

$d(d,\gamma)^4\text{He}$ の天文学的S因子の分析

新潟大学 青山茂義

核力第一原理から構造と反応の統一的理解
ークラスター現象を中心にー

以下の論文以降の発展 (SOTANCP3に向けて)

S. Aoyama, K. Arai, Y. Suzuki, P. Descouvemont and D. Baye, FBS52(2012)97.

K. Arai, S. Aoyama, Y. Suzuki, P. Descouvemont and D. Baye, PRL107(2011) 132502.

内容

1. $d(d, \gamma)^4\text{He}$ の天文学的S因子

- E2以外の電磁遷移 (E1とM1)は、無視できるか？

PRL107 (2011) 132502やSOTANCP2(新井招待講演)では、E2だけで議論

- 長波長近似は、問題ないか(特に、E1)？

$E_\gamma \approx 24\text{MeV}$ なので、 $k_\gamma r$ は、1に近い。

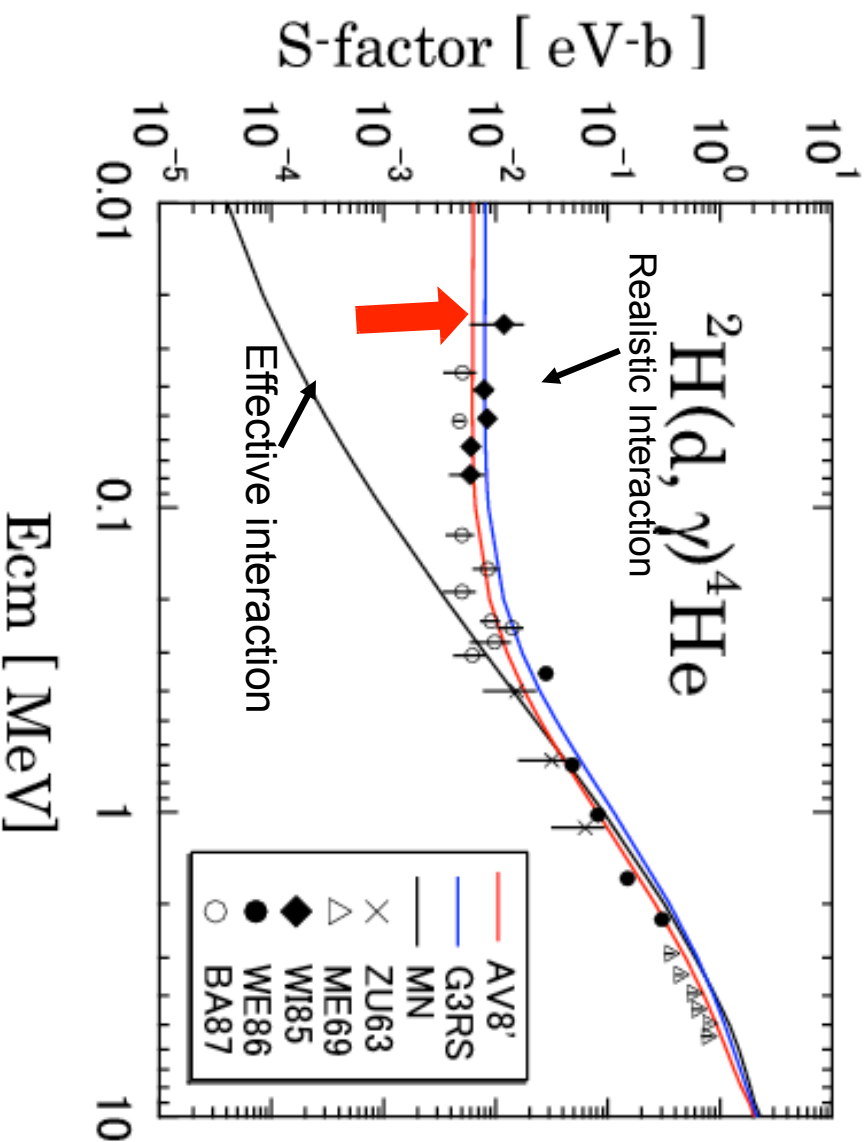
2. ^4He は、クラスターとしきい値物理の宝庫

- Inversion Doublet
- 三体ハロー
- テンソル力

これまでの知識を総動員する必要がある。

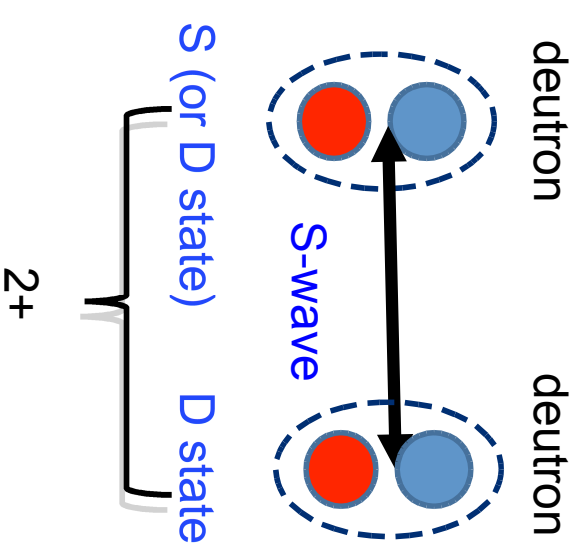
Radiative capture

K. Arai, S. Aoyama, Y. Suzuki, P. Descouvemont and D. Baye, PRL107 (2011) 132502.



$$d(1+; T=0) + d(1+; T=0) \Rightarrow {}^4\text{He} (T=0) + \gamma$$

We can add a new evidence of D-wave components (tensor) of deuteron and ${}^4\text{He}$ to the text book in nuclear physics.



E2 transition is not reduced so much because of d-wave component.

長波長近似での電磁遷移オペレーター (E1, E2, M1)

$$\mathcal{M}_{1\mu}^E = e \sum_i^A g_l^{(i)} r_i Y_{1\mu}(\hat{\mathbf{r}}_i)$$

$$\mathcal{M}_{2\mu}^E = e \sum_i^A g_l^{(i)} r_i^2 Y_{2\mu}(\hat{\mathbf{r}}_i)$$

$$\mathcal{M}_{1\mu}^M = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \mu_N \sum_i^A [g_l^{(i)} \boldsymbol{\ell}_i + g_s^{(i)} \mathbf{s}_i]_{\mu}$$

$$\mu_N = \frac{eh}{2m_n c}$$

$$g_l^{(i)} = \frac{1}{2} - t_{i3}$$

$$g_s^{(i)} = g_p \left(\frac{1}{2} - t_{i3} \right) + g_n \left(\frac{1}{2} + t_{i3} \right)$$

$$\sigma_c = \frac{2J_f + 1}{(2I_1 + 1)(2I_2 + 1)} \sum_{\sigma_{\lambda_1 l_1}} \frac{k_{\sigma}^{2\lambda+1}}{2l_1 + 1} \frac{8\pi(\lambda + 1)}{\hbar \lambda (2\lambda + 1)!!^2} |\langle \Psi^{J_f \pi_f} \| M_{\lambda}^{\sigma} \| \Psi_{l_1}^{J_i \pi_i}(E) \rangle|^2$$

M1は？

$$\begin{aligned}\frac{1}{\mu_N}\mu &= \sum_{i=1}^A \left\{ \frac{1}{2}[1 - (\tau_i)_z]l_i + 5.586\frac{1}{2}[1 - (\tau_i)_z]s_i - 3.826\frac{1}{2}[1 + (\tau_i)_z]s_i \right\} \\ &= \frac{1}{2}\mathbf{L} + 0.88\mathbf{S} - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^A (\tau_i)_z l_i - 4.706\sum_{i=1}^A (\tau_i)_z s_i \\ &= \frac{1}{2}\mathbf{J} + 0.38\mathbf{S} + \frac{1}{2}(\mathbf{L}_p - \mathbf{L}_n) + 4.706(\mathbf{S}_p - \mathbf{S}_n), \quad (13.4)\end{aligned}$$

主要項

Structure and Reactions of Light Exotic Nuclei, 410ページ
Suzuki, Lovas, Yabana, Varga

Correlated Gaussian function with triple global vectors for four nucleon system

Unnatural parity 0-

$$F_{L_1 L_2(L_{12}) L_3 L M}(u_1, u_2, u_3, A, x)$$

$$L_1=L_2=L_{12}=L_3=1$$

$$= \exp\left(-\frac{1}{2}\tilde{x}Ax\right) \left[\mathcal{Y}_{L_1}(\tilde{u}_1x) \right] \mathcal{Y}_{L_2}(\tilde{u}_2x) \left[\mathcal{Y}_{L_{12}} \mathcal{Y}_{L_3}(\tilde{u}_3x) \right]_{LM}$$

Single global vector

Double global vector

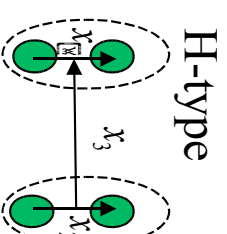
New extension(triple)

$$\mathcal{Y}_{L_i M_i}(\tilde{u}_i x) = |\tilde{u}_i x\rangle^{L_i} Y_{L_i M_i}(\widehat{\tilde{u}_i x}) \quad \tilde{u}_i x = \sum_{j=1}^{N-1} (u_i)_j x_j$$

For H-type, we can choose, $\tilde{u}_1=(1,0,0)$, $\tilde{u}_2=(0,1,0)$ and $\tilde{u}_3=(0,0,1)$

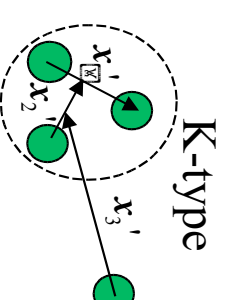
We also write the K-type basis function in the same form.

$$\exp\left(-\frac{1}{2}\tilde{x}'A_Kx'\right) \left[\mathcal{Y}_{L_1}(x'_1) \mathcal{Y}_{L_2}(x'_2) \right]_{L_{12}} \mathcal{Y}_{L_3}(x'_3) \Big]_{LM}$$



$$x' = U_{KH}x \quad \tilde{u}_1=(1,0,0), \tilde{u}_2=(0,-\frac{1}{2},1) \text{ and } \tilde{u}_3=(0,\frac{2}{3},\frac{2}{3})$$

$$A = (u_1 u_2 u_3) A_K \begin{pmatrix} \tilde{u}_1 \\ \tilde{u}_2 \\ \tilde{u}_3 \end{pmatrix} = \widetilde{U_{KH} A_K U_{KH}}$$



Hamiltonian(4-body case)

$$H = \sum_{i=1}^4 T_i - T_{cm} + \sum_{i < j}^4 V_{ij} + \sum_{i < j < k}^4 V_{ijk},$$

Realistic Interaction: **AV8'** (+Coulomb+3NF)

Pudliner, Pandharipande, Carlson, Pieper, Wiringa: PRC56(1997)1720

Hiyama, Gibson, Kamimura, PRC 70(2003)031001

Effective Interaction: **MN** (+Coulomb)

Thompson, LeMere, Tang, NPA(1977)286

Microscopic R-matrix method

a : channel radius (13-15fm)

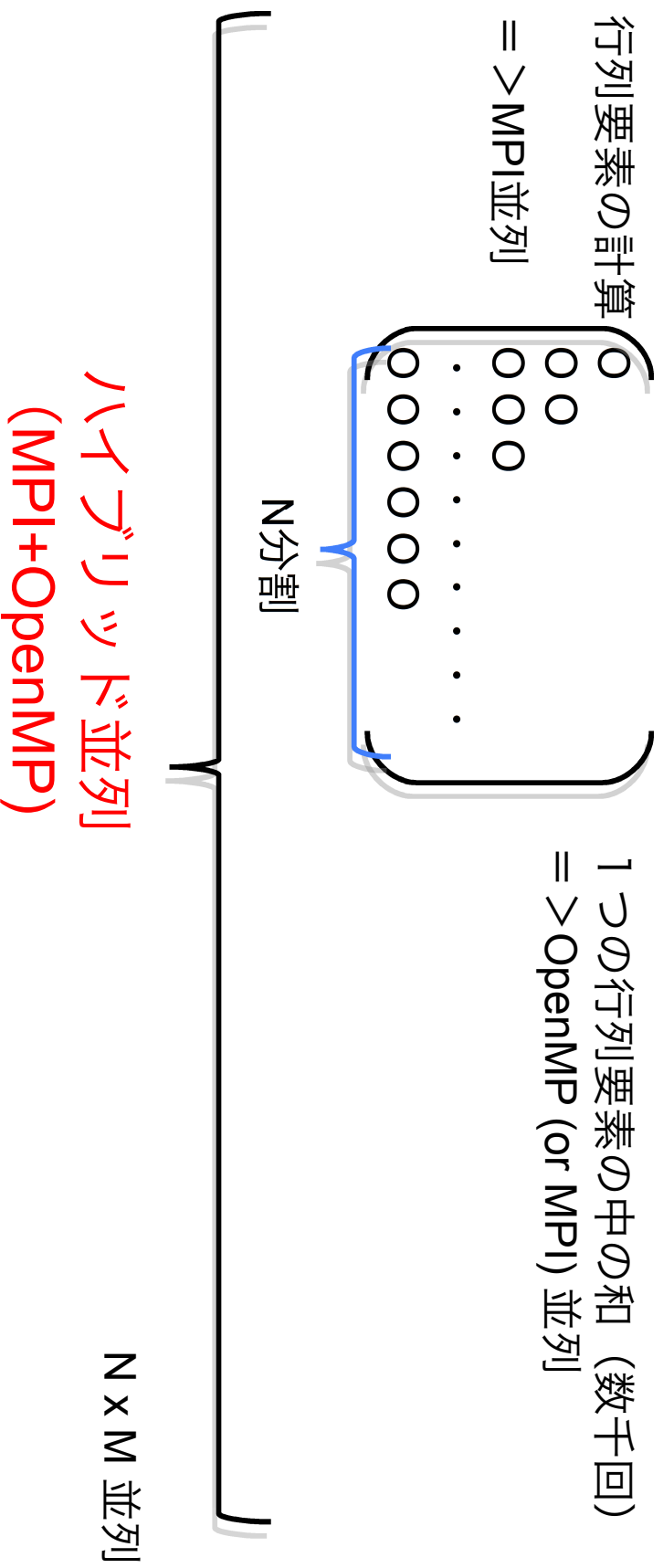
$x_3 < a$ --- Gaussian expansion

$x_3 > a$ --- $I_1(ka) d'_{aa'}$ - $S_{aa'}$ $O_1(ka)$ or $W_{l+1/2,h}(2ka)$

e.g. **D. Baye, P.-H.Heenen, M. Libert-Heinemann, NPA291(1977).**

並列化デザイン

(5核子計算に向けて、単純MPI並列から、現在、拡張中)



北海道大学SR160000の1000~4000コアを利用

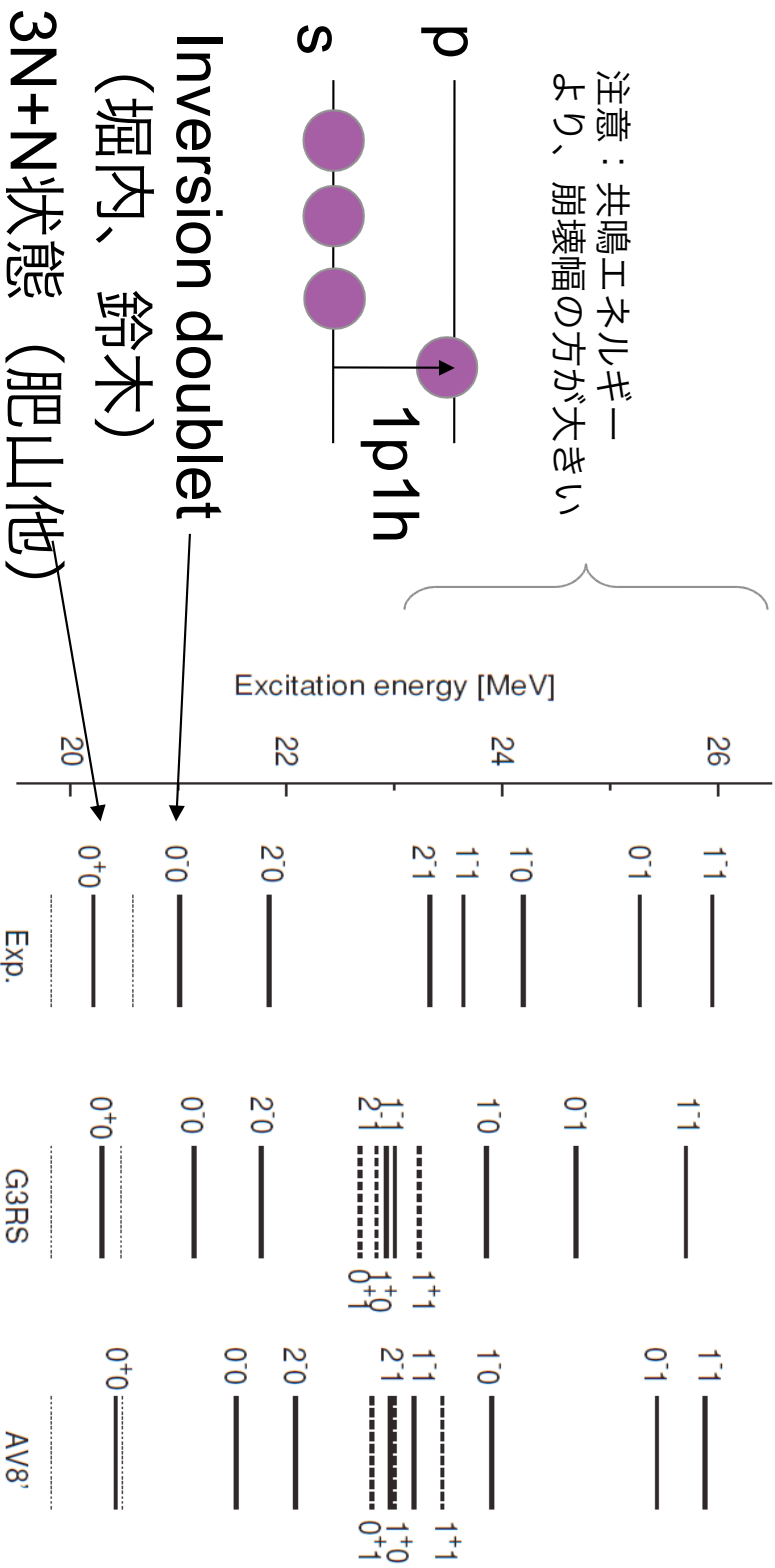
平成24~25年度HPCIシステム利用研究課題
「現実的核力をを用いたビッグバン元素合成反応の第一原理計算」

Inversion doublets of $3N + N$ cluster structure in excited states of ${}^4\text{He}$

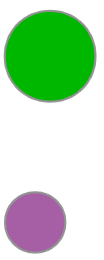
W. Horiuchi¹ and Y. Suzuki²

堀内、鈴木の第一原理計算 (束縛近似)

注意：共鳴エネルギーより、崩壊幅の方が大きい



0+と0-は、t+pの共鳴



3N N

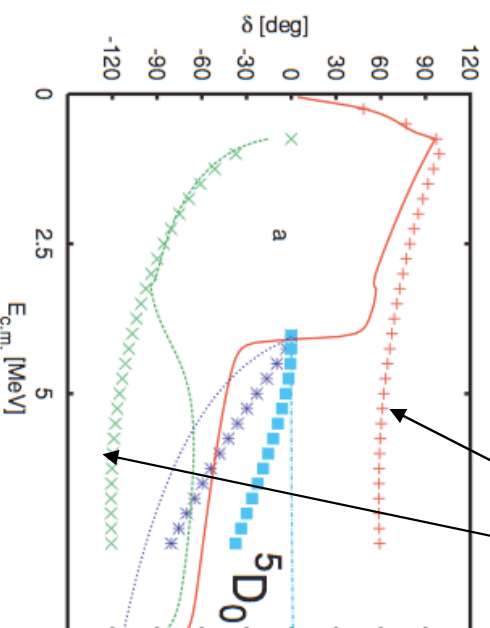
S. Aoyama, K. Arai, Y. Suzuki, P. Descouvemont and D. Baye, FBS52, (2012)97.

h+nのInversion doubletsは、何処へ？

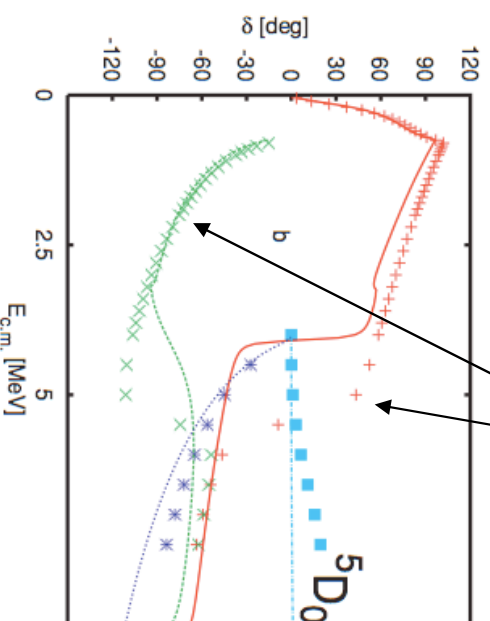
Phase Shift (R行列理論による実験の解析)

Hofmann, Hale, PRC77(2008)044002

解析 (旧)



解析 (新)

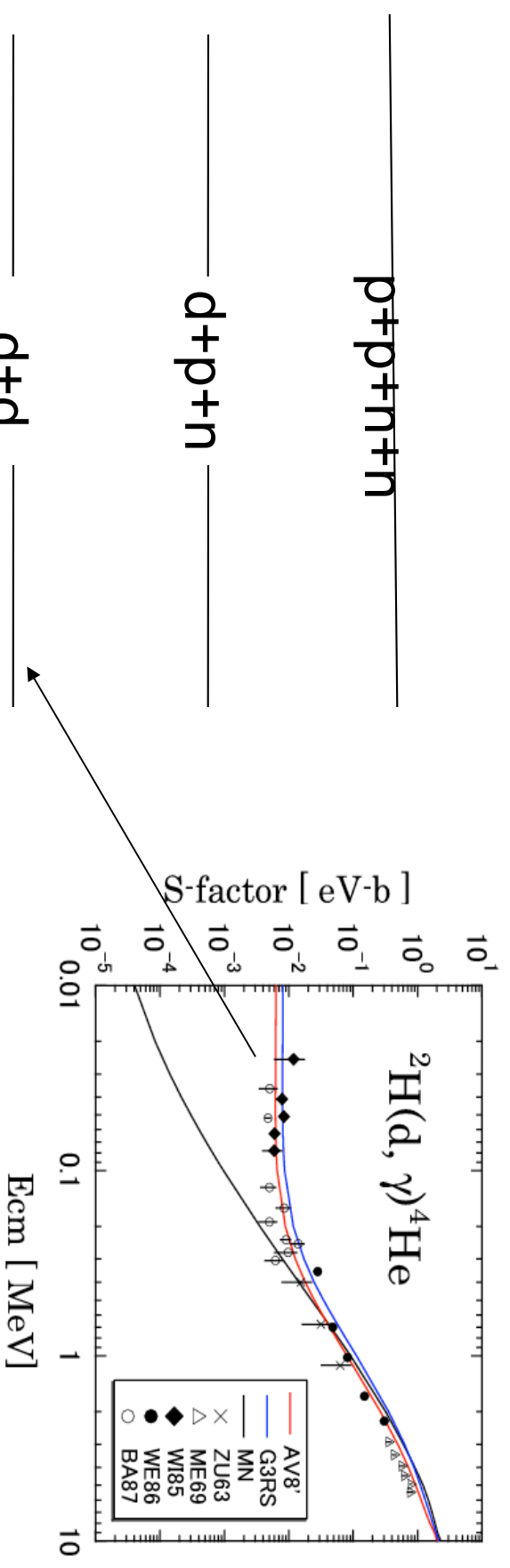


HofmannのRRGM計算(AV18)でも、 $t+p$ と ${}^3\text{He}+n$ の 1S_0 Phase Shiftの特異な振る舞いがでている。

実験のPhase Shift解析も更新

Refined RGM+Kohn-Hulthen 変分法

^4He の励起状態まとめ (第一原理計算をクラスター描像から)



テンソルカが見える

