

Strange Strong Force and Bound System 2022
ST2-2022

J-PARC $\pi 20$ ビームラインに用いる
Beam-RICH 検出器の設計

京都大学原子核ハドロン物理学研究室

M1 鈴木翔太

2022/12/16 (Fri.) 10:40 – 11:00

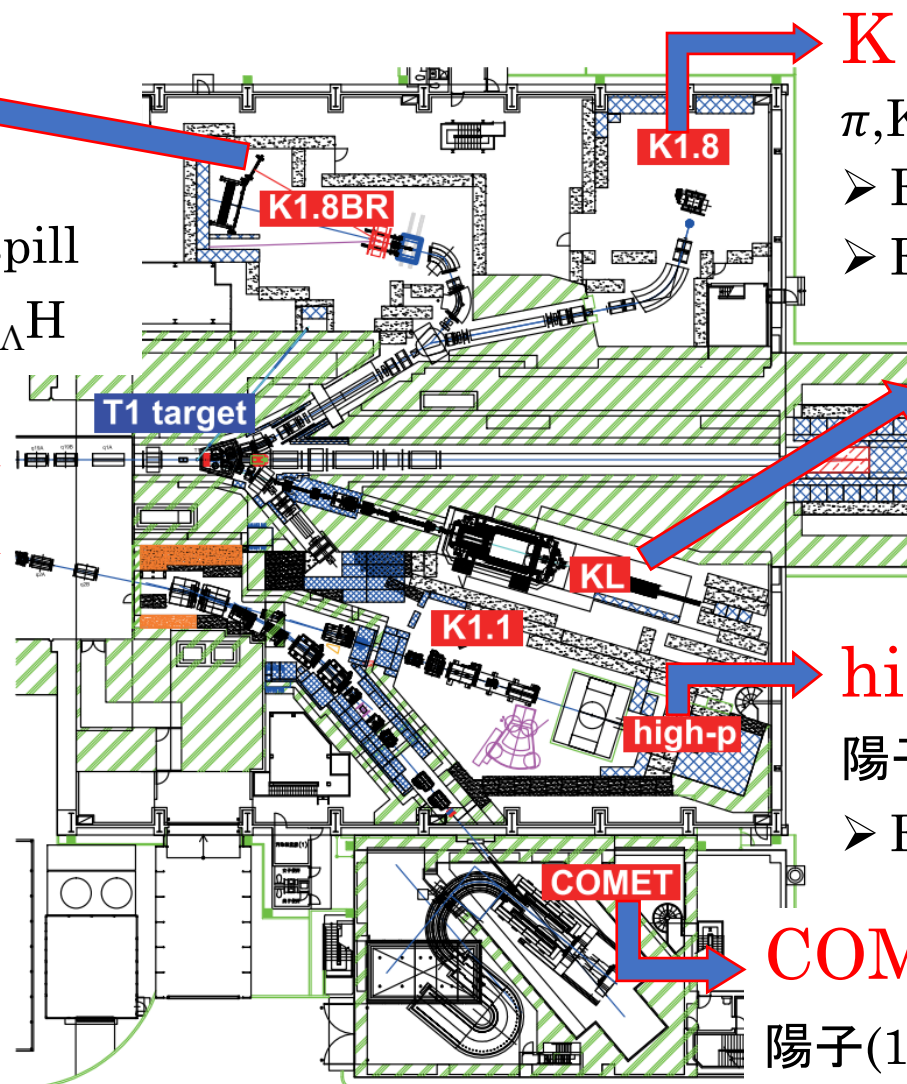
π 20 ビームライン

現在のJ-PARC ハドロン実験施設

K 1.8 BR

$\pi, K < 1.1 \text{ GeV}/c$,
 $\sim 5 \times 10^5 K^- / \text{spill}$
 ➤ E73 : ${}^3,4\text{He}(K^-, \pi^0){}^3,4_{\Lambda}\text{H}$

陽子 from
Main Ring



K 1.8

$\pi, K 1.0 - 2.0 \text{ GeV}/c, \sim 10^6 K^- / \text{spill}$
 ➤ E70 : ${}^{12}\text{C}(K^-, K^+){}^{12}_{\Xi}\text{-Be}$
 ➤ E75 : ${}^7\text{Li}(K^-, K^+){}^7_{\Xi}\text{-H}, {}^7_{\Xi}\text{-H} \rightarrow {}^5_{\Lambda\Lambda}\text{H} + 2n$

KL

K_L 平均 $2.1 \text{ GeV}/c, 10^7 K_L / \text{spill}$
 ➤ E14 (KOTO) : $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

high-p

陽子(1次ビーム) $30 \text{ GeV}/c, \sim 10^{10} p / \text{spill}$
 ➤ E16 : $\phi \rightarrow e^+ e^-$

COMET (建設中)

陽子(1次ビーム) $8 \text{ GeV}/c \rightarrow \pi^- \rightarrow \mu^-$

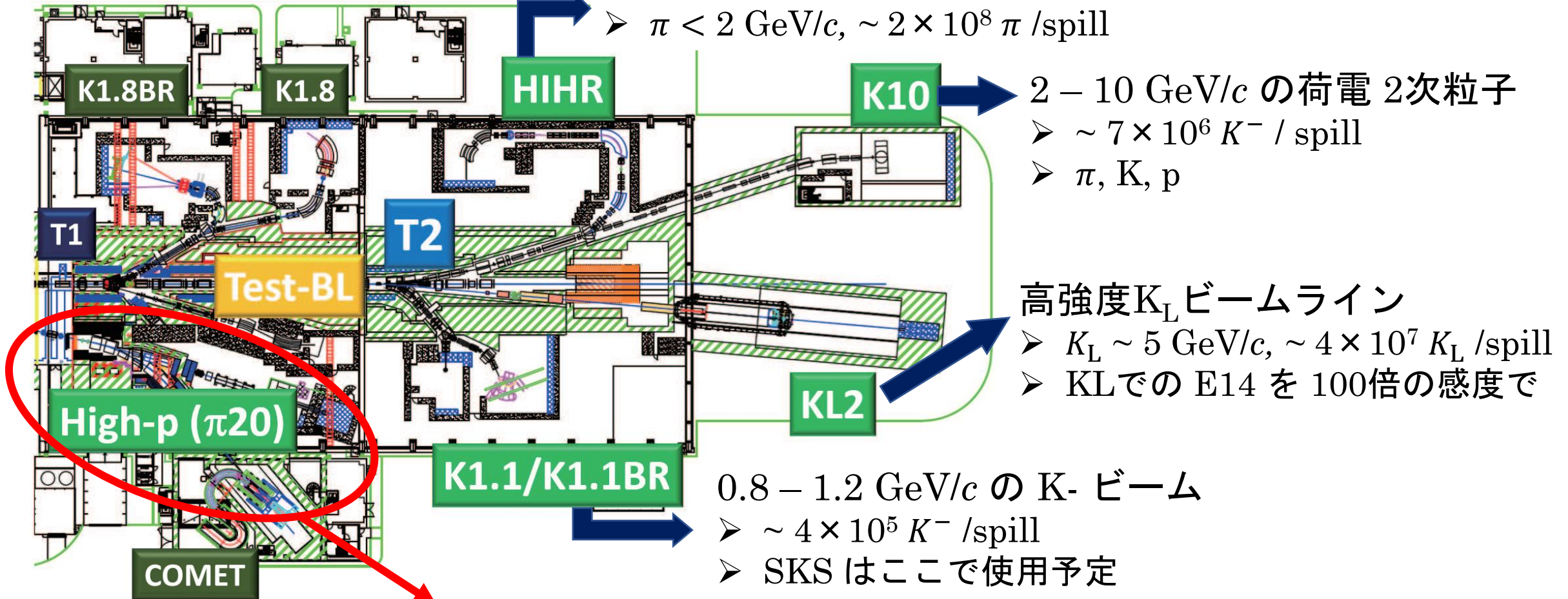
➤ E21 : ミューオン - 電子転換過程の観測

J-PARC ハドロン実験施設拡張計画

~ 2028 年 (?)

大強度高分解能ビームライン

➤ $\pi < 2 \text{ GeV}/c$, $\sim 2 \times 10^8 \pi / \text{spill}$

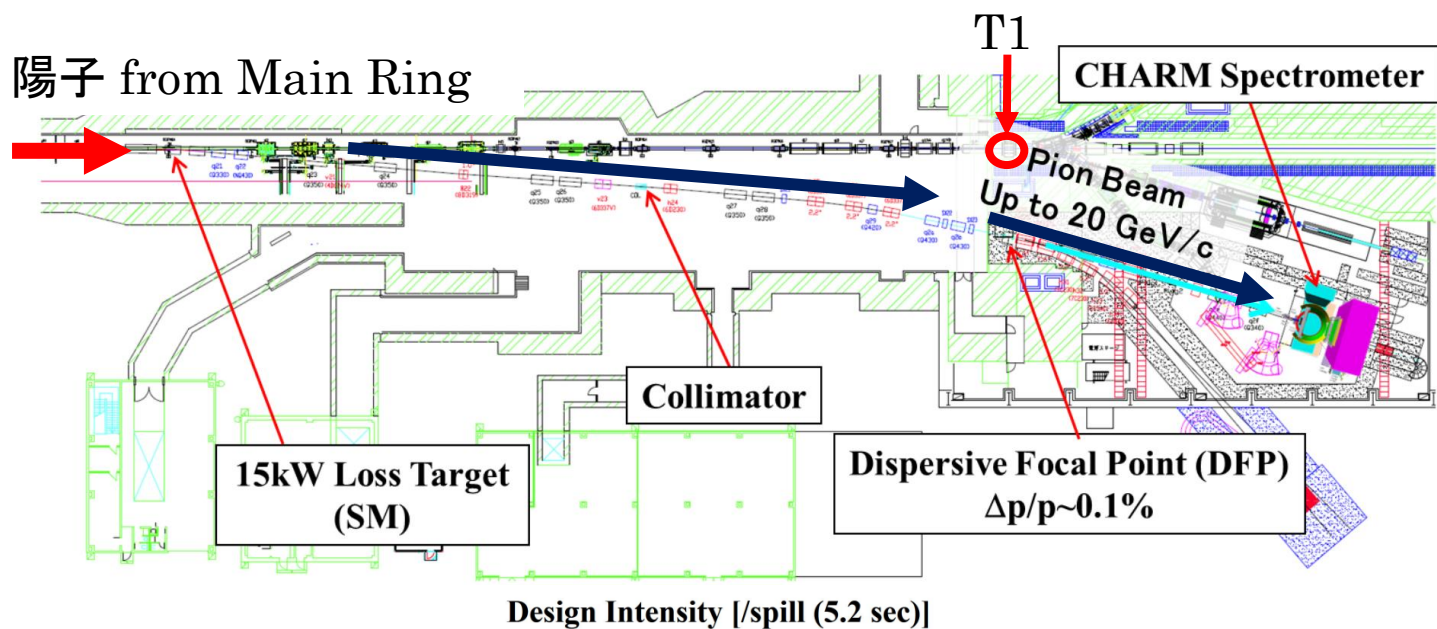


arXiv:2110.04462

2022/12/16

high-p ビームラインを 2 次粒子化

$\pi 20$ ビームライン



SM の上流に 2次粒子生成ターゲット

π , K , p を 20 GeV/c まで利用可能

➤ π^- : $\sim 10^7$ /spill @ 20 GeV/c

➤ K^- : $\sim 10^5$ /spill @ 5 GeV/c

Dispersive Focal Point での運動量分解能

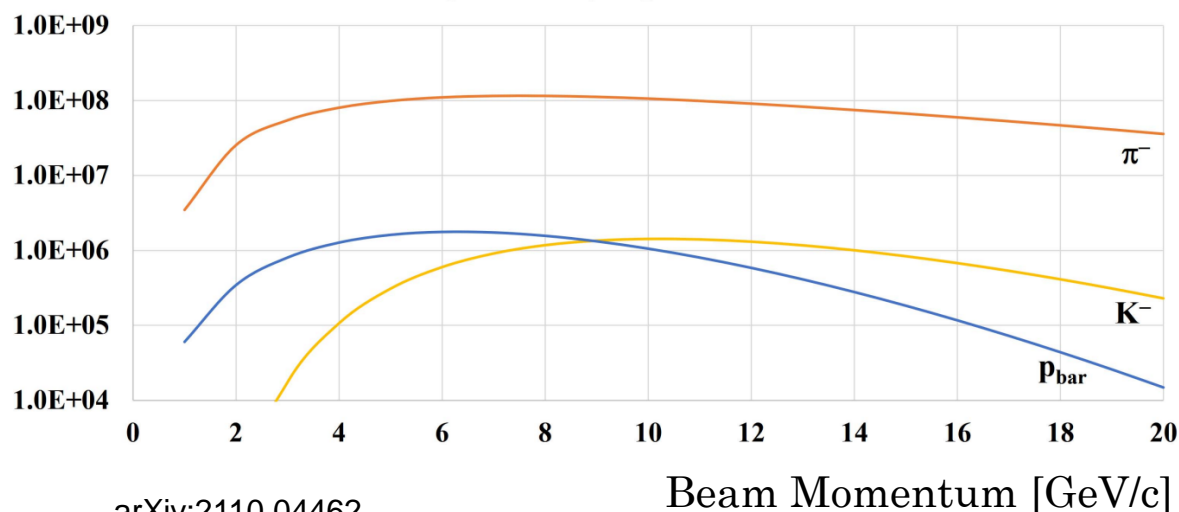
1.031 cm/%

→ 1 mm の位置分解能で $\Delta p/p \sim 0.1\%$

生成粒子を分離せず輸送

➤ 静電分離装置等はない

→ 高レート下での粒子識別が必要



π 20 ビームラインで計画されている実験

E50 : チャームバリオン分光実験

Diquark のカラー・スピン相互作用 $\propto m_{\text{quark}}^{-1}$

→ チャームバリオンにおいて軽い2つのクォークの相関が顕著に

基底状態 $\Lambda_c^+(1/2^+)$: 2286 MeV/c²

励起状態

➤ λ モードと ρ モードの2つ

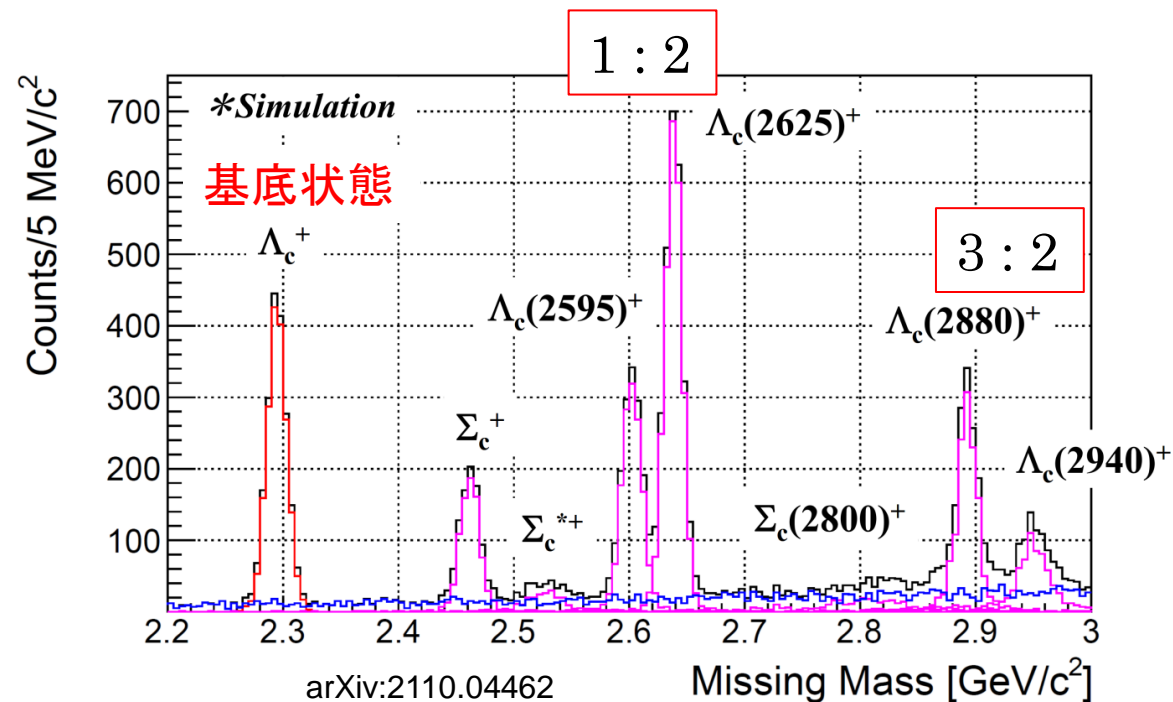
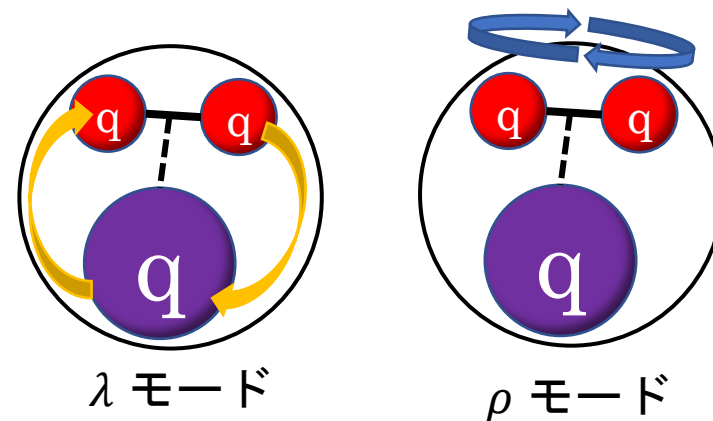
λ モード

➤ Diquark と charm クォークの間に角運動量

ρ モード

➤ Diquark 間に角運動量をもつ励起

➤ λ モードよりもエネルギーの高い励起状態



E50 : チャームバリオン分光実験

$$\pi^- (p, D^{*-}) Y_c^{*+} @ \pi^- 20 \text{ GeV}/c$$

散乱 D^{*-} からの $K^+, \pi^-, \pi_{\text{slow}}^-$ を測定

- $K^+, \pi^- : 2 \sim 16 \text{ GeV}/c$
- $\pi_{\text{slow}}^- : 0.5 \sim 1.7 \text{ GeV}/c$

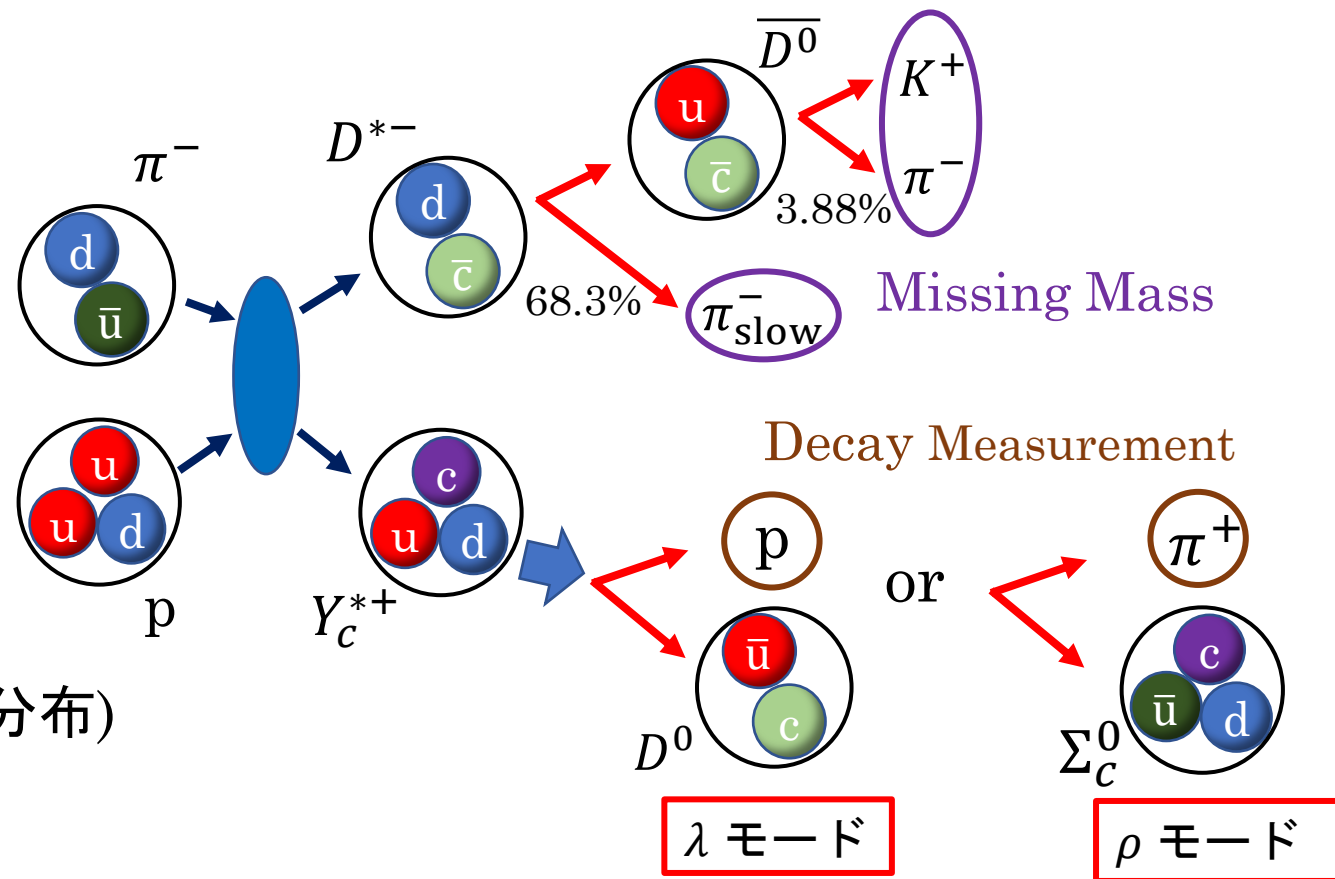
→ Missing Mass Spectroscopy

- Y_c^{*+} の質量測定
 - $> 1 \text{ GeV}/c^2$ までの全励起状態を測定
- 生成比から励起モードの情報を引き出す

Y_c^{*+} からの崩壊粒子を測定 (分岐比, 角度分布)

- λ モード : $p + D^0$ に崩壊しやすい
- ρ モード : $\pi^+ + \Sigma_c^0$ に崩壊しやすい
 - $p, \pi^+ : 0.2 \sim 4.0 \text{ GeV}/c$

→ 崩壊粒子から励起モードの情報を得る



世界初の試み

E50 : チャームバリオン分光実験

Multi purpose

- π , K, p に崩壊する様々な反応を測定可

Streaming DAQ

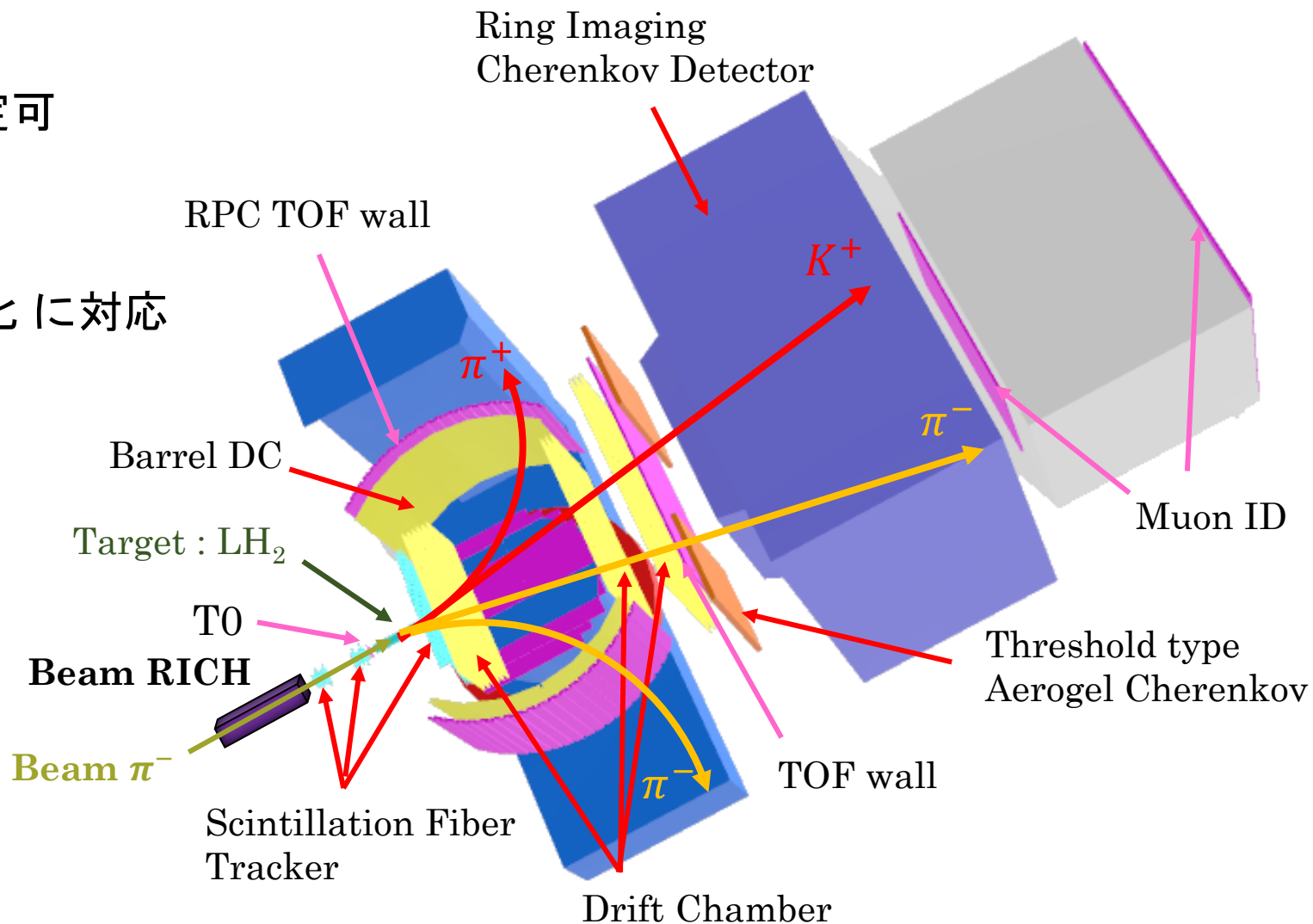
- ハードウェアトリガーを使わない
- 高レート, 読み出しの多チャンネル化に対応

高い運動量分解能

Large Acceptance

E50 では

- Target : 液体水素 4 g/cm^2
- Missing Mass 分解能 $\sim 5 \text{ MeV}/c^2$



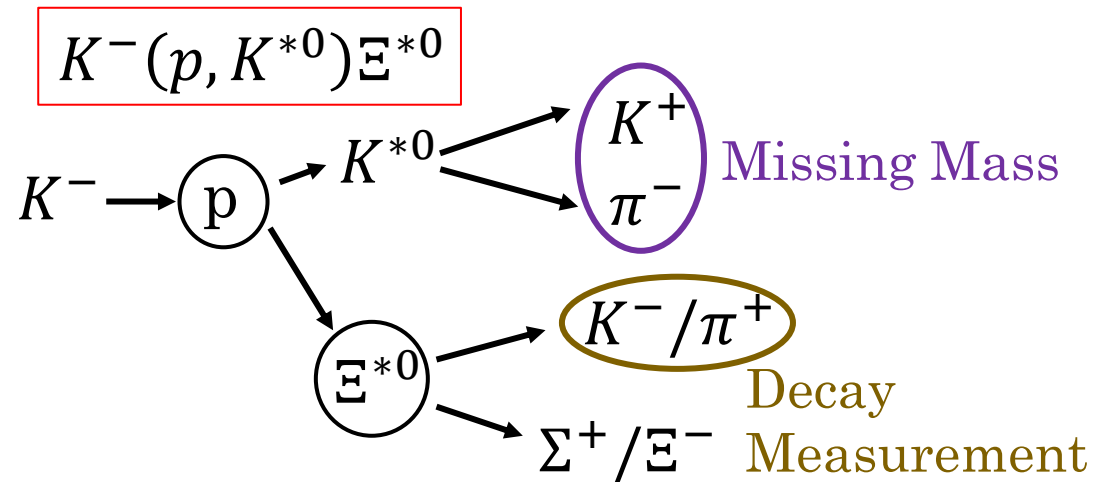
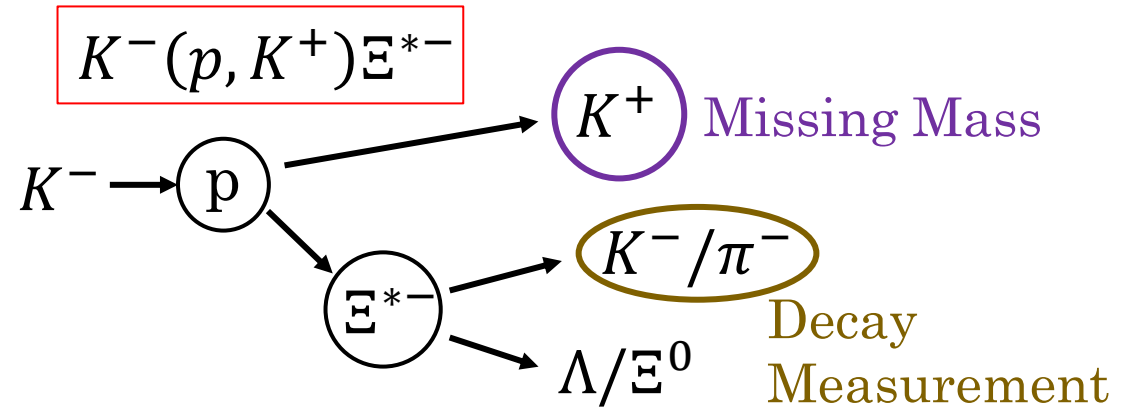
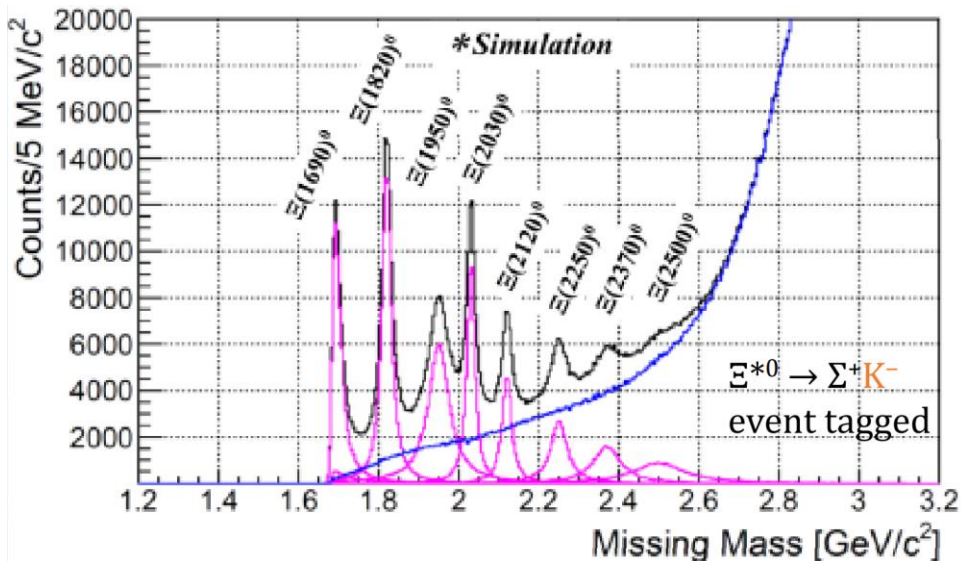
LoI : Ξ バリオン分光実験

- 反応 : $K^-(p, K^+)\Xi^{*-}$, $K^-(p, K^{*0})\Xi^{*0}$
- Beam : K^- 5 GeV/c
 - 2 GeV/c² までの質量, 幅, 断面積測定
 - 励起モードも調査
- 検出器は E50 と同じ

PDG

Particle	J^P	Overall status
$\Xi(1318)$	1/2+	****
$\Xi(1530)$	3/2+	****
$\Xi(1620)$		*
$\Xi(1690)$		***
$\Xi(1820)$	3/2-	***
$\Xi(1950)$		***
$\Xi(2030)$		***
$\Xi(2120)$		*
$\Xi(2250)$		**
$\Xi(2370)$		**
$\Xi(2500)$		*

期待される Missing Mass Spectrum

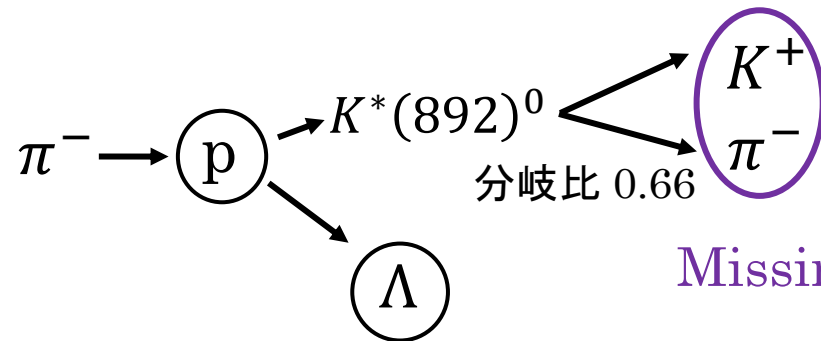


LoI : Λp 散乱の断面積測定

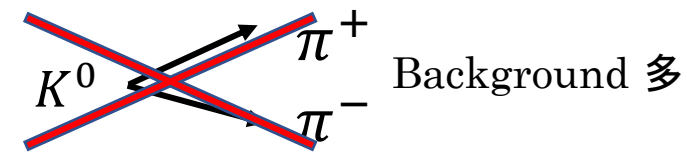
$$\pi^-(p, K^*(892)^0)\Lambda, \quad K^*(892)^0 \rightarrow K^+\pi^-$$

- Background-free Λ tagging
 - $K^*(892)^0$ の崩壊からの K^+ をタグ
→ s クォークの生成イベントを識別
- Beam : π^- 8.5 GeV/c, 60 M/spill
 - 断面積は 20 μb と推定
- Target : 液体水素
 - ϕ 100 mm \times 570 mm
- ⇒ 2900 Λ /spill 生成
- $0.4 \text{ GeV}/c < p_\Lambda < 1.4 \text{ GeV}/c$ で
微分断面積を測定
 - まだ高統計で測定されていない
- E50 Setup + Target まわりに検出器
 - p と散乱した Λ ,
崩壊した Λ からの p, π^- を測定

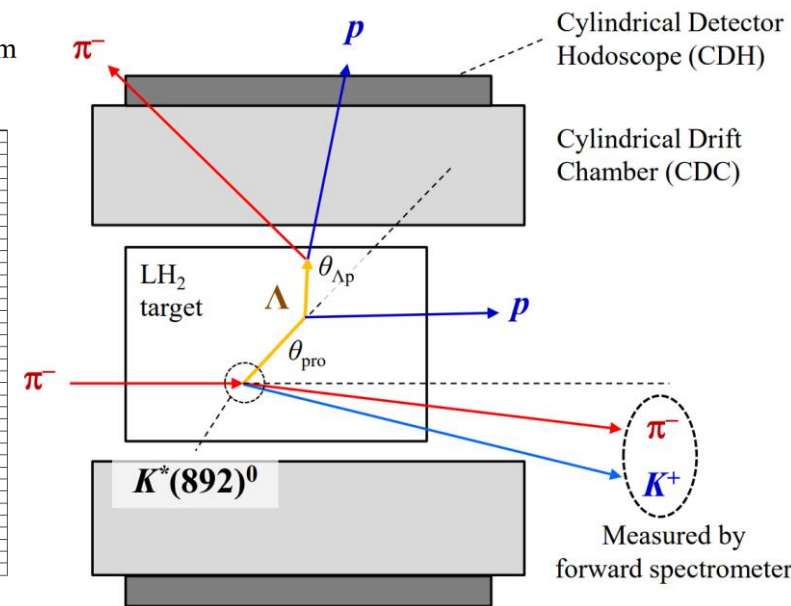
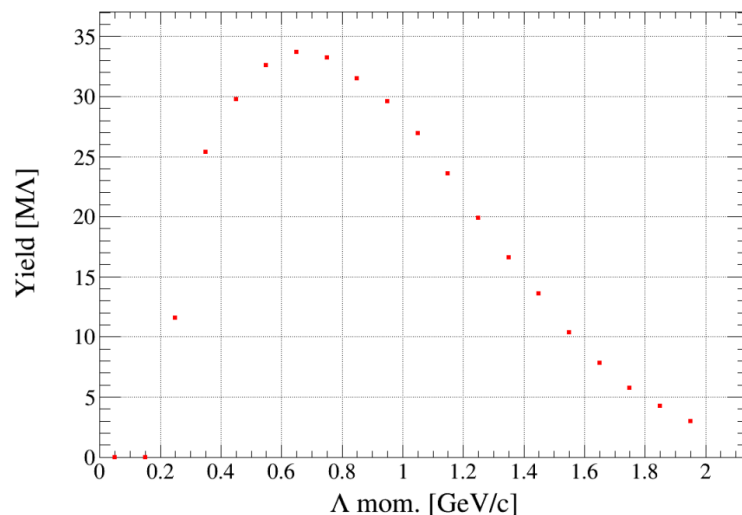
$$\pi^-(p, K^*(892)^0)\Lambda$$



Missing Mass



Yields of the Λ beams as a function of the Λ beam momentum (30-day beam time)



ビームPID のための RICH検出器開発

Ring Imaging Cherenkov 検出器

荷電粒子の速さが物質中の光速を超える
 → Cherenkov 光が発生

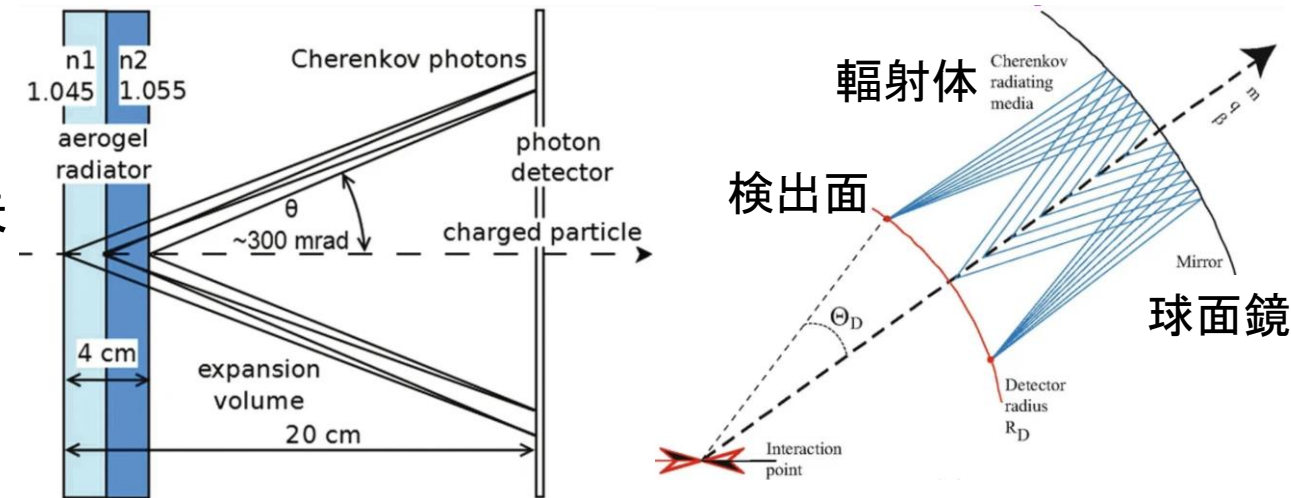
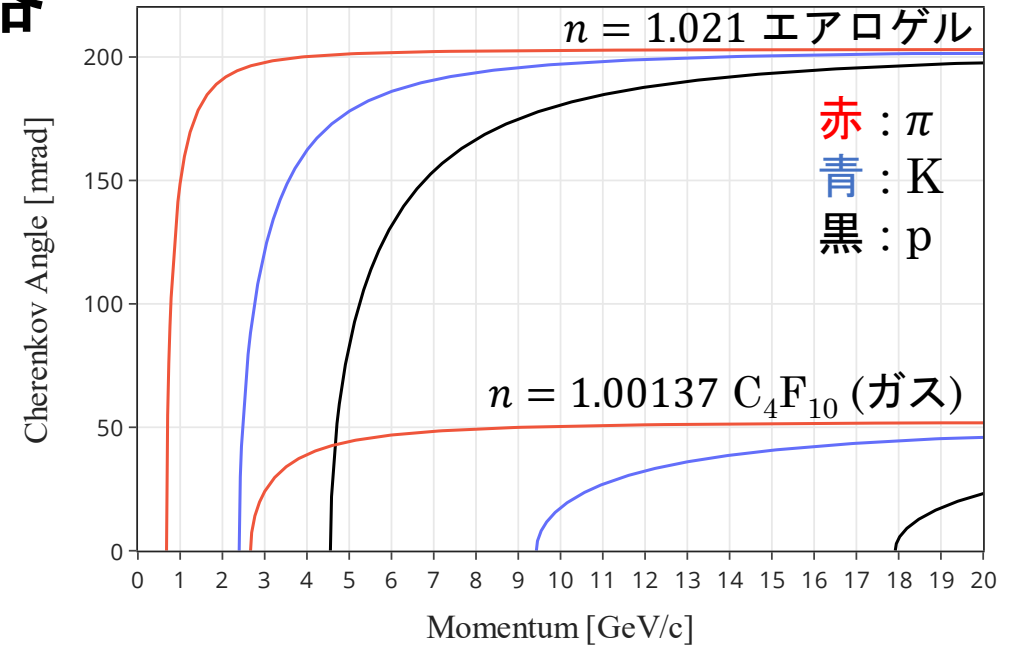
放射角(Cherenkov Angle) θ_c

$$\cos \theta_c = \frac{1}{\beta n} \left(\beta = \frac{v}{c} = \frac{p}{\sqrt{p^2 + m^2}} \right)$$

同じ運動量で質量の違う粒子
 → β が異なる \Leftrightarrow Cherenkov Angle が異なる

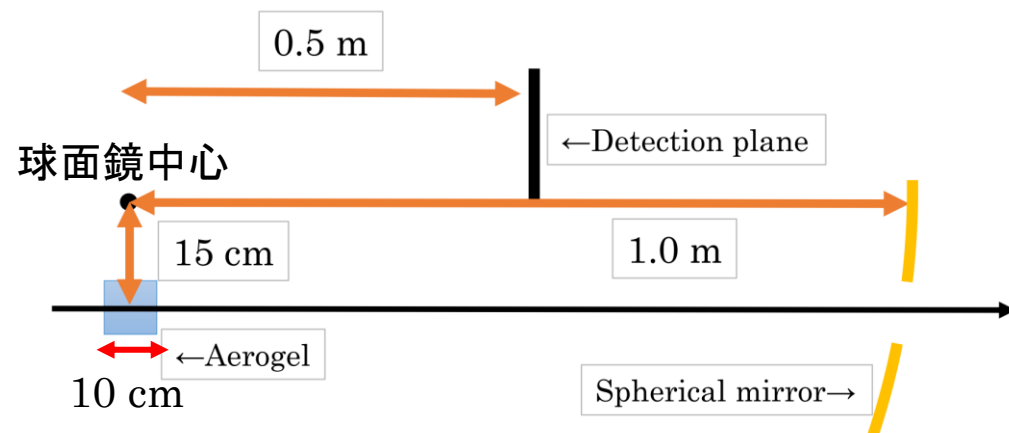
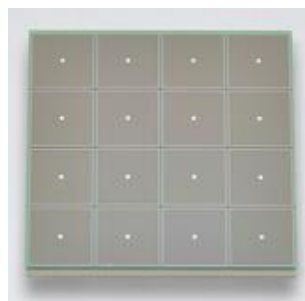
Cherenkov Ring を直接測定
 → 粒子識別が可能

- 輻射体厚によるリングの広がりを小さくする工夫
- 異なる屈折率の輻射体を重ねる
 - 球面鏡を利用する



先行研究 (東北大学梶川さん 修士論文 2021)

- 輻射体 : エアロゲル ~10 cm ($n=1.021$ @ 400 nm)
- 光検出器 : MPPC アレイ
 - Hamamatsu S13361-3050AE-04
 - 1 セル : 3 mm × 3 mm
 - チャンネル数 : 16 (4 × 4)

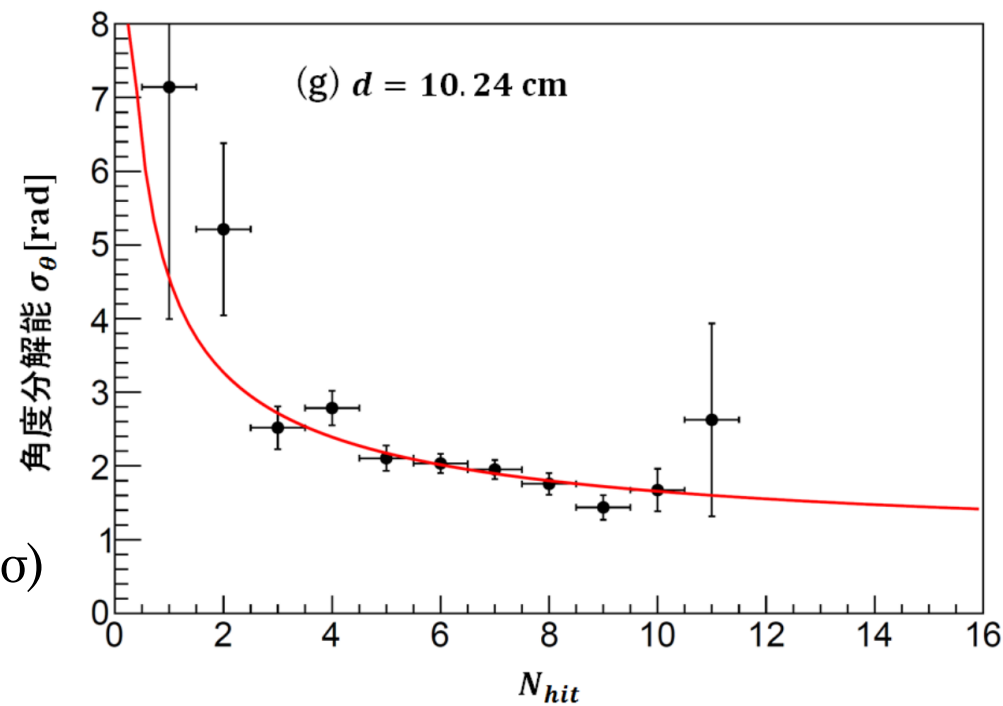


MPPC での検出は画期的 (従来はMaPMT など)

性能試験 @ Spring-8 LEPS ビームライン

- 陽電子 0.95 GeV/c
- 検出光子数 5 photons 以上
- 角度分解能 2.1 mrad

→ K^- 8.5 GeV/c で 10 photons 以上, 1.51 mrad が期待
 π, K の Cherenkov Angle の差 @ 8.5 GeV/c ≈ 7.7 mrad ($\sim 5 \sigma$)



Beam-RICH の最終設計に向けて

- 5 GeV/c ~ 20 GeV/c までの π, K, p の PID
- エアロゲルより低い屈折率の輻射体が必要
 - エアロゲル ($n=1.021$) : 5 ~ 10 GeV/c
 - C_4F_{10} (ガス) ($n=1.00132$) : 10 ~ 20 GeV/c

特に 10 GeV/c 付近で PID をうまく行いたい

設計項目 1

2 つの輻射体で PID ← beam方向 2m の大きさ制限あり
or

低運動量領域 → TOF, 高運動量領域 → ガス Cherenkov

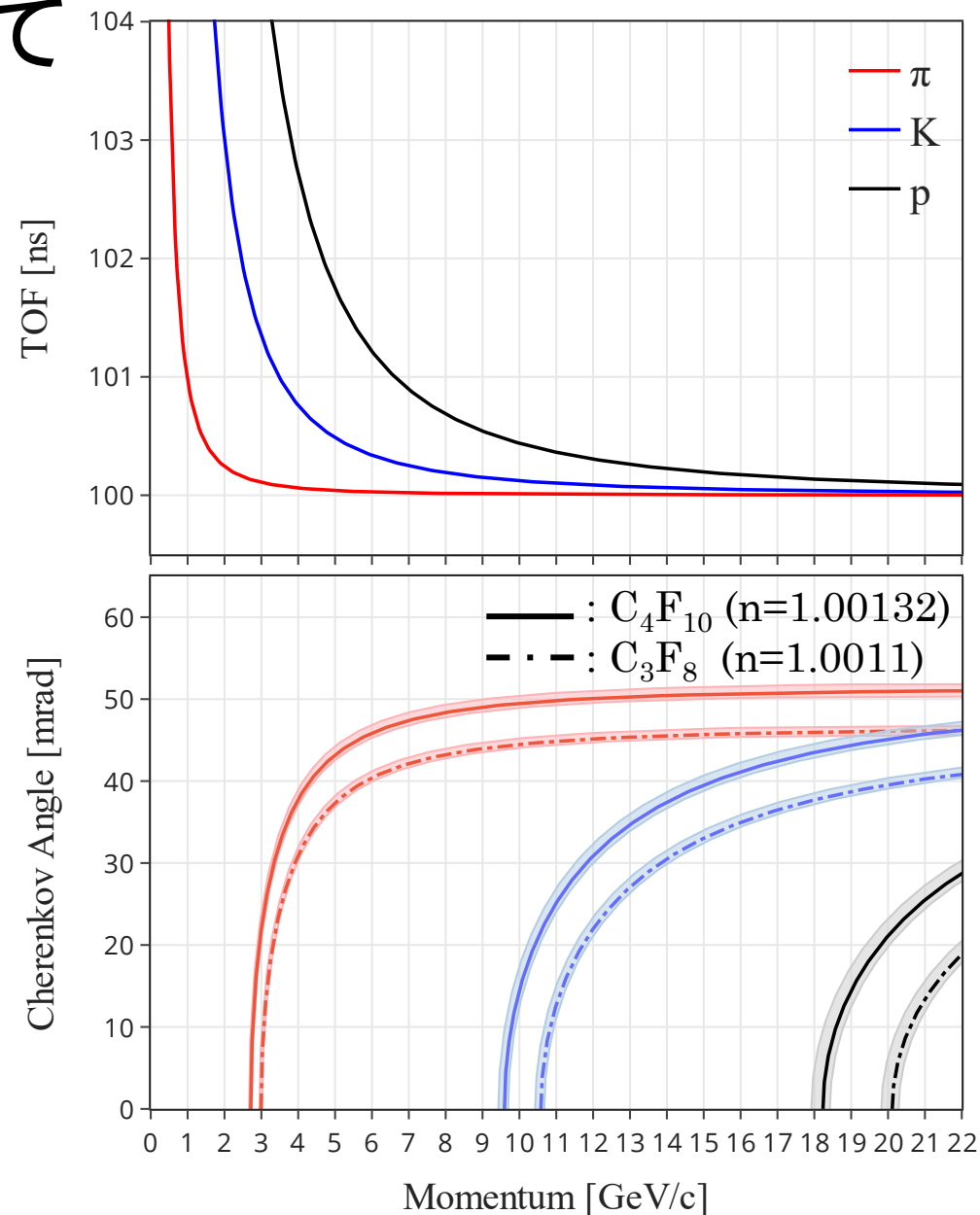
設計項目 2

C_4F_{10} ← 日本では入手が非常に厳しい

or

C_3F_8 ← 屈折率 小 ⇒ Threshold Momentum 大

光学系の調整に Geant4 を用いて、設計を決定



Geant4 によるシミュレーション

- Ver 11.0 patch3 を用いて作成中
 - Multi Thread 処理をできるようにした

Beam Momentum 8.5 GeV/c

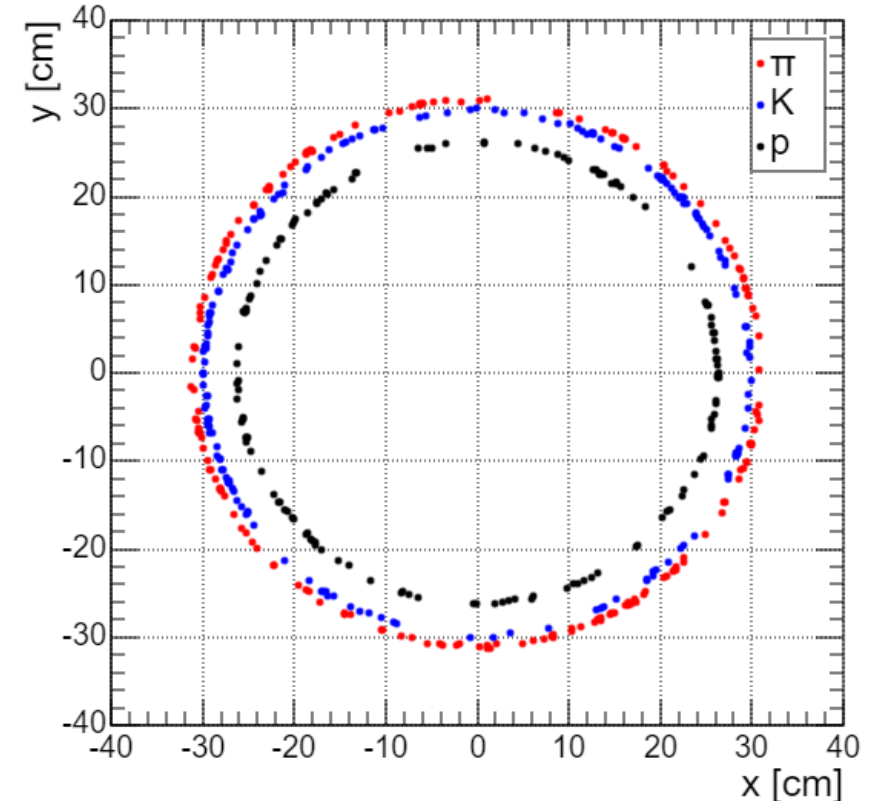
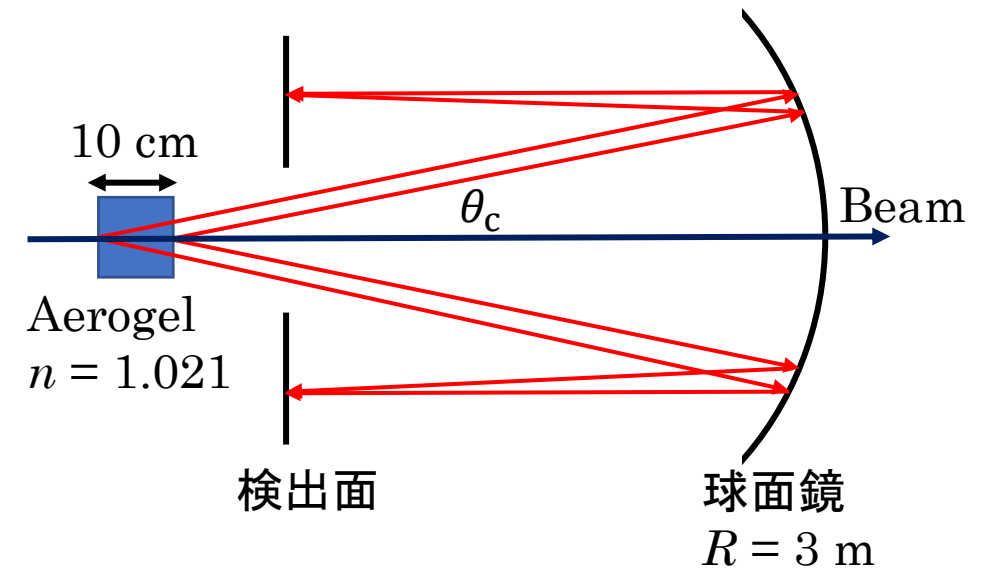
Aerogel – 空気間での屈折も考慮した Cherenkov 角

- π : 206.7 mrad
- K : 198.9 mrad
- p : 174.8 mrad

シミュレーションから求めた Cherenkov 角

- π : 203.967 mrad
- K : 196.408 mrad
- p : 173.069 mrad

理論値とシミュレーションの値が異なっている
→ 原因はまだわかっていない



まとめ

J-PARC ハドロン実験施設拡張が計画されている

- high-p ビームラインを2次粒子化し、 $\pi 20$ ビームラインに
- 20 GeV/c までの π, K, p を利用可能

$\pi 20$ ビームラインでは Multi purpose なスペクトロメータを用いて様々な実験が計画されている

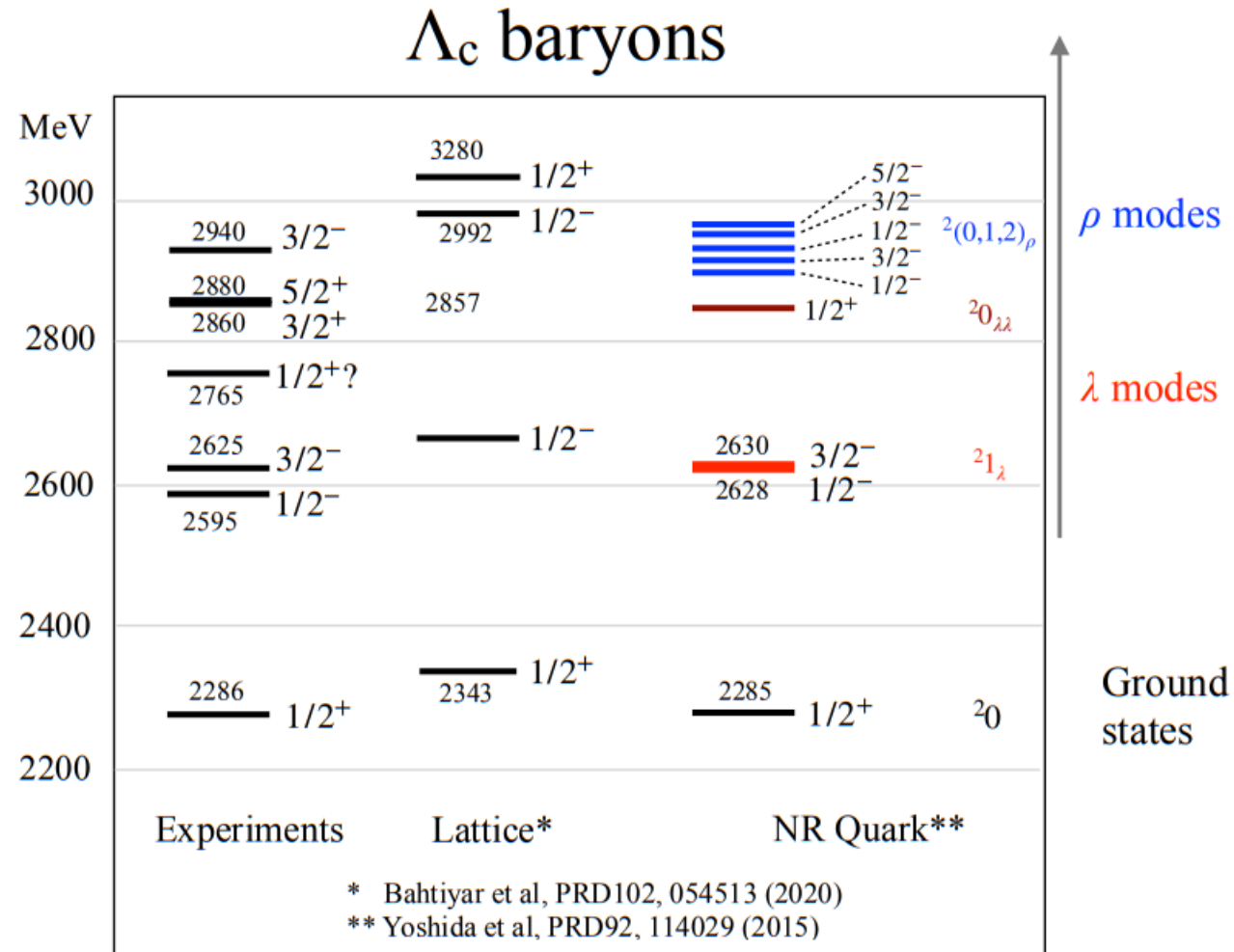
- チャームバリオン分光実験
- Ξ バリオン分光実験
- Λp 散乱の断面積測定実験

ビームの粒子識別のための Beam-RICH 検出器を現在設計中

- 輻射体の選定, TOF 検出器との役割分担などを検討
- Geant4 Ver.11.0 patch 3 を用いたシミュレーションも作成中

Back up

Λ_c の測定された準位と理論予測



Ξ バリオン分光実験

Background

Non resonant $K^+\pi^-/K^+K^-, K^{*0}\pi^-/K^{*0}K^-$

Ground state $\Xi^0/\Lambda, \Xi^-/\Sigma^+$ productions

JAM を用いて推定

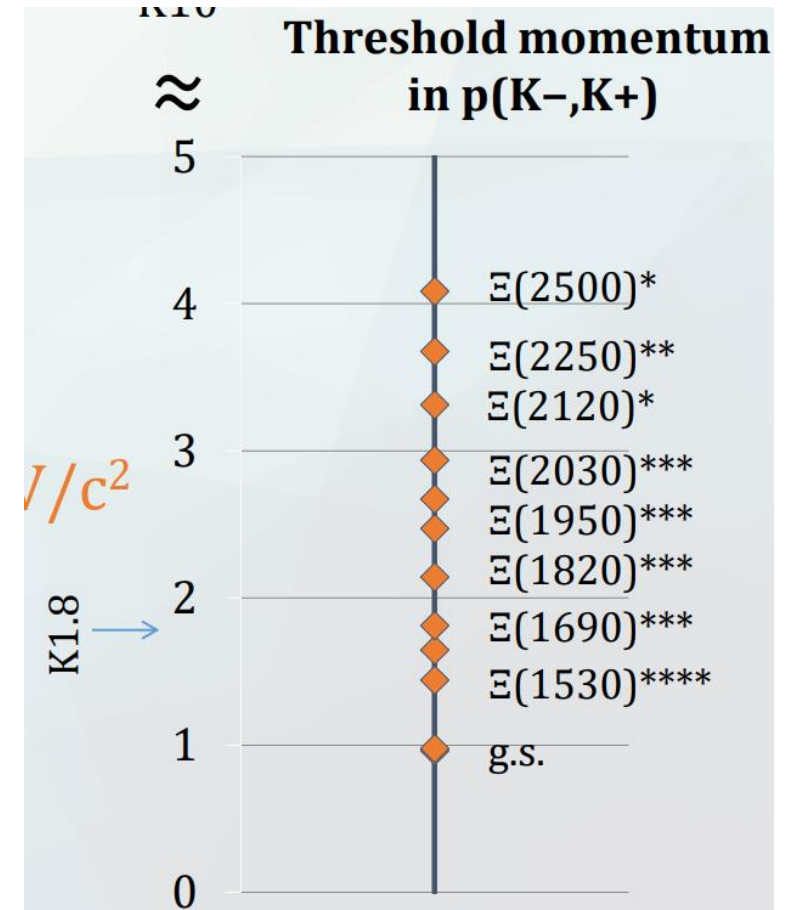
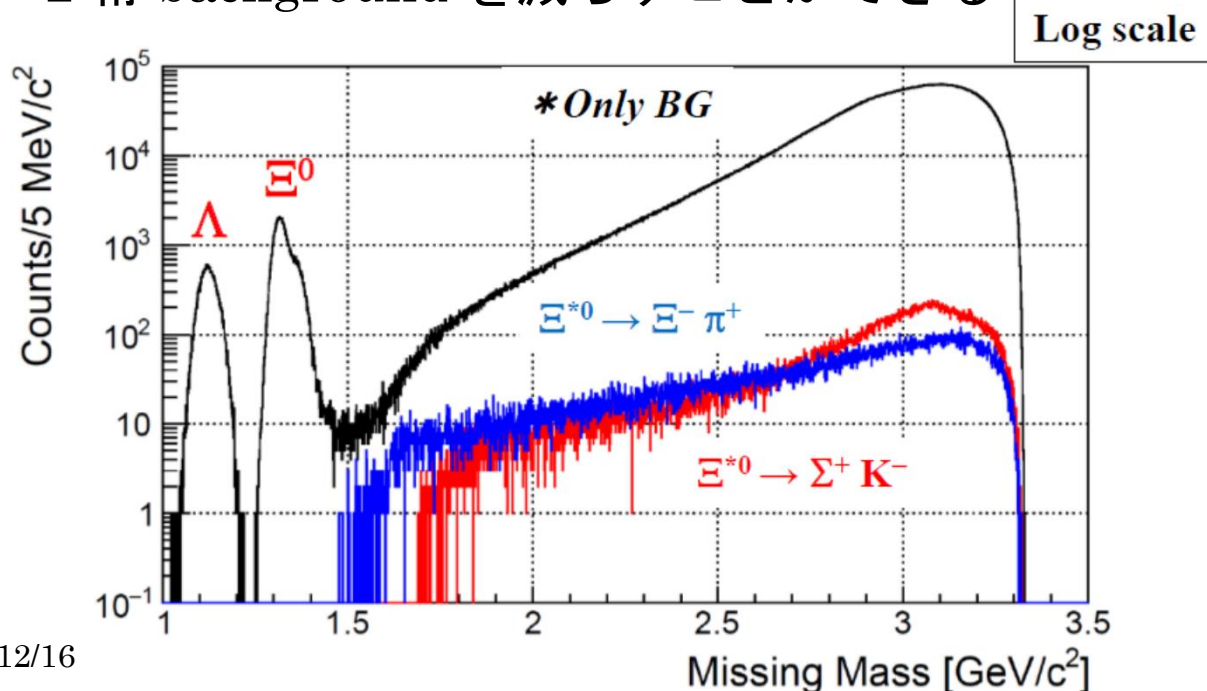
Decay event selection : $\Xi^{*0} \rightarrow \Sigma^+ K^-, \Xi^{*0} \rightarrow \Xi^- \pi^+$

→ 2 桁 background を減らすことができる

期待される収量

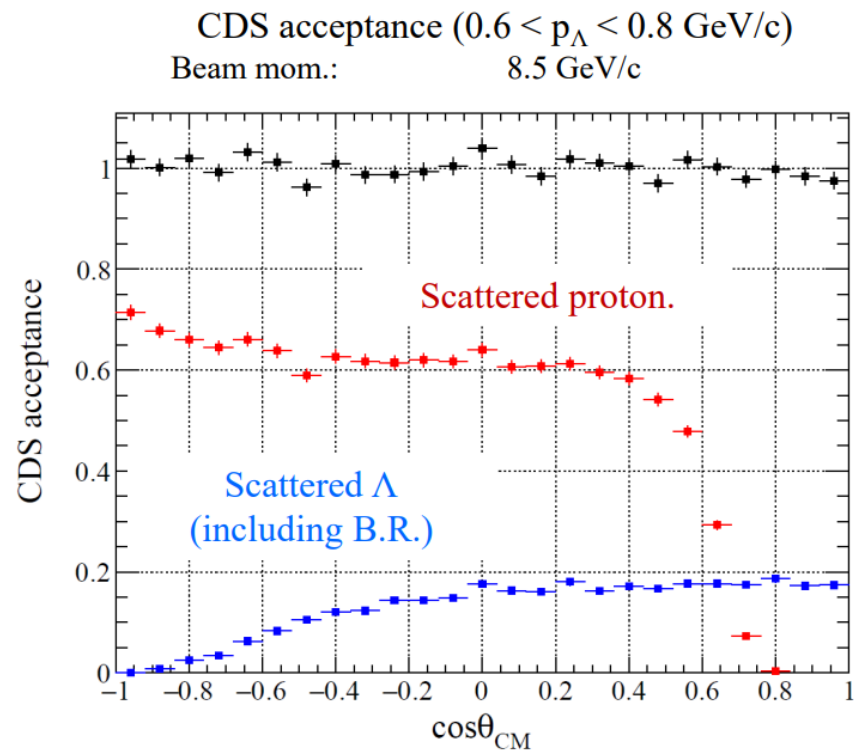
➤ High-p : 7k /month ($I_K = 10^6/\text{spill} \ \& \ 0.8 \ \mu\text{b}$)

➤ K10 : 56k /month ($I_K = 7 \times 10^6/\text{spill} \ \& \ 0.8 \ \mu\text{b}$)



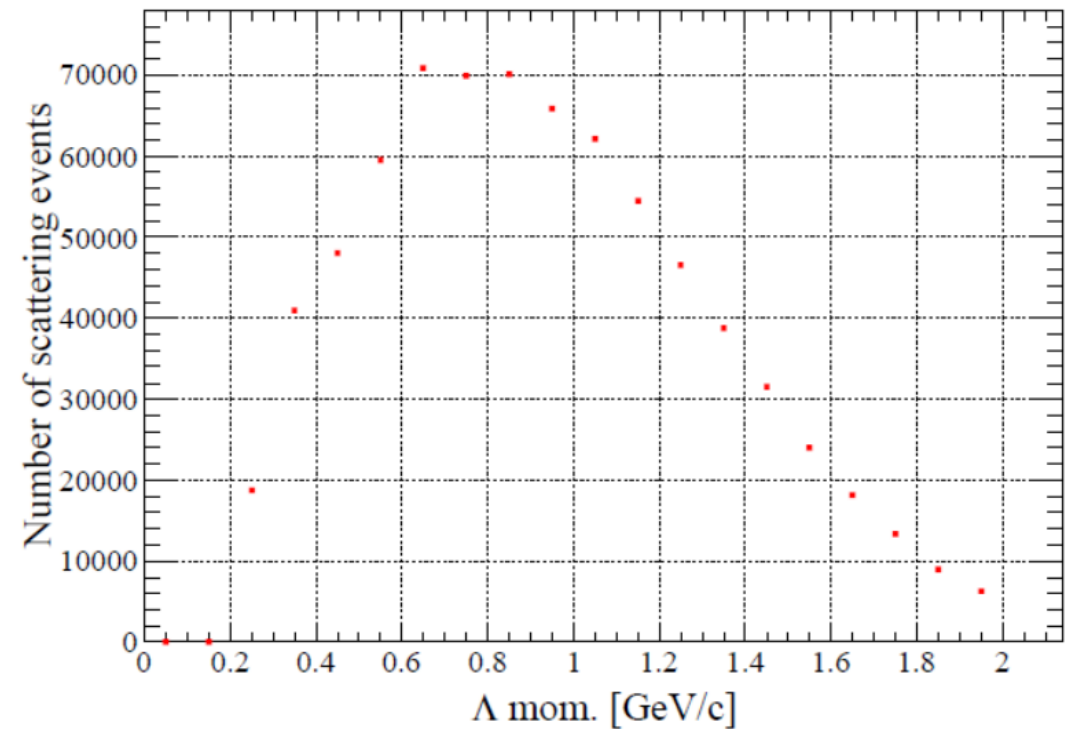
Λp 散乱の断面積測定

散乱の断面積は $\sigma = 20$ mb と推定
→ 3900 events/ 1 million Λ beams



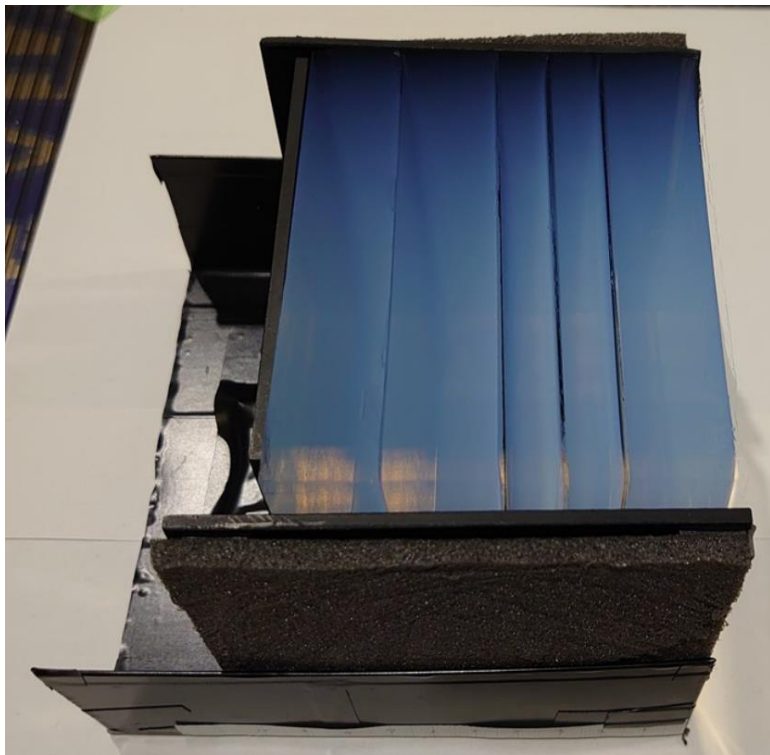
All the region of $\cos\theta_{CM}$ is covered by CDS

Yields of the Λp scattering events as a function of
the Λ beam momentum
(30-day beam time)

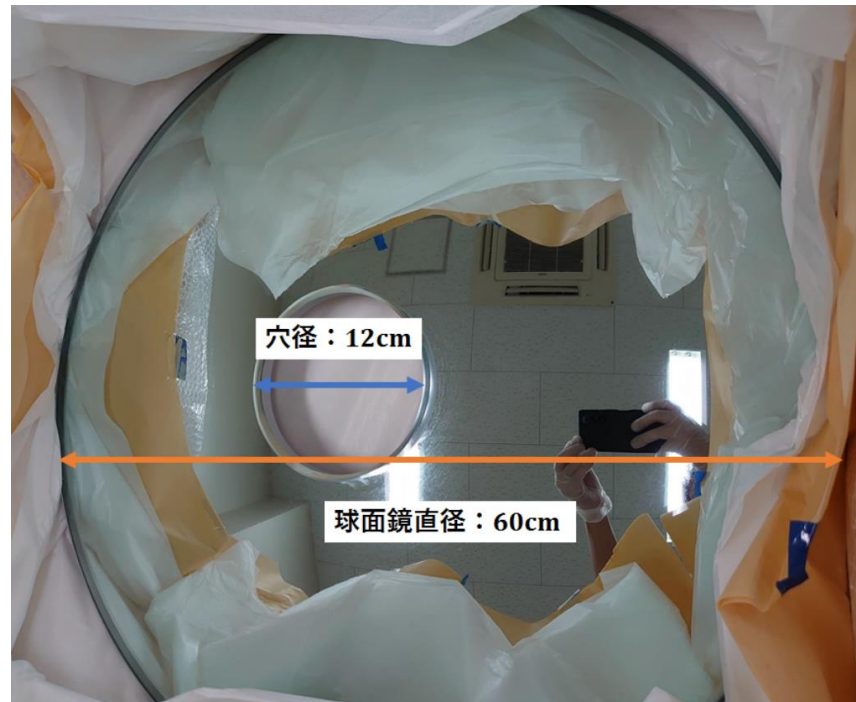


先行研究

Aerogel ~ 10 cm



球面鏡 $R = 1.0 \text{ m}$



MPPC : 8 個 (128 ch)

