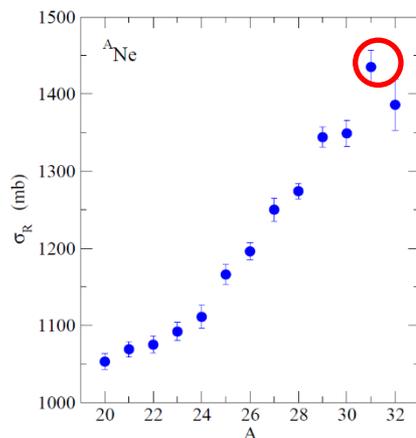
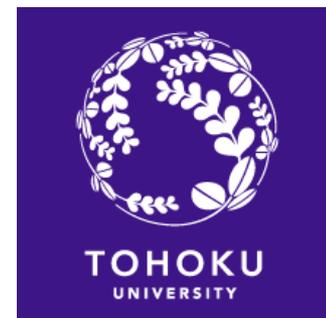


# 反応断面積の偶奇効果と対相関

萩野浩一 (東北大理)  
佐川弘幸 (会津大)



K.H. and H. Sagawa,

•PRC84('11)011303(R)

•PRC85('12)014303

•PRC, in press.

(arXiv:1202.2725 [nucl-th])

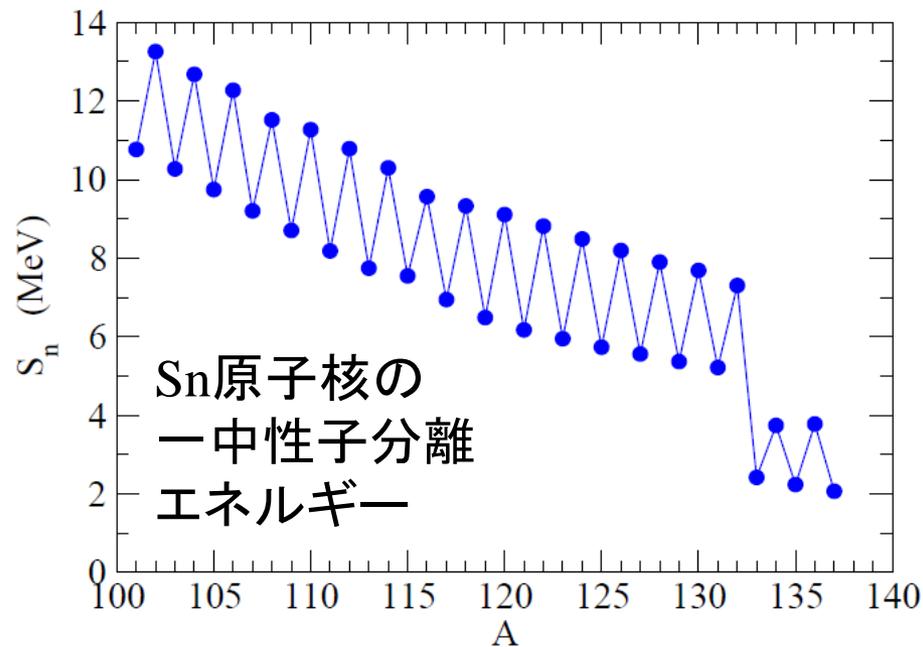
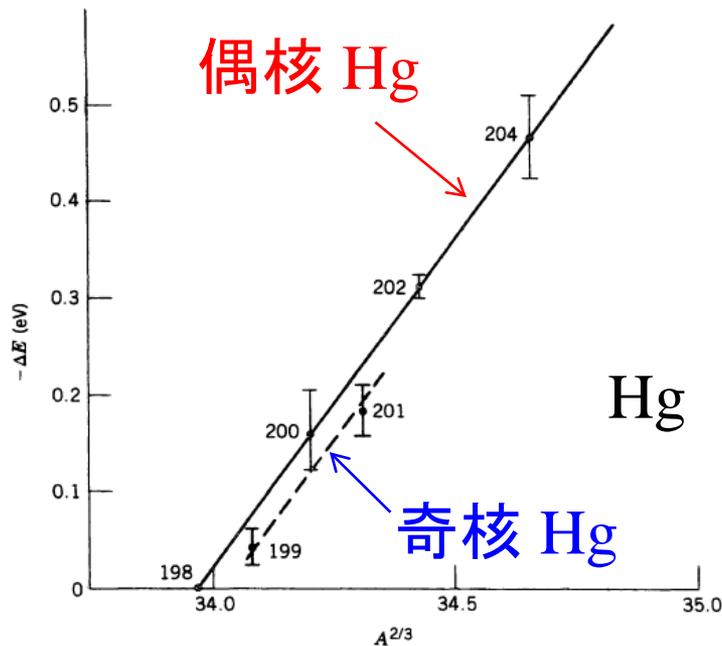
1. はじめに: 原子核における偶奇効果
2. 反応断面積における偶奇効果
3. 弱束縛原子核における対相関
4. 反応断面積と *staggering* パラメーター
5. まとめ

# はじめに：原子核における偶奇効果

➤ 荷電半径：奇核はやや小

➤ 束縛エネルギー：

偶核はより束縛



Sn原子核の  
一中性子分離  
エネルギー

➡ 対相関

cf. Bohr-Mottelson, eq. (2.85)

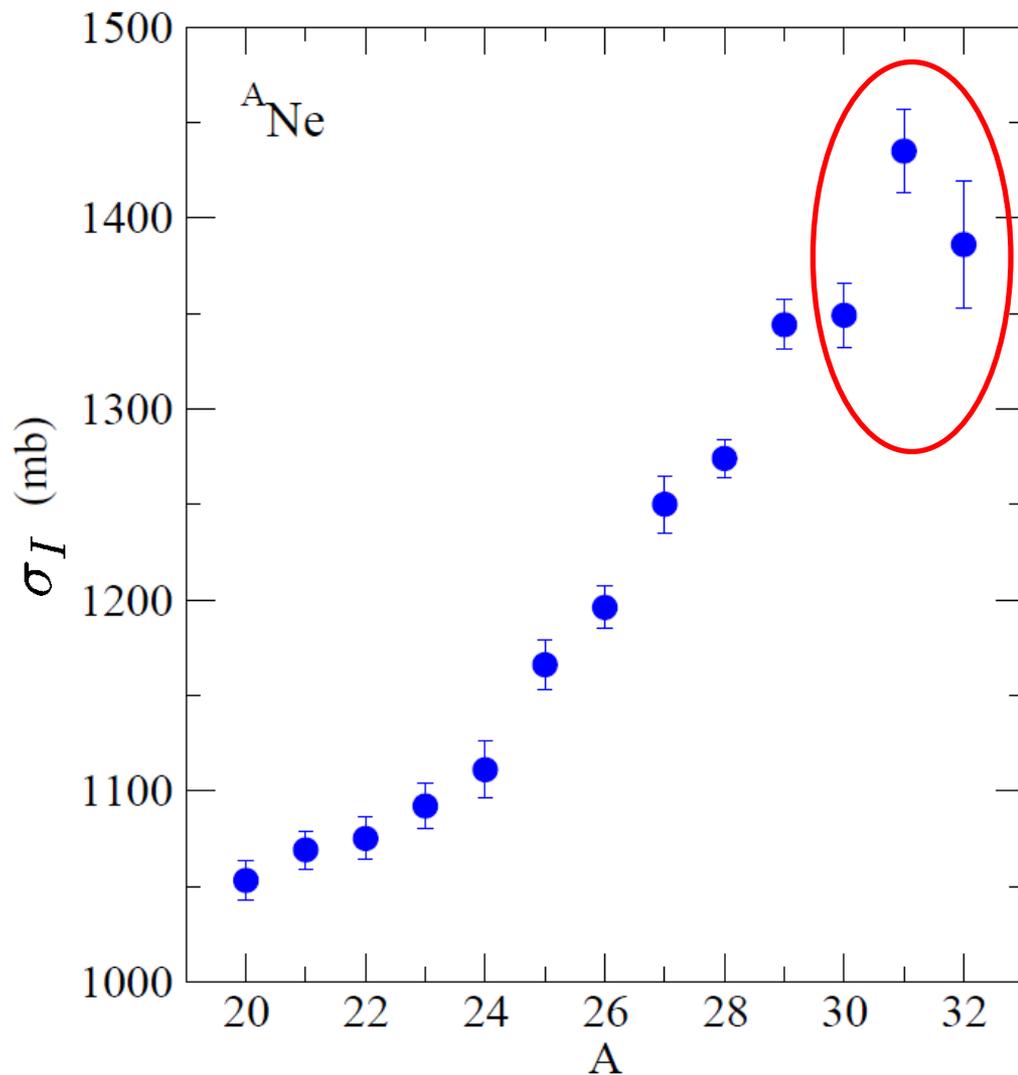
$$\gamma \equiv \frac{\langle r^2 \rangle_{A+1} - \langle r^2 \rangle_A}{\langle r^2 \rangle_{A+2} - \langle r^2 \rangle_A}$$

- 変形の効果？ - 対相関？

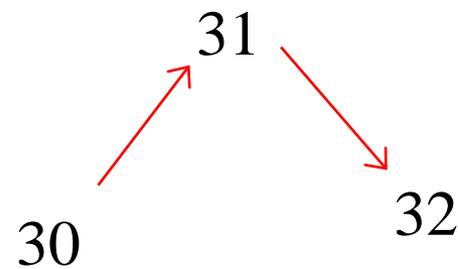
Figure 3.6 K X-ray isotope shifts in Hg. The energy of the K X ray in Hg is about 100 keV, so the relative isotope shift is of the order of  $10^{-6}$ . The data show the

K.S. Krane, "Introductory Nuclear Physics"

# 反応断面積の偶奇効果

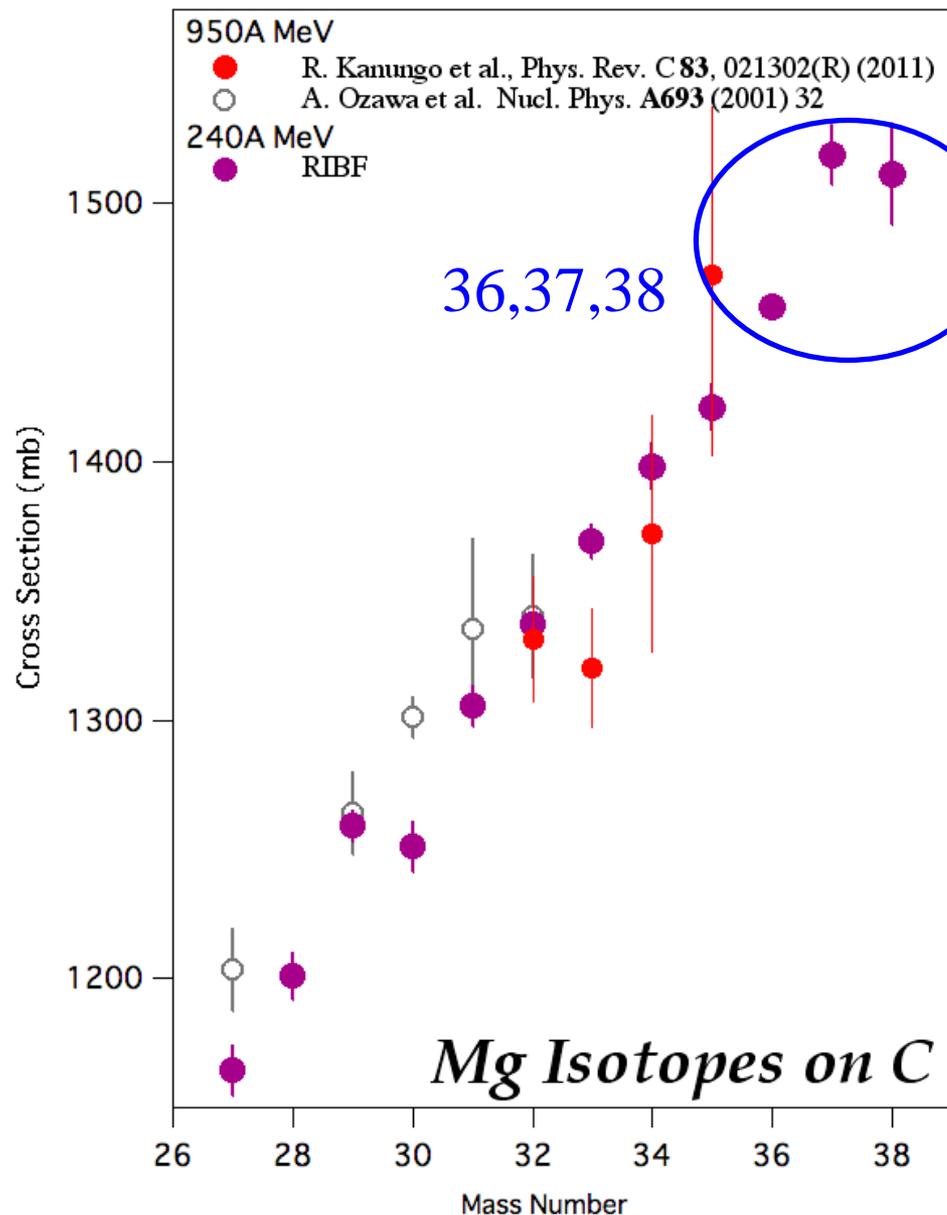


最近の Ne アイソトープ  
に対する実験データ  
M. Takechi et al.,  
NPA834('10)412c  
Phys. Lett. B707 ('12) 357

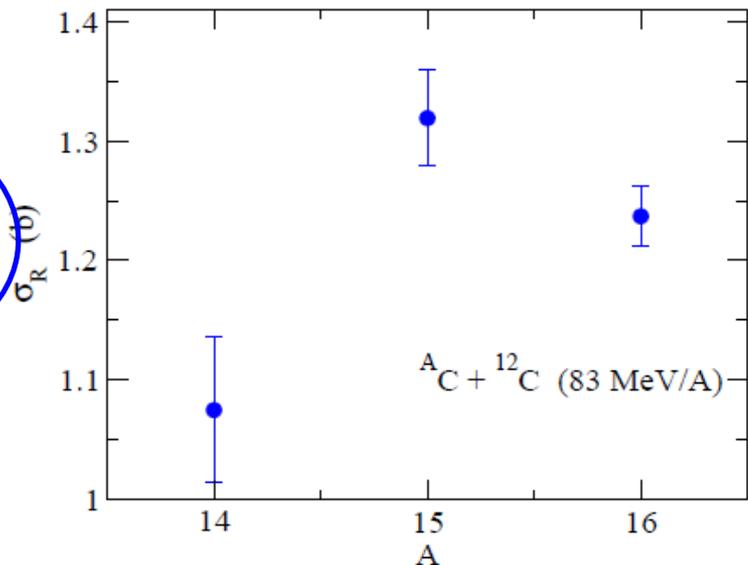


顕著な偶奇効果

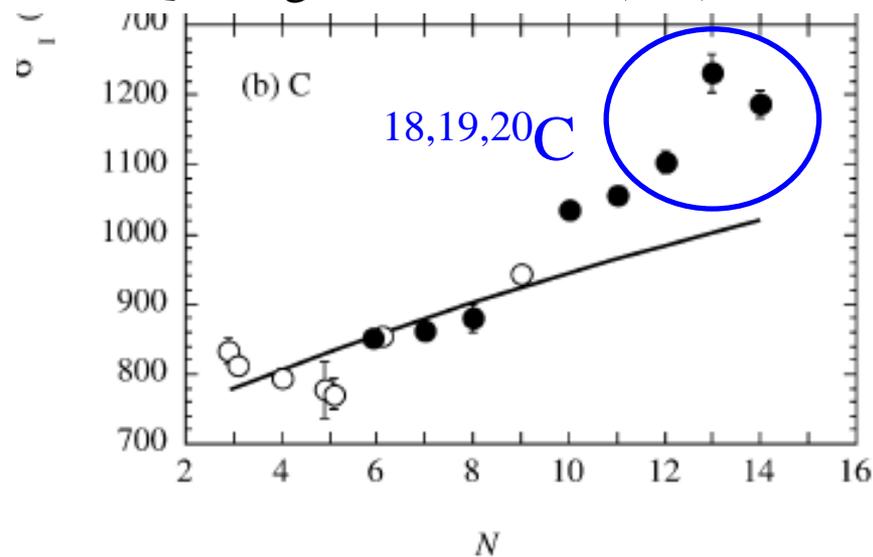
# 他の例



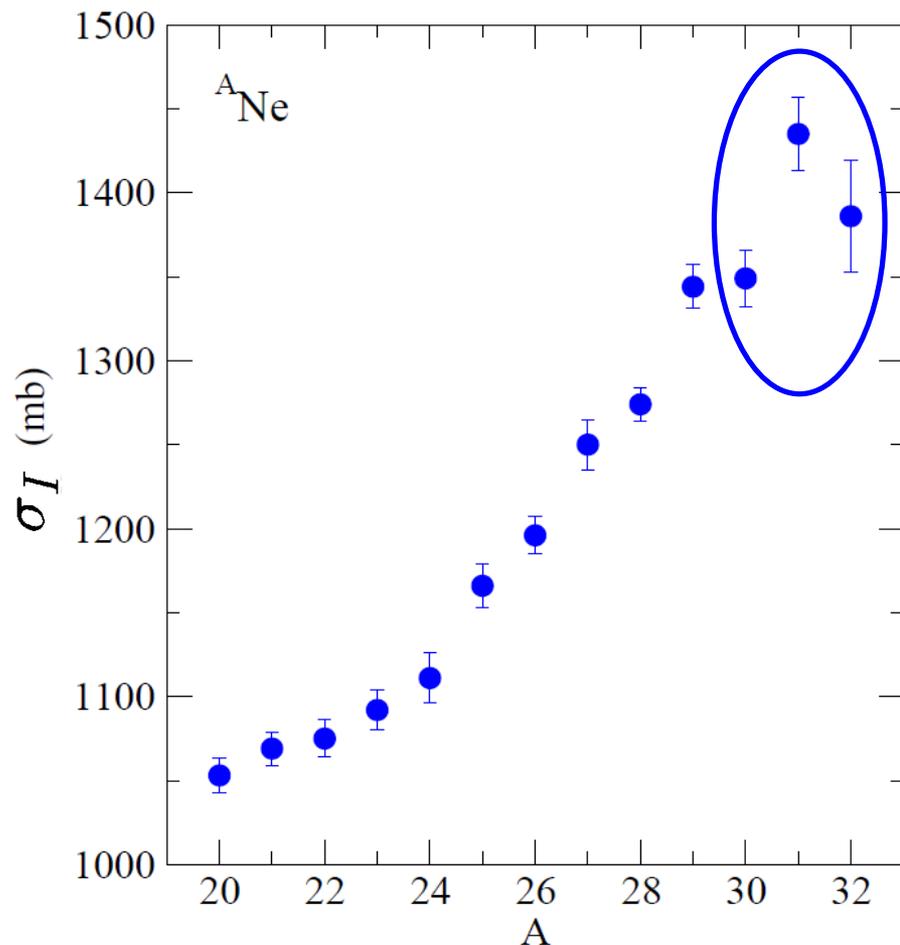
M. Takechi, private communications



D.Q. Fang et al., PRC69('04)034613



A. Ozawa et al., NPA691('01)599



## 我々の問題意識

- 反応断面積の偶奇性は対相関で理解できるのか？
- 何故、弱束縛になると偶奇性が現れるのか？
- 安定核では何故偶奇性が現れないのか？

cf. ペアリング anti-halo 効果

K. Bennaceur, J. Dobaczewski, and M. Ploszajczak, PLB496('00)154

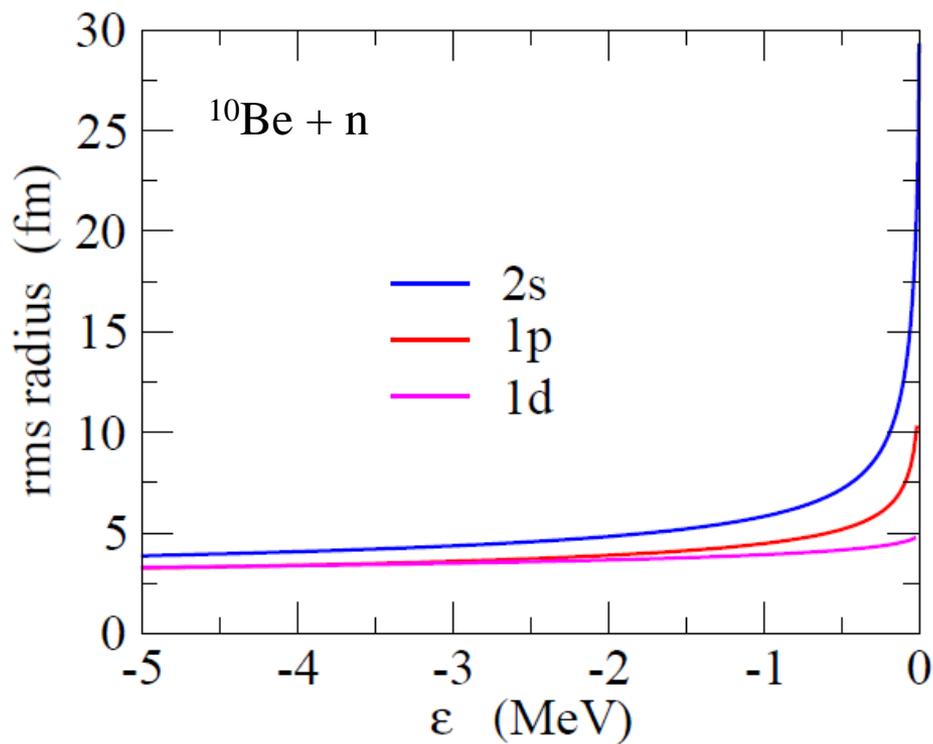
対相関 —→ 波動関数の遠方での振る舞いに変化  
 —→ 密度分布の広がりが抑制

# 弱束縛軌道の半径の振る舞い

i) 対相関がない場合の波動関数の漸近形 ( $l = 0$ ):

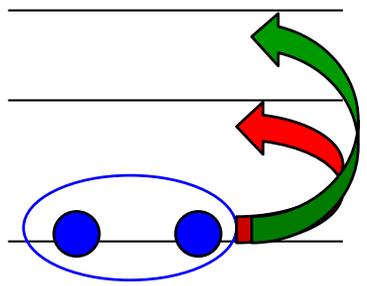
$$\psi(r) \sim \exp(-\kappa r) \quad \kappa = \sqrt{\frac{2m|\epsilon|}{\hbar^2}}$$

$$\langle r^2 \rangle_{\text{HF}} = \frac{\int r^2 |\psi(r)|^2 dr}{\int |\psi(r)|^2 dr} \propto \frac{1}{\kappa^2} = \frac{\hbar^2}{2m|\epsilon|} \rightarrow \infty$$



$$\langle r^2 \rangle \propto \begin{cases} \frac{1}{|\epsilon|} & (l = 0) \\ \frac{1}{\sqrt{|\epsilon|}} & (l = 1) \\ \text{const.} & (l = 2) \end{cases}$$

ii) 対相関がある場合:



Cooper 対

Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) 方程式:

$$\begin{pmatrix} \hat{h} - \lambda & \Delta(r) \\ \Delta(r) & -\hat{h} + \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_k(r) \\ V_k(r) \end{pmatrix} = E_k \begin{pmatrix} U_k(r) \\ V_k(r) \end{pmatrix}$$

$\Delta(r)$ : 対ポテンシャル  
 $\lambda$ : 化学ポテンシャル

密度分布:  $\rho(r) = \sum_k |V_k(r)|^2$

波動関数  $V_k(r)$  の漸近形:

$$V_k(r) \sim \exp(-\beta_k r)$$

$$\beta_k = \sqrt{\frac{2m(E_k - \lambda)}{\hbar^2}} \underset{\uparrow}{\sim} \sqrt{\frac{2m\Delta}{\hbar^2}}$$

$$E_k \sim \sqrt{(\epsilon - \lambda)^2 + \Delta^2} \sim \Delta \quad (\epsilon, \lambda \rightarrow 0)$$

$$\langle r^2 \rangle_{\text{HFB}} \propto \frac{\hbar^2}{2m\Delta}$$

“ペアリング anti-halo 効果”

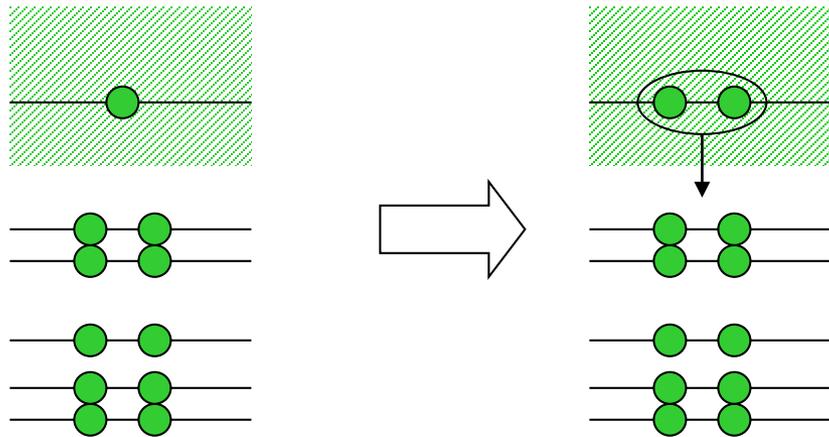
# 弱束縛核における対相関

$$\langle r^2 \rangle_{\text{HFB}} \propto \frac{\hbar^2}{2m\Delta}$$

“ペアリング anti-halo 効果”

$$\Delta \neq 0 \text{ as } \epsilon, \lambda \rightarrow 0?$$

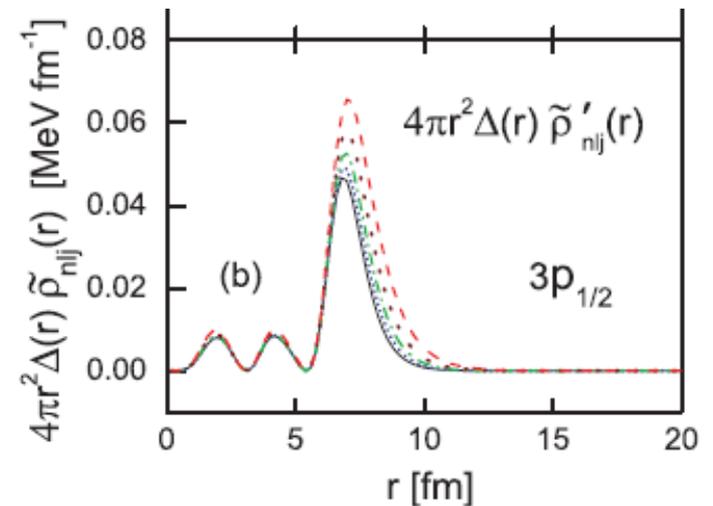
(i) ボロミアン原子核



非束縛

束縛

(ii) 重い中性子過剰核



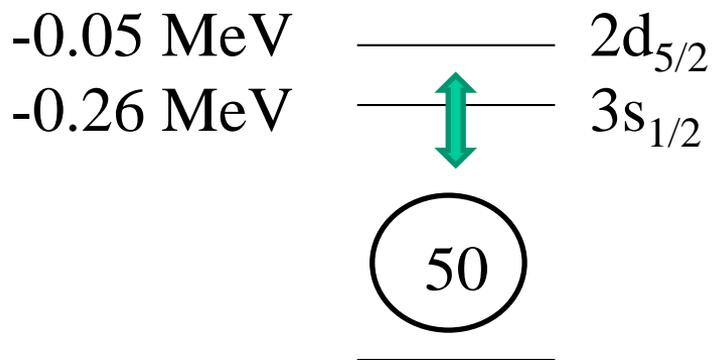
Y. Zhang, M. Matsuo, J. Meng,  
PRC83('11)054301

see also M. Yamagami, PRC72('05)064308

# HFB 法による解析 (3s<sub>1/2</sub> 状態 : <sup>76</sup>Cr<sub>52</sub>)

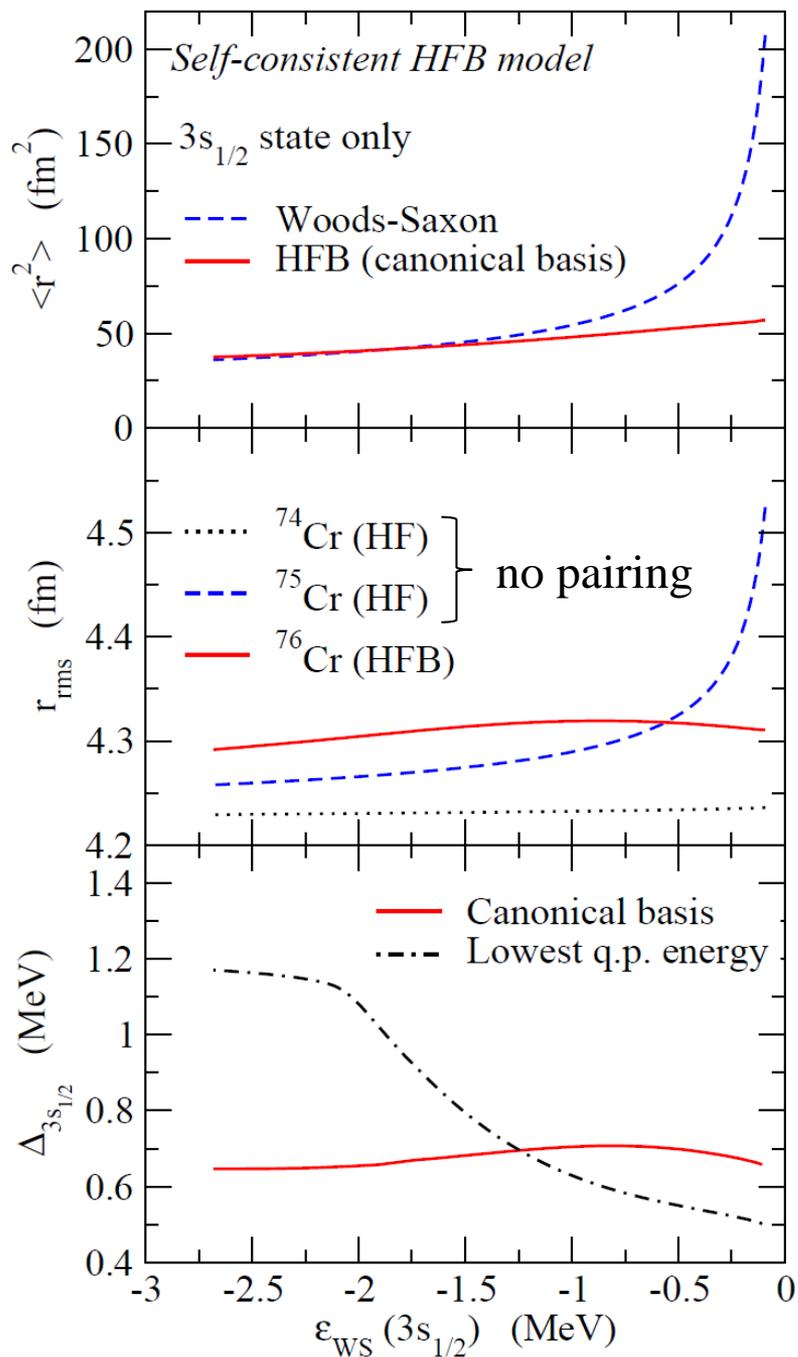
$$\begin{pmatrix} \hat{h} - \lambda & \Delta(r) \\ \Delta(r) & -\hat{h} + \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_k(r) \\ V_k(r) \end{pmatrix} = E_k \begin{pmatrix} U_k(r) \\ V_k(r) \end{pmatrix}$$

平均場 : 球形 Woods-Saxon ポテンシャル  
+ 密度依存ゼロ・レンジ対相関相互作用 ←  $\Delta(r)$



- ✓  $\lambda$ : 平均中性子数  $N=52$
- ✓  $E_{\text{cut}} = 50 \text{ MeV}$  above  $\lambda$
- ✓  $R_{\text{box}} = 60 \text{ fm}$

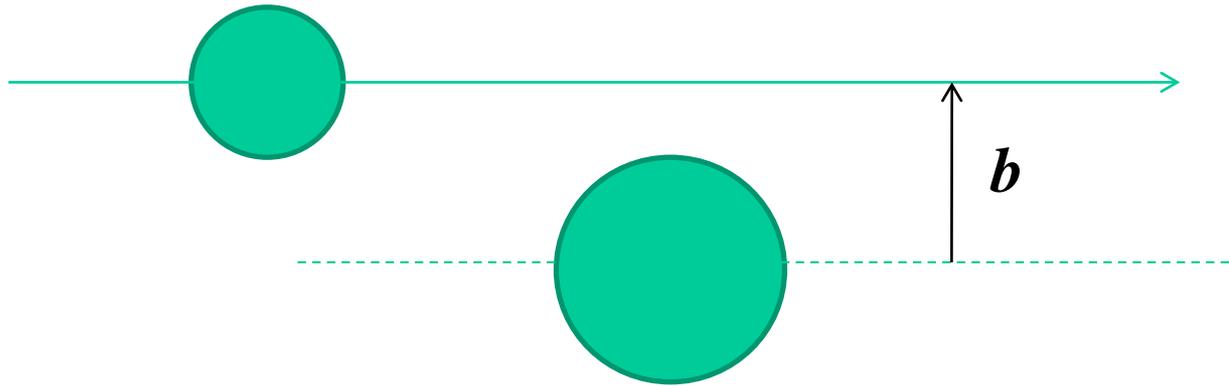
s<sub>1/2</sub> 状態に対する WS ポテンシャルの深さを変化させ、  
半径や反応断面積の変化を調べる



半径の抑制

← 対ギャップ: ゼロ束縛の極限でも有限  
(Zhang-Matsuo-Mengと同様の結論)

# 反応断面積の計算



グラウバー理論 (光学極限近似)  $\sigma_R = \int d^2b \left(1 - |e^{2i\chi(b)}|^2\right)$

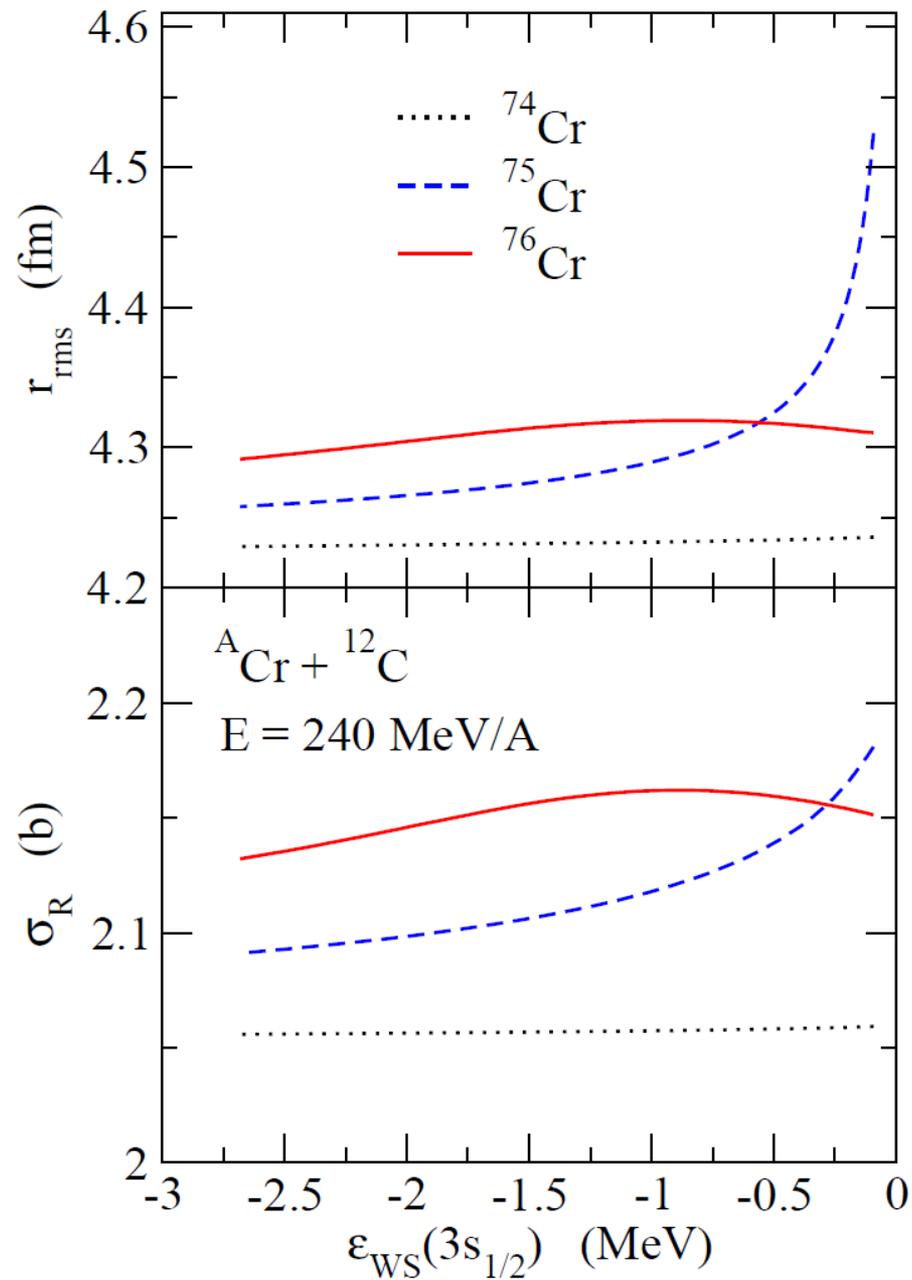
$$e^{2i\chi(b)} = \exp \left[ - \int d\mathbf{r}_P \mathbf{r}_T \rho_P(\mathbf{r}_P) \rho_T(\mathbf{r}_T) \Gamma(\mathbf{b} + \mathbf{s}_P - \mathbf{s}_T) \right]$$

$$\Gamma(\mathbf{b}) = \frac{1 - i\alpha}{4\pi\beta} \sigma_{NN}^{\text{tot}} \exp \left( -\frac{b^2}{2\beta} \right)$$

## • 光学極限近似の補正

B. Abu-Ibrahim and Y. Suzuki, PRC61('00)051601(R)

$$2i\chi(b) \rightarrow - \int d\mathbf{r}_P \rho_P(\mathbf{r}_P) \left[ 1 - e^{- \int \mathbf{r}_T \rho_T(\mathbf{r}_T) \Gamma(\mathbf{b} + \mathbf{s}_P - \mathbf{s}_T)} \right]$$

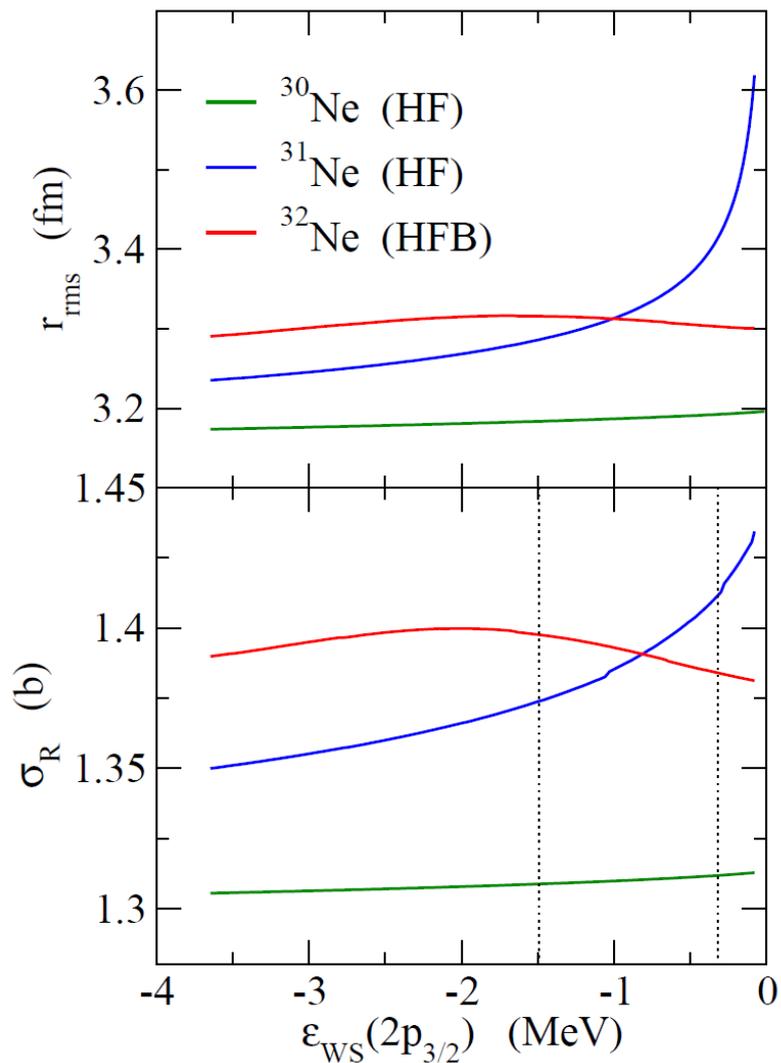


$^{74,75,76}\text{Cr} + ^{12}\text{C}$  reactions  
 at  $E=240 \text{ MeV/A}$

density of  $^{74,75,76}\text{Cr}$  : HF/HFB  
 density of  $^{12}\text{C}$  : Gaussian

# 他の系: $^{30,31,32}\text{Ne}$

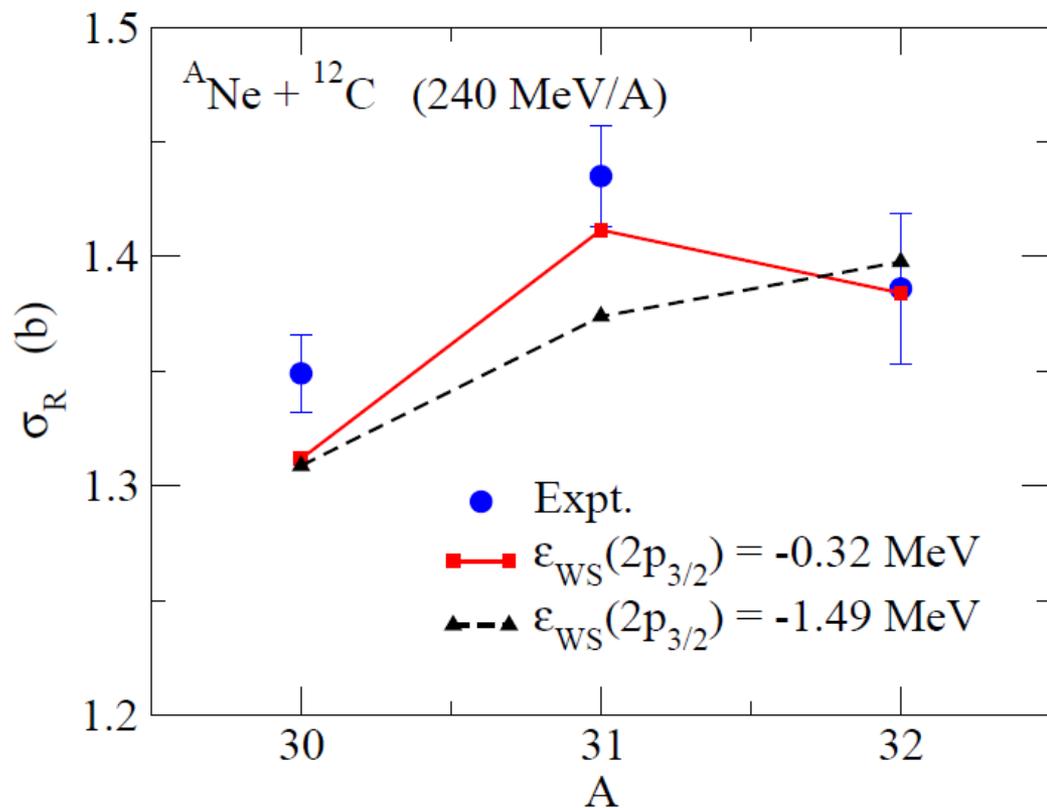
## 球形 Woods-Saxon ポテンシャル によるHFB計算



-0.066 MeV ———  $1f_{7/2}$   
 -0.321 MeV ———  $2p_{3/2}$

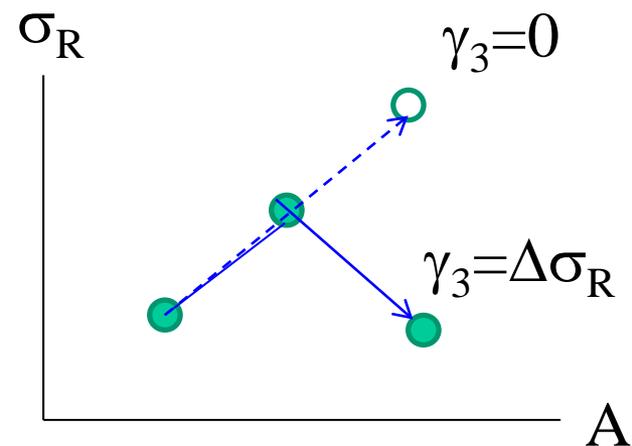
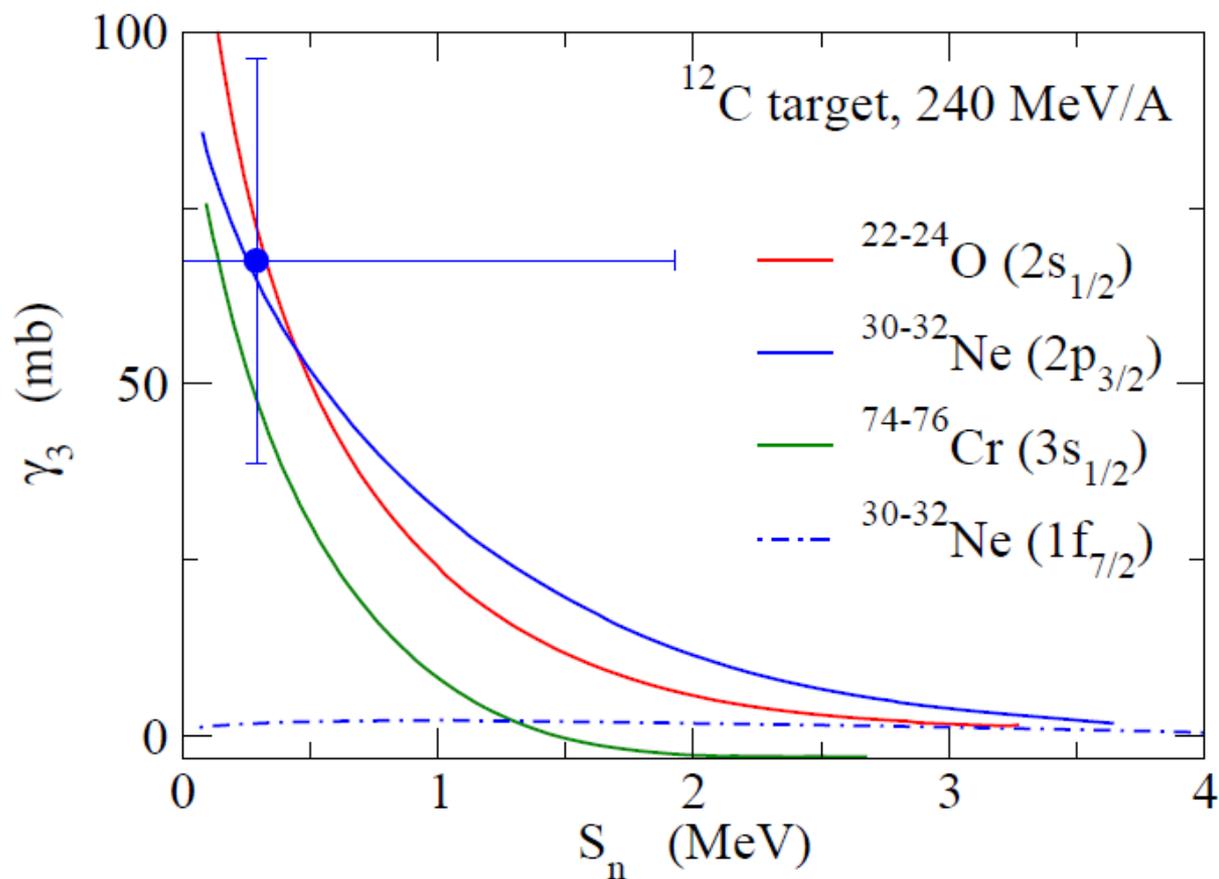
20

$^{31}\text{Ne}$  ( $a = 0.75$  fm)

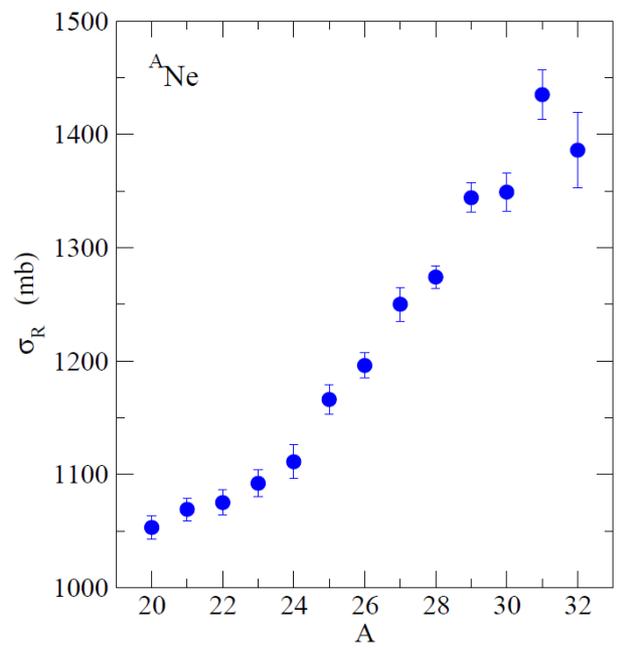
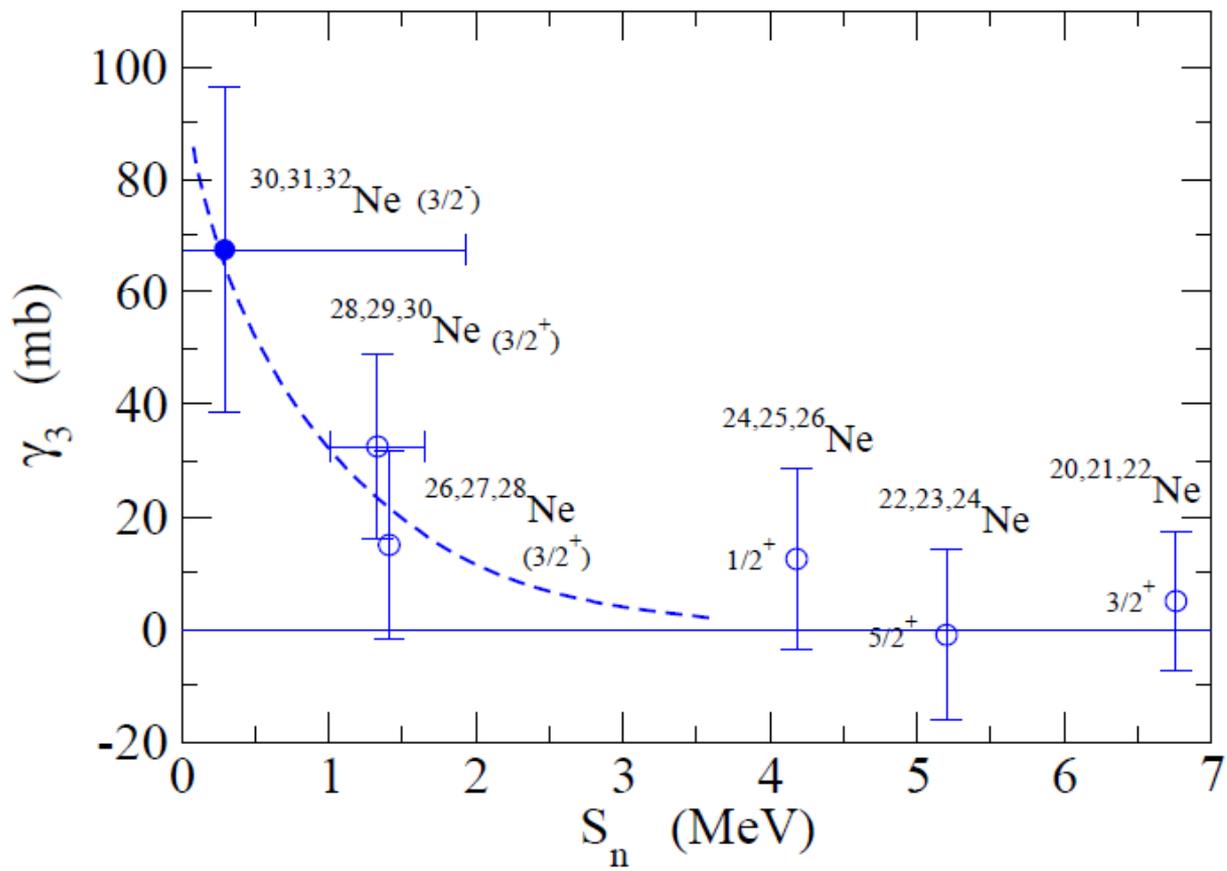


# 偶奇効果の系統性: OES パラメーター

$$\gamma_3 \equiv -\frac{1}{2}[\sigma_R(A+2) - 2\sigma_R(A+1) + \sigma_R(A)]$$

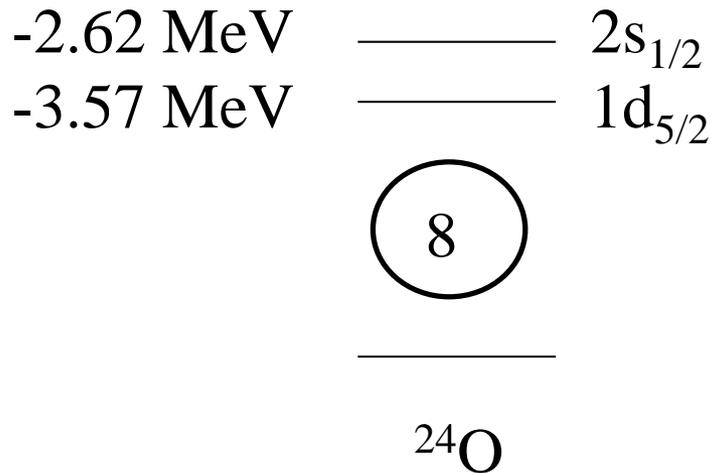
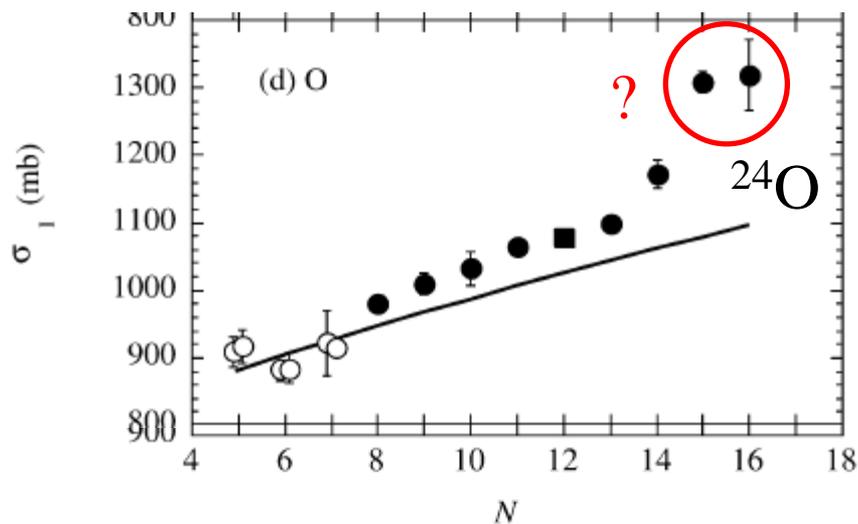


# Ne アイソトープの系統性

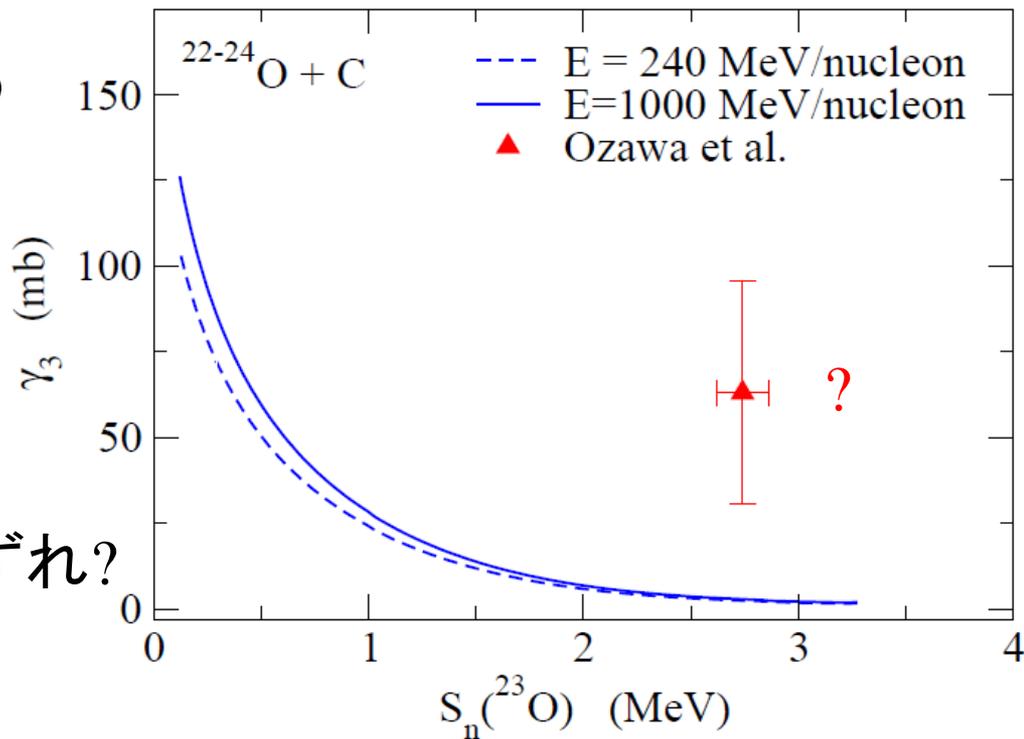


変形による  
s/p-wave の混じりの  
現れ?

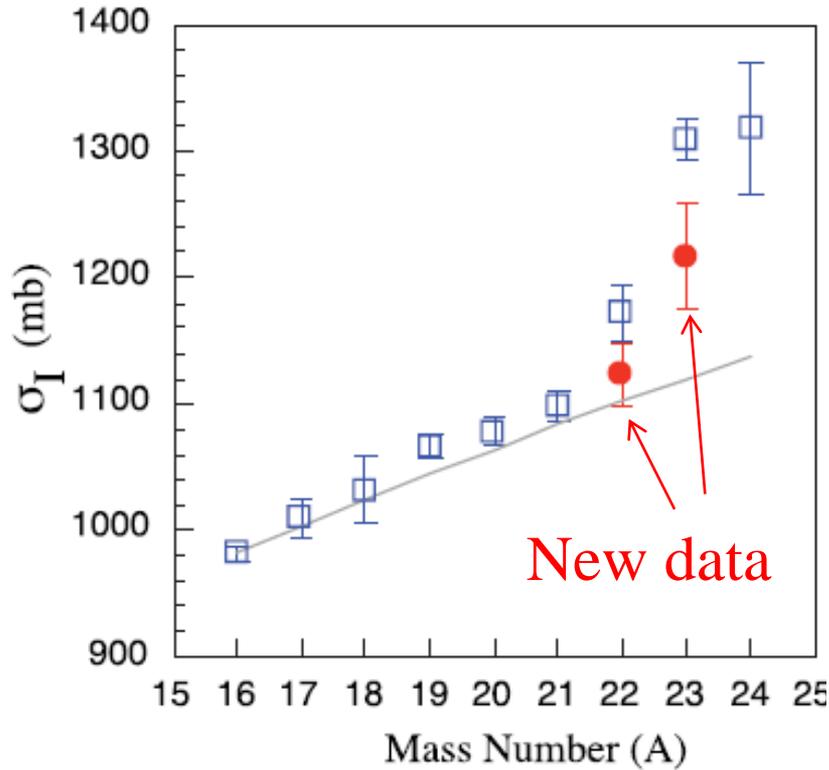
# OESパラメーターのエネルギー依存性と $^{22,23,24}\text{O} + ^{12}\text{C}$ @ 950 MeV/A



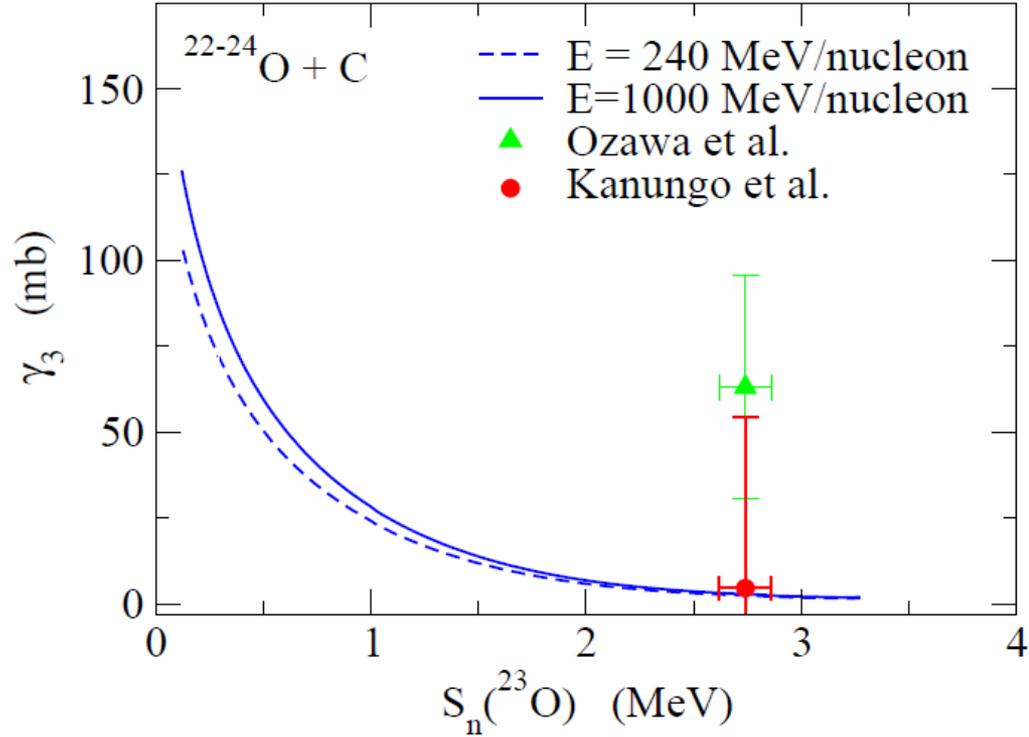
A. Ozawa et al., NPA691('01)599



- 非常に弱いエネルギー依存性
- Ozawa et al. の系統性からのずれ?



R. Kanungo et al.,  
 PRC84('11)061304(R)



K.H. and H. Sagawa,  
 PRC, in press.  
 arXiv:1202.2725 [nucl-th]

# まとめ

## • HFB + Glauber 近似による 反応断面積の解析

弱束縛の偶核：  
s-軌道及び p-軌道では  
対相関による半径の減少

➡ 反応断面積の減少



反応断面積の偶奇効果

- 実験データに見られる反応断面積の偶奇効果：対相関が重要な役割
- OESパラメーター：弱束縛核の対相関を調べるのに強力な方法

残された課題

変形の効果？

cf.  $^{31}\text{Ne}$  のクーロン分解

九州グループによる Ne の解析

