

ハイパー核セッションのまとめ

肥山詠美子(理研)

27日午後 (13:15-17:00)

A. Hypernuclei

AI. J-PARC を目指したハイパー核物理 1

- 13:30-14:00 肥山詠美子 (理研) 少数多体系観点からのハイパー核構造研究の現状と将来
14:00-14:30 元場俊雄 (阪電大) 中重ハイパー核生成と構造研究の問題点
14:30-15:00 原田融 (阪電大) ハイパー核反応の今後
15:00-15:30 山本安夫 (都留文科大) YN、YY 相互作用はどこまで分かったか
15:30-16:00 議論と休憩

AII. J-PARC を目指したハイパー核物理 2

- 16:00-16:30 新村昌治 (岐阜大) バリオン-バリオン間相互作用、バリオン-メソン間相互作用について
16:30-17:00 糸永一憲 (岐阜大) 弱崩壊研究の将来 (30)

28日午前 (9:00-12:00)

A. Hypernuclei

AIII. 全体討論

- 9:00-9:30 田村裕和 (東北大) 実験サイドから理論への要望
9:30-12:00 全体討論

7名の講演者

議論: 藤原、福田、仲澤、谷田、三輪、福川、古本

14名

ハイパー核分野における研究目的
バリオン間相互作用の統一的理解
中性子、陽子、ハイペロンで構成された多体系の
ダイナミクスを理解する。



ハイパー核の生成反応

ハイパー核の弱崩壊

ハイパー核の構造

Motoba, Bando et al.

の主張: これらの3つの柱でハイパー核の研究目的を達成していく。

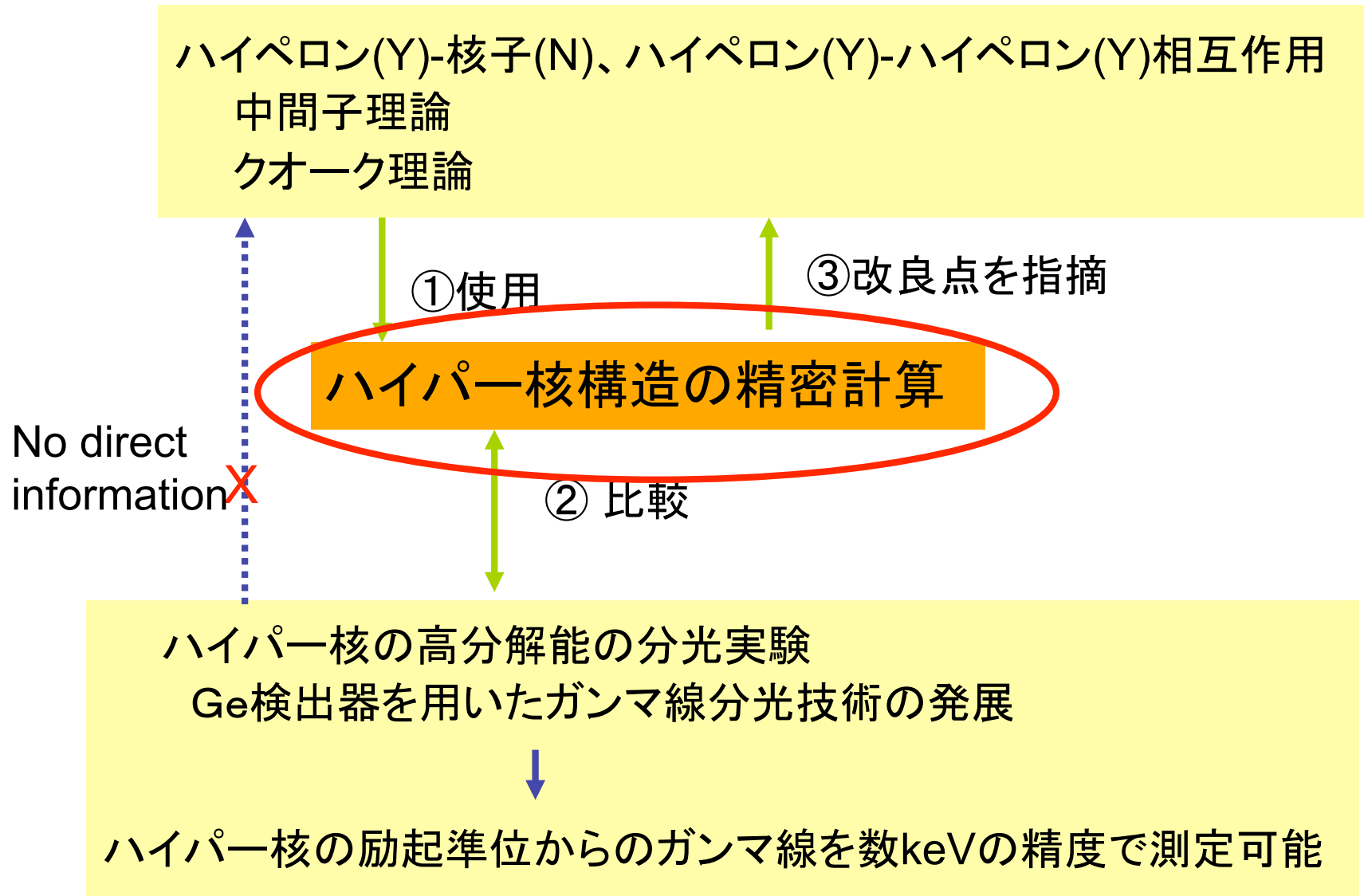
構造

相互作用の研究と最も直結している部分

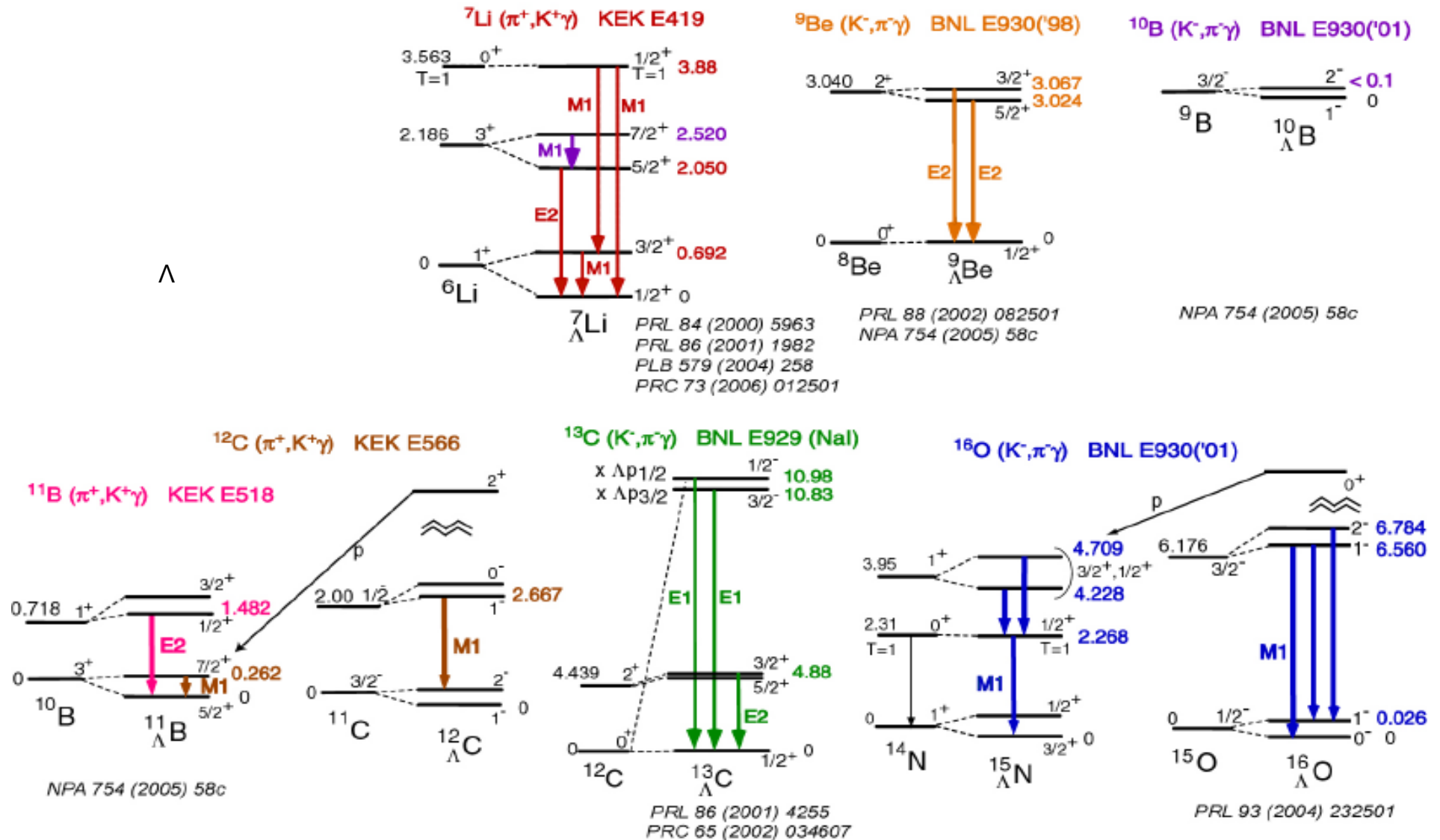
軽いハイパー核の構造研究：肥山

中重ハイパー核の構造と反応：元場

相互作用を決める戦略



Hypernuclear γ -ray data since 1998



$$V_{\Lambda N} = V_0 + \sigma_\Lambda \cdot \sigma_N V_{\sigma\cdot\sigma} + \mathbf{L} \cdot (\mathbf{s}_\Lambda + \mathbf{s}_N) V_{\text{SLS}} + \mathbf{L} \cdot (\mathbf{s}_\Lambda - \mathbf{s}_N) V_{\text{ALS}} + S_{12} V_{\text{tensor}} + \dots$$

- Millener (p-shell model),
- Hiyama (few-body)

S=-1セクターにおいては、NN力ほどではないが、おおよそ ΛN 相互作用については、分かってきた。

残されている課題は何か？

ΛN 相互作用については・・・

(1) Charge symmetry breaking

(2) $\Lambda N - \Sigma N$ coupling

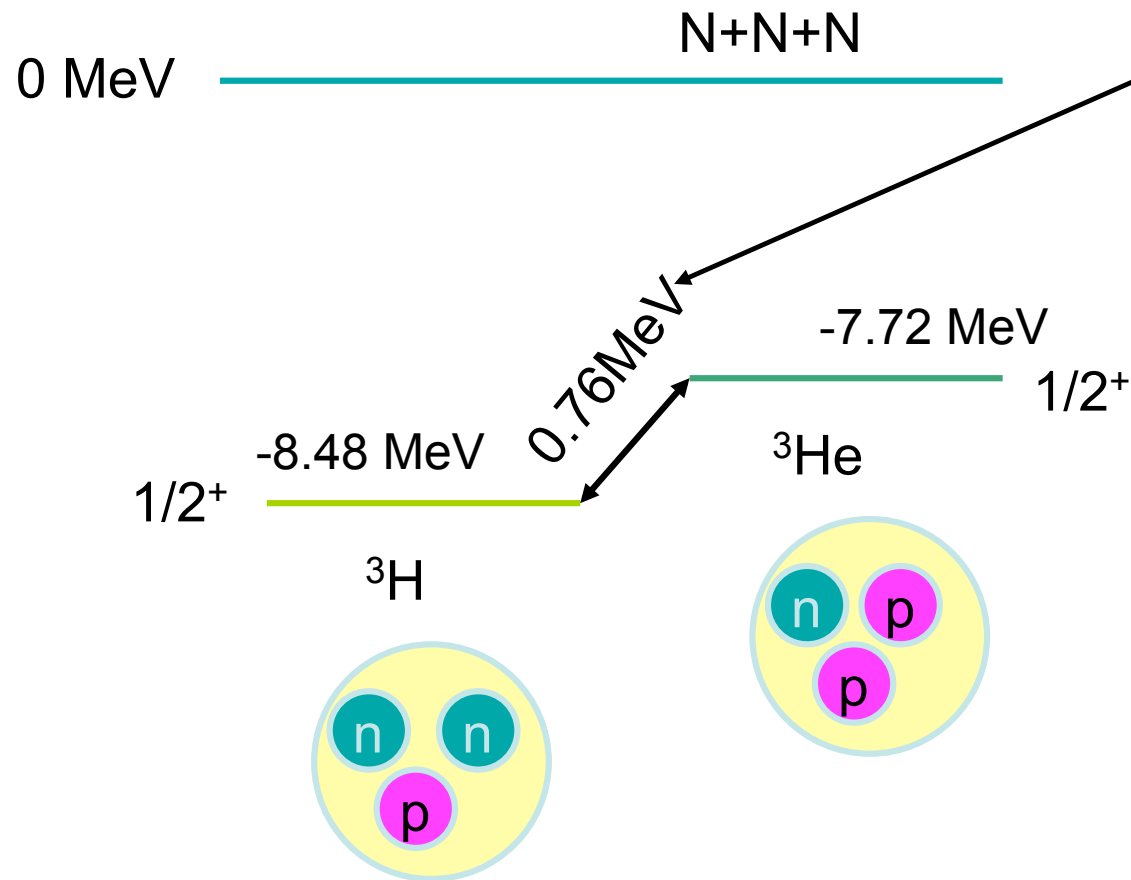
構造からYN相互作用の理解についても、限界がある。

どうしてもYN散乱実験が欲しい。三輪さん

YN散乱実験の現状-> Yd散乱でcross sectionを測るなどのアイデア

(1) Charge Symmetry breaking

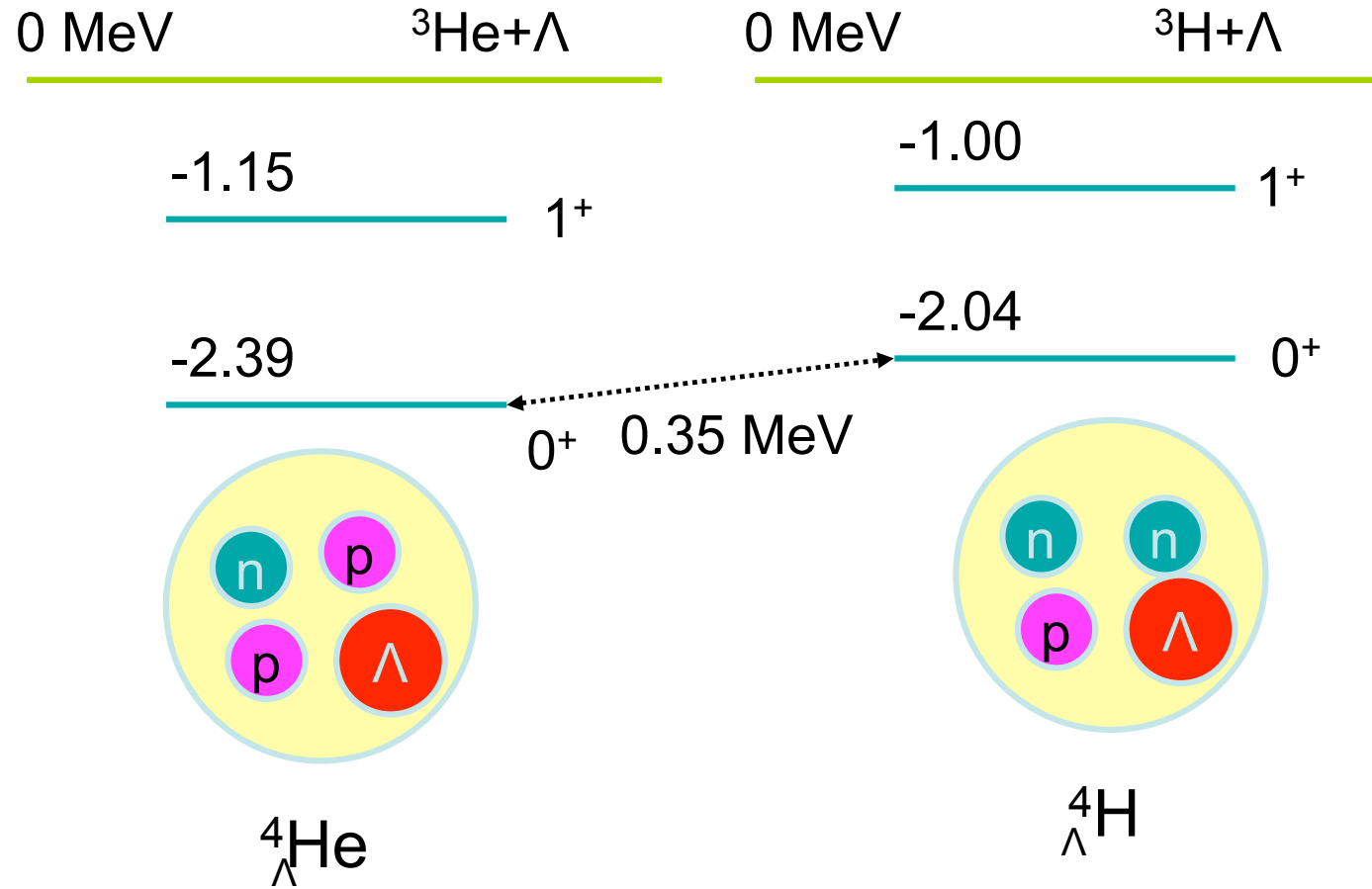
In $S=0$ sector



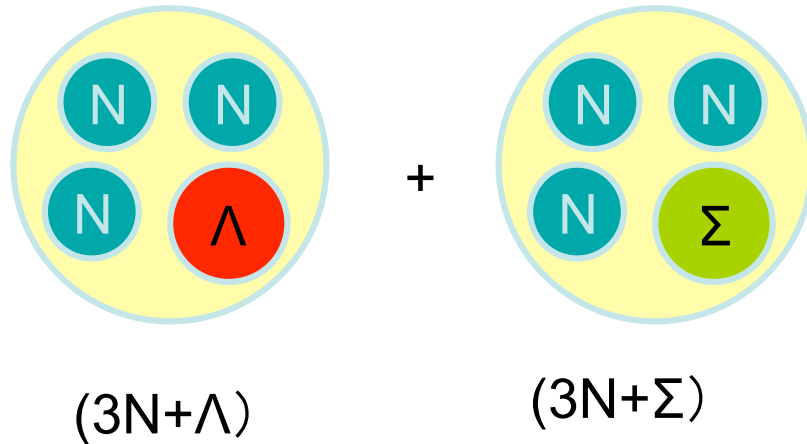
Energy difference comes from dominantly Coulomb force between 2 proton.
Charge symmetry breaking effect is very small.

In $S=-1$ sector

Exp.

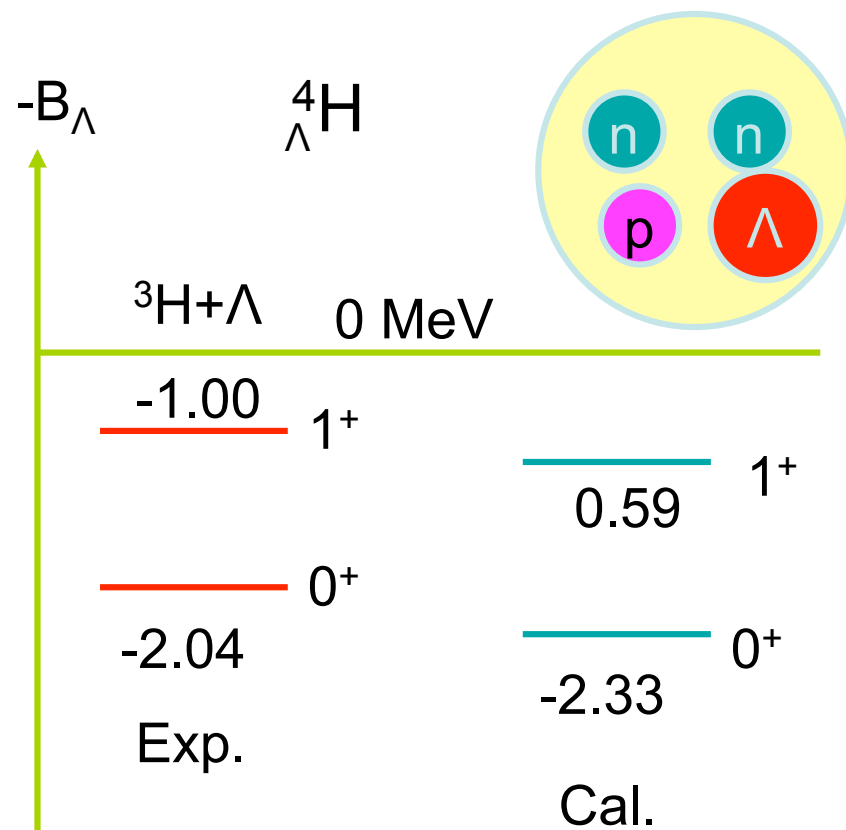
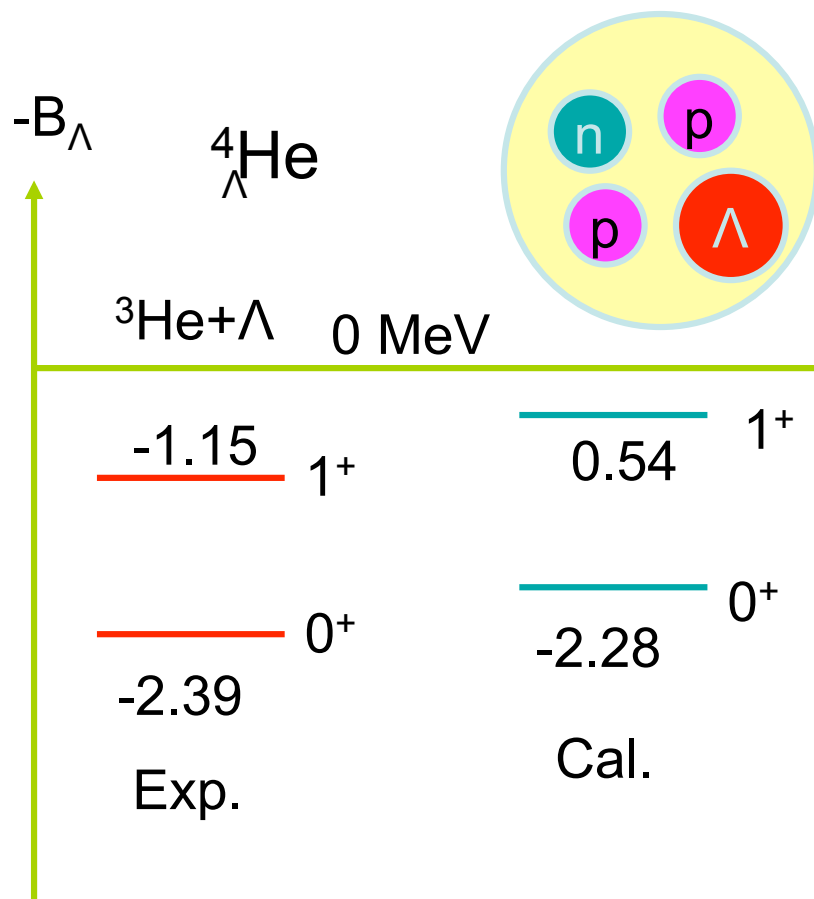


In order to explain the energy difference, 0.35 MeV,



- E. Hiyama, M. Kamimura, T. Motoba, T. Yamada and Y. Yamamoto, Phys. Rev. C65, 011301(R) (2001).
- A. Nogga, H. Kamada and W. Gloeckle, Phys. Rev. Lett. 88, 172501 (2002)
- H. Nemura, Y. Akaishi and Y. Suzuki, Phys. Rev. Lett.89, 142504 (2002).

Coulomb potentials between charged particles (p , Σ^\pm) are included.



E. Hiyama et al. PRC65, 011301(R) (2001)

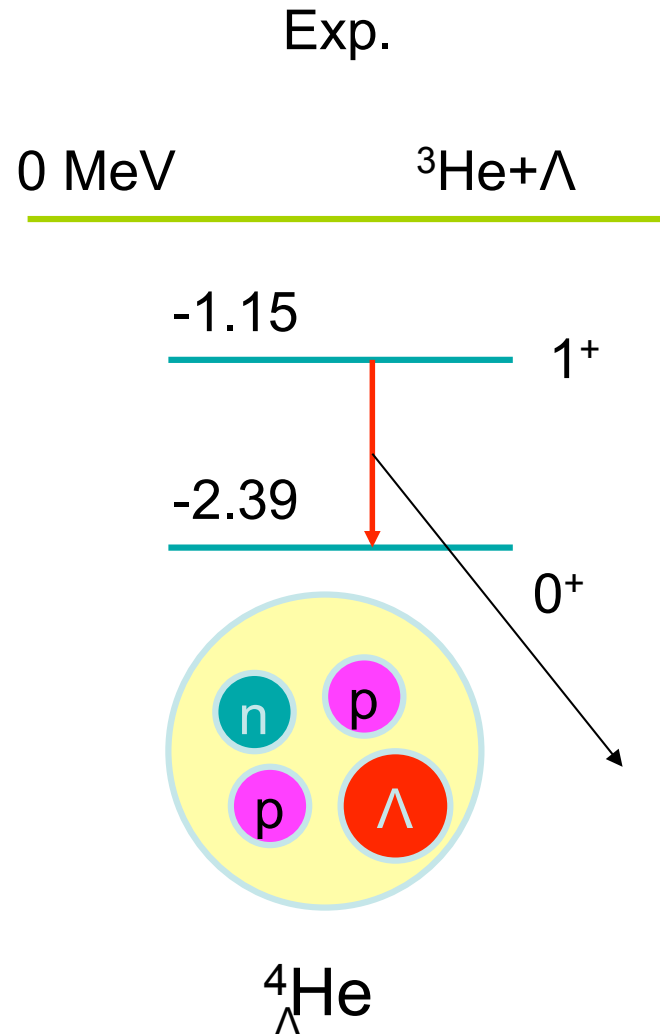
Λ -separation energy: B_{Λ}

The energy difference between the ground state of ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ and that of ${}^4_{\Lambda}\text{H}$

Exp.	$2.39 - 2.05 = +0.35$ MeV
	↕ inconsistent
Cal.	$2.28 - 2.33 = -0.05$ MeV

Nobody could succeed in reproducing the observed data.

Charge symmetry breaking effect?



Recently, Tamura et al. pointed out that it is necessary to perform γ -ray experiment about this hypernucleus again .

Because the measurement of this data was once reported in 1970's.

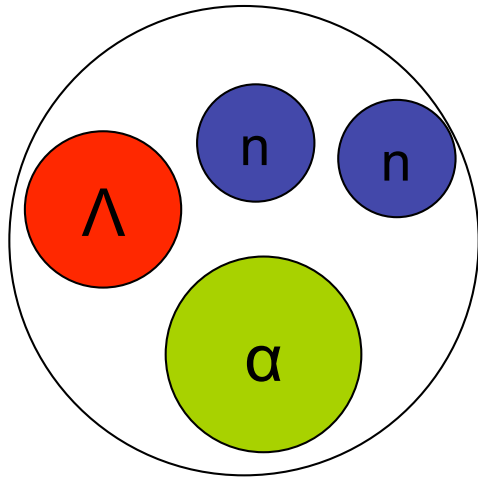
At that time, the statistical quality of the ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ γ - ray spectrum was extremely poor.

この γ 線を測定することで、
 相対エネルギーを精度よく測る。
 しかし、CSBを知るためには、
 B_{Λ} が本当のところ、知りたい

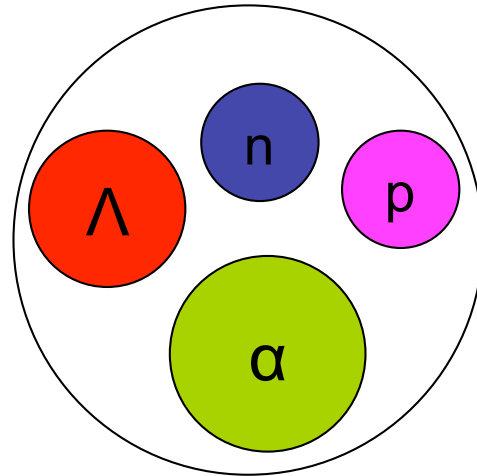
- E13 “ γ -ray spectroscopy of light hypernuclei” by Tamura and his collaborators
 Day-1 experiment

We should wait for their data at J-PARC.

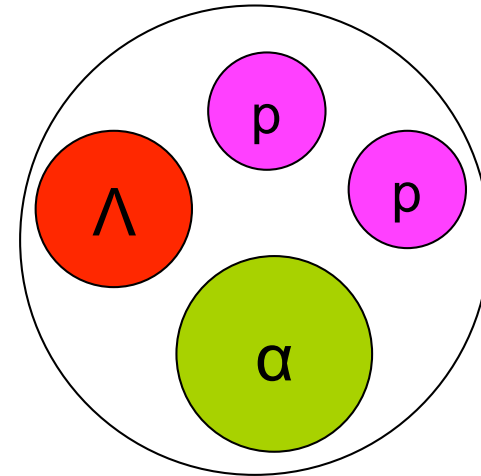
そこで、CSBを知るために、下記のハイパー核の B_Λ 測定を提案(ずっと昔に谷田さんが提案したらしい、が忘れた)。



${}^7_\Lambda\text{He}$

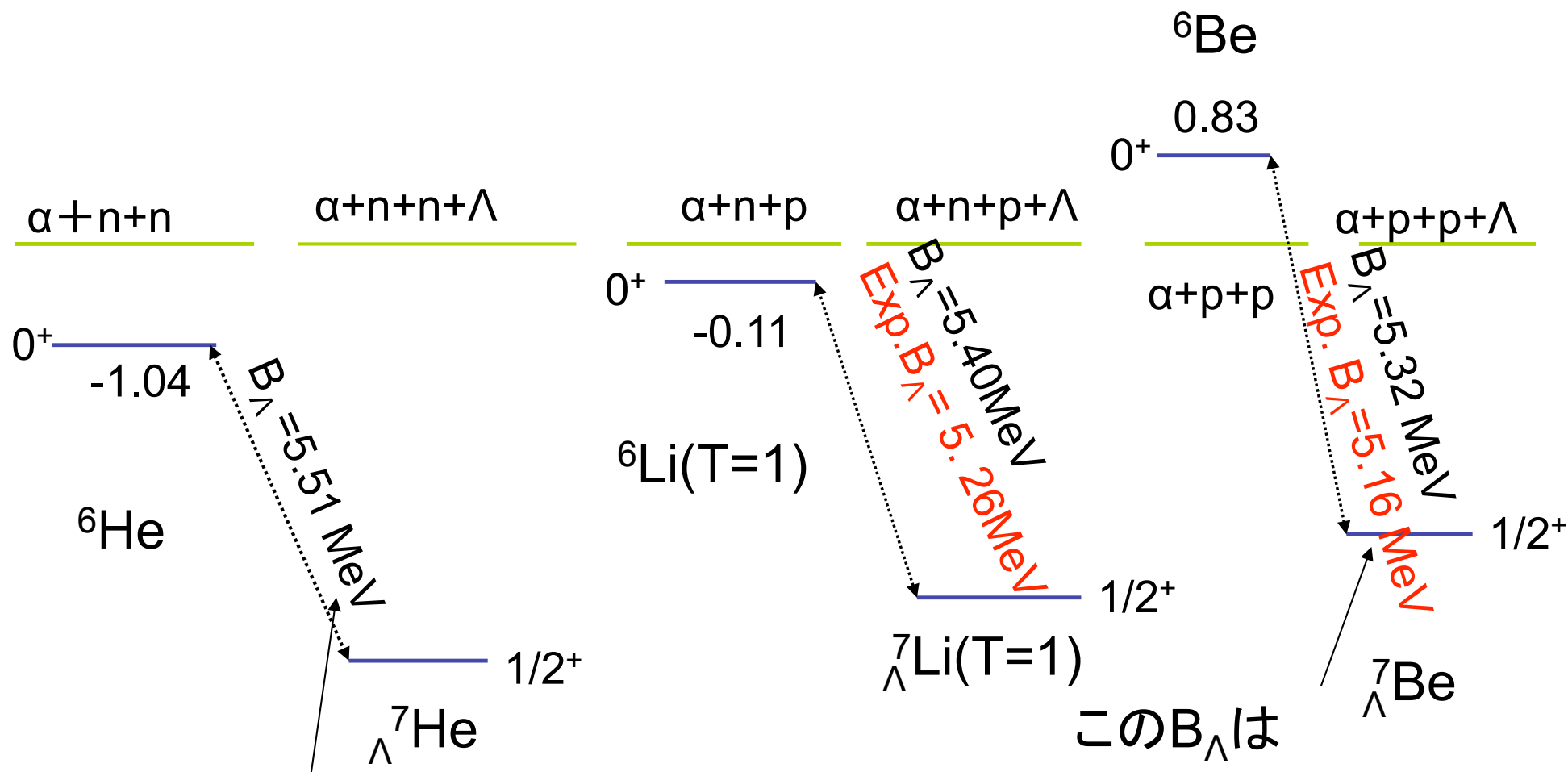


${}^7_\Lambda\text{Li}(T=1)$



${}^7_\Lambda\text{Be}$

A=4,7,9,10、13を再現する Λ N相互作用を使用する。



実験で、この B_Λ が分かれば、CBSの効果分かる。

JLABでの実験が待ち望まれる。

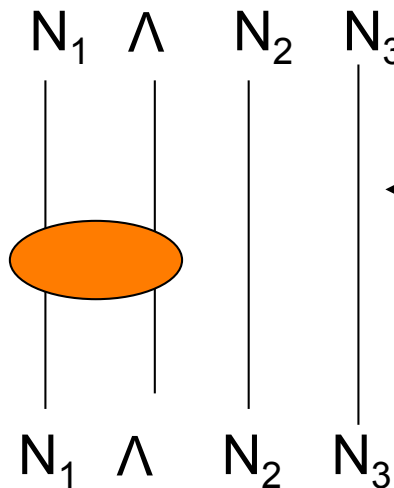
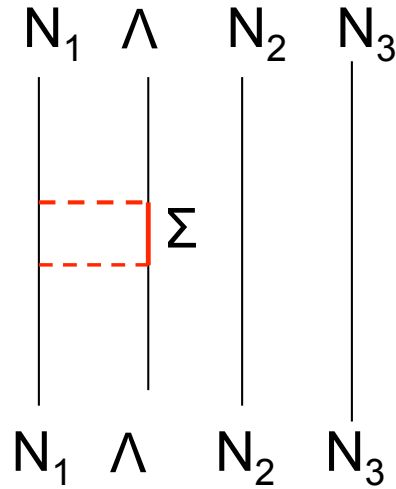
この B_Λ はdoubtful
本来CBSが効けば、 B_Λ は大きくなるはず

しかし、 ${}^7_\Lambda\text{Be}$ の実験は不可能

(2) Λ N- Σ N coupling

2通りある。

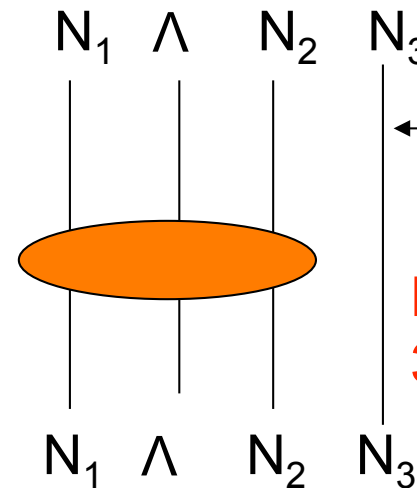
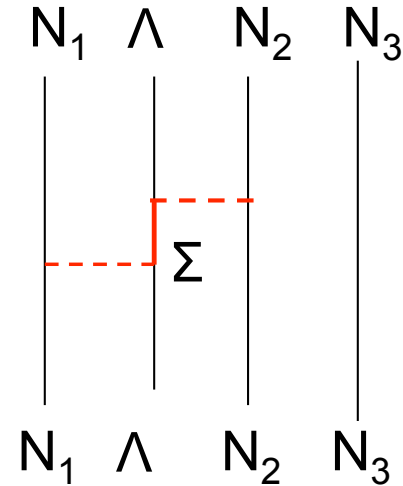
①



← Effective
2-body Λ N
force

3N+ Λ space

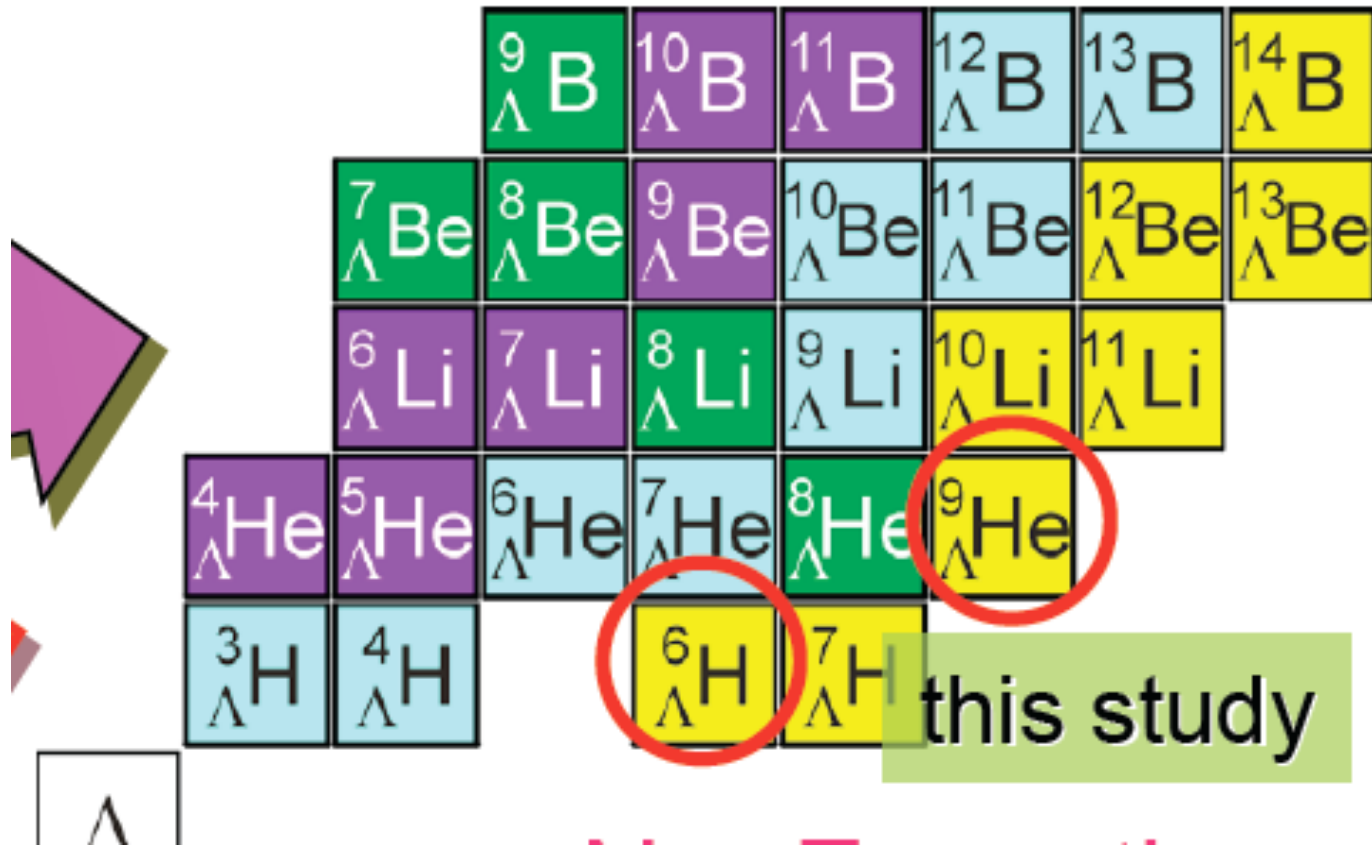
②



← Effective 3-body
 Λ NN force

How large is the
3-body effect?

Λ -hypernuclei



Drip-lineを系統的に計算して求める。
殻模型が適している？

Figure
By Sakaguchi

中重ハイパー核研究を行う重要性は？

Λ のsingle particle energyを求める。

ΛN のparing interactionが斥力的になる。

どうい核をせめていくのか？ $^{180}(K^-, \pi^-)^{180}\Lambda$ が例

やはり、エネルギーのみ？

Dynamical coupling (Coreのrotational band

$B(E2)$ 、 $B(M1)$ は難しい？

Vibrational band)

Reaction

Elementary processが分かっている必要がある。

(K^-, π^-) 、 (K^-, K^+) 、 (π^+, K^+) については、大丈夫。

(e, e') については、論争になっている。→cross sectionについては、問題なし。

信頼できる波動関数を用意する必要である。

High resolution (π, K) (K^-, π^-) を提案→必ずピークは出てくる。

J-PARCで $P_k=1.5$ GeV/cくらいであれば、いろいろなstateが励起される。

例、 $^{28}\text{Si}(\pi, K)^{29}\text{Si}\Lambda$

中重ハイパー核：何が面白いのか？

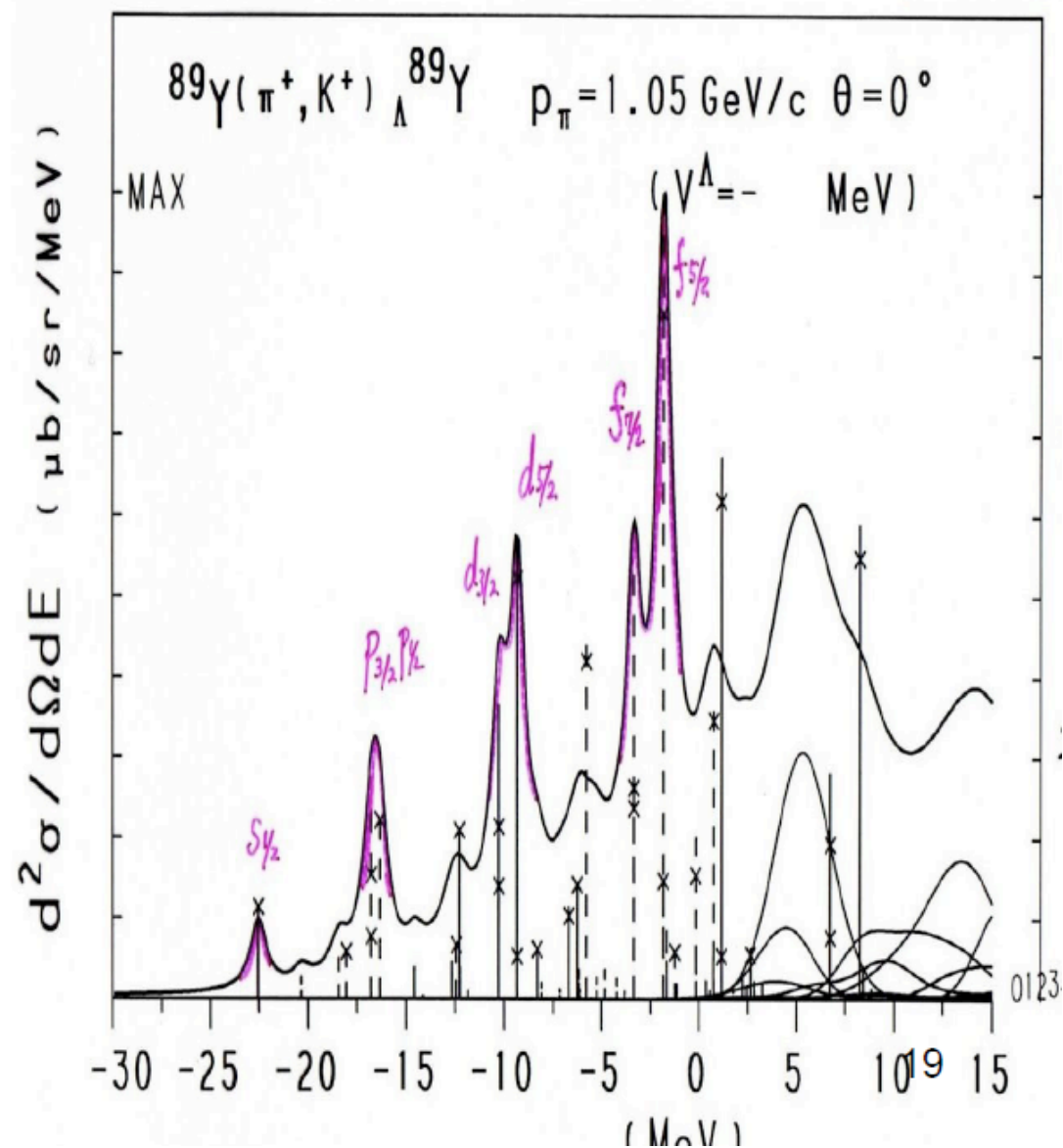
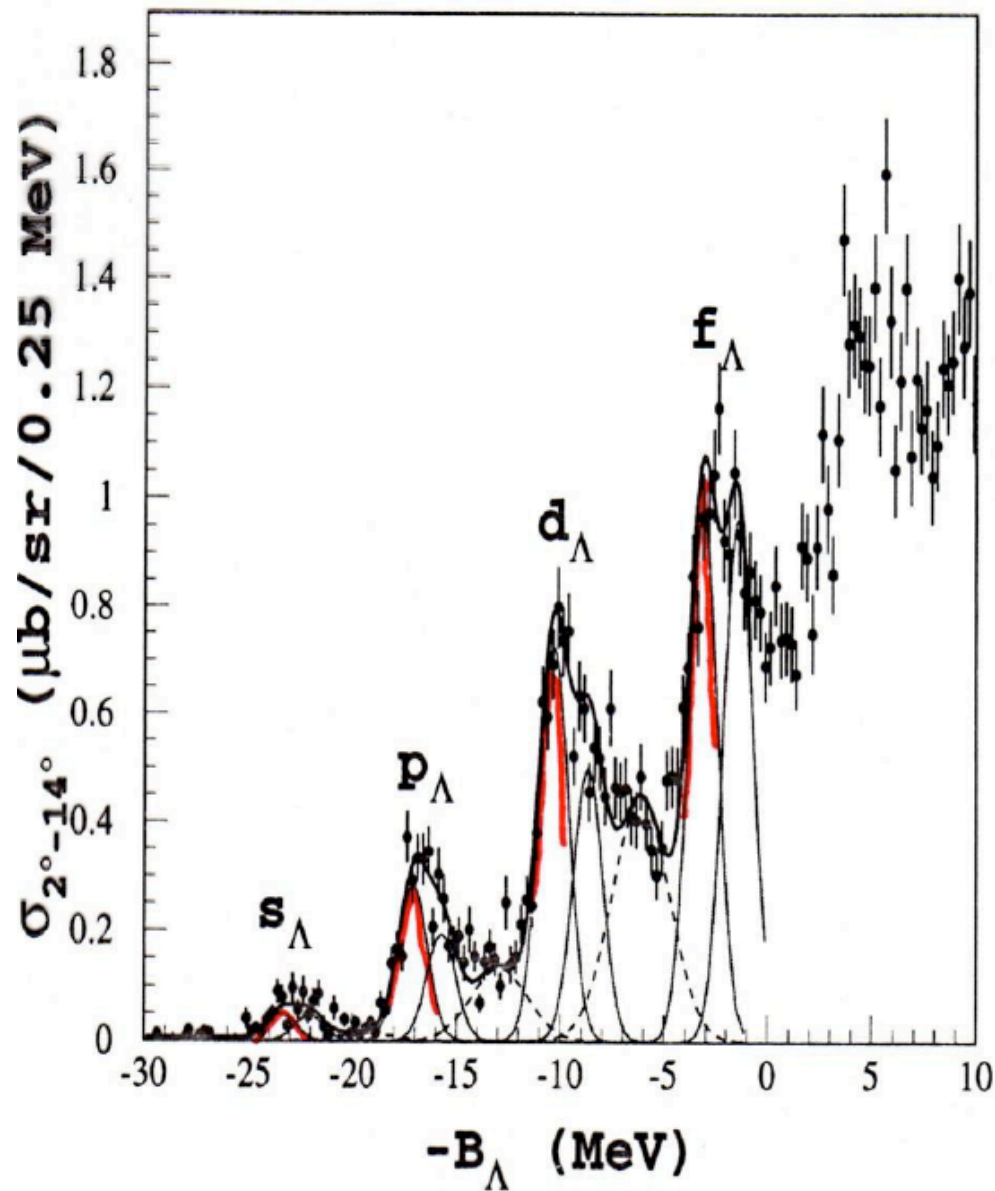
- Λ s.p.e. over wide periodic table
広い範囲で本当に理論記述可能か
DDHF, Rel.DDHF work?, Y identity: μ , mass
- Dynamical coupling of Y w/rot. & vib. $L^9\text{Be}$
- Unique role of Y when coupled with shell & cluster states
(軽い系のクラスター構造：本質的) $^9\text{Be}(e, e'K^+)$
- valuable experience to predict sd-shell
 Ξ -hypernuclei (軽い典型例からsd殻へ)

EXP vs. DWIA CAL (WS, $V_{LS}=4.3\text{MeV}$)

Motoba-Bando-Wuensch-Zofka, PRC 38 (1988)

S(E)MAX=0.0294 X (E)em.XS)=TOTAL XS

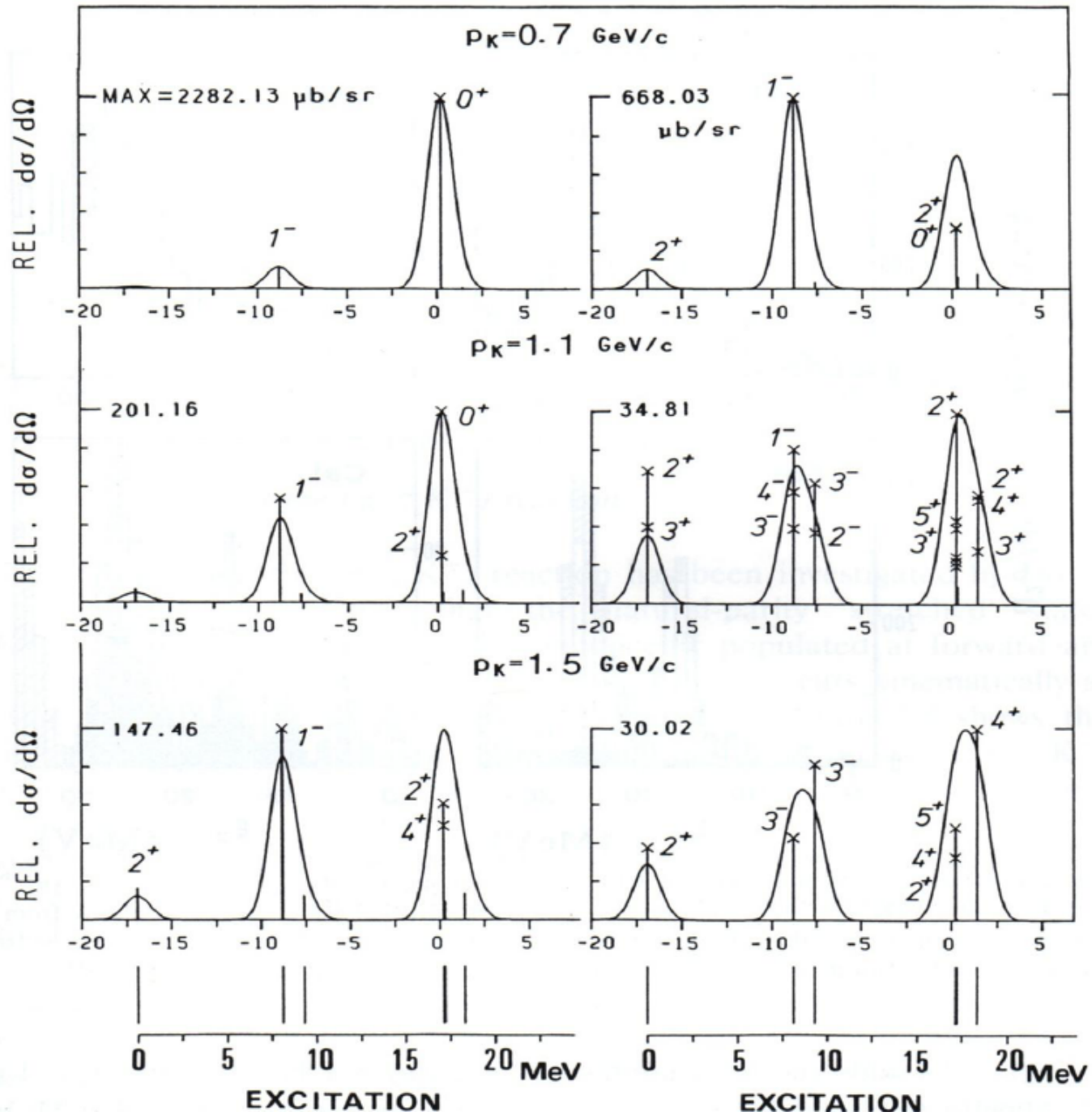
$V_{LS}^{\Lambda} \Rightarrow 4.3\text{MeV}$



$^{28}\text{Si}(\text{K}^-, \pi^-)^{28}_{\Lambda}\text{Si}$

$\theta = 3^\circ$

$\theta = 10^\circ$



中重ハイパー核について

何が面白いのか？

更なる議論がまだ必要。(今回では煮詰めることは不可能だった)

J-PARCに向けて、現在のところ最も関心の高い課題

S=-1については、

特に焦点は、 $\Lambda N - \Sigma N$ 結合の情報をどのように得るべきか？

中性子過剰 Λ ハイパー核の構造の研究

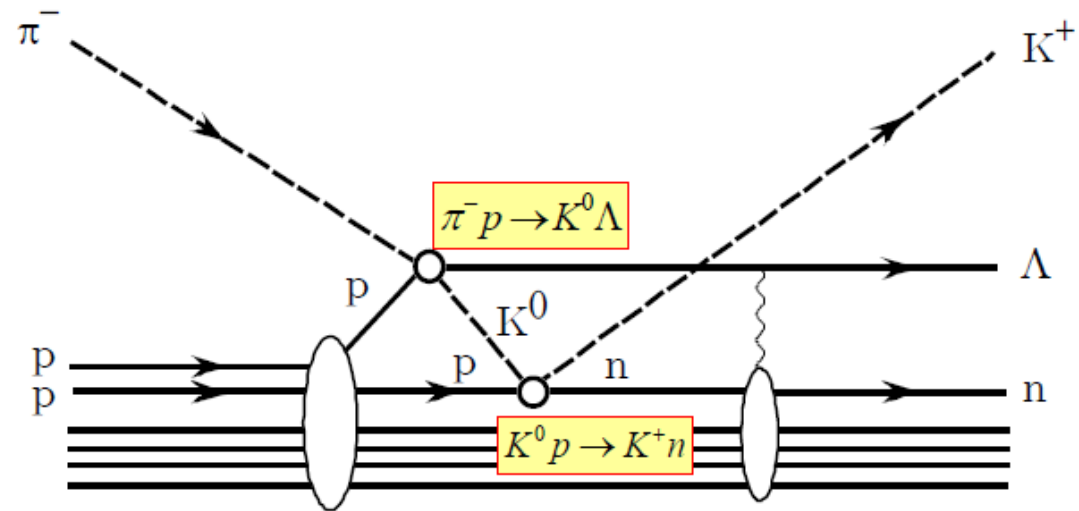
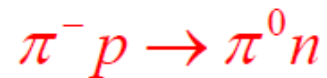
生成反応から情報を得たい。

(double charge exchange reaction)

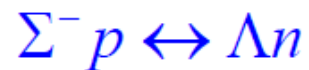
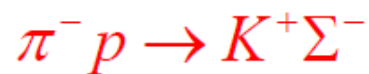
Challenging なreaction

(π^-, K^+) – Double Charge Exchange (DCX) Reaction

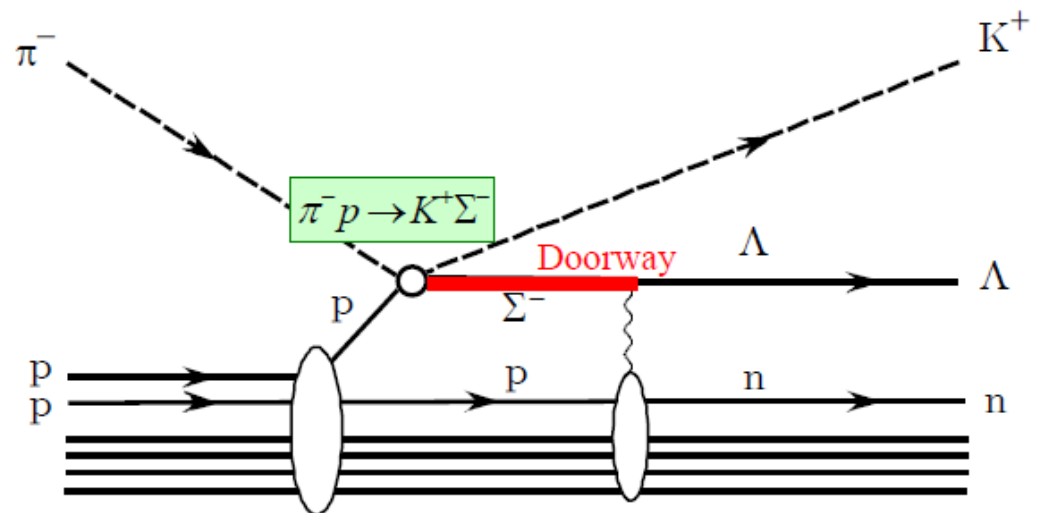
▪ *Two-step process:*



▪ *One-step process:*



Σ - Λ coupling



ハイパー核の生成反応

反応：原田融（大阪電通大）

これまで

(π^+ 、 K^+)(K^- 、 π^-)反応が有用。

反応のkinematicsはよく分かってきた。(Λハイパー核の生成に有効)

Σ-N相互作用の情報を生成反応から情報を得よう。

quasi-freeのelementaryの(π 、 K^+)反応の研究を行う。

Σ^- spectrum by (π^-, K^+) reaction at 1.2 GeV/c

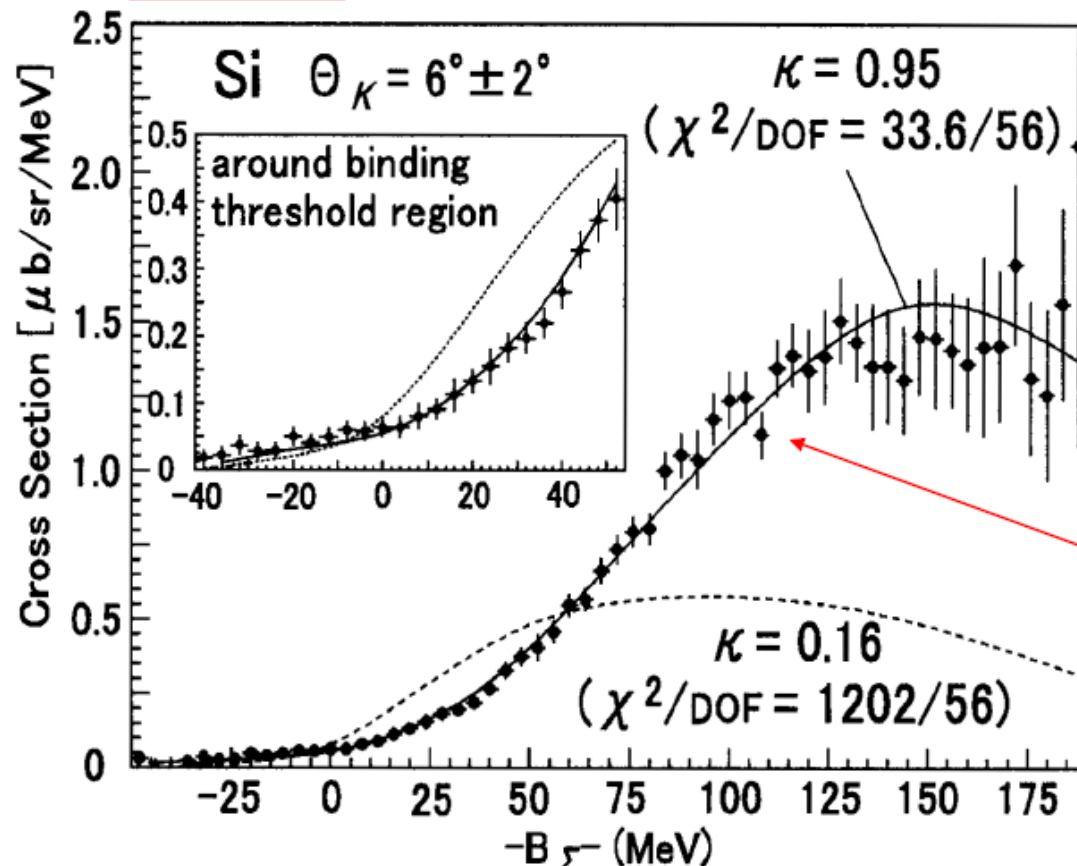
(π^-, K^+) 反応による生成

原子核内部から Σ 粒子を生成

標的: ^{28}Si , ^{58}Ni , ^{115}In , ^{209}Bi

^{28}Si

H.Noumi, et al. PRL89(2002)072301



Woods-Saxon form

$$U_{\Sigma} = \frac{V_{\Sigma} + iW_{\Sigma}}{1 + \exp[(r - R)/a]}$$

$$R = r_0(A-1)^{1/3} \text{ fm}$$

$$a = 0.67 \text{ fm} \quad r_0 = 1.1 \text{ fm}$$



$$V_{\Sigma} = +150 \text{ MeV}$$

$$+90 \text{ MeV}$$

$$W_{\Sigma} = -15 \text{ MeV}$$

$$-40 \text{ MeV}$$

(NEW)

Σ -Nのspin- isospin -averaged int.が斥力

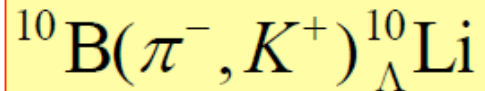
H.K.Saha, et al., PRC70(2004)044613

Λ ハイパー核、 Σ ハイパー核の生成メカニズムについて
分かってきた。

次のステップは、中性子過剰 Λ ハイパー核の生成反応

初のDCX反応実験

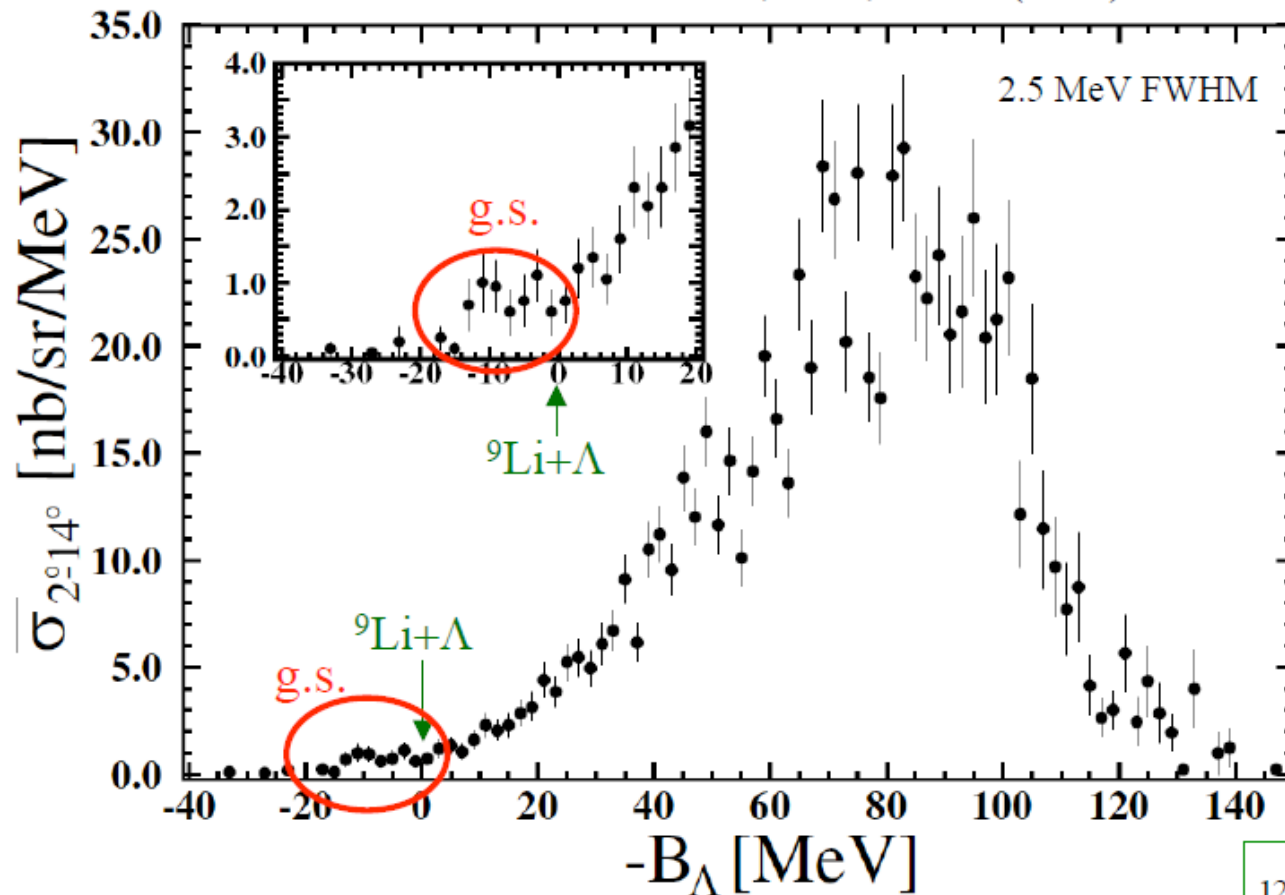
Λ spectrum by DCX (π^- , K^+) reaction at 1.2 GeV/c



neutron-rich Λ hypernucleus

First successful measurements

KEK-PS-E521 P. K. Saha, et al., PRL94(2005)052502



Cross sections

- $p_{\pi} = 1.20 \text{ GeV/c}$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_L} \approx 11.3 \pm 1.9 \text{ nb/sr}$$

- $p_{\pi} = 1.05 \text{ GeV/c}$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_L} \approx 5.8 \pm 2.2 \text{ nb/sr}$$

$\sim 1/1000$

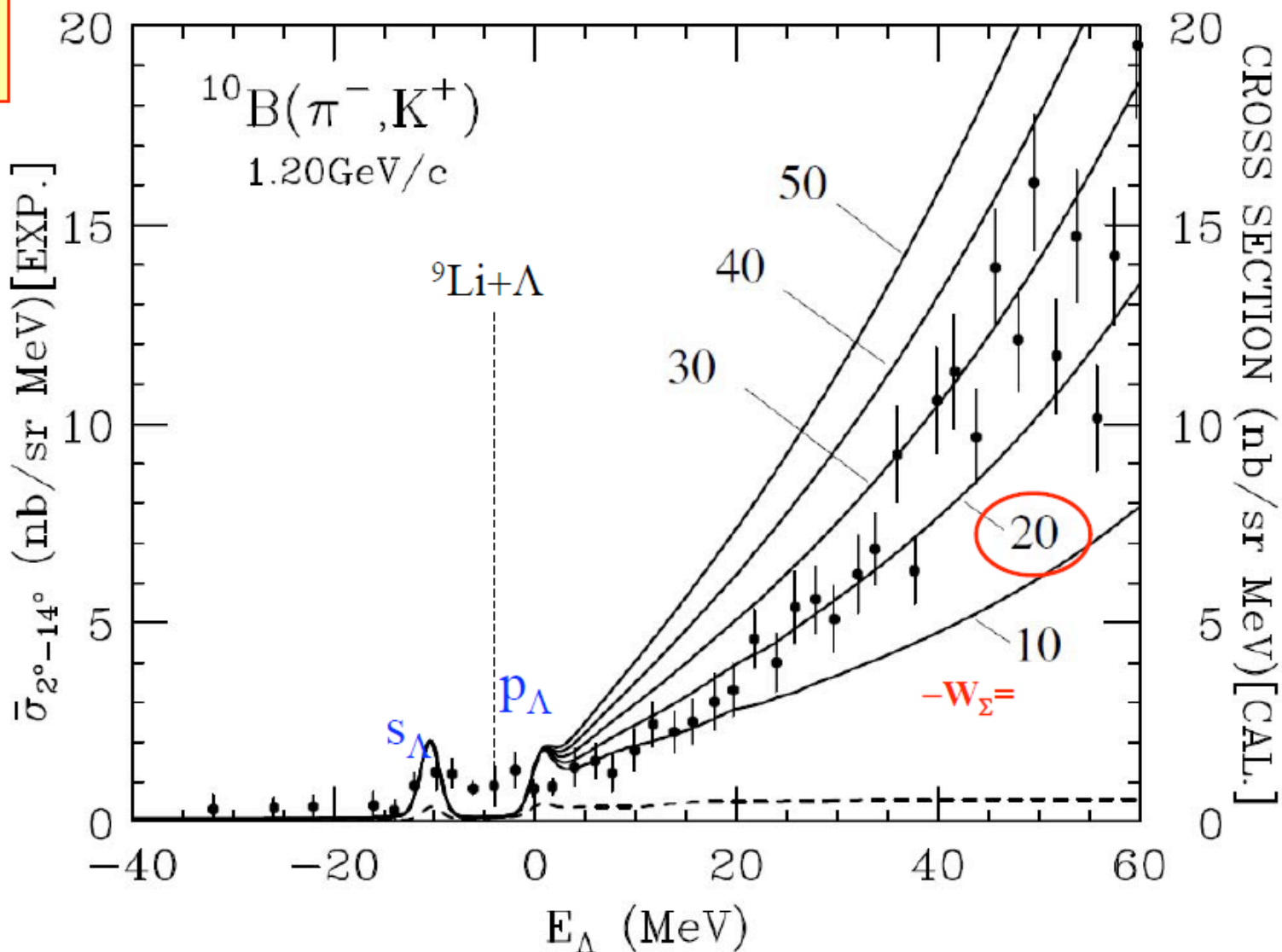
$^{12}\text{C}(\pi^+, K^+)_{\Lambda}^{12}\text{C}$ at 1.20 GeV/c
 $17.5 \pm 0.6 \mu\text{b/sr}$

Λ spectrum by DCX (π^- , K^+) reaction at 1.2 GeV/c

Spreading potential dep.

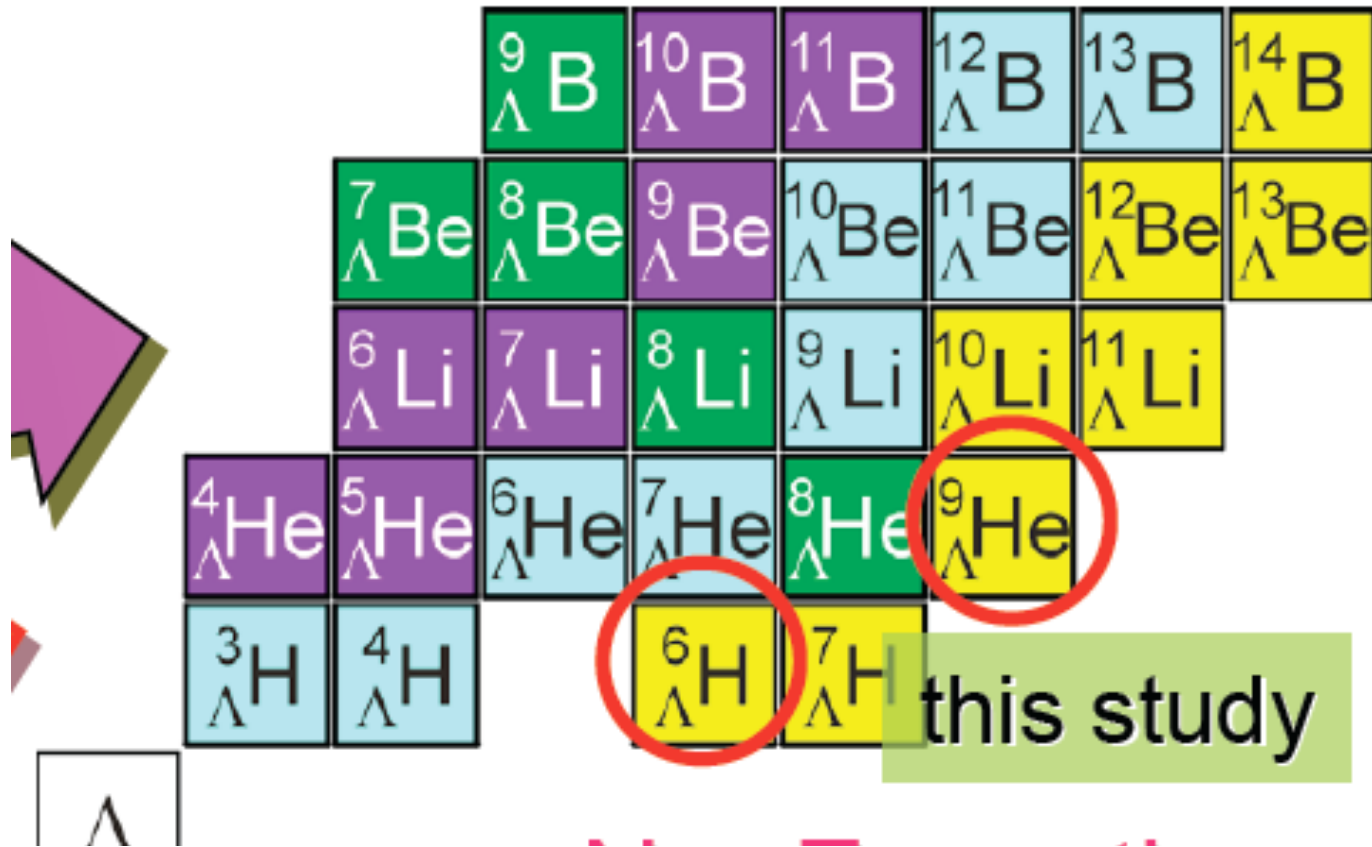
$U_X = 11$ MeV is fixed. $P_{\Sigma^-} = 0.57\%$

^{10}B



➡ $-W_{\Sigma} = 20-30$ MeV は Σ^- 生成の解析と矛盾しない。

Λ -hypernuclei



更なるDCX反応による中性子過剰 Λ ハイパー核生成から
 ΛN - ΣN 結合メカニズムを理解する。

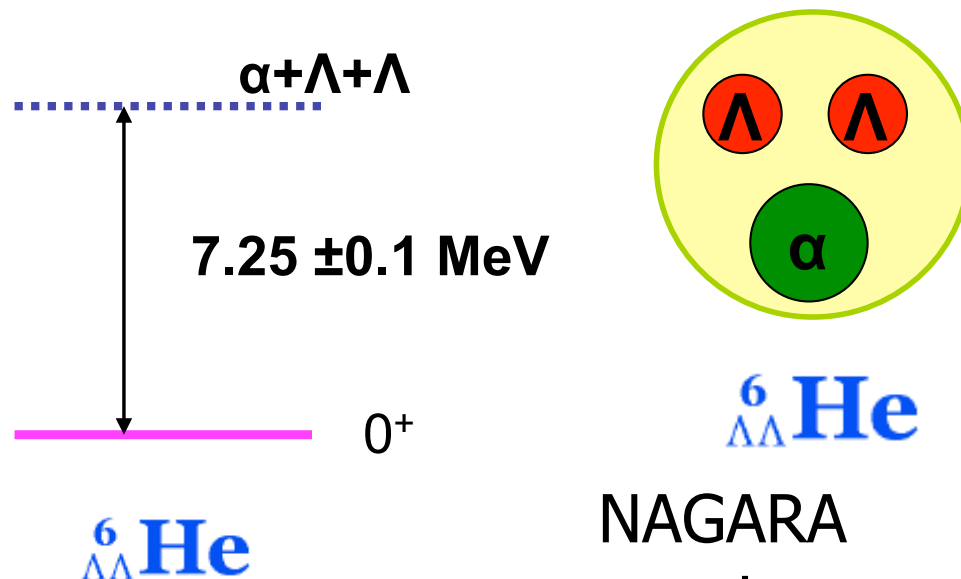
S=-2 セクター

S=-2について、ダブルΛハイパー核が一つ見つかった。

ΛΛ相互作用に情報を与える。
KEK-E373 experiment.

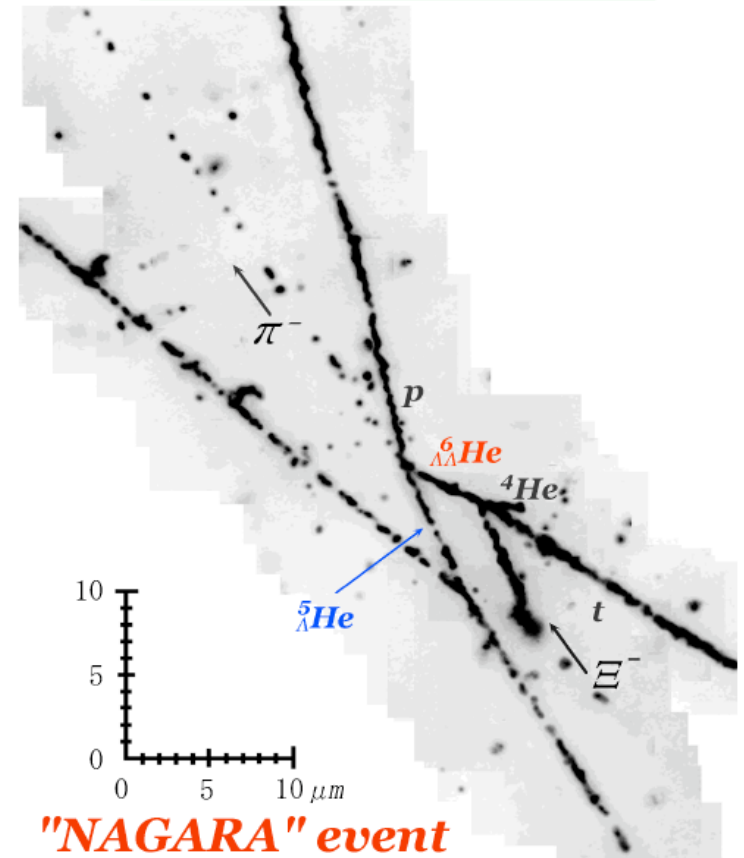
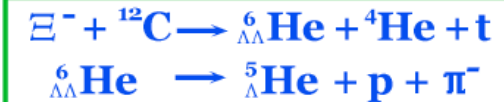
Observation of ${}_{\Lambda\Lambda}^6\text{He}$

Uniquely identified without ambiguity for the first time



NAGARA event

${}_{\Lambda\Lambda}^6\text{He}$ double-hypernucleus
Unique interpretation!!

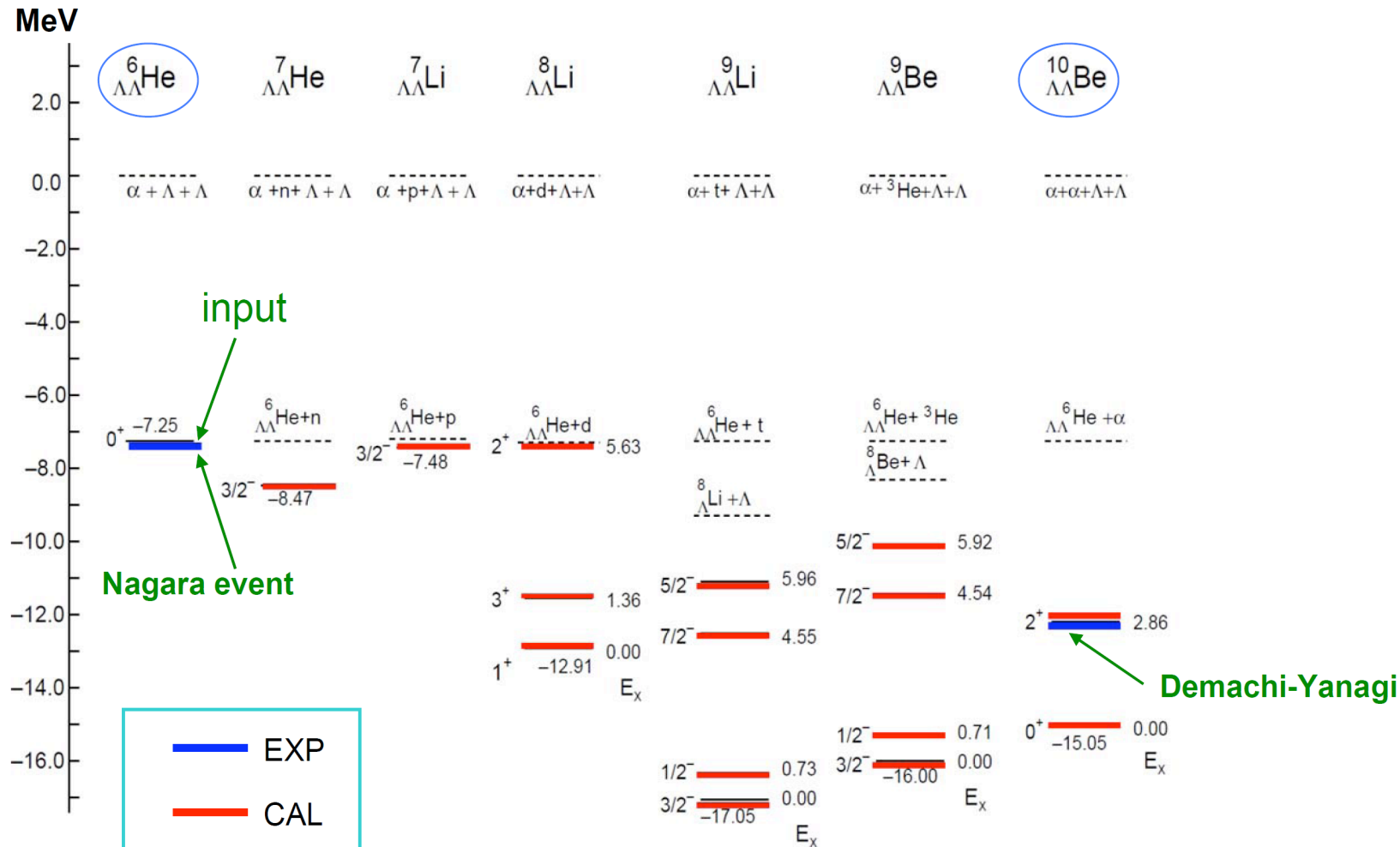


"NAGARA" event
presented by E373(KEK-PS) on Jan.2001

H. Takahashi et al., PRL 87, 212502-1 (2001)

Spectroscopy of $\Lambda\Lambda$ -hypernuclei

E. Hiyama, M. Kamimura, T. Motoba, T. Yamada and Y. Yamamoto
Phys. Rev. C **66** (2002) 024007



By comparing this theoretical prediction and future experimental data, we can interpret the spectroscopy of those double Λ hypernuclei.

- E07 Approved proposal at J-PARC
“Systematic Study of double strangeness systems at J-PARC”
by Nakazawa, Tamua, Imai and his collaborators

1つのダブル Λ 核の発見だけでは、 $\Lambda\Lambda$ 相互作用の情報はまだ不十分。E07実験でさらなる系統的实验を期待。今は実験待ち

In $S=-2$ sector, the most important subjects still to be studied

(1) $\Lambda\Lambda-\Xi N$ coupling

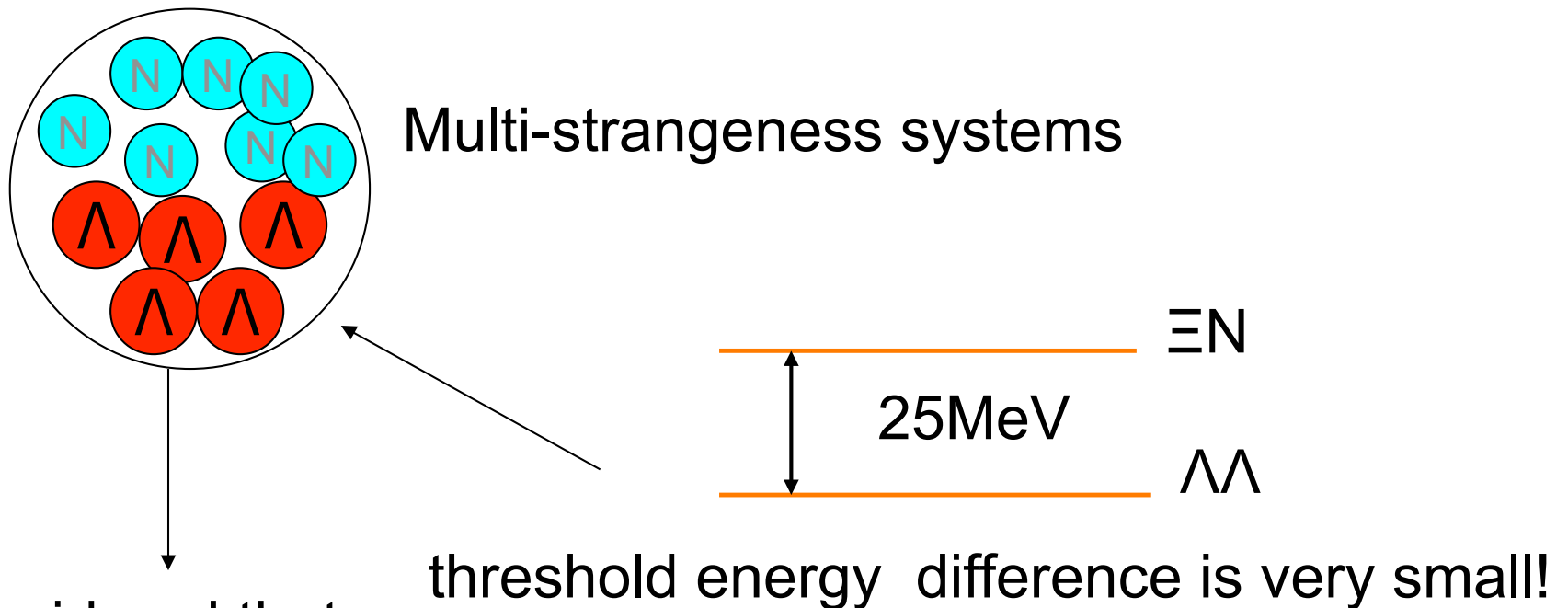
→ S殻ダブル Λ ハイパー核
実験の提案

(2) $\Xi N-\Xi N$ interaction

→ ${}^7\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$ ターゲットを
使用した三ハイパー核実験
の提案

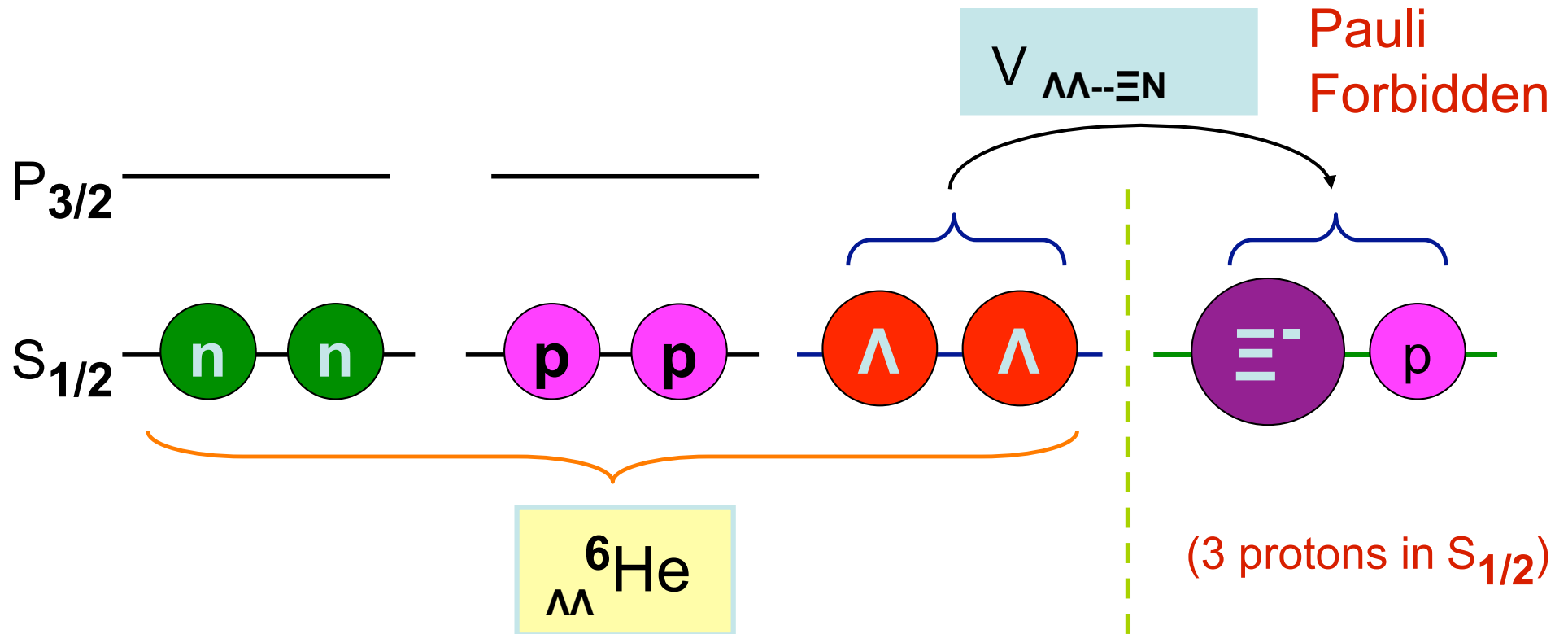
(1) $\Lambda\Lambda$ - Ξ N coupling

One of the major goals in hypernuclear physics
To study structure of multi-strangeness systems
(extreme limit : neutron star)

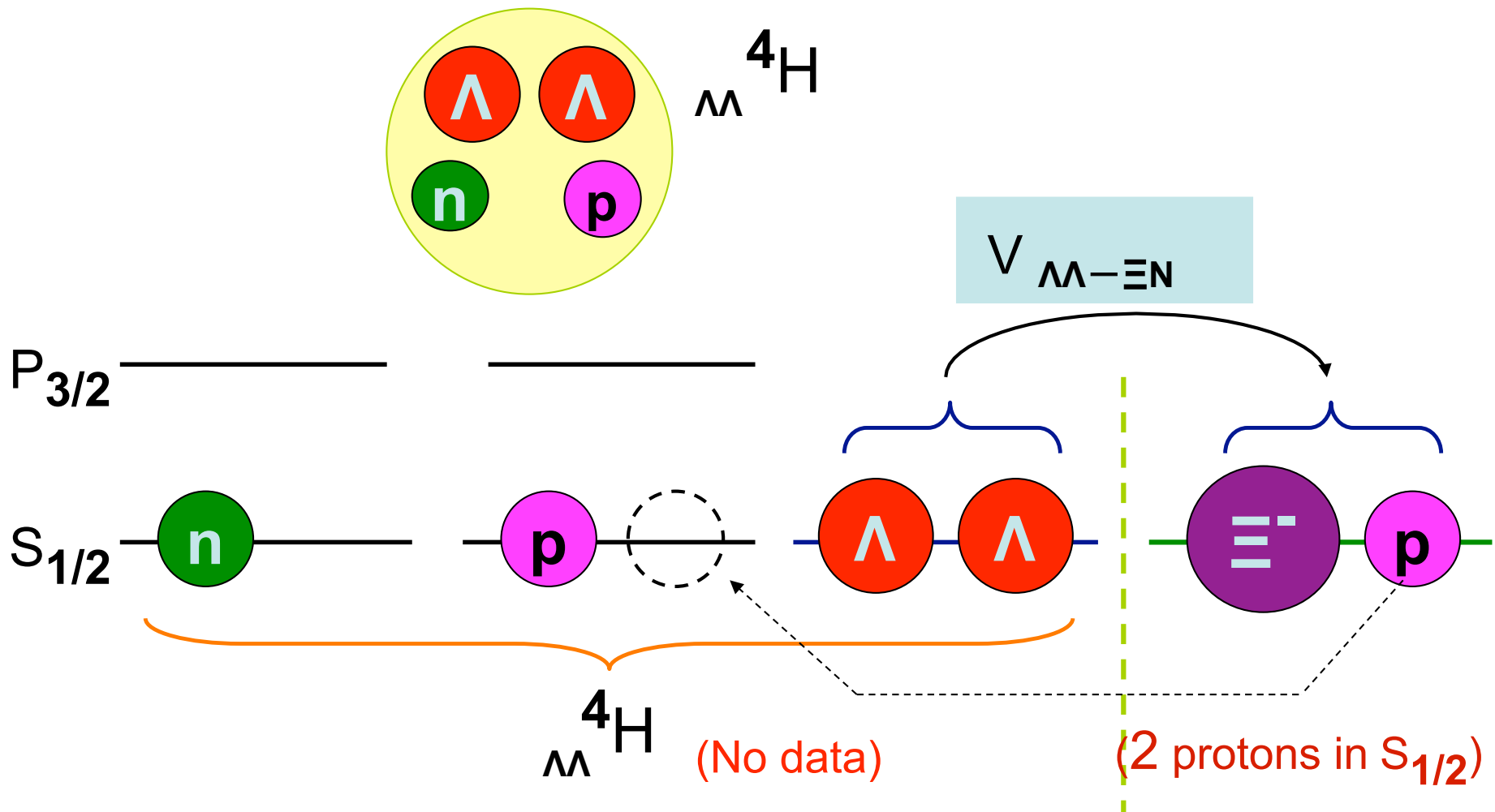


It is considered that
 $\Lambda\Lambda \rightarrow \Xi$ N particle conversion
is strong in multi-strangeness system.

Effect of $\Lambda-\Xi N$ coupling is small in ${}^6_{\Lambda}\text{He}$ which was observed as NAGARA event.



- I.R. Afnan and B.F. Gibson, Phys. Rev. C67, 017001 (2003).
- Khin Swe Myint, S. Shinmura and Y. Akaishi, nucl-th/029090.
- T. Yamada and C. Nakamoto, Phys. Rev.C62, 034319 (2000).

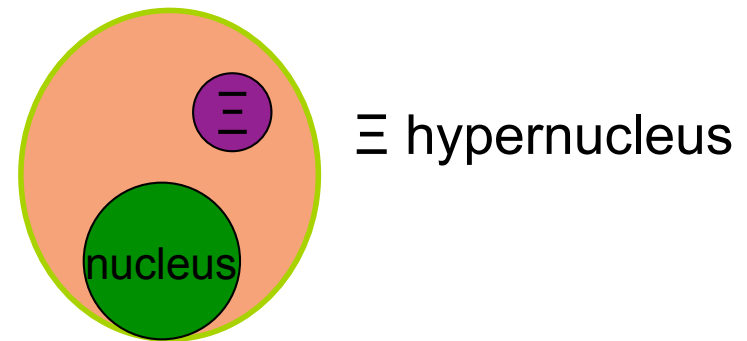


Due to NO Pauli plocking, the $\Lambda\Lambda-\Xi N$ coupling can be large in ${}_{\Lambda}^4\text{H}$

B.F. Gibson, I.R. Afnan, J.A. Carlson and D.R. Lehman, Prog. Theor. Phys. Suppl. 117, 339 (1994).

In $S=-2$ fields, the most important subjects to be still studied

(2) Ξ N- Ξ N interaction



For the study of Ξ N interaction, it is important to study structure of Ξ hypernuclei.

However, so far there was no observed Ξ hypernuclei. Then, it is important to predict theoretically what kinds of Ξ hypernuclei will exist as bound states.

BNL-E885

PHYSICAL REVIEW C 61 054603

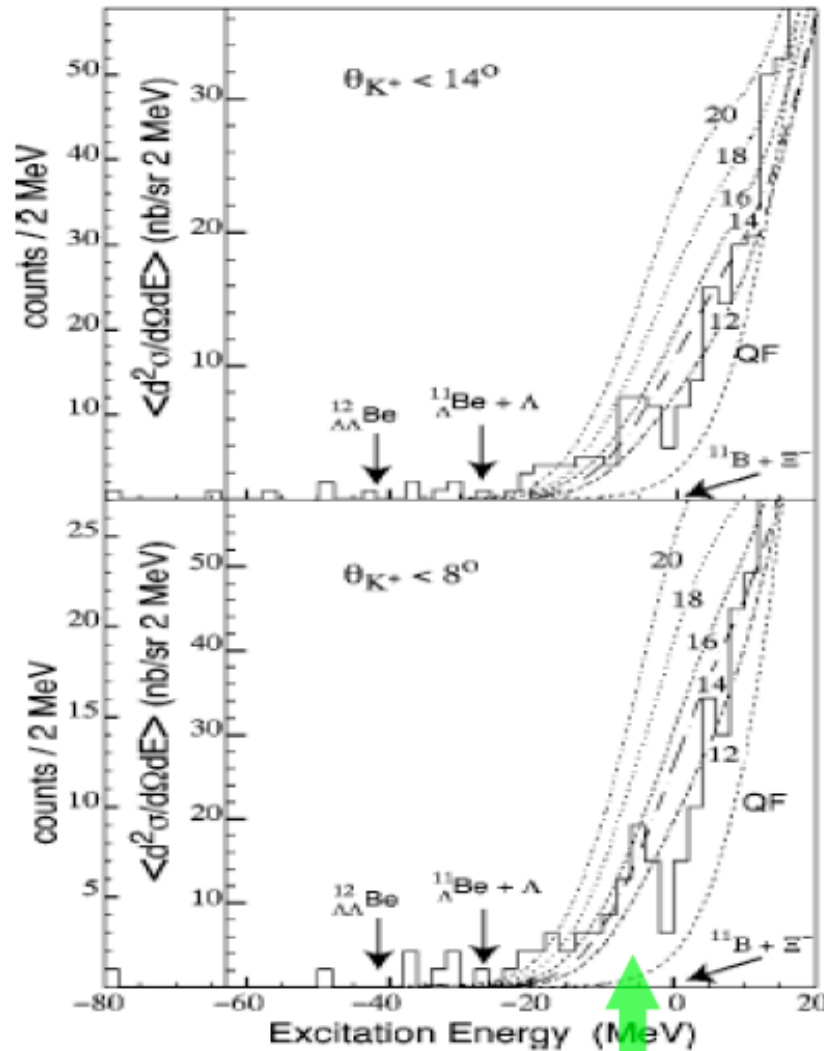
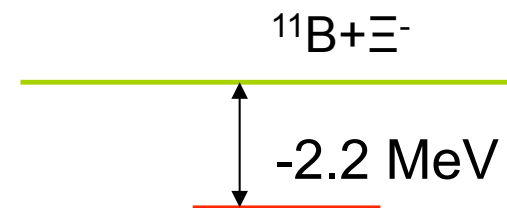


FIG. 6. Excitation-energy spectra from E885 for $^{12}\text{C}(K^-, K^+)X$

Only experimental data

By assuming a Ξ -nucleus Woods-Saxon potential with a depth of ~ 14 MeV, we reproduce the experimental data.

This WS potential leads to be bound by -2.2 MeV in ^{12}Be when the Coulomb interaction is switched off.

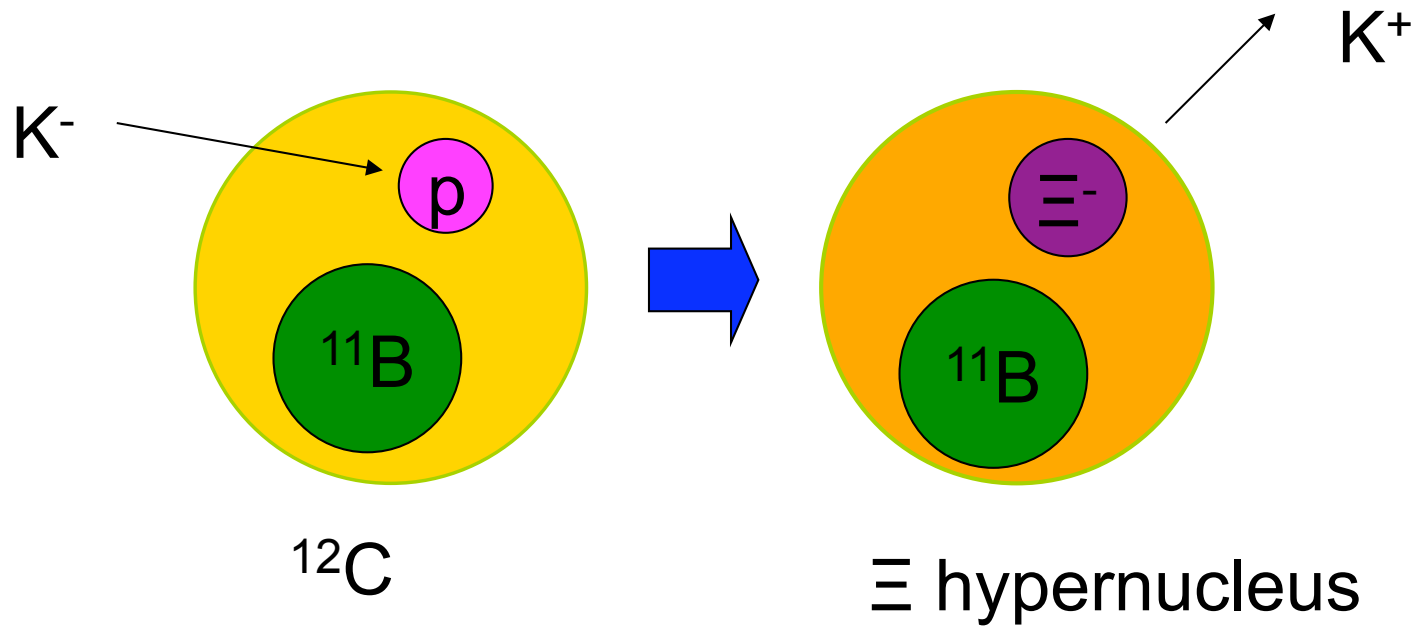


We use this information.

Approved proposal at J-PARC

- E05 “Spectroscopic study of Ξ -Hypernucleus, ^{12}Be , via the $^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{K}^+)$ Reaction” by Nagae and his collaborators

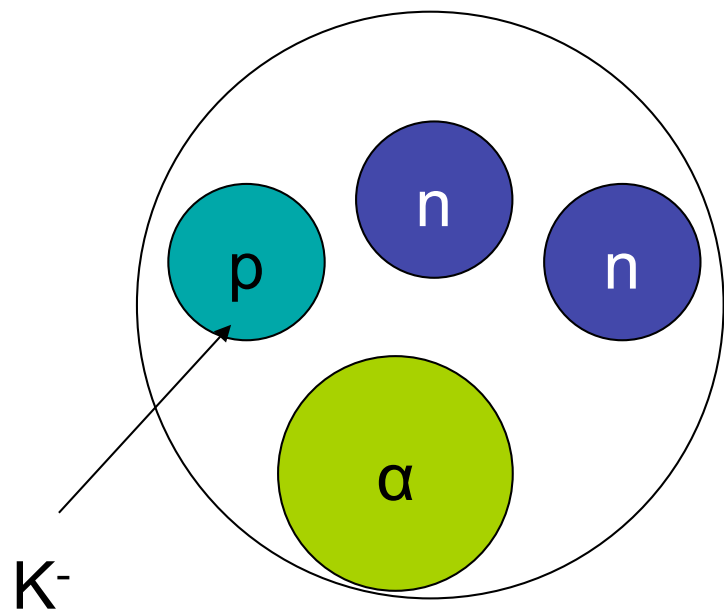
Day-1 experiment



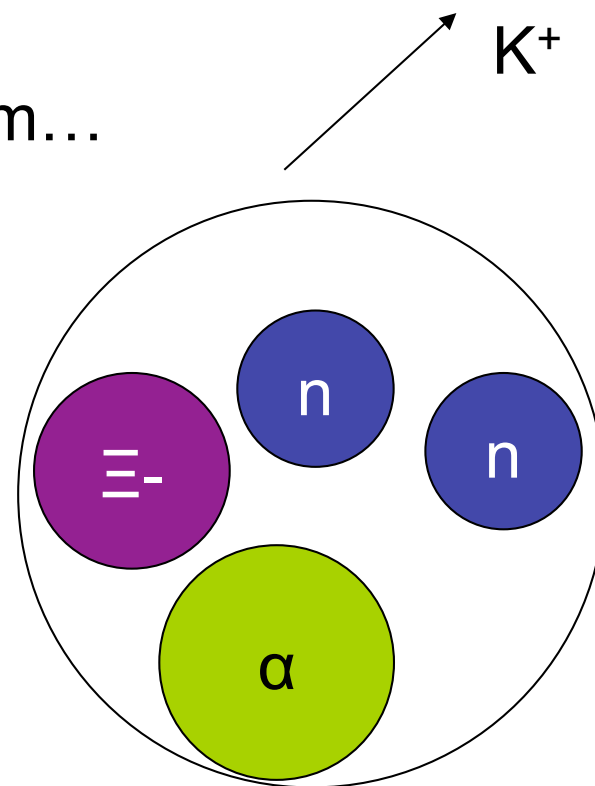
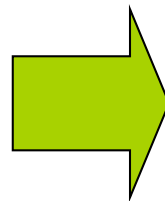
First observation of Ξ hypernucleus

This observation will give information about ΞN interaction.

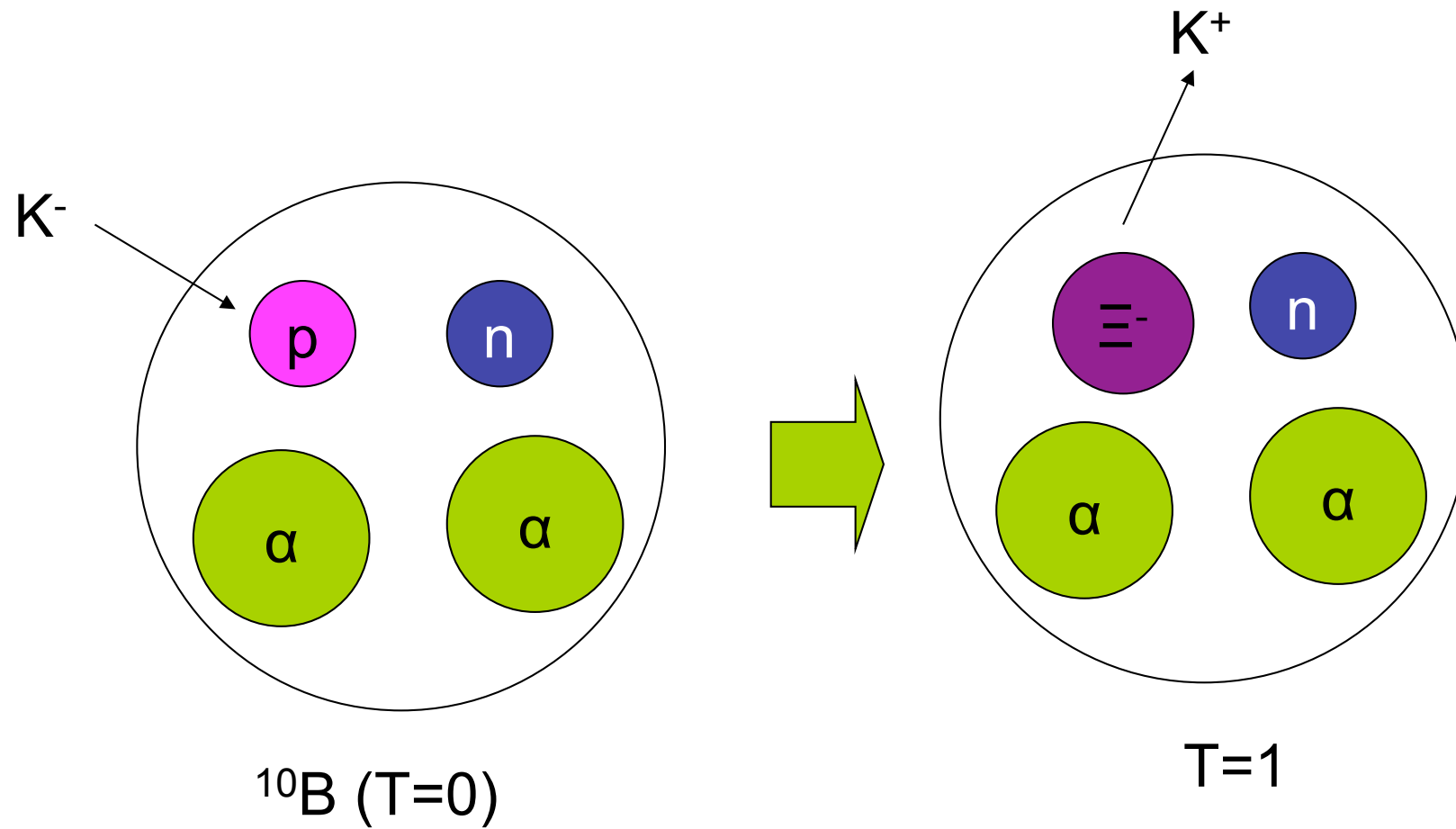
For this purpose, we propose to perform...



${}^7\text{Li}(T=1/2)$



$T=3/2$



ともかく三ハイパー核については、実験待ち

BNL-E885

PHYSICAL REVIEW C 61 054603

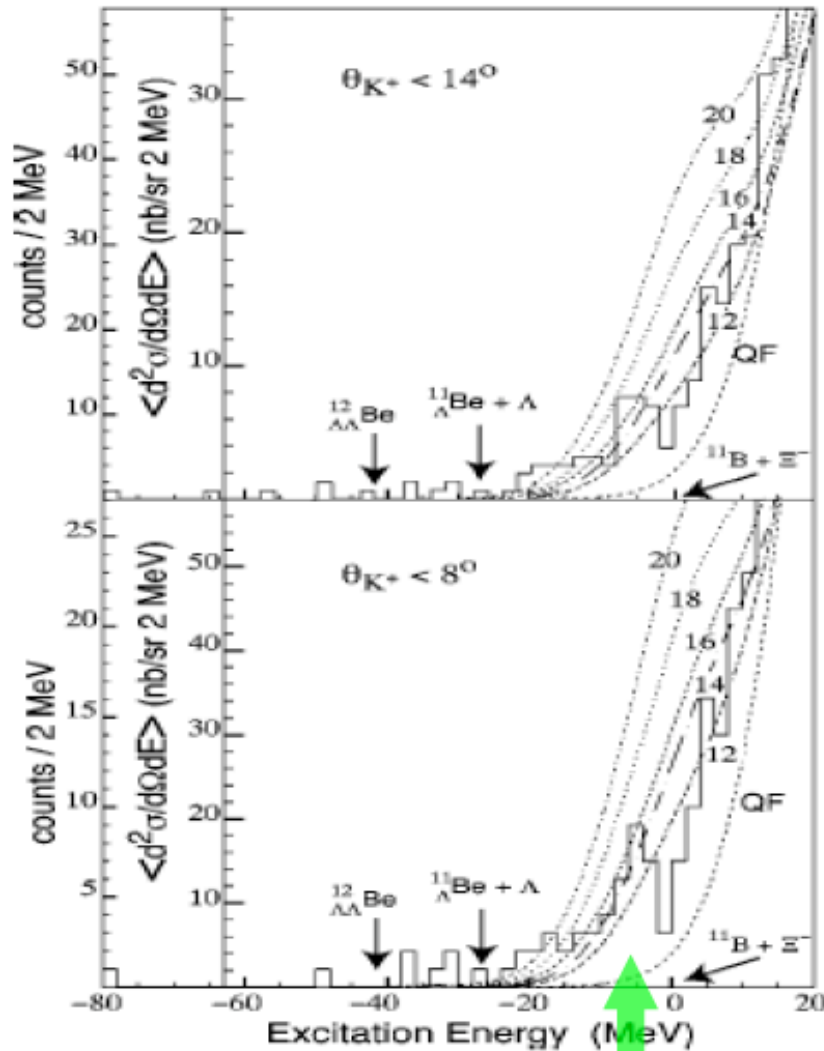


FIG. 6. Excitation-energy spectra from E885 for $^{12}\text{C}(K^-, K^+)X$

Day-1実験待ちにしても、
理論としては、
(K-,K+) reactionで
 $\Lambda\Lambda$ - ΞN 結合を經由して
ダブル Λ ハイパー核の
生成反応計算をすべき

YN,YY相互作用のモデルはどこまで完成したか。
何が、問題か？

Nijmegen model:山本安夫(都留文科大)

Gifu-Funabashi model:新村昌治(岐阜大)

NSC97a,b,c,d,e,fを提案して、少数粒子系計算とのチェックができた。
 ${}^3H_{\Lambda}$ で計算した。

Nijmegen model が苦闘中である課題

small spin-orbit force, repulsive Σ potential,
attractive Ξ potential

弱崩壊研究

- ・弱相互作用の決定 ($\Delta=1/2$ rule)
- ・新しくできたハイパー核のidentificationに有効

弱崩壊: 糸永一憲 (岐阜大)

Mesic decay

π -decay hamiltonian
establishされてきた。

Γ_{π^0} , Γ_{π^-} , π^0/π^- , $\Gamma_{\pi}^{\text{sum}}$: expとconsistent

1 Experiment : Pi-Mesonic Weak Decay

- Mesonic decay rates

Data (~ 2000)

Hypernucleus		Ref.
${}^4_{\Lambda}\text{H}$	Γ_{π^-}	Outa(1995)
${}^4_{\Lambda}\text{He}$	$\Gamma_{\pi^0}, \Gamma_{\pi^-}$	Outa(1995,1998) Zeps(1998)
${}^5_{\Lambda}\text{He}$	$\Gamma_{\pi^0}, \Gamma_{\pi^-}$	Szymanski(1991)
${}^9_{\Lambda}\text{Be}$	Γ_{π}	Bando(1987) ?
${}^{11}_{\Lambda}\text{B}$	Γ_{π} Γ_{π^0} $\Gamma_{\pi^0}, \Gamma_{\pi^-}$	Grace(1985) Sakaguchi(1991) Noumi(1995)
${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$	$\Gamma_{\pi^0}, \Gamma_{\pi^-}$ Γ_{π^0} $\Gamma_{\pi^0}, \Gamma_{\pi^-}$	Szymanski(1991) Sakaguchi(1991) Noumi(1995)

Data (2000~)

Hypernucleus		Ref.
${}^{11}_{\Lambda}\text{B}$	$\Gamma_{\pi^{-}}$	Sato(2005)
${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$	$\Gamma_{\pi^{-}}$	Sato(2005)
${}^{28}_{\Lambda}\text{Si}, {}^{27}_{\Lambda}\text{Si}$	$\Gamma_{\pi^{-}}$	Sato(2005)
${}_{\Lambda}\text{Fe}$	$\Gamma_{\pi^{-}}$	Sato(2005)
${}^7_{\Lambda}\text{Li}$	π^{-} spectra, $\Gamma_{\pi^{-}}$	Botta(2008)
${}^9_{\Lambda}\text{Be}$	π^{-} spectra, $\Gamma_{\pi^{-}}$	Botta(2008)
${}^{11}_{\Lambda}\text{B}$	π^{-} spectra, $\Gamma_{\pi^{-}}$	Botta(2008)
${}^{15}_{\Lambda}\text{N}$	π^{-} spectra, $\Gamma_{\pi^{-}}$	Botta(2008)

Mesic decayについて

Asymmetryについてはまだ測定されていない。

${}^9\text{Be}_\Lambda : {}^{13}\text{C}_\Lambda$ の実験を行って欲しい

$${}^9_\Lambda\mathbf{B}(1/2^+) \quad , \quad \alpha_1^\pi = -0.64 \quad (\text{cal.})$$

$${}^{13}_\Lambda\mathbf{C}(1/2^+) \quad , \quad \alpha_1^\pi = -0.16 \quad (\text{cal.})$$

$\Gamma_{\pi 0}$ が測定されていない。

Non-mesic decay

多くのモデルが提案

Effective field theory、 Direct quark interaction 、 axial vector meson etc.

Γ_n / Γ_p (n/p ratio)

Exp.	${}^5_{\Lambda}\text{He}$	0.45 +/- 0.11 +/- 0.03	Kang(2006)
	${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$	0.56 +/- 0.12 +/- 0.04	Outa(2005)
		0.51 +/- 0.13 +/- 0.05	Kim (2006)

は、どのモデルでもおおよそ再現するようになった。

C. Asymmetry parameter α_1, α_Λ

Exp.	${}^5_\Lambda\text{He}$	0.11 +/- 0.08 +/- 0.04	Outa, Maruta(2005)
		0.07 +/- 0.08 (+0.08/-0.00)	Maruta(2006)
		0.24 +/- 0.22	Ajimura(2000)
	${}^{12}_\Lambda\text{C}$	-0.20 +/- 0.26 +/- 0.04	Outa, Maruta(2005)
		-0.16 +/- 0.28(+0.18/-0.00)	Maruta(2006)

モデルによって、Asymmetry に関する理論的解釈が異なる。
論争中

${}^7_\Lambda\text{Li}$ 、 ${}^{13}_\Lambda\text{C}$ の Asymmetry を測定して欲しい

議論して、収束したこと(らしい)

S=-2はともかく実験待ち、実験を待ってからでないと理論も動けない。

S=-1は実験が豊富

ここ5年は、ここに集中しましょう。

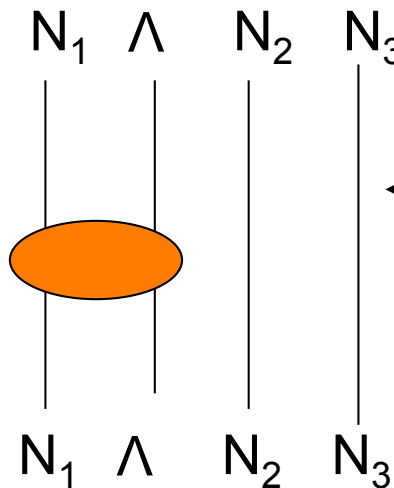
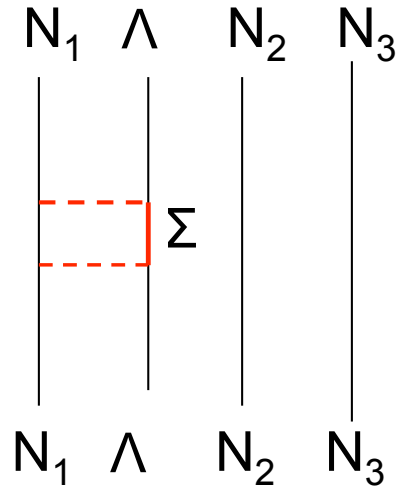
一番急ぐのは、核内における $\Lambda N - \Sigma N$ 結合メカニズム

$\Lambda N - \Sigma N$ 結合を含んだ、s-,p-殻 Λ 核の系統的計算が必要。

(2) Λ N- Σ N coupling

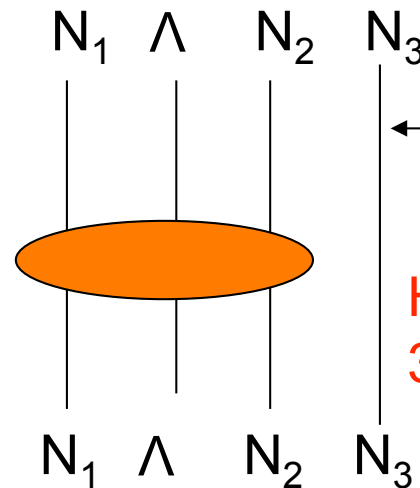
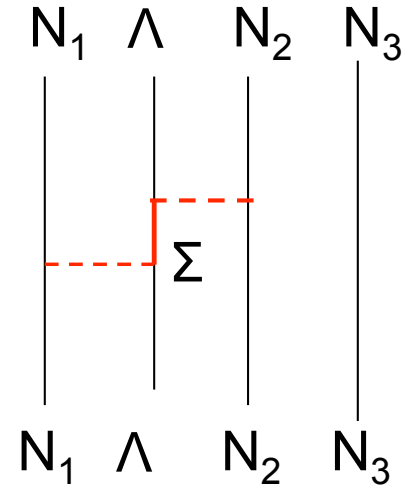
Λ 核内でこの2通りのcontribution
について系統的に議論

①



← Effective
2-body Λ N
force

②



← Effective 3-body
 Λ NN force

How large is the
3-body effect?

3N+ Λ space

おわり

中性子過剰 Λ ハイパー核の生成に重要反応

Double charge exchange reaction
Kinematics

核内の Σ mixing probabilityを決めるのに、今後有効かもしれない反応。

しかし、核内の Σ mixing と反応の中に含まれる Σ mixingと2つ入ってくるので、気をつけないといけない。

今後、系統的な反応実験によって、この2つの内訳を決定付けることが可能かも・・・。

$\Lambda\Lambda$ - 3N couplingの状態をみるために、
(K^- , K^+) reactionで 3 ハイパー核をつくり、
そこから $\Lambda\Lambda$ 核へのdecayを見るのが有効？

実験からの要望：田村裕和（東北大）