

# 核谱学的新进展

F. A. Selove      E. K. Warburton

核谱学可以定义为研究原子核是怎样吸收和放出能量的学科。因此它与核能级的特性(能量、角动量(自旋)、同位旋、电磁矩和跃迁率等)密切相关。1945年以来,由于核物理实验设备、实验方法和数据分析技术的迅速发展,特别是近15年来在数据分析中应用了计算机,使得我们对于核能级特性的知识近乎指数式地增长。

核谱学对于了解核结构有着直接的贡献。迄今所知,核结构是一个复杂而困难的多体问题。核谱学家的处理方法是利用各种核模型作为实验结果和核理论基础之间的桥梁。各种核模型可以弥补我们对核力知识的不足和有限的计算时间和空间。近年来,各种核模型的预言能力大有提高,特别是相互作用玻色子模型用于周期表某些区域取得了极大成功。根据这种模型的计算已预言了核的新对称性。

近年来,核物理学家利用各种类型的加速器产生的多种粒子束(从电子、 $\mu$ 介子、 $\pi$ 介子、 $K$ 介子、中子到全周期表元素的离子,其能量从几分之一电子伏到几个GeV)作为核探针来引起各种核反应,从反应产物确定各个核能级的特性。因而鉴别和了解核反应机制亦成为核谱学工作的主要内容之一。由于迄今我们对强相互作用尚未完全了解,导致我们对反应机制的知识必定是近似的。幸而,在一种核探针和核之间通常只有一种主要的相互作用,因此核探针的多样性及其与核相互作用的特殊性允许我们高精度测定多种核性质。

## 核 反 应

转移反应:1970年引入Q3D谱仪后才得

以对此类反应进行深入的研究。据最近报导,用120MeV $^{16}\text{O}$ 和90MeV $^{12}\text{C}$ 打 $^{148}\text{Sm}$ 的单中子转移反应 $^{148}\text{Sm}(^{16}\text{O}, ^{15}\text{O})^{149}\text{Sm}$ ,  $^{148}\text{Sm}(^{12}\text{C}, ^{11}\text{C})^{149}\text{Sm}$ 中观测到以前未测到的三个态( $J^\pi = 13/2^+$ ,  $9/2^-$ 和 $7/2^-$ )。同时,在线计算机软件的发展对利用磁谱仪于复杂反应亦有极大的重要性。这类软件允许改变电子学参数並立即观测重置门所引起的变化,因而使我们能迅速鉴别通过谱仪的各种粒子。计算机显示亦可用于同时获得各种粒子的详细信息。这种技术的一种新应用是劳仑兹伯克利实验室用88吋回旋加速器产生的 $\alpha$ 打 $^{20}\text{Ne}$ ,主要反应产物是 $^8\text{He}$ ,然而在稀有情况下(约占百万分之几), $^{20}\text{Ne}$ 转移一个 $\alpha$ 到入射 $^4\text{He}$ 上而形成 $^8\text{He}$ 和 $^{16}\text{Ne}$ ,即 $^{20}\text{Ne}(\alpha, ^8\text{He})^{16}\text{Ne}$ 反应。这些产物是用一台四极—六极—偶极谱仪来分析的。LBL小组从1千万个其他粒子中,选出22个 $^8\text{He}$ 粒子,从而测定非束缚态 $^{16}\text{Ne}$ 核的质量。

近十年来,这些高分辨、高能核探针成为选择建立在基态上的不同激发模式的有效工具。例如,比较 $\pi^+$ 和 $\pi^-$ 非弹散射,可以解决中子和质子对一给定跃迁率的贡献;可用氘核和 $\alpha$ 粒子选择同位旋标量跃迁和利用电子选择同位旋矢量偶极跃迁。电子散射亦获得了引人注目的结果。新一代的高分辨电子散射设备,如麻省贝茨直线加速器和法国萨克莱加速器连同色散匹配磁谱仪可提供的分辨率,对100—400MeV的电子为万分之一。这就允许通过非弹散射分开大部分低能级。

多重库仑激发:在50年代,库仑激发曾对发现大形变转动核和发展转动模型有所贡献。近年来,库仑激发已用来探测形变核E2基态能带的极高自旋(高达30)。多重库仑激

发已成为研究基态转动带的有效工具。对这种研究有贡献的另一种技术发展就是大型锆 $\gamma$ 探测器的研制(对1MeV $\gamma$ 射线的分辨率约为2KeV)。这种探测器在60—70年代革新了 $\gamma$ 能谱学。这种方法的一个特例就是西德达姆斯塔特的GSI组用5.3MeV/n的 $^{208}\text{Pb}$ 离子激发 $^{238}\text{U}$ 核(薄靶),获得角动量达到 $J=30$ 的基态转动带的 $\gamma$ 谱。发射的 $\gamma$ 射线有强的多普勒位移,利用它可以测量 $10^{-9}$ — $10^{-16}$ 秒区间的核寿命。

辐射中子俘获:即 $(n, \gamma)$ 反应是试验完全描述低态的核模型的理想工具。相互作用玻色子模型的广泛适用性的很多重要验证就来自最近的 $(n, \gamma)$ 研究。如1981年的 $^{188}\text{Er}$ 的低自旋正宇称转动带的实验表明了相互作用玻色子模型在再现 $^{188}\text{Er}$ 能级基本特性方面的成功,从而证实了该模型在宽广形变核区中的普遍适用性。过去类似的实验研究确立了核中新对称性 $O(6)$ 的存在,而现今正用来寻找预期的奇偶核中玻色子—费米子超对称性的存在。

$(n, \gamma)$ 谱学的能力多半是由于 $\gamma$ 能谱学的技术进展。如具有十分锐的线宽的锆探测器,允许我们分辨大多数 $\gamma$ 跃迁(即使在最重核中),精确测定 $\gamma$ 射线的强度和能量(精度达到百万分之几)。

## 高自旋态

近年来,核谱学的最大进展是在重离子熔合一蒸发反应的 $\gamma$ 能谱学领域中。由于这种反应放出的 $\gamma$ 射线是从十分高自旋的态发出的,而且这些态是沿着束流方向高度排列的。高的排列度和大的熔合截面(几百毫巴)使得熔合一蒸发反应成为研究高自旋态的有力工具。特别是“转晕”态的研究,因为其波函数特别简单,因而能特别清楚地揭示核基本结构,而显得更为重要。利用这种方法对转动带能级研究的一个新近例子就是挪威奥斯陆组和随后的美国橡树岭组对 $^{180}\text{Yb}$ 能级的研究。前者的 $^{180}\text{Yb}$ 是由 $^{16}\text{O}$ 和 $^{147}\text{Sm}$ 熔合(蒸发

3个中子)而成;后者是由 $^{48}\text{Ti}$ 和 $^{116}\text{Cd}$ 熔合(蒸发4个中子)而成。前者观测到 $^{180}\text{Yb}$ 的自旋直到 $28\hbar$ ,后者则观测到 $J^\pi$ 为 $38^+$ 或 $40^+$ 的态。在这些实验中观测到的态显然聚集成为数不多的能带。从转动带结构可以计算核的惯性矩对能量的函数关系。对某些特定的J值,核具有较小的惯性矩(因而较小的转动角速度)对 $^{180}\text{Yb}$ 的转晕态,这种角速度为 $0.27\text{MeV}/\hbar$ 。这种“回弯”现象与带结构的基本改变有关。

$\gamma$ 射线的线极化给出其多极性的信息。由于极化正比于核的排列,因而高度排列的态(如在熔合一蒸发反应中遇到的)十分适合于多极性的研究。最近,已利用一种简单的极化计(由两个锆(锂)探测器构成,并由计算机控制)测量了熔合一蒸发反应 $^{74}\text{Ge}(^{18}\text{O}, 4n)^{88}\text{Zr}$ 的 $\gamma$ 射线极化谱。

高自旋态研究中的一个主要进展是多元探测设备的研制。它力求探测尽可能多的发射粒子和 $\gamma$ 射线。如 $4\pi$ 组合探测系统可以测量总能量和出射道的多重性。这种探测器的例子有橡树岭的自旋谱仪(曾用于 $^{180}\text{Yb}$ 研究),海德堡的晶体球和达累斯伯里的Tessa II(其中 $\gamma$ 探测器的一种新改进就是用锆酸铯代替碘化钠,前者的密度约为后者的两倍)。

## 异原子核

具有异靶核或弹核的熔合一蒸发反应中形成新同位素的 $\gamma$ 衰变的仔细能谱学研究常能提供有价值的与理论比较的矩阵元。例如,近十年来布鲁克海文已观测到16个新同位素的 $\gamma$ 衰变。一个有趣的可能性就是通过 $^{10}\text{Be}(^{14}\text{C}, 2p)^{22}\text{O}$ 反应产生 $^{22}\text{O}$ 。

这种新能谱学方法应用的一个重要例子就是109号元素的发现。它是通过 $^{209}\text{Bi}(^{68}\text{Fe}, n)^{266}109$ 反应形成的。实际上,在三个星期中仅观测到一个原子的 $\alpha$ 衰变。然而实验者相当确信此衰变与 $^{266}109$ 有关。

## 未来趋向

在今后几年内核谱学的可能发展方向

是：1. 研究放射性靶核或弹核的核反应。这些反应将有可能激发用现有的射弹尚未观测到(或未充分研究过)的核态。例如布鲁克海文正在应用的108MeV的强 $^{14}\text{C}$ 束。

2. 在束流光学和宽束出射粒子的高效率、高分辨率探测方面继续取得技术进展。这将允许我们分辨间隔更密的态並研究生成截面十分小的态。

3. 高能探针将得到更广泛的应用。它将允许我们以更高的精度和新的方式研究核

的自由度和核结构。

4. 当我们确切知道核反应中涉及的态的特性时，将能更好地了解反应机制。

5. 核模型将会起到预期的作用。

6. 将进行愈来愈多的多元实验，以试图测量所有有关参数；而且实验将会愈来愈复杂、费钱和费时。因而高能(基本粒子)和低能(核)物理之间的传统区别将会消失。

[朱维和编译自 *Phys. today*, 1983, **36**, 11, 26-32]