

# 核 谱 学

F. A. Selove, E. K. Warburton

核谱学可以被定义为研究核如何吸收和发射能量的学科。它特别关注于单个能级的一些性质，如能量、角动量(自旋)、同位旋(体现中子和质子本质上的等同性)、磁矩和电矩以及跃迁率等等。自从1945年以来，我们对上述这些性质的知识取得了快速和引人注目的增长。这种近于指数式的进展之所以会发生是由于在设备、实验方法和实验数据分析等技术方面有着惊人的进步。在最近十五年中用计算机作分析具有特别的重要性。本文力求传达我们对当今核谱学是纷繁而复杂的这种体验。我们将重点介绍最近几年中，在了解核能级性质方面取得最大进展的那些领域。

## 核模型

核谱学本身并不是一个目的。我们研究核态的参数有许多原因。很可能核物理的主要目的是了解在核中核子的行为如何。有时核谱学对这一目标的贡献是直接的；但是比较通常的情况是谱学数据被用来提取核能级的性质和波函数，因此它是贡献于用来预言核能级的理论。

即使我们能够了解作用在核内的核力并且了解了电磁力，核结构将仍然是一个复杂和艰难的多体问题。核谱学家的方法是利用各种各样的核模型在实验结果与核理论的基础之间进行思考。例如，人们经常考虑在有效相互作用影响下的“自由”核子，该作用代表了其余核子引起的力。这样的模型弥补了我们对核力知识的不确切性和计算的时间和容量的限制。当人们把实验结果与核模型作比

较时，第一步通常是要看一看已知自旋和宇称的能级的谱。因此测定核的量子态的能量、自旋和宇称大概是核谱学最重要的方面。

壳模型建立在下述的假设上，即少数价核子在许多核子产生的势中运动。因此，这一假设对于反映核子间的各别作用的实验观察量来说是一个非常好的近似，但是用壳模型来表述反映核子集体效应的实验观察量则比较差。在这种情况下，比较合适的是所谓集体模型。例如在周期表中核形状严重偏离简单球形的那些区域中，核形状通常具有四极的特征。由核的转动产生的能带中的能级是由电四极(E2)跃迁联接起来的。在这些区域中的核结构可以用集体模型非常好地来描述。这种模型的最简单的形式就是简单的刚体转子。较复杂的一些模型把壳模型和集体模型结合起来。最近几年，“互作用玻色子模型”在周期表若干区域中的应用取得了惊人的成功。在超导现象中，电子形成稳定的对，它们的作用如同玻色子；同样，核力也优惠于使核子成对，它们是玻色子，是比两个单独的核子更容易处理的实体。根据这一模型所作的计算预言了在核中新对称性，它们都被相继地发现了。此外，识别由价费米子对组成的玻色子使人们把集体结构上的变化与可利用的价核子数的改变直接联系起来。所有这些核模型的预言能力近年来都有了引人注目的改进。

在最成功的壳模型的计算程序中，有效相互作用由最小二乘法拟合能级的能量来确定的。而这些能级的自旋和宇称则是在实验确定了它们的组态后是已知的。人们通常从

拟合波函数的某些参量入手，这些参量对能级的小的混杂是不灵敏的，如电四极矩和跃迁几率以及单核子谱因子。最后检验模型所得的结果是将它与更精确的性质，诸如另外的电的和磁的跃迁和矩以及 $\beta$ 衰变的矩阵元等进行比较来实现的。

## 专 一 性

在1983年，可由核物理学家们安排的束流有电子、 $\mu$ 介子， $\pi$ 介子、K介子和中子直到整个周期表中许多元素的离子，包括象 $^3\text{H}$ 和 $^{14}\text{C}$ 这样的放射性离子。产生这些束流的加速器种类繁多，能量范围从十分之几个电子伏到几个Gev。这些品种齐全的探针是我们探索原子核的决定性因素。

通常，这些探针引发核反应并且我们试图从反应产物来确定单个能级的性质。因此，鉴别和了解反应进行的机制是核谱学家工作中极其重要的内容。由于我们对强相互作用的了解还很不完全，因此我们对反应机制的知识总是近似的。幸好，在探针和核之间通常有一种占主要地位的相互作用，因此每一种探针主要地测量一个算符的矩阵元。卓有见识的表述是由A.玻尔和B.莫特逊引入的专一性定则：对每一种核性质存在着最适合研究它的一种探针。

例如电子束与核的相互作用通过电磁相互作用，我们对后者是完全了解的。因此电子很适于测量电磁跃迁的性质。另一个例子是对一个核态的核子（或核子结团）X的谱因子S(x)的测量；该核态是从具有A个核子的核的基态形成有A+x个核子的核态。这个谱因子是基态波函数和A+x结团的波函数之间相似性的一个指示量。用转移反应来测量这个因子最好。例如 $^{210}\text{mBi}(t, \alpha)^{209}\text{Pb}$ ，其中x个核子（此时为一个质子）在初始核和终核之间进行了转移。在这种测量中可以得到的能量上的分辨率大约是3/10000，因此给出在终核 $^{209}\text{Pb}$ 中非常精确

的能级测定。这一特定的例子有意思的还在于铋 $^{210}\text{m}$ 靶本身是放射性的，它的半衰期是三百万年，为至今所用靶子中具有的最高自旋（它的 $J^\pi$ 是 $9^-$ ，见图1）。

可以采用的探针的数量及多样性和它们相互作用的专一性使我们在很大程度上得以克服反应机制和根本结构的不可分性并使它能够很精确地测定许多核性质。

## 反应的类型

不同类型的核反应可以用靶子和炮弹之间的最接近距离来表征。粗略地讲，库仑激发是在10fm量级的距离上通过长程的电相互作用而发生的。像核子转移以及弹性和非弹性散射这些直接反应是通过周边碰撞由核力的作用而发生的，而熔合后裂变或其他衰变过程则是当炮弹和靶核有可观的重叠时才发生。核反应可以方便地用简化符号A(x,y)B表示。其中A表示靶核，x表示炮弹，B是与发射y相关的反应产物。

**转移反应** 在直接核反应中发射的带电粒子常常用磁谱仪按它们的动量进行分析。

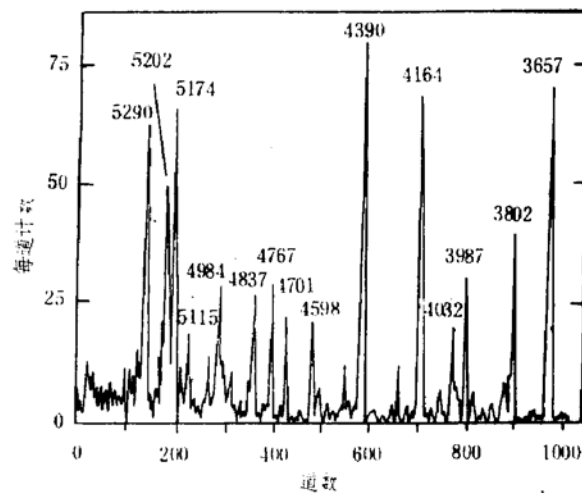


图1  $^{210}\text{mBi}(t, \alpha)^{209}\text{Pb}$ 反应的 $\alpha$ 粒子能谱。标在峰上面的数字是keV为单位的 $^{209}\text{Pb}$ 的激发能。对动能为[30MeV]的 $\alpha$ 粒子来说典型的峰的半宽度是10keV，相当于能量分辨率为 $3 \times 10^{-4}$ 。靶子是珍贵的，因为它是放射性的，能量为271keV的亚稳态的半衰期是 $3 \times 10^6$ 年并具有迄今使用的靶子中最高的自旋( $J^\pi = 9^-$ )。

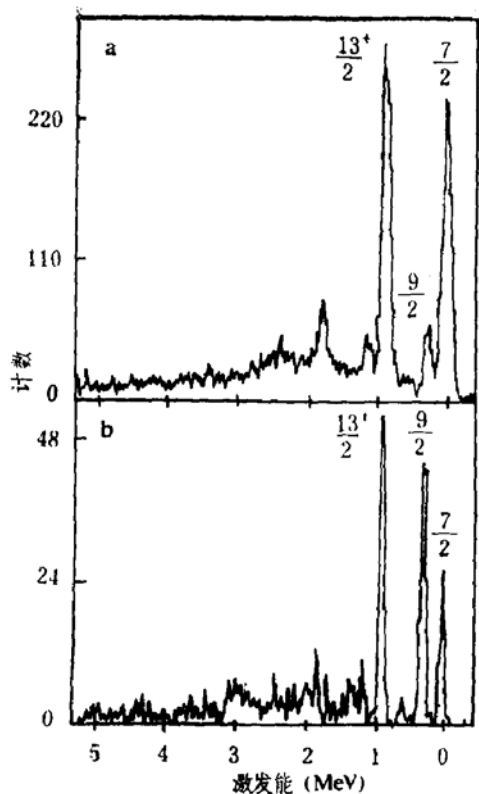


图2 单中子转移反应。在两种情况下靶核都是 $^{148}\text{Sm}$ ，它接受一个中子变成 $^{149}\text{Sm}$ 。在a中炮弹是120 MeV的 $^{16}\text{O}$ ；在b中是90 MeV的 $^{12}\text{C}$ 。注意末态（用 $J^\pi$ 值标记）相对居留的明显差别。

例如图1的数据是用“Q3D”谱仪得到的。这种谱仪，由一个四极和三个偶极磁透镜组成，在世界上有若干台在运行。它们特别适合于高分辨的重离子探测（即对于质量数大于3的离子）并在重离子非弹性散射和转移反应研究中起了关键性的作用。直到1970年Q3D刚问世的时候，这些反应基本上还未被研究过。图1表示出重离子反应的灵敏性，它可用来选择特定的末态。在所显示的两个反应中，都是 $^{148}\text{Sm}$ 拾取一个中子形成 $^{149}\text{Sm}$ 。但在图2a中这个中子来自 $^{16}\text{O}$ ，而在图2b中则来自 $^{12}\text{C}$ 。图中指出的三个态在早期 $^{148}\text{Sm}$ 从氦拾取一个中子的研究中没有被观察到，这充分显示出重离子转移反应的重要性。很明显，核子转移有很高的选择性：即从轻离子转移到低角动量态而从重离子则转移到高角动量态。

在线计算机软件的研制对使用Q3D这样谱仪和研究复杂反应是极其重要的。软件允许改变电子学的参数并且可立即观察到由于新开的门和其他设置所引起的变化。这样人们可以快速地鉴别通过谱仪的不同类型的粒子。计算机显示可用来得到各型粒子大量的同时的信息，每种粒子和它自己的选通门相关。例如我们能够选通飞行时间对能量损失和能量对粒子沿谱仪焦平面的位置。这种技术的一个最新的应用是用 $\alpha$ 粒子轰击 $^{20}\text{Ne}$ 的实验，主要的产物是 $^8\text{He}$ （当然还有 $\alpha$ 粒子）。然而在极少数情况下（百万分之几） $^{20}\text{Ne}$ 核转移整个 $\alpha$ 粒子到入射的 $^4\text{He}$ 核，形成 $^8\text{He}$ 和 $^{16}\text{Ne}$ ，反应可表示为 $^{20}\text{Ne}(\alpha, ^8\text{He})^{16}\text{Ne}$ 。 $\alpha$ 粒子是从劳伦兹伯克利实验室的88对回旋加速器上获得的。通过成功地对计数进行选通，首先排除了质子、氘和氚。然后限制飞行时间、微分能损和能量使之恰好适合于 $^8\text{He} + ^{16}\text{Ne}$ 的这些量。LBL小组能够在一千多万个其他事件中拾取出22个 $^8\text{He}$ 粒子从而测定了非束缚核 $^{16}\text{Ne}$ 的质量。

**弹性和非弹性散射** 在最近十年中，高分辨的、高能质子、中子、 $\pi$ 介子和电子束也已经成为可广泛利用的束流，因此也就更广泛地被用作核探针。所有这些探针对于在基态上选择不同激发模式提供了强大的工具。例如比较 $\pi^+$ 和 $\pi^-$ 的非弹性散射我们可以把中子和质子在给定跃迁率下的各自贡献分开来。人们也能够用氘和 $\alpha$ 粒子来选择等标量跃迁（即同位旋不改变的跃迁）和用电子束选择等矢量（同位旋改变）偶极跃迁。相反，质子和中子是非选择性探针。目前还没有别的方法比用电子散射对结果的改进更引人注目。新一代的电子散射设备，如马萨诸塞州的Bates直线加速器实验室和法国的Saclay加速器，与色散匹配的磁谱仪一起对能量为100—400 MeV的电子的分辨率为 $1/10^4$ 。这样，通过非弹性散射可以分开最低位的能级。改变散射电子的角度或能量，我们可以改变在反应中转移的动量 $q$ 从而画

出跃迁密度 $\rho$ 对核半径 $r$ 的图形。(在动量为 $q$ 时的散射强度与 $\rho(r)$ 的傅里叶变换有关)。传统上的电矩和磁矩或跃迁仅相应于 $q=0$ 的情况。因此电子(在少数情况下,和强子)散射提供了一个新的维度( $q$ 方向)使观察量与理论进行比较。

**多次库仑激发** 库仑激发,即通过库仑相互作用,用一个核激发另一个核的过程,它是我们完全了解的电磁现象。在五十年代,关于库仑激发的知识使人们发现了高度变形的核并发展了转动模型。近年来,库仑激发已经被用来探索形变核中很高自旋的 $E2$ 基态带。对高 $Z$ 的炮弹和靶子来说,若能量(亦对应的距离)刚好低于能发生核反应的能量时,库仑激发的几率接近于1。一个有偶数质子和偶数中子的核可以被相继地激发 $n$ 次( $O^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 4^+$ 等等),而且在实验上发现几率 $P^n$ 对 $n$ 高达15时仍然是很可观的。这就是说,自旋可高达30。因此库仑激发已经成为研究基态转动带的强有力的工具。

为这些研究作出贡献的另一个技术进步是大的锗 $\gamma$ 探测器的发展,其分辨率对1MeV $\gamma$ 射线可达2keV。实际上,在六十和七十年代这类探测器对 $\gamma$ 射线谱学进行了革命。

作为这些技术的应用的一个特殊例子,我们考虑Eckart Crosse和他的同事们在西德达姆斯达特的GSI完成的一个实验。他们用 $^{208}\text{Pb}$ 离子束(单核能为5.3MeV)激发薄的箔靶中的 $^{238}\text{U}$ 核。通过测量与散射的炮弹和反冲的靶核符合的 $\gamma$ 射线计数GSI小组得到了角动量 $J=30$ 的基态转动带。(这组 $\gamma$ 射线是由快速旋转的核减慢转速至零角动量的过程中发射的)。

一个重核被另一个核库仑激发时所涉及到的质心系速度大约是光速的7%,因此从薄靶发射的 $\gamma$ 射线存在有强烈的多普勒移动,其能量决定于反冲核和 $\gamma$ 射线探测器之间的相对方向。如果不对多普勒移动进行修正,则这转动带的顶部附近的跃迁的 $\gamma$ 峰将被模糊掉而很难观察到。为了进行修正要求有一台

在线数据分析的计算机,它用反冲核和炮弹(同时的)的位置灵敏探测信号对 $\gamma$ 射线的多普勒移动进行修正,然后再将 $\gamma$ 谱显示出来。

上面这个例子中所不希望有的多普勒移动,在另外一种情况下(如为了测量核寿命)却成为有用的效应。例如,这个实验中的薄 $^{238}\text{U}$ 靶用厚的材料作为衬底来停止反冲的 $^{238}\text{U}$ 核,那末 $\gamma$ 射线将在 $^{238}\text{U}$ 核慢化过程中发射。慢化过程大约需要 $10^{-11}$ 秒,我们对这一过程的了解是很充分的。因此它提供了测量核态寿命的时间标尺。比 $10^{-12}$ 秒长很多的寿命不存在多普勒移动,而寿命比1psec短很多的则是全多普勒移动。介于两者之间的中等寿命有中等多普勒移动,通过对它的分析可以得到核态的寿命。基于多普勒效应和各种核反应,已经发展了一些复杂的方法来测量1nsec和1fsec之间的核寿命(从而得到跃迁矩阵元)。

**辐射中子俘获** 当一个核俘获一个中子时产物核被激发并通过 $\gamma$ 射线级联衰变到基态。俘获本身及辐射级联的统计性质保证了低位能级在很宽范围内布居而不受依赖于核结构的选择定则的限制。实际上的限制仅来源于角动量选择定则,它使末态自旋限制在俘获态自旋的几个单位以内。所以,与大部分其他核反应截然相反,( $n, \gamma$ )反应没有什么专一性。正因为如此,它代表了一种理想的工具,可以用来检验那些可以给出低位态完整描述的核模型。为了拟合中子辐射俘获实验中得到的数据,不仅必须确定理论是否正确地预言特定能级的某些性质;而且还必须确定是否实验观察到了一套完整的能级序列,并且只有这一套完整的能级序列可由该模型来产生。

互作用玻色子模型是这种理论的一个极好的例子。的确,这种模型广泛的适用性中的许多重要的证据都来自最近的( $n, \gamma$ )研究。图3表示的是一个例子。在图中我们将 $^{168}\text{Er}$ 中低自旋正宇称转动带的次序的实验结

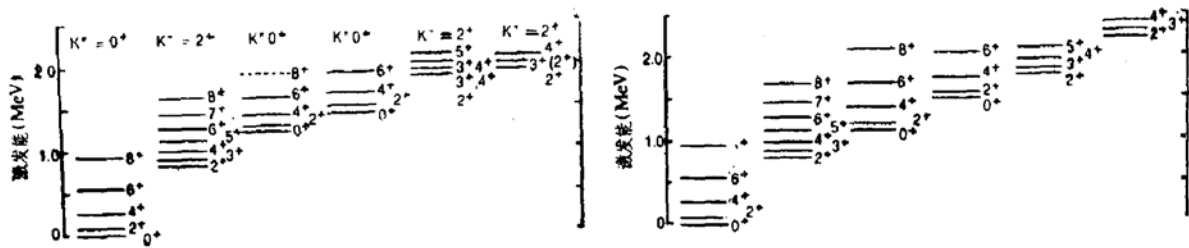


图3  $^{168}\text{Er}$ 的若干系列的能级。每个能级标出了它的 $J^\pi$ 。实验值(左)和相互作用玻色子模型的理论预言作了比较。

果和理论预言作了比较。相互作用玻色子模型再现了 $^{168}\text{Er}$ 纲图的基本性质。这一成功证实了模型对宽的形变核区域的普遍适用性。过去,类似的实验研究已经确定了在核中存在新的对称性 $O(6)$ ,接着正在寻找预言的在奇偶系统中存在玻色子-费米子超对称性的问题。

(n,  $\gamma$ )谱学的活力大部分是由于 $\gamma$ 谱学在技术方面的进步,如可以得到非常窄的线宽的错探测器,在前面我们已经讲过了。这些性能允许我们能分辨开绝大部分 $\gamma$ 跃迁,即使是在最重的核中,以获得精确的强度测量值而且还可以以百万分之几的精度来确定 $\gamma$ 射线的能量。

## 高自旋态

近几年来最惊人的进展大概要算在重离子熔合一蒸发反应之后的 $\gamma$ 射线谱学领域。这种反应能够用经典的图象加以考虑:两个核碰撞并熔合,接着它们发射轻粒子—中子、质子和 $\alpha$ 粒子—直到系统“冷却”到足以发射 $\gamma$ 射线。在这个“蒸发”过程中核的高角动量只损失很少一点,这一高角动量是它在熔合时获得的。因此 $\gamma$ 射线从自旋很高的态发射;而且这些态是沿着束流方向高度排列的。大的截面(几百毫巴)和排列这两点使熔合蒸发反应成为研究高自旋态的强有力的工具。“冷旋”态(对给定角动量,具有最低能量的态)是重要的,因为它们波函数特别简单—形成它们的方法并不多—因此特别清楚地揭示出基本的核结构。

下面的例子说明用新的技术来探索核性质的方法,这就是研究属于各种转动带的能级。例如Leo Riedinger和一个小组用挪威奥斯陆的串列静电加速器研究了 $^{161}\text{Yb}$ 中的转动带。用 $^{16}\text{O}$ 和 $^{147}\text{Sm}$ 核的熔合反应然后蒸发三个中子生成 $^{161}\text{Yb}$ 。接着在橡树岭实验室继续进行这些研究,用 $^{48}\text{Ti}$ 和 $^{110}\text{Cd}$ 熔合,蒸发四个中子形成 $^{160}\text{Yb}$ 。为了测定 $^{160}\text{Yb}$ 核的自旋和能量,Riedinger和他的合作者测量了当核的自旋降低时发射的 $\gamma$ 射线的能量和强度。在早期的实验中已观察到自旋为28 $\hbar$ 。稍后,在橡树岭Riedinger报导了“冷旋”

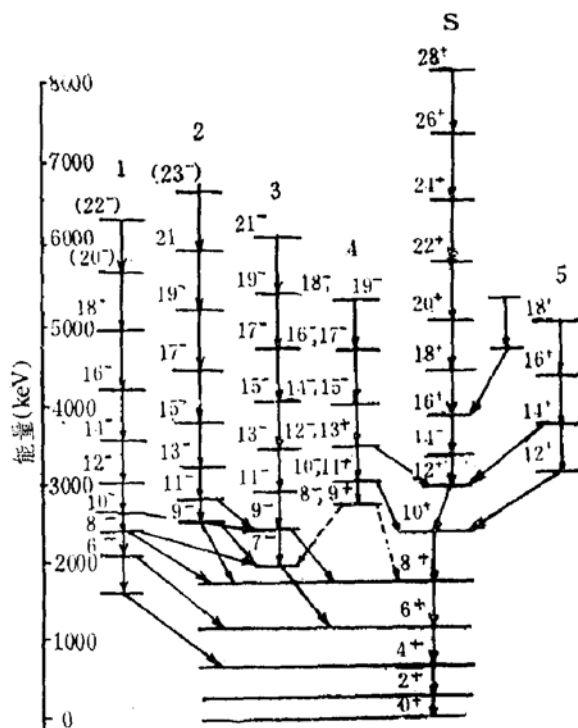


图4  $^{160}\text{Yb}$ 的能级图,每个系列的能级用 $J^\pi$ 值标记。图中表示的能级没有给出能级测量的精度(一般为0.1KeV)。所有标出的跃迁的强度和能量都是已经测到的。

带延伸到 $J^{\pi}$ 为 $38^{+}$ 或 $40^{+}$ ；该小组还测到了在其他带中自旋高达 $33\hbar$ 的态。图4表示从这些研究中已经得到的能级图。

在这样的实验中所看到的态清楚地分成为数不多的带，每个带相应于一个单级联，这样使分析变得容易一些。一般的 $^{160}\text{Yb}$ 的能级图只是一堆很难理解的能级。仅仅是在最近由于新的技术和实验者的聪明才智才有可能拾取特定的态而表示成为简单的带结构。或许我们应该把Bohr-Mottelson关于专一性定则从探针扩展到包括探测器和计算机分析。

根据转动带的结构一如从 $\gamma$ 射线级联测量中所得到的—我们可以计算作为能量函数的核的转动惯量。在某些情况下，得到的结果表明在一些特定的 $J$ 值下出现核的转动惯量比邻近的态度要小一些的情况（即较慢的转动速度）。对 $^{160}\text{Yb}$ 的“冷旋”态这一角速度大约是 $0.27 \text{ MeV}/\hbar$ 。这种所谓的“反弯”现象与能带结构的根本变化有关。

$\gamma$ 射线的线极化给出关于 $\gamma$ 射线多极性的信息，即到底是磁跃迁还是电跃迁或者是两者的混合。由于极化正比于核的排列，高度排列的态，例如在熔合蒸发反应中遇到的这些态，非常适合于研究多极性。

一个简单的极化仪由两个锗探测器组成，放在离靶子大约20厘米的地方。计算机软件把来自探测器的两个符合的信号加在一起；这样，我们测量了从一个探测器到另一个探测器的康普敦散射。康普敦散射对线极化是灵敏的，所以计数率的差，即垂直于和平行于反应平面的康普敦散射的差，是极化的一个量度。计算机自动地以选定的间隔转动双探测器系统并把谱贮存起来。图5表示用这样的—个系统产生的结果。

在高自旋态研究中的一个主要的进展是研制了“多举”探测设备，它力争测量尽可能多的发射粒子和 $\gamma$ 射线。这种设备称为“ $4\pi$ 分块探测系统”（因为它们几乎覆盖了 $4\pi$ 立体弧度并且是以分成块的独立的探测器覆盖

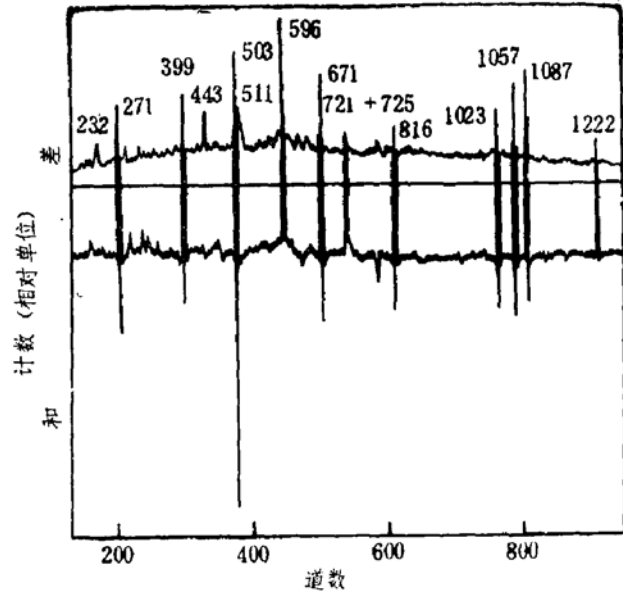


图5 用60MeV的 $^{18}\text{O}$ 离子轰击 $^{74}\text{Ge}$ 薄靶产生的 $\gamma$ 射线极化谱。 $\gamma$ 线的能量以keV表示，大部分线是 $^{88}\text{Zr}$ 发射的，它是由核熔合后发射四个中子形成的。为了测定极化，用了两个锗探测器，一个探测器探测被另一个散射的康普敦光子。由于康普敦散射决定于极化，因此安排在反应平面或垂直于它的计数器的计数率差是极化的一个量度。上部的图是两个计数率的和，下边的是差。这里所用的约定是E2跃迁( $\Delta J = 2$ )的差值为负，M1跃迁( $\Delta J = 1$ )为正。

球面。系统的外貌像倒置的苍蝇眼)。这种系统允许测量出射道的总能量和多重性，而这些参量对分离不同的事件提供了非常有选择性的信号。这类探测器的一些例子是：Riedinger在研究 $^{160}\text{Yb}$ 时所使用的在橡树岭的自旋谱仪；在海德堡的类似的晶体球谱仪和在达累斯伯里的Tessa II（见图6）。

$\gamma$ 射线探测器的一个最新进展是在Tessa II中已经采用锗酸铋来代替标准的碘化钠闪烁体。锗酸铋的密度大约是NaI的两倍，因此对给定的总效率，可以用较小的探测器。

## 奇异核

本文提到的所有技术进步都适用于寻找新同位素。当今正在追求的技术包括奇异集团的转移，如我们在前面已经讨论过的 $^{20}\text{Ne}$

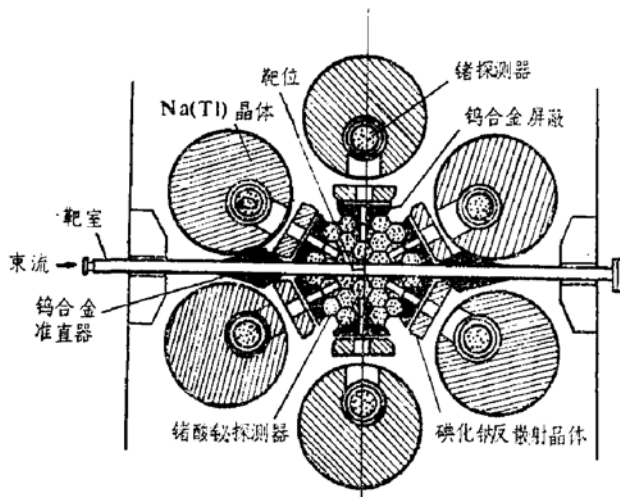


图6 建在英国达累斯伯里的球形谱仪 TESSA I 的垂直断面图(通过中心线)外围的锗探测器被NaI(Tl)晶体探测器包围以抑制康普敦散射效应,中心探测器是由锗酸铋材料做成的。

( ${}^4\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$ ) ${}^{16}\text{Ne}$  反应;还包括高能质子(能量在1GeV以上)引起的核的散裂反应以及采用奇异靶或炮弹的熔合一蒸发反应。在熔合蒸发反应中形成的新同位素,如果对它的衰变 $\gamma$ 谱学作细致研究,常常能够提供与理论作比较的有价值的矩阵元。例如在最近十年中,布鲁克海文的一些小组已经观察了来自16个新同位素的 $\gamma$ 衰变。一个有意思的可能性是通过 ${}^{10}\text{Be}$  ( ${}^{14}\text{C}$ ,  $2\text{p}$ ) ${}^{22}\text{O}$  反应产生 ${}^{22}\text{O}$ 核,其中靶和束流都是放射性的。

新的谱学技术应用的一个重要的例子是109号元素的发现,目前尚未对它命名。它是通过 ${}^{209}\text{Bi}$  ( ${}^{58}\text{Fe}$ ,  $n$ ) ${}^{226}109$  反应形成的。实际上,在三个星期的时间内只观察到一个原子的 $\alpha$ 衰变,然而实验者比较确信地把这个衰变与 ${}^{226}109$ 联系起来。

## 基本现象

在我们了解基本粒子和支配它们的力和对称性中,核起了主要的作用。例如弱相互作用的大部分基本性质是从观察复杂核中的 $\beta$ 衰变而建立起来的。一个很好的例子是由 Maurice Goldhaber, Lee Grodzins 和

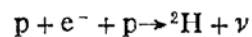
Andrew Sunyar在一个极好的实验中所作的中微子的螺旋性的测定。这一实验是以对 ${}^{152}\text{Eu}$ 谱的非常详细的了解为前提的。一个最有兴趣的例子是强相互作用中的宇称不守恒。

在流行的基本理论中,核是由核子和介子场组成的,或者换一种说法,是由夸克(禁闭的,如在口袋模型中那样)和非线性的介子场所组成的。在核物理中存在着若干效应,其中两个核子间的介子交换效应可以设想被分离开。宇称不守恒就是其中之一,在这一效应中衰变的费曼图有一个弱的和一个强的顶点。宇称变化力按 $L\cdot S$ 耦合展开有六项。为了确定所有这六项,我们必须考虑在轻核中的宇称混合,这些轻核的结构可能是足够简单便于我们了解并且可以与被测量的效应分离开。这个宇称变化力的强度仅为强作用力的 $10^9$ 分之一,所以实验的确是很难做的。我们在这里谈及这些打算是指,在实验数据能够产生一个有意义的结果之前,人们必须高精度地确定有关能级的谱学,并且极为细致地和完整地完 成 结 构 计 算。这样的考虑已经成为要求更好的壳模型计算和更详尽和精确的测量的一个强的推动力。

## 应 用

我们在核谱方面的知识在许多其他科学领域内也具有重要性。这里我们将只提及少数例子,它们涉及从天体物理到核医学。

**太阳中微子** 它被认为是来源于所谓 pep 反应



而这一反应则是由 ${}^7\text{Be}$ 的K俘获和 ${}^8\text{B}$ 的正电子衰变造成的。Ray Davis在若干完善的实验中已经发现中微子探测的计数率比预言的要小1倍。在过去的几十年中,关于轻核的一些最有价值的工作都是企图通过重新测量旧的截面值来阐明这个问题。例如测量 ${}^7\text{Be}(p,$

$\gamma$ ) $^8\text{B}$ 和 $^4\text{He}(^3\text{He}, \gamma)^7\text{Be}$ 反应的截面以及分枝比。激发态的位置常常成为很重要的因素：如果在 $^6\text{Be}$ 衰变为 $^3\text{He} + ^3\text{He}$ 的阈值附近存在着 $\text{O}^+$ 激发态，那末在质子链中形成的 $^7\text{Be}$ 较少，中微子计数率将减少(比较反应 $^3\text{He}(^3\text{He}, 2\text{p})^4\text{He}$ 和 $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ )。当这个建议被提出来以后，许多实验研究很快地证明，不管是在 $^6\text{Be}$ 中还是在同量异位核 $^6\text{He}$ ( $^6\text{Be}$ 的镜核)和 $^6\text{Li}$ 中都不存在这样的态。我们应再次指出，关于太阳中微子通量的奥秘，目前尚未解决。

**星球中核的合成** 在早期星体中元素的产生是通过众所周知的核反应链由氢向氦转变所造成的。在较老的星体中存在着重元素，它们的产生必定包含一些核反应链，而这些核反应链必须绕过原子数为5的不稳定核(例如无论 $^4\text{He} + \text{p}$ 或 $^4\text{He} + \text{n}$ 都形不成稳定的实体)；以及包括一些能克服 $^8\text{Be}$ 的轻微不稳定性的反应( $^8\text{Be}$ 会衰变为两个 $\alpha$ 粒子)。通过 $^4\text{He}(^3\text{He}, \gamma)^7\text{Be}$ ， $^4\text{He}(\text{t}, \gamma)^7\text{Li}$ 和 $^4\text{He}(\text{d}, \gamma)^6\text{Li}$ 反应有可能绕过 $A = 5$ 。 $^8\text{Be}$ 不稳定性的问题并不严重。在星球中的核是如此之多，虽然 $^8\text{Be}$ 基态的平均寿命只有0.1fsec，但是在任何给定的时刻在星球上包含数目可观的 $^8\text{Be}$ 核，它们是由 $\alpha$ 粒子的碰撞所形成的。这些 $^8\text{Be}$ 核与 $\alpha$ 粒子作用生成 $^{12}\text{C}$ 。在 $^{12}\text{C}$ 核中，在能量为7654.2keV处的 $\text{O}^+$ 态大约是在 $^{12}\text{C}$ 核中 $^8\text{Be} + \alpha$ 结合能之上300keV，而7.7MeV态的尾部允许在红巨星中进行 $^8\text{Be} + \alpha \rightarrow ^{12}\text{C}$ 的反应。在 $A = 12$ 以上，合成重元素的道路是畅通的。

**Gamow-Teller态和超新星** 在超新星爆炸中， $\beta$ 衰变在星核的崩溃中起到关键作用。特别是由质子加电子形成中子(逆 $\beta$ 衰变)的速率，它使崩溃过程中电子形成的压力被消除，是一个重要的参量。影响该速率的重要过程之一是Gamow-Teller跃迁，这种跃迁使核的自旋改变一个单位。因此Gamow-Teller共振的位置和强度是涉及崩溃问题的一个重要部分。

最近，洛斯阿拉莫斯的一个组已经开始用( $\text{t}, ^3\text{He}$ )反应研究 $^{56}\text{Mn}$ ，以确定Gamow-Teller共振的位置并测量它们的强度。在这些实验中人们已经能够在一百多条其他能级的密集的海洋中定位和研究少数(16条) $i^+$ 态。

**轻离子的熔合** 作为能源的核聚变工作的重点是入射或反射粒子涉及到中子的一些反应。其中 $^3\text{H}(\text{d}, \text{n})^4\text{He}$ 反应释放17.6MeV的能量； $^6\text{Li}(\text{n}, \alpha)^3\text{H}$ 反应释放4.8MeV以及 $^3\text{H}(\text{t}, 2\text{n})^4\text{He}$ 释放11.3MeV。中子轰击 $^6\text{Li}$ 的截面是很好地知道的；对其他两个反应，在设计聚变反应堆所感兴趣的能区中，对其有关截面知道得很差。洛斯阿拉莫斯的Nelson Jarmie指出，目前d-t截面数据的不确定性会对反应值产生高达50%的系统误差。因此新的测量正在进行以确定在1keV到100keV能区内熔合反应截面的绝对值。

**断定年代和杂质** 某些轻核的特定性质已被用到作放射性断定年代和材料样品中杂质的测定等领域中。例如 $^{14}\text{C}$ 断定年代有很长的历史并且是很成功的，近来其他同位素如 $^{10}\text{Be}$ (半衰期1.6百万年)已经成为有用的工具。

为了寻找杂质，人们可以用已知的轻核的 $\gamma$ 射线谱作为标准。例如样品中的 $^{19}\text{F}$ 杂质的测定可以用低能质子轰击靶子，然后寻找由 $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$ 反应形成的 $^{16}\text{O}$ 中已知跃迁的 $\gamma$ 谱。

**核医学** 核谱学在核医学中的应用是很多的。这里我们仅举一例。自旋为 $\frac{1}{2}$ 的负宇称态 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 是一个同质异能态； $^{99}\text{Tc}$ 的基态 $J^\pi$ 为 $9/2^+$ 。同质异能态通过143keV $\gamma$ 射线衰变，半衰期为6小时。病人被静脉注射化合物针剂，这种化合物含有 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，它优先吸附在癌细胞上。经过一段时间让这种化合物通过全身后，用NaI $\gamma$ 射线计数器阵列对病人进行扫描以确定骨骼系统的任何部分是否有不寻常的 $\gamma$ 射线强度。很清楚，不寻常的强度指示出癌的生长。当然，还有其他许多方法使核



谱学，核探测器和核加速器用于诊断和处理各种疾病，为病人谋福利。

## 今后的趋向

作为本文的总结，我们试着建议几个在未来几年中核谱学的发展方向。

▲将会出现采用放射性束流或靶子作核反应研究；这些反应将优先地激发一些核态，它们在现有的束流下是观察不到的（或研究得很不充分的）。例如，最大能量为108MeV的 $^{14}\text{C}$ 束在布鲁克海文刚刚投入例行运行。

▲在束流光学方面，在一系列出射粒子的高效高分辨探测方面，技术的进步将会继续下去。这将允许我们分开比目前研究的态间隔更小的一些能态以及研究形成截面非常

低的态。

▲高能探针将被更为广泛地应用，我们可以用更高的精度和新的方法研究核的自由度与核的组分。

▲当我们确切地知道核反应中所涉及的能级的性质时，反应机制将会被更好地理解。

▲各种核模型将获得更大的预知能力。

▲在试图测量全部有关参量中，将越来越多地进行多举实验。因此实验将日益复杂并在时间和金钱上变得越来越昂贵。这样，在高能（基本粒子）和低能（核）物理之间的传统的界限将会消失。

（孙锡军译自《Physics today》1983，  
№.11，pp.26—32，戴光曦校）