

核子剥離反応の解析による 分光学的因子の決定とその不定性

九大院理
蓑茂 工将

共同研究者 九大院理 松本琢磨, 八尋正信
RCNP 緒方一介

コンテンツ

- ✓ 中性子剥離反応を計算する新しい方法の紹介
- ✓ ^{31}Ne の解析を通じた分光学的因子とANCの議論

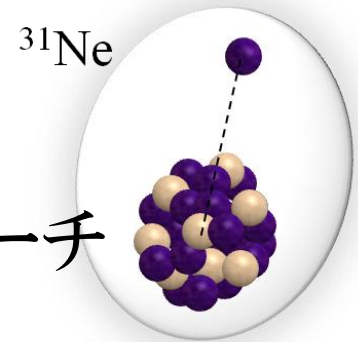
I. イントロダクション

～Island of inversion の物理と反応的アプローチ

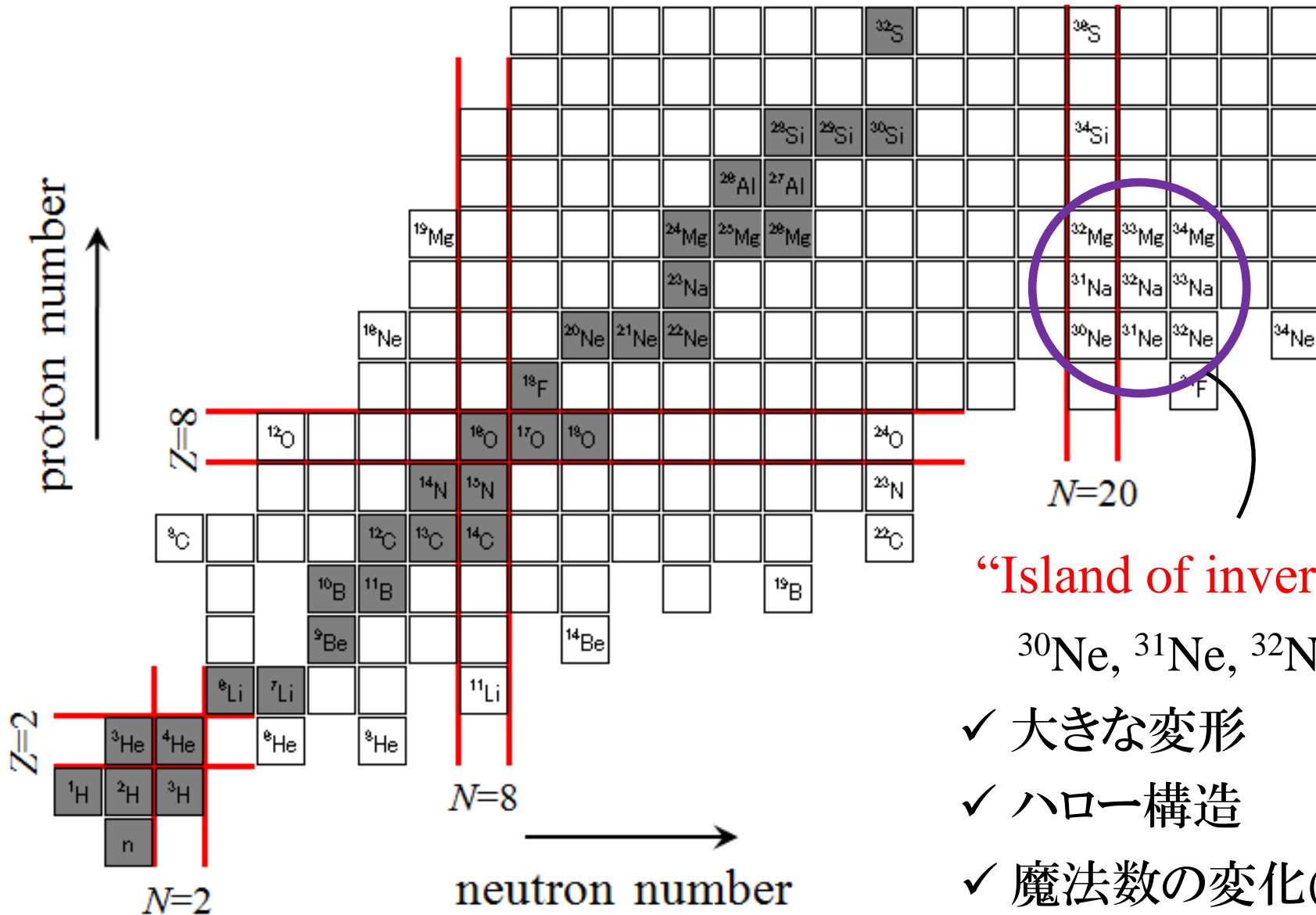
II. Eikonal reaction theory (ERT)

III. ERTを用いた ^{31}Ne の1中性子剥離反応の解析

IV. 総括

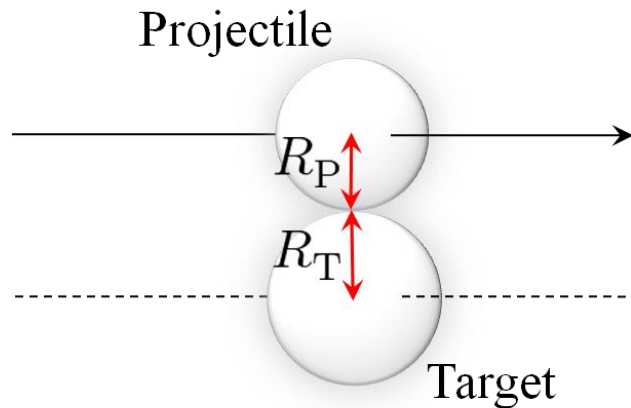


Island of inversionの物理



不安定核反応実験の代表的な観測量

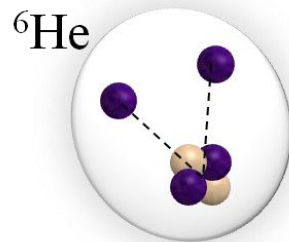
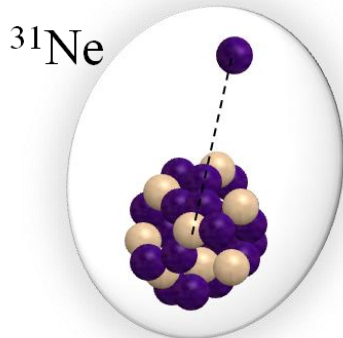
- ✓ 全反応断面積 (または相互作用断面積) ⇒ **原子核の“大きさ”**



全反応断面積の近似的表式

$$\sigma_R \propto \pi(R_P + R_T)^2$$

- ✓ 核子剥離反応 (断面積, 運動量分布) ⇒ **価核子配位**



核子の軌道, 束縛エネルギーに敏感
ドリップライン近傍の弱束縛核

Island of inversion 核反応の解析

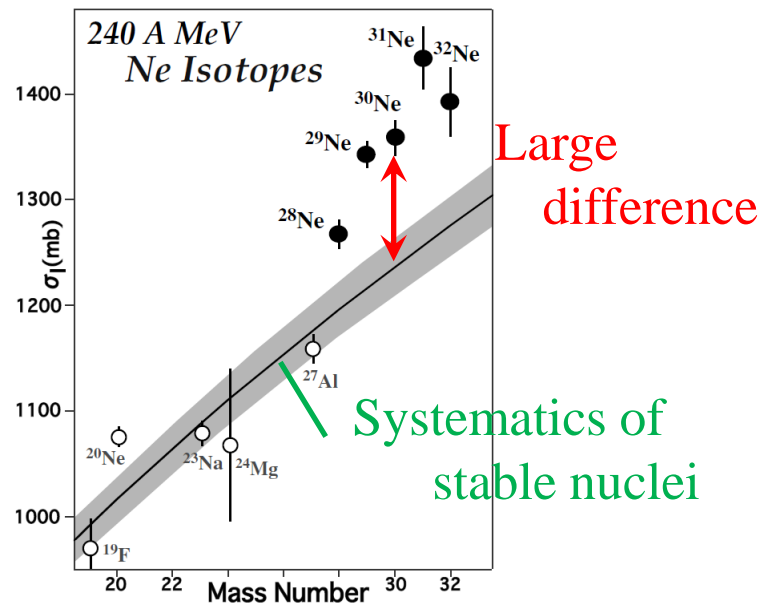
✓ 中性子過剰核の相互作用断面積測定

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

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

安定核の系統性($\sim A^{1/3}$)とは異なる振る舞い

→ 巨大変形やハローの効果?



✓ 完全な微視的枠組みによる理論解析

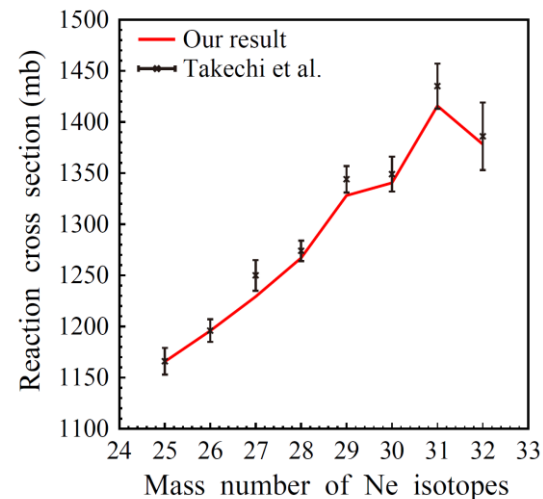
K. Minomo, et al., PRL108, 052503 (2012).

AMD波動関数を用いた二重畳み込みモデル

$$U(\mathbf{r}) = \int d\mathbf{r}' d\mathbf{r}'' \underbrace{\rho_{\text{Ne}}(\mathbf{r}') \rho_{\text{C}}(\mathbf{r}'')}_{\text{AMD}} \underbrace{g_{\text{NN}}(\rho; \mathbf{r} - \mathbf{r}' + \mathbf{r}'')}_{\text{Melbourne } g\text{-matrix}}$$

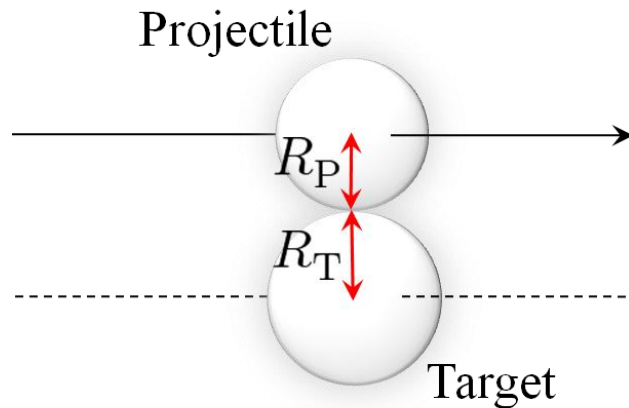
調節パラメータなしに, 実験を系統的に再現

変形の効果やハロー構造の存在を**実証**



不安定核反応実験の代表的な観測量

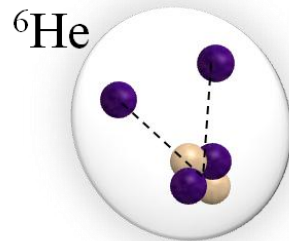
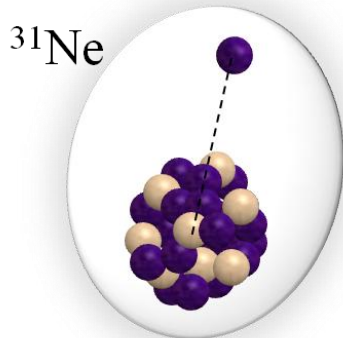
- ✓ 全反応断面積 (または相互作用断面積) ⇒ **原子核の“大きさ”**



全反応断面積の近似的表式

$$\sigma_R \propto \pi(R_P + R_T)^2$$

- ✓ 核子剥離反応 (断面積, 運動量分布) ⇒ **価核子配位**

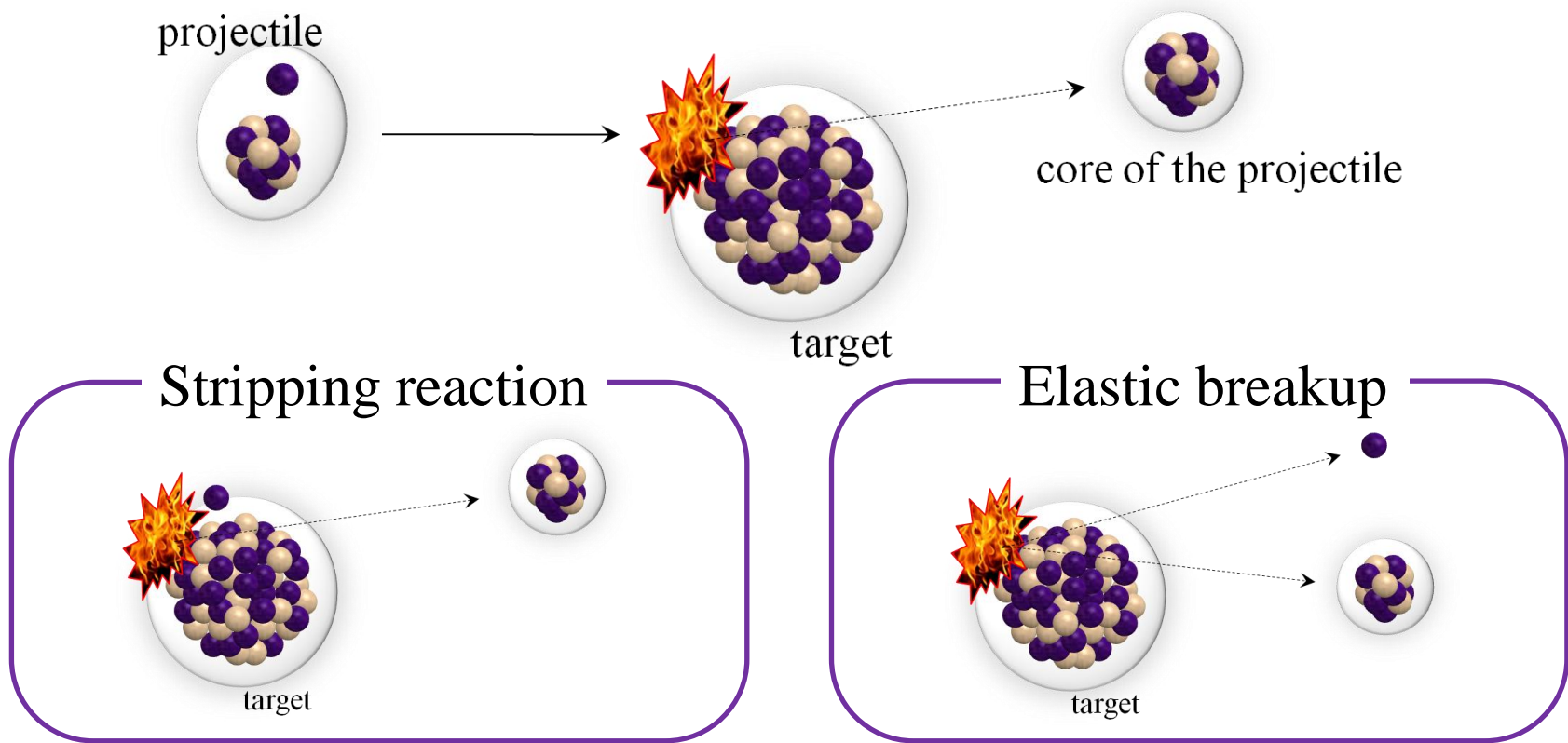
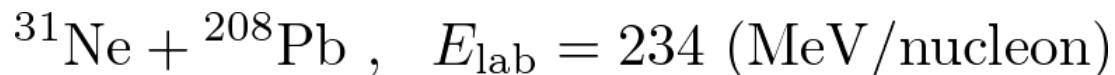
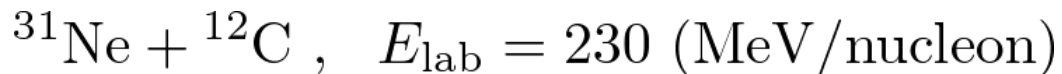


核子の軌道, 束縛エネルギーに敏感
ドリップライン近傍の弱束縛核

^{31}Ne の1中性子剥離反応

✓ ^{31}Ne の1中性子剥離反応断面積測定

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

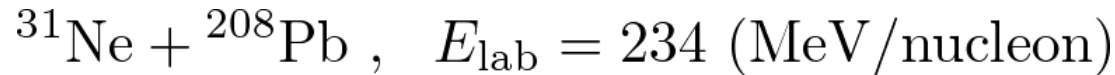
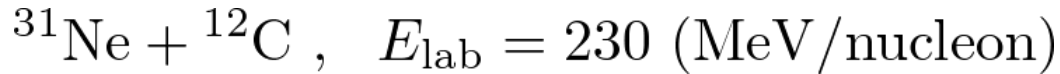


標的核と中性子を観測しない → 包括的断面積 (⇔ 排他的断面積)

^{31}Ne の1中性子剥離反応

✓ ^{31}Ne の1中性子剥離反応断面積測定

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



単純な殻模型では

21個目の中性子が占める軌道は $0f$ または $1p$

大きなCoulomb分解反応断面積

→ $1p_{3/2}$ が主成分のハロー構造?

✓ 理論解析(先行研究)

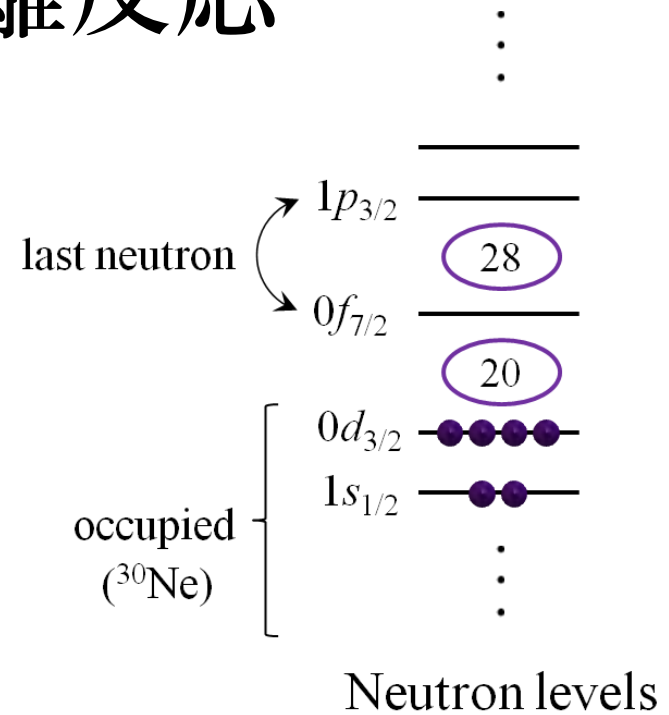
Glauber模型 + virtual photon theory

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

Virtual photon theory with the particle-rotor model

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

いずれも、核力とCoulomb力は別に扱われている



代表的な反応理論の長所と短所

✓ Glauber模型

○排他的断面積

○包括的断面積

アイコナル近似 + 断熱近似

Coulomb分解に対して断面積が発散!

✓ 連続状態離散化チャネル結合法(CDCC)

○排他的断面積

×包括的断面積

分解反応を極めて精密に記述可能

CDCCを用いて包括的観測量を計算する新たな手法を提案

Eikonal reaction theory (ERT)

M. Yahiro, K. Ogata, and K. Minomo, PTP126, 167 (2011).

コンテンツ

- ✓ 中性子剥離反応を計算する新しい方法の紹介
- ✓ ^{31}Ne の解析を通じた分光学的因子とANCの議論

I. イントロダクション

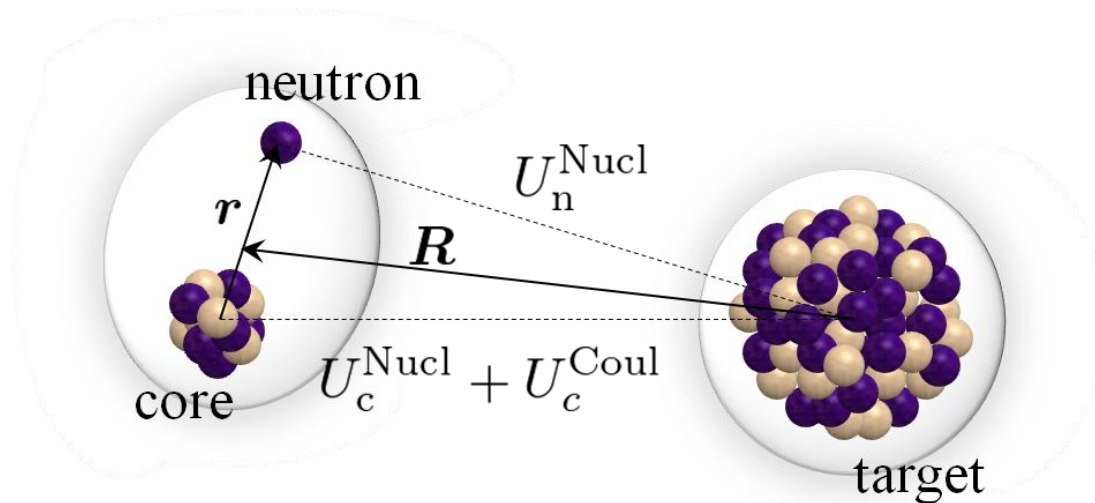
～Island of inversion の物理と反応的アプローチ

II. Eikonal reaction theory (ERT)

III. ERTを用いた ^{31}Ne の1中性子剥離反応の解析

IV. 総括

3体模型



3体模型に基づく Schrödinger 方程式

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla_{\mathbf{R}}^2 + h_{\text{P}} + U(r_{\text{c}}, r_{\text{n}}) - E \right] \Psi = 0$$

入射核の内部 Hamiltonian: $h_{\text{P}} = -\frac{\hbar^2}{2\mu_{\text{P}}} \nabla_{\mathbf{r}}^2 + V(\mathbf{r})$

ポテンシャル: $U(r_{\text{c}}, r_{\text{n}}) = U_{\text{c}}^{\text{Nucl}}(r_{\text{c}}) + U_{\text{c}}^{\text{Coul}}(r_{\text{c}}) + U_{\text{n}}^{\text{Nucl}}(r_{\text{n}})$

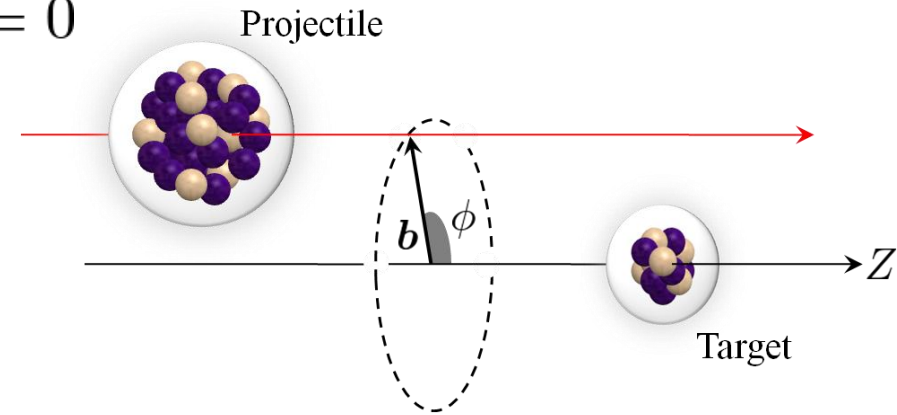
Eikonal reaction theory

✓ Eikonal近似による記述

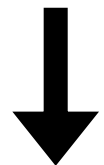
$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla_{\mathbf{R}}^2 + h_P + U(r_c, r_n) - E \right] \Psi = 0$$

$$\Psi = \hat{O}\psi(\mathbf{R}, \mathbf{r}) \quad \hat{O} = \frac{1}{\sqrt{\hbar\hat{v}}} e^{i\hat{K}\cdot\mathbf{Z}}$$

$$(\hat{K} = \sqrt{2\mu(E - h_P)/\hbar})$$



Eikonal近似



$$\nabla_{\mathbf{R}}^2 \Psi = [\nabla_{\mathbf{R}}^2 \hat{O}] \psi + [\nabla_{\mathbf{R}} \hat{O}] \cdot [\nabla_{\mathbf{R}} \psi] + \cancel{\hat{O} [\nabla_{\mathbf{R}}^2 \psi]}$$

$$i \frac{d\psi}{dZ} = \hat{O}^\dagger U \hat{O} \psi \quad (\text{cf. Eikonal-CDCC})$$

形式解としてのS行列(\mathcal{P} : Path ordering operator)

$$S = \exp \left[-i \mathcal{P} \int_{-\infty}^{\infty} dZ \hat{O}^\dagger \left(U_c^{\text{Nucl}} + U_c^{\text{Coul}} + U_n^{\text{Nucl}} \right) \hat{O} \right]$$

Eikonal reaction theory

$$S = \exp \left[-i\mathcal{P} \int_{-\infty}^{\infty} dZ \hat{O}^\dagger \left(U_c^{\text{Nucl}} + U_c^{\text{Coul}} + U_n^{\text{Nucl}} \right) \hat{O} \right]$$

$\hat{O}^\dagger U_n^{\text{Nucl}} \hat{O}$ の項にのみ断熱近似 ($\hbar v_P \rightarrow \varepsilon_P$) を適用

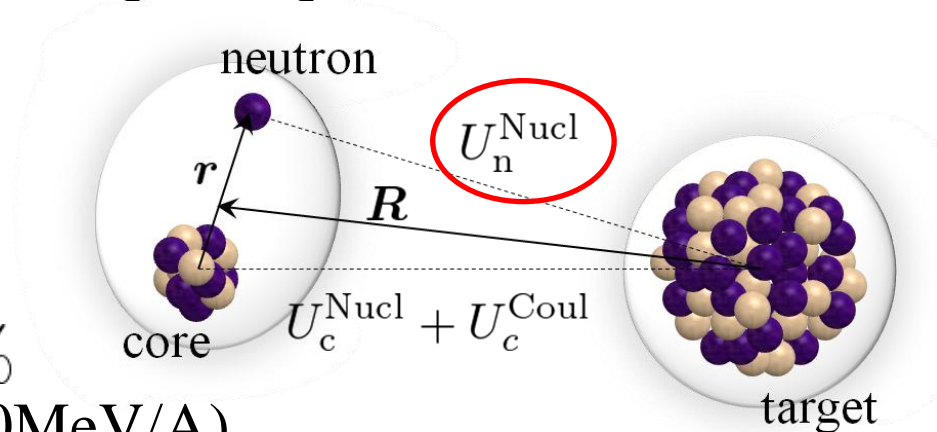
$$\hat{O}^\dagger U_n^{\text{Nucl}} \hat{O} \rightarrow \frac{U_n^{\text{Nucl}}}{\hbar v_0}$$

断熱近似に対する誤差評価

$\sim 3\%$

($\sigma_R, \sigma_{\text{bu}}, \sigma_{\text{str}}$ for $^{31}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$ @ 240 MeV/A)

Very good!



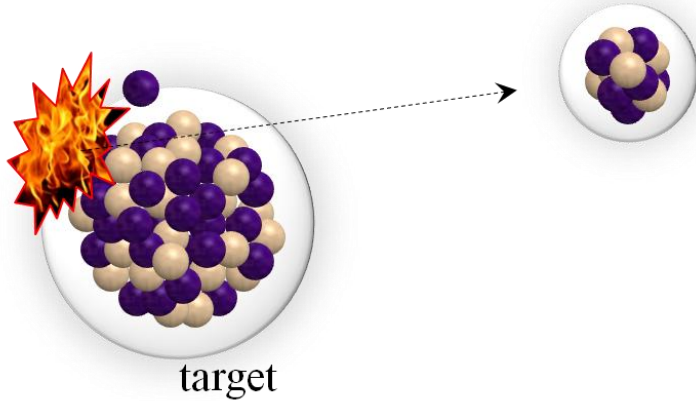
$$S \approx \exp \left[-i\mathcal{P} \int_{-\infty}^{\infty} dZ \hat{O}^\dagger \left(U_c^{\text{Nucl}} + U_c^{\text{Coul}} \right) \hat{O} \right] \exp \left[-\frac{i}{\hbar v_0} \int_{-\infty}^{\infty} dZ U_n^{\text{Nucl}} \right]$$

$$= S_c S_n$$

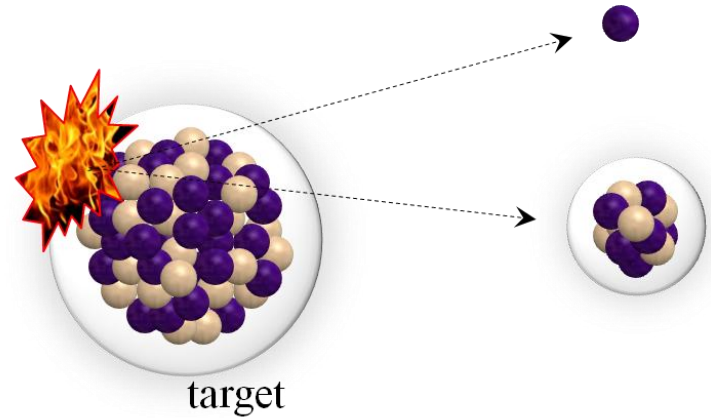
Cross sections

✓ 1中性子剥離反応断面積 $\sigma_{-n} = \sigma_{\text{str}} + \sigma_{\text{bu}}$

Stripping reaction



Elastic breakup



$$\sigma_{\text{str}} = \int d^2\mathbf{b} \langle \varphi_0 | |S_c|^2 (1 - |S_n|^2) | \varphi_0 \rangle \quad \sigma_{\text{bu}} = \sum_{\beta} \int d^2\mathbf{b} |\langle \varphi_{\beta} | S_c S_n | \varphi_0 \rangle|^2$$

✓ S_c の計算

S_c は U_n^{Nucl} を除いた (3体系) Schrodinger 方程式の形式解

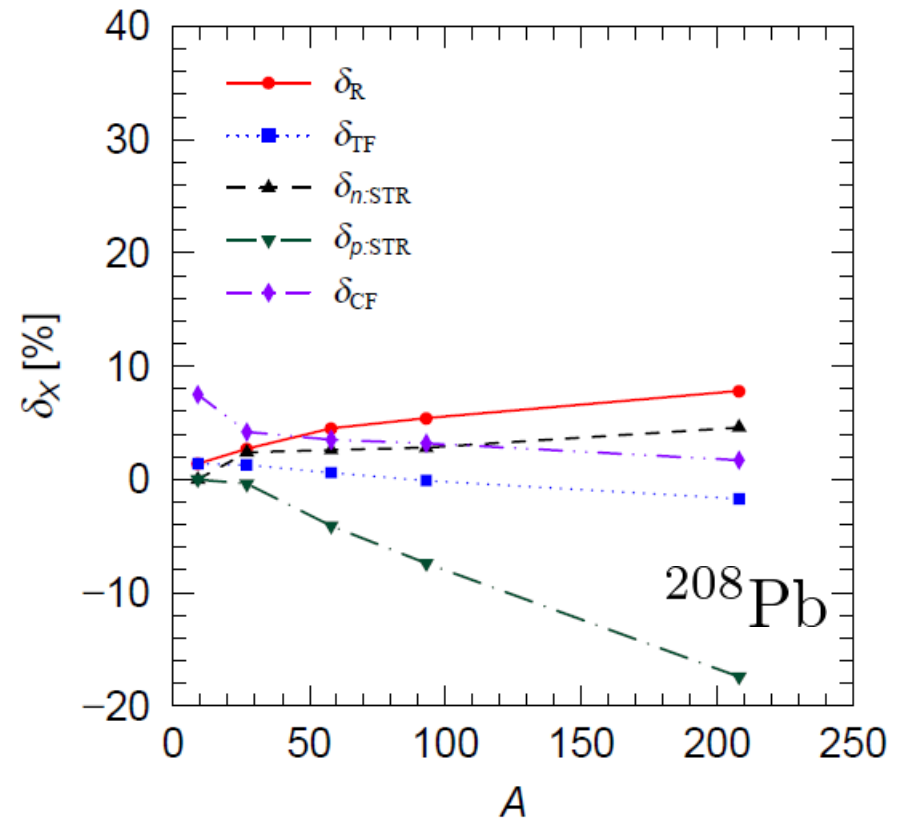
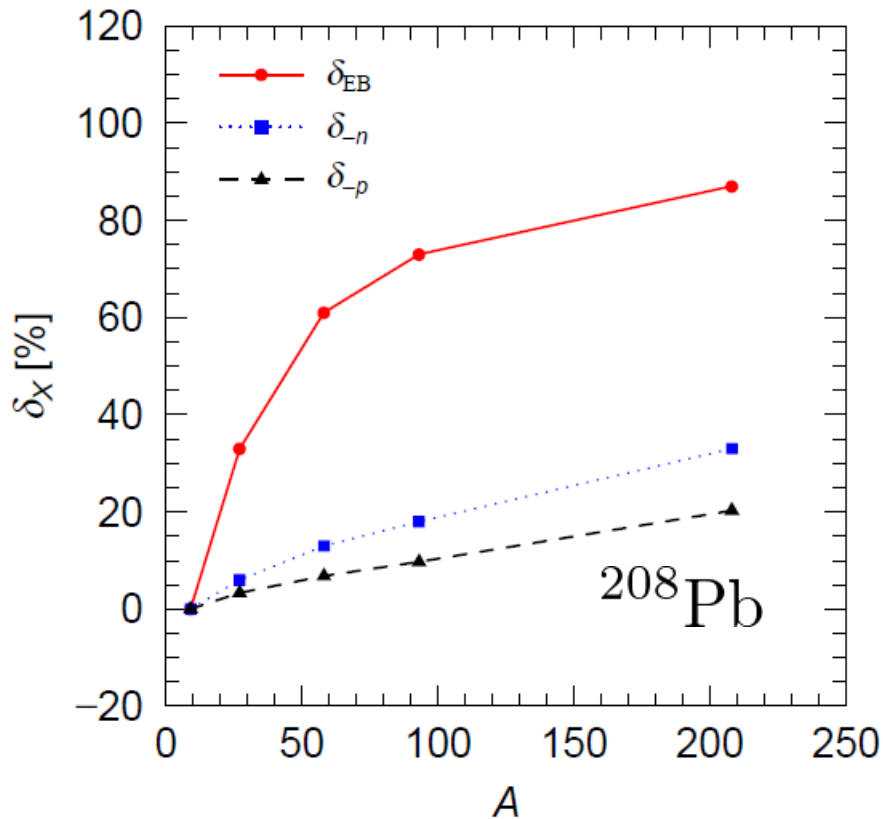
$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla_{\mathbf{R}}^2 + h_{\text{P}} + U_c^{\text{Nucl}}(r_c) + U_c^{\text{Coul}}(r_c) - E \right] \Psi_c = 0$$

Glauber模型の妥当性の評価

S. Hashimoto, K. Ogata, M. Yahiro, K. Minomo, S. Chiba, PRC83, 054617 (2011).

200 MeV/nucleonの重陽子入射反応でERTとGlauber模型の誤差を評価

$$\delta_X = [\sigma^{(\text{ERT})} - \sigma^{(\text{Gl})}] / \sigma^{(\text{ERT})}$$



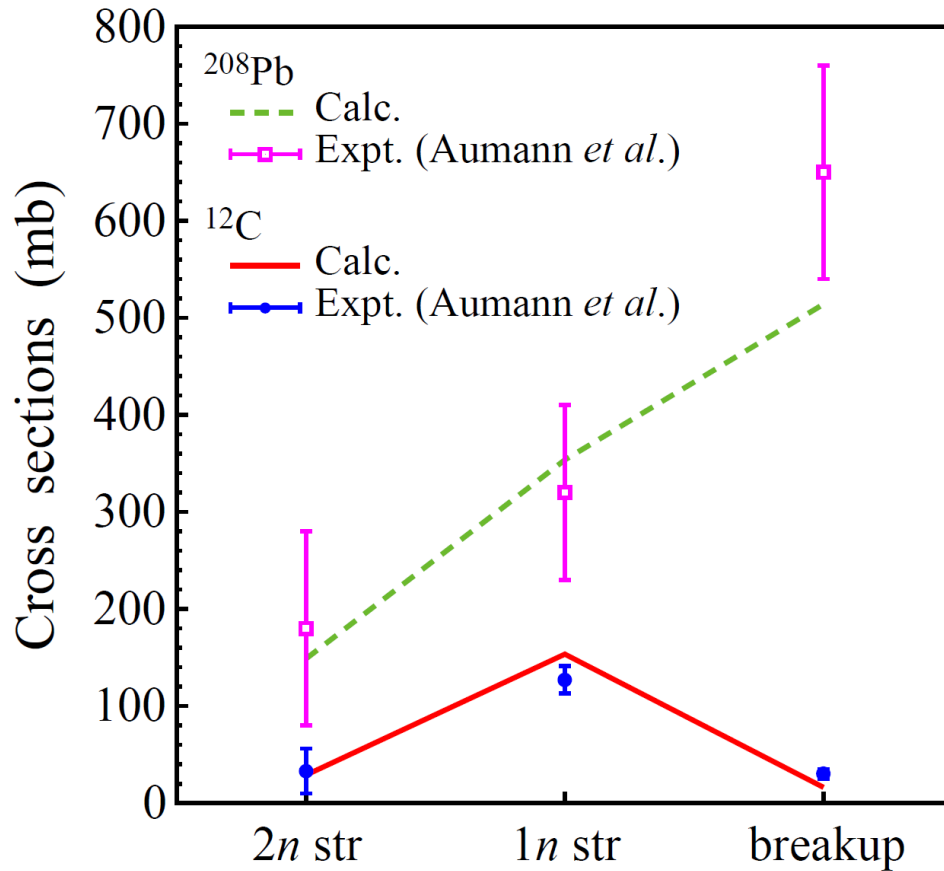
重い標的の反応で歴然とした差が見える

${}^6\text{He}$ の2中性子剥離反応

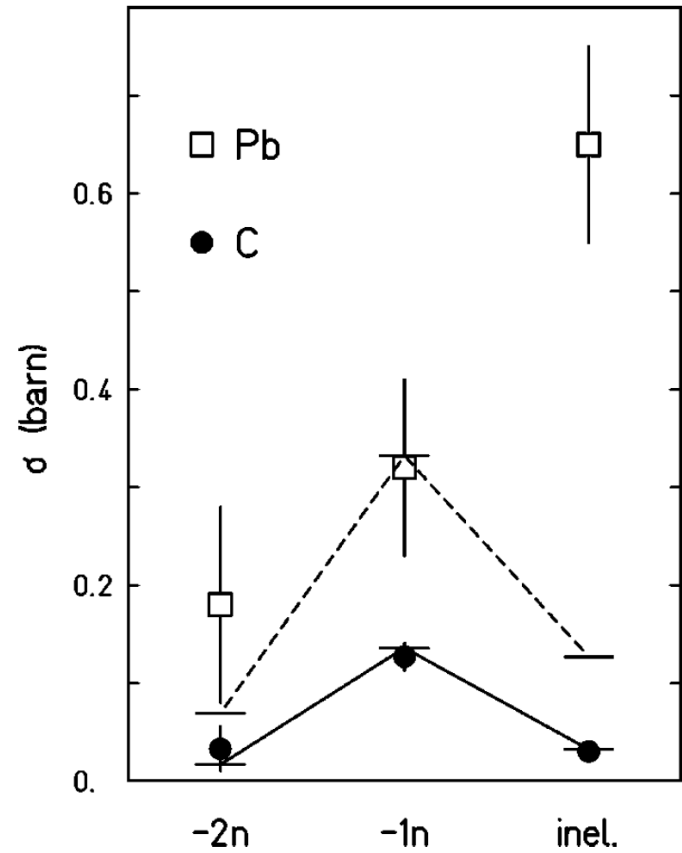
$${}^6\text{He} + {}^{12}\text{C} ({}^{208}\text{Pb}), \quad E_{\text{lab}} = 240 \text{ (MeV/nucleon)}$$

T. Aumann, et al. PRC59, 1252 (1999).

ERT



Glauber model



コンテンツ

- ✓ 中性子剥離反応を計算する新しい方法の紹介
- ✓ ^{31}Ne の解析を通じた分光学的因子とANCの議論

I. イントロダクション

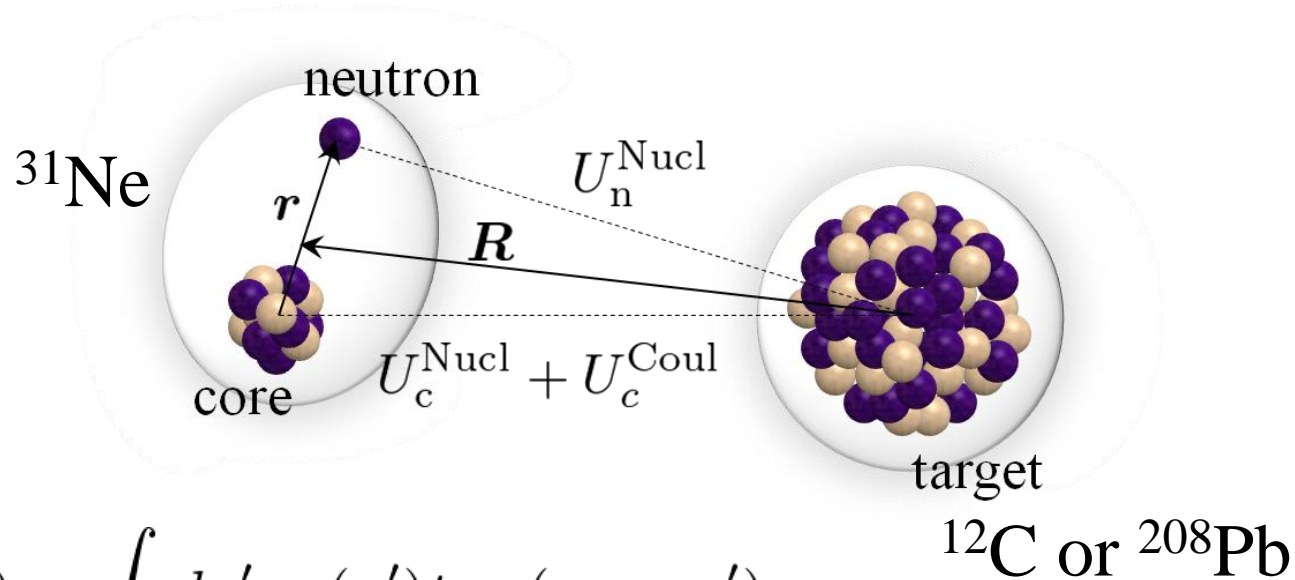
～Island of inversion の物理と反応的アプローチ

II. Eikonal reaction theory (ERT)

III. ERTを用いた ^{31}Ne の1中性子剥離反応の解析

IV. 総括

Model setting



$$U_n^{\text{Nucl}}(\mathbf{r}_n) = \int d\mathbf{r}' \rho_T(\mathbf{r}') t_{\text{NN}}(\mathbf{r}_n - \mathbf{r}')$$

$$U_c^{\text{Nucl}}(\mathbf{r}_c) = \int d\mathbf{r}' d\mathbf{r}'' \rho_c(\mathbf{r}') \rho_T(\mathbf{r}'') t_{\text{NN}}(\mathbf{r}_c - \mathbf{r}' + \mathbf{r}'')$$

t 行列相互作用

B. Abu-Ibrahim, et al., PRC77, 034607 (2008).

平均場(Woods-Saxonポテンシャル)模型

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

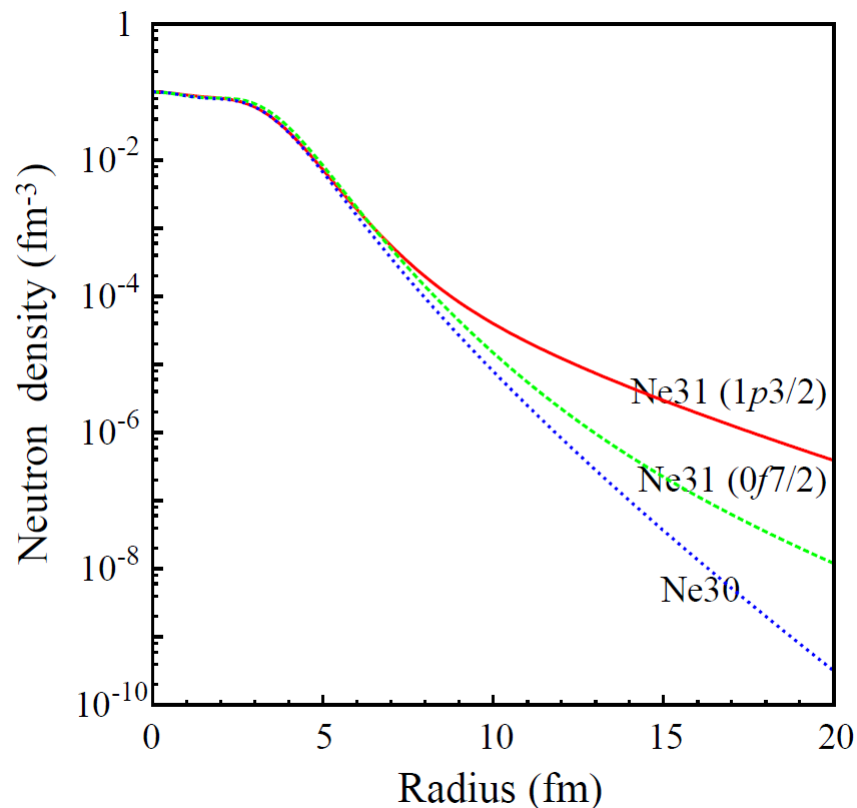
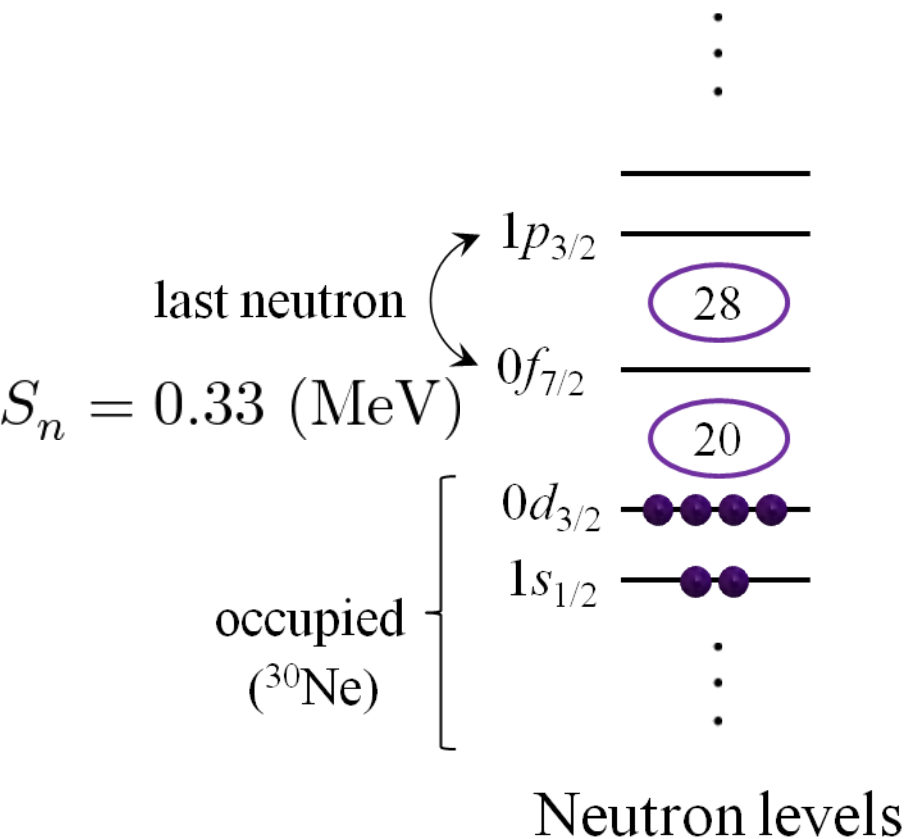
→ 新潟グループと同じ相互作用, 同じ核密度を用いる

Structure of ^{31}Ne

Core $^{30}\text{Ne}(0^+)$ + valence neutron $0f_{7/2}$ or $1p_{3/2}$

球形Woods-Saxonポテンシャル中での独立粒子模型

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



1中性子剥離反応断面積

	1p3/2 orbit		0f7/2 orbit	
	¹² C	²⁰⁸ Pb	¹² C	²⁰⁸ Pb
σ_{str}	90	244	29	53
σ_{bu}	23.3	799.5	3.3	73.0
σ_{-n}	114	1044	32	126
Exp.	79 ± 7	712 ± 65	79 ± 7	712 ± 65
S	0.693	0.682	2.47	5.65

³¹Ne の基底状態は、³⁰Ne(0⁺) \otimes 1p3/2 が主成分(~70%)

ERT vs. Glauber model

¹²C target

$$\sigma^{(\text{ERT})} = 114 \text{ (mb)}$$

$$(\sigma_{\text{str}} = 90 \text{ (mb)}, \sigma_{\text{bu}} = 24 \text{ (mb)})$$

$$\sigma^{(\text{Glauber})} = 96 \text{ (mb)}$$

²⁰⁸Pb target

$$\sigma^{(\text{ERT})} = 1044 \text{ (mb)}$$

$$\sigma^{(\text{Glauber})} = 1140 \text{ (mb)}$$

Reaction mechanism

Stripping反応断面積の表式

$$\sigma_{\text{str}} = \int d^2\mathbf{b} \langle \varphi_0 | \underbrace{|S_c|^2}_{\text{core}} \underbrace{(1 - |S_n|^2)}_{\text{valence}} | \varphi_0 \rangle$$

✓ b が小さい領域

芯核の強い吸収

✓ b が非常に大きい領域

核力の短距離性により反応が起こらない

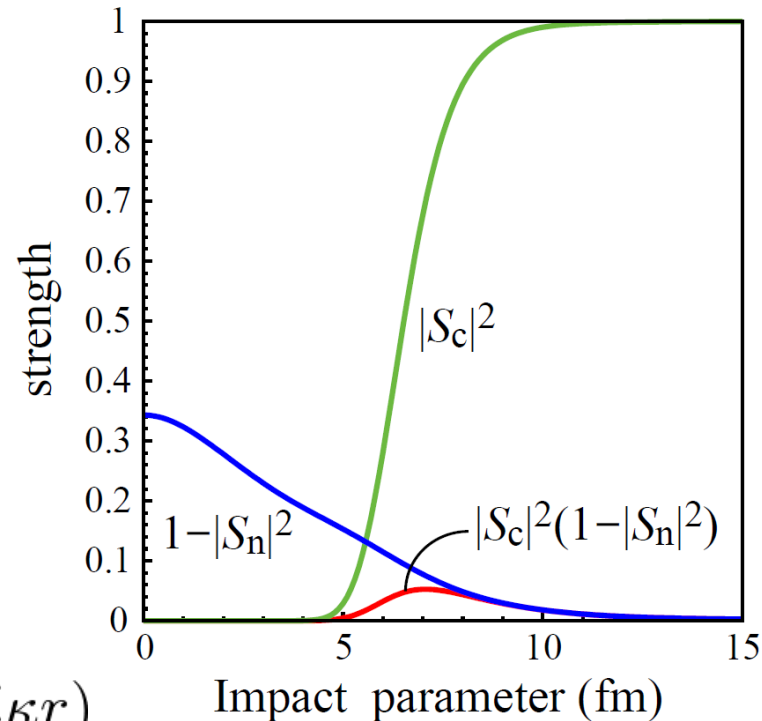
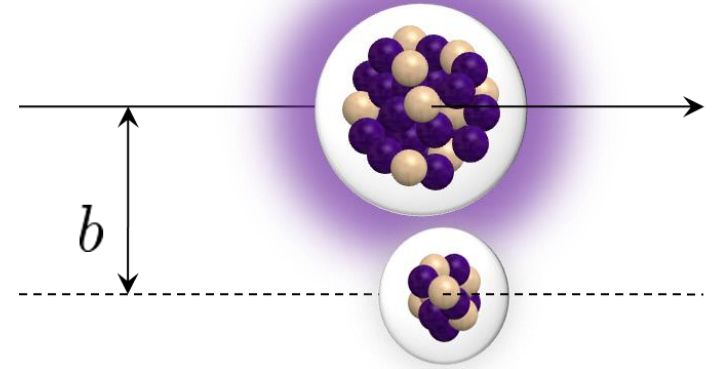
Peripheralな反応!

↳ **ANC法**を適用できる

(ANC : Asymptotic normalization coefficient)

$$I(\mathbf{r}) = \langle \phi_c(\zeta_c) \phi_n(\zeta_n) | \phi_{31}(\zeta_c, \zeta_n, \mathbf{r}) \rangle$$

$$I(\mathbf{r}) \text{の動径部分: } I_{lj}(r) \rightarrow C_{lj}^{(\text{ANC})} h_l^{(+)}(i\kappa r)$$



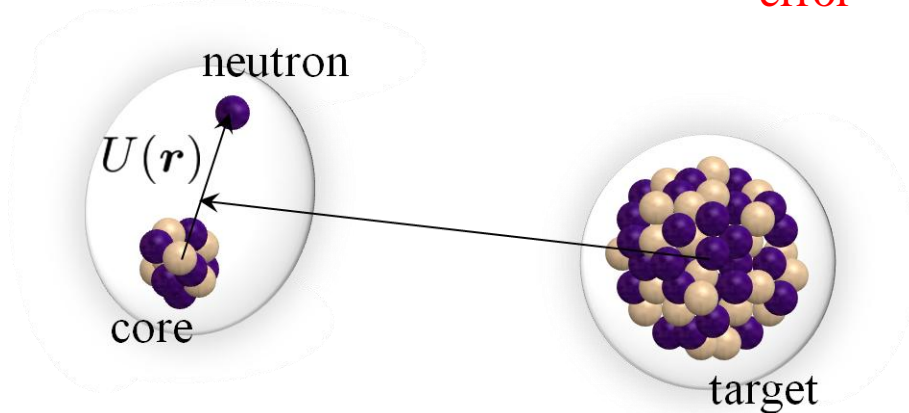
分光学的因子とANC

For $1p_{3/2}$ orbit and ^{12}C target,

$$S = 0.693 \pm 0.133 \pm 0.061$$

$$C_{\text{ANC}} = 0.320 \pm 0.010 \pm 0.028 \text{ (fm}^{-1/2}\text{)}$$

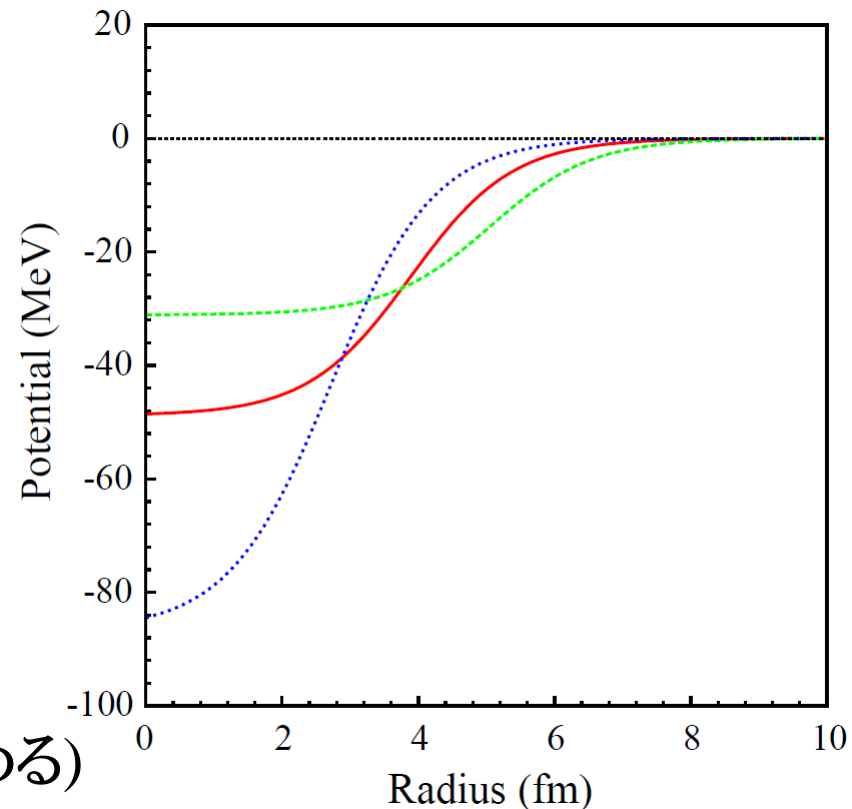
Theoretical error Experimental error



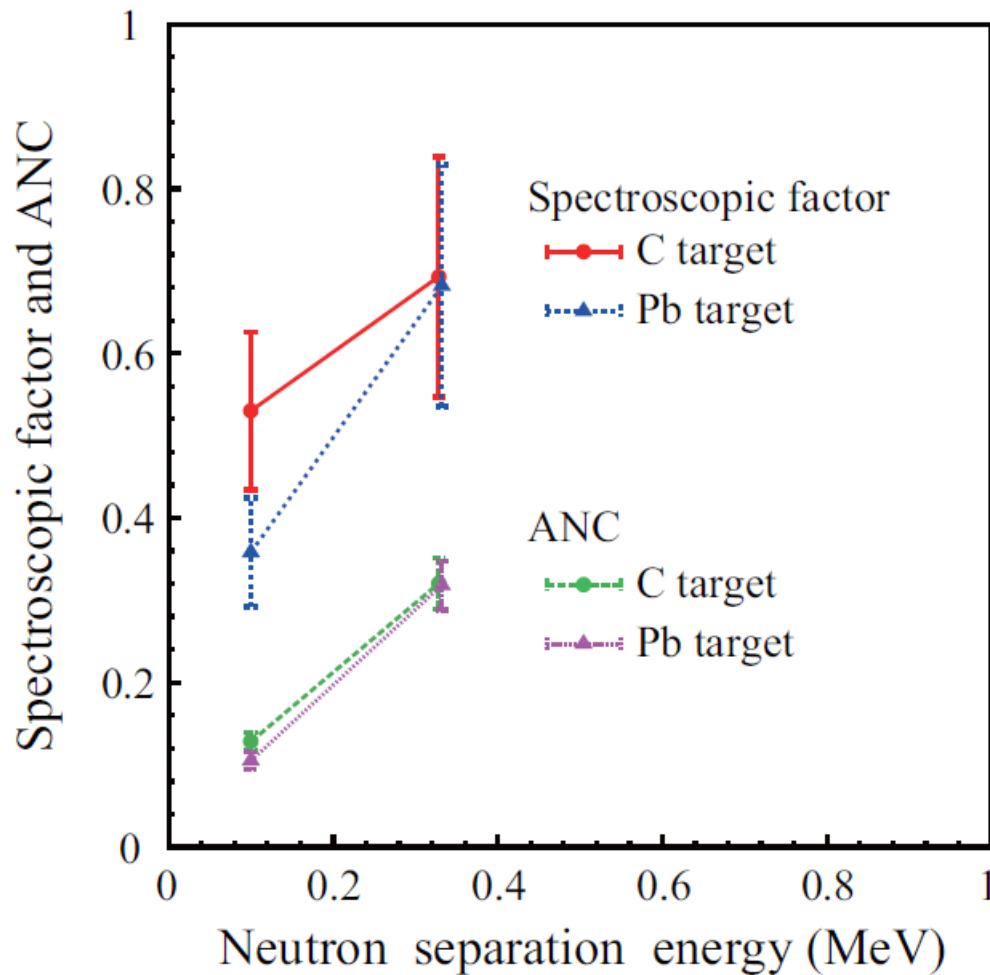
$$U(r) = V_0 \frac{1}{1 + \exp[(r - r_0)/a_0]}$$

r_0 と a_0 を30%変化させる

(V_0 は $S_n = 0.33$ (MeV)を満たすよう決める)



分光学的因子とANCの不定性



✓ 分光学的因子

S_n 依存性

→ 標的核によって大きく異なる

ポテンシャルによる不定性

→ 大きい(~20%)

✓ ANC

S_n 依存性

→ 標的核による違いはない

ポテンシャルによる不定性

→ 非常に小さい(~3%)

Peripheralな反応から分光学的因子を決める際には注意が必要

ただし, ANCは核力分解でもシャープに決められる

コンテンツ

- ✓ 中性子剥離反応を計算する新しい方法の紹介
- ✓ ^{31}Ne の解析を通じた分光学的因子とANCの議論

I. イントロダクション

～Island of inversion の物理と反応的アプローチ

II. Eikonal reaction theory (ERT)

III. ERTを用いた ^{31}Ne の1中性子剥離反応の解析

IV. 総括

総括

- ✓ **Island of inversion**

巨大な変形やハロー構造の議論

特に ^{31}Ne のハロー構造に注目

- ✓ **Eikonal reaction theory (ERT)**

中性子剥離反応の包括的断面積を計算する新しい方法

重い標的の反応で, Glauberモデルは破綻

- ✓ **^{31}Ne の中性子剥離反応の解析**

^{31}Ne の基底状態は, $^{30}\text{Ne}(0^+) \otimes 1p_{3/2}$ が主成分(~70%)

分光学的因子とANCを見積もり, その不定性を評価