

微視的構造・反応理論による

island of inversion核の

定量的反応解析

九大院理

蓑茂 工将

渡邊 慎, 角 剛典, 清水 良文, 八尋 正信

北大創成

木村 真明

阪大RCNP

緒方 一介

Island of inversion核の反応実験

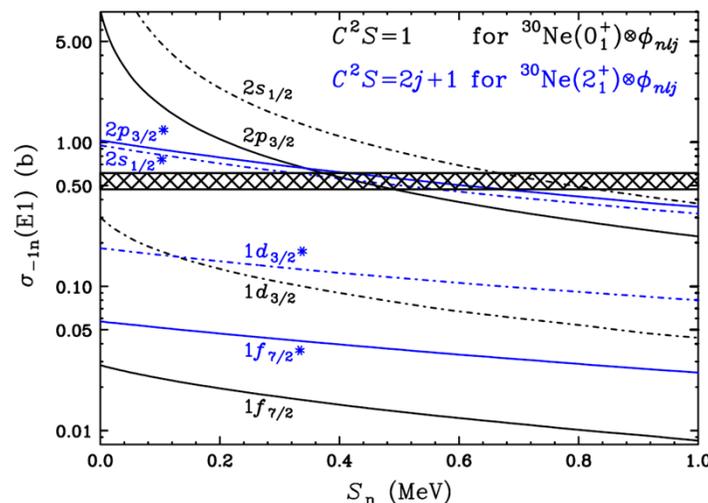
✓ ^{31}Ne の1中性子除去反応断面積

T. Nakamura et al., PRL103, 262501 (2009).

$^{31}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$, $E_{\text{lab}} = 230$ (MeV/nucleon)

$^{31}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$, $E_{\text{lab}} = 234$ (MeV/nucleon)

非常に大きなCoulomb分解断面積



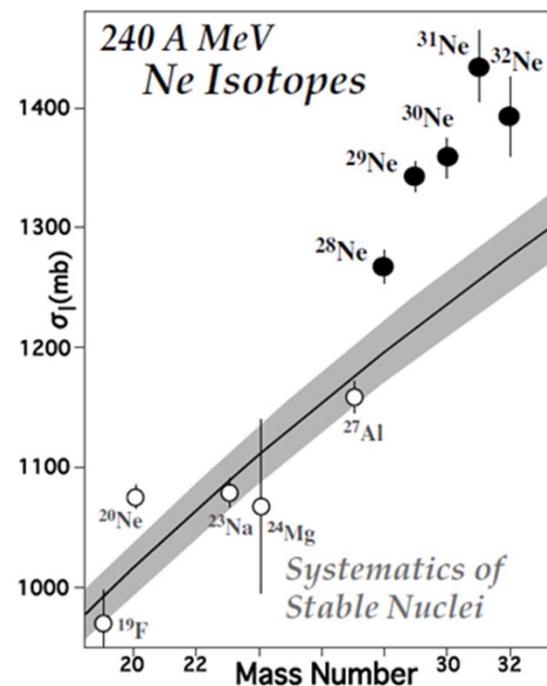
✓ Ne同位体の相互作用断面積測定

M. Takechi et al., NPA834, 412c (2010).

$^A\text{Ne} + ^{12}\text{C}$, $E_{\text{lab}} \sim 240$ (MeV/nucleon)

異常に大きな ^{31}Ne の相互作用断面積

→ p3/2配位が支配的なハロー構造?
魔法数N=20の変化, または消失?



Island of inversion核の反応解析

^{31}Ne の1中性子除去反応

Glauber model

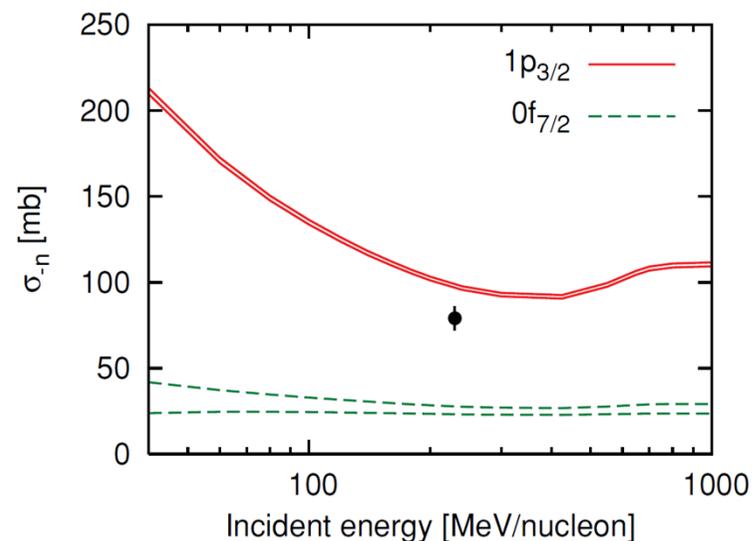
W. Horiuchi et al., PRC81, 024606 (2010).

Particle-rotor model

Y. Urata et al., PRC83, 041303(R) (2011).

Eikonal reaction theory

M. Yahiro et al., PTP126, 167 (2011).



Suggested properties of ^{31}Ne

- ✓ スピン・パリティ $J^\pi = 3/2^-, 3/2^+, 7/2^-, 1/2^+$
- ✓ Intruder configuration **Super deformation**
- ✓ Halo structure ($S_n^{(\text{exp})} = 0.29 \pm 1.64$ (MeV))

観測量へのアプローチ

全反応断面積 原子核の“大きさ”

- ✓ Antisymmetrized Molecular Dynamics (AMD)
- ✓ Double folding model
- ✓ Melbourne g -matrix

包括的断面積 価核子配位

- ✓ Continuum Descretized Coupled Channels (CDCC)
- ✓ Eikonal Reaction Theory (ERT)

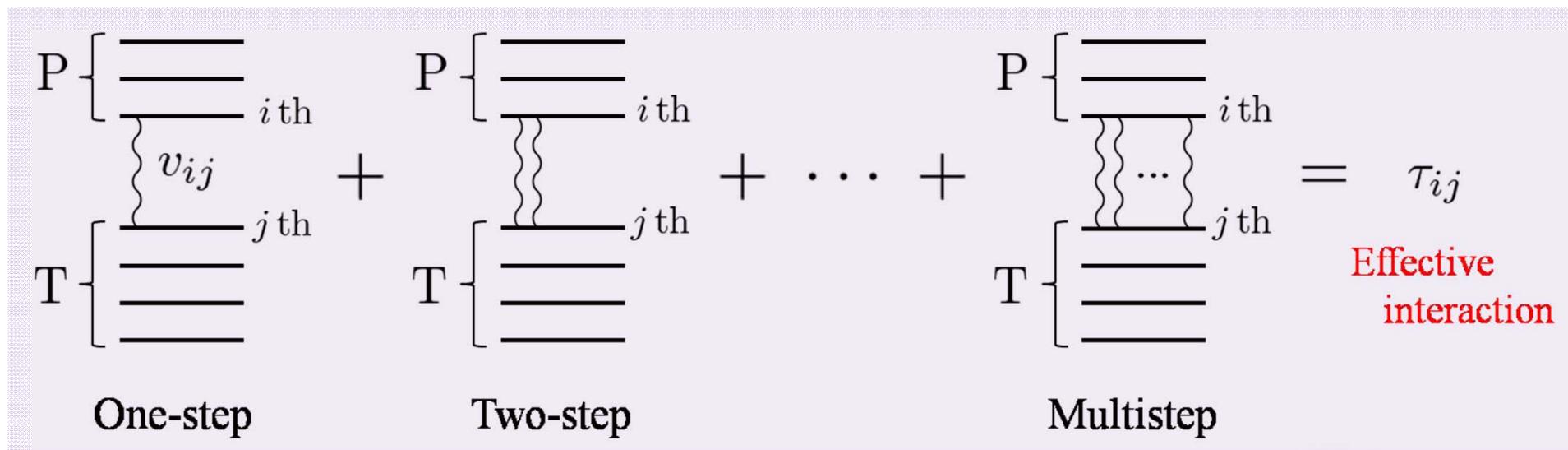
微視的理論による定量的反応解析

多重散乱理論

✓ Full microscopic Schrödinger equation

$$\left[K + h_P + h_T + \sum_{i \in P, j \in T} v_{ij} - E \right] \Psi = 0$$

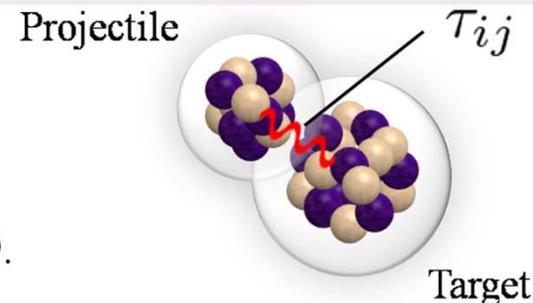
Multistep of v_{ij} between i th nucleon in projectile and j th nucleon in target



有効相互作用

$$v_{ij} \rightarrow \tau_{ij}$$

M. Yahiro, K. Minomo, K. Ogata, M. Kawai, PTP120, 767 (2008).



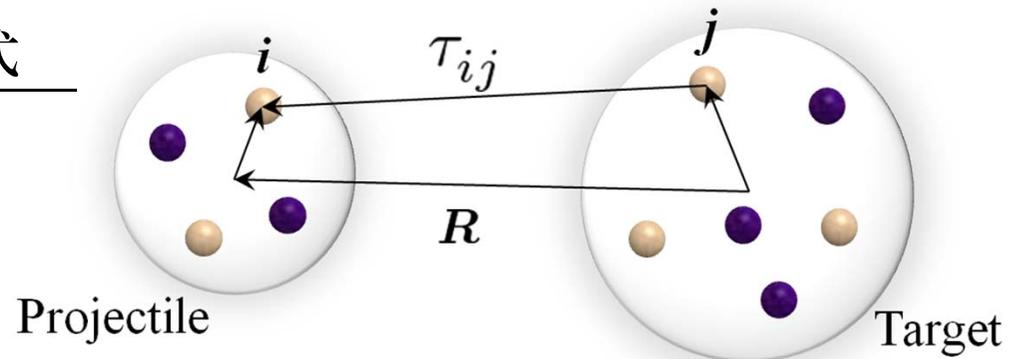
二重畳み込み模型

✓ 有効相互作用を用いたSchrödinger方程式

$$\left[K + h_P + h_T + \sum_{i \in P, j \in T} \tau_{ij} - E \right] \Psi = 0$$

相対波動関数 $\chi(\mathbf{R})$ についての方程式

$$\left[K + U - E_{\text{in}} \right] \chi(\mathbf{R}) = 0$$



$$\text{Folding potential } U = \left\langle \varphi_P \varphi_T \left| \sum_{i \in P, j \in T} \tau_{ij} \right| \varphi_P \varphi_T \right\rangle$$

Brieva-Rook流の方法で局所化する

Melbourne相互作用の信頼性

$$U = \langle \varphi_P \varphi_T | \sum_{i \in P, j \in T} \tau_{ij} | \varphi_P \varphi_T \rangle$$

Melbourne相互作用

電子散乱実験から得られた
現象論的な核密度

H. de Vries et al., ADNDT36, 495 (1987).

K. Amos et al., PRL75, 3241 (1995).

Test

A + ^{12}C @ 250 MeV/nucleon

T. Suzuki et al., PRL75, 3241 (1995).

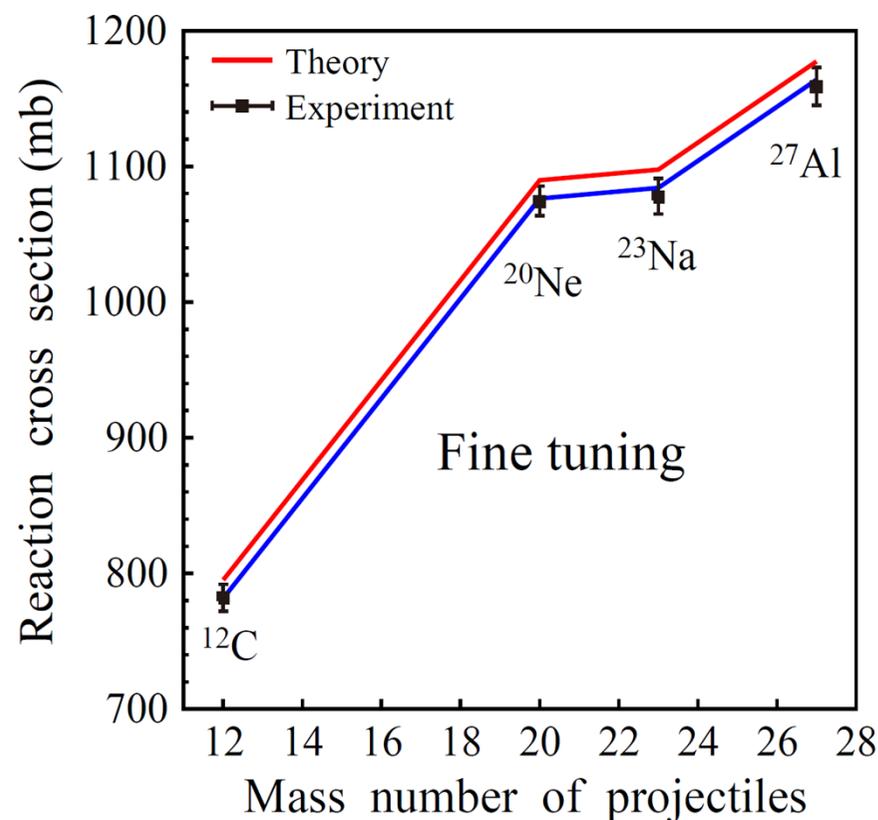
L. Chulkov et al., NPA603, 219 (1996).

M. Takechi et al., PRC79, 061601(R) (2009).

Fine tuning

理論の結果を1.8%だけreduction.

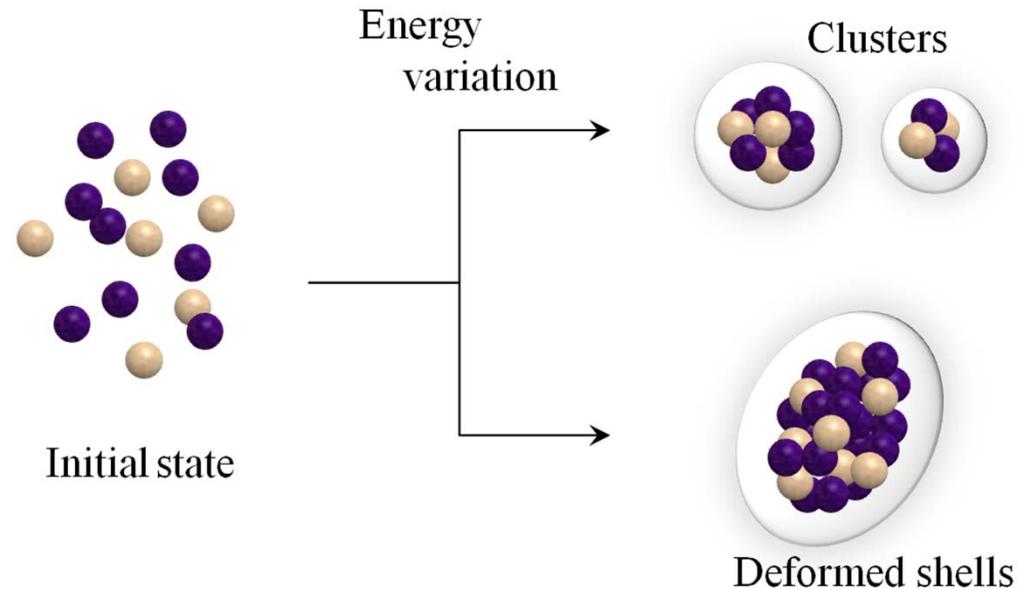
Ne同位体の解析にもこの規格化係数を用いる.



AMDとRGM

AMD

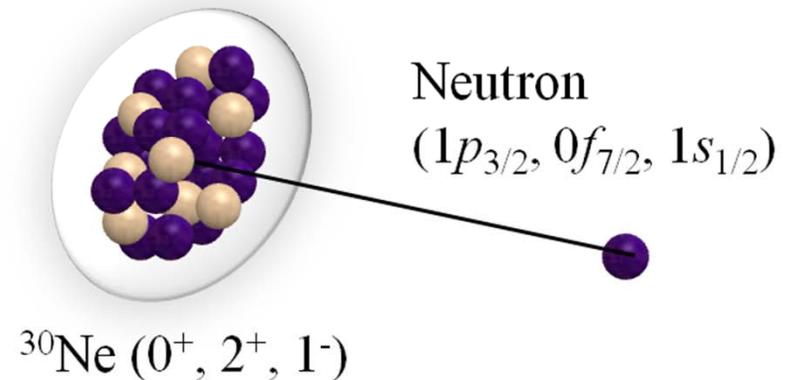
- ✓ Gogny D1Sを採用したA体系のHamiltonian
- ✓ 1核子をGauss波束で表現し、エネルギー変分をとる



RGM

$$\Psi(^{31}\text{Ne}) = \mathcal{A} \sum_c \left\{ \phi_c(r_c - r_n) \Phi_c(^{30}\text{Ne}) \Phi_n \right\}$$

- ✓ コア-中性子間の波動関数を漸近領域まで正しく記述
- ✓ コア励起を考慮して相対運動を解く



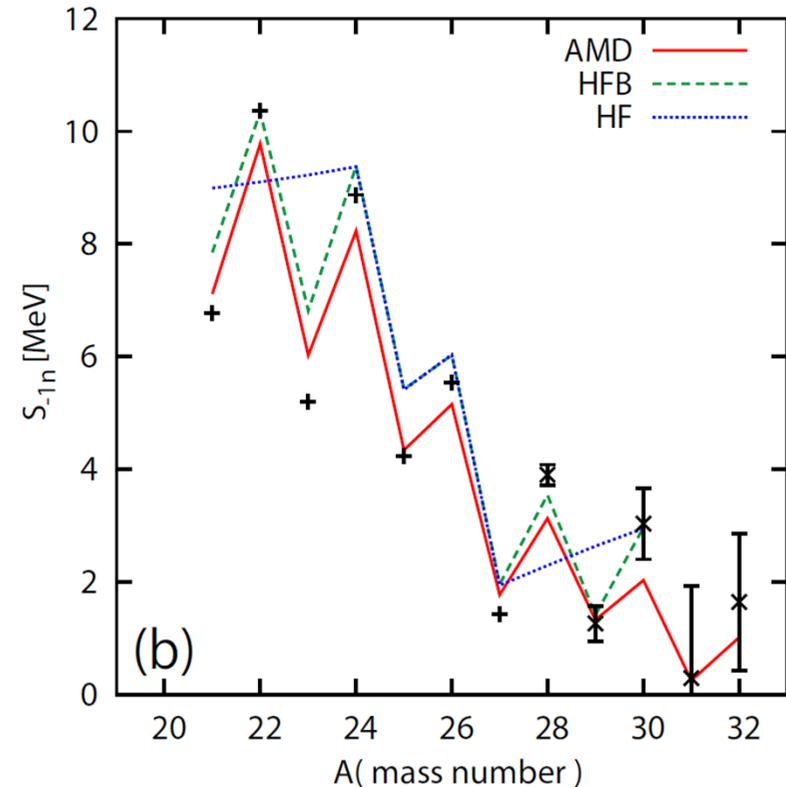
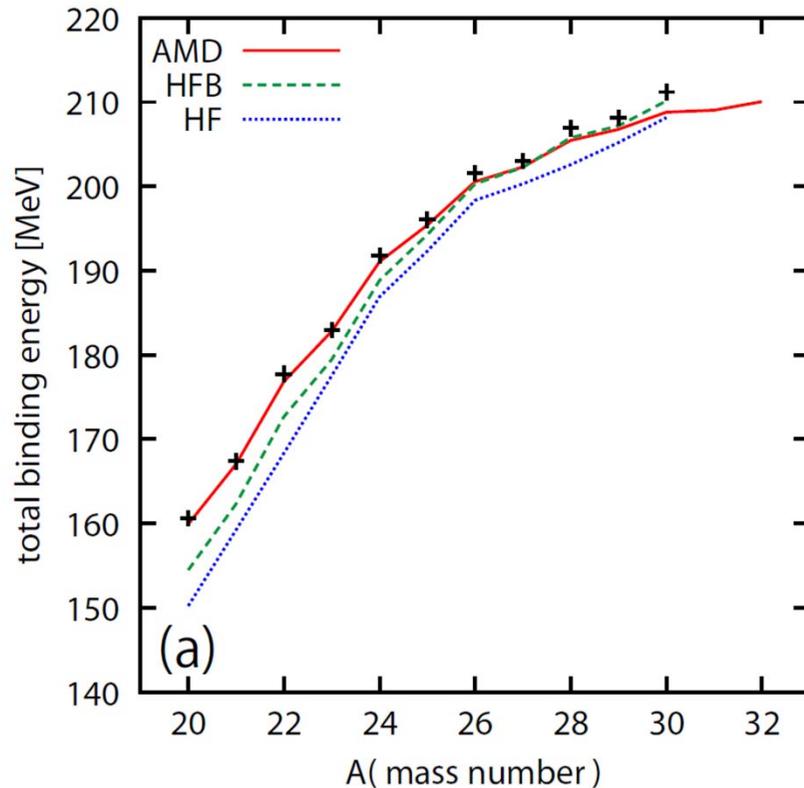
AMD波動関数のテール補正 **AMD-RGM**

AMDによるNe同位体の計算

✓ 四重極変形度

| 核種 | ^{25}Ne | ^{26}Ne | ^{27}Ne | ^{28}Ne | ^{29}Ne | ^{30}Ne | ^{31}Ne | ^{32}Ne |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| β_2 | 0.20 | 0.22 | 0.27 | -0.29 | 0.45 | 0.40 | 0.42 | 0.34 |

✓ 束縛エネルギー



G. Audi, et al., NPA729, 337 (2003).

AMD-RGMによる ^{31}Ne の計算

✓ 中性子配位

| Configurations | Amplitude | |
|--|-----------|------|
| | AMD-RGM | AMD |
| $^{30}\text{Ne}(0^+) \otimes 1p_{3/2}$ | 56 % | 37 % |
| $^{30}\text{Ne}(2^+) \otimes 1p_{3/2}$ | 24 % | 41 % |
| $^{30}\text{Ne}(2^+) \otimes 0f_{7/2}$ | 9 % | 12 % |
| $^{30}\text{Ne}(1^-) \otimes 1s_{1/2}$ | 5 % | 5 % |
| other components | 6 % | 5 % |

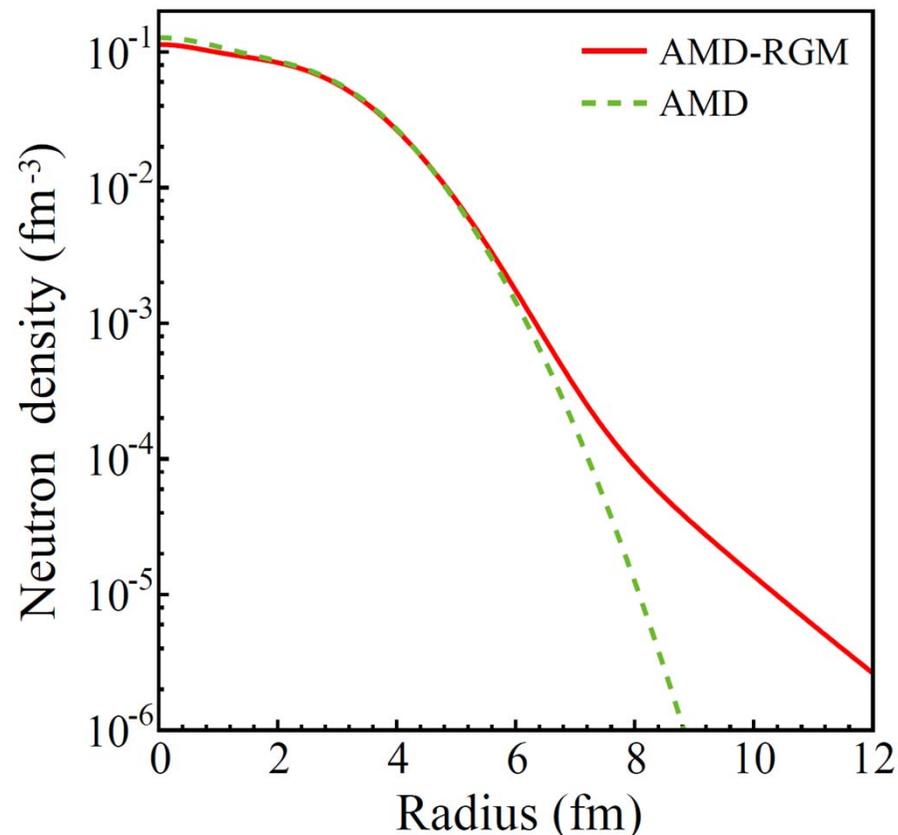
✓ 1中性子分離エネルギー

$$S_n^{(\text{AMD})} = 0.25 \text{ (MeV)}$$

$$S_n^{(\text{AMD-RGM})} = 0.45 \text{ (MeV)}$$

$$S_n^{(\text{exp})} = 0.29 \pm 1.64 \text{ (MeV)}$$

✓ 中性子密度

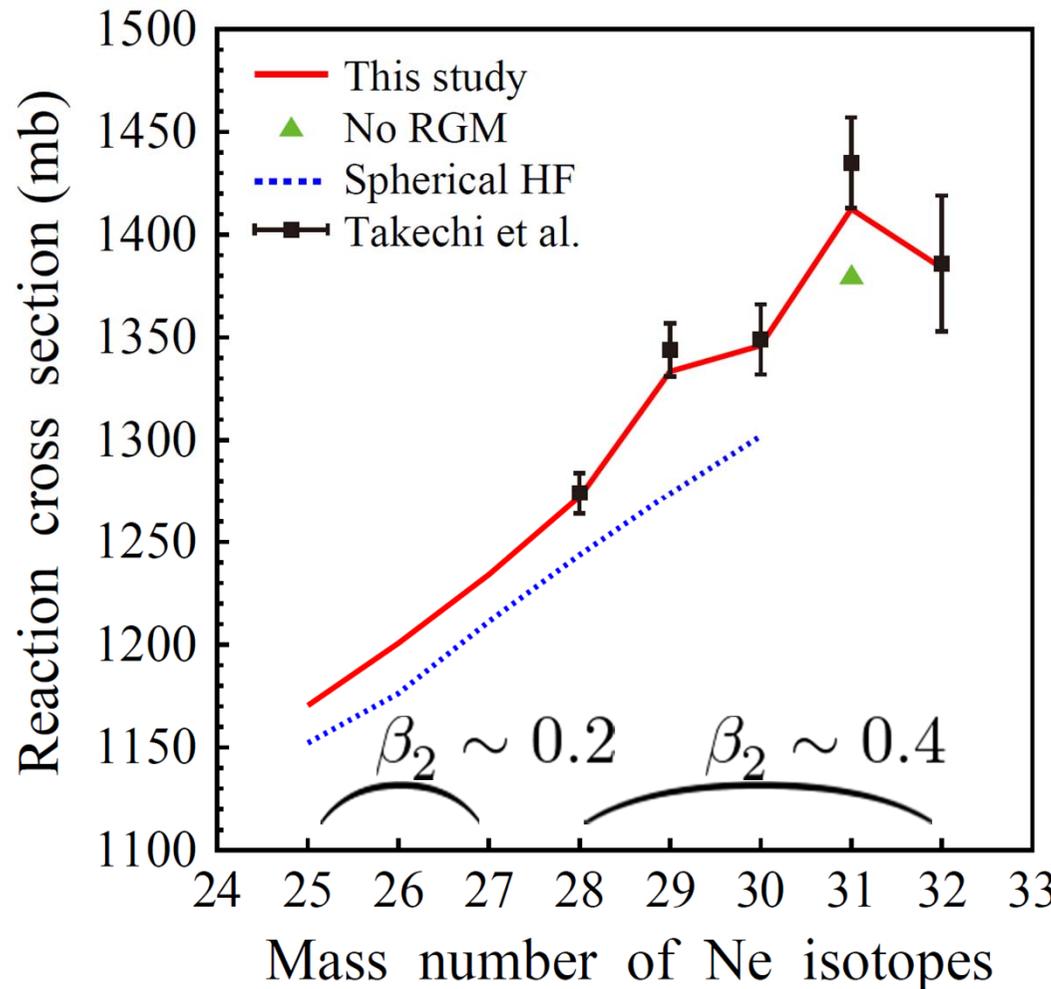
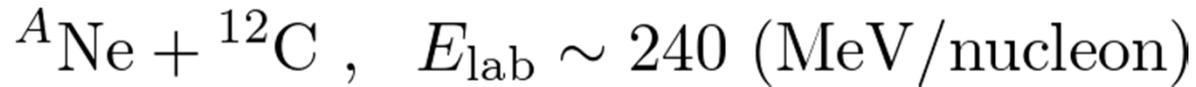


中性子密度の平均二乗半径

AMD-RGM: 3.62 fm

AMD: 3.49 fm

Ne同位体の反応断面積



AMD vs spherical HF

変形の効果は反応断面積を増大させる

中性子過剰Ne同位体では変形が本質的に重要

AMD-RGM vs AMD

テール補正の差が有意に見える

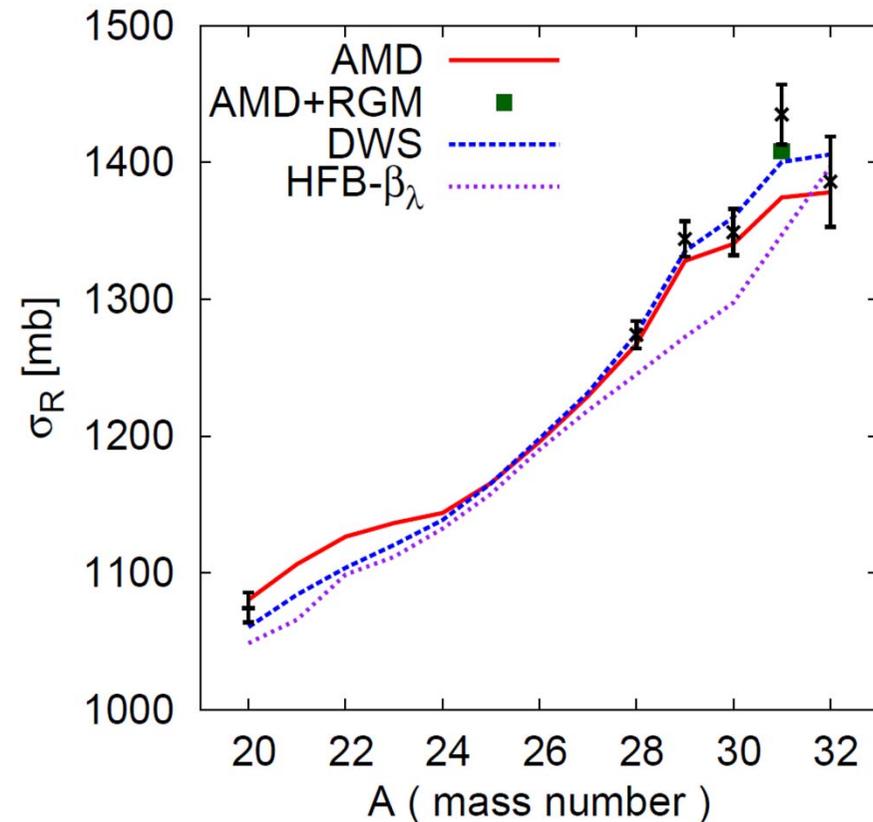
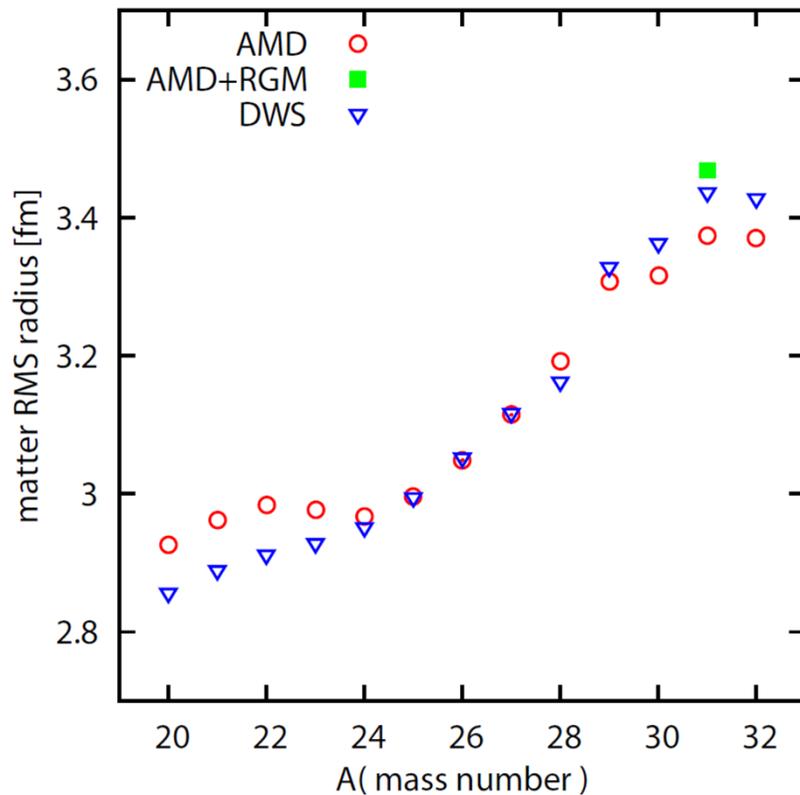
${}^{31}\text{Ne}$ は大きく変形し、
且つハロー構造を持つ

AMDによる ${}^{31}\text{Ne}$ のスピン・パリティ

$$J^\pi = 3/2^-$$

変形平均場模型

- ✓ 変形Woods-Saxonポテンシャルを用いた平均場計算
 - ✓ R. Wyss氏提唱のパラメータを用いる
 - ✓ 変形度はAMDの結果を用いる

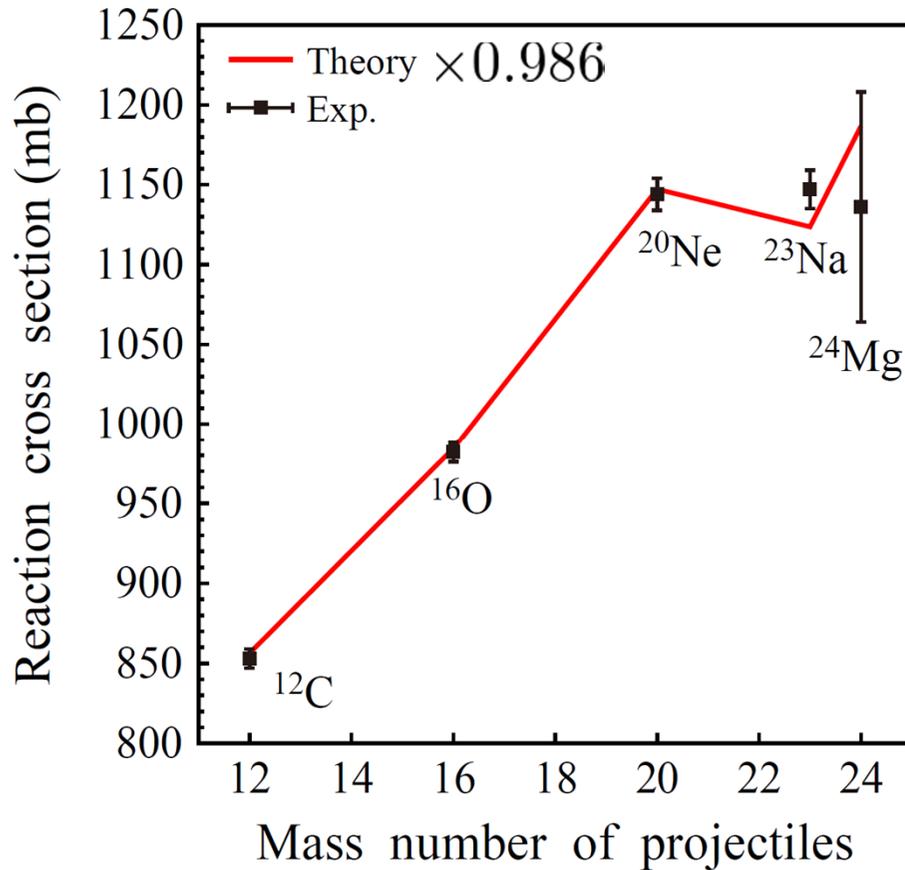


他のエネルギー領域での実験

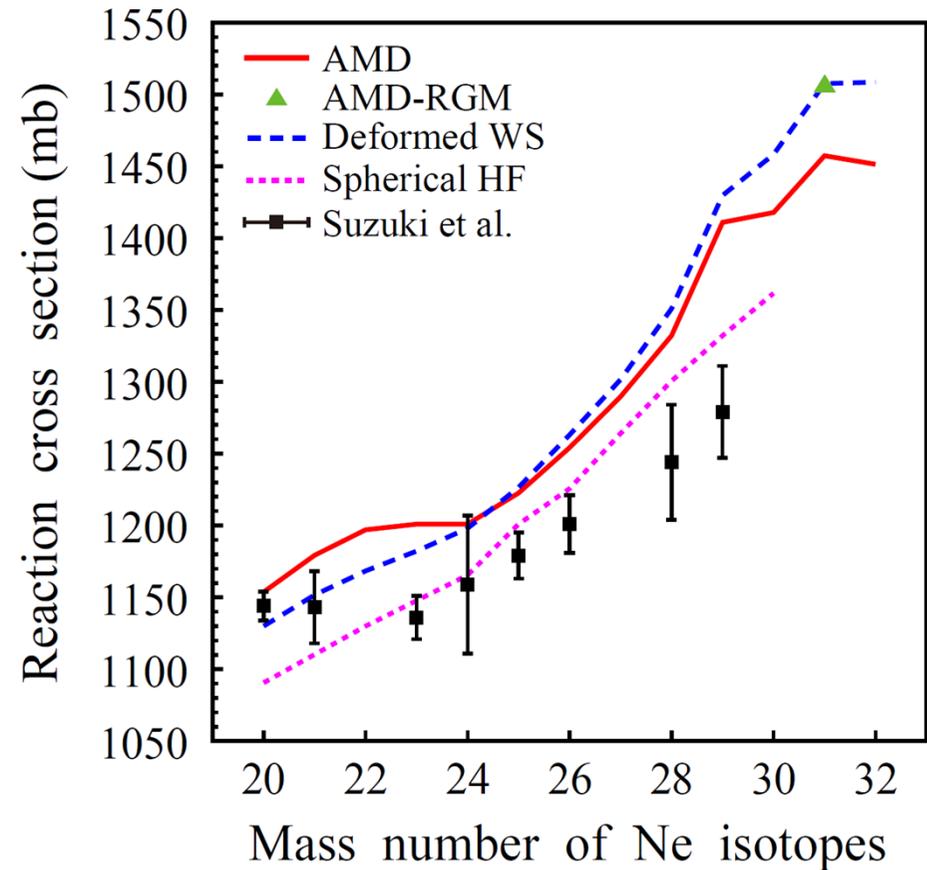
| | | Ne isotopes | Mg isotopes |
|----------------------------|----|-------------|-------------|
| 低エネルギー ~50 MeV/nucleon | 実験 | 存在 | 存在 |
| | 理論 | 未解析 | 未解析 |
| 中間エネルギー 240 MeV/nucleon | 実験 | 存在 | 解析中 |
| | 理論 | 解析済 | 未解析 |
| 高エネルギー 950 MeV/nucleon | 実験 | 存在 | 存在 |
| | 理論 | 未解析 | 未解析 |

高エネルギーでの全反応断面積

$A + {}^{12}\text{C}$, $E_{\text{lab}} = 950 \text{ MeV/nucleon}$



$A\text{Ne} + {}^{12}\text{C}$, $E_{\text{lab}} = 950 \text{ MeV/nucleon}$



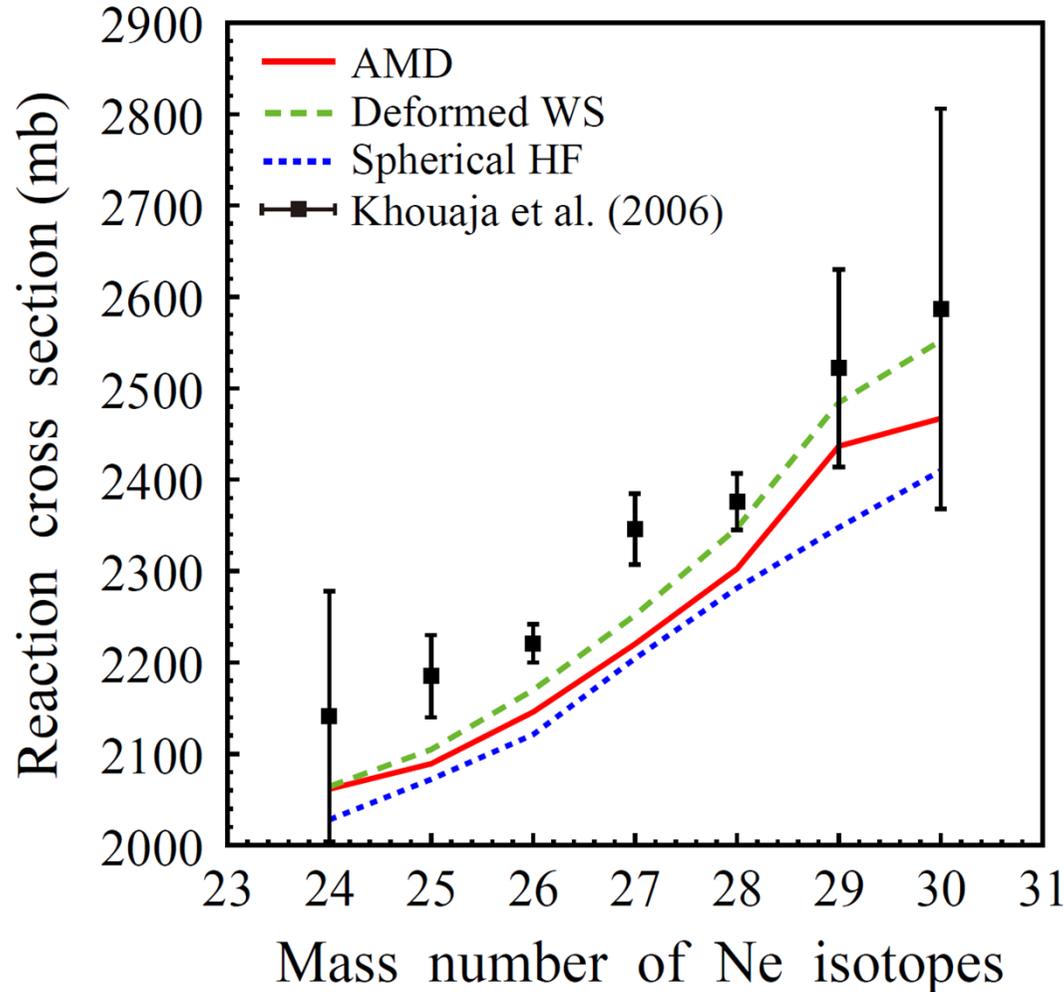
大きなinconsistency

T. Suzuki, et al., PRL75, 3241 (1995).

L. Chulkov, et al., NPA603, 219 (1996).

低エネルギーでの全反応断面積

$${}^A\text{Ne} + {}^{28}\text{Si}, E_{\text{lab}} \approx 50 \text{ MeV/nucleon}$$



✓ 分解断面積の見積もり

${}^{29}\text{Ne}({}^{28}\text{Ne}+n)+{}^{28}\text{Si}$ とする3体模型
に基づいてCDCC計算

$$\sigma_{\text{bu}} \sim 80 \text{ (mb)}$$

✓ 非弾性断面積の見積もり

${}^{30}\text{Ne}$ について,
 0^+ と 2^+ の状態を変形平均場で
計算し, 非弾性散乱を計算

$$\sigma_{\text{inel}} \sim 10 \text{ (mb)}$$

低エネルギーでは分解(と回転励起)の効果が重要.

Summary

✓ island of inversion核の全反応断面積の解析

AMD(RGM), 二重畳み込み模型, Melbourne相互作用を組み合わせ,
Ne同位体の反応断面積を非常に良く再現.

✓ Conclusive results

I. Strong deformation

$^{28-32}\text{Ne}$ で $\beta_2 \sim 0.4$

II. The structure of ^{31}Ne

変形に加えて, ハロー構造を持つ.

スピン・パリティ $3/2^-$.

III. Loss of magic number

Island of inversionでの $N=20$ 魔法数の消失

調節パラメータのない微視的枠組み \Rightarrow Mg同位体などの理論予測