

文章编号: 1007-4627(2008)02-0107-05

宏观微观模型对重核区原子核基态性质的研究^{*}

彭金松¹, 李璐璐^{2, #}, 周善贵^{2, 3}, 赵恩广^{2, 3}

(1 河池学院物理与电子工程系, 广西 宜州 546300;

2 中国科学院理论物理研究所, 北京 100080;

3 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用连续介质模型并基于 Nilsson 模型考虑微观修正, 研究了重核区原子核 ($Z \geq 82$) 基态性质, 得到了较好的结果。通过拟合 $Z \geq 82$ 原子核的结合能实验数据, 得到了两组连续介质模型的新参数。利用这两组参数计算的重核结合能与实验值的均方根偏差约为 0.8 MeV, 电荷半径的均方根偏差约为 0.07 fm。

关键词: 宏观微观模型; 连续介质模型; 重核区; 基态性质

中图分类号: 0571.31⁺¹

文献标识码: A

1 引言

原子核的基态性质包括电荷、质量、半径、电四极矩、自旋、宇称以及同位旋等。其中质量是比较重要的一个量, 实验上也比较容易测量。早期的液滴模型就是因为能较好地描述原子核的质量, 因而获得了很大的成功。至今仍有很多人在进行 Weizsäcker 质量公式修正方面的工作^[1]。

Weizsäcker 公式能成功地描述原子核的质量, 原因在于用公式简单和参数很少, 特别是对于稳定核, 其给出的结合能与实验值均方根偏差小于 3 MeV。当然, 作为一个宏观描述, 它不可能很好地描述原子核的壳效应, 而这一点在 1955 年 Mayer 等^[2]引入自旋轨道耦合后得以解决。正是由于这方面的缺陷, Weizsäcker 公式仅是一个很好的近似。

液滴模型把原子核看作是均匀带电的液滴, 而实际上原子核的密度并非是均匀的。尽管它也包含了描述原子核表面性质的表面项, 但是, 由于原子核的表面是弥散的, 表面密度与中心密度有着很大的差别, 而液滴模型并没有考虑到这一点。于是, Myers 和 Swiatecki^[3]提出了他们的小液滴模型, 这种模型考虑了原子核的密度变化, 在原子核表面的

处理上, 他们认为原子核有一个很薄的壁, 这就考虑了原子核表面的密度变化。它比早期的液滴模型有了改进, 能给出更好的结果。但是它还是不能给出核表面很大的密度变化, 而对于形变核, 这种描述应该是至关重要的。

本文所讨论的宏观微观模型, 宏观上用的是连续介质模型, 采用的是能量密度泛函方法。该方法是 Brueckner 等^[4]在 20 世纪 70 年代提出的, 在该模型中原子核的宏观能被表示为核子密度的泛函。后来胡济民等进一步发展了该模型, 提出了原子核的连续介质模型^[5]。该模型把原子核的质量看成是中子密度以及质子密度的泛函。通过变分求得原子核的中子密度以及质子密度, 然后再由它们得到原子核的基态性质。当然, 仅仅有宏观的描述, 无法给出原子核的壳效应。因此, 还要加上微观修正。在文献^[5]中, 作者对微观修正部分直接采用了文献^[6]的结果; 文献^[7]采用 Nilsson 势计算微观修正, 但是宏观部分采用的依然是文献^[5]中给出的参数; 文献^[8]采用变形 Woods-Saxon 势计算微观修正, 同样采用文献^[5]中给出的参数。本文采用了 Nilsson 势计算微观修正, 在此基础上重新对连续

* 收稿日期: 2007 - 08 - 20; 修改日期: 2007 - 10 - 08

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10475003, 10575036, 10435010); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2007CB815000); 中国科学院知识创新工程重点方向性资助项目(KJXC3-SYW-No2, KJXC2-SW-No17)

作者简介: 彭金松(1963-), 男(汉族), 广西藤县人, 副教授, 从事原子核物理和粒子物理方面的科学研究和教学工作;

E-mail: 123pjs@163.com

通信联系人: 李璐璐, E-mail: lilulu@itp.ac.cn

介质模型的参数进行了拟合,并用新参数研究重核区的原子核基态性质。

本文第 2 节介绍原子核连续介质模型,第 3 节给出用该模型加上微观修正后对重核区原子核基态性质计算的结果,第 4 节为结论。

2 理论模型

如上所述,宏观微观模型的宏观部分采用的是连续介质模型,它是把原子核看成由中子和质子组成的连续介质,并把原子核的能量写成如下形式的中子和质子密度的泛函:

$$E[\rho_n, \rho_p] = \int \left[-a_1 + \frac{a_3(\rho_n - \rho_p)^2}{\rho_0^2} + \frac{sa_3(\rho_n + \rho_p - \rho_0)^2}{\rho_0^2} \right] \rho_0 dV + \int \left[a_4 - \frac{a_6(\rho_n - \rho_p)^2}{\rho_0^2} + \frac{sa_6(\rho_n + \rho_p - \rho_0)^2}{\rho_0^2} \right] |\nabla \rho_0| dV + \frac{e^2}{2} \iint \frac{\rho_p(\mathbf{r}_1)\rho_p(\mathbf{r}_2)}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} dV_1 dV_2, \quad (1)$$

其中, ρ_n 和 ρ_p 分别表示中子和质子的密度; ρ_0 为参考密度,取为费米分布:

$$\rho_0 = \frac{t}{4\pi a^3} \frac{1}{1 + e^{(r-R)/a}}. \quad (2)$$

可以看到,式(1)的物理含义是很明确的,第 1 项为

体积能部分;第 2 项为表面能部分;第 3 项为库仑能的贡献。 a_1, a_3, a_4, a_6, s 和 a 为模型的参数。 ρ_n 和 ρ_p 满足条件:

$$\int \rho_n dV = N, \quad \int \rho_p dV = Z. \quad (3)$$

用能量对中子密度和质子密度分别做变分取极小值,并考虑到边界条件^[5],就可以得到中子和质子的密度分布,从而可以算出原子核的宏观能。对于微观部分,采用 Nilsson 势进行微观修正,并在此基础上对宏观参数重新进行了拟合。

3 结果与讨论

本工作拟合的参数是 a_1, a_3, a_4, a_6, s 和 a 。拟合基于文献[9]中 $Z \geq 82$ 的重核结合能数据。对 421 个原子核的结合能实验数据进行拟合得到了第 1 组参数,进而对包含外推估计值的 714 个原子核结合能数据进行拟合,得到了第 2 组参数。

拟合结果列在表 1 中。从表中可以看到,对 421 个核以及 714 个核的拟合得到的结合能对实验值的均方根偏差分别为 0.820 0 和 0.803 5 MeV。可以看到,同文献[5]中的 4 组参数(它们给出的均方根偏差都大于 1 MeV)相比,本文给出的参数能够更好地描述重核区原子核的结合能。图 1 给出了两组参数计算的结合能数据与实验值的差随质量数的变化。从图中可以看到,在 $A = 210$ 附近的数据

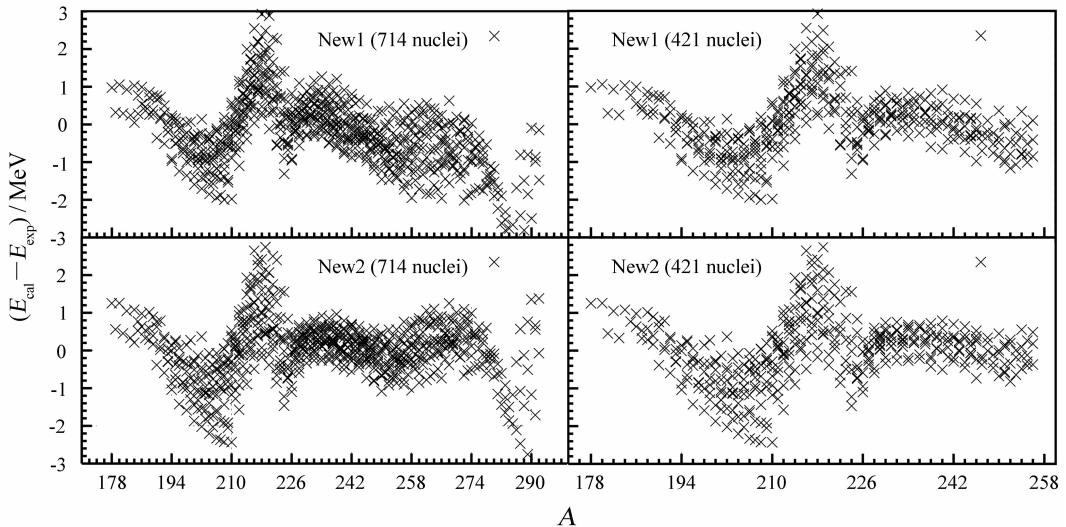


图 1 利用两组新参数计算重核的结合能与实验值的偏差

New1 是第 1 组参数, New2 是第 2 组参数。

差分布有明显的变化。这是由于本文拟合的参数都是连续介质模型的参数，属于宏观部分，而对于²⁰⁸Pb附近的核，它们的壳效应比较明显所致。

表 1 中最后一列是各组参数计算的电荷半径与文献[10]中 106 个有实验数据的原子核的电荷半径的均方根偏差。本文的两组参数给出的电荷半径均方根偏差分别为 0.075 1 和 0.076 3 fm。表 2 给出了这 106 个原子核的半径理论值和实验值。可以看

到，对于电荷半径，本文的参数也能给出比较好的描述。关于基态的形变，本文的结果普遍比实验值小 0.05—0.07。我们知道，电荷半径与电荷密度分布是密切相关的，这一点可以说明我们的模型对原子核的电荷密度分布可以给出很好的描述；而形变与实验的差别可能来源于微观修正部分，在重核区，微观修正对原子核的基态形变起着重要的作用，这一点是需要进一步改进的地方。

表 1 连续介质模型的参数*

	a_1/MeV	a_3/MeV	a_4/MeV	s	a/fm	σ_E/MeV (421 个核)	σ_E/MeV (714 个核)	σ_R/fm
I	16.146 5	27.130 0	15.065 0	0.249 9	0.517 5	2.520 7	2.672 8	0.126 1
II	16.219 4	27.248 0	15.231 0	0.251 0	0.513 5	1.955 6	1.974 1	0.084 2
III	16.096 7	26.903 0	14.992 0	0.474 9	0.525 7	1.521 6	1.566 0	0.111 6
IV	16.165 0	27.012 0	15.147 0	0.477 0	0.522 0	1.380 5	1.416 2	0.074 0
New1	16.091 7	27.213 2	14.956 7	0.467 234	0.522 115	0.820 0	0.975 8	0.075 1
New2	16.033 7	27.078 7	14.889 6	0.464 563	0.522 225	0.862 5	0.803 5	0.076 3

* 前 4 组为文献[5]中给出的参数，后两组为本工作给出的新参数；最后一列是用这些参数计算的 $Z \geq 82$ 的 106 个核的电荷均方根半径与文献[10]中实验数据的均方根偏差。

表 2 重核区 106 个原子核的电荷半径的计算值与文献[10]中的实验值*

fm

Z	A	r_{New1}	r_{New2}	r_{Exp}	Z	A	r_{New1}	r_{New2}	r_{Exp}
82	190	5.458 9	5.458 9	5.421 0	82	191	5.466 0	5.466 0	5.421 7
82	192	5.473 1	5.473 1	5.428 7	82	193	5.480 2	5.480 2	5.429 8
82	194	5.487 3	5.487 3	5.435 9	82	196	5.501 3	5.501 3	5.442 0
82	197	5.508 3	5.508 3	5.442 0	82	198	5.515 2	5.515 2	5.450 0
82	199	5.522 3	5.522 3	5.450 0	82	200	5.529 1	5.529 1	5.459 0
82	201	5.535 9	5.535 9	5.461 0	82	202	5.542 8	5.542 8	5.469 0
82	203	5.549 6	5.549 6	5.471 0	82	204	5.556 4	5.556 4	5.479 4
82	205	5.563 3	5.563 3	5.482 0	82	206	5.569 9	5.569 9	5.489 7
82	207	5.576 6	5.576 6	5.494 2	82	208	5.583 3	5.583 3	5.501 0
82	209	5.590 1	5.590 1	5.511 0	82	210	5.596 6	5.596 6	5.523 0
82	211	5.603 3	5.603 3	5.533 0	82	212	5.609 8	5.609 8	5.545 0
82	214	5.622 9	5.622 9	5.565 0	83	209	5.594 4	5.594 4	5.521 1
84	200	5.537 2	5.537 2	5.486 1	84	202	5.551 0	5.551 0	5.493 6
84	204	5.564 8	5.564 8	5.502 5	84	205	5.571 5	5.571 5	5.504 4
84	206	5.578 2	5.578 2	5.512 3	84	207	5.585 0	5.585 0	5.514 7
84	208	5.591 7	5.591 7	5.522 2	84	209	5.598 5	5.598 5	5.526 4
84	210	5.605 1	5.605 1	5.533 6	86	202	5.571 1	5.571 1	5.515 0
86	204	5.572 5	5.572 5	5.519 7	86	205	5.584 5	5.584 5	5.519 8
86	206	5.586 2	5.586 2	5.527 0	86	207	5.593 0	5.593 0	5.528 2

86	208	5.599 8	5.599 8	5.535 4	86	209	5.606 5	5.606 5	5.537 3
86	210	5.613 3	5.613 3	5.544 2	86	211	5.620 0	5.620 0	5.547 9
86	212	5.626 6	5.626 6	5.554 5	86	218	5.666 2	5.666 2	5.617 2
86	219	5.672 7	5.672 7	5.628 0	86	220	5.679 2	5.679 2	5.636 3
86	221	5.685 7	5.685 7	5.646 7	86	222	5.692 1	5.692 1	5.654 9
87	207	5.602 0	5.602 0	5.534 9	87	208	5.608 8	5.608 8	5.535 8
87	209	5.610 4	5.610 4	5.542 8	87	210	5.617 2	5.617 2	5.544 8
87	211	5.623 9	5.623 9	5.551 1	87	212	5.630 6	5.630 6	5.554 5
87	213	5.637 3	5.637 3	5.560 6	87	220	5.683 3	5.683 3	5.632 0
87	221	5.689 8	5.689 8	5.642 2	87	222	5.696 3	5.696 3	5.652 3
87	223	5.702 7	5.702 7	5.658 4	87	224	5.732 2	5.732 2	5.669 5
87	225	5.746 2	5.746 2	5.674 7	87	226	5.759 8	5.759 8	5.682 5
87	227	5.770 2	5.770 2	5.697 2	87	228	5.780 9	5.780 9	5.703 6
88	208	5.607 4	5.607 4	5.547 5	88	209	5.614 2	5.614 2	5.547 8
88	210	5.621 0	5.621 0	5.554 2	88	211	5.627 7	5.627 7	5.555 4
88	212	5.634 5	5.634 5	5.561 6	88	213	5.641 1	5.641 1	5.564 6
88	214	5.647 8	5.647 8	5.570 5	88	220	5.687 3	5.687 3	5.631 1
88	221	5.693 9	5.693 9	5.642 3	88	222	5.700 3	5.700 3	5.650 2
88	223	5.706 8	5.706 8	5.660 2	88	224	5.713 2	5.713 2	5.667 6
88	225	5.758 8	5.758 8	5.678 1	88	226	5.763 9	5.763 9	5.684 1
88	227	5.781 4	5.781 4	5.691 1	88	228	5.786 4	5.786 4	5.700 2
88	229	5.797 4	5.797 4	5.708 8	88	230	5.802 4	5.802 4	5.718 6
88	232	5.818 6	5.818 6	5.735 1	90	227	5.790 9	5.790 9	5.665 4
90	228	5.795 9	5.795 9	5.673 8	90	229	5.808 5	5.808 5	5.680 7
90	230	5.813 4	5.813 4	5.692 0	90	232	5.829 5	5.829 5	5.710 0
92	233	5.853 7	5.853 7	5.813 8	92	234	5.858 4	5.858 4	5.828 9
92	235	5.870 2	5.870 2	5.828 7	92	236	5.875 0	5.875 0	5.836 6
92	238	5.890 2	5.890 2	5.850 7	94	238	5.901 0	5.901 0	5.824 8
94	239	5.905 7	5.905 7	5.831 1	94	240	5.916 4	5.916 4	5.840 7
94	241	5.921 2	5.921 2	5.845 1	94	242	5.924 7	5.924 7	5.852 3
94	244	5.934 7	5.934 7	5.864 3	95	241	5.925 0	5.925 0	5.892 9
95	243	5.934 8	5.934 8	5.904 7	96	242	5.933 5	5.933 5	5.785 1
96	244	5.943 4	5.943 4	5.799 5	96	245	5.954 5	5.954 5	5.804 0
96	246	5.959 5	5.959 5	5.812 7	96	248	5.968 8	5.968 8	5.825 2

* 第 1 组参数(New1)给出的理论值与实验值的均方根偏差为 0.075 1 fm, 第 2 组(New2)的为 0.076 3 fm。

4 结论

本文采用宏观微观模型对重核区的原子核基态性质进行了研究。宏观部分,采用的是原子核的连续介质模型,微观修正部分采用的是 Nilsson 模型的计算结果。用文献[9]中的结合能数据对其中的 5 个参数 a_1, a_3, a_4, s 和 a 进行了拟合,得到的参数

对于重核区的结合能以及电荷半径都能给出很好的结果,这说明能在宏观上正确地给出中子密度以及质子密度。但是对于重核区的基态形变,计算值系统性偏小,这可能是由于微观修正部分对于形变计算存在系统性的误差,需要进一步改进。

致谢 感谢北京大学郑春开和许甫荣两位教授的讨

论和建议。

参考文献 (References):

- [1] Royer G, Gautier C. Phys Rev, 2006, **C73**: 067 302.
- [2] Mayer M G, Jensen J H D. Elementary Theory of Nuclear Shell Structure. New York: Wiley, 1955, 54.
- [3] Myers W D, Swiatecki W J. Ann Phys, 1969, **55**: 395.
- [4] Brueckner K A, Chirico J H, Meldner H W. Phys Rev, 1971, **C4**: 732.
- [5] Hu Jimin, Zheng Chunkai. Chinese Journal of Nuclear Physics, 1985, **7**: 1 (in Chinese).
(胡济民, 郑春开. 原子核物理, 1985, **7**: 1.)
- [6] Möller P, Nix J R. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1981, **26**: 165.
- [7] Zheng Chunkai, Hu Jimin, Xu Furong. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1996, **20**: 4(in Chinese).
(郑春开, 胡济民, 许甫荣. 高能物理与核物理, 1996, **20**: 4.)
- [8] Wu Zheyang, Xu Furong. Nuclear Physics Review, 2004, **21** (4): 363(in Chinese).
(吴哲英, 许甫荣. 原子核物理评论, 2004, **21**(4): 363.)
- [9] Audi G, Wapstra A H, Thibault C. Nucl Phys, 2003, **A729**: 337.
- [10] Angeli I. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 2004, **87**: 185.

Study on Ground State Properties of Heavy Nuclei with Macroscopic-microscopic Model*

PENG Jin-song¹, LI Lu-lu^{2, #}, ZHOU Shan-gui^{2, 3}, ZHAO En-guang^{2, 3}

(¹ Department of Physics and Electronic Engineering, Hechi University, Yizhou 546300, Guangxi, China;

² Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

³ Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The continuous medium model with shell correction from Nilsson model is used to study the ground state properties of heavy nuclei ($Z \geq 82$). New parameters are obtained for the continuous medium model by fitting the experimental binding energies. The theoretical calculations for the masses and radii are in good agreements with experimental values, and the root-mean-square deviations are about 0.8 MeV for the masses, and about 0.07 fm for the radii.

Key words: macroscopic-microscopic model; continuous medium model; heavy nucleus; ground state property

* Received date: 20 Aug. 2007; Revised date: 8 Oct. 2007

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10475003, 10575036, 10435010); Major State Basic Research Development Program of China (2007CB815000); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences(KJ CX3-SYW-No2, KJ CX2-SW-No17)

Corresponding author: Li Lu-lu, E-mail: lilulu@itp.ac.cn