

关于中子子壳与质子子壳以及两者的相互交织 (II)——稀土区

张敬业 钟纪泉 李宝安

(中国科学院近代物理所)

张 梦 中

(兰州大学)

摘 要

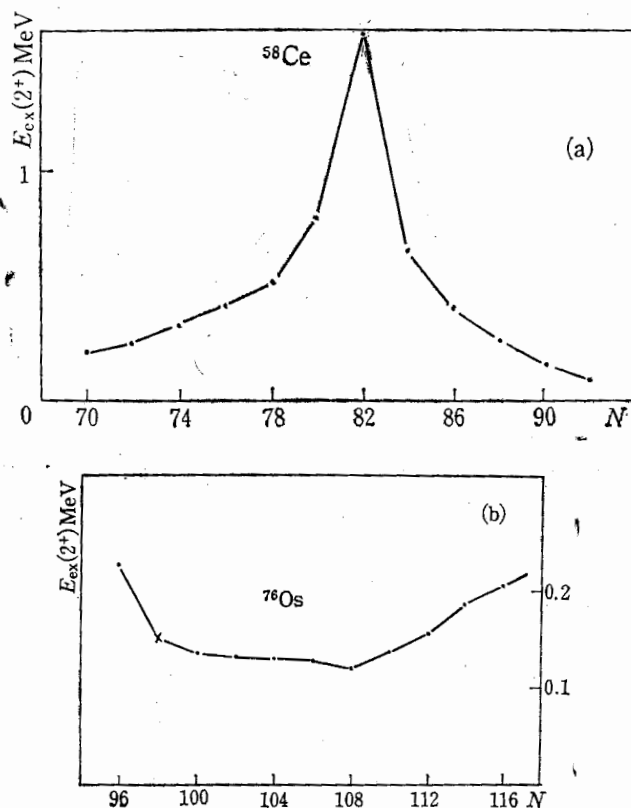
根据稀土区偶偶核的实验数据进一步探讨了二类核子子壳间的相互交织现象^[1]。着重分析了 $z = 64$ 这一子壳的特征及对中子数和自旋的依赖关系。并利用 Nilsson 能级图和 n-p 相互作用的简化计算对上述结果作了解释。

一、

对于稀土区来说, $z = 58, 64, 76$ 分别对应于质子填满 $g_{7/2}, d_{5/2}$ 及 $h_{11/2}$ 三个 i 壳, 应是球形子壳。但是, 对于 $Z = 58$ 的 Ce 同位素来说, 从实验上可以测到 2^+ 态的 $N = 70$ 到 92 诸核^[2], 除 $N = 82$ 这样的满壳核呈球形外, $N = 70-78$ 以及 $86-92$ 的同位素 2^+ 能量均不超过 0.5MeV , 均为形变核。 $N = 80$ 和 84 , 可视为过渡核 (见图 1(a))。就是对于 $^{140}\text{Ce}_{82}$ 这样的球形核, 其壳修正能随着自旋的增高也将迅速减小, 如当自旋由 0^+ 升至 2^+ , 壳修正能将由 $\approx -3.7\text{MeV}$ 变为 $\approx -2.1\text{MeV}$ 。而相邻同位素的变化均小得多, 这意味着 $^{140}\text{Ce}_{82}$ 核的球形特征将随着自旋的升高而迅速减少。 $Z = 76$ 的 Os 核在实验上已测到 2^+ 态的 $N = 96-116$ 的全部同位素, 均是形变核, 2^+ 态能级皆 $\lesssim 0.2\text{MeV}$ (见图 1(b))。可见在这样的中子数范围内, 观察不到 $Z = 76$ 的球形子壳的特征。

$Z = 64$ 的 Gd 同位素实验资料较丰富, 值得深入地加以分析。1978 年 Kleinheinz 等^[3], 首先肯定了 $^{146}\text{Gd}_{82}$ 核的第一个激发态是 3^- 态, 这是典型的双满壳核 $^{208}\text{Pb}_{126}$ 所具有的特性。而且, 在束内转换电子与 γ 的符合实验测定^[4]了这一 $3^-(1.58\text{MeV})$ 态的寿命, 给出了 $B(E3, 3^- \rightarrow 0^+) = 37 \pm 4W.U.$ 。这样高的数值证明了 3^- 态是集体态。 ^{208}Pb 的 $3^-(2.61\text{MeV})$ 态的 $B(E3)$ 值, 也正好是 $37W.U.$ 。这些结果, 最后确定了 $^{146}\text{Gd}_{82}$ 核是双幻核。相邻的 $N = 82$ 的同中素均不具有这类特征 (见图 2)。

但是 $^{146}\text{Gd}_{82}$ 这一双幻核和 $^{208}\text{Pb}_{126}$ 存在着本质的差别。 ^{208}Pb 同位素在中子数偏离 126

图 1 实验 \$2^+\$ 能级^[2](a) ^{58}Ce 同位素,(b) ^{76}Os 同位素

× 号表示未最后肯定的实验值

相当大的范围内, 其基态均为球形核。然而 ^{64}Gd 的同位素, 当 N 大于 82 以后, 球形特征很快消失, 实验 2^+ 能级急剧下降(图 3)。为了进一步研究这一过程的物理内容, 可以利用规范空间的分析方法^[5], 探讨有效能隙随着质子数 (或中子数) 的变化特征。图 4 是 $N = 82, 84, 86, 88, 90$ 诸同中子素的质子数与质子费米面 ($Z \sim \lambda_p$) 关系图, 如文献[5]所详细讨论的, 质子费米能 λ_p 由下式确定,

$$\lambda_p(I) = \frac{\partial E(Z, N, I)}{\partial Z} \approx \frac{E(Z+1, N, I) - E(Z-1, N, I)}{2} \quad (1)$$

其中 $E(Z, N, I) = -E_B(Z, N) + E_{ex}(Z, N, I)$ (2)
 E_B 为基态结合能, E_{ex} 为自旋是 I 的状态相对于基态的激发能。已知这类 $Z \sim \lambda_p$ 曲线上的平台对应于有效能隙^[5], 由图 4 可见, 当 N 偏离 82 后, 对应于 $Z = 64$ 的有效能隙迅速减小, 到 $N = 88, 90$ 已完全消失, 这和图 3 所示的 2^+ 能级当 $N \geq 88$ 后急剧下降, 核呈大变形的结果是一致的, 并为后者提供了一种物理解释。不仅如此, $^{64}\text{Gd}_{82}$ 这一双幻核的有效能隙, 随着自旋的升高也会迅速消失。(见图 $4I = 2^+$ 的曲线)。这些事实表明, 尽管 $^{64}\text{Gd}_{82}$ 核具有像 $^{82}\text{Pb}_{126}$ 这样典型双幻核的主要特征, 但它都是不稳定的, 随着 N 或 I 的增大而迅速消失。

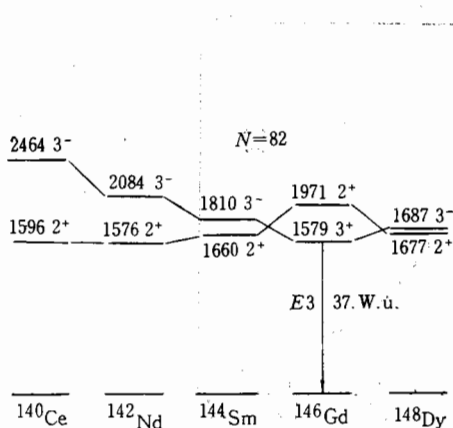


图2 $N = 82$ 同中子素的 2^+ 及 3^- 能级
只有 ${}^{146}\text{Gd}_{82}$ 3^- 态低于 2^+ 态

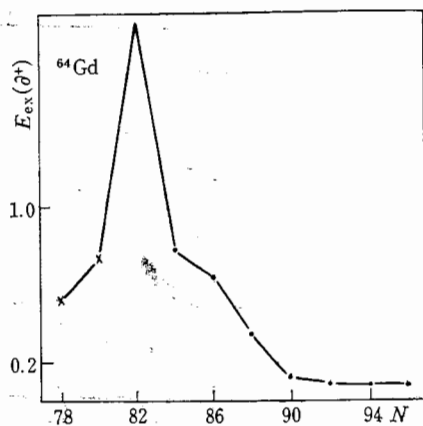


图3 ${}^{64}\text{Gd}$ 同位素的实验 2^+ 能级^[2]
× 符号表示未最后肯定的实验值

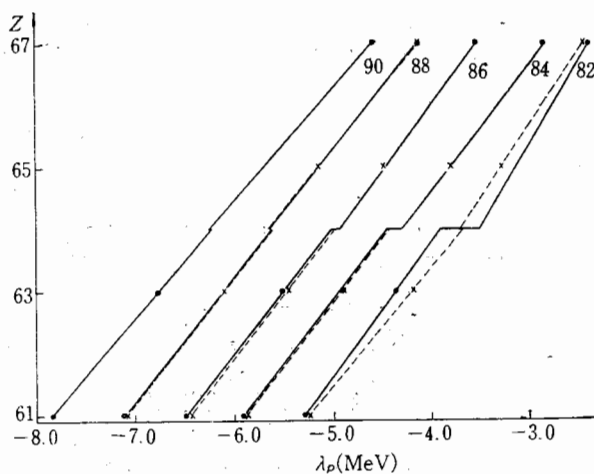


图4 $N = 82-90$ 的同中子素 $Z \sim \lambda_p$ 关系曲线。为了突出有效能隙的变化过程，
实验点均用直线相连接
--- 2^+ 态，——基态

二、

以上的实验结果，可以从 Nilsson 能级图 (图 5) 上得到定性说明。由图 5(a) 可见， $Z = 58$ 这一球形子壳能隙本身就比较小，而在长椭球方向， $Z = 58$ 的形变子壳，能量上更为有利。(由于 $h_{11/2}$ 轨道急剧下降)。所以仅当中子数取 82 这一满壳值时， ${}^{58}\text{Ge}_{82}$ 核呈球形，而当 N 偏离 82 时，Ge 同位素即趋于变形。 $Z = 76$ 的质子球形子壳虽然本身比较稳定，但在有实验 2^+ 能级的同位素的中子数 96—116 范围内，中子形变子壳(包括长椭球和扁椭球)在能量上更为有利，所以观察不到呈球形的 Os 同位素。

由图 5(a) 可见， $Z = 64$ 除了对应于一个不大的球形子壳外，由于 $h_{11/2}$ 的低(高) Ω 轨道在长(扁)椭球方向急剧下降，所以还存在着在能量上更为有利的长椭球和扁椭球的

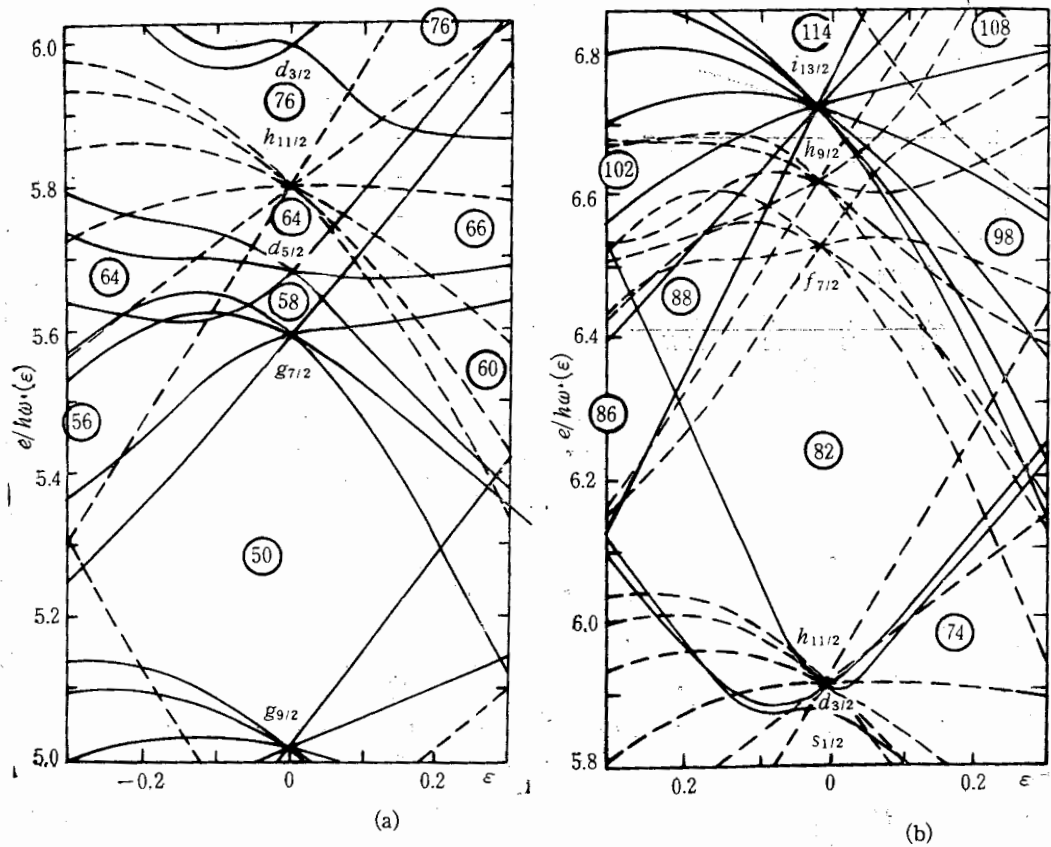


图 5 用 $A = 165$ 参数计算所得的 Nilsson 能级图
(a) 质子, (b) 中子

形变子壳。而中子数离开 82 后, 由于 $f_{7/2}$, $h_{9/2}$, $i_{13/2}$ 的低(高) Q 轨道在长(扁)椭球方向的下降, 核越来越有利于变形, 所以 $Z = 64$, $N = 82$ 这一双满壳的结构特征随着 N , Z 的变化会很快消失。如图 2, 3, 4 所揭示的那样。

应该指出的是, 以上的讨论只是定性的, 因为 Nilsson 能级并未包括对关联, 所以并不能严格反映出真实核的单粒子填充次序及能隙的严格数值。例如由图 5 看来 $Z = 76$, $N = 114$ 似乎应该形成一个球形的双满子壳核, 但这个核的实验 2^+ 能级仅 0.186MeV, 是个大变形核。这个核形变的形成机制仍值得作进一步探讨。

三、

上述关于中子壳和质子壳的特征及其存在强烈地依赖于另一类核子的事实, 有力地支持了关于中子质子作用在核变形中起关键作用的观点^[6]。文献 [6] 的作者们指出, 同类核子的对关联有利于核呈球形。而 $n-p$ 相互作用则有利于变形。所以当后者占主导地位时, 核出现形变。

为了作一粗略估计, 假定^[7,6,8]核子在谐振子中心位中运动, 而核子间 (同类的或异类

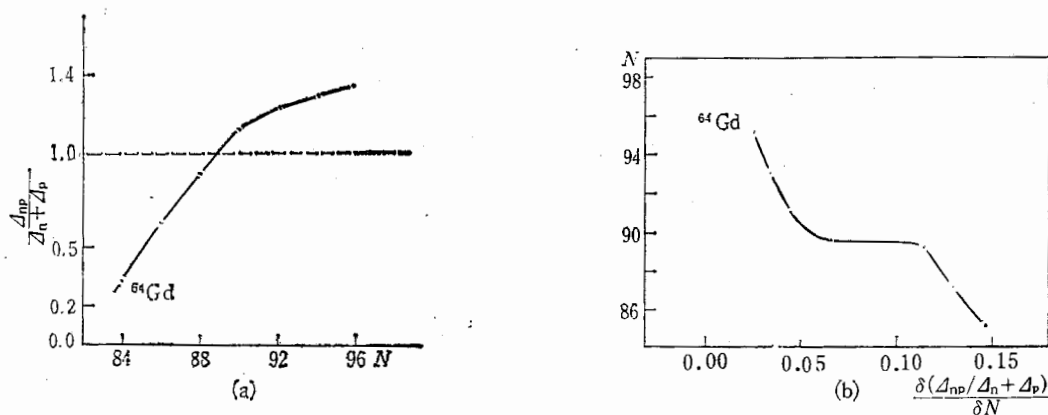


图 6 (a) $\frac{\Delta_{np}}{\Delta_n + \Delta_p} \sim N$ 关系曲线
(b) 图 (a) 的一级差分曲线

的)相互作用为 δ 力,

$$V = 4\pi g \delta(r_1 - r_2)$$

根据球形 Nilsson 能级的填充次序,我们计算了 ^{64}Gd 诸同位素的 n-p 相互作用能 Δ_{np} 与中子对关联 Δ_n 及质子对关联 Δ_p . 图 6(a) 是 $\Delta_{np}/(\Delta_n + \Delta_p)$ 与 N 的关系曲线,可以看出当 N 超过一个临界值 $N_c \approx 89$ 后, $\Delta_{np}/(\Delta_n + \Delta_p) > 1$, 即核呈变形. 这和图 3 上所显示的 2^+ 能级在 $N = 88-90$ 范围内急剧下降一致,也和图 4 所示的有效能隙的消失区域相对应. 应该指出,这里的定量符合含有一定的偶然性,因为计算中作了如前所述的近似. 对于其它较重的稀土核如 Er 等,这类计算所给出的 N_c 均偏大 2—3 核子数. 但是图 6(a),

以及为了突出曲线斜率的变化而作的一级差分图, $\delta\left(\frac{\Delta_{np}}{\Delta_n + \Delta_p}\right) \delta N \sim N$ 关系曲线. 图 6(b) 确实显示了当满壳外的中子数和质子数超过某一临界值,同时占据了 n-p 相互作用较强的配偶轨道时^[6], Δ_{np} 有可能超过 $\Delta_n + \Delta_p$, 使核呈变形. 在稀土区,这类配偶轨道主要是 $(\pi 1g_{7/2}, \nu 1f_{7/2})$, $(\pi 1g_{7/2}, \nu h_{9/2})$, $(\pi 1h_{11/2}, \nu 1h_{9/2})$, $(\pi 1h_{11/2}, \nu 1i_{13/2})$ 等.

综上所述,稀土区的质子子壳和中子子壳结构包含着丰富的内容,实验上关于长椭球形变子壳的存在有较多数据,但对于扁椭球形变子壳则尚缺少实验结果. 两类子壳的相互交织及 n-p 相互作用的进一步讨论研究也有待于进行,特别是这个区域积累了大量的高自旋态数据,为理论上研究高自旋对于 n-p 相互作用的影响提供了有利的条件.

参 考 文 献

- [1] 张敬业, 钟纪泉, 李宝安, 高能物理与核物理, 9(1985), 736.
- [2] C. M. Leazer and V. S. Shirley, "Table of Isotopes" 7th edition (1976).
- [3] P. Kleinheinz et al., Z. Phys., A284(1978), 315.
- [4] P. Kleinheinz et al., Z. Phys., A286(1973), 27.
- [5] R. Bengtsson, Jing-ye Zhang (张敬业), S. Abeng, Phys. Lett., B105(1981), 5. Jing-ye Zhang, Invited talk presented at the workshop on the "Collective states in Nuclei" 8—18 Sept, 1983, Suzhou. to be published on Nuclear Physics.
- [6] I. Talmi, Rev. Mod. Phys., 34(1962), 704. S. Pittel, Nucl. Phys., (1980).
- [7] N. Zeldes, Nucl. Phys., 2(1956/1957), 1.

- [8] 钟纪泉, 张敬业, 李宝安, 1984 年罗马尼亚核物理夏季讲习班论文集, n-p 相互作用在原子核形变中的重要作用.

THE PROTON AND NEUTRON SUBSHELLS AND THE INTERPLAY BETWEEN THEM (II) RARE EARTH REGION

ZHANG JING-YE ZHONG JI-QUAN LI BAO-AN
(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou*)

ZHANG MONG-ZHONG
(*Lanzhou University*)

ABSTRACT

Based on the experimental data of even-even nuclei in rare earth region, a further study on the interplay between subshells of two kinds of nucleons has been carried out. Emphasis is placed on the characteristic and N, I dependence of $Z=64$ subshell. Theoretical explanation is given in terms of the Nilsson diagram and a simplified calculation of n-p interactions.