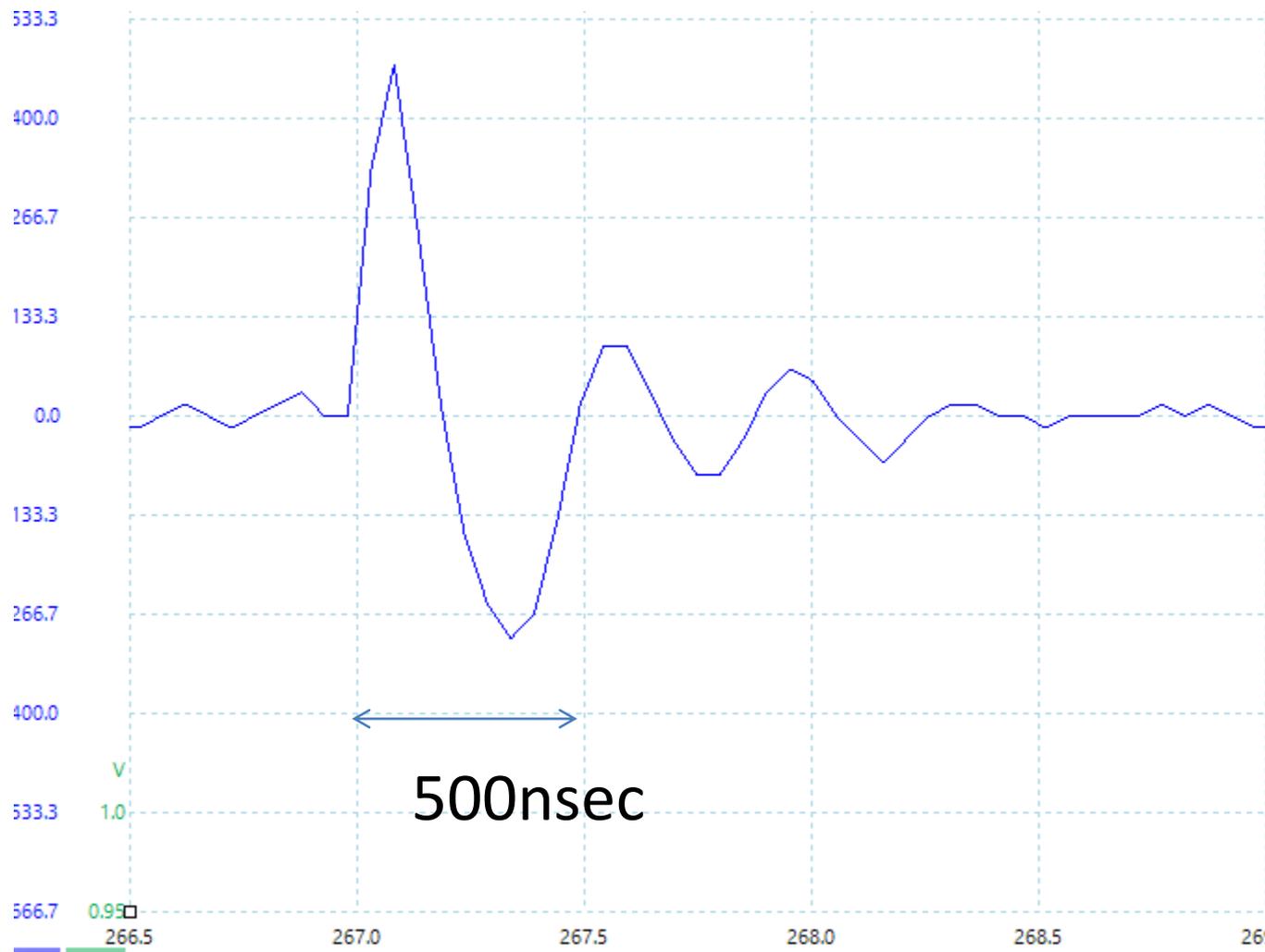


- 検出器の位置情報からバックグラウンド源を決定し、加速器の運転にフィードバック

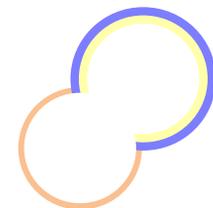
EASIROCの回路の概念図



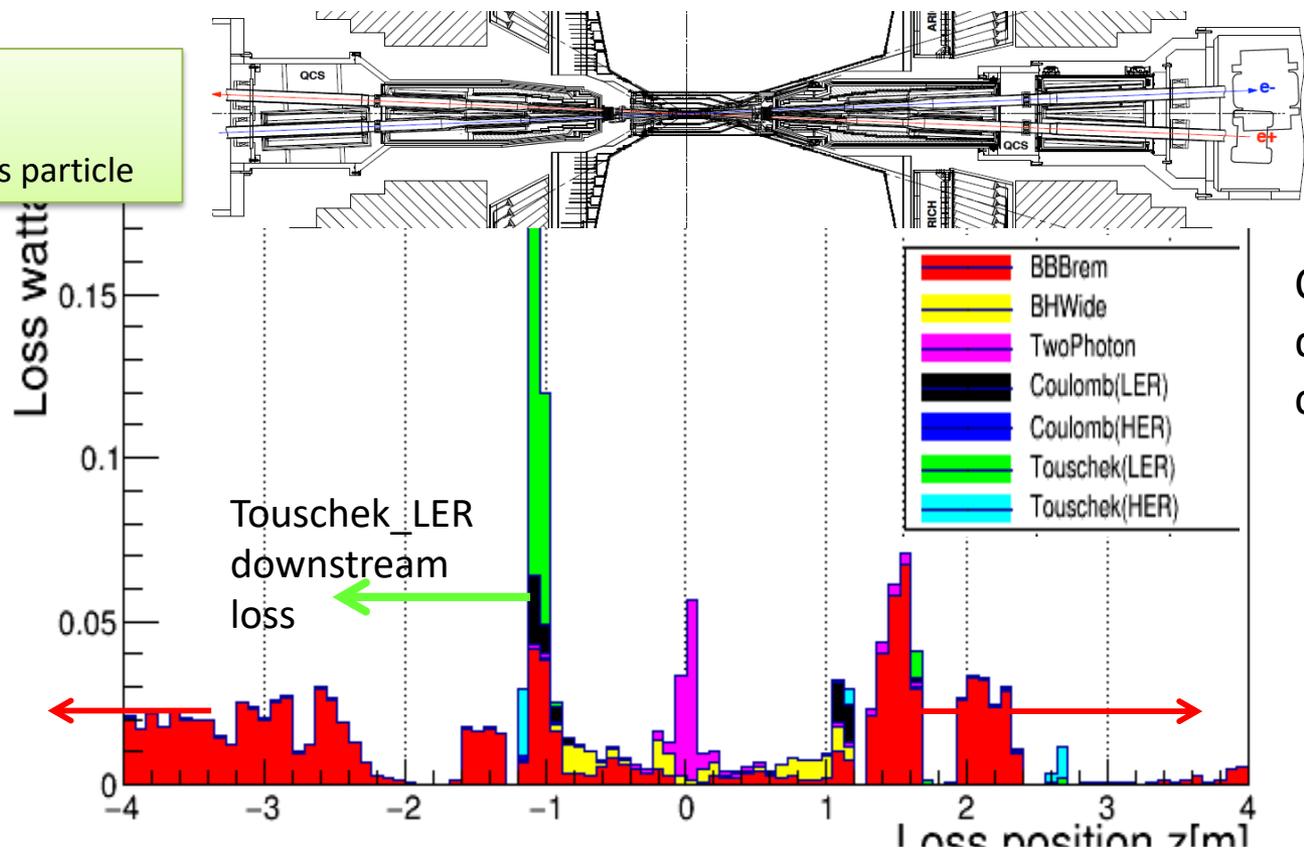
生信号



(15th campaign) Phase3 BG loss distribution



Loss wattage
= loss rate
* energy of loss particle



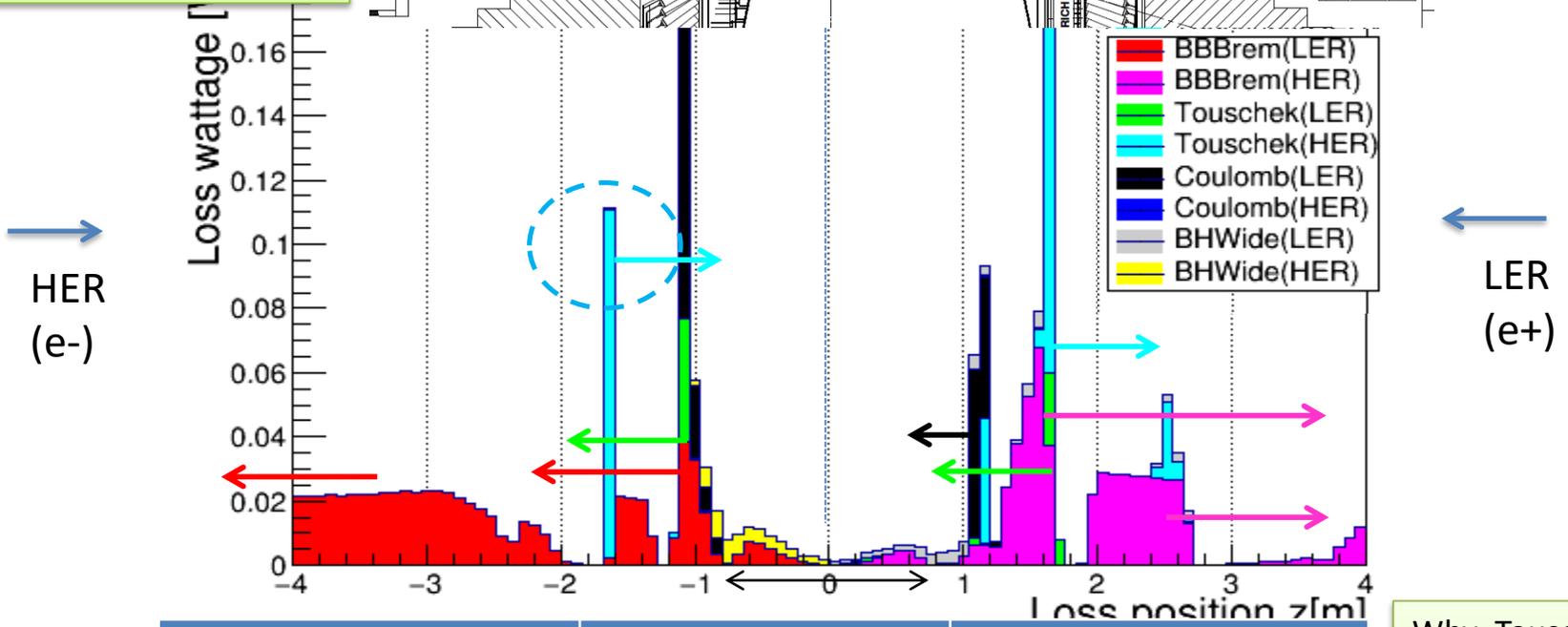
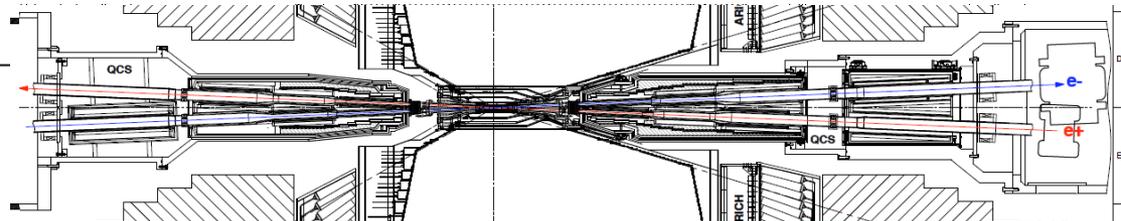
Color definition changed!

	LER (4GeV e+)	HER (7GeV e-)
Lumi-dependent BG	BBBrem: 1.08 W (0.06 W in z <65cm) BHWide: 0.11 W (0.04 W), 2photon: 0.14 W(0.11W)	
Touschek	0.27 W (0.42GHz)	0.04 W (0.03GHz)
Coulomb	0.06 W (0.10Hz)	0.00 W (0.002GHz)

Collimators are optimized for the latest optics

(14th campaign) Phase3 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

BG rate (Phase.3)

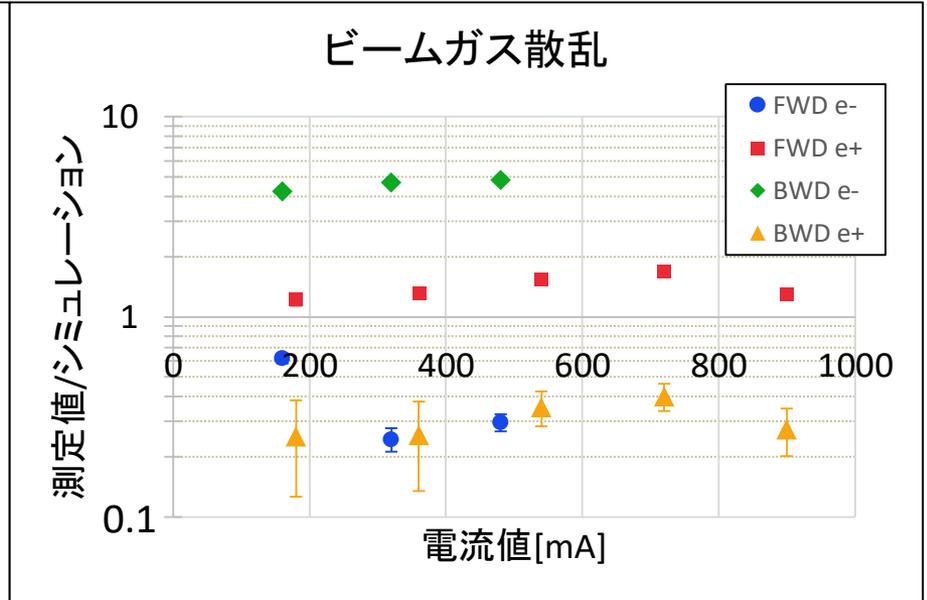
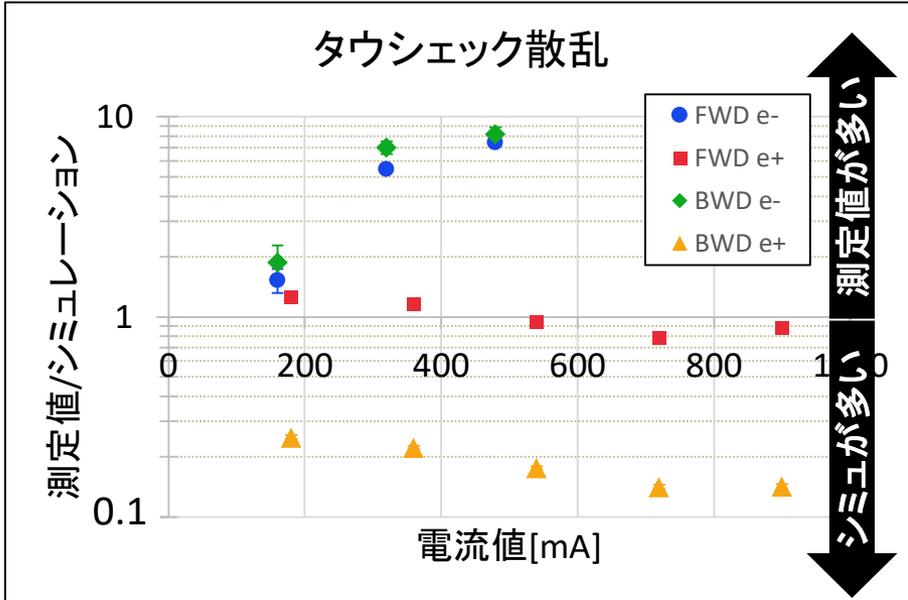
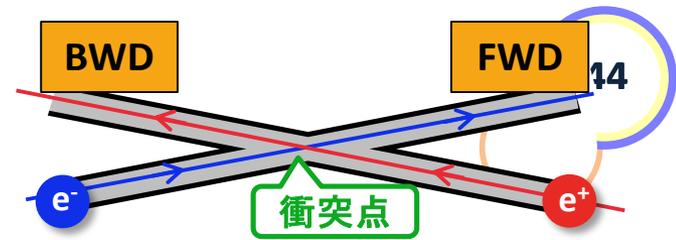
Table 3: The ring loss rates and the IR loss rates simulated by SAD.

	Ring loss [GHz]	IR loss [MHz]
LER Coulomb	0.79	3.71
LER Brems	2.92	5.07
LER Touschek	3.48	4.59
HER Coulomb	2.12	1.35
HER Brems	3.55	1.94
HER Touschek	3.75	0.05

injection BG

- KEKBでは3msのVETO(10Hz入射)
- SuperKEKBは25or50Hzで入射したい

測定値/シミュレーション



差異を生む要因

- タウシェック散乱: ビームサイズ測定値
- ビームガス散乱: 残留ガス圧力測定値、残留ガスの種類
- その他
 - ・ 設置位置
 - ・ 検出器の応答 など...

ビームサイズ大きい → 青と緑助けれる

×2 から ×1/2 くらいの不定性

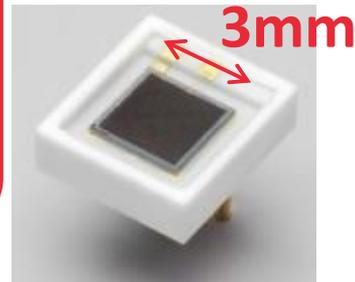
Z=7でやってる → 実際はCOだけじゃなく H₀もいるはず (Z=5くらい) → 青助けれる

5倍以上... シミュレーション改良中
 FWDとBWDの比をとってキャンセルできる?

MPPC

(Multi-Pixel Photon Counter)

浜松ホトニクス社製 [S12572-050C](#)



- シリコン光検出器
- ガイガーモードで動作するアバランシェ・フォトダイオード
- 常温・低電圧(70V)・増幅率 $\sim 10^5$ ・時間分解能 $\sim \text{ps}$ ・磁場に強い

項目	記号	S12572						単位
		-025C	-050C	-100C	-025P	-050P	-100P	
有効受光面サイズ	-	3 × 3			3 × 3			mm
ピクセルピッチ	-	25	50	100	25	50	100	μm
ピクセル数	-	14400	3600	900	14400	3600	900	-
有感部の開口率	-	65	62	78	65	62	78	%
パッケージ	-	セラミック			表面実装型			-
窓材	-	エポキシ樹脂			エポキシ樹脂			-
窓材屈折率	-	1.59			1.55			-