

20MeV 到 180MeV/u $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 系统的 BUU 计算: 线动量与角动量转移依赖 碰撞参数与能量研究*

阎德宏 戴光曦 罗清政 贺智勇 漆玉金

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1993年5月28日收到

摘 要

用考虑了角动量守恒的 BUU 模型计算了 $20\text{MeV} \leq E/u \leq 180\text{MeV}$ 能区 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 系统的反应线性动量转移 (LMT) 及余核角动量, 着重讨论了反应线性动量转移及余核角动量对反应碰撞参量、入射能 E/u 的依赖关系, 比较了计算 LMT 与 Viola 系统性给出的结果间的偏差。计算结果揭示了当 $E/u \geq 90\text{MeV}$ 时, 余核角动量对 E/u 增长出现的饱和现象, 主要来源于靶核对弹核捕获能力的持续丢失。

关键词 BUU 模型, 角动量守恒, 线性动量转移, 余核角动量。

1 引 言

重离子反应中线性动量转移 (LMT) 与转移到靶余核角动量测量研究是获取中能区核反应系统趋势信息的重要来源^[1-3]。过去十年, 实验上完成了大量的反应重核 LMT 及角动量的测量。为了很好地理解实验结果, 通常需要了解转移到余核的线动量, 角动量随碰撞参量和入射能等的变化行为。实验上取得这些量的最常用方法是测量靶余核的速度及反应带电粒子多重性, γ 多重性, 或中子多重性。在 $E/u \geq 200\text{MeV}$ 高能区总带电粒子多重性被广泛用来标示反应碰撞中的中心性^[4,5]。到了低入射能 $E/u \leq 20\text{MeV}$ 余核的中子及 γ 线多重性可以提供类似的信息。对中能反应观测量的最佳能区 $20\text{MeV} \leq E/u \leq 200\text{MeV}$ 情况, 实验上还不很清楚。然而通过有效的微观反应模型的计算可望获得关于这些实验观测量的性质的一些指导。

我们采用改进的 Boltzmann 模型对选定的 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 反应体系进行了系统的计算, 提取了各反应进程中转移至靶余核的线性动量、角动量值及其它重要物理量, 并着重探讨了它们随入射能增加的演化特征及对碰撞参量的依赖特性。本文第二部分讨论计算

* 甘肃省自然科学基金资助。

过程,第三部分描述计算结果,第四部分给出有关的结论。

2 计算过程

Boltzmann 方程描述了核反应过程 Wigner 相空间函数 $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$ 在平均场与两体碰撞机制竞争下的时间演变。它的形式为^[6,7]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} f_1 - \nabla_{\mathbf{r}} U \cdot \nabla_{\mathbf{p}} f_1 = I_{coll} \\ = \frac{4}{(2\pi)^3} \int d^3 k_2 d^3 k_3 d^3 k_4 \sigma_{NN}(Q) v_{12} [f_3 f_4 (1 - f_1)(1 - f_2) \\ - f_1 f_2 (1 - f_3)(1 - f_4)] \delta(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_4), \end{aligned} \quad (2.1)$$

其中 $\sigma_{NN}(Q)$ 及 v_{12} 为碰撞核子的微分截面和相对速度, U 是核系统的平均场势, 近似为:

$$U(\rho) = A(\rho/\rho_0) + B(\rho/\rho_0)^\sigma + C(\rho_n - \rho_p)\tau_z/\rho_0, \quad (2.2)$$

此处, ρ , ρ_n 及 ρ_p 分别为局域核子, 中子及质子密度, τ_z 为同位旋算子。 $A = -356 \text{ MeV}$, $B = 303 \text{ MeV}$, $C = 32 \text{ MeV}$, $\sigma = \frac{7}{6}$ 。这样的参数选取保证了(2.2)式满足核物质的

的饱和性, 给出的压缩系数为 $K = 200$ 。计算中 $\sigma_{NN}(Q)$ 采用核子-核子散射截面取为 41 mb , 并假定与能量和角度无关。考虑到计算量的限制, 计算中忽略了质子间的库仑排斥效应, 在该较高能区下这种简省对计算结果带来的影响是相当微弱的^[8]。

数字解方程(2.1)是通过按牛顿限制传播检验粒子来实现的。平均场及碰撞积分项中的泡利阻塞因子由计算分布函数得到, 该分布函数是 100 次模拟实验的系综平均值。

需要说明的是, 本工作的目的不是寻找一种最好的关于平均场和介质截面的参数化方法, 目前阶段我们的目的是要了解主导中能核反应过程中线性动量转移及角动量转移的重要机制。

每次模拟中, 对开始碰撞后的各个时段的核子相空间分布进行检验。检验中, 以 $U(\rho)$ 作为核子相空间运动状态的判据。确认 $U(\rho) < -6 \text{ MeV}$ 的单核子处于束缚态, 反之则为自由传播态。这种方法得到的反应观测量在一定程度上同另一种更为简单直观的方法(如在靶核周围画一个 $R = 1.44 A^{1/3}$ 的球面) 所得结果大体一致。余核的线性动量及内禀角动量分别由

$$\mathbf{p}_t = \sum_i \mathbf{p}_i = m \mathbf{v}_t, \quad \mathbf{I}_t = \sum_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{p}_i$$

给出, 其中 \mathbf{v}_t 系反应核子实验室系速度; $\mathbf{r}_i, \mathbf{p}_i$ 分别为反应核子的余核质心系坐标及质心系动量。

此外, 为使计算提取的角动量值更趋合理, 在现有的 BUU 算法上, 加进了保证核子微观碰撞过程角动量守恒的修正。通过对核子-核子散射体系做适当变换, 从而实现微观碰撞到宏观过程的角动量守恒, 其变换形式如下^[9]:

$$\mathbf{p}_f = (\cos\theta_i \hat{\mathbf{n}} + \sin\theta_i \hat{\mathbf{n}}_\perp) \mathbf{p}, \quad (2.3)$$

其中 \mathbf{p}_f 为核子-核子散射后在质心系中的动量, θ_i 为 N-N 散射参数化实验分布的 Monte Carlo 抽样值, $\hat{\mathbf{n}}$ 为散射前 \mathbf{p} 的方向矢.

$$\hat{\mathbf{n}}_\perp = \pm \hat{\mathbf{n}} \times [(\gamma - 1)(\hat{\beta} \cdot \hat{\mathbf{L}}_{rel})\hat{\beta} + \hat{\mathbf{L}}_{rel}] / |\text{Norm}|, \quad (2.4)$$

其中 γ, β 为 Lorentz 变换参量, $|\text{Norm}|$ 为归一因子, 上式保证了散射前后反应平面的一致性.

$$\mathbf{r}'_{12} = (\mathbf{r}_{12} \cdot \hat{\mathbf{p}}'_{rel}) \hat{\mathbf{p}}'_{rel} + \left[\frac{\mathbf{L}_{rel}}{p'_{rel}} \right] \hat{\mathbf{q}}, \quad (2.5)$$

此处,

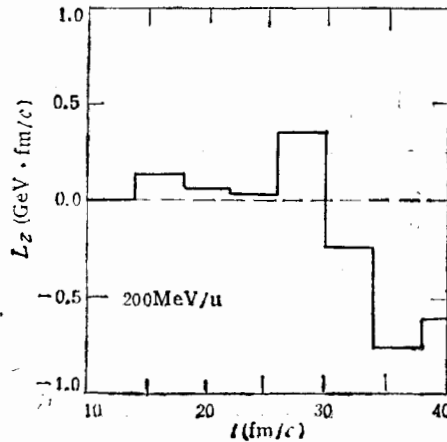


图 1 ⁴⁰Ca + ⁴⁰Ca 在 $E/u = 200\text{MeV}$ 能量下, 总角动量 Z 成分随时间演化关系
虚线为经角动量守恒修正者, 实线为未考虑角动量守恒情形

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{12} &= \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2, \mathbf{p}'_{rel} = (\mathbf{p}'_1 - \mathbf{p}'_2)/2, \mathbf{L}_{rel} \text{ 为 } (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \times (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2), \\ \hat{\mathbf{q}} &= [\mathbf{r}_{12} - (\mathbf{r}_{12} \cdot \hat{\mathbf{p}}_{rel})\hat{\mathbf{p}}_{rel} / p_{rel}] / |\text{Norm}|. \end{aligned} \quad (2.6)$$

通过(2.5)、(2.6)式对散射核子空间坐标的变换, 进一步保证了散射前后角动量值的守恒. 图 1 给出了加入及未加入角动量守恒修正的反应总角动量 L_z 分量的时间演化情形. 计算是在不考虑核子的费米运动情况下进行的. 因此 L_z 初值恒为零. 由图可见, 上述的变换能够很好保证反应中的角动量守恒.

3 计算结果

我们对 ¹⁶O + ¹⁹⁷Au 系统在 $20\text{MeV} \leq E/u \leq 180\text{MeV}$ 能区的一系列入射能量点的反应过程进行了系统计算. 在反应进程 $t = 200\text{fm}/c$ 时给出观测量的统计值. 反应在 $t = 200\text{fm}/c$ 时, 可以根据核子相空间分布很好地区分出每一个碰撞参数下的反应余核, 以提取合理的观测量值. 图 2 给出了 $t = 150\text{fm}/c$ 时该反应系统较低入射能量 $E/u = 30, 40, 50\text{MeV}$ 的反应平面束缚核子的相空间密度分布. 从图可见, 低入射能时, 当 $b \leq$

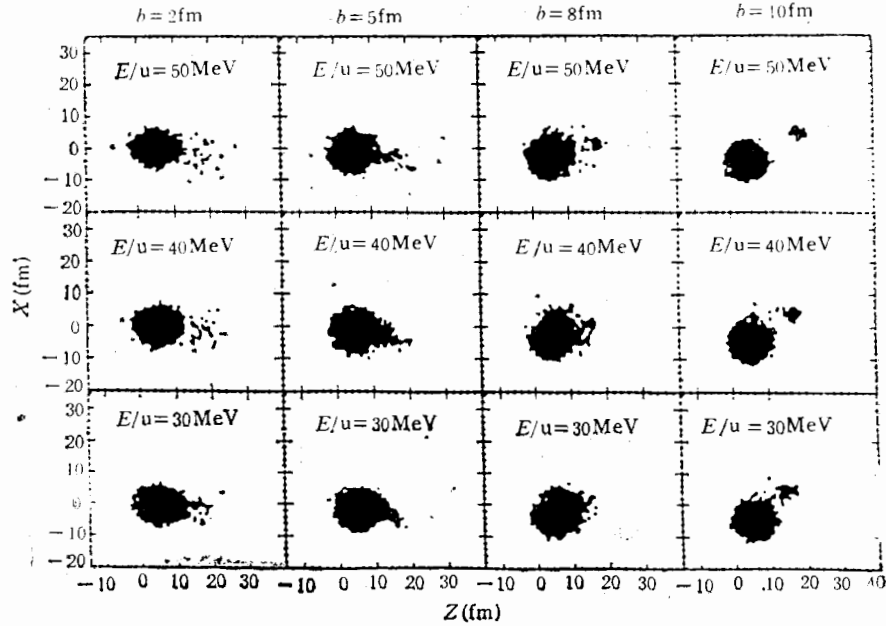


图2 由 Boltzmann 方程给出的 $t = 150 \text{ fm}/c$ 时低 E/u 下的束缚态核子反应平面相空间密度分布

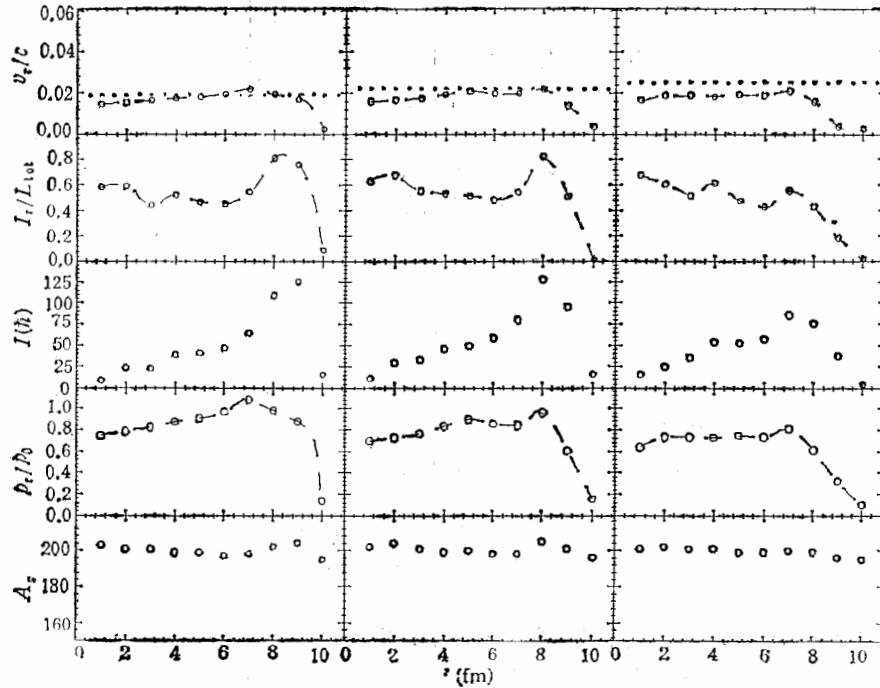


图3 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ $E/u = 30 \text{ MeV}$ (左), 40 MeV (中), 50 MeV (右) 时, 靶余核的束流方向速度 v_t 、角动量转移率及余核自旋 I_t 、线性动量转移及类靶余核的质量
 顶图点线为系统的质心速度 v_{cm} , 虚线用以指示变化趋势

8fm, 反应给出唯一的余核, 且出射碎片很少, 具有全熔合反应的特征, 当 $b > 8\text{fm}$ 时反应类弹核出现, 表现出深部非弹碰撞的特征。随着入射能量的增加, 由于注入核系统的能量增加, 余核出射的碎片增加, 类弹核在逐渐减小的碰撞参数下出现。图 3 分别给出 E/u 为 30MeV (左), 40MeV (中), 50MeV (右) 时该反应系统不同碰撞参量下的束流方向的余核速度 v_r , 余核角动量转移率 I_r/L_{tot} (L_{tot} 为系统的总轨道角动量), 系统转移到余核的角动量 I_r , 线动量转移 p_r/p_0 (p_0 为入射弹核的动量), 以及余核质量。此处由于余核质量及角动量随反应时间的演进将不断减小, 对反应余核质量的统计可以提供一个了解因复合核蒸发而丢失的余核角动量的粗略量度。其中 v_r 图中的虚线对应于完全线性动量转移情形, 即全熔合反应过程。靶余核速度 v_r 对碰撞参量 b 的依赖的敏感性存在一个阈值 b_{th} , 当 $b \leq b_{th}$ 时 v_r 非常稳定。

当 $b > b_{th}$ 时, 在较大碰撞参数下, 可以在计算中区分出类弹碎片。该能区小碰撞参数对应区域的 $\langle \text{imt} \rangle$ 在 60%—85% 之间, 与针对重靶系统建立的 Viola 系统性给出的量值 56%—77% 基本相同。

图 4 分别给出 $E/u = 60\text{MeV}$ (左), 120MeV (中), 180MeV (右) 入射能量下各反应余核的特性观测量对碰撞参量的依赖。当反应进行到 $t = 150\text{fm}/c$ 时, 可以从反应产物相空间密度分布中很好地区分出反应余核。同前面所述三个较低能量下反应情况比较, 此处各观测量趋势有更大差异。 $E/u = 60\text{MeV}$ 时, 余核速度在 $b_{th} = 5\text{fm}$ 时开始下降, 较 $E/u = 60\text{MeV}$ 时进一步减小。计算得到的 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ $E/u = 60\text{MeV}$ 的最大转移角动量约为 $61\hbar$, 远小于由液滴模型预言的最大值 ($1 > 80\hbar$)^[8]。 $b < 5\text{fm}$ 区域余核速度及线

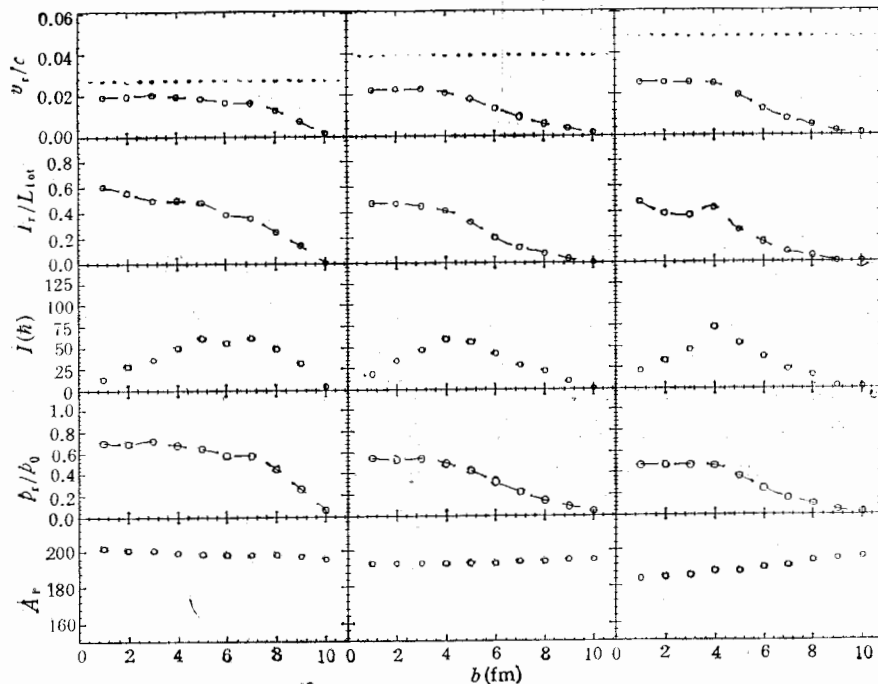


图 4 同图 3, $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ $E/u = 60\text{MeV}$ (左), 120MeV (中), 180MeV (右)

性动量转移率 LMT 均对碰撞参数的变化不敏感,只有转移到余核中的角动量对如此小的碰撞参数敏感。

$E/u = 120, 180\text{MeV}$ 时 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 反应各观测量对碰撞参数的变化与 $E/u = 60\text{MeV}$ 时相近。余核的最大转移角动量对应于这两个能量点分别为 $60\hbar$ ($E/u = 120\text{MeV}$) 和 $72\hbar$ ($E/u = 120\text{MeV}$), 同样远小于由液滴模型给出的该质量区的最大角动量转移值 ($80\hbar$)。在这两个较高能量点,标志余核速度大幅度下降及线动量转移迅速减小的碰撞参数阈 b_{th} 进一步随着入射能的增加而减小。在此阈值以内,余核速度以及线动量转移对

碰撞参数的依赖不强,转移余核自旋随碰撞参数的增加而单调增加。大于该阈值 b_{th} 时,余核的速度 v_r , 余核自旋 I_r 及线动量转移均迅速减小。

图5(上)给出各个能量下 b_{th} 的变化情况,从图可以了解 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 各反应提取量的碰撞参数依赖对入射能的变动趋势。从前面的讨论可以看到, b_{th} 可以作为区分反应中产生单一余核近心碰撞类型的一个量度。另一方面由于 $b_{th} \propto \sigma(b_{th})$ 所代表的反应类型的截面,因而在低能 b_{th} 的较大值,表明该反应在低能具有较大的全熔合或非全熔合截面。随着能量的升高, b_{th} 逐渐减小,并渐趋于一稳定值,说明形成非全熔合的截面在较高入射能下不断减小并接近于一个稳定值。这一稳定值显然同弹靶核的系统特性有关。

图5(中)给出当 $b \leq 6\text{fm}$ 及对所有 b 作平均的各反应点的线动量转移对入射能的依赖关系。作为比较而一同给出了服从 Viola 系统性的线动量转移^[10]与入射能半经验关系曲线 ($\langle l_{mt} \rangle = -0.092(E/u)^{1/2} + 1.273, (E/u)^{1/2} > 3.2 [\text{MeV}/u]^{1/2}$)^[11]。从图可见,总的平均线性动量转移在 $E/u \leq 90\text{MeV}$ 能区与 Viola 系统性给出的结果相当符合,表现为随能量升高而降低,

当入射能继续增加时则迅速表现出很大的差异,依系统性趋势,在达到 180MeV 时, LMT 几乎为零,即靶核对弹核的入射完全透明,几乎没有阻挡力。与此相应的 BUU 计算结果则表现出,随弹核入射能提高,靶核的阻止能力虽继续减小,但却不断减慢,渐趋于一稳定值。Viola 系统性正是从反应能区 $20\text{MeV} \leq E/u \leq 90\text{MeV}$ 的实验数据提取的半经验关系^[11],出现上述差异是可以理解的。

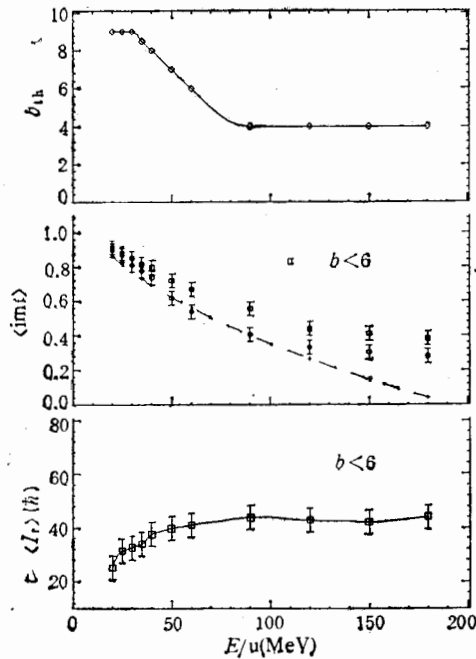


图5(上) $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 反应系统 b_{th} 对入射能 E/u 的变化(详见正文)

(中) $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 反应系统全熔合或非全熔合反应及所有反应类型对应的平均余核线性动量转移 $\langle l_{mt} \rangle$ 随入射能 E/u 依赖关系
虚线为 Viola 系统性给出的值。

(下) $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 反应系统全熔合或非全熔合反应所对应的反应靶核平均自旋 $\langle I_r \rangle$ 随入射能 E/u 依赖关系

为考察近心碰撞中入射能对系统转移到余核角动量的影响, 图 5(下)给出 $b < 6\text{fm}$ 时, $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 反应中转移到余核的平均角动量对入射能的依赖关系。低能 $20 \leq E/u \leq 60\text{MeV}$ 区域反应系统转移到余核中的角动量值随入射能的提高增长迅速, 当 $E/u \geq 60\text{MeV}$ 转移到余核的角动量值的增加趋于饱和。类似的现象在实验中也观测到, 有的作者^[12]把它归结为由于入射能的提高, 靶核对弹核的阻挡效果相对削弱, 使线动量转移大大降低, 减小了系统轨道角动量向靶余核的转移量。图 5(中)显示了与图 5(下)各反应点相对应 ($b < 6\text{fm}$) 的平均线动量转移对入射能增长的变化情形。可见, 随着入射能的升高 ($l\text{mt}$) 呈单调下降的趋势。由此, 反应余核角动量对入射能的生长的变化行为可以理解为是反应线动量下降及入射能增长这两种贡献相互竞争的结果。对应于较低能量部分的角动量转移量, 由于反应线动量转移值较高(约为 0.8), 因此余核角动量值表现出随入射能增加而增加的趋势。当入射能继续升高, 伴随线性动量转移减小导致的角动量转移的负增长同入射能提高而带来的角动量转移的增长总量相当, 两者相抵, 使得余核转移角动量的净增加趋于平衡。

4 结 论

借助 BUU 理论对 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 中能区反应的重要物理量进行了系统计算。着重讨论了 LMT 和靶余核角动量对碰撞参量及反应系统入射能的依赖关系。计算显示, 所有入射能量下, 余核角动量值对碰撞参量变化敏感, 在 $b < b_{ch}$, 随 b 增加而单调增加在 $b = b_{ch}$ 时达到最大值, $b > b_{ch}$ 时单调减小。其它物理量, 余核速度 v_r , 余核线动量转移 LMT 和角动量转移 AMT, 变化趋势相似, 当 $b < b_{ch}$ 时均对 b 变化不敏感, 当 $b > b_{ch}$ 则呈单调下降趋势。

此外, 理论给出的 LMT 随入射能变化, 在较低能域 $20\text{MeV} \leq E/u \leq 90\text{MeV}$, 与半经验 Viola 系统性相符, 在更高能量下 $E/u > 90\text{MeV}$, 两者呈现较大差异。

理论计算的余核角动量随入射能增加的变化行为, 给出了与实验值相一致的结果。较低能量下, 余核角动量随入射能增加呈上升趋势。当入射能量继续增加, LMT 的迅速降低, 使转移余核角动量增加达到饱和。

感谢靳根明同志的有益讨论, 感谢本所 VAX 计算中心工作人员的大力协助。

参 考 文 献

- [1] V.E. Viola, B. B. Back, K. L. Wolf, T. C. Awes et al., *Phys. Rev.*, **C26**(1982)178.
- [2] H. Morgentern, W. Bohne, K. Grabisch et al., *Z. Phys.*, **313**(1983)39.
- [3] M. N. Namboodiri, R. K. Choudhury, L. Adler et al., *Phys. Rev.*, **C35**(1987)149.
- [4] A. L. Warwick, H. H. Wieman, H. H. Gutbrod et al., *Phys. Rev.*, **C27**(1983)1083.
- [5] H. A. Gustafssen, H. H. Gutbrod, B. Kolo et al., *Phys. Rev. Lett.*, **52**(1984)1590.
- [6] G. F. Bertsch and S. Das Gupta, *Phys. Rep.*, **160**(1988)189.
- [7] J. Aichelin and G.F. Bertsch, *Phys. Rev.*, **C31**(1985)1730.
- [8] M. Betty Tsang, George F. Bertsch et al., *Phys. Rev.*, **C40**(1989)1685.
- [9] C. Gale, S. Das Gupta et al., *Phys. Rev.*, **C42**(1990)1577.
- [10] V.E. Viola et al., *Nucl. Phys.*, **A471**(1987) 53c.

- [11] G. La. Rana, *Nucl.Phys.*, **A407**(1983)233.
[12] 戴光曦、漆玉金等, 高能物理与核物理, **14**(1990)739.

**Application of the Modified BUU Model to Reaction Induced
by ^{16}O on ^{197}Au at $20\text{MeV} \leq E/u \leq 180\text{MeV}$: Dependence of
the Angular and Linear Momentum Transfer
on Impact Parameter and Energy**

Yan Dehong Dai Guangxi Luo Qingzheng He Zhiyong Qi Yujin

(*Institute of Modern Physics, Academia sinica, Lanzhou 730000*)

Received on May 28, 1993

Abstract

The angular and linear momentum transferred to target residue on 20 to 180MeV/u $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ system are calculated with BUU (Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck) model in which the angular momentum conservation is added. The dependence of angular and linear momentum on impact parameter and incident energy is discussed. The deviations between calculated values of $\langle lmt \rangle$ and those from viola system are compared. The results of the simulations suggest that the saturation of angular momentum transfer with incident energy increase mainly comes from the loss of capture ability of the target on projectile.

Key words BUU model, angular momentum conservation, linear momentum transfer, angular momentum of residue.