

Belle II実験用中央飛跡検出器 Inner chamberの 製作・宇宙線テストと 読み出しエレクトロニクス のエネルギー損失分解能の 性能評価

奈良女子大学 峰村さつき

目次

- Belle II実験について
- Belle II実験のCDC(中央飛跡検出器)について
- Inner chamberの製作
- Inner chamberの宇宙線による動作確認
- テストチェンバーを用いたビームによる
エネルギー損失分解能の性能評価
- まとめ

Belle II実験について

Belle II 実験とは？

- Belle実験(1999年から2010年まで運転)
 - B中間子のCP対称性の破れの発見
 - 小林・益川理論を検証



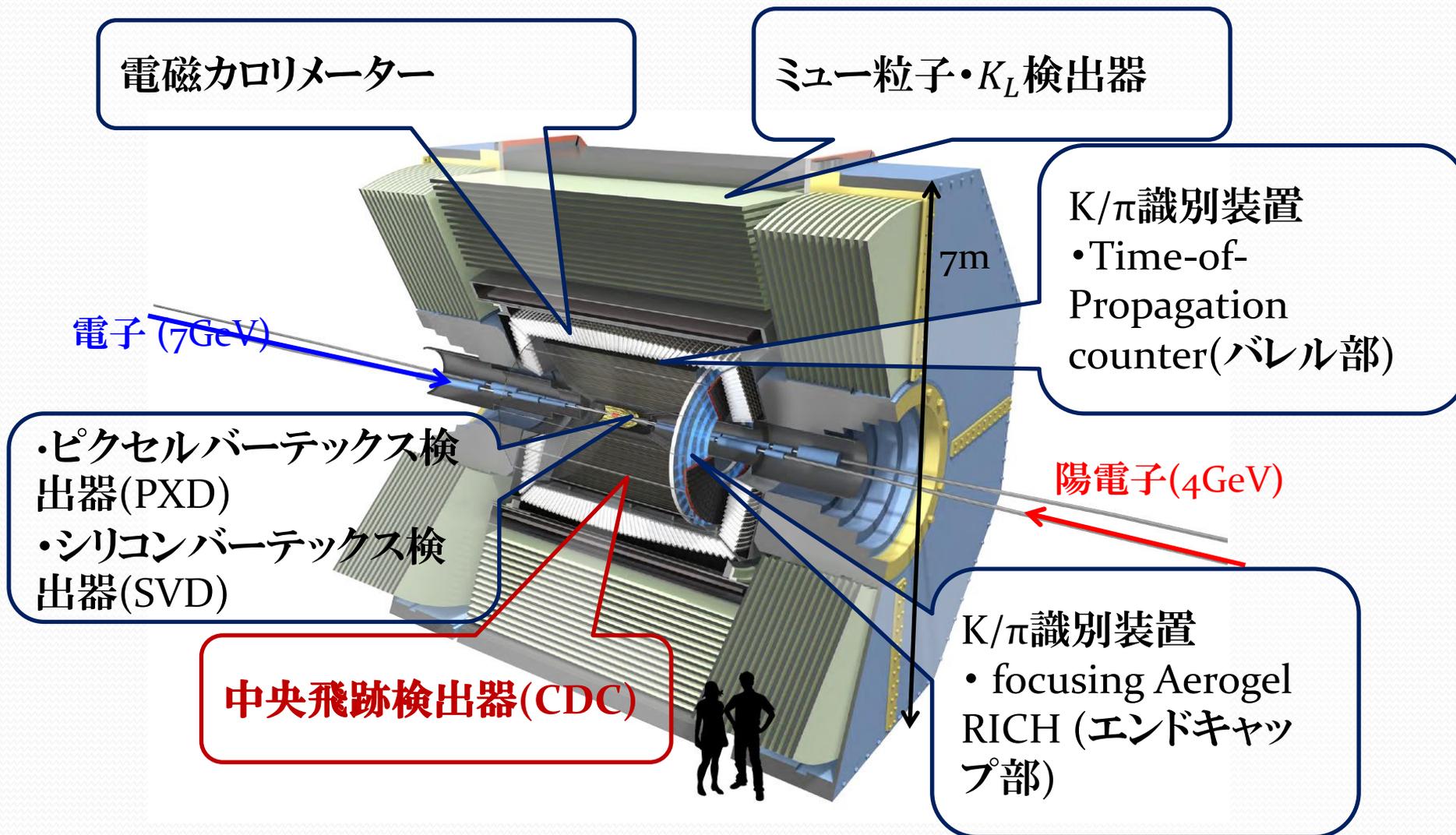
KEKB加速器&Belle検出器をアップグレード
Super KEKB加速器&Belle II検出器

- Belle II実験(2016年物理実験開始予定)
 - Super KEKB加速器:ルミノシティをKEKBの40倍へ
 - Belle II測定器:加速器の高度化に対応するよう
検出器をアップグレード

大量に生成されたB/D中間子, τ レプトンの
稀崩壊を精度よく測定

標準理論を超えた新しい物理の探索

Belle II測定器



Belle II実験のCDC(中央飛跡検出器) について

Belle II実験CDCの役割、要求性能

- 荷電粒子の飛跡の測定＝運動量を高い精度で測定

- 運動量分解能

$$\frac{\sigma_{P_t}}{P_t} \sim 0.3\% \sqrt{1 + P_t^2} \quad (P_t \text{ in GeV})$$

[σ_{P_t} :荷電粒子の横運動量の分散, P_t :荷電粒子の横運動量]

- 位置分解能

$$\sigma_{r\phi} = 100\mu\text{m}, \sigma_z = 2.5\text{mm}$$

[$\sigma_{r\phi}$:ビーム軸に対して垂直な面の位置精度,

σ_z :ビーム方向の位置精度]

- エネルギー損失 dE/dx

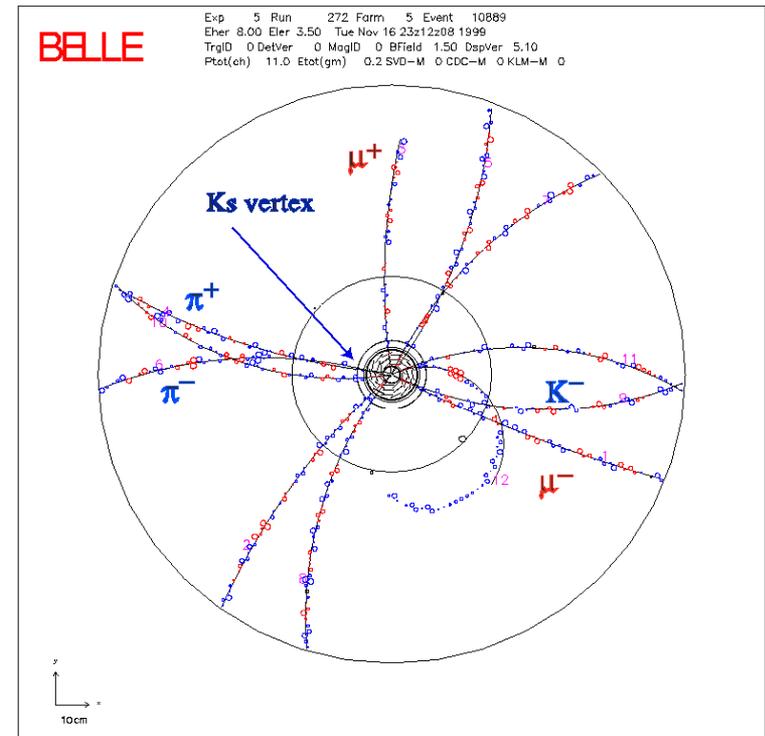
粒子識別の情報を取得

- エネルギー損失分解能 6%以内

- トリガー信号の形成

- 各検出器に位置情報を与える

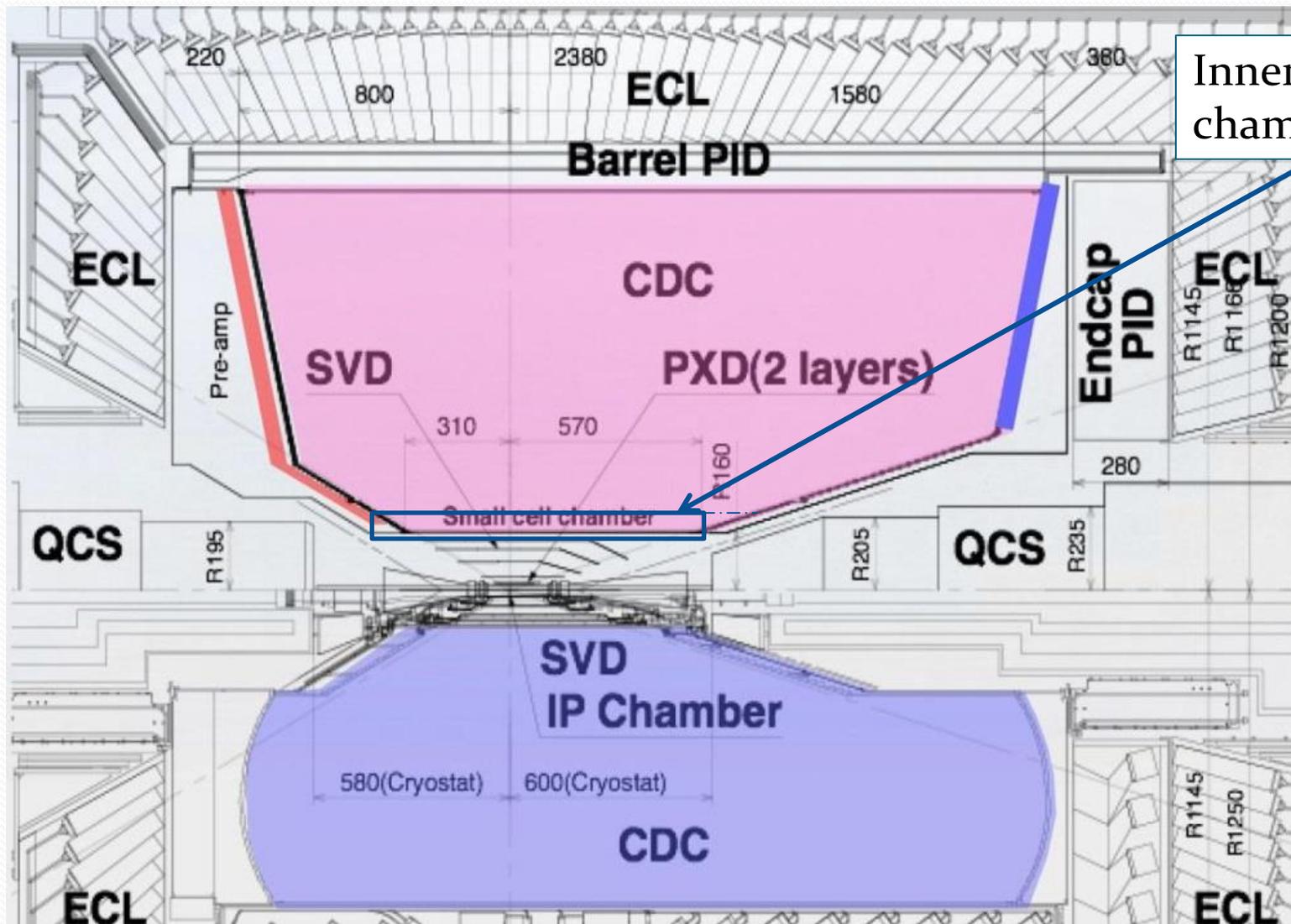
低物質質量であることが重要



CDCの構造

Belle II

Inner chamber



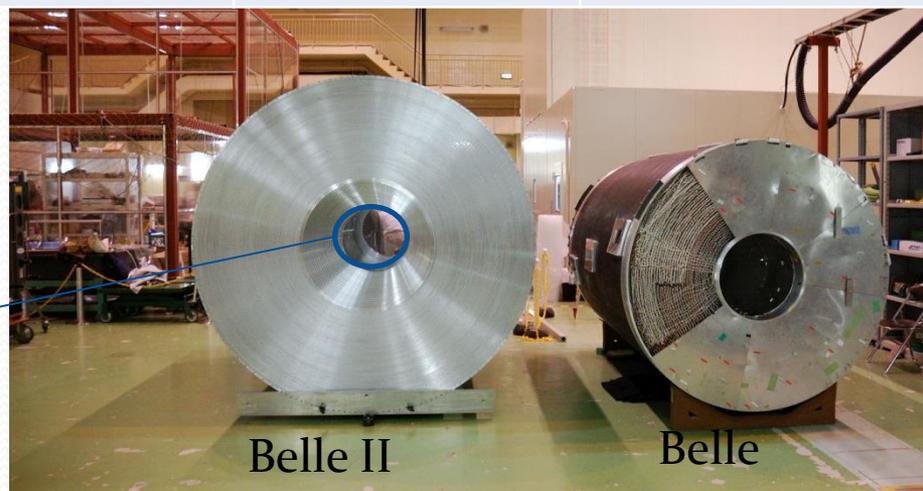
Belle

Belle II CDCにおける改善点

- 内筒半径の拡大
 - 放射線の高い領域を避ける
 - SVDに場所を提供
- 外筒半径の拡大
 - 運動量分解能
 - エネルギー損失分解能向上
- 信号数が1.7倍に増える

	Belle	Belle II
内筒半径(mm)	77	160
外筒半径(mm)	880	1130
信号ワイヤー(本)	8400	14336
層数	50	56
ガス	ヘリウム50% + エタン50%	ヘリウム50% + エタン50%
信号ワイヤーの直径(μm)	30	30

ここに
Inner
Chamber
が入る



Belle II CDCの高レート対策

- 最内部でビームバックグラウンド増大によるtracking efficiency低下のおそれ



そこで

- Inner chamberのセルサイズを小さくする

セルサイズ: 径 10(mm) × 周 6.6~9.5(mm)
(メインのcell size: 18(mm) × 10.1~18.2(mm))

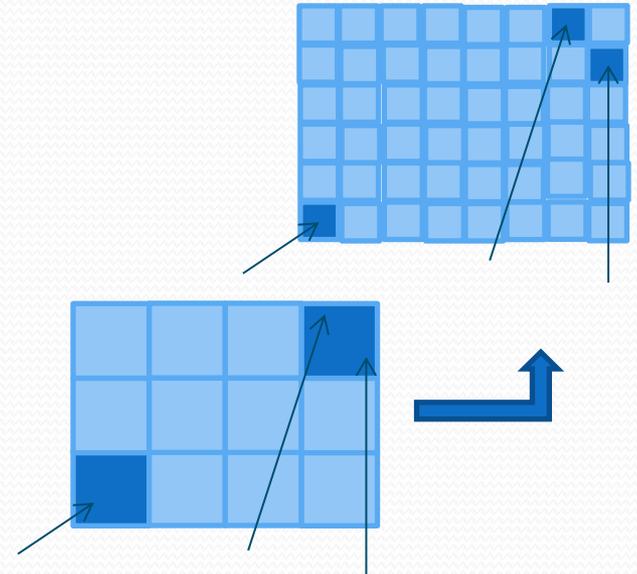
- 1, wire1本あたりのヒットレート低減
- 2, 最大ドリフト時間の縮小
- 3, 高い位置分解能の実現(~100um)

- 新しい読み出しエレクトロニクス

- 1, 連続的に波形を測定(FADCを使用)

Pre-ampの後のShaperで、shaping timeを短縮
時間的に近接した信号の分離能力向上

- 2, 高いトリガーレートに対して、Dead time無しのデータ収集システム(パイプライン読み出し)

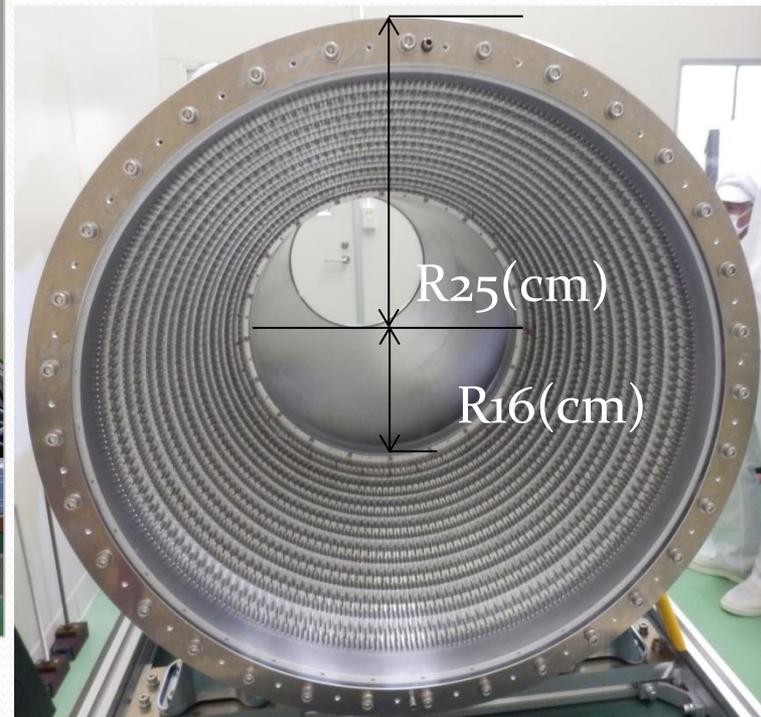
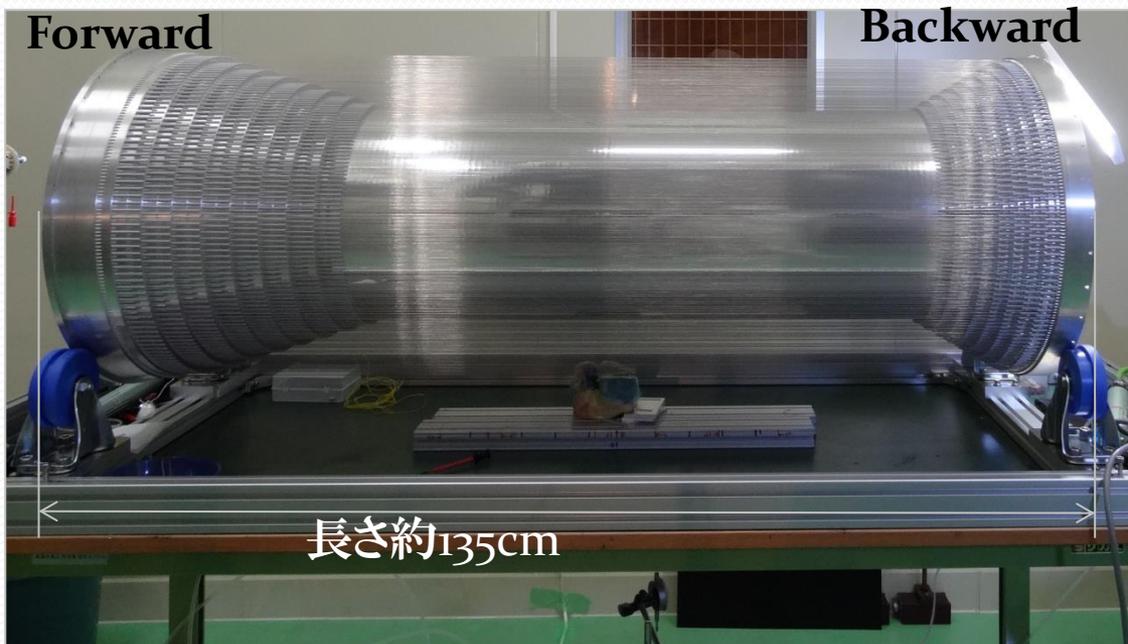




Inner Chamberの 製作

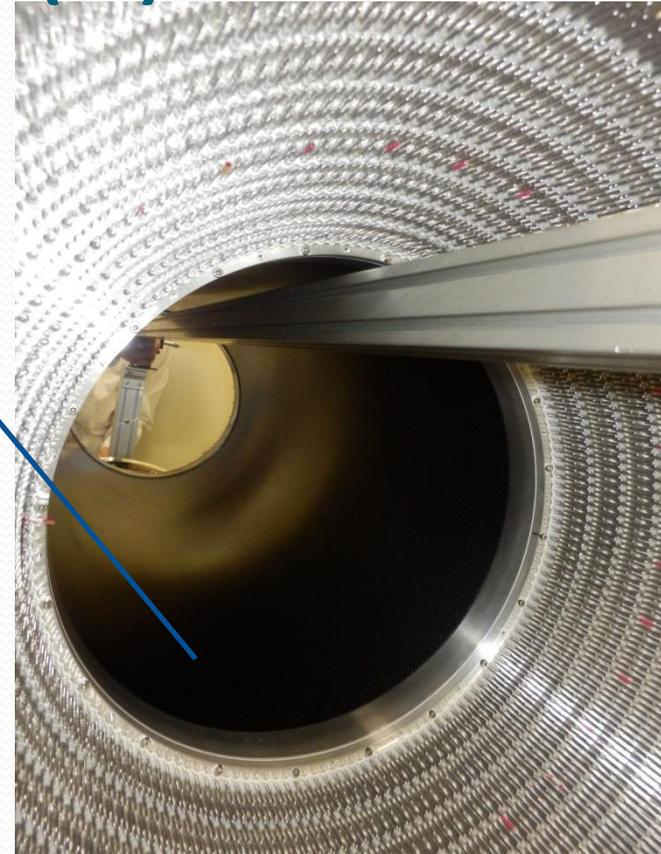
Inner Chamberとは?

- CDC最内8Layer分に相当
- サイズ:長さ約135(cm)×半径16~25(cm)
- ワイヤーの本数:5120本(信号ワイヤー: 1280本)



Inner Chamberの特徴(1)

- 低物質質量
高い運動量分解能を得るために重要
- Inner Chamber部の全張力(370kg)
- この張力を0.5mm厚のCFRP
(Carbon-Fiber-Reinforced Plastic)
による内筒で支える。



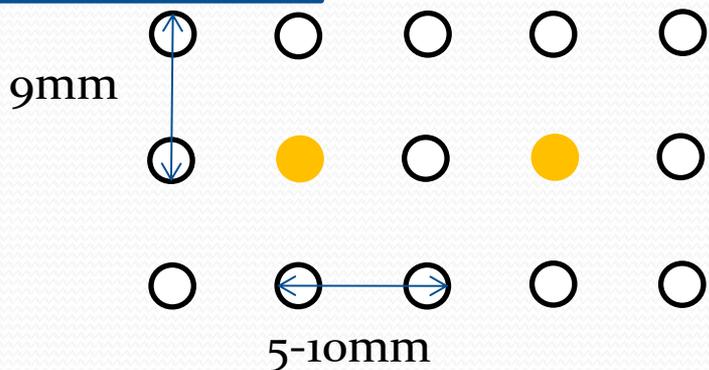
Inner chamber内筒部の
拡大図

Inner Chamberの特徴(2)

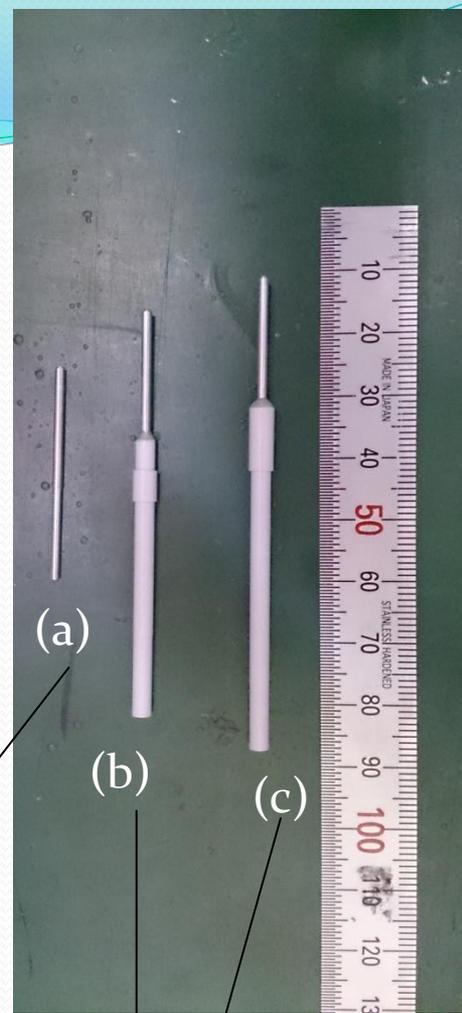
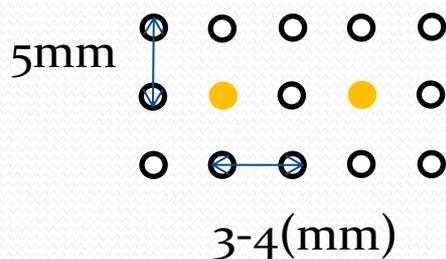
- 小さいセルサイズ

径10(mm) × 周6.6~8(mm)

CDC主要部



Inner chamber

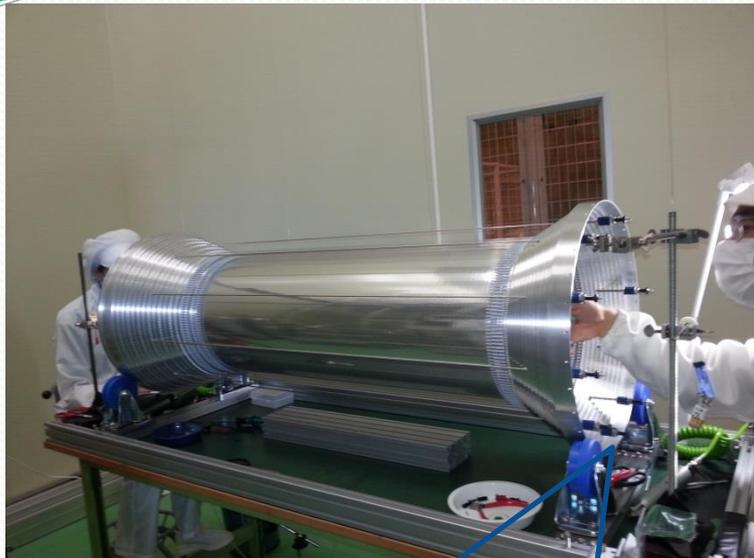


Field wire用

信号ワイヤー用

- ワイヤー固定用に特殊なツール(feedthrough)がInner chamberに必要

Inner chamber製作の様子



左右それぞれでワイヤーを張り、
固定。
片側が重りをワイヤーにかけるこ
とでテンションをかける。
作業工程はメインとほぼ同じ



外筒がないため、ワイヤーを外
からガイドすることが容易

Inner chamberの宇宙線による 動作確認

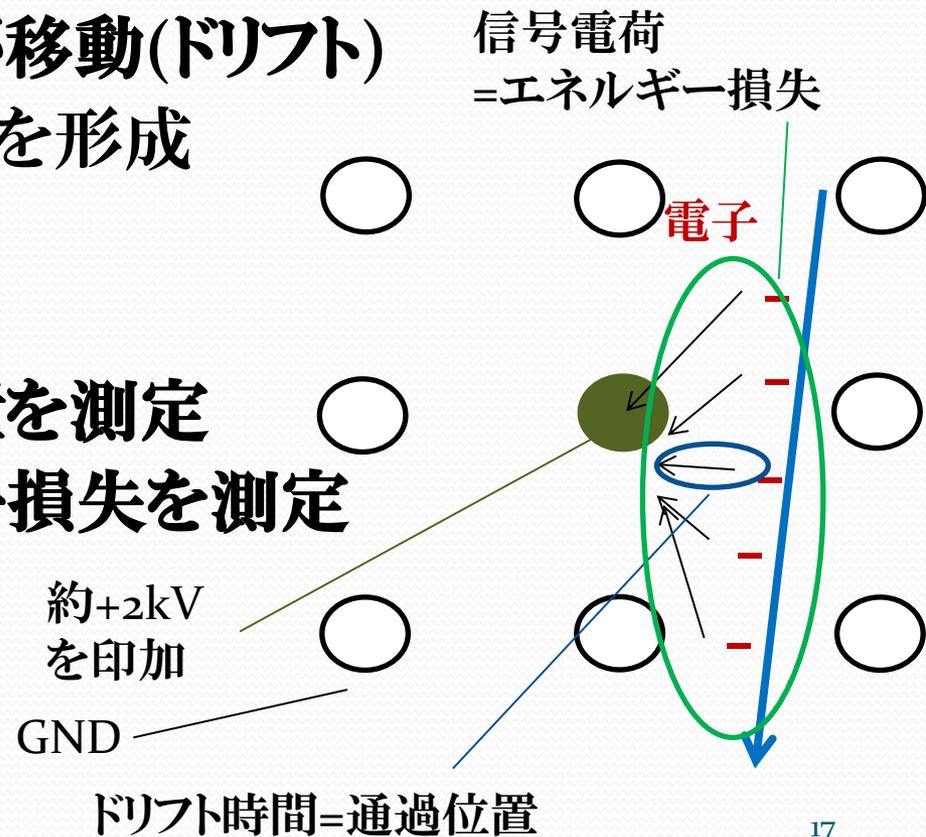
- ドリフトチェンバーの原理
- 宇宙線による信号の確認
 - オシロスコープによる信号
確認
 - ドリフト時間分布
 - エネルギー損失分布

Drift chamberの動作原理

- フィールドワイヤーを接地、信号ワイヤーに約+2kVかける
⇒ワイヤーを中心に電場ができる
- 荷電粒子はガス内を通るとき、ガス分子をイオン化させながら進む ⇒電子と正イオンを生成
- 電場により、生成された電子が移動(ドリフト)
- 信号ワイヤー付近で電子雪崩を形成



ドリフト時間から粒子の通過位置を測定
信号電荷から粒子のエネルギー損失を測定

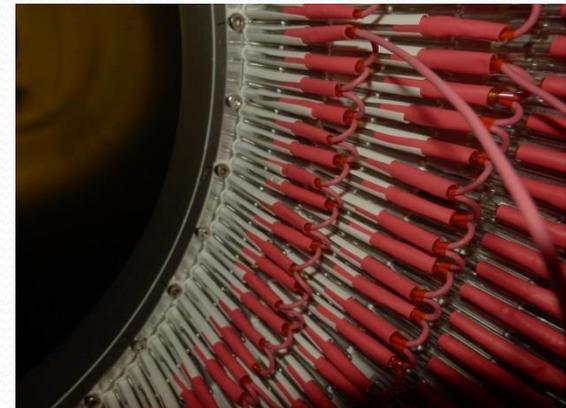


ガス漏れと漏れ電流

端部の構造が非常に複雑なため、
ガス漏れと放電の防止に工夫が必

- ガスリークテスト
 - 目標値 10cc/min
@差圧100mmH₂Oを達成
- HVテスト(ヘリウム50% + エタン50%)
 - 各層で定格のHVを印加
最内層1996V-第8層2091V
 - Gas gain: $\sim 2 \times 10^4$
 - 漏れ電流: 30nA以下(1280本の合計)

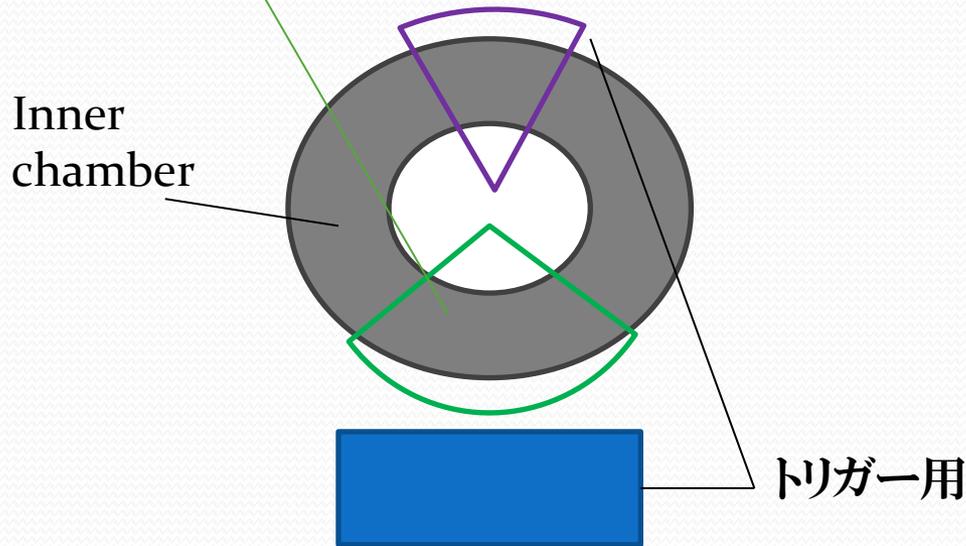
どちらも許容範囲と確認



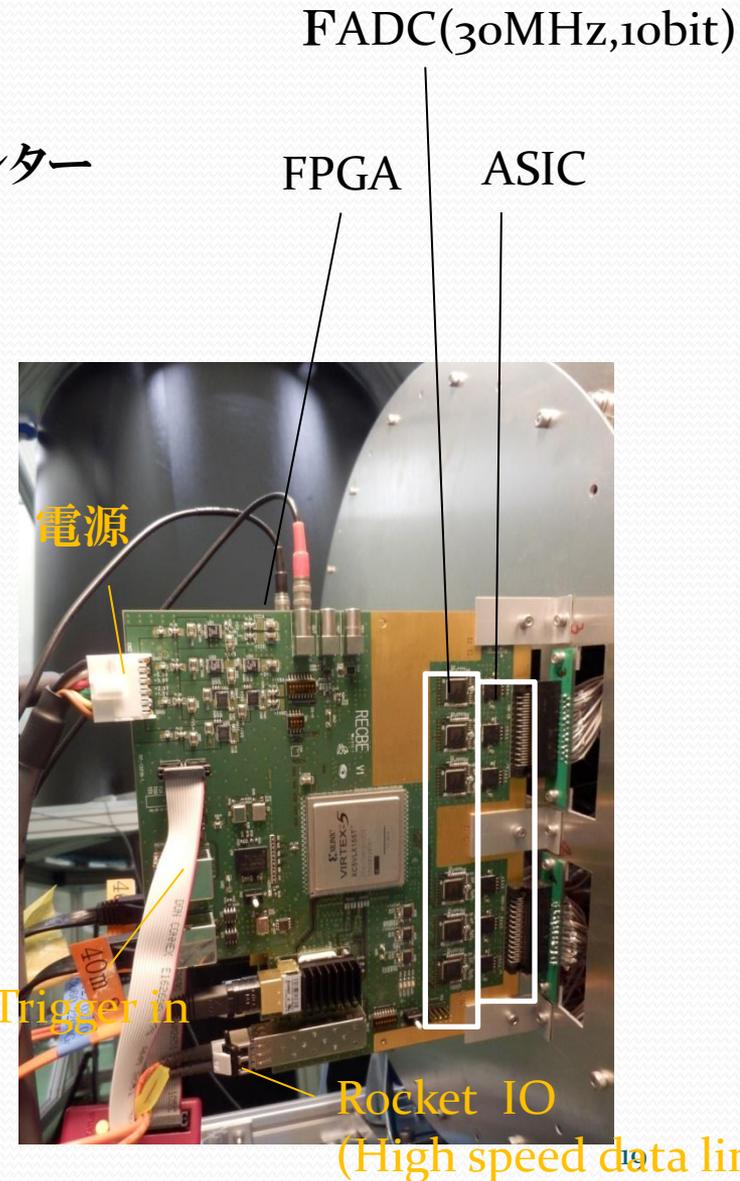
宇宙線による動作確認

セットアップ

- トリガー:
チェンバー上部 4ch +シンチレーションカウンター
- 試験領域:チェンバー下部6ch×8layerの48ch



シンチレーションカウンター
(size:厚さ12mm×縦70mm
×横300mm)

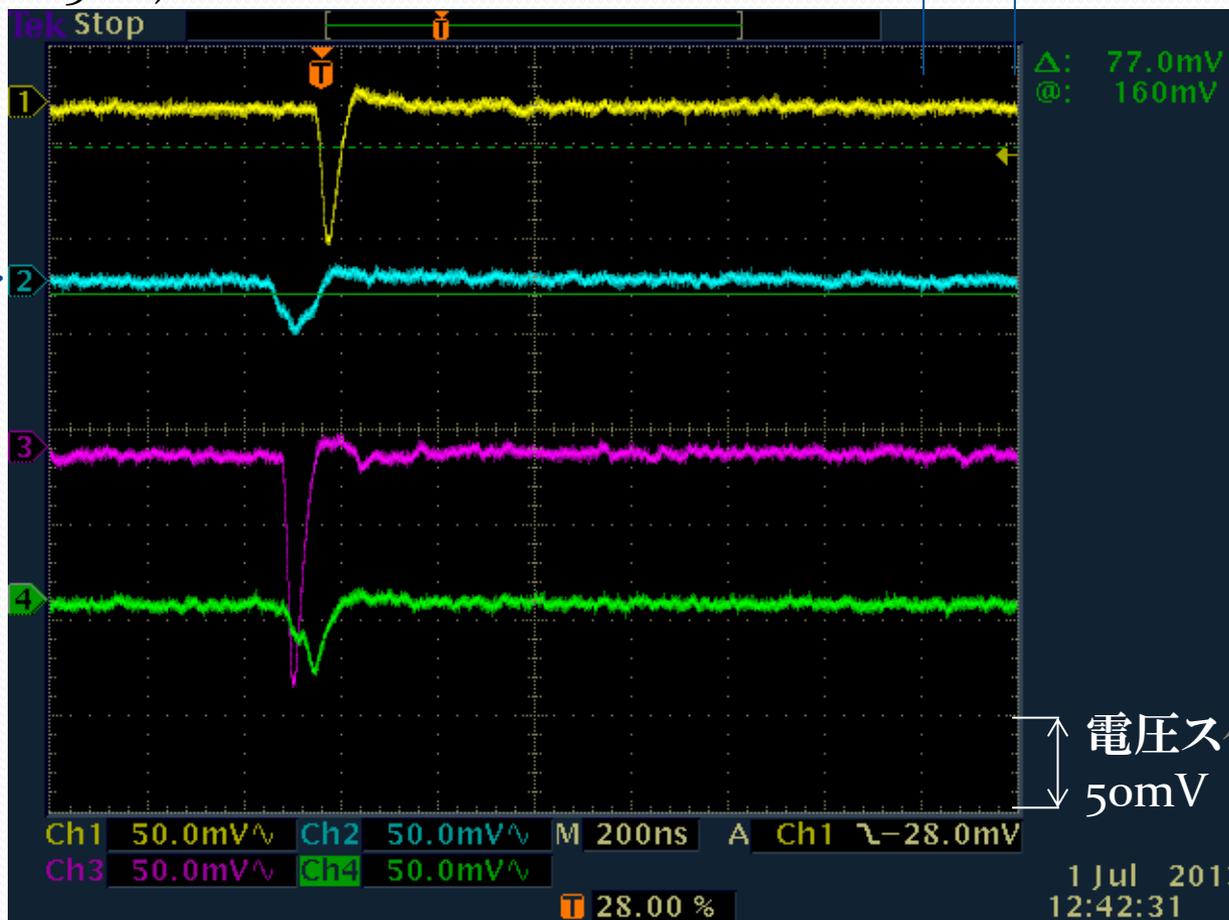


宇宙線による信号の確認

● 宇宙線の信号確認

(ヘリウム50% + エタン50%)

時間スケール: 200ns



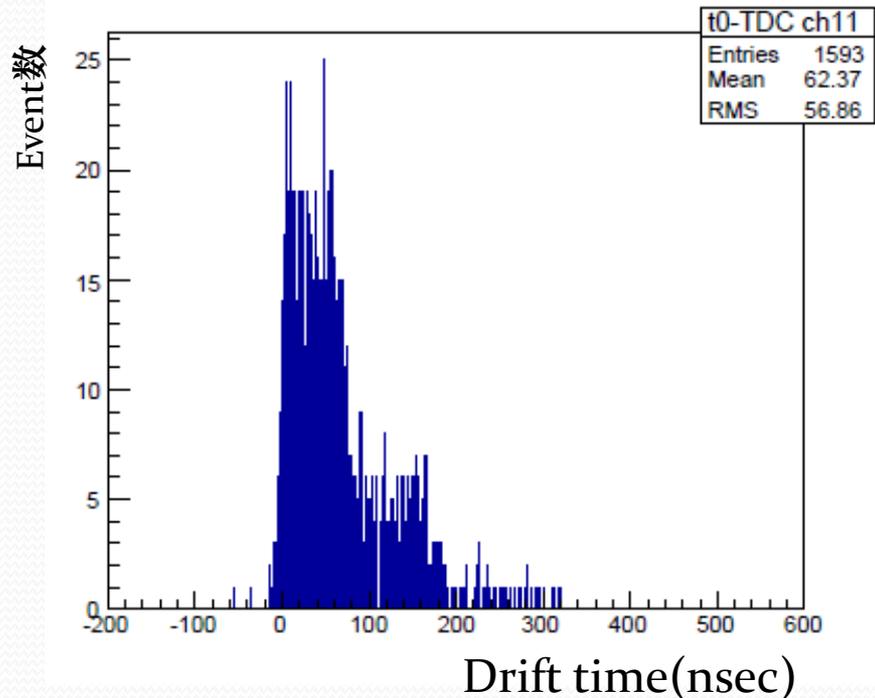
Layer 2,4,6,8に
垂直に一直線で
入った宇宙線

オシロスコープの画像

結果&考察

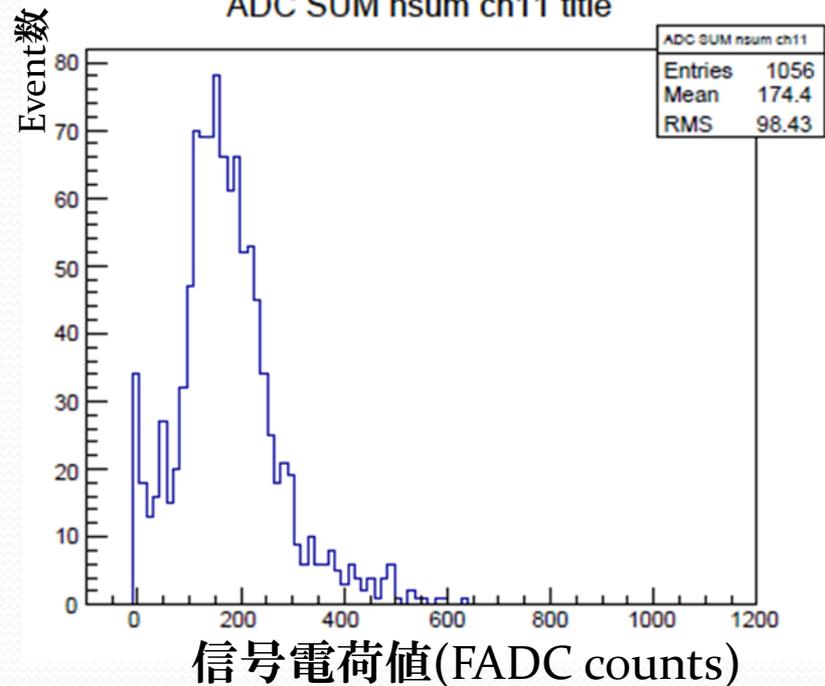
ドリフト時間分布

t0-TDC ch11 title



信号電荷分布

ADC SUM nsum ch11 title



- 最大ドリフト時間 100nsec以下
- ドリフト速度4cm/us(He-C₂H₆)
- 100nsecは0.4cm(セルサイズに対応)

信号電荷分布は明瞭なランダウ分布を示している。



期待通り動作していることを確認

テストチェンバーを用いた ビームによるエネルギー損失 分解能の性能評価

ビームテストの目的

- Belle II実験のCDCでは新規開発した読み出しエレクトロニクスを用いる。
- このエレクトロニクスをチェンバーに接続して高計数率下(30kHz)で十分な性能(エネルギー損失分解能)を得られるか確認するテスト実験を行った。
- この測定には、後述するテストチェンバーを使用。
- ビームテストはLEPSビームラインで実施。

テストチェンバー(2種類)

X chamber

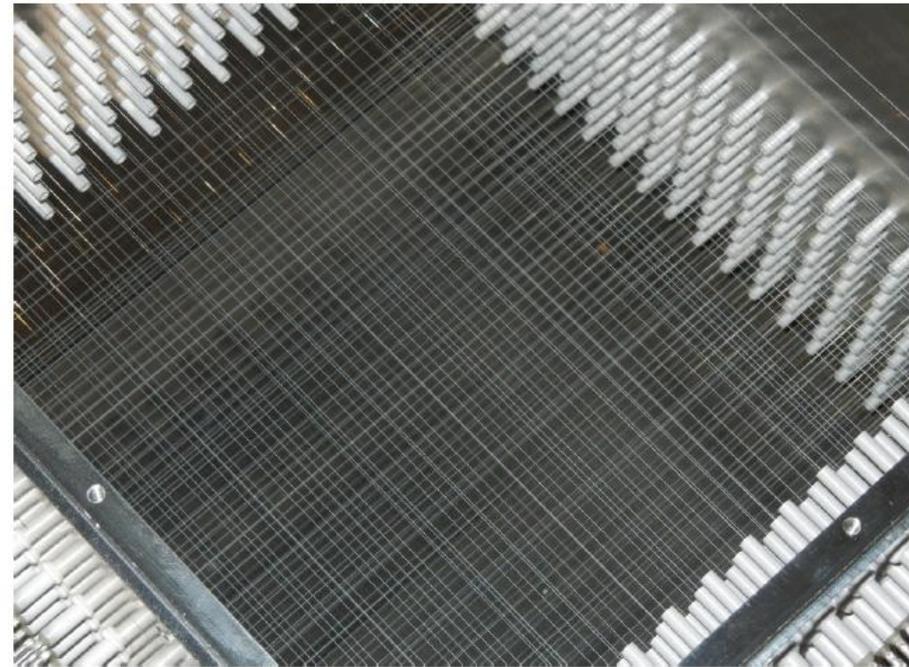
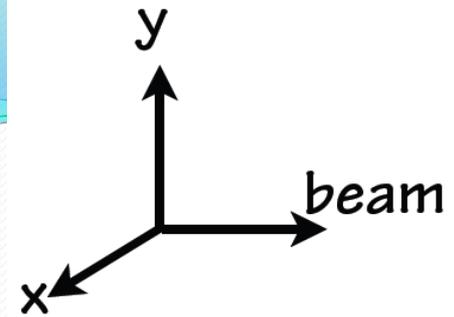
- 測定に使用するMain chamber



Axial 8layer ,wire length~490mm

XY chamber

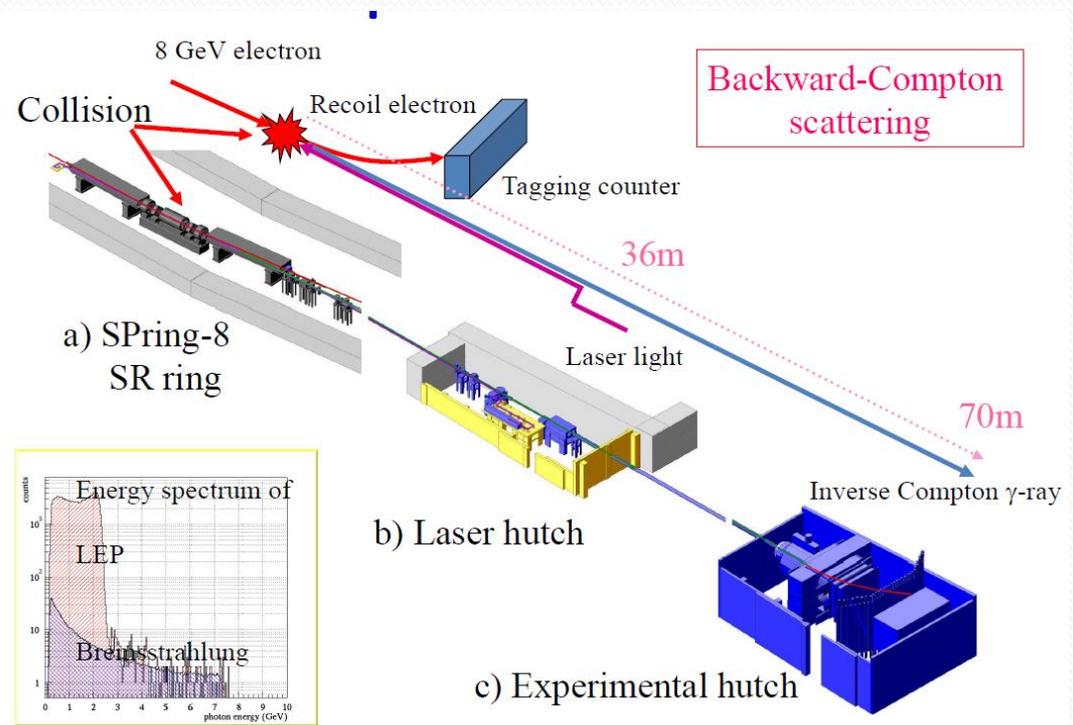
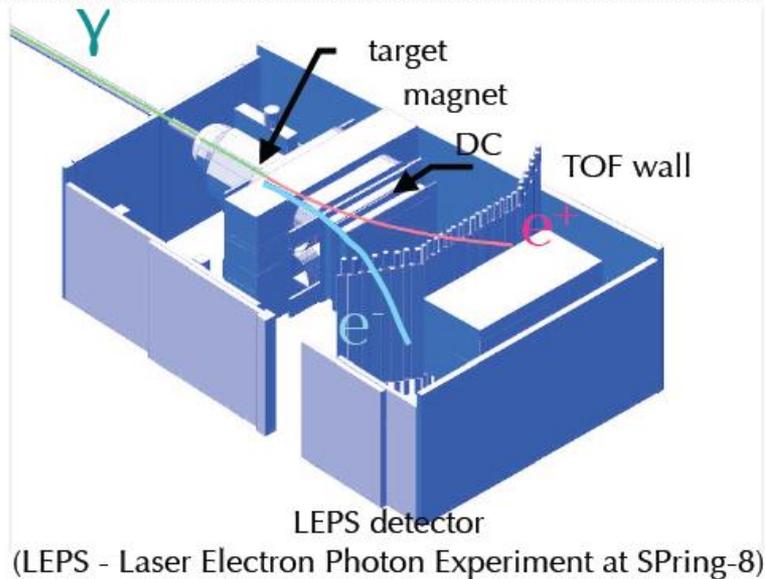
- リファレンス用のChamber
(前後に配置)



wire length~200mm

SPring8 LEPSビームライン

最高エネルギーが2.4 GeVの γ 線をコンバーター標的に当てて電子・陽電子対に転換し、 $\sim 1\text{GeV}$ の電子を使用。



セットアップ

Test Beam Area

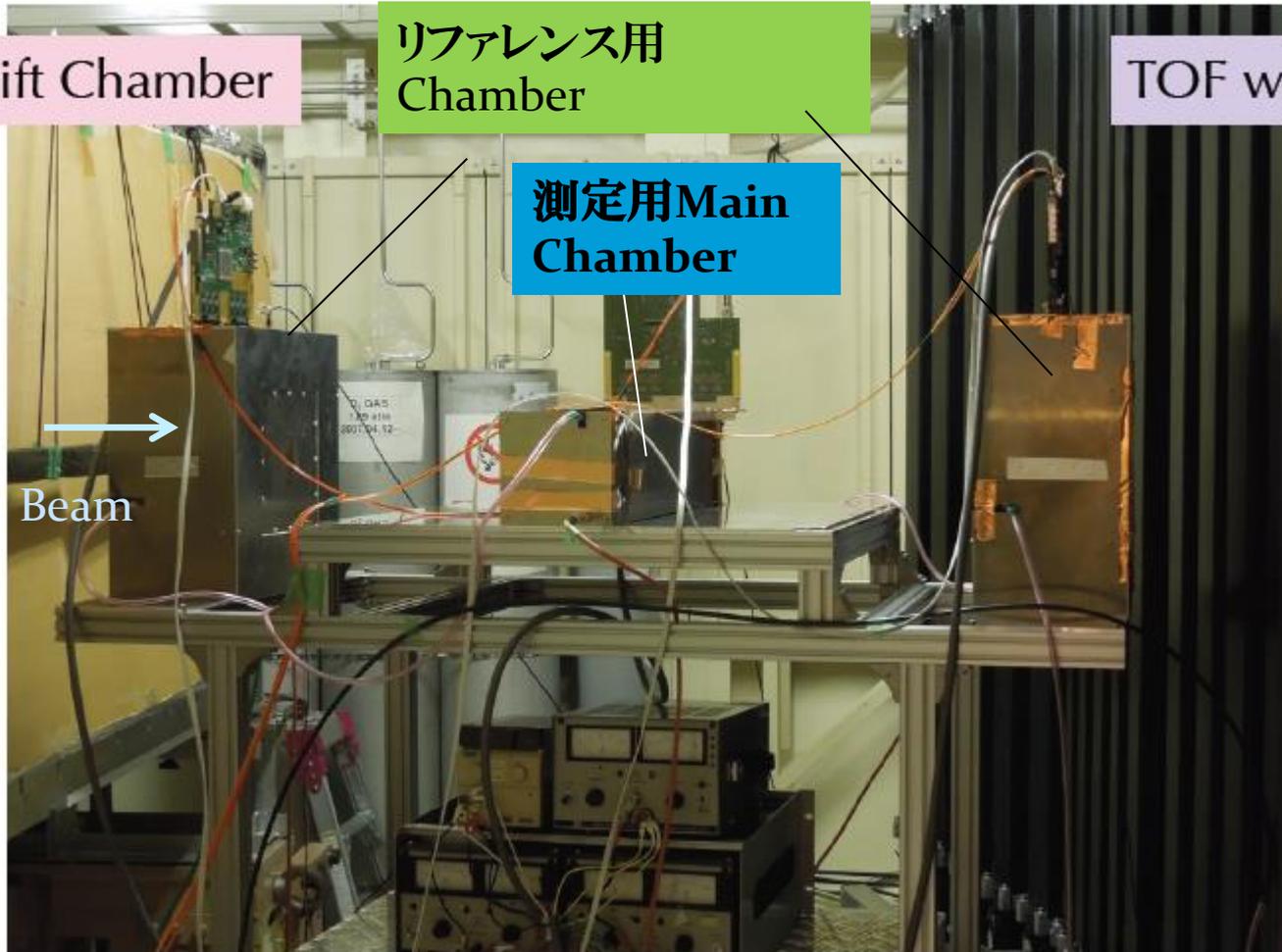
LEPS Drift Chamber

リファレンス用
Chamber

TOF wall

測定用Main
Chamber

→
Beam

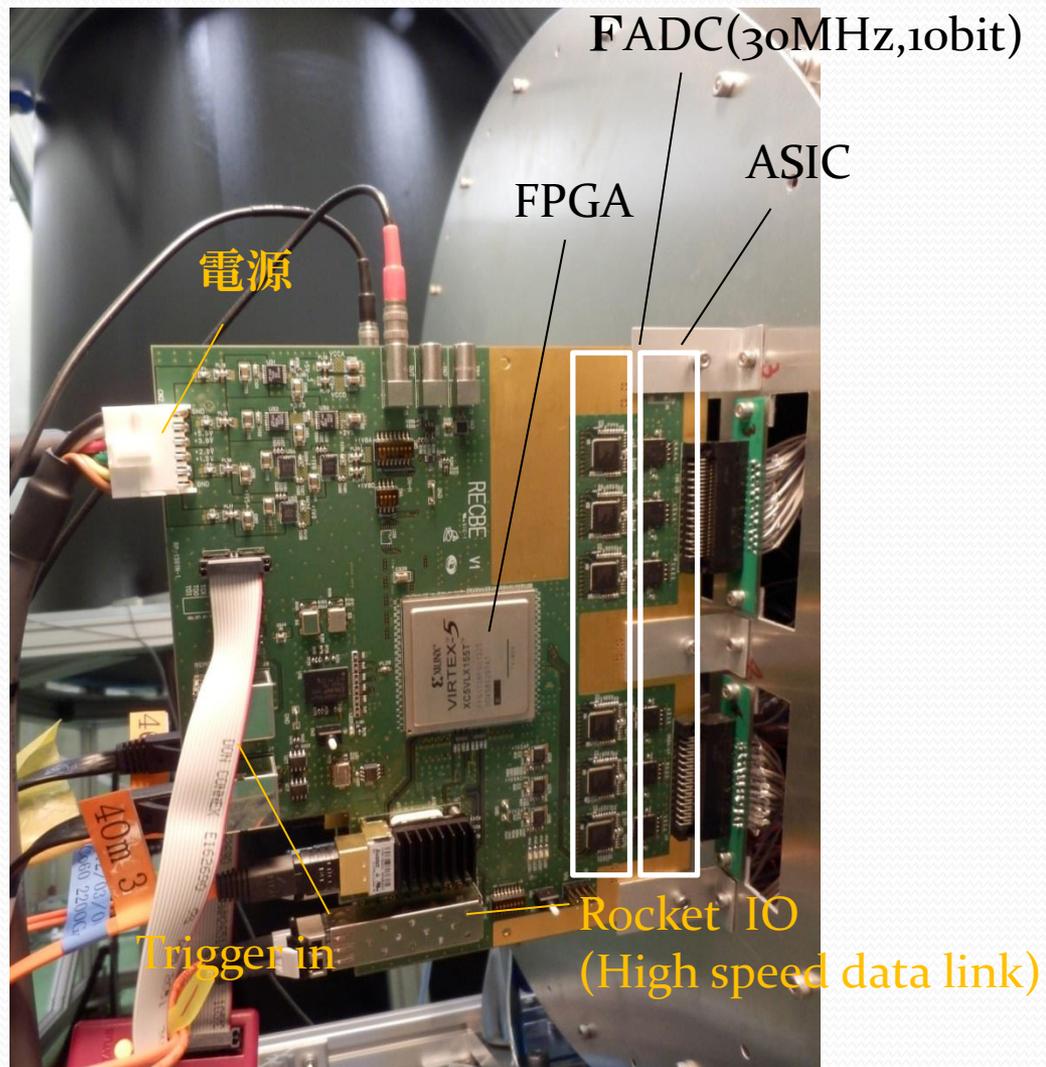


読み出しエレクトロニクス

Belle II実験の本番で用いる最終版のエレクトロニクスの構成になっている。
高いトリガーレート(30kHz)において要求性能を満たせるか確認を行うことが本実験の主目的である。

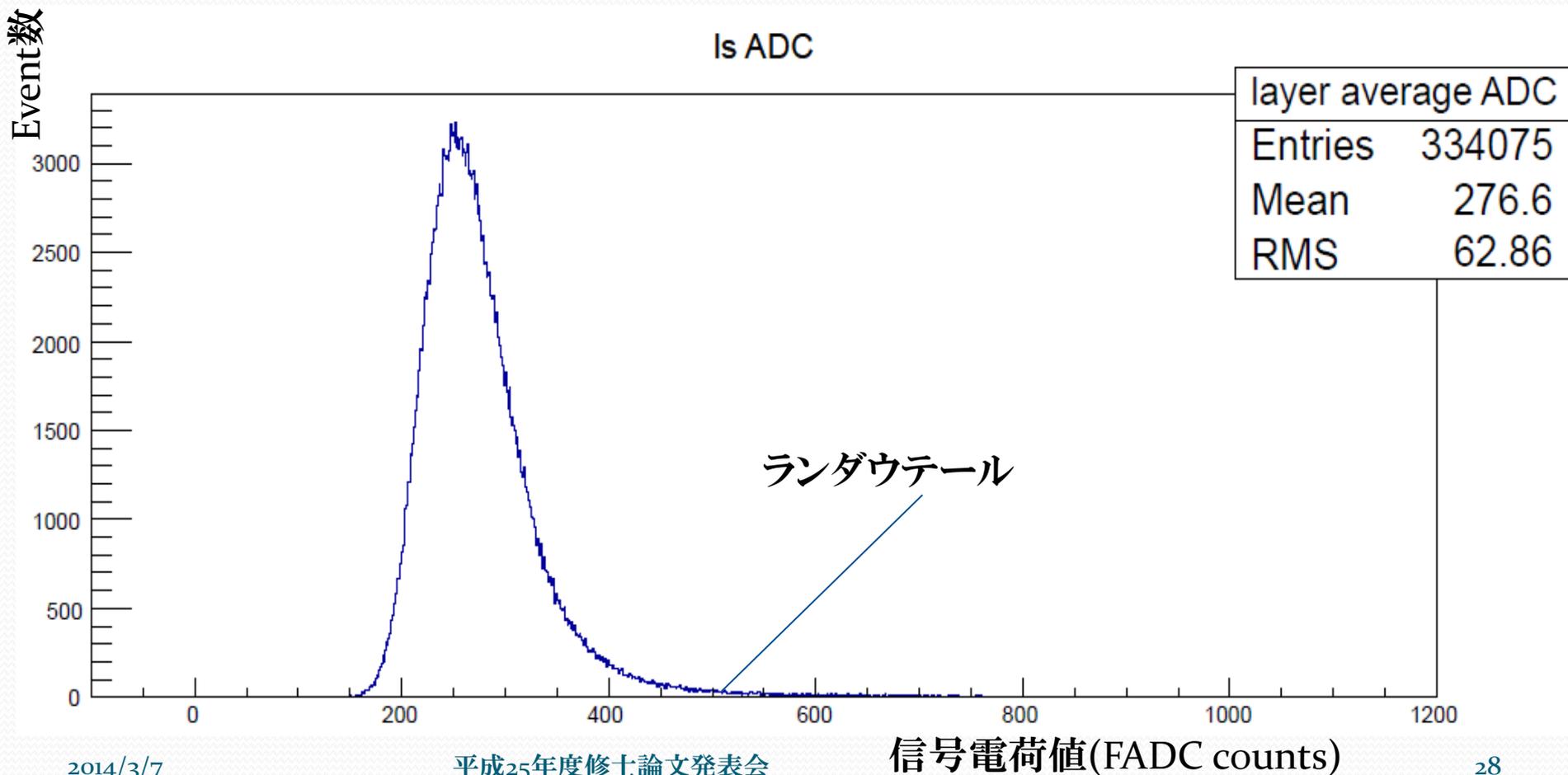
確認項目

- エネルギー損失分解能
(この部分を担当)



エネルギー損失の測定方法

- ひとつのセルをビーム電子が通過した際のエネルギー損失分布
 - ランダウ分布を示し高い値にテールを持つ。



Truncated Mean

- 荷電粒子は多くのセルを通過する。(Belle II実験では56点,この実験では12点)
- 荷電粒子のエネルギー損失は通過したセルの信号電荷量の平均値から求める。
- しかし、ランダウテールの部分を含めて平均値を求めると、分解能が悪化する。
- そこで、全測定点を信号電荷量値の小さい順に並べ、ある割合以上の信号電荷量値の大きい測定点を取り除いて、エネルギー損失を算出する。

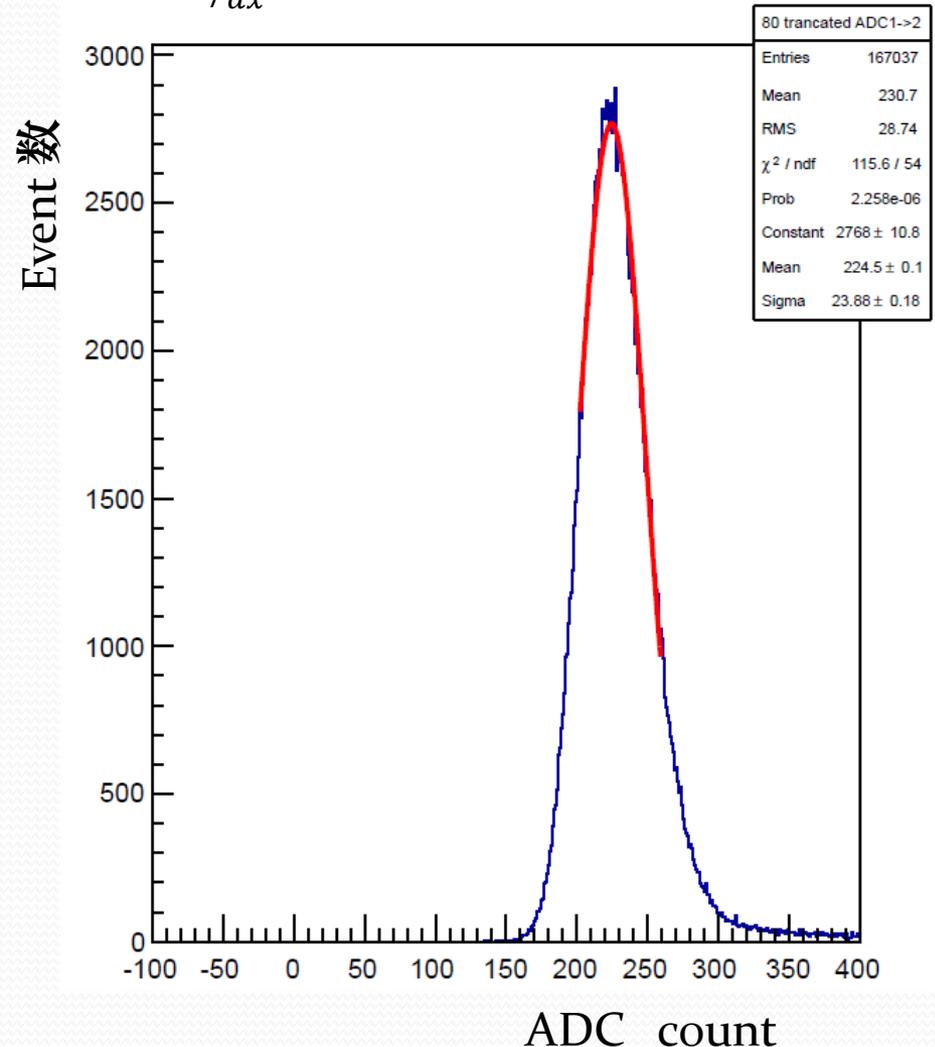


これを「Truncated Mean法」と呼ぶ。

Truncated Mean の結果

- 80%truncated Mean (測定点12点中ADC値の小さい9点を使用)
- 正規分布でフィットした信号電荷分布
イベント数 167037
平均値 224.5 ± 0.1
標準偏差 23.88 ± 0.18
- エネルギー分解能
12層分 10.6%
実機56層では5%が期待できる。
これは要求性能を十分満たす。

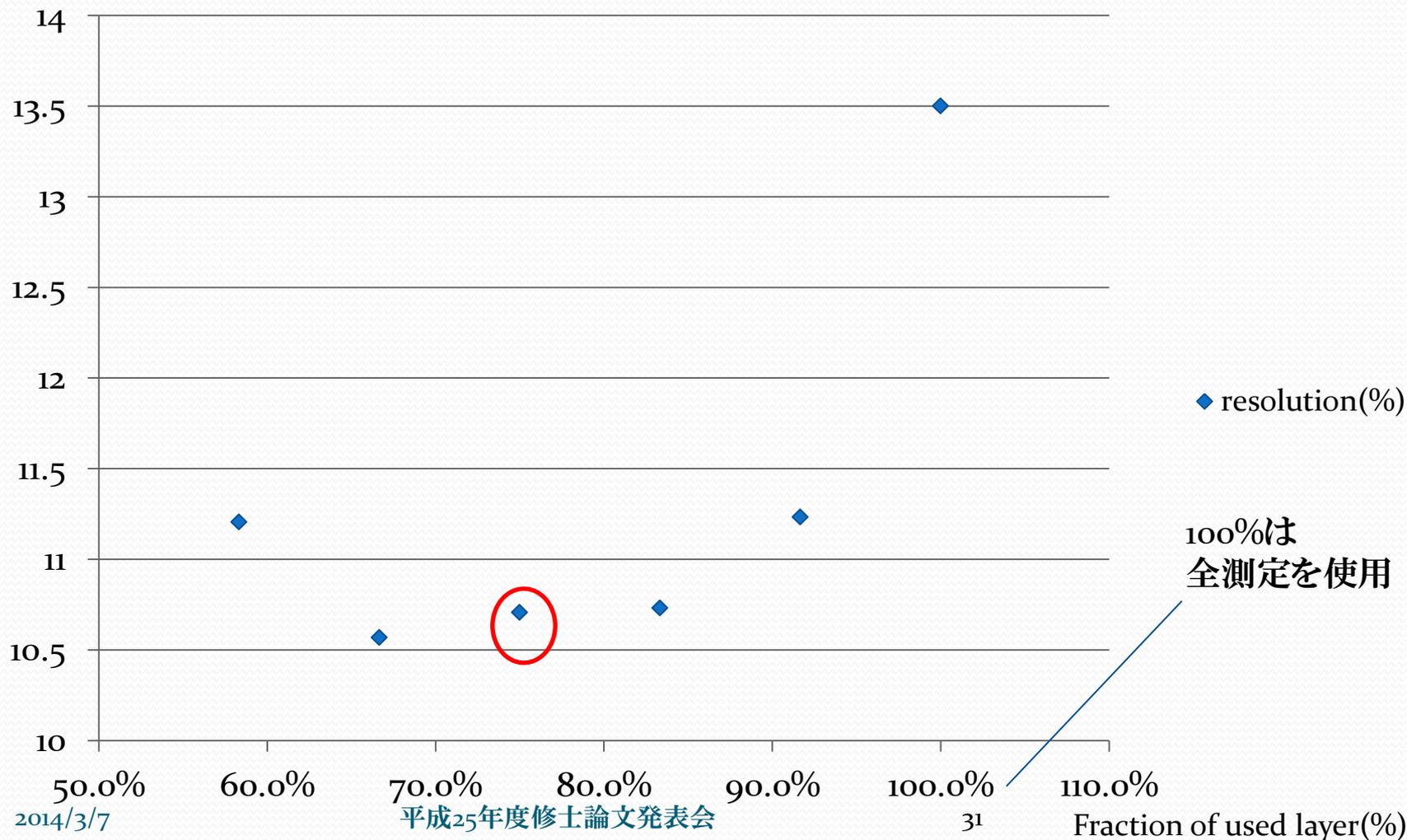
$$\frac{\sigma_{dE/dx}}{dE/dx} = 10.6\% \text{ 80 ADC1}$$



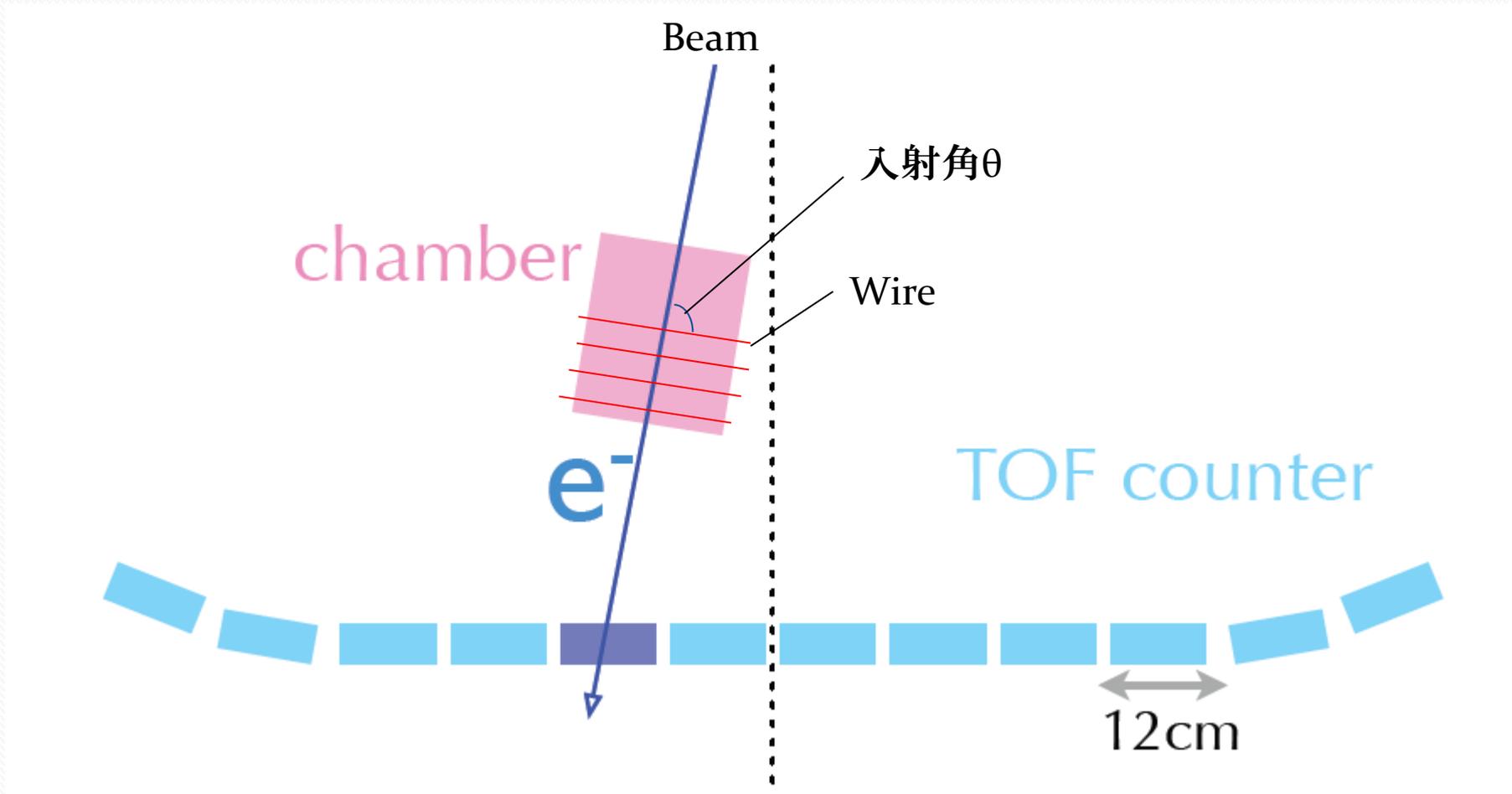
Truncated Meanで使用する サンプル数依存性

エネルギー損失分解能(%)

Truncated Mean Dependence

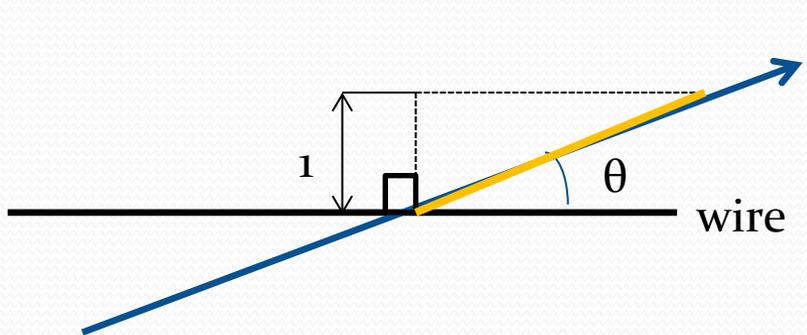
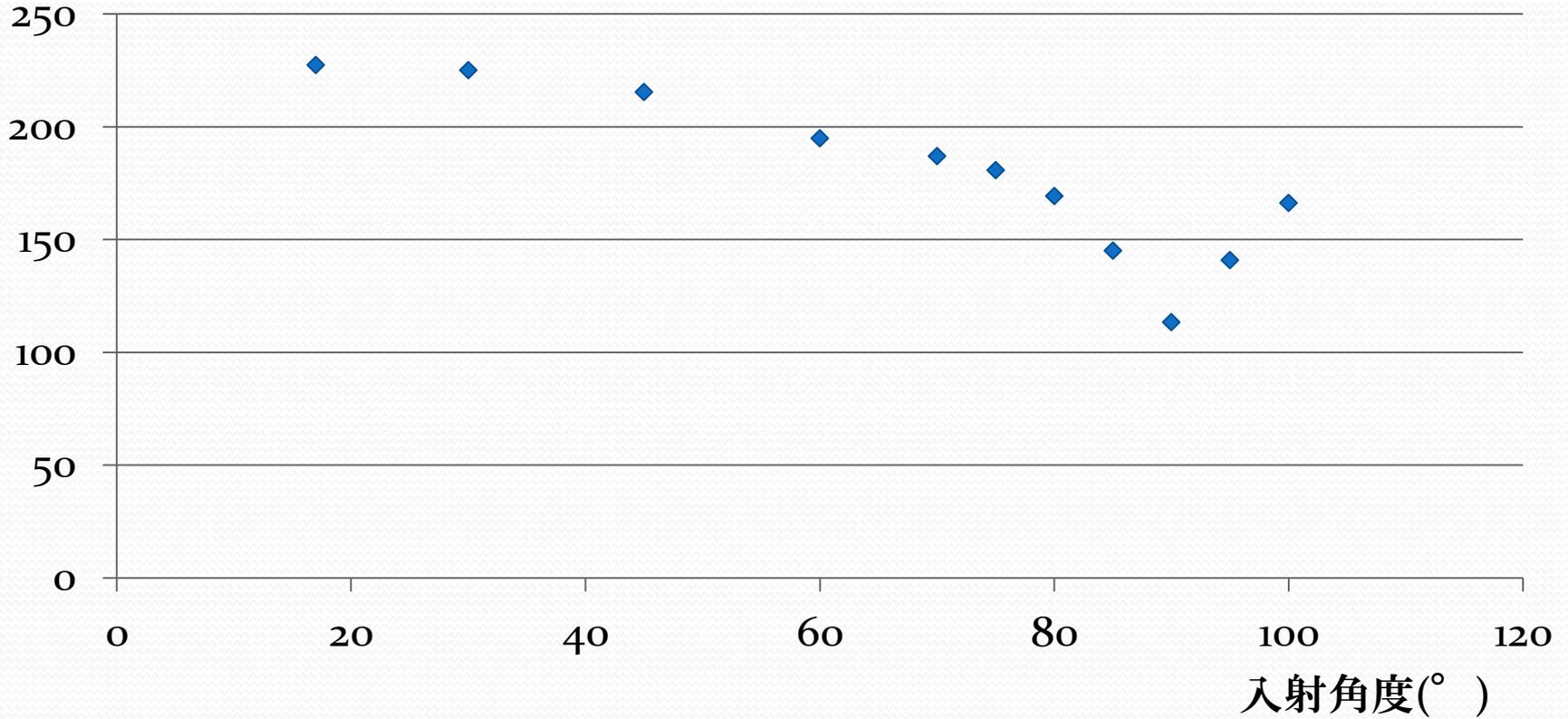


エネルギー損失の入射角度依存性



ビームの入射角度とチェンバーの位置関係

入射角度vs単位長さあたりのエネルギー損失



セルを通過する長さは、入射角 θ として、 $\frac{1}{\sin \theta}$ に比例

エネルギー損失の 入射角度依存性

荷電粒子の入射角度がワイヤーに対して

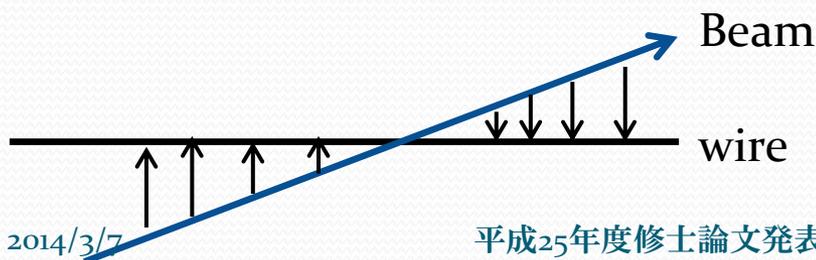
▶ 17° など入射角度が浅い場合

ワイヤー上で電子雪崩が作られる場所が分散するため、どの電子も同様の大きさの電子雪崩を形成できる。

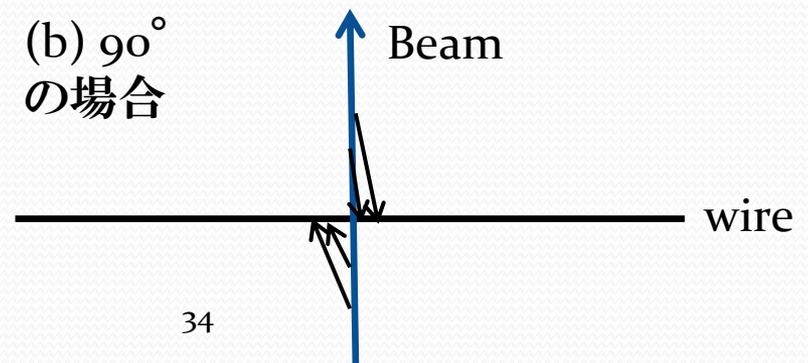
▶ 90° 付近の場合

飛跡に沿って電離された電子がワイヤー上のほぼ同一の領域に向かってドリフトする。遅れてきた電子は既に作られた電子雪崩の影響を受けて、形成する電子雪崩が小さくなる。

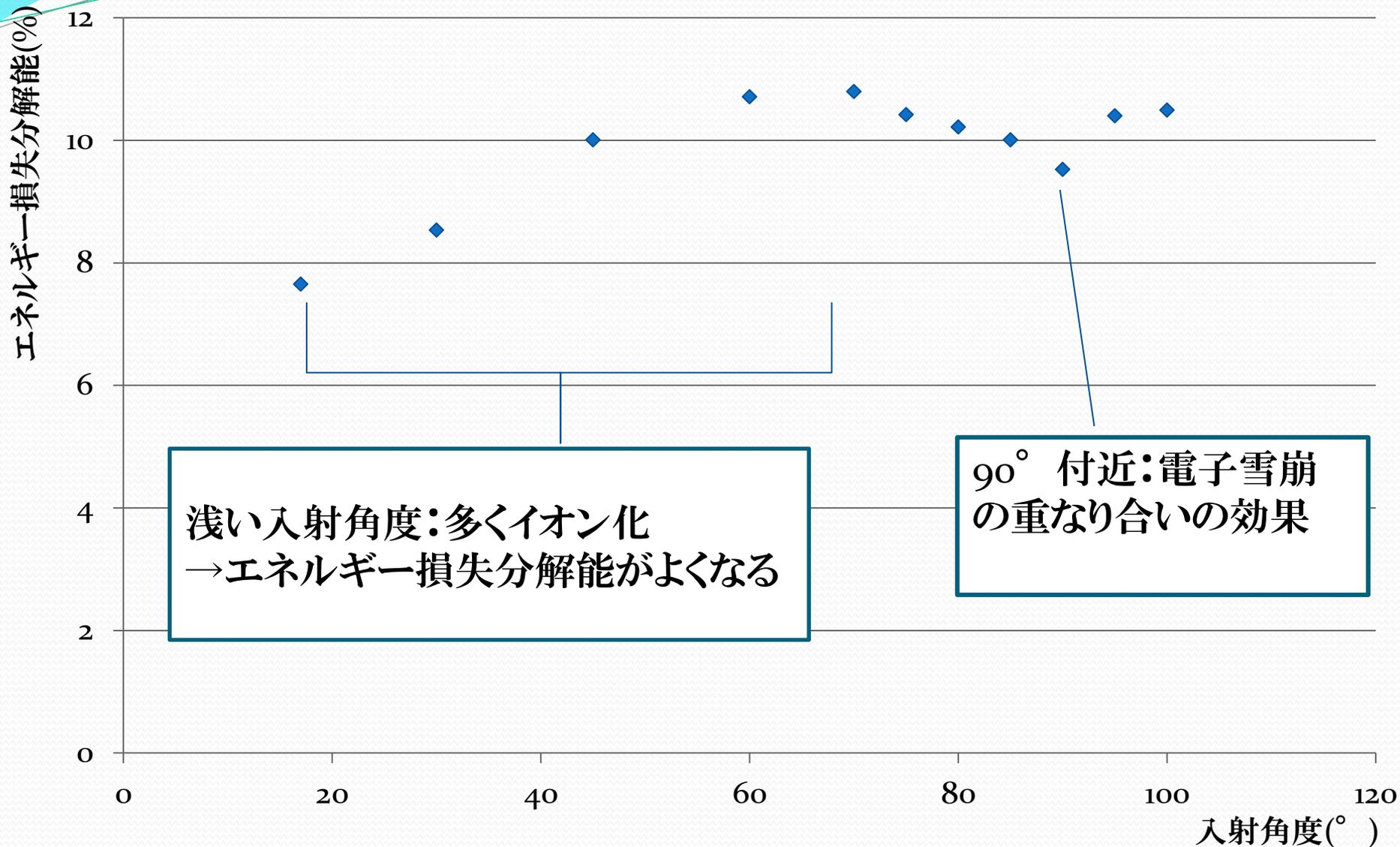
(a) 17° の場合



(b) 90° の場合



入射角度vsエネルギー損失分解能(%)



まとめ

- Inner chamberを製作,動作確認
 - ガスリーク、漏れ電流を抑え、宇宙線の信号を確認
 - 宇宙線テスト
 - 最大drift時間 100nsec以下
 - エネルギー損失はきれいなランダウ分布。
- テストチェンバーを用いたビームによるエネルギー損失分解能の性能評価
 - エネルギー損失分解能
 - 12層分10.6% 56層では5%が期待できる。
 - 入射角度依存性 想定範囲内であった。

Inner chamber,読み出しエレクトロニクスとも、ビーム衝突実験へ向けて準備が整った。

Back up

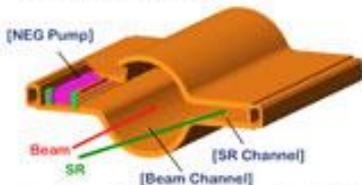
Super KEKB 加速器



2極磁石(5.9m) : 短い磁石に交換

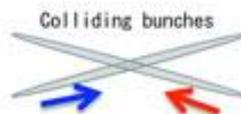
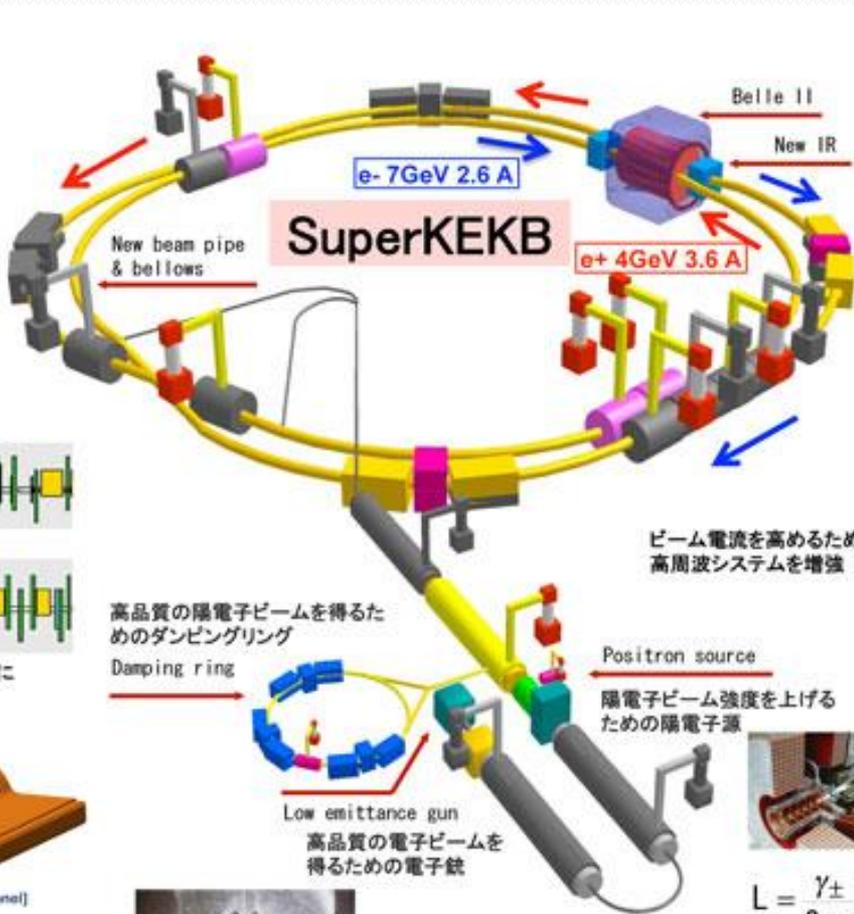


低エミッタンスを実現するために磁石配置を全面的に変更
磁石台数も大幅に増加



低エミッタンスビームのためのビームパイプ

ビームパイプ内面コーティング



衝突点でビームを極限まで絞り込むための超伝導/永久4極磁石システム



ビーム電流を高めるために高周波システムを増強

陽電子ビーム強度を上げるための陽電子源

高品質の電子ビームを得るための電子銃



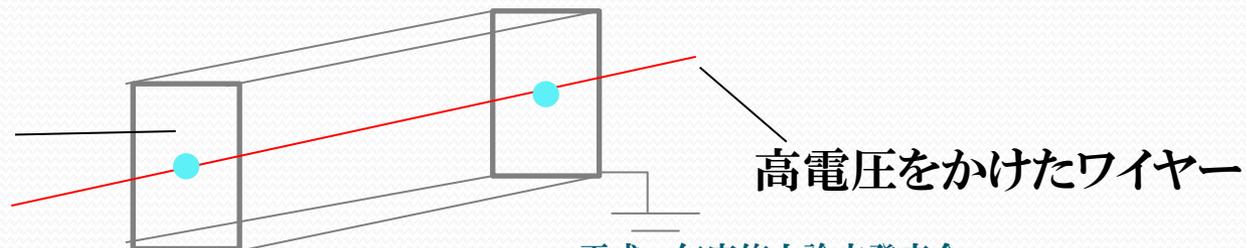
$$L = \frac{\gamma_{\pm}}{2e\epsilon_0} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*} \frac{l_{\pm} \xi_{\pm y}}{\beta_y^*} \right) \begin{pmatrix} R_L \\ R_y \end{pmatrix}$$

$8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を目指す

Wire Chamber とは？

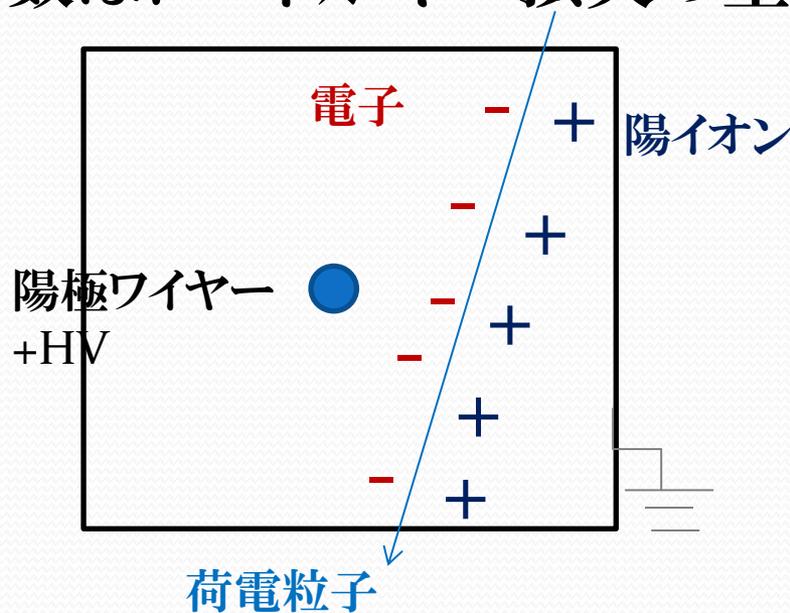
- 荷電粒子がチェンバー内のガスをイオン化することで電子を生成、ワイヤー付近でガス増幅し、電気信号として取り出す
 - 安価、巨大化しやすい
 - 低物質質量 = 生成された粒子の状態を損なわない
 - 素粒子実験、原子核実験で広く使われている
- 素粒子実験に対する貢献度の高さにより発明者のG.Charpakはノーベル物理学賞を受賞
- そのほかにも比例計数管やガイガーカウンタもwire chamber
 - 下の図は、wire chamberの具体例の1つ

箱の中は
ガス



Point.1 ガス分子のイオン化

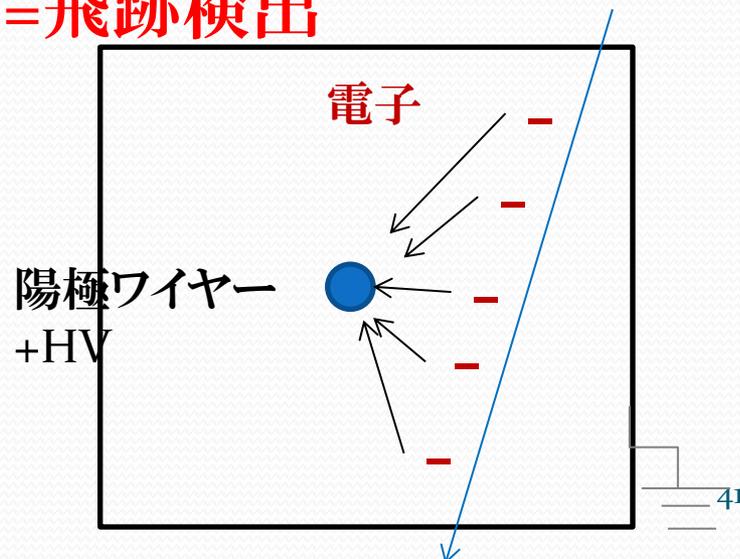
- 荷電粒子がガス中を通過すると、荷電粒子とガス分子の電子が衝突 ⇒ 電子とイオンを生成
(電離、イオン化)
- 荷電粒子はガス分子の電子と衝突した際、その分のエネルギーを失う = エネルギー損失
- 発生する電子の数は、エネルギー損失の量に比例



Point.2

生成された電子が移動(ドリフト)

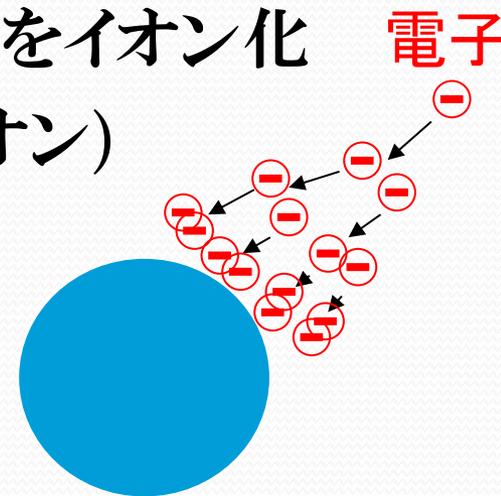
- ワイヤーに高電圧を印加することで電場を形成
- 電気力線にそって、電子が陽極ワイヤーに向かって移動 ⇒ 電子のドリフト
- 移動中の多重衝突によって移動速度は比較的遅い
～50 $\mu\text{m}/\text{nsec}$
- 移動時間の測定⇒位置の測定 = 飛跡検出



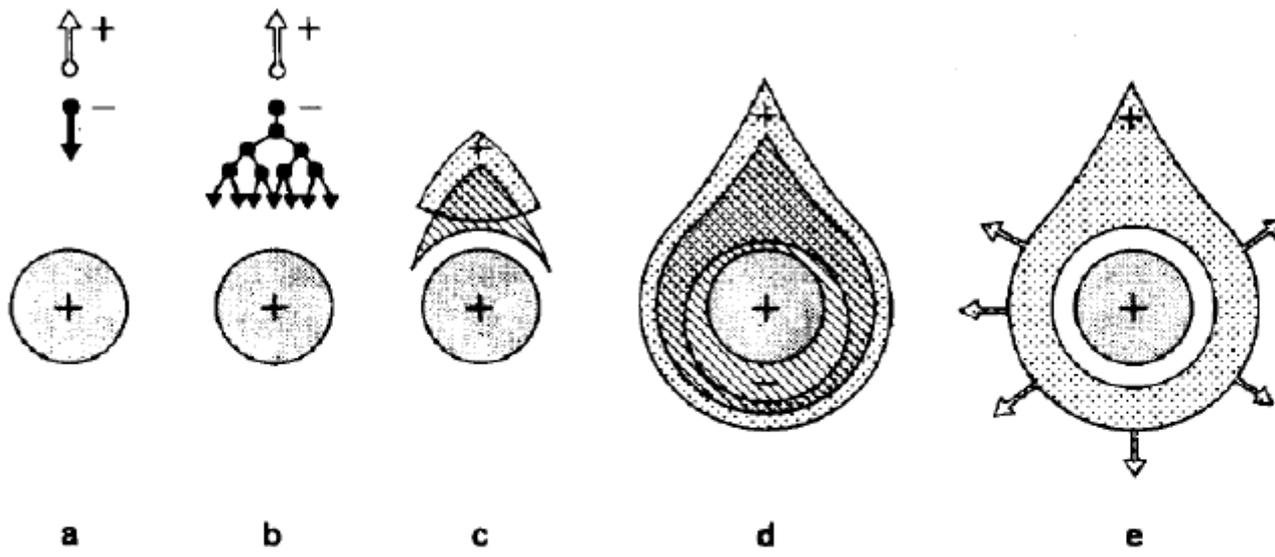
荷電粒子

Point.3 陽極ワイヤー付近でのガス増幅

- 細いワイヤー(直径 $\sim 0.03\text{mm}$)を使うことで高電場 ($>30\text{kV/cm}$)が容易に得られる
- 陽極ワイヤー近傍の高電場によって、電子は加速
- 加速された電子がまたガス分子をイオン化
- この繰り返しにより電子(及びイオン)の数はネズミ算的に増える (ガス増幅、電子雪崩)
- 増幅度 $\sim 10^5$ まで容易に得られる



陽極ワイヤー



Belle CDCとBelle II CDCの比較

	Belle	Belle II
Sense wire(本)	8400	14336
外筒半径(mm)	880	1130
内筒半径(mm)	77	160
層数	50	56
ガス	ヘリウム50% + エタン50%	ヘリウム50% + エタン50%
Sense wireの直径 (μm)	30	30



Belle II実験での中央飛跡検出器 への要求

- 生成された粒子の状態の変化を小さく
- 飛跡から曲率を求める
 - 多重散乱の影響を考える必要あり



- 低物質質量
 - 使用ガス : ヘリウム50%
+ エタン50%
 - 外筒+エンドプレートの質量: 約400kg

- 運動量分解能

$$P_t \geq 100 \text{ MeV}$$

$$17^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$$

の荷電粒子に対して

$$\frac{\sigma_{P_t}}{P_t} \sim 0.5\% \sqrt{1+P_t^2} \quad (P_t \text{ in GeV})$$

- 位置分解能

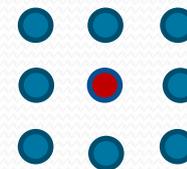
Belleでは平均 $\sim 130(\mu\text{m})$

Belle IIでは

$\sim 130(\mu\text{m})$ かそれ以上の位置分解能を目指す

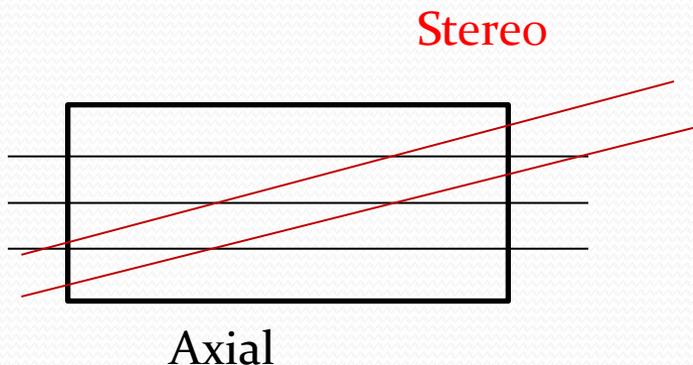
CDCのワイヤー配置

- 陽電圧をかける細い(直径)ワイヤー(Sense)の八方にグランドとなる(Field)となるワイヤーを配置



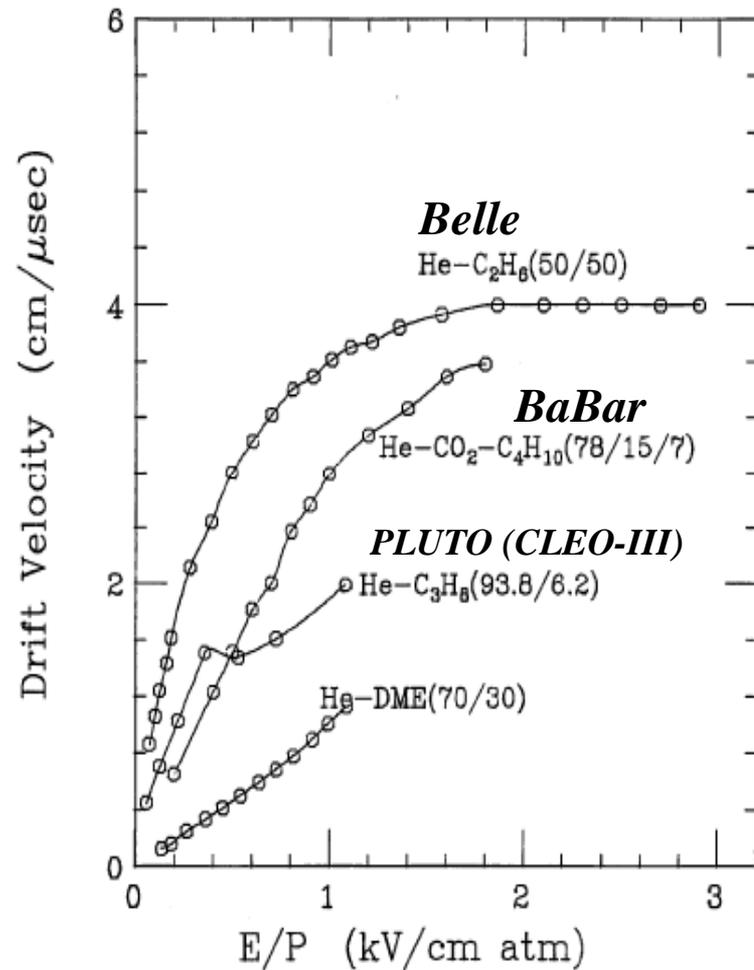
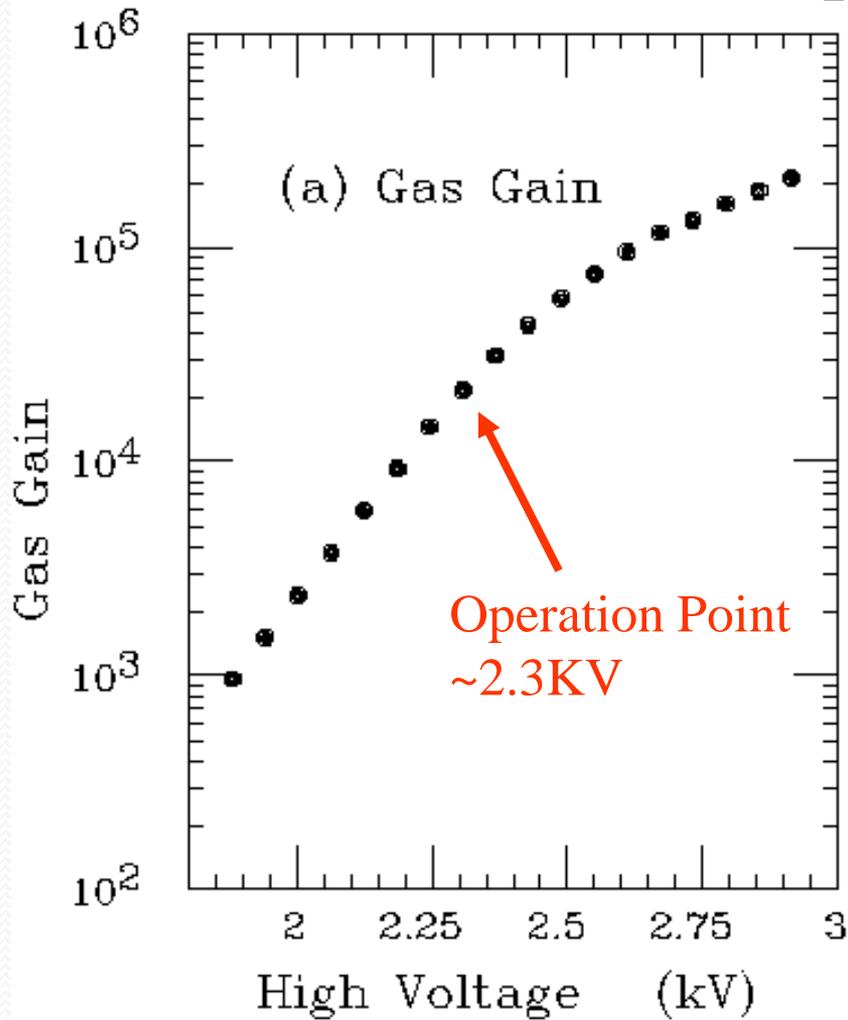
赤:シグナル
青:グランド

- ワイヤーには、まっすぐ張るもの(Axial), 斜めに張るもの(stereo)があり、これにより3次元の位置情報(飛跡)が得ることができる。

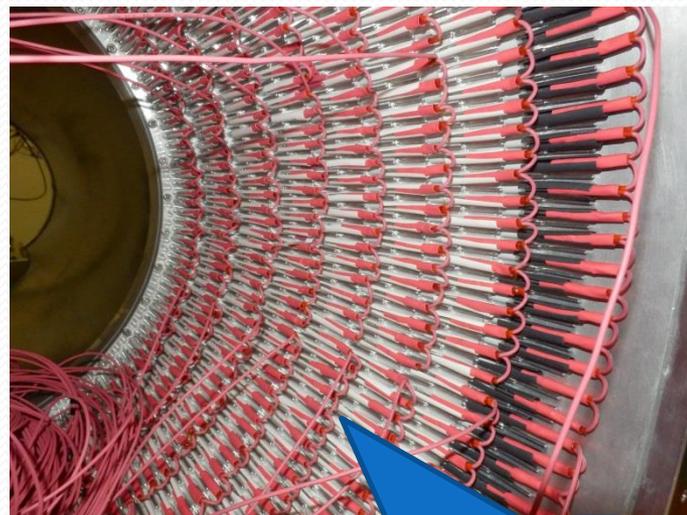
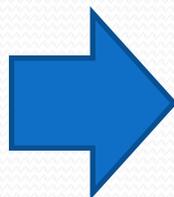
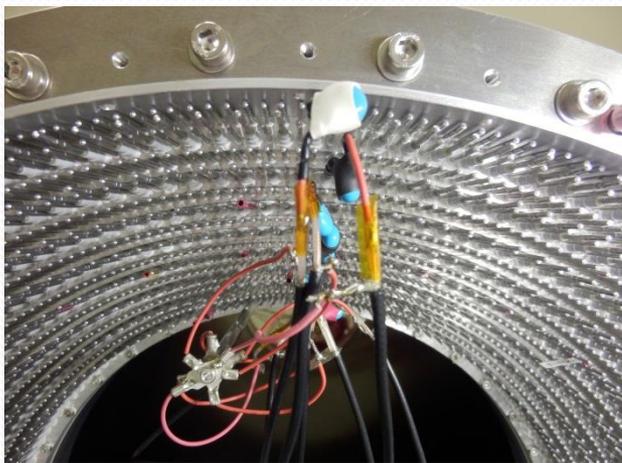


Gas Gain and Drift Velocity

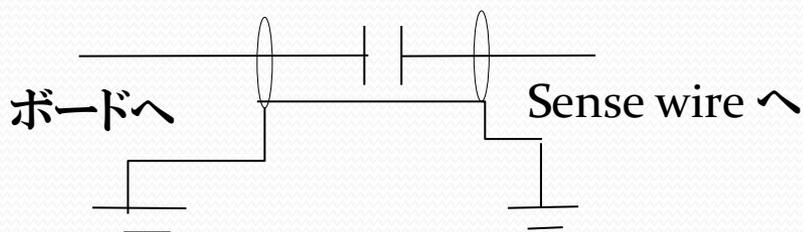
He-C₂H₆(50/50)



* 熱圧縮チューブ取り付け



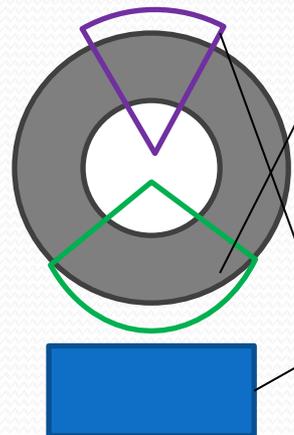
* 読み出しケーブル製作



熱収縮チューブに熱を
かけてないものを使用

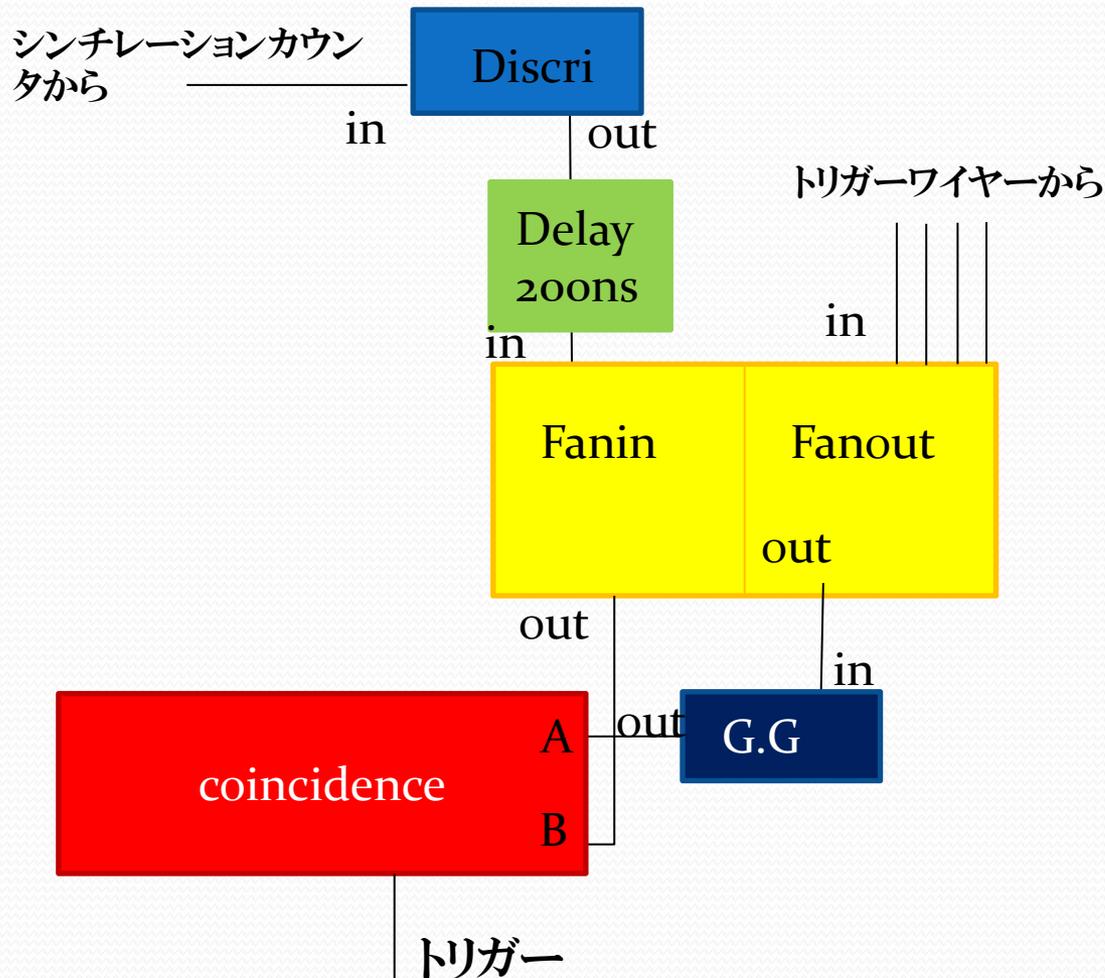
セットアップ(トリガー)

チェンバー上部
トリガー用 同layer横並び
に4ch使用

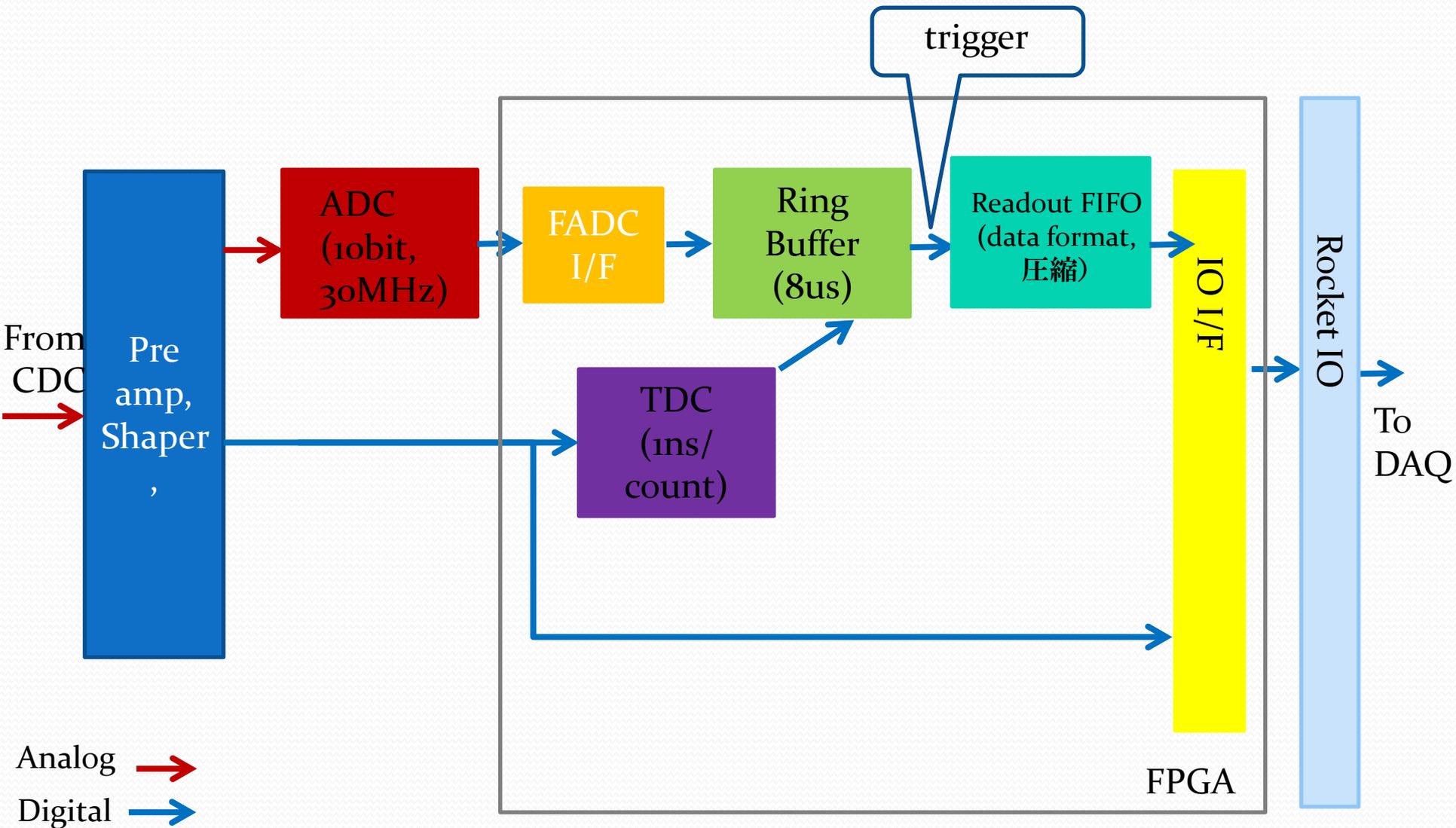


チェンバー
下部
データ取得
用
6ch×8layer
トリガー用

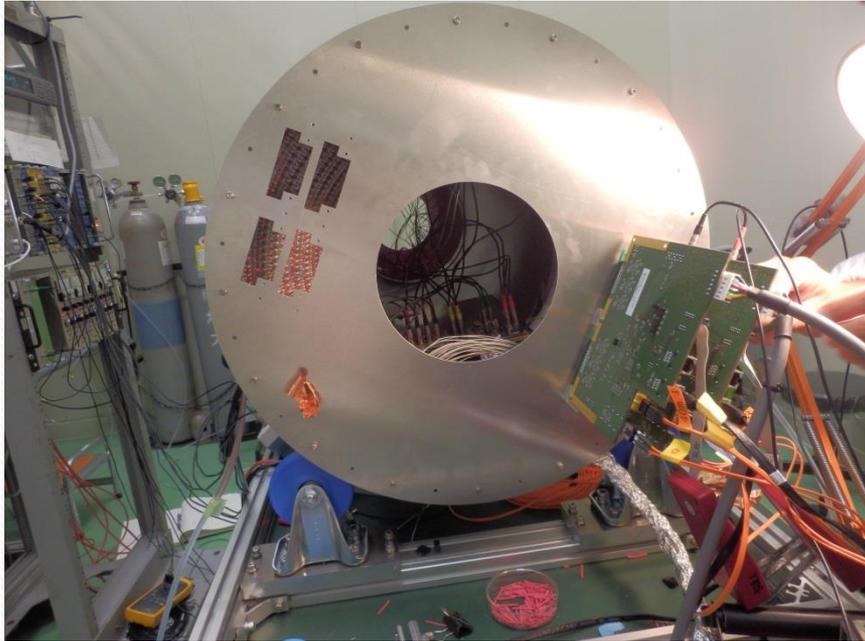
シンチレーション
カウンタ
HV=1.6kV



Read out system Block Diagram1



Inner chamberの様子

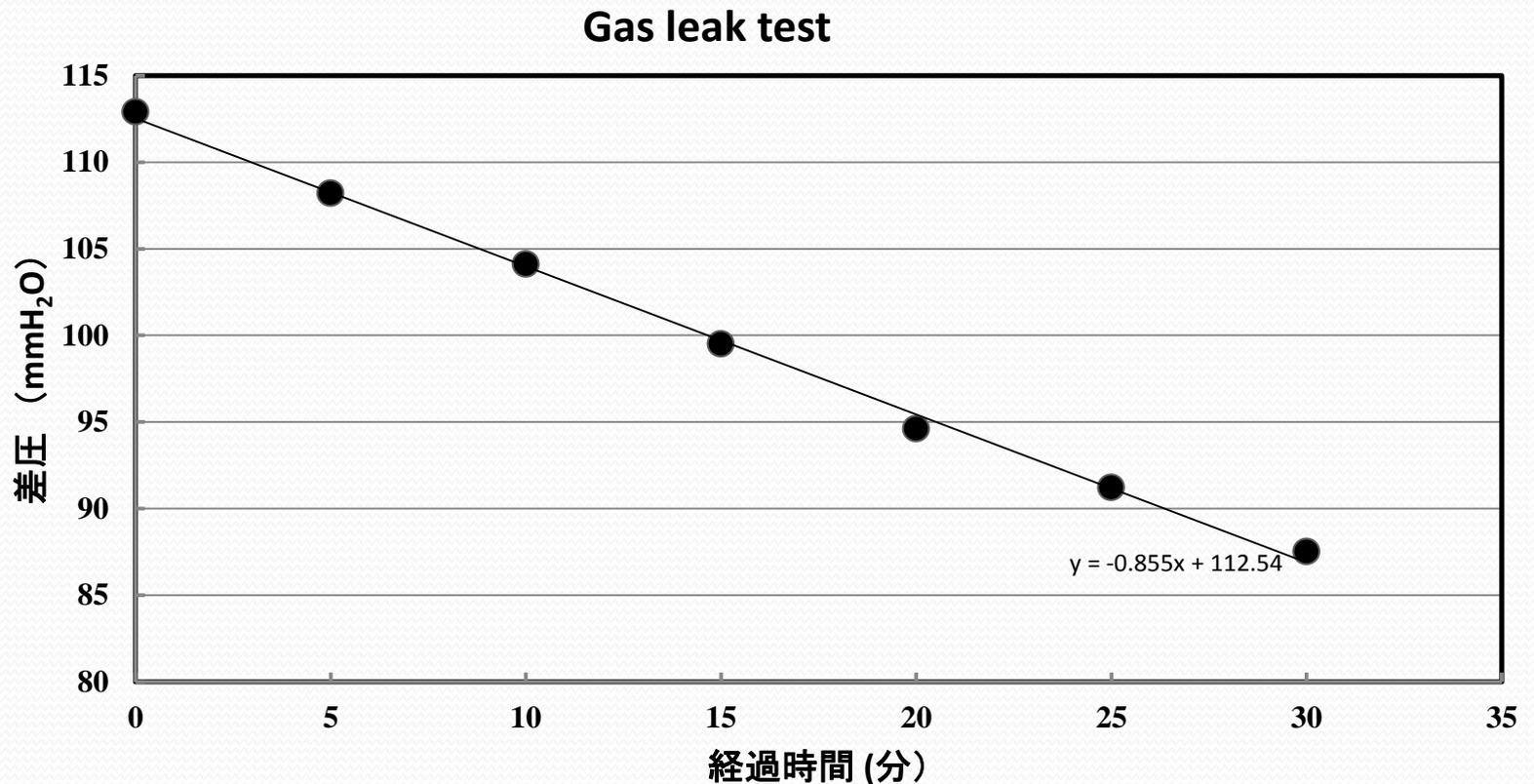


データ取得側

各LayerのHV

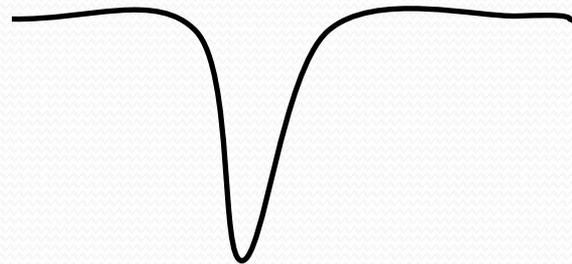
layer	HV[V]
0	1996
1	2068
2	2081
3	2091
4	2101
5	2110
6	2118
7	2091

Gas leak test

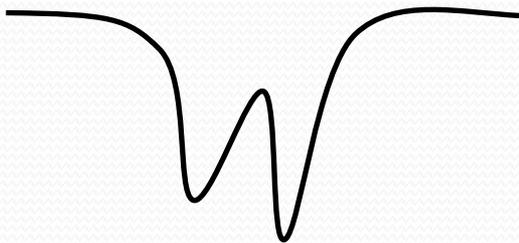


事象選択(信号電荷分布)

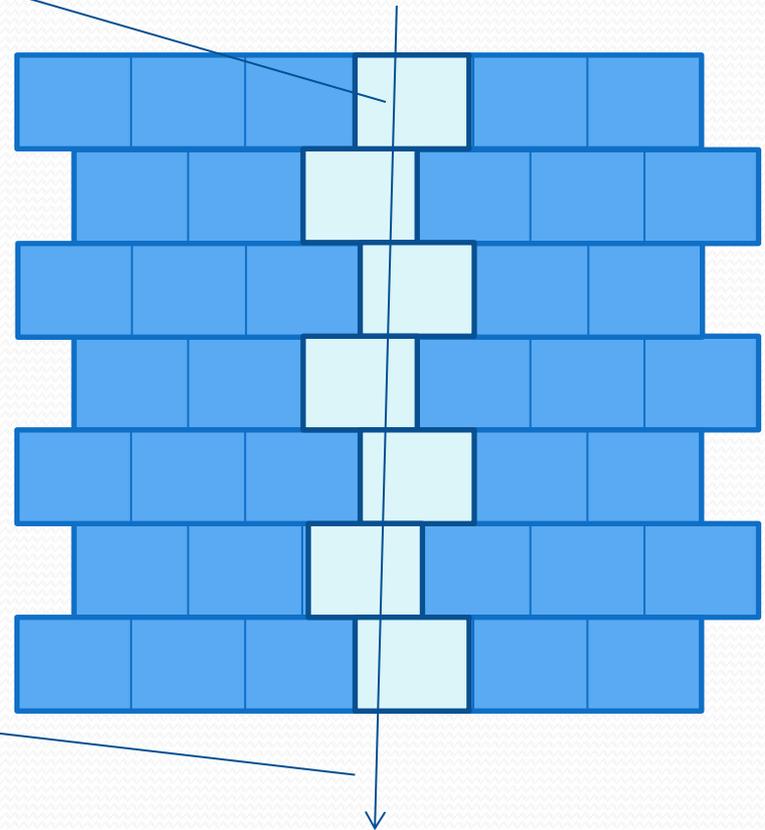
- 各Layerに1hit
- シングルパルス ○



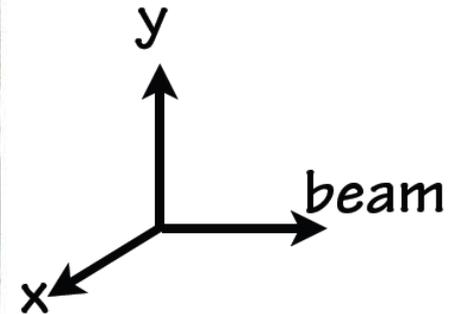
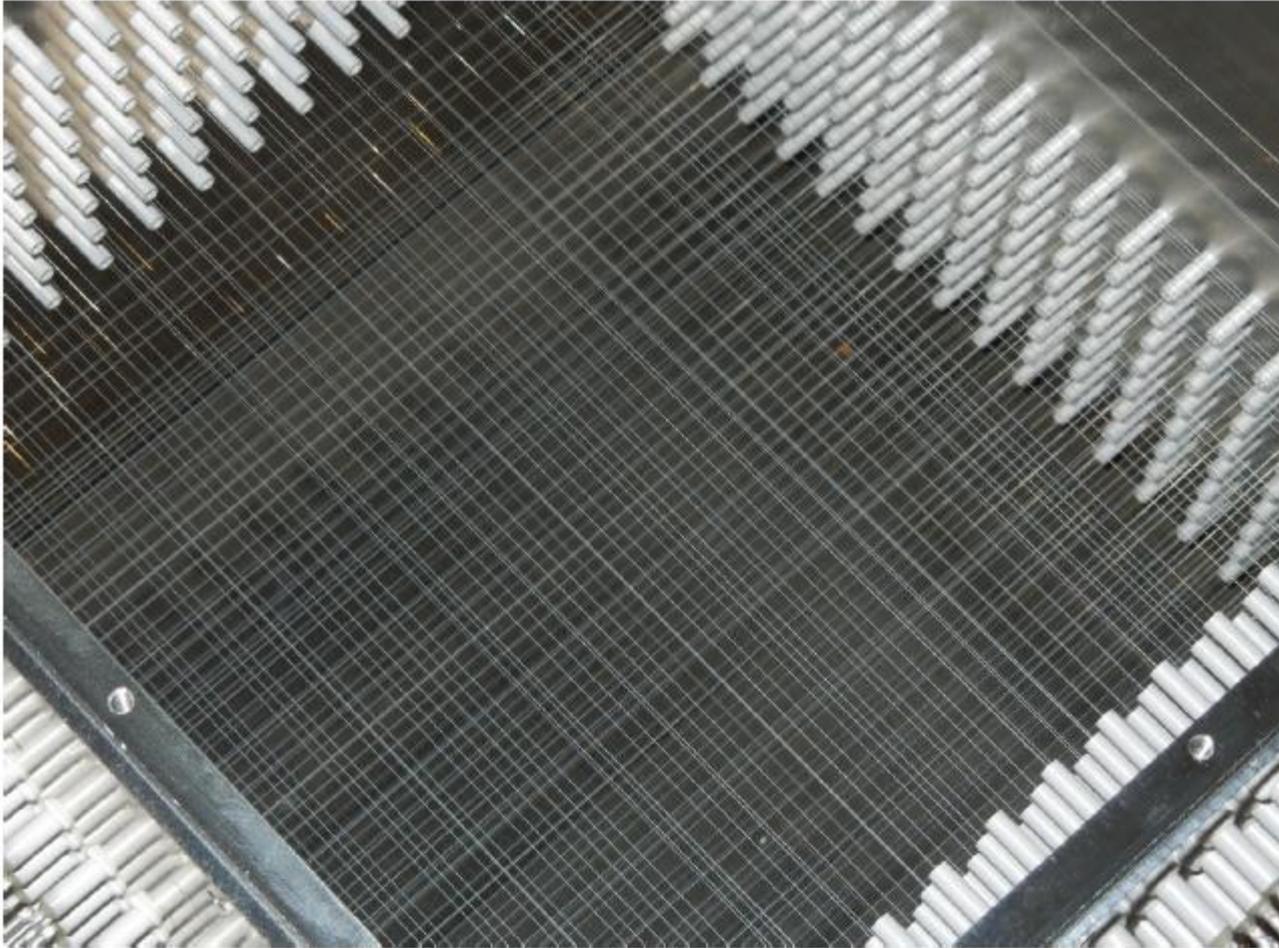
ダブルパルス ×



- 全てのlayerにhit

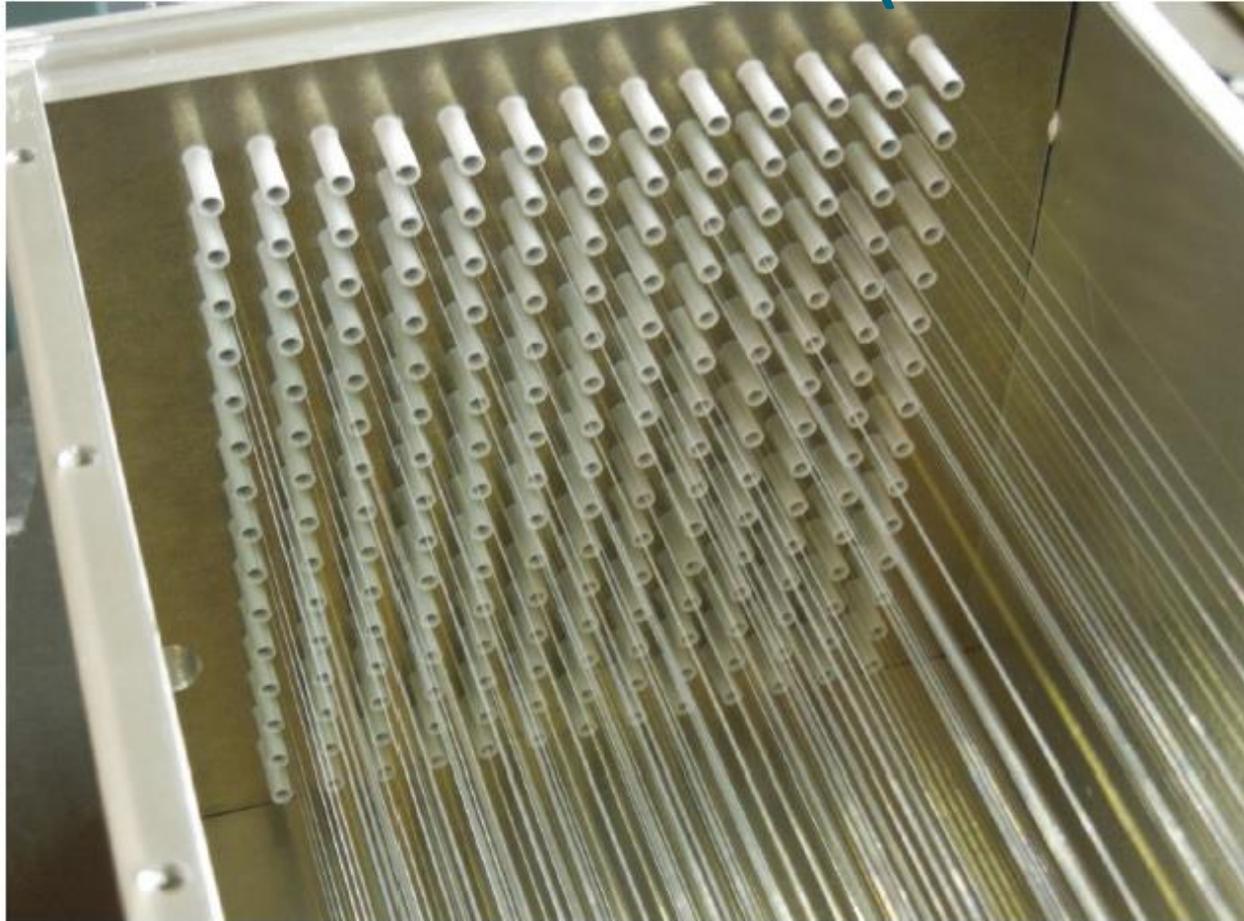


テストチェンバー(リファレンス)



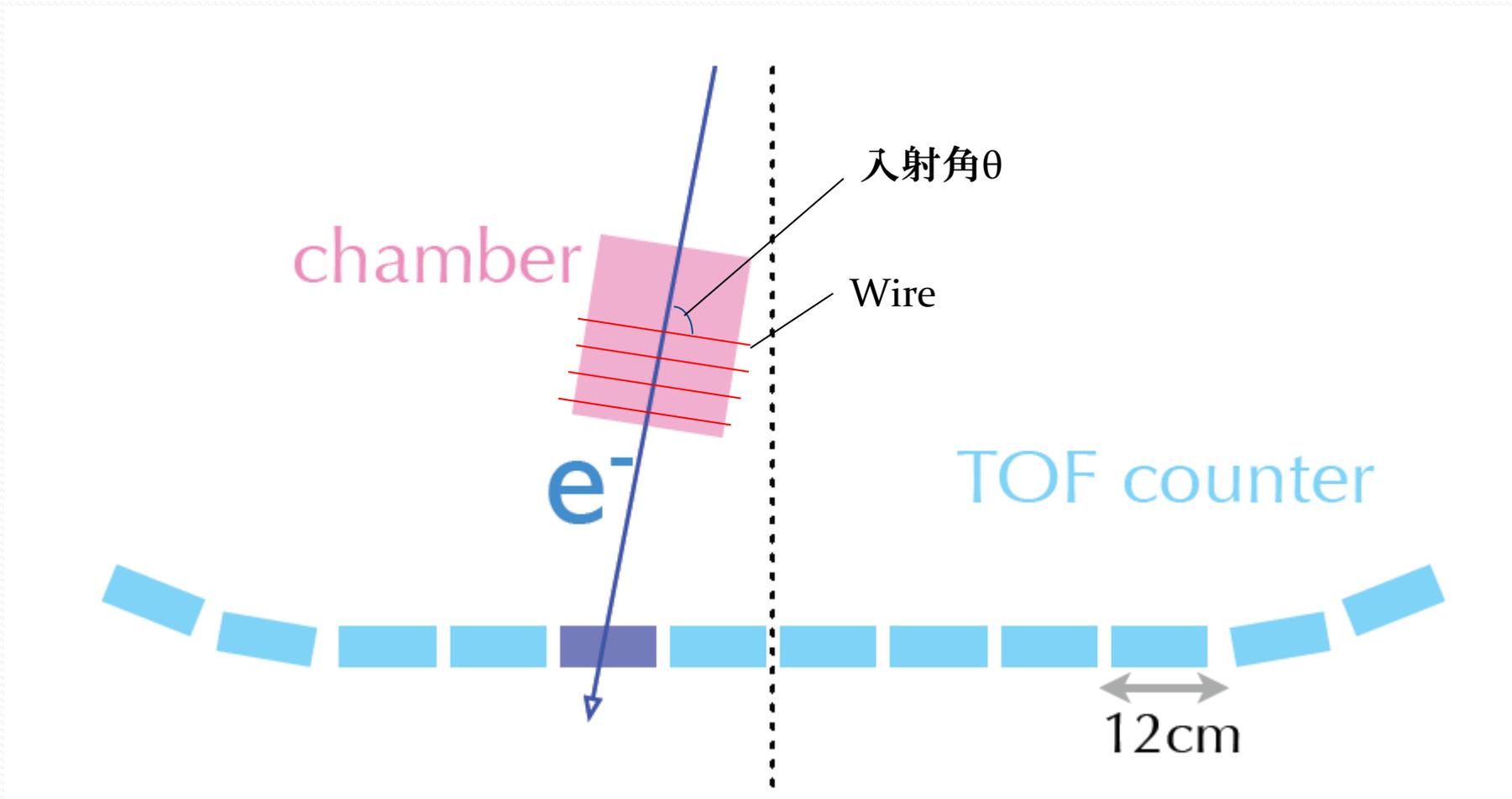
XY chamber : A4 U4, wire length ~200mm

テストチェンバー(Main Chamber)



Main chamber : Axial 8-Layers, wire length ~ 490mm

LEPS 角度依存性 測定時の模式図



スペースチャージ効果

- 電子雪崩が生成されると電子はアノードワイヤーに、正イオンはカソードにドリフト
- 正イオンの質量が電子に比べて格段に大きいため、ドリフト速度が遅く、正イオンはワイヤー近傍からすぐには離れない。
- この正イオンが作り出す電場により、電子雪崩の先端では電場が低くなり、電子雪崩の成長が抑制される。これを**スペースチャージ効果**と呼ぶ。