

LEPS2のための Time Projection Chamber の開発

京都大学 原子核・ハドロン物理学研究室
野沢 勇樹

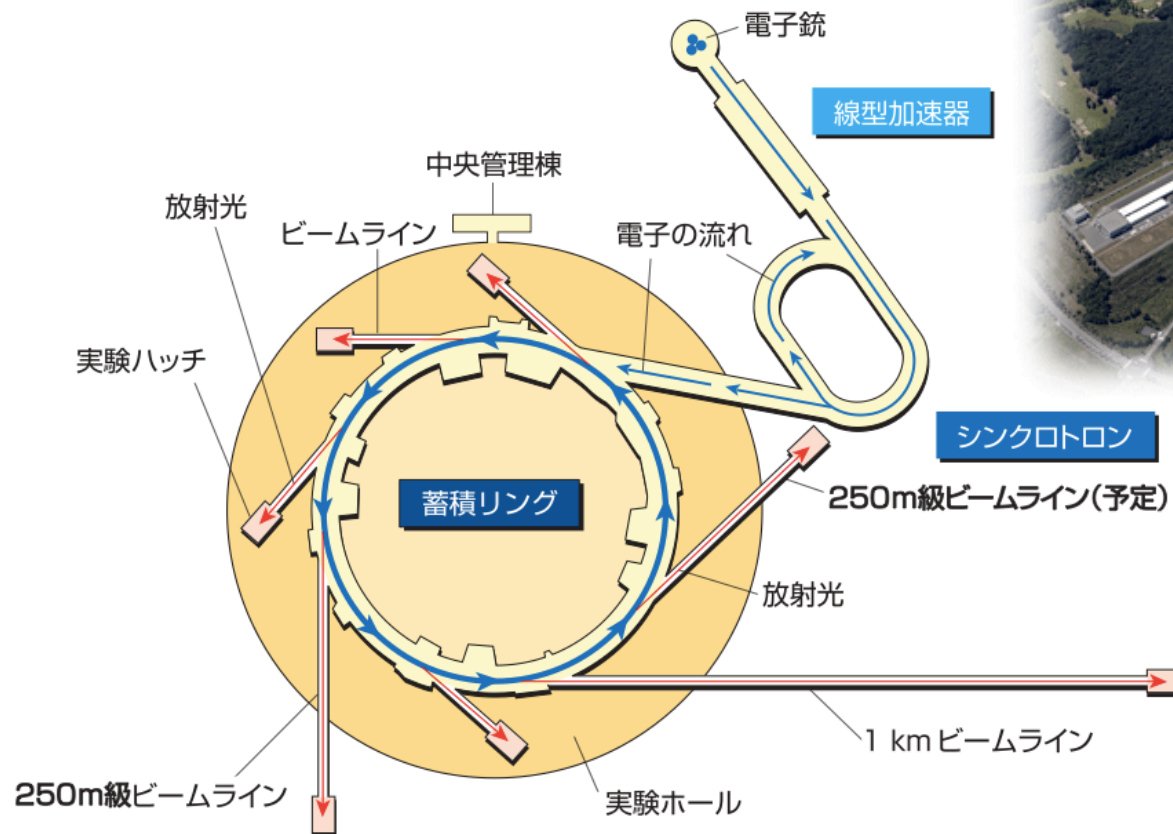
Contents

- LEPS2 実験
- Time Projection Chamber (TPC)
- 位置分解能の測定実験
- LEPS2-TPC の設計
- まとめ、今後の予定

1. LEPS2 実験

● SPring-8 (Super Photon ring-8 GeV)

- 世界最高性能の放射光施設
- 8 GeV の電子蓄積リング

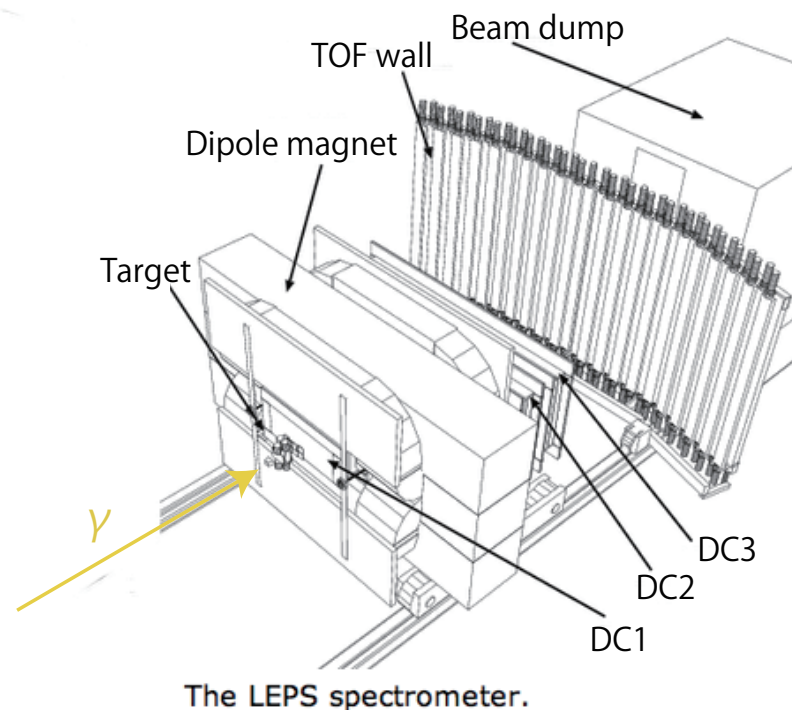
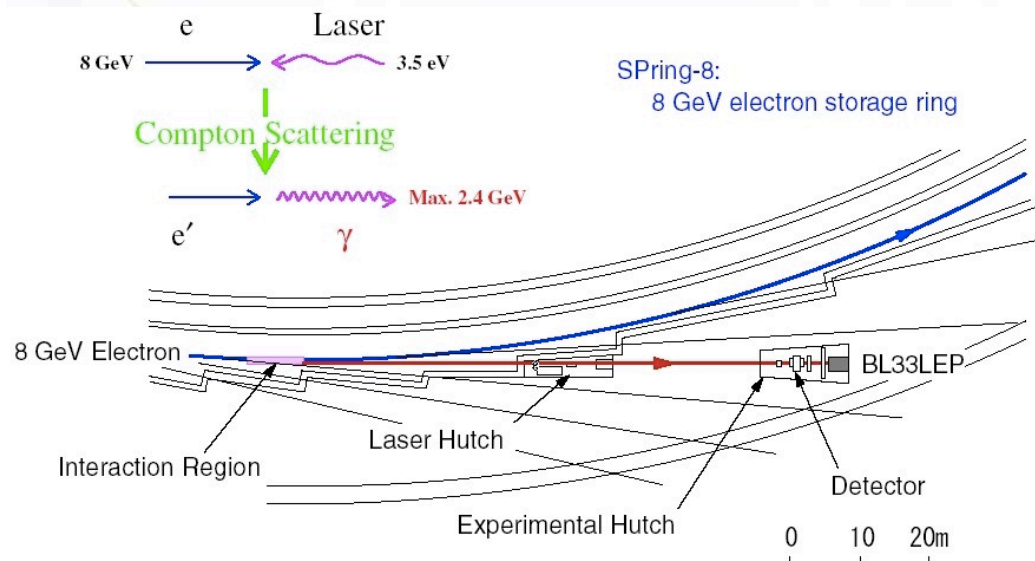


● LEPS (LASER Electron Photon at SPring-8)

● 高エネルギー γ 線によるハドロン生成実験

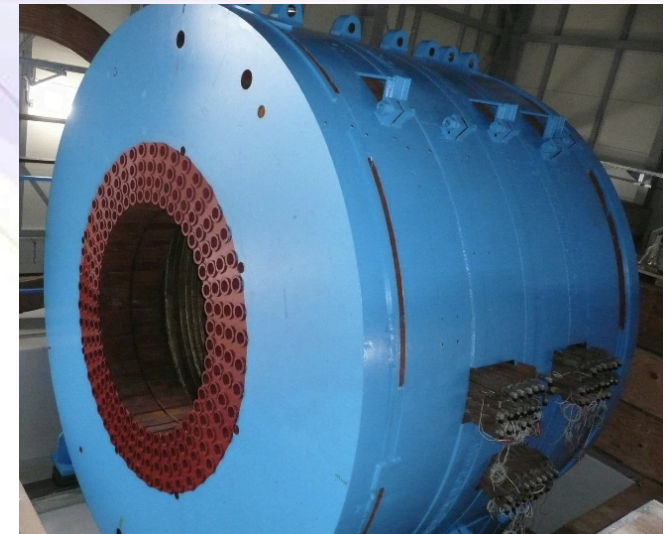
逆コンプトン散乱により
およそ 2.4 GeV の
高エネルギー γ 線を得る

LEPS の検出器群は前方に
acceptance をもつ



LEPS2

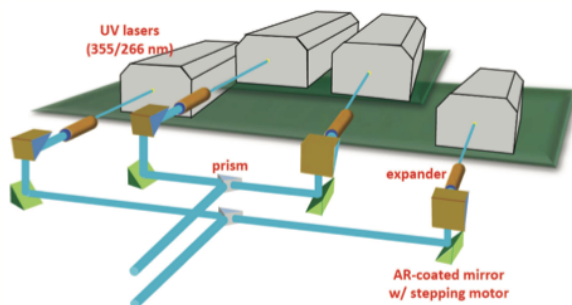
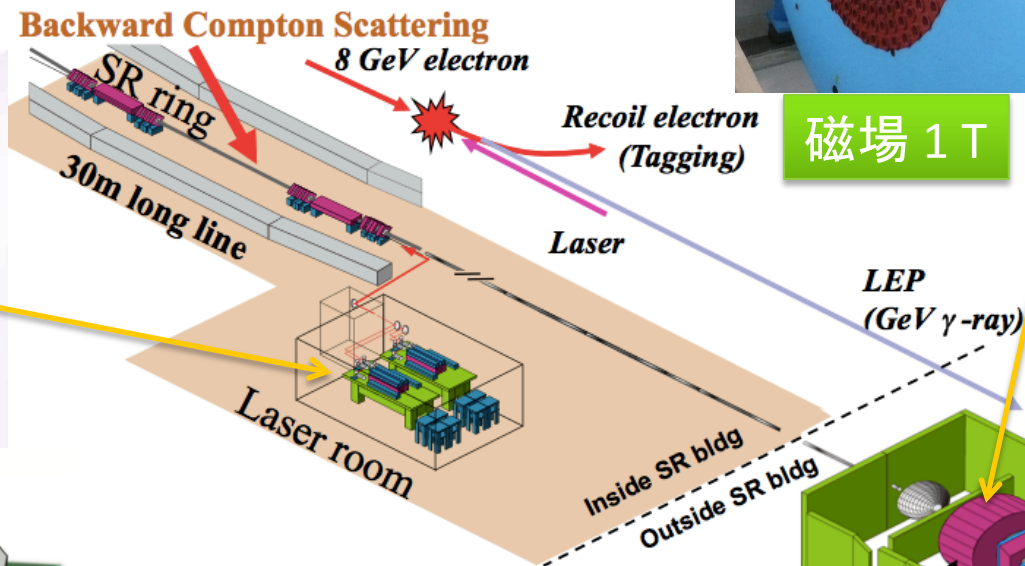
- 最大およそ 3 GeV の γ 線 (LEPS \sim 2.4 GeV)
- LEPS の 10 倍の光子強度 ($\sim 10^7$ 個/sec)
- ほぼ 4π を覆う acceptance



磁場 1 T

ソレノイド
内径 : 2.22 m

LASER 4台を同時
入射することにより
 10^7 個/sec の高輝度
 γ 線を得る



2.LEPS2 で行うハドロン生成実験

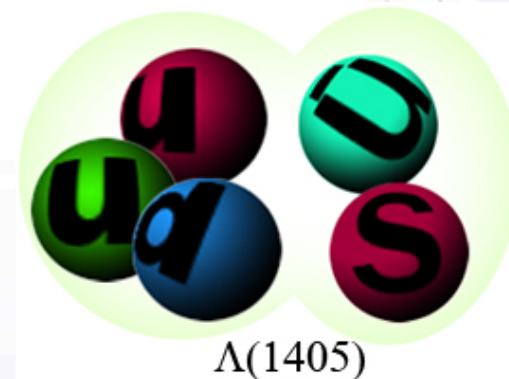
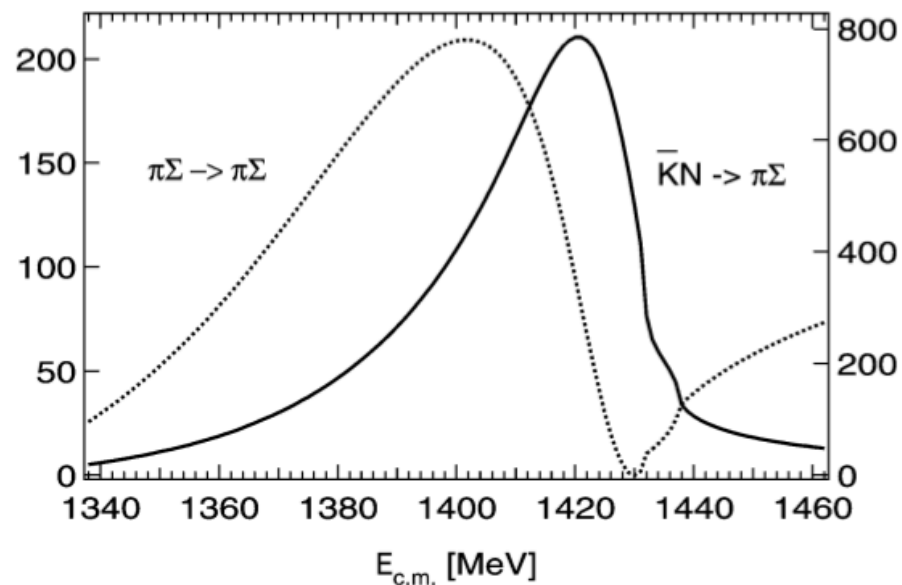
- 多クォーク系の物理
 - 4 quark, 5 quark, molecule,
- ハドロン間相互作用
 - ϕN , ηN , ΛN , KN ,
- 対称性とハドロンの性質、質量の起源
 - カイラル対称性、 $U_A(1)$ アノマリー

$\Lambda(1405)$

- Λ 粒子の励起状態
- スピン多重項の $\Lambda(1520)$ との質量差が大きく、LS相互作用で説明できない



3 クォーク状態ではなく、M-B 分子状態？

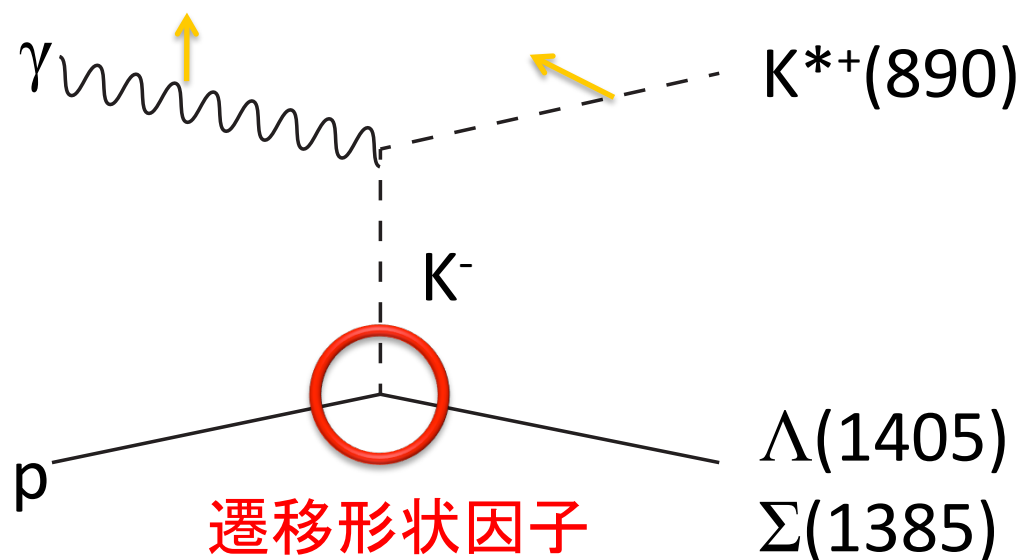


$\Lambda(1405)$ のエネルギー領域に 2つの極

$z_1 : 1390 + 66 i$ (KN に強く結合)
 $z_2 : 1426 + 16 i$ ($\pi\Sigma$ に強く結合)

● $\gamma p \rightarrow K^{*+} \Lambda(1405)$

- 偏極した γ 線を液体水素標的に入射
- γ 線の偏極と垂直な偏極を持つ K^{*+} を選ぶことで交換粒子を K^- に特定できる



遷移形状因子を $\Sigma(1385)$ と比較することで内部構造を特定

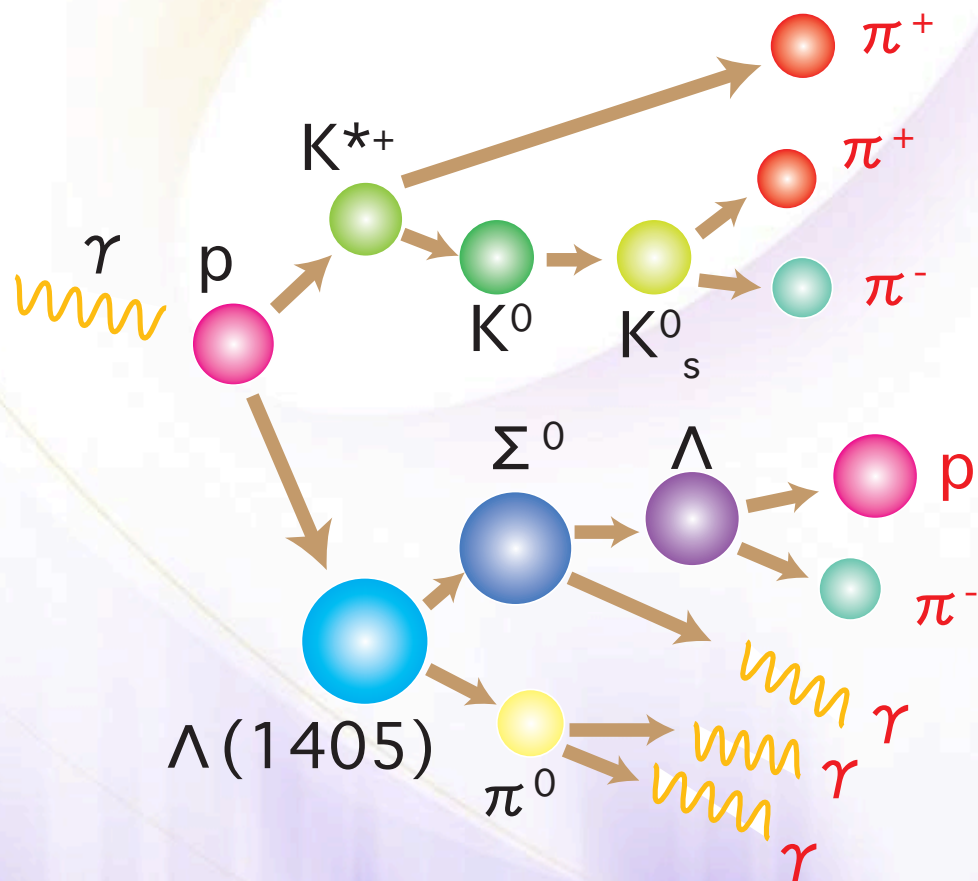
M-B 分子状態であれば...

K-p に強く結合する極の寄与のみを取り出すことができる



K-p 束縛エネルギーの測定

観測する $\Lambda(1405)$ の崩壊モード



$\Lambda(1405)$ の崩壊幅 : $50 \text{ MeV}/c^2$
 $\Sigma(1385)$ との質量差 : $25 \text{ MeV}/c^2$

$\Lambda(1405)$ と $\Sigma(1385)$ との区別
 は非常に困難 !!



$\Lambda(1405) \rightarrow \Sigma^0 \pi^0$ の崩壊モードを
 測定することで $\Sigma(1385)$ の寄与を
 なくすことができる

これらの崩壊粒子を全て測定する
 には広い acceptance が必要



LEPS2は wide acceptance !

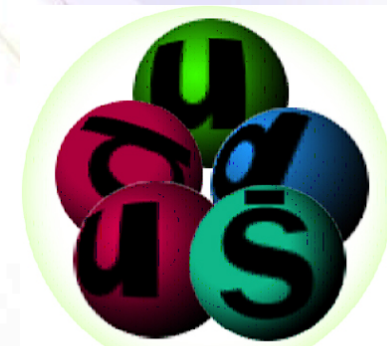
ペンタクォーク (Θ^+)

● エキゾチックハドロン

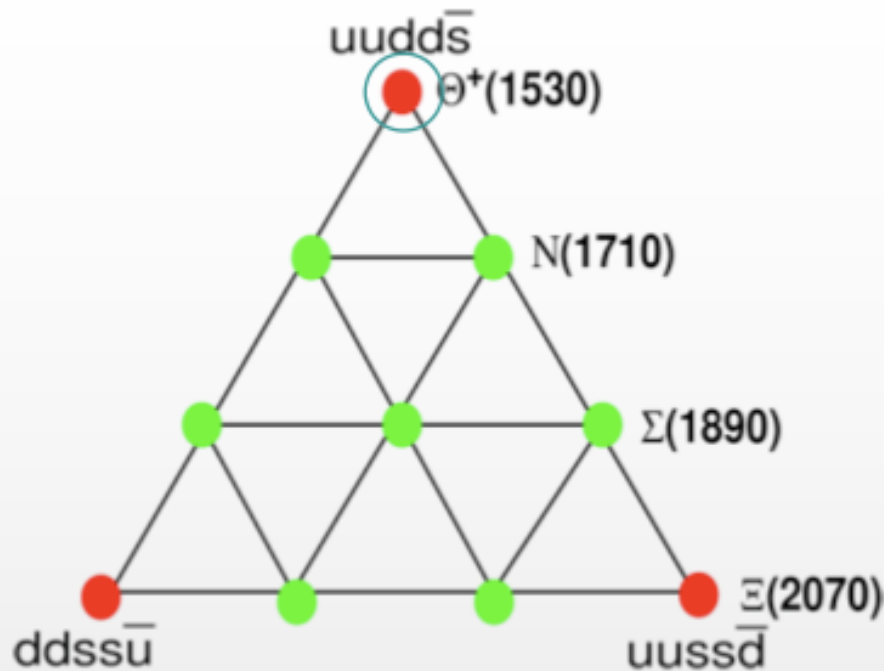
- Glueball (ggg, \dots), hybrid meson (gqq^{bar}, \dots), multi-quark state ($qqq^{\text{bar}}q^{\text{bar}}, qqqqq^{\text{bar}}, \dots$),



QCD では禁止されていない



ペンタクォーク (Θ)



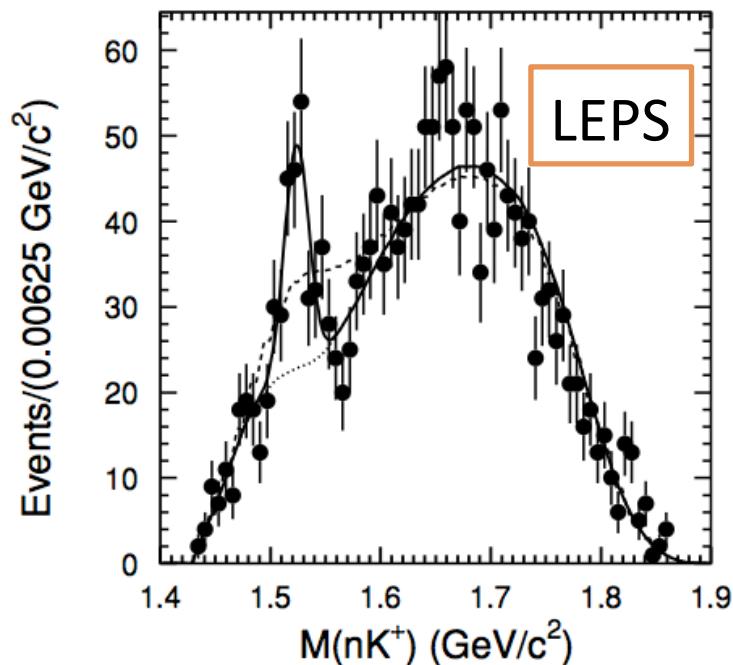
$\Theta^+(1530)$

- $uudds^{\text{bar}}$
- Mass : $\sim 1530 \text{ MeV}/c^2$
- Width : $15 \text{ MeV}/c^2$
- strangeness : $S = +1$
- $J^\pi = 1/2^+$

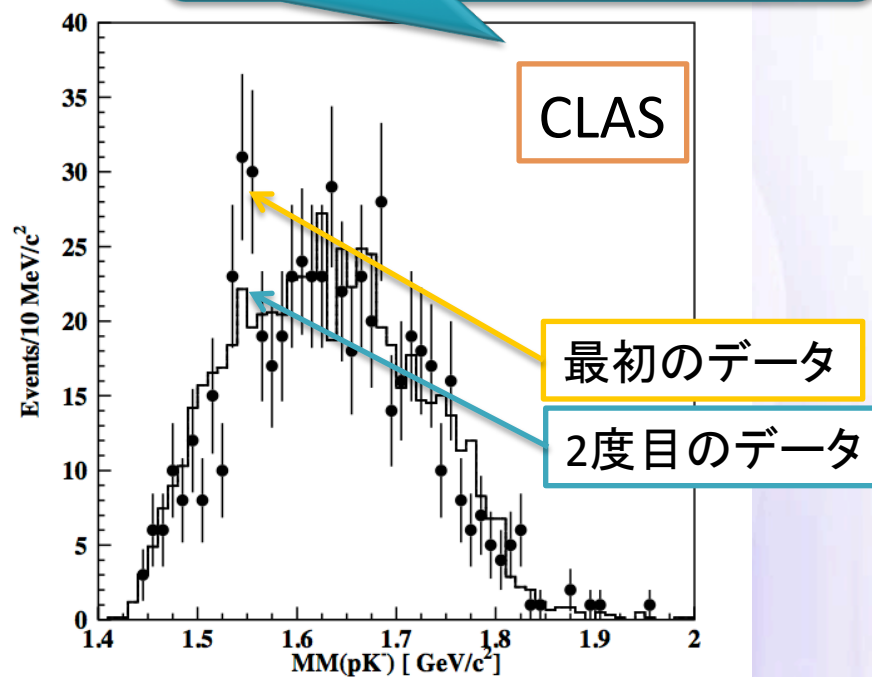
Θ^+

- 2002年に SPring-8 / LEPS で初めて観測
- 高統計の実験でも観測されている
- CLAS では観測されていない

1度目はpositive result だったが、
2度目ではnegative result となった

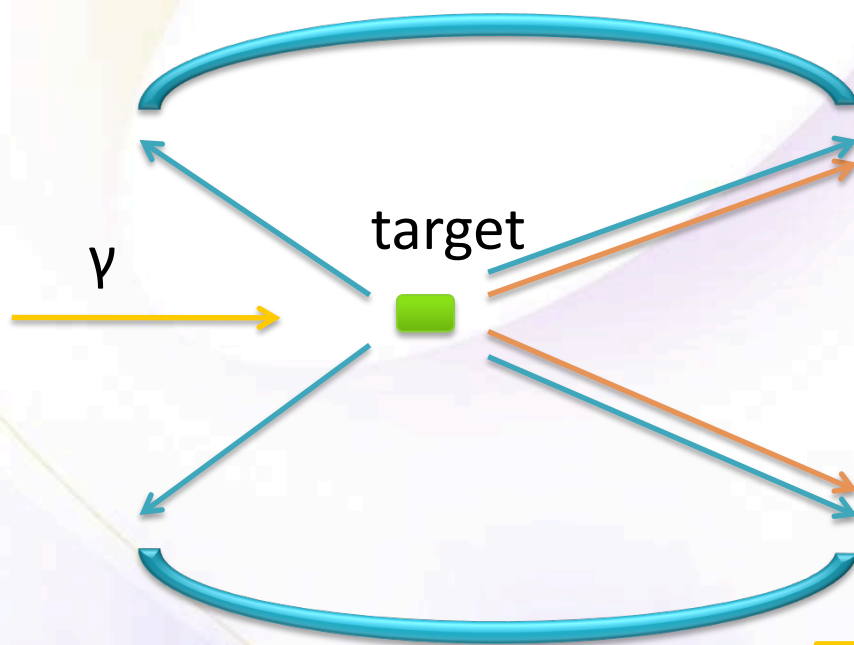


T.Nakano et al. PRC 79 (2009) 025210



B.McKinnon et al. PRL 96 (2006) 212001

● LEPS と CLAS の比較



LEPS : 前方に acceptance をもつ
CLAS : 後方に acceptance をもつ

LEPS
 $\theta < 20$ degrees

CLAS
 $\theta > 20$ degrees

θ_+ が前方ピークでのみ生成される
ならば両実験は consistent



LEPS2 はCLASの領域も覆うことができる !!

2. Time Projection Chamber

- 荷電粒子の飛跡検出

- 前方 ($\theta < 30^\circ$)



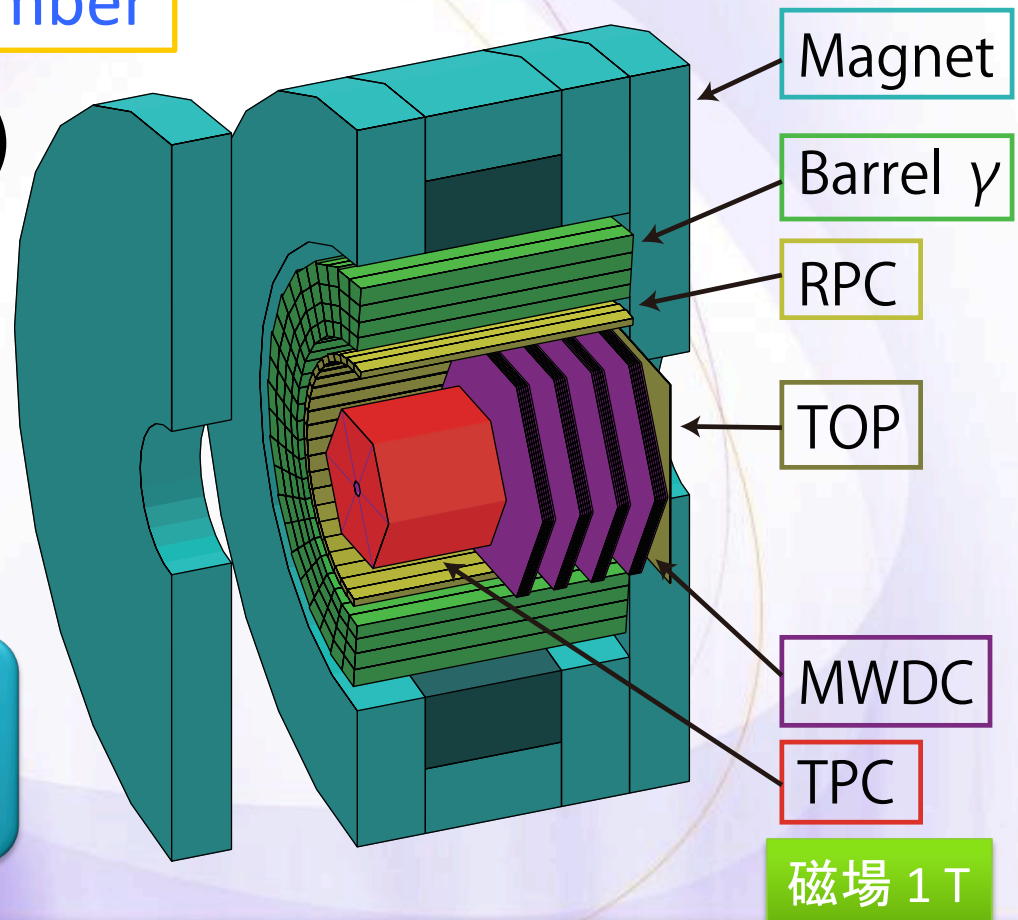
Planar Drift Chamber

- 後方 ($30^\circ < \theta < 120^\circ$)



Time
Projection
Chamber

CDCではなくTPCを用いることで前方の物質量を小さくできる



● Time Projection Chamber (TPC)

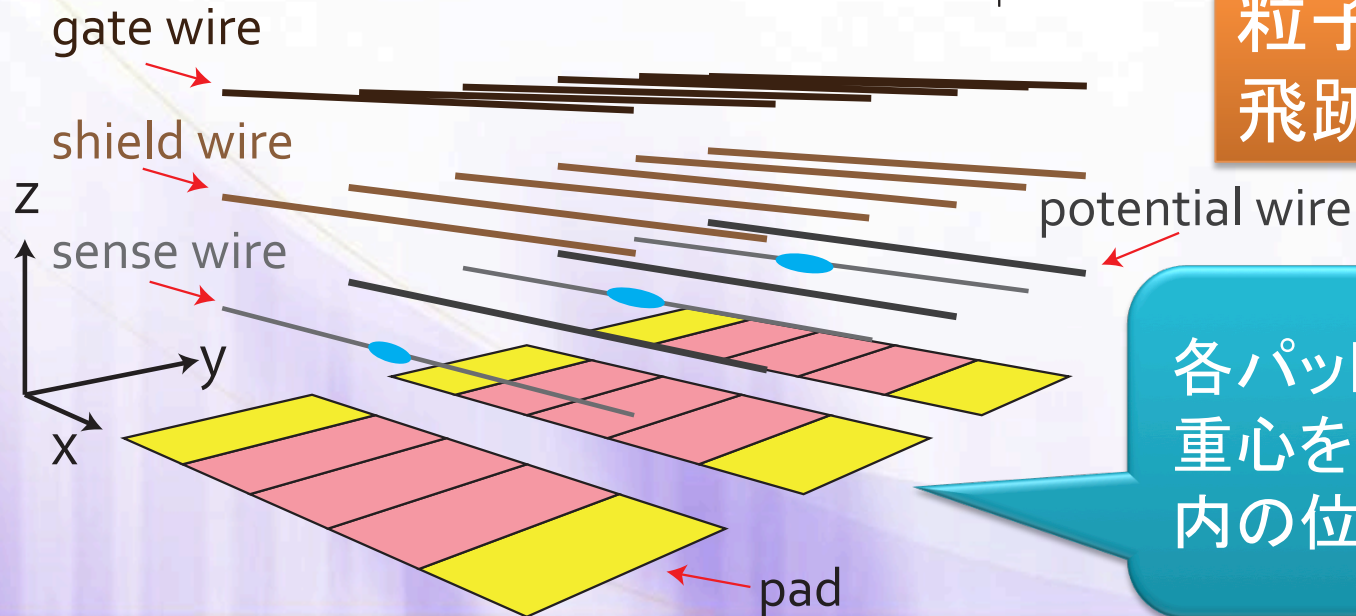
Charged Particle

ドリフト時間から
z軸方向の位置を測定

drift electron

E, B

粒子の3次元的な
飛跡検出ができる



各パッド列の誘起電荷の
重心をとることで、xy平面
内の位置を特定する

● TPCの位置分解能

● パッド平面内

試作機1で測定

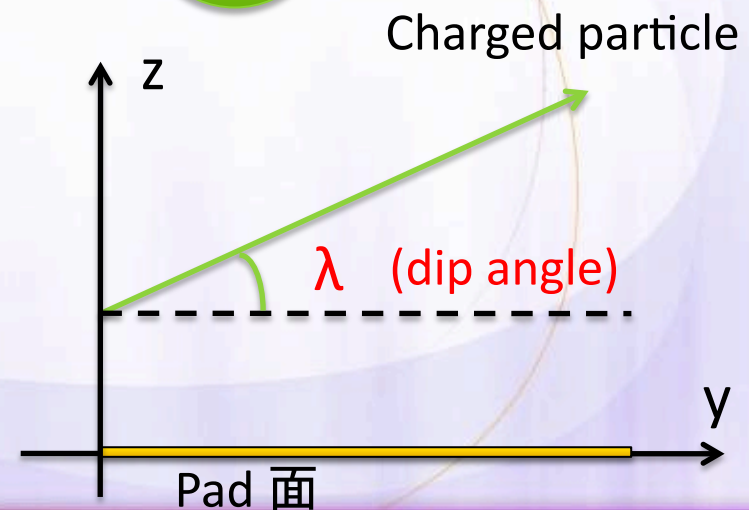
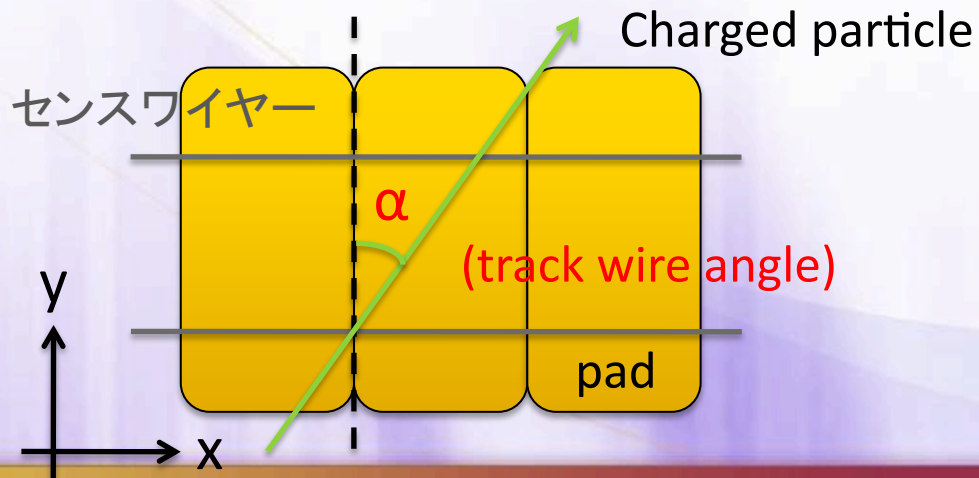
$$\sigma_{xy}^2 = \sigma_{0,xy}^2 + \sigma_{W,P}^2 \tan^2 \alpha + \sigma_{D_T}^2 L_D$$

ドリフト距離

● ドリフト方向

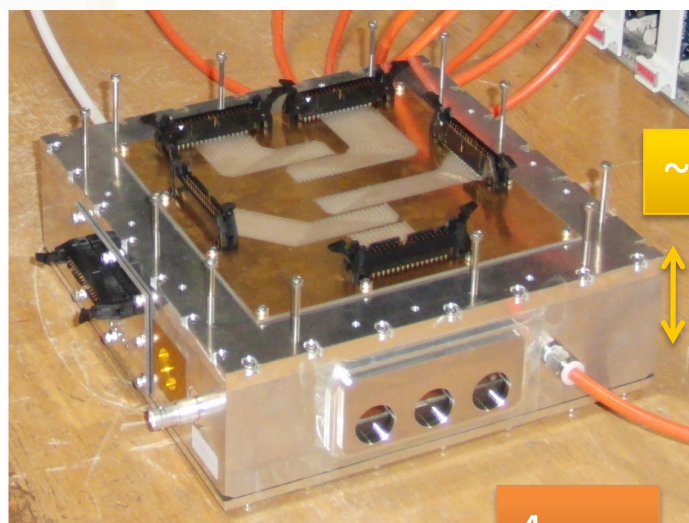
試作機2で測定

$$\sigma_z^2 = \sigma_{0,z}^2 + \sigma_{\text{dip}}^2 \tan^2 \lambda + \sigma_{D_L}^2 L_D$$



● 試作機 1

有感領域 (50 mm × 50 mm × 20 mm)

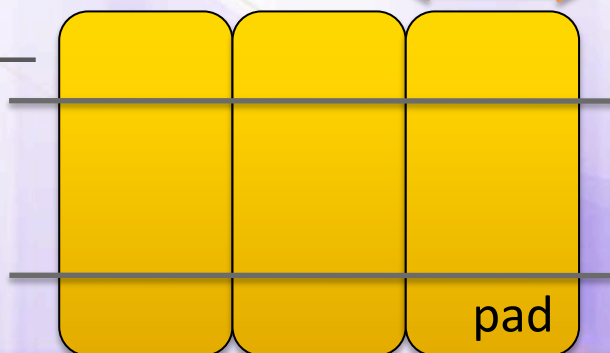


~ 20 mm

• P10
• Ne-CH₄
でテスト

4 mm

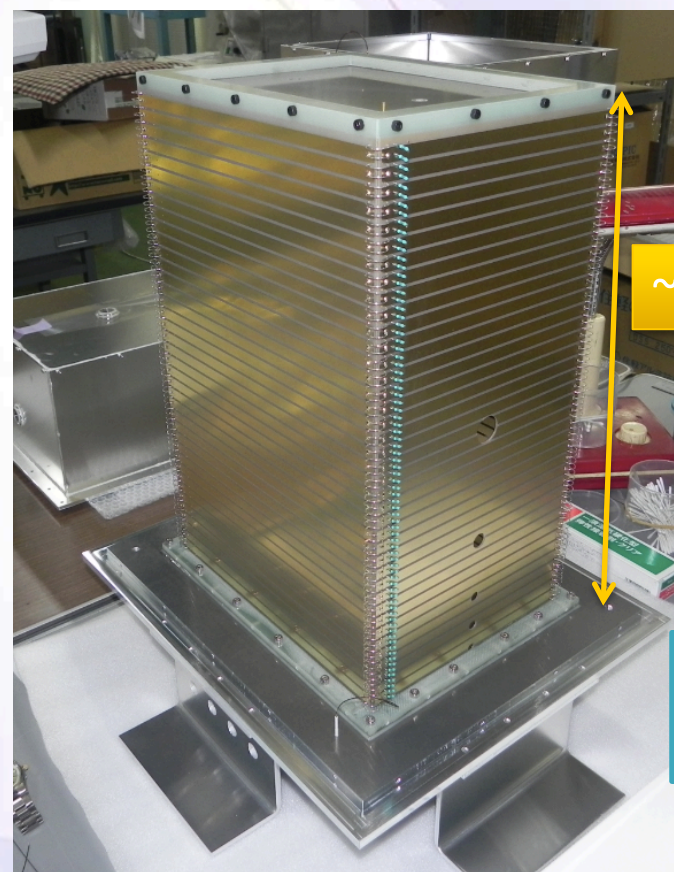
センス
ワイヤー



10 mm

● 試作機 2

有感領域 (118 mm × 250 mm × 412.6 mm)

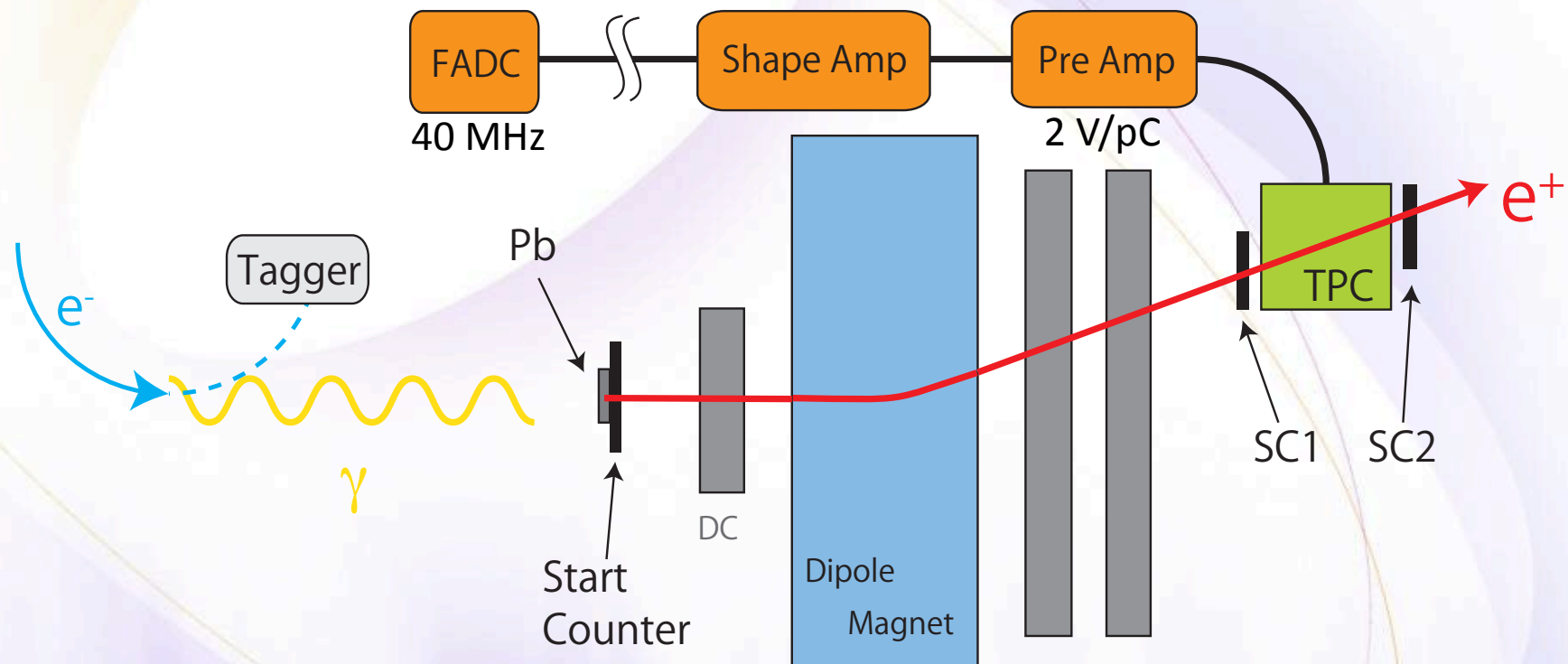


~ 400 mm

• P10
でテスト

2. 位置分解能の測定実験

- Setup (Trigger : Tagger × Start Counter × SC1 × SC2)

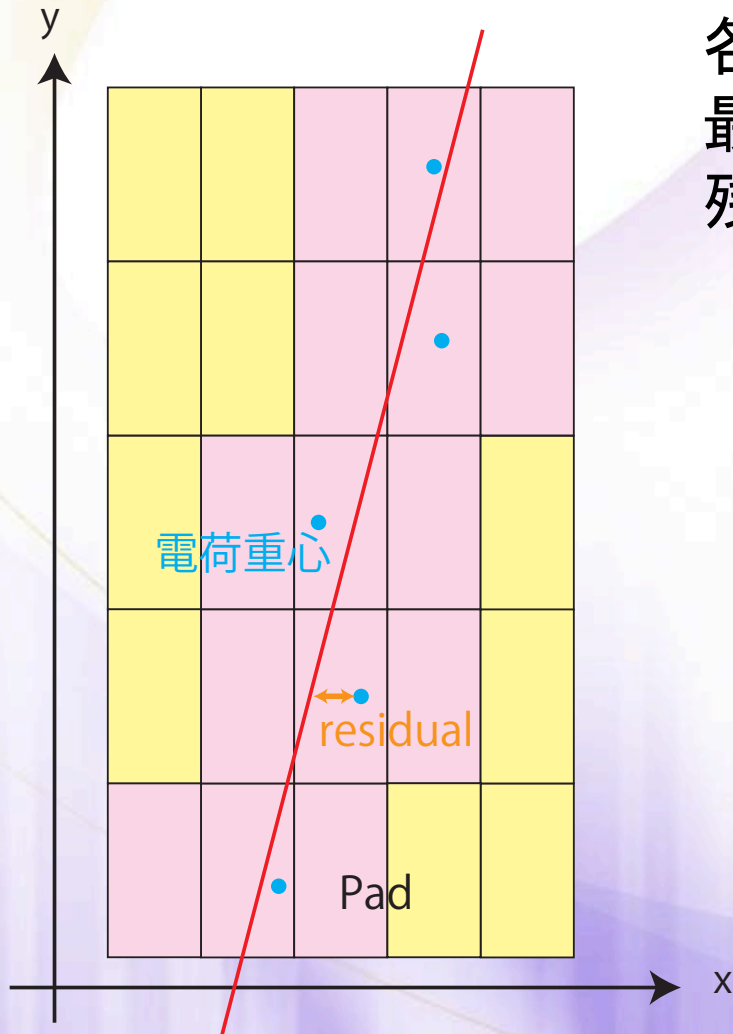


使用したガス

- P10ガス (Ar : CH_4 = 90 : 10)
- Ne- CH_4 ガス (Ne : CH_4 = 90 : 10)

	電子・イオン対の数	放射長
P10	90 個/cm	130 m
Ne- CH_4	41 個/cm	363 m

● 位置分解能の評価方法 (パッド平面内)

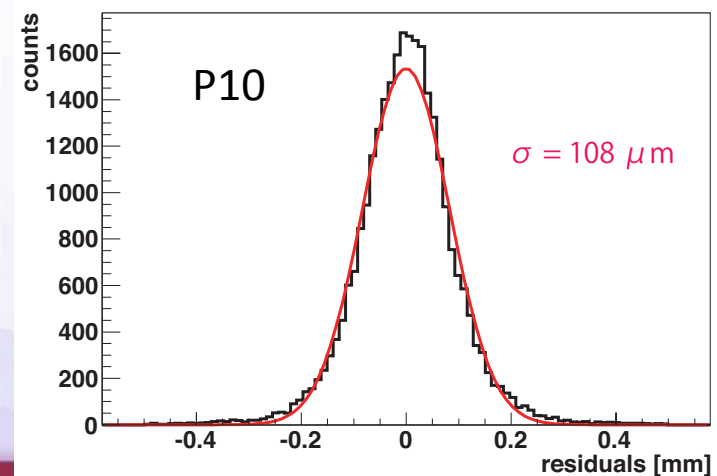


各パッド列における電荷重心を
最小2乗法を用いて直線Fitしたときの、
残差分布の幅から求める。

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1 \times \sigma_2}$$

σ_1 : 自分自身を含めた Fitting

σ_2 : 自分自身を含めない Fitting



試作機1を用いた実験

● Track wire angle 依存性

P10

大きい track wire angle では
印加電圧が大きい方が
位置分解能は向上

P10の方が Ne-CH₄よりも
位置分解能はよい

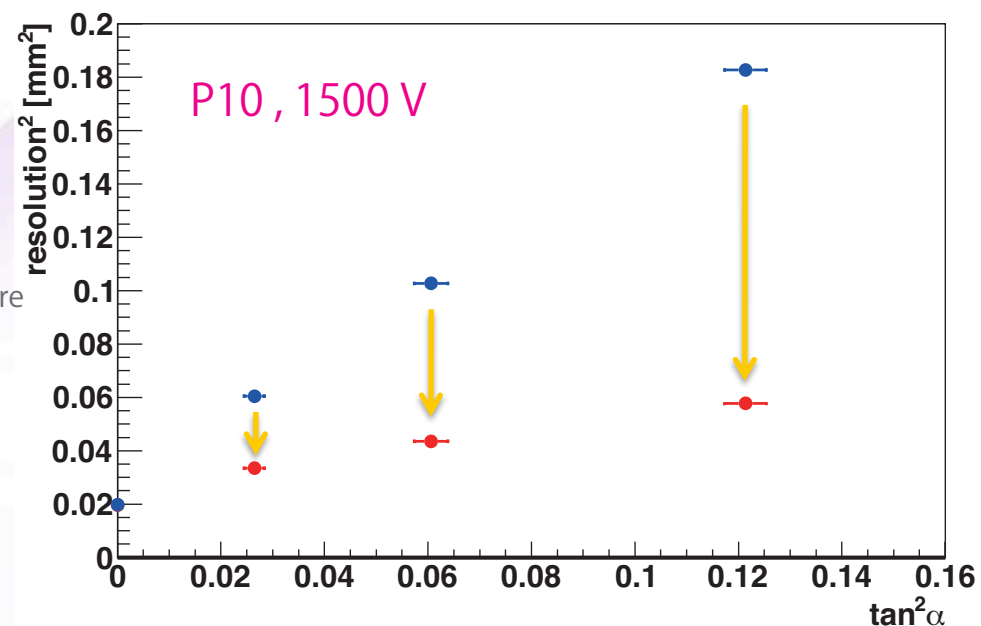
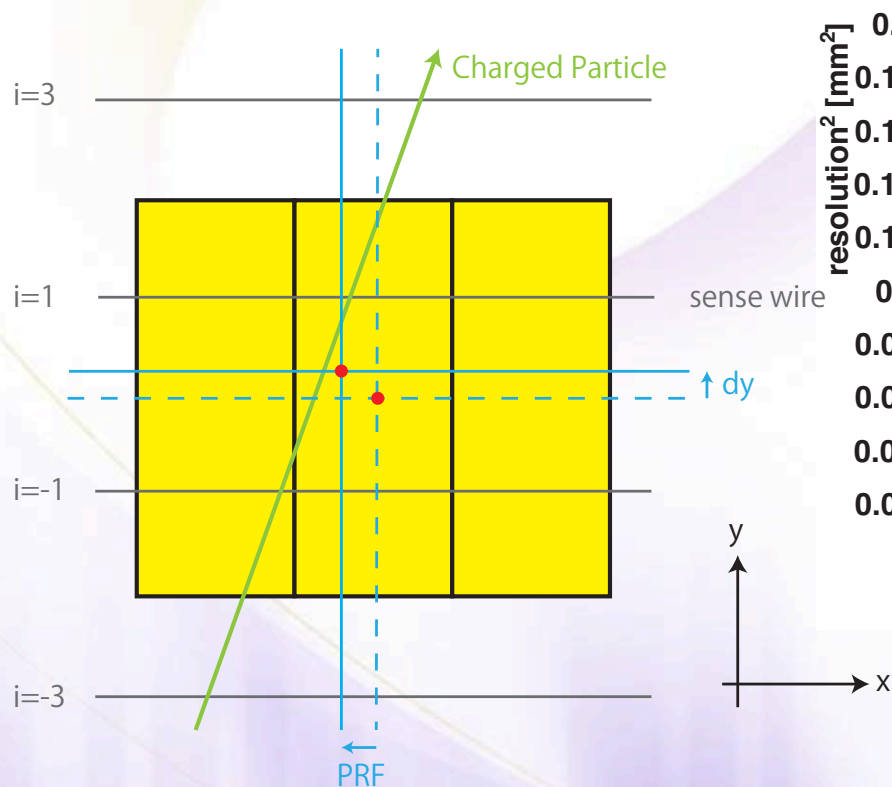
高印加電圧ではワイヤー上でのアバランシェ
のふらつきが抑えられている？

Ne-CH₄ではガス増幅によりゲインを稼いで
いるためアバランシェが空間的に広がって
いる可能性

$\alpha = 0^\circ$ 位置分解能は最小 $\alpha = 10^\circ, 20^\circ$ 位置分解能は最小

	P10 , Low	P10 , High	Ne-CH ₄ , Low	Ne-CH ₄ , High
0°	108 ± 1 μm	134 ± 1 μm	125 ± 1 μm	174 ± 1 μm
10°	290 ± 2 μm	243 ± 1 μm	308 ± 2 μm	335 ± 2 μm
20°	520 ± 3 μm	418 ± 2 μm	589 ± 3 μm	508 ± 2 μm

● センスワイヤーを用いた2次元読み出し

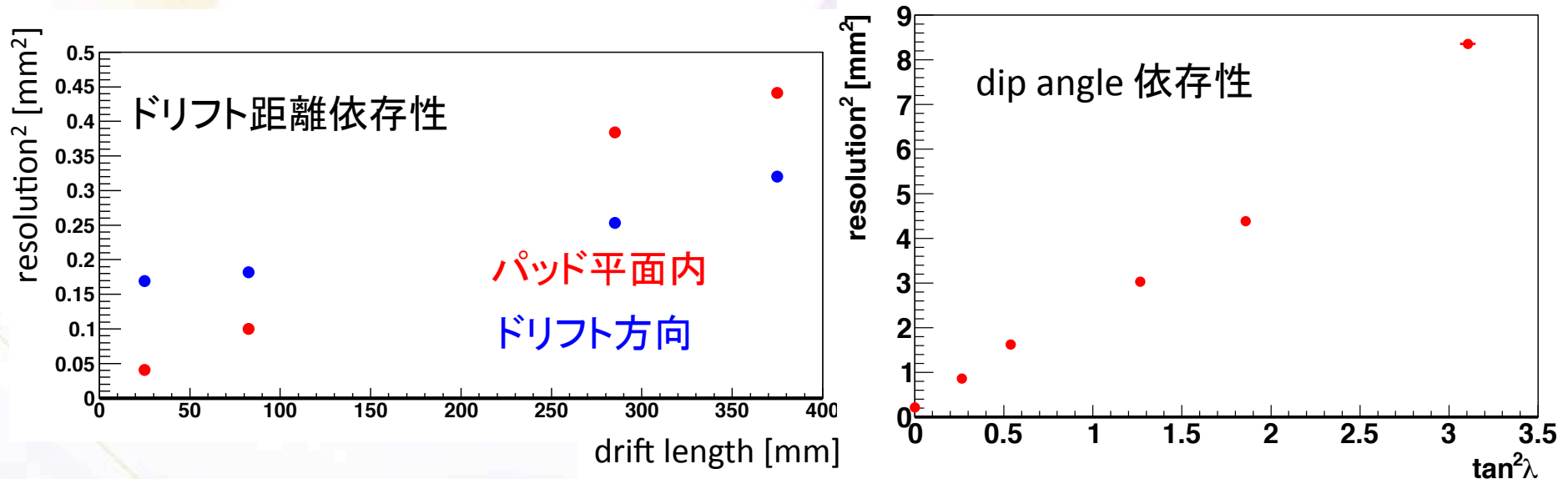


センスワイヤーの情報を考慮することで位置分解能は向上

	w/o sense	w/ sense
0°	108 ± 1 um	106 ± 1 um
10°	290 ± 2 um	161 ± 1 um
20°	520 ± 3 um	265 ± 2 um

試作機2を用いた実験

● ドリフト距離依存性 & dip angle 依存性 (P10)



Ne-CH₄ については 実験できなかったためP10の結果から見積もる。



位置分解能の全ての依存性を得た

Ex) P10ガス、1500 V (B = 1 T)

$$\sigma_{xy}^2 [\text{mm}^2] = 0.017 + 1.34 \cdot \tan^2 \alpha + 0.00011 \cdot L_D [\text{mm}]$$

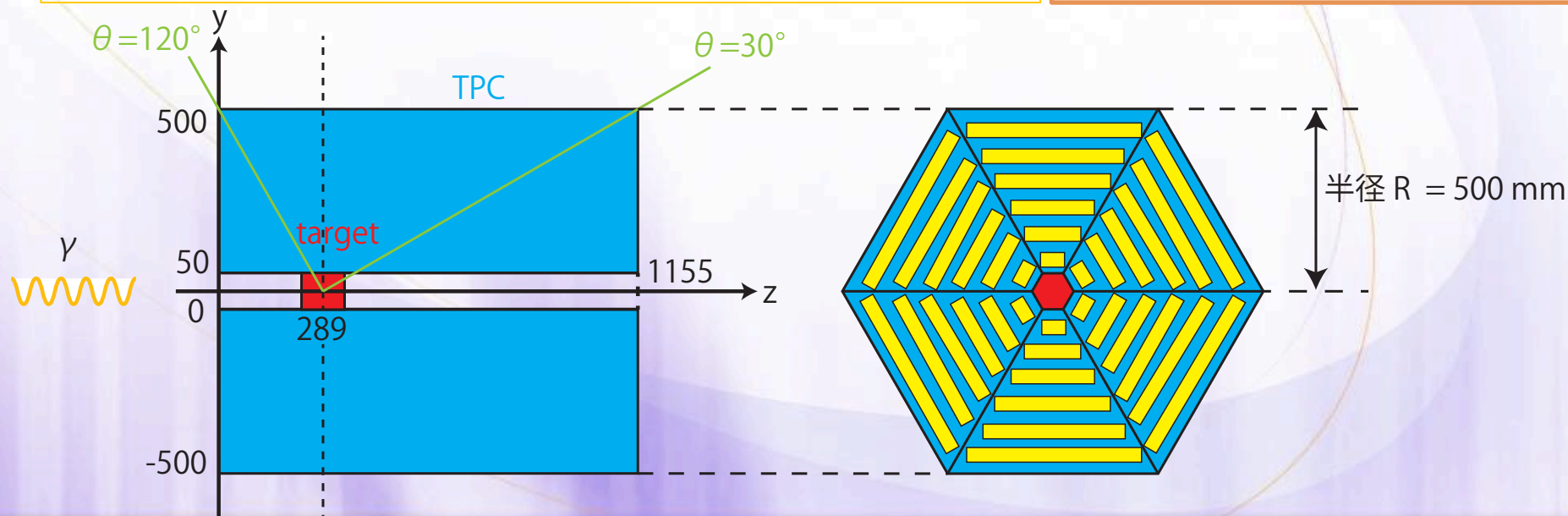
$$\sigma_z^2 [\text{mm}^2] = 0.156 + 2.38 \cdot \tan^2 \lambda + 0.0004 \cdot L_D [\text{mm}]$$

3. LEPS2-TPCの設計

● 設計するTPC

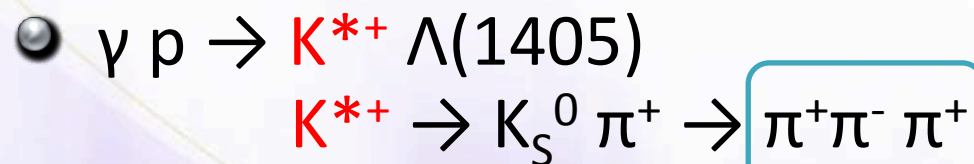
- TPCの覆う角度 : $30^\circ < \theta < 120^\circ$
- 目標パッド総数 : $\sim 10,000$ ch
- $\gamma p \rightarrow K^{*+} \Lambda(1405)$ 反応に対して
 $\Lambda(1405)$ の質量分解能 $< 12 \text{ MeV}/c^2$
- $\gamma n \rightarrow K^- \Theta^+$ 反応に対して
 Θ^+ の質量分解能 $< 5 \text{ MeV}/c^2$

- パッドの配置
- ガスおよび印加電圧
- TPCの半径
について最適化

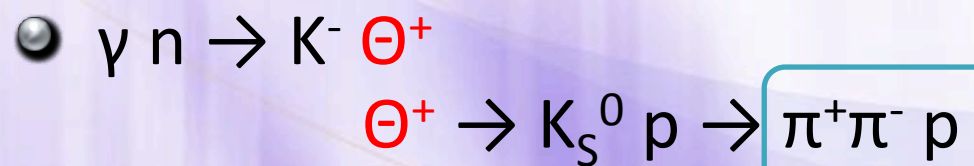


● シミュレーション

- 試作機で測定した位置分解能の依存性を考慮
- γ 線のエネルギー : 3 GeV
(エネルギー分解能 10 MeV)
- ガス中、ターゲット (LH_2 、 LD_2) 中における多重散乱を考慮



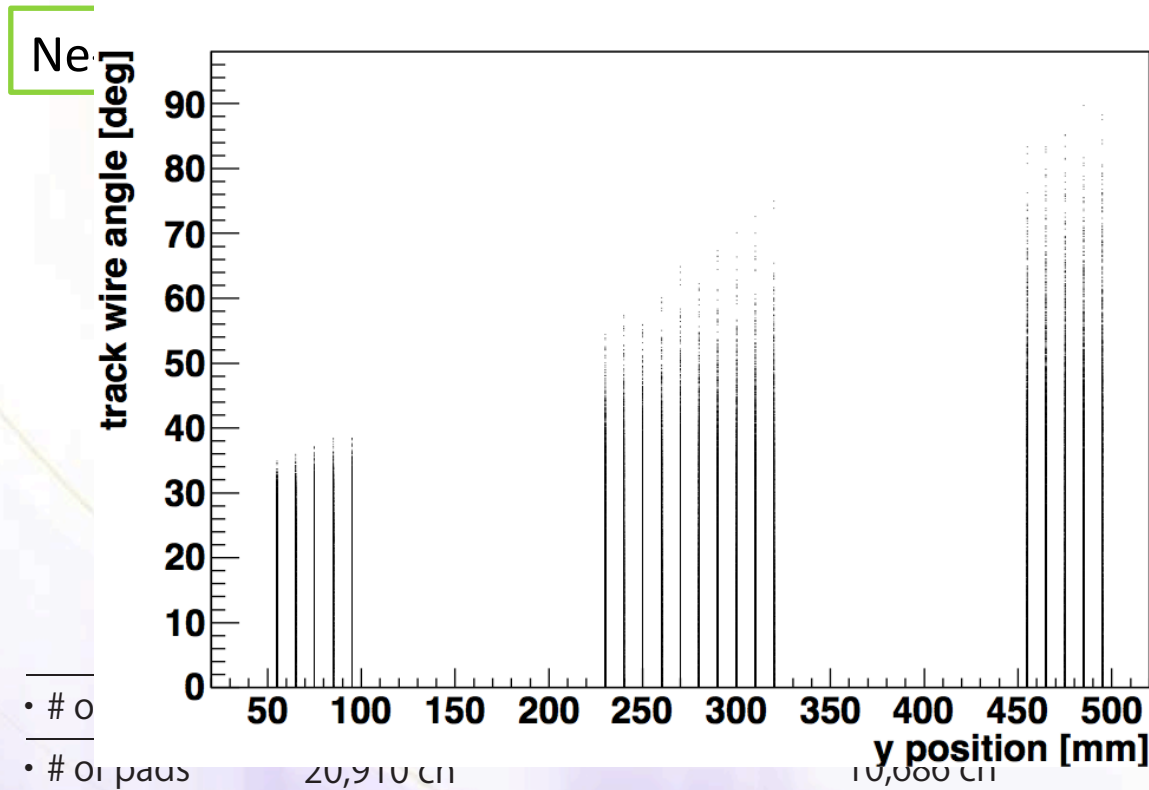
$\pi^+ \pi^- \pi^+$ の運動量をTPCで測定することにより $\Lambda(1405)$ の質量を構成



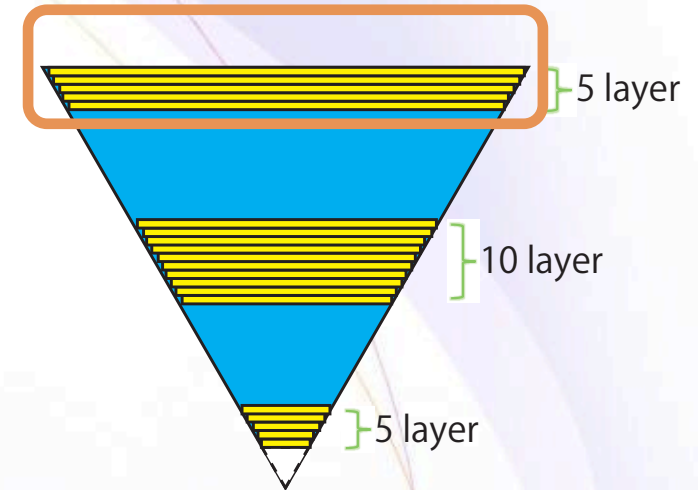
$\pi^+ \pi^- p$ の運動量をTPCで測定することにより Θ^+ の質量を構成

● パッドの配置の最適化

位置分解能向上



センスワイヤー読み出し



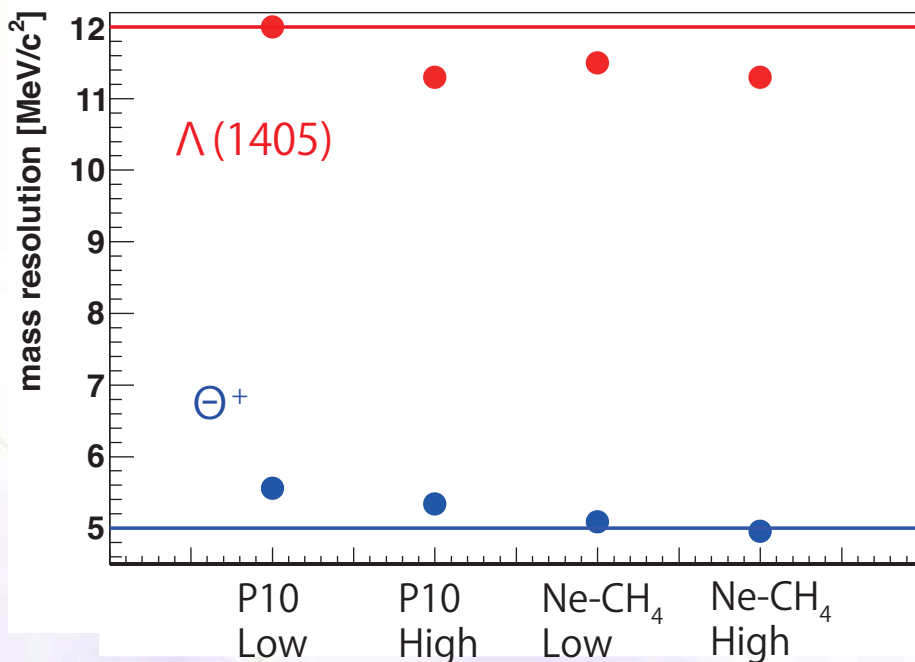
PATTERN 3

20 layer

9,288 ch

	PATTERN 1	PATTERN 2	PATTERN 3	PATTERN 3 (sense wire)
$\Lambda(1405)$	10.8 MeV/c ²	13.4 MeV/c ²	11.9 MeV/c ²	11.3 MeV/c ²
Θ^+	4.78 MeV/c ²	5.59 MeV/c ²	5.14 MeV/c ²	4.96 MeV/c ²

● 各ガスおよび印加電圧での質量分解能



位置分解能

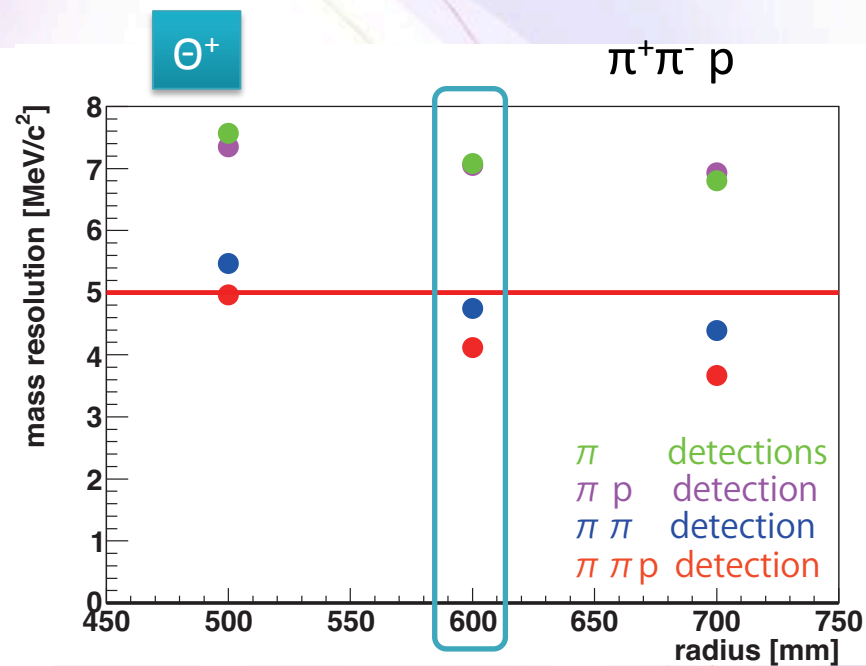
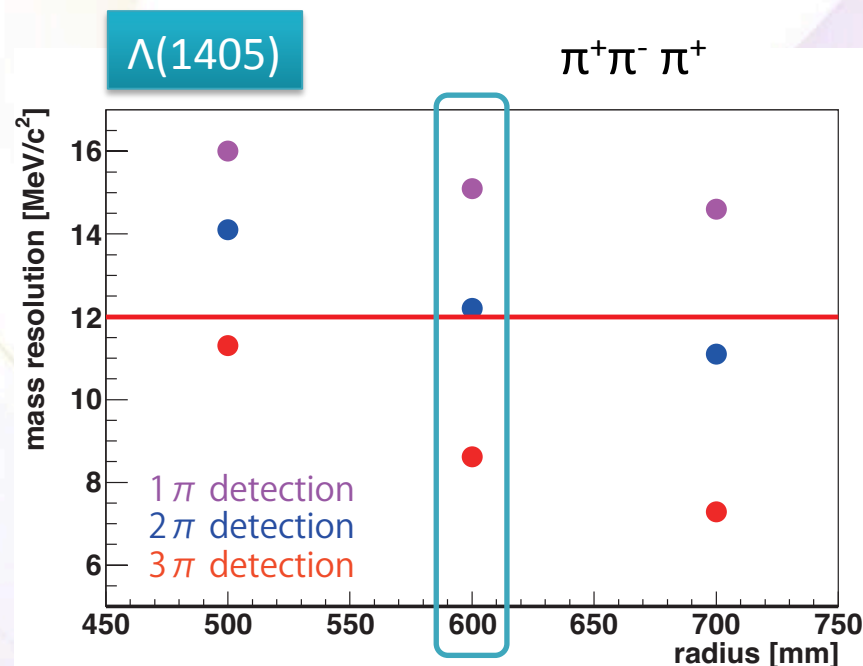
α が小さい → 低印加電圧
α が大きい → 高印加電圧

Ne-CH₄ガスの高印加電圧で動作することで目標質量分解能を達成できる

	P10 , Low	P10 , High	Ne-CH ₄ , Low	Ne-CH ₄ , High
Λ(1405)	12.0 MeV/c ²	11.3 MeV/c ²	11.5 MeV/c ²	11.3 MeV/c ²
Θ ⁺	5.56 MeV/c ²	5.34 MeV/c ²	5.09 MeV/c ²	4.96 MeV/c ²

● 半径を大きくする (パッド総数 ~ 10,000 ch)

前方 DC の運動量分解能 : 2 %



TPCの半径を $R \sim 600$ mm とすると

- $\Lambda(1405)$ 生成反応における 2 π 検出
- Θ^+ 生成反応における $\pi\pi$ 検出

についても目標質量分解能をほぼ達成

R = 500 mm : 9,288 ch
R = 600 mm : 9,930 ch
R = 700 mm : 10,218 ch
R = 800 mm : 10,152 ch

4. まとめ & 今後の予定

● まとめ

● 試作機を用いた位置分解能の評価実験

- P10 と Ne-CH₄ について位置分解能を比較

- 0°入射での位置分解能は P10 で 108 μm, Ne-CH₄ で 125 μm

● LEPS2 の TPC の設計

- Ne-CH₄ の方が質量分解能を小さくできる

- $\Lambda(1405)$ の質量分解能 11.1 MeV/c²

- Θ^+ の質量分解能 4.96 MeV /c²

目標質量分解能
を達成

- 半径 ~ 600 mm にすることで、 $\pi\pi$ 検出についても
目標質量分解能を達成

● 今後の予定

- Ne-CH₄ で試作機2 を用いて位置分解能の測定

- 本年中には実機のデザインを最終決定し製作開始

- 2013年には LEPS2 にインストール予定