

反応断面積・荷電変化断面積
で探る陽子・中性子分布

大阪大学理学研究科 福田 光順

内容

★核半径・中性子スキンと状態方程式

★中間エネルギー反応断面積と不安定核核子密度分布

★陽子・中性子密度分布の分離→3つの方法

- 陽子密度分布(半径)を他の実験から
- σ_{NN} のアイソスピン非対称性を利用する方法
- 荷電変化断面積を利用する方法

主な研究グループメンバー

阪大理：福田光順, 三原基嗣, 松多健策

東京理科大：西村太樹

GSI：武智麻耶

埼玉大理：山口貴之, 鈴木健

新潟大理：鈴木伸司, 長島正幸, 大坪隆, 泉川卓司

筑波大：小沢顕, 森口哲朗, 石橋陽子

SINAP：W. Xu, G.W. Fan

高知工大：百田佐多生

福井工大：南園忠則

放医研 (HIMAC)：福田茂一, 佐藤眞二, 金澤光隆, 北川敦志

理研：BigRIPS team, 田中鐘信, 石原正泰, 櫻井博儀

核半径・中性子スキンと状態方程式

核物質の状態方程式 (EOS:Equation Of State)

非対称度： $\delta = (Q_n - Q_p)/Q$

$$e(Q, \delta) = e(Q, 0) + c_{\text{sym}}(Q)\delta^2 + \dots$$

$$c_{\text{sym}}(Q) = J - L \varepsilon + 1/2 K_{\text{sym}} \varepsilon^2$$

$$\varepsilon = (Q_0 - Q) / 3Q_0 \qquad L = 3\rho \left. \frac{\partial c_{\text{sym}}(\rho)}{\partial \rho} \right|_{\rho_0}$$

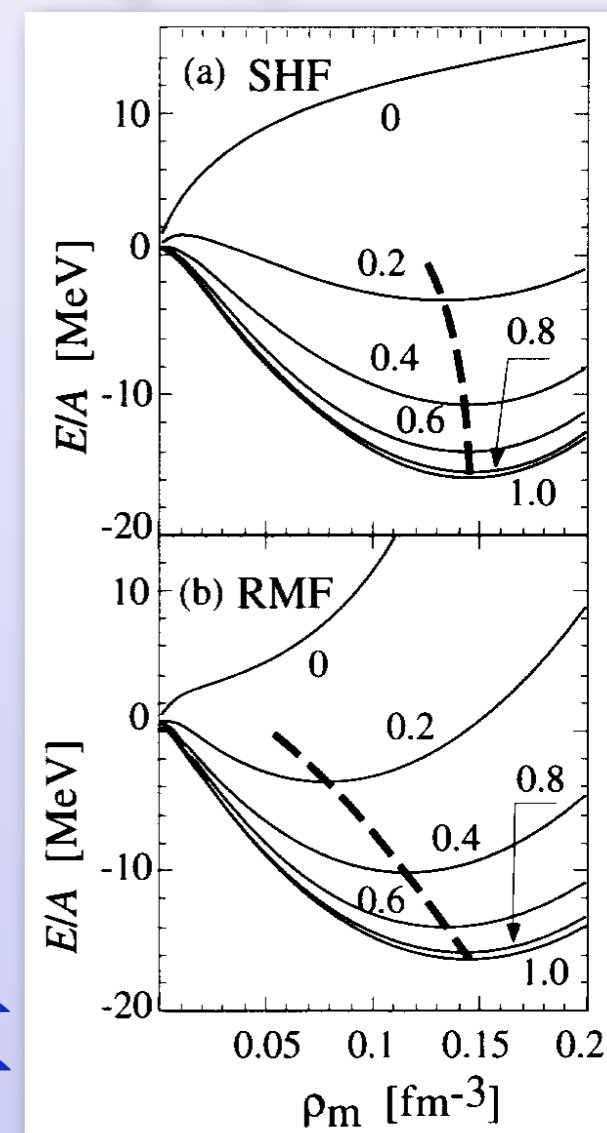
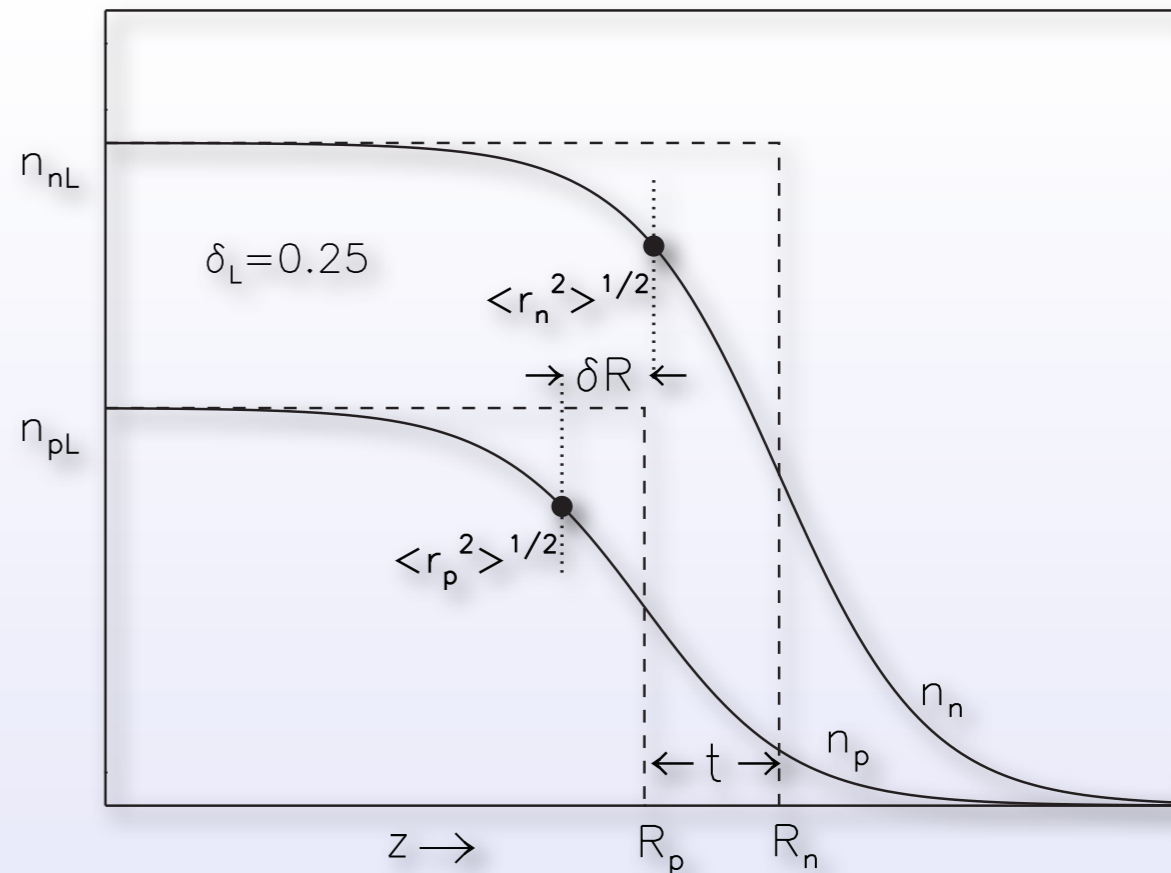
中性子スキンと宇宙物理

中性子スキンの厚さ ΔR

$$\Delta R = R_n - R_p$$

$\Delta R \iff$ 核物質の EOS
(*Equation of State*)

$\Delta R \Rightarrow$ 中性子星の半径,
中性子星内部の圧力, *etc.*



EOS 計算

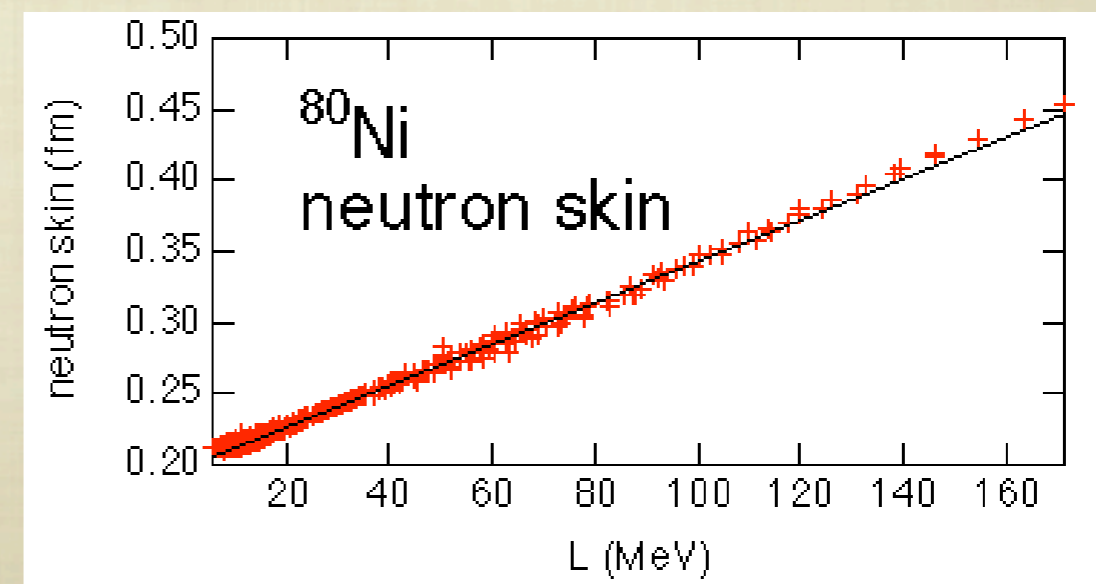
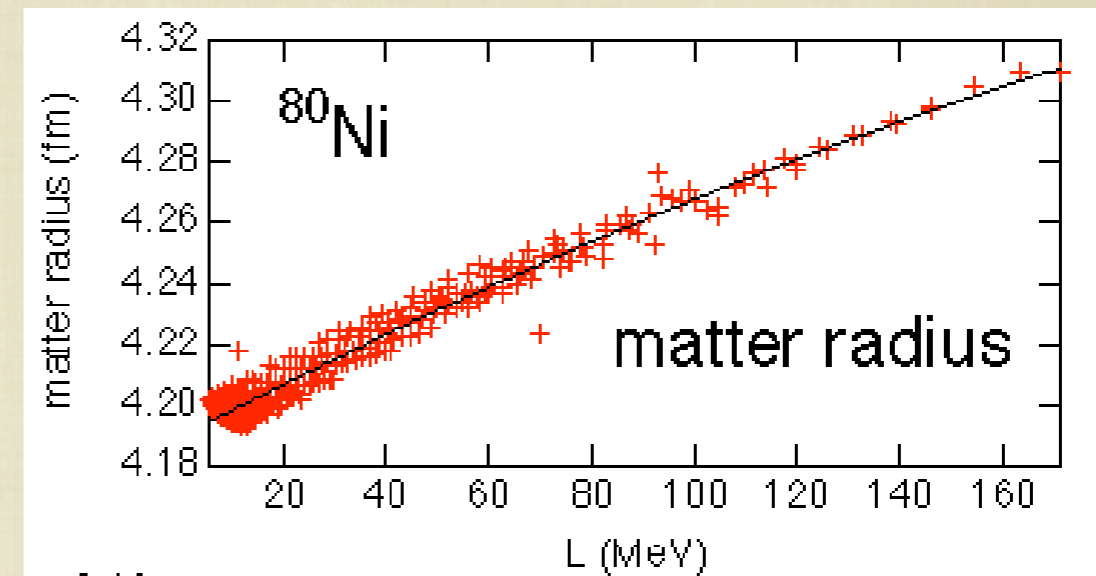
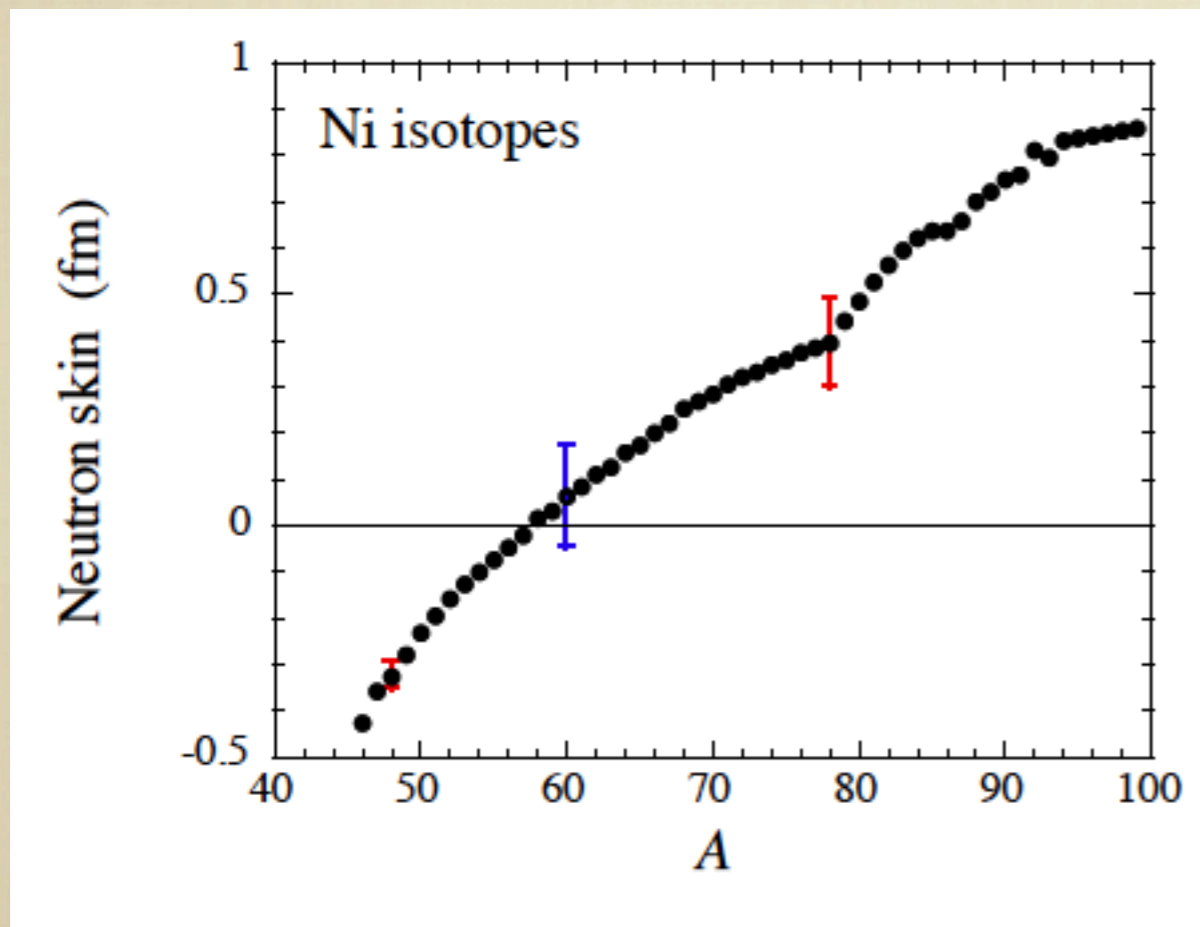
親松さん et al. の計算

Energy per nucleon of nearly symmetric nuclear matter

$$w(n, x) \approx w_0 + \frac{K_0}{18n_0^2} (n - n_0)^2 + (1 - 2x)^2 \left[S_0 + \frac{L}{3n_0} (n - n_0) \right]$$

n_0 : nuclear density, w_0 : saturation density, K_0 : incompressibility

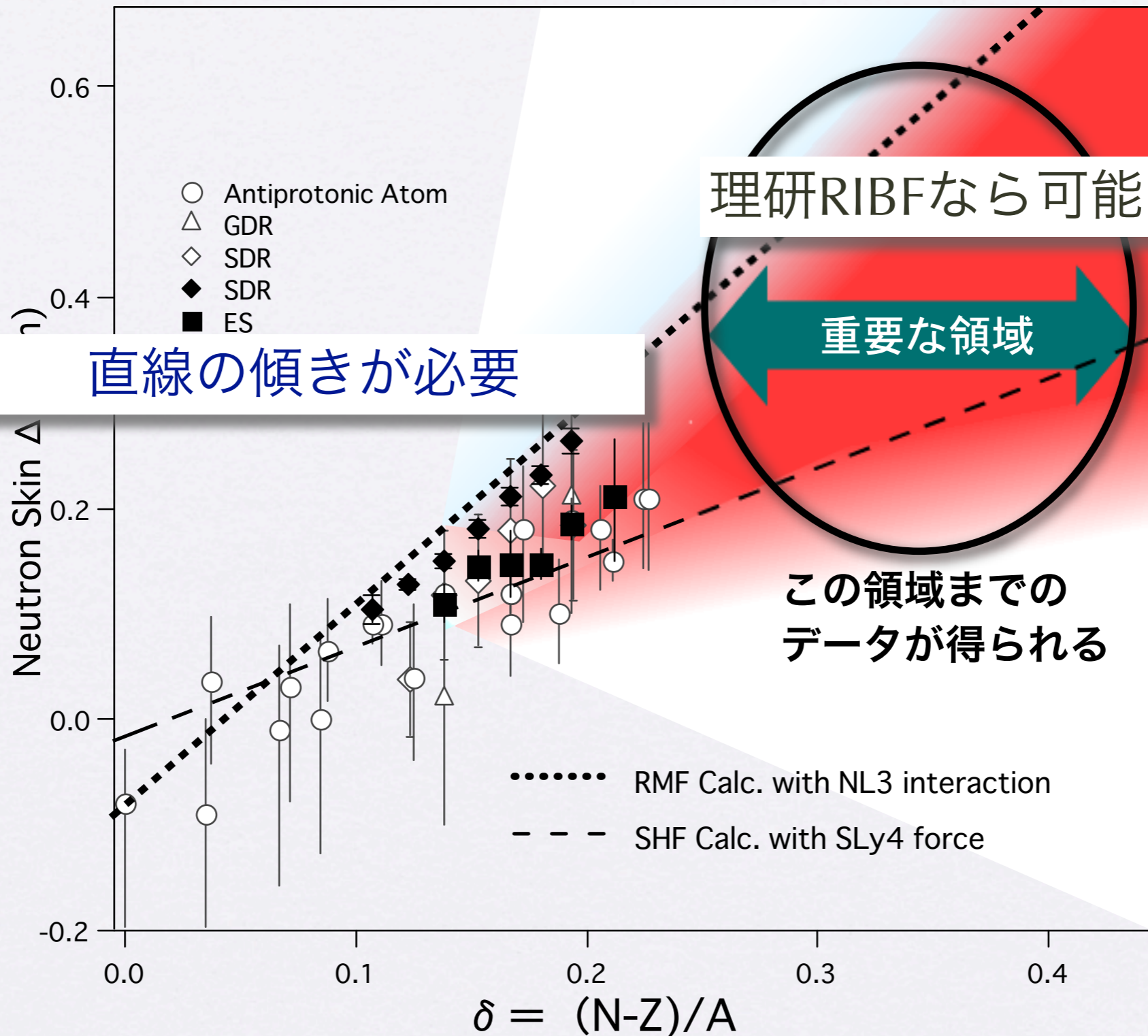
S_0 : symmetry energy at $n=n_0$, L : its density derivative coefficient



calculated by K. Oyamatsu et al.

$$\Delta R \sim L \cdot \delta + c$$

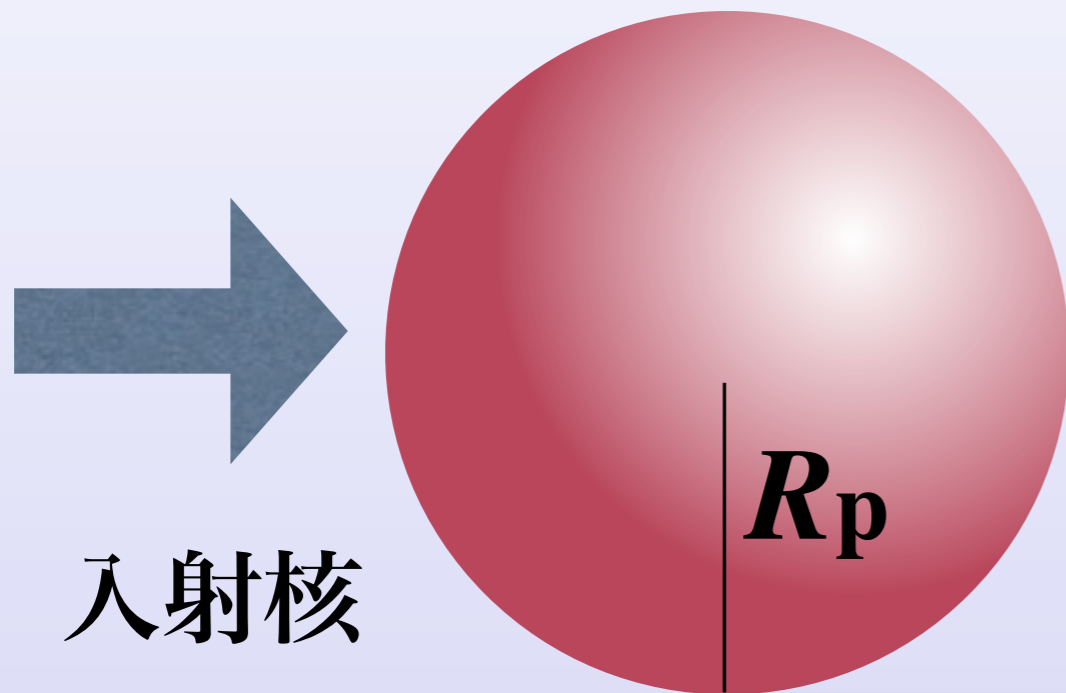
M. Centelles et al., Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 122502.



反応断面積と核半径・核子密度分布

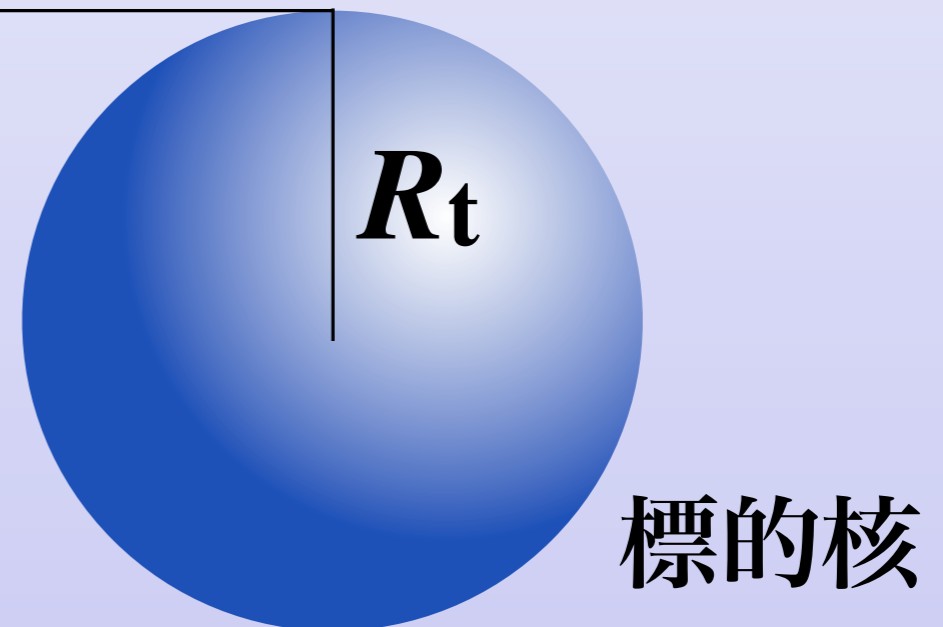
反応断面積と核半径

$$\begin{aligned}\text{反応断面積 } \sigma_R &= \text{全断面積} - \text{弾性散乱断面積} \\ &= \text{非弾性チャンネルの全断面積}\end{aligned}$$



$$\sigma_R = \pi(R_p + R_t)^2$$

中性子分布・陽子分布
両方に感度がある

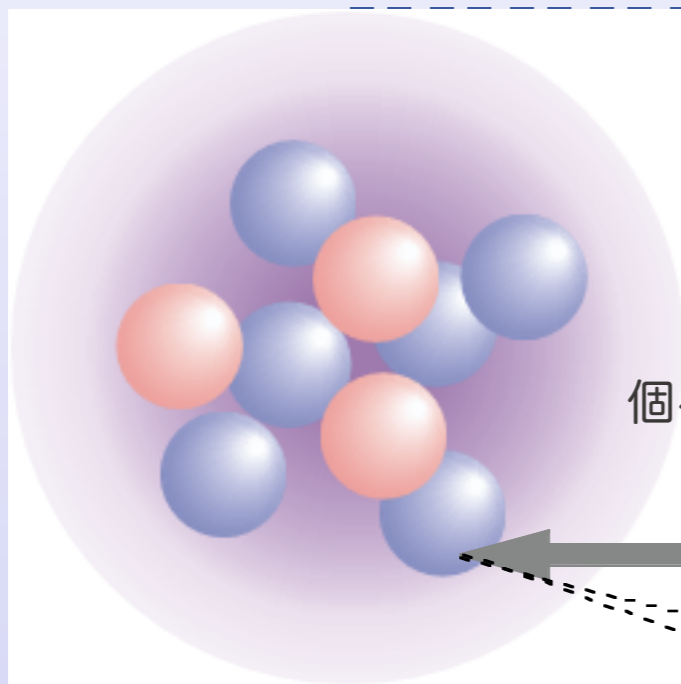


Glauber 計算

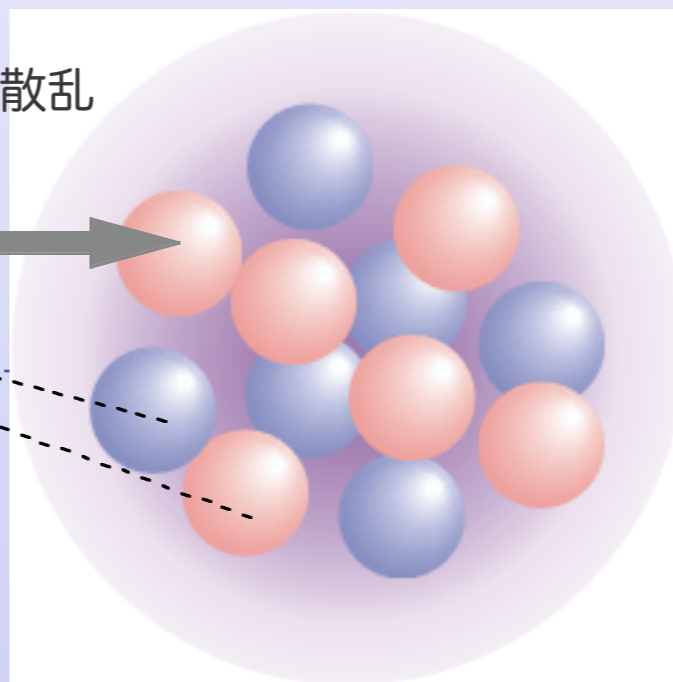
原子核の散乱 \longrightarrow 原子核を構成する核子の個々の散乱の和

$$\sigma_R = \int db \left[1 - \exp \left(- \int d^2r \sum_{i,j} \sigma_{ij}(E) \rho_z^{P_i}(\mathbf{r}) \rho_z^{T_j}(\mathbf{r} - \mathbf{b}) \right) \right] C(E)$$

Projectile



Target



個々の核子-核子散乱

σ_{NN}

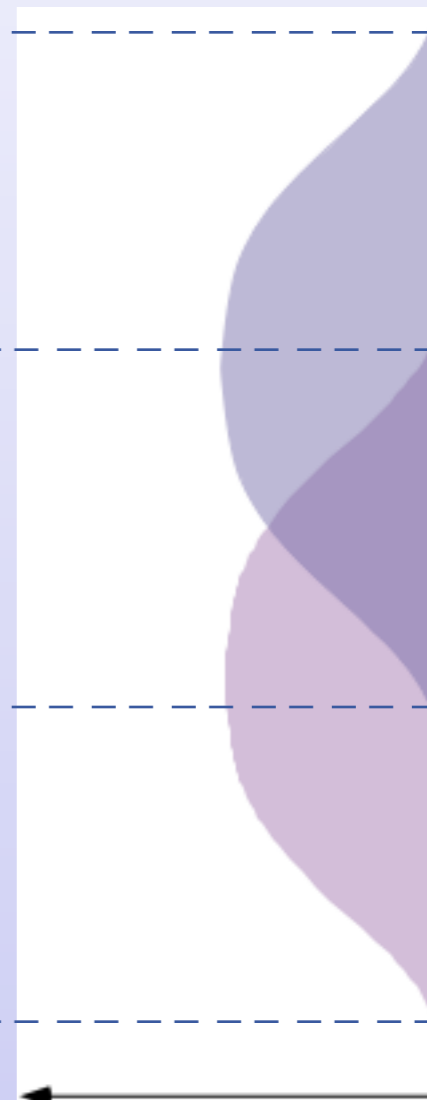
反応断面積



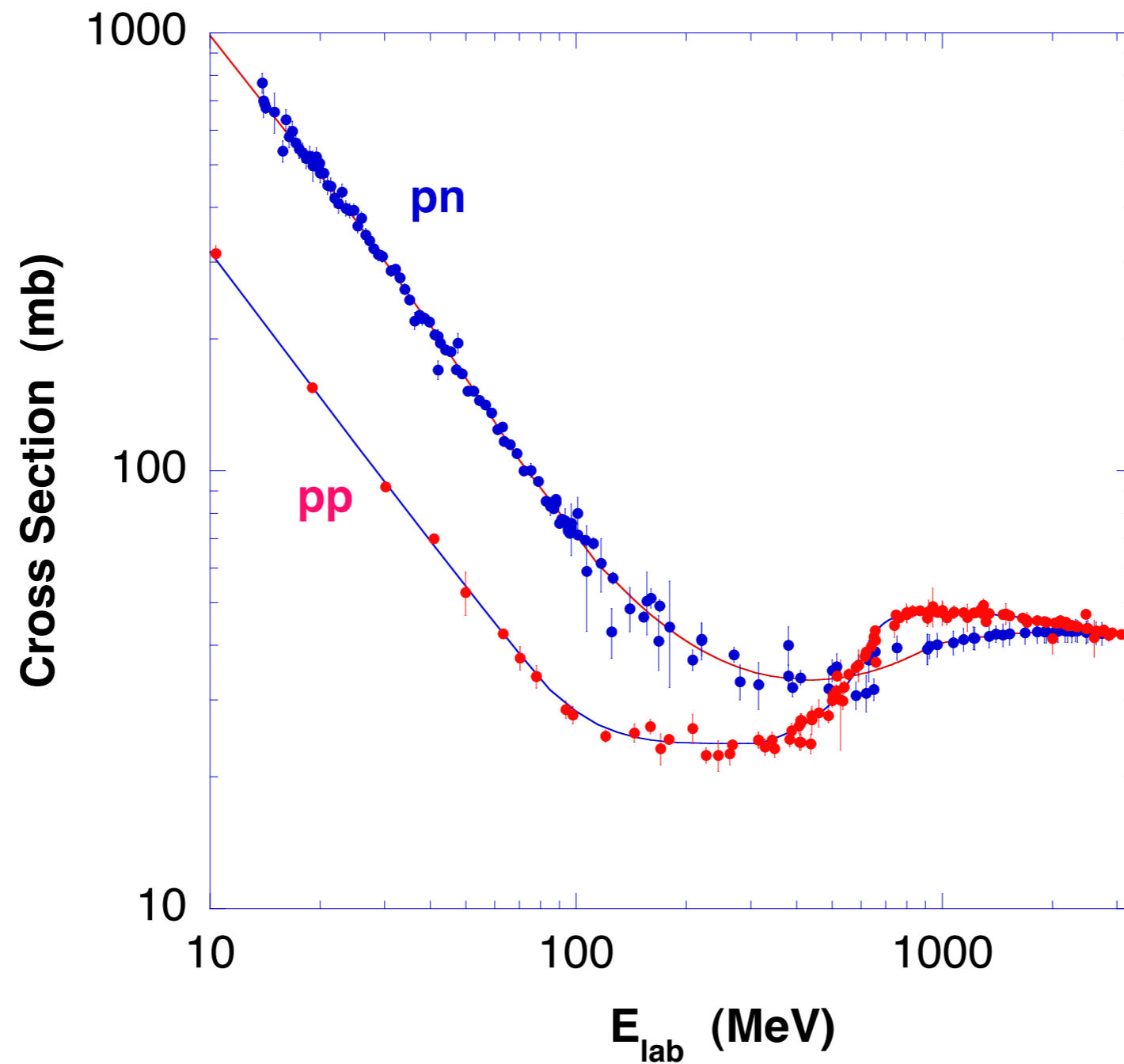
Glauber計算
(optical limit)

核子密度分布

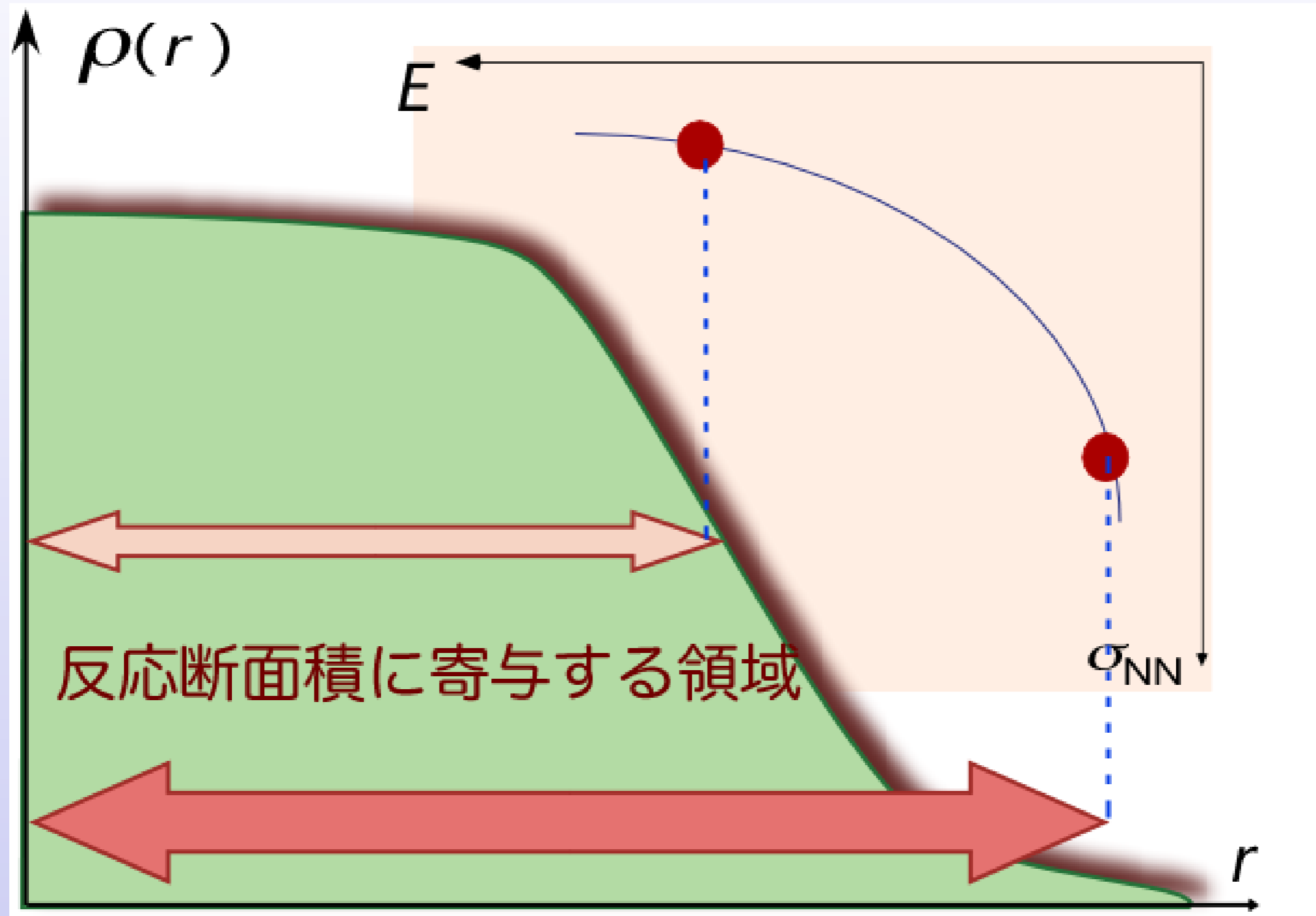
核子密度分布 $\rho(r)$



核子-核子全斷面積

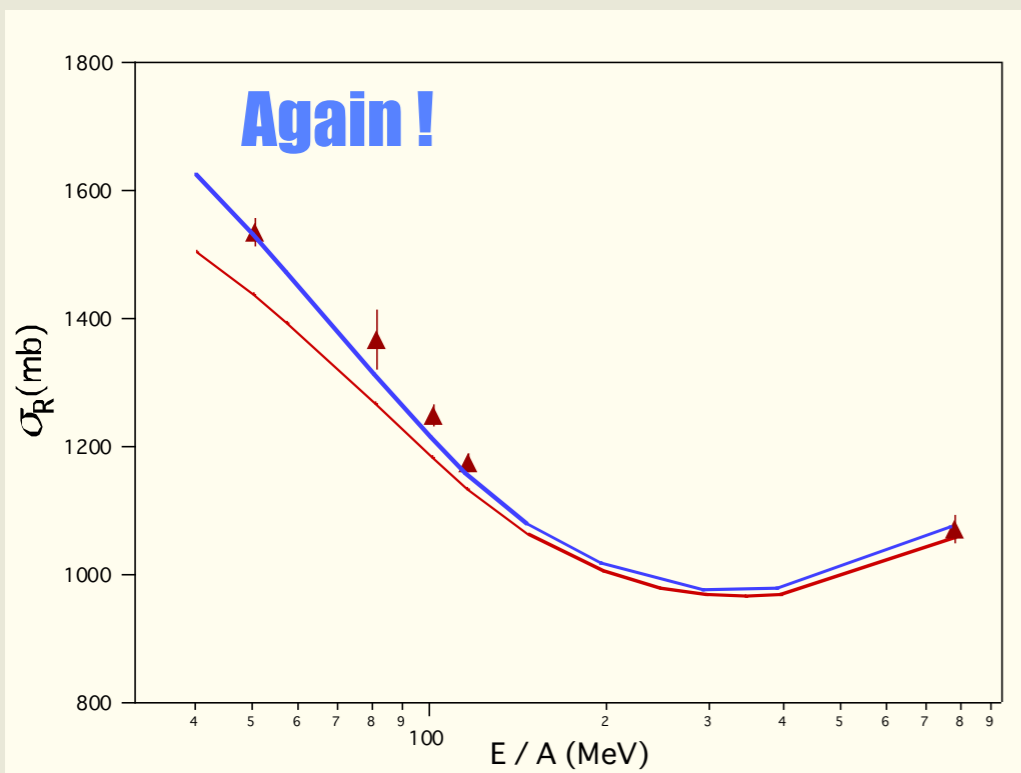
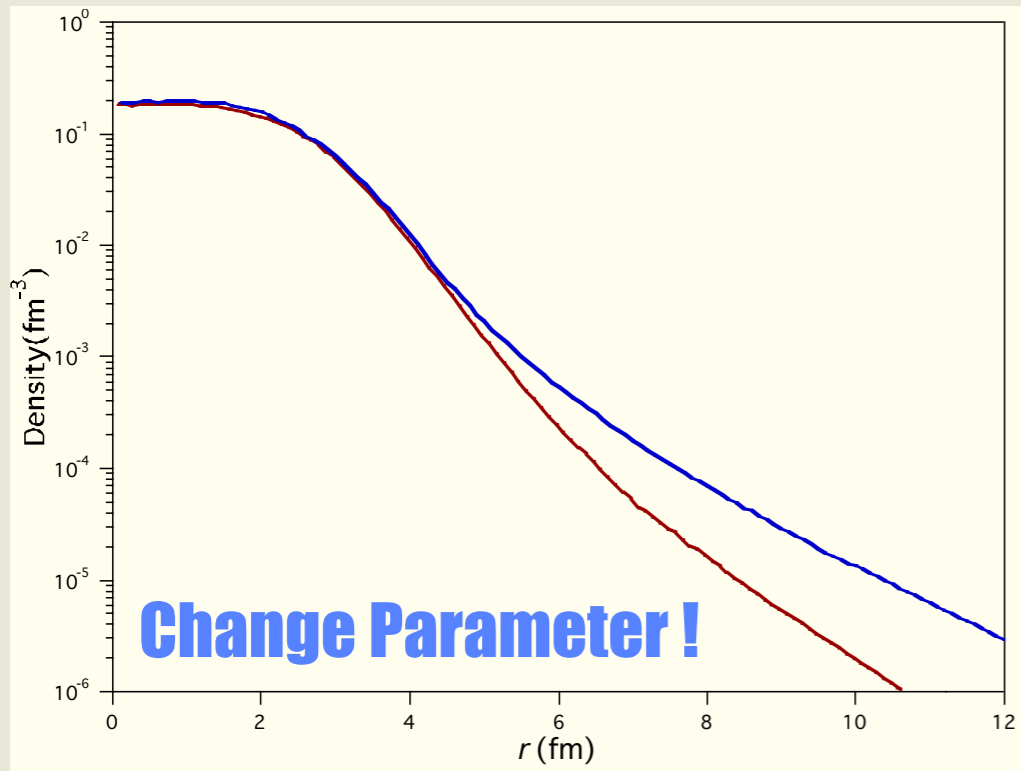


反応断面積のエネルギー依存性を用いる方法



How to Deduce Nucleon Density

~ χ^2 fitting procedure ~



$$\rho(r)$$

$\rho(r)$: Model Density

*Glauber
Calculation*

$$\sigma_R(\text{Calc.})$$

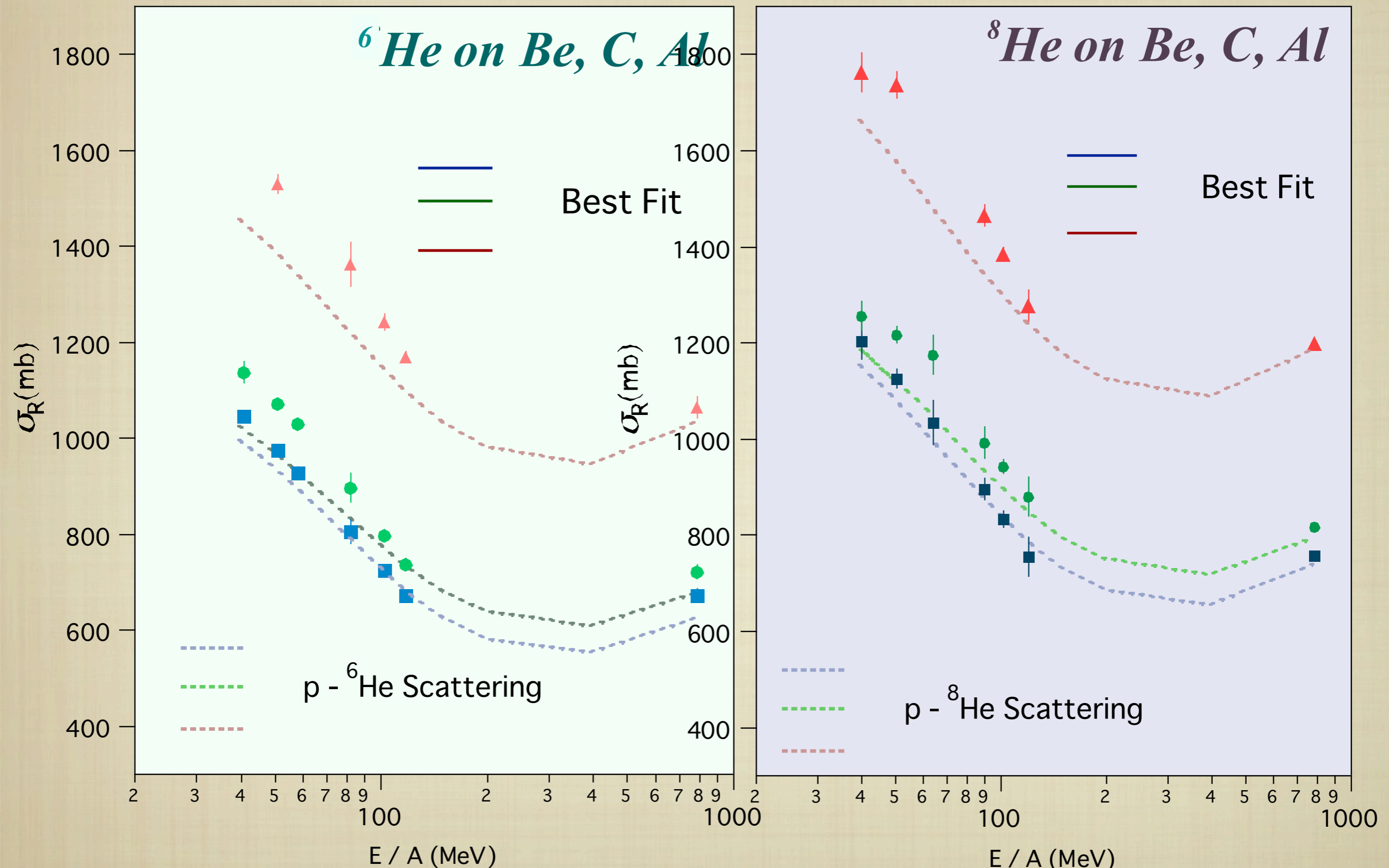
Compare

$$\sigma_R(\text{Expt.})$$

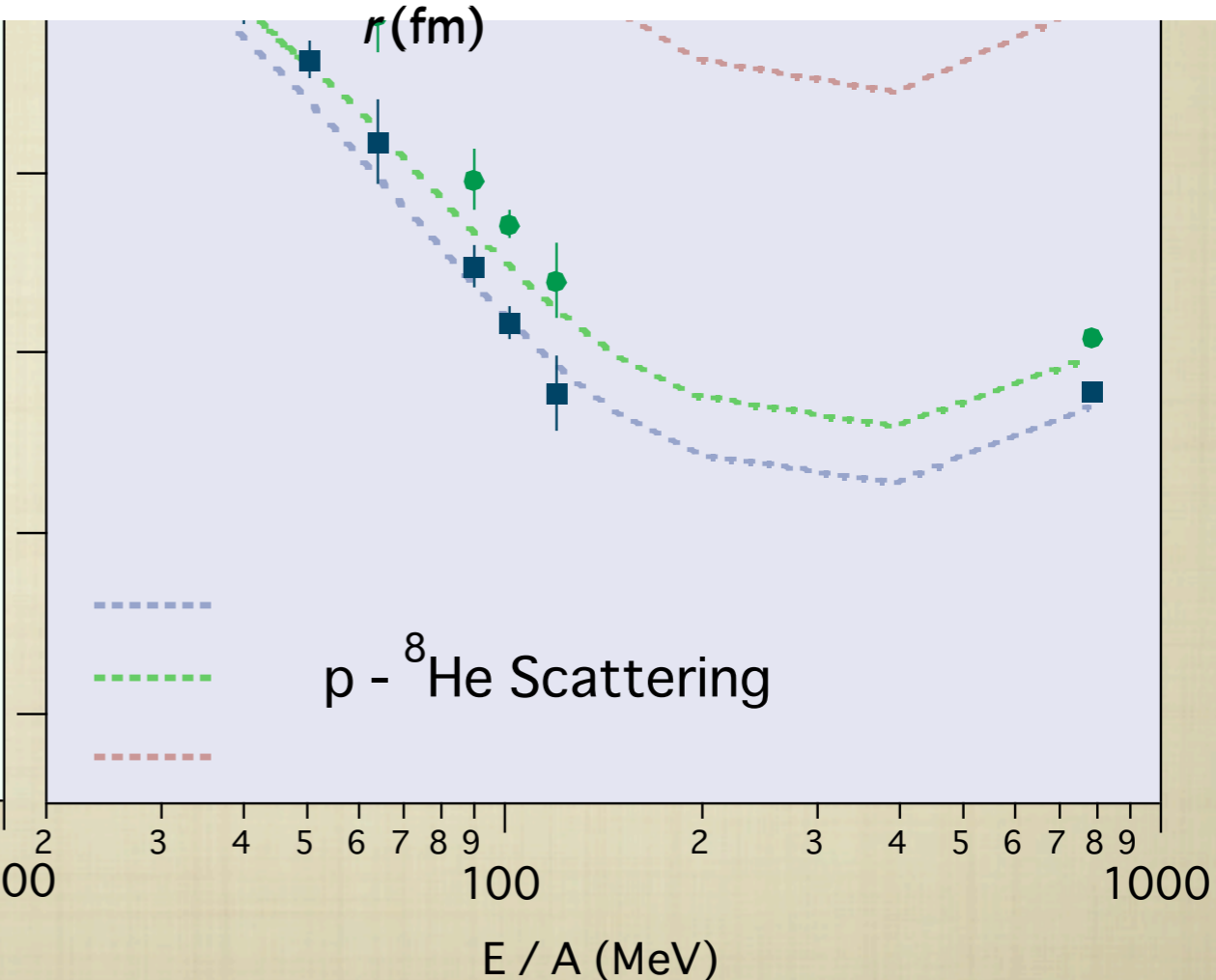
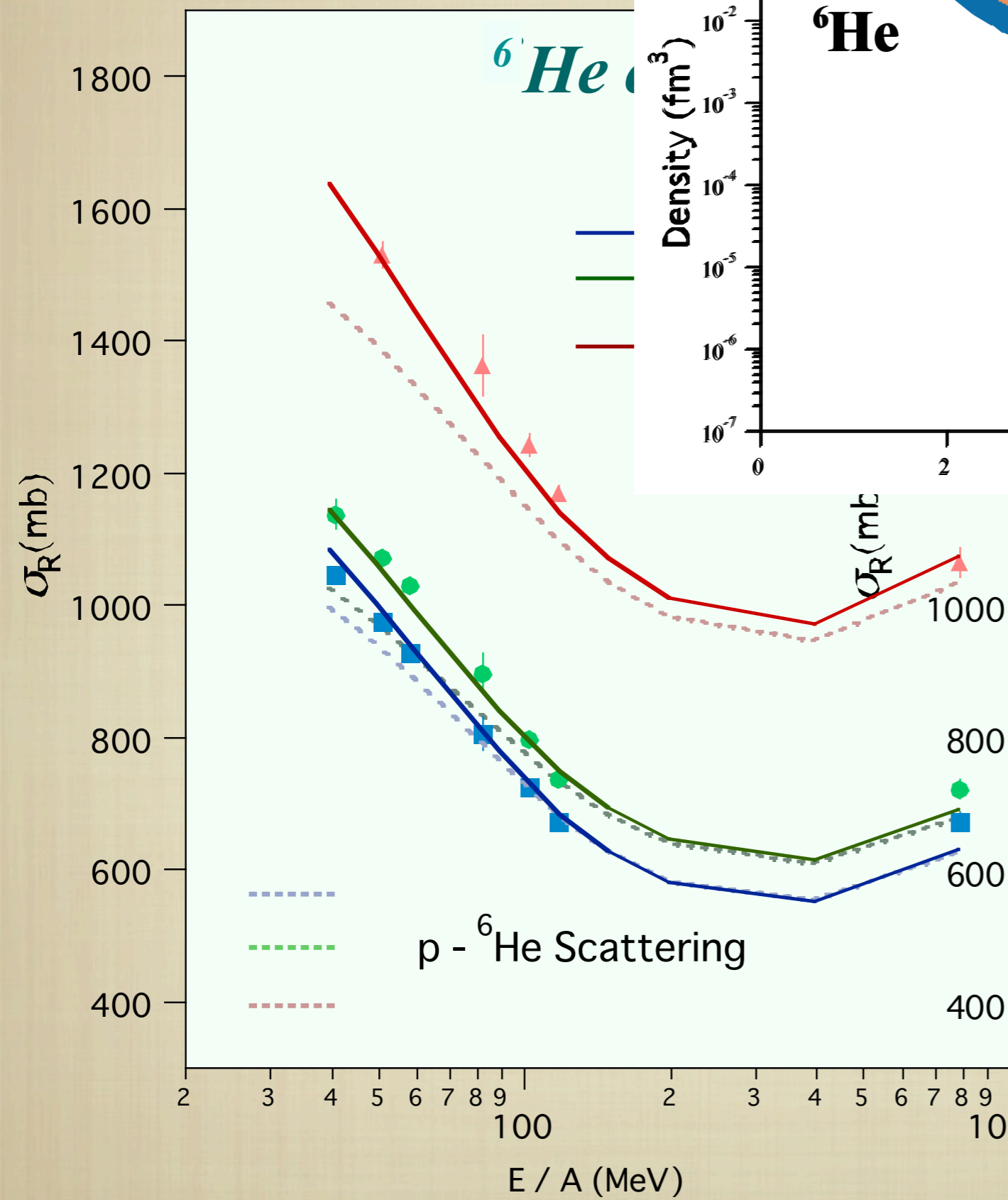
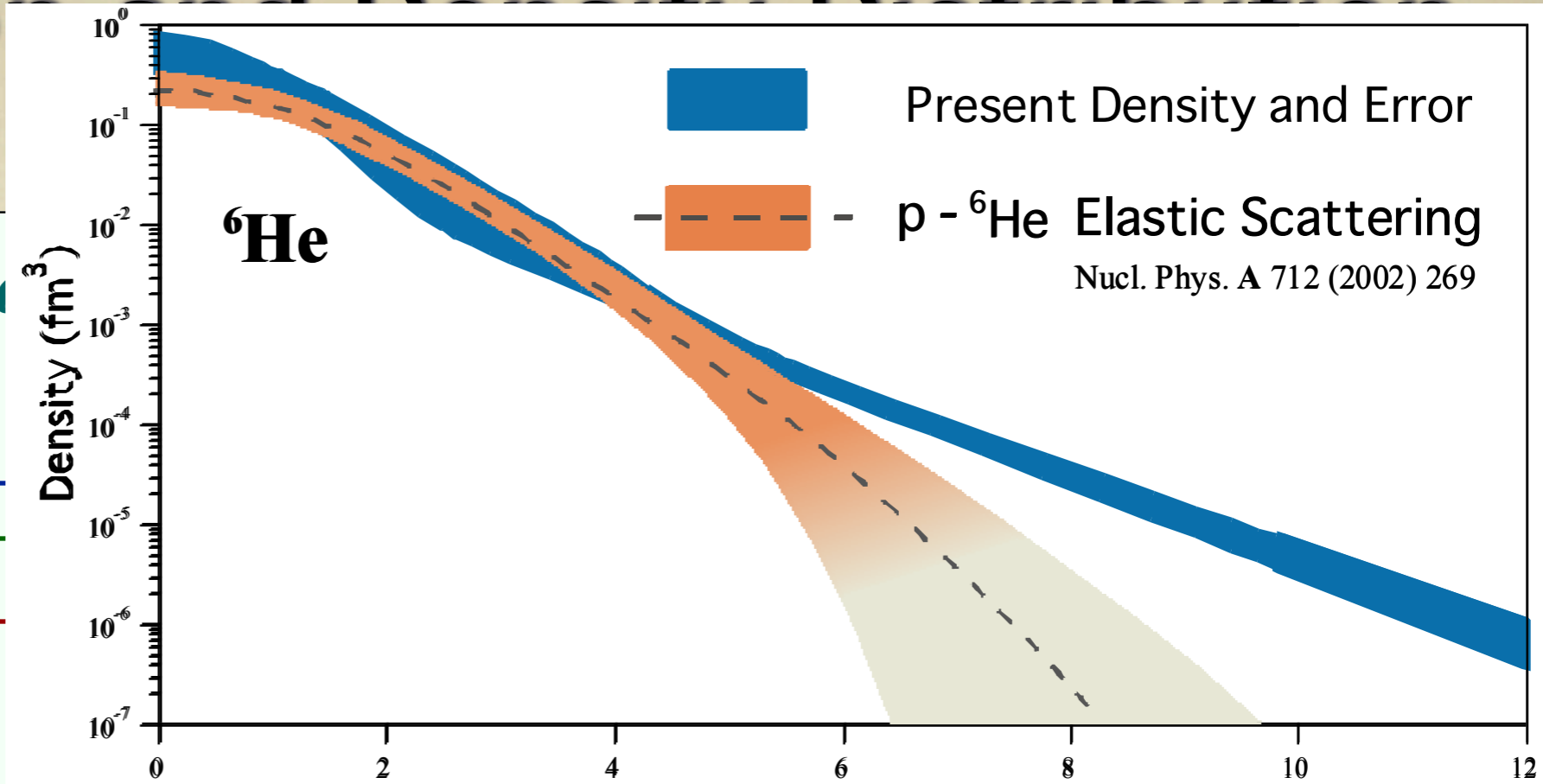
Feed Back

不安定核核子密度分布導出への応用

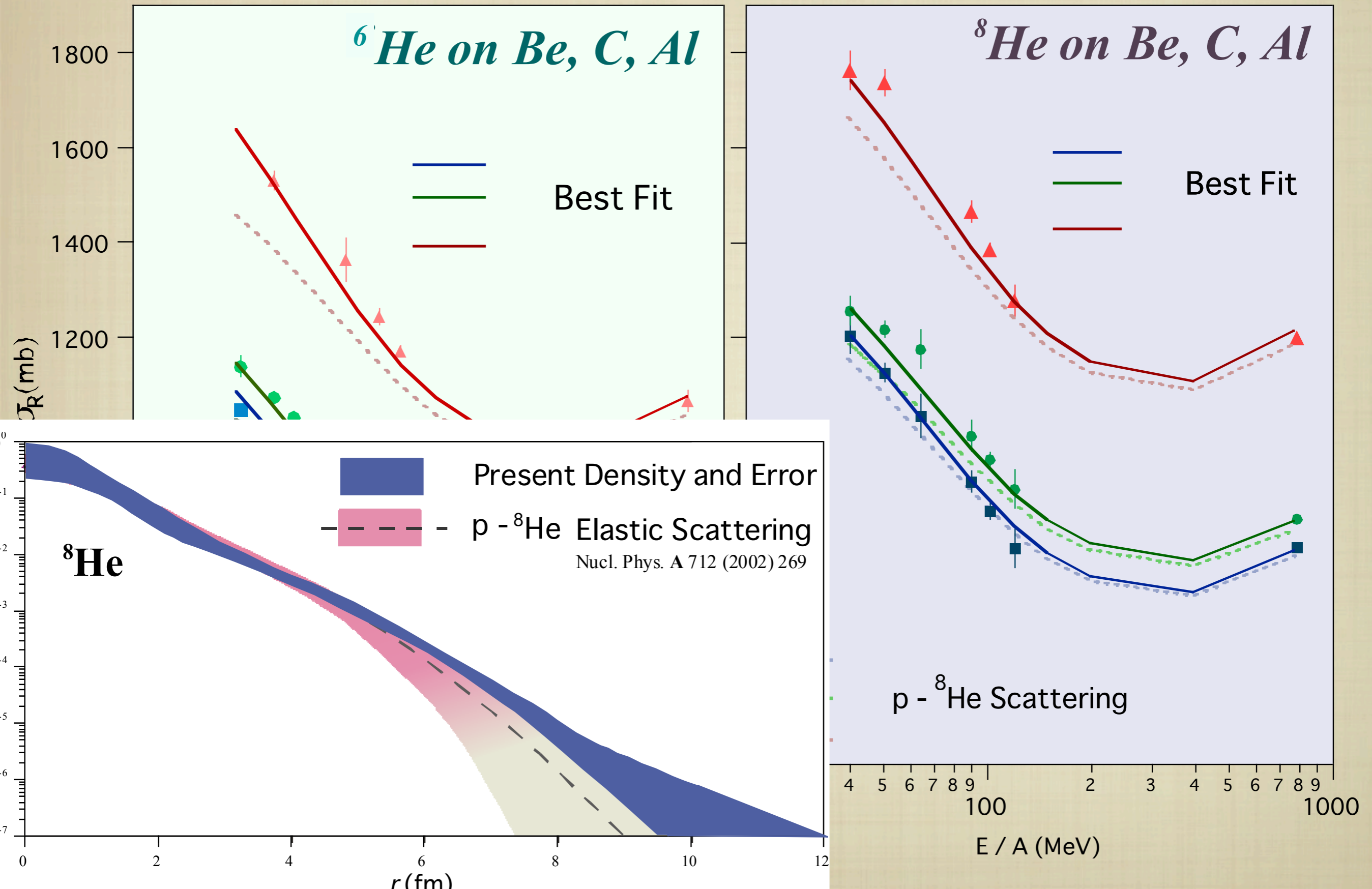
Cross Section and Density Distribution



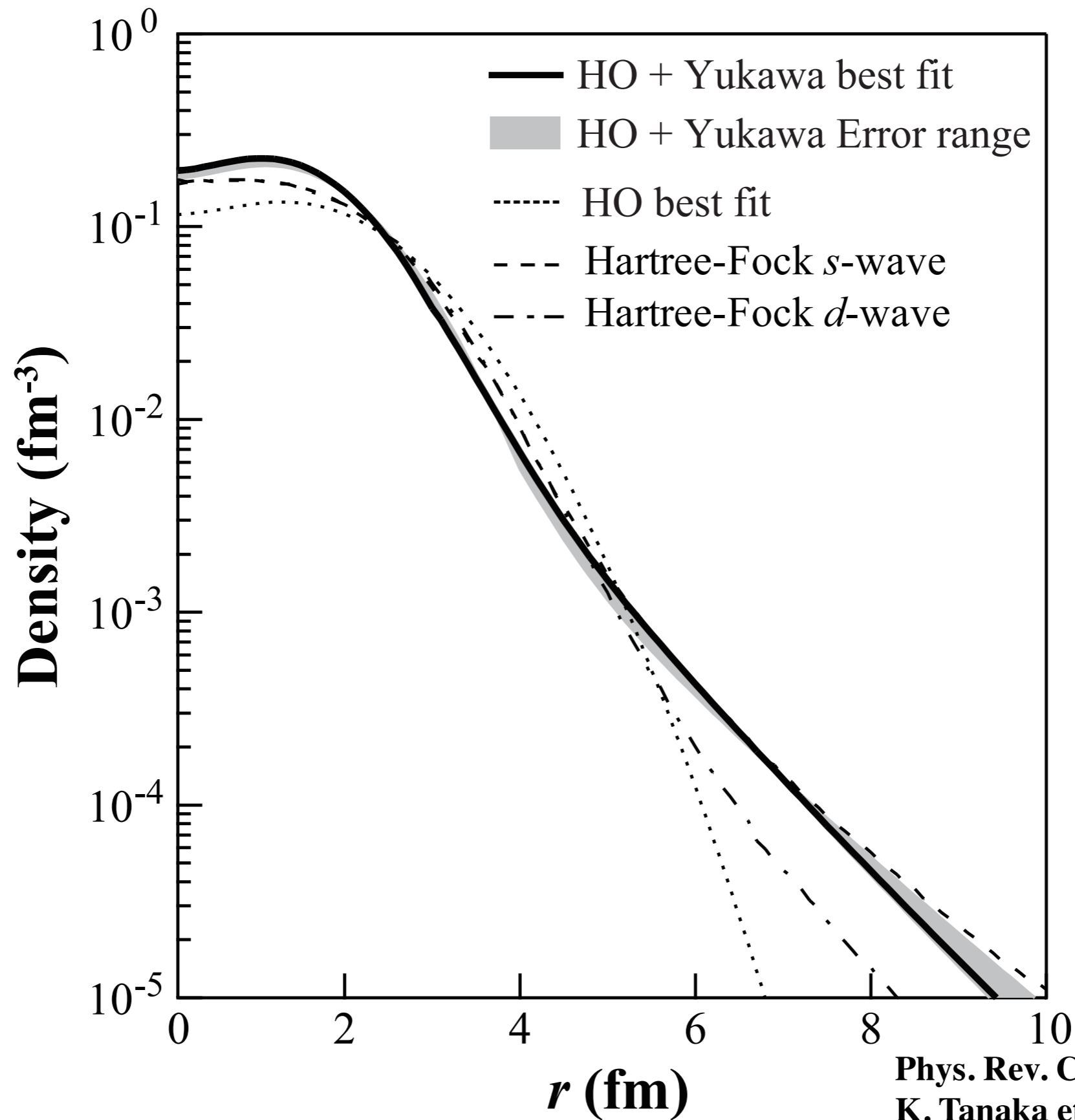
Cross Section and Density Distribution



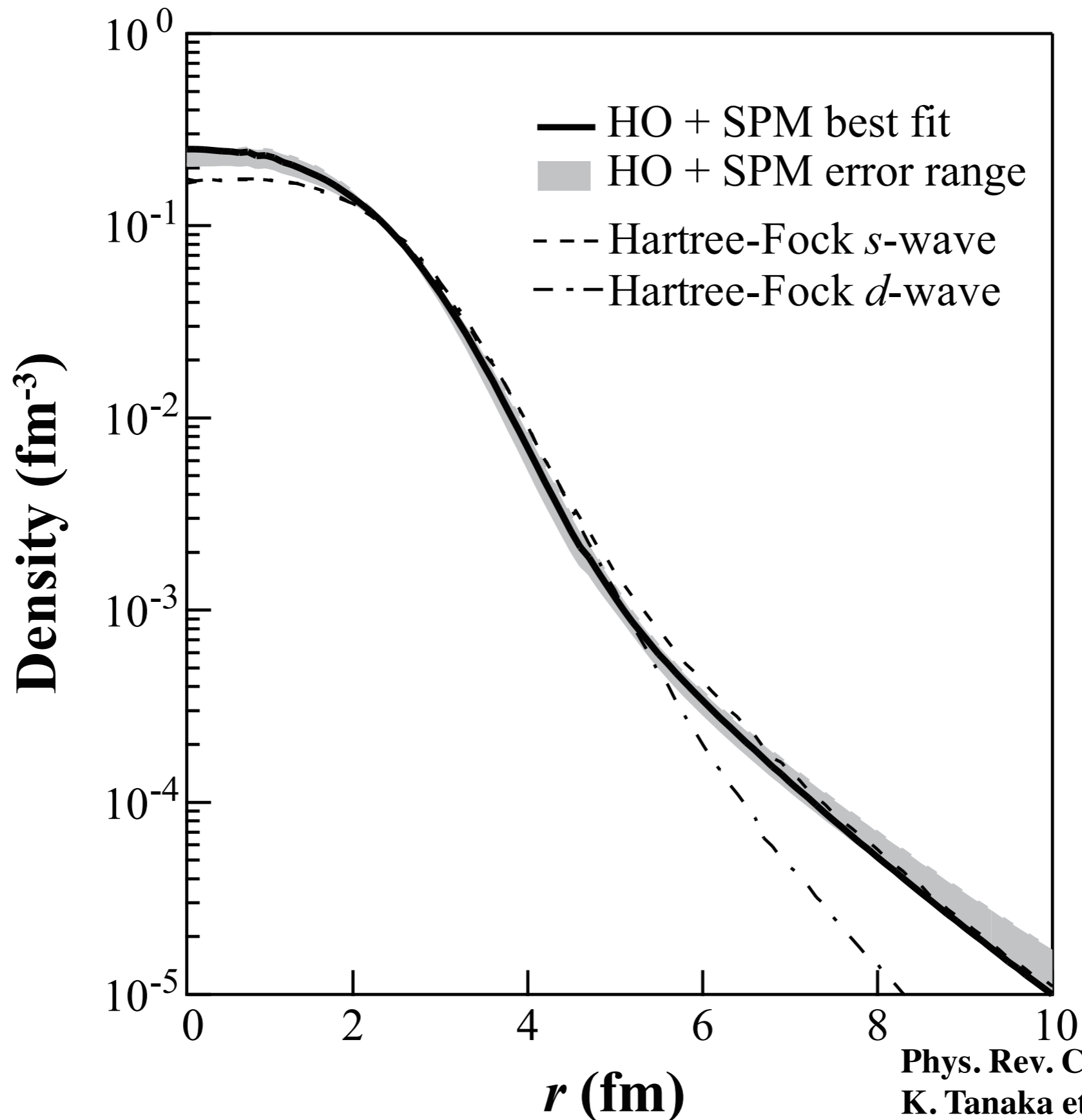
Cross Section and Density Distribution



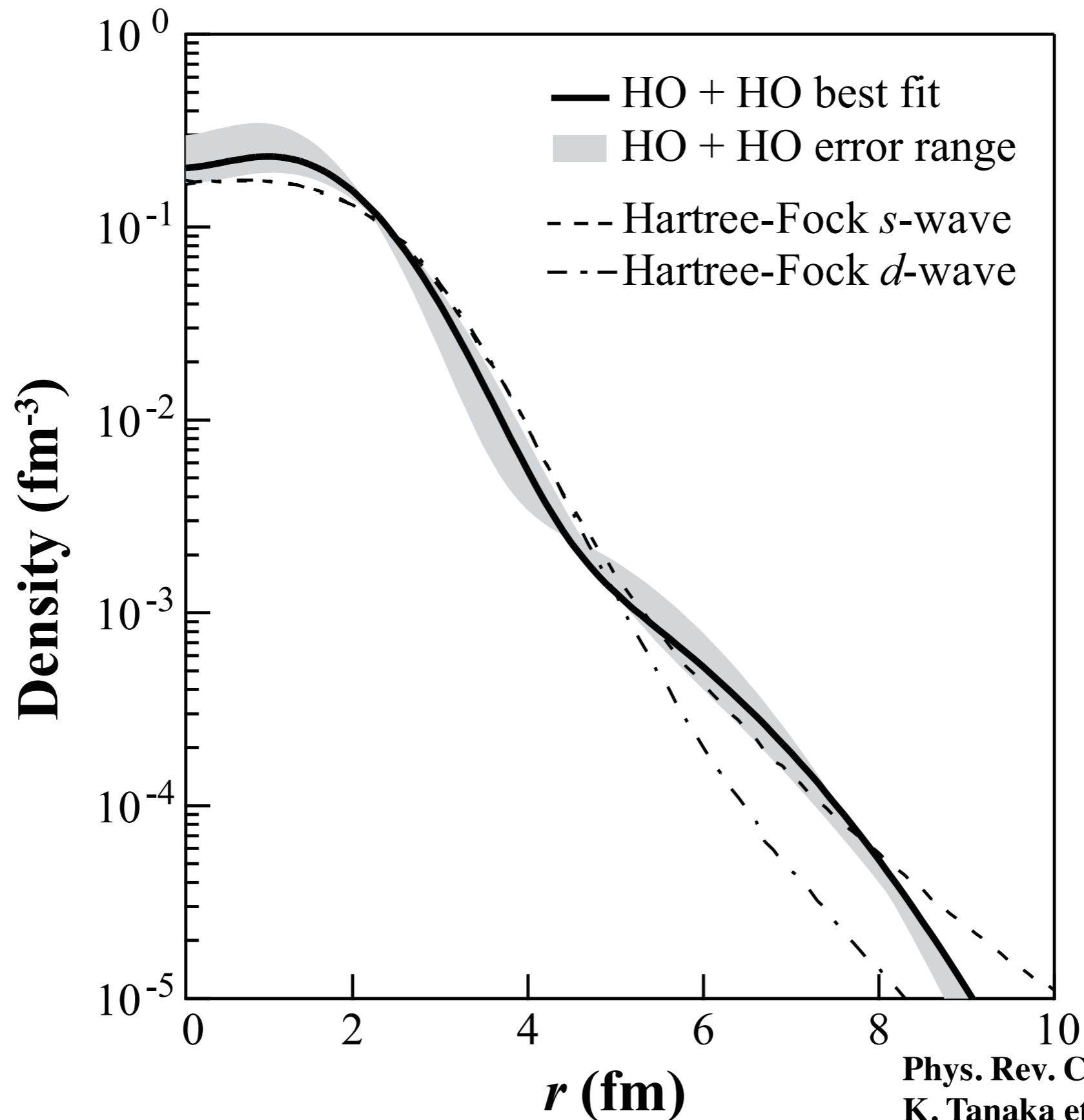
Nucleon Density Distribution of ^{17}Ne



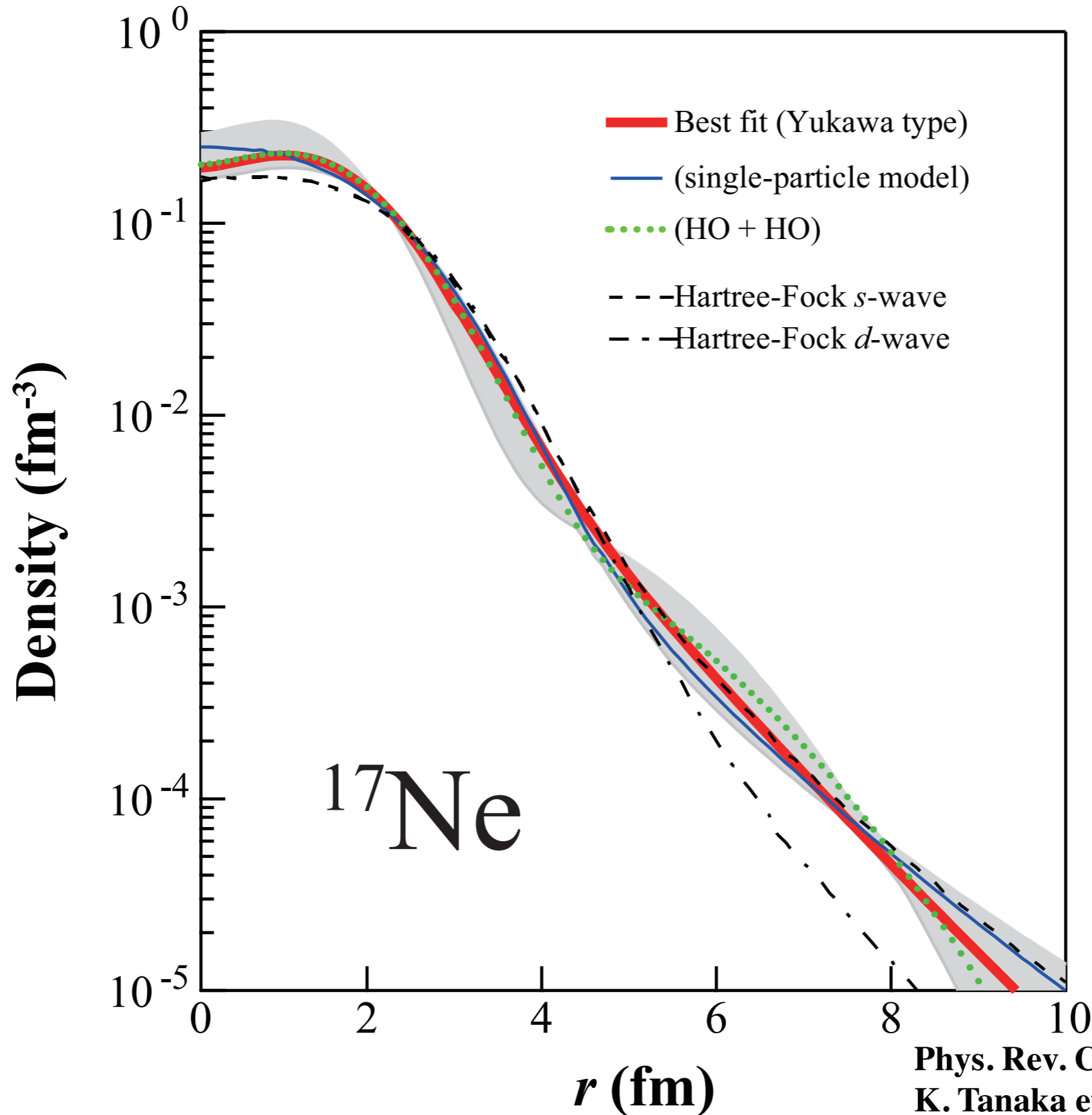
Nucleon Density Distribution of ^{17}Ne



Nucleon Density Distribution of ^{17}Ne



Nucleon Density Distribution of ^{17}Ne



陽子・中性子密度分布(半径)の独立決定

陽子分布半径を他の実験から

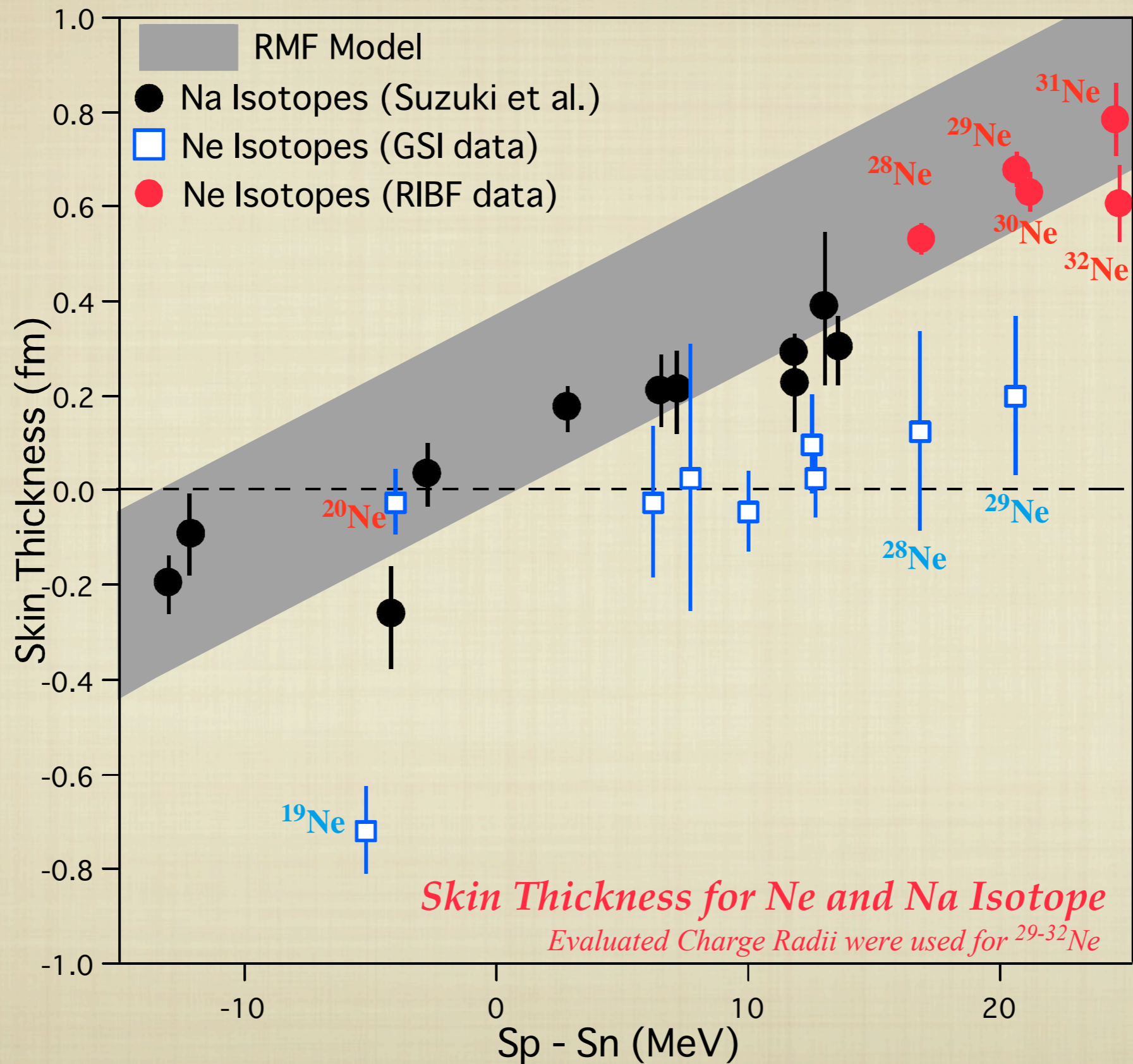
$$A \langle r_m^2 \rangle = Z \langle r_p^2 \rangle + N \langle r_n^2 \rangle$$

$$\langle r_m^2 \rangle \Leftarrow \sigma_R$$

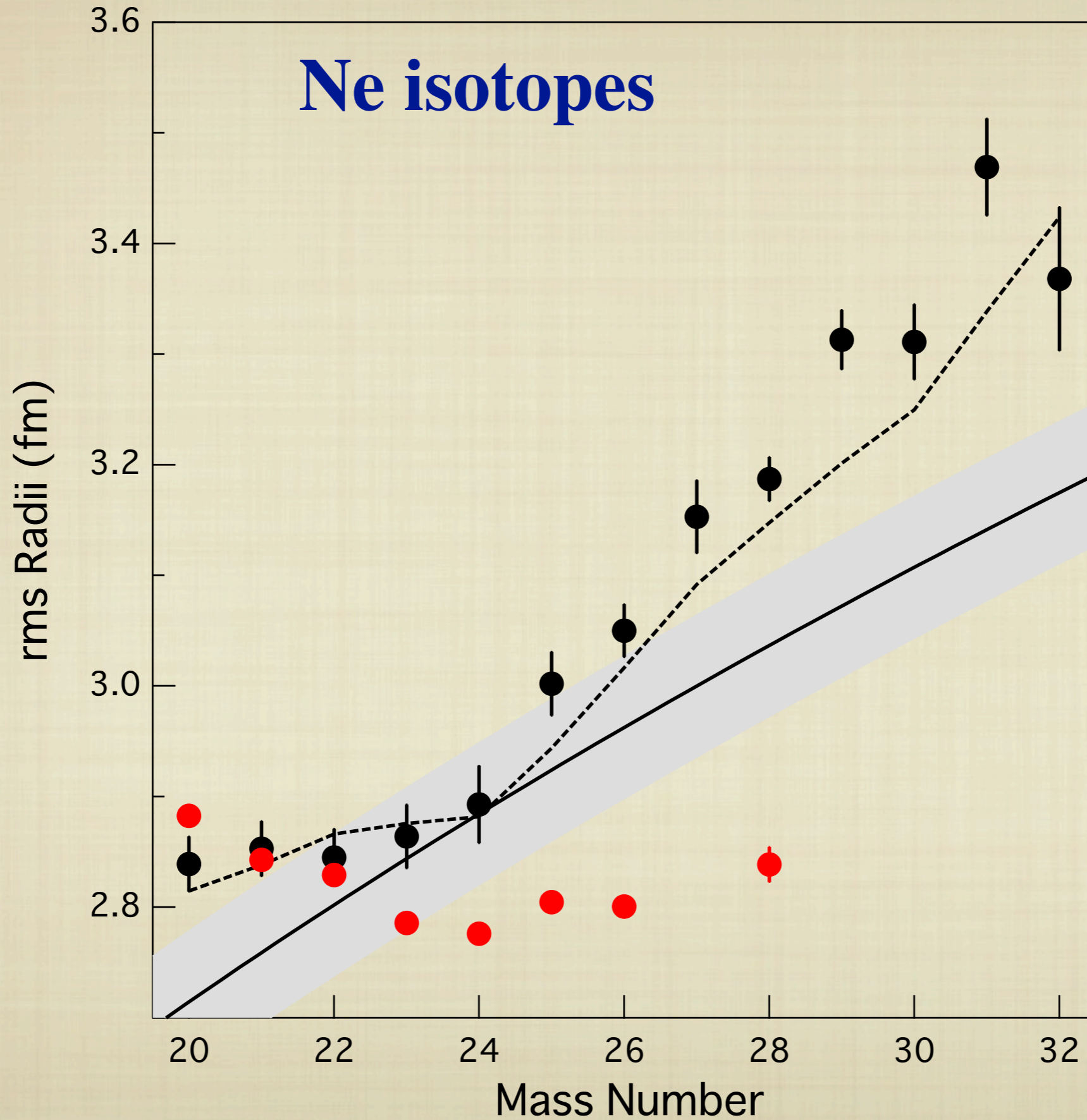
$$\langle r_p^2 \rangle \Leftarrow \text{電子散乱} \cdot \text{アイソトープシフト}$$

$$\Delta R = \sqrt{\langle r_n^2 \rangle} - \sqrt{\langle r_p^2 \rangle}$$

Ne, Na 同位体の中性子スキン



Ne 同位体の核子分布・陽子分布半径

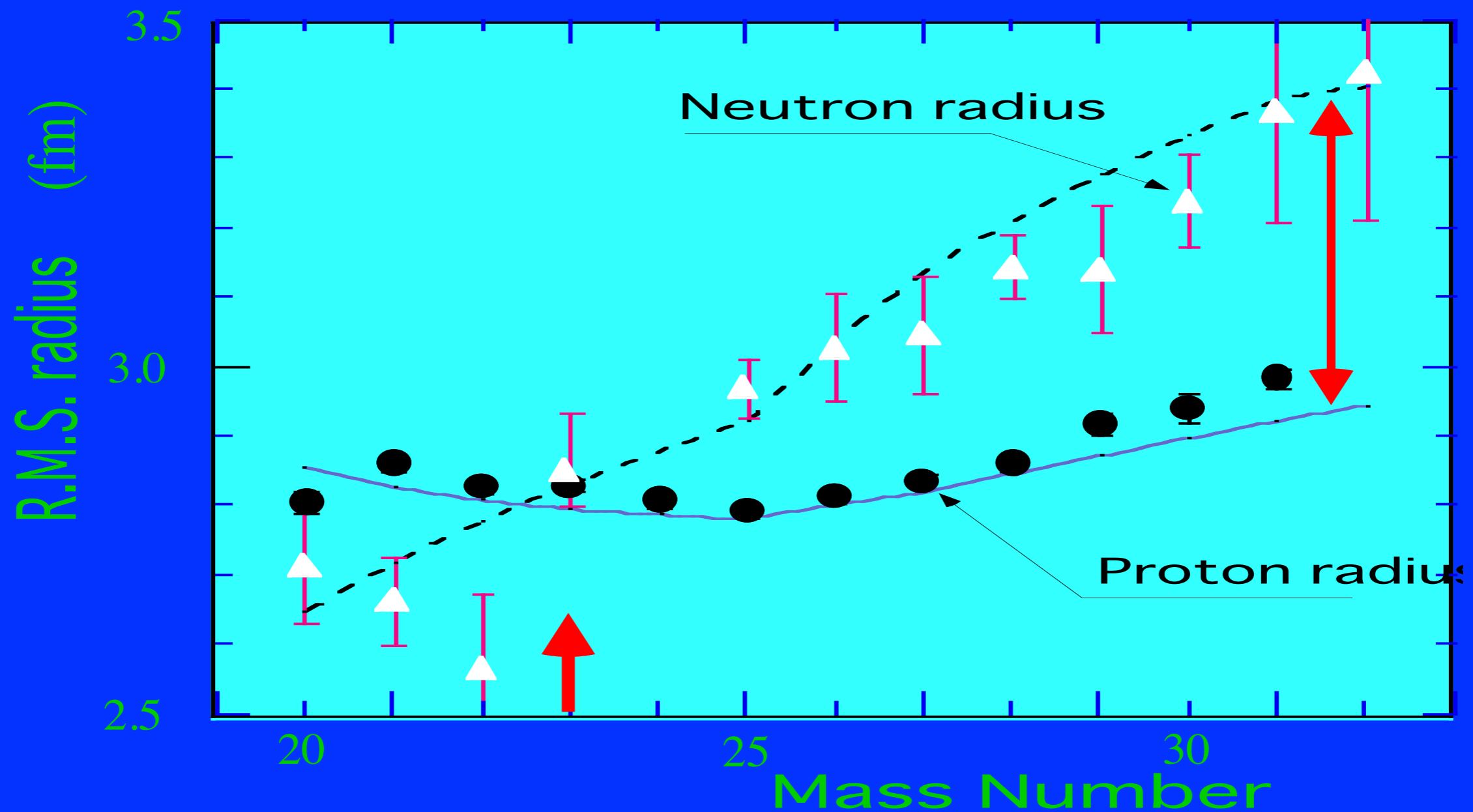


Neutron skin in Na isotope

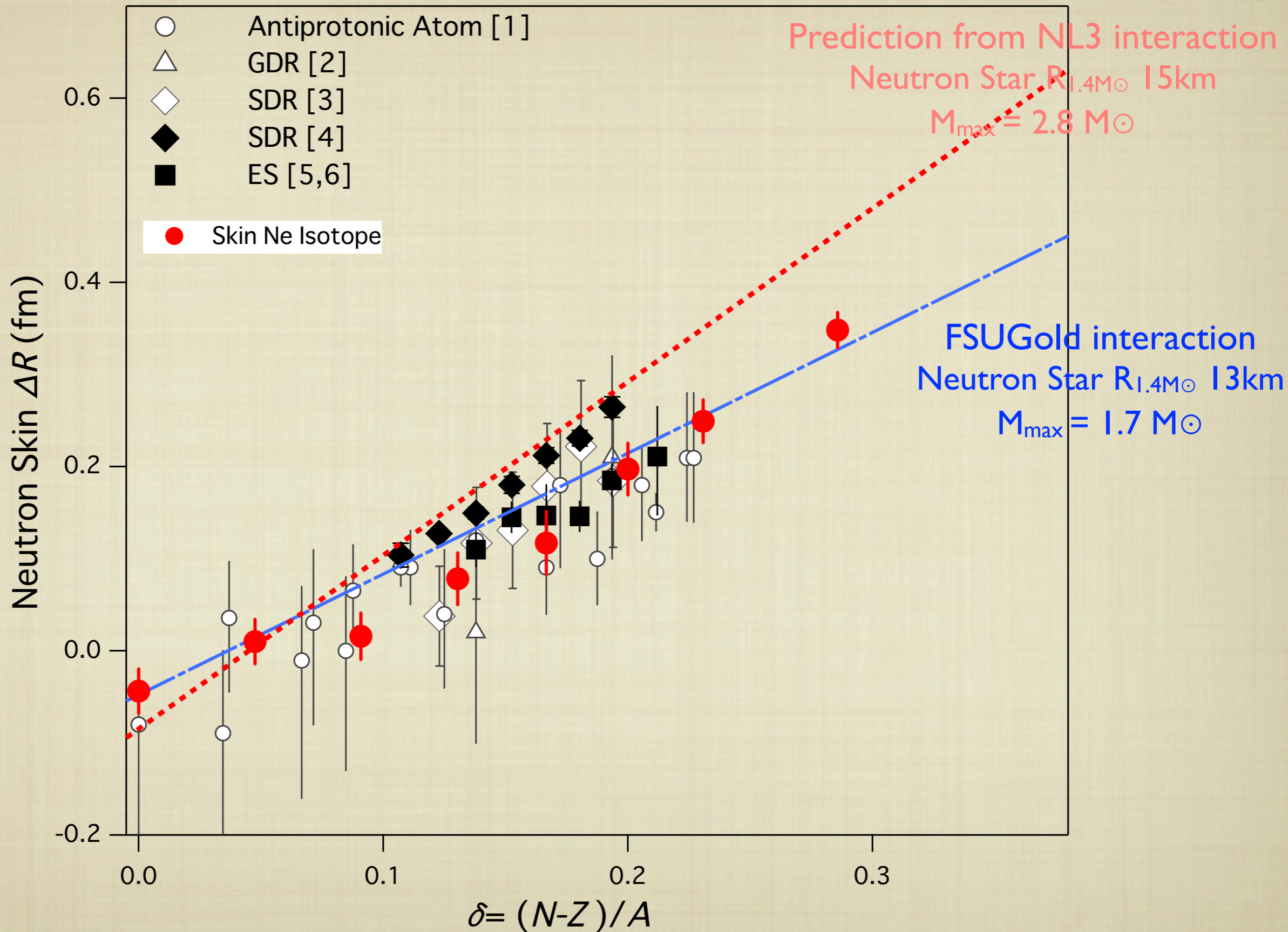
$$\langle R_m \rangle^2 = Z/A \langle R_p \rangle^2 + N/A \langle R_n \rangle^2 \quad DR = (\langle R_p \rangle^2)^{1/2} - (\langle R_n \rangle^2)^{1/2}$$

$\uparrow s_I$

\uparrow isotope shift...etc



Ne 同位体の中性子スキン

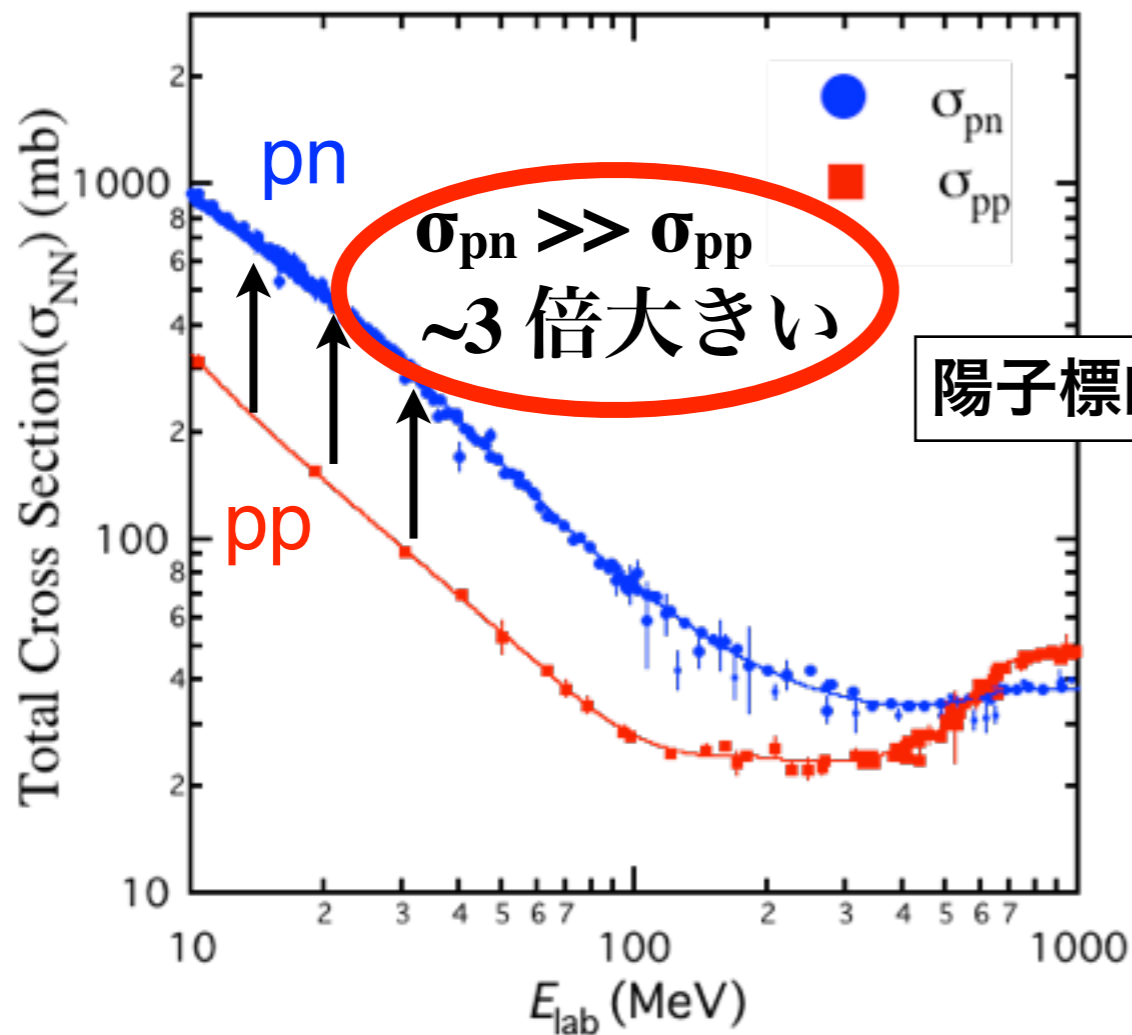


陽子分布・中性子分布の分離

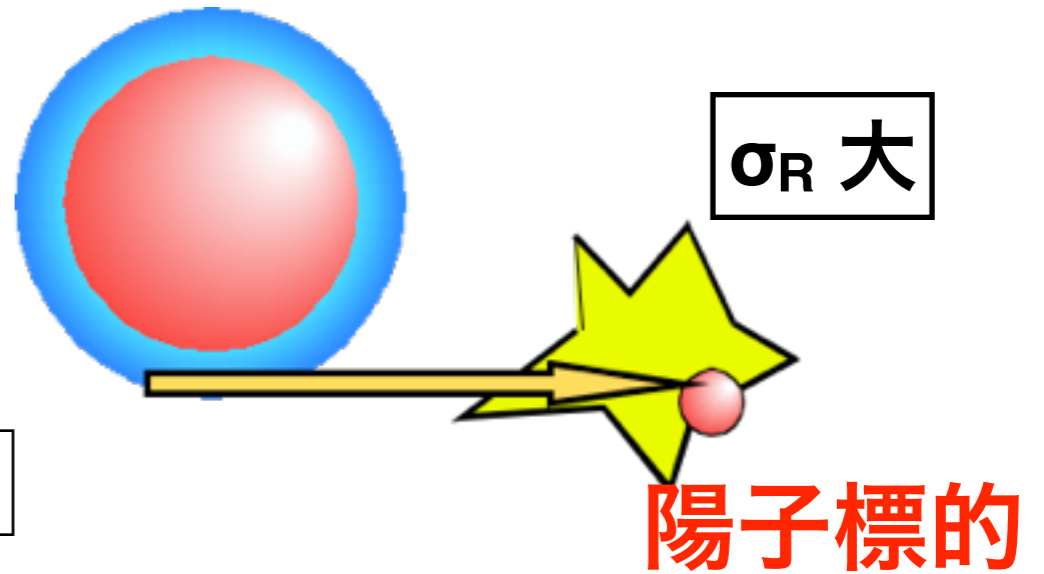
核子核子全断面積のアイソスピン非対称性 を利用する方法

核力の性質(σ_{pp} と σ_{pn} の違い)

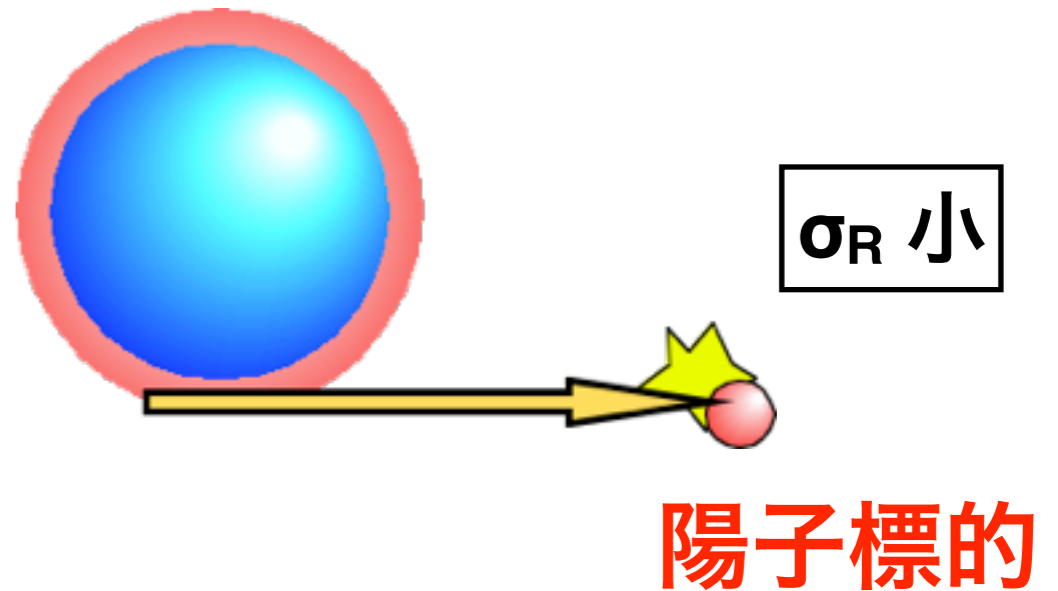
核子-核子全断面積 σ_{NN}



外側に中性子が広がった原子核

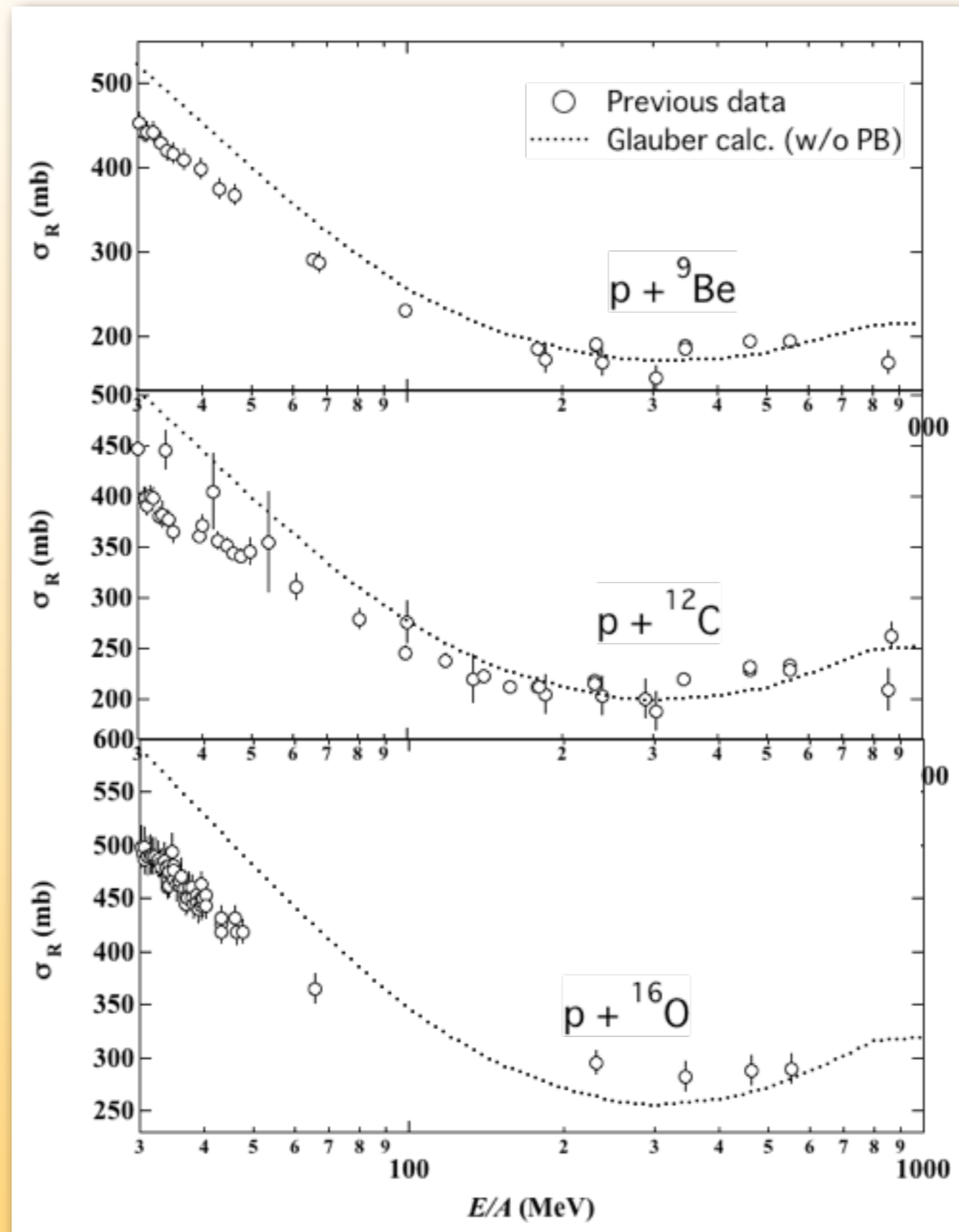


外側に陽子が広がった原子核



陽子-原子核 σ_R から陽子・中性子分布を分離可能

陽子標的の σ_R 実験値と計算値



パウリブロッキングの効果

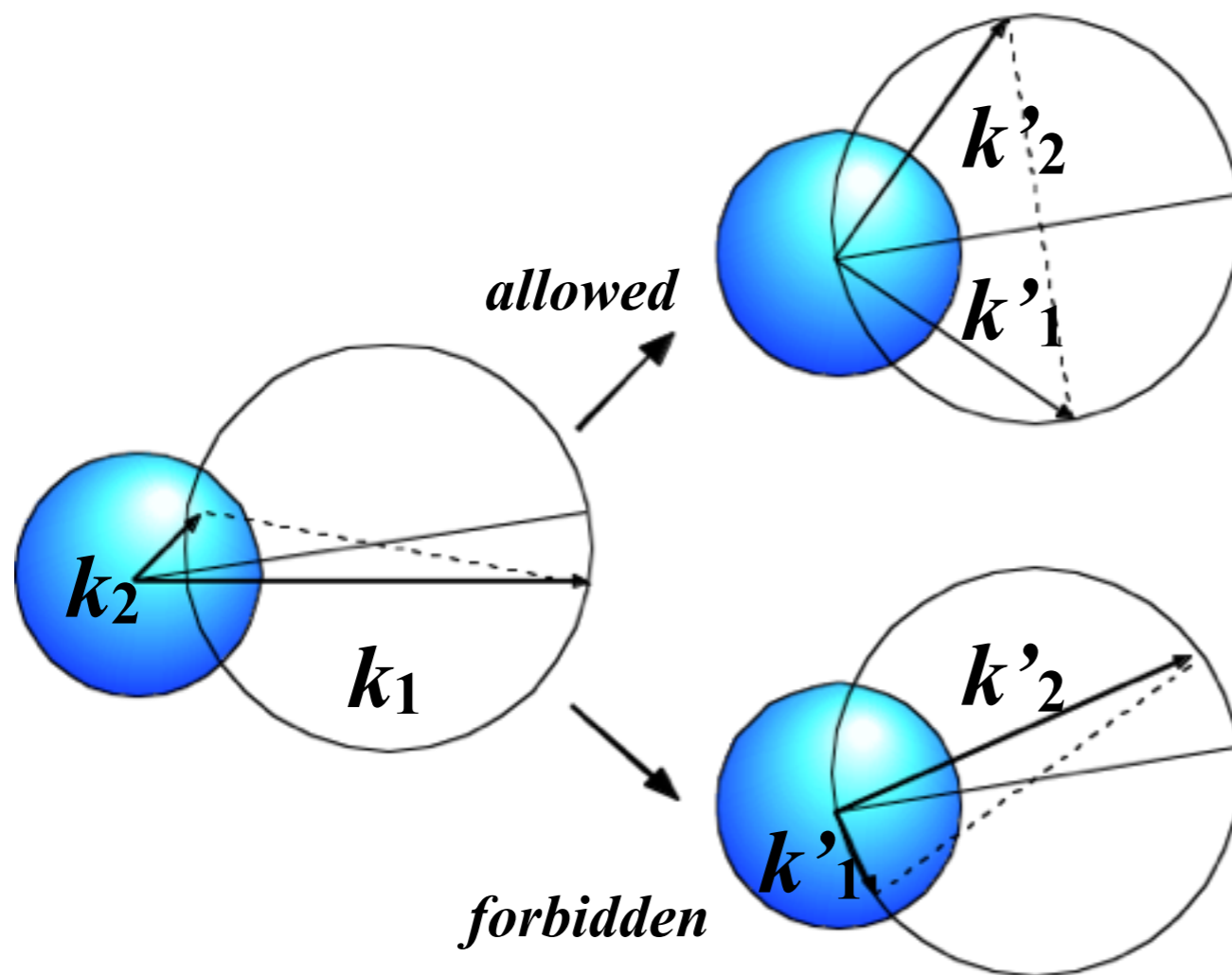
パウリブロッキング

反応後の核子の状態が既に占有されていると反応が禁止される効果。

運動量空間でのパウリブロッキングの表現

衝突前

衝突後



σ_{NN} の変更

$$\sigma_{NN}^{PB} = \int \sigma_{NN}^{free} \frac{\Omega_{\text{pauli}}}{4\pi} d\mathbf{k}_2$$

M. S. Hussein et al., Phys. Rep. 201 (1991) 279.

密度依存

$$k(r) = [3\pi^2 \rho(r)]^{1/3}$$

R. E. Warner et al., PRC 65 (2002) 044617

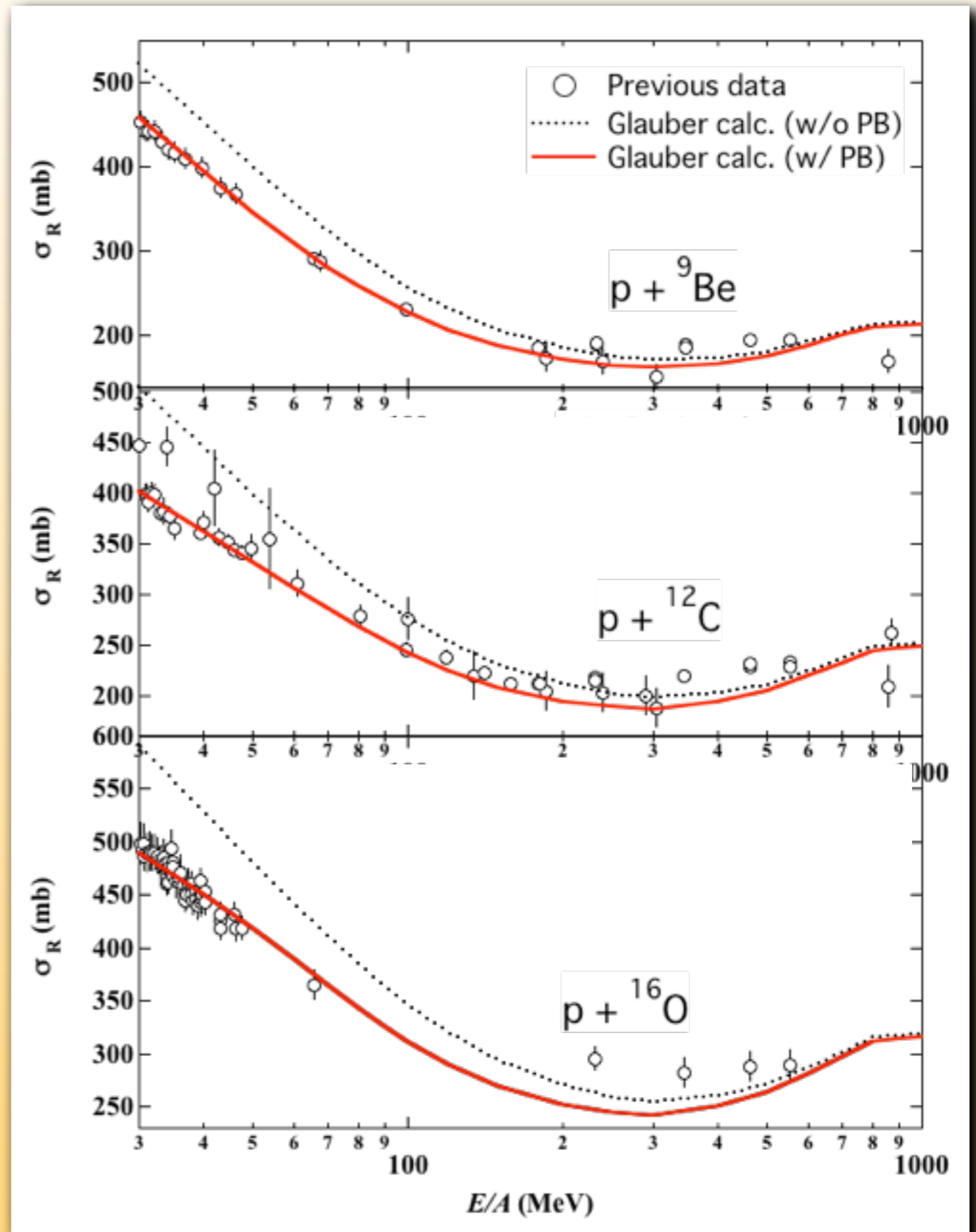
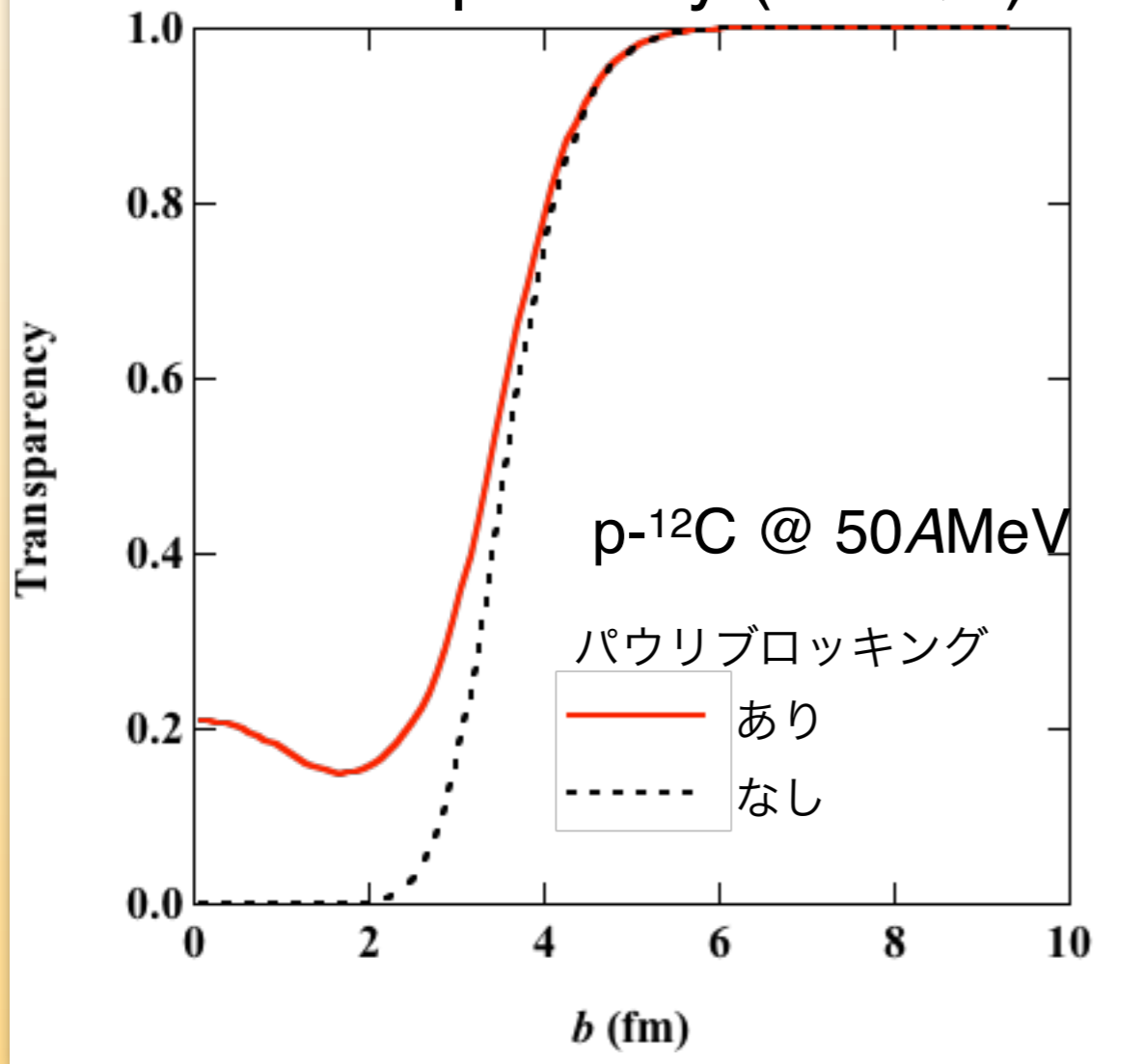
アイソスピン依存

$$k_p(r) \neq k_n(r)$$

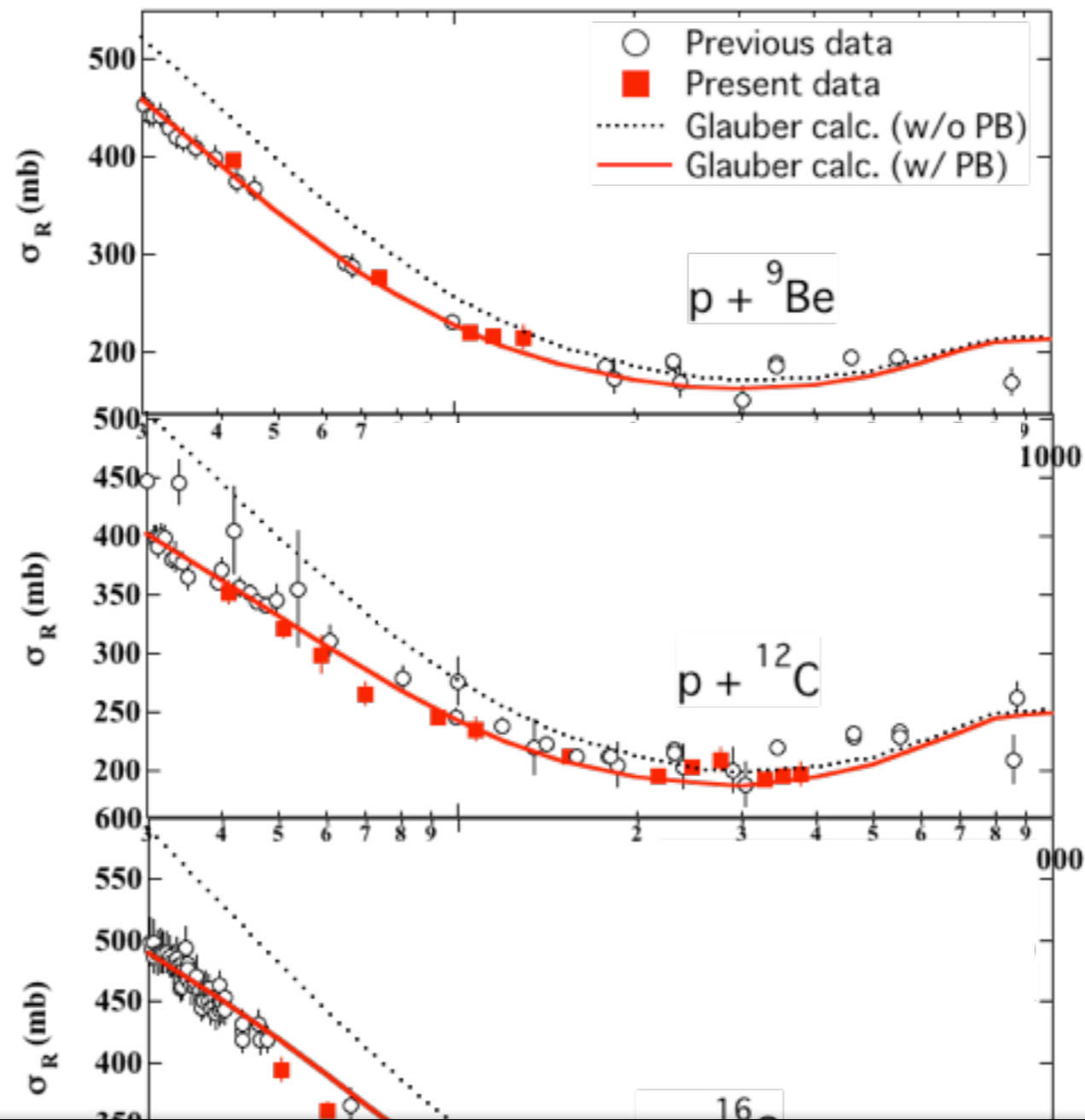
L.W.Chen et al., PRC64(2001)064315.

パウリブロッキングの効果

Transparency (透過度)

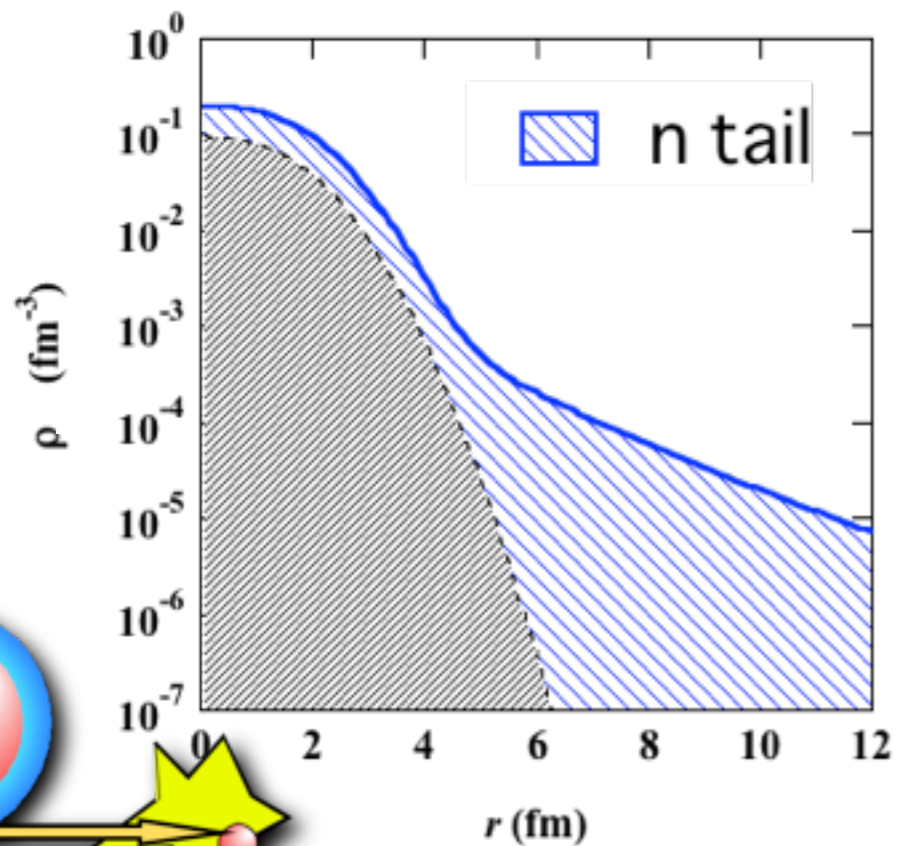
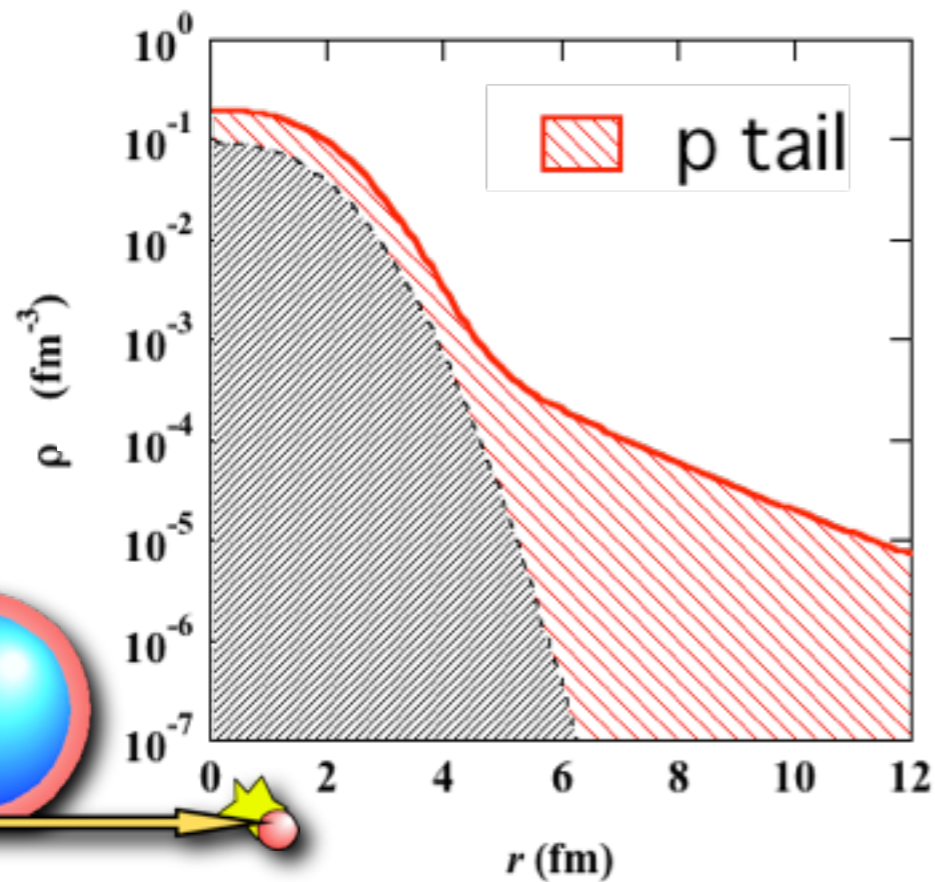


陽子-安定核 σ_R 実験結果

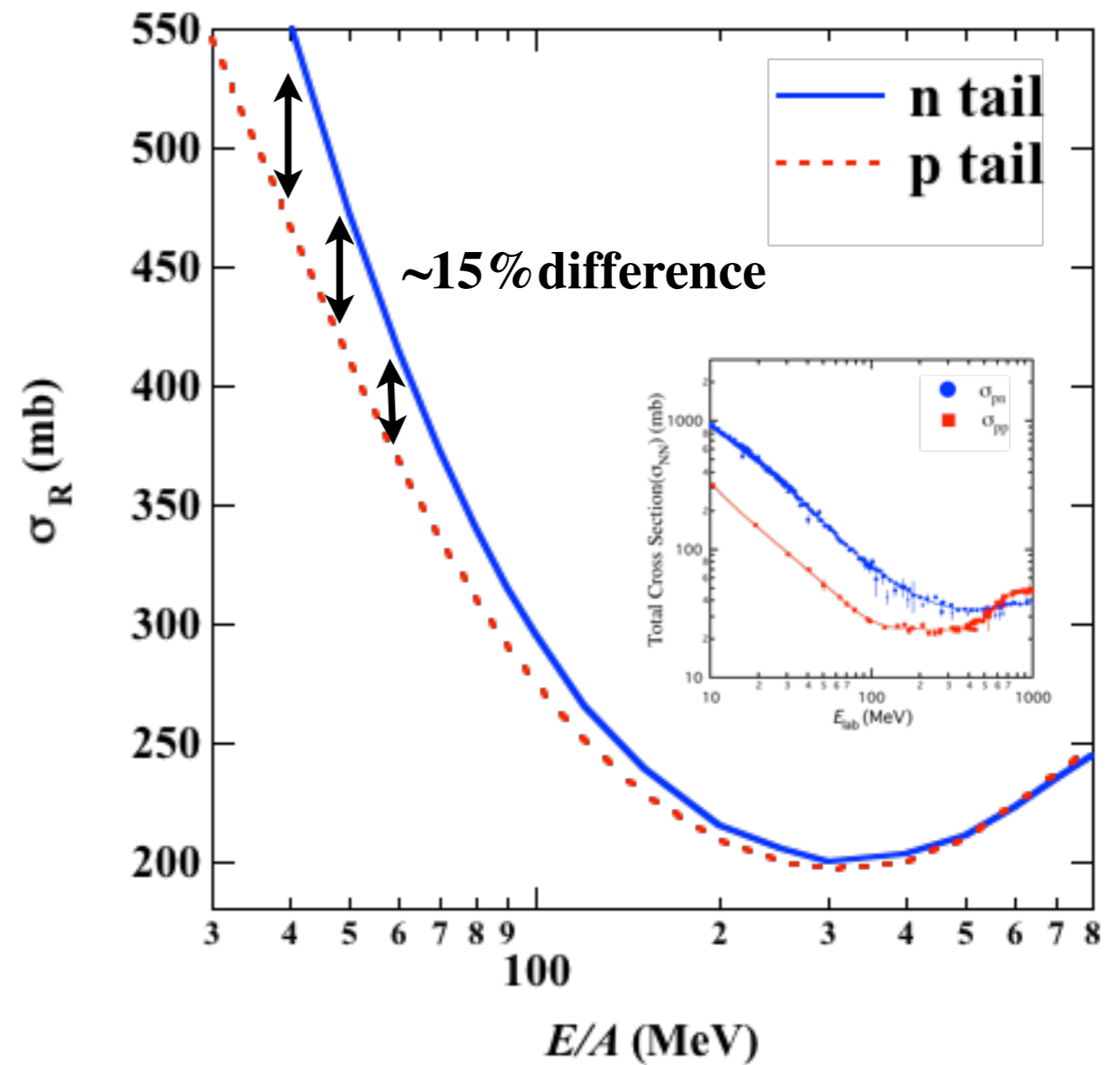


パウリブロッキングを考慮した
グラウバー計算が実験値を良く再現する。

陽子・中性子分布の分離法の計算例

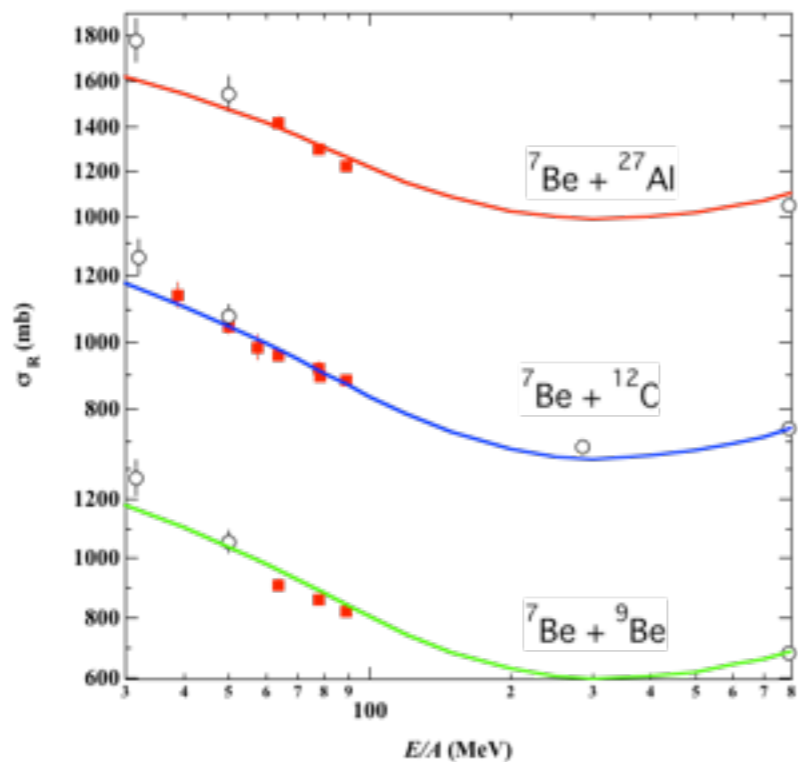


陽子との反応断面積の計算例

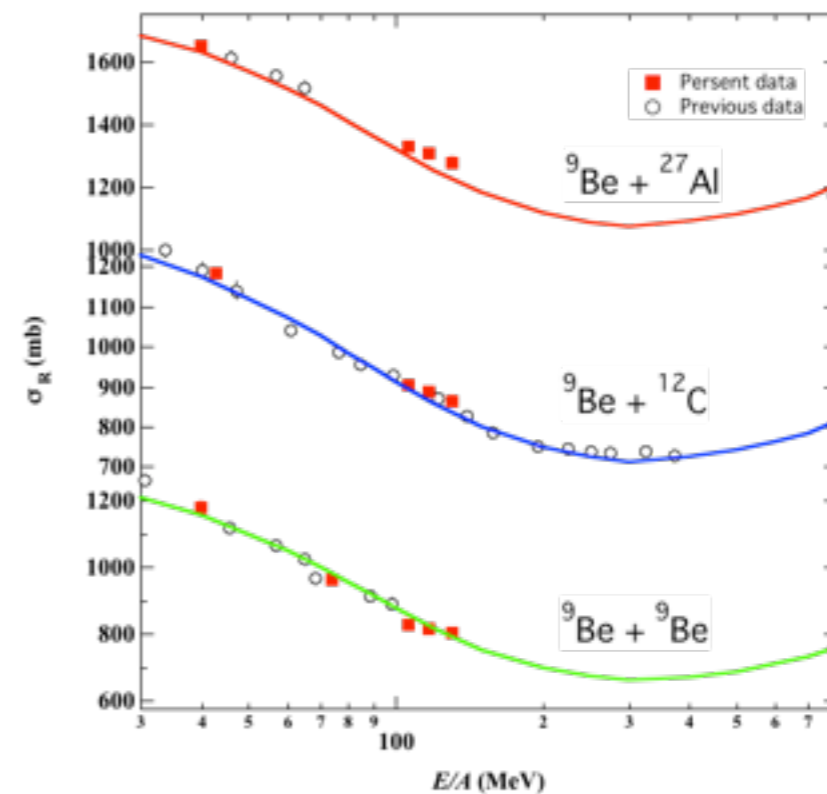


Be同位体-原子核の σ_R 実験結果

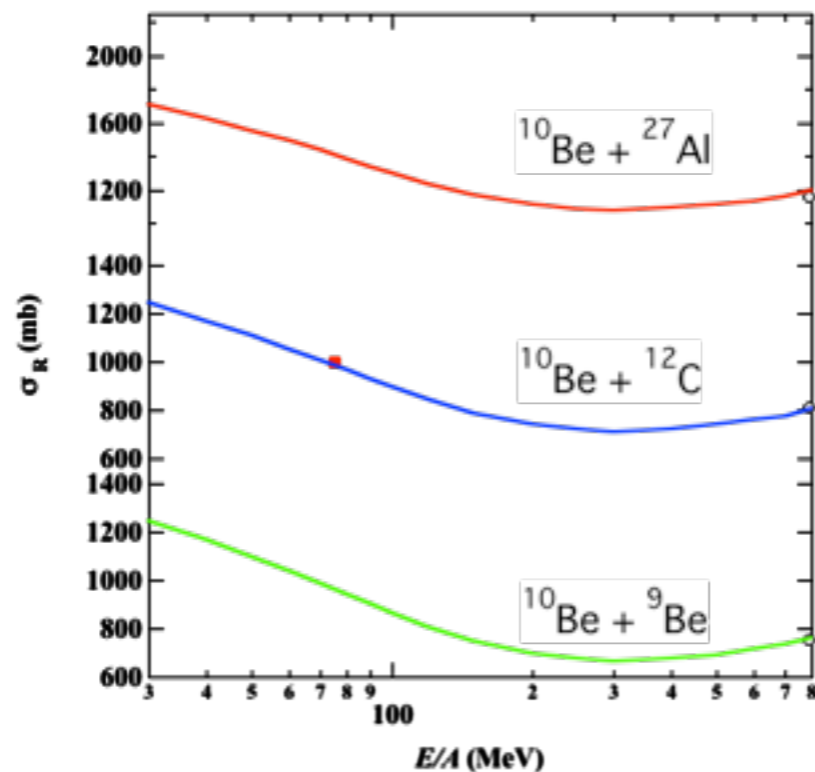
${}^7\text{Be}$



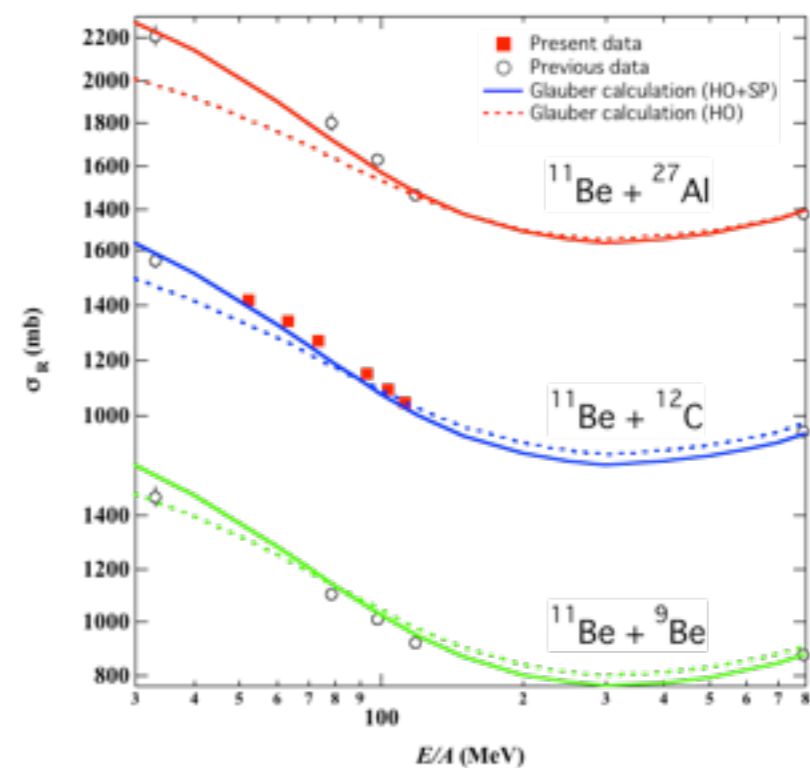
${}^9\text{Be}$



${}^{10}\text{Be}$

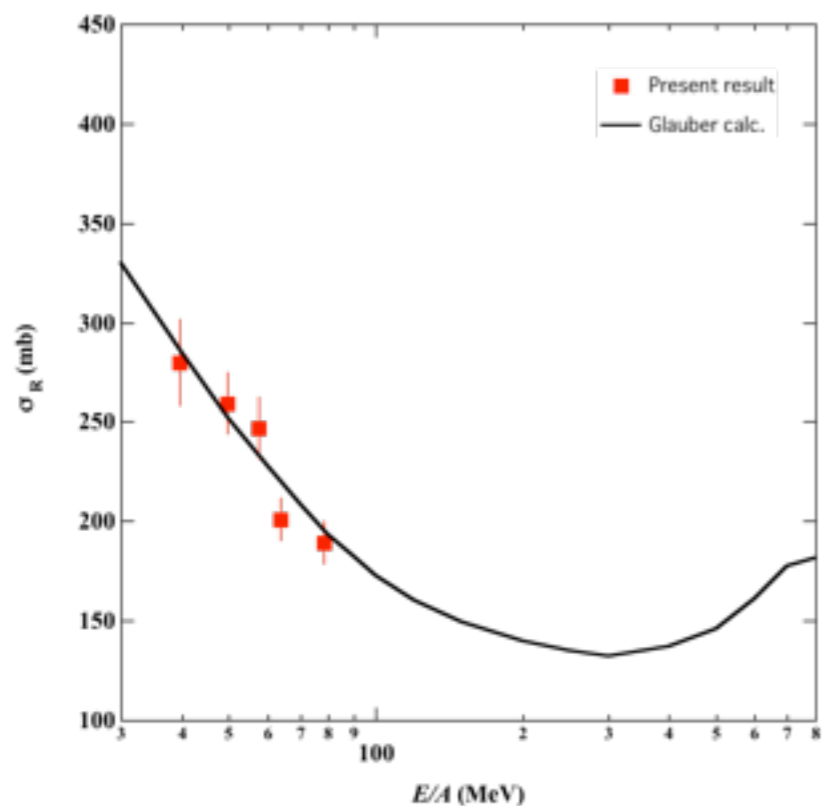


${}^{11}\text{Be}$

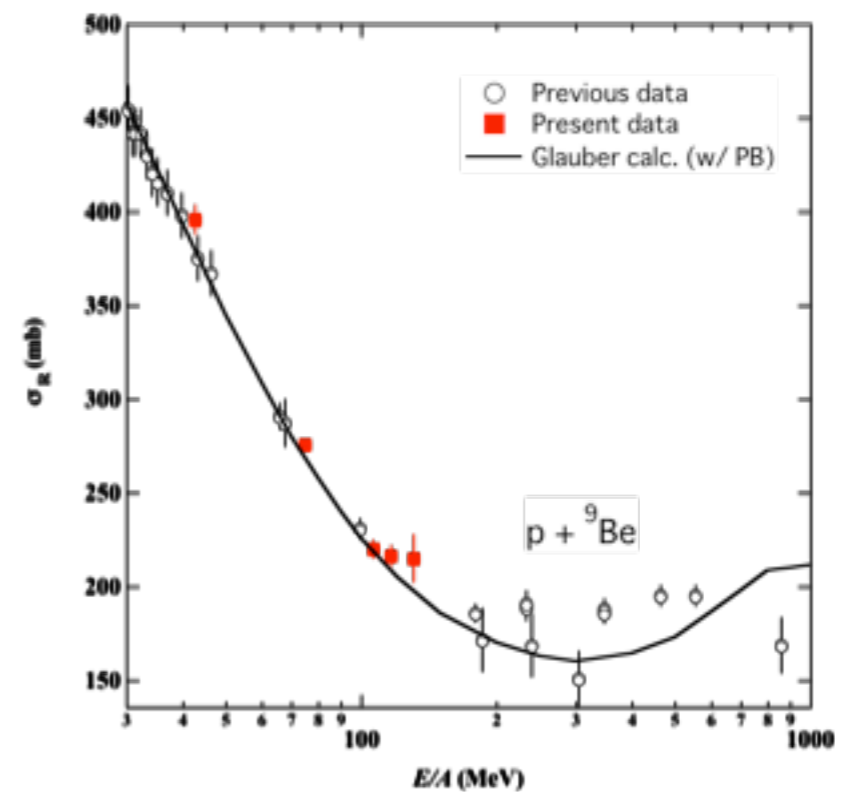


陽子-Be同位体 σ_R の実験結果

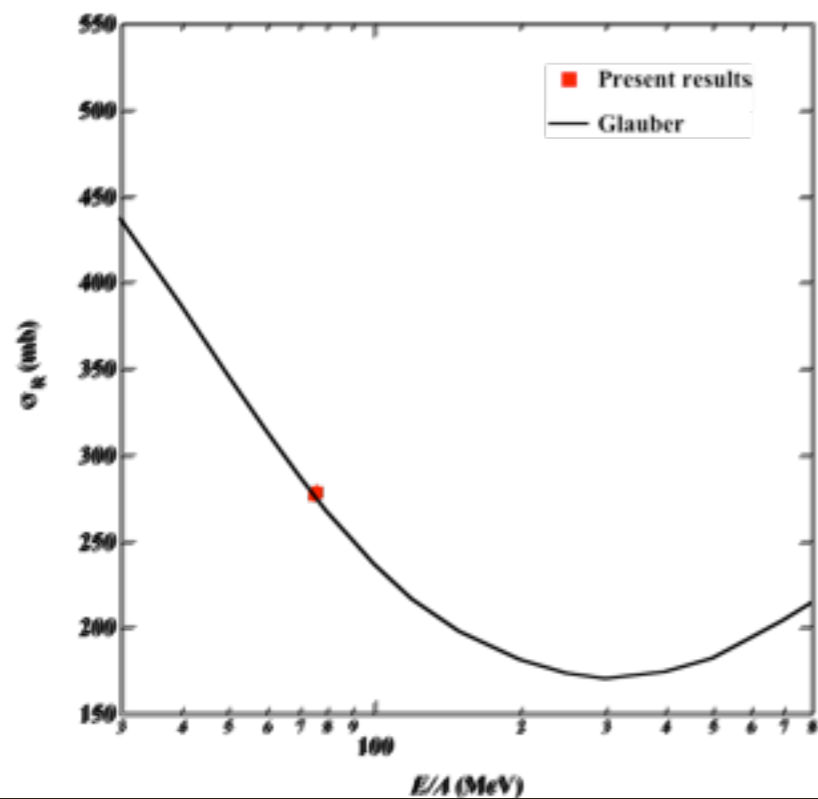
${}^7\text{Be}$



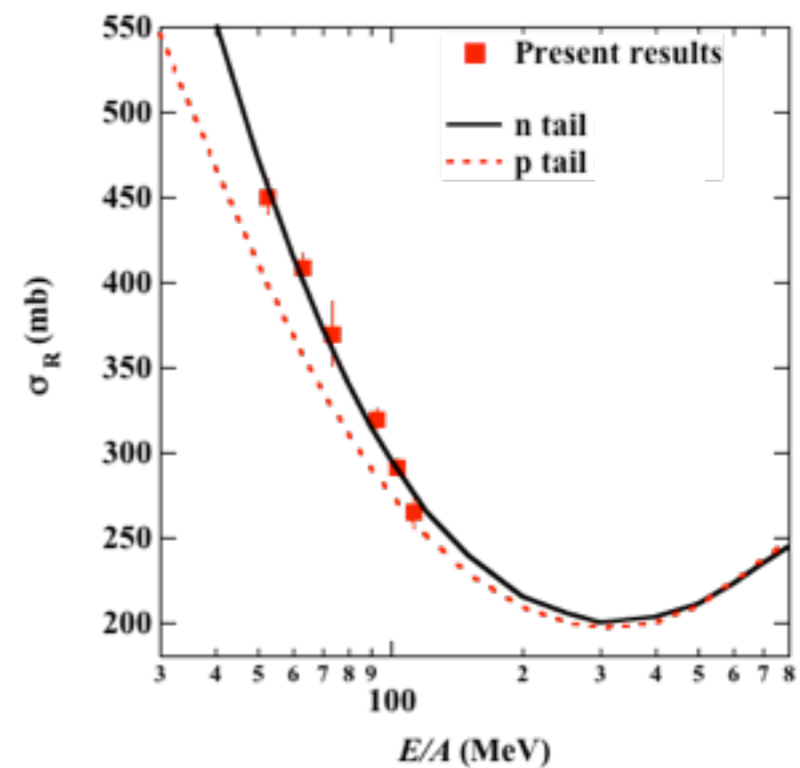
${}^9\text{Be}$



${}^{10}\text{Be}$

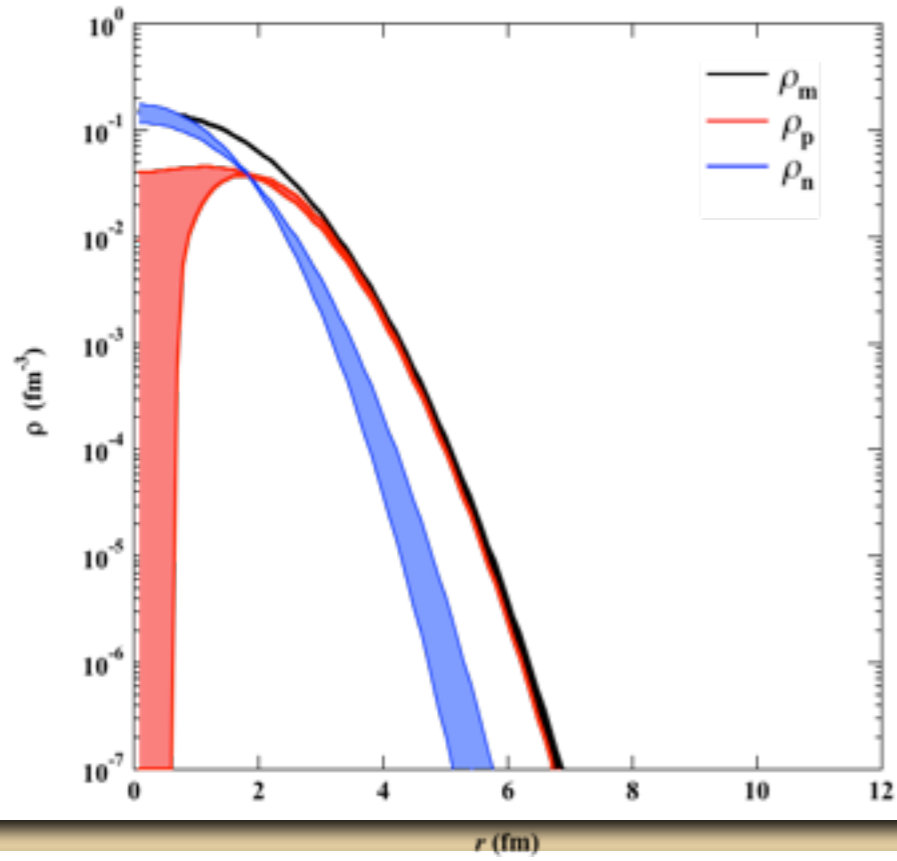


${}^{11}\text{Be}$

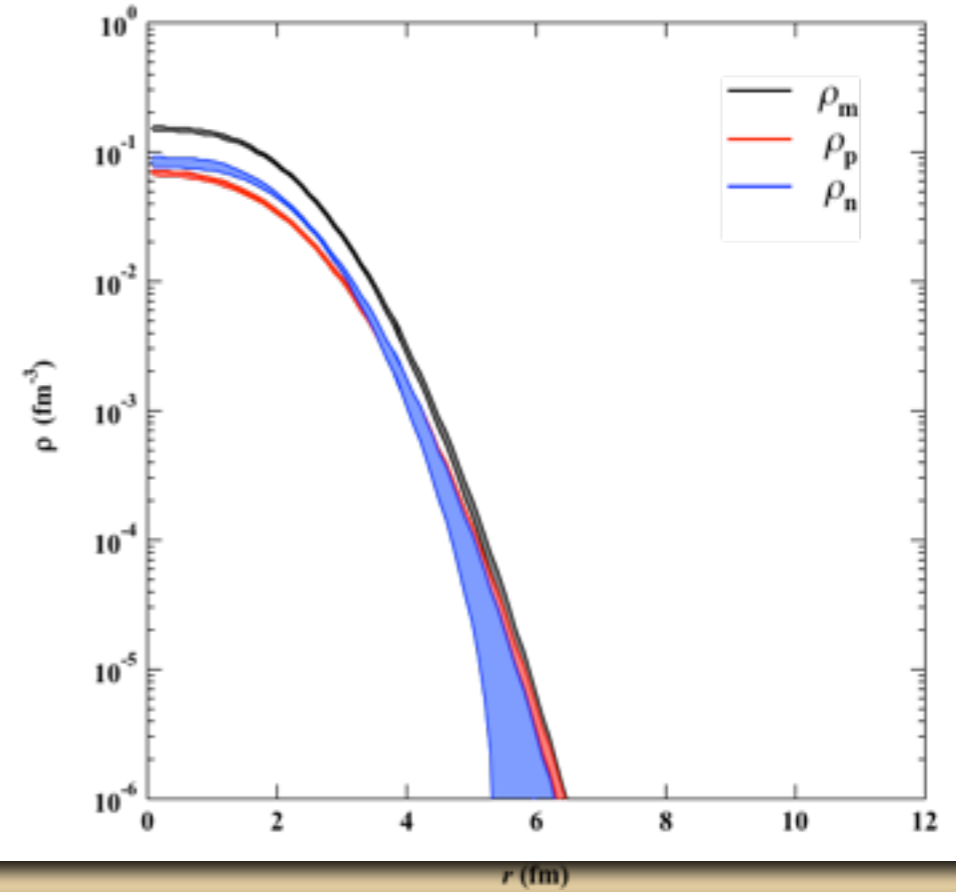


Be 同位体の陽子・中性子密度分布

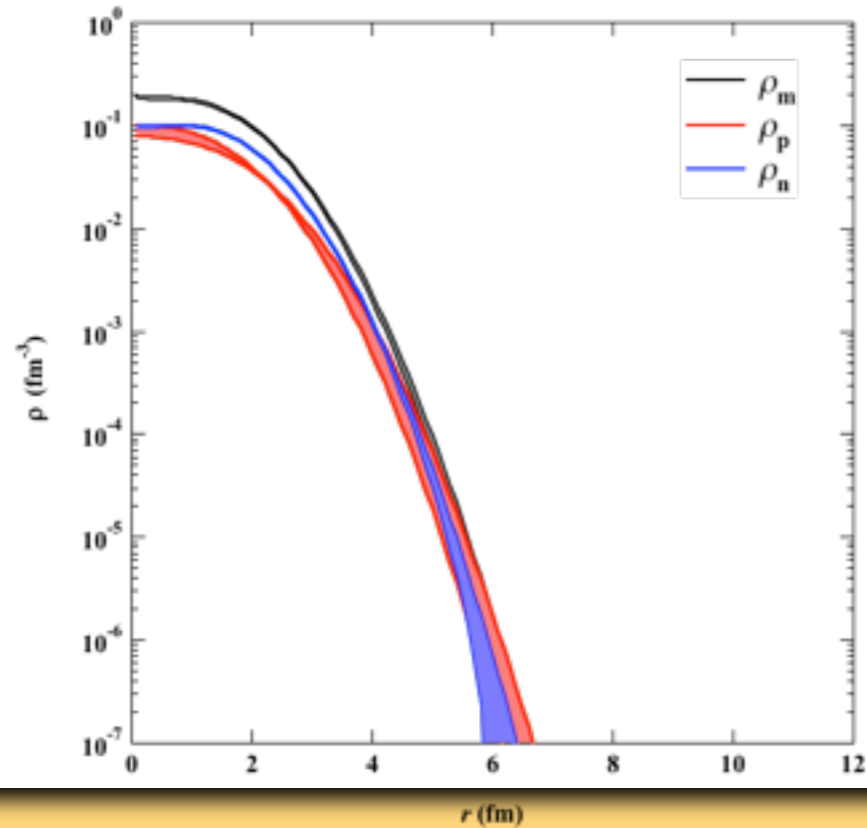
${}^7\text{Be}$



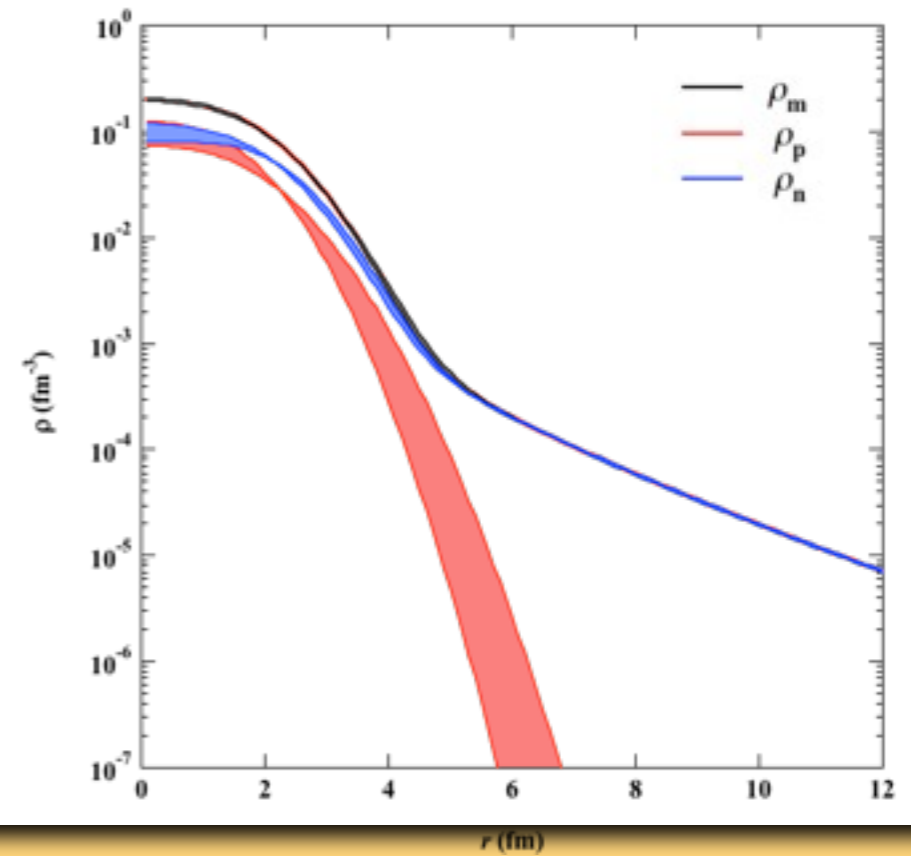
${}^9\text{Be}$



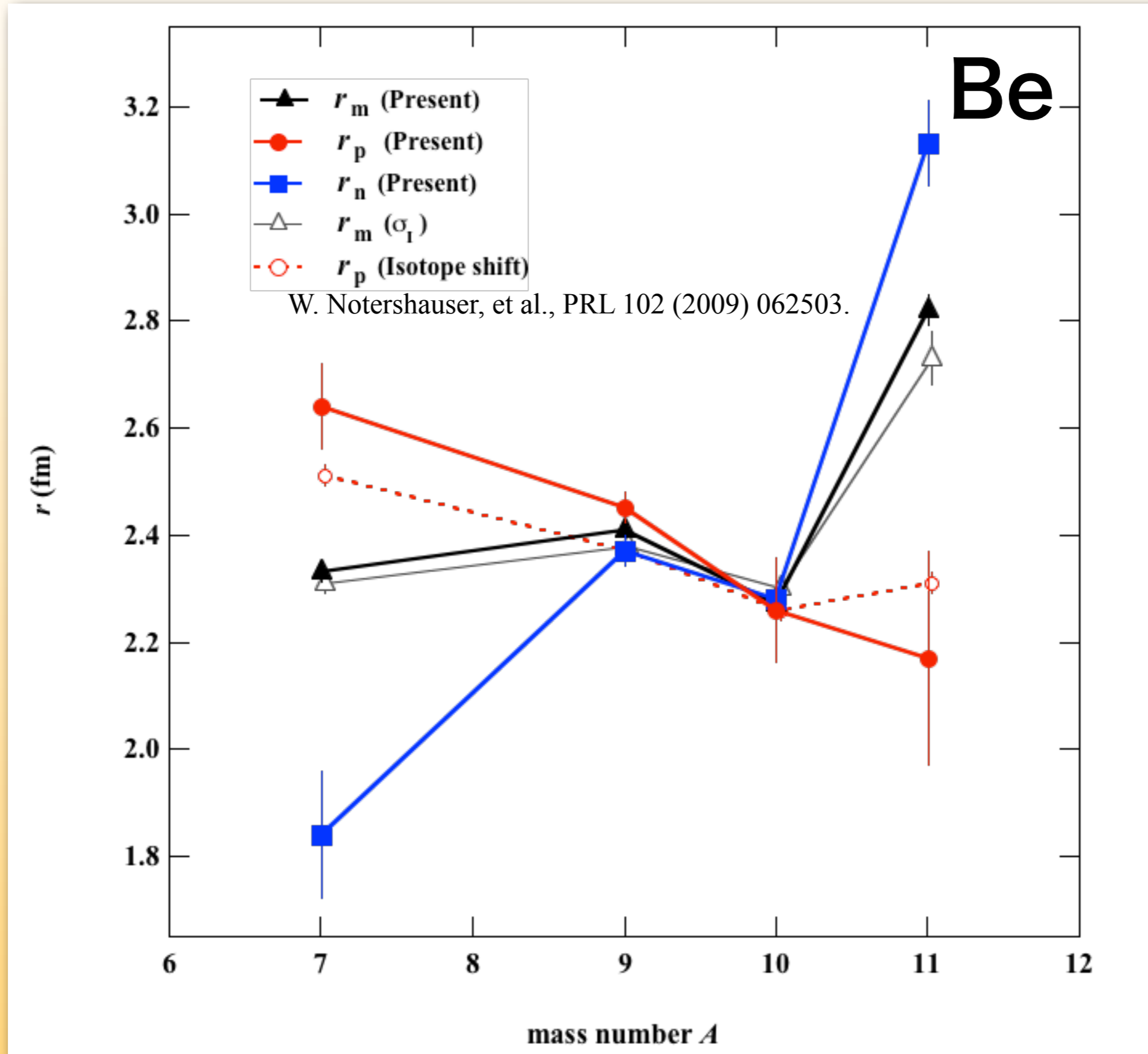
${}^{10}\text{Be}$



${}^{11}\text{Be}$



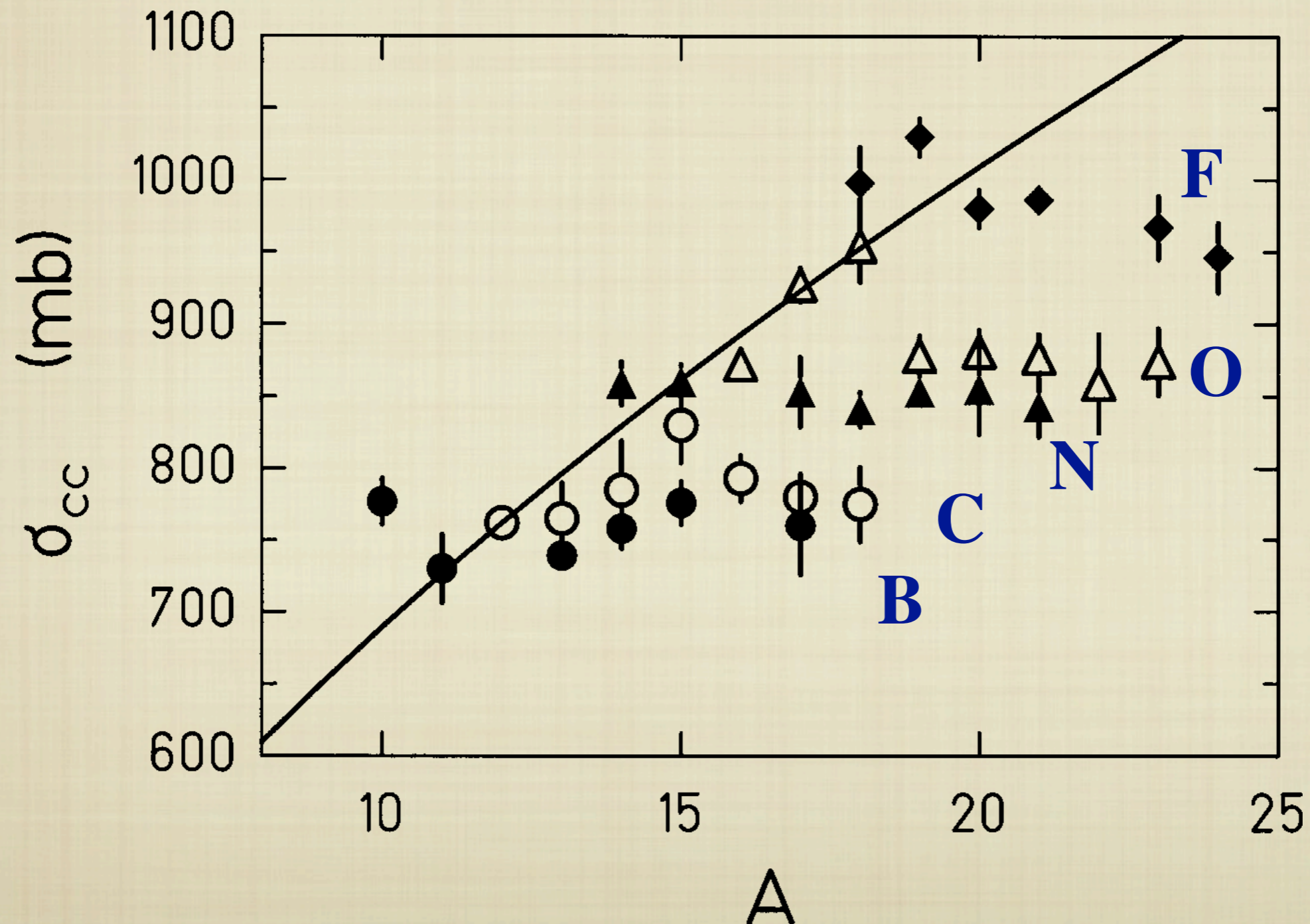
Be同位体の平均2乗半径の比較



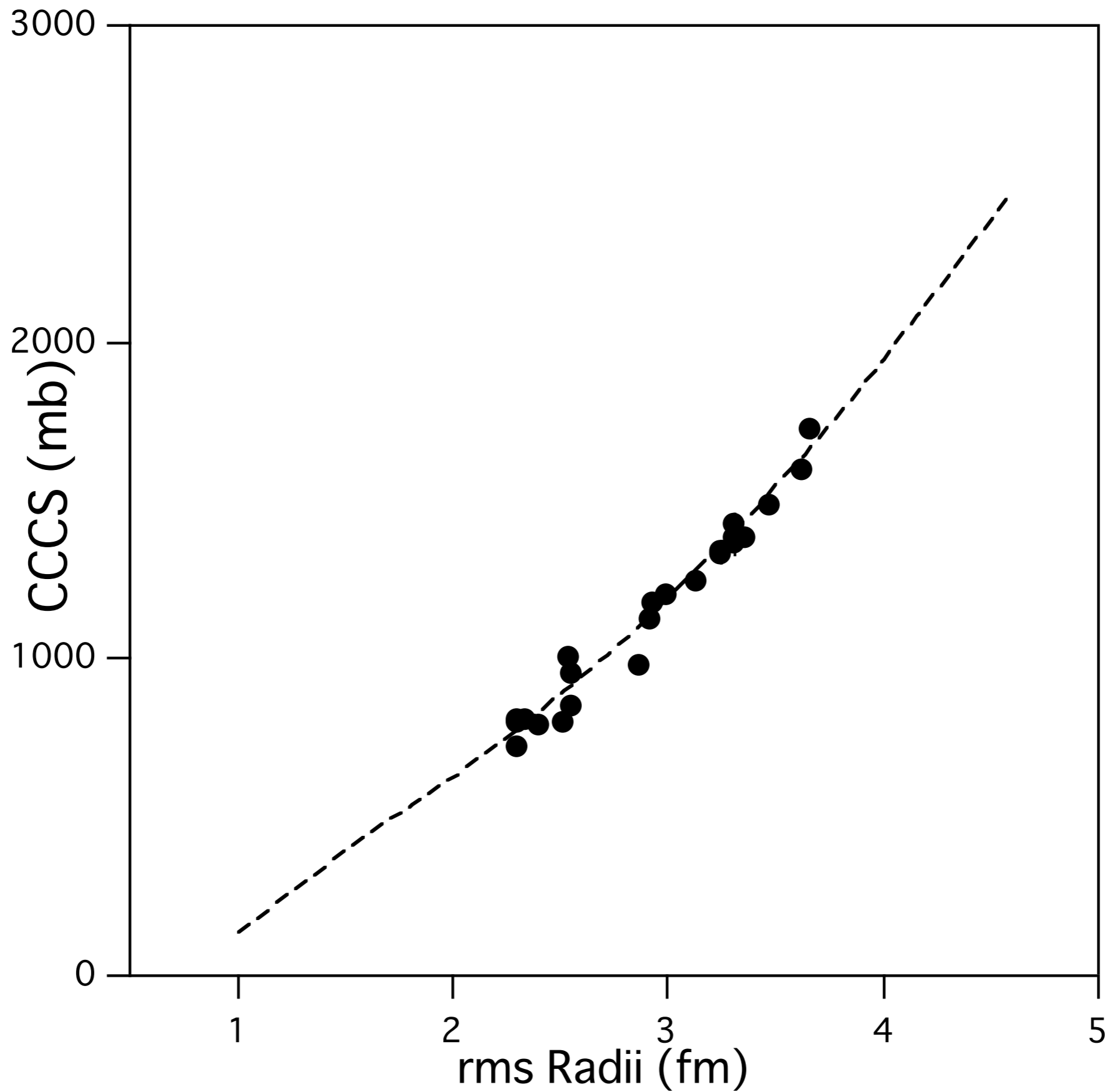
荷電変化断面積を利用する方法

GSIでの荷電変化断面積測定

荷電変化断面積 = 陽子数が変化するチャンネルの総断面積
Charge Changing Cross Section



荷電変化断面積と荷電平均 2 乗半径

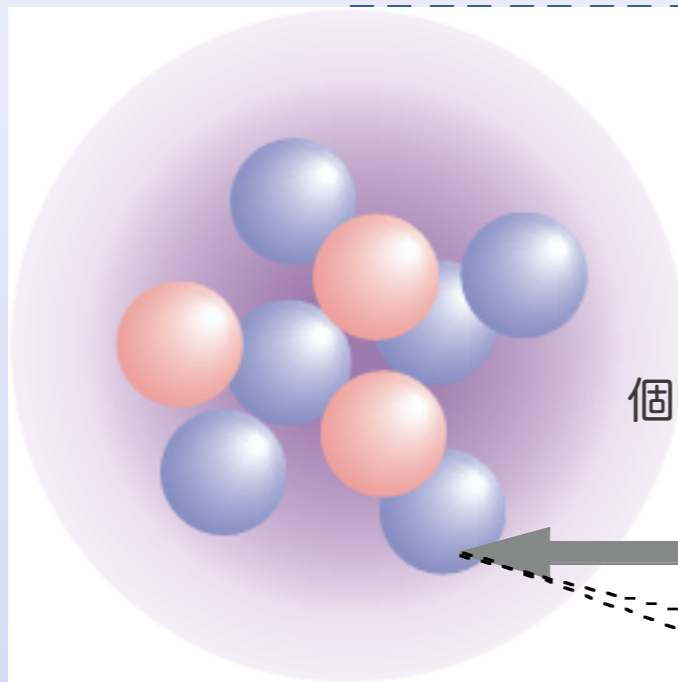


荷電変化断面積のGlauber 計算

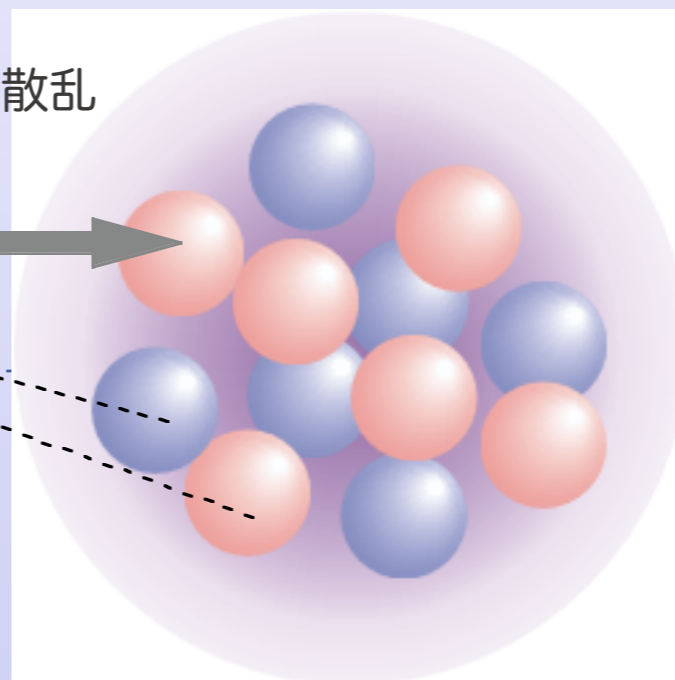
入射核の密度 \longrightarrow 陽子分布だけを入力

$$\sigma_R = \int d\mathbf{b} \left[1 - \exp \left(- \int d^2\mathbf{r} \sum_{i,j} \sigma_{ij}(E) \rho_z^{P_i}(\mathbf{r}) \rho_z^{T_j}(\mathbf{r} - \mathbf{b}) \right) \right] C(E)$$

Projectile

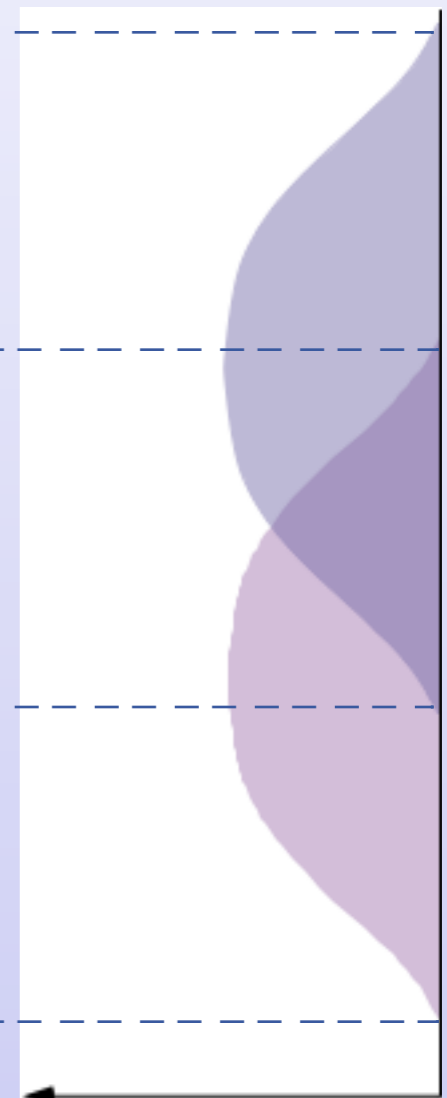
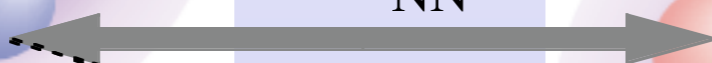


Target



個々の核子-核子散乱

σ_{NN}



荷電変化断面積



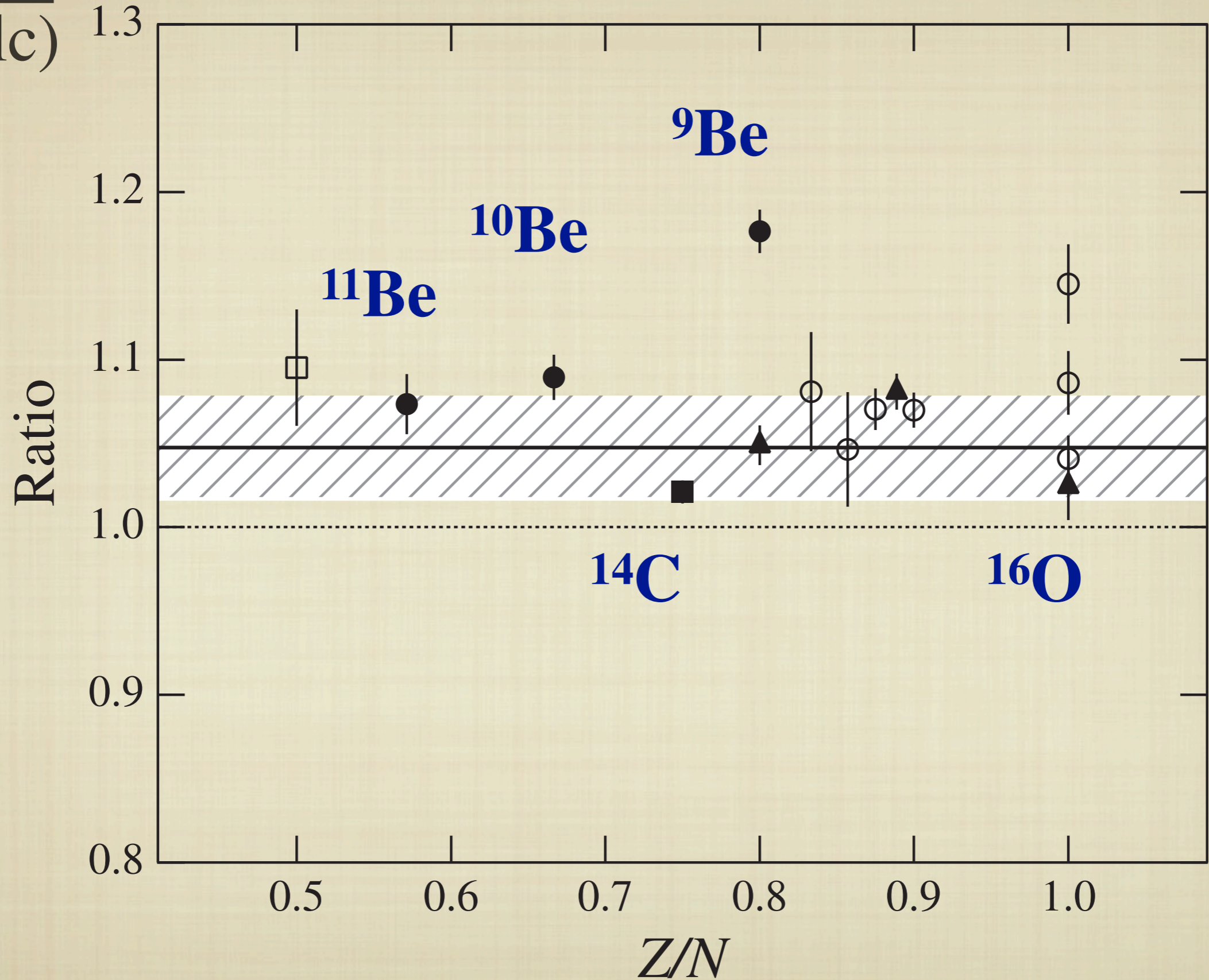
Glauber計算
(optical limit)

陽子密度分布

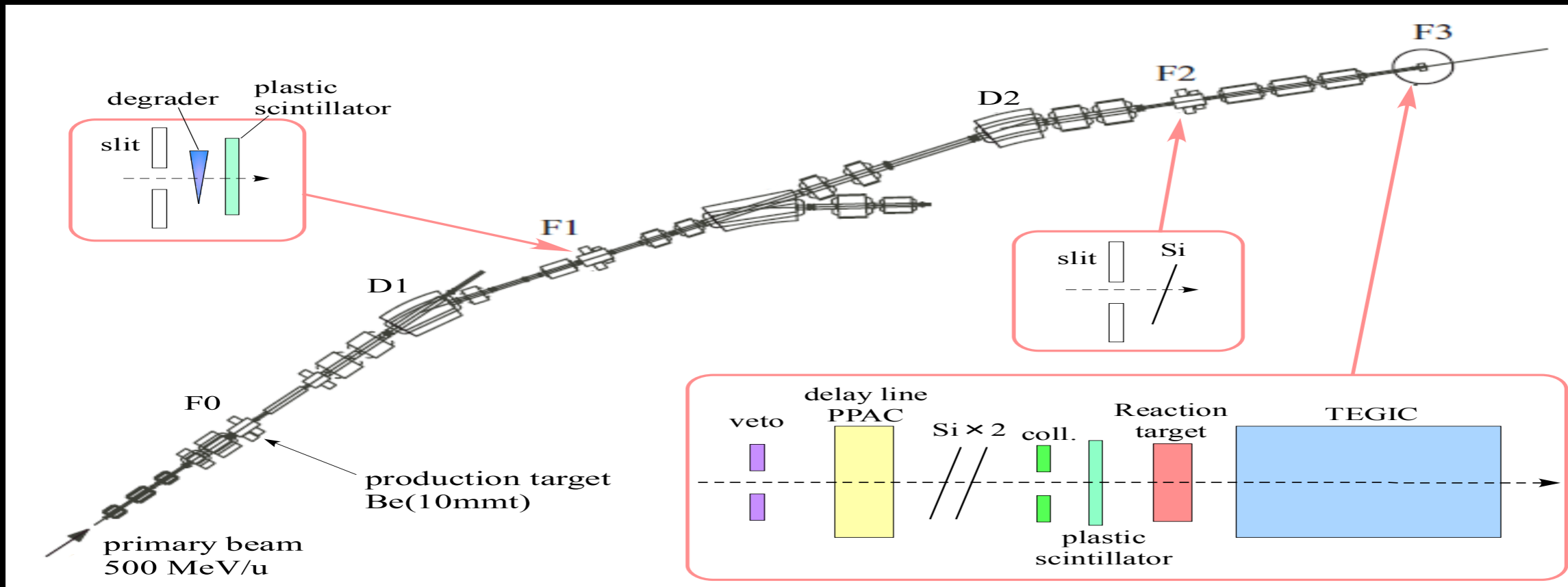
核子密度分布 $\rho(r)$

Factor は一定？

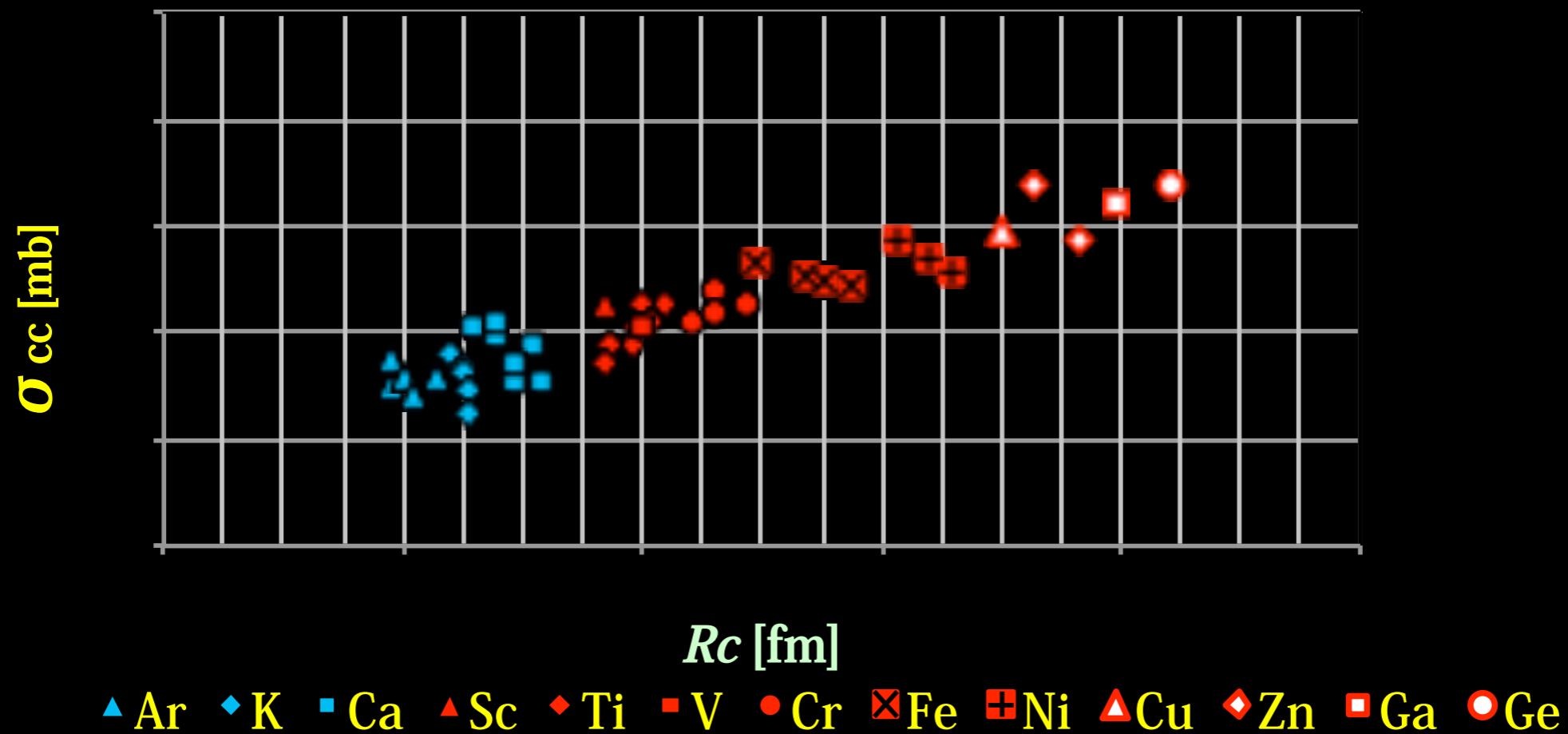
$$\frac{\sigma_{cc}(\text{exp})}{\sigma_{cc}(\text{calc})}$$



Experiment at NIRS-HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)

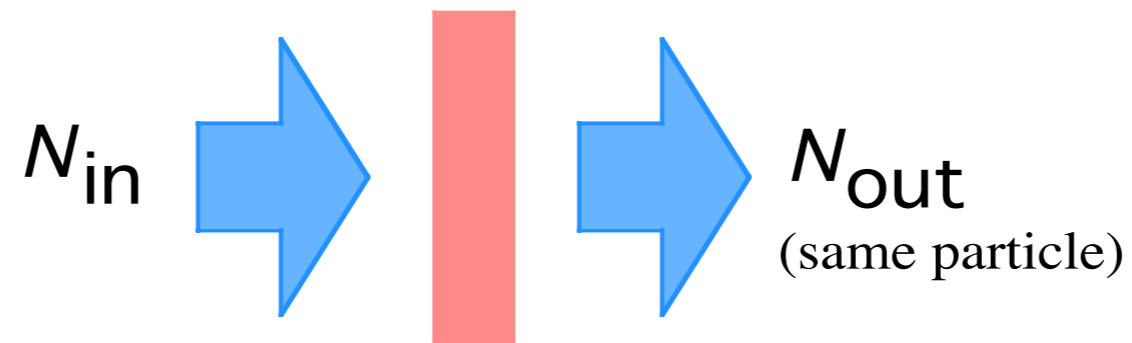


σ_{cc} dependence on rms charge Radii

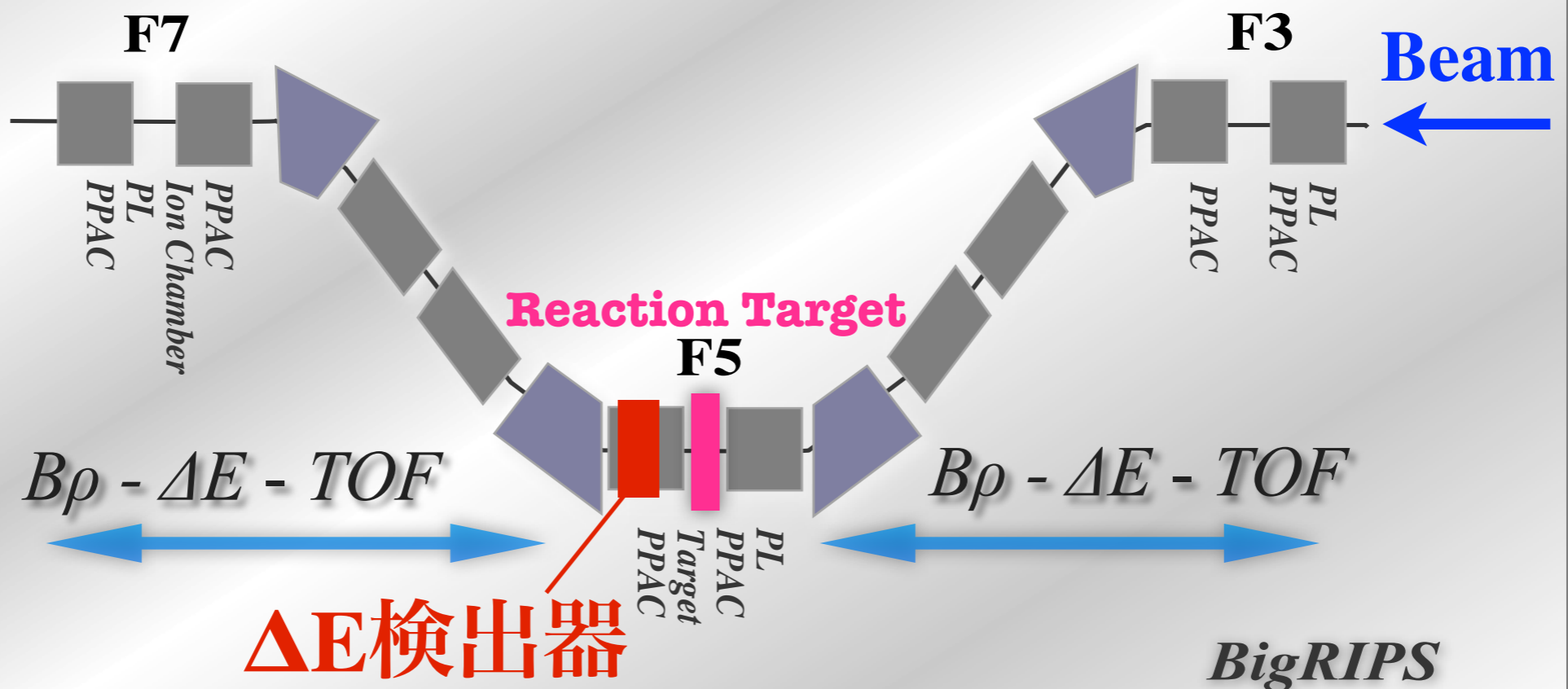


Measurements of σ_R at RIBF

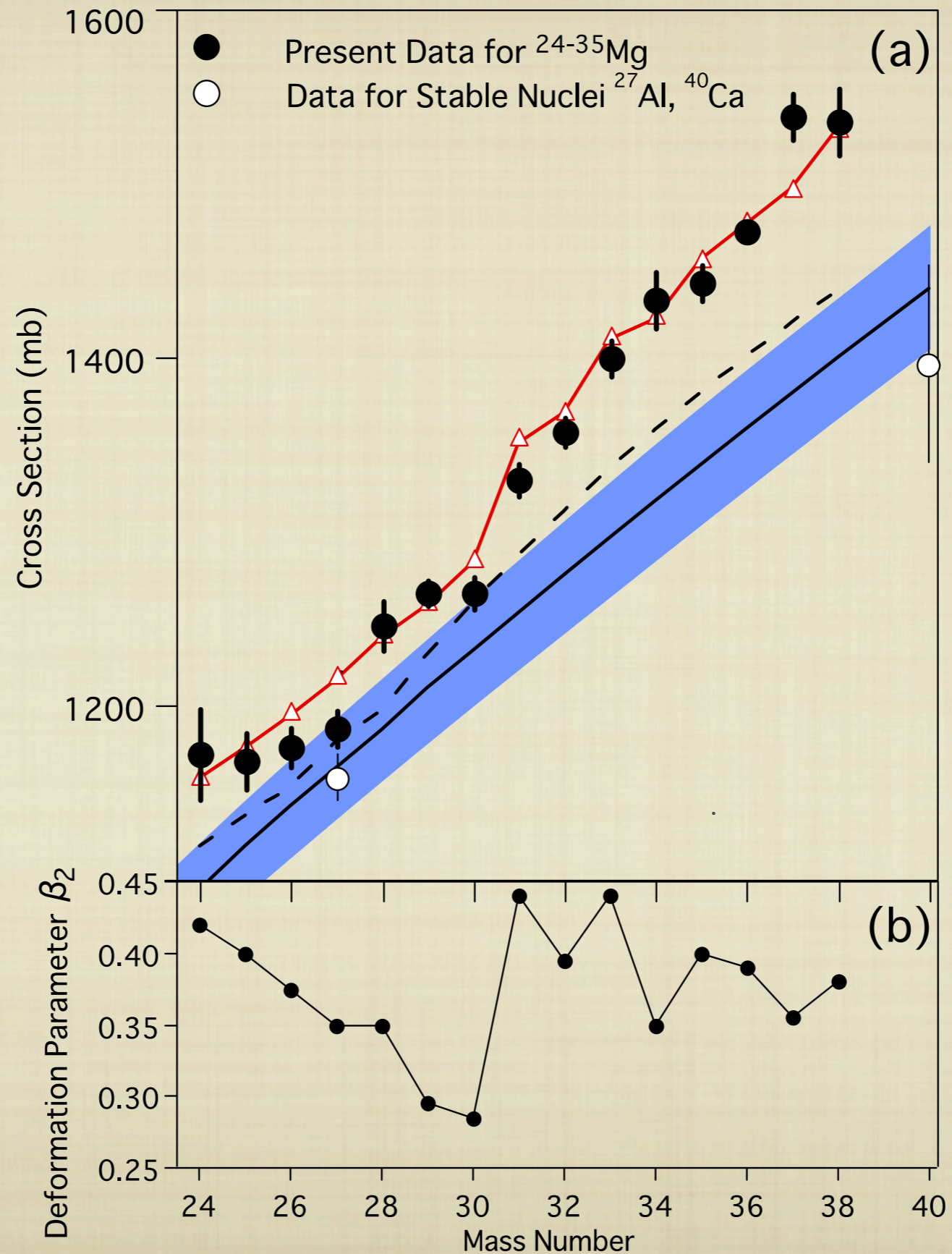
Transmission Method



$$\sigma_R = \frac{1}{t} \ln \left(\frac{N_{in}}{N_{out}} \right)$$

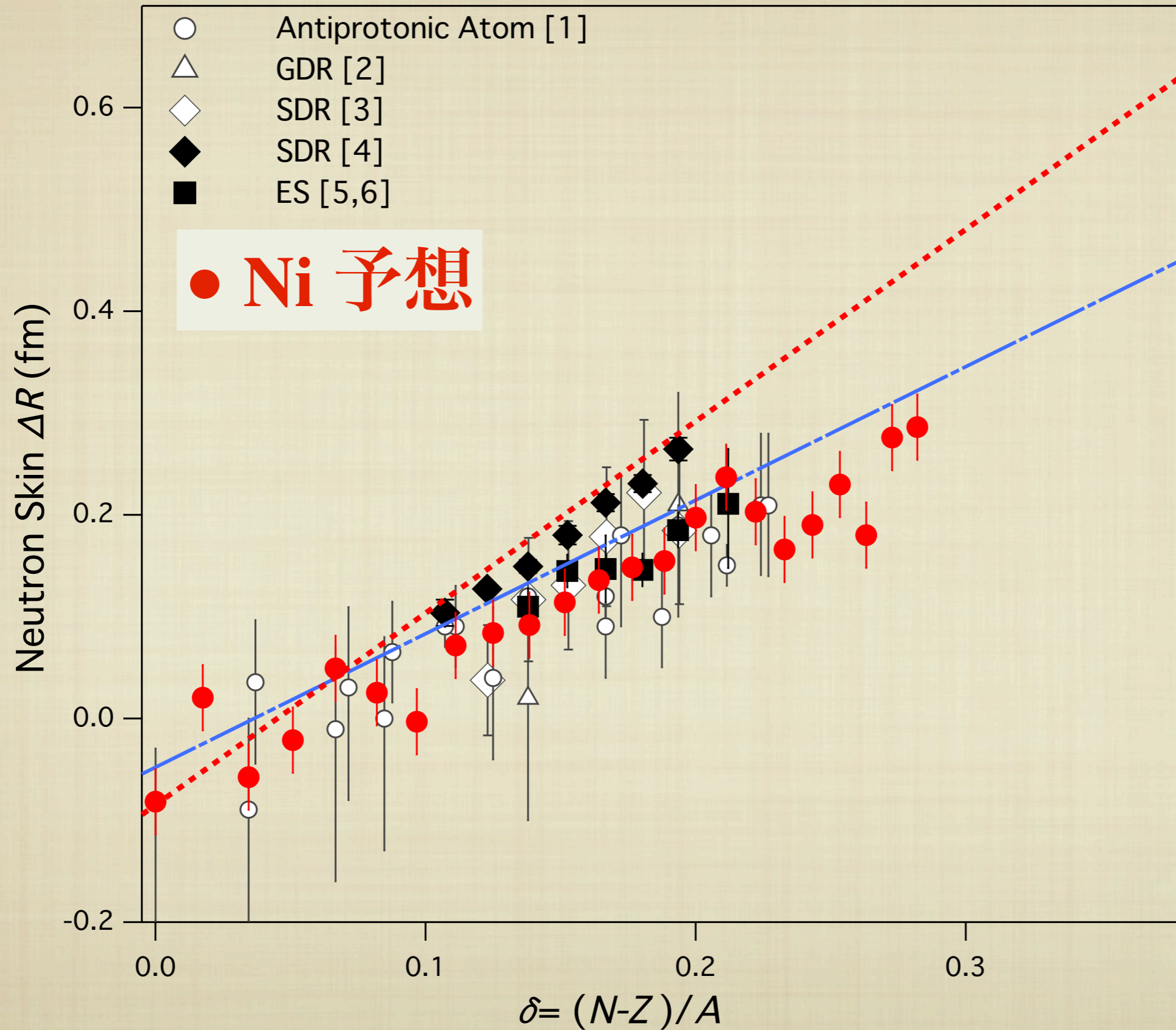


Mg 同位体の反応断面積測定



九大・渡邊氏らの計算

Ni 同位体での中性子スキン測定(予想)



SUMMARY

- ❖ σ_R の中間エネルギー領域での高精度測定
→不安定核の核子密度分布導出
- ❖ $\sigma_R \rightarrow$ 陽子・中性子分布(半径)
3つの方法
 - ❖ 他の実験から陽子分布(半径)
 - ❖ σ_{NN} のアイソスピン非対称性
 - ❖ 荷電変化断面積