

文章编号: 1007-4627(2004)04-0368-03

## 超重核的壳结构\*

张 炜<sup>1,2</sup>, 孟 杰<sup>1,2,3</sup>, 张双全<sup>1,2</sup>, 耿立升<sup>1,2,4</sup>, H. Toki<sup>4</sup>

(1 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;

2 北京大学物理学院, 北京 100871;

3 中国科学院理论物理研究所, 北京 100080;

4 Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University, Ibaraki, Osaka, 567-0047, Japan)

**摘 要:** 在相对论连续谱 Hartree-Bogoliubov (RCHB) 理论框架下, 在质子数  $Z=100-140$  和中子数  $N=Z+30-2Z+32$  等偶偶核中进行了超重球形双幻核的探索. 采用的有效相互作用为 NL1, NL3, NLSH, TM1, TW-99, DD-ME1, PK1 和 PK1R. 基于对双核子分离能 ( $S_{2p}$  和  $S_{2n}$ )、双核子能隙 ( $\delta_{2p}$  和  $\delta_{2n}$ )、壳修正能量 ( $E_{\text{shell}}^p$  和  $E_{\text{shell}}^n$ )、对能 ( $E_{\text{pair}}^p$  和  $E_{\text{pair}}^n$ ) 和有效对能隙 ( $\Delta_p$  和  $\Delta_n$ ) 等物理量和能级结构的分析, 预言了可能的质子幻数和中子幻数, 并观察到在超重核区壳的弱化现象.

**关键词:** 超重核; 相对论平均场理论; 壳结构

中图分类号: O571.21 文献标识码: A

### 1 引言

核物理中一个长期探索的基本问题就是原子核电荷与质量的上限. 研究超重核的性质无论对物理, 还是对化学都有非常重要的意义. 但是经过多年的探索, 核素图右上角的边界仍然是未知的. 多数理论预言存在比  $^{208}\text{Pb}$  更重的双幻核, 但是预言的双幻核在核素图上的位置却强烈依赖于所采用的模型, 如  $^{184}114$ <sup>[1,2]</sup>,  $^{172}120$ <sup>[2,3]</sup>,  $^{184}120$ <sup>[4]</sup>,  $^{184}124$ <sup>[3]</sup> 和  $^{184}126$ <sup>[2,3,5]</sup> 等.

关于超重核结构的研究多采用 BCS 近似处理对关联<sup>[2,3,4]</sup>, 而有的研究, 例如文献[6], 甚至完全忽略了对关联. 对关联在超重核区可能还是一个比较重要的效应. 通常 BCS 近似并不适用于滴线核, 而 Bogoliubov 准粒子变换则可用于稳定核与滴线核. 如果在超重核区采用 Bogoliubov 准粒子变换处理对关联, 应给出更可靠的理论预言. 本文采用的相对论连续谱 Hartree-Bogoliubov (RCHB) 理论就是在相对论平均场理论的基础上引入 Bogoliubov 准粒子变换来处理对关联的模型<sup>[7]</sup>.

### 2 RCHB 理论简介

从相对论平均场理论的 Lagrangian 量出发, 对介子场进行正则量子化, 经过一系列推导, 可导出如下的相对论 Hartree-Bogoliubov (RHB) 方程<sup>[8]</sup>:

$$\int d^3 r' \begin{pmatrix} h - \lambda & \Delta \\ \Delta & -h + \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_U^k \\ \psi_V^k \end{pmatrix} = E_k \begin{pmatrix} \psi_U^k \\ \psi_V^k \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中,

$$h(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \{\alpha \cdot \mathbf{p} + V_V(\mathbf{r}) + \beta [M + V_S(\mathbf{r})]\} \delta(\mathbf{r}, \mathbf{r}'),$$

$$\Delta_{\mu\nu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{2} \int d^3 r_1 \int d^3 r_1'.$$

$$\sum V_{\mu\nu, \mu'\nu'}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_1') \kappa_{\mu'\nu'}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_1'),$$

$\begin{pmatrix} \psi_U^k \\ \psi_V^k \end{pmatrix}$  为第  $k$  个准粒子的波函数. 为了自洽地描述束缚态、连续谱以及它们之间的耦合, 在坐标空间下求解上面的 RHB 方程, 即为 RCHB 理论<sup>[7]</sup>. 它既适用于描述通常的稳定核, 也适用于描述滴线核. 具体细节见文献[7].

收稿日期: 2004 - 08 - 16

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000077407); 国家自然科学基金资助项目(10025522, 10221003, 10047001)

作者简介: 张 炜(1976-), 男(汉族), 河南焦作人, 博士, 从事超重核结构和核反应研究; E-mail: zhangwei@jcn.pku.edu.cn

### 3 结果与讨论

本文在质子数  $Z=100-140$  和中子数  $N=Z+30-2Z+32$  的偶偶核中寻找可能的球形双幻核. 采用的有效相互作用为 NL1, NL3, NLSH, TM1, TW-99, DD-ME1, PK1 和 PK1R, 其中

表 1 超重核区可能的质子幻数

相互作用	物理量	可能的质子幻数					
		106	114	120	126	132	138
NL3	$S_{2p}$	■		■		■	■
	$\delta_{2p}$	■		■		■	■
	$E_{shell}^p$	■		■		■	■
	$E_{pair}^p$	■	■	■		■	■
	$\Delta_p$	■	■	■		■	■
DD-ME1	$S_{2p}$			■		■	■
	$\delta_{2p}$	■		■		■	■
	$E_{shell}^p$	■		■		■	■
	$E_{pair}^p$	■	■	■	■	■	■
	$\Delta_p$	■	■	■	■	■	■
PK1	$S_{2p}$	■		■		■	■
	$\delta_{2p}$	■		■		■	■
	$E_{shell}^p$	■	■	■		■	■
	$E_{pair}^p$	■	■	■		■	■
	$\Delta_p$	■	■	■		■	■
PK1R	$S_{2p}$	■		■		■	■
	$\delta_{2p}$	■		■		■	■
	$E_{shell}^p$	■	■	■		■	■
	$E_{pair}^p$	■	■	■		■	■
	$\Delta_p$	■	■	■		■	■

TW-99 和 DD-ME1 是密度依赖的相互作用. 考察的物理量为双核子分离能 ( $S_{2p}$  和  $S_{2n}$ )、双核子能隙 ( $\delta_{2p}$  和  $\delta_{2n}$ )、壳修正能量 ( $E_{shell}^p$  和  $E_{shell}^n$ )、对能 ( $E_{pair}^p$  和  $E_{pair}^n$ )、有效对能隙 ( $\Delta_p$  和  $\Delta_n$ ) 等, 其中双核子分离能与双核子能隙分别是结合能的一阶和二阶差分, 壳修正能量代表单粒子能谱的整体行为, 对能与有效对能隙用来量化对效应. 通过观察双核子分离能图中的 gap、双核子能隙图中的峰、壳修正能量图中的谷、对能与有效对能隙图中接近 0 的峰出现的位置, 可以得到相应的核子幻数<sup>[9]</sup>. 表 1 总结了质子幻数的情形 (这里仅列出 NL3, DD-ME1, PK1 和 PK1R 等 4 组相互作用对应的结果). 从表 1 可以看出, 基于上述物理量, 质子幻数 120, 132 和 138 被相互作用 NL3, DD-ME1, PK1 和 PK1R 所支持. 同样, 可以得到相应的中子幻数 172, 184, 198, 228, 238 和 258. 另外, 在双核子能隙和壳修正能量的等值图中, 可以观察到超重核区普遍存在壳的弱化 (quenching) 现象. 这使得上述幻数组合的超重核并不一定是双幻核. 进一步, 通过形变约束的 RMF 理论计算验证上述可能的幻数组合是否存在稳定的球形极小, 结果表明,  $_{172}120$ ,  $_{184}120$  等核素可以存在比较稳定的球形极小. 可以看出, RCHB 理论预言的双幻核  $_{172}120$ <sup>[2, 3]</sup>,  $_{184}120$ <sup>[4]</sup> 与以前采用相对论平均场理论的研究<sup>[2-4]</sup> 是一致的. 更详细的计算细节和研究结果见文献<sup>[9]</sup>.

### 参 考 文 献:

- [1] Moller P, Nix J R. J Phys G: Nucl Part Phys, 1994, **20**: 1 681.
- [2] Rutz K, Bender M, Burvenich T, *et al.* Phys Rev, 1997, **C56**: 238.
- [3] Kruppa A T, Bender M, Nazarewicz W, *et al.* Phys Rev, 2000, **C61**: 034313.
- [4] Patra S K, Wu C-L, Prahara J C R, *et al.* Nucl Phys, 1999, **A651**: 117.
- [5] Cwiok S, Dobaczewski J, Heenen P-H, *et al.* Nucl Phys, 1996, **A611**: 211.
- [6] Bender M, Nazarewicz W, Reinhar P-G. Phys Lett, 2001, **B515**: 42.
- [7] Meng J. Nucl Phys, 1998, **A635**: 3.
- [8] Kucharek H, Ring P. Z Phys, 1991, **A339**: 23.
- [9] Zhang W, Meng J, Zhang S-Q, *et al.* Submitted to Phys Rev C, nucl-th/0403021.

(下转第 381 页)

different initial temperatures. It is found that the LLE peaks at the temperature (“critical temperature”) where the density fluctuation reaches a maximal value and the mass distribution fragments is fitted best by the Fisher’s power law from which the critical exponents for mass and charge distribution are obtained. The time-dependent behavior of the LLE and density fluctuation is studied. We find that the time scale of the density fluctuation is much longer than that of inverse LLE, which means that chaotic motion can be developed well during the process of fragment formation. The finite-size effect on “critical temperature” for nuclear systems ranging from calcium to superheavy nuclei is also studied.

**Key words:** the largest Lyapunov exponent; density fluctuation; multifragmentation

(上接第 369 页)

## Shell Structure of Superheavy Nuclei\*

ZHANG Wei<sup>1,2</sup>, MENG Jie<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Shuang-quan<sup>1,2</sup>, GENG Lis-heng<sup>1,2,4</sup>, H. Toki<sup>4</sup>

(1 *Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China;*

2 *School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;*

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

4 *Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University, Ibaraki, Osaka, 567-0047, Japan*)

**Abstract:** The magic proton and neutron numbers are searched in the superheavy region with proton number  $Z=100-140$  and neutron number  $N=(Z+30)-(2Z+32)$  by the relativistic continuum Hartree-Bogoliubov (RCHB) theory with interactions NL1, NL3, NLSH, TM1, TW99, DD-ME1, PK1, and PK1R. Based on the two-nucleon separation energies  $S_{2p}$  and  $S_{2n}$ , the two-nucleon gaps  $\delta_{2p}$  and  $\delta_{2n}$ , the shell correction energies  $E_{\text{shell}}^p$  and  $E_{\text{shell}}^n$ , the pairing energies  $E_{\text{pair}}^p$  and  $E_{\text{pair}}^n$ , and the pairing gaps  $\Delta_p$  and  $\Delta_n$ , some proton numbers and neutron numbers are suggested to be the magic numbers within the present approach. The shell quenching phenomena are observed in the region of the superheavy nuclei.

**Key words:** superheavy nuclei; relativistic mean field theory; shell structure

\* **Foundation item:** Major State Basic Research Development Program of China(G2000077407); National Natural Science Foundation of China(10025522,10221003,10047001)