

On the angular distribution of intermediate-energy heavy-ion reactions based on a simple model

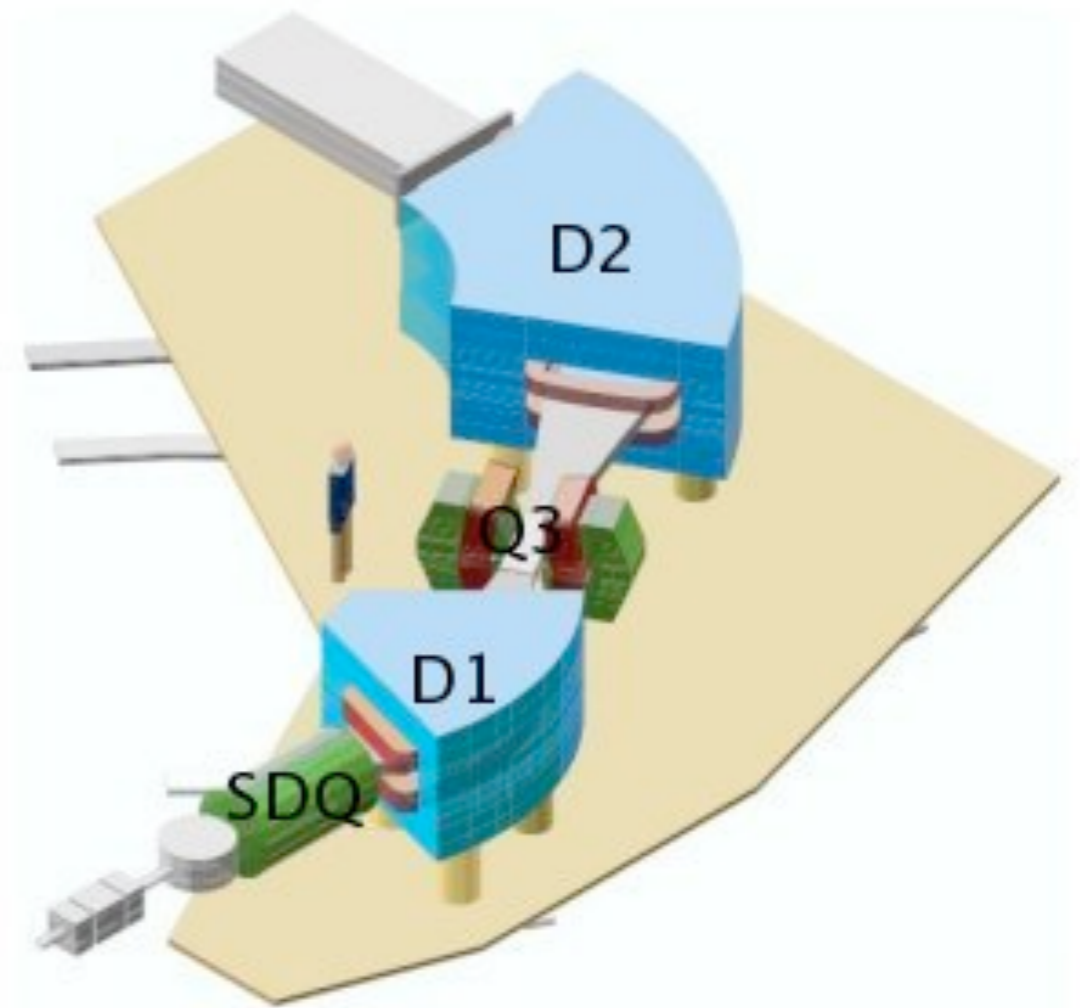
理研仁科センター
堂園昌伯

共同研究者
上坂友洋(理研)、市村宗武(理研)

導入

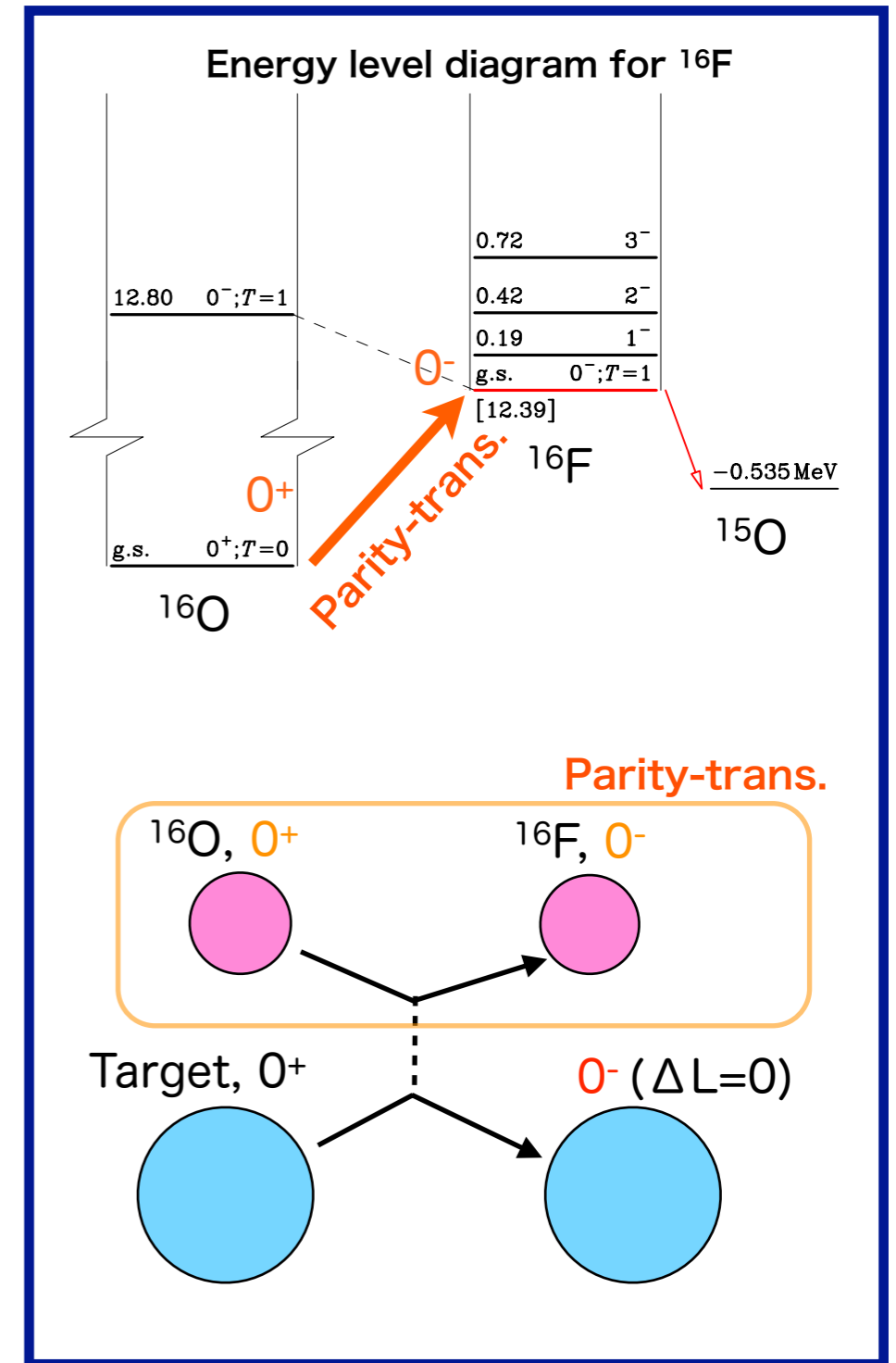
- SHARAQ spectrometer
 - 中間エネルギー (~数百MeV)
重イオン(HI)反応測定用の
高分解能スペクトロメータ
 - 運動量分解能 $p/\delta p \sim 15000$
 - 角度分解能 $\delta\theta \sim 1\text{mrad}$
- SHARAQで目指している物理
 - HI反応(特にMutual Excitation含む)
が持つ励起モードの選択性
を活かした新しい励起モードの研究
 - ($^{10}\text{C}, ^{10}\text{B}$ (IAS)) $0^+ \rightarrow 0^+$
 \Rightarrow IVMR ($\Delta T=1, \Delta S=0$)
 - ($^{16}\text{O}, ^{16}\text{F}$) $0^+ \rightarrow 0^-$
 \Rightarrow Collective 0^- state

Spectroscopy with **H**igh-resolution **A**nalyzer
and **R**adio**A**ctive **Q**uantum beams



パリティ移行核反応 ($^{16}\text{O}, ^{16}\text{F}$)

- パリティ移行核反応 ($^{16}\text{O}, ^{16}\text{F}$)
 - $^{16}\text{O}(\text{g.s.}, 0^+) \rightarrow ^{16}\text{F}(\text{g.s.}, 0^-)$
 - 0-状態を探るのに適切なプローブ
⇒ **パイ中間子相関**
 - 特徴
 - Spin-longitudinalな遷移 ($\sigma \cdot q$) ($\sigma \cdot q$)
 - Unnatural-parity状態を選択的に励起
 - 各 ΔL に対して1つの J^π を励起
 - 角度分布から J^π を同定可能
- ⇒ **0-状態のクリアな測定が可能**



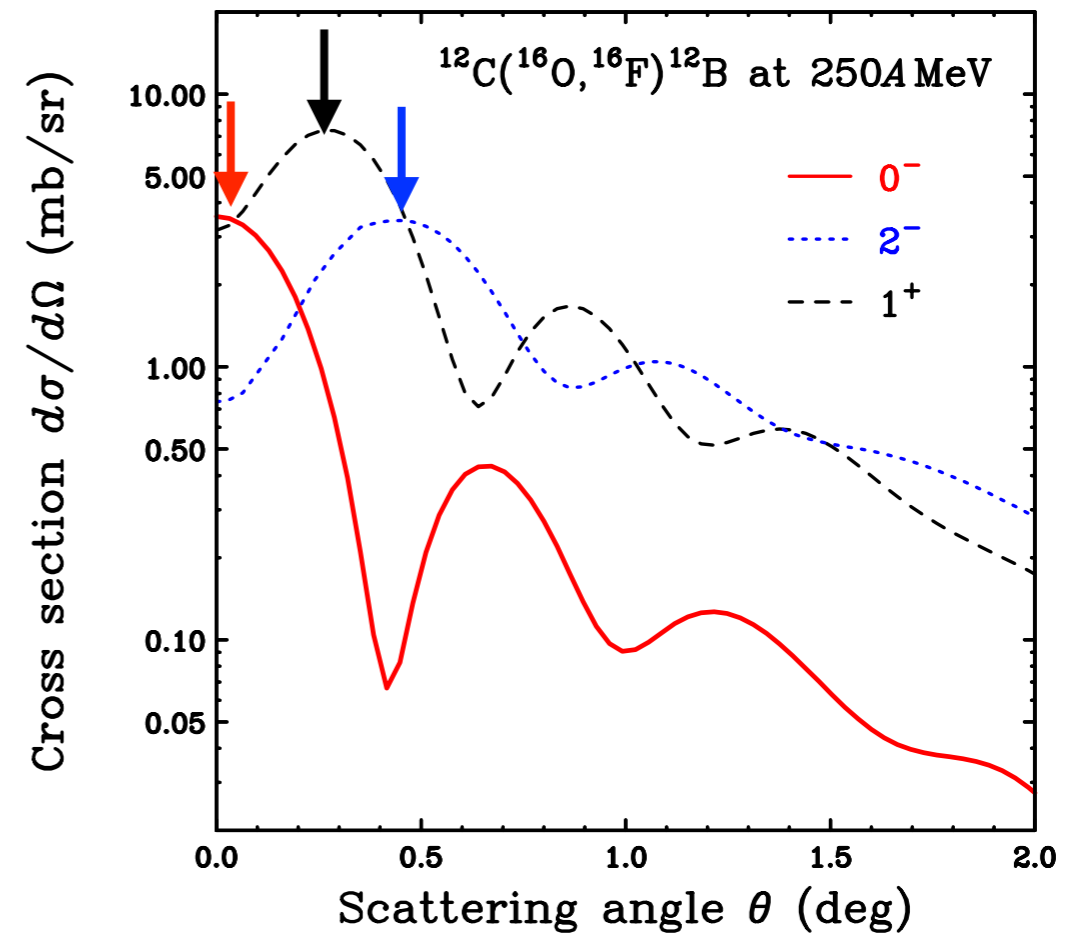
	$\Delta L=0$	$\Delta L=1$	$\Delta L=2$...
Parity-trans.	0^-	1^+	2^-	...
従来の反応 (p,n),(d, ^2He)等	$0^+, 1^+$	$0^-, 1^-, 2^-$	$1^+, 2^+, 3^+$...

$(^{16}\text{O}, ^{16}\text{F})$ 反応の角度分布

- DWBA計算結果

- 0^- ($\Delta L_R=0$) : 前方ピーク
- 1^+ ($\Delta L_R=1$) : $\theta \sim 0.3^\circ$ にピーク
- 2^- ($\Delta L_R=2$) : $\theta \sim 0.5^\circ$ にピーク

角度分布は ΔL_R で
決まっているように見える

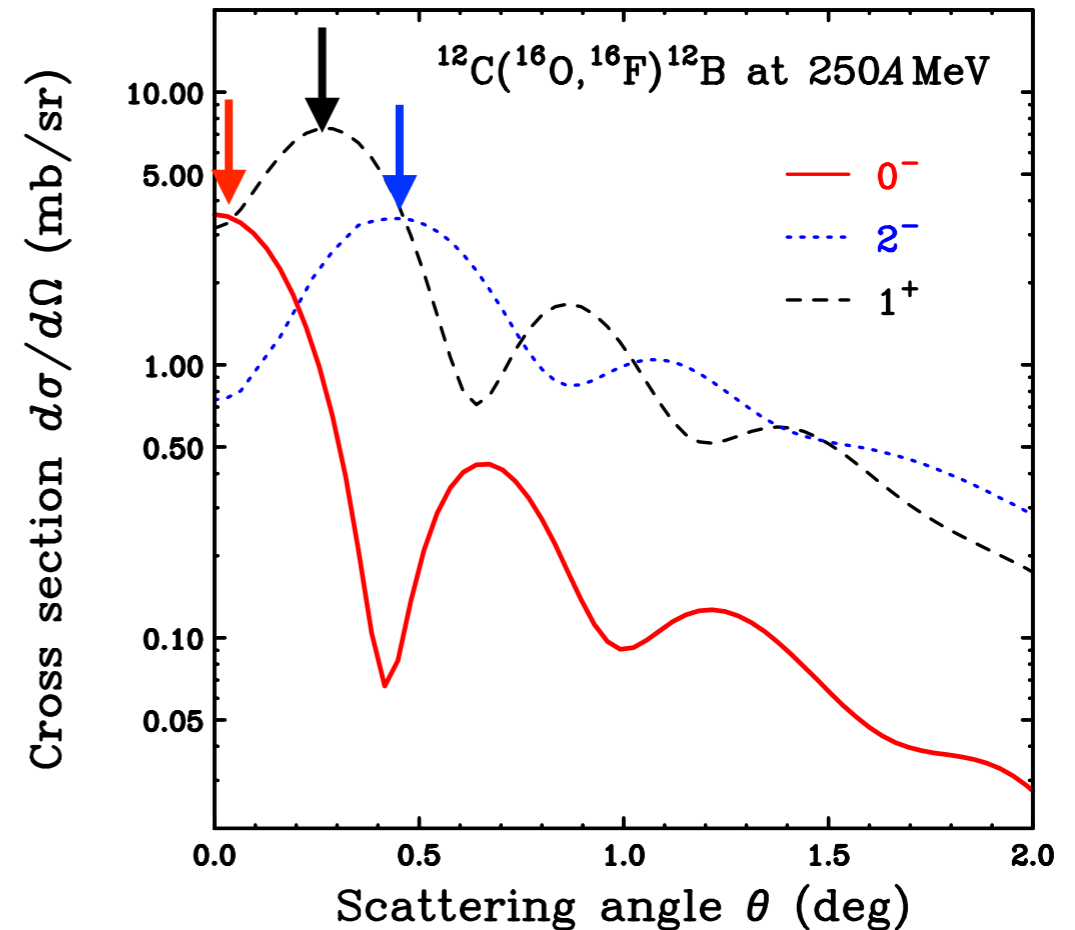


$(^{16}\text{O}, ^{16}\text{F})$ 反応の角度分布

- DWBA計算結果

- 0^- ($\Delta L_R=0$): 前方ピーク
- 1^+ ($\Delta L_R=1$): $\theta \sim 0.3^\circ$ にピーク
- 2^- ($\Delta L_R=2$): $\theta \sim 0.5^\circ$ にピーク

角度分布は ΔL_R で
決まっているように見える



0^- は $\Delta L_R=0$ だから前方ピーク? ⇒ 間違い

- 「 $\Delta L_R \Leftrightarrow$ 角度分布」は適用されない
 - 今回のMutual excitationの場合、projectileのtransition densityが $\Delta L_a=1$ を含む ($0^+ \rightarrow 0^-$ なので)
 - 「 $\Delta L_R \Leftrightarrow$ 角度分布」が成り立つのは $\Delta L_a=0$ の場合のみ
- では、なぜ 0^- は前方ピークなのか?

研究の目的

- 背景

- SHARAQスペクトロメータの完成により、
中間エネルギー重イオン反応の高分解能測定が可能に
- 中間エネルギー重イオン反応(特にMutual excitationを含む)を
原子核のspectroscopy toolとして確立したい

- 目的

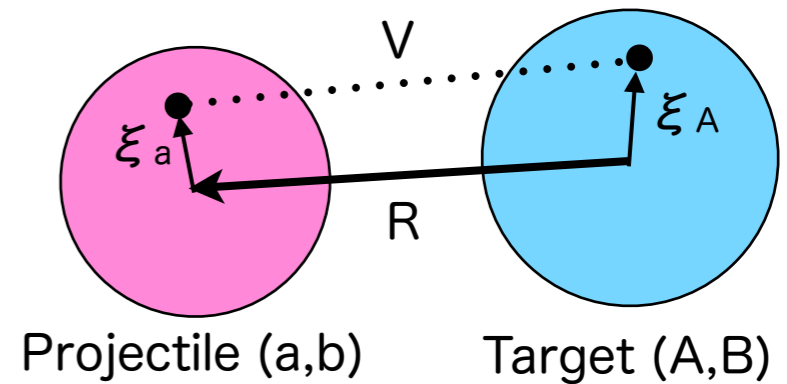
- 中間エネルギー重イオン反応の反応機構を明らかにしたい
 - 何が本質的か？
- (反応機構が単純な場合)簡単なモデルで直感的に理解したい

- 今回

- $^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{F})^{12}\text{B}$ at 200A MeVのDWBA計算を例に議論していく
 - Mutual excitationの場合の角度分布
 - 吸収の効果(Damping factor)

解析方法 DWBA計算コード FOLD/DWHI

- 反応： $^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{F})^{12}\text{B}$ at 200A MeV
- 計算の概要



Woods-Saxon pot.

Cohen-Kurath(positive parity)

Millener-Kurath(negative parity)

一粒子波動関数

$$\phi_p, \phi_n$$

一体遷移密度(OBTD)

$$\langle b || [a_n^\dagger a_p] || a \rangle$$



遷移密度

$$\rho_{LSJ} = \sum_{np} \langle b || [a_n^\dagger a_p] || a \rangle [\phi_p^* \phi_n]$$

Franey-Love t-matrix at 210MeV

有効相互作用

$$V^{(\tau)} = (V_\tau + V_{\sigma\tau} \sigma_a \cdot \sigma_A + V_{T\tau} S_{12}) \tau_a \cdot \tau_A$$



形状因子(2重畳込みモデル)

$$F_{\beta\alpha}(R) = \int d\xi_a d\xi_A \rho_{ab}(\xi_a) V^\tau(R, \xi_a, \xi_A) \rho_{AB}(\xi_A)$$

OMP determined from $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ at 200A MeV

光学ポテンシャル

$$\chi_a, \chi_b$$

$U(R) = V(R) + iW(R)$
(Woods-Saxon form)

$V_0 = -18.5 \text{ MeV},$
 $r_R = 1.0 \text{ fm}, a_R = 0.75 \text{ fm}$
 $W_0 = -100.7 \text{ MeV},$
 $r_I = 0.602 \text{ fm}, a_I = 0.819 \text{ fm}$



遷移行列要素

$$T_{\beta\alpha} = \langle \chi_\beta^{(-)} | F_{\beta\alpha} | \chi_\alpha^{(+)} \rangle$$

断面積

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\mu_a \mu_b}{(2\pi\hbar^2)^2} \frac{k_f}{k_i} |T_{\alpha\beta}|^2$$

PWBA計算結果

- PWBAではRの積分がanalyticに可能

$$T^{\text{PWBA}} \propto F_{\Delta L_a}^{ba}(q) F_{\Delta L_A}^{BA}(q)$$

- $^{12}\text{B}(0^-)$

- $0^+ + 0^+ \rightarrow 0^- + 0^-$ ($\Delta L_a=1, \Delta L_A=1, \Delta L_R=0$)

$$T^{\text{PWBA}} \propto F_{\Delta L_a=1}^{ba}(q) F_{\Delta L_A=1}^{BA}(q)$$

- $q \sim 0.5 \text{ fm}^{-1}$ で第一ピーク

- $^{12}\text{B}(1^+)$

- $0^+ + 0^+ \rightarrow 0^- + 1^+$ ($\Delta L_a=1, \Delta L_A=0, \Delta L_R=1$)

$$T^{\text{PWBA}} \propto F_{\Delta L_a=1}^{ba}(q) F_{\Delta L_A=0}^{BA}(q)$$

- $\theta \sim 0.2 \text{ fm}^{-1}$ で第一ピーク

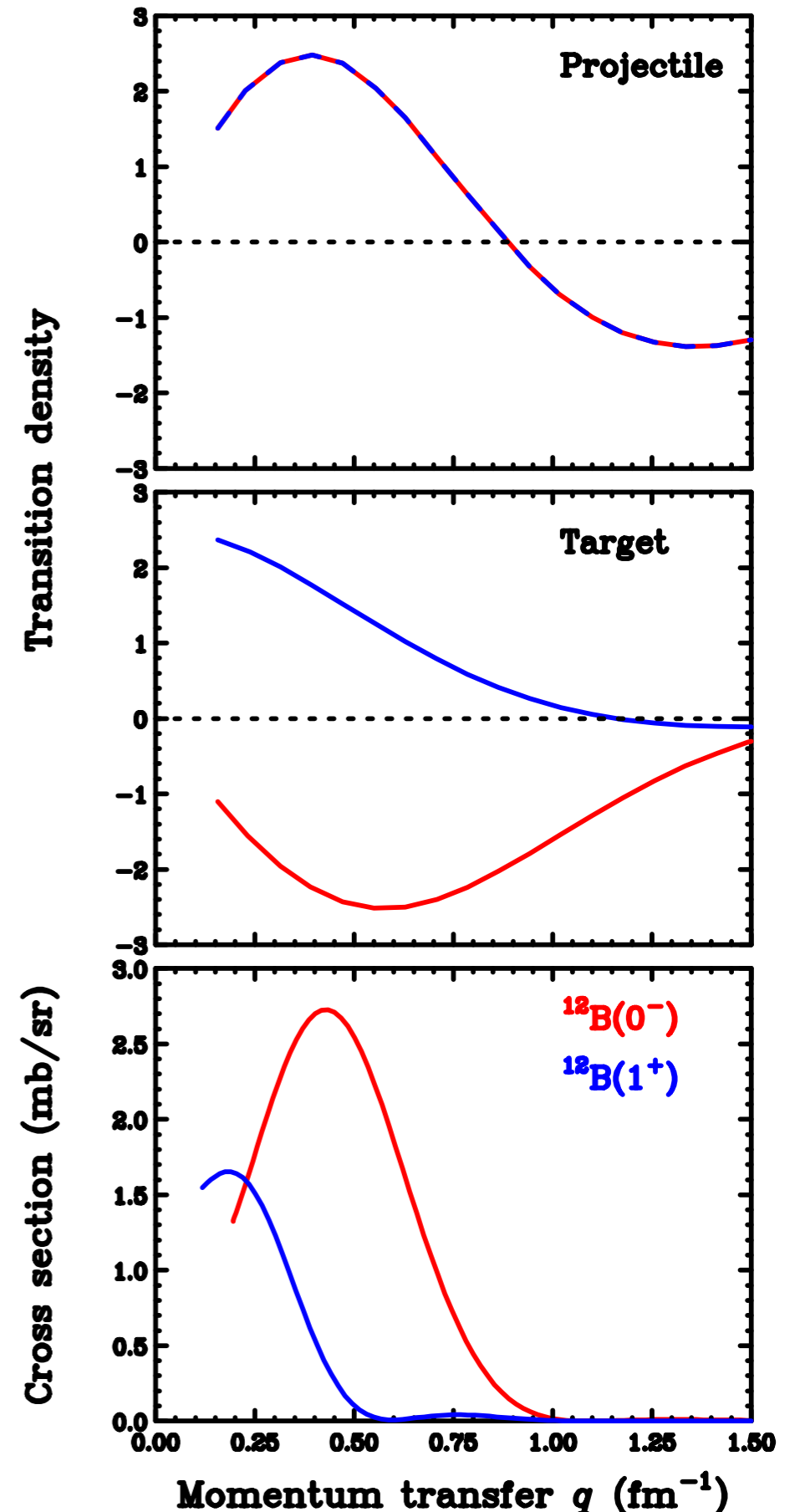
(0^- より前方なのは $\Delta L_A=0$ だから)

$\Delta L_R \Leftrightarrow$ 角度分布ではない!

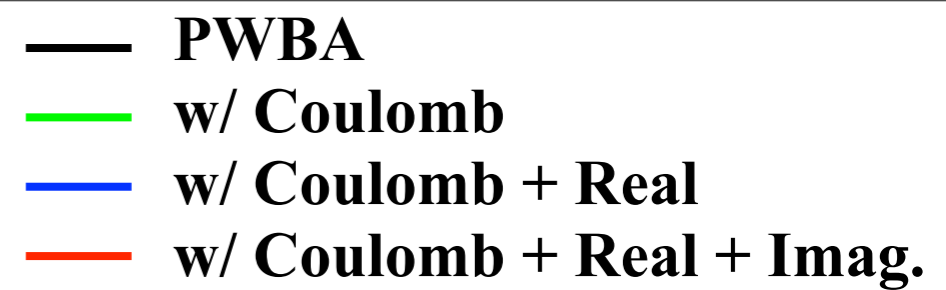
$\Delta L_a, \Delta L_A$ で角度分布が決まる

\Rightarrow DWBA計算で 0^- が前方ピークの原因はDistortion?

$^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{F})$ at 200 A MeV

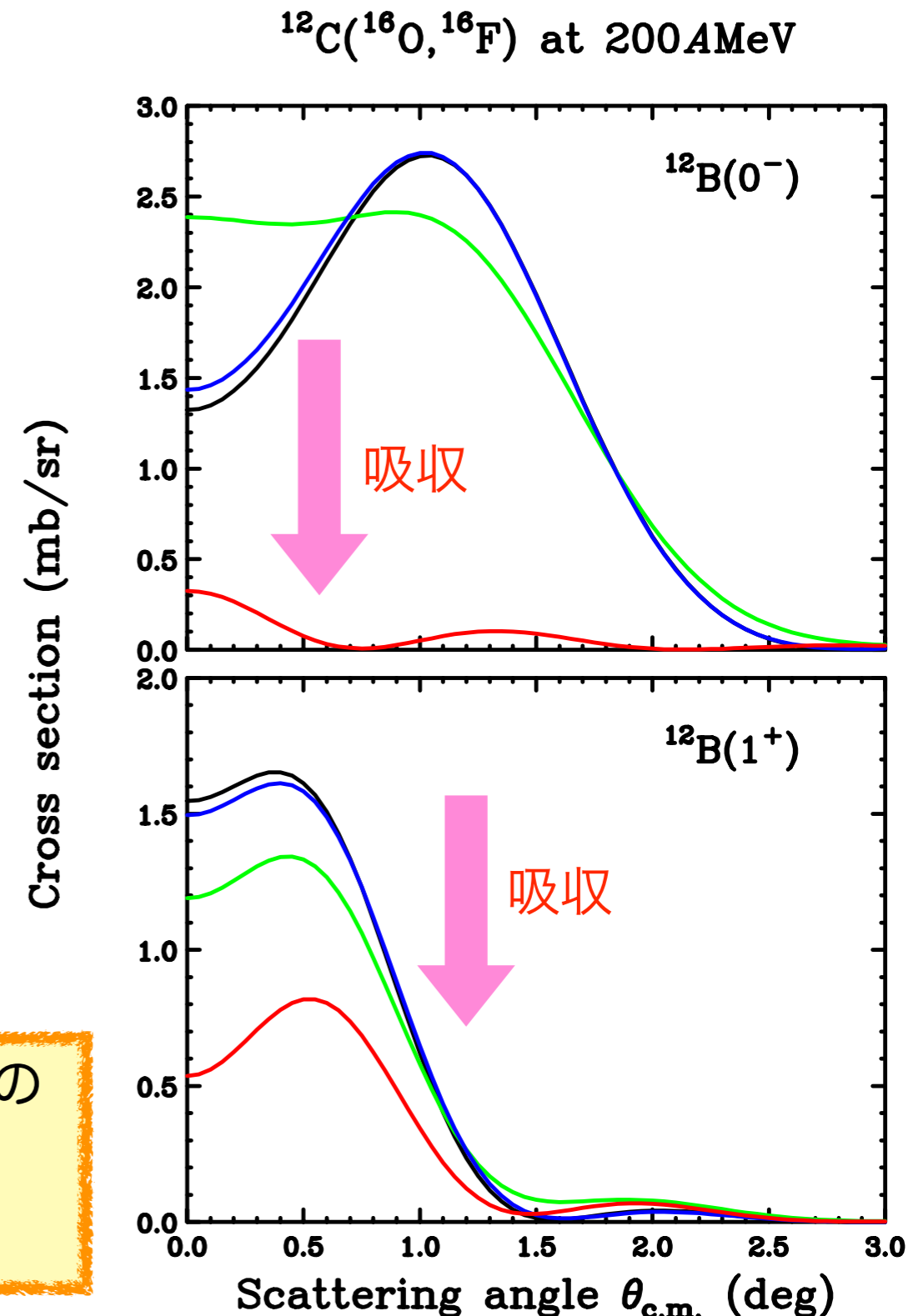


DWBA計算結果



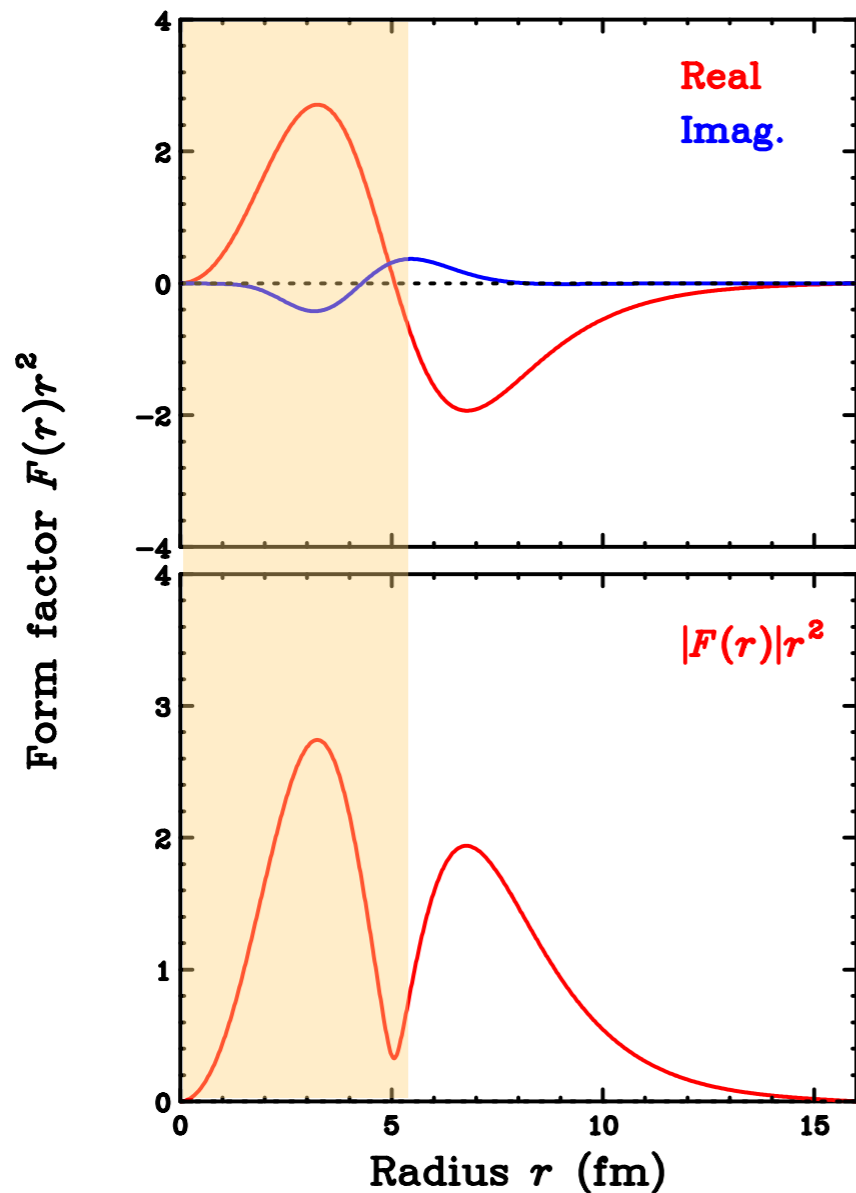
- $^{12}\text{B}(0^-)$
 - Coulomb \Rightarrow 0° 付近がうまる
 - Real \Rightarrow PWBAとほぼ同じ結果
 - Imag.
 \Rightarrow 断面積が小さくなる、
角度分布が変わり前方ピークとなる
- $^{12}\text{B}(1^+)$
 - Coulomb \Rightarrow 断面積が小さくなる
 - Real \Rightarrow PWBAとほぼ同じ結果
 - Imag.
 \Rightarrow 断面積が小さくなる、
角度分布はあまり変わらない

- 中間エネルギー重イオン反応では、Real partの寄与は小さくImaginary part(吸収)が重要!
- 吸収の効果が 0^- と 1^+ で異なる



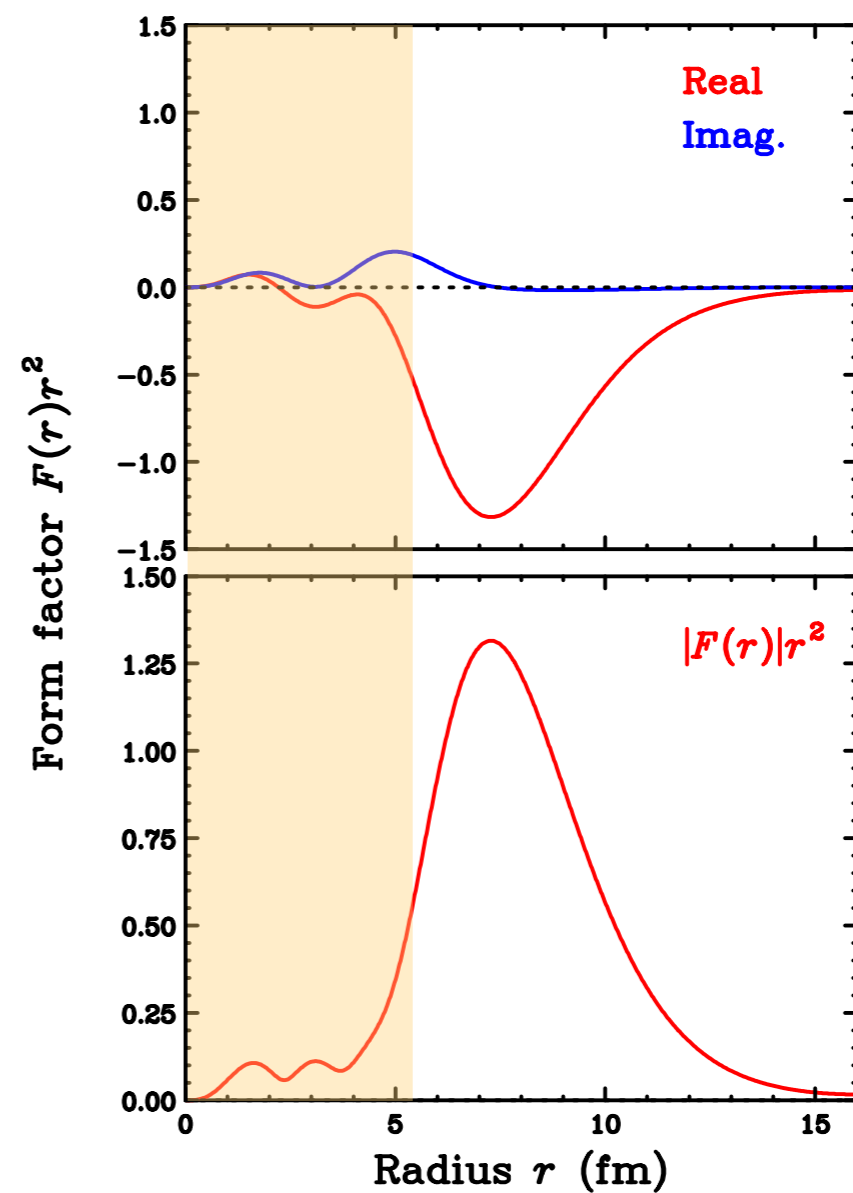
なぜ0-と1+で吸収の効果が異なるのか？

• $^{12}\text{B}(0^-)$



中まで寄与していて符号が違う
 ⇒ 吸収により角度分布が変わる？

$^{12}\text{B}(1^+)$



そもそも中の寄与がない
 ⇒ 吸収による効果が小さい？

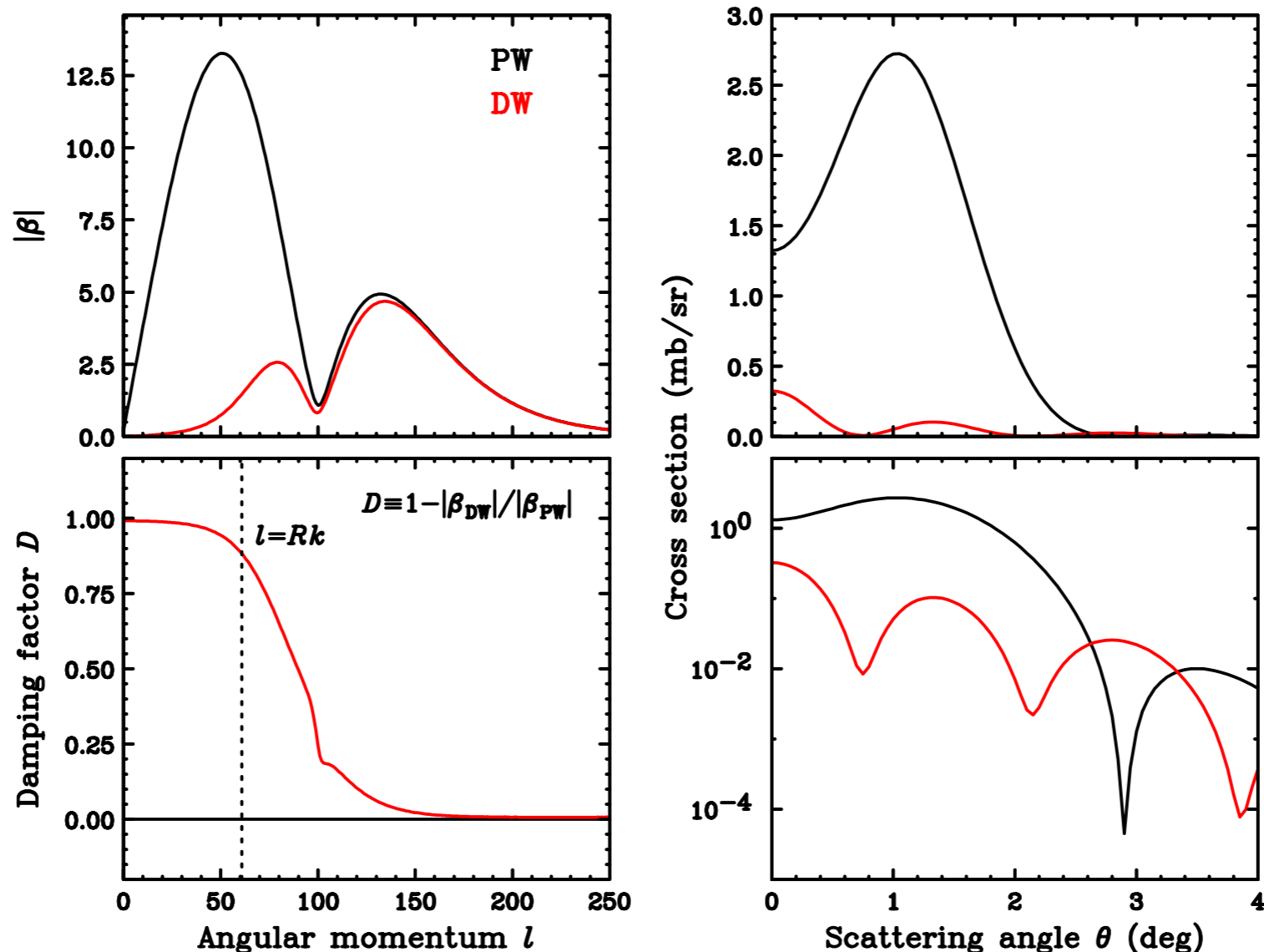
実際に $l=kb$ (r に対応)の分布をみしてみる

吸収の効果 $^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{F})^{12}\text{B}(0^-)$ at 200MeV

- 各角運動量 l の寄与 β

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = K \sum_m \left| \sum_l \beta_{lm} P_l^m(\theta) \right|^2 \quad \text{Damping factor } D \equiv 1 - |\beta_{\text{DW}}|/|\beta_{\text{PW}}|$$

- 2つの成分(Real partがノードを持つため)
- 吸収により第一成分の寄与が小さくなり、角度分布が変わる



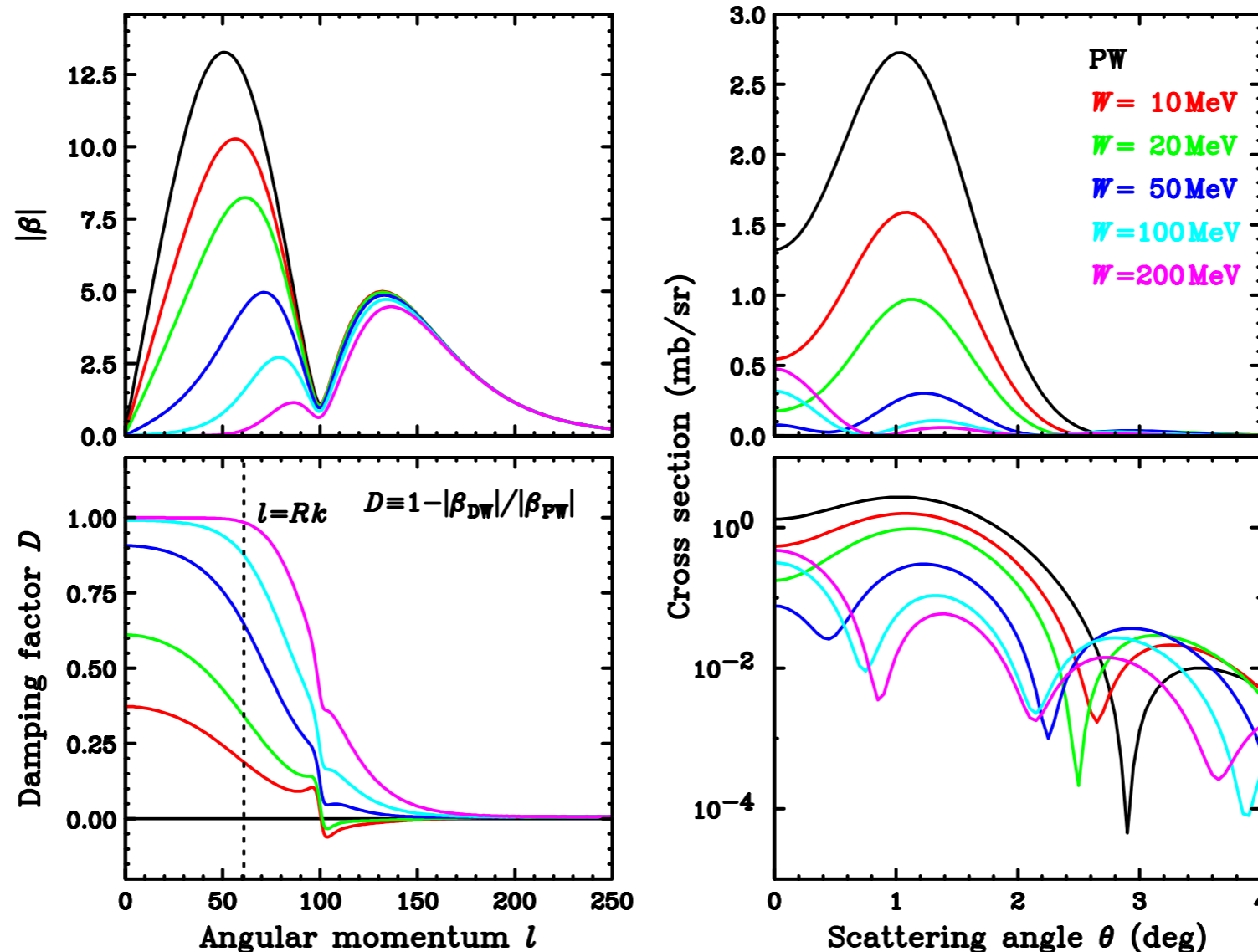
吸収の効果 $^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{F})^{12}\text{B}(0^-)$ at 200MeV

- 各角運動量 l の寄与 β

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = K \sum_m \left| \sum_l \beta_{lm} P_l^m(\theta) \right|^2$$

Damping factor $D \equiv 1 - |\beta_{\text{DW}}|/|\beta_{\text{PW}}|$

- 2つの成分(Real partがノードを持つため)
- 吸収により第一成分の寄与が小さくなり、角度分布が変わる



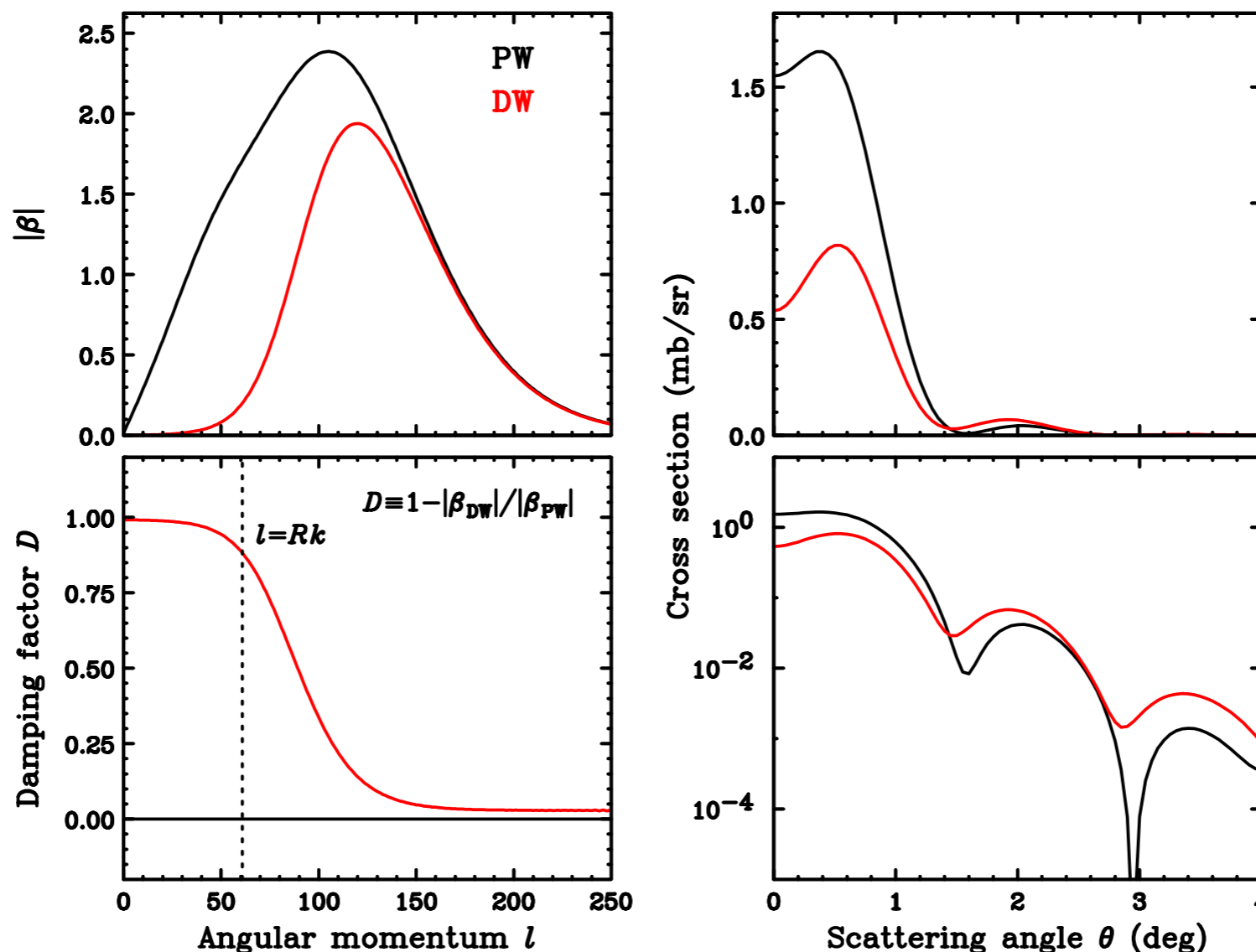
吸収の効果 $^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{F})^{12}\text{B}(1^+)$ at 200MeV

- 各角運動量 l の寄与 β

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = K \sum_m \left| \sum_l \beta_{lm} P_l^m(\theta) \right|^2$$

Damping factor $D \equiv 1 - |\beta_{\text{DW}}|/|\beta_{\text{PW}}|$

- 1つの成分
- 吸収により低角運動量成分がけずれ、断面積が小さくなる



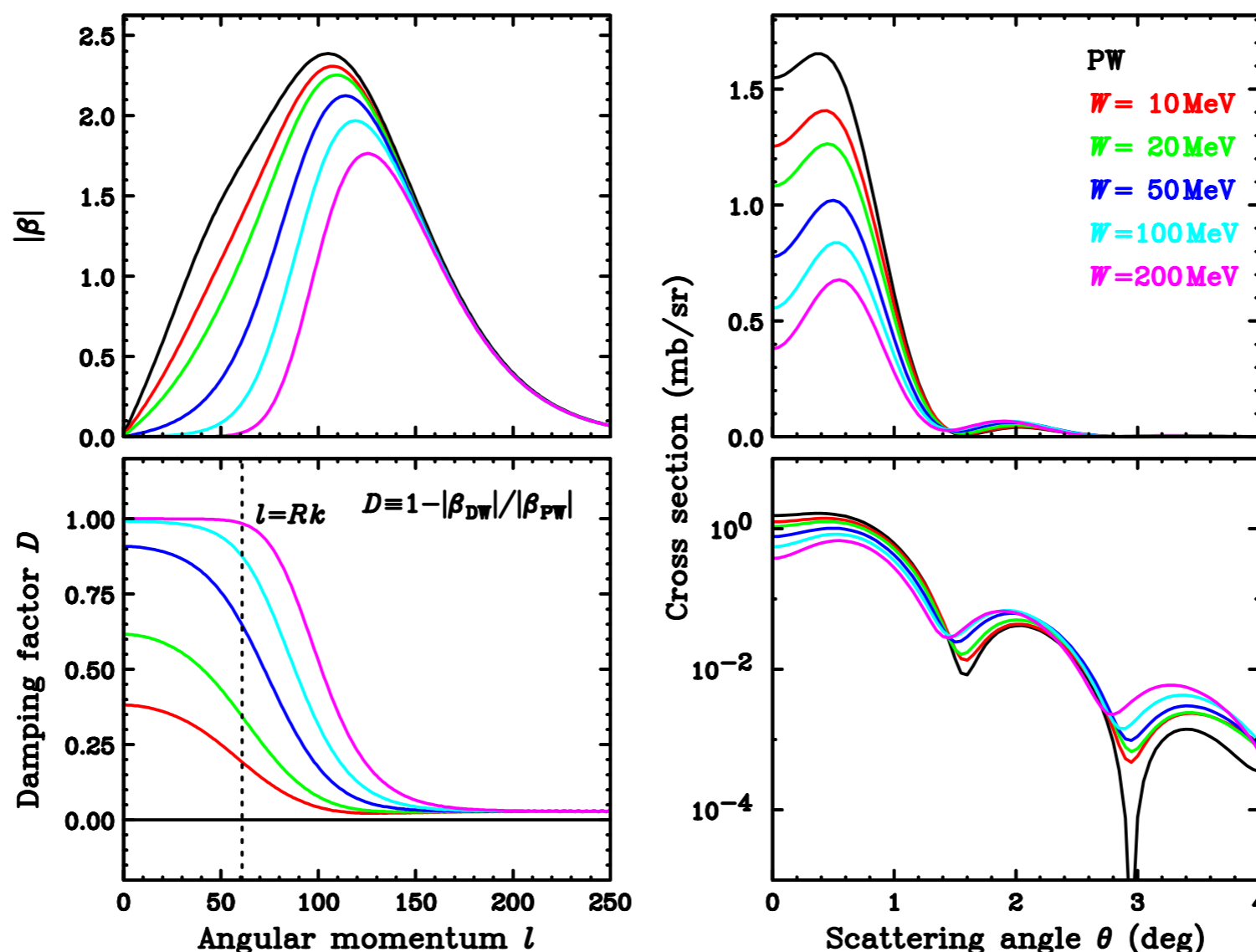
吸収の効果 $^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{F})^{12}\text{B}(1^+)$ at 200MeV

- 各角運動量 l の寄与 β

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = K \sum_m \left| \sum_l \beta_{lm} P_l^m(\theta) \right|^2$$

Damping factor $D \equiv 1 - |\beta_{\text{DW}}|/|\beta_{\text{PW}}|$

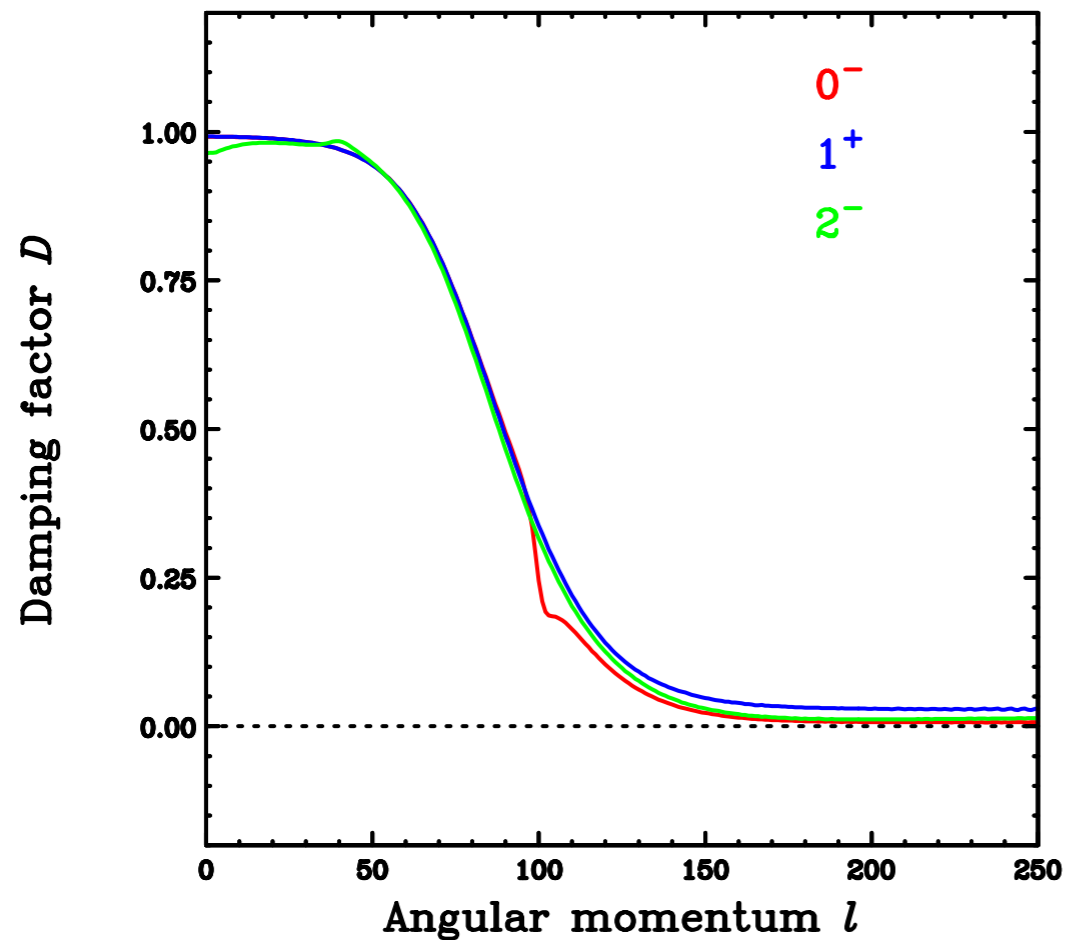
- 1つの成分
- 吸収により低角運動量成分がけずれ、断面積が小さくなる



Damping factor D について

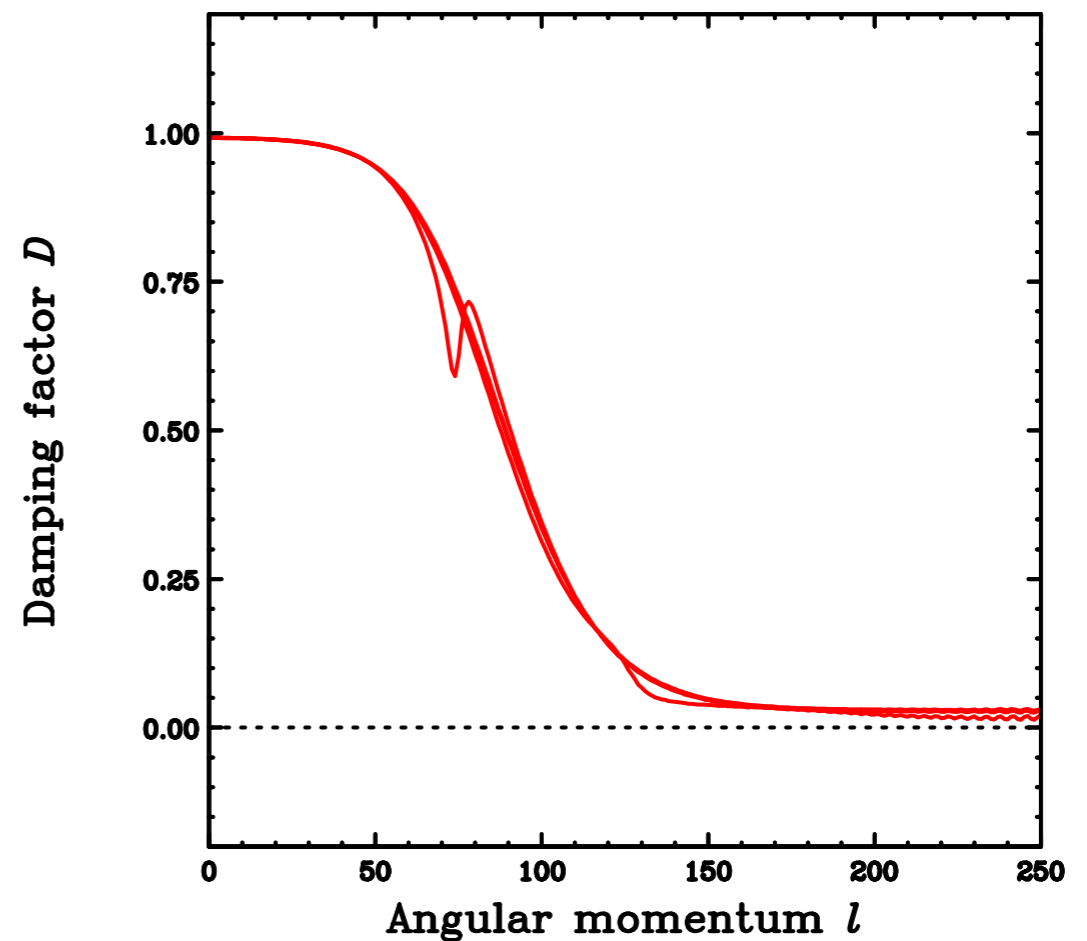
各 J^π の計算から求めた β を比較

$^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{F})$ at 200 A MeV



1^+ に対して、違うconfigurationで計算

$^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{F})$ at 200 A MeV



遷移の詳細(J^π , configuration)によらず、Damping factorはよく一致

Damping factor Dについて

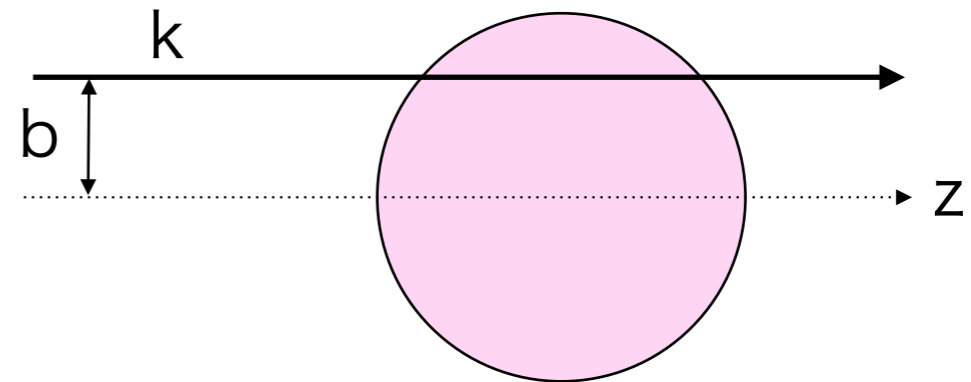
M. Kawai, PTP 27 (1962) 155.

- Eikonal近似(Distorted waveに対する) *Y. Suzuki, RIBF lecture note*

$$D^{\text{Eikonal}}(b) = \exp \left[\frac{1}{\hbar v} \int_{-\infty}^{+\infty} W(\sqrt{b^2 + z^2}) dz \right]$$

前方角度散乱、
 $|q|/|k| \ll 1$ なので直線で近似

$$v = \frac{\hbar k}{\mu}, \quad b^2 = x^2 + y^2$$



- WKB近似(部分波に対する) *Gotz et al., Phys. Rep. 16 (1975) 115.*

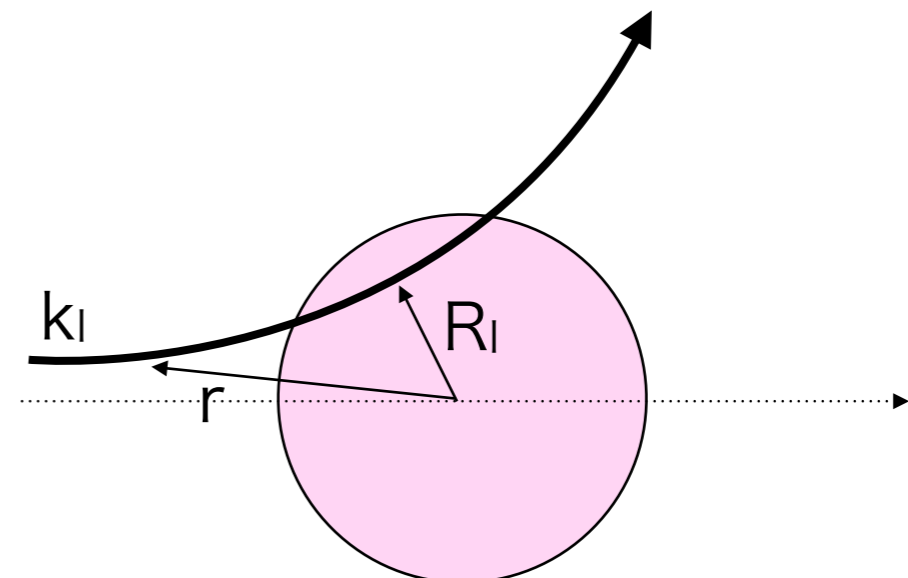
$$D^{\text{WKB}}(l) = \exp \left[2 \int_{R_l}^{\infty} \frac{\mu W(r)}{\hbar^2 k_l(r)} dr \right]$$

Local momentum k_l

$$k_l(r) = \sqrt{k^2 - \frac{(l + 1/2)^2}{r^2} - \frac{2\mu}{\hbar^2} V(r)}$$

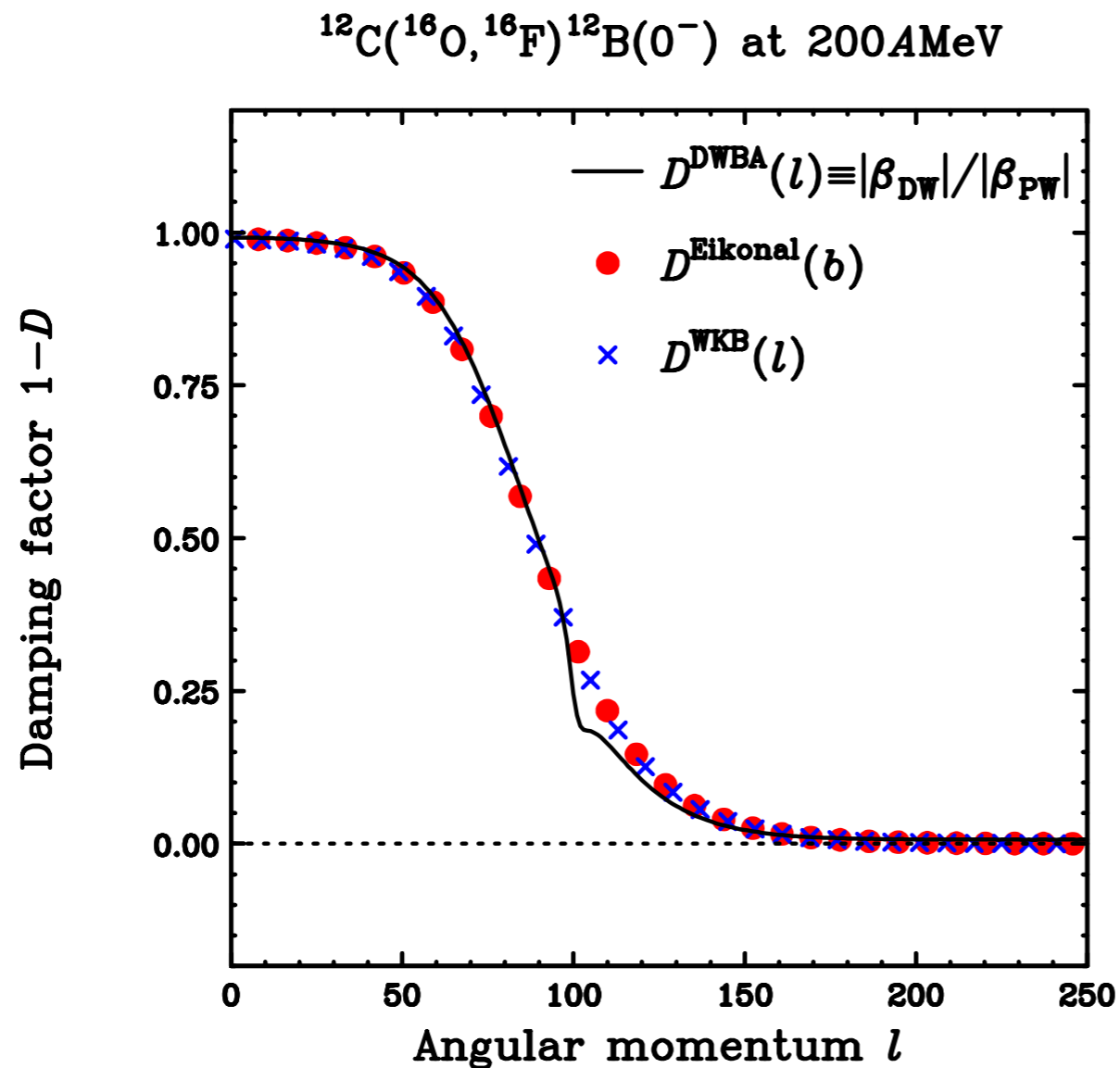
Classical turning point R_l

$$k_l(R_l) = 0$$



Damping factor D について

- D^{DWBA} を D^{Eikonal} 、 D^{WKB} と比較
 - WKBについては $kb=l+1/2$ で l に変換



$V_0 = -18.5$ MeV, $r_R = 1.0$ fm, $a_R = 0.75$ fm
 $W_0 = -100.7$ MeV, $r_I = 0.602$ fm, $a_I = 0.819$ fm

DWBAから求めたDistortion factorはEikonal, WKBでよく再現される

Damping factorを導入したsimple model

- Damping factor D
 - 遷移の詳細(J^π , configuration)によらない
 - Eikonal, WKBの結果とも一致(計算にもよらない)
- Damping factorを導入した簡単なモデルを構築できないか？

$$T = \int k^2 dk \underbrace{v(k)}_{\text{相互作用}} \underbrace{F_p(k) F_t(k)}_{\text{遷移密度}} \underbrace{\tilde{D}(k, q)}_{\text{歪曲波}}$$

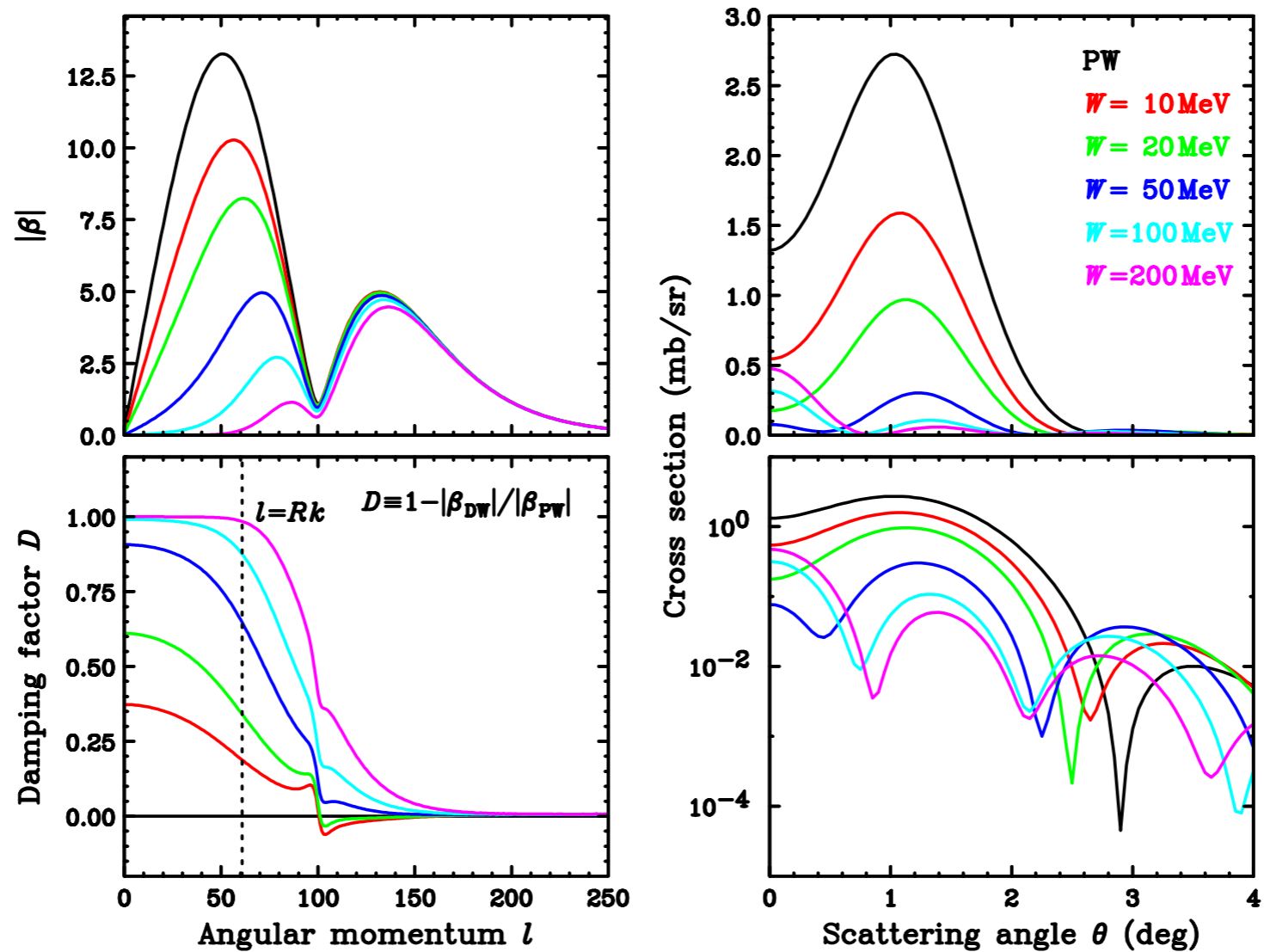
- ↑
- Eikonal, WKBから求めたD
 - 現象論的なD

まとめ

- DWBA計算結果
 - 光学ポテンシャルのReal partの寄与(coulomb含む)は小さい
 - 入射エネルギー $\sim 3\text{GeV}$ に対し、 $V \sim$ 数十MeV
 - Imaginary partの影響が大きい
 - 吸収の効果が支配的
 - 0° の角度分布を理解するためには吸収の効果が本質的
- Damping factor D
 - 遷移の詳細(J^π , configuration)によらない
 - Eikonal, WKBと比較した結果、よく再現された
- Future work: Damping factorを導入した簡単なモデル
 - Eikonal, WKBのDamping factorを用いた計算
 - 現象論的なDamping factorを用いた計算

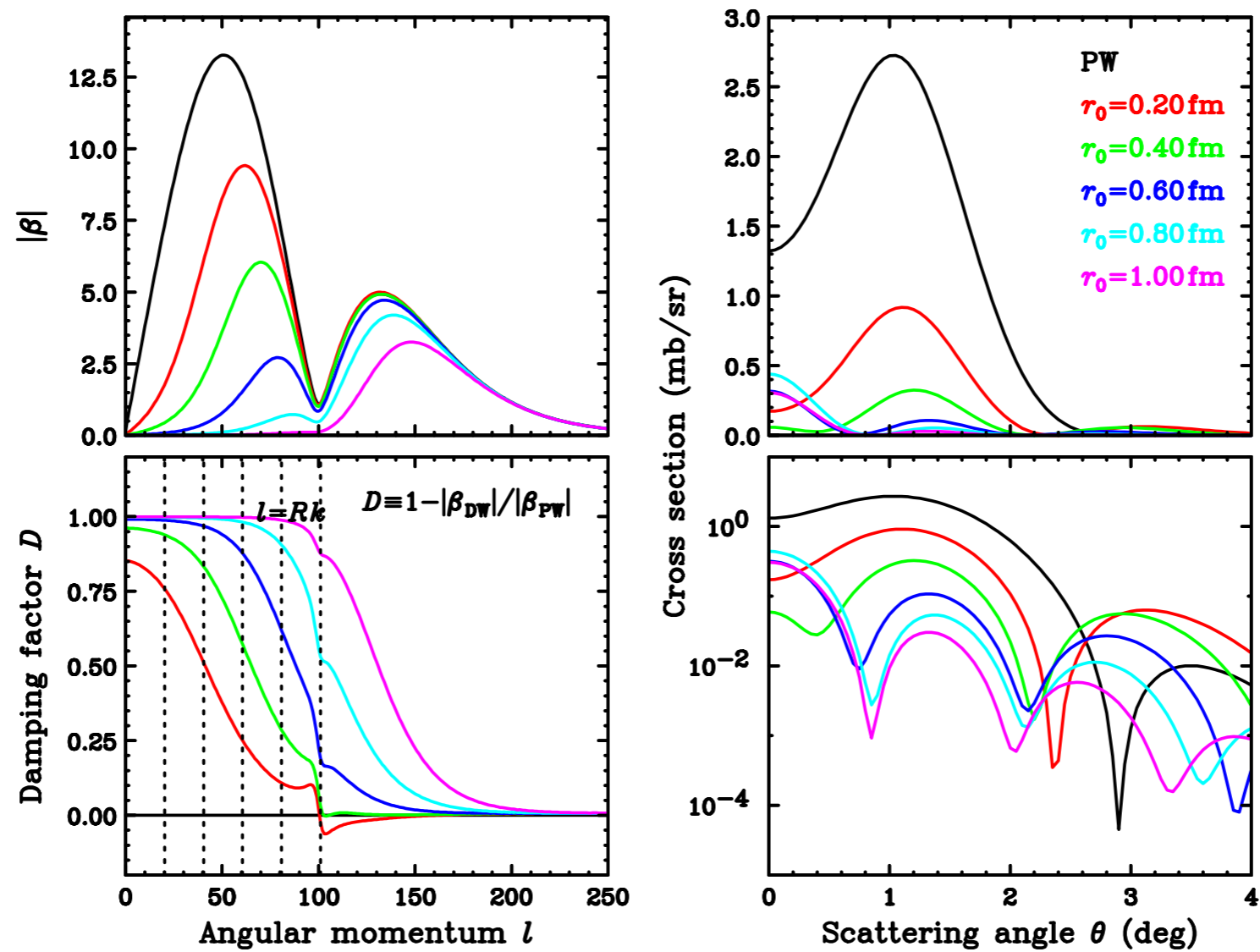
Damping factor 深さ W の依存性

W dependence ($r_0=0.60$ fm, $a_0=0.80$ fm)

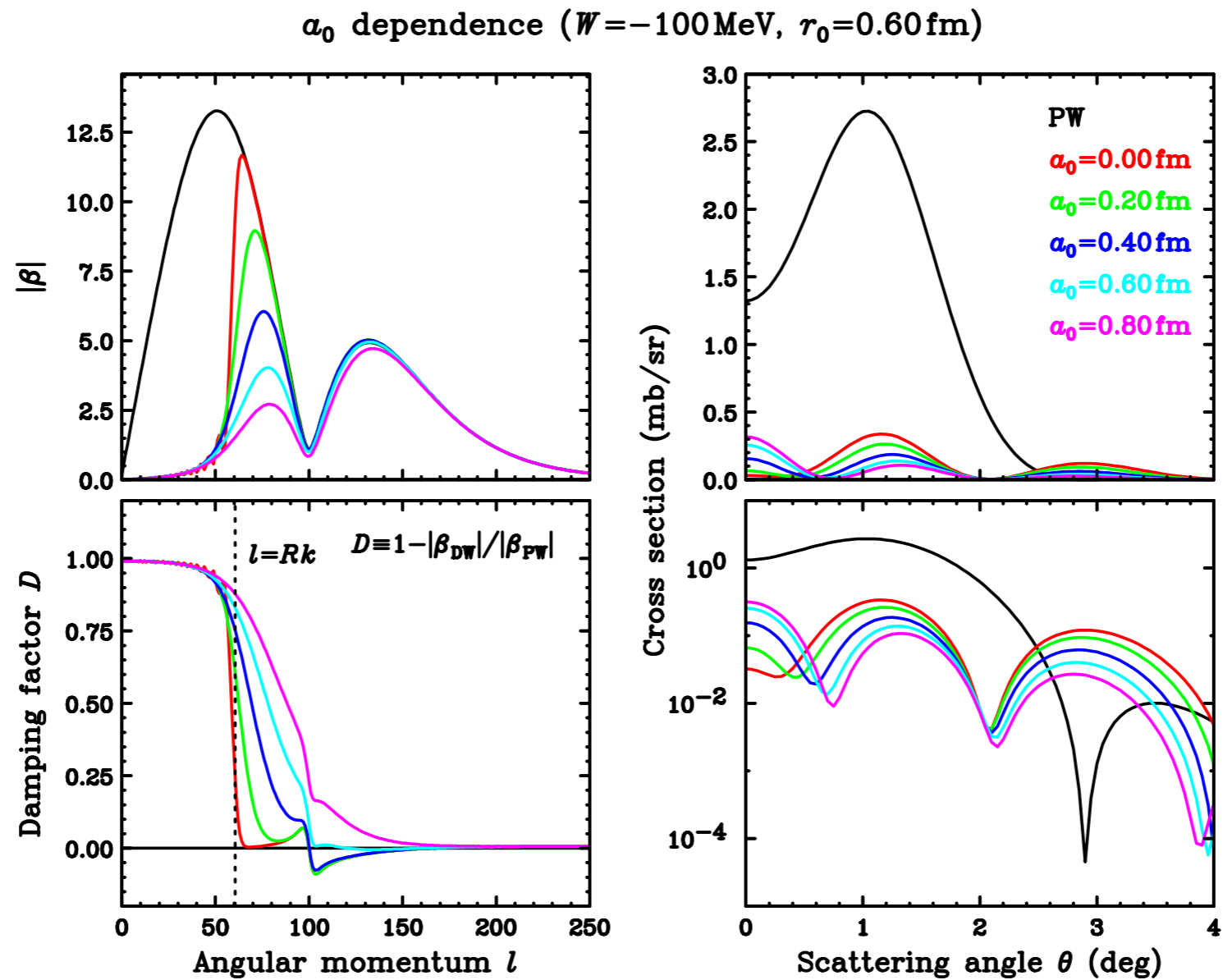


Damping factor 距離の依存性

r_0 dependence ($W = -100 \text{ MeV}$, $\alpha_0 = 0.80 \text{ fm}$)



Damping factor diffuseness a_0 の依存性



計算の概要

