



Deeply Bound Pionic Atom Formation by $(d, {}^3\text{He})$ Reactions at RIBF

奈良女子大学 木村梨恵 (M1 )

山縣淳子

比連崎悟

IFIC Valencia Univ. Li Sheng Geng

Introduction

- π 中間子原子の観測(1950年代～)

- X線分光 ex) C. Batty, E. Friedman, and A. Gal, Phys. Rep. 287(1997)385

- (d, ^3He)反応 重い核の深く束縛された状態を観測

H. Toki, T. Yamazaki, Phys. Lett. B213(1988)129

H. Toki, S. Hirenzaki, T. Yamazaki, R. S. Hayano, Nucl. Phys. A501(1989)653

1996年 Pb標的(2p state)

S. Hirenzaki, H. Toki, T. Yamazaki, Phys. Rev. C44(1991)2472

K. Itahashi, et al. , Phys. Rev. C62(2000)025201

2001年 Sn標的(1s state)

Y. Umemoto, S. Hirenzaki, K. Kume and H. Toki, Phys. Rev C62(2000) 024606

K. Suzuki, et al. , Phys. Lett. 92(2004)072302

@ドイツGSI

● π 中間子原子の高分解能実験@理研RIBF

RIBF-027 K. Itahashi, et al. ,

- (d, ^3He)反応
- $T_d=500[\text{MeV}]$ Recoilless
- 標的核 $^{119}\text{Sn}, ^{120}\text{Sn}, ^{124}\text{Sn}, ^{121}\text{Sb}, ^{123}\text{Sb}, ^{122}\text{Te}, ^{124}\text{Te}, ^{126}\text{Te}$
- 分解能 $\sim 150[\text{keV}]$ (以前の3倍近くの分解能)
→1つの標的核に対して多くの状態を観測可能?

アイソトープ
アイソトーン

[目的]・中性子分布 ρ_n の不定性を減らす

(→ π -A相互作用の不定性を減らし、より精密に決定する)

・浅い状態をX線分光と(d, ^3He)反応で観測・比較

● π 中間子原子の高分解能実験 @ 理研RIBF

RIBF-027 K. Itahashi, et al. ,

○ (d, ^3He)反応

○ $T_d=500[\text{MeV}]$ Recoilless

○ 標的核 ^{119}Sn , ^{120}Sn , ^{124}Sn , ^{121}Sb , ^{123}Sb , ^{122}Te , ^{124}Te , ^{126}Te

○ 分解能 $\sim 150[\text{keV}]$ (以前の3倍近くの分解能)

→ 1つの標的核に対して多くの状態を観測可能?

[目的]・中性子分布 ρ_n の不定性を減らす

($\rightarrow \pi$ -A相互作用の不定性を減らし、より精密に決定する)

・浅い状態をX線分光と(d, ^3He)反応で観測・比較

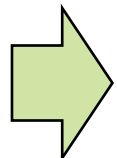
● 理論側からの興味、計算のinputに対する結果の依存性

○ 中性子の波動関数

○ 標的核中の各レベルの中性子占有確率

これらの不定性が計算結果に
どのような影響を与えるか?

Y. Umemoto, S. Hirenzaki, K. Kume and H. Toki, Phys. Rev C62, 024606(2000)



生成断面積の理論的な評価を行う

Formulation (Structure)

H. Toki, S. Hirenzaki, T. Yamazaki, R. S. Hayano,
Nucl. Phys. A501(1989)653

- Klein-Gordon方程式を用いた構造計算

$$[-\vec{\nabla}^2 + \mu^2 + 2\mu V_{opt}(r)]\phi(\vec{r}) = [E - V_{coul}(r)]^2 \phi(\vec{r})$$

$$2\mu V_{opt}(r) = -4\pi[b(r) + \varepsilon_2 B_0 \rho^2(r)] + 4\pi \nabla \cdot [c(r) + \varepsilon_2^{-1} C_0 \rho^2(r)] L(r) \nabla$$

$$b(r) = \varepsilon_1 [b_0 \rho(r) + b_1 [\rho_n(r) - \rho_p(r)]]$$

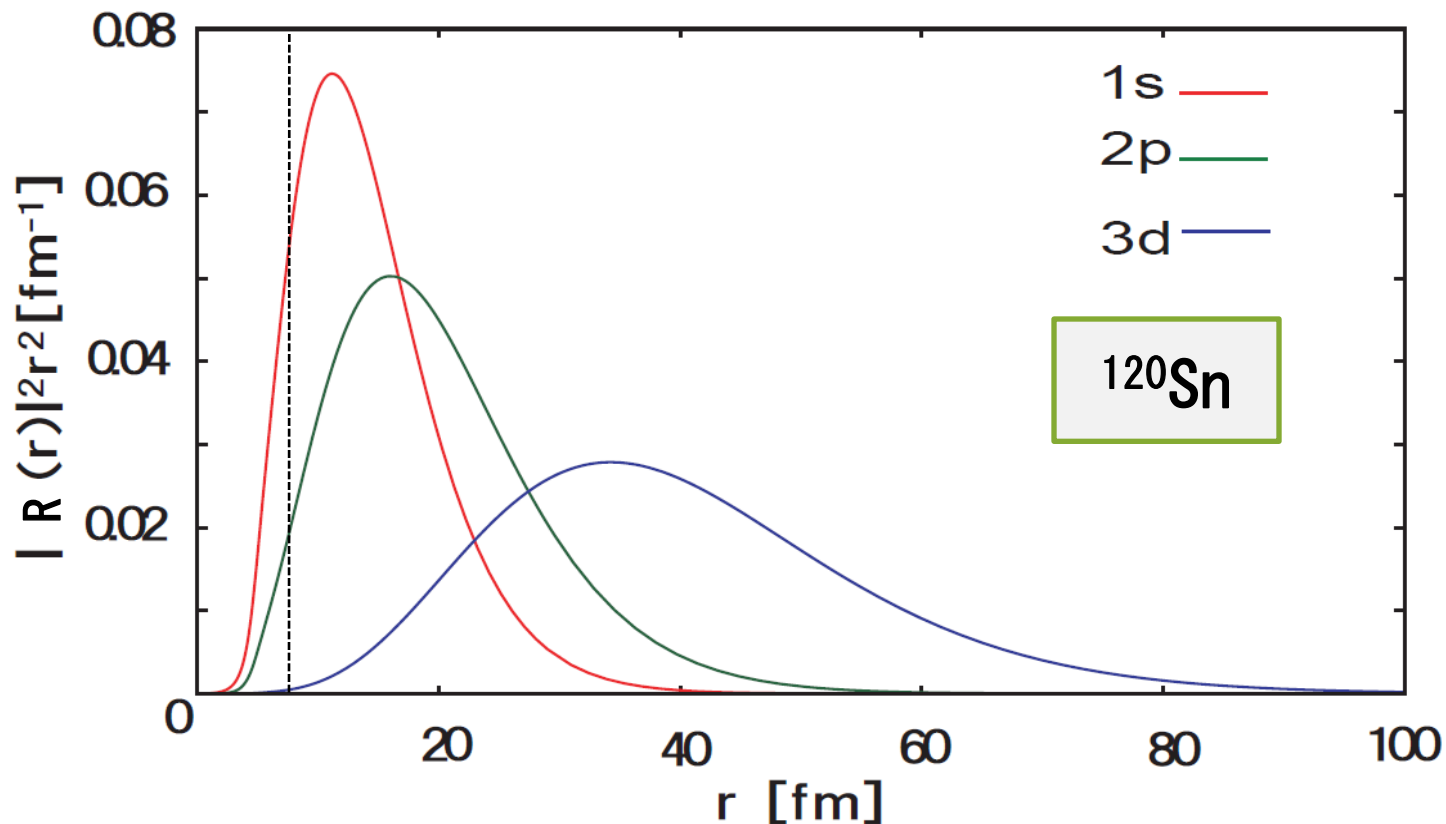
$$c(r) = \varepsilon_1^{-1} [c_0 \rho(r) + c_1 [\rho_n(r) - \rho_p(r)]]$$

$$L(r) = \left\{ 1 + \frac{4}{3} \pi [c(r) + \varepsilon_2^{-1} C_0 \rho^2(r)] \right\}^{-1}$$

M. Ericson and T. E. O Ericson, Ann. Of. Phys, 36(1966)496

R. Seki, K. Masutani, Phys. Rev. C27(1983)2799

- π 中間子の波動関数とエネルギー



1s 状態	BE=3878 (keV)	$\Gamma=335.9$ (keV)
2p 状態	BE=2281 (keV)	$\Gamma=122.0$ (keV)
3d 状態	BE=1044 (keV)	$\Gamma=2.54$ (keV)

Formulation (Reaction)

Bound state
Only

Y. Umemoto, S. Hirenzaki, K. Kume and H. Toki, Phys. Rev C62, 024606(2000)

- Effective Number法による生成断面積の計算

$$\frac{d^2\sigma}{dEd\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{dn \rightarrow {}^3\text{He}\pi}^{lab} \times \sum_{[l_\pi \otimes j_n^{-1}]} \text{N}_{\text{eff}} \frac{\Gamma_\pi}{2\pi} \frac{1}{(E-Q)^2 + \Gamma_\pi^2/4}$$

$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{dn \rightarrow {}^3\text{He}\pi}^{lab}$: 素過程断面積 (実験データ)

- 歪曲波インパルス近似
- アイコーナル近似 (歪曲波)

$$\text{N}_{\text{eff}} = \sum_{JMm_s} \left| \int d^3x \chi_f^*(\vec{r}) \xi_{1/2, m_s}^* [\phi_{l_\pi}^*(\vec{r}) \otimes \psi_{j_n}(\vec{r})]_{JM} \chi_i(\vec{r}) \right|^2 \times F_0 \times F_R$$

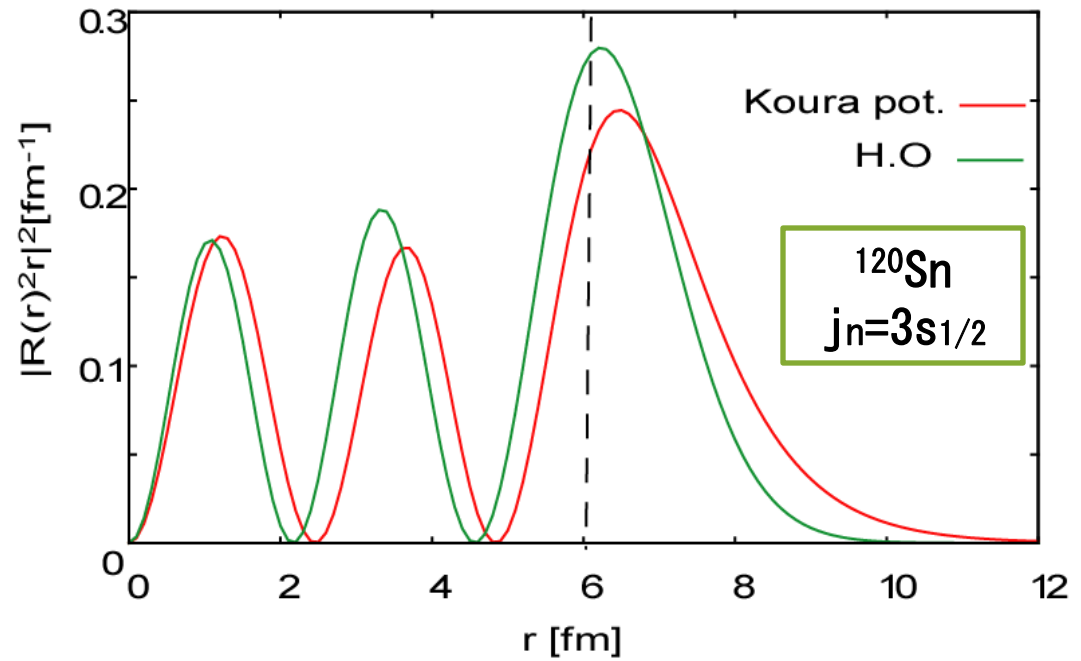
F_0 : 標的核の軌道 j_n に存在する中性子の占有確率

F_R : 軌道 j_n から pick up されたできたホールの相対励起強度

$$-Q = m_\pi + S_n(j_n) - (M_n + M_d - M_{{}^3\text{He}}) : Q\text{値}$$

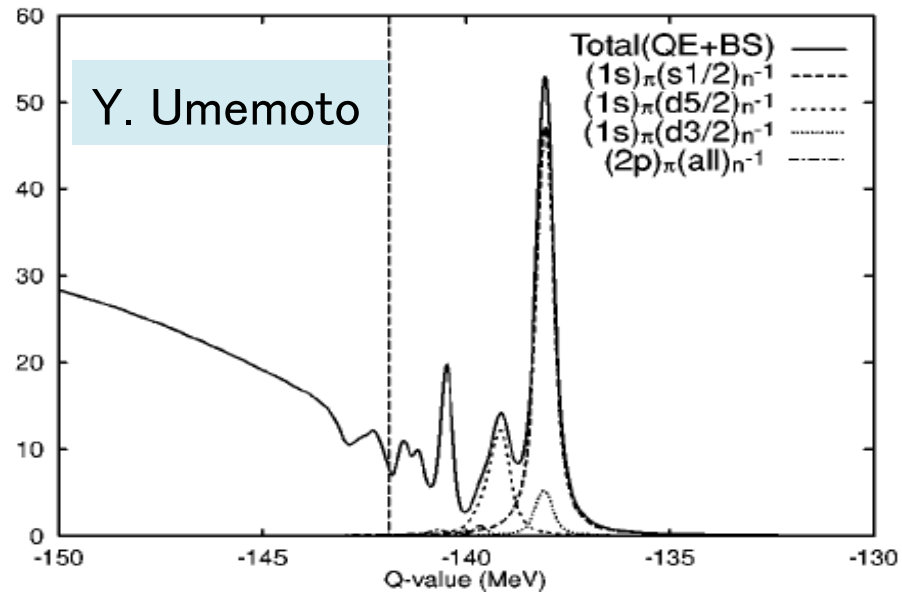
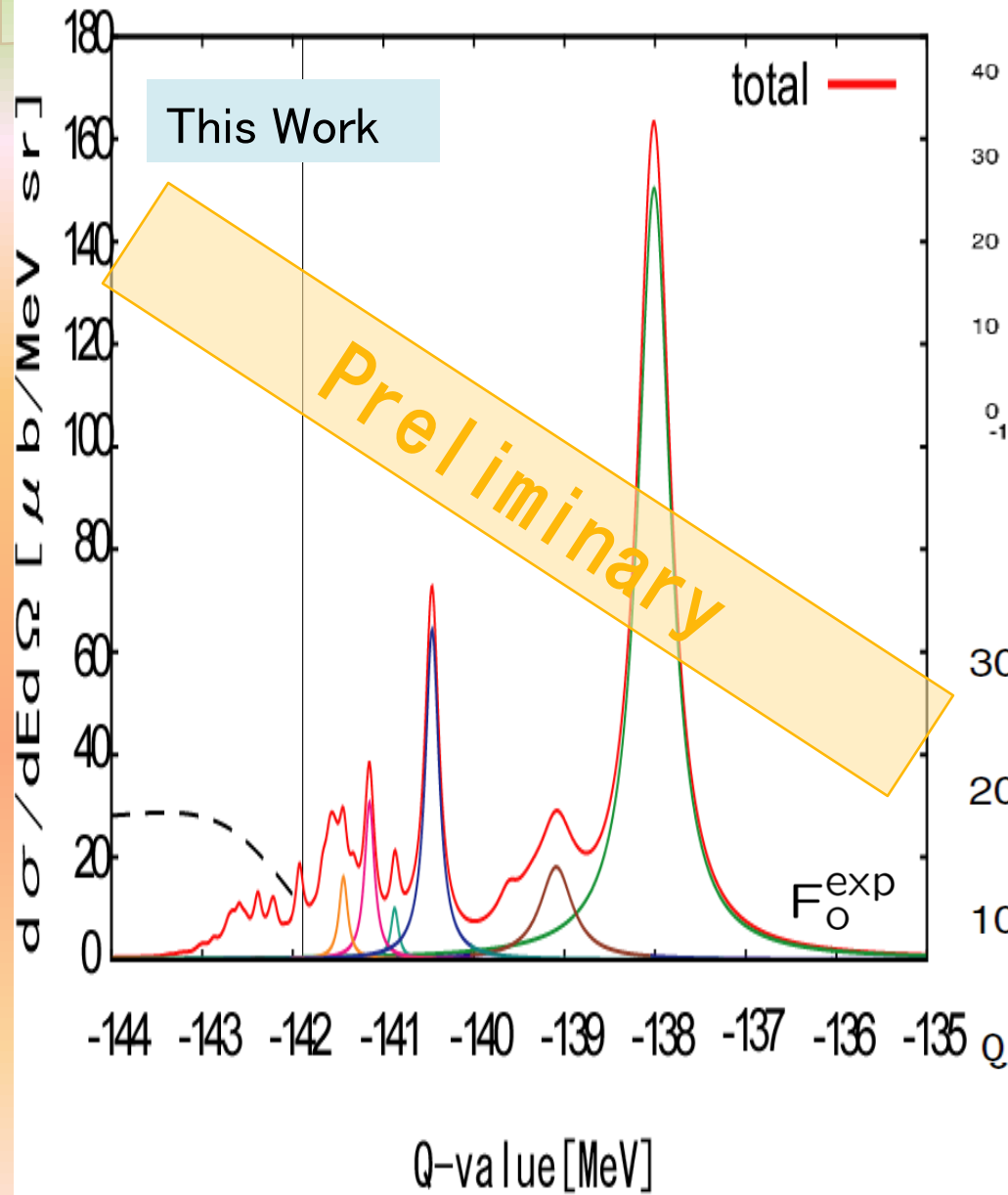
- 中性子の波動関数

H. Koura, M. Yamada,
Nucl. Phys. A671(2000)96

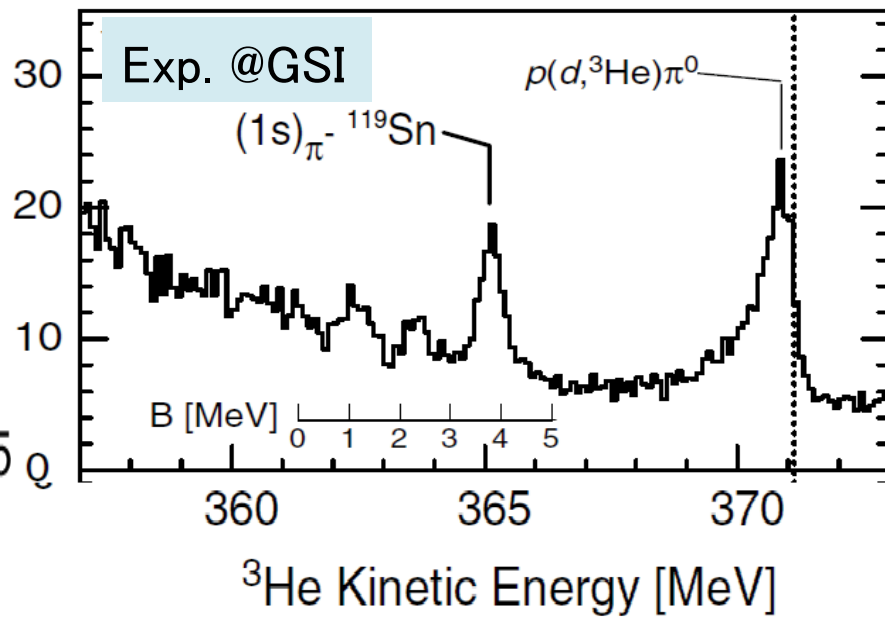


- 中性子占有確率

π 中間子の生成断面積 $^{120}\text{Sn}(d, ^3\text{He})$



Y. Umemoto, S. Hirenzaki, K. Kume and H. Toki,
Phys. Rev C62(2000) 024606



K. Suzuki, et al. , Phys. Lett.92(2004)072302

- 中性子の波動関数

- 中性子占有確率 $F_0(3s_{1/2})$

(実験)

M. A. G Fernandes and M. N. Rao, J. Phys., 3, 10(1977)1397
 E.J. Schneid, A. Prakash, and B.L. Cohen, Phys. Rev.156,1316(1967)

(理論)

L. Geng, T. Toki, S. Sugimoto, and J. Meng, Prog. Theor. Phys. 110(2003)921

$3s_{1/2}$	^{120}Sn	^{124}Sn	^{122}Te	^{126}Te
実験値	0.7	0.8	0.335	0.50
理論値 (deformed)	0.525	0.777	0.022	0.054
理論値 (spherical)	0.54	0.78	0.41	0.69

- 中性子の波動関数

- 中性子占有確率 $F_0(3s_{1/2})$

(実験)

M. A. G Fernandes and M. N. Rao, J. Phys., 3, 10(1977)1397
 E.J. Schneid, A. Prakash, and B.L. Cohen, Phys. Rev.156,1316(1967)

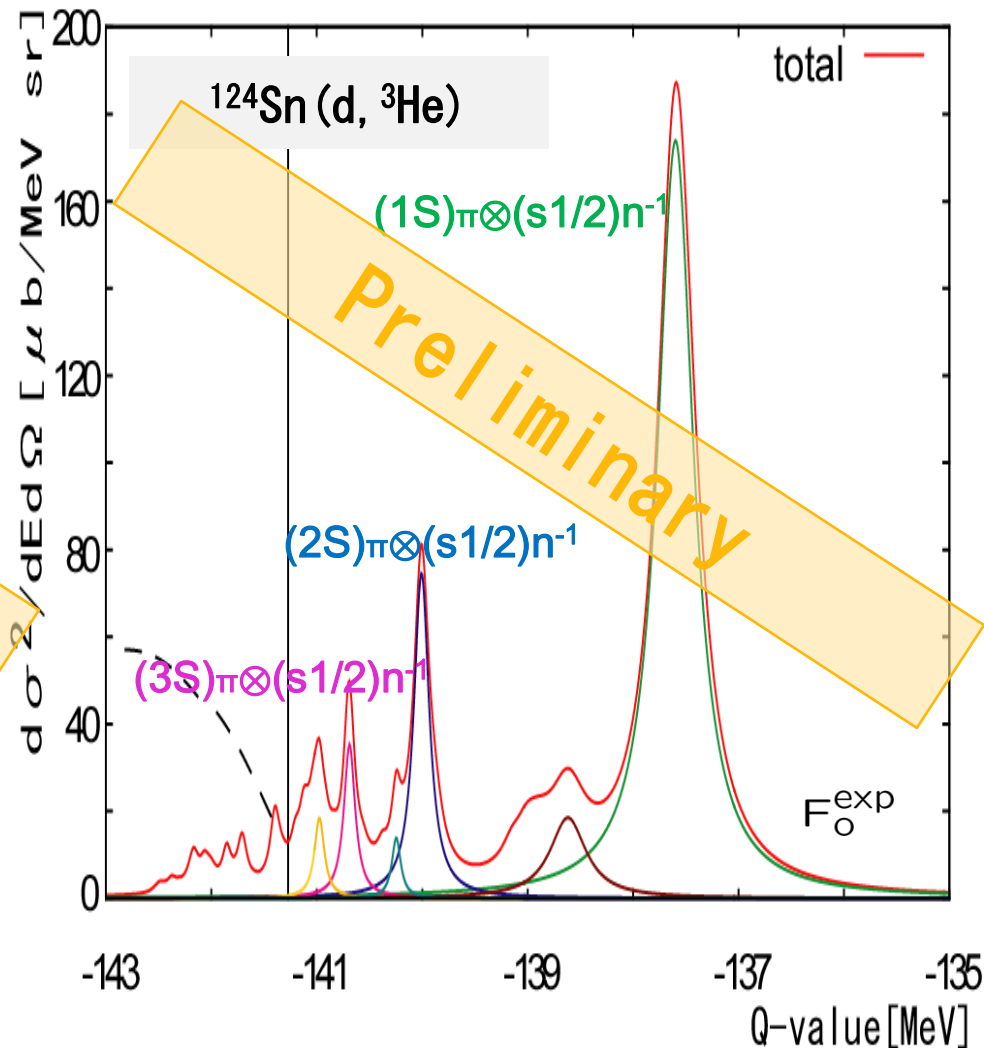
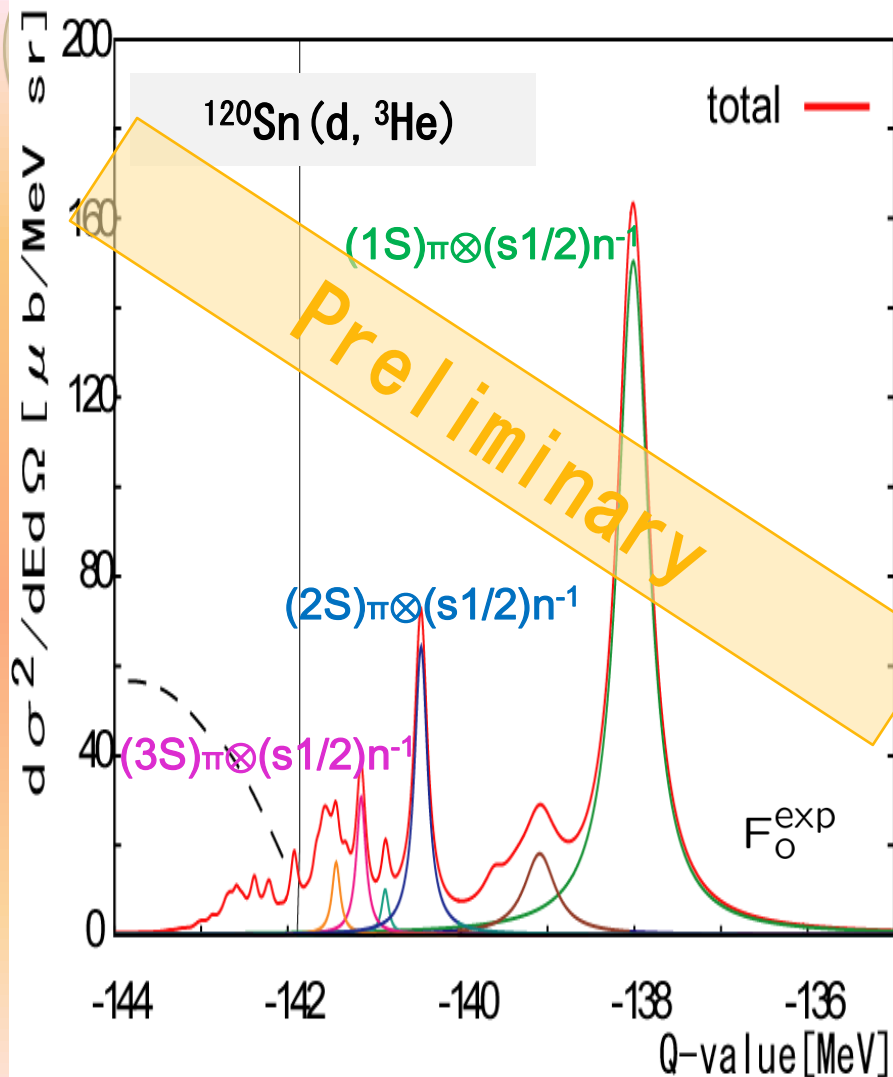
(理論)

L. Geng, T. Toki, S. Sugimoto, and J. Meng, Prog. Theor. Phys. 110(2003)921

$3s_{1/2}$	^{120}Sn	^{124}Sn	^{122}Te	^{126}Te
実験値	0.7	0.8	0.335	0.50
理論値 (deformed)	0.525	0.777	0.022	0.054
理論値 (spherical)	0.54	0.78	0.41	0.69

Numerical Results

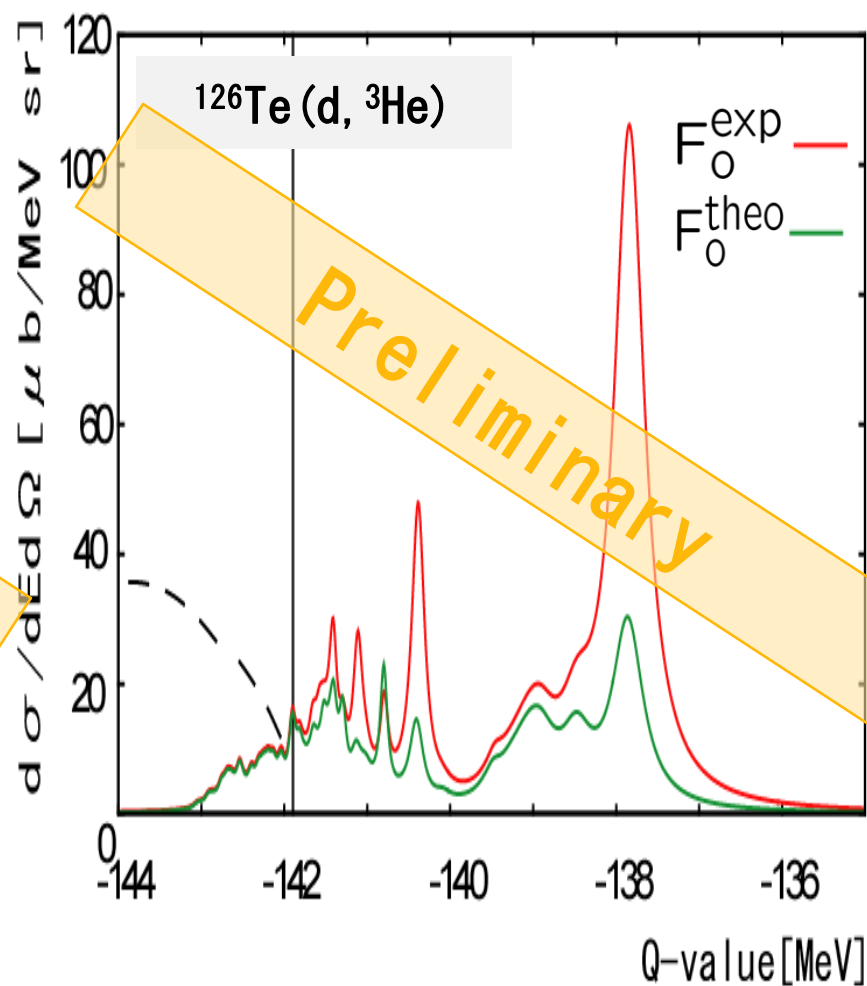
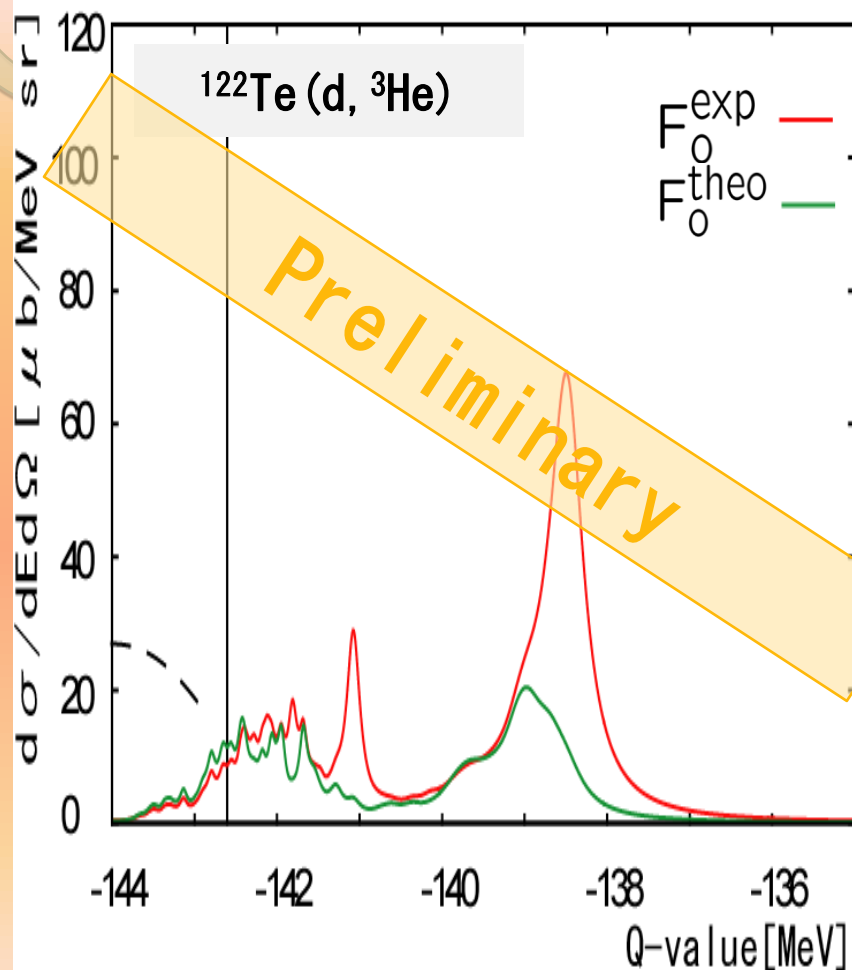
π 中間子原子の生成断面積 標的核 ^{120}Sn , ^{124}Sn



Numerical Results

π 中間子原子の生成断面積

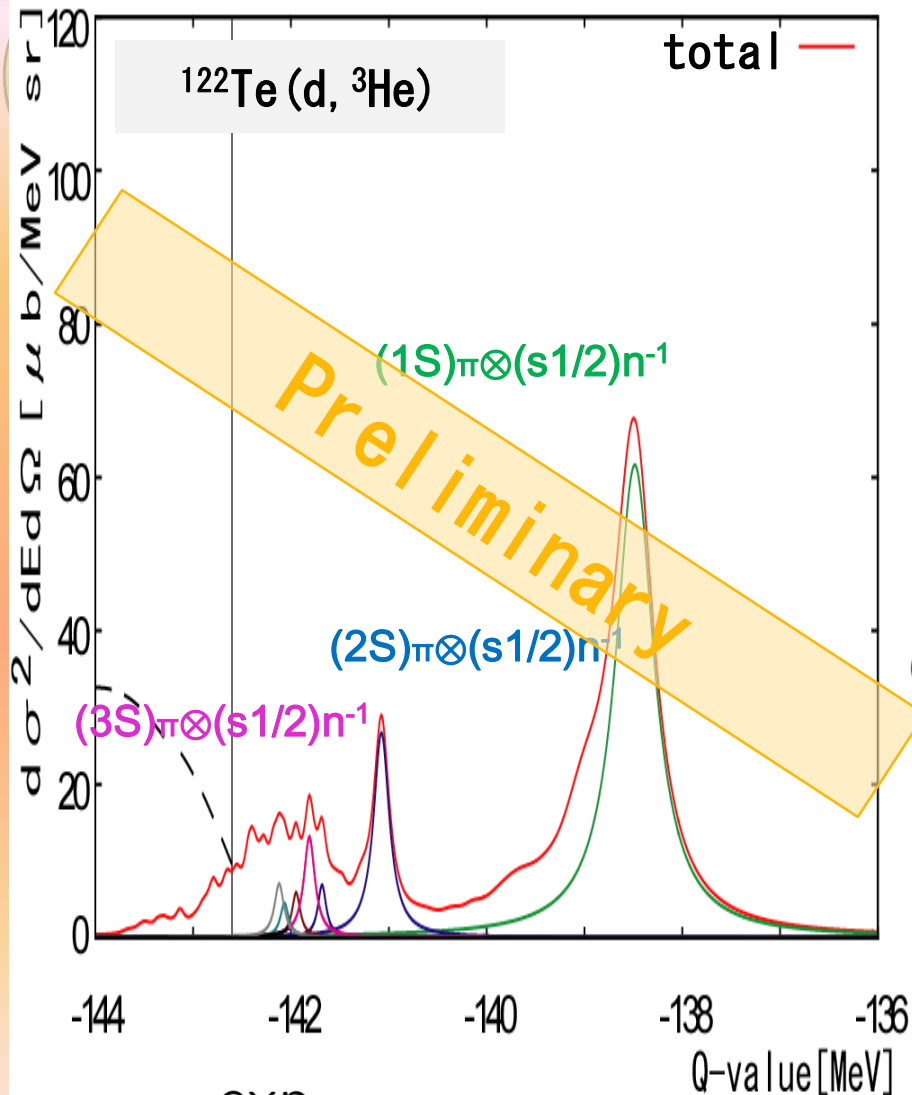
標的核 ^{122}Te , ^{126}Te



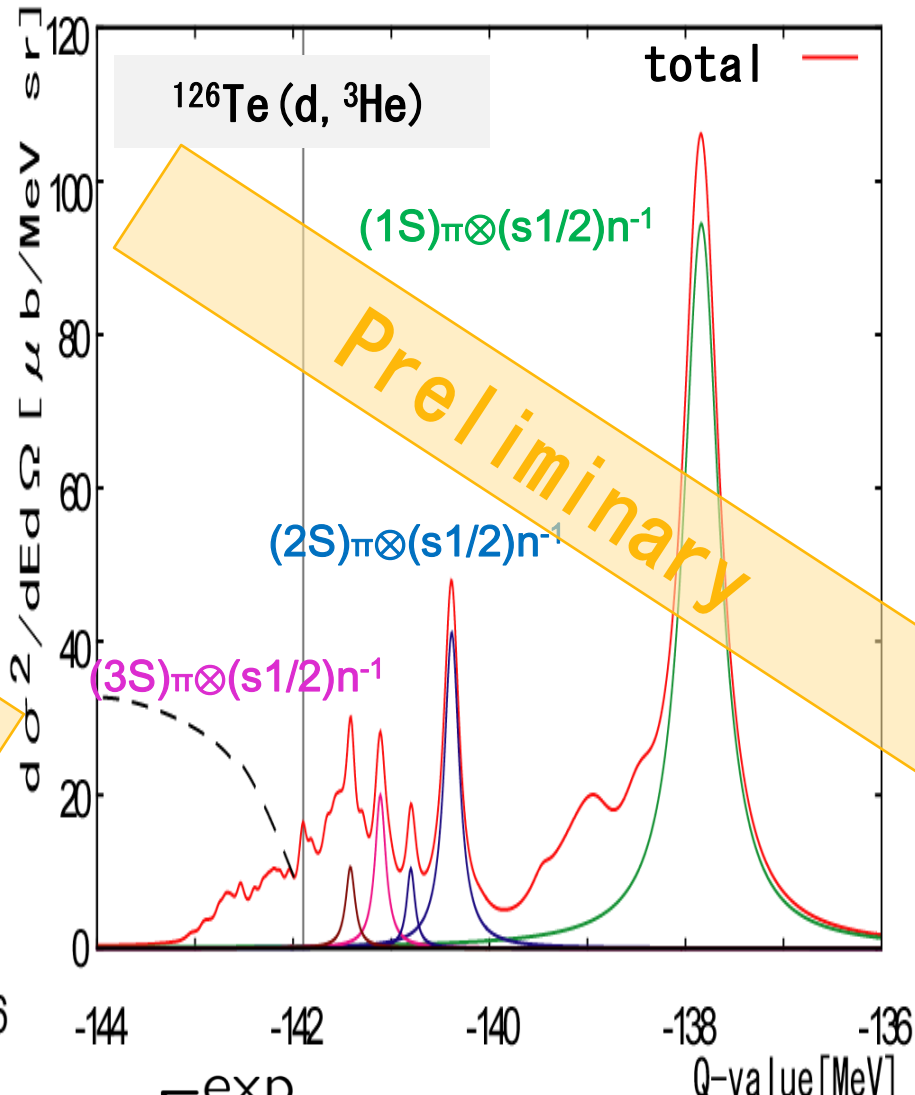
Numerical Results

π 中間子原子の生成断面積

標的核 ^{122}Te , ^{126}Te



$$F_{\text{O}}^{\text{exp}} (S1/2) = 0.335$$

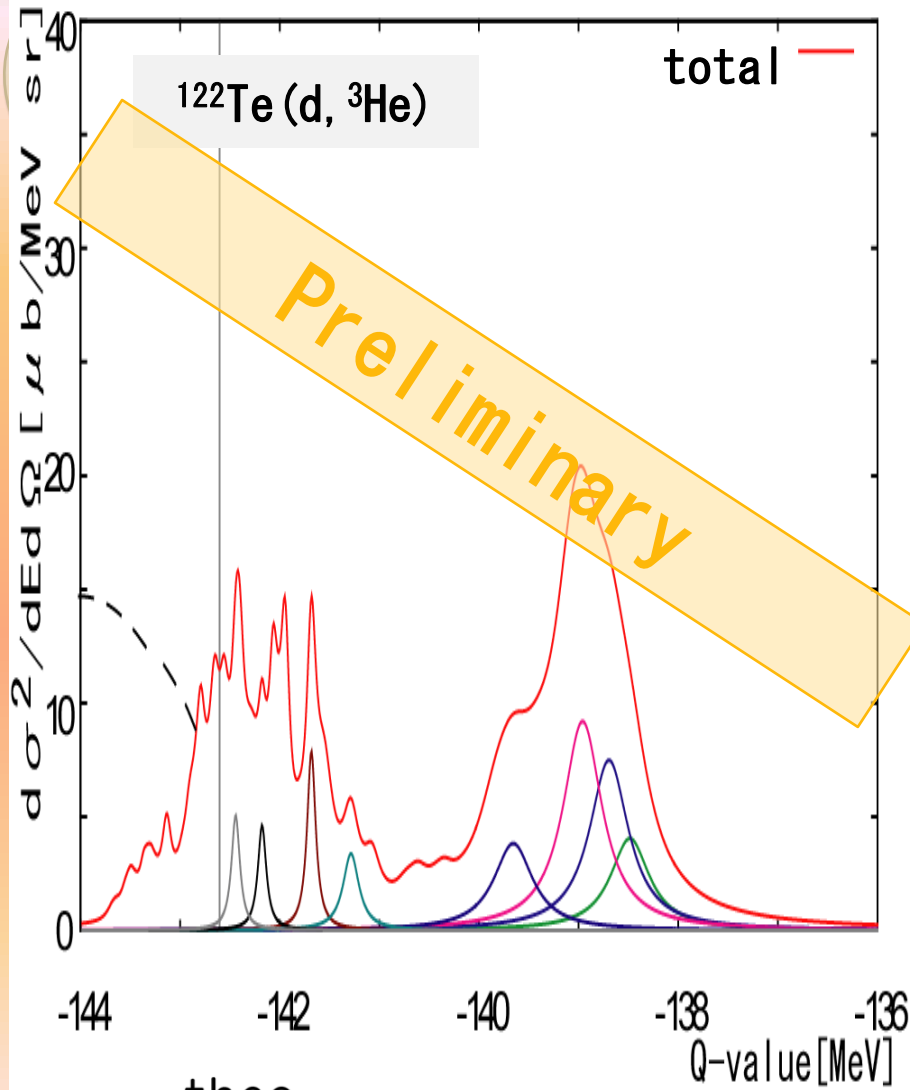


$$F_{\text{O}}^{\text{exp}} (S1/2) = 0.50$$

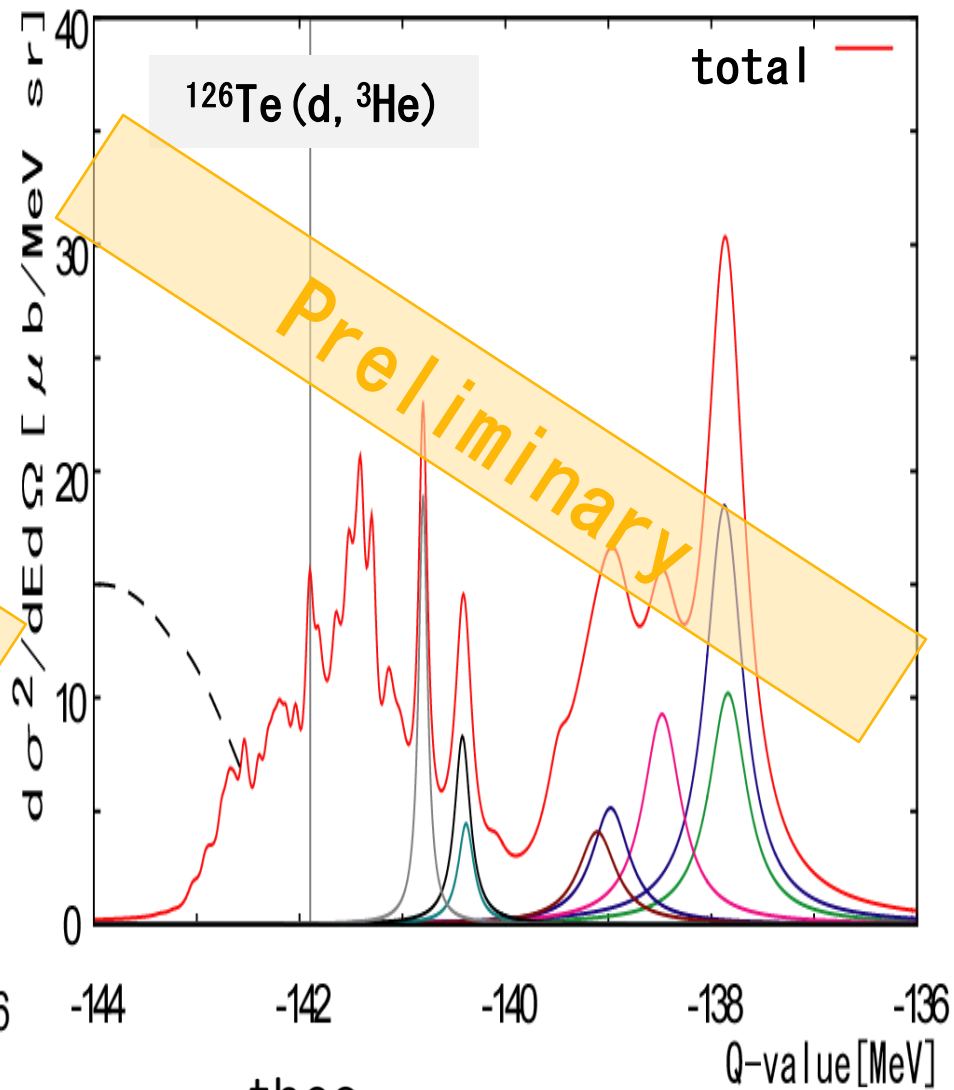
Numerical Results

π 中間子原子の生成断面積

標的核 ^{122}Te , ^{126}Te



$$F_0^{\text{theo}}(s1/2) = 0.022$$

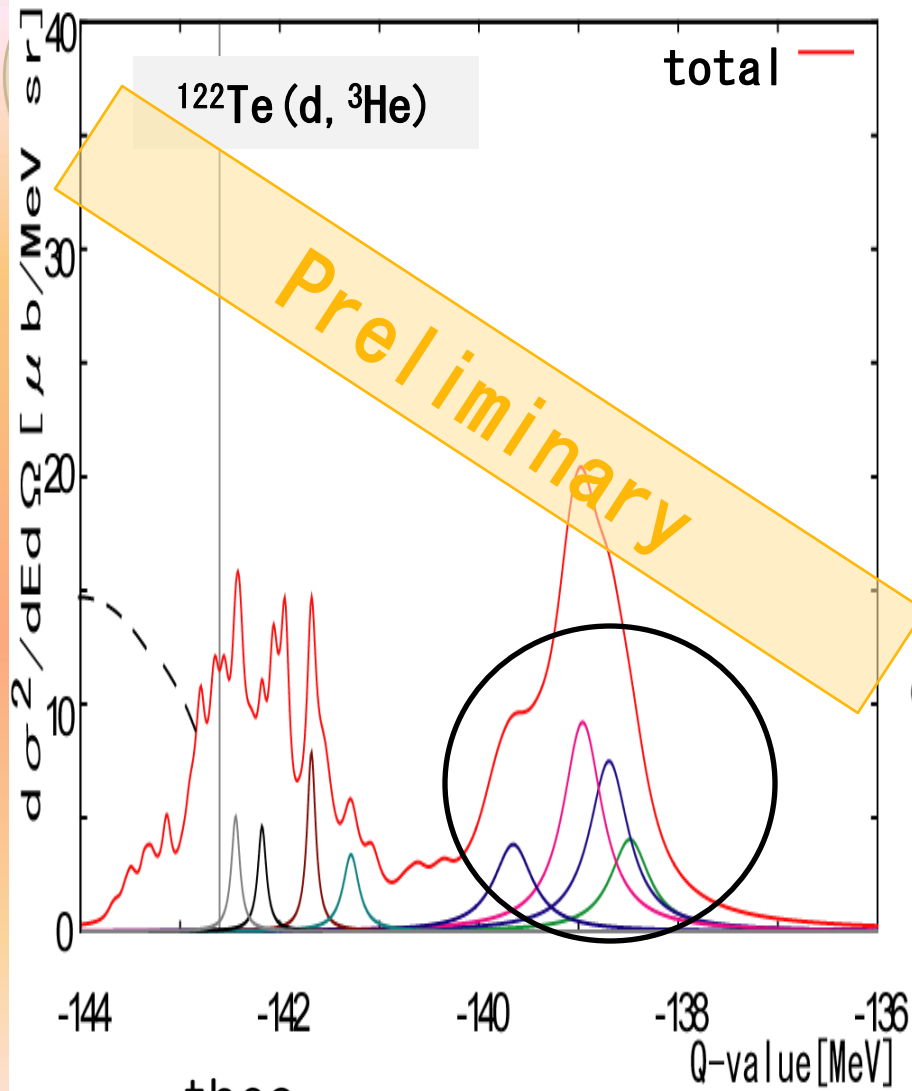


$$F_0^{\text{theo}}(s1/2) = 0.054$$

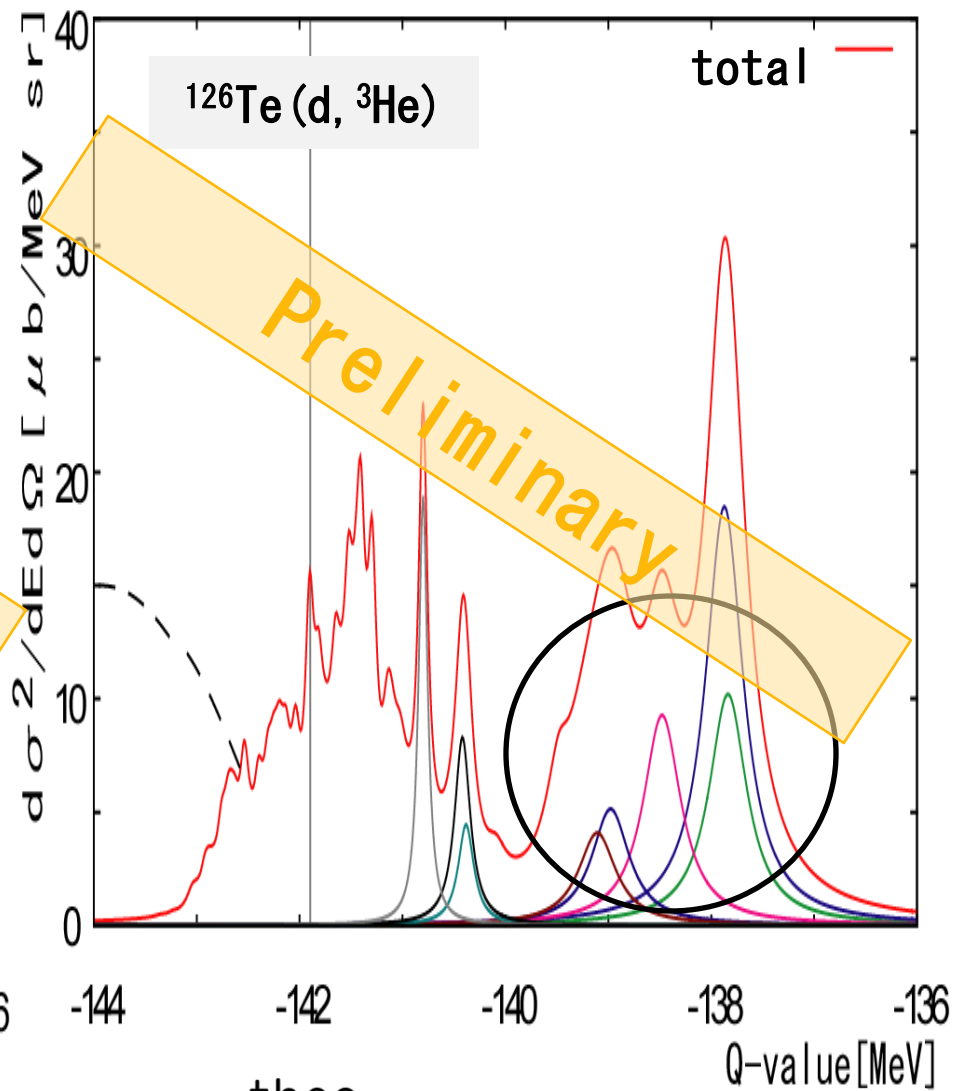
Numerical Results

π 中間子原子の生成断面積

標的核 ^{122}Te , ^{126}Te



$$F_0^{\text{theo}}(s1/2) = 0.022$$



$$F_0^{\text{theo}}(s1/2) = 0.054$$

Summary

- (d,³He), T_d=500MeV π 中間子原子の生成断面積の理論的評価
 - Effective Number 法
 - 標的核 ¹²⁰Sn, ¹²⁴Sn, ¹²²Te, ¹²⁶Te
 - ¹²⁰Sn, ¹²⁴Sn は1s,2s,3s,3d などの状態がピークとして見える。
 - TeはF₀^{exp} とF₀^{theo}を用いた場合で断面積が大きく異なる。

F₀^{exp} → ¹²²Te, ¹²⁶Teは 1s, 2s, 3sなどの状態の構造が見える。

F₀^{theo} → ¹²²Te, ¹²⁶Teは s-holeの寄与が小さくなり、
詳細な構造を見るのは難しそう。

- 中性子波動関数による生成断面積の変化

● 今後の課題

- 実験で提案されているすべての標的核について断面積を評価する。

- Isotope, Isotoneのスペクトラムより π -A相互作用を精密に導く最適の方法・観測量の理論的検討

- ψ_n, F_0 による計算結果の不定性について更に検討

➡ より信頼性の高い断面積の理論的予測