

关于中子子壳与质子子壳以及 两者的相互交织 (I)

—— $A \approx 80-100$ 区

张敬业 钟纪泉 李宝安

(中国科学院近代物理研究所)

摘 要

根据实验 2^+ 能级及从规范空间的 $N-\lambda_n$ 图上反映出来的有效能隙的变化规律, 指出了质子子壳与中子子壳间的依赖关系, 探讨了质子壳效应与中子壳效应之间的相互竞争以及质子中子关联的作用, 并具体就 $A \approx 80-100$ 区内的质子子壳 $Z = 38, 40$ 及中子子壳 $N = 56$ 作了分析。

$A \approx 80-100$ 区域内核的形状、形状共存的特征等, 近年来引起了广泛的兴趣^[1-4]。实验上发现在 $Z = 40$ 球形子壳附近, $Z = 38$ 却是个大形变子壳, 例如 $^{100}_{38}\text{Sc}_{62}$, 其四极形变 ϵ_2 甚至超过 0.3 ^[2]。而这两个质子子壳的特性是强烈地依赖于中子数的。实验上还发现 $N = 56$ 是个球形子壳, 例如 $^{96}_{40}\text{Zr}_{56}$ 的 2^+ 态的能量达到 1.76MeV ^[3], 远超过大形变核以及相邻的 Zr 同位素的 2^+ 态能量。同样地, $N = 56$ 这一子壳的存在与否, 反过来则强烈地依赖于质子数。

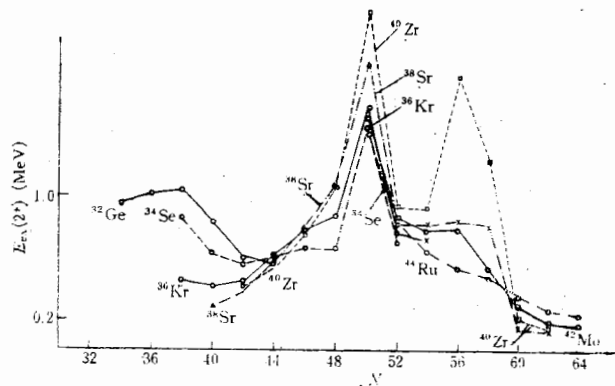


图1 $A \approx 80-100$ 区域核的实验 2^+ 态能级
×表示实验上未最后肯定的数据

图1是 $A \approx 60-80$ 区域核的实验 2^+ 态能级, 由1图可以看出如下特点, (i) 在这个区域内 $N = 50$ 是个大壳, 当 Z 从 34 变到 $Z = 44$ (由于实验数据的限制未再能扩大这个范围), 2^+ 态的能量均 $\geq 1.5\text{MeV}$ 可见这些核均是球形或近球形的。因此可以认为中子 $N = 50$ 这一大壳的存在, 在所考察的 Z 的变化范围内, 不受 Z 的影响。 (ii) $N = 56$ 这一子

壳的行为则完全不同. 实际上仅当 $Z = 40$ 时, 这一中子球形子壳才存在, $E_2^+(\%Zr_{56}) \approx 1.76\text{MeV}$; 而当 $Z = 38$ 或 42 , 这一球形子壳已经消失. (iii) $Z = 40$ 这一子壳则除了 $N = 50$ 外, 仅当 $N = 56, 58$ 及 48 , 呈现出某种球形子壳的特征 ($E_2^+ > 1\text{MeV}$); 而当 $N = 42, 60, 62$ 等, 这一球形子壳已完全不存在. (iv) $Z = 38$ 子壳除 $N = 50$ 外, 仅当 $N = 48$, $E_2^+ > 1\text{MeV}$. N 取其它值, 均呈现出一种形变子壳的特征. 对于 $N = 40, 42, 60, 62$, 均是大形变核子.

如文献 [5] 所指出的, 中子数与费米能 λ 的关系, 亦即规范空间中的角动量与转动频率关系是密切联系于有效单粒子能隙的. 其中 λ 可通过正则关系确定:

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

$$E(Z, N, I) = -E_B(Z, N) + E_{cx}(Z, N, I) \quad (2)$$

E_B 为基态结合能, E_{cx} 为自旋是 I 的态相对于基态的能量. 由图 2 及图 3 可见, 不论

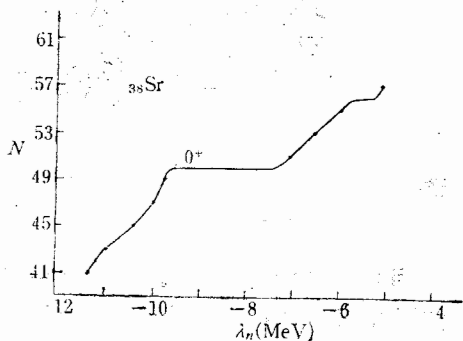


图 2 Sr 同位素的 $N - \lambda_n$ 关系图

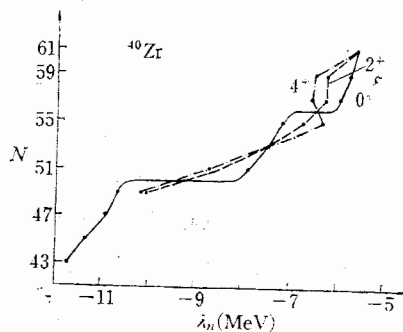


图 3 Zr 同位素的 $N - \lambda_n$ 关系图

$Z = 38$ 或 40 , $N \sim \lambda_n$ 曲线在 $N = 50$ 处, 均出现个平台 (宽约 2.4MeV), 对应于真实核中单粒子轨道分布的有效能隙. 而在 $N = 56$, Z 为 40 的 $N \sim \lambda_n$ 曲线出现宽约为 1MeV 的平台, 但 Z 为 38 的 $N \sim \lambda_n$ 曲线则仅出现宽约为 0.5MeV 的平台. 这意味着 $N = 56$ 子壳的效应必定小于 $N = 50$ 大壳, 而且在 $Z = 38$ 核中的效应又远弱于在 $Z = 40$ 核中. 由图 3 还可以看到, 随着自旋的增加, $N = 56$ 的平台 (相应地, 这一子壳的效应) 很快地消失了. 即使是 $N = 50$ 这一大壳对应的平台的宽度也是逐渐减小的 (由于可资利用的实验数据的限制, 这一点在图 3 中未能充分显示出来).

二

上述中子及质子子壳的特性以及对于另一类核子数的依赖关系可以从核内独立粒子运动的像貌加以说明. 图 4 是质子与中子的 Nilsson 能级图. 形变值是根据本文着重讨论的 Sr 及 Zr 同位素的位能面计算^[6]结果确定的: $^{82}\text{Sr}_{44}$, $\epsilon_2 = 0.023$, $\gamma = -105.96^\circ$; $^{86}\text{Sr}_{50}$, $\epsilon_2 = 0$, $\gamma = 60^\circ$; $^{90}\text{Sr}_{56}$, $\epsilon_2 = 0.198$, $\gamma = -57.65^\circ$; ^{94}Sr , $\epsilon_2 = 0.333$, $\gamma = -120^\circ$ 以及 $^{96}\text{Zr}_{56}$, $\epsilon_2 = 0.175$, $\gamma = -56.35^\circ$; $^{100}\text{Zr}_{60}$, $\epsilon_2 = 0.299$, $\gamma = -4.15^\circ$. ϵ_4 均为 0. 这一组形变值可以大体反映出这个区域的核的基态形状. 因此确定 Nilsson 能级时, 就是

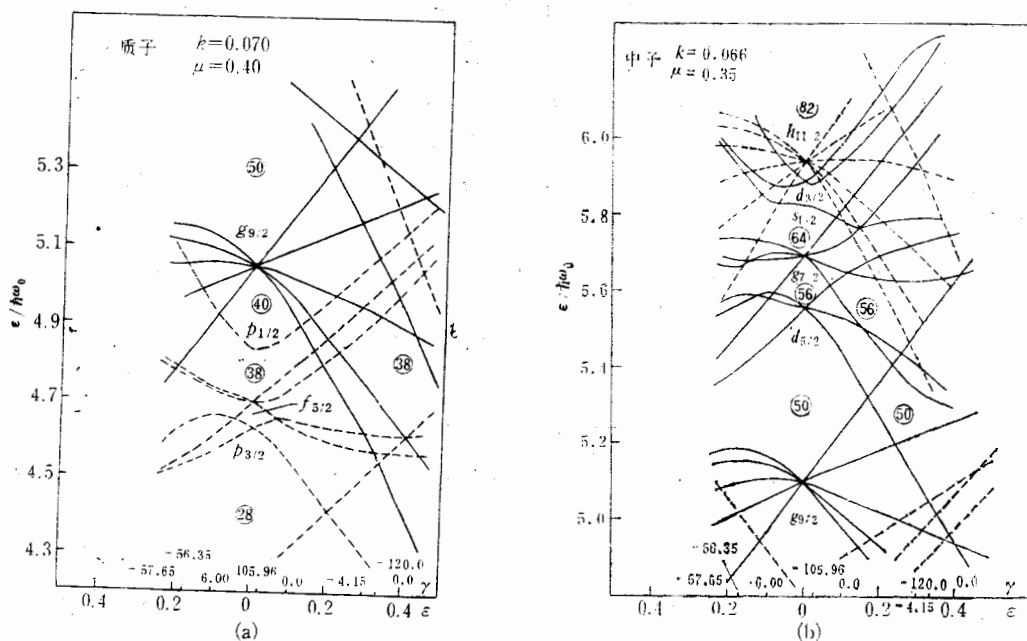


图4 Nilsson 能级图

(a) 质子 $x_p = 0.07$, $\mu_p = 0.4$ (b) 中子 $x_n = 0.066$, $\mu_n = 0.35$.

按对应的这一组 (ϵ_2, γ) 值进行计算的参数 k 及 μ 取自瑞典 Lund 小组^[7]。由图 4(a) 的质子 Nilsson 能级图立即可见, 在所涉及的形变范围内, $Z = 40$ 对应于一个球形子壳 ($\epsilon_2 < -0.2$, 还对应一个扁椭球子壳); 而 $Z = 38$, 除对应一个能隙较小的球形子壳外, 还对应于一个能隙较大的大形变子壳, 形变值大于 0.3, 且能量上较球形子壳更为有利。利用折叠 Yukawa 位所作的单粒子能级计算^[8], 同样给出了 $Z = 38$ 的形变子壳。图 3(b) 所示的中子 Nilsson 能级图中, 可以明显地看到 $N = 56$ 除了对应于一个能隙较小的球形子壳外, 还对应于一个能隙较大的形变子壳, 且能量上较球形子壳更为有利。

从这样的能级图上可以看到, $N = 56$ 的球形子壳对应的能隙本身就比较小 ($\lesssim 1.2\text{MeV}$), 而 $N = 56$ 的形变子壳在能量上更为有利。所以仅当质子数也正好填满一个球形子壳, 例如 $Z = 40$ 时, 才有可能显示出球形子壳的特征, 使核呈近球形。而一旦质子数偏离球形子壳时, $N = 56$ 的球形子壳效应立即消失, 而呈现出形变子壳的属性, 这正是我们从图 1 至图 3 所看到的情况。

由图 4(a) 可以看到, $Z = 38$ 的球形子壳对应的能隙也比较小 ($\lesssim 1.2\text{MeV}$), 但形变子壳较大且在能量上较球形子壳有利, 所以除了 $N = 50$ 这样的大壳满壳核。实验上只能观察到 $Z = 38$ 的形变子壳。当质子数偏离 38 时, 例如: $N = 62$ 的同中素形变立即减小, $^{100}_{38}\text{Sr}$, $^{102}_{40}\text{Zr}$, $^{104}_{42}\text{Mo}$ 的 2^+ 态能量分别为 129.2, 151.9 及 192.2 keV^[11]。 $N = 40$ 的同中素亦有相似的行为: $^{78}_{38}\text{Sr}$, $^{76}_{36}\text{Kr}$, $^{74}_{34}\text{Se}$, $^{72}_{32}\text{Ge}$ 的 2^+ 态能量^[9]分别为 278, 424, 635, 691 keV。这些实验事实均是 $Z = 38$ 这一形变子壳存在的旁证。

图 5 是 ^{88}Sr 同位素的实验壳修正能 Eshell^[10]。

$$E_{\text{shell}} = E - E_{L,D}^{\text{ph}}$$

(3)

其中 E 即(2)式给出的实验能量, E_{sh}^{lp} 是球形核液滴能量^[8]. 如文献[10]所指出的, 由一个满壳(图中是 $N = 50$)起, E_{shell} 将从负值开始逐渐增大, 达到极大时, 核将调整自己的形状, 产生形变, 以降低壳修正能. 对于 Sr, N 偏离 50 后, 壳修正能迅速增大, 表明球形在能量上越来越不利; 当 N 达到并超过 60 和低于 44 时, 核即进入大形变区.

值得注意的是, 图 5 的曲线在 $N = 56$ 处, 也有个微小的下降, 这是 56 子壳的效应(可以看到它是远小于 $N = 50$ 这一大壳的效应的). 而当自旋升至 2^+ 时, 这一效应则被洗去, 连 $N = 50$ 的大壳所对应的谷, 也变浅了不少, 即壳效应减弱了.

综上所述可见, 除了中子对关联及质子对关联的存在有利于核呈球形外, 中子的壳结构及原子壳结构的特性也是强烈地影响核的形状的. 两者的依存与竞争, 影响了核从球形至变形的变化过程, 而在一些过渡区, 则可能存在复杂的形状共存现象^[1,4,11].

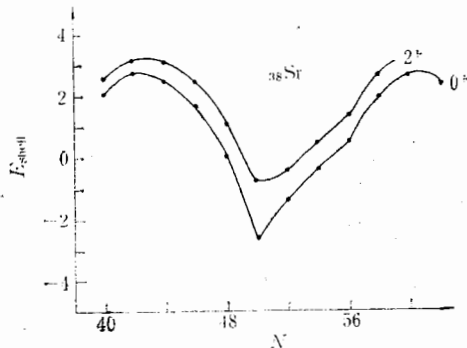


图 5 ^{88}Sr 同位素的实验壳修正能

三

中子壳的特性(球形或变形)及存在与否依赖于质子数, 反之亦然. 这一事实似乎意味着中子质子的对关联应该在决定核的形状上起重要作用. 早在 1962 年^[12]就有人指出过, 轻核(例如 ^{20}Ne)其形变就是来自于 p-n 相互作用的. 近年来, 有的作者^[3,13]进一步扩展了上述思想指出 p-n 关联不仅是轻核出现形变的原因, 而且也是中重核和重核出现形变的原因.

文献[14]指出, 仅当中子及质子所占轨道有大的重叠时, 两者才会有强的关联. 如果中子和质子所占的轨道分别为 $(n_N l_N j_N)$ 和 $(n_p l_p j_p)$, 则当 $n_N = n_p$, $l_N \approx l_p$, 两轨道可以有最大的重叠. 这样的两条轨道叫配偶 (Partner) 轨道.

假定核子在谐振子位 $(\hbar\nu^2/2M)r^2$ 中运动, 而 p-n 关联为 δ 函数形式,

$$V_{np} = 4\pi g \delta(\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_p) \quad (4)$$

且中子和质子均配对存在, 于是可得^[14,15]

$$\langle V_{np} \rangle = n_n \cdot n_p \cdot F^{(0)} \quad (5)$$

其中 n_n , n_p 分别为处于未满中子 j_n 壳及质子 j_p 壳中的中子数及质子数, $F^{(0)}$ 是径向重叠积分.

$$F^{(0)} = g \left(\frac{\nu^3}{2\pi} \right)^{1/2} \frac{(2l_p + 2l_N + 1)!!}{2^{l_p + l_N - 1} \cdot (2l_p + 1)!! (2l_N + 1)!!} \quad (6)$$

常数 $g \left(\frac{\nu^3}{2\pi} \right)^{1/2}$ 可通过实验值确定. 由(6)式很容易看到, 处于配偶轨道的质子与中子之间的关联最强.

文献[3]曾经据此指出了 ${}_{40}\text{Zr}$, ${}_{42}\text{Mo}$ 两同位素,当 $N \geq 60$ 时,核具有大的形变的原因,正是由于质子占据了 $1g_{9/2}$ 轨道,而中子占据了配偶的 $1g_{7/2}$ 轨道的缘故.这里存在着各种效应的竞争,仅当填充了配偶轨道的中子与质子,通过n-p相互作用所获得的能量增益(均就绝对值而言)大于由于填充不同轨道的单粒子能量损失加上质子对能和中子对能时,中子和质子才会填充配偶轨道,大形变才会出现.

第二节提到的 $Z = 38$ 子壳,由图4(a)可见,当质子填充形变子壳时,不仅占据了 $1g_{9/2}$ 这一有利于与中子 $1g_{7/2}$ 配偶的轨道,且单粒子能量比填充 $1f_{7/2}$ 构成球形子壳为低,(即改变填充次序能量损失为负).这和 $Z = 40$ 的子壳情况不同:最后两个质子如果不填充 $2p_{1/2}$ 这一球形子壳,而改填充 $1g_{9/2}$ 轨道,从单粒子能量上并不有利,这可以说明 $Z = 38g$ 为什么通常以形变子壳出现的缘故,只要中子有可能填充 $1g_{7/2}$ 这一配偶轨道.

由图4(b)可见,在 $A \approx 80-100$ 这个区域内,中子数超过50后,先填充的是 $2d_{5/2}$,不是 $1g_{9/2}$ 的配偶轨道.但当大于56,就有可能填充 $1g_{7/2}$,于是有利于出现形变.只要质子有可能填充 $1g_{9/2}$,特别是当中子达到60,62时,除了在 $1g_{7/2}$ 轨道上外, $1h_{n/2}$ (这也是质子 $1g_{9/2}$ 的配偶轨道,对于 l_p 和 l_n 比较大时,由(6)式可见, $l_p = l_n \pm 1$ 的一对轨道重叠也很大^[3])轨道也填充了中子,因而更加有利于出现形变.当 N 小于50,中子填充未满的 $1g_{9/2}$ 轨道.特别是当 $N \leq 46$ 时,中子填充形变的轨道在能量上较填充球形轨道更为有利,加上处于配偶轨道($\pi g_{9/2}$, $\nu g_{9/2}$)上质子中子的相互作用能量,促使核呈大的形变.这一切正是第一节中由图1实验结果所归纳出来的这一区域核的形状的概貌.

应该指出,上面关于p-n相互作用的讨论中使用了 δ 函数这种简化的相互作用形式和谐振子位,这自然是一种近似,但它已可以给出与实验大致符合的定性结果,这说明其中包含着一定的合理内核的.为了定量地说明p-n关联对于核的形变的作用,需要对p-n相互作用的形式作更深入一步的探讨,并使用更加接近真实情况的核位.

对于稀土区的质子与中子子壳的讨论,将在随后的工作中加以讨论.

参 考 文 献

- [1] J. H. Hamilton, *Heavy Ion Collisions, in Lecture Notes in Physics*, 168 (1982), 300.
- [2] J. H. Hamilton, A. Y. Ramayya, C. F. Maguire, R. B. Piercey, R. Bengtsson, P. Moller, J. R. Nix, Jing-ye Zhang, R. L. Robinson and S. Frauendorf, to be published.
- [3] P. Federman and S. Pittel, *Phys. Lett.*, 69B (1977), 385.
- [4] 张敬业、李宝安, *高能物理与核物理*, 8(1984), 761.
- [5] R. Bengtsson, Jing-ye Zhang, S. Aberg, *Phys. Lett.*, 105B (1981), 5; 张敬业, Invited talk presented at the "Workshop on the Nuclear Collective States" 9-18 sept 1983, Suzhou, to be published on *Nucl. Phys. A*.
- [6] S. Aberg, *Phys. Scripta*, 25 (1982), 23.
- [7] G. Leander, 私人通讯, (1982).
- [8] R. Bengtsson, P. Moller, R. Nix and Jing-ye Zhang, *Phys. Scripta* to be published.
- [9] C. M. Lederer and V. S. Shirley, "Table of Isotopes", 7th edition.
- [10] R. Bengtsson, I. Ragnarsson, Jing-ye Zhang, S. Aberg, IV Int. Conf. on Nuclei far from stability Helsingor, Denmark (1981), p. 509.
- [11] 张敬业, *高能物理与核物理*, 4 (1980) 649.

- [12] I. Talmi, *Rev. Mod. Phys.*, **34** (1962), 704.
[13] P. Federman, S. Pittel and R. Campos, *Phys. Lett.*, **82B** (1979), 9.
[14] A. de Shalit and M. Goldhaber, *Phys. Rev.*, **92** (1953), 1211.
[15] A. de Shalit, *Phys. Rev.*, **105** (1957), 1528.

THE PROTON AND NEUTRON SUBSHELLS AND
THE INTERPLAY BETWEEN THEM
(I) $A \approx 80-100$ REGION

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

ABSTRACT

Basing on the experimental 2^+ levels and the behavior of the variations of the effective gap coming from the $N \sim \lambda_n$ plot in gauge space, relations between proton and neutron subshells are pointed out.

The competition between proton and neutron shell effect and proton-neutron correlation are discussed too. As an example, $Z=38, 40$ and $N=56$ subshells in region of $A \approx 80-100$ are analyzed in detail.