

# 核结构研究的若干新成就

颜家骏

(中科院近代物理所)

**摘要:** 随着核物理实验设备和加速器束流品质的持续进展,核结构研究不断取得新的成就。本文评述了令人感兴趣的几个方面:超变形核的发现,奇异核 $^{80}\text{Zr}$ 的观测,放射性 $\text{Sr}$ 核的激光测量,高能氙核引起反应中的集体现象。

## 一、总的态势

1986年8月在Harrogate,召开了一次有影响的国际核物理会议。参加这次会议的有来自许多国家的600多名代表,核结构研究的进展引起了人们的广泛兴趣。会议之后形成了一个核结构研究的新热潮。超变形核的发现、奇异核 $^{80}\text{Zr}$ 的观测、放射性 $\text{Sr}$ 核的激光测量和高能氙核引起反应中的集体现象,这些研究都成了当今的热门话题。

按照现在一种时髦的分类方法,核结构研究粗略地分为三类:快速转动核的结构、远离稳定性核的研究以及核反应的研究。有些核的性质只要稍微改变一点中子数和质子数,就会发生急剧变化。对于研究这类核来说,头两种方法经常是行之有效的。最引人注目的成就是鉴别 $^{152}\text{Dy}$ 核的超变形态。所用方法是用新型的TESSA探测装置测量分离 $\gamma$ 射线的谱线。在达累斯伯里,现已测量了这个超变形核的八种性质和关于这类特殊现象的新信息。绝大多数理论都预言了超变形核的存在,但对研究它们的最佳条件却莫衷一是。这些核的形状类似椭球,其长轴约为短轴长度的二倍。有些理论把向超变形态的转变和液体与固体之间的相变进行了比较。目前有些性质尚未弄懂,特别是为什么在 $^{152}\text{Dy}$ 附近的核没有观测到超变形态。无论是实验研究还是理论探索,在欧美许多实验室都依然是一个充满希望的活跃领域。去

年还研究了象缺中子 $\text{Ce}$ 核这类其它核素,它们在快速转动情况下已经严重变形。用反冲分离器和POLYTESSA的组合已经进行了一些实验,研究了 $\text{Te}$ 和 $\text{Xe}$ 同位素中的八极效应,也已用于探索质子滴线附近的新的 $\alpha$ 衰变同位素。总的研究势头是可观的。

反冲分离器和POLYTESSA组合也已用于远离稳定性核的研究,并已取得了显著成效。在达累斯伯里利用这些领先的设备,已经鉴别和测量了从来不知道的核素 $^{80}\text{Zr}$ 发射的 $\gamma$ 射线。正因为在美国和欧洲一些其它实验室也在进行着类似的实验,上述成就更给人深刻印象。激光在核尺寸和形状的研究中起着突出作用。现在已经研究出一种新的激光谱仪符合技术,并已首先用于研究非常缺中子 $\text{Sr}$ 核的核电荷半径。这些核显示出一个罕见的现象,较重同位素的电荷半径比较轻同位素的小。远离稳定性核的研究,涉及到周期表的几个区域。在这些区域里,象核基态自旋和磁量子数这样一些基本核性质都还毫无所知。测量这些核性质,特别是在核以微量出现时进行这类测量,并从中提取关于稳定性极值的重要信息,这些都是对核物理实验技术的严重考验。现在已经改进了同位素分离器和相连的稀释致冷器、以及激光装置,最近对不稳定的 $\text{Sr}$ 、 $\text{I}$ 和 $\text{Cs}$ 同位素都已进行了研究。

核碰撞研究依然是实验和理论工作的主要手段。用某些核在与其它核碰撞时分离成碎片的验证测量,证实了某些核中的结团

态。这些结团态的一部分具有很奇异的形态，并且寿命如此之短，以致用 $\gamma$ 射线谱无法进行研究。另外还进行了转移反应对核碰撞影响的研究，此时核子在这些核间发生转移。在用反冲分离器进行的唯一的一次实验中，用探测前冲反冲产物的方法，研究了低于库仑位垒一些反应。限于篇幅，本文将主要讨论几个特别令人瞩目的新成就。

## 二、超变形核的发现

理论预言，在快速转动引起的核物质极端压缩的情况下，一些核将变成拉长的“超变形”椭球的形状，其椭球长短半轴之比为二比一。这些核物质的稀有状态的实验观测，人们多年来只是望洋兴叹，最近终于获得成功，这是藉助于达累斯伯里新建成的 $\gamma$ 射线谱仪即TESSA装置实现的。

实验方法大致如下。用NSF的高能重离子束轰击靶核，由此产生处于激发态的快速转动核。这些核在转动逐渐变慢时放射出特征 $\gamma$ 射线，测量这些射线就能够研究超变形和其它高自旋现象。由于退激过程中产生的 $\gamma$ 射线十分复杂，这就要求非常高级的 $\gamma$ 射线探测技术。这种技术能够测量在一个高自旋单激发能级退激过程中所能放出的所有 $\gamma$ 射线。在达累斯伯里工作的物理学家，称得起是在这类谱仪建造方面的佼佼者，在过去几年里他们已建造过几个复杂的 $\gamma$ 射线探测装置。TESSA是总能量抑制屏蔽装置的缩写，也是高自旋核物理领域中的一次实质性变革。TESSA3是其中最新的一个，它把晶体球量热计和一套高分辨Ge探测器组合起来。它是由利物浦大学和达累斯伯里实验室共同设计和建造的。晶体球是由62个六角形的铋的锗酸盐的闪烁探测器组成，它们效率高、分辨低，几乎把靶完全包围起来。核碰撞后射出的 $\gamma$ 射线的总数目和总能量，都能进行测量。还有12个高分辨Ge半导体光子探测器，它们中的每一个都被大量的铋的锗酸盐

环绕，以便抑制本底。用分析大量事件的方法，这些事件中的 $\gamma$ 射线都能同时被几个探测器探测到的话，就能够重建核整个减慢过程中的核的完整能级图象，据此就能导出核的形状。

到目前为止，来自达累斯伯里、利物浦大学和玻尔研究所的一个小组，已经鉴别了 $^{162}\text{Dy}$ 的超变形态。把 $^{48}\text{Ca}$ 离子在NSF中加速到25MeV，然后轰击 $^{108}\text{Pd}$ 靶，就生成 $^{162}\text{Dy}$ 。测到的谱是由一组19条 $\gamma$ 射线组成的，各条间相互的能量间隔是约47KeV，这相当于 $85\hbar^2\text{MeV}^{-1}$ 的惯量矩。这就是由超变形长球状所预期的转动惯量矩。当核由60单位的角动量（约每秒 $2 \times 10^{20}$ 转）减速到22单位时，就射出上述 $\gamma$ 射线，其中每条 $\gamma$ 射线都带走2个单位的角动量。能够直接观测带60单位角动量的核态，这件事本身就是了不起的成就。过去报导的最大角动量是46个单位，不久前的改进也不过是每次提高一到二个单位。因此，对于还没变成二个碎片飞开前的任何一个转动核来说，60个单位的角动量值已经非常接近极限值了。

## 三、奇异核 $^{80}\text{Zr}$ 的观测

核谱学中最重要特色之一在于集体效应之间的相互影响。这些影响既包括许多核子的运动和单粒子间的效应，又包括特殊能级间单独核子的跃迁。许多年来，为描述单粒子行为发展了壳层模型，为描述集体行为发展了另外一些模型。人们一直致力于对于所有核都通用的统一描述，随着大型现代化计算机的迅速发展，这个愿望正在慢慢地逐渐变成现实。

由于直到最近对中等质量的核还没有进行深入地研究，要想理解它们的性质还是困难的。在这种情况下，集体效应和单粒子完全自由竞争，为了解释它们的行为就需要一个统一的模型。在已经实现了这些核的谱学研究之后，正在转向对新的还没试验好的模

型进行极灵敏的检验。在测定核形状中，集体效应和单粒子效应间的平衡是微妙复杂的，要想对此作出计算是特别困难的。

对于某些形状时单粒子态能量分布中出现间隙，正是影响核形状的支配性因素量子效应。只要把恰好低于这些间隙之一的所有可以利用的能级，都用质子和中子填满，那末就能得到具有这个形状的核中稳定性最大的那些核。无论是用质子还是中子，只要把低于某间隙的态都填满的核，预期会有特别稳定的形状。对于这类核的研究是对单粒子结构也就是对核模型的灵敏检验。但是，具有相同质子数和中子数的中等质量核都是远离稳定谷的。要想研究它们，就需要一些特殊的方法。

如果核是长球形状的话，对于具有约80个粒子的中等质量核而言，单粒子序列中的最大间隙将发生在质子数和中子数均为40处。因此，具有40个中子和40个质子的核 $^{80}\text{Zr}$ ，在具有变形很大的长球形状的核中应当是稳定的。但是，对 $^{80}\text{Zr}$ 已经进行过二十多次详细的理论估算，结果预言它的形状范围从扁球状经三轴状到长球状都是可能的。因为各种预言的形状依据不同的模型，显然实验测定形状就能检验各种模型的优劣了。

来自曼彻斯特大学、利物浦大学和达累斯伯里实验室的物理学家，已经进行了这种实验。他们所用的 $^{80}\text{Zr}$ ，是用 $^{24}\text{Mg}$ 离子轰击 $^{58}\text{Ni}$ 靶得到的。尽管得到的 $^{80}\text{Zr}$ 的量很小，对它还是成功地进行了鉴别，结果证明它是具有很大变形的长球状的。

对于稍轻些的其它一些系统来说，在扁球形状和中子与质子数为36时，一些理论模型预言在单粒子能级中存在一个新的间隙。 $^{72}\text{Kr}$ 核具有36个质子和36个中子。目前已经成功地找到了它具有扁球状基态的有力证据。对于一些模型的预言能力来说，这实在是一次令人振奋的凯旋。在具有偶数的中子数和质子数的核中，其形状由球形开始变形的一个迹象表现在它的第一个激发态 $2^+$ 态的

能量上。当这些核开始变形时，上述能量开始下降，这是因为下降的那部分表现为代之而起的转动能量了。实验测量表明，对于所有中等质量的核来说，在中子数和质子数都接近40时，核的形状都迅速转变成变形很大的形状。

#### 四、放射性Sr核的激光测量

同位素分离器和与之相关的一些技术，都已用于远离稳定性核的研究。这些相关技术中发展很快的一种就是激光光谱学。它的原理是测量核的有限尺寸和形状对核外电子能级的影响。随着由一种同位素向另一种同位素转变时中子数的改变，核电荷半径的改变引起了电子能级能量上的变化。这些核的一些其它性质，象它的磁矩和电四极矩，都因原子的电子能级而发生劈裂。这些极小的漂移和劈裂，典型的数值仅为一次原子跃迁能量的百分之一。尽管如此，用激光技术仍能进行测量。达累斯伯里和伯明翰大学的物理学家们，已经研制出一种新的超灵敏激光谱仪。曼彻斯特和萨里的同行用上述谱仪测量了远离稳定性核的这些效应。因为这类核能够得到的量非常少，这当然就需要一种非常灵敏的技术。已经对缺中子放射性Sr核进行了首次测量。用把 $^{32}\text{S}$ 离子加速到160MeV的高能束流然后轰击 $^{54}\text{Fe}$ 和 $^{50}\text{Fe}$ 靶的方法，提供了实验所需要的Sr核。Fe靶按下述要求安装，使得生成的Sr离子能够反冲后通过薄窗，并进入同位素分离器的热离子源。它们作为离子在箔中经剥离变成了原子。由于离子源处于高温状态，放射性原子随之从箔中释放出来，紧接着离子化然后加速到30KeV的能量。之后用激光器的光束激发Sr的原子中的电子。为使不同的同位素受激，需要不同的波长，可以精确测量所需激光束在波长上的微小不同。通过保持激光束波长固定并改变原子的速度，就能做到使它们都呈现某个移动了的波长。对于绝大多数缺中子同位素

都已进行了一些测量。对于 $^{76}\text{Sr}$ 的测量情况，只有每秒50个Sr原子与激光束相互作用。激光能量能够达到如此高的灵敏度，真是令人赞叹不已了。

根据这些测量就能够推断，从一种同位素到另一种同位素时核电荷半径会怎样改变。对于Sr的一些轻的同位素，已经测量了核电荷半径的变化情况。对于在中子数50、原子序数88处的那个封闭壳层而言，比它低的那些同位素的电荷半径，实际上随中子数的增加而减小。这种现象过去只在不多几个其它核中观测到。它的出现是由于下述两个效应的竞争。尽管添加中子增加了核的总体积也就是电荷半径；但是由于电四极矩改变造成的变形，引起的电荷半径的减小更为明显。这种现象在 $^{78}\text{Sr}$ 的情况是明显的，它是已知的最大变形的核之一。

我们能够算出这些竞争过程的预期效应，并能预期出核的扩大或收缩的平均特色。但是，有关电荷半径变化的几个难题，至今还不能解释。象电荷半径变化中出现的摆动，就是这类难题之一。对于一些Sr的同位素而言，奇中子的核大于相邻偶中子核的平均值。与在周期表其它部分的绝大多数其它测量中观测到的情况相比，Sr的情况十分不同。这或许应该归因于在奇中子核中，存在着更加微妙的变形。

## 五、高能氚核引起反应 中的集体现象

核物理学家研究核碰撞时，经常需要研究核态的性质，这要涉及到核中不多几个束缚最小的核子，即是在此区域内的核结构并没有很大扰动。依据核反应射出粒子的能谱鉴别低能时的这些简单核态，是早期常用的方法之一。由于剩余核处于某个具体的激发态，能量守恒定律要求粒子具有相应于每个激发态的不同的分离的能量。但是，核的内部结构中紧密束缚着许多核子。研究它们

的困难之处在于，随着激发能的增加，能级数目急剧增加，直到分离的不连续的峰淹没在平滑的毫无特色的连续谱之中。但是，在高能时发现了很简单的激发模式，在谱中出现了粘附在连续本底上的展宽的谱结构。这些结构之一相当于归入巨共振之类。此时核中所有核子围绕它的平衡形状而振荡。这种运动也是集体运动，能够设想为类似“流体”中的情况。描述集体运动的模型有多种。在同位旋标量模型中，质子和中子一起同相运动。在同位旋矢量模型中，质子和中子的运动有 $180^\circ$ 相移。巨电偶极子（同位旋矢量）模型已经知道多年。通过 $\alpha$ 粒子非弹性散射等方式激发的核能够发射一个展宽的 $\gamma$ 射线能量分布，其中心约在15MeV处。 $\gamma$ 射线能量之所以展宽，是由于这个态的寿命很短，振荡是很强的阻尼的。

为了研究高激发能时的集体现象，通常采用象 $^3\text{H}$ 这样的轻探针，这样做的原因主要是为了避免复杂的反应机制的问题。来自伯明翰大学、利物浦大学、曼彻斯特大学和达累斯伯里实验室的物理学家小组，详细地研究了 $^3\text{H}$ 引起的反应。在谱中观测到宽广的结构，这应当归因于33MeV的 $^3\text{H}$ 轰击核所引起的三种不同的反应道。最近已经测量了在 $^{51}\text{V}$ 靶上 $^3\text{H}$ 非弹性散射的能谱，在约7.6MeV的激发能处能够看到明显的凸起。这个特点是同位旋标量较低能八极子共振(LEOR)引起的，在核成块振荡时就产生了这种类似梨的谱形状。在同位旋标量模型中，质子和中子是同相振荡。在轰击粒子拾取到来自靶的质子反应中( $^3\text{H}$ ,  $^4\text{H}$ 反应)，也已表明谱中存在一个非常展宽的结构，在 $^{50}\text{Te}$ 时结构中心处于10.2MeV的激发能处，该结构覆盖在超过8MeV的本底之上。经鉴别这个结构是一个深部质子-空穴态，这个态是来自内部区域的一个质子被激发到一个松弛的束缚轨道，之所以如此激发是由于它和一些集体态的耦合所致。

在 $^3\text{H}$ 引起反应的测量中所有感兴趣之

处,几乎都与巨共振激发有关。在这个领域中的另一重要进展就是带电粒子探测器的研制,特别是大的条式探测器的安装制备。把硅的一个单个表面分割成一组窄条,从而形成一组相互独立的探测器。极化离子源现在已经在达累斯伯里接近完成了研制,并计划今年正式投入使用。

综合上述,我们可以得到一个明确的结论:那就是加速器束流品质和核物理实验装置,这两者共同为核物理研究提供了基本的物质基础。核科学工作者的任务,就在于充分利用这个物质基础,最大限度地发挥学术思想的创造性,使工作更上一层楼。最近核结构研究取得的若干新成就,就充分说明了这一点。我们深信,随着加速器束流和实验装置的持续进展,核结构研究必将出现一个鼓舞人心的局面,并为探索物质世界的奥秘,做出应有的贡献。

### 参考文献

1. D. M. Brink et al., J. Phys. G13 (1987)629
2. B. M. Nyakó et al., Phys. Rev. Lett. 56(1986)2680.
3. H. G. Price, CERN Courier 26(1986) 14
4. P. J. Twin et al., Phys. Rev. Lett. 57(1986)811
5. J. D. Garrett, Nature 323(1986)395
6. S. S. L. Ooi et al., Phys. Rev. C34 (1986)1153
7. K. L. Ying et al., J. Phys. G; Nucl. Phys. 12(1986)L211
8. D. A. Eastham et al., J. Phys. G; Nucl. Phys. 12(1986)L205
9. R. F. Davie et al., Nucl. Phys. A463 (1987)683
10. L. Goettig et al., Nucl. Phys. A464 (1987)159