

超高強度2次ビームで展開する精密ストレンジネス核分光

野海博之, 大阪大学 核物理研究センター

ストレンジネス(フレーバー)核物理の取り組み

Q: “核力” について $SU_F(3)$ の枠組みで理解できるか
とくに, バリオン間相互作用の **短距離部分** の解明
クォーク自由度 の重要性

Q: “核物質” についての理解はどこまで深まるか
とくに, **高密度核物質** の性質の解明
中性子星はハイペロン星か?
クォーク星、ストレンジクォーク物質は存在するか?

Q: 核媒質中でハドロンの性質はどのように変化するのか
カイラル対称性の(部分的)回復との関係
クォークの凝縮のなぞにせまれるか

J-PARCでは、

K中間子ビームを用いた $S=-2$ 核の研究

を錦の御旗にして関連する研究とともに推進

K1.8とK1.8BR (K1.1)

$\sim 10^7$ Hz のKビーム

○ストレンジネス核分光実験はビーム強度の計数限界($\sim 10^7$ Hz)を
迎えている。

この限界を超え、ストレンジネス核分光研究に質的な変化をもたらす
(期待)

○J-PARCはこの限界を超えるビーム強度を供給できる。

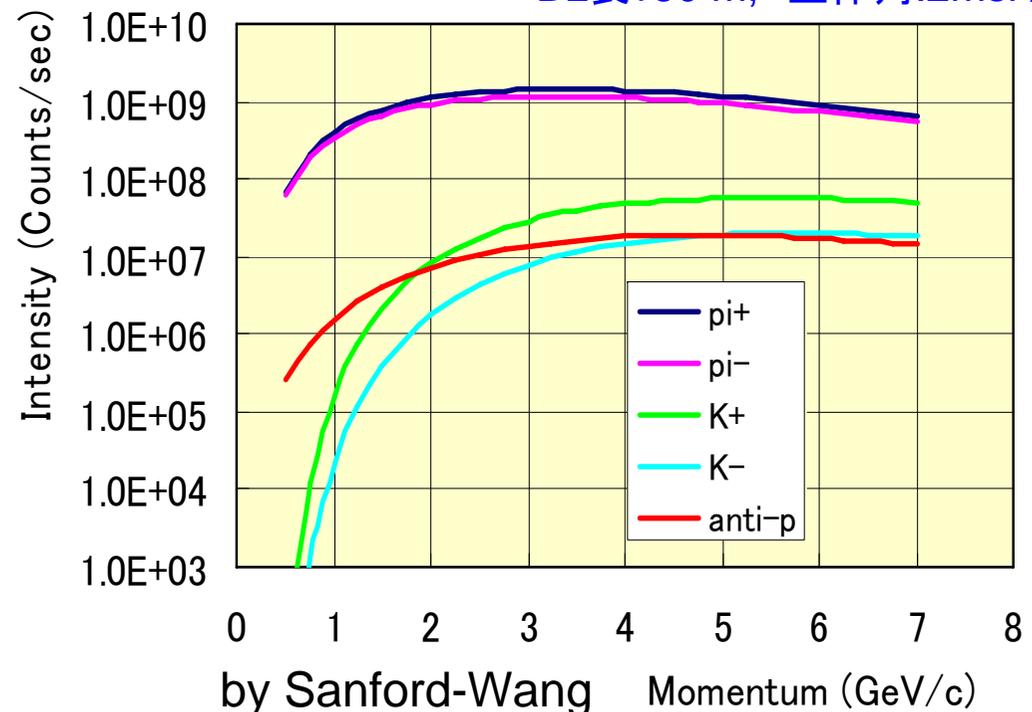
pion: $10^8 \sim 10^9$ Hz

pbar: 10^7 Hz

更なる増強も期待できる

100倍の効率、高統計による
高精度、高感度実験
(統計精度、分解能の向上)

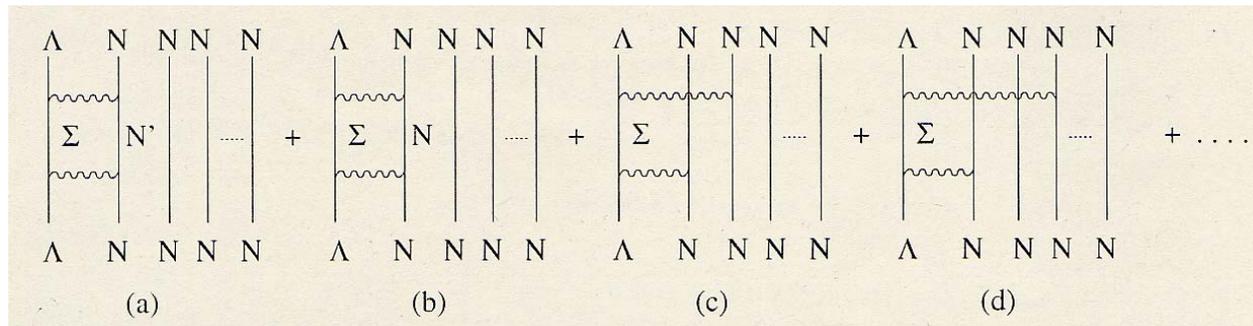
2次ビーム強度
50GeV-15 μ A on Ni-54mm,
BL長: 50 m, 立体角: 2msr%



残された課題－1

YN、YA相互作用

✓ Λ N- Σ N結合の効果(多体効果)



coherent $\Lambda \rightarrow \Sigma$
w/o exciting N
(b)~(d)...

No effect in T=0

中性子過剰ハイパー核構造

→ 味村

1/1000の生成率(DCX/NCX)

高効率(>100倍)、かつ、高分解能(<1MeV)が求められる。

✓ Σ 核ポテンシャルの詳細

斥力の大きさ?

LSポテンシャルの大きさ?

周辺部の形状? (Σ -原子軌道)

高効率かつ高分解能が必要。

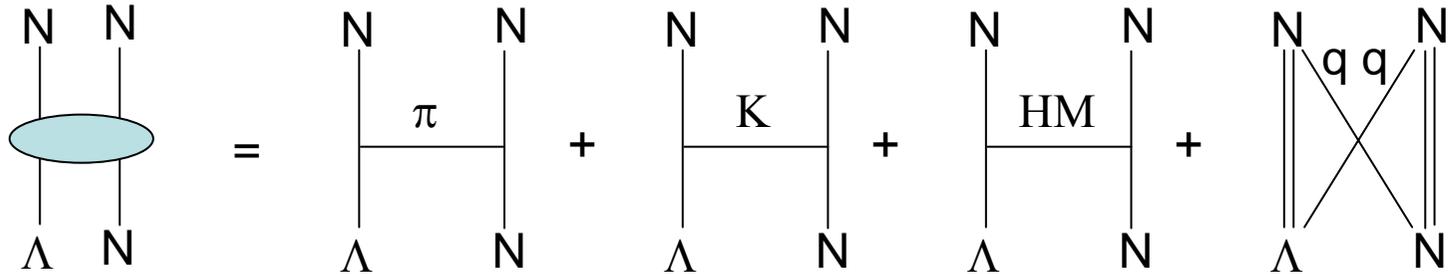
残された課題-2

Λ ハイパー核の弱崩壊機構

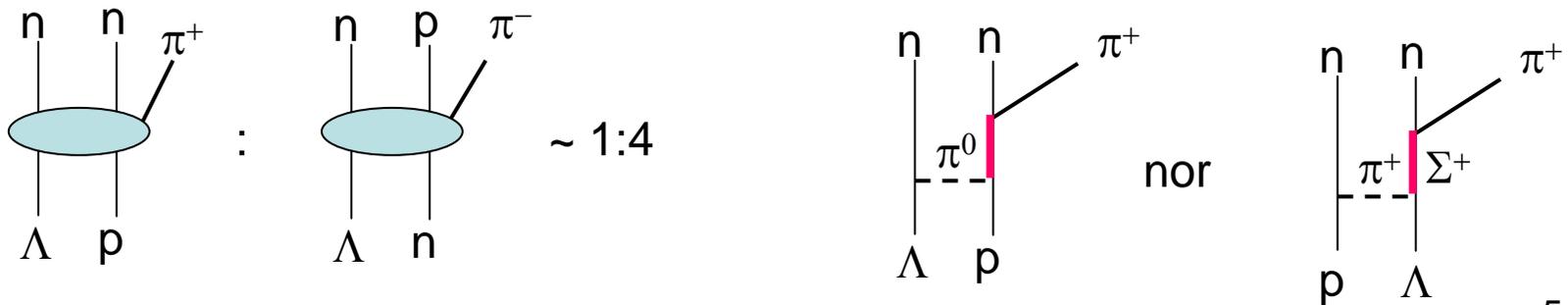
非中間子崩壊においても $\Delta I=1/2$ 規則は成立しているか。
短距離部分の効果:クォーク交換の寄与はあるのか。

✓ ハイペロン核子弱相互作用のスピンアイソスピン構造: → 味村

$\Delta I=1/2$ 規則が成立すると $\Gamma_p/\Gamma_n(^4_\Lambda\text{H})^* \Gamma_p/\Gamma_n(^4_\Lambda\text{He})=2\Gamma_p/\Gamma_n(^5_\Lambda\text{He})$



✓ π^+ 弱崩壊: $\Delta I=3/2$ 振幅に敏感, クォーク過程が関与 (Oka et al.)



Soft pion emission Weak Decay

small? for S-wave, soft π^+ emission

野心的、挑戦的な課題－1

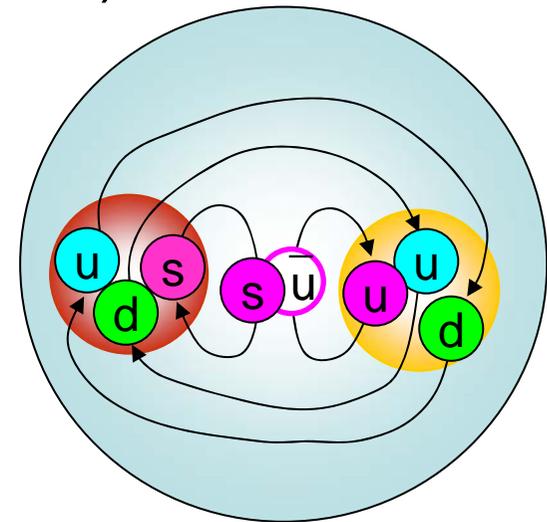
✓ Λ ハイパー核の電磁気能率測定

- 核媒質の変化：芯偏極
- 交換電流 (媒質中でのバリオン間相互作用)
K-ex., $\Lambda\Sigma$ coupling effect (Isospin $\neq 0$)
- 核媒質中でのハドロンの変化

これらの効果を見るには
数%の精密測定が必要か？

S. Takeuchi et al., NPA481, 639(1988)

K. Saito et al., NPA625, 95-106(1997)



間接的測定 B(M1), H. Tamura et al.

直接的測定 → 野海

野心的、挑戦的な課題－2

✓ チャームド核

s	⇒	c
\bar{K}		D
Λ		Λ_c
$\bar{K}N, \Lambda(1405)$		$DN, \Lambda_c(2595)$



cを核媒質中に入れたらどうなるか？

どうやって作り、どうやって同定するか。

→ 常見、野海

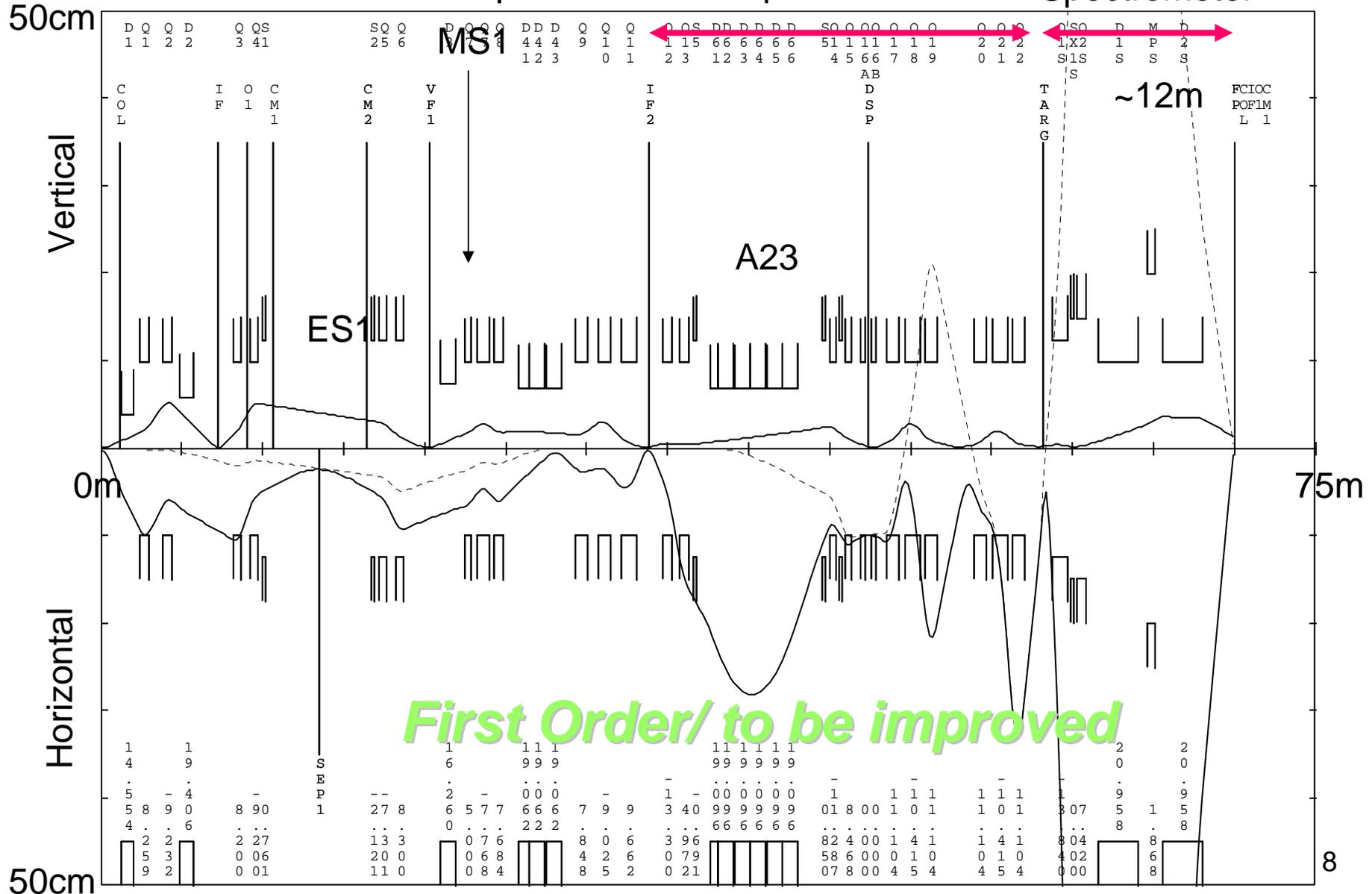
Momentum Matching Beam line and Spectrometer System

QQDQD

Beam Envelope

Dispersive beam

Spectrometer



Extension of Hadron Hall

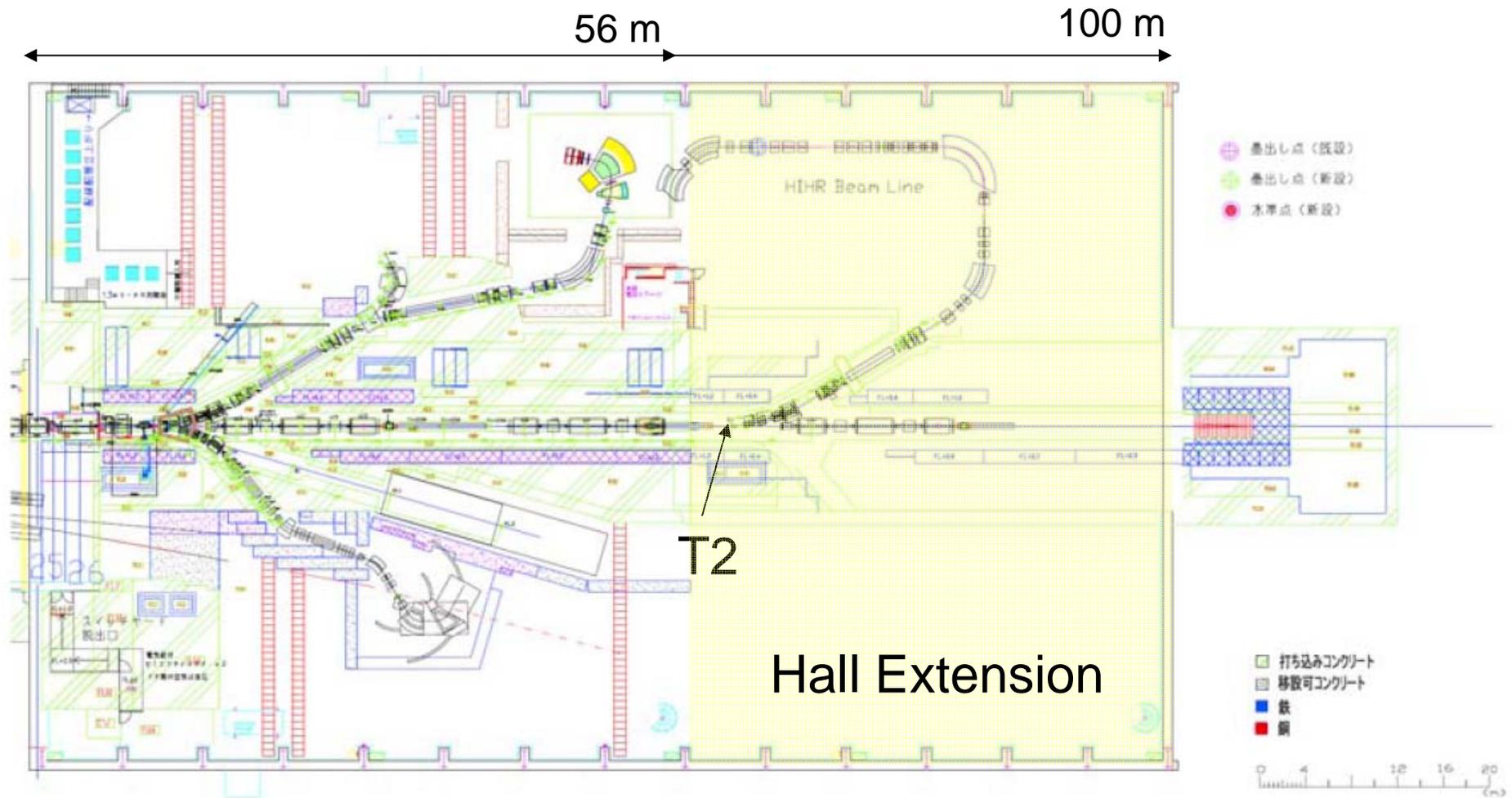


Fig. 1: An example of layout plan of High Intensity, High Resolution (HIHR) Beam Line connected to the T2 target in the extended Hadron Experimental Hall.

コメント1

Λハイパー核の電磁気能率測定

Electromagnetic Property of Hypernucleus

...provides

more detail/direct information on the dynamics of hadrons in nuclear medium.

The magnetic moment, μ , is described as

$$\mu = \langle \psi^*(m=J) | M_z | \psi(m=J) \rangle$$

$$M = \int \mathbf{r} \times \mathbf{j}(\mathbf{r}) d\mathbf{r}$$

\mathbf{j} : represents the *current* distribution (of constituents) in the nucleus

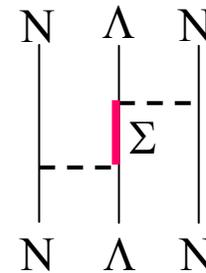
M : magnetic dipole operator, $M(M1)$

Naive Picture: single-particle orbital motion + Intrinsic spin

$$M(M1) \sim \sum_i^A (g_\ell^i \ell_i + g_s^i \mathbf{s}_i) \quad \text{i.e. Schmidt value}$$

Correction:

- medium modification by implication of Λ core polarization
- exchange current (BB interaction in medium)
 $\Lambda\Sigma$ coupling effect (Isospin $\neq 0$)
- hadron modification in medium



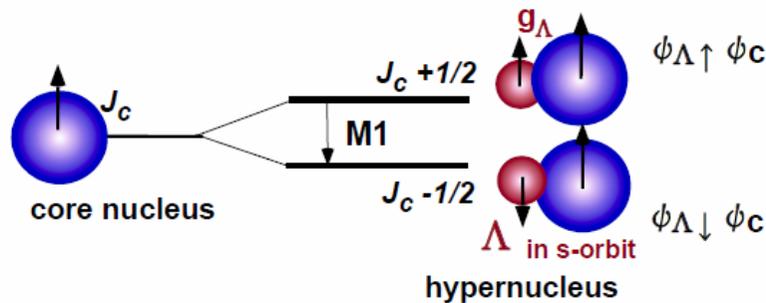
Approach to the Λ hypernuclear Magnetic Moment:

✓ Indirect measurement $\rightarrow \tau, B(M1)$

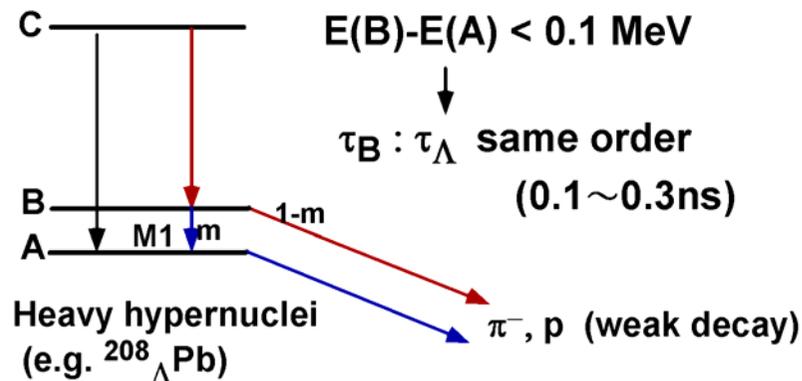
proposed by H. Tamura (Tohoku) et al.

● Doppler Shift Attenuation Method:

$$B(M1) \sim |\langle f | \mu_z | i \rangle|^2 \sim (g_C - g_\Lambda)^2$$

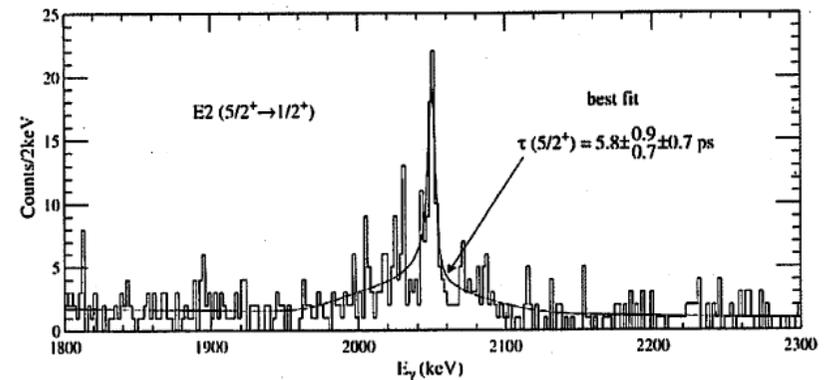


● γ -Weak Coincidence Method:



K. Tanida et al. PRL86, 1982(2001)

c.f. $\tau^{-1} \sim B(E2) \sim 3.6 \pm 0.5^{+0.5}_{-0.4} [\text{e}^2 \text{fm}^4]$
 \rightarrow Q-moment $\sim \langle R^4 \rangle$



✓ Direct measurement

Approach to the Λ hypernuclear Magnetic Moment:

- ✓ Direct measurement : precession in Strong Magnetic Field

Independent measurement of $B(M1)$

detail analysis w/ precise calculation

- Relativistic HF:

M. Asakawa et al. KEK Rep. 2000-11, J-PARC

T. Saito et al, GSI/FAIR

The precession angle

can be enhanced by γ (Lorentz Boost) factor.

Promising way, *if significant polarization of HF is proofed.*

- “pionic-decay NMR” from Polarized Hypernuclei:

Polarization of Hypernuclei

Asymmetric weak decay pion:

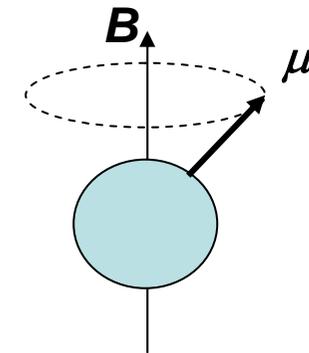
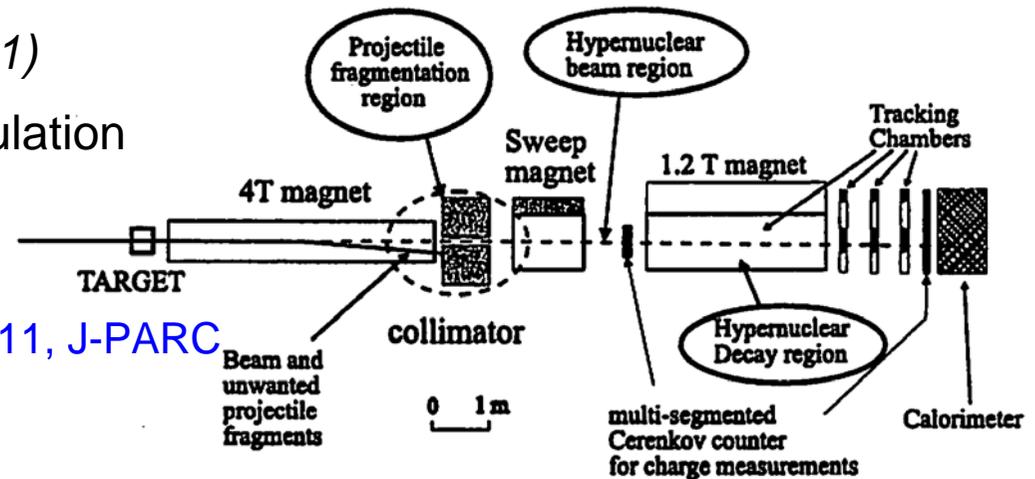
$$W(\theta) = 1 + \sum_k a_k P_{\Lambda} P_k(\theta)$$

(a_k ~ small for Nonmesonic WD-proton)

H. Ejiri, T. Kishimoto, and HN, PLB225, 35(1989)

$P_{\Lambda} \sim 0.2$ in (π^+, K^+) at 15 deg.

for medium nuclei



Strong Magnetic Field for precession is needed

Hypernuclear Polarization:

Λ Pol. in (π^+, K^+) and (K^-, π^-)

20

K. Itonaga, T. Motoba and M. Sotona

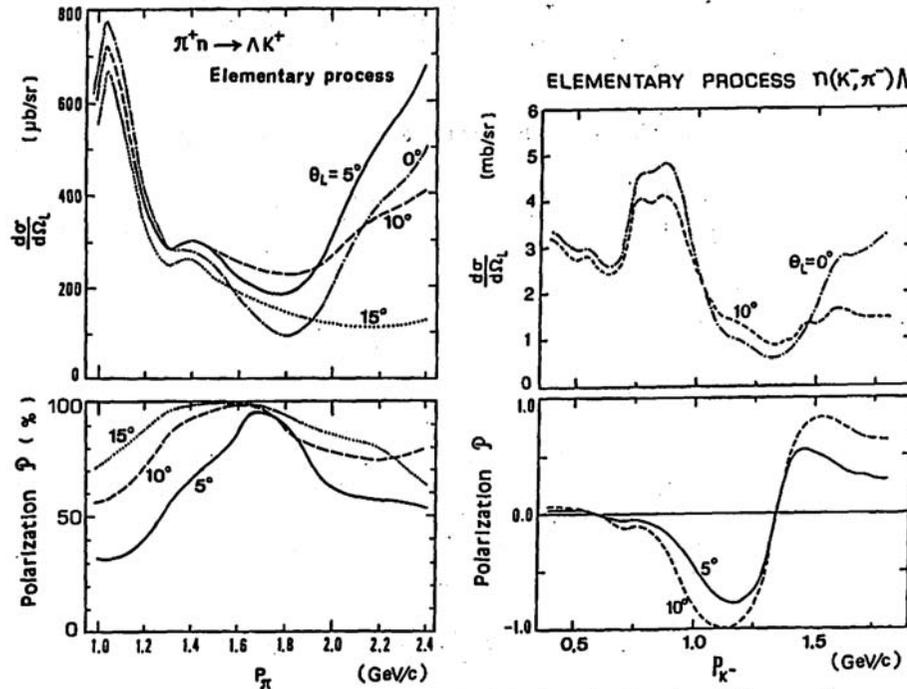


Fig. 1. (left): The elementary cross sections and polarizations for the $\pi^+n \rightarrow \Lambda K^+$ process²³⁾ as a function of the incident momentum p_π and the lab. scattering angle θ_L . (right): Similarly the cross sections and polarizations for the $K^-n \rightarrow \Lambda \pi^-$ process.²⁴⁾

Phase Shift Analysis by
K. Itonaga, T. Motoba, and M. Sotona
PTP suppl.117, 17(1994)

Large Polarization is produced
via the (π^+, K^+) reaction

Measured Pol. of ${}^5_\Lambda\text{He}$
produced via (π^+, K^+) on ${}^6\text{Li}$

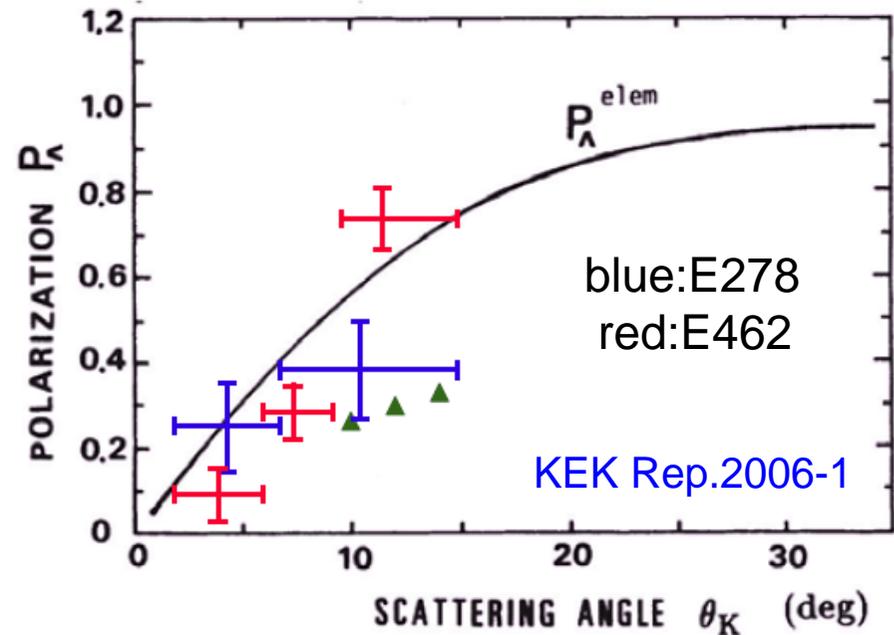
$$W(\theta) = 1 + \alpha P_\Lambda \cos\theta, \quad \alpha = -0.642(13)$$

KEK-PS E278

S. Ajimura, PRL84, 4052(2000)

KEK-PS E462

T. Maruta, KEK Rep.2006-1



直接測定：時間積分摂動角相関法

$^5_{\Lambda}\text{He}$ の場合($g \sim 1.2$)

$d\sigma/d\Omega \sim 3 \mu\text{b/sr}$, $P_{\Lambda} = 0.8$ at 15 deg. at $p_{\pi} = 1.2 \sim 1.4 \text{ GeV}/c$

$B_{\text{ext}} = 10 \text{ T}$ ($\langle Bt \rangle \sim 2500 \text{ T ps}$) : $\Phi \sim 8^{\circ}$

$\Omega_{\text{K}} \sim 0.01 \text{ sr}$ $\varepsilon_{\text{K}} \sim 0.7 * 0.2$ $\Omega_{\text{decay-}\pi} \sim 0.2$ (att.f ~ 0.8)

10^9 Hz のビームで90シフト走って、 $\Delta g \sim 3\%$

なのだけれど、、、

decay- π^{-} の強磁場による巻きつき問題のうまい解決方法がみつからない ↷

0.1 GeV/c π^{-} : 10T の磁場中での軌道半径はわずか3.3cm !

○コンパクトな標的領域に強磁場を発生できるか

→究極の方法が原子レベルの強磁場(内部磁場)の利用

強磁性体に埋め込まれた原子の偏極が不明

→Transient Fieldの利用

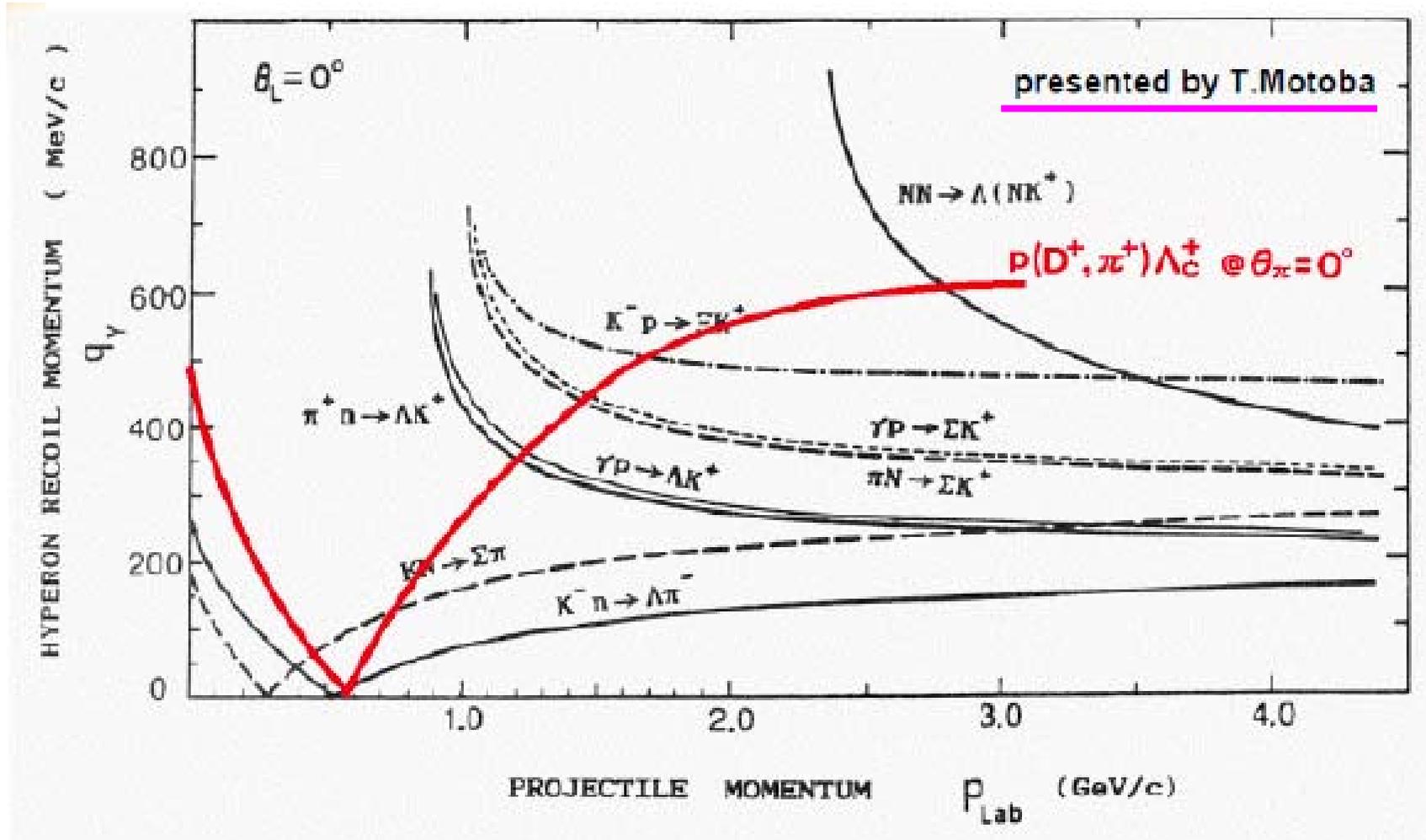
~psオーダーの遷移(E2遷移など)の測定($\langle Bt \rangle$ はあまり得しない。)

○ π^0 を測定する。

→イールドは半分に(精度は1.4倍悪化)。でも、意外と現実的かも。 15

コメント2

チャームド核の生成



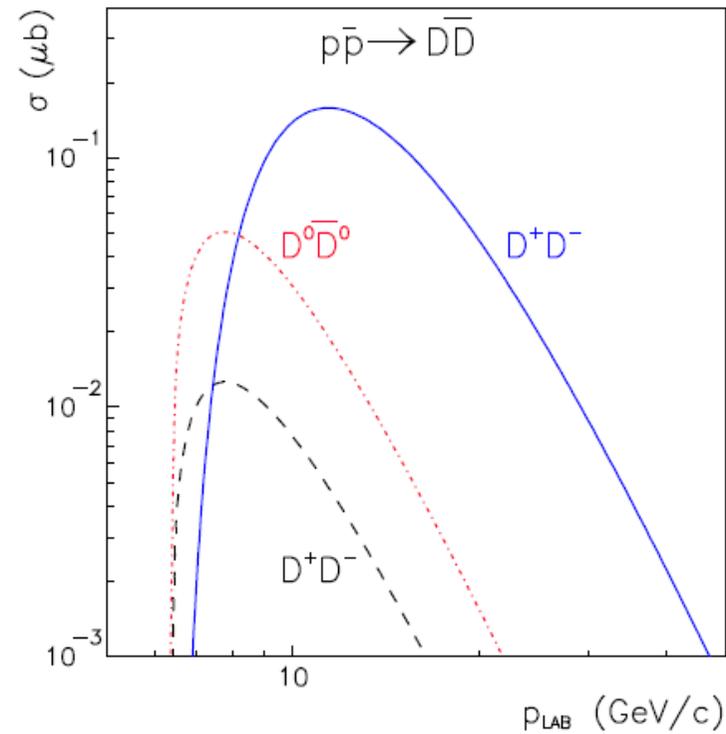
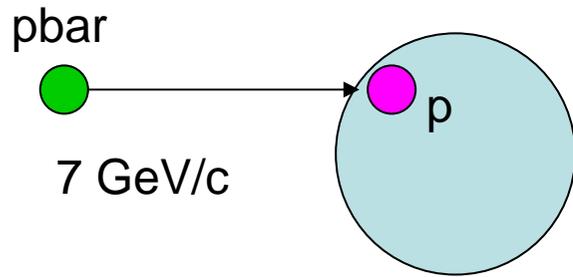


Fig. 6. Predictions for the $\bar{p}p \rightarrow \bar{D}D$ annihilation cross section taken from Refs. [54] (solid line) and [55] (dashed and dash-dotted lines).

[54] P. Knoll et al, NPB316, 373(1989)

[55] A. B. Kaidalov et al, ZPC63, 517(1994)

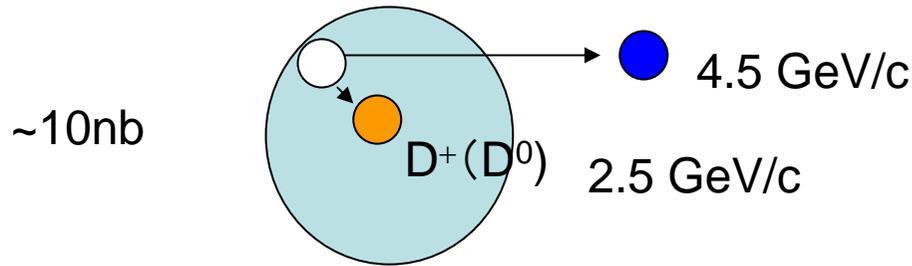


$${}^A Z (\text{pbar}, D^- \pi^+) {}^{A-1} \Lambda_c^+ Z$$

精々, $d\sigma/d\Omega \sim 0.05 \text{ pb}$ のオーダーか？

$$10^7 * 6.0 \times 10^{23} * 0.5 * 10^{-36} = 3 \times 10^{-6} \text{ Hz}$$

10^7 sec (350 shifts) で3個！

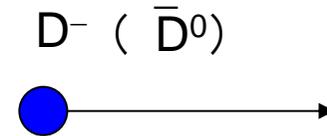
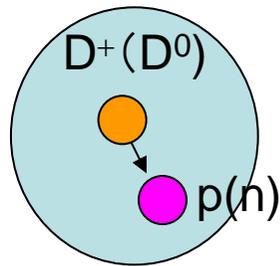


$$\lambda \sim (\rho\sigma)^{-1} \sim 70 \text{ fm}$$

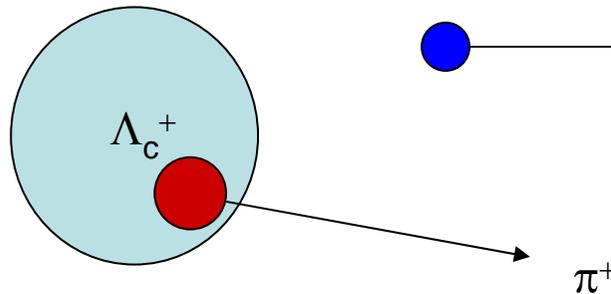
$$\rho \sim 0.14 \text{ fm}^{-3}$$

$$\sigma \sim 1 \text{ mb} = 0.1 \text{ fm}^2$$

$$1 - \text{Exp}(-r/\lambda) \sim 0.05$$



"sticking Prob."
 < 0.001 at $q_{\Lambda_c} \sim 0.6 \text{ GeV}/c$



$$\text{br}(D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-) \sim 9\%$$

$$\text{br}(\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-) \sim 3\%$$

cf $\sigma(K^- p \rightarrow \Lambda \pi^-) \sim 4 \text{ mb/sr}$ at $2 \text{ GeV}/c$

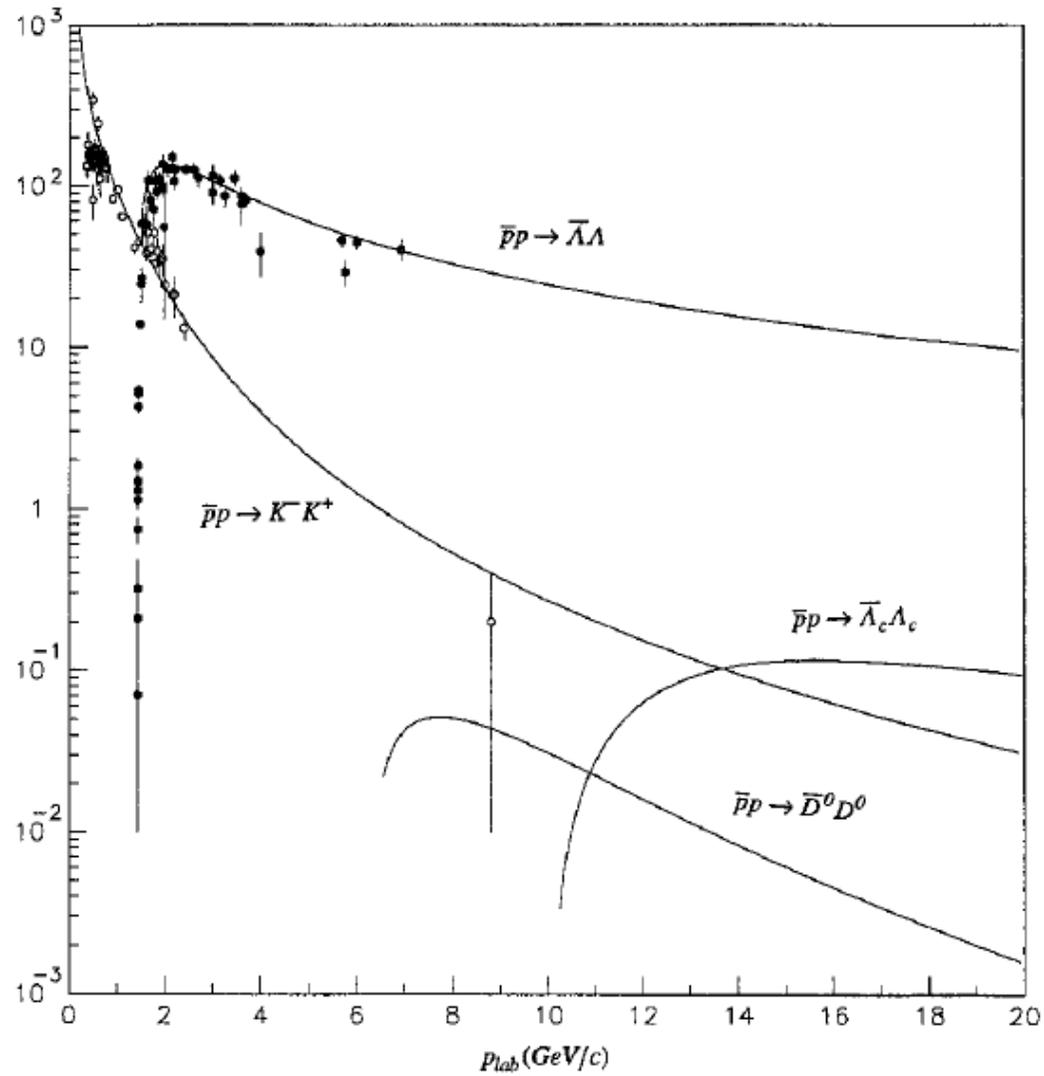
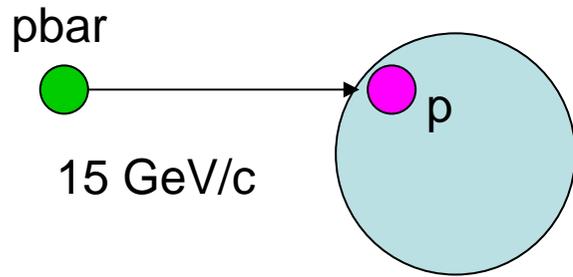


Fig. 2. Description of $\bar{p}p \rightarrow \bar{\Lambda}\Lambda$ and $\bar{p}p \rightarrow K^- K^+$ cross-sections and predictions for $\bar{p}p \rightarrow \bar{\Lambda}_c \Lambda_c$ and $\bar{p}p \rightarrow \bar{D}^0 D^0$ cross-sections

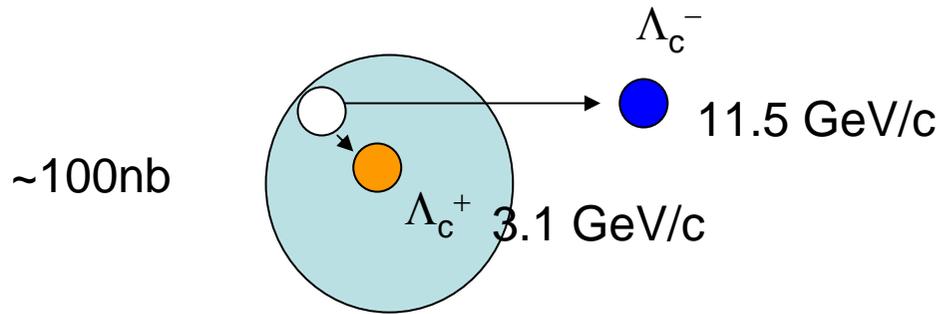


$$^AZ(\text{pbar}, \Lambda_c^- d) ^{A-1}_{\Lambda_c^+} Z$$

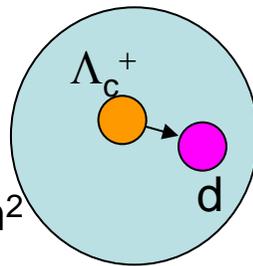
精々, $d\sigma/d\Omega \sim 0.2 \text{ pb}$ のオーダーか？

$$10^7 \cdot 6.0 \times 10^{23} \cdot 0.2 \cdot 10^{-36} = 1 \times 10^{-6} \text{ Hz}$$

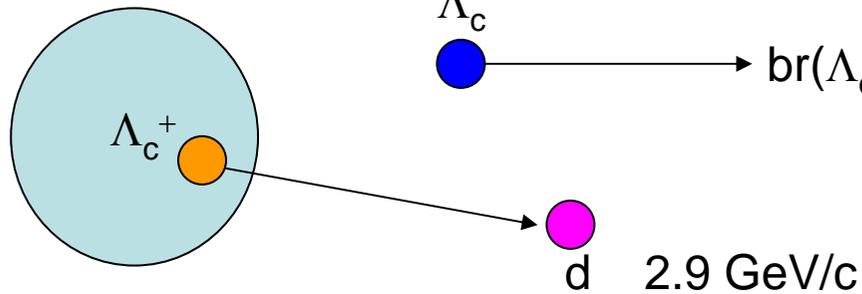
10^6 sec (35 shifts) で1個！



$\lambda \sim (\rho\sigma)^{-1} \sim 70 \text{ fm}$
 $\rho \sim 0.14 \text{ fm}^{-3}$
 $\sigma \sim 0.1 \text{ mb} = 0.01 \text{ fm}^2$
 $1 - \text{Exp}(-r/\lambda) \sim 0.005$



"sticking Prob."
 $0.01?$ at $q_{\Lambda_c} \sim 0.2 \text{ GeV/c}$



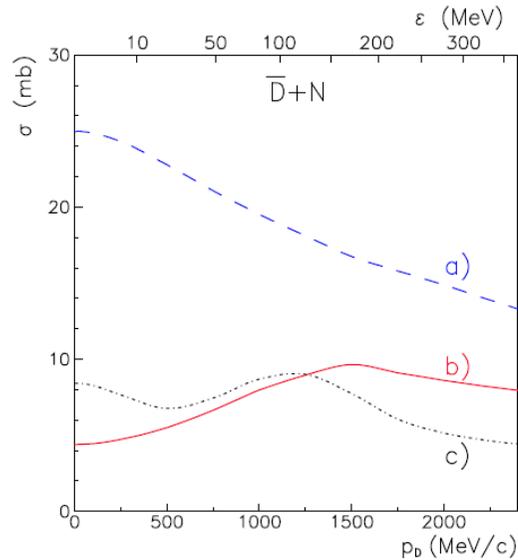


Fig. 2. Reaction cross section for (a) $D^-n \rightarrow D^-n$ (dashed line), (b) $D^-p \rightarrow D^-p$ (solid line) and (c) $D^-p \rightarrow \bar{D}^0n$ (dash-dotted line) as a function of the \bar{D} -meson momentum (lower axis) and the kinetic energy ϵ in the center-of-mass system (cms) (upper axis).

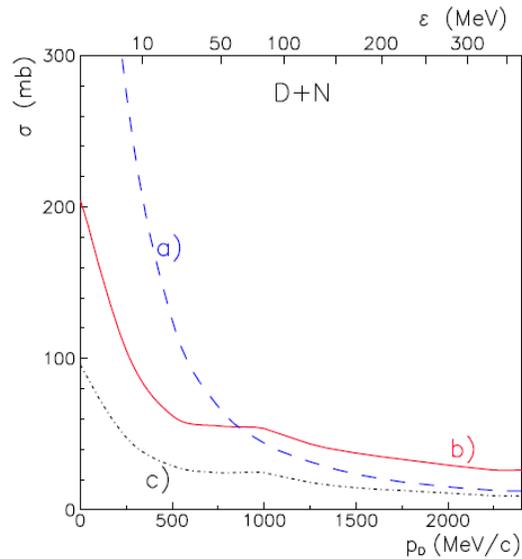


Fig. 4. Reaction cross sections for (a) $D^0n \rightarrow D^0n$ (dashed line), (b) $D^0p \rightarrow D^0p$ (solid line) and (c) $D^0p \rightarrow D^+n$ (dash-dotted line) as a function of the D -meson momentum (lower axis) and the cms kinetic energy ϵ (upper axis).

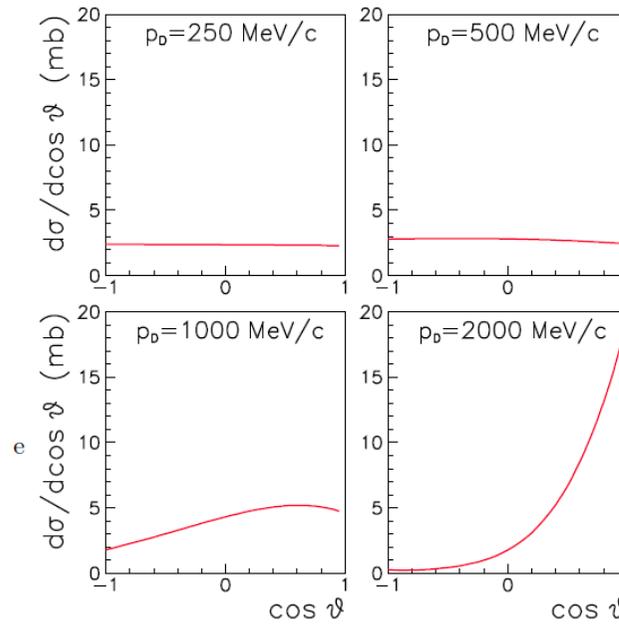


Fig. 3. Differential cross sections for the $D^-p \rightarrow D^-p$ reaction in the cm system at different momenta.

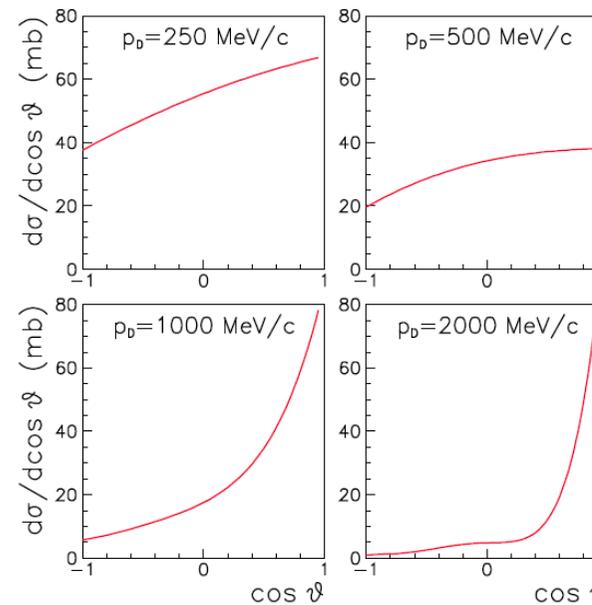
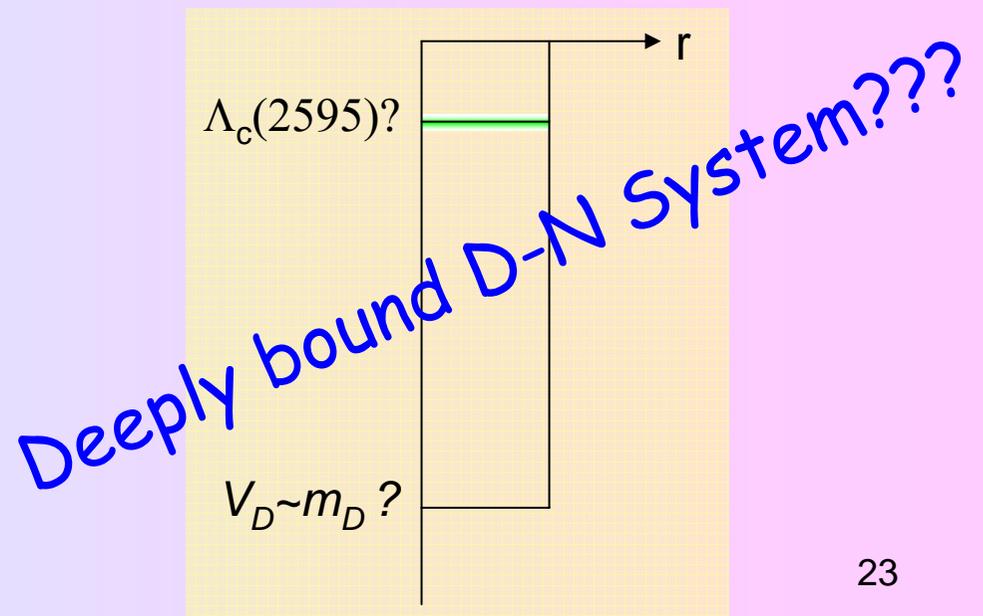
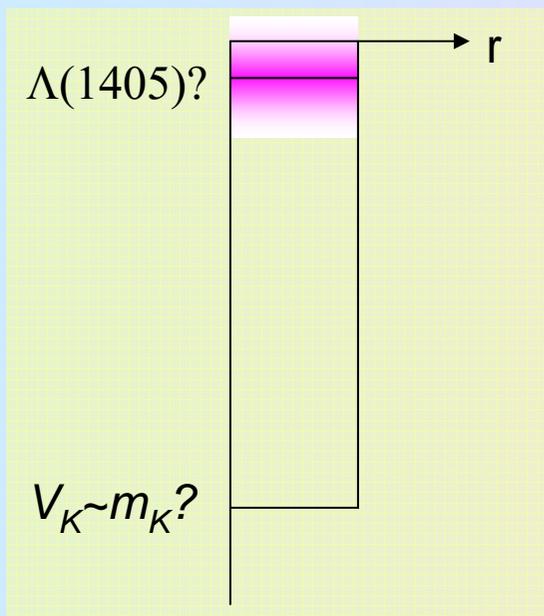
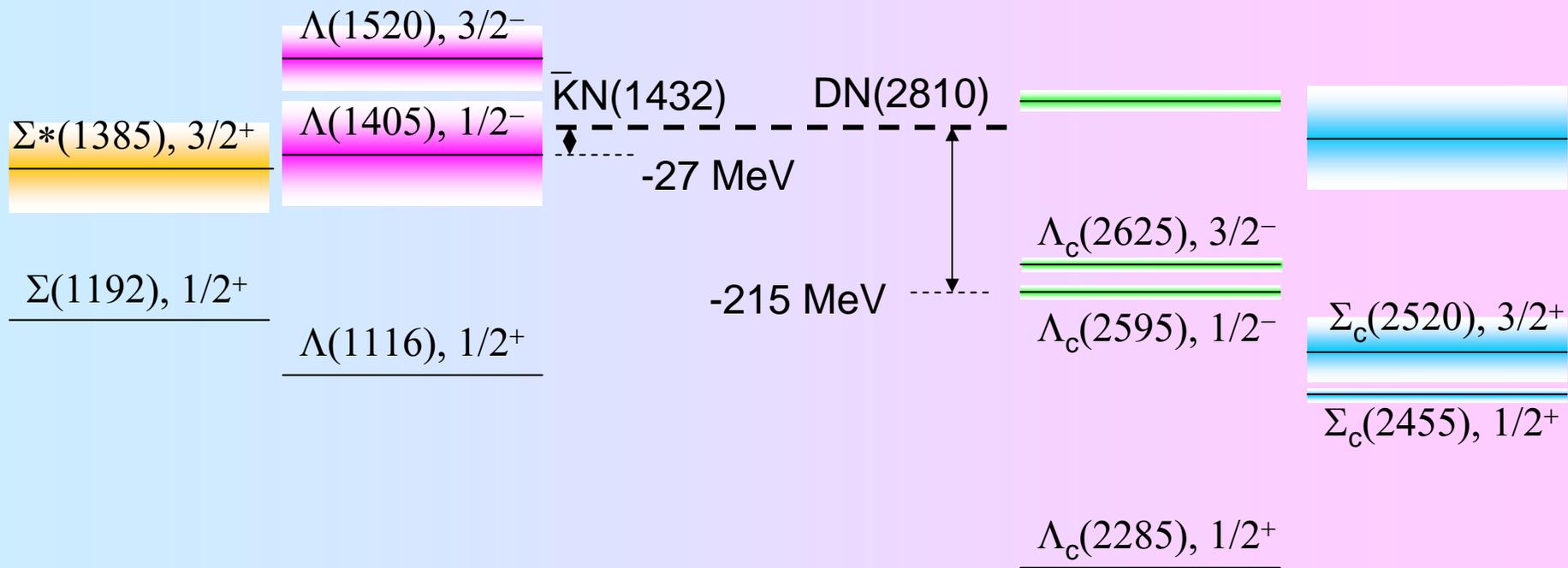


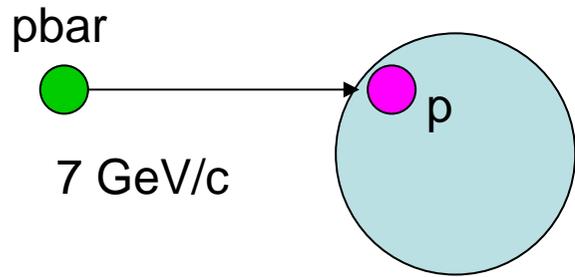
Fig. 5. Differential cross sections for the $D^0p \rightarrow D^0p$ reaction in the cm system at different momenta.

$\bar{K}N$ のアナロジーで
 DN の強い引力! ?

hep-ph arXiv:
 0803.3752v1
 J. Haidenbauer et al.



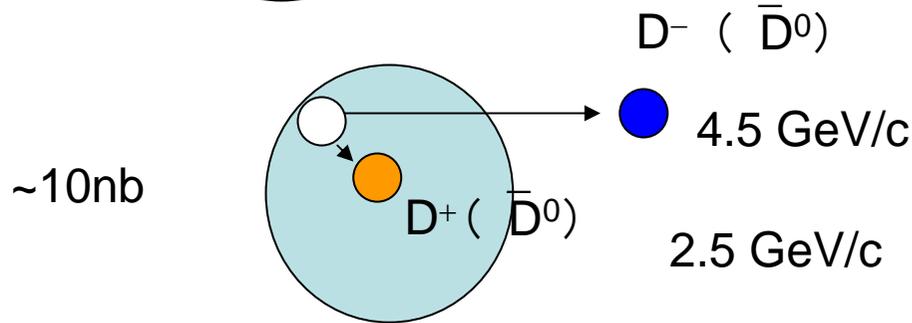
$$^AZ(\text{pbar}, D^-p)^{A-1}_{D^+}Z$$



精々, $d\sigma/d\Omega \sim 0.3 \text{ pb}$ のオーダーか？

$$10^7 \cdot 6.0 \times 10^{23} \cdot 0.3 \cdot 10^{-36} = 2 \times 10^{-6} \text{ Hz}$$

10^6 sec (35 shifts) で2個！

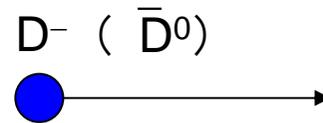
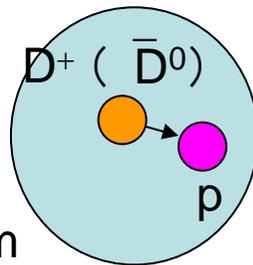


$$\lambda \sim (\rho\sigma)^{-1} \sim 70 \text{ fm}$$

$$\rho \sim 0.14 \text{ fm}^{-3}$$

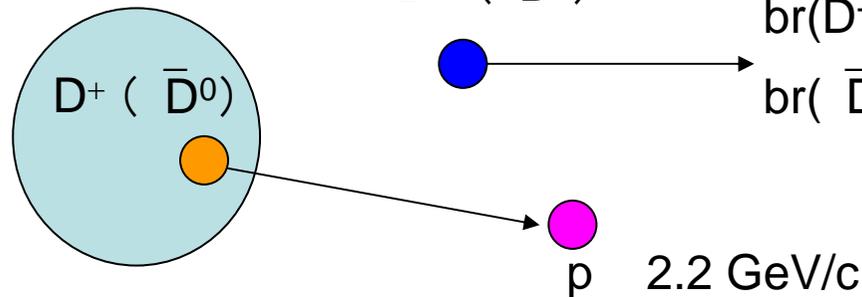
$$\sigma \sim 1 \text{ mb} = 0.1 \text{ fm}^2$$

$$1 - \text{Exp}(-r/\lambda) \sim 0.05, r=3 \text{ fm}$$



"sticking Prob."

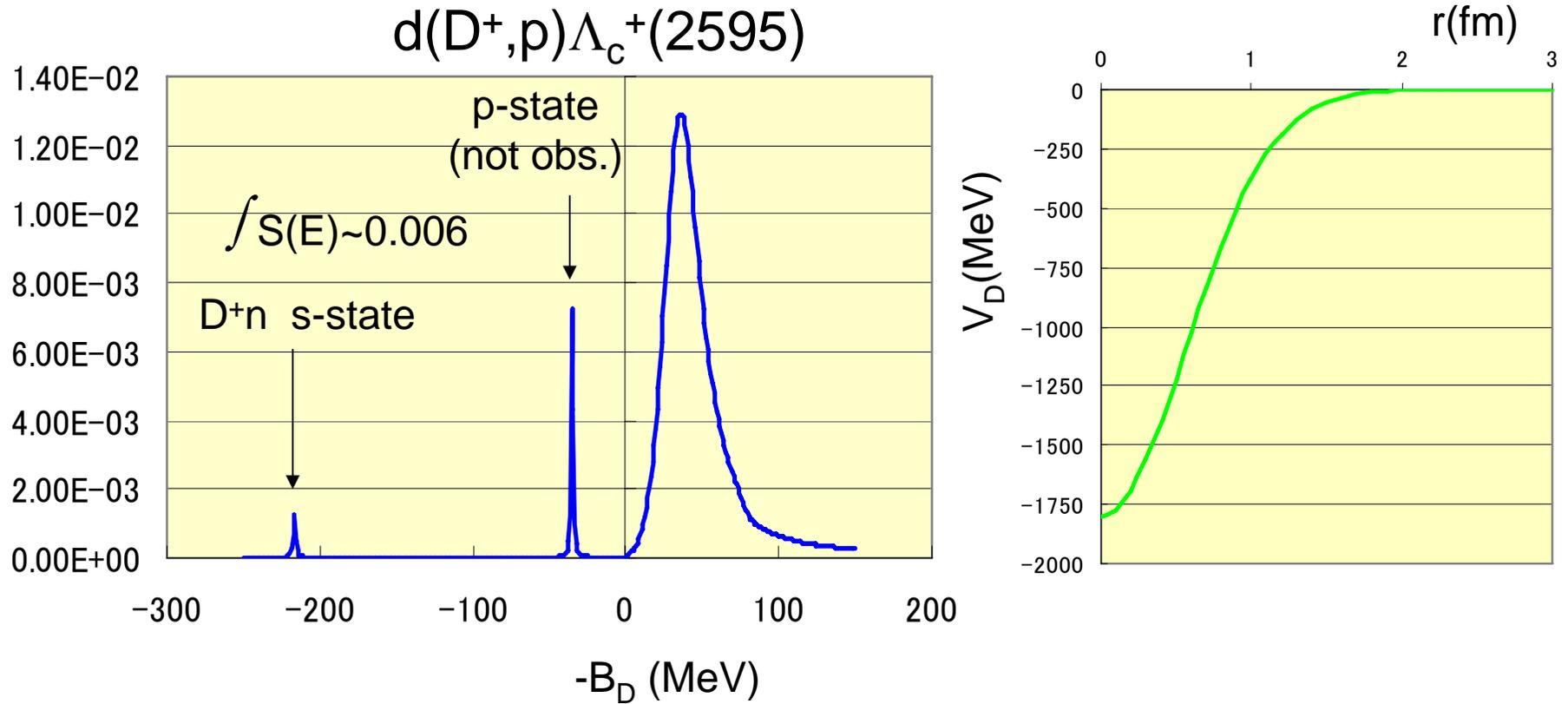
0.006? at $q_D \sim 0.3 \text{ GeV}/c$



$$\text{br}(D^- \rightarrow K^+\pi^-\pi^-) \sim 9\%$$

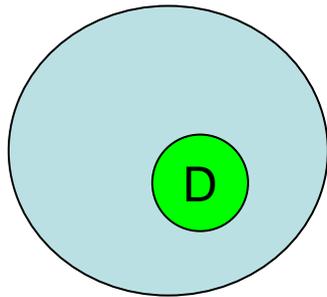
$$\text{br}(\bar{D}^0 \rightarrow K^+\pi^-) \sim 3\%$$

TOY Model 計算 (PWIA)

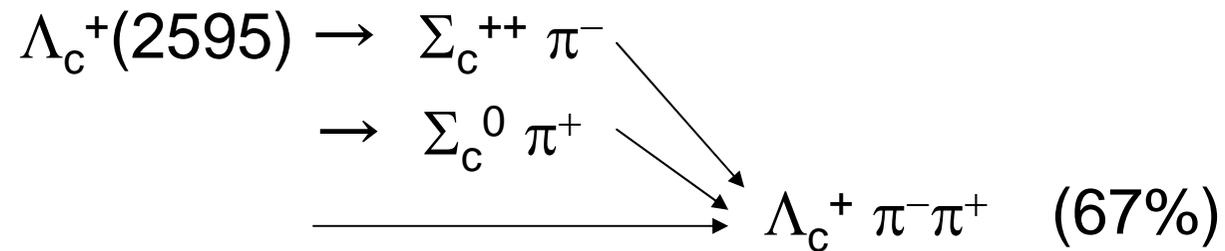


$$10\text{nb} * 0.05 * 0.006 * \text{br}(D \rightarrow K\pi\pi : 9\%) \sim 0.3\text{pb}$$

D核の崩壊と同定



Full Width= 3.6 MeV !



$$p_\pi = 24 \text{ MeV}/c$$

高運動量大強度反陽子弁別ビームライン

□ 欲しいビームラインのスペック:

強度: 10^8 Hz、アクセプタンス: 20 msr%

運動量: ~ 7 GeV/c (15GeV/c)

Dispersive at TGT(ビームの運動量分析必要)

大強度高分解能 π ビームラインは最初のステップになる。

Kビームの利用にも応用可能(Ξ 核, $\Lambda\Lambda$ 核の量産化へ)

長さ: 100~200m? (反陽子純度のためには長いほうが有利)

□ どうやって反陽子ビームの純度を上げるか。

RFセパレータ?

TOF(w/バンチドビーム)?

もっと

ハドロンホールの拡張が必要!