

ストレンジネス核物理 の現状と展望



東北大学理学研究科 田村裕和
Tohoku University
H. Tamura

Contents

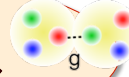
1. バリオン間相互作用と核物質
ハイパー核の精密構造とYN散乱
2. 核内ハドロン
核内 Λ のg因子と Λ 単一粒子軌道
3. 核構造
 Λ の不純物効果
4. おわりに

ストレンジネス核物理の意義

様々なストレンジ核・3次元核図表の拡大

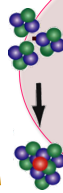
BB(バリオン間) 相互作用

u,d \rightarrow u,d,s 拡張によるBB間力の統一的理解、
特に短距離力のクォーク描像での理解
Lattice QCDの検証



不純物核物理

核の大きさ、変形、クラスター性、
集団運動などの(劇的)変化
新しい対称性の発現
ハイペロンを用いた通常核の
構造解明



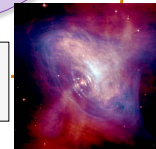
核内バリオンの性質変化

核内 μ_Λ や重い Λ 核一粒子軌道から
カイラル対称性の破れと
核子スピン・質量の起源の理解へ



クォーク \rightarrow ハドロン \rightarrow 原子核
の首尾一貫した真の理解

低温高密度核物質の
解明



1. バリオン間相互作用と核物質

分かってきたこと:

- ・ハイパー核を通したYN, YY相互作用の情報の一部

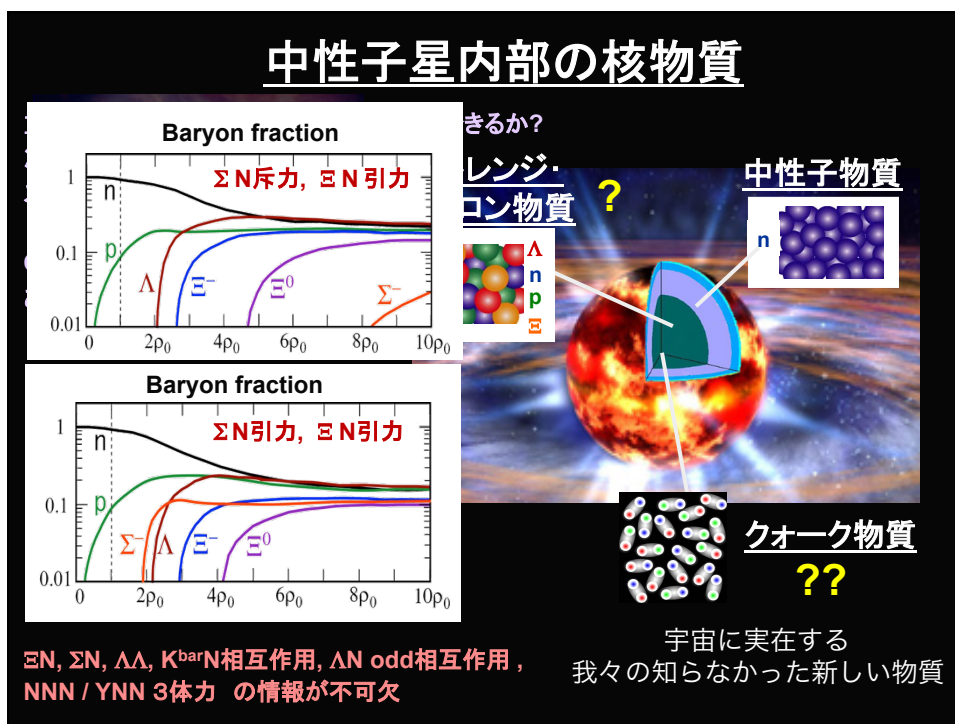
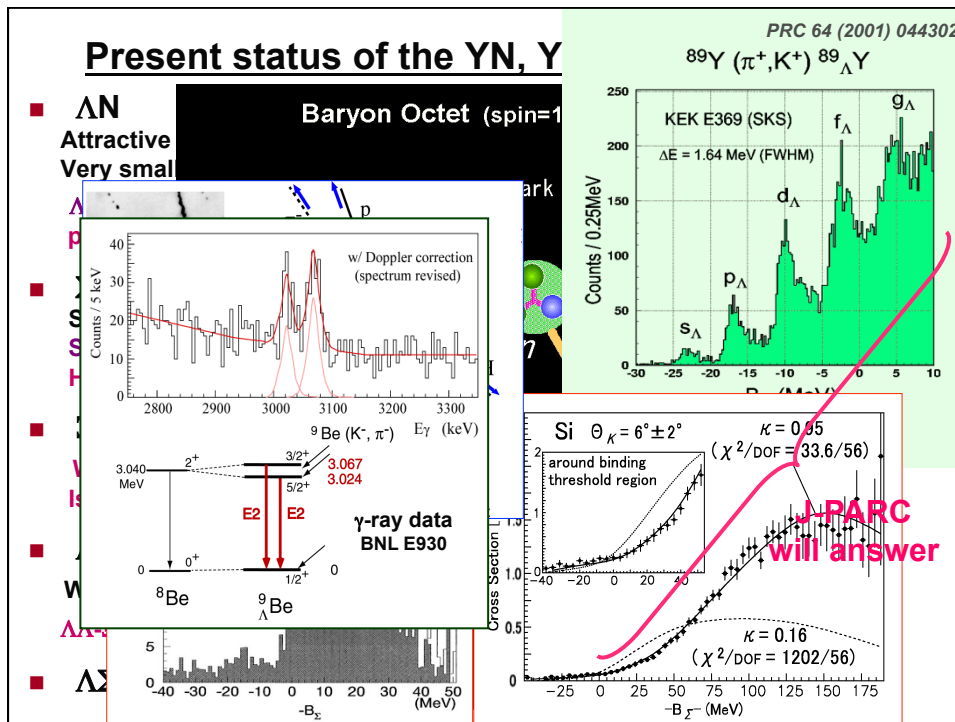
今後必要なこと:

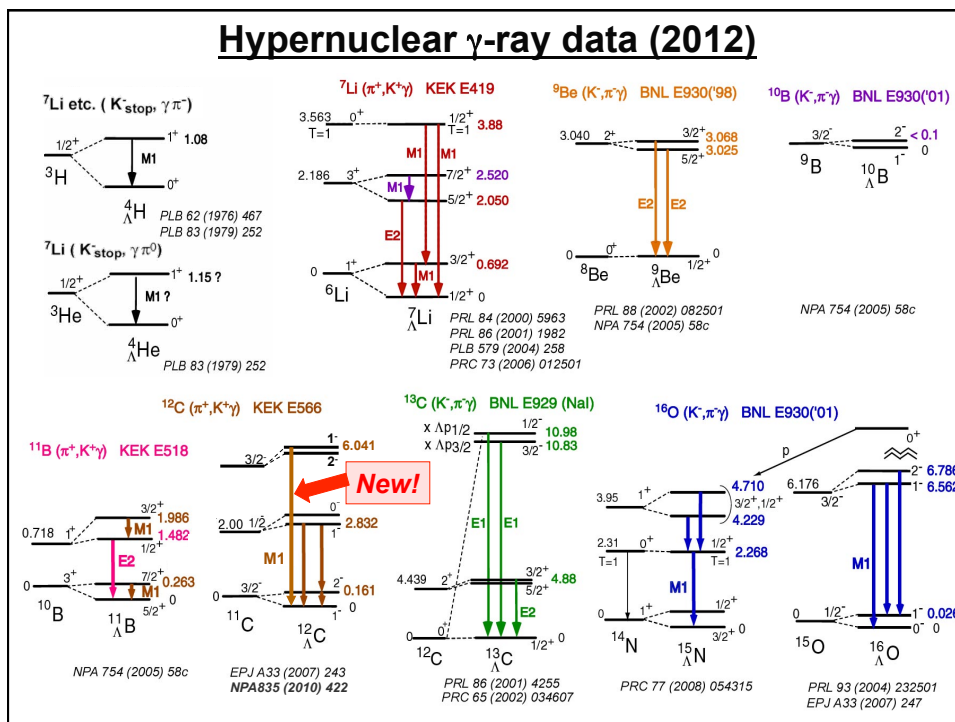
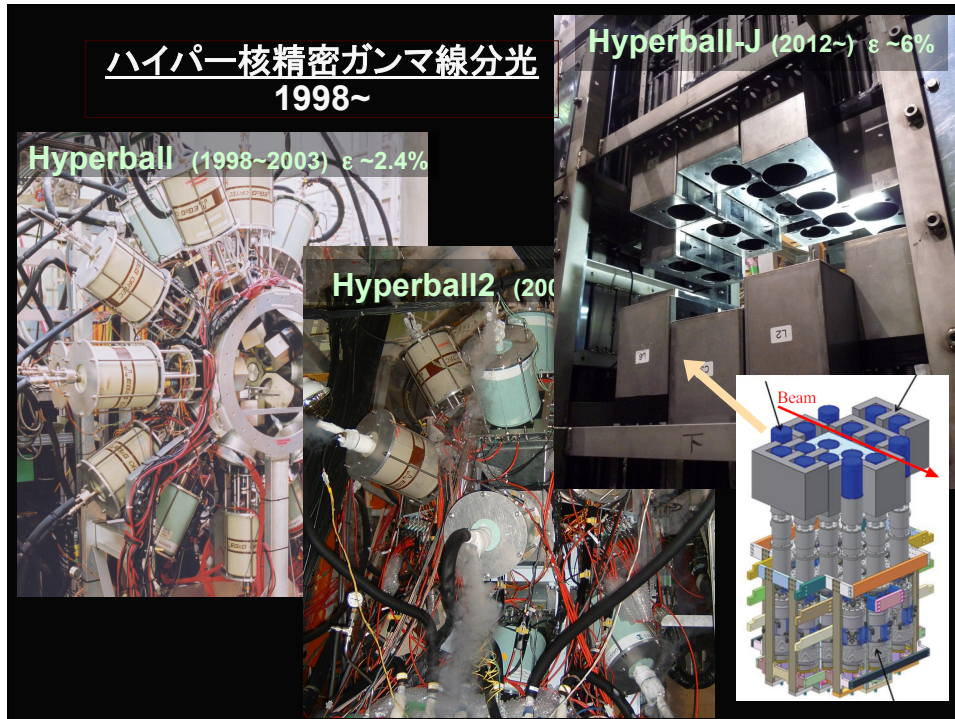
- ・ハイパー核を通したYN, YY相互作用の情報 (特に $-S \geq 2$, 3体力)
- ・散乱実験によるYN相互作用の情報
(ΛN , ΣN , ΞN ; 広いエネルギー範囲, スピン・アイソスピン依存性)
- ・K中間子核による $K^{\text{bar}}N$ 相互作用の情報
- ・Charmed baryon への拡張
- ・Lattice計算による情報

\rightarrow バリオン間力の理論的枠組みの完成

- ・短距離間力のクォーク描像による理解の確立
- ・中間子交換模型の適用範囲
- ・EOSへの適用 (密度依存性、3体力も記述)

“核力の理解と中性子星の理解”





ΛN スピン依存相互作用

Two-body ΛN effective interaction

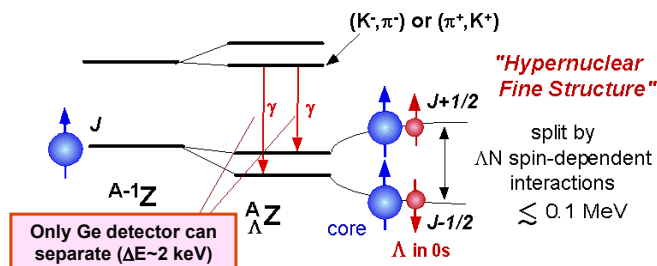
Dalitz and Gal, Ann. Phys. 116 (1978) 167
Millener et al., Phys. Rev. C31 (1985) 499

$$V_{\Lambda N}^{\text{eff}} = V_0(r) + V_\sigma(r) \hat{s}_\Lambda \hat{s}_N + V_\Lambda(r) \hat{l}_{\Lambda N} \hat{s}_\Lambda + V_N(r) \hat{l}_{\Lambda N} \hat{s}_N + V_T(r) S_{12}$$

\bar{V} Δ S_Λ S_N T

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

p -shell: 5 radial integrals for $s_\Lambda p_N$ w.f.
 $\Delta = \int V_\sigma(r) |u(r)|^2 r^2 dr, \quad r = r_{s_\Lambda} - r_{p_N}$



γ -線データ $\Rightarrow \Delta = 0.33$ (0.43 for $A=7$), $S_\Lambda = -0.01$, $S_N = -0.4$, $T = 0.03$ [MeV]
 すべてのスピン依存力が小さいことが確立

ハイパー核レベルエネルギーの再現

Millener's parameter set

$A=7-9 \quad \Delta = 0.430 \quad S_\Lambda = -0.015 \quad S_N = -0.390 \quad T =$
 $A=10-16 \quad \Delta = 0.330 \quad S_\Lambda = -0.015 \quad S_N = -0.350 \quad T =$

Calculated from G-matrix using ΛN - ΣN force in NSC97f



doublet spacing

contribution of each term (keV)

	J_u^π	J_l^π	$\Lambda\Sigma$	Δ	S_Λ	S_N	T	ΔE^{th}	ΔE^{exp}
${}^7_\Lambda\text{Li}$	$3/2^+$	$1/2^+$	72	628	-1	-4	-9	693	692
${}^7_\Lambda\text{Li}$	$7/2^+$	$5/2^+$	74	557	-32	-8	-71	494	471
${}^8_\Lambda\text{Li}$	2^-	1^-	151	396	-14	-16	-24	450	(442)
${}^9_\Lambda\text{Li}$	$5/2^+$	$3/2^+$	116	530	-17	-18	-1	589	
${}^9_\Lambda\text{Li}$	$3/2_2^+$	$1/2^+$	-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

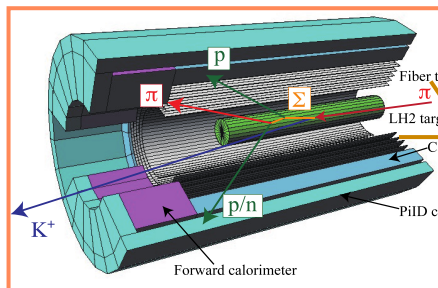
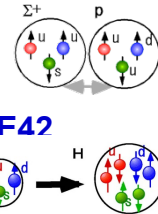
D.J. Millener, J.Phys.Conf.Ser. 312 (2011) 022005

斥力芯の起源を解明する

Oka-Yazaki 's QCM: (confirmed by Lattice)

■ Quark Pauli effect --- Σ^+p interaction **E40**

■ Color magnetic interaction - H diharvon **F42**



**J-PARC E40 (Miwa et al.)
 Σp Scattering Experiment**

MPPC+Sci.fiber

- Σ^+p production by $1.3 \text{ GeV/c } \pi^- p \rightarrow K^+ \Sigma^-$
- Σ^+p track not directly measured
- Measure proton momentum vector
→ kinematically complete

⇒ $d\sigma/d\Omega$ for $\Sigma^+p, \Sigma^-p, \Sigma^-p \rightarrow \Lambda n$
($p_\Sigma = 400-700 \text{ MeV/c}$)

⇒ Phase shift of 3S_1 channel ⇒ confirm quark Paul effect

2. 核内バリオンの振る舞い

分かったこと:

- ・ハイパー核内での大まかな Λ 単一粒子軌道

今後必要なこと:

- ・ Λ ハイパー核を用いた核内バリオンの性質変化
g因子、 Λ 弱崩壊率 **spin-flip B(M1), weak decay,...**
- ・ Λ ハイパー核を用いた核内粒子軌道の精密研究
平均場理論の精密テスト、LS分岐の起源、
重い Λ 核にいたる詳細なレベル

→ 平均場とそこでのバリオンの振る舞いの理解

→ バリオンの質量やスピン、構造の理解への手がかり

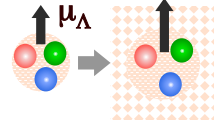
“原子核とハドロンの理解の深化”

核内 Λ の磁気モーメント

カイラル対称性の部分的回復で変化するか？

$$\mu_q = \frac{e\hbar}{2m_q c} \quad m_q: \text{Const. quark mass}$$

m_q は核内で減少 $\rightarrow \mu$ は増加？



\rightarrow constituent quarkとは？スピンの起源は？の理解の手がかり

Λ -スピン反転 M1 遷移の遷移確率 $B(M1)$

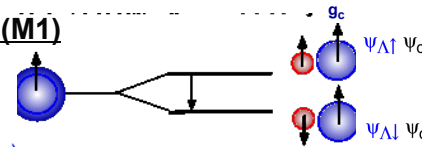
$$B(M1) = (2J_{up} + 1)^{-1} |\langle \Psi_{low} || \mu || \Psi_{up} \rangle|^2$$

$$= (2J_{up} + 1)^{-1} |\langle \Psi_{\Lambda} \Psi_c || \mu || \Psi_{\Lambda} \Psi_c \rangle|^2$$

$$\mu = g_c J_c + g_{\Lambda} J_{\Lambda} = g_c J + (g_{\Lambda} - g_c) J$$

$$= \frac{3}{8\pi} \frac{2J_{low} + 1}{2J_c + 1} (g_{\Lambda} - g_c)^2 \quad [\mu_N^2]$$

Λ スピンによる g_c の変化は小さい



$\sim 100\%$ Doppler Shift Attenuation Method

$$\Gamma = BR / \tau = \frac{16\pi}{9} E_{\gamma}^3 B(M1)$$

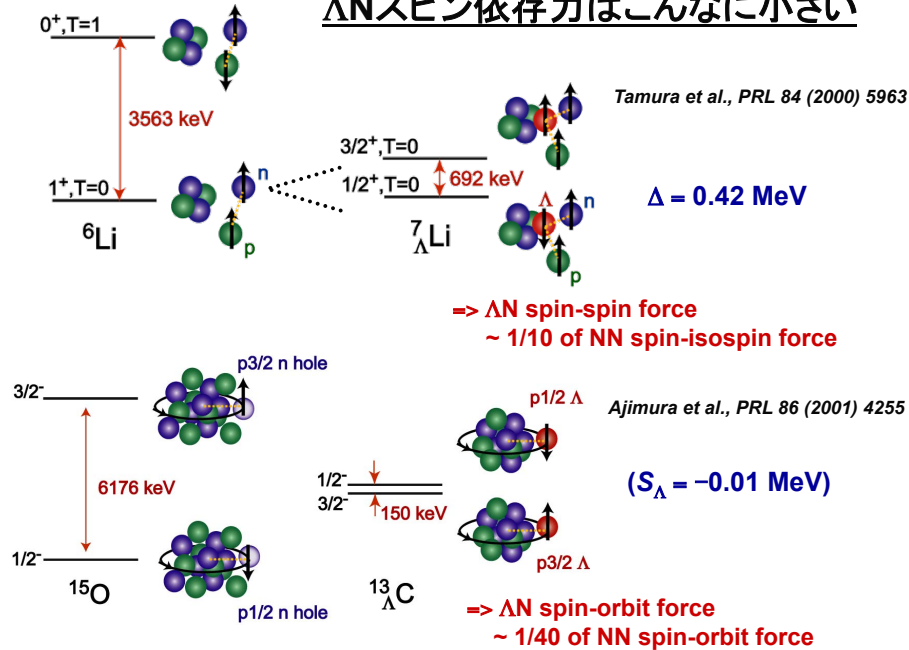
Prelim. data for ${}^7_{\Lambda}\text{Li}(3/2^+ \rightarrow 1/2^+)$ (BNL E930, M.Ukai)

$$g_{\Lambda} = -1.1^{+0.6}_{-0.4} \mu_N \quad \leftrightarrow \quad g_{\Lambda}(\text{free}) = -1.226 \mu_N$$

J-PARC E13 (Tamura et al.)
 γ spectroscopy of light Λ hypernuclei

$\Delta|g_{\Lambda} - g_c| \sim 3\%$ for ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$, $\sim 10\%$ for ${}^{19}_{\Lambda}\text{F}$
その後アイソスピン、密度依存性

ΛN スピン依存力はこんなに小さい



Λ の単一粒子軌道の測定

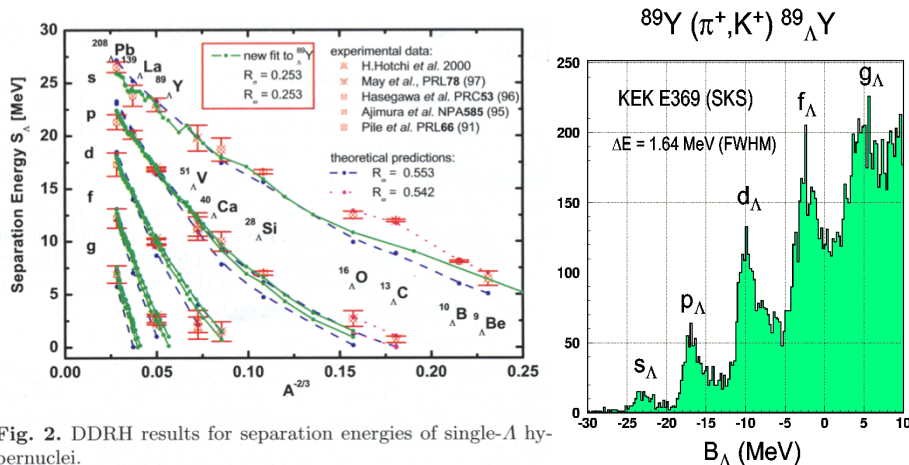


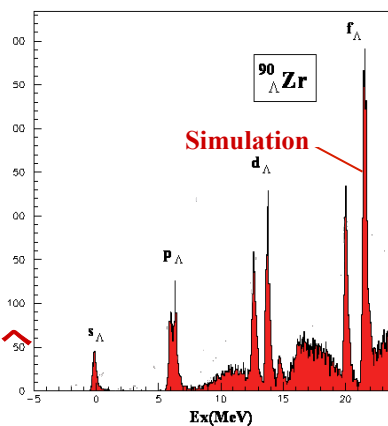
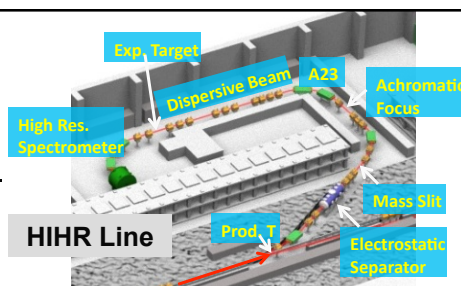
Fig. 2. DDRH results for separation energies of single- Λ hypernuclei.

- $E(s_\Lambda, p_\Lambda, d_\Lambda, f_\Lambda, \dots) < 0.1 \text{ MeV accuracy}$
High resolution (π^+, K^+), ($e, e'K^+$)
- $E(s_\Lambda) - E(p_\Lambda), E(p_{1/2\Lambda}) - E(p_{3/2\Lambda}) < 0.01 \text{ MeV accuracy}$
 γ spectroscopy for $E1(p_\Lambda \rightarrow s_\Lambda)$

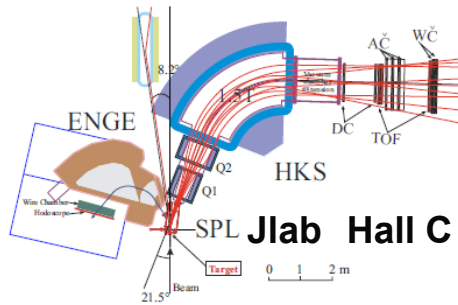
Λ 単一粒子軌道の 精密データから何がわかるか

- “単一粒子軌道”の起源の理解
平均場と有効相互作用の
物理的・定量的理解
- LS splittingの起源の定量的理解
(2体 LS力、テンソル力、多体相関?)
- 物理的理解に基づく正確なEOSの確立
→ 高密度核物質の理解
- 核内バリオンの核内バリオン間力の
媒質効果の影響

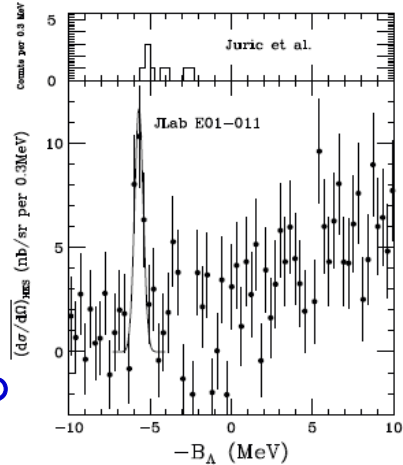
=> 原子核とハドロンのより深い理解へ



(e,e'K⁺) spectroscopy @ Jlab



$\Delta E \sim 600 \text{ keV (FWHM)}$

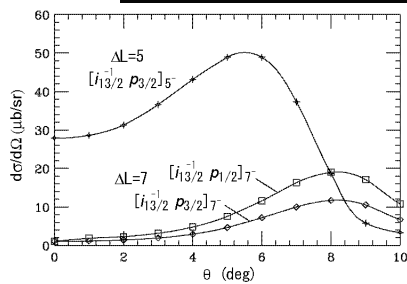


${}^7\text{Li}(e,e'K^+){}^7_\Lambda\text{He}$

${}^7_\Lambda\text{He}$, ${}^7_\Lambda\text{Li}^*$, ${}^7_\Lambda\text{Be}$ で ΛN 相互作用の荷電対称性の破れのテスト

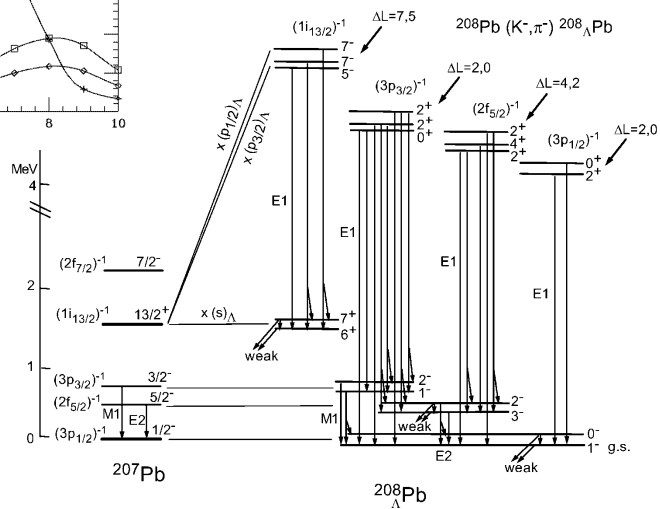
S.N. Nakamura et al., PRL 110 (2013) 012502

ガンマ線による LS splittingの精密測定へ



γ-spectroscopy of ${}^{208}_\Lambda\text{Pb}$

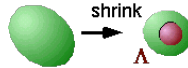
H. Tamura et al., J-PARC LOI



3. 不純物効果を用いた核構造の研究

分かったこと:

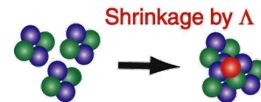
・ Λ による核収縮効果 (${}^7_{\Lambda}\text{Li}$)



今後必要なこと:

・「不純物効果」(収縮、ハローの消失、クラスター・球形転換、
変形や集団運動の変化)

の系統的研究



・ Λ 応答を用いた通常核の構造の理解

詳細なレベル構造, $B(E2)$, 生成断面積, ...

-> 核構造の理解、核構造理論の進化

“原子核構造の理解の深化へ”

おわりに

ストレンジネスを使って、

核力の問題、EOSの問題、平均場の問題、

ハドロン構造の問題、核構造の問題

= 核物理の本質的テーマ

を攻めるときが来た。

J-PARCハドロン施設の拡張・高度化

Jlab, Mainz, GSI/FAIR等海外との連携

理論とのますますの連携

をすすめたい。

山崎・中井(杉本)研の伝統を新時代の核物理研究に生かしたい