

Σ 、 Ξ -核のポテンシャルと高密度物質の状態方程式

A. Ohnishi (Hokkaido U.)

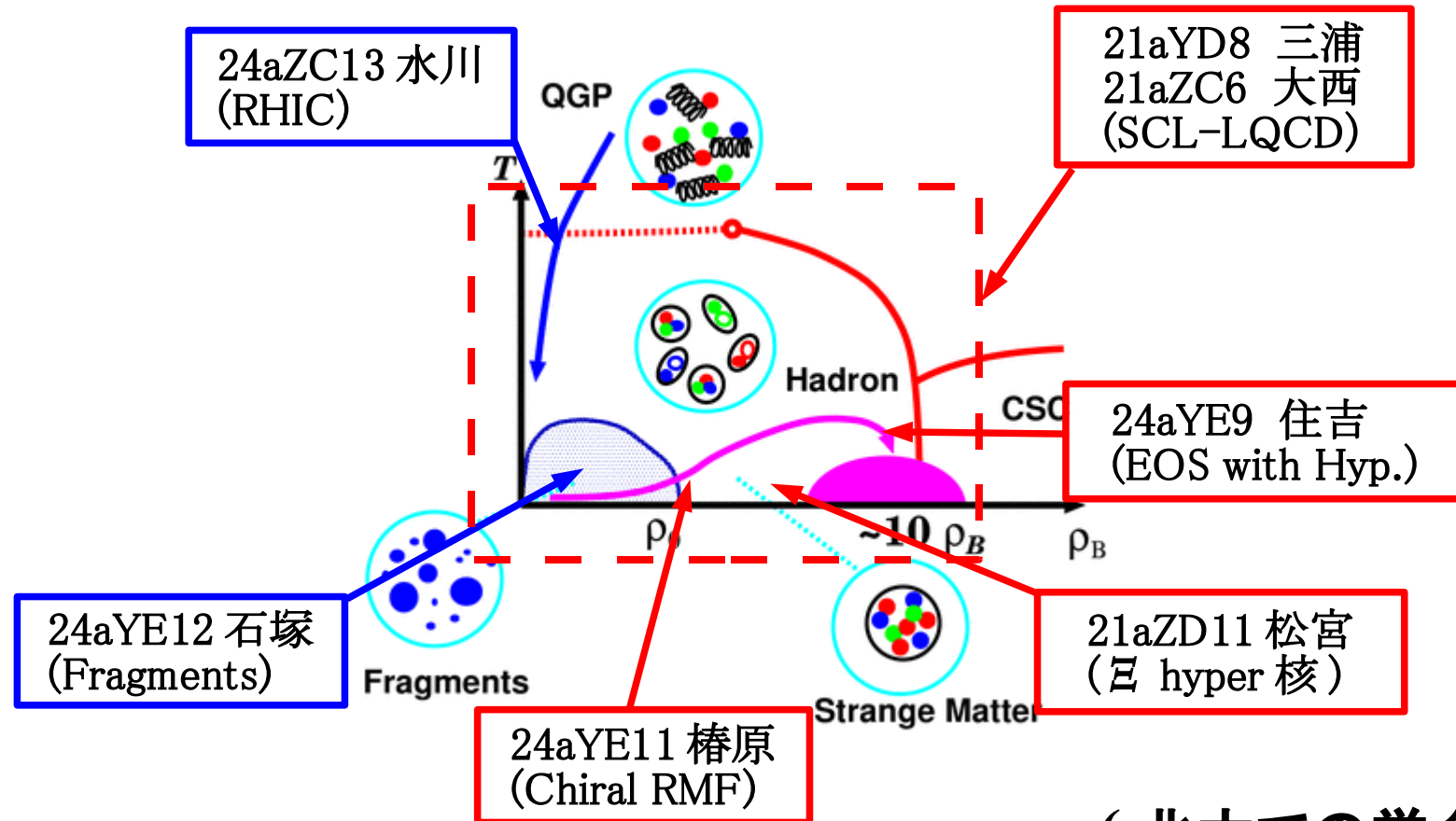
- Introduction
- Σ hypernuclear production, and Σ potential in nuclear matter
(*Maekawa, Tsubakihara, AO, EPJA 33 (2007), 269 [arXiv:nucl-th/0701066]*
Maekawa, Tsubakihara, Matsumiya, AO, arXiv:0704.3929 (Ξ);
in preparation (Σ))
- Coupled Channel AMD Study of Ξ hypernuclear structure
(*Matsumiya, Tsubakihara, Maekawa, AO, Dote*)
- Relativistic EOS of Supernova Matter with Hyperons
(*Ishizuka, Tsubakihara, AO, Sumiyoshi, Yamada, to be submitted*
<http://nucl.sci.hokudai.ac.jp/~chikako/EOS/>)
- Summary

前川 (D 論準備)、松宮 (雑誌会発表準備)
→ これないので、かわりに「白い恋人」を買ってきました。



Quark and Hadronic Matter Phase Diagram

- 特定理論班：
「ハドロン物理学 - 高エネルギー重イオン反応 - 構造関数」(岡)
大西：ハイペロンを含む高密度物質状態方程式



(北大での学会発表)

大目標： QCD から原子核密度汎関数を得て様々な系を記述する

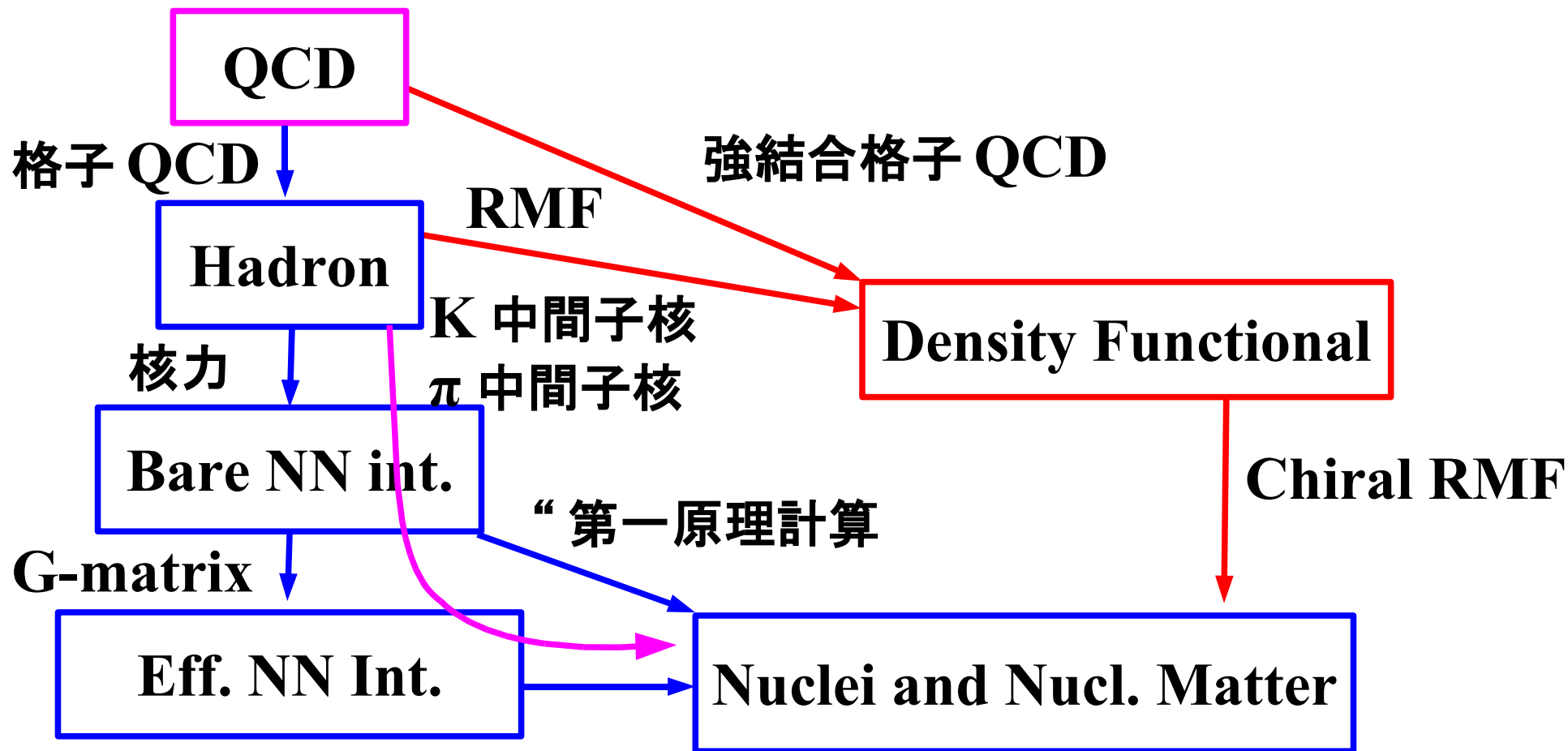


原子核物理学の基本課題

- 「QCD から核構造へ」の標準的な道

QCD → Hadron → Bare NN int. → Nuclei

- 第2の道 = QCD から原子核の密度汎関数を得る
+ 密度汎関数を様々な系で確かめる (午前中の椿原講演)



クラスター, AMD, RMF



*Σ hypernuclear production reactions
and Σ potential in nuclear matter*



Quasi Free Hyperon Production

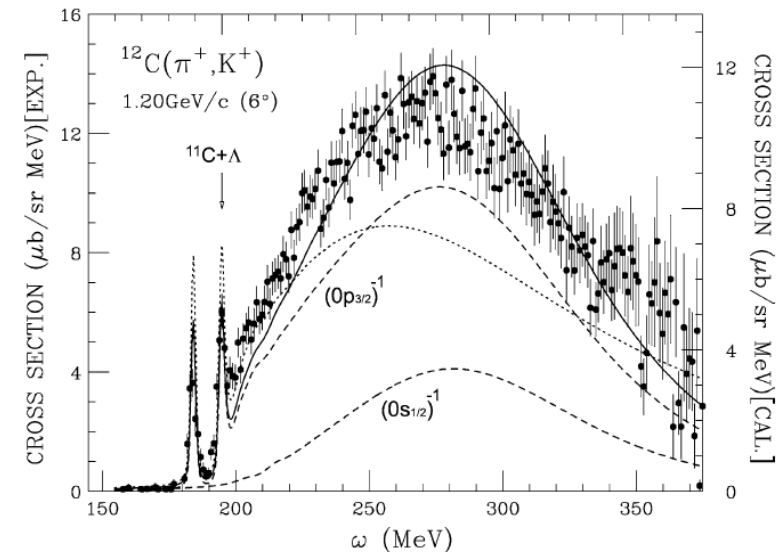
- 核物質中でのハイペロン・ポテンシャルの深さ
→ 中性子星物質、高密度超新星物質の性質を大きく左右

- Λ ポテンシャル：束縛状態から ~ -30 MeV
- Ξ ：束縛領域での生成量から分析
- Σ ：QF 生成スペクトルから分析

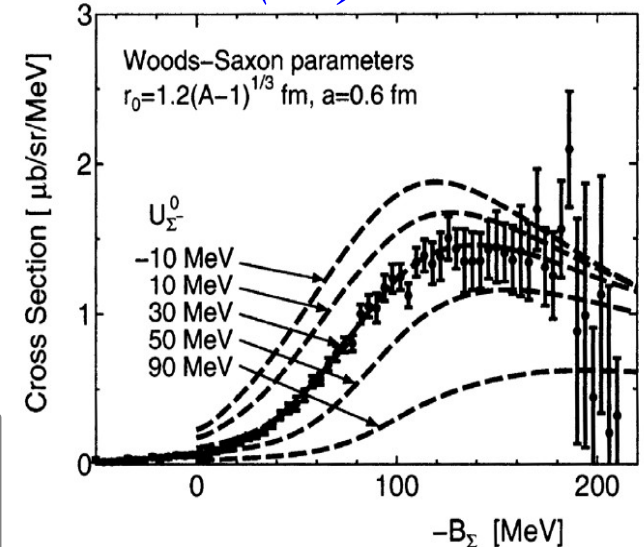
- 準自由ハイペロン生成反応

- エネルギー移行の範囲が大きい
→ (ω, q) ごとに標的内核子の最適な運動量を選んで素過程断面積を与える必要性 (Optimal Momentum Fermi Averaging) (cf. Frozen Nucleon Momentum)
- KEK E438 実験
(Saha, Noumi et al. PRC70('04)044613)
→ Σ -核ポテンシャルは斥力

Harada, Hirabayashi, NPA744('04),323.



Kohno, Fujiwara, Kawai, et al. PTP112('04)895



形・生成量絶対値は同時に合っていない
→ ポテンシャルの強さの不定性



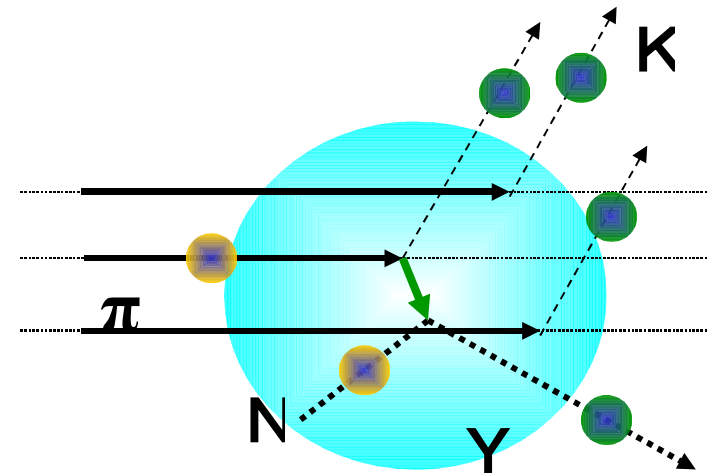
Local Optimal Fermi Averaging t-matrix (LOFAt)

- ポテンシャルが存在するために、ハイペロンの生成点により運動学が異なる
→ 衝突点ごとに Fermi 平均を行う
(局所最適 Fermi 平均 t 行列)

$$E_i = \sqrt{\mathbf{p}_i^2 + m_i^{*2}(\mathbf{r})} \simeq \sqrt{\mathbf{p}_i^2 + m_i^2 + V_i(\mathbf{r})},$$

$$m_i^{*2} = m_i^2 + 2m_i V_i(\mathbf{r})$$

$$\bar{t}(r, \omega, \mathbf{q}) = \frac{\int d\mathbf{p}_N t(s, t) \rho(p_N) \delta^{(4)}(p_1 + p_2(r) - p_3 - p_4(r))}{\int d\mathbf{p}_N \rho(p_N) \delta^{(4)}(p_1 + p_2(r) - p_3 - p_4(r))}$$



- Response Function and Diff. Cross Section
→ σ^{elem} の factorization はできなくなる

$$S(E) = -\frac{1}{\pi} \text{Im} \int d\mathbf{r} d\mathbf{r}' f_{\alpha}^*(\mathbf{r}) \bar{t}_{\alpha}^*(\mathbf{r}) G_{\alpha\alpha'}(E; \mathbf{r}', \mathbf{r}) \bar{t}_{\alpha'}(\mathbf{r}) f_{\alpha'}(\mathbf{r})$$

Non-Factorization t-matrix

$$\frac{d^2 \sigma}{dE_K d\Omega_K} = \frac{p_K E_K}{(2\pi)^2 v_{\text{inc}}} S(E)$$



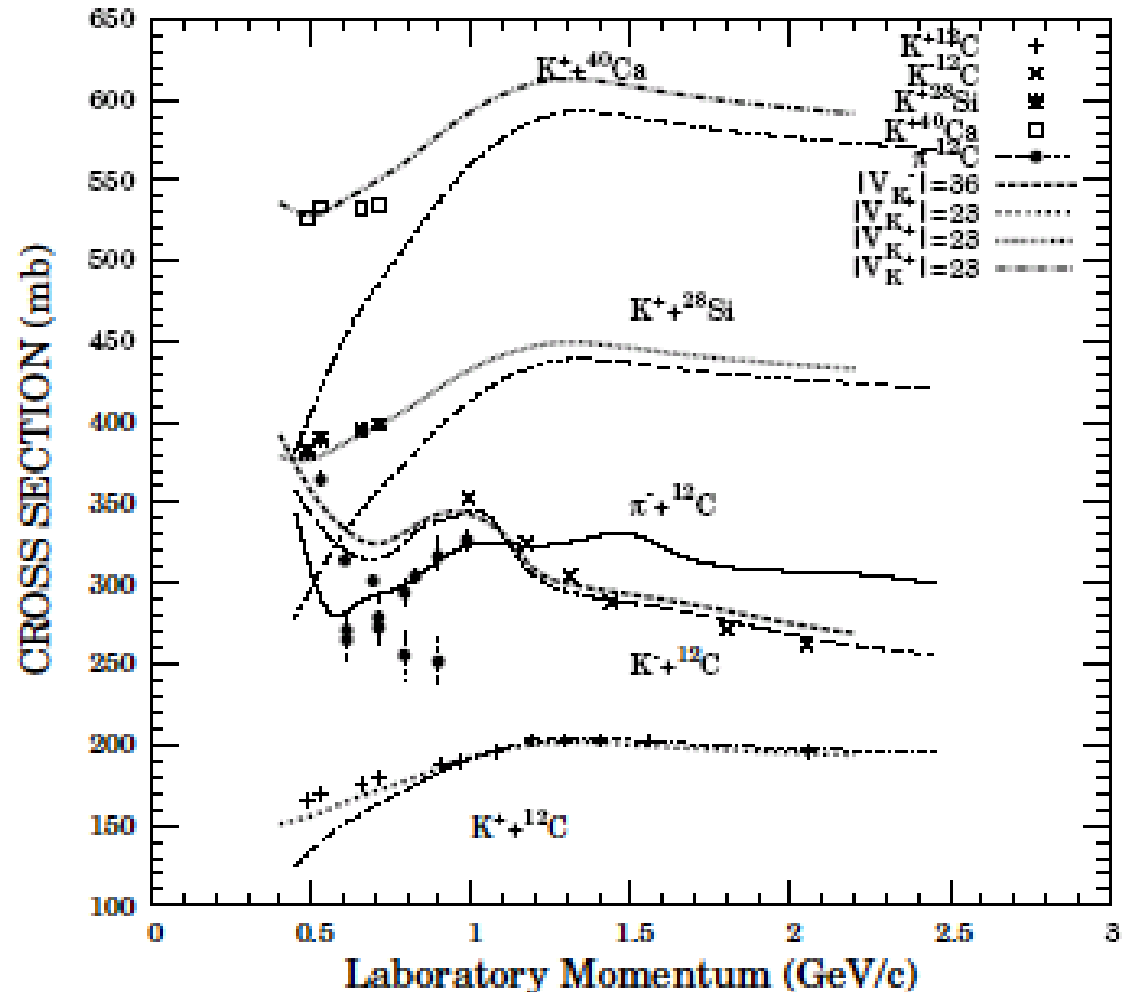
K^+ nucleus potential

Maekawa, Tsubakihara, Matsumiya, AO, in preparation.

■ K^+ -nucleus potential

... determined by fitting K^+ -nucleus cross sections

- $p_{K,\pi} > 1 \text{ GeV}/c$
→ small effects
- $p_K \sim 0.6 \text{ GeV}/c$
→ 30-50 % effects



$$V(K^+) \sim 23 \text{ MeV}$$

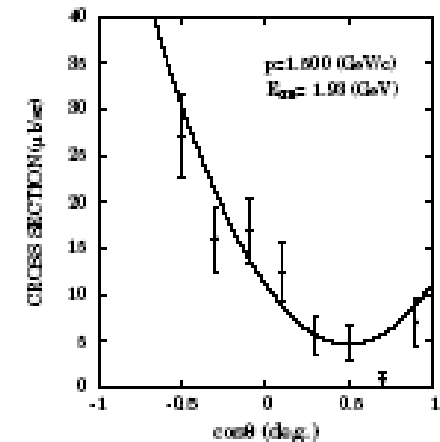
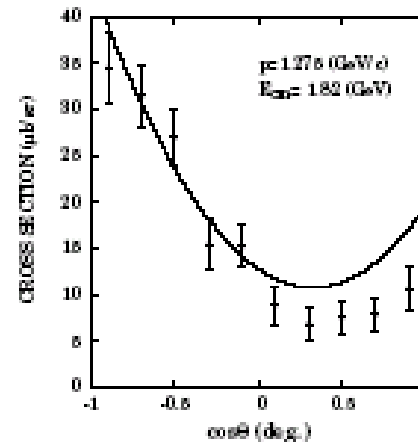
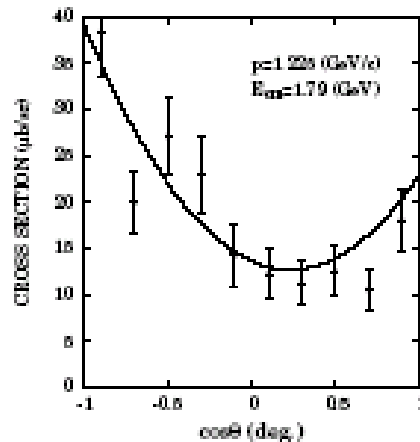
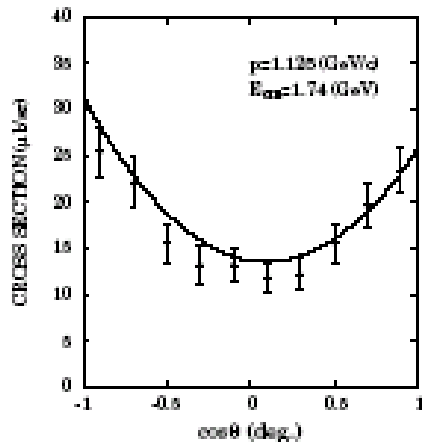
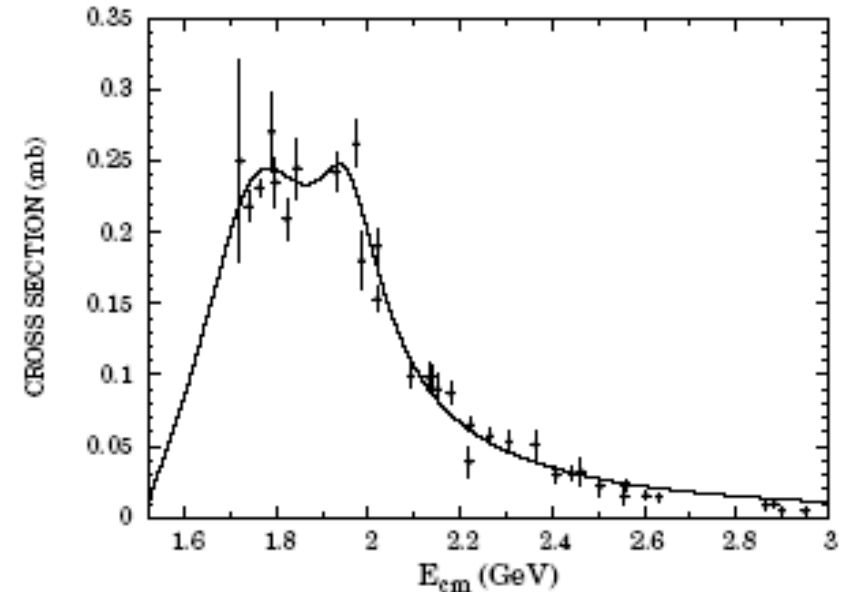


Elementary cross section: $p(\pi, K^+) \Sigma^-$

Maekawa

Elementary differential cross section

- Determines the shape of QF spectra
- High energy
→ Backward peaked due to u-channel dominance
- Low energies
→ Forward-Backward peaked (Res.)



Σ Potential in Nuclear Matter

Maekawa, Thesis (in preparation)

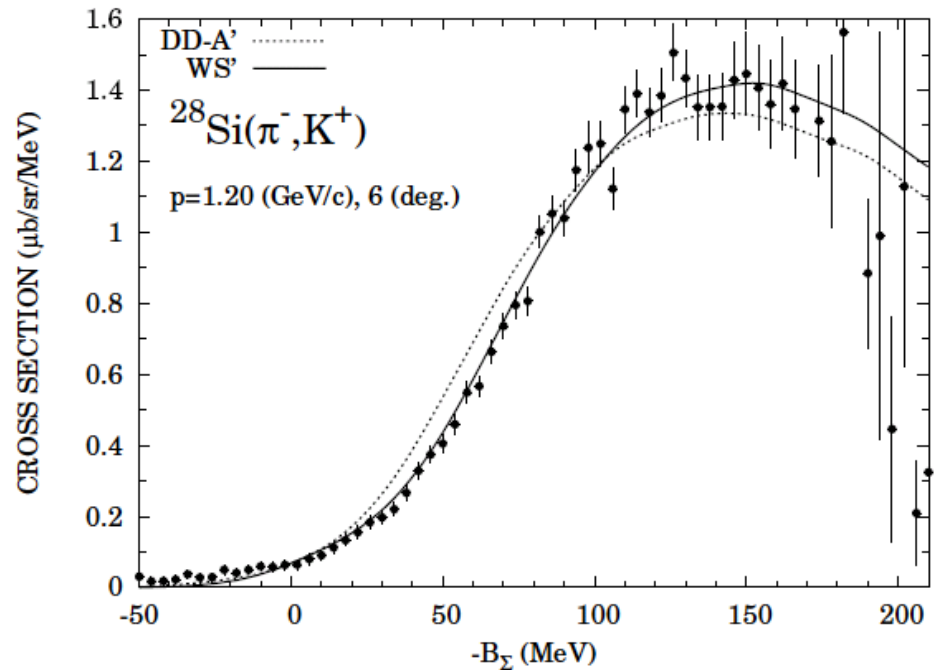
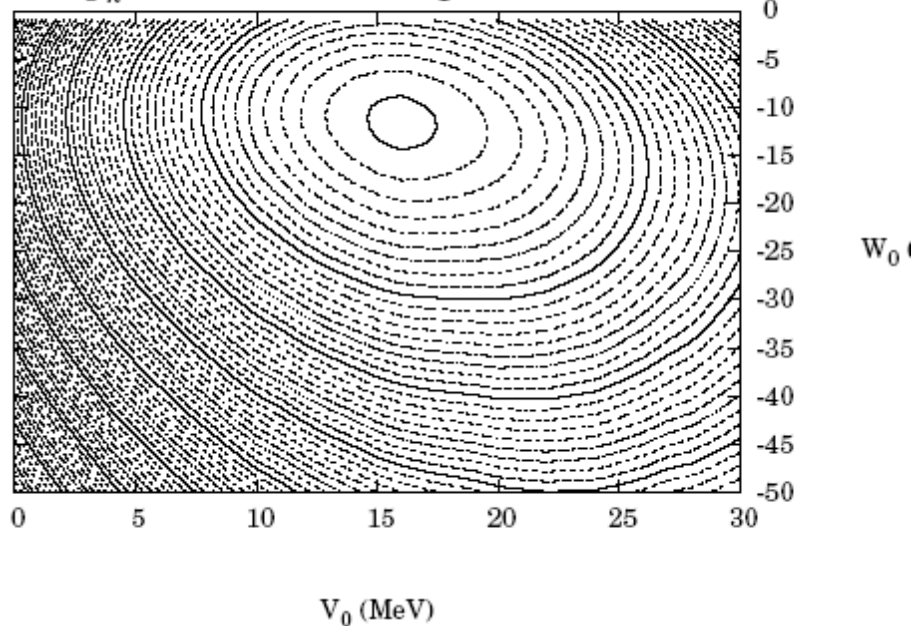
Maekawa, Tsubakihara, Matsumiya, AO, in preparation.

■ Σ -nucleus potential depth

- With LOFAt, absolute values also depends on the potential depth.
- Spectrum fit (Shape and Yield) in Woods-Saxon form
→ $(V_0, W_0) \sim (+15 \text{ MeV}, -10 \text{ MeV})$
- Density dependent potential (Batty type): Final results will be shown soon.

Woods-Saxon with $r_0=1.1(\text{fm})$, $d=0.6(\text{fm})$

$^{28}\text{Si}, p_\pi=1.2 \text{ (GeV/c)}, \theta=6 \text{ (deg.)}$



Summary of Σ potential part

- Σ production spectrum is sensitive to
 - Fermi averaging procedure
c.f. Optimal Fermi Averaging (*Harada, Hirabayashi*)
Semi-Classical Distorted Wave model (*Kohno et al.*)
 - Details of Elementary Diff. Cross Section
 - K^+ nucleus potential, when $p(K^+) < 1 \text{ GeV}/c$
 - Local Optimal Fermi Averaging
→ modifies \sqrt{s} in the incident and final channel
Maekawa, Tsubakihara, AO, EPJA 33 (2007), 269 [arXiv:nucl-th/0701066]
- With shallow pocket which explains the atomic shift,
potential at nuclear center becomes high (more repulsive)
→ $V(\Sigma) > +15 \text{ MeV}$ (moderately repulsive)
Maekawa, Tsubakihara, Matsumiaya, AO, in preparation (Σ)



Comment on Ξ -nucleus potential

Maekawa, Tsubakihara, AO, EPJA33('07), 269 [nucl-th/0701066]

Maekawa, Tsubakihara, Matsumiya, AO, arXiv:0704.3929.

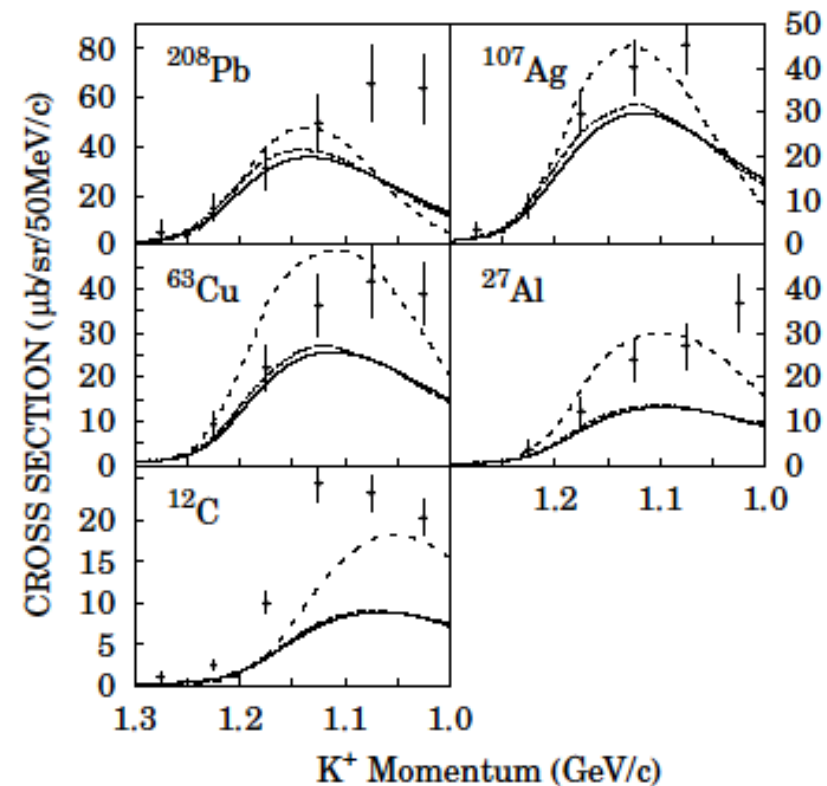
- Spectrum shape in the bound state region $\rightarrow V(\Xi) \sim -14$ MeV
(Fukuda et al. PRC58('98),1306; Khaustov et al. PRC61('00), 054603)
- It is difficult to understand absolute values of $^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{K}^+)$ spectra.

- Rough fit of elem. t-matrix + Larger eikonal σ
 \rightarrow Rough target dependence and absolute values (EPJA)

- Careful fit of elem. t-matrix
 \rightarrow Underestimate for ^{12}C target.
(Maekawa et al.(arXiv), Hashimoto et al.,
Tadokoro et al.(0 deg.),
Nara et al. (Cascade),)

- Reason

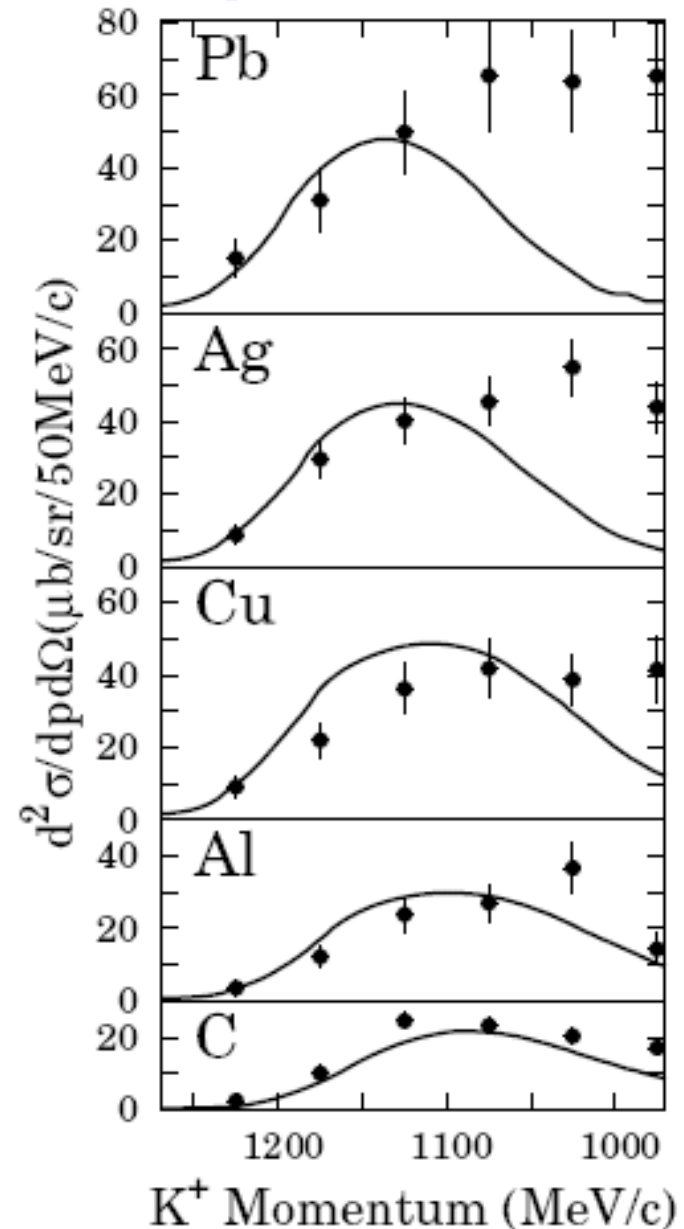
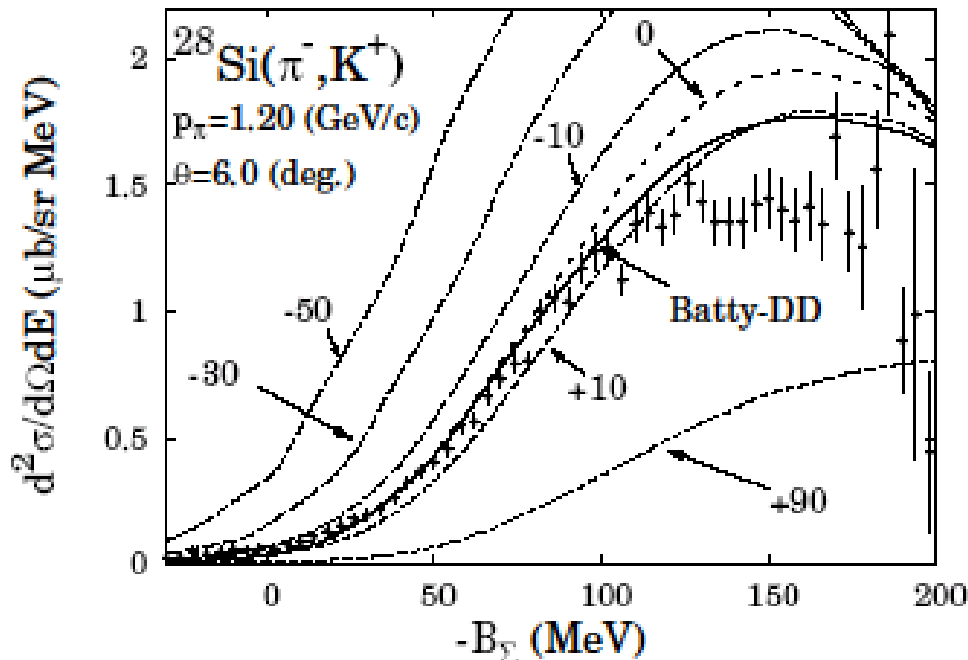
- Center-of-mass correction ?
- Short range correlation in ^{12}C ?
- K^+ -nucleus potential ?



Hyp06 で示した結果

Maekawa, Tsubakihara, AO, EPJA33('07), 269 [nucl-th/0701066]

- Σ : Simple t-matrix (Regge type),
No K^+ optical potential.
- Ξ : Simple t-matrix,
No K^+ optical potential,
Larger Eikonal σ .

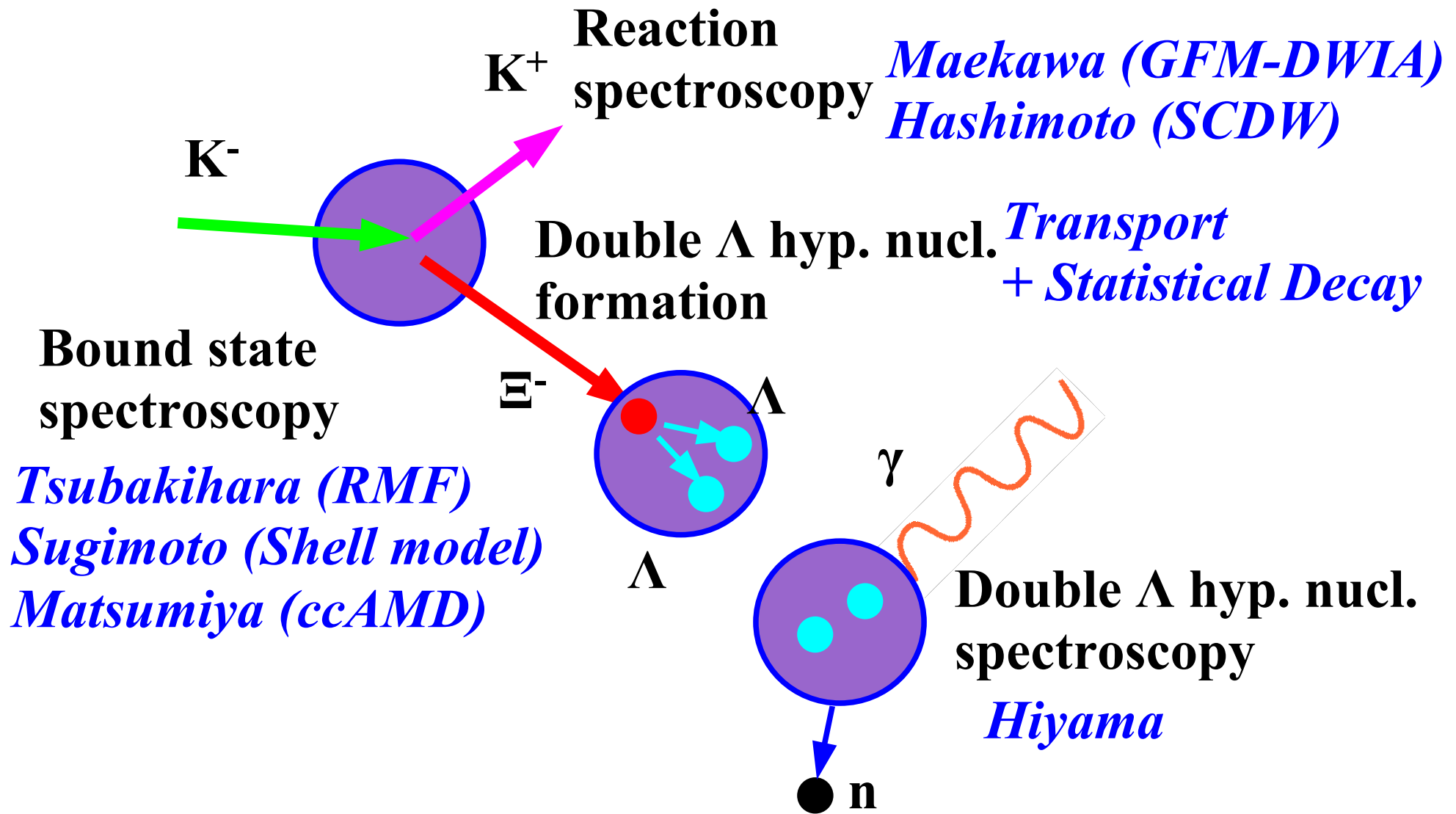


*Ξ hypernuclear structure study
in coupled channel AMD*



Ξ Hypernuclear Physics

- Ξ hypernuclei → Doorway to Multi Strangeness Systems



Ξ hypernuclear physics

■ Interest

- Laboratory of BB interaction models

QCD \rightarrow Hadrons \rightarrow Bare BB interaction \rightarrow Eff. interaction \rightarrow Nuclei

Nemura, Fujiwara Yamamoto, Kohno

- Admixture in neutron star core

$V(\Sigma) > 0 \rightarrow \Xi^-$ may be the first hyperon which appear at high ρ .

- Structure change due to Ξ

Tensor interaction from $N\Xi$ OPEP would generate rich structure.

■ Difficulty

- Small production cross section, Conversion width to $\Lambda\Lambda$, Shallow pot. ...
 \rightarrow Need to obtain spectroscopic info. from **low stat. production spectra.**



Ξ hypernuclear reaction spectroscopy

■ 平均場の取り扱い

Ikeda, Fukuda, Motoba, Takahashi, Yamamoto, PTP91('94),747;

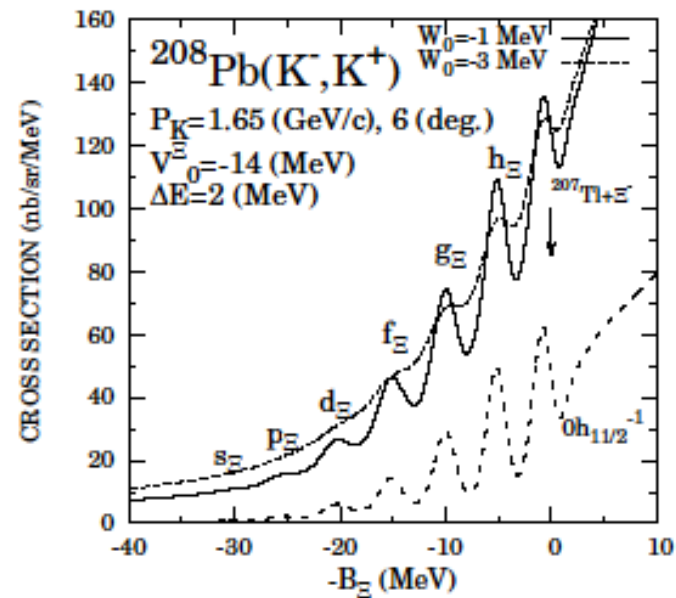
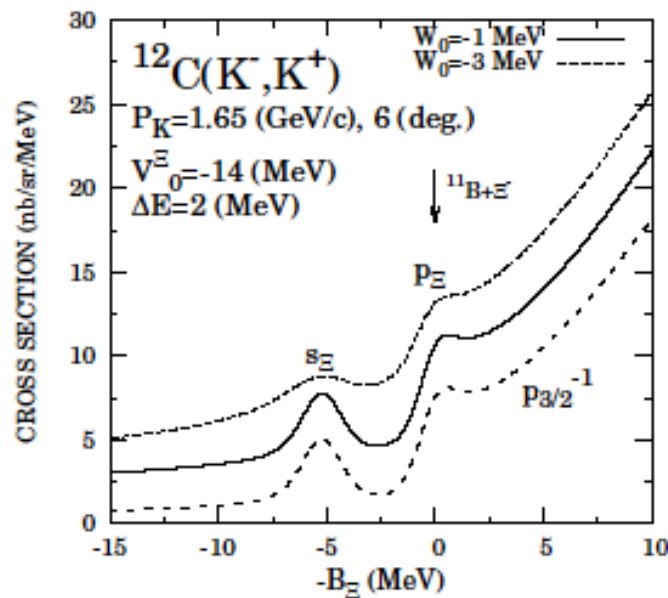
Tadokoro, Kobayashi, Akaishi, PRC51('95),2656;

Hashimoto, Kohno, Ogata, Kawai, nucl-th/0610126;

Maekawa, Tsubakihara, AO, EPJA 33 (2007), 269 [arXiv:nucl-th/0701066]

Maekawa, Tsubakihara, Matsumiaya, AO, arXiv:0704.3929.

Sugimoto, Motoba, Yamamoto



■ 軽い核は必ずしも丸くない。

→ クラスタ構造がある / 変化するとき、スペクトルはどうなるか？



Coupled Channel AMD (ccAMD)

- Wave function = superposition of Channel AMD w.f.
 → Use co-factor rather than inv. matrix in transition matrix elements.

$$|\Psi\rangle = \sum_a x_a |\Phi^a\rangle \quad (a : \text{channel}) \quad |\Phi^a\rangle = \frac{1}{\sqrt{A!}} \det [|\varphi_j^a(i)\rangle]$$

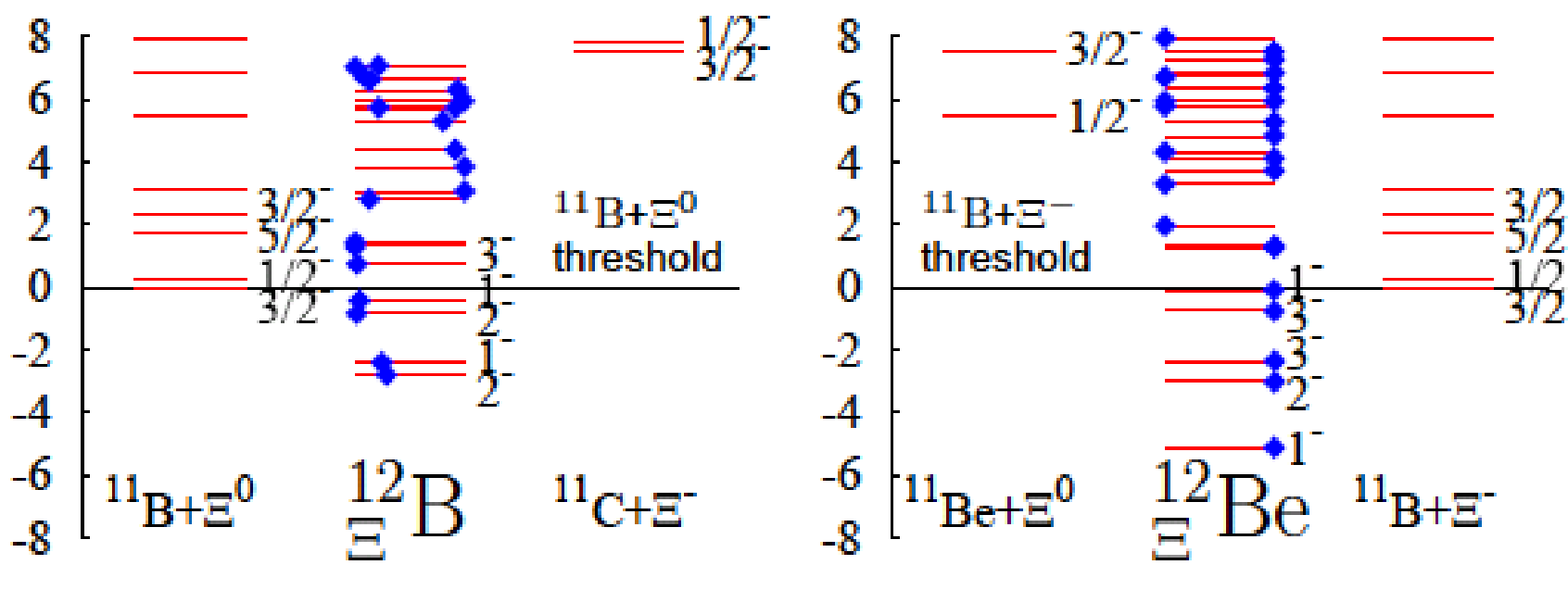
- Hamiltonian = $T + V_{\text{NN}} + V_{\text{YN}} + \text{Mass diff.}$

$$\hat{H} = \hat{T} - \hat{T}_{\text{cm}} + \hat{V} + \Delta mc^2$$

- VNN : Brink-Boeker-Okabe (BBO1)
- VYN : G-matrix of Nijmegen Extended Soft Core (ESC04d, *Rijken, Yamamoto, 2006*)
 Consistency VYN (ρ) \leftrightarrow $\rho = \langle \rho \rangle$ (Dote-Akaishi prescription)

Ξ hypernuclear level structure

- $^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{K}^0)^{12}_{\Xi}\text{B}$, $^{12}_{\Xi}\text{B} = ({}^{11}\text{B} + \Xi^0) + ({}^{11}\text{C} + \Xi^-)$
 (Mirror Core) $\otimes \Xi \rightarrow$ Coherent coupling, but not perfect
- $^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{K}^+)^{12}_{\Xi}\text{Be}$, $^{12}_{\Xi}\text{Be} = ({}^{11}\text{Be}(\text{T}=3/2) + \Xi^0) + ({}^{11}\text{B}(\text{T}=1/2) + \Xi^-)$
 Different T of core \rightarrow Almost no coupling in low lying levels

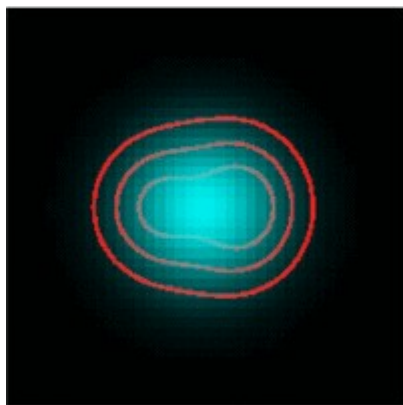


(Preliminary: No spin rotation, No GCM, Single Gauss AMD,)

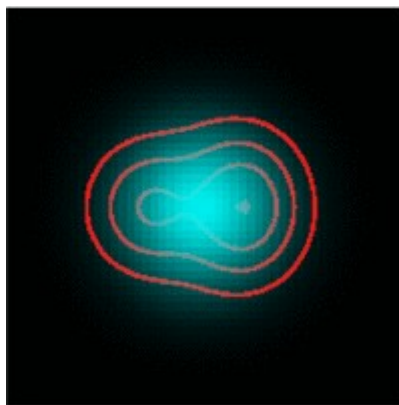


Density Distribution

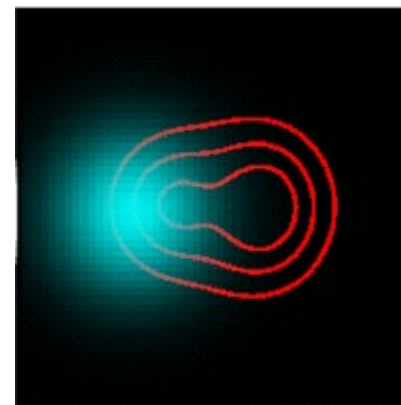
■ $^{12}_{\Xi}\text{Be}$



Intrinsic

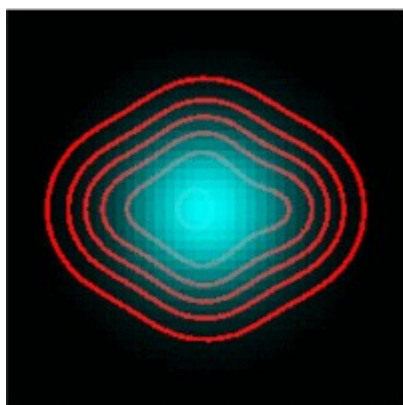


$\pi = -1$

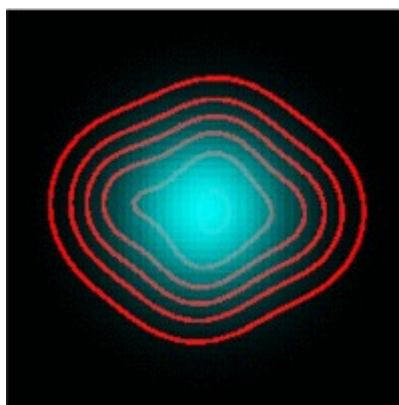


$\pi = +1$

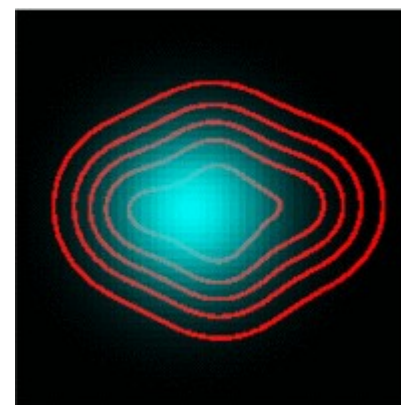
■ $^{28}_{\Xi}\text{Mg}$



Intrinsic



$\pi = +1$



$\pi = -1$

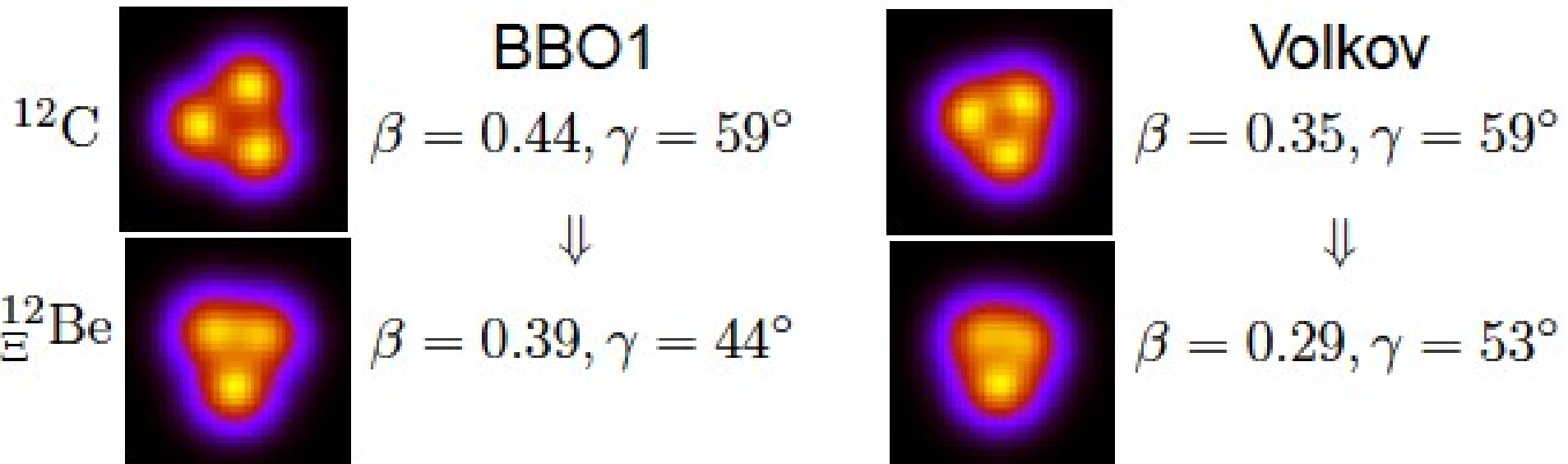
■ Nuclei are not necessarily spherical !

■ Core and Ξ Parities are mixed !

Density and Effective Number ($^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}_{\text{E}}\text{Be}$)

- Brink-Boeker type effective NN interaction
 - Developed clustering structure, Small Effective Number
- Volkov ($m=0.56$)
 - Smaller deformation, Larger Effective Number

$Z_{\text{eff}} \times 10^3$	AMD		WS14	WS24 ^[10]
	BBO1	Volkov		
$(0_1^+ \rightarrow 1_1^-)$	0.101	1.43	2.30	27.5



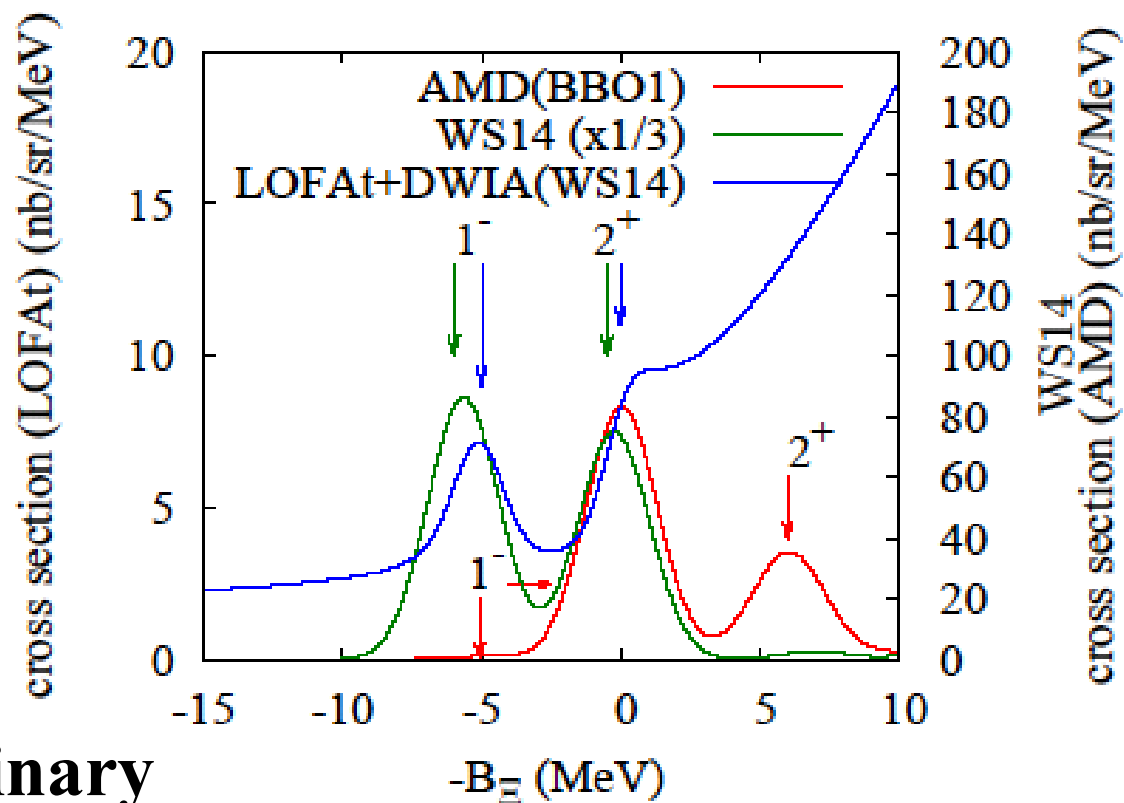
Comparison of $^{12}\text{C}(K, K^+)^{12}_{\Xi}\text{Be}$ Spectrum

- Effective Number 法による束縛近似での Ξ 核生成スペクトル
→ 標的・ Ξ 核の変形 (クラスター構造の発達度合い) により、生成スペクトルが大きく変化する可能性あり。

ccAMD による結果 (Preliminary)

- 1_1^- から 1_2^- へ Z_{eff} が流れている。
(一つの intrinsic state からの projection の影響か?)
- 2^+ は高く出る。
(single Gauss AMD のため、 Ξ の p-wave がうまく作れていない。)

*Need more studies !
E.g. Application
to Λ hypernuclei*



Preliminary

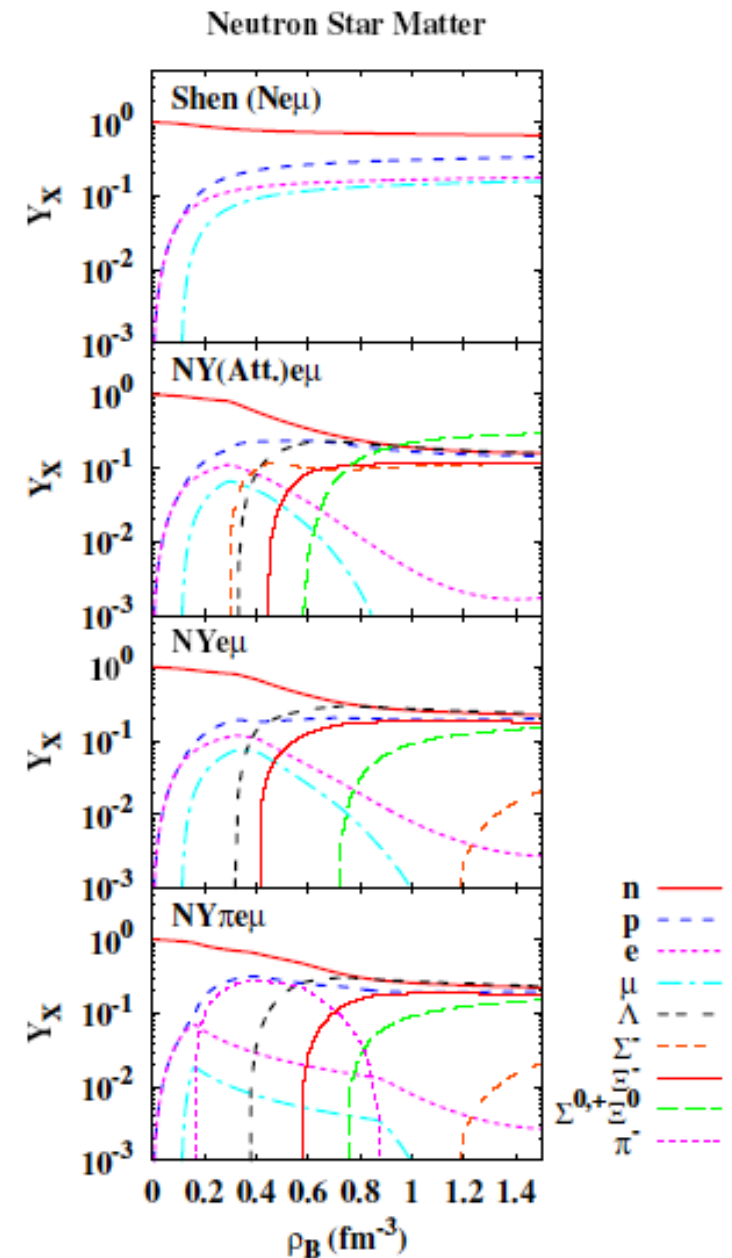
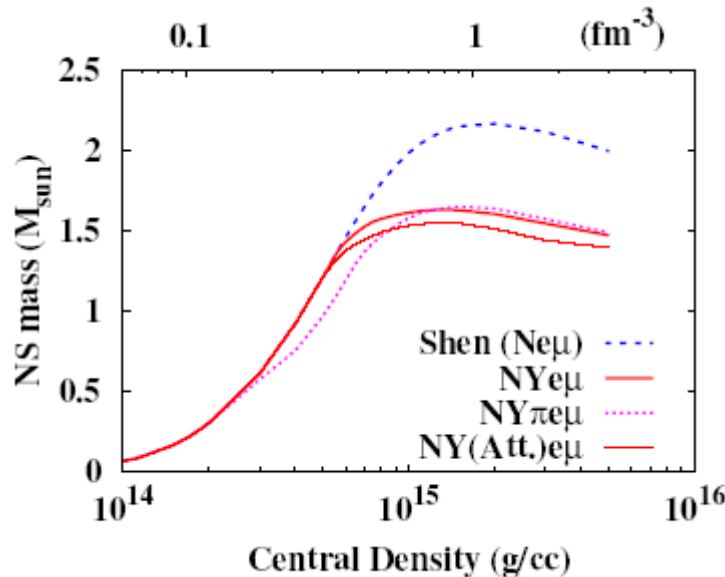
超新星物質状態方程式テーブル



ハイペロンを取り入れた超新星物質 EOS テーブル (1)

Ishizuka, Tsubakihara, AO, Sumiyoshi, Yamada, in preparation

- ハイパー核反応から示唆される
ハイペロン・ポテンシャルを考慮して
ハイペロンを取り入れた EOS テーブル
(conservative; (non-chiral) TM1+Hyperons)
- 中性子星への適用
 - 高密度で Σ^- はなかなか現れない
 - 古い示唆より斥力的 \rightarrow 最大質量 ($1.6 M_{\text{sun}}$) は、ほぼ Λ のポテンシャルで決まる

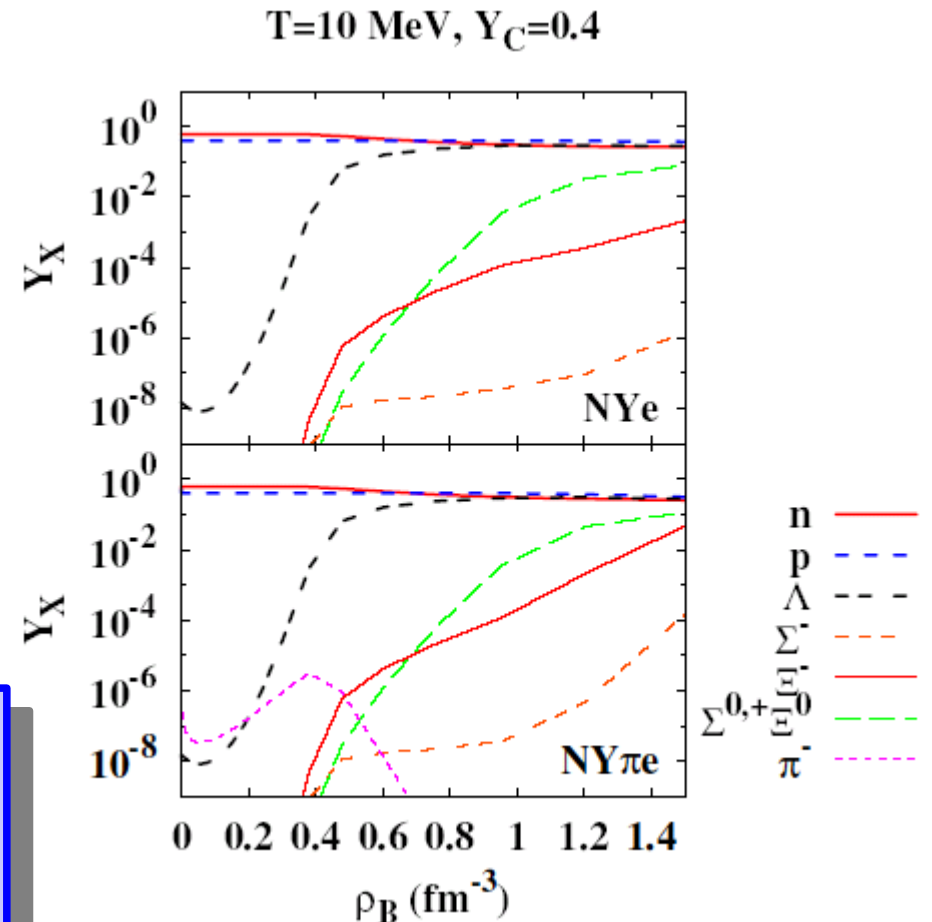
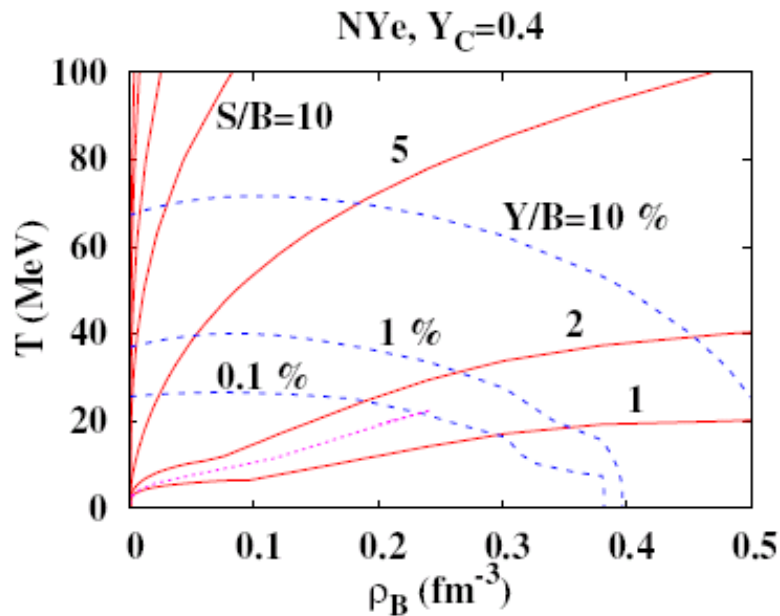


ハイペロンを取り入れた超新星物質 EOS テーブル (2)

Ishizuka, Tsubakihara, AO, Sumiyoshi, Yamada, in preparation

■ 有限温度 (超新星物質) への適用

- $\rho < 2\rho_0$ 、 $T < 20$ MeV 程度では、ハイペロンはほとんど現れない。
- 高温・高密度領域では大きな役割



Black Hole 形成時
 → ハイペロンによるソフト化により、
 ν 放出時間が減少 (住吉)



Summary

- Hyperon の存在と、その核物質中でのポテンシャルの深さは、高密度核物質の性質とコンパクト天体現象に大きな役割を果たしうる。
- Σ - 核ポテンシャルの分析と影響
 - QF スペクトルの「形」と「絶対値」の再現 $\rightarrow V(\Sigma) > 15 \text{ MeV}$
- ccAMD による Ξ 核構造と生成スペクトルの分析 (preliminary)
 - 軽い核では、 Ξ によって変形度が大きく変化しうる。
 \rightarrow 生成スペクトルの形を変化させる可能性あり。
- Σ, Ξ のポテンシャルを取り入れた RMF による EOS table
 - 低密度領域では Shen EOS と結合
 - Σ とベクトル中間子の結合に単純なクォーク数 counting を用いると、 ρ_0 で斥力であれば Σ はなかなか現れない。
 - 中性子星では大きな影響。超新星爆発では限定的。Black Hole 形成では有意の影響 (住吉)。
 - 重い中性子星が確定すれば、EOS の硬化が必要。 $\rightarrow ?$

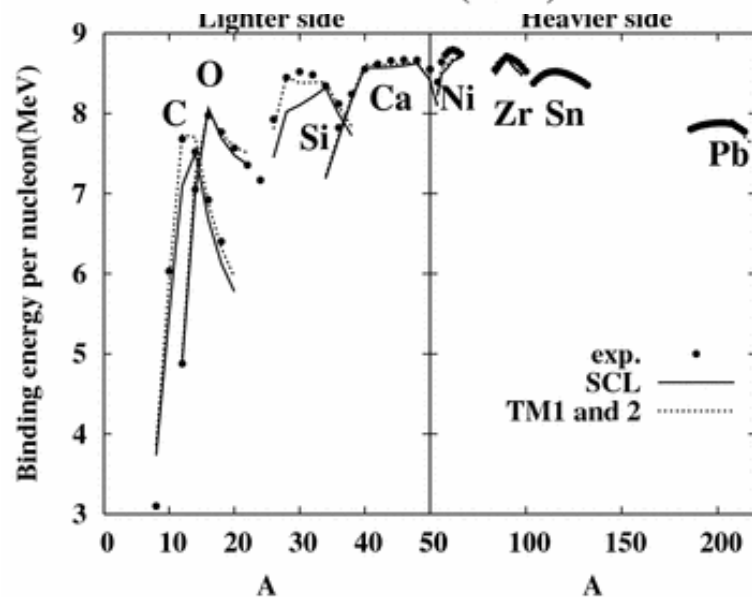
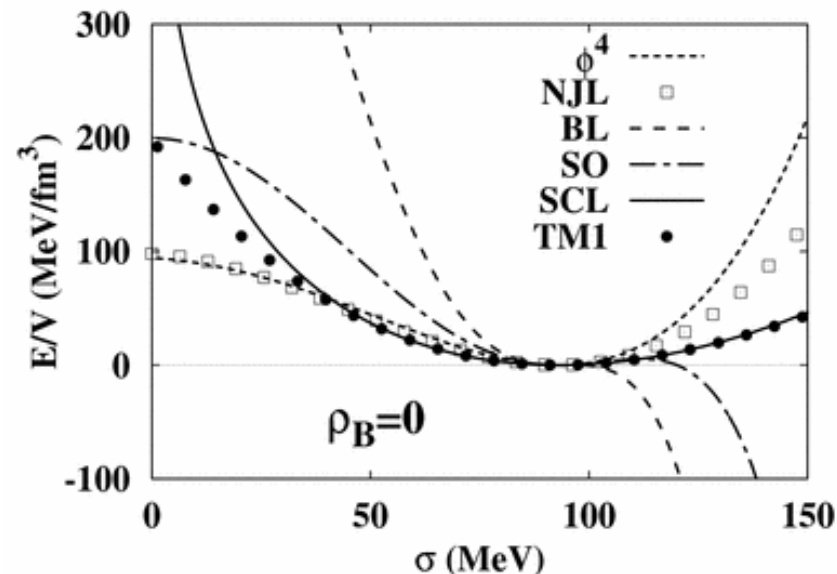
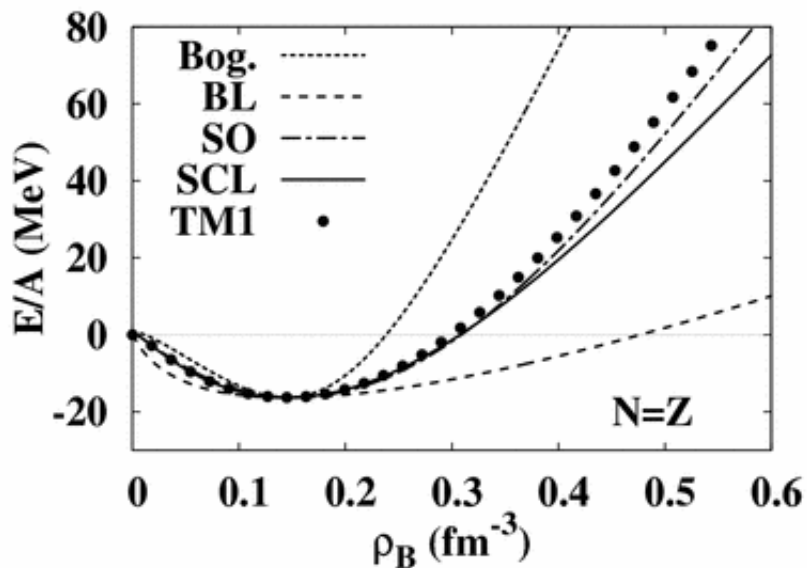


backups



Chiral RMF

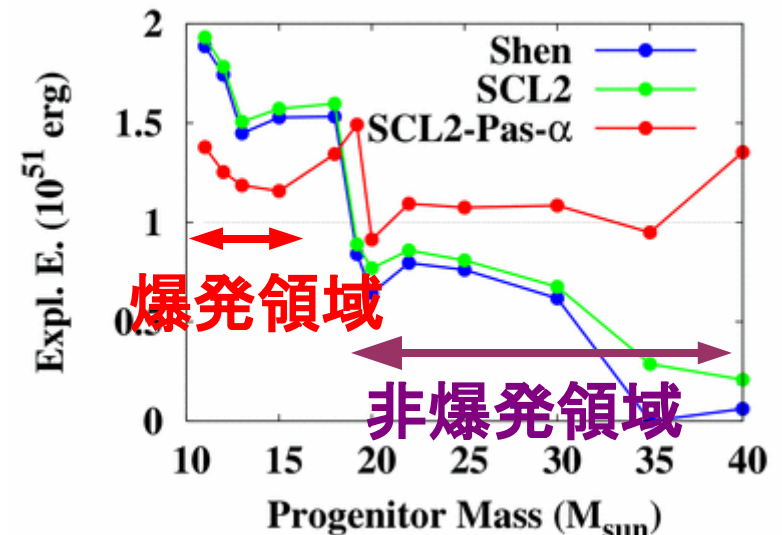
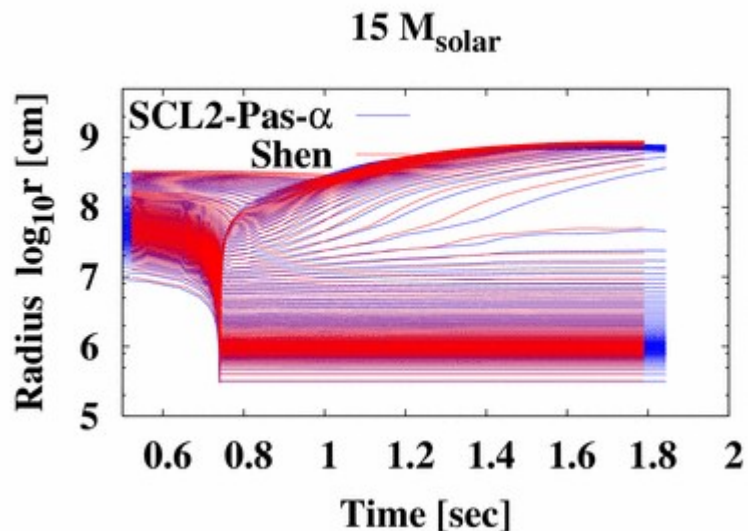
- 強結合格子 QCD の成果に基づく
対数型の Chiral potential を導入
→ 真空の安定性
- 十分に柔らかい状態方程式
- 広い質量数領域において、
原子核の束縛エネルギーと
荷電半径を再現



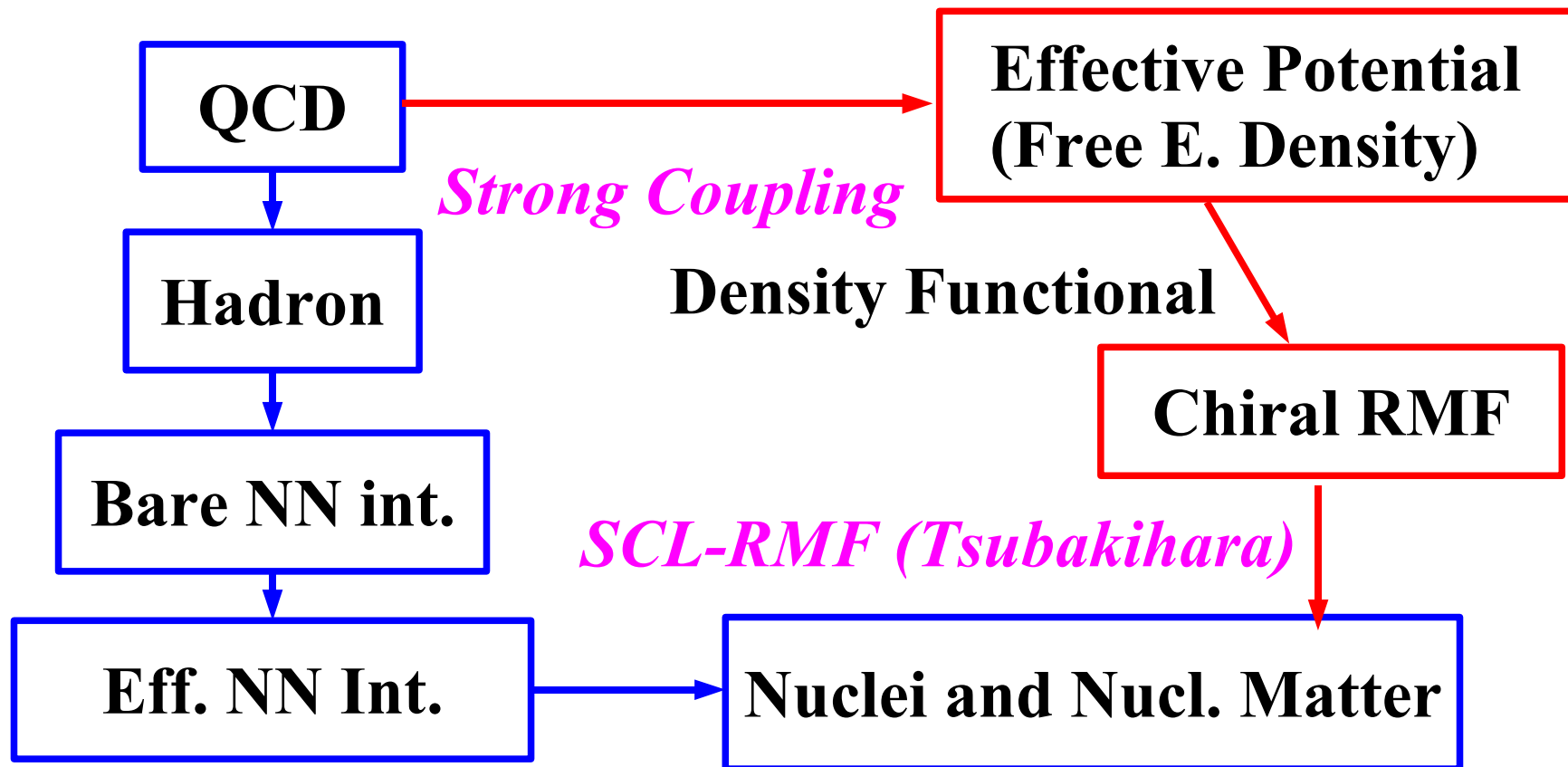
(Tsubakihara, AO, 2006)

超新星爆発エネルギー

- 超新星爆発模型：1次元流体模型 (Sumiyoshi et al., 2002)
 - ニュートリノ輸送は考慮せず、Ye は一定 → prompt Expl.
- 「Chiral RMF+ 連続パスタ」→ 爆発は起こらず
- 「Chiral RMF+ 連続パスタ + α 」 (preliminary) を非常に低密度の領域で Shen EOS と連続に結合
 - 爆発の成否は Shen EOS と同じ
 - 爆発エネルギーは 10-20 % の減少



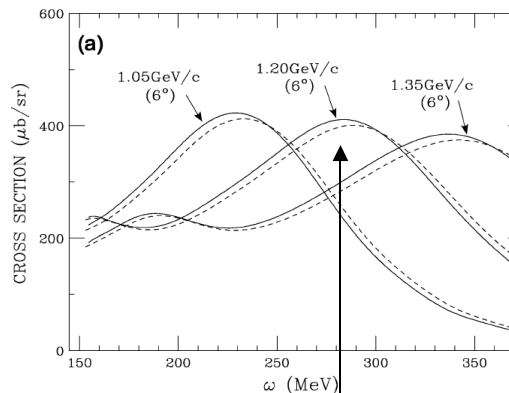
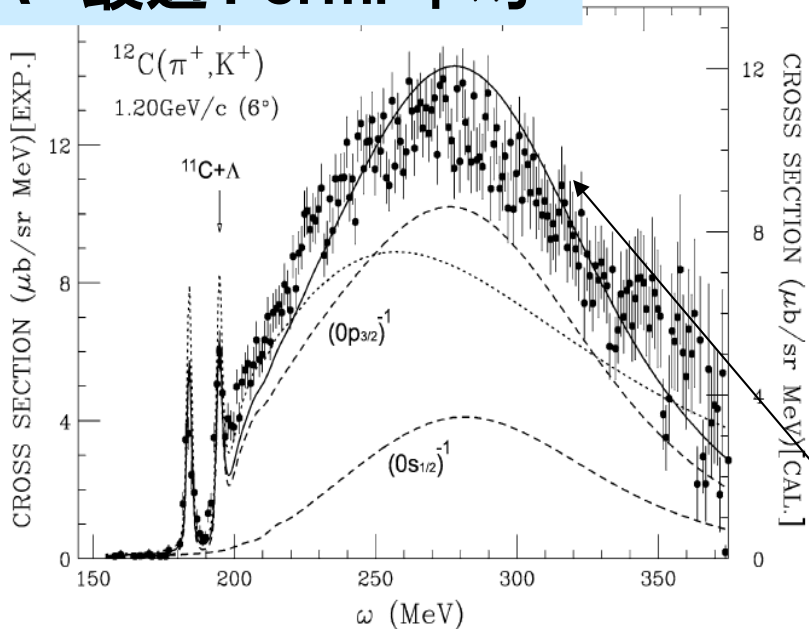
ハイパー核反応データによるハイペロン・ポテンシャルの決定



On-shell 条件を取り入れた素過程t行列の Fermi 平均

T. Harada, Y. Hirabayashi, Nucl. Phys. A 744 (2004) 323

DWIA+ 最適 Fermi 平均



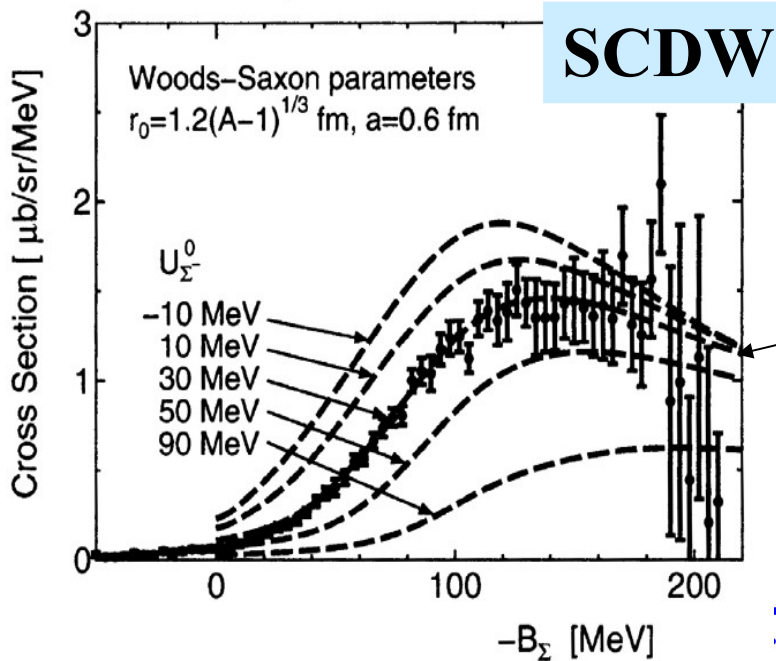
$$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)^{Opt} S(E)$$

Optimal Cross Section

On-shell 条件 + Fermi 平均 (最適 Fermi 平均)

素過程の強いエネルギー依存性

QF の記述に重要



$$\langle t(s, t) \rangle = \frac{\int d\mathbf{p}_N t(s, t) \rho(p_N) \delta^{(4)}(p_1 + p_2 - p_3 - p_4)}{\int d\mathbf{p}_N \rho(p_N) \delta^{(4)}(p_1 + p_2 - p_3 - p_4)}$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)^{Opt} = \frac{p_K E_K}{(2\pi)^2 v_\pi} |\langle t(s, t) \rangle|^2$$

M. Kohno, Y. Fujiwara, M. Kawai et al,

PP112 (2004)895, 特定研究会, 2007/11/26-28

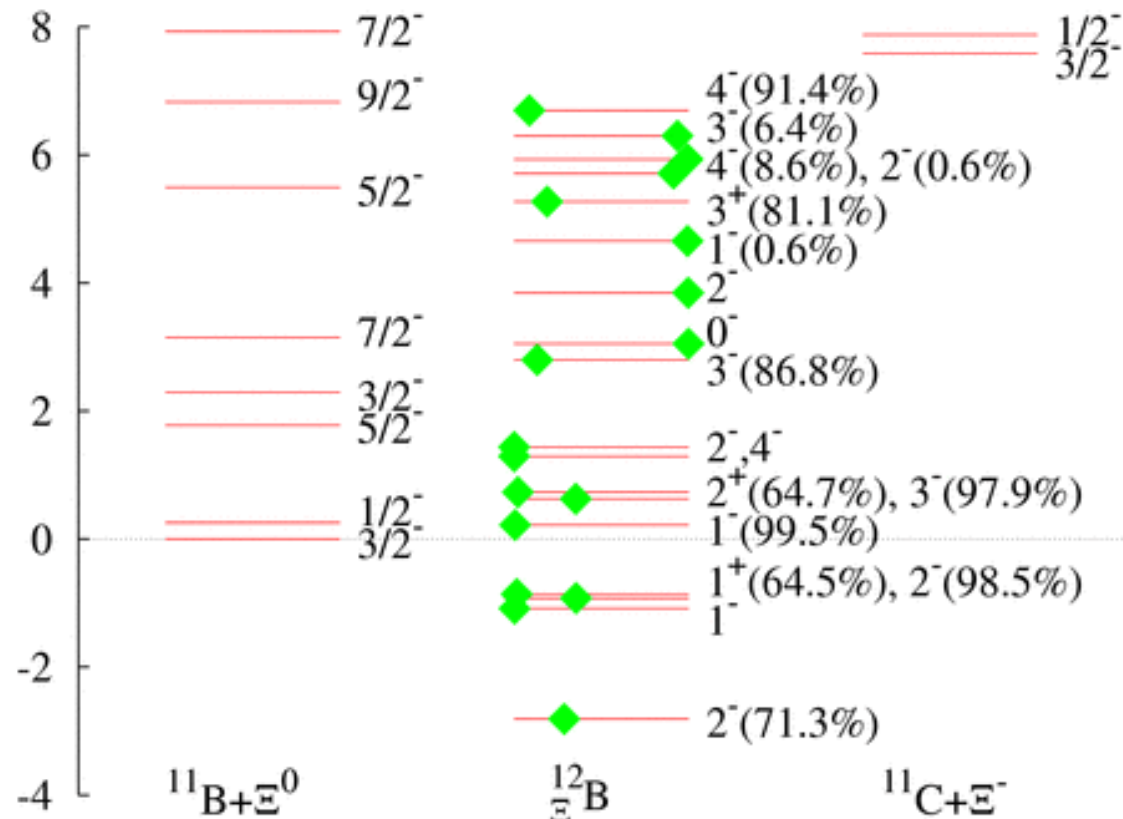
Antisymmetrized Molecular Dynamics (AMD)

- Microscopic Model for *Structure and Reaction* Studies
Ono, Horiuchi, Maruyama, AO, 1992 / Kanada-En'yo, Horiuchi, 1995
 - Slater determinant of Gaussian wave packets
 - **Capable of describing Shell / Cluster states**
 - Variation of parameters determines the shape of nuclei
 - Good description of transition matrix element (B(E2), ..)
 - **Problems in structure studies:**
 - High CPU cost for heavy nuclei
 - Nodes are generated by Antisym. → No Node for one particle
 - **Wait for Faster CPU**
 - Inverse matrix elements of s.p. overlap → No particle mixing
 - **Multigauss AMD** (*Dote, Akaishi, Horiuchi, Yamazaki, 2004*)
 - **CoFactor rather than Inverse Matrix** (*This work*)

Level Structure: $^{12}_{\Xi}B$ (Coherent mixing ?)

■ $12C(K^-, K^0)^{12}_{\Xi}B, \quad ^{12}_{\Xi}B = (^{11}B + \Xi^0) + (^{11}C + \Xi^-)$

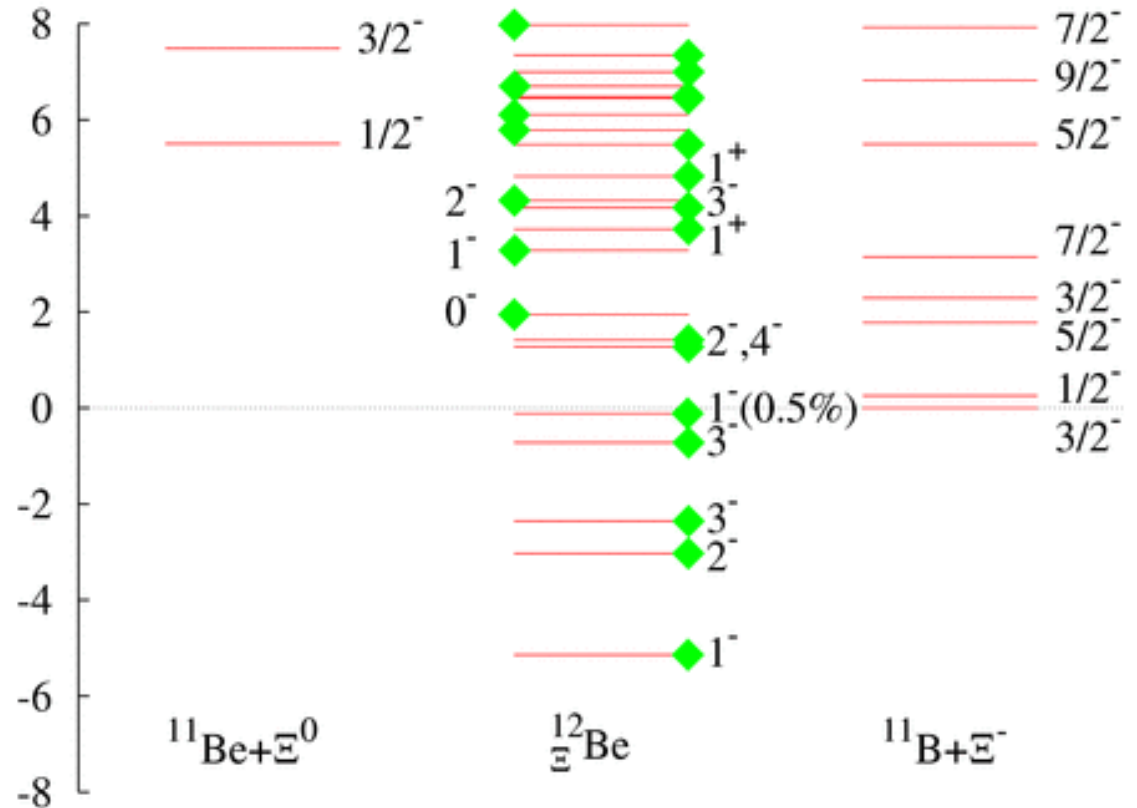
- (Mirror Core) $\otimes \Xi, T=0, 1 \rightarrow \Xi^0 : \Xi^- = 1:1$ without isospin breaking
- Mass diff. ($M(\Xi^-) \sim M(\Xi^0) + 7 \text{ MeV}$) & Coulomb break isospin sym. \rightarrow We need Charge base !



Level Structure: $^{12}_{\Xi}\text{Be}$ (Day-One Experiment Nucleus)

■ $12\text{C}(\text{K}^-, \text{K}^+)^{12}_{\Xi}\text{Be}$, $^{12}_{\Xi}\text{Be} = ({}^{11}\text{Be}(\text{T}=3/2) + \Xi^0) + ({}^{11}\text{B}(\text{T}=1/2) + \Xi^-)$

- “Mass diff. of Core > Mass diff. of Ξ ” + “Core T diff.”
 - Almost No Coupling Effects
 - Single Channel (potential) description would be good enough !



Level Structure: $^{28}_{\Xi}\text{Mg}$ (Day-Two Experiment ?)

- $^{28}\text{Si}(K^-,K^+)^{28}_{\Xi}\text{Mg}$, $^{28}_{\Xi}\text{Mg} = ({}^{27}\text{Mg}(T=3/2)+\Xi^0) + ({}^{27}\text{Al}(T=1/2)+\Xi^-)$
 - “Masses of Core+ Ξ ” are Comparable, but Core T are different.
 - Almost no mixture of Ξ^- and Ξ^0 channels
 - Ξ^- states will be selectively populated in (K^-,K^+) reaction

