

# 重离子引起的核反应

R. Bock, H. Emling, K. D. Hildenbrand

当能量高得足以克服相排斥的库仑力的时候,被加速的离子和静止的靶核间就可以引起核反应。两个核会互相接触甚至穿透,它们可以合成一个复合系统或者在一定的相接时间内交换了大量的中子和质子以后作为不同的核而又分开。因为它们是形变的和高激发的,它们将发射各种放射性和核子而退激,或者甚至会碎裂为一系列的轻碎片,这些碎片最后能在探测系统中被观察和鉴别。

UNILAC提供的最大能量(所有的离子为 $17\text{MeV/u}$ )超过了约为 $5\text{MeV/u}$ 的相互作用阈,甚至对最重的天然的弹—靶组合,如铀打铀,也能满足这种条件。因此能够研究各种可能的弹核和靶核之间的各种反应和它们与束流能量之间的关系。与质子和 $\alpha$ 粒子等轻粒子引起的核反应相比,重离子有两个特点。首先,在参与的核内可积累大得多的激发能,其次,大块的核和与之相近大小的核的碰撞一般与更大的角动量联系在一起。因此在这些反应中人们可以研究高激发(热)核系统的行为和作用在它们之上的巨大的转动力。

在美国Berkeley的BEVALAC加速器所提供的几百 $\text{MeV/u}$ 至 $2\text{GeV/u}$ 的能区内发生

了很奇异的现象。最有趣的是中心碰撞,这时能量的积累是如此之大,以至于相碰的核分解为单个的核子。在这种碰撞的第一阶段,核之间有强烈的相互作用,使得核密度高出正常值的几倍并且会产生惊人的过程,因为低能时核物质是不可压缩的液体。因此,这个能区中的碰撞将提供研究核状态方程和核物质在高温高密度之下的相变的可能性。

本文的第一章将讨论能量离位垒不远甚至低于位垒的离子引起的激发核,以研究它们的内部结构。第二章讨论相互作用系统平衡时的反应机制问题。最后,在第三章中讨论了极端条件下的核物质问题。

## 重离子核谱学:快转动核

在卢瑟福的著名的实验提出了原子核的结构以后,深入原子核的内部和发现它的内部结构自然是物理学家研究的目的。原子核是一个可多达250个组成物的物体,这些组成物是核子,它们聚集在 $10^{-37}\text{cm}^3$ 的狭小的体积内,受到核力和电磁力的作用。探索核的基本性质和这些组成物之间复杂的相互作用的基本规律过去是,现在仍然是对实验家

GSI 达姆施塔特,联邦德国

### 参考文献

- [1] 卢希庭主编,原子核物理, p.92, 原子能出版社, 1981年
- [2] A. Sandulescu et al., Sov. J. Part. Nucl. 11, 528 (1980)
- [3] H. J. Rose and G. A. Jones, Nature 307, 246 (1984)
- [4] S. Gales et al., Phys. Rev. Lett, 53,

- 759 (1984)
- [5] P. B. Price et al., Phys. Rev. Lett. Vol. 54 No. 4, 297 (1985)
- [6] S. W. Barwick et al., Phys. Rev. Lett. 将发表
- [7] D. N. Poenaru et al., J. Phys. G: Nucl. Phys. 10, L 183 (1984)
- [8] Y. J. Shi and W. J. Swiatecki, Preprint LBL-18349 (1984)

和理论家的要求。

核的“壳”模型的发展是认识过程中的重要的一步,当时认为核子像独立的粒子那样在围绕一个共同的中心的轨道内运动,这和电子围绕原子核,行星围绕太阳运动一样。核物理学家对这样的系统是熟悉的,他们觉得基础是可靠的。可是不久就有事实说明除独立粒子运动之外,还存在集体现象。像从宏观系统所知道的那样,在一定的条件下集体模式对核的行为还能起到决定性的作用:其中的超流性的存在、核表面的稳定形变和振荡、二极振动和相干的转动运动等都能被观察到。与核的单粒子壳模型相对应,核的集体模型把核基本上描述为一种均匀的、带电的、不可压缩的量子流体。接着单粒子自由度之间的复杂的相互作用、相干模式、特别还有不同的核相随核子数如何演化的问题等吸引了核物理学家的注意力。

新型的重离子加速器的发展在核结构研究中打开了进入一个新的领域的门:两个重离子间的任何一种反应都必然包含大的角动量转移,使得反应产物处于快速转动状态(高自旋态)。过去的十年间高自旋态是核物理的重要领域,现在,在外加转动力的影响下可以研究核的内部结构。有两种典型的产生转动频率为 $10^{21}/\text{S}$ 量级和与之对应的有 $50\hbar$ 或更大的角动量(“自旋”,核自旋是以 $\hbar = 6.6 \cdot 10^{-22} \text{MeV} \cdot \text{S}$ 为单位的)的快速旋转核的方法。

### 高自旋态的产生模式

在阈能以下(一般为4至5 MeV/u),在散射过程中两个碰撞离子并不互相接触,因此两核之间只通过电磁场发生相互作用(见图1),通过库仑场的激发(库仑激发)提供一种产生冷的快速转动核的手段,因为转动能几乎用去了所有的激发能。能够转移到形变靶核的角动量强烈地依赖于弹核的核电荷数 $Z$ (见图2)。因而在六十年代,随着串列式静电加速器的建造,这方面的工作有明显的增加。这类加速器可将 $Z < 25$ 的

核加速到足够高的能量。可是直到1976年UNILAC加速器投入运行后,库仑激发研究方面的最终的设想才得以实现,这台加速器能将 $^{208}\text{Pb}$ 束流加速达到对自然界存在的所有元素的库仑位垒的能量。

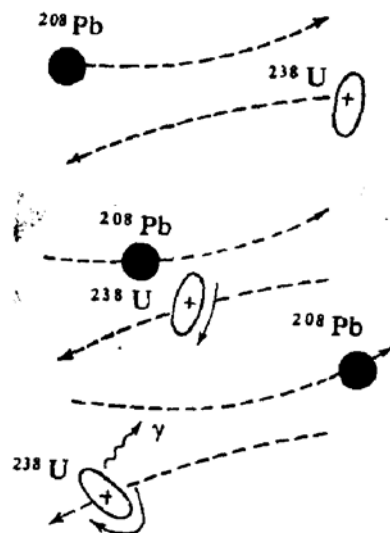


图1 库仑激发过程的示意图。 $^{208}\text{Pb}$ 弹核沿经典双曲线轨道运动,甚至在最接近距离时两核仍在核力范围之外。强形变的 $^{238}\text{U}$ 靶核在弹核电场的影下开始转动。这是质心系中画的图。

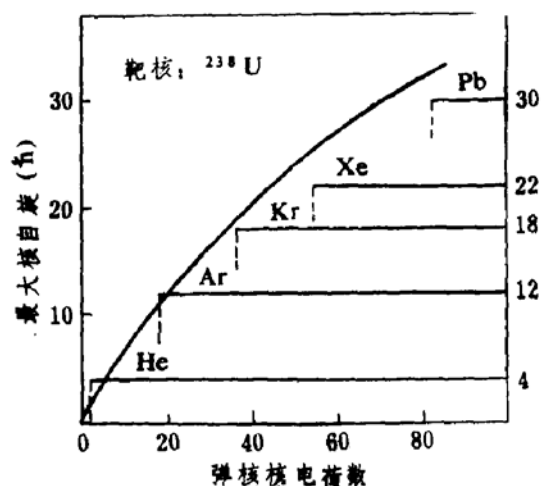


图2 用不同核电荷的弹核的库仑激发在 $^{238}\text{U}$ 靶核中可得到的最大核自旋。实线为理论预言值,水平线表示用不同弹核在实验中达到的自旋值。

另一种可能产生激发核的过程是将两个离子熔合成复合核。在这情况下,束流能量必需超过库仑位垒。复合核的高的激发能和自旋通过发射轻粒子和 $\gamma$ 射线释放出来。

在下面几节中我们将简单地总结一下用 $^{208}\text{Pb}$ 和其他重离子束以库仑激发完成的核结构的研究。

### 大形变核

在核素图中有两个显著的区域，稀土和锕系元素区。这两个区内的核明显地不是球形的：它们具有轴对称的长椭球形变（雪茄形）。在这两个区内高自旋态只能用库仑激发来形成，因为中子过剩所以不能在熔合反应中形成丰中子的稀土同位素，而通过熔合形成的锕系元素对裂变是不稳定的。用Pb束在稀土同位素中可得到高达 $22\hbar$ 的自旋，在稍低于位垒的轰击能之下在锕系核中可得到的自旋高达 $30\hbar$ 。这些研究工作的主要目的是弄清单粒子和集体自由度的各自的规律性，特别是转动可能引起核相变的问题。图3是至今所研究的最重的核 $^{248}\text{Cm}$ 的退激 $\gamma$ 射线谱。它表明这些核有强的集体性，核的自旋来源于整个核的相干转动。而以前在锕系核中已知的最高自旋大于 $20\hbar$ ，稀土同位素的已知最高自旋为 $14\hbar$ ，那时集体模式还是不能令人信服的。在高自旋时单粒子型的激发参

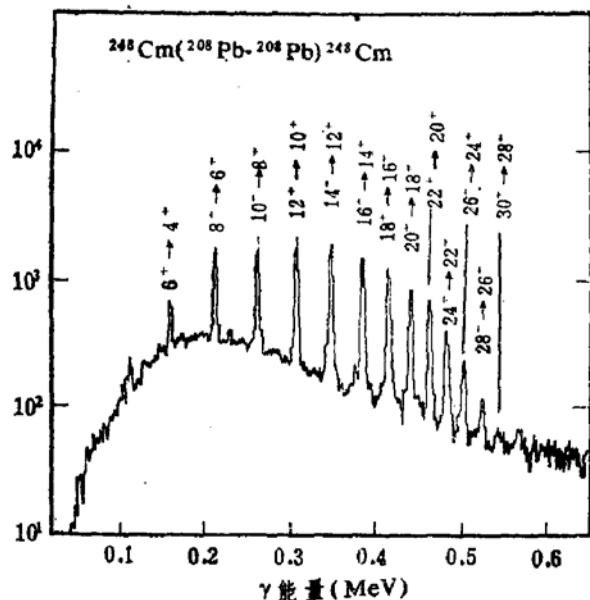


图3 以 $^{208}\text{Pb}$ 激发 $^{248}\text{Cm}$ 后观察到的退激发 $\gamma$ 射线谱。由 $^{248}\text{Cm}$ 的高自旋态到基态的退激是通过发射一系列的 $\gamma$ 射线，每次带走二个单位的角动量。 $\gamma$ 射线谱的有规则结构表明这是集体转动。

加竞争，反过来可以影响集体自由度，例如已经观察到了由轴对称到非轴对称（三轴）形状的跃迁。

### 过渡核

这些核的特征是弱的集体结构；在核素图上它们位于球形核和形变核的边界附近。由于它们具有低的集体性，甚至用Pb束也只能将它们激发到中等大小的角动量（典型的为 $10\hbar$ ）。可是就在这个自旋的范围内从库仑激发过程的细微的研究几乎可以得到它们内部电磁结构的完整的信息。在相当低的自旋和激发能时，这些核显示出不同核形状的共存。特别是在质量数接近于 $A \approx 100$ 和 $A \approx 200$ 的小岛内的核产生三轴形变，很长时间内一直是个问题，现在已经确认了。

### 球形核

在高的转动频率下，球形核的行为与形变核完全不同。它们不是相干地转动，反应带入的角动量（例如熔合反应）表现于绕任意轴转动的特定核子轨道角动量取向。根据这种‘取向’组态的特性预言了长寿命的高自旋态。通过广泛的研究，在 $Z = 64, N = 82$ 附近的稀土核岛中发现确实存在这样的长寿命态，高角动量寿命长至几百毫微秒（1毫微秒 =  $10^{-9}\text{s}$ ，请注意，在形变核中高自旋态的典型寿命为 $10^{-12}\text{s}$ ）。这个结果激励了对非集体高自旋态的核谱学的详细研究。

## 低能重离子反应

### 重离子之间的熔合

当能量超过互作用位垒时，两个核相互接近，只要它们之间有一定的重叠就可以熔为一个复合系统。事实上，只要两者之中至少有一个是轻核，那末在位垒附近或稍高于位垒时这样的过程就是主要的反应道。由于这个原因，多年以来，轻核或中重核之间的熔合机制被研究得相当多，这个过程在理论上也得到了很好的解释。复合核本身通常处于激发状态，因此它常常会蒸发核子或者甚至

一些轻的核(例如氦核和 $\alpha$ 粒子)。假如激发能很高,总的角动量太大,生成物就不稳定,会裂变或碎裂成两块碎片(熔合一裂变)。就其本身而言,熔合意味着复合系统失去对其形成史的记忆,它的最终归宿——譬如说衰变——只决定于复合核本身的性质,而与形成它的具体反应无关。

加速重核的可能性重新激起了人们对熔合过程的兴趣,不仅因为熔合能形成奇异的核和非常重的核,并研究它们的退激发和内部结构(如上一章所说的那样),而且还因为两个重的大小相近的实体互相穿透和混合本身就是一个非常引人注意的过程。

近年来,人们认识到熔合过程,特别是位垒附近的熔合,不能再用在早期的熔合实验中所用的模型来进行解释。像核的形状(球形的或者变形的)那样的特殊的静态特性与核的动力学性质——如与核的软硬和可形变性有关的核表面的小的振荡——一样起作用。所有这些都能在位垒或稍低于位垒处强烈地影响熔合的几率,因此实验中即使对稍有不同的靶核或弹核也会观察到很大的差别,其特点显示在图4中。它给出了作为质心系动能( $E_{cm}$ )函数的熔合几率(截面)。为了去掉一些无关紧要的影响并使读者将注意力集中于本质的差别,两个坐标都进行了归一。对Ar打Sn的不同的同位素 $^{112}\text{Sn}$ 和 $^{122}\text{Sn}$ , Ar打Sm的同位素 $^{144}\text{Sm}$ ,  $^{148}\text{Sm}$ 和 $^{154}\text{Sm}$ 的测量结果用不同的符号标出。

首先,熔合不像预期的那样从一个非常确切的能量开始的,这在前面已经说过了。量子力学将熔合描述为隧道过程,只有在位垒区中才有很迅速的下跌。确实,在一个很小的能区内截面下降了好几个数量级(纵轴是对数坐标)。实线是以能很好地描述 $\alpha$ 引起的熔合的模型对这些系统的计算结果。这里很明显,只有高能时是相符的,在能量降低时截面相差好几个数量级。这个差别是由小的表面振荡引起的,对较重的核来说甚至基态都有这种表面振荡。假如在理论中考虑

这种效应,可以对Sn的不同同位素和 $^{144}\text{Sm}$ 上的截面得到很好的描述,可是在Sm同位素之间的差别至今仍不能得到解释。在相同能量下,Ar同 $^{154}\text{Sm}$ 的熔合几率要比同 $^{144}\text{Sm}$ 的高几个数量级,后者比前者要少十个中子。其原因是较重的同位素有强的形变,呈橄榄球状,如果对所有的随机的空间取向积分的话,会导致较大的核的平均半径,用一个弹核来击中这样的核并使之熔合的几率就会增大。直至几年以前还未意识到的实际上会产生更严重的后果的情况是:两个碰撞的核在没有达到一定的距离时不可能发生熔合,只有从这一点开始核吸引力才能克服库仑排斥力使双核组合成为一个复合系统(在通常用来描述物理过程的势能图的框架中,系统必需经过“鞍点”)。在非常重的系统中这个“无返回距离”可以小于决定相互作用位垒的核接触半径。因此,除非以足够高的能量使两核达到更接近的距离,否则在熔合还被禁止的时候其他核反应早就会发生了。为了打开熔合反应道,需要一个超过位垒的额外的能量。一旦完成了熔合,这个额外能量将表现为附加的激发能,这将大大地降低复合核系统的存活而不再裂变的机会。为了证实这个先由理论预言的效应,实验上作了许多努力。图5给出了许多数据,每个点表示每一系统测得的熔合位垒,画出了实验测到的熔合位垒及计算的相互作用位垒之间的差 $\Delta B$ 。正的 $\Delta B$ 表示熔合位垒高于预言值,或者说对相应的系统的熔合需要额外的能量。

横轴是“有效的可裂变性参数” $X_{eff}$ ,它是弹核和靶核的质子数和中子数的函数,这样就可以把不同的系统汇合到同一张图中。在两核的质量数 $A=100$ 附近的 $X_{eff}$ 值时 $\Delta B$ 开始增加。对更重的系统(不管是靶核还是弹核哪个更重都一样,否则情况又不同了)熔合越来越困难。这对想用重的对称的靶—弹组合的熔合来合成非常重的核的实验带来了严重的后果。

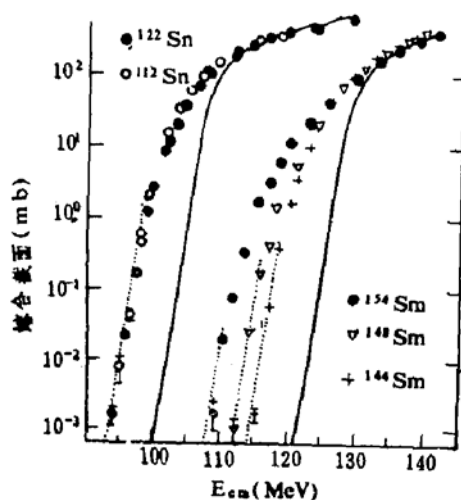


图4 对 $^{40}\text{Ar} + ^{112}\text{Sn}$ ,  $^{112}\text{Sn}$  和  $^{40}\text{Ar} + ^{134}\text{Sm}$ ,  $^{148}\text{Sm}$ ,  $^{154}\text{Sm}$  系统的熔合截面激发函数。虚线是按点画的, 实线是用经典的隧道效应计算的 (见文)。

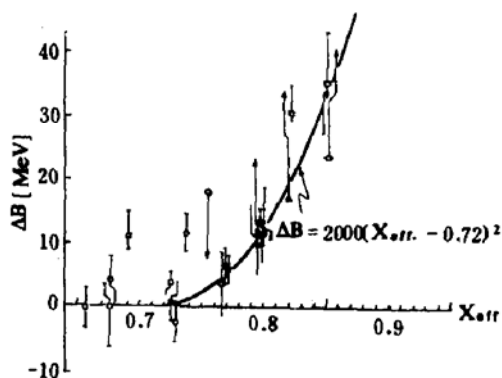


图5 实验熔合位垒比较图。每个点表示一定的靶-弹组合。 $\Delta B$ 是测得的位垒与计算的相互作用位垒之差, 正的 $\Delta B$ 表示系统熔合所需的额外能量。横轴是有关的靶核和弹核中子数和质子数的相关量。

### 耗散碰撞

上一节中讨论的阈能仅是形成复合系统的必要条件。实际上, 当两核的总质量超过一定的值时, 它们的熔合变得越来越不可能了。那样的重复合系统太不稳定了, 即使没有转动力的作用, 它们也没有足够长的时间来产生混合, 只因为对这样大的核的组合不存在稳定的组态。因此通过所谓耗散过程, 熔合截面的相对值逐步减小。

在加速器能给出重离子弹核以后, 这种反应机制才被人们所发现。这与熔合过程相反, 十五年以前人们对此一无所知。图6中大致地画出了耗散碰撞的不同阶段。中间系

统一直是双核系统, 由于非中心碰撞所带入的角动量必需守恒, 所以系统要转动一段时间。然后两个碎片再分开, 通过发射中子、带电粒子或 $\gamma$ 射线而退激。整个过程不应与熔合-裂变, 即形成复合核系统后的瞬发裂变相混淆。在复合的情况下, 中间的混合系统转动许多圈, 并在 $10^{-16}$ 到 $10^{-18}$ s后发生裂变。而现在所说的中间系统转动少于一周并约在 $10^{-21}$ s后就重新分开。

这个过程的最突出之点是碰撞过程中的动能损失。这能够将质心系中碎片的相对运动速度降低到库仑排斥的相对分离速度的这样一个最可几值 (否则它们是完全不能再分开的)。理论上, 动能的损失被归咎于在碰撞中两核之间的摩擦力的作用。这部分损失的动能被表现为碎片的激发能, 因此这类反应是已知的在核内积聚热量的最有效的途径。正是由于能量阻尼的这种耗散性质, 整个反应机制才得以命名为耗散碰撞。

不仅相对动能发生耗散, 在碰撞的第一阶段, 还是在摩擦的影响之下, 两个核互相滚动和滑动, 最后粘贴在一起, 一部份与相对运动有关的角动量不可逆地转化为内部的转动, 这使分离后的终核发生转动。

这类反应的一个有趣特点是大部分为统计性的核子转移。中子和质子通过两核之间的相接区很快地在两个方向上扩散。这可以与在不同温度下充以不同混合比的两种气体的容器相类比 (如果容器不是一样大的话, 气体分子的总数还是不同的)。对靶核和弹核内的中子和质子数之比也发生类似情况。但是也可能, 特别是在非常轻的核和重核相互碰击时, 会与此不同。在相接 $10^{-22}$ s的时间以后, 两个碰撞核的中-质比就变成一样的了。这当然是物理学中所观察到的最快的平衡过程之一。

这个过程结束之后, 进一步的核子交换主要是统计性的了, 最终产物的质子数和中子数可不同于靶核或弹核, 可是所有产物的平均值还是接近于靶核和弹核的值。因此所

观察到的质量谱或元素谱显示出有两个组成部份, 一个峰在对应的靶核值附近, 另一个峰在对应的弹核值附近, 因此人们把它们称之为类靶和类弹反应产物。这些分布的宽度随着动能损失的增加而加宽, 从而随着激发能的增加, 就可以有机会观察到与靶核或弹核更为不同的产物。这样的核素分布能遍及核素图的相当大的部分, 尾巴内会有人们感兴趣的产物, 耗散碰撞确实是产生奇异核, 特别是丰中子奇异核的有效的方法。

近年来得到了许多有关耗散碰撞的细节, 绝大部份实验是在超过位垒几个MeV/u的束流能量之下完成的, 这完全是由于现有加速器的限制。已经弄清, 反应过程主要是两体的, 即在出射道只观察到两块重的碎片。可是如果靶核或弹核有一个是可裂变核, 例如是铀, 那末只要6MeV的激发能就能使之裂变。因为在反应产物中很容易达到几百MeV的能量, 所以很大部份的类铀产物会发生裂变, 这种情况下会观察到三个产物, 两个裂变产物和另一个原始产物(三体反应)。然而, 可以表明裂变过程完全是继发性的, 就是说两个原始碎片互相分离接着发生裂变。

UNILAC加速器提高能量第一次使这些研究延伸到更高的能区。早在12MeV/u时就在不太容易裂变的核的碰撞中观察到了相当大的三体事件的比分。使人惊奇的是裂变不再是明确的继发过程了, 原始碎片的碎裂发生在另一碎片的附近, 它的发射方向和能量都受到了影响。在更高的能量下, 这种趋势是否会继续发展为中间复合系统同时碎裂为三体的过程, 在目前这还是尚未解决的问题。三体过程的存在大大地加宽了观察到的质量谱和元素谱。图7给出了14.7MeV/u的 $^{92}\text{Mo} + ^{92}\text{Mo}$ 反应中所测到的元素谱, 这是对所有的出射能量积分以后的谱。在 $Z = 42$ 附近的主峰对应于类靶、类弹的原始产物(对称碰撞系统)。对完全的两体反应中谱应该

对 $Z = 42$ 对称, 但实际上并不这样。大量的产物一直延伸到碳( $Z = 6$ , 更轻的产物在实验中被切除了), 这表明三体出射道占了相当大部分的截面。

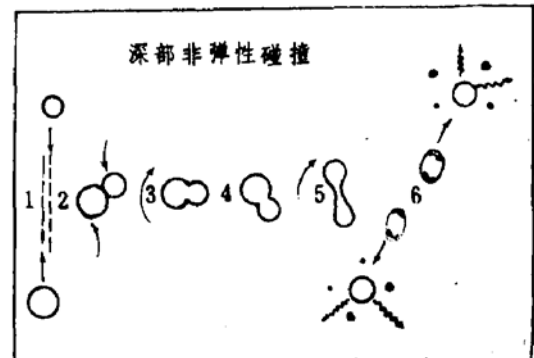


图6 耗散碰撞示意图: 靶核和弹核相互接近(在质心系中), 形成双核系统, 在非中心碰撞所引入的角动量之下转动。短时间以后, 碎片互相分离, 激发碎片大体上仍然是类靶的和类弹的。进一步的解释见文。

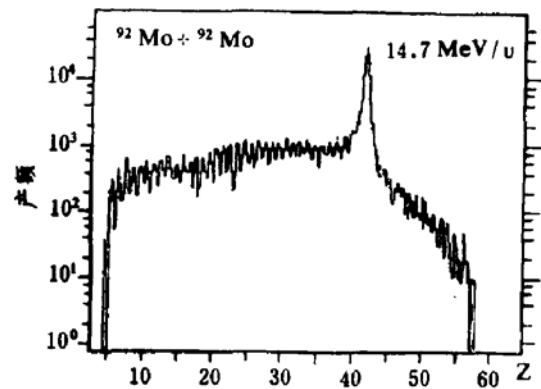


图7 14.7MeV/u  $^{92}\text{Mo} + ^{92}\text{Mo}$ 反应中测得的元素谱。在完全的两体反应中分布应对称于 $Z = 42$ , 即弹核及靶核的原子序数。大量的轻元素产物(每个峰表示一个元素)是由三体碎裂过程造成的, 这种过程在能量超过12MeV/u时起作用。

(未完待续)

(诸永泰译自Interdisciplinary Science Reviews, Vol.9, No.4, 1984, 305—310)