

重离子核物理

刘建业

沈文庆

重离子物理是近十多年来物理学界发展起来的一个主要研究领域，是用高速重离子轰击原子核、原子、分子、各种固态物质乃至生物细胞，从而研究它们的内部结构和变化规律的一门综合性科学。由于重离子质量大、核内电荷多，加速后的动能比轻粒子高得多，用它来轰击原子核可以“开拓”出许多新的研究领域，我们称之为重离子物理，现已成为原子核物理研究的一个主要前沿领域。

六十年代末期以来，重离子物理研究的进展引起了世界各国政府和科学家的普遍重视，各国纷纷建造新型重离子加速器或改造老型的加速器，目前世界上已有上百台各种类型的低能重离子加速器，从七十年代开始，许多国家都在向中能区（ $10\text{MeV} \sim 100\text{MeV}$ /每核子）及相对论重离子能区（几百 MeV~若干 GeV/每核子），进军，并力图加速全离子（即自然界所有的稳定同位素）。美国、苏联、西德、日本都已建成或正在建造相对论重离子加速器，期望将原子核与高能物理两个层次的学科结合起来进行研究以探索微观世界的奥秘，美国学术界正在申请建造耗资高达 120 亿美元的超级重离子对撞机，一些中等国力的国家例如法国、意大利、加拿大、英国、荷兰等国家也都建成了或正在建造中能重离子加速器，到 1988 年底，世界上将有十几台中能重离子加速器，包括配套的重离子物理实验设备，这就为开展重离子物理研究提供了良好的技术条件，必将促进重离子物理研究的进一步发展。

1. 新元素、新核素的产生及奇异衰变方式的研究

自然界最重要的放射元素是 92 号元素铀和 94 号元素钚，在 101 号元素之前的其它超铀元素都是人工合成的。但在重离子被加速之

前，法合成重要的元素。六十年代随着重离子加速器的建成，美、苏两国竞相利用重离子核反应先后合成了 102 号到 106 号元素。七十年代末期西德国家重离子实验室利用重离子核反应合成了 107、108 和 109 号元素。根据原子核理论计算外推、预言在质子数为 114 和中子数为 184 附近存在着一个超重核稳定岛（图）。能否通过重离子核反应产生超重核成为检验和发展现有核理论的重大研究课题。七十年代以来，各国科学家一方面花费大量人力和物力在自然界寻找超重核；另一方面在实验室里通过重离子核反应来产生超重核。目前尚未有成功的报道，要想利用重离子核反应来产生超重核，必须从搞清反应机制入手。如何得到激发能尽可能低，原子核形变尽可能小的产物核，这已经成为重要的研究课题。

自然界存在的稳定同位素不过 300 多个，连同人工合成的核素在内共约 2000 多个，且绝大部分分布在 β 稳定线附近，只有很少数到了质子滴线（即质子结合能为零的线，图中 $\beta p = 0$ 的线）。根据原子核理论预言共有 5000 多个，即还有 3000 多个新核素有待人们通过重离子反应去产生。

远离 β 稳定线的新核素都是不稳定的放射性核，过去人们只知有 α 、 β 、 γ 和自裂变四种放射性衰变方式。

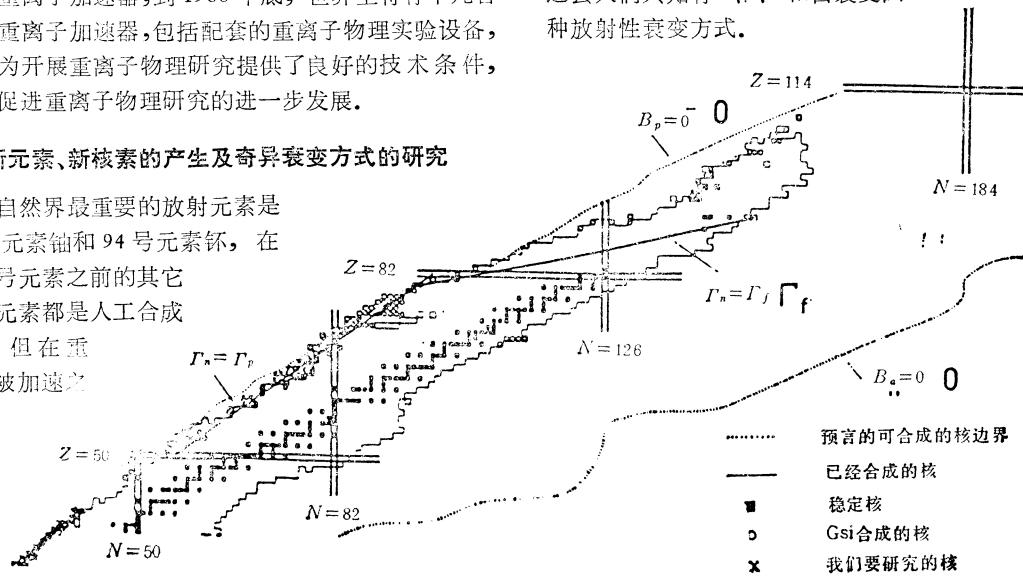


图 新核素的图示。

随着逐步远离 β 稳定线人们预言并发现了一些与此不同的奇异衰变方式。例如 β 延迟中子和质子衰变(先发射 β 粒子后的核仍在激发态，随后相继发射中子或质子)， β 延迟双中子，双质子衰变。直接中子，质子，双质子衰变。比 α 粒子还重的粒子衰变，例发射 ^{14}C 粒子衰变。根据理论预言还可能存在像已发现： ^{30}Mg 、 ^{46}Ar 等这样一些重粒子放射性。这些奇异衰变方式的研究将对原子核结构理论是个极好的检验和发展。

2. 原子核结构研究的新发展

通过重离子反应能够产生高激发能，高角动量和大变形的原子核，故不仅可以研究原子核结构性质随质子数和中子数变化的规律，还可以研究随着角动量和形变自由度变化的特性。现已经发现随着原子核转动速度的加快，原子核内两成对耦合的核子被拆开或者原子核的形状突然发生改变，从而造成了原子核转动惯量随转动角速度平方的关系曲线出现各种回弯现象。这种现象已成为当前核物理领域中的热门研究课题。重离子核反应过程为研究原子核的形状及其随质量数和激发能演变的过程提供了有力的实验手段。七十年代原子核形状同质异能态的发现及势能双峰位垒的解释把原子变形及裂变理论大大推进了一步，目前正在对变形进行深入研究。

由重离子轰击原子核会产生原子核的各种激发模式，如各种振动，转动，粒子-空穴激发及其之间的耦合从而形成各种巨共振态。也可能引起从超导到正常态的跃进——相变。这些问题的研究对于深入了解原子核这个多体量子系统的微观运动规律具有重要意义。

3. 内容丰富、现象奇特的重离子核反应

按照入射弹核轰击能量的高低可将重离子核反应分为低能、中能和相对论重离子(即高能)三个能区。各能区表现明显不同的特征。

入射动能超过弹核和靶核之间的库仑位垒高度就会产生核反应。除去轻粒子核反应中已有的弹性散射，非弹性散射转移反应和复合核反应外，还发现了一些新的反应机制，例如深度非弹性碰撞、快裂变、非完全熔合等。即便是转移反应也有了新的发展，如在两个碰撞核之间除了单核子转移，双核子转移外，还有多粒子以至大质量转移，特别是深度非弹性散射，是一个典型的非平衡态过程，它为研究自然界强相互作用有限的非平衡态量子系统提供了一个极好的实验条件。随着入射能量的增加，两个碰撞核重叠耗散过程的增长，反应系统向平衡态过渡进而熔合成一个复合系统(不是复合核)，当经历一段时间之后再裂开这就是快裂变。当然，如能满足形成复核的条件，就会形成复合核，此后通过复合核蒸发各种轻粒子而退激或者由于激发能很高或角动量太大而裂成两个碎片谓之熔

合——裂变，对一定的反应系统和入射能量而言，往往同时存在几种反应机制，随着入射能量和反应系统的变化各种反应机制相互竞争和转化。

自从1979年第一台中能重离子加速器建成后，该能区的研究发展很快。这是介于低能和高能之间的过渡区，核子之间的两体碰撞增强而核子与其它核子平均场之间的作用逐渐减弱，即由单体耗散向两体耗散过渡。在激发能和核温度升高时还可能出现核物质的气液相变。中能情况下，尽管每个核子的平均能量小于 π 介子的产生阈能，但由于能量的涨落或集合，仍然有可能使能量集中到少数自由度上而产生 π 介子，即所谓 π 阈下产生或产生高能 γ 光子。正常核物质状态下每个核子能承受的最大激发能的极限、中能碰撞中的复杂粒子发射、多重碎裂等都是该能区中颇受重视的研究课题。但总的来说，中能区域的研究开始较晚，各种理论只能解释一个侧面，有些概念甚至相互矛盾。这都有待于进一步的实验和理论研究。

在美国贝克利实验室的BEVALAC加速器上，在此能区已经发现或已经预言了许多令人感兴趣的奇特现象。例如两核中心碰撞中由于核子间的强相互作用而产生冲击压缩使得原子核密度增加到基态密度的3—5倍。与此同时核物质加热从而产生高能量、高密度的火球状态，随后发生火球膨胀和凝结，并产生 π 介子，这就提供了研究核状态方程和核物质在高温高密度下相变的可能。当相对论重离子能量更高时可以研究夸克物质的形成，夸克相变和夸克-胶子等离子体等。现在西德的国家重离子物理实验室、西欧中心CERN，美国的布鲁克海文实验室都在建造更高能量的重离子加速器以供开展这些激动人心的研究。