

Belle II の測定器

後田 裕

将来計画検討小委員会 2009.11

KEK and KEKB



Mt. Tsukuba

KEKB

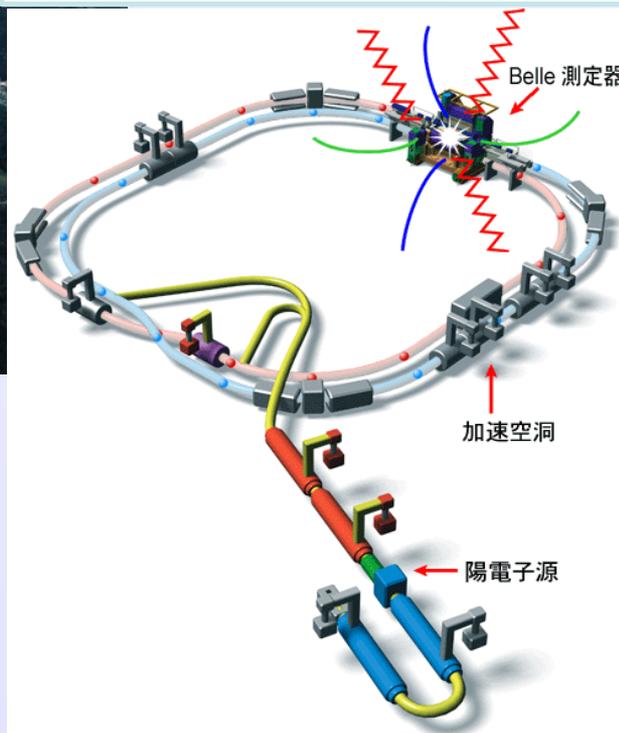
Belle

~1 km in diameter



- e^- (8 GeV) on e^+ (3.5 GeV)
 - $\sqrt{s} \approx m_{Y(4S)}$
 - Lorentz boost: $\beta\gamma=0.425$
- 22 mrad crossing angle
- Operating since 1999

Peak luminosity (WR!) :
 $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



Belle Detector

γ, π^0 reconstruction
 e^+, K_L identification

Electromagnetic Calorimeter
CsI(Tl) $16X_0$

TOF counter

K/π separation

8.0 GeV e^-

B vertex

Si Vertex Detector
4-layer DSSD

K/π separation

Aerogel Cherenkov Counter
 $n = 1.015 \sim 1.030$

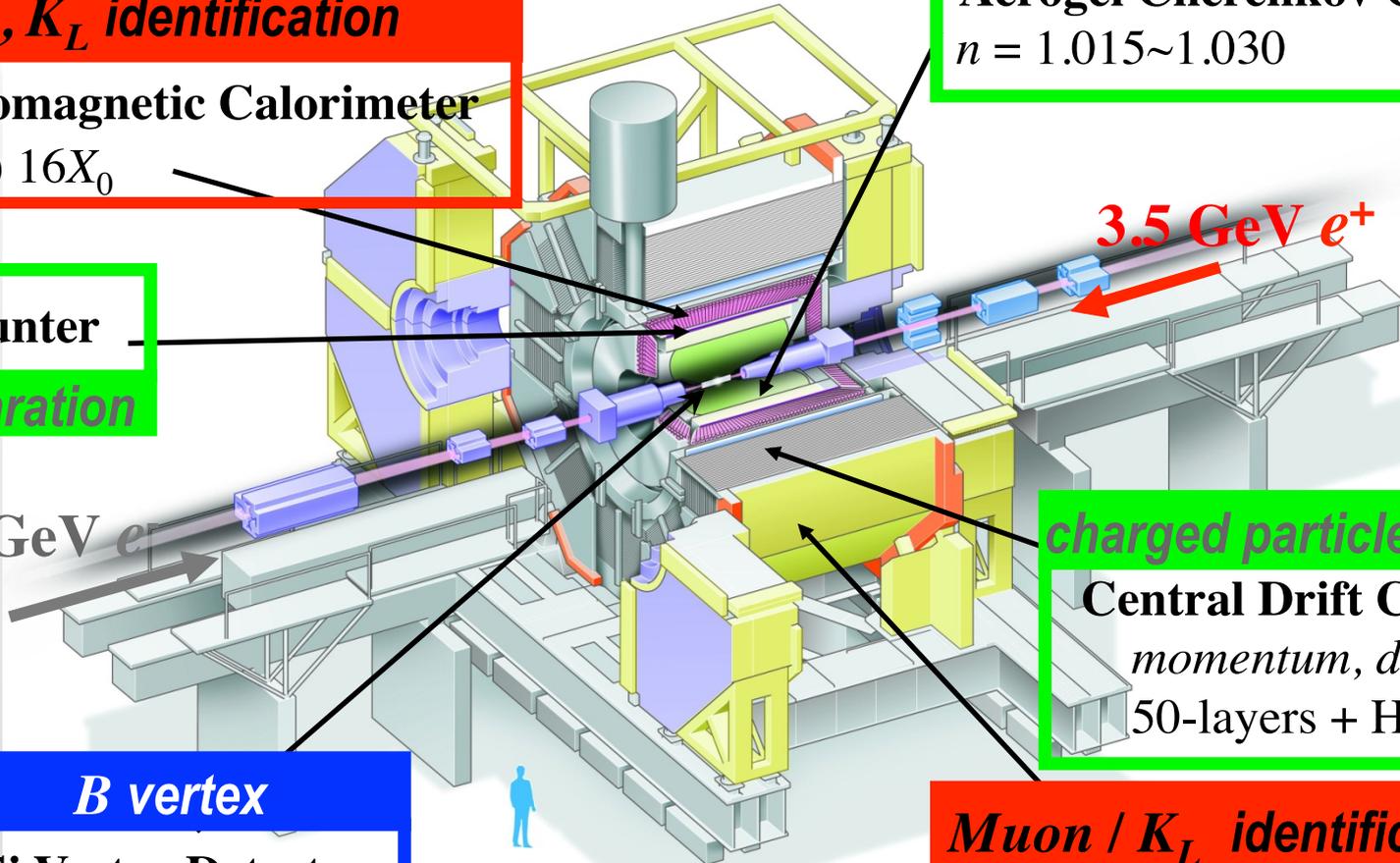
3.5 GeV e^+

$\text{charged particle tracking}$

Central Drift Chamber
momentum, dE/dx
50-layers + He/C₂H₆

Muon / K_L identification

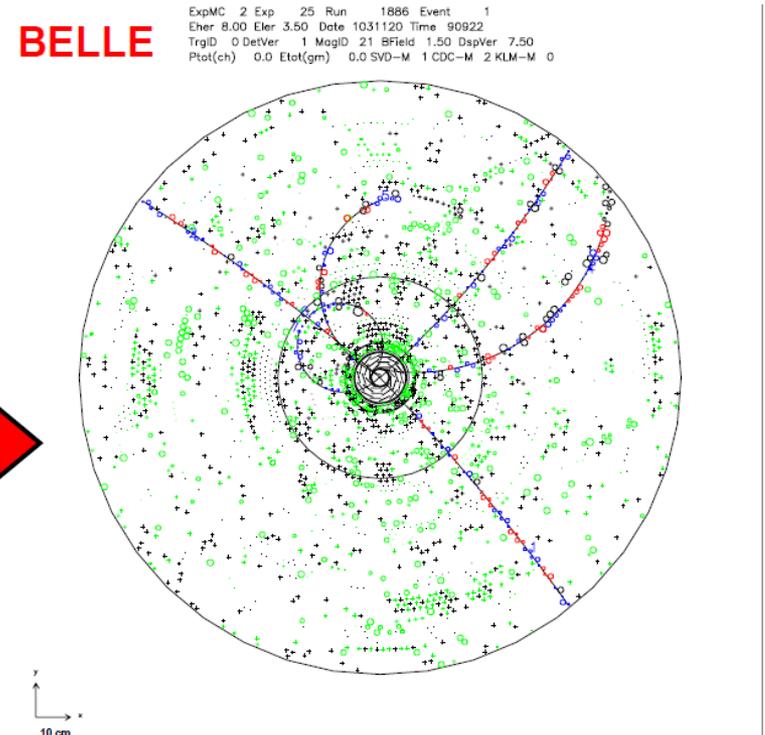
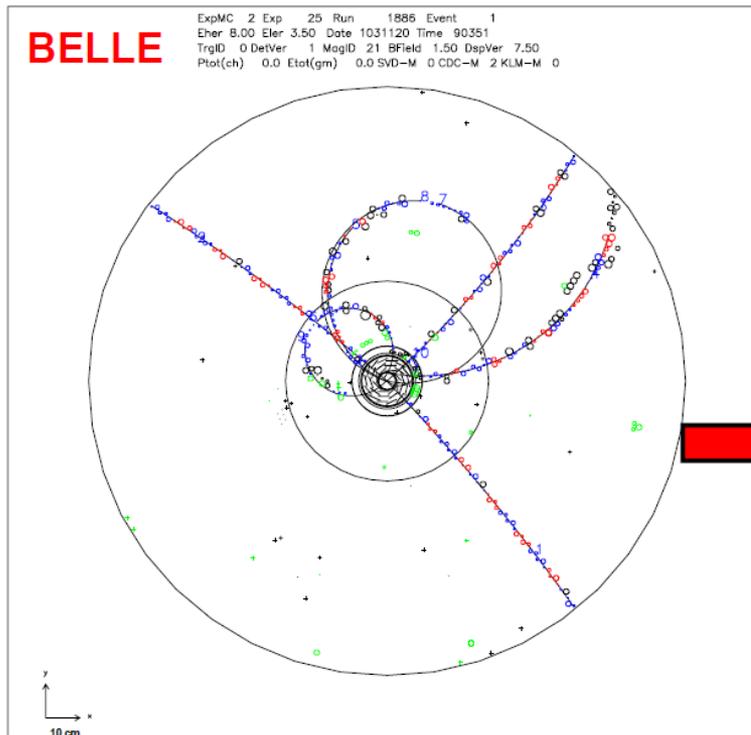
$K_L \mu$ detector
14/15 layer RPC+Fe



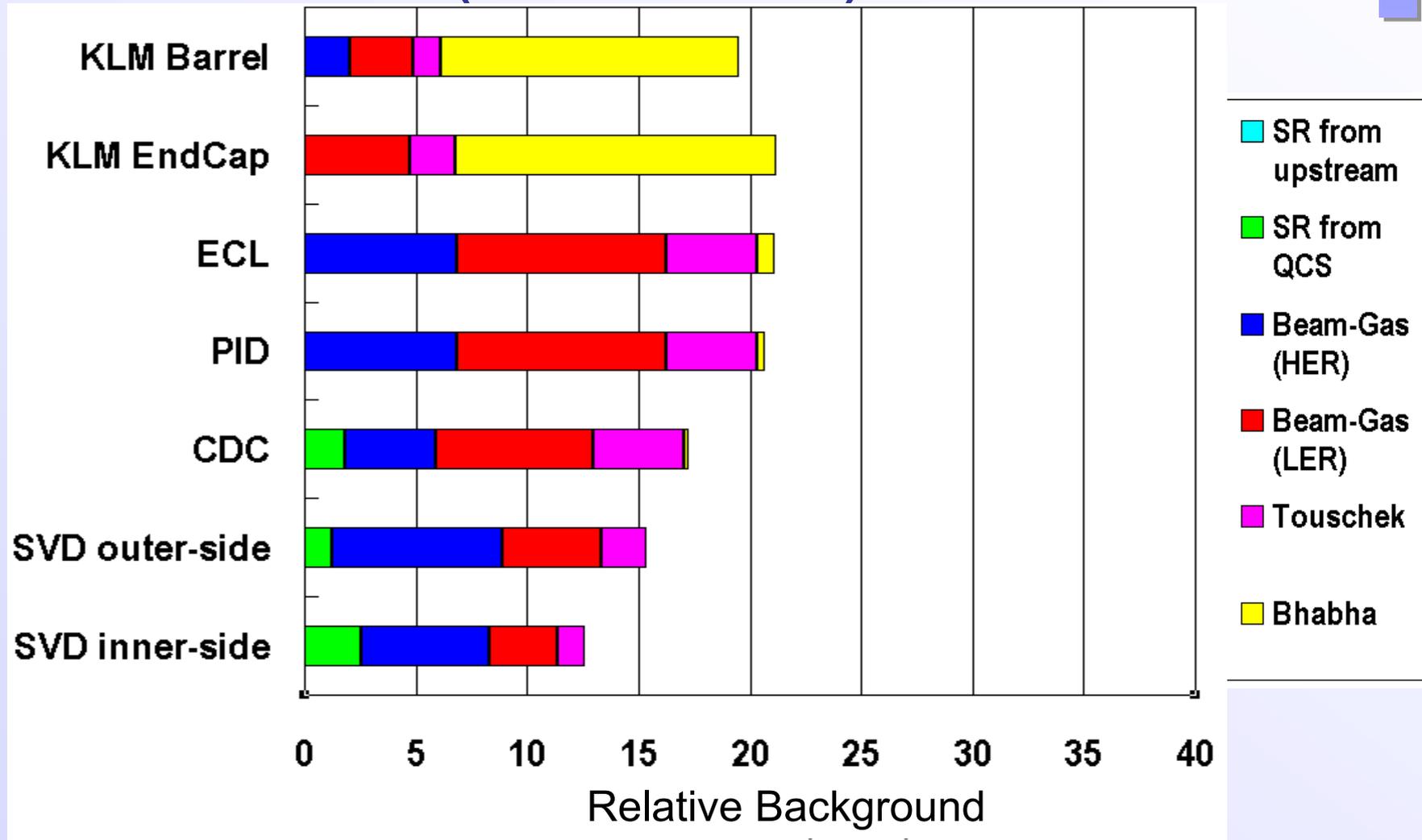
当初のアップグレード計画

- 現在のKEKBと同様の衝突手法で、比較的単純に電流を増強。루미ノシティとバックグラウンドが増大。
- 測定器は、
 - 高バックグラウンド環境下(x20)で現在と同程度の性能を発揮できること
 - 粒子識別、崩壊点位置検出器等、性能を格段に向上させたいという二つの要請に沿ってデザイン。

Charged tracks under x20 more background



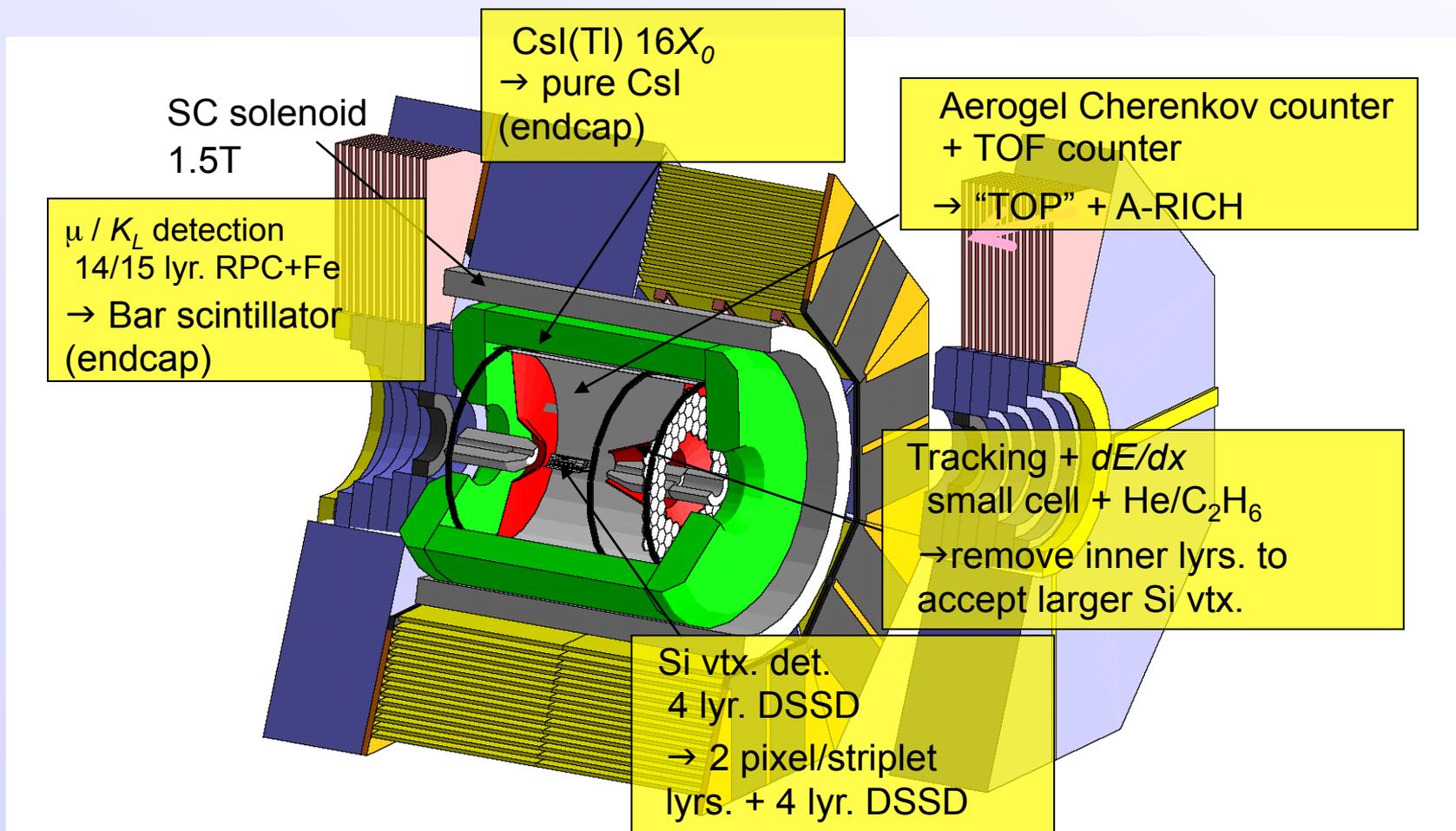
Beam Background Expectation (as of 2008)



20 times more background @ full I_{beam}

Baseline Design of Belle II

One of the possible designs; minimum modification to the Belle structure
Comparable or better performance under 20 times more background



加速器デザイン変更の影響

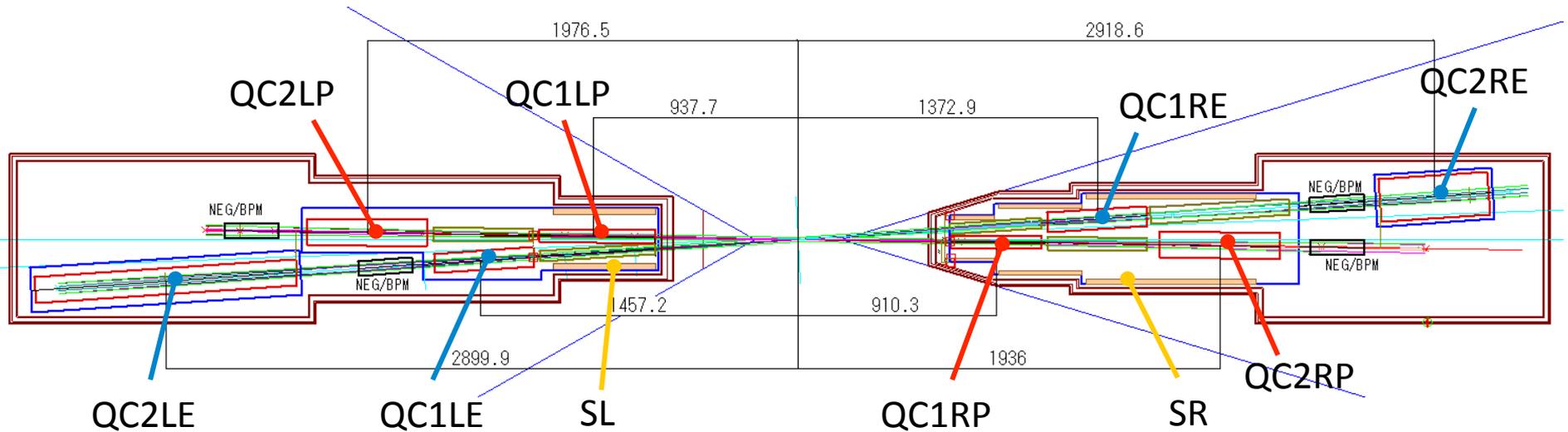
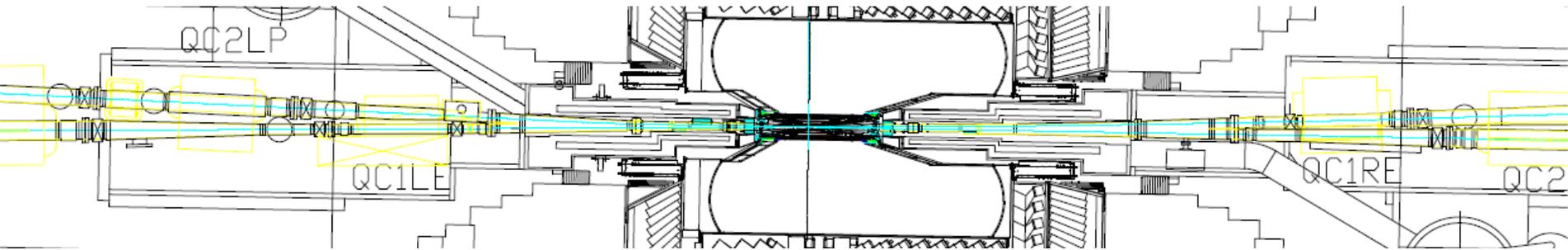
もともと、High currentを想定して測定器をデザインしていた。
最近、High current から nano beam へと大きく転換した。

- 衝突点領域のデザインを大きく変更した。
- 予想されるバックグラウンドは大きく変わった。
- 測定器のデザインはほとんど変更していない。
- ビームエネルギーが 8×3.5 から 7×4 に変更された。



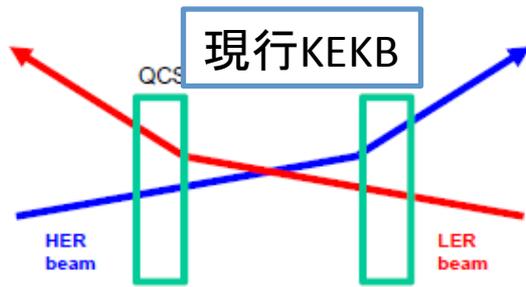
Outline of this talk

IR

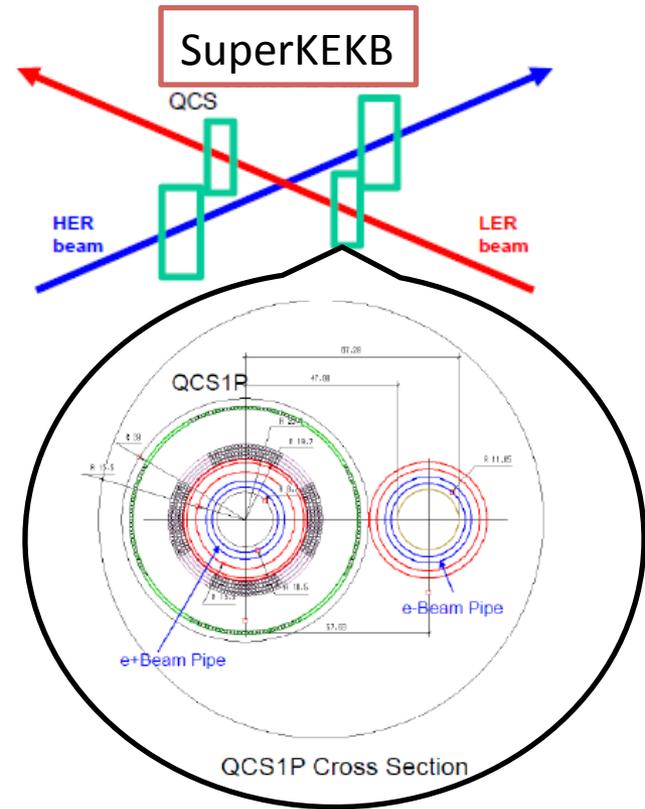


IR超伝導電磁石システム構成： 主4極電磁石8台、補正ソレノイド2台、補正コイル43台

一体Qと独立Q

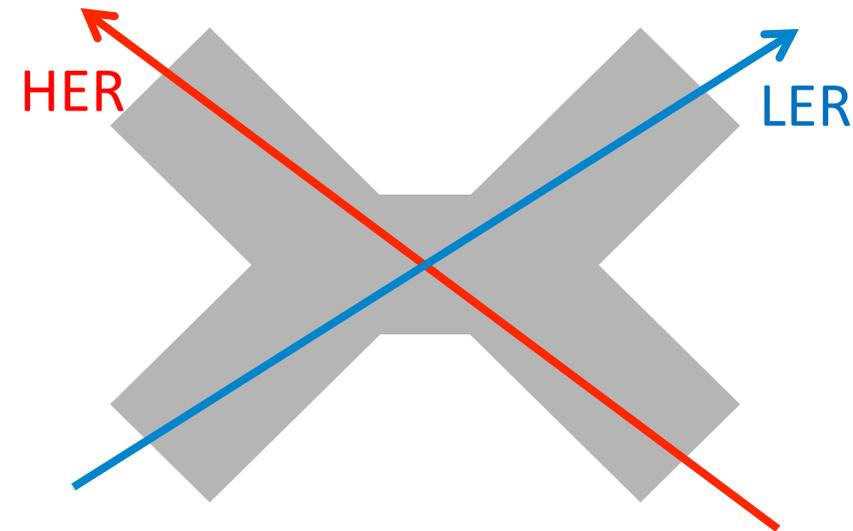


out-going beam に対してbendを兼ねる。
(crossing-angleを小さくするために必要だった。)
→ バックグラウンドの原因



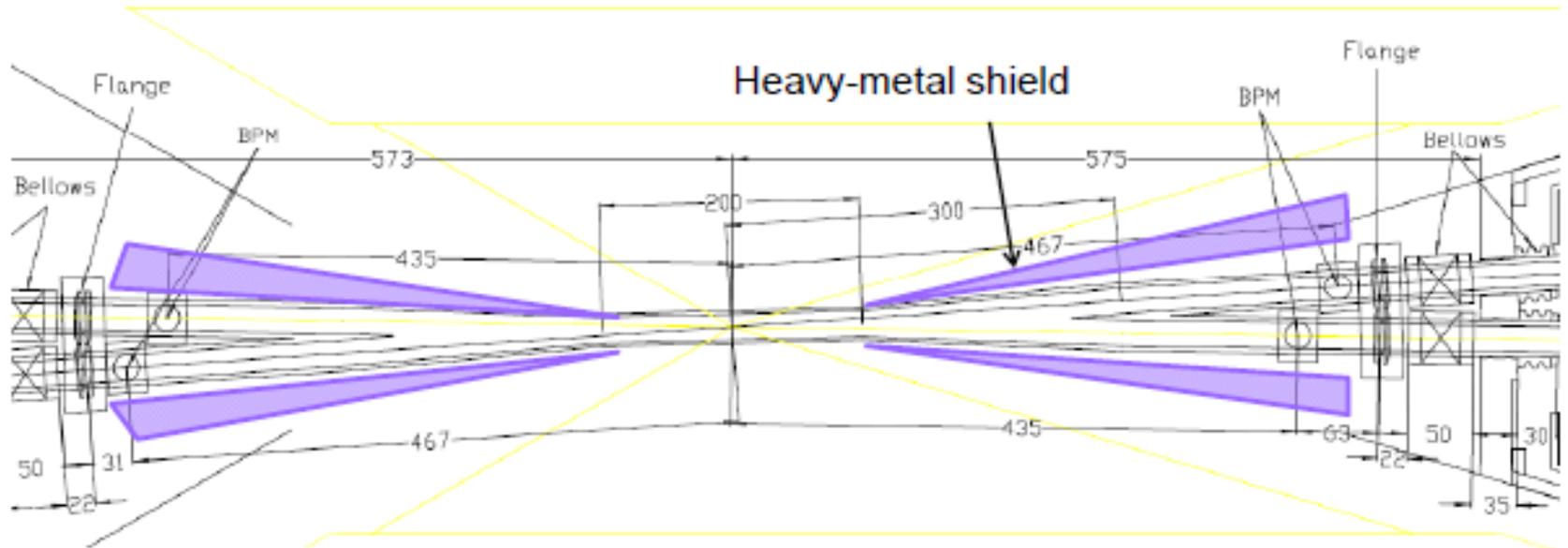
Qのbendによるバックグラウンドはほぼなくなる。
一方の磁場を他方のビームが感じないようにするために、crotchはQよりIP側に来る。
なるべくIPに近付けたいので、ビームパイプは細くなる($r=10.5\text{mm}$)。Cavity構造を作らないために、これより内側のビームパイプは $r < 10.5\text{mm}$ 。

Beam Pipe の形状



課題

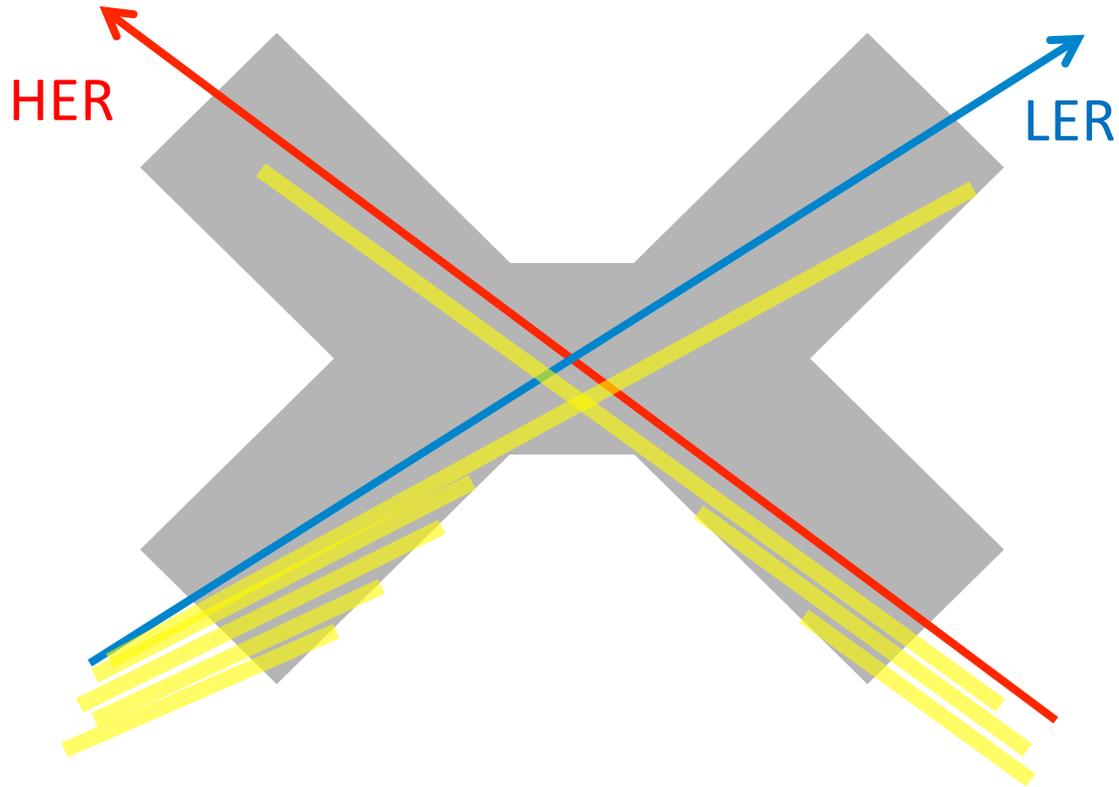
- Heavy metal mask をどう支えるか？
- Heavy metal mask とBPMの場所の取り合い
- Flangeをどうやって開け閉めするか？
- IPの真空度



BEAM BACKGROUND

-  SR from upstream
-  SR from QCS
-  Beam-Gas (HER)
-  Beam-Gas (LER)
-  Touschek
-  Radiative Bhabha

SR from upstream



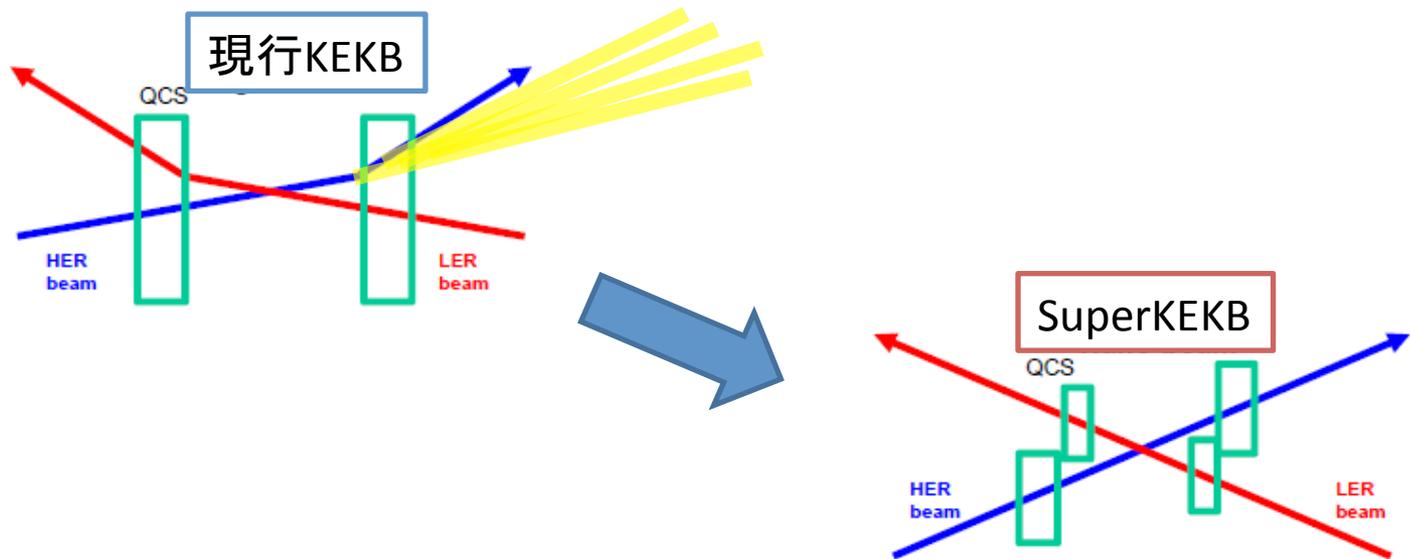
High current の時は、太いビームを一気に絞るので、全体にSRを受けていた。→ SR mask nano beam では、final bend だけ気にすればよい。

上流からのSRが直線部に直撃しないように、final bendとビームパイプの向きを調整。

High current (O(kW) on SR mask) → nano beam (<100W?)

SR from QCS (backscattered @ crotch)

独立Qなので忘れてよい。(～2/1600)



Beam-Gas scattering

- 真空度とビーム電流(x2)に比例
- リングの真空は、(電流に比例して悪化しがちだが)KEKBと同等に抑える。
- 衝突点の真空は、細いビームパイプのせいでひどく悪化 x100 – x1000。

以下の2つが、測定器へのバックグラウンドになると考えられる

- 1) 少し上流でBeam-gas散乱をおこし、エネルギーを少し失ったビームが、測定器近辺の加速器コンポーネントに衝突し、二次粒子を発生させる
→ KLM, カロリメータ等、多くの検出器に影響する
- 2) IP近辺でBeam-gas散乱をおこし、そのときに生成された粒子(比較的 low E)が測定器のバックグラウンドとなる
→ 内側の検出器(PXD, SVD)に影響する

KEKB/Belle では、1) が効いているが、真空が三ケタも本当に悪化するなら、2) も心配。

Touschek scattering

- Intra-beam scattering
- loss rateは**ビームサイズ**に反比例
- nano beam で特に問題

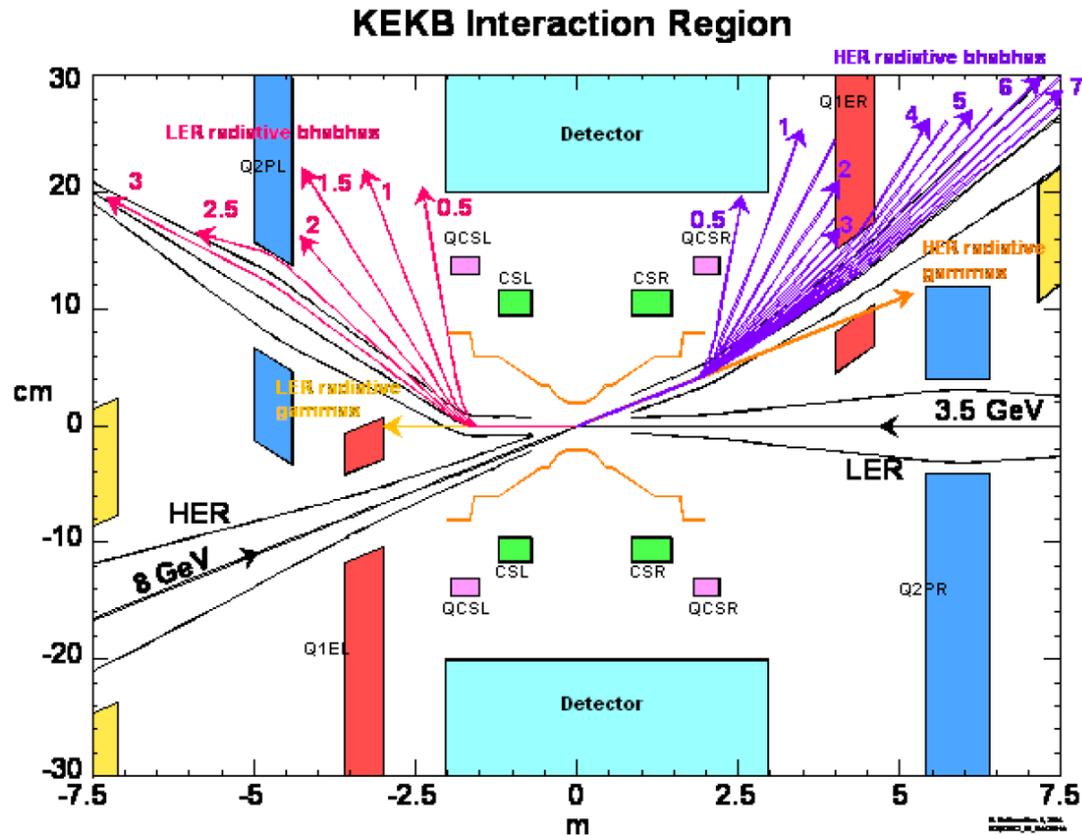
非常にビームサイズの小さい衝突点領域は、短い。
バックグラウンドへの寄与は全周のほうが主。

現在、 $\tau_{\text{Touschek}} \sim$ 数時間

加速器のシミュレーションによると、 $\tau_{\text{Touschek}} \sim 10\text{min}$

約30倍のバックグラウンドが予想される。

Radiative Bhabha (1) over-bent particle



Luminosity に比例するが、
独立Qなので忘れてよい。(～40/1600)

Radiative Bhabha (2)

photon \rightarrow neutrons

Luminosity に比例 (x40)

photon が machine component にあたり、Giant photonuclear resonance mechanism により生成された中性子が測定器領域に戻ってくる。

KLM が特に影響を受ける。



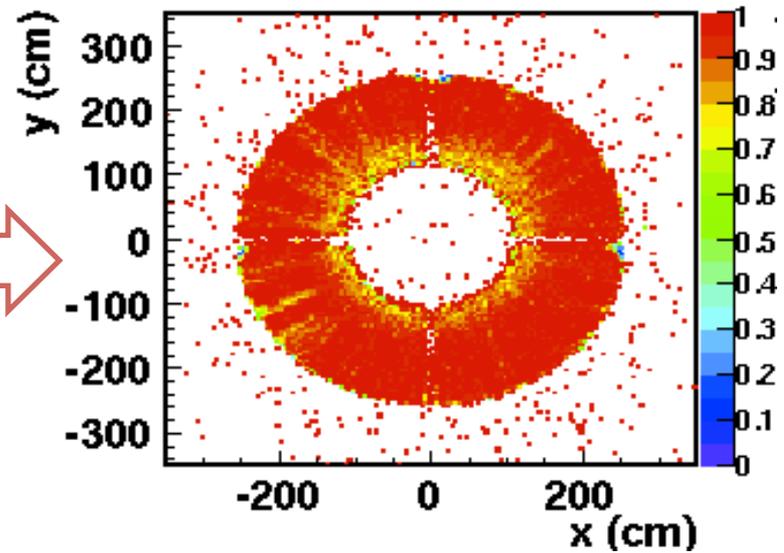
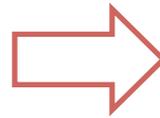
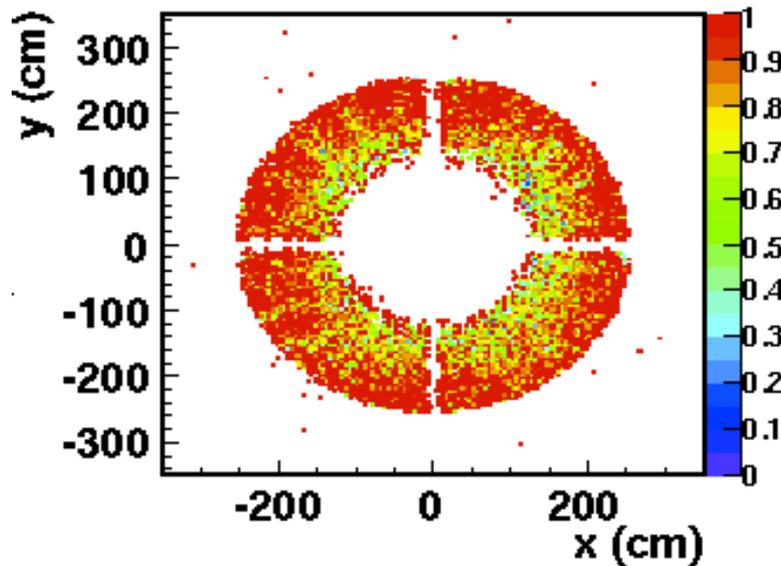
Polyethylene shield



layer 9 before shield

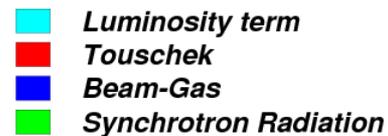
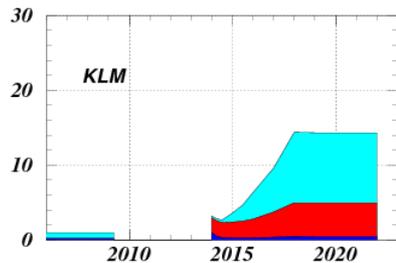
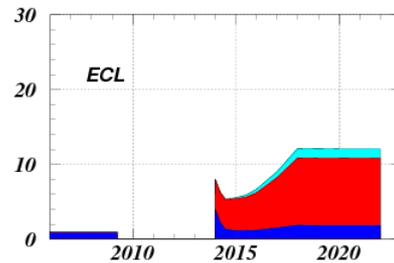
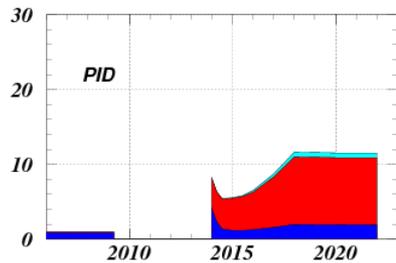
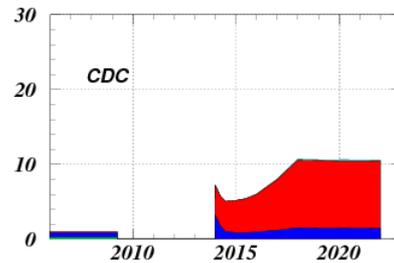
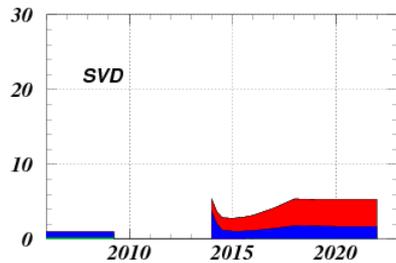


layer 9 after shield



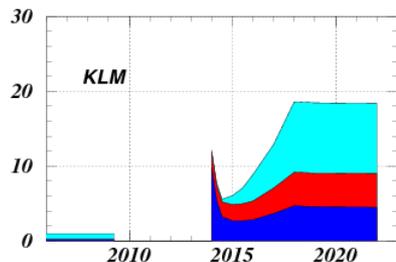
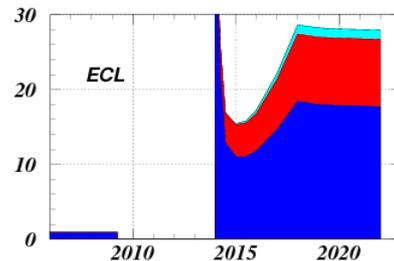
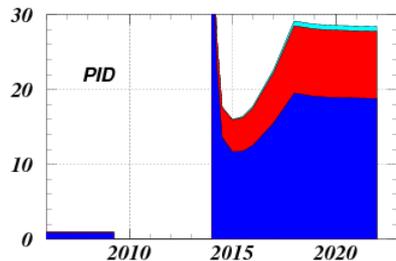
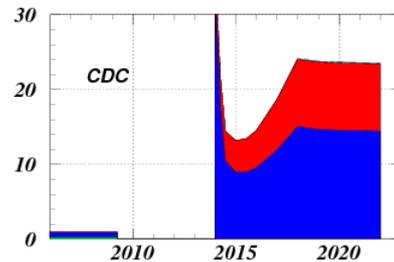
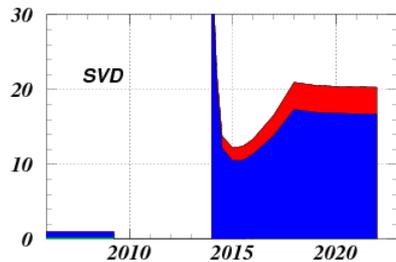
efficiency recovered!

Background のまとめ



- 様々な根拠ある仮定に基づく外挿
+いい加減な仮定:
- radiative Bhabha (1) : (2) = 50% : 50% とした。
 - 中性子の発生源をポリエチシールドで半分くらい抑えられるとした。
 - IPの真空は、そんなには効かないとした (Simulation 待ち)。

Background のまとめ



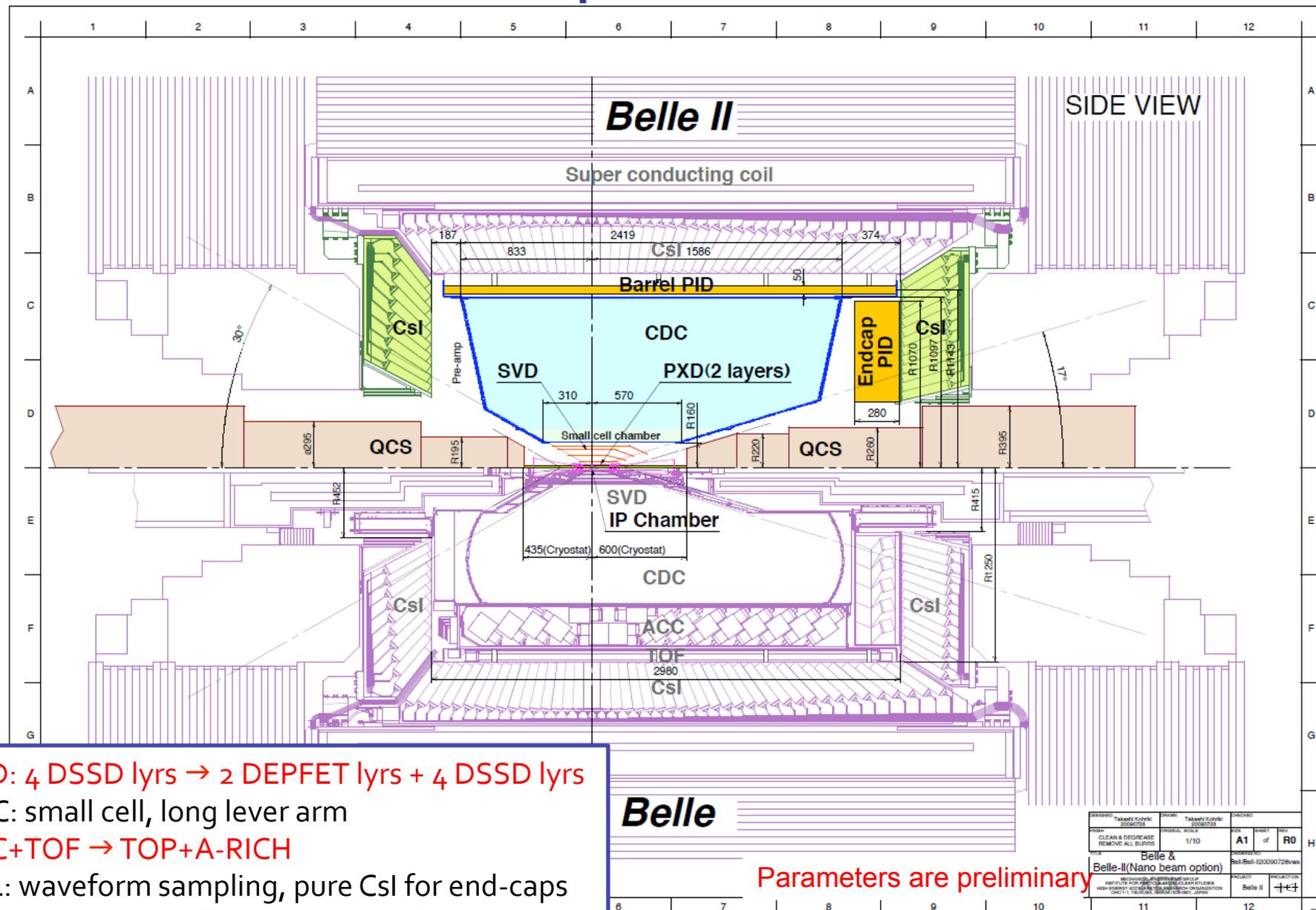
 *Luminosity term*
 *Touschek*
 *Beam-Gas*
 *Synchrotron Radiation*

- 様々な根拠ある仮定に基づく外挿
+いい加減な仮定:
- radiative Bhabha (1) : (2) = 50% : 50% とした。
 - 中性子の発生源をポリエチシールドで半分くらい抑えられるとした。
 - IPの真空が、結構効くとした (Simulation 待ち)。

nano beam になったけど、
20倍のバックグラウンドだと
思っておくことにする。

DETECTOR

Belle II in comparison with Belle



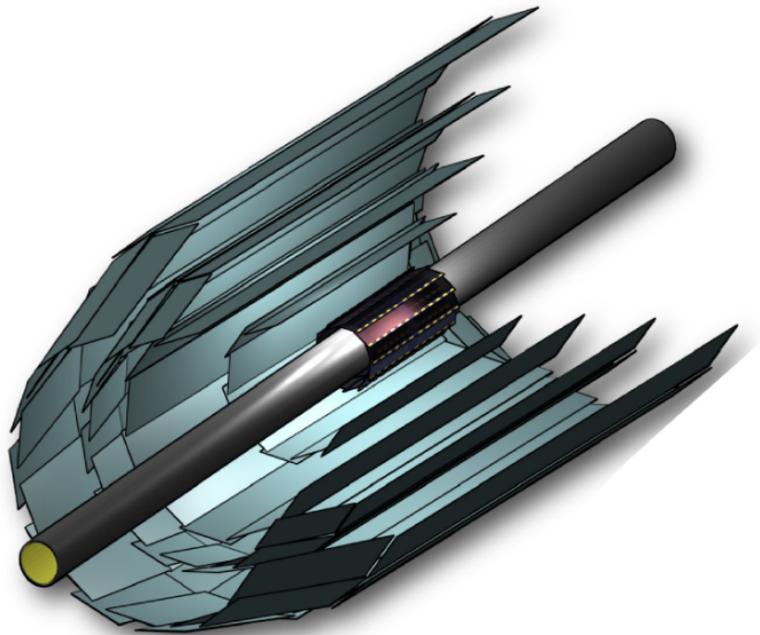
SVD: 4 DSSD lyrs → 2 DEPFET lyrs + 4 DSSD lyrs

CDC: small cell, long lever arm

ACC+TOF → TOP+A-RICH

ECL: waveform sampling, pure CsI for end-caps

KLM: RPC → Scintillator +SiPM (end-caps)



Beam Pipe

$r = 1\text{cm}$

DEPFET

Layer 1

$r = 1.3\text{cm}$

Layer 2

$r = 2.2\text{cm}$

DSSD

Layer 3

$r = 3.8\text{cm}$

Layer 4

$r = 8.0\text{cm}$

Layer 5

$r = 11.5\text{cm}$

Layer 6

$r = 14.0\text{cm}$

VERTEX DETECTOR

DEPFET group

DEPFET = **D**epleted **P**-Channel **F**ield **E**ffect **T**ransistor

Proposed in 1985 by Kemmer and Lutz [Nucl. Instr. and Meth. A 253 (1987), p. 365]

DEPFET collaboration

University of Barcelona, Spain

Universitat Ramon Llull, Barcelona, Spain

IGFAE, Santiago de Compostela University, Spain

IFIC, CSIC-UVEG, Valencia, Spain

Bonn University, Germany

Heidelberg University, Germany

Giessen University, Germany

Goettingen University, Germany

Karlsruhe University, Germany

MPI Munich, Germany

IFJ PAN, Krakow, Poland

Charles University, Prague, Czech Republic

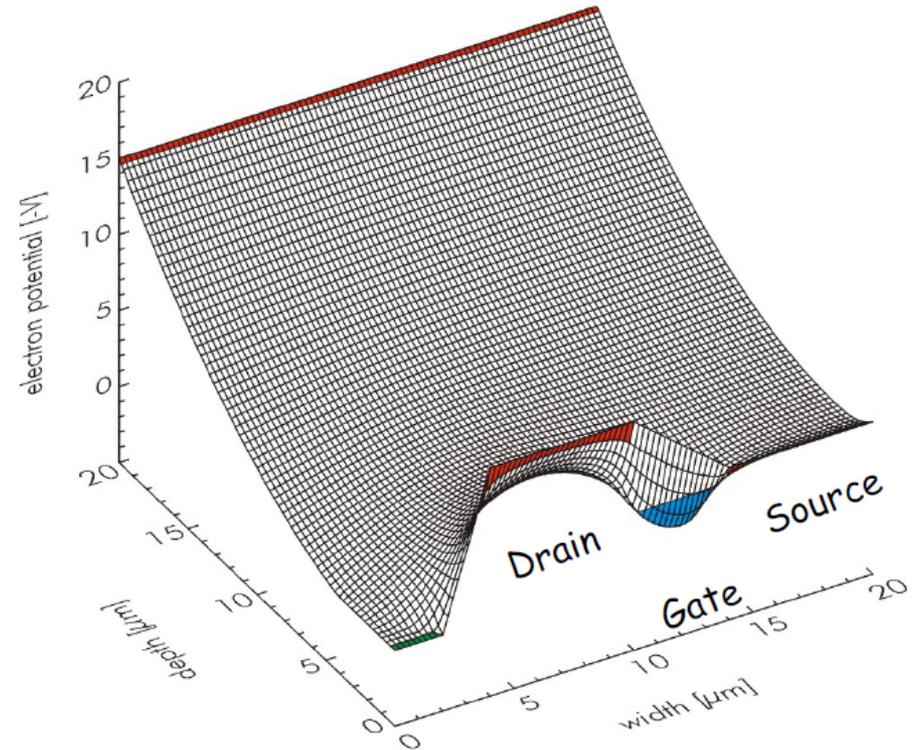
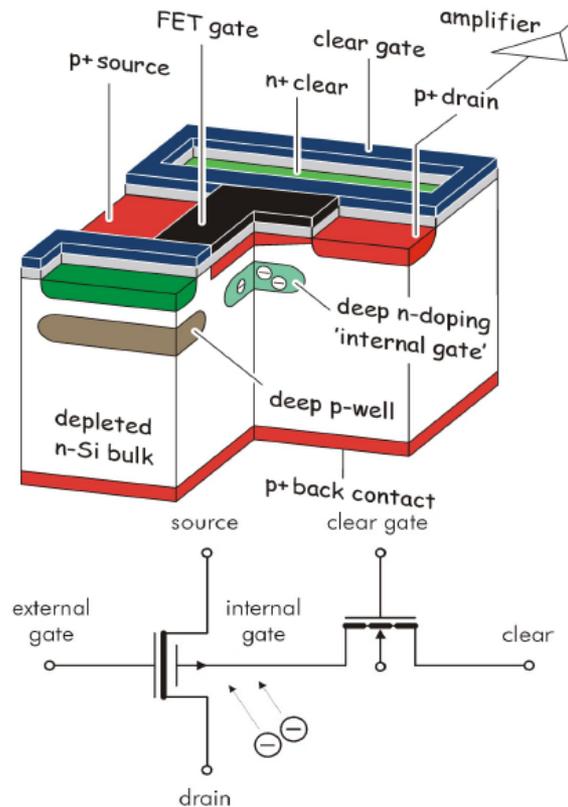
Formed originally for ILC pixel detector. **Joined to Belle II collaboration (blue).**

DEPFET Principle

J. Kemmer & G. Lutz, 1987



DEpleted P-channel FET

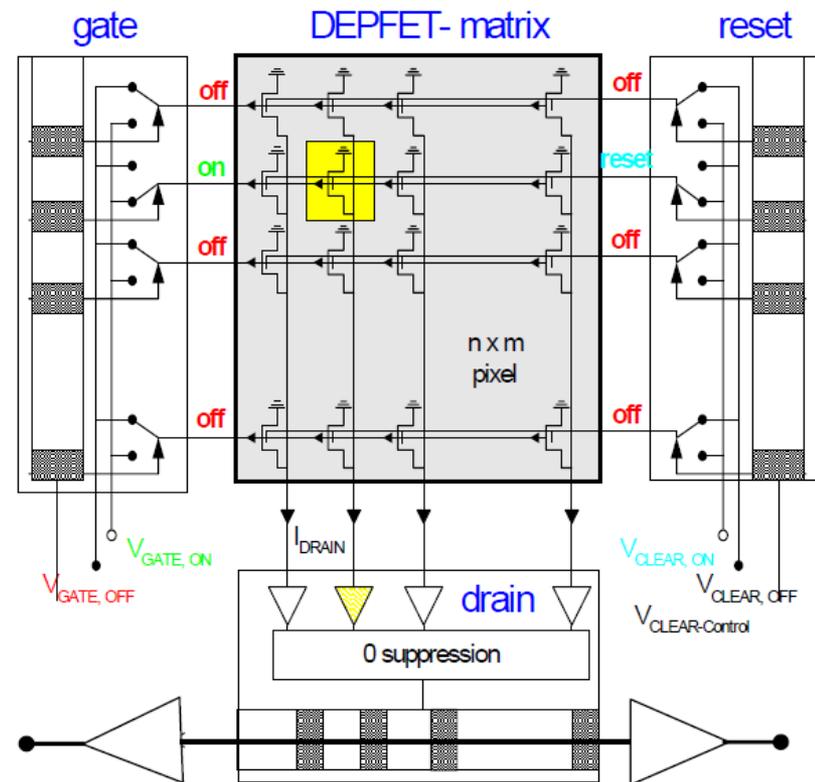
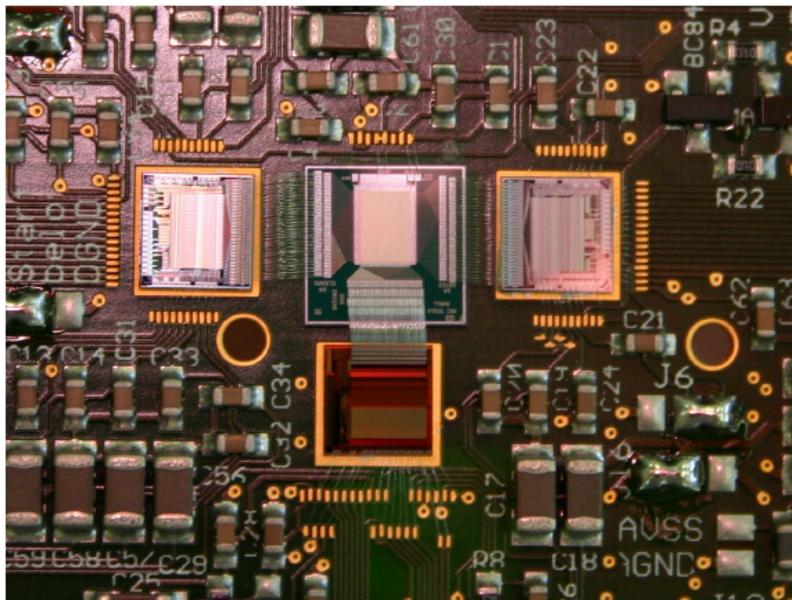


- fully depleted sensitive volume, charge collection by drift
- internal amplification \rightarrow q-I conversion: 0.5 nA/e, scales with gate length and bias current
- Charge collection in "off" state, read out on demand

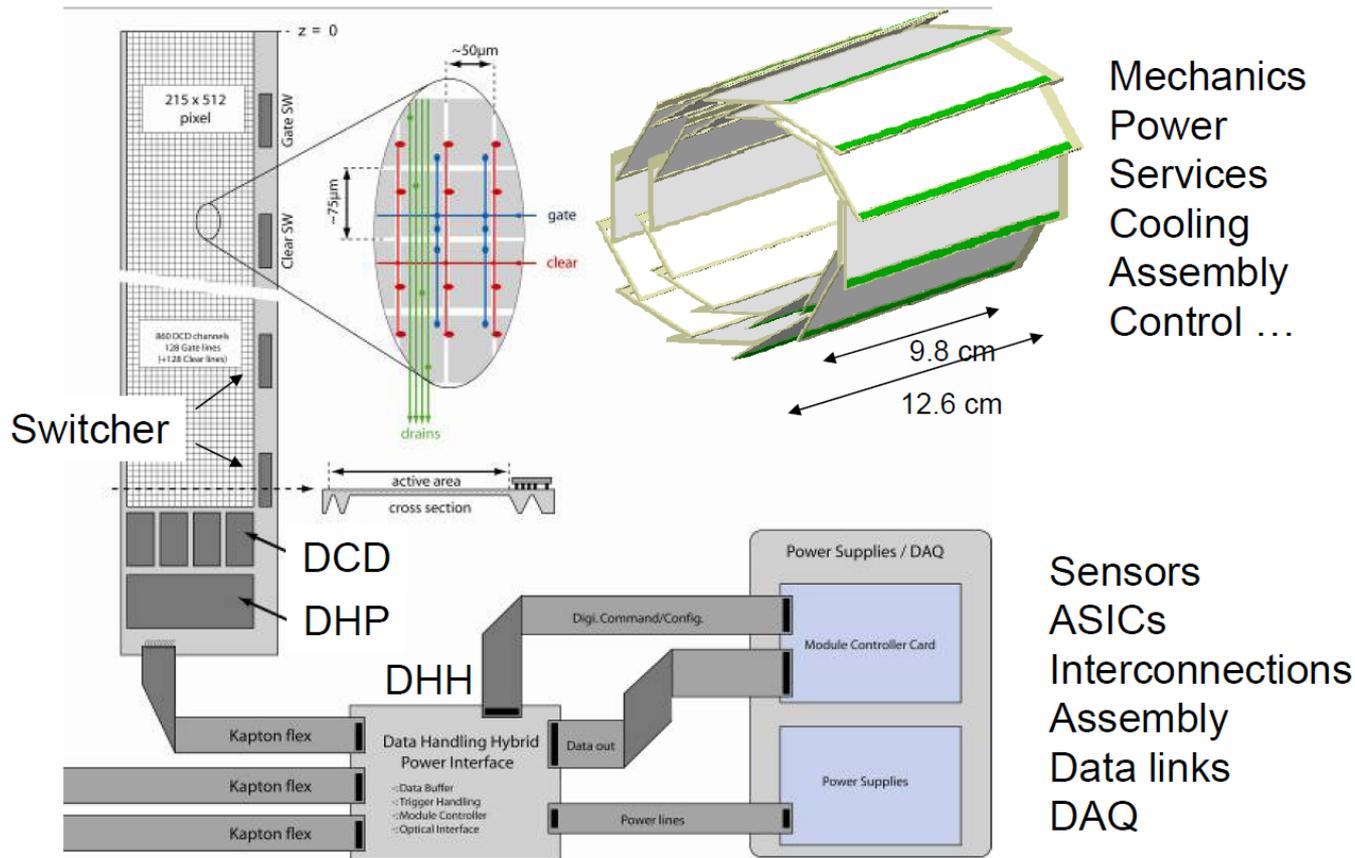
● An Array of DEPFETs

Row wise read-out ("rolling shutter")

- select row with external gate, read current, clear DEPFET, read current again
→ the difference is the signal
- only one row active → low power consumption
- two different auxiliary ASICs needed



Main Components of the PXD

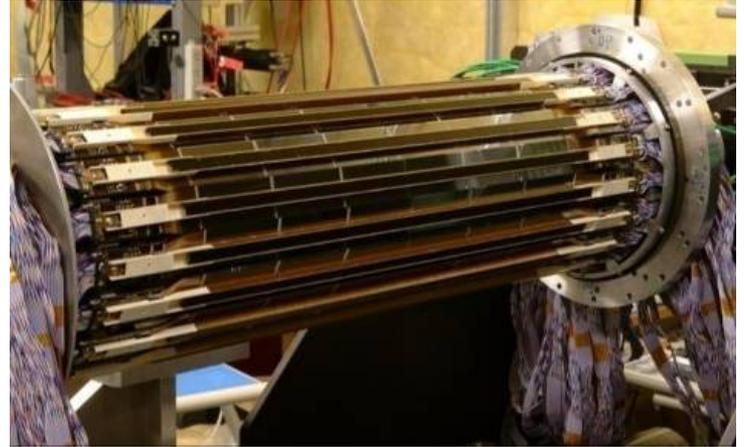
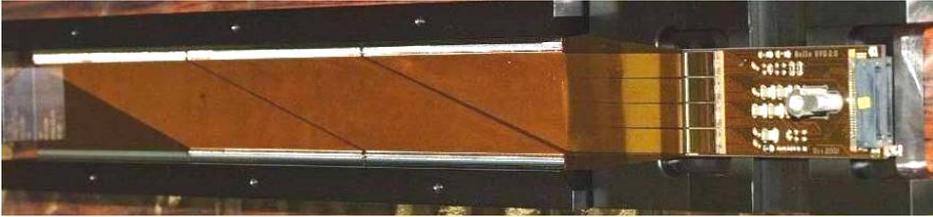


C. Kiesling, Inter Detector Meeting (via EVO), Oct. 15, 2009

12

11Mpx (20usに一度読みだす場合)
 1-2% occupancy
 L1 rate 30kHz (ave. 20kHz)
 $11M \cdot 0.02 \cdot 30k \cdot 4\text{byte} = 200\text{Gbps}$ (zero suppressed)
 RoIをSVD standalone tracking により設定する必要あり。

現在のBelle SVD



まっすぐなラダー

読み出しASIC (VA1TA)はラダーの端に置き、最大3枚のセンサーを読む。

VA1TA $\tau = 800\text{ns}$

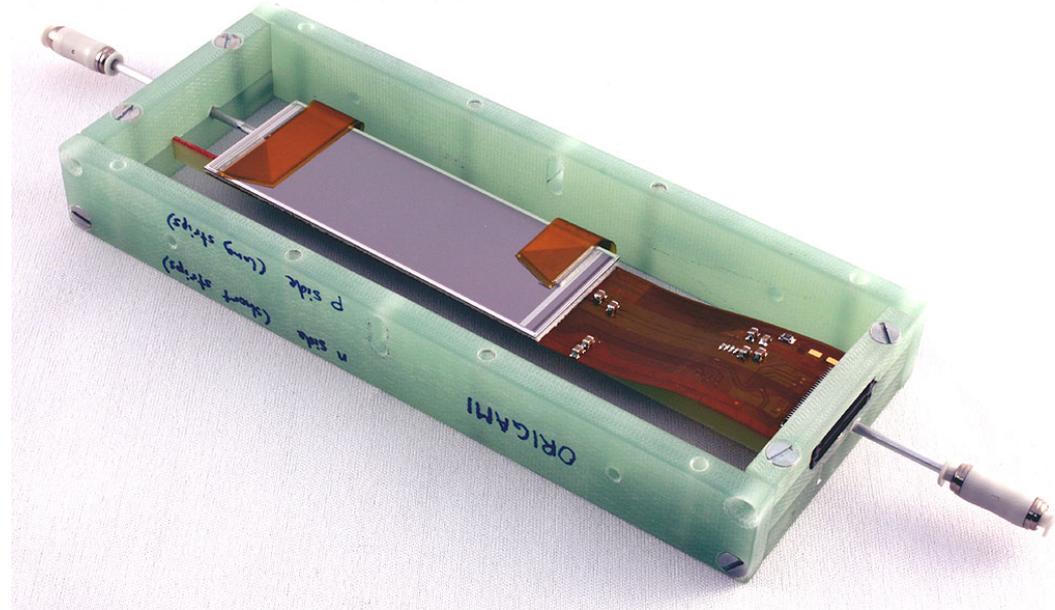
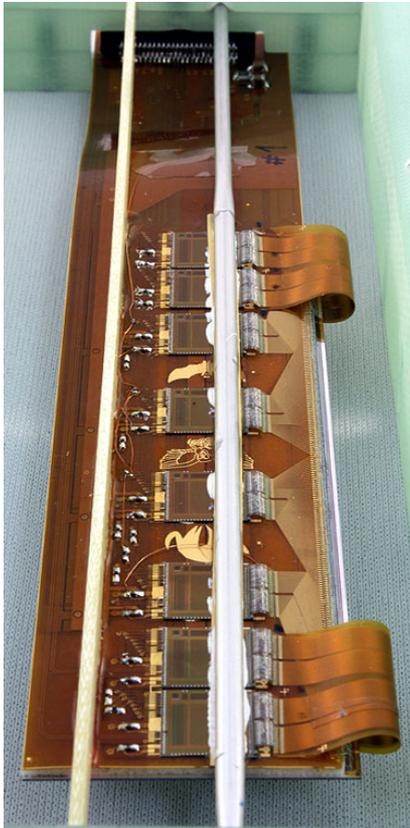
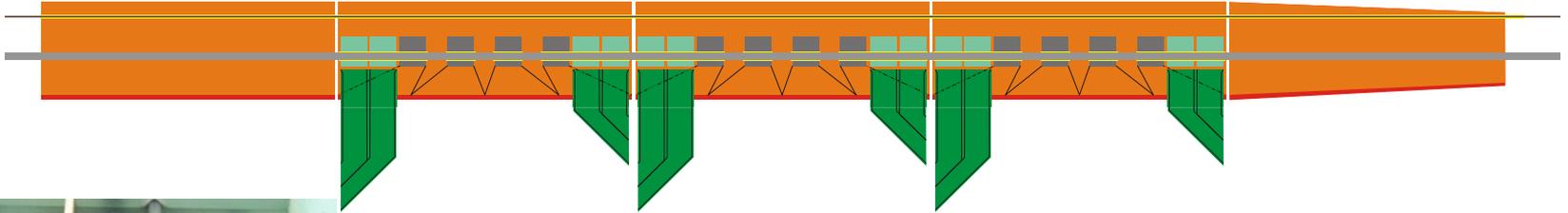


Belle II SVD

Fast shaping (APV25) $\tau = 50\text{ns}$ (occupancy を抑えるため)

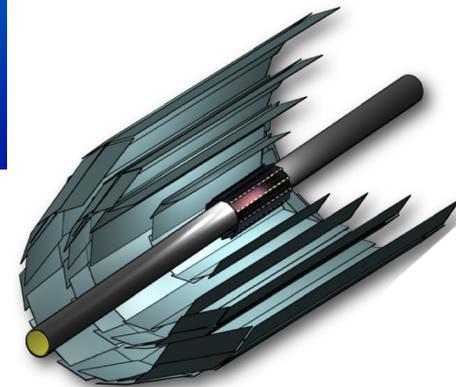
長いラダーなので、 C_d が大きい。

APV25 on DSSD



なるべく物質量を少なくするために、裏面用APV25も表面に置く。(冷却配管は一本で済みます)

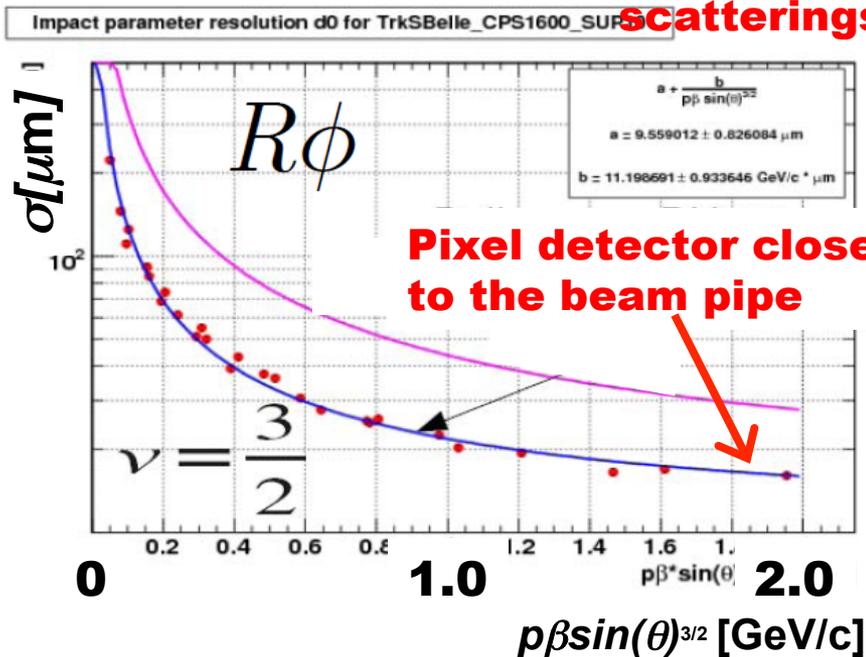
Vertex Detector



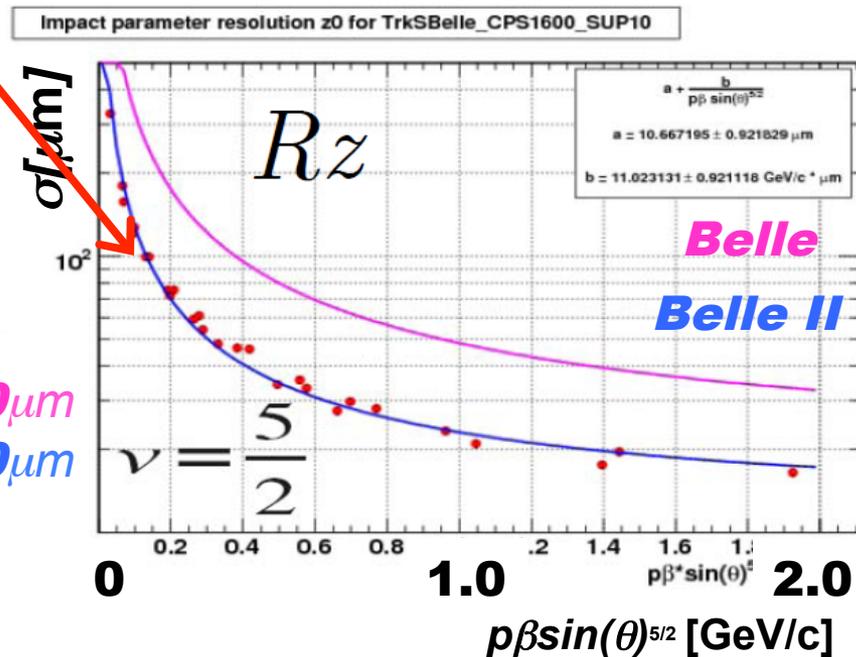
Significant improvement in IP resolution!

$$\sigma = a + \frac{b}{p\beta \sin^\nu \theta}$$

Less Coulomb scatterings



30 μm
20 μm



PARTICLE IDENTIFICATION

Current system

- Barrel: TOF + ACC
- End cap: ACC
(ACC: Threshold type
Aerogel Cherenkov Counter)

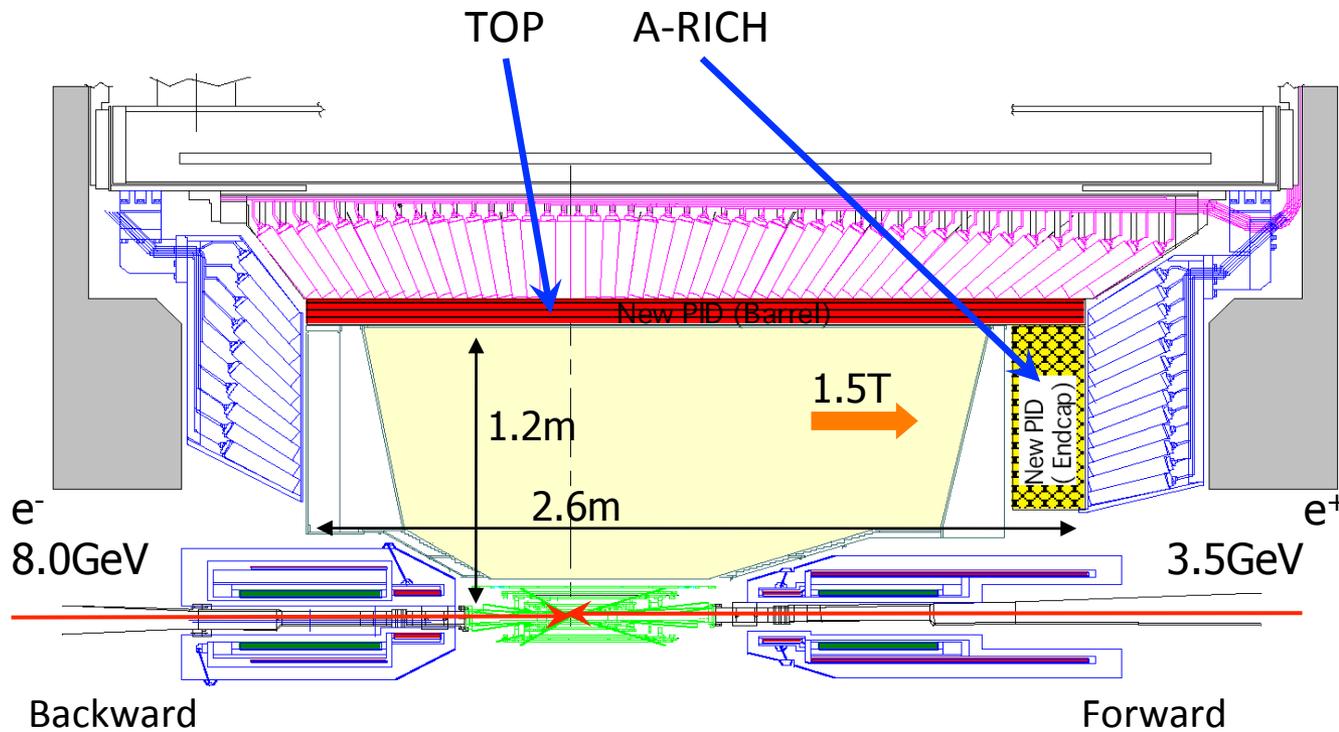


Belle-II

- Barrel: TOP counter
- End cap: Aerogel RICH
(TOP: Time-of-Propagation)

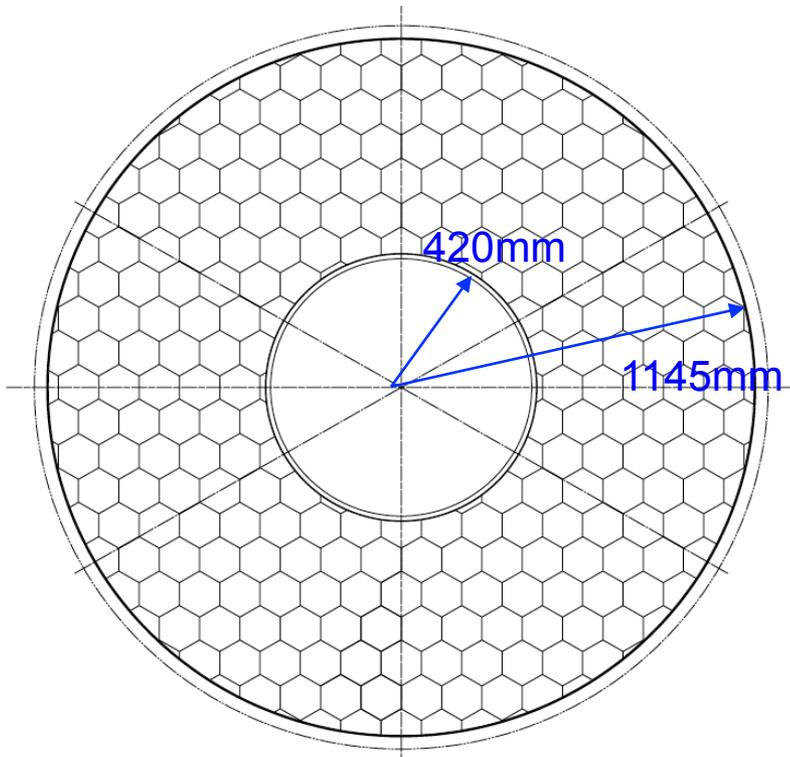
3σ K/pi separation

4σ K/pi separation up to 4GeV

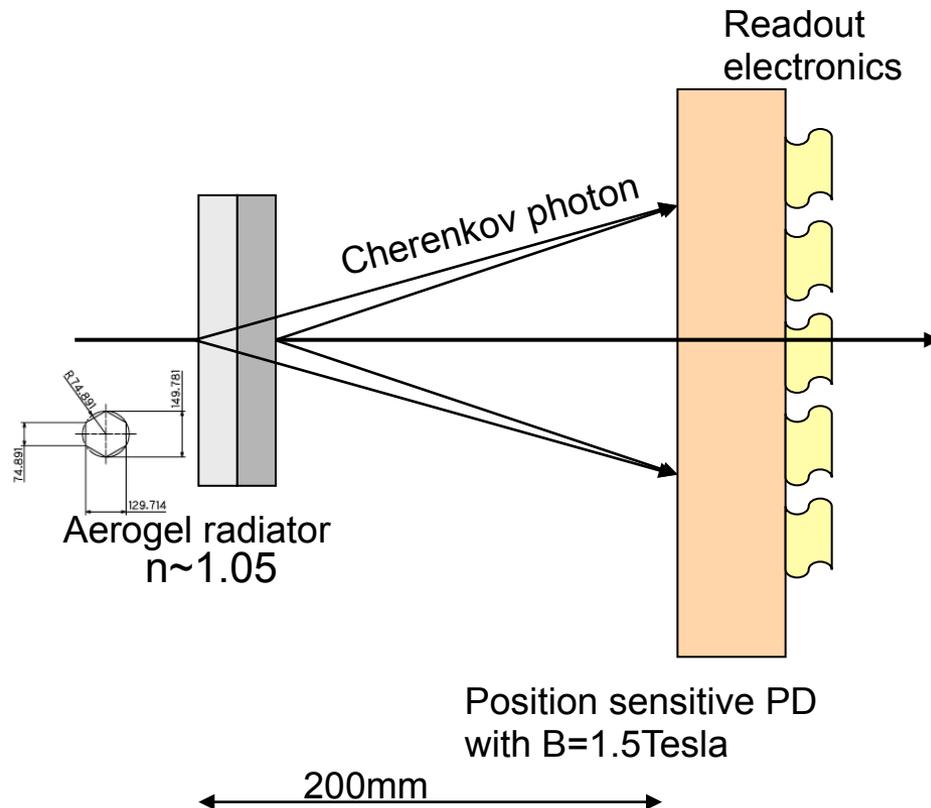


Baseline Design for End-cap PID

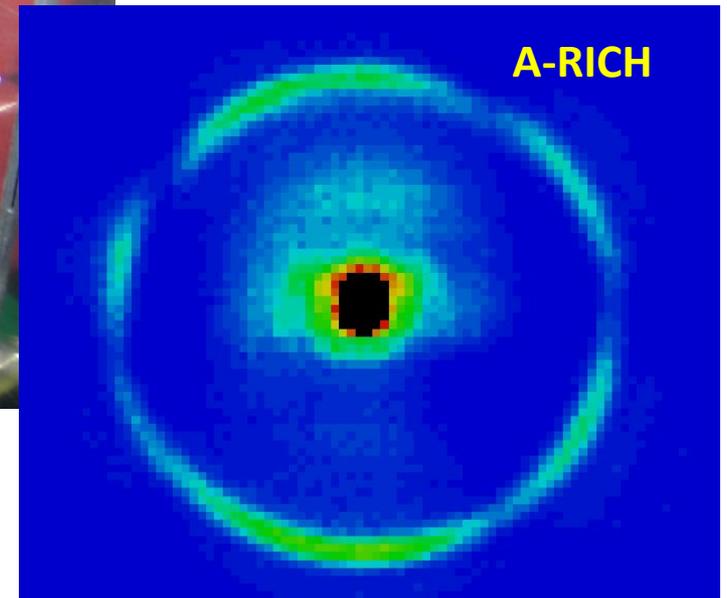
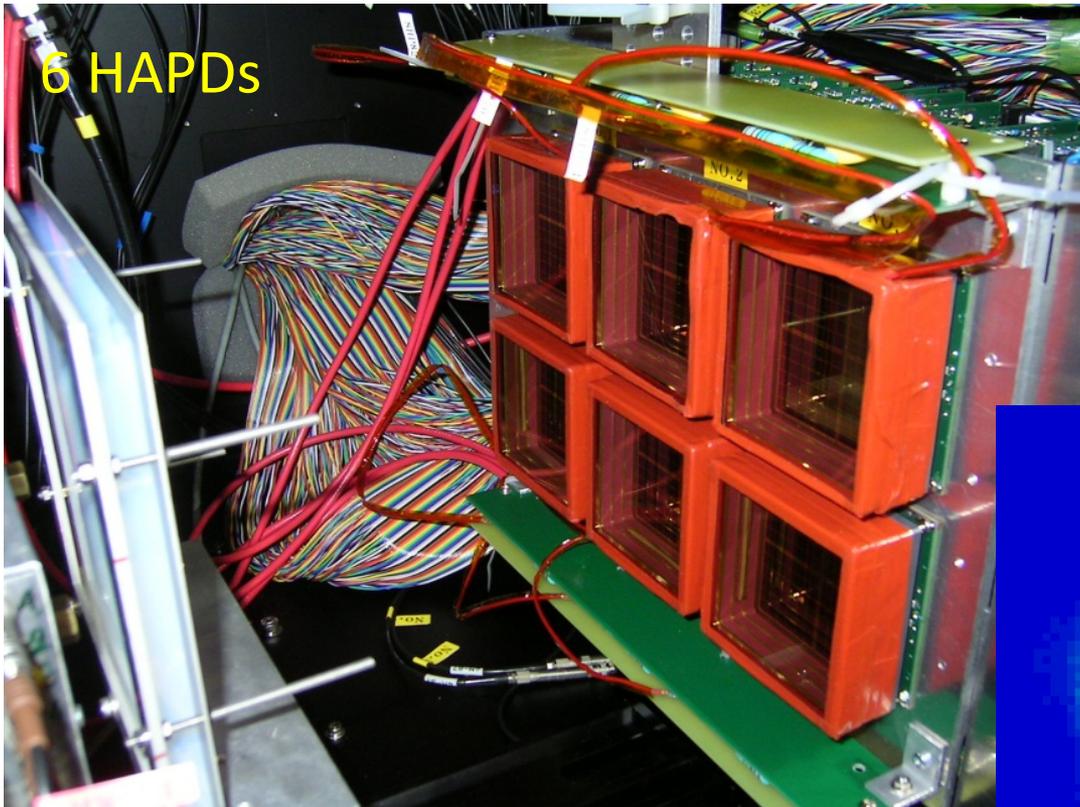
Proximity focusing RICH with silica aerogel as Cherenkov radiator for new Belle forward PID



x-y view of forward end-cap



Test beam (2008)



Clear ring image observed !

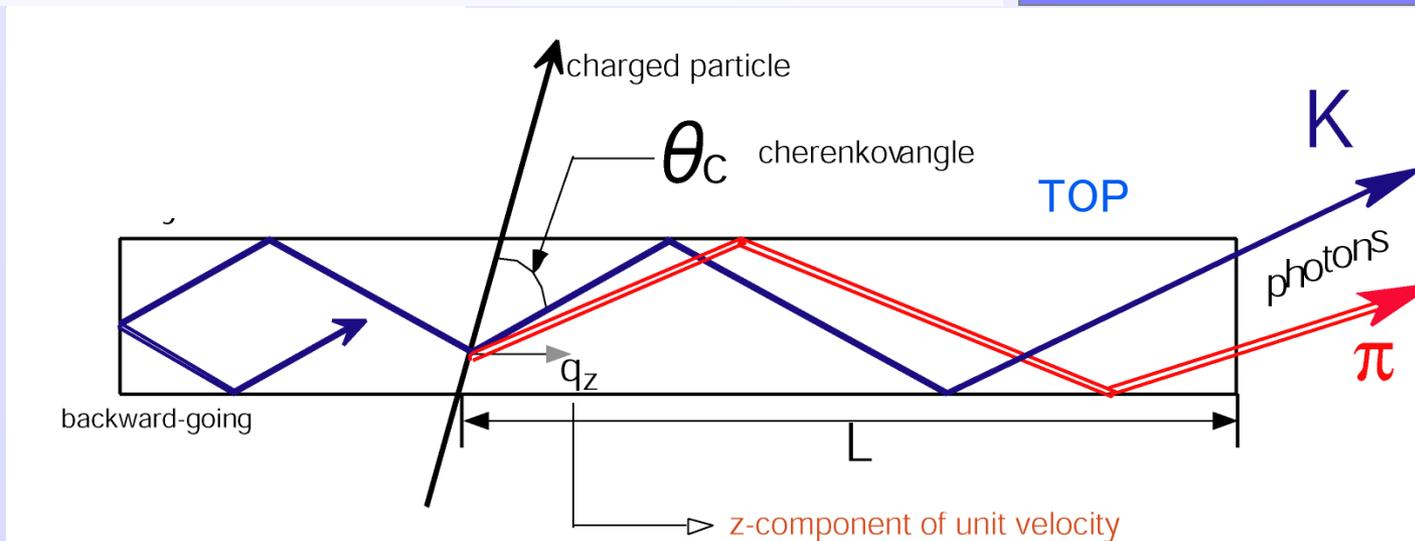
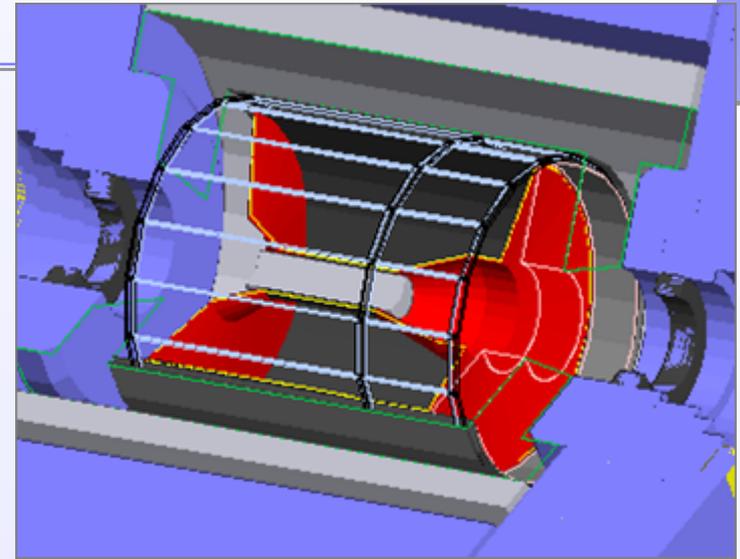
Barrel PID (TOP)

Ring imaging with :

- One coordinate with a few mm precision
- Time-of-arrival

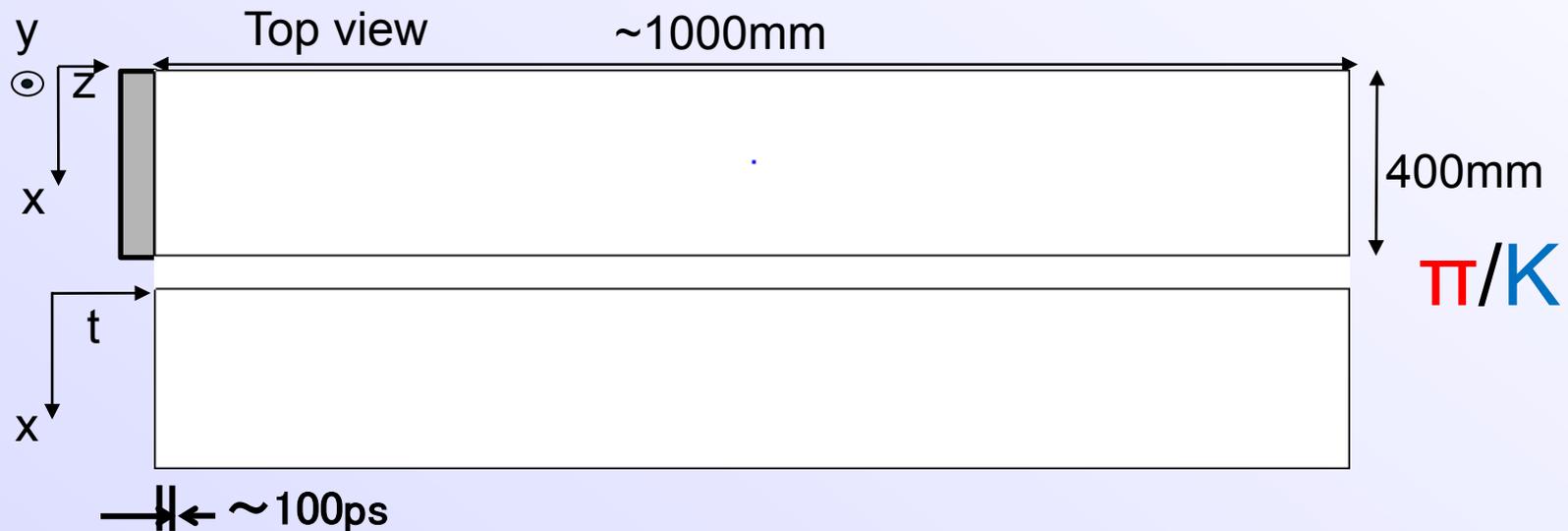
+ Time-of-Flight

→ Excellent time resolution $< \sim 40\text{ps}$
required for single photon in 1.5T B field



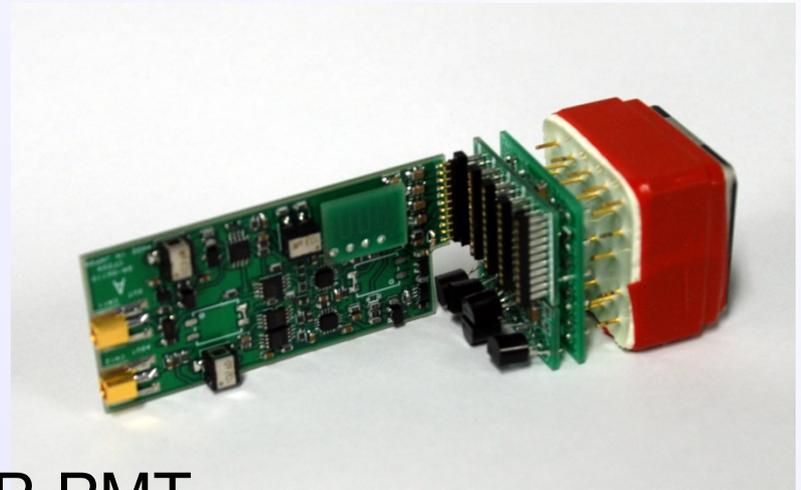
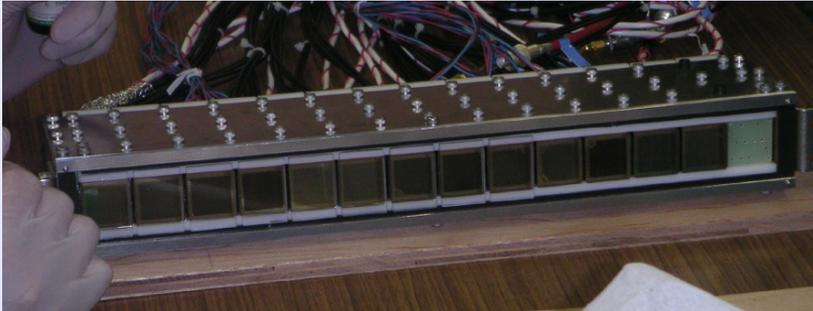
$\sim 1.2\text{m}$
TOF

Typical Ring Image



Detection position & time

TOP の prototype



MCP-PMT

27.5x27.5 mm square

By Hamamatsu photonics

Quartz bar

Size; 915 x 400 x 20 mm

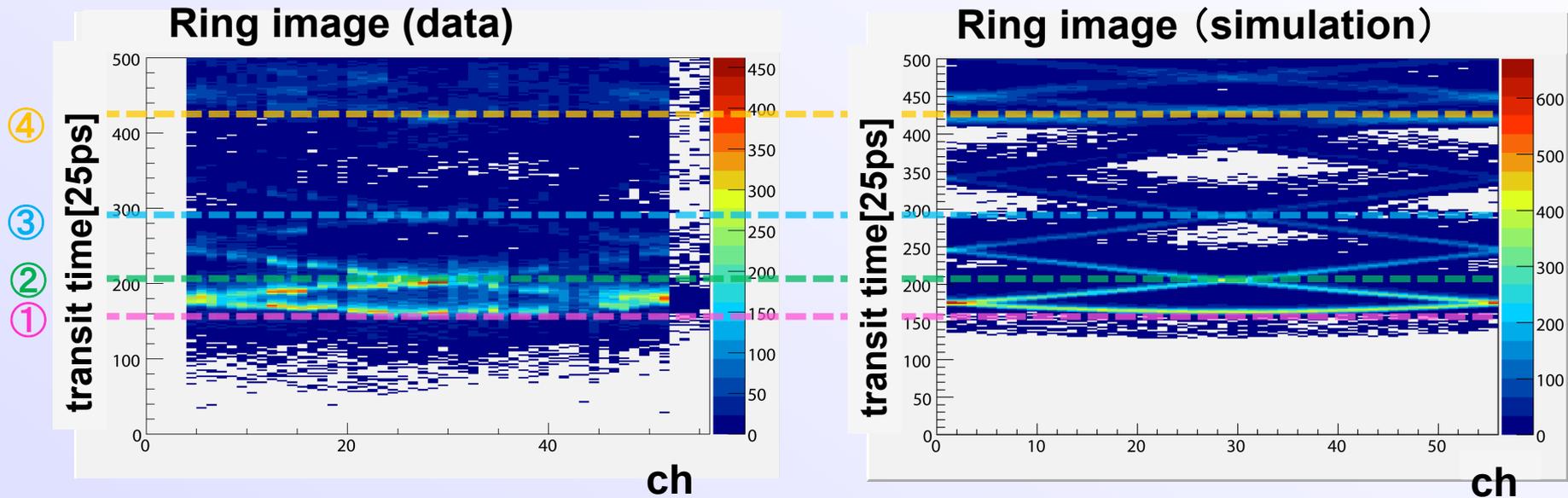
Flatness; $<2\mu\text{m}$

Roughness; $<0.5\text{nm}$

By Okamoto optics work, inc.

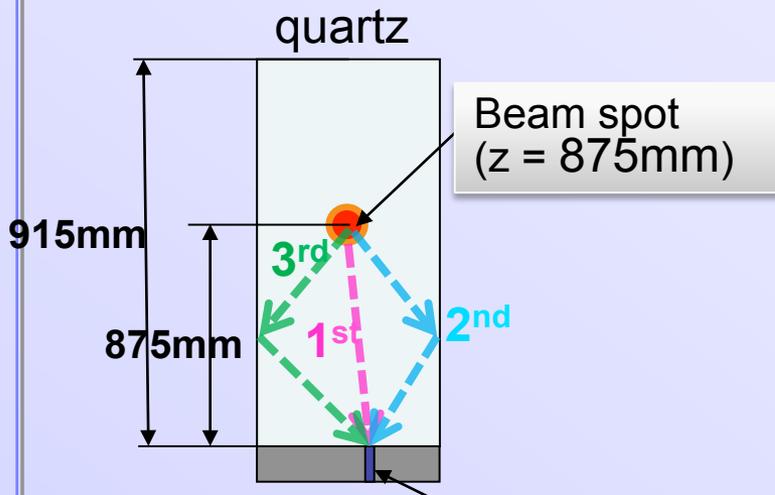
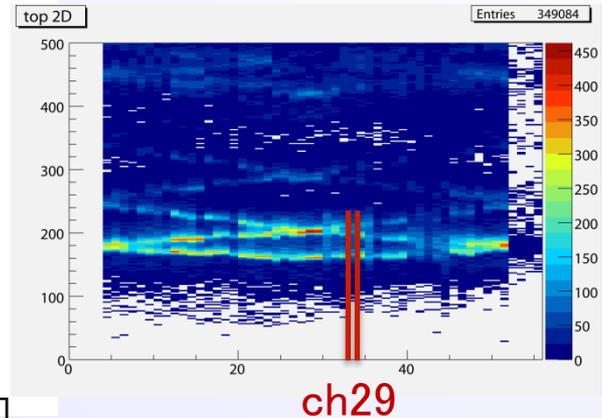
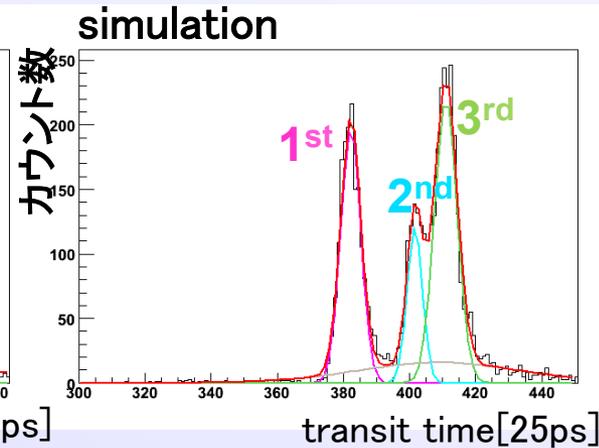
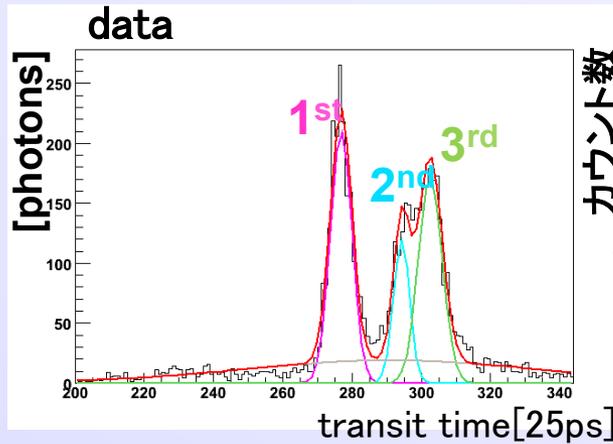


Test beam (2008)



Principle confirmed

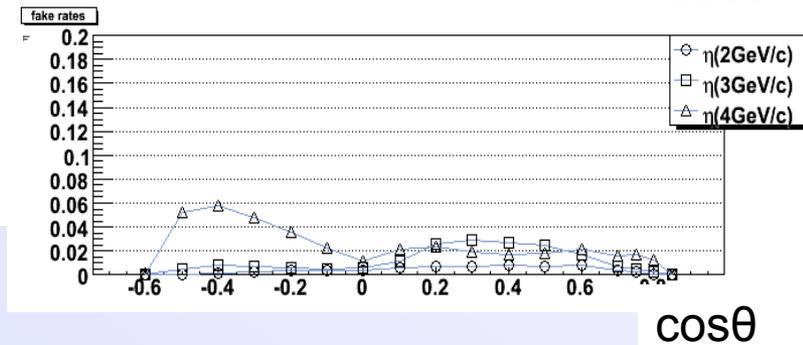
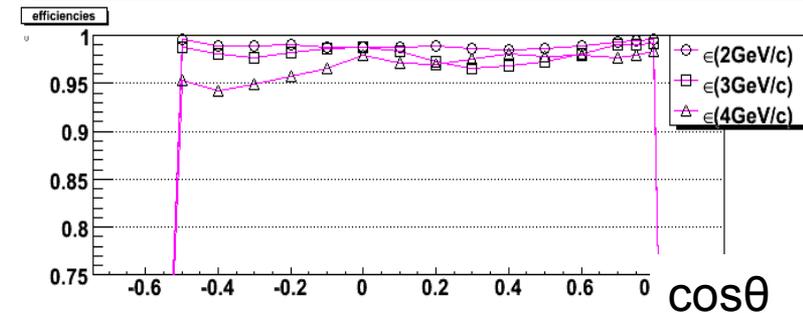
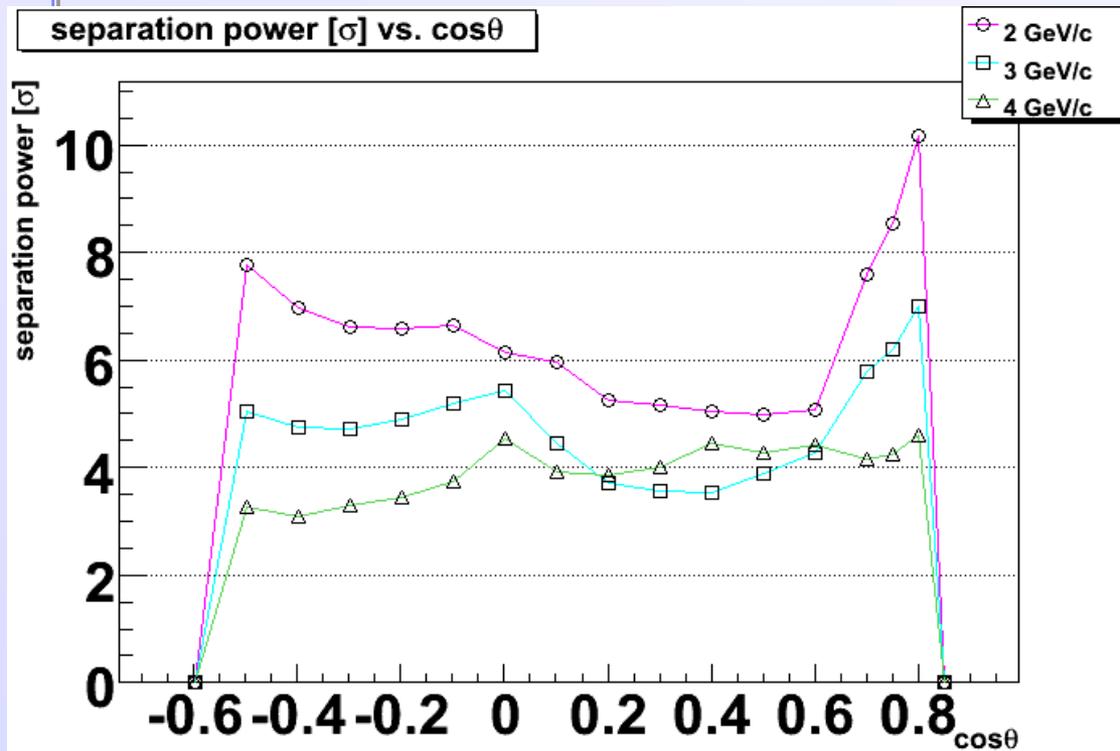
Transit-time spread (TTS)



| | TTS (1 st peak) |
|------------|----------------------------|
| Data | 76.0±2.0 [ps] |
| Simulation | 77.7±2.3 [ps] |

$$\sigma_{\text{top}} = \sqrt{\sigma_{\text{MCP-PMT}}^2 + \sigma_{\text{chromatic}}^2}$$

Expected performance



K/p separation power $\sim 4\sigma$ for $2\text{GeV} < p < 4\text{GeV}$

Luminosity Gain by PID upgrade

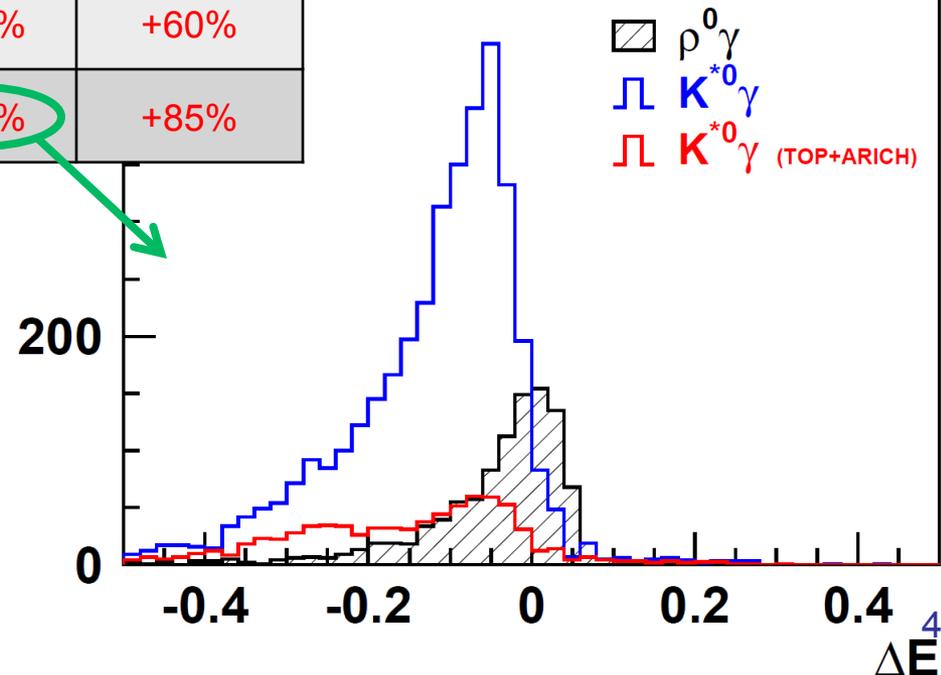
$B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$

No upgrade
BAD

Upgrade
GOOD

| FWD BRL | dE/dx NA | As good as Belle | A-RICH | A-RICH +TOF |
|---------------------|----------|---------------------|--------|----------------|
| TOF, dE/dx NA | -74% | -68% | -62% | -62% |
| TOF NA | -41% | -32% | -22% | -22% |
| As good as Belle | -10% | 0% (definition) | +12% | +13% |
| TOP opt.0 | +27% | +40% | +59% | +60% |
| TOP opt.2 | +45% | +60% | +83% | +85% |

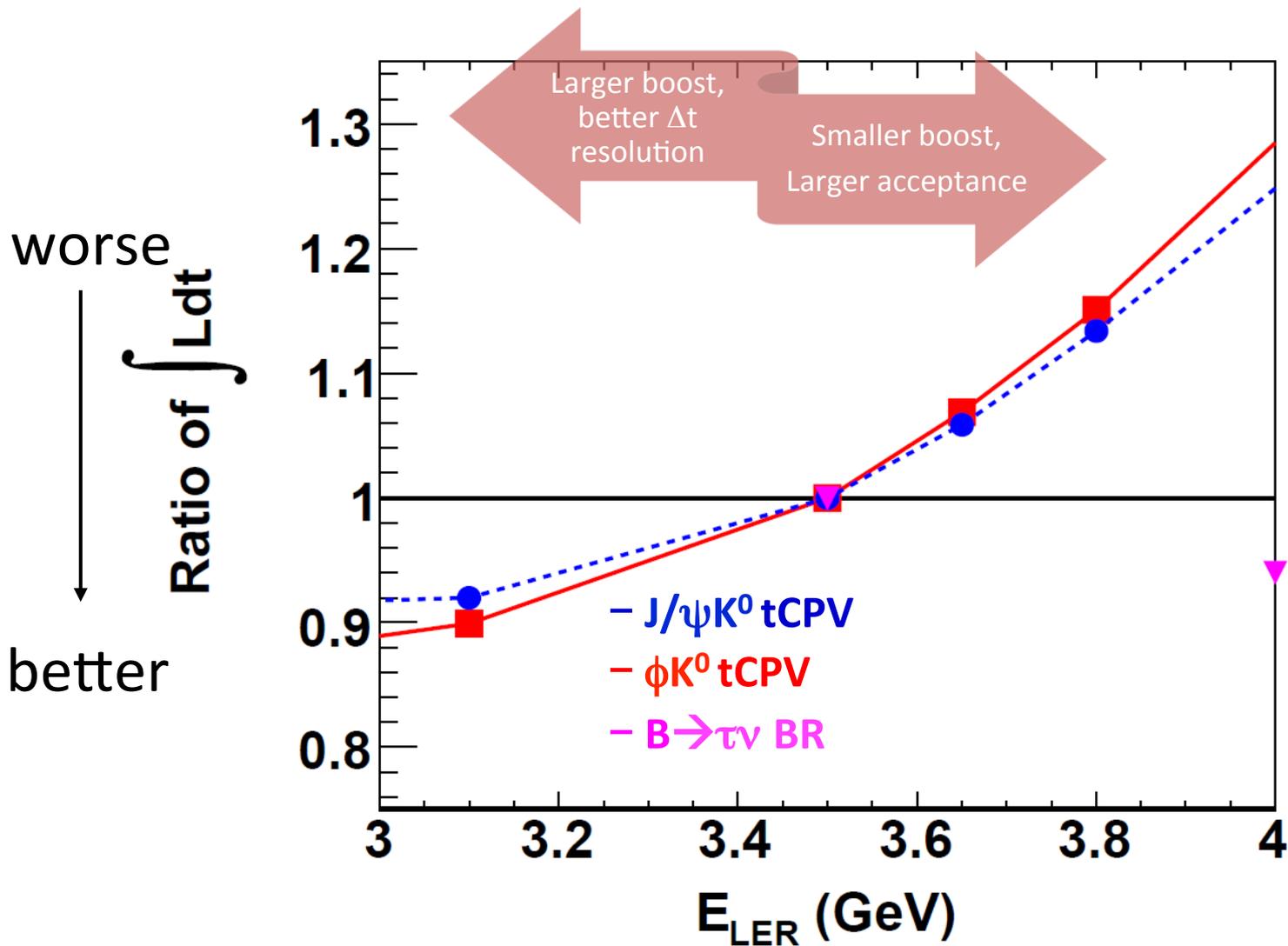
Completely different world with excellent PID detectors!



BEAM ENERGY

ビームエネルギー

$E_{\text{LER}} = 3.5 \text{ GeV} \rightarrow 4 \text{ GeV}$
Touschek lifetimeが厳しいので。



加速器デザイン変更の影響 まとめ

- もともと、High currentを想定して測定器をデザインしていた。最近、High current から nano beam へと大きく転換した。
- **衝突点領域のデザイン**を大きく変更した。
 - 最終収束系 (common Q → independent Q)
 - ビームパイプ直径 3cm → 2cm (IP resolution 向上, 真空悪化, 構造は弱く)
 - Crossing angle 30mrad → 83mrad
- 予想される**バックグラウンド**は大きく変わった。
 - トータルでは低くなると期待されるが、要simulation。
- **測定器**のデザインはほとんど変更していない。
 - バックグラウンドが予想より大きいときに備えて。
- **ビームエネルギー**を 8x3.5 から 7x4 に変更した。
 - boostが弱くなるので、time-dependent analysisは25%の損、full-reconstructionが重要なモードで6%程度の得。

コラボレーションの現状

- 2008.12 にコラボレーションが発足
- 2008.03.03 IB chairが決定
- 2009.05.05 名前がBelle II に決定
- 2009.07.06 初代Spokespersonが決定
- 2009.07.09 EB, EB chair が決定

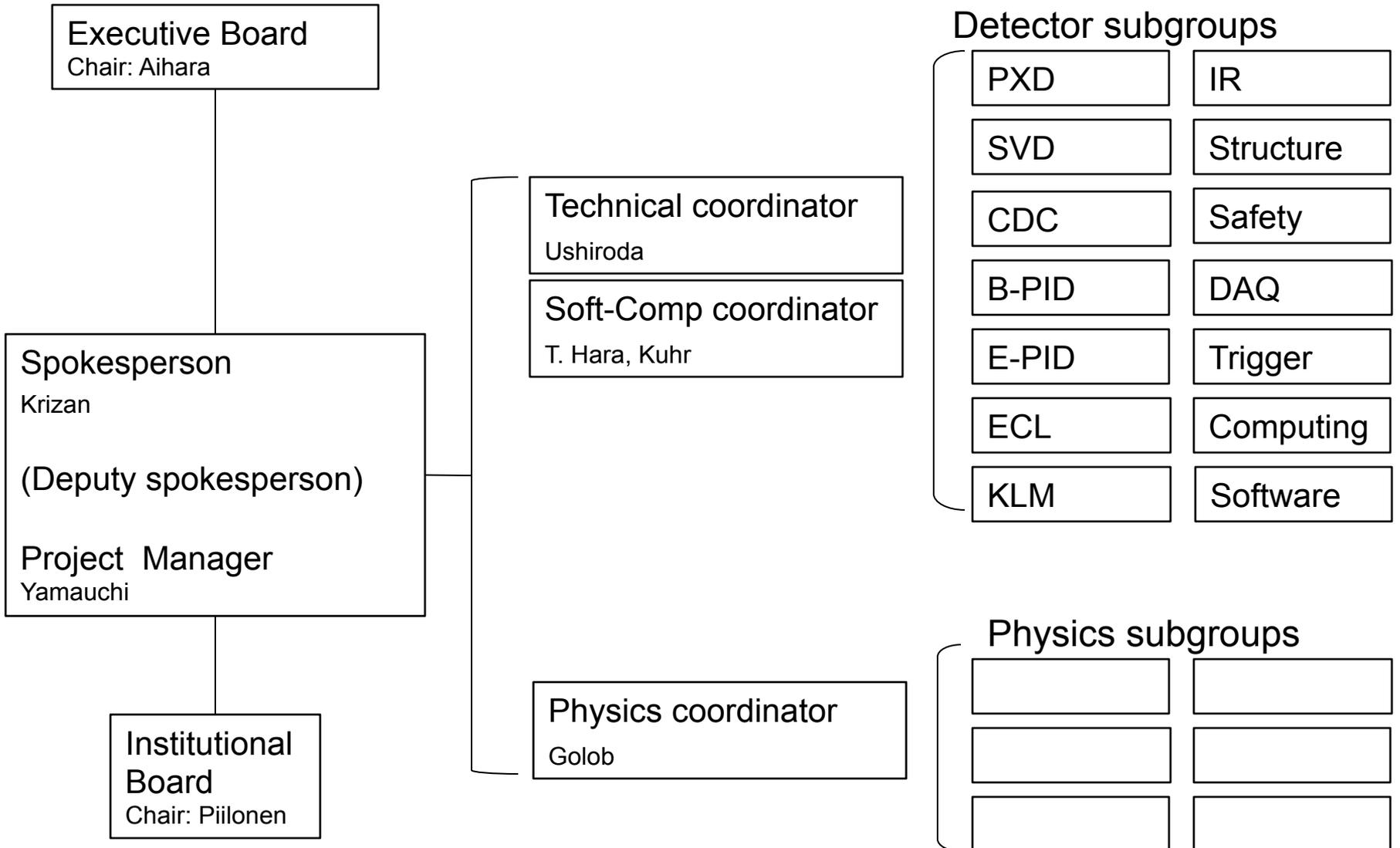
Belle II collaboration



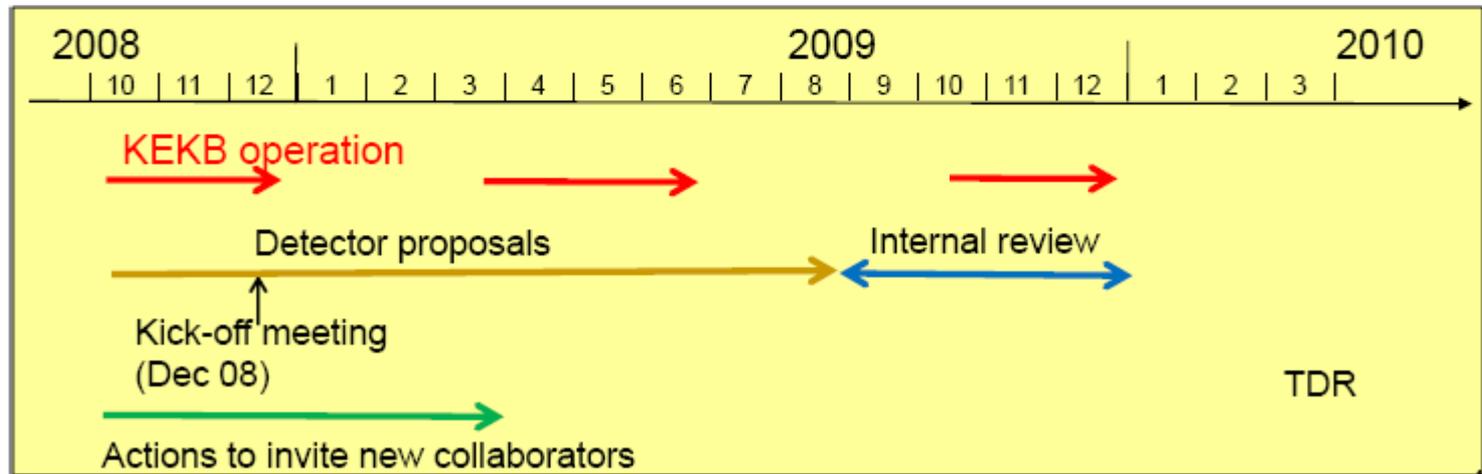
地図は少々obsolete

13 countries/regions, 45 institutes, about 300 researchers

Belle II Organization

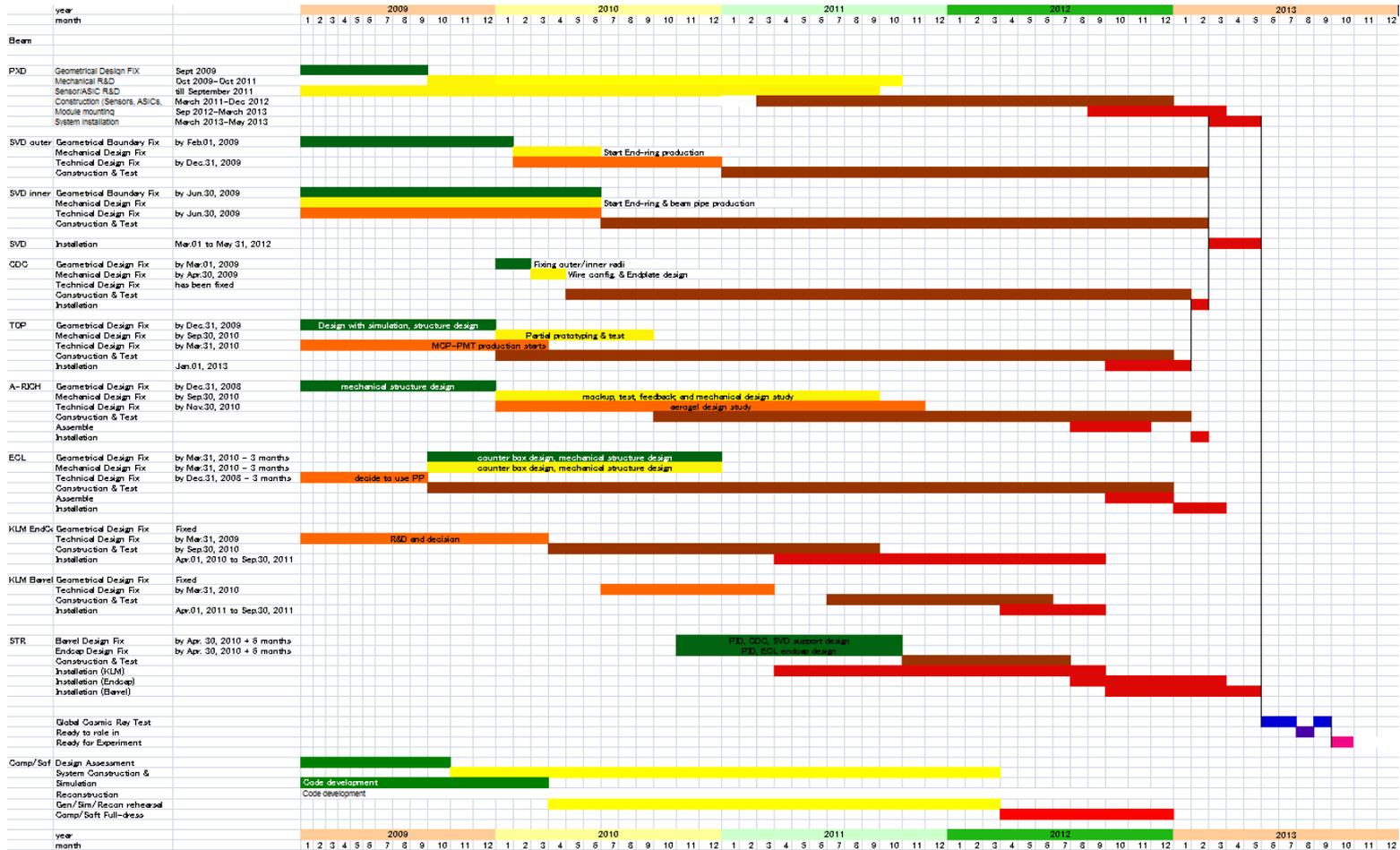


Near-term schedule



- KEKB operation Oct. -- Dec. (and shutdown?)
- Start internal review from Sep. toward technology decision by Dec. 2009
- TDR sometime in 2010 (could be after approval)

Construction Schedule



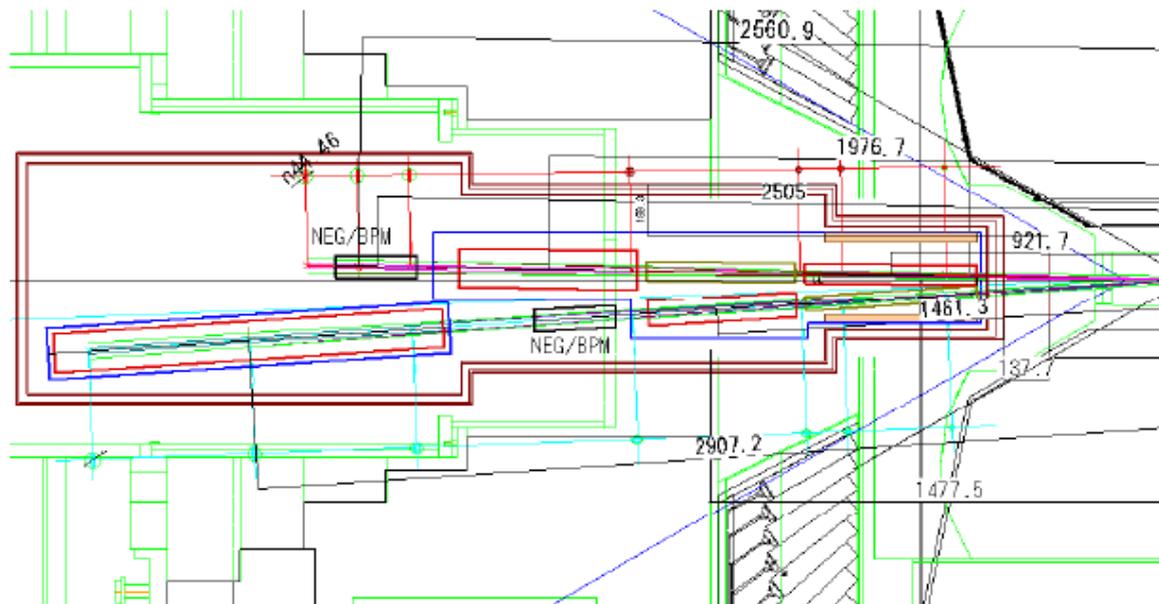
FY2010-12 で建設し、2013 秋には ready

まとめ

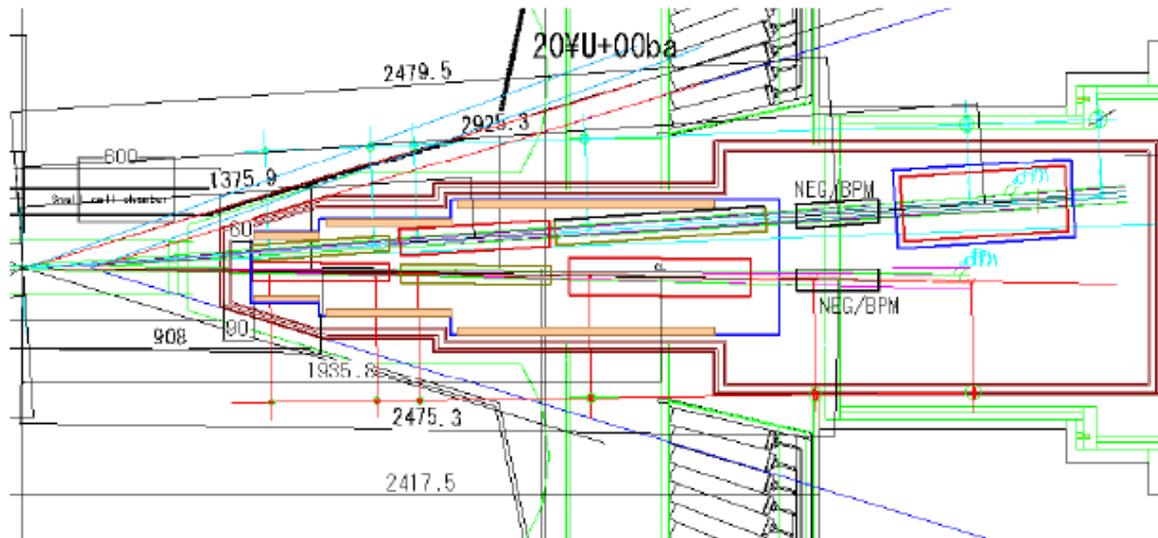
- 加速器の変更に伴い、IR design, beam background, beam energy等が変わった。
- 測定器のデザインは大きくは変更しない。
- 2008年、コラボレーションがスタートした。
- 2013年実験開始を目指す。

BACKUP

IR-magnets in the left side



IR-magnets in the right side



Level 1 trigger

- Belleと基本路線は同じ。
 - CDC track trigger
 - ECL energy trigger
 - ECL isolated cluster triggerの3つの主要なトリガーのOR。
 - BBに対しほぼ100%の効率。
 - Latency $\sim 5\mu\text{s}$ (was $2.2\mu\text{s}$ for Belle)
- Belleの経験から、400Hz中、Luminosityに比例するものが300Hz。

Normalized Trigger Rate



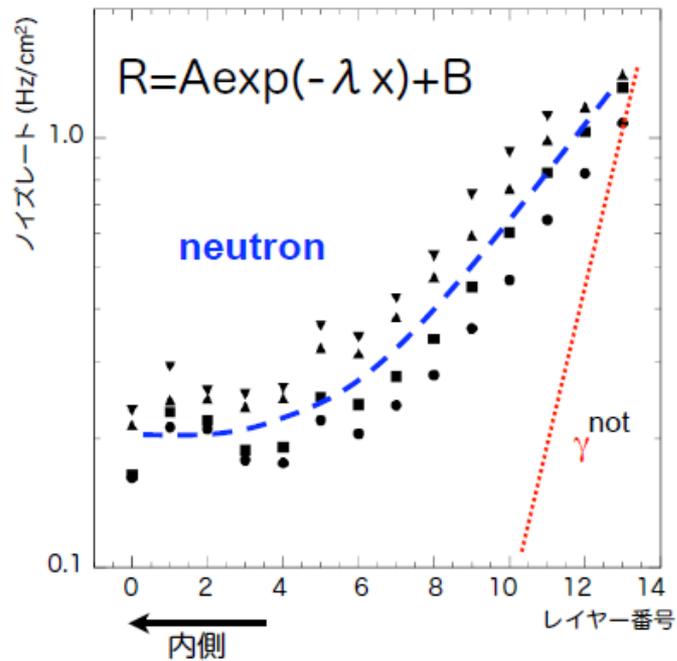
| Lum ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) | Lowest Rate | Highest Rate |
|--|----------------|-----------------|
| 1×10^{34} | 250 Hz | 1300 Hz |
| 1×10^{35} | 2.5 kHz | 13 kHz |
| 2×10^{35} | 5.0 kHz | 26 kHz |
| 8×10^{35} | 20 kHz | 100 kHz |

Normalized Trg Rate = Rate / Lum
 Rate : Hz
 Lum : $1 \times 10^{34} (\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$

Norm. Trg rate includes everything (physics + BG)

Luminosity で規格化すると、 $1e^{34}$ あたり250Hzに収束。
 そのままスケールすると、 $8e^{35}$ で20kHz (2割ほどoverestimate)

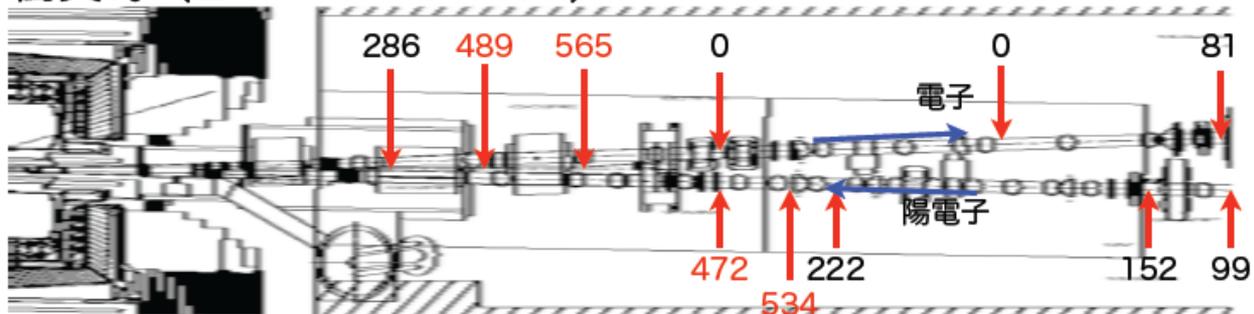
ノイズの原因



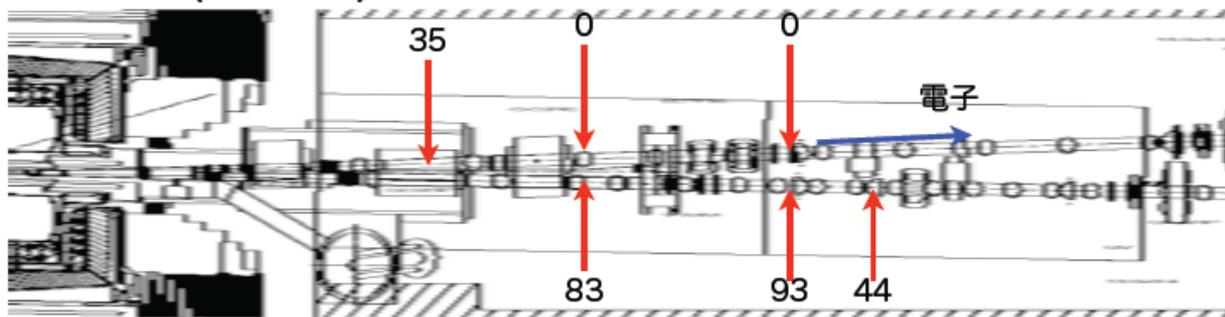
- 係数は中性子を示唆
 - $\lambda=0.29\sim 0.40$
- γ 線では無い
 - $\lambda\sim 1.0$
- ポリエチレンでシールド可能かテスト

ビームラインに沿った γ 線のレート

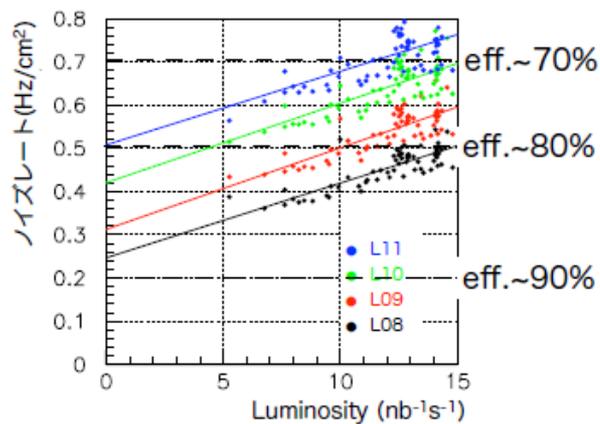
衝突時 ($L \sim 1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)



電子のみ(1.04 A)

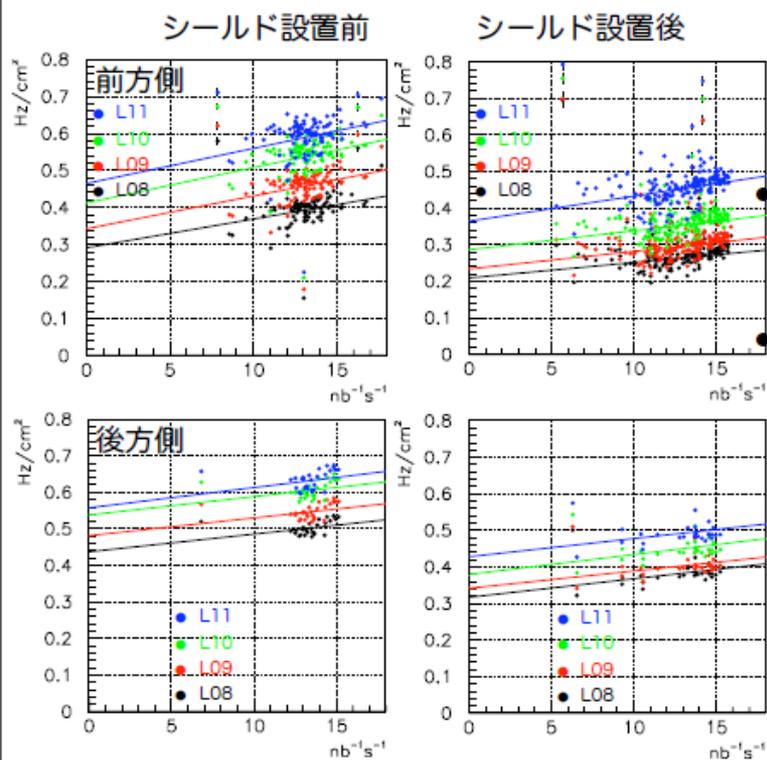


ノイズのルミノシティ依存性



- ノイズレートはルミノシティに強く依存
- 高いノイズレート
⇒RPCの検出効率の低下

ルミノシティ依存性



- ルミノシティ依存性も減少
- 同じレートまで許容すると、 $>30\text{nb}^{-1}\text{s}^{-1}$ まで使用可能

Beam-gas BGについて

以下の2つが、測定器へのバックグラウンドになると考えられる

- 1) 上流でBeam-gas散乱をおこし、エネルギーを失ったビームが、測定器近辺の加速器コンポーネントに衝突し、二次粒子を発生させる
→ KLM, カロリメータ等、多くの検出器に影響する
- 2) IP近辺でBeam-gas散乱をおこし、そのときに生成された粒子が測定器のバックグラウンドとなる
→ 内側の検出器(PXD, SVD)に影響する

1)による影響: 「どの場所に、どの程度ビームが衝突するのか?」知る必要がある
上流での真空度(=現行KEKBと同じ)、ビームの電流値、
ビーム光学とビームパイプのアパーチャーによって決まる

2)による影響

IP近辺の真空度(=現行KEKBの100-1000倍)、ビームの電流値で決まる

現行KEKBでは、1)による影響が優勢。

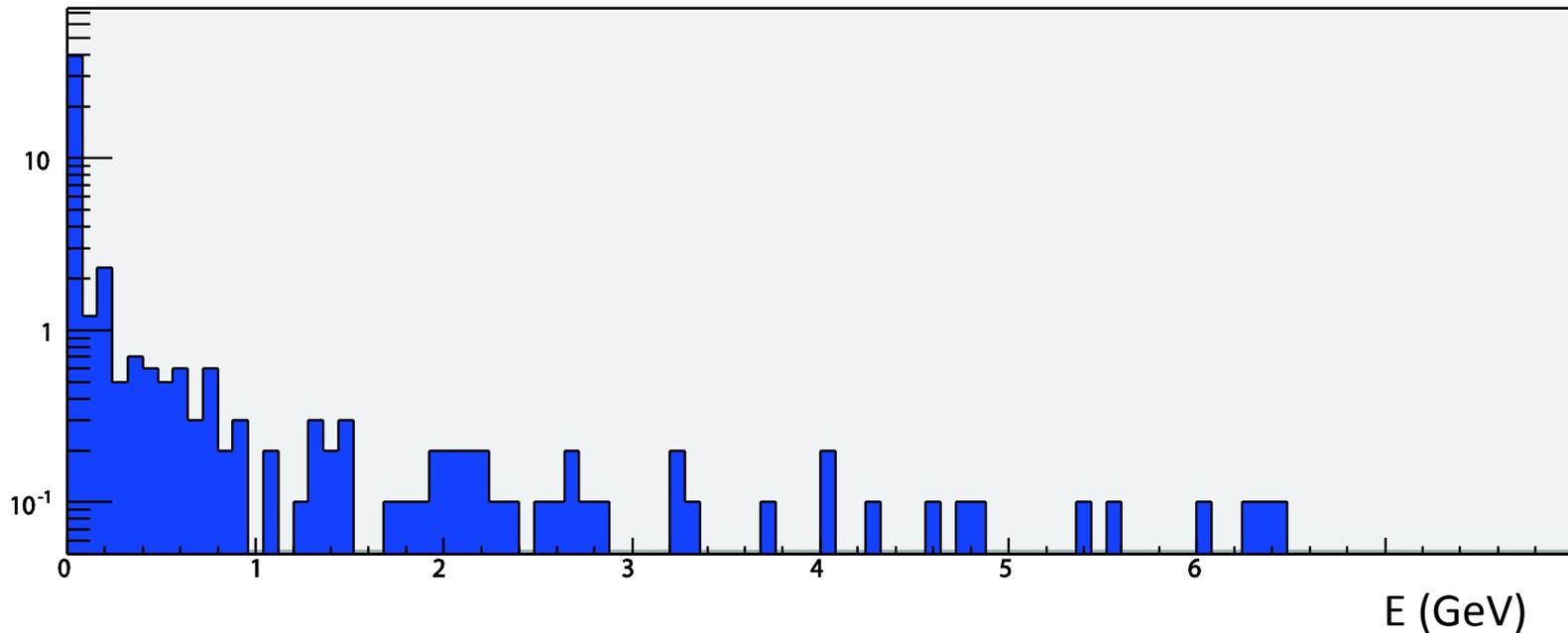
Super-KEKBではどうなるか? →シミュレーションで見積もる必要がある

現在、1)の影響を見積もるために、シミュレーションを実行中。現状を以下で報告。

電子ビームラインsimulation

- Beam-gas simulation用に、7GeV電子ビーム、1/4周分のビームラインを構築した(約700m)
- 真空度を実際よりも 10^7 倍悪化させた。(～700mでビームガス散乱の回数は平均0.002回/粒子)
- ビームパイプを作成 : 半径4.5cm 厚さ4mm(IR) 6mm(それ以外) 材質SUS← 後で変更
- 10^5 event生成した→ 10^7 (真空度のスケールファクター) × 10^5 (event) ～10bunch分に相当
- ビーム・ガス散乱が起こった場所は、ビームラインに沿って一様

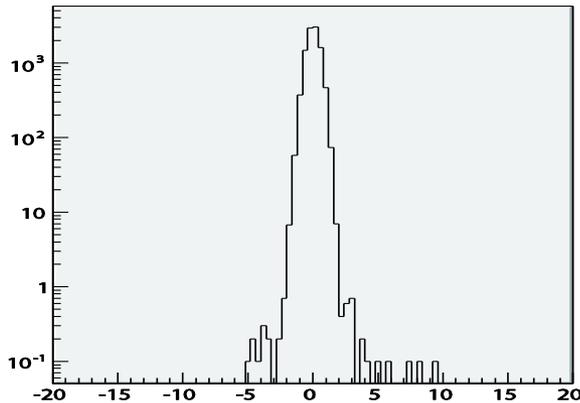
ビーム・ガス散乱で生成された粒子(光子)のエネルギー (平均0.3GeV)



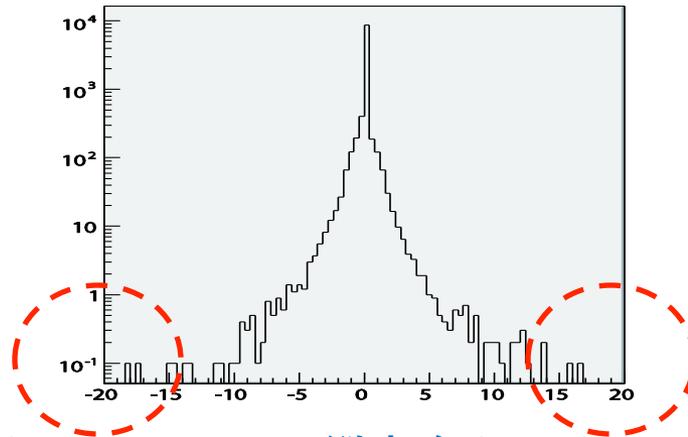
電子ビームラインsimulation

- ビーム・ガスでエネルギーを失ったビームは、通常の軌道から外れる
- IPに最も近い、最終収束Q磁石(QC1)でビームパイプ径が小さくなるため($r=1.7\text{cm}$)ビームが衝突する可能性が高くなる

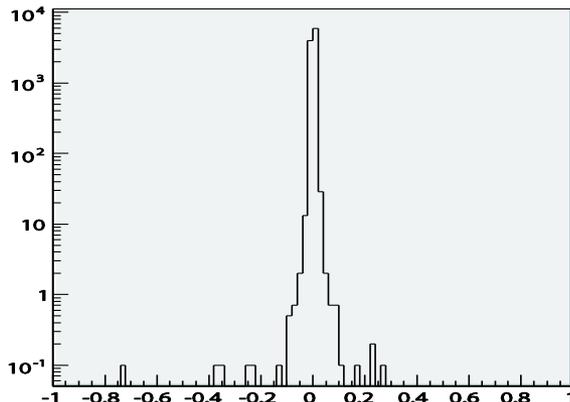
QCS前面でのビームサイズ:水平方向(mm)



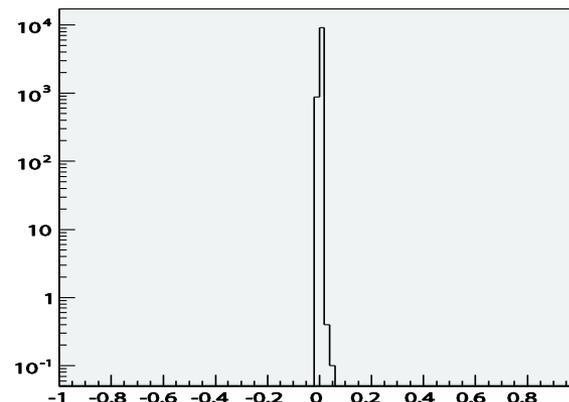
縦方向(mm)



IPでのビームサイズ:水平方向(mm)



縦方向(mm)



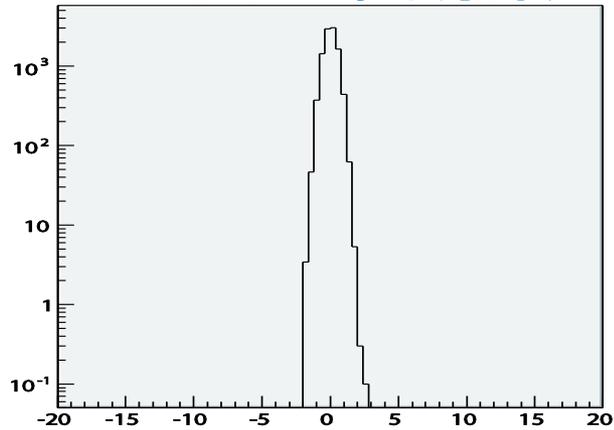
1バンチの電子ビームのうち、平均1.5個の電子が、最終収束Q磁石の前面をヒットする
→ 磁石のクエンチ・測定器へのバックグラウンドを防ぐために、マスクが必要

Back up

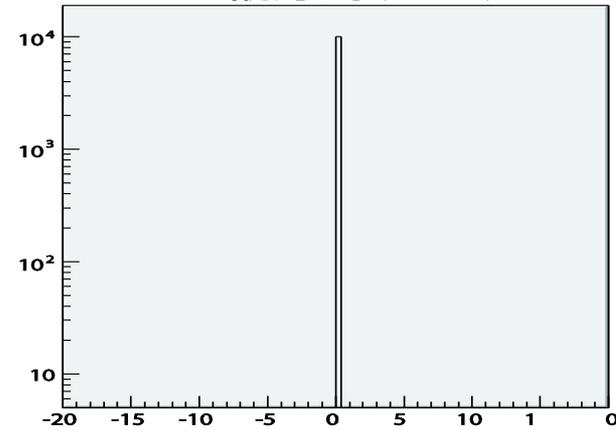
電子ビームラインsimulation

参考: Physics process なし のときのビームサイズ (縦方向はビームサイズ=0とした)

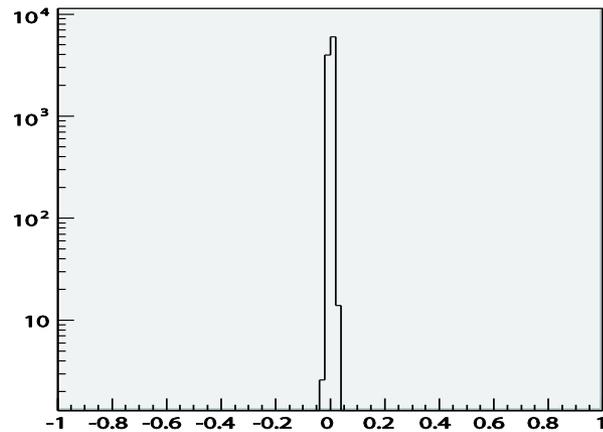
QCS前面でのビームサイズ: 水平方向 (mm)



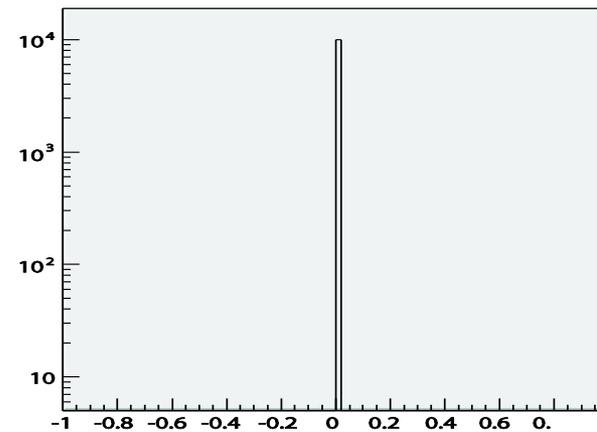
縦方向 (mm)



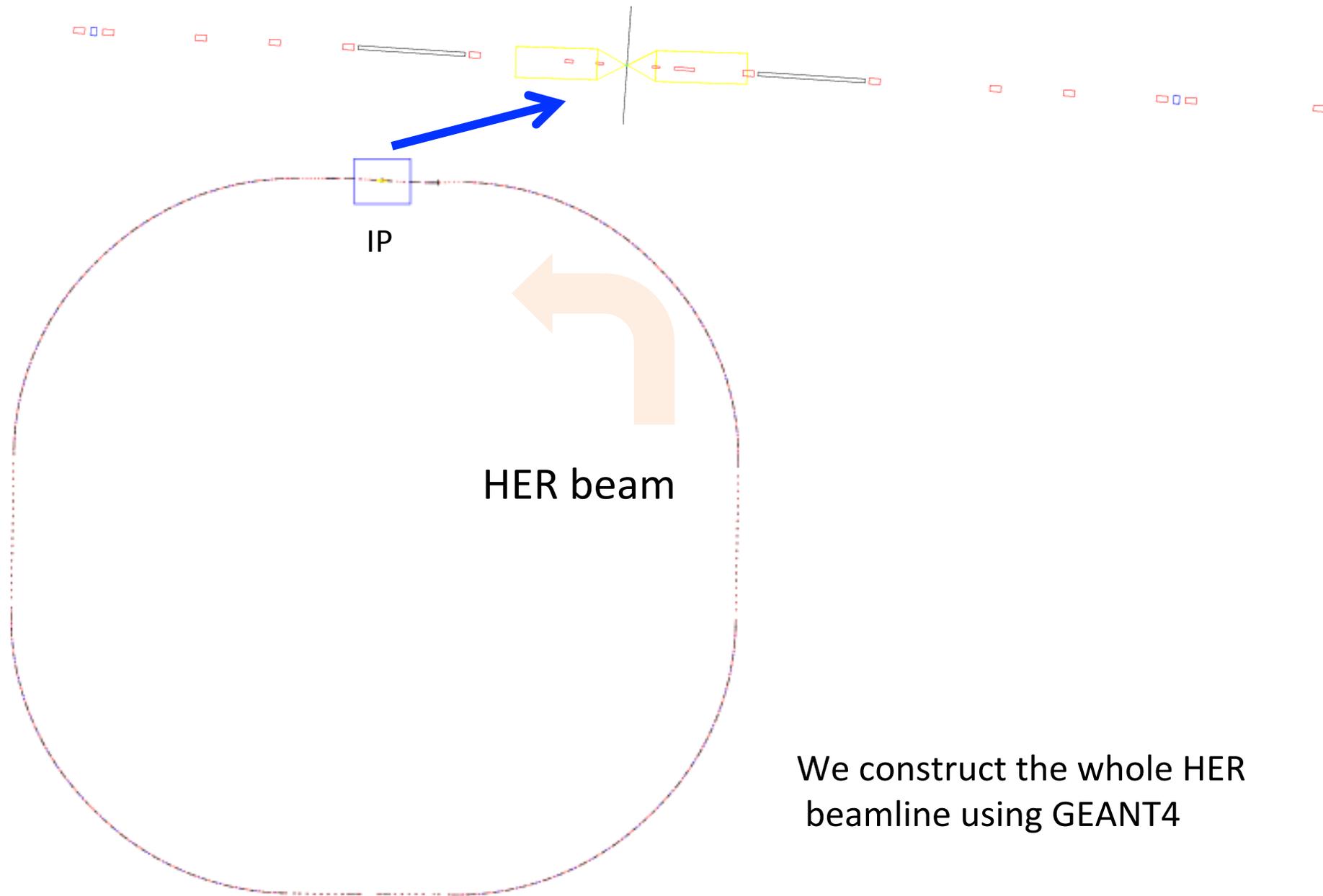
IPでのビームサイズ: 水平方向 (mm)



縦方向 (mm)

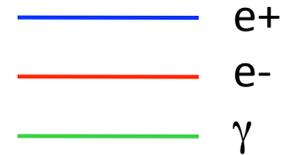
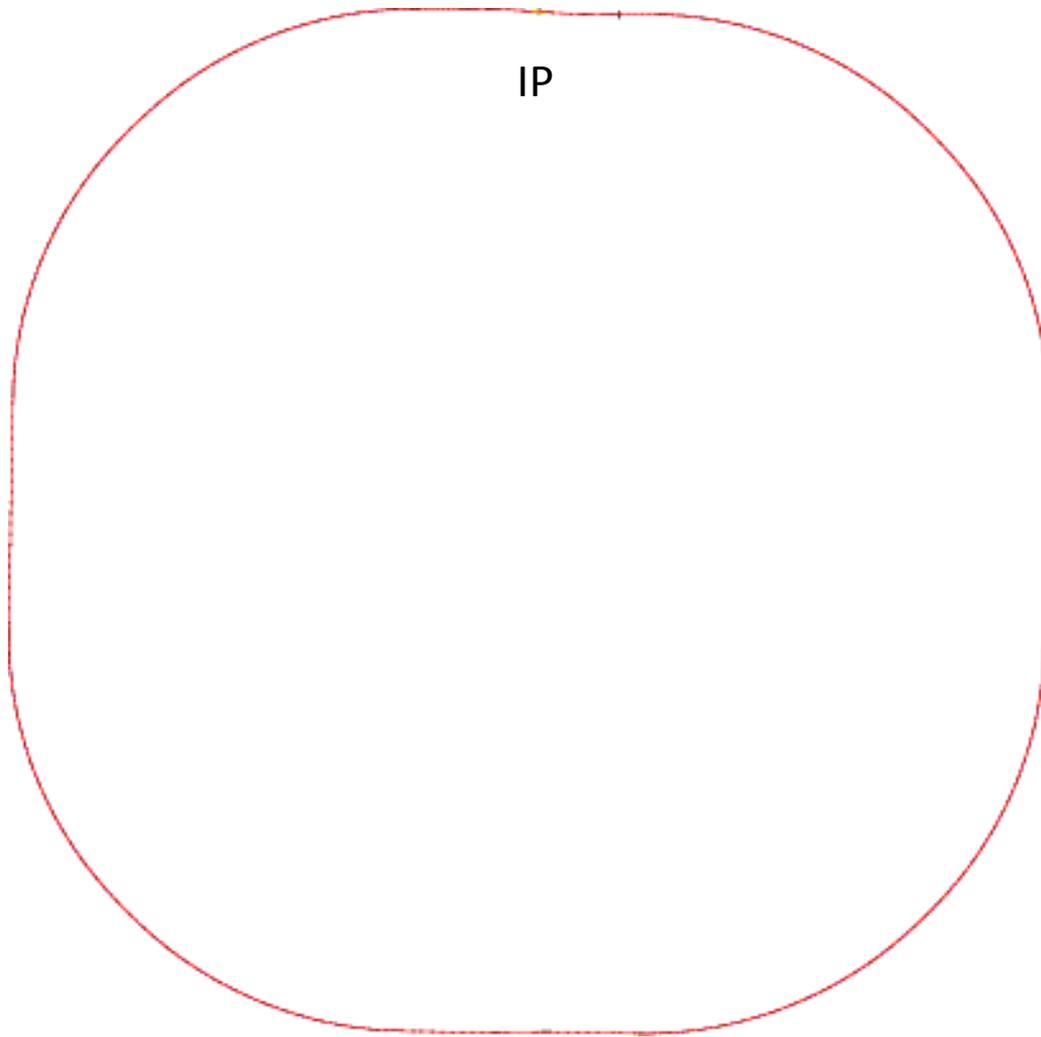


HER beam-line simulation



We construct the whole HER
beamline using GEANT4

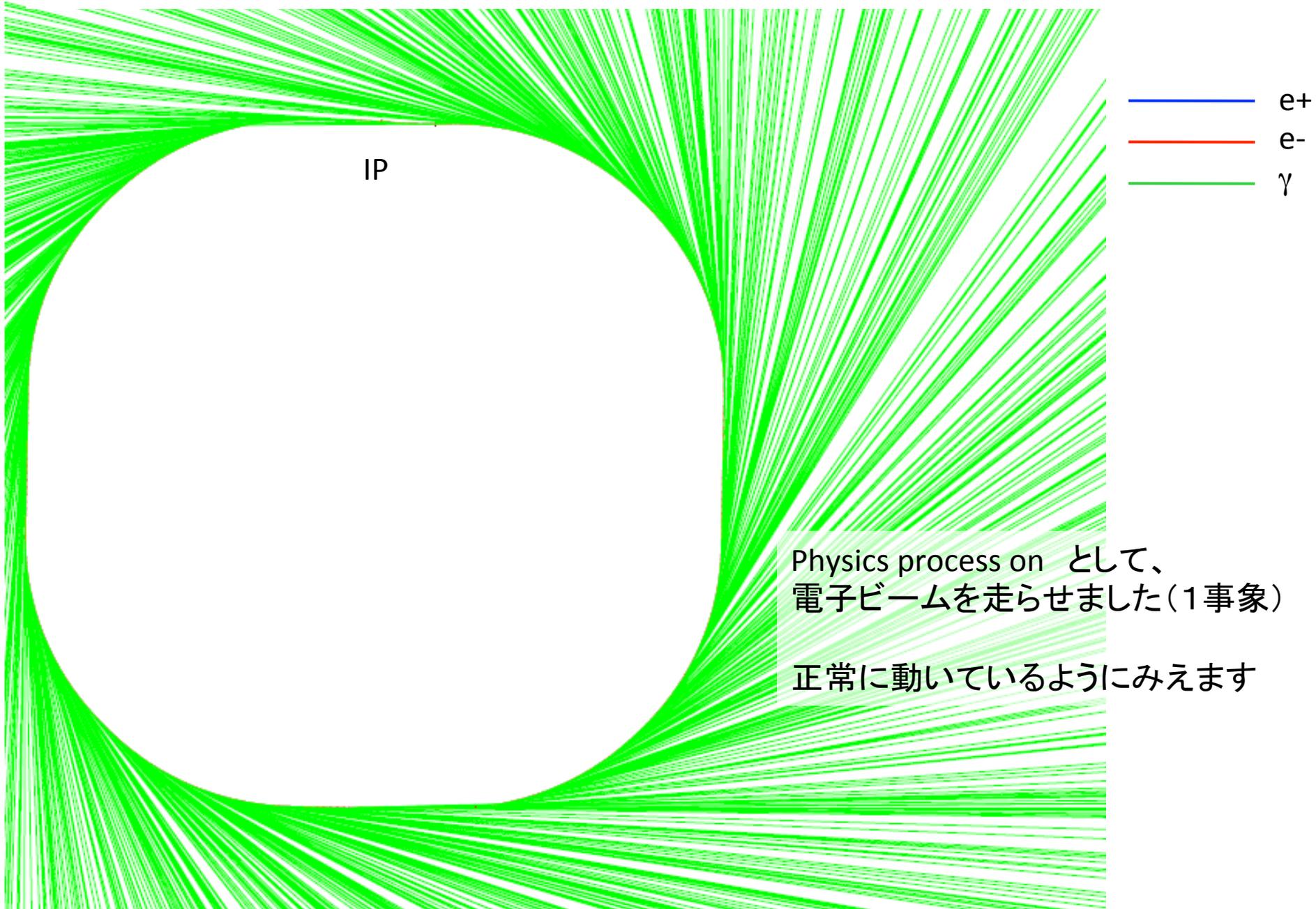
HER beam-line simulation



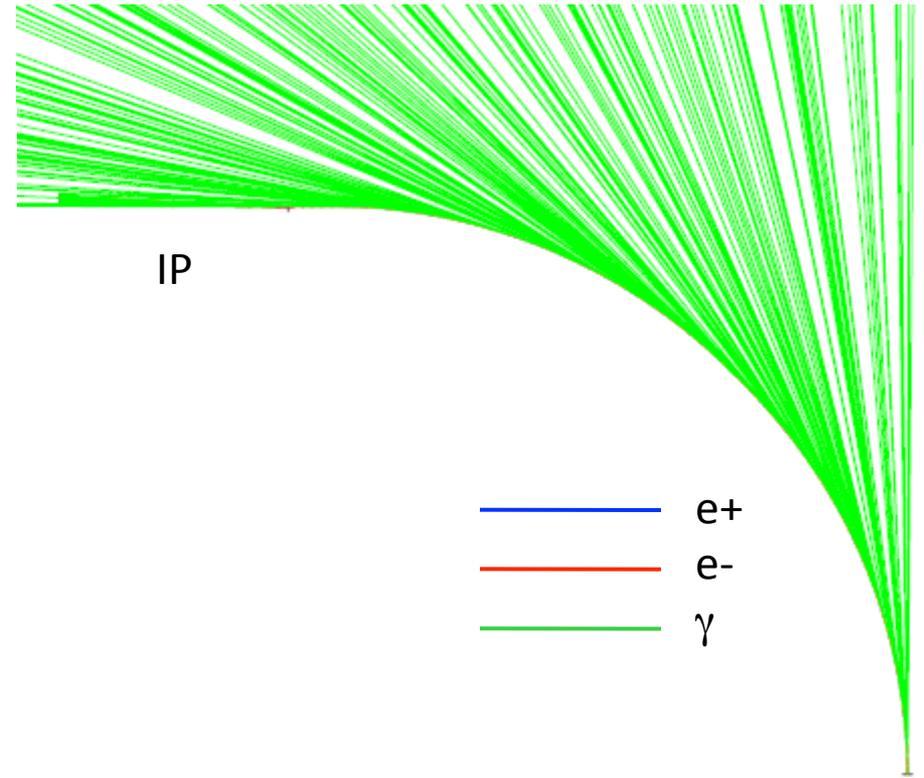
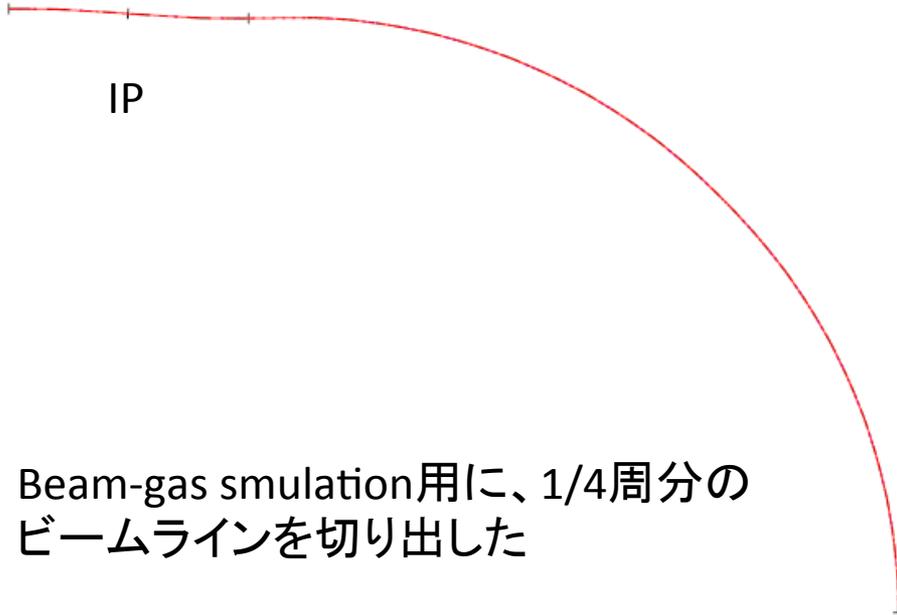
電子ビームを入射しました
(physics process off)

ちゃんと周回します。
ただし、ずっと回り続けて帰ってきません。
→ 1周したら、止めるようにしました

HER beam-line simulation



HER beam-line simulation



(Physics process on)

“effective” background with new hardware

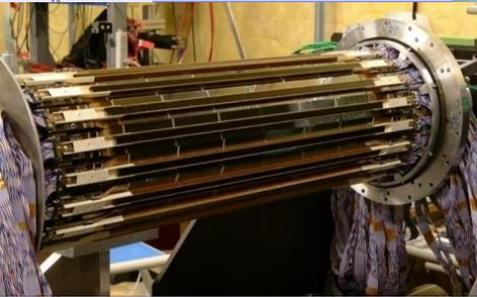
| | How to cope with | Reduction factor | bkg |
|-------|--------------------------------|------------------|------------|
| SVD | Shorter t_p | $50/800 = 1/16$ | 0 ~ 1 |
| CDC | Smaller cell | $<2/3$ | 4 ~ 13 (*) |
| PID | Brand new device | Good enough | 0 ~ 1 |
| B-ECL | Waveform fitting | 1/7 | 1 ~ 2 |
| E-ECL | Pure Csl (shorter τ) | 1/200 | 0 ~ 1 |
| KLM | Faster detector, finer segment | Under control | 0 ~ 1 |

(*) Software efforts needed for CDC

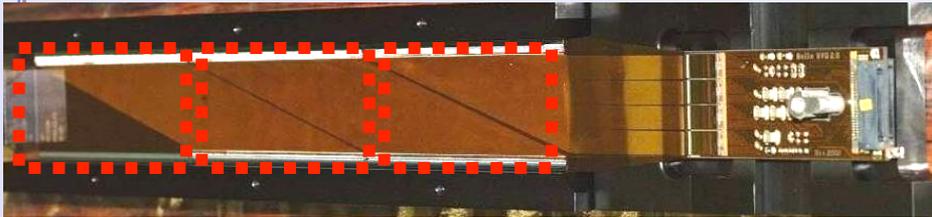
Bottom Line:

We know how to cope with
high background

Requirement on S/N ratio



- Assuming signal=MIP@300 μ m Si
- Noise determined with
Sensor Leakage current
Detector Capacitance

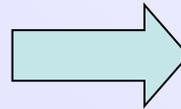


3DSSDs are readout via FLEX
 \Rightarrow Chain readout makes
 large detector capacitance

Noise performance \Rightarrow Depends on FE chip

Belle

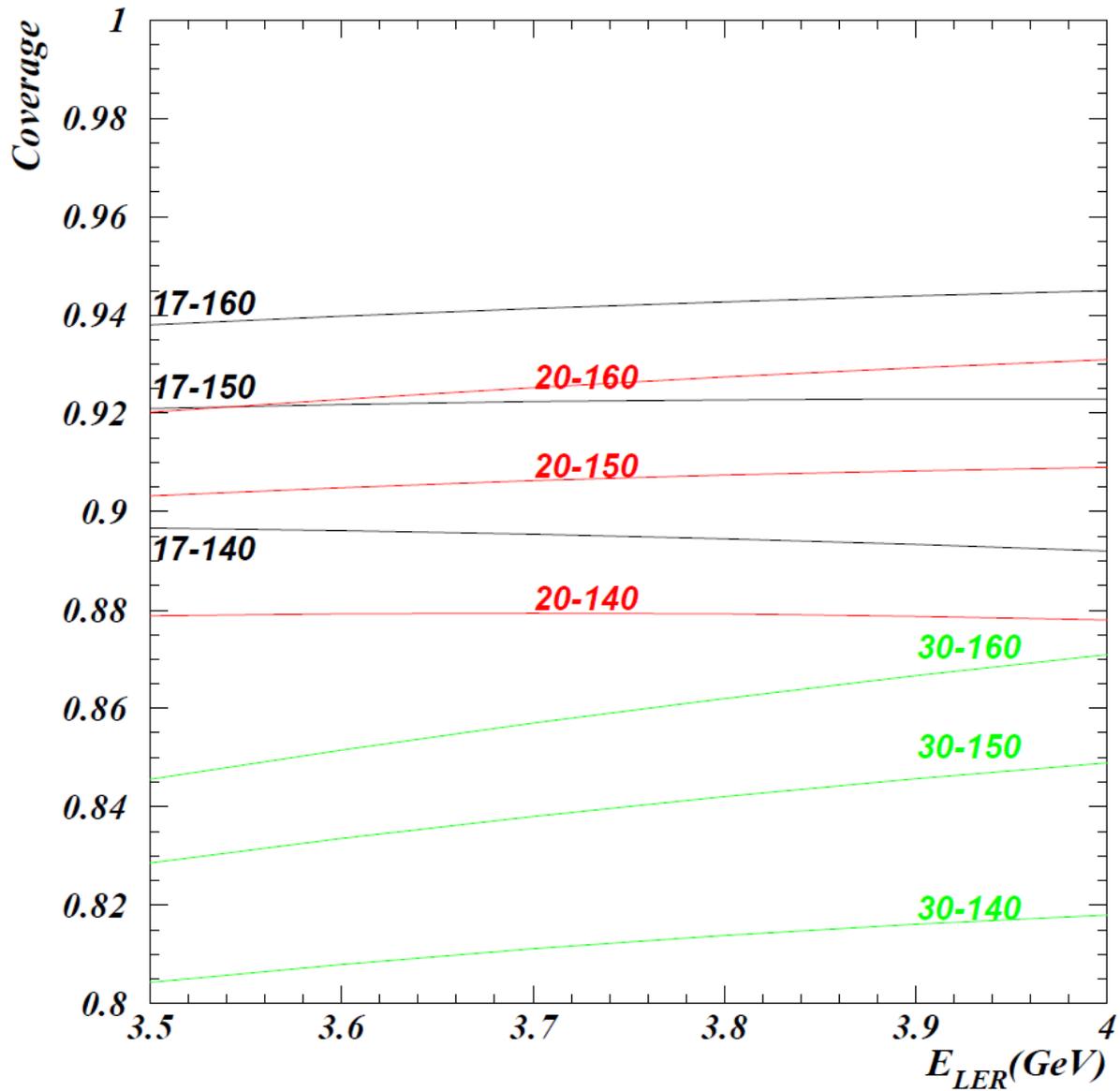
VA1 @ $T_p=1\mu$ s
 $enc [e^-] = 180 + 7.5/Cd[pF]$
 \Rightarrow Leakage current
 dominates
 3DSSD: $\sim 60pF$ **630e⁻**



sBelle

APV25 @ $T_p=50ns$
 $enc [e^-] = 246 + 36/Cd[pF]$
 \Rightarrow Detector capacitance is
 crucial
 \Rightarrow **2500e⁻**

(Only Det. Capacitance components)



| E_{LER} | 3.5 | 4 |
|-----------|-------|-------|
| 17-160 | 0.938 | 0.945 |
| 17-150 | 0.921 | 0.923 |
| 17-140 | 0.897 | 0.892 |
| 20-160 | 0.920 | 0.931 |
| 20-150 | 0.903 | 0.909 |
| 20-140 | 0.879 | 0.878 |

測定器に期待される項目

高エネルギー実験で一般に重要：

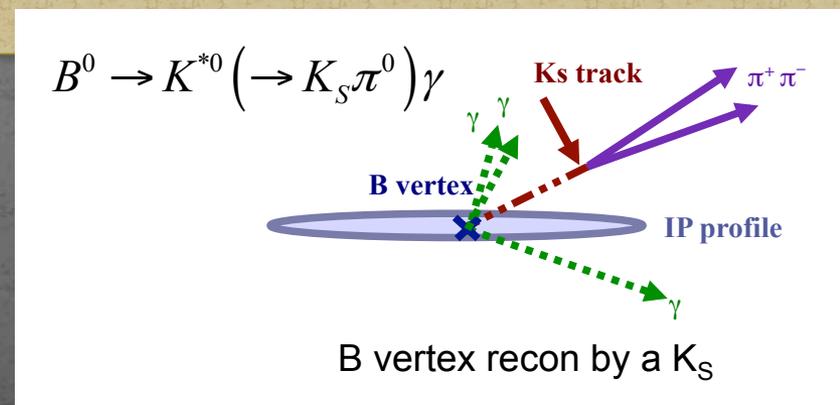
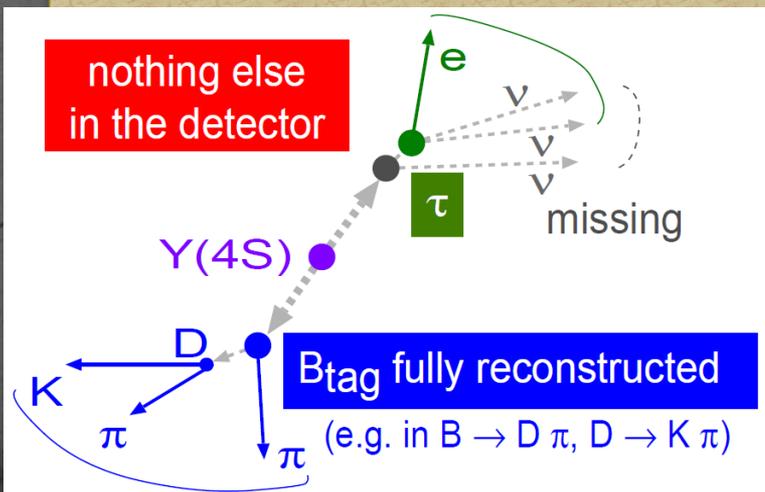
- 荷電粒子の運動量を測定
- 粒子のエネルギーを測定
- ミュー粒子の識別
- ...

Bファクトリー実験で特に重要：

- (K中間子と π 中間子の) 粒子識別
- B中間子の崩壊点位置を測定
- ...

次期Bファクトリー実験で特に重要：

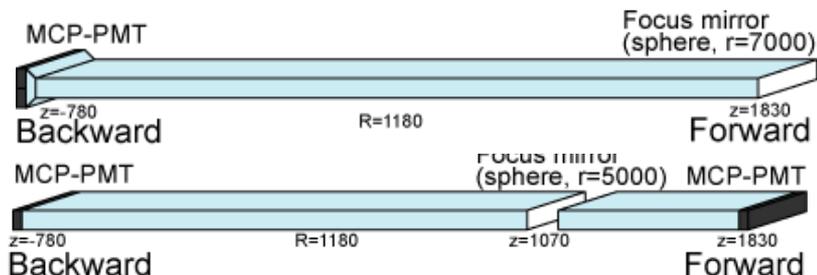
- 測定器に穴がないこと (hermeticity)
- B中間子の崩壊点位置を K_S の娘粒子の飛跡から効率よく測定できること
- ...





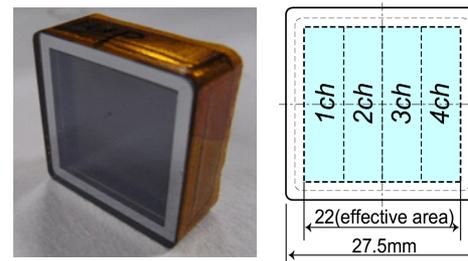
- Cherenkov ring imaging detector with precise timing information

- Quartz radiator
 - $2\text{cm}^T \times \sim 40\text{cm}^W \times \sim 2.5\text{m}^L$
 - Possible configurations
 - 1-bar or 2-bar
 - Small stand-off box or not



- MCP-PMT

- Two candidates
 - Hamamatsu SL10 or Photonis 85015
- Excellent time resolution ($<40\text{ps}$) required for good K/π separation; confirmed on laser bench



Hamamatsu SL10

- Electronics

- Fast waveform sampling
 - New ASIC chip ready soon

