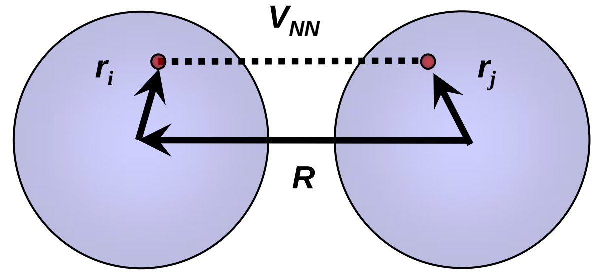
複素有効核力を用いた核反応の研究の展望（コメント）

櫻木千典（大阪市大・理）
with
古本猛憲（大阪市大・理）
山本安夫（都留文科大）

Double-Folding Model

input: v_{NN} ：有効核力
ρ_T ：標的核の核子密度
ρ_P ：入射核の核子密度

Double-Folding Model (DFM)



Projectile ***Target***

$$V_{DFM}(\boldsymbol{R}) = \left\langle \Phi_P \Phi_T \left| \sum_{i \in P,\, j \in T} v_{ij}\left(\vec{R} + \vec{r}_i - \vec{r}_j\right) \right| \Phi_P \Phi_T \right\rangle$$

$$= \int \rho_p(\vec{r}_1)\,\rho_t(\vec{r}_2)\,v_{NN}(\vec{R} + \vec{r}_1 - \vec{r}_2)\,d\vec{r}_1\,d\vec{r}_2$$

Effective nucleon-nucleon (NN) interaction in nuclear medium

(G-matrix interaction)

1. *Real, density-independent, energy-dependent*

   ***M3Y**, etc.*

2. *Real, density-dependent, energy-dependent*

   ***DDM3Y, CDM3Y, BDM3Y**, etc*

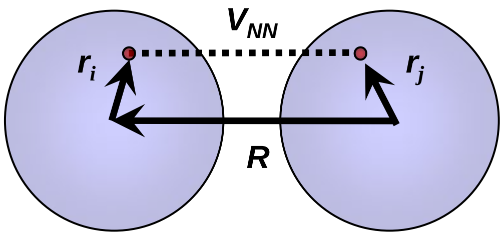
3. *Complex, density-dependent, energy-dependent*

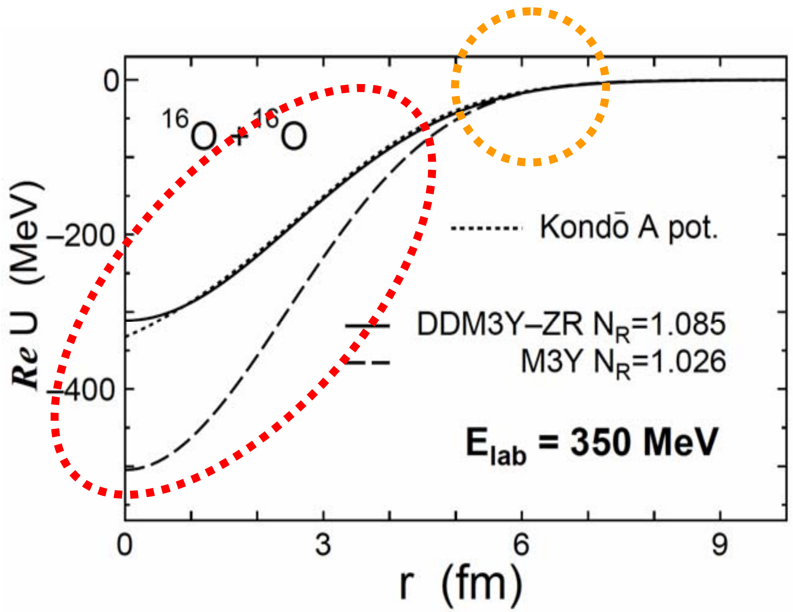
   ***JLM , CEG , Melbourne-G**, etc*

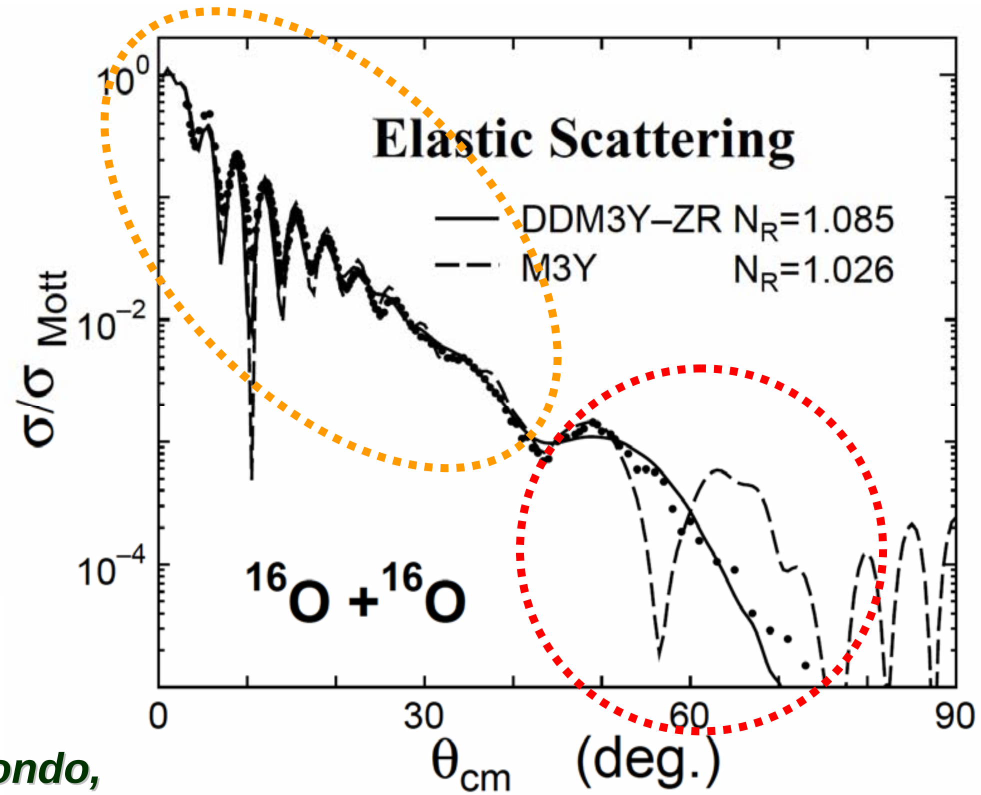
→ ***new, modern G-matrix interactions, also.***

Double-Folding-model potentials
with M3Y (density-independent)
with DDM3Y (density-dependent)

Double-Folding Model (DFM)

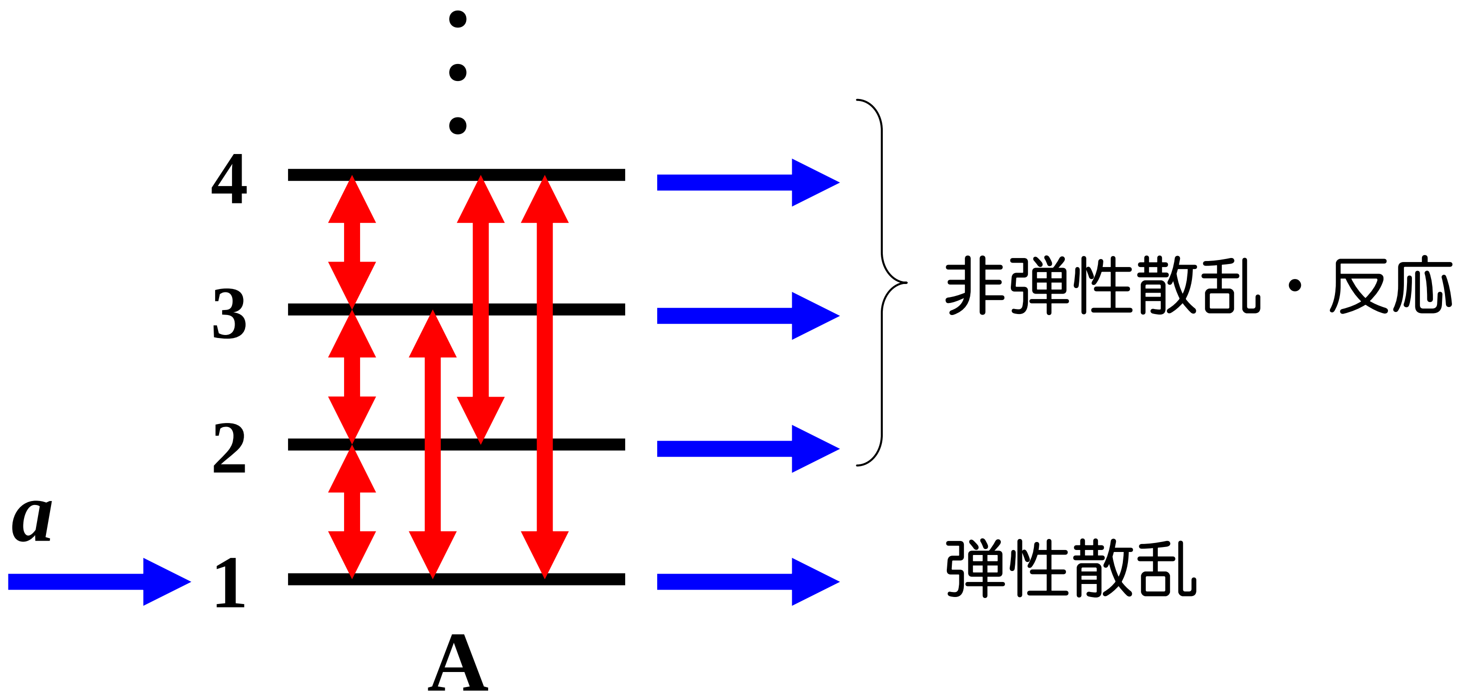






M.Katsuma, Y.Sakuragi, S.Okabe, Y.Kondo,
Prog.Theor.Phys. 107 (2002) 377

チャネル結合法（CC）
（ Coupled-Channels Method ）



状態(チャネル)間の多段階遷移を厳密に取り入れる非摂動計算

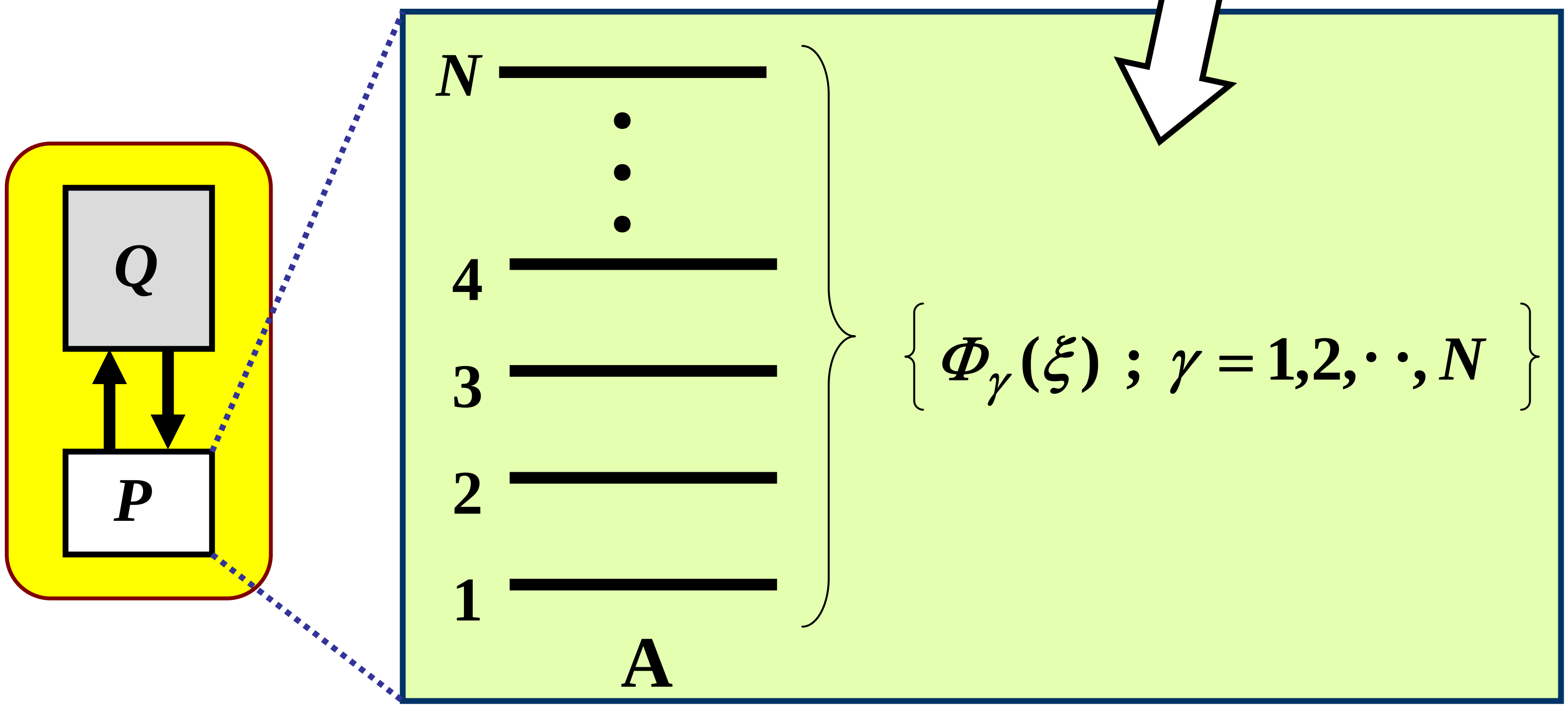
全系の波動関数を核の
内部波動関数で展開

有限の模型
空間に限定

チャネル結合法

$$\Psi_{\alpha}^{(+)}(\mathbf{r},\xi) = \sum_{\gamma=1}^{\infty} \Phi_{\gamma}(\xi)\cdot\chi_{\gamma}^{(+)}(\mathbf{r}) \cong \underbrace{\sum_{\gamma=1}^{N} \Phi_{\gamma}(\xi)\cdot\chi_{\gamma}^{(+)}(\mathbf{r})}$$

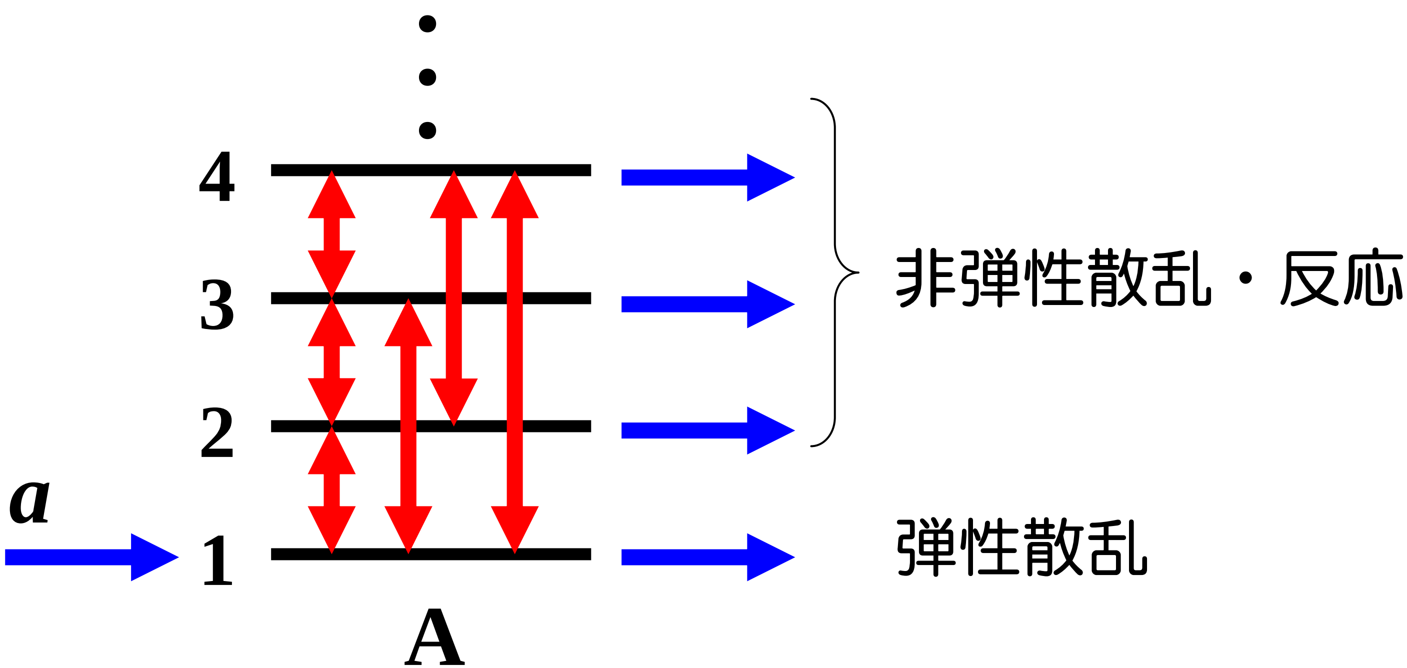
模型空間



チャネル結合方程式 (Coupled-Channels Equations)

$$(K_\beta + V_{\beta\beta}(r) - E_\beta)\chi_\beta^{(+)}(r) = -\sum_{\gamma\neq\beta}^{N} V_{\beta\gamma}(r)\chi_\gamma^{(+)}(r)$$

$$(\beta = 1, 2, 3, \cdots, N)$$



Feshbach の Projection Operator

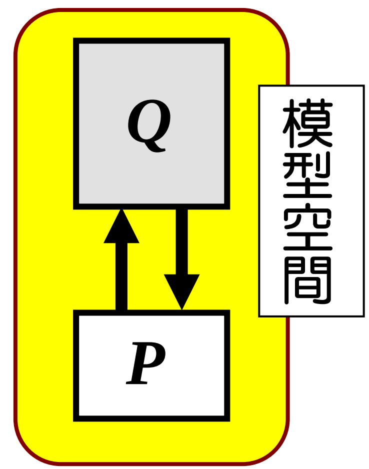
$$P = \sum_{\gamma=1}^{N} \left| \Phi_\gamma \right\rangle \left\langle \Phi_\gamma \right| , \quad Q = \sum_{n \neq \gamma} \left| \Phi_n \right\rangle \left\langle \Phi_n \right| = 1 - P$$

$$\Rightarrow \; P + Q = 1, \quad P^2 = P, \quad Q^2 = Q, \quad PQ = QP = 0$$

$$(H - E)\Psi^{(+)} = 0$$

$$\begin{cases} P(H-E)P\Psi^{(+)} + PV\,Q\Psi^{(+)} = 0 \\ Q(H-E)Q\Psi^{(+)} + QVP\Psi^{(+)} = 0 \end{cases}$$

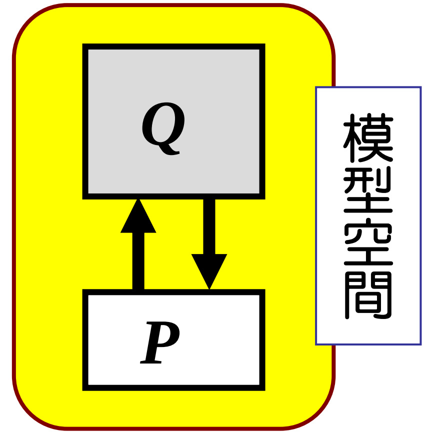
「Q空間の成分」を消去して
P空間だけの方程式にする



P 空間での「チャネル結合方程式」

$$(K_\beta + \boxed{V_{\beta\beta}(\mathbf{r})} - E_\beta)\chi_\beta^{(+)}(\mathbf{r}) = -\sum_{\gamma\neq\beta}^{N} \boxed{V_{\beta\gamma}(\mathbf{r})}\,\chi_\gamma^{(+)}(\mathbf{r})$$

$$(\beta = 1, 2, 3, \cdots, N)$$



複素ポテンシャル

$$V_{\beta\gamma} \equiv \left\langle \Phi_\beta \middle| \mathcal{V}_{eff} \middle| \Phi_\gamma \right\rangle$$

Q 空間の効果

$$= \left\langle \Phi_\beta \middle| V_{PP} + \boxed{V_{PQ}\frac{1}{E - H_{QQ} + i\varepsilon}V_{QP}} \middle| \Phi_\gamma \right\rangle$$

$$\Delta V_{PP} + \boxed{i\Delta W_{PP}}$$

Q空間への吸収効果

P 空間での「チャネル結合方程式」

$$\left(K_\beta + \boxed{V_{\beta\beta}(\mathbf{r})} - E_\beta\right)\chi_\beta^{(+)}(\mathbf{r}) = -\sum_{\gamma\neq\beta}^{N} \boxed{V_{\beta\gamma}(\mathbf{r})}\,\chi_\gamma^{(+)}(\mathbf{r})$$

$$(\beta = 1, 2, 3, \cdots, N)$$

チャネル結合方程式に現れるポテンシャルは、

・チャネルのポテンシャル $V_{\beta\beta}$ も、

・チャネル間の結合ポテンシャル $V_{\beta\gamma}\,(\beta \neq \gamma)$ も

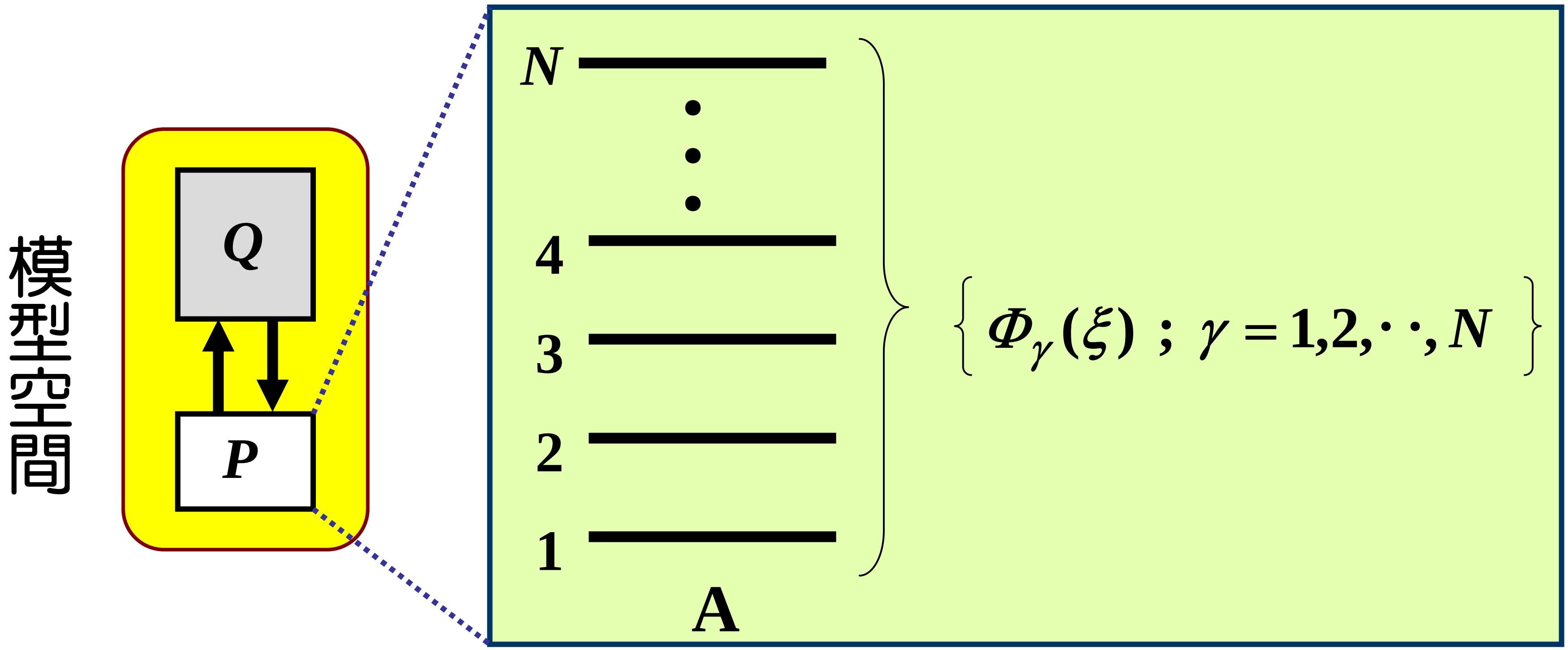
原理的には、すべて、Q空間を消去した効果を含む「複素ポテンシャル」である。

チャネル結合(CC)方程式：具体形

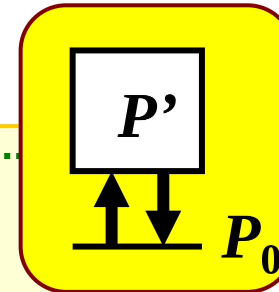
$$
\begin{cases}
(K_1 + \underline{V_{11}(r)} - E_1)\chi_1^{(+)}(r) = -\sum_{\gamma \neq 1} V_{1\gamma}(r)\chi_\gamma^{(+)}(r) \\
(K_2 + V_{22}(r) - E_2)\chi_2^{(+)}(r) = -\sum_{\gamma \neq 2} V_{2\gamma}(r)\chi_\gamma^{(+)}(r) \\
(K_3 + V_{33}(r) - E_3)\chi_3^{(+)}(r) = -\sum_{\gamma \neq 3} V_{3\gamma}(r)\chi_\gamma^{(+)}(r) \\
\qquad \cdots\cdots \qquad\qquad \cdots\cdots \\
(K_N + V_{NN}(r) - E_N)\chi_N^{(+)}(r) = -\sum_{\gamma \neq N} V_{N\gamma}(r)\chi_\gamma^{(+)}(r)
\end{cases}
$$

$$V_{11} \neq U_{opt}$$

Channel 2〜N との結合効果を含む



複素ポテンシャル



$$\mathcal{V}_{opt} \equiv \boldsymbol{V}_{11} + \sum_{ij} \boldsymbol{V}_{1i} \left(\frac{1}{E - \mathcal{H}_{P'P'} + i\varepsilon} \right)_{ij} \boldsymbol{V}_{j1}$$

$$\left(K_1 + \mathcal{V}_{opt} - E_1 \right) \chi_1^{(+)} = 0$$

一般化光学ポテンシャル

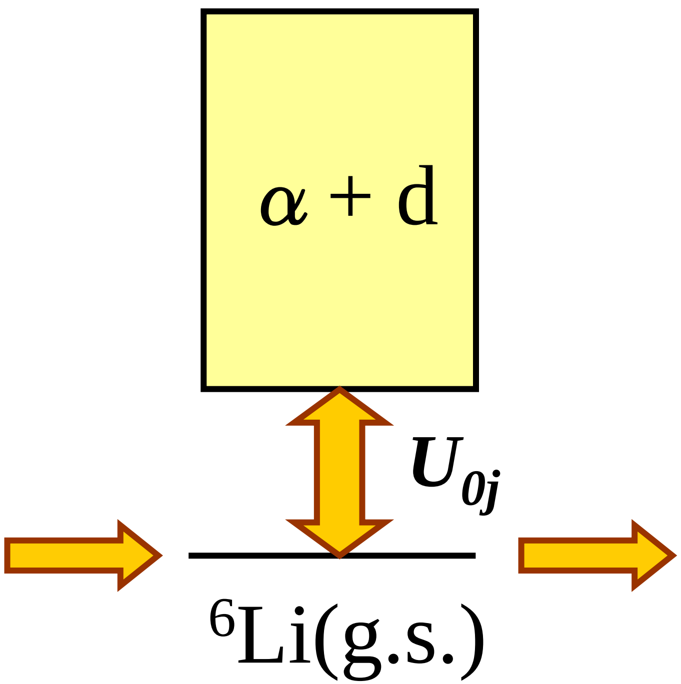
$$\left(K_1 + U_{opt} - E_1 \right) \chi_{opt}^{(+)} = 0$$

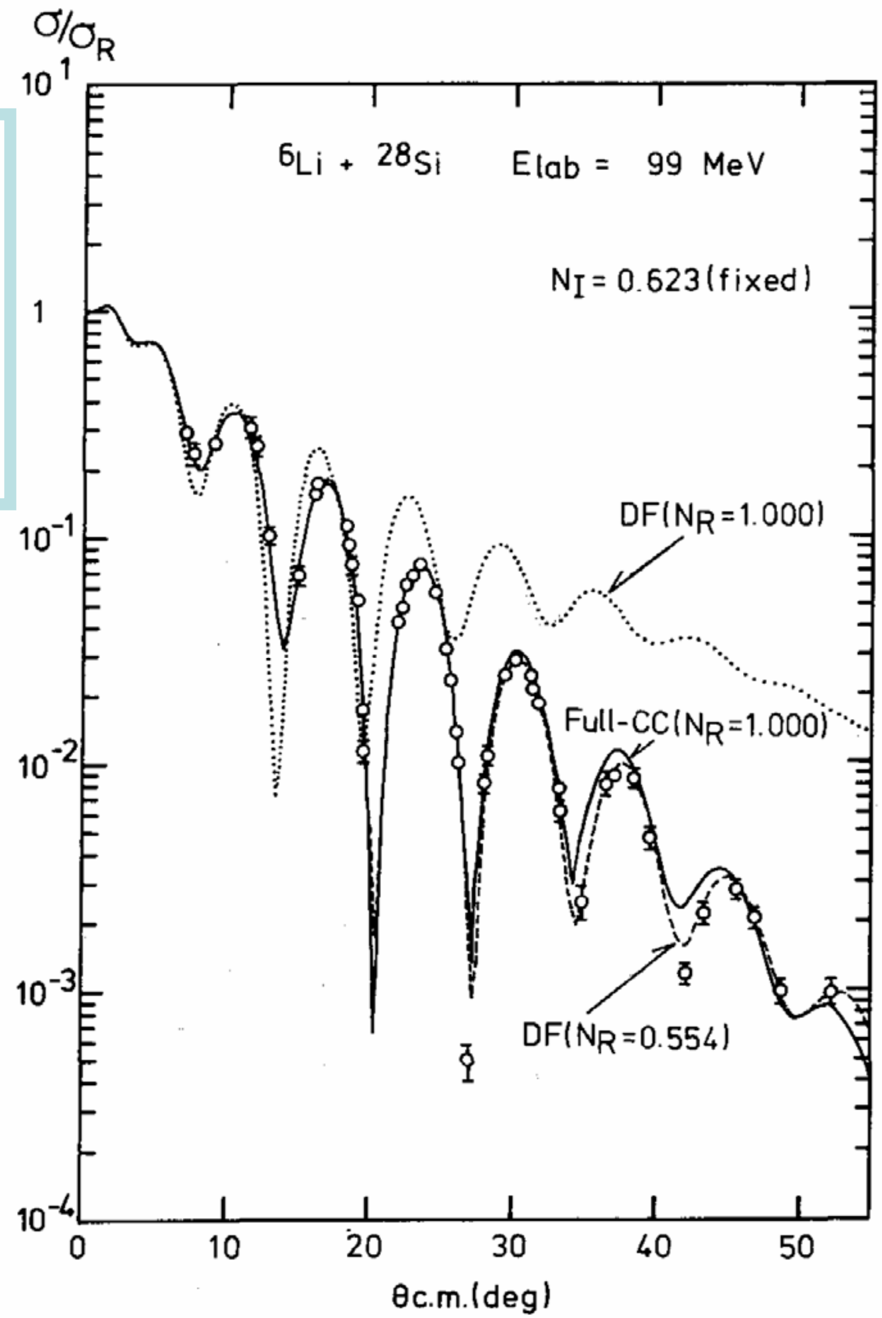
現象論的光学ポテンシャル

CDCC by DFM (with M3Y-ZR)

Breakup⇒強い斥力(real)

Y.Sakuragi, M.Yahiro, M.Kamimura, Prog.Theor.Phys. 70 (1983) 1047





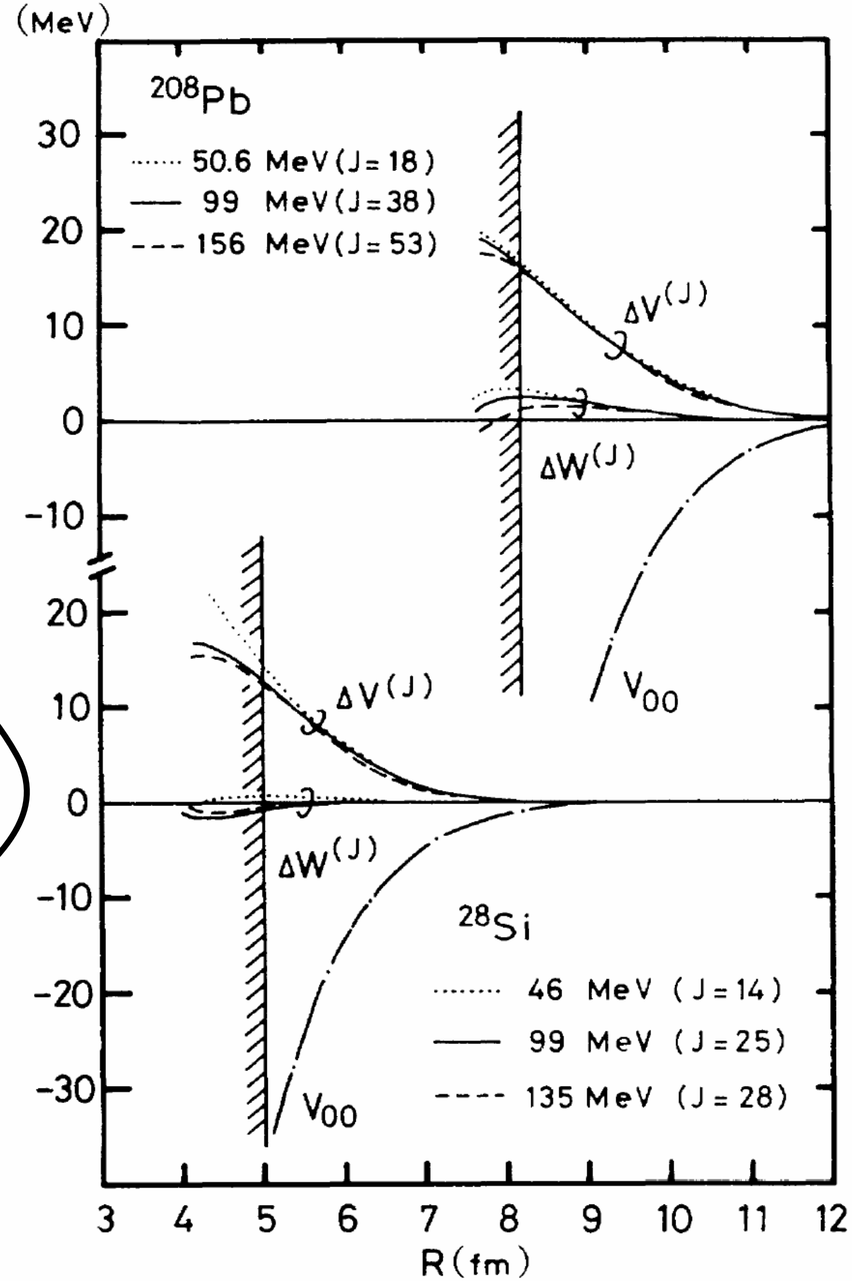
Y.Sakuragi, Phys.Rev.C 35 (1987) 2161

CDCC Calculation of
Dynamical Polarization
Potential due to ^{6}Li Breakup

$$\Delta U = \sum_{j\neq 0} \underline{U_{0j} G_j^{(+)} U_{j0}}$$

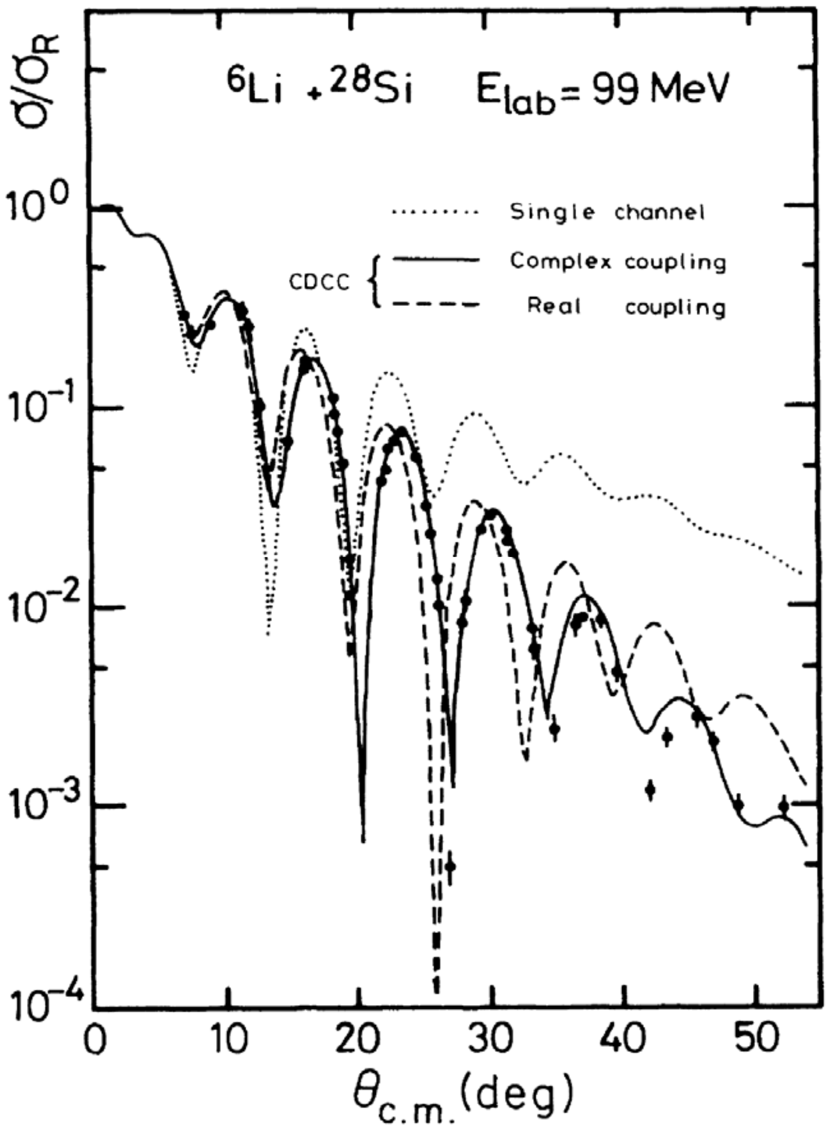
ΔV>0, ΔW～0

$U_{0j}=(N_R+iN_I)V_{0j}$: **complex!**

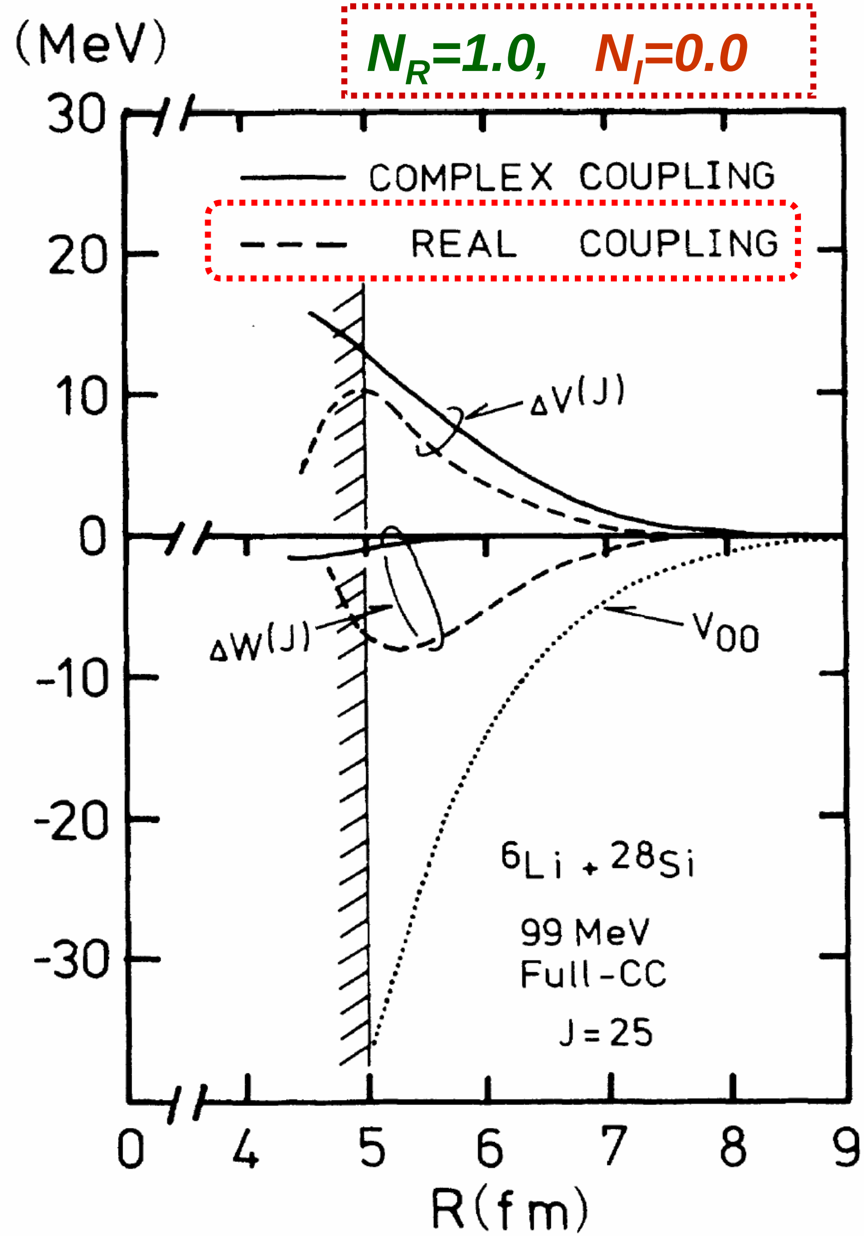


Role of the imaginary part of Coupling potentials

$U_{0j}=(N_R+iN_I)V_{0j}$



$N_R=1.0,\quad N_I=0.0$



P 空間での「チャネル結合方程式」

$$(K_\beta + \boxed{V_{\beta\beta}(r)} - E_\beta)\chi_\beta^{(+)}(r) = -\sum_{\gamma\neq\beta}^{N} \boxed{V_{\beta\gamma}(r)}\chi_\gamma^{(+)}(r)$$

$$(\beta = 1, 2, 3, \cdots, N)$$

チャネル結合方程式に現れるポテンシャルは、

・チャネルのポテンシャル $V_{\beta\beta}$ も、

・チャネル間の結合ポテンシャル $V_{\beta\gamma}\ (\beta\neq\gamma)$ も

原理的には、すべて、Q空間を消去した効果を含む「複素ポテンシャル」である。

Effective nucleon-nucleon (NN) interaction in nuclear medium

(G-matrix interaction)

1. *Real, density-independent, energy-dependent*

   M3Y, *etc.*

2. *Real, density-dependent, energy-dependent*

   DDM3Y, CDM3Y, BDM3Y, *etc*

3. *Complex, density-dependent, energy-dependent*

   JLM , CEG , Melbourne-G, *etc*

→ ***new, modern G-matrix interactions, also.***