

奇奇核与奇 A 核 n-p 相互作用*

高早春¹ 陈永寿^{1,2}

1 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

2 (中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

摘要 从结合能实验值提取 n-p 相互作用能 ϵ_{ip-jn} , 系统比较了奇奇核单质子单中子相互作用能 ϵ_{1p-1n} 与相邻奇 A 核相应量的平均值, 发现前者普遍大于后者. 提出奇奇核 n-p 增强的解释为, GM shift 效应和同类核子对关联对奇 A 核 n-p 相互作用的削弱效应. 同时指出, 奇质子核的 ϵ_{1p-2n} 相当好地近似等于同质量数奇中子核的 ϵ_{2p-1n} , 并且这与 Garvey-Kelson 关系是等价的.

关键词 n-p 相互作用 结合能 质子(中子)分离能

1 引言

n-p 相互作用在原子核结构中的重要意义很早就被广泛地认识到^[1,2], 应用这一相互作用解释许多诸如组态混合、原子核的集体运动等现象已经引起了人们极大的兴趣. 1962 年 Talmi^[2] 指出, n-p 相互作用对于奇 A 核的低激发能级结构并不重要, 但对奇奇核将产生非常重要的影响. Federman 和 Pittel^[3] 的研究表明, 在 $A=100$ 附近, 原子核由球形到椭球形的突变就是由于价核子之间的单极 n-p 相互作用导致单粒子能级发生变化的结果. 这一论断已经推广到其它形状发生突变的核区^[4]. 他们还发现^[3], 所有变形核区都有一个有趣的特征, 即质子中子所填轨道在空间的重叠程度是比较大的. 由此可见, 强的 n-p 相互作用对于原子核的形变起着很重要的作用. 另外, 在满壳附近, n-p 相互作用的增强证实了自旋轨道耦合效应与 n-p 相互作用密切相关^[5]. 质子中子之间的相互作用还可能对质子滴线附近的核结构产生重要的影响. 近年来, 奇奇核低自旋能谱中发现了不少 Signature 反转现象, 研究表明, n-p 相互作用对于奇奇核的 Signature 反转也可能起着重要的作用^[6]. 由此可见, n-p 相互作用对核结构产生了非常重要的影响.

从结合能提取最后 i 个质子与最后 j 个中子之间的相互作用能 ϵ_{ip-jn} 已经有很多文献介绍过(如文献[7—10]), 基本定义如下(为方便起见, 以下约定 N, Z 为偶数)

$$\epsilon_{ip-jn}(N+j, Z+i) = S_{jn}(N+j, Z+i) - S_{jn}(N+j, Z) \quad (1.1a)$$

1998-12-9 收稿

* 国家自然科学基金(19677203)和核工业科学基金(J95A01001)资助项目

$$\epsilon_{ip-jn}(N+j, Z+i) = S_{ip}(N+j, Z+i) - S_{ip}(N, Z+i), \quad (1.1b)$$

其中 S_{ip} 与 S_{jn} 分别为最后 i 个质子与最后 j 个中子的分离能, 它们的定义如下:

$$S_{ip}(N, Z+i) = B(N, Z+i) - B(N, Z), \quad (1.2)$$

$$S_{jn}(N+j, Z) = B(N+j, Z) - B(N, Z). \quad (1.3)$$

就 n-p 相互作用能 ϵ_{2p-1n} 和 ϵ_{1p-2n} 而言, 它们分别包含一对质子和一对中子, 应期望比值 $\epsilon_{2p-1n}/\epsilon_{1p-1n}(\epsilon_{1p-2n}/\epsilon_{1p-1n})$ 为 2, 然而在文献[5, 10]中, 分别在以 ^{40}Ca 和 ^{16}O 为核实的区域内给出了 $N=Z$ 情况下的值分别约为 1.25 和 1.48, 初步得出了奇奇核 ϵ_{1p-1n} 大于相应奇 A 核中平均单质子单中子相互作用能的结论.

本文对奇奇核 $(N+1, Z+1)$ 的 ϵ_{1p-1n} 、奇质子核 $(N+2, Z+1)$ 的 ϵ_{1p-2n} 以及奇中子核 $(N+1, Z+2)$ 的 ϵ_{2p-1n} 作了系统的比较. 结果表明, ϵ_{1p-1n} 普遍大于 $\epsilon_{1p-2n}/2$ 和 $\epsilon_{2p-1n}/2$, 称之为奇奇核 n-p 相互作用的增强. 更细致的分析表明, 丰质子奇奇核 n-p 相互作用的这种增强比丰中子核的更加显著. 尤其在靠近质子滴线的核, 奇奇核 n-p 相互作用的增强是非常的显著, 以致于它们的 ϵ_{1p-1n} 相当普遍地大于相应奇质子核的 ϵ_{1p-2n} 或相应奇中子核的 ϵ_{2p-1n} 本身. 同时分析表明, 在绝大部分核区, Garvey-Kelson 关系的误差在 500keV 之内.

2 计算与分析

定义

$$\Delta S_p(N+1, Z+1) = \epsilon_{1p-1n}(N+1, Z+1) - \frac{\epsilon_{1p-2n}(N+2, Z+1)}{2} \quad (2.1)$$

及

$$\Delta S_n(N+1, Z+1) = \epsilon_{1p-1n}(N+1, Z+1) - \frac{\epsilon_{2p-1n}(N+1, Z+2)}{2}, \quad (2.2)$$

由核力的电荷无关性, 应期望

$$\epsilon_{2p-1n}(N+1, Z+2) \approx \epsilon_{1p-2n}(N+2, Z+1), \quad (2.3)$$

因而应有

$$\Delta S_p(N+1, Z+1) \approx \Delta S_n(N+1, Z+1), \quad (2.4)$$

从结合能提取的 $\Delta S_p(N+1, Z+1)$ 和 $\Delta S_n(N+1, Z+1)$ 看, 两者的值的确基本是相当的, 这从下面的分析可以看到. 为此我们定义 ΔS

$$\Delta S(N+1, Z+1) = \frac{\Delta S_p(N+1, Z+1) + \Delta S_n(N+1, Z+1)}{2}, \quad (2.5)$$

定义误差限 dS

$$dS(N+1, Z+1) = \frac{|\Delta S_p(N+1, Z+1) - \Delta S_n(N+1, Z+1)|}{2}. \quad (2.6)$$

图 1, 2 分别给出了 $A < 220$ 几乎所有奇奇核(有些处于滴线附近的核, 由于它们的结合能没有精确地测定, 所以没有统计这些核)的 ΔS 及 dS 值(本文采用文献[11]的结合能). 可以看出, 奇奇核的 ΔS 几乎都是正的(只有极少数例外), 因而奇奇核 n-p 相互作

用的增强是一个普遍现象. 同时, dS 的值绝大部分都落在 125keV 内, 因而(2.3)式是一个很好的近似, 将(2.3)式用结合能表达出来, 即有 Garvey-Kelson 关系^[12]

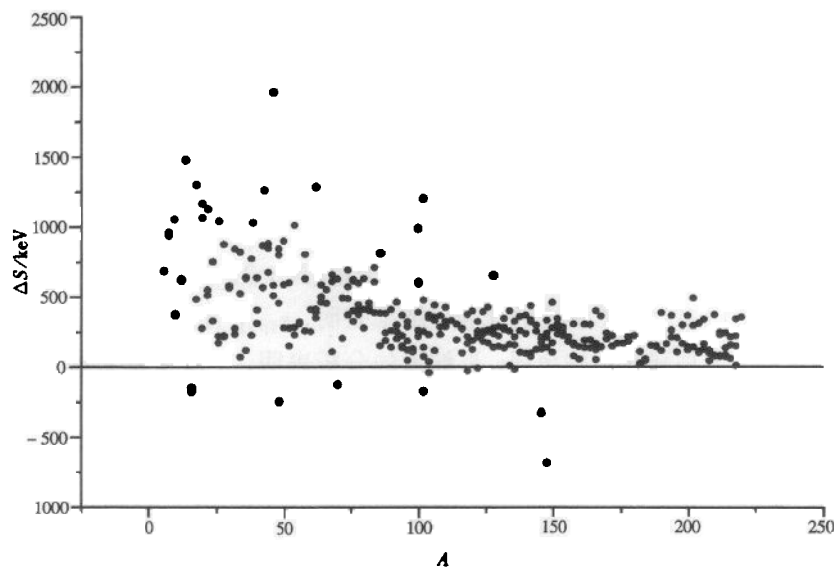


图1 $A < 220$ 奇奇核 ΔS_p 与 ΔS_n 的平均值 ΔS

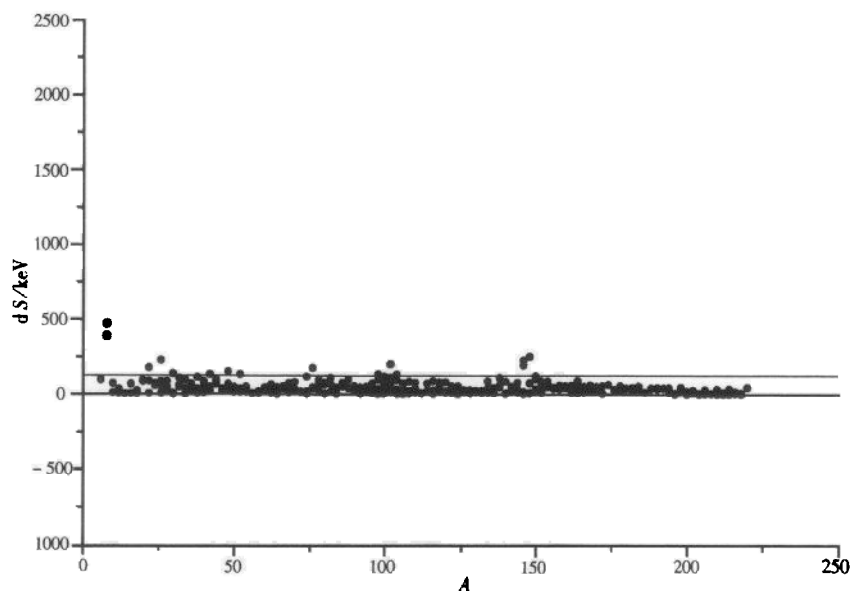


图2 $A < 220$ 奇奇核 ΔS_p 与 ΔS_n 之差绝对值的一半 dS
横线为 125keV 的位置.

$$B(N+1, Z+2) + B(N+2, Z) + B(N, Z+1) - B(N+2, Z+1) - B(N, Z+2) - B(N+1, Z) \approx 0 \quad (N, Z \text{ 取偶}), \quad (2.7)$$

由(2.1), (2.2), (2.6)式得出(2.7)左边的绝对值是 dS 的 4 倍. 于是易知(2.7)式的误

差基本上在 500keV 之内。

研究奇奇核 n-p 相互作用增强的起因, 首先应考虑 GM shift^[13] 的贡献, 它反映了奇奇核内两个奇粒子角动量分别耦合成平行和反平行时 n-p 相互作用能的差, 即

$$E_{GM} = \langle \chi_{k_p} \chi_{-k_n} | V_{np} | \chi_{k_p} \chi_{-k_n} \rangle - \langle \chi_{k_p} \chi_{k_n} | V_{np} | \chi_{k_p} \chi_{k_n} \rangle, \quad (2.8)$$

其中 χ 表示单粒子态(假设原子核具有轴对称性), $k (> 0)$ 表示奇粒子角动量沿对称轴方向上的投影绝对值. GM shift 可以从奇奇核低激发谱中提取^[14]; 而另一方面, 如果本文讨论的 n-p 相互作用的增强完全由 GM shift 引起, 则根据(2.8)式, GM shift 也可从奇奇核及其相邻奇 A 核 n-p 相互作用能中提取:

$$E'_{GM} = 2\epsilon_{1p-1n}(N+1, Z+1) - [\epsilon_{1p-2n}(N+2, Z+1) + \epsilon_{2p-1n}(N+1, Z+2)]/2, \quad (2.9a)$$

即有

$$E'_{GM} = 2\Delta S, \quad (2.9b)$$

应期望

$$E'_{GM} = |E_{GM}|. \quad (2.10)$$

表 1 稀土区若干奇奇核的 E'_{GM} 与 $|E_{GM}|$ 的比较

	¹⁵⁸ Tb	¹⁶⁰ Tb	¹⁶⁴ Ho	¹⁶⁶ Ho	¹⁶⁸ Tm	
$ E_{GM} /\text{keV}$	133	126	148	84	138	
E'_{GM}/keV	291	269	250	302	260	
	¹⁷⁰ Tm	¹⁷⁴ Lu	¹⁷⁶ Lu	¹⁸² Ta	¹⁸⁶ Re	¹⁸⁸ Re
$ E_{GM} /\text{keV}$	192	114	253	86	163	149
E'_{GM}/keV	465	319	317	195	287	280

E_{GM} 的数据取自文献[14]

然而, E'_{GM} 系统地大于 $|E_{GM}|$, 例如表 1 列出了稀土区若干核的 E'_{GM} 及 $|E_{GM}|$ 的值, 前者几乎是后者的 2 倍. 显然仅仅 GM shift 还不足以解释奇奇 n-p 相互作用的增强, 除此以外, 应还有其它因素. 在式(2.9a)右侧, 包含了奇 A 核的 n-p 相互作用能 1p-2n 和 2p-1n, 它们分别包含一对质子和一对中子. 我们认为, 正是由于同类核子的对关联, 才引起了 n-p 相互作用能 1p-2n 和 2p-1n 的削弱, 从而导致 E'_{GM} 的相应增大. 这是容易理解的, 根据微扰论, 原子核基态的 n-p 相互作用能可近似表示为

$$\Delta E_g = \langle G | V_{np} | G \rangle + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{|\langle EX_i | V_{np} | G \rangle|^2}{E_i - E_g}, \quad (2.11)$$

其中 $|G\rangle$ 表示基态, $|EX_i\rangle$ 表示第 i 个激发态, E_g 和 E_i 分别是相应的基态能量和激发能. 众所周知, 任何类型的核内相互作用都必须使原子核具有确定的自旋 J 和宇称 π . 于是我们只考虑那些自旋宇称与基态相同的激发态. 对于奇质子核的基态, 全部中子的自旋宇称 $J_n^* = 0^+$, 故 $J^* = J_p^*$. 一般说来, 第一个具有相同 J^* 的激发态应由 $J_n^* = 2^+$ 构成, 显然由于能隙, 该激发态要比基态高出许多, 于是对于奇质子核的 ΔE_g , 其主要部分是 $\langle G | V_{np} | G \rangle$. 类似地, 奇中子核也应如此. 可是对于奇奇核, 基态与激发态之间不存在能隙, 式(2.11)右侧第二项(二阶微扰)变得重要起来. 因而相对于奇奇核而言, 奇 A 核

的对关联有削弱 n-p 相互作用的效应。

奇奇核 n-p 相互作用的增强有一个有趣的特征是在丰质子区, 尤其是在质子滴线附近, 这种增强十分显著, 有些奇奇核的 ϵ_{1p-1n} 甚至大于相邻奇 A 核的 ϵ_{1p-2n} 和 ϵ_{2p-1n} 本身. 例如, 图 3 给出了质子数为 85 奇奇同位素的 ϵ_{1p-1n} 值与相应的 $(\epsilon_{1p-2n} + \epsilon_{2p-1n})/2$ 值. 可见, 当 $N \leq 116$ 时前者大于后者. 系统分析表明, 这种奇怪的现象在轻核区出现得比较偶然, 但在中重核区越来越系统地出现, 对这一现象需进一步解释. 另外, 在丰中子区域, $\epsilon_{1p-1n} > (\epsilon_{1p-2n} + \epsilon_{2p-1n})/2$ 的现象却从未出现.

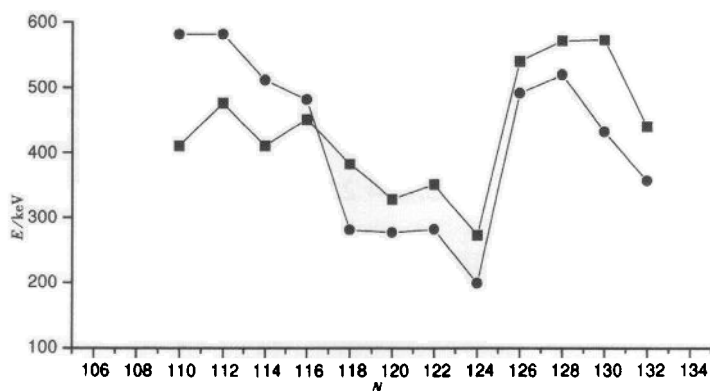


图 3 质子数为 85 奇奇同位素的 ϵ_{1p-1n} 与相应 $(\epsilon_{1p-2n} + \epsilon_{2p-1n})/2$ 的值

注意, 在 $N=126$ 处的突然增大是由于中子数达到满壳;

● $\epsilon_{1p-1n}(N+1, 85)$; ■ $[\epsilon_{1p-2n}(N+2, 85) + \epsilon_{2p-1n}(N+1, 86)]/2$.

还有一个有趣的现象是在 $N=Z$ 处, ΔS 的值要比在 $N=Z \pm 2$ 处的值显著地高(如表 2 所示). 事实上, 在 $N=Z$ 的情况下, 各种 n-p 相互作用能 $\epsilon_{i_p-j_n}$ 本身都出现了明显的增强^[8,9], 这是因为质子中子填充在相同的轨道上, 彼此波函数重叠程度很大, n-p 相互作用自然就会很大, 可是若进一步比较 ϵ_{1p-1n} 与 ϵ_{2p-2n} (ϵ_{1p-2n}), 就会发现 ϵ_{1p-1n} 的增强幅度比 ϵ_{2p-1n} (ϵ_{1p-2n}) 的增强幅度还要显著, 即表现为 ΔS 的显著增大. 这一现象也需进一步理解.

表 2 $N=Z, Z \pm 2$ 处 ΔS 值的比较

Z	$N=Z-2$	$N=Z$	$N=Z+2$	Z	$N=Z-2$	$N=Z$	$N=Z+2$
5	942	1055	612	19	630	1030	404
7	621	1472	-185	21	307	1250	877
9	-161	1288	1158	23	845	1947	841
11	1062	1121	750	25	798	895	598
13	746	1040	222	27	275	1009	307
15	211	563	272	29	—	802	408
17	230	818	639	31	—	1274	584

奇奇核 n-p 相互作用的增强,显然会对原子核的结构产生影响.特别是在质量数 A 不超过 100 的核区,这种增强尤其显著, ΔS 值从几百 keV 到近 1MeV. 丰质子区的奇奇核 n-p 增强也十分显著.因此,在处理这些核区与奇奇核结合能有关的问题时,应须特别考虑这种增强效应.然而,奇奇核 n-p 相互作用及其增强效应是如何影响核结构的,尤其是远离 β 稳定线核的结构、影响程度怎样,这是有待进一步研究的问题.

3 总结

本文从实验结合能提取质子中子相互作用能,系统比较了几乎所有奇奇核 ϵ_{1p-1n} 与相邻奇 A 核的 ϵ_{1p-2n} (奇质子核)和 ϵ_{2p-1n} (奇中子核),前者普遍大于后者的一半,在质子滴线附近,前者甚至大于后者本身.因而奇奇核 n-p 相互作用的增强是一个普遍现象.分析表明,造成奇奇核 n-p 增强的因素除 GM shift 外,还有同类核子对关联对奇 A 核 n-p 相互作用的削弱效应.同时指出奇质子核的 ϵ_{1p-2n} 相当好地近似于同质量数奇中子核的 ϵ_{2p-1n} ,这与很早就提出的 Garvey-Kelson 关系是等价的.

n-p 相互作用的增强会影响核结构,尤其是在 $A \leq 100$ 的核区,包括了对核天体物理非常重要的核.研究核天体物理,需要对它们进行细致的核结构计算,就应要考虑 n-p 相互作用的增强.

参考文献(References)

- 1 de Shalit A, Goldhaber M. Phys. Rev., 1953, **92**:1211
- 2 Talmi I. Rev. Mod. Phys., 1962, **34**:704
- 3 Federman P, Pittel S. Phys. Lett., 1977, **B69**:385
- 4 Casten R F et al. Phys Rev. Lett., 1981, **47**:1433
- 5 Mouze G, Bidegainberry S, Rocaboy A et al. Nuovo Cimento, 1993, **A106**:885
- 6 LIU Y Z et al. Phys. Rev., 1995, **C52**:2514
- 7 ZHANG J Y, Casten R F, Brenner D S. Phys. Lett., 1989, **B227**:1
- 8 Mouze G, Rocaboy A. Nuovo Cimento, 1996, **A109**:527
- 9 Brenner D S, Wesselborg C, Casten R F et al. Phys. Lett., 1990, **B243**:1
- 10 Mouze G, Ythier C. Nuovo Cimento, 1990, **A103**:1467
- 11 Audi G, Wapstra A H. Nucl. Phys., 1995, **A595**:409
- 12 Garvey G T, Kelson J. Phys. Rev. Lett., 1966, **16**:197
- 13 Gallagher C J, Moszkowski S A. Phys. Rev., 1958, **111**:1282
- 14 Boisson J P, Piepenbring R, Ogle W. Phys. Rep., 1976, **26**:99

n-p Interaction in Odd-Odd Nuclei and Odd-A Nuclei*GAO ZaoChun¹ CHEN YongShou^{1,2}¹ (Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)² (Institute of Theoretical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The interaction energies of the last i proton(s) and the last j neutron(s) were obtained from nuclear mass-data-base. The last n-p interaction energy ϵ_{1p-1n} of odd-odd nuclei was compared with half of the average value of the last proton-dineutron interaction energy ϵ_{1p-2n} in odd- Z nuclei and the last diproton-neutron interaction energy ϵ_{2p-1n} in odd- N nuclei. It is found that the former is systematically greater than the latter. The enhancement of n-p interaction may be attributed to the effect of pairing weakening the n-p interaction in odd- A nuclei as well as GM shifts. Additionally, it is found that ϵ_{1p-2n} in odd- Z nuclei is generally approximate to ϵ_{2p-1n} in odd- N nuclei with the same mass number A , which is equivalent to the Garvey-Kelson mass relation.

Key words neutron-proton interaction, binding energy, proton (neutron) separation energy

Received 9 December 1998

* Project supported by National Natural Science Foundation of China(19677203) and Science Foundation of Chinese Nuclear Industry (J95A01001)