

# 重离子反应中的线性动量和角动量转移

R. K. Choudhury等\*

近年来,由于加速器能够提供10—100 MeV/A的中能重离子束,所以,又激起人们研究中能重离子核反应机制的兴趣。在这个能区,随着能量的增加单个核子的行为变得愈来愈重要,而对平均场效应就显得不那么灵敏了。弹核速度可分为在核物质中的声速和核子的费米速度,若超过了这两个特征速度就将导致两个重核间反应的不同行为。

在中能重离子碰撞中,线性动量和角动量转移测量能够提供大量关于核反应机制的资料以及中能区核反应机制的系统趋势。这些量之间的关联有可能给出核反应机制对分波的依赖关系。研究核反应机制的目的就在于发现在极限角动量和激发能条件下具有明确定义的核以及在这一条件下表征核的行为。

在中能区,基本上使用两项实验技术测量剩余核速度和裂变碎片角关联。迄今,人们已经完成了能量一直到84MeV/A的各种弹核引起反应的线性动量转移测量的实验,很好地研究了线性动量转移的系统性。图1(略)是这些测量中得到的实验结果的典型例子。Morgestern等<sup>(1)</sup>测量了14.5MeV/A  $^{20}\text{Ne}$  轰击各种靶核的余核速度分布。结果表明,如果靶核比弹核重,相应的速度分布的峰位低于全部动量转移速度分布的峰位,并且比用CASCADE统计蒸发程序计算的分布宽。对于 $^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$ 反应,没有观测到速度漂移,实验的分布比计算的分布要宽的多。分布的最可几速度小于相应的全部动量转移的最可几速度。

图2(略)给出了27MeV/A  $^{40}\text{Ar} + ^{238}\text{U}$ 反

应碎片角关联的测量结果。Rivet和Borderie等的工作表明<sup>(2)</sup>,重离子反应可粗略地分为有很少动量转移的周边碰撞和很多动量转移的中心碰撞。即使是中心成分的最可几动量转移也小于全部动量转移。

裂变碎片和向前方向发射的类弹碎片符合测量结果进一步支持了把重离子反应分为周边碰撞和中心碰撞的想法。例如,对于310MeV  $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ 反应,在与较重的出射粒子( $Z=4-6$ )符合测量中,观测到很大的折迭角分布,而与较轻的出射粒子( $Z=1,2$ )符合测量则观测到中心成分,这表明某些粒子是来自快过程,而另一些粒子不是由组合体系发射的就是由裂变碎片发射的。最小的动量转移表现为与周边碰撞的非完全熔合反应或大质量转移反应有关,而较多的动量转移与快粒子发射有关。

如果我们把注意力集中在中心碰撞上,就可以考察动量转移随弹核增加的系统性。图3给出了最近关于余核速度和角关联测量的综合结果<sup>(3)</sup>。当弹核能量超过8-10MeV/A时,转移的弹核动量与弹核的相对速度完全是线性关系。绝对地说,当单核子动量转移接近0.19GeV/C时,存在着某些最可几动量转移饱和的证据,但是,这个饱和值还没有完全确定。

值得注意的是,即使最可几动量转移与全部动量转移之差随弹核速度很快地增加,观测的分布仍然处在相应于全部动量转移的区域。这是不是反映了存在全部动量转移的熔合体系以及这些体系的激发能和温度特性,或者反映了低动量转移体系粒子退激发

\* 美国得克萨斯大学回旋加速器研究所

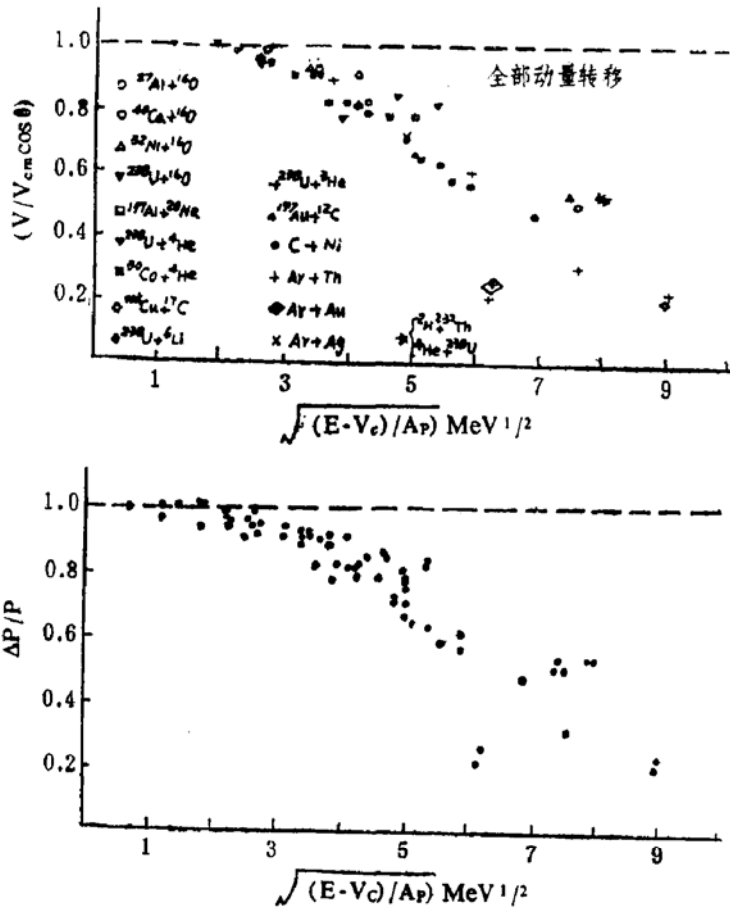


图3. 部分动量转移作为重离子弹核相对速度的函数。

的起伏？在这些测量中，激发能是令人感兴趣待探索的问题之一。另一个感兴趣的问题是，什么样的分波对产生这样体系作出贡献。用图示方法有助于概括地了解线性动量和角动量转移给中能碰撞重产物的对应关系。图4定性表示了占优势的核反应机制对碰撞参数的依赖以及这些量之间可能的关联。图4(a)表示相应于全部动量转移的中心碰撞和部分动量转移的周边碰撞。图4(b)表示小于全部动量转移的低 $l$ 窗存在的可能性。图

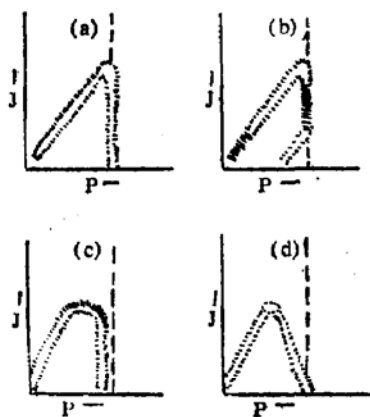


图4. 余核角动量与线性动量的关系。

4(c)表示对于任何分波都不能产生全部动量转移。图4(d)表示只有在中心碰撞时才产生全部动量转移。在典型的线性动量转移测量中，通常是测量余核速度分布在 $p$ 轴上的投影。

为了探讨起主导作用的反应机制对分波的依赖关系，可以使用若干种实验技术。例如，同时测量裂变截面和动量转移就是一种能够提供某些信息的方法。Huizenga等<sup>(6)</sup>采用这种方法研究了 $^{20}\text{Ne}$ 轰击各种靶核的相互作用。根据经验分解出反应平面测量的折迭角分布。余核分布和碎片角关联函数，从而获得了全部动量转移的截面。结果与动力学模型计算值符合。如果假设这个截面仅仅相应于最低分波，就可以进一步导出贡献给TMT和大质量

转移事件的分波范围。在能量为 $20\text{MeV}/A$ 区域，Gavron等<sup>(7)</sup>由测量激发函数和动量转移确定了占优势反应的分波范围。

讨论关于贡献给各种非完全融合过程分波的某些结果是有兴趣的。由于这些过程依赖于没有或有很少重叠的 $l$ 窗的截面。因此，确定反应过程对分波的依赖关系是困难的。一些理论模型预言了这些反应过程对应的碰撞参数所处的区域，但是，它和由截面导出的某一特定反应对应的碰撞参数范围是完全不同的。

Wilczynski等<sup>(8)</sup>，Udagawa和Tamura<sup>(9)</sup>以及Homeyer<sup>(10)</sup>已经提出一些非完全融合反应模型。Udagawa和Tamura模型是一种最完善的理论处理方法。但是，它还没有广泛地应用于像本文所讨论的重离子反应中，所以，这里仅限于其它两个模型与实验的比较，Wilczynski模型作为一个低能模型由核势确定了给定质量转移对应的分波范围。而Harey·Homeyer模型类似高能擦掉-蒸发

模型，实际上是一个几何重叠模型。确定这些模型在中能区的适用范围是有用的。以上两个模型在解释实验结果方面都取得了某些成功。例如，在6-10MeV/A能量范围内，各种 $\gamma$ 多重性测量结果和Wilczynski模型预言的平均角动量转移是符合的<sup>(8)(11)</sup>。此外，能量超过20MeV/A  $^{20}\text{Ne} + ^{187}\text{Au}$ 反应出射粒子的激发函数和Harey-Homeyer模型预言的结果也很好的符合。值得注意的是，这个模型成功地预言了较高入射能量的截面。

使用如图5(略)所示的实验装置，我们测量了  $310\text{MeV}^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$  反应的非完全熔合过程的角动量转移，以便对理论模型进行仔细地检验。实验时，在 $\theta_L = 12^\circ$  (靠近擦边角)用符合方法测量了出射粒子  $Z = 3 - 9$  的平均的总 $\gamma$ 能量<sup>(12)</sup>。出射粒子的能谱如图6所示，当出射粒子质量数接近弹核质量数时，

均总 $\gamma$ 射线能量导出转移的角动量。用图8给出的校准曲线，根据经验上的系统性<sup>(13)</sup>导出的。标定我们校准结果和 Sarantites等<sup>(14)</sup>结果的误差是困难的。平均角动量在2-3 $\hbar$ 范围内是符合的，表明这些结果是可信的。

图9表示了测量的转移角动量分布(用 $\theta_L = 12^\circ$ 的截面权重)。下面我们给出转移角动量的最可几值与Wilczynski模型，Haravey-Homeyer模型预言值的比较。图10和图11表示对于  $310\text{MeV}^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$  反应根据模型计算的角动量 $l$ 分布。图中画出了熔合反应以及出射粒子是 $^4\text{He}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ 反应的分波分布。两个模型计算的贡献给熔合反应的分波是相同的。而贡献给非完全熔合反应的分波是完全不同的。对于给定的非完全熔合反应，Haravey-Homeyer模型预言的最可几分波比Wilczynski模型大的多。图12(a)(略)-(c)给出了我们的实验结果和模型计算值的比较。图12(a)(略)表示导出的反应产物的角动量与用两个模型计算值的比较。实验点表示相应于出射粒子最可几能量的角动量。假设发射粒子具有束流速度，然而，在比较中产生的严重问题可能是，模型是对初始出射粒子计算的，而实验数据

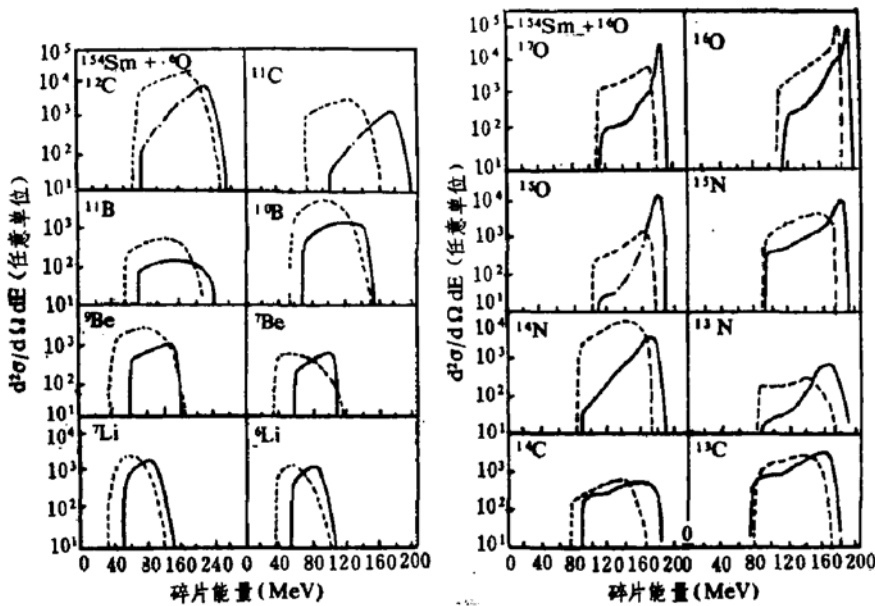


图6. 出射粒子能谱。虚线表示180MeV $^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$ ，实线表示310MeV $^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$ 反应。

最可几能量接近弹核能量。随着弹核和出射粒子质量数之差增加，峰值能量和相应的束流速度的出射粒子能量差也增加了。20MeV/A $^{16}\text{O}$ 轰击其它靶核时，也观测到类似的能谱。当弹核能量为180MeV和310MeV时，图7(略)给出了作为能量函数的测量的平均总 $\gamma$ 能量。实验中最关键的问题是，由测量的平

是对观测的出射粒子，实际上，它并不等于碰撞早期阶段迁移出的全部质量。为了修正失去的质量，我们使用了Back等<sup>(4)</sup>的310MeV $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ 反应的数据。通过碎片和出射粒子符合测量能够证明，初始弹核动量不等于出射粒子动量与余核动量之和。这说明还有没探测到的粒子。从它们的数据能够确定丢

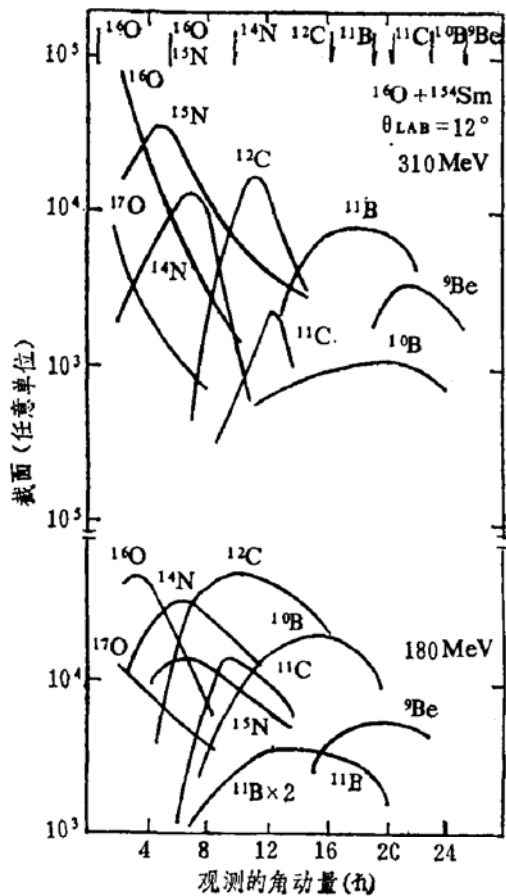


图9. 观测的出射粒子角动量分布 ( $\theta_L = 12^\circ$ )。

失的动量。在本实验中，如果我们假设丢失动量的几率与Back等人的实验是相同的，那么我们就能够修正实验点；如果没有丢失质量，这些实验点就反映了观测的角动量。丢失的质量或者是由于出射粒子连续地粒子发射或者是由于组合体系发射快粒子所引起的。似乎前一种情形更合乎逻辑。

图12(b)表示测量的角动量与模型的比较。对数据进行了丢失动量修正之后，实验结果与Wilczynski模型的符合比Harvey-Homeyer模型的符合好的多。更加仔细地比较，我们还注意到，远离弹核的出射粒子的最可几速度小于束流速度与模型相比有较大的动量损失。图12(c)给出了与丢失动量有关的实验值和随着出射粒子质量减少而增加动量转移的模型计算值比。实验和计算的转移动量之比可以看作实验确定的分波与模型预言的分波之比。由图12(c)可以看出，实验

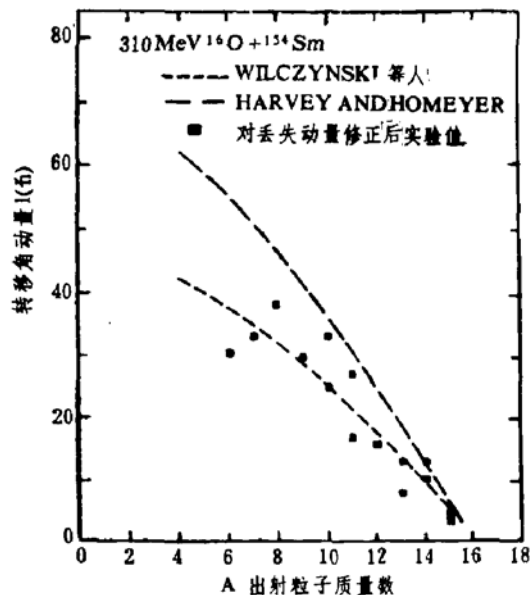


图12(b). 对于310 MeV  $^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$  反应实验结果与理论模型的比较。

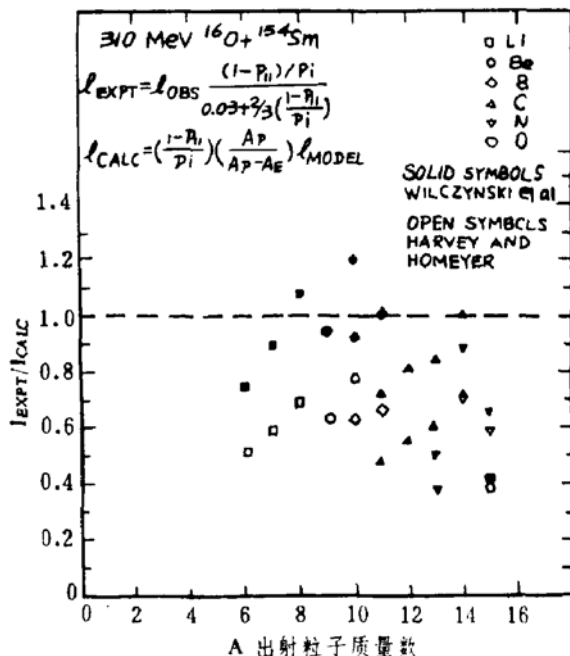


图12(c). 对于310 MeV  $^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$  反应实验结果与理论模型的比较。

结果与Wilczynski模型预言值符合是相当好的。在解释出射粒子激发函数方面，Harvey-Homeyer模型取得成功表明，还应做进一步研究，以澄清这一结果。确定所包括的分波是对提出的任何模型一个严格的检验。

M. Namboodiri在这个会议上报告了MPI, LLL, BARC, Geissen大学和Texas大学等单位合作完成的实验。他们用中子与 $\gamma$ -射线符合方法测量重核速度以避免对丢

失动量的修正。在MPI和GSI,用晶体球研究了 $248.9\text{MeV}^{19}\text{F} + ^{154}\text{Sm}$ 反应。根据余核产生机制对分波的依赖关系,试图从实验数据导出中子多重性,给出逐个事件重新构成的分波分布。

TAMU, LLL, ANL和MPI等单位在能量为19和35MeV/A时正在探索与高能粒子 $^{14}\text{N}$ 关联的一组余核。实验中,用时间余行谱仪作起始探测器, Si作终止探测器测量余核速度分布。图13(略)表示 $261\text{MeV}^{14}\text{N} + ^{154}\text{Sm}$ 反应的速度分布 $\frac{d^2\sigma}{V^2 d\Omega dv}$ 。图中还与统计模型

型计算的速度分布做了比较<sup>(17)</sup>。实验和理论计算的分布宽度完全相同,但是,在相当低的速度时,实验分布的峰值和早期关于动量转移系统测量结果是一致的<sup>(6)</sup>。由于存在相应于全部动量转移的余核,就有可能存在全熔合反应。为了进一步研究这个问题,需要测量余核的质量分布并且与根据全平衡假设计算的质量分布做仔细地比较。不幸地是,由脉冲高度亏损和等离子因素的影响,获得低能反冲核精确的质量分布是很困难的。图14(略)表示 $35\text{MeV/A}^{14}\text{N} + ^{154}\text{Sm}$ 反应的分布 $\frac{d^2\sigma}{V^2 d\Omega dv}$ 。图17(略)表示由时间和能量测量导出的质量分布。为了检验我们的方

法,实验结果还与用放射化学方法测量的 $420\text{MeV}^{12}\text{C} + ^{154}\text{Sm}$ 反应的质量分布做了比较(图15)。在我们的情况下,由于不能准确地确定脉冲高度亏损造成了较宽的质量分布。

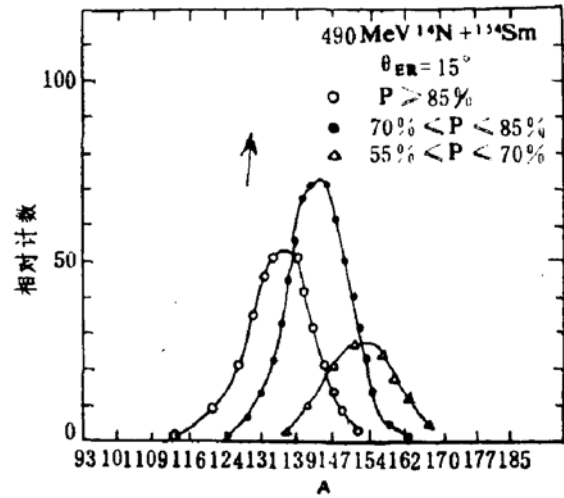


图16. 三个部分动量转移窗的质量分布。

图16给出了由三个不同的动量转移区域导出的质量分布。随着动量转移和激发能增加,蒸发粒子的数目也增加了,统计模型计算将确定实验的趋势是否与具有全部动量转移的核温度的复合系统退激发一致。

(参考文献略)。

(刘国兴译自Proceedings of the International Conference on Nuclear Physics, India, 1984. P. 293.)