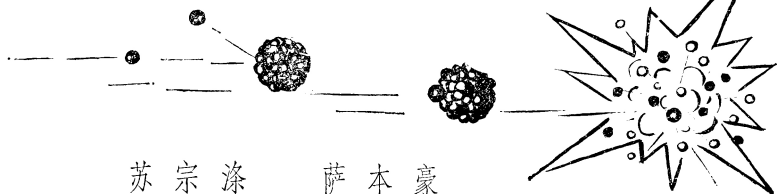


重离子核反应浅说

苏宗涤 萨本豪



1919年卢瑟福成功地用天然放射性元素放射的 α 粒子轰击氮,得到了氢核与氧核。这是人类历史上第一次用人工方法分裂原子的核反应实验。整整六十年过去了,六十年来核反应的实验技术有了很大进步。早期只能用天然放射的 α 粒子作为轰击原子核的“炮弹”,三十年代初,加速器建成后用加速的带电粒子如质子、氘、 α 粒子等作“炮弹”,克服了早期实验在品种、能量和强度等方面的局限性。特别是1932年中子的发现,由于它不受库仑位垒的阻挡,用它作“炮弹”为人们找到分裂原子的钥匙,六十年来,利用中子、质子、氘、氚、 α 粒子、电子及 γ 光子等作“炮弹”进行了数千计各种类型的核反应,使我们对原子核的认识有了很大的深化,裂变现象的发现为人类开拓了新的能源,核反应在现代科学技术中得到了日益广泛的应用。

近二十年里,用高能粒子和重离子作“炮弹”,标志着核反应的研究进入了一个新的阶段。本文仅介绍重离子核反应的基本轮廓以及那些十分有趣的课题。为方便起见,先从通常的核反应谈起。

(一)

通常的核反应是用一定能量的粒子束流(例如前面提到七种中任一种)轰击原子核(又叫靶核),然后观察它所发生的变化以及出现的种种现象。例如当入射粒子的能量部分或全部交给靶核,靶核就被激发到一定的激发状态,提供了研究原子核激发态性质和运动形态的手段,从中可以得到原子核结构的许多知识。当然原子核的激发态都是不稳定的,通过放出 γ 光子和其它粒子释放能量,有的甚至分裂成二、三块,这就是裂变。在核反应研究中通常总是观测放出了什么粒子(即反应产物)?出射粒子的能量分布(即能谱)怎样?以及空间分布(也称角分布)如何?在反应产物中,如果出射粒子和入射粒子是同一种,而且它们的能量也相同,这样一类反应叫做弹性散射,而其它情况统称为非弹性反应。当然,反应中放射不同能量各种粒子的反应几率是不一样的,为了标度各种反应几率的大小,

经常用截面这个物理量来表示。

通过各种类型核反应的研究,逐步认识了核反应的规律,以及它的整个物理图象(也叫反应机制)。虽然在几十年里做了数以千计的各种核反应,尽管入射粒子的品种和能量不一样,受轰击的靶核和出射粒子各不相同,但从反应机制上看来,大致可分成两类:一类是入射粒子仅与靶核中少数核子发生碰撞并交换能量,在很短的时间内(这个时间大约和粒子穿过一个原子核的时间差不多,约 10^{-22} 秒)又有粒子从核中被碰出。这类反应叫做直接反应。另一类反应是入射粒子和靶核内核子进行多次碰撞,充分交换能量,形成了统计平衡的中间阶段——复合核,在经历了“相当长”的时间以后(可比前一类反应长百万倍),能量又集中在某个粒子上,使它可能从核中飞出。这类反应由于经历复合核阶段,所以称为复合核反应。这类反应可用受热液体的蒸发来比喻,入射粒子打进靶核可以看作液体受热,而由复合核放射粒子又像水分子从受热液体中蒸发一样。上述两类反应除反应时间有很大差异之外,在能谱和角分布上的特征也是很不相同的。当然在一个实际的核反应中,情况往往很复杂,两类反应机制可能同时存在而又互相竞争。从六十年代以来,从实验中还观察到一种新的反应机制,这就是在趋于统计平衡过程中不断放射粒子。这种反应称为预平衡发射。

(二)

重离子核反应通常是指比 ${}^4\text{He}$ 还重的元素,剥掉它一定数目的电子经加速后用来轰击原子核引起核反应。重离子核反应与前节介绍的传统核反应有什么不同的特点呢?在过去的核反应中“炮弹”都用轻粒子,只有七种,而重离子核反应中可以把元素周期表中直到铀这样重的离子加速并作为“炮弹”,因此“炮弹”的种类多,质量大,可以想象具有大质量的“炮弹”,其动能和动量都比轻“炮弹”大得多,因此用重“炮弹”轰击原子核要比轻“炮弹”有效得多,而且将会发现很多新

现象。

前节已指出：为了研究原子核的激发态，首先要有激发原子核的手段。如用带电粒子轰击原子核，由于“炮弹”和靶核之间的电磁相互作用引起核的激发就是一例，通常称为库仑激发。轻粒子反应由于“炮弹”荷电太小（荷电最多的 α 粒子仅2个单位的电荷），所以只能激发少数的低激发态。而在重离子核反应中，可以选择多种荷电离子作“炮弹”，用它研究原子核的低激发态有利得多。

产生核的高激发态最好方法是形成复合核，这是因为此时入射粒子所带进来的动能全部赋予整个体系，而产生高激发态。但在轻粒子入射情况中，高能粒子不易被靶核俘获形成复合核，它可能一下子就从中穿出，或者和靶核中个别核子发生碰撞，把它们从核中击出。而在重离子反应中，虽然重离子的总动能很高，但每个核子的能量并不高，在碰撞中容易形成复合核，而且用不同质量的重离子可组合成各种原子核的高激发态。不仅如此，重离子反应还会给原子核带来很高的角动量，这种高速旋转下的原子核有很多新的现象，而且会改变核的结构，关于高自旋态的研究是当今相当活跃课题之一。

下面我们再谈谈人工合成同位素的问题，利用轻粒子引起核反应合成了上千种的放射性同位素，其中包括93号，95号—100号新元素（即镱、镱、铜、镓、铟、铪及铱）。但由于轻粒子质量很轻，最重的 α 粒子也不过质量数为4，所以能转移到靶核上的粒子很有限。而目前的技术要求靶核的寿命足够长，所以轻粒子反应合成的都是在稳定核附近的同位素，合成新元素的工作，由于铪的寿命很短已不能再作靶，用 α 粒子轰击铪合成了101号元素，但目前条件下合成更重的新元素，是无能为力了。可是用重离子作“炮弹”，可以转移几十个核子，用它来合成远离稳定核素的同位素及新元素要比轻粒子有效得多，通过重离子反应合成了几百种新同位素，还包括102号到106号新元素。

理论上还预言在质子数为114，中子数184的附近有一个稳定核素区，称为超重核稳定岛。不少人都想“登”上稳定岛，除了从自然界中寻找超重核之外，就是用重离子核反应来合成。曾经是最热闹的研究课题，经过十多年的努力，至今还没成功，不过仍在努力。

当然重离子核反应所取得的成就远远不止这些，上面只略举一、二，下面我们进一步讨论重离子核反应的物理图象。

(三)

我们首先粗略地看看重离子和靶核之间是如何碰撞的，并且随入射能量的不同会发生什么现象呢？

具有一定动能 E 的重离子射向靶核，由于它们都

带正电，当两者靠近时，首先受到静电排斥力的作用。如果 E 不大，不足以克服这种排斥作用，因而打不到靶核上，这时只会引起弹性散射和库仑激发。如果 E 稍大些，两个核之间能靠得更近一些，核力就会起吸引作用。这时根据核的碰撞情况不同，实际上会发生不同类型的反应（后面另作详细的描述）。当 E 继续增加但尚未达到高能范围，重离子会把靶核打散，有人叫做散裂反应。对于这种反应，人们还不太清楚。当 E 达到相对论性能量范围（例如每核子的能量约2 GeV），又将出现新的现象，提出很多有意义的新课题，例如 π 凝聚和反常核态等问题，此外相对论性重离子实现惯性约束聚变是有着十分重要的实际意义的。

由于篇幅所限，我们只着重讨论 E 不太大的情况。如图1所示，可以用碰撞距离 b （或相对轨道角动量 $l \sim b$ ）来表征碰撞的深浅程度。当 b 很大时，只能发生弹性散射和库仑激发。随着 b 的减小，正好落到两个核之间核力作用范围内，就会发生擦边碰撞（相应的 b 记为 b_{gr} ）。这种核反应仅发生在两个核的表面，反应时间较短，属直接反应。其中包括弹性、非弹性反应及少数核子转移等反应。当 b 较 b_{gr} 小得多时，可以导致统计平衡的中间阶段——复合核，和形成复合核相应的 b 又称临界碰撞距离 b_{cr} 。这类反应的时间是很长的，而且处于高激发态下的复合核是不稳定的，它往往通过蒸发轻粒子或裂变而衰变，不过这时裂变是两块质量相等的对称裂变，这类反应又称熔合反应。而介于直接反应和熔合反应之间一种新的反应机制——深部非弹反应被观测到，它的碰撞距离是在 b_{cr} 和 b_{gr} 之间，反应时间约为 10^{-21} — 10^{-20} 秒。

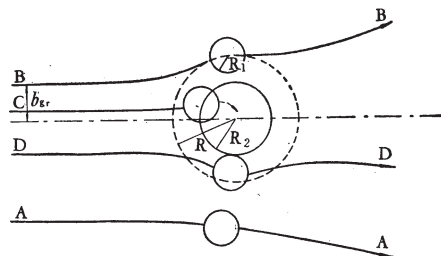


图1 各类重离子反应随碰撞距离 b 改变的示意图
(A) 远碰撞——弹性散射，库仑激发；(B) 擦边碰撞——直接反应；(C) 复合核形成；(D) 深部非弹反应

图2是用288 MeV的 ^{40}Ar 轰击 ^{238}U 测量的不同质量碎块的反应截面。实验结果区分了各种反应机制。曲线(A)是熔合反应裂变产物的截面，峰位在“炮弹”和靶核质量的总合一半之处，属对称裂变；(B)是靶核经交换少数核子后引起的裂变；(C)是深部非弹轻碎块的质量分布；(D)是重碎片再裂变的产物；而像“兔子耳朵”的(E)和(F)分别是经直接反应后得到的轻、重两碎片的质量分布。

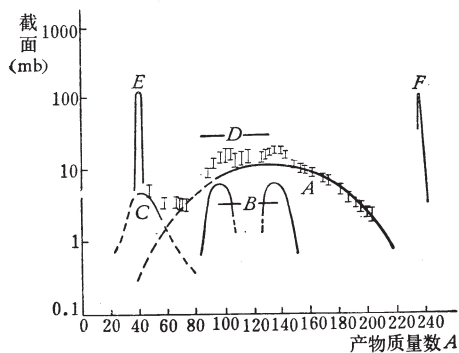


图 2 $^{40}\text{Ar} + ^{238}\text{U}$ 反应产物的质量分布

深部非弹反应是在轻粒子反应中观察不到的一种新的反应机制，顾名思义就是两个核在相互碰撞时以更深的部位相碰。其最基本的特征是在反应中有能

量、角动量、电荷及质量的转移：两个核的相对动能变成核的激发能，相对运动角动量变成核的自旋，并在碰撞中发生相当数目的核子迁移。由于这样一类反应涉及到从非平衡态向平衡态过渡的许多有意义的问题，所以近十年里吸引了很多实验和理论科学工作者，研究核反应中各种宏观量的弛豫过程。目前的实验认为：中子过剩自由度（即中子数和质子数之比）弛豫时间最短，能量和角动量的弛豫要长些，而质量弛豫时间最长。但这些宏观量输运现象的研究还有待进一步探讨。

以上我们只极其简略地介绍了有关重离子核反应的某些侧面。在短短的二十年里，一门崭新的学科——重离子物理学正在迅速发展。它不仅涉及用高速重离子研究原子核，而且还包括原子、分子、固体、甚至生物细胞等等。肯定地说，它将在原子物理、固体物理、材料科学和生物科学等等学科及技术领域内得到日益广泛的应用。
(题头：牛枢学)