

重离子深部非弹碰撞中,核子交换过程 对角动量转移和能量耗损的贡献

葛凌霄 刘建业 钟纪泉 杨世俊

(中国科学院近代物理研究所)

摘 要

考虑核子的等量和不等量交换以及交换核子过程中的反冲效应和驱动力效应,讨论核子交换对重离子深部非弹碰撞中能量损失和角动量转移的贡献,并对等量和不等量交换的贡献作了比较.

一、前 言

自从实验^[1]提取出电荷分布的半极大全宽度 $T_{1/2}$ 同总动能损失 ΔE 的关系曲线以后,重离子深部非弹碰撞实验以很大的兴趣来研究电荷分布或质量分布同总动能损失的关联,以及角动量损失和总动能损失的关联. 这种关联的研究对于认识深部非弹反应机制提供了很重要的信息. 使得人们对这种过程的认识从维辛斯基^[2,3]三维图的基础上又向前进了一步.

重离子深部非弹的一个典型特征是相对运动的动能和角动量大量转移为内部激发能和内部自旋,然后,出射碎片仍保留了原始碰撞核的主要特征. 值得注意的是二体特征,使得理论对这种过程的处理有很大方便,一般都是通过中间复合系统的不同宏观自由度来讨论碰撞动力学过程,诸如能量、线动量和角动量、质量、电荷等宏观量的变化. 电荷分布宽度 $T_{1/2}$ 和角动量损失 ΔL 以及总动能损失 ΔE 的关系告诉我们,这些动力学性质很强烈地被系统内的核子交换所影响,不同的出射碎片有不同的内部角动量大小和排列. 因而核子交换机制对深部非弹性过程起重要作用. 输运理论^[4]通过质量和电荷扩散系数来讨论这种过程的质量分布,电荷分布. 宏观动力学方法^[5,6]也引入质量交换来讨论这些分布的平均值.

核子交换可考虑两个方面,一是系统内核子的等量交换,出射碎片质量同人射道靶核和弹核相同,二是系统内核子的不等量交换,出射碎片的质量不同于靶核和弹核. 本文基于上面的考虑,利用核子交换时所引起的反冲和驱动力两种效应,讨论交换核子对深部非弹碰撞所观察到的一些主要特征,象能量和角动量损失的贡献,比较等量交换和不等量交换的结果.

二、反应系统内的核子交换

如果在某个时刻, 在运动轨道的某处, 总共交换 N 个核子, 那么, 在这 N 个核子中就包括 ΔN 个不等量交换的数目和 N' 个等量交换的数目,

$$N = N' + \Delta N, \quad (1)$$

为方便起见, 等量交换数目写为 $N' = N - \Delta N$.

让我们考虑 $A_2(A_1, B_2)B_1$ 反应系统. 单位时间从 A_1 向 A_2 转移 $\frac{dn}{dt}$ 个核子, 从 A_2 向 A_1 转移 $\frac{dm}{dt}$ 个核子, 那么, 单位时间总共交换的核子数为

$$\frac{dN}{dt} = \frac{dn}{dt} + \frac{dm}{dt}. \quad (2)$$

假设我们考虑系统随时间朝着对称方向发展, 那么, 单位时间炮弹 A_1 和靶核 A_2 不等量交换的数目为

$$\frac{d\Delta N}{dt} = \frac{dm}{dt} - \frac{dn}{dt}. \quad (3)$$

单位时间 A_1 和 A_2 等量交换的数目为

$$\frac{d(N - \Delta N)}{dt} = \frac{dN}{dt} - \left(\frac{dm}{dt} - \frac{dn}{dt} \right). \quad (4)$$

由(2)、(3)可以得到

$$\frac{dm}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{dN}{dt} + \frac{d\Delta N}{dt} \right); \quad (5)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{dN}{dt} - \frac{d\Delta N}{dt} \right), \quad (6)$$

(5)、(6)实际上分别是靶核到炮弹和从炮弹到靶核的质量跃迁几率.

问题的关键是如何得到单位时间内总的交换核子数和不等量交换核子数. 理论上, 目前还没有一个确切的方法来得到它们, 一般还得借助于模型假设^[6]. 用费米气体模型来确定交换核子数, 由于相对运动动能在短时间内耗损百分之七十以上, 因而, 系统内有较大的激发能, 使许多粒子激发到费米面以上, 费米面以下的核子由于泡利原理的限制不易发生交换, 费米面以上核子的交换正如经典气体那样做无规则运动. 这样, 我们就可以得到交换核子总数.

另外, 如果我们假设核子做无规运动, 那么交换核子总数可以通过质量分布的宽度来表示^[4]

$$\Gamma_A^2 = N. \quad (7)$$

质量分布的宽度如果考虑到中子过剩自由度迅速达到平衡的实验事实, 可用元素分布的宽度 Γ_Z^2 得到. 一般采用转移过程中质子和中子有密切关联的情况,

$$\Gamma_A^2 = \left(\frac{A}{Z} \right)^2 \Gamma_Z^2, \quad (8)$$

A 和 Z 分别是复合系统的质量和电荷.

如果我们知道了不同入射 l 分波的相互作用时间, 并假设对于每一个 l 分波都有一个福克-普郎克方程成立, 那么, 由福-普方程的简单形式解, 就可以确定质量传输系数 $D_A^{(1)}$

$$D_A = [16 \ln 2 t_{int}(l)]^{-1} \Gamma_A^2. \quad (9)$$

根据爱因斯坦关系^[5], 质量的飘移系数可写为

$$v_{A_1} = -\frac{D_A}{T(E_l^* A_1)} \frac{\partial U}{\partial A_1}. \quad (10)$$

v_{A_1} 通过驱动力 $\frac{\partial U}{\partial A_1}$ 同扩散系数相联系, $T(E_l^* A_1)$ 是在一定激发能 E_l^* 和 A_1 时的核温度. 从(10)式可以看到, v_{A_1} 依赖于势能随 A_1 的变化, 我们考虑势能为下面形式:

$$U(A_1, l) = U_{LD}(A_1) + U_{LD}(A_2) - U_{LD}(A) + V_c + V_N + V_l, \quad (11)$$

$A = A_1 + A_2$, U_{LD} 为半经验质量公式给出的值, 库仑势 V_c 取点电荷近似, 核势 V_N 为亲近势, 离心势 V_l 取与角动量平方成正比和与转动惯量成反比的一般形式, 那么由(11)可计算出在不同 l 时, 势能 $U(A_1, l)$ 随 A_1/A 的变化.

如果考虑象 $Kr + Er$ 这样的反应系统, 它的初始的质量非对称性 $A_1/A \approx 0.34$, 由位能曲线随 A_1/A 的变化, 这个系统随时间主要应向对称方向发展, 按 Morreto^[7] 关于注入点的讨论, 这个系统的注入点不在势能的峰处, 而在峰的一边朝 $A_1/A = 0.5$ 方向, 这时, 位能形状可用抛物线形式来近似^[8]

$$U_l(A_1) = c_l \left(\frac{A_1}{A} - 0.5 \right)^2 + d_l, \quad (12)$$

c_l 和 d_l 是相关于 l 分波的值, 它从(12)和(11)式的拟合来得到. 飘移系数可以写为

$$v_{A_1}^{(l)} = a_A^{(l)} (1 - 2A_1/A). \quad (13)$$

其中 $a_A^{(l)} = \frac{D_A c_l}{TA}$. $A_1 = \frac{1}{2} A$ 的对称碎片, 质量飘移趋于零. 我们假设对于一个人射 l 分波, 扩散和飘移系数是常数, 即取平均值, 因而, 一个固定的 l 分波, 我们也取 $\langle A_1 \rangle$. 这样, 福-普方程的解是具有平均值为

$$\langle A_1 \rangle = A_p - \left(A_p - \frac{1}{2} A \right) [1 - \exp(-2a_A t/A)]$$

的高斯形式^[8]. A_p 为炮弹的初始质量. 不等量交换的数目 $\Delta N = \langle A_1 \rangle - A_p$, 所以,

$$\Delta N = -\left(A_p - \frac{1}{2} A \right) [1 - \exp(-2a_A t/A)]. \quad (14)$$

那么, 在一定时间范围内, 炮弹和靶核分别交换的核子数目为

$$n = \frac{1}{2} (N - \Delta N), \quad (15)$$

$$m = \frac{1}{2} (N + \Delta N). \quad (16)$$

三、核子交换和总动能损失

如果在某个时刻, 在轨道的某处, 炮弹有 n 个核子给靶核, 靶核有 m 个核子给炮弹, 那

么由于反冲效应, 根据动量守恒, 交换前后的相对运动速度会发生改变, 即动量发生改变, 设交换前的相对运动速度为 v_i , 交换后的相对运动速度为 v_f , 那么^[9]

$$v_f = \left[1 - \frac{n}{A_2 - m + n} - \frac{m}{A_1 - n + m} \right] v_i, \quad (17)$$

A_2 为靶质量, A_1 为炮弹质量, 取核子质量为 1, 即 m 和 n 为交换 m 个和 n 个核子的质量。

交换前的能量为

$$E_i = \frac{1}{2} \mu_i v_i^2 + U_{\text{int}}^{(i)}, \quad (18)$$

交换后的能量为

$$E_f = \frac{1}{2} \mu_f v_f^2 + U_{\text{int}}^{(f)}. \quad (19)$$

μ_i 和 μ_f 分别为交换核子前后的约化质量, $U_{\text{int}}^{(i)}$ 和 $U_{\text{int}}^{(f)}$ 分别为交换核子前后的势能, 由能量守恒

$$\Delta E = \frac{1}{2} \mu_i v_i^2 - \frac{1}{2} \mu_f v_f^2 + U_{\text{int}}^{(i)} - U_{\text{int}}^{(f)}, \quad (20)$$

由(20)和(17)式我们得

$$\begin{aligned} \Delta E_c = \frac{E_{\text{eff}}}{A_1 A_2} & \left[A_1 A_2 - (A_2 - m + n)(A_1 - n + m) - \frac{n^2(A_1 - n + m)}{A_2 - m + n} \right. \\ & \left. - \frac{m^2(A_2 - m + n)}{A_1 - n + m} + 2n(A_1 - n + m) + 2m(A_2 - m + n) - 2mn \right] \\ & + \Delta U_{\text{int}}, \end{aligned} \quad (21)$$

$U_{\text{int}} = U_{\text{int}}^{(i)} - U_{\text{int}}^{(f)}$, (21) 式包括了等量 and 不等量交换的总贡献。如果仅考虑等量交换的部分, 那么

$$\Delta E_c = \frac{E_{\text{eff}}}{A_1 A_2} \left[N'(A_1 + A_2) - \frac{1}{4} (N')^2 \left(\frac{A_1^2 + A_2^2}{A_1 A_2} \right) - \frac{1}{2} (N')^2 \right], \quad (22)$$

E_{eff} 为交换前的有效能量, $N' = N - \Delta N$ 。

由(11)给出的势能表达式, 我们计算核子交换前后势能的变化, 即 ΔU_{int} 。对于 $\text{Kr} + \text{Er}$ 反应系统, 随着相互作用时间增长, 它的质量非对称性 A_1/A 从 0.34 变化至 0.41, 其 ΔU_{int} 从 0.6 MeV 变化至 5.8 MeV。势能变化最大占总动能损失的 10%, 绝大多数 l_i 分波都小于这个值。

四、核子交换和角动量损失

如图 1 表示, 中间复合系统集体以 θ 转动, 碎片以 θ_1 和 θ_2 转动, θ_1 、 θ_2 和 θ 转动方向相同。如果入射角动量为 l_i , 那么出射道轨道角动量

$$l_f = l_i - (l_1 + l_2), \quad (23)$$

l_1 和 l_2 是碎片自旋。为了简单讨论, 我们不考虑核子的分布, 假定核子都以 A_1 和 A_2 中心沿着平均距离 d_1 和 d_2 扩散, 那么, 根据角动量的定义, 内部运动角动量 l_1 和 l_2 随时间变化的方程为^[10]

$$l_i = d_1 \left[\frac{dn}{dt} d_1 (\theta - \theta_1) + d_2 \frac{dm}{dt} (\theta - \theta_2) \right]; \quad (24)$$

$$l_2 = d_2 \left[\frac{dn}{dt} d_1 (\dot{\theta} - \dot{\theta}_1) + d_2 \frac{dm}{dt} (\dot{\theta} - \dot{\theta}_2) \right]. \quad (25)$$

我们假定相对运动和个体转动都是刚体转动, \mathcal{F}_1 , \mathcal{F}_2 和 \mathcal{F}_{rel} 分别为个体转动和相对运动的转动惯量.

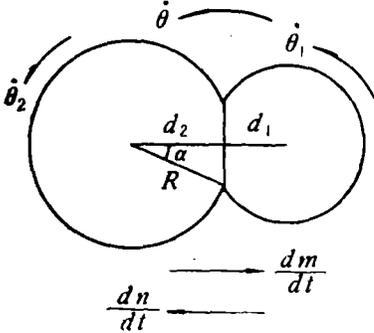


图1 两碰撞核的几何图象

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= [l_i - (l_1 + l_2)] \hbar / \mathcal{F}_{rel}, \\ \dot{\theta}_1 &= l_1 \hbar / \mathcal{F}_1, \quad \dot{\theta}_2 = l_2 \hbar / \mathcal{F}_2. \end{aligned} \quad (26)$$

带(26)到(24)和(25)中,我们设:

$$\begin{aligned} E &= d_1 \left(\frac{dn}{dt} d_1 + \frac{dm}{dt} d_2 \right) \frac{l_i}{\mathcal{F}_{rel}}; \\ B &= d_1 \left(\frac{dn}{dt} d_1 \frac{\mathcal{F}_1 + \mathcal{F}_{rel}}{\mathcal{F}_1 \mathcal{F}_{rel}} + \frac{dm}{dt} d_2 \frac{1}{\mathcal{F}_{rel}} \right); \\ C &= d_1 \left(\frac{dn}{dt} d_1 \frac{1}{\mathcal{F}_{rel}} + \frac{dm}{dt} d_2 \frac{\mathcal{F}_2 + \mathcal{F}_{rel}}{\mathcal{F}_2 \mathcal{F}_{rel}} \right); \\ E' &= E d_2 / d_1; \quad B' = B d_2 / d_1; \quad C' = C d_2 / d_1; \end{aligned}$$

就可以得到一组非齐次的一阶微分方程

$$l_1 + B l_1 + c l_2 = E, \quad l_2 + B' l_1 + c' l_2 = E'. \quad (27)$$

对于一个 l_i 入射波,对应着一个确定的相互作用时间 $t_{int}(l_i)$, 我们所讨论的问题是,角动量损失同相互作用时间的联系. 故在一个 l_i 分波范围内,我们取 E, E', B, B' 和 C, C' 的平均值,我们得到的也是对一个 l_i 分波的 l_1 和 l_2 的平均值. 按照标准的代数方法,(27)的解为:

$$l_1 = \frac{E' \frac{C}{B + \lambda_2} + E}{\left(1 - \frac{B + \lambda_1}{B + \lambda_2}\right) \lambda_1} (e^{\lambda_1 t} - 1) + \frac{E' \frac{C}{B + \lambda_1} + E}{\left(1 - \frac{B + \lambda_2}{B + \lambda_1}\right) \lambda_2} (e^{\lambda_2 t} - 1). \quad (28a)$$

$$l_2 = \frac{E' \frac{C}{B + \lambda_2} + E}{\left(1 - \frac{B + \lambda_1}{B + \lambda_2}\right) \lambda_1} \frac{B + \lambda_1}{C} (1 - e^{\lambda_1 t}) + \frac{E' \frac{C}{B + \lambda_1} + E}{\left(1 - \frac{B + \lambda_2}{B + \lambda_1}\right) \lambda_2} \frac{B + \lambda_2}{C} (1 - e^{\lambda_2 t}). \quad (28b)$$

其中 λ_1 和 λ_2 分别为

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -\frac{1}{2} (C' + B) + \frac{1}{2} \sqrt{(C' + B)^2 - 4(BC' - B'C)}, \\ \lambda_2 &= -\frac{1}{2} (C' + B) - \frac{1}{2} \sqrt{(C' + B)^2 - 4(BC' - B'C)}. \end{aligned}$$

总角动量损失为

$$\Delta l = l_1 + l_2. \quad (29)$$

根据计算, $BC' - B'C \approx 0$, (28)式就变得简洁一些.

五、计算结果和讨论

本文试图用简单的模型来探索核子交换机制对于重离子深部非弹碰撞动力学性质的

影响。采用(21)和(29)来计算核子交换所造成的能量和角动量损失。不同碰撞参数的相互作用时间是利用[11]所提供的经典动力学方法来完成的, 经典动力学计算的能损, 限制全融合临界角动量值, 擦边角等尽量符合实验值。通过微分方程的数值计算, 我们可以确定一定碰撞参数下相互作用时间, 最接近距离和总动能损失。

交换核子总数利用实验所提供的元素分布半极大处全宽度 $\Gamma_{1/2}^2$ 。根据计算的相互作用时间, 由(9)式确定质量扩散系数 D_A , 其数值在 $1-2.5 \times 10^{22}$ /秒范围内。不等量交换数目由(14)式得到, 让(12)和(11)相等, 确定出一个 l 分波其系数 c_l 的平均值。交换核子总数和不等量交换的数目随相互作用时间的变化表示在图 2 中。

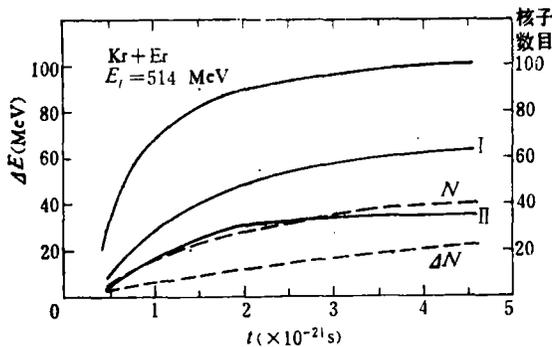


图 2 总动能损失 ΔE 和相互作用时间 t 的关系
I 为包括等量和不等量交换的计算结果, II 为等量交换的计算结果。最上部曲线是经典动力学计算结果, 虚线为交换核子数与 t 的关系, N 为交换核子总数, ΔN 为不等量交换核子数。

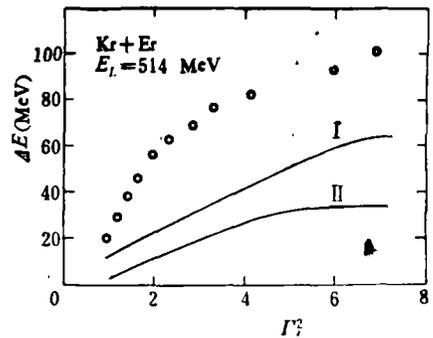


图 3 总动能损失 ΔE 和元素分布宽度 $\Gamma_{1/2}^2$ 关系
圆圈为实验点, I 和 II 见图 2 说明

核子交换所造成的能量损失 ΔE 由(21)给出, 它随相互作用时间 t_{int} 的变化表示在图 2 中, 与交换质子总数的关系表示在图 3 中。圆圈是实验结果, I 包括了等量和不等量交换两部分的贡献, II 仅考虑了等量交换的情况。造成深部非弹过程中能量损失的原因是多方面的, 核子交换是一个重要因素, 但核子交换是在整个过程中都发生的。没有核子交换发生时, 相对自由度和集体激发模式耦合, 使得声子激发, 它发生在反应过程的初期阶段, 这个阶段会损失相对运动动能。由实验 $\Delta E \sim \Gamma_{1/2}^2$ 曲线可以看出能损与不同系统, 不同的入射能量都有大的关系。[1]给出了伴随交换核子所产生的能损, 这是一种等量交换的结果, 没有净交换发生。本文考虑了由于反冲效应和核的驱动力所引起的等量和不等量交换, 仍然表明, 核子交换机制只贡献一部分能量损失, 与实验结果有大的不同。这个不同主要来源于没有交换核子时其它效应对能损的贡献, 由图 2 可看出, 在低能损部分(即短的相互作用时间)曲线很平缓, 而实际情况变化很陡峭, 这是由于在低 ΔE 部分, 快过程会起更重要的作用。M. Dakowski 等人已做了估计^[12]。

能量损失同时间关系是非线性关系, 它说明了能量损失的第一步是快过程, 在这个过程中, 能量损失的速率变化很大。第二步是弛豫过程, 其能量损失速率变化较小^[2]。

核子交换引起的角动量损失由(29)给出。 E, B, C 和 E', B', C' 在一个相互作用时间范围内取平均值, 主要是平均距离 d_1 和 d_2

$$d_i = \frac{\sum_{j=0}^i d_j \Delta t_j}{\sum_{j=0}^i \Delta t_j}$$

$\Delta t_j = 0$ 时, $d_i = R_i$, R_i 是核的半径, 当两碰撞核到最近距离时, $d_i = R_i \cos \alpha$, (图 1), 当 $\Delta t_j = t$ 时, $d_i = R_i$. 相对运动转动惯量 $\mathcal{I}_{rel} = \mu r^2$, r 的平均也采用了和 d_i 同样的方法. 个体转动的转动惯量取球的形式, $\mathcal{I}_i = \frac{2}{5} A_i R_i^2 (i = 1, 2)$.

Δl 随相互作用时间的变化表示在图 4 中, 曲线 I 是考虑等量 and 不等量交换的结果, II 仅考虑等量交换, 图 5 是角动量损失 Δl 和能损 ΔE 的关系, 圆圈是实验点^[2]并假设 $\langle M_j \rangle = 2\hbar$. 造成角动量耗损原因, 由图 5 看出, 核子交换起了主要作用. 当然, 没有核子交换时也会造成角动量损失. 另外, 跟随着核子交换的角动量转移应该有两部分贡献, 一是伴随着炮弹和靶核的相对运动, 一是伴随着炮弹和靶核的内部运动, 实验测出了角动量排列大小和能损的关系, 能量损失小时, 这个排列很小, 甚至趋于零. 能量损失大时, 排列较大. R. Vandenbosch^[23] 定性认为, 对于小 ΔE , 占优势的费米运动的无规性质; 而对于大 ΔE , 会发生更多核子交换, 从费米运动的无规耦合所得到的结果比起相对运动的共线排列增长的很慢. 本文仅仅考虑了炮弹和靶核的相对运动, 没有涉及核子本身的无规速度. 因而可以从图 5 看出在 ΔE 较小时, 计算的 Δl 值比实验值要小.

图 6 是出射碎片的电荷数 Z_1 和角动量损失的变化关系, $Z_1 = \left(\frac{Z}{A}\right) A_1$, Z 和 A 分别

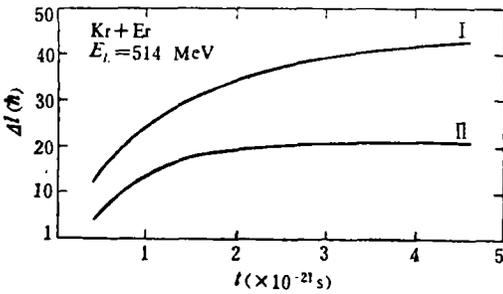


图 4 角动量损失 Δl 和相互作用时间 t 的关系
I 为包括等量 and 不等量交换计算结果, II 为等量交换计算结果

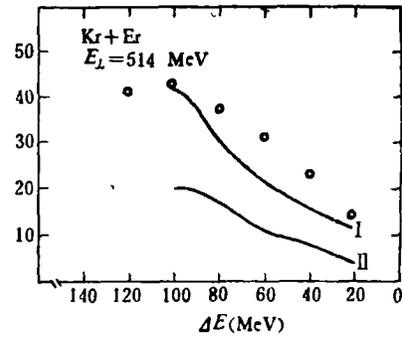


图 5 角动量损失 Δl 和总动能损失 ΔE 关系
圆圈为实验点, I 和 II 说明见图 4

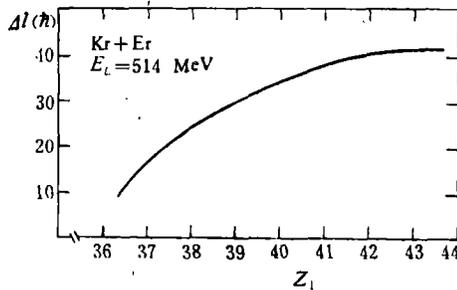


图 6 电荷数 Z_1 同角动量损失 Δl 的关系

是复合系统的电荷和质量数。本文仅考虑了电荷数大于炮弹电荷数 Z_p 的情况。这是因为驱动力模型使碎片朝着对称发展, 没有考虑朝着不对称方向的几率。

由于核子交换时的反冲效应和驱动力效应, 核子会发生等量交换和不等量交换。通过对 $Kr + Er(E_{lab} = 514\text{MeV})$ 的计算可以看出, 核子交换机制仅仅是能量损失的一个重要原因, 但核子交换机制在角动量损失中起了主要作用。就等量 and 不等量交换而言, 等量交换占主要部分。

参 考 文 献

- [1] W. Schroder et al., *Phys. Lett.*, **71B** (1977), 283. *Phys. Reports*, **45** (1978), 301.
- [2] R. Bock, 重离子核物理, (1979), p. 182 重庆情报研究所编.
- [3] K. E. Rehm et al., *Phys. Lett.*, **86B** (1979), 256.
- [4] W. Norenberg, European Conference on Nuclear Physics with Heavy Ions Caen (1976) C-5-141.
- [5] A. K. Jain et al., *Nucl. Phys.*, **A309** (1978), 264.
- [6] 葛凌霄, 刘建业, 杨世俊, 未发表(1979).
- [7] L. G. Morreto et al., European Conference on Nuclear Physics with Heavy Ions Caen (1976) C-5-109.
- [8] R. Schmidt et al., *Nucl. Phys.*, **A311** (1978), 247.
- [9] P. J. Siemens et al., *Phys. Lett.*, **36B** (1971), 24.
- [10] J. S. Sventek et al., *Phys. Rev. Lett.*, **40** (1978), 697.
- [11] 葛凌霄, 吴国华, 刘建业, 高能物理与核物理, **3**(1979), 760.
- [12] M. Dakowski et al., GSI-Preprint 79-16.
- [13] R. Vandenbosch, *Phys. Rev.*, **C20** (1979), 171.
- [14] J. Wilczynski, *Phys. Lett.*, **47B** (1973), 484.
- [15] S. Ayik et al., *Z. Physik*, **A286** (1978), 271.

THE CONTRIBUTION OF THE NUCLEON EXCHANGE TO THE TRANSFER OF IN DEEP ANGULAR MOMENTUM AND ENERGY INELASTIC COLLISION

GE LING-XIAO LIU JIAN-YE ZHONG JI-QUAN YANG SHI-JUN

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The nucleon exchange can be divided into two different modes, the equal one and unequal one. Assuming that the motion of nucleon is random and according to Einstein relation the number of equal and unequal exchange is discussed. The total energy loss and the angular momentum for the reaction $Kr+Kr$ have been calculated. The results show that the total energy loss is only partly induced by nucleon exchange, while the angular momentum dissipation is mainly induced by nucleon exchange and the equal exchange is more important than unequal one in both cases.