第8卷 第5期 高能物理与核物理 Vol. 8, No. 5
1984 年 9 月 PHYSICA ENERGIAE FORTIS ET PHYSICA NUCLEARIS Sept., 1984

重离子反应中角动量转移机制进一步探索

王 正 大
(中国科学院近代物理研究所)

摘 要

本文讨论了经典动力学研究重离子反应角动量转移机制的困难，并根据长期研究原子核转动的概念，将转移到靶核与炮弹上的角动量 I 区分为集体转动 I_R 和内部核子重排 I_i 两类角动量.

引 言

在探索重离子反应机制的研究中，经典动力学起了很大作用，不少实验表明在某些方面确实可以用经典动力学的物理图象去描述重离子反应. 但是在探索重离子反应导致的角动量转移中，经典动力学遇到了困难. 只要回顾一下研究原子核转动的历史，就会发现经典物理图象与长期研究原子核转动得到的并被实验证实了的某些基本结论相矛盾. 对原子核转动的早期研究认为，球形核不存在集体转动，轴对称核不存在绕对称轴的集体转动. 近期研究还表明，由于科氏力反对对力，在原子核内部某些核子会发生转动重排. 最近关于非常高自旋态的研究认为，绕对称轴转动只表现在核子重排上. 纯经典的图象只考虑存在集体转动，不考虑存在内部核子转动重排. 而近年来原子核转动概念的发展，要求区分原子核集体转动与内部核子重排两种类型的角动量. 本文希望在原子核发生形变、集体转动以及内部核子转动重排的基础上，深化研究在重离子反应中角动量转移机理.

经典动力学遇到的困难

根据经典动力学表面摩擦的概念，由于作用力等于反作用力，力距导致角动量变化，转移靶核与炮弹内部角动量 I_1 和 I_2 应该与两者的半径成比例:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1(\alpha_1)}{R_2(\alpha_2)} \tag{1}$$

$$R_i(\alpha_i) = R_{i0}(1 + \alpha_i)$$

$$R_{i0} = r_0 A_i^{\frac{1}{3}} \quad i = 1, 2.$$

这里 R_{i0} 是球形核半径，α_i 是四极形变参数.

本文 1982 年 8 月 24 日收到.

为了描述角动量转移的物理图象，经典动力学用 ω、ω_1 和 ω_2 三个集体转动角速度，分别描述靶核和炮弹绕系统总的质心、靶核和炮弹各自绕自己的质心的集体转动．经典动力学描绘重离子角动量转移的物理图象可以分成三个阶段：开始滑动摩擦

$$(\omega > 0,\ \omega_1 = \omega_2 = 0);$$

然后滚动摩擦与滑动摩擦共存 $(\omega > \omega_i > 0,\ i = 1, 2)$；最后导致相互粘在一起集体转动 $(\omega = \omega_i,\ i = 1, 2)$．这三种情况总起来可以写成：

$$\omega \geqslant \omega_i$$

$$\frac{L_f}{J_t} \geqslant \frac{I_i}{J_i} \quad i = 1, 2. \tag{2}$$

这里 L_f 是残余角动量，J_t 和 J_i 分别是系统总的转动惯量以及靶核和炮弹绕自己质心各自的转动惯量，第三种情况是粘住模型的物理图象，转移到靶核与炮弹内部角动量之比应该与它们自身转动的转动惯量成比例

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{J_1}{J_2} \tag{3}$$

从上述讨论可以得到两个相互矛盾的结论：由表面摩擦的概念得到转移到靶核与炮弹内部的角动量与两者半径成比例的结论，而由粘住模型的概念得到与两者自身转动的转动惯量成比例的结论．这也暴露了用纯经典概念描述重离子反应角动量转移的困难．对原子核转动的长期研究表明，原子核不但存在集体转动，而且存在内部核子转动重排．而经典模型仅仅考虑了集体转动角动量，只有引入转动重排角动量，才有可能清除经典动力学导致的上述矛盾

$$I_i = I_{Ri} + I_{ji} \quad i = 1, 2. \tag{4}$$

粘住模型存在的问题不仅在于没有考虑重排角动量，而且在于用粘住模型计算角动量转移总是把靶核与炮弹自转的转动惯量作为刚性转动惯量来考虑，这就过高估计了转移到靶核与炮弹上的集体转动角动量，而造成靶核与炮弹上内部核子重排角动量可以忽略的错误结论．对原子核转动的长期研究证明，球形核不存在集体转动，球形核的集体转动惯量应该等于零．因此，根据微观量子系统转动概念，如果靶核与炮弹不发生形变，就不存在转移到靶核与炮弹上的集体转动角动量 I_{Ri}．

$$I_{Ri} = \omega J_i(\alpha_i = 0) = 0 \quad i = 1, 2. \tag{5}$$

但是重离子反应的特点是，靶核与炮弹开始接触相粘，然后发生拉长形变，最后断裂发射出去，因此 $J_i(\alpha_i)$ 并不为零，仍旧存在集体转动角动量 I_{Ri}．改进后的粘住模型必须研究重离子反应在断点的拉长形变 α_i^s 以及集体转动惯量与形变的关系 $J_i(\alpha_i)$，才能正确估计转移到靶核与炮弹上的集体转动角动量 I_{Ri} 的大小．1980 年我们所作的关于重离子反应断点拉长形变的研究表明，处在断点的拉长形变 α_i^s 基本上与相互作用的库仑力以及离心力无关，而由相互粘住的核力 $F_N(\alpha_1, \alpha_2)$，即靶核或炮弹自身收缩的变形力 $F_{fi}(\alpha_i)$ 可以确定[4]．

$$F_N(\alpha_1, \alpha_2) = F_{fi}(\alpha_i) \quad i = 1, 2. \tag{6}$$

在这里看到的物理图象是，两个类似弹簧的核，一端被核力彼此粘住，另一端被库仑力和离心力拉开，当变形力等于核力时便发生断裂．核力与变形力可以由液滴模型推导出来

$$F_N(\alpha_1,\alpha_2)=2\pi(\gamma_1+\gamma_2)R_{10}R_{20}\left\{R_{10}\frac{1+\alpha_2}{\left(1-\frac{\alpha_2}{2}\right)^2}+R_{20}\frac{1+\alpha_1}{\left(1-\frac{\alpha_1}{2}\right)^2}\right\}^{-1} \tag{7}$$

$$F_{fi}=4\pi\gamma_i R_{i0}=[0.8(1-x_i)\alpha_i-0.1143(1+2x_i)\alpha_i^2]\quad i=1,2.$$

原子核转动惯量的研究是十分有趣的，长期以来人们从不同角度探索这个问题，可是并没有找到一个与实验符合的原子核变形 α_i 与原子核转动惯量之间的关系式. 1981 年我们对一系列大变形区核进行了计算，当我们在刚性转动惯量基础上扣除短轴为半径的球形部分时（图 1），我们找到了变形 α_i 与转动惯量 $J_i(\alpha_i)$ 之间的解析表达式. 这个公式与微观量子系统转动的概念不相抵触，并能使得原子核电四极矩确定的形变 α 与原子核转动能谱确定的基态转动惯量一致，仅仅是由于在接近球形区核半径参数 r_0 偏小，才使得由 α 的实验值算出的转动惯量值比转动惯量实验值偏高一些[5]. (图 2)

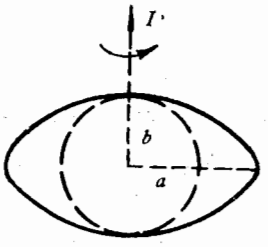

图 1

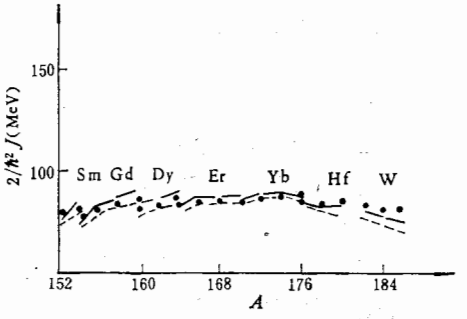

图 2

——实验值；…计算值；---微观理论计算值

$$J_i(\alpha_i)=\frac{1}{5}A_i mR_{i0}^2[(1+\alpha_i)^2+(1+\alpha_i)^{-1}-2(1+\alpha_i)^{-\frac{5}{2}}]$$
$$i=1,2. \tag{8}$$
$$J_t(\alpha_1,\alpha_2)=\mu[R_1(\alpha_1)+R_2(\alpha_2)]^2+J_1(\alpha_1)+J_2(\alpha_2).$$

这里 m 和 μ 分别是单核子质量与两核的折合质量. 改进了的粘住模型有如下的数学描述

$$I_{R1}+I_{R2}=L_f\frac{J_1(\alpha_1)+J_2(\alpha_2)}{J_t(\alpha_1,\alpha_2)} \tag{9}$$
$$I_{R1}/I_{R2}=J_1(\alpha_1)/J_2(\alpha_2)$$

这里 L_f 是粒子转移导致角动量转移之后剩下的残余角动量.

量子统计理论的某些结论

重离子碰撞形成的中间结构可以用一个双心位垒描述，费米面上的核子相互转移带来动量转移，从而造成角动量转移(图 3). 1980 年我们探索了核子转移导致的动量转移与角动量转移，根据动量守恒定律，可以得到转移角动量与转移核子数有如下关系[6]

$$\sum_{i=1}^{2}I_{fi}=L_i(1-e^{-\frac{N}{\mu}}) \tag{10}$$

这里 L_i 是初始轨道角动量；N 是相互转移的核子数，等于靶核和炮弹两者激发到费米面上的单核子数．这种机制导致的角动量转移与经典动力学的机制完全不同，角动量转移与单粒子激发紧密联系，靶核和炮弹必须具有一定的激发能，使得核子激发在费米面上才可以造成这种类型的角动量转移，这种机制导致的角动量转移表现为靶核和炮弹内部的核子转动重排角动量．由于这种转移是表面核子转移引起角动量转移造成的，这一点可以与经典动力学表面摩擦的概念相一致，因此靶核与炮弹上核子转动重排角动量的分配应该与两者的核半径成比例

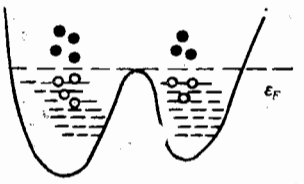

图 3

$$I_{j1}/I_{j2} = R_1(\alpha_1)/R_2(\alpha_2) \tag{11}$$

根据量子统计理论，核子是费米子服从费米统计分布，激发到费米面上的粒子数与激发能有如下关系

$$N_{Fi} = \frac{\ln 2}{\pi}(6g_{Fi})^{\frac{1}{2}}E_i^{*\frac{1}{2}} \tag{12}$$

$$i = 1, 2$$

这里 g_{Fi} 是费米面上单粒子平均能级密度．假定靶核和炮弹彼此交换的粒子数等于激发到费米面上总的粒子数

$$N = c_0(N_{F1} + N_{F2}) \tag{13}$$

从 (10)、(11)、(12) 和 (13) 式我们可以得到分配到靶核与炮弹上的重排角动量与激发能和核半径的关系

$$I_{ji} = L_i \frac{R_i(\alpha_i)}{R_1(\alpha_1) + R_2(\alpha_2)} [1 - \exp(-cE_i^{*\frac{1}{2}})] \quad i = 1, 2. \tag{14}$$

$$E_i^* = E_1^* + E_2^*$$

$$c = c_0 \frac{\ln 2}{\pi}\left[\left(6g_{F1}\frac{A_1}{A_1 + A_2}\right)^{\frac{1}{2}} + \left(6g_{F2}\frac{A_2}{A_1 + A_2}\right)\right]$$

$$\cdot \left[\ln\left(1 - \frac{1}{A_1}\right) + \ln\left(1 - \frac{1}{A_2}\right)\right]$$

在上式中我们假设了激发能在靶核与炮弹上的分配正比于两者的质量，能级密度 g_{Fi} 正比于核子数

$$g_{Fi} = 0.076\text{A/MeV}$$

再从 (9) 和 (14) 我们可以得到转移到靶核与炮弹上的集体转动角动量为

$$I_{Ri} = L_i \frac{J_i(\alpha_i)}{J_t(\alpha_1, \alpha_2)} \exp(-cE_i^{*\frac{1}{2}})$$
$$L_f = L_i \exp(-cE_i^{*\frac{1}{2}}), \tag{15}$$

(14) 和 (15) 两式分别描述了重离子反应中转移到靶核与炮弹内部的核子重排角动量和集体转动角动量，并反映出这两种类型角动量在靶核与炮弹之间是如何分配的．

讨　　论

本文用经典粘住模型和量子统计理论将转移到原子核内部的角动量，区分为集体转

动与内部核子转动重排两类，并初步探索了这两类角动量在靶核与弹核上的分配机理，这是本文得到的初步结果．为了区分两种不同类型的角动量．我们用了以前我们研究重离子反应得到的某些结论，比如碎片处在断点的拉长形变，原子核集体转动惯量与形变的关系，以及粒子转移与角动量转移的关系．理论上研究角动量转移基本上有四种模型：经典粘住模型，经典动力学模型、扩散模型以及粒子转移引起的角动量转移．经典动力学模型和扩散模型本文中不直接涉及，因此没有讨论．粘住模型是重离子反应角动量转移理论基础之一，在角动量转移机制研究中起了很大作用，至今仍有不少实验核物理学家和理论核物理学家运用这个模型分析讨论角动量转移实验数据[7,8]．本文吸取了前人提出的经典粘住模型的思想概念，并作了两点尝试，考虑了原子核发生形变，用新的集体转动惯量公式替换了刚性转动惯量公式．

我们计算了 514MeV Kr^{86} 轰击 Er^{166} 和 Sn 两个反应道 γ 多重性与总能损关系曲线，并初步区分出了由粒子转移导致的内部核子转动重排部分和由粘住模型导致的集体转动部分（见图 4 和图 5）．对于 $Er^{166}+Kr^{86}$ 反应道，断点的拉长形变参数为 $\alpha_1=0.63$，

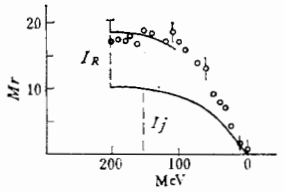

图 4

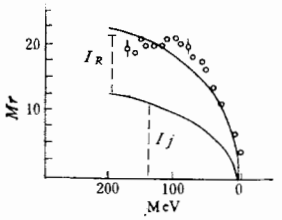

图 5

$\alpha_2=0.45$，平均初始轨道角动量 $L_i=125\hbar$，参数 $c_0=\frac{1}{2}$；对于 $Sn^{120}+Kr^{86}$ 反应道，断点的拉长形变 $\alpha_1=0.45$，$\alpha_2=0.50$，平均初始轨道角动量值 $L_i=110\hbar$，参数 $c_0=\frac{1}{2}$．

从计算结果我们可以看到，在能损小时主要是粒子转移导致角动量转移，这时还没有发生粘住拉长，碎片在断点是接近球形，转移到原子核内部角动量的集体转动成份是很小的．

参 考 文 献

[1] A. Bohr and B. R. Mottelson, *Nuclear Structure*, Vol. **2**, p. 144.
[2] 杨澄中，冉启惠，吴国华，王正大，《低能核物理资料汇编》(原子能出版社，1974年3月) p. 138.
[3] 王正大，顾金南，余超凡、罗诗裕，高能物理与核物理，**3**(1979)，348.
[4] 王正大、徐树威、缪容之，高能物理与核物理，**4**(1980)，788.
[5] 王正大、郑蔓芃，高能物理与核物理，**5**(1981)，765.
[6] 王正大，高能物理与核物理，**4**(1980)，661.
[7] A. J. Pacheco et al., *Nuclear Physics*, A**397** (1983), 313.
[8] P. R. Christensen et al., *Nuclear Physics*, A**390** (1982), 336.

A FURTHER EXPLORATION FOR MECHANISM OF ANGULAR MOMENTUM TRANSFER IN HEAVY ION REACTION

WANG ZHENG-DA

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The difficulty of the classical dynamics in studing the mechanism of angular momentum transfer is discussed. According to the nuclear rotational concept formed in the study of the nuclear structure for a long time, we point out that it is convenient to divide the total angular momentum I transfered to the target and the projectile into two components—the nuclear collective angular momentum I_R and the rotational alignment angular momentum I_j.