

# 素粒子物理学入門(?)

川崎健夫

北里大学 理学部 物理学科

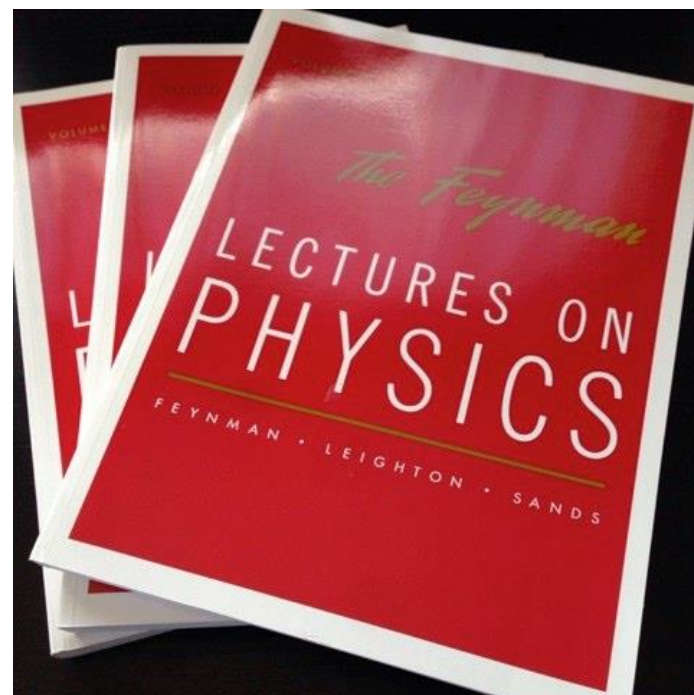
# 内容

- 去年のFPWSでは千代さん(山形大)が、素粒子物理学のトークを聞くにあたり、わかりやすい講義をしてくださいました。
  - 私は自分の好きなことを話したいと思います。
- こういう時、理論の方は初歩の初歩から話してくださいます。
  - でも実験屋は、初歩を飛ばしたりします
- 理論の方にも、実験のことを分かって欲しい...ということで
  - 実験の細かいところにも触れたいと思います。
  - 実験の若い人にも役立つと嬉しいです

# 目次

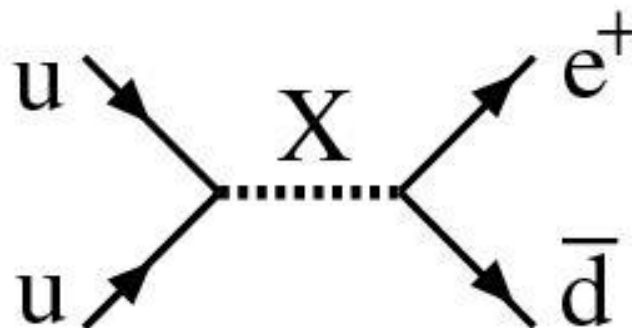
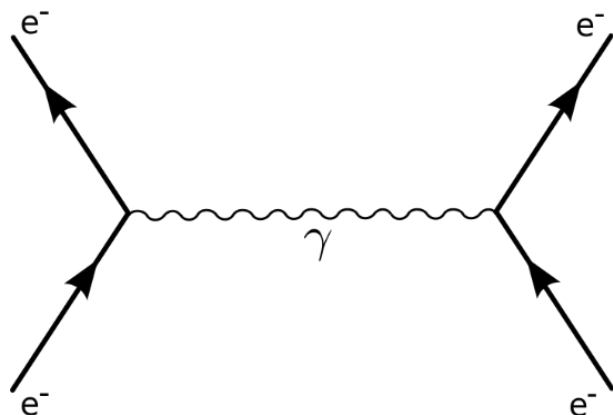
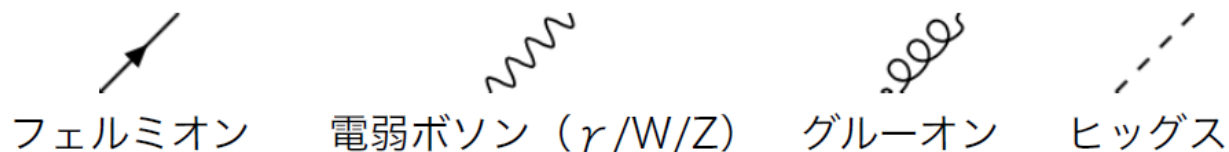
- 素粒子物理・実験
- 物理量の測定
- 事象の再構成
- バックグラウンド・イベントセレクション
- 系統誤差：検出効率
- まとめ

# 素粒子物理



# 素粒子物理

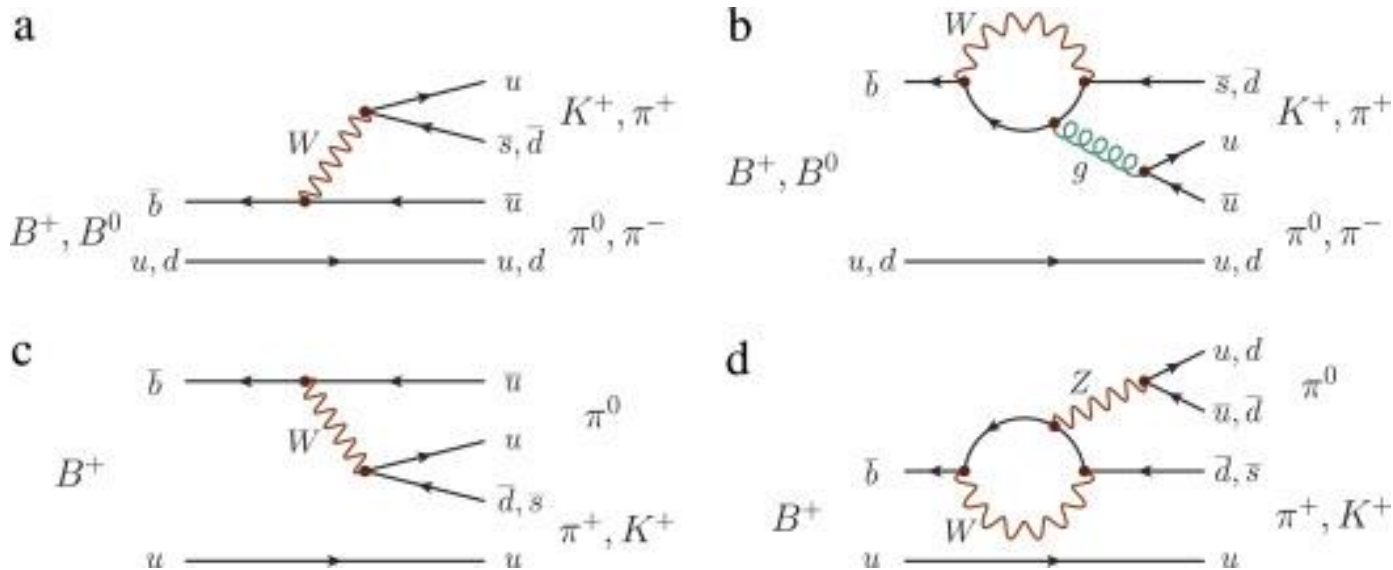
- 素粒子の反応: ファインマンダイアグラム



- よくわからなくても  
とりあえず描ける

# 素粒子物理

- 素粒子の反応: ファインマンダイアグラム
- 同じ始・終状態でも複数のダイアグラムが書けたりする

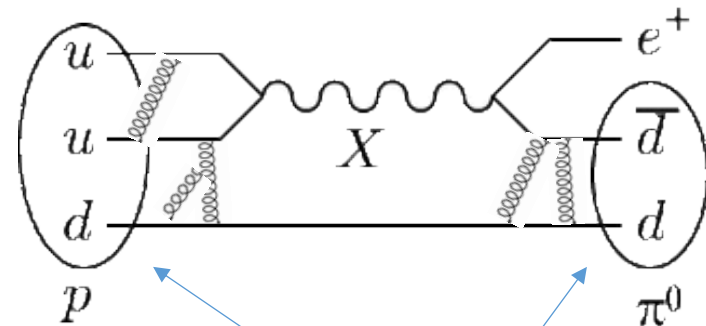
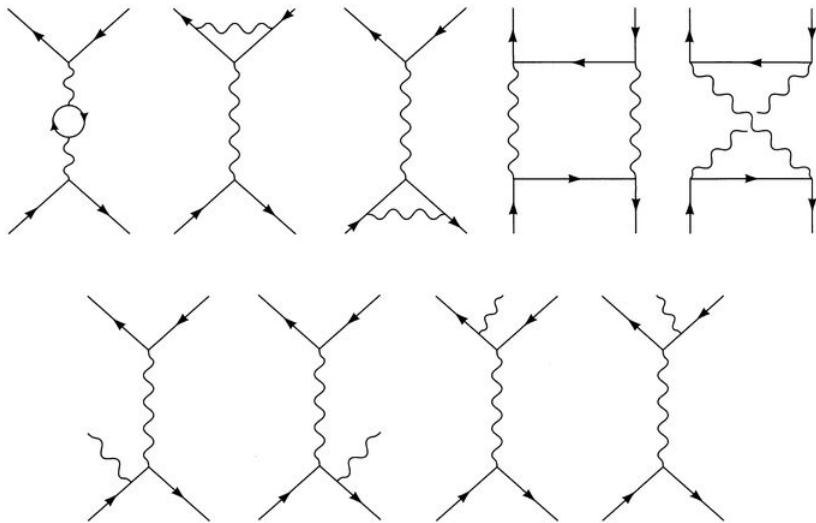


- 区別がつかない
  - 起こり得る確率・位相で足し合わせる  $\Rightarrow$  混ざる・干渉する

# 素粒子物理

## • 高次の効果

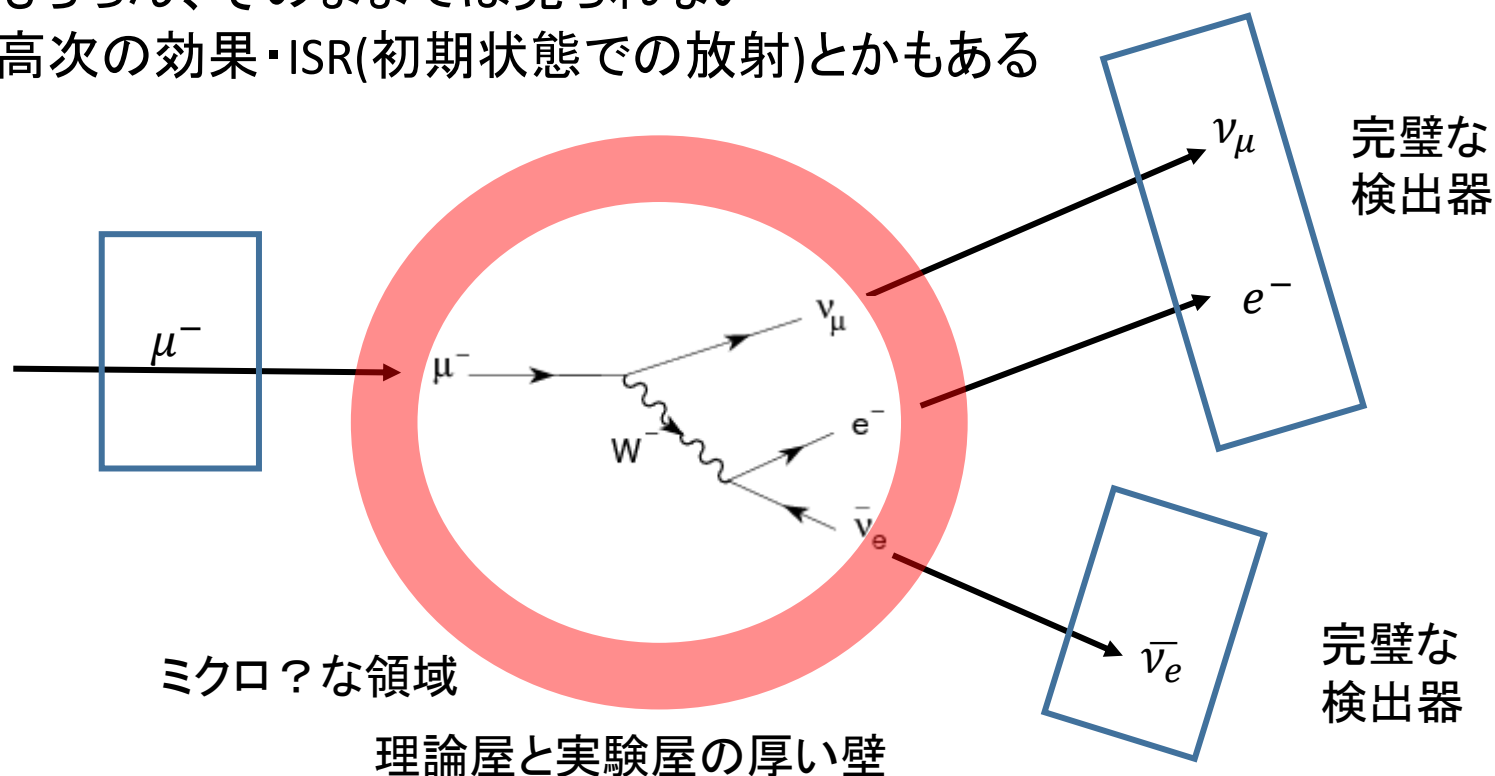
- 描かれていない場合も
- 外線がレプトンだけなら、まあ計算も可能
- ハドロンでは正確な計算は難しい



ハドロン状態まで描いている  
素過程ではないので  
ファインマンダイアグラム  
とは言えないが...

# 素粒子実験

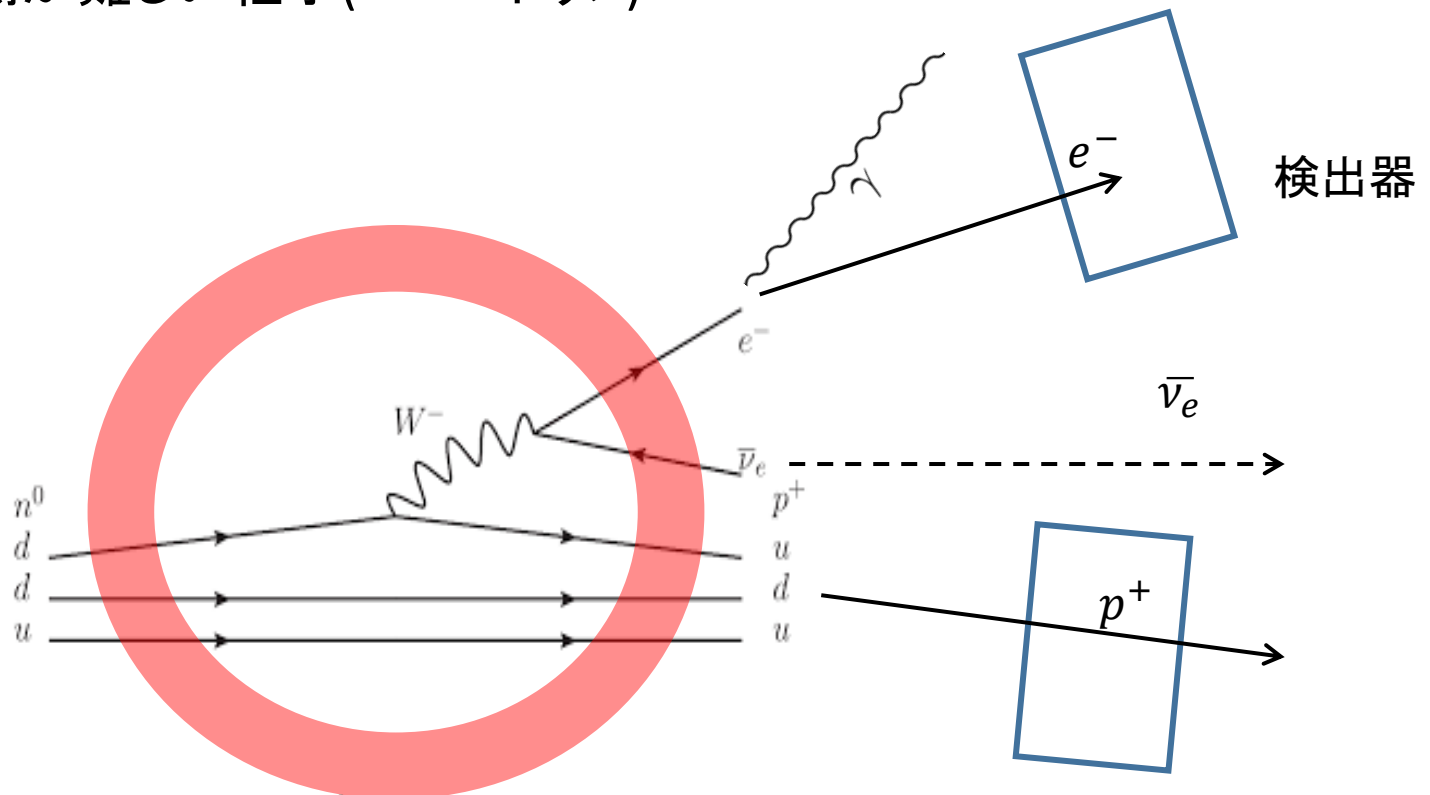
- 実験では何を見るか
  - ダイアグラムの外線のずっと先
  - もちろん、そのままでは見られない
  - 高次の効果・ISR(初期状態での放射)とかもある





# 素粒子実験

- 実験では何を見るか
  - 観測されるまで、そのままとは限らない
    - 崩壊、制動輻射...
  - 観測が難しい粒子(ニュートリノ)

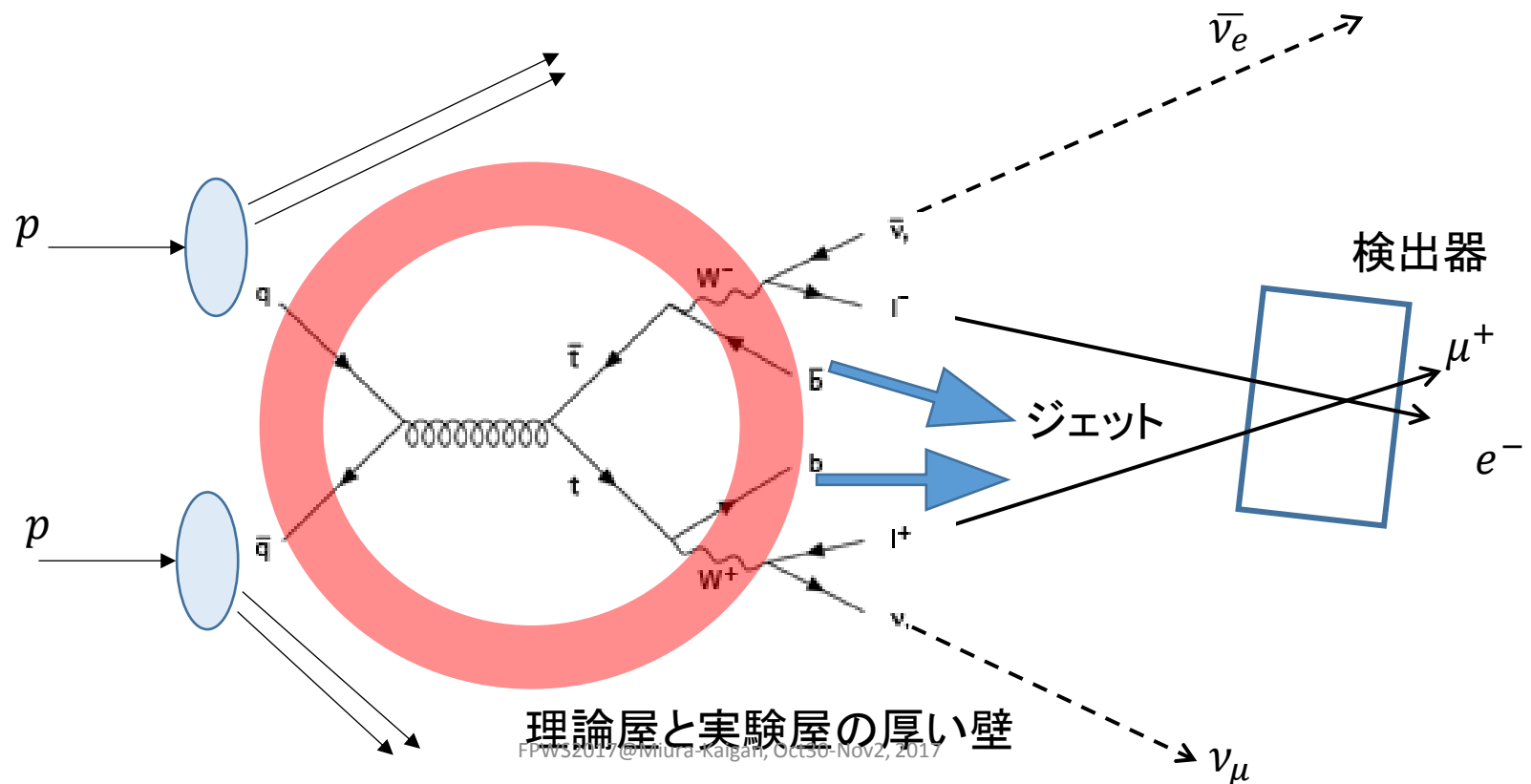


理論屋と実験屋の厚い壁

# 素粒子実験

## • 実験では何を見るか

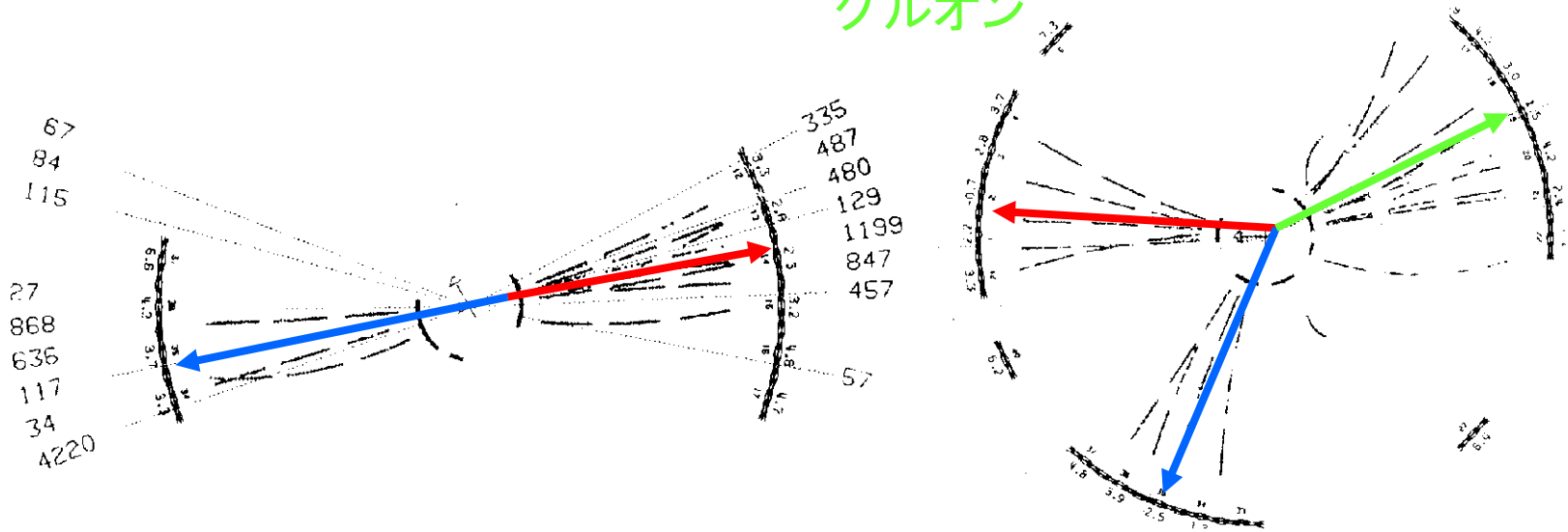
- クォークは当然見られない⇒ハドロンになった状態を観測する
  - 高エネルギーではジェットになる
  - 観測されるのは、大量の $\pi, K$ などである
  - 中間状態のハドロンが特定できるとは限らない( $\rho$ - $\omega$ とか)



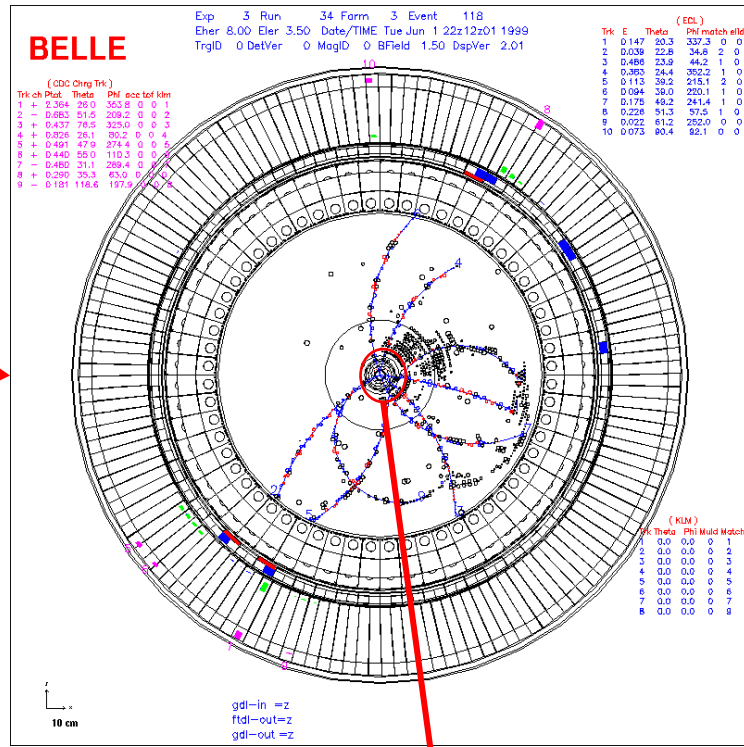
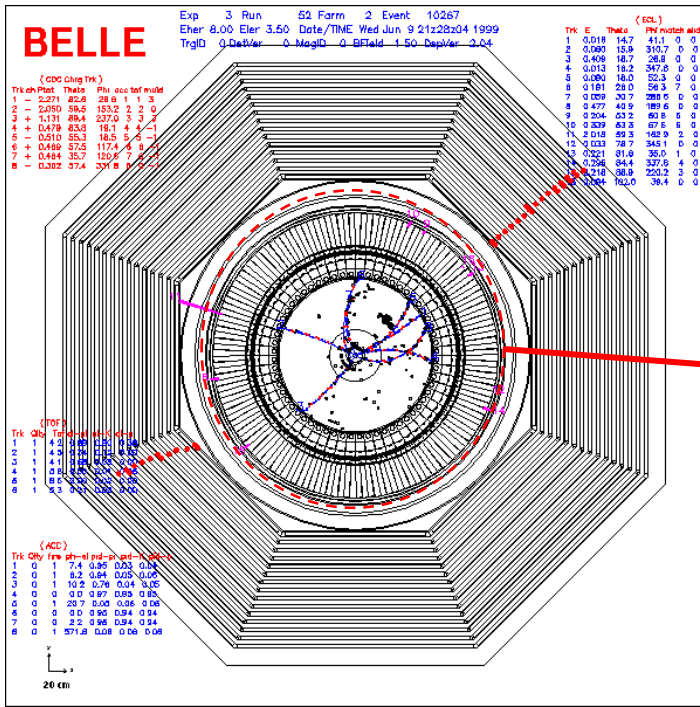
# 高エネルギーでのクォークのハドロン化

## • ジェットとしての観測

クォーク  
反クォーク  
グルオン

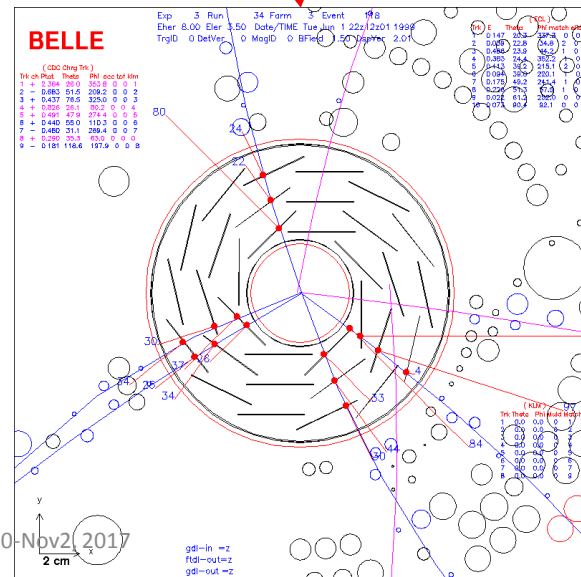


大量のハドロン(おおくは $\pi$ )として観測  
個々の粒子として測定できないことも  
⇒カロリメータではエネルギークラスターとして観測



## $e^+e^-$ コライダーでは ファインマンダイアグラムっぽく観測される

- 短寿命の粒子は測定器で観測されない。
  - 崩壊後の2次粒子のみ観測
- 低運動量の粒子は検出器まで達しない
- $\pi^\pm, K^\pm$  は、途中で崩壊することもある
  - 低運動量では検出効率が下がる
- $K_S$  は、測定器の途中で崩壊



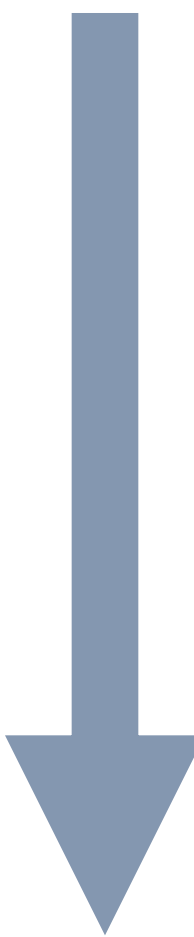
# 言いたいこと

- 理論と実験の間の壁
  - 難しいことは全て相手の領分、と考えてはいけません
- お互い歩み寄りましょう
  - お互いの領域にも興味を持ちましょう
  - お互いに判りやすく説明する努力が必要

# 物理量の測定

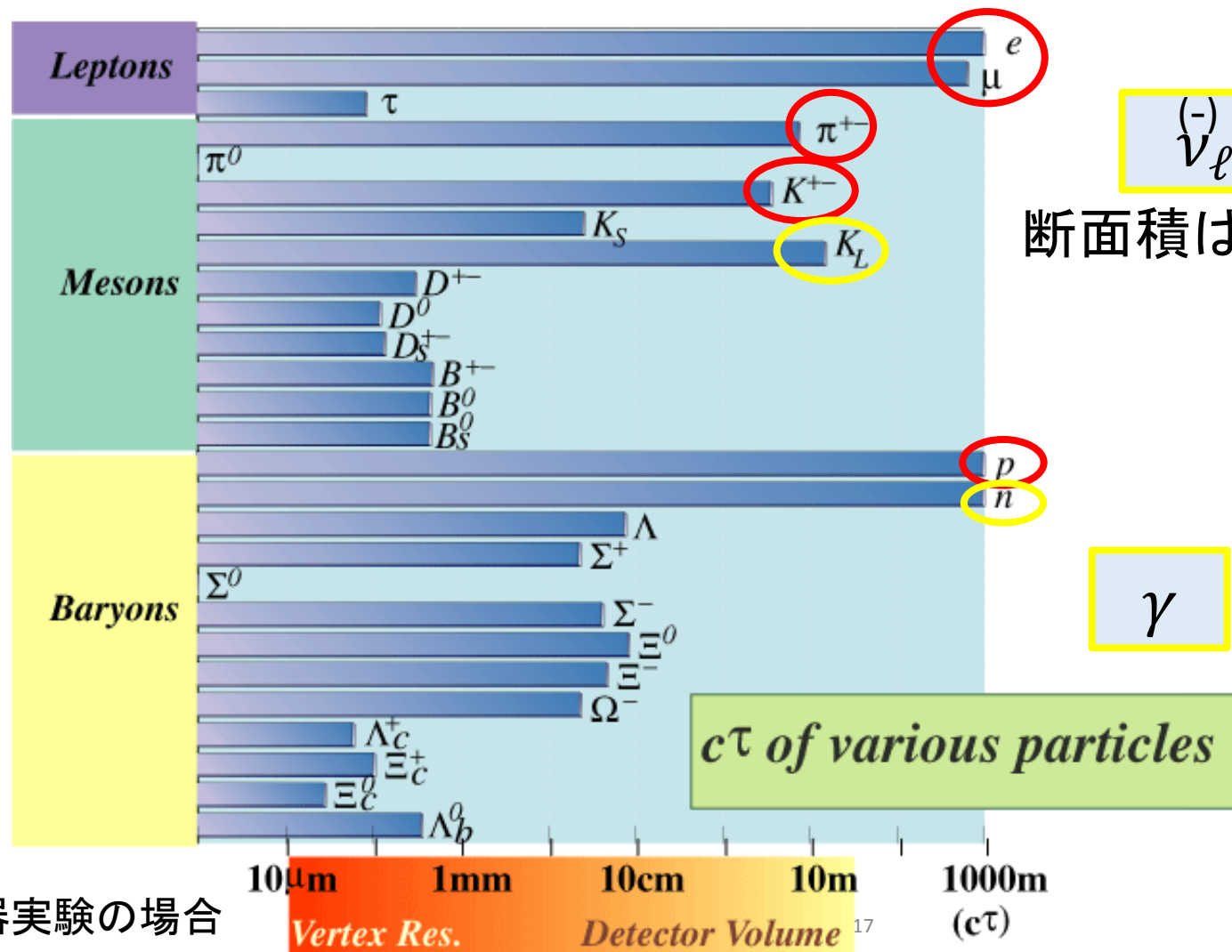


# 測定値から物理量へ

- 
- 検出器信号の波高値、時間、位置の情報
  - エネルギークラスター、飛跡、飛行時間
  - エネルギー、運動量 ( $E, p$ )
  - 粒子識別、ジェット、運動量欠損
  - 親粒子質量 再構成、パートン情報
  - 反応素過程

# (直接)観測できる粒子

- ある程度寿命が長い
- 反応断面積が大きい: 荷電粒子...光子、中性子...



加速器実験の場合

Vertex Res.

Detector Volume



# 実験で知りたい情報

- 始状態と終状態のすべての粒子の4元運動量と4元ベクトル  
4-momentum  $(E, \mathbf{p})$  , 4-vector  $(t, \mathbf{x})$
- 加速器情報で始状態が判ることもある
- 情報がすべてあるとは限らない
  - 例)高エネルギーの  $\mu^\pm$  のエネルギーは測れない(止められないから)

2つの物理量が測定できれば4元運動量が決まる。

$(E, \mathbf{p})$  or  $M, \mathbf{p}$  or  $\mathbf{p}, \mathbf{v}$  or  $E, \mathbf{v}$  or  $M, E$  (と方向)

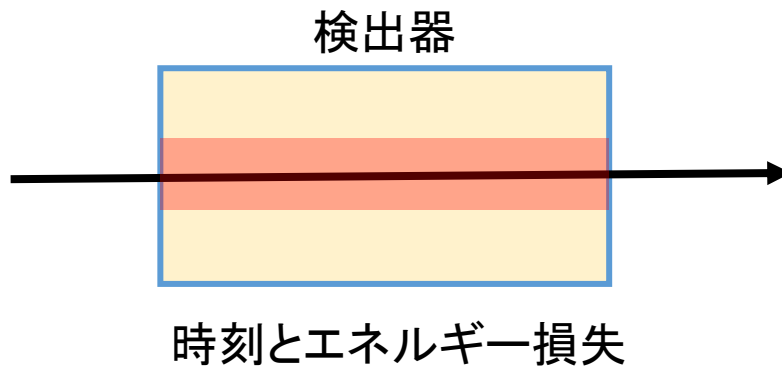
相対論的なエネルギー

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

情報は多いほど良い⇒複数の検出器で、複数の物理量を測定する

# 物理量の測定@素粒子実験

- 測定する物理量
  - 粒子の位置、時刻、エネルギー、運動量....
  - どれくらい正確に測れるか？
- (ほぼ)直接測れるもの⇒荷電粒子の位置・時刻(・速度)ぐらい
  - 電磁相互作用で測定(電離損失/制動放射/チェレンコフ等)
  - 元の情報に(あまり)影響しない



測りたいのは.....

- 4-momentum ( $E, \mathbf{p}$ )
- 粒子の識別
- 電荷やスピンなどの量子数

# 測定器 その1



- 位置測定器
  - シンチレータ
  - ガスチェンバー
  - 半導体(シリコンストリップ等)
- 基本的に、構造の精密さに依存
  - 検出器での測定精度:  $\sim 1\mu\text{m}$  くらいが限界
  - 荷電粒子は物質により散乱されるので
    - 物質が多いと、精密でも意味がない
    - 物質量を減らす必要がある
- 時間分解能はシンチレータの方が良い
  - 発光立ち上がり時間  $< 1\text{ns}$ ,
  - 分解能は光検出器の方で決まる。  $\sim 60\text{ps}$  くらいまで
- 運動量測定(磁場 + 位置測定器)

# 測定器2

- エネルギー/運動量

- カロリメータ: 粒子を停止させる

- 電磁カロリメータ
    - ハドロンカロリメータ

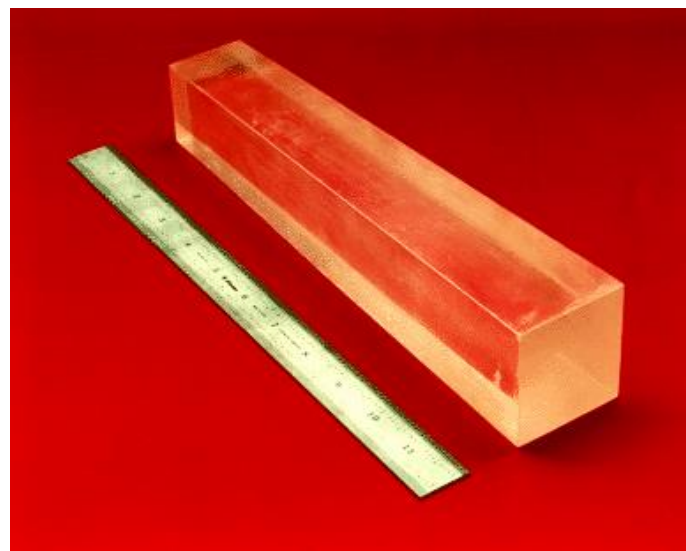
高エネルギーの粒子は、  
シャワーを起こして多数の粒子を生成  
⇒電荷・光信号・熱として測定

- エネルギー測定

- 高エネルギー⇒大きな物質質量が必要
  - 分解能 $\propto 1/\text{シャワー粒子数}$

- シンチレータ・半導体・サンプリング型

- 低～高エネルギーに対応



# 測定器3

## 粒子識別

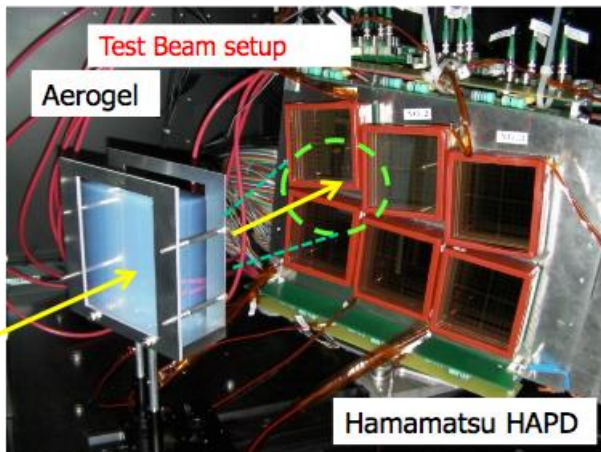
- 四元運動量から質量を求める

$p, E, v$ の2つ以上

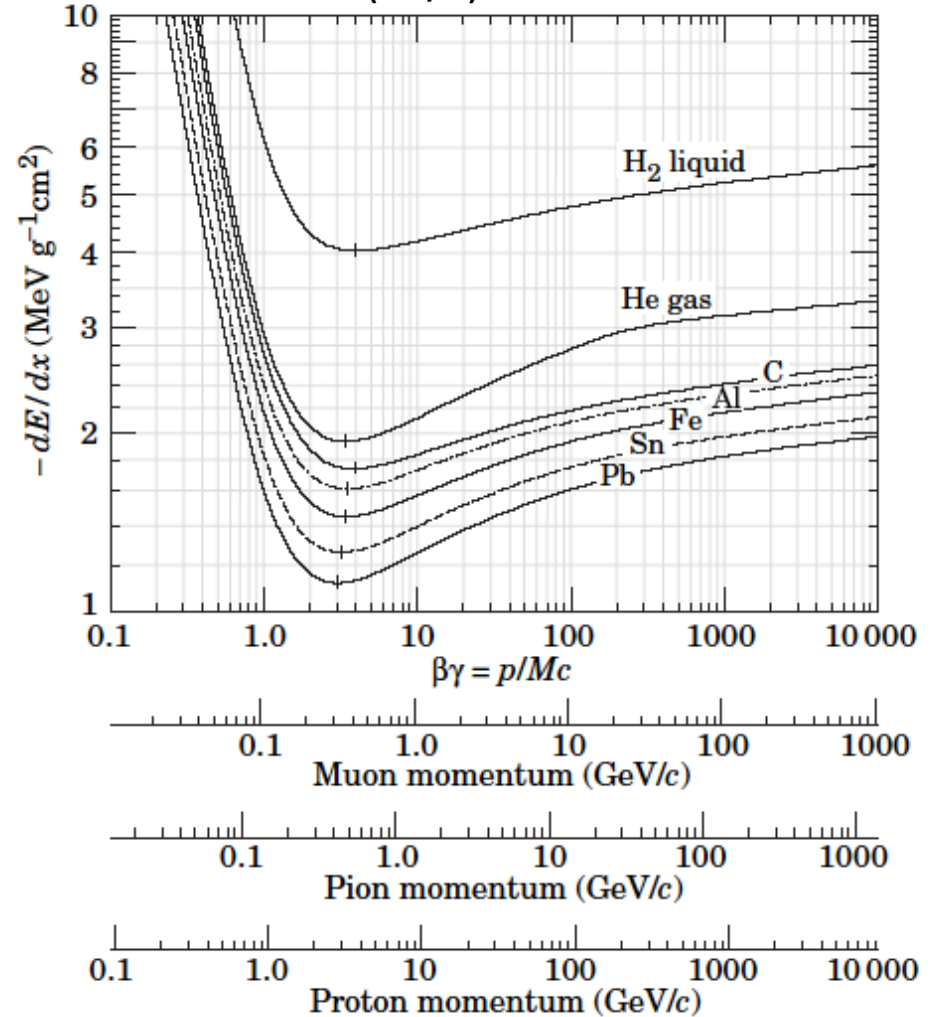
- カロリメータ+チェンバー
- 速度: TOF(飛行時間)  
 $dE/dx$ , チェレンコフ

- 相互作用を用いる

- 電磁/ハドロンシャワー



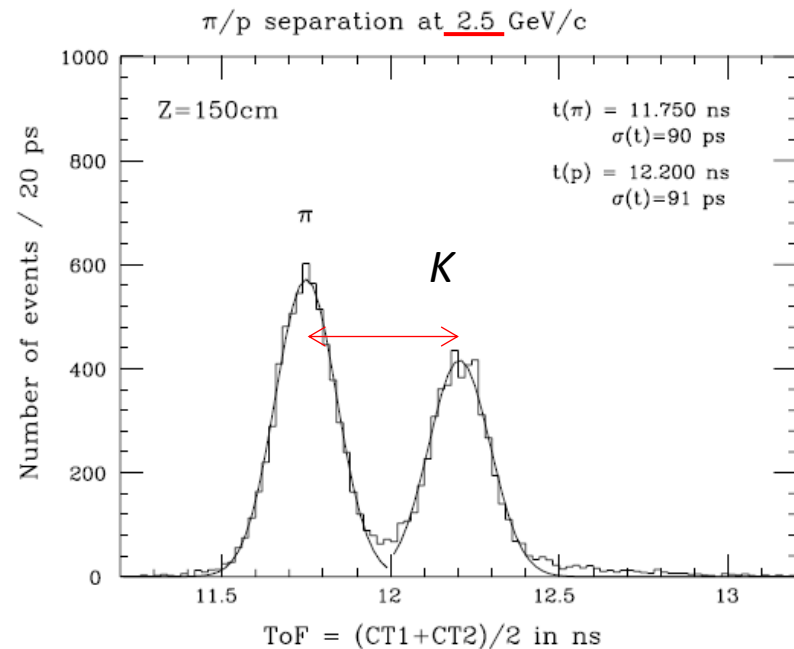
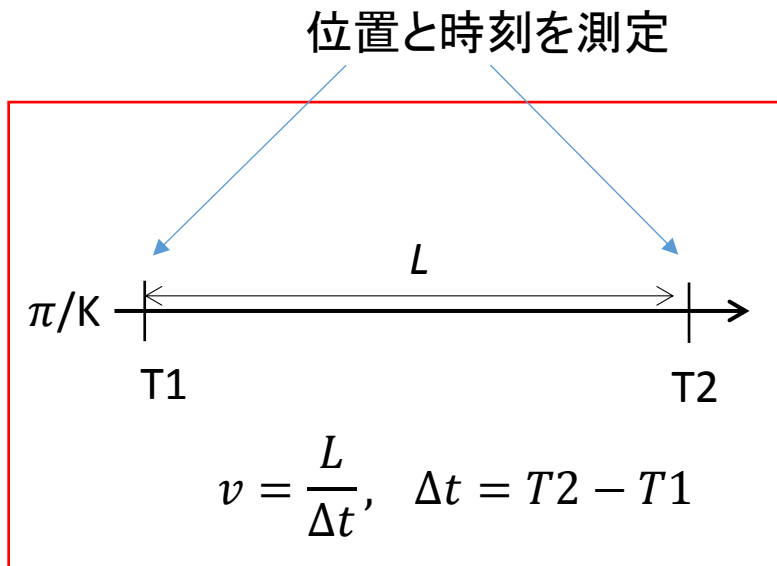
電離損失( $dE/x$ )の大きさと運動量



# 粒子識別の例

- 質量が大きく違えば識別しやすい
  - $\pi^\pm, K^\pm, p^\pm, \mu^\pm, e^\pm$
  - 飛行時間から速度を測る(運動量と組み合わせる)

識別の有意度  $\Delta t / \sigma(\Delta t)$   
 $\sigma(\Delta t)^2 = \sigma(T1)^2 + \sigma(T2)^2$

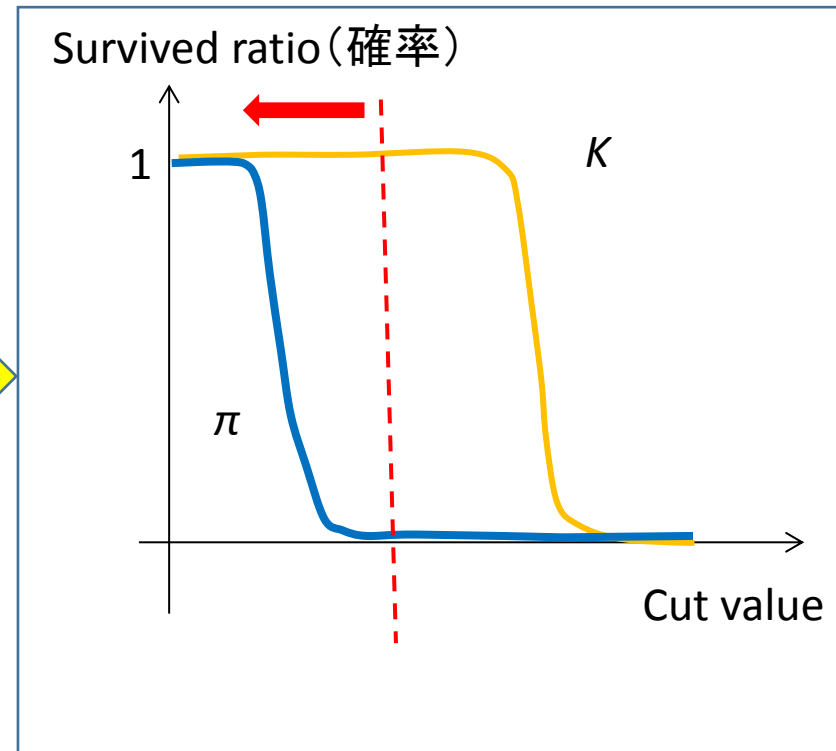
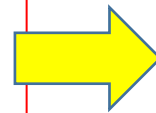
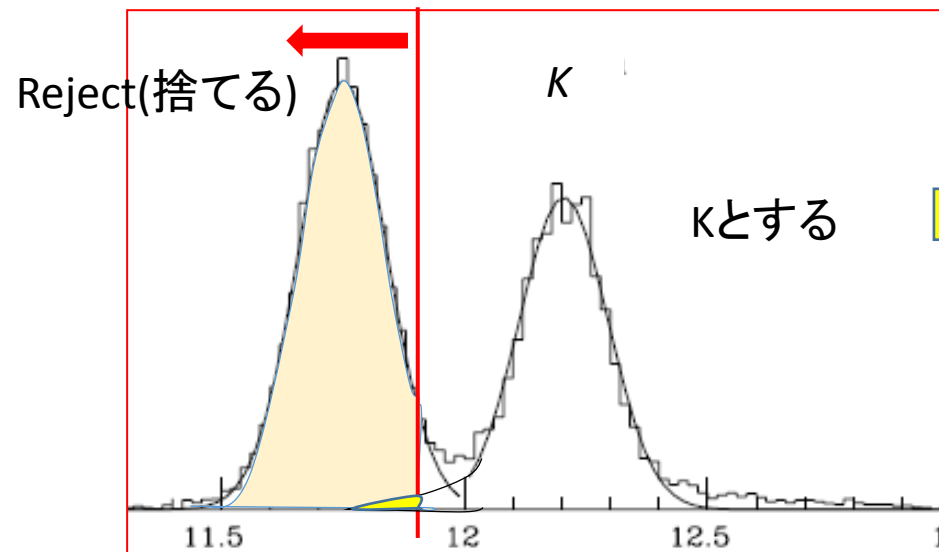


$\pi/K$  separation at 2.5 GeV/c

# 粒子識別

- 完全ではない。あくまで確率。
  - “ $\pi^+$ ”は、95%  $\pi^+$ で、5%  $K^+$  とか
- 数値化する
  - カット値を決める
  - $\pi/K$ である確率を計算

純度(Purity)  $\leftrightarrow$  効率(Efficiency)  
目的によって最適値は違う



# 粒子識別

- 数値化する

$$\text{PID}(K) = \frac{P_K}{P_K + P_\pi}$$

Survived ratio

$$\text{PID}(\pi) = 1 - \text{PID}(K).$$

Cutは識別の要求にも依る。

- Kが欲しい
- $\pi$ で無いものが欲しい
- 効率 重視
- 純度 重視

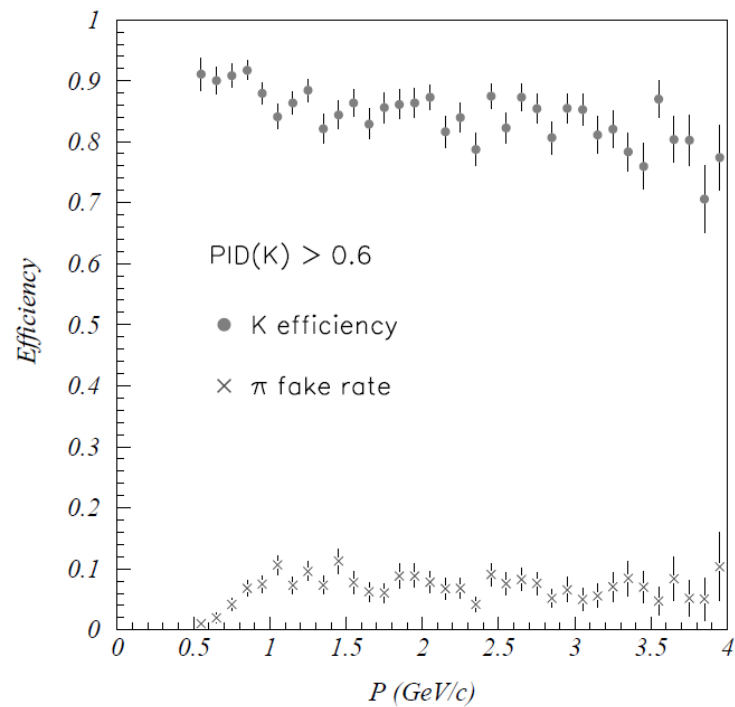
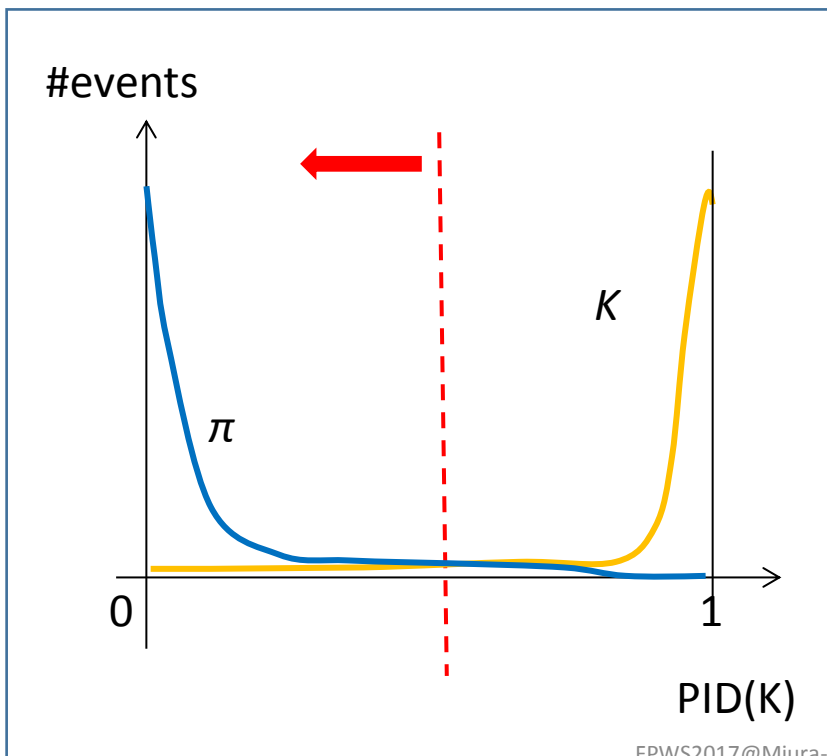
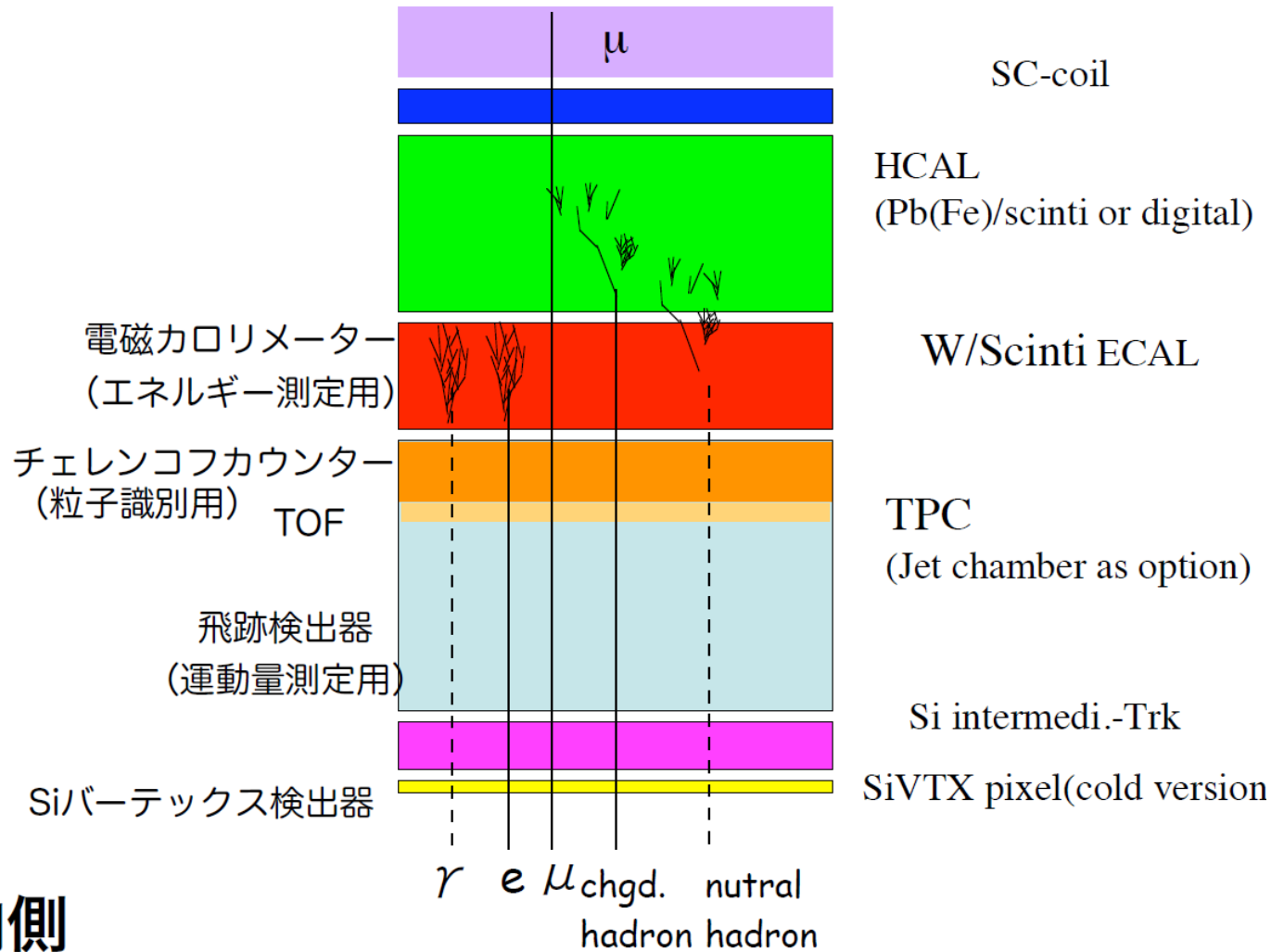


Fig. 53. K efficiency and  $\pi$  fake rate, measured with  $D^{*+} \rightarrow D^0(K\pi) + \pi^+$  decays, for the barrel region. The likelihood ratio cut  $\text{PID}(K) \geq 0.6$  is applied.



# コライダー用検出器の例

## 測定器外側



## 測定器内側

# まとめ

- 万能の検出器はない
  - 複数の検出器を組み合わせる
- 物理解析において
  - 測定値には必ず誤差がある
  - 粒子の種類さえも完全ではない
- 検出器の性能をよく知って
  - 出来る/出来ないことを理解する

# 解析：事象の再構成



# 事象の再構成

- 事象の再構成

- 始・終状態のすべての情報が判れば完璧
  - 4-momentum  $(E, \mathbf{p})$
- 測定できない・困難な粒子もあるが(ニュートリノ・中性子)...

再構成: 4元運動量の和

$$p = p_A + p_B = (E_A + E_B, \mathbf{p}_A + \mathbf{p}_B)$$

$$m^2 = E^2 - p^2$$

$$p_A = (E_A, \mathbf{p}_A)$$

$$m_A^2 = E_A^2 - p_A^2$$

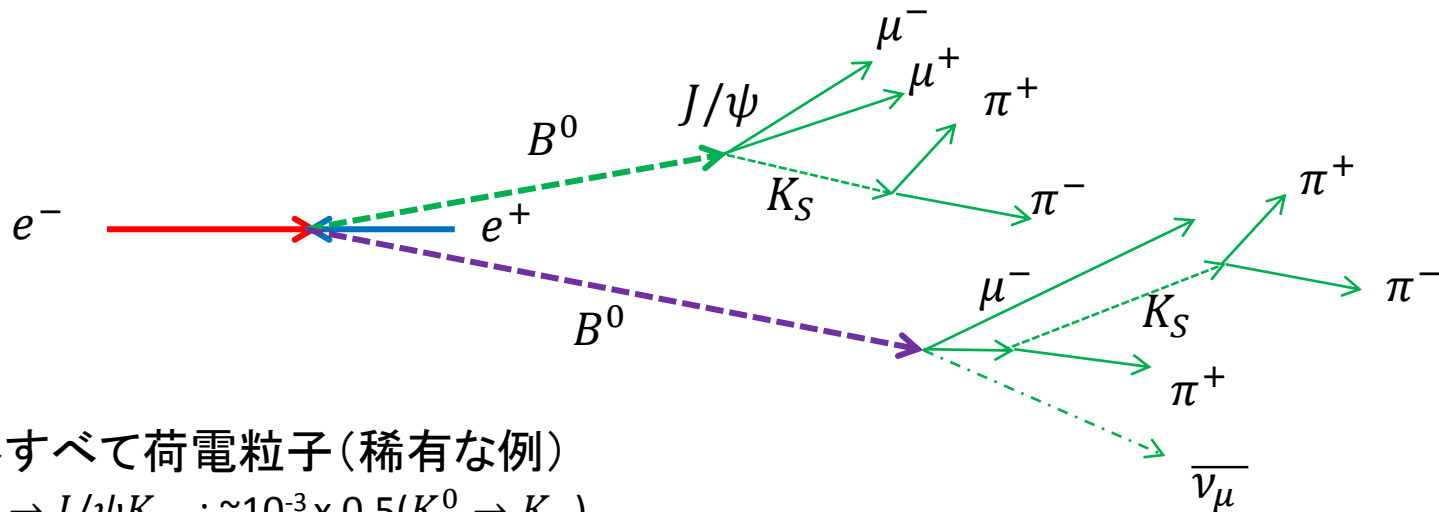
$$p_B = (E_B, \mathbf{p}_B)$$

$$m_B^2 = E_B^2 - p_B^2$$

# 事象の再構成

例)  $e^+e^-$  コライダー (Bファクトリー)

- $B^0 \rightarrow J/\psi K_S, \bar{B}^0 \rightarrow D^+ \mu^- \bar{\nu}_\mu$ 
  - $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-, K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$
  - $D^+ \rightarrow K_S \pi^+, K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$



$\bar{\nu}_\mu$  以外すべて荷電粒子 (稀有な例)

$$B^0 \rightarrow J/\psi K_S : \sim 10^{-3} \times 0.5 (K^0 \rightarrow K_S)$$

$$\bar{B}^0 \rightarrow D^+ \mu^- \bar{\nu}_\mu : \sim 1\%$$

$$J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^- : \sim 12\%$$

$$K_S \rightarrow \pi^+ \pi^- : \sim 50\%$$

$$D^+ \rightarrow K_S \pi^+ : \sim 1.5\%$$

$$K_S \rightarrow \pi^+ \pi^- : \sim 50\%$$

$$\text{Total} \Rightarrow \sim 10^{-9}$$

# 事象再構成: $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$

終状態:  $\mu^+ \mu^- \pi^+ \pi^-$

- 4元運動量がすべてわかっているならば不変質量と運動量が組める  $(E, \mathbf{p})$  と  $(t, \mathbf{x})$

中間状態のconstraintを入れないなら

$$E_B = E_{\mu^+} + E_{\mu^-} + E_{\pi^+} + E_{\pi^-}$$

$$\mathbf{p}_B = \mathbf{p}_{\mu^+} + \mathbf{p}_{\mu^-} + \mathbf{p}_{\pi^+} + \mathbf{p}_{\pi^-}$$

$$M_B^2 = E_B^2 - |\mathbf{p}_B|^2$$

## 別の変数を用いる方法

$$\Delta E = E_B - E_{beam}$$

$$M_{bc} = \sqrt{(E_{beam})^2 - (p_B)^2}$$

(Beam constraint mass)

$e^+ e^-$  衝突だからできること

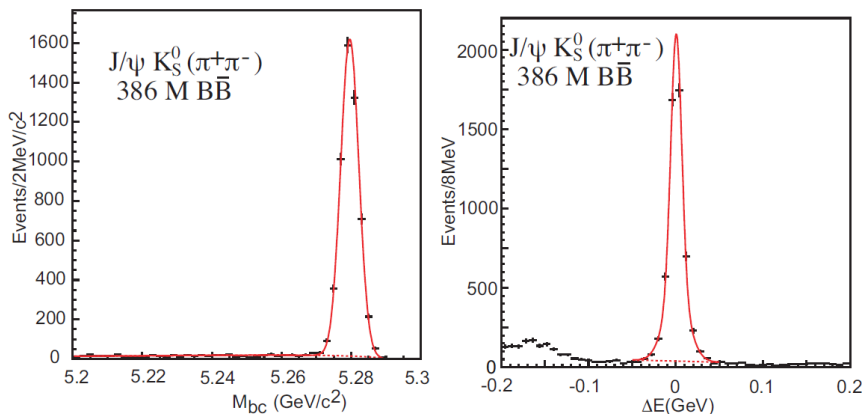


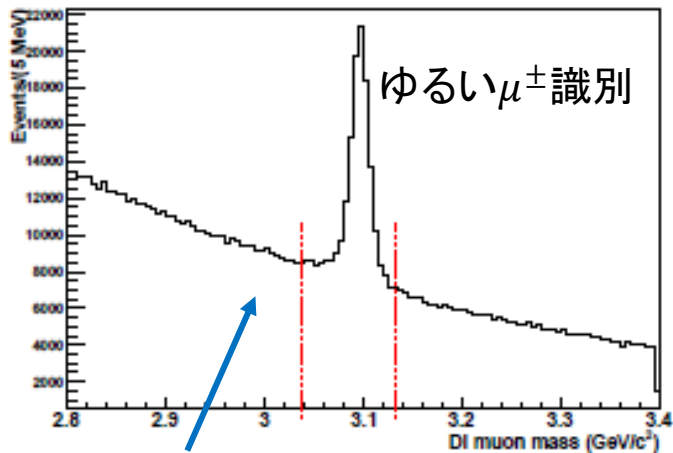
Figure 3: The  $M_{bc}$  projection (left) of  $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0 (\pi^+\pi^-)$  candidates in  $\Delta E$  signal region ( $-0.04 \text{ GeV} < \Delta E < 0.04 \text{ GeV}$ ) and  $\Delta E$  projection (right) in  $M_{bc}$  signal region ( $5.27 \text{ GeV}/c^2 < M_{bc} < 5.29 \text{ GeV}/c^2$ ).

# 事象再構成: 中間状態

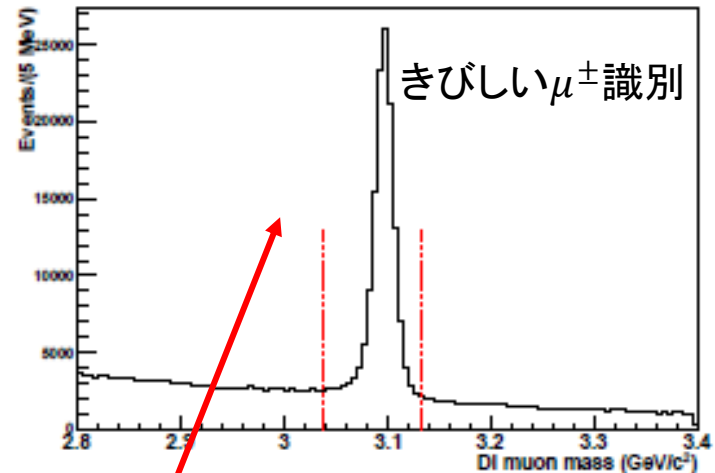
中間状態( $J/\psi$ ,  $K_S$ )の不変質量はBGを減らすために組む

- 粒子識別により種類を $\mu^\pm$ を選ぶ
  - 完全ではない(例: $\mu^+$ に10%の $\pi^+$ が混入...)
- 組み合わせて、不変質量を計算する。
  - 測定されているのは運動量なので、粒子の種類が必要..

$J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ の不変質量分布



- バックグラウンド
  - 粒子識別の間違い
  - $J/\psi$ 以外からの $\mu^\pm$ も存在する

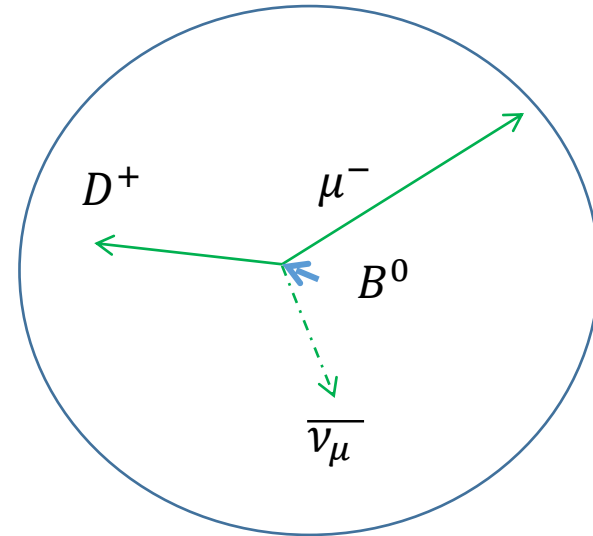


- 幅: 測定器の分解能(主に運動量測定)
  - $J/\psi$ の幅はずっと小さい < 100KeV

# 事象再構成

- 反対側のBは？

- $\overline{B^0} \rightarrow D^+ \mu^- \overline{\nu}_\mu$
- $\overline{\nu}_\mu$ は観測されない。
- 完全な再構成は無理



- 加速器の情報を用いる

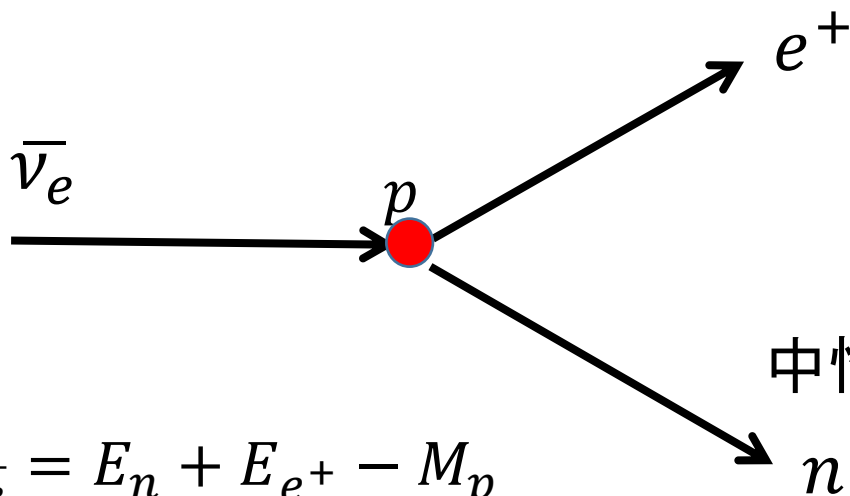
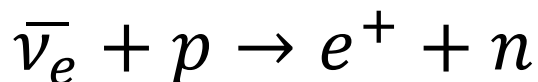
- $e^+e^-$ コライダーなら始状態はだいたい判る
- 複数のニュートリノがあると無理

- ハドロンコライダーでは  
ビームに垂直な方向で運動量が保存



# 事象の再構成

- 例:原子炉実験:反電子ニュートリノの逆ベータ反応



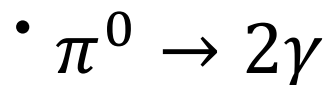
中性子の運動量は測定できない

$$\begin{aligned} E_{\bar{\nu}_e} &= E_n + E_{e^+} - M_p \\ &= \sqrt{M_n^2 - p_n^2} + E_{e^+} - M_p \cong E_{e^+} + M_n - M_p \end{aligned}$$

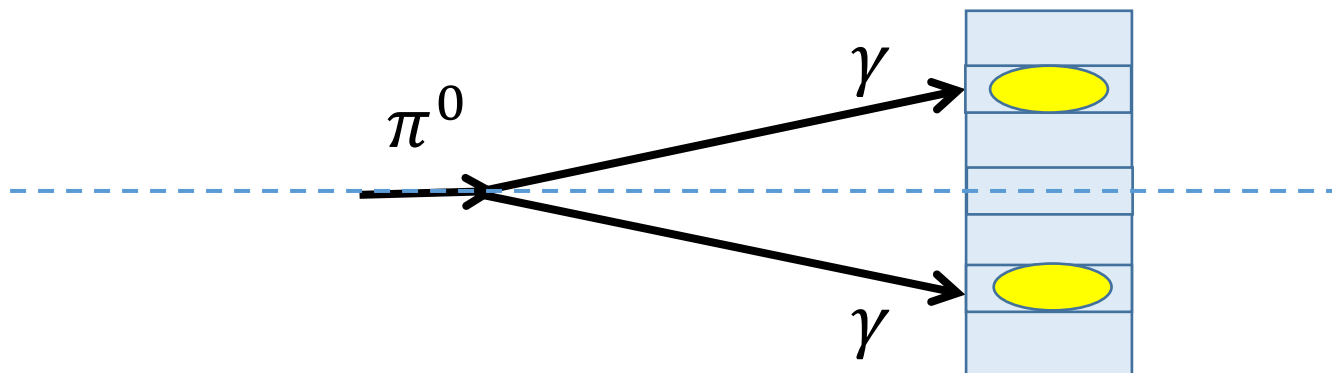
ニュートリノのエネルギーは、ほぼ測定できる  
しかし、方向は判らない(中性子の運動量が必要)

# 事象の再構成

- 例: 中性 $\pi$ 中間子の再構成



光子はエネルギーと位置を測定できる  
方向は測定できない



1. 崩壊点を仮定すれば、再構成できる ( $e^+e^-$ コライダー)
2. ビーム軸上での崩壊を仮定すれば、  
 $\pi^0$ の質量からビーム方向の位置が計算できる ( $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ )

もちろん、バックグラウンドが混ざりやすくなる

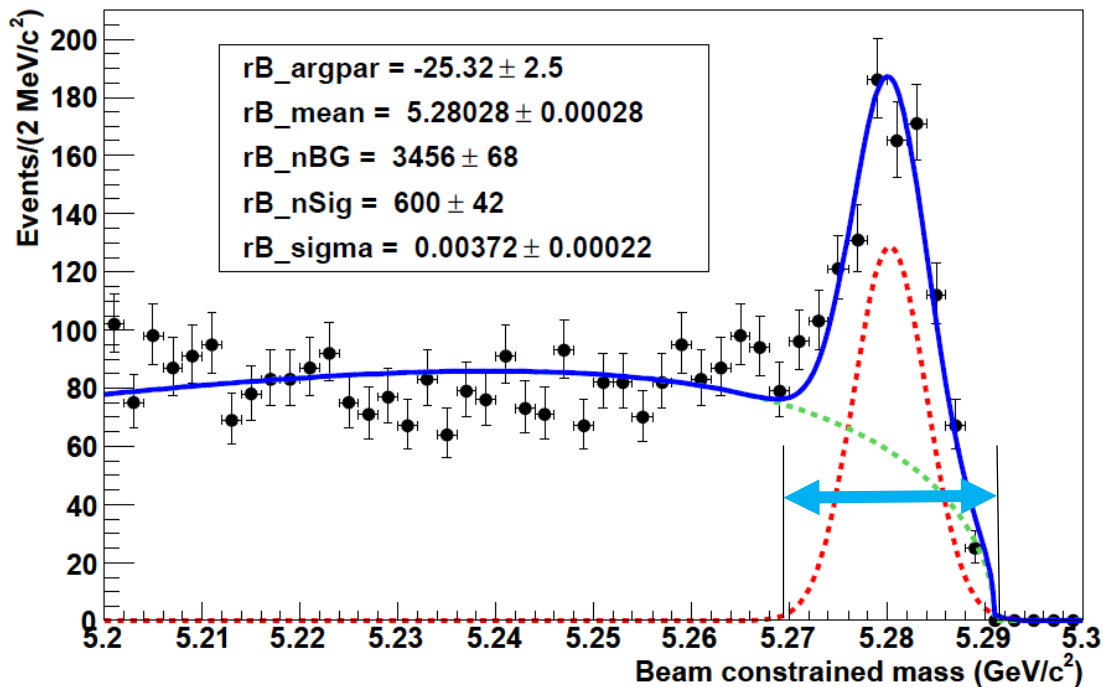
# 解析：イベントセレクション



# バックグラウンド(背景事象・雑音事象)

- 事象再構成・Selectionの結果

- バックグラウンド(外道)が残る ⇒ (統計)誤差の要因



## BGの取扱い

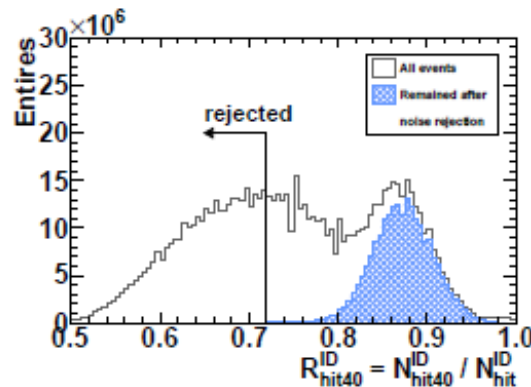
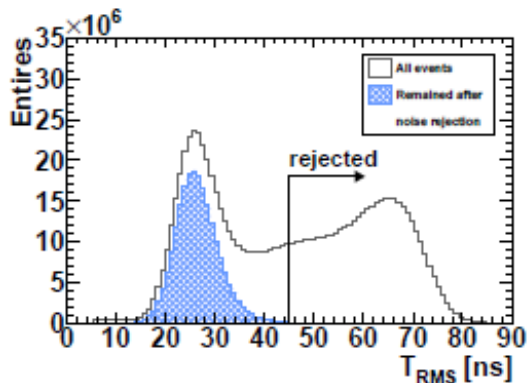
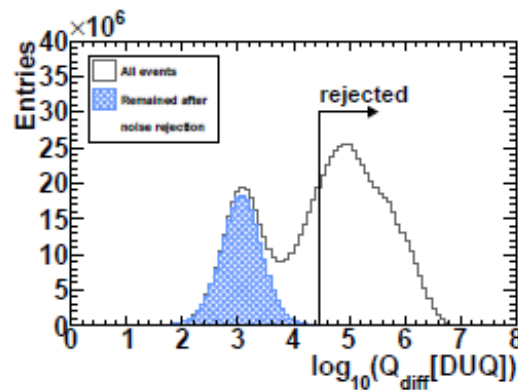
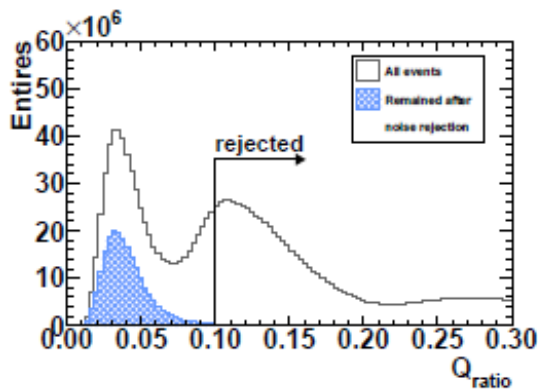
1. 見積もって差し引く
2. カットで減らす

セレクションを厳しくする？

# Selection/ BG cut

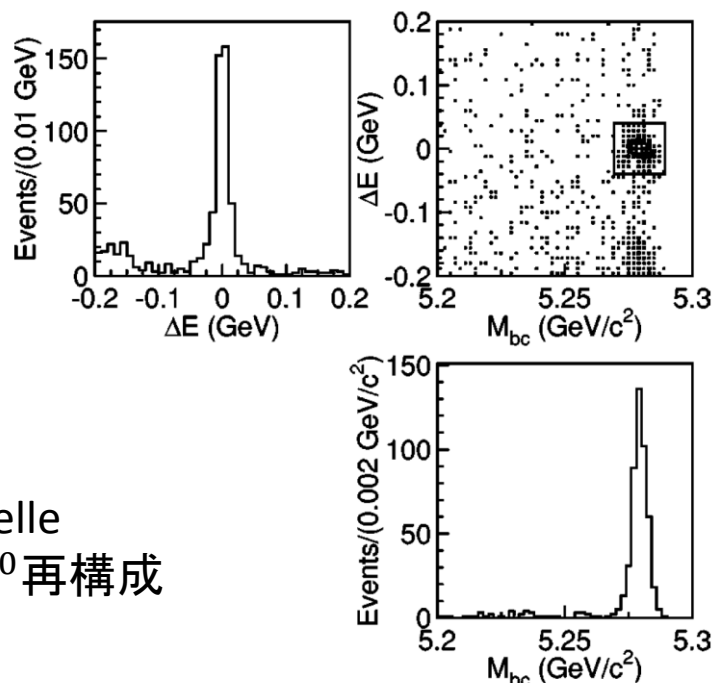
BGを減らすのが目的・でも信号は減らしたくない

- Purity  $\leftrightarrow$  Efficiency
- カットの不定性により系統誤差は増えないか？
  - タイトなカットは危険

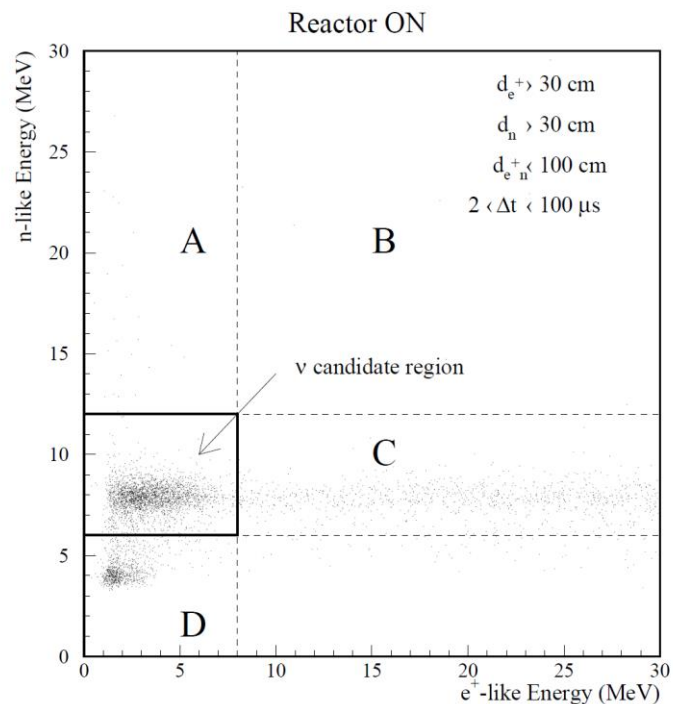


DoubleChoozでの  
PMT Light Noise cut

# 2次元でのカット



Belle  
 $B^0$ 再構成



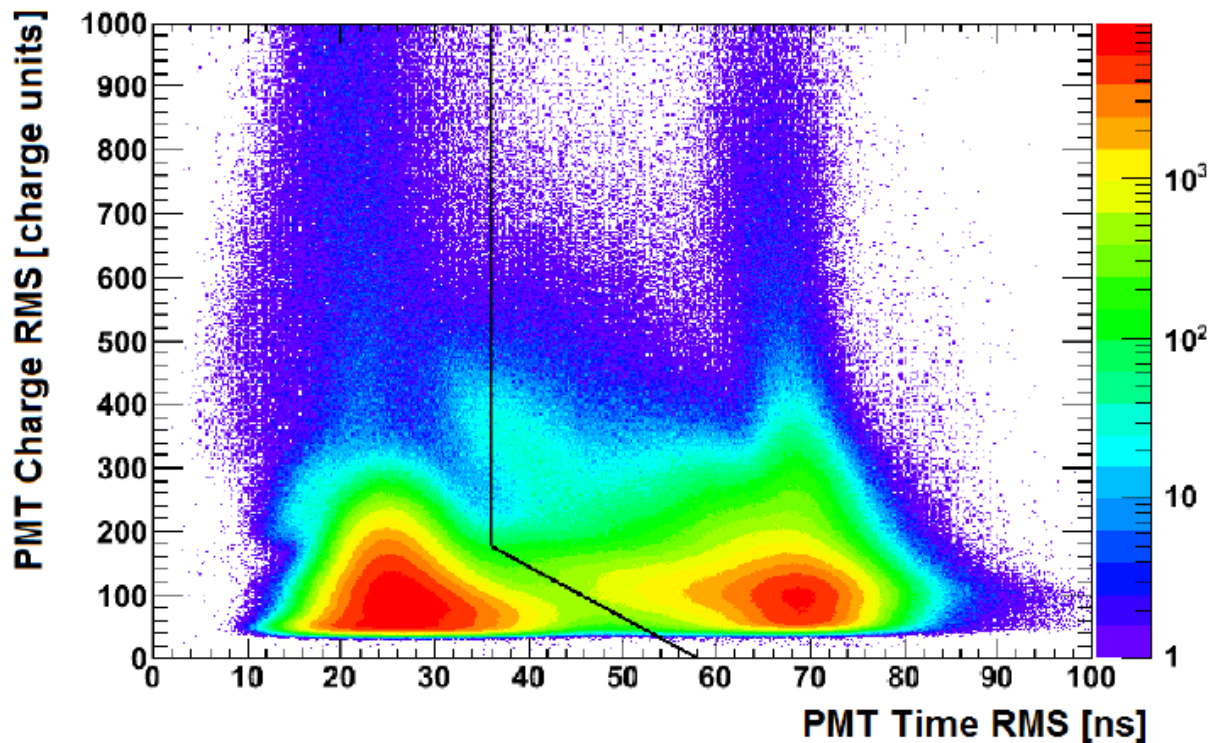
Chooz実験 反電子ニュートリノ

- 相関がなければ、独立なカットと考えられる

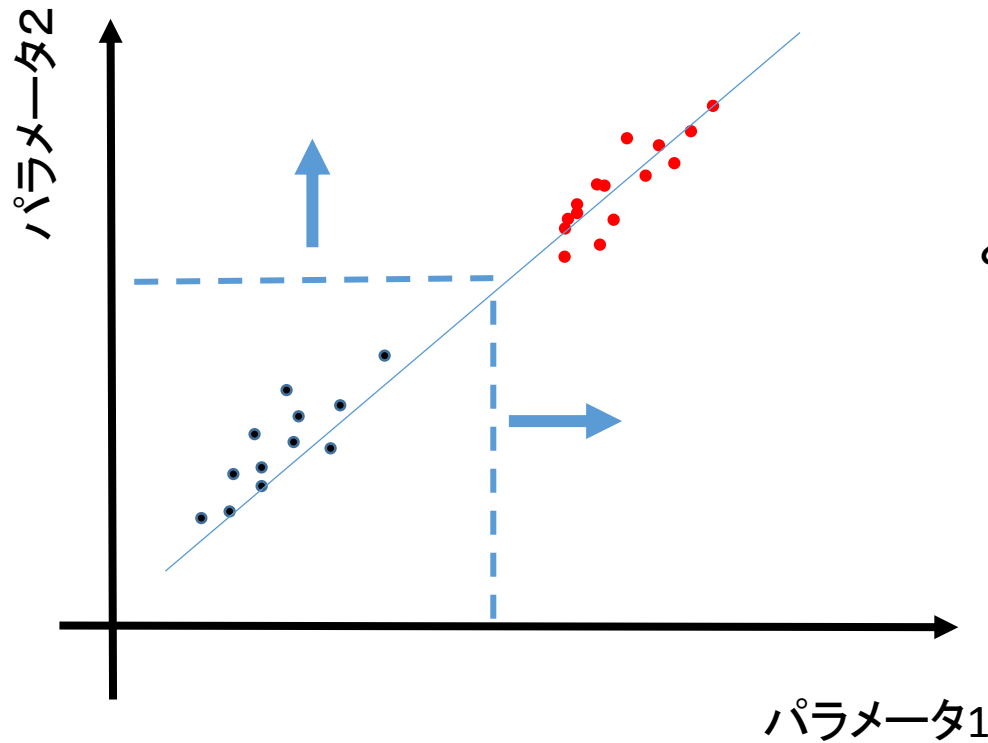
# 2次元でのカット

- 系統誤差を増やさないか？

DoubleChoozでの  
PMT Light Noise cut...



# セレクションパラメータの相関

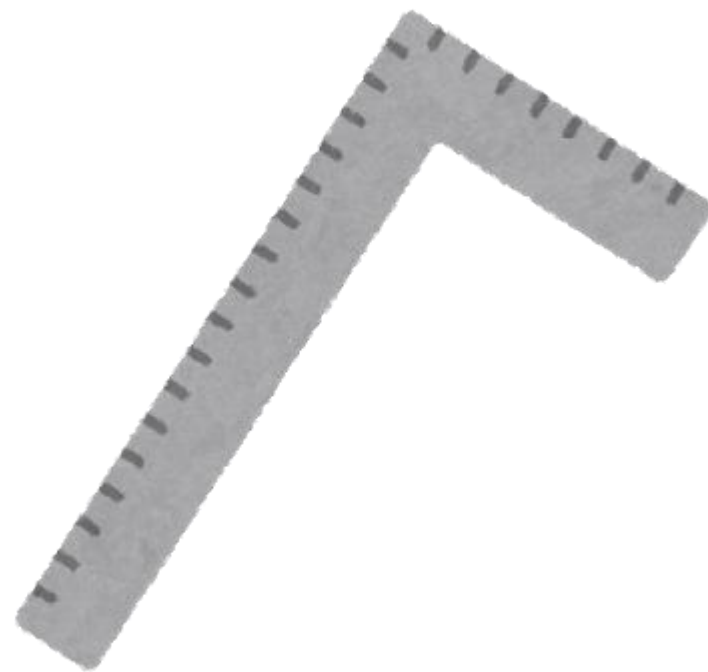


どちらのパラメータで  
カットしても同じ!

何回も面接がある  
就職人事選考のようなもの?



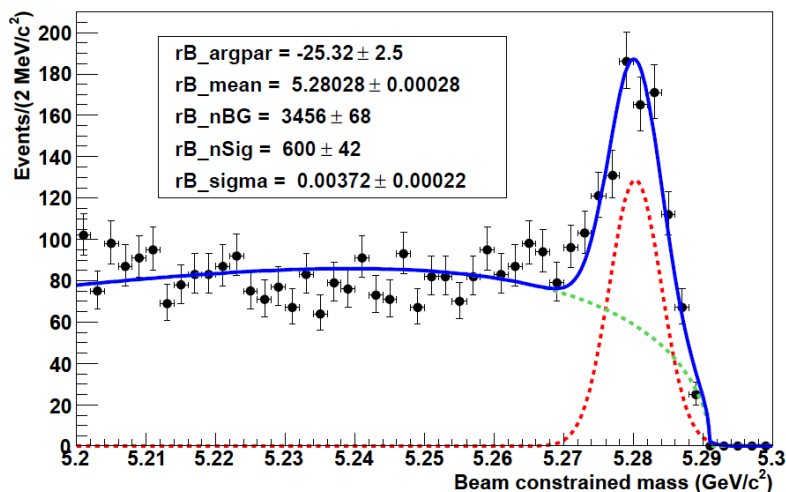
# 解析：系統誤差



# 系統誤差の例：検出効率の不定性

## 崩壊分岐比の測定

- 例)  $B^0 \rightarrow D^- \pi^+$  の崩壊分岐比 (Branching Ratio: BR)
  - 再構成して #signal を算出
  - $B^0 \rightarrow D^- \pi^+, D^- \rightarrow K_S \pi^-, K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-, (\pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^- @ \text{終状態})$



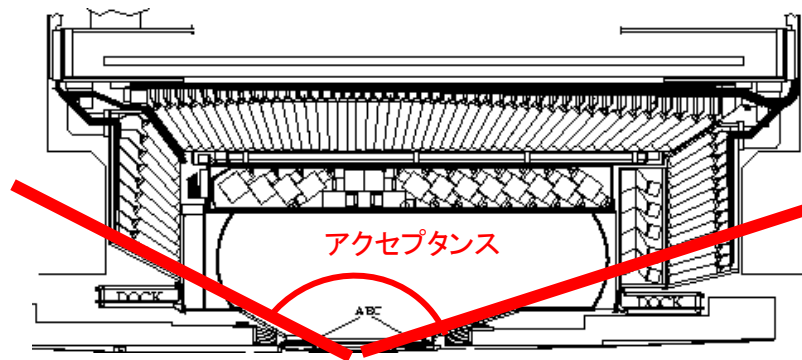
$$BR = \frac{\#signal}{\#BB \times Eff. \times BR_{sub}}$$

$\Gamma(D^- \pi^+)/\Gamma_{total}$					$\Gamma_{31}/\Gamma$
VALUE (units $10^{-3}$ )	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT	
<b>2.68 ± 0.13 OUR FIT</b>					
<b>2.68 ± 0.13 OUR AVERAGE</b>					
2.55 ± 0.05 ± 0.16		1 AUBERT	07H BABR	$e^+ e^- \rightarrow \Upsilon(4S)$	

系統誤差

# 系統誤差：検出効率の不定性

- 検出効率(再構成効率):
  - 高ければ良いのか？
  - 同時に、不定性が小さい方が良い



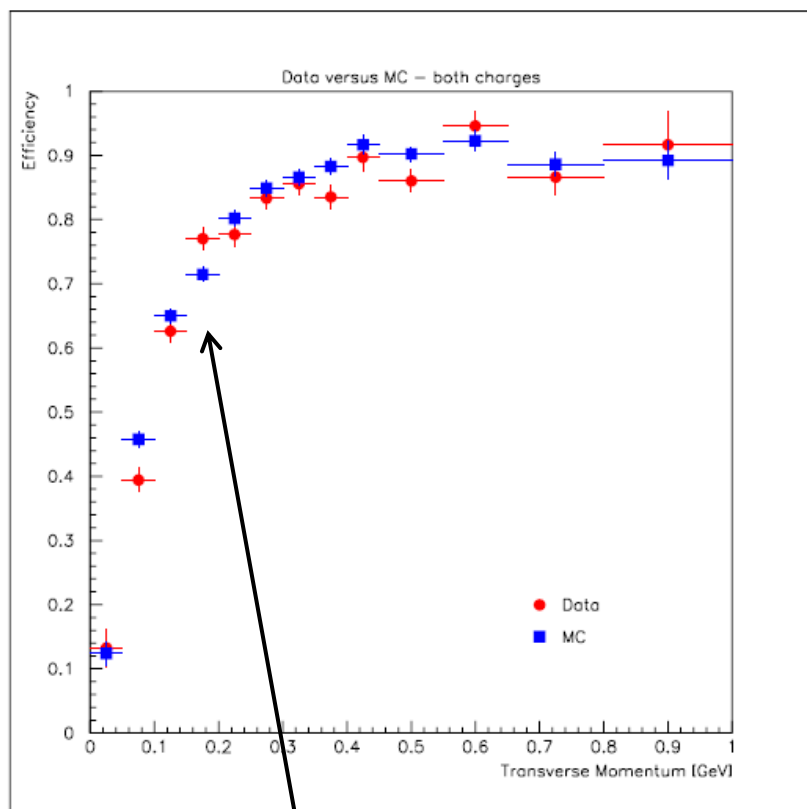
Belle検出器：密閉性(Hermeticity)が悪い

- 検出効率の計算
  - MCで計算する=再構成事象数/発生事象数
  - MCの不正確さがそのまま影響する
    - 頼りすぎない方が良い

- 崩壊比が既知で類似の崩壊モード(コントロールモード)を用いる

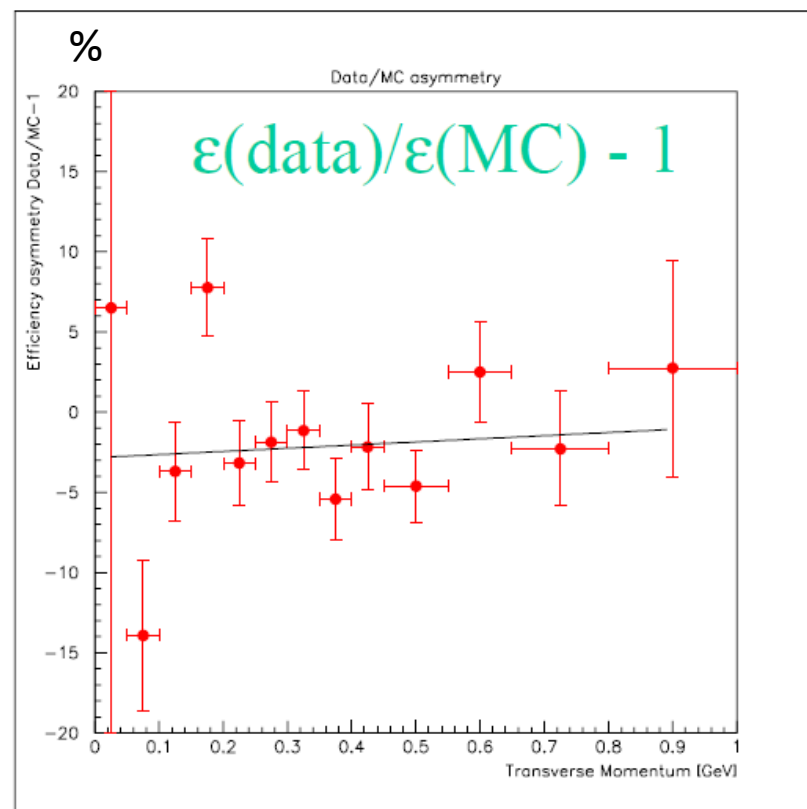
$$\frac{\text{測定モード分岐比}}{\text{コントロールモード分岐比}} = \frac{\text{測定モード} \left( \frac{\text{データ}}{MC} \right)}{\text{コントロールモード} \left( \frac{\text{データ}}{MC} \right)}$$

# Belle 飛跡再構成効率



半径が小さい  
ヒットが少ない。  
飛行中崩壊

Pt (GeV)  
横運動量



Pt (GeV)

# 解析に苦労した例

Charge asymmetry of  $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$

---

## CP VIOLATION

$A_{CP}$  is defined as

$$\frac{B(B^- \rightarrow \bar{f}) - B(B^+ \rightarrow f)}{B(B^- \rightarrow \bar{f}) + B(B^+ \rightarrow f)},$$

the CP-violation charge asymmetry of exclusive  $B^-$  and  $B^+$  decay.

### $A_{CP}(B^+ \Rightarrow J/\psi(1S)K^+)$

<u>VALUE</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
<b>0.003 ± 0.006 OUR AVERAGE</b>	Error includes scale factor of 1.8. See the ideogram below.		
0.0059 ± 0.0036 ± 0.0007	ABAZOV	13M D0	$p\bar{p}$ at 1.96 TeV
-0.0076 ± 0.0050 ± 0.0022	SAKAI	10 BELL	$e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S)$
0.09 ± 0.07 ± 0.02	<sup>1</sup> WEI	08 BELL	$e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S)$
0.030 ± 0.014 ± 0.010	<sup>2</sup> AUBERT	05J BABR	$e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S)$
0.018 ± 0.043 ± 0.004	<sup>3</sup> BONVICINI	00 CLE2	$e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S)$

PRD82, 091104 (2010) K.Sakai et.al. (Belle collaboration)

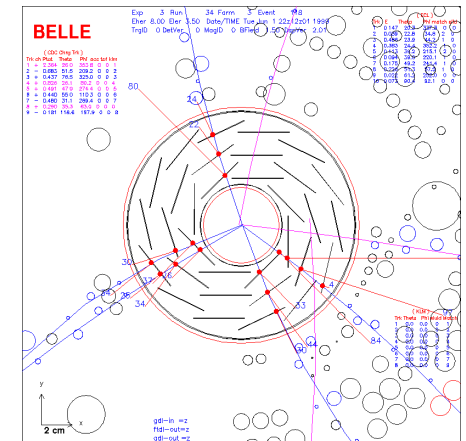
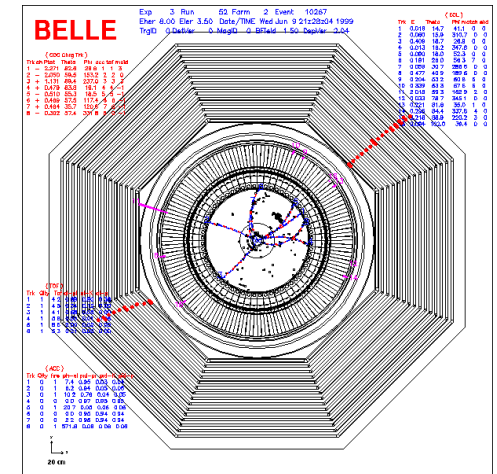
# Charge asymmetry of $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$

$$A_{cp}^{B^-} = \frac{Br(B^- \rightarrow J/\psi K^-) - Br(B^+ \rightarrow J/\psi K^+)}{Br(B^- \rightarrow J/\psi K^-) + Br(B^+ \rightarrow J/\psi K^+)}$$

- 高統計のモード(分岐比 $\sim 10^{-3}$ )
  - イベント数は十分にある
  - S/Nも良い  $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm \rightarrow \mu^+\mu^-K^\pm, e^+e^-K^\pm$
- 検出効率の非対称性 ( $K^+ \rightleftharpoons K^-$ )
  - 物質との相互作用の違い
    - 粒子識別の非対称性( $\pi/K$ )
  - 測定器の対称性
    - $K^+/K^-$ 磁場で曲がる方向が逆
    - そもそも測定器が対称か?

$B^\pm \rightarrow D^0 \pi^\pm$   
 $\rightarrow K^\pm \pi^\mp \pi^\pm$   
 などを用いて、  
 非対称性を調べた

D0: 検出器の磁場を反転させて測定した



# 他に話したかったこと

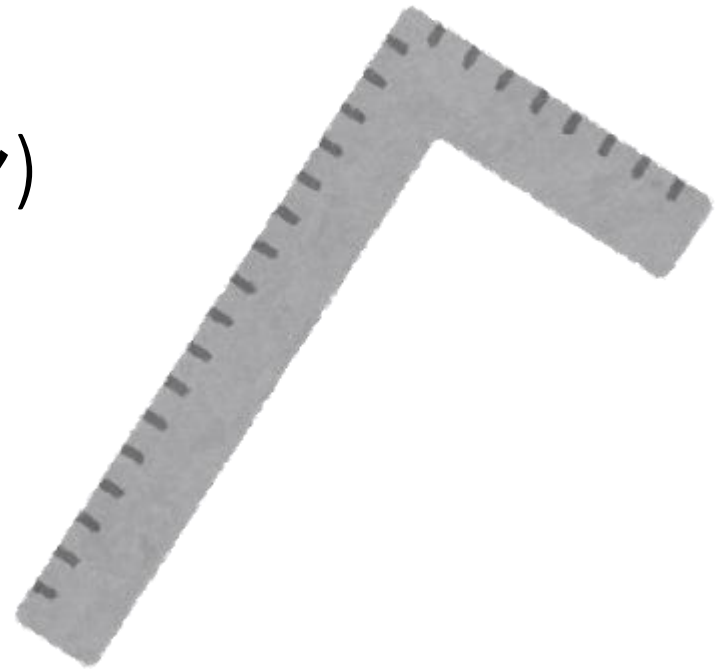
- 統計
- トリガー
- シミュレーション
- キャリブレーション

# まとめ

- 理論と実験
  - 双方の歩み寄りが大事
  - 出来ること/出来ないことをわかってもらうと  
画期的な新しい実験の提案をしてもらえるかもしれない
- 大実験グループでは、整備されたデータが使えますが
  - 与えられる情報のみで満足しないでください>実験の若い人
  - 改良してやろう、ぐらいの意気込みをお願いします
- 系統誤差
  - 統計誤差に比べて、解析の努力に依存します
  - 統計が増えるほど、解析は細かくなっていきます
- では、面白い話をたくさん聞きましょう



# 較正(キャリブレーション)

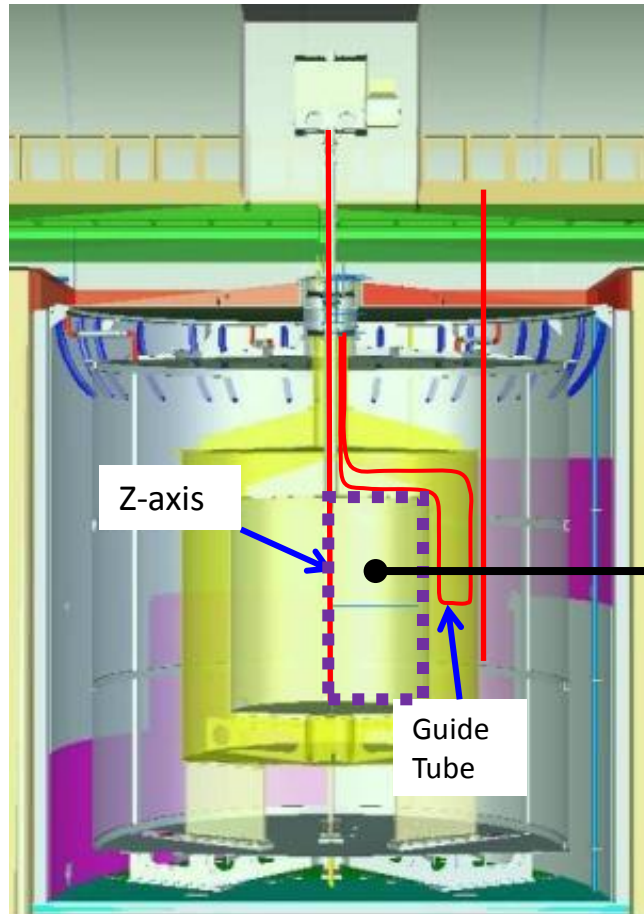


# 較正(キャリブレーション)

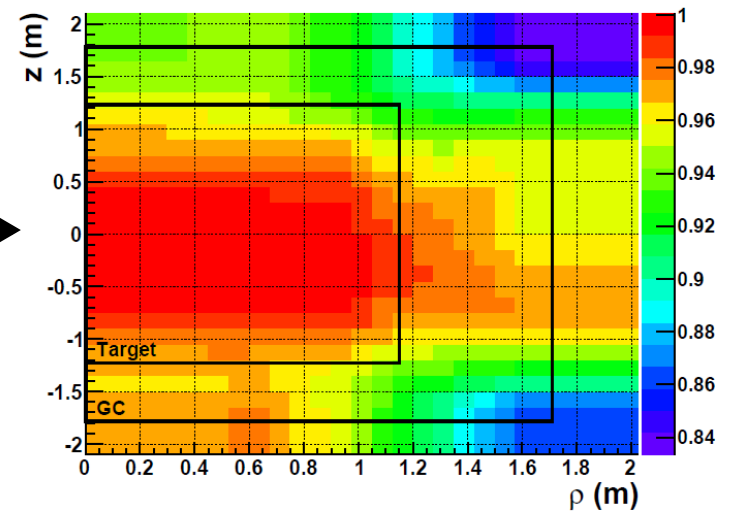
- 実験屋の苦勞のかなりの部分を占める
- エネルギー、運動量、時間の測定において
  - 目盛りを決める(測定値と物理量の対応付け)
  - 実験データを用いて行う
  - 特別なランで、較正データを収集することも
- 解析レベルでは
  - 再構成・検出効率
  - Miss-Identificationにも影響する

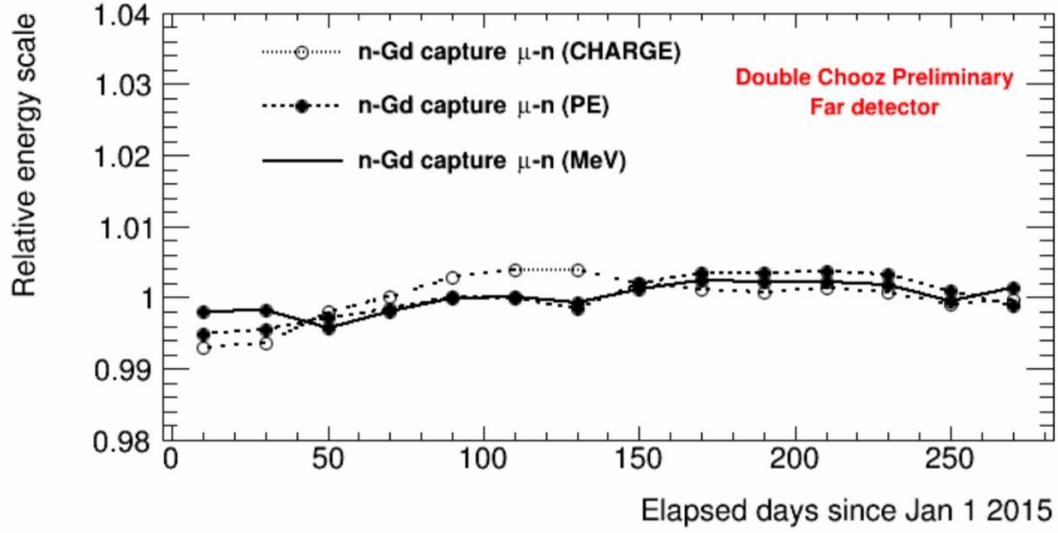
# エネルギー較正の例

- DoubleChooz: エネルギーキャリブレーション(マップ)



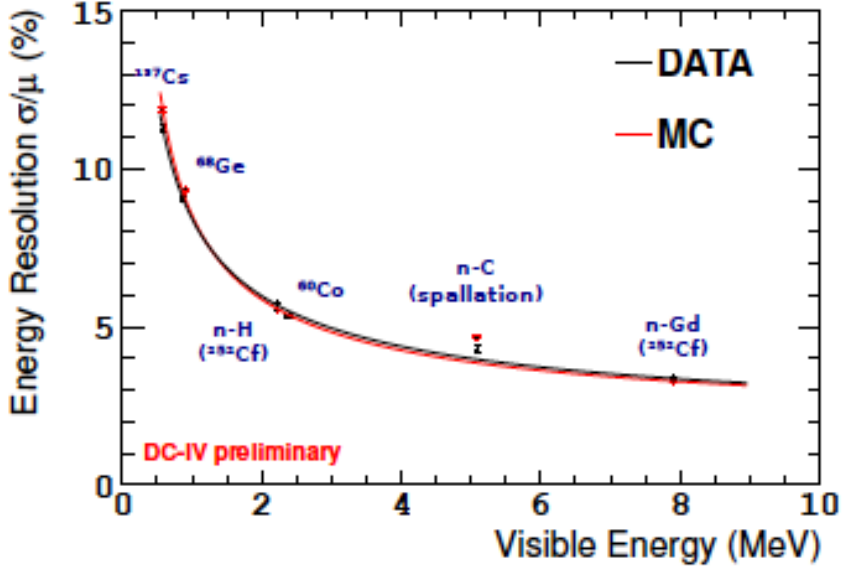
光量の位置依存性





長期時間安定性

FAR DETECTOR I



エネルギー分解能

# 数学的準備

- 自然単位系の導入
- 4元運動量の計算

全ての物理量の次元は、重さ  $[M]$ 、長さ  $[L]$ 、時間  $[T]$  の組み合わせで得られる。通常は MKS 単位を使い  $kg, m, s$  を単位にとる。エネルギーは  $[ML^2T^{-2}]$  の次元を持ち、ジュール  $= (kg \cdot m^2 s^{-2})$  が単位となるが、素粒子の世界では大きすぎる。単位としては一個の電子を 1 ボルトで加速したときのエネルギー、「電子ボルト」を使う。

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{Coulomb} \cdot \text{volt} = 1.602 \times 10^{-19} \text{joule} \quad (2.1a)$$

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV} \quad (2.1b)$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} \quad (2.1c)$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} \quad (2.1d)$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV} \quad (2.1e)$$

$$1 \text{ PeV} = 10^{15} \text{ eV} \quad (2.1f)$$

相対論からの公式

$$\beta = v/c$$

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$$

$$pc = mc^2 \beta \gamma$$

$$E = mc^2 \gamma$$

$$\beta \gamma = pc/mc^2$$

$$\gamma = E/mc^2$$

自然単位系では

$$\beta = v$$

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$$

$$p = m \beta \gamma$$

$$E = m \gamma$$

$$\beta \gamma = p/m$$

$$\gamma = E/m$$