

2016. 2. 17

新学術領域ウインタースクール2016

# ストレンジネスと中性子星

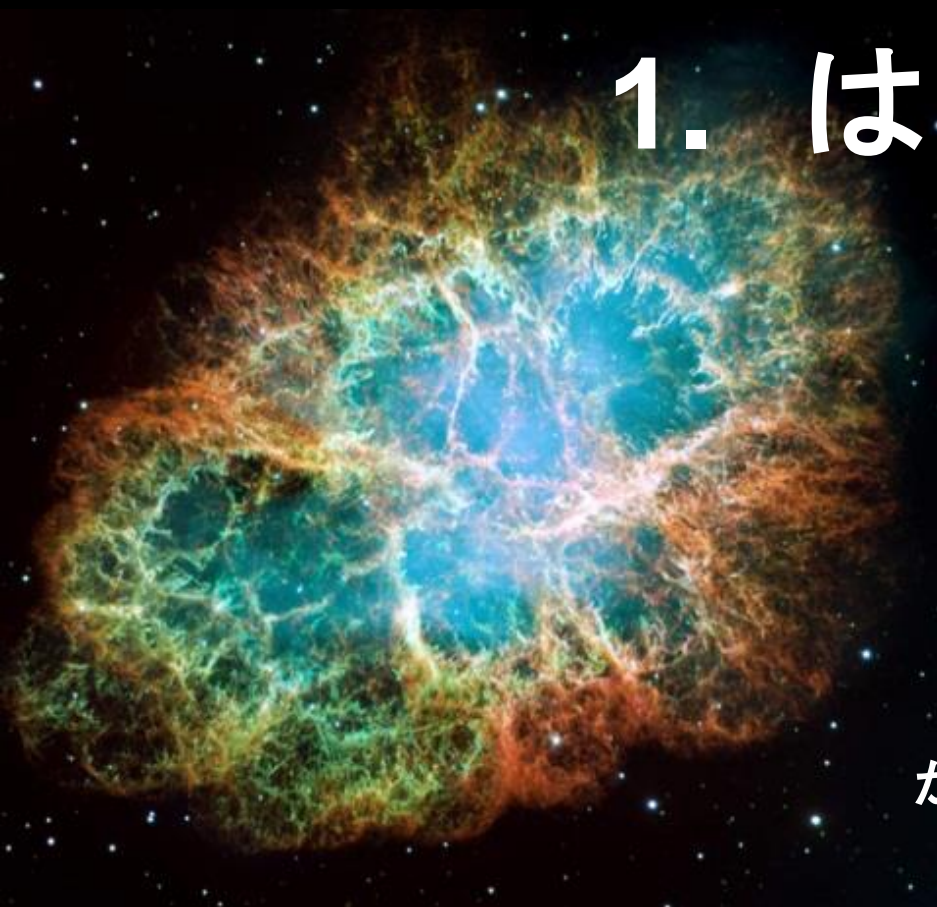
東北大理  
田村 裕和



# 内容

1. はじめに
2. 中性子星とは—その構造と核物質EOS
3. ストレンジネスの発生
4. ストレンジネス核物理とYN, YY相互作用  
Λハイパー核、Σ核とΣN散乱、ΛΛ核、三核
5. Hyperon puzzleと三体斥力の解明へ
6. おわりに

# 1. はじめに

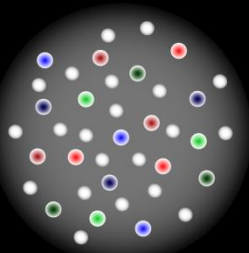


かに星雲(かに座超新星残骸)の  
光学画像とX線画像



温度

ビッグバン  
(初期宇宙)



$T_c$   
~170 MeV

膨張による冷却

クォーク・グルーオン・  
プラズマ (QGP)

ハドロン

バリオン

メソン

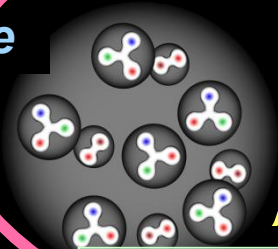


“気体的” → 完全流体的

元素合成

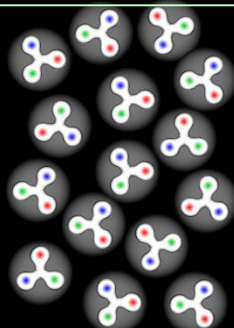
恒星

$H, He \rightarrow Fe$



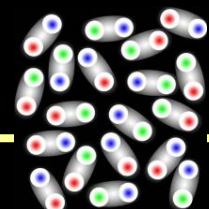
重力圧縮

中性子星



重力圧縮

クォーク星?



$Fe \rightarrow U$

超新星爆発?

通常の原子核

高密度核物質

クォーク物質

密度

宇宙における

物質(クォーク多体系)

の起源と進化

中性子星の物質科学

超伝導状態



## クォーク物質の理解

RHIC/LHC

クォーク・グルオン・  
プラズマの物性

クォーク・  
グルオン・  
プラズマ

核子構造関数

ハドロン分光・探索

ELPH/LEPS

核内ハドロン

J-PARC

ハイパー核

ハドロン

天体核物理

RIBF

中性子・陽子過剰核

超重元素

RCNP

精密核分光

原子核

原子核を用いた基礎物理

京コンピュータ

カラー超伝導状態の解明

クォーク閉じ込め機構  
の解明

核子スピン起源  
の解明

ハドロン質量  
起源の解明

高密度核物質の  
生成・理解

バリオン間力の理解

多彩な新核種の生成と  
その統合的理解

## 原子核の理解

次世代スーパー  
コンピュータ

クォーク多体系の  
相図の決定

新世代  
加速器施設

## ハドロン理解

核物質状態方程式  
の完成

超新星・中性子星の  
生成・構造の解明

元素合成の解明

安定超重元素の発見

あらゆる原子核の  
物性の解明と応用

基本対称性と  
物質優勢宇宙の  
起源の解明

二重ベータ崩壊の発見  
時間反転対称性の破れの発見

加速器・放射線測定技術による高度な医療・安全の実現

原子炉・核融合炉のための核データ

核変換技術の確立

機能的アイソトープの人工生成と利用

フェルト  
テクノロジー  
の拓く  
未来社会

2020

2030

2040

年





# 2012~2016 新学術領域

実験と観測で解き明かす中性子星の核物質

Nuclear matter in neutron stars investigated by experiments and astronomical observations

領域代表：田村裕和(東北大)

A班：ハイペロンの相互作用(J-PARC)

高橋俊行(KEK), 田村裕和(東北大)

B班：中性子物質のEOS(RIBF,冷却原子)

村上哲也(京大)、中村隆司(東工大)、堀越宗一(東大)

C班：X線天文観測(ASTRO-H) 高橋忠幸(JAXA)

D班：理論研究 大西明(基研)

# 本新学術領域: 実験・観測・理論 連携

X線天文衛星  
**ASTRO-H**

“クォークの物質科学”

日本が誇る  
世界最高の2大加速器  
と天文衛星

中性子星全体の内部構造の解明

理論

“核物質EOS”を決定

不安定原子核工場  
**RIBF**

X線天文観測

⇒ 中性子星の半径

大強度陽子加速器  
**J-PARC**

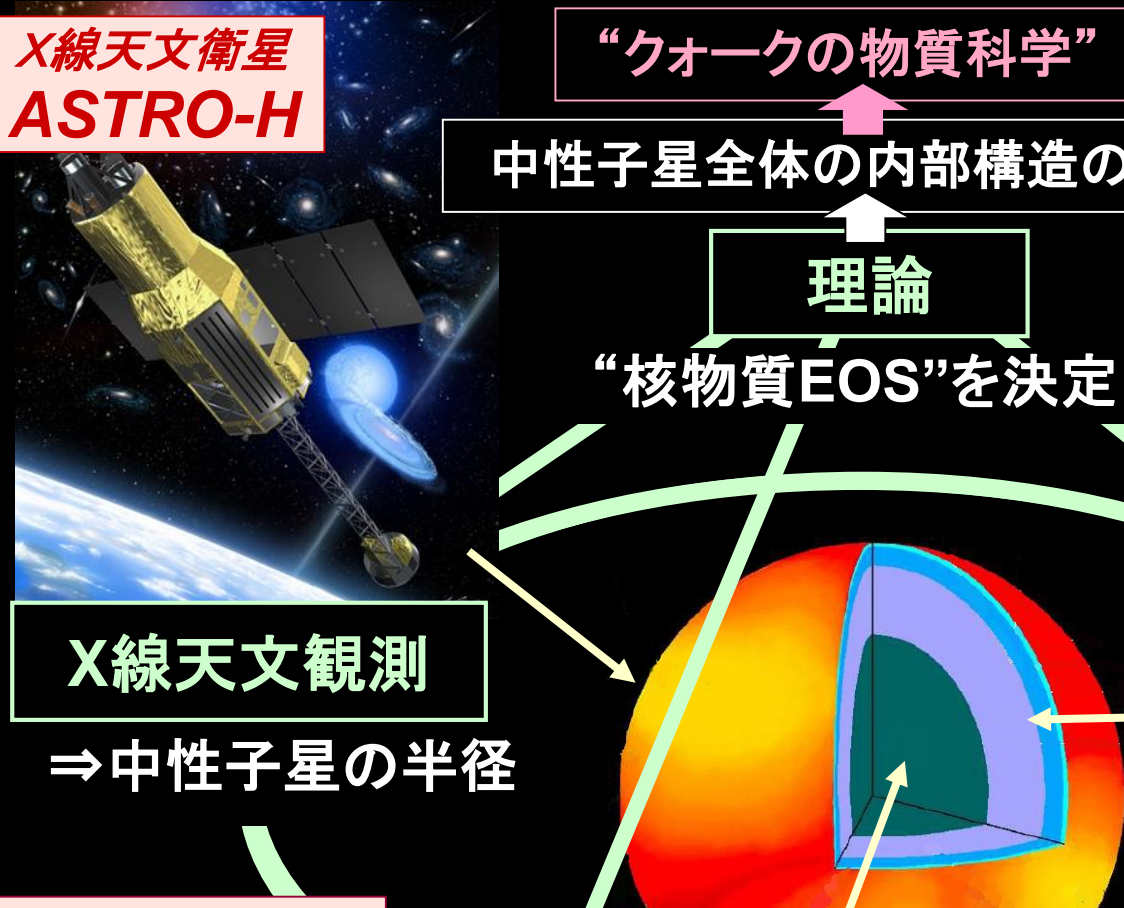
中性子過剰核物理

冷却原子ガス

⇒ 中性子物質の物性

ストレンジネス核物理

⇒ ハイペロン粒子の間の力





# “クォークの物質科学”

## 電子とクォーク(原子核)からなる物質

### 原子からなる物質

地球上の物質

「原子・分子物理学」「物性物理学」  
「化学」

### プラズマ

恒星内部の物質

「プラズマ物理学」


電子(+原子核)と電磁気学が主役

## クォークのみからなる物質

中性子星内部の物質

「原子核物理学」→ “クォークの物質科学”

クォーク(ハドロン)と強い相互作用が主役



## 2. 中性子星とは —その構造と核物質EOS

超新星残骸カシオペアAと、その中心にある中性子星

# 中性子星の発見

1932年 中性子の発見 (Chadwick)

1934年 中性子星の理論的予測 (Baade, Zwicky)

1967年 「パルサー」発見 (Bell, Hewish)

電波 (80MHz) の正確な周期的パルス ( $T=1.337301$ 秒) を観測

PSR1919+21

Hewishはノーベル賞

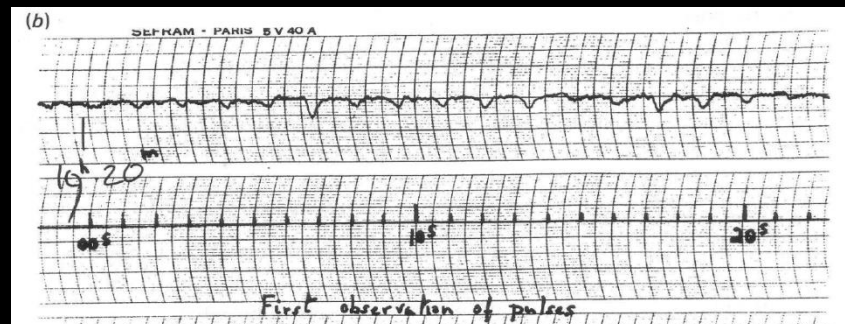
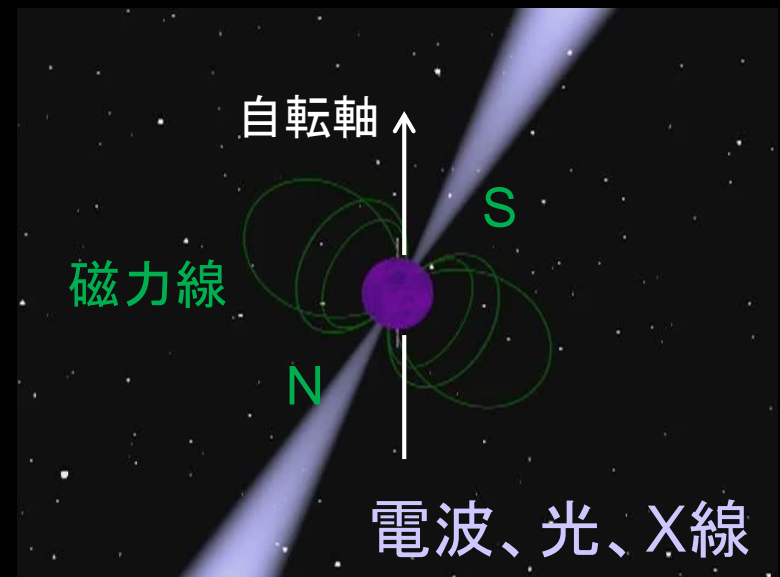


Fig. 1.1.  
PSR B19  
(b) Fast  
trace (He



→ 高速で自転する中性子星が放出  
恒星中心部で密度が上がり電子の縮退圧で  
重力が支えられなくなると  $e^- + p \rightarrow n + \nu$



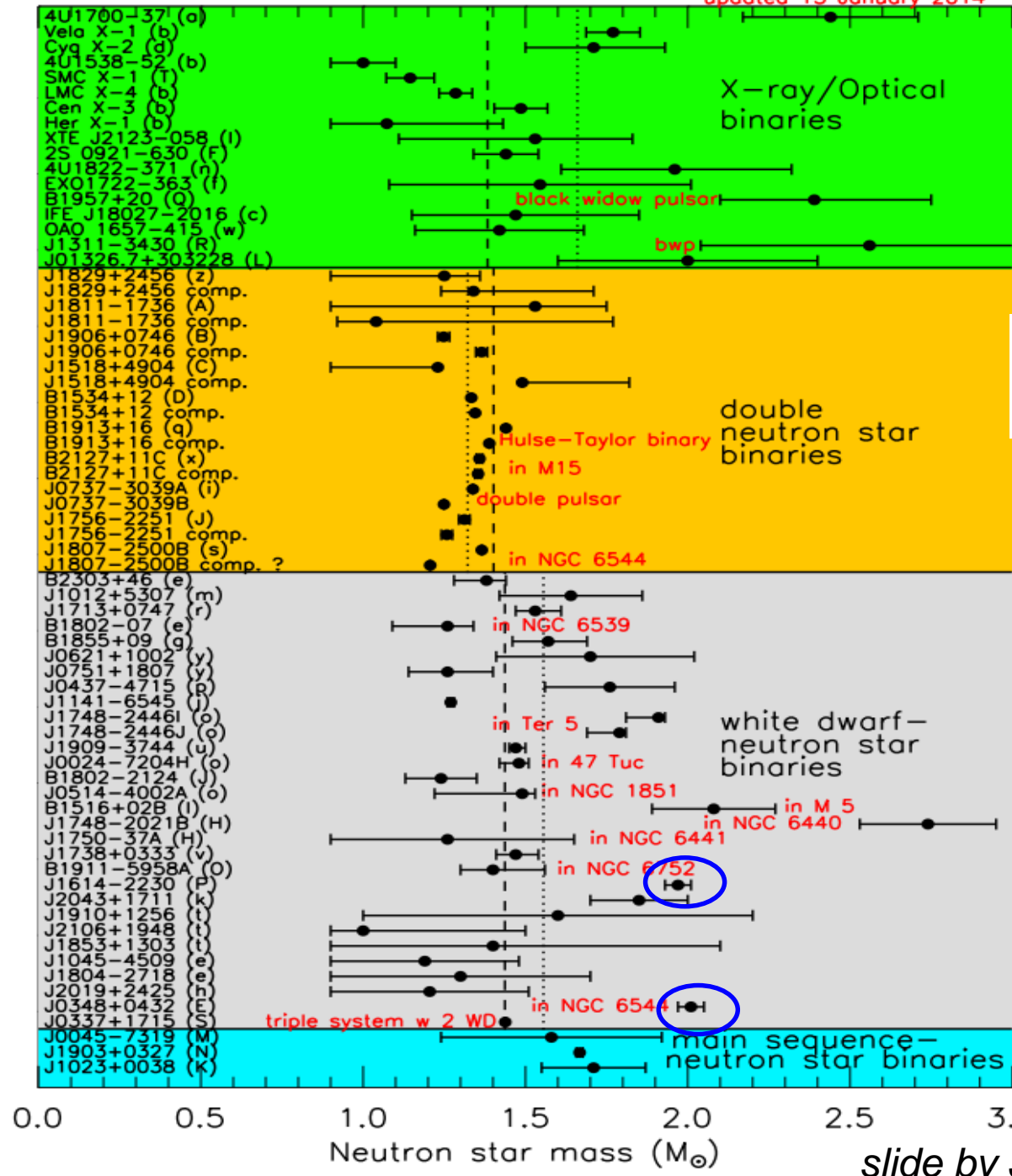
# 中性子星の観測量

- 超新星残骸の中心部に観測 → 超新星爆発で生成
- 自転周期 1 ms ~ 10 s → 遠心力 < 重力より、密度は核密度程度  
スピンドアウン → 磁場の強さ、グリッチ
- 連星の回転周期 周期変化 → 重力波放出の証拠  
パルサー一周期の Doppler shift → 視線方向速度  
=> 質量: 1~2 M<sub>☉</sub> 高精度データは 1.4 M<sub>☉</sub> に集中
- 光度、スペクトル → 表面温度、冷却速度  
=> 半径: R = 7~15 km (黒体輻射の仮定、距離・吸収の誤差)

=> 密度:  $1.5M_{\odot} / ((4/3\pi)(10\text{km})^3) = 0.43 \text{ 個fm}^{-3} = 2.7\rho_0$   
中心部はもっと高いはず

天文学: Compact Star = 核物理: 超巨大・高密度原子核

# 中性子星質量の観測値



高精度の NS-NS連星データは  
1.4M<sub>⊙</sub>に集中

信頼性の高い ~2 M<sub>⊙</sub>の衝撃

Demorest et al. 2010

Antoniadis et al. 2013

Champion et al. 2008

# 物質の密度は何が決める？ フェルミガス模型

通常の固体、原子核、中性子星を統一的に考える

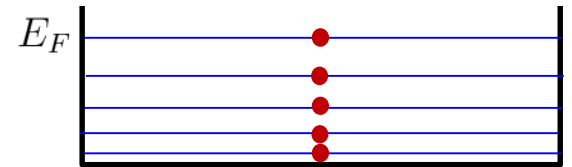
粒子数  $N$ , 閉じ込められた体積  $V$  : 密度  $\rho = V/N$

$$N = 2 \frac{(\text{位相空間体積})}{(2\pi\hbar)^3} = 2 \frac{\frac{4\pi}{3} p_F^3 V}{(2\pi\hbar)^3} \quad \therefore p_F = (3\pi^2 \rho)^{1/3} \hbar$$

電子系：通常の固体（固体水素  $\rho = 0.09 \text{ g/cm}^3$ ）

$$p_F = \left( 3\pi^2 \frac{6 \times 10^{23}}{1 \text{ g}} \times 0.09 \text{ g/cm}^3 \right)^{1/3} \times 197 \text{ MeV}\cdot\text{fm}/c = 2.3 \text{ keV}/c$$

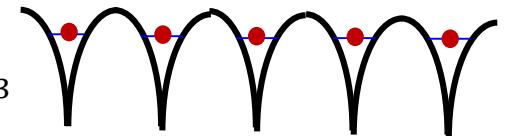
$$E_F = \frac{p_F^2}{2m} = \frac{(2.3 \text{ keV}/c)^2}{2 \times 511 \text{ keV}/c^2} = 5.2 \text{ eV}$$



$$\begin{aligned} \Leftrightarrow -B &= \langle T \rangle - \langle V \rangle \\ &= \langle T \rangle - 2\langle T \rangle \\ &= -\langle T \rangle = -13.6 \text{ eV} \end{aligned}$$

実際は

$$\begin{aligned} p_F^2/2m &= 13.6 \text{ eV のとき} \\ \rho &= p_F^3/3\pi^2 = 0.38 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$





# ちよつと余談

凝縮物質(固体、液体)の密度のオーダーは何で決まる？

電子の空間的広がり

$\propto 2\pi\hbar / \text{運動量}$  ← 閉じ込める力のエネルギーで決まる

古典系(惑星系、銀河系、銀河団): 温度ゼロ(運動エネルギー=0)  
なら大きさゼロ

量子系(通常の固体, 原子核): 温度ゼロでも有限の大きさ

余談: 前期量子論の罨

加速度運動する電子は電磁波を放出する。水素原子の1s軌道を回る電子は、なぜ電磁波を出さず、原子は安定でいられるのか？

答: 1s軌道の電子は回っていない(角運動量ゼロ)。よって電磁波を出すはずもない。古典的には、1sは原点に落ち込んだ状態。一方、電子が2p軌道にいる水素原子は、電子が回っているので安定ではなく、電磁波を出して1sに遷移する。

# フェルミガス模型

$$p_F = (3\pi^2 \rho)^{1/3} \hbar$$

核子系： 原子核  $\rho_p \sim \rho_n \sim \frac{A/2}{\frac{4\pi}{3}(r_0 A^{1/3})^3} = \frac{3}{8\pi r_0^3} = \frac{1}{2}\rho_0$

$$p_F = \left( 3\pi^2 \frac{0.16 \text{ fm}^{-3}}{2} \right)^{1/3} \times 197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}/c \sim 260 \text{ MeV}/c$$

$$E_F = \frac{p_F^2}{2m_N} = \frac{260^2}{940} \sim 36 \text{ MeV}$$

核子系： 中性子星

中性子が $\Lambda$ に転換する条件は

$$E_F = \sqrt{p_F^2 + m_n^2} - m_n > m_\Lambda - m_n = 1116 \text{ MeV} - 940 \text{ MeV} = 176 \text{ MeV}$$

$$p_F = (3\pi^2 \rho)^{1/3} \hbar \rightarrow \rho > \frac{1}{3\pi^2} \frac{(m_\Lambda^2 - m_n^2)^{3/2}}{\hbar^3} = 0.962 \text{ fm}^{-3} \sim 6\rho_0$$

# 中性子星内部の密度分布と半径

静水圧平衡 (圧力勾配=重力)

$\rho(r)$ : 質量を含むエネルギー密度

$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{G}{r^2} M(r) \rho(r) \quad \frac{dM(r)}{dr} = 4\pi\rho(r)r^2$$

一般相対論化 Tolman-Oppenheimer-Volkov equation

$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{G}{r^2} \frac{\left[ M(r) + 4\pi r^3 \frac{P(r)}{c^2} \right] \left[ \rho(r) + \frac{P(r)}{c^2} \right]}{\left[ 1 - \frac{2GM(r)}{c^2 r} \right]}$$

1.5 $M_{\odot}$  のとき  
およそ  $R \sim 10$  km

$P(r)$  中性子の縮退圧— $\rho(r)$  の関数

$$\rho = m\rho_n$$

フェルミガス模型では

$$p_F = (3\pi^2 \rho_n)^{1/3} \quad \bar{E} = \frac{3}{5} N E_F = \frac{3}{5} N \frac{p_F^2}{2m}$$

$$P = -\frac{d\bar{E}}{dV} = \frac{(3\pi^2)^{2/3} \hbar^2}{5m} \rho_n^{5/3} \quad \rightarrow \text{相対論的極限} \quad P = \frac{(3\pi^2)^{1/3}}{4} \hbar c \rho_n^{4/3}$$

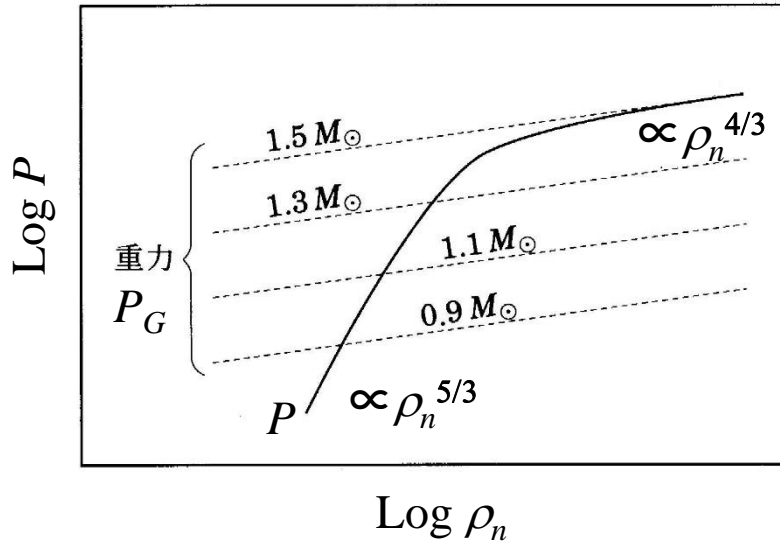
$V = N/\rho_n$

$P(\rho_n)$ :  $T=0$ での状態方程式 → 核力で変わる

cf. 理想気体  $P(\rho_n) = \rho_n kT$



# 中性子星内部の密度分布と半径



$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{G}{r^2} M(r) \rho(r)$$

星表面での重力の圧力は  
 $M \propto \rho R^3$  として

$$P_G \sim GM\rho_n/R \propto GM^{2/3}\rho_n^{4/3}$$

$P(r)$  中性子の縮退圧— $\rho(r)$  の関数

$$\rho = m\rho_n$$

フェルミガス模型では  $p_F = (3\pi^2\rho_n)^{1/3}$   $\bar{E} = \frac{3}{5}NE_F = \frac{3}{5}N\frac{p_F^2}{2m}$

$$P = -\frac{d\bar{E}}{dV} = \frac{(3\pi^2)^{2/3}}{5} \frac{\hbar^2}{m} \rho_n^{5/3} \rightarrow \text{相対論的極限 } P = \frac{(3\pi^2)^{1/3}}{4} \hbar c \rho_n^{4/3}$$

$V = N/\rho_n$

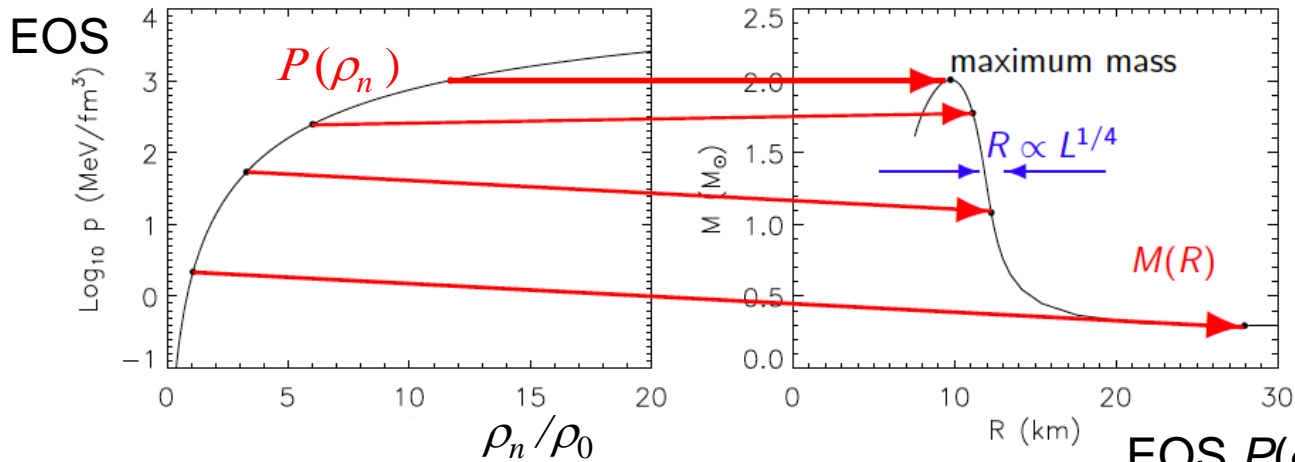
$P(\rho_n)$ :  $T=0$ での状態方程式 → 核力で変わる

cf. 理想気体  $P(\rho_n) = \rho_n kT$

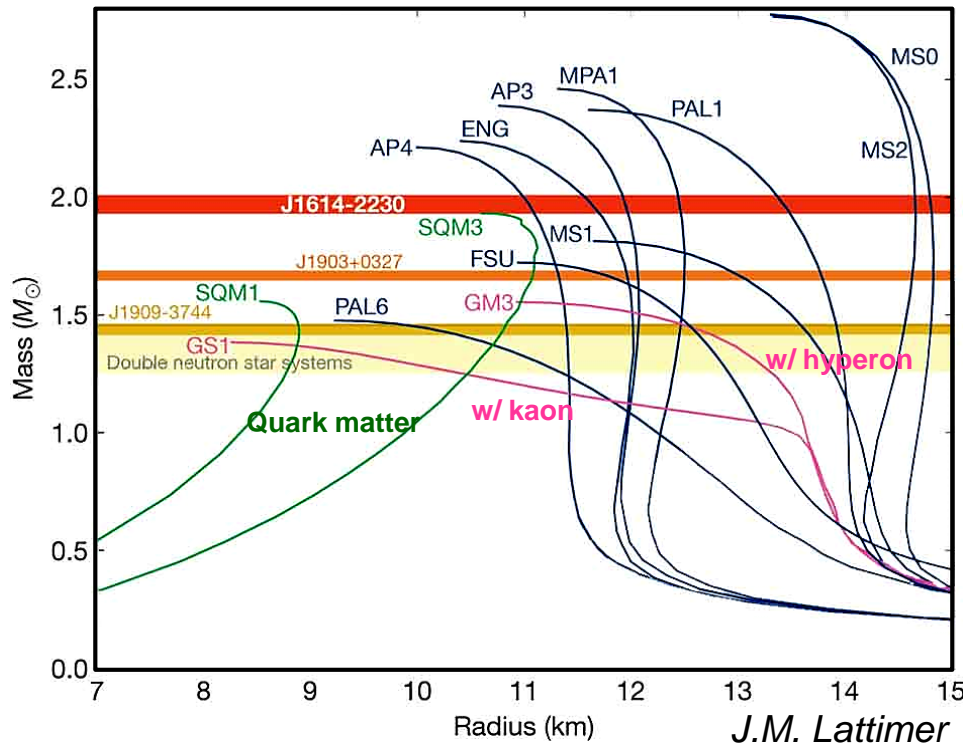
=> Chandrasekhar 限界  $N_{\max} \sim \left(\frac{\hbar c}{Gm^2}\right)^{3/2} \sim 2 \times 10^{57} \rightarrow M_{\max} = N_{\max}m \sim 1.7M_{\odot}$

c.f. Schwarzschild 半径  $r_g = \frac{2GM}{c^2} = 3 \text{ km for } M_{\odot}$

# 中性子星の質量-半径とEOS



EOS  $P(\rho)$  と  
M-R 曲線とは  
一対一対応

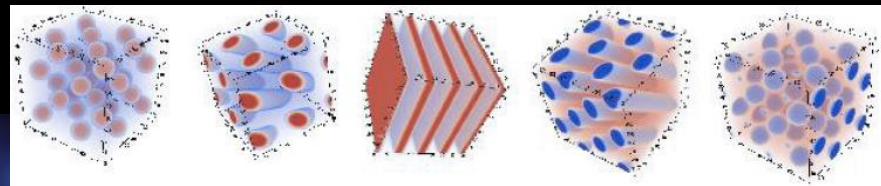


核物理の理論的枠組みや  
核力の違いにより、  
EOSには大きな不定性  
がある。

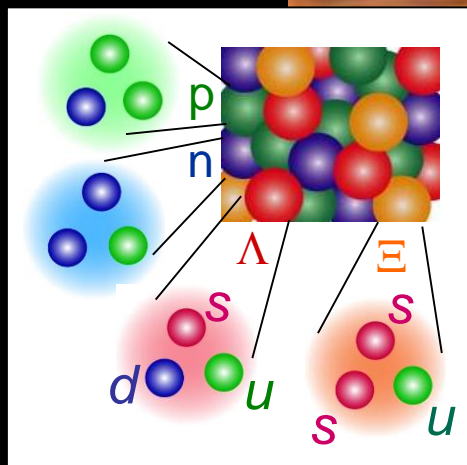
M-R 観測による選別が可能

# 中性子星内部の 未知物質 (予想)

## [地殻] パスタ原子核

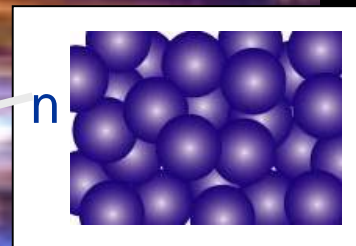


原子核と中性子物質が  
さまざまな形で混在



## [内核] スレンジ核物質 ?

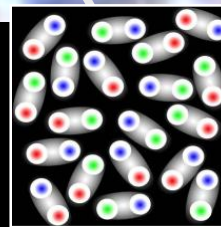
3種のクォーク (u,d,s) からなるハドロン  
(陽子、中性子、ハイペロン、  
あるいはK中間子)が集まった物質



## [外核] 中性子物質

ほとんど中性子だけで  
できた物質  
超流動状態か

NASA



## [中心部] スレンジ・クォーク物質

クォークが閉じ込めから解放  
u,d,sクォークの  
カラー超伝導状態 ??

人類が知らないまったく新しい姿の物質たち

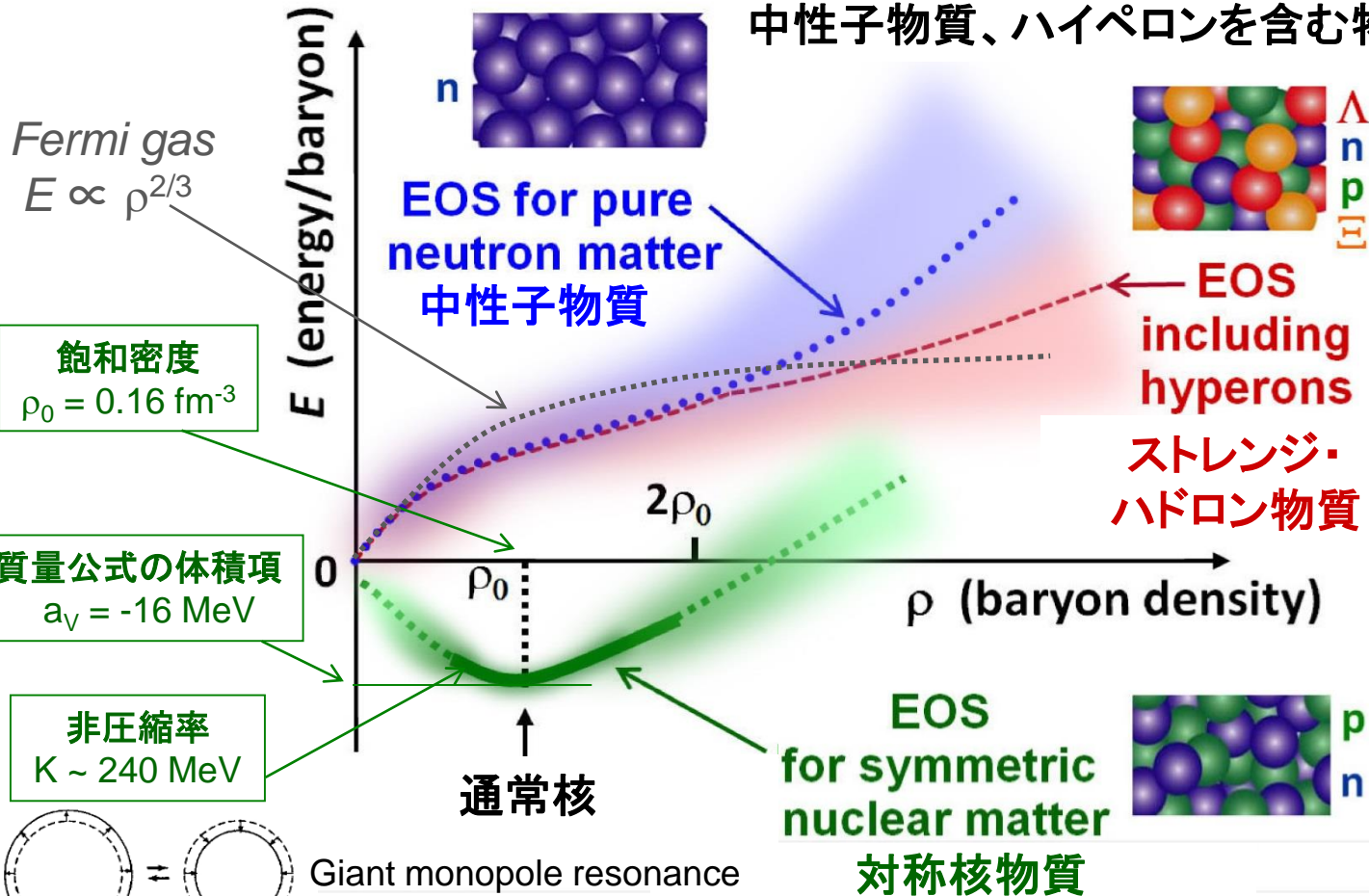


# 核物質(バリオン多体系)の状態方程式 (EOS)

中性子星では、  
電気的中性  
バリオン数保存

実験的によくわかっているのは  
対称核物質の  $\rho_0$  周辺のみ

$\rho_0$  周辺以外、とくに高密度側にどう拡張するか  
中性子物質、ハイペロンを含む物質にどう拡張するか

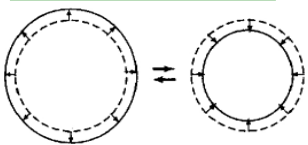


Fermi gas  
 $E \propto \rho^{2/3}$

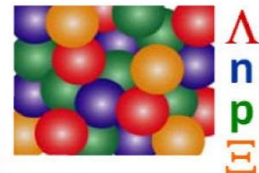
飽和密度  
 $\rho_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}$

質量公式の体積項  
 $a_v = -16 \text{ MeV}$

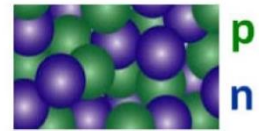
非圧縮率  
 $K \sim 240 \text{ MeV}$



Giant monopole resonance  
(Breathing mode)



EOS including hyperons  
スレンジ・ハドロン物質



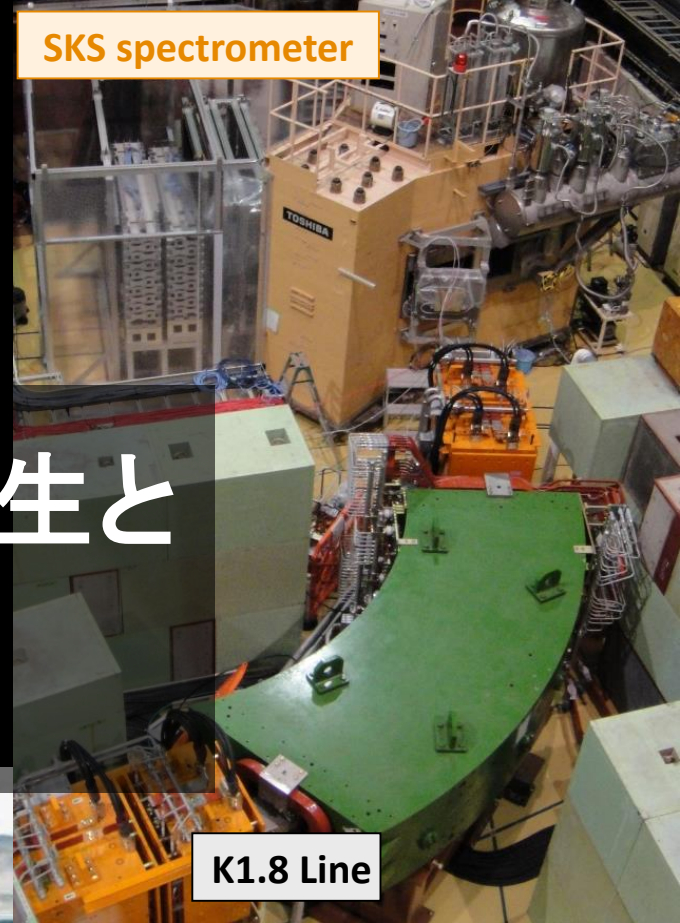
EOS for symmetric nuclear matter  
対称核物質

- ・原子核-原子核衝突
  - ・中性子過剰核
  - ・ハイパー核
- のデータから引き出す

拡張(補外)に対して  
信頼性の高い理論的  
枠組みを開発する

# 3. ストレンジネスの発生と Hyperon puzzle

SKS spectrometer



J-PARC

K1.8 Line



# ハイペロンの出現

高密度ほど  
斥力的

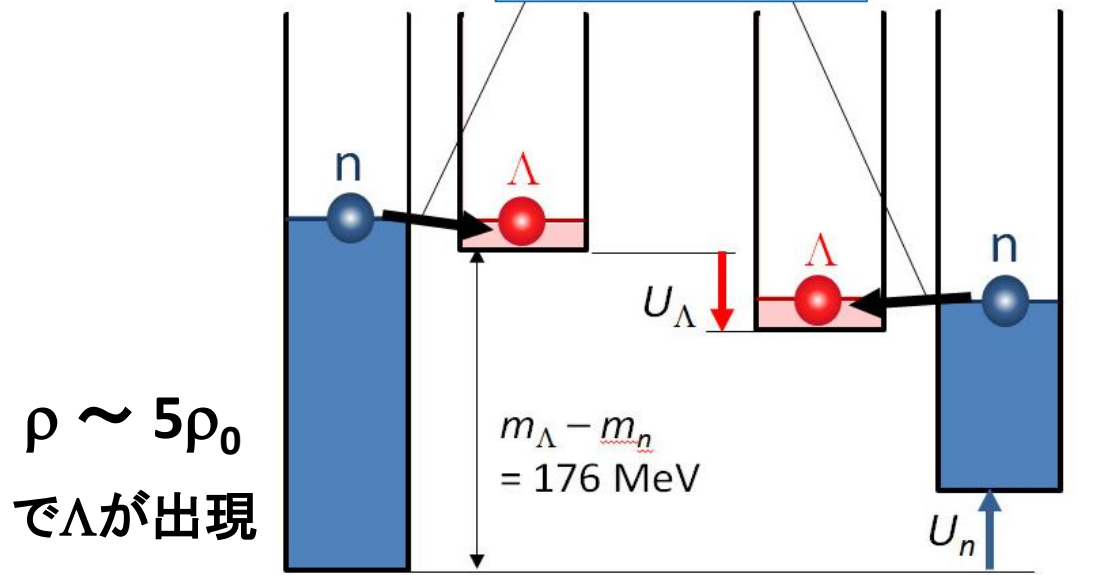
フェルミガスモデルでは

$$p_F = (3\pi^2 \rho_n)^{1/3} \quad E_F = \frac{p_F^2}{2m_n} > m_\Lambda - m_n \quad \text{より} \quad \rho_n > 5.0\rho_0$$

実際はポテンシャルの効果も大きい

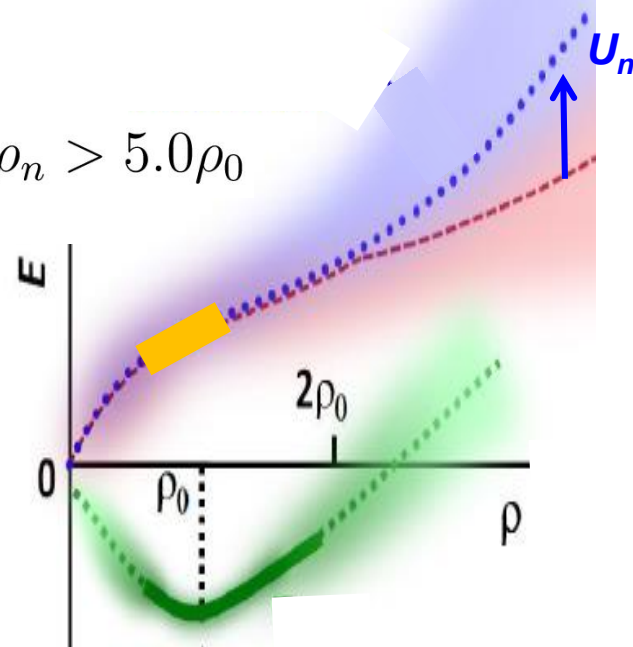
$$\mu_B = m_B + \frac{k_F^2}{2m_B} + U(k_F)$$

weak interaction  
n → Λ



(a) w/o BB interaction

(b) w/ BB interaction



$$U_\Lambda = -30 \text{ MeV at } \rho_0$$

$$U_n > 0 \text{ at large } \rho$$

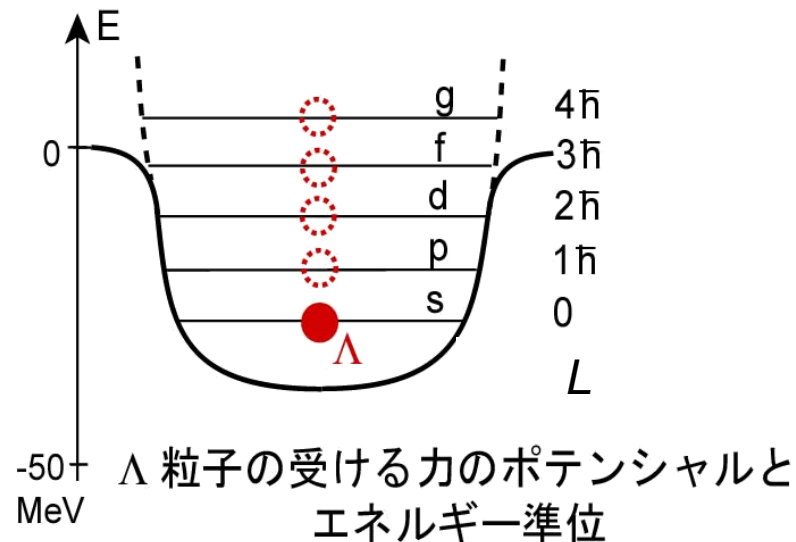
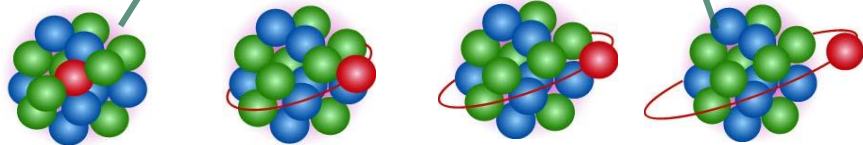
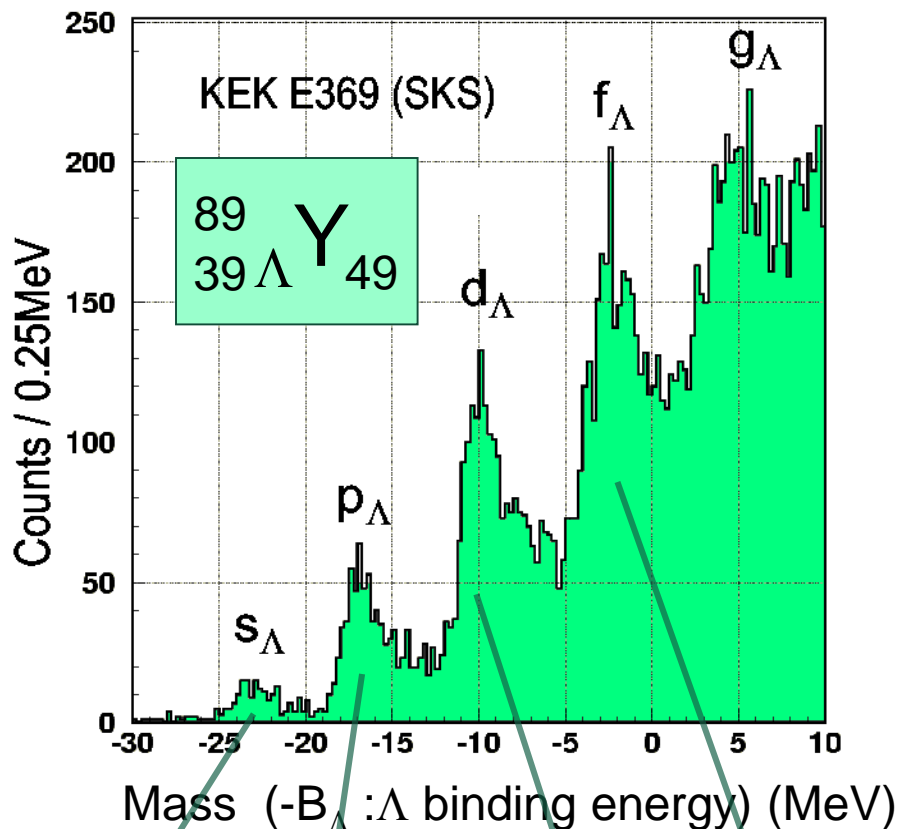
$$\rho \sim 2 - 2.5\rho_0$$

でΛが出現



# $\Lambda$ ハイパー核の存在 $\rightarrow$ $\Lambda N$ 相互作用は引力

$^{89}\text{Y} (\pi^+, K^+) ^{89}_{\Lambda}\text{Y}$



$\Rightarrow$

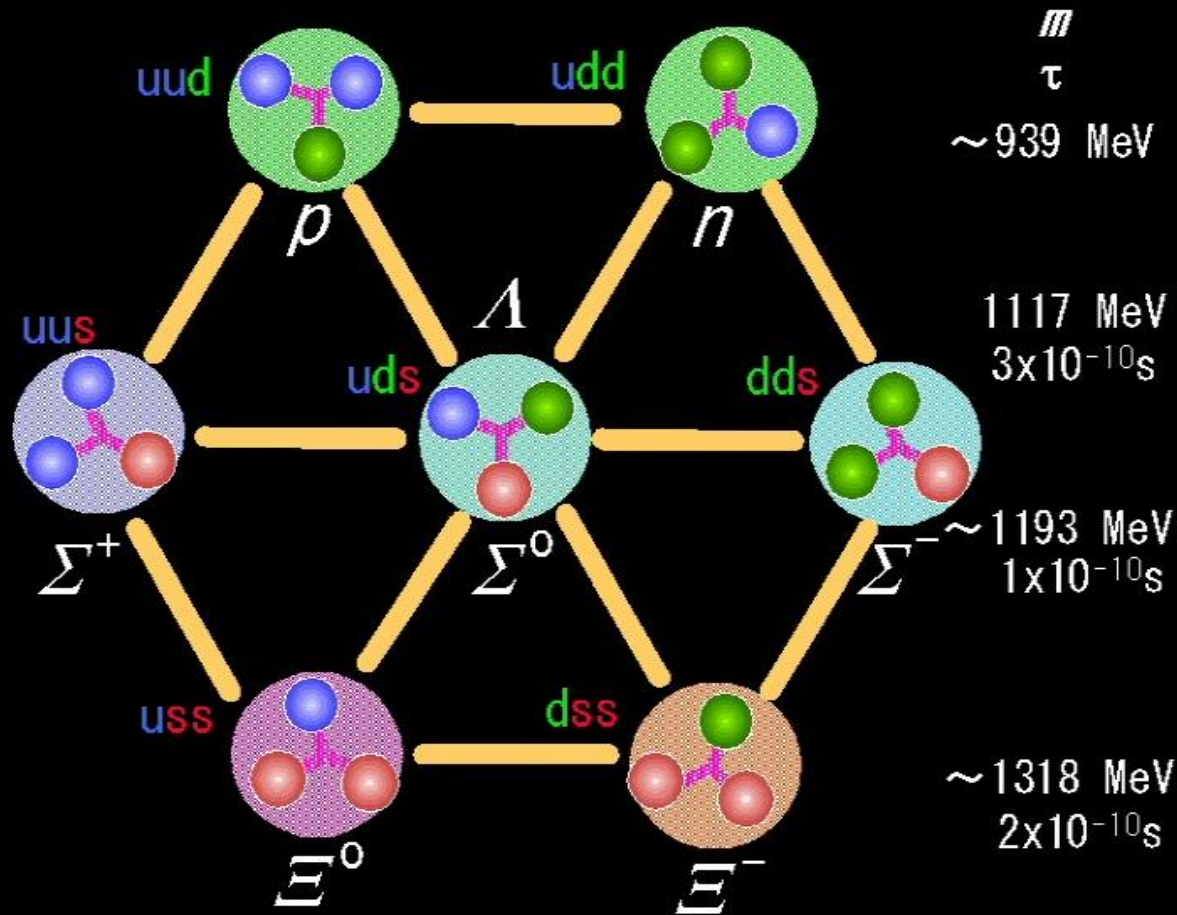
$U_{\Lambda}$  ( $\Lambda$ のpotential depth) = - 30 MeV

c.f.  $U_N = - 50$  MeV

$\Lambda N$  相互作用は核力より少し弱い引力

# バリオン8重項とハイペロン(Y)

## バリオン8重項(スピン1/2) u, d, sからなるバリオンの基底状態



弱い相互作用で  
互いに移り変わる

$u \leftrightarrow d$   
 $u \leftrightarrow s$

- 1)自由空間では、pのみ安定
  - 2)核内では、束縛エネルギーにより  $p \leftrightarrow n$  は移り変わる ( $u \leftrightarrow d$ )
  - 3)中性子星では、同様に8つのバリオンが移り変わる? ( $u \leftrightarrow d, u \leftrightarrow s$ )
- 2)の移り変わり方(束縛エネルギーがどう変化するか)は核力に依存  
->  
3)に答えるには、8つのバリオン間の力を知る必要あり。きっと似ている?

# 中性子星のハイペロン存在比

$$\mu_B = m_B + \frac{k_F^2}{2m_B} + U(k_F)$$

バリオン数保存

$$y_n + y_p + y_\Lambda + y_{\Sigma^-} + y_{\Xi^-} = 1,$$

電荷中性

$$y_p = y_{\Sigma^-} + y_{\Xi^-} + y_e + y_\mu,$$

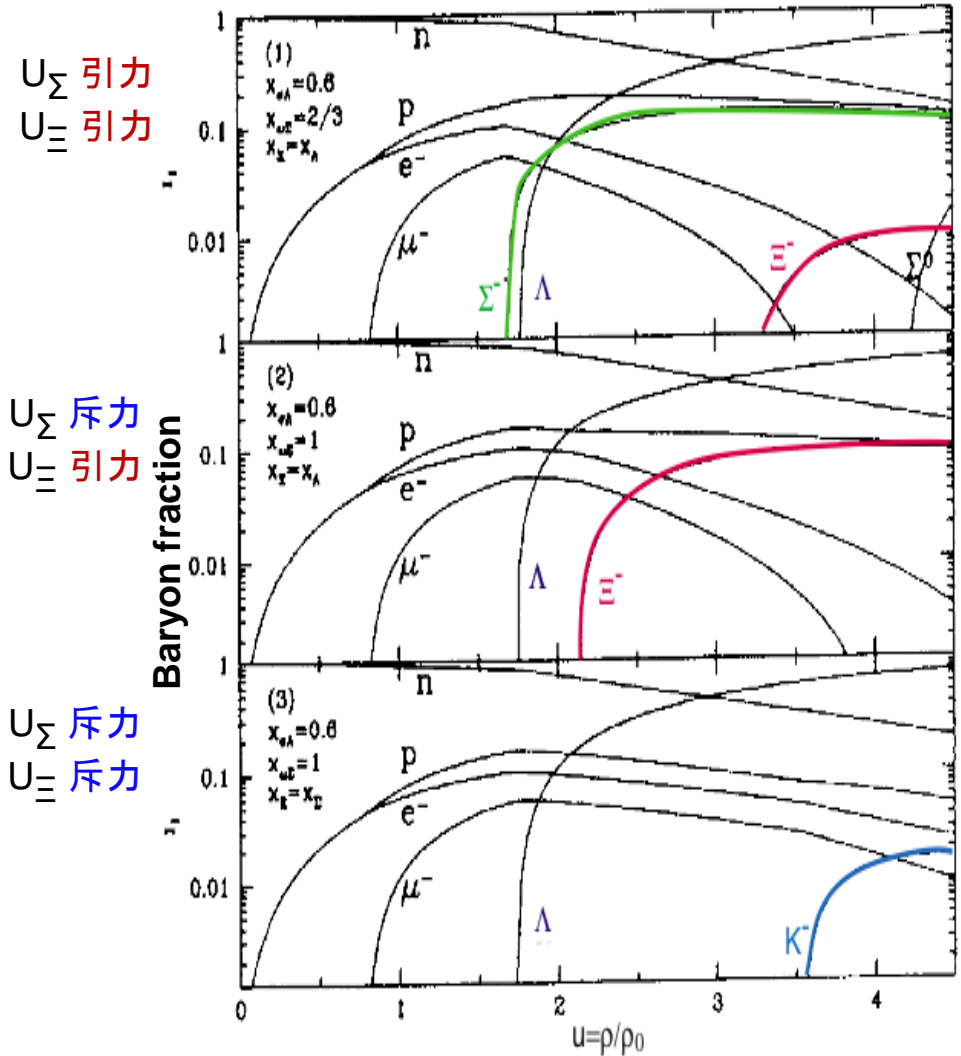
弱い相互作用での粒子転換

$$\mu_n = \mu_p + \mu_e,$$

$$\mu_\Lambda = \mu_n,$$

$$\mu_{\Sigma^-} = \mu_{\Xi^-} = \mu_n + \mu_e$$

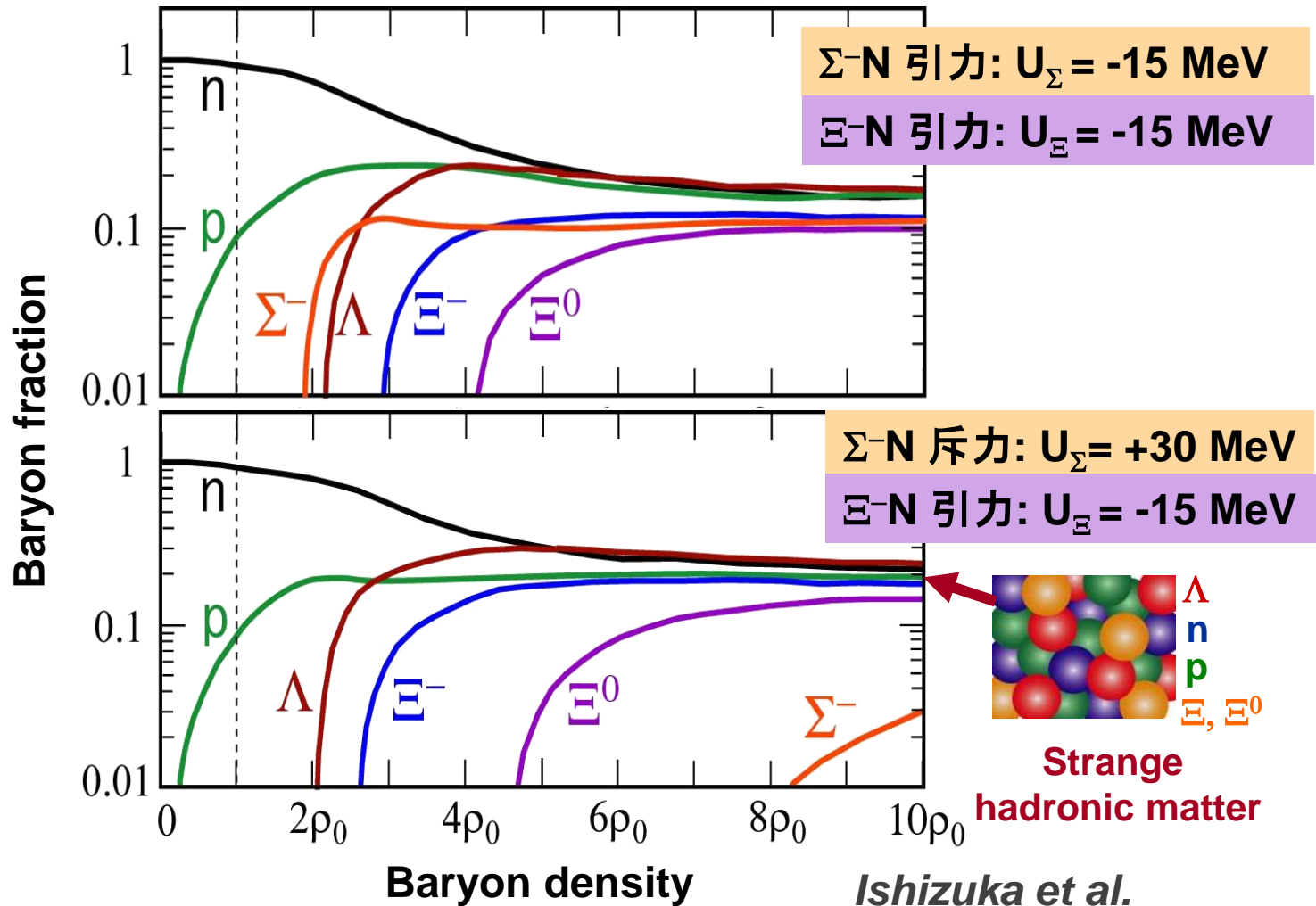
$$\mu_\mu = \mu_e,$$



# YN,YY相互作用と中性子星のハイペロン存在比

ハイパーデータからわかっていること

- $\Lambda$ N: 引力  $U_{\Lambda} = -30$  MeV
- $\Xi$ N: 弱い引力  $U_{\Xi} \sim -15$  MeV??
- $\Sigma$ N: 斥力  $U_{\Sigma} \sim +$ 数10 MeV?
- $\Lambda\Lambda$ : 弱い引力  $\Delta B_{\Lambda\Lambda} \sim 1$  MeV

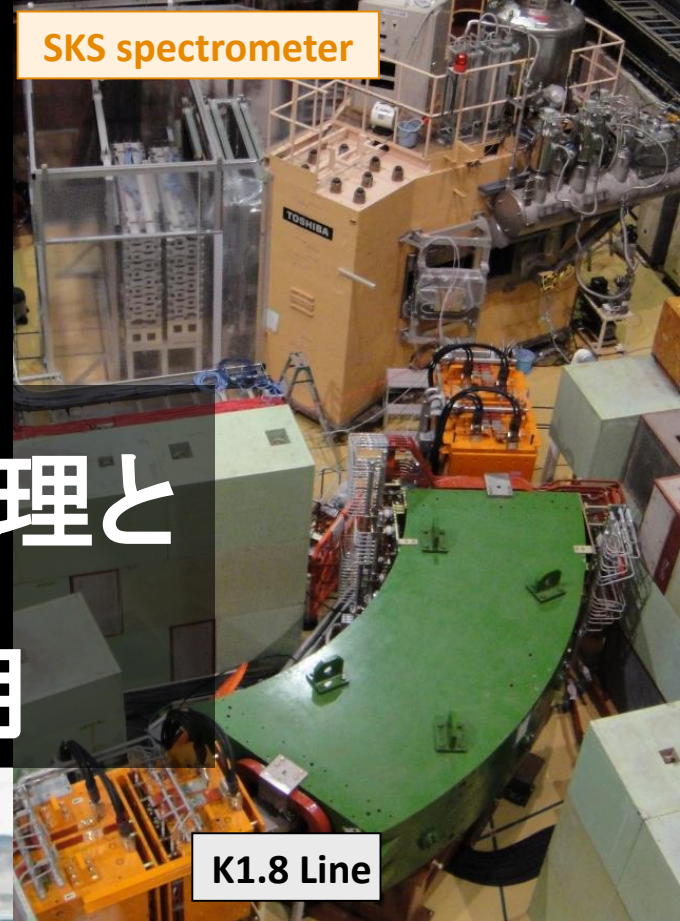


Ishizuka et al.



# 3. ストレンジネス核物理と バリオン間相互作用

SKS spectrometer



K1.8 Line

J-PARC



# 核力とバリオン間力の の解明へ

核力：物質の成り立ちの基本

白色(中性)の複合粒子間の力

→ 分子間力と同様に複雑

特に近距離部分はいまだ理解されず

■ 斥力芯 → 原子核の安定性

■ スピン軌道力 → 宇宙の元素存在比  
(原子核の魔法数を決定)

↓  
sクォークが手がかりを与える

ハイペロン( $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ,  $\Xi$ )の核力は、まったく違う？

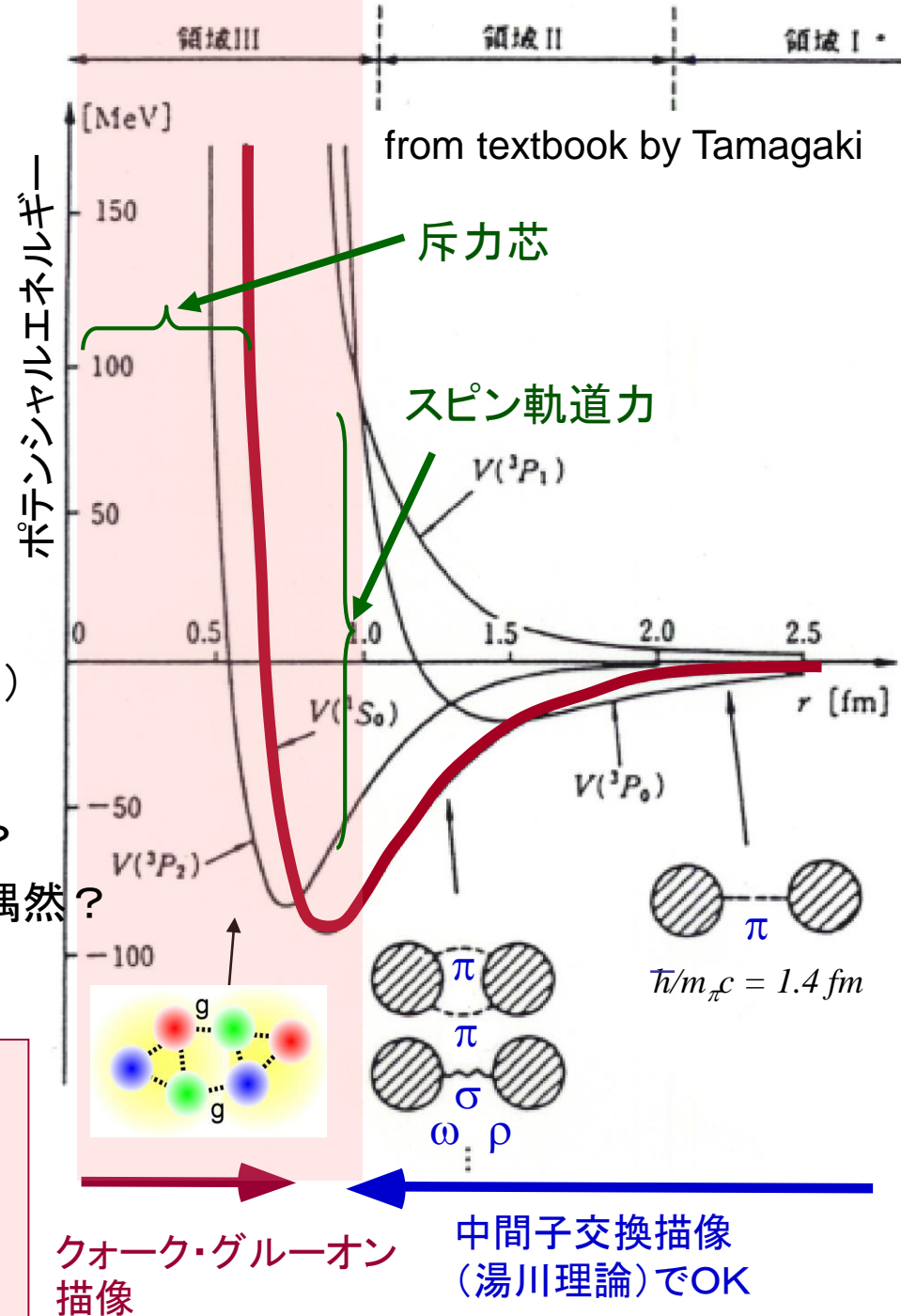
核子間(NN)の絶妙な引力・斥力バランスは偶然？

## バリオン間力の統一的な理解へ

核力を  $u, d \rightarrow u, d, s$  に拡張し統一的に扱う

→ クォーク描像による核力の起源の理解

→ ストレンジ物質など宇宙の他の形態の物質をも理解



# バリオン間相互作用をどう扱うか

強い相互作用はフレーバーによらない

ただし quark mass が大きく違う  $m_u \sim 2 \text{ MeV}, m_d \sim 5 \text{ MeV}, m_s \sim 95 \text{ MeV}$

constituent quark mass:  $m_u^* \sim m_d^* \sim 0.3 \text{ GeV}, m_s^* \sim 0.5 \text{ GeV}$  は近い

→ 近似的な  $SU(3)_f$  対称性

(アイソスピンは  $SU(2)_f$  対称性)

NN, YN, YY 相互作用はほとんど同じか? 簡単に NN => YN, YYへ拡張?

(1) BB間力の対称性の違い  $8 \otimes 8 = 27_S \oplus 10_A \oplus 10_A^* \oplus 8_S \oplus 8_A \oplus 1_S$

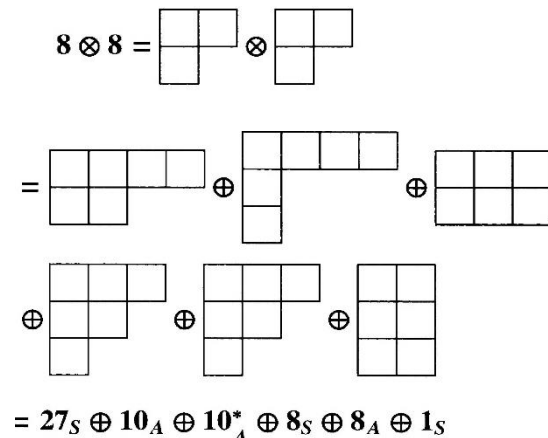
多重項ごとに、特に短距離部分に大きな違い

(クォーク間のパウリ効果)

(2)  $SU(3)_f$  対称性の破れ (sクォークは重い)

中間子交換 (quark交換) では、

s を含む中間子は重い → 到達距離が短い



大雑把に言って、sが多いバリオンほど相互作用弱い 一中・遠距離に大きな違い

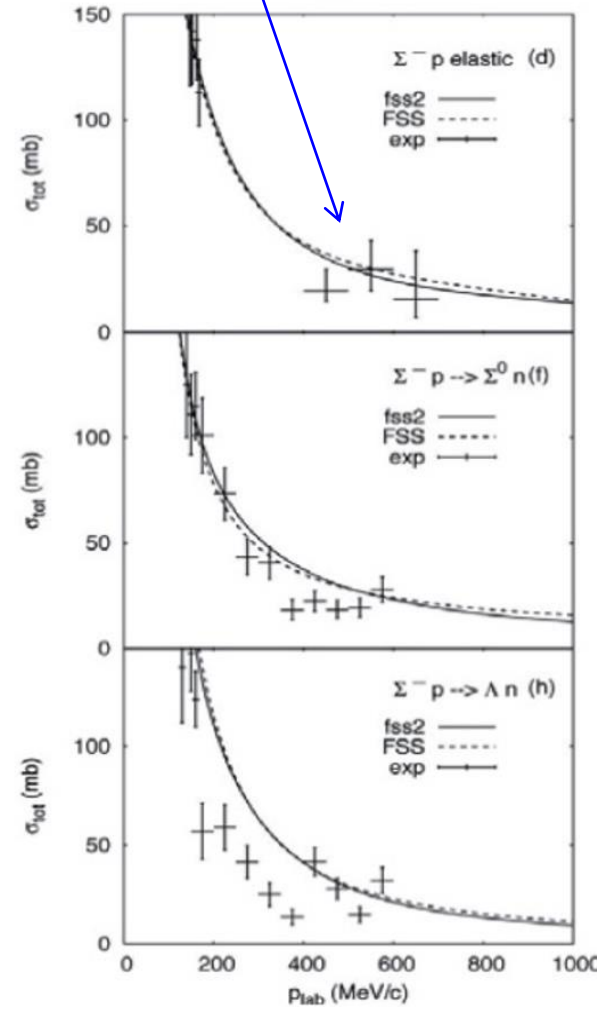
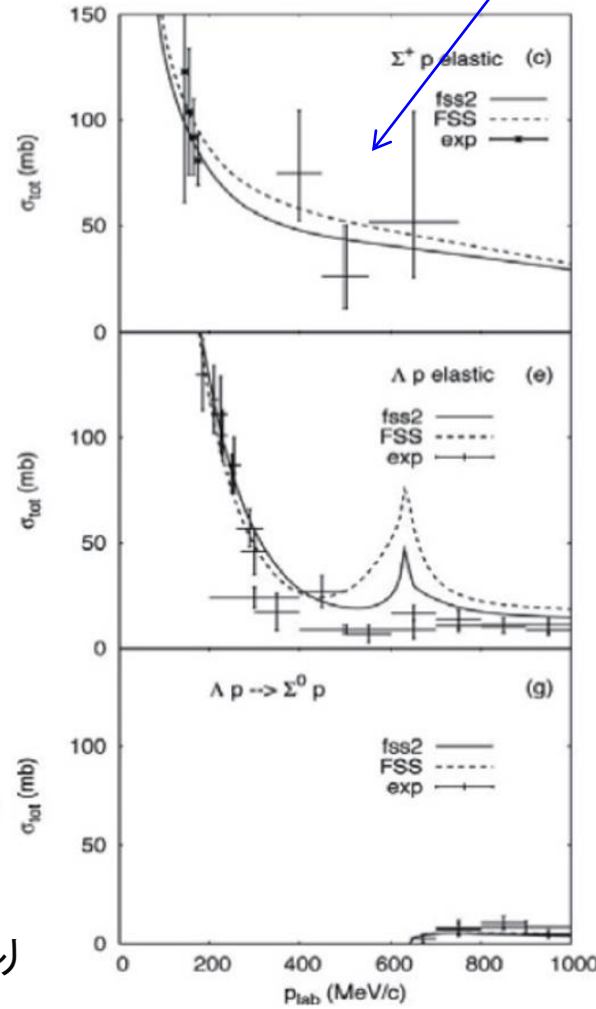
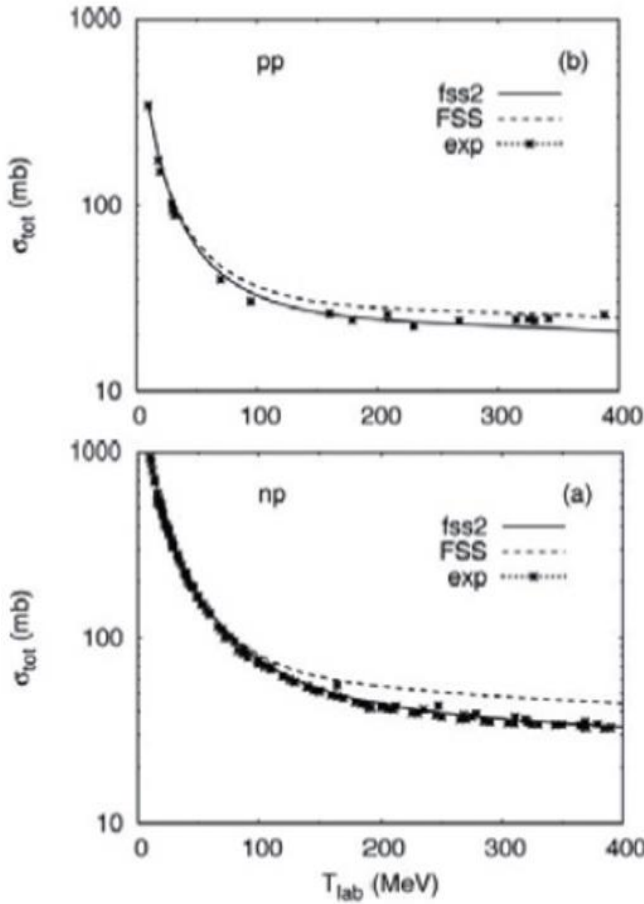


# NN, YN散乱データの例

ハイペロンの寿命  $\tau \sim 10^{-10}$  s ( $c\tau \sim 3$  cm)  $\rightarrow$  YN散乱実験は極めて困難

ほとんどが 1970年代のbubble chamber のデータ

KEK E251, E289 カウンター実験(scintillating fiber)



広いエネルギー領域の多数の  
微分断面積・偏極観測量のデータあり

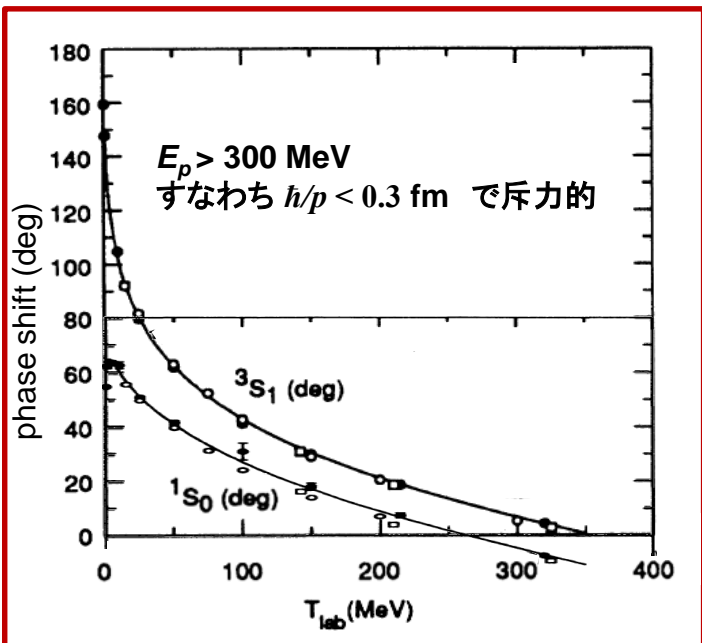
$$8 \otimes 8 = \begin{array}{|c|c|} \hline \square & \square \\ \hline \square & \square \\ \hline \end{array} \otimes \begin{array}{|c|c|} \hline \square & \square \\ \hline \square & \square \\ \hline \end{array}$$

$$= \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \square & \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square & \square \\ \hline \end{array} \oplus \begin{array}{|c|c|c|} \hline \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square \\ \hline \end{array} \oplus \begin{array}{|c|c|c|} \hline \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square \\ \hline \end{array}$$

$$\oplus \begin{array}{|c|c|c|} \hline \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square \\ \hline \end{array} \oplus \begin{array}{|c|c|c|} \hline \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square \\ \hline \end{array} \oplus \begin{array}{|c|c|c|} \hline \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square \\ \hline \end{array}$$

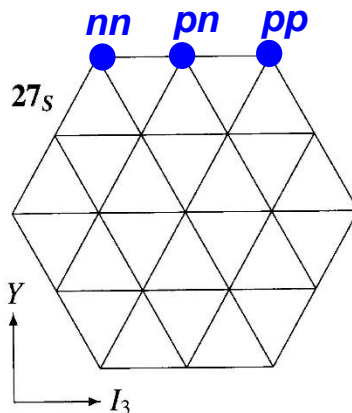
$$= 27_S \oplus 10_A \oplus 10_A^* \oplus 8_S \oplus 8_A \oplus 1_S$$

NN(I=1)  $27_S$  と NN(I=0)  $10_A^*$  は  
たまたま大きな違いはなかった。  
一核力だけみてもわからない

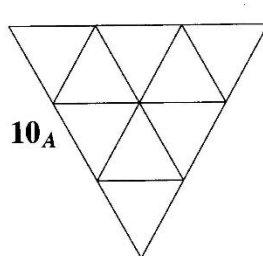


# (1) BB間力の対称性の違い

flavor  $S = \text{spin } A \ (J=0)$   
Flavor  $A = \text{spin } S \ (J=1)$



- $S = 0$   $NN \ (I = 1)$
- $S = -1$   $\Sigma N \ (I = 3/2), \ \Sigma N - \Lambda N \ (I = 1/2)$
- $S = -2$   $\Sigma\Sigma \ (I = 2), \ \Xi N - \Sigma\Sigma - \Sigma\Lambda \ (I = 1),$   
 $\Xi N - \Sigma\Sigma - \Lambda\Lambda \ (I = 0)$
- $S = -3$   $\Xi\Sigma \ (I = 3/2), \ \Xi\Sigma - \Xi\Lambda \ (I = 1/2)$
- $S = -4$   $\Xi\Xi \ (I = 1)$

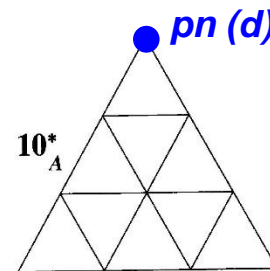


$\Sigma N \ (I = 3/2)$

$\Xi N - \Sigma\Lambda - \Sigma\Sigma$   
 $(I = 1)$

$\Xi\Sigma - \Xi\Lambda$   
 $(I = 1/2)$

$\Xi\Xi \ (I = 0)$

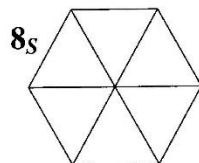


$NN \ (I = 0)$

$\Sigma N - \Lambda N$   
 $(I = 1/2)$

$\Xi N - \Sigma\Lambda - \Sigma\Sigma$   
 $(I = 1)$

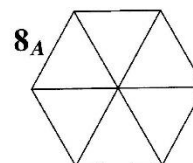
$\Xi\Sigma \ (I = 3/2)$



$\Sigma N - \Lambda N \ (I = 1/2)$

$\Xi N - \Sigma\Lambda \ (I = 1),$   
 $\Xi N - \Sigma\Sigma - \Lambda\Lambda \ (I = 0)$

$\Xi\Sigma - \Xi\Lambda \ (I = 1/2)$



$\Sigma N - \Lambda N \ (I = 1/2)$

$\Xi N - \Sigma\Lambda - \Sigma\Sigma \ (I = 1),$   
 $\Xi N \ (I = 0)$

$\Xi\Sigma - \Xi\Lambda \ (I = 1/2)$

$1_S \bullet \ \Xi N - \Lambda\Lambda - \Sigma\Sigma \ (I = 0)$

**H dibaryon**

## (2) $SU(3)_f$ 対称性の破れ (sクォークは重い)

$$m_u \sim 2 \text{ MeV}, m_d \sim 5 \text{ MeV}, m_s \sim 95 \text{ MeV} \Leftrightarrow m_u^* \sim m_d^* \sim 0.3 \text{ GeV}, m_s^* \sim 0.5 \text{ GeV}$$

擬スカラー中間子(カイラル対称性の破れによる南部GS boson)では大きな差

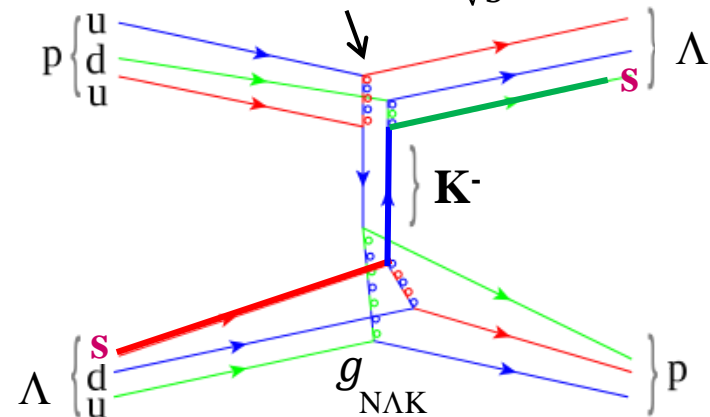
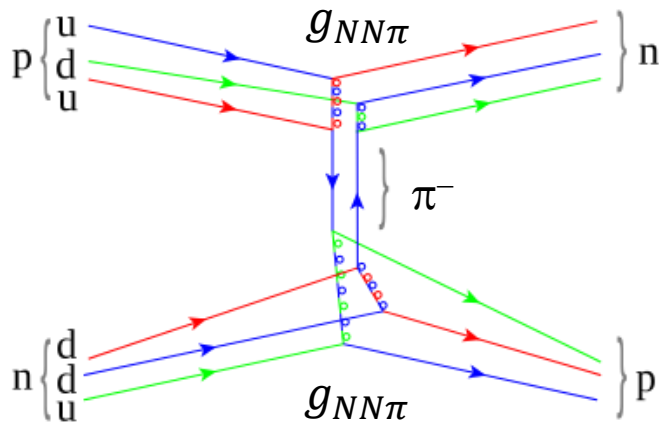
$$m_\pi \sim 139 \text{ MeV}, m_K \sim 495 \text{ MeV} \Leftrightarrow m_\omega \sim 780 \text{ MeV}, m_\phi \sim 1020 \text{ MeV}$$

$$\text{湯川型ポテンシャル} \quad -g^2 e^{-mr} / r$$

$$\text{到達距離 } r_0 = 1/m \quad (\hbar/mc)$$

$$\text{FD比 } \alpha = \frac{2}{5} \text{ from } SU(6)$$

$$g_{\text{NAK}} = -\frac{1}{\sqrt{3}} g_{\text{NN}\pi} (1 + 2\alpha)$$



$$1/m_\pi = 197 \text{ MeV fm} / 139 \text{ MeV} = 1.4 \text{ fm}$$

$$1/m_K = 197 \text{ MeV fm} / 494 \text{ MeV} = 0.40 \text{ fm}$$

結合定数  $g$  は基本的に同じもの ( $SU(3)_f$  対称性から係数が決まる)

到達距離だけ実際の中間子の質量で与える

→ NNの中間子交換モデルをBBに拡張できる (Nijmegen group)



# Quark Cluster Model (Oka-Yazaki) での バリオン間力の斥力芯・引力芯

Pauli禁止

Oka-Yazaki

<i>BB</i> 状態	<i>S</i>	<i>I</i>	<i>SU(6)<sub>s-f</sub></i>		短距離力
			[51]	[33]	
<i>NN</i> ( <sup>1</sup> <i>S</i> <sub>0</sub> )	0	1	4/9	5/9	斥力
<i>NN</i> ( <sup>3</sup> <i>S</i> <sub>1</sub> )	1	0	4/9	5/9	斥力
<i>ΛN</i>	0	1/2	1/2	1/2	斥力
<i>ΛN</i>	1	1/2	1/2	1/2	斥力
<i>ΣN</i>	0	3/2	4/9	5/9	斥力
<i>ΣN</i>	1	3/2	8/9	1/9	強い斥力 (≈ Pauli 禁止)
<i>ΣN</i>	0	1/2	17/18	1/18	強い斥力 (≈ Pauli 禁止)
<i>ΣN</i>	1	1/2	1/2	1/2	斥力
<i>ΛΛ, NΞ, ΣΣ</i>	0	0	0	1	引力 (H ダイバリオン)

# Quark Cluster Modelの予言

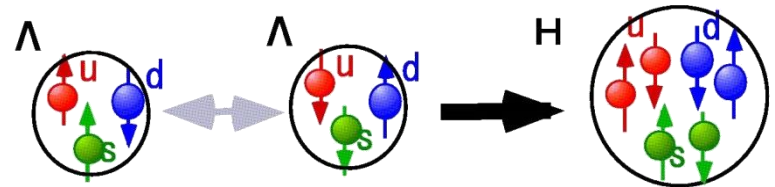
- H dibaryonの存在 (color magnetic inte  
“H” strongly attractive=“引力芯”

ΛΛより軽いHは存在せず！  
ΛΛとΞNの間にありそう

H: [uuddss]<sub>S=0</sub> SU<sub>f</sub>(3) X SU<sub>f</sub>(3) flavor singlet state

$$BB^{(1)} = -\sqrt{\frac{1}{8}}\Lambda\Lambda + \sqrt{\frac{3}{8}}\Sigma\Sigma + \sqrt{\frac{4}{8}}N\Xi,$$

H dibaryon (6 quark state) exists.  
Λ-Λ, Ξ-N is strongly attractive.



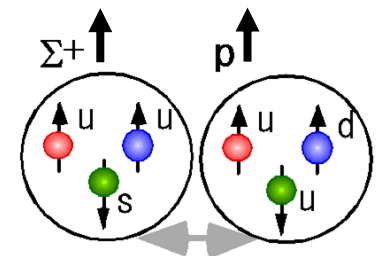
- ΣN (S=1, T=3/2) の強い斥力 (quark Pauli effect)

示唆あり (ΣNのspin, isospin平均力が強い斥力)

- LS力(L<sub>YN</sub>S<sub>Y</sub>) Λ-Nではほぼゼロ その通り！

Σ-N ではN-Nと同程度

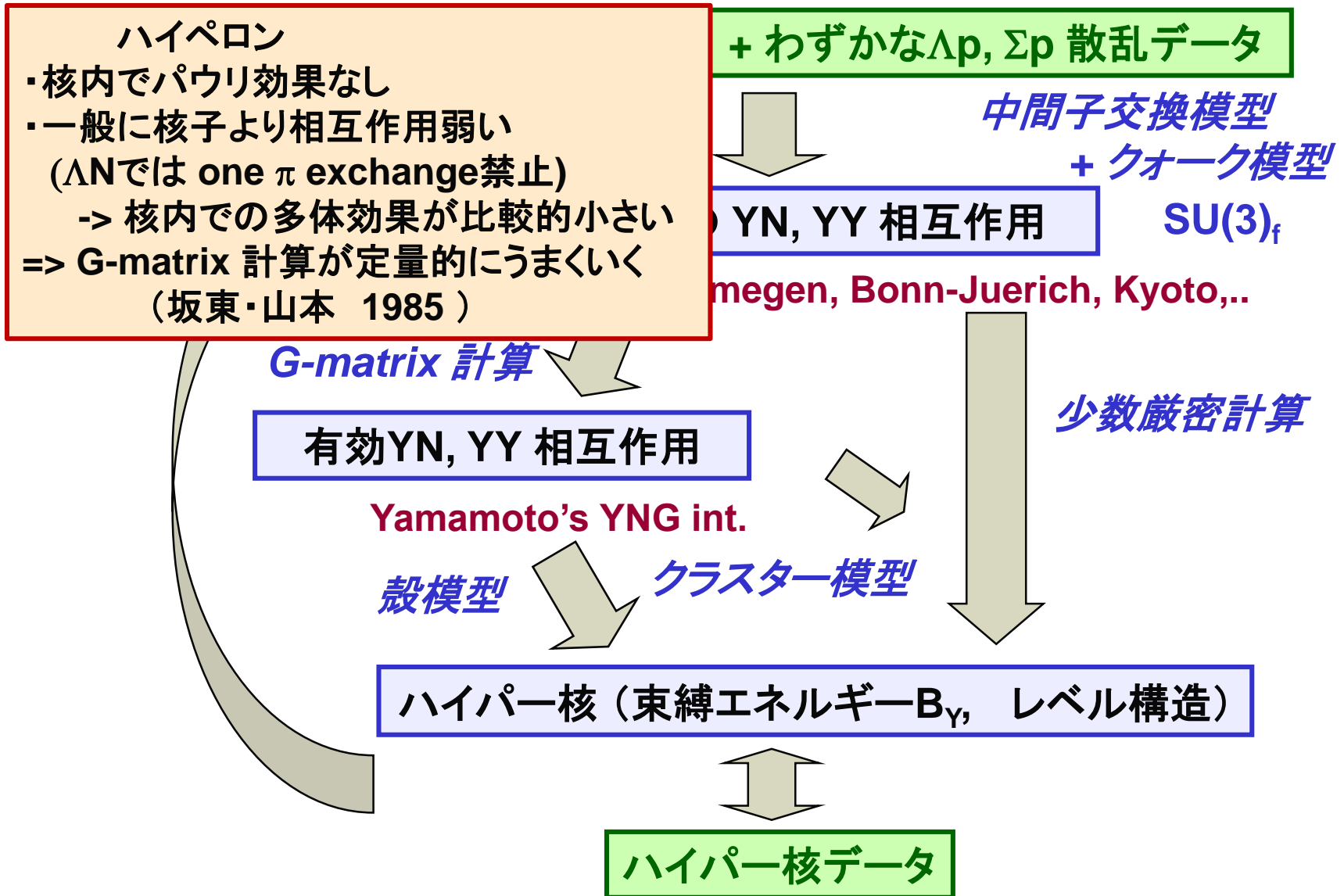
示唆あり



Lattice QCDでもこれらの特徴が再現されている

核力をハイペロンを含むバリオン間力に拡張してくわしく調べる事が重要

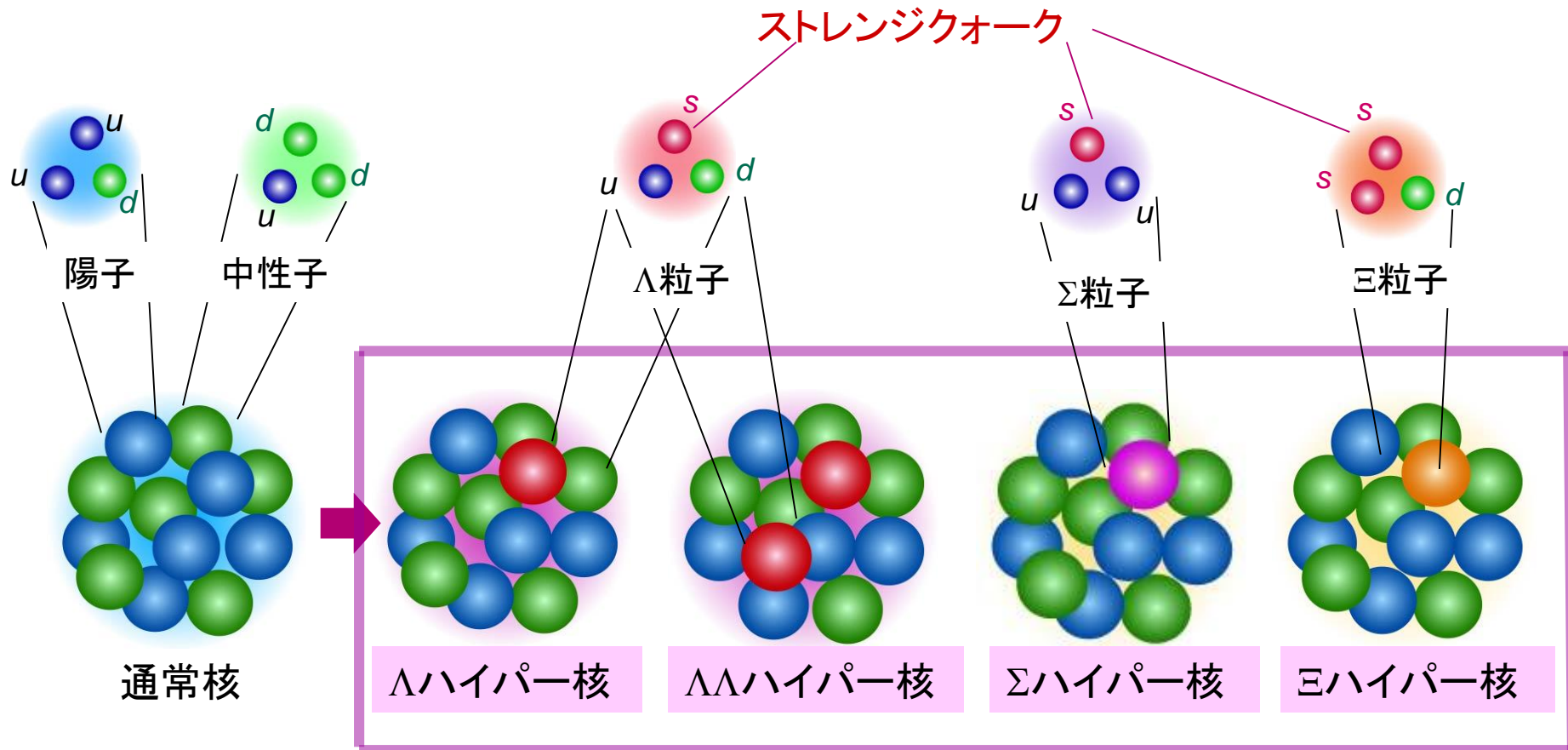
# YN, YY 相互作用をどう求めるか: 難しい核物理の“逆問題”



# ハイパー核

ストレンジ・クォークを含む新しいタイプの“原子核”

原子核の描像を  
核子多体系→バリオン多体系(→クォーク多体系) に拡張



これらはすべて加速器で作れる。



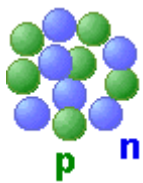
# ストレンジ・クォークで果てしなく広がる物質の世界

Nu ~ Nd ~ Ns



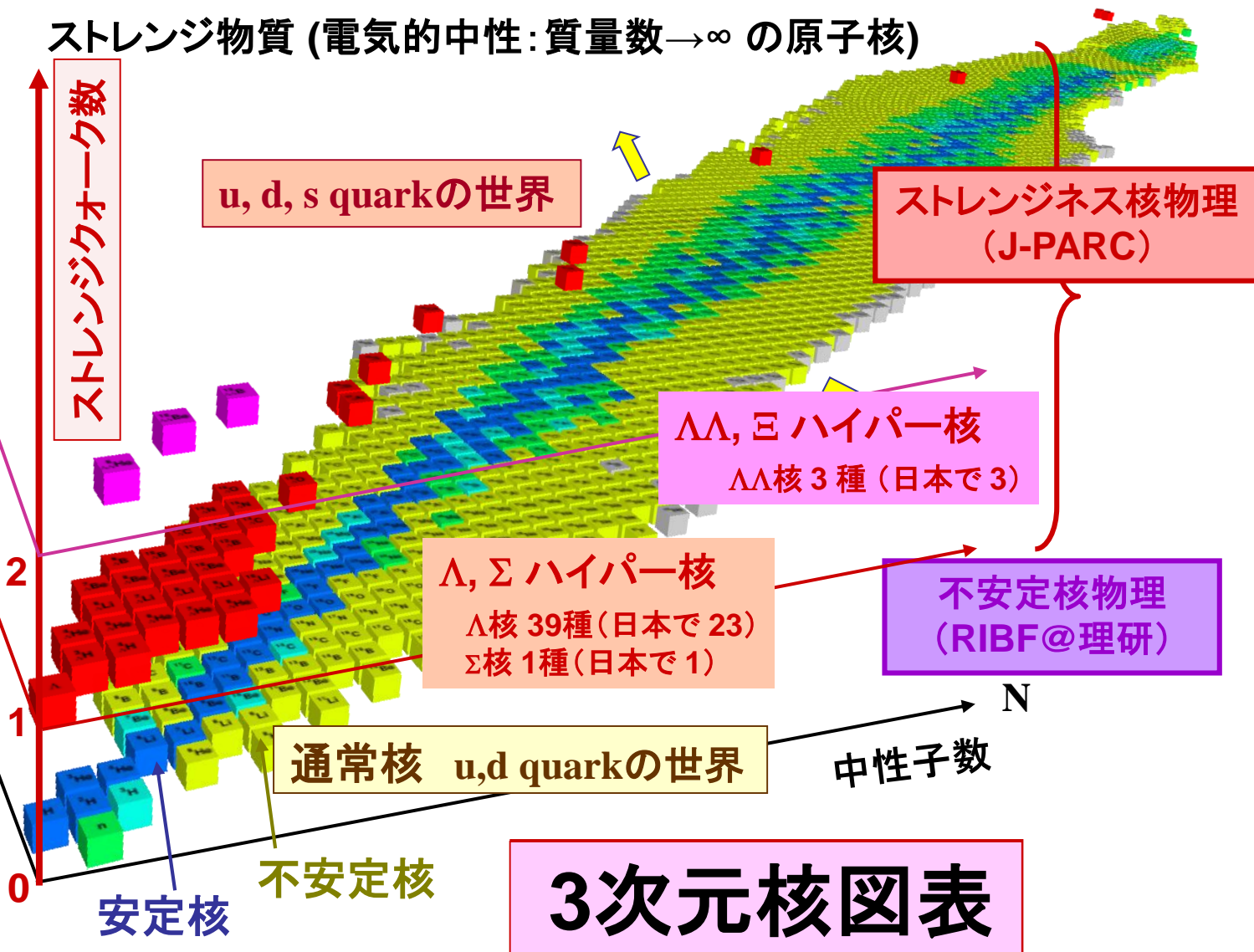
p, n,  $\Lambda$ ,  $\Xi^0$ ,  $\Xi^-$

高密度化



中性子星の中心部に存在？

ストレンジ物質 (電気的中性: 質量数  $\rightarrow \infty$  の原子核)



u, d, s quarkの世界

ストレンジネス核物理 (J-PARC)

$\Lambda\Lambda, \Xi$  ハイパー核  
 $\Lambda\Lambda$ 核 3種 (日本で3)

$\Lambda, \Sigma$  ハイパー核  
 $\Lambda$ 核 39種 (日本で23)  
 $\Sigma$ 核 1種 (日本で1)

不安定核物理 (RIBF@理研)

通常核 u,d quarkの世界

不安定核  
安定核

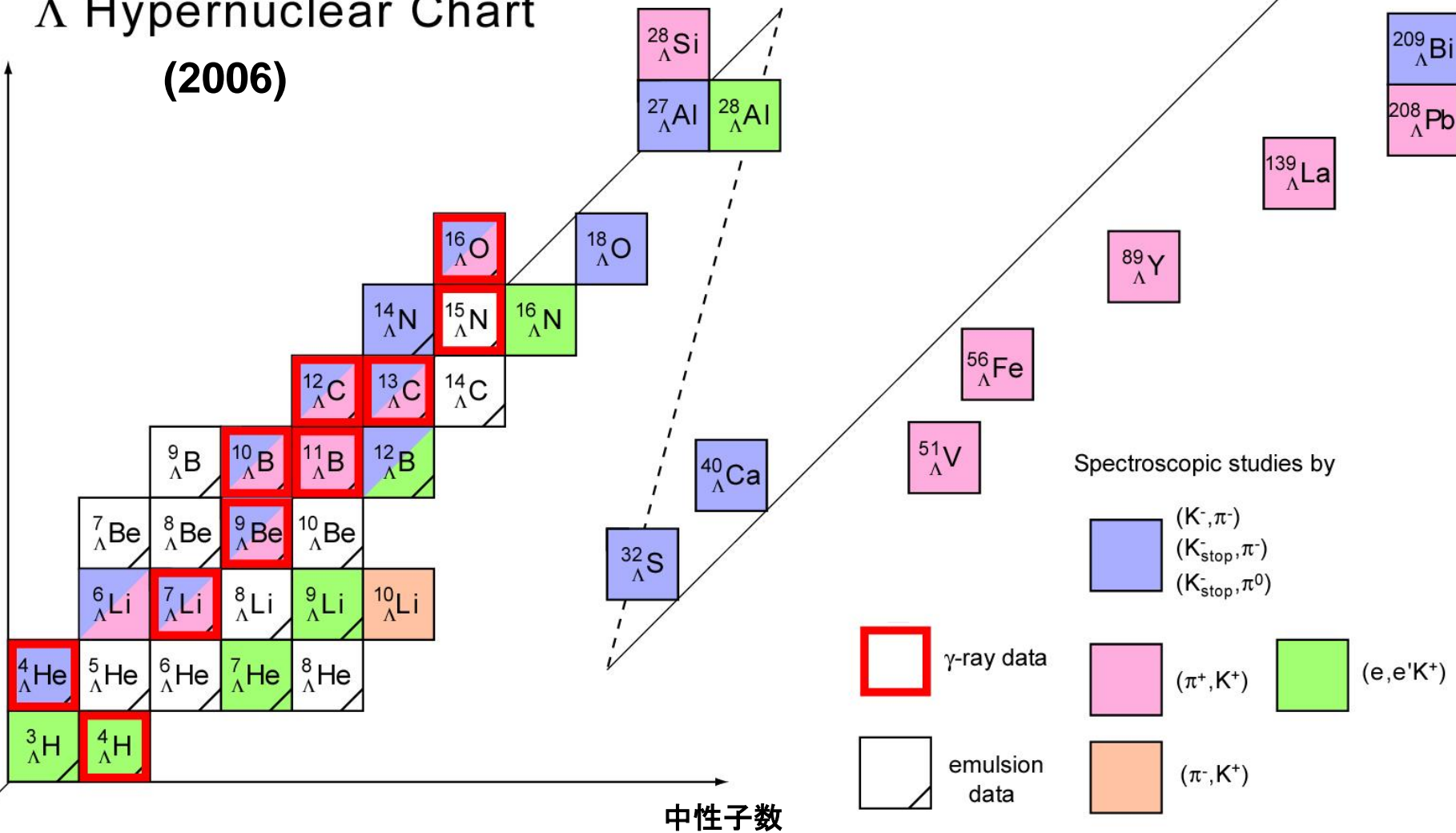
3次元核図表

# これまでに発見された $\Lambda$ ハイパー核

39種中23種は日本(人)によって発見・構造決定

$\Lambda$  Hypernuclear Chart  
(2006)

陽子数

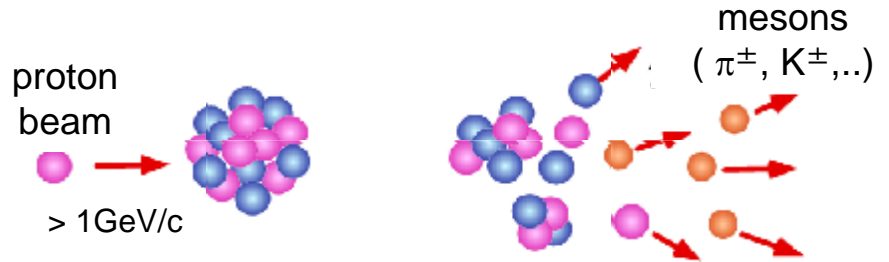


Updated from: O. Hashimoto and H. Tamura, Prog. Part. Nucl. Phys. 57 (2006) 564.

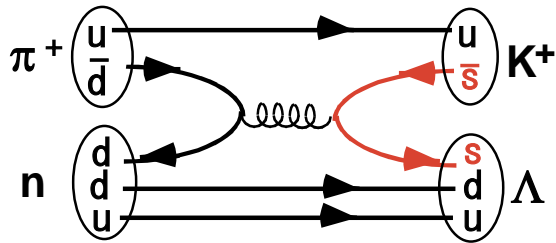
# ハイパー核の生成反応

- 陽子加速器で  
(J-PARC, BNL-AGS, KEK-PS)

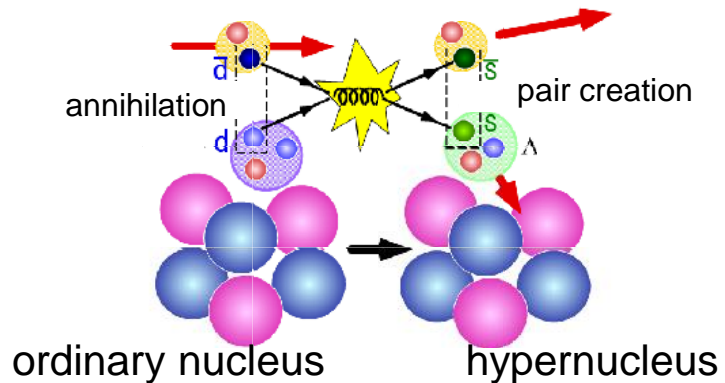
$p + A \rightarrow \pi, K, \dots$  mesons  
We use  $\pi, K$ , meson beams.



$(\pi^+, K^+)$  reaction :  $\pi^+ + n \rightarrow \Lambda + K^+$

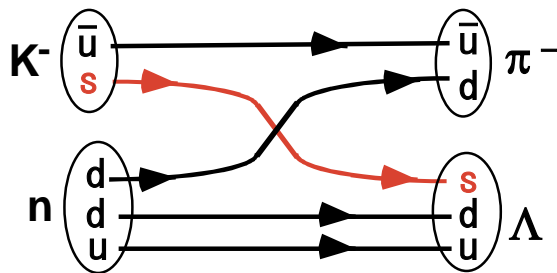


$s\bar{s}$  クォークの対生成



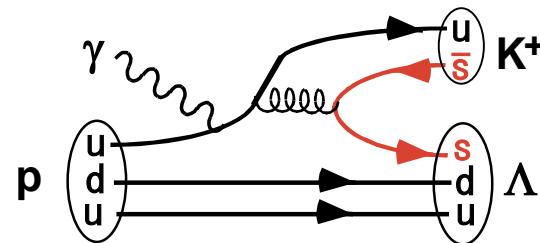
- 電子加速器で (JLab CEBAF, MAMI-C)

$(K^-, \pi^-)$  reaction :  $K^- + n \rightarrow \Lambda + \pi^-$



$s$  クォークの交換

$(e, e'K^+)$  reaction :  $e^- + p \rightarrow e^- + \Lambda + K^+$



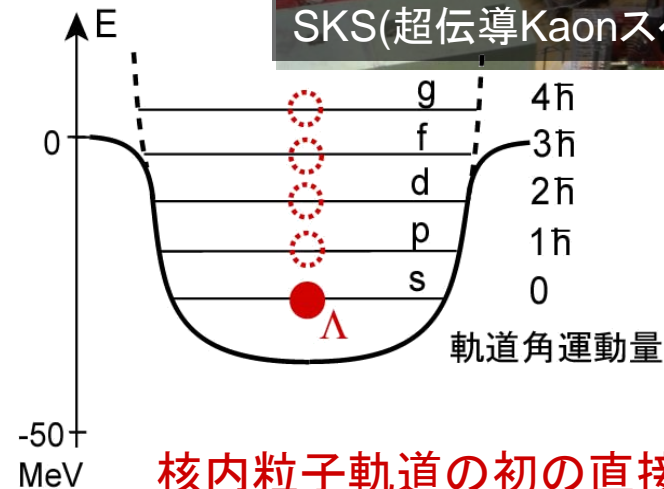
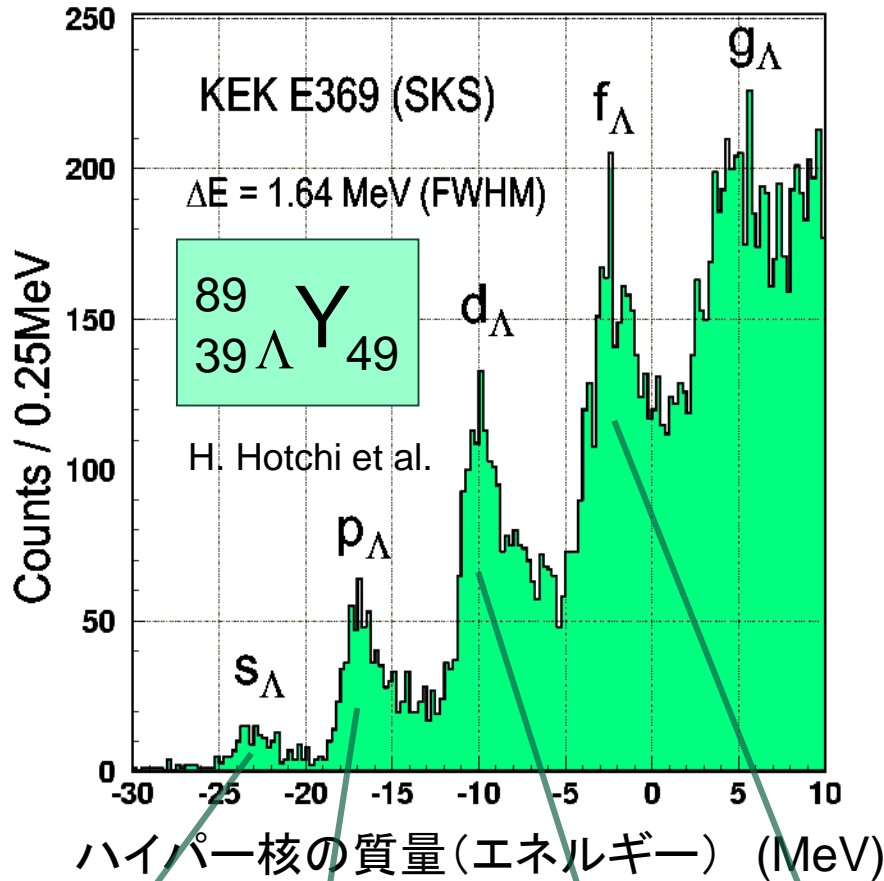
$s\bar{s}$  クォークの対生成

## 2.1 $\Lambda$ ハイパー核と $\Lambda N$ 相互作用



# $\Lambda$ ハイパー核の画期的データ

—原子核深部の軌道を見る—

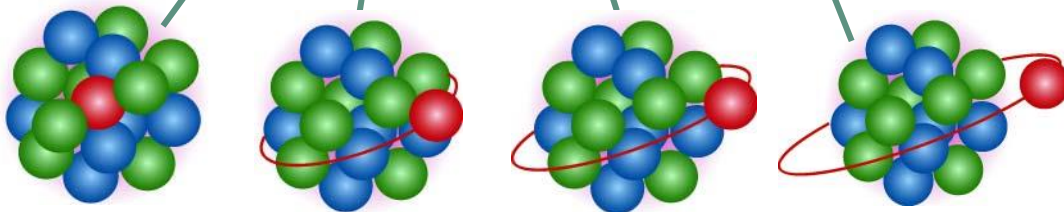


**核内粒子軌道の初の直接観測**

**軌道エネルギーから $\Lambda$ N間力の強さ解明**

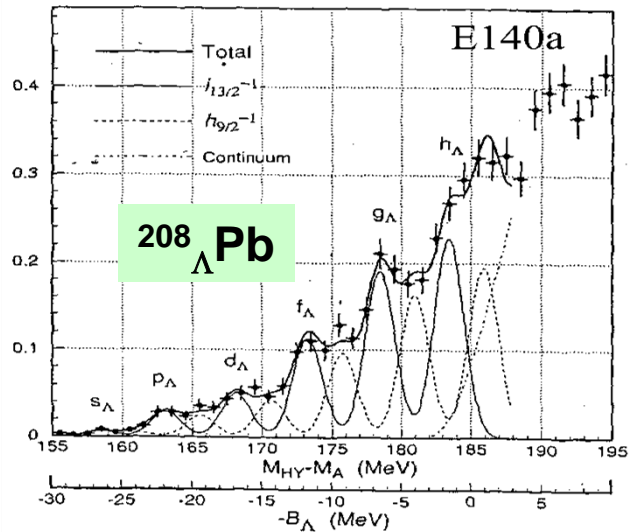
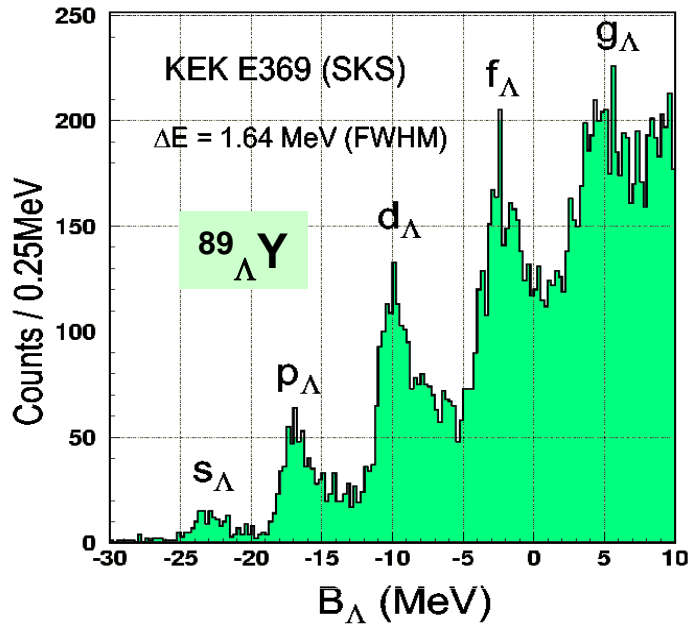
分解能を向上できれば、

- ・ガンマ線測定による精密分光
  - ・電子ビームによる高分解能分光
- $\Lambda$ N間力が詳しくわかる



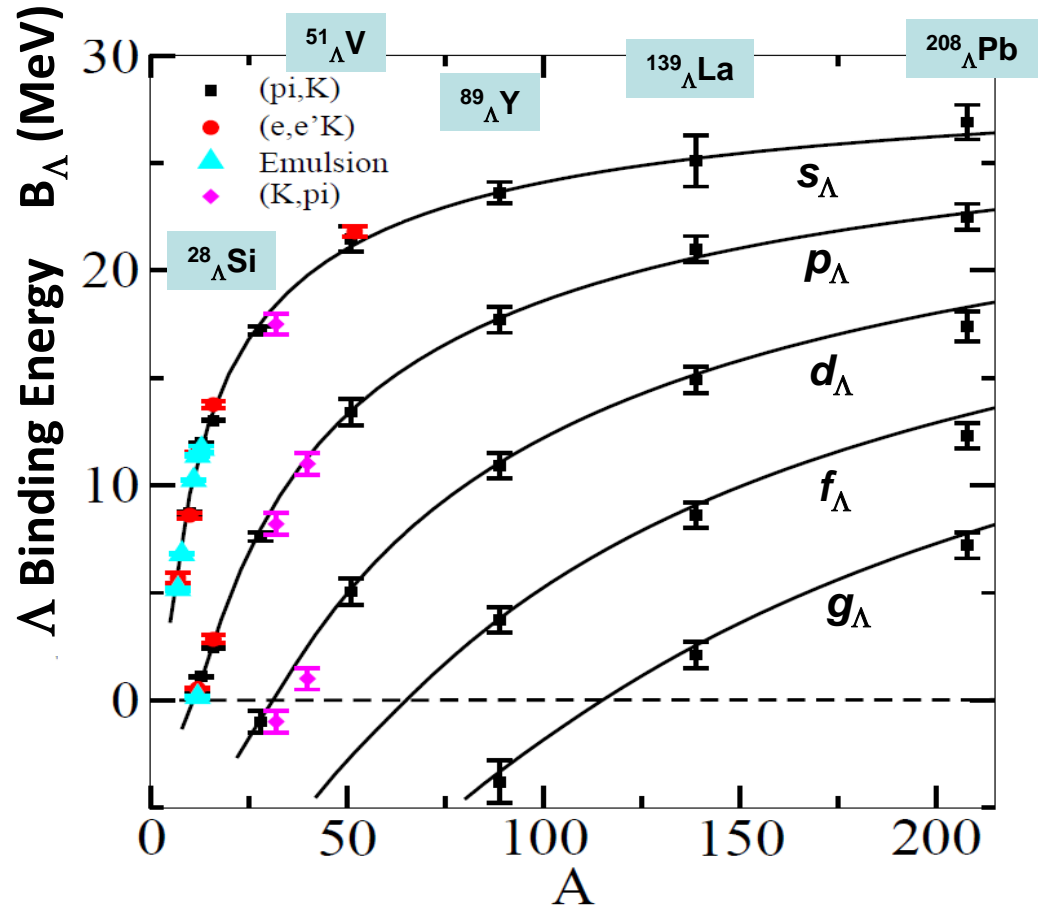
# $\Lambda$ の単一粒子軌道エネルギー

$^{89}\text{Y} (\pi^+, \text{K}^+) ^{89}_{\Lambda}\text{Y}$



T. Hasegawa, O. Hashimoto et al.

Plot by D. J. Millener

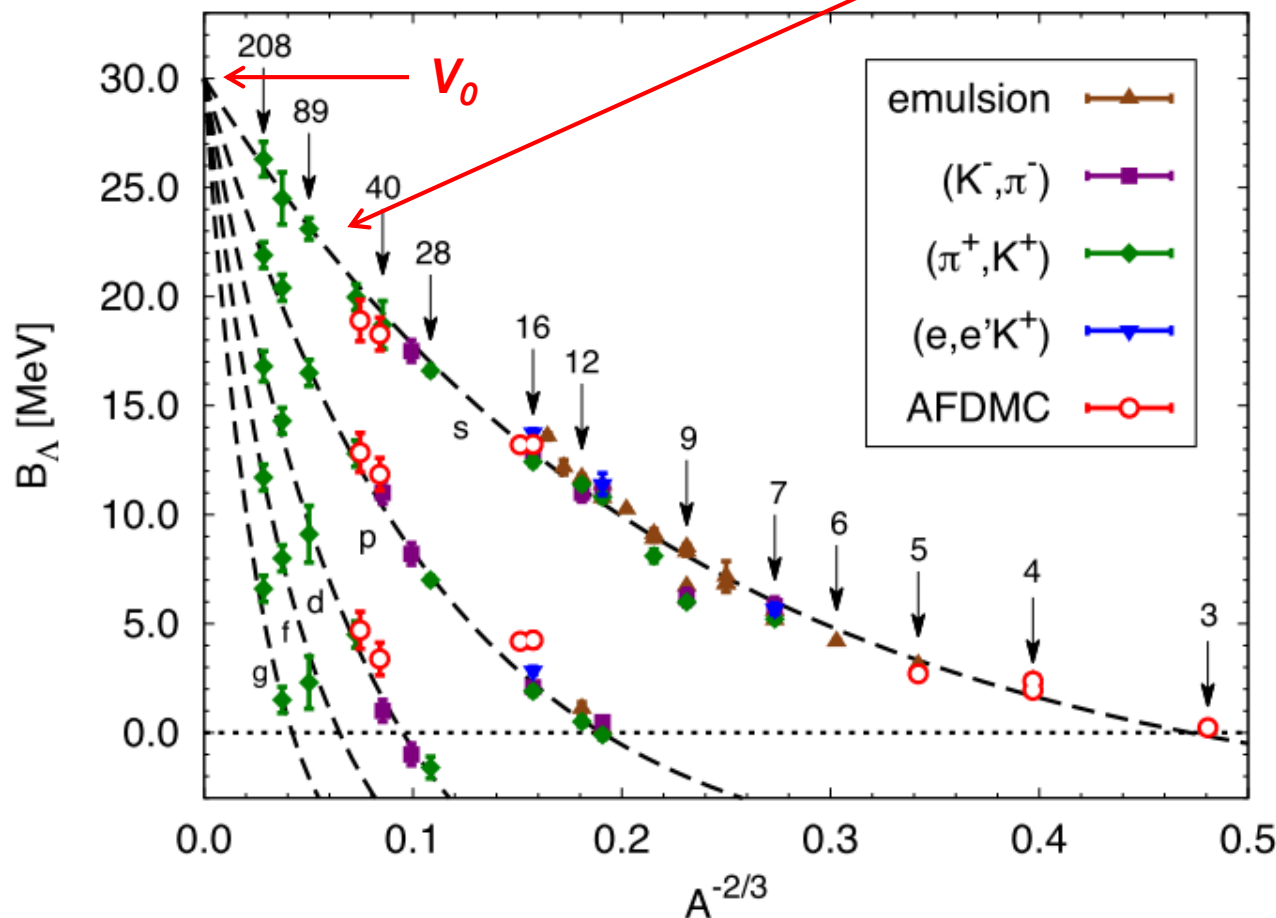


# $\Lambda$ の単一粒子軌道エネルギー

深さ  $V_0$ , 半径  $R$  の3次元箱型ポテンシャルでの  
基底状態エネルギーは

$$E_s = \pi^2 \hbar^2 / (8mR^2) \quad \therefore B_\Lambda = V_0 - E_s = V_0 - \frac{\pi^2 \hbar^2}{8mr_0^2} A^{-2/3}$$

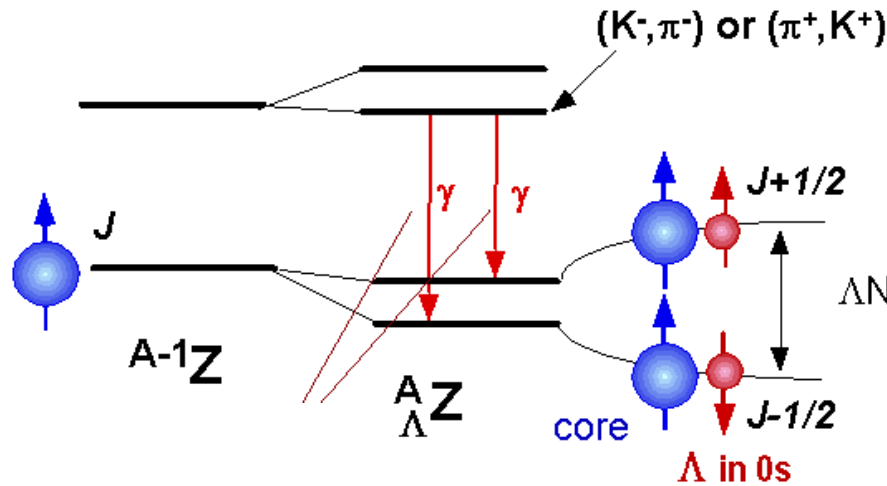
$$(R = r_0 A^{1/3})$$



**=> 核物質での $\Lambda$ のポテンシャルの深さ  $U_\Lambda = -B_\Lambda(0s; A \rightarrow \infty) = -30 \text{ MeV}$**

# $\Lambda N$ スピン依存相互作用

## ■ $\Lambda$ ハイパー核低励起状態の構造



“ハイパー核微細構造”

split by  
 $\Lambda N$  spin-dependent  
interactions  
 $\lesssim 0.1$  MeV

殻模型  
=> レベル間隔は  
 $\Delta, S_A, S_N, T$  の  
線形結合で書ける

## ■ 二体 $\Lambda N$ 有効相互作用

Dalitz and Gal, Ann. Phys. 116 (1978) 167  
Millener et al., Phys. Rev. C31 (1985) 499

$$V_{\Lambda N}^{\text{eff}} = V_0(r) + \underbrace{V_\sigma(r)}_{\Delta} \vec{s}_\Lambda \vec{s}_N + \underbrace{V_\Lambda(r)}_{S_A} \vec{l}_{\Lambda N} \vec{s}_\Lambda + \underbrace{V_N(r)}_{S_N} \vec{l}_{\Lambda N} \vec{s}_N + \underbrace{V_T(r)}_T S_{12}$$

$p$ -shell:  $s_\Lambda p_N$  w.f.による動径積分が5つある

$$\Delta = \int V_\sigma(r) |u(r)|^2 r^2 dr, \quad \mathbf{r} = \mathbf{r}_{s_\Lambda} - \mathbf{r}_{p_N}$$

Well known  
from  $U_\Lambda = -30$  MeV

$\gamma$ -ray data =>  $\Delta = 0.33$ ,  $S_A = -0.01$ ,  $S_N = -0.4$ ,  $T = 0.03$  MeV

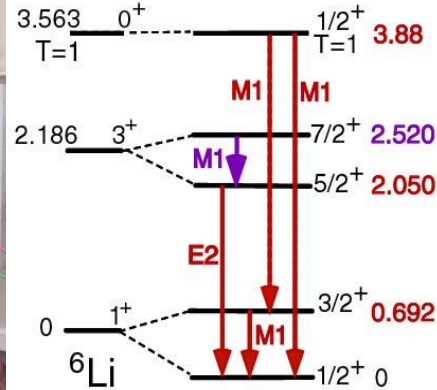


# Hypernuclear $\gamma$ -ray data



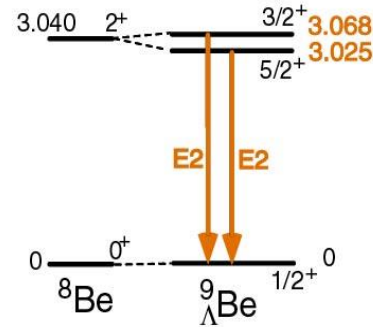
Hyperball: 1998~  
Hyperball2: 2004~  
Hyperball-J: 2015~

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



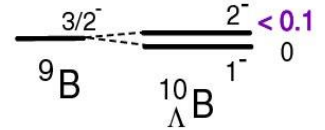
${}^7\Lambda\text{Li}$  PRL 84 (2000) 5963  
PRL 86 (2001) 1982  
PLB 579 (2004) 258  
PRC 73 (2006) 012501

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



PRL 88 (2002) 082501  
NPA 754 (2005) 58c

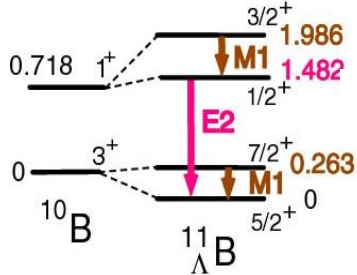
${}^{10}\text{B} (K^-, \pi^-\gamma)$  BNL E930('01)



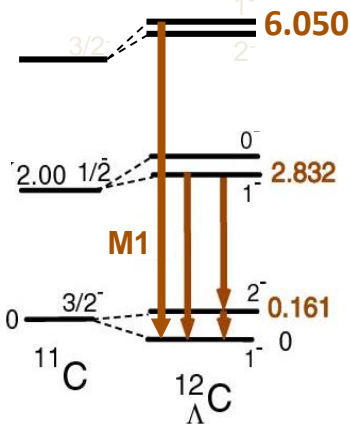
NPA 754 (2005) 58c

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

${}^{11}\text{B} (\pi^+, K^+\gamma)$  KEK E518

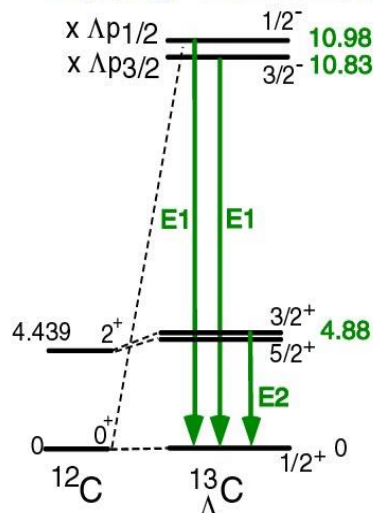


NPA 754 (2005) 58c



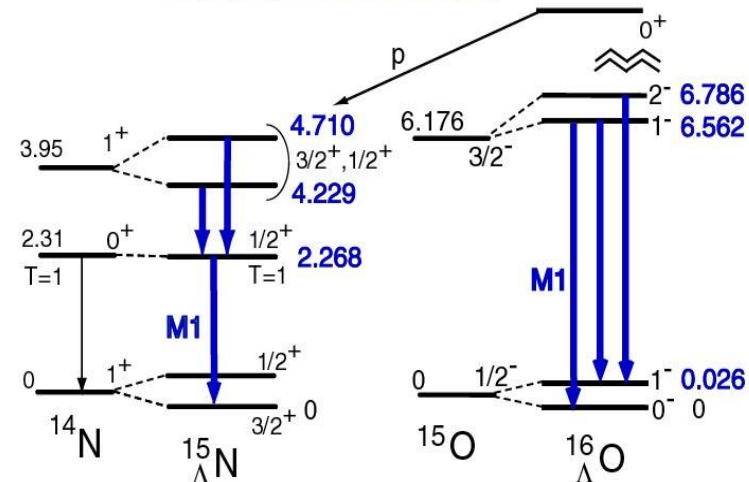
EPJ A33 (2007) 243  
PTEP (2015) 081D01

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



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

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



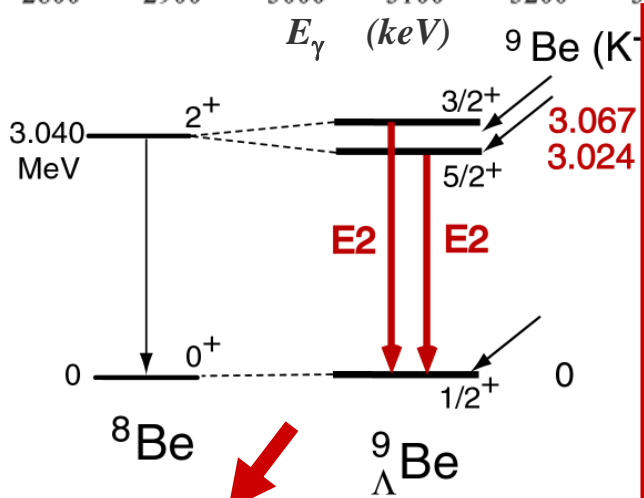
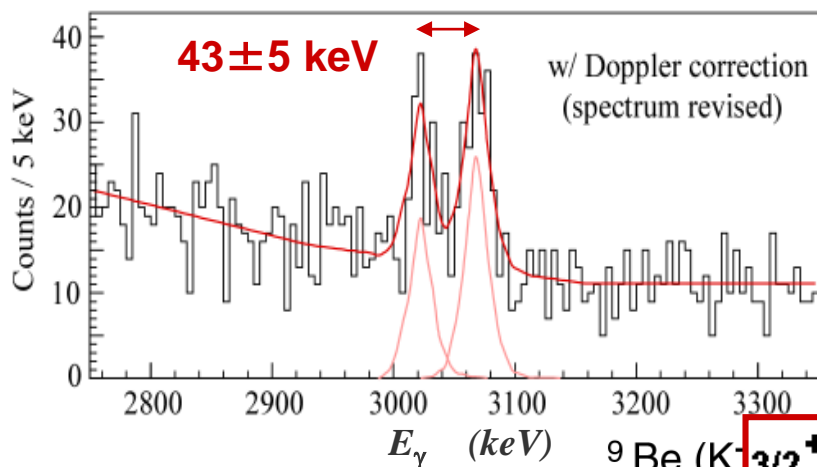
PRC 77 (2008) 054315

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

# ハイパー核微細構造の発見

BNL E930 (AGS D6 line + Hyperball)

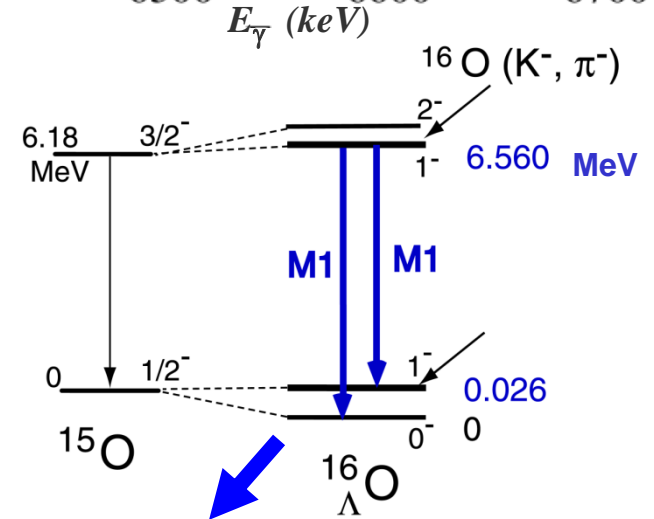
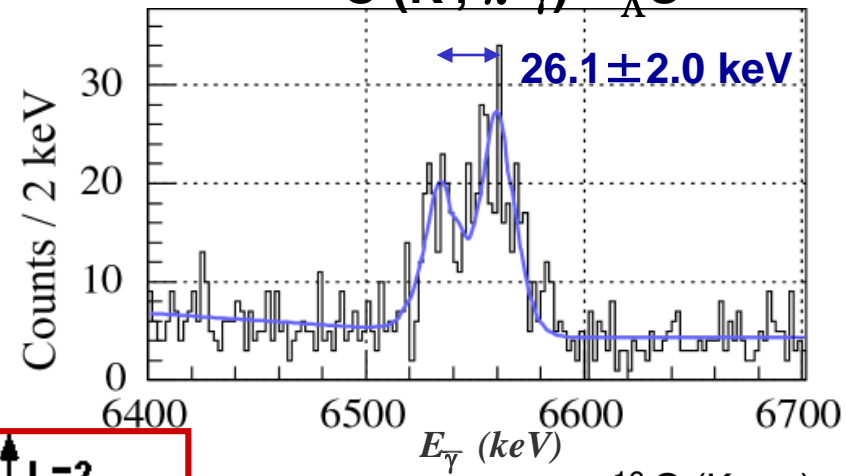
${}^9\text{Be} (K^-, \pi^- \gamma) {}^9_{\Lambda}\text{Be}$



$S_{\Lambda} = -0.01 \text{ MeV}$

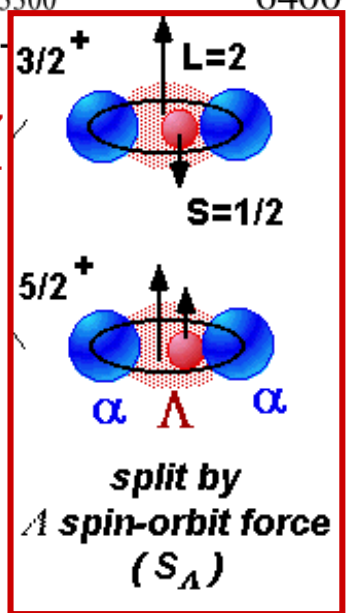
PRL 88 ('02) 082501

${}^{16}\text{O} (K^-, \pi^- \gamma) {}^{16}_{\Lambda}\text{O}$



$T = 0.03 \text{ MeV}$

PRL 93 (2004) 232501



# Reproduction of level energies

D.J. Millener, *J.Phys.Conf.Ser.*  
312 (2011) 022005

Millener's parameter set

$$\Delta = 0.33 \text{ (0.43 for } A=7), \quad S_A = -0.015, \quad S_N = -0.35, \quad T = 0.024 \text{ [MeV]}$$

Calculated from G-matrix using  $\Lambda N$ - $\Sigma N$  force in NSC97f

doublet spacing

	$J_u^\pi$	$J_l^\pi$	contribution of each term (keV)	keV					
			$\Lambda\Sigma$	$\Delta$	$S_A$	$S_N$	$T$	$\Delta E^{th}$	$\Delta E^{exp}$
${}^7_A\text{Li}$	$3/2^+$	$1/2^+$	72	628	-1	-4	-9	693	692
${}^7_A\text{Li}$	$7/2^+$	$5/2^+$	74	557	-32	-8	-71	494	471
${}^8_A\text{Li}$	$2^-$	$1^-$	151	396	-14	-16	-24	450	(442)
${}^9_A\text{Li}$	$5/2^+$	$3/2^+$	116	530	-17	-18	-1	589	
${}^9_A\text{Li}$	$3/2_2^+$	$1/2^+$	-80	231	-13	-13	-93	-9	
${}^9_A\text{Be}$	$3/2^+$	$5/2^+$	-8	-14	37	0	28	44	43
${}^{10}_A\text{B}$	$2^-$	$1^-$	-15	188	-21	-3	-26	120	< 100
${}^{11}_A\text{B}$	$7/2^+$	$5/2^+$	56	339	-37	-10	-80	267	264
${}^{11}_A\text{B}$	$3/2^+$	$1/2^+$	61	424	-3	-44	-10	475	505
${}^{12}_A\text{C}$	$2^-$	$1^-$	61	175	-12	-13	-42	153	161
${}^{15}_A\text{N}$	$1/2_1^+$	$3/2_1^+$	44	244	34	-8	-214	99	
${}^{15}_A\text{N}$	$3/2_2^+$	$1/2_2^+$	65	451	-2	-16	-10	507	481
${}^{16}_A\text{O}$	$1^-$	$0^-$	-33	-123	-20	1	188	23	26
${}^{16}_A\text{O}$	$2^-$	$1_2^-$	92	207	-21	1	-41	248	224

# レベルエネルギーの再現

D.J. Millener, J.Phys.Conf.Ser.  
312 (2011) 022005

Millener's parameter set

$$\Delta = 0.33 \text{ (0.43 for } A=7), \quad S_A = -0.015, \quad S_N = -0.35, \quad T = 0.024 \text{ [MeV]}$$

- A=10~12mの数レベルを除くすべてのレベルで、4つのパラメータのみできわめてよく実験を再現できた。
- $\Sigma\Lambda$  結合力の効果を計算して加えると実験との合いがほぼ完璧になった。→  $\Sigma\Lambda$  結合力の理論モデルは正しい？

${}^9_{\Lambda}\text{Li}$	$3/2_2^+$	$1/2^+$	-80	231	-13	-13	-93	-9	
${}^9_{\Lambda}\text{Be}$	$3/2^+$	$5/2^+$	-8	-14	37	0	28	44	43
${}^{10}_{\Lambda}\text{B}$	$2^-$	$1^-$	-15	188	-21	-3	-26	120	< 100
${}^{11}_{\Lambda}\text{B}$	$7/2^+$	$5/2^+$	56	339	-37	-10	-80	267	264
${}^{11}_{\Lambda}\text{B}$	$3/2^+$	$1/2^+$	61	424	-3	-44	-10	475	505
${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$	$2^-$	$1^-$	61	175	-12	-13	-42	153	161
${}^{15}_{\Lambda}\text{N}$	$1/2_1^+$	$3/2_1^+$	44	244	34	-8	-214	99	
${}^{15}_{\Lambda}\text{N}$	$3/2_2^+$	$1/2_2^+$	65	451	-2	-16	-10	507	481
${}^{16}_{\Lambda}\text{O}$	$1^-$	$0^-$	-33	-123	-20	1	188	23	26
${}^{16}_{\Lambda}\text{O}$	$2^-$	$1_2^-$	92	207	-21	1	-41	248	224



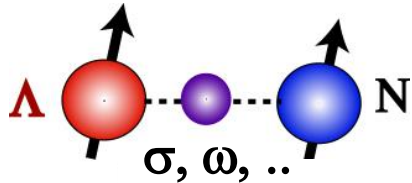
# バリオン間 相互作用模型への フィードバック

## Nijmegen meson-exchange models

	$\Delta$	$S_{\Lambda}$	$S_N$	$T$ (MeV)	
ND	-0.048	-0.131	-0.264	0.018	} G-matrix calc. by Yamamoto
NF	0.072	-0.175	-0.266	0.033	
NSC89	1.052	-0.173	-0.292	0.036	
NSC97f	0.754	-0.140	-0.257	0.054	
(“Quark” Strength equivalent to quark-model LS force by Fujiwara et al.)		0.0	-0.4		
<b>Exp.</b>	<b>0.3~0.4</b>	<b>-0.01</b>	<b>-0.4</b>	<b>0.03</b>	

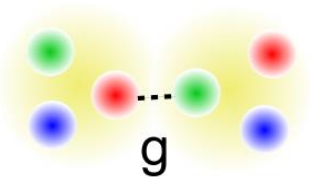
Hiyama et al., PRL 85 (2000) 270

Fujiwara et al. Prog.Part.Nucl.Phys.58 (2007) 439.

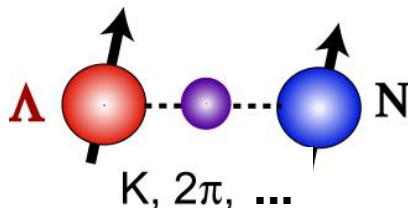


**Origin of the  $\Lambda N$  spin-orbit force:  
Quark-gluon exchange  
rather than heavy meson exchange  
(Also for the large NN spin-orbit force?)**

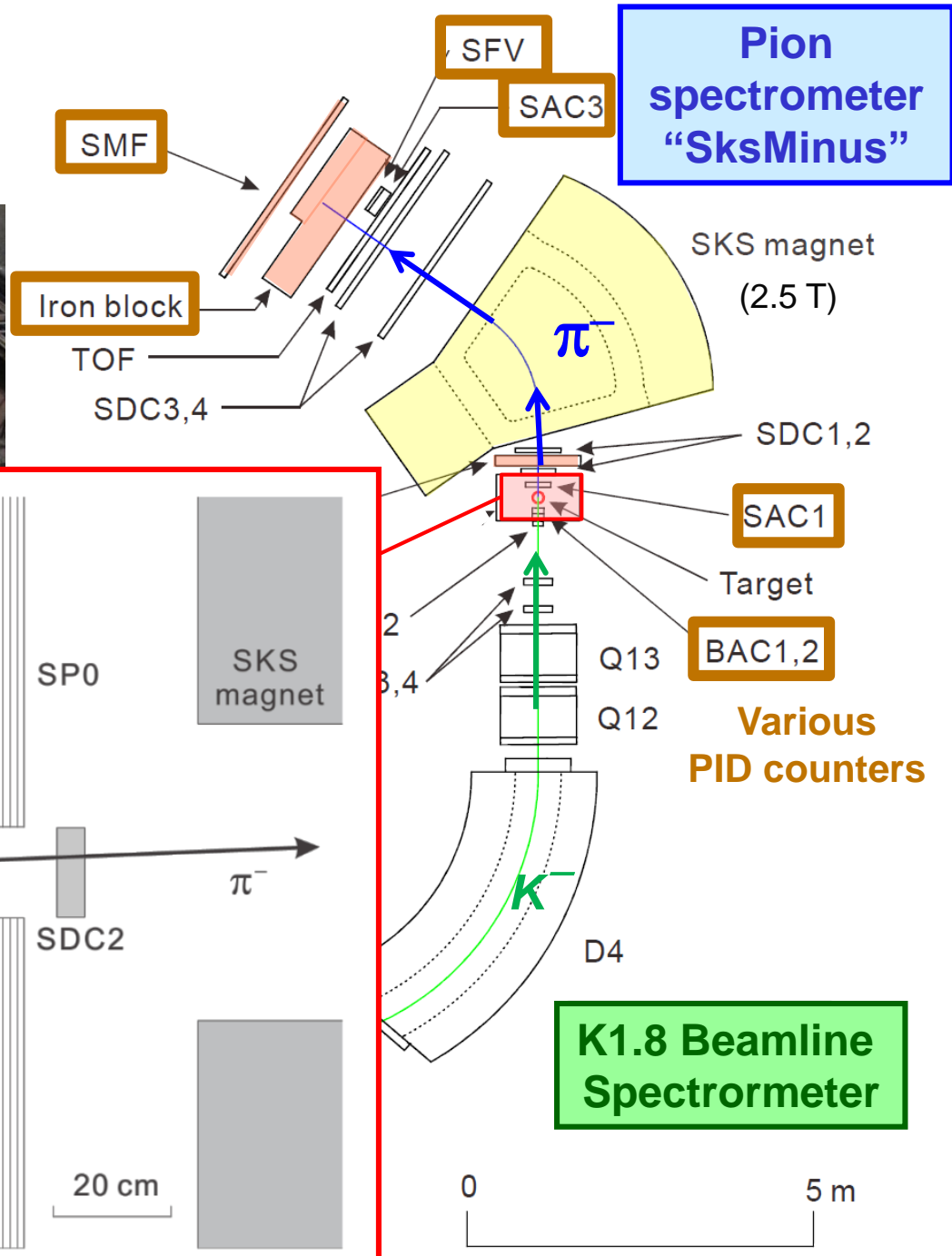
**Nijmegen interaction  
updated to include it  
(ESC06)**



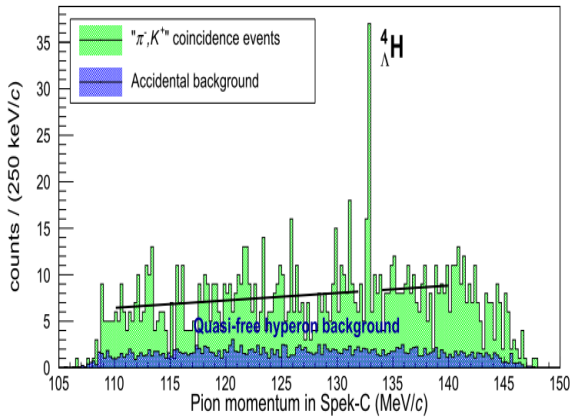
**Origin of  $\Lambda N$  tensor force:  
Meson exchange. Same as NN tensor force**



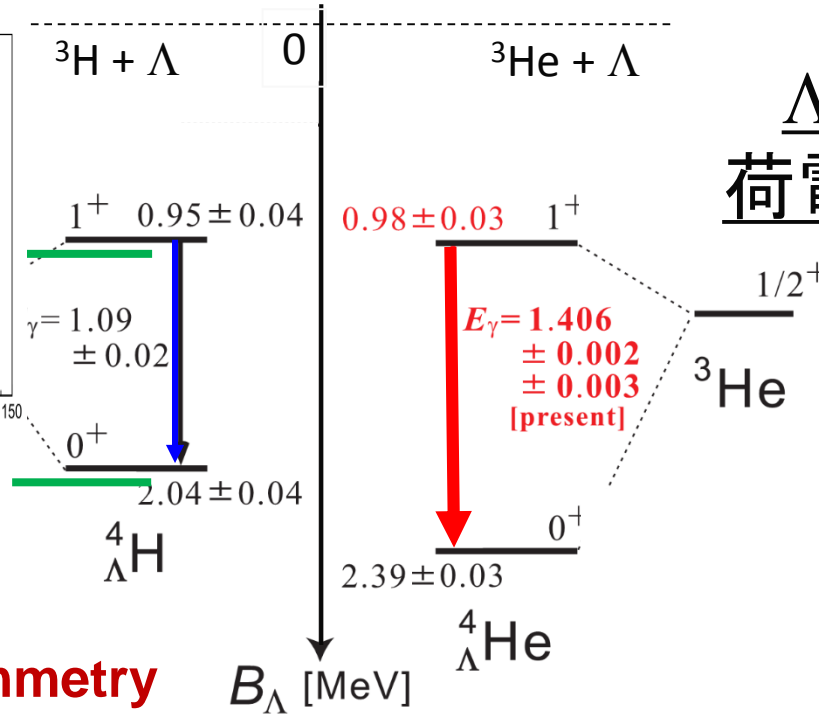
# Setup at J-PARC K1.8



# 最近の結果 $\Lambda N$ 相互作用の 荷電対称性の破れ



A.Esser, S.Nagao et al.,  
PRL114 (2015) 232501.



**=> 大きなCharge Symmetry  
Breaking (CSB) の明確な証拠**

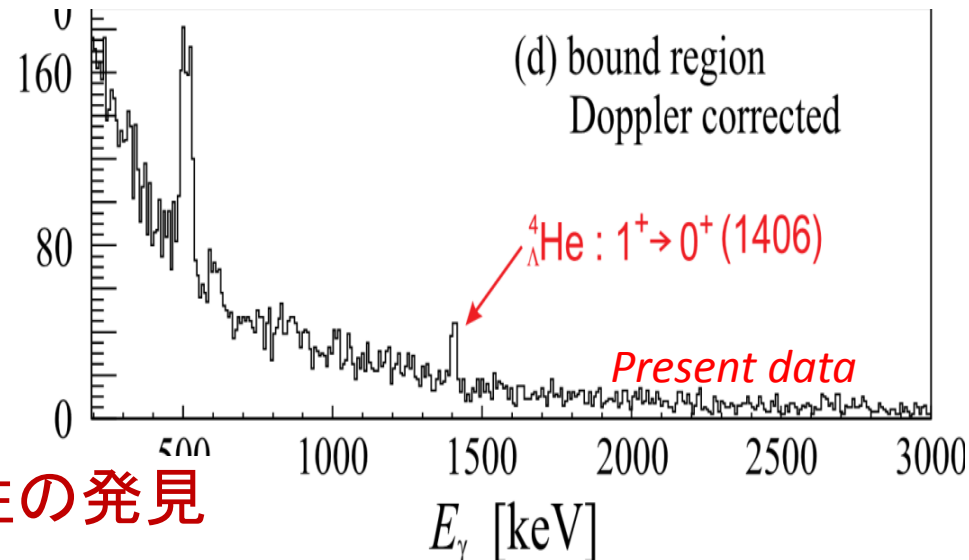
エマルジョンのデータと  
組み合わせて

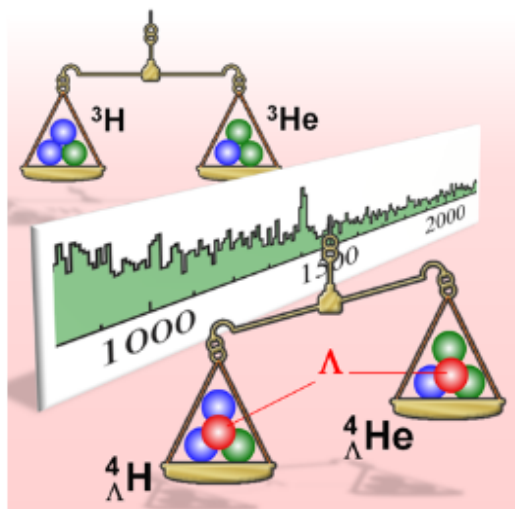
$$\Delta B_\Lambda(1^+) : 0.03 \pm 0.05 \text{ MeV}$$

$$\Delta B_\Lambda(0^+) : 0.35 \pm 0.05 \text{ MeV}$$

**=> CSBの大きなスピン依存性の発見**

**=>  $\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合力がわかる**





## EDITORS' SUGGESTION

### Observation of Spin-Dependent Charge Symmetry Breaking in $\Lambda N$ Interaction: Gamma-Ray Spectroscopy of ${}^4_{\Lambda}\text{He}$

The energy spacing of the spin-doublet states in the  ${}^4_{\Lambda}\text{He}$  hypernucleus indicate a large spin dependent charge symmetry breaking in the  $\Lambda N$  interaction.

T. O. Yamamoto *et al.* (J-PARC E13 Collaboration)

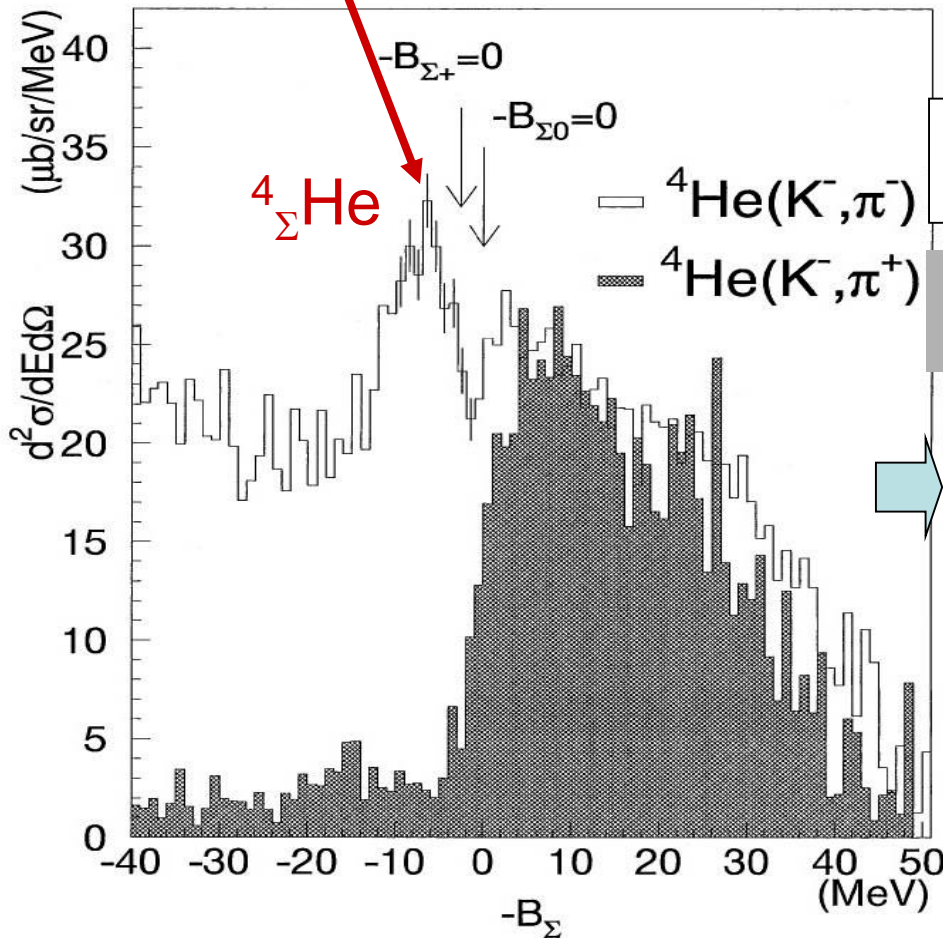
[Phys. Rev. Lett. 115, 222501 \(2015\)](#)



## 5. $\Sigma$ ハイパー核と $\Sigma N$ 相互作用

# $\Sigma$ -ハイパー核の束縛状態

Substitutional ( $\Delta L=0$ ) state:  $n(s_{1/2})^{-1}\Lambda(s_{1/2}1)$



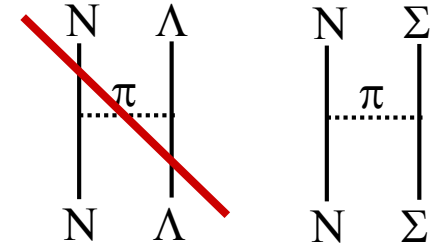
$T$ : total isospin

$T=1/2, 3/2$

$S=0$

$T=3/2$  only

$S=0$



One pion exchange plays important role in  $\Sigma N$

$\Sigma N$  相互作用に

大きなスピン・アイソスピン依存性

$(I, S) = (3/2, 0), (1/2, 1)$  attractive

$(3/2, 1), (1/2, 0)$  repulsive

-- 中間子交換模型の予想と一致

OPEP (one pion exchange potential):

$$\propto (\tau_1 \cdot \tau_2) \{ (\sigma_1 \cdot \sigma_2) + Z(mr) S_{12} \} e^{-mr} / r$$

スピン・アイソスピン平均した力の強さ?

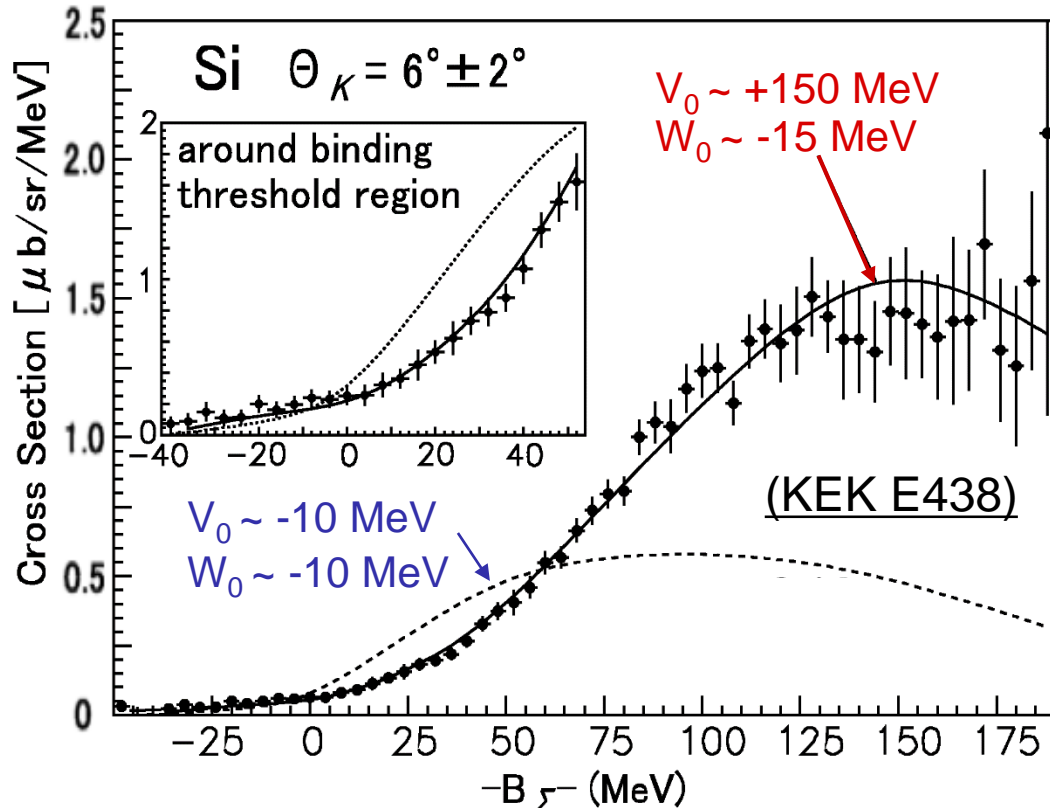
中性子星中に  $\Sigma$  はあるか ( $\Sigma$ - $n$  相互作用) ?

BNL-AGS, Nagae et al., PRL 80 (1995) 1605

他の  $\Sigma$  ハイパー核束縛状態観測されず

# $\Sigma N$ 相互作用は斥力 $-\Sigma^- - {}^{28}\text{Si}$ ポテンシャル

${}^{28}\text{Si} (\pi^-, K^+)$  at 1.2 GeV/ with SKS

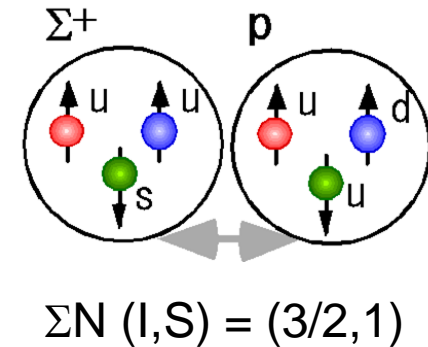


Noumi et al., PRL 87(2002) 072301

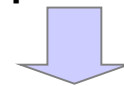
$$U_\Sigma = (V_0 + i W_0) f_{WS}(r)$$

きわめて強い斥力ポテンシャルを示唆  
(より正しい扱いをすると  $V_\Sigma \sim +30 \text{ MeV}$ )

■ この強い斥力ポテンシャルは、  
Quark Cluster ModelやLattice QCD  
が予言するクォークパウリ効果のため  
か？



■ 中性子星では  $\Sigma^- n$  相互作用が  
重要: 中性子星中に  $\Sigma^-$  は決して  
現れないか？

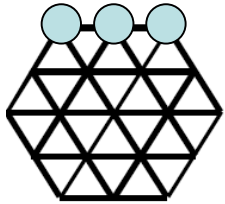


高統計の  $\Sigma^+ p / \Sigma^- p$  散乱実験を  
J-PARCで行う予定 (E40)

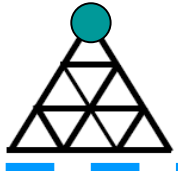
# バリオン (Oka-Yazaki's Quark Cluster Model (QCD) と予想が再現されている)

6 independent forces in favor of  $SO(3)$  symmetry

$8 \otimes 8 =$



(27)



(10\*)



(10)



(8s)

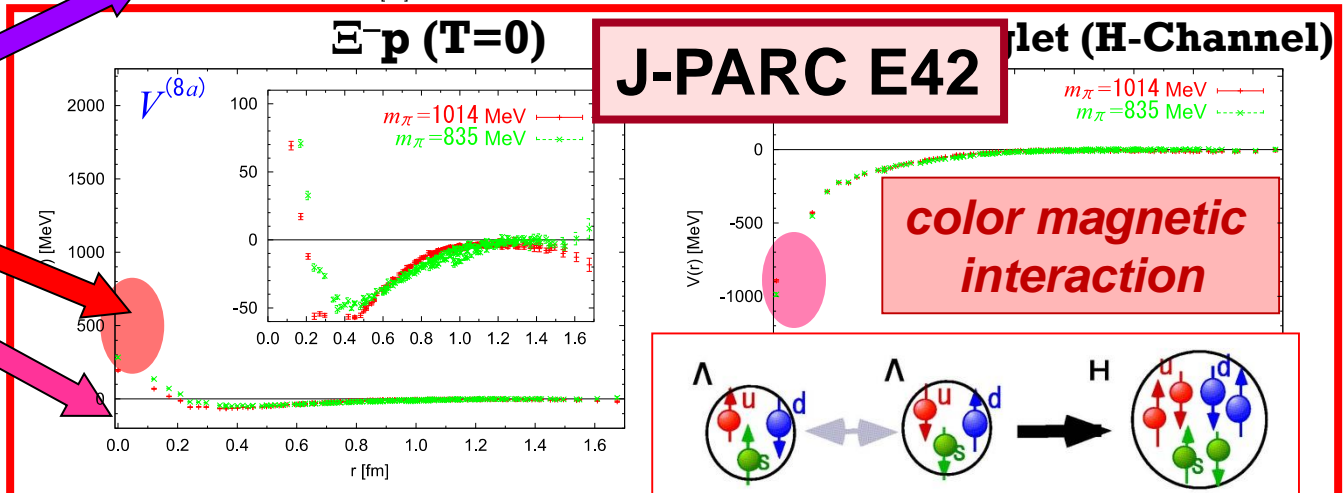
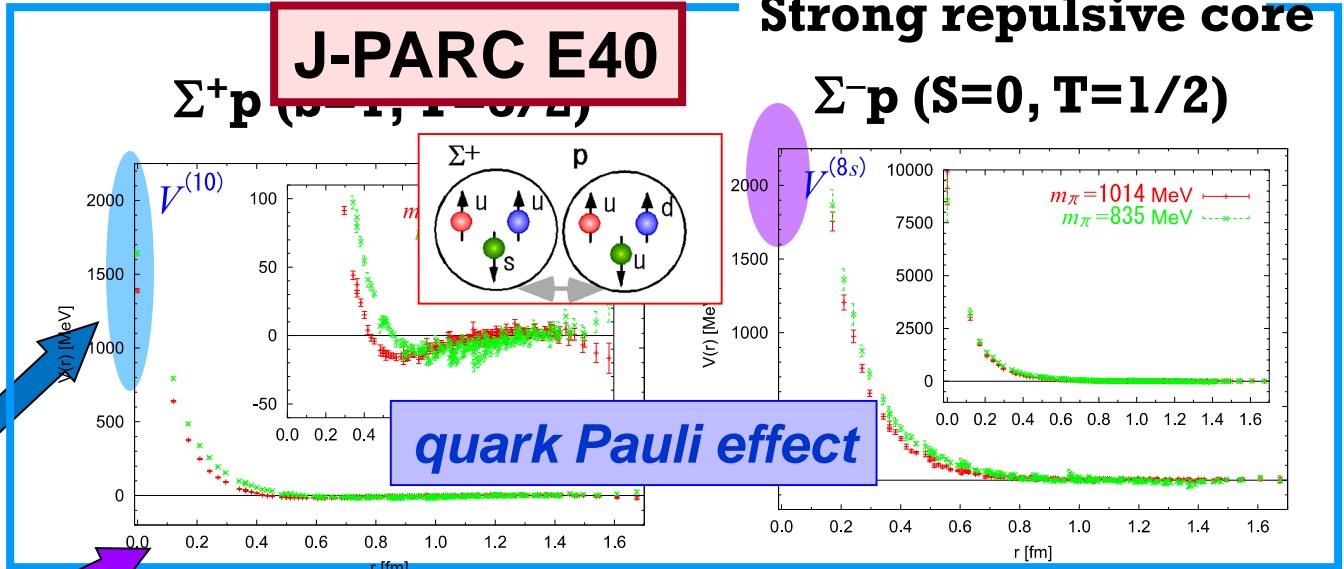


(8a)



(1)

Lattice QCD,  
T. Inoue et al.  
Prog. Theor. Phys. 124 (2010) 4



Weakly repulsive or attractive  
Core



# G-matrix 計算による $\Sigma$ 核ポテンシャルの深さ

*Rijken et al., PRC59 (1999) 21*

TABLE XIV. Contributions to  $U_\Sigma$  at  $k_F=1.0 \text{ fm}^{-1}$  in the cases of NSC97e, NSC97f, NSC89, NHC-F, and NHC-D. Conversion widths  $\Gamma_\Sigma$  are also shown. All entries are in MeV.

Model	Isospin $T=\frac{1}{2}$			Isospin $T=\frac{3}{2}$			Sum	$\Gamma_\Sigma$
	$^1S_0$	$^3S_1$	$P$	$^1S_0$	$^3S_1$	$P$		
NSC97e	5.2	-7.5	0.0	-6.1	-2.5	-0.9	-11.8	14.6
NSC97f	5.2	-7.6	0.0	-6.2	-2.2	-0.9	-11.6	15.5
NSC89	3.0	-4.2	-0.3	-5.8	3.7	0.1	-3.6	25.0
NHC-F	4.2	-10.9	-1.5	-5.3	18.6	-1.7	3.5	16.3
NHC-D	2.1	-9.6	-2.2	-5.4	9.4	-3.0	-8.7	8.7
ESC04d	6.5	-21.0	-3.4	-20.2	24.0	-20.9	-26.0	
fss2(quark)	6.7	-23.9	-5.2	-9.2	41.2	-1.4	7.5	

*Rijken, Yamamoto  
PRC73 (2006) 044008*

*Fujiwara et al.,  
Prog.Part.Nucl.Phys.  
58 (2007) 439*

$k_f=1.35 \text{ fm}^{-1}$

Lane term  $(\sigma_\Sigma \sigma_N)(\tau_\Sigma \tau_N)$  by  $\pi/\rho$  exchange

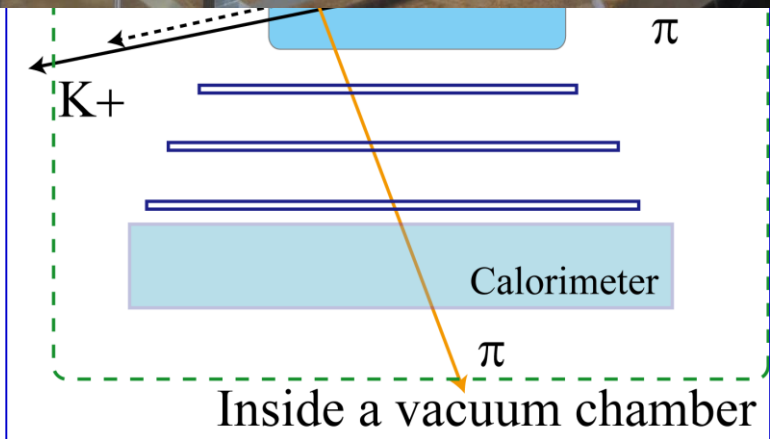
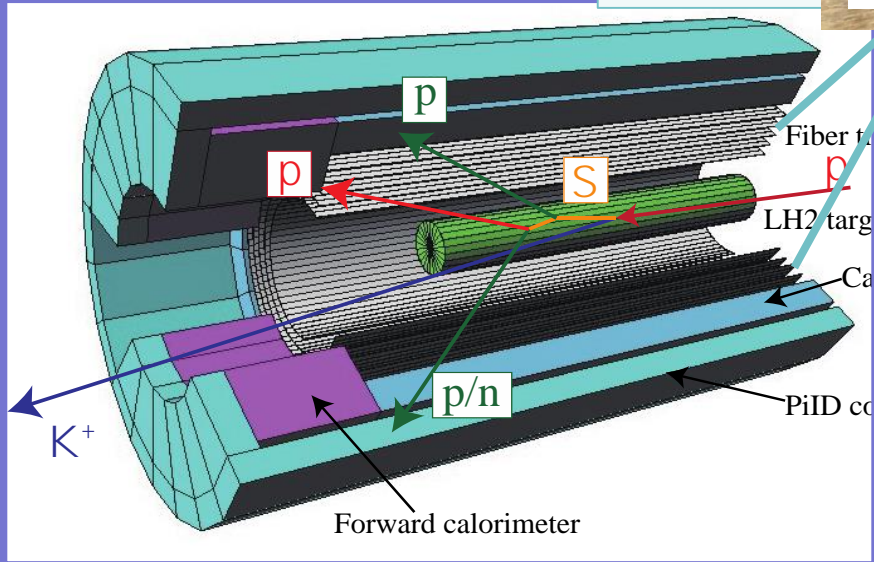
quark Pauli effect

# J-PARC E40 (Miwa $\Sigma p$ Scattering Experiment)



Prototype of the scattered proton detector

- 1.3 GeV/c  $\pi^+ p \rightarrow K^+ \Sigma^+$  reaction
- $\Sigma^+$  track not directly measured
- Measure proton momentum vector  
 -> kinematically combined MPPC+S

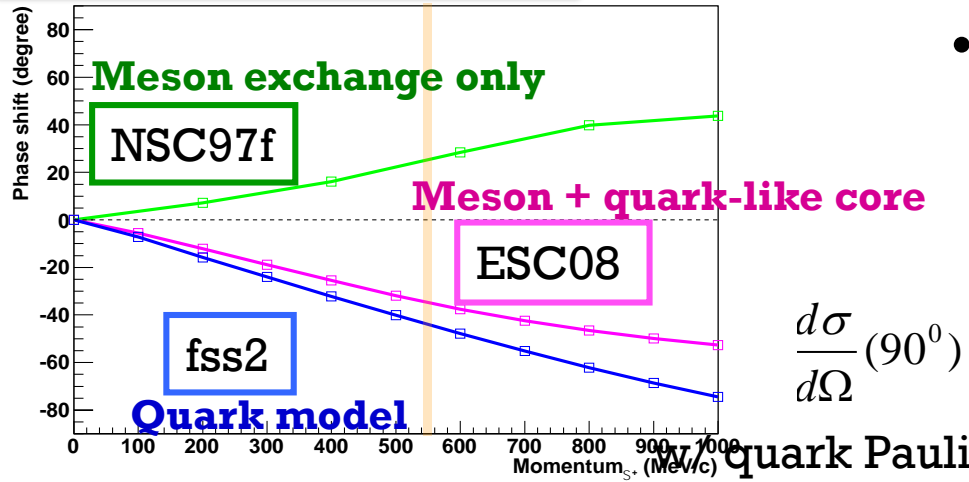


Ultra-fast fiber tracker (MPPC readout)  
 Calorimeter (BGO)  
 Liq. H<sub>2</sub> target

$\Rightarrow d\sigma/d\Omega$  for  $\Sigma^+ p, \Sigma^- p, \Sigma^- p \rightarrow \Lambda n$   
 $(p_\Sigma = 400-700 \text{ MeV}/c)$   
 Phase shift of  $^3S_1$  channel  
 $\Rightarrow$  confirm quark Paul effect

# E40: Phase shift of $^3S_1$ channel

Phase shift of  $\Sigma^+p$  ( $^3S_1$  channel)



- Energy dependence of  $\delta_{3S1}$  from  $d\sigma/d\Omega(90^\circ)$

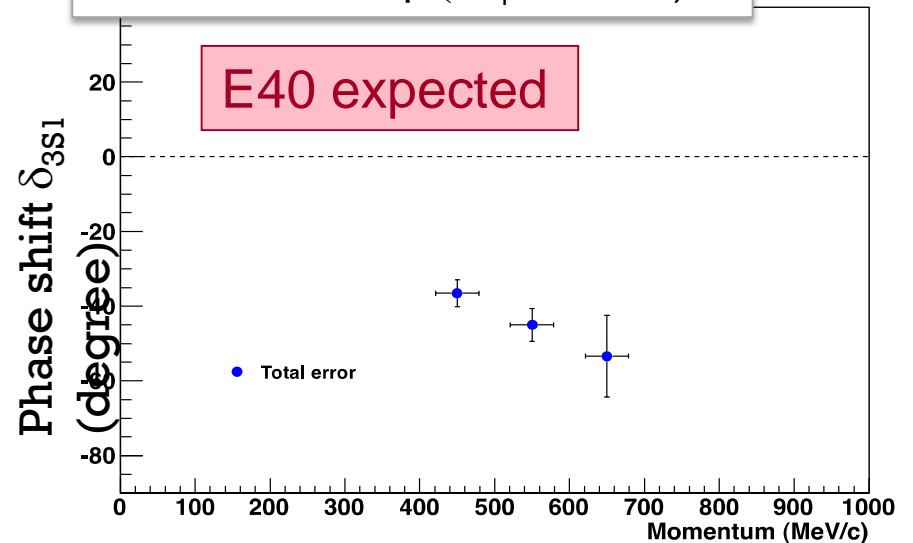
Negligibly small

Almost model-independent

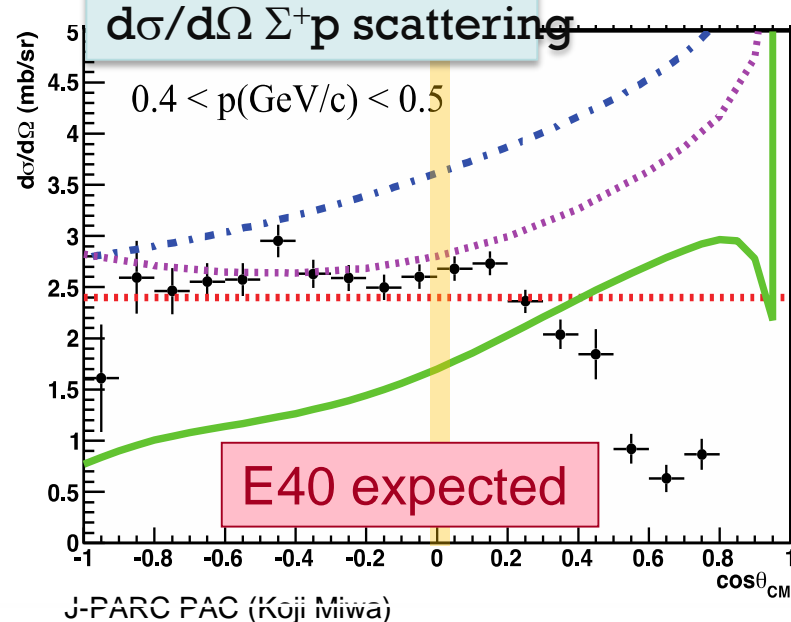
$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(90^\circ) = \frac{1}{4} \frac{1}{k^2} \sin^2 \delta_{1S0} + \frac{3}{4} \frac{1}{k^2} \sin^2 \delta_{3S1} + (\text{higher waves})$$



Phase shift of  $\Sigma^+p$  ( $^3S_1$  channel)



$\Sigma^+$  beam momentum (MeV/c)



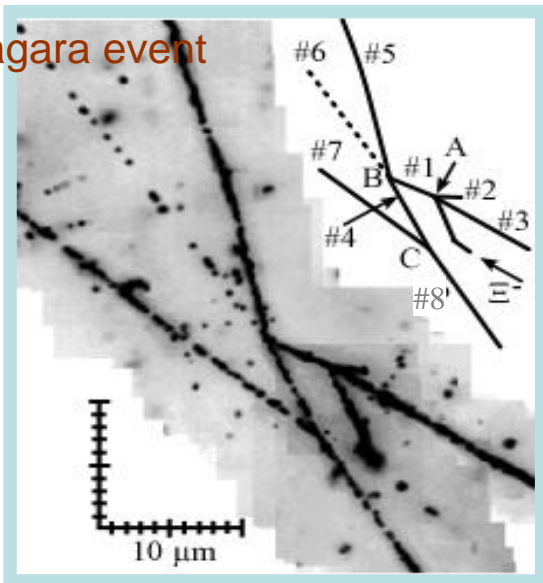
## 6. $\Lambda\Lambda$ ハイパー核と $\Lambda\Lambda$ 相互作用



# $\Lambda\Lambda$ ハイパー核の観測例

## ハイブリッド・エマルジョン方式 (KEK E373)

Nagara event

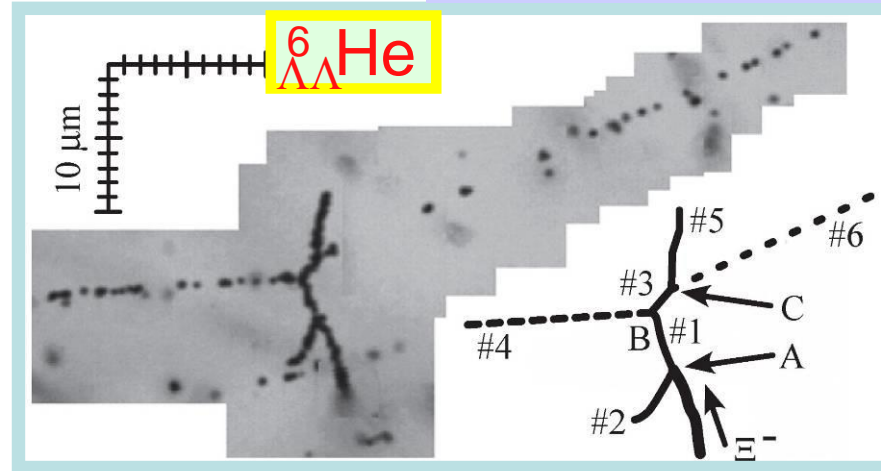


${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$   
(unique and accurate)

$\Delta B_{\Lambda\Lambda} = 0.67 \pm 0.17 \text{ MeV}$

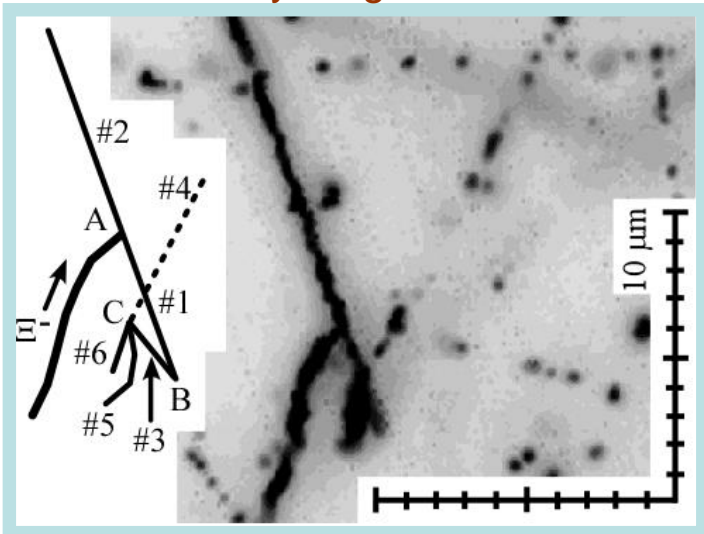
Mikage event

$\Delta B_{\Lambda\Lambda} = 3.82 \pm 1.72 \text{ MeV}$



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

Demachi-yanagi event

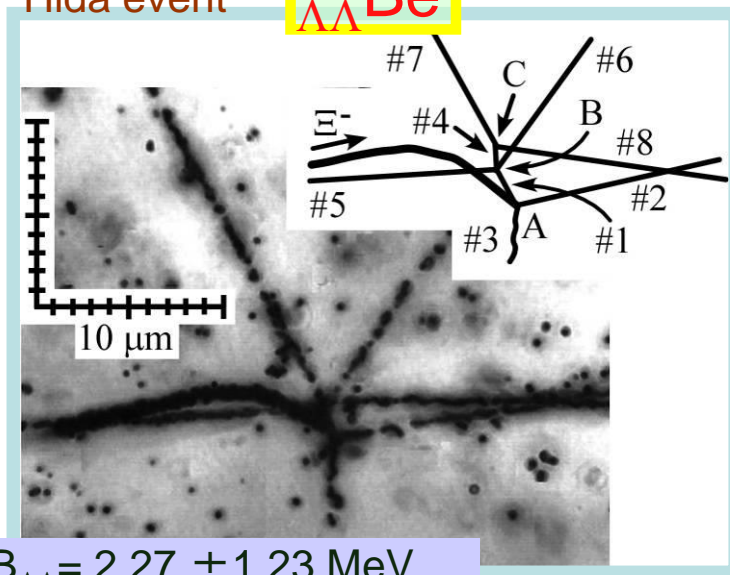


${}^{10}_{\Lambda\Lambda}\text{Be}^*$   
(w/ theoretical help)

$\Delta B_{\Lambda\Lambda} = -1.52 \pm 0.15 + 3.0$   
*cf. Ex = 3.0*

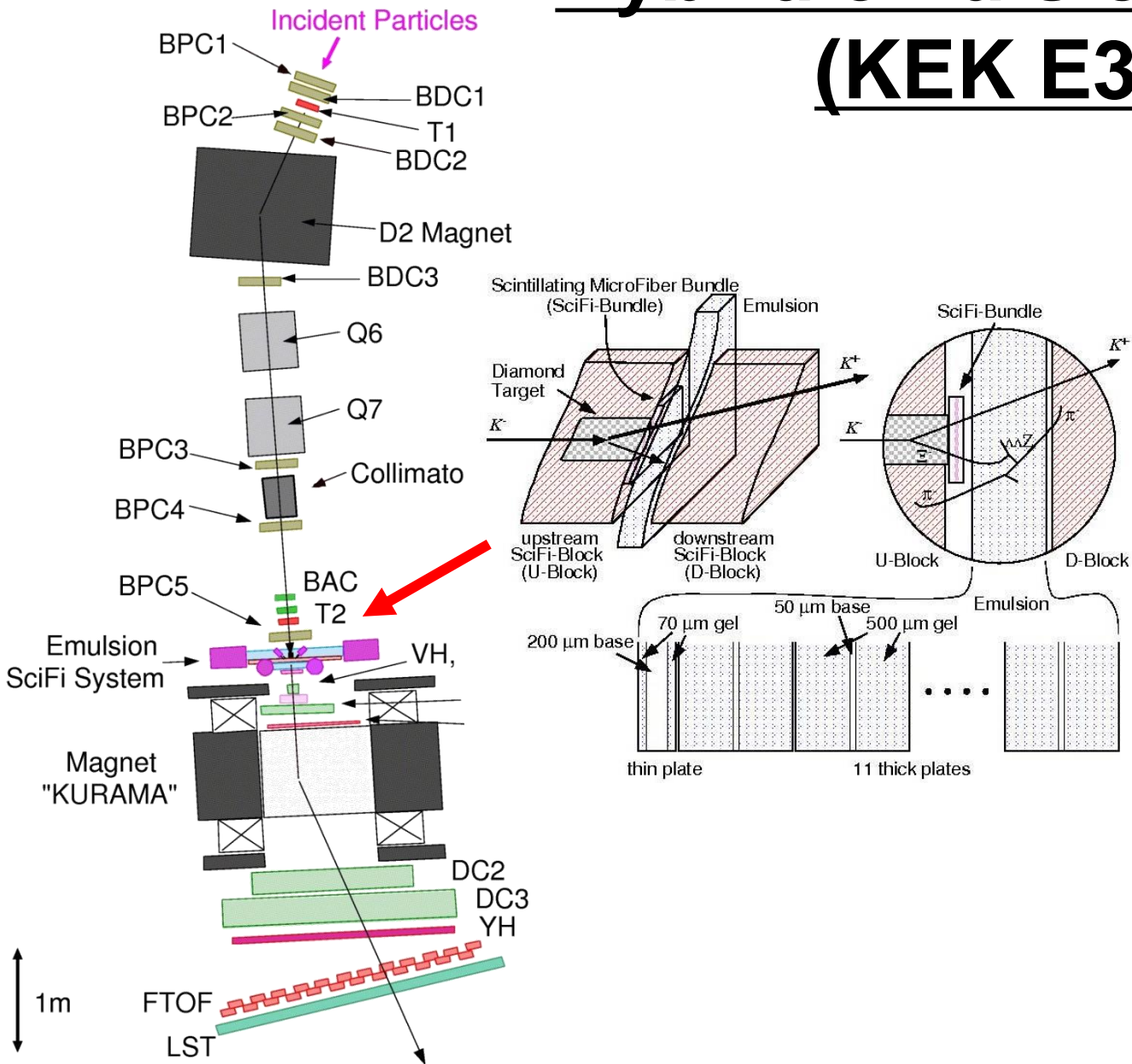
Hida event

${}^{11}_{\Lambda\Lambda}\text{Be}$

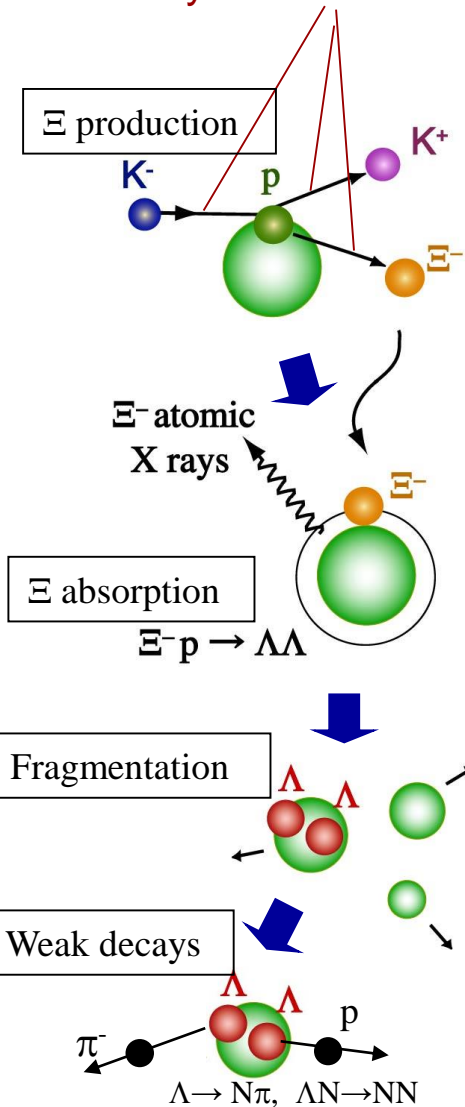


$\Delta B_{\Lambda\Lambda} = 2.27 \pm 1.23 \text{ MeV}$

# Hybrid emulsion method (KEK E373)

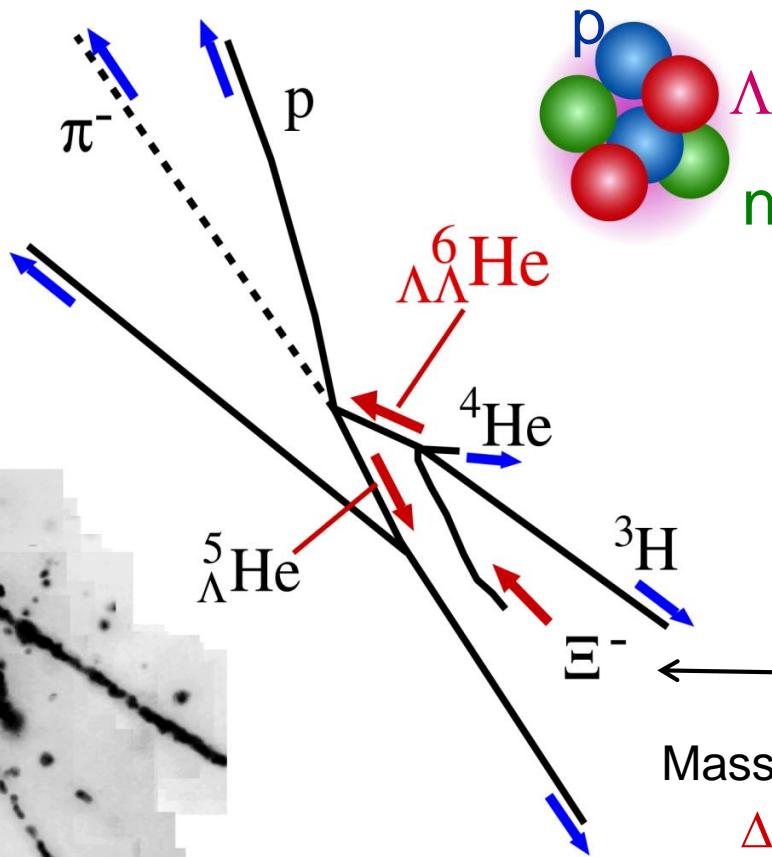
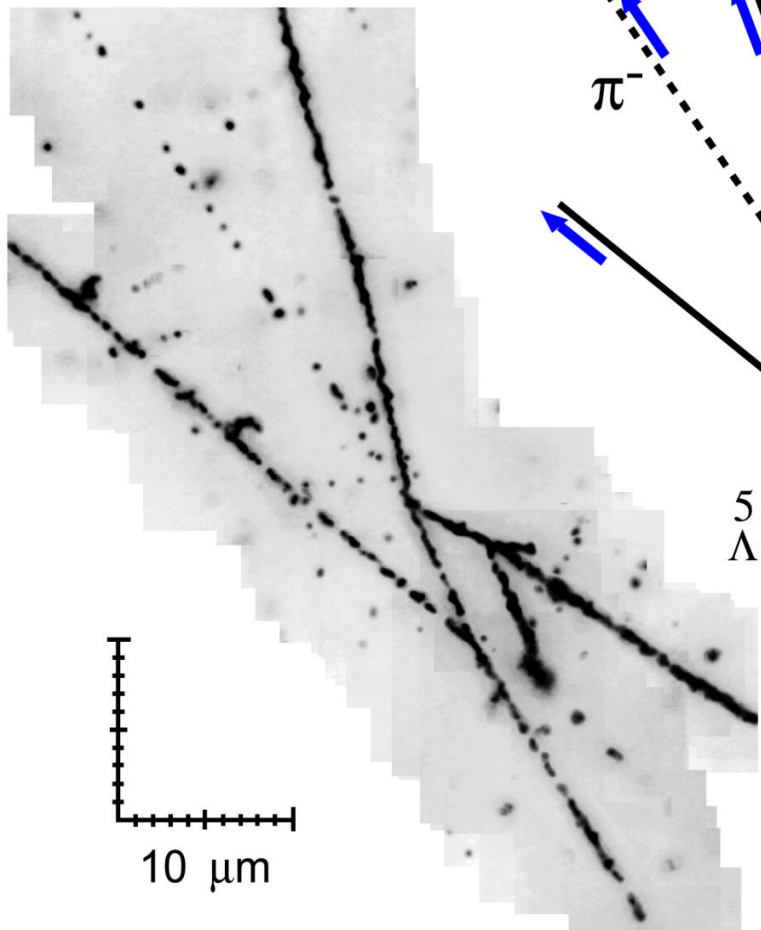


Measure tracks  
by counters

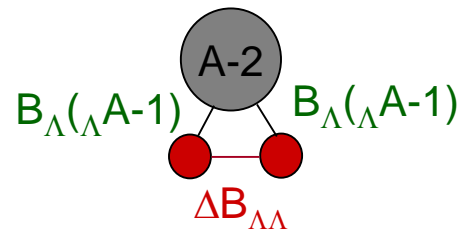
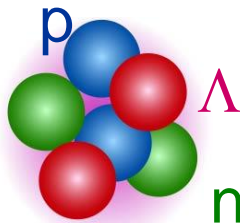


# $\Lambda\Lambda$ 相互作用の強さ

Nagara event



“三重閉殻”の原子核



$$\Delta B_{\Lambda\Lambda} = B_{\Lambda\Lambda} - 2B_{\Lambda(\Lambda A-1)},$$

$$B_{\Lambda\Lambda} = M(A-2) + 2M(\Lambda) - M(\Lambda\Lambda A)$$

$\Xi^-$  ←  $K^- p \rightarrow \Xi K^+$  反応で生成

Massの決定 ->

$$\Delta B_{\Lambda\Lambda} = 0.67 \pm 0.17 \text{ MeV}$$

Takahashi et al., PRL 87 (2001) 212502

- $\Lambda\Lambda$  間相互作用は、弱い引力
- 束縛した H dibaryon は存在しない  
(核内で  $\Lambda\Lambda \rightarrow H$  が起こるはず)

J-PARCで10倍の実験 ( $\Lambda\Lambda$ 核100個)を実施中 (E07, Nakazawa)

## 6. $\Xi$ ハイパー核と $\Xi N$ 相互作用

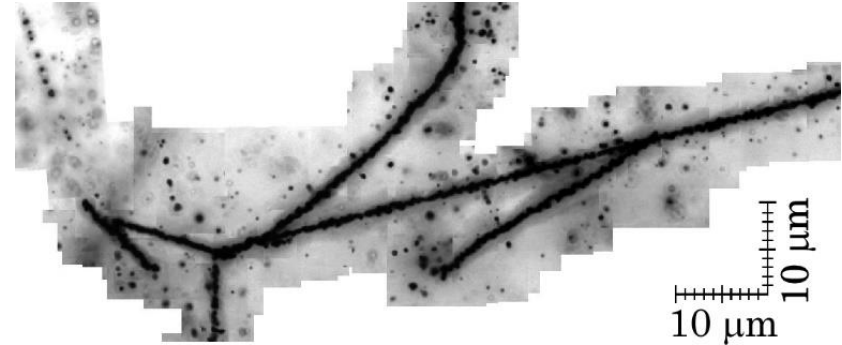


# 世界初のΞハイパー核の観測

## Ξ<sup>-</sup>-<sup>14</sup>N系の深い束縛状態 Kiso event

Nakazawa et al., PTEP (2015) 3, 033D02

- J-PARC実験用に開発したエマルジョン全スキャン装置で、過去のKEK-PSの実験で照射したエマルジョンを解析して発見



2015年(平成27年)1月19日(月曜日)

### 岐大、宇宙創生の謎に一步

## 中性子星に「グザイ」存在

結果は、日本物理学会などがインターネットで発表する学術論文誌に近く掲載される。

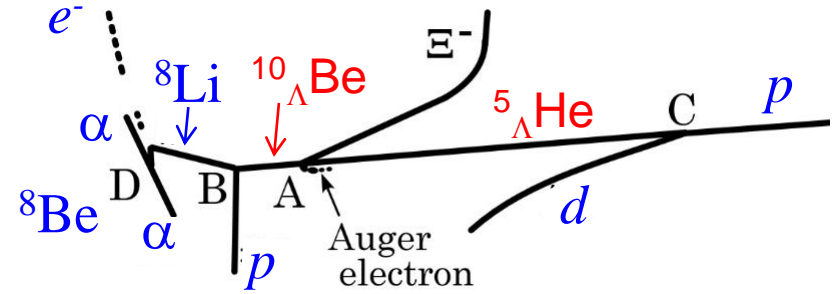
中性子星は、寿命が尽きた恒星が爆発した後に残る星。大きさは太陽の百万分の一程度だが、質量は約二倍と極めて密度が高い。このため、素粒子のうち陽子や中性子より重いラムダ(Λ)やシグマ(Σ)などの素粒子が、中性子星に存在する可能性がある。グザイは、中性子星内部に存在する可能性が高いと考えられている。グザイは、中性子星内部に存在する可能性が高いと考えられている。グザイは、中性子星内部に存在する可能性が高いと考えられている。

仲沢教授は「二〇一一年、通常の陽子と中性子でできている原子核に、ラムダを結合した超原子核を作製。加速器からは高エネルギーを加えて、中性子とラムダが結び付くことが分かった。中性子星に存在する可能性が高いと考えられている。グザイは、中性子星内部に存在する可能性が高いと考えられている。」

真乾板に当てて顕微鏡で撮影した。約八百万枚の画像を分析した結果、空室の原子核にグザイが吸収された超原子核を発見した。

超原子核内の引力を測定すると、原子核がグザイが互いの電磁力の三十倍の強さで引き合っていた。グザイ

●陽子 ▲中性子 ○グザイ、ラムダなどの重い素粒子



- Ξ<sup>-</sup>と<sup>14</sup>N核の束縛エネルギー  $B_{\Xi}$  を導出  
 $B_{\Xi} = 4.38 \pm 0.25 \text{ MeV}$  if  ${}^{10}_{\Lambda}\text{Be}$  is in ground state,  
 $> 1.11 \pm 0.25 \text{ MeV}$  if it is excited.  
 c.f.  $0.17 \text{ MeV}$  (3D atomic orbit)

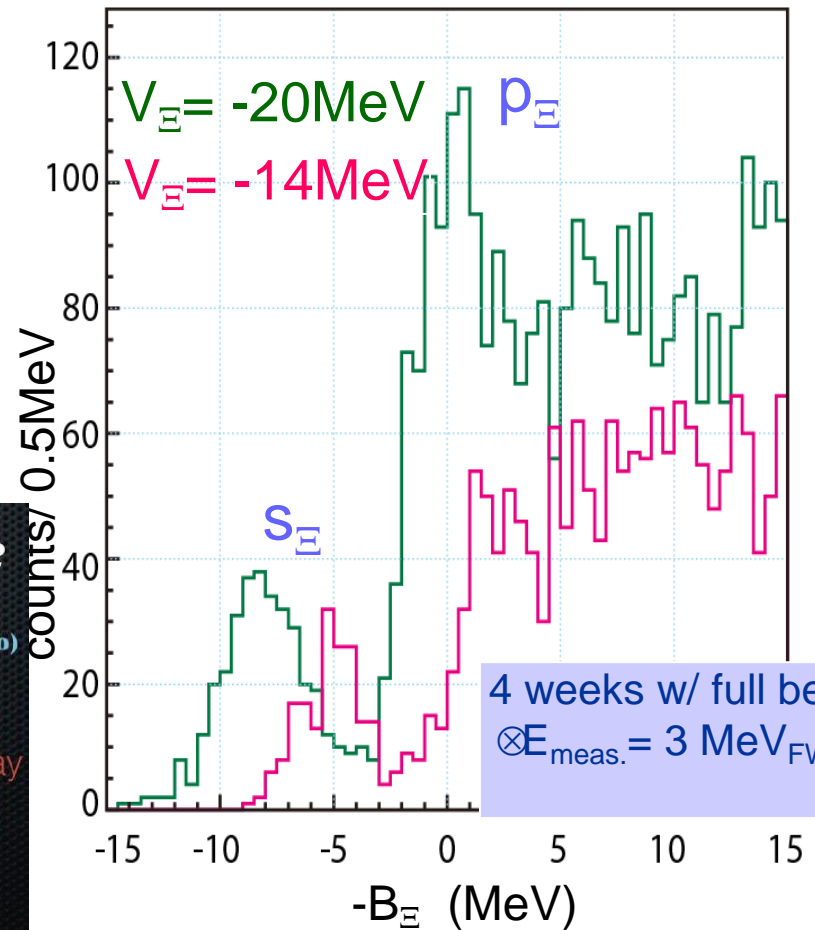
⇒ Ξ-N相互作用は引力  
 ⇒ 中性子星内部の Ξ<sup>-</sup> の存在を強く示唆

# (K<sup>-</sup>,K<sup>+</sup>) 反応による三ハイパー核分光へ

J-PARC E05

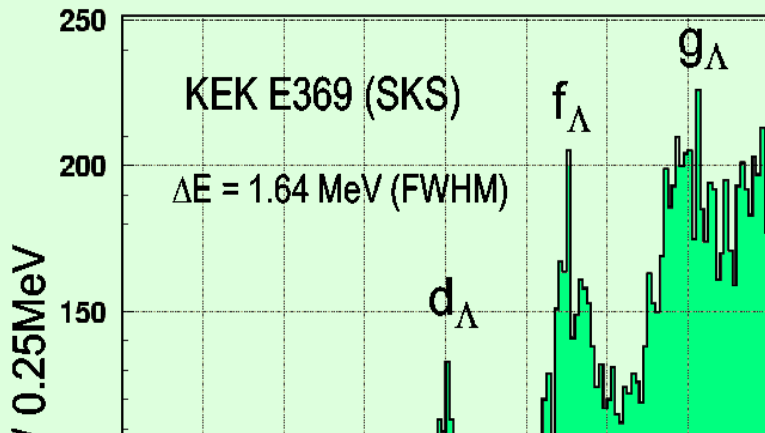
p K<sup>-</sup> → Ξ<sup>-</sup> K<sup>+</sup>

Expected <sup>12</sup>C (K<sup>-</sup>,K<sup>+</sup>) <sup>12</sup>Ξ<sup>-</sup>Be Spectrum



PRC 64 (2001) 044302

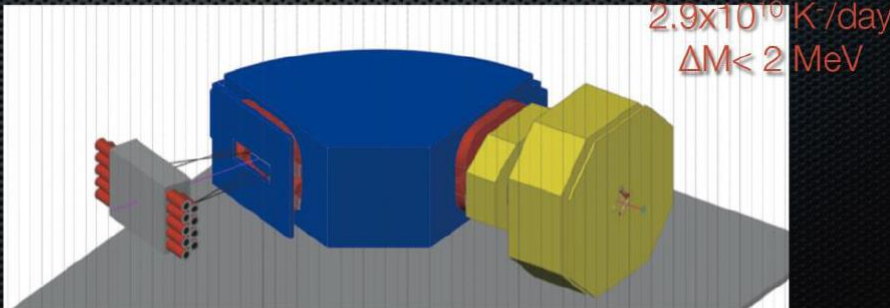
<sup>89</sup>Y (π<sup>+</sup>,K<sup>+</sup>) <sup>89</sup>Λ<sub>Y</sub>



- 60 msr,  $\Delta p/p = 0.05\% \rightarrow \Delta M = 1.5 \text{ MeV}$
- Construction of S-2S(QQD): ~3 years
- Installation in 2014
- Data taking in 2015 with > 150 kW !!

T. Nagae

S. Kanatsuki (Kyoto)

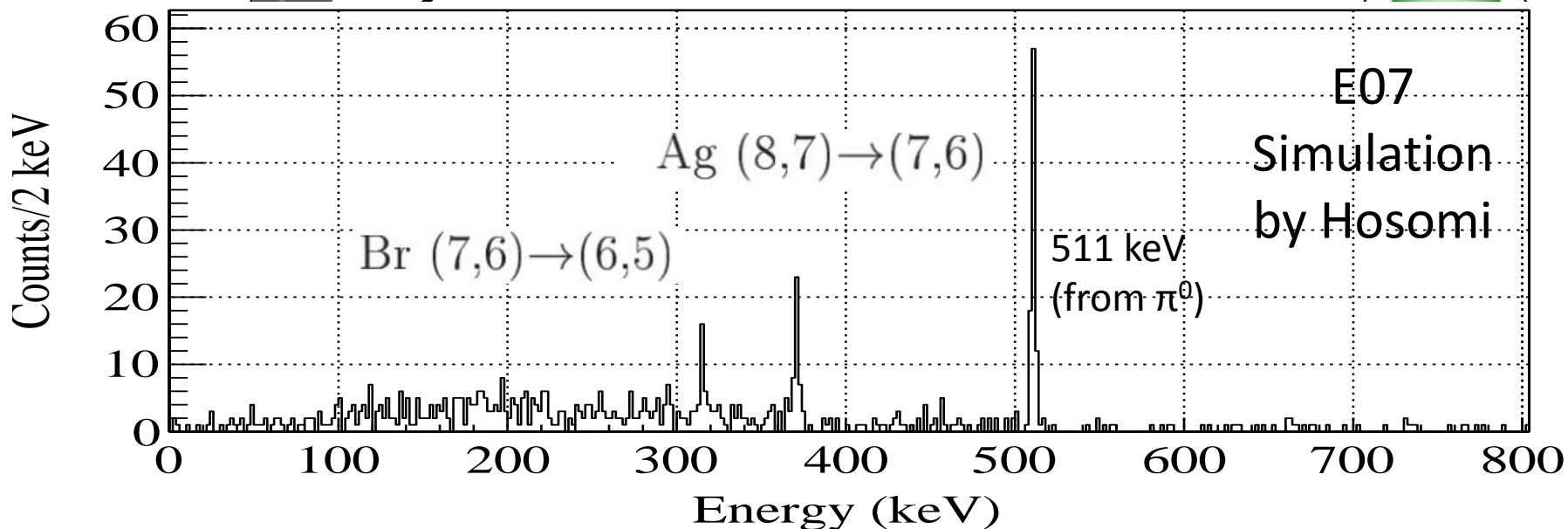
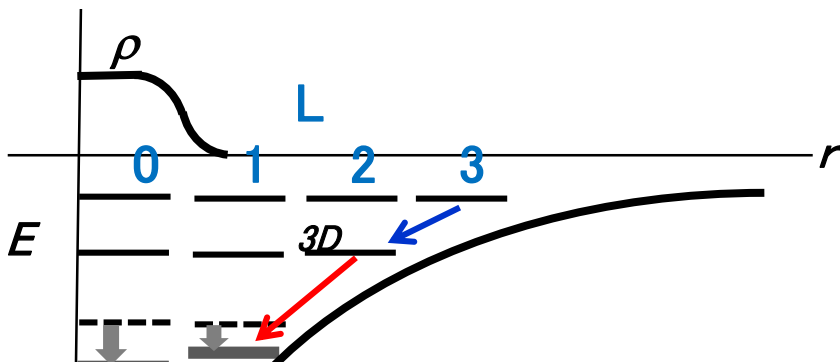
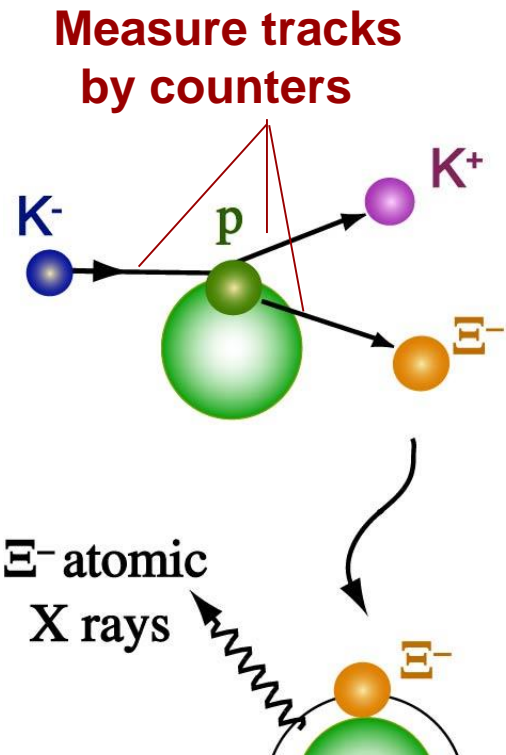


New spectrometer (S-2S) is under construction

First step to multi-strangeness baryon systems

# Ξ原子のX線測定 (J-PARC E07,E03)

Ξ<sup>-</sup> 原子のX線の測定で、核とΞ<sup>-</sup>の相互作用がわかる  
 引力のΞ核ポテンシャル→レベルが下がる (shift)  
 核によるΞ<sup>-</sup>の吸収→幅をもつ (width)



# 5. Hyperon puzzleと 三体斥力の解明へ

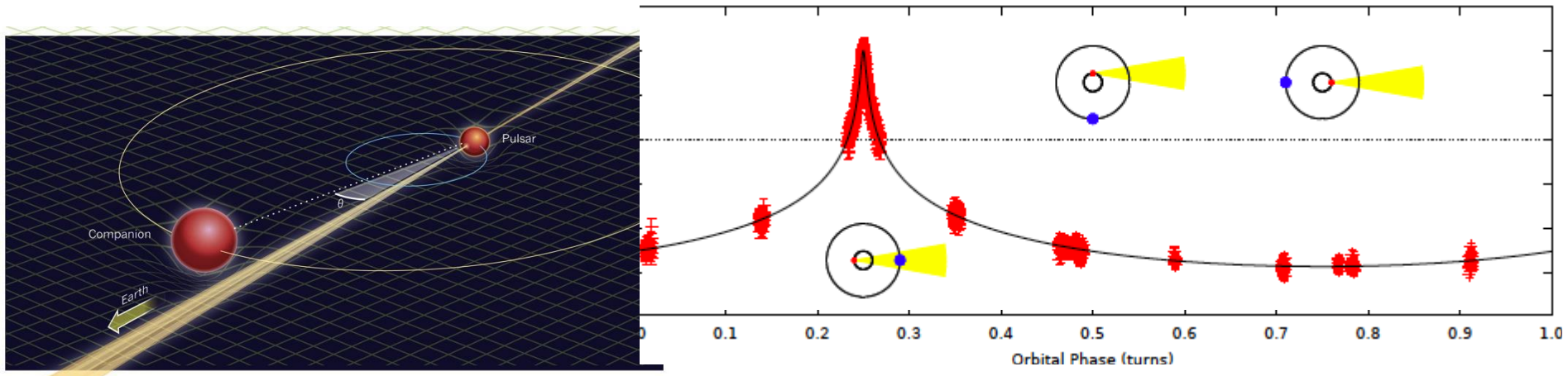
# 重い中性子星の発見

Slide by  
Baym

## PSR J1614-2230-- 中性子星-白色矮星の連星系

*Demorest et al., Nature 467, 1081 (2010); Ozel et al., ApJ 724, L199 (2010).*

Spin period = 3.15 ms; orbital period = 8.7 day  
Inclination =  $89:17^\circ \pm 0:02^\circ$



伴星の重力による時間の遅れ (Shapiro delay) により、  
パルサー周期が変動

$$M_{\text{NS}} = 1.97 \pm 0.04 M_{\odot}; \quad M_{\text{white dwarf}} = 0.500 \pm 0.006 M_{\odot}$$

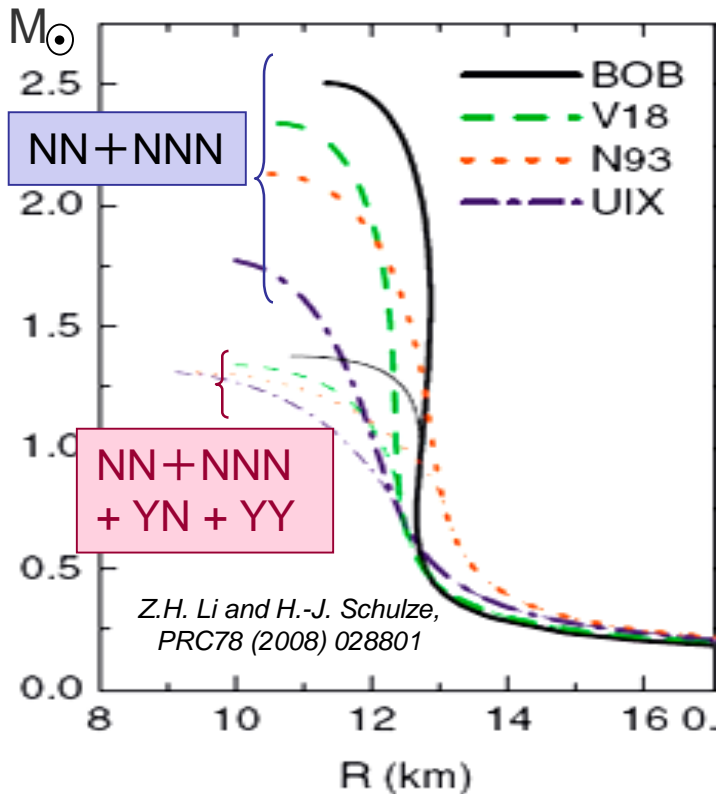


# Hyperon puzzle

- 少なくとも  $\Lambda$  は  $\rho = 2.0 \sim 2.5 \rho_0$  で出現
- ハイペロン (or kaon) の存在を許す EOS は軟らか過ぎ  
 ->  $1.5 M_{\odot}$  以上の中性子星は支えられない

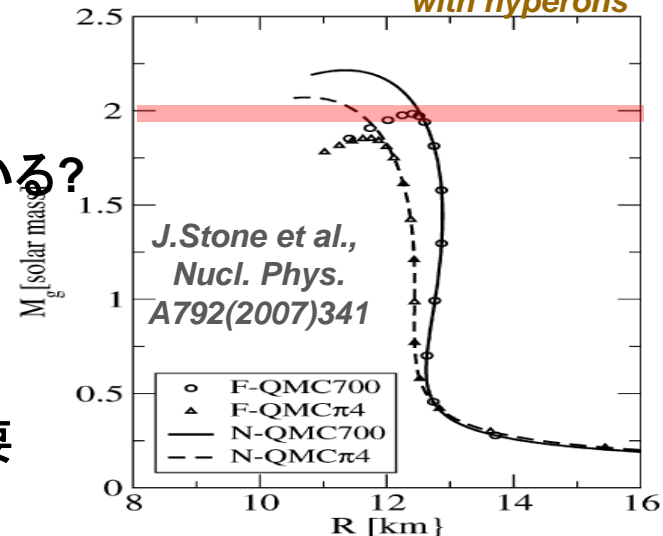
$\sim 2.0 M_{\odot}$  の  
 中性子星の  
 信頼できる  
 観測例2例

核物理の大問題 -  $\rho_0$  周辺のデータのみを参照して作られた  
 現在の核物理は、高密度での扱いが正しくない



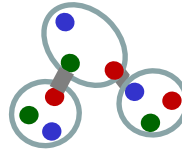
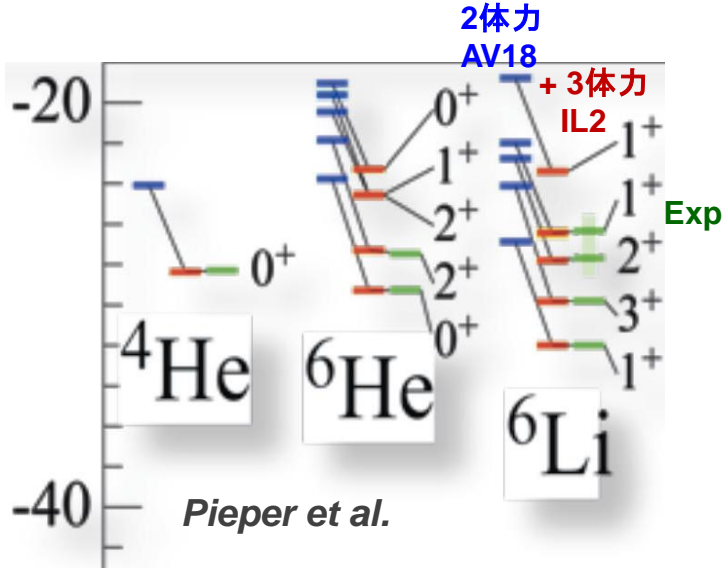
- 斥力の3体力(高密度で重要)が NNNと同様に YNN, YYN, YYYにもあると仮定
- 結合定数やメソン質量を密度に依存させる、クォーク描像をとりいれる
- Lattice QCD?
- クォーク物質への相転移が起こっている? (クォーク星/ハイブリッド星)

*Quark Meson Coupling model with hyperons*

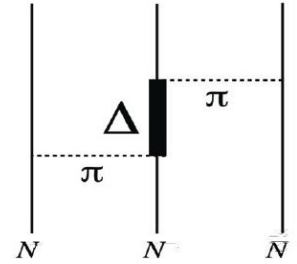


信頼できる  
 理論的枠組みが必要

# 3体核力(NNN)の性質



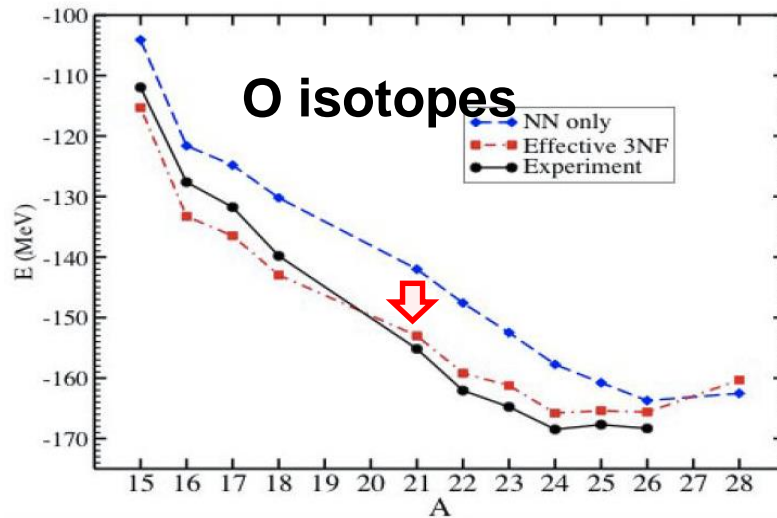
ハドロンは内部構造があるので「3体力」がある



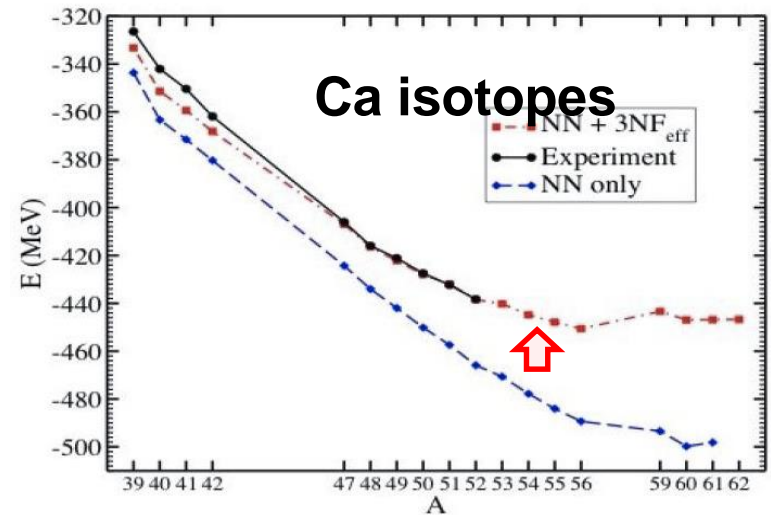
軽い核(低密度)では、引力的  
～藤田・宮沢型

重い核(高密度 $\sim\rho_0$ )では、斥力的  
+ 相対論的效果

Illinois型3体力( $2\pi$  exchange, 藤田・宮沢型)



Chiral effective field theoryによる3体力



G. Hagen et al., PRL 109 (2012) 032502

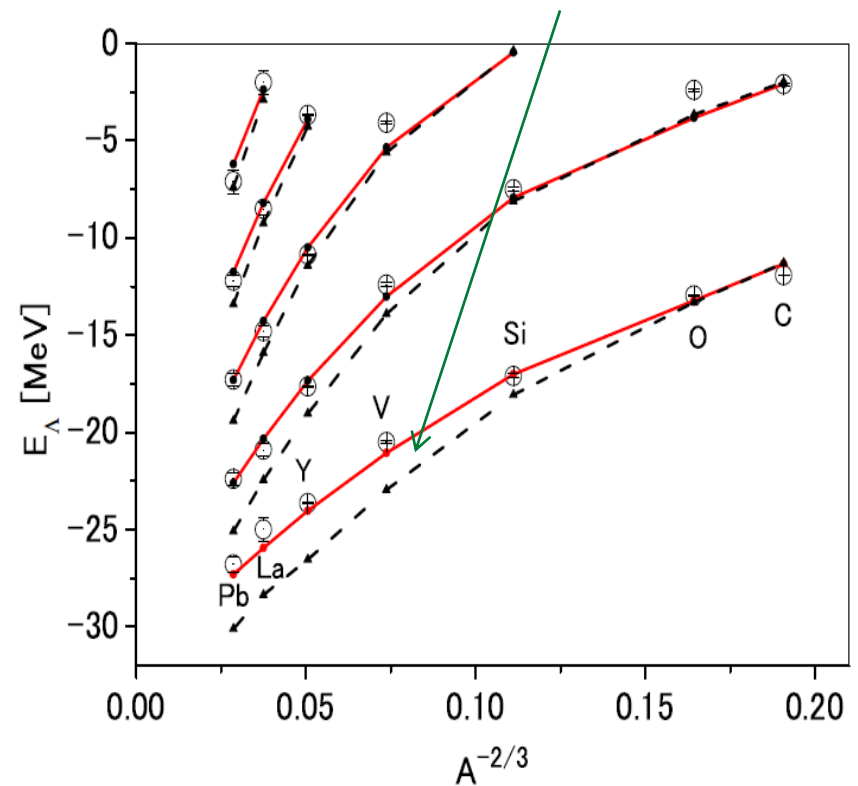
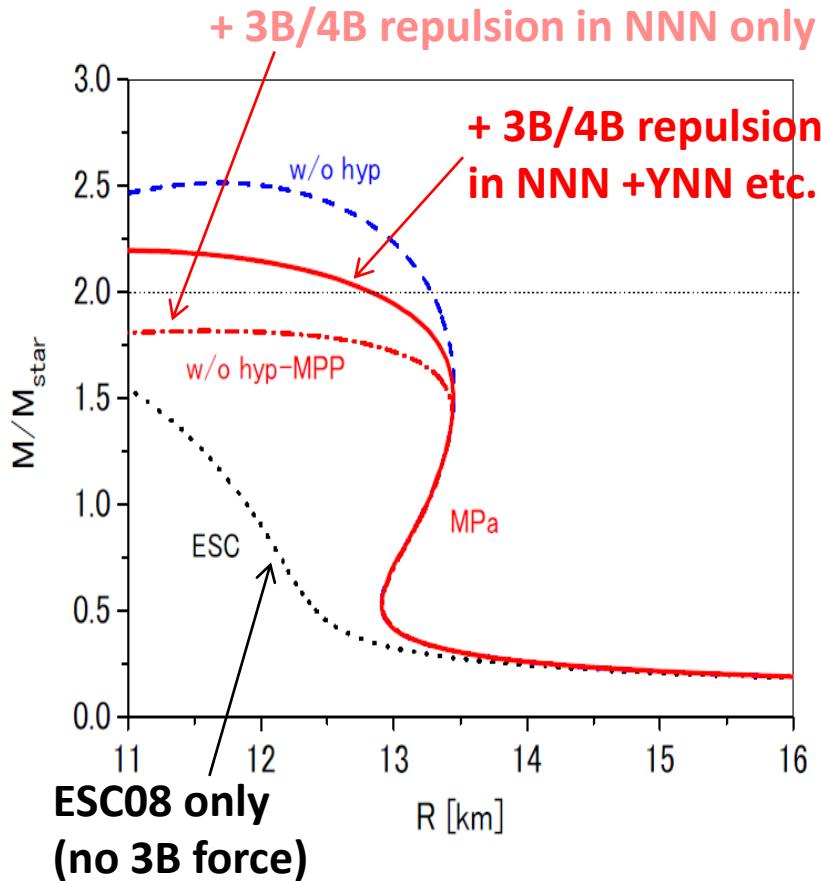
# ハイパー核と中性子星最大質量

Nijmegen ESC08 相互作用: ほぼすべての  
ハイパー核+YN散乱データを再現

Y. Yamamoto et al.  
PRC 88 (2013) 2, 022801  
PRC 90 (2014) 4, 045805

“3体/4体斥力は、核子のみNNNでもハイペロンが入っていても(YNN, YYN,..)同じと仮定。  
原子核同士の大角度弾性散乱データで決める。  
 (“universal 3B repulsion”).

w/o and w/ 3体+4体 repulsion in YNN  
傾きに差が出る

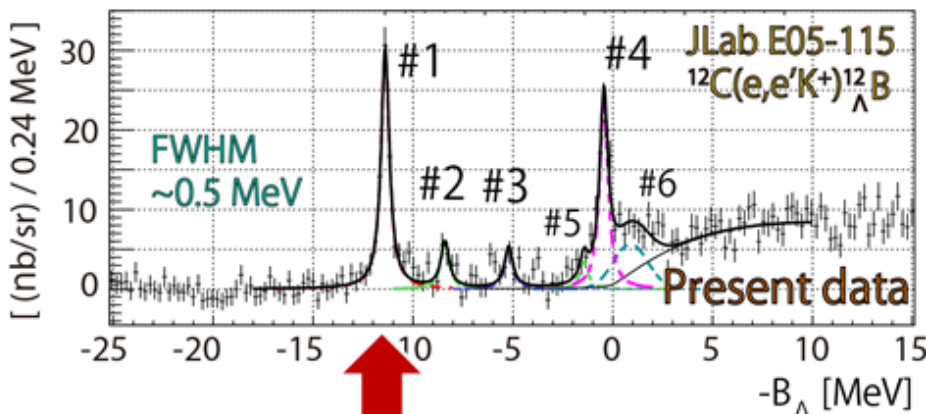
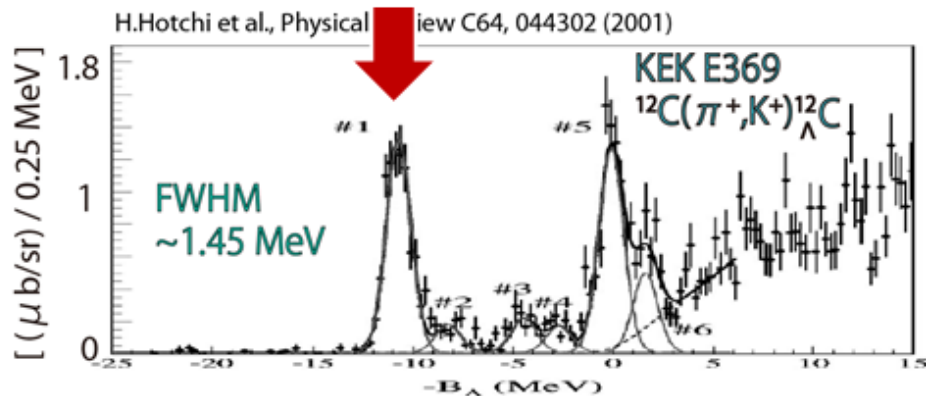


高精度( $\pm 0.1$  MeV)の $\Lambda$ 束縛エネルギーのデータが必要

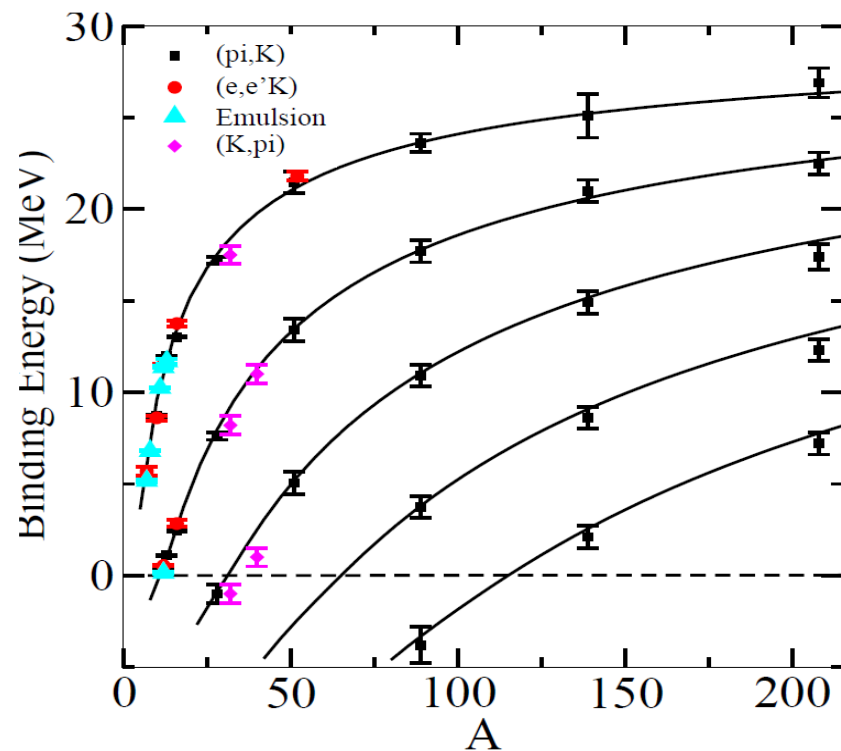
# (e,e'K<sup>+</sup>)反応によるΛハイパー核分光

ハイパー核反応分光では最高の分解能~500 keV(FWHM)  
 $B_{\Lambda}$  の絶対値校正が  $p(e,e'K^+) \Lambda, \Sigma^0$  で可能

$^{12}_{\Lambda}\text{C}$ : Emulsion data (6 events)



$^{12}_{\Lambda}\text{B}$ : Calibrated by  $p(e,e'K^+) \Lambda, \Sigma^0$

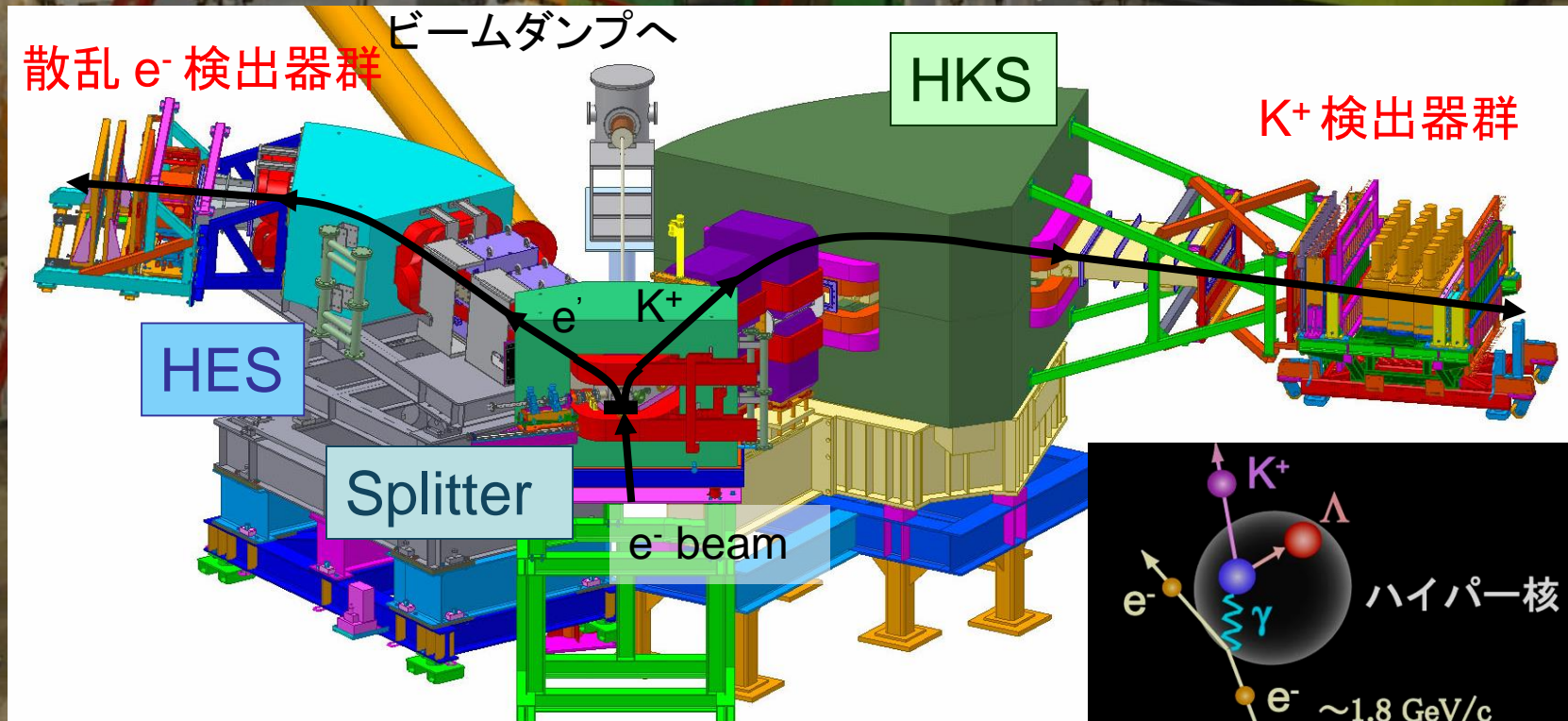
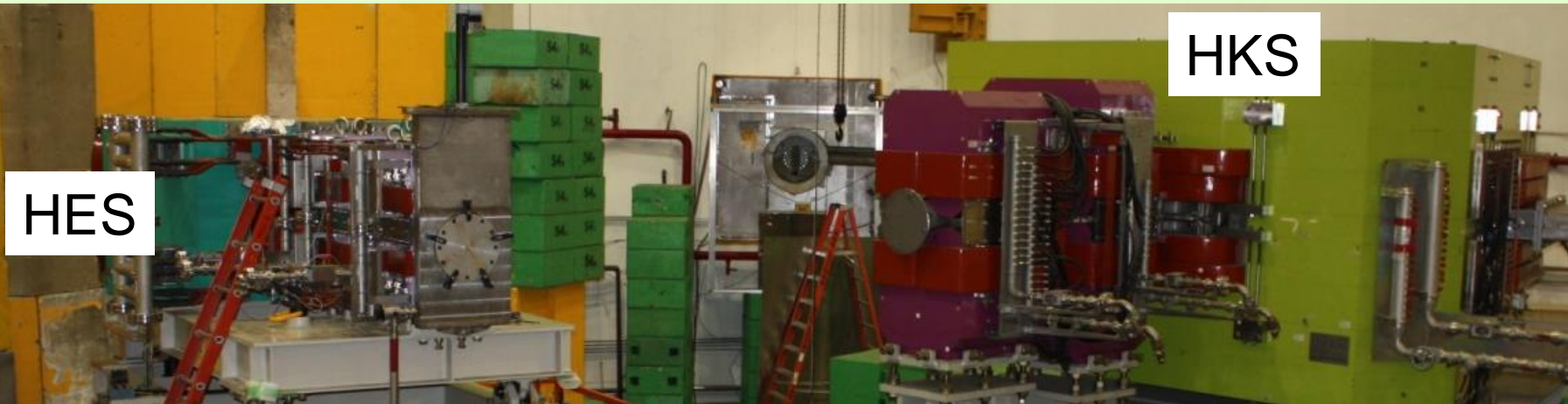


$(\pi^+, K^+), (K^-, \pi^-)$ : systematic error ~0.5 MeV

$(e,e'K^+)$ : systematic error ~ 100 keV

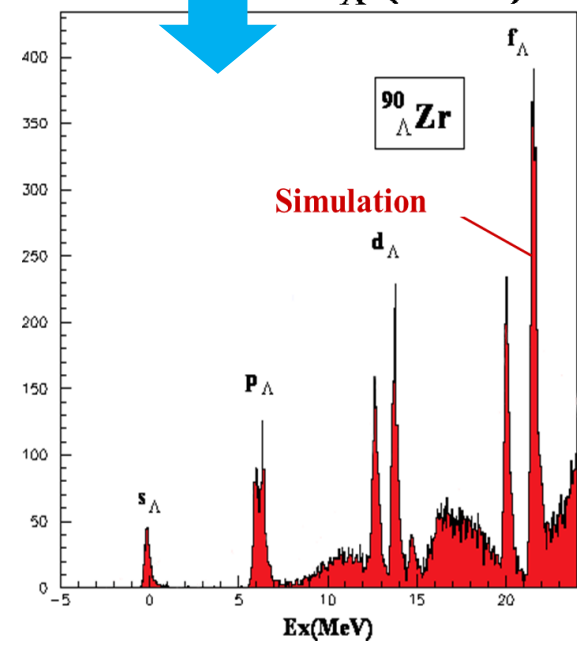
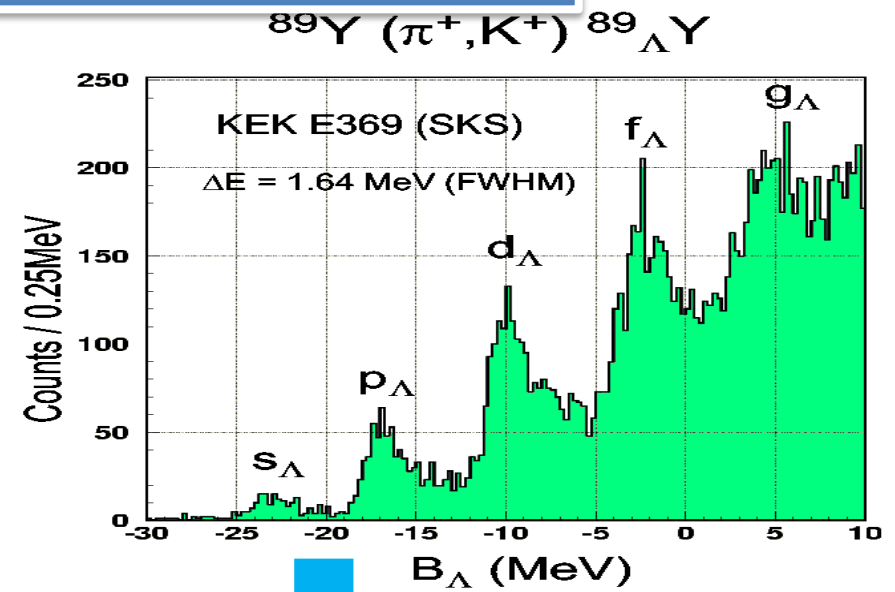
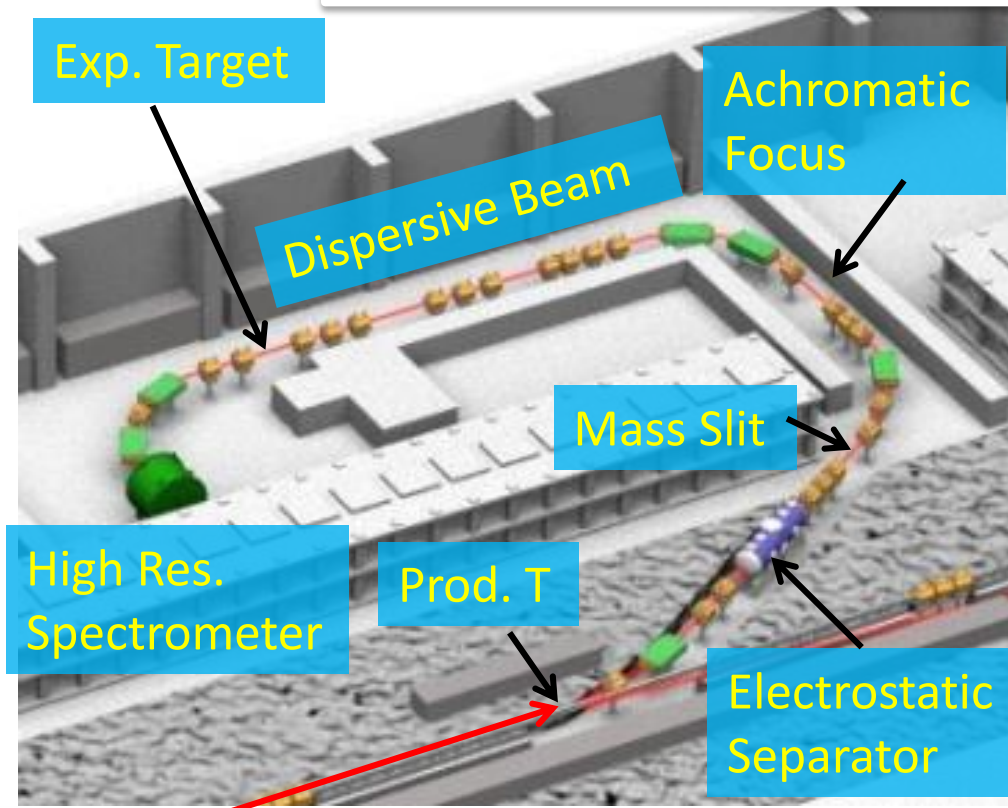


# Jlabでの高分解能ハイパー核分光





# J-PARCハドロン施設拡張での High-Intensity High-Resolution line (HIHR)



**Intensity:  $\sim 1.8 \times 10^8$  pion/pulse**  
**(1.2 GeV/c, 50 m, 1.4msr\*%,**  
**100kW, 6s spill, Pt 60mm)**  
 **$\Delta p/p \sim 1/10000$  ( $\Delta m \sim 200$  keV)**

**高分解能の( $\pi, K^+$ )ハイパー核分光へ**

# どこまでYN,YY相互作用は実験でわかったか？

Established Unknown 特に中性子星で重要

## ■ $\Lambda N$

- 引力  $U_{\Lambda} = -30 \text{ MeV}$  (核力の約 2/3) <- 広い質量数範囲の $\Lambda$ 単一粒子軌道の $B_{\Lambda}$
- $\Lambda$ スピン依存力(LS力、テンソル力、スピンスピン力) (核力の1/10以下)  
<- p-shell  $\Lambda$ 核のガンマ分光データ
- $\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合力, CSB ( $\Lambda p \neq \Lambda n$ )の原因 <- s-shell  $\Lambda$ 核の  $B_{\Lambda}$
- 中性子過剰環境下での $\Lambda N$ 力
- p-wave の $\Lambda N$ 力

## ■ YNN, YYN 力をどう理解するか？

## ■ $\Sigma N$

- 強いアイソスピン依存性 ( $T=3/2, S=0, T=1/2, S=1$ は引力) <-  ${}^4_{\Sigma}\text{He}$
- 斥力  $U_{\Sigma} \sim +30 \text{ MeV}$  <-  ${}^{28}\text{Si} (\pi, K^+)$  spectrum
- 各スピン・アイソスピン成分の強さ  
特に $T=3/2, S=1$  channel ( $\Sigma n$ 相互作用)の斥力の強さ

## ■ $\Xi N$

- 弱い引力  $U_{\Xi} < 0$  <-  ${}^{14}\text{N}$   $\Xi$ 束縛状態 (Kiso event)
- $U_{\Xi}$ の大きさ、アイソスピン依存性 ( $\Xi n$ 相互作用)

## ■ $\Lambda\Lambda$

- 弱い引力  $B(\Lambda-\Lambda) \sim 1 \text{ MeV}$  <-  ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$  (Nagara event)
- $\Lambda\Lambda$ - $\Xi N$ - $\Sigma\Sigma$  結合力、H dibaryonの存在

## おわりに

- ・中性子星の内部は、核物理の究極の目標「核物質EOS」と直結。
- ・中性子のフェルミエネルギーとハイペロンの引カポテンシャルから、中心部分にはハイペロンが発生するはず。
- ・重い中性子星は、現在の核物理が正しくないことを示す (Hyperon puzzle)。バリオン間力の真の理解および多体系の正しい扱い方が不可欠。
- ・ハイパー核とハイペロン散乱などのJ-PARC等での地上実験によって、YN, YY相互作用はわかりつつある。核力(バリオン力)の真の理解にもつながる。
- ・今後、ハイペロンを含む3体斥力の解明が鍵。

中性子星を契機に新世代の核物理を拓いてほしい。