Belle II実験の概要

Flavor Physics Workshop 2022

宇野 健太 (新潟大)

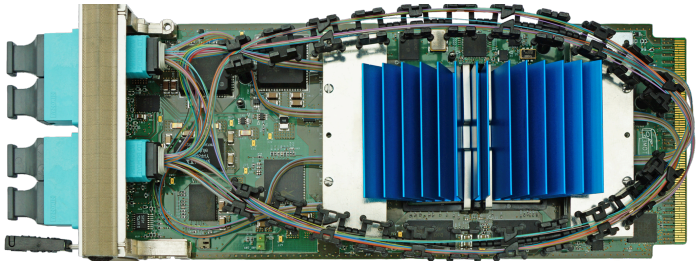
自己紹介

Belle II実験にうつってから初めての(国内)対面会議なので

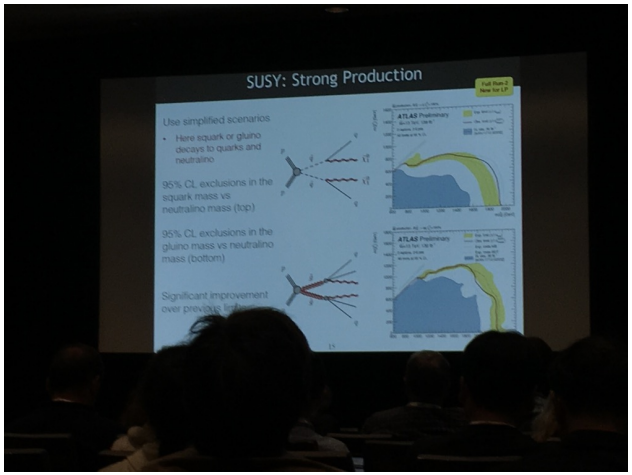
2015年4月 – 2020年3月 (修士、博士): ATLAS実験 @ CERN

- ファームウェア開発やRun2のオペレーションも携わった
- Run2全データを用いた超対称性粒子探索 (スクォーク, グルイーノ)

2020年4月 – 現在: Belle II実験 @ KEK



- レプトン物理を中心に: タウ粒子を用いた解析
- 検出器運転も携わってます: 粒子識別検出器



今日の目標

- 細かいことは立ち入らずに、出来るだけ簡単に
  - (博士の方とかにはつまらないかも..すみません)
- Belle IIトークが複数あるので、その助けになれば

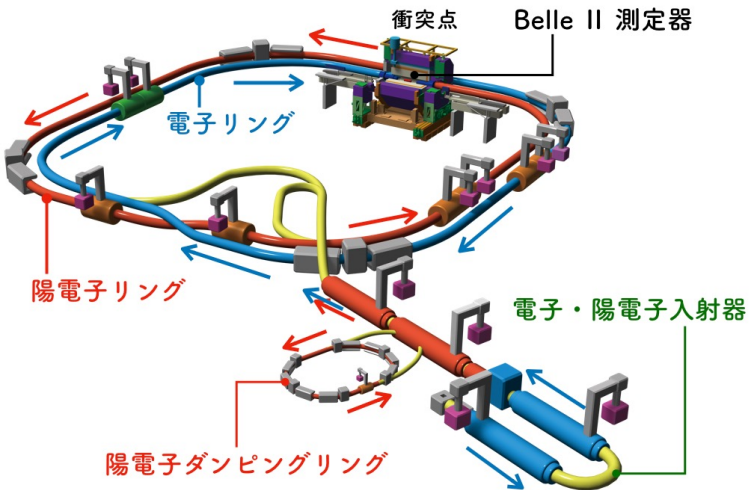
お品書き

- Belle II実験の概要
- Belle II検出器
- Belle II解析 (流れを少し紹介)

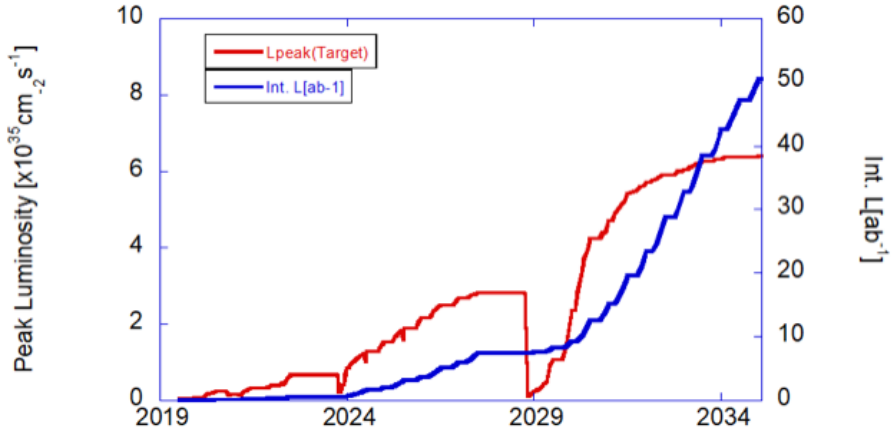
(まず最初に) Belle II実験とは？

茨城県つくば市で行われているBファクトリー実験

- 2018年からスタート
- 電子(7 GeV)と陽電子(4 GeV)を衝突
- 重心系エネルギー($\sqrt{s} = 10.58$ GeV)
- 衝突点周りに粒子検出器を設置
- 目標ルミノシティ: 6.5×10^{35} cm^{-2} s^{-1}
  - 2022年6月に、4.8×10^{34} cm^{-2} s^{-1}
- 積分ルミノシティ: 50 ab^{-1}



標準理論を超える物理現象の探索



標準模型理論

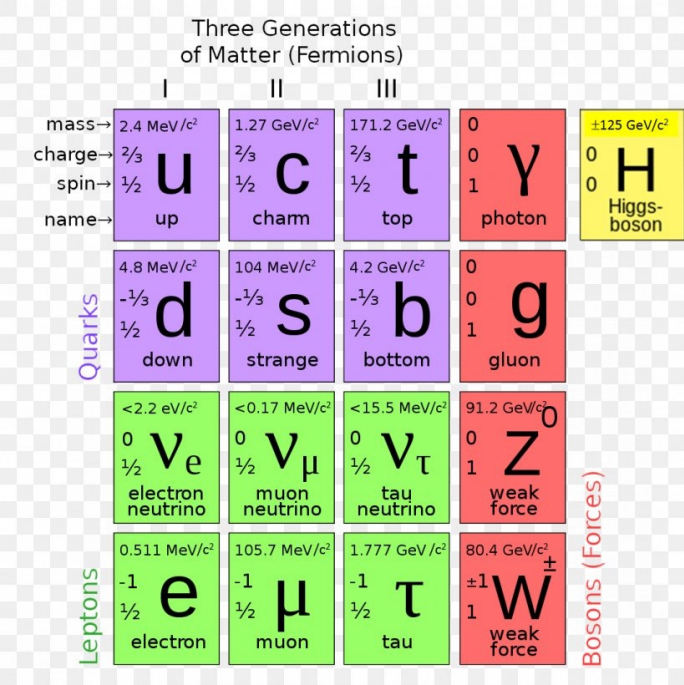
あらゆる実験結果を高い精度で説明可能！

標準模型粒子

- 物質を構成する粒子フェルミオン
- 力を伝搬するゲージ粒子
- 質量の起源: ヒッグス粒子

→ **<u>標準模型で予言された粒子: 発見済</u>**

- 終わり？ → No. まだ満足してない！



未解決の謎が(多々)ある

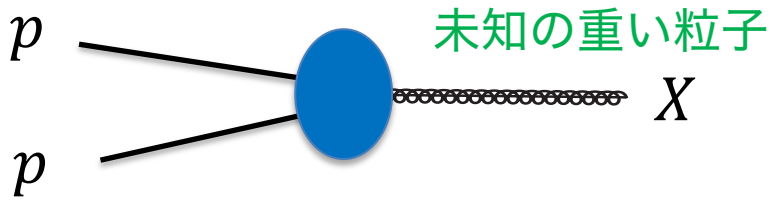
- 例えば、 暗黒物質の正体は？ 現在物質優勢宇宙なのはなぜ？

→ **<u>標準理論: より高尚な理論 (新物理) の近似であるはず</u>**

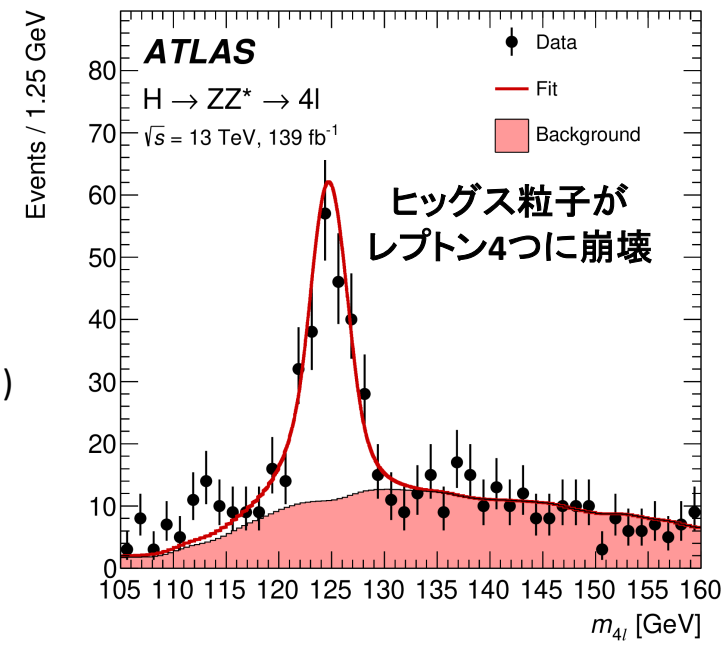
高いエネルギースケールの物理現象を見て、 標準理論が破綻するか調べる

より高いエネルギースケールへ

シンプルに高エネルギーで衝突させるのが王道



arXiv:2207.00320



<u>新粒子を直接生成する: 直接探索実験</u>

- 質量分布にピーク (終状態粒子が全部測定できるなら)
- 誰がみても納得
- 新粒子が重すぎると生成不可

→ LHC-ATLAS, CMS実験がこのアプローチ

直接生成しなくても高エネルギースケールにアクセスはできる → 間接探索

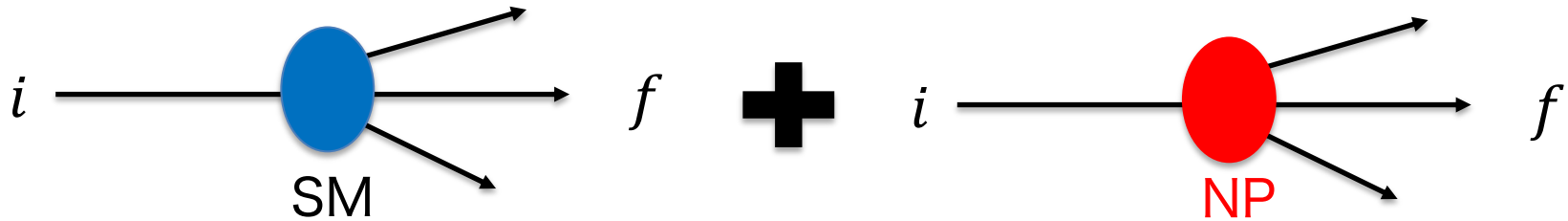
ATLAS/CMSでも間接探索可能

間接探索実験

既知粒子の崩壊から新粒子の量子効果による寄与を測定

始状態iから終状態fへの崩壊幅

- $\Gamma(i \to f) = |A(i \to f)|^2 = |A_{\mathrm{SM}}(i \to f) + A_{\mathrm{NP}}(i \to f)|^2$



同じ始状態 → 終状態のダイヤグラムは全て寄与する

- 重い新粒子がループ中に寄与するならば、その効果が現れる
- 新物理の寄与はかなり小さい → **大統計データが必要**

50 ab^{-1} → N_{BB}~50×10^{9}個

Belle II実験は、大量のデータを蓄積して
高エネルギースケールの物理を探索している

小休止: Belle II実験

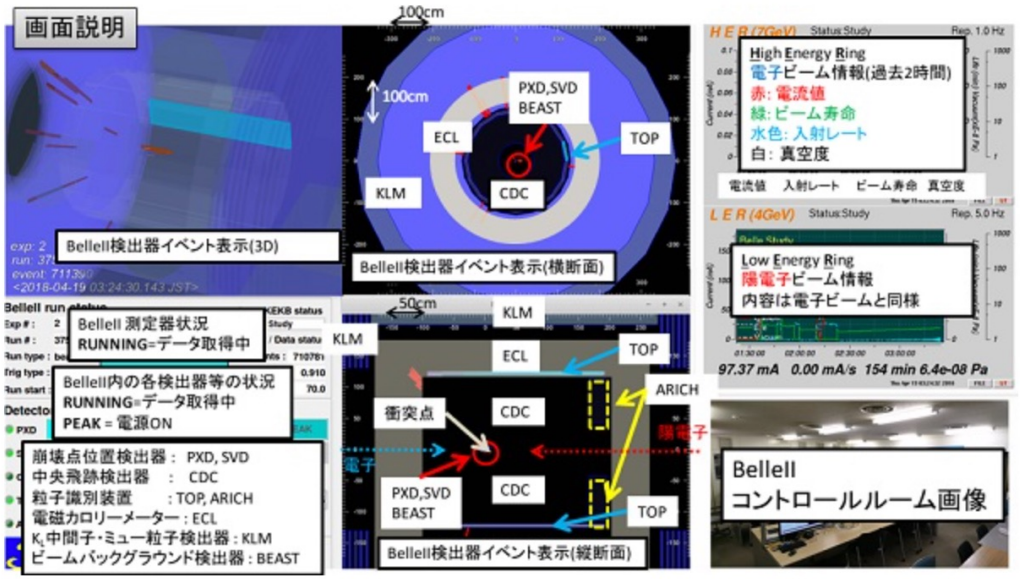
https://live.nicovideo.jp/watch/lv312372695

【世界最強加速器SuperKEKB】電子と陽電子の初衝突の瞬間を見守ろう KEK×niconico 4月20日～

公式 2018/4/20(金) 12:00開始 (80時間)

一般(その他) カテゴリ　ニコニコニュース　報道　KEK　高エネルギー加速器研究機構　Belle2　SuperKEKB　ファースト・コリジョン　科学　科学技術週間　ニコニコサイエンス

「画面の解説」



2018年4月20日にBelle II実験、初衝突の瞬間が放送:
一般の人の反応は？

ニコニコ生放送 コメント

Belle II実験のイメージ

「ソシャゲで大量課金してガチャでスーパーレアを引く」

「ガチャを引く速度が50倍になる。廃課金やんけ」

「CERNに勝って欲しい」

光検出器に対してのコメント(HAPD)

全体的にポジティブなコメントが多かった

Belle II実験で行っている物理

Bの物理

詳細は古賀さん、佐藤さんのトークで

- ユニタリティ三角形の精密測定
- CP violation
- Lepton Flavor Universality: $B \to D^* \tau \nu, b \to s \ell \ell$

τの物理

最後の方にちょっと紹介します

- τのLepTon Flavor Violation: $\tau \to \mu\gamma, \mu\mu\mu, \ldots$
- τ Electric Dipole Moment
- τのLepton Flavor Universality

ダークセクターの物理

詳細は伊藤さんのトークで

- 暗黒物質直接探索, $Z' \to$ inv.

ハドロン物理

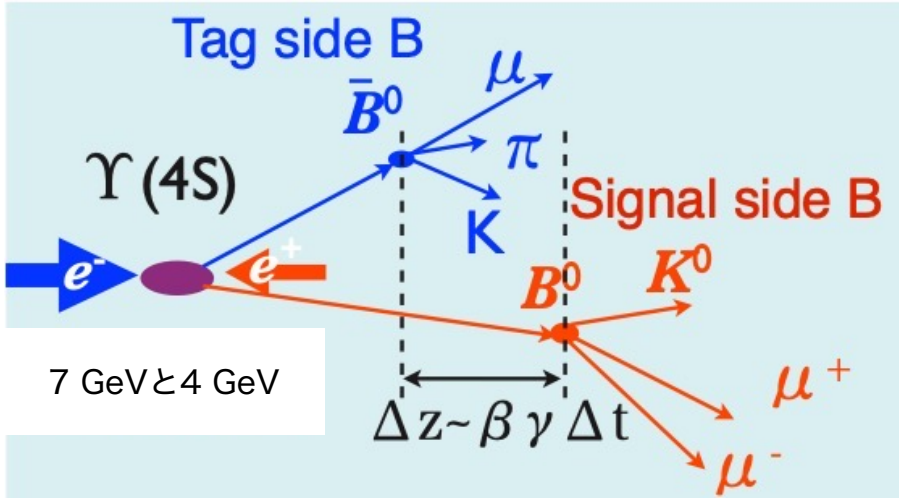
詳細は谷田さんのトークで

あくまで一例です。大事なのは幅広く探索すること

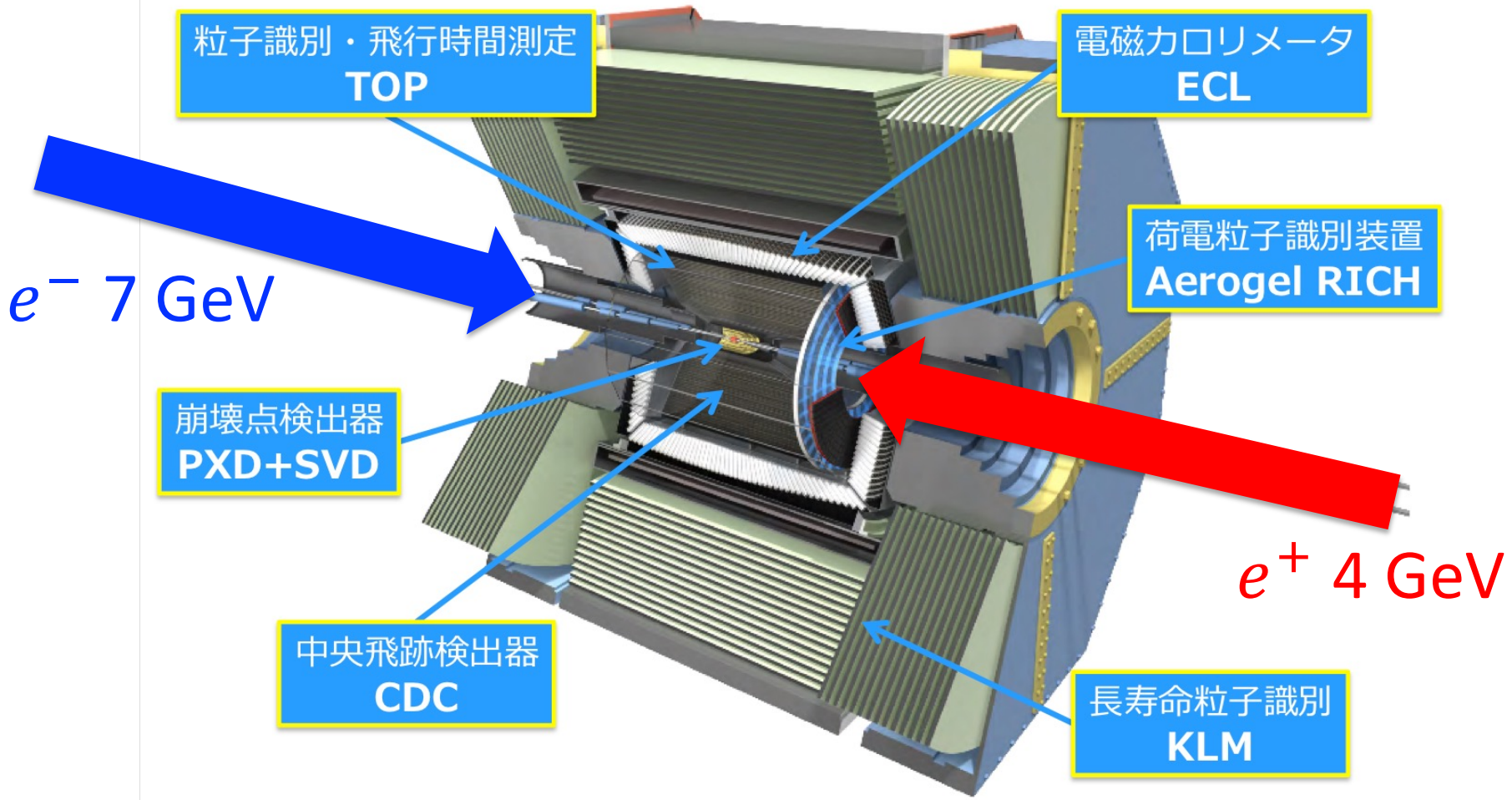
Belle II検出器: コンセプト

B, τ, ダークセクターなどの物理ができるように

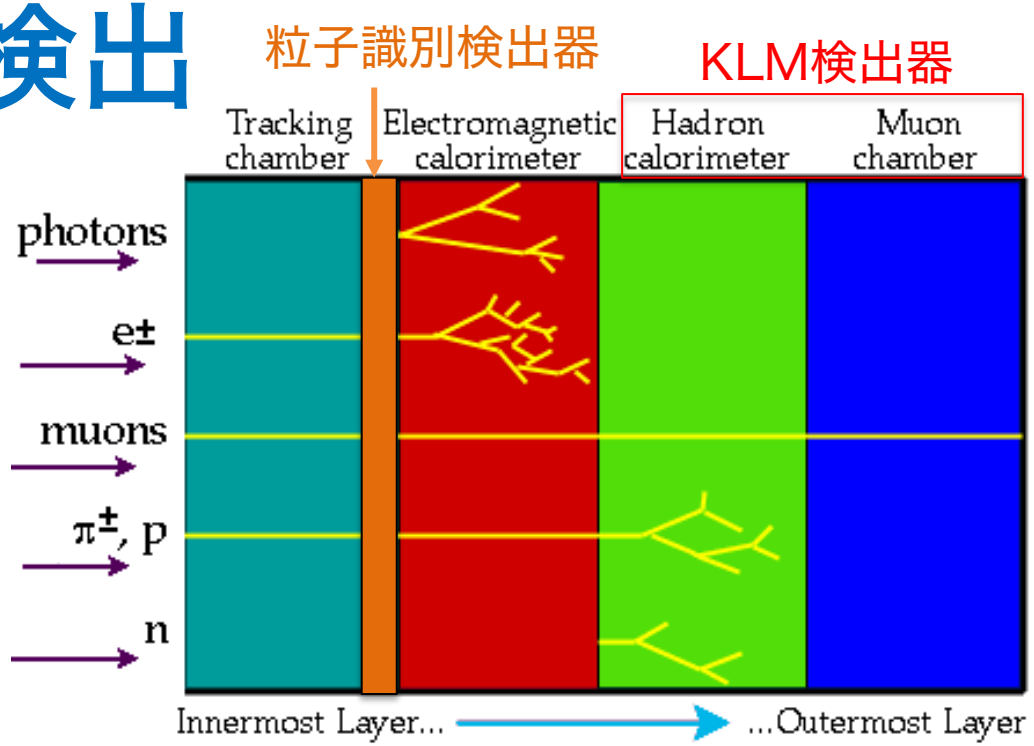
- B中間子を再構成: Bの崩壊粒子を全て検出
  - $e, \mu, \gamma, \pi, K, p$の粒子識別
  - 運動量 O(10) MeV/cから5~6 GeV/c, 幅広い領域 (角度)をカバー
- Bの寿命測定: Bの崩壊点を~100 umで測定
  - 非対称エネルギー衝突によりB中間子対が飛ぶ
  - B中間子対の崩壊点の差から寿命依存性が測定可
- 高ルミノシティ
  - 高イベントレートに
  - 高放射線耐性



Belle II検出器


粒子識別・飛行時間測定
TOP
電磁カロリメータ
ECL
荷電粒子識別装置
Aerogel RICH
e^- 7 GeV
崩壊点検出器
PXD+SVD
e^+ 4 GeV
中央飛跡検出器
CDC
長寿命粒子識別
KLM

粒子の検出

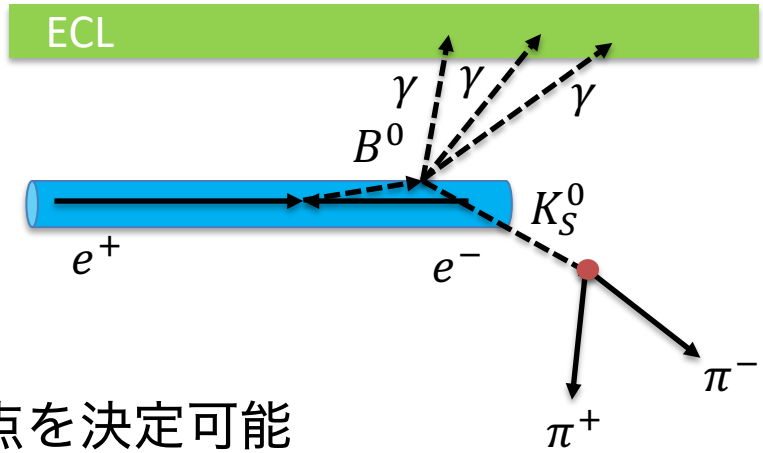


※ Belle IIはハドロンカロリメータない

- ソレノイド磁場により、荷電粒子の飛跡は曲げられる
  - その曲がり具合から、粒子の運動量測定, p_{T}測定
- Belle IIでは、$K^{\pm}$, $\pi^{\pm}$の識別のために、専用検出器を設置
- 電子や光子のエネルギーは、ECLで測定
- K_{L}やμはKLM検出器で同定

崩壊点検出器

B中間子の崩壊位置を検出したい



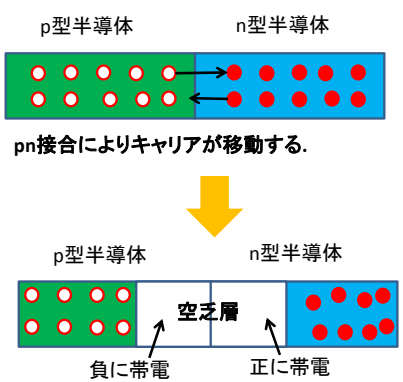
例. $B^0 \to K^*(\to K_S^0\pi^0)\gamma$

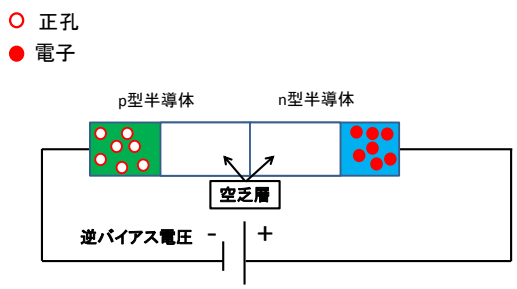
- K_S^0の崩壊点を測定 + 衝突点情報でBの崩壊点を決定可能

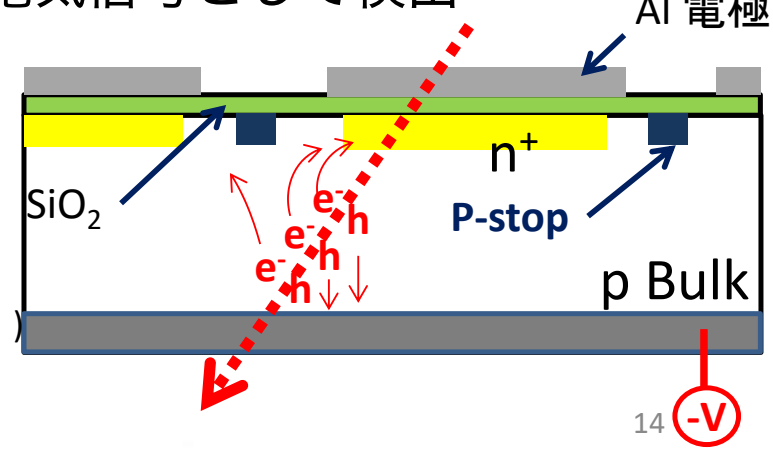
→ **<u>半導体検出器を利用して、高精度な位置測定!</u>**

半導体検出器

- p型とn型半導体を接続したものに、逆バイアスをかけて空乏層を作る
- 荷電粒子が空乏層を通過 → 電子/正孔ペア生成 (シリコン: 3.6 eV/pair)
- 電子/正孔がn/p型半導体に引き寄せられて電気信号として検出

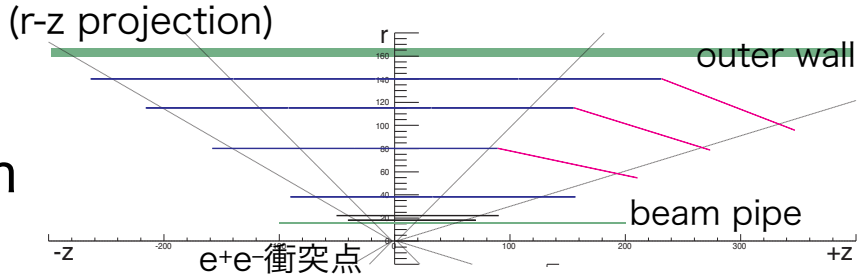






Belle II: PXD, SVD

Belle II崩壊点検出器は６層で構成:



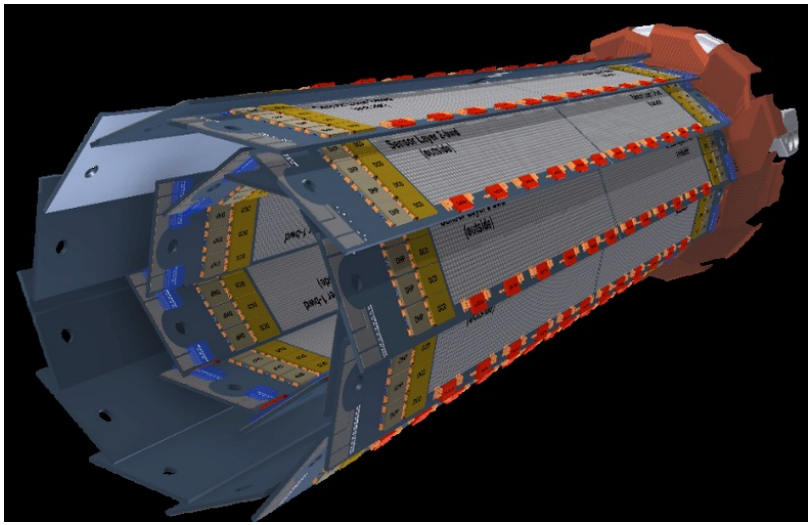
- 最内層半径14 mm, 最外層半径140 mm

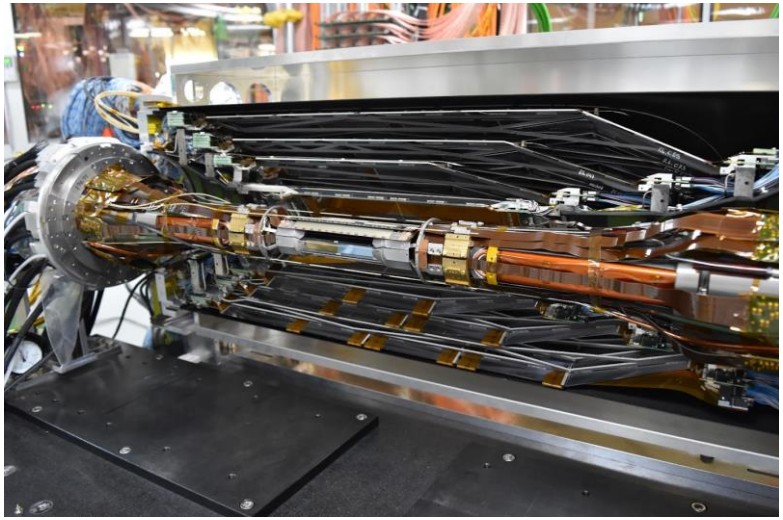
内側2層: DEPFETピクセル検出器 (PXD)

- ピクセルサイズ: (55 – 85) × 50 um^2

外側4層: 両面シリコンストリップ検出器 (SVD)

- ストリップ間隔: 50 - 75 um (r, ϕ), 160-240 um (z)



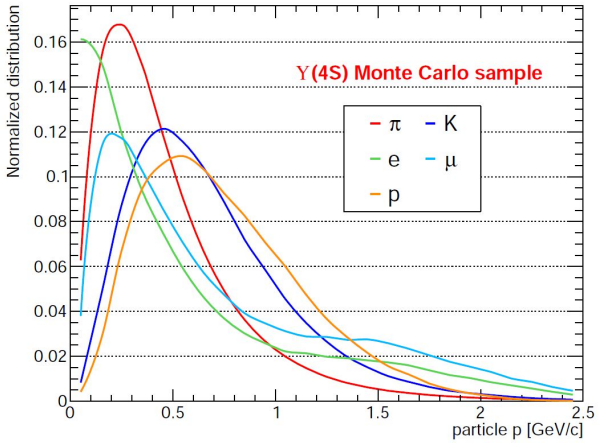


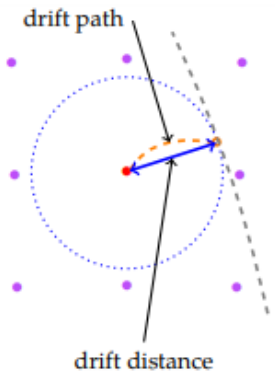
中央飛跡検出器: CDC

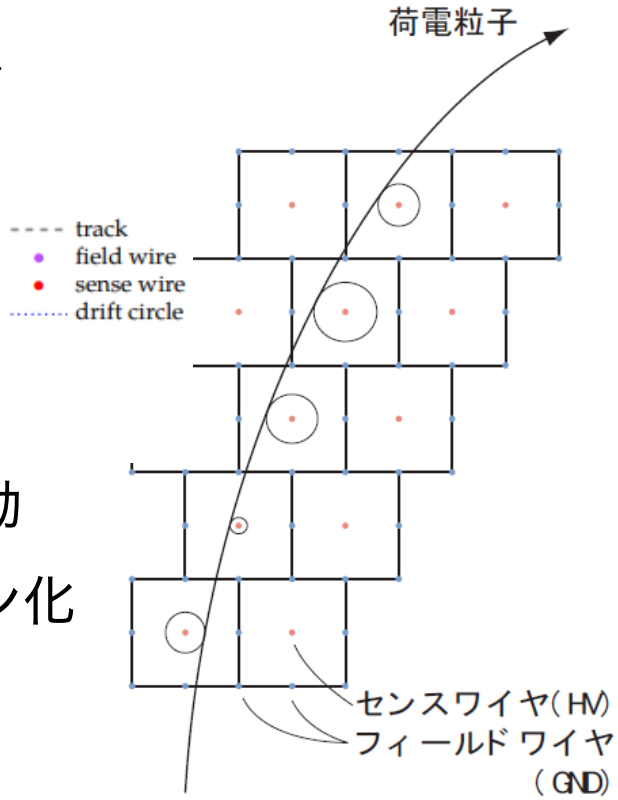
役割は大きく分けて二つ

- 荷電粒子のトラッキング, 運動量測定
- エネルギー損失 (dE/dx)を用いた粒子識別

→ ガス増幅を利用したドリフトチェンバー







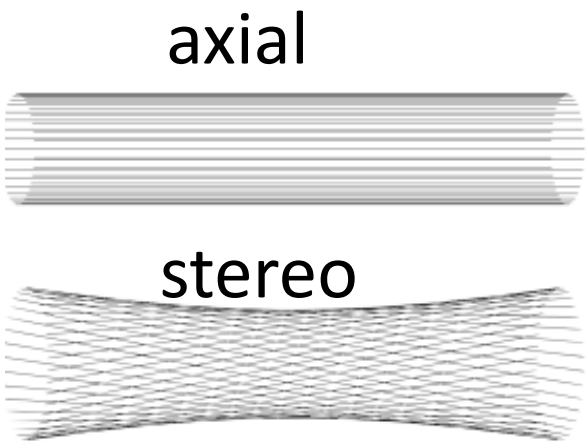
ドリフトチェンバー

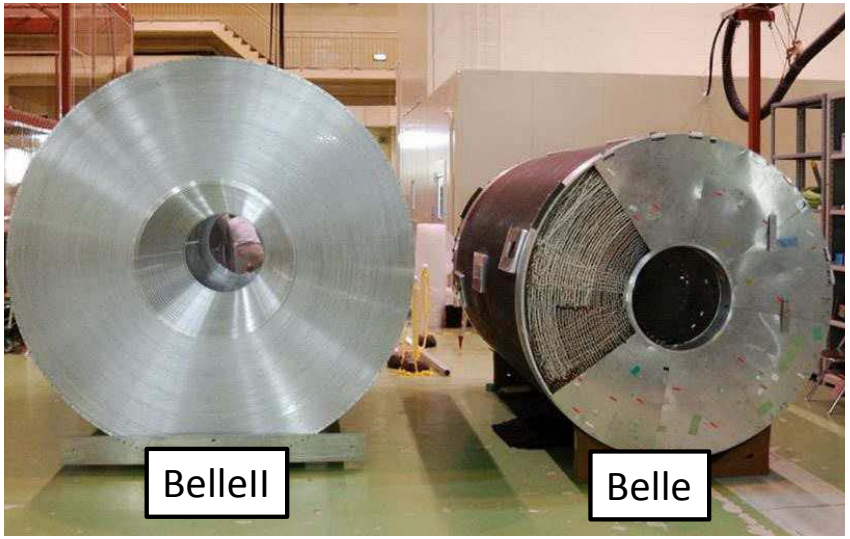
- 荷電粒子がチェンバー内部を通過
- ガス分子をイオン化して電子が生成、陽極へ移動
- 陽極付近でドリフト電子が他のガス分子をイオン化
- ドリフト時間から粒子の位置が測定できる
- 信号の大きさからエネルギー損失量もわかる

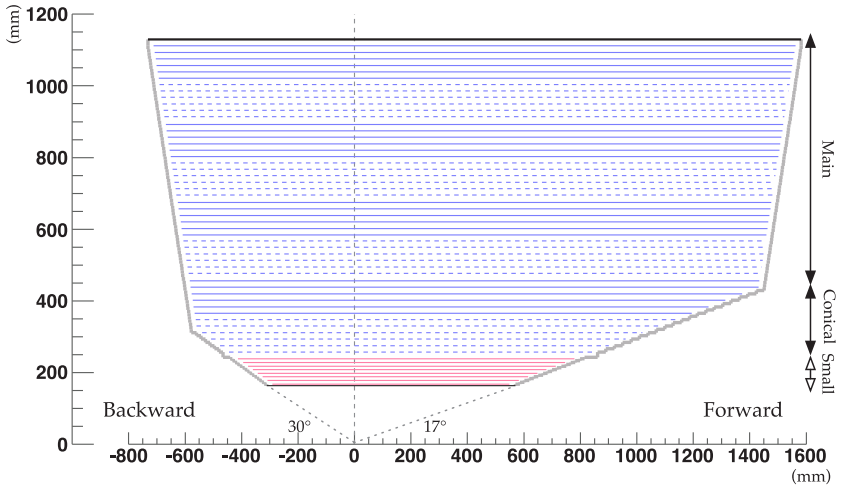
Belle II CDC

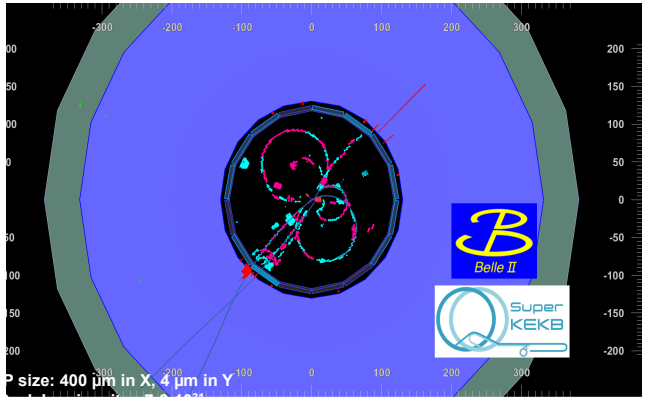
- 低物質量: He + C2H6ガス, アルミワイヤー
- ビーム軸に平行なワイヤーが5層
- 3次元測定用に傾けられたワイヤー4層
- 内層は高密度でワイヤを配置, 外層は半径を大きく

→ Belleより、位置, 運動量測定精度向上



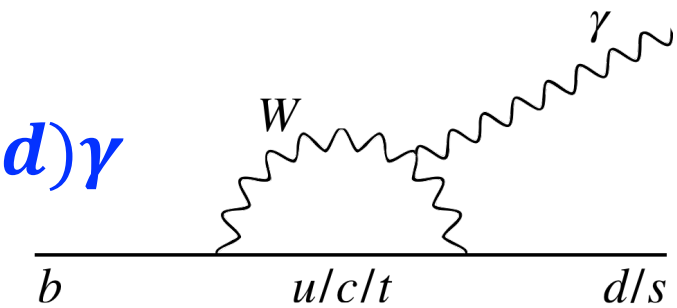






K/π粒子識別

Belle IIで重要な物理解析: $b \to s(d)\gamma$

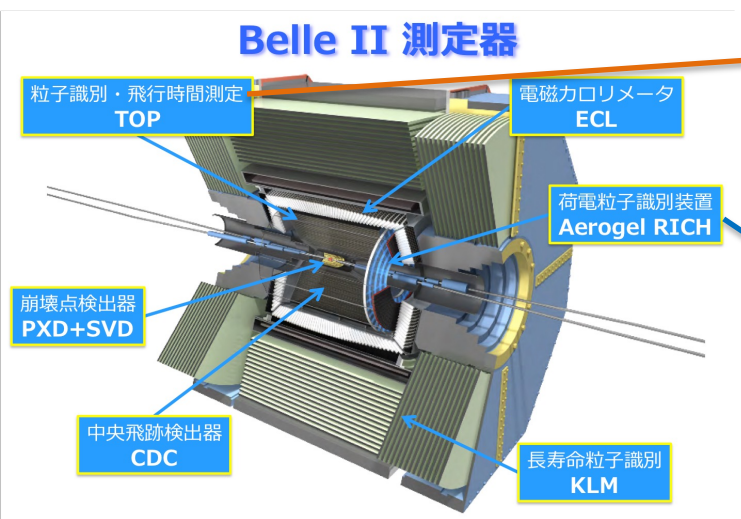


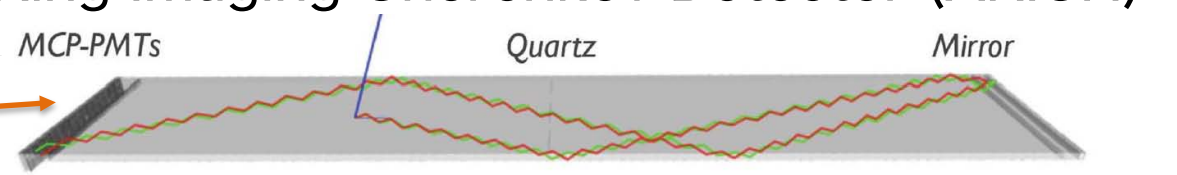
- ループ中に新粒子が回る可能性有 (eg. $H^{\pm}$)

→ <u>高い運動領域 (~ 4 GeV/c)までカバーしたK/π識別が重要</u>

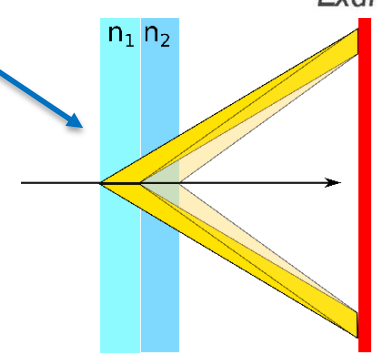
Ring Imaging Cherenkov detector採用

- バレル部: Time of Propagation (TOP)検出器
  - 時間情報を用いてチェレンコフ光のリングイメージ測定
- エンドキャップ: Aerogel Ring Imaging Cherenkov Detector (ARICH)





Example of Cherenkov-photon paths for 2 GeV/c $\pi^{\pm}$ and $K^{\pm}$.

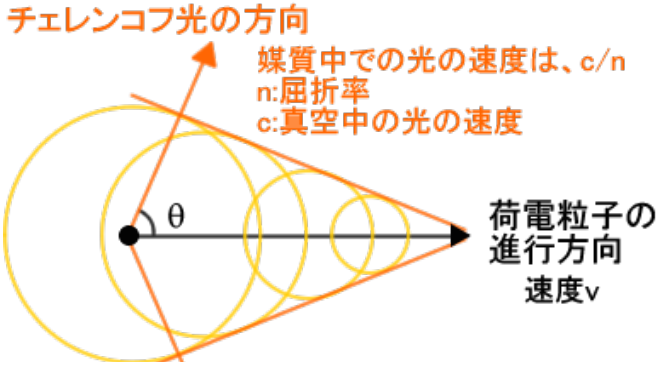


チェレンコフ光を利用した識別

チェレンコフ光放射

- 荷電粒子が水や光などの物質中を、その物質中での光の速さ (c/n)より速く進む場合、衝撃波としてチェレンコフ光を放射する
- 放射したチェレンコフ光の角度 θ_Cは
  - $cos\theta_c = \frac{1}{\beta n} = \frac{\sqrt{(m/p)^2+1}}{n}$

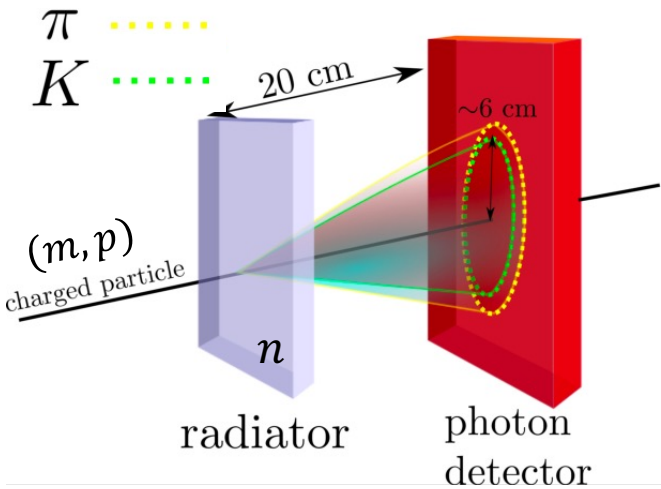
→ **粒子の質量, 運動量, 屈折率で角度は決定**



Ring Imaging Cherenkov counter

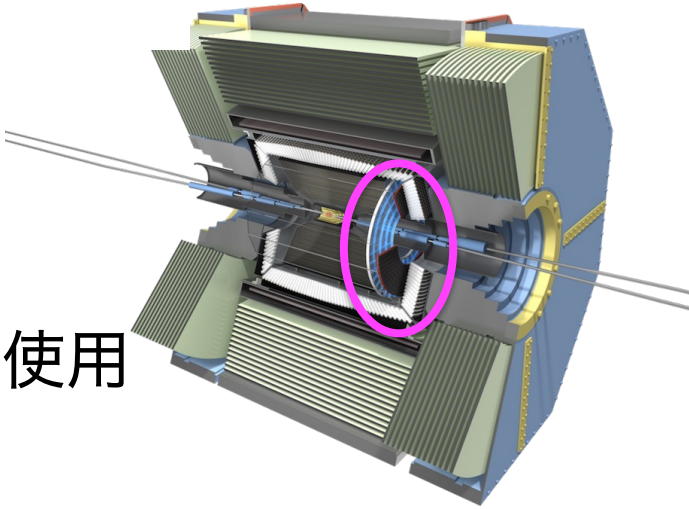
- θ_Cを測定し、飛跡検出器で得られた運動量から粒子の質量を算出

→ 粒子の種類がわかる!



Aerogel RICH detector

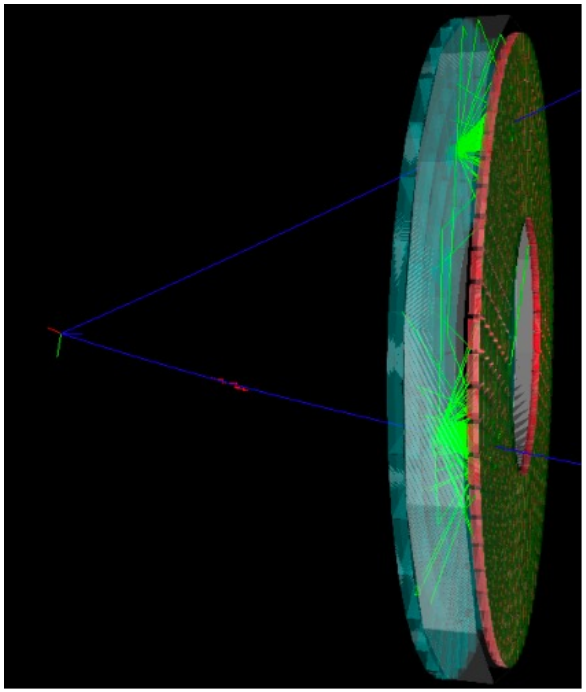
エンドキャップ部にある粒子識別検出器

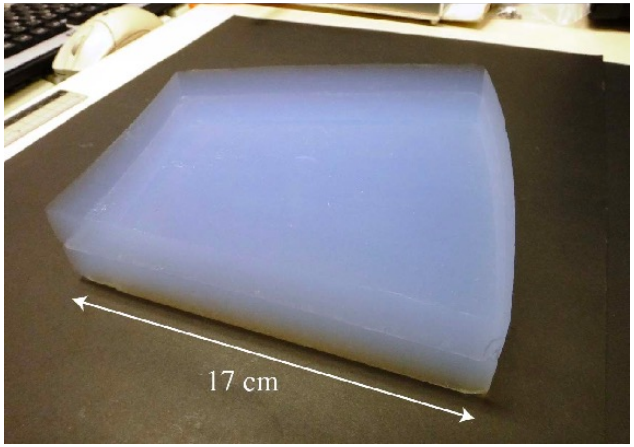


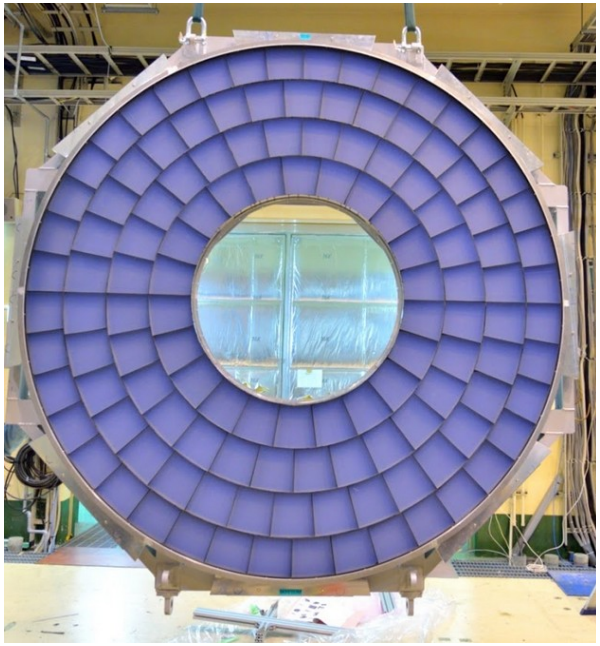
- 幅広い運動量領域 (- 4.0 GeV/c)でK/π識別
- 制限された領域で幅広いエリアのカバーが必要

エアロジェルをチェレンコフ輻射体として使用

- そのすぐ正面に光検出器を配置 → 近接型RICH



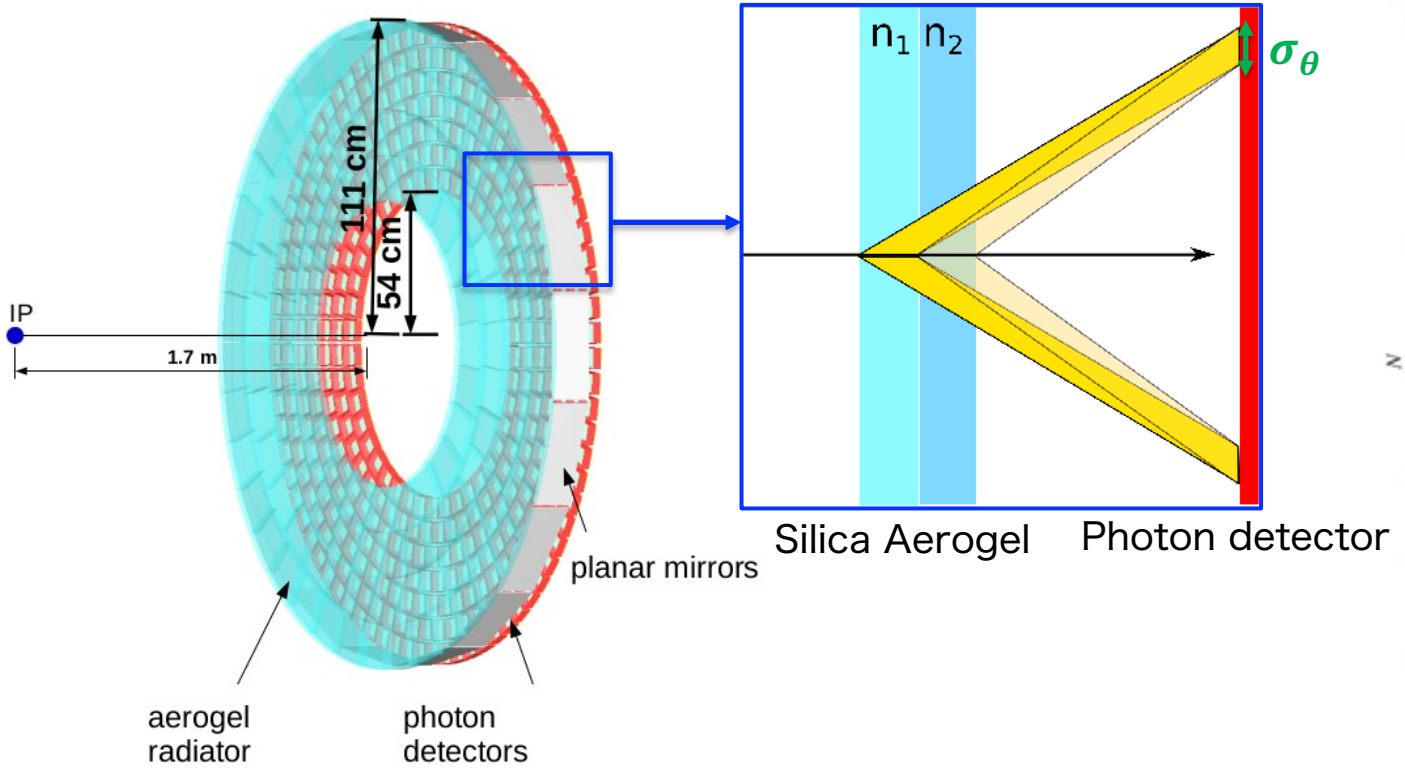


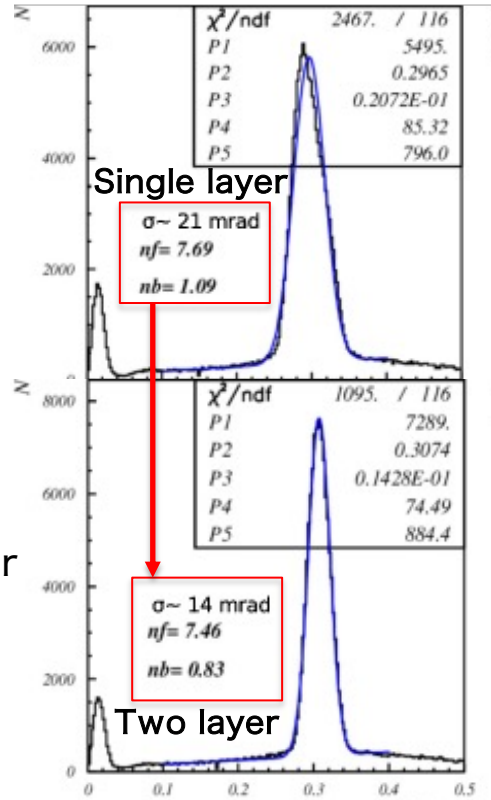


Aerogel radiator

エアロジェルの屈折率を調整し、光検出器面で焦点を結ぶ

- 2層のエアロジェルで構成: 屈折率 $n_1 = 1.045, n_2 = 1.055$



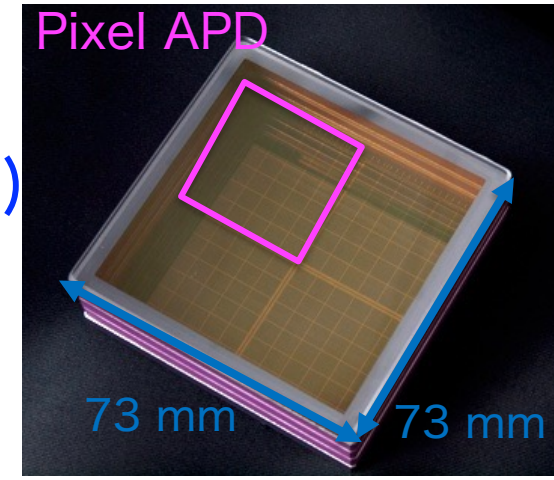


光検出器

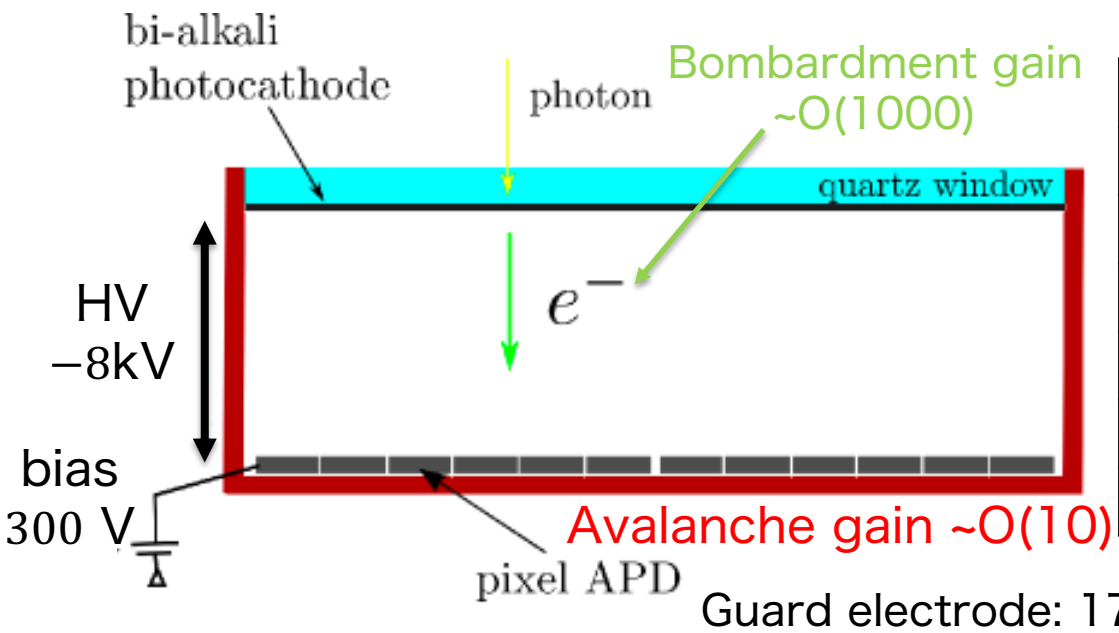
Hybrid Avalanche Photo-Detector(HAPD)

- 高放射線耐性 (10^{11} neutrons/cm^2/year)
- 磁場中で安定動作 + 良い光子検出効率 + 位置分解能

→ 浜松ホトニクスと共同で開発



Developed by Hamamatsu Photonics

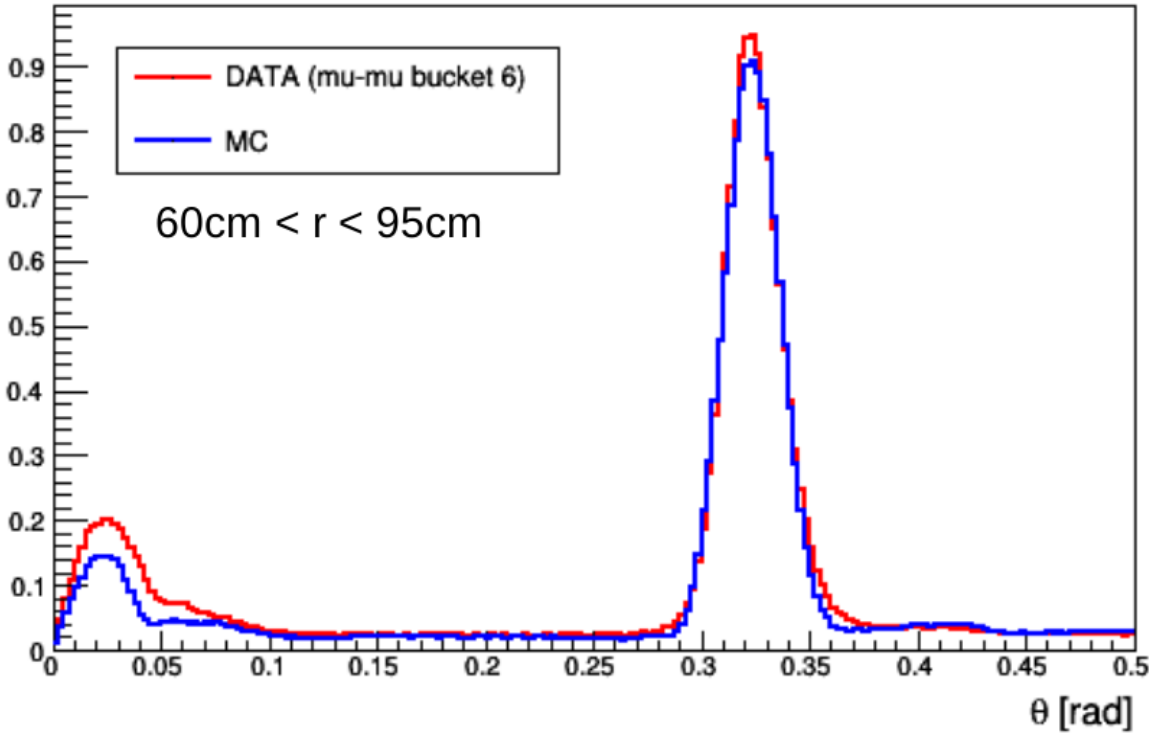


	HAPD
Size	73×73×28 mm^3
# of channels	12×12 = 144 ch
Channel size	4.9×4.9 mm^2
Effective area	65%
Peak QE	~30%
Total Gain	~70000

420個のHAPDを使用している

Cherenkov angle distribution

$e^+e^- \to \mu^+\mu^-$ events, 2019 data



DATA

$$N_{sig} = 11.38/\text{track}$$

$$\sigma_c = 12.7 \text{ mrad}$$

MC

$$N_{sig} = 11.27/\text{track}$$

$$\sigma_c = 12.75 \text{ mrad}$$

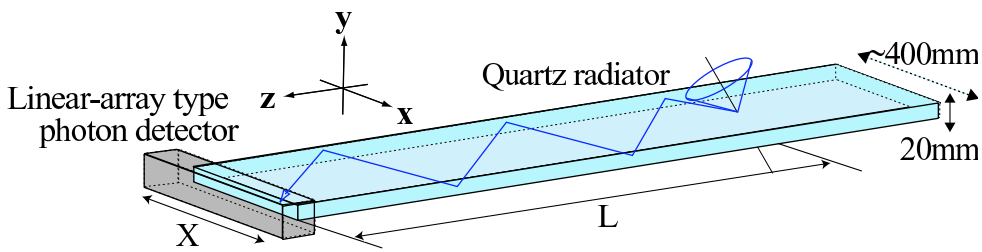
- <u>Good agreement between data and MC simulation</u>

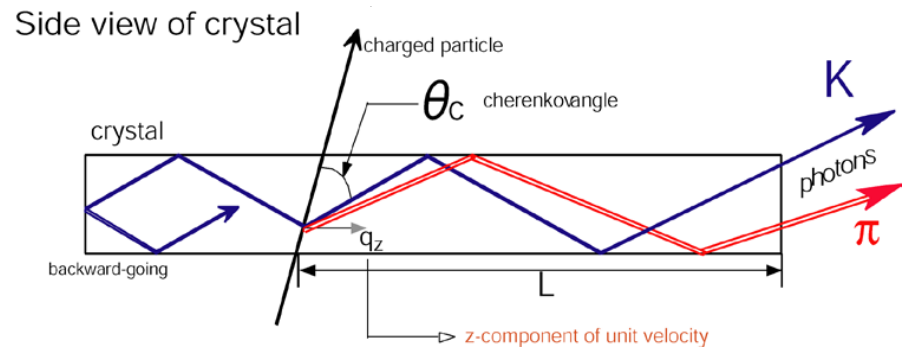
バレル部: TOPカウンター

チェレンコフ光の到着位置 + 時間から粒子識別

- 石英輻射体で発生したチェレンコフ光を光検出器で観測
- 同じ運動量の粒子に対して異なる開き角

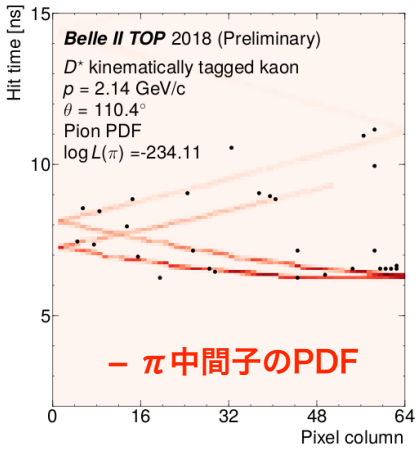
→ 異なる伝搬距離 (伝搬時間, TOP) + 衝突点からの飛行時間 (TOF)

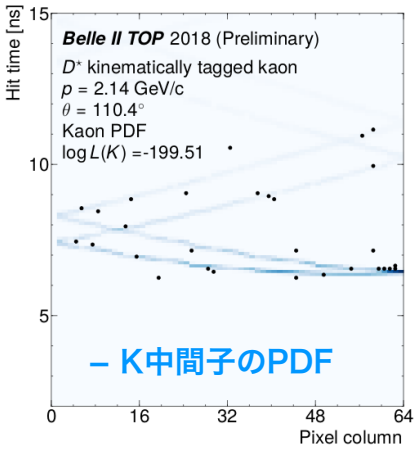


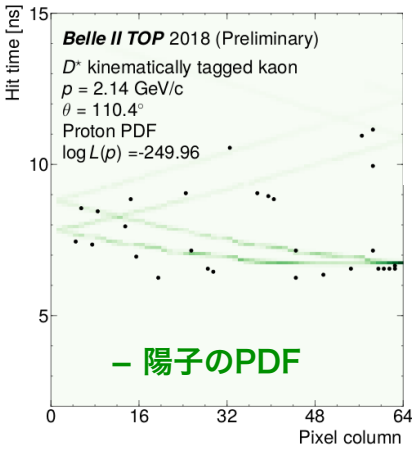


時間分解能 σ~40 ps

通過粒子はKらしい







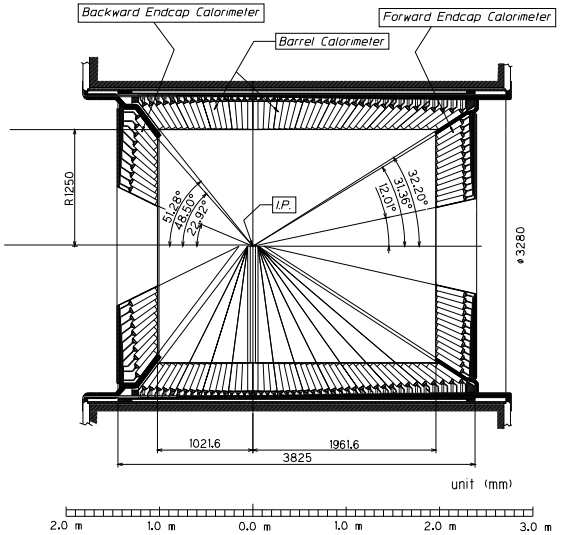
電磁カロリメータ ECL

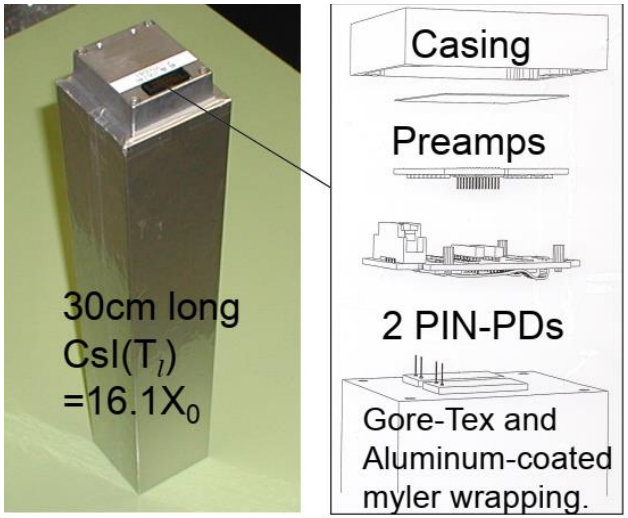
1 GeV以下のエネルギー領域にも高分解能を → 全吸収型採用

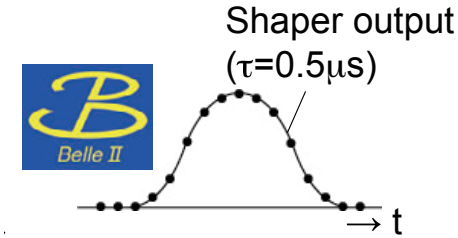
- **8736本のCsI (Tl)シンチレータ結晶で構成**
  - 電子・光子は結晶中で電磁シャワーをおこす → シンチレータ光
  - 光検出器、PIN-PD(フォトダイオード)でエネルギー測定

→ エネルギー分解能は、~1.3%/$\sqrt{E}$

- **波形をサンプリングして読みだす**
  - FPGAで波高とタイミングを算出 → パイルアップ削減







2MHz, 18bits digitizer

↓

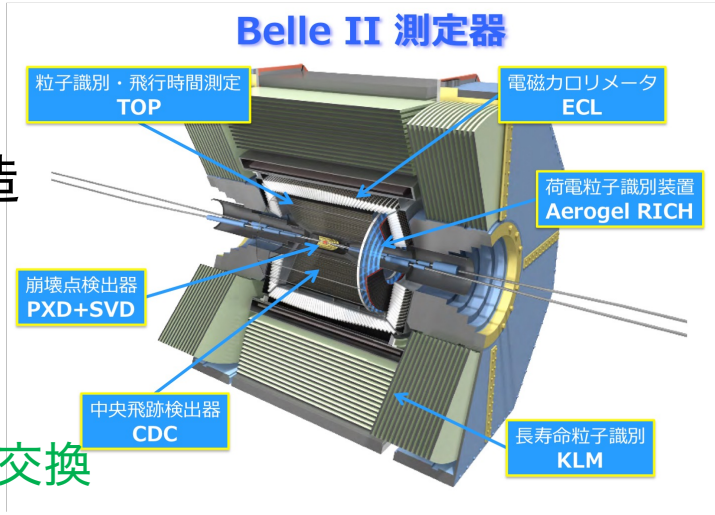
waveform fit to get energy and timing (i.e. Digital Signal Processing) by FPGA

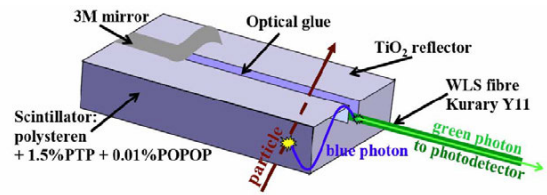
K_L, ミューオン検出器: KLM

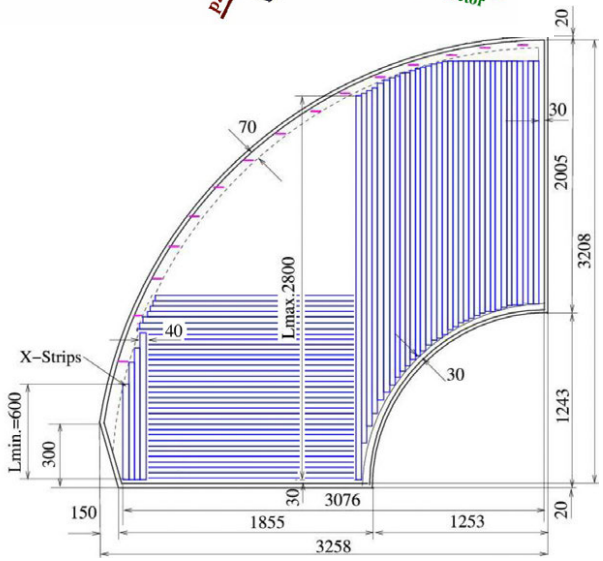
Belle II検出器の最外層: 大面積をカバー

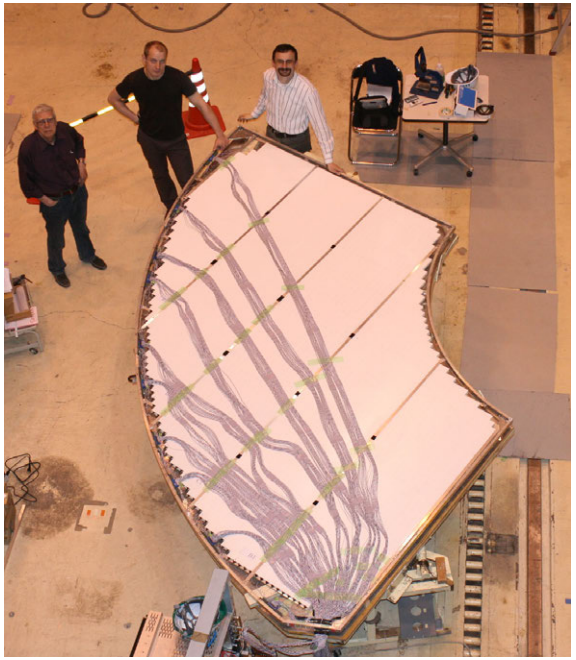
- 鉄 + シンチレータ or RPCのサンドイッチ構造
  - 貫通力の高いミューオンの通過を測定
  - 鉄とK_Lとの反応を検出

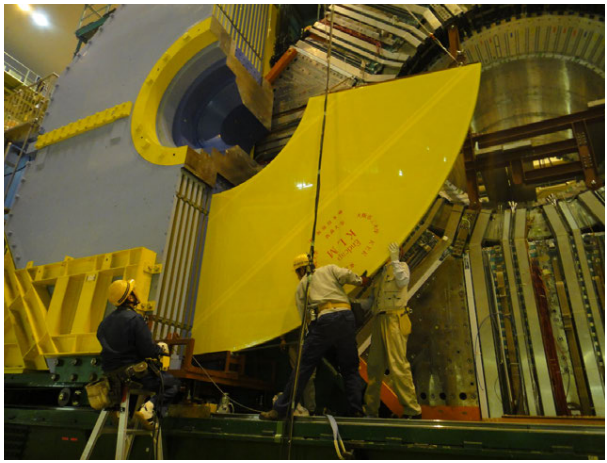
※ Belle IIでエンドキャップとバレルの一部をシンチへ交換









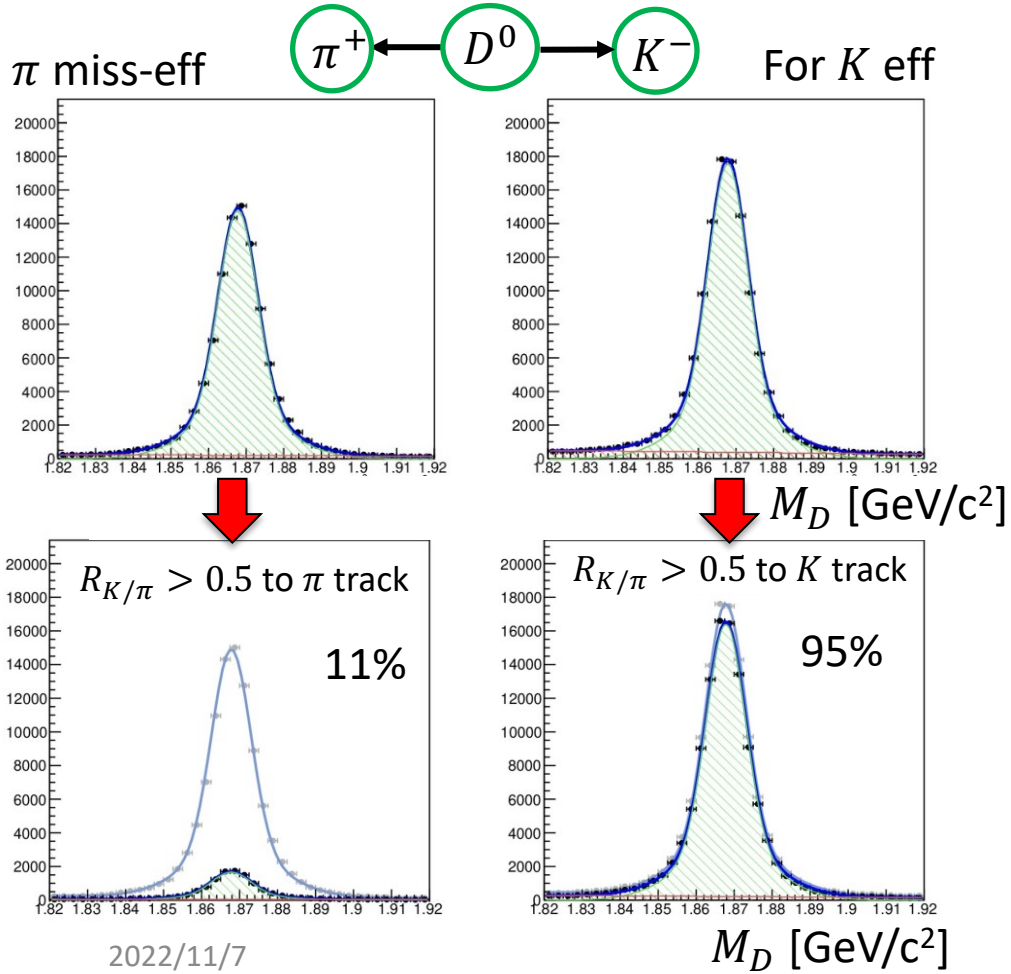


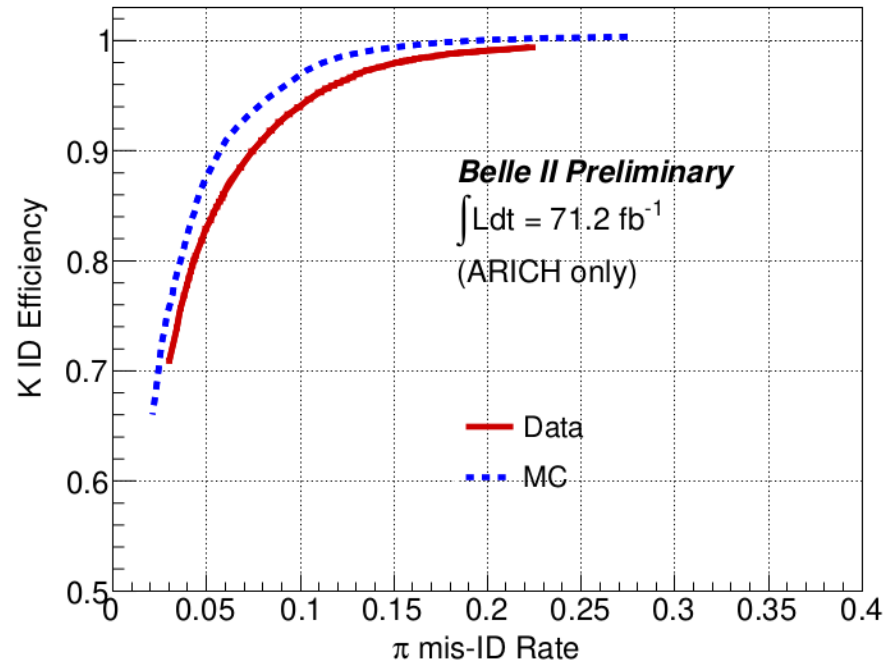
x方向とy方向にシンチレータストリップを詰めて2次元情報を得る

検出器のパフォーマンス

良い物理結果を出すためには、良いパフォーマンスが大事!

- K/π識別: D^*崩壊からのK,πトラックを利用: eg. $D^{*+} \to D^0\pi^+_{slow}$





識別性能

- K efficiency: ~95%
- π mis-efficiency: ~10%

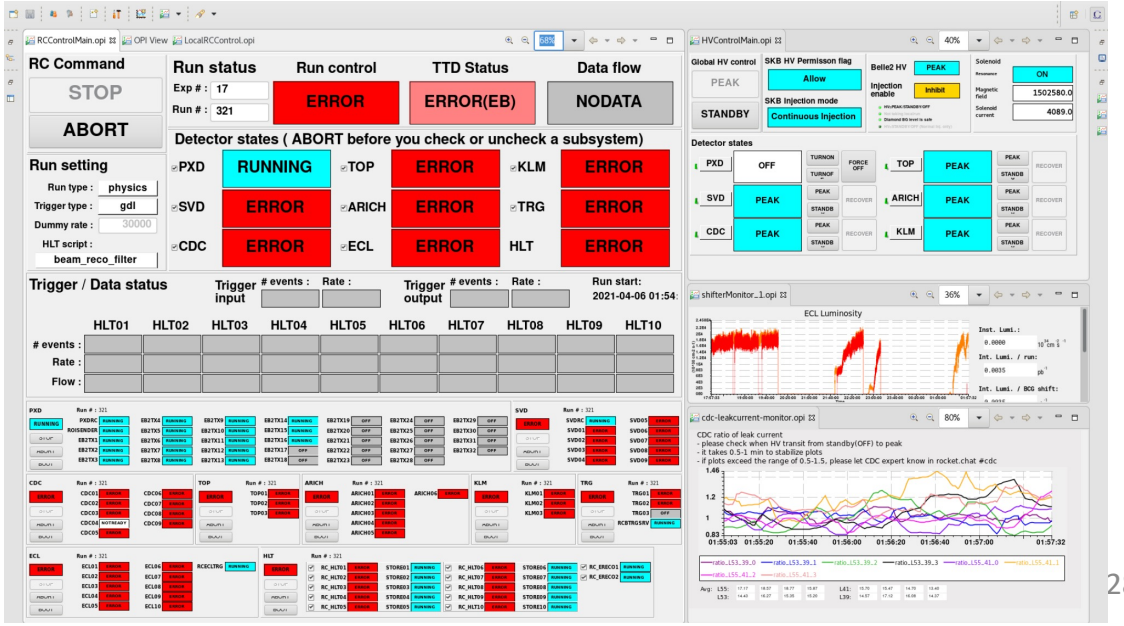
Belle II実験の運転体制

実験は24時間動いている

- 実験シフト: 8時間交代, ローカルシフト1名 + リモートシフト2名
  - コロナによりKEKに滞在できる人が激減 (特に外国人の数が激減)
- 検出器毎のエキスパートシフト (各1-2名)
  - 検出器のエラーが起きたら、即対応 (深夜の場合電話がなる)

→ 午前9:00から加速器の人も含めた打ち合わせ、10:00からBelle IIで打ち合わせ, 日中は物理ランや加速器調整, 深夜は物理ラン.. まぁまぁ忙しい

(今日は触れてませんが)読み出しシステムやモニタリングシステムの自動化がかなり進んでおり、負担は大分減った



Belle II実験でどうやって物理結果出しているのか？

Bでなくτで簡単に..

τ Lepton Flavor Violation

Belle IIでタウ解析やるなら最初にみるトピック

- レプトンフレーバ保存則
  - 例1. $\tau^- \to \nu_\tau \mu^- \bar{\nu}_\mu$:
    - 始状態: タウフレーバ数: +1
    - 終状態: ミューオンフレーバ数: 1 – 1 = 0, タウフレーバ数: +1
  - 例2. $\tau^+ \to \bar{\nu}_\tau e^+ \nu_e$:
    - 始状態: タウフレーバ数: -1
    - 終状態: 電子フレーバ数: -1 + 1 = 0, タウフレーバ数: -1

→ 反応前後でレプトンフレーバ数は一致する

標準模型:

- レプトンフレーバ保存則は成立。しかし、それが破れる場合を考えてみる

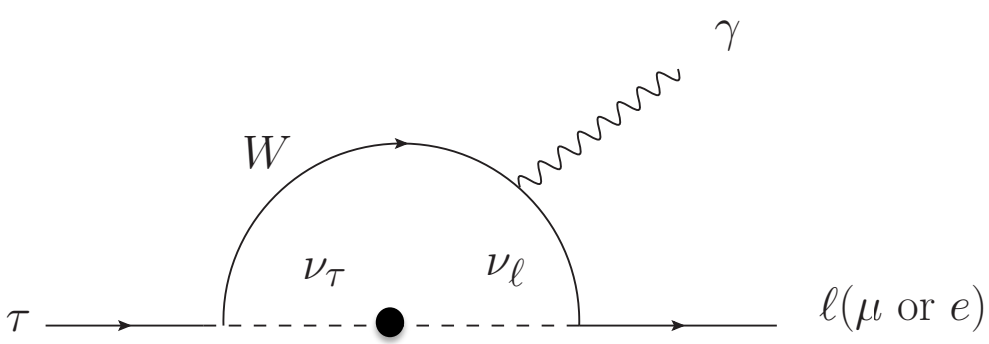
Belle IIでの王道: $\tau \to \ell\gamma$解析

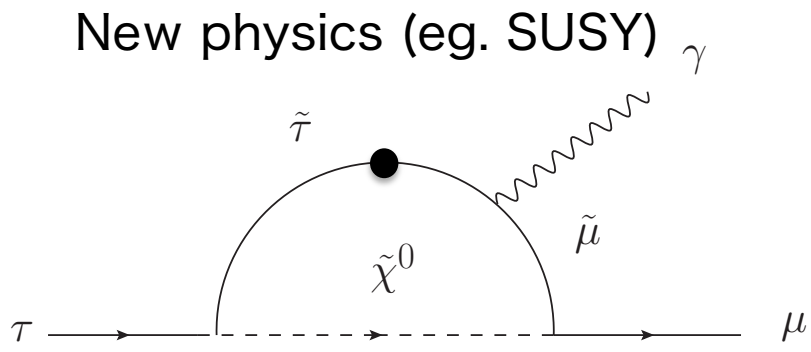
$\tau \to \ell\gamma$: τLFVの中で最もシンプルな過程

→ 新物理への感度が高い

- 標準模型 + ニュートリノ振動では、$\mathcal{B}(\tau \to \mu\gamma) < 10^{-40}$
  - **<u>観測可能な大きさではない</u>**
- SUSYなどの新物理モデルが存在した場合

→ ループ中に新粒子が絡む: 崩壊分岐比が増加？

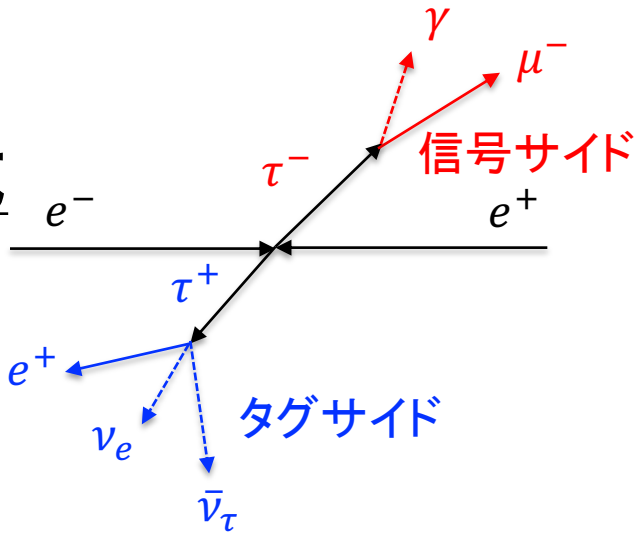




LFVの発見 → 新物理の発見: シンプル

Belle II τLFV解析手法

タウ粒子はペア($e^+e^- \to \tau^+\tau^-$)で生成

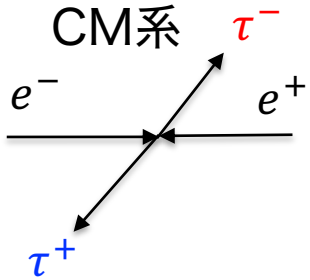


- 信号サイド、タグサイドのタウを定義
  - 信号サイド: LFV崩壊
  - タグサイド: 既知なタウ崩壊 (例: $\tau \to e\nu\nu, \pi\nu$)

信号サイドタウ($\tau \to \mu\gamma$)はニュートリノを含まない

- **ミューオンと光子でタウを再構成可能**: $m_{\mathrm{inv}} \sim m_\tau$
- 重心系で$\tau^+\tau^-$生成はback-to-back → $\sqrt{s} = 2E_\tau^{\mathrm{CM}}$: $E_\tau^{CM} = \frac{\sqrt{s}}{2}$
  - **ミューオンと光子の重心系エネルギーの合計値が有効**

※ 実際は、$\Delta E = E_\tau^{\mathrm{CM}} - \sqrt{s}/2$を使用 (LFV崩壊 → 0付近)

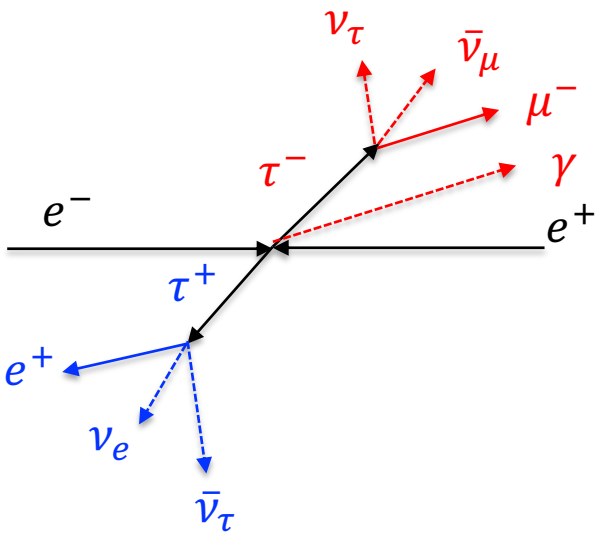


基本的にはこの2変数を使って、LFV崩壊を見つける!

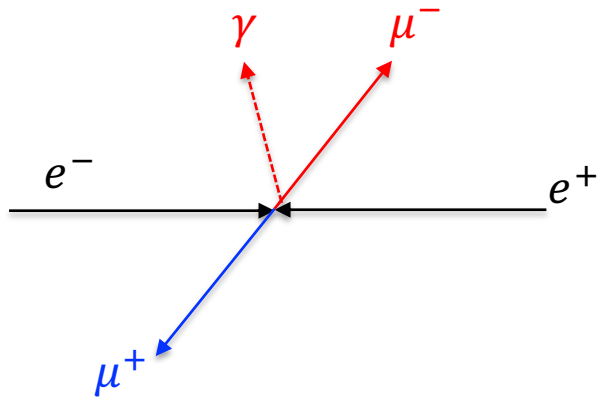
背景事象について

LFV崩壊探索で考慮するべき背景事象

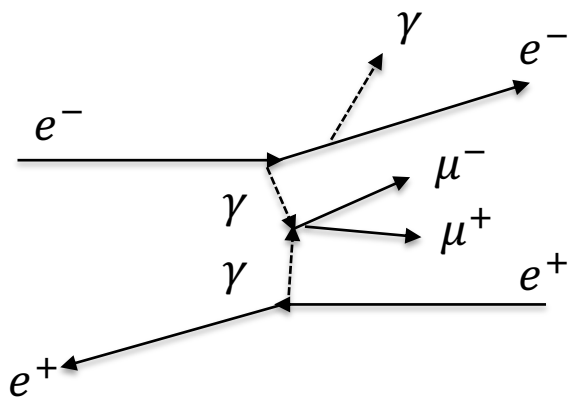
- $\tau \to \mu\gamma$解析の場合



標準模型τ崩壊 + ISR



$ee \to \mu\mu$ + ISR



$ee\mu\mu$ + ISR (two-photon)

- $ee \to \mu\mu\gamma$や$ee \to ee\mu\mu$: $\tau \to \mu\gamma$とKinematics異なる

→ Total energyなどで削減可

- $\tau\tau$: $\tau \to \mu\gamma$とKinematicsが似ている.. 削減難しい (頑張る)

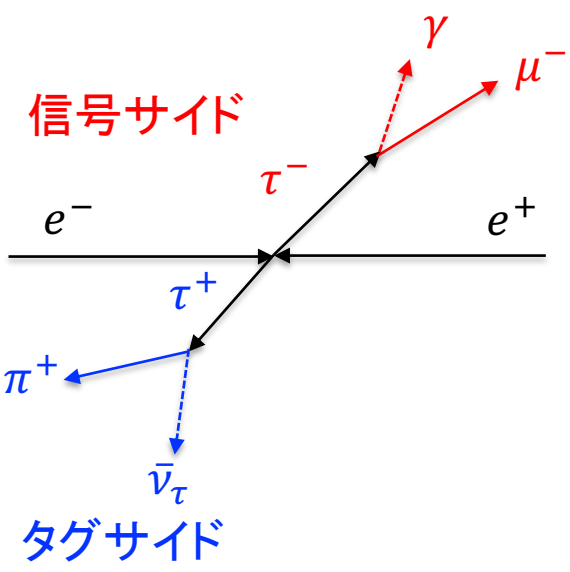
($ee \to q\bar{q}, q = u, d, c, s$は、信号, タグサイドに$\pi^0$が多数存在 → 光子数で落とせる)

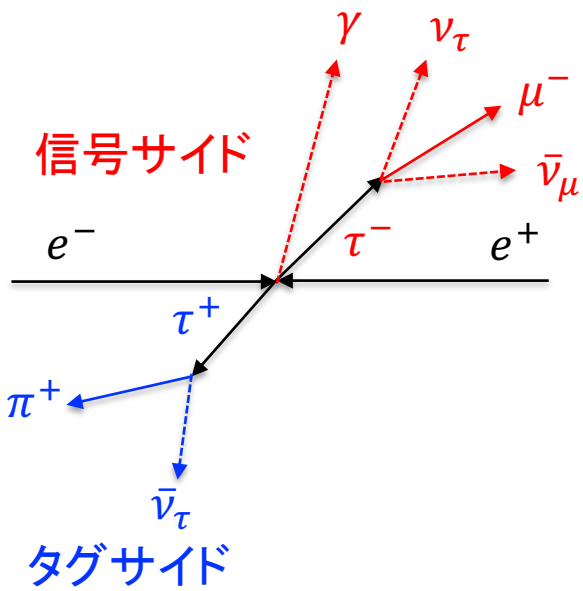
Missing massについて

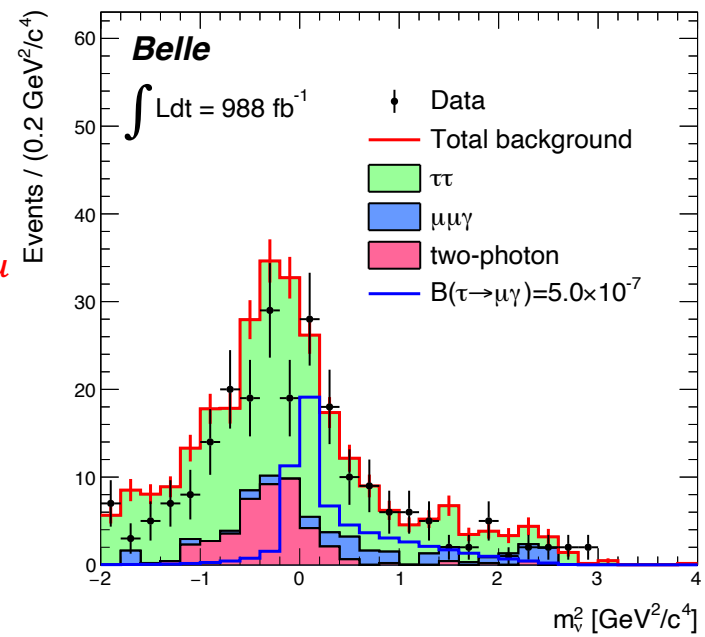
$$m_\nu^2 = \left(E_{\mu\gamma}^{\mathrm{CM}} - E_{\mathrm{tag}}^{\mathrm{CM}}\right)^2 - \left(p_{\mathrm{miss}}^{\mathrm{CM}}\right)^2$$

- 信号事象: タグサイドが$\tau \to \pi\nu$の場合 (ニュートリノが1つ)
  - $E_{\mu\gamma}^{\mathrm{CM}} - E_{\mathrm{tag}}^{\mathrm{CM}} \sim -E_\nu^{\mathrm{CM}}$ かつ $p_{\mathrm{miss}}^{\mathrm{CM}} \sim p_\nu^{\mathrm{CM}}$

  → m_νはニュートリノ質量に対応する (ほぼ0)
- 背景事象: 上の関係式が成り立たない。







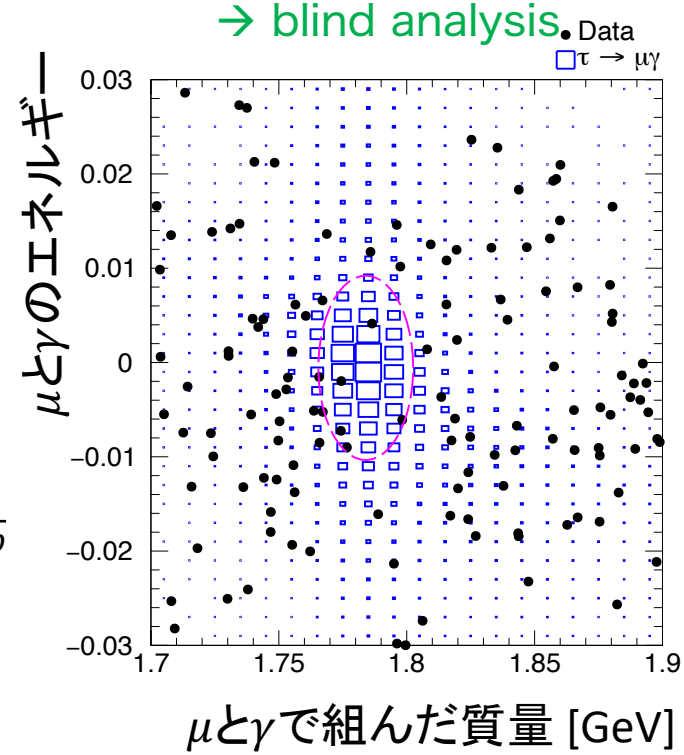
Belle II τLFV解析手法

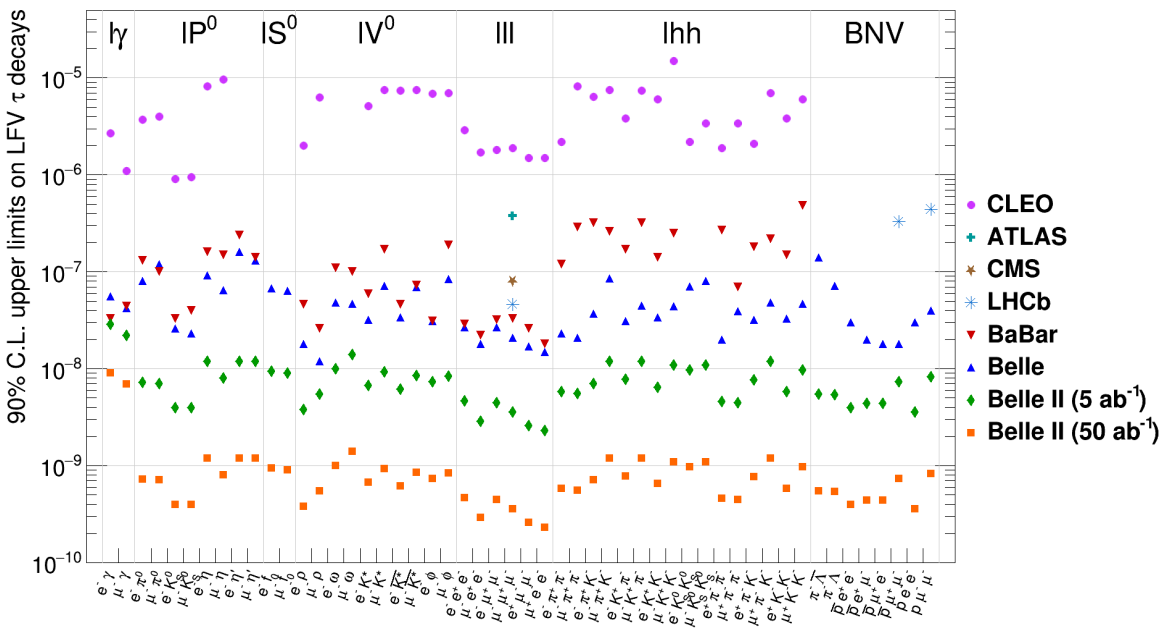
※ 解析手法が全てFixするまで、楕円中のデータを見ない
→ blind analysis

2変数を使って、２次元分布

- LFV事象: $M_{\mathrm{inv}} \sim m_\tau$かつ$\Delta E \sim 0$ GeV
- 信号領域は楕円: 効率よく信号事象を!
- 楕円の大きさは入ってくる背景事象数も考慮して決める → figure of merit

例えば、figure of merit = $s/\sqrt{s+b}$





$$\mathcal{B}(\tau^\pm \to \mu^\pm\gamma) < \frac{\tilde{s}_{90}}{2\epsilon N_{\tau\tau}} = 4.2 \times 10^{-8},$$

$$\mathcal{B}(\tau^\pm \to e^\pm\gamma) < \frac{\tilde{s}_{90}}{2\epsilon N_{\tau\tau}} = 5.6 \times 10^{-8},$$

$\tau \to \ell\alpha$ at Belle II

$e^+e^- \to \tau^+\tau^-, \tau \to \ell\alpha$ (α: invisible)

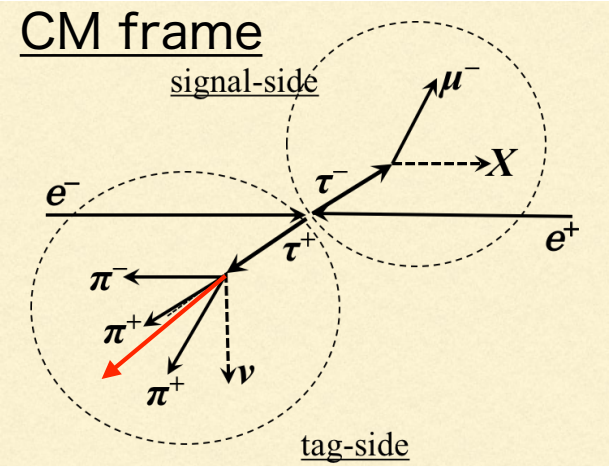
- $\tau \to \ell\alpha$: 2体崩壊, $\tau \to \ell\nu\nu$: 3体崩壊
  - τ静止系p_ℓ: mono-chromatic ($\tau \to \ell\alpha$)

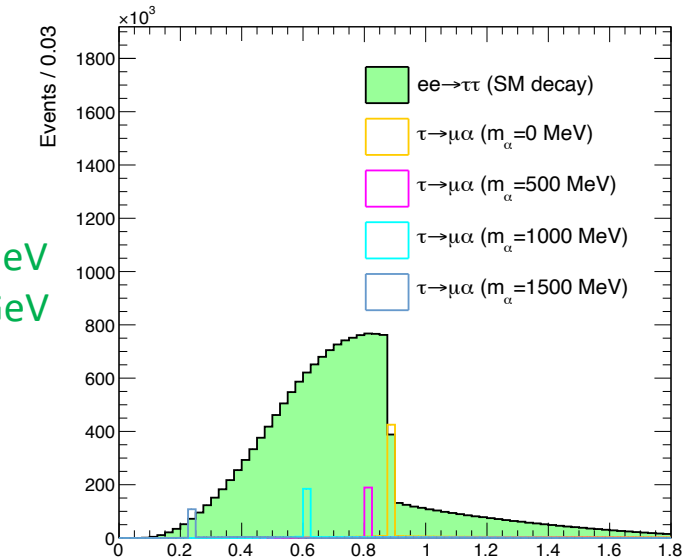
τが飛んだ方向が知りたい

- ニュートリノがあるので、再構成不可
- **反対側のタウ $\tau \to 3\pi\nu$を要求**

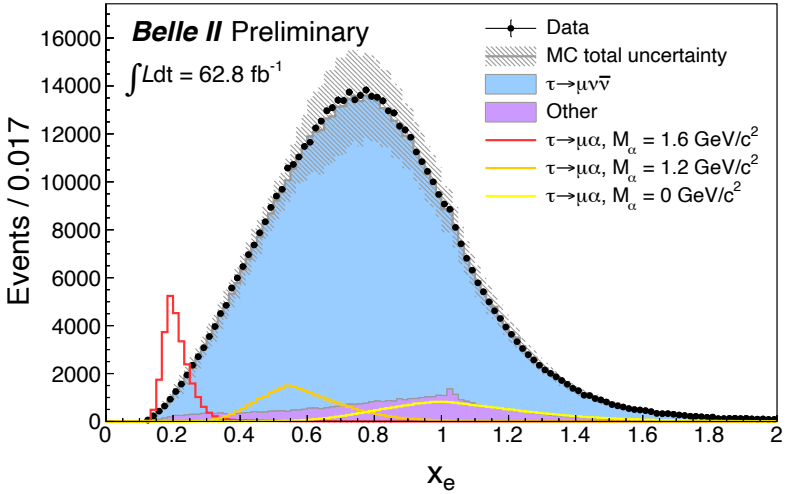
$m_\tau = 1.78$ GeV
$m_{a_1} = 1.26$ GeV

→ 3πをタウの方向と近似($\hat{e}_\tau \approx \hat{e}_{3h}$)





τ静止系のレプトン運動量 [GeV]



$\mathcal{B}(\tau \to \mu\alpha) < \sim 10^{-3}$まで
Belle IIで棄却できてる

Summary

新物理現象の発見を目指し、Belle II実験はスタート

- Belle実験の50倍ものデータ収集を予定
- まだまだ始まったばかりで、様々な課題や問題が今後も起こると思います
- Belle IIメンバーみんなで一生懸命頑張ってデータ収集や物理解析を行っていますので、(特に理論家さんは)楽しみに待っていてください

Backup

Resistive Plate Counter

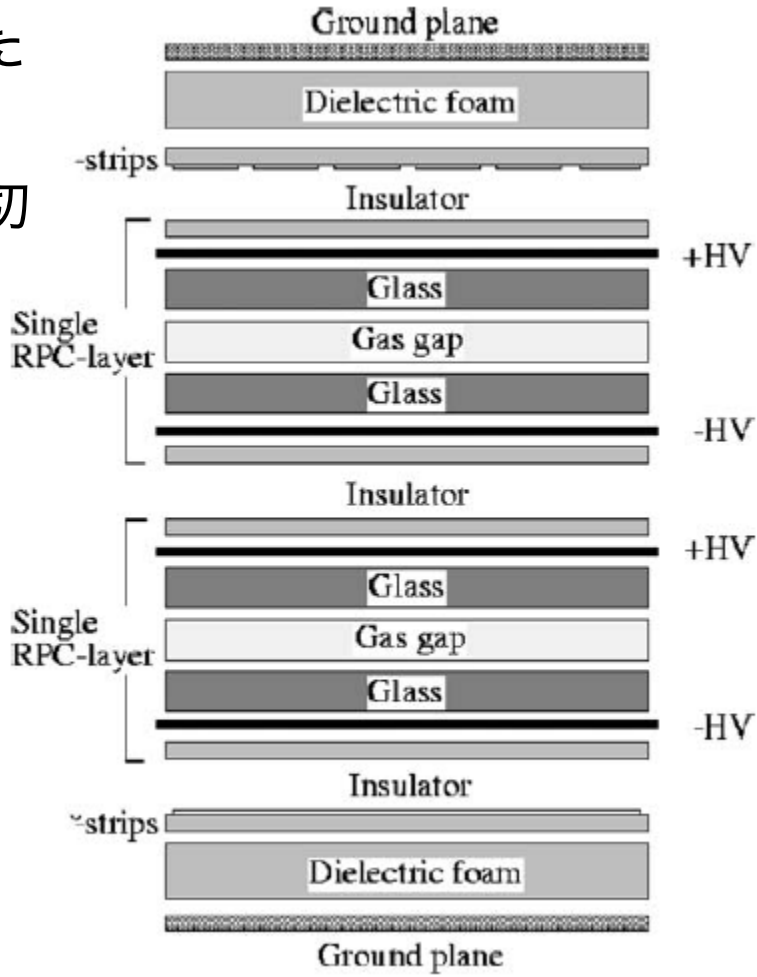
- 2枚の高抵抗の板を数mmのギャップで並べた構造
- 1万ボルト前後の電圧を印加しギャップに適切なガスで満たす
- 荷電粒子が通過すると放電を起こす

→ ガス電極の表面を高電圧でcharge up

→ 荷電粒子の通過によって誘起された信号検出

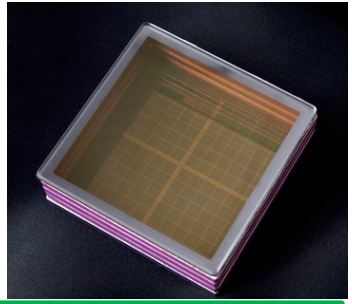
問題点

- 再びcharge upするまでに2秒
- 中性子バックグラウンドが高いエンドキャップでは、信号の検出効率が低下

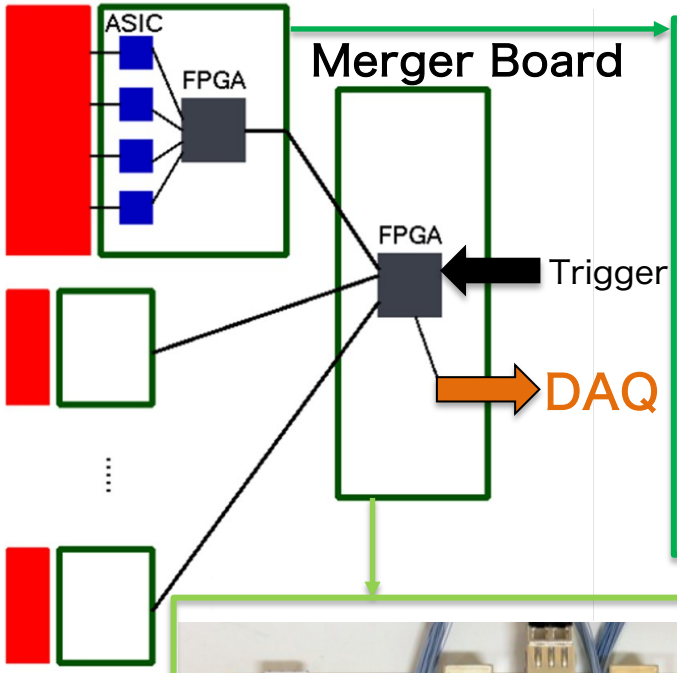


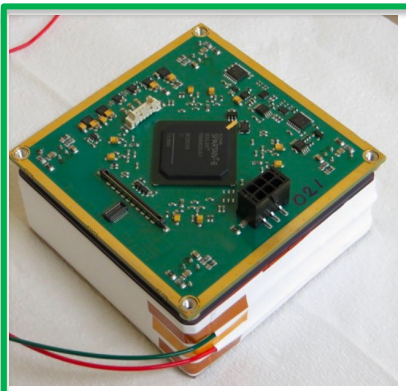
ARICH: 読み出し回路

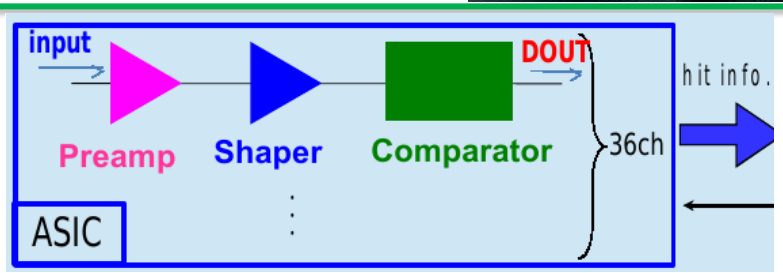
それぞれのチャンネル: 1-bit情報(ON/OFF)を送る



Total: 60000 channels

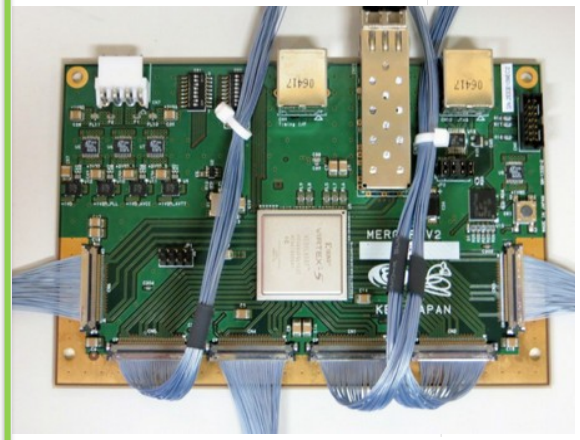






Xilinx Spartan-6 FPGA

- HAPD信号をデジタル化する



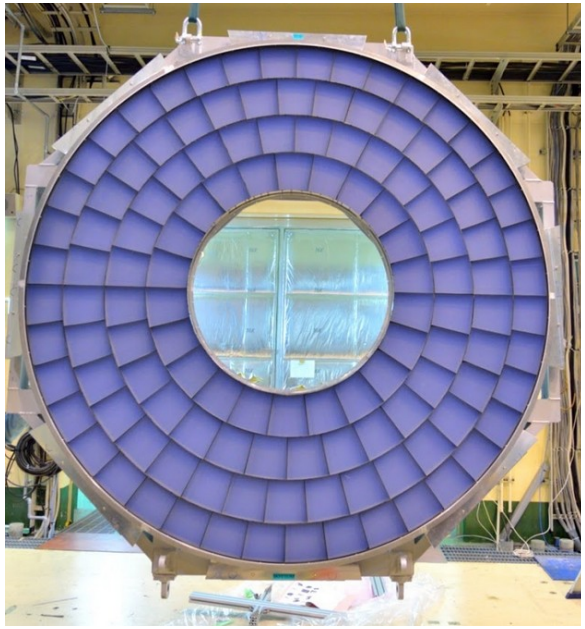
Xilinx Vertex-5 FPGA: Control 5-6 FEBs

- ファームウェアダウンロード,
- 温度や電圧, SEUなどをモニター
- FEBデータを合わせて、DAQに送る

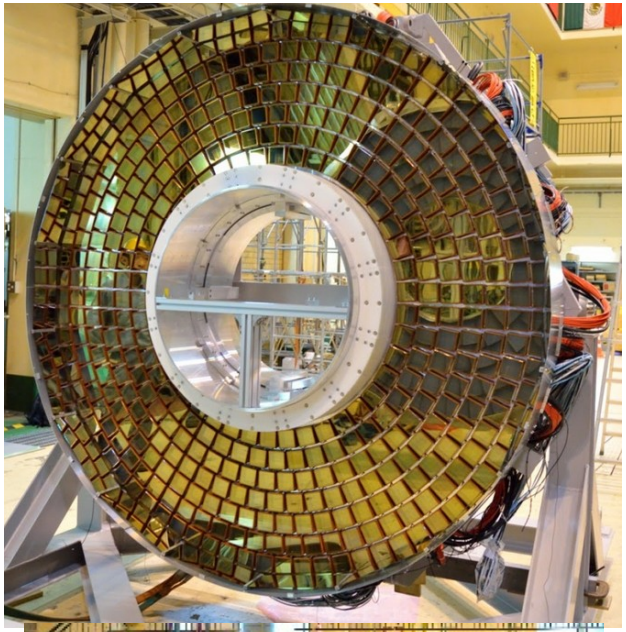
ARICH検出器: construction

- 2016 – 2018 ARICH construction and installation
- 2018: Belle II commissioning run

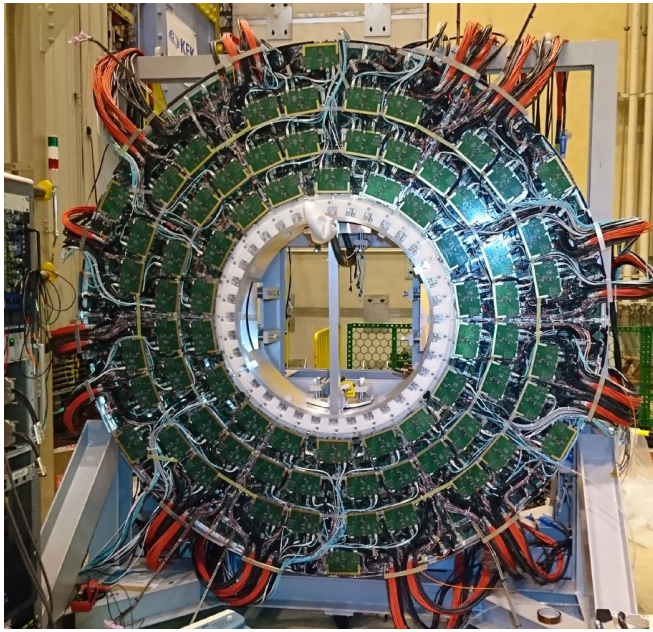
Radiator plane

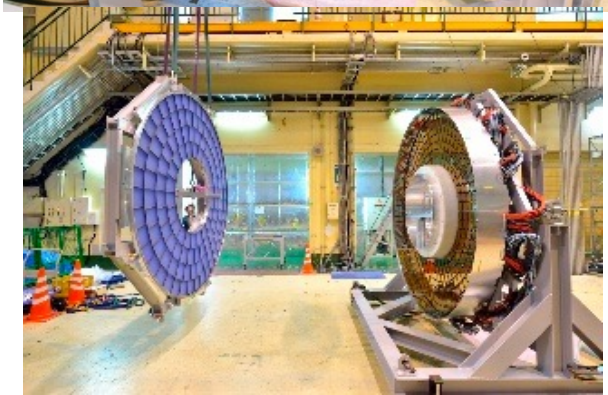


Photon detector plane



Backside plane





Particle Identification in ARICH

Comparison b.t.w observed hit and the expected PDF

- PDF: Cherenkov angle distribution
- Construct likelihood function for 6 type hypotheses (e, μ, π, K, p, d)

$$\ln \mathcal{L}_h = -N_h + \sum_{hit\ i} \left[n_i^h + \ln\left(1 - e^{-n_i^h}\right) \right]$$

h: particle hypothesis

N_h: expected total number of hits

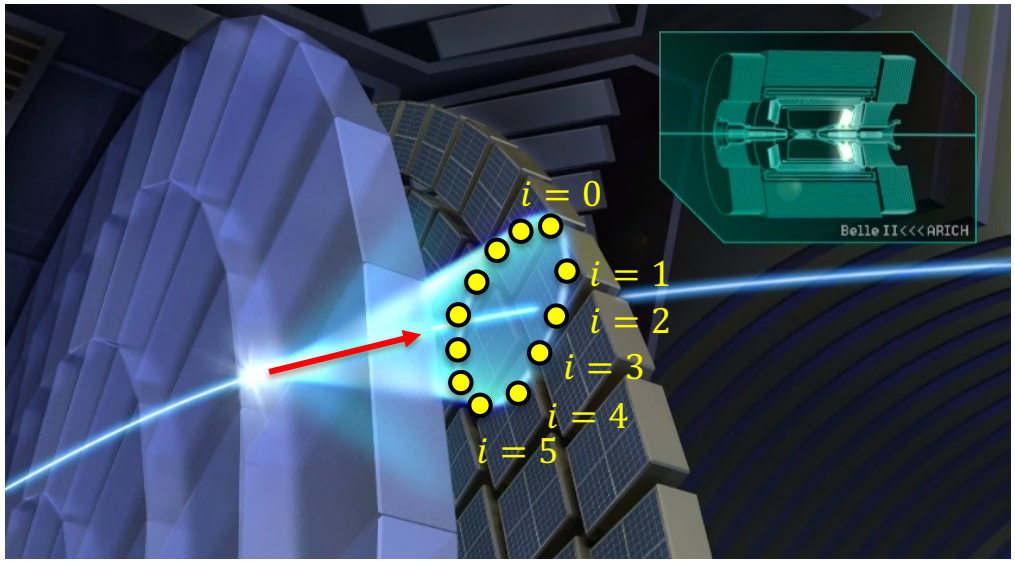
n_i^h: expected number of hits on pixel i

※ 1 bit (ON/OFF) information in each pixel

Likelihood ratio

$$R_{K/\pi} = \frac{\mathcal{L}_K}{\mathcal{L}_K + \mathcal{L}_\pi}$$

$$R_{\pi/K} = \frac{\mathcal{L}_\pi}{\mathcal{L}_K + \mathcal{L}_\pi} = 1 - R_{K/\pi}$$



結果

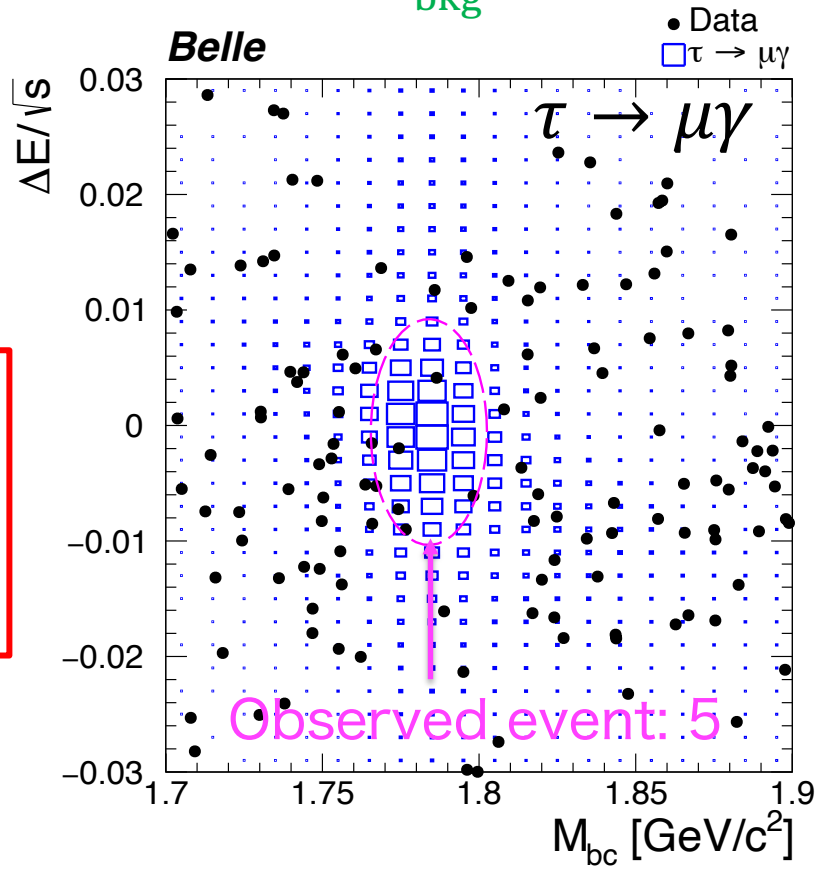
Unbinned Extended ML fit result

$$s = -0.3^{+1.8}_{-1.3}, b = 5.3^{+3.2}_{-2.3}$$

$$\mathcal{B}(\tau^\pm \to \mu^\pm\gamma) < \frac{\tilde{s}_{90}}{2\epsilon N_{\tau\tau}} = 4.2 \times 10^{-8},$$

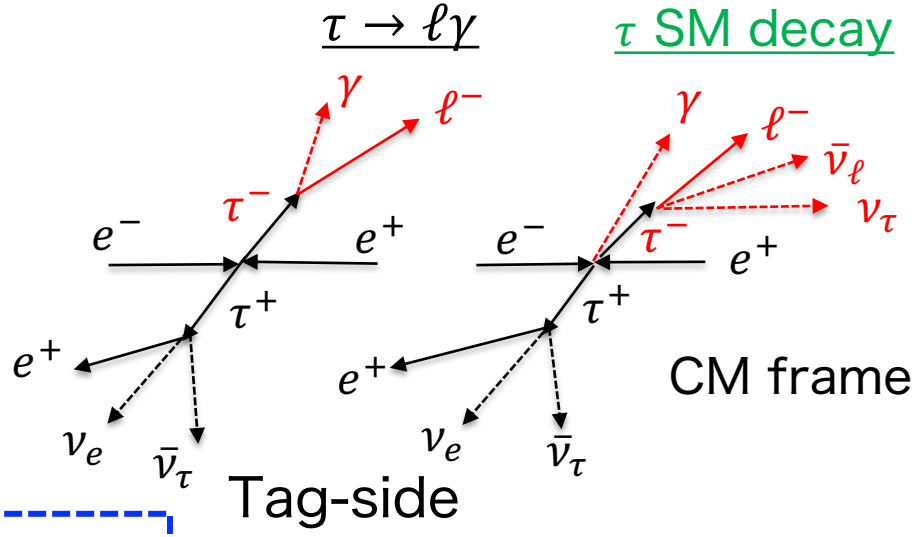
$$\mathcal{B}(\tau^\pm \to e^\pm\gamma) < \frac{\tilde{s}_{90}}{2\epsilon N_{\tau\tau}} = 5.6 \times 10^{-8},$$

Signal eff. = 3.7% $N_{\rm bkg}^{\rm exp} = 5.8 \pm 0.4$



有効なカット

$$\xi^{\mathrm{CM}}_{\tau(\mathrm{tag}),\mathrm{track(tag)}} = \frac{(p^{\mathrm{CM}}_{\tau(\mathrm{tag})} \cdot p^{\mathrm{CM}}_{\mathrm{track(tag)}})}{\left|p^{\mathrm{CM}}_{\tau(\mathrm{tag})}\right| \left|p^{\mathrm{CM}}_{\mathrm{track(tag)}}\right|}$$



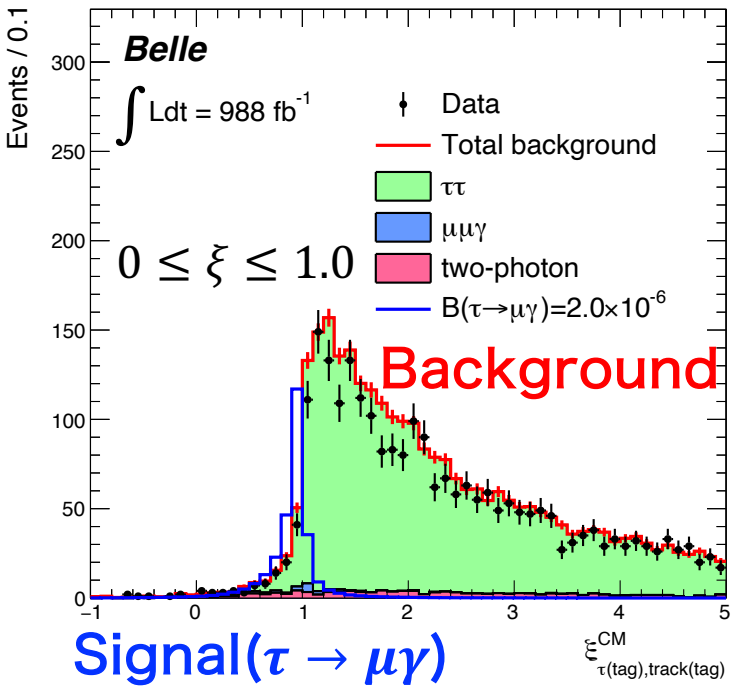
理想的な信号 ($\tau \to \mu\gamma$)の場合

$$p^{\mathrm{CM}}_{\tau(\mathrm{tag})} = -p^{\mathrm{CM}}_{\tau(sig)} = -\left(p^{\mathrm{CM}}_{\ell} + p^{\mathrm{CM}}_{\gamma}\right)$$

→ $\xi^{\mathrm{CM}}_{\tau(\mathrm{tag}),\mathrm{track(tag)}} = \cos\theta_{\tau(\mathrm{tag}),\mathrm{track(tag)}}$

$$\tau \to \mu\nu\nu + \gamma : p^{\mathrm{CM}}_{\tau(sig)} \neq p^{\mathrm{CM}}_{\ell} + p^{\mathrm{CM}}_{\gamma}$$

→ $\xi^{\mathrm{CM}}_{\tau(\mathrm{tag}),\mathrm{track(tag)}} \neq \cos\theta_{\tau(\mathrm{tag}),\mathrm{track(tag)}}$



<u>ある程度良く信号と背景事象を分けられる</u>