

原子核的单粒子共振态*

张时声^{1, 2}, 孟 杰^{1, 2, 3}, 周善贵^{1, 2, 3}, G. C. Hillhouse⁴

(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 Department of Physics, University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa)

摘 要: 采用基于相对论平均场的耦合常数解析延拓方法研究球形核的单粒子共振态. 具体计算了 Zr 同位素链中巨晕核的核芯核¹²²Zr 阈值附近的中子共振态的能量、宽度和波函数, 其结果同相应的散射相移法的结果一致.

关键词: 单粒子共振态; 相对论平均场; 耦合常数解析延拓方法; 能量、宽度和波函数

中图分类号: O571.41⁺1 **文献标识码:** A

1 引言

近年来, 大批远离 β 稳定线的新核素相继诞生. 这些弱束缚的奇特核, 其中子(或质子)费米面接近连续谱, 所以价核子很容易被散射到连续谱中而引起奇特的现象, 比如“皮”和“晕”结构^[1]. 连续谱中起主要作用的是那些单粒子共振态. 人们在研究巨共振现象时发现, 连续谱对巨共振的贡献主要来自单粒子共振态. 所以, 对于单粒子共振态的研究有助于人们理解这些奇特核的性质. 同时, 利用原子核共振态信息可以估算天体演化过程中的元素丰度比, 预测大质量星体演化形成中子星或黑洞的可能性, 有助于人们了解宇宙演化的规律.

本文采用耦合常数的解析延拓 (ACCC) 方法研究原子核中单粒子共振态的能量、宽度和波函数.

为了考察 ACCC 方法计算的能量和宽度的稳定性和收敛性, 我们曾分别基于 Schrödinger 方程和 Dirac 方程, 在球方势阱、Woods-Saxon 势和谐振子势下, 利用 ACCC 方法计算了共振态或正能量态的能量和宽度, 并详细研究了它们对耦合常数取值区间的选取、取点方式和 Padé 多项式阶数等因素的依赖性^[2, 3]. 在这些工作的基础上, 我们将

ACCC 方法和相对论平均场 (RMF) 理论相结合 (RMF-ACCC) 研究了原子核的单粒子共振态的能量、宽度和波函数^[4].

2 理论方法和计算细节

关于相对论平均场理论的综述性文章可参见文献[5]. 自洽求解相对论平均场方程, 可以得到原子核的基态性质以及相应的核势——标量势 $V_s(r)$ 和矢量势 $V_v(r)$, 以及束缚态的单粒子能量和波函数等. 对于单粒子共振态, 利用 ACCC 方法来求解.

引入耦合常数 (或称为势强度因子) λ , 使得 $V_p(r) = V_v(r) + V_s(r) \rightarrow \lambda V_p(r)$. 通过增加吸引势 ($\lambda > 1$ 且足够大), 使共振态下降成为束缚态.

在支点 λ_0 (对于 $l > 0$, 满足 $k(\lambda_0) = 0$) 附近, 动量 $k(\lambda)$ 用第二类 Padé 逼近从束缚态区解析延拓到共振态区^[6]:

$$k(x) \approx k^{[L, N]}(x) = i \frac{c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + \cdots + c_L x^L}{1 + d_1 x + d_2 x^2 + \cdots + d_N x^N}, \quad (1)$$

其中, $x = \sqrt{\lambda - \lambda_0}$; $c_0, c_1, \dots, c_L; d_1, \dots, d_N$ 为 Padé

收稿日期: 2004 - 08 - ; 6

* 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: 张时声(1976—), 女(汉族), 山东恩县人, 讲师, 从事原子核理论和核天体物理方面的研究;

E-mail: kerry@pku.edu.cn

多项式的系数，由数对 $\{x_i, k(x_i)\}$ 决定， $k(x_i)$ 对应于 $\lambda_i > \lambda_0 (i=1, 2, \dots, L+N+1)$ 的 Dirac 方程的解。 $\lambda = 1$ 时，式(1)给出共振态的复动量 $k_R = k_r + ik_i$ ，那么共振能量 E 和宽度 Γ 可以从关系式 $\epsilon = E - i\Gamma/2$ 和相对论能量-动量关系得到。类似地，可以得到共振态的内部波函数 $\varphi(k_R, r) (r < R_m, R_m$ 为在坐标空间求解 RMF 方程时盒子的大小)；再同外部的自由波函数对接；在全空间对波函数进行 Zel'dovich 归一化。

3 结果和讨论

采用上述 RMF-ACCC 方法，计算了 Zr 同位素链中巨晕核的核芯核 ^{122}Zr 阈值附近的中子共振态的能量、宽度和波函数^[4]。

图 1 给出了 ^{122}Zr 中子共振态 $3p_{3/2}, 3p_{1/2}, 2f_{7/2}, 2f_{5/2}, 1h_{9/2}$ 和 $1i_{13/2}$ 的能量 E 和 Γ 宽度。实心圆点是 RMF-ACCC 方法的结果，空心圆圈是基于相对论平均场理论的散射相移方法 (RMF-S)^[7] 的结果。可见，除了 $3p_{3/2}$ 和 $2f_{5/2}$ 两条能级的宽度有一定差别，两种理论方法得到的单粒子共振态能量和宽度大体一致。另外，分别用 RMF-ACCC 法和 RMF-S 法得到了 ^{122}Zr 中子共振态 $3p_{3/2}, 2f_{7/2}, 2f_{5/2}$ 和 $1h_{9/2}$ 的波函数，在此仅给出 $1h_{9/2}$ 的波函数 (如图 2 所示)。实线是 RMF-ACCC 方法的结果，虚线是 RMF-S 的结果。由于 RMF-ACCC 得到的波函数是复的，RMF-S 得到的波函数是实的，所以将复波函数的实部同 RMF-S 的实波函数比较。可见，对于用两种方法得到的能量和宽度很接近的能级，其相应的波函数也很一致。

参 考 文 献:

[1] Meng J, Ring P. Phys Rev Lett, 1996, 77: 3 963.
 [2] 张时声, 孟杰, 郭建友. 高能物理与核物理, 2003, 27: 1 095.
 [3] Zhang S S, Guo J Y, Zhang S Q, et al. Chin Phys Lett, 2004, 21: 632.
 [4] Zhang S S, Meng J, Zhou S G, et al. Phys Rev C (submitted), nucl-th/0403013.

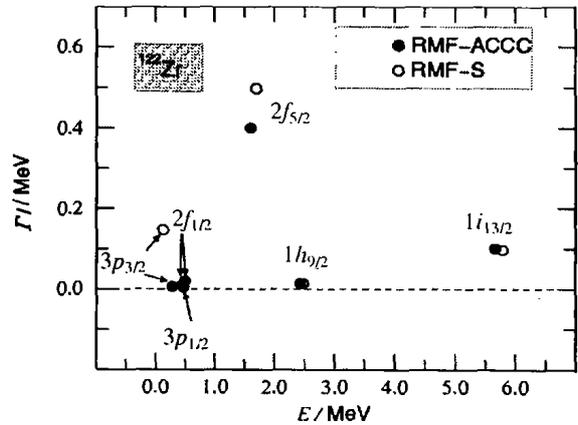


图 1 ^{122}Zr 中子共振态 $3p_{3/2}, 3p_{1/2}, 2f_{7/2}, 2f_{5/2}, 1h_{9/2}$ 和 $1i_{13/2}$ 的能量 E 和宽度 Γ

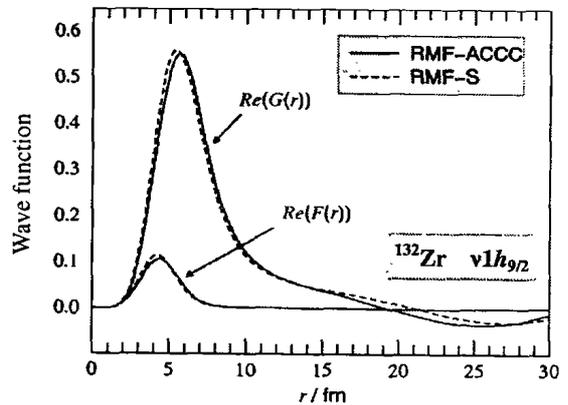


图 2 ^{122}Zr 中子共振态 $1h_{9/2}$ 的波函数

总之，我们用基于相对论平均场的耦合常数解析延拓方法研究原子核中单粒子共振态的能量、宽度和波函数。具体计算了 Zr 同位素链中巨晕核的核芯核 ^{122}Zr 阈值附近的中子共振态的能量、宽度和波函数，其结果同相应的散射相移法的结果一致。

[5] Ring P. Prog Part Nucl Phys, 1996, 37: 193.
 [6] Kukulin V I, Krasnopolsky V M, Horáček J. Theory of Resonances; Principles and Applications (Kluwer Academic, Dordrecht, 1989).
 [7] Sandulescu N, Geng L S, Toki H, et al. Phys Rev, 2003, C68: 054323.

(下转第 367 页)

[20] Myers W D, Swiatecki W J. *Phys Rev*, 1998, **C58**: 3 368.[21] Ren Z Z. *Phys Rev*, 2002, **C65**: 051304(R).

Spherical and Deformed Shell Closures in Superheavy Nuclei*

WU Zhe-ying¹, XU Fu-rong^{1, 2, 3}(1 *Department of Technical Physics and MOE Key Laboratory, Peking University, Beijing 100871, China;*2 *Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*3 *Center for Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The structure of superheavy nuclei has been studied by using the macroscopic-microscopic model. The macroscopic energy was calculated with the continuous medium model in which the energy is expressed as a functional of nucleon densities. The deformations and structures of superheavy nuclei were investigated systematically. Calculations reproduce well the available data of experimental α decay energies and half-lives. The investigation of single-particle levels shows that the shell structure is deformed and isospin dependent. Potential-energy-surface calculations display that superheavy nuclei have in general much harder shapes than that of the nuclei in other mass regions.

Key words: superheavy nuclei; continuous medium model; ground-state properties

(上接第 359 页)

Single-particle Resonant States in Spherical Nuclei**

ZHANG Shi-sheng^{1, 2}, MENG Jie^{1, 2, 3}, ZHOU Shan-gui^{1, 2, 3}, G. C. Hillhouse⁴(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 *Department of Physics, University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa*)

Abstract: Using analytic continuation in the coupling constant (ACCC) method within the framework of the self-consistent relativistic mean field (RMF) theory, the energies, widths and wave functions for single-particle resonant states close to the continuum threshold are evaluated. Predictions are also compared with corresponding results obtained by the scattering phase shift method.

Key words: single-particle resonant states; analytic continuation in the coupling constant; relativistic mean field; energy, width and wave function

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (10175002, 10047001); Major State Basic Research Development Program (G2000077400); Education Ministry of China; Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-5W-No2)

** **Foundation item:** Major State Basic Research Development Program (G2000077407); National Natural Science Foundation of China (10025522, 10221003, 1047001)