

# HYPERON-NUCLEON SCATTERING EXPERIMENT AT J-PARC

東北大 三輪 浩司



# CONTENTS

- $\Sigma_P$ 散乱の微分断面積
- 今後のハイペロン陽子散乱実験の展開
  - 偏極 $\Lambda$ ビームを用いた $\Lambda P$ 散乱実験の計画
  - 低エネルギー $\Upsilon P$ 散乱実験のアイデア
- まとめ

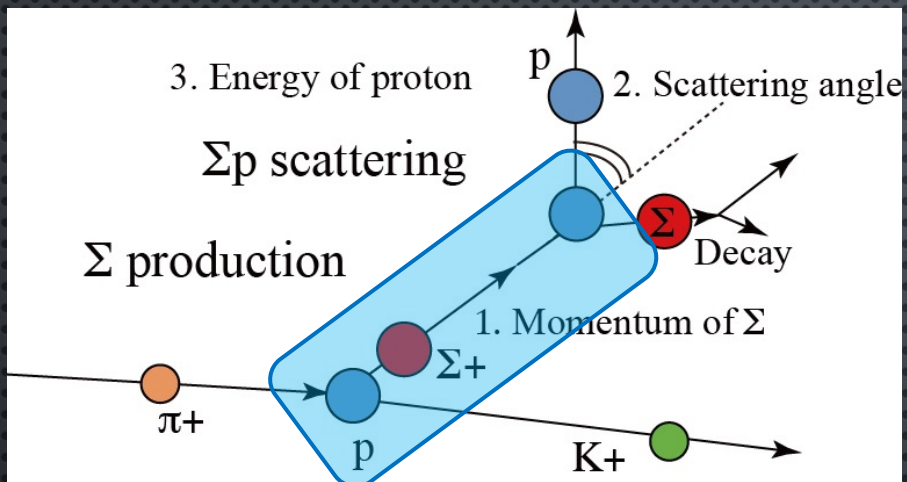


# ハイペロンと陽子の直接散乱で相互作用を調べる意義

- ハイペロン核子(YN)相互作用をクォーク描像で理解したい
  - 核力の斥力芯の起源は？
  - スピンに依存する相互作用に対してクォークはどう寄与している？
- 現実的な2体のYN相互作用を決定することでハイパー核物理の土台を支えたい
  - 現実的な核力は原子核物理の土台
  - 同様に現実的なYN相互作用を構築し、ハイパー核物理の土台を作る。
    - ハイパー核の多様な多体系としての側面をより正確に理解することが出来るはず。
- モデルに依存しない相互作用を調べる手段
  - 散乱データ(微分断面積、スピン観測量)を蓄積して散乱の位相差を決定したい。



# J-PARCでハイペロン陽子散乱実験が可能になった！



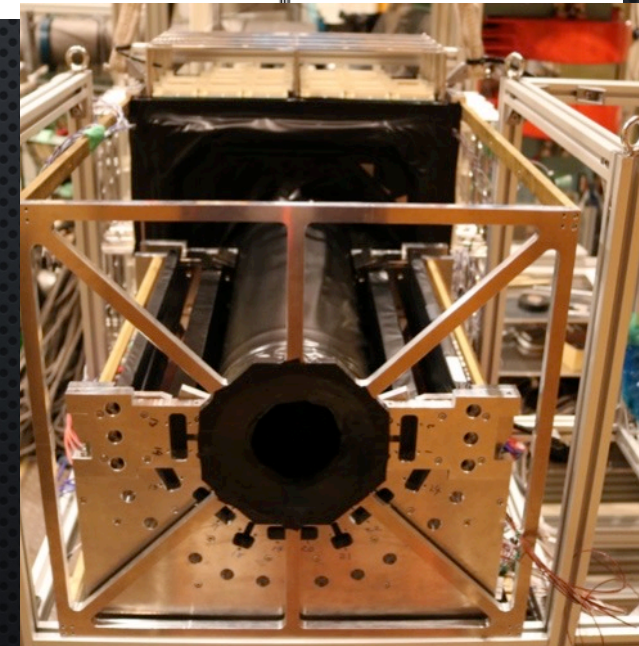
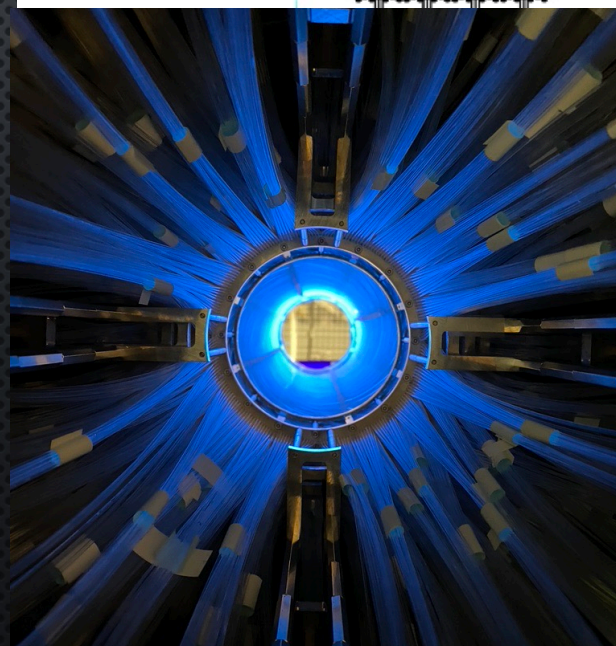
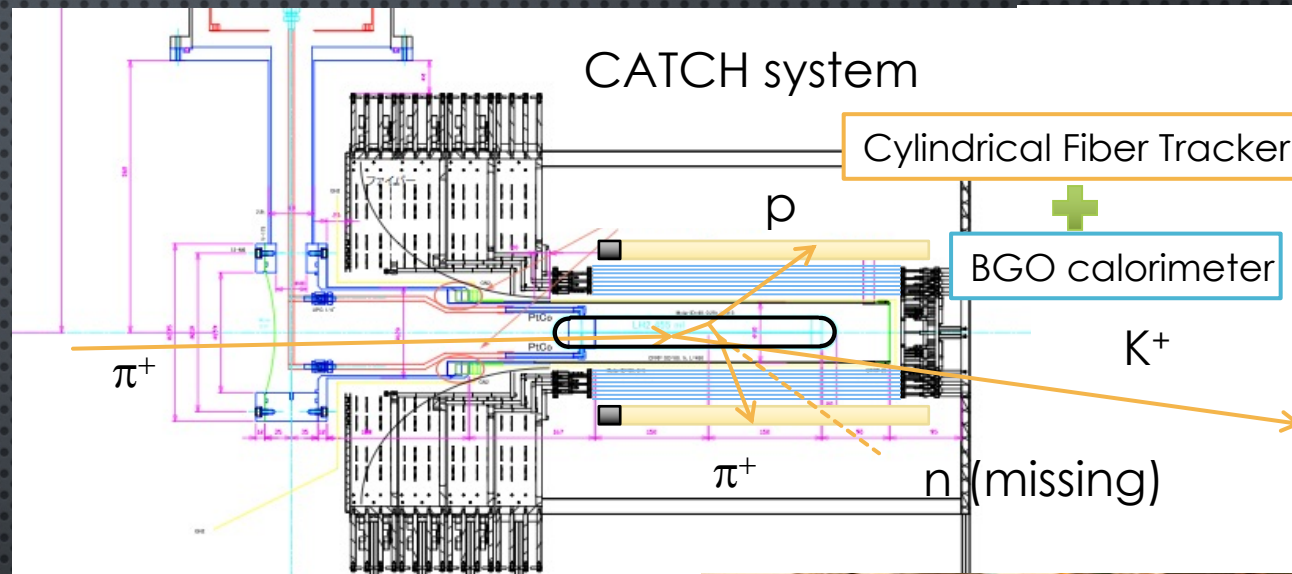
液体水素標的

水素標的中に大量のハイペロンを生成する  
引き続き発生するハイペロンと陽子の散乱を周囲  
の測定器で同定

$\Sigma p$ 散乱実験 @ J-PARC K1.8ビームライン

- $\Sigma^-$ ビーム
  - $\Sigma^- p$ 弾性散乱
  - $\Sigma^- p \rightarrow \Lambda n$  非弾性散乱
- $\Sigma^+$ ビーム
  - $\Sigma^+ p$ 弾性散乱

現在、微分断面積を求めており、今後、  
スピン観測量などを導出する

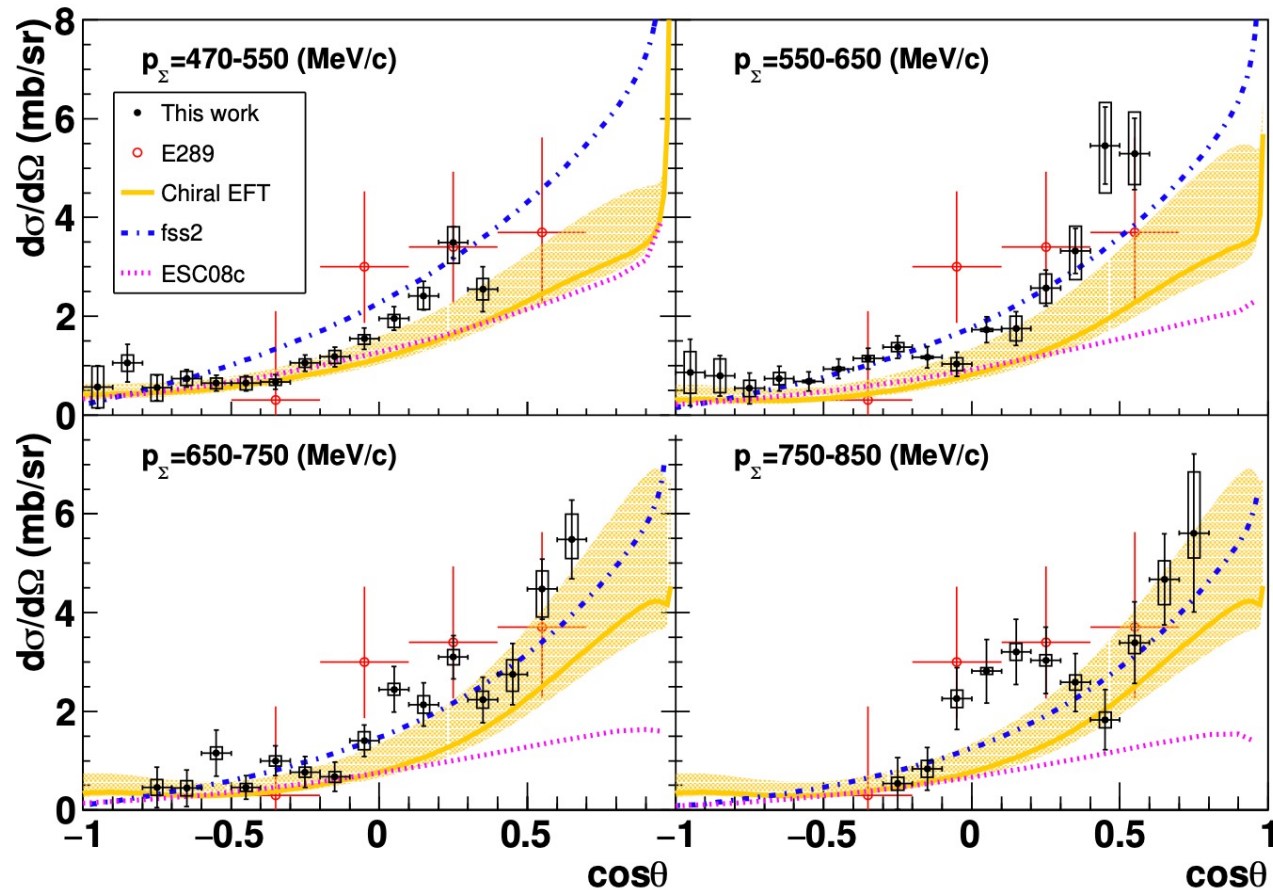




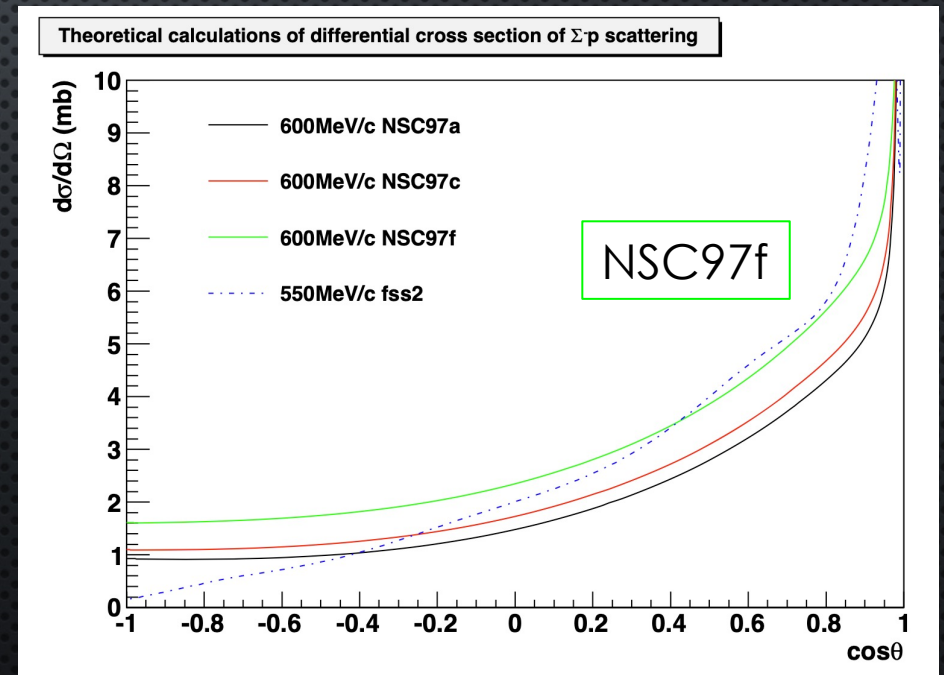
# $\Sigma$ -P ELASTIC SCATTERING DIFFERENTIAL CROSS SECTIONS

K. Miwa et al., PRC 104, 045204 (2021)

Differential cross sections of  $\Sigma$ -p scattering



- クォーク模型、カイラル模型は比較的よく再現する
- ESC08は明らかにunderestimate
  - ただし、NSC97fは比較的近いように見える↓

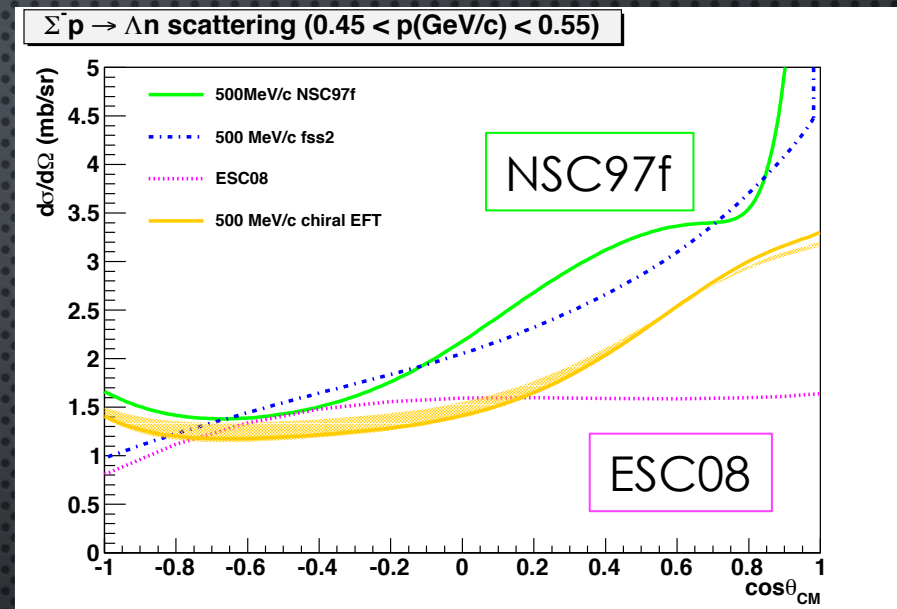
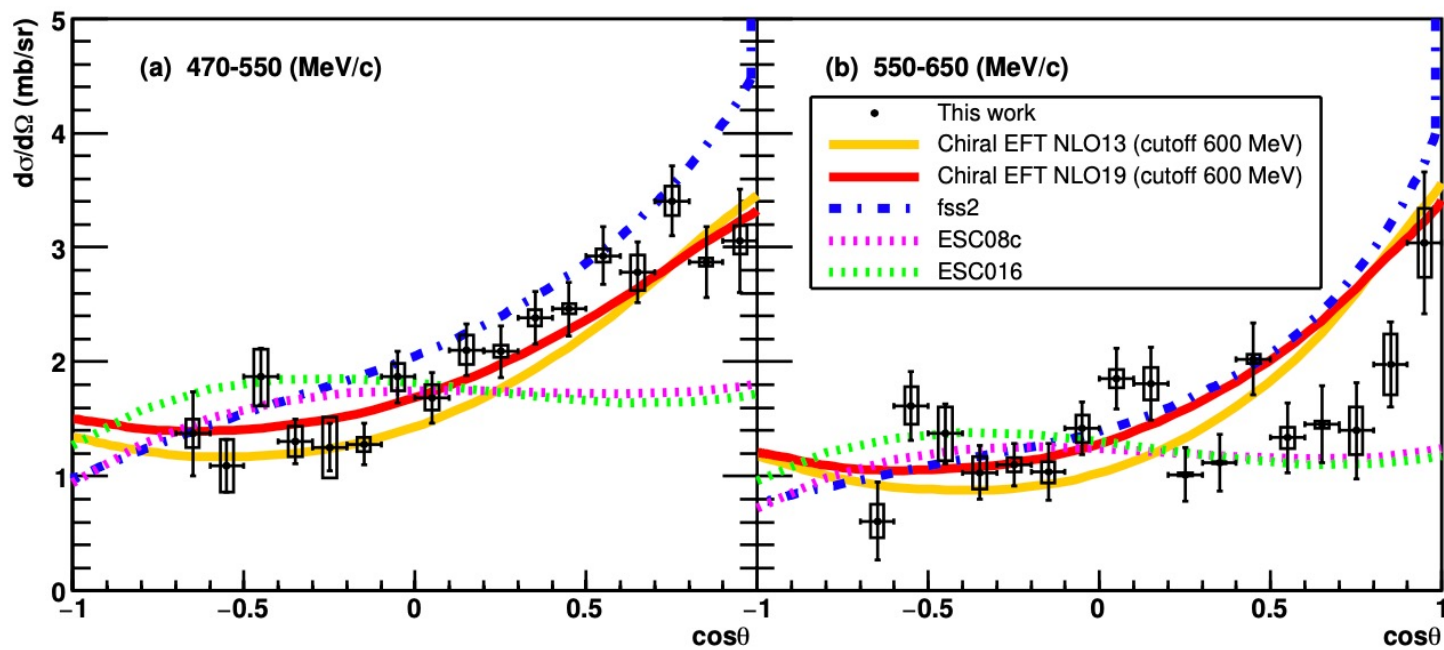




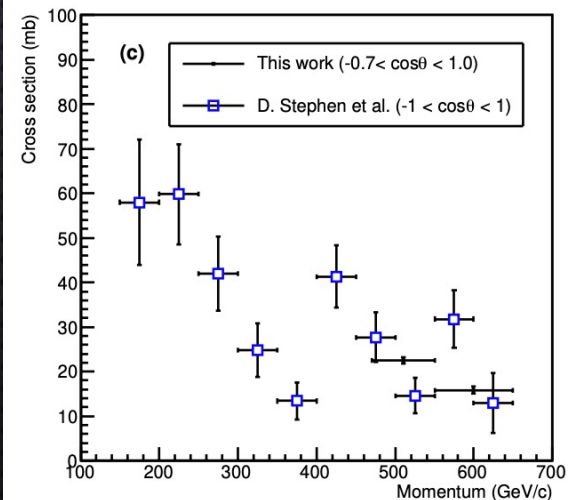
# $\Sigma^- p \rightarrow \Lambda n$ REACTION DIFFERENTIAL CROSS SECTIONS

K. Miwa et al., arXiv:2111.14277

Differential cross section of  $\Sigma^- p \rightarrow \Lambda n$  reaction



Total cross section of  $\Sigma^- p \rightarrow \Lambda n$  reaction



- クォーク模型、カイラル模型は比較的 $\Sigma$ -pのチャンネルは比較的よく再現する方向にある。
- Nijmegenは明らかにunderestimateする
  - こちらNSC97fの方が傾向がまっているように見える



# $\Sigma^+p$ ELASTIC SCATTERING DIFFERENTIAL CROSS SECTION

analysis by T. Nanamura (Kyoto, JAEA)

Very Preliminary

最新の解析内容は、七村君からの今後の報告を期待してください

fss2が予言するほどは断面積が大きくないのは間違いない

$$0.45 < p_{\Sigma} \text{ (GeV/c)} < 0.55$$

$S$	$BB$ channel ( $I$ )	${}^1E$ or ${}^3O$	${}^3E$ or ${}^1O$
0	$NN(I=0)$	--	(10*)
	$NN(I=1)$	(27)	--
-1	$\Lambda N(I=1/2)$	$\frac{1}{\sqrt{10}}[(8_s) + 3(27)]$	$\frac{1}{\sqrt{2}}[-(8_a) + (10^*)]$
	$\Sigma N(I=1/2)$	$\frac{1}{\sqrt{10}}[3(8_s) - (27)]$	$\frac{1}{\sqrt{2}}[(8_a) + (10^*)]$
	$\Sigma N(I=3/2)$	(27)	(10)

$\Sigma^+p$ のチャンネルは27重項と10重項のみで表すことができる。  
27重項にNNの位相差を使ったり、  
理論模型の位相差を使ったりすることで位相差解析のパラメータを制限することで実際に位相差解析を現在進めている。



# 現実的なYN相互作用構築に向けて

## YNの場合

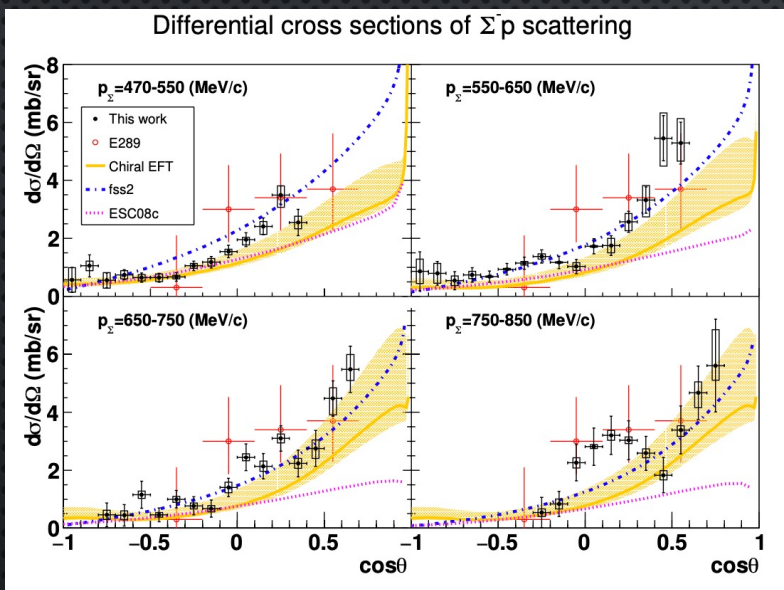
2体の散乱データ → 位相差解析

理論模型に基づいた  
ポテンシャルの構築

S=-1のチャンネルでの散乱観測の測定から  
YNでの位相差の決定を進めていきたい

- ✓ 現実的な核力模型の構築
- ✓ Chiral EFTに基づいた原子核の研究

原子核、  
核物質の研究



K. Miwa et al. arXiv:2104.13608

比較

位相差の導出

Lattice QCD simulation

QCD

ポテンシャルの構築

位相差の解析には断面積に加えて、多くのスピン観測が必要

E40

- $\Sigma^+p, \Sigma^-p \rightarrow \Lambda n$  反応での polarization (散乱後の  $\Sigma^+, \Lambda$  の崩壊の非対称度の測定)

P86

- $\Lambda p$  散乱の Analyzing power, Depolarization



## 次のターゲット ( $\Lambda$ P散乱)

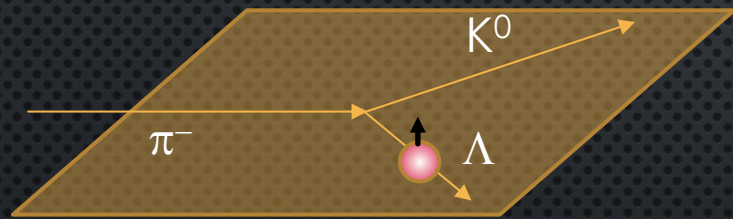
- ようやく、2体のYN相互作用は散乱データから導出しようという流れが、実験、理論の双方で出来てきた。
- $\Lambda$ N相互作用に関しては、 $\Lambda$ ハイパー核のデータから多くの情報が得られているが、依然として2体の相互作用に不定性は大きい
  - S, P, D波のそれぞれの相互作用はどうなっているか？
  - スピンの依存性はどうなっているか？
  - $\Lambda$ N- $\Sigma$ N COUPLINGは、2体でどうなっているのか？
- $\Lambda$ N相互作用をきっちり調べると、 $\Lambda$ ハイパー核の理解の基盤になる
  - 現実的な $\Lambda$ N相互作用が作られると、 $\Lambda$ ハイパー核を第1原理計算から計算しようという新しい理論の流れが、今後ますます進むはず。
  - $\Lambda$ NNの3体力を求めるための、よりどころになるのが2体力になる。



# 断面積に加えて、スピンの関わる測定量を

- 核力と同様にYN相互作用にも多様なスピン依存力(スピン・スピン力、スピン軌道力、テンソル力)がある。
- ハイペロンのスピンを制御することで、2体散乱のスピン依存力に新しい情報を与える。

ハイペロンは生成されるときに、生成平面の法線方向に自然と偏極されることが多い



これらの特徴を使うことでスピン観測量を測定する

ハイペロンは崩壊するとき、スピンの向きを教えてくれる

## ASYMMETRY IN HYPERON DECAY

amplitude : a      amplitude : b

$f(\theta)$  : Probability that proton is emitted to  $\theta$  from spin direction

$$f(\theta) = \left( \frac{|a|^2 + |b|^2}{2} \right) + \left( \frac{|a|^2 - |b|^2}{2} \right) \cos \theta$$

$$= \beta \cdot (1 + \alpha \cos \theta)$$

Parity is conserved  $\rightarrow a = b$   
isotropic angular distribution

Parity is NOT conserved  $\rightarrow a \neq b$   
asymmetric angular distribution

Hyperon decay with weak interaction

Relation of mirror reflection



# 断面積に加えて、スピンの関わる測定量を

- 核力と同様にYN相互作用にも多様なスピン依存力(スピン・スピン力、スピン軌道力、テンソル力)がある。
- ハイペロンのスピンを制御することで、2体散乱のスピン依存力に新しい情報を与える。

## 偏極分解能 (Analyzing power)

$\Lambda p$ 散乱の左右非対称度 ( $\Lambda$ のスピンの対して)

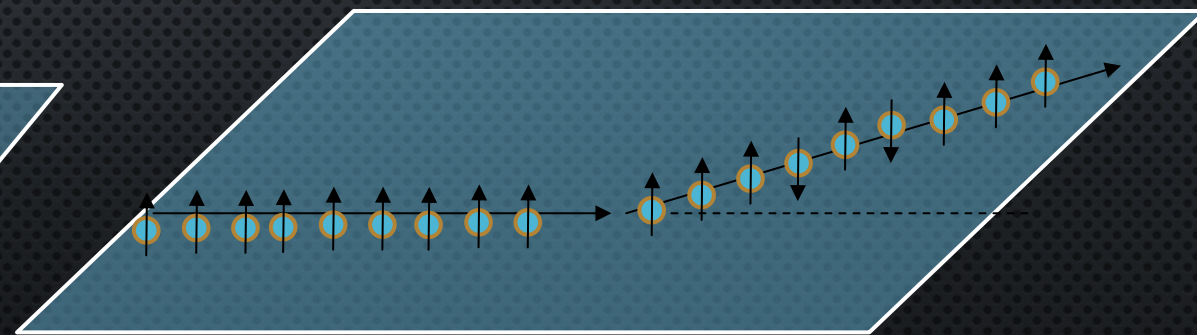
Left scattered event

Right scattered event



## 減偏極 (Depolarization)

$\Lambda p$ 散乱前後での $\Lambda$ の偏極の変化



このようなスピンに関するデータを沢山集めて、将来的には散乱の位相差の解析を行いたい



# Spin-dependent YN interaction from scattering

From S. Ishikawa et al.  
PRC 69, 034001 (2004)

$d\sigma/d\Omega$  and spin observables are essential to construct realistic YN interaction.

spin-independent    spin-spin    symmetric LS ( $\Delta S=0$ )    anti-symmetric LS ( $\Delta S=1$ )    Tensor

T matrix

$$\mathbf{M} = V_c + V_\sigma(\mathbf{s}_a \cdot \mathbf{s}_b) + V_{SLS}(\mathbf{s}_a + \mathbf{s}_b) \cdot \mathbf{L} + V_{ALS}(\mathbf{s}_a - \mathbf{s}_b) \cdot \mathbf{L} + V_T([\mathbf{s}_a \otimes \mathbf{s}_b]^{(2)} \cdot \mathbf{Y}_2(\hat{\mathbf{r}})),$$

Scalar amplitude

Vector amplitude

Tensor amplitude

$$U_\alpha \equiv \langle \mathbf{k}_f | V_c | \mathbf{k}_i \rangle, U_\beta \equiv \langle \mathbf{k}_f | V_\sigma | \mathbf{k}_i \rangle$$

$$S_{ALS} \equiv \langle \mathbf{k}_f | V_{ALS} L_1 | \mathbf{k}_i \rangle, S_{SLS} \equiv \langle \mathbf{k}_f | V_{SLS} L_1 | \mathbf{k}_i \rangle$$

$$T_j = \frac{1}{2} \langle \mathbf{k}_f | V_T Y_{2j-1} | \mathbf{k}_i \rangle$$

We are going to measure following observables.

Differential cross section

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) = \frac{1}{4} \text{Tr}(\mathbf{M}\mathbf{M}^\dagger) = |U_\alpha|^2 + \frac{3}{16}|U_\beta|^2 + \frac{1}{2}(|S_{SLS}|^2 + |S_{ALS}|^2) + \frac{1}{4}|T_1|^2 + \frac{1}{2}(|T_2|^2 + |T_3|^2).$$

Analyzing power  
(Polarization)

$$A_y(Y) = -\frac{1}{\sqrt{2\sigma(\theta)}} \text{Im} \left\{ (U_\alpha + \frac{1}{4}U_\beta)^* S_{SLS} + (U_\alpha - \frac{1}{4}U_\beta)^* S_{ALS} - \frac{1}{2}T_\alpha^* (-S_{ALS} + S_{SLS}) \right\},$$

Depolarization

$$D_y^y = \frac{1}{\sigma(\theta)} \text{Re} \left\{ \frac{1}{2\sqrt{3}} \left( U_0 + \frac{1}{\sqrt{3}}U_1 \right)^* U_1 + \frac{1}{2} \left( U_0 - \frac{1}{\sqrt{3}}U_1 \right)^* \left( \frac{1}{\sqrt{6}}T_1 + T_3 \right) - S_1^* S_2 + \frac{1}{2}|S_3|^2 - \frac{1}{\sqrt{6}}T_1^* \left( \frac{1}{\sqrt{6}}T_1 - T_3 \right) - \frac{1}{2}|T_2|^2 \right\}.$$

13

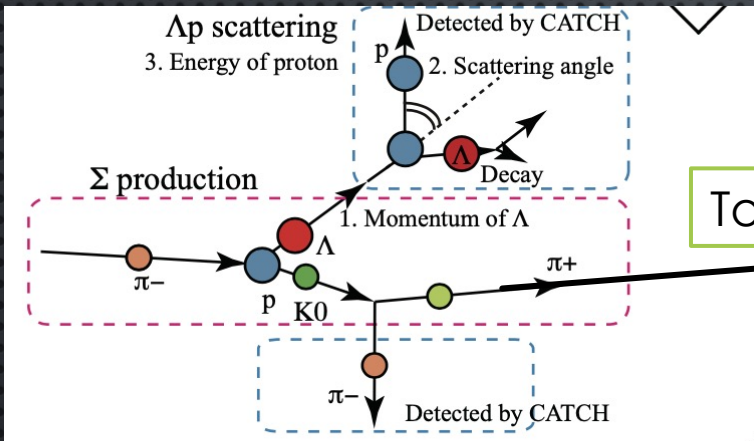
Number of observables is still limited to determine each component separately.  
But measurements of many observables contribute to impose constraints on YN theoretical models.



# $\Lambda$ SCATTERING EXPERIMENT AT K1.1 BEAM LINE

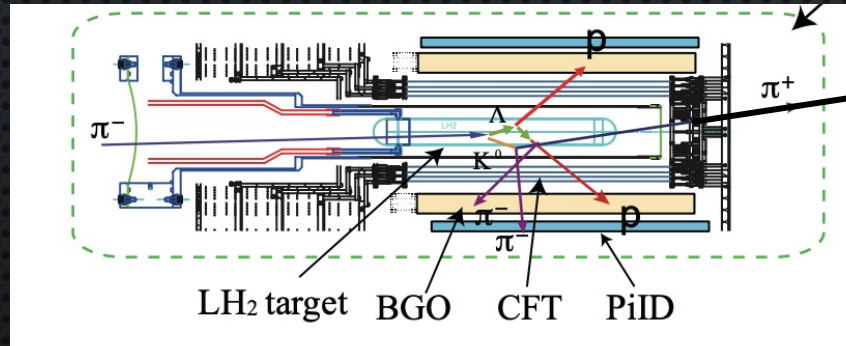
## $\Lambda$ beam identification

Tagged by  $\pi^-p \rightarrow K^0\Lambda$  reaction at  $p=1.05$  GeV/c



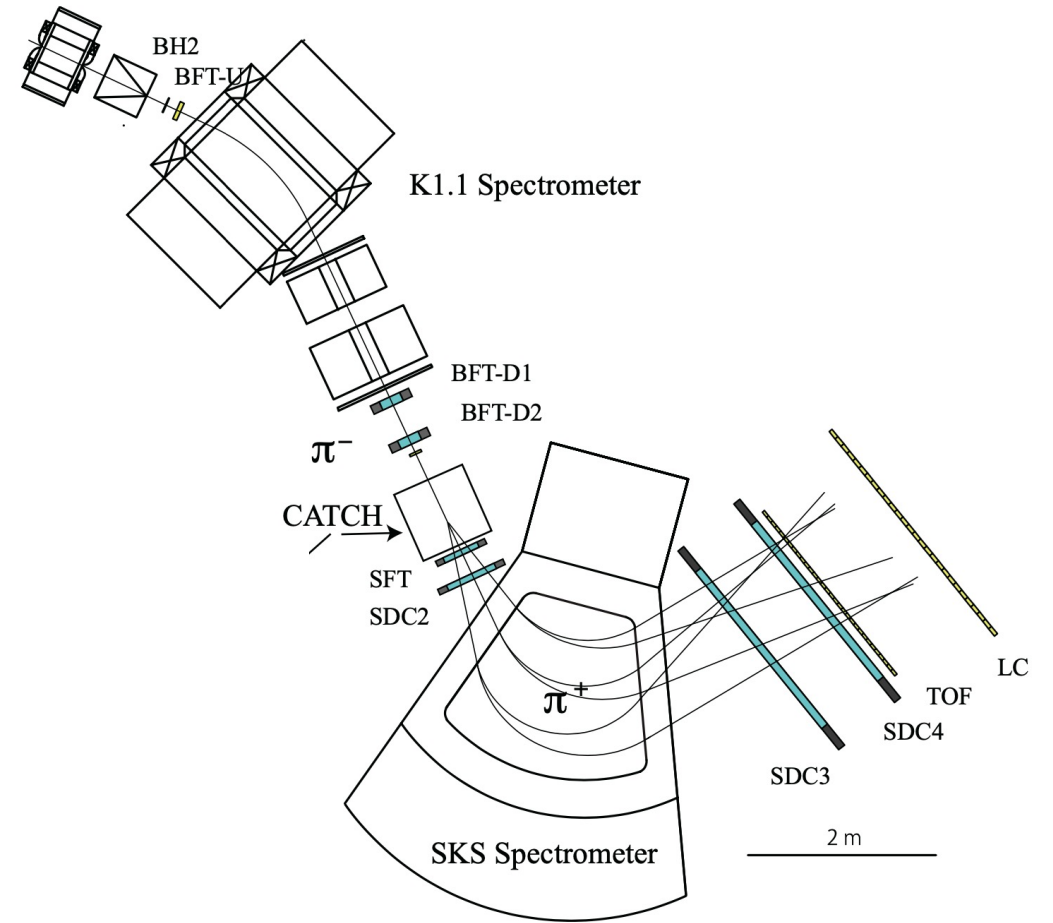
To SKS spectrometer

SKS spectrometer



## $\Lambda$ p scattering identification

Detected by CATCH



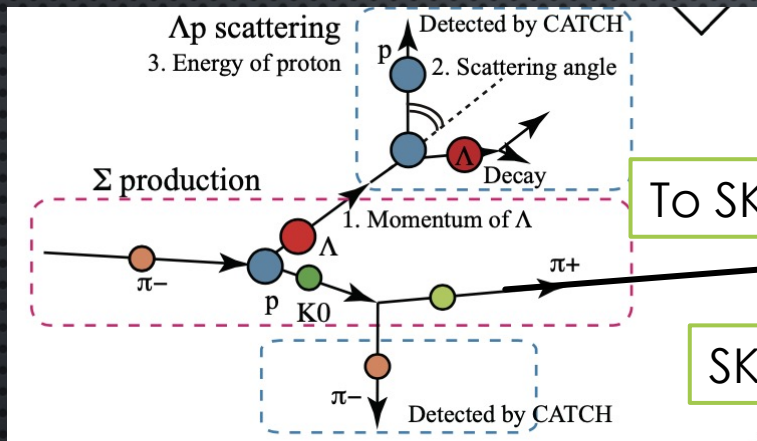


# $\Lambda$ SCATTERING EXPERIMENT AT K1.1 BEAM LINE

## $\Lambda$ beam identification

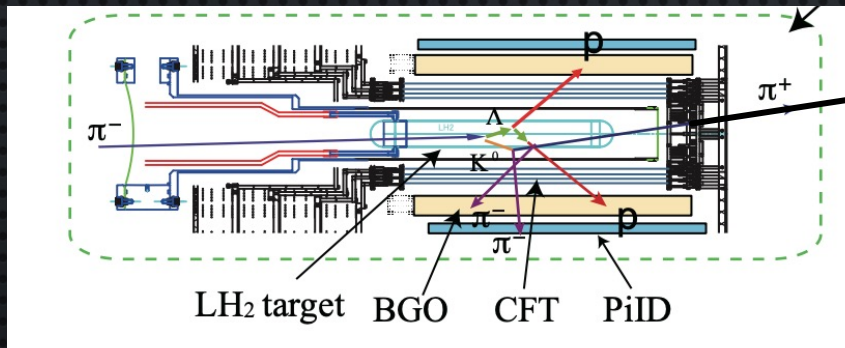
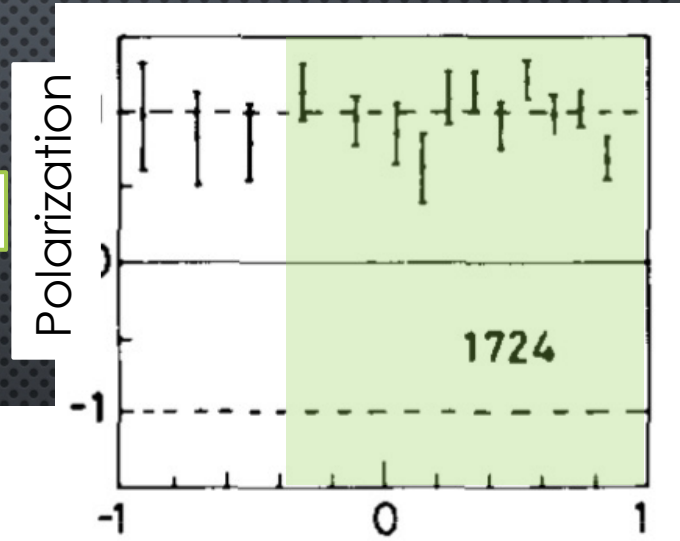
Tagged by  $\pi^-p \rightarrow K^0\Lambda$  reaction at  $p=1.05$  GeV/c

High spin polarization of  $\Lambda$  for  $\Lambda$  production plane  
 R.D. Baker et al. , Nucl. Phys. B141 (1978) 29



To SKS spectrometer

SKS spectrometer

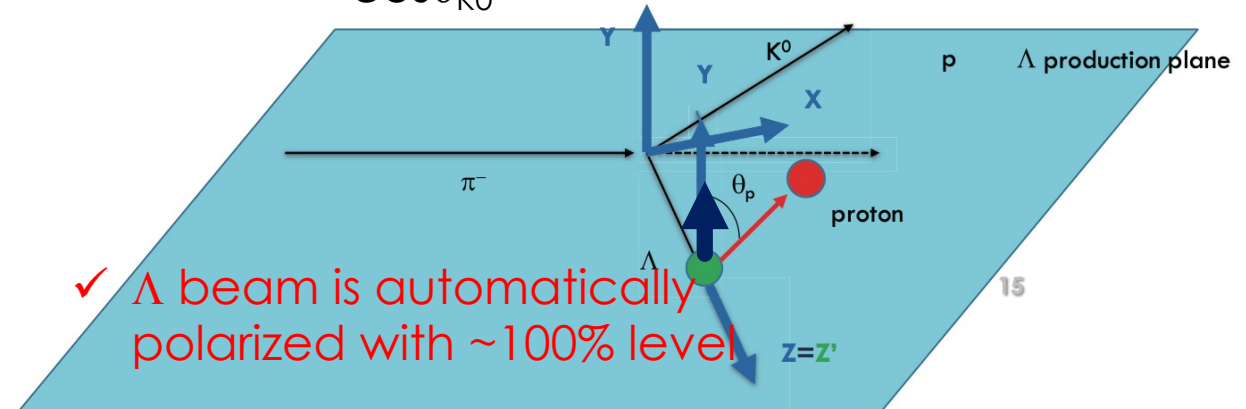


$\Lambda$ p scattering identification

Detected by CATCH

$\cos\theta_{K^0}$

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= \mathbf{P}_{\pi^-} \times \mathbf{P}_{K^0} \\ \mathbf{X} &= \mathbf{Y} \times \mathbf{P}_{\Lambda} \\ \mathbf{Z} &= \mathbf{P}_{\Lambda} \end{aligned}$$



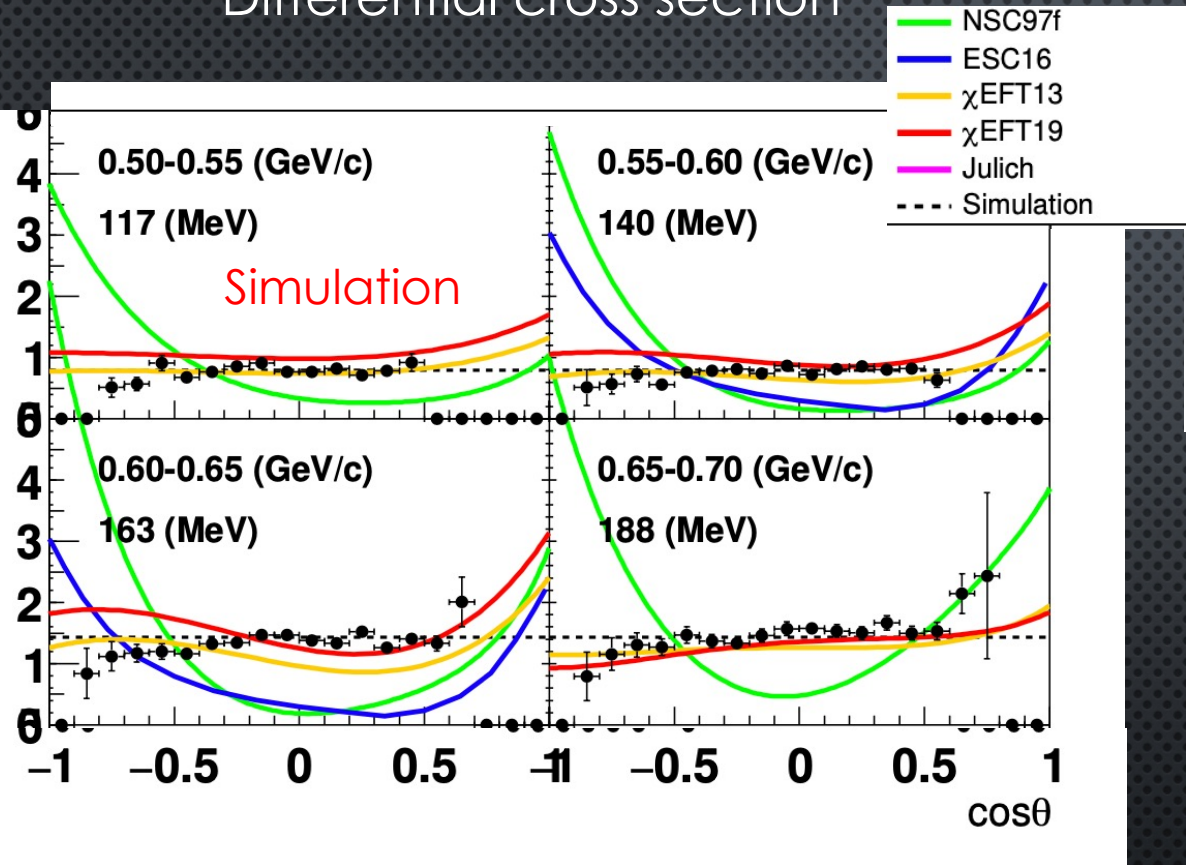
✓  $\Lambda$  beam is automatically polarized with  $\sim 100\%$  level



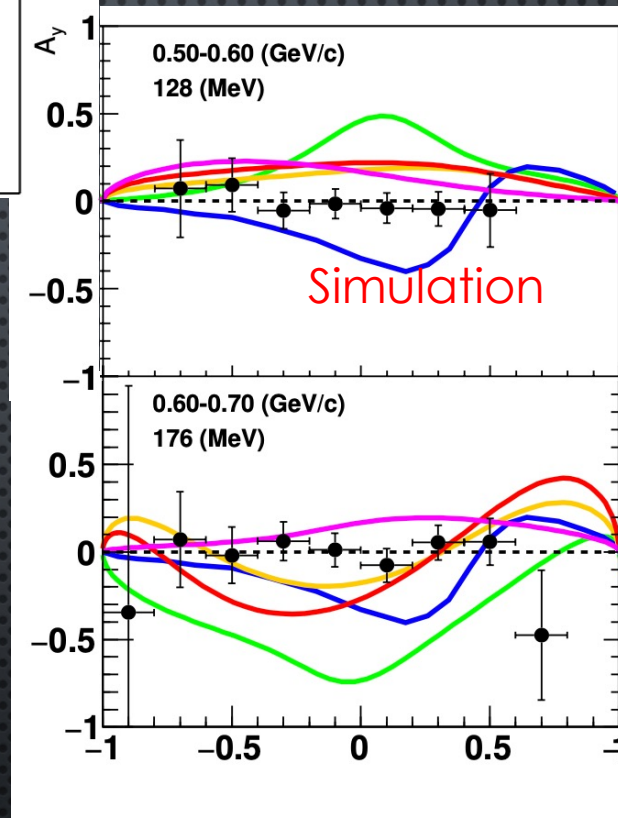
# $D\Sigma/D\Omega$ AND SPIN OBSERVABLES IN $\Lambda p$ SCATTERING

Simulated results w/ 100M  $\Lambda$

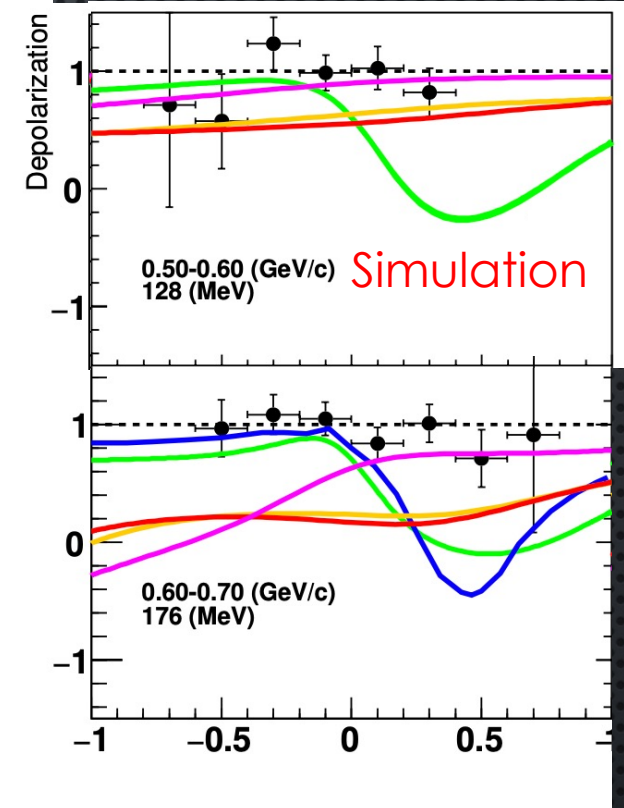
Differential cross section



Analyzing power



Depolarization ( $D_y^y$ )



**No differential observables of  $\Lambda p$  scattering in present.**

--> Large uncertainty in P-wave and higher-wave interaction.

Theoretical prediction shows quite different angular dependence in  $d\sigma/d\Omega$ ,  $A_y$  and  ${}_{18}D_y^y$

These new scattering data becomes essential constraint to determine spin-dependent  $\Lambda N$  interaction

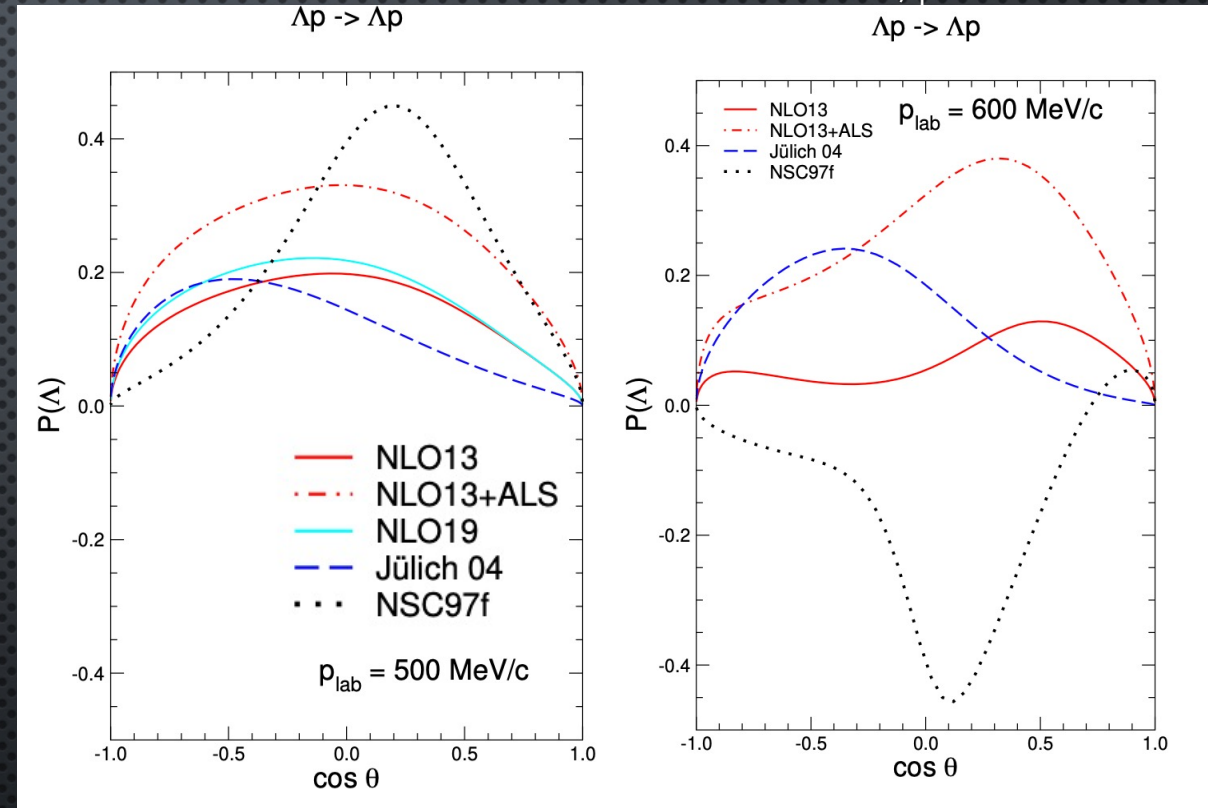
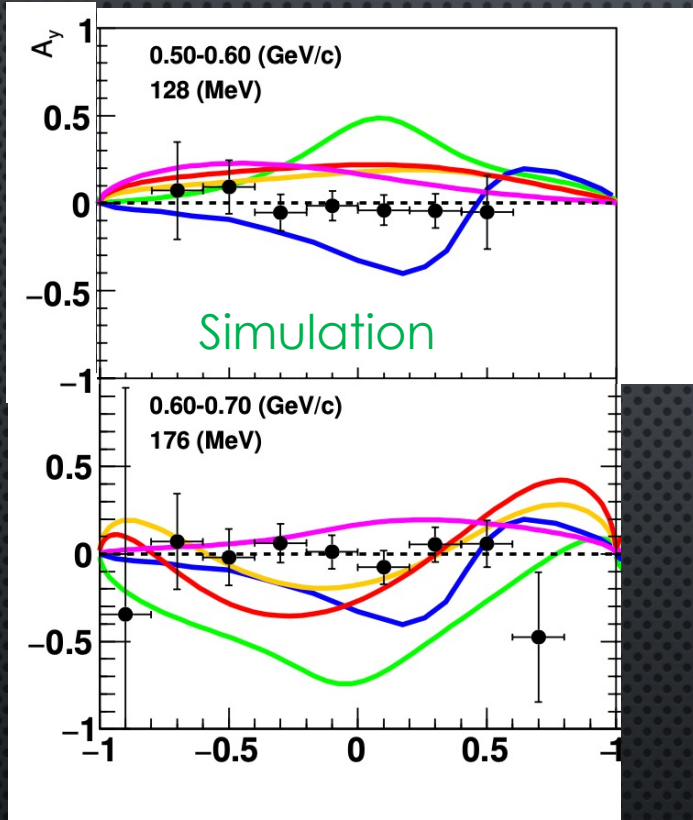


# ANALYZING POWER AND ANTI-SYMMETRIC LS FORCE

$A_y$  with and without ALS in chiral EFT

J. Haidenbauer, private communication

100M  $\Lambda$  beam



$$A_y(Y) = -\frac{1}{\sqrt{2}\sigma(\theta)} \text{Im} \left\{ (U_\alpha + \frac{1}{4}U_\beta)^* S_{SLS} + (U_\alpha - \frac{1}{4}U_\beta)^* S_{ALS} - \frac{1}{2}T_\alpha^* (-S_{ALS} + S_{SLS}) \right\},$$

→ Sensitive Anti-symmetric LS force + ...

By adding ALS force,  $A_y$  can be changed rather drastically (There is less change in  $d\sigma/d\Omega$  in chiral EFT)

Our data can constrain size of anti-symmetric LS force, which is never constrained from scattering data



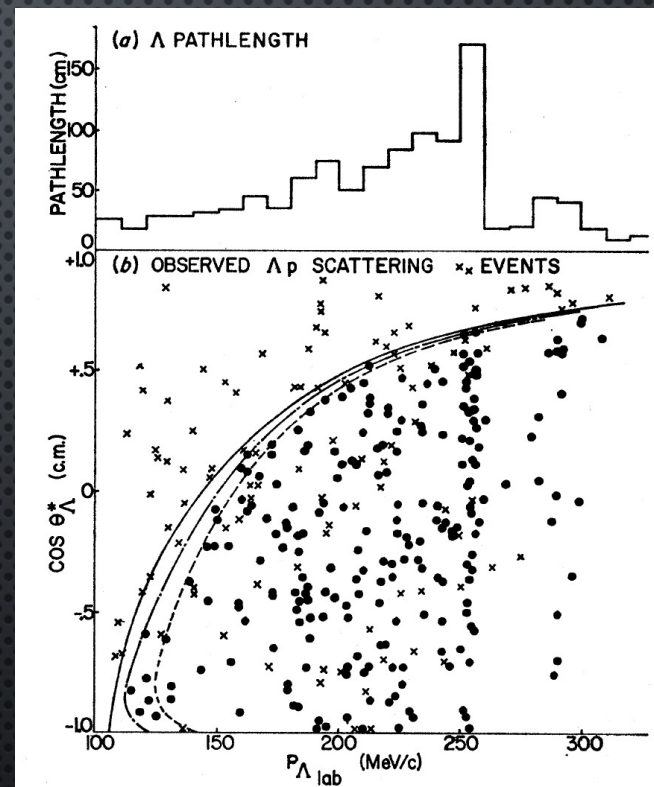
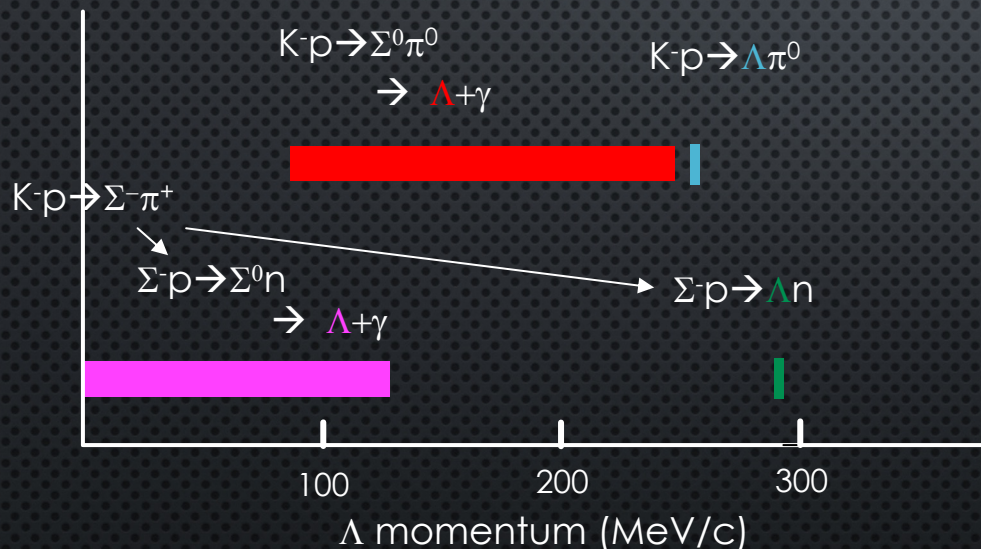
# 次のステップは？

- $\Lambda$ D散乱
- 低エネルギーの $\Upsilon$ P散乱 (現代のバブルチェンバー実験)
- 高エネルギーの $\Upsilon$ P散乱 (本多@HIGH-P)
- $\Xi^-$ P,  $\Xi^0$ P散乱による $\Xi$ N相互作用のアイソスピン依存性の解明



# 低エネルギーの $\Lambda p$ 散乱の測定

- 過去の水素バブルチェンバーは強力な手法であった
  - STOPPED K-で効率的にハイペロンを作る
  - 4 $\pi$ 検出器でイベントを全て検出できる
  - $\Lambda$ の運動量は $0 < p \text{ (MeV/c)} < 300$



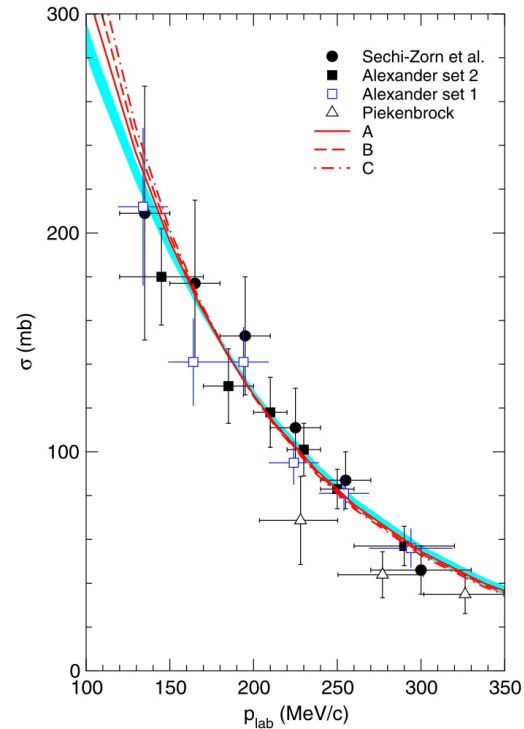
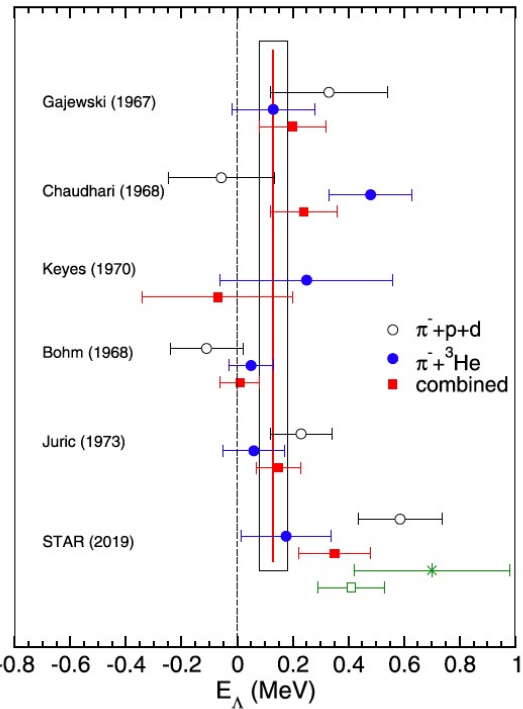
低エネルギーのYN散乱データを精度良く測り直すことは重要。  
 しかし、femtoscropyによるデータも高統計で出てくることを考えると、  
 断面積だけではなくスピンの情報を得ることが重要。



# $\Lambda N$ 相互作用の $^3S_1$ と $^1S_0$

H. Le et al, Phys. Lett. B 801 (2020) 135189

Slide from Haidenbauer



Shell model: role of the spin-dependence of the  $\Lambda N$  potential for the binding energies of s-shell hypernuclei

$$\begin{aligned}
 {}^3_{\Lambda}\text{H} : \tilde{V}_{\Lambda N} &\approx \frac{3}{4}V_{\Lambda N}^s + \frac{1}{4}V_{\Lambda N}^t \\
 {}^4_{\Lambda}\text{He} (0^+) : \tilde{V}_{\Lambda N} &\approx \frac{1}{2}V_{\Lambda N}^s + \frac{1}{2}V_{\Lambda N}^t \\
 {}^4_{\Lambda}\text{He} (1^+) : \tilde{V}_{\Lambda N} &\approx \frac{1}{6}V_{\Lambda N}^s + \frac{5}{6}V_{\Lambda N}^t \\
 {}^5_{\Lambda}\text{He} : \tilde{V}_{\Lambda N} &\approx \frac{1}{4}V_{\Lambda N}^s + \frac{3}{4}V_{\Lambda N}^t
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} {}^3_{\Lambda}\text{H} \\ {}^4_{\Lambda}\text{He} (0^+) \\ {}^4_{\Lambda}\text{He} (1^+) \\ {}^5_{\Lambda}\text{He} \end{aligned}} \right\} \text{近似で表される}$$

$$\sigma_{\Lambda p} = \frac{1}{4}|f_{\Lambda p}^s|^2 + \frac{3}{4}|f_{\Lambda p}^t|^2$$

少なくとも2つの測定量が必要

recall: we use different spin-dependence of  $\sigma_{\Lambda p}$  and  $B({}^3_{\Lambda}\text{H})$  to fix the relative strength of the  $^1S_0$  and  $^3S_1$   $\Lambda N$  interactions

hypertritonの束縛エネルギーは？  
 → E07の全面スキャンで精度良い値  
 が得られると期待  
 $^1S_0$ はもっと強い？

$^1S_0$ の散乱長を変化させても $\Lambda p$   
 の断面積にはあまり効かない

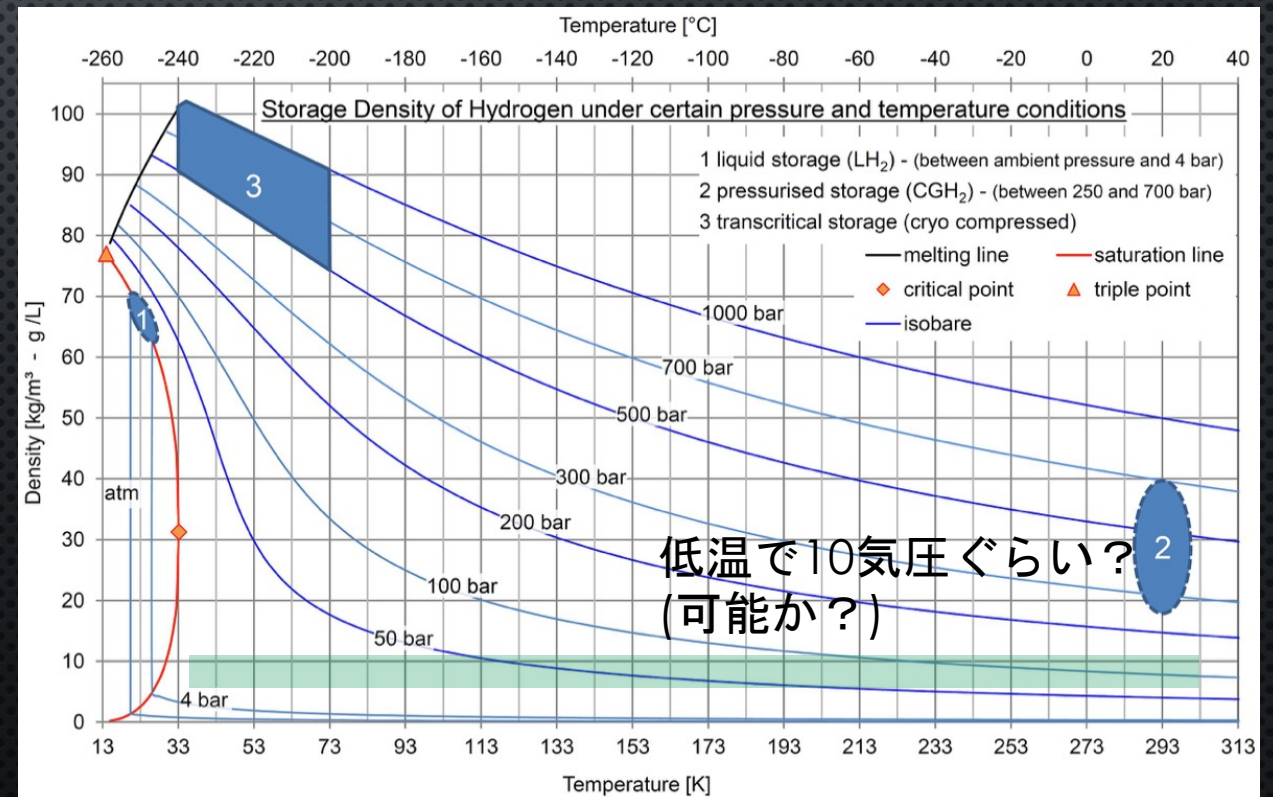
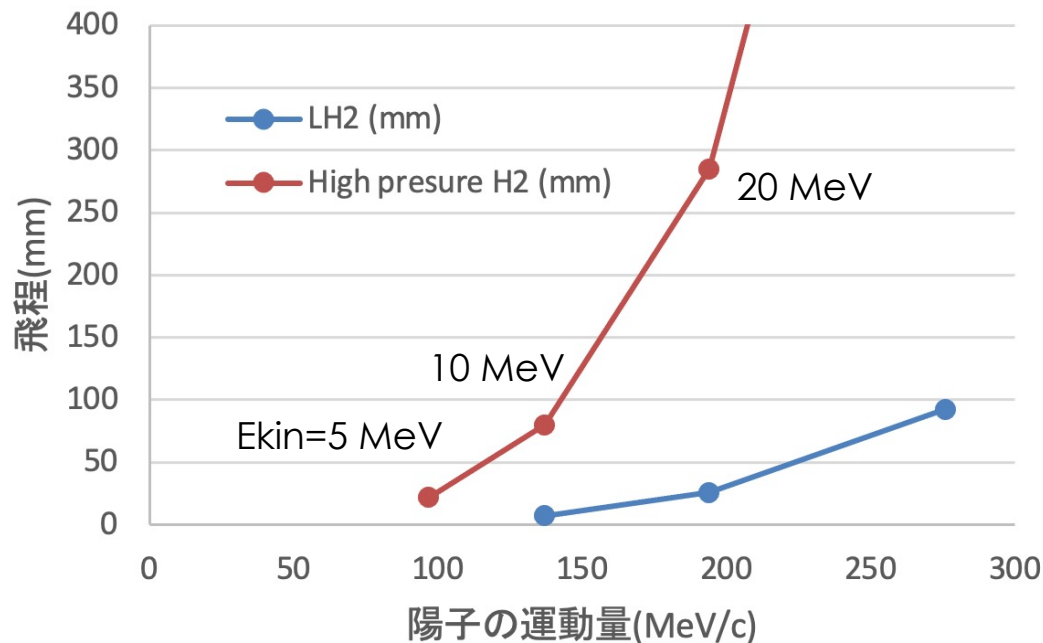
低エネルギーの $\Lambda p$ 散乱から $^3S_1$ と $^1S_0$ が決められないか？ --> 終状態のスピンの測定(スピン相関係数)が必要



# 高圧水素TPCを用いた低エネルギー $\Delta P$ 散乱実験のアイデア

- 低エネルギー散乱のための実験的な要求
  - 低エネルギーの陽子の軌跡が同定できること  
→ 液体水素( $\rho=0.0708\text{g/cm}^3$ )では密度が高すぎる
  - 散乱するために十分な物質質量があること  
→ 低エネルギーであると断面積が100~300MBと高くなるので、液体水素の1/10ぐらいの密度でなんとかなる

## 陽子の飛程





# 高圧水素TPCを用いた低エネルギー $\Delta P$ 散乱実験のアイデア

## Status of H<sub>2</sub> TPC

### ● H<sub>2</sub> TPC

- TPC operated in ionization mode without gas amplification
  - MAYA experiment : scattering with unstable nuclei
  - $\mu$ CF experiment
- TPC operated with gas amplification
  - Fermilab E612 : cylindrical TPC operating in hydrogen at a pressure of 15 atm
  - MuCap TPC : operate with gas amplification in pure hydrogen
  - MuSun experiment : cryogenic TPC operating at gas densities 5% of LH<sub>2</sub> at 30 K

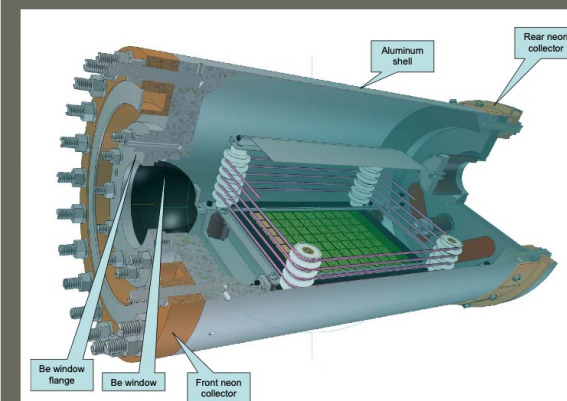
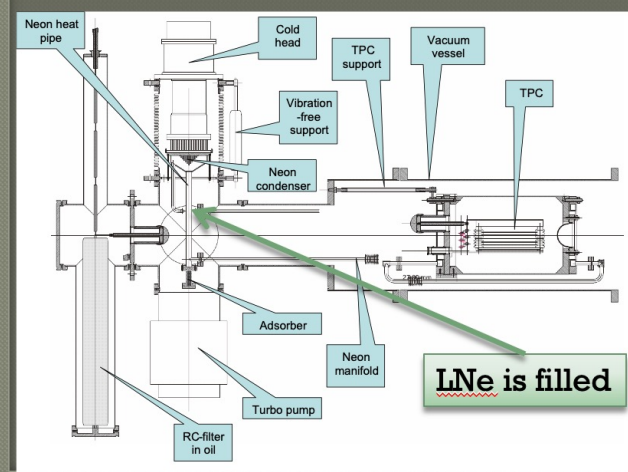
## cryo-TPC (MuSun)

### ● D<sub>2</sub> TPC @ 30 K

Ne is liquefied and liquid Ne is circulated to cool down the TPC vessel

Operation in ionization chamber (w/o gas amplification)

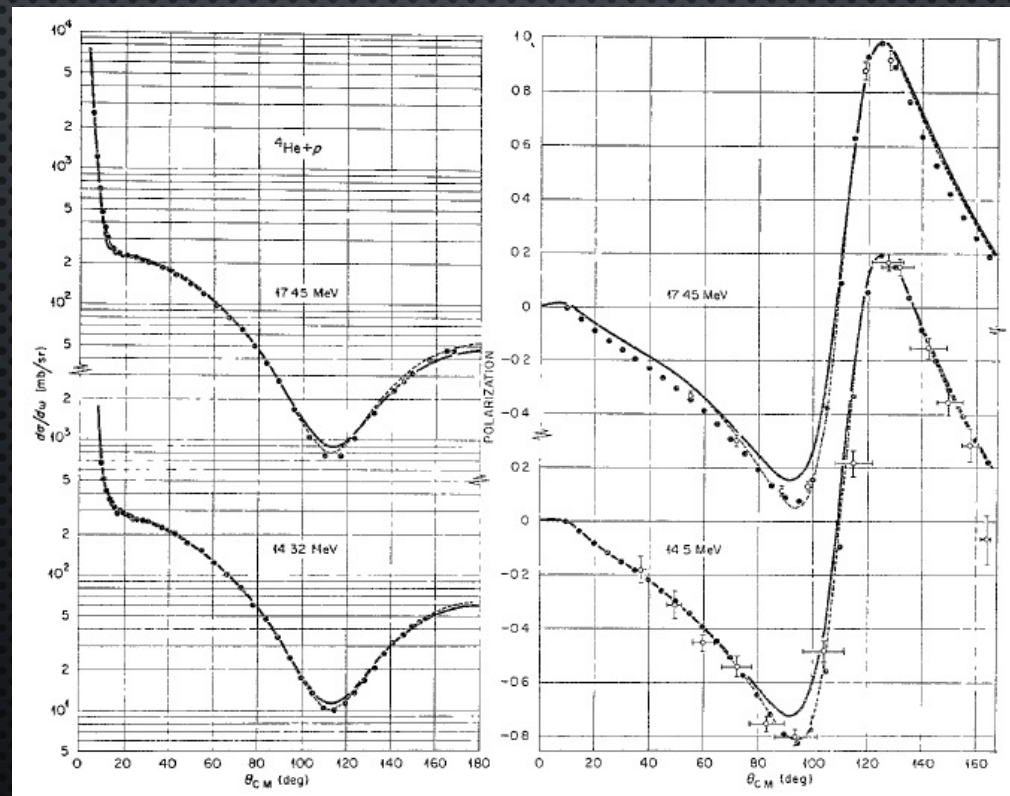
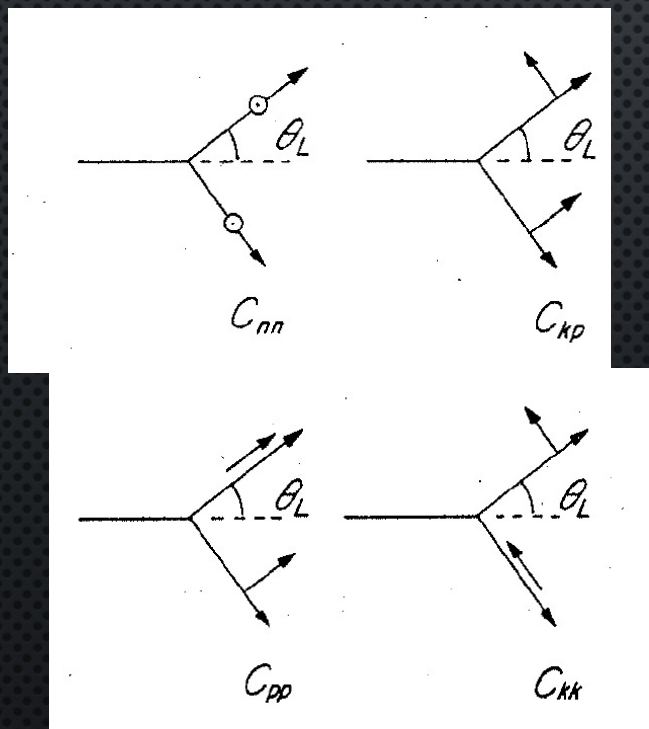
Ne : boiling temperature 27 K





# 高圧水素TPCを用いた低エネルギー $\Lambda$ P散乱実験のアイデア

- 散乱後のスピン相関係数を測る
    - 散乱Lと反跳陽子のスピン偏極を測る必要がある
      - $\Lambda$ はDECAY ASYMMETRYで偏極は分かる
      - 反跳陽子はもう一度散乱させる必要がある
- 25 MEV以下では $^4\text{He}$ がANALYZERとして用いられるようだ(30MEV以上は $^{12}\text{C}$ )

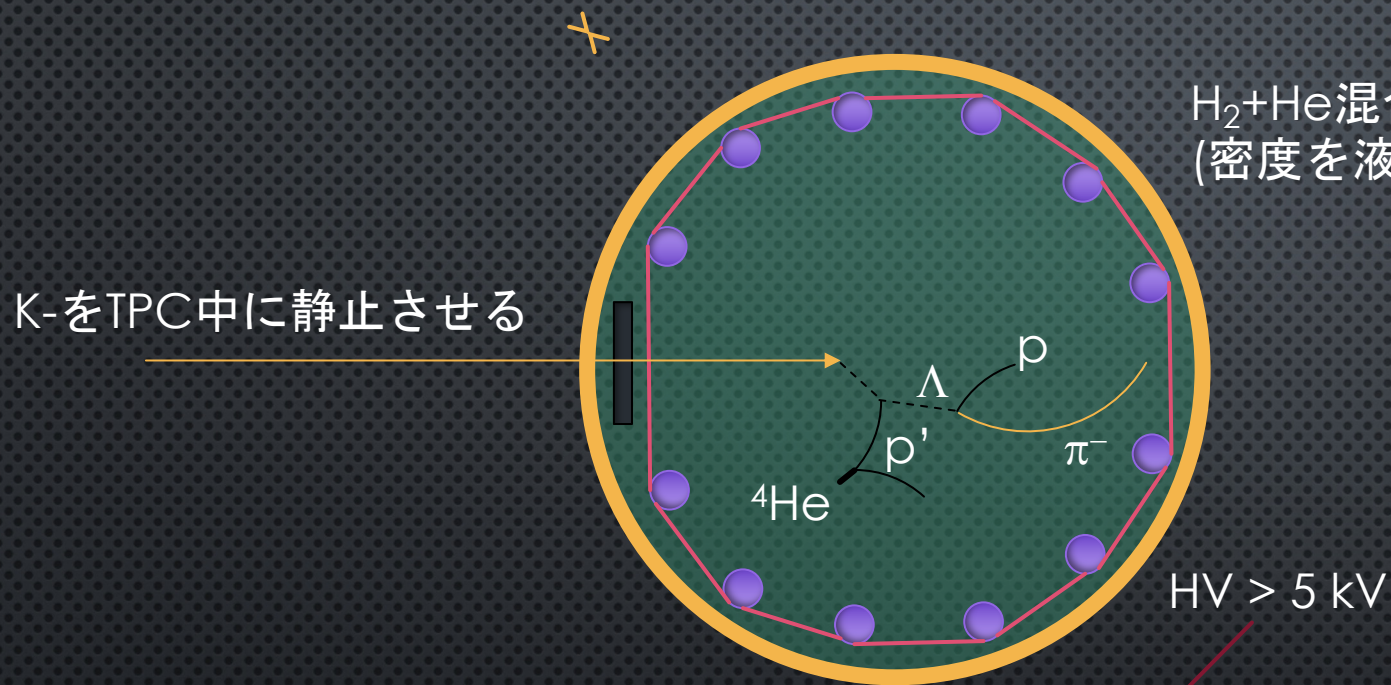


TPCのガスを混合ガスにする  
 $\text{H}_2$ ガス  
 +  
 $\text{He}$ ガス

ガスを混ぜてTPCとして  
 動くかは不明



# 高圧水素TPCを用いた低エネルギー $\Lambda$ P散乱実験のアイデア



起こりうる反応

primary散乱

- $\Lambda$ p散乱
- $\Lambda$ -<sup>4</sup>He散乱

secondary散乱

- p-<sup>4</sup>He散乱
- p-p散乱

基本的には  
粒子識別と  
運動学で分離する





# 低エネルギー $\Lambda$ p散乱実験の収量の見積もり

$\Lambda$ p散乱の数の見積もり	
K-ビーム強度 (/spill)	150k (K1.1BRの値を用いる)
K- stopping probability	$10^{-3}$ (仮定、ちゃんとした計算が必要)
水素ガスの密度	$0.00708 \text{ g/cm}^3$
Stop K-当たりの $\Lambda$ 生成率	100%
$\Lambda$ の平均自由行程	1.76 cm (250 MeV/cのときの値)
$\Lambda$ p散乱断面積	100 mb
1日当たりの $\Lambda$ p散乱の数	2070

鍵となるのはやはりK-をどれくらい効率的に止められるか。  
経験のある方にコメントいただけるとありがたい。

反跳陽子のp-4He散乱数の見積もり	
Heガスの密度	$0.00708 \text{ g/cm}^3$
反跳陽子の平均飛程	5.7 cm (125 MeV/cの陽子の飛程)
p-4He弾性散乱断面積	100 mb (仮定)
Rescatteringの確率	$2.4 \times 10^{-3}$ (400個の反跳陽子に対して1度のrescattering)
1日当たりのrescatteringの数	5

断面積を求めるには十分な数

double scatteringを測定するには出来ればあと1桁あげたい



# まとめ

- YN散乱はようやく可能な実験になってきた
- J-PARC E40の結果
  - $\Sigma^-P$ 弾性散乱,  $\Sigma^-P \rightarrow \Lambda N$ 反応 : FSS2, CHIRAL EFTは比較的データを再現。NIJMEGENはESCよりもNSC97Fの方がデータを再現する方向にある
  - $\Sigma^+P$ 弾性散乱 : FSS2が预言するほど断面積は大きくない。むしろNIJMEGENの断面積の方に近い。現在位相差解析を行なっている。
- 偏極 $\Lambda$ ビームを用いた $\Lambda P$ 散乱実験(J-PARC P86)
  - $0.4 < p_L < 0.8$  GeV/cでのDIFFERENTIAL OBSERVABLEの測定から $\Lambda N$ 相互作用モデルを改善するためのデータを与える
  - DIFFERENTIAL CROSS SECTION, ANALYZING POWER, DEPOLARIZATION
- 現代的なBUBBLE CHAMBERでの低エネルギーYP散乱のアイデア
  - 高圧(重)水素-ヘリウムTPCで微分断面積に加えてスピン相関係数の測定ができないか？