

# 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。

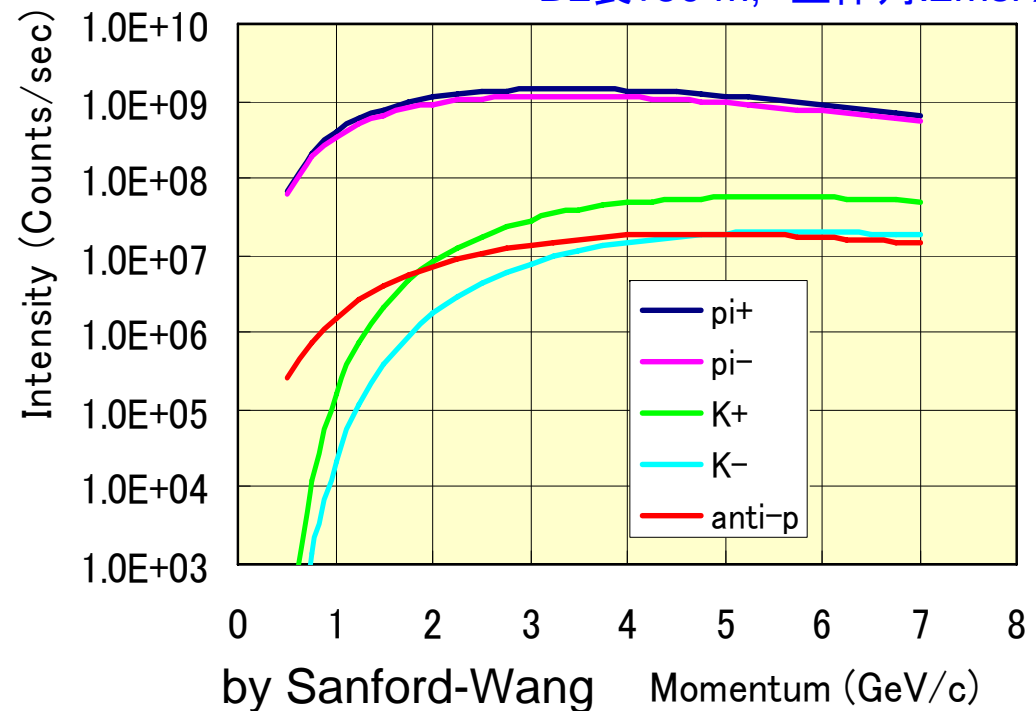
pion:  $10^8 \sim 10^9$  Hz

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)

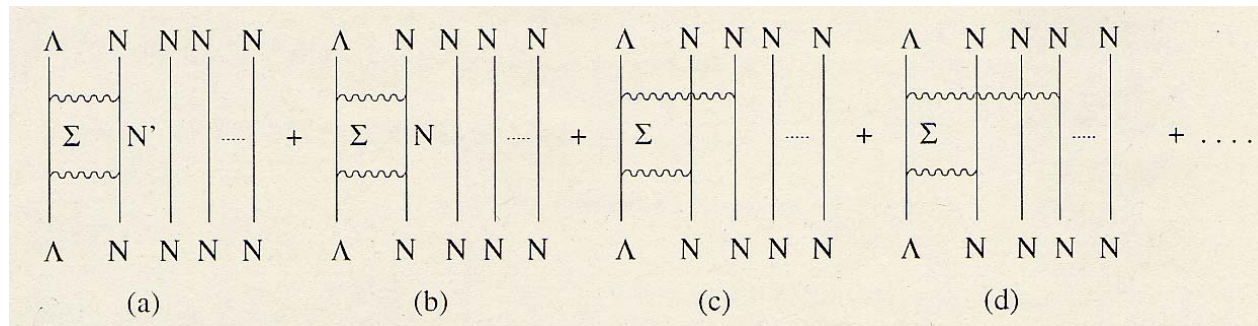
2次ビーム強度  
50GeV-15  $\mu$  A on Ni-54mm,  
BL長: 50 m, 立体角: 2msr%



# 残された課題－1

## YN、YA相互作用

✓  $\Lambda$ N- $\Sigma$ 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。

✓  $\Sigma$ 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? ( $\Sigma$ -原子軌道)

高効率かつ高分解能が必要。

# 残された課題-2

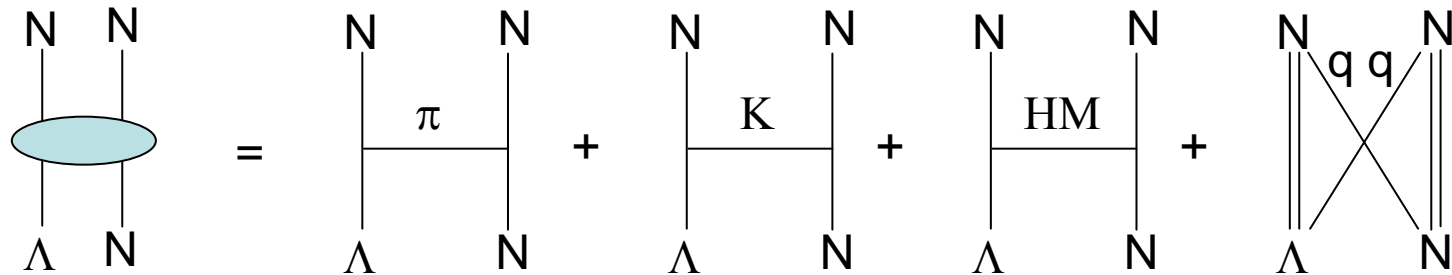
## $\Lambda$ ハイパー核の弱崩壊機構

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。

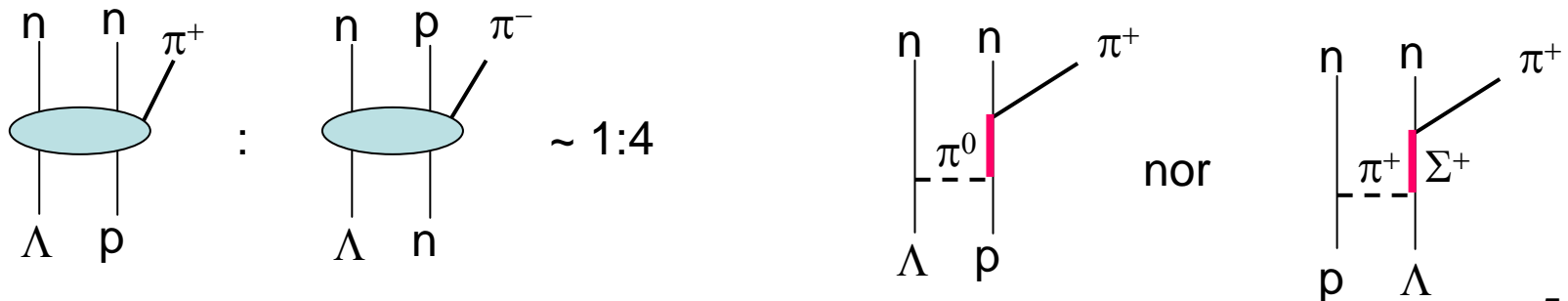
✓ ハイペロン核子弱相互作用のスピンスピン構造:

→ 味村

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



✓  $\pi^+$  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  $\pi^+$  emission

# 野心的、挑戦的な課題－1

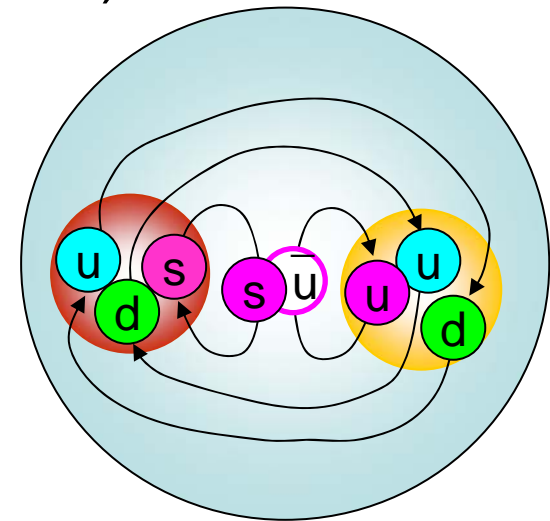
## ✓ $\Lambda$ ハイパー核の電磁気能率測定

- 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
$\Lambda$		$\Lambda_c$
$\bar{K}N, \Lambda(1405)$		$DN, \Lambda_c(2595)$



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





# Extension of Hadron Hall

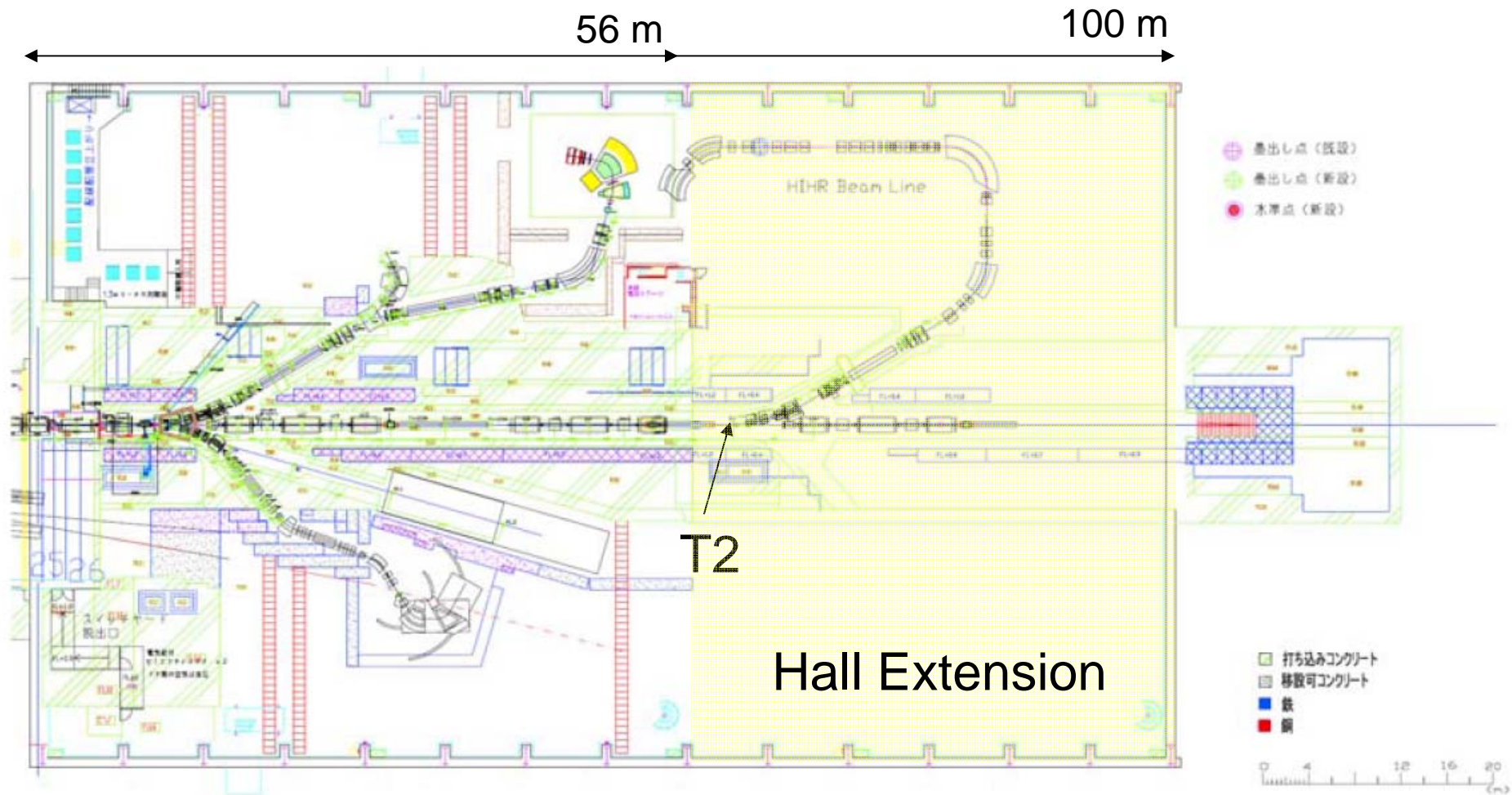


Fig. 1: An example of layout plan of High Intensity, High Resolution (HIHR) Beam Line connected to the T2 target in the extended Hadron Experimental Hall.

## 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,  $\mu$ , 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

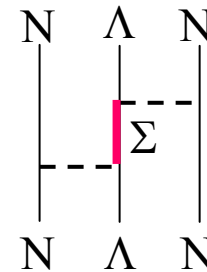
$M$ : magnetic dipole operator,  $M(M1)$

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

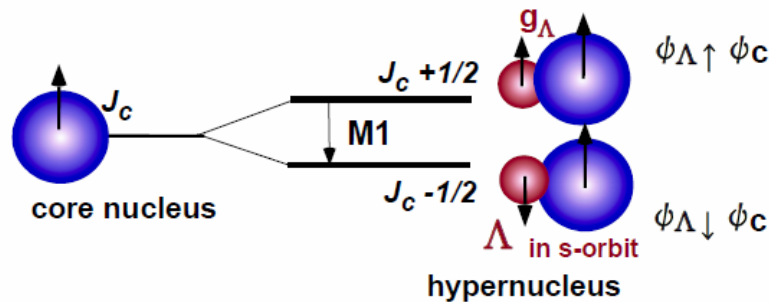


# Approach to the $\Lambda$ hypernuclear Magnetic Moment:

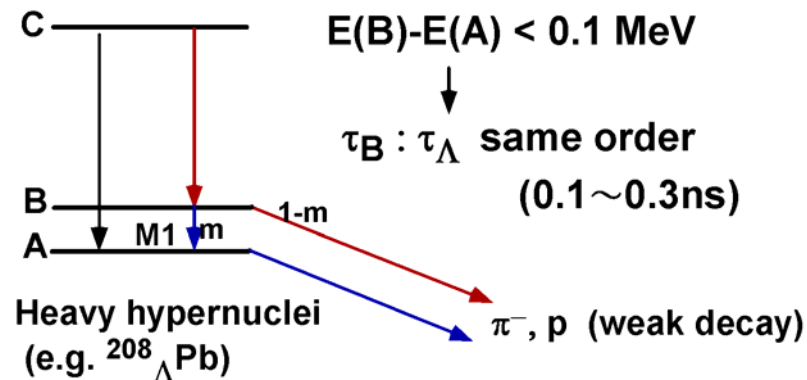
- ✓ Indirect measurement  $\rightarrow \tau, B(M1)$   
proposed by H. Tamura (Tohoku) et al.

- Doppler Shift Attenuation Method:

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

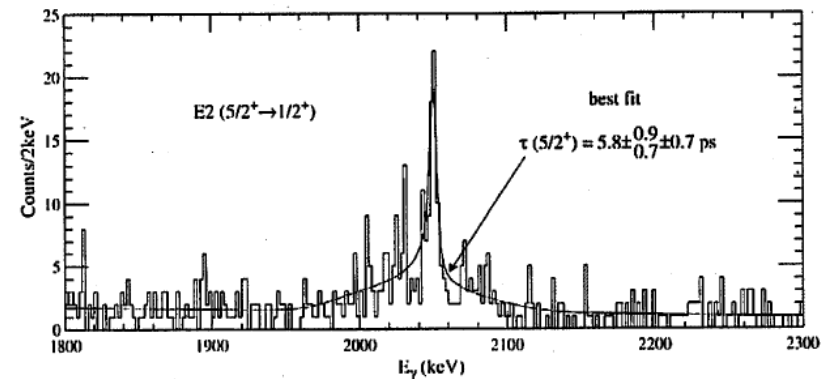


- $\gamma$ -Weak Coincidence Method:



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

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



- ✓ Direct measurement

# Approach to the $\Lambda$ 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  $\gamma$ (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:

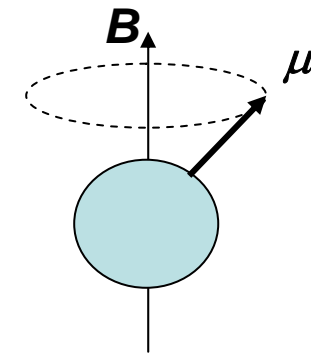
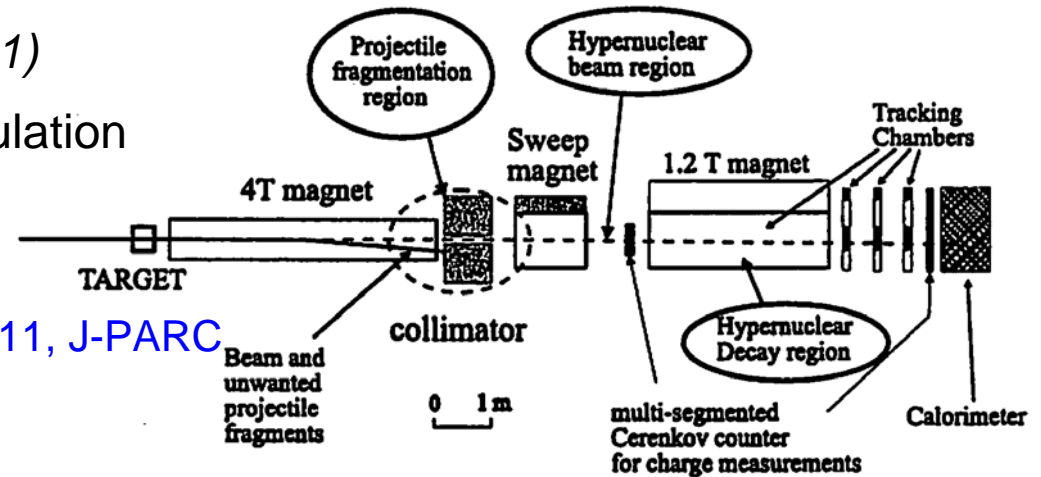
$$W(\theta) = 1 + \sum_k a_k P_{\Lambda} P_k(\theta)$$

( $a_k$  ~ small for Nonmesonic WD-proton)

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

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

for medium nuclei



Strong Magnetic Field for precession is needed

# Hypernuclear Polarization:

$\Lambda$  Pol. in  $(\pi^+, K^+)$  and  $(K^-, \pi^-)$

20

*K. Itonaga, T. Motoba and M. Sotona*

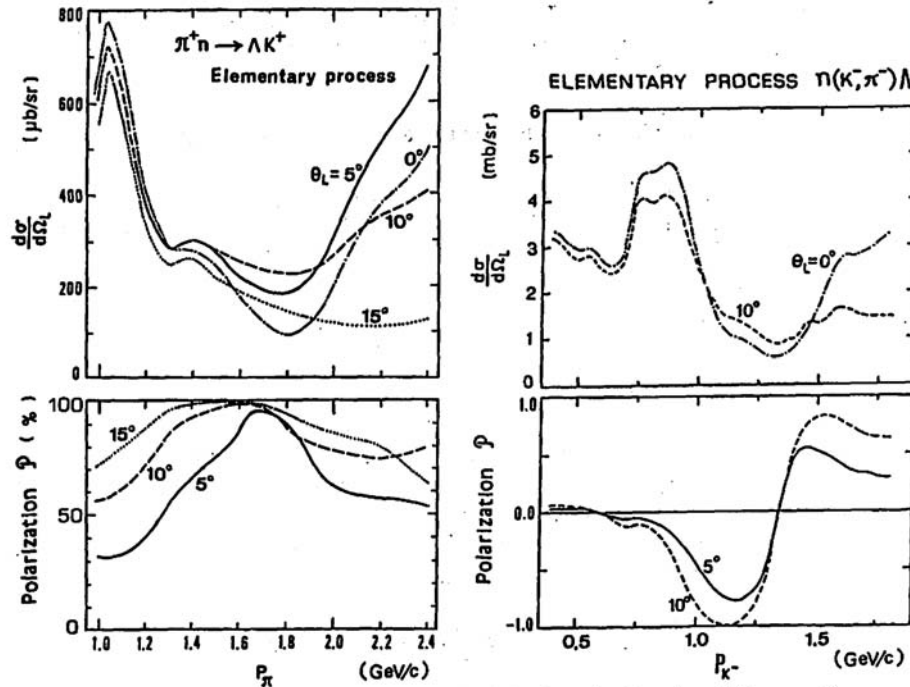


Fig. 1. (left): The elementary cross sections and polarizations for the  $\pi^+n \rightarrow \Lambda K^+$  process<sup>23)</sup> as a function of the incident momentum  $p_\pi$  and the lab. scattering angle  $\theta_L$ . (right): Similarly the cross sections and polarizations for the  $K^-n \rightarrow \Lambda \pi^-$  process.<sup>24)</sup>

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

Large Polarization is produced  
via the  $(\pi^+, K^+)$  reaction

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

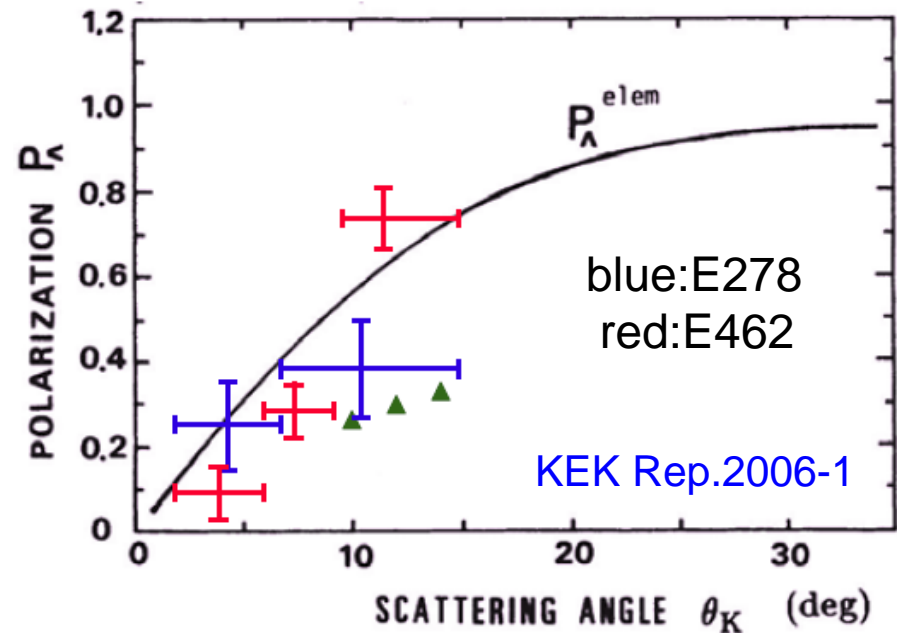
$$W(\theta) = 1 + \alpha P_\Lambda \cos\theta, \quad \alpha = -0.642(13)$$

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  $\sim 0.8$ )

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

なのだけれど、、、

decay- $\pi^{-}$ の強磁場による巻きつき問題のうまい解決方法が見つからない ↘

0.1 GeV/c  $\pi^{-}$  : 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。)

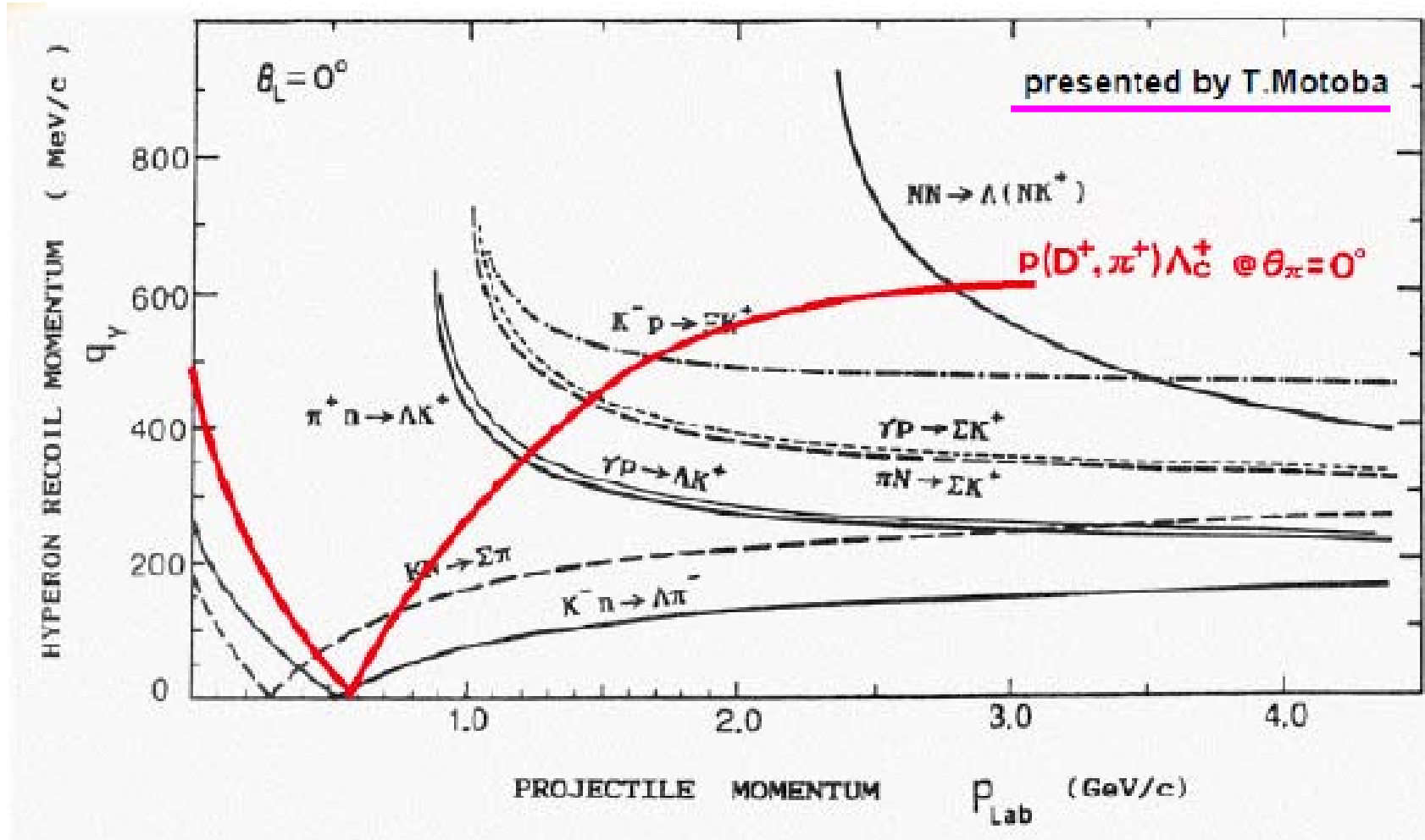
○ $\pi^0$ を測定する。

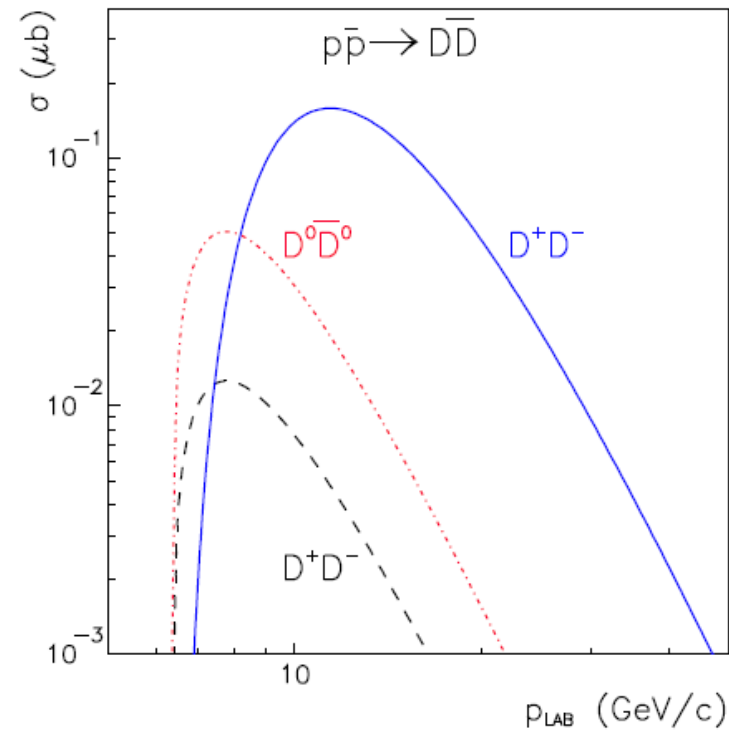
→イールドは半分に(精度は1.4倍悪化)。でも、意外と現実的かも。 15

## コメント2

チャームド核の生成



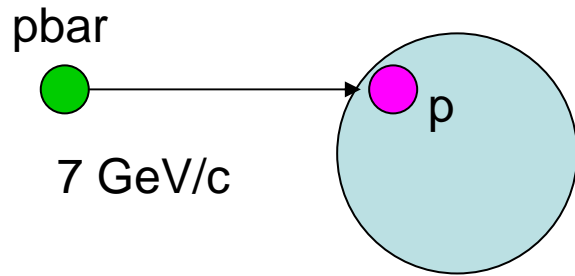




**Fig. 6.** Predictions for the  $\bar{p}p \rightarrow \bar{D}D$  annihilation cross section taken from Refs. [54] (solid line) and [55] (dashed and dash-dotted lines).

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

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

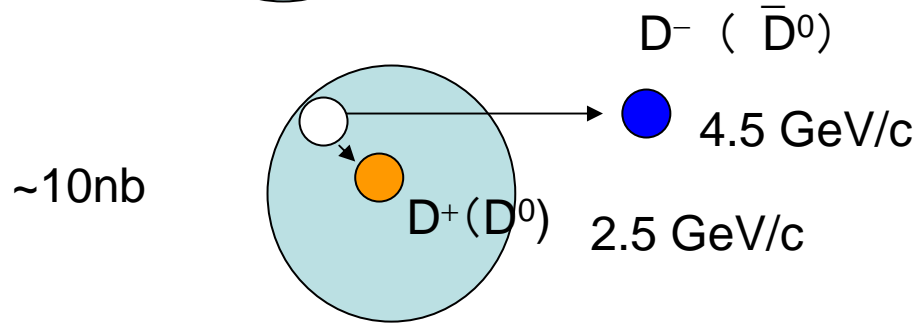


$${}^A Z (\text{pbar}, D^- \pi^+) {}^{A-1} \Lambda_c^+ Z$$

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

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

$10^7 \text{ sec}$  (350 shifts) で3個！

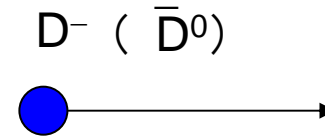
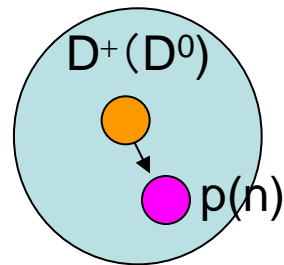


$$\lambda \sim (\rho\sigma)^{-1} \sim 70 \text{ fm}$$

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

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

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

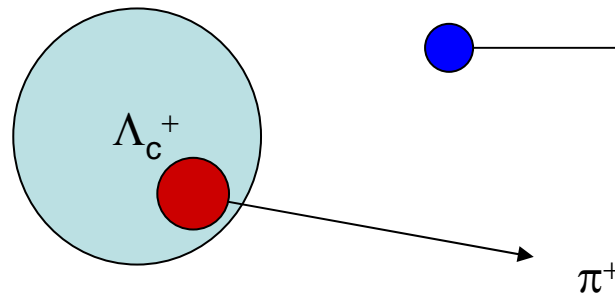


D- ( $\bar{D}^0$ )

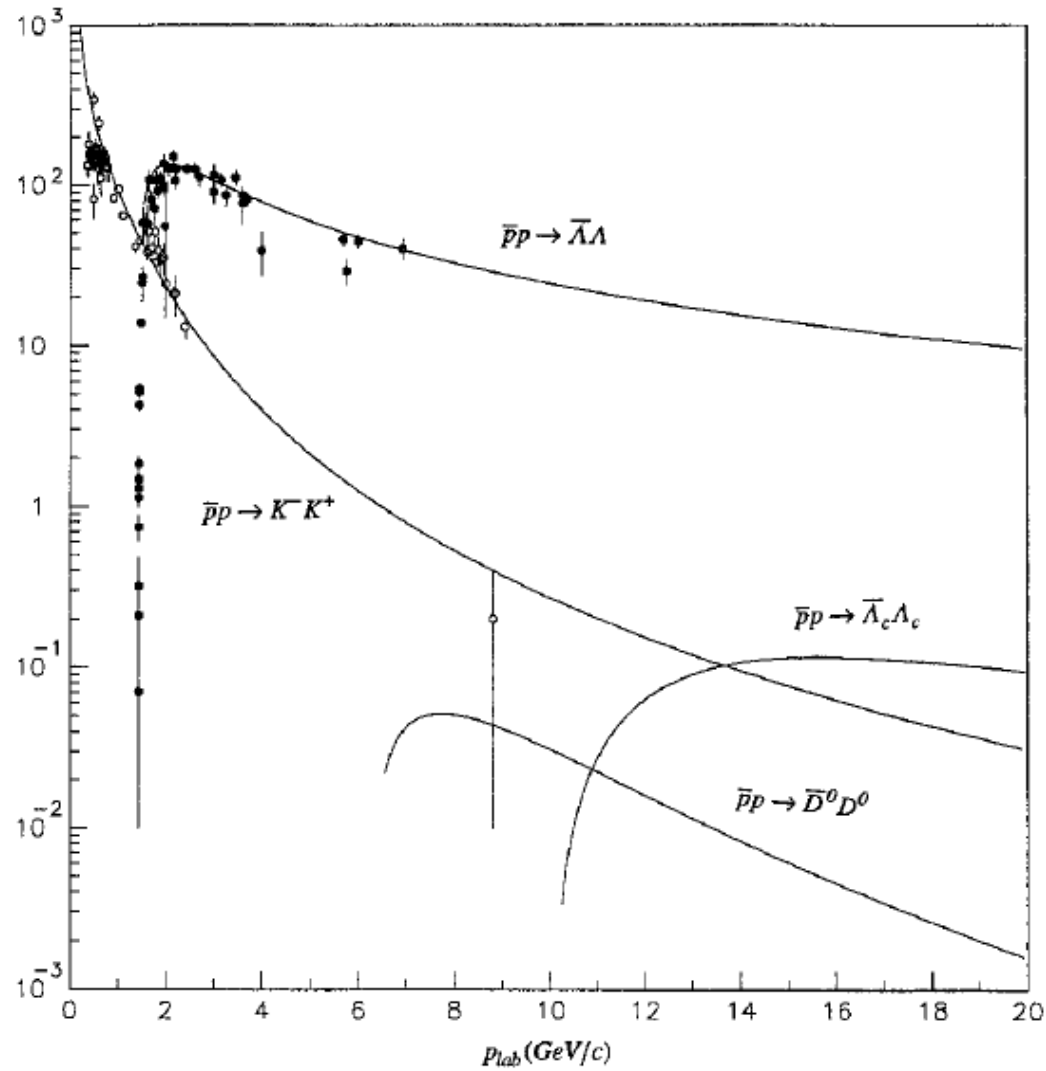
$$\text{br}(D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-) \sim 9\%$$

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

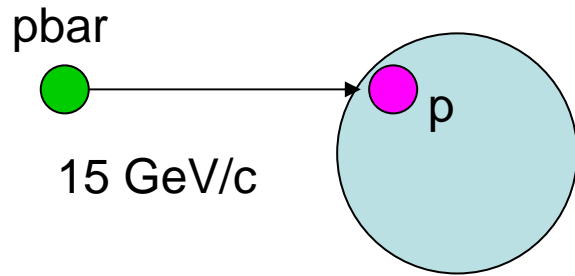
"sticking Prob."  
<0.001 at  $q_{\Lambda_c} \sim 0.6 \text{ GeV}/c$



cf  $\sigma(K^- p \rightarrow \Lambda \pi^-) \sim 4 \text{ mb/sr}$  at 2 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  $\bar{p}p \rightarrow \bar{D}^0D^0$  cross-sections

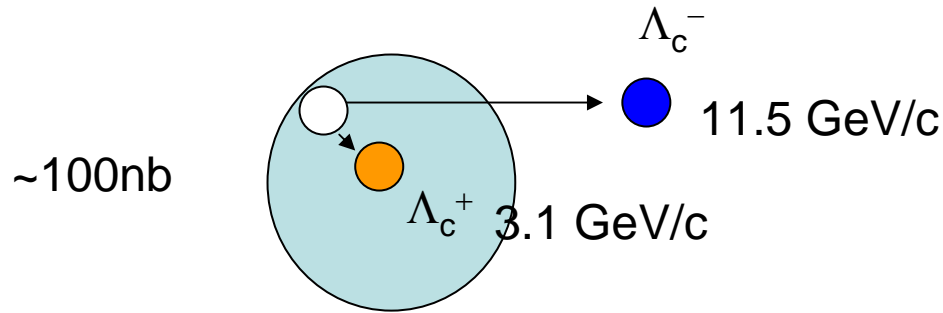


$$^AZ(\text{pbar}, \Lambda_c^- d) ^{A-1}_{\Lambda_c^+} Z$$

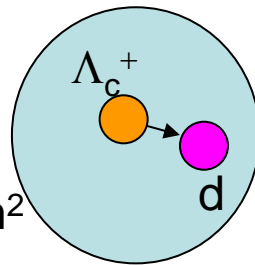
精々,  $d\sigma/d\Omega \sim 0.2 \text{ pb}$  のオーダーか？

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

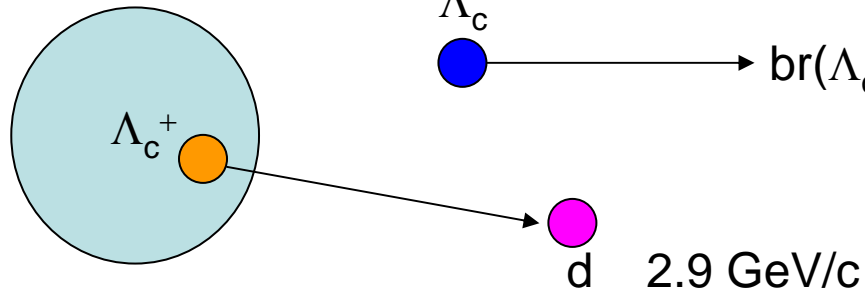
$10^6 \text{ sec}$  (35 shifts) で1個！



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



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



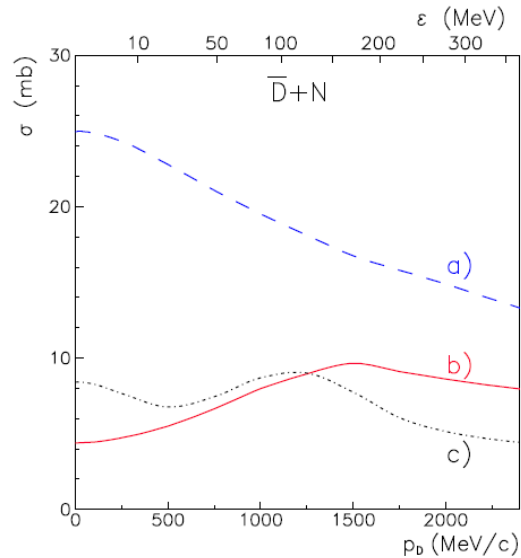


Fig. 2. Reaction cross section for (a)  $D^-n \rightarrow D^-n$  (dashed line), (b)  $D^-p \rightarrow D^-p$  (solid line) and (c)  $D^-p \rightarrow \bar{D}^0n$  (dash-dotted line) as a function of the  $\bar{D}$ -meson momentum (lower axis) and the kinetic energy  $\epsilon$  in the center-of-mass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

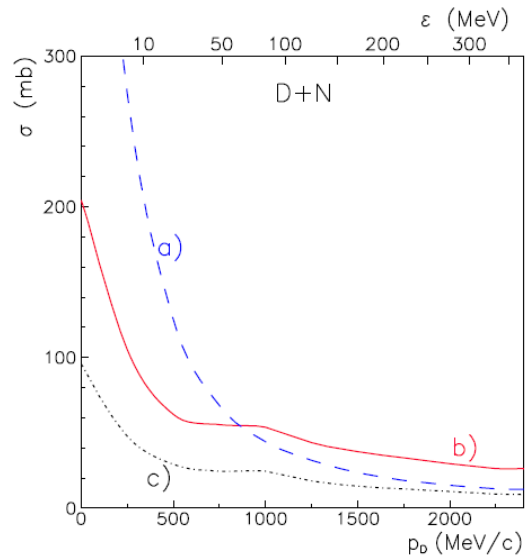


Fig. 4. Reaction cross sections for (a)  $D^0n \rightarrow D^0n$  (dashed line), (b)  $D^0p \rightarrow D^0p$  (solid line) and (c)  $D^0p \rightarrow D^+n$  (dash-dotted line) as a function of the  $D$ -meson momentum (lower axis) and the cms kinetic energy  $\epsilon$  (upper axis).

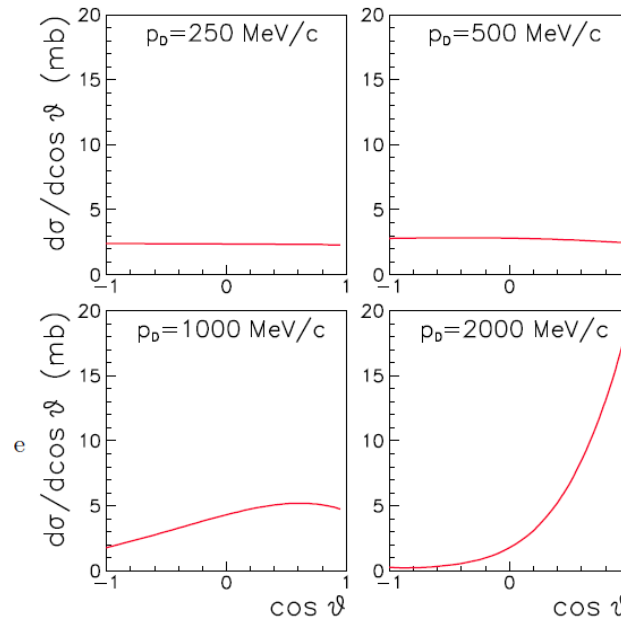


Fig. 3. Differential cross sections for the  $D^-p \rightarrow D^-p$  reaction in the cm system at different momenta.

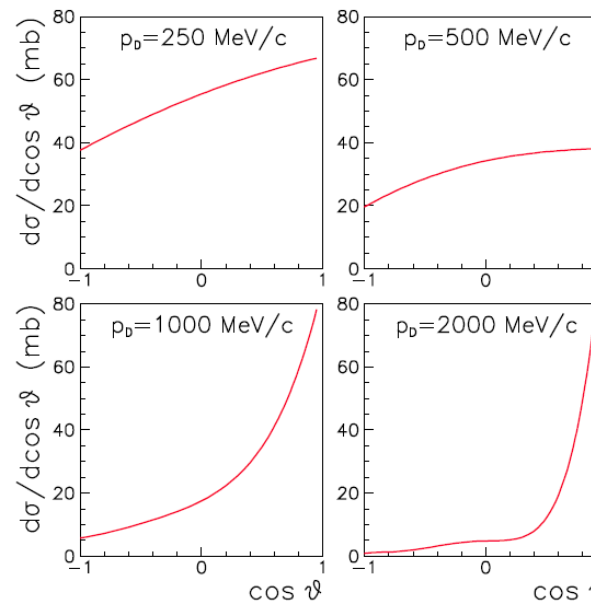
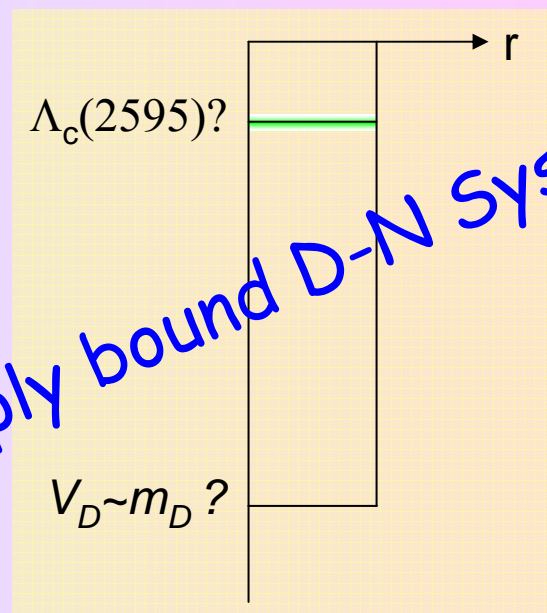
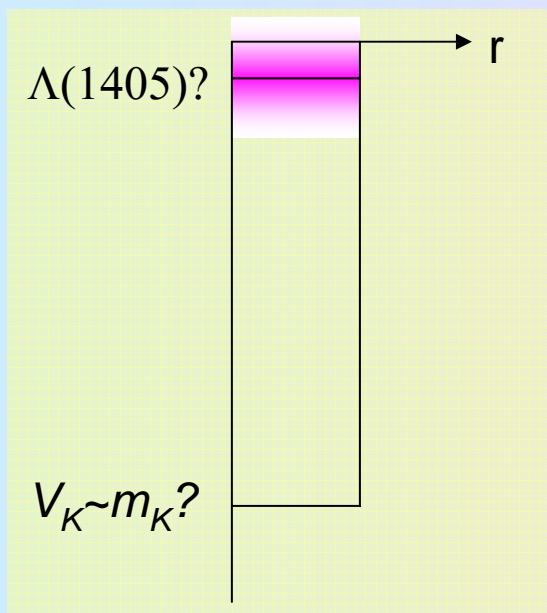
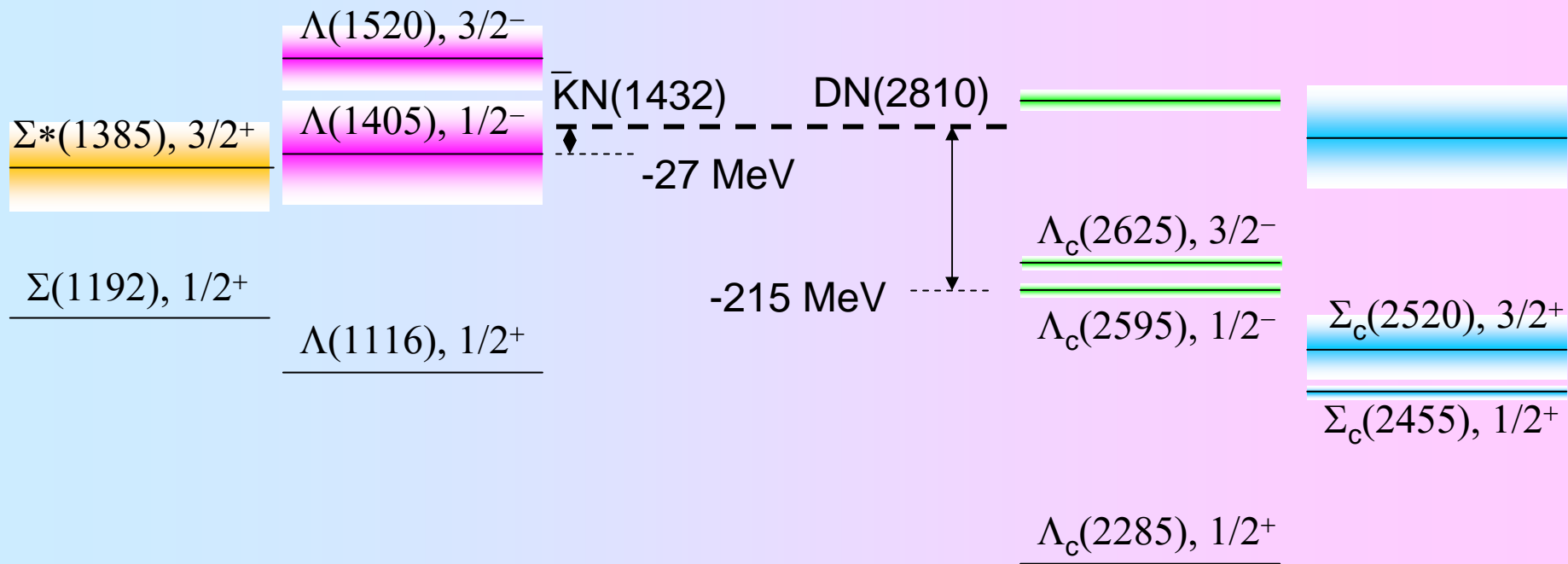


Fig. 5. Differential cross sections for the  $D^0p \rightarrow D^0p$  reaction in the cm system at different momenta.

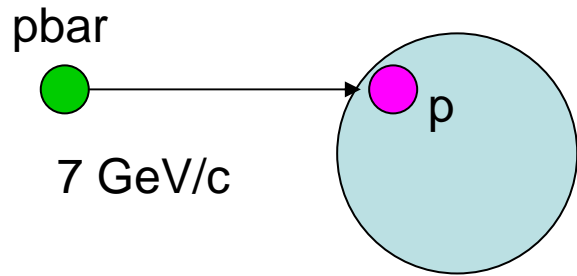
$\bar{K}N$ のアナロジーで  
DNの強い引力! ?

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



Deeply bound D-N System???

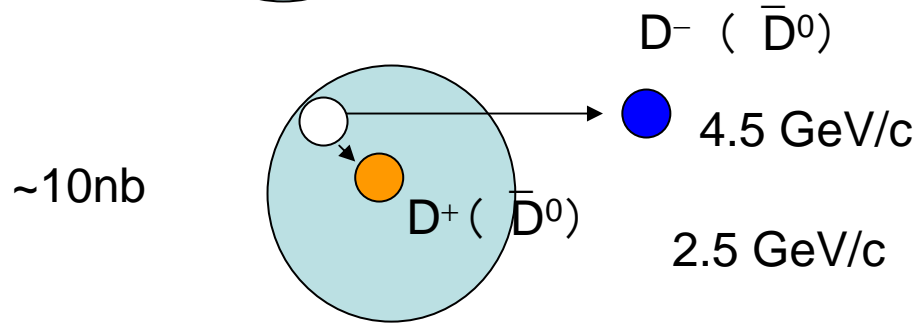
$$^AZ(\text{pbar}, D^-p)^{A-1}_{D^+}Z$$



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

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

$10^6 \text{ sec}$  (35 shifts) で2個！

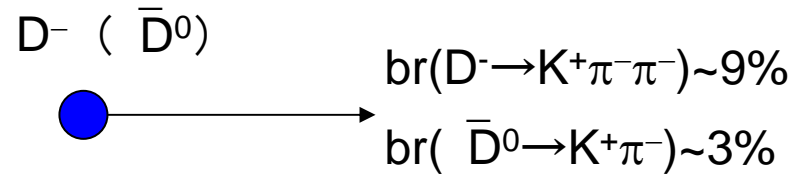
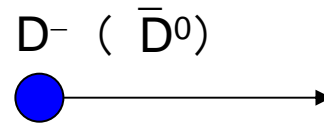
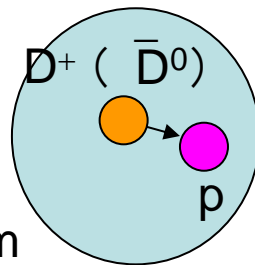


$$\lambda \sim (\rho\sigma)^{-1} \sim 70 \text{ fm}$$

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

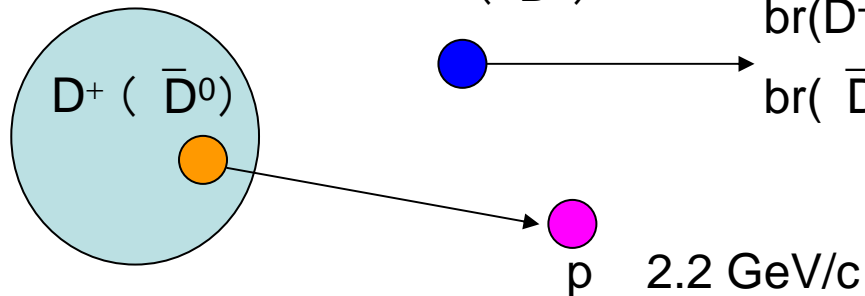
$$\sigma \sim 1 \text{ mb} = 0.1 \text{ fm}^2$$

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



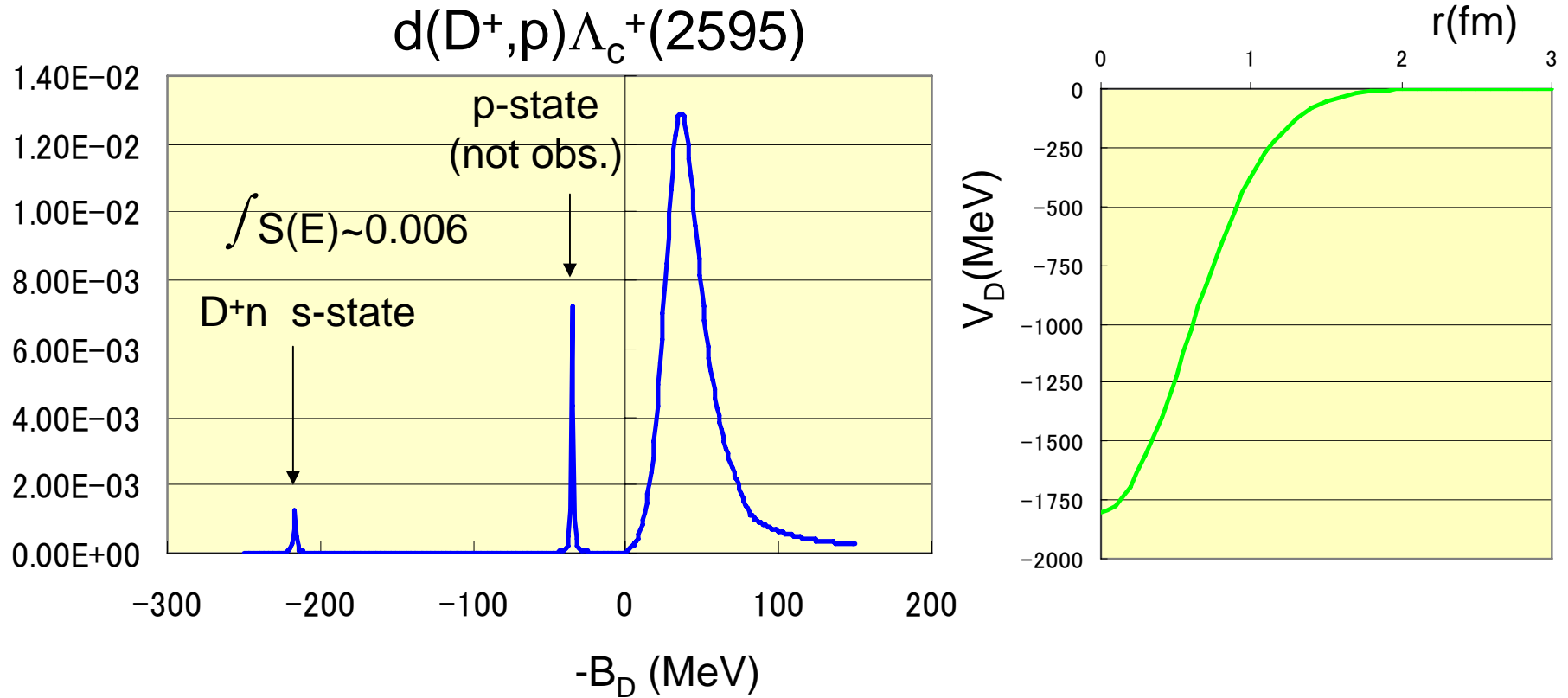
"sticking Prob."

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



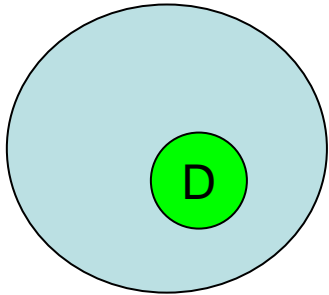


# TOY Model 計算 (PWIA)

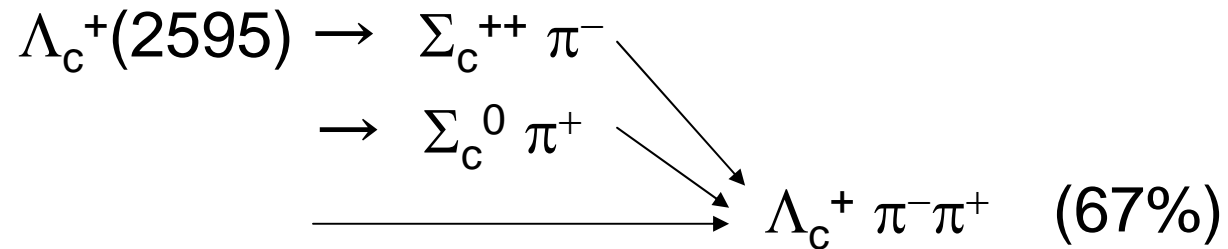


$$10\text{nb} * 0.05 * 0.006 * \text{br}(D \rightarrow K\pi\pi : 9\%) \sim 0.3\text{pb}$$

# 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:  $\sim 7$ 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 $\pi$ 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( $\Xi$ 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!