

ECC2 程序使用说明手册

程序 ECC (版本 2.0) · 最后更新: 2026年7月8日

一、程序简介

ECC2 (Empirical Coupled-Channel, 经验耦合道模型) 是一个用于计算重离子熔合反应俘获激发函数的 Fortran 程序。该程序基于经验耦合道模型, 采用**非对称高斯势垒分布**来等效地考虑相对运动与内禀自由度之间的耦合效应。

程序的核心物理思想是: 将复杂的耦合道效应归结为一个有效的势垒分布函数, 通过对不同势垒高度的穿透概率进行加权积分, 得到给定入射能量下的俘获截面。相比于完整的耦合道计算, ECC 方法在保持较高精度的同时大幅降低了计算复杂度。

主要参考文献:

N. Wang, et al., *Phys. Rev. C* **111**, 024621 (2025)

N. Wang, et al., *Chin. Phys. C* **50**, 044110 (2026)

...

程序下载: <http://www.imqmd.com/fusion/ECC2.zip>

二、物理模型概述

2.1 核-核相互作用势

程序采用**改进的 Broglia-Winther (BW91^{*}) 势**来描述弹靶核之间的相互作用。该势由核势和库仑势两部分组成:

$$V_{ws}(R) = V_N(R) + V_C(R)$$

其中核势采用 Woods-Saxon 形式, 并引入了 Pauli 阻塞项以改进对**俘获势阱深度**的描述。

2.2 势垒分布

ECC2 模型采用**非对称高斯分布**来描述势垒分布：

$$\begin{aligned} f(B) &= 1/\mathcal{N} \cdot \exp[-((B-B_m)/\Delta_1)^2] & (B < B_m) \\ f(B) &= 1/\mathcal{N} \cdot \exp[-((B-B_m)/\Delta_2)^2] & (B \geq B_m) \end{aligned}$$

- B_m ：最可几势垒高度
- Δ_1 ：左半宽度 ($\Delta_1 = 3/2 W_{\text{EBD2}}$)
- Δ_2 ：右半宽度 ($\Delta_2 = 2 \Delta_1$)
- $\mathcal{N}$ ：归一化因子 ($\mathcal{N} = \sqrt{\pi \cdot (\Delta_1 + \Delta_2)/2}$)

2.3 俘获截面计算

给定质心系能量 $E_{\text{c.m.}}$ 下，俘获截面表示为各分波贡献之和：

$$\sigma_{\text{cap}}(E) = (\pi \hbar^2) / (2\mu E) \cdot \sum (2\ell+1) \cdot T_\ell(E)$$

其中分波穿透概率 $T_\ell(E)$ 通过Hill–Wheeler 公式并对势垒分布加权积分得到：

$$T_\ell(E) = \int f(B) \cdot T_{\text{HW}}(E, B, \ell) \, dB$$

2.4 EBD2 宽度公式

势垒分布宽度 W_{EBD2} 由以下因素综合决定：弹靶核基态形变以及动力学形变效应。

三、程序结构与子程序

3.1 主程序 (PROGRAM ECC2)

主程序负责：读取核质量表 (WS4_Beta4.txt)、读取用户输入的弹靶核参数、计算反应 Q值、计算 BW91* 势的势垒参数、计算 EBD2 宽度、计算俘获激发函数并输出结果。

3.2 子程序 BW91

计算改进的Brogia-Winther (BW91*) 核-核相互作用势。

调用格式：

```
call BW91(A1, Z1, A2, Z2, R, Vws)
```

参数	说明
A1, Z1	弹核的质量数和电荷数
A2, Z2	靶核的质量数和电荷数
R	两核质心距 (fm)
Vws (输出)	相互作用势 (MeV)

四、输入文件说明

4.1 WS4_Beta4.txt（必需）

核质量与形变参数文件。每行格式：

A Z Exth Beta2 Beta4

字段	说明	示例
A	质量数	208
Z	电荷数	82
Exth	质量亏损	-21.748
Beta2	四极形变参数	-0.002
Beta4	十六极形变参数	0.002

注意事项： 该文件由程序自动读取，用于确定弹核、靶核和复合核的结合能及形变。文件应放置在程序运行目录下。

五、程序运行与交互

5.1 编译

使用 Fortran 编译器编译：

```
ifort ECC2.FOR
```

也可使用其他 Fortran 编译器（如 gfortran）。

5.2 运行

```
./ECC2
```

5.3 交互输入

程序运行后会提示：

```
INPUT REACTION: A1, Z1, A2, Z2
```

用户需依次输入**弹核的质量数、电荷数、靶核的质量数、电荷数**。

示例：

```
INPUT REACTION: A1, Z1, A2, Z2
48, 20, 208, 82
```

表示计算 $^{40}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ 反应的俘获激发函数。

5.4 输出信息

程序运行后在屏幕显示：

```
48 Ca + 208 Pb
Bm, RB, hw, W1, Bcap = 173.486 11.337 2.427 2.041 7.113
B0, Qvalue, hw0, E* = 175.317 -153.797 3.553 21.520
```

六、输出文件说明

6.1 sigma_cap.DAT（主输出文件）

俘获激发函数数据文件

```
48 Ca      +      208 Pb
Ecm (MeV),  sigma_cap (mb)

164.0000    0.1483E-03
164.5000    0.3825E-03
...
```

列	内容
第1列	质心系能量 $E_{c.m.}$ (MeV)
第2列	俘获截面 σ_{cap} (mb)

文件末尾包含势垒参数汇总：

Bm, RB, hw, W1, Bcap = 173.486 11.337 2.427 2.041 7.113

6.2 Potential.DAT

核-核相互作用势随距离的变化

```
R(fm)      V(MeV)
8.97        199.861
9.07        197.382
...
```

6.3 T.dat

各分波穿透概率数据

```
Ecm(MeV),  L,      T(E,L)
164.00      0      0.1165E-04
164.00      1      0.1147E-04
...
```

列	内容
第1列	质心系能量 (MeV)

第2列	角动量量子数 ℓ
第3列	穿透概率 $T_\ell(E)$

6.4 Bdis.dat

势垒分布函数 $f(B)$

B (MeV)	f(B)
158.1787	0.1706E-11
158.4083	0.3592E-11
...	

七、关键物理量说明

符号	含义	单位
B_0	BW91* 势的原始势垒高度	MeV
B_m	修正后的最可几势垒高度	MeV
R_0	势垒位置	fm
R_B	考虑深非弹性散射修正后的有效势垒半径	fm
$\hbar\omega_0$	势垒曲率 (抛物线近似)	MeV
$\hbar\omega$	有效势垒曲率 (考虑库仑长尾修正)	MeV
W_{EBD2}	势垒分布宽度 (简化的 EBD2 公式)	MeV
B_{cap}	俘获势阱深度	MeV
Q_0	反应 Q 值	MeV
E^*	复合核激发能 ($B_0 + Q_0$)	MeV

八、适用条件与限制

8.1 适用范围

- **弹靶质量：** $Z \geq 6$, $N \geq 6$ & $Z_1 + Z_2 < 125$
- **能量范围：** 从略低于垒高 B_m 到垒上约 20 MeV
- **反应系统：** 从轻的熔合体系（弹靶为紧束缚核）到超重体系（俘获势阱深度 $B_{cap} > 1$ MeV）

8.2 特殊处理

对**轻核诱发的反应** ($A_1 \leq 16$ 或 $A_2 \leq 16$)，需要考虑德布罗意波长对核结构效应的弱化效应：当约化德布罗意波长 $\lambda_B \geq 0.18$ fm 时，EBD2 宽度采用简化公式：

$$W_{EBD2} = 0.63 + 0.015 \times B_m$$

8.3 注意事项

- **输入文件必须存在：** 程序运行需要 `WS4_Beta4.txt` 文件。
- **核素数据完整性：** 若文件中缺少弹核或靶核数据，程序将使用默认值（形变参数为 0）。
- **能量步长：** 程序固定使用 0.5 MeV 步长进行激发函数扫描。
- **角动量上限：** 程序自动确定角动量截断（穿透概率 $< 10^{-8}$ 时停止）。

九、结果验证与在线计算

用户可通过以下在线平台验证计算结果：

ECC2 在线计算： <http://www.imqmd.com/fusion/ECC2/>

该在线工具与Fortran程序结果一致，可作为程序结果的快速校验参考。

十、常见问题

Q1：程序提示找不到 WS4_Beta4.txt 文件？

A：确保该文件与可执行文件在同一目录下。该文件包含了核质量与形变参数数据。

Q2：计算结果与实验数据有较大偏差？

A：请检查输入的弹靶核 Z、A 是否正确。对于形变核，程序会自动读取 Beta2

和 Beta4 参数。若数据文件中缺少特定核素的形变参数，程序会使用默认值。

Q3：如何修改能量扫描范围？

A：在源代码中调整 `EcmL` 和 `EcmH` 变量的赋值（第 200 行前后）：

```
EcmL = FLOAT(INT(VB - 3*Delta1))  
EcmH = VB*1.15 + 20
```

Q4：如何修改能量步长？

A：在源代码的 `do Ecm=EcmL,EcmH,0.5` 循环中修改步长值。

十一、版本历史

版本	日期	更新内容
2.0	2026-06-09	改进BW91势；引入 EBD2 分布宽度；引入有效势垒曲率；考虑深非弹对势垒半径的修正

如有问题或建议，请邮件联系：wangning@gxnu.edu.cn 或 534565481@qq.com