

# Introduction to the Glauber theory and its application

理研仁科センター原子核物理学連続講義 (2010-2011)

Yasuyuki Suzuki  
Niigata Univ. & Riken

## Outline

1. Introduction
2. Basics of potential scattering theory
3. Eikonal approximation
4. Glauber approximation for nuclear collision
5. Nucleon-nucleon profile function and calculation of phase shift function
6. Case of halo nuclei
7. Elastic scattering and dynamic polarization potential
8. Breakup processes with Coulomb interaction

# 1. Introduction

グラウバー理論 (Roy J. Glauber, 1925-)

High-energy collision theory

Lectures in Theoretical Physics, Vol I (Interscience, New York, 1959)

1950年代の電子散乱による原子核研究に触発されて展開 R.Hofstadter  
素過程の相互作用をベースにして、複合粒子間衝突を記述 (Nobel prize 1961)

グラウバー理論はアイコンナル近似と断熱近似を仮定

(但しこの用語は講義録には現れない)

断面積と波動関数との関係が簡明に表現される

不安定核の研究

ハロー構造の発見以後、ドリップ線近傍核の構造の研究が  
p, sd殻核領域を越えて進展中

中高エネルギー反応(核子当り、数100MeV以上の入射エネルギー)  
により有用な実験結果が蓄積

講義の目標

practical, middlebrow

# quantum theory of optical coherence (1963, Nobel prize 2005)

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 131, NUMBER 6

15 SEPTEMBER 1963

## Coherent and Incoherent States of the Radiation Field\*

ROY J. GLAUBER

*Lyman Laboratory of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts*

(Received 29 April 1963)

Methods are developed for discussing the photon statistics of arbitrary radiation fields in fully quantum-mechanical terms. In order to keep the classical limit of quantum electrodynamics plainly in view, extensive use is made of the coherent states of the field. These states, which reduce the field correlation functions to factorized forms, are shown to offer a convenient basis for the description of fields of all types. Although they are not orthogonal to one another, the coherent states form a complete set. It is shown that any quantum state of the field may be expanded in terms of them in a unique way. Expansions are also developed

### III. COHERENT STATES OF A SINGLE MODE

The next few sections will be devoted to discussing the description of a single mode oscillator. We may therefore simplify the notation a bit by dropping the mode index  $k$  as a subscript to the state vector and to the amplitude parameters and operators. To find the oscillator state  $|\alpha\rangle$  which satisfies

$$a|\alpha\rangle = \alpha|\alpha\rangle, \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} |\alpha\rangle &= D(\alpha)|0\rangle \\ &= e^{-\frac{1}{2}|\alpha|^2} e^{a\alpha^\dagger} |0\rangle \\ &= e^{-\frac{1}{2}|\alpha|^2} \sum_n \frac{(\alpha a^\dagger)^n}{n!} |0\rangle \end{aligned}$$

These forms show that the average occupation number of the  $n$ th state is given by a Poisson distribution with mean value  $|\alpha|^2$ ,

$$|\langle n|\alpha\rangle|^2 = \frac{|\alpha|^{2n}}{n!} e^{-|\alpha|^2}. \quad (3.9)$$

Roy J. Glauber – Autobiography  
1943 Santa Fe, Manhattan Project  
Oppenheimer, Bethe, Feynman,  
Bohr, Schwinger

# Measurements of Interaction Cross Sections and Nuclear Radii in the Light $p$ -Shell Region

PHYSICAL REVIEW LETTERS 9 DECEMBER 1985

I. Tanihata,<sup>(a)</sup> H. Hamagaki, O. Hashimoto, Y. Shida, and N. Yoshikawa

*Institute for Nuclear Study, University of Tokyo, Tanashi, Tokyo 188, Japan*

K. Sugimoto,<sup>(b)</sup> O. Yamakawa, and T. Kobayashi

*Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley,*

**<sup>11</sup>Li Halo**

N. Takahashi

*Osaka University*

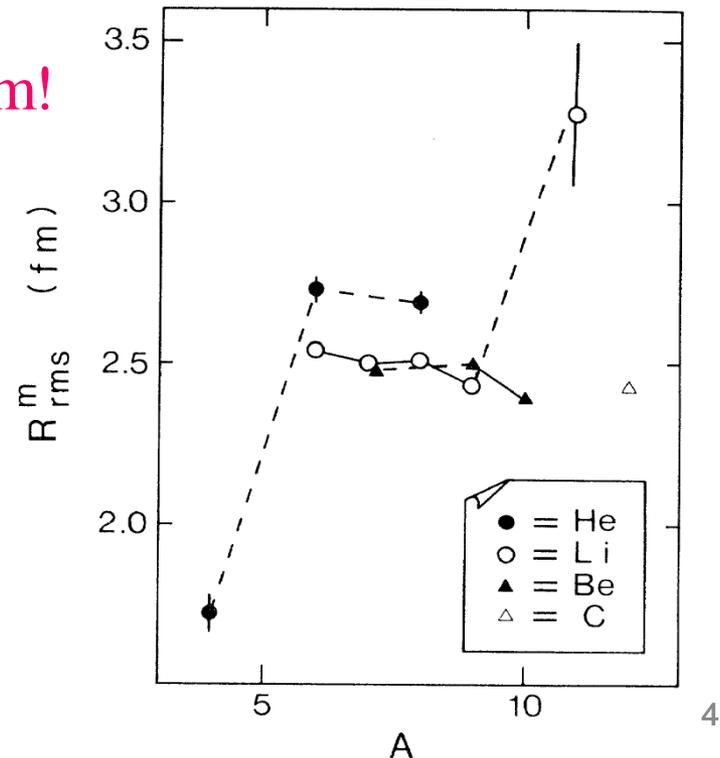
**Secondary beam!**

H.H.Heckman et al. PRC17

**Fragmentation of <sup>4</sup>He, <sup>12</sup>C, <sup>14</sup>N, and <sup>16</sup>O nuclei  
in nuclear emulsion at 2.1 GeV/nucleon MAY 1978**

An empirical expression for the interaction cross section that traditionally has been used to interpret the data given in Table I is the geometrical formula first proposed by Bradt and Peters,<sup>24</sup>

$$\sigma_{BT} = \pi \gamma_0^2 (A_B^{1/3} + A_T^{1/3} - b)^2, \quad (1)$$



## 中高エネルギー原子核反応実験で測定されたもの

Interaction cross sections

Reaction cross sections

Neutron removal cross sections

Charge-changing cross sections

Energy and momentum distributions of fragments

Angular distribution in elastic scattering

Inelastic scattering

Coulomb excitations

これらの諸物理量と波動関数、相互作用との関係を明らかにしたい

1992~ Galuber, eikonal模型による研究

Reaction Mechanisms of  $^{11}\text{Li}$  at Intermediate Energy

K. Yabana, Y. Ogawa and Y. Suzuki, Nucl. Phys. A539, 295 (1992)

Break-up Effect on the Elastic Scattering and the Optical Potential of  $^{11}\text{Li}$

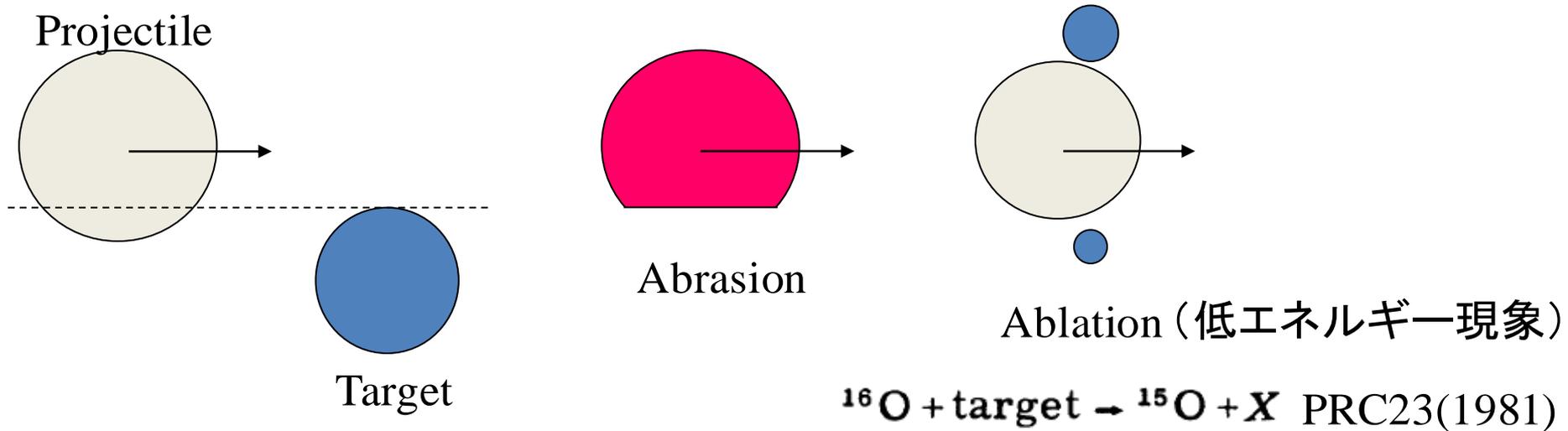
K. Yabana, Y. Ogawa and Y. Suzuki, Phys. Rev. C45, 2909 (1992)

Glauber Model Analysis of the Fragmentation Reaction Cross Sections of  $^{11}\text{Li}$

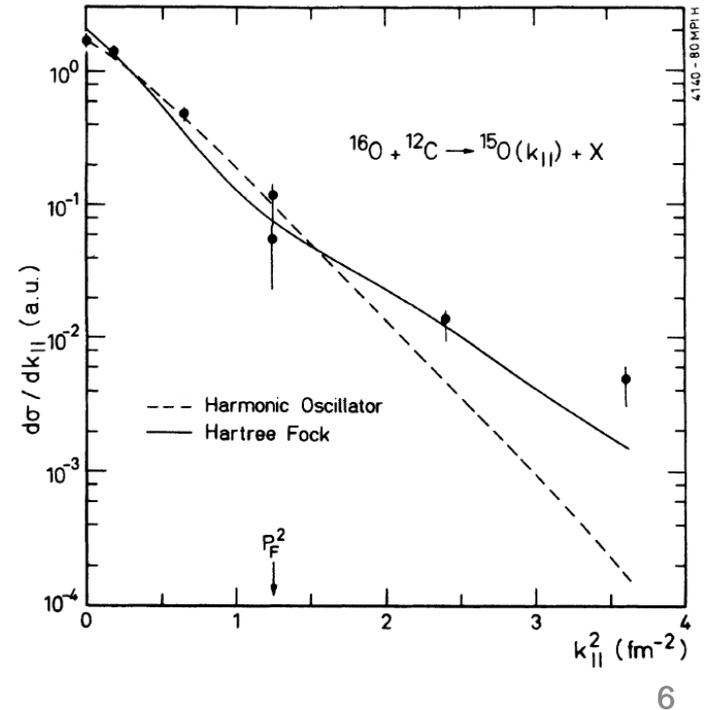
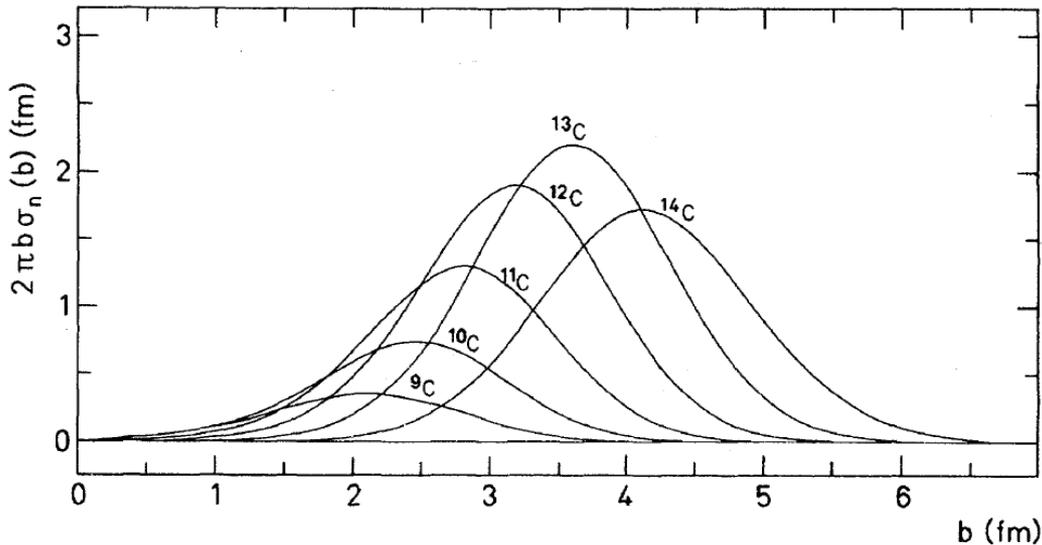
Y. Ogawa, K. Yabana and Y. Suzuki, Nucl. Phys. A543, 722 (1992)

1989.2-1990.1 ミシガン大学滞在中に不安定核の反応に興味

# Abrasion-Ablation model for relativistic heavy-ion reactions



J.Hüfner et al. Glauber theory



# 1. Introduction

2. Basics of potential scattering theory
3. Eikonal approximation
4. Glauber approximation for nuclear collision
5. Nucleon-nucleon profile function and calculation of phase shift function
6. Case of halo nuclei
7. Elastic scattering and dynamic polarization potential
8. Breakup processes with Coulomb interaction

## 2. Basics of potential scattering theory

2.1 Key words: 散乱振幅、断面積、フラックスの保存、光学定理、位相差

球対称ポテンシャル散乱、或は2粒子衝突の相対運動の方程式

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) \right] \psi(\mathbf{r}) = E\psi(\mathbf{r}) \quad E = \hbar^2 k^2 / 2m$$

境界条件  $\psi(\mathbf{r}) = e^{ikz} + f(\theta) \frac{e^{ikr}}{r} \quad (r \rightarrow \infty) \quad f(\theta)$  散乱振幅

ポテンシャルの詳細によらない一般論

確率密度  $\rho = |\psi(\mathbf{r})|^2$

確率流密度  $\mathbf{j} = \frac{\hbar}{2mi} (\psi^* \nabla \psi - \psi \nabla \psi^*)$

$$\mathbf{j}_{\text{inc}} = v \hat{z} \quad \mathbf{j}_{\text{out}} = v \hat{r} \frac{|f(\theta)|^2}{r^2} \quad v = \hbar k / m$$

微分断面積

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\theta)|^2$$

$\hat{a}$  は単位ベクトル

複素ポテンシャル(非弾性散乱、フラグメンテーション等を記述)の場合

時間依存のシュレーディンガー方程式から  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = \frac{2}{\hbar} \rho \operatorname{Im} V(r)$

定常状態の解では第1項=0

フラックスの保存

$$\int_V d\mathbf{r} \nabla \cdot \mathbf{j} = \int_S dS \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{j} = \frac{2}{\hbar} \int_V d\mathbf{r} \rho(\mathbf{r}) \operatorname{Im} V(r)$$

(ガウスの定理)

$\hat{\mathbf{r}} \cdot \nabla = \partial / \partial r$  を用いてフラックスの計算を行う

$$\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{j} = v \cos \theta + v \frac{|f(\theta)|^2}{r^2} + v \operatorname{Re} \left[ \frac{1 + \cos \theta}{r} f(\theta) e^{ikr(1 - \cos \theta)} \right] \\ - v \operatorname{Im} \left[ \frac{1}{kr^2} f(\theta) e^{ikr(1 - \cos \theta)} \right].$$

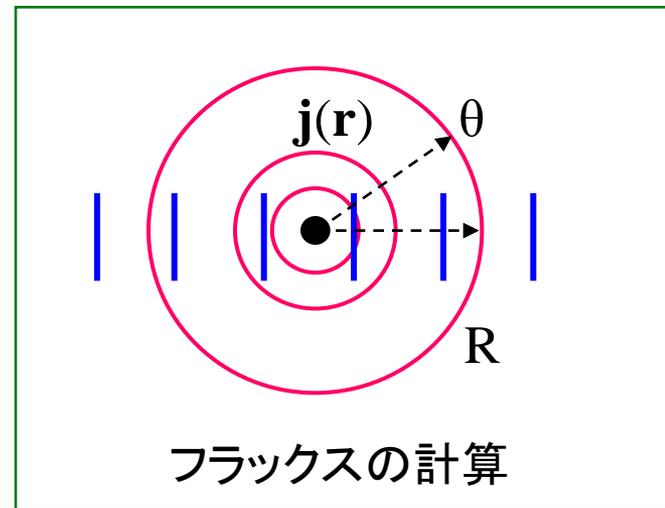
右辺第3項、第4項は入射波と散乱波の干渉項

干渉項は $R \rightarrow \infty$ のとき、 $\theta = 0$ でのみ寄与することがわかる

十分大きな半径 $R$ の球面 $S$ でフラックスを計算

$$dS = R^2 d\Omega = 2\pi R^2 \sin \theta d\theta$$

第3項は以下のようになる



$$\int_S dS \frac{1 + \cos \theta}{R} f(\theta) e^{ikR(1 - \cos \theta)} = 2\pi R \int_{-1}^{+1} dt (1 + t) \tilde{f}(t) e^{ikR(1 - t)}$$

$R$ が十分大きいときは、  
 $\theta = 0$  ( $t = 1$ )でのみ積分に寄与

$$= \frac{4\pi i}{k} f(0) + \frac{2\pi}{ik} \int_{-1}^{+1} dt \left[ \frac{d}{dt} (1 + t) \tilde{f}(t) \right] e^{ikR(1 - t)}$$

右辺第1項のみ寄与、第2項は $1/R$ のオーダー

第4項は第3項の $1/R$ のオーダー

$\hat{r} \cdot \mathbf{j}$  の第1項は球面積分で消え、第2項と $f(0)$ の項のみ残る

$$\int_S dS \hat{r} \cdot \mathbf{j} = v \left[ \int d\Omega |f(\theta)|^2 - \frac{4\pi}{k} \text{Im} f(0) \right]$$

実数ポテンシャルのとき、 $\int_S dS \hat{r} \cdot \mathbf{j}$  はゼロ  $\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{el}} = \frac{4\pi}{k} \text{Im} f(0)$

複素ポテンシャルのとき

$$\int_V d\mathbf{r} \nabla \cdot \mathbf{j} = \int_S dS \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{j} = \frac{2}{\hbar} \int_V d\mathbf{r} \rho(\mathbf{r}) \operatorname{Im} V(r)$$

この量を  $v\sigma_{\text{abs}} = - \int_S dS \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{j}$  (吸収断面積) と定義する

$$\sigma_{\text{abs}} = \frac{2}{\hbar v} \int_V d\mathbf{r} \rho(\mathbf{r}) [-\operatorname{Im} V(r)] \quad (29\text{頁参照})$$

一般化された光学定理  $\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{el}} + \sigma_{\text{abs}} = \frac{4\pi}{k} \operatorname{Im} f(0)$

部分波展開  $\psi(\mathbf{r}) = \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) R_l(r) P_l(\cos \theta)$

$$R_l(r) \propto \frac{1}{kr} \sin(kr - \frac{1}{2}\pi + \delta_l) \quad (r \rightarrow \infty)$$

Phase shift

これを境界条件の式と比べて散乱振幅の部分波展開式を得る

$$f(\theta) = \frac{1}{2ik} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) (e^{2i\delta_l} - 1) P_l(\cos \theta)$$

$$\sigma_{\text{el}} = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l+1) |1 - e^{2i\delta_l}|^2 \quad \sigma_{\text{abs}} = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l+1) (1 - |e^{2i\delta_l}|^2)$$

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{el}} + \sigma_{\text{abs}} = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l+1) 2\operatorname{Re}(1 - e^{2i\delta_l}) = \frac{4\pi}{k} \operatorname{Im} f(0)$$

## 2.2 Key words: Lippmann-Schwinger方程式、グリーン関数

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) \right] \psi(\mathbf{r}) = E\psi(\mathbf{r}) \quad E = \hbar^2 k^2 / 2m$$

$$\psi(\mathbf{r}) = e^{ikz} + f(\theta) \frac{e^{ikr}}{r} \quad (r \rightarrow \infty)$$

散乱の境界条件 + シュレーディンガー方程式と等価な積分方程式

$$\left[ E - \left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \right) \right] \psi(\mathbf{r}) = V(r) \psi(\mathbf{r})$$

Lippmann-Schwinger方程式

$$\psi(\mathbf{r}) = e^{ikz} + \int d\mathbf{r}' G^{(+)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}') V(r') \psi(\mathbf{r}')$$

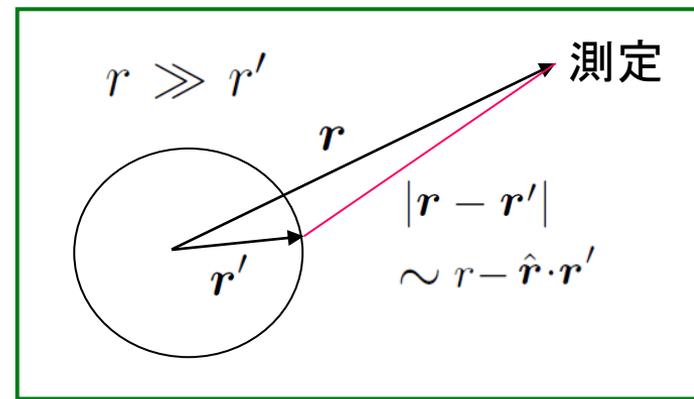
自由粒子のグリーン関数  $\left[ E - \left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \right) \right] G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$

$$G^{(\pm)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}') = -\frac{2m}{\hbar^2} \frac{e^{\pm ik|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}$$

See, e.g., L.I. Schiff  
Quantum Mechanics (2nd edition)  
pp. 162-164

$$r \rightarrow \infty$$

$$G^{(+)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \sim -\frac{2m}{\hbar^2} \frac{1}{4\pi r} e^{ikr - ik\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}'}$$



$$\psi(\mathbf{r}) = e^{ikz} - \frac{2m}{\hbar^2} \frac{1}{4\pi r} \int d\mathbf{r}' e^{-ik\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}'} V(r') \psi(\mathbf{r}')$$

散乱振幅の積分表示  $f(\theta) = -\frac{2m}{\hbar^2} \frac{1}{4\pi} \int d\mathbf{r}' e^{-ik' \cdot \mathbf{r}'} V(r') \psi(\mathbf{r}')$

散乱振幅の計算には、ポテンシャルが消えない領域で波動関数を精度よく求めればよく、境界条件を満たさないものを用いても良い  
仮に、ポテンシャルが弱く平面波からの歪みを無視できれば

1次ボルン近似  $\psi(\mathbf{r}') = e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}'}$   $\mathbf{q} = \mathbf{k}' - \mathbf{k}$  (移行運動量)

$$f(\theta) = -\frac{m}{2\pi\hbar^2} \int d\mathbf{r}' e^{-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}'} V(r') \quad (\text{フーリエ変換})$$

# Variational Principles for Scattering Processes. I

B. A. LIPPMANN

*Nucleonics Division, Naval Research Laboratory, Washington, D. C.*

AND

JULIAN SCHWINGER

*Harvard University, Cambridge, Massachusetts*

(Received April 10, 1950)

Lippmann-Schwinger 論文

A systematic treatment is presented of the application of variational principles to the quantum theory of scattering.

Starting from the time-dependent theory, a pair of variational principles is provided for the approximate calculation of the unitary (collision) operator that describes the connection between the initial and final states of the system. An equivalent formulation of the theory is obtained by expressing the collision operator in terms of an Hermitian (reaction) operator; variational principles for the reaction operator follow. The time-independent theory, including variational principles for the operators now used to describe transitions, emerges from the time-dependent theory by restricting the discussion to stationary states. Specialization to the case of scattering by a central force field establishes the connection with the conventional phase shift analysis and results in a variational principle for the phase shift.

As an illustration, the results of Fermi and Breit on the scattering of slow neutrons by bound protons are deduced by variational methods.

グリーン関数  
Resolvent

$$\Psi_a^{(\pm)} = \Phi_a + \frac{1}{E_a \pm i\epsilon - H_0} H_1 \Psi_a^{(\pm)}. \quad (1.61)$$

These equations provide a time-independent formulation of the scattering problem, in which the small positive or negative imaginary addition to the energy serves to select, automatically, outgoing or incoming scattered waves.

## 2.3 付録: 境界条件を満たさない波動関数を用いて散乱を解く例

Spectroscopic amplitude (SA) や位相差の計算に束縛状態の波動関数を用いるを試みる

Nuclear Physics A 823 (2009) 1–15  
Phase-shift calculation  
using continuum-discretized states

Y. Suzuki <sup>a</sup>, W. Horiuchi <sup>b,\*</sup>, K. Arai <sup>c</sup>

SA  $y(r)$  の定義と満たすべき方程式

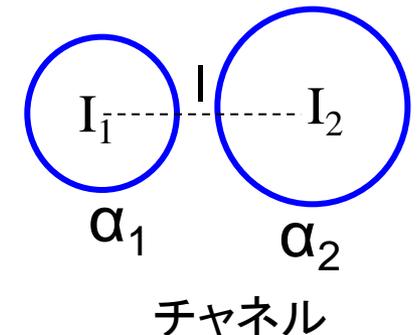
$$y(r) = \langle \Phi_{cJM}(r) | \Psi_{JM} \rangle$$

$$\Phi_{cJM}(r) = \left[ \left[ \psi_{I_1}(\alpha_1) \psi_{I_2}(\alpha_2) \right]_I Y_\ell(\hat{r}_c) \right]_{JM} \frac{\delta(r_c - r)}{r_c r}$$

シュレーディンガー方程式をチャンネルcに射影

$$\langle \Phi_{cJM}(r) | H | \Psi_{JM} \rangle = E \langle \Phi_{cJM}(r) | \Psi_{JM} \rangle$$

$$H = H_{\alpha_1} + H_{\alpha_2} + T_c + V_c$$



2原子核間のチャンネルcで働く相互作用  $V_c = \sum_{i \in \alpha_1, j \in \alpha_2} v_{ij}$

SAの漸近的振舞い  $y(r \rightarrow \infty)$  から位相差が決まる

SAが満たす方程式をは以下のように与えられる  
 ここで、原子核間の局所ポテンシャルUの選び方は任意

$$\left[ \frac{d^2}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d}{dr} - \frac{\ell(\ell+1)}{r^2} - \frac{2\mu}{\hbar^2} U(r) + k^2 \right] y(r) = \frac{2\mu}{\hbar^2} z(r)$$

$$z(r) = \langle \Phi_{cJM}(r) | V_c - U | \Psi_{JM} \rangle$$

グリーン関数を用いて境界条件を満足するSAを得る

$$\left[ \frac{d^2}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d}{dr} - \frac{\ell(\ell+1)}{r^2} - \frac{2\mu}{\hbar^2} U(r) + k^2 \right] G(r, r') = \frac{1}{rr'} \delta(r - r')$$

$$G(r, r') = \begin{cases} kv(r)h(r') & r \leq r' \\ kh(r)v(r') & r \geq r' \end{cases}$$

$$y(r) = \lambda v(r) + \frac{2\mu}{\hbar^2} \int_0^{\infty} G(r, r') z(r') r'^2 dr'$$

See, e.g., L.I. Schiff  
 pp. 166-167

$V_c - U$  が  $r$  の大きいところで消えるように  $U$  を選べば、  
 $\Psi_{JM}$  は相互作用領域でのみ高精度で記述されていればよい  
 この近似解  $\Psi_{JM}$  から  $\lambda, z(r)$  を決定できる。  
 結果として正しい漸近系を持つ  $\Psi_{JM}$  が得られる

# Comparison of the phase shifts of $\alpha + n$ scattering

近似解を得る (CDCCと同様の考えで、連続状態を2乗可積分関数で展開)

$\alpha$ と中性子間の相対運動をガウス基底で展開

連続状態を離散化したエネルギーと波動関数を求める

微視的模型 反対称化演算子

$$\Psi_{JM} = \sum_{i=1}^K C_i \Psi_i \quad \mathcal{A} = \frac{1}{A!} \sum_P (-1)^{\epsilon(P)} P$$

$$\Psi_i = \mathcal{A} \left\{ \left[ [\psi_0(\alpha) \psi_{1/2}(n)]_{1/2} Y_\ell(\hat{\mathbf{r}}) \right]_{JM} r^\ell e^{-\beta_i r^2} \right\}$$

$$\sum_{j=1}^K [\langle \Psi_i | H | \Psi_j \rangle - E \langle \Psi_i | \Psi_j \rangle] C_j = 0 \quad (i = 1, \dots, K)$$

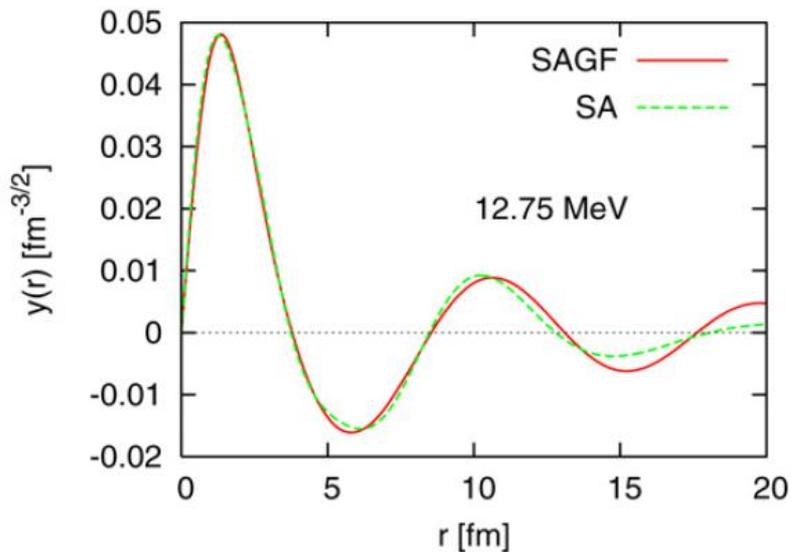


Resonating Group Method (RGM)

$$\Psi_{JM} = \mathcal{A} \left\{ \left[ [\psi_0(\alpha) \psi_{1/2}(n)]_{1/2} Y_\ell(\hat{\mathbf{r}}) \right]_{JM} u(r) \right\}$$

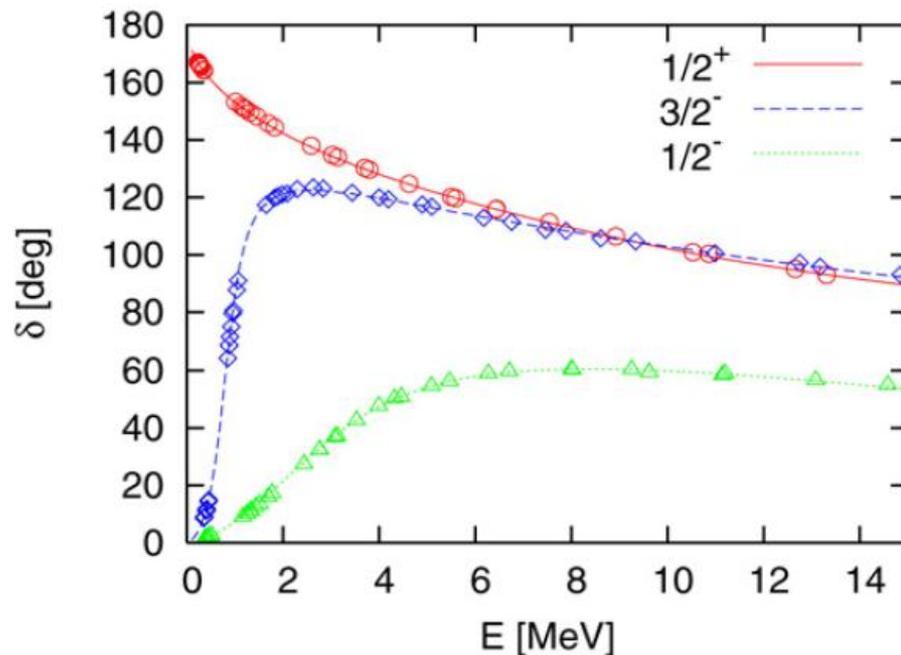
この仮定から、 $u(r)$ に対する微積分方程式を境界条件に従って解き、位相差を得る (single channel近似でexact)

# MN力(中心力+スピン軌道力)、 $U=0$

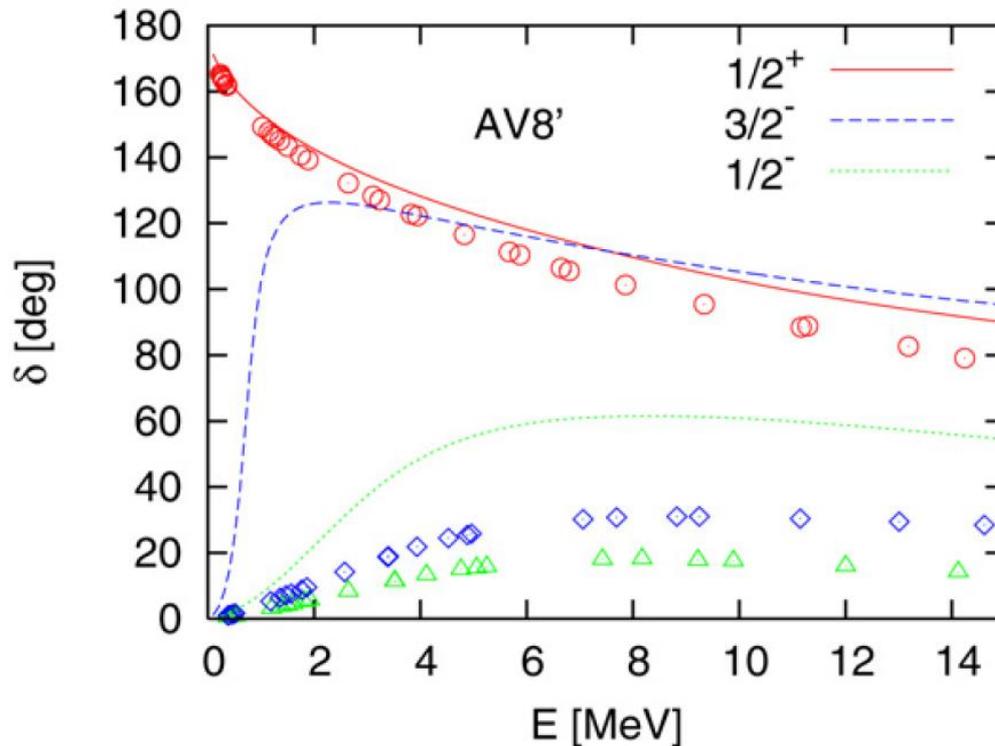


束縛状態近似とグリーン関数で修正した解との比較

高精度のR-行列計算の位相差と  
離散化波動関数によるものとの比較  
S波、P波いずれも一致



## 現実的AV8'力(強い中心斥力、テンソル力を含む)の場合



現実的核力の結果を  
実験データと比較:  
S波散乱はほぼ良い  
P波散乱は引力効果が  
足りない

$\alpha$ の歪み  
パウリ原理  
3体力

「Coupled-channelへ拡張する、任意のエネルギーで散乱解を得る」課題に  
応えるには？

Solving a coupled-channels scattering problem  
by adding confining potentials

Y. Suzuki<sup>a,\*</sup>, D. Baye<sup>b</sup>, A. Kievsky

Nuclear Physics A 838 (2010) 20–37

## 2.4 補足: 反対称化演算子とspectroscopic factor

Antisymmetrizer 
$$\mathcal{A} = \frac{1}{\sqrt{A!}} \sum_P^{A!} \text{sign}(P)P \quad PA = AP = \text{sign}(P)\mathcal{A}$$

Pは空間、スピン、アイソスピンすべての座標を交換する

(反対称化)射影演算子  $\mathcal{A}^2 = \sqrt{A!}\mathcal{A}$

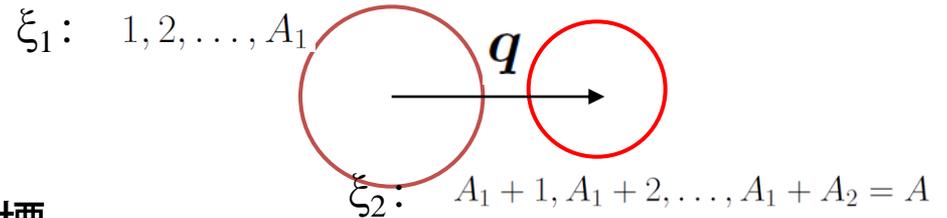
例: 3核子系 
$$\mathcal{A}\phi(1, 2, 3) = \frac{1}{\sqrt{6}} [\phi(1, 2, 3) - \phi(1, 3, 2) + \phi(2, 3, 1) - \phi(2, 1, 3) + \phi(3, 1, 2) - \phi(3, 2, 1)]$$

$\phi = \psi_1(1)\psi_2(2)\psi_3(3)$  1粒子波動関数の積なら

$$\mathcal{A}\phi(1, 2, 3) = \frac{1}{\sqrt{6}} \det\{\psi_1(1)\psi_2(2)\psi_3(3)\} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{vmatrix} \psi_1(1) & \psi_1(2) & \psi_1(3) \\ \psi_2(1) & \psi_2(2) & \psi_2(3) \\ \psi_3(1) & \psi_3(2) & \psi_3(3) \end{vmatrix}$$

Slater 行列式

## 2クラスター波動関数



$$A_{12} \{ \Phi_1(\xi_1) \Phi_2(\xi_2) \phi(\mathbf{q}) \}$$

$\mathbf{q}$  はクラスター間の相対座標

各クラスター波動関数  $\Phi_i(\xi_i)$  は反対称化されてノルム1に規格化

$$\langle \Phi_i(\xi_i) | \Phi_i(\xi_i) \rangle = 1$$

$A_{12}$  クラスター間の反対称化演算子 (表現は一義的ではない)

$$A_{12} = \sqrt{\frac{A_1! A_2!}{A!}} \sum_{P_{\leftrightarrow}}^{N_{12}} \text{sign}(P_{\leftrightarrow}) P_{\leftrightarrow} \quad N_{12} = \frac{A!}{A_1! A_2!}$$

$A_1=2, A_2=2$  の4核子系の場合

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{(12)(34)} &= \frac{1}{\sqrt{6}} (1 - P_{13} - P_{14} - P_{23} - P_{24} + \underline{P_{13}P_{24}}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{6}} (1 - P_{13} - P_{14} - P_{23} - P_{24} + \underline{P_{14}P_{23}}) \end{aligned}$$

$$P_{13}P_{24} = P_{13}P_{24} \underline{P_{12}P_{34}} = P_{13}P_{14}P_{24}P_{34} = P_{14}P_{34}P_{24}P_{34} = P_{14}P_{23}$$

クラスター1, 2が同一の場合は、クラスター全体の交換も考慮する必要がある

## Spectroscopic amplitude (SA) $g(\mathbf{R})$

規格化された反対称波動関数  $\Psi$  に、クラスター1, 2の成分が含まれる目安を与える

$$\begin{aligned} \text{テスト関数 } \Psi_{\mathbf{R}} &= \mathcal{A}_{12} \{ \Phi_1(\xi_1) \Phi_2(\xi_2) \delta(\mathbf{R} - \mathbf{q}) \} \\ g(\mathbf{R}) &\equiv \langle \Psi_{\mathbf{R}} | \Psi \rangle \\ &= \langle \mathcal{A}_{12} \{ \Phi_1(\xi_1) \Phi_2(\xi_2) \delta(\mathbf{R} - \mathbf{q}) \} | \Psi \rangle \\ &= \sqrt{\frac{A!}{A_1! A_2!}} \langle \Phi_1(\xi_1) \Phi_2(\xi_2) \delta(\mathbf{R} - \mathbf{q}) | \Psi \rangle \end{aligned}$$

$A_{12} = \sqrt{\frac{A_1! A_2!}{A!}} \sum_{P_{\leftrightarrow}}^{N_{12}} \text{sign}(P_{\leftrightarrow}) P_{\leftrightarrow}$   
 $P\mathcal{A} = \mathcal{A}P = \text{sign}(P)\mathcal{A}$

Spectroscopic factor (SF)  $S$  は  $g(\mathbf{R})$  のノルム  $S = \int d\mathbf{R} |g(\mathbf{R})|^2$

例： 十分発達したクラスター状態の規格化とSの値

$\Psi = \mathcal{A}_{12} \{ \Phi_1(\xi_1) \Phi_2(\xi_2) \phi(\mathbf{q}) \}$  とし、クラスターは十分に離れていて両者の反対称化は無視できるとする

$$\begin{aligned} g(\mathbf{R}) &= \sqrt{\frac{A!}{A_1! A_2!}} \langle \Phi_1(\xi_1) \Phi_2(\xi_2) \delta(\mathbf{R} - \mathbf{q}) | \mathcal{A}_{12} \{ \Phi_1(\xi_1) \Phi_2(\xi_2) \phi(\mathbf{q}) \} \rangle \\ &\Rightarrow \langle \Phi_1(\xi_1) \Phi_2(\xi_2) \delta(\mathbf{R} - \mathbf{q}) | \Phi_1(\xi_1) \Phi_2(\xi_2) \phi(\mathbf{q}) \rangle = \phi(\mathbf{R}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\langle \Psi | \Psi \rangle &= \int d\mathbf{R} \phi^*(\mathbf{R}) \langle \Psi_{\mathbf{R}} | \Psi \rangle \\ &= \int d\mathbf{R} \phi^*(\mathbf{R}) g(\mathbf{R}) = \int d\mathbf{R} |\phi(\mathbf{R})|^2 = 1\end{aligned}$$

$\phi(\mathbf{R})$  が規格化されていれば  $\Psi$  も規格化されている  
このとき、Sは1となり、直感と合致する

SFの和則:  $1 = \langle \Psi | \Psi \rangle = \sum_{ij} \langle \Psi | \Phi_1^{(i)} \Phi_2^{(j)} \rangle \langle \Phi_1^{(i)} \Phi_2^{(j)} | \Psi \rangle$

$$\langle \Phi_1^{(i)} \Phi_2^{(j)} | \Psi \rangle = \sqrt{\frac{A_1! A_2!}{A!}} g_{ij}(\mathbf{q}) \quad 1 = \sum_{ij} \frac{A_1! A_2!}{A!} \int d\mathbf{q} |g_{ij}(\mathbf{q})|^2 = \frac{A_1! A_2!}{A!} \sum_{ij} S_{ij}$$

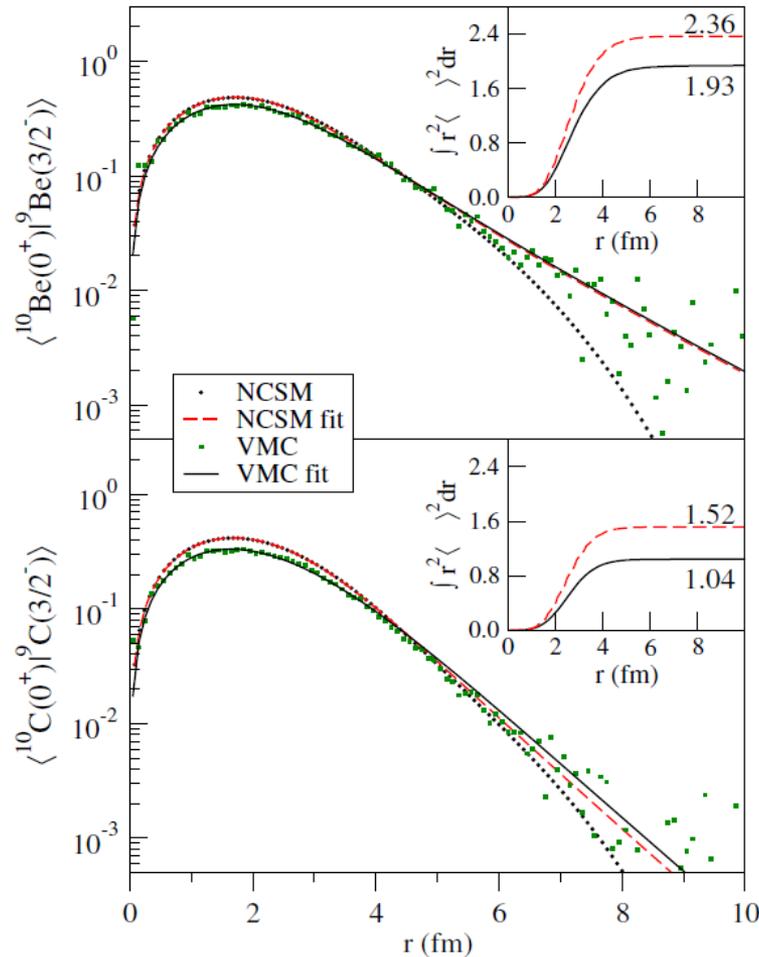
$g(\mathbf{R})$  が従う方程式はpp.15-16に与えた。(gではなく、yと記した)

正確なSAの定義には、2クラスターの粒子数に依存する因子、  
及び同一クラスターの場合には更に  $\sqrt{2}$  の因子が必要になる。

束縛状態の場合には、Rの大きいところで減衰するように  
グリーン関数を定義すればよい。内部で高精度の波動関数があれば  
境界条件を満たすSAを求められる

## Knockout Reactions from $p$ -Shell Nuclei: Tests of *Ab Initio* Structure Models

G. F. Grinyer,<sup>1,\*</sup> D. Bazin,<sup>1</sup> A. Gade,<sup>1,2</sup> J. A. Tostevin,<sup>3</sup> P. Adrich,<sup>1</sup> M. D. Bowen,<sup>1,2</sup> B. A. Brown,<sup>1,2</sup> C. M. Campbell,<sup>1,2</sup> J. M. Cook,<sup>1,2</sup> T. Glasmacher,<sup>1,2</sup> S. McDaniel,<sup>1,2</sup> P. Navrátil,<sup>4,†</sup> A. Obertelli,<sup>1,‡</sup> S. Quaglioni,<sup>4</sup> K. Siwek,<sup>1,2</sup> J. R. Terry,<sup>1,2</sup> D. Weisshaar,<sup>1</sup> and R. B. Wiringa<sup>5</sup>



1. Introduction

## 2. Basics of potential scattering theory

2.1 散乱振幅、断面積、フラックスの保存、光学定理、位相差

2.2 Lippmann-Schwinger方程式、グリーン関数

2.3 付録: 境界条件を満たさない波動関数を用いて散乱を解く例

2.4 補足: 反対称化演算子とspectroscopic factor

3. Eikonal approximation

4. Glauber approximation for nuclear collision

5. Nucleon-nucleon profile function and  
calculation of phase shift function

6. Case of halo nuclei

7. Elastic scattering and dynamic polarization potential

8. Breakup processes with Coulomb interaction

# 3. Eikonal approximation

## 3.1 Key words: 高エネルギー近似、衝突係数表示、位相差関数

ポテンシャル問題で散乱解を求めるのは容易だが、複合粒子系の散乱問題を解くことは容易ではない

相対運動と複合粒子の励起が分離せず結合する

相互作用が強い場合はボルン近似は無力

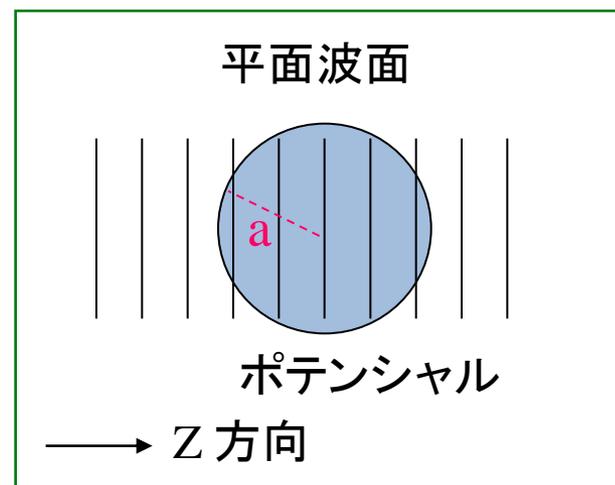
弾性散乱でも、特に弱く結合した複合粒子の場合には、その励起効果を見捨てるできない

終状態は一般に多岐にわたり、入射エネルギーの高いときには個々の反応生成断面積を計算することは難しい

高エネルギー近似のポテンシャル散乱

$$\psi(\mathbf{r}) = e^{ikz} \hat{\psi}(\mathbf{r})$$

入射波の高い振動は平面波で表現され、ずれの部分  $\hat{\psi}(\mathbf{r})$  はそれに比べて激しく振動しない



$$\hat{\psi}(\mathbf{r}) \text{ が従う方程式 } \left( vp_z + \frac{p^2}{2m} \right) \hat{\psi}(\mathbf{r}) + V(r)\hat{\psi}(\mathbf{r}) = 0$$

$vp_z\hat{\psi}(\mathbf{r})$  に比べて  $(p^2/2m)\hat{\psi}(\mathbf{r})$  を無視できる条件

1. 入射運動量  $p$  からの揺らぎが小さい。運動量の不確定さ  $\delta p$

$$p = \hbar k = mv \quad \delta p \sim \hbar/a \quad \frac{\delta p}{p} \approx \frac{1}{ka} \ll 1$$

入射波長  $\frac{2\pi}{k}$  はポテンシャルのレンジより十分に小さいこと

2. 運動量移行  $\Delta p$  が小さい。力積の関係から

$$\Delta p = F \Delta t \simeq V/a \cdot 2a/v \quad \frac{\Delta p}{p} \approx \frac{2V}{mv^2} = \frac{V}{E} \ll 1$$

入射エネルギーはポテンシャルの深さより十分に大きいこと

$ka \cdot V/E = \underline{2Va/\hbar v}$  の大きさには条件なし。(cf. ボルン近似. 27頁参照)

$E(\text{MeV})$  で入射する核子の波長  $\sim 30/\sqrt{E}$  (fm)

$$\frac{\partial}{\partial z} \hat{\psi}(x, y, z) = \frac{1}{i\hbar v} V(x, y, z) \hat{\psi}(x, y, z)$$

1 階の偏微分方程式。 初期条件  $\hat{\psi}(x, y, z \rightarrow -\infty) = 1$

$$\longrightarrow \hat{\psi}(x, y, z) = \exp \left[ \frac{1}{i\hbar v} \int_{-\infty}^z dz' V(x, y, z') \right]$$

アイコナール近似の波動関数

$$\psi(\mathbf{r}) = \exp \left[ ikz + \frac{1}{i\hbar v} \int_{-\infty}^z dz' V(x, y, z') \right] \quad \mathbf{b} = (x, y, 0)$$

波数とポテンシャルとの関係  $\frac{\hbar^2 [k'(\mathbf{r}')]^2}{2m} + V(\mathbf{r}') = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$

$$(k'(\mathbf{r}') - k)(k'(\mathbf{r}') + k) = -\frac{2m}{\hbar^2} V(\mathbf{r}') \quad k'(\mathbf{r}') - k = -\frac{1}{\hbar v} V(\mathbf{r}')$$

$$k'(\mathbf{r}') + k \approx 2k$$

衝突径数  $b$  がポテンシャルのレンジより大きいとき、アイコナール近似解は平面波！ 境界条件を満たさず、 $r \rightarrow \infty$  として散乱振幅は計算できない

# 物理におけるアイコナールの由来

ΕΙΚΩΝ

アイコナール

H. Bruns (1895)

電磁場の方程式  $[\nabla^2 + k^2 n^2(\mathbf{r})] \psi(\mathbf{r}) = 0$   $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

波長が屈折率の変化に比べて十分に小さいとき  $\psi(\mathbf{r}) = f(\mathbf{r}) e^{i\phi(\mathbf{r})}$

シュレーディンガー方程式  $\left[ \nabla^2 + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V(\mathbf{r})) \right] \psi(\mathbf{r}) = 0$  への適用

高速荷電粒子の散乱理論 I 遮蔽クーロン場の単一散乱 (1947)

## Theorie der Streuung schneller geladener Teilchen I Einzelstreuung am abgeschirmten Coulomb-Feld <sup>1</sup>

VON GERT MOLIERE

Aus dem Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik, Hechingen

(Z. Naturforschg. 2 a, 133—145 [1947]; eingegangen am 24. September 1946)

$$\psi(x_0, \varrho) = \exp(i[k_0 x_0 + \Phi(\varrho)])$$

$$\Phi(\varrho) = -\frac{1}{\hbar v} \int_{-\infty}^{+\infty} V\left(\sqrt{x^2 + \varrho^2}\right) dx = -\frac{2}{\hbar v} \int_{\varrho}^{\infty} \frac{V(r) r dr}{\sqrt{r^2 - \varrho^2}}$$

アイコナール近似の波動関数はポテンシャル領域でよい近似として散乱振幅を計算できる

$$f(\theta) = -\frac{2m}{\hbar^2} \frac{1}{4\pi} \int d\mathbf{r}' e^{-i\mathbf{k}' \cdot \mathbf{r}'} V(\mathbf{r}') \psi(\mathbf{r}') \quad \psi(\mathbf{r}) = \exp \left[ ikz + \frac{1}{i\hbar v} \int_{-\infty}^z dz' V(x, y, z') \right]$$

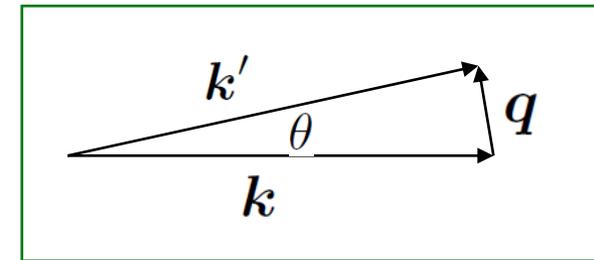
$$f(\theta) = -\frac{2m}{\hbar^2} \frac{1}{4\pi} \int d\mathbf{r} \exp \left[ \underline{-i\mathbf{k}' \cdot \mathbf{r} + ikz} + \frac{1}{i\hbar v} \int_{-\infty}^z dz' V(x, y, z') \right] V(\mathbf{r})$$

(zに依らない!)

$$-i\mathbf{k}' \cdot \mathbf{r} + ikz = -i\mathbf{k}' \cdot \mathbf{r} + i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} = -i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r} \approx -i\mathbf{q} \cdot \mathbf{b} \quad \mathbf{b} = (x, y, 0)$$

$$k'^2 - k^2 = (\mathbf{k}' + \mathbf{k}) \cdot (\mathbf{k}' - \mathbf{k}) = (\mathbf{k}' + \mathbf{k}) \cdot \mathbf{q} = 0$$

高エネルギー散乱では $\theta$ は小さい  $k \cdot \mathbf{q} \approx 0$



$\mathbf{q}$  は xy 面のベクトル  $\mathbf{q} = (q_x, q_y, 0)$

Z積分実行可能

$$\int_{-\infty}^{+\infty} dz V(x, y, z) e^{\frac{1}{i\hbar v} \int_{-\infty}^z dz' V(x, y, z')}$$

$$= i\hbar v \left[ e^{\frac{1}{i\hbar v} \int_{-\infty}^z dz' V(x, y, z')} \right]_{z=-\infty}^{z=+\infty}$$

## アイコナール近似の散乱振幅と位相差関数

$$f(\theta) = \frac{ik}{2\pi} \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b}} \left[ 1 - e^{i\chi(\mathbf{b})} \right] \quad q = 2k \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\chi(\mathbf{b}) = -\frac{1}{\hbar v} \int_{-\infty}^{+\infty} dz V(\mathbf{b} + z\hat{z}) \quad \text{Phase-shift function}$$

球対称ポテンシャルの場合、位相差関数は  $b$  の方向には依存せず、  
角度積分実行可能

$$f(\theta) = ik \int_0^{\infty} db b J_0(qb) \left[ 1 - e^{i\chi(b)} \right]$$

部分波展開との対応

$$f(\theta) = \frac{1}{2ik} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1)(e^{2i\delta_l} - 1) P_l(\cos \theta)$$

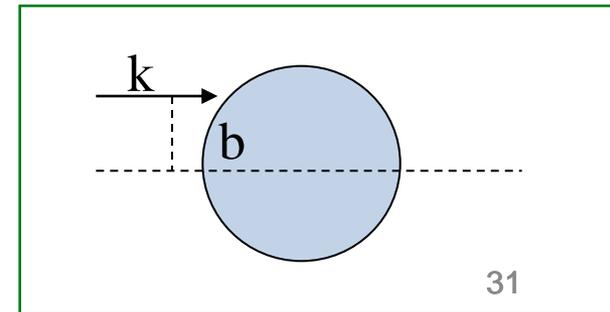
$$l + \frac{1}{2} = kb \quad \sum_{\ell} \rightarrow k \int db$$

$$P_l\left(\cos \frac{x}{l}\right) \sim J_0(x) \quad (l \rightarrow \infty)$$

$$x = l\theta \approx 2\left(l + \frac{1}{2}\right) \sin \frac{\theta}{2} = 2kb \sin \frac{\theta}{2} = qb$$

$$\chi(b) = 2\delta_l \text{ の対応}$$

$$\begin{aligned} & \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b}} f(b) \\ &= \int_0^{\infty} db b f(b) \int_0^{2\pi} d\phi e^{-iqb \cos \phi} \\ &= 2 \int_0^{\infty} db b f(b) \int_0^{\pi} d\phi e^{-iqb \cos \phi} \\ &= 2\pi \int_0^{\infty} db b f(b) J_0(qb) \end{aligned}$$



## ボルン近似との関係

$|\chi(\mathbf{b})|$  は  $2Va/\hbar v$  の程度

$|\chi(\mathbf{b})| \ll 1$  なら 1次ボルン近似に帰着

$$f(\theta) \approx \frac{ik}{2\pi} \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b}} [-i\chi(\mathbf{b})] = -\frac{m}{2\pi\hbar^2} \int d\mathbf{r} e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}} V(r)$$

原子核の散乱では一般にこの条件は成り立たない

---

付録： スピン-軌道ポテンシャルがある場合のアイコナル近似

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V_c(r) + V_{s.o.}(r) \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{L} \right] \psi(\mathbf{r}) = E\psi(\mathbf{r})$$

散乱面に垂直なベクトル

散乱振幅演算子  $\hat{f}(\theta, \phi) = f(\theta) + \boldsymbol{\sigma} \cdot \hat{\mathbf{n}} g(\theta)$

$$\hat{\mathbf{n}} = \frac{\mathbf{k} \times \mathbf{k}'}{|\mathbf{k} \times \mathbf{k}'|}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} \sum_{m'} \sum_m |\langle \frac{1}{2}m' | \hat{f} | \frac{1}{2}m \rangle|^2 = |f(\theta)|^2 + |g(\theta)|^2$$

$$\mathbf{L} = \frac{1}{\hbar} \mathbf{r} \times \mathbf{p} \rightarrow kb \times \hat{\mathbf{z}} \quad f(\theta) = ik \int_0^\infty db b J_0(qb) \left\{ 1 - e^{i\chi_c(b)} \cos [kb\chi_{s.o.}(b)] \right\}$$

$$g(\theta) = ik \int_0^\infty db b J_1(qb) e^{i\chi_c(b)} \sin [kb\chi_{s.o.}(b)]$$

### 3.2 Key words: 諸断面積、光学定理、位相差関数の例

立体角の積分を運動量移行の積分に変換  $q = 2k \sin \frac{\theta}{2}$

$$\begin{aligned} d\mathbf{q} &= dq_x dq_y = q dq d\phi \\ &= k^2 \sin \theta d\theta d\phi = k^2 d\Omega \end{aligned}$$

#### 全弾性散乱断面積

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{el}} &= \int d\Omega |f(\theta)|^2 & P_{\text{el}}(\mathbf{b}) &= |1 - e^{i\chi(\mathbf{b})}|^2 \\ &= \int \frac{d\mathbf{q}}{k^2} \left| \frac{ik}{2\pi} \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b}} [1 - e^{i\chi(\mathbf{b})}] \right|^2 = \int d\mathbf{b} |1 - e^{i\chi(\mathbf{b})}|^2 \end{aligned}$$

ここで  $\int d\mathbf{q} \left| \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b}} F(\mathbf{b}) \right|^2$

$$\begin{aligned} &= \int d\mathbf{q} \int d\mathbf{b} \underline{e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b}} F(\mathbf{b})} \int d\mathbf{b}' \underline{e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b}'} F^*(\mathbf{b}')} \\ &= (2\pi)^2 \int d\mathbf{b} F(\mathbf{b}) \int d\mathbf{b}' F^*(\mathbf{b}') \delta(\mathbf{b} - \mathbf{b}') = (2\pi)^2 \int d\mathbf{b} |F(\mathbf{b})|^2 \end{aligned}$$

## 全断面積と光学定理

1. 光学定理から  $\sigma_{\text{tot}} = (4\pi/k) \text{Im } f(0)$

アイコナル振幅を用いれば  $\sigma_{\text{tot}} = \int d\mathbf{b} 2 \left[ 1 - \text{Re } e^{i\chi(\mathbf{b})} \right]$

2.  $\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{el}} + \sigma_{\text{abs}}$  から (cf.  $\sigma_{\text{abs}} = \frac{2}{\hbar v} \int_V d\mathbf{r} \rho(\mathbf{r}) [-\text{Im} V(r)]$  )

吸収断面積 
$$\begin{aligned} \sigma_{\text{abs}} &= \frac{2}{\hbar v} \int_V d\mathbf{r} [-\text{Im } V(r)] \left| e^{\frac{1}{i\hbar v} \int_{-\infty}^z dz' V(x,y,z')} \right|^2 \\ &= \frac{2}{\hbar v} \int_V d\mathbf{r} [-\text{Im } V(r)] e^{\frac{2}{\hbar v} \int_{-\infty}^z dz' \text{Im } V(x,y,z')} \\ &= \int dx \int dy \left[ -e^{\frac{2}{\hbar v} \int_{-\infty}^z dz' \text{Im } V(x,y,z')} \right]_{z=-\infty}^{z=+\infty} \\ &= \int d\mathbf{b} \left[ 1 - |e^{i\chi(\mathbf{b})}|^2 \right]. \quad P_{\text{abs}}(\mathbf{b}) = 1 - |e^{i\chi(\mathbf{b})}|^2 \end{aligned}$$

これに  $\sigma_{\text{el}}$  を加えれば、1の結果と同じになる

アイコナル振幅は光学定理を満たす！

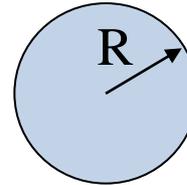
アイコナル近似の断面積は部分波展開の表式と対応していることに注意<sup>34</sup>

# 簡単な例

## 1. Sharp cut-off 模型

Heaviside関数

$$e^{i\chi(\mathbf{b})} = H(b - R) \equiv \begin{cases} 0 & b < R \\ 1 & b \geq R \end{cases}$$



強吸収のポテンシャルを示唆するが、アイコナル近似の条件を破るかもしれない。位相差関数の数学的理想化例

$$f(\theta) = ik \int_0^R db b J_0(qb) = ikR^2 \frac{J_1(qR)}{qR} \quad (\text{Fraunhofer回折振幅})$$

弾性散乱の角分布は  $qR \simeq 3.83 \simeq kR\theta$  でdip

$$\sigma_{\text{el}} = \int d\mathbf{b} |1 - e^{i\chi(\mathbf{b})}|^2 = \pi R^2,$$

$$\sigma_{\text{abs}} = \int d\mathbf{b} [1 - |e^{i\chi(\mathbf{b})}|^2] = \pi R^2$$

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{el}} + \sigma_{\text{abs}} = 2\pi R^2.$$

実際は核表面でのぼやけがある

## 具体的応用

A. Kohama, K. Iida, K. Oyamatsu, PRC72 (2005)

陽子-原子核反応により、原子核の核半径Rを評価し、弾性散乱と全反応断面積との関係を見る

弾性散乱の角分布  $|f(\theta)|^2 \sim \left| \frac{J_1(qR)}{qR} \right|^2$

(クーロン力の効果は無視できる)

角分布の最初のピークは

$$x J_1'(x) - J_1(x) = 0 \quad x = qR = 5.13\dots$$

$$R = 5.13\dots / 2k \sin(\theta_M/2)$$

このとき、陽子-原子核反応の全反応断面積は

$$\sigma_{\text{abs}} = \sigma_{\text{reac}} \approx \pi R^2$$

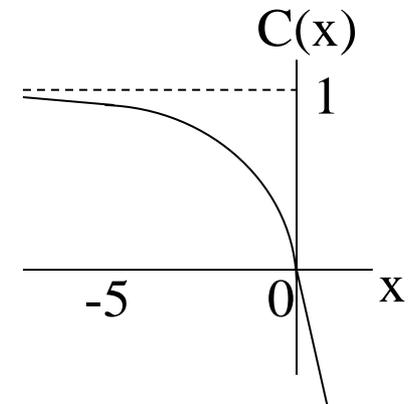
## 2. 箱型ポテンシャル

$$V(r) = (V_0 + iW_0)H(R - r)$$

$$\chi(b) = -\frac{2}{\hbar v}(V_0 + iW_0)\sqrt{R^2 - b^2}H(R - b)$$

$$\sigma_{\text{abs}} = \pi R^2 C(x) \quad x = 4W_0 R / \hbar v$$

$$C(x) = 1 - \frac{2}{x^2} [(x-1)e^x + 1]$$



$$\sigma_{\text{tot}} = 2\pi R^2 \text{Re} C(z) \quad z = 2(W_0 - iV_0)R / \hbar v$$

### 3. クーロンポテンシャル

$$V(r) = Ze^2/r \quad \chi_C(b) = -\frac{Ze^2}{\hbar v} \int_{-\infty}^{+\infty} dz \frac{1}{\sqrt{b^2 + z^2}}$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 + c}} = \log |2x + 2\sqrt{x^2 + c}|$$

Log発散！ 長距離力のため、大きなbに対しても位相差は消えない

## 大きな半径aでクーロン力をcut off (遮蔽 Coulombポテンシャル)

$$V(r) = \frac{Ze^2}{r} H(a - r)$$

$$\chi_C(b) = -\frac{Ze^2}{\hbar v} \int_{-\infty}^{\infty} dz \frac{H(a - \sqrt{z^2 + b^2})}{\sqrt{z^2 + b^2}}$$

$$\chi_C(b) = -\frac{2Ze^2}{\hbar v} H(a - b) \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - b^2}}{b} = -\frac{2Ze^2}{\hbar v} \int_0^{\sqrt{a^2 - b^2}} dz \frac{1}{\sqrt{z^2 + b^2}}$$

$$= \frac{2Ze^2}{\hbar v} \left[ \ln \frac{b}{2a} + \left( \frac{b}{2a} \right)^2 + \dots \right] \approx 2\eta \ln \frac{kb}{2ka} \quad \eta = Ze^2 / \hbar v$$

$$\rightarrow \underline{2\eta \ln kb} \quad (\text{有効クーロン位相差})$$

## アイコナル近似のクーロン散乱振幅

$$1 - e^{i\chi_C(b)} \rightarrow 1 - (kb)^{2i\eta} \quad \text{第一項は}\theta=0\text{でのみ寄与(31頁の積分公式参照)}$$

$$f_C(\theta) = -\frac{2k\eta}{q^2} e^{-\frac{2i\eta \ln(qa)}{q^2} + 2i\sigma_0} \quad (\theta \neq 0) \quad \sigma_0 = \arg \Gamma(1 + i\eta)$$

Rutherford 振幅  $F_C(\theta)$  との違い:  $\underline{-2i\eta \ln(\sin \theta/2)}$  に代えればよい

$e^{-2i\eta \ln(2ka)}$  の一定のphaseだけ違う。

微分断面積はcut off 半径によらず、Rutherfordの公式と一致  
アイコナル近似で正しい結果が得られる

#### 4. クーロン力と短距離力の2ポテンシャル問題

$$V(r) = \frac{Ze^2}{r}H(a-r) + V_N(r)$$

$$\begin{aligned}
 f(\theta) &= \frac{ik}{2\pi} \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b}} \left[ 1 - e^{i\chi_C(b)+i\chi_N(b)} \right] && \text{位相差関数は加算的!} \\
 &= \frac{ik}{2\pi} \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b}} \left[ 1 - e^{i\chi_C(b)} \right] + \frac{ik}{2\pi} \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b}} e^{i\chi_C(b)} \left[ 1 - e^{i\chi_N(b)} \right] \\
 &= f_C(\theta) + \frac{ik}{2\pi} \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b}} e^{2i\eta[\ln(kb)-\ln(2ka)]} \left[ 1 - e^{i\chi_N(b)} \right] \\
 &= e^{-2i\eta \ln(2ka)} \left\{ F_C(\theta) + \frac{ik}{2\pi} \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b} + \frac{2i\eta \ln(kb)}{}} \left[ 1 - e^{i\chi_N(b)} \right] \right\} \\
 &\hspace{15em} \text{a-independent} \hspace{10em} \text{Coulomb phase}
 \end{aligned}$$

第2項はCoulomb-nuclear干渉(分け方はユニークではない)

微分断面積  $d\sigma/d\Omega = |f(\theta)|^2$  はcut off半径に依らない

# 具体例

# 中性子散乱

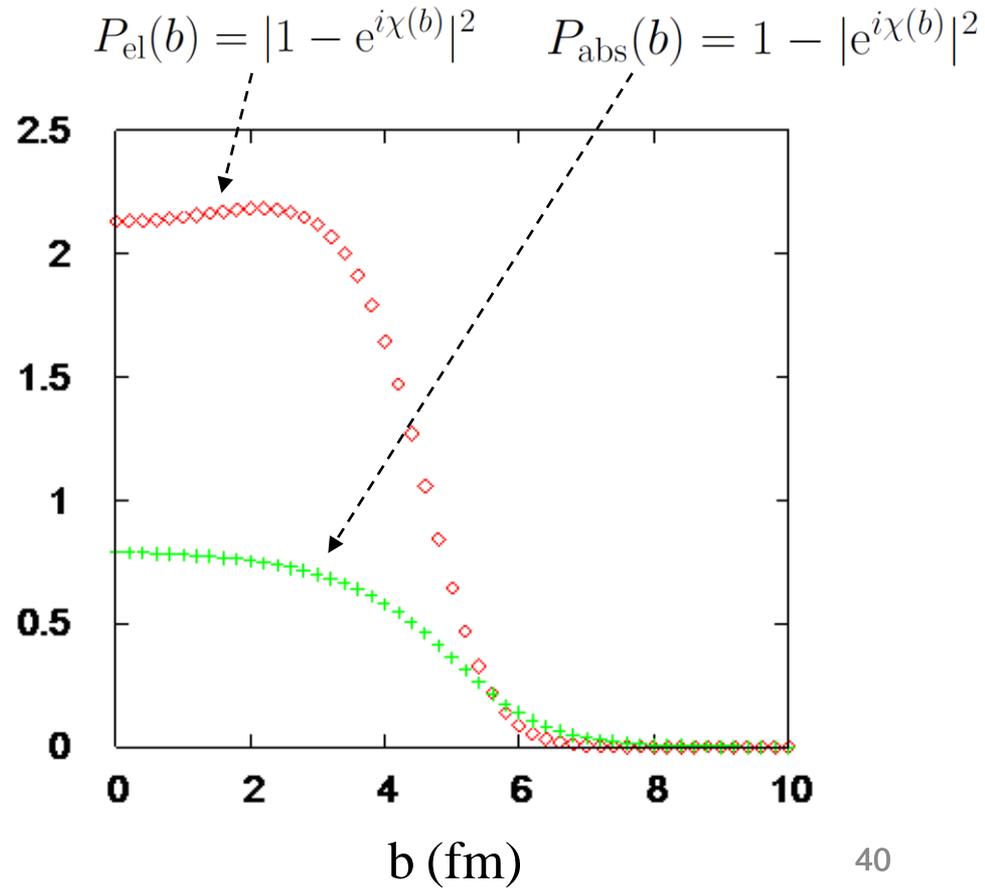
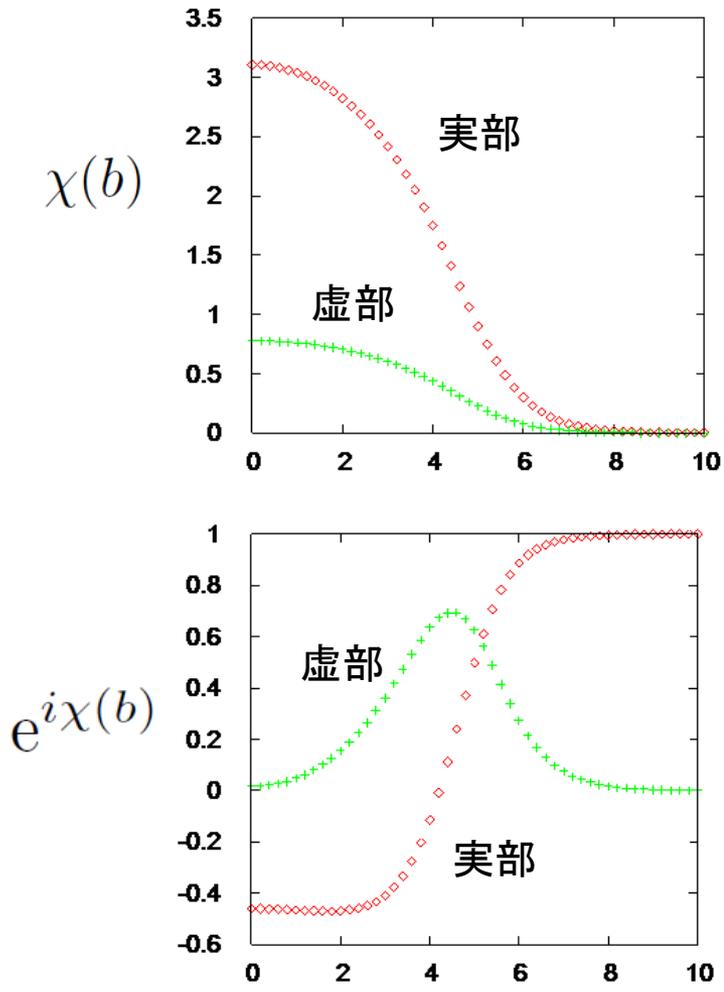
E=200 MeV

$$V(r) = (V_0 + iW_0) / (1 + e^{(r-R)/a})$$

$V_0 = -40$  MeV,  $W_0 = -10$  MeV

$R = 5$  fm,  $a = 0.65$  fm

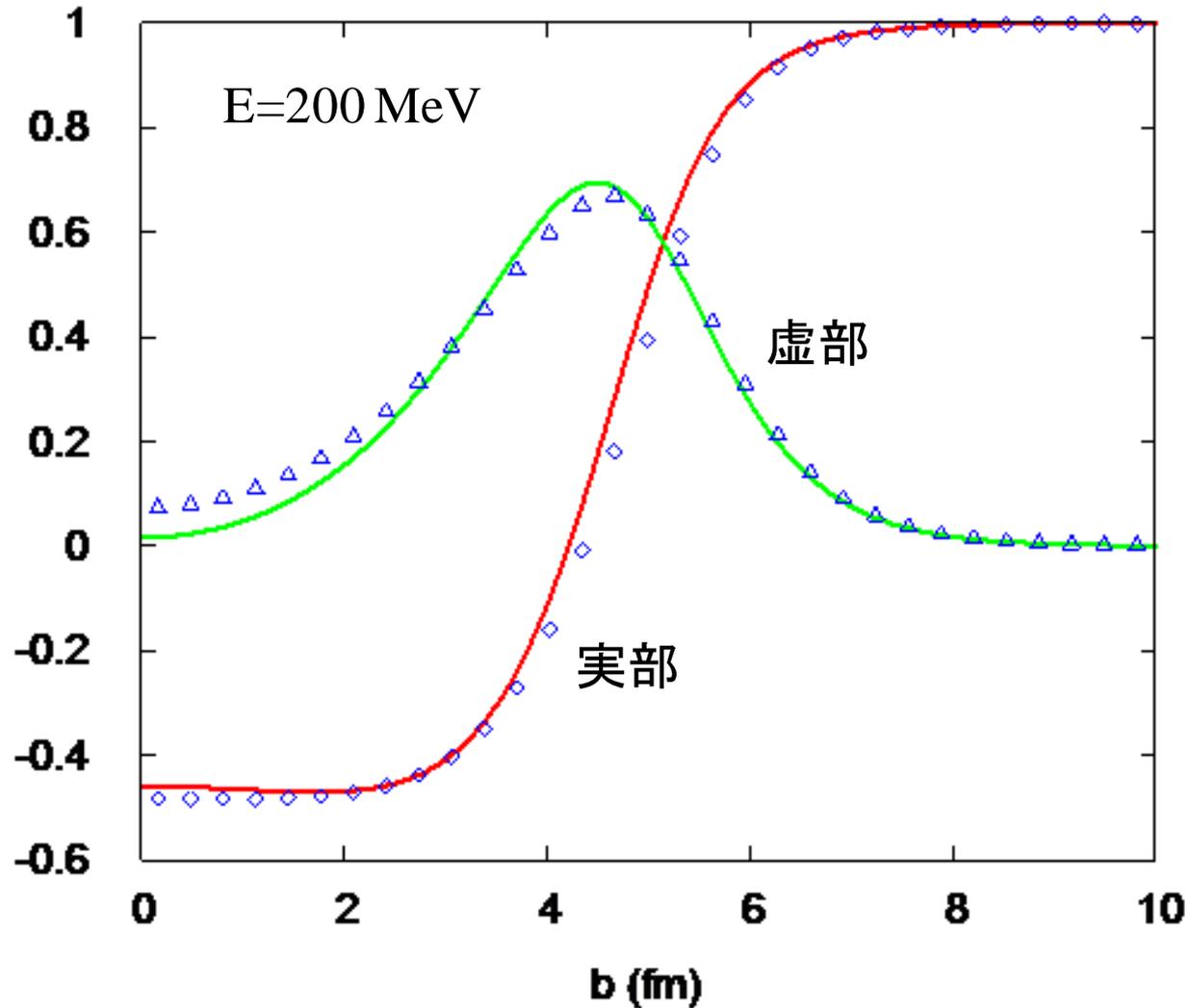
## 位相差関数に関する諸量のb依存性



# Partial-wave expansion vs eikonal approximation

$$e^{2i\delta_l} \quad l \rightarrow b = (l + \frac{1}{2})/k \quad e^{i\chi(b)}$$

S行列の比較



部分波展開表示での断面積 (cf. アイコナル表示)  
11, 33, 34頁参照

$$\sigma_{\text{el}} = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1) |1 - e^{2i\delta_l}|^2 \rightarrow 4\pi |a|^2$$

$$\sigma_{\text{abs}} = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1) (1 - |e^{2i\delta_l}|^2) \rightarrow \frac{4\pi}{k} \text{Im}(-a)$$

$$\sigma_{\text{tot}} = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1) 2\text{Re}(1 - e^{2i\delta_l}) \rightarrow \frac{4\pi}{k} \text{Im}(-a) + 4\pi |a|^2$$

特に極低エネルギーではS波のみ寄与  
有効距離理論 (散乱長  $a$  有効距離  $r_0$ )

$$k \cot \delta_0 = -\frac{1}{a} + \frac{1}{2} r_0 k^2 + \dots \quad e^{2i\delta_0} \rightarrow \frac{1 - iak}{1 + iak}$$

諸断面積は散乱長で表される

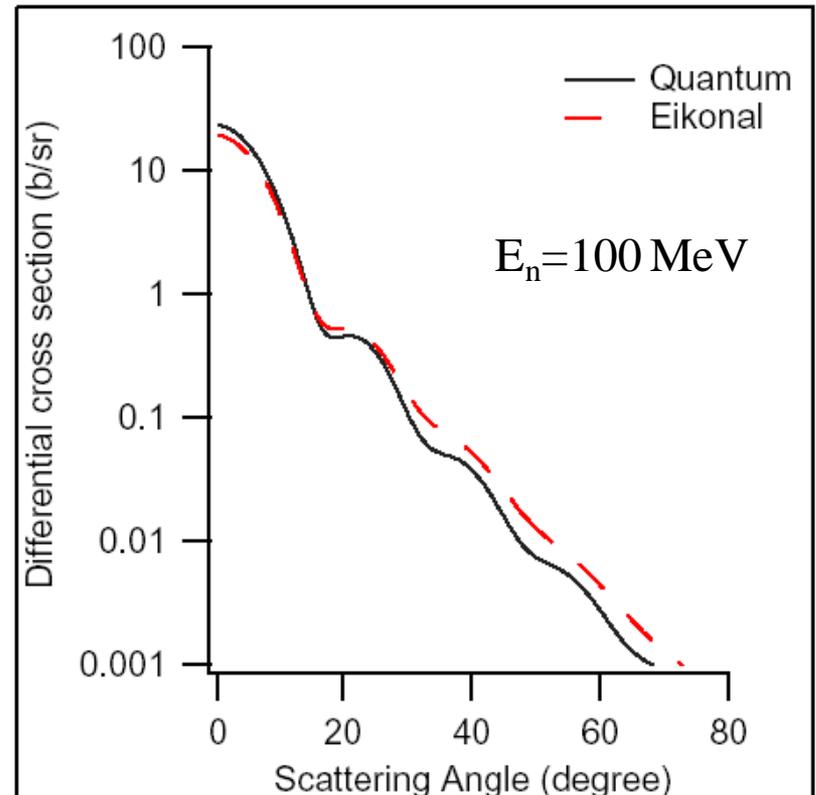
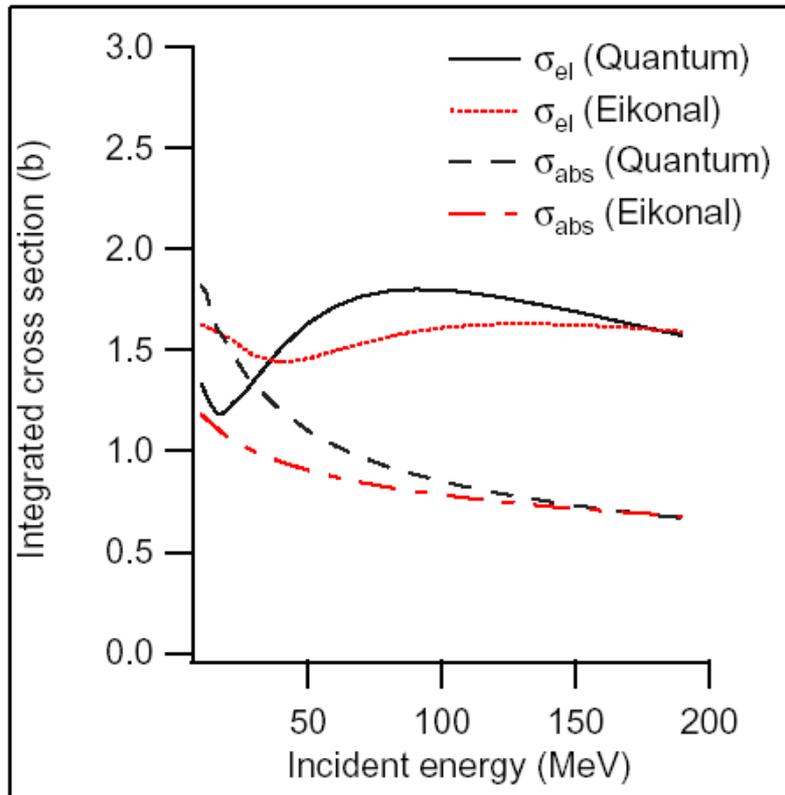
現在採用しているWoods-Saxonポテンシャルについて  
散乱長  $a=5.45-2.47i$  (fm)

# 中性子散乱

$$V(r) = (V_0 + iW_0) / (1 + e^{(r-R)/a})$$

$$V_0 = -40 \text{ MeV}, W_0 = -10 \text{ MeV}$$

$$R = 5 \text{ fm}, a = 0.65 \text{ fm}$$



Quantumは部分波展開による計算

$1b = 100 \text{ fm}^2$

1. Introduction
2. Basics of potential scattering theory
- 3. Eikonal approximation**
  - 3.1 高エネルギー近似、衝突係数表示、位相差関数
  - 3.2 諸断面積、光学定理、位相差関数の例
4. Glauber approximation for nuclear collision
5. Nucleon-nucleon profile function and calculation of phase shift function
6. Case of halo nuclei
7. Elastic scattering and dynamic polarization potential
8. Breakup processes with Coulomb interaction

# 4. Glauber approximation for nuclear collision

4.1 Key words: エネルギースケール、アイコナール近似、断熱近似、時間依存方程式

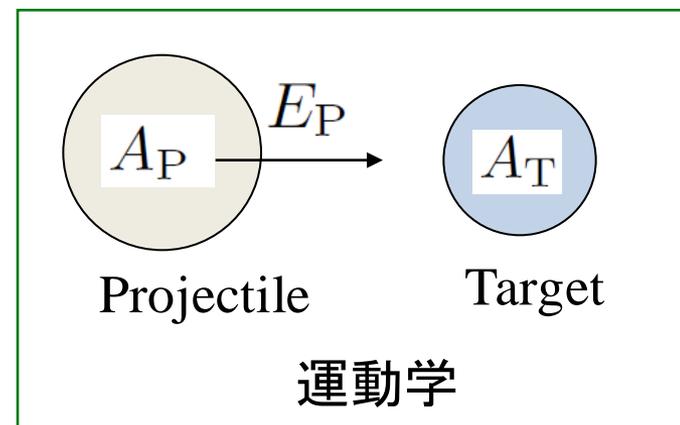
相対運動のエネルギー

$$E_{\text{rel}} = \frac{A_T}{A_P + A_T} E_P = \frac{\hbar^2 K^2}{2M_{\text{PT}}}$$

換算質量  $M_{\text{PT}} = m_N A_P A_T / (A_P + A_T)$

$$m_N \simeq 931.5 \text{ MeV}/c^2$$

相対運動の波数  $K = \frac{M_{\text{PT}} v_P}{\hbar} = 4.72 \frac{A_P A_T}{A_P + A_T} \frac{v_P}{c} \text{ [fm}^{-1}\text{]}$



入射核の全エネルギー  $\epsilon_P = E_P + A_P m_N c^2 = \frac{A_P m_N c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_P}{c}\right)^2}}$

これから 入射速度  $v_P$  を求められる

$$\frac{v_P}{c} = \left[ 1 - \left( \frac{m_N c^2}{\frac{E_P}{A_P} + m_N c^2} \right)^2 \right]^{1/2}$$

0.43  $E_P/A_P = 100 \text{ MeV}$   
 0.86  $E_P/A_P = 900 \text{ MeV}$

原子核同士の相互作用距離  $R$

$$R = r_0 (A_P^{1/3} + A_T^{1/3})$$

$$KR \approx 6.3 \frac{A_P A_T}{A_P + A_T} (A_P^{1/3} + A_T^{1/3}) \frac{v_P}{c}$$

$KR \gg 1$  のアイコナール条件は殆ど満たされる

# 原子核衝突におけるエネルギースケール

1. 相対運動のエネルギー
2. 核内核子の運動: フェルミエネルギー  $E_F \approx 40\text{MeV}$  ( $p_F \approx 260\text{MeV}/c$ )
3. 核子-核子衝突でのハドロン( $\pi$ 等)生成  $E_P/A_P \geq 300\text{MeV}$

$E_P/A_P \leq 100\text{MeV}$  では、核子交換や核子移行などを無視できない  
ハドロン生成の起こるエネルギーでは、核子-核子相互作用に吸収項を  
もたせて、フラックスの減少として表現

アイコンナル近似は、大雑把に言って  $E_P/A_P \geq 100\text{MeV}$  で安全に適用可能

## 核子-原子核衝突の定式化

核子-核子相互作用の情報をinputして、断面積 (inclusive) を求める

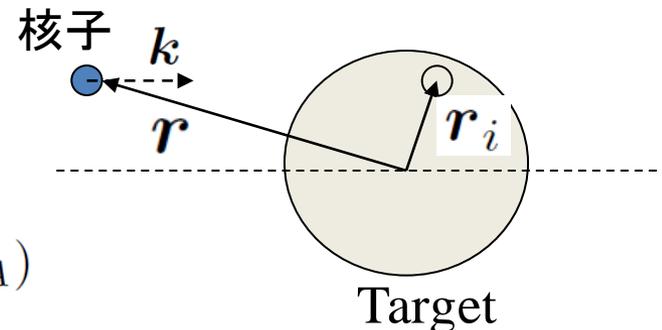
### 標的のハミルトニアン

$$H_T \Phi_\alpha(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_A) = E_\alpha \Phi_\alpha(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_A)$$

### 全系のシュレーディンガー方程式

$$H \Psi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_A) = E \Psi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_A)$$

$$H = \frac{p^2}{2m} + H_T + \sum_{i=1}^A V(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)$$



## 境界条件

$$\Psi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_A) = e^{ikz} \Phi_0(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A) + \sum_{\alpha} f_{\alpha}(\theta, \phi) \frac{e^{ik_{\alpha}r}}{r} \Phi_{\alpha}(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A)$$

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + E_0 = \frac{\hbar^2 k_{\alpha}^2}{2m} + E_{\alpha}$$

終状態 $\alpha$ への微分断面積  $\frac{d\sigma_{\alpha}}{d\Omega} = \frac{v_{\alpha}}{v} |f_{\alpha}|^2$

### 注意：反対称化無視

核子座標のみで記述しており、ハドロン生成は顕には扱えない  
漸近系から明白なように、粒子移行過程は無視  
標的のフラグメンテーションは、連続的励起状態と考えればよい

ポテンシャル散乱と同様、グリーン関数、Lippmann-Schwinger方程式、  
散乱振幅の積分表示、アイコナル近似の順に展開する

$$(E - H_0) \Psi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A) = \sum_{i=1}^A V(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \Psi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A)$$

$$H_0 = \frac{\mathbf{p}^2}{2m} + H_T \quad (\text{相互作用の無い場合のハミルトニアン})$$

## グリーン関数

$$(E - H_0)G^{(+)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}') = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')\mathbf{1}$$

グリーン関数に含まれる相対座標以外の原子核の核子座標は省いた  
右辺の1は原子核の波動関数に対して単位演算子であることを表す

$$G^{(+)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}') = \sum_{\alpha} G_{\alpha}^{(+)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}')|\Phi_{\alpha}\rangle\langle\Phi_{\alpha}|$$

$$G_{\alpha}^{(+)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}') = -\frac{2m}{\hbar^2} \frac{e^{ik_{\alpha}|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \quad E = E_{\alpha} + \frac{\hbar^2 k_{\alpha}^2}{2m}$$

但し  $E < E_{\alpha}$  の時 (closed channel  $\alpha$ )  $k_{\alpha} \rightarrow i\kappa_{\alpha}$  ( $\kappa_{\alpha} > 0$ )

(証明)  $(E - H_0)G^{(+)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}') = (E - H_0) \sum_{\alpha} G_{\alpha}^{(+)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}')|\Phi_{\alpha}\rangle\langle\Phi_{\alpha}|$

$$= \sum_{\alpha} \left( E - \frac{\mathbf{p}^2}{2m} - E_{\alpha} \right) G_{\alpha}^{(+)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}')|\Phi_{\alpha}\rangle\langle\Phi_{\alpha}|$$
$$= \sum_{\alpha} \left( \frac{\hbar^2 k_{\alpha}^2}{2m} - \frac{\mathbf{p}^2}{2m} \right) G_{\alpha}^{(+)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}')|\Phi_{\alpha}\rangle\langle\Phi_{\alpha}|$$
$$= \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \sum_{\alpha} |\Phi_{\alpha}\rangle\langle\Phi_{\alpha}| = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')\mathbf{1}$$

$\sum_{\alpha} |\Phi_{\alpha}\rangle\langle\Phi_{\alpha}| = \mathbf{1}$  (closureの関係) 49

境界条件を含んだシュレーディンガー方程式 (Lippmann-Schwinger方程式)

$$\Psi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A) = e^{ikz} \Phi_0(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A) + \int d\mathbf{r}' G^{(+)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \sum_{i=1}^A V(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_i) \Psi(\mathbf{r}', \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A)$$

$r \rightarrow \infty$  として、グリーン関数の漸近系から(open channelのみ効く) 散乱振幅の表示を得る

$$f_\alpha(\theta, \phi) = -\frac{2m}{\hbar^2} \frac{1}{4\pi} \int d\mathbf{r}' \int d\mathbf{r}_1 \dots \int d\mathbf{r}_A e^{-ik'_\alpha \cdot \mathbf{r}'} \Phi_\alpha^*(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A) \times \sum_{i=1}^A V(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_i) \Psi(\mathbf{r}', \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A) \quad (k'_\alpha = k_\alpha \hat{\mathbf{r}})$$

ポテンシャルの作用する領域で高精度の波動関数を求めればよい

$$\Psi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A) = e^{ikz} \hat{\Psi}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A)$$

$$\left[ vp_z + \cancel{\frac{p^2}{2m}} + (\cancel{H_T} E_0) + \sum_{i=1}^A V(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \right] \hat{\Psi}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A) = 0$$

アイコナル近似 断熱近似 (励起エネルギー  $\sim \frac{\hbar^2 q^2}{2m} \ll$  入射エネルギー<sub>50</sub>)

(但し、クーロン分解反応では断熱近似は破綻. 9章参照)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial z} \hat{\Psi}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A) = \frac{1}{i\hbar v} \sum_{i=1}^A V(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \hat{\Psi}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A) \\ \text{初期条件 } \hat{\Psi}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A) = \Phi_0(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A) \quad (z \rightarrow -\infty) \end{array} \right.$$

この解は以下のようになる

$$\hat{\Psi}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A) = \exp \left[ \frac{1}{i\hbar v} \int_{-\infty}^z dz' \sum_{i=1}^A V(\mathbf{b} + z'\hat{z} - \mathbf{r}_i) \right] \Phi_0(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A)$$

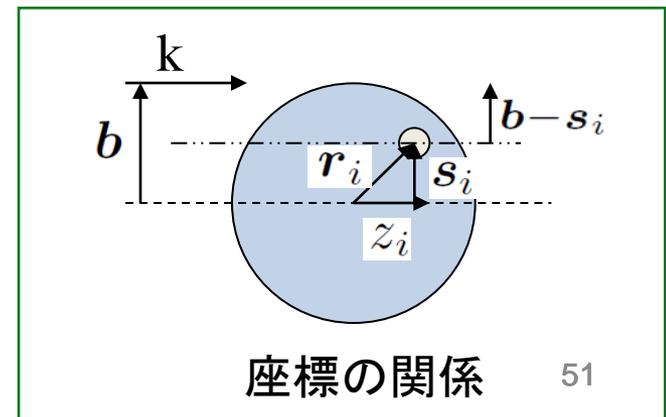
ポテンシャル散乱の場合と同様の計算から、標的核の状態 $\alpha$ への散乱振幅を得る

$$f_\alpha(\theta, \phi) = \frac{ik}{2\pi} \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b}} \langle \Phi_\alpha | 1 - e^{i \sum_{i=1}^A \chi(\mathbf{b} - \mathbf{s}_i)} | \Phi_0 \rangle \quad \mathbf{r}_i = (\mathbf{s}_i, z_i)$$

$$\chi(\mathbf{b}) = -\frac{1}{\hbar v} \int_{-\infty}^{+\infty} dz V(\mathbf{b} + z\hat{z}) \quad (\text{核子-核子散乱の位相差関数})$$

$\langle \Phi_\alpha | \dots | \Phi_0 \rangle$  は標的核の座標に関する積分

グラウバー理論は、摂動展開を使用せず、  
多重散乱効果をすべてのオーダーまで含む  
微視的多体反応論



断熱近似を用いない場合： 外場のある時間依存方程式に書き換えられる

$$\left[ vp_z + \cancel{\frac{p^2}{2m}} + (H_T - E_0) + \sum_{i=1}^A V(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \right] \hat{\Psi}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A) = 0$$

$z = vt$  と置く  $\hat{\Psi}(t, \mathbf{b}) = \hat{\Psi}(\mathbf{b} + vt\hat{\mathbf{z}}, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A)$  と略記すると

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \hat{\Psi}(t, \mathbf{b}) = \left[ (H_T - E_0) + \sum_{i=1}^A V(\mathbf{b} + vt\hat{\mathbf{z}} - \mathbf{r}_i) \right] \hat{\Psi}(t, \mathbf{b})$$

初期条件  $\hat{\Psi}(-\infty, \mathbf{b}) = \Phi_0(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A)$  のもとに方程式を解き  
 $\hat{\Psi}(\infty, \mathbf{b})$  を計算 これを標的核の状態で展開して諸断面積を求める

$$\hat{\Psi}(\infty, \mathbf{b}) = \sum_{\alpha} C_{\alpha}(\mathbf{b}) \Phi_{\alpha}(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A)$$

### 参考文献

Esbensen et al. NPA581, 107 (1995); NPA600, 37 (1996)

Kido et al. PRC53, 2296 (1996)

Goldstein et al. PRC73, 024602 (2006)

## 4.2 Key words: 全反応断面積、ハドロン生成、相互作用断面積

個々の励起状態への断面積ではなく、inclusiveな断面積を求める  
Closureの関係式を利用する

$$\begin{aligned}\sigma_\alpha &= \int d\Omega \frac{v_\alpha}{v} |f_\alpha(\theta, \phi)|^2 & d\Omega &= d\mathbf{q}/k^2 \\ & & v_\alpha &\simeq v \\ &\simeq \int \frac{d\mathbf{q}}{k^2} \left| \frac{ik}{2\pi} \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b}} \langle \Phi_\alpha | 1 - e^{i\sum_{i=1}^A \chi(\mathbf{b}-\mathbf{s}_i)} | \Phi_0 \rangle \right|^2 \\ &= \int d\mathbf{b} \left| \langle \Phi_\alpha | 1 - e^{i\sum_{i=1}^A \chi(\mathbf{b}-\mathbf{s}_i)} | \Phi_0 \rangle \right|^2.\end{aligned}$$

衝突係数  $\mathbf{b}$  の衝突で、状態 $\alpha$ が励起される確率

$$P_\alpha(\mathbf{b}) = \left| \langle \Phi_\alpha | 1 - e^{i\sum_{i=1}^A \chi(\mathbf{b}-\mathbf{s}_i)} | \Phi_0 \rangle \right|^2$$

弾性散乱断面積  $\sigma_{el} = \int d\mathbf{b} \left| 1 - \langle \Phi_0 | e^{i\sum_{i=1}^A \chi(\mathbf{b}-\mathbf{s}_i)} | \Phi_0 \rangle \right|^2$

“全断面積”  $\sum_\alpha \sigma_\alpha = \int d\mathbf{b} \langle \Phi_0 | \left| 1 - e^{i\sum_{i=1}^A \chi(\mathbf{b}-\mathbf{s}_i)} \right|^2 | \Phi_0 \rangle$

Closureの関係式 基底状態の波動関数のみで表現される

これは全断面積  $\sigma_{\text{tot}}$  か？ 全反応断面積  $\sigma_{\text{reac}}$  はどう与えられるか？

ハドロン生成を伴う高エネルギー反応では、 $\chi(\mathbf{b})$  は複素数として扱う

$$\Xi \equiv e^{i \sum_{i=1}^A \chi(\mathbf{b}-\mathbf{s}_i)} \quad |\Xi|^2 = e^{-2 \sum_{i=1}^A \text{Im} \chi(\mathbf{b}-\mathbf{s}_i)} \neq 1$$

全断面積  $\sigma_{\text{tot}} = \frac{4\pi}{k} \text{Im} f_{\alpha=0}(0)$  (光学定理)

$$f_{\alpha=0}(0) = \frac{ik}{2\pi} \int d\mathbf{b} \langle \Phi_0 | 1 - e^{i \sum_{i=1}^A \chi(\mathbf{b}-\mathbf{s}_i)} | \Phi_0 \rangle$$

$$\text{Im} f_{\alpha=0}(0) = \frac{k}{2\pi} \int d\mathbf{b} \left( 1 - \text{Re} \langle \Phi_0 | e^{i \sum_{i=1}^A \chi(\mathbf{b}-\mathbf{s}_i)} | \Phi_0 \rangle \right)$$

全反応断面積  $\sigma_{\text{reac}} = \sigma_{\text{tot}} - \sigma_{\text{el}}$

$$= \int d\mathbf{b} \left( 1 - |\langle \Phi_0 | e^{i \sum_{i=1}^A \chi(\mathbf{b}-\mathbf{s}_i)} | \Phi_0 \rangle|^2 \right)$$

ハドロン生成なし  $\sum_{\alpha \neq 0} P_{\alpha}(\mathbf{b}) = P_{\text{reac}}^{\text{0HP}}(\mathbf{b})$

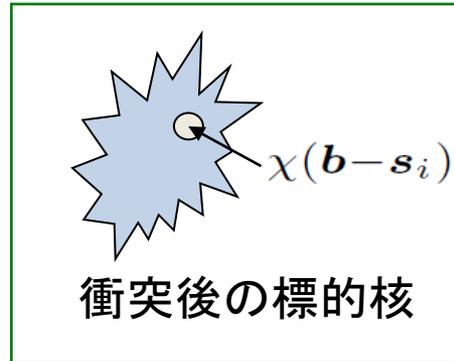
ハドロン生成あり  $P_{\text{reac}}^{\text{HP}}(\mathbf{b}) = P_{\text{reac}}(\mathbf{b}) - P_{\text{reac}}^{\text{0HP}}(\mathbf{b})$

# 諸断面積の直感的意味

アイコンナール+断熱近似で核子-原子核の相対運動はすでに解いた衝突後の標的核の波動関数は、核内核子がそれぞれ位相差をうけ、それらの総和の位相( $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{s}_i$ に依存する)だけ変化する

## 衝突後の標的核の波動関数

$$\hat{\Psi}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A) = e^{i \sum_{i=1}^A \chi(\mathbf{b}-\mathbf{s}_i)} \Phi_0(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A) \quad (z \rightarrow \infty)$$



初期状態の波動関数との差が衝突による変更部分を表す

$$\begin{aligned} \Psi_{\text{scat}} &= \hat{\Psi} - \Phi_0 = \left[ e^{i \sum_{i=1}^A \chi(\mathbf{b}-\mathbf{s}_i)} - 1 \right] \Phi_0 \\ &= \sum_{\alpha} \Phi_{\alpha} \langle \Phi_{\alpha} | e^{i \sum_{i=1}^A \chi(\mathbf{b}-\mathbf{s}_i)} - 1 | \Phi_0 \rangle \\ &= \underbrace{\Phi_0 \langle \Phi_0 | e^{i \sum_{i=1}^A \chi(\mathbf{b}-\mathbf{s}_i)} - 1 | \Phi_0 \rangle}_{\text{弾性散乱}} + \sum_{\alpha \neq 0} \underbrace{\Phi_{\alpha} \langle \Phi_{\alpha} | e^{i \sum_{i=1}^A \chi(\mathbf{b}-\mathbf{s}_i)} | \Phi_0 \rangle}_{\text{非弾性散乱}} \end{aligned}$$

係数のノルムの2乗が状態 $\alpha$ を励起する確率を与える

ハドロン生成がある場合は  $\langle \hat{\Psi} | \hat{\Psi} \rangle < 1$

# 原子核-原子核衝突の定式化は、核子-原子核の場合と同様

原子核間の相対座標  $\mathbf{R} = (b, Z)$

ハミルトニアン

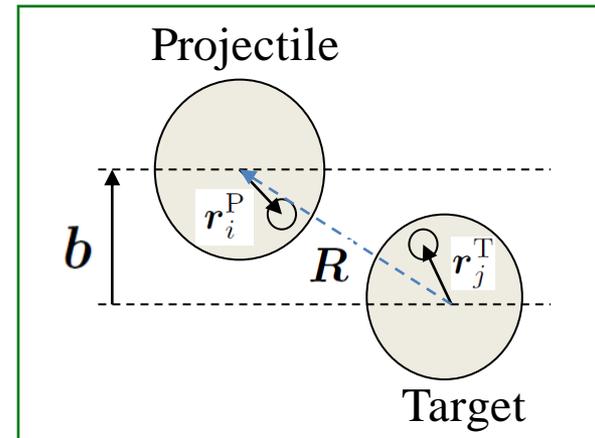
$$H = \frac{P^2}{2M_{PT}} + H_P + H_T + \sum_{i \in P} \sum_{j \in T} V(\mathbf{R} + \mathbf{r}_i^P - \mathbf{r}_j^T)$$

境界条件

$$\begin{aligned} \Psi(\mathbf{R}, \mathbf{r}_1^P, \dots, \mathbf{r}_{A_P}^P, \mathbf{r}_1^T, \dots, \mathbf{r}_{A_T}^T) \\ = e^{iKZ} \Phi_0^P(\mathbf{r}_1^P, \dots, \mathbf{r}_{A_P}^P) \Phi_0^T(\mathbf{r}_1^T, \dots, \mathbf{r}_{A_T}^T) \\ + \sum_{\alpha\beta} f_{\alpha\beta}(\theta, \phi) \frac{e^{iK_{\alpha\beta}R}}{R} \Phi_{\alpha}^P(\mathbf{r}_1^P, \dots, \mathbf{r}_{A_P}^P) \Phi_{\beta}^T(\mathbf{r}_1^T, \dots, \mathbf{r}_{A_T}^T) \end{aligned}$$

$$\Psi(\mathbf{R}, \mathbf{r}_1^P, \dots, \mathbf{r}_{A_P}^P, \mathbf{r}_1^T, \dots, \mathbf{r}_{A_T}^T) = e^{iKZ} \hat{\Psi}(\mathbf{R}, \mathbf{r}_1^P, \dots, \mathbf{r}_{A_P}^P, \mathbf{r}_1^T, \dots, \mathbf{r}_{A_T}^T)$$

$$\left[ vP_z + \frac{P^2}{2M_{PT}} + (H_P - E_0^P) + (H_T - E_0^T) + \sum_{i \in P} \sum_{j \in T} V(\mathbf{R} + \mathbf{r}_i^P - \mathbf{r}_j^T) \right] \\ \times \hat{\Psi}(\mathbf{R}, \mathbf{r}_1^P, \dots, \mathbf{r}_{A_P}^P, \mathbf{r}_1^T, \dots, \mathbf{r}_{A_T}^T) = 0$$



運動エネルギー一項と励起エネルギー一項を無視する

## 散乱振幅

$$f_{\alpha\beta}(\theta, \phi) = \frac{iK}{2\pi} \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b}} \langle \Phi_{\alpha}^{\text{P}} \Phi_{\beta}^{\text{T}} | 1 - e^{i \sum_{i \in \text{P}} \sum_{j \in \text{T}} \chi(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^{\text{P}} - \mathbf{s}_j^{\text{T}})} | \Phi_0^{\text{P}} \Phi_0^{\text{T}} \rangle$$

入射核状態 $\alpha$ 、標的核 $\beta$ へ遷移する断面積  $\sigma_{\alpha\beta} = \int d\mathbf{b} P_{\alpha\beta}(\mathbf{b})$

$$P_{\alpha\beta}(\mathbf{b}) = \left| \langle \Phi_{\alpha}^{\text{P}} \Phi_{\beta}^{\text{T}} | 1 - e^{i \sum_{i \in \text{P}} \sum_{j \in \text{T}} \chi(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^{\text{P}} - \mathbf{s}_j^{\text{T}})} | \Phi_0^{\text{P}} \Phi_0^{\text{T}} \rangle \right|^2$$

核子-核子位相差関数は加算的

入射核と標的核の座標に関する多重積分

全反応断面積（一般に、光学定理を利用して得られる）

$$P_{\text{reac}}(\mathbf{b}) = 1 - \left| \langle \Phi_0^{\text{P}} \Phi_0^{\text{T}} | e^{i \sum_{i \in \text{P}} \sum_{j \in \text{T}} \chi(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^{\text{P}} - \mathbf{s}_j^{\text{T}})} | \Phi_0^{\text{P}} \Phi_0^{\text{T}} \rangle \right|^2$$

$$\sigma_{\text{el}} = \int d\mathbf{b} \left| 1 - \langle \Phi_0^{\text{P}} \Phi_0^{\text{T}} | e^{i \sum_{i \in \text{P}} \sum_{j \in \text{T}} \chi(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^{\text{P}} - \mathbf{s}_j^{\text{T}})} | \Phi_0^{\text{P}} \Phi_0^{\text{T}} \rangle \right|^2$$

$$\sigma_{\text{reac}} = \int d\mathbf{b} \left( 1 - \left| \langle \Phi_0^{\text{P}} \Phi_0^{\text{T}} | e^{i \sum_{i \in \text{P}} \sum_{j \in \text{T}} \chi(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^{\text{P}} - \mathbf{s}_j^{\text{T}})} | \Phi_0^{\text{P}} \Phi_0^{\text{T}} \rangle \right|^2 \right)$$

# 核子-原子核反応の断面積の計算

諸断面積の表現.  $\sigma_x = \int d\mathbf{b} P_x(\mathbf{b})$

x	$P_x(\mathbf{b})$	
tot	$2 - 2\langle \text{Re}\Xi \rangle$	
el	$ 1 - \langle \Xi \rangle ^2$	
reac	$1 -  \langle \Xi \rangle ^2$	$\Xi \equiv e^{i \sum_{i=1}^A \chi(\mathbf{b} - \mathbf{s}_i)}$
reac (0HP)	$\langle  \Xi ^2 \rangle -  \langle \Xi \rangle ^2$	$\langle \dots \rangle = \langle \Phi_0   \dots   \Phi_0 \rangle$
reac (HP)	$1 - \langle  \Xi ^2 \rangle$	

基底状態の波動関数のみ必要

原子核-原子核反応の場合には以下の読み替えを行う

$$\Xi \rightarrow e^{i \sum_{i \in P} \sum_{j \in T} \chi(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P - \mathbf{s}_j^T)}$$

$$\langle \dots \rangle \rightarrow \langle \Phi_0^P \Phi_0^T | \dots | \Phi_0^P \Phi_0^T \rangle$$

## 相互作用断面積

高エネルギー反応では、

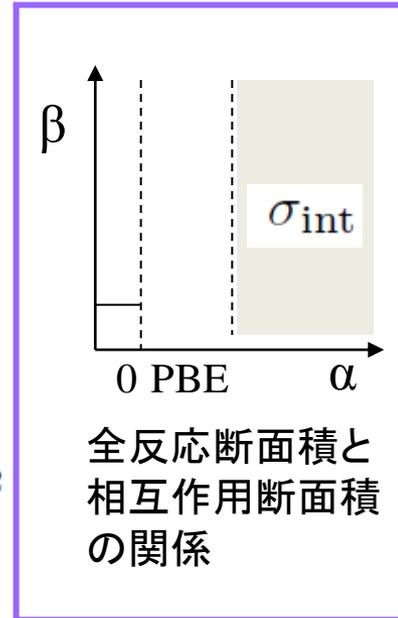
多くの終状態を区別するのは不可能、衝突後入射核の核子数は増えない  
核子数が減った終状態への断面積の総和として相互作用断面積を定義

$$\sigma_{\text{reac}} = \sum_{\alpha\beta} \sigma_{\alpha\beta} - \sigma_{00} \quad \sigma_{\text{int}} = \sum_{\alpha\beta} \sigma_{\alpha\beta} - \sum_{\alpha \in \text{PB}} \sigma_{\alpha\beta}$$

$$\Delta\sigma = \sum_{\alpha \in \text{PB}} \sigma_{\alpha\beta} - \sigma_{00} = \sum_{\beta} \sigma_{0\beta} - \sigma_{00} + \sum_{\alpha \in \text{PBE}} \sigma_{\alpha\beta}$$

標的核の状態 $\beta$ は観測しないのでclosureを使う  $\sum_{\beta} |\Phi_{\beta}^{\text{T}}\rangle \langle \Phi_{\beta}^{\text{T}}| = 1$

$$\Delta\sigma = \sum_{\alpha \in \text{PB}} \int db \langle \Phi_0^{\text{T}} | | \langle \Phi_{\alpha}^{\text{P}} | \mathcal{O} | \Phi_0^{\text{P}} \rangle |^2 | \Phi_0^{\text{T}} \rangle - \int db | \langle \Phi_0^{\text{P}} \Phi_0^{\text{T}} | \mathcal{O} | \Phi_0^{\text{P}} \Phi_0^{\text{T}} \rangle |^2$$



## 全反応断面積と相互作用断面積

実験的には相互作用断面積の測定のほうが容易

cf. Takechi et al. PRC79(2009) 全反応断面積を測定

理論的には全反応断面積の計算のほうが容易

上の表式の評価ができればよい(キュムラント展開の適用を後述)

$\sigma_{\text{int}} \simeq \sigma_{\text{reac}}$  として測定された相互作用断面積を全反応断面積で評価することが通常行われる

粒子崩壊の閾値以下に励起状態をもたない場合には相互作用断面積と全反応断面積の差は $\alpha=0$ の基底状態のみの寄与で評価される。ハロー核の場合この差は小さい

妥当性の検証は、

原子核の励起構造、入射エネルギーの違いに応じて幾つかの場合になされるのが望ましいが、どこまでいっているのか

Ozawa et al. NPA709(2002)

$\gamma$ 線を測定して評価

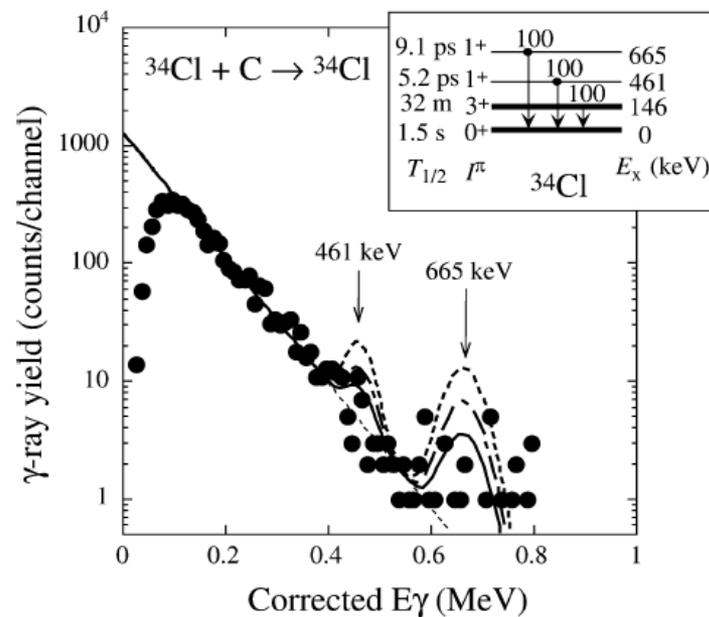
差は10 mb程度(相対論的エネルギーで)

安定核の場合の両断面積の違いについてくろたま模型による現象論

A. Kohama, K. Iida, K. Oyamatsu, PRC78 (2008)

炭素標的で相対論的エネルギーでも

$\sigma_{\text{reac}} - \sigma_{\text{int}}$  は100mb程度になり得る ( $\sigma_{\text{BS}} = \sigma_{\text{reac}}$  として)



NB: 最近charge-changing cross sectionが測定されている。理論的定式化? 60

1. Introduction
2. Basics of potential scattering theory
3. Eikonal approximation
- 4. Glauber approximation for nuclear collision**
  - 4.1 エネルギースケール、アイコナル近似、断熱近似、時間依存方程式
  - 4.2 全反応断面積、ハドロン生成、相互作用断面積
5. Nucleon-nucleon profile function and calculation of phase shift function
6. Case of halo nuclei
7. Elastic scattering and dynamic polarization potential
8. Breakup processes with Coulomb interaction

# 5. Nucleon-nucleon profile function and calculation of phase shift function

## 5.1 Key words: プロファイル関数

核子-核子相互作用に基づいて記述

$$\chi(\mathbf{b}) = -\frac{1}{\hbar v} \int_{-\infty}^{+\infty} dz V(\mathbf{b} + z\hat{z}) \quad (\text{核子-核子散乱の位相差関数})$$

核力と核子-核子散乱の位相差関数を関係づける関係であるが、現実の核力から計算するのは殆ど不可能だし意味があるとは限らない

核子-核子散乱データと関係づけて、位相差関数或はプロファイル関数を考える

$$f(\theta) = \frac{ik}{2\pi} \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b}} \left[ 1 - e^{i\chi(\mathbf{b})} \right] \quad q = 2k \sin \frac{\theta}{2}$$

**Profile関数**  $\Gamma(\mathbf{b}) = 1 - e^{i\chi(\mathbf{b})}$  と核子-核子散乱断面積との関係

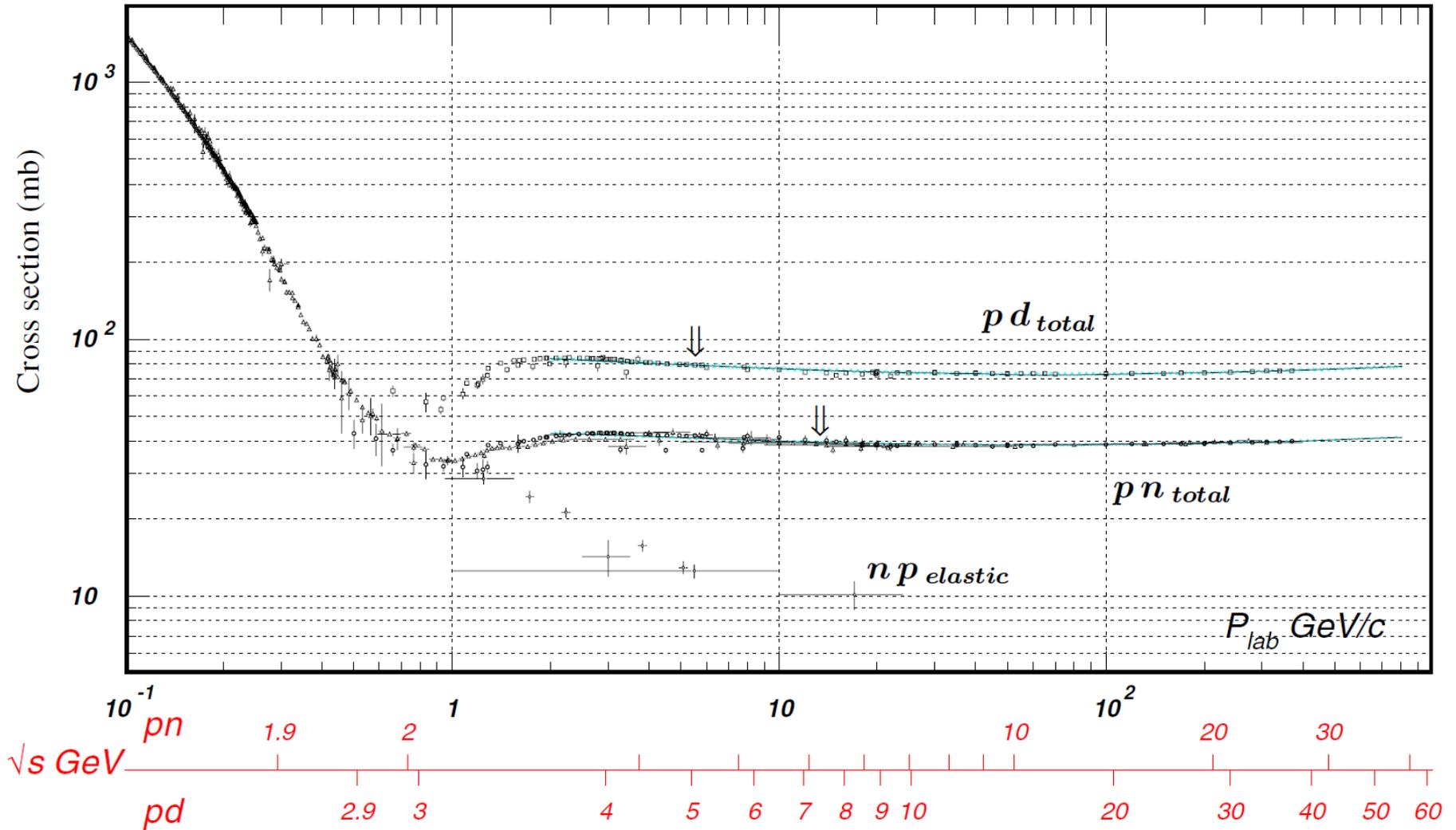
$$\sigma_{\text{tot}}^{\text{NN}} = \frac{4\pi}{k} \text{Im} f(0) = 2 \int d\mathbf{b} \text{Re} \Gamma(\mathbf{b}) \quad \sigma_{\text{el}}^{\text{NN}} = \int d\mathbf{b} |\Gamma(\mathbf{b})|^2$$

Total and elastic cross sections for pp collision

PLB667(2008)



# Total and elastic cross sections for np collision



$$\Gamma(\mathbf{b}) = \frac{1 - i\alpha}{4\pi\beta} \sigma_{\text{tot}}^{\text{NN}} \exp\left(-\frac{\mathbf{b}^2}{2\beta}\right) \quad 62\text{頁から}$$

Parameters of the  $pn$  and  $pp$  profile functions

$E$ (MeV)	$\sigma_{pp}^{\text{tot}}$ (fm <sup>2</sup> )	$\alpha_{pp}$	$\beta_{pp}$ (fm <sup>2</sup> )	$\sigma_{pn}^{\text{tot}}$ (fm <sup>2</sup> )	$\alpha_{pn}$	$\beta_{pn}$ (fm <sup>2</sup> )
40	7.0	1.328	0.385	21.8	0.493	0.539
60	4.7	1.626	0.341	13.6	0.719	0.410
80	3.69	1.783	0.307	9.89	0.864	0.344
100	3.16	1.808	0.268	7.87	0.933	0.293
120	2.85	1.754	0.231	6.63	0.94	0.248
140	2.65	1.644	0.195	5.82	0.902	0.210
160	2.52	1.509	0.164	5.26	0.856	0.181
180	2.43	1.365	0.138	4.85	0.77	0.154
200	2.36	1.221	0.117	4.54	0.701	0.135
240	2.28	0.944	0.086	4.13	0.541	0.106
300	2.42	0.626	0.067	3.7	0.326	0.081
425	2.7	0.47	0.078	3.32	0.25	0.0702
550	3.44	0.32	0.11	3.5	-0.24	0.0859
650	4.13	0.16	0.148	3.74	-0.35	0.112
700	4.43	0.1	0.16	3.77	-0.38	0.12
800	4.59	0.06	0.185	3.88	-0.2	0.12
1000	4.63	-0.09	0.193	3.88	-0.46	0.151

$$f(\theta) = \frac{k}{4\pi} (\alpha + i) \sigma_{\text{tot}}^{\text{NN}} \exp\left(-\frac{\beta}{2} \mathbf{q}^2\right)$$

$\beta$ は前方の角度分布を決める

$$\sigma_{\text{el}}^{\text{NN}} = \frac{1 + \alpha^2}{16\pi\beta} (\sigma_{\text{tot}}^{\text{NN}})^2$$

$$\alpha = \frac{\text{Re}f(0)}{\text{Im}f(0)}$$

$\alpha$ 、 $\beta$ を両断面積のデータと矛盾しないように選ぶ

$\pi$ 中間子生成以下のエネルギーでは弾性散乱断面積と全断面積が等しい

$$\beta = \frac{1 + \alpha^2}{16\pi} \sigma_{\text{tot}}^{\text{NN}}$$

cf. ゼロレンジ

$$\Gamma(\mathbf{b}) = \frac{1 - i\alpha}{2} \sigma_{\text{tot}}^{\text{NN}} \delta(\mathbf{b})$$

## 5.2 Key words: 位相差関数、キュムラント展開、密度分布、optical limit 近似、遷移密度、Foldingポテンシャル、モンテカルロ積分、光学ポテンシャル

### 位相差関数の計算

#### I. 解析的計算

$$e^{i\chi(b)} = \langle \psi_0 \theta_0 | \prod_{i \in P} \prod_{j \in T} (1 - \Gamma_{ij}) | \psi_0 \theta_0 \rangle$$

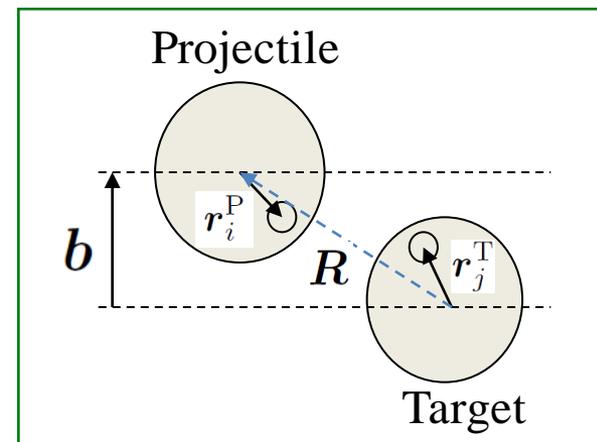
$$\Gamma_{ij} \text{ の変数 } \quad \xi_i - \eta_j + \mathbf{b} = (\mathbf{r}_i - \mathbf{R}_P)^\perp - (\mathbf{r}_j - \mathbf{R}_T)^\perp + \mathbf{b}$$

$$e^{i\chi(b)} = 1 + \sum_{n=1}^{A_P A_T} (-1)^n \sum_{(i_1, j_1), (i_2, j_2), \dots, (i_n, j_n)} \langle \psi_0 \theta_0 | \Gamma(\xi_{i_1} - \eta_{j_1} + \mathbf{b}) \cdots \Gamma(\xi_{i_n} - \eta_{j_n} + \mathbf{b}) | \psi_0 \theta_0 \rangle$$

多重散乱級数展開

原子核の波動関数がガウス型関数の場合は計算可能

交代級数的であり、数項で打ち切って評価するのはよくない



# p+<sup>6</sup>He散乱の解析例

p-<sup>6</sup>Heの位相差関数を核子-核子  
プロフィール関数から計算

$$F(\mathbf{q}) = e^{i\chi_s} \left\{ F_C(\mathbf{q}) + \frac{iK}{2\pi} \int d\mathbf{b} e^{i(\mathbf{q}\cdot\mathbf{b} + 2\eta \ln(Kb))} (1 - e^{i\chi(b)}) \right\}$$

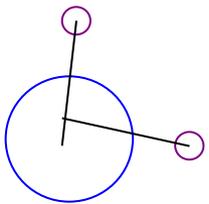
p.39 クーロン  
力有を参照

$$\Psi_{\text{Shell}} = \mathcal{A}\{\phi(\alpha)[[\Gamma_1(\boldsymbol{\rho}_1, \gamma_1)\Gamma_1(\boldsymbol{\rho}_2, \gamma_2)]_0\eta_0]_{00}\}$$

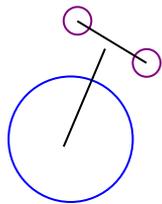
$$\Psi_{\text{Cluster}} = \mathcal{A}\{\phi(\alpha)[[\Gamma_0(\boldsymbol{\rho}_1, \nu_1)\Gamma_0(\boldsymbol{\rho}_2, \nu_2)]_0\eta_0]_{00}\}$$

$\alpha$ 粒子は(0s)<sup>4</sup>調和振動子波動関数

$$\Gamma_{lm}(\boldsymbol{\rho}, \nu) \propto \rho^l \exp(-\nu\rho^2) Y_{lm}(\hat{\boldsymbol{\rho}})$$



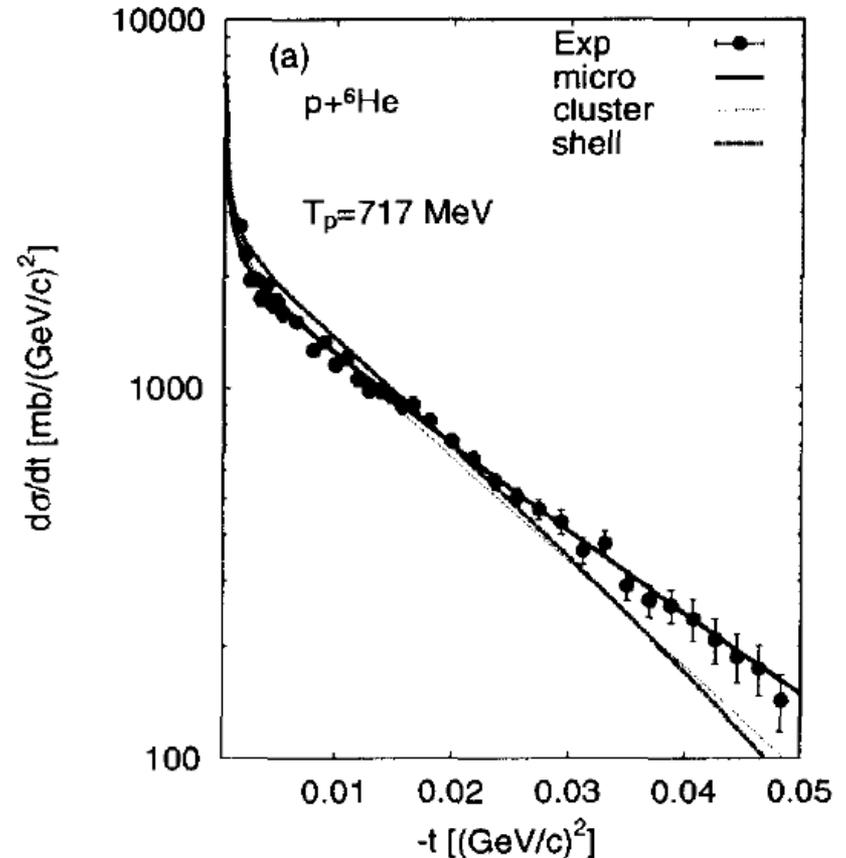
Shell



Cluster

$$\Psi_{\text{Micro}} = \sum_{K,(l_1 l_2)LS} C_{K,(l_1 l_2)LS} \Psi_{K,(l_1 l_2)LS}$$

Rms半径はどれもマイクロ計算値2.51 fm  
に一致するようにした



## II キュムラント(cumulant)展開による近似計算

$$e^{i\chi(\mathbf{b})} = \langle \Phi_0^P \Phi_0^T | \mathcal{O} | \Phi_0^P \Phi_0^T \rangle$$

$$\sigma_{\text{react}} - \sigma_{\text{int}} = \sum_{\alpha \in \text{PB}} \int d\mathbf{b} \langle \Phi_0^T | | \langle \Phi_\alpha^P | \mathcal{O} | \Phi_0^P \rangle |^2 | \Phi_0^T \rangle - \int d\mathbf{b} | \langle \Phi_0^P \Phi_0^T | \mathcal{O} | \Phi_0^P \Phi_0^T \rangle |^2$$

多重散乱演算子(関数)

$$\begin{aligned} \mathcal{O} &= \exp \left( i \sum_{i=1}^{A_P} \sum_{j=1}^{A_T} \chi_{ij}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P - \mathbf{s}_j^T) \right) \\ &= \prod_{i=1}^{A_P} \prod_{j=1}^{A_T} (1 - \Gamma_{ij}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P - \mathbf{s}_j^T)) \end{aligned}$$

全反応断面積では入射核、標的核が基底状態にあるときの位相差関数が必要となる

相互作用断面積では入射核が励起される過程の断面積を評価する必要がある

## 核子-原子核の位相差関数を例として考える

### Cumulant expansion I (核子-核子位相差関数を用いた場合)

$$\begin{aligned} e^{i\chi(\mathbf{b})} &= \langle \Phi_0^{\text{P}} | e^{i \sum_{i=1}^{A_{\text{P}}} \chi_{NN}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^{\text{P}})} | \Phi_0^{\text{P}} \rangle \\ &= \langle e^X \rangle = e^{\langle X \rangle} \langle e^{X - \langle X \rangle} \rangle \quad X = i \sum_{i=1}^{A_{\text{P}}} \chi_{NN}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^{\text{P}}) \end{aligned}$$

$$i\chi(\mathbf{b}) = \ln G(1) \quad G(\lambda) = \langle e^{\lambda X} \rangle = e^{\lambda \langle X \rangle} \langle e^{\lambda(X - \langle X \rangle)} \rangle$$

モーメント展開  $G(\lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda^n}{n!} \mu_n \quad \mu_n = \langle X^n \rangle$

キュムラント展開  $\ln G(\lambda) = \lambda \langle X \rangle + \ln \left( 1 + \frac{\lambda^2}{2} \langle (X - \langle X \rangle)^2 \rangle + \dots \right)$   
 $= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda^n}{n!} \kappa_n$  **Xの揺らぎによる展開**

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots$$

$$\kappa_0 = 0 \quad \kappa_1 = \langle X \rangle = \mu_1 \quad \kappa_2 = \langle (X - \langle X \rangle)^2 \rangle = \mu_2 - \mu_1^2$$

$$e^{i\chi(\mathbf{b})} = \exp \left( \mu_1 + \frac{1}{2}(\mu_2 - \mu_1^2) + \dots \right)$$

$\mu_1 = i \int d\mathbf{r} \rho^P(\mathbf{r}) \chi_{\text{NN}}(\mathbf{b} + \mathbf{s})$  は1粒子密度で表現される

$\mu_2$ は1、2粒子密度を用いて表され、核内の核子-核子相関に依存する

$$\mu_2 = - \left\langle \sum_{i=1}^{A_P} \sum_{j=1}^{A_P} \chi_{\text{NN}}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P) \chi_{\text{NN}}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_j^P) \right\rangle$$

## Cumulant expansion II (核子-核子プロファイル関数を用いた場合)

$$e^{i\chi(\mathbf{b})} = \langle \Phi_0^P | \prod_{i=1}^{A_P} (1 - \Gamma_{NN}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P)) | \Phi_0^P \rangle$$

$$i\chi(\mathbf{b}) = \ln G(1) \quad G(\lambda) = \langle \prod_{i=1}^{A_P} (1 - \lambda \Gamma_{NN}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P)) \rangle$$

$$e^{i\chi(\mathbf{b})} = \exp \left( \mu_1 + \mu_2 - \frac{1}{2} \mu_1^2 + \dots \right)$$

$$\mu_1 = - \int d\mathbf{r} \rho^P(\mathbf{r}) \Gamma_{NN}(\mathbf{b} + \mathbf{s})$$

$$\mu_2 = \left\langle \sum_{i < j}^{A_P} \Gamma_{NN}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P) \Gamma_{NN}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_j^P) \right\rangle \quad \text{2粒子密度で表現される}$$

両者の関係？  $\chi$ が小さいとして  $\Gamma = 1 - e^{i\chi} \approx -i\chi$  考えれば  
両者の対応関係は見やすいが、完全には対応しない

# キュムラント展開の断面積の計算への適用

全反応断面積の場合（核子-核子のプロファイル関数を用いて表現）

$$e^{i\chi(\mathbf{b})} = \langle \Phi_0^P \Phi_0^T | \prod_{i=1}^{A_P} \prod_{j=1}^{A_T} (1 - \Gamma_{NN}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P - \mathbf{s}_j^T)) | \Phi_0^P \Phi_0^T \rangle$$

$$e^{i\chi(\mathbf{b})} = \exp \left( \mu_1 + \mu_2 - \frac{1}{2} \mu_1^2 + \dots \right)$$

OLAは $\mu_1$ のみ考慮

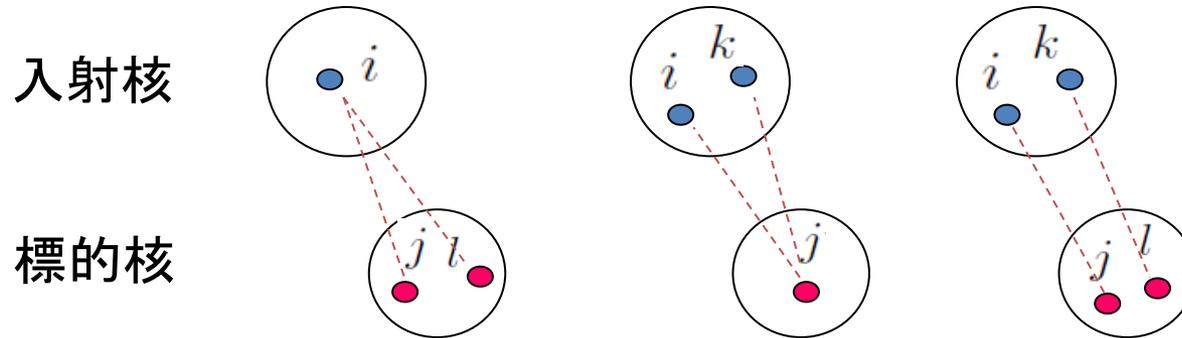
$$\begin{aligned} \mu_1 &= - \langle \Phi_0^P \Phi_0^T | \sum_{i=1}^{A_P} \sum_{j=1}^{A_T} \Gamma_{NN}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P - \mathbf{s}_j^T) | \Phi_0^P \Phi_0^T \rangle \\ &= - \int \int d\mathbf{r} d\mathbf{r}' \rho^P(\mathbf{r}) \rho^T(\mathbf{r}') \Gamma_{NN}(\mathbf{b} + \mathbf{s} - \mathbf{s}') \end{aligned}$$

$\mu_1$ は1粒子密度と  
 $\Gamma$ で簡単に表される

$$\mu_2 = \langle \Phi_0^P \Phi_0^T | \sum_{i=1}^{A_P} \sum_{j=1}^{A_T} \sum_{k=1}^{A_P} \sum_{l=1}^{A_T} \Gamma_{NN}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P - \mathbf{s}_j^T) \Gamma_{NN}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_k^P - \mathbf{s}_l^T) | \Phi_0^P \Phi_0^T \rangle$$

$\mu_2$ の項は全反応断面積のOLA評価を減らすように働く

$\mu_2$ に現れる $\Gamma$ の2次の項は3タイプの相互作用に分類され、  
1粒子及び2粒子密度によって表現される



## 相互作用断面積への応用

$\langle \Phi_0^T | | \langle \Phi_\alpha^P | \mathcal{O} | \Phi_0^P \rangle |^2 | \Phi_0^T \rangle$  非弾性過程に伴う新しいタイプの行列要素

$\alpha \neq 0$   $\langle \Phi_\alpha^P | \mathcal{O} | \Phi_0^P \rangle$  の計算は同様にキュムラント展開で行う

$$G(\lambda) = \langle \Phi_\alpha^P | \prod_{i=1}^{A_P} \prod_{j=1}^{A_T} (1 - \lambda \Gamma_{NN}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P - \mathbf{s}_j^T)) | \Phi_0^P \rangle + 1$$

$\langle \Phi_0^T | \dots | \Phi_0^T \rangle$  の部分もキュムラント展開を行う

$$\langle \Phi_0^T | | \langle \Phi_\alpha^P | \mathcal{O} | \Phi_0^P \rangle |^2 | \Phi_0^T \rangle \approx \exp(\langle \Phi_0^T | \mu_1 \mu_1^* | \Phi_0^T \rangle + \dots) - 1$$

$$\mu_1 = - \langle \Phi_\alpha^P | \sum_{i=1}^{A_P} \sum_{j=1}^{A_T} \Gamma_{NN}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P - \mathbf{s}_j^T) | \Phi_0^P \rangle$$

$$= - \sum_{j=1}^{A_T} \int d\mathbf{r} \rho_\alpha^P(\mathbf{r}) \Gamma_{NN}(\mathbf{b} + \mathbf{s} - \mathbf{s}_j^T)$$

入射核の遷移密度

$\mu_1$  は標的核の核子座標の1体演算子。入射核の遷移密度と標的核の2核子密度があれば相互作用断面積の評価が可能

### III 全反応断面積の計算再考

核子-標的核の光学ポテンシャルが与えられたとする  
 これから核子-標的核の位相差関数が定義できる

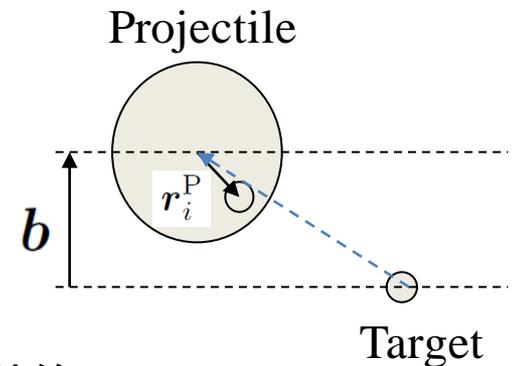
$$\chi_{NT}(\mathbf{b}) = -\frac{1}{\hbar v} \int dz V_{OPT}(\mathbf{b} + z\hat{z})$$

入射核-標的核の位相差関数を上記の位相差関数から計算し、  
 それから全反応断面積、弾性散乱断面積を計算できる

$$\begin{aligned} e^{i\chi(\mathbf{b})} &= \langle \Phi_0^P | e^{i \sum_{i=1}^{A_P} \chi_{NT}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P)} | \Phi_0^P \rangle \\ &\approx e^{i \langle \Phi_0^P | \sum_{i=1}^{A_P} \chi_{NT}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P) | \Phi_0^P \rangle} \end{aligned}$$

この近似の位相差関数は光学ポテンシャルの重ね合わせによって  
 得られたFoldingポテンシャルの位相差関数になる

$$\begin{aligned} \chi(\mathbf{b}) &= \langle \Phi_0^P | \sum_{i=1}^{A_P} \chi_{NT}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P) | \Phi_0^P \rangle \\ &= \int d\mathbf{r} \rho^P(\mathbf{r}) \chi_{NT}(\mathbf{b} + \mathbf{s}) = -\frac{1}{\hbar v} \int dz V_{Fold}(\mathbf{b} + z\hat{z}) \\ V_{Fold}(\mathbf{b}) &= \int d\mathbf{r} \rho^P(\mathbf{r}) V_{OPT}(\mathbf{b} + \mathbf{r}) \end{aligned}$$



Breakupの効果  
 は入らない

## NTG近似 OLAと同様、1粒子密度のみで計算

Abu-Ibrahim, Y.S. PRC61(2000)

核子-標的核の光学ポテンシャルから核子-標的核のプロファイル関数を定義する

$$\chi_{NT}(\mathbf{b}) = -\frac{1}{\hbar v} \int dz V_{OPT}(\mathbf{b} + z\hat{z}) \quad \Gamma_{NT}(\mathbf{b}) = 1 - e^{i\chi_{NT}(\mathbf{b})}$$

入射核-標的核の位相差関数をこのプロファイル関数から計算する

$$e^{i\tilde{\chi}(\mathbf{b})} = \langle \Phi_0^P | \prod_{i=1}^{A_P} (1 - \Gamma_{iT}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P)) | \Phi_0^P \rangle$$
$$\approx \exp \left( - \langle \Phi_0^P | \sum_{i=1}^{A_P} \Gamma_{iT}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P) | \Phi_0^P \rangle \right) = \exp \left( - \int d\mathbf{r} \rho^P(\mathbf{r}) \Gamma_{NT}(\mathbf{b} + \mathbf{s}) \right)$$

$\chi_{NT}$  が小さいなら  $\Gamma_{NT} \approx -i\chi_{NT}$  Folding ポテンシャルの位相差関数と同じ  
しかし一般には異なる

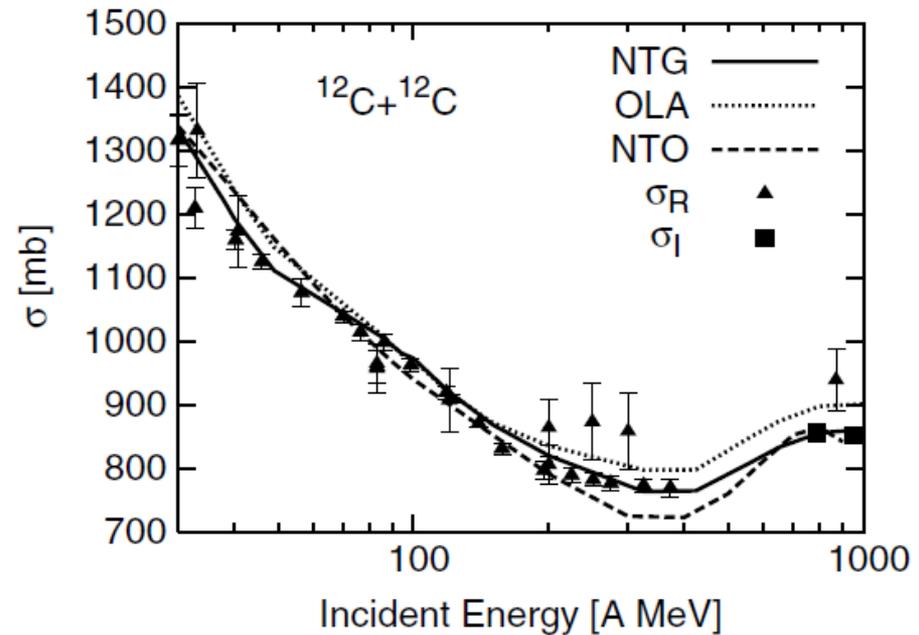
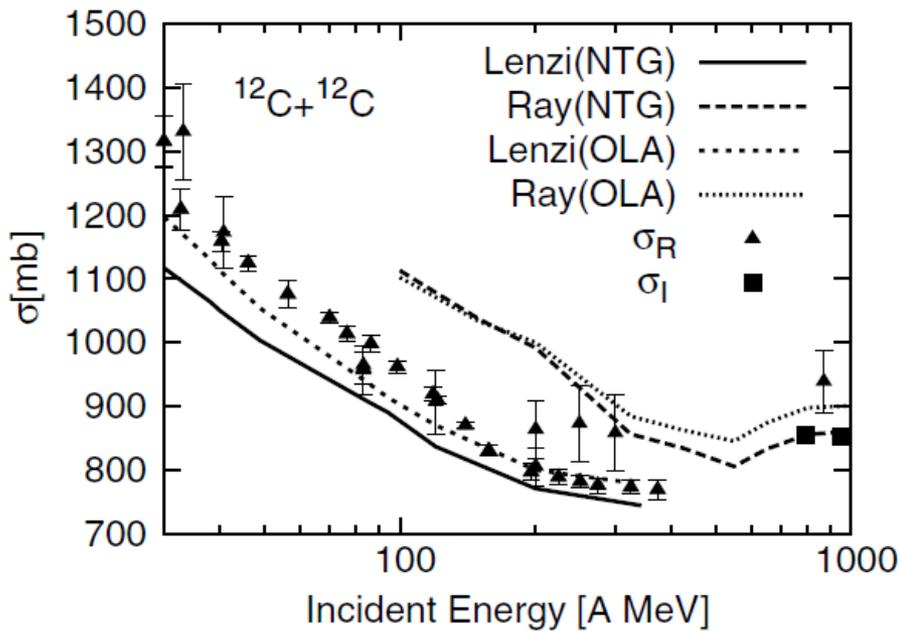
光学ポテンシャルが利用できないとき、核子-核子プロファイル関数から  
 $\Gamma_{NT}(\mathbf{b})$  を計算する

$$\Gamma_{iT}(\mathbf{b}) = 1 - \langle \Phi_0^T | \prod_{j=1}^{A_T} (1 - \Gamma_{ij}(\mathbf{b} - \mathbf{s}_j^T)) | \Phi_0^T \rangle$$
$$\approx 1 - \exp \left( - \langle \Phi_0^T | \sum_{j=1}^{A_T} \Gamma_{ij}(\mathbf{b} - \mathbf{s}_j^T) | \Phi_0^T \rangle \right) = 1 - \exp \left( - \int d\mathbf{r} \rho^T(\mathbf{r}) \Gamma_{NN}(\mathbf{b} - \mathbf{s}) \right)$$

## プロフィール関数や全反応断面積の計算の近似法の比較

炭素核の密度は平均場描像で生成  
 中性子、陽子の分離エネルギーを再現  
 重心運動は(良い近似で)分離  
 電子散乱から得られた密度と良い一致

Horiuchi et al., PRC75(2007)

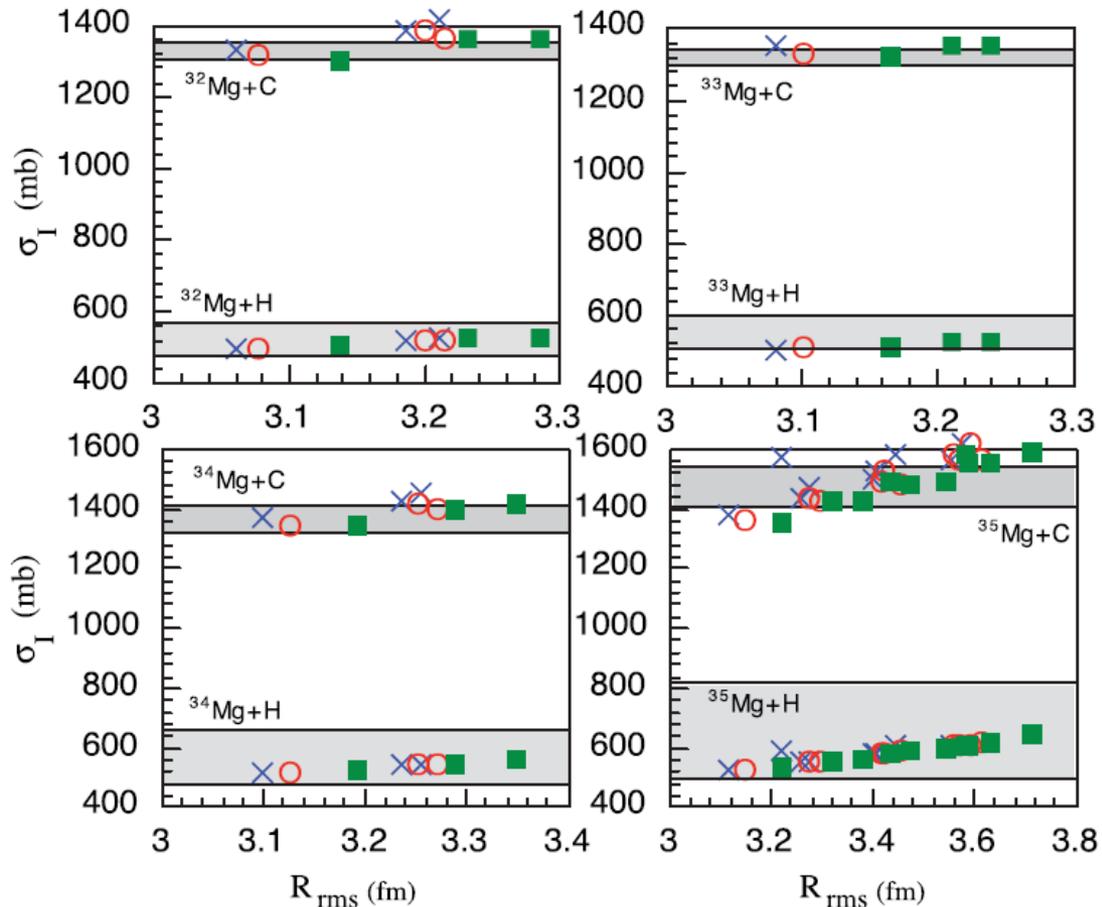
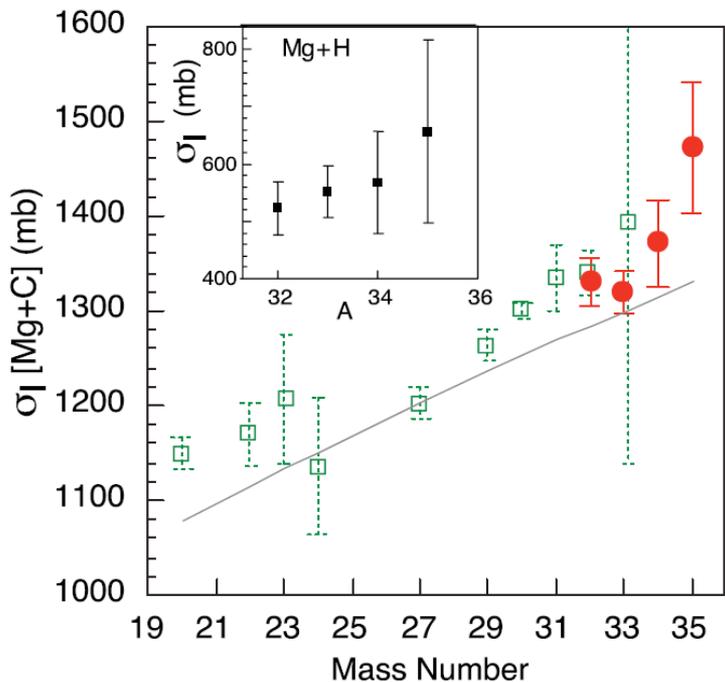


Fermi型の密度を仮定

陽子分布は電荷半径を再現

中性子分布は陽子分布より広がっている

×	○	■
$r_0^p(\text{fm}) = 0.97$	1.09	1.18
$a^p(\text{fm}) = 0.5$	0.4	0.3



	Rms半径(fm)
$^{32}\text{Mg}$	$3.17 \pm 0.11$
$^{33}\text{Mg}$	$3.19 \pm 0.03$
$^{34}\text{Mg}$	$3.23 \pm 0.13$
$^{35}\text{Mg}$	$3.40 \pm 0.24$

H標的のデータは誤差が大きく有効な範囲を与えない

## IV モンテカルロ積分法 (MCI)による数値計算

多変数関数の積分  $I = \int_V f(x) dx \approx V \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i)$

$$p(x) \geq 0$$

$$\int_V p(x) dx = 1 \quad I = \int_V g(x) p(x) dx \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(x_i)$$

$(x_1, x_2, \dots, x_N)$   $p(x)$  の分布に従って発生 (Metropolis法)

位相差関数はこの型の積分に該当

$$e^{i\chi_{el}(\mathbf{b})} = \langle \Phi_0^P \Phi_0^T | \prod_{i \in P} \prod_{j \in T} [1 - \Gamma(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P - \mathbf{s}_j^T)] | \Phi_0^P \Phi_0^T \rangle$$

$$p(x) \rightarrow |\Phi_0^P \Phi_0^T|^2$$

この方法の利点

1. 核子数や入射核、標的核の波動関数に制限なし
2. すべての多重散乱項を考慮できる
3. 計算は非常に簡単

**Metropolis法:** 重み関数 $p(x)$ に従って座標点列  $x_1, x_2, \dots, x_N$  を発生させる。

$x_i$  まで生成した

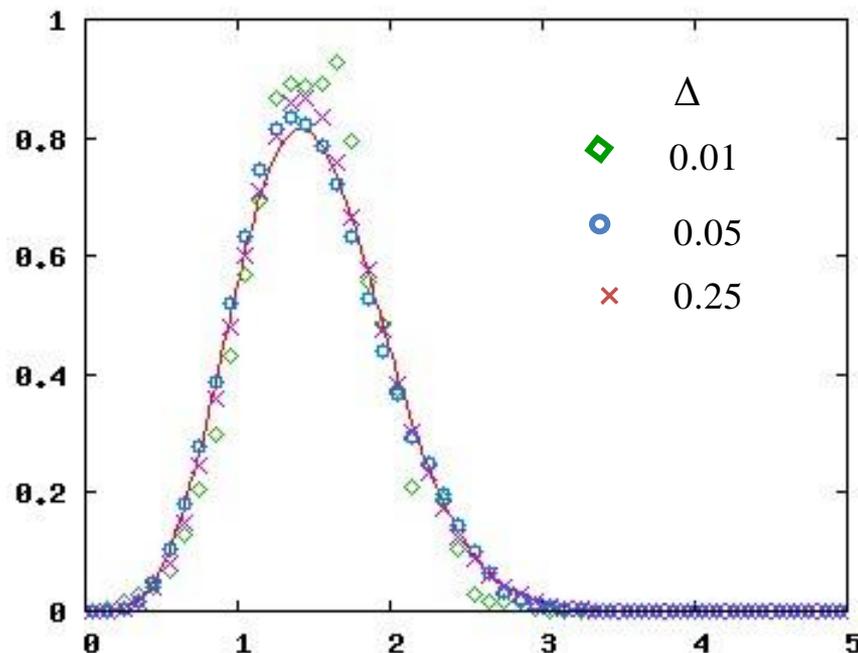
1.  $x_{i+1}$  の候補  $x_t$  を  $x_i$  のまわりでランダムに選ぶ
2.  $r = p(x_t) / p(x_i)$  を計算  
 $r$  が1以上なら  $x_{i+1} = x_t$   
 $r$  が1より小さいとき  
 $r$  がランダム数  $\alpha$  以上なら  $x_{i+1} = x_t$   
 $r$  が  $\alpha$  より小さいならステップ1へ行く
3.  $i \rightarrow i+1$

Random walk の  
ステップ幅  $\Delta$  に依存

$$p(x) = \frac{8}{3\sqrt{\pi}} x^4 e^{-x^2} \quad (x \in [0, \infty])$$

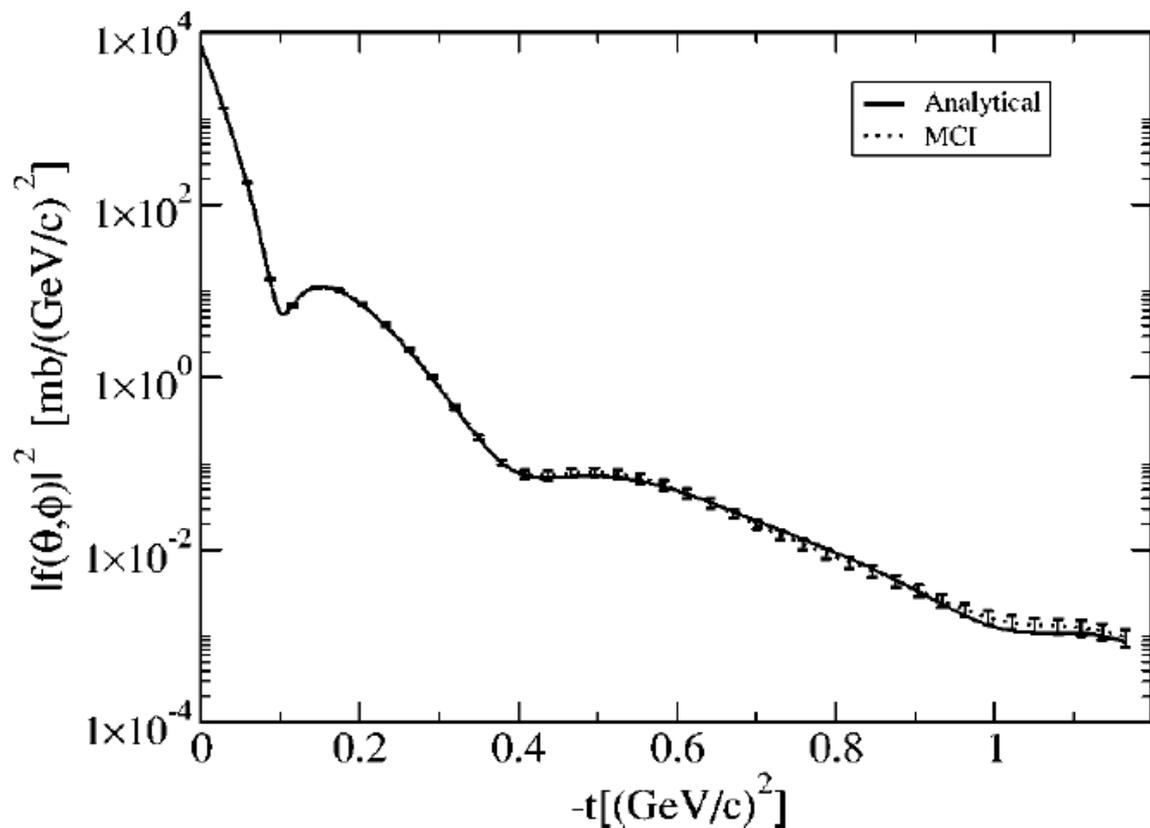
の分布に従う座標  $x$  を百万個発生

$[0,1]$  の乱数  $\alpha$  に対して  
 $(2\alpha-1)\Delta$  で動かしたときの発生点のヒストグラム



$\alpha+\alpha$ 弾性散乱角分布と反応断面積

5.07GeV/c

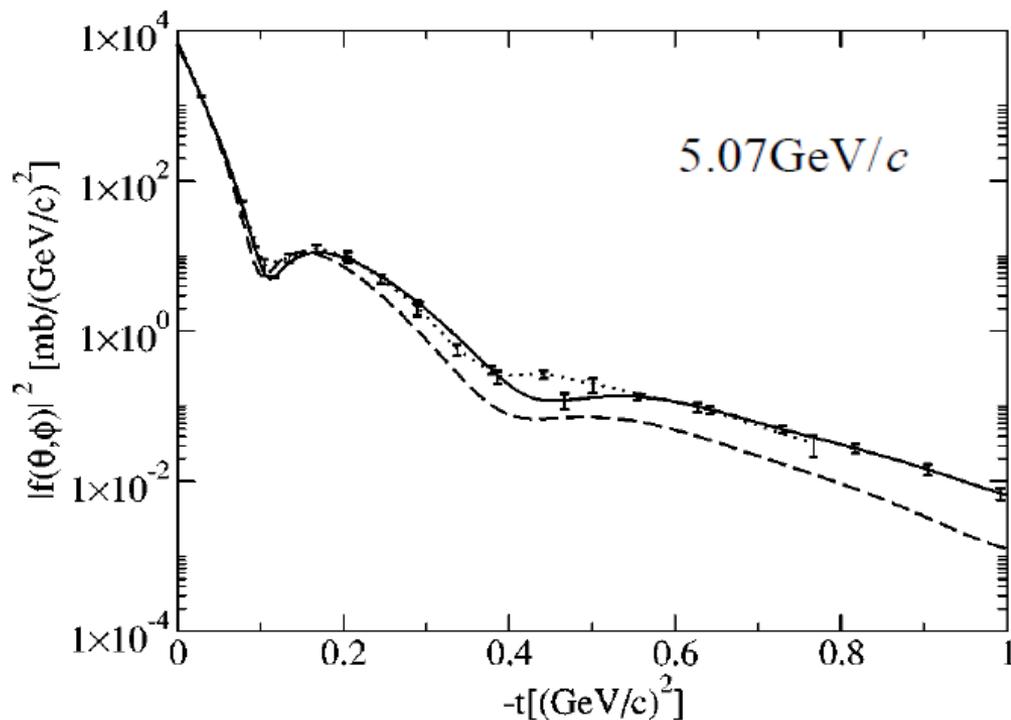


Method	$\sigma_{\text{reac}}$ (mb)
Analytic	242.91
MCI	242.8(7)

計算精度は信頼でき、MCIの結果は予言能力あり

## $\alpha+\alpha$ 弾性散乱角分布の実験データとの比較

Variational Monte Carlo (VMC) WF . . . 実線  
( $0s$ )<sup>4</sup>HOWFで同じ半径を与えるもの . . . ダッシュ線



VMCに考慮している核子相関の効果が最初のdipを越えたところから見えている

## 全反応断面積(MCI理論値)と相互作用断面積(実験値)との比較

Varga et al., PRC66(2002)

System	Energy (GeV/nucleon)	$\sigma_{\text{reac}}$ (mb)	$\sigma_{\text{int}}$ (mb) (experiment)
$p + {}^{12}\text{C}$	0.8	261(1)	$262 \pm 13.5^\dagger$
$\alpha + {}^{12}\text{C}$	0.8	506(1)	$503 \pm 5, 527 \pm 26^\dagger$
$p + {}^6\text{He}$	0.8	178(1)	
$p + {}^6\text{Li}$	0.8	171(1)	
${}^6\text{He} + {}^{12}\text{C}$	0.8	733(2)	$722 \pm 6$
${}^6\text{Li} + {}^{12}\text{C}$	0.8	712(2)	$688 \pm 10$
${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C}$	0.8	865(1)	$856 \pm 9, 939 \pm 49^\dagger$

( $\dagger$ 印は0.87GeV/nucleonのデータ)

## 位相差関数から光学ポテンシャルへ

核子-核子プロファイル関数から核子-原子核、原子核-原子核、あるいは核子-原子核プロファイル関数から原子核-原子核の位相差関数を求めた。これらは弾性散乱をアイコンール近似で記述するもの

$$e^{i\chi_{\text{el}}(\mathbf{b})} = \langle \Phi_0^{\text{P}} | e^{i \sum_{i=1}^{A_{\text{P}}} \chi_{NT}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^{\text{P}})} | \Phi_0^{\text{P}} \rangle = e^{\langle X \rangle} \langle e^{-X - \langle X \rangle} \rangle$$

$$X = i \sum_{i=1}^{A_{\text{P}}} \chi_{NT}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^{\text{P}})$$

$\langle X \rangle$  はFoldingポテンシャルの位相差関数に対応

$i\chi_{\text{el}}(\mathbf{b})$  を  $\langle X \rangle$  で近似するのは、原子核の励起を無視することになる  
高次項は原子核の励起効果による位相差関数のずれを表す

$\chi_{\text{el}}(\mathbf{b})$  を生成する光学ポテンシャル？

$$\chi_{\text{el}}(b) = -\frac{1}{\hbar v} \int_{-\infty}^{+\infty} dz V_{\text{opt}}(\sqrt{b^2 + z^2})$$

数学的には $\chi$ から $V$ への逆変換で、位相差関数が軸対称、 $b$ の長さのみに依存するときには容易に可能

$$\chi_{\text{el}}(b) = -\frac{1}{\hbar v} \int_{-\infty}^{+\infty} dz V_{\text{opt}}(\sqrt{b^2 + z^2})$$

左辺が既知のとき、 $V_{\text{opt}}$ を求める問題

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} dy \chi_{\text{el}}(\sqrt{x^2 + y^2}) &= -\frac{1}{\hbar v} \int_{-\infty}^{+\infty} dy \int_{-\infty}^{+\infty} dz V_{\text{opt}}(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}) \\ &= -\frac{2\pi}{\hbar v} \int_0^{\infty} d\rho \rho V_{\text{opt}}(\sqrt{x^2 + \rho^2}) \\ &= -\frac{2\pi}{\hbar v} \int_x^{\infty} dr r V_{\text{opt}}(r) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{opt}}(r) &= \frac{\hbar v}{2\pi} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \int_{-\infty}^{+\infty} dy \chi_{\text{el}}(\sqrt{r^2 + y^2}) \\ &= \frac{\hbar v}{\pi} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \int_r^{\infty} db \frac{b}{\sqrt{b^2 - r^2}} \chi_{\text{el}}(b) \end{aligned}$$

原子核の励起を頭に入れないで、光学ポテンシャルを計算する  
頭連続状態を入れないで、ハロー核のブレークアップ効果を評価できる

1. Introduction
2. Basics of potential scattering theory
3. Eikonal approximation
4. Glauber approximation for nuclear collision

## **5. Nucleon-nucleon profile function and calculation of phase shift function**

### 5.1 プロファイル関数

5.2 位相差関数、キュムラント展開、核子密度、optical limit 近似、遷移密度、Foldingポテンシャル、モンテカルロ積分、光学ポテンシャル

6. Case of halo nuclei
7. Elastic scattering and dynamic polarization potential
8. Breakup processes with Coulomb interaction

# 6. Case of halo nuclei

## 6.1 Key words: ハロー核、諸断面積の計算法

### ハロー原子核

弱いハロー中性子の束縛、空間的に広がった分布  
安定核の場合とは異なった特徴

### 1 中性子ハロー原子核

基底状態のみ束縛し、励起状態は連続状態と仮定  
マクロスコピックモデル(反対称化無視、芯核の歪み無視)

$$|\phi_0\rangle\langle\phi_0| + \int d\mathbf{k} |\phi_{\mathbf{k}}\rangle\langle\phi_{\mathbf{k}}| = 1$$

全反応断面積、ハロー中性子removal断面積、弾性散乱角分布、  
芯核の運動量分布などを具体的に計算することを目的とする

# Cross section calculations in Glauber model: I. Core plus one-nucleon case <sup>☆</sup>

B. Abu-Ibrahim <sup>a,b</sup>, Y. Ogawa <sup>c</sup>, Y. Suzuki <sup>d,\*</sup>, I. Tanihata <sup>a</sup>

<sup>a</sup> *The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan*

<sup>b</sup> *Department of Physics, Cairo University, Giza 12613, Egypt*

<sup>c</sup> *Department of Physics, Osaka University, 1-1 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan*

<sup>d</sup> *Department of Physics, Niigata University, Niigata 950-2181, Japan*

Received 6 June 2002

*Keywords:* Glauber model, one-nucleon halo, reaction cross section, nucleon-removal cross section, momentum distribution, elastic differential cross section

*Nature of physical problem*

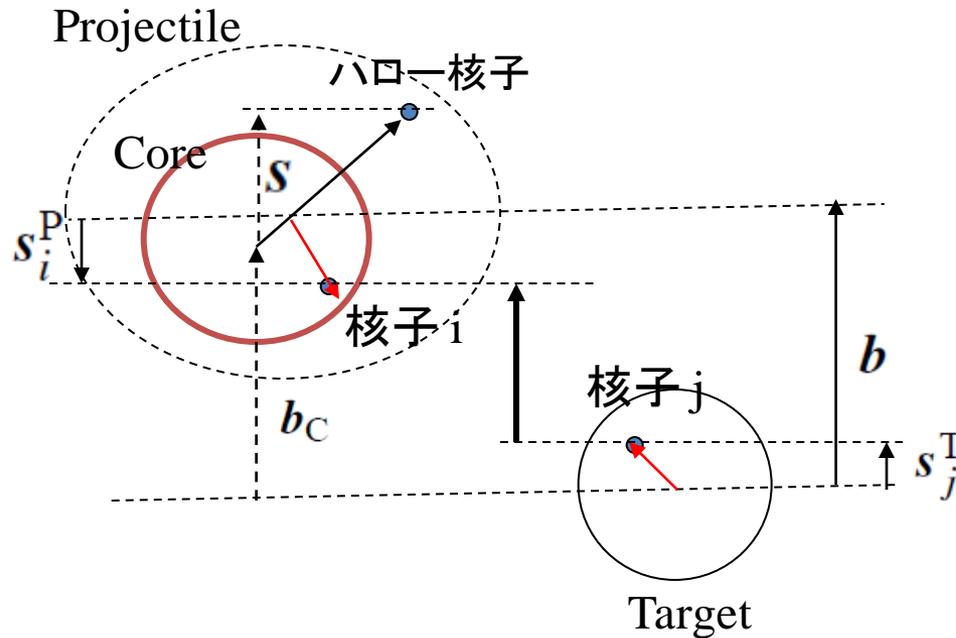
This computer code calculates the cross sections of various reactions for a core plus one valence-nucleon system in the framework of the Glauber model. The examples of calculation include the reaction cross sections for  $^{13,19}\text{C}+^{12}\text{C}$ , the elastic differential cross section for  $^{11}\text{Be}+^{12}\text{C}$  and the momentum distribution of the core nucleus for  $^{11}\text{Be}+^9\text{Be}$  and  $^8\text{B}+^{12}\text{C}$  systems.

入射核Pと標的核Tが衝突後、それぞれ状態  $a, c$  に遷移した

グラウバー理論による散乱振幅

$$F_{ac}(\mathbf{q}) = \frac{iK}{2\pi} \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b}} \left\langle \Psi_a \Theta_c \left| 1 - \prod_{i \in P} \prod_{j \in T} (1 - \Gamma_{ij}) \right| \Psi_0 \Theta_0 \right\rangle$$

$\Gamma_{ij}$  は  $\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P - \mathbf{s}_j^T$  の関数



遷移の断面積  $\sigma_{ac} = \int \frac{d\mathbf{q}}{K^2} |F_{ac}(\mathbf{q})|^2$

## 全反応断面積

$$\sum_{ac \neq 00} \sigma_{ac} = \sum_{ac \neq 00} \frac{1}{(2\pi)^2} \int d\mathbf{q} d\mathbf{b} d\mathbf{b}' e^{-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{b} + i\mathbf{q} \cdot \mathbf{b}'}$$

$$\times \langle \Psi_0 \Theta_0 | \prod \prod (1 - \Gamma_{ij}(\mathbf{b}')^*) | \Psi_a \Theta_c \rangle$$

$$\times \langle \Psi_a \Theta_c | \prod \prod (1 - \Gamma_{ij}(\mathbf{b})) | \Psi_0 \Theta_0 \rangle$$

**q 積分を実行**

$$= \sum_{ac \neq 00} \int d\mathbf{b} \langle \Psi_0 \Theta_0 | \prod \prod (1 - \Gamma_{ij}(\mathbf{b})^*) | \Psi_a \Theta_c \rangle$$

$$\times \langle \Psi_a \Theta_c | \prod \prod (1 - \Gamma_{ij}(\mathbf{b})) | \Psi_0 \Theta_0 \rangle$$

closure

$$\sum_{ac} |\Psi_a \Theta_c\rangle \langle \Psi_a \Theta_c| = 1$$

$$= \int d\mathbf{b} \left[ \langle \Psi_0 \Theta_0 | \prod \prod |1 - \Gamma_{ij}|^2 | \Psi_0 \Theta_0 \rangle - |e^{i\chi_{\text{PT}}(\mathbf{b})}|^2 \right]$$

unitarity

$$|1 - \Gamma|^2 = 1$$

$$e^{i\chi_{\text{PT}}(\mathbf{b})} = \left\langle \Psi_0 \Theta_0 \left| \prod_{i \in \text{P}} \prod_{j \in \text{T}} [1 - \Gamma(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^{\text{P}} - \mathbf{s}_j^{\text{T}})] \right| \Psi_0 \Theta_0 \right\rangle$$

$$\sigma_{\text{reac}}(\text{P} + \text{T}) = \sum_{ac \neq 00} \sigma_{ac} = \int d\mathbf{b} (1 - |e^{i\chi_{\text{PT}}(\mathbf{b})}|^2)$$

**exp [ -2 Im  $\chi_{\text{PT}}(\mathbf{b})$  ]**

衝突により励起されない確率

入射核が1核子ハロー核で近似できると仮定。芯核は基底状態に固定

$$\Psi_0 = \varphi_0 \Phi_0$$

ハロー核子の状態は $n, l, j$ の量子数で指定されるとする

$$\varphi_{nljm}(\mathbf{r}) = u_{nlj}(r) \sum_{m_l m_s} \langle l m_l \frac{1}{2} m_s | j m \rangle Y_{l m_l}(\hat{\mathbf{r}}) \chi_{\frac{1}{2} m_s}$$

入射核-標的核の位相差関数の計算

$$e^{i\chi_{\text{PT}}(\mathbf{b})} = \langle \varphi_0 \Phi_0 \Theta_0 | \dots | \varphi_0 \Phi_0 \Theta_0 \rangle = \langle \varphi_0 | X | \varphi_0 \rangle$$

$$X = \langle \Phi_0 \Theta_0 | \prod_{i \in P} \prod_{j \in T} (1 - \Gamma_{ij}) | \Phi_0 \Theta_0 \rangle \quad \Gamma_{ij} = \Gamma(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^P - \mathbf{s}_j^T)$$

原子核間の相対運動は核内の核子の運動に比べて十分速いとして、frozen近似を使用する(キュムラント展開が使える)

ハロー核子は空間的運動の揺らぎが大きいのでfrozen近似を用いない

$X$  は位相差、 $X = e^{i\chi}$

$$\begin{aligned} i\chi &= \log X \approx - \sum_{i \in P} \sum_{j \in T} \langle \Phi_0 \Theta_0 | \Gamma_{ij} | \Phi_0 \Theta_0 \rangle \\ &= - \sum_{i \in C} \sum_{j \in T} \langle \Phi_0 \Theta_0 | \Gamma_{ij} | \Phi_0 \Theta_0 \rangle - \sum_{j \in T} \langle \Theta_0 | \Gamma_{Nj} | \Theta_0 \rangle \\ &= i\chi_{CT}(\mathbf{b}_C) + i\chi_{NT}(\mathbf{b}_C + \mathbf{s}) \end{aligned}$$

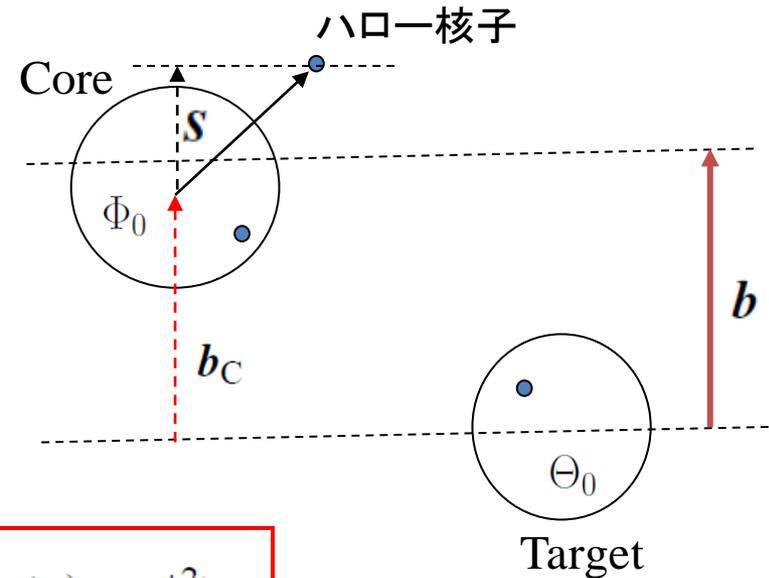
$$\mathbf{b}_C = \mathbf{b} - \frac{1}{A_P} \mathbf{s}$$

$$i\chi_{CT}(\mathbf{b}) = - \int d\mathbf{r} \int d\mathbf{r}' \rho_C(\mathbf{r}) \rho_T(\mathbf{r}') \Gamma(\mathbf{b} + \mathbf{s} - \mathbf{s}')$$

$$i\chi_{NT}(\mathbf{b}) = - \int d\mathbf{r} \rho_T(\mathbf{r}) \Gamma(\mathbf{b} - \mathbf{s}).$$

キュムラント展開の  
第一項によるOLA近似

各核内核子について  
1体の演算子



$$\sigma_{\text{reac}}(P + T) = \int d\mathbf{b} (1 - |\langle \varphi_0 | e^{i\chi_{CT}(\mathbf{b}_C) + i\chi_{NT}(\mathbf{b}_C + \mathbf{s})} | \varphi_0 \rangle|^2)$$

$$\sigma_{\text{reac}}(C + T) = \int d\mathbf{b} (1 - |e^{i\chi_{CT}(\mathbf{b})}|^2)$$

## 相互作用断面積

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\text{int}} &= \sum_{a \neq 0, c} \sigma_{ac} \\
 &= \int d\mathbf{b} \left[ 1 - \langle \Psi_0 \Theta_0 | \prod \prod (1 - \Gamma_{ij}(\mathbf{b})^*) | \Psi_0 \rangle \right. \\
 &\quad \left. \times \langle \Psi_0 | \prod \prod (1 - \Gamma_{ij}(\mathbf{b})) | \Psi_0 \Theta_0 \rangle \right] \\
 &= \sigma_{\text{reac}} - \sum_{c \neq 0} \sigma_{0c} \approx \sigma_{\text{reac}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{a \neq 0} |\Psi_a\rangle \langle \Psi_a| &= 1 - |\Psi_0\rangle \langle \Psi_0| \\
 \sum_c |\Theta_c\rangle \langle \Theta_c| &= 1
 \end{aligned}$$

ハロー核が基底状態にとどまり、  
標的核を励起する断面積は小さい

## ハロ一核子removal断面積

入射核は芯核(基底状態にある)と運動量 $\mathbf{k}$ のハロ一核子の状態に遷移

$$\begin{aligned}\sigma_{-N} &= \sum_c \int d\mathbf{k} \sigma_{a=(\mathbf{k},0)c} \\ &= \sum_c \int d\mathbf{k} |\phi_{\mathbf{k}} \Phi_0 \Theta_c\rangle \langle \phi_{\mathbf{k}} \Phi_0 \Theta_c| = |\Phi_0\rangle \langle \Phi_0| - |\phi_0 \Phi_0\rangle \langle \phi_0 \Phi_0| \\ &= 1 - |\Psi_0\rangle \langle \Psi_0| - (1 - |\Phi_0\rangle \langle \Phi_0|) \\ &\quad \sum_c |\Theta_c\rangle \langle \Theta_c| = 1 \quad \int d\mathbf{k} |\phi_{\mathbf{k}}\rangle \langle \phi_{\mathbf{k}}| = 1 - |\phi_0\rangle \langle \phi_0|\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{-N}(P + T) &= \sigma_{\text{int}}(P + T) - \sigma_{\text{int}}(C + T) \\ &\approx \sigma_{\text{reac}}(P + T) - \sigma_{\text{reac}}(C + T)\end{aligned}$$

Ogawa et al. Nucl. Phys. A543(1992)

$$\sigma_{-N} = \sum_c \int d\mathbf{k} \sigma_{a=(\mathbf{k},0)c}$$

Elastic breakup ( $c=0$ ) と Inelastic breakup ( $c \neq 0$ ) に分離

$$\bar{\sigma}_{-N} = \sigma_{-N}^{\text{el}} + \sigma_{-N}^{\text{inel}}$$

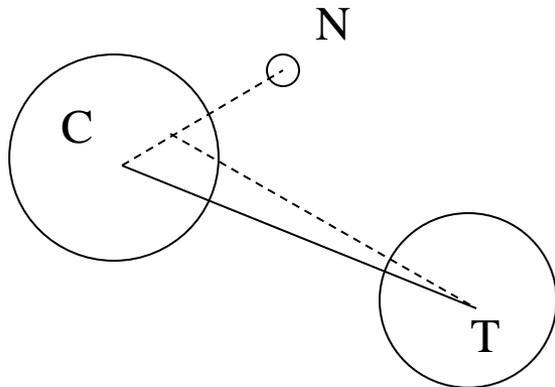
Ogawa et al. Nucl. Phys. A543(1992)

$$\sigma_{-N}^{\text{el}} = \int d\mathbf{b} \left\{ \langle \varphi_0 | e^{-2\text{Im}\chi_{CT}(\mathbf{b}_C) - 2\text{Im}\chi_{NT}(\mathbf{b}_C+s)} | \varphi_0 \rangle - \left| \langle \varphi_0 | e^{i\chi_{CT}(\mathbf{b}_C) + i\chi_{NT}(\mathbf{b}_C+s)} | \varphi_0 \rangle \right|^2 \right\}$$

標的核は励起されない

$$\sigma_{-N}^{\text{inel}} = \int d\mathbf{b} \langle \varphi_0 | e^{-2\text{Im}\chi_{CT}(\mathbf{b}_C) - 2\text{Im}\chi_{NT}(\mathbf{b}_C+s)} | \varphi_0 \rangle$$

標的核はハロー核子により励起されるが  
芯核によっては励起されない



芯核と標的核との相互作用は入射核の重心と標的核と間に作用するものに近いが少しずれる (潮汐力)

ハロー核子と標的核との相互作用が無くても elastic breakupは起こる (e.g. クーロンbreakup)

$$e^{i\chi_{\text{PT}}(\mathbf{b})} \rightarrow \langle \varphi_0 | e^{i\chi_{\text{CT}}(\mathbf{b}_C) + i\chi_{\text{NT}}(\mathbf{b}_C + \mathbf{s})} | \varphi_0 \rangle$$

## 計算の具体化

芯核、標的核の密度をuserがガウス型で用意

$$\rho(r) = \sum_i c_i e^{-a_i r^2}$$

$i\chi_{\text{CT}}(\mathbf{b})$   $i\chi_{\text{NT}}(\mathbf{b})$  の計算を解析的にするため  
ハロー核子の波動関数はuserの自前のもの  
或はcodeで作成したものを使用

$$U(r) = -V_0 f(r) + V_{1s}(\mathbf{l} \cdot \mathbf{s}) r_0^2 \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f(r) + V_{\text{Coul}}$$

$$f(r) = [1 + \exp(\frac{r-R}{a})]^{-1} \quad R = r_0 A_C^{1/3}$$

$$V_{1s} = 17 \text{ MeV}$$

$$\langle \varphi_0 | \Omega(\mathbf{b}, \mathbf{s}) | \varphi_0 \rangle \rightarrow \frac{1}{2j+1} \sum_{m=-j}^j \int d\mathbf{r} \varphi_{nljm}^*(\mathbf{r}) \Omega(\mathbf{b}, \mathbf{s}) \varphi_{nljm}(\mathbf{r}) \quad (\text{スピン座標の積分処理})$$

$$= \frac{1}{4\pi} \int d\mathbf{r} |u_{nlj}(r)|^2 \Omega(\mathbf{b}, \mathbf{s}).$$

$\mathbf{b}$ の方向には依存しない

断面積はハロー核子座標に関する積分及び衝突係数(1次元)に関する積分で得られる。

前者はモンテカルロ法により、後者は台形公式で行う。

# 計算できるもの

$icond1 = 0$  Codeがハロー核子の波動関数を生成  
 $1$  自前の波動関数を使う

$icond2 = 1$  全反応断面積、ハロー核子removal断面積  
 $2$  弾性散乱角分布  
 $3$  芯核の運動量分布

**react.out**  
**ang.out**

$icond2 = 3$  のとき

$icond3 = 1$   $\frac{d\sigma_{-N}^{inel}}{dP_{\parallel}} = \int dP_{\perp} \frac{d\sigma_{-N}^{inel}}{dP}$ 、反応機構によらない運動量分布

**momdist.out**

$2$   $\frac{d\sigma_{-N}^{inel}}{dP_{\parallel}} = \sum_{m_l=-l}^l \left( \frac{d\sigma_{-N}^{inel}}{dP_{\parallel}} \right)_{m_l}$

**comp.out**

$3$   $\left. \frac{d\sigma_{-N}^{inel}}{dP} \right|_{P_{\perp}=0}$

**per0.out**

モンテカルロ積分のチェック **nsdist.out** **MCtest.out**

位相差関数  $i\chi_{CT}(b), i\chi_{NT}(b)$  **phaseshift.out**

**csc.inp****wf.inp**

$$\Gamma(\mathbf{b}) = \frac{1 - i\alpha}{4\pi\beta} \sigma_{\text{NN}} e^{-b^2/2\beta}$$

$$\Gamma(\mathbf{b}) = \frac{1 - i\alpha}{2} \sigma_{\text{NN}} \delta(\mathbf{b})$$

Input files for the  $^{13}\text{C}+^{12}\text{C}$  system

csc.inp

12.0	13.0	12.0	$A_T, A_P, A_C$
6.0	6.0	6.0	$Z_T, Z_P, Z_C$
800.0			incident energy per nucleon (in MeV)
4.26	-0.07	0.21008	profile function ( $\sigma_{\text{NN}}$ in $\text{fm}^2$ , $\alpha, \beta$ in $\text{fm}^2$ )
1			$l$ (orbital angular momentum)
500000	2.5	-11213	Monte Carlo parameters ( $N_s, \delta, \text{irand}$ )
0			<i>icond1</i> (1: available, 0: not available)
1	0		<i>icond2, icond3</i>
20.0	10		max. angle (or momentum ) and number of points
2			number of Gaussians used to fit the target density
-1.23342874	0.462770142		coefficient, range (in $\text{fm}^{-2}$ )
1.38536085	0.373622826		
2			number of Gaussians used to fit the core density
-1.23342874	0.462770142		coefficient, range (in $\text{fm}^{-2}$ )
1.38536085	0.373622826		

wf.inp

70.0		initial depth $V_0$ of the optical potential (in MeV)
0.6		diffuseness parameter $a$ (in fm)
1.2		radius parameter $r_0$ (in fm)
-4.946		energy eigenvalue for the valence nucleon (in MeV)
0.5		$j$ -value of the valence-nucleon orbit
0		node number of the valence-nucleon orbit

i, ns distribution

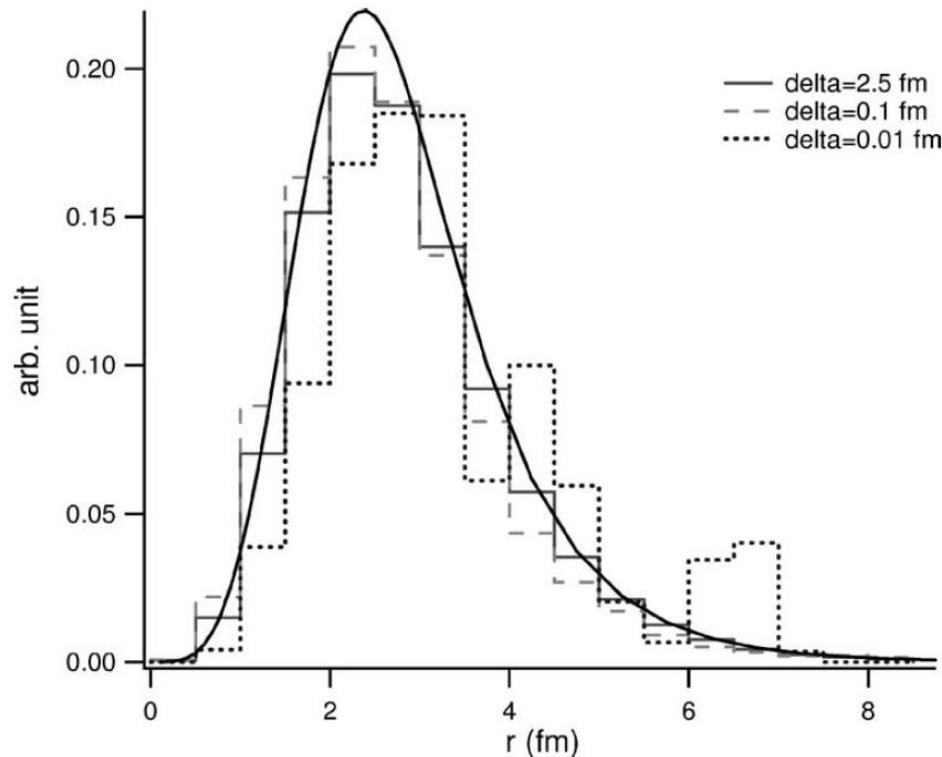
0.0000000000000000E+000	6.3800000000000000E-004
0.5000000000000000	1.4894000000000000E-002
1.0000000000000000	6.9950000000000000E-002
1.5000000000000000	0.1489540000000000
2.0000000000000000	0.1986700000000000
2.5000000000000000	0.1861380000000000
3.0000000000000000	0.1408100000000000
3.5000000000000000	9.304999999999999E-002
4.0000000000000000	5.8726000000000000E-002
4.5000000000000000	3.5294000000000000E-002
5.0000000000000000	2.1172000000000000E-002
5.5000000000000000	1.2658000000000000E-002
6.0000000000000000	7.4160000000000000E-003
6.5000000000000000	4.5440000000000000E-003
7.0000000000000000	2.6680000000000000E-003
7.5000000000000000	1.6380000000000000E-003
8.0000000000000000	9.8000000000000000E-004
8.5000000000000000	7.2800000000000000E-004

r, |u(r)|^2

0.2500000000000000	3.771107468492923E-004
0.7500000000000000	2.556442336691664E-002
1.2500000000000000	0.137294387052811
1.7500000000000000	0.304679315110752
2.2500000000000000	0.402735931179052
2.7500000000000000	0.376084330329547
3.2500000000000000	0.280833004319430
3.7500000000000000	0.184798626485129
4.2500000000000000	0.114374366920157
4.7500000000000000	6.904918385451099E-002
5.2500000000000000	4.138708898080567E-002
5.7500000000000000	2.481748153393734E-002
6.2500000000000000	1.493027834267444E-002
6.7500000000000000	9.018134602256618E-003
7.2500000000000000	5.468414307706130E-003
7.7500000000000000	3.327627517641249E-003
8.2500000000000000	2.031157457432592E-003
8.7500000000000000	1.243101361356758E-003

# nsdist.out

## Monte Carlo 積分に用いられる 生成点の分布のテスト



The probability distribution of  $N_s = 500,000$  points for different choices of the step size  $\delta$

solid curve  $r^2 |u_{nlj}(r)|^2$  multiplied by an appropriate constant value

## On Monitor

20.00000000000000	-9.094947017729282E-012
45.00000000000000	-3.64866854145475
57.50000000000000	-9.999999999999091
51.25000000000000	-6.80229630489521
48.12500000000000	-5.17572094128809
46.56250000000000	-4.39846862595914
47.34375000000000	-4.78384267987167
47.73437500000000	-4.97898936276215
47.53906250000000	-4.88121541166947
47.63671875000000	-4.93005255149001
47.68554687500000	-4.95450853738475
47.66113281250000	-4.94227743461124
47.67333984375000	-4.94839220914400
47.66723632812500	-4.94533462760046
47.67028808593750	-4.94686336981431
47.66876220703120	-4.94609898657473
47.66799926757810	-4.94571680404079
47.66838073730470	-4.94590789455287
47.66857147216800	-4.94600344037281
47.66847610473630	-4.94595566739918
47.66852378845210	-4.94597955387690
47.66854763031010	-4.94599149712485
47.66855955123900	-4.94599746873973
47.66856551170350	-4.94600045455627
47.66856253147130	-4.94599896163891
47.66856402158740	-4.94599970809759
47.66856476664540	-4.94600008131783
47.66856476664540	-4.94600008131783

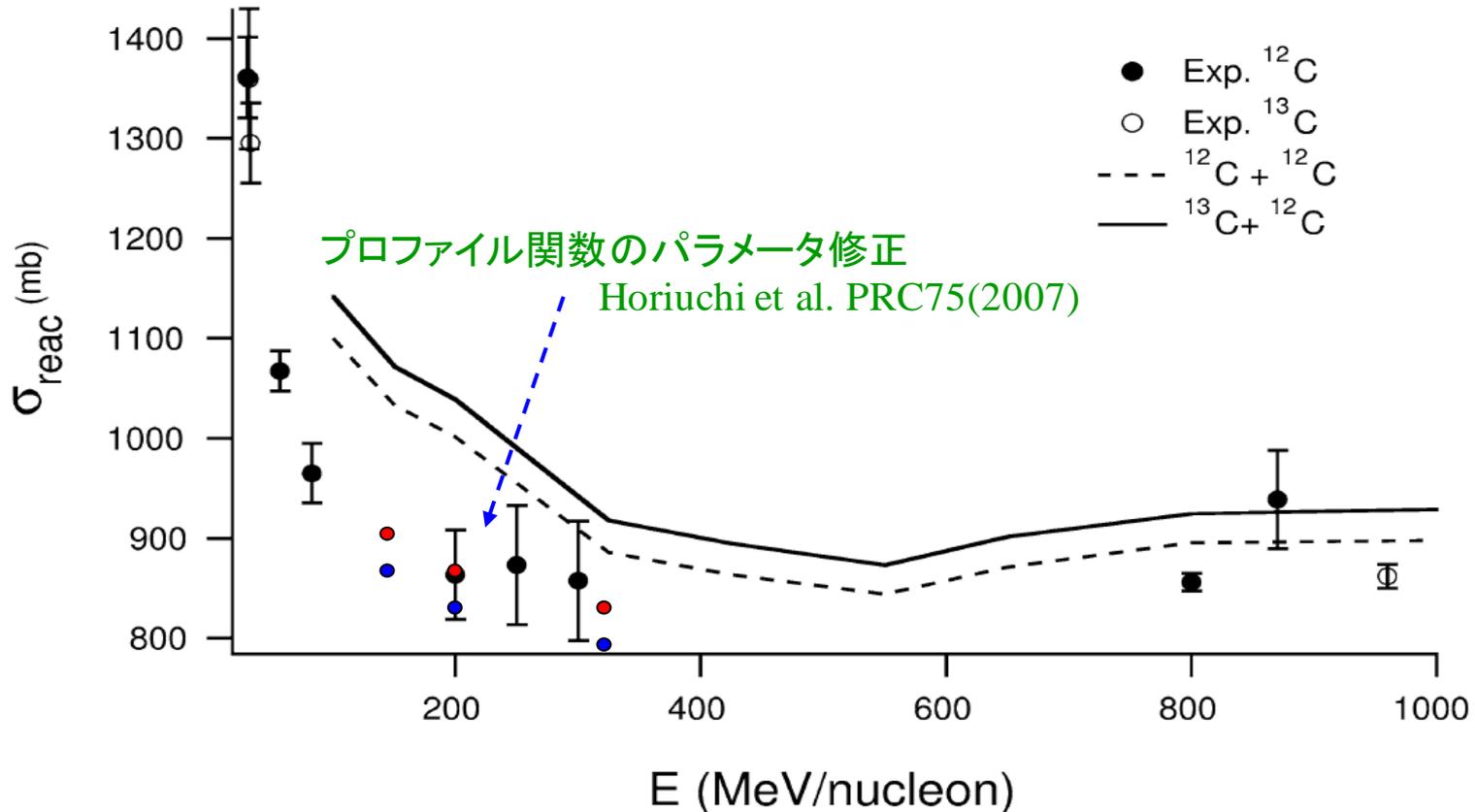
ハロー核子のエネルギーを与える  
ポテンシャルの深さの決定

potential depth= 47.6685647666454      energy= -4.94600008131783  
no. of points of w.f.=      3000  
mesh of w.f.= 1.0000000000000000E-002  
norm= 0.9999999999999816  
radius-rms (fm)= 3.09134982549623  
The results printed in the file reac.out.

# $^{13}\text{C}+^{12}\text{C}$ 全反応断面積

react.out

Projectile:mass= 13.000000000000000 charge= 6.000000000000000  
Target:mass= 12.000000000000000 charge= 6.000000000000000  
Energy (MeV/nucleon) 800.0000000000000  
Proj. reaction cross section (mb) 924.591208908092  
Core reaction cross section (mb) 894.721068317768  
N-removal cross section (mb) 29.7797261259063  
N-removal (elastic) (mb) 3.53765343360972  
N-removal (inelastic) (mb) 26.2420726922966



# $^{19}\text{C} + ^{12}\text{C}$ ハロー中性子removal断面積

```

12.d0 19.d0 18.d0
6.d0 6.d0 6.d0
800.d0
4.26d0 -0.07d0 0.21008d0
0
500000 2.5d0 -87651
0
1 0
20.0 10
2
-1.23342874d0 0.462770142d0
1.38536085d0 0.373622826d0
2
3.641632 0.277710327
-3.536232 0.298798802

```

```

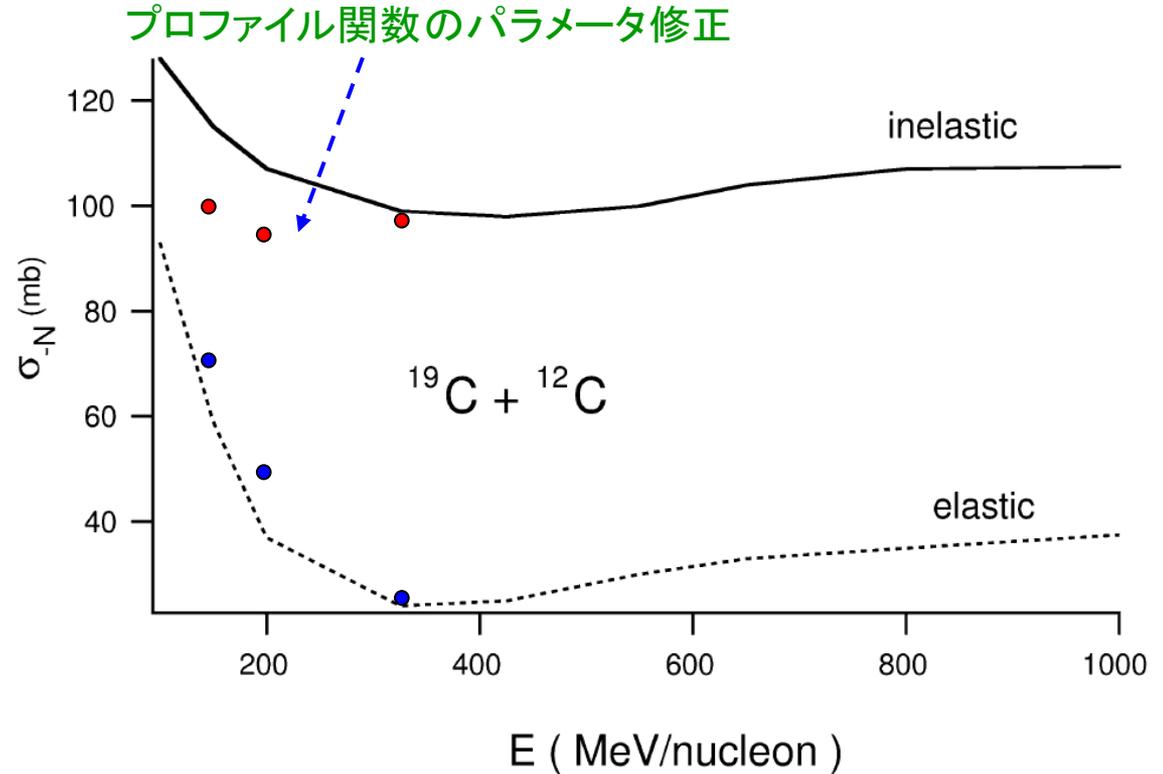
70.0
0.60
1.20
-0.24
0.5
1

```

```

potential depth= 42.9282505810261  energy= -0.239999959949273
no. of points of w.f.= 3000
mesh of w.f.= 1.0000000000000000E-002
norm= 1.0000000000000076
radius-rms (fm)= 8.46859444361747
The results printed in the file reac.out.

```



## 弹性散乱角分布

(39頁参照)

$$F(\mathbf{q}) = e^{i\chi_s} \left\{ F_{\text{Coul}}(\mathbf{q}) + \frac{iK}{2\pi} \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b} + 2i\eta \ln(Kb)} (1 - \langle \varphi_0 | e^{i\chi_{\text{CT}}(\mathbf{b}_C) + i\chi_{\text{NT}}(\mathbf{b}_C + \mathbf{s})} | \varphi_0 \rangle) \right\}$$

$$F_{\text{Coul}}(\mathbf{q}) = -\frac{2\eta K}{q^2} \exp \left\{ -2i\eta \ln \left( \frac{q}{2K} \right) + 2i \arg \Gamma(1 + i\eta) \right\}$$

$$\chi_s = -2\eta \ln(2Ka)$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |F(\mathbf{q})|^2$$

$$\frac{d\sigma_{\text{Ruth}}}{d\Omega} = |F_{\text{Coul}}(\mathbf{q})|^2$$

# $^{11}\text{Be}+^{12}\text{C}$ 弹性散乱角分布

12.d0 11.d0 10.d0  
6.d0 4.d0 4.d0  
49.3d0  
10.4d0 0.94d0 0.389719526  
0  
500000 2.5d0 -87651  
0  
2 0  
20.0 20  
2  
-1.23342874d0 0.462770142d0  
1.38536085d0 0.373622826d0  
5  
0.431424 0.348220487  
-0.2703851 0.741007304  
7.5928909d-3 0.169025886  
2.9563738d-4 0.089822028  
4.0531981d-7 0.031585001

70.0  
0.60  
1.20  
-0.503  
0.5  
1

potential depth= 62.9715968668461 energy= -0.503000022172273  
no. of points of w.f.= 3000  
mesh of w.f.= 1.0000000000000000E-002  
norm= 1.000000000000031  
radius-rms (fm)= 6.89928071200524  
max. angle= 20.00000000000000  
angle mesh= 1.0000000000000000  
The results printed in the file ang.out.

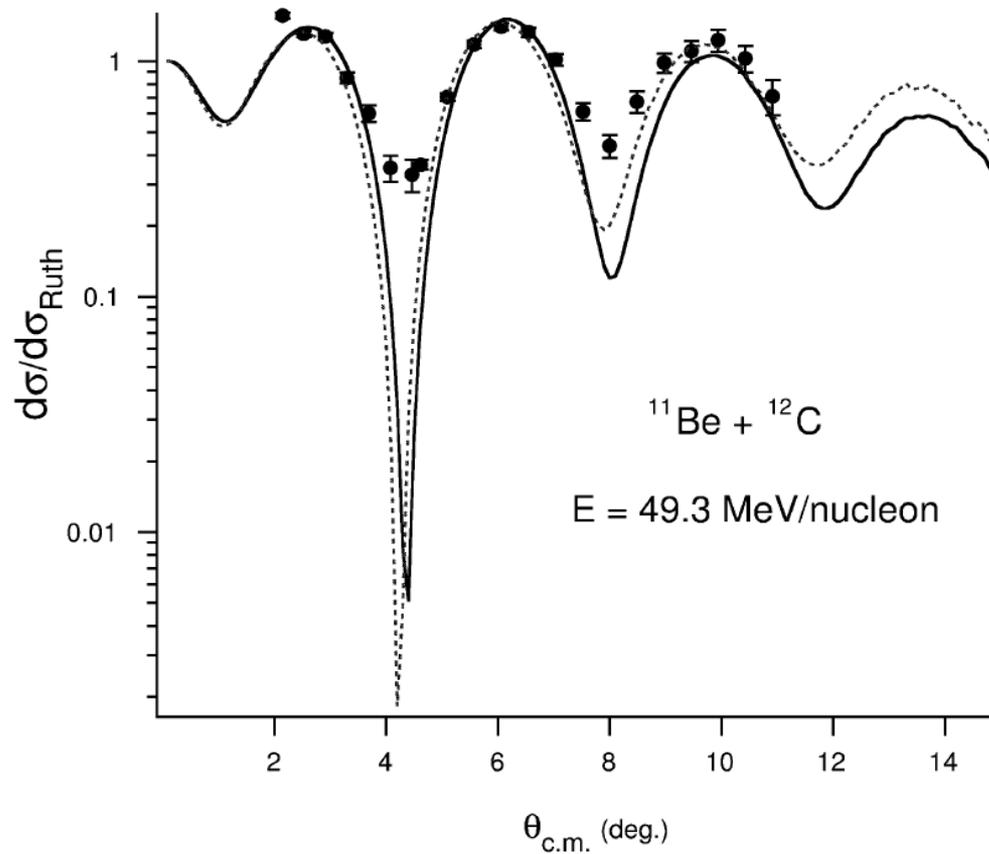
**ang.out**

---

theta[deg.]	(ds/dR)_P	(ds/dR)_C
1.0000000000000000	0.569380473828731	0.590802719239604
2.0000000000000000	1.08478427844810	0.952817842195523
3.0000000000000000	1.24200034575921	1.52278183508574
4.0000000000000000	0.152687140746571	0.554542664591669
5.0000000000000000	0.425991643726920	8.521274186138170E-002
6.0000000000000000	1.47952145615889	1.40714735417807
7.0000000000000000	0.902025083300844	1.84634550595928
8.0000000000000000	0.120275564298211	0.614393721181272
9.0000000000000000	0.677044030971754	0.312777586154410
10.0000000000000000	1.05489382859207	1.32795805993269
11.0000000000000000	0.512782093756856	1.52853608206312
12.0000000000000000	0.248154302982949	0.724569287742850
13.0000000000000000	0.507935565764858	0.471635933186167
14.0000000000000000	0.550048581482413	0.919980343620035
15.0000000000000000	0.302980690356101	1.03995063570501
16.0000000000000000	0.206559706991014	0.672702271982074
17.0000000000000000	0.250287864255740	0.445852216207505
18.0000000000000000	0.232001959843641	0.526061090404805
19.0000000000000000	0.145290623538747	0.572267417639367
20.0000000000000000	0.111350032636181	0.444236509663115

## Folding模型の近似

$$\langle \varphi_0 | e^{i\chi_{CT}(b_C) + i\chi_{NT}(b_C + s)} | \varphi_0 \rangle \rightarrow e^{\langle \varphi_0 | i\chi_{CT}(b_C) + i\chi_{NT}(b_C + s) | \varphi_0 \rangle}$$



点線はfolding模型の角分布

## ハロー核子removal反応での芯核の運動量分布

入射核への移行運動量  $q$ 、芯核の運動量  $P$ 、ハロー核子の運動量  $p_N$

$$\mathbf{q} = \mathbf{P} + \mathbf{p}_N \quad \mathbf{k} = \frac{1}{A_P}(A_C \mathbf{p}_N - \mathbf{P}) \quad \rightarrow \quad \mathbf{P} = \frac{A_C}{A_P} \mathbf{q} - \mathbf{k}$$

inelastic breakupによる縦方向の運動量分布を計算する。このとき、ハロー核子の波動関数  $\phi_k$  は平面波で近似して計算してもよいと期待される。elastic breakupについては、正しい波動関数を使うことが望ましい。基底状態の軌道に直交させた平面波で近似的に計算してもかなり良い。

Abu-Ibrahim, Suzuki. PTP112 (2004)

芯核の運動量分布

$$\frac{d\sigma_{-N}}{d\mathbf{P}} = \int d\mathbf{q} \int d\mathbf{k} \delta\left(\mathbf{P} - \frac{A_C}{A_P} \mathbf{q} + \mathbf{k}\right) \frac{d\sigma_{-N}}{d\mathbf{q}d\mathbf{k}}$$

$$\frac{d\sigma_{-N}}{d\mathbf{q}d\mathbf{k}} = \frac{1}{K^2} \sum_{c \neq 0} |F_{a=(\mathbf{k}0)c}(\mathbf{q})|^2$$

$$\delta\left(\mathbf{P} - \frac{A_C}{A_P} \mathbf{q} + \mathbf{k}\right) = \delta\left(\mathbf{P}_\perp - \frac{A_C}{A_P} \mathbf{q}_\perp + \mathbf{k}_\perp\right) \delta(P_\parallel + k_z)$$

Suzuki et al., Structure and reactions of light exotic nuclei  
(2003, Taylor & Francis, London & New York)

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{-N}^{\text{inel}}}{d\mathbf{P}} &= \int d\mathbf{b}_N (1 - e^{-2\text{Im}\chi_{\text{NT}}(\mathbf{b}_N)}) \\ &\quad \times \frac{1}{(2\pi\hbar)^3} \frac{1}{2j+1} \sum_{mm_s} \left| \int d\mathbf{r} e^{\frac{i}{\hbar}\mathbf{P}\cdot\mathbf{r}} \chi_{\frac{1}{2}m_s}^* e^{i\chi_{\text{CT}}(\mathbf{b}_N-s)} \varphi_{nljm}(\mathbf{r}) \right|^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{-N}^{\text{inel}}}{dP_{\parallel}} &= \int d\mathbf{P}_{\perp} \frac{d\sigma_{-N}^{\text{inel}}}{d\mathbf{P}} \\ &= \frac{1}{2\pi\hbar} \int d\mathbf{b}_N (1 - e^{-2\text{Im}\chi_{\text{NT}}(\mathbf{b}_N)}) \int ds e^{-2\text{Im}\chi_{\text{CT}}(\mathbf{b}_N-s)} \\ &\quad \times \int dz \int dz' e^{\frac{i}{\hbar}P_{\parallel}(z-z')} u_{nlj}^*(r') u_{nlj}(r) \frac{1}{4\pi} P_l(\hat{\mathbf{r}}' \cdot \hat{\mathbf{r}}) \end{aligned}$$

$$\int dP_{\parallel} \frac{d\sigma_{-N}^{\text{inel}}}{dP_{\parallel}} = \sigma_{-N}^{\text{inel}}$$

$$\frac{d\sigma_{-N}^{\text{inel}}}{dP_{\parallel}} = \sum_{m_l=-l}^l \left( \frac{d\sigma_{-N}^{\text{inel}}}{dP_{\parallel}} \right)_{m_l}$$

$$\left( \frac{d\sigma_{-N}^{\text{inel}}}{dP_{\parallel}} \right)_{m_l} = \frac{1}{2\pi\hbar} \int db_N (1 - e^{-2\text{Im}\chi_{\text{NT}}(b_N)}) \int ds e^{-2\text{Im}\chi_{\text{CT}}(b_N-s)}$$

$$\times \frac{1}{2l+1} \left| \int dz e^{\frac{i}{\hbar}P_{\parallel}z} u_{nlj}(r) Y_{lm_l}(\hat{r}) \right|^2$$

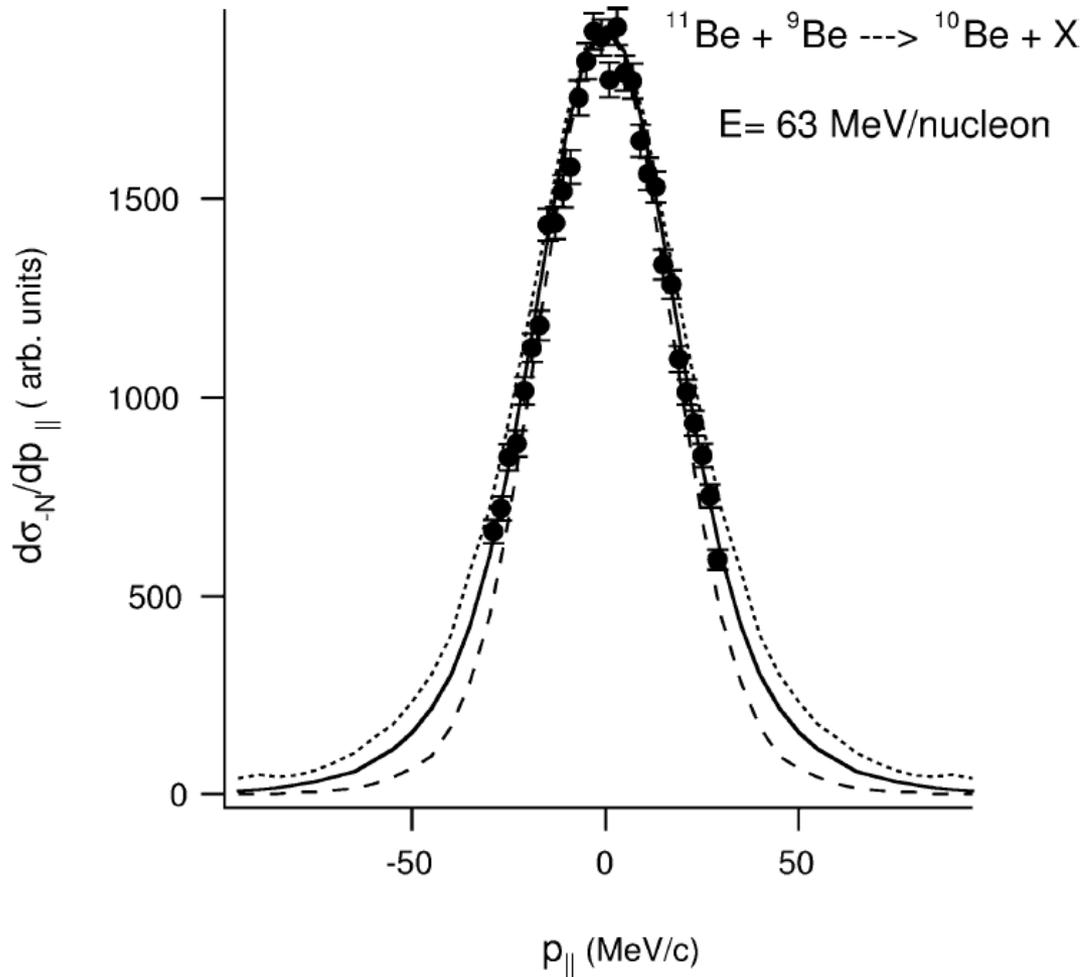
$$\frac{d\sigma_{-N}^{\text{inel}}}{dP} \Big|_{P_{\perp}=0}$$

ハロ一核子の波動関数の運動量分布(反応のダイナミクスによらないもの)

$$\rho(P_{\parallel}) = \frac{1}{2\pi\hbar} \int ds \int dz \int dz' e^{\frac{i}{\hbar}P_{\parallel}(z-z')} u_{nlj}^*(r') u_{nlj}(r) \frac{1}{4\pi} P_l(\hat{r}' \cdot \hat{r})$$

$$= \frac{1}{2\pi\hbar} \frac{1}{2l+1} \sum_{m_l=-l}^l \int ds \left| \int dz e^{\frac{i}{\hbar}P_{\parallel}z} u_{nlj}(r) Y_{lm_l}(\hat{r}) \right|^2$$

# $^{11}\text{Be} + ^9\text{Be}$ 反応での $^{10}\text{Be}$ の運動量分布



$n=1, l=0,$   
 $E = -0.503 \text{ MeV}$

実線

正しく計算

ダッシュ線

$\left. \frac{d\sigma_{-N}^{\text{inel}}}{dP} \right|_{P_{\perp}=0}$

点線

$\rho(P_{\parallel})$

# $^8\text{B} + ^{12}\text{C}$ 反応での $^7\text{Be}$ の運動量分布

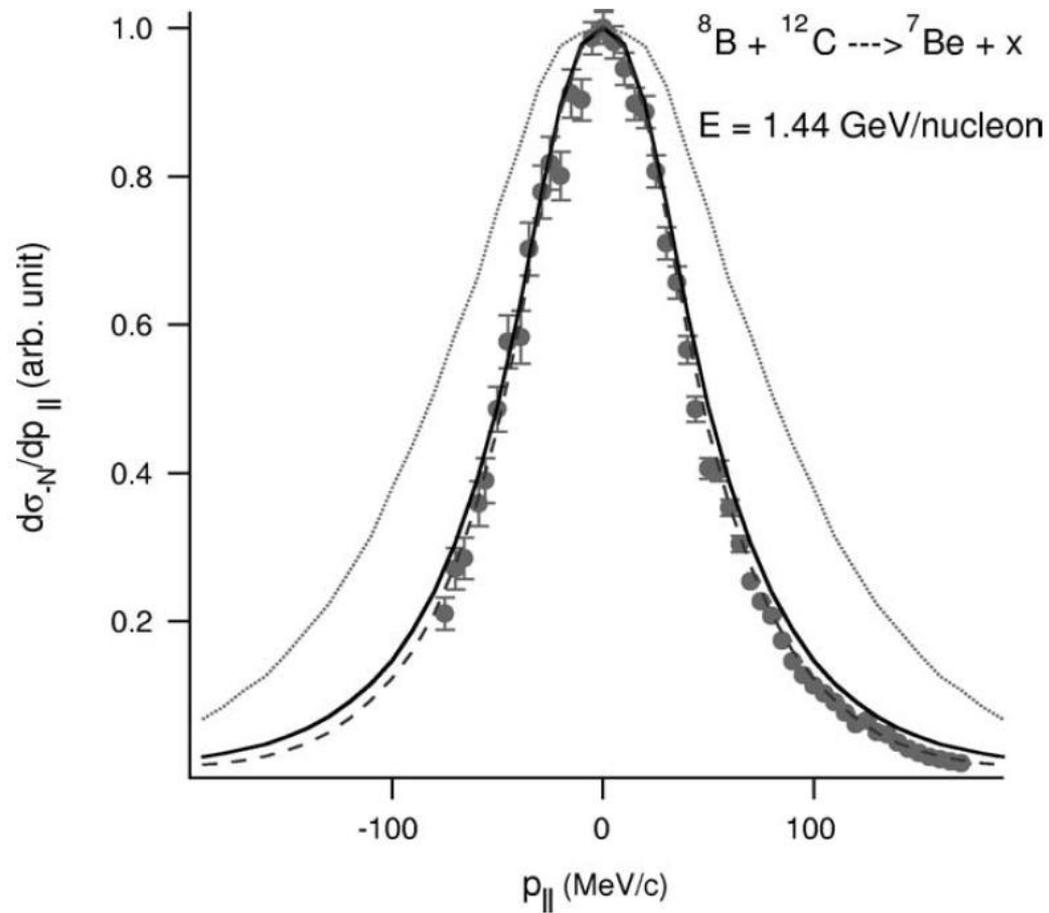
12.0 8.0 7.0  
6.0 5.0 4.0  
1470.0  
4.32 -0.275 0.210084033  
1  
500000 2.5 -87651  
0  
3 2  
100 20  
2  
-1.23342874 0.462770142  
1.38536085 0.373622826  
3  
0.1571397 0.200311441  
0.2755311 0.269658254  
-0.2419691 0.212919207

$n=0, l=1,$   
 $E=-0.137\text{MeV}$

potential depth= 46.9179053604603 energy= -0.137000081986116  
no. of points of w.f.= 3000  
mesh of w.f.= 1.0000000000000000E-002  
norm= 0.999999999999893  
radius-rms (fm)= 4.30705251202434  
max. momentum= 100.0000000000000  
step of the momentum= 5.000000000000000  
The results printed in the file comp.out.

---

70.0  
0.60  
1.20  
-0.137  
1.5  
0



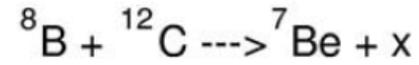
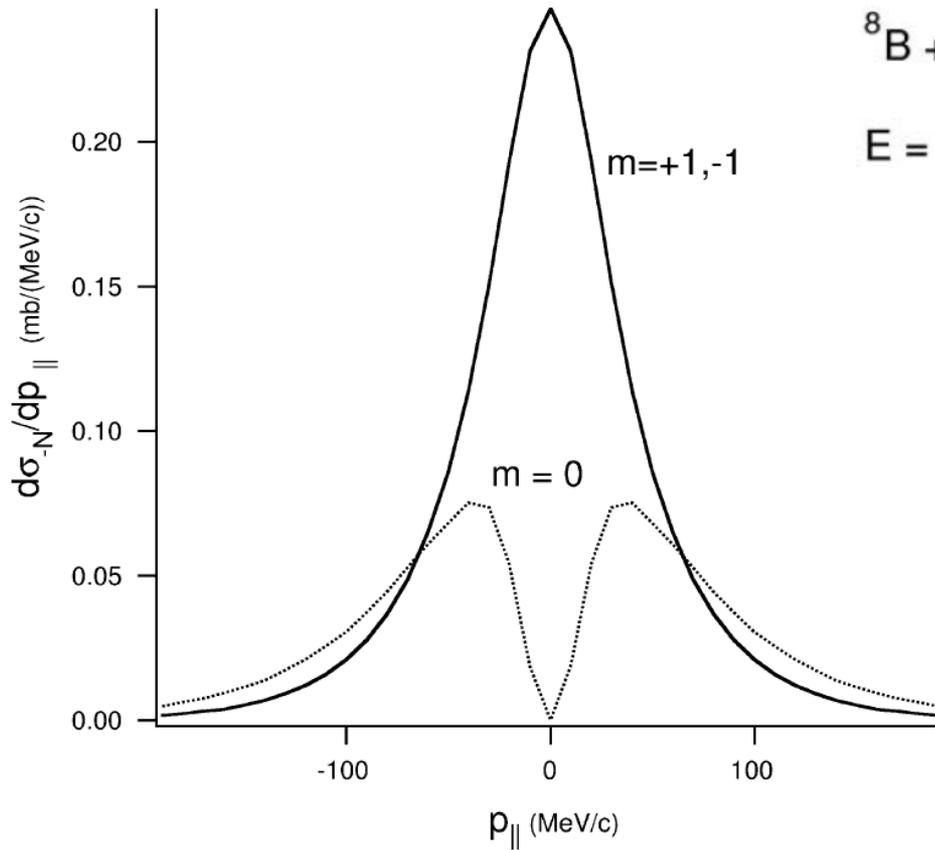
実線  
 点線

正しく計算  
 $\rho(P_{||})$

**comp.out**

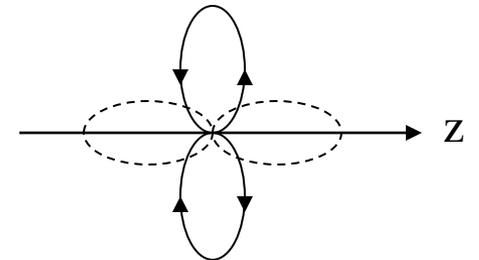
```
P|[MeV/c] (ds/dpz)[mb/(MeV/c)]
m=      0
0.0000000000000000E+000 3.715372942721051E-003
5.0000000000000000      8.308433004457069E-003
10.000000000000000     2.067766276834806E-002
15.000000000000000     3.720235769200932E-002
      ..
      ..
      ..
85.000000000000000     4.108598449724087E-002
90.000000000000000     3.762016084519255E-002
95.000000000000000     3.432401201944979E-002
m=      1
0.0000000000000000E+000 0.247918199800764
5.0000000000000000      0.244076536138137
10.000000000000000     0.233126388140145
15.000000000000000     0.216621228395605
      ..
      ..
      ..
85.000000000000000     3.320408397604061E-002
90.000000000000000     2.867659805353214E-002
95.000000000000000     2.468343005457487E-002
```

# $m_l$ の異なる軌道の運動量分布への寄与



$E = 1.44$  GeV/nucleon

$m = \pm 1$  の軌道が breakup により大きな寄与をする



## CPCコードの諸課題

1. OLA近似を改良する
2. 陽子-陽子、陽子-中性子のプロファイル関数を区別する
3. スピン軌道ポテンシャルの強さを変える、特に芯核が中性子過剰核の場合
4. Folding模型の弾性散乱角分布や光学ポテンシャルの計算を含める
5. クーロン相互作用によるbreakupを含める
6. Elastic breakupによる運動量分布の計算を含める
7. 全反応断面積と相互作用断面積の差の分析

その他重要な拡張として

    芯核が励起する場合

    2中性子ハロー核の場合

上記1-5の課題は解決しており、問題はない。6は`time-dependent` アイコナール方程式(52頁参照)を解けばよいことが分かっている。或は、運動量 $k$ のハロー波動関数を基底状態に直交化した平面波で近似すればほぼよく、計算も簡単。

質量数がより大きい原子核でのテストはしていない。

標的核や芯核の密度を与える妥当で簡便な処方箋も試した。

2中性子ハロー核の断面積も、芯核+2核子の3体問題で波動関数をつくり、計算した。

## 6.2 Key words: 平均場の密度、分析の具体例

### 簡単なポテンシャル模型による密度の計算

占有軌道を指定してSlater determinat 波動関数を仮定  
 $S_n, S_p$ を再現する $V_0$ を決める  
 中性子、陽子密度を計算する  
 重心運動の影響を除いたintrinsic密度を求める  
 奇核は芯核+n、2中性子ハロー核は芯核+2nの2体、3体  
 問題を解いてより精密な波動関数を求める

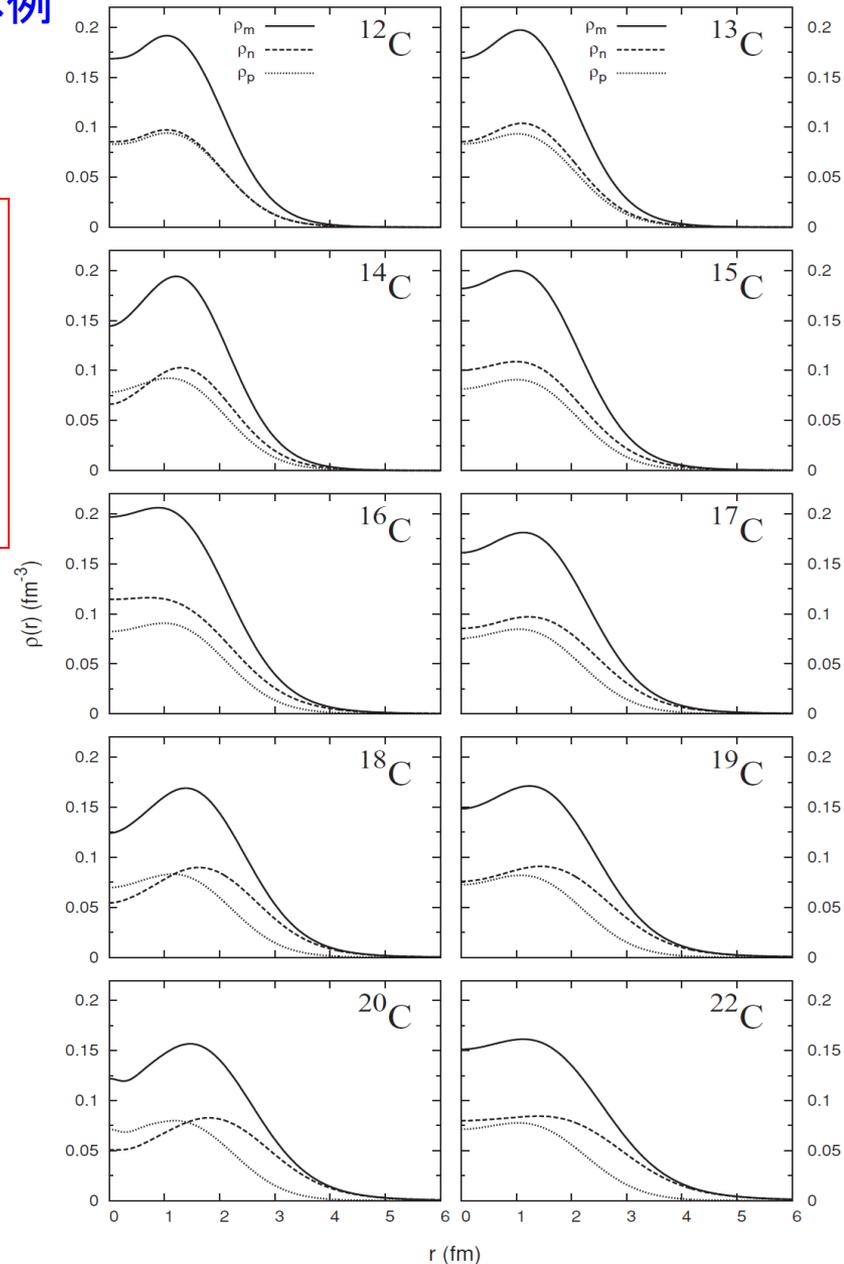
### 1粒子軌道を決める1体ポテンシャル

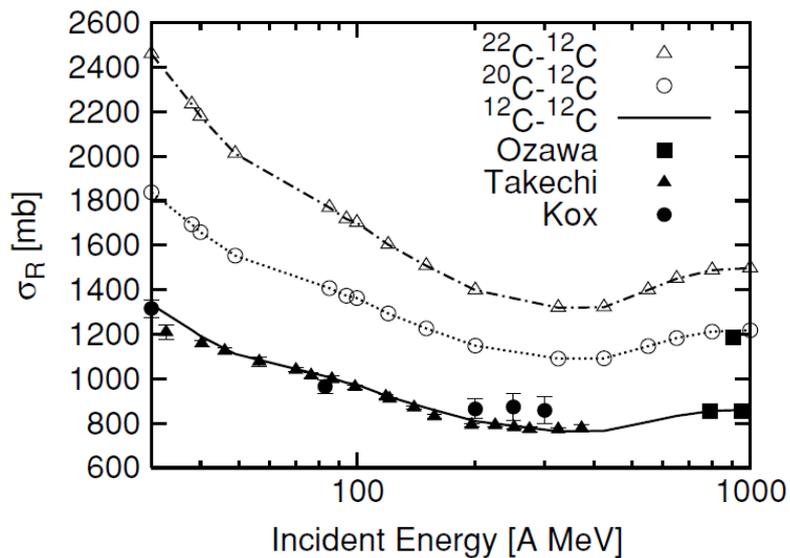
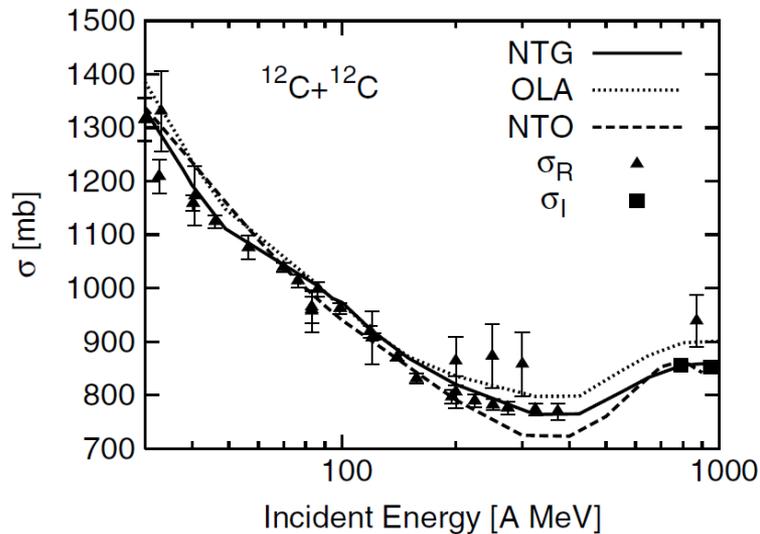
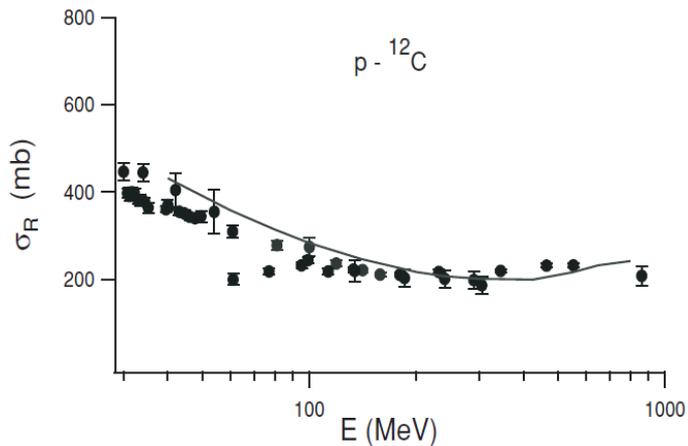
$$U(r) = -V_0 f(r) + V_1 r_0^2 \ell \cdot s \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f(r) + V_c(r) \frac{1 - \tau_3}{2}$$

$$V_1 = 22 - 14 \frac{N - Z}{A} \tau_3$$

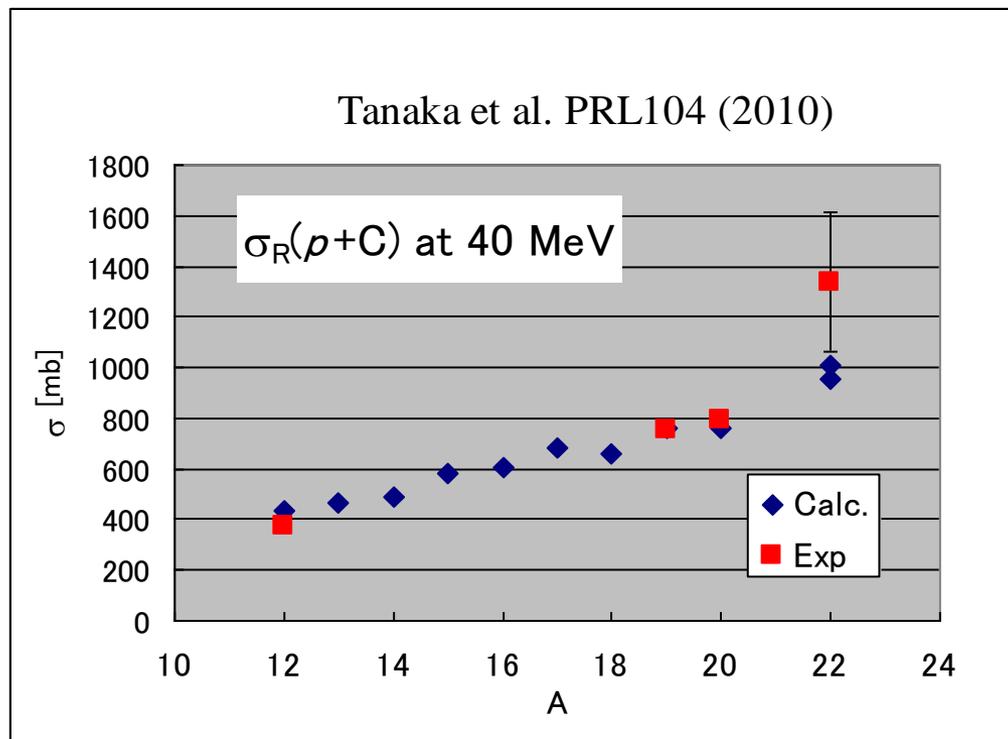
Horiuchi et al. PRC75 (2007)

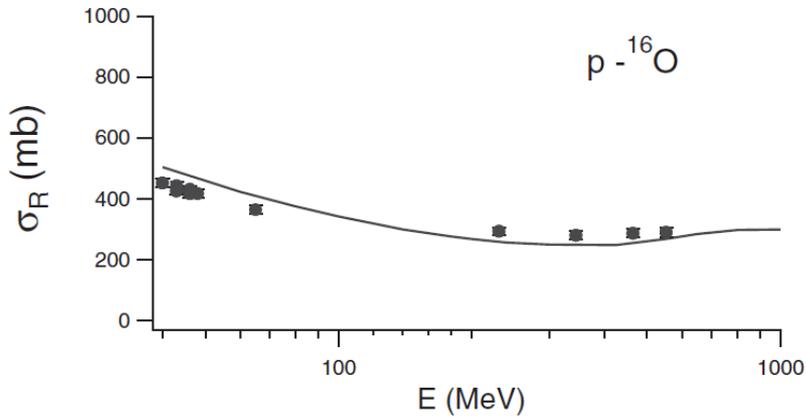
Abu-Ibrahim et al. PRC77 (2008)



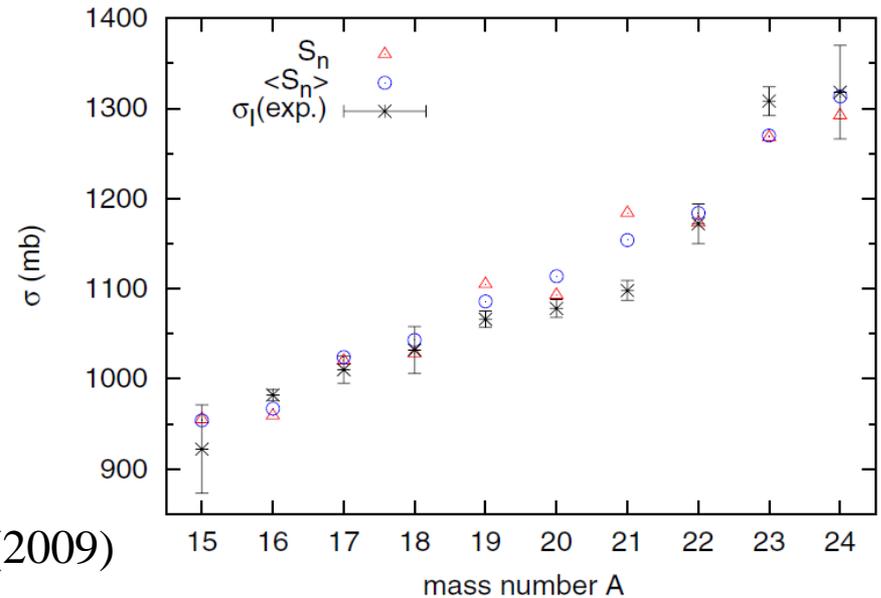


Horiuchi, Suzuki, PRC74(2006)





Abu-Ibrahim et al., JPSJ78(2009)



$^{23}\text{O}$  puzzle:

$^{22}\text{O}$ : closed shell ( $Z=8, N=14$ )

$^{23}\text{O} = ^{22}\text{O} + n$  ( $S_n = 2.73\text{MeV}$ )

theory predicts smaller  $\sigma$  than exp.

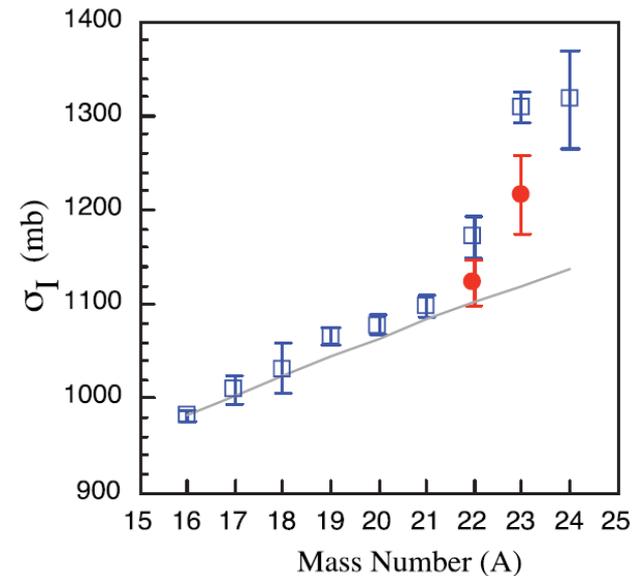
core deformation?

**Remeasurement** by Kanungo et al.

significant reduction in  $\sigma$

the increase of  $\sigma$  from  $^{22}\text{O}$  to  $^{23}\text{O}$

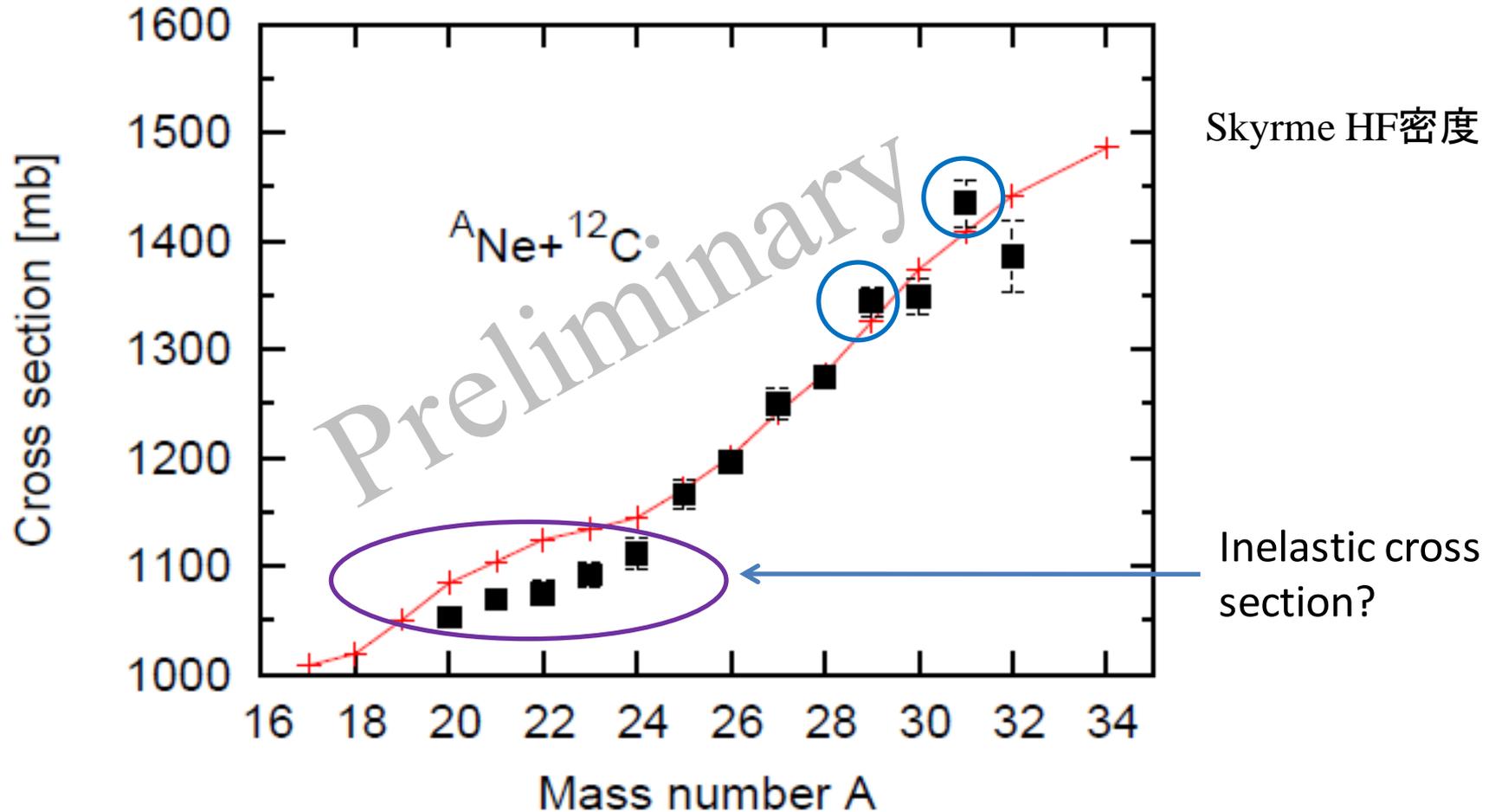
is well reproduced by the theory



Kanungo et al., PRC84(2011)

# Ne isotopes at 240AMeV

Horiuchi, Inakura, Nakatsukasa, Suzuki



Takechi et al., Phys. Lett. B707 (2012)

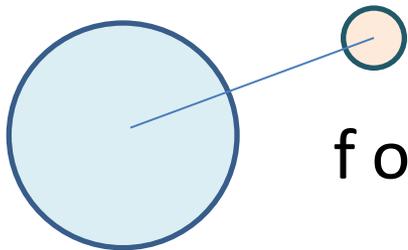
# Reaction cross sections of $^{31}\text{Ne}$ on C

Horiuchi, Suzuki, Capel, Baye, PRC81(2010)

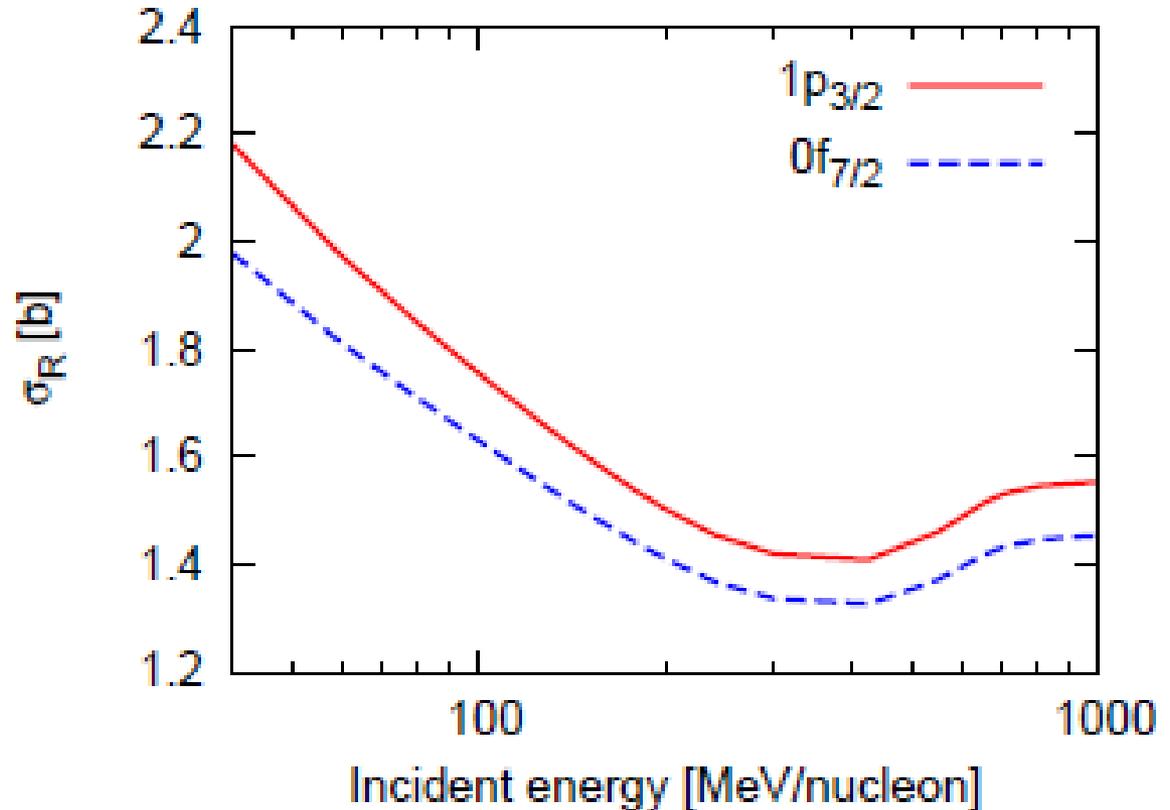
$^{30}\text{Ne}$ : Slater det.

$^{31}\text{Ne}$ :  $^{30}\text{Ne}+n$

( $S_n=0.33$  MeV)



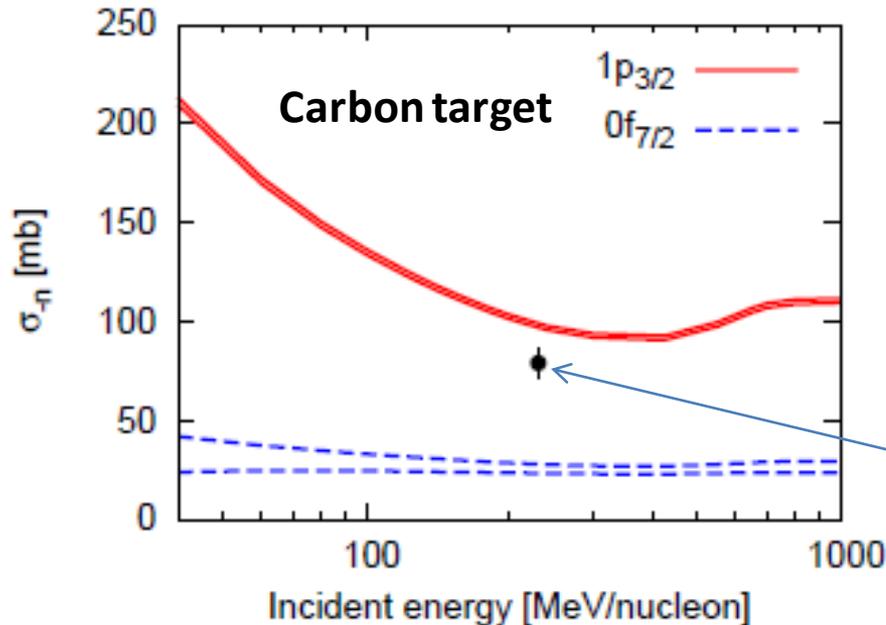
f or p?



Reaction cross sections strongly depend on the valence neutron orbit

# One-neutron removal cross section

Horiuchi, Suzuki, Capel, Baye, PRC81(2010)



$$\sigma_{-n} \approx \sigma_R(^{31}\text{Ne}) - \sigma_R(^{30}\text{Ne})$$

$$\sigma_{-n}(1p_{3/2}) \gg \sigma_{-n}(0f_{7/2})$$

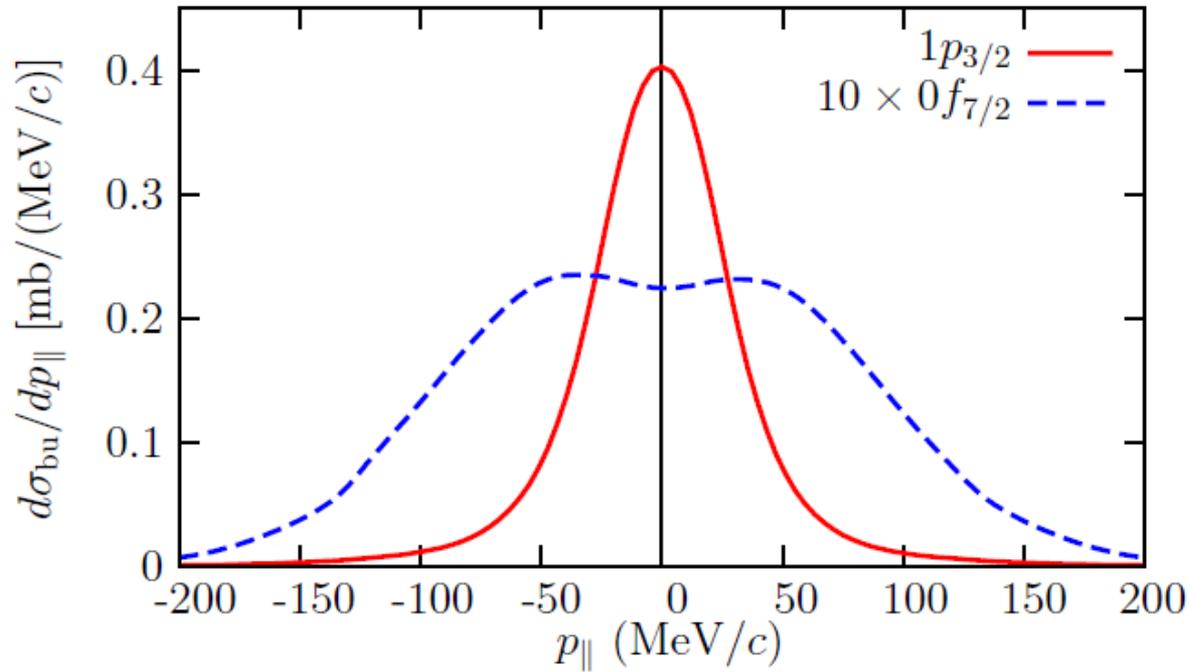
Nakamura et al., PRL103(2009)

Lead target at 240 MeV/u

Nuclear and Coulomb contributions

$$\sigma_{-n}(1p_{3/2}) = 1.14 \text{ b}, \quad \sigma_{-n}(0f_{7/2}) = 91 \text{ mb}$$

$$\sigma_{\text{exp}} = 712(65) \text{ mb} \rightarrow \mathbf{1p_{3/2} \text{ dominance}}$$



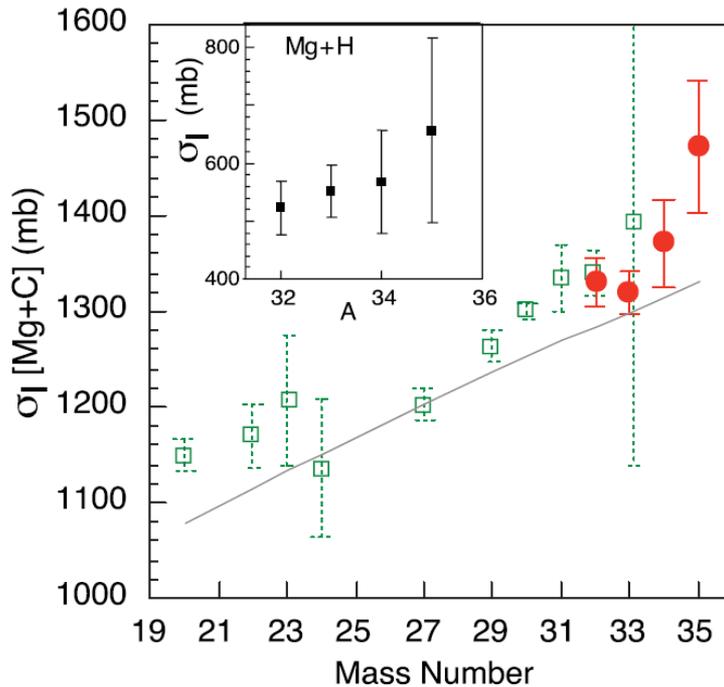
$^{12}\text{C}$ による $^{31}\text{Ne}$ のelastic breakupの運動量分布

Capel, Horiuchi, Suzuki, Baye, Mod. Phys. Lett. A25 (2010)

# Mg isotope on C at 900 MeV/A

Fermi分布の密度を仮定し、  
a, r<sub>0</sub>によるσの変化をみた

Kanungo et al., PRC83(2011)



相互作用断面積のデータからは $^{33}\text{Mg}$ のほうが  
 $^{32}\text{Mg}$ より小さいように想像される。本当か？

$^{32}\text{Mg}$ :  $N=20$ ,  $S_n=5.79\text{MeV}$

$^{33}\text{Mg}$ :  $S_n=2.21\text{MeV}$

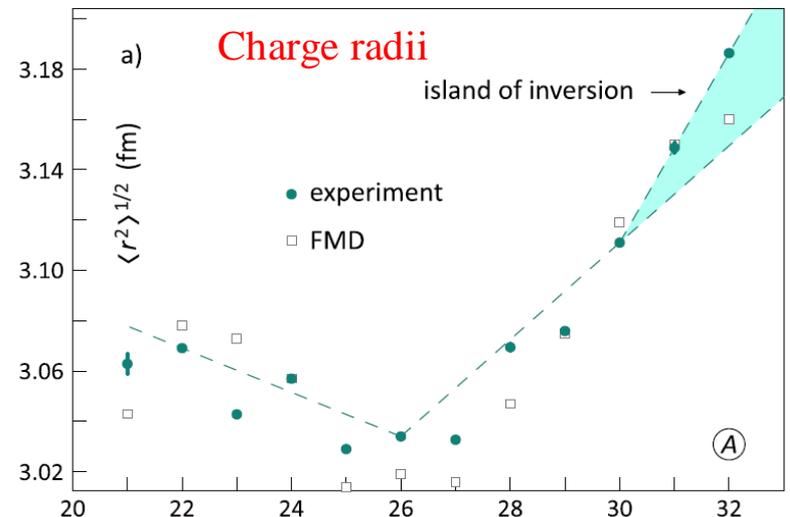
新たなパズル？

TABLE I. Measured interaction cross sections and the rms [ $R_{\text{rms}}^m$  (ex)] matter radii for  $^{32-35}\text{Mg}$  extracted from them are compared with the HF and RMF predictions.

Isotope	$\sigma_I^C$ (mb)	$\sigma_I^H$ (mb)	$R_{\text{rms}}^m$ (ex) (fm)	HF [6] <sup>a</sup> (fm)	RMF [20] (fm)
$^{32}\text{Mg}$	1331(24)	523(47)	$3.17 \pm 0.11$	3.20	3.21
$^{33}\text{Mg}$	1320(23)	552(45)	$3.19 \pm 0.03$	3.23	3.26
$^{34}\text{Mg}$	1372(46)	568(90)	$3.23 \pm 0.13$	3.26	3.33
$^{35}\text{Mg}$	1472(70)	657(160)	$3.40 \pm 0.24$	3.30	3.38

<sup>a</sup>The values are read from [6].

Yordanov et al. PRL108(2012)



1. Introduction
2. Basics of potential scattering theory
3. Eikonal approximation
4. Glauber approximation for nuclear collision
5. Nucleon-nucleon profile function and calculation of phase shift function

## **6. Case of halo nuclei**

6.1 ハロ一核、諸断面積の計算法

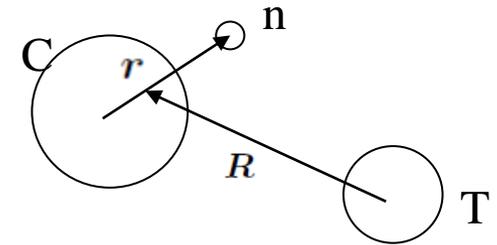
6.2 平均場の密度、分析の具体例

7. Elastic scattering and dynamic polarization potential
8. Breakup processes with Coulomb interaction

# 7. Elastic scattering and dynamic polarization potential

## 7.1 Key words: アイコナル位相、光学ポテンシャル

1中性子ハロー核の弾性散乱におけるbreakup効果  
光学ポテンシャルへの影響をアイコナル近似で求める



$$\left[ \frac{P^2}{2M_{PT}} + H_{nC} + V_{CT} \left( R - \frac{r}{A_P} \right) + V_{nT} \left( R + \frac{A_P - 1}{A_P} r \right) \right] \Psi(R, r) = E \Psi(R, r)$$

$$H_{nC} \phi_0(r) = \varepsilon_0 \phi_0(r)$$

$$H_{nC} \phi_{\mathbf{k}}(r) = (\hbar^2 k^2 / 2\mu) \phi_{\mathbf{k}}(r)$$

$V_{CT}$   $V_{nT}$ は光学ポテンシャル  
芯核と標的核のクーロン相互作用は無視できるとする

$$\Psi(R, r) = e^{iKZ} \hat{\Psi}(R, r)$$

$$\left[ vP_z + \frac{P^2}{2M_{PT}} + (H_{nC} - \varepsilon_0) + V_{CT} \left( R - \frac{r}{A_P} \right) + V_{nT} \left( R + \frac{A_P - 1}{A_P} r \right) \right] \hat{\Psi}(R, r) = 0$$

アイコナル近似及び断熱近似

アイコンール近似:  $R$  の垂直成分  $b$  がパラメータとして扱える

断熱近似: ハロ一核子のbreakupの周期  $\Delta t_H$  が標的核と入射核の衝突時間  $\Delta t$  より十分長いことが条件

核子当り50MeVの衝突で  $R_H = 10 \text{ fm}$   $\varepsilon_0 = -0.5 \text{ MeV}$  のとき

$$\Delta t_H = \hbar/|\varepsilon_0| = 1.3 \times 10^{-21} \text{ s} \quad \Delta t \simeq 2R_H/v = 2 \times 10^{-22} \text{ s}$$

(クーロン力に対しては衝突時間が極めて長くなることに注意)

アイコンール近似の解

$$\hat{\Psi}(R, r) = \exp \left\{ \frac{1}{i\hbar v} \int_{-\infty}^Z dZ' \left[ V_{CT} \left( \mathbf{b} + Z\hat{z} - \frac{\mathbf{r}}{A_P} \right) + V_{nT} \left( \mathbf{b} + Z\hat{z} + \frac{A_P - 1}{A_P} \mathbf{r} \right) \right] \right\} \phi_0(r)$$

$$Z \rightarrow \infty \quad \hat{\Psi}(\mathbf{b}, r) = e^{i\chi_{CT}(\mathbf{b} - \frac{\mathbf{s}}{A_P}) + i\chi_{nT}(\mathbf{b} + \frac{A_P - 1}{A_P} \mathbf{s})} \phi_0(r)$$

$$f_{el}(\theta) = \frac{iK}{2\pi} \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{b}} \left[ 1 - \langle \phi_0 | e^{i\chi_{CT}(\mathbf{b} - \frac{\mathbf{s}}{A_P}) + i\chi_{nT}(\mathbf{b} + \frac{A_P - 1}{A_P} \mathbf{s})} | \phi_0 \rangle \right]$$

$$f_{\mathbf{k}}(\theta) = -\frac{iK}{2\pi} \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{b}} \langle \phi_{\mathbf{k}} | e^{i\chi_{CT}(\mathbf{b} - \frac{\mathbf{s}}{A_P}) + i\chi_{nT}(\mathbf{b} + \frac{A_P - 1}{A_P} \mathbf{s})} | \phi_0 \rangle$$

これから、弾性散乱やbreakupの断面積、運動量分布が計算できる。

重陽子散乱:  $d+^{58}\text{Ni}$   $E_d=80\text{MeV}$  Yabana,Ogawa,Suzuki,PRC45(1992)

3体問題: 重陽子の連続状態を含むチャネルと弾性チャネルを結合して  
高精度の計算可能(CDCC)

$$\left[ \frac{P^2}{2M_{\text{PT}}} + H_{\text{pn}} + U_{\text{p}} \left( R + \frac{r}{2} \right) + U_{\text{n}} \left( R - \frac{r}{2} \right) \right] \Psi(R, r) = E\Psi(R, r)$$

$$\chi_{\text{p}}(b) = -\frac{1}{\hbar v} \int_{-\infty}^{+\infty} dz U_{\text{p}}(b + z\hat{Z}) \quad e^{i\chi_{\text{el}}(b)} = \langle \phi_0 | e^{i\chi_{\text{p}}(b + \frac{s}{2}) + i\chi_{\text{n}}(b - \frac{s}{2})} | \phi_0 \rangle$$

$$f_{\text{el}}(\theta) = \frac{iK}{2\pi} \int db e^{-iq \cdot b} \left[ 1 - e^{i\chi_{\text{el}}(b)} \right] \longrightarrow \text{アイコナール近似の角分布}$$

更に、 $d-^{58}\text{Ni}$ の光学ポテンシャルを求めることが可能

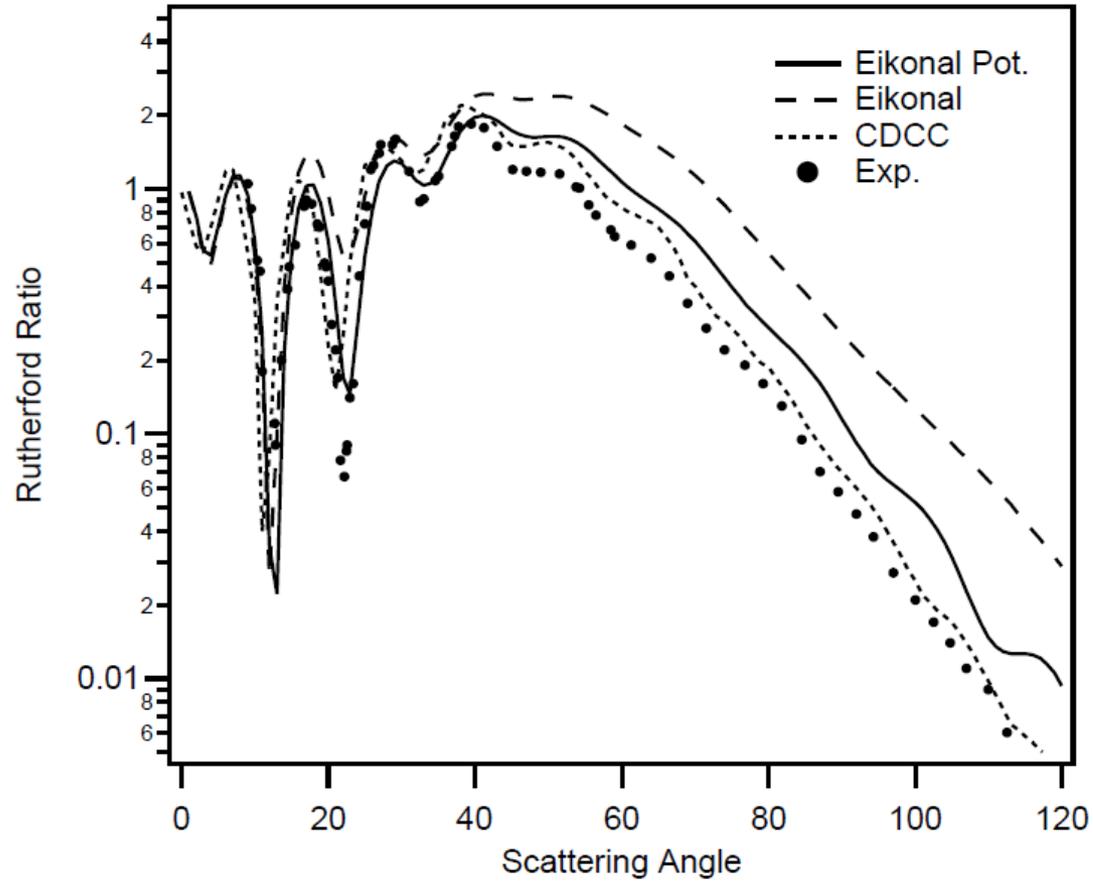
$$\text{アイコナール近似では} \quad \chi_{\text{el}}(b) = -\frac{1}{\hbar v} \int_{-\infty}^{+\infty} dz V_{\text{opt}}(\sqrt{b^2 + z^2})$$

$\chi_{\text{el}}$ が求まっているので、 $V_{\text{opt}}$ を次式から計算できる(84,85頁参照)

$$V_{\text{opt}}(r) = \frac{\hbar v}{2\pi} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \int_{-\infty}^{+\infty} dy \chi_{\text{el}}(\sqrt{r^2 + y^2})$$

この光学ポテンシャルを用いてアイコナール近似によらず、  
部分波展開で散乱振幅の計算可能  $\longrightarrow$  アイコナール近似を超えた計算 126

### 3通りの方法による $d+^{58}\text{Ni}$ 弾性散乱の角分布



## Dynamic polarization potential

d-<sup>58</sup>Niのfoldingポテンシャル

$$V^F(R) = \int d\mathbf{r} |\phi_0(\mathbf{r})|^2 \left[ U_p \left( \mathbf{R} + \frac{\mathbf{r}}{2} \right) + U_n \left( \mathbf{R} - \frac{\mathbf{r}}{2} \right) \right]$$

foldingポテンシャルに対応するアイコナル近似の位相差関数

$$\begin{aligned} \chi_F(\mathbf{b}) &= -\frac{1}{\hbar v} \int_{-\infty}^{+\infty} dz V^F(\mathbf{b} + z\hat{\mathbf{Z}}) \\ &= \int d\mathbf{r} |\phi_0(\mathbf{r})|^2 \left[ \chi_p(\mathbf{b} + \frac{\mathbf{s}}{2}) + \chi_n(\mathbf{b} - \frac{\mathbf{s}}{2}) \right] \\ &= \langle \chi_{pn} \rangle \qquad \chi_{pn} = \chi_p(\mathbf{b} + \frac{1}{2}\mathbf{s}) + \chi_n(\mathbf{b} - \frac{1}{2}\mathbf{s}) \end{aligned}$$

光学ポテンシャルに対応する位相差関数

$$e^{i\chi_{el}(\mathbf{b})} = \langle e^{i\chi_{pn}} \rangle = e^{i\langle \chi_{pn} \rangle} \langle e^{i(\chi_{pn} - \langle \chi_{pn} \rangle)} \rangle \quad \text{キュムラント展開}$$

$$\chi_{el}(\mathbf{b}) = \langle \chi_{pn} \rangle + \frac{i}{2} [\langle \chi_{pn}^2 \rangle - \langle \chi_{pn} \rangle^2] + \dots = \chi^{(1)} + \chi^{(2)} + \dots$$

第1項から構成した光学ポテンシャルはfoldingポテンシャル、それからのずれのポテンシャルの主要項は  $\chi^{(2)}$  からくる。

簡単のために、陽子、中性子の光学ポテンシャルは同じとする。

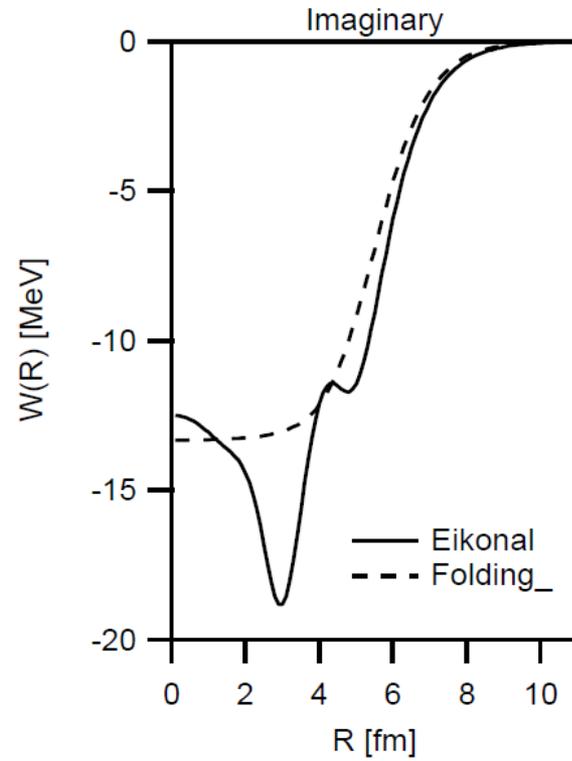
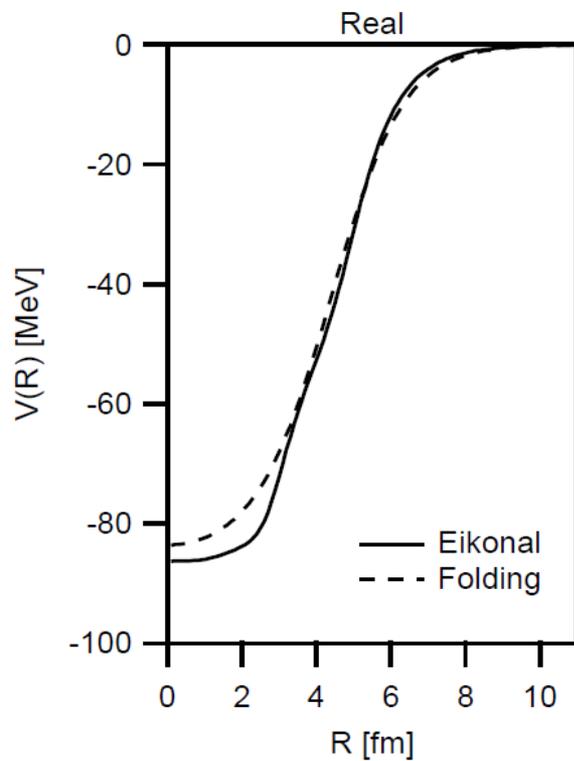
$$U_p = U_n = (V_0 + iW_0)U(r)$$

$$\chi_{pn}(\mathbf{b}, \mathbf{s}) = (V_0 + iW_0)f(\mathbf{b}, \mathbf{s})$$

$$f(\mathbf{b}, \mathbf{s}) \equiv -\frac{1}{\hbar v} \int_{-\infty}^{\infty} dZ \left[ U \left( \mathbf{b} + Z\hat{z} + \frac{\mathbf{r}}{2} \right) + U \left( \mathbf{b} + Z\hat{z} - \frac{\mathbf{r}}{2} \right) \right]$$

$$\begin{aligned} \chi^{(2)}(b) &= \frac{i}{2}(V_0 + iW_0)^2 \langle f - \langle f \rangle \rangle^2 \\ &= \left[ -V_0W_0 + \frac{i}{2}(V_0^2 - W_0^2) \right] \langle f - \langle f \rangle \rangle^2 \end{aligned}$$

これに対応するポテンシャルがDPPの主要項と考えられる。  
ポテンシャルの符号は位相差関数の符号と逆なので、  
DPPの実部の符号は  $V_0W_0 > 0$ 、虚部の符号は  $-(V_0^2 - W_0^2) < 0$



表面付近で、光学ポテンシャルの実部は浅くなり虚部は吸収が強くなる。

# ${}^6\text{He} + {}^{12}\text{C}$ 散乱 40 MeV/A

Abu-Ibrahim, Suzuki, NPA728 (2003)

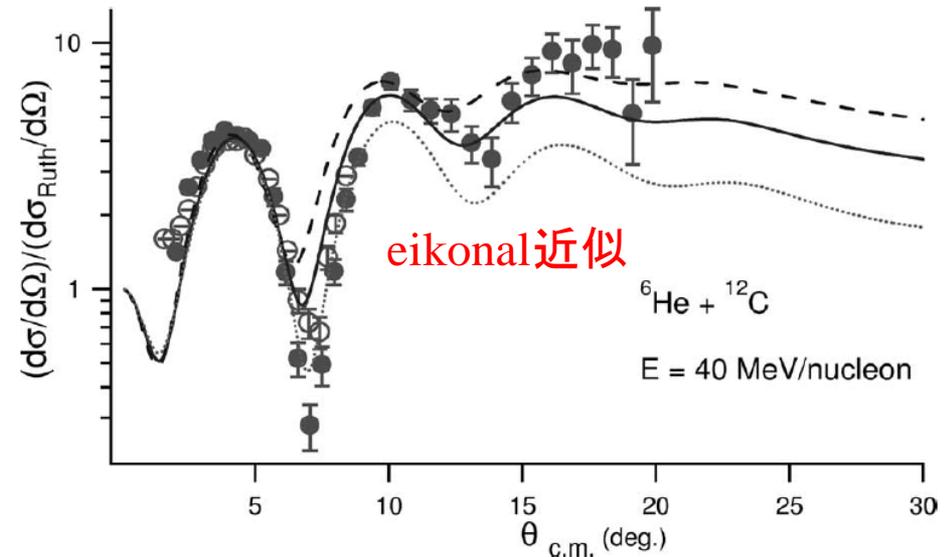
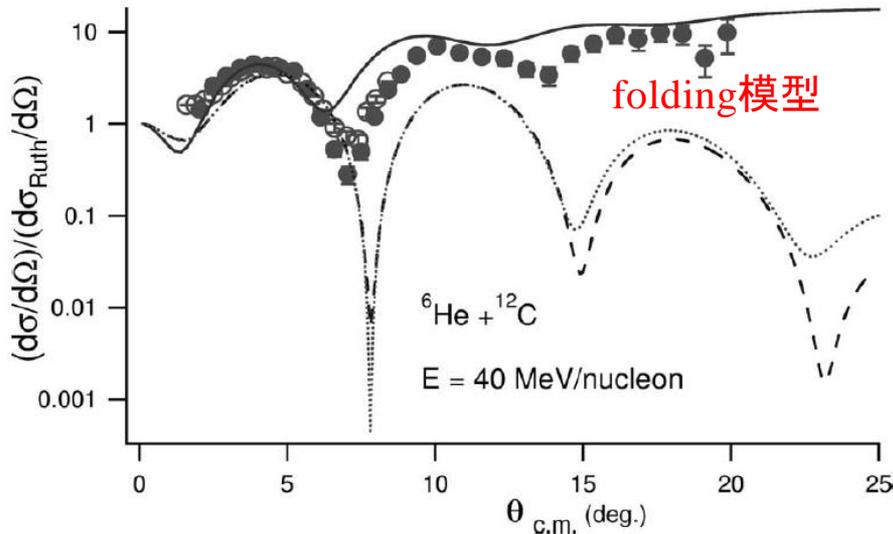
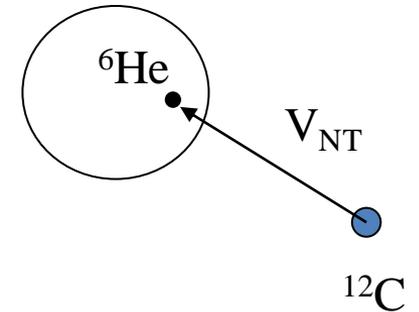
${}^6\text{He}$ のbreakupの効果を調べる。

${}^6\text{He}$ は3体模型ではなく、VMCによる6核子系の波動関数を用い、核子- ${}^{12}\text{C}$ の光学ポテンシャルを採用。

foldingポテンシャル 
$$U_f(R) = \int dr \rho^{(P)}(r) V_{NT}(R+r)$$

$$\chi_{NT}(\mathbf{b}) = -\frac{1}{\hbar v} \int_{-\infty}^{\infty} dz V_{NT}(\mathbf{b} + z\hat{z})$$

アイコナル位相 
$$e^{i\tilde{\chi}(\mathbf{b})} = \langle \psi_0^{(P)} | e^{i \sum_{i \in P} \chi_{NT}(\mathbf{b} + \mathbf{s}_i^{(P)})} | \psi_0^{(P)} \rangle$$
 モンテカルロ積分



1. Introduction
2. Basics of potential scattering theory
3. Eikonal approximation
4. Glauber approximation for nuclear collision
5. Nucleon-nucleon profile function and calculation of phase shift function
6. Case of halo nuclei

## **7. Elastic scattering and dynamic polarization potential**

### 7.1 アイコナル位相、光学ポテンシャル

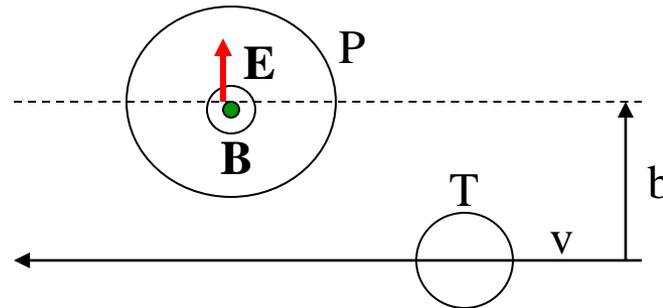
8. Breakup processes with Coulomb interaction

# 8. Breakup processes with Coulomb interaction

## 8.1 Key words: equivalent photon method、電気双極子遷移、和則

入射核が標的核のクーロン場によって励起される(クーロン励起)

1. これまでの反応理論をクーロン相互作用を含めて拡張する
2. equivalent photon method (Bertulani, Baur, Phys. Rep. 163 (1988))



電荷 $Z_T e$ の標的核が高速で衝突係数 $b$ で入射核(座標原点にあるとする)の近傍を通過すると、入射核にパルス上の電磁場を及ぼす

Lienard-Wiechert ポテンシャル  $\phi(r, t) = \frac{Z_T e}{u}$ ,  $A(r, t) = \frac{Z_T e v}{u c}$

$$u = \sqrt{\frac{1}{\gamma^2}(s - b)^2 + (z + vt)^2}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\nabla\phi - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \nabla \times \mathbf{A}$$

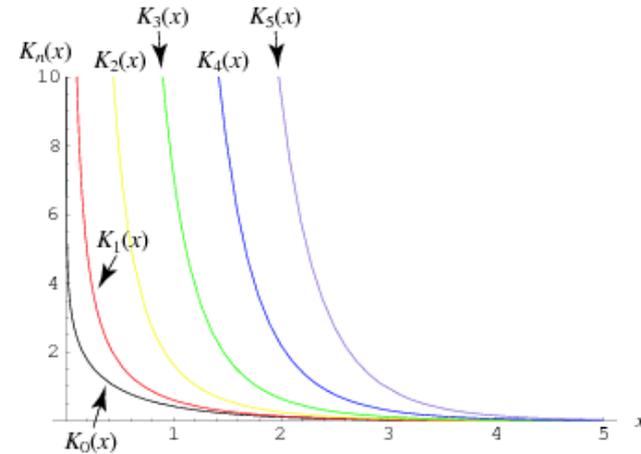
$$\text{エネルギー密度} \quad \varepsilon = \frac{1}{8\pi} [\mathbf{E}^2(\mathbf{r}, t) + \mathbf{B}^2(\mathbf{r}, t)]$$

パルス状の電磁場(平面波に類似)のフーリエ展開

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dt e^{i\omega t} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$$

$$|\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega)|_{\mathbf{r}=0}^2 = \left(\frac{Z_T e}{\pi}\right)^2 \frac{\xi^2}{b^2 v^2} \left[ K_1^2(\xi) + \frac{1}{\gamma^2} K_0^2(\xi) \right]$$

$$\xi = b\omega/\gamma v \quad \text{横成分} \gg \text{縦成分}$$



単位領域当りのエネルギーは $\varepsilon$ を $z$ で積分すればよい

$$I = \frac{c}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dt \mathbf{E}^2(\mathbf{r}, t) = \int_0^{\infty} d\omega c |\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega)|^2$$

Equivalent photon numberの定義  $\hbar\omega N(\mathbf{b}, \omega) d\omega = c |\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega)|^2 d\omega$

$$N(\mathbf{b}, \omega) = \frac{c}{\hbar\omega} |\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega)|_{\mathbf{r}=0}^2 = \frac{Z_T^2 \alpha}{\pi^2} \left(\frac{c}{v}\right)^2 \frac{\xi^2}{\omega b^2} \left[ K_1^2(\xi) + \frac{1}{\gamma^2} K_0^2(\xi) \right]$$

クーロン励起の反応確率は光吸収断面積から

$$P(b) = \int_0^\infty d\omega N(b, \omega) \sigma_\gamma(\omega)$$

光吸収断面積は主に、原子核の電気双極子遷移強度に関係して決まる  
 ハロー核で基底状態のみ束縛しているときには、反応確率を衝突係数について  
 積分すれば、クーロンbreakup (photodisintegration) 断面積が得られる  
 Soft dipole mode 或はpygmy dipole resonanceと関連して、特に低エネルギーの  
 断面積が興味深い

Photodisintegrationの逆反応はradiative captureで、低エネルギーの  
 $A+B \rightarrow C+\gamma$  反応は元素合成の重要な反応

## 電気双極子 (E1) 遷移と和則

$$\sigma_\gamma(E_\gamma) = \frac{4\pi^2}{\hbar c} E_\gamma \frac{1}{3} S(E_\gamma) \quad S(E) = \mathcal{S}_{\mu f} |\langle \Psi_f | \mathcal{M}_{1\mu} | \Psi_0 \rangle|^2 \delta(E_f - E_0 - E)$$

$$m_p(E_{\max}) = \int_0^{E_{\max}} E_\gamma^p \sigma_\gamma(E_\gamma) dE_\gamma$$

$$m_{-1}(\infty) = \mathcal{G} \left( Z^2 \langle r_p^2 \rangle - \frac{Z(Z-1)}{2} \langle r_{pp}^2 \rangle \right) \quad \mathcal{G} = 4\pi^2 e^2 / 3\hbar c$$

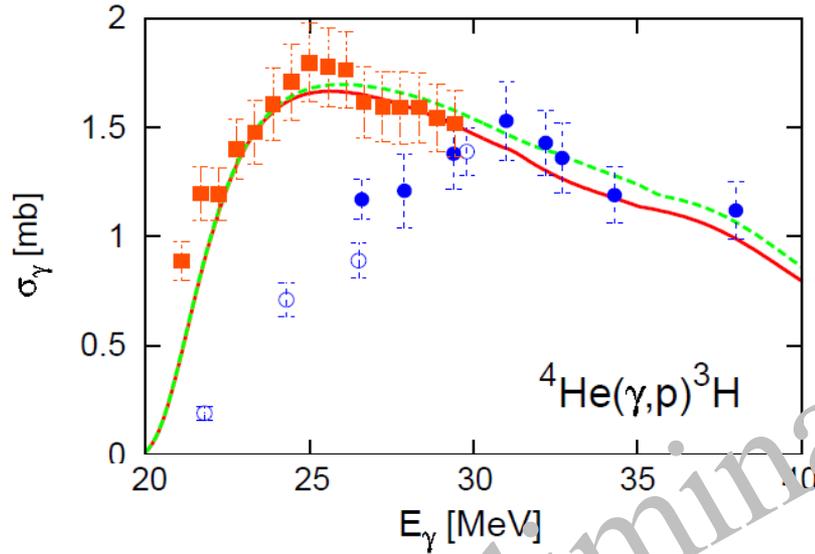
$$m_0(\infty) = \mathcal{G} \frac{3NZ\hbar^2}{2Am_N} (1 + K) \quad K_p = \frac{2Am_N}{3NZ\hbar^2 e^2} \frac{1}{2} \sum_\mu \langle \Psi_0 | [\mathcal{M}_{1\mu}^\dagger, [V_p, \mathcal{M}_{1\mu}]] | \Psi_0 \rangle$$

1+Kのうち1は運動エネルギーの寄与でTRKの和則

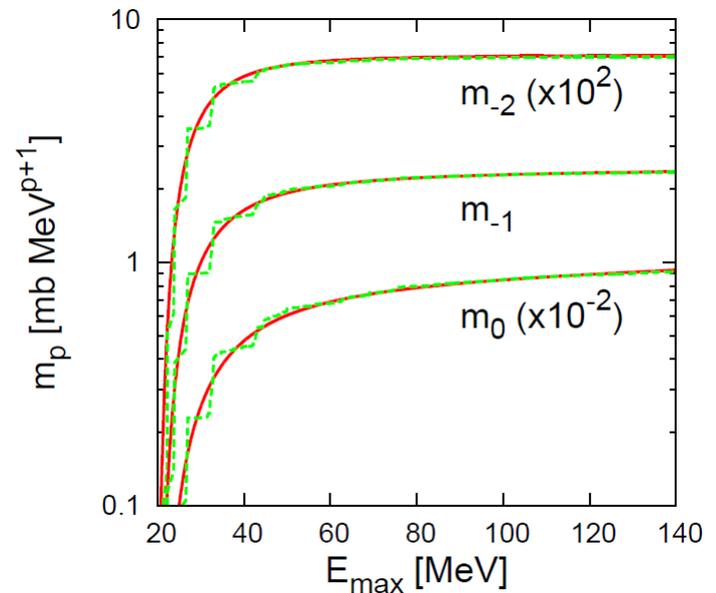
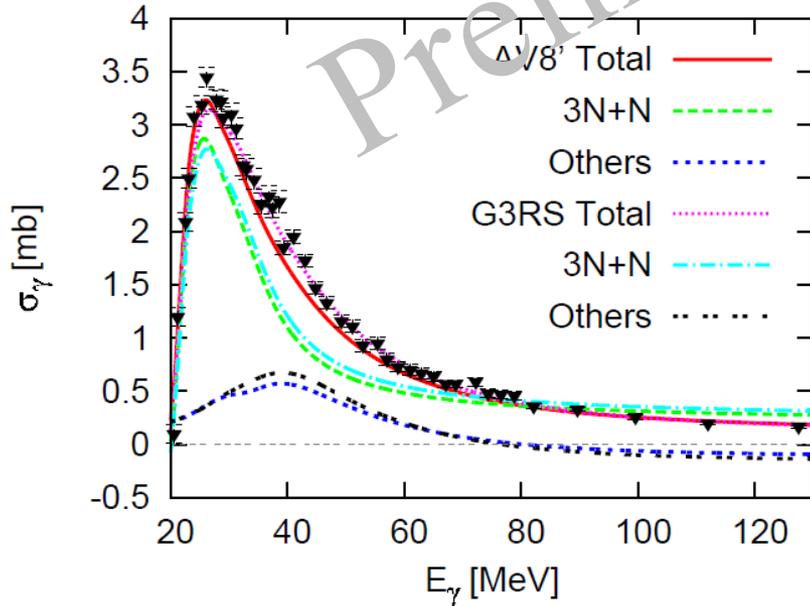
$$V_p = \sum_{i < j} v^{(p)}(r_{ij}) \mathcal{O}_{ij}^{(p)}$$

# $^4\text{He}$ の光吸収

Horiuchi, Suzuki, Arai

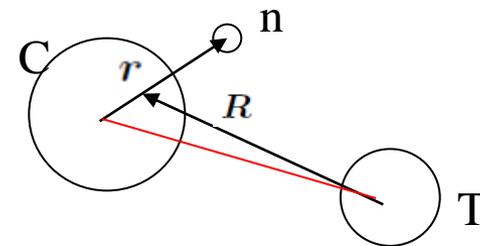


$p$	AV8'+3NF		$\mathcal{O}_{ij}^{(p)}$
	$\langle V_p \rangle$	$K_p$	
1	17.39	0	1
2	-9.59	0	$\sigma_i \cdot \sigma_j$
3	-5.23	0.011	$\tau_i \cdot \tau_j$
4	-59.42	0.460	$\sigma_i \cdot \sigma_j \tau_i \cdot \tau_j$
	(-12.51)	(0.187)	
5	0.75	0	$S_{ij}$
6	-70.93	0.574	$S_{ij} \tau_i \cdot \tau_j$
	(-68.65)	(0.667)	
7	11.09	0	$(\mathbf{L} \cdot \mathbf{S})_{ij}$
8	-15.93	0.061	$(\mathbf{L} \cdot \mathbf{S})_{ij} \tau_i \cdot \tau_j$
Total	-131.9	1.11	



## 8.2 Key words: クーロン励起の摂動論、Coulomb-corrected eikonal

弾性散乱の場合と同じ条件、記号を使う(124頁参照)  
 芯核と重い標的核の間にクーロン力が働く点異なる  
 長距離力のため断熱近似が適用できない



$$\left[ \frac{P^2}{2M_{PT}} + H_{nC} + V_{CT}^N \left( R - \frac{r}{A_P} \right) + V_{nT} \left( R + \frac{A_P - 1}{A_P} r \right) + \frac{Z_C Z_T e^2}{\left| R - \frac{r}{A_P} \right|} \right] \Psi(R, r) = E \Psi(R, r)$$

運動量移行が入射運動量に比べて十分小さいとしてアイコナル近似を使う

$$\Psi(R, r) = e^{iKZ} \hat{\Psi}(R, r)$$

$$\left[ -i\hbar v \frac{\partial}{\partial Z} + (H_{nC} - \varepsilon_0) + V_{CT}^N \left( R - \frac{r}{A_P} \right) + V_{nT} \left( R + \frac{A_P - 1}{A_P} r \right) + \frac{Z_C Z_T e^2}{\left| R - \frac{r}{A_P} \right|} \right] \hat{\Psi}(R, r) = 0$$

時間依存のシュレーディンガー方程式と同型に変形可能(52頁参照)

$$\tilde{\Psi}(b, r, t) \equiv \hat{\Psi}(R, r) \quad R = b + Z\hat{z} \quad Z = vt \quad \text{とすれば、}$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \tilde{\Psi}(b, r, t) = \left[ (H_{nC} - \varepsilon_0) + V_{CT}^N \left( b + vt\hat{z} - \frac{r}{A_P} \right) + V_{nT} \left( b + vt\hat{z} + \frac{A_P - 1}{A_P} r \right) + \frac{Z_C Z_T e^2}{\left| b + vt\hat{z} - \frac{r}{A_P} \right|} \right] \tilde{\Psi}(b, r, t)$$

$$\text{初期条件} \quad \tilde{\Psi}(b, r, t \rightarrow -\infty) = \phi_0(r)$$

## 断熱近似を用いたとすればどうなるか

$$\tilde{\Psi}(\mathbf{b}, \mathbf{r}, t \rightarrow \infty) = e^{i\chi_{\text{CT}}^N(\mathbf{b} - \frac{\mathbf{s}}{A_P}) + i\chi_{\text{nT}}(\mathbf{b} + \frac{A_P - 1}{A_P} \mathbf{s}) + i\chi^C(\mathbf{b} - \frac{\mathbf{s}}{A_P})} \phi_0(\mathbf{r})$$

$$\chi^C(\mathbf{b}) = 2\eta \ln \frac{b}{2a} \quad \text{クーロン力の位相差関数は38頁参照}$$

$$\chi^C\left(\mathbf{b} - \frac{\mathbf{s}}{A_P}\right) = \chi^C(\mathbf{b}) + \Delta\chi^C(\mathbf{b}, \mathbf{s}) \quad \text{第1項 } \chi^C(\mathbf{b}) \text{ はクーロン力が芯核ではなく}$$

入射核の重心に働いたときの位相差を表す

$$e^{i\Delta\chi^C(\mathbf{b}, \mathbf{s})} = e^{i\chi^C(\mathbf{b} - \frac{\mathbf{s}}{A_P}) - i\chi^C(\mathbf{b})} = \left(\frac{|\mathbf{b} - \frac{\mathbf{s}}{A_P}|}{b}\right)^{2i\eta} \quad \text{ハロー核子の波動関数を}$$

長距離にわたって歪める

弾性散乱振幅、反応確率は前と同様に求められる

$$f_{\text{el}}(\theta) = \frac{iK}{2\pi} \int d\mathbf{b} e^{-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{b}} \left[ 1 - e^{i\chi^C(\mathbf{b})} \langle \phi_0 | e^{i\chi_{\text{CT}}^N(\mathbf{b} - \frac{\mathbf{s}}{A_P}) + i\chi_{\text{nT}}(\mathbf{b} + \frac{A_P - 1}{A_P} \mathbf{s}) + i\Delta\chi^C(\mathbf{b}, \mathbf{s})} | \phi_0 \rangle \right]$$

$$P_{\text{reac}}(\mathbf{b}) = 1 - \left| \langle \phi_0 | e^{i\chi_{\text{CT}}^N(\mathbf{b} - \frac{\mathbf{s}}{A_P}) + i\chi_{\text{nT}}(\mathbf{b} + \frac{A_P - 1}{A_P} \mathbf{s}) + i\Delta\chi^C(\mathbf{b}, \mathbf{s})} | \phi_0 \rangle \right|^2$$

$\chi_{\text{CT}}^N$   $b$ が芯核と標的核の半径の和を超えると消える

$\chi_{\text{nT}}$   $b$ の寄与する範囲はハローの大きさと標的核の半径の和で限られる

両者の寄与する $b$ をこえると  $\Delta\chi^C$  が主要項になり、遠方まで寄与する

bの大きいところでの反応確率の見積もり

$$\begin{aligned}
 P_{\text{reac}}(\mathbf{b}) &\approx 1 - |\langle \phi_0 | e^{i\Delta\chi^C(\mathbf{b},\mathbf{s})} | \phi_0 \rangle|^2 \\
 &= 1 - |\langle \phi_0 | \left( \frac{|\mathbf{b} - \frac{\mathbf{s}}{A_P}|}{b} \right)^{2i\eta} | \phi_0 \rangle|^2 \\
 &\approx \frac{2\eta^2}{3A_P^2 b^2} \langle \phi_0 | r^2 | \phi_0 \rangle + \dots \quad \mathbf{b} \gg \mathbf{s} \text{ とし、}\phi_0 \text{ は球対称とした}
 \end{aligned}$$

bに関する積分は対数発散を起こす

実際には大きなbに対しては、クーロン励起の確率は指数関数的に減衰するであろう。

対数発散を起こすのは、断熱近似で扱ったクーロン励起の一次の項であることは明らか

発散項をクーロン励起の摂動論で求められる一次の項で置き換えれば、発散がなくアイコンナル近似の利点を生かした簡便な計算が可能となろう

$$e^{i\Delta\chi^C(\mathbf{b},\mathbf{s})} \rightarrow e^{i\Delta\chi^C(\mathbf{b},\mathbf{s})} - i\Delta\chi^C(\mathbf{b},\mathbf{s}) + i\chi^{FO}(\mathbf{b},\mathbf{s})$$

Margueron, Bonaccorso, Brink, NPA720(2003)  
 Abu-Ibrahim, Suzuki, PTP112(2004); ibid.114(901)

## クーロン励起の摂動論

$$\tilde{\Psi}(\mathbf{b}, \mathbf{r}, t) = c_0(\mathbf{b}, t)\phi_0(\mathbf{r})e^{-\frac{i}{\hbar}\varepsilon_0 t} + \sum_{lm} \int_0^\infty dE c_{Elm}(\mathbf{b}, t)\phi_{Elm}(\mathbf{r})e^{-\frac{i}{\hbar}Et}$$

$$\begin{aligned} c_{Elm}(\mathbf{b}) &= \frac{1}{i\hbar} \int_{-\infty}^{+\infty} dt \langle \phi_{Elm} | \frac{Z_C Z_T e^2}{|\mathbf{b} + vt\hat{z} - \frac{\mathbf{r}}{A_P}|} | \phi_0 \rangle e^{\frac{i}{\hbar}(E-\varepsilon_0)t} \\ &= \frac{2Z_C Z_T e^2}{i\hbar v} \langle \phi_{Elm} | e^{i\frac{E-\varepsilon_0}{\hbar v} \frac{z}{A_P}} K_0 \left( \frac{E-\varepsilon_0}{\hbar v} \left| \mathbf{b} - \frac{\mathbf{s}}{A_P} \right| \right) | \phi_0 \rangle \\ &\quad \int_{-\infty}^{+\infty} dt \frac{e^{i\omega t}}{|\mathbf{b} + vt\hat{z} - \frac{\mathbf{r}}{A_P}|} = \frac{2}{v} e^{i\frac{\omega}{v} \frac{z}{A_P}} K_0 \left( \frac{\omega}{v} \left| \mathbf{b} - \frac{\mathbf{s}}{A_P} \right| \right) \end{aligned}$$

クーロン励起の演算子  $E^* = E - \varepsilon_0$      $\xi = E^* b / \hbar v$

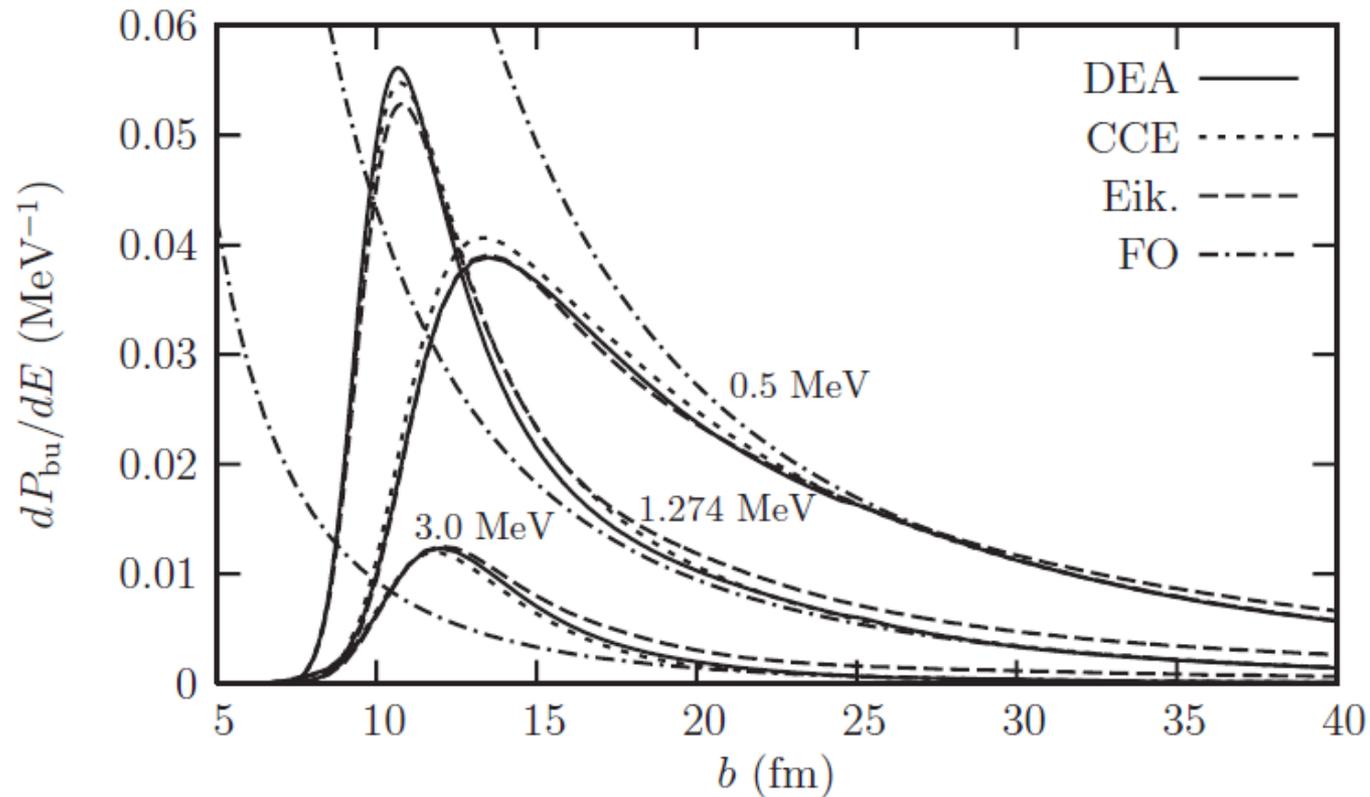
$$\begin{aligned} e^{i\frac{E^*}{\hbar v} \frac{z}{A_P}} K_0 \left( \frac{E^*}{\hbar v} \left| \mathbf{b} - \frac{\mathbf{s}}{A_P} \right| \right) &= e^{i\xi \frac{z}{b A_P}} K_0 \left( \xi \left| \hat{\mathbf{b}} - \frac{\mathbf{s}}{b A_P} \right| \right) \\ &= \left( 1 + i\frac{\xi}{b} \frac{z}{A_P} + \dots \right) \left[ K_0(\xi) - K_0'(\xi) \xi \frac{\hat{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{s}}{b A_P} + \dots \right] \\ &= K_0(\xi) + \underline{i\xi K_0(\xi) \frac{1}{b} \frac{z}{A_P}} + \xi K_1(\xi) \frac{\hat{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{s}}{b A_P} + \dots \end{aligned}$$

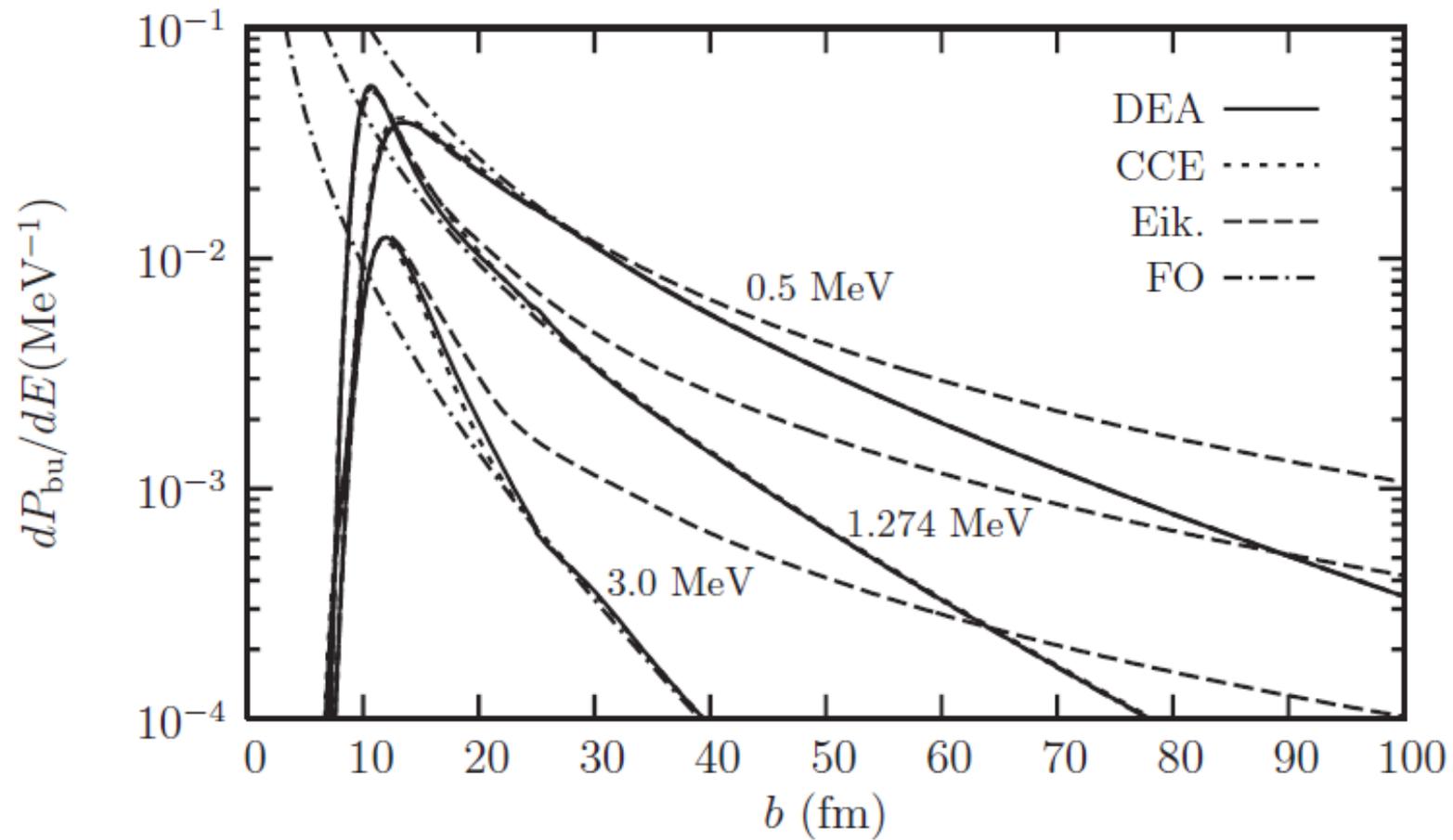
$$\chi^{\text{FO}}(\mathbf{b}, \mathbf{r}) = -\eta \frac{m_f}{m_p} \frac{2\omega}{v} \left[ K_1 \left( \frac{\omega b}{v} \right) \hat{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{s} + i K_0 \left( \frac{\omega b}{v} \right) z \right]$$

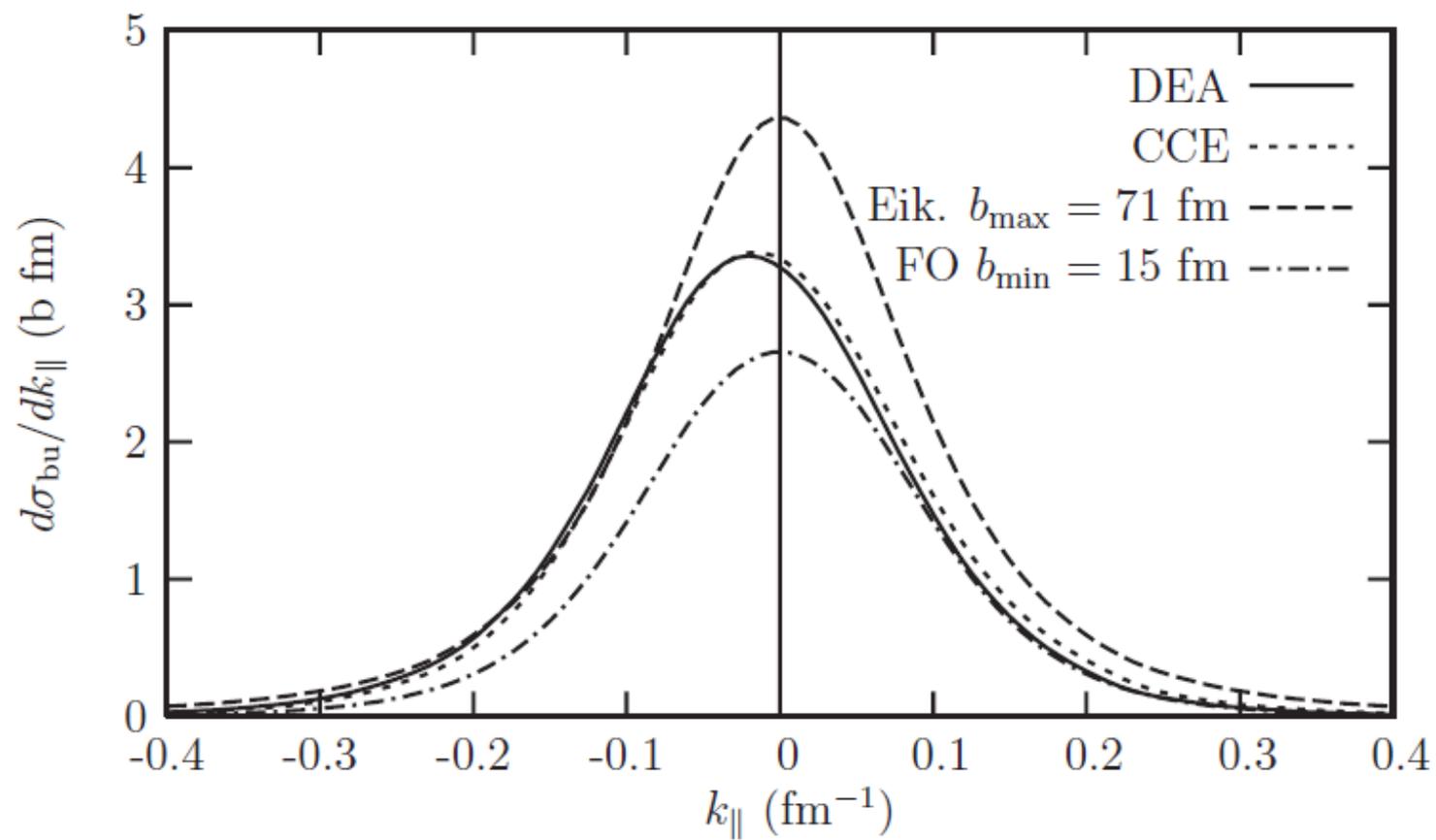
# クーロン補正したアイコンナル近似(CCE)のテスト

$^{11}\text{Be}+^{208}\text{Pb}$  69 MeV/A

Capel, Baye, Suzuki, PRC78 (2008)







## より複雑な反応への応用

### ${}^6\text{He}+{}^{208}\text{Pb}$ 反応への応用例

Baye,Capel,Descouvemont,Suzuki, PRC79 (2009)

${}^6\text{He}$ を $\alpha+n+n$ の3体系で記述すれば4体問題になる。

3体系の入射核と標的核との運動をCCEで解く事は十分に可能

主要な問題としては、

1. 3体系のbreakupした連続状態の記述  
複素回転法の適用などが試みられている
2. (中性子過剰な)芯核と標的核との信頼できる光学ポテンシャル  
実験データの定量的分析には必要

1. Introduction
2. Basics of potential scattering theory
3. Eikonal approximation
4. Glauber approximation for nuclear collision
5. Nucleon-nucleon profile function and calculation of phase shift function
6. Case of halo nuclei
7. Elastic scattering and dynamic polarization potential
- 8. Breakup processes with Coulomb interaction**
  - 8.1 equivalent photon method、電気双極子遷移、和則
  - 8.2 クーロン励起の摂動論、Coulomb-corrected eikonal