

# ストレンジネス核物理と ハイペロン核子散乱実験 (2)

Koji Miwa (Tohoku Univ.)

ハイペロン核子散乱実験の現状と  
ハイパー核分光によるバリオン間相  
相互作用の導出

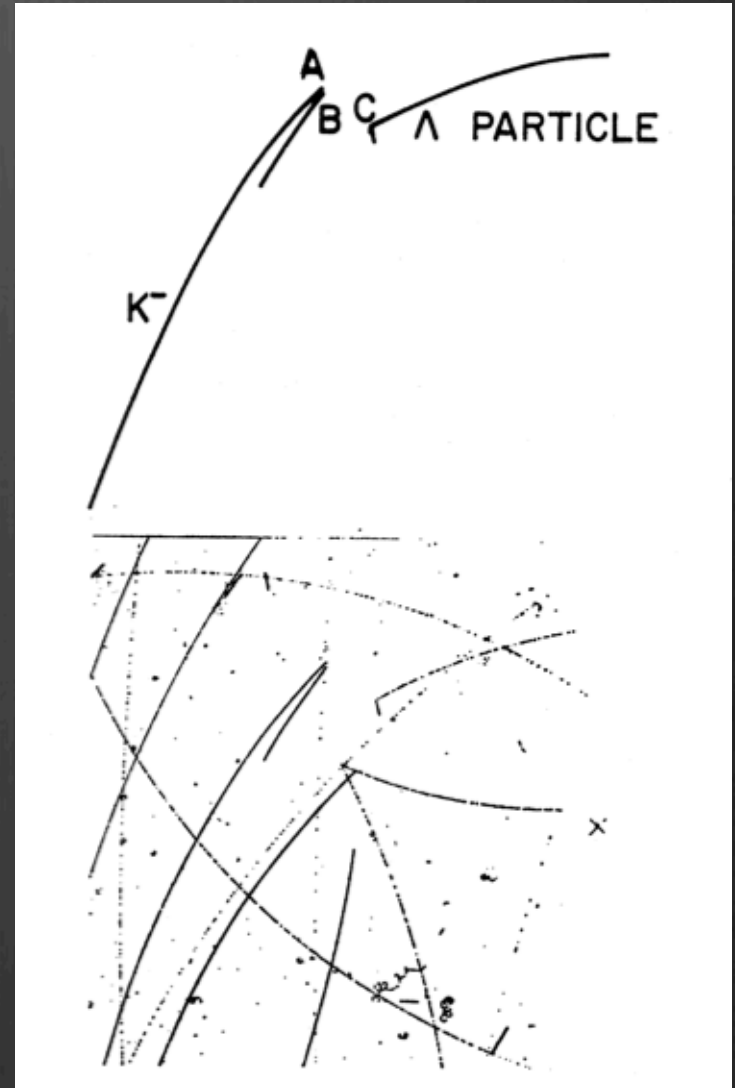
# ハイペロンの寿命

- ⊗  $\Lambda : c\tau = 7.89 \text{ cm}$ 
  - ⊗  $\Lambda \rightarrow p + \pi^- (63.9\%)$
  - ⊗  $\Lambda \rightarrow n + \pi^0 (35.8\%)$
- ⊗  $\Sigma^+ : c\tau = 2.404 \text{ cm}$ 
  - ⊗  $\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0 (51.57\%)$
  - ⊗  $\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+ (48.31\%)$
- ⊗  $\Sigma^- : c\tau = 4.434 \text{ cm}$ 
  - ⊗  $\Sigma^- \rightarrow n + \pi^- (99.848\%)$
- ⊗  $\Xi^- : c\tau = 4.91 \text{ cm}$ 
  - ⊗  $\Xi^- \rightarrow \Lambda\pi^-$

ハイペロンは生成してもすぐに崩壊してしまう  
そのため実験は非常に難しい

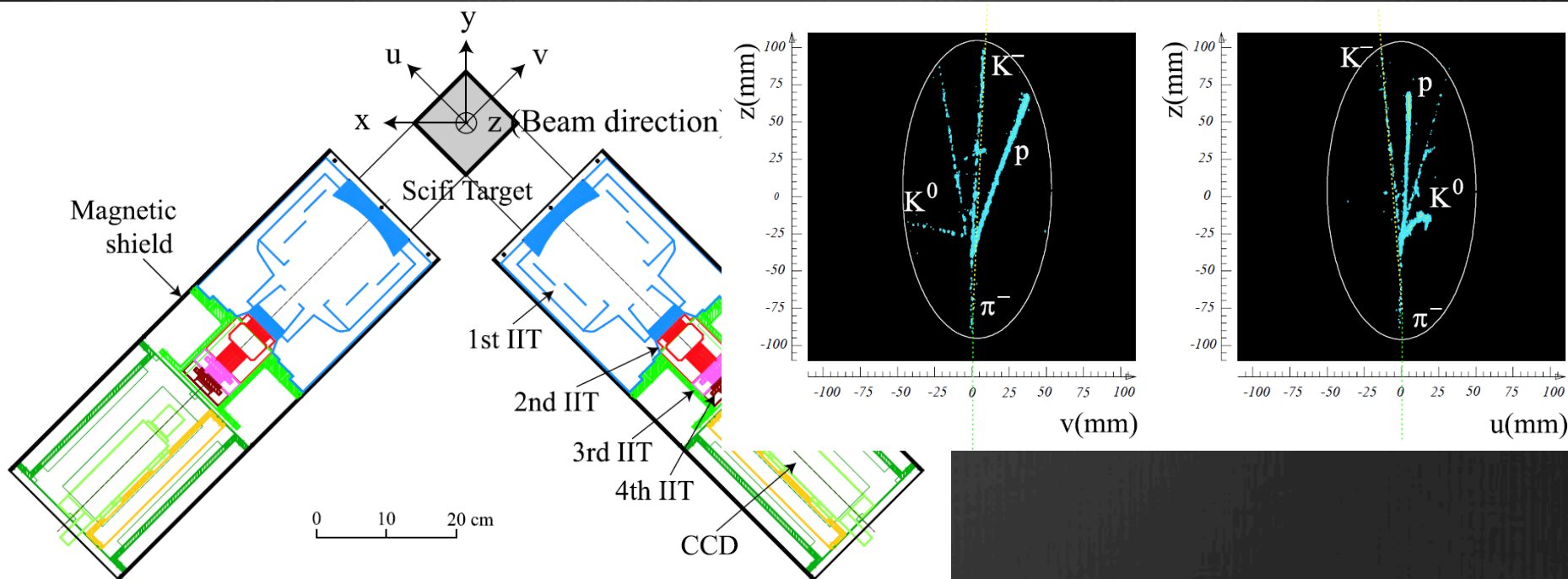
# ハイペロン陽子散乱実験の歴史

- バブルチェンバー内にK-ビームを静止させ、ハイペロンを生成させる。静止K-法がハイペロンを最も効率的に生成するため。
  - $K^-p \rightarrow \Lambda + \pi^0$
  - $K^-p \rightarrow \Sigma^0 + \pi^0$
  - $\quad \quad \rightarrow \Lambda + \gamma$
  - $\sim 300 \text{ MeV}/c$ までの低運動量のハイペロンを生成
- バブルチェンバー内の陽子と散乱する事象を写真で記録していた。



# $\Sigma p$ scattering experiments at KEK

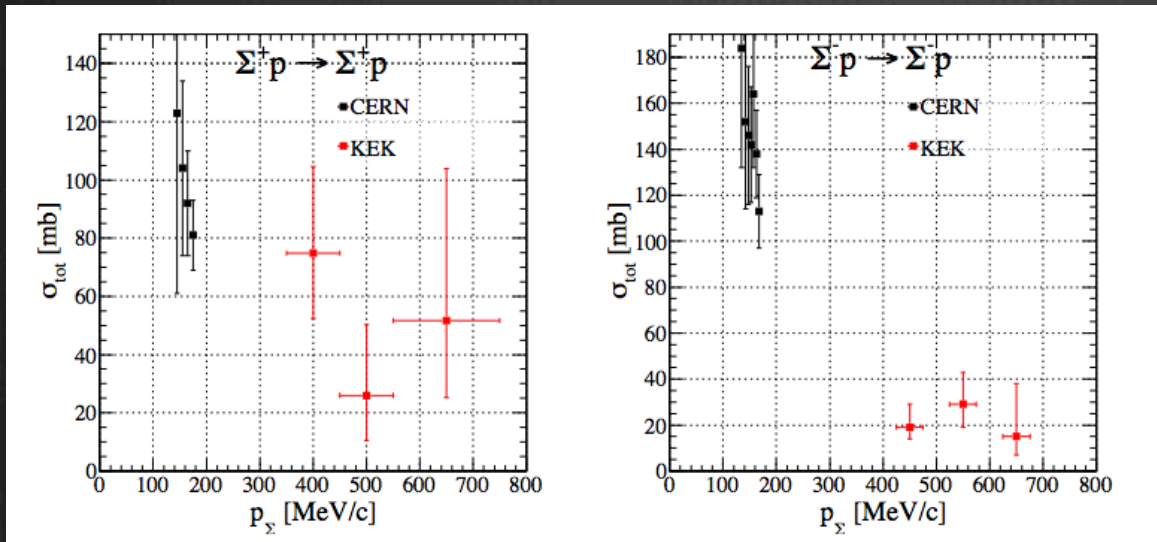
- ⊗  $\Sigma p$  scattering experiments at KEK
  - ⊗ Imaging method using CH active target



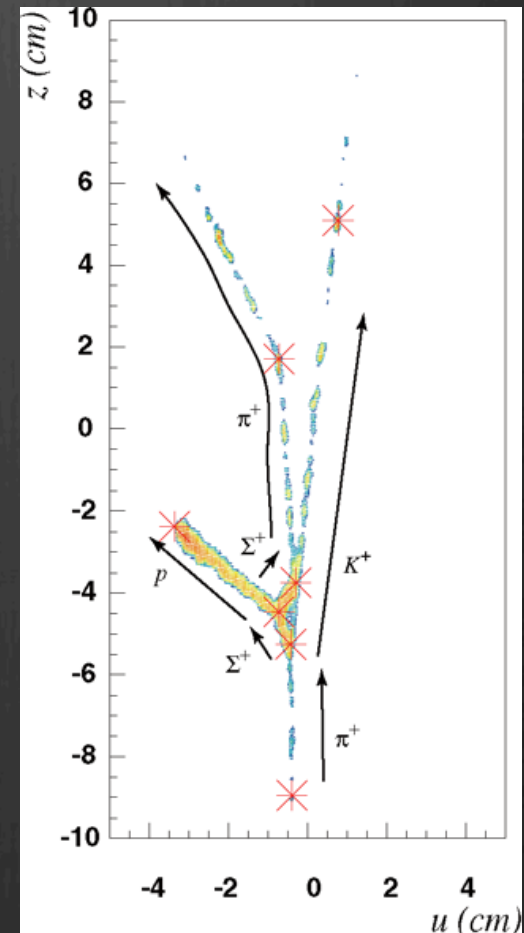
(c) SCIFI Active Target system

# $\Sigma p$ scattering experiments at KEK

- ⊗  $\Sigma p$  scattering experiments at KEK
  - ⊗ Imaging method using CH active target
    - ⊗ Low beam intensity
    - ⊗ Background from quasi free event with “C”



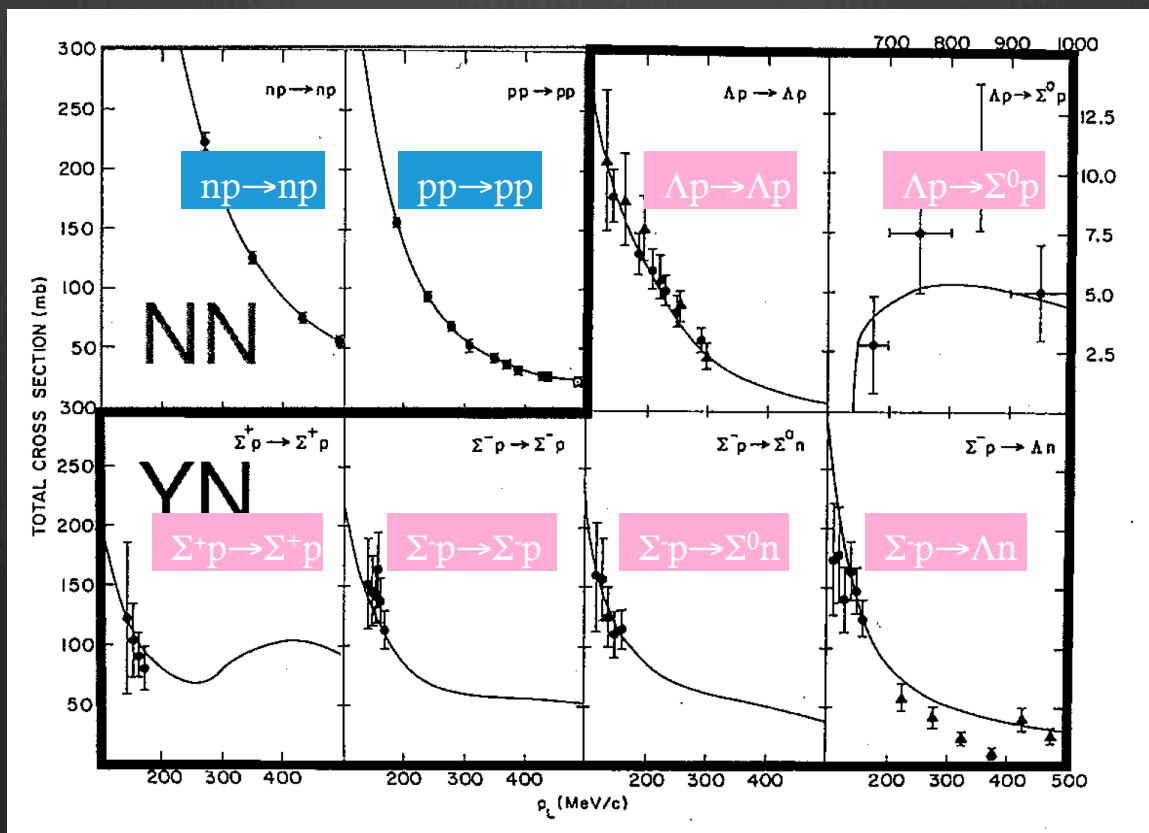
J.K.Ahn et al.; Nucl.Phys.A761(2005)41



# YN散乱実験の現状

- 豊富なNN散乱のデータ
- YNは非常に統計的に乏しい

Y. Kondo Doctor thesis



# Strategy of hypernuclear physics

Nuclear physics

Hypernuclear physics

Known nuclear force

Unknown YN interaction

Hyperon proton scattering

Lattice QCD



Unknown nuclear structure

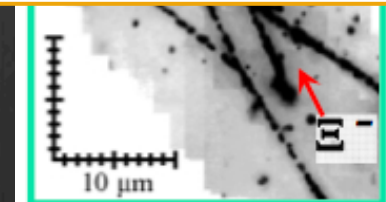
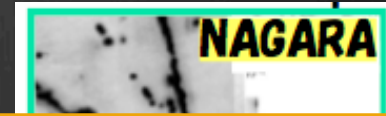


Expect from hypernuclear structure

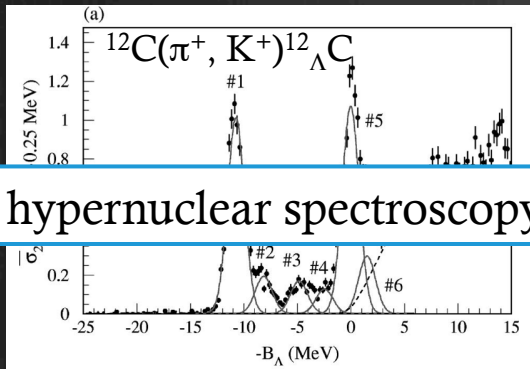
Theoretical framework extended to  $SU_F(3)$  symmetry



10 times more  $\Lambda\Lambda$  hypernuclei

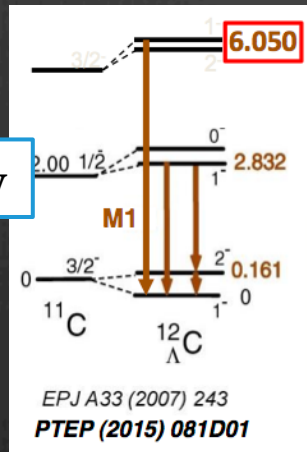


PRL 87 212502 (2001)



hypernuclear spectroscopy

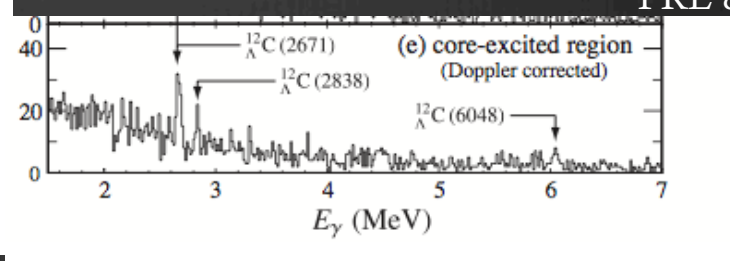
PRC 64 044302 (2001)



EPJ A33 (2007) 243  
PTEP (2015) 081D01

sd-shell  $\Lambda$  hypernuclei

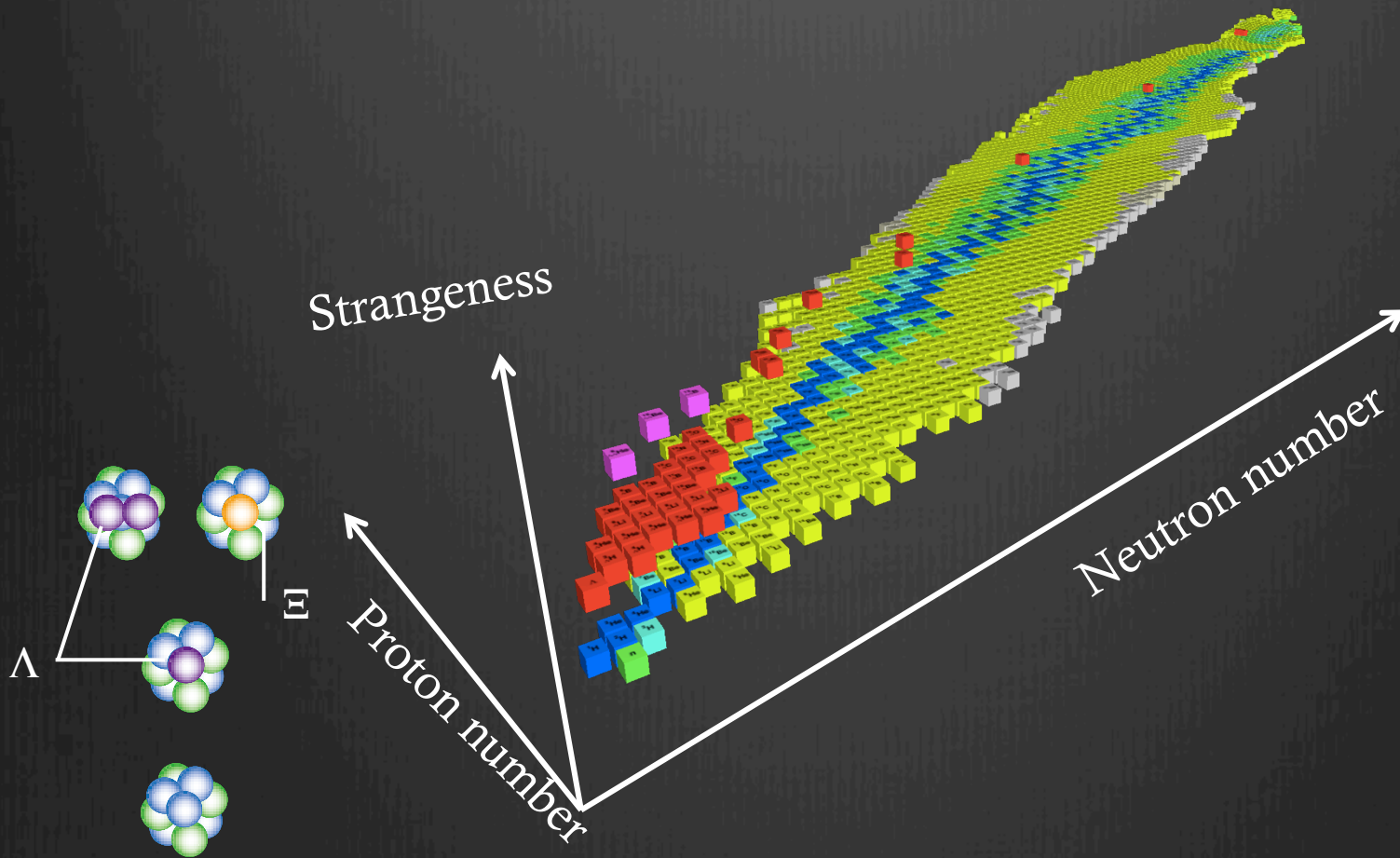
$\gamma$ -ray spectroscopy



PRL 87 212502 (2001)

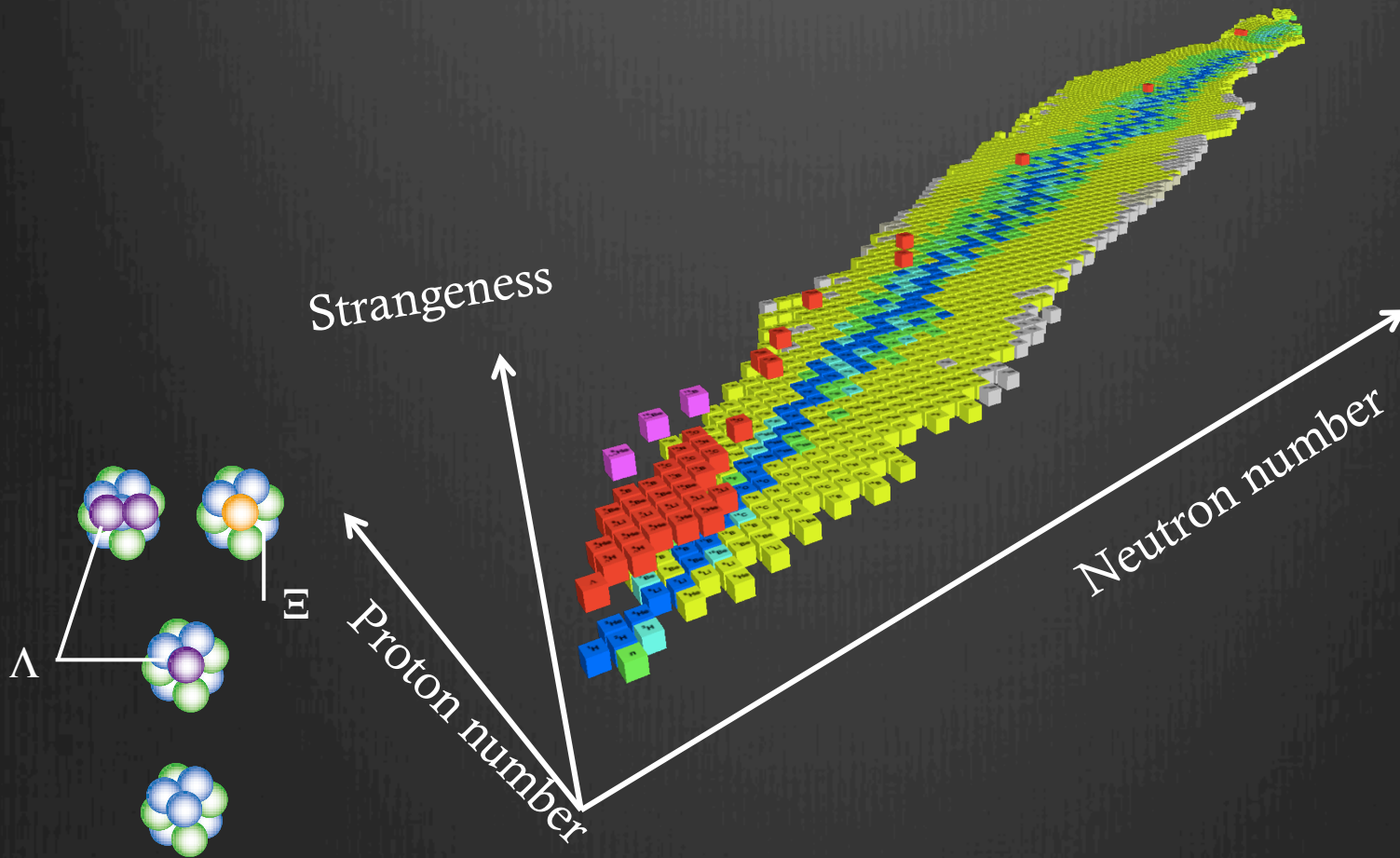


# Strangeness nuclear physics



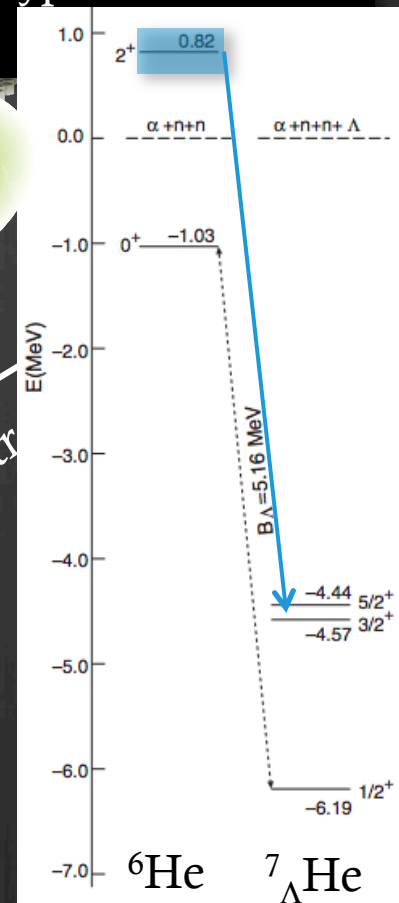
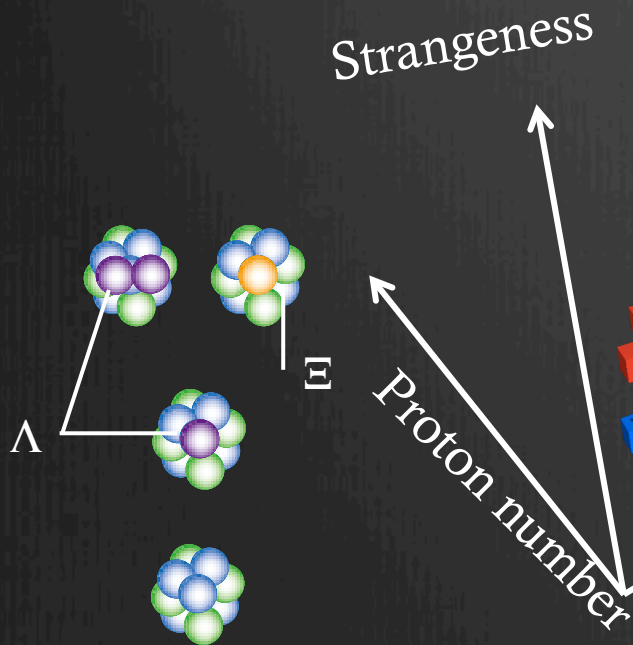
# Strangeness nuclear physics

- Investigation of Baryon-Baryon interaction  
NN interaction  $\rightarrow$  YN, YY interaction

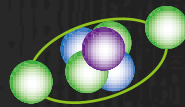


# Strangeness nuclear physics

- Investigation of Baryon-Baryon interaction  
 NN interaction  $\rightarrow$  YN, YY interaction
- Extend neutron drip line  
 $\Lambda$  glue-like role  
 Not only neutron-rich  $\Lambda$  hypernuclei but also core nuclei



E. Hiyama et al.  
 PRC 80, 054321 (2009)



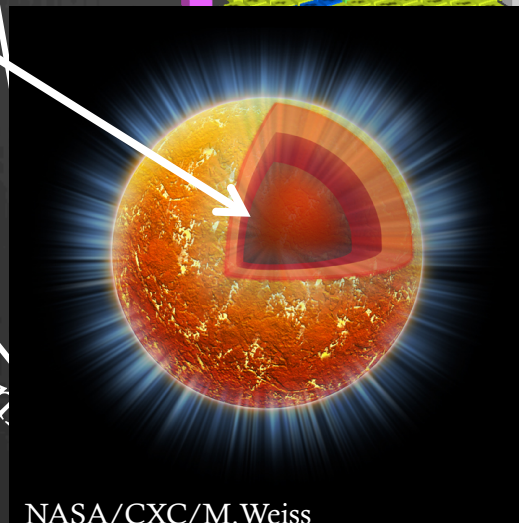
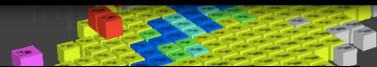
# Strangeness nuclear physics

- Investigation of Baryon-Baryon interaction  
 NN interaction  $\rightarrow$  YN, YY interaction
- Extend neutron drip line  
 $\Lambda$  glue-like role  
 Not only neutron-rich  $\Lambda$  hypernuclei but also core nuclei
- Possible existence of hyperon in high density nuclear matter such as neutron star

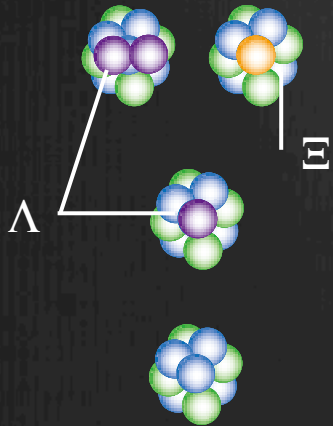
p, n,  $\Lambda$ ,  $\Xi^0$ ,  $\Xi^-$



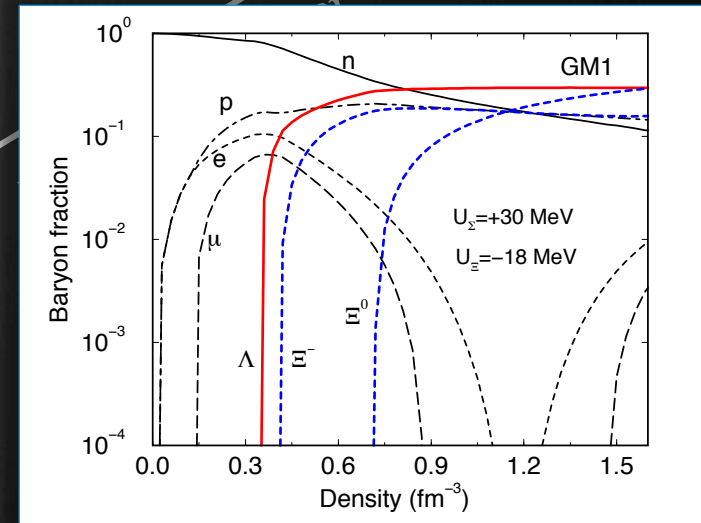
Strangeness



NASA/CXC/M. Weiss



Proton number



# ハイパー核の表現方法

質量数  $A$   $Z$  トータルの電荷  
ハイペロン  $Y$

## ● 例えば

●  ${}^{12}_{\Lambda}C : \Lambda + 6p + 5n$

●  ${}^6_{\Lambda\Lambda}He : \Lambda\Lambda + pp + nn$

●  ${}^4_{\Sigma}He : (\Sigma^+ + p + nn) + (\Sigma^0 + pp + n) + (\Sigma^- + ppp)$

●  ${}^{12}_{\Xi}Be : (\Xi^- + 5p + 6n) + (\Xi^0 + 4p + 7n)$

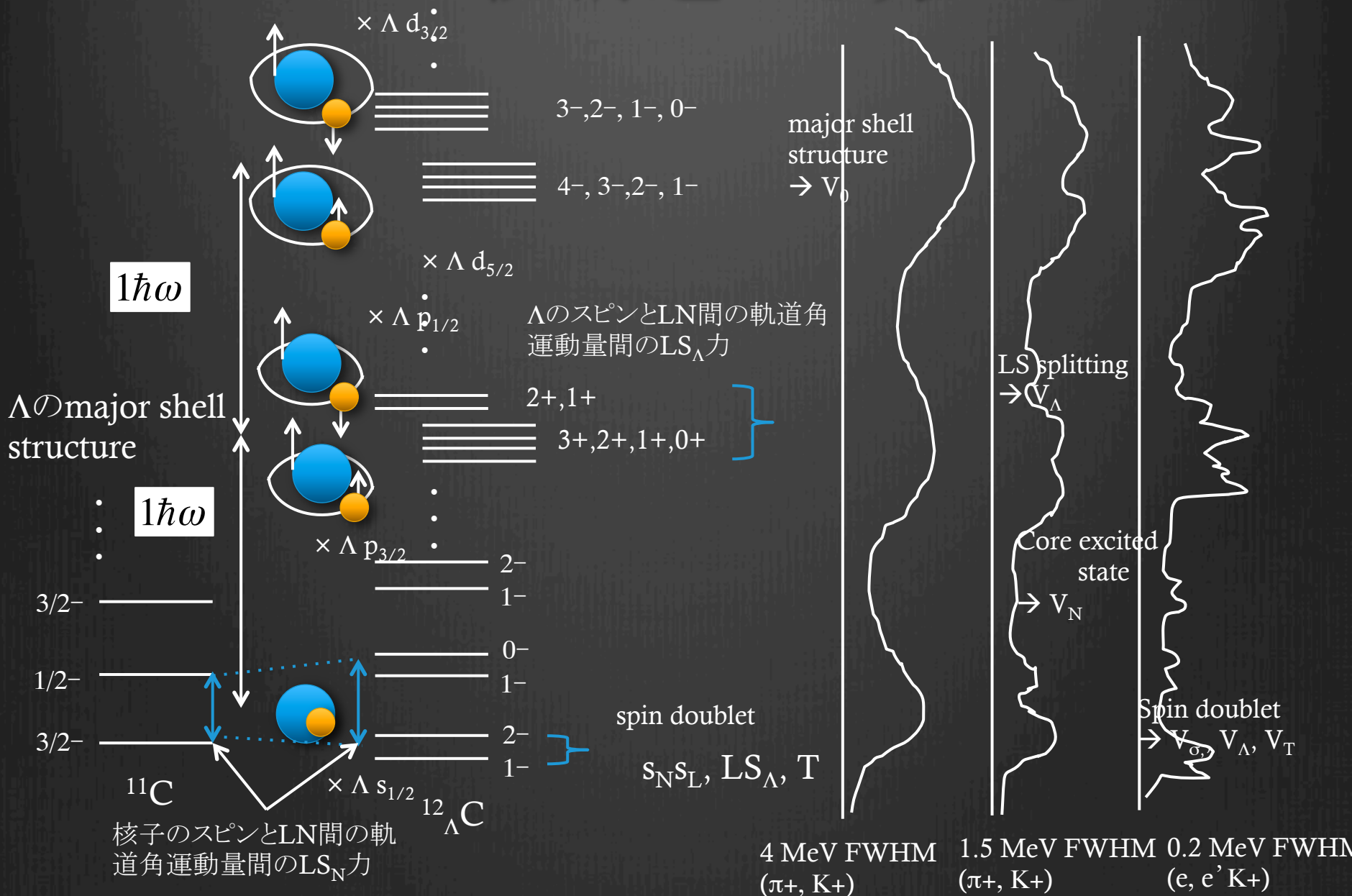
ハイペロンが電荷を持ちはじめると少しややこしくなる

# ハイパー核実験からのYN, YY 相互作用の情報のまとめ

- ⊗  $\Lambda$ N相互作用 (Almost established)
  - ⊗  $\Lambda$ は原子核内を探るプローブ
  - ⊗  $\Lambda$ N相互作用のポテンシャルの深さ : 30 MeV (NNの場合は50 MeV)
  - ⊗ スピンに依存した相互作用の大きさもp shellまでは決定
    - ⊗ 小さなLS力
- ⊗  $\Sigma$ N相互作用 (あまり分かっていない)
  - ⊗ 非常に強いスピン・アイソスピン依存を持つ
  - ⊗ 特に $\Sigma$ N(I=3/2, S=1)は非常に強い斥力
  - ⊗ 観測されている $\Sigma$ ハイパー核は ${}^4_{\Sigma}\text{He}$ のみ
- ⊗  $\Xi$ N相互作用 (ほとんど分かっていない)
  - ⊗  $\Xi$ ハイパー核が束縛状態として存在することは分かった
- ⊗  $\Lambda\Lambda$ 相互作用 (少し分かっている)
  - ⊗ 引力であるが非常に弱い

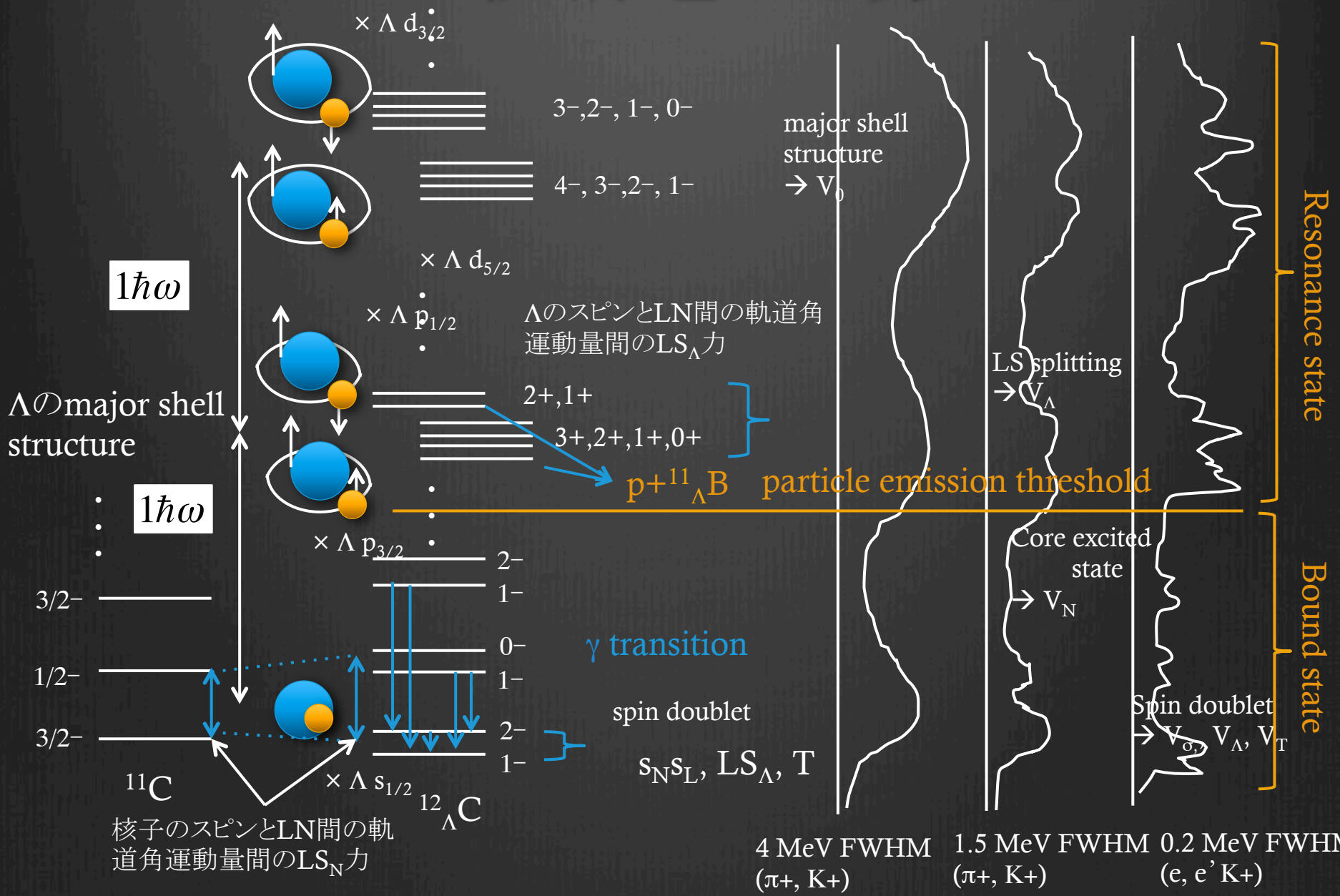


# $\Lambda$ ハイパー核構造から分かること



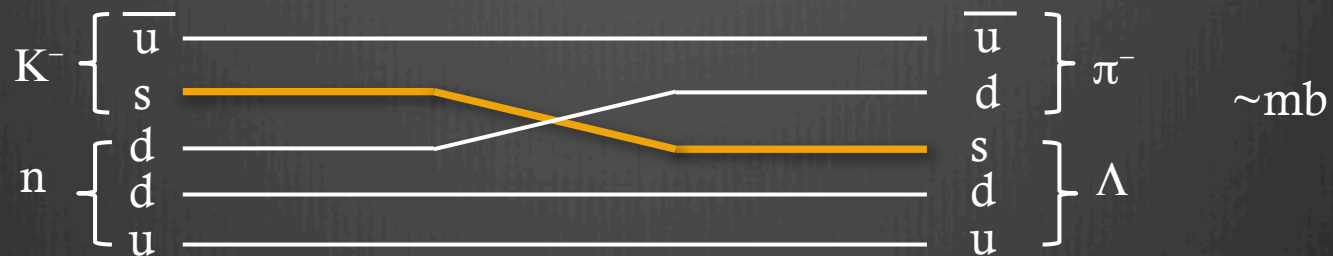


# $\Lambda$ ハイパー核構造から分かること

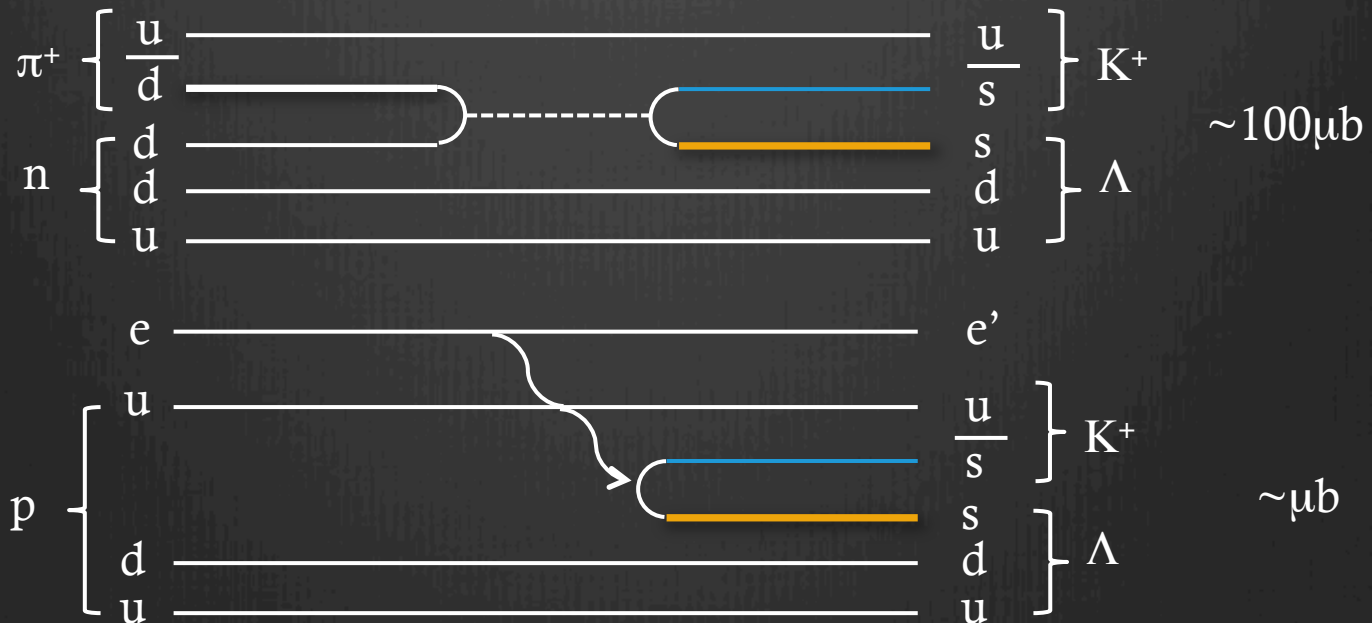


# strangeness production

## ⊗ Strangeness exchange reaction



## ⊗ Associated production reaction



# ハイパー

## ⊗ DWIA計算

⊗ 素過程の断面積  $d\sigma$

$$d\sigma / d\Omega(A) =$$

$N_{\text{eff}}$  : 有効核子数

$\alpha_{\text{kin}}$  : 素過程から原

⊗ ハイペロンが核に捕

$$S(q : nl(N), nl(Y)) = |\langle \phi_{nl(Y)}(r) | j(qr) | \phi_{nl(N)}(r) \rangle|^2$$

$q$  : 運動量移行 (ハイペロンの運動量)

$j(qr)$  : Bessel関数

$q$ が小さいとき : もとの核子とちょうど入れ替わるような状態 (substitutional state)が作られやすい

$q$ が大きいとき : 角運動量の変化の大きな状態(もとの核子と異なる軌道にハイペロンが捕獲される)が作られやすい (ただし全体の捕獲率は小さくなる)

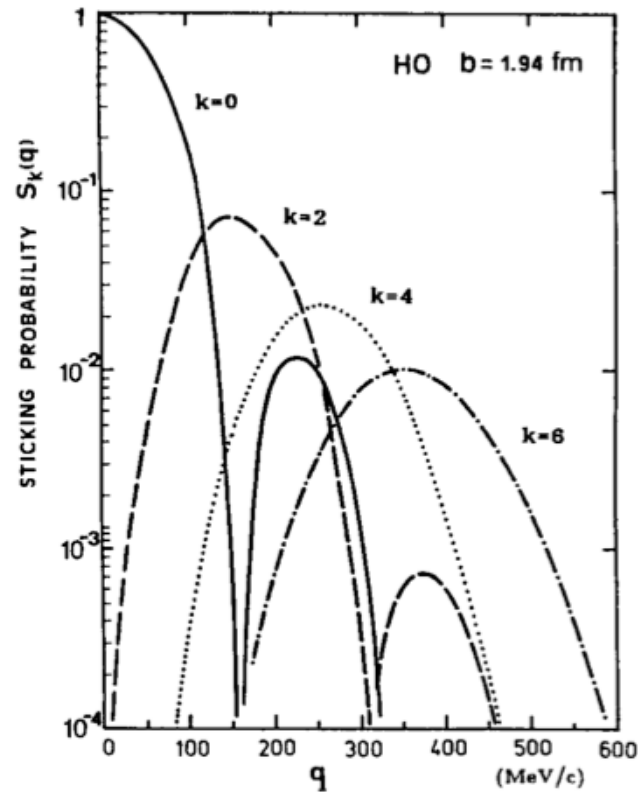
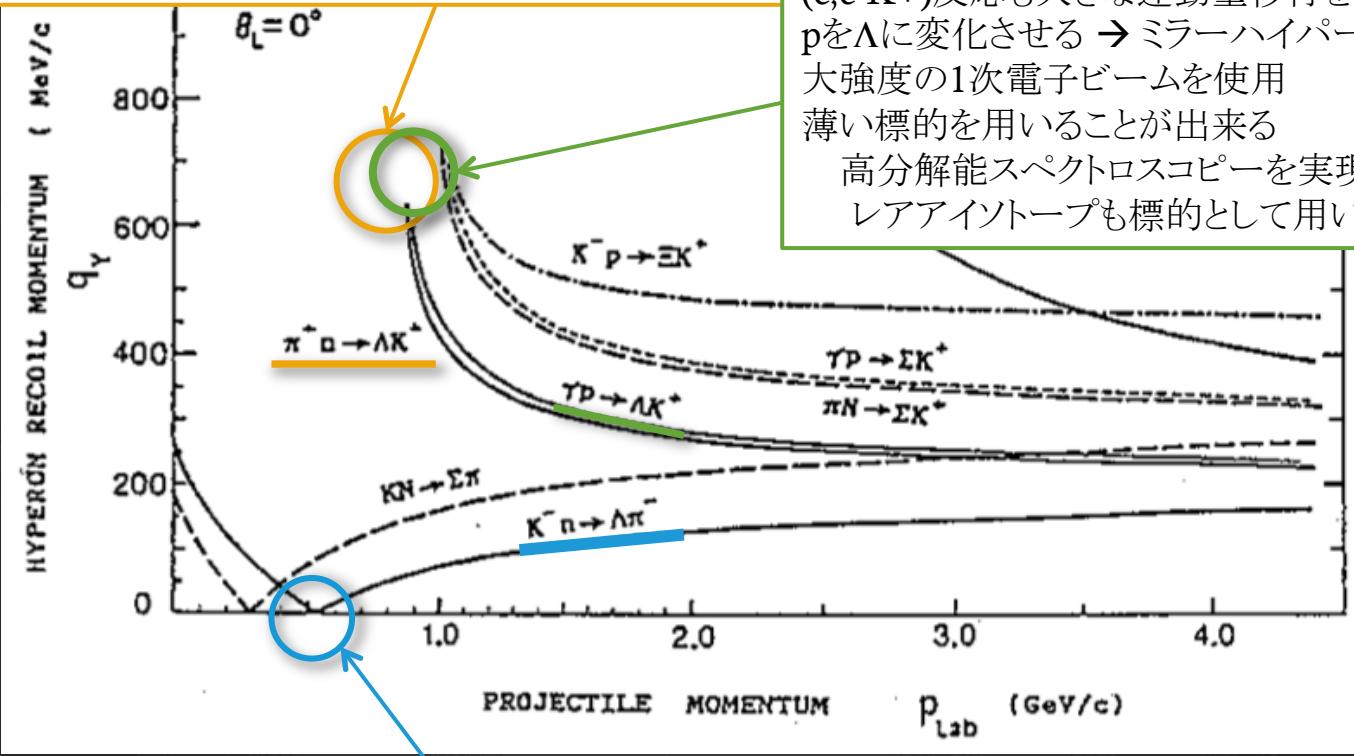


Fig. 2.4. The sticking probabilities  $S_k(q; (0f)_N, (0f)_Y)$  of Eq. (2.2) as a function of  $q$ . The harmonic oscillator size parameter  $b = 1.94$  fm is used.

# パイペロン生成時の運動量移行

( $\pi^+$ ,  $K^+$ )反応では大きな運動量移行が得られる  
 角運動量を大きく変化させ、原子核表面の核子を $\Lambda$ に変化させ更に $\Lambda$ を原子核深部に入れる

( $e, e'K^+$ )反応も大きな運動量移行をもつ  
 $p$ を $\Lambda$ に変化させる  $\rightarrow$  ミラーハイパー核の生成  
 大強度の1次電子ビームを使用  
 薄い標的を用いることが出来る  
 高分解能スペクトロスコピーを実現  
 レアアイソトープも標的として用いることが出来る



( $K^-, \pi^-$ )反応では $q=0$ となるmagic momentumが存在  
 カウンター実験初期では低い強度のK-ビームでも効率よくハイパー核を生成



substitutional stateがほぼ作られる  
 $\Lambda$ を原子核深部に入れることは難しい

# 反応核分光

- 生成されたハイパー核の質量を励起状態も含めて測定を行いたい



4元運動量の保存

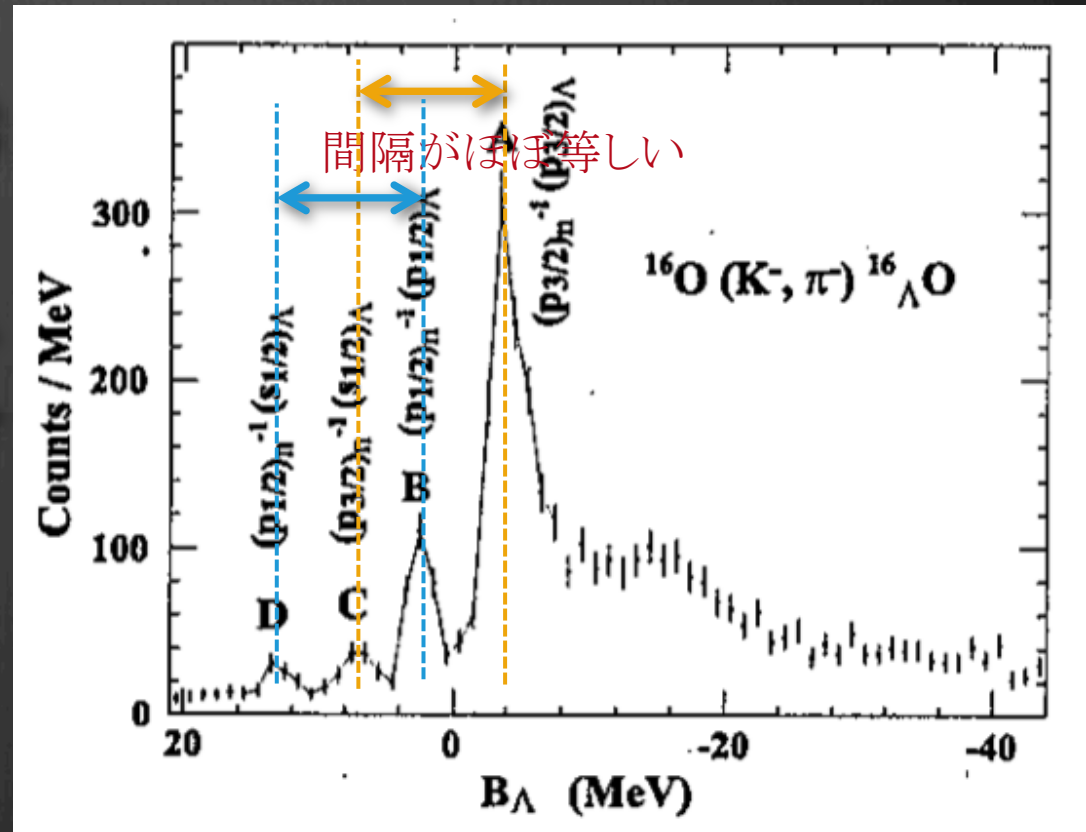
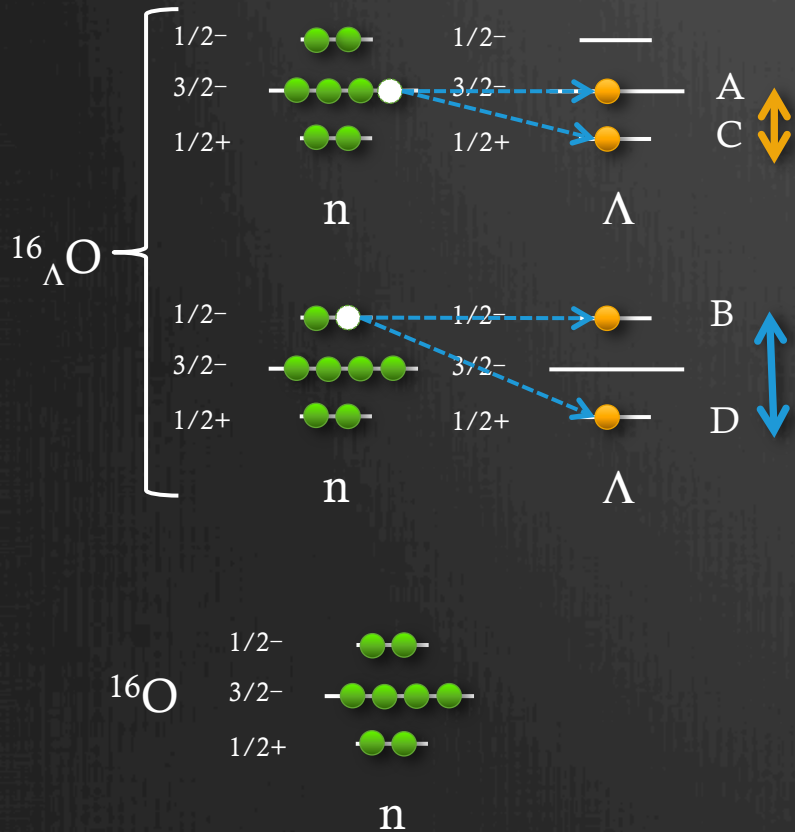
$$\mathbf{p}_{\text{beam}} + \mathbf{p}_{\text{target}} = \mathbf{p}_{\text{scat}} + \mathbf{p}_{\text{hyp}}$$

$$p_{\text{hyp}}^2 = M_{\text{hyp}}^2 = (\mathbf{p}_{\text{beam}} + \mathbf{p}_{\text{target}} - \mathbf{p}_{\text{scat}})^2$$

入射ビームの運動量、散乱粒子の運動量、および散乱角度を測定することで生成されたハイパー核の質量が測定出来る

# ( $K^-$ , $\pi^-$ )反応による $\Lambda$ ハイパー核スペクトロスコピー

## ⊙ Substitutional stateの生成

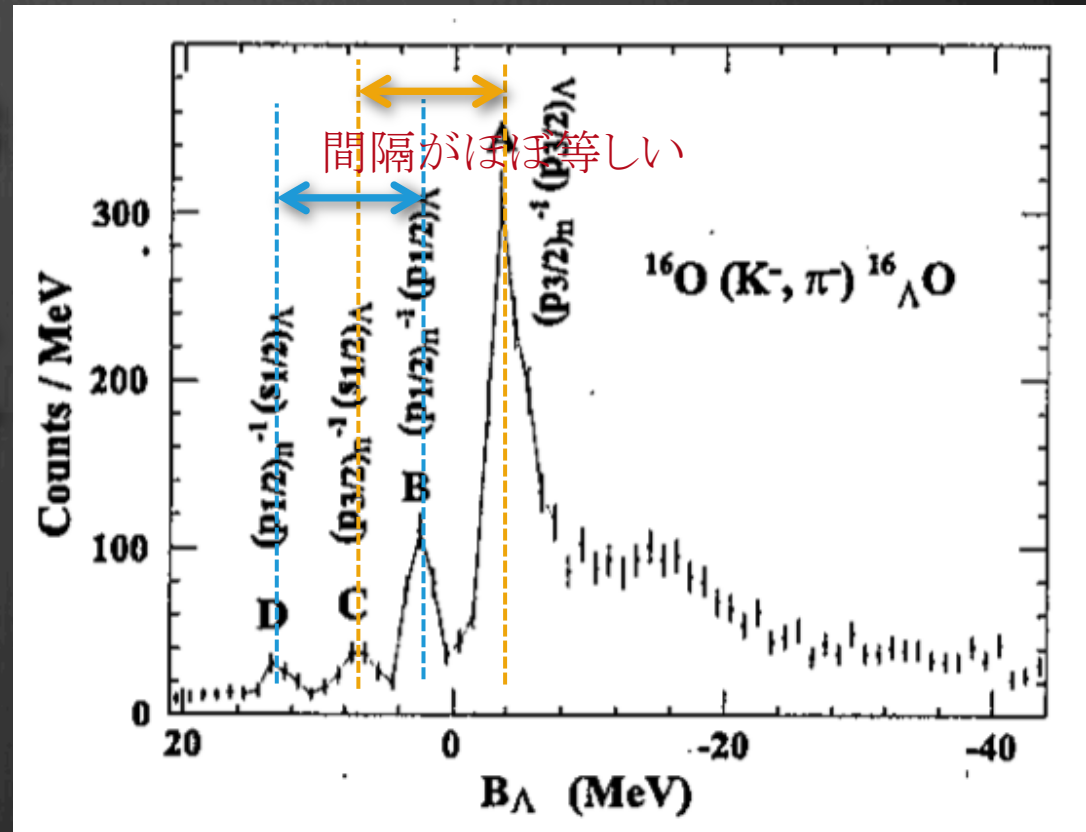
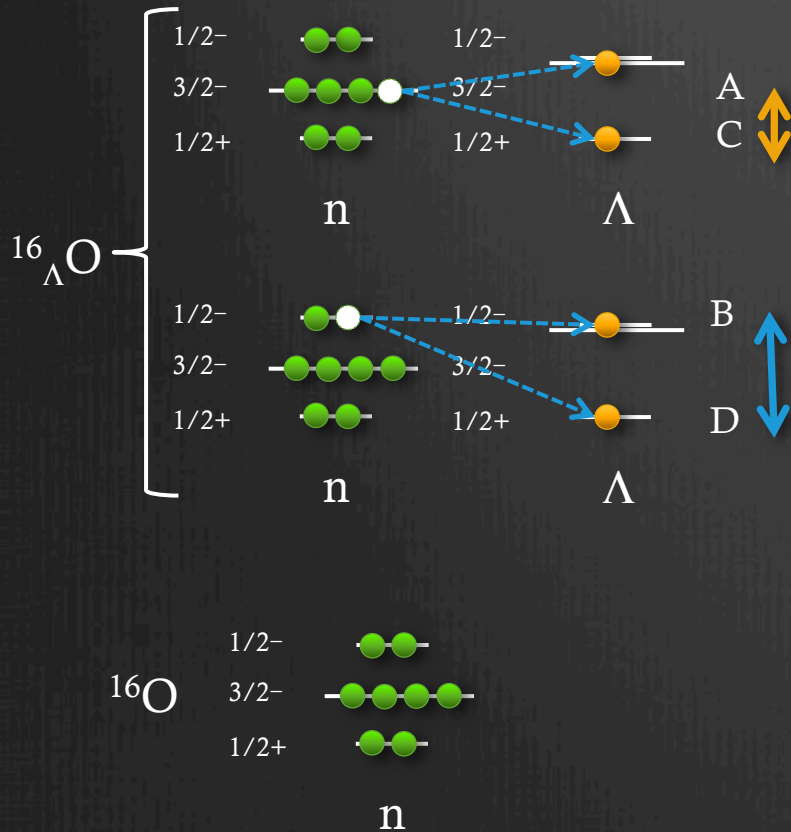


# (K<sup>-</sup>, π<sup>-</sup>)反応によるΛハイパー核スペクトロスコピー

⊗ Substitutional stateの生成

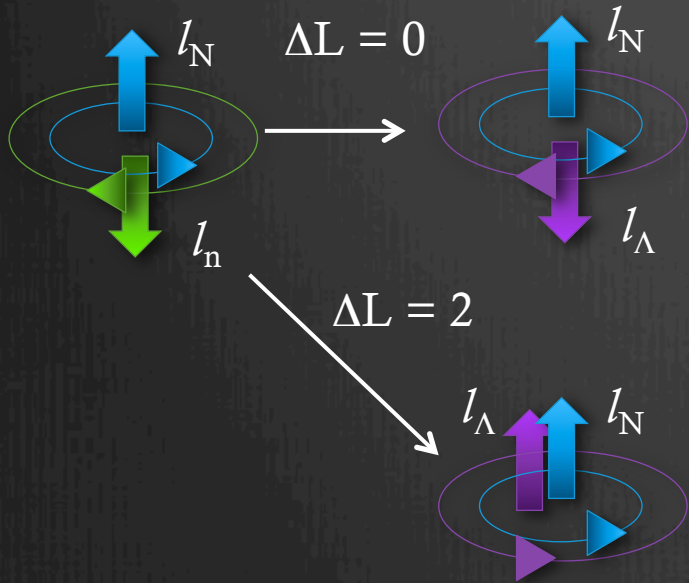
⊗ ΛのスピンによるLS力が非常に小さい

クォーク模型の予想に一致

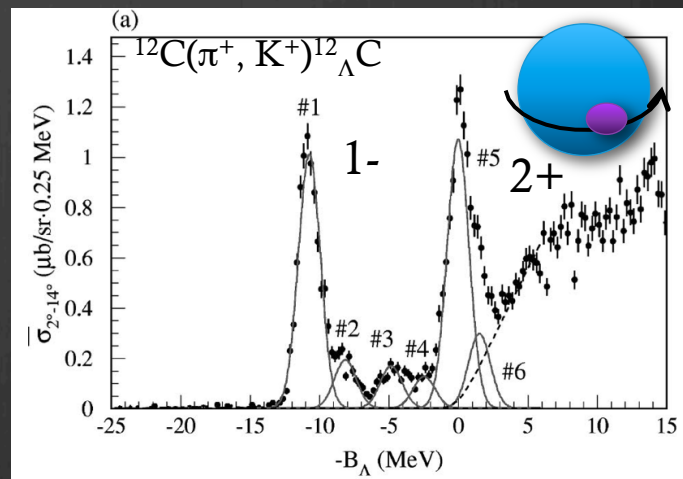
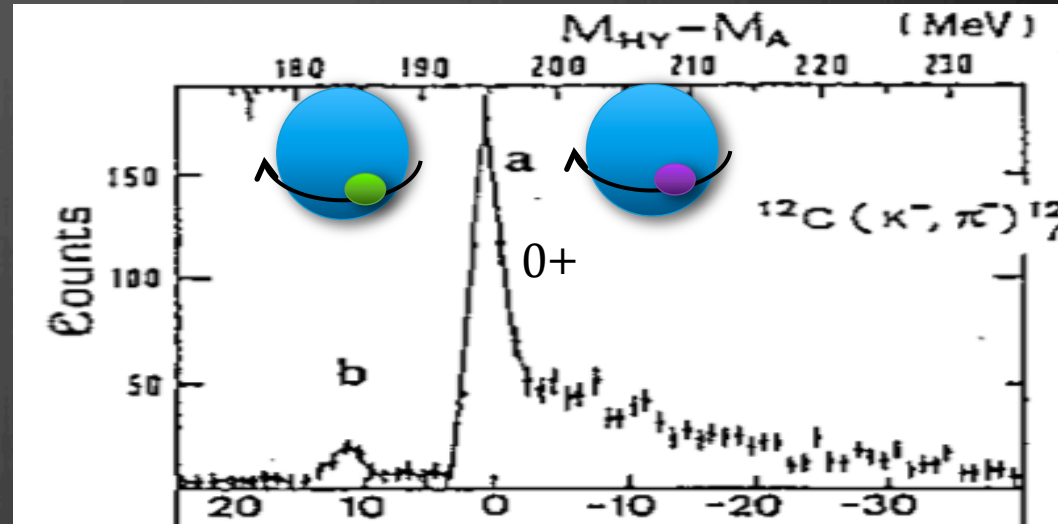


# ( $\pi^+$ , $K^+$ )反応による $\Lambda$ ハイパー核 スペクトロスコピー

- 大きな運動量移行
- $\Delta L$ の大きな順位が生成されやすい



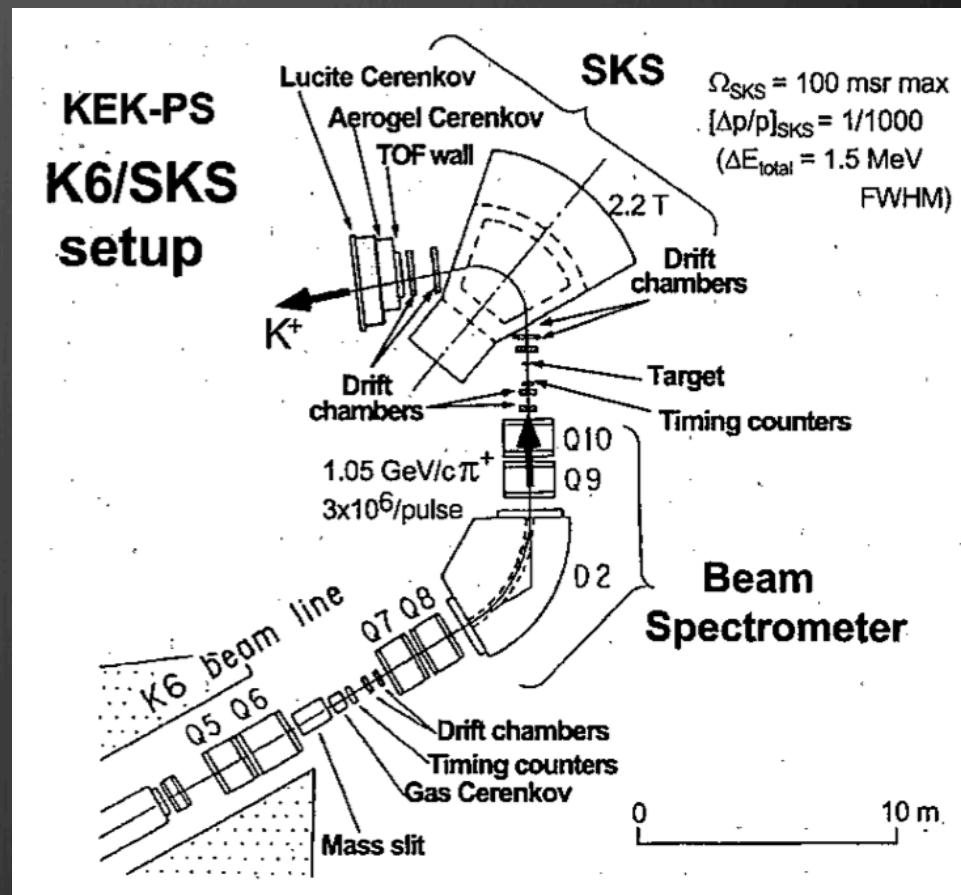
Spin stretched stateを選択的に生成





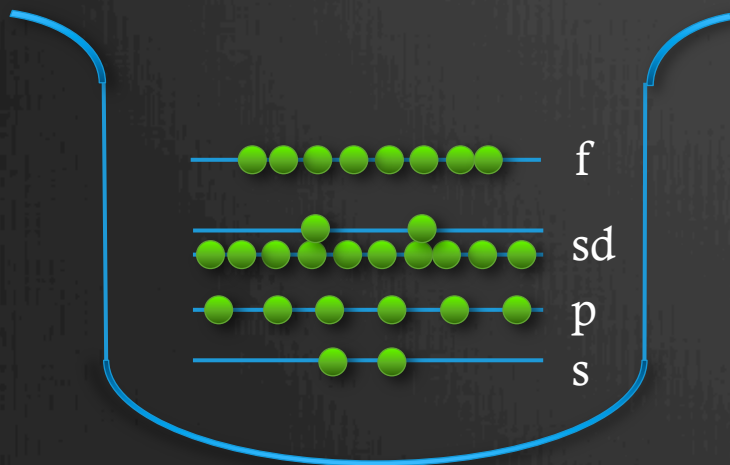
# KEKでのハイパー核実験

- KEK 12 GeV PSでは( $\pi^+$ ,  $K^+$ )反応を用いた $\Lambda$ ハイパー核の高分解能スペクトロスコープ
- $K^-$ の強度ではBNLに劣っていた
- $\pi$ の強度は検出器の高計数率耐性で決まるのでKEK PSでも十分勝負ができた。
- K6ビームラインとSKSスペクトロメータ
- $\Delta p_{K6} = 10^{-4}$  (FWHM)
- $\Delta p_{SKS} = 10^{-3}$  (FWHM)
- Mass resolution 1.5 MeV (FWHM)



# 重たい $\Lambda$ ハイパー核

- ⊗ 原子核の殻模型 (shell model)
  - ⊗ 一体場のポテンシャルの中を核子が独立に運動する
  - ⊗ 原子核の性質は最外殻の核子の軌道の性質で決まる
    - ⊗ 最外殻よりも内側の核子がどうなっているかは全く分からなかった



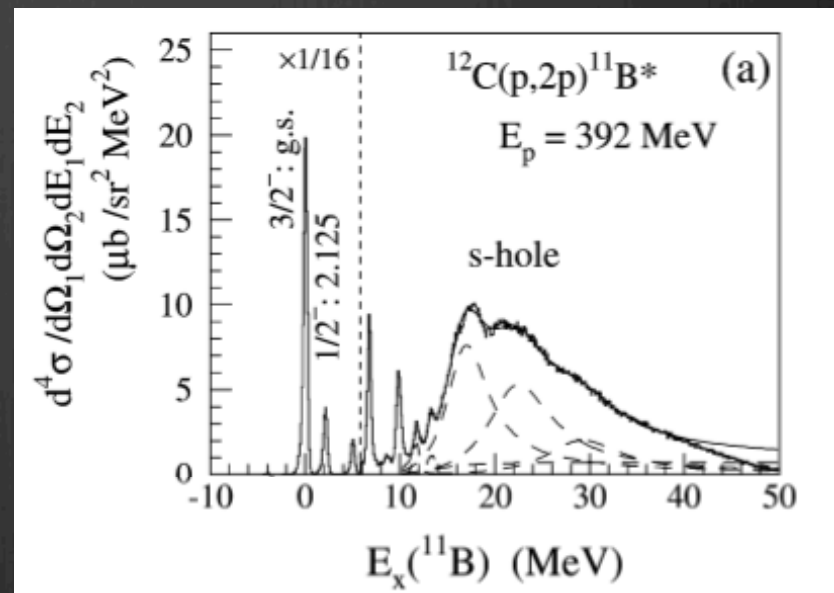
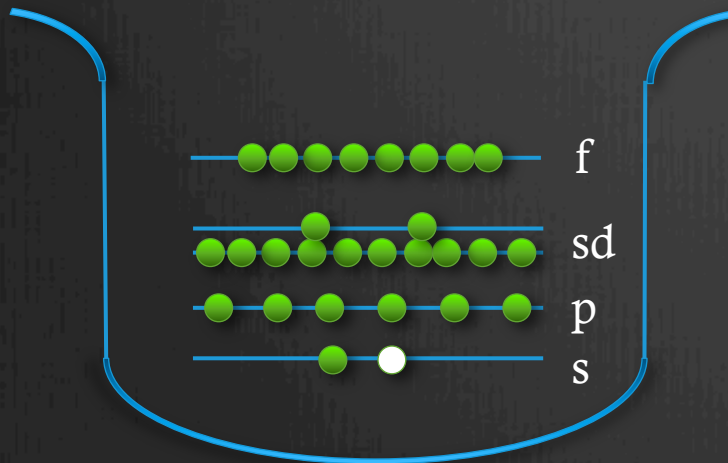
# 重たい $\Lambda$ ハイパー核

## ⊗ 原子核の殻模型 (shell model)

- ⊗ 一体場のポテンシャルの中を核子が独立に運動する
- ⊗ 原子核の性質は最外殻の核子の軌道の性質で決まる
- ⊗ 最外殻よりも内側の核子がどうなっているかは全く分からなかった

s hall state

非常に幅の狭い状態

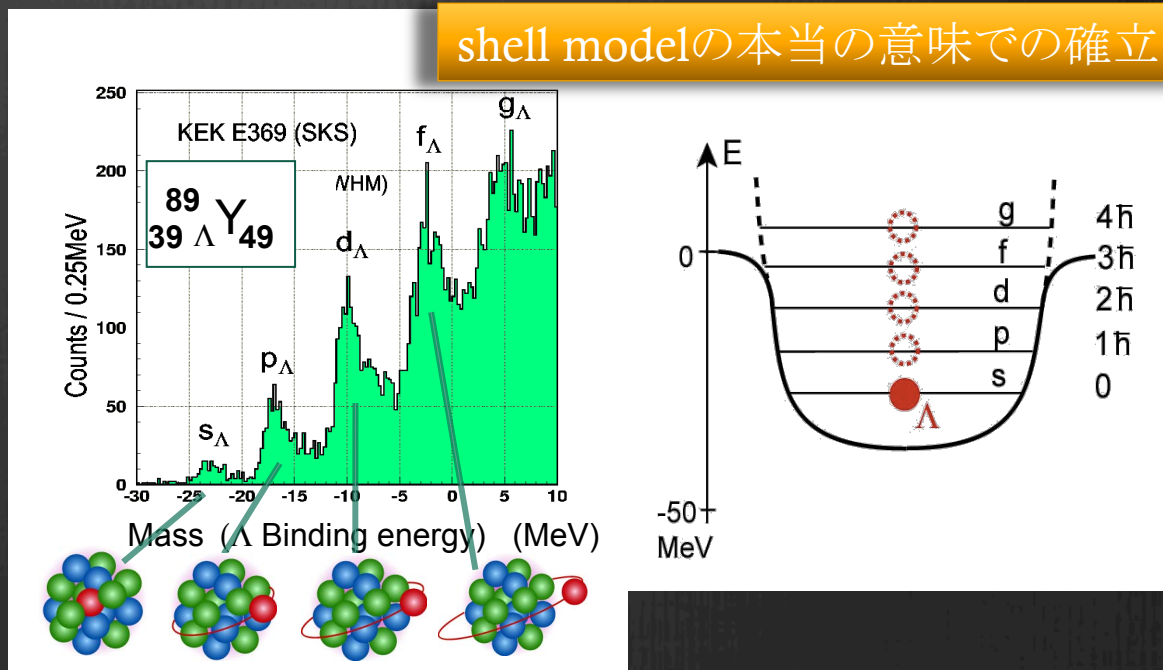


# 重たい $\Lambda$ ハイパー核

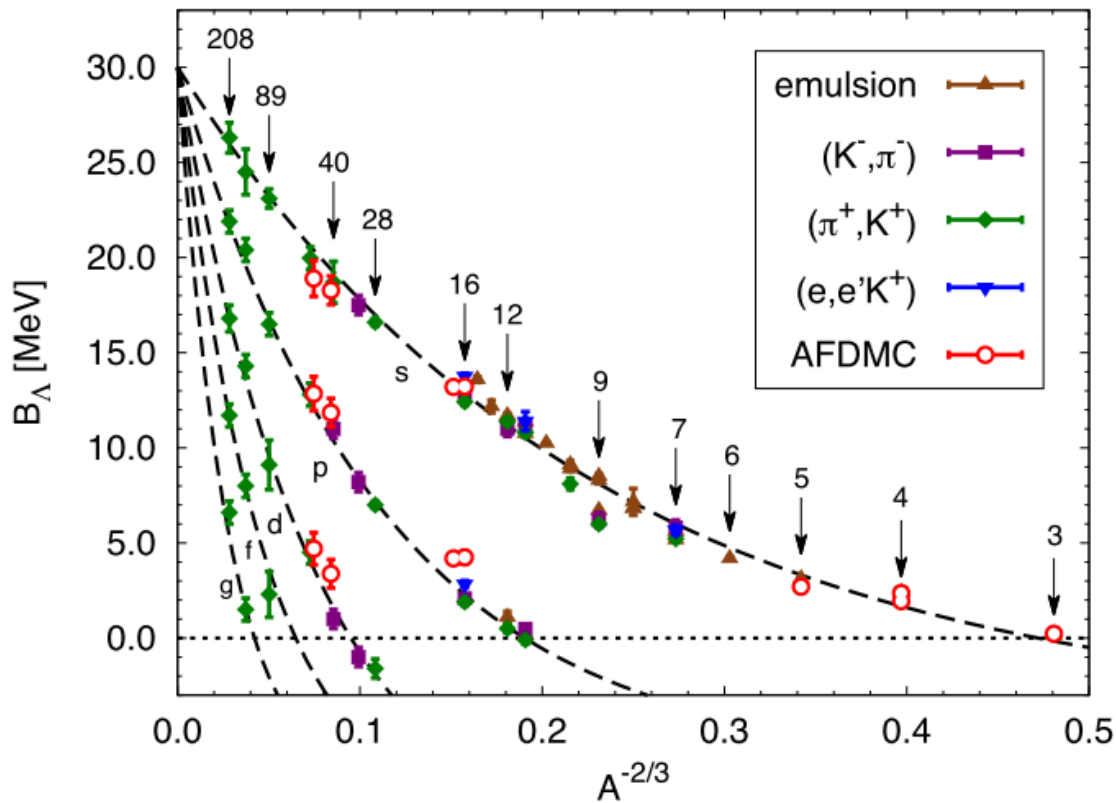
- ⊗ 原子核の殻模型 (shell model)
  - ⊗ 一体場のポテンシャルの中を核子が独立に運動する
  - ⊗ 原子核の性質は最外殻の核子の軌道の性質で決まる
    - ⊗ 最外殻よりも内側の核子がどうなっているかは全く分からなかった
- ⊗  $\Lambda$ は原子核深部へと入ることが出来るプローブ

- $\Lambda$ は核子からのパウリ排他律を受けない
- $\Lambda N$ 相互作用は比較的弱い
  - pion交換が禁止される

shell modelの本当の意味での確立



# $\Lambda$ single particle state



$\Lambda$ の核ポテンシャルを深さ $V_0$ の箱形ポテンシャルとするとフェルミエネルギーは以下ようになる

$$V_0 - B_\Lambda = \frac{\pi^2 h^2}{2MR^2} \propto A^{-2/3}$$

F.Pedriva et al. arXiv:1506.04042

- ⊗ 様々な反応から得られたLハイパー核の束縛エネルギー
- ⊗  $A^{-2/3}$ に対してほぼ直線的になる
- ⊗  $A \rightarrow \infty$ から $\Lambda$ のポテンシャルは $\sim 30$  MeV

# + ガンマ線分光を使ったハイパー核研究

スピンに依存した $\Delta N$ 相互作用を調べたい!

→ ハイパー核のスピン2重項などの精密構造の情報が必要

## ハイパー核の低励起の準位構造

### 反応分光

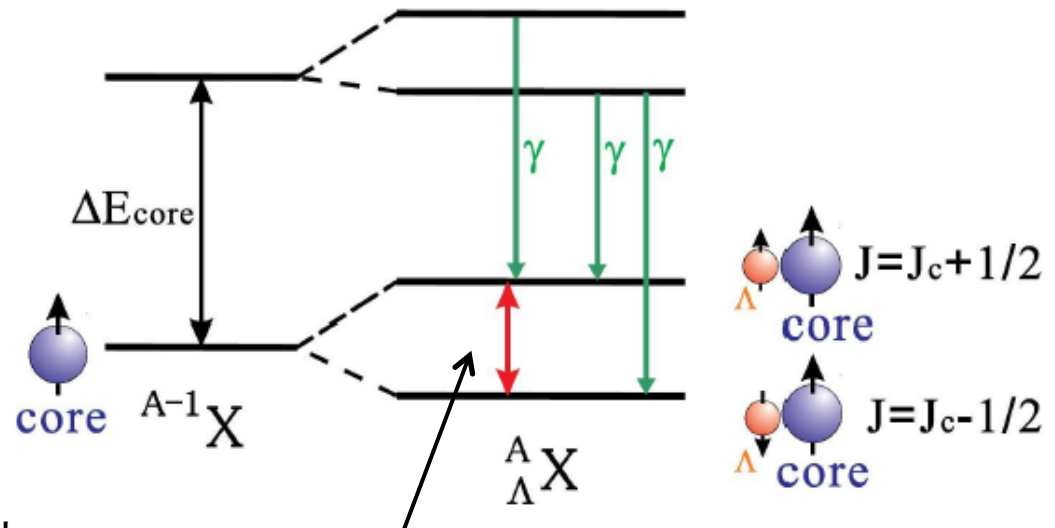
入射・散乱粒子の運動量解析

励起エネルギーを直接測定

エネルギー分解能:

$(K^-, \pi^-), (\pi^+, K^+)$ :  $\sim 1.5$  MeV

$(e, e'K^+)$ :  $\sim 400$  keV



### + ガンマ線分光

ハイパー核の脱励起時に発生  
するガンマ線をGe検出器で測定

**エネルギー分解能:  $\sim 3$  keV**

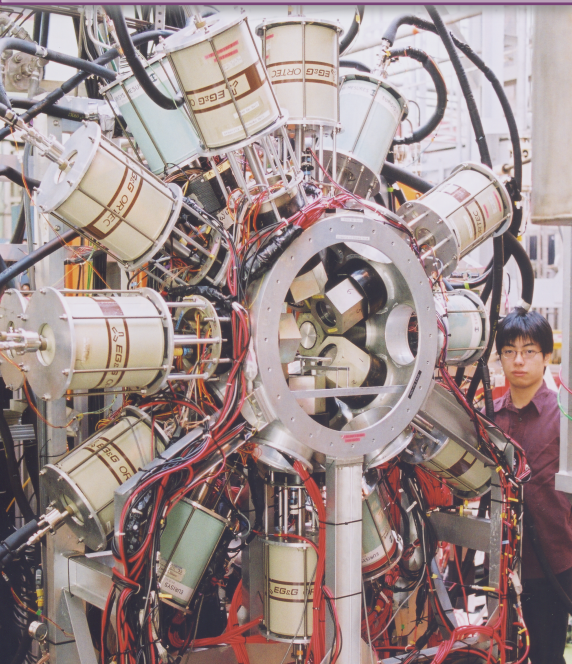
→ **ハイパー核の精密構造を解明できる**

(束縛状態のみ情報が得られる)

### スピン2重項

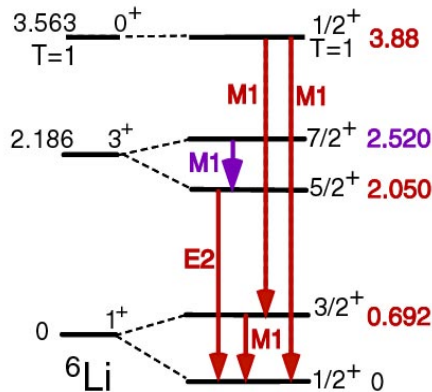
(準位間のエネルギー: 数100keV)

# Hyperball



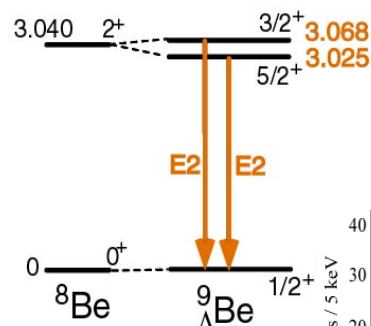
# Hypernuclear $\gamma$ -ray data

${}^7\text{Li} (\pi^+, K^+\gamma)$  KEK E419



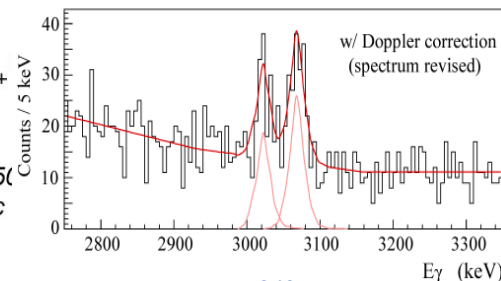
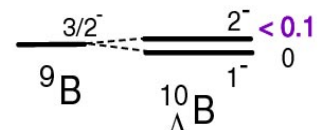
${}^7_{\Lambda}\text{Li}$  PRL 84 (2000) 5963  
PRL 86 (2001) 1982  
PLB 579 (2004) 258  
PRC 73 (2006) 012501

${}^9\text{Be} (K^-, \pi^-\gamma)$  BNL E930('98)

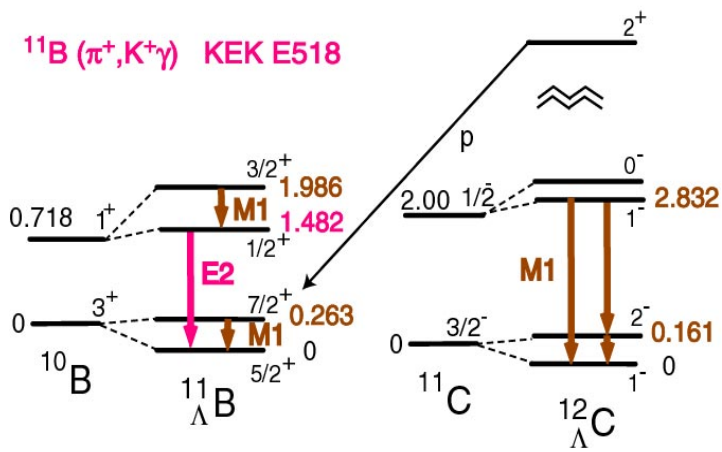


PRL 88 (2002) 0825  
NPA 754 (2005) 58c

${}^{10}\text{B} (K^-, \pi^-\gamma)$  BNL E930('01)



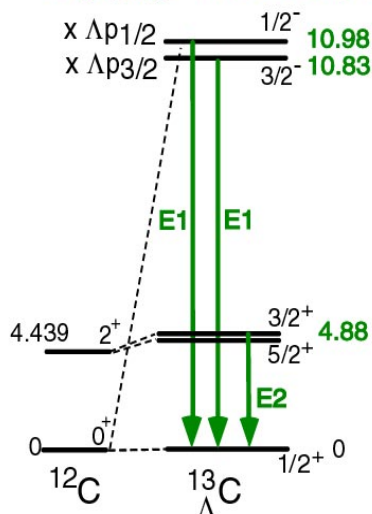
${}^{12}\text{C} (\pi^+, K^+\gamma)$  KEK E566



NPA 754 (2005) 58c

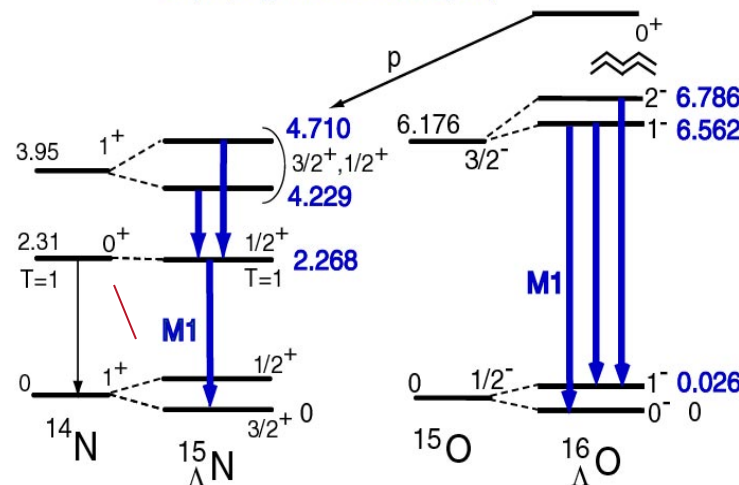
EPJ A33 (2007) 243

${}^{13}\text{C} (K^-, \pi^-\gamma)$  BNL E929 (NaI)



PRL 86 (2001) 4255  
PRC 65 (2002) 034607

${}^{16}\text{O} (K^-, \pi^-\gamma)$  BNL E930('01)

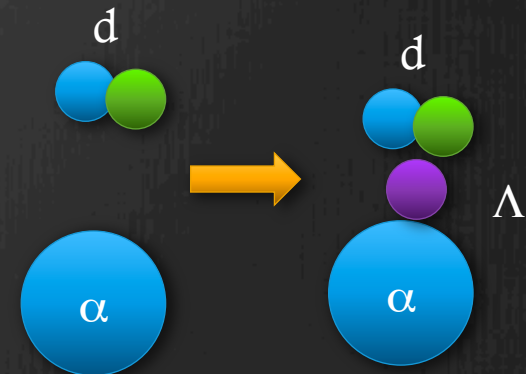
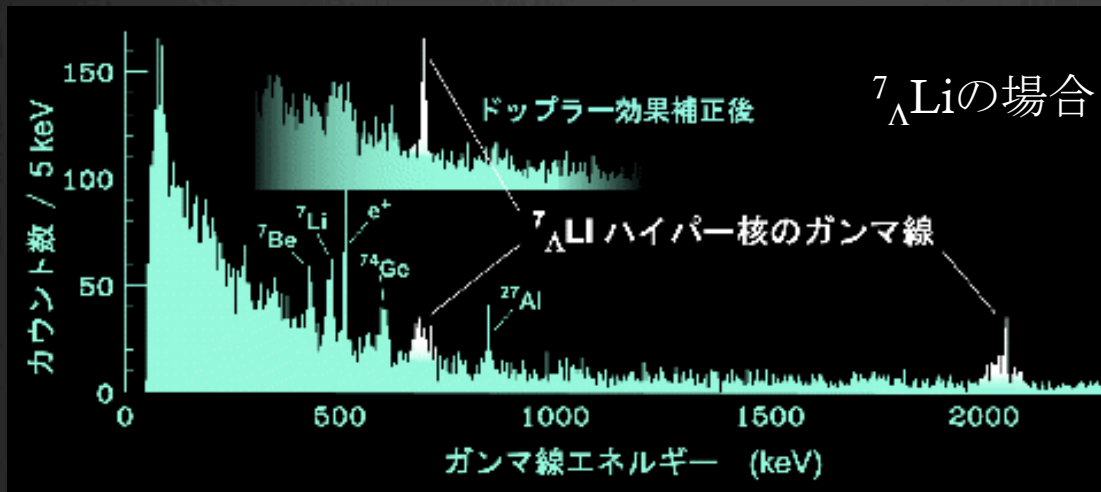


PRC 77 (2008) 054315

PRL 93 (2004) 232501  
EPJ A33 (2007) 247

# $\Lambda$ ハイパー核の $\gamma$ 線分光

- ⊗ エネルギー分解能の圧倒的な改善 (1.5 MeV  $\rightarrow$  2 keV)
  - ⊗  $\Lambda$ のスピンのによるLS splittingを測定
- ⊗ ハイパー核の電磁遷移確率の測定
  - ⊗ B(M1) :  $\Lambda$ のスピンスリップ
  - ⊗ Lの核内の磁氣的性質
  - ⊗ B(E2) ( $\propto R^4$ ) :  $\Lambda$ が入ることによってどれくらい原子核が縮むか

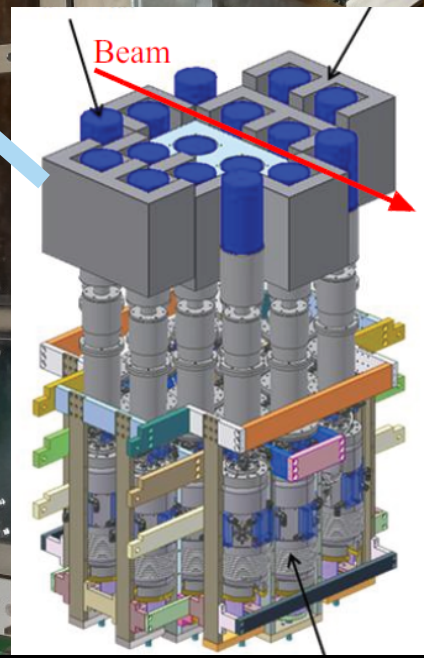
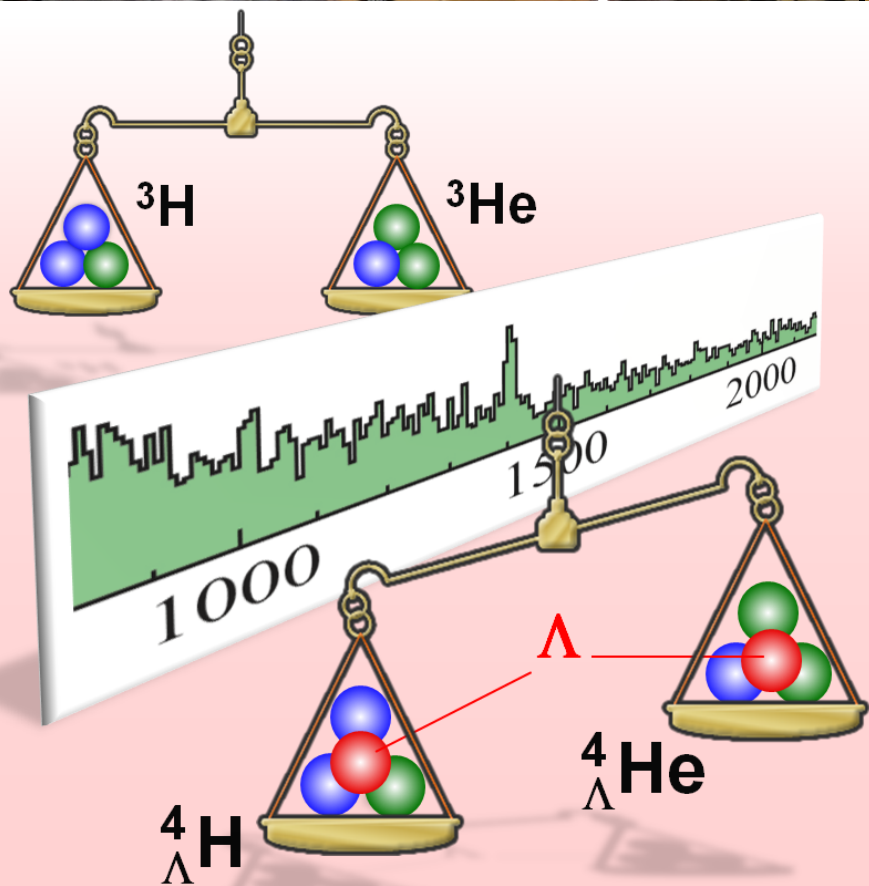




SKS spectrometer

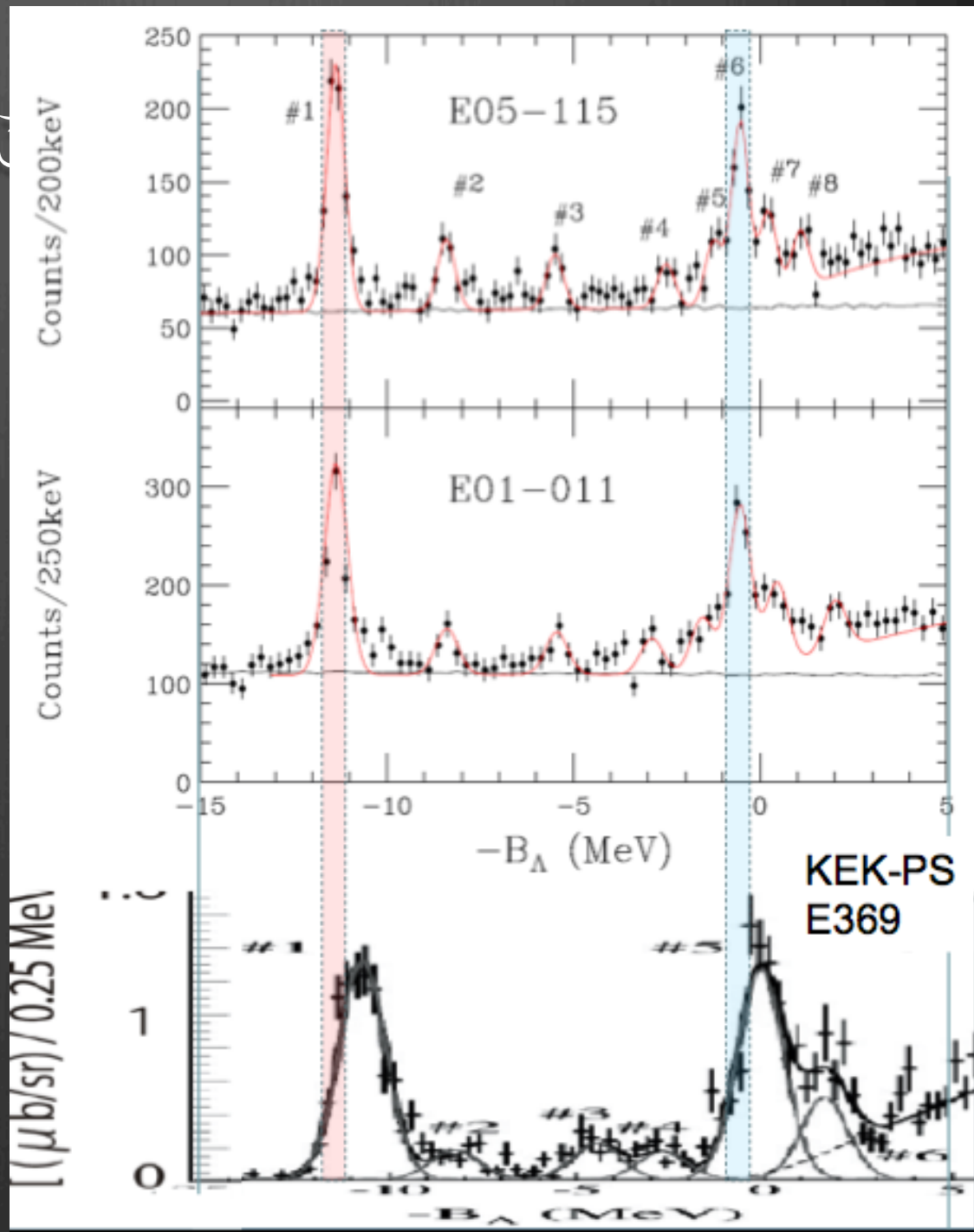


Hyperball-J (2012~)  $\epsilon \sim 6\%$

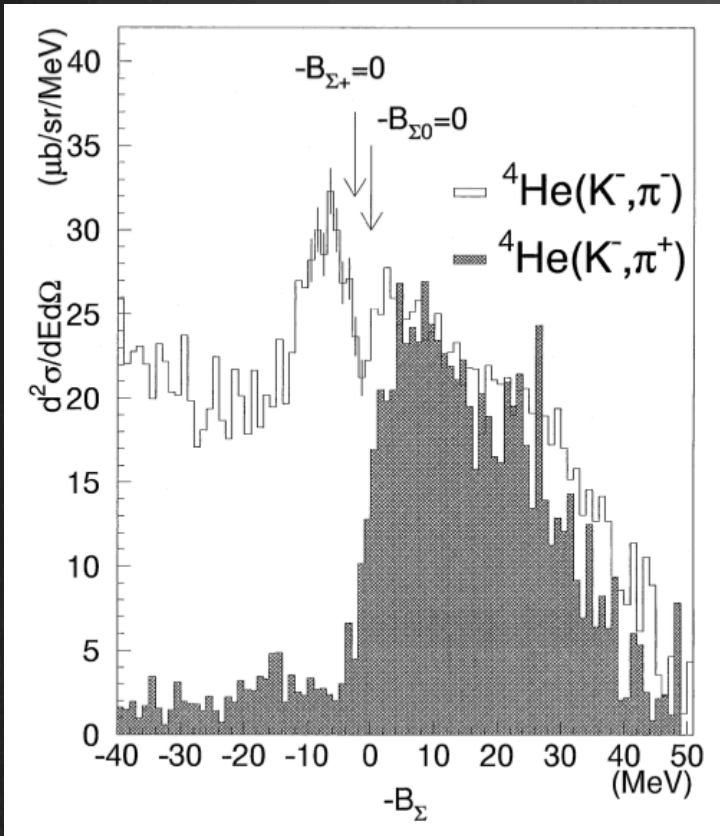


# $(e, e'K^+)$ 反応は

⊗ aa

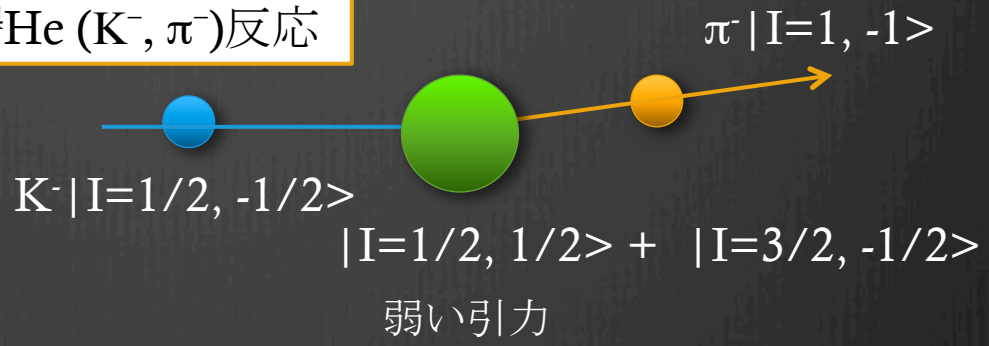


# Σパイパー核は？

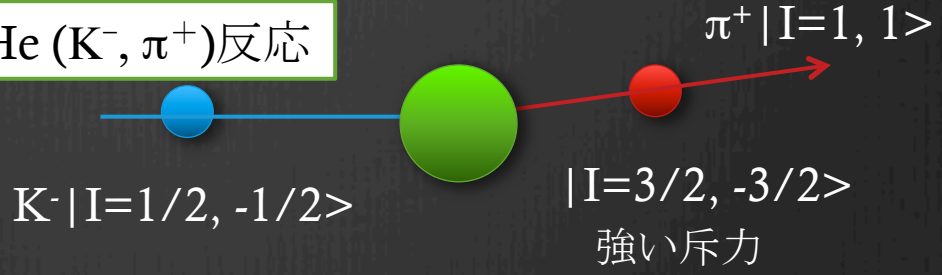


	S=0	S=1
$\Sigma N(I=1/2)$	$1/\sqrt{10}[3(8_s) - (27)]$	$1/\sqrt{2}[(8_a) + (10^*)]$
$\Sigma N(I=3/2)$	(27)	(10)

**⁴He (K⁻, π⁻)反応**



**⁴He (K⁻, π⁺)反応**



T. Nagae *et al.*, Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 1605  ${}^4_{\Sigma}\text{He}$ 以外のΣハイパー核は見つかっていない

# 重い原子核の中でのΣハイペロン

## ⊗ Σ-nucleus potential

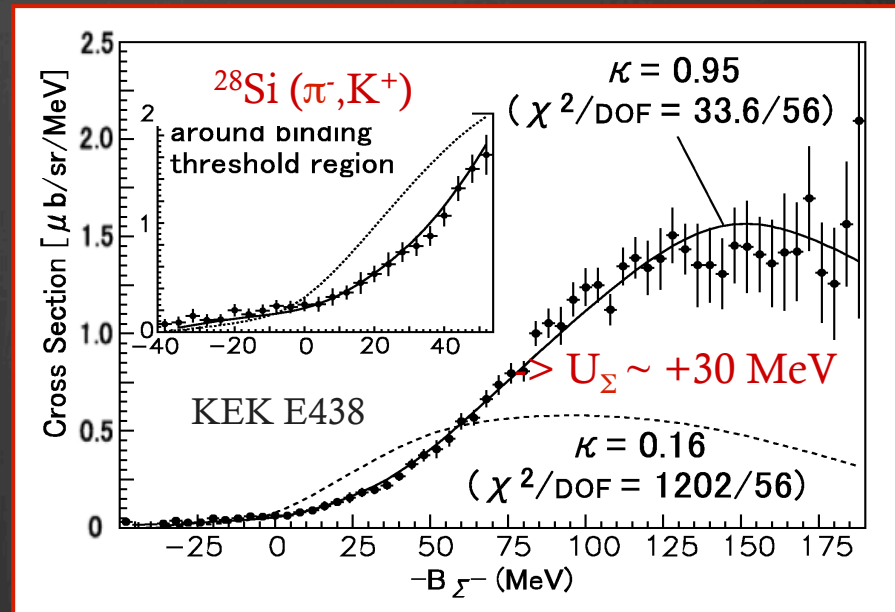
$$U_0^\Sigma + U_\tau^\Sigma (T_C \times T_\Sigma) / A_{core}$$

スピン・アイソスピン  
平均のポテンシャル

Lane's term : アイソスピン依存  
ポテンシャル

重たい原子核では主に  
 $U_0$ が見えることになる

Σは原子核の中で  
斥力を感じている



P.K. Saho et al.; Phys.Rev.C70(2004)

044612

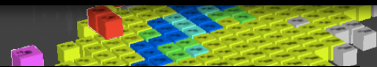
# Strangeness nuclear physics

- Investigation of Baryon-Baryon interaction  
 NN interaction  $\rightarrow$  YN, YY interaction
- Extend neutron drip line  
 $\Lambda$  glue-like role  
 Not only neutron-rich  $\Lambda$  hypernuclei but also core nuclei
- Possible existence of hyperon in high density nuclear matter such as neutron star

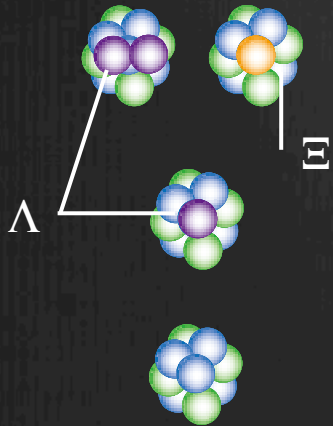
p, n,  $\Lambda$ ,  $\Xi^0$ ,  $\Xi^-$



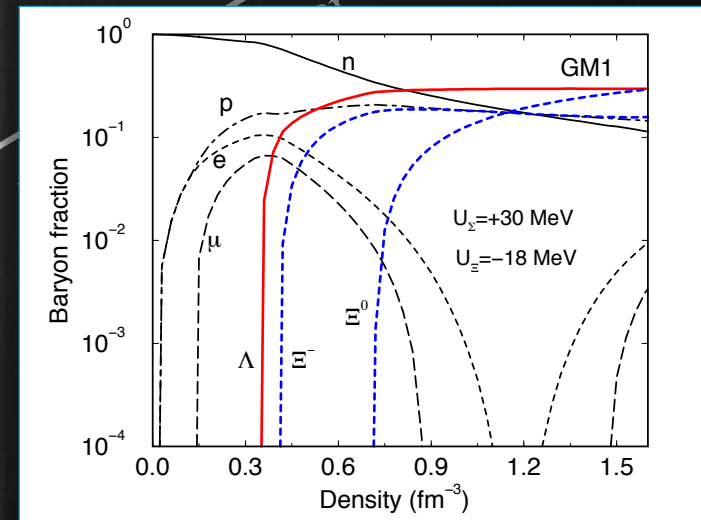
Strangeness



NASA/CXC/M. Weiss



Proton number



# Hyperon mixing in neutron star

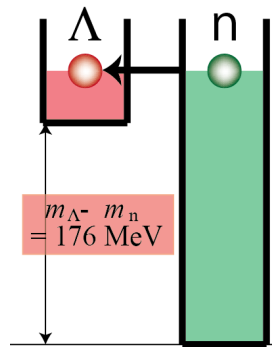
Chemical equilibrium condition via weak interaction (w/o interaction)

$$\Lambda \quad m_{\Lambda}c^2 = \mu_{\Lambda} = \mu_n = \epsilon_{Fn} + m_n c^2$$

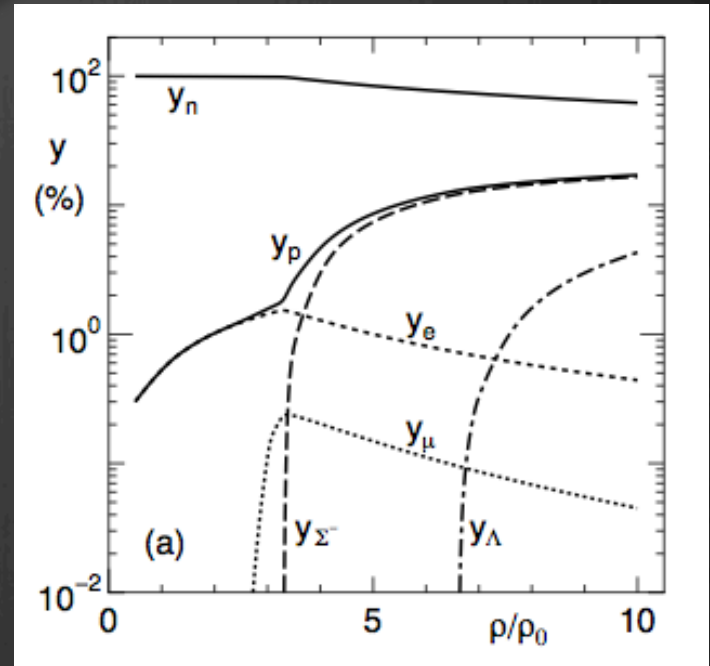
electrons are highly relativistic

$$\Sigma \quad m_{\Sigma^-}c^2 = \mu_{\Sigma^-} = \mu_n + \mu_e = \epsilon_{Fn} + m_n c^2 + \mu_e$$

100~200 MeV



w/o BB interaction



# Hyperon mixing in neutron star

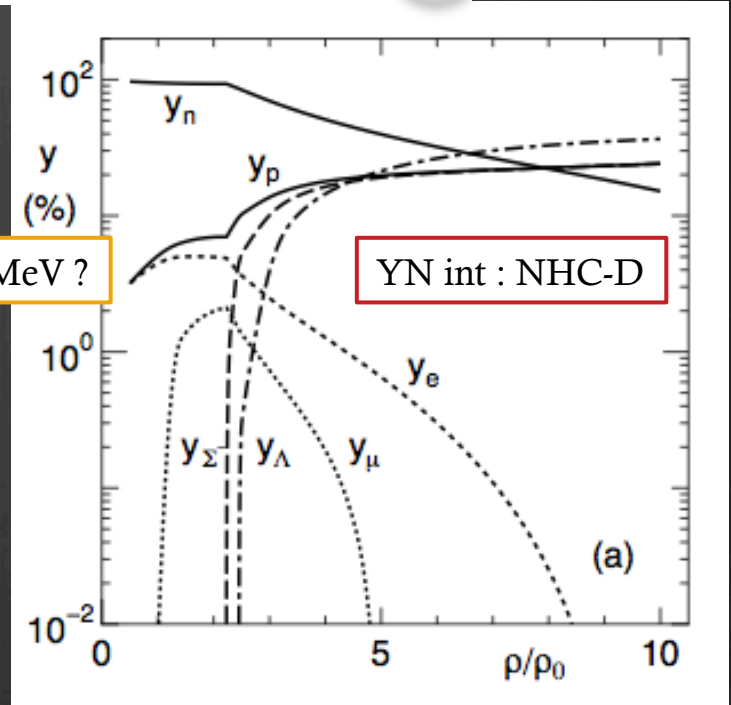
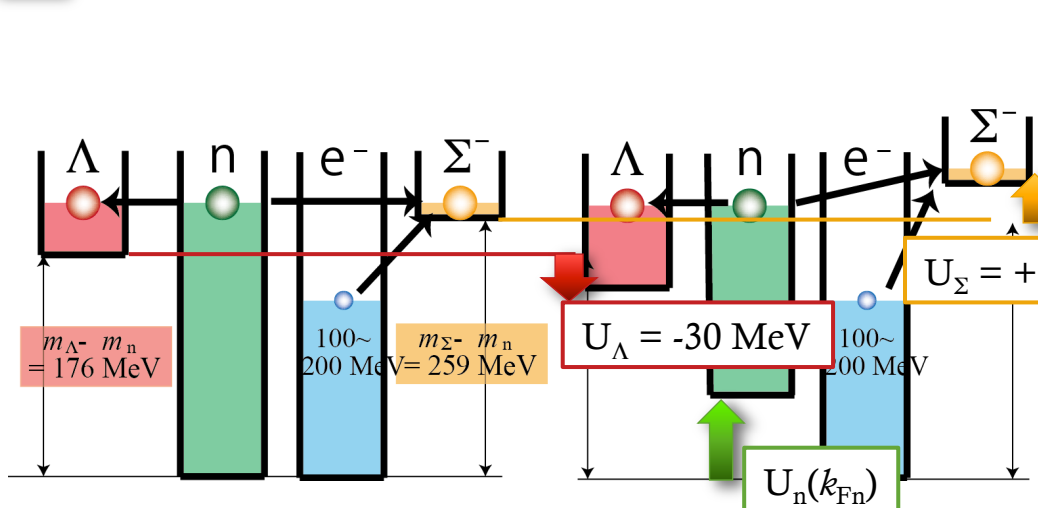
Chemical equilibrium condition via weak interaction (w/ interaction)

$$\Lambda \quad m_{\Lambda}c^2 + U_{\Lambda}(0) = \mu_{\Lambda} = \mu_n = \epsilon_{Fn} + U_n(k_{Fn}) + m_n c^2$$

electrons are highly relativistic

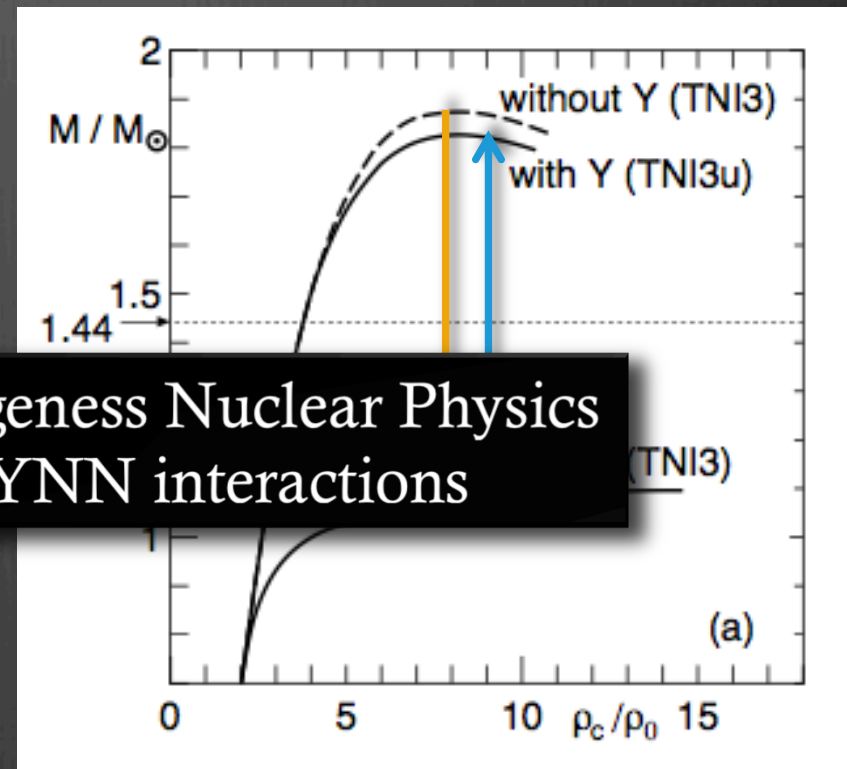
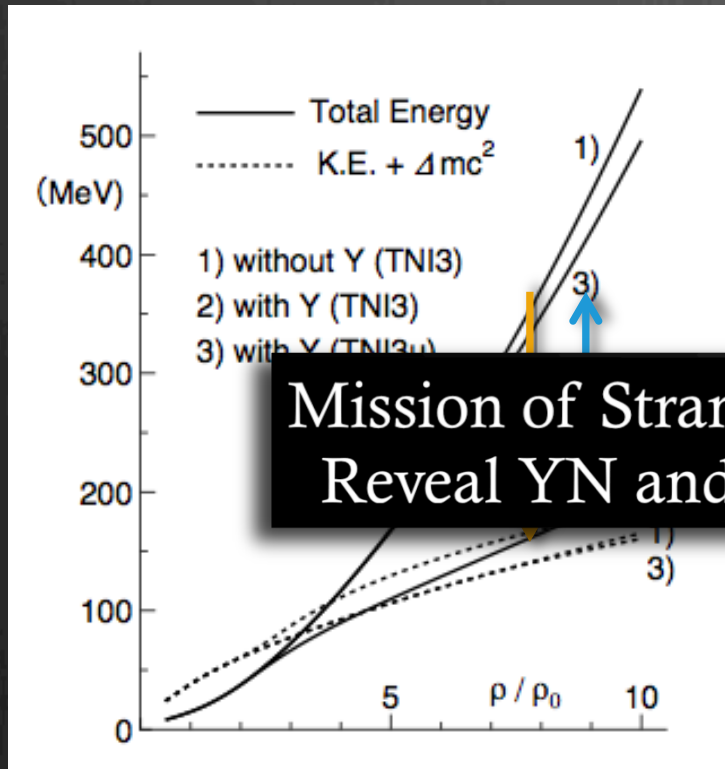
$$\Sigma \quad m_{\Sigma^-}c^2 + U_{\Sigma^-}(0) = \mu_{\Sigma^-} = \mu_n + \mu_e = \epsilon_{Fn} + U_n(k_{Fn}) + m_n c^2 + \mu_e$$

100~200 MeV



- ⊗  $\Lambda$  and  $\Sigma^-$  mixings depend not only on the YN interaction but also the NN interaction
- ⊗ Nuclear symmetry energy  $E_{\text{sym}}(\rho)$  plays an important role.
- ⊗  $E_{\text{sym}}$  also affect threshold density  $\rho_t(Y)$  through  $U_n(k_F)$

# Softening of EOS due to the Y-mixing



Mission of Strangeness Nuclear Physics  
Reveal YN and YNN interactions

T. Takatsuka, Prog. Theo. Phys. Suppl.156 (2004) 84

S. Nishizaki et al. Prog. Theo. Phys. 108 (2002) 703

⊗ Dramatic softening of the EOS due to the Y-mixing

- ⊗  $M_{\max}$  of NS's is greatly reduced
- ⊗ This can not be resolved by enhancing the stiffness in N-part EOS

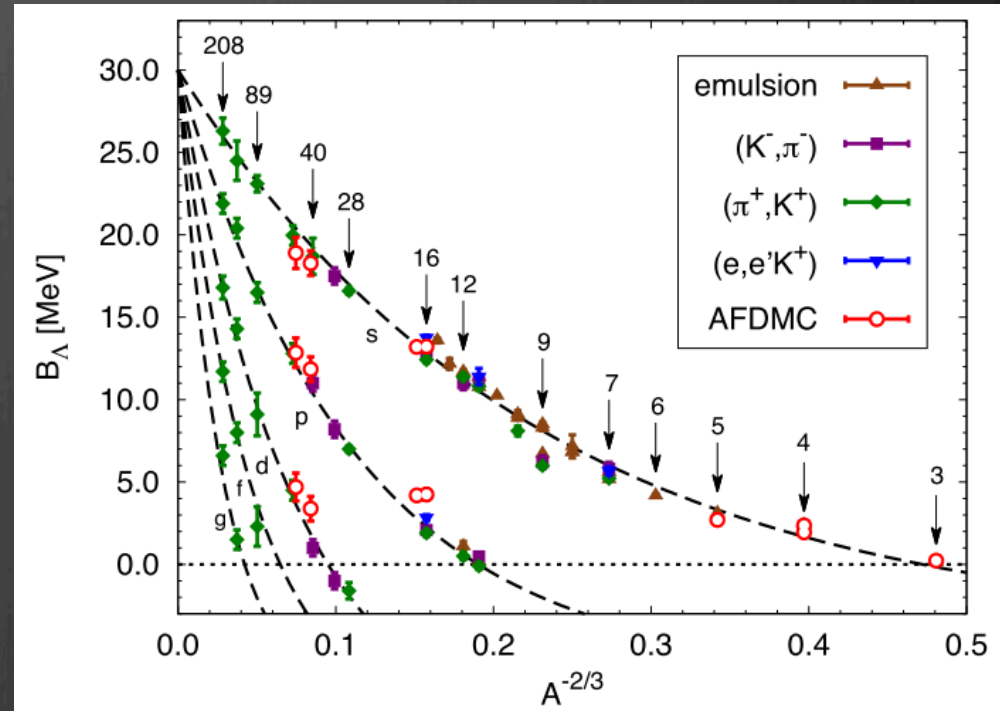
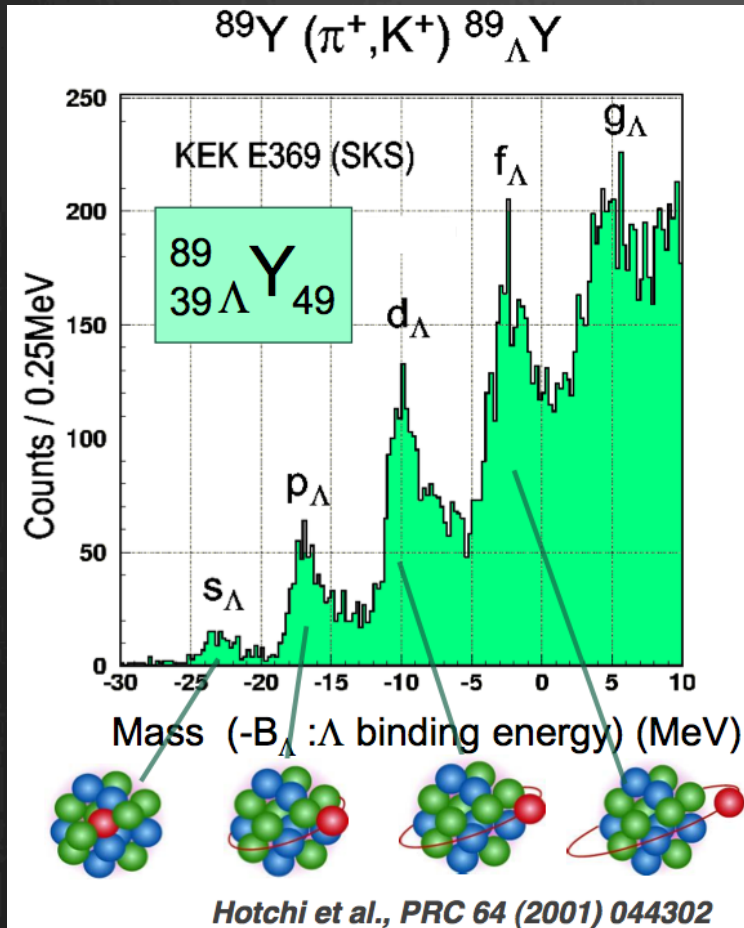


Necessity of extra repulsion

Universal 3 body interaction  
NNN, YNN, YYN, YYY



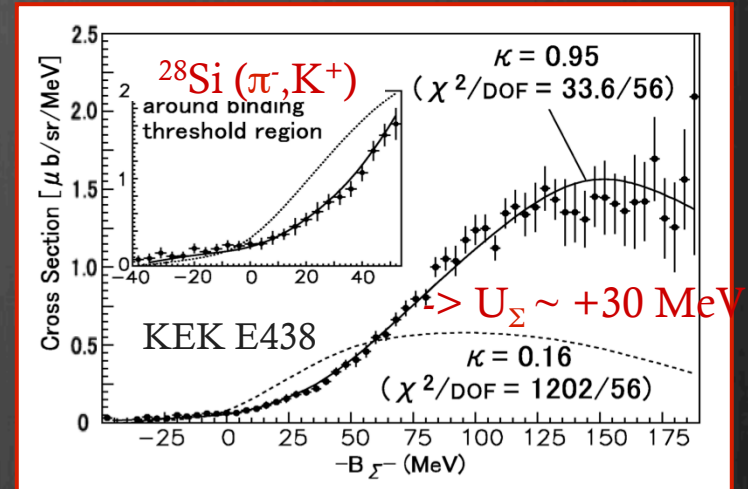
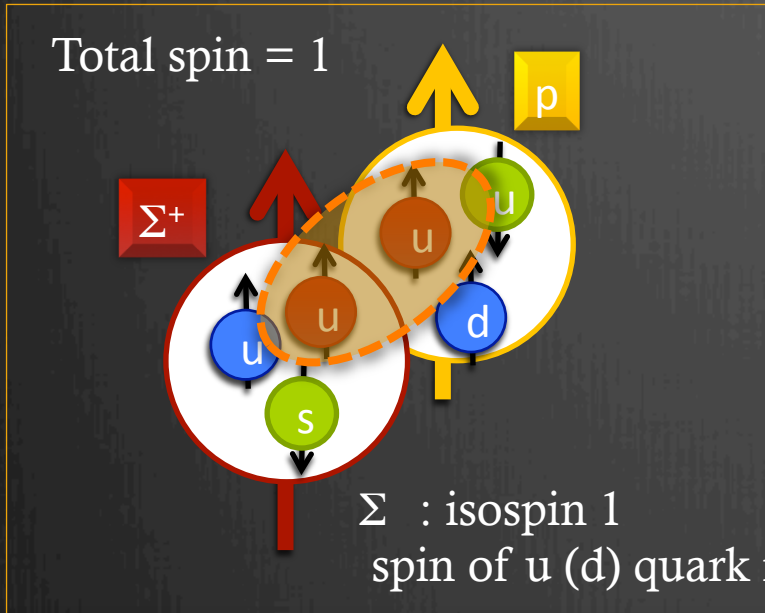
# $\Lambda$ potential in nuclear matter



F. Pedriva et al. arXiv:1506.04042

⊗ Attractive potential  $U_{\Lambda} = -30 \text{ MeV}$

# $\Sigma N$ interaction



P.K. Saha et al. PRL94 (2005) 052502

- ⊗  $\Sigma N$  interaction : large spin-isospin dependence
- ⊗  $\Sigma N(I=3/2, S=1)$  : Large repulsive force is predicted
- ⊗ Our knowledge is quite limited
  - ⊗ Only  $^4_\Sigma\text{He}$  hypernucleus
  - ⊗  $\Sigma$  quasi free production spectrum  $\rightarrow$  repulsive potential +30 MeV
- ⊗ How much is the  $\Sigma N$  interaction ( $\Sigma$ -n interaction) repulsive ?
  - ⊗ We need quantitative information about  $\Sigma^-$ -interaction.