

これからのストレングス核物理



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
2. 核内ハドロン
3. 核構造
4. 今後の実験の進め方

1. バリオン間相互作用と核物質

分かってきたこと:

- ・ハイパー核を通じたYN, YY相互作用の情報の一部

今後必要なこと:

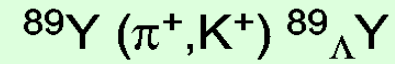
- ・ハイパー核を通じたYN, YY相互作用の情報 (特に $-S \geq 2$, 3体力)
- ・散乱実験によるYN相互作用の情報
($\Lambda N, \Sigma N, \Xi N$; 広いエネルギー範囲, スピン・アイソスピン依存性)
- ・K中間子核による $K^{\text{bar}}N$ 相互作用の情報
- ・Charmへの拡張
- ・Lattice計算による情報

→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)

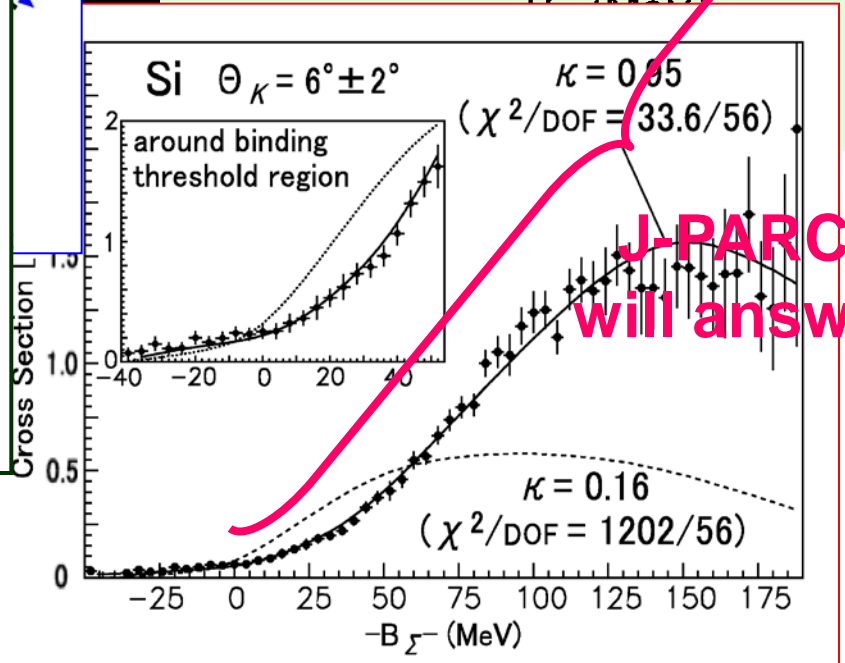
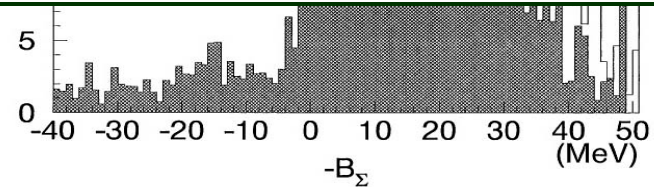
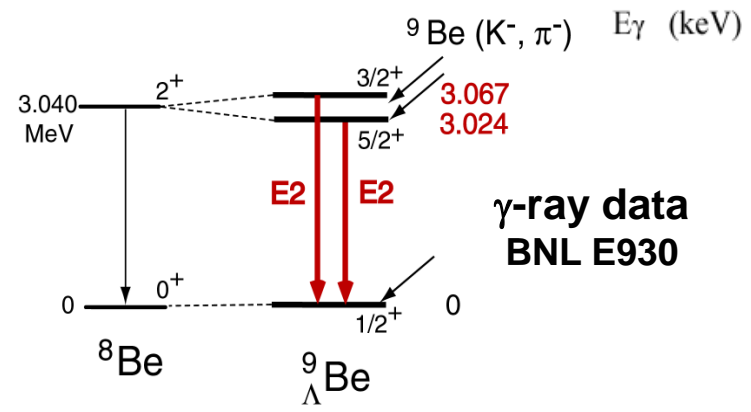
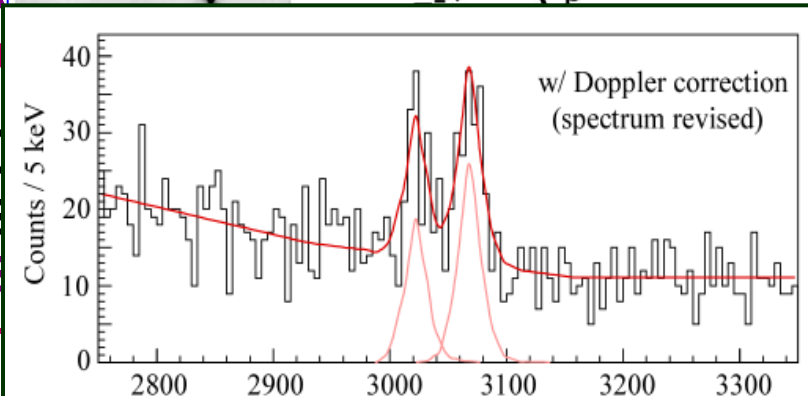
“核力の理解と中性子星の理解”

Present status of the ΛN , ΣN , $\Sigma \Lambda$, $\Sigma \Sigma$, $\Sigma \Lambda \Lambda$, $\Lambda \Lambda \Sigma$



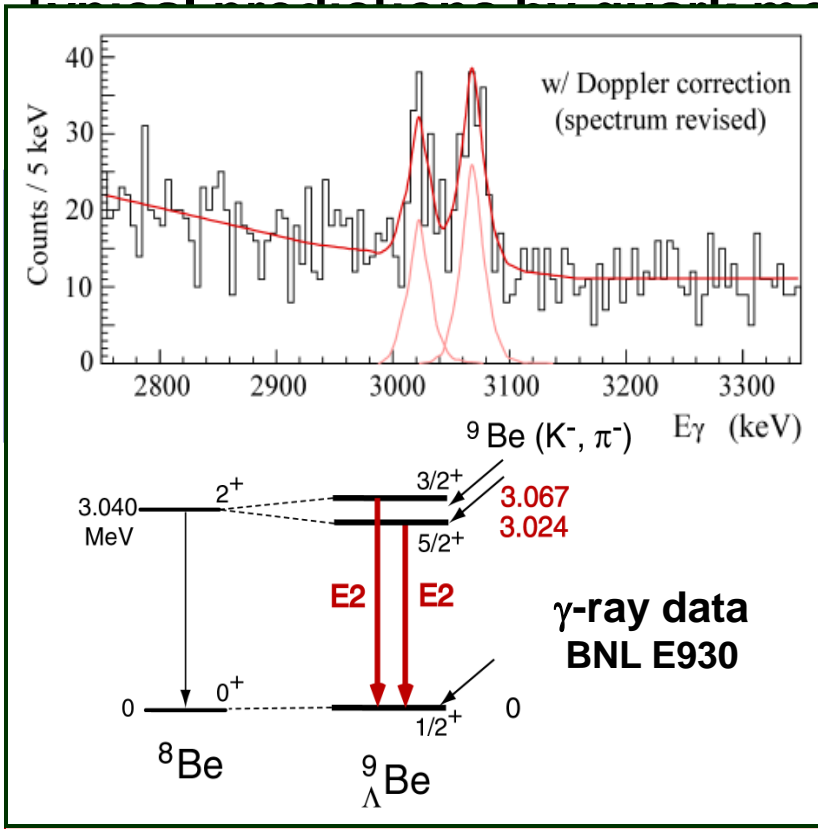
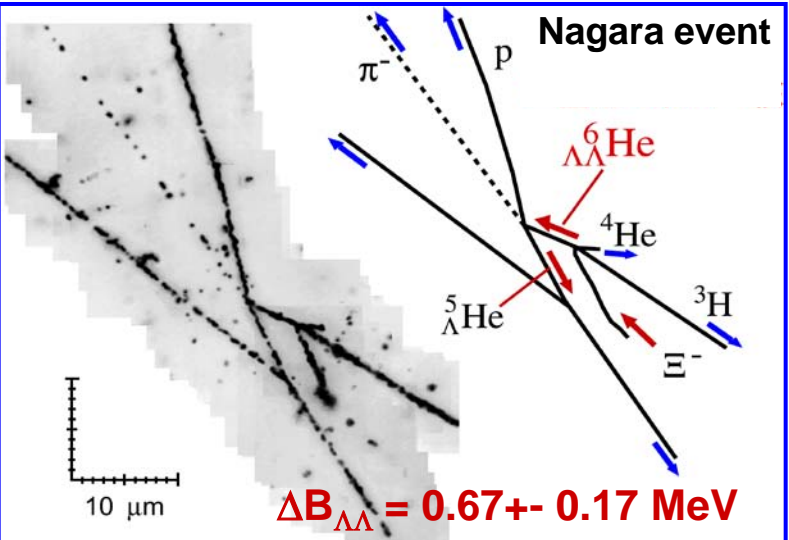
- ΛN
- Attractive
- Very small

Baryon Octet (spin=1/2)



**J-PARC
will answer**

Understanding baryon-baryon interactions in terms of quark models



Models

-> "H dibaryon"

Exist!

Hypernuclei

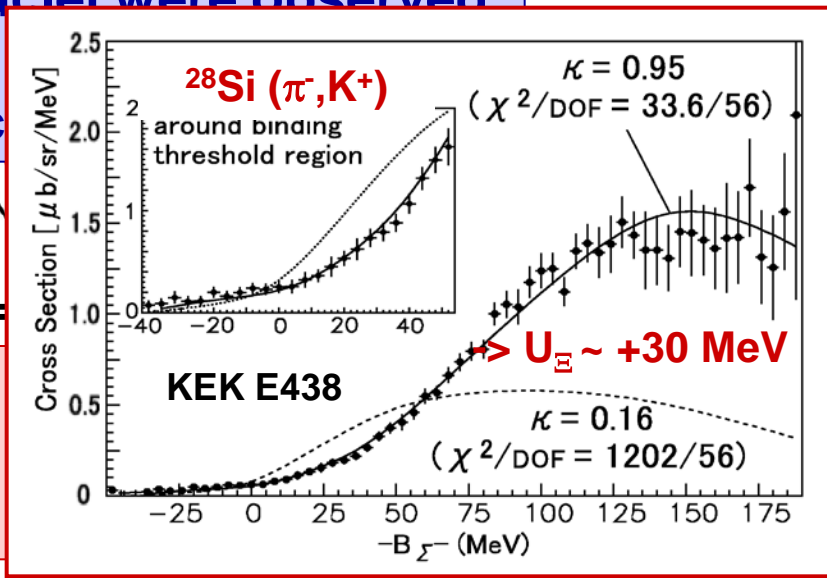
Stability

of $\Lambda\Lambda$ nuclei

Why?

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

potential is



■ **LS force** Λ -N ($L_{\Lambda N} S_{\Lambda}$) : almost zero

Σ -N ($L_{\Sigma N} S_{\Sigma}$) : as large as N-N

-- **Strangeness plays essential roles.**

Yes, it is ! (LS_{Λ} splitting ~ 0)

Yes, a suggestion exists.

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
($\Lambda N, \Sigma N, \Xi N$; 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
- ・Charmへの拡張
- ・Lattice計算による情報

→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”

High density matter in neutron stars

Large neutron Fermi energy -> Hyperons appear

Baryon fraction: sensitive to YN, YY interactions

-> Maximum mass, Cooling speed; **How to explain $M=1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$?**

Hypernuclear data -> realistic calculations possible

One probable assumption but should be determined by exp.

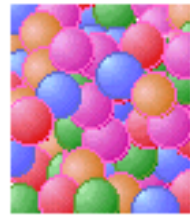
We still need

ΞN , $\Lambda\Lambda$, ΣN , $\bar{K}N$ forces, ΛN p-wave force,

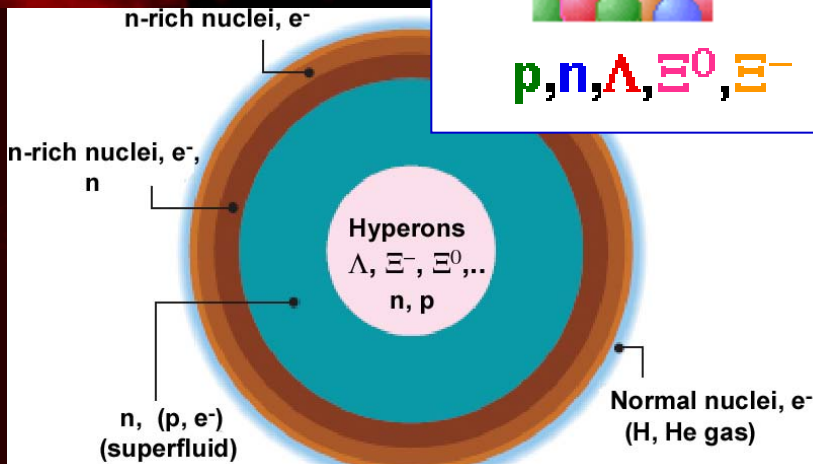
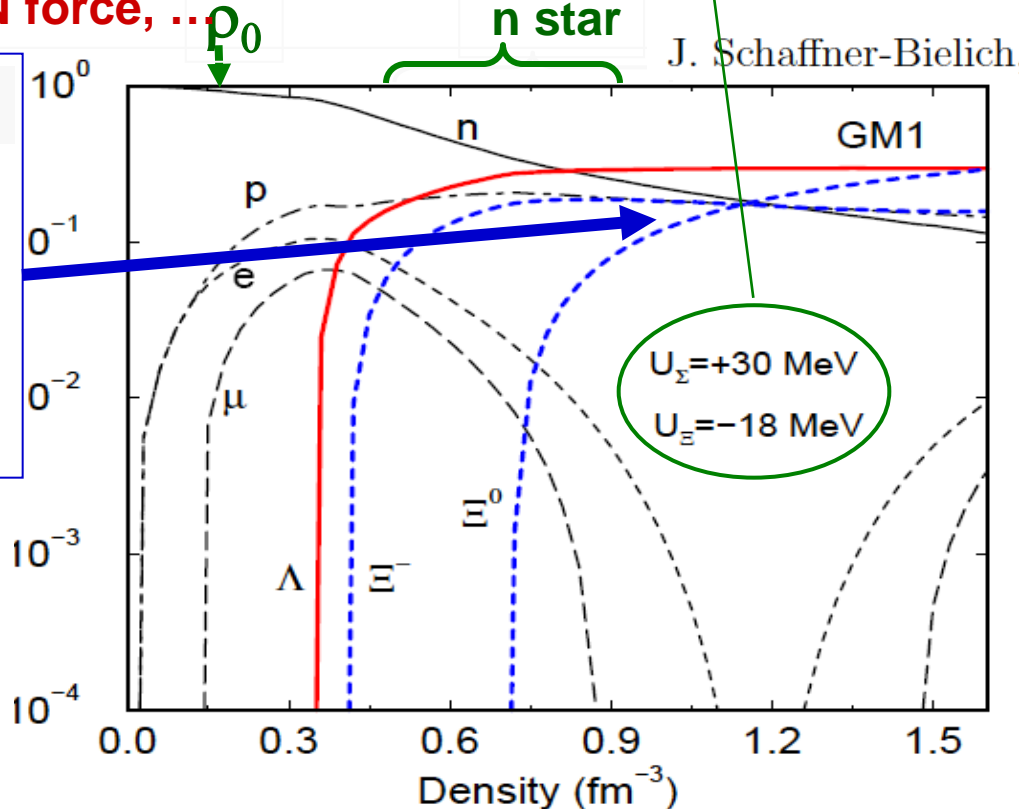
NNN and YNN force, ...



$N_u \sim N_d \sim N_s$



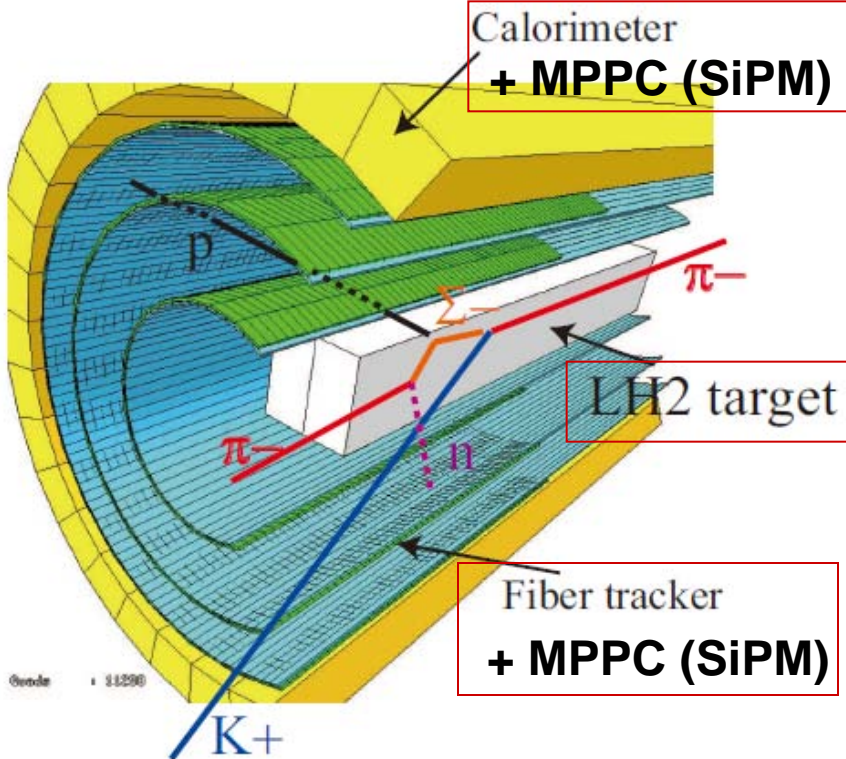
$p, n, \Lambda, \Xi^0, \Xi^-$



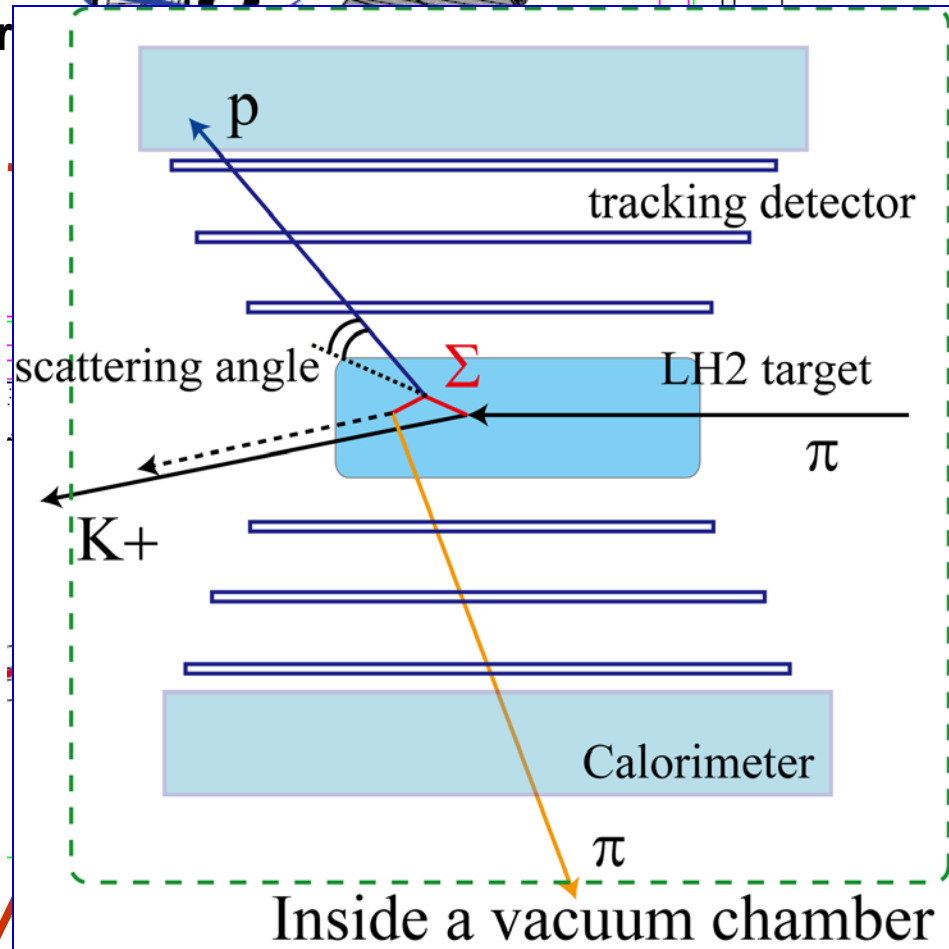
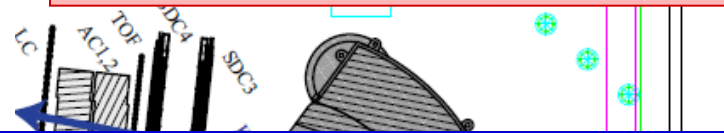
Miwa et al. (P40) YN Scattering Experiment

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

1.3 GeV/c



JPARC K1.8 beam line + SKS

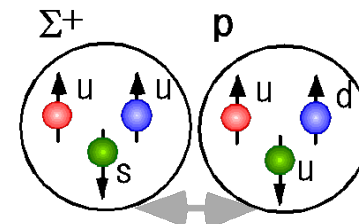


- Differential cross section of Σ^-p and Σ^+p scattering with 100 times larger statistics

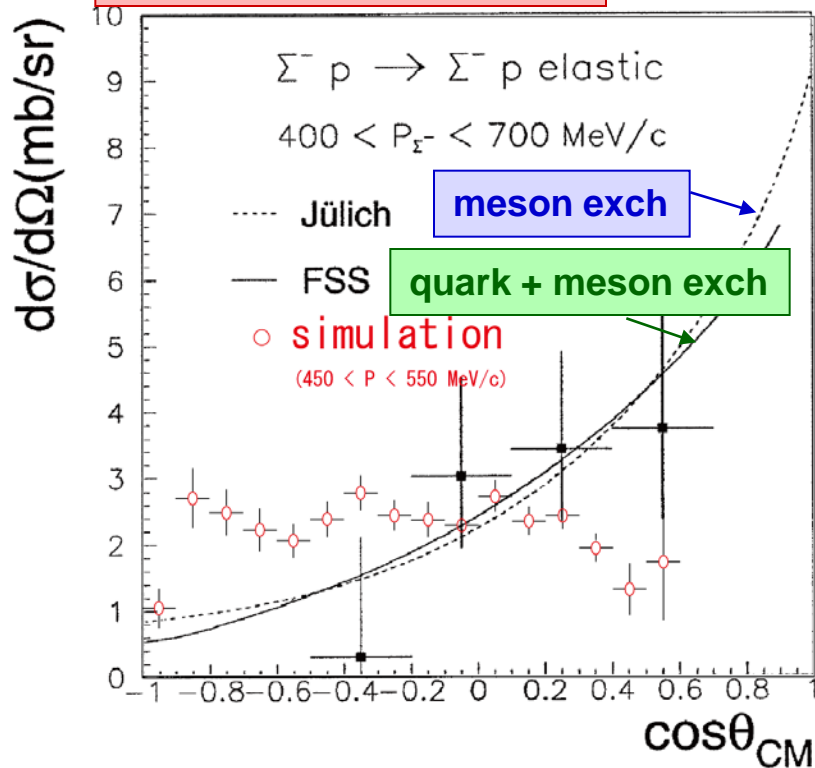
- $\Sigma^-p \rightarrow \Lambda n$ also measured

- Motivation: See “quark-Pauli effect”

$\Sigma N (S=1, I=3/2)$

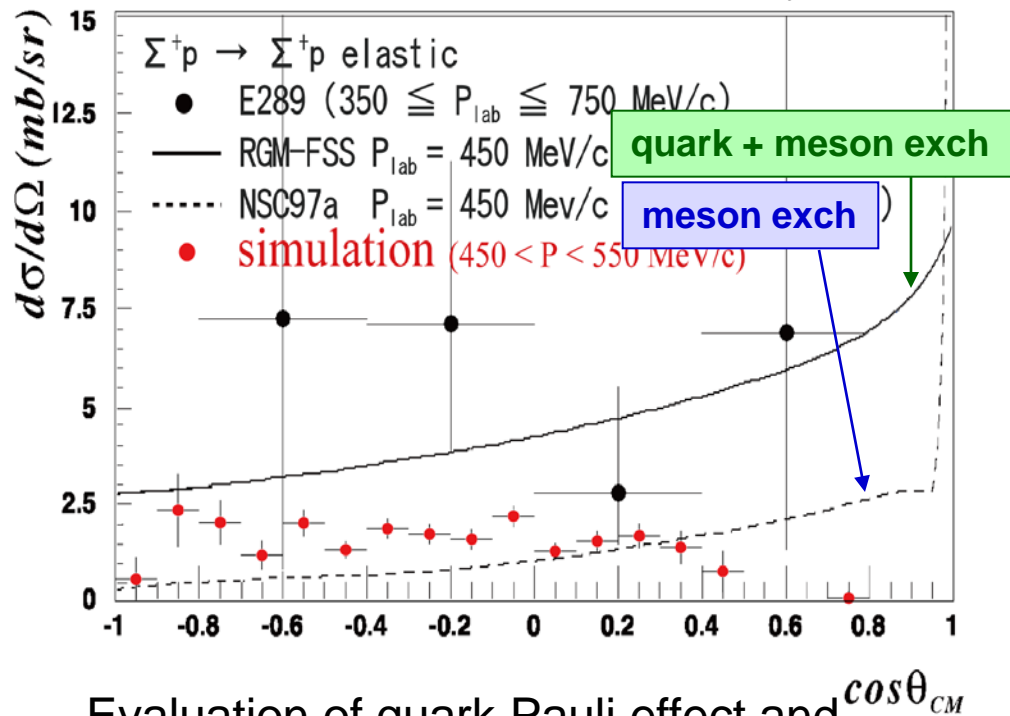


Σ^-p (No quark Pauli) 10 days



Check the theoretical frame work
 Extended to flavor SU(3) symmetry.

Σ^+p (quark Pauli) 17 days



Evaluation of quark Pauli effect and
 understanding the origin of the hard core
 of the nuclear force

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 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

“原子核とハドロンの理解の深化”

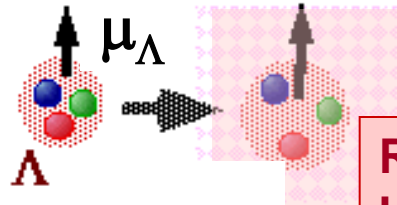
J-PARC E13 (Tamura et al.)

Gamma-ray spectroscopy of light hypernuclei

-- Baryon's magnetic moment in a nucleus

How the magnetic moment of baryons changes in a nucleus?

...can be measured using a Λ



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

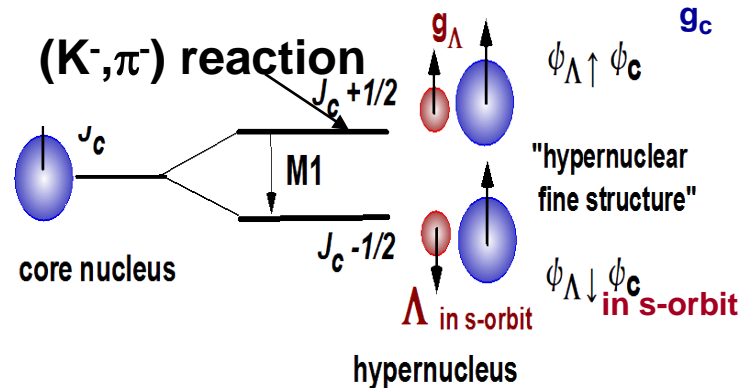
Reduction of m_q by chiral sym. restoration
-> enhancement of μ ??

Direct measurement of μ : extremely difficult

-> B(M1) gives g_Λ value

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

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



~100% **Doppler Shift Attenuation Method :**

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

(accuracy ~5%)

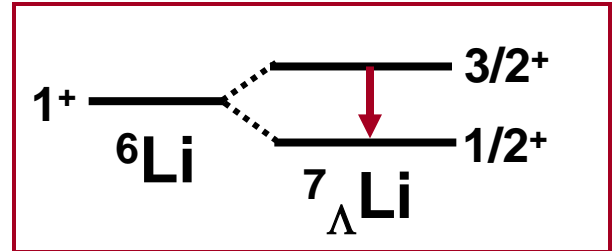
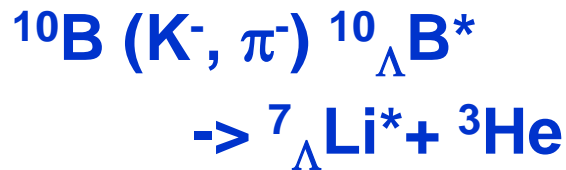
Applied to
“hypernuclear shrinkage” in ${}^7_\Lambda\text{Li}$ from B(E2)
Tanida et al., *PRL* 86 ('01)1982

Preliminary data on g_{Λ}

■ E930 (M. Uikai)

$$g_{\Lambda} = -1.1^{+0.6}_{-0.4} \mu_N$$

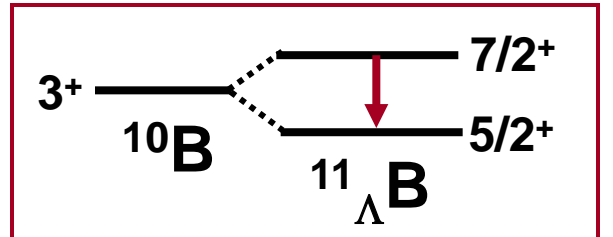
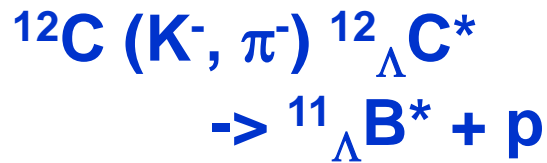
τ from DSAM



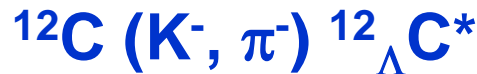
■ E566 (Y. Ma)

$$g_{\Lambda} > -1.76 \mu_N$$

τ from DSAM



$$g_{\Lambda} = -1.04 \pm 0.41 \mu_N$$



• Yield ratio for 161 keV / 2670 keV γ -rays

$$\rightarrow \text{Br}(2^- \rightarrow 1^-) = 0.19 \pm 0.12$$

• Weak decay rate of 2^- and 1^- are assumed

to be the same, $\Gamma_{\text{weak}} = (\text{lifetime } 230.7 \pm 6.3 \text{ ps})^{-1}$

$$\Rightarrow \Gamma_{M1} = \text{Br} / (1 - \text{Br}) \Gamma_{\text{weak}}$$

$$\leftrightarrow g_{\Lambda}(\text{free}) = -1.226 \mu_N$$

\Rightarrow J-PARC E13: $^7\text{Li} (\text{K}^-, \pi^-) ^7_{\Lambda}\text{Li}(3/2^+ \rightarrow 1/2^+) \sim 5\%$ accuracy for B(M1)

$^{19}\text{F} (\text{K}^-, \pi^-) ^{19}_{\Lambda}\text{F}(3/2^+ \rightarrow 1/2^+) \sim$ under estimate

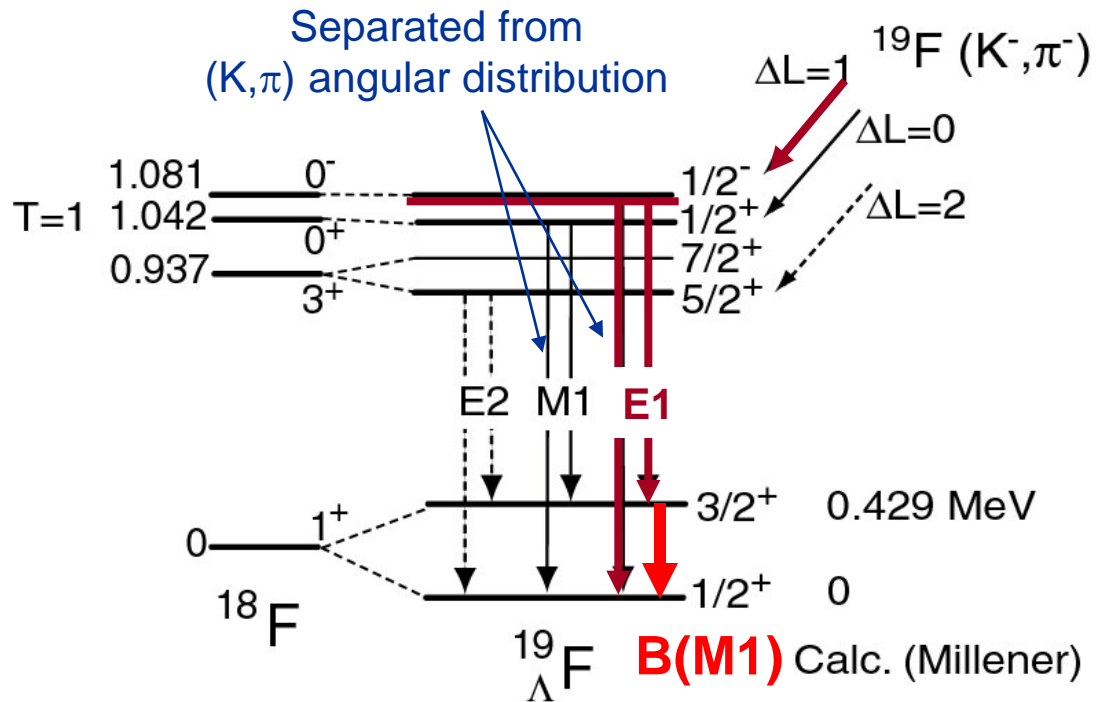
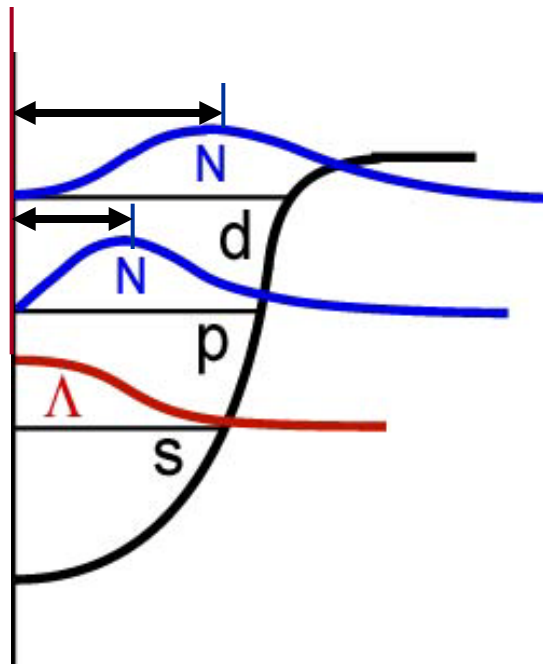
$^{19}_{\Lambda}$ F spectroscopy (E13)

The first sd-shell hypernuclear study

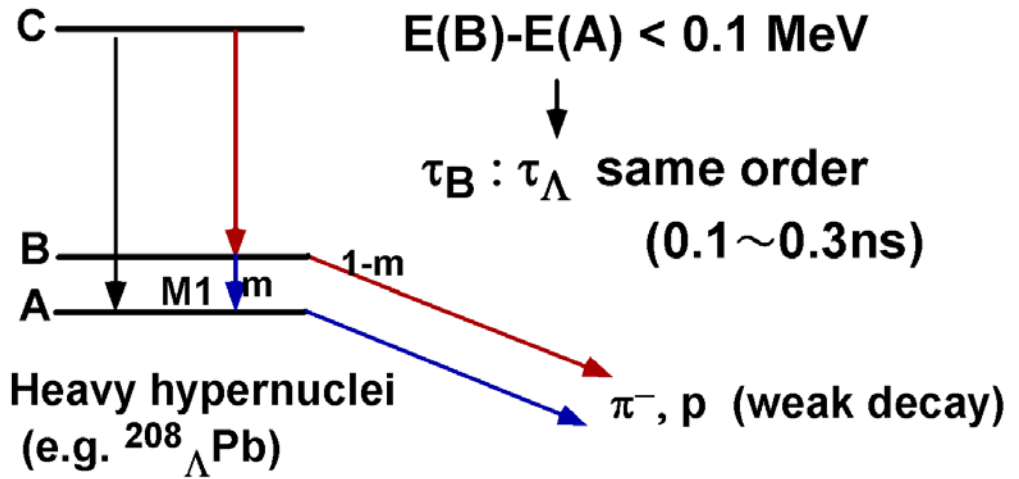
Radial dependence of Λ N spin-dependent interaction

--- sensitive to interaction range and exchanging mesons

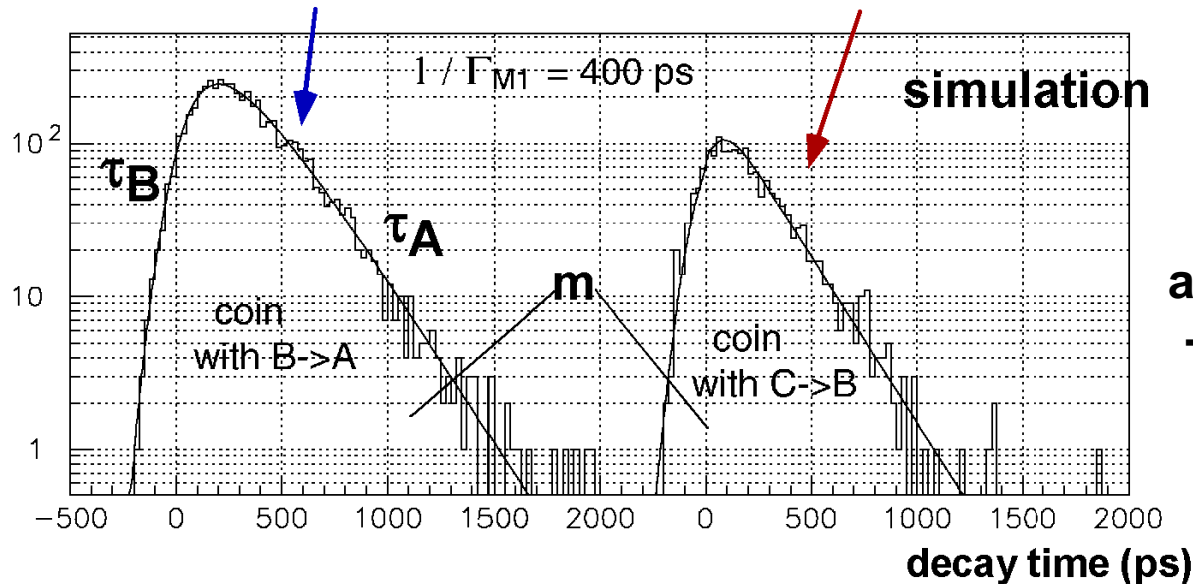
$$\bar{r}(s_{\Lambda}-d_N) > \bar{r}(s_{\Lambda}-p_N)$$



Future: B(M1) measurement by γ -weak coincidence method



Measure the time spectra of weak decay particles
 in coincidence with $B \rightarrow A$ γ ray and with $C \rightarrow B$ γ ray



$^{12}_\Lambda \text{C}$ case

900 hours, 9×10^6 K/spill
 at K1.1 (50 GeV full beam)
 -> 5% stat. error of B(M1)

-> m, τ_B

-> $m / \tau_B = \Gamma_{M1} \propto B(M1)$

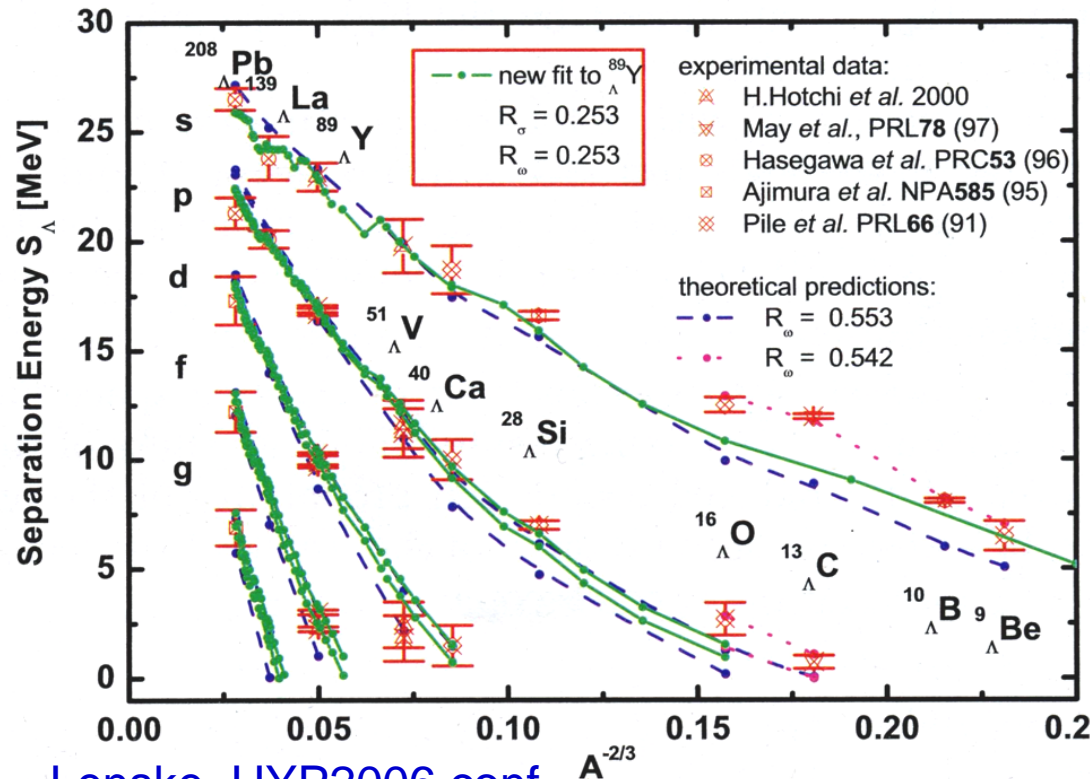
Single particle energies of Λ

Experimental data

$E(s_\Lambda, p_\Lambda, d_\Lambda, f_\Lambda, \dots) < 0.1$ MeV accuracy **high resolution (e,e'K⁺), (π^+ ,K⁺)**

$E(s_\Lambda) - E(p_\Lambda), E(p_{1/2_\Lambda}) - E(p_{3/2_\Lambda}) < 0.01$ MeV accuracy

γ spectroscopy for $E1(p_\Lambda \rightarrow s_\Lambda)$



Lenske, HYP2006 conf.

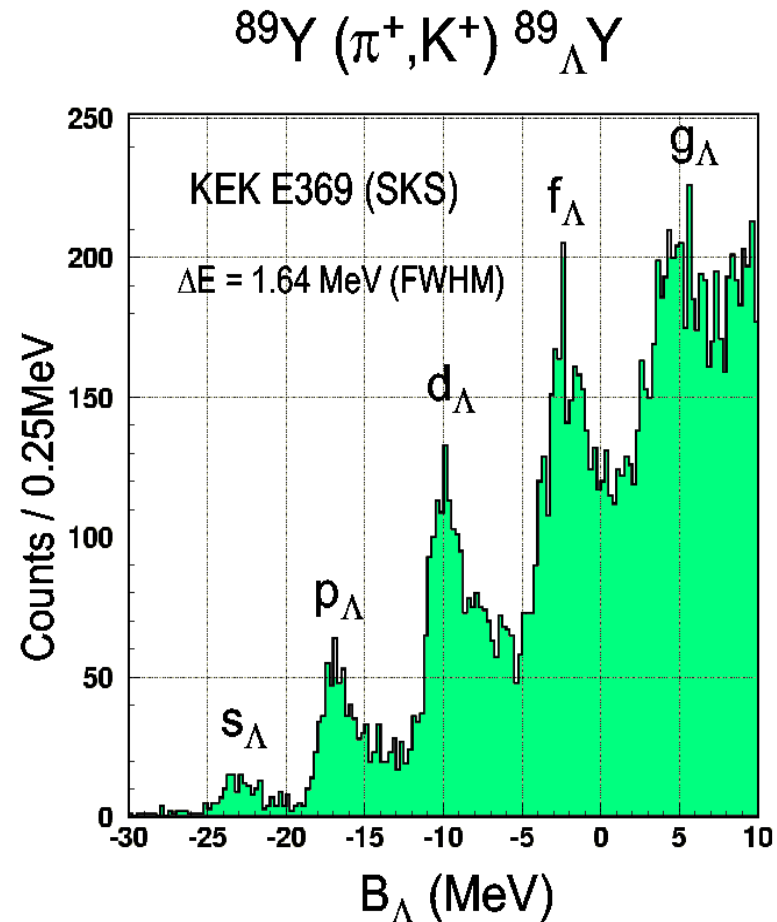
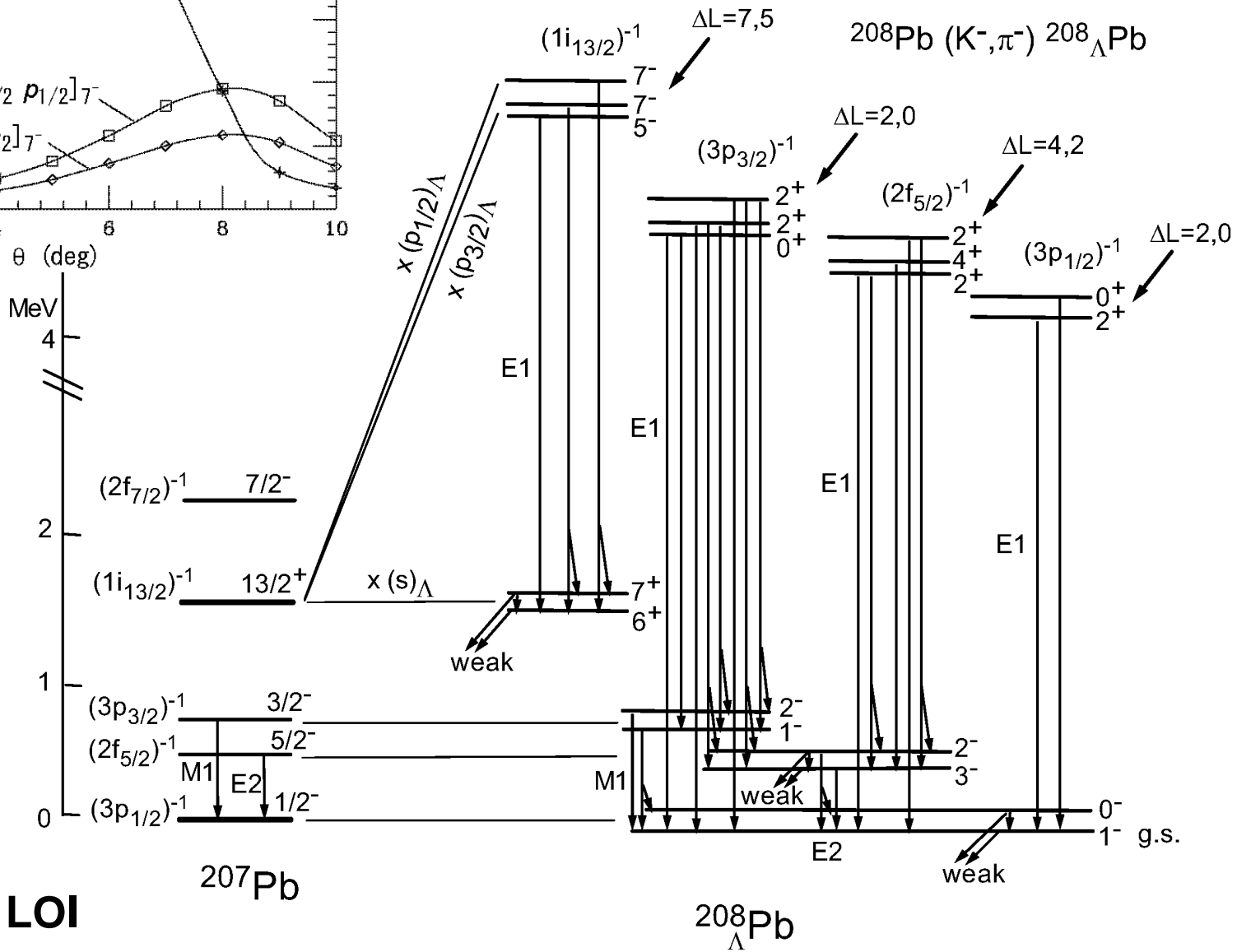
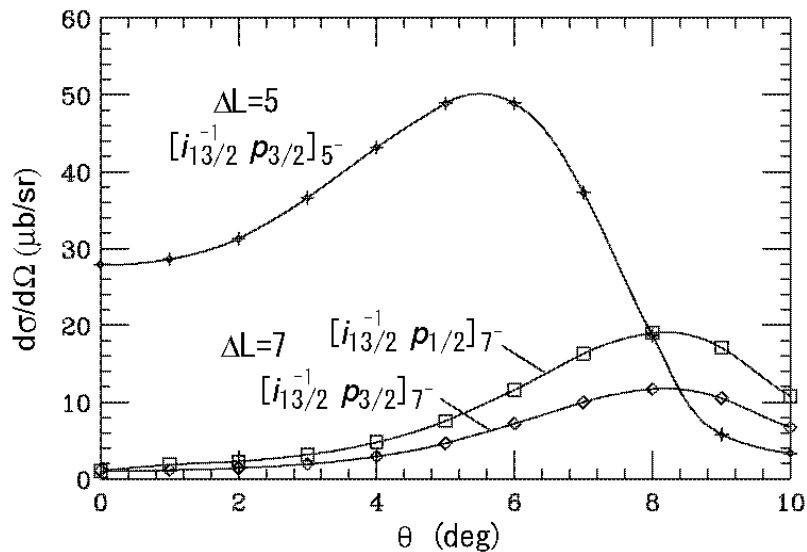


Fig. 2. DDRH results for separation energies of single- Λ hypernuclei.

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



from 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

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”

Λ hypernuclei: Impurity effect

γ spectroscopy + high resolution (e,e'K⁺), (π^+ ,K⁺)

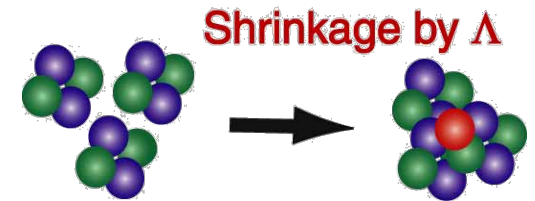
- Shrinkage of ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ from B(E2) confirmed

Tanida et al., *PRL* 86 ('01)1982

- Clustering of normal nuclei and their response to Λ

${}^9_{\Lambda}\text{Be}$, ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$, ${}^{20}_{\Lambda}\text{Ne}$, ..

→ clustering structure in ${}^8\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$



- Change of deformation / collective motions
sd-shell hypernuclei

${}^{23,24}_{\Lambda}\text{Na}$, ${}^{24,25,26}_{\Lambda}\text{Mg}$, ...

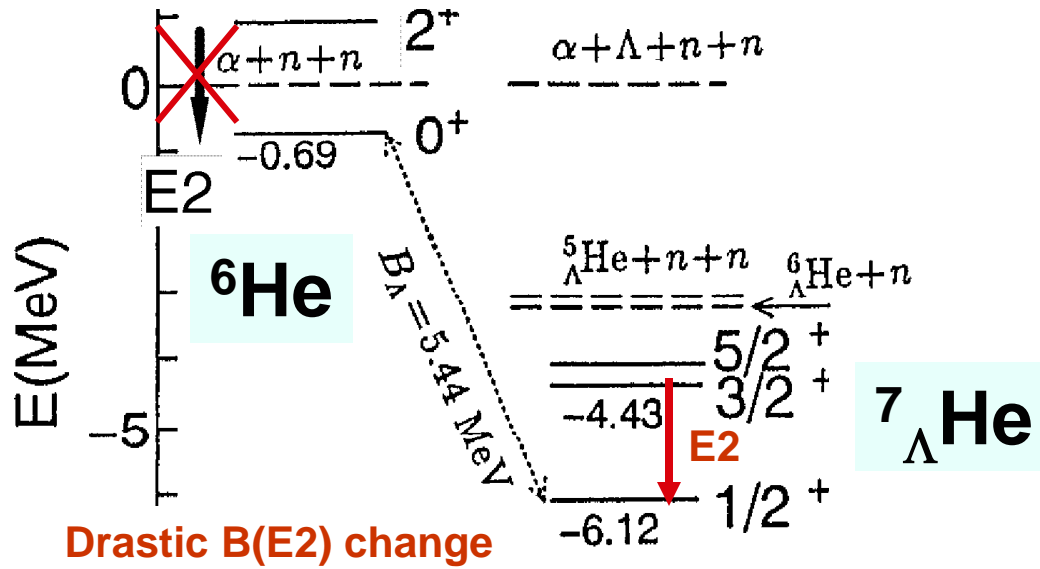


- Disappearance of neutron halo: B(E2) in ${}^7_{\Lambda}\text{He}$

Disappearance of n-halo by a Λ ?

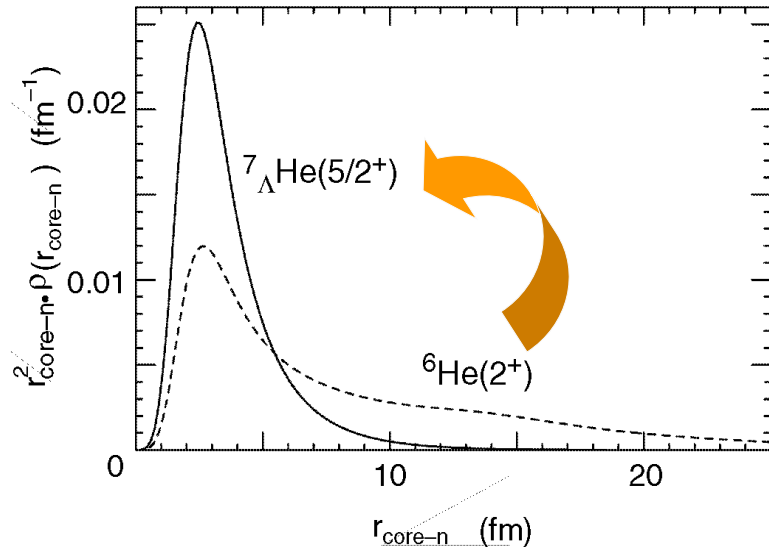
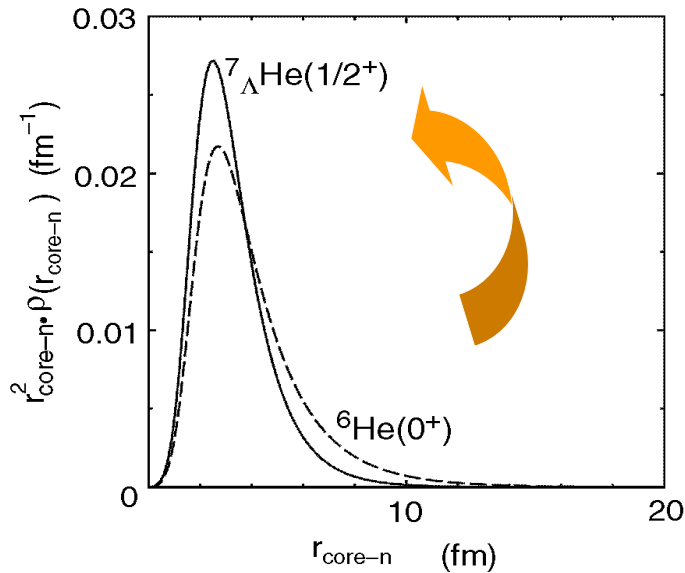
${}^7\text{Li} (\text{K}^-, \pi^0 \gamma) {}^7_{\Lambda}\text{He}$ reaction
with Hyperball-J at K1.1

Calc. by Hiyama



Drastic B(E2) change

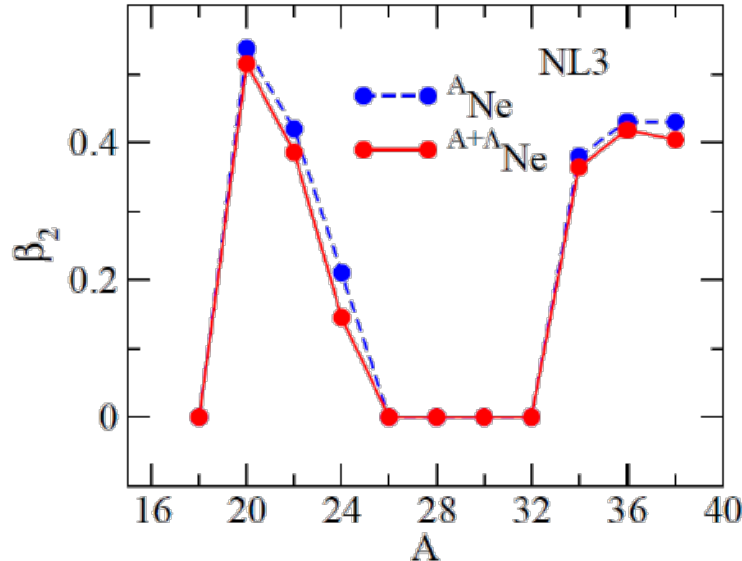
0.58	$B(E2) \text{ e}^2 \text{fm}^4$	0.068
	\longrightarrow	0.059



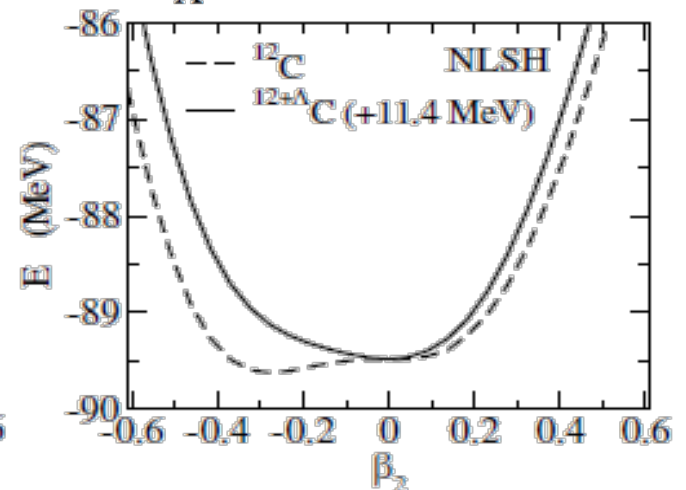
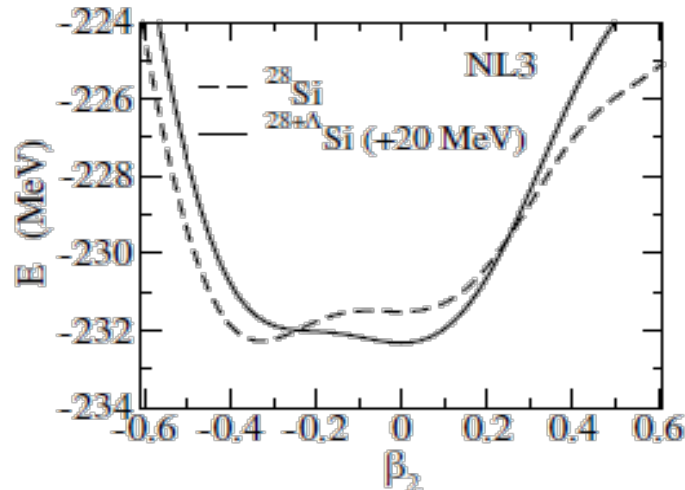
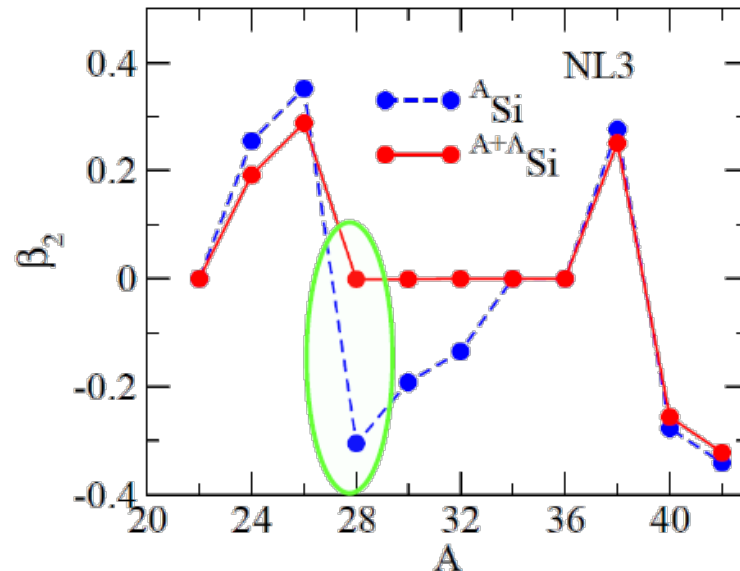
Impurity effect in deformation

Myaing Thi Win and K.Hagino, Phys. Rev. C78, 054311 (2008) RMF calc.

Ne isotopes



Si isotopes



T. Koike, Plans to investigate ${}^{24,25,26}_{\Lambda}\text{Mg}$ hypernuclei

今後の方針(実験)

完成
予算化済み
申請中
構想中

J-PARC

- ・遅い取り出しビームのduty改善、強度増加、ビームタイム増加
- ・ビームライン増強 **K1.1, HR-line**
- ・装置の増強・開発

K1.8/SKS、Hyperball-J、S2S(永江)、Hybrid-emulsion(仲澤)、

YN散乱装置(三輪・田村)、TPC(高橋)、High-rate trackers(高橋・田村)、

- ・**ハドロンホールの拡張(理研)**

- 様々なビームと様々な装置による実験が同時に実施できること
- 学生が育ちコミュニティが大きくなること

JLab, MAMI-C, GSIとの連携

- 研究者の世界的広がり

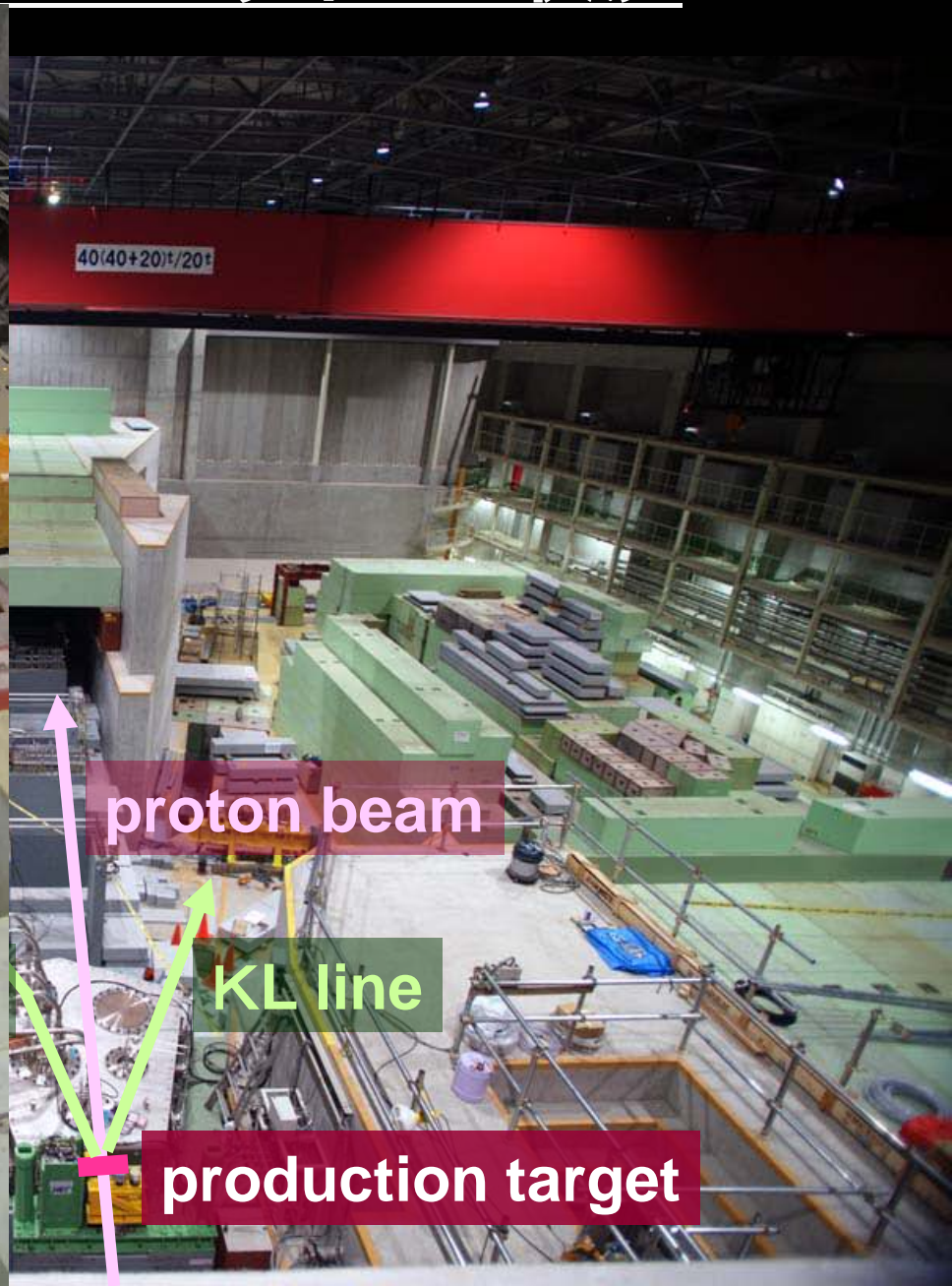
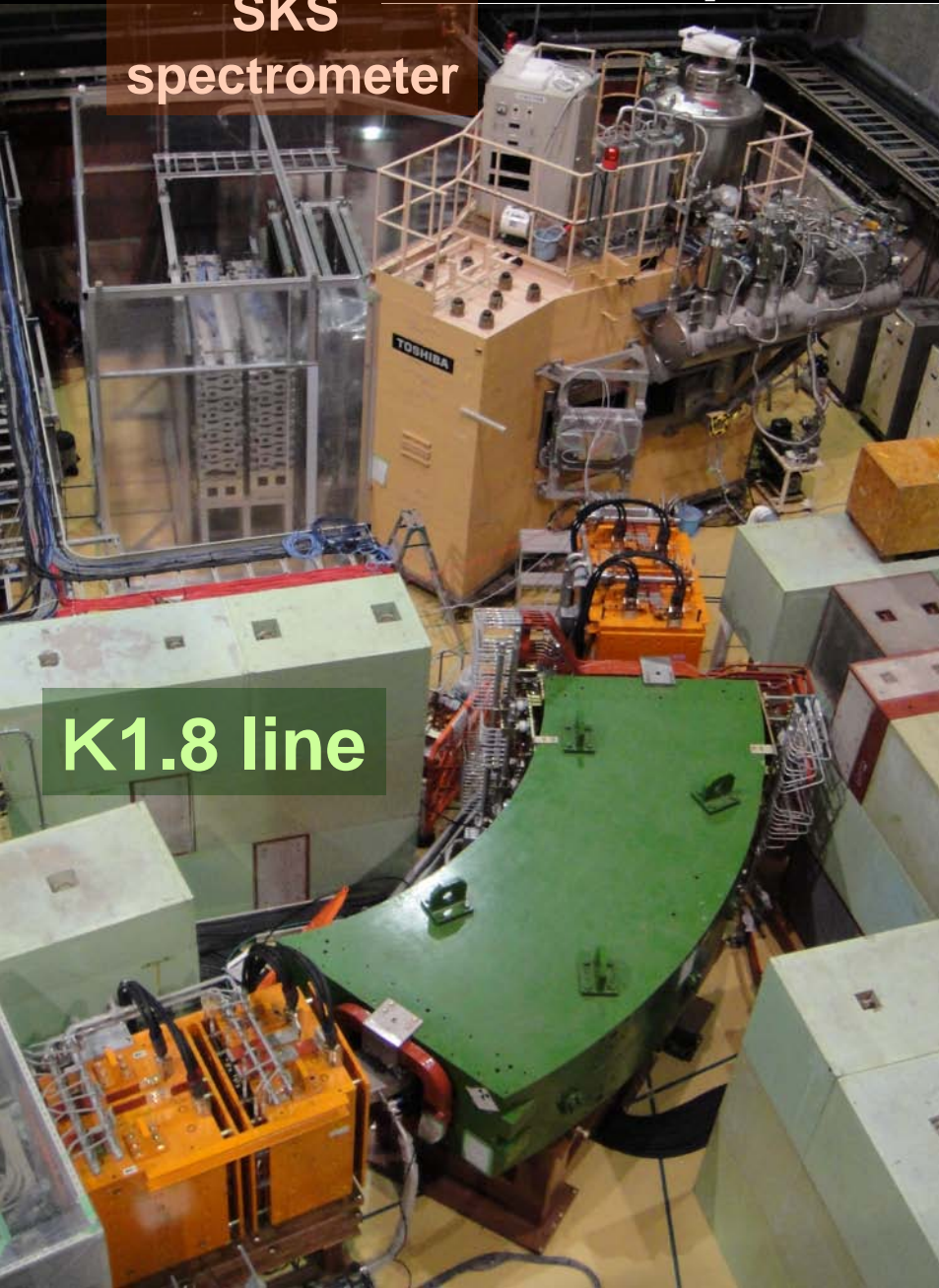
橋本Core-to-core(国際戦略型) 2011-2013

**(Establishing International collaboration Platform
for Strangeness Nuclear Physics by Electron Beams)**

ハドロンホールとK1.8ラインの状況

SKS
spectrometer

K1.8 line



40(40+20)t/20t

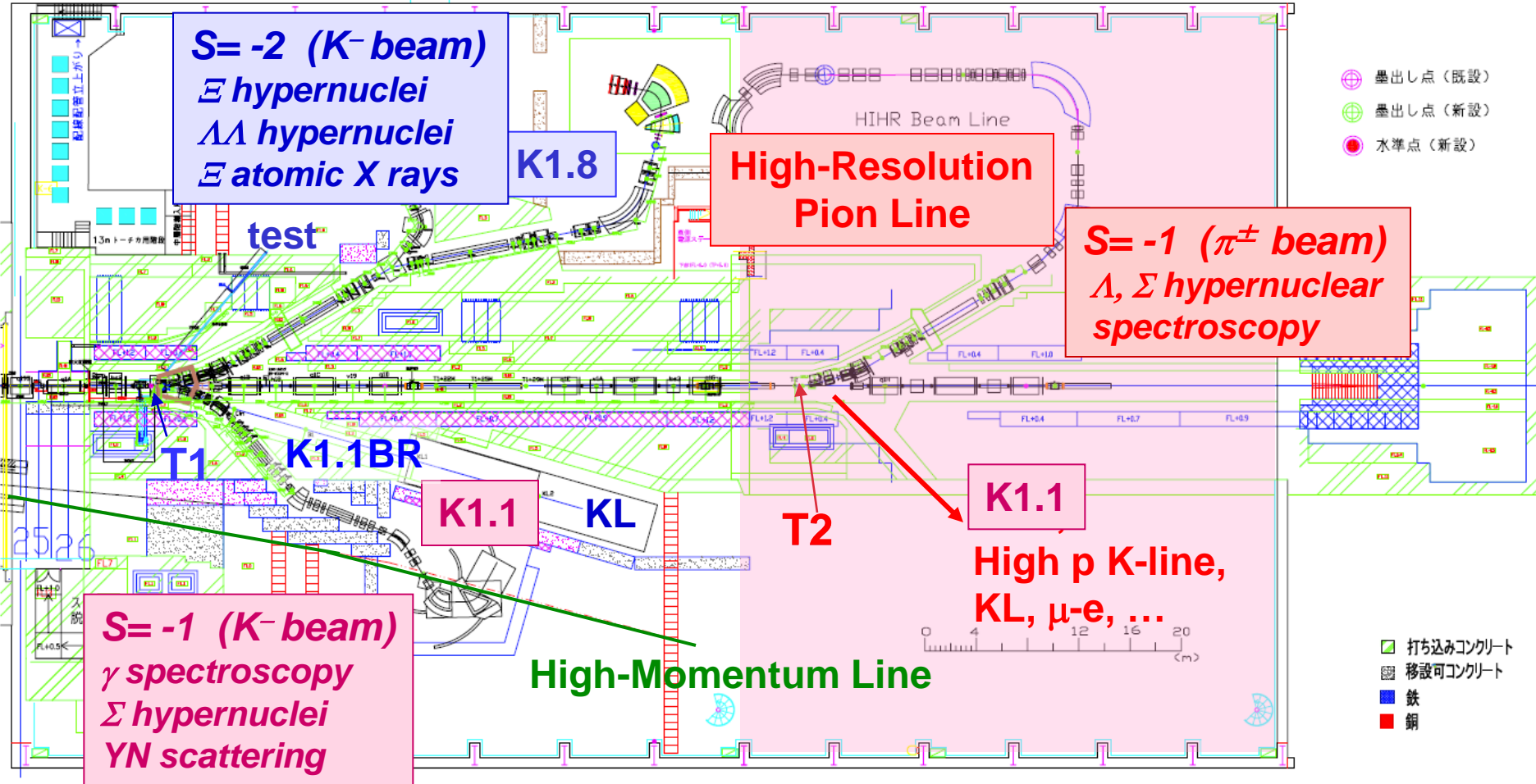
proton beam

KL line

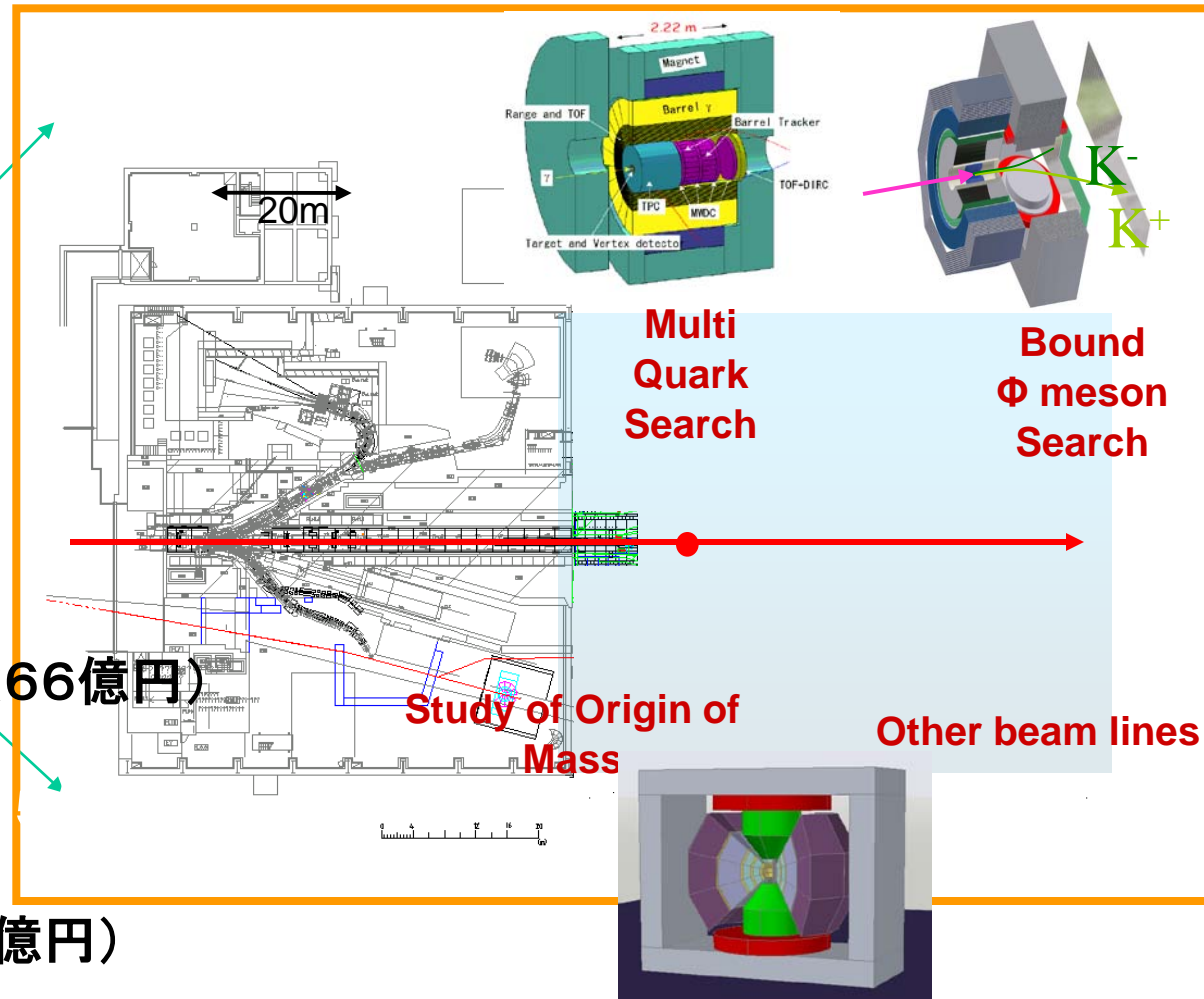
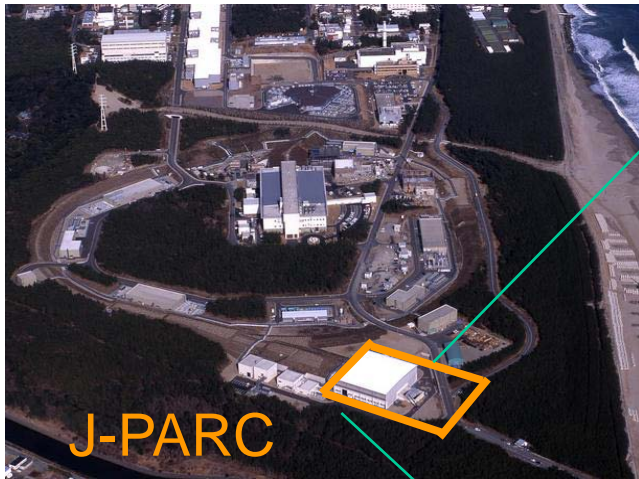
production target

A Plan of Hadron Hall Extension

Completed/ under construction




ハドロン施設拡充案



- ハドロン施設拡張(建設費66億円)
- 第二生成標的を設置
- ビームラインを数本設置
- スペクトロメータ設置 (9億円)

建設: H23~H27

理研が積極的な参加を表明—2012年度予算要求を目指し検討中



**Nuclear matter in neutron stars
investigated by experiments and
astronomical observations**

**実験と観測で解き明かす
中性子星の核物質**

**H. Tamura
Department of Physics, Tohoku University**

EOS covering wide range of ρ , p/n asymmetry, strangeness

ASTRO-H



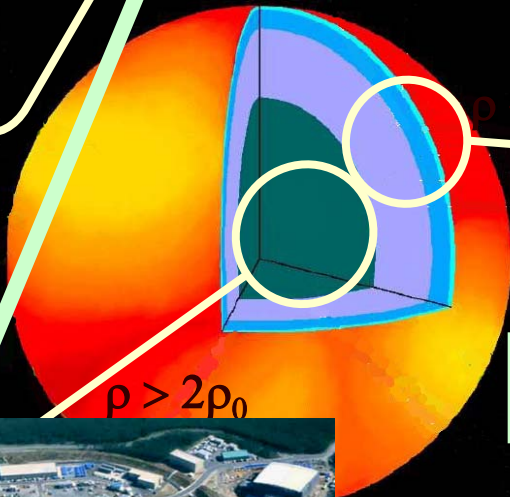
World-best two accelerators and astronomical satellite

D: theory

C: astronomical X-ray observation

⇒ radius and mass

neutron star



RIBF



B: neutron-rich nuclei

Ultra-cold atomic gas

⇒ asymmetric nuclear matter and thin neutron matter

J-PARC



A: strangeness nuclear physics

⇒ Interactions between strange particles

研究組織

- X00 実験と観測で解き明かす中性子星の核物質
大)
Nuclear matter in neutron stars investigated by
(Tohoku)
experiments and astronomical observations $\rho \sim 2\text{--}3\rho_0$ 田村 裕和 (東北)
H. Tamura
- A01 中性子過剰核物質中のストレンジネス
北大)
Strangeness in neutron-rich nuclear matter $\rho > 3\rho_0$ 田村 裕和 (東北)
H. Tamura
- A02 多重ストレンジネスのバリオン間相互作用
Multi-strangeness baryon-baryon interactions $\rho < 1\rho_0$ 高橋俊行(KEK)
(KEK) T. Takahashi
- B01 中性子過剰な低密度核物質の物性
Properties of low/medium density neutron-rich $\rho \sim 1\text{--}2\rho_0$ 中村隆司(東工大)
(TIT) nuclear matter T. Nakamura
- B02 高密度中性子過剰核物質の状態方程式 (R,M) 村上哲也 (京大)
EOS of high-density neutron-rich nuclear matter T. Murakami
(Kyoto)
- C01 宇宙X線・ガンマ線観測による中性子星研究の新展開 高橋忠幸(JAXA)
New development of neutron star studies by cosmic T. Takahashi
(JAXA)

A01 中性子過剰核物質中のストレンジネス

代表者・分担者

ストレンジネスが現れだす $\rho \sim 3\rho_0$ 領域を理解する

(1) Σ^+p, Σ^-p 散乱実験 J-PARC P40

三輪浩司(東北大)、田村裕和(東北大)

-> ΣN 相互作用 (特に $\Sigma^+p = \Sigma^-n$ 相互作用)

-> Σ が中性子星に存在するのかどうかを確定

(2a) Λ ハイパー核ガンマ線分光

J-PARC E13

小池武志(東北大)、田村裕和(東北大)

-> $\Lambda N, \Lambda N-\Sigma N (\Lambda NN)$ 相互作用

(2b) 中性子過剰 Λ ハイパー核分光

J-PARC E10

阪口篤志(大阪大)

中性子過剰環境での $\Lambda N-\Sigma N (\Lambda NN)$ 相互作用

-> 中性子星中の Λ 粒子の発生密度や組成比を決定

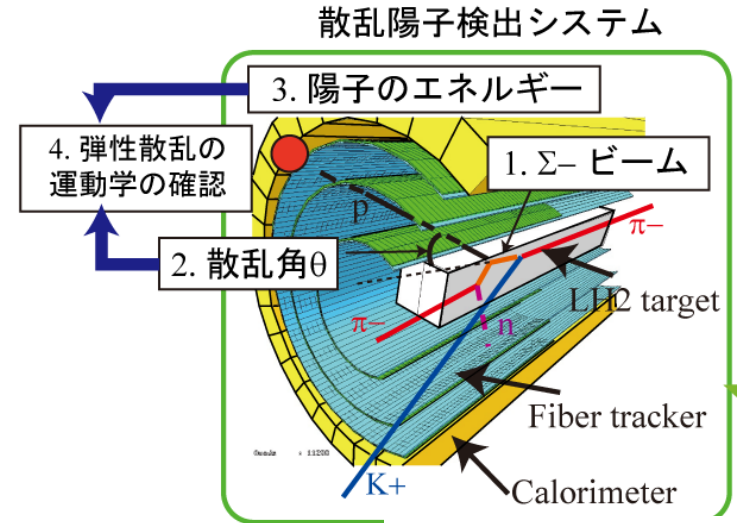
(3) K^- 原子核束縛状態

J-PARC E15

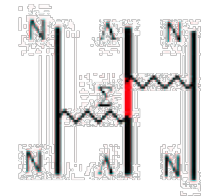
應田治彦(理研) 鈴木隆敏(東京大)

-> $K^{\text{bar}}N$ 相互作用

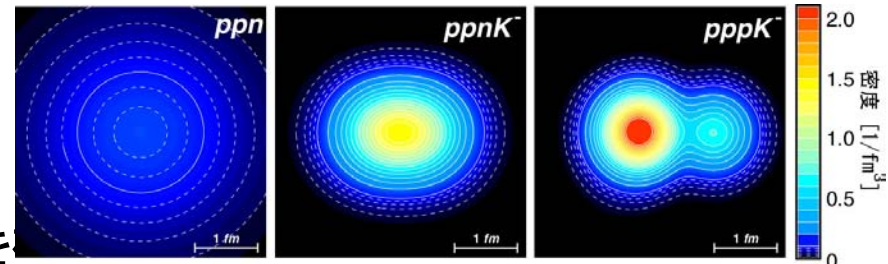
-> K^- 中間子が中性子星に存在するのかどうかを



Λ - Σ coherent coupling

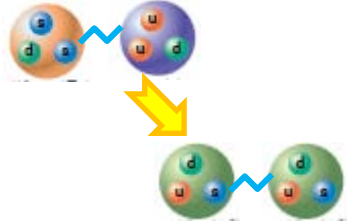


Akaishi et al.,
PRL 84 (2000) 3539



A02 多重ストレンジネスのバリオン間相互作用

$\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$ 相互作用



ΞN 相互作用



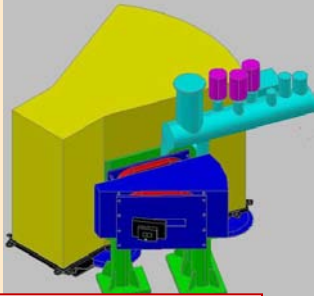
高密度核物質のEOS

$\Lambda\Lambda$ 相互作用



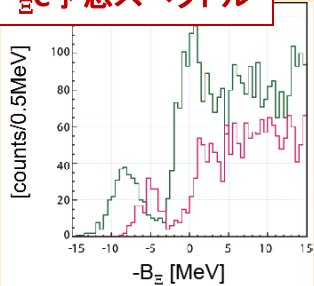
Ξ ハイパー核分光実験

SksPlus スペクトロメータ



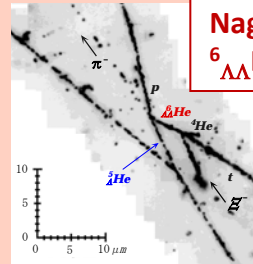
成木
高橋俊

$^{12}_{\Xi}\text{C}$ 予想スペクトル



0千円

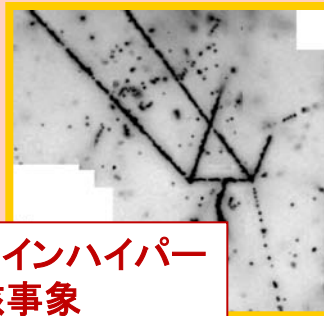
エマルジョン実験
+ 画像自動解析システム



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

仲澤
住浜
高橋仁
PD1

ツインハイパー
核事象



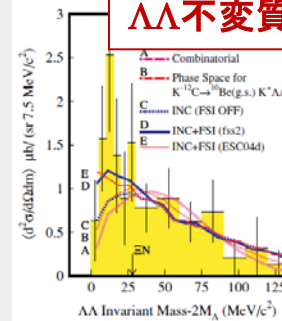
115,500千円

ハイペロン崩壊検出器
による $\Lambda\Lambda$ 相関研究

検出器概念図



$\Lambda\Lambda$ 不変質量



佐藤
今井
高橋俊
成木
PD2

68,000千円

既存検出器維持 20,600千円

旅費 26,000千円

D01 中性子星と核物質の理論研究

■ 中性子星物質

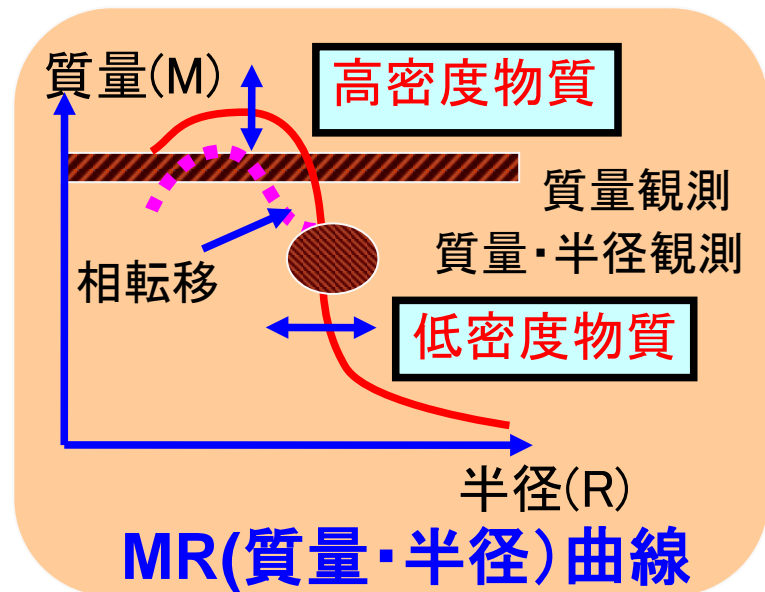
- 最近の大きな進展
最大質量、半径観測
- 多体問題の宝庫

■ ミクロ(原子核、Cold Atom)とマクロ(中性子星)を繋ぐ！

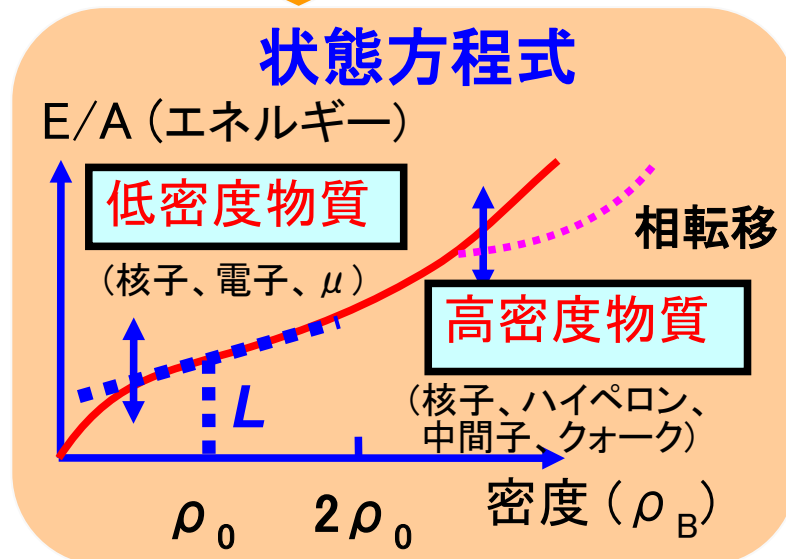
- 中性子過剰核
↔ 低密度非対称物質
- スレンジネス核・クォーク物質
↔ 高密度多成分物質
- 状態方程式(EOS) ↔ 天体現象
(重い中性子星パズル)

■ 全国的共同研究体制

- 代表+分担8名+連携7名
- 理論核物理を中心に
宇宙物理・物性物理が連携



↑↓ TOV方程式



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。

ますます理論と実験の強い連携が必要。
理論によって実験計画を導いてください。