

KEK



実際の現場より： Belle II実験から見る計測

中村克朗 (KEK素核研)

2020年7月31日

総研大講義「計測と制御」

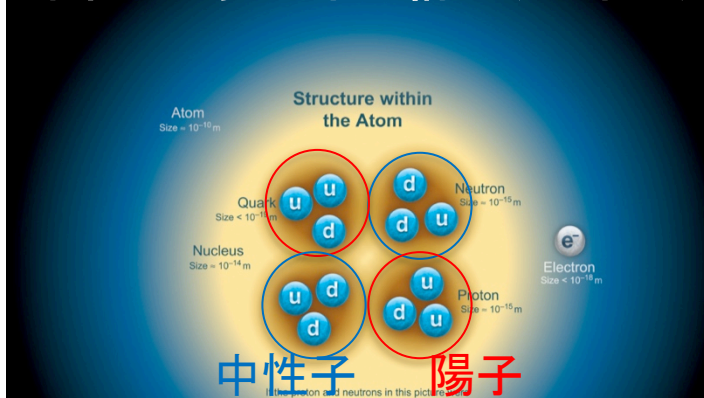
自己紹介



- 中村 克朗：KEK 素粒子原子核研究所・助教
- 学位取得は京都大学の原子核ハドロン研究室・RHIC PHENIX実験
(偏極陽子衝突実験)
- 現在は、Belle II実験 シリコンストリップ検出器の開発・運転
- 今日はBelle II実験を例に、
大型素粒子実験での粒子計測について話します
- 内容にまとまりがないかもしれませんがご容赦ください

物質と素粒子

素粒子で見る原子構造 (He原子)



標準理論

物質を形作る粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	アップ (u)	チャーム (c)	トップ (t)
	ダウン (d)	ストレンジ (s)	ボトム (b)
レプトン	eニュートリノ (ν _e)	μニュートリノ (ν _μ)	τニュートリノ (ν _τ)
	電子 (e)	ミュオン (μ)	タウ (τ)

力を伝える粒子

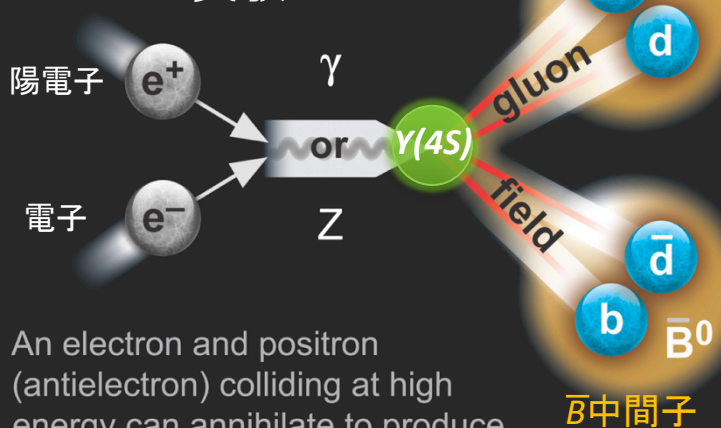


人類が知る素粒子の一覧表

$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ ゲージ対称性
+ ヒッグス機構

**ニュートリノ振動・重力相互作用を除く
素粒子実験結果を無矛盾に説明**

$e^+ e^- \rightarrow B^0 \bar{B}^0$
Belle II 実験

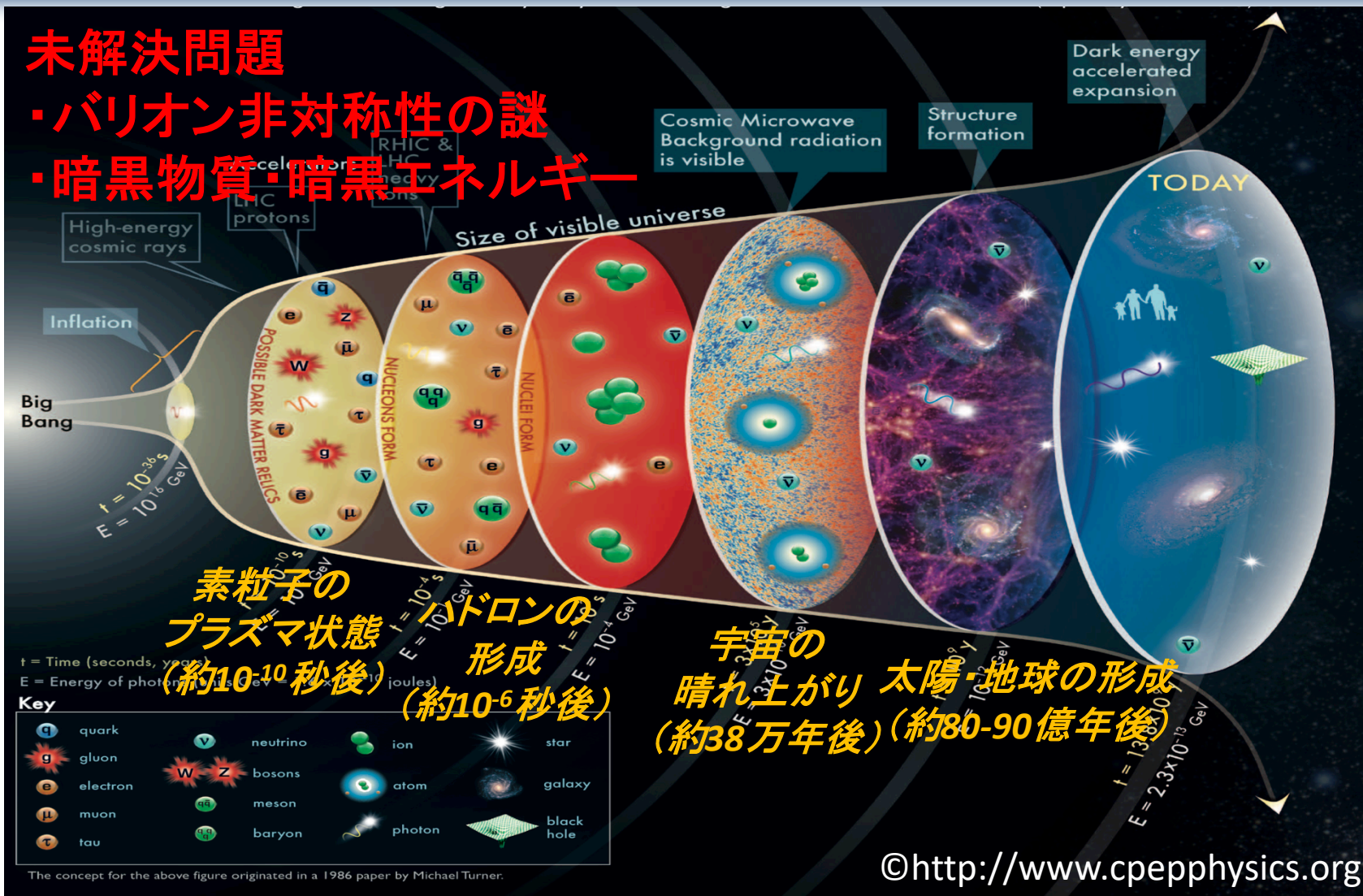


An electron and positron (antielectron) colliding at high energy can annihilate to produce \bar{B}^0 and B^0 mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.
© <http://www.cpepphysics.org>

初期宇宙の発展と素粒子物理

未解決問題

- ・バリオン非対称性の謎
- ・暗黒物質・暗黒エネルギー



©<http://www.cpepphysics.org>

反粒子の消失

物質を形作る粒子 反粒子とは？


	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム


$$\begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$



Belle 実験が理論の証明に貢献


1010

 The Nobel Prize in Physics 2008



© The Nobel Foundation Photo: U. Mostan

Makoto Kobayashi



© The Nobel Foundation Photo: U. Mostan

Toshihide Maskawa

しかしながら、小林益川理論のCP対称性の破れでは
 反粒子の消失を説明するには不十分！
 さらなるCP対称性の破れ → 標準模型を超える物理
 また、バリオン数非保存の新たな相互作用が必要 (← サハロフの3条件)

標準模型の先に踏み込む

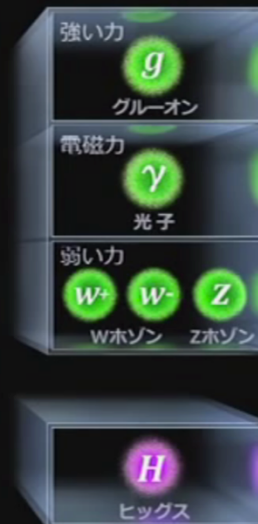
■ さまざまな新物理模型のアイデア

標準理論

物質を形作る粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム
レプトン	ν_e eニュートリノ	ν_μ μ ニュートリノ	ν_τ τ ニュートリノ
	e 電子	μ ミュオン	τ タウ

力を伝える粒子



拡張

- 超対称性理論 (SUSY)
 - Two Higgs-Doublet Model
- 余剰次元模型
- レプトクォーク
- Hidden Sector
 - $U(1)'$ Z'ボソン
 - 暗黒光子
- アクシオン
- など候補は色々...

高エネルギー素粒子実験での粒子計測

- 素粒子実験で現れる粒子は多数
 - Particle Data Group (PDG) 参照 : <https://pdg.lbl.gov/index.html>
 - 粒子は直接見ることはできない

荷電粒子（電荷を持った粒子）： 電磁相互作用してくれる

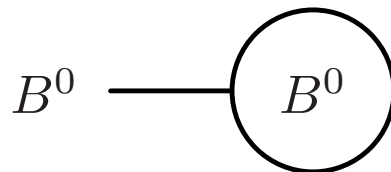
- 物質を通過する際に様々な形で“**痕跡**”を残す
 - イオン化、励起、蛍光、チェレンコフ光、等々
- この痕跡を電気信号に変換して読み出すことで粒子を検出し、様々な情報を計測することができる
 - 運動量、速さ、エネルギー、等々 → 検出器

中性粒子（電荷を持たない粒子）：

- 何らかの反応を用いて荷電粒子に変換することで測定
 - 例: γ （光子）は電磁シャワーにより電子・陽電子に変換

終状態における粒子

B^0 中間子: $c\tau = 491 \text{ } \mu\text{m}$ J/ψ 中間子:
 $c\tau = \sim 2 \text{ } \mu\text{m}$



$B^0 \rightarrow J/\psi + K_S$

K_S 中間子:
 $c\tau = 26.9 \text{ mm}$

終状態

- 終状態：検出器の大きさのスケールで残った粒子の状態
 - 長寿命粒子のみが残る： $c\tau > 1\text{m}$ 程度
- 現実的には我々が観測するのは終状態の粒子のみ
 - 例外：ストレンジネスハドロン・原子核実験等
- 終状態には限られた種類の粒子のみが現れる

終状態に現れる粒子

- 終状態には限られた種類の粒子のみが現れる

荷電粒子

- π^\pm 中間子、 K^\pm 中間子、 e^\pm 、 μ^\pm 、陽子
 $c\tau = 3.7 m$ $c\tau = 660 m$

中性粒子

- γ (光子)、 K_L 中間子、中性子、 ν (ニュートリノ)
 $c\tau = 15.3 m$

- 測定したいのは終状態の粒子の4元運動量

終状態の荷電粒子の測定

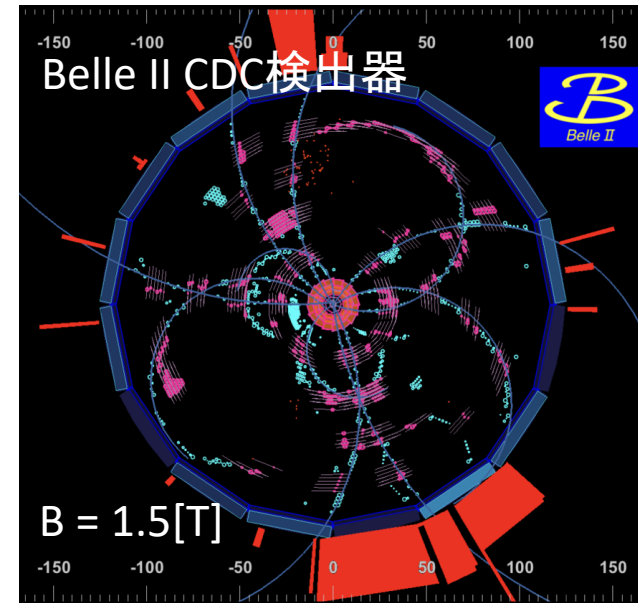
荷電粒子

- π^\pm 中間子、 K^\pm 中間子、 e^\pm 、 μ^\pm 、陽子
- 基本的にエネルギー損失の小さい痕跡を利用して測定
→ 粒子はその後もほぼ同じ運動量で飛び続ける
- さまざまな検出器を組み合わせて、複数の情報を測定可能
 - 例：崩壊点検出器 → 崩壊位置
 - 飛跡検出器 → 運動量
 - 粒子識別検出器 → 粒子種
 - カロリメーター → エネルギー

終状態の荷電粒子：運動量

荷電粒子

- π^\pm 中間子、 K^\pm 中間子、 e^\pm 、 μ^\pm 、陽子
- 荷電粒子は磁場中でローレンツ力によって運動方向を曲げられる
(フレミングの左手の法則)
- 一様な磁場では円運動となる
- $p[\text{GeV}/c] = 0.3 \times \rho[\text{m}] \times B[\text{T}]$
 - 曲率半径と磁場から運動量がもとまる
 - 電荷が同じ限り、この計算式はどの粒子でも同じ
- 逆に、狙う運動量と磁場の強さから検出器のおおまかな大きさが決まる



終状態の荷電粒子：粒子識別

荷電粒子

- π^\pm 中間子、 K^\pm 中間子、 e^\pm 、 μ^\pm 、陽子
- 粒子識別：測定した運動量 + **質量or反応の違い**を利用

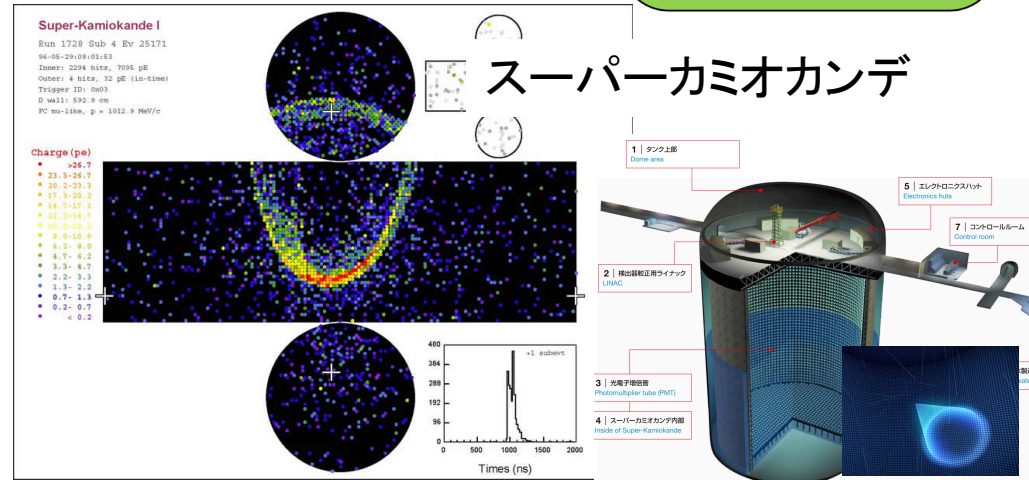
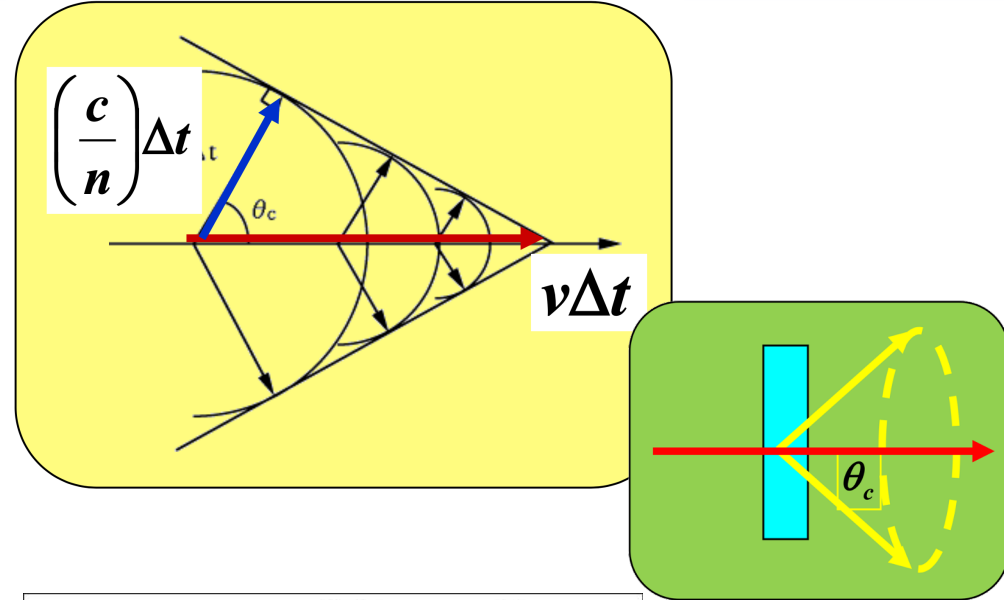
関係式 $p = \gamma\beta m$ を利用

- 方法1. 速度 β or γ を測定
 - TOF(Time of Flight)検出器、チェレンコフ検出器、 dE/dx 測定、Transition Radiation検出器
- 方法2. 反応の違いを利用
 - 電磁カロリメータによる電子識別（電磁シャワー）
 - カロリメータで大きなエネルギーを落とさない： μ 識別

速度 β の測定手法の例 (1)

チェレンコフ光

- 物質中の光の速度は屈折率の分遅くなり c/n
- 粒子の速度が物質中の光の速度を超えることができる
→ 光の衝撃波 = チェレンコフ光
- $\cos \theta_c = (n\beta)^{-1}$
放射角から粒子速度 β が求まる
- 運動量が大きい領域で有効
- $\beta > 1/n$ が必要
- ただし、運動量が大きすぎて $\beta = 1$ に近づくと識別できなくなる



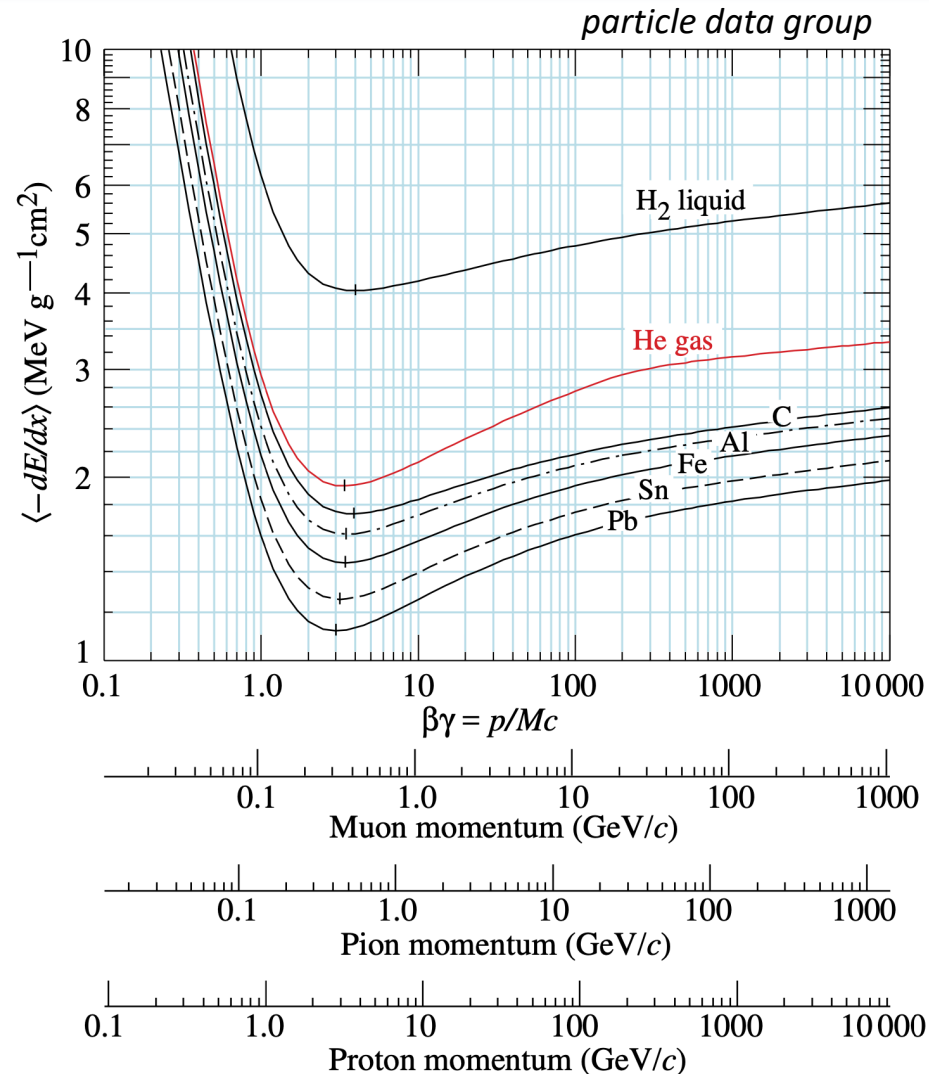
速度 β の測定手法の例 (2)

エネルギー損失: dE/dx

■ Bethe-Blochの公式

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

- dE/dx は粒子速度 β に依存
→ 粒子種を分けることが可能
- 運動量が小さい領域で特に有効
 - β が小さいと dE/dx の β 依存性がとても大きくなる
- 運動量が大きい領域でも効果はあるが識別精度は限定的

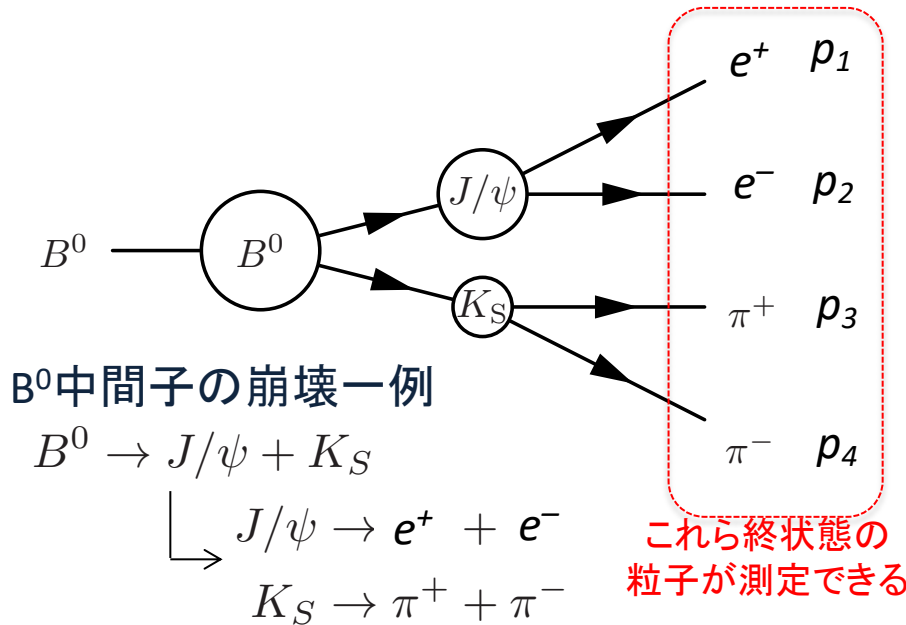


終状態の中性粒子の測定

中性粒子

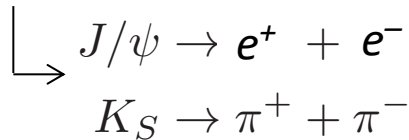
- γ (光子)、 K_L 中間子、中性子、 ν (ニュートリノ)
- 何らかの反応を用いて荷電粒子に変換することで測定
→ 基本的に反応後は違う粒子となる
- γ (光子) : 電磁カロリメーターで電磁シャワーを起こしてエネルギーを測定
- K_L 中間子 : ハドロンカロリメーターでハドロンシャワーを起こしてエネルギーを測定
- ν : 物質中で荷電カレント反応 $\text{中性子} + \nu \rightarrow \text{陽子} + l^-$ を起こして l^- の情報からエネルギーを測定 (カミオカンデ)
- 粒子識別 : 反応様式から識別可能
- 4元運動量 : 測定したエネルギー + 発生位置 (ビーム衝突点などを仮定) と反応位置から定まる運動量方向

親粒子の再構成



B^0 中間子の崩壊一例

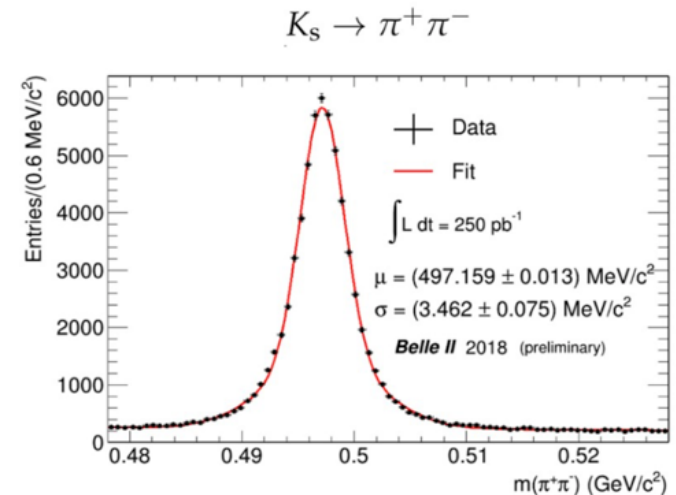
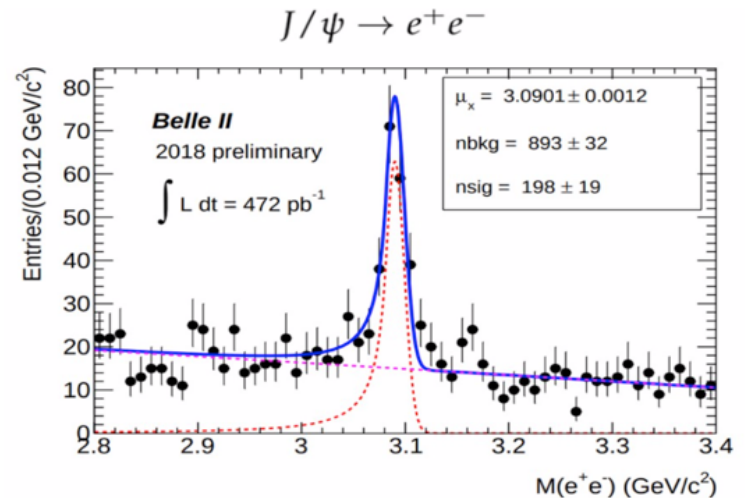
$$B^0 \rightarrow J/\psi + K_S$$



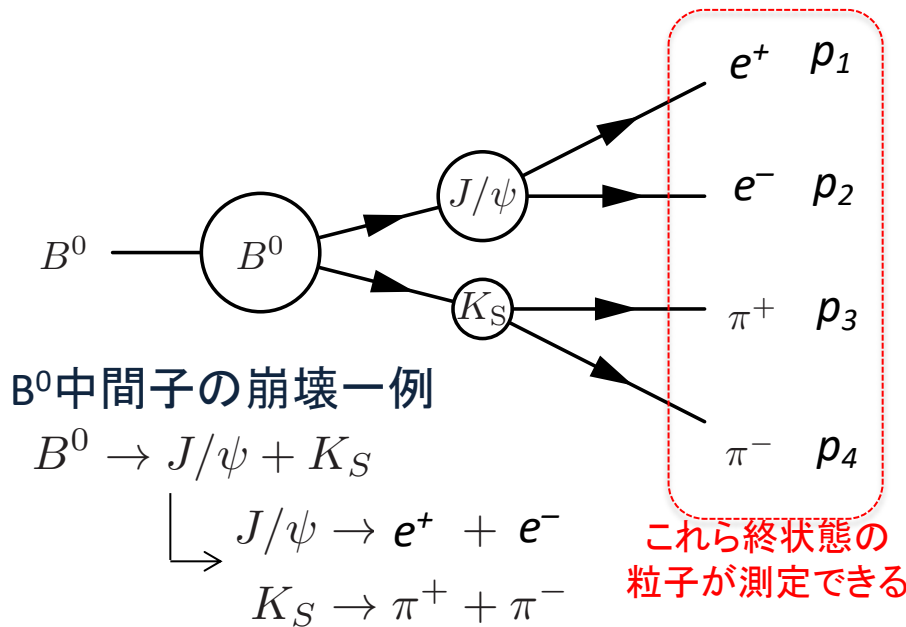
- 「一般的に」崩壊前の親粒子の同定は4元運動量から再構成される質量分布を用いる

- $m(B^0) = 5.280 \text{ GeV}/c^2$
- $m(J/\psi) = 3.097 \text{ GeV}/c^2$
- $m(K_S) = 0.498 \text{ GeV}/c^2$

Step.1: J/ψ , K_S 中間子を再構成

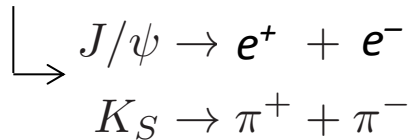


親粒子の再構成



B^0 中間子の崩壊一例

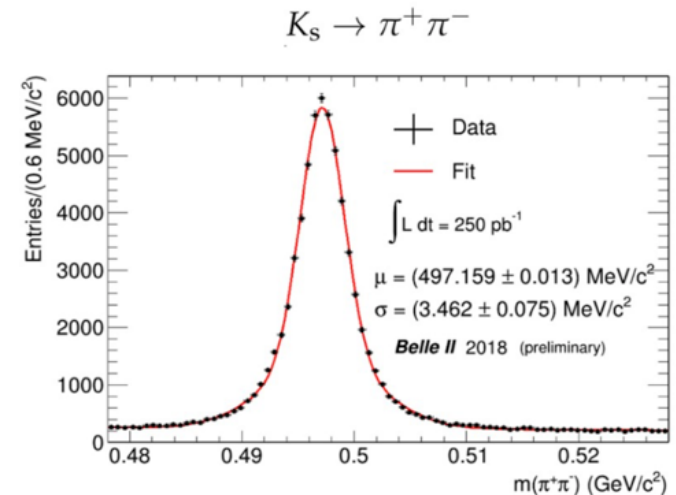
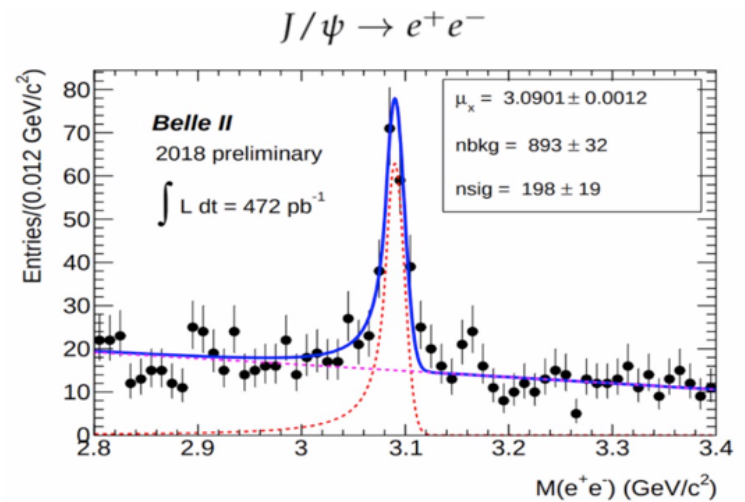
$$B^0 \rightarrow J/\psi + K_S$$



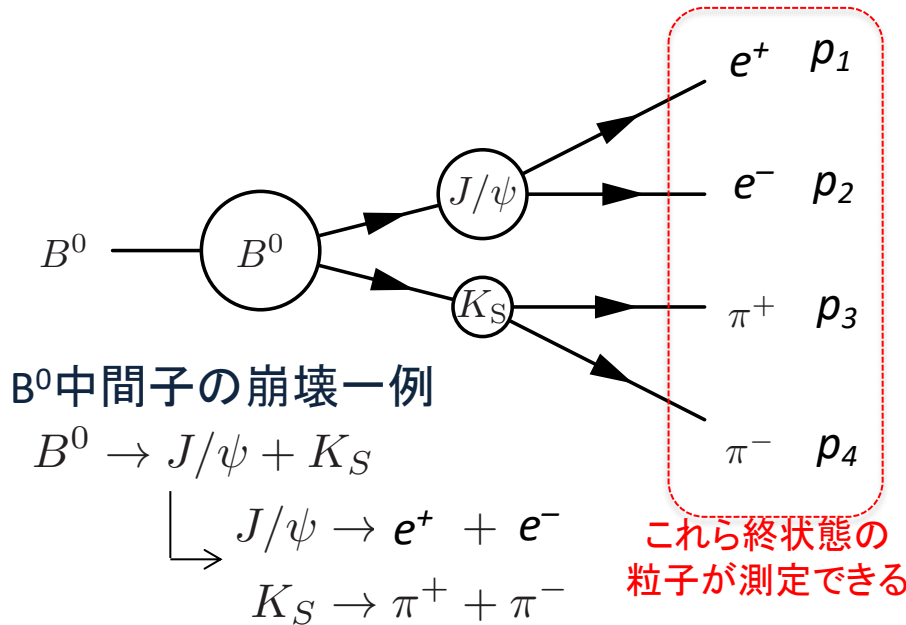
- 「一般的に」崩壊前の親粒子の同定は4元運動量から再構成される質量分布を用いる

- $m(B^0) = 5.280 \text{ GeV}/c^2$
- $m(J/\psi) = 3.097 \text{ GeV}/c^2$
- $m(K_S) = 0.498 \text{ GeV}/c^2$

Step.2: $J/\psi, K_S$ 質量ピーク付近の粒子を選定



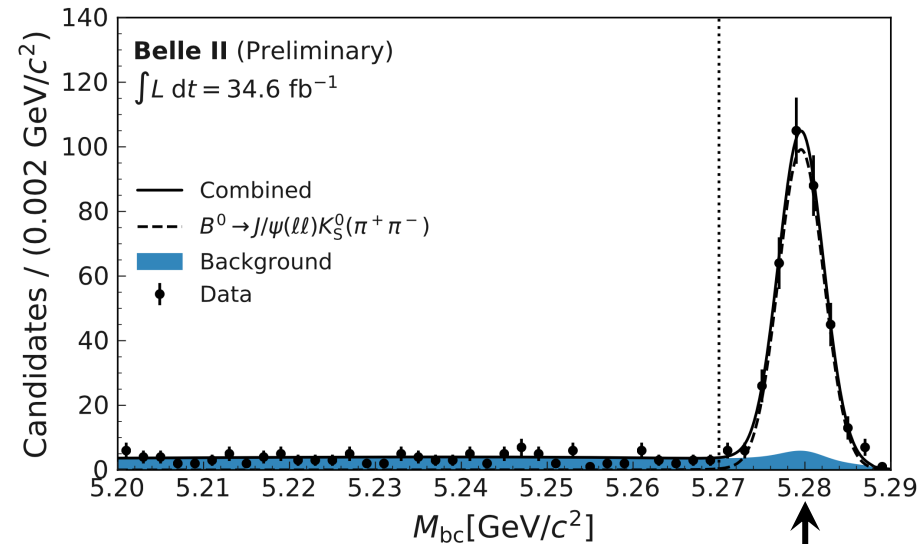
親粒子の再構成



- 「一般的に」崩壊前の親粒子の同定は4元運動量から再構成される質量分布を用いる

- $m(B^0) = 5.280 \text{ GeV}/c^2$
- $m(J/\psi) = 3.097 \text{ GeV}/c^2$
- $m(K_S) = 0.498 \text{ GeV}/c^2$

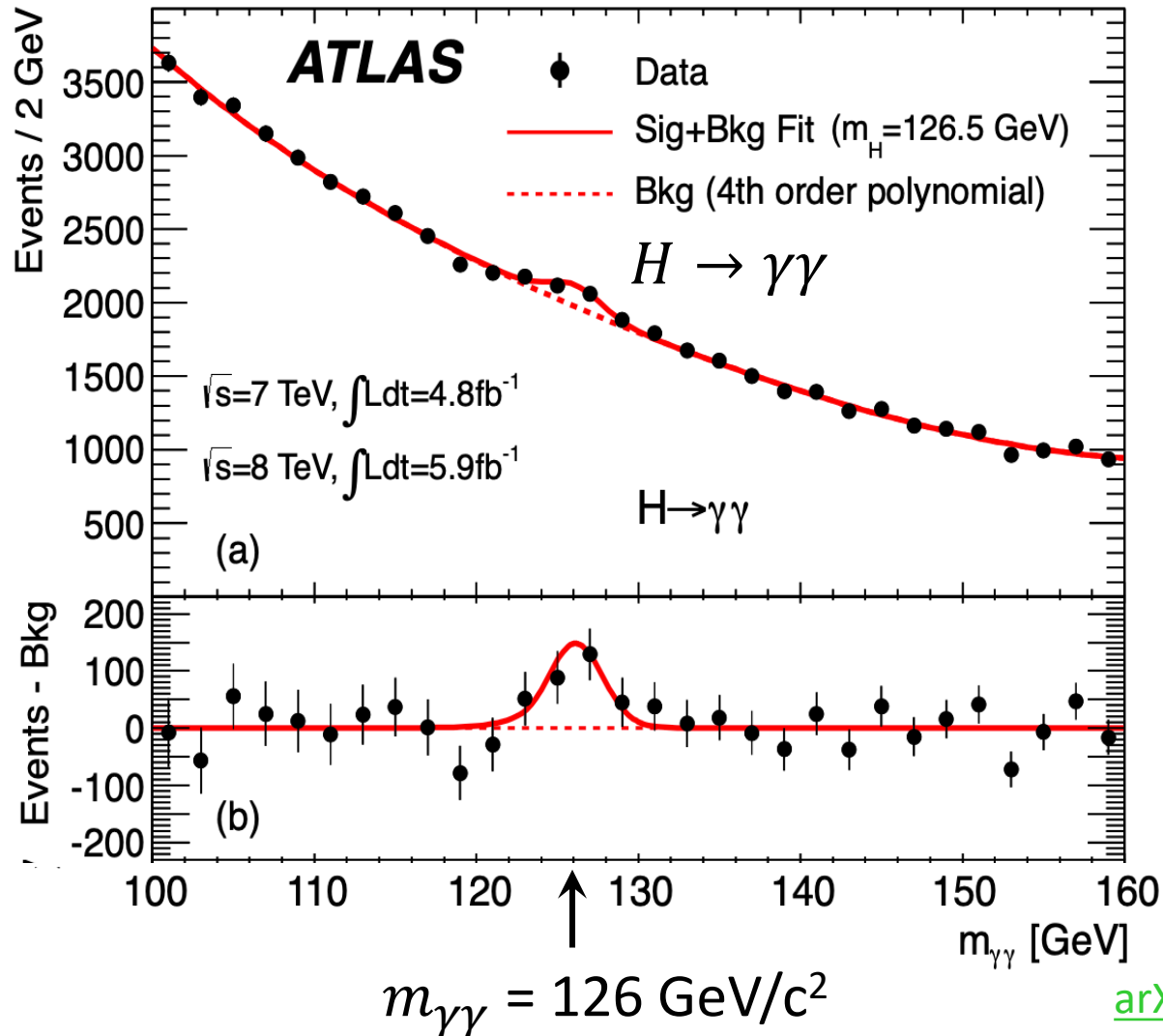
Step.3: B^0 中間子を再構成

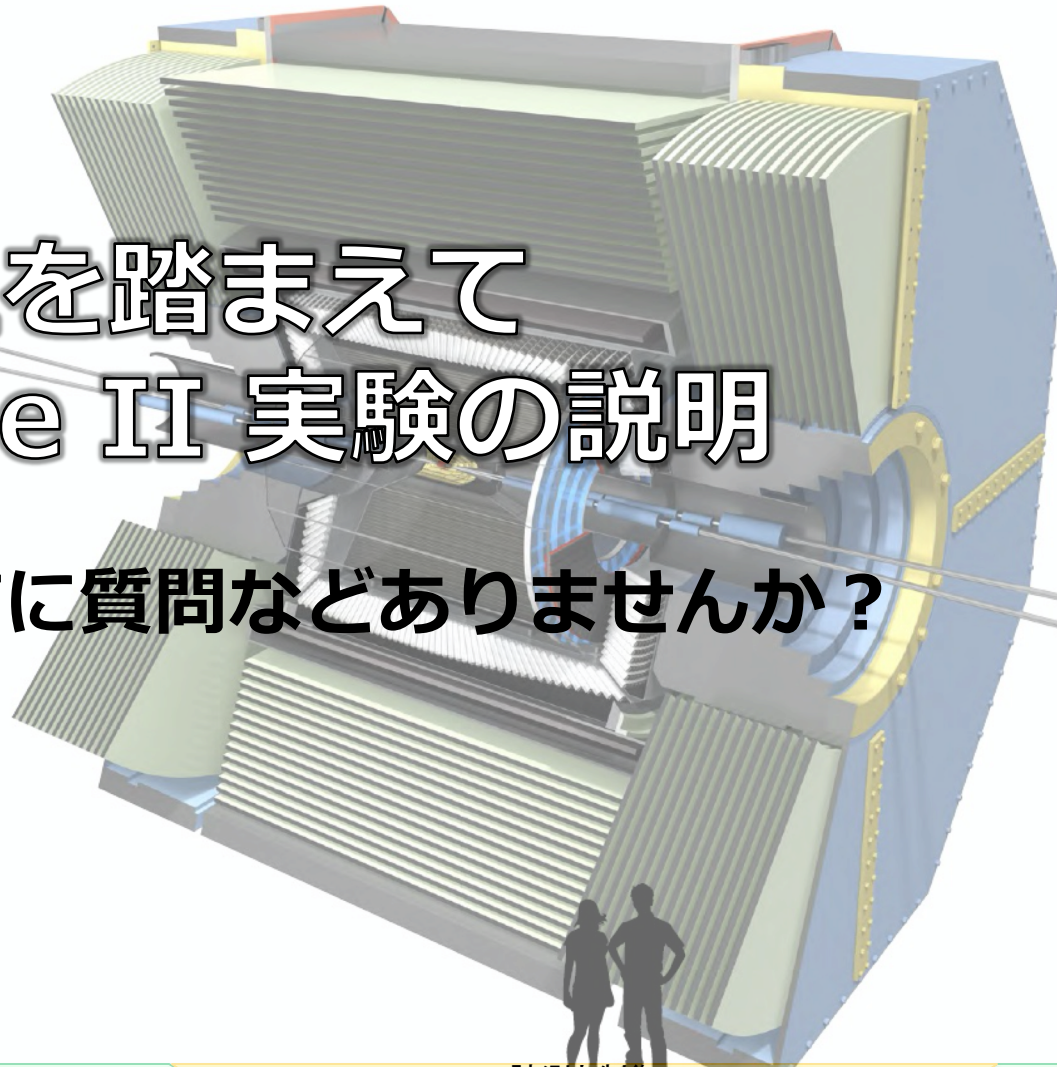


$$m_{B^0} = 5.28 \text{ GeV}/c^2$$

Belle II実験 (e^+e^-) のデータ
 大部分が $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$ の
 非常にクリーンな実験

例：Higgs粒子発見 (ATLAS/CMS)

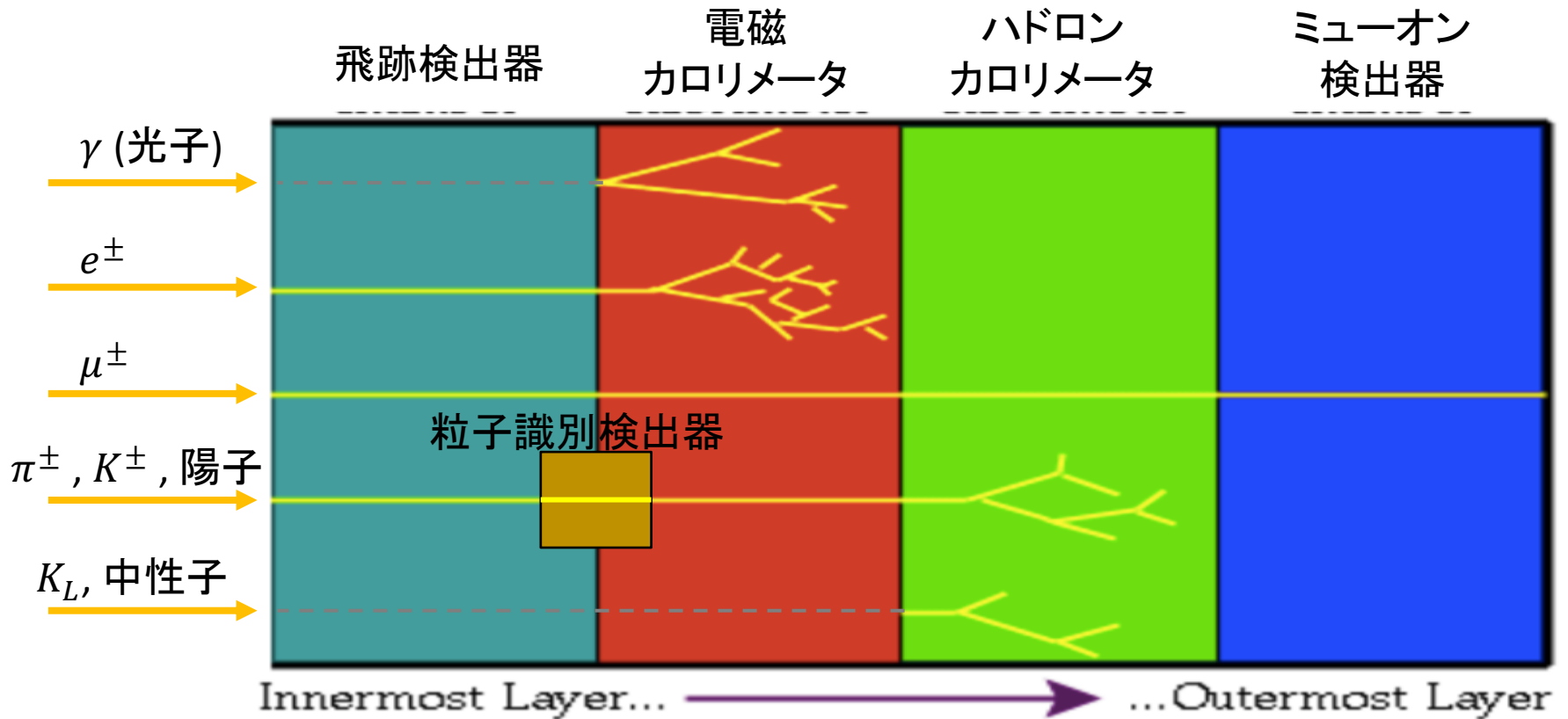


A 3D cutaway diagram of the Belle II detector, showing its complex internal structure with various layers and components. The detector is primarily blue and grey, with some yellow and red accents. It is shown from a perspective that allows a view into its internal chambers and detector layers.

以上を踏まえて Belle II 実験の説明

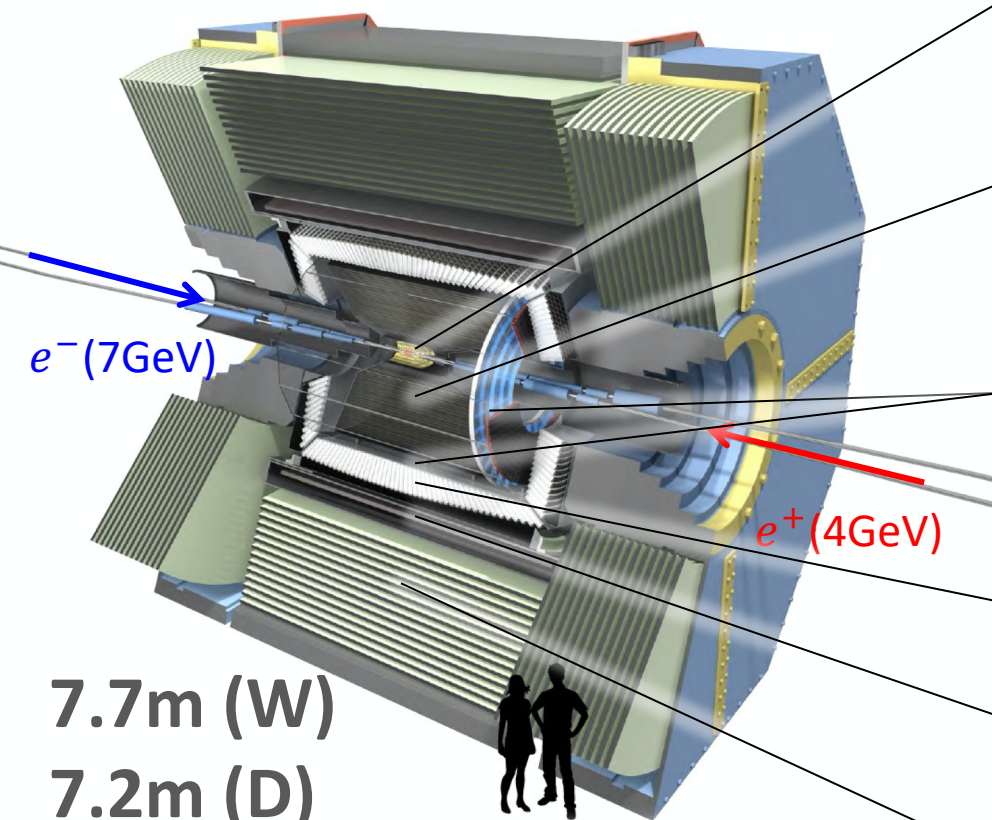
その前に質問などありませんか？

終状態の粒子測定のみとめ



ν (ニュートリノ) はほぼ反応しない

Belle II 測定器



7.7m (W)

7.2m (D)

7.9m (H) 物理測定領域: $17^\circ < \theta < 150^\circ$

崩壊点検出器

- Inner 2 layers: DEPFET pixel sensor
- Outer 4 layer: DSSD (strip) sensor

ドリフトチェンバー (DC)

- Smaller cell size than Belle

PID検出器

- Barrel: Time-Of-Propagation counters
- Endcap: Aerogel RICH
- mis-PID ... half of Belle

EMカロリメータ

- CsI(Tl) + wave-form readout

超伝導電磁石ソレノイド: 磁場 1.5 T

K_L/μ -検出器

- Outer barrel: RPC (streamer)
- Endcap/inner barrel: Sci. + WL shift

Fast and broadband DAQ

- Maximum Level-1 rate: 30kHz
- Typical data size: 1MB/event

Level-1 トリガーシステム

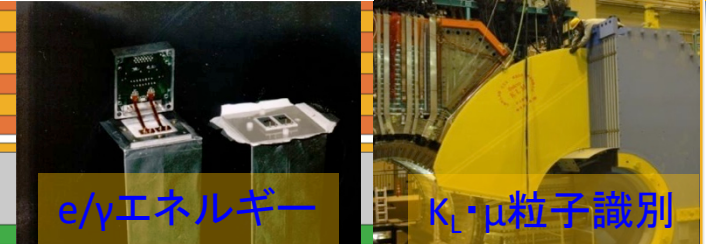
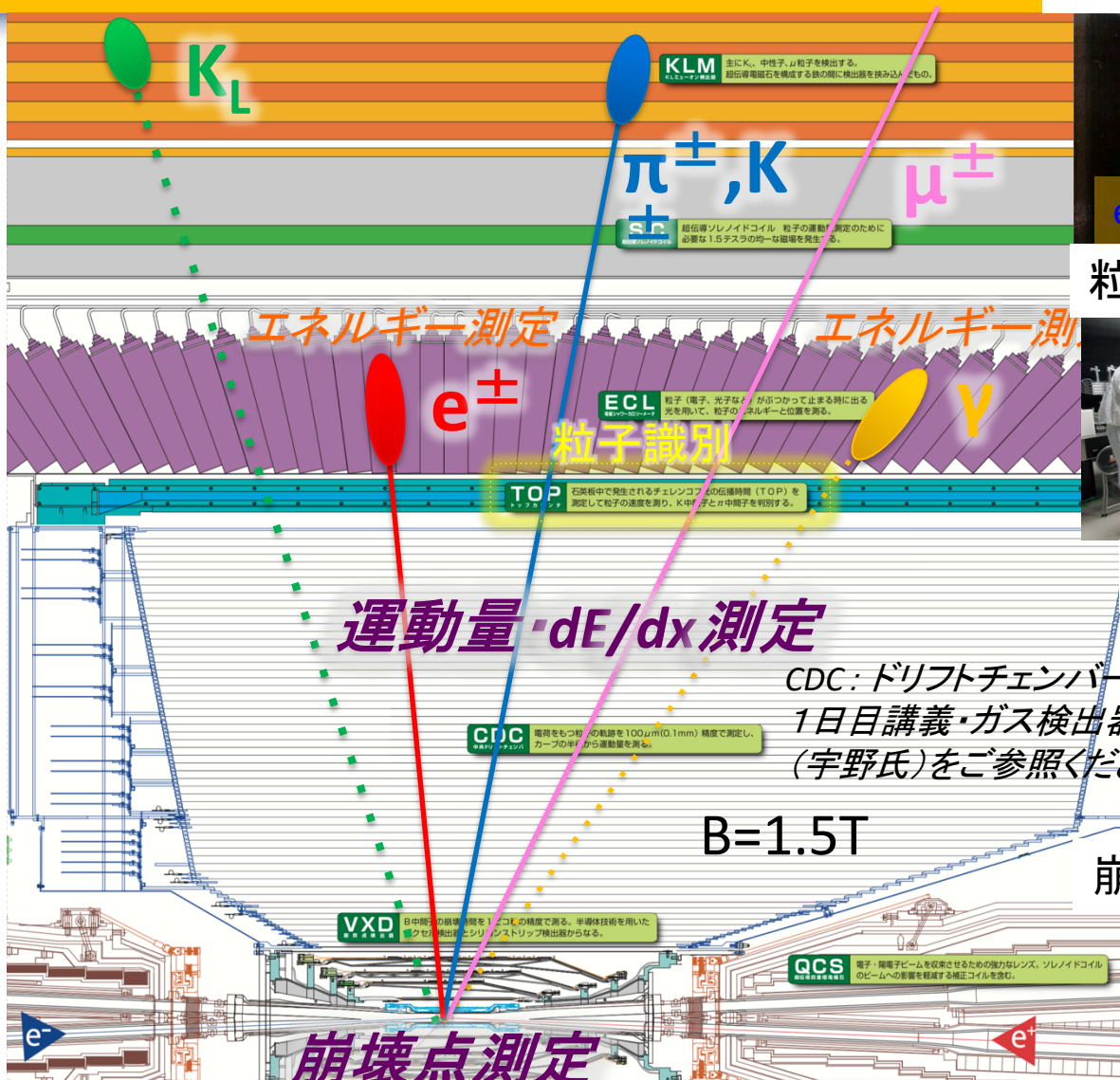
- Tracking + EM-cal + μ
- L1 trigger latency : 5 μ sec

内層

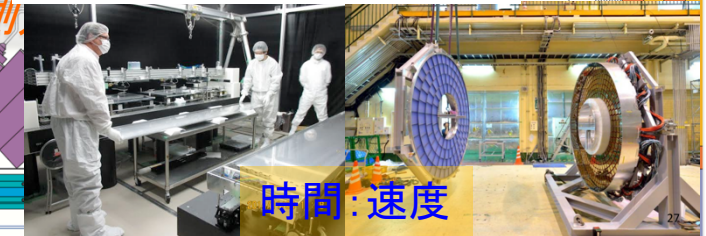
外層

Belle II 検出器による粒子測定

電磁カロリメータ(ECL) K_L ・ μ 粒子検出器(KLM)

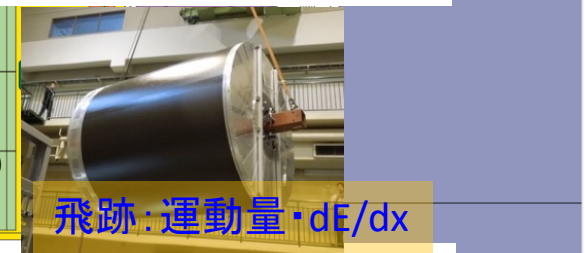


粒子識別 (TOP+ARICH)

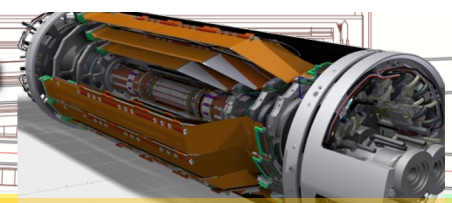


中央飛跡検出器 (CDC)

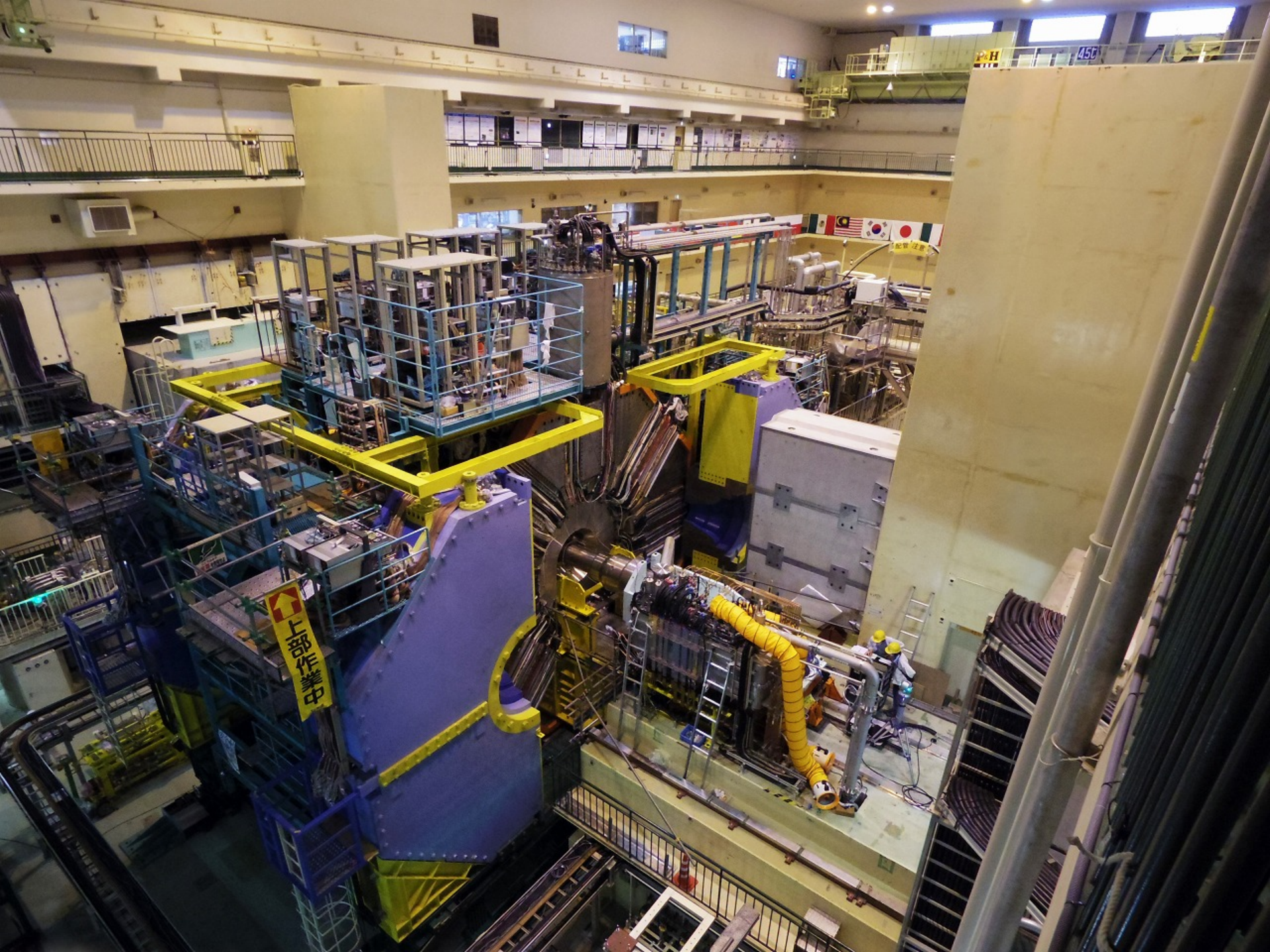
CDC:ドリフトチェンバー
1日目講義・ガス検出器
(宇野氏)をご参照ください



崩壊点検出器 (PXD+SVD)



崩壊位置・(運動量・ dE/dx)

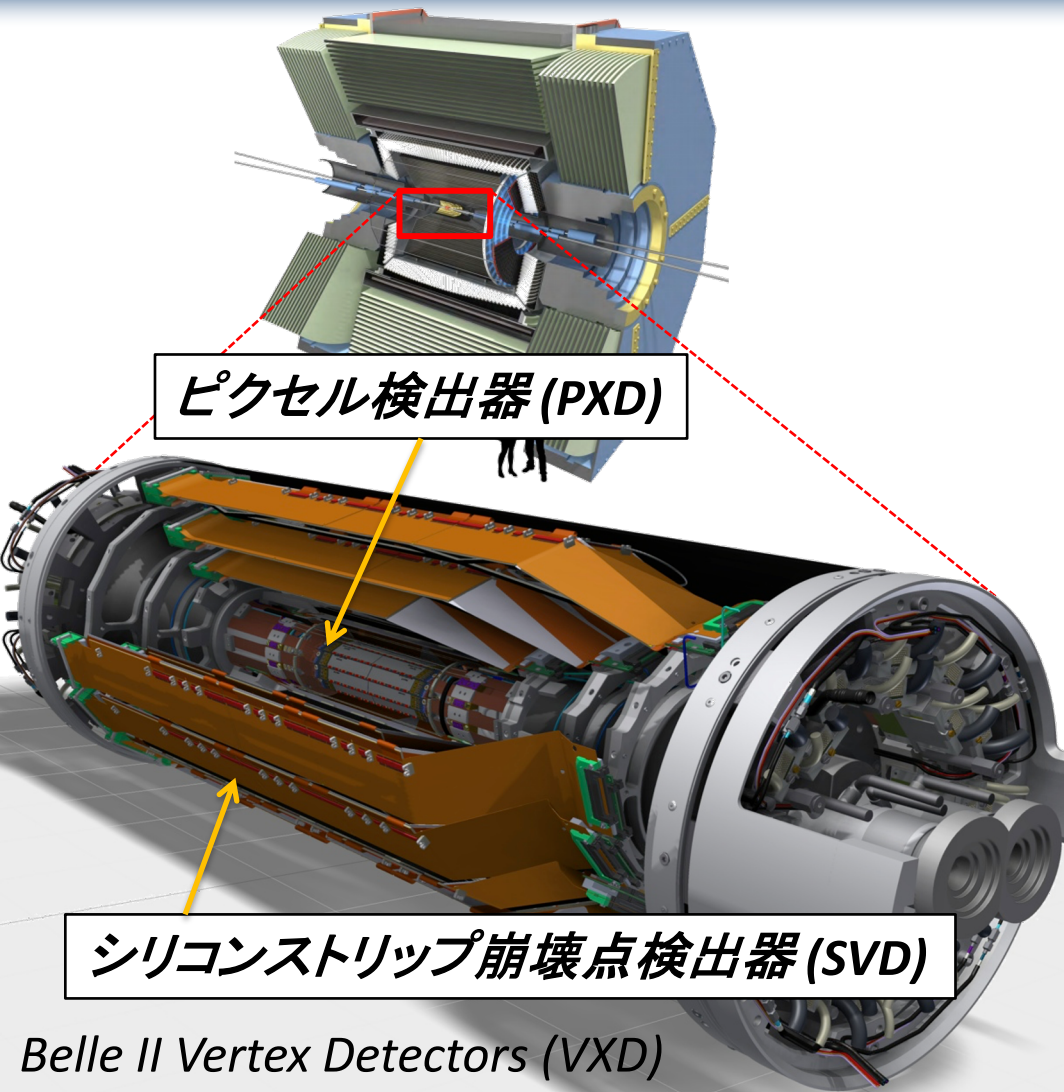


↑
上部作業中



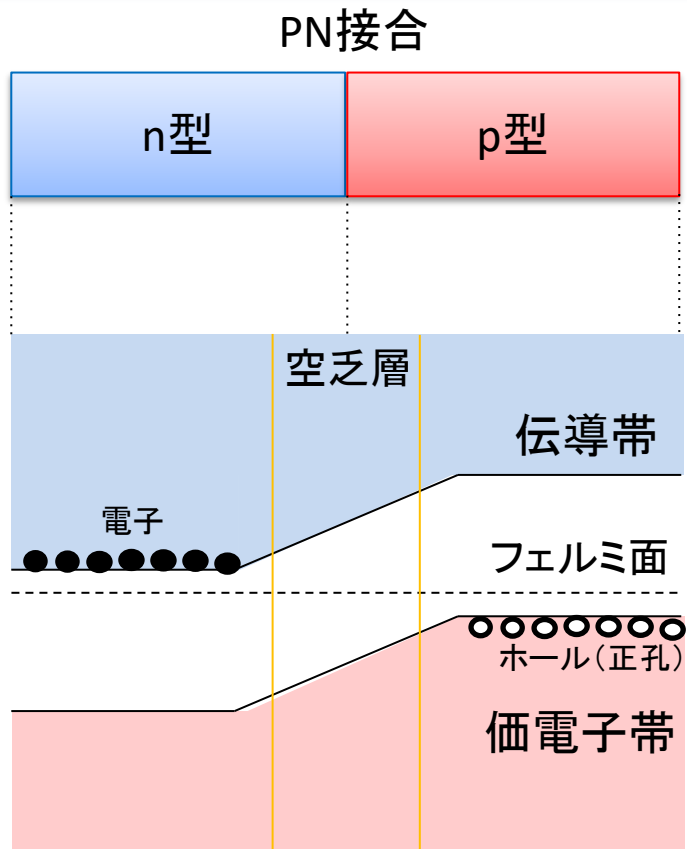
Belle IIの検出器 (一部のみ)

シリコン崩壊点検出器

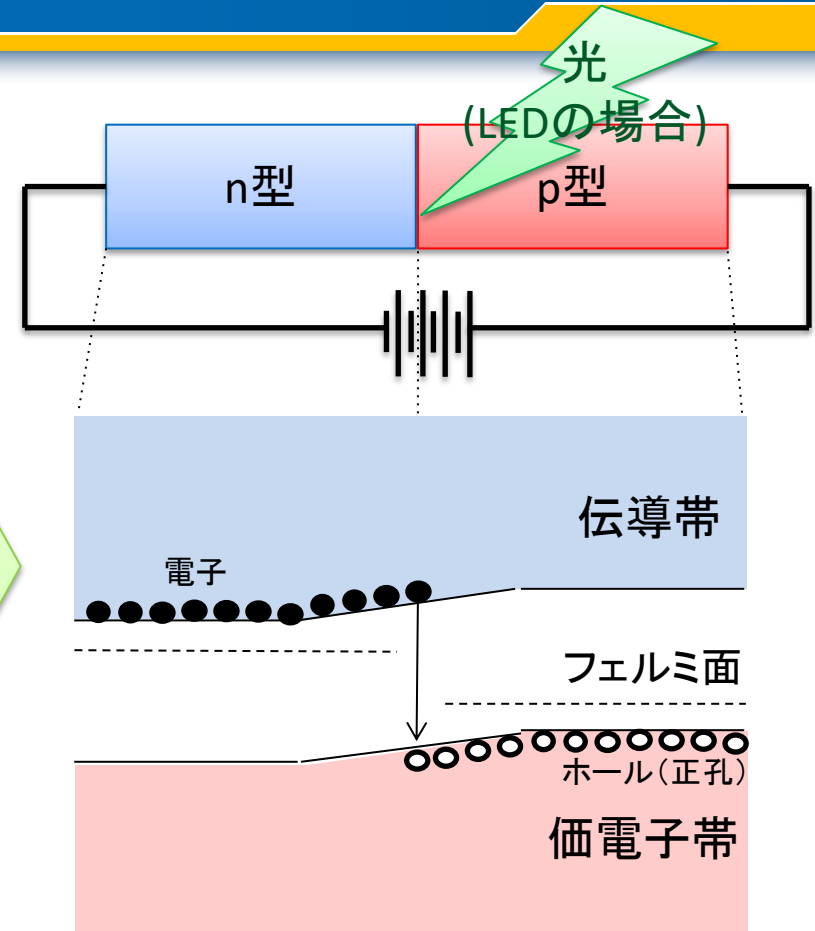


- Belle II検出器のビーム衝突点に設置
- 2つのシリコン検出器から構成
- **ピクセル検出器 (PXD)**
 - 内側2層
 - DEPFET センサー
- **シリコンストリップ崩壊点検出器 (SVD)**
 - 外側4層
 - Double-sided Si strip detectors (DSSDs)

シリコン検出器の原理

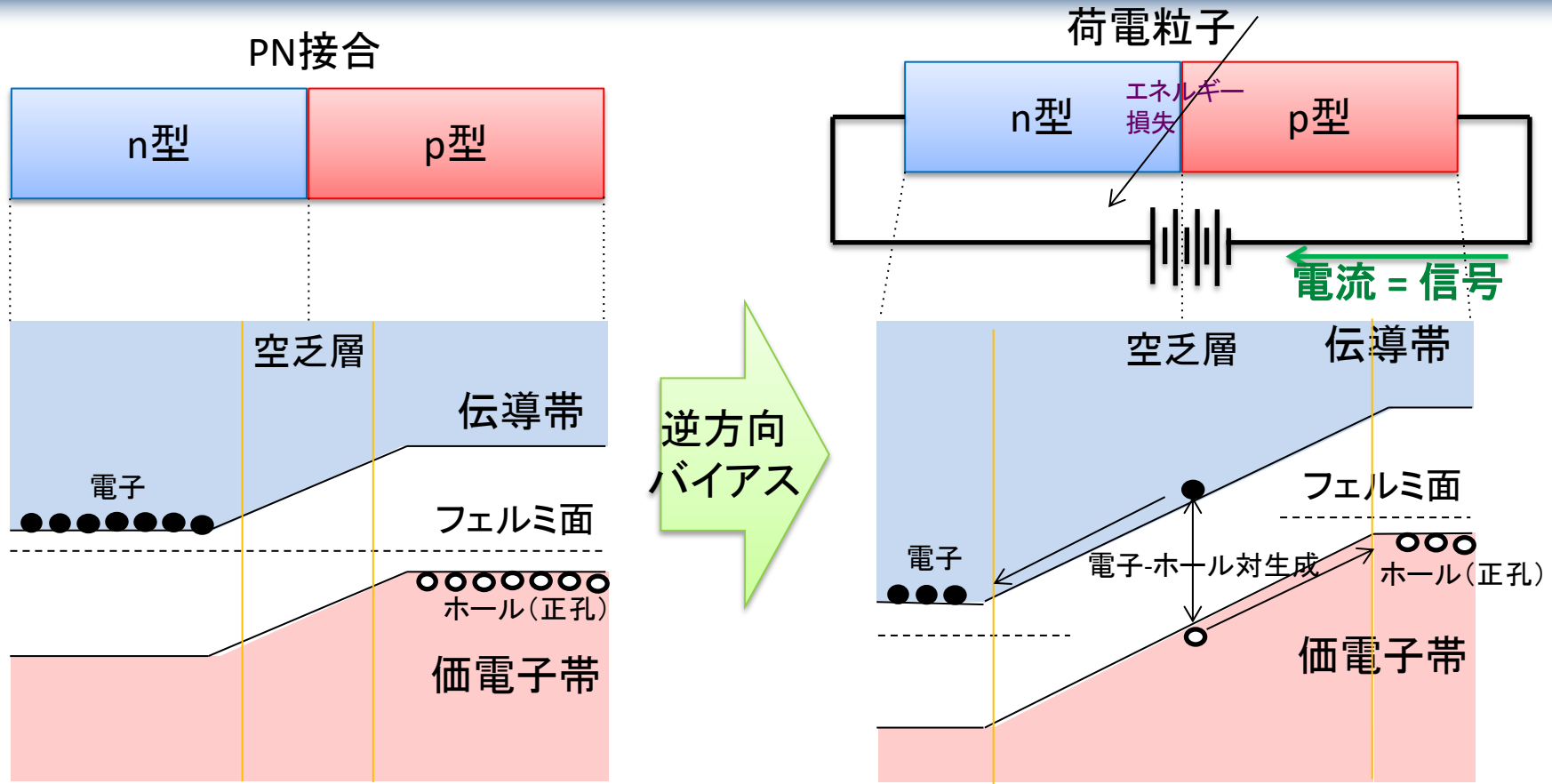


順方向
バイアス



- PN接合に順方向に電圧をかけると電流が流れる。
 - → ダイオード(整流性), LED (Light Emitting Diode)

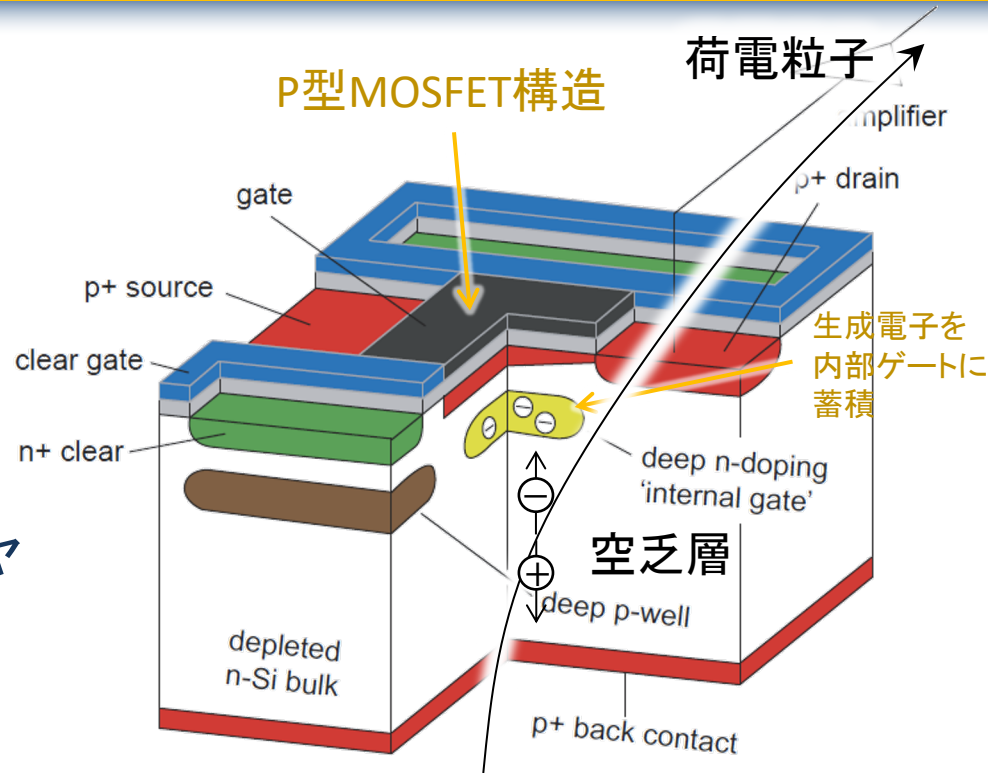
シリコン検出器の原理



- PN接合に逆方向に電圧をかけると空乏層が増大
- 空乏層に荷電粒子が通過すると、エネルギー損失分の電子-ホール対が生成され、電流変化として検出される
 - → シリコン検出器

ピクセル検出器：DEPFETセンサー

- **Depleted P-channel Field Effect Transistor**
 - 空乏化したP型MOSFET
- 荷電粒子により生成した電子が内部ゲートの電位を変化
 - n型ドーピングによるポテンシャル極小領域に電子を捕獲
- → ソース-ドレイン間の電流が変化
 - 増幅率 $\sim 400 \text{ pA}/e^-$
- 蓄積電荷は定期的にクリアされる



詳細は1日目講義・シリコン検出器
(岸下氏)をご参照ください

ピクセル検出器：DEPFETセンサー

製作の遅れにより
第2層は2モジュールのみ設置
(2022年にFullの検出器と交換)

Info	Layer 1	Layer 2
Modules	8	12
Radius	14 mm	22 mm
Size	15x136 mm	15x170 mm
Pixel size	50x55 μm	50x70 μm
	50x60 μm	50x85 μm
# Pixels	250x1536	250x1536
Thickness	75 μm	75 μm

センサー領域

ASIC's

Switcher: 読み出すピクセル列の選択

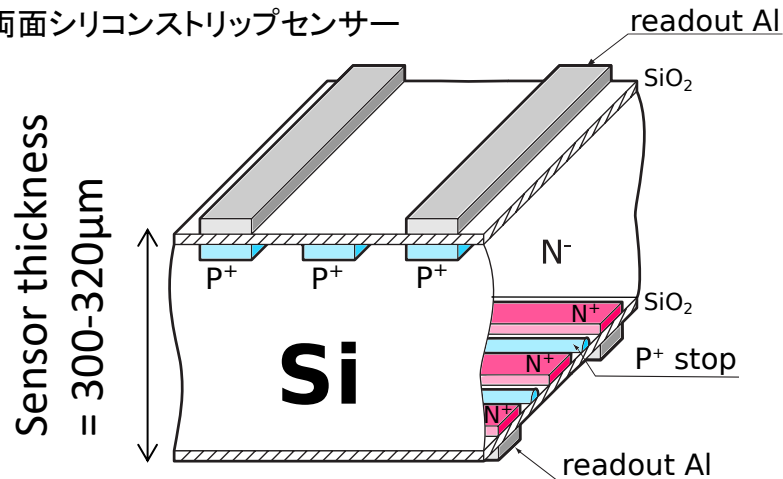
Drain Current Digitizer : 8bit ADC, 92ns sampling

Data Handling Processor: Common-mode + pedestal correction, Zero-Suppression

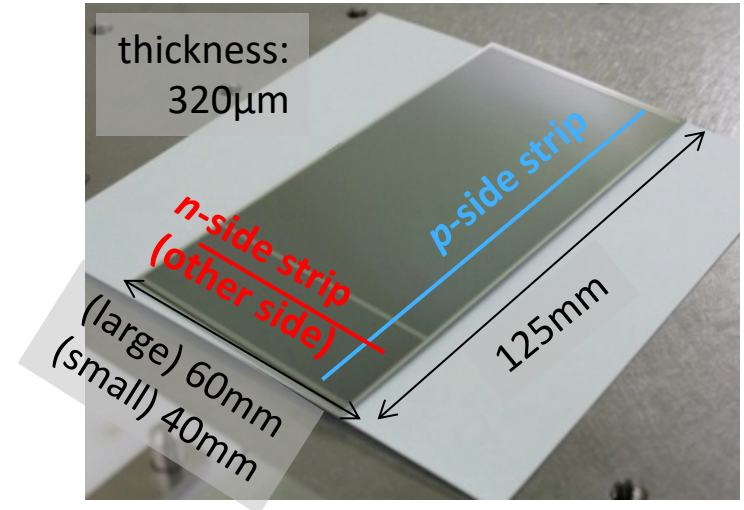
ストリップ検出器：DSSDセンサー

DSSD (Double-sided Si strip detector)

= 両面シリコンストリップセンサー



センサーの写真 (HPK製)



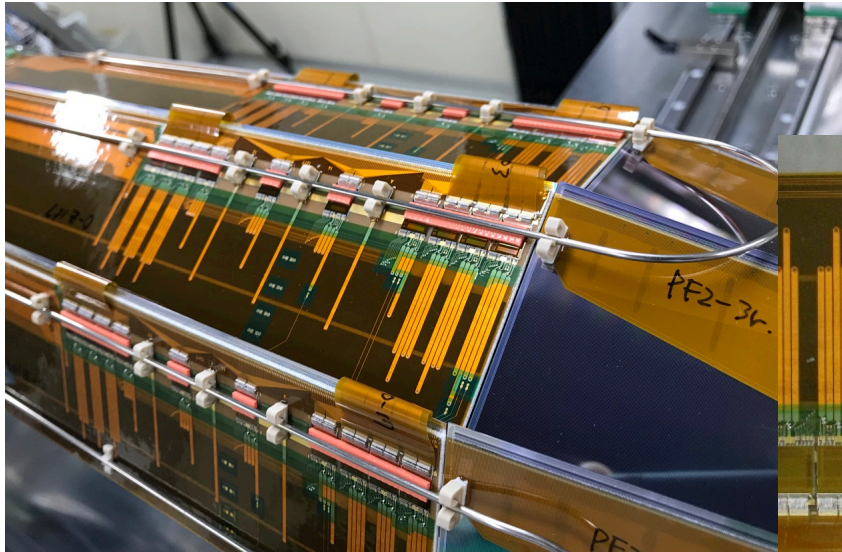
Strip numbers and pitches

読み出しストリップの仕様

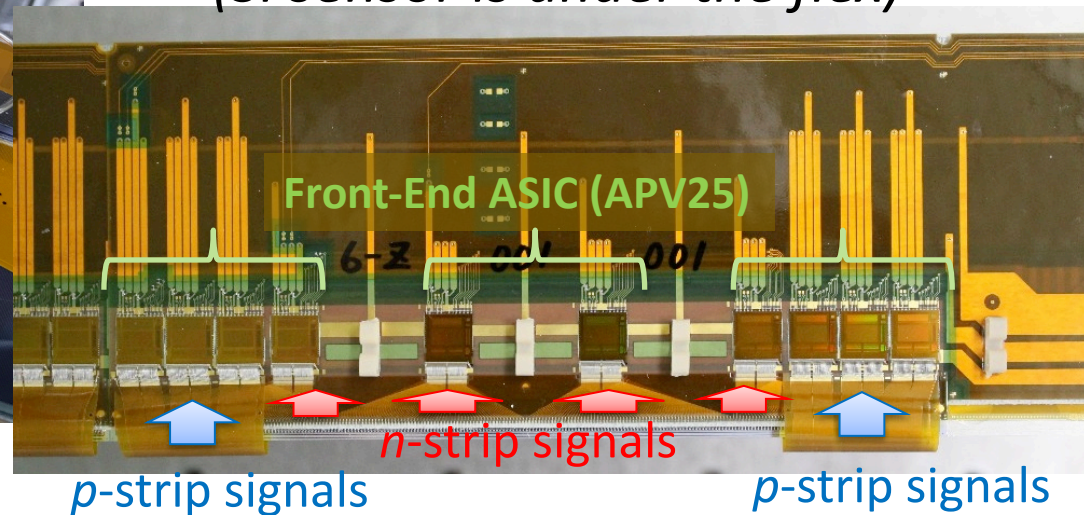
p側ストリップ本数	768
p側ストリップ間隔	50 μm
n側ストリップ本数	768
n側ストリップ間隔	160 μm

小さい長方形センサー

Chip-On-Sensor Concept



*ORIGAMI flex
(Si sensor is under the flex)*



- シリコンからの信号は小さい
- 加速器の高いバックグラウンドレートに耐えるためには、読み出し時定数を短く(50nsec)する必要がある
- → ノイズを小さくすることが課題となる

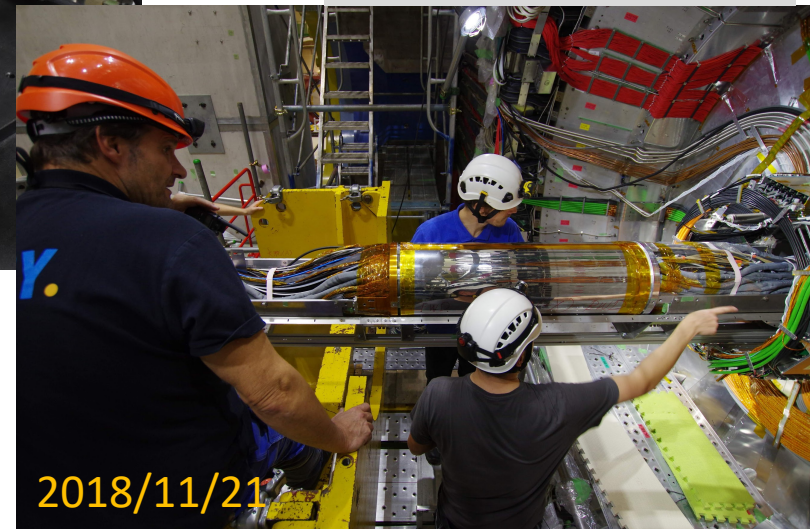
読み出しASICをセンサーの直上に配置することで検出器容量を削減し、ノイズを最小化: **Chip-On-Sensor concept** ASICは100um厚まで削る

シリコン崩壊点検出器

ピクセル検出器に
ストリップ検出器の半分が
取り付けられた写真

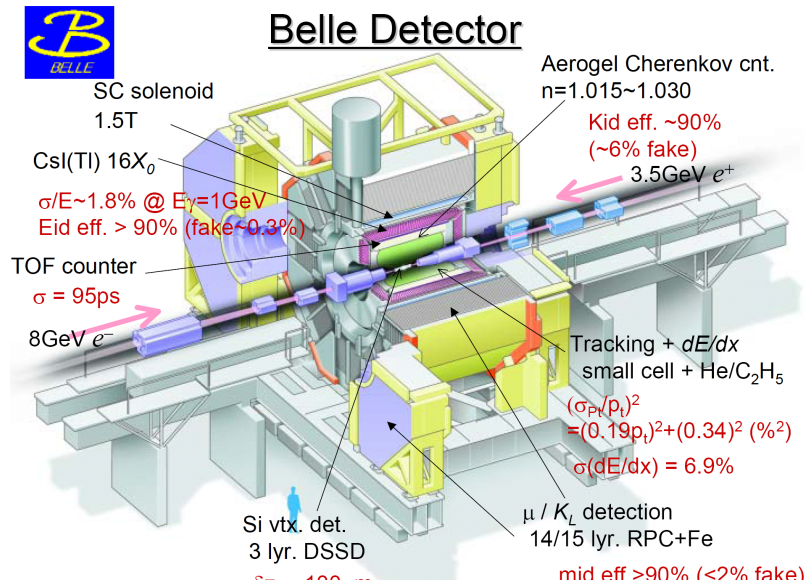


崩壊点検出器をBelle IIに
設置している写真



TOP(Time-Of-Propagation)検出器

- TOF(Time-Of-Flight)による粒子識別はエネルギーが高い実験になるほど困難になる
 - 粒子種による速度差は小さくなる
 - 識別精度向上にはとても大きな検出器が求められる
 - $\delta\beta = \beta^2/L \times \delta t$

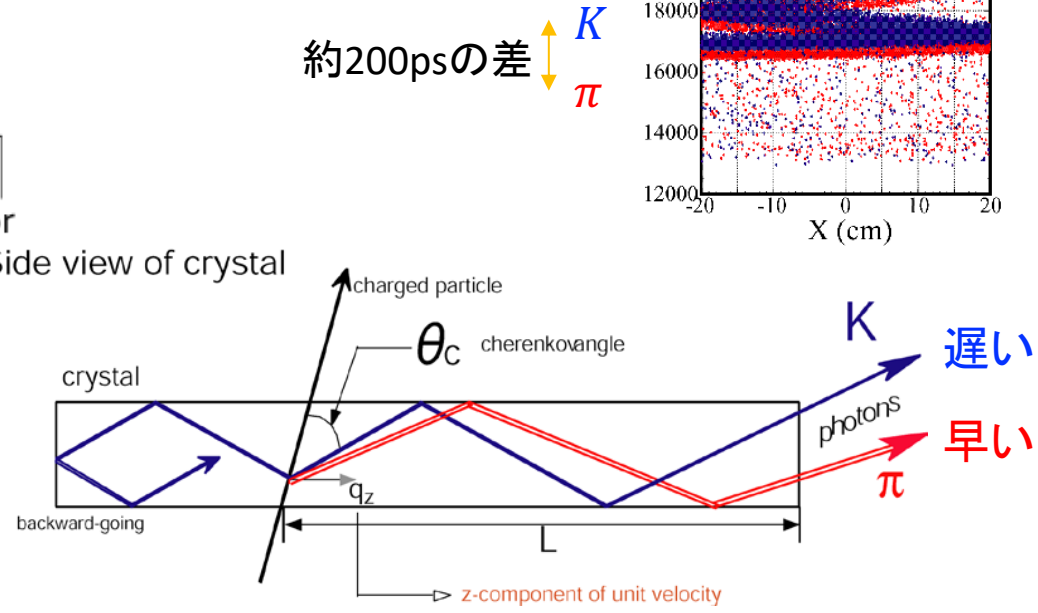
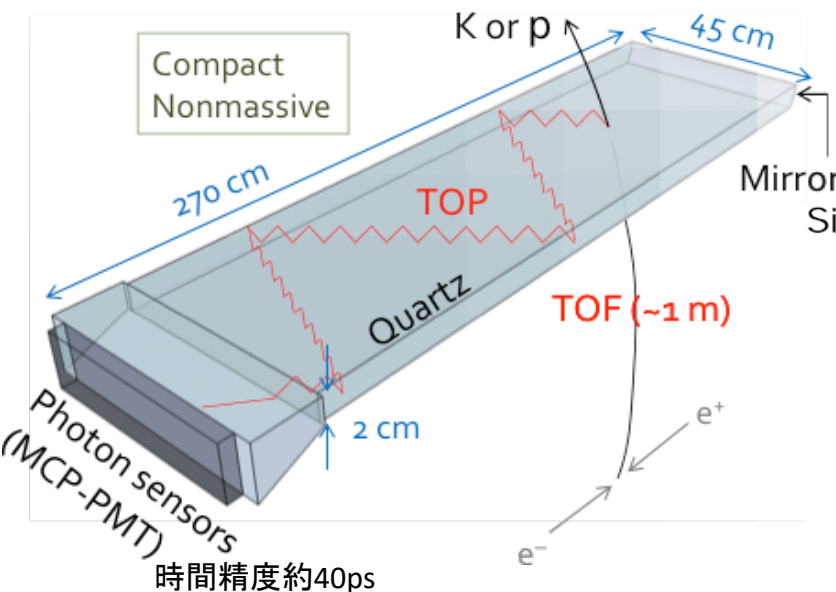
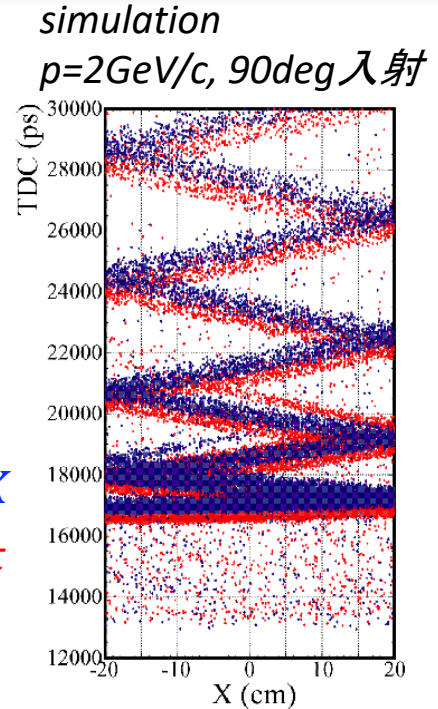


先代のBelle実験では
TOF検出器と
閾値型チェレンコフ検出器の
2つの粒子識別検出器が
必要となっていた。

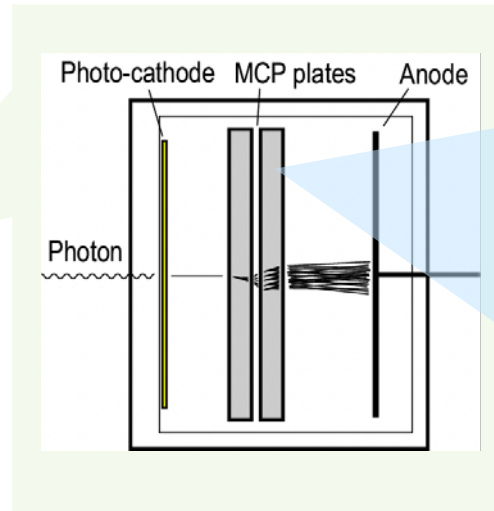
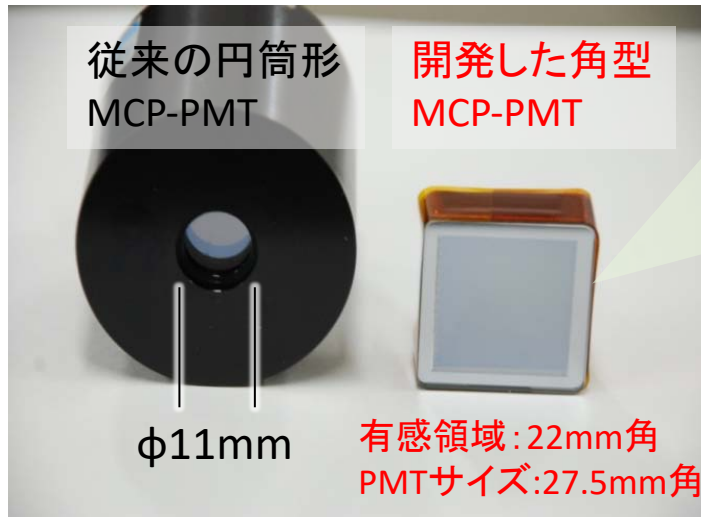
1つにできないか？

TOP(Time-Of-Propagation)検出器

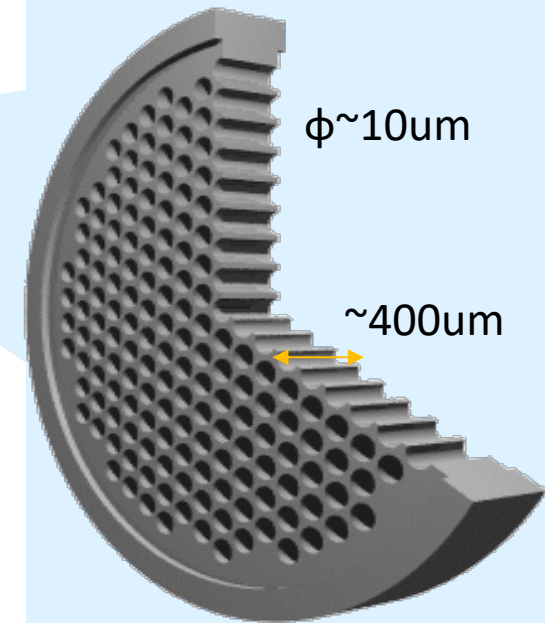
- TOP(Time-Of-Propagation): チェレンコフ光の到達時間と発生位置を測定
- 石英内のチェレンコフ光の角度 θ_c の違いにより到達時間が変化
 - TOF+TOP測定: 検出器サイズを変えることなく、粒子識別の精度を向上するアイデア



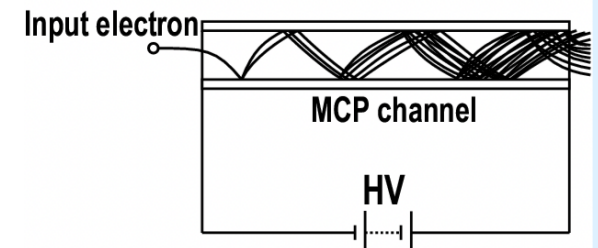
TOP(Time-Of-Propagation)検出器



MCP plate

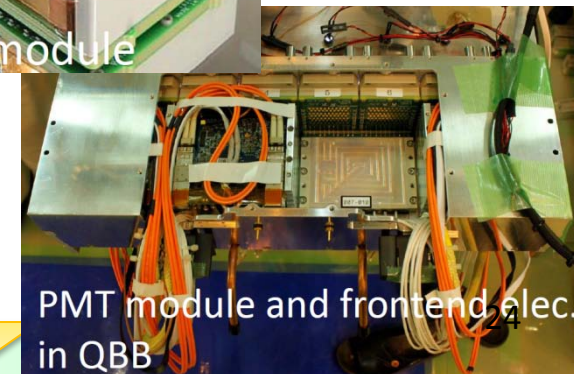
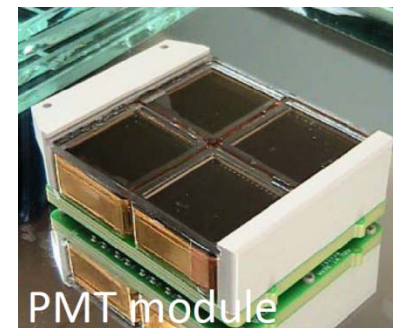
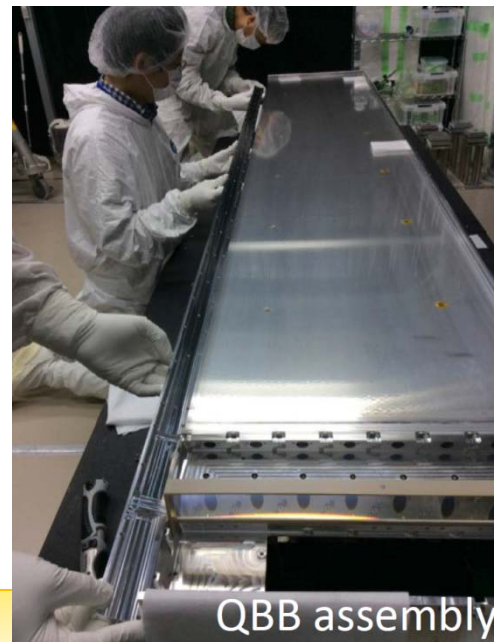
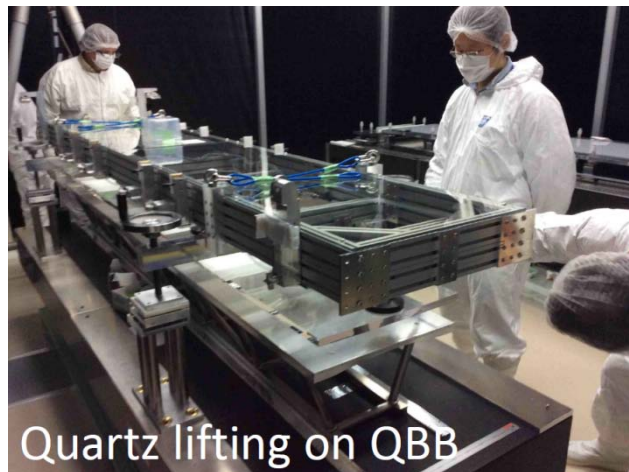
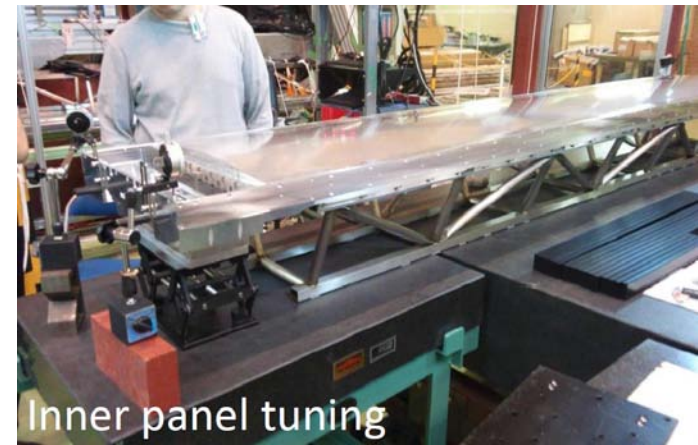
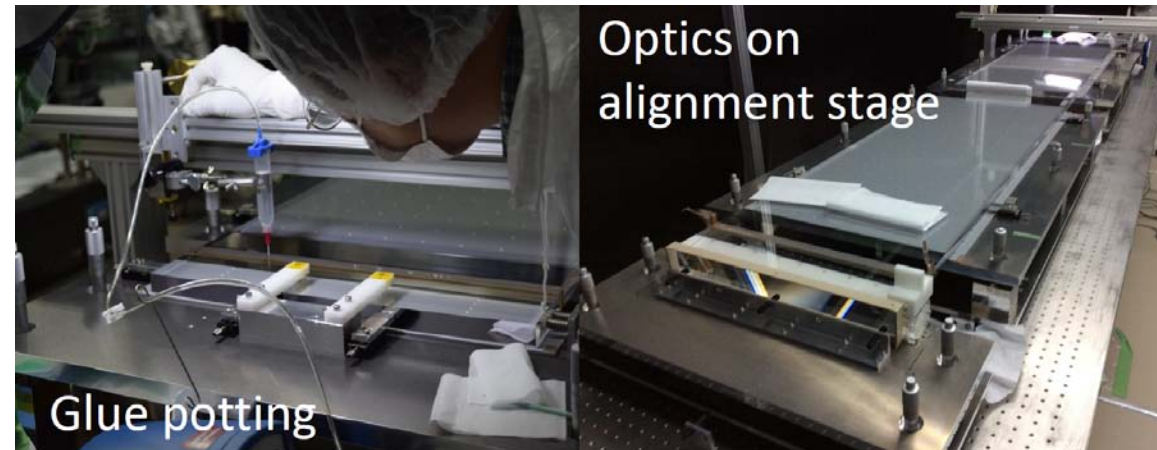


- チェレンコフ光検出：MCP-PMT (Micro-Channel-Plate PMT)
- 狭い領域で高い電子増幅率を実現
→ 高い時間分解能：40ps以下

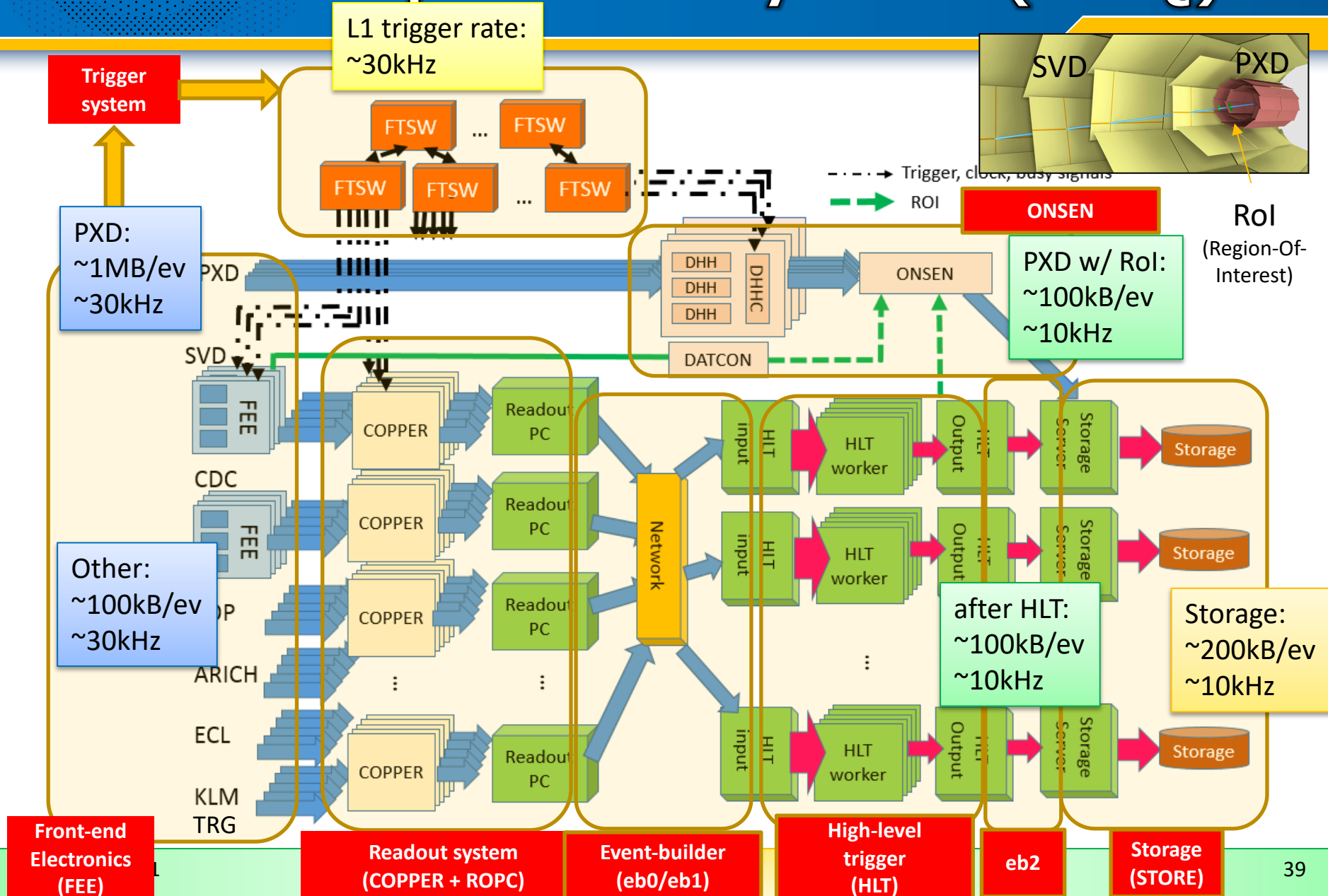


TOP(Time-Of-Propagation)検出器

- 製作手順の開発、(16+1)台の製作

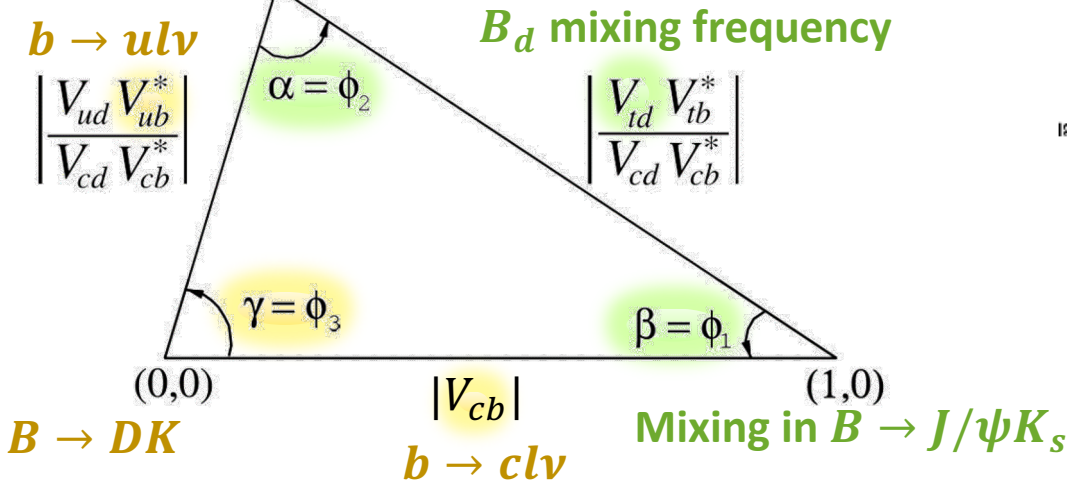


Data Acquisition System (DAQ)



代表的なBelle IIでの物理: CKM精密検証

Mixing in $B \rightarrow \pi\pi, \pi\rho, \rho\rho$ **CKM行列**
ユニタリー三角形



Belle II実験だけで3辺・3角のすべてを測定可能

Tree と Loop とでユニタリー三角形が一致するか?

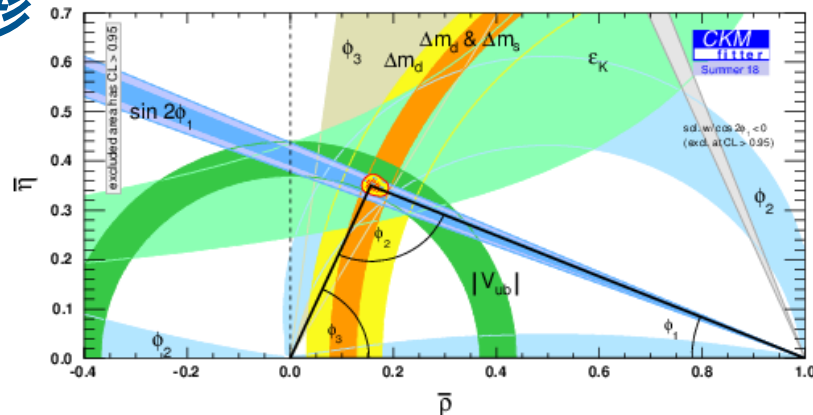
目標ルミノシティー 50 ab^{-1} での予想感度

- 全ての角を ~ 1 度の誤差で測定
- 全ての辺を $1 \sim 2\%$ の誤差で測定

新物理のエネルギースケールにして200TeVもの感度を有する

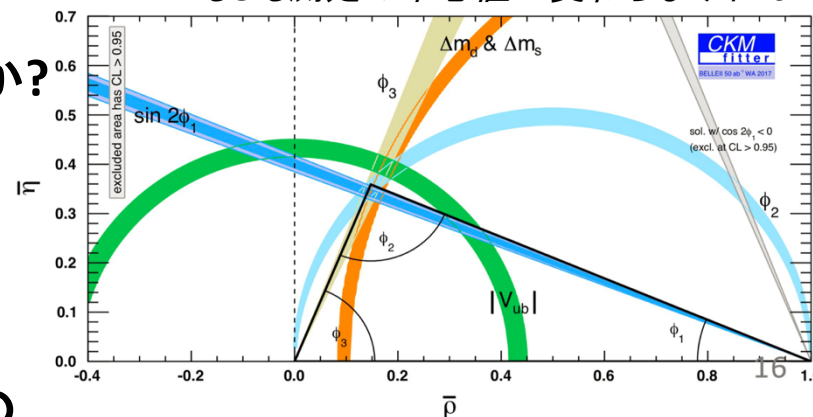
arXiv:1309.2293

Before Belle II (2018)



After Belle II ($50/\text{ab}$)

もしも測定の中心値が変わらなければ..



崩壊点測定と時間依存CP非対称度測定の繋がり

崩壊幅の時間依存CP非対称度

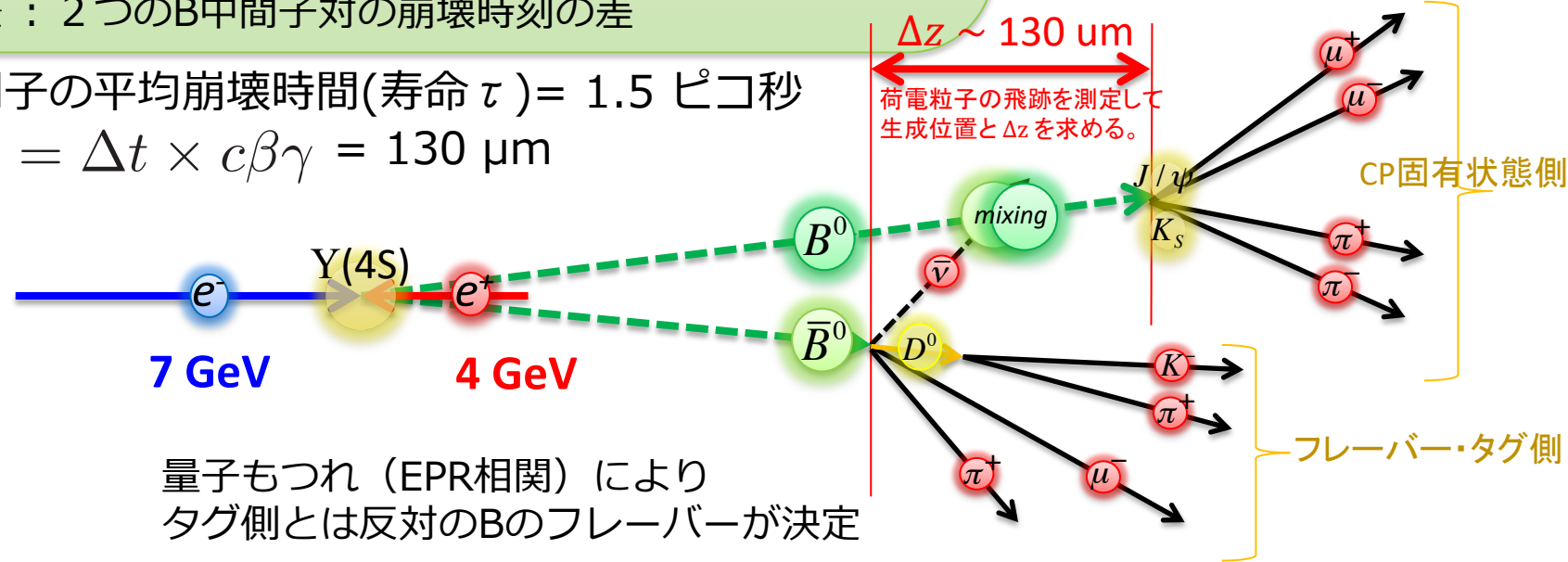
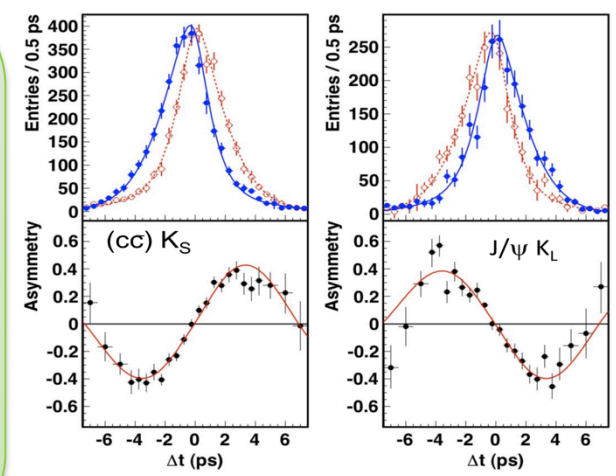
$$\Gamma_{B^0 \rightarrow f_{CP}}(\Delta t) \propto \exp\left[-\frac{|\Delta t|}{\tau_{B^0}}\right] \times (1 - A \cos \Delta m_d \Delta t - S \sin \Delta m_d \Delta t)$$

$$\Gamma_{\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP}}(\Delta t) \propto \exp\left[-\frac{|\Delta t|}{\tau_{B^0}}\right] \times (1 + A \cos \Delta m_d \Delta t + S \sin \Delta m_d \Delta t)$$

e.g. $S(B \rightarrow J/\psi K_S) = \sin 2\phi_1$: CKM 三角形の角度

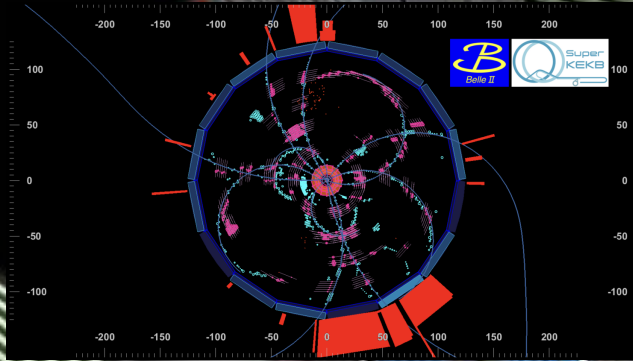
Δt : 2つのB中間子対の崩壊時刻の差

B^0 中間子の平均崩壊時間(寿命 τ) = 1.5 ピコ秒
 $\rightarrow \Delta z = \Delta t \times c\beta\gamma = 130 \mu\text{m}$

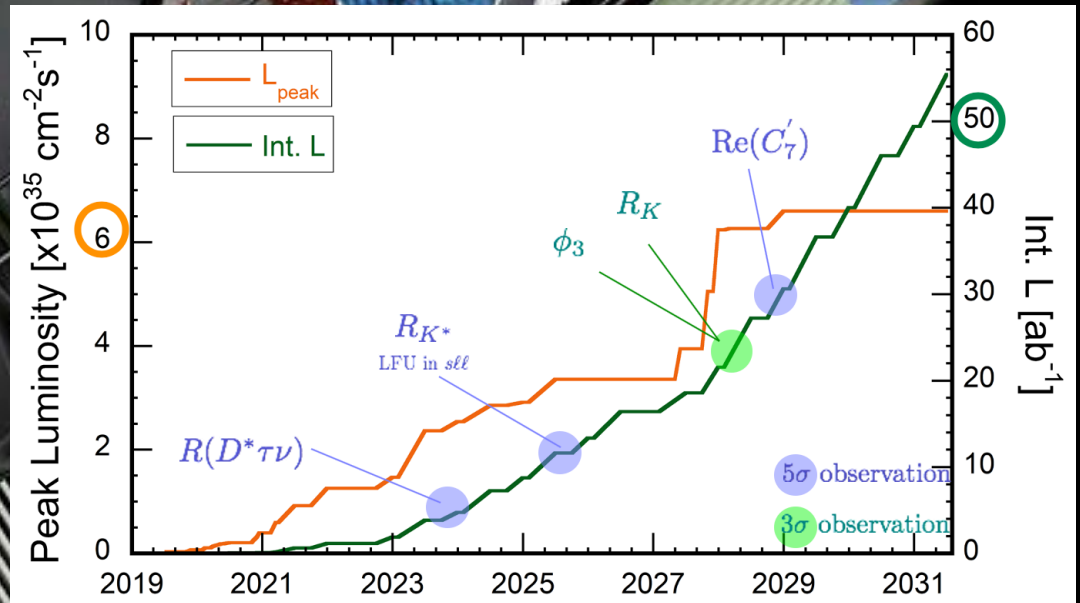


量子もつれ (EPR相関) により
 タグ側とは反対のBのフレーバーが決定

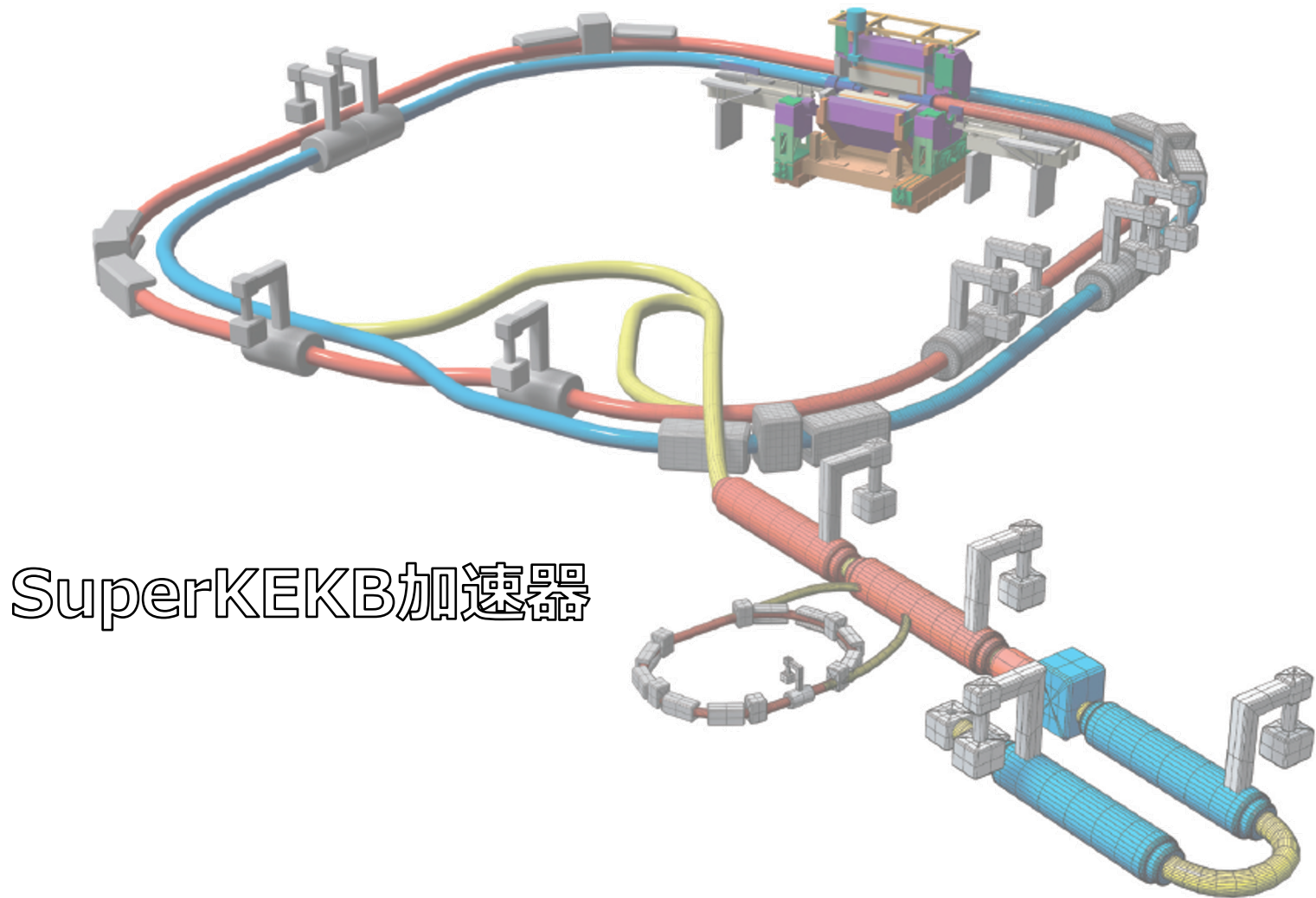
最後に



- 今回はBelle II実験での粒子計測をメインに説明しましたが、検出技術は実験ごとに大きく異なり、また技術開発は日進月歩で進み新しい検出器が様々あります。
- Belle II実験以外でつかわれていう検出器技術も是非調べてみてください。

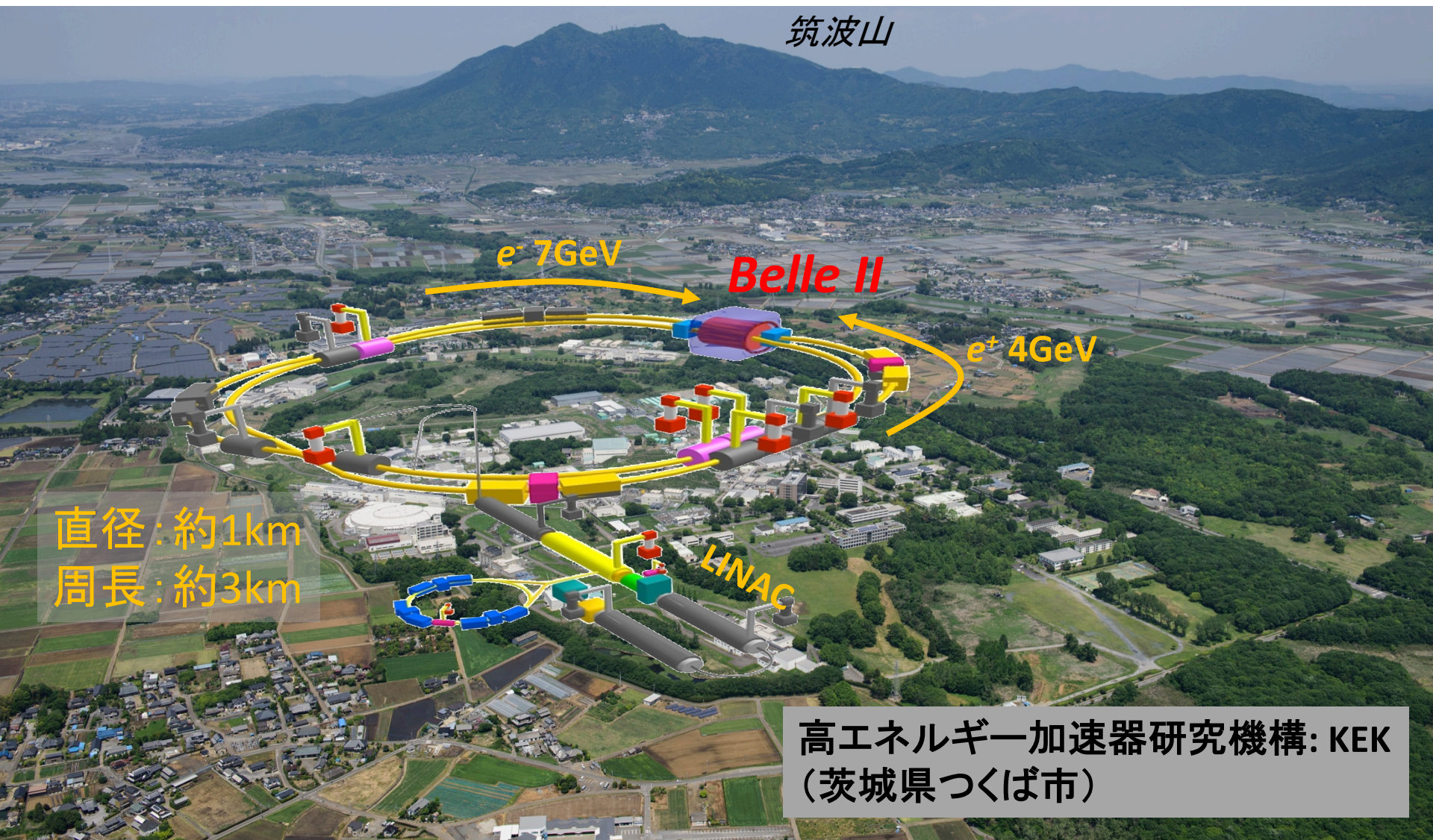


Backup



SuperKEKB加速器

SuperKEKB加速器 @ KEK



SuperKEKB加速器

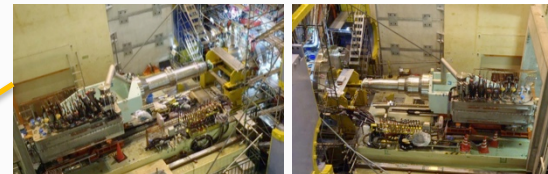
KEKB加速器から
SuperKEKB加速器へ



短い偏極電磁石を
長いものに交換

Belle II 検出器

最終収束超伝導電磁石 (QCS)



衝突点でのビームサイズを
約60nmにまで絞る



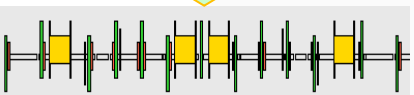
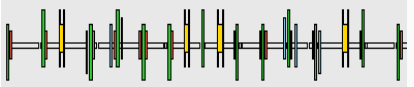
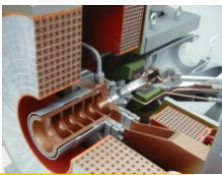
SuperKEKB Main Ring

e^- 7GeV 2.6 A

e^+ 4GeV 3.6 A

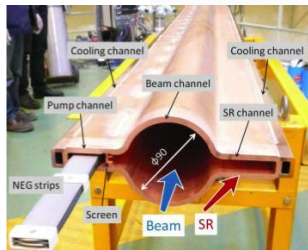
周長: 約3km,
RF周波数: 509MHz
目標輝度: $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

陽電子源
ターゲット
の改造



低エミッタンス化のため
光学系の再設計

アンテナチャンバ付きビームパイプ
(TiNコーティング)



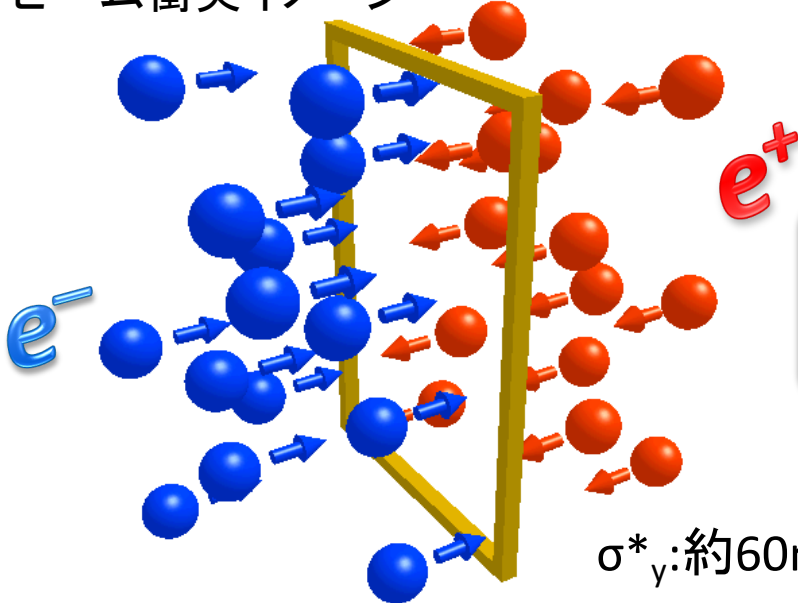
電子雲の削減
低エミッタンス化
低SRパワー密度

ダンピングリング
(陽電子@1.1GeV)
入射陽電子ビームの
低エミッタンス化

低エミッタンス電子銃
入射ビームの
低エミッタンス化

加速器とルミノシティー (輝度)

ビーム衝突イメージ



σ_y^* : 約60nm!

$$Y = \sigma \times L$$

物理事象の
生成頻度
[s⁻¹]

反応断面積
自然法則で決定
人間は変えられない
[cm²]

ルミノシティ
加速器の性能
人間の努力で向上
[cm⁻²s⁻¹]

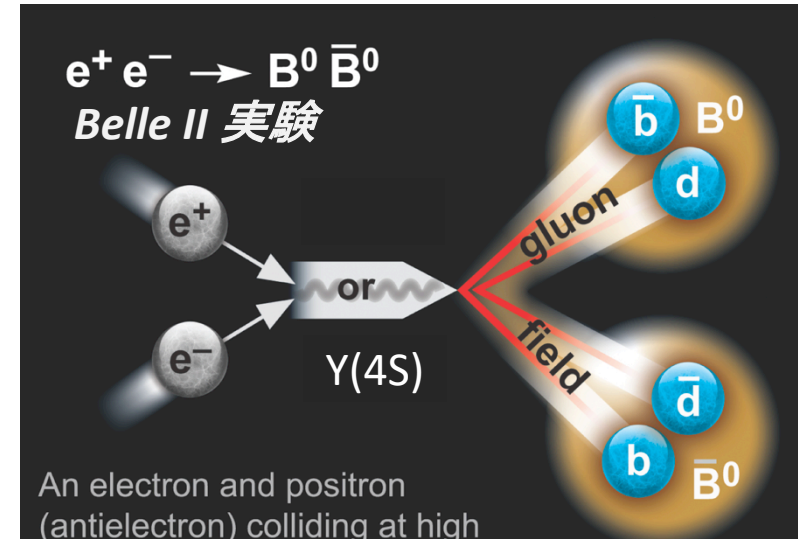
ルミノシティーの増強(目標40倍)

■ ビーム電流を上げる

- KEKBから2倍に増強

■ ビームサイズを小さくする

- 垂直ベータ関数を小さくする
- ビームの低エミッタンス化
- KEKBから20分の1に改善

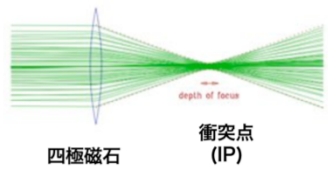


反応断面積:

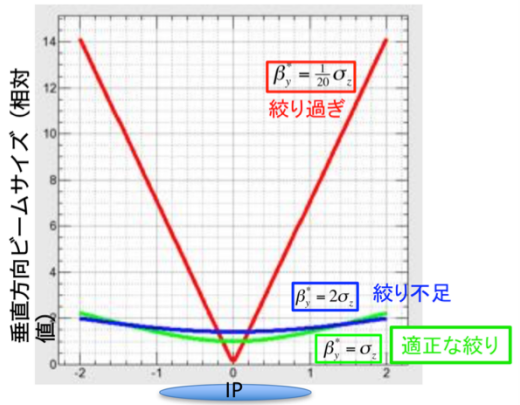
$$\sigma(E_{cm} \sim 11\text{GeV}) = 1.1\text{nb} = 1.1 \times 10^{-33} \text{cm}^2$$

極細のビームサイズへの挑戦 世界初の「ナノビーム方式」衝突

「砂時計効果」による制限



しかし、衝突点で絞り過ぎると、衝突点の両側でふくれる(砂時計のように)。

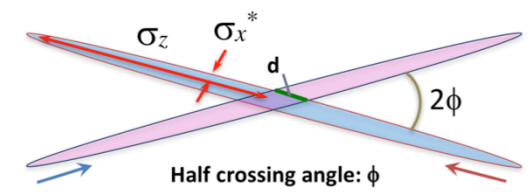


正面衝突、有限角度衝突、クラブ衝突、いずれの場合も、ビームの重なる長さ程度までしか、絞れない。

新しい、「ナノ・ビーム」方式

Nano-Beam Scheme

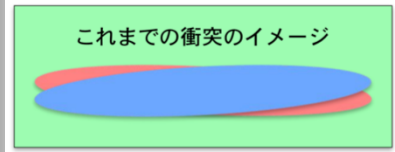
P. Raimondi が発案。SuperKEKBで採用。



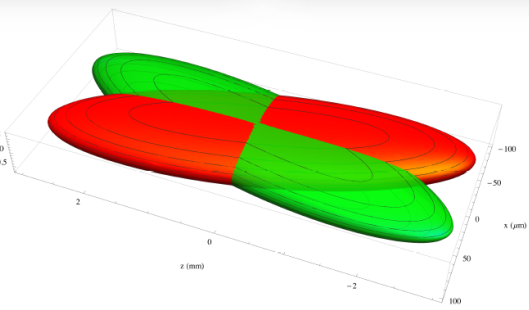
$$\beta_y^* \geq \frac{\sigma_x^*}{\phi} = d$$

~200-300 μm

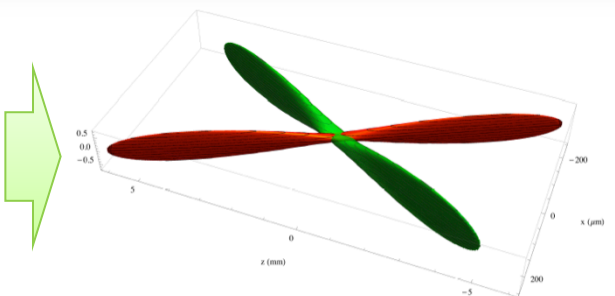
長く、細く、極めて薄いバンチ同士(進行方向 6 mm、水平方向 10 μm 、垂直方向 50~60 nm)を大きな交差角(約5度)で衝突させる。



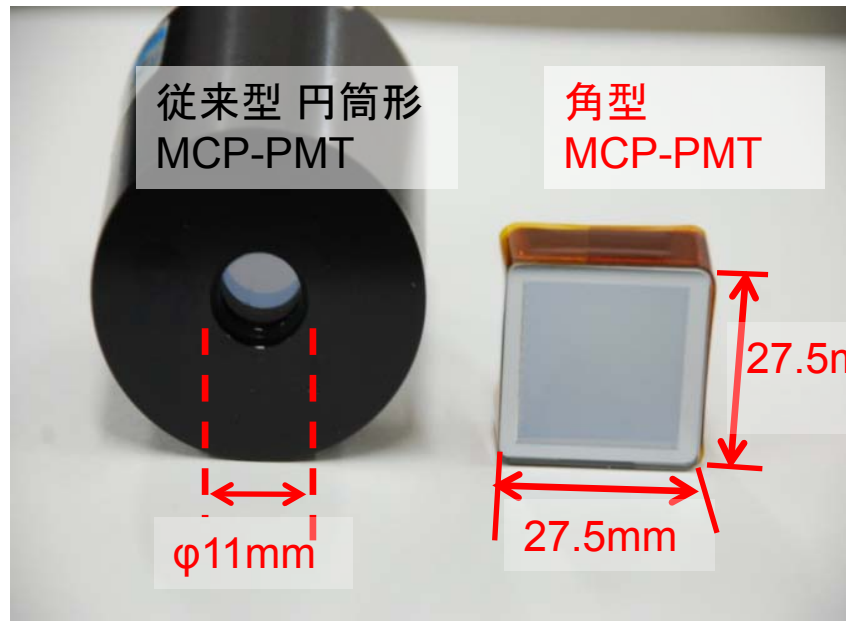
ナノビーム方式により、 ビームサイズを極限まで 絞ることが可能になる。



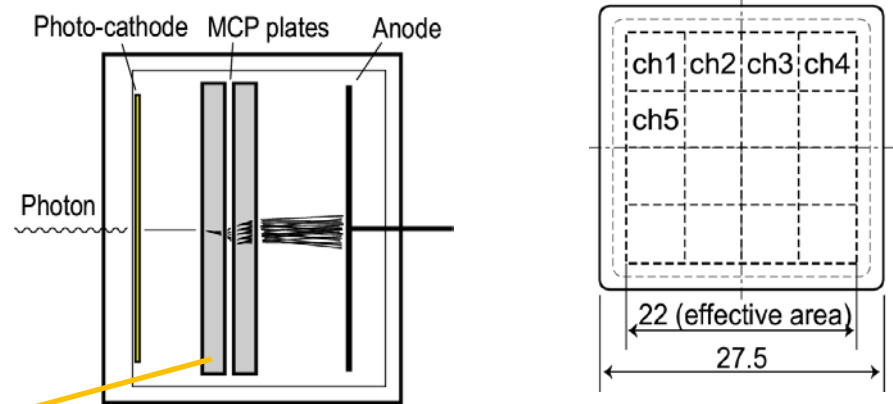
従来の衝突イメージ



ナノビームでの衝突イメージ

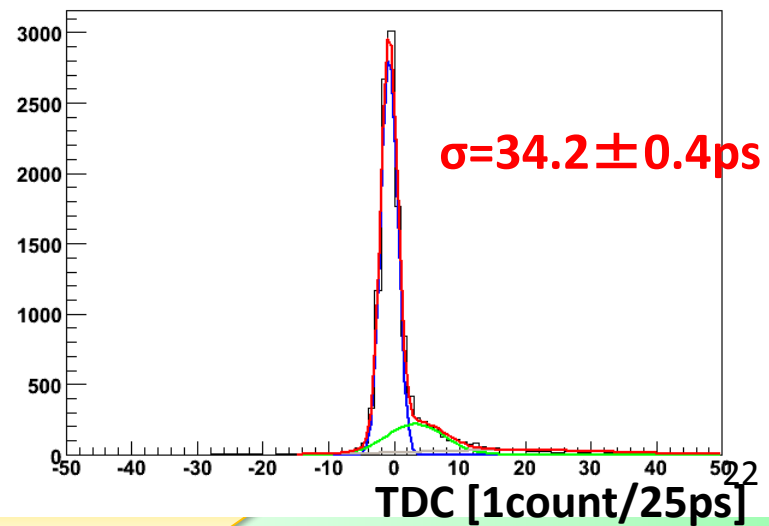
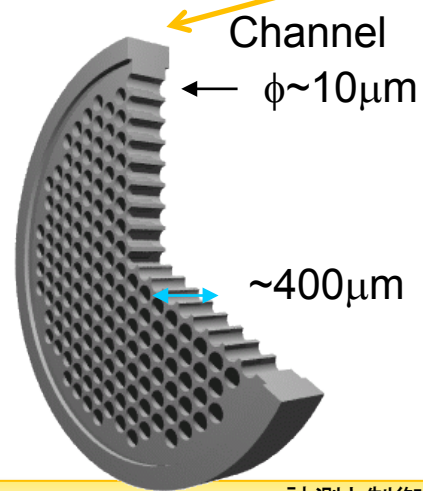
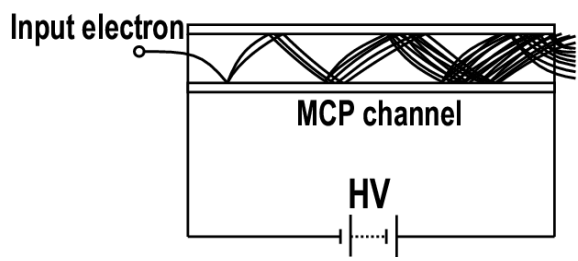


- 1.5T磁場中で1光子検出可能(gain $>10^6$)
- 高時間分解能 $\sigma < 40\text{ps}$
- 角型で高有効面積率 64%
- 位置情報 4x4 読み出し (5mmピッチ)

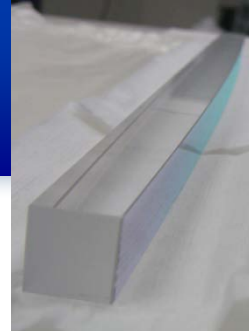


浜松ホトニクス社と共同開発

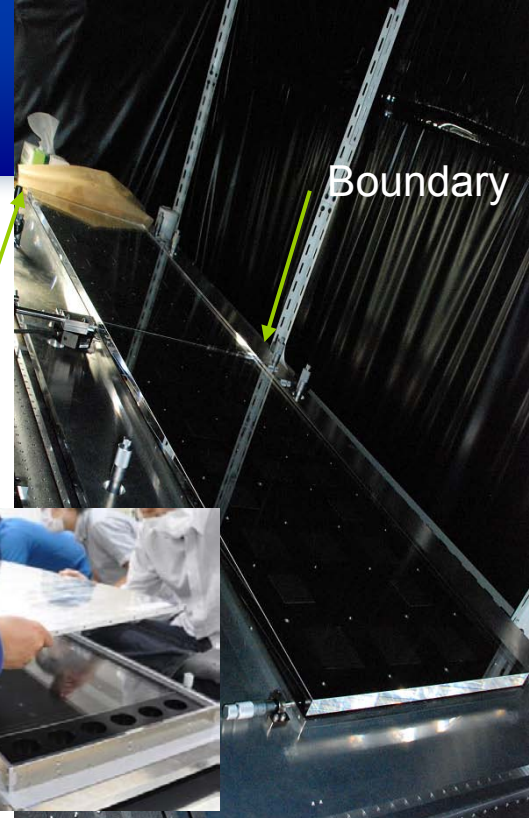
電子増倍部にMCPを使用
狭い領域で高い増幅率を達成することで高時間分解能を実現



- 石英輻射体(岡本光学加工所, Zygo社)
 - 高精度研磨大型石英板
 - $\sim 1\text{m} \times 40\text{cm} \times 2\text{cm}$
 - 平面性: $< 1.2\mu\text{m/m}$, 面粗度: $< 0.5\text{nm}$
 - フォーカスマirror (R=5m)
 - 平面度0.2mradで接着
- アルミハニカム支持体
 - 昭和飛行機社



Focusing mirror



- 複数回に亘るビームテスト

