

# 实验质子-中子相互作用能量\*

张敬业

(理论分中心, CCAST (World Lab.) 和 中国科学院近代物理所, 兰州 730000)

## 摘 要

本文介绍并发展了一种从实验结合能及激发能提取质子-中子相互作用能  $\delta V_{pn}$  的方法, 据此对  $N \geq 40$  全部偶偶核的基态及部份核的高自旋态的质子-中子互作用作了讨论. 同时, 还讨论了一些奇A核中特定组态的高自旋态的质子-中子互作用. 结果表明, 这类实验  $\delta V_{pn}$  值包含着 p-n 互作用的各种多极项, 主要是单极和四极项, 而且灵敏地依赖于核的形变, 组态与转动频率.

## 一、基本方法

核内存在质子-中子相互作用是早被人们认识到的. 我们容易发现核子对的分离能存在如下规律: 核内一对中子的分离能  $S(N)$  随着质子数的增加而增大; 与此同时, 一对质子的分离能  $S(Z)$ , 随中子数的增加而增大. 然而  $S(N)$  ( $S(Z)$ ) 却随中子(质子)数的增加而减小. 由此不难得出结论, 核内不仅存在质子-中子互作用, 而且总是相互吸引的. 然而中子-中子或质子-中子互作用在总体上却是相互排斥的. 仅仅是中子-中子对作用和质子-质子对作用, 是相互吸引的<sup>[1,2]</sup>. 早在五十年代初, de Shalit 和 Goldhaber 就指出<sup>[3]</sup>, 质子-中子互作用是核具有偏离于球形的形变的基本原因. 但很长一段时间内, 这一认识并未能得到发展.

到七十年代末八十年代初, 越来越多的人开始探讨这一问题. 人们对于质子-中子互作用与核的形变及集体运动的关系有了较为深刻的认识, 理论上有了许多定量的分析(见文献[4—6]). 同时, 从实验上提取和分析质子-中子互作用的信息也引起了人们的注意<sup>[7-9]</sup>. 近两年来, 我们从核的结合能系统地提取并分析了实验 p-n 互作用能  $\delta V_{pn}$ , 研究了它随中子、质子数、转动频率以及组态的变化规律<sup>[10-13]</sup>. 理论分析指出, 这种  $\delta V_{pn}$  包括了 p-n 互作用的各种多极项, 主要是单极项和四极项.

由于核内核子间的互作用主要是二体作用, 从原则上我们可以将核的结合能作如下分解:

$$B(Z, N) = V^{nn}(N) + V^{pp}(Z) + V_{mf}^n(N) + V_{mf}^p(Z) + V^{pn}(Z, N), \quad (1)$$

其中  $V^{nn}(N)$  是残余中子-中子互作用, 只是中子数的函数, 而  $V^{pp}(Z)$  是残余的质子-

本文1990年10月31日收到.

\* 国家自然科学基金资助项目.

质子相互作用,只是质子数的函数;  $V_{m_i}^n(N)$  ( $V_{m_i}^p(Z)$ ) 则是中子(质子)对平均场的贡献,其余的是质子-中子相互作用  $V^{pn}(Z, N)$ 。

于是最后一个质子与最后一个中子间的残余相互作用可以表示为:

$$\delta V_{pn}(Z, N) = \frac{1}{4} \{ [B(Z+1, N+1) - B(Z+1, N-1)] - [B(Z-1, N+1) + B(Z-1, N-1)] \}, \quad (2)$$

因为第一个方括号是质子数相同的相邻两核的结合能之差,由(1)式可知,纯粹质子-质子相互作用以及质子平均场部份已被消去,余下的是最后两个中子之间的相互作用,它们对平均场的贡献以及它们与全部  $Z+1$  个质子的相互作用。第二个方括号内的量也一样,所不同的只是这儿质子数是  $(Z-1)$  个。这两个方括号中量的差值,则进一步消去了残余的中子-中子相互作用及它们对平均场的贡献。而余下的只是最后一对质子与最后一对中子间的相互作用。除以4,则得到最后一个质子与最后一个中子相互作用的平均能量。

请注意,在下面的实际计算中,本文分析的主要是偶偶核的实验数据,由式(2)的标记法,所得的  $\delta V_{pn}$  对应的  $Z$  和  $N$  将是奇数。这意味着这一  $\delta V_{pn}$  值是来自相邻四个偶偶核的结合能,而不意味着这一  $\delta V_{pn}$  值是来自奇奇核。

随着自旋的增加,核的内部结构与形状有许多变化。对应的核内 p-n 相互作用变化规律自然也是十分有兴趣的问题。注意到在给定转动频率  $\hbar\omega$  下核的总能量是

$$B_\omega(Z, N, \omega) = B(Z, N) + E_{ex}(Z, N, \omega), \quad (3)$$

其中  $E_{ex}$  是相对于基态的激发能。对应于(2)式,不难得到此转动频率下  $\delta V_{pn}$  的表达式:

$$\delta V_{pn}(Z, N, \omega) = \frac{1}{4} \{ [B_\omega(Z+1, N+1, \omega) - B_\omega(Z+1, N-1, \omega)] - [B_\omega(Z-1, N+1, \omega) - B_\omega(Z-1, N-1, \omega)] \}. \quad (4)$$

## 二、结果讨论

根据已测量的核的基态结合能数据<sup>[1]</sup>,利用公式(2),很容易求得对应的  $\delta V_{pn}$  值。作为例子,图1给出了  $N \geq 40$  所有核的  $\delta V_{pn}$  值。插图是放大的  $Z = 37, 39, 41, N = 45-59$  区域的  $\delta V_{pn}$ ,从图1首先可以看到  $\delta V_{pn}$  的绝对值随质量数的增加而减少的总趋势:由  $N \approx 40$  到铜系区,  $|\delta V_{pn}|$  由 600 降到 200keV。这是和中子轨道半径及质子轨道半径的差别随质量数的增大而增大,亦即最后一个质子与最后一个中子的波函数重叠越来越小相联系的。下面进一步研究一下  $\delta V_{pn}$  相对于平均值的涨落行为。

如前所述,实验  $\delta V_{pn}$  值包括了 p-n 相互作用各级多极项,主要是单极及四极相互作用。单极相互作用取决于质子和中子的径向波函数的重叠量,因此主要取决于质子和中子的主量子数  $n$  和轨道量子数  $l$  的差值 ( $\Delta n \equiv |n_n - n_p|$ ,  $\Delta l \equiv |l_n - l_p|$ ) 可十分粗略地表示为<sup>[2]</sup>

$$\delta V_{pn}(\text{单极}) \approx \frac{-x_0}{\Delta n + \Delta l + 1}, \quad (5)$$

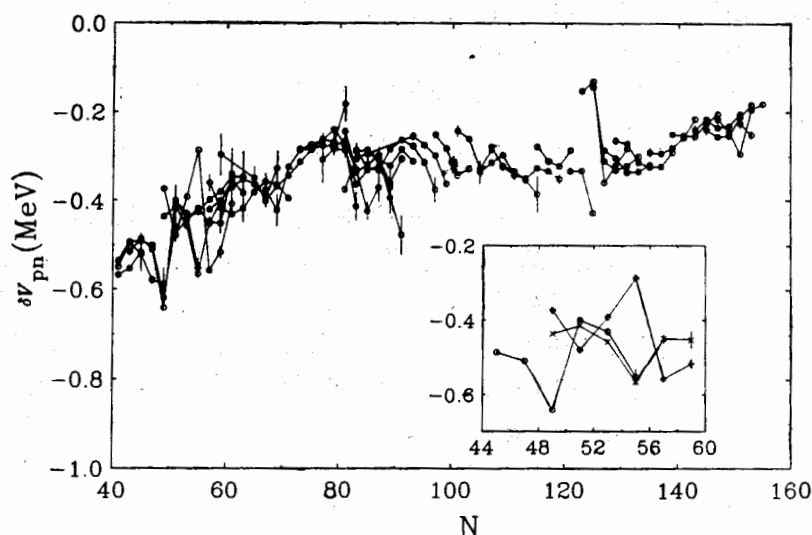


图1 实验  $\delta V_{pn}$  值。插图是  $Z = 37-41, N = 45-59$  区的放大图。

○:  $Z = 37, \times: Z = 39, \oplus: Z = 41$

而四极项则取决于质子和中子占据的轨道  $i, j$  的四极矩  $q_p(i), q_n(j)$  和在轨道上的占据几率  $V_p^2(i), V_n^2(j)$

$$\delta V_{pn}^{ij}(\text{四极}) \approx -x_2 q_p(i) q_n(j) V_p^2(i) V_n^2(j), \quad (6)$$

其中  $x_0, x_2 > 0$ , 是单极和四极 p-n 相互作用强度系数。由(5)式可知,对确定的  $i, j$  壳,  $\delta V_{pn}$  (单极)是个常数。而四极相互作用则取决于所占据轨道的四极矩联系于斜率,当所讨论的这一对质子和中子同时占据上翘(下降)的轨道,则  $\delta V_{pn}^{ij}$  (四极)为负,即对整个核 p-n 相互作用贡献一个相互吸引的作用,反之,  $\delta V_{pn}^{ij}$  (四极)为正,贡献相互排斥的作用。 $\delta V_{pn}$  的涨落行为正是密切联系于这些核结构特征的。例如,图1插图所示,  $Z = 39$  和  $Z = 41$  的同位素链的  $\delta V_{pn}$  值总是位相相反地随  $N$  而变化。这是因为第 39 个质子主要是填充  $p_{1/2}[301]1/2$  的上翘轨道,而第 41 个质子则主要占据  $g_{7/2}[440]1/2$  下降轨道,两者的四极矩符号相反。再比如第 55 个中子主要是填充上翘轨道  $d_{5/2}[413]5/2$ , 四极矩为负,于是与也是填充上翘道的第 39 个质子的相互作用强于与第 41 个质子的相互作用,即负的更多,第 57 个中子主要填充下降轨道  $g_{7/2}[420]1/2$  情况正好相反,可见这些核的结构特

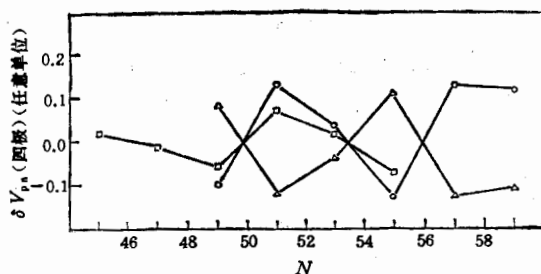


图2 利用 Nilsson 模型求得的  $\delta V_{pn}$  (四极)值

□  $Z = 37$  ○  $Z = 39$  △  $Z = 41$

征灵敏地反映在  $\delta V_{pn}$  值的变化之中。

注意到所讨论核是在  $Z = 40$  满壳附近,核平均地应该是近球形。利用 Nilsson 模型计算出一个核总的四极 p-n 相互作用能,再按 (2) 式作对应的双差分,即可求得对应的理论  $\delta V_{pn}$  (四极) (见图 2)<sup>[12]</sup>。很容易看到,  $\delta V_{pn}$  (四极)理论值再现了实验  $\delta V_{pn}$  值的变化规律,包括极值的位置,请注意图 2  $\delta V_{pn}$  (四极)理论值是取任意单位。我们并未去调 (6) 式的  $x_2$  值,而且由于一条轨道的四极矩是和形变有关,而我们只是任意地取一个小形变(如  $\epsilon_2 \approx 0.01$ ) 进行计算的。由理论与实验的比较可见,对于近球形核,实验  $\delta V_{pn}$  值的涨落主要来自于 p-n 四极相互作用。对于大形变区,此时核的费米面处于对应壳层的中间轨道,四极矩很小,因此最后一个质子和中子间的四极相互作用很小,单极项的相对贡献变大。总的  $\delta V_{pn}$  将是各多极项贡献的总和。

利用公式 (5) 和 (6) 我们可以求得给定转动频率下偶偶核激发态对应的  $\delta V_{pn}$  值。图 3 给出一部份稀土区核高自旋态的  $\delta V_{pn}$  值。由图可见核处于高转动频率时, p-n 互

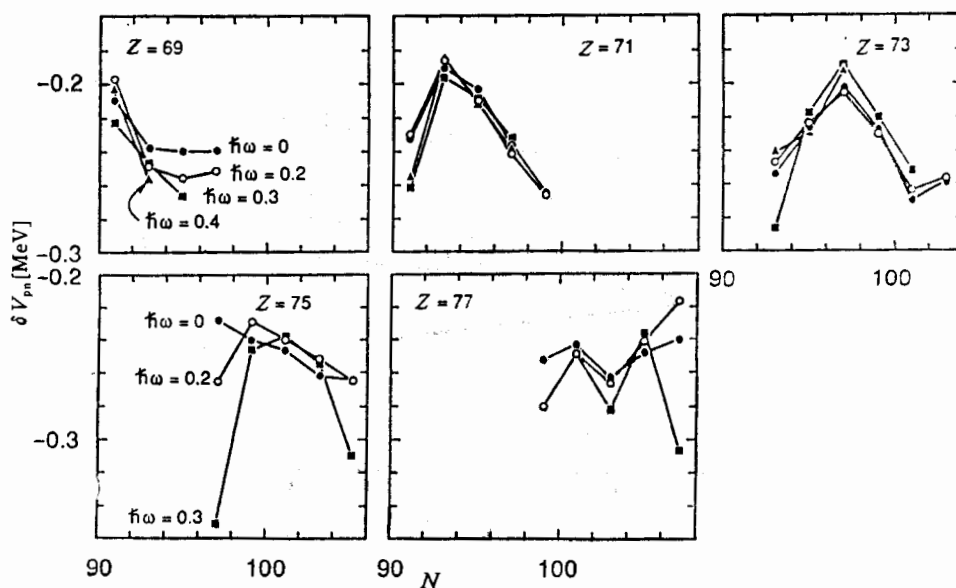


图 3 部份稀土核高自旋态的  $\delta V_{pn}$  值

●  $\hbar\omega = 0$ ; ○  $\hbar\omega = 0.2$ ; ■  $\hbar\omega = 0.3$ ; ▲  $\hbar\omega = 0.4$

作用所有不同的变化特征,值得做深入的理论探讨。由于图 3 所涉及的偶偶核大部份基态质量尚未测量过,因此应主要研究  $\delta V_{pn}$  随转动频率的相对变化规律。其中有的现象可以得到解释。例如:由图可见  $Z = 75, N = 97$  的  $\delta V_{pn}$  绝对值随转动频率的增大而增大,尤其是从  $\hbar\omega = 0.2$  到  $0.3\text{MeV}$ ,有个大的跳跃。这是因为在相应的形变( $\epsilon_2 \approx 0.23-0.25$ ),第 97 个中子主要占据  $i_{13/2}[642]5/2$  下降轨道,而第 75 质子,在相应形变下,当  $\hbar\omega \leq 0.2\text{MeV}$ ,主要占据的是  $h_{11/2}[514]9/2$  的上翘轨道,但  $\hbar\omega$  增大时,此轨道将和  $h_{9/2}[541]1/2$  下降轨道相交,如图 4 的单粒子罗斯量图所示。这就是说当  $\hbar\epsilon$  由 0.2 增至  $0.3\text{MeV}$ ,第 75 质子将由主要占据上升轨道变为主要占据下降轨道,而第 97 个

中子却一直主要占据  $i_{13/2}[642]5/2$  这一下降轨道,因此我们观察到了  $\delta V_{pn}$  值在此转动频率范围内的突变,图4同时指出,这种下降轨道与上升轨道的交叉,在  $\hbar\omega \leq 0.3 \text{ MeV}$  的

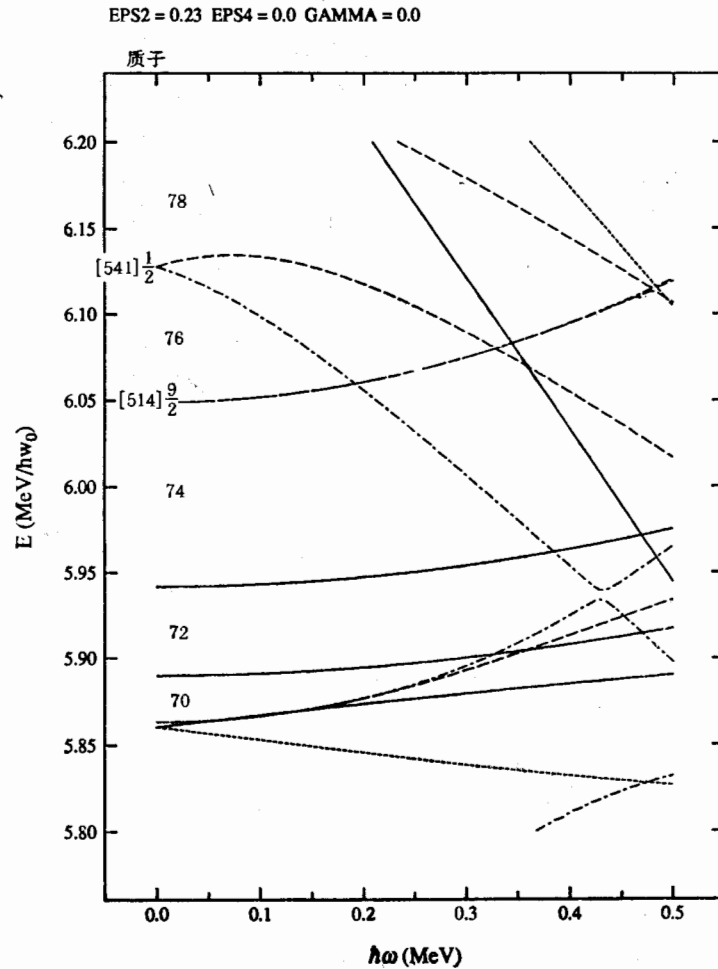


图4 质子单粒子罗斯量图

范围,并不出现在  $Z = 70, 72$  和  $78$  等质子数上,这就是为什么我们未看到在  $Z = 71, 73, 77$  的  $\delta V_{pn}$  值有与上述出现在  $Z = 75, N = 97$  的  $\delta V_{pn}$  值相似的突变,由这个例子可以看到,  $\delta V_{pn}$  值确实包含着丰富的核结构的信息,值得做深入的探讨,特别是目前我们还仅能定性地解释部份  $\delta V_{pn}$  值的变化规律。

另一个相关联的课题是奇  $A$  核中  $p$ - $n$  相互作用能对于组态和转动频率的依赖关系,对于奇  $A$  核,  $\delta V_{pn}$  的表达式(以奇质子核为例,很容易写出奇中子核的相应表达式),须做如下相应的变化,并且应区分粒子态和空穴态。

$$B_{\omega}(Z, N, \omega, \sigma) = B(Z, N) + E_{\sigma}(Z, N, \omega, \sigma), \quad (7)$$

$$\delta V_{pn}(Z, N, \omega, \sigma) = \frac{1}{2} \{ [B_{\omega}(Z, N+1, \omega, \sigma) - B_{\omega}(Z, N-1, \omega, \sigma)]$$

$$- [B_{\omega}(Z-1, N+1, \omega, \sigma) - B_{\omega}(Z-1, N-1, \omega, \sigma)] \quad (8)$$

$$\delta V_{pn}(Z, N, \omega, \sigma) = \frac{1}{2} \{ [B_{\omega}(Z+1, N+1, \omega, \sigma) - B_{\omega}(Z+1, N-1, \omega, \sigma)] \\ - [B_{\omega}(Z, N+1, \omega, \sigma) - B_{\omega}(Z, N-1, \omega, \sigma)] \}. \quad (9)$$

其中  $Z, N$  是奇数, 而  $\sigma$  是特定的组态。(8) 式对应的是粒子组态, (9) 式对应的是空穴组态。表 1 是个例子, 实验数据取自文献 [16], 说明 Ir 同位素中占据  $h_{11/2}, d_{5/2}, h_{9/2}$  和  $i_{3/2}$  的奇质子与最后一个中子的 p-n 相互作用能随频率的变化情况, 作为比较把取自相邻偶偶核的对应值也列在表上。我们立即可以看到  $\delta V_{pn}$  值对组态的强烈依赖关系。正

表 1 Ir 同位素  $\pi h_{11/2}, \pi d_{5/2}, \pi h_{9/2}$  和  $\pi i_{3/2}$  组态中的  $\delta V_{pn}$  值 (MeV)

$\hbar\omega(\text{MeV})$	0.0	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
$\delta V_{pn}(77, 101, \omega, d_{5/2})$		0.19	-0.22	-0.22		
$\delta V_{pn}(77, 101, \omega, h_{9/2})$		-0.26	-0.24	-0.24	-0.40	-0.43
$\delta V_{pn}(77, 101, \omega, h_{11/2})$			-0.28	-0.27	-0.30	-0.33
$\delta V_{pn}(77, 101, \omega, i_{3/2})$			-0.16	-0.14	-0.08	-0.10
$\delta V_{pn}^{ee}(77, 101, \omega)^*$	-0.24	-0.22	-0.22	-0.21	-0.27	-0.29
$\delta V_{pn}(77, 103, \omega, d_{5/2})$		-0.25	-0.23	-0.26	-0.33	
$\delta V_{pn}(77, 103, \omega, h_{9/2})$		-0.31	-0.28	-0.27	-0.24	-0.37
$\delta V_{pn}(77, 103, \omega, h_{11/2})$				-0.28	-0.31	-0.36
$\delta V_{pn}(77, 103, \omega, i_{3/2})$			-0.20	-0.21	-0.06	-0.07
$\delta V_{pn}(77, 103, \omega)^*$	-0.26	-0.25	-0.25	-0.25	-0.23	-0.21

\* 利用公式 (4) 取自偶-偶核数据, 故用上标  $ee$ , 以区别于其它取自奇  $A$  核的结果。

如文献 [17, 16] 总罗斯量面 (TRS) 计算所指出的, 这几个 Ir 同位素, 由于核实比较软, 单质子占据不同轨道, 对应着核的不同形变, 而当转动频率变化时, 这些组态的形变又会作不同的变化。显然对应的  $\delta V_{pn}$  值变化规律的研讨对于揭示内含的核结构信息是十分有价值的。

关于奇奇核中 p-n 相互作用问题<sup>[8, 9]</sup>, 一方面实验数据更少些, 另一方面自旋的效应问题等, 有待于作专门的探讨。

### 三、结 束 语

应该指出, 本文进一步详细介绍的提取实验 p-n 相互作用能  $\delta V_{pn}$  的方法, 对于研究核内 p-n 相互作用与核结构及核集体运动的依赖关系是很有意义的。但是目前这种研究仍处于开始阶段, 实验和理论方面均有大量工作要做。这一方法本身还有它的局限性。首先它当然取决于实验值, 而迄今还有许多原子核的基态质量没有测量值, 例如目前已有丰富的高自旋数据的稀土核, 其中许多并无基态质量的测量值。其次, 如公式 (2) 所示, 实验  $\delta V_{pn}$  是从相邻四个核的结合能提取的, 因此实质上是这四个核内有关核子的 p-n 相互作用的某种平均。而不是(目前看来也无法)直接从一个核本身提取出该核内的 p-n 相互作用能。这一个平均性质, 在进行理论与实验结果的比较时, 应特别予以注意。

核内 p-n 相互作用是个早已提出, 而又远未解决的课题, 值得深入探讨。最近, 美国橡

树岭国家实验室在探讨放射性束流的研究前景的专题会议上,就把研究 p-n 相互作用,特别是  $Z = N$  核内的 p-n 相互作用作为重要课题之一<sup>[19]</sup>。这值得我们予以注意。

作者对 R. Casten 和 J. Garrett 教授所做的有益讨论表示感谢。文中所用到的高自旋数据及部分图形是周文彩、金浩强、俞长虹及 C. Wesselborg 提供或帮助准备的,在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] I. Talmi, *Rev. Mod. Phys.*, **34**(1962), 704.
- [2] R. F. Casten, "Nuclear Structure From A Simple Perspective", Oxford University Press, 1990, Chap. 1. 3.
- [3] A de Shalit and M. Goldhaber, *Phys. Rev.*, **92**(1953), 1211.
- [4] P. Federman and S. Pittel, *Phys. Lett.*, **B69**(1977), 385.
- [5] M. Sakai, *Nucl. Phys.*, **A345**(1980), 232, and references therein.
- [6] K. Heyde et al., *Phys. Lett.*, **B155**(1985), 303.
- [7] R. F. Casten et al., *Phys. Rev. Lett.*, **47**(1981), 1433.
- [8] J. Janecke and E. Comay, *Nucl. Phys.*, **A436**(1985), 108.
- [9] G. E. Arenas Peris and P. Federman, *Phys. Lett.*, **173B**(1986), 359; *Phys. Rev.*, **C33**(1988), 493.
- [10] J.-Y. Zhang, C-S. Wu, C-H. Yu and J. D. Garrett, in: Contemporary Topics in Nuclear Structure Physics, Cocoyoc, Mexico, 1988, Abstract Volume, p. 109.
- [11] J.-Y. Zhang, R. F. Casten and D. S. Brenner, *Phys. Lett.*, **227B**(1989), 1.
- [12] J.-Y. Zhang, J. D. Garrett, R. F. Casten, D. S. Brenner, C. Wesselborg, C-H. Yu, and M. Carpenter, Proc "Nuclear Structure at Ninetics", April 23—27, 1990, Oak Ridge, USA.
- [13] D. S. Brenner, C. Wesselborg, R. F. Casten, D. D. Warner and J.-Y. Zhang, *Phys. Lett.*, **B243**(1990), 1.
- [14] A. H. Wapstra, G. Audi and R. Hoekstra, *At. Data and Nucl. Data Tables* **39**(1988), 281.
- [15] W.-T. Zhou, J.-Y. Zhang, R. F. Casten and D. S. Brenner, "Comparison of Calculated and Empirical p-n Interactions in Heavy Nuclei", submit to *Phys. Lett.*
- [16] L. L. Riedinger, H.-J. Jin, and J.-Y. Zhang, Proc. "重离子物理和应用国际会议", 10月8日—12日, 1990年, 兰州.
- [17] J.-Y. Zhang, Proc. Conf. "Physics at Tandem", May 1986, Eds. J. C. Jiang et al. World Scientific, Singapore (1987), p. 512; R. Bengtsson, T. Beagtsso, J. Dudek, G. Leander, W. Nazarewicz and J.-Y. Zhang, *Phys. Lett.*, **B183**(1987), 1.
- [18] 胡济民,私人通讯,1990年五月.
- [19] J. D. Garrett et al., "Possibilities for Radioactive Beams at HHIRF", Oak Ridge. Oct. 1990. USA.

## Empirical Proton-Neutron Interaction Energy

ZHANG JINGYE

(Theoretical Center, CCAST (World Laboratory),

Institute of Modern Physics, Academia Sinica of China, Lanzhou 730000)

### ABSTRACT

A method for extracting the empirical proton-neutron interaction energy between the last proton and the last neutron,  $\delta V_{pn}$  has been described and developed. The results for ground states of all even-even nuclei with  $N$  not less than 40 and for high spin states of some nuclei have been discussed.  $\delta V_{pn}$  values at high frequency for given configuration of some odd A nuclei were shown as well. It is found that these empirical  $\delta V_{pn}$  values include all multipole (mostly the monopole and quadrupole) terms of proton-neutron interaction and sensitively depend on nuclear deformation, configuration and rotational frequency.