

Andes (Ver.4.1) マニュアル

2023 年 3 月 井芹

1. はじめに

“Andes”は Windows 上で GUI ベースに光学ポテンシャルによる散乱問題を数値的に解くプログラムである。必要なパラメータのみを入力ボックスに入力した後は、ボタンのクリック操作だけで結果の数値出力やグラフ表示ができる。Andes の名称は、“A program for Near-side/far-side Decomposition in Elastic Scatterings”の頭文字の一部を取ったものである。Ver.4.1 では、開発言語として Microsoft Visual Basic .NET (.NET Framework 4.8)を用いている。特徴としては以下のことが挙げられる。

- (1) Windows 上で簡単に操作できる。
- (2) Windows 10, 11 などそのまま動く（はず）。
- (3) 計算結果のグラフをすぐに見ることができる。グラフのスケールを変えることも可能。
- (4) 微分断面積や偏極の Near-side / Far-side 分解計算ができる。
- (5) Becchetti-Greenlees や CH89、Koning-Delaroche などの global 光学ポテンシャルのパラメータ値を計算できる。
- (6) 運動学の相対論的補正ができる。
- (7) グラフに実験データの重ね書きができる。
- (8) ポテンシャルの数値データをファイルから読み込むことができる。
- (9) 計算パラメータの保存と読み込みができる。

なお、本プログラムは印刷には全く対応していない。これは、印刷処理はプリンタなど個々の環境に依存する部分が多いことと、印刷のオプションには際限がないからである。グラフ印刷については、本プログラムで求めた数値結果を別ファイルにコピー＆ペーストし、他のグラフ専用ソフトに任せる方がよい。Andes は飽くまで、画面上で結果のグラフを簡便に表示するものと割り切ってほしい。

2. 計算内容

2-1. 散乱方程式

ある原子核が別の原子核に衝突する散乱問題を考える。入射粒子（質量 M_p 、原子番号 Z_p 、スピン \vec{S} ）と標的核（質量 M_T 、原子番号 Z_T 、スピン 0）で作るポテンシャルを U とする。この U による散乱を記述する Schrödinger 方程式は、相対座標 \vec{r} の波動関数を $\psi_{LJM}(\vec{r})$ として次のように書ける。

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + U(r) - E_{\text{CM}} \right] \psi_{LJM}(\vec{r}) = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\mu \equiv M_p M_T / (M_p + M_T)$ はこの系の換算質量（reduced mass）、 E_{CM} は重心系での入射エネルギーである。また、 \vec{L} は入射粒子が持つ軌道角運動量、 $\vec{J} \equiv \vec{L} + \vec{S}$ は全角運動量、 M は J の z 成分である。

波動関数 ψ_{LJM} を動径部分 $u_{LJ}(r)$ と角度部分およびスピン部分に分ける。

$$\psi_{LJM}(\vec{r}) = \frac{u_{LJ}(r)}{r} \cdot i^L [Y_L(\hat{r}) \otimes \chi_s]_{JM} \quad (2)$$

ここで、 $Y_{LM}(\hat{r})$ は座標 \hat{r} の角度を変数とする球面調和関数、 χ_{sv} は入射粒子のスピン波動関数である。(2)式を用いると、(1)式は動径部分のみの方程式にすることができる。

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \left\{ \frac{d^2}{dr^2} - \frac{L(L+1)}{r^2} \right\} + U(r) - E_{\text{CM}} \right] u_{LJ}(r) = 0 \quad (3)$$

この微分方程式を、境界条件 $u_{LJ}(0) = 0$ と $r \rightarrow \infty$ での漸近形

$$u_{LJ} \sim u_L^{C(-)}(k, \eta; r) - S_{LJ}^N u_L^{C(+)}(k, \eta; r) \quad (4)$$

を満たすように解く。ここで、 $u_L^{C(\pm)}(k, \eta; r)$ は、漸近形

$$u_L^{C(\pm)}(k, \eta; r) \sim \exp \left[\pm i \left(kr - \eta \ln 2kr + \sigma_L - \frac{L\pi}{2} \right) \right] \quad (5)$$

を持つ外向き (+) および内向き (-) の Coulomb 球面波である。また、 $k \equiv \sqrt{2\mu E_{\text{CM}}}/\hbar$ は波数、 $\eta \equiv \mu Z_p Z_T e^2 / \hbar^2 k$ は Sommerfeld parameter、 σ_L は Coulomb phase shift である。こうして求めた S_{LJ}^N が部分波 (L, J) に対する nuclear S 行列要素 (S-matrix elements) になる。

2-2. 光学ポテンシャル

$U(r)$ は光学ポテンシャル (optical potential) と呼ばれ、標的核と入射粒子の相互作用を複素一体ポテンシャルとして表したものである。ここでは、原子核の光学ポテンシャルとしてよく用いられる次の形のものを取る。

$$U(r) = U^{\text{CE}}(r) + U^{\text{SO}}(r) \vec{L} \cdot \vec{\sigma} + V^{\text{Coul}}(r) \quad (6)$$

ここで、CE、SO、Coul はそれぞれ中心力 (central force)、スピン軌道力 (spin-orbit force)、Coulomb 力を表している。また、 $\vec{\sigma} \equiv 2\vec{S}$ である。スピン軌道力のオペレーターは核子 ($S = 1/2$) 以外の場合でも $\vec{L} \cdot \vec{\sigma}$ で定義しており、 $\vec{L} \cdot \vec{S}$ よりも 2 倍大きくくなっていることに注意すること。

(1) 中心力部分

$U^{\text{CE}}(r)$ は次の形をとる。

$$U^{\text{CE}}(r) = [-V_0 f(r_{0R}, a_R; r) + h_R(r)] + i [-W_0 f(r_{0I}, a_I; r) - W_D g(r_{0ID}, a_{ID}; r) + h_I(r)] \quad (7)$$

f, g は Woods-Saxon (WS) 型とその微分型の形状因子で、

$$f(r_{0x}, a_x; r) = 1 / \left[1 + \exp \left(\frac{r - R_x}{a_x} \right) \right] \quad (8)$$

$$g(r_{0x}, a_x; r) = 4 \exp \left(\frac{r - R_x}{a_x} \right) / \left[1 + \exp \left(\frac{r - R_x}{a_x} \right) \right]^2 \quad (9)$$

とする。半径パラメーター R_x は、軽イオン散乱では通常、標的核の質量数 A_T を用いて、 r_{0x} から

$$R_x = r_{0x} A_T^{1/3} \quad (10)$$

で計算される。重イオン散乱の場合、入射核 (質量数 A_P) の広がりも考慮して、

$$R_x = r_{0x} (A_T^{1/3} + A_P^{1/3}) \quad (11)$$

とすることもある。(Andes ではどちらのタイプを使うか選択できる。)

$h_R(r), h_I(r)$ は、外部ファイルから数値的に読み込んだポテンシャル部分である。

(2) スピン軌道力部分

$U^{\text{SO}}(r)$ は“Thomas 型”、“Woods-Saxon 微分型 (WSD)”、“Gauss 型”の 3 種類から選ぶことができる。また、それらに加えて、外部ファイルから数値的に読み込んだポテンシャルを付け加えることもできる。

“Thomas 型”は以下の形をしている。

$$U^{\text{SO}}(r) = \lambda_\pi^2 \left[V_{\text{SO}} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f(r_{0RS}, a_{RS}; r) + i W_{\text{SO}} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f(r_{0IS}, a_{IS}; r) \right] \quad (12)$$

ここで、 λ_π は π 中間子の Compton 波長で、 $\lambda_\pi^2 = 2.0 \text{ fm}^2$ である。“Thomas 型”は原点で $1/r$ で発散している。

軽イオン散乱では Thomas 型ではなく“Woods-Saxon 微分型 (WSD)”のスピンの軌道力を用いることもある[Watson]。これは Thomas 型の $1/r$ を $1/R$ に置き換えることで得られる。

$$U^{SO}(r) = \lambda_\pi^2 \left[V_{SO} \frac{1}{R_{RS}} \frac{d}{dr} f(r_{0RS}, a_{RS}; r) + i W_{SO} \frac{1}{R_{IS}} \frac{d}{dr} f(r_{0IS}, a_{IS}; r) \right] \quad (13)$$

より単純に、“Gauss 型”を用いることもできる。

$$U^{SO}(r) = - \left[V_{SO} \exp \left\{ - \left(\frac{r - R_{RS}}{a_{RS}} \right)^2 \right\} + i W_{SO} \exp \left\{ - \left(\frac{r - R_{IS}}{a_{IS}} \right)^2 \right\} \right] \quad (14)$$

形状因子が決まっているこれら 3 つの型に加えて、外部ファイルから数値的に読み込んだポテンシャル $h_{RS}(r), h_{IS}(r)$ を付け加えることもできる。

$$U^{SO}(r) = \dots + h_{RS}(r) + i h_{IS}(r) \quad (15)$$

[Watson] B.A.Watson, P.P.Singh, and R.E.Segel, Physical Review 182, 977 (1969)

(3) Coulomb 力部分

Coulomb ポテンシャルは通常、点電荷と一様帯電球によるポテンシャル (point-sphere 型) を用いる。

$$V^{Coul}(r_{0C}; r) = \begin{cases} \frac{Z_P Z_T e^2}{2R_C} \left(3 - \frac{r}{R_C} \right) & \text{for } r \leq R_C \\ \frac{Z_P Z_T e^2}{r} & \text{for } r > R_C \end{cases} \quad (16)$$

ここで、 R_C は r_{0C} から(10), (11)と同様にして求められる。

重イオン散乱の場合、入射粒子の広がりも考慮して、一様帯電球どうしの Coulomb ポテンシャル (sphere-sphere 型) を用いることもある[Jain]。

$$V^{Coul}(r_{0C}; r) = \begin{cases} \frac{3Z_P Z_T e^2}{2a_1^3 a_2^3} \left[a_1^3 a_2^2 - \frac{1}{5} a_1^5 - \frac{1}{3} a_1^3 r^2 \right] & \text{for } 0 \leq r \leq a_2 - a_1 \\ \frac{3Z_P Z_T e^2}{8a_1^3 a_2^3 r} \left[\frac{1}{12} (a_1^6 + a_2^6) - \frac{3}{4} (a_1^2 a_2^4 + a_1^4 a_2^2) + \frac{4}{3} a_1^3 a_2^3 \right. \\ \quad \left. + 2r \left(a_1^3 a_2^2 + a_1^2 a_2^3 - \frac{1}{5} (a_1^5 + a_2^5) \right) + \frac{3r^2}{4} (a_1^2 - a_2^2)^2 \right. \\ \quad \left. - \frac{2r^3}{3} (a_1^3 + a_2^3) + \frac{r^4}{4} (a_1^2 + a_2^2) - \frac{r^6}{60} \right] & \text{for } a_2 - a_1 \leq r \leq a_1 + a_2 \\ \frac{Z_P Z_T e^2}{r} & \text{for } r > R_C \end{cases} \quad (17)$$

ここで、 a_1 は入射核の荷電半径 ($r_{0C}^P A_P^{1/3}$) と標的核の荷電半径 ($r_{0C}^T A_T^{1/3}$) のうちの小さい方、 a_2 は大きい方である。

Andes ではどちらの型かを選ぶことができる。

[Jain] A.K.Jain, M.C.Gupta, C.S.Shastry; Physival Review C, Vol.12, Number 3, pp.801-805 (1975)

2-3. 断面積と偏極

入射運動量を \vec{P} 、散乱後の放出運動量を \vec{P}' で表す。座標系を $z \parallel \vec{P}$ 、 $y \parallel \vec{P} \times \vec{P}'$ となるように取り (Madison convention)、散乱角を θ で表すと、この散乱の微分断面積 (differential cross section) は

$$\sigma(\theta) \equiv \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2S+1} \sum_{\nu\nu'} |f_{\nu\nu'}(\theta)|^2 \quad (18)$$

偏極 (polarization) は

$$p_y(\theta) = \frac{1}{S(2S+1)} \frac{1}{\sigma(\theta)} \sum_{\nu\nu'} \sqrt{(S-\nu)(S+\nu+1)} \operatorname{Im}(f_{\nu\nu'}(\theta) f_{\nu+1\nu'}^*(\theta)) \quad (19)$$

と書くことができる。ここで $f_{\nu\nu'}(\theta)$ は散乱角 θ における散乱振幅 (scattering amplitude) で、S 行列から

$$\begin{aligned} f_{\nu\nu'}(\theta) &= f^{Coul}(\theta) \delta_{M0} \\ &+ \frac{i}{2k} (-)^{\frac{M+|M|}{2}} \sum_{LJ} (2L+1) \sqrt{\frac{(L-|M|)!}{(L+|M|)!}} \\ &\times (LMS\nu|J\nu')(L0S\nu'|J\nu') e^{2i\sigma_L} (1-S_{LJ}^N) P_L^{|M|}(\theta) \end{aligned} \quad (20)$$

によって計算される。ただし、 $M \equiv \nu' - \nu$ で、 $f^{Coul}(\theta)$ は Coulomb 散乱振幅、 σ_L は角運動量 L での Coulomb phase shift、 $P_L^M(\theta)$ は通常の Legendre 陪関数である。また、 $(j_1 m_1 j_2 m_2 | j_3 m_3)$ は角運動量の合成に伴う Clebsh-Gordan 係数である。

弾性散乱の核力全断面積 σ_{total}^{Nuc} と反応断面積 σ_{reac} は、S 行列から以下のようにして計算できる。

$$\sigma_{total}^{Nuc} = \frac{1}{2S+1} \frac{\pi}{k^2} \sum_{LJ} |1 - S_{LJ}^N|^2 \quad (21)$$

$$\sigma_{reac} = \frac{1}{2S+1} \frac{\pi}{k^2} \sum_{LJ} (1 - |S_{LJ}^N|^2) \quad (22)$$

ただし、この弾性散乱の全断面積 σ_{total}^{Nuc} は Coulomb 力の寄与を含んでいないので、Coulomb 力がある場合は仮想的なものとなる。

2-4. Near-side/Far-side 分解

量子力学的散乱を古典的に近似することにより、散乱の際に散乱粒子が標的核のどちら側を通ったかを区別して、散乱振幅を near-side (NS) 成分 $f_{\nu\nu'}^{NS}(\theta)$ と far-side (FS) 成分 $f_{\nu\nu'}^{FS}(\theta)$ に分解することができる。

$$f_{\nu\nu'}(\theta) = f_{\nu\nu'}^{NS}(\theta) + f_{\nu\nu'}^{FS}(\theta) \quad (23)$$

これらの振幅は、(19)式中の $P_L^M(\theta)$ を

$$P_{LM}(\theta) = \tilde{Q}_{LM}^{(+)}(\theta) + \tilde{Q}_{LM}^{(-)}(\theta) \quad (24)$$

と分解したとき、NS 成分は $\tilde{Q}_{LM}^{(+)}(\theta)$ から、FS 成分は $\tilde{Q}_{LM}^{(-)}(\theta)$ からの寄与として計算できる。ただし、

$$\tilde{Q}_{LM}^{(\pm)}(\theta) \equiv \frac{1}{2} \left[P_L^M(\theta) \mp i \frac{2}{\pi} Q_L^M(\theta) \right] \quad (25)$$

で、 $Q_L^M(\theta)$ は第2種 Legendre 陪関数である。

Coulomb 散乱振幅については、 $f^{Coul}(\theta)$ も NS/FS 成分に分解してそれぞれの成分に足し込む方式 [Fuller]と、 $f^{Coul}(\theta)$ をそのまま NS 成分にのみ繰り込み FS 成分には入れない方式がある。Andes では前者を「Type-1」、後者を「Type-2」として選択することができる。

こうして得られた NS/FS の散乱振幅から、(18)(19)式と同様にして、NS/FS の微分断面積と偏極を計算することができる。なお、偏極については、NS 成分・FS 成分を計算する際、(19)式右辺の分母に

ある微分断面積 $\sigma(\theta)$ に total の微分断面積を用いるか、それぞれ NS または FS の微分断面積を用いるかの 2 種類の計算方法が考えられる。前者は全体の偏極における NS 成分・FS 成分の寄与を表し、後者は NS 成分または FS 成分ごとの偏極を表すと考えることができる。Andes では前者を「Type-A」、後者を「Type-B」として選択することができる。

[Fuller] R.C.Fuller; Physival Review C, Vol.12, Number 5, pp.1561-1574

2-5. 運動学の相対論的補正

入射エネルギーが高くなると、運動学の相対論的補正が必要になる。

(1) 非相対論の場合

非相対論 (“non-rel”) では、実験室系での入射エネルギー E_{Lab} 、重心系でのエネルギー E_{CM} 、換算質量 μ 、波数 k について、以下の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} E_{\text{CM}} &= \frac{A_T}{A_P + A_T} E_{\text{Lab}} \\ \mu &= \frac{A_P A_T}{A_P + A_T} u \\ k &= \sqrt{2\mu E_{\text{CM}}}/\hbar \end{aligned} \quad (26)$$

ここで、 u は原子質量単位 (atomic mass unit) である。

(2) 相対論的補正

相対論的補正を行う場合、以下の関係式を使う。

$$\begin{aligned} \hbar c k_P^L &= \sqrt{(E_{\text{Lab}} + M_P c^2)^2 - (M_P c^2)^2} \\ E_{\text{CM}}^{\text{tot}} &= \sqrt{(M_P c^2)^2 + (M_T c^2)^2 + 2M_T c^2 (E_{\text{Lab}} + M_P c^2)} = E_P^{\text{CM}} + E_T^{\text{CM}} \\ k &= \frac{M_T c^2}{E_{\text{CM}}^{\text{tot}}} k_P^L \\ E_P^{\text{CM}} &= \sqrt{(\hbar c k)^2 + (M_P c^2)^2} = [(M_P c^2)^2 + M_T c^2 (E_{\text{Lab}} + M_P c^2)]/E_{\text{CM}}^{\text{tot}} \\ E_T^{\text{CM}} &= \sqrt{(\hbar c k)^2 + (M_T c^2)^2} = [(M_T c^2)^2 + M_T c^2 (E_{\text{Lab}} + M_P c^2)]/E_{\text{CM}}^{\text{tot}} \\ \mu c^2 &= \frac{1}{2} \frac{(E_P^{\text{CM}} + M_P c^2)(E_T^{\text{CM}} + M_T c^2)}{E_P^{\text{CM}} + M_P c^2 + E_T^{\text{CM}} + M_T c^2} \quad (\text{rel. cor. 1}) \\ \mu c^2 &= \frac{E_P^{\text{CM}} E_T^{\text{CM}}}{E_P^{\text{CM}} + E_T^{\text{CM}}} \quad (\text{rel. cor. 2}) \\ E_{\text{CM}} &= \frac{(\hbar k)^2}{2\mu} \end{aligned} \quad (27)$$

ここで、 $M_P = A_P u$ 、 $M_T = A_T u$ は、それぞれ入射粒子と標的核の質量である。

補正の処方に、“rel.cor.1”と“rel.cor.2”の 2 種類がある。Andes ではどちらの処方を取るか選択できる。“rel.cor.1”と“rel.cor.2”では、波数 k は同じであるが、換算質量 μ の値が異なり、その結果、CM 系での運動エネルギー E_{CM} の値も変わる。“rel.cor.1”では、

$$\begin{aligned} E_{\text{CM}} &= \frac{(\hbar k)^2}{2\mu} = \frac{(\hbar c k)^2}{E_P^{\text{CM}} + M_P c^2} + \frac{(\hbar c k)^2}{E_T^{\text{CM}} + M_T c^2} \\ &= \frac{(E_P^{\text{CM}})^2 - (M_P c^2)^2}{E_P^{\text{CM}} + M_P c^2} + \frac{(E_T^{\text{CM}})^2 - (M_T c^2)^2}{E_T^{\text{CM}} + M_T c^2} \\ &= (E_P^{\text{CM}} - M_P c^2) + (E_T^{\text{CM}} - M_T c^2) \\ &= E_{\text{CM}}^{\text{tot}} - M_P c^2 - M_T c^2 \end{aligned} \quad (29)$$

となる。一方、“rel.cor.2”は、換算エネルギー（reduced energy）を換算質量とみなす処方で、

$$E_{\text{CM}} = \frac{(\hbar k)^2}{2\mu} = \frac{(\hbar ck)^2}{2E_p^{\text{CM}}} + \frac{(\hbar ck)^2}{2E_T^{\text{CM}}} \quad (28)$$

となる。

動径方程式(3)を

$$\left[\frac{d^2}{dr^2} - \frac{L(L+1)}{r^2} - \frac{2\mu}{\hbar^2} U(r) + k^2 \right] u_{LJ}(r) = 0 \quad (30)$$

と書き直すと、 μ の違いはポテンシャルの大きさを変える効果として現れることが分かる。“non-rel”での μ の値からの違いは、一般に“rel.cor.1”の方が“rel.cor.2”より大きくなる。

2.6 使用している物理定数

計算に使用している物理定数は CODATA 2018 [CODATA] によるものである。

$$\hbar c = 197.3269804 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

$$1 u = 931.49410242 \text{ MeV}$$

$$e^2/\hbar c = 1/137.035999084$$

[CODATA] <https://physics.nist.gov/constants>

3. プログラムの使い方

3-1. 起動とメインフォーム

AndesV41.exe のアイコンをダブルクリックすると、メインのフォームが開く。



3-2. 計算パラメーターの入力

計算に必要なパラメーター値を入力する。

Basic Parameters

散乱系を指定するパラメーターである。

PMass, PZZ, PSpin..... 入射粒子 (Projectile) の質量、電荷 (原子番号)、スピン

Tmass, TZZ..... 標的核 (Target) の質量、電荷 (原子番号)

ELab 入射エネルギー (単位は MeV)

- 右側のコンボボックスから、入力するエネルギーの形式を変更できる。

ELab(non-rel.)..... 実験室系での入射エネルギー (非相対論的扱い)

ECM(non-rel.)..... 重心系での入射エネルギー (非相対論的扱い)

TLab(rel.cor.1)..... 実験室系での入射エネルギー (相対論的補正: rel.cor.1)

TLab(rel.cor.2)..... 実験室系での入射エネルギー (相対論的補正: rel.cor.2)

- Rmass, ECM, Fkay, Eta, DRho は、換算質量 (μ)、重心系でのエネルギー (E_{CM})、波数 (k)、Sommerfeld parameter (η)、数値計算のメッシュ ($k \cdot \Delta r$) のことで、計算 ([Calculate]) 後に値が表示される。

Potential Parameters

ポテンシャルに関するパラメーターである。

- V0, r0R, aR 中心力ポテンシャル (WS 型) 実部の深さ V_0 、半径 r_{0R} 、拡がり a_R
- W0, r0I, aI 中心力ポテンシャル (WS 型) 虚部の深さ W_0 、半径 r_{0I} 、拡がり a_I
- WD, r0ID, aID 中心力ポテンシャル (WS 微分型) 型虚部の深さ W_D 、半径 r_{0ID} 、拡がり a_{ID}
- r0C クーロンポテンシャルの半径 r_{0C}
- VSO, r0RS, aRS スピン軌道力ポテンシャル実部の深さ V_{SO} 、半径 r_{0RS} 、拡がり a_{RS}
- WSO r0IS, aIS スピン軌道力ポテンシャル虚部の深さ W_{SO} 、半径 r_{0IS} 、拡がり a_{IS}
- パラメータの単位は、ポテンシャルの深さはすべて MeV、半径パラメータと拡がりパラメータについてはすべて fm である。
- Coulomb ポテンシャルについては、計算の形式をコンボボックスから選択できる。
 - Point-Sphere 入射粒子を点電荷とし標的核を一樣帯電球として扱う。
 - Sphere-Sphere 入射粒子も標的核も一樣帯電球として扱う。これを選択した場合、入射粒子に対する半径パラメータ r_{0C}^P を入力するボックスが表示される。
 - No Coulomb Coulomb ポテンシャルを計算しない。これは、外部ファイルから読み込むポテンシャルに Coulomb ポテンシャルも含まれているときなどに使う。
- スピン軌道力については、形式をコンボボックスから選択できる。
 - Thomas Thomas 型の形状因子を用いる。
 - Watson(WSD) Watson らの広域光学ポテンシャルで使われている WS 微分型を形状因子として用いる。
 - Gauss Gauss 型の形状因子を用いる。
- 半径の計算について、計算形式をコンボボックスから選択できる。
 - * $A_t^{1/3}$ 軽イオン散乱で用いられる $R_x = r_{0x} A_t^{1/3}$ の形式を用いる。
 - * $(A_p^{1/3} + A_t^{1/3})$ 重イオン散乱で用いられる $R_x = r_{0x} (A_t^{1/3} + A_p^{1/3})$ の形式を用いる。
 - Just Value 入力した値をそのまま ($R_x = r_{0x}$) 用いる。

from File

ポテンシャルを外部ファイルから読み込んで用いることができる。

- [Select] ボタンをクリックすると、ファイル選択のウィンドウが開くので、読み込ませたいポテンシャルのファイルを指定する。ファイル内のデータの記述の仕方については、§4 を参照。
- ファイルから読み込むポテンシャルの r についてのメッシュ間隔が、計算で指定する間隔の値と異なるときは、3 次の Lagrange 補間を行う。ただし、外挿は行わないので、計算で用いる r の最大値より大きいところまでポテンシャルを与える必要がある。
- 実際の散乱計算の際には、読み込んだポテンシャルを定数倍して用いることもできる。中心力の実部・虚部、スピン軌道力の実部・虚部ごとにかける係数を、テキストボックスで指定する。
Vfact, Wfact, Vsfact, Wsfact はそれぞれ、中心力実部、中心力虚部、スピン軌道力実部、スピン軌道力虚部に掛ける係数である。
- ファイルから読み込んだポテンシャルだけを用いるか、それにさらに通常の WS 型などのポテンシャルを加えて用いるかを選択できる。[File Only] のチェックボックスをチェックするとファイルからのポテンシャルのみになり、チェックをはずすと他のポテンシャルパラメータも有効になる。ク

ーロンポテンシャルについては、No Coulomb にしない限り、[File Only]をオンにしても計算に組み込まれる。

Scattering Parameters

数値計算を行う際のパラメーターである。

DR.....数値積分を行う際の r のメッシュ間隔

Rmax漸近型とマッチングさせる位置の r の値。

Lmin, Lmax, Ldel 計算する部分波の軌道角運動量 L の最小値、最大値、間隔。

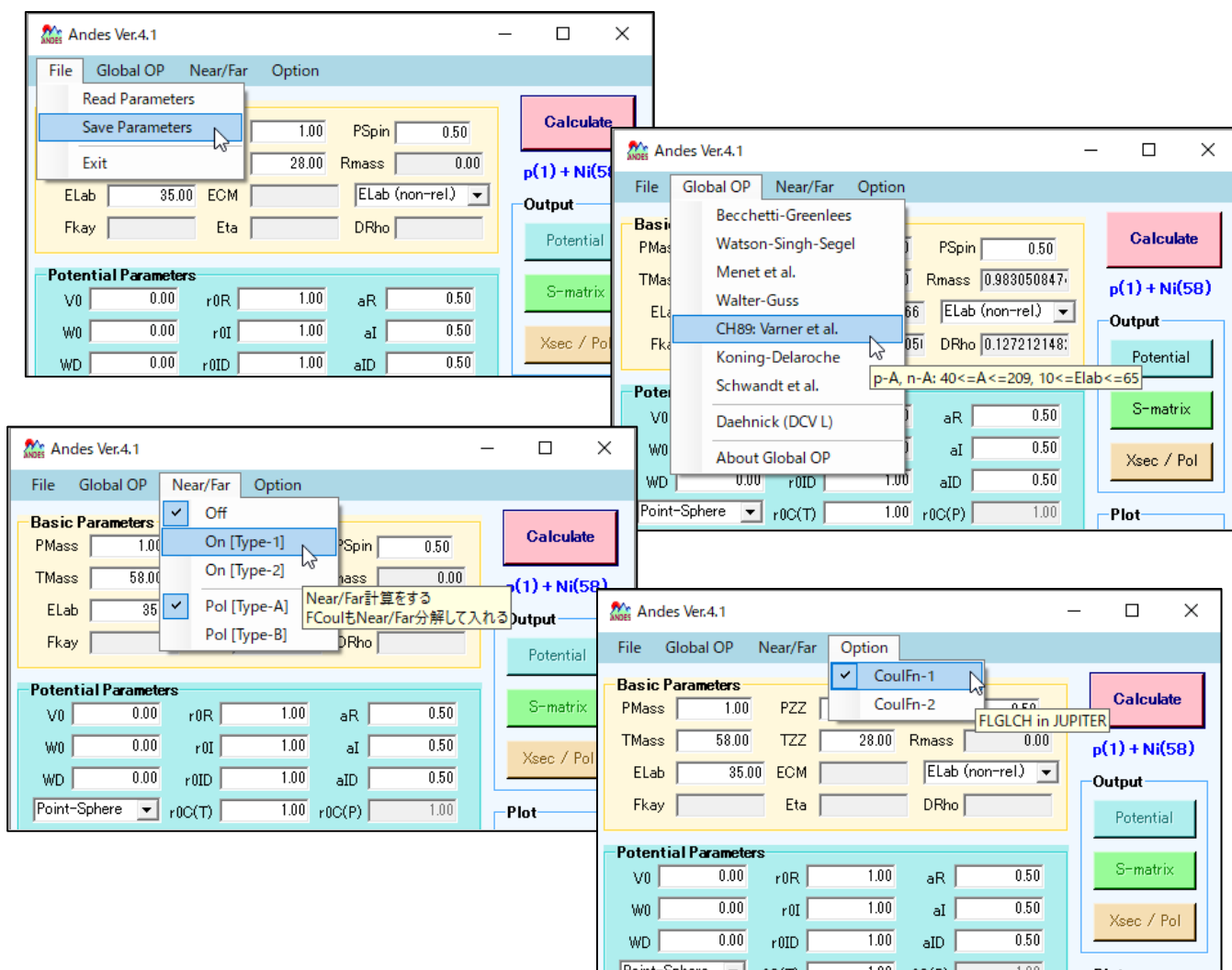
THmin, THmax, THdel... 計算する微分断面積などの重心系での角度 θ_{cm} の最小値、最大値、間隔。

- パラメータの単位は、座標 r に関するものは fm、軌道角運動量 L に関するものは \hbar 、角度 θ_{cm} に関するものは degree である。
- NRmax は、数値計算を行う r のメッシュ個数 (NRmax=Rmax/DR) で、計算 ([Calculate]) 後に値が表示される。

3-3. メニューによる指定

メニューバーには、[File], [Global OP], [Near/Far], [Option]の4つのメニュー項目がある。

- メニュー内のアイテムによっては、マウスポインターを載せるとツールチップが表示されるので、選択する際に参考にできる。



[File]メニュー

ファイルに関する指定を行う。

Read Parameters

フォーム上に入力するパラメータの値を外部ファイルから読み込む。これを用いると、よく使うパラメータ値を計算のたびに入力する必要がなくなる。

この項目を選ぶと、ファイル選択のウィンドウが表示されるので、読み込ませたいパラメータファイルを指定する。

Save Parameters

フォーム上に入力したパラメータの値を外部ファイルに保存する。

この項目を選ぶと、ファイル保存のウィンドウが表示されるので、保存するフォルダやファイル名を指定する。保存されたファイル内のデータの形式については、§4を参照。

Exit

開いていたウィンドウをすべて閉じて、Andesを終了する。

[Global OP]メニュー

広域光学ポテンシャル(Global Optical Potential)を用いる際の指定を行う。

- 現在、8個のセットが利用できる。これらの中からどれかを選ぶと、現在入力している“Basic Parameters”の値を用いて広域光学ポテンシャルのパラメータセットを計算し、“Potential Parameters”のボックスに結果を出力する。
- これらのセットには、適用できる範囲がそれぞれ決まっている。範囲外の条件に適用すると、警告のメッセージボックスが表示される。メッセージボックスで、[OK]ボタンをクリックすると範囲外でもそのまま計算を実行し、[キャンセル]ボタンをクリックすると計算を行わない。

Becchetti-Greenlees

核子散乱。標的核は $A > 40$ 、入射エネルギーは $E \leq 50$ MeV。

F.D. Becchetti, Jr., and G.W. Greenlees, Physical Review 182, 1190 (1969).

Watson-Singh-Segel

核子散乱。標的核は ${}^6\text{Li}$ から ${}^{16}\text{O}$ 、入射エネルギーは $10 \leq E \leq 50$ MeV。

B.A. Watson, P.P. Singh, and R.E. Segel, Physical Review 182, 977 (1969).

Menet et al.

核子散乱。標的核は ${}^{12}\text{C}$ から ${}^{208}\text{Pb}$ 、入射エネルギーは $30 \leq E \leq 60$ MeV。

J.J. H. Menet, E.E. Gross, J.J. Malanify, and A. Zucker, Physical Review C 4, 1114 (1971).

Walter-Guss

核子散乱。標的核は $54 \leq A \leq 208$ 、入射エネルギーは $10 \leq E \leq 80$ MeV。

R.L. Walter and P.P. Guss, “Nuclear Data for Basic and Applied Science”, Vol. 2, 1079 (1986).

R.L. Walter, “Nucleon-Nucleus Optical Model up to 200 MeV”, Proceedings of a specialists meeting, p.199 (1996)

CH89: Varner et al.

核子散乱。標的核は $40 \leq A \leq 209$ 、入射エネルギーは $10 \leq E \leq 65$ MeV。

R.L. Varner, W.J. Thompson, T.L. McAbee, E.J. Ludwig and T.B. Clegg, Physics Reports 201, 57 (1991)

Koning-Delaroche

核子散乱。標的核は $24 \leq A \leq 209$ 、入射エネルギーは $1 \text{ keV} \leq E \leq 200 \text{ MeV}$ 。

A.J. Koning and J.P. Delaroche, Nuclear Physics A713, 231 (2003).

Schwandt et al

陽子散乱。標的核は $24 \leq A \leq 208$ 、入射エネルギーは $80 \leq E \leq 180 \text{ MeV}$ 。

P. Schwandt, H.O. Meyer, W.W. Jacobs, A.D. Bacher, S.E. Vigdor, and T.R. Donoghue, Physical Review C 26, 55 (1982).

Daehnick et al

重陽子散乱。標的核は $27 \leq A \leq 238$ 、入射エネルギーは $11.8 \leq E \leq 90 \text{ MeV}$ 。

W.W. Daehnick, J.D. Childs, and Z. Vrcelj, Physical Review C 21, 2253 (1980).

About Global OP

用いている広域光学ポテンシャルについての簡単な説明（適用範囲と原論文のレファレンス）を表示する。

[Near/Far]メニュー

Near-side / Far-side 分解の計算についての指定をする。

- 以下の3つの項目があり、これらの中からどれか1つを選択する。選択された項目には、チェックマーク（✓）が付く。一旦指定すると、次に別の指定を行うまでそれが有効である。

Off

Near/Far 分解計算をしない。

On [Type-1]

Near/Far 分解計算をする。Coulomb 散乱振幅も NS/FS 成分に分解してそれぞれの成分に足し込む。

On [Type-2]

Near/Far 分解計算をする。Coulomb 散乱振幅は、そのまま NS 成分にのみ繰り込み FS 成分には入れない。

Pol [Type-A]

偏極の NS/FS 成分を計算する際、分母にある微分断面積 $\sigma(\theta)$ に total の微分断面積を用いる。

Pol [Type-B]

偏極の NS/FS 成分を計算する際、分母にある微分断面積 $\sigma(\theta)$ に、それぞれ NS または FS の微分断面積を用いる。

[Option]メニュー

その他のオプションの指定をする。

CoulF-1

Coulomb 関数を計算する際、コード “JUPITER” で用いられていた subroutine “FLGLCH” をもとにした計算を行う。

CoulF-2

Coulomb 関数を計算する際、Bennett による “COUL90” をもとにした計算を行う。

3-4. 計算の実行

計算に必要なパラメータ値を入力し、指定したい設定をメニューから行った後、フォーム上の[Calculate]ボタンをクリックすると、計算が実行される。

The screenshot shows the 'Andes Ver.4.1' window with several tabs: File, Global OP, Near/Far, and Option. The 'Option' tab is active, displaying various parameter groups:

- Basic Parameters:** PMass (2.00), PZZ (1.00), PSpin (1.00), TMass (40.00), TZZ (20.00), Rmass (1.904761904), ELab (56.00), ECM (53.33333333), ELab (non-rel), Fkay (2.204643106), Eta (0.595238983), DRho (0.220464310).
- Potential Parameters:** V0 (75.47), r0R (1.20), aR (0.769), W0 (2.452), r0I (1.32), aI (0.783), WD (9.775), r0ID (1.32), aID (0.783). There are also fields for Point-Sphere, r0C(T), r0C(P), VSO, r0RS, aRS, WSO, r0IS, aIS, SO type (Thomas), and Radius type (*At^{1/3}).
- from File:** Select File, Vfact (1.00), Wfact (1.00), VSfact (1.00), WSfact (1.00), File Only checkbox.
- Scattering Parameters:** DR (0.10), Rmax (20.00), NRmax (200), Lmin (0), Lmax (50), Ldel (1), THmin (0.00), THmax (180.00), THdel (1.00).

On the right side, there are buttons for 'Calculate', 'Output' (Potential, S-matrix, Xsec / Pol), 'Plot' (Potential, X section, Polarization), and 'Exp. Data' (Select File).

3-5. 計算結果の出力：数値データ

フォーム右の「Output」グループの[Potential], [S-matrix], [Xsec/Pol]の各ボタンをクリックすると、それぞれ、ポテンシャルの値、S行列の値、微分断面積・偏極の値が別パネルに出力される

The 'Output: Potential (1)' window shows a table with columns R, VVV, VVVV, VVS, VWS, and VCL. The data is for step 1.

R	VVV	VVVV	VVS	VWS	VCL
0.000	-7.510861e+01	-2.568115e+00	-5.391215e+28	0.000000e+00	9.716497e+00
0.100	-7.505889e+01	-2.581547e+00	-6.189672e-01	0.000000e+00	9.714858e+00
0.200	-7.500193e+01	-2.593048e+00	-3.551951e-01	0.000000e+00	9.709942e+00
0.300	-7.493738e+01	-2.618891e+00	-2.716633e-01	0.000000e+00	9.701750e+00
0.400	-7.486401e+01	-2.641382e+00	-2.336404e-01	0.000000e+00	9.690280e+00
0.500	-7.478063e+01	-2.666868e+00	-2.142223e-01	0.000000e+00	9.675533e+00
0.600	-7.468589e+01	-2.695737e+00	-2.000000e+00	0.000000e+00	9.658333e+00
0.700	-7.457828e+01	-2.728418e+00	-1.818182e+00	0.000000e+00	9.638333e+00
0.800	-7.445611e+01	-2.765333e+00	-1.600000e+00	0.000000e+00	9.615000e+00
0.900	-7.431746e+01	-2.807222e+00	-1.333333e+00	0.000000e+00	9.588333e+00
1.000	-7.416018e+01	-2.854556e+00	-1.000000e+00	0.000000e+00	9.558333e+00
1.100	-7.398187e+01	-2.907333e+00	-7.692308e-01	0.000000e+00	9.525000e+00
1.200	-7.377983e+01	-2.966111e+00	-5.555556e-01	0.000000e+00	9.488333e+00
1.300	-7.355108e+01	-3.036111e+00	-3.703704e-01	0.000000e+00	9.448333e+00
1.400	-7.329229e+01	-3.112667e+00	-2.222222e-01	0.000000e+00	9.405000e+00
1.500	-7.299376e+01	-3.188889e+00	-1.000000e-01	0.000000e+00	9.358333e+00
1.600	-7.266944e+01	-3.256667e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	9.308333e+00
1.700	-7.229887e+01	-3.404111e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	9.255000e+00
1.800	-7.187719e+01	-3.525778e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	9.198333e+00
1.900	-7.140512e+01	-3.661111e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	9.138333e+00
2.000	-7.087489e+01	-3.813333e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	9.075000e+00
2.100	-7.028074e+01	-3.982000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	9.008333e+00
2.200	-6.961599e+01	-4.169111e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	8.938333e+00
2.300	-6.887408e+01	-4.376111e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	8.865000e+00
2.400	-6.804817e+01	-4.604222e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	8.788333e+00
2.500	-6.713136e+01	-4.854556e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	8.708333e+00
2.600	-6.611686e+01	-5.127999e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	8.625000e+00
2.700	-6.499813e+01	-5.425000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	8.538333e+00
2.800	-6.376940e+01	-5.748000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	8.448333e+00
2.900	-6.242536e+01	-6.090444e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	8.355000e+00
3.000	-6.096206e+01	-6.457111e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	8.258333e+00
3.100	-5.937692e+01	-6.844222e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	8.158333e+00
3.200	-5.766917e+01	-7.248889e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	8.055000e+00
3.300	-5.584010e+01	-7.667000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	7.948333e+00
3.400	-5.389341e+01	-8.093778e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	7.838333e+00
3.500	-5.183598e+01	-8.522556e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	7.725000e+00

The 'Output: S-matrix (1)' window shows a table with columns J, L, delta, and S-matrix. The data is for step 1.

J	L	delta	S-matrix
0.0	0.0	2.418924e-01	1.671131
1.0	2.0	2.374007e-01	142.780
2.0	2.0	2.294635e-01	121.184
3.0	2.0	2.201657e-01	99.259
4.0	2.0	2.064306e-01	76.024
5.0	4.0	1.901708e-01	49.741
6.0	6.0	1.701096e-01	21.217
7.0	8.0	1.414305e-01	167.577
8.0	8.0	1.295671e-01	133.888
9.0	6.0	6.321600e-02	100.869
10.0	10.0	1.374274e-01	33.286
11.0	10.0	3.581490e-01	18.285
12.0	12.0	5.696230e-01	11.085
13.0	13.0	7.306386e-01	6.704
14.0	14.0	8.379970e-01	3.994
15.0	15.0	9.045660e-01	2.350
16.0	16.0	9.443589e-01	1.371
17.0	17.0	9.677277e-01	0.795
18.0	18.0	9.813336e-01	0.480
19.0	19.0	9.892213e-01	0.285
20.0	20.0	9.937931e-01	0.153
21.0	21.0	9.964175e-01	0.088
22.0	22.0	9.979372e-01	0.051
23.0	23.0	9.988130e-01	0.029
24.0	24.0	9.993175e-01	0.017
25.0	25.0	9.996077e-01	0.010
26.0	26.0	9.997747e-01	0.006
27.0	27.0	9.998707e-01	0.003
28.0	28.0	9.999258e-01	0.002
29.0	29.0	9.999575e-01	0.001
30.0	30.0	9.999756e-01	0.001
31.0	31.0	9.999860e-01	0.000
32.0	32.0	9.999920e-01	0.000
33.0	33.0	9.999954e-01	0.000
34.0	34.0	9.999974e-01	0.000

The 'Output: Xsec/Pol (1)' window shows a table with columns Theta, abs-X, absX/RutX, RutX, and Pol. The data is for step 1.

Theta	abs-X	absX/RutX	RutX	Pol
0.000	1.822410e+39	1.000000e+00	1.822410e+39	0.00000
1.000	3.068154e+07	9.756978e-01	3.142525e+07	-0.00009
2.000	1.619662e+06	8.245170e-01	1.964377e+06	-0.00012
3.000	2.522391e+05	6.498936e-01	3.881236e+05	0.00153
4.000	6.911456e+04	5.544803e-01	1.229484e+05	0.00722
5.000	2.965423e+04	5.890589e-01	5.034170e+04	0.01536
6.000	1.824918e+04	7.512730e-01	2.429101e+04	0.02064
7.000	1.304918e+04	9.345768e-01	1.312034e+04	0.02226
8.000	9.587631e+03	1.245671e+00	7.696762e+03	0.02199
9.000	6.862459e+03	1.426944e+00	4.809201e+03	0.02088
10.000	4.670959e+03	1.478917e+00	3.158364e+03	0.01919
11.000	2.973533e+03	1.376950e+00	2.159507e+03	0.01687
12.000	1.736893e+03	1.137802e+00	1.526539e+03	0.01257
13.000	9.038721e+02	8.145080e-01	1.109714e+03	0.00486
14.000	3.976623e+02	4.813335e-01	8.251670e+02	-0.01250
15.000	1.393448e+02	2.133933e-01	6.278494e+02	-0.09378
16.000	3.228853e+01	6.646963e-02	4.857636e+02	-0.26011
17.000	2.427542e+01	8.358124e-02	3.818017e+02	-0.25770
18.000	5.779928e+01	1.899354e-01	3.043101e+02	-0.05886
19.000	9.795240e+01	3.988465e-01	2.455892e+02	-0.00700
20.000	1.253491e+02	6.253975e-01	2.004312e+02	0.01142
21.000	1.328750e+02	8.041354e-01	1.652395e+02	0.02099
22.000	1.217993e+02	8.858237e-01	1.374836e+02	0.02810
23.000	9.801730e+01	8.497242e-01	1.159519e+02	0.03541
24.000	6.892467e+01	7.067146e-01	9.752927e+01	0.04487
25.000	4.121202e+01	4.962777e-01	8.304226e+01	0.05880
26.000	1.980181e+01	2.754242e-01	7.118952e+01	0.07921
27.000	6.422173e+00	1.046591e-01	6.136280e+01	0.08177
28.000	1.801058e+00	3.385183e-02	5.320414e+01	-0.35596
29.000	4.235925e+00	9.134835e-02	4.637112e+01	-0.45644
30.000	1.131105e+01	2.785105e-01	4.061264e+01	-0.29395
31.000	2.038300e+01	5.704495e-01	3.573147e+01	-0.23986
32.000	2.911782e+01	9.222847e-01	3.157140e+01	-0.21179
33.000	3.582573e+01	1.279137e+00	2.800780e+01	-0.20758
34.000	3.959191e+01	1.587456e+00	2.494049e+01	-0.21939
35.000	4.023638e+01	1.805261e+00	2.228840e+01	-0.22783

- ポテンシャル、微分断面積・偏極の値のパネルでは、出力する際の刻み値を変更することができる。パネル上部の[Step]ボックスに新しい刻み値を入力し、[Output]ボタンをクリックすると変更後の刻みで出力する。
- パネル上部の[Copy All]ボタンをクリックすると、内容をすべてクリップボードにコピーする。内容の一部をコピーしたいときは、範囲を選択後、右クリック（コンテキストメニュー）または[Ctrl]+Cでコピーできる。

ポテンシャルの結果

計算で用いているポテンシャルの値を出力する。

- 出力項目は、左より順に、動径座標、中心力の実部、中心力の虚部、スピン軌道力の実部、スピン軌道力の虚部、Coulomb 力ポテンシャルである。
- 座標の単位は fm、ポテンシャルの単位は MeV である。
- 出力の最後に、各ポテンシャルの体積積分 (volume integral)、平均二乗半径 (root mean square radius) の値が出力される。

S 行列の結果

nuclear S 行列 S_{LJ}^N の値を (L, J) のセットごとに出力する。

- 出力項目は、左から順に、 L の値、 J の値、S の絶対値 ($|S_{LJ}^N|$)、位相差 (phase shift, $\arg(S_{LJ}^N)/2$)、S の実部、S の虚部である。
- 位相差の単位は degree である。

微分断面積・偏極の結果

微分断面積などの観測量を角度ごとに出力する。

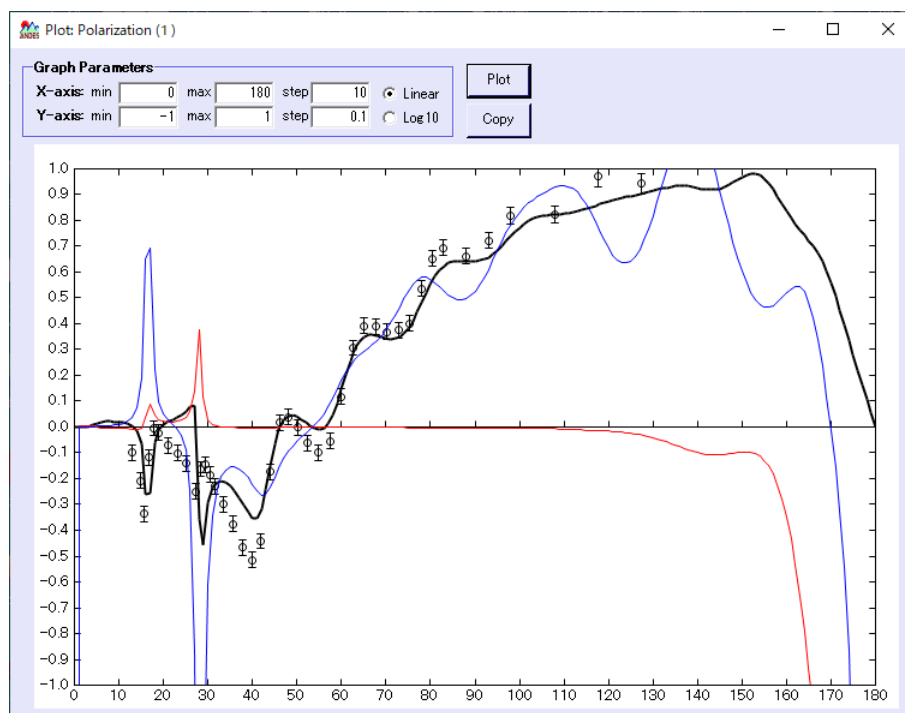
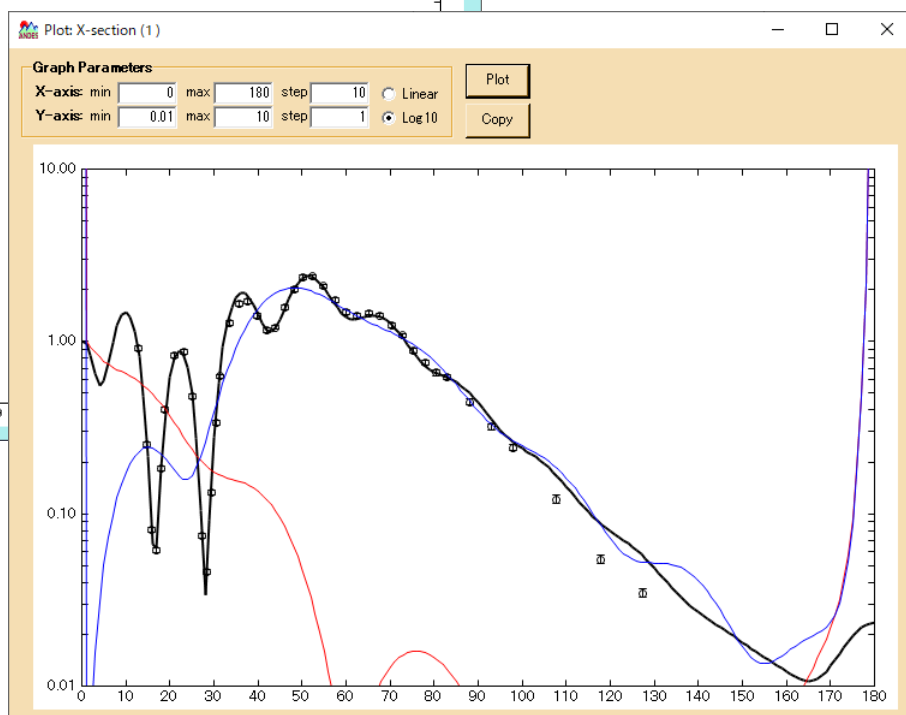
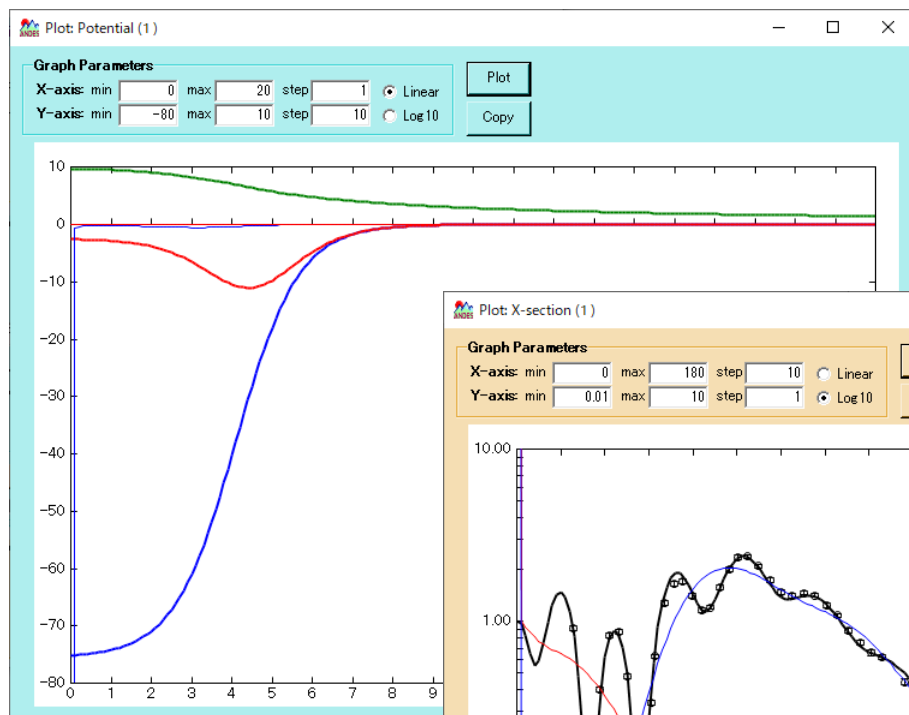
- 出力項目は、左から順に、重心系での散乱角度、微分断面積の絶対値、微分断面積の Rutherford 散乱断面積による比、Rutherford 散乱断面積の値、偏極の値である。
- 微分断面積、Rutherford 散乱断面積の絶対値単位は mb/sr である。
- 出力の最後に、弾性散乱の核力全断面積 σ_{total}^{Nuc} と反応断面積 σ_{reac} の値が出力される。
- Near/Far 分解計算を行った場合は、その結果が続いて出力される。

3-6. 計算結果の出力：グラフ表示

フォーム右の「Plot」グループの[Potential], [Xsection], [Polarization]の各ボタンをクリックすると、それぞれ、ポテンシャル、微分断面積、偏極のグラフが別パネルに出力される

- 各パネルのウィンドウサイズは、ウィンドウ枠をドラッグすることで自由に変更できる。
- X 軸・Y 軸のスケールを変えてプロットし直すことができる。パネル上部の入力ボックスに各軸の最小値・最大値・刻み値を入力して、[Plot]ボタンをクリックすると再プロットする。
- Linear スケールか Log10 スケールかを指定できる。Log10 スケールの場合、プロットは各量の絶対値を取って行う。ただし、Y 軸のスケールは必ず正の値を指定しておくこと。
- パネル上部の[Copy]ボタンをクリックすると、グラフ部分の画像がクリップボードにコピーされる。
- グラフは計算ごとに、別パネルに表示させることも、同じパネルに重ね書きさせることもできる。切り替えは、フォーム上の[new panel]チェックボックスで指定する。ここにチェック (✓) してあると次のグラフは新規パネルにプロットされ、チェックがないと直前のパネルに重ねてプロットされる。

- 微分断面積と偏極のグラフには、実験データを重ねてプロットさせることができる。フォーム右下の「Exp. Data」グループの[Select File]ボタンをクリックすると、データファイル指定のダイアログボックスが現れるので、ファイルを指定すると実験データを読み込む。その後、フォーム上の[exp. data]チェックボックスにチェック (✓) を入れておくと、それ以降グラフ表示ボタンをクリックした際、同時に実験データをプロットする。チェックをはずすと、プロットしない。



ポテンシャルのグラフ

中心力実部を青色太線、中心力虚部を赤色太線、スピン軌道力実部を青色細線、スピン軌道力虚部を赤色細線、Coulomb 力を緑色太線でプロットする。

- 横軸の単位は fm、縦軸の単位は MeV である。

微分断面積・偏極のグラフ

微分断面積・偏極の角度分布を黒色太線でプロットする。

- Near/Far 分解を行ったときは、Near 成分を赤色細線、Far 成分を青色細線でプロットして追加する。
- 横軸の単位は degree、縦軸の単位は、断面積（Rutherford 比）ではなし、断面積（絶対値）では mb/sr、偏極ではなしである。
- 異なる計算結果を重ね書きする場合、線の色は Black→Red→Blue→Green→Magenta→SkyBlue→DarkOrange→Lime→Brown→Silver と循環して変わる。この色と順序はファイル“Andes.ini”を書き換えることで変更可能である。

4. 外部ファイルの利用

Andes では、ある種のデータを外部ファイルから読み込んだり、パラメーターを外部ファイルに保存したりすることができる。これらの外部ファイルの形式について説明する。

4-1. 実験データ

実験データを外部ファイルから読み込むことができる。データの記述形式は次のとおりである。

- 先頭がアスタリスク (*) で始まる行は、コメント行として読み飛ばす。
- データ部分は、1 行に複数の数値を並べ、間は 1 個以上の空白で区切る。これを必要な行数分繰り返す。
- データが断面積だけか断面積と偏極両方があるか、誤差は±で共通か+/-で別か、などを選ぶことができる。1 行のデータの個数によって判別する。

3 個の場合: θ_{CM} σ $\Delta\sigma(\pm)$

4 個の場合: θ_{CM} σ $\Delta\sigma(+)$ $\Delta\sigma(-)$

5 個の場合: θ_{CM} σ $\Delta\sigma(\pm)$ P_y $\Delta P_y(\pm)$

7 個の場合: θ_{CM} σ $\Delta\sigma(+)$ $\Delta\sigma(-)$ P_y $\Delta P_y(+)$ $\Delta P_y(-)$

ここで、 θ_{CM} は重心系での散乱角度 (degree)、 σ は微分断面積、 $\Delta\sigma$ は微分断面積の誤差値、 P_y は偏極、 ΔP_y は偏極の誤差値である。

- ファイルの最後、または /end/ とのみ書いてある行で読み込みを終了する。
データ個数はそれまでに読み込んだ件数を自動的にカウントして用いる。

実験データファイルの例
(データが 5 個の場合)

```
*experimental data 40Ca(d,d)40Ca at Ed=56MeV
* THETA      X/XR      Py
12.820  9.122D-01  2.737D-02 -0.09800  0.0300
14.720  2.527D-01  7.552D-03 -0.20760  0.0300
15.770  8.105D-02  2.430D-03 -0.33700  0.0300
16.820  6.177D-02  1.851D-03 -0.11730  0.0300
17.870  1.827D-01  5.492D-03 -0.00450  0.0300
18.920  4.045D-01  1.213D-02 -0.02190  0.0300
21.020  8.262D-01  2.479D-02 -0.07060  0.0300
23.110  8.685D-01  2.606D-02 -0.10160  0.0300
25.210  4.829D-01  1.444D-02 -0.14170  0.0300
27.300  7.489D-02  2.247D-03 -0.24920  0.0300
28.350  4.618D-02  1.383D-03 -0.16260  0.0300
29.390  1.334D-01  4.000D-03 -0.14490  0.0300
:      :      (以下、必要な行数続く)      :
```


4.2 ポテンシャルデータ

ポテンシャルの値を外部ファイルから読み込むことができる。データの記述形式は次のとおりである。

- 先頭がアスタリスク (*) で始まる行は、コメント行として読み飛ばす。
- 最初に 1 行、与えるポテンシャルデータについて DR と NRNUM のデータを与える。間は 1 個以上の空白で区切る。
 - ① DR..... r についてのメッシュ幅
 - ② NRNUM データの個数
- データ部分は、5 個の数値を 1 行に並べ、間は 1 個以上の空白で区切る。これを NRNUM 行繰り返す。
 - ① 動径座標 r の値
 - ② 中心力ポテンシャル実部
 - ③ 中心力ポテンシャル虚部
 - ④ スピン軌道力ポテンシャル実部
 - ⑤ スピン軌道力ポテンシャル虚部
- ここで与えたポテンシャル値の r のメッシュ幅と、実際に計算する際のメッシュ幅が異なる場合、計算の前に 3 次の Lagrange 補間を行って内挿する。ただし、外挿は行わないので、計算で用いる r の最大値より大きいところまでポテンシャルを与えておく必要がある。

⇒ 原点 ($r=0$) から始めるので、 r の最大値は $DR \cdot (NRNUM-1)$ となる。

```
* d-40ca at 56 MeV
0.5 43 DR NRNUM
* R VVV WWW VVS WWS
0.000 -7.5109e+01 -2.5661e+00 -2.1422e-01 0.0000e+00
0.500 -7.4781e+01 -2.6669e+00 -2.1422e-01 0.0000e+00
1.000 -7.4160e+01 -2.8545e+00 -2.0950e-01 0.0000e+00
1.500 -7.3000e+01 -3.1988e+00 -2.6497e-01 0.0000e+00
2.000 -7.0875e+01 -3.8133e+00 -3.5596e-01 0.0000e+00
2.500 -6.7131e+01 -4.8545e+00 -4.6071e-01 0.0000e+00
3.000 -6.0962e+01 -6.4571e+00 -5.2812e-01 0.0000e+00
3.500 -5.1835e+01 -8.5226e+00 -4.9978e-01 0.0000e+00
4.000 -4.0281e+01 -1.0407e+01 -3.7925e-01 0.0000e+00
4.500 -2.8227e+01 -1.1011e+01 -2.3674e-01 0.0000e+00
5.000 -1.7941e+01 -9.7495e+00 -1.2873e-01 0.0000e+00
5.500 -1.0565e+01 -7.2776e+00 -6.4470e-02 0.0000e+00
: : (以下、必要な行数続く) :
```

ポテンシャルデータファイルの例

4.3 パラメーターデータ

メインフォーム上に入力したパラメーター値をファイルに保存することができる。また、保存したファイルからパラメーター値を読み込むこともできる。

- これを利用すると、よく利用する系やパラメーターセットについて、毎回細かなポテンシャルパラメーター値などを入力する手間を省くことができる。
- 他者との間でファイルとしてデータを共有したり、受け渡したりすることができる。
- ファイルの内容はプログラムにより自動的に作成出力されるので、データの形式や順序はそれを変更できない。しかし、テキストファイルなのでエディタによりデータの値を任意に書き換えることは可能である。各行の右側に対応するパラメータ名も書き出されるので、それぞれの数値の意味は明らかであろう。
- 先頭がアスタリスク (*) で始まる行は、コメント行として読み飛ばす。

```
* ANDES parameter file: (2023/03/03 15:30:01)
*
* ----- !! DO NOT change the order of following lines !! -----
4 1 0 -- ANDES Version (Ver.4.1)
2 1 1 -- Pmass, Pzz, Pspin
40 20 -- Tmass, Tzz
56 0 -- Elab, KntLE
75.47 1.2 0.769 -- V0, r0R, aR
2.452 1.32 0.783 -- W0, r0I, aI
9.775 1.32 0.783 -- WD, r0ID, aID
1.3 1 -- r0C, r0C(P)
2.4935 1.01 0.712 -- VSO, r0RS, aRS
0 1 0.5 -- WSO, r0IS, aIS
0 0 0 -- KCoutype, KSotype, KRadtype
1 1 1 1 -- Vfact, Wfact, VSfact, WSfact
0.1 20 -- DR, Rmax
0 50 1 -- Lmin, Lmax, Ldel
0 180 1 -- THmin, THmax, THdel
"dca40_potent.dat" -- potential file
"dca40_exp.dat" -- exp data file
```

パラメーターデータファイルの例

4.4 Andes.ini ファイル

プログラムの設定に関わる値をファイル “Andes.ini” に記述している。

- このファイルは実行ファイル “AndesVxx.exe” と同じフォルダーに置かれる。プログラム起動時に “Andes.ini” ファイルがあれば、その内容を読み込み、プログラム終了時に書き換えて保存する。ファイルがないときは、default 値を利用して自動的に作成して、プログラム終了時に保存する。
- ファイルの内容はプログラムにより自動的に作成出力されるので、ユーザーは特に意識する必要はない。
- データの形式などは自由には変更できない。しかし、テキストファイルなのでエディタによりデータの値を任意に書き換えることは可能である。
- 各行で、セミコロン (;) 以降はコメントとして扱われる。

```
[Andes]
Version=Ver.4.1 ; Version
Last Date=2023/03/06 14:08:16 ; Last used date
[Dimension]
NRdim=530 ; >= Rmax/dR +3
NSdim=2 ; >= 2*spin
Ldim=150 ; >= Lmax
Mdim=5 ; >= 2*spin
NTHdim=240 ; >= (THmax-THmin)/THdel
NExpdim=100 ; >= Number of Exp data
LmaxFacLog=500 ; > Lmax*3 ?
[File]
Potential="" ; potential file
Exp Data="" ; exp data file
Parameters="" ; parameter file
[Color]
0="Black" ; ColorName
1="Red" ; ColorName
2="Blue" ; ColorName
3="Green" ; ColorName
4="Magenta" ; ColorName
5="SkyBlue" ; ColorName
6="DarkOrange" ; ColorName
7="Lime" ; ColorName
8="Brown" ; ColorName
9="Silver" ; ColorName
```

Andes.ini ファイルの例

[Andes]セクション

全体に関することを記録している。

- プログラムのバージョン、最後に実行した日時

[Dimension]セクション

プログラム内で使用している配列を宣言する際のサイズを設定している。

数値計算を効率的に行うには、プログラム内での配列の利用が不可欠である。使用する配列に必要なサイズは、計算する系（入力する計算パラメータ）により異なってくる。Visual Basic では動的な配列宣言ができるので、入力されたパラメータ値により必要な配列サイズを計算し、完全に動的に配列宣言を行うことで、プログラムのユーザーとしては全く配列サイズを意識しないようにさせることもできる。しかし、不注意などから誤ったパラメータ値を入力してしまった場合、思わぬサイズの配列宣言とメモリー使用が行われ、PC のパフォーマンスを著しく低下させることがあり得る。それを避けるには、ユ

ユーザーに配列のサイズを意識的に制御できるようにしておいた方がよいと考えた。そこで、プログラム起動時に配列サイズ用のファイルからサイズ値を読み込み、配列宣言を行うようにした。

- ユーザーは必要に応じてこのセクションの数値を変更することで、配列のサイズを制御できる。
- 指定できる配列サイズの種類、意味、default 値は以下のとおりである。Visual Basic では、配列の添字は 0 から始まるので、配列内での実際の要素の個数は以下の数値より+1 多いことに注意。

サイズ名	意味	関係する配列	default 値	値の目安
NRdim	r のメッシュの個数	ポテンシャル、 波動関数など	530	$R_{\max}/DR+3$
NSdim	スピンの z 成分の個数	S 行列、散乱振幅など	2	$2 \times P_{\text{Spin}}$
Ldim	L の個数	S 行列、Coulomb 波、 Legendre 関数など	150	L_{\max}
Mdim	L の z 成分の個数	Legendre 関数	5	$4 \times P_{\text{Spin}}+1$
NTHdim	θ の個数	散乱振幅、微分断面 積、偏極、Legendre 関数など	240	
NumExpdim	実験データの個数	実験データ	100	
LmaxFacLog	$\log(n!)$ の個数	Clebsh など	500	$L_{\max} \times 3$

[File]セクション

ファイルを利用した際のパスを記録している。

- 対応する外部ファイルを最後に入出力した際のパス

[Color]セクション

プログラム内で使用する色を設定している。

- グラフを重ね書きで描画する際の色の順番 (0 番～9 番の 10 個が指定可能)