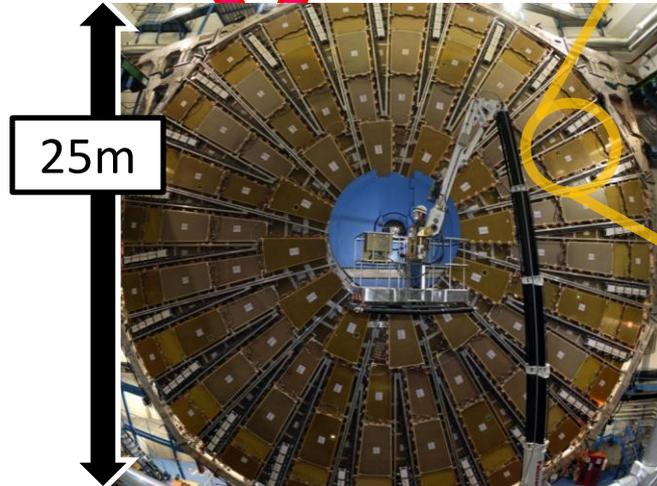
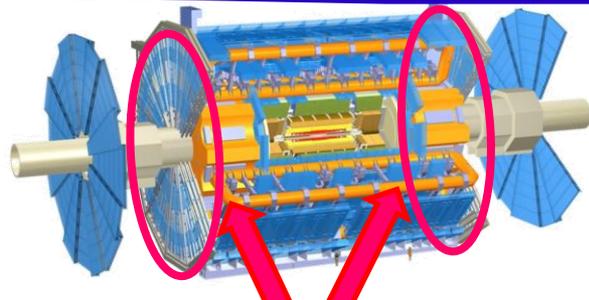


# 検出効率解析に基づく $\mu$ 粒子検出器の高電圧・閾値電圧の最適化

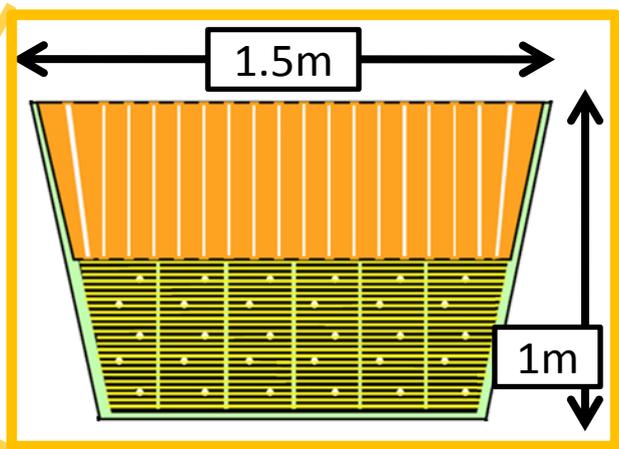
高エネルギー物理学研究室

伊藤 悠貴

# TGC $\mu$ 粒子トリガーシステム

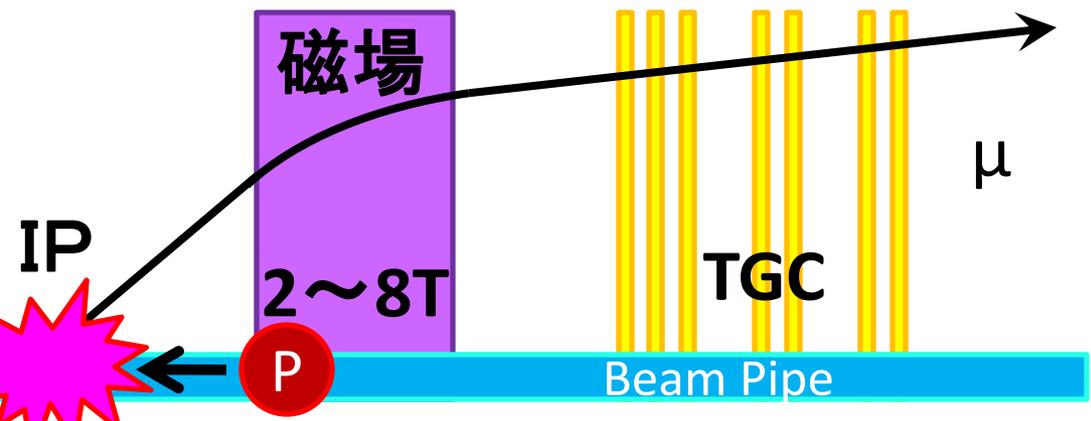


• 高運動量 $\mu$ 粒子生成事象を特定



- 薄型MWPC
- チェンバー総数 3408枚
- 総面積 6000m<sup>2</sup>
- 位置分解能 1cm

6GeV以上の $\mu$ 粒子にトリガー発行  
 ⇒ATLASは事象データを保存



**取りこぼし厳禁**

95%以上のトリガー効率  
 ⇒94%以上の検出効率

# TGC検出器への要請

- **94%以上の検出効率**
  - $\mu$ 粒子生成事象を逃すことなく特定する
- **検出効率の面一様性**
  - 系統誤差のない、高精度物理解析のため

宇宙線による検出効率評価を行い、  
要求を満たす最適な動作環境の構築を目指す

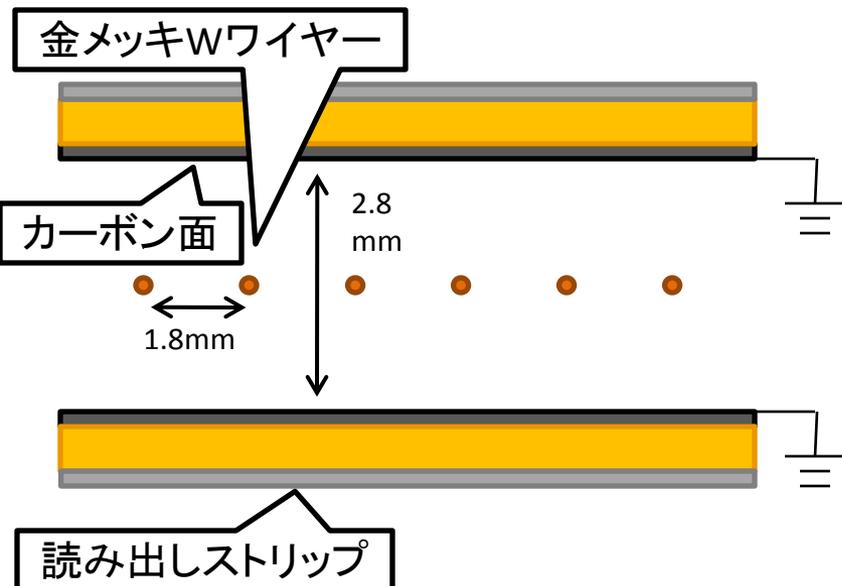
## ※検出効率の決定要因

- 閾値電圧を超えられず、デジタル化されない信号の存在
  - チェンバー個性による出力信号の違い
    - » 検出効率場所依存性

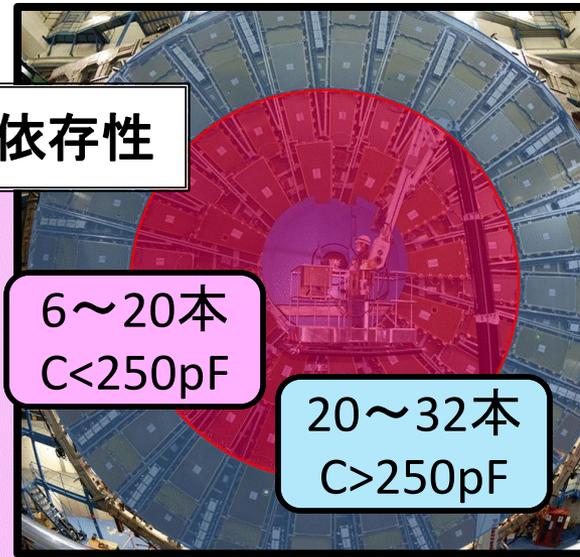
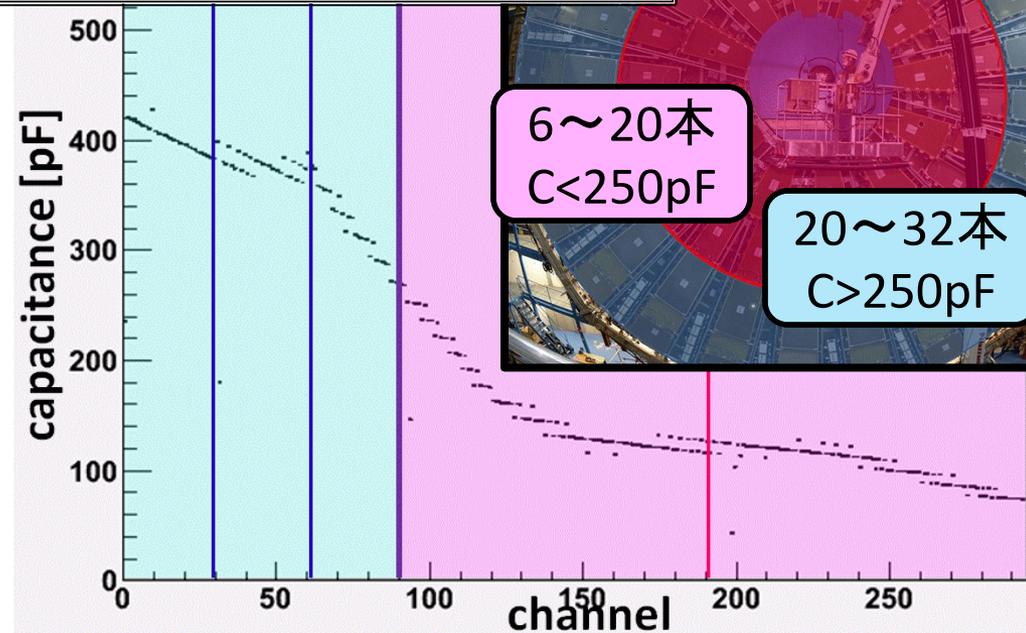
# チェンバーの個性

- 検出器静電容量
- 複数本のワイヤーを束ね、読み出しを行う。  
 ※粒子到来頻度をそろえる  
 ⇒チャンネル当たりのワイヤー本数が場所により異なる。  
 – 検出器静電容量の場所依存性

## TGC断面図

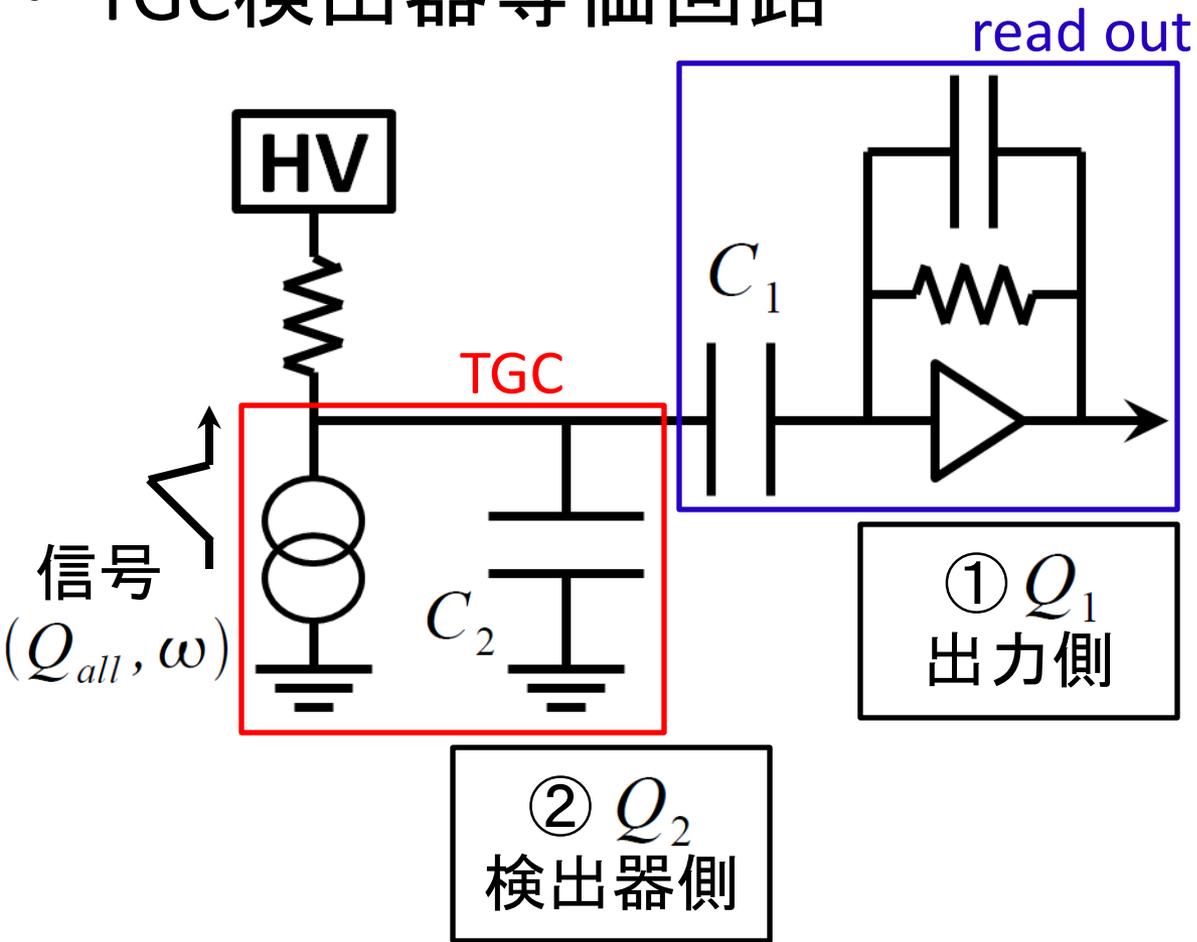


## 静電容量のチャンネル依存性



# 出力電荷量への影響

## • TGC検出器等価回路



※インピーダンスを算出し、出力電荷量を見積もる。

$$Q_1 : Q_2$$

(出力側 : 検出器側)

$$\frac{1}{\omega \times C_2} : \frac{1}{\omega \times C_1} + 80[\Omega]$$

読み出し側コンデンサ (固定値: 470pF)

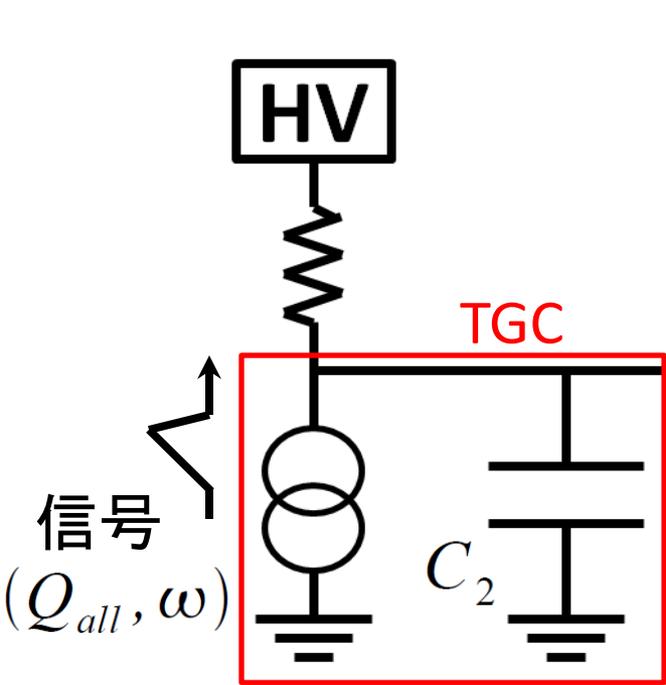
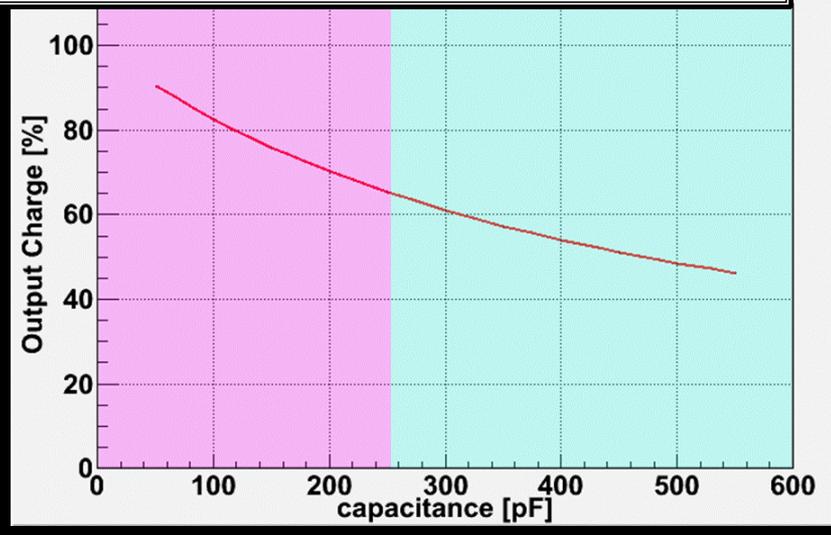
検出器静電容量

**検出器静電容量 (C2) の値で出力電荷量が決まる**

# 出力電荷量への影響

- TGC検出器等価回路

出力側へ流れる電荷量の割合



①  $Q_1$   
出力側

②  $Q_2$   
検出器側

$$\frac{1}{\omega \times C_2} : \frac{1}{\omega \times C_1} + 80[\Omega]$$

読み出し側コンデンサ  
(固定値: 470pF)

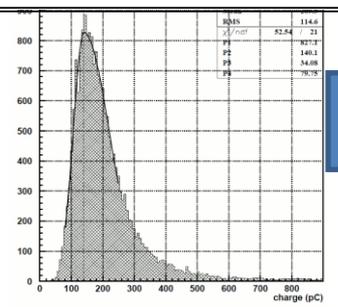
検出器静電容量

**検出器静電容量 (C2) の値で出力電荷量が決まる**

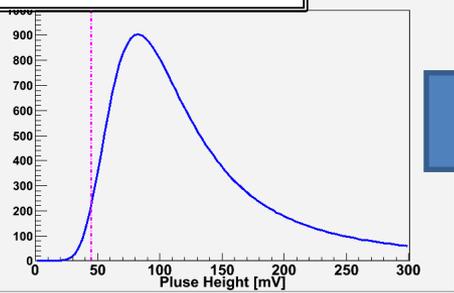
# 静電容量と検出効率

## 出力電荷量分布による検出効率の見積もり

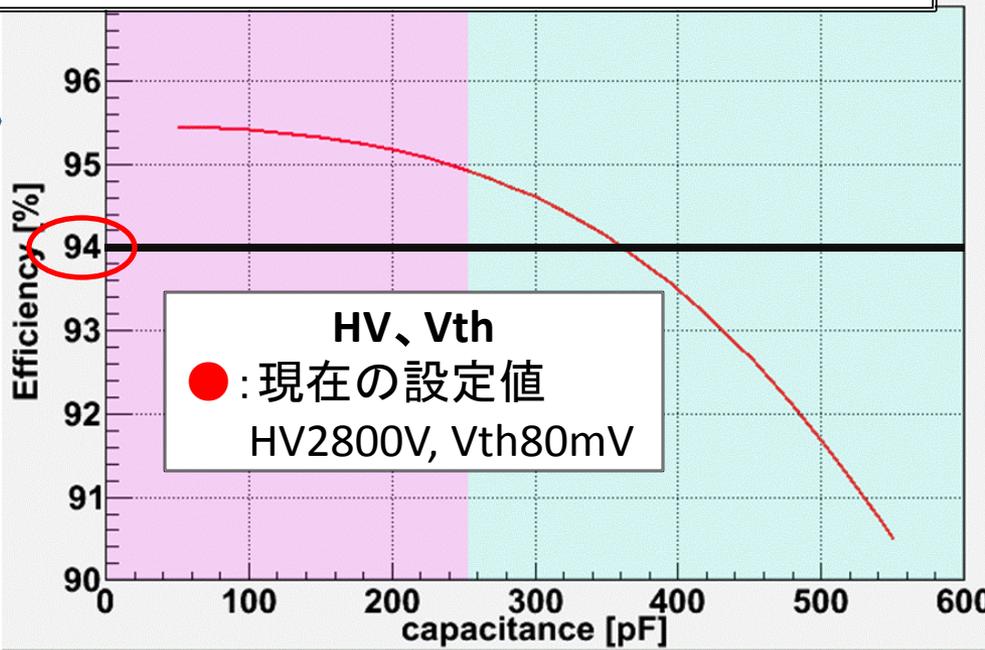
出力電荷量分布



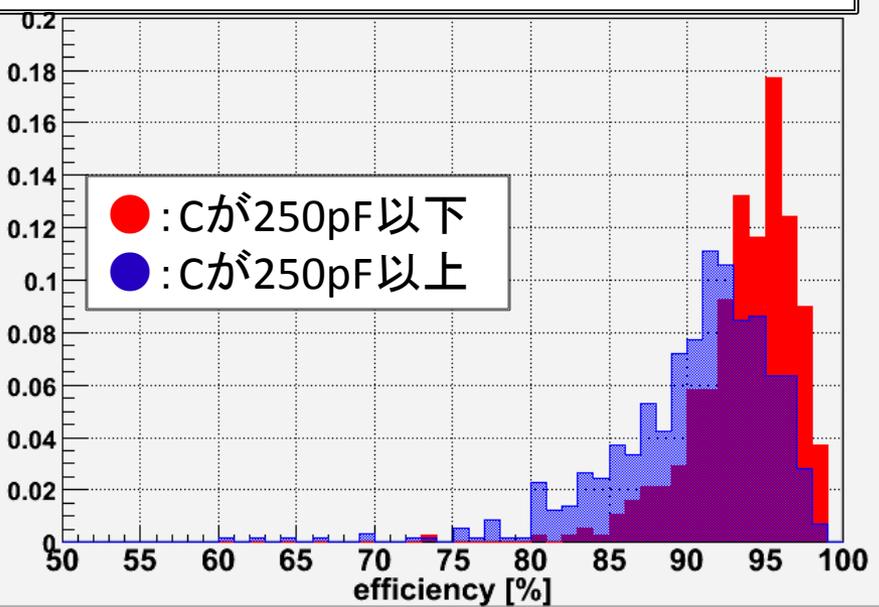
出力波高分布



検出効率見積もり結果(静電容量依存性)



昨年度宇宙線試験による検出効率結果



※現在の設定値  
 コミッショニングのため、高検出効率で安全な運転を  
 目指し、地上試験結果を参考に決定された。

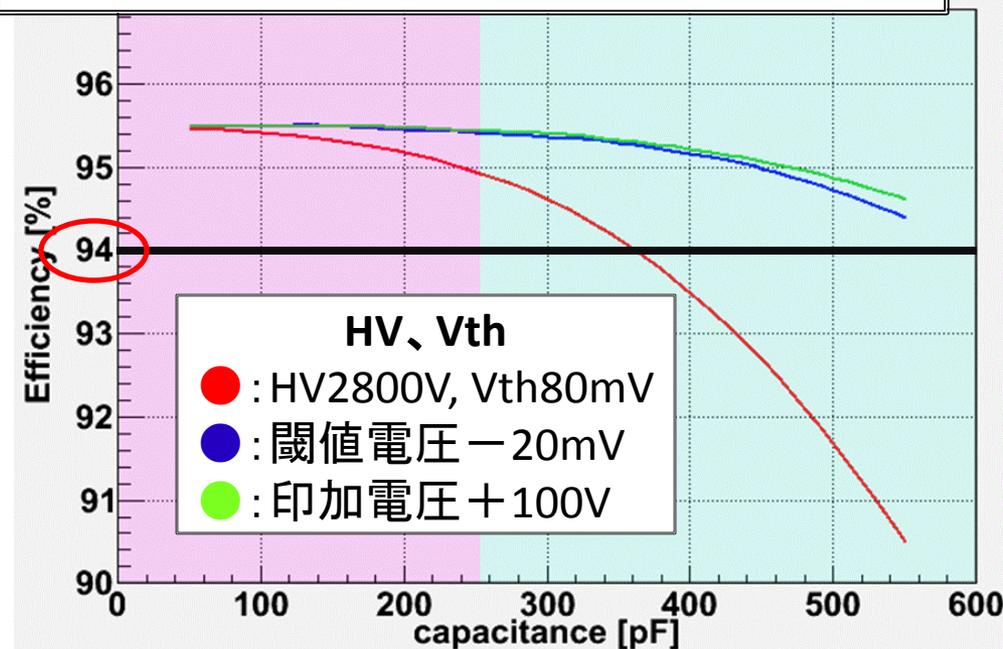
# 動作パラメータの調整

- 印加電圧、閾値電圧調整で検出効率の改善可能
- どちらを優先すべき？

– 高すぎる印加電圧

- チェンバーの寿命は出力電荷量に依存  
⇒ 寿命を縮める
- 放電により検出器へダメージを与える可能性

検出効率見積もり結果(静電容量依存性)



安全な動作のため、

- 1, 低い閾値電圧
- 2, 低い印加電圧

で

高い検出効率を目指す。

# 閾値電圧の最適化手法

- ランダムトリガー事象によるヒットレートの評価
  - 信号とノイズの区別可能な範囲で、閾値電圧を下げる

※ヒットレート =  $\frac{\text{ヒット数}}{\text{全イベント数}}$

4種類の閾値電圧  
50, 60, 70, 80mV

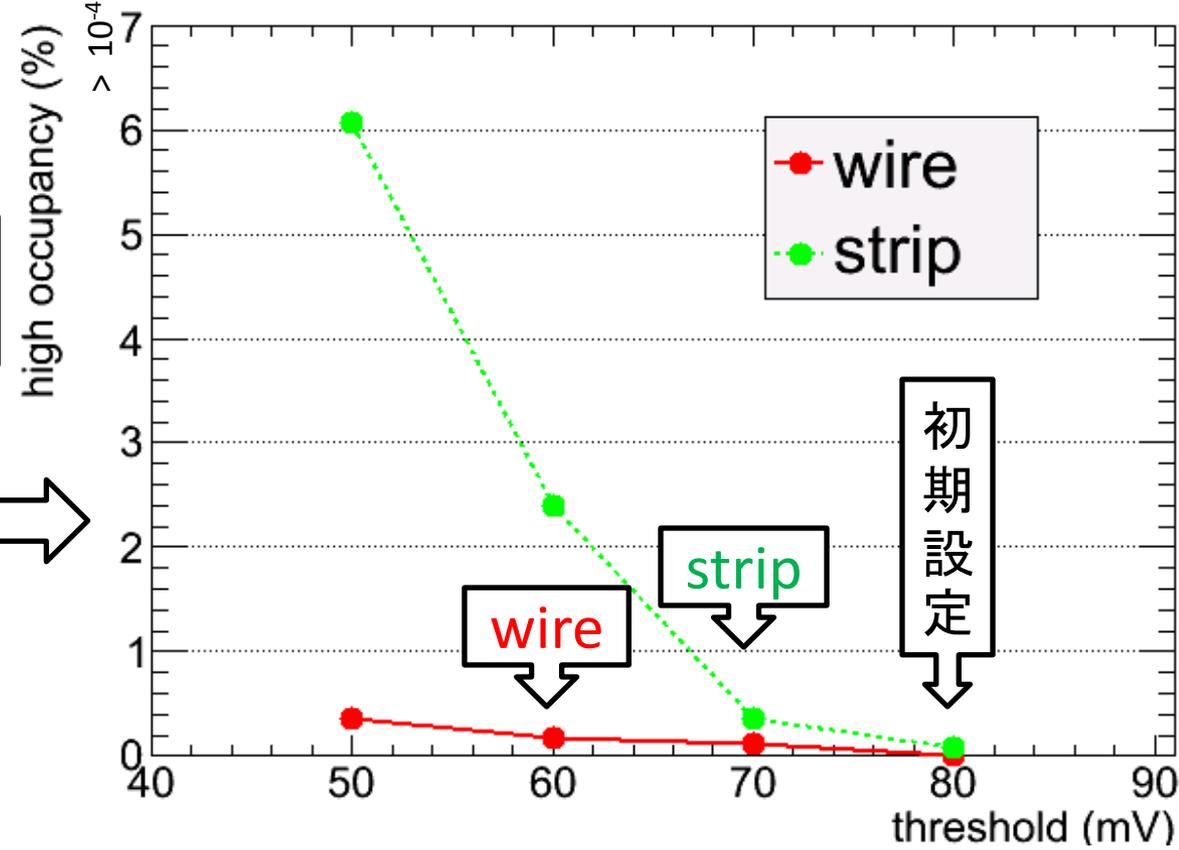
※評価基準  
宇宙線レート(10<sup>-4</sup>)を超えない

縦軸  
 $\frac{\text{高ヒットレートのチャンネル数}}{\text{全チャンネル数}}$

ワイヤー: 60mV  
ストリップ: 70mV

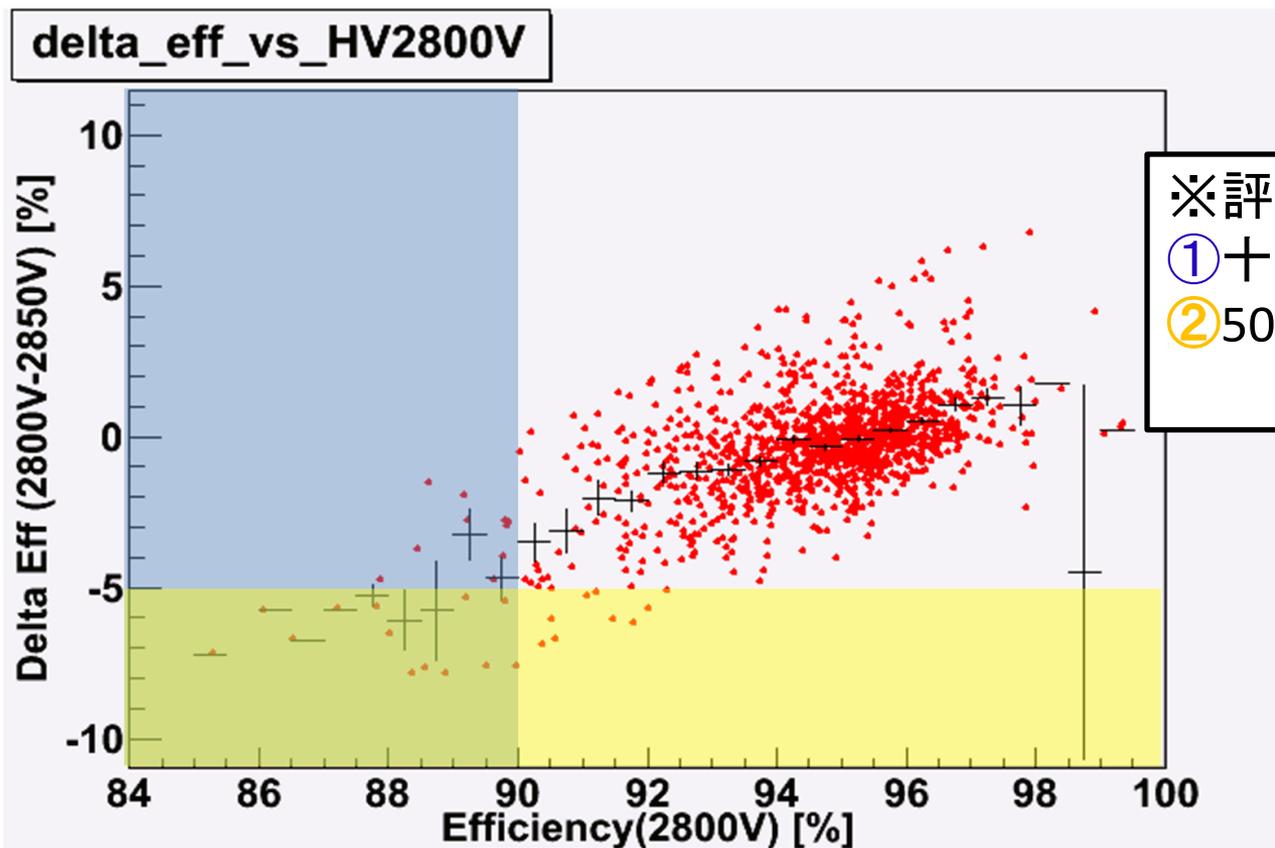
(80mV以上 計3%)

高ヒットレートチャンネルの占める割合



# 印加電圧の最適化手法

- 5億イベントの宇宙線事象を使用した検出効率評価
  - 94%以上、安定した検出効率を目指す。



3種類の印加電圧

・2800V、2850V、2900V

※評価基準

- ①十分な検出効率を得られない
- ②50Vの印加電圧の変化で検出効率の低下が著しい

↓  
該当したチェンバーは  
印加電圧を上げる

2800V: 90.4%

2850V: 5.2%

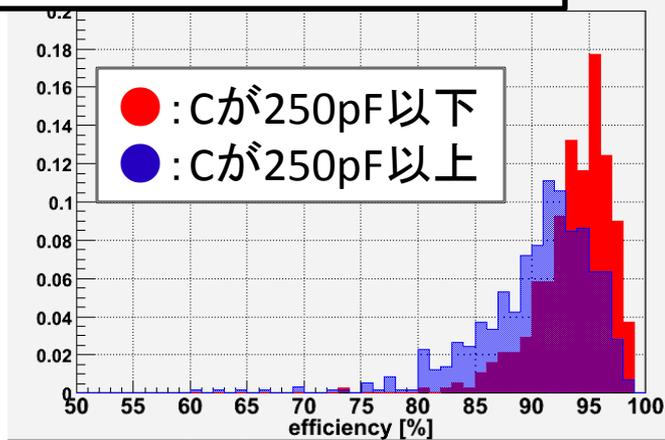
2900V: 4.4%

横軸: 2800Vの検出効率

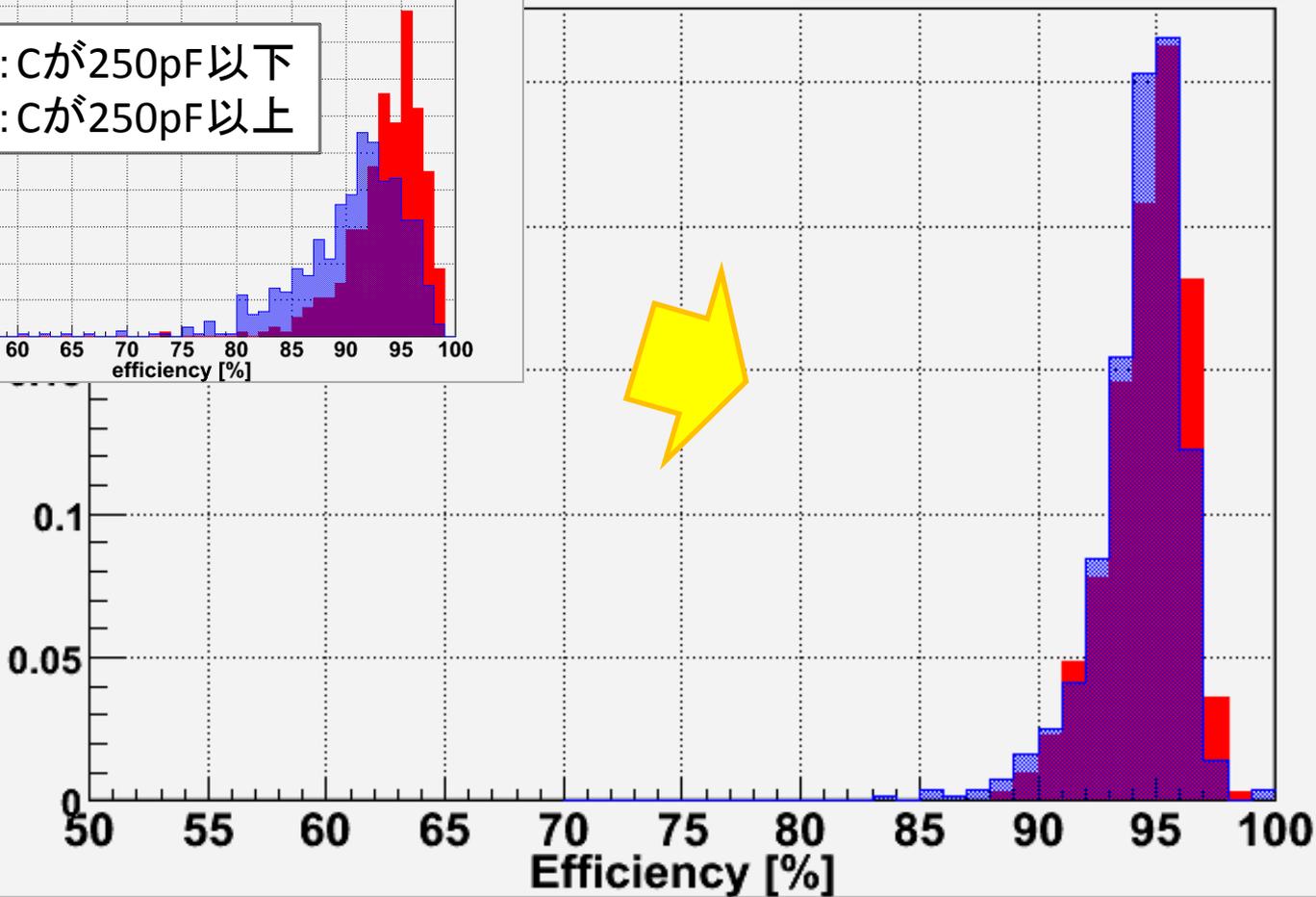
縦軸: (2800Vの検出効率) - (2850Vの検出効率)

# 最適化による検出効率の改善

## 最適化前検出効率

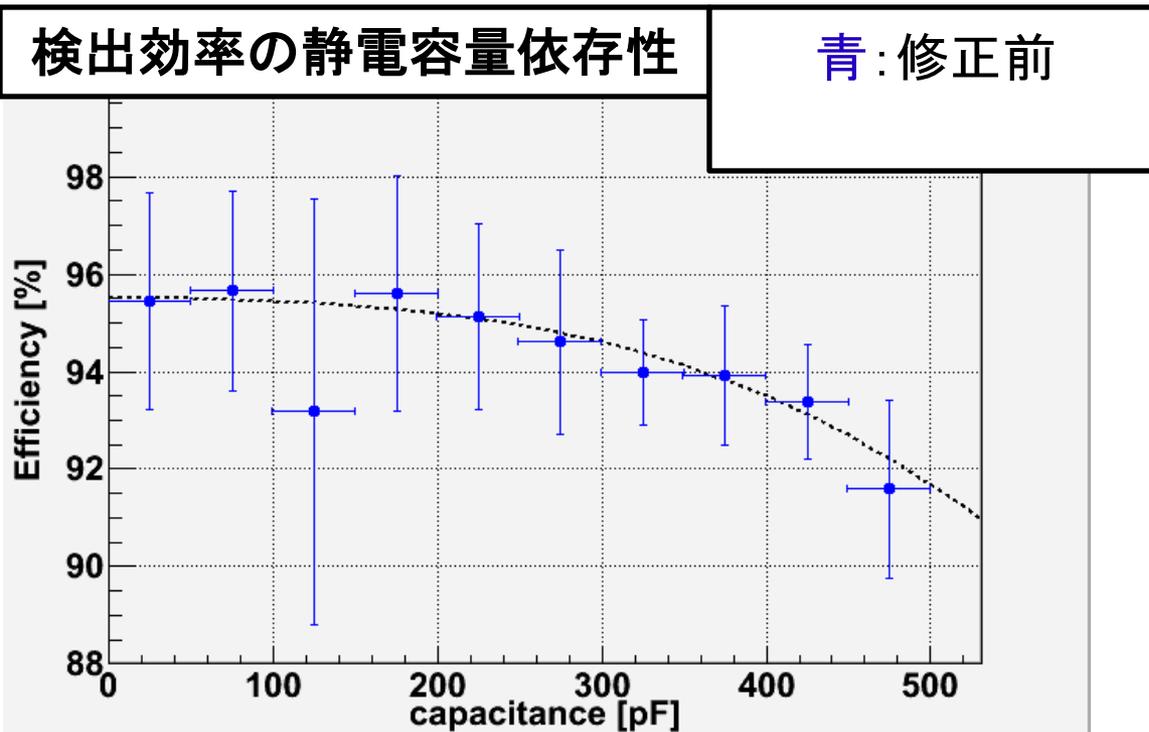


## 最適化後検出効率



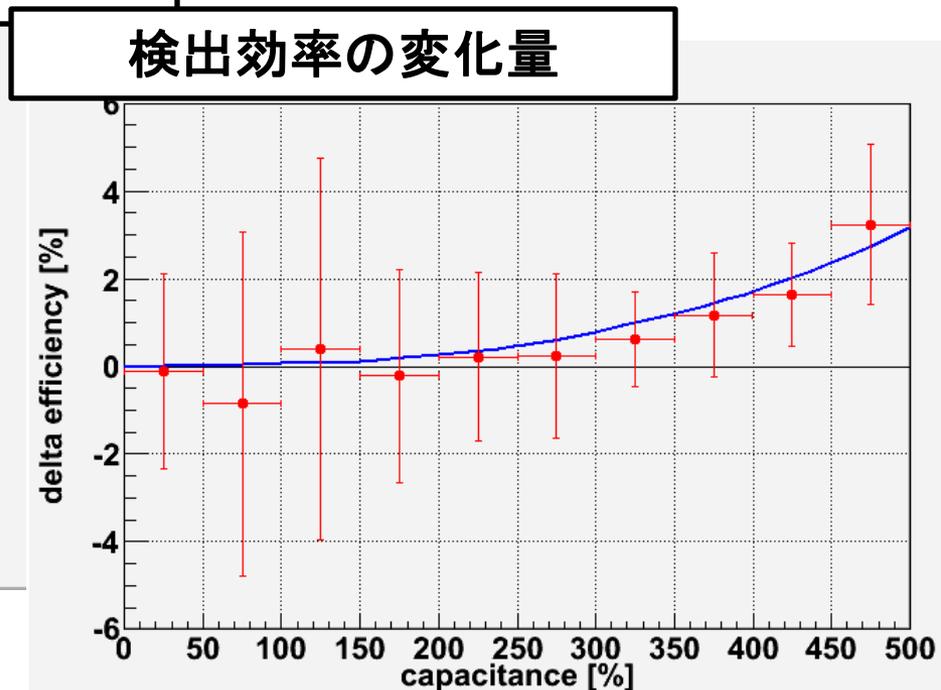
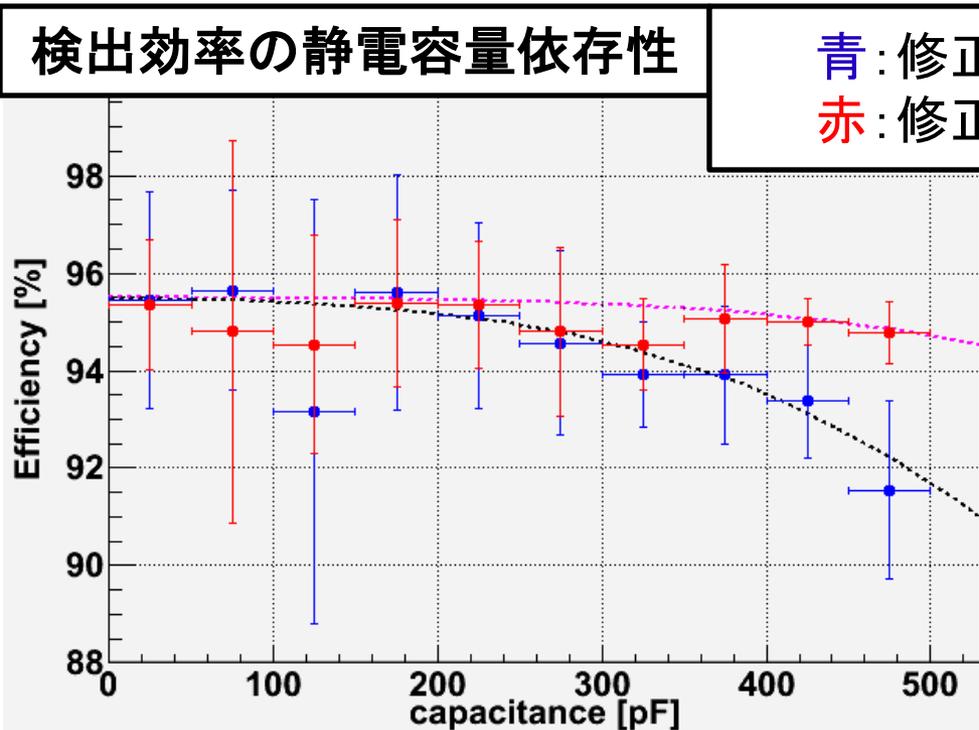
C > 250pFの領域における検出効率平均値は92.9%から94.8%へ向上

# 検出効率の静電容量依存性



- 静電容量による検出効率のばらつきを改善
- 計算値とも一致、正しい理解の元で修正を行った。

# 検出効率の静電容量依存性



- 静電容量による検出効率のばらつきを改善
- 計算値とも一致、正しい理解の元で修正を行った。

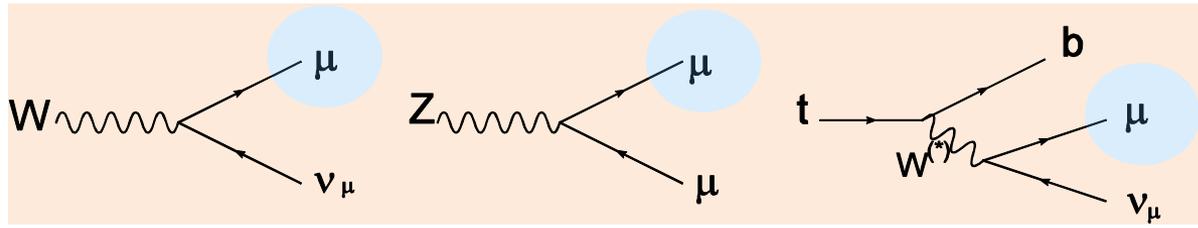
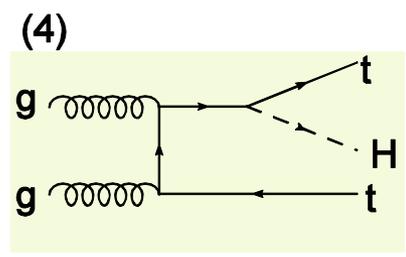
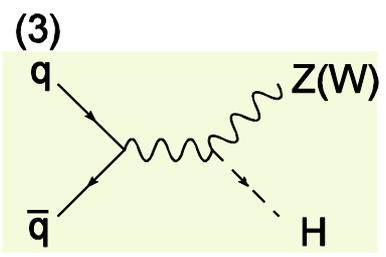
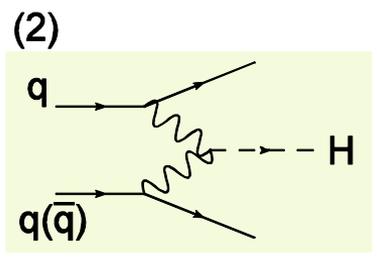
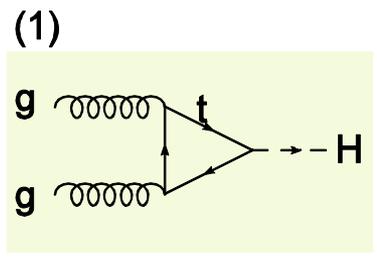
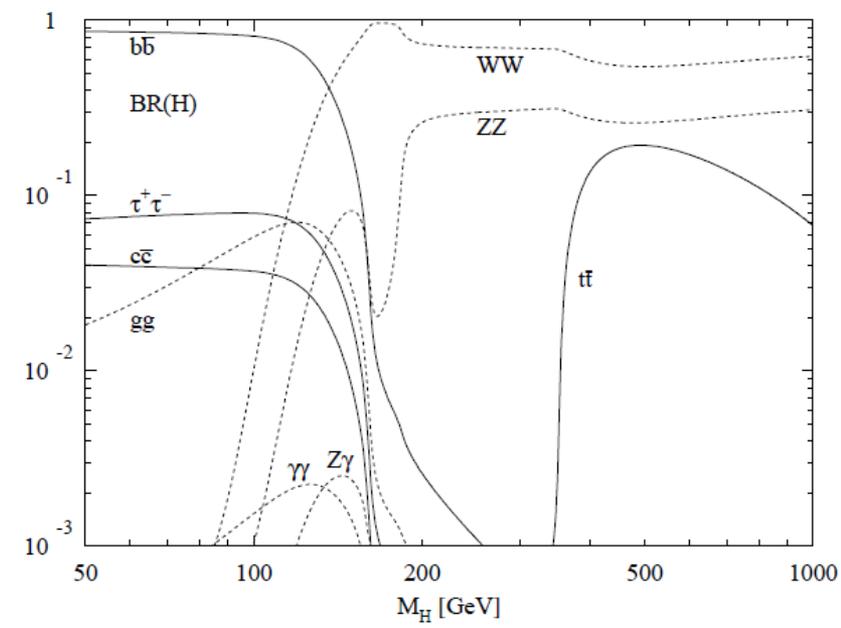
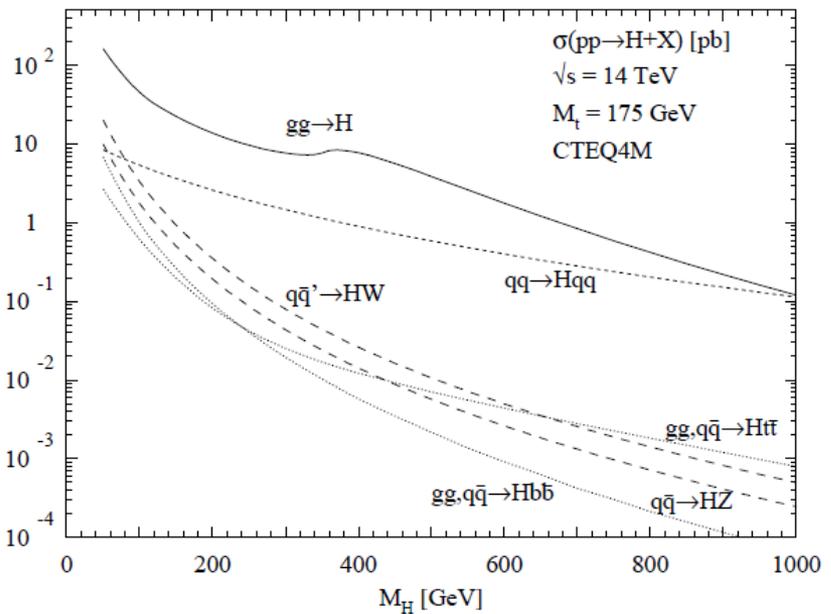
# まとめ

- 94%以上で一様な検出効率での動作を目指す
  - 検出器の電気的特性の理解が重要
    - 静電容量由来の出力電荷量の差 ⇒ 場所依存性
  - 印加電圧、閾値電圧の調整によりこれらを解決する
- 結果、
  - $C > 250\text{pF}$ の領域の検出効率を92.9%から94.8%へ改善  
場所依存性を解決

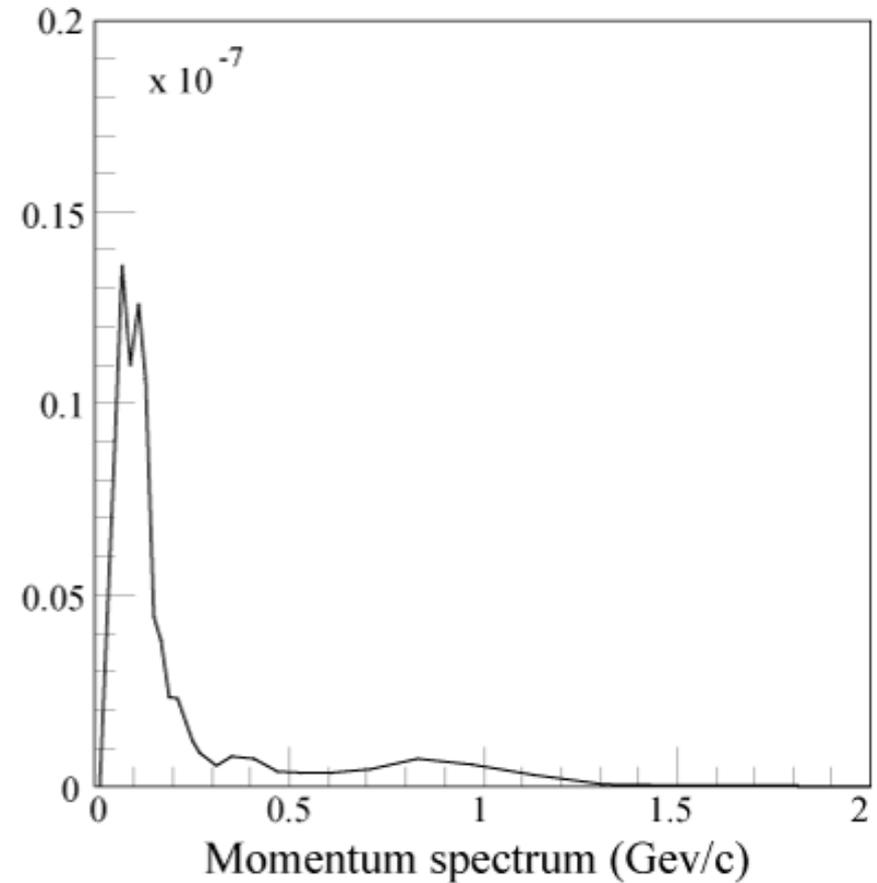
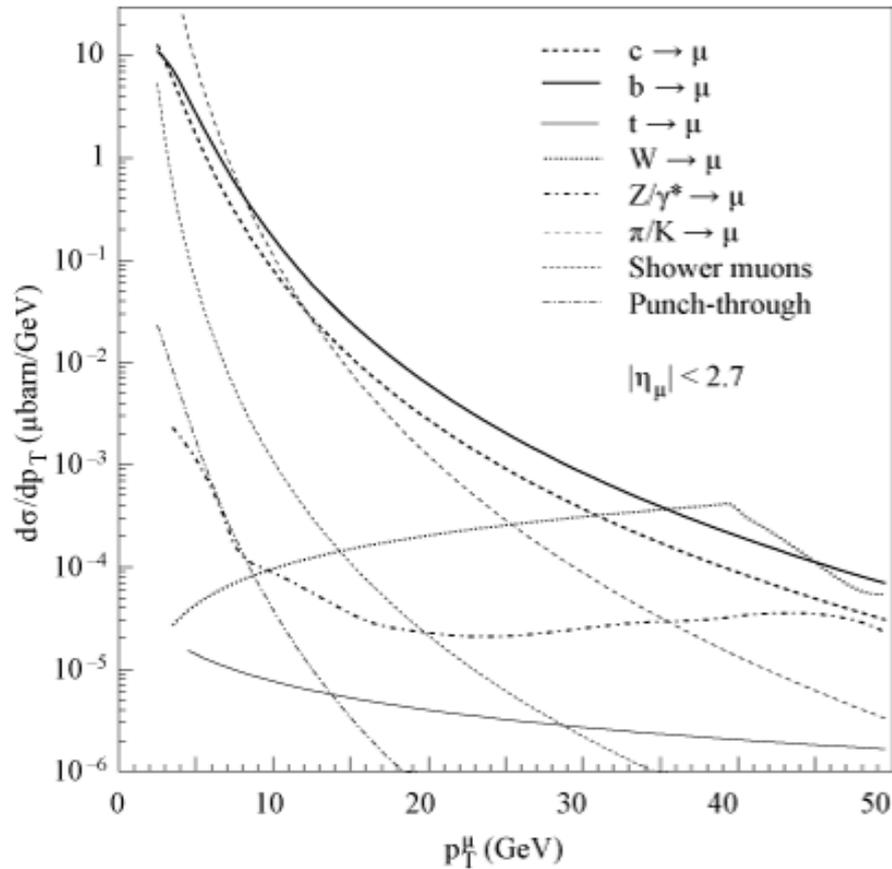
本研究により、TGCのコミッショニングは全て終了  
TGC検出器への要求を全て達成した  
最高の状態で2010年のLHC本格稼働を迎える

- back up

# 生成、崩壊断面積



# μ粒子トリガーの性能①



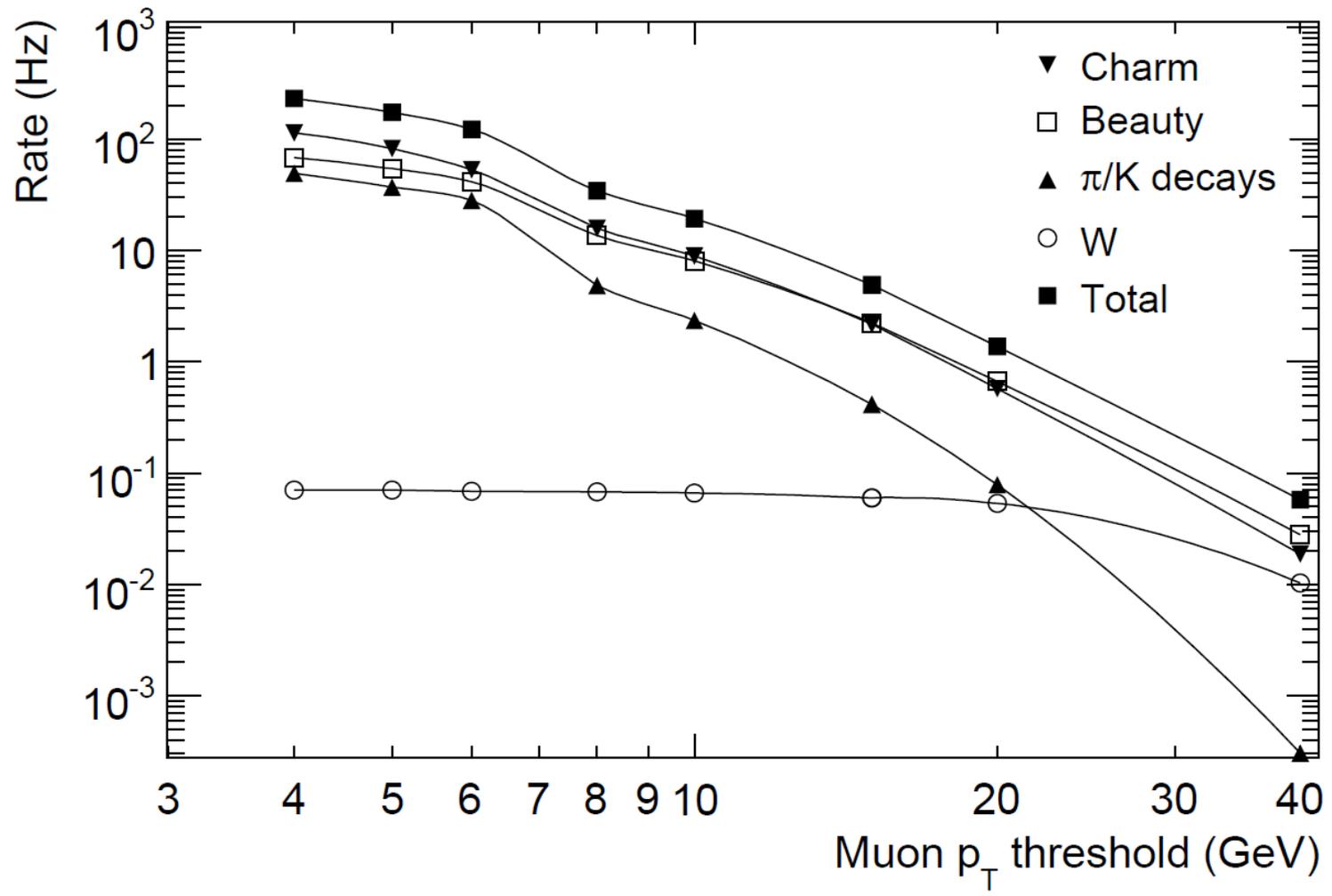
高エネルギーμ粒子

→ヒッグス由来 = Z / W粒子を含む

→μ粒子を効率的に選択

→背景事象との区別を可能とする

# μ粒子トリガーの性能②



# チェンバー構造

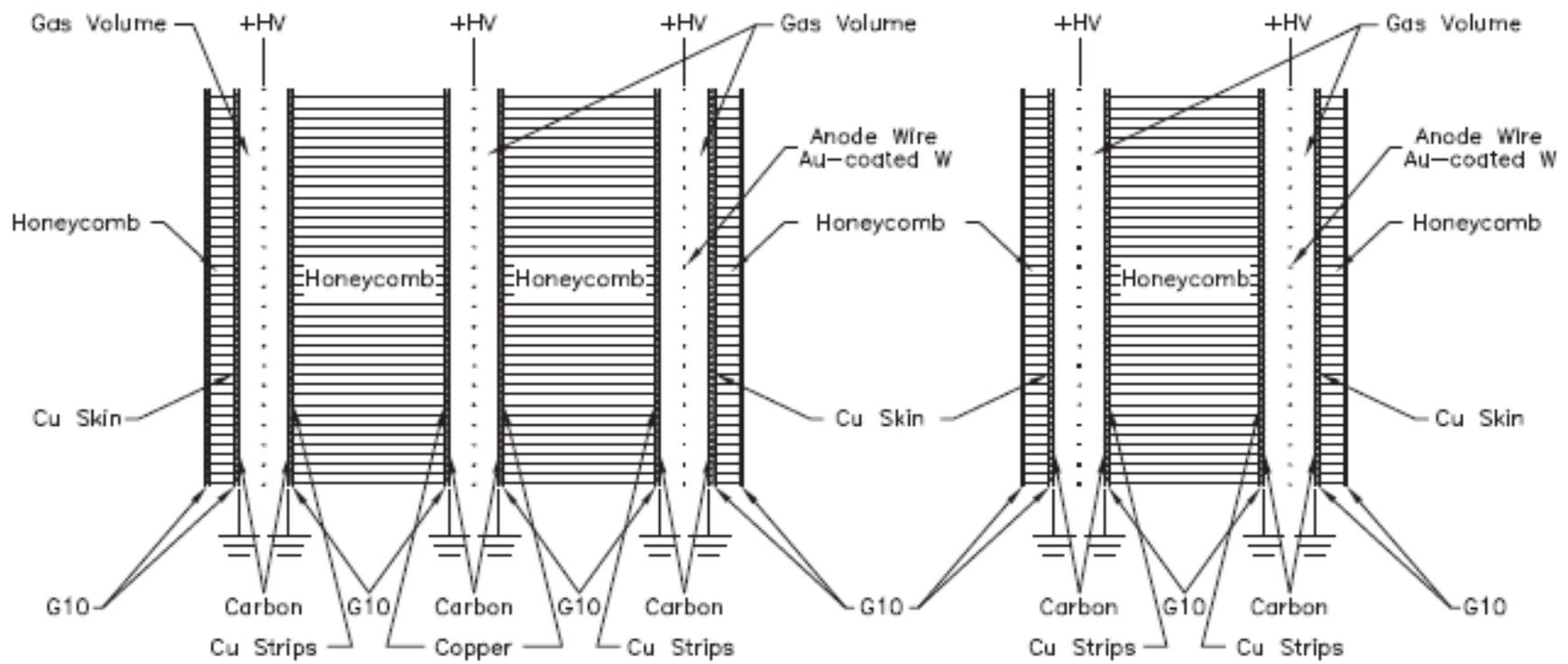
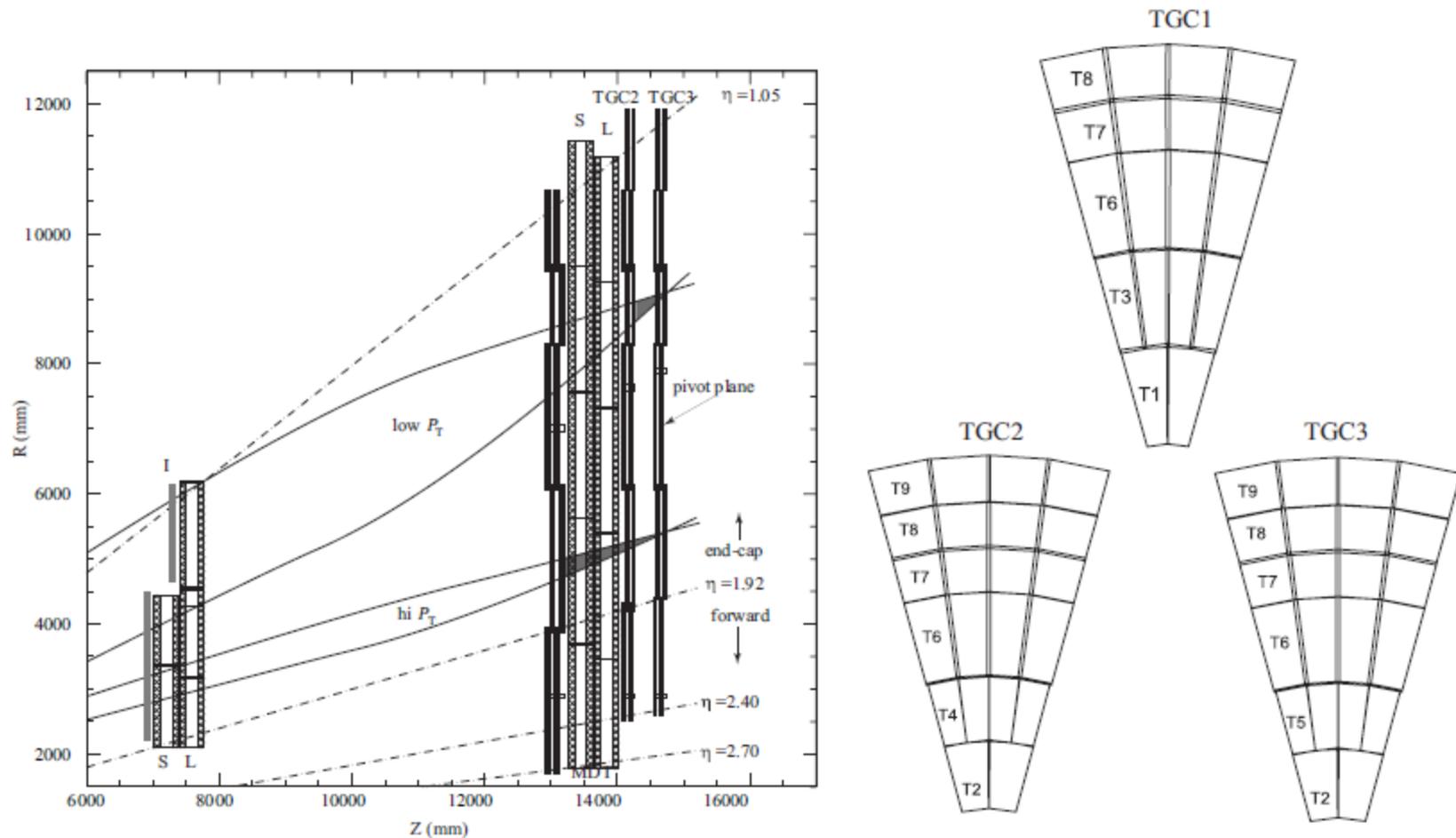
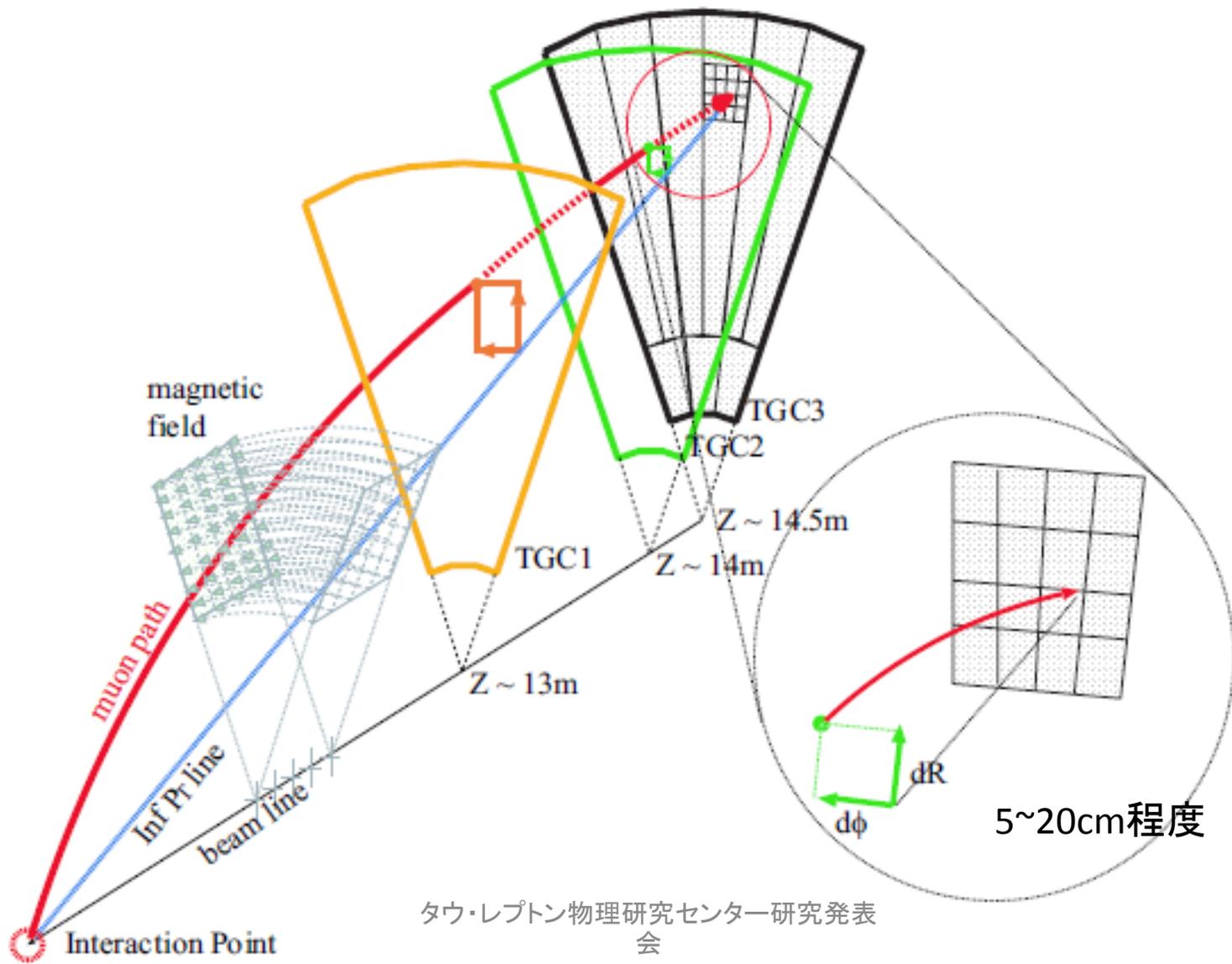


図 3.4 左: Triplet 右: Doublet

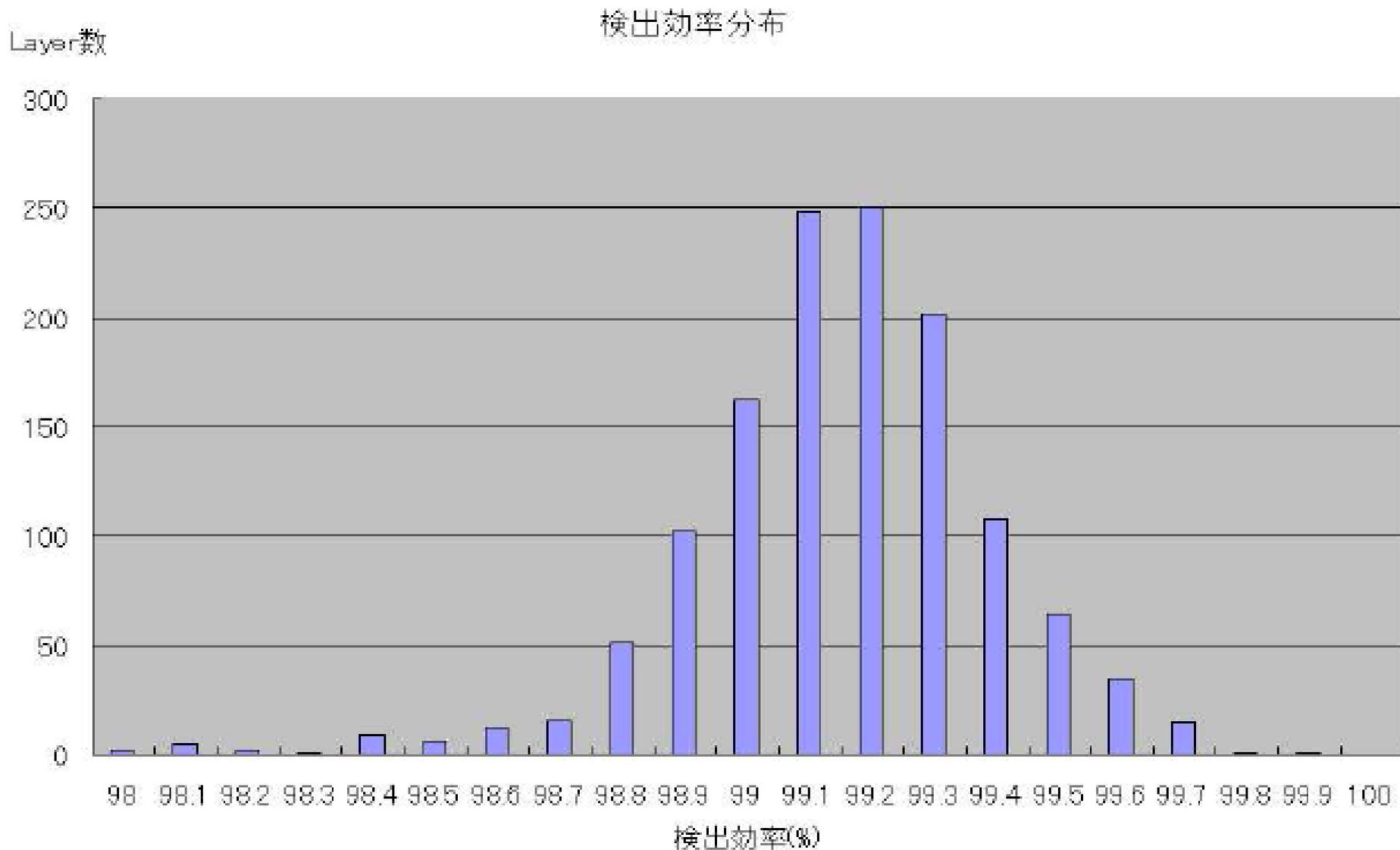
# チェンバーの配置



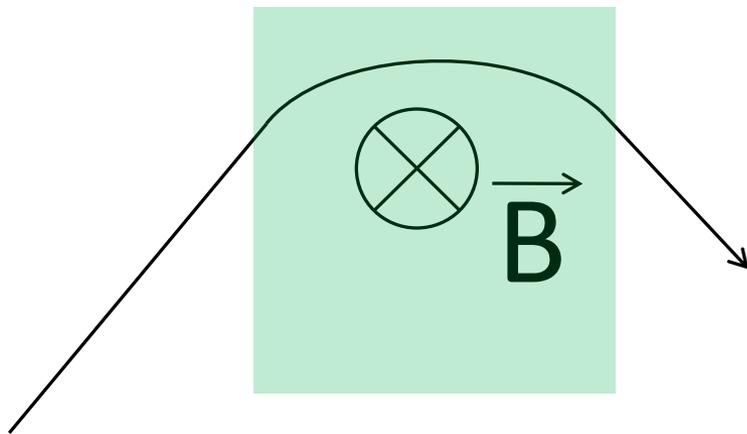
# コインシデンスウィンドウ



# 検出効率分布



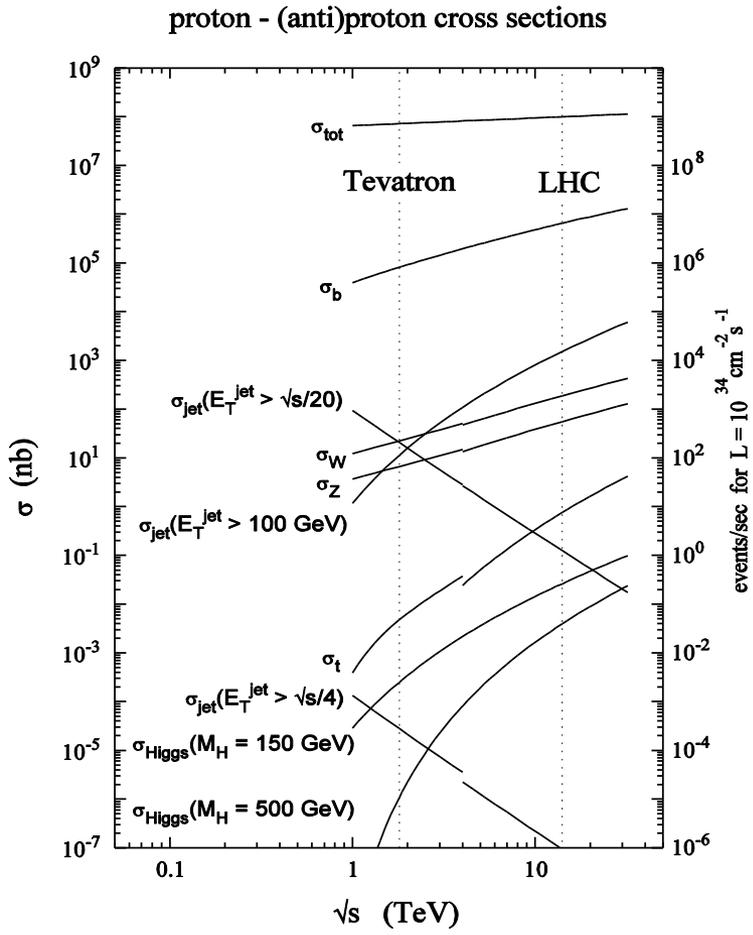
# 磁場中のμ粒子



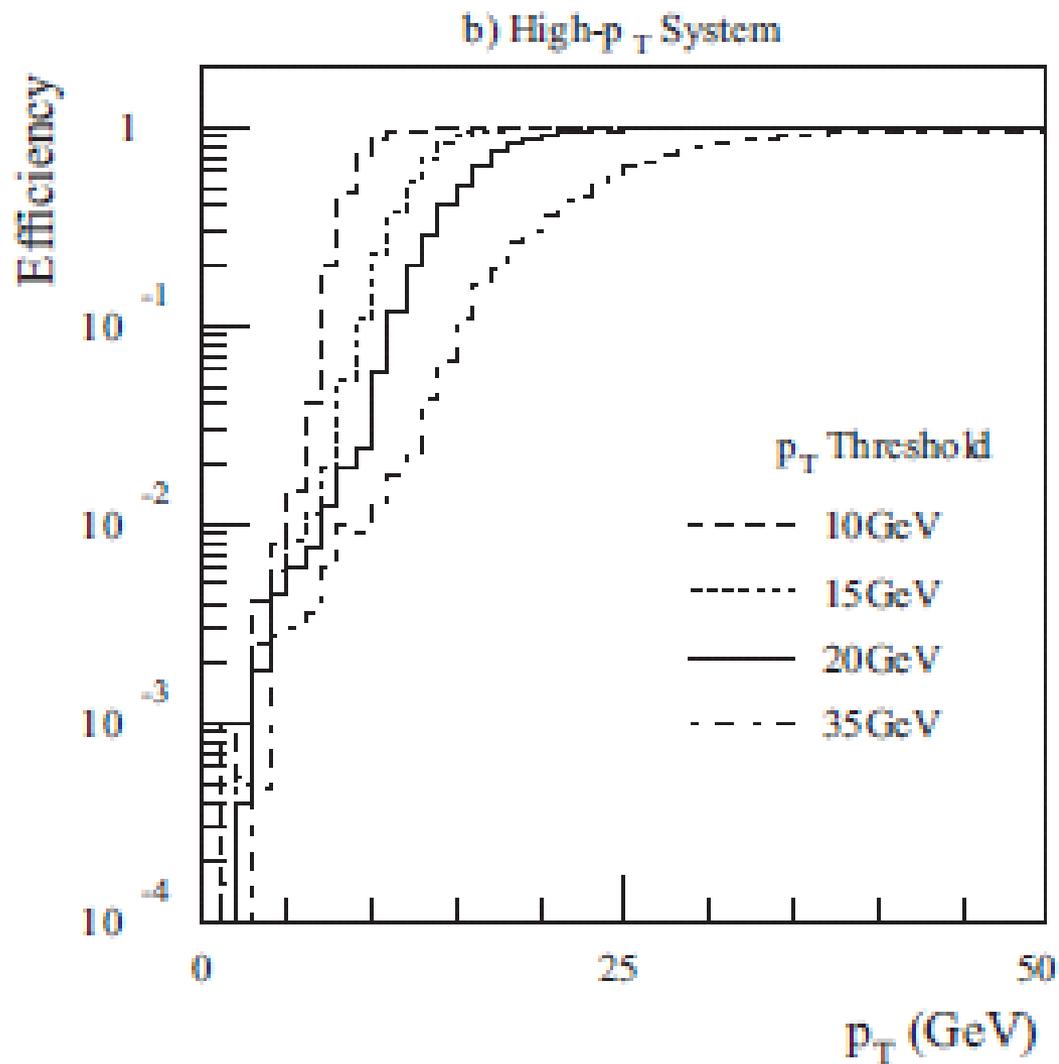
$$P_T [\text{GeV}/c] = 0.3 B \rho [\text{Tesla m}]$$

$P_T$	: 横運動量
$B$	: 磁場 1~2 Tesla
$\rho$	: 曲率半径

# LHCにおける粒子生成数

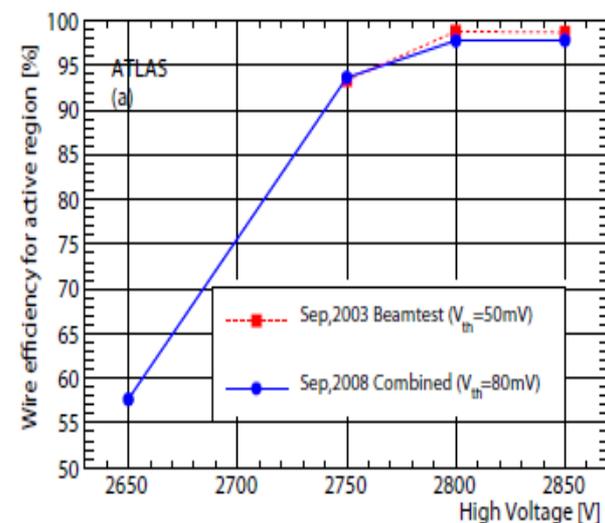
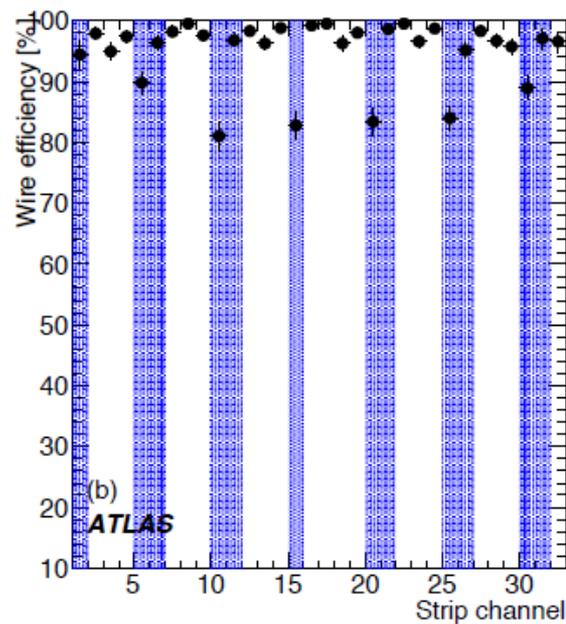
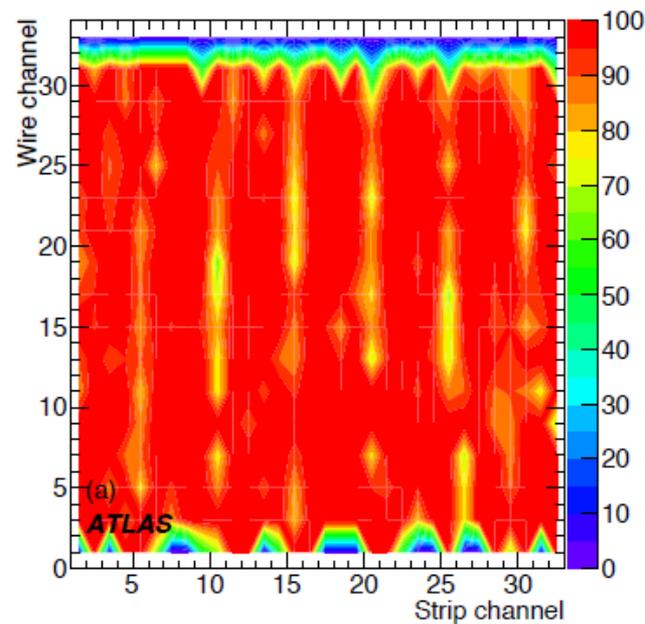


# トリガー効率



YH19V04

# 有感領域における検出効率



- 高分解能の飛跡を使用、chamber 内部構造を確認
- 有感領域検出効率→98%

chamber内の特徴を正確に確認

⇒検出効率評価の正しさが立証された

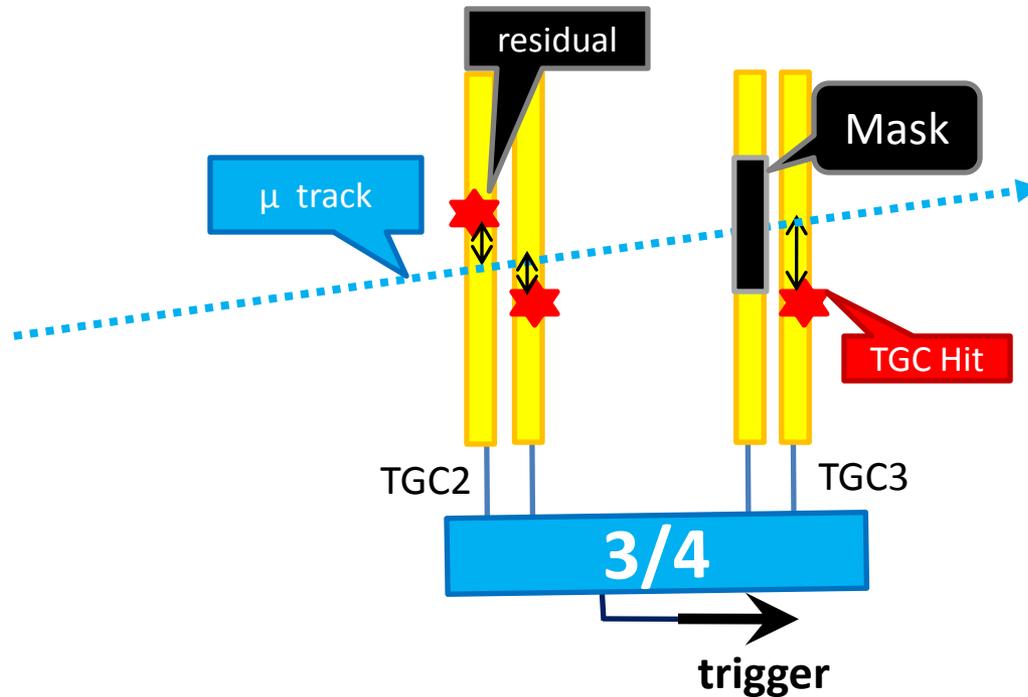
# 検出効率評価手法

(1) 精度、純度の高い宇宙線trackを選ぶ

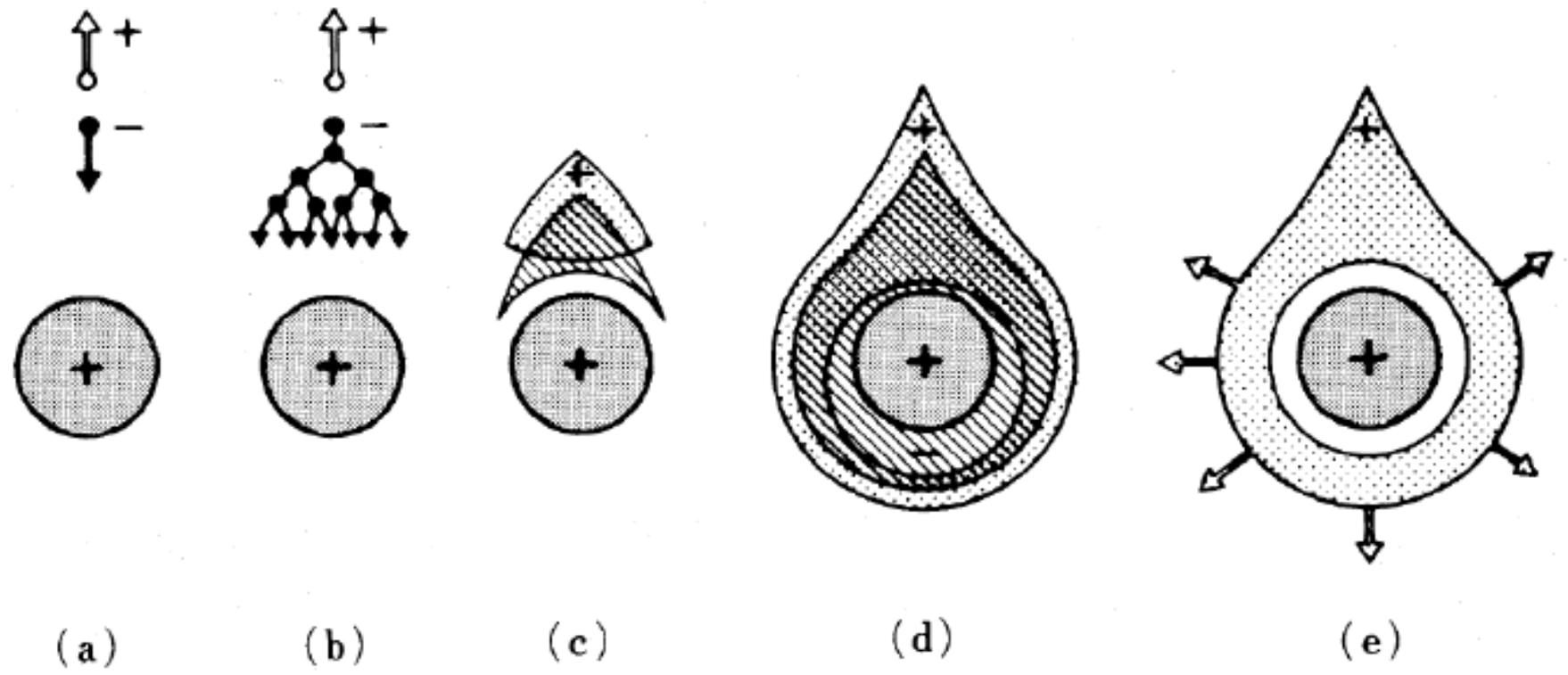
(2) 評価したい層のtrigger biasをなくす

⇒ 3層のみでtriggerを発行できるcoincidence条件を満たす

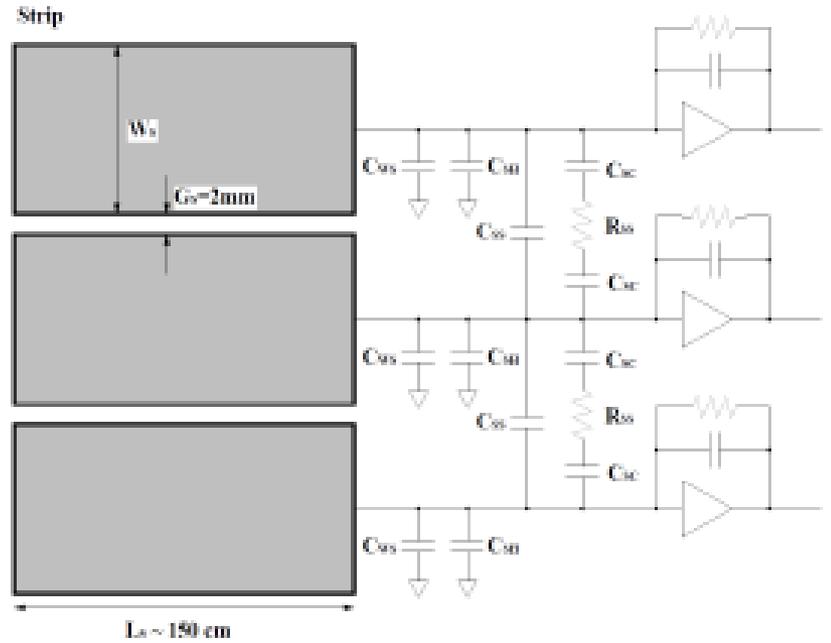
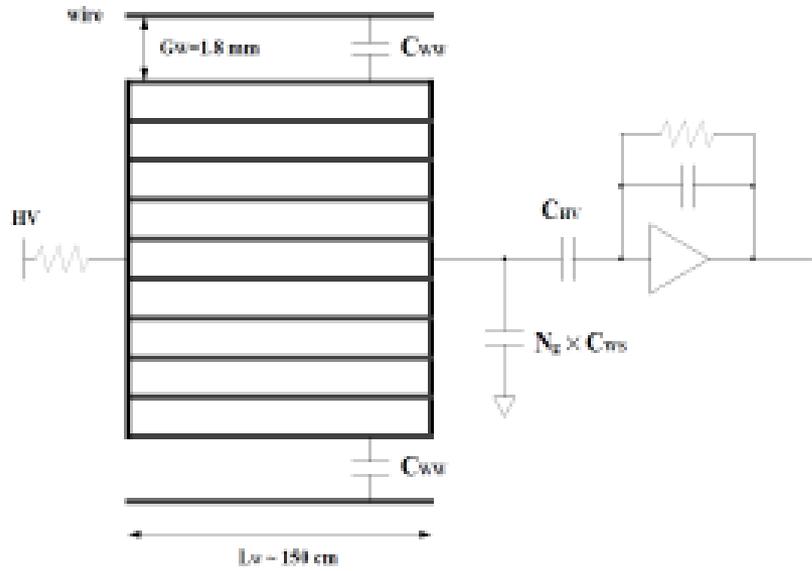
この時、評価したい層にHitがあるか？



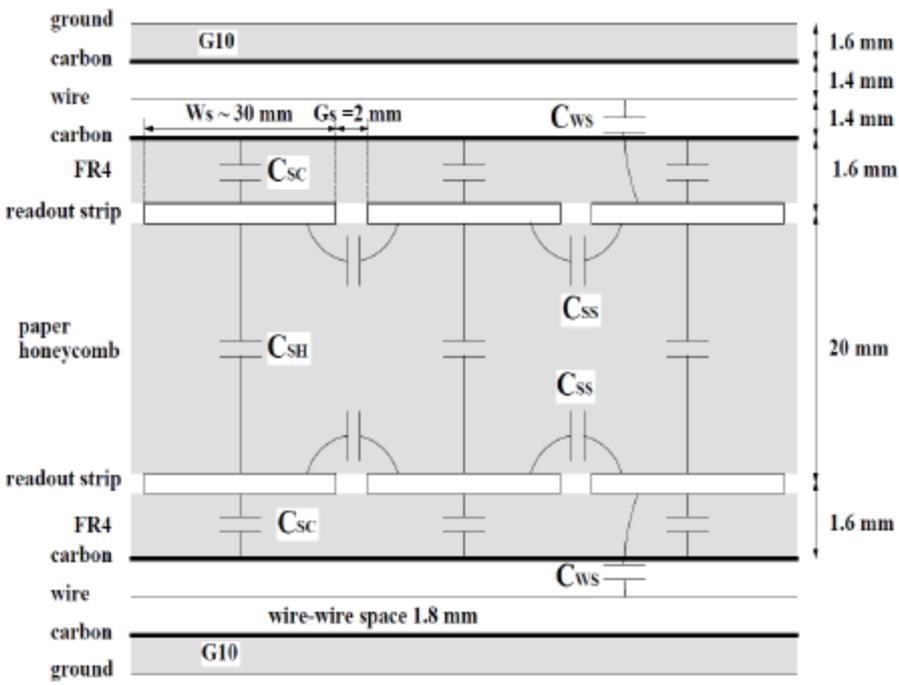
# ガス増幅



# チャンネル構造



# 電氣的構造

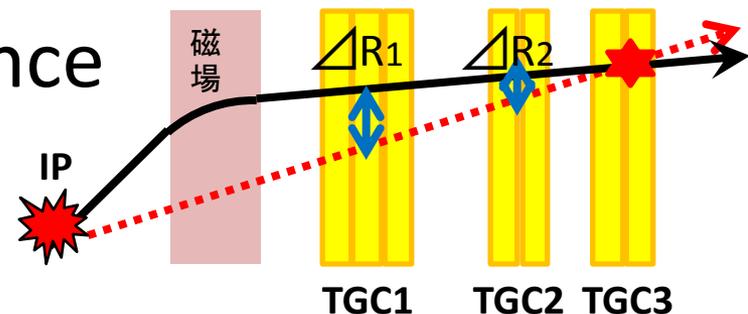


# トリガーロジック

- 7層のchamberによるcoincidence

→trigger発行

- 興味領域(ROI)
- 運動量(6段階 Pt) 0, 6, 10, 15, 20, 40 (pt)



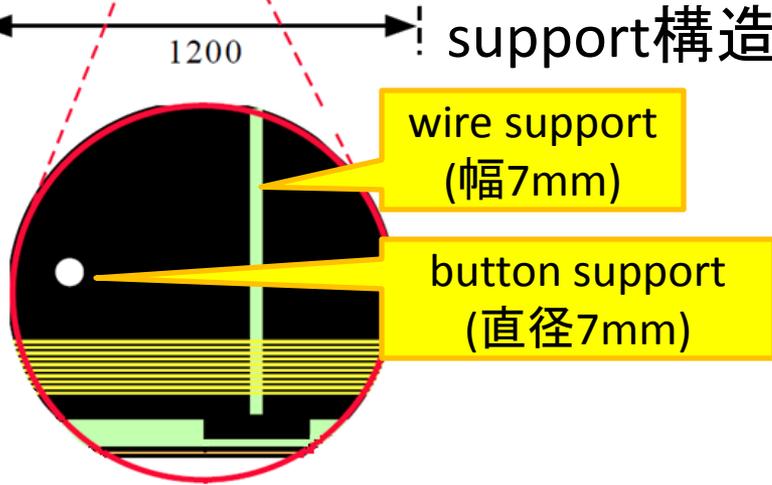
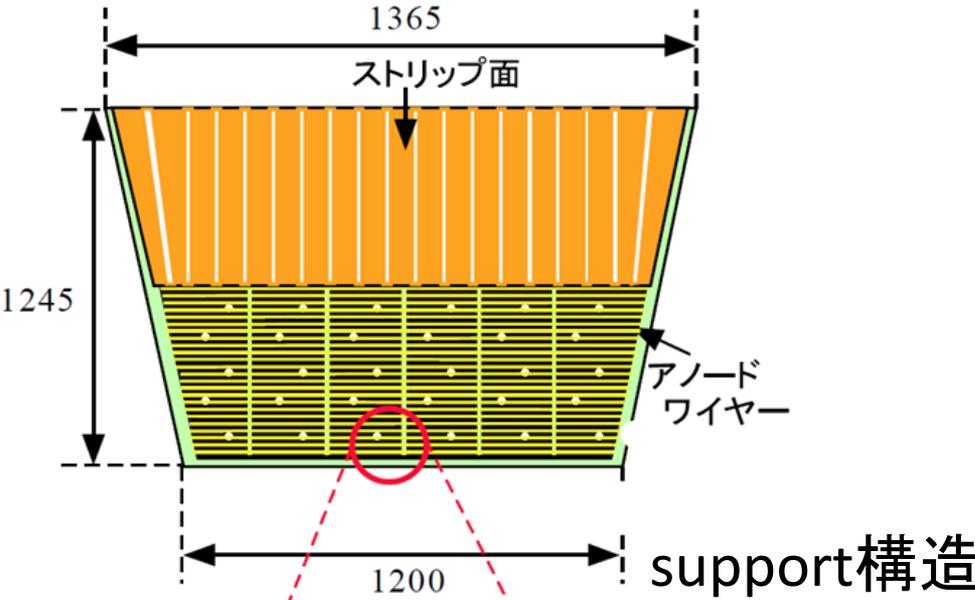
- 宇宙線trigger

Pt4,5	TGC1	TGC2	TGC3
Wire(R)	2/3	3/4	
Strip( $\Phi$ )	-	3/4	
$\Delta R1$	Pt4=10 < $\Delta R1(TGC1) \leq 15$ Pt5=1 $\Delta R1(TGC1) \leq 10$		

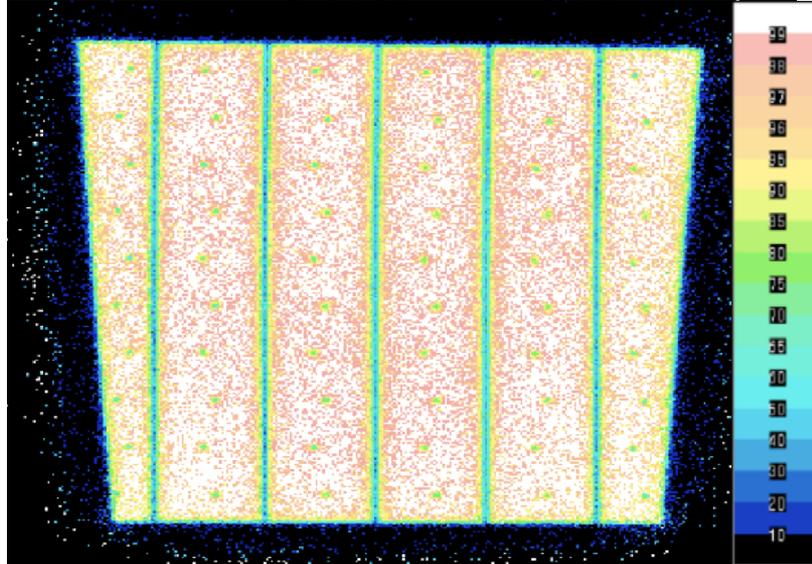
Pt1	TGC1	TGC2	TGC3
Wire(R)	-	3/4	
Strip( $\Phi$ )	-	3/4	
$\Delta R2$	$\Delta R2(TGC2) \leq 7$		

# TGCチェンバー

wire, strip 2D読み出し  
Gas CO<sub>2</sub>+n-pentan(55:45)



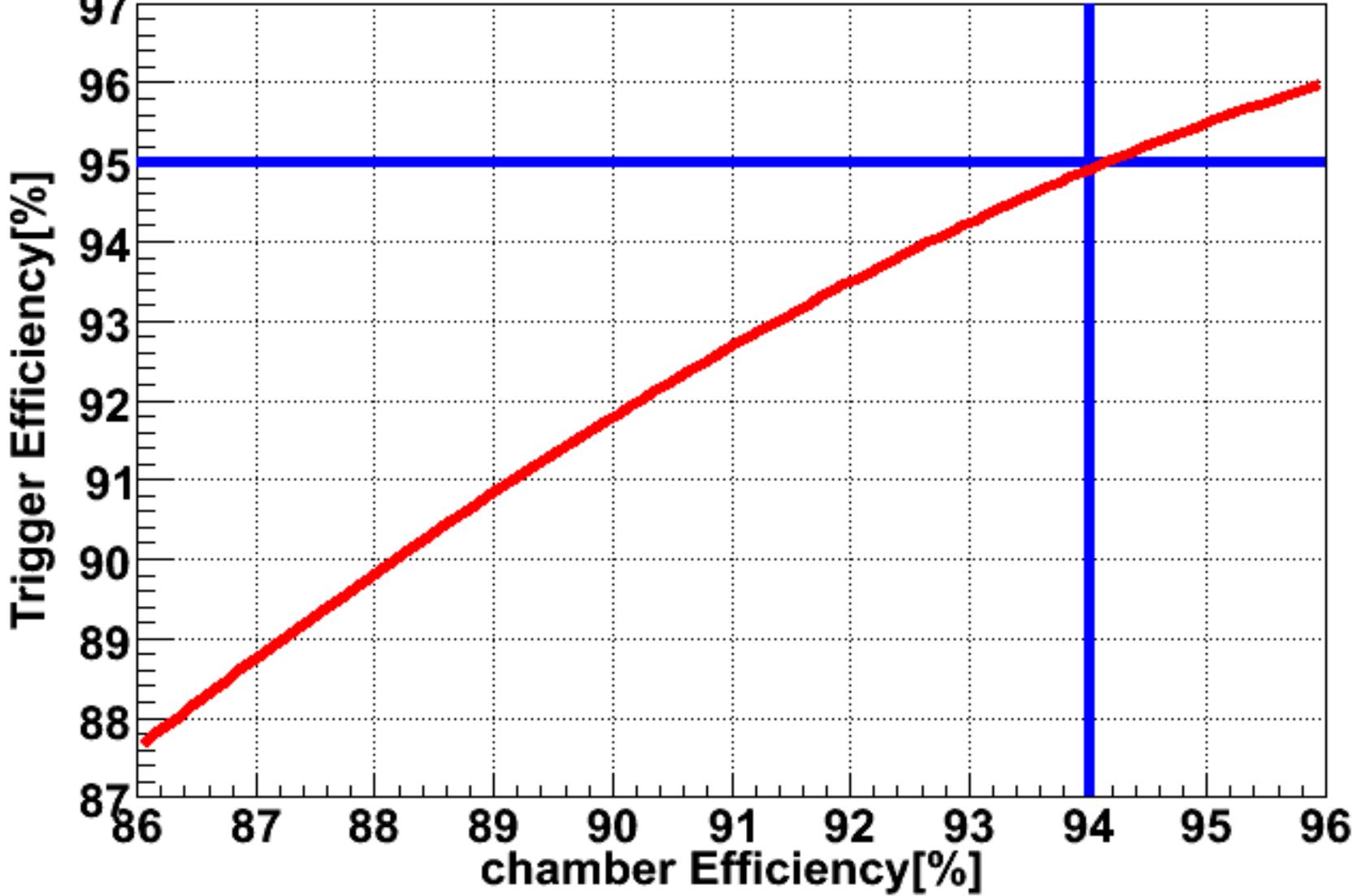
### 地上宇宙線テスト結果



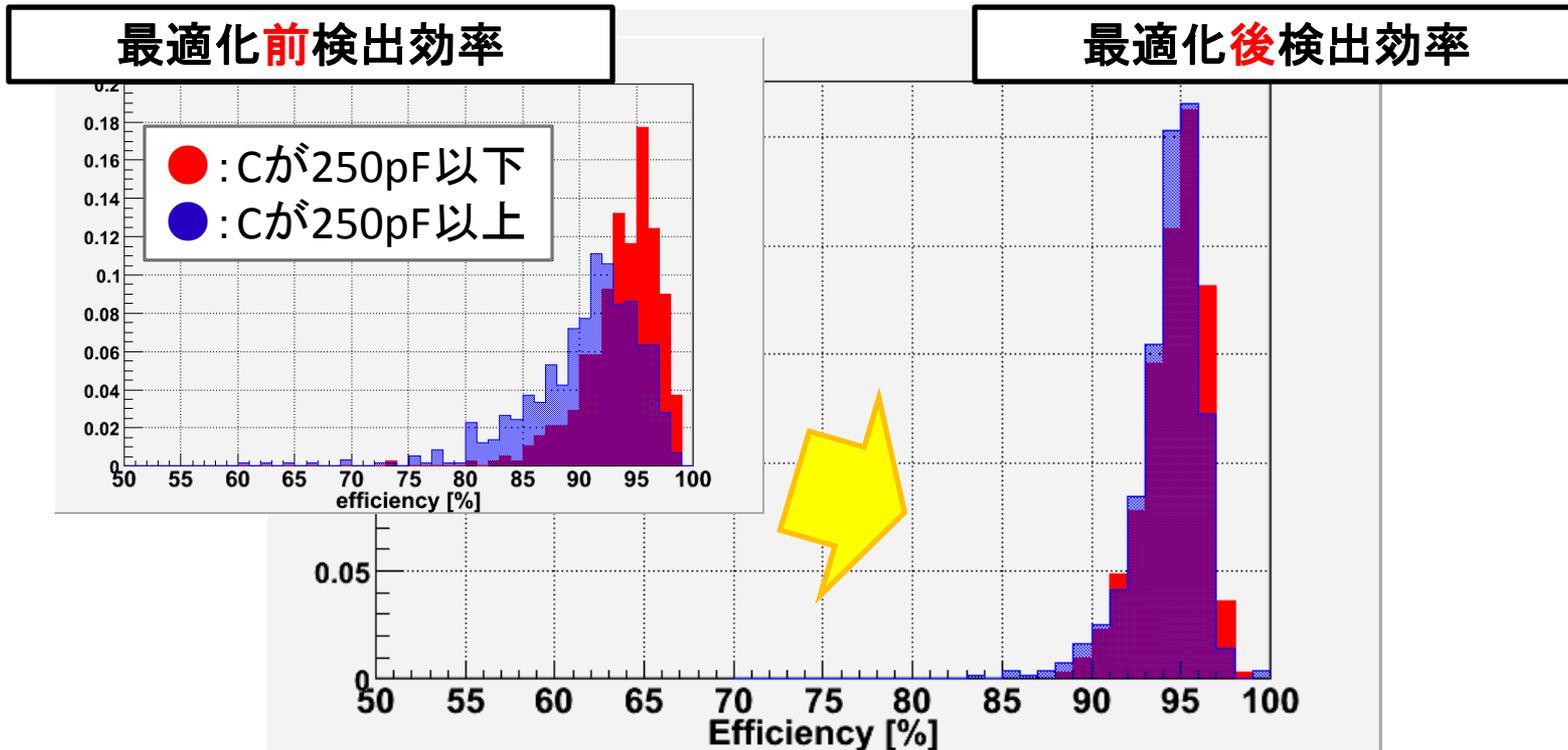
地上での測定における検出効率  
有感領域で99%  
不感領域込みで94%

# トリガー効率の検出効率依存性

**trigger\_efficiency**



# 最適化による検出効率の改善



C > 250pFの領域における検出効率平均値は92.9%から94.8%へ向上

※非一様性由来の誤差

$$\epsilon_{total} = \sqrt{\epsilon_{statistical}^2 + \epsilon_{nonuniform}^2}$$

	total誤差	統計誤差	非一様性による誤差
調整前	4.4%	3.6%	2.6%
調整後	1.5%	1.3%	0.7%

静電容量、チェンバー個体差による検出効率のばらつきを改善

# 閾値電圧の最低値

※閾値電圧をノイズレベルを示すENCにおける単位に換算する。

- ・メインアンプ 7倍
- ・チャージアンプ 0.8V/pC
- ・1 electron =  $1.6 \times 10^{-19}$

より、4.48mV/5000electron

となる。

閾値電圧50mVの時、実際に回路上では30mVの閾値となる。

よって、

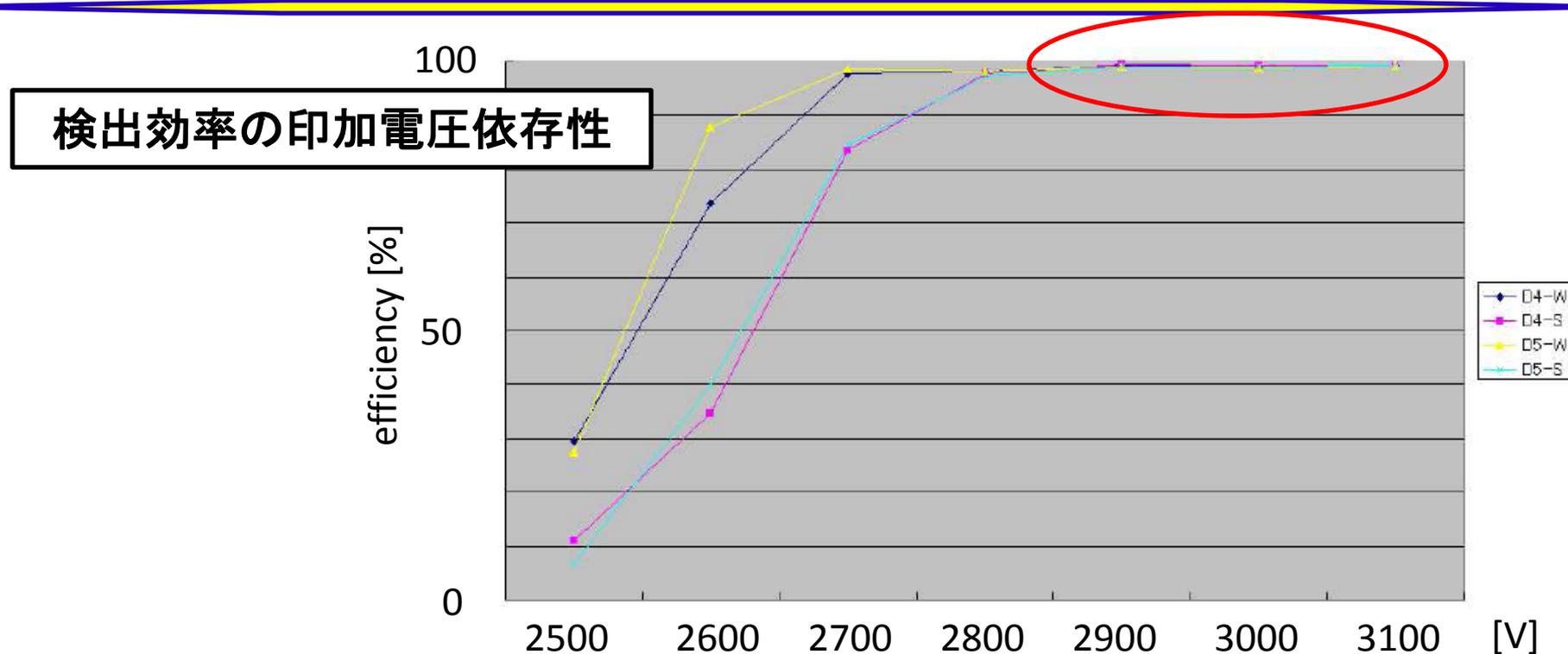
閾値電圧50mVは33000electronに相当。

ノイズは7000electronである。

閾値電圧はノイズの5倍以上を満たしたい、  
35000electron以上を満たす閾値電圧に設定したい。

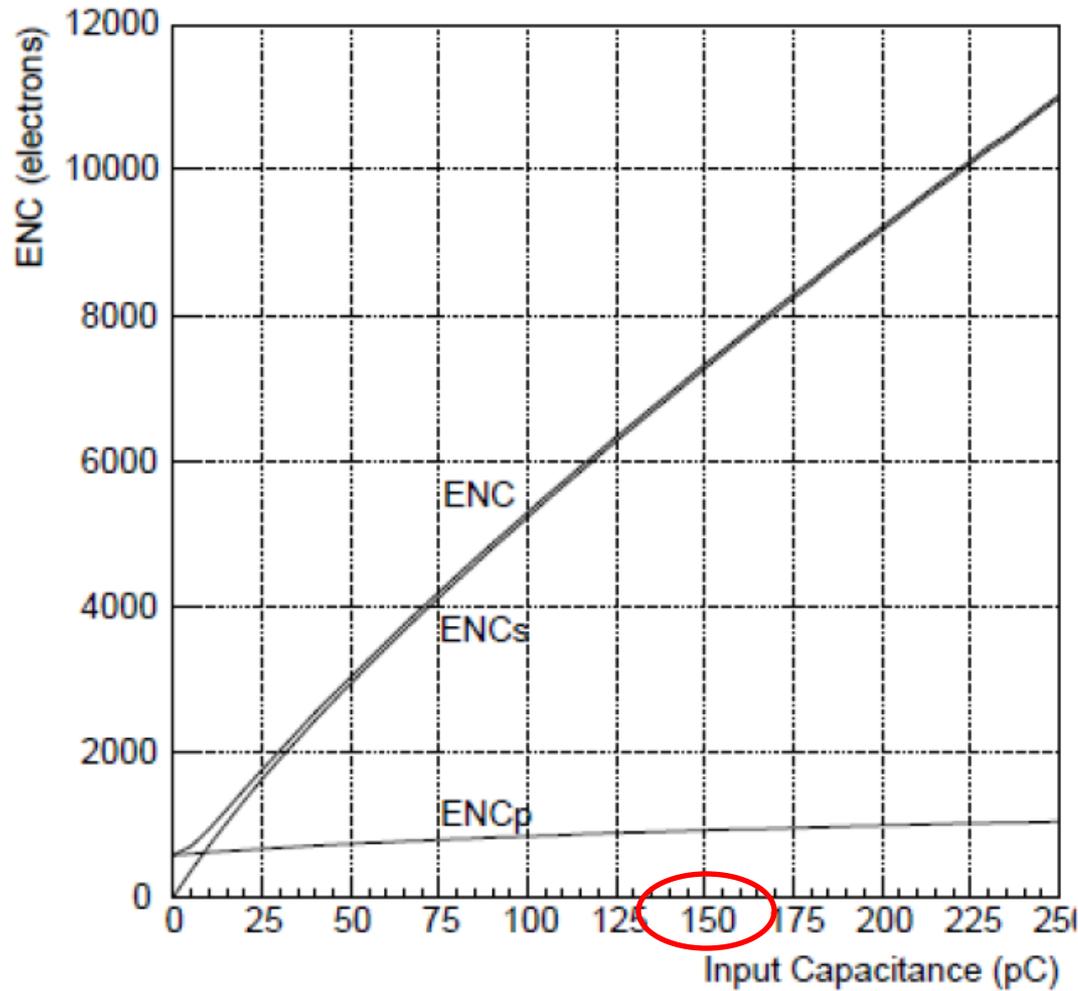
したがって、閾値電圧50mVは低すぎるため、60mV(39000electron)とした。

# 安定動作領域



- 印加電圧の微小変化に対しても検出効率の値が変化しない領域 ⇒ プラトー領域
- 実験環境のふらつき(温度、気圧、HVモジュール)による検出効率への影響はない安定動作領域

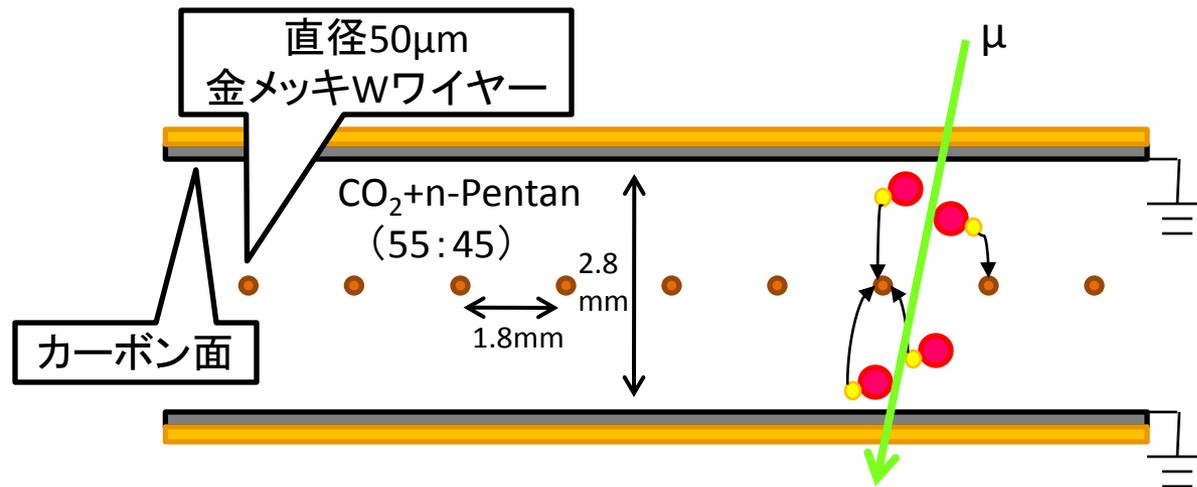
# Equivalent Noise Charge



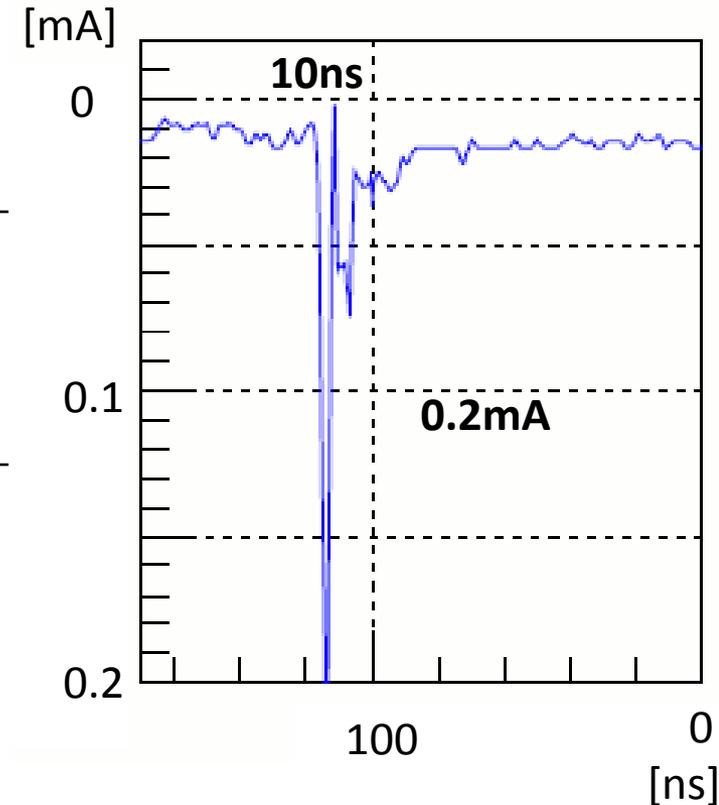
アンプへ接続した回路の静電容量と、ノイズの関係。  
一般に、ノイズに対し閾値電圧は5倍以上の余裕を持たせて設定する

# 内部構造と検出原理

## • TGC断面図



TGC出力波形



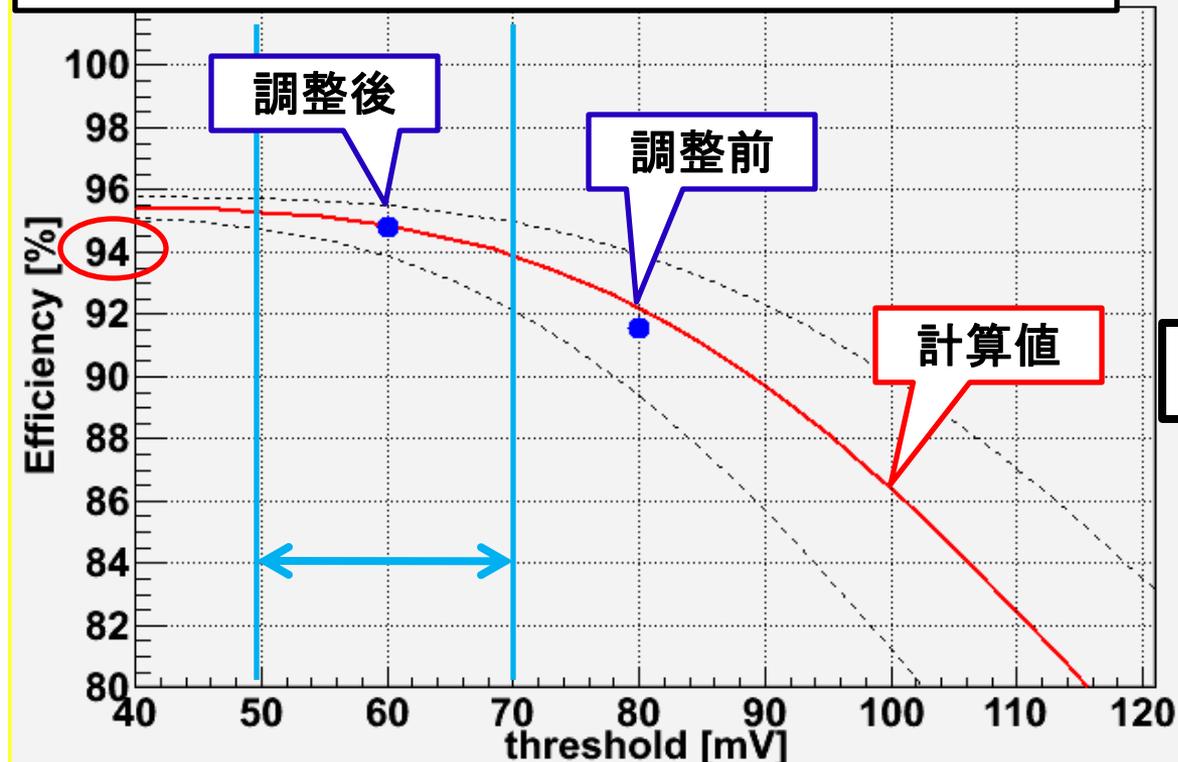
## ※検出原理

1.  $\mu$ 粒子が通過
2. ガス分子が電離、初期電子が生成
3. 電子がワイヤーへ向かう
4. ガス増幅(電子が $10^6$ 倍に増幅)
5. 信号出力
6. デジタル化し、信号計算回路へ

実験環境に依存

# 安定動作の検証

静電容量450pF以上のチャンネルの検出効率



※実験環境のふらつき  
⇒10%出力電荷量が上下。



閾値電圧10mVのふらつき

- 実験環境による出力電荷量の変化に対し、常に94%以上の検出効率を保つことが保証された。  
⇒安定動作領域での動作を実現した。

# LHC-ATLAS実験

- **ヒッグス粒子の実験的観測を目指す**

- 大型陽子陽子加速器 (LHC)

- 重心系E :  $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$
- 衝突頻度 : 25ns毎
- 最高ルミノシティ :  $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

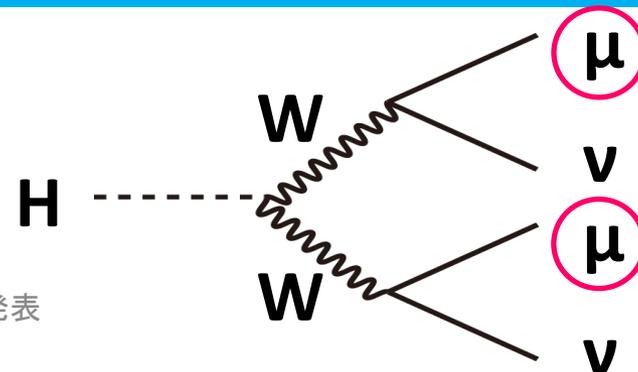
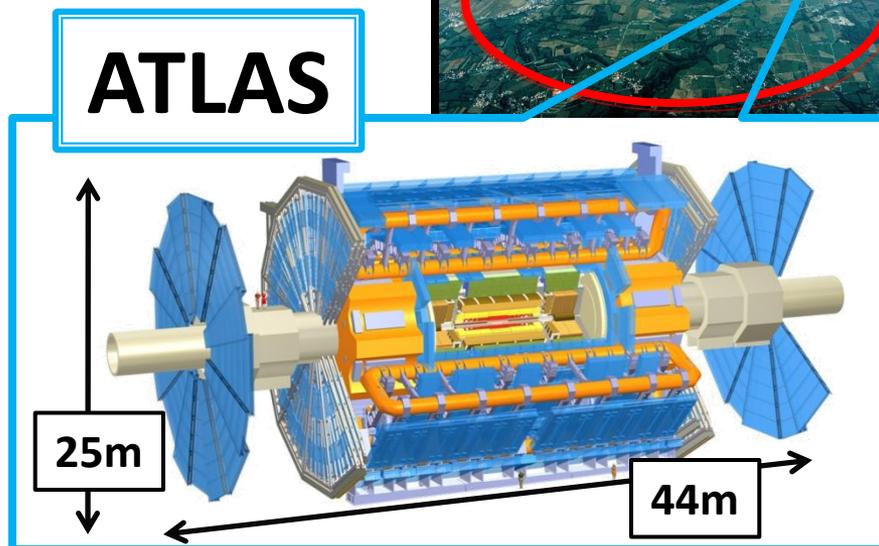
- ATLAS検出器

- 大型汎用検出器
  - 内部飛跡検出器
  - カロリメータ
  - $\mu$ 粒子検出器

- ATLASにおけるヒッグス探索

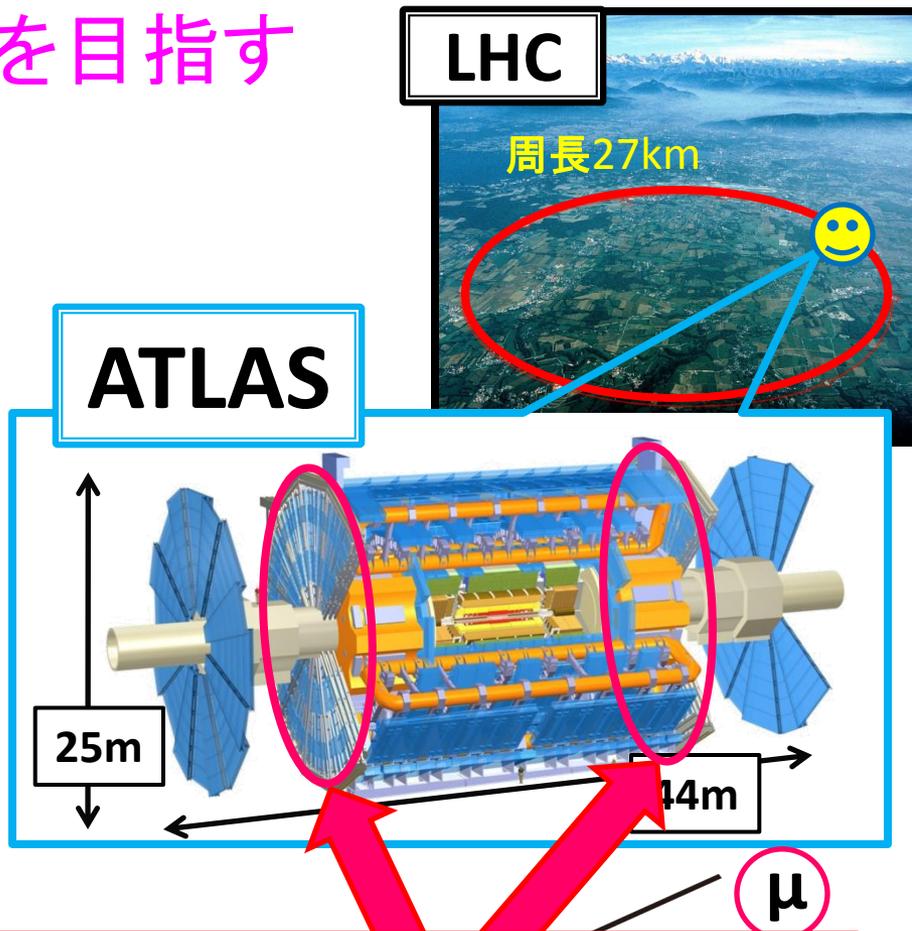
- LHCの衝突4億回で1個生成
- **事象選別がカギ**

⇒ **高運動量 $\mu$ 粒子の精密測定**



# LHC-ATLAS実験

- **ヒッグス粒子の実験的観測を目指す**
- 大型陽子陽子加速器 (LHC)
  - 重心系E :  $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$
  - 衝突頻度 : 25ns毎
  - 最高ルミノシティ :  $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- ATLAS検出器
  - 大型汎用検出器
    - 内部飛跡検出器
    - カロリメータ
    - $\mu$ 粒子検出器
- ATLASにおけるヒッグス探索
  - LHCの衝突4億回で1
  - 事象選別がカギ
  - ⇒ 高運動量 $\mu$ 粒子



Thin Gap Chamber

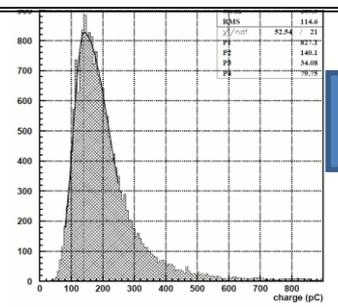
# TGC検出効率の決定要因

- 出力信号が閾値電圧を超えられず  
デジタル化されない信号の存在
  - チェンバー個性による出力信号の違い
    - ⇒ 検出効率場所依存性
  - 時間経過に伴うによる出力信号の変化
    - ⇒ 検出効率時間依存性
- TGC構造安定のため、不感領域が存在
  - 約4%の低下
    - ⇒ 7層コインシデンスによりトリガー効率への影響無し
- 初期電子が生成されない or 増幅前にガスに再度吸収される
  - 0.01%以下
- 読み出し回路における欠損
  - 構築は完了、影響は完全になくなった

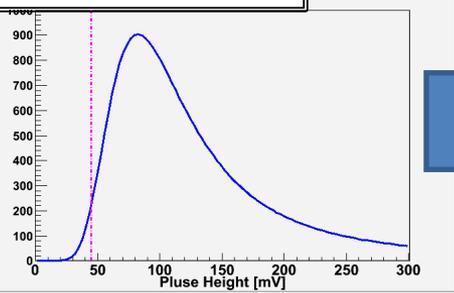
# 静電容量と検出効率

## 出力電荷量分布による検出効率の見積もり

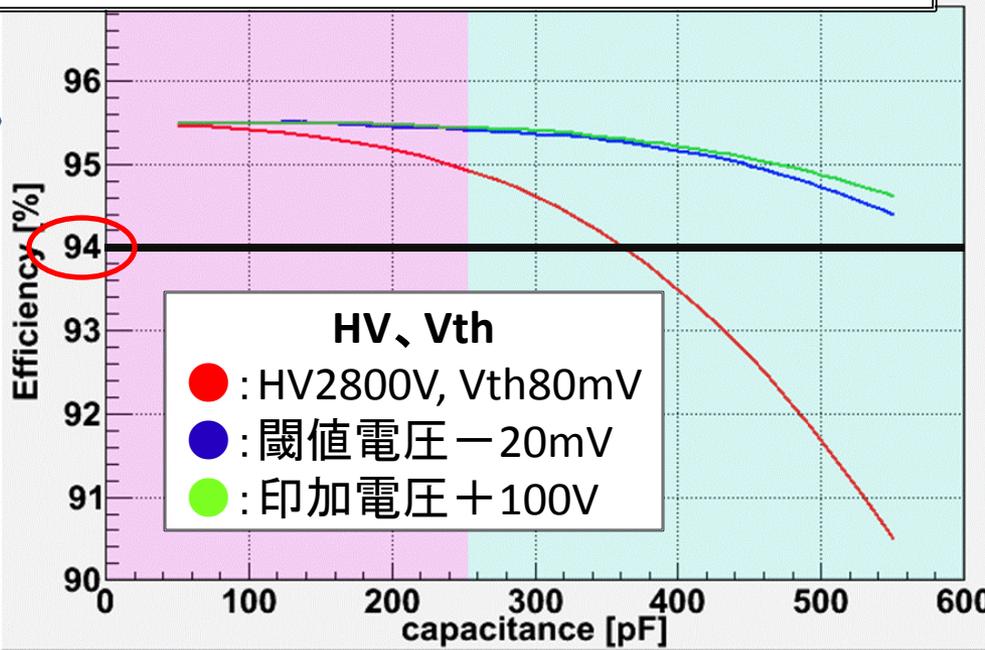
出力電荷量分布



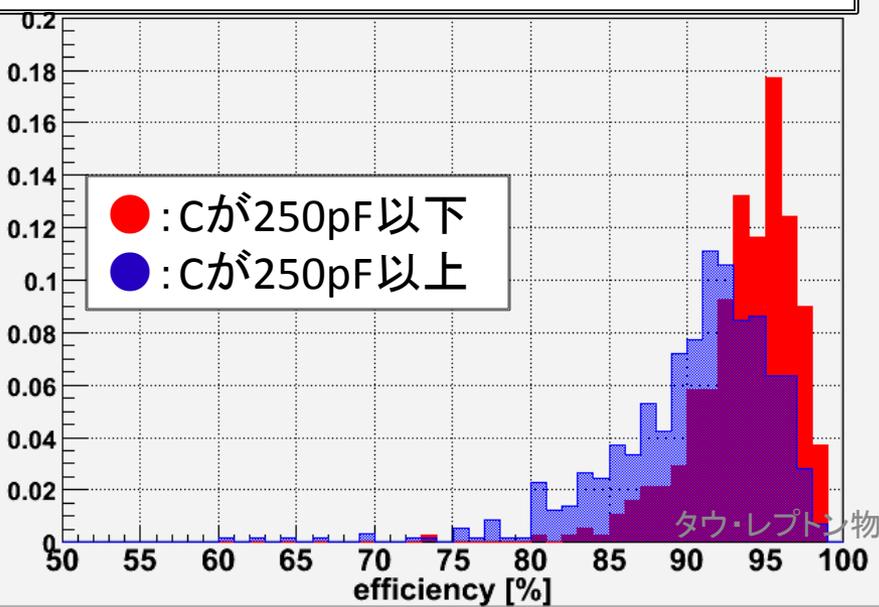
出力波高分布



検出効率見積もり結果(静電容量依存性)



昨年度宇宙線試験による検出効率結果



印加電圧、閾値電圧の調整で  
TGCの最適環境を実現する