第9卷 第1期 高能物理与核物理 Vol.9, No.1
1985年1月 PHYSICA ENERGIAE FORTIS ET PHYSICA NUCLEARIS Jan., 1985

激子模型中复杂粒子出射几率公式的一个修改

缪容之 吴国华 郑卫汉* 刘建业 余超凡 于 遲
(中国科学院近代物理研究所)

摘 要

本文采取区分中子质子的态密度公式，给出了复杂粒子出射几率 $W_{\alpha\beta}$ 和纯组合几率 $R_{\alpha\beta}$ 修正公式的一个推导. 计算结果与实验的拟合，比文献[1][2]有较明显的改善.

一、引 言

在激子模型理论中，复杂粒子的出射几率是人们感兴趣的问题之一，但也存在许多有分歧的看法[1-4]，多年来未获得统一.

1972年C. K. Cline[1] 首先提出了纯组合几率 $R_{\alpha\beta}(p)$ 的概念，并得到了后来被广泛引用的复杂粒子出射几率公式

$$W_{\alpha\beta}=\frac{\alpha s_\beta+1}{\pi^2\hbar^3}\mu_\beta\varepsilon_\beta\sigma_{inv}(\varepsilon_\beta)\frac{\omega(p-p_\beta,p-p_\alpha,U)}{\omega(p,p-p_\alpha,E)}p_\beta!R_{\alpha\beta}(p). \qquad (1)$$

但是在(1)中因子 $p_\beta!$ 是为了拟合实验而经验地引进的，而在 $R_{\alpha\beta}(p)$ 的表示式中对于 i 组态(靶核中有 i 个质子被激发到费米面以上的态)出现几率的考虑与系统所处的激子态无关. 这显然是不妥当的.

1973年 I. Ribansky 等人[2]对(1)提出修正，他们以因子 $\left(\gamma_\beta\frac{\omega(p_\beta,0,E-U)}{g}\right)$ 代替(1)中经验因子 $p_\beta!$，但是仍然沿用 C. K. Cline 的 $R_{\alpha\beta}(p)$ 的表示式.

1976年郑卫汉[3]在(1)基础上重新推导了 $R_{\alpha\beta}(p)$ 的表示式. 他的贡献在于把 i 组态出现几率与系统所处的激子态联系起来了. 但是由于他的工作是在(1)式基础上作的，他获得的 $R_{\alpha\beta}(p)$ 并不归一.

本文将结合郑卫汉[3]和 I. Ribansky[2] 的考虑对复杂粒子出射几率 $W_{\alpha\beta}$ 和纯组合几率 $R_{\alpha\beta}$ 作进一步的修改.

二、公式的建立

1. 状态的描述

* 兰州大学，现代物理系.
本文1983年5月5日收到.

考察入射 α 粒子 ($p_\alpha = \pi_\alpha + \nu_\alpha$) 出射 β 粒子 ($p_\beta = \pi_\beta + \nu_\beta$) 的过程. 对系统的状态可能存在两种不同的描述.

如果认为激子是不区分中子与质子的核子及其空穴，则复合系统和余核分别以 (p, $p - p_\alpha$, E) 及 ($p - p_\beta$, $p - p_\alpha$, U) 表征,其中 $U = E - B_\beta - \varepsilon_\beta$.

如果激子是可以区分中子和质子的核子及其空穴，那末靶核中有 i 个质子被激发到费米面以上的复合系统的态 (i 组态)应以 ($\pi_\alpha + i$, i, $p - \pi_\alpha - i$, $p - p_\alpha - i$, E) 表征，而余核将以 ($\pi_\alpha + i - \pi_\beta$, i, $p - \pi_\alpha - i - \nu_\beta$, $p - p_\alpha - i$, U) 表征, 这里

$$0 \leqslant i \leqslant p - p_\alpha$$

在以 (p, $p - p_\alpha$, E) 描写的态中出现 i 组态的几率是

$$P_i = \frac{\omega(\pi_\alpha + i, i, p - \pi_\alpha - i, p - p_\alpha - i, E)}{\sum\limits_{i=0}^{p-p_\alpha} \omega(\pi_\alpha + i, i, p - \pi_\alpha - i, p - p_\alpha - i, E)}. \tag{2}$$

2. 核子可区分情况下的出射几率 $W_{\alpha\beta}$

基于文献[2]的相同考虑,系统在 i 组态出射由p_β个核子(其中 π_β 个质子、ν_β 个中子)组成的 β 粒子集团的几率是:

$$W_\beta^i = \frac{(\alpha s_\beta + 1)}{\pi^2 \hbar^3} \mu_\beta \varepsilon_\beta \sigma_{inv}(\varepsilon_\beta) \gamma_\beta \frac{\omega(\pi_\beta, 0, \nu_\beta, 0, E - U)}{g'} \times \frac{\omega(\pi_\alpha + i - \pi_\beta, i, p - \pi_\alpha - i - \nu_\beta, p - p_\alpha - i, U)}{\omega(\pi_\alpha + i, i, p - \pi_\alpha - i, p - p_\alpha - i, E)}. \tag{3}$$

这里 $g' = g_\pi \simeq g_\nu$ 是质子、中子的单粒子态密度. γ_β 是这 p_β 个核子聚合成 β 粒子的平均几率.

由于以 (p, $p - p_\alpha$, E) 描写的态是各种可能的 i 组态的总和,由(2)及(3)得

$$W_{\alpha\beta}(p, p - p_\alpha, E) = \sum_i P_i W_{\alpha\beta}^i,$$

即

$$W_{\alpha\beta}(p, p - p_\alpha, E) = \frac{(\alpha s_\beta + 1)}{\pi^2 \hbar^3} \mu_\beta \varepsilon_\beta \sigma_{inr}(\varepsilon_\beta) \gamma_\beta \frac{\omega(\pi_\beta, 0, \nu_\beta, 0, E - U)}{g'} \times \frac{\sum\limits_{i=c}^{D} \omega(\pi_\alpha + i - \pi_\beta, i, p - \pi_\alpha - i - \nu_\beta, p - p_\alpha - i, U)}{\sum\limits_{i=0}^{p-p_\alpha} \omega(\pi_\alpha + i, i, p - \pi_\alpha - i, p - p_\alpha - i, E)}. \tag{4}$$

这里 $C = \max\{0, \pi_\beta - \pi_\alpha\}$, $D = \min\{p - p_\alpha, p - \pi_\alpha - \nu_\beta\}$, 以保证(4)中阶乘有意义.

3. 不区分核子情况下的出射几率 $W'_{\alpha\beta}$

作为一种对比,我们给出不区分核子情况下的出射 p_β 个核子集团(未必按 π_β 个质子、ν_β 个中子正确组成)的几率

$$W'_{\alpha\beta}(p, p - p_\alpha, E) = \frac{(\alpha s_\beta + 1)}{\pi^2 \hbar^3} \mu_\beta \varepsilon_\beta \sigma_{inr}(\varepsilon_\beta) \gamma_\beta \times \frac{\omega(p_\beta, 0, E - U)}{g} \frac{\omega(p - p_\beta, p - p_\alpha, U)}{\omega(p, p - p_\alpha, E)}. \tag{4.1}$$

这里 g 是不区分中子质子的单粒子态密度.

4. 纯组合几率 $R_{\alpha\beta}(p)$

将(4)式表示为与(4′)相似的形式

$$W_{\alpha\beta}(p, p-p_\alpha, E) = K_{\rm eff} W'_{\alpha\beta}(p, p-p_\alpha, E),$$

$$K_{\rm eff} \equiv f_g \cdot R_{\alpha\beta}(p) = \left[\frac{\omega(\pi_\beta, 0, \nu_\beta, 0, E-U)}{g'}\right] \Big/ \left\{\left[\frac{\omega(p_\beta, 0, E-U)}{g}\right] \times \left[\frac{\omega(p-p_\beta, p-p_\alpha, U)}{\omega(p, p-p_\alpha, E)}\right]\right\} \times \frac{\sum\limits_{i=c}^{D} \omega(\pi_\alpha + i - \pi_\beta, i, p - \pi_\alpha - i - \nu_\beta, p - p_\alpha - i, U)}{\sum\limits_{i=0}^{p-p_\alpha} \omega(\pi_\alpha + i, i, p - \pi_\alpha - i, p - p_\alpha - i, E)}.$$

忽略泡里原理的限制，代入态密度的 Erieson 公式，最后得到

$$f_g = \left(\frac{g}{g'}\right), \tag{5.1}$$

$$R_{\alpha\beta}(p) = \frac{p_\beta!}{\pi_\beta!\,\nu_\beta!} \frac{(p-p_\beta)!}{p!} \times \frac{\sum\limits_{i=c}^{D} \frac{1}{(\pi_\alpha + i - \pi_\beta)!\,i!\,(p - \pi_\alpha - i - \nu_\beta)!\,(p - p_\alpha - i)!}}{\sum\limits_{i=0}^{p-p_\alpha} \frac{1}{(\pi_\alpha + i)!\,i!\,(p - \pi_\alpha - i)!\,(p - p_\alpha - i)!}}. \tag{5.2}$$

这里，f_g 是由于单粒子态密度转换而引入的因子. $R_{\alpha\beta}(p)$ 作为纯组合几率的意义将在下面讨论. 容易验证 $\sum\limits_{\beta} R_{\alpha\beta}(p) = 1$.

于是我们有

$$W_{\alpha\beta}(p, p-p_\alpha, E) = \frac{(\alpha s_\beta + 1)}{\pi^2\hbar^3} \mu_\beta \varepsilon_\beta \sigma_{inr}(\varepsilon_\beta) \gamma_\beta \times \frac{\omega(p_\beta, 0, E-U)}{g} \frac{\omega(p-p_\beta, p-p_\alpha, U)}{\omega(p, p-p_\alpha, E)} f_g R_{\alpha\beta}(p). \tag{5.3}$$

可以看到 (5.3) 与 [2] 中的公式在形式上很接近，所不同的是增加了 f_g 因子：且 $R_{\alpha\beta}(p)$ 的内容也很不一样.

三、$R_{\alpha\beta}(p)$ 的物理意义

假定一个以 $(p, p-p_\alpha, E)$ 描述的复合系统出射 p_β 个粒子(未必按 π_β 个质子、ν_β 个中子正确构成 β) 的几率如 (4.1) 式所示. 其中系统处于某一 i 组态时由全部 p 个激发粒

子中挑选出 π_β 个质子、ν_β 个中子以正确构成 β 粒子的机会是

$$Q_i = \left(\frac{(\pi_\alpha + i)!}{\pi_\beta!(\pi_\alpha + i - \pi_\beta)!}\,\frac{(p - \pi_\alpha - i)!}{\nu_\beta!(p - \pi_\alpha - i - \nu_\beta)!}\right)\Big/ \left(\frac{p!}{p_\beta!(p - p_\beta)!}\right).$$

于是处于 $(p, p - p_\alpha, E)$ 态的复合系统由其全部可能的 i 组态中正确构成 β 粒子的机会是

$$\sum_i P_i Q_i = \frac{p_\beta!}{\pi_\beta!\nu_\beta!}\,\frac{(p - p_\beta)!}{p!} \times \frac{\displaystyle\sum_{i=c}^{D} \frac{1}{(\pi_\alpha + i - \pi_\beta)!\,i!\,(p - \pi_\alpha - i - \nu_\beta)!\,(p - p_\alpha - i)!}}{\displaystyle\sum_{i=0}^{p-p_\alpha} \frac{1}{(\pi_\alpha + i)!\,i!\,(p - \pi_\alpha - i)!\,(p - p_\alpha - i)!}}.$$

这 E 是(5.2)式，亦即 $R_{\alpha\beta}(p)$ 具有纯组合几率的意义.

于是，按照 C. K. Cline 的推导，在 $(p, p - p_\alpha, E)$ 态出射 β 粒子的几率应是

$$\widetilde{W}_{\alpha\beta} = W'_{\alpha\beta} R_{\alpha\beta}(p) = \frac{(\alpha s_\beta + 1)}{\pi^2 \hbar^3}\,\mu_\beta \varepsilon_\beta \sigma_{inr}(\varepsilon_\beta) \gamma_\beta \times \frac{\omega(p_\beta, 0, E - U)}{g}\,\frac{\omega(p - p_\beta, p - p_\alpha, U)}{\omega(p, p - p_\alpha, E)} R_{\alpha\beta}(p). \qquad (5.3)'$$

比较(5.3)及(5.3)′我们看到后者失落了因子 $f_g = \frac{g}{g'}$，这是由于假定(4.1)式适用引起的，这一点也正是 Cline 推导方式的一个缺陷.

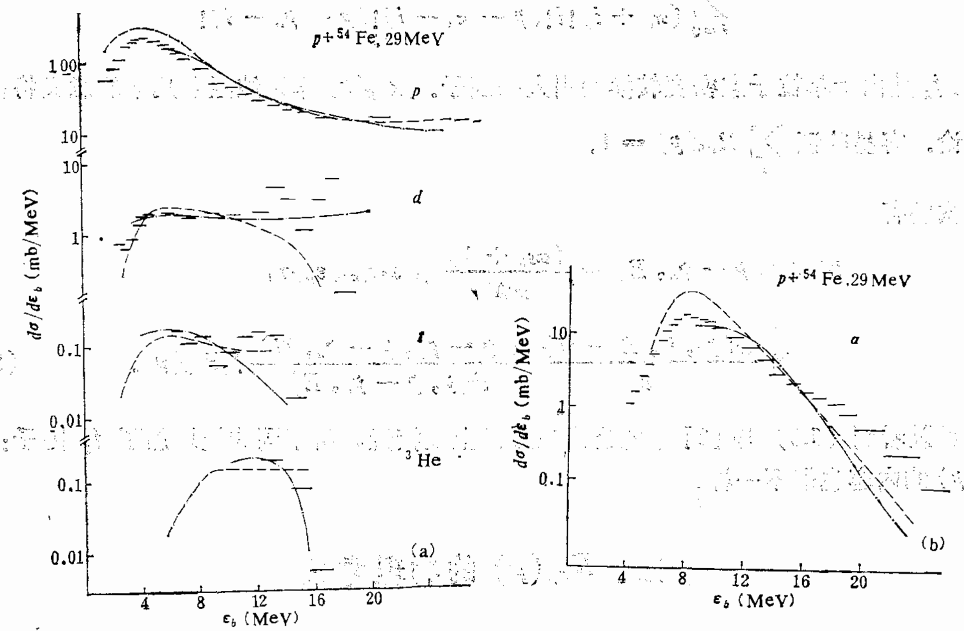

图　1

——实验值　-----本计算结果，——文献[1]结果

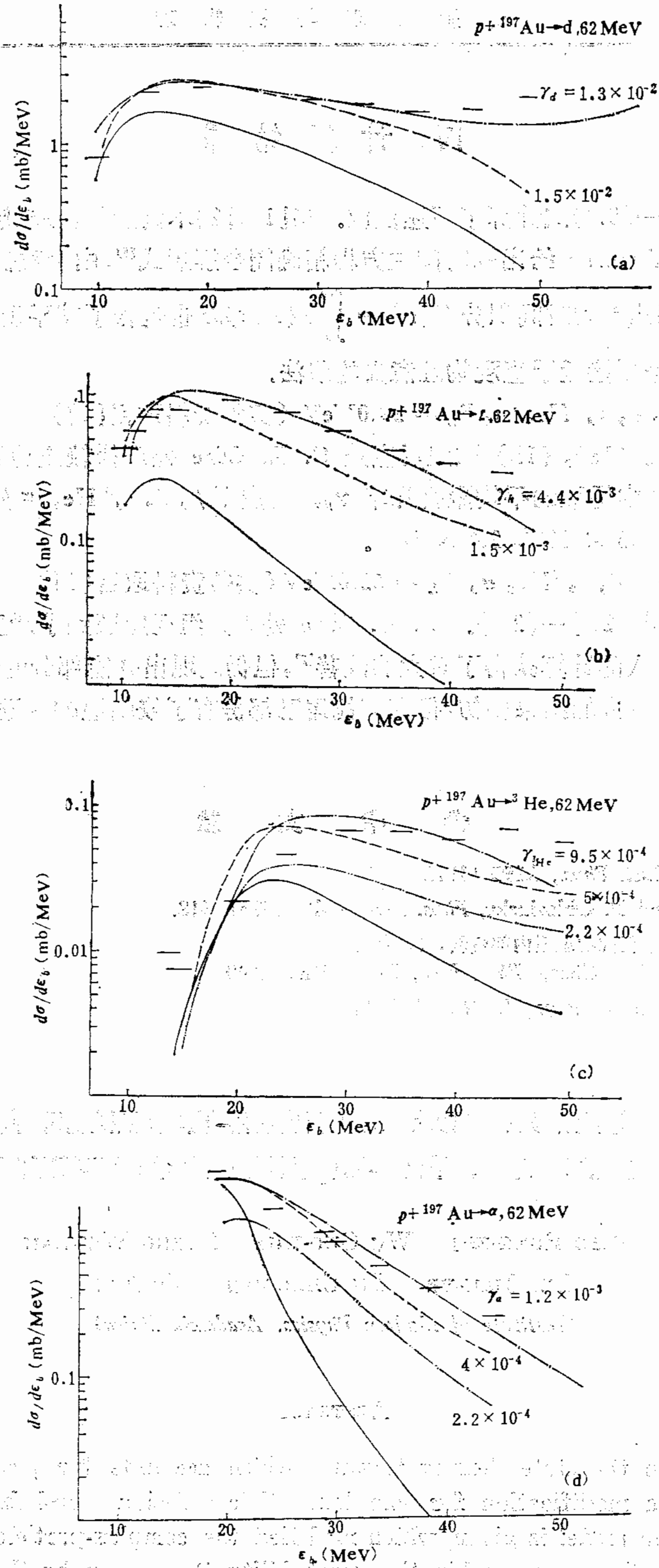

图 2

—实验结果 -·-·-本计算结果 ===文献[2]结果 ——文献[1]结果

四、计算结果

我们用(5.1)—(5.3)式计算了下述反应．与[1],[2]不同的是，在求解主方程时，我们采用了 J. M. Akkermans 给出的时间主方程精确闭合解形式[5]，由于我们取的 n_{max} 足够大，可以认为占据几率的时间积分 $T(n)=\int_0^\infty P(n,t)dt$ 也包含了其平衡部分．相应地我们取 $n_0=3$，这是更接近于直观物理意义的取法．

1. $p+{}^{54}Fe\longrightarrow p, d, t, {}^3He, \alpha, E_L=29.0MeV$（实验资料取自[1]）

计算能谱见图（1a)，(1b）这组反应是 C. K. Cline 处理得较成功的[1]，我们也获得了较好的拟合．从中提取的平均聚合几率 γ_β，对应于 $p, d, t, {}^3He, \alpha$ 分别是 1.0，3.3×10^{-2}，8.6×10^{-3}，3.3×10^{-2}，2.4×10^{-3}．

2. $p+{}^{197}Au\longrightarrow d, t, {}^3He, \alpha, E_L=62.0MeV$（实验资料取自[1]）

计算结果见图（2.a)—(2.d)． C. K. Cline 处理这组反应遭到了严重困难[1]；比较之下 I. Ribansky 等人的计算获得了重大的改善[2]，但仍表现出高能部分的低落．我们的计算与 I. Ribansky 等人的结果相仿，但在高能尾巴部份有了较明显的改进，从而更接近实验资料．

参考文献

[1] C. K. Cline, *Nucl. Phys.*, **A193** (1972), 417.
[2] I. Ribansky and P. Oblozinsky, *Phys. Lett.*, **45B** (1973), 318.
[3] 郑卫汉，兰州大学现代物理系内部资料，(1976).
[4] J. R. Wu and C. C. Chang, *Phys. Rev.*, **C17** (1978), 1540.
[5] J. M. Akkermans, Z. *Phys.*, **A292** (1979), 57.

A MODIFICATION FOR COMPLEX-PARTICLE EMISSION PROBABILITY IN THE PRE-EQUILIBRIUM EXCITON MODEL

Miao Rong-zhi Wu Guo-hua Zheng Wei-han
Liu Jian-ye Yu Chao-fan Yu Xie
(Institute of Modern Physics, Academia Sinica)

Abstract

Starting from the state density formula which accounts for proton-neutron distinguish ability, a modification for complexparticle emission probability in the pre-equilibrium exciton model is given, which modified the complex-particle emission probability $W_{\alpha\beta}$ and the pure combination probability $R_{\alpha\beta}$ given by C. K. Cline and I. Ribansky et al. The calculated results by using modification formula are in better agreement with the experimental data compared to that of Cline and Ribansky.