

文章编号: 1007-4627(2009)03-0183-05

$N=127$ 同中子核素激发态的 RMF 理论研究*

孙 琴, 郭建友[#]

(安徽大学物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230039)

摘 要: 在球形相对论平均场模型下, 采用 PK1 和 NL3 相互作用, 对 $N=127$ 同中子核素的基态和低激发态进行了研究, 获得了价核子的激发能及中子、质子和最后一个中子的密度分布, 指出 ^{209}Pb 的 $3d_{5/2}$, $4s_{1/2}$ 和 $3d_{3/2}$ 激发态可能存在一个中子晕结构, ^{207}Hg , ^{208}Tl , ^{210}Bi 和 ^{211}Po 的 $3d_{5/2}$, $4s_{1/2}$ 及 $3d_{3/2}$ 激发态也可能存在一个中子晕结构。

关键词: 相对论平均场; 同中子核素; 激发态晕

中图分类号: O571.25⁺¹ **文献标识码:** A

1 引言

自从实验上发现在 ^{11}Li ^[1] 中存在中子晕现象以来, 原子核的奇特结构研究引起了人们的浓厚兴趣。晕核的奇特结构是起因于价核子分离能很低的一种临界现象^[2]。当束缚能很小时, 价核子的波函数向核外弥散并导致了在具有明显核力作用的范围外波函数有一个很长的尾巴, 这时束缚能趋近于零, 晕现象随之出现。由于弥散的价核子密度分布将导致核能级的翻转和新幻数的出现^[3], 所以晕核的研究对于在滴线附近寻找新的幻数是很重要的。另一方面, 晕现象对强子质量能给出很多有用信息, 逐渐成为核结构研究方面的一个重要分支。 β 稳定线上及其附近核素的基态和激发态的晕现象在实验和理论方面已被广泛研究。任中洲^[4-6]、陈金根^[7] 和张虎勇^[8] 等分别用相对论平均场(RMF)理论研究了原子核的基态和激发态的晕现象, 取得了很大成绩。由于 RMF 理论在描述原子核的基态和低激发态性质方面取得了很大成功, 用 RMF 模型从理论上预言原子核的奇特结构引起了人们的兴趣^[9-11]。目前, 关于奇特核结构的研究主要集中在轻核区, 对于中重质量核和重核的奇特结构研究较少。刘祖华等通过 $^{208}\text{Pb}(d, p)^{209}\text{Pb}$ 反应实验指出 ^{209}Pb 的激发态存在晕或皮结构^[12], 这一结果激

起了人们对重核奇特结构的兴趣。本文利用非线性 RMF 理论系统研究 $N=127$ 同中子核素基态和低激发态性质, 展示这些核素的低激发态可能存在晕或皮等奇特结构。

2 理论框架

用 RMF 模型研究原子核结构与性质的文献很多^[7, 9-11], 其中综述性的文章可参看文献^[13]。为了叙述问题方便, 下面简单介绍 RMF 模型的基本理论框架。

RMF 模型的出发点是包括了核子, σ , ω , ρ 介子和光子及其相互作用的拉格朗日量。在考虑了 σ 介子、 ω 介子的非线性作用以后, RMF 的拉格朗日量可以写成:

$$L = \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - M)\psi + \frac{1}{2} \partial^\mu \sigma \partial_\mu \sigma - \frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 - \frac{1}{3} g_2 \sigma^3 - \frac{1}{4} g_3 \sigma^4 - g_\sigma \bar{\psi} \psi \sigma - \frac{1}{4} \omega^\mu{}_\nu \omega_{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega^\mu \omega_\mu - g_\omega \bar{\psi} \gamma^\mu \omega_\mu \psi + \frac{1}{4} g_4 (\omega^\mu \omega_\mu)^2 - \frac{1}{4} \mathbf{R}^\mu{}_\nu \mathbf{R}^{\nu\mu} + \frac{1}{2} m_\rho^2 \boldsymbol{\rho}^\mu \boldsymbol{\rho}_\mu - g_\rho \bar{\psi} \gamma^\mu \boldsymbol{\tau} \boldsymbol{\rho}_\mu \psi - \frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} - e \bar{\psi} \gamma^\mu \frac{1 - \tau_3}{2} A_\mu \psi. \quad (1)$$

* 收稿日期: 2008-10-20; 修改日期: 2008-06-08

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10475001, 10675001); 教育部新世纪优秀人才支持计划基金资助项目(NCET-05-0558); 安徽省人才开发基金资助项目(2007Z018); 安徽省教育厅重点科研项目(KJ2009A129)

作者简介: 孙琴(1983-), 女(汉族), 安徽阜阳人, 在读硕士研究生, 从事核理论研究; E-mail: sunqin5432@163.com

通讯联系人: 郭建友, E-mail: jianyou@ahu.edu.cn

通过经典变分原理可得核子运动的狄拉克方程

$$\{-i\boldsymbol{\alpha} \cdot \nabla + V(\mathbf{r}) + \beta[M + S(\mathbf{r})]\} \psi_i = \epsilon_i \psi_i \quad (2)$$

和介子运动的 Klein-Gordon 方程

$$\begin{aligned} (-\Delta + m_\sigma^2)\sigma(\mathbf{r}) &= -g_\sigma \rho_s(\mathbf{r}) - g_2 \sigma^2(\mathbf{r}) - g_3 \sigma^3(\mathbf{r}), \\ (-\Delta + m_\omega^2)\omega^\mu(\mathbf{r}) &= g_\omega j^\mu(\mathbf{r}) - g_4 (\omega^\nu \omega_\nu) \omega^\mu(\mathbf{r}), \\ (-\Delta + m_\rho^2)\boldsymbol{\rho}^\mu(\mathbf{r}) &= g_\rho \mathbf{j}^\mu(\mathbf{r}), \\ -\Delta A^\mu(\mathbf{r}) &= e j_\rho^\mu(\mathbf{r}), \end{aligned} \quad (3)$$

其中矢量势和标量势分别为

$$V(\mathbf{r}) = \beta \left[g_\omega \gamma^\mu \omega_\mu(\mathbf{r}) + g_\rho \gamma^\mu \boldsymbol{\tau} \boldsymbol{\rho}_\mu(\mathbf{r}) + e \gamma^\mu \frac{1 - \tau_3}{2} A_\mu(\mathbf{r}) \right],$$

$$S(\mathbf{r}) = g_\sigma \sigma(\mathbf{r}). \quad (4)$$

为了求解非线性方程(2)和(3), 采用无海近似, 忽略了来自负能态的贡献, 真空没有激发。自洽迭代求解(2)和(3), 可获得原子核的结合能、中子和质子的密度分布以及均方根半径。

3 计算结果与讨论

选用²⁰⁹Pb 作为例子, 在 RMF 理论计算中采用 PK1^[14] 和 NL3^[15] 相互作用参数组, 对²⁰⁹Pb 基态及激发态进行计算, 结果见表 1 和表 2。从表 1 和表 2 可看出, 两组不同参数组的计算结果是有差异的, 采用 PK1 和 NL3 的 RMF 计算的结合能和实验值

表 1 RMF 程序采用参数 PK1 对²⁰⁹Pb 基态及激发态的计算结果*

数据名称	PK1			
	GS(1i _{11/2})	ES(3d _{5/2})	ES(4s _{1/2})	ES(3d _{3/2})
$E_{\text{exp}}/\text{MeV}$	-1640.367			
$E_{\text{cal}}/\text{MeV}$	-1639.442	-1636.934	-1636.859	-1636.402
R_n/fm	5.736	5.756	5.777	5.771
R_p/fm	5.454	5.447	5.445	5.446
R_m/fm	5.627	5.637	5.649	5.646
$R(1i_{11/2})/\text{fm}$	6.482			
$R(3d_{5/2})/\text{fm}$		8.726		
$R(4s_{1/2})/\text{fm}$			10.430	
$R(3d_{3/2})/\text{fm}$				9.925
$\epsilon(1i_{11/2})/\text{MeV}$	-3.102	-3.056	-3.041	-3.048
$\epsilon(3d_{5/2})/\text{MeV}$	-0.563	-0.577	-0.562	-0.559
$\epsilon(4s_{1/2})/\text{MeV}$	-0.484	-0.498	-0.493	-0.482
$\epsilon(3d_{3/2})/\text{MeV}$	-0.031	-0.035	-0.022	-0.038

* E_{exp} 为实验值, E_{cal} 为理论计算值。GS 和 ES 分别代表基态和激发态。 nl_j 代表最后一个中子占据能级的量子数。 R_n , R_p 和 R_m 分别表示中子、质子和物质的均方根半径, $R(1i_{11/2})$, $R(3d_{5/2})$, $R(4s_{1/2})$, $R(3d_{3/2})$ 和 $\epsilon(1i_{11/2})$, $\epsilon(3d_{5/2})$, $\epsilon(4s_{1/2})$, $\epsilon(3d_{3/2})$ 分别表示最后一个中子占据相应各态的均方根半径和能量, 束缚能和单粒子能量的单位为 MeV, 各种半径的单位为 fm。

表 2 RMF 程序采用参数 NL3 对²⁰⁹Pb 基态及激发态的计算结果*

数据名称	PK1			
	GS(1i _{11/2})	ES(3d _{5/2})	ES(4s _{1/2})	ES(3d _{3/2})
$E_{\text{exp}}/\text{MeV}$	-1640.367			
$E_{\text{cal}}/\text{MeV}$	-1642.603	-1640.382	-1640.236	-1639.806
R_n/fm	5.756	5.773	5.791	5.784
R_p/fm	5.471	5.463	5.462	5.463

R_m/fm	5.646	5.653	5.664	5.660
$R(1i_{11/2})/\text{fm}$	6.540			
$R(3d_{5/2})/\text{fm}$		8.516		
$R(4s_{1/2})/\text{fm}$			10.015	
$R(3d_{3/2})/\text{fm}$				9.463
$\epsilon(1i_{11/2})/\text{MeV}$	-3.029	-2.981	-2.965	-2.973
$\epsilon(3d_{5/2})/\text{MeV}$	-0.775	-0.792	-0.776	-0.769
$\epsilon(4s_{1/2})/\text{MeV}$	-0.623	-0.639	-0.637	-0.617
$\epsilon(3d_{3/2})/\text{MeV}$	-0.199	-0.200	-0.186	-0.207

* 符号标注同表 1。

的偏差分别为 0.925 和 2.236 MeV。采用 PK1 的 RMF 计算的结果更接近于实验值。为此,下面以 PK1 的 RMF 计算为例分析 ^{209}Pb 的结构。从表 1 可以看出,当最后一个中子占据 $1i_{11/2}$ 单粒子态时,中子的均方根半径为 6.482 fm,比质子的均方根半径大 1.028 fm。当最后一个中子占据 $3d_{5/2}$, $4s_{1/2}$ 和 $3d_{3/2}$ 单粒子态时,中子的均方根半径分别为 8.726, 10.430 和 9.925 fm,比质子的均方根半径分别大 3.279, 4.985 和 4.479 fm。由此可以看出, ^{209}Pb 的单中子激发态具有明显的中子晕结构。此时,价中子的单粒子能量分别为 -0.577, -0.493 和 -0.038 MeV,是弱束缚的,容易形成弥散的结构。而且轨道角动量 l 较小,离心位垒较低,容易形成奇特的晕结构。结合图 1 和图 2 可以清楚地看出, ^{209}Pb 的 $1i_{11/2}$ 基态没有异常结构, $3d_{5/2}$, $4s_{1/2}$ 和 $3d_{3/2}$ 激发态可能存在一个中子晕结构。

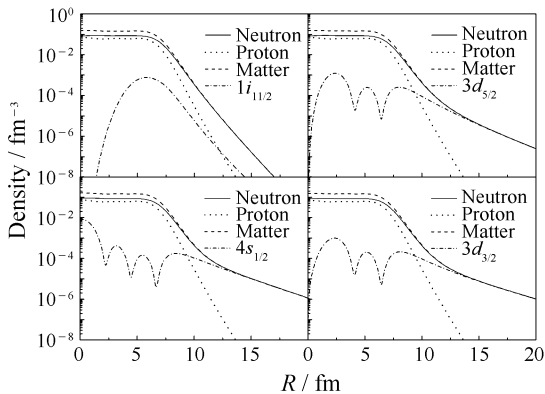


图 1 ^{209}Pb 基态及激发态的各种密度分布

实线、点线、短划线和点划线分别表示中子、质子、物质和最后一个中子占据各能级的密度分布,相互作用参数为 PK1。

表 2 列出了 NL3 相互作用参数组计算的结果,与表 1 类似,除基态结合能有比较大的差异外,其余结果相似。NL3 相互作用参数组计算结果同样给

出 ^{209}Pb 的基态没有出现奇特结构,而 $3d_{5/2}$, $4s_{1/2}$ 和 $3d_{3/2}$ 激发态可能存在一个中子晕结构。不同的参数组算出的基态结合能有所差别,但反映出的奇特性质是相似的。

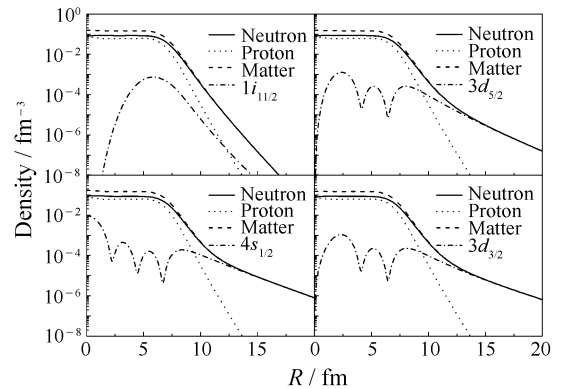


图 2 ^{209}Pb 基态及激发态的各种密度分布

为了更加清楚地看出 ^{209}Pb 的基态和低激发态是否存在奇特结构,图 1 给出了基态和各个激发态的中子、质子、物质以及最后一个中子占据能级的密度分布。从图 1 可以清楚地看到当最后一个中子占据 $1i_{11/2}$ 能级,即核 ^{209}Pb 在基态 $1i_{11/2}$ 并没有异常结构,属于正常稳定核,没有晕或皮现象产生。而当最后一个中子在激发态 $3d_{5/2}$, $4s_{1/2}$ 和 $3d_{3/2}$ 时,中子分布出现了更为宽大的尾部,而价中子的单粒子能量又异常小,表明 ^{209}Pb 在激发态 $3d_{5/2}$, $4s_{1/2}$ 和 $3d_{3/2}$ 时形成一个中子晕结构。图 2 是采用相互作用参数 NL3 所计算的结果。和图 1 类似,当最后一个中子占据 $1i_{11/2}$ 能级时没有出现异常结构,而当最后一个中子在激发态 $3d_{5/2}$, $4s_{1/2}$ 和 $3d_{3/2}$ 时,中子分布出现宽大的尾部。在 RMF 理论框架下,采用不同的相互作用参数组,计算的结果是相似的, ^{209}Pb 在激发态 $3d_{5/2}$, $4s_{1/2}$ 和 $3d_{3/2}$ 时可能存在一个中子晕结构,和实验的结论一致。

除了²⁰⁹Pb, 我们还用 PK1 和 NL3 相互作用参数研究了²⁰⁷Hg, ²⁰⁸Tl, ²¹⁰Bi 和²¹¹Po 等同中子核素的基态和低激发态结构。计算结果表明这些核的基态结合能和实验值符合得非常好, 在激发态 $3d_{5/2}$, $4s_{1/2}$ 和 $3d_{3/2}$ 时也可能存在一个中子晕结构。为了清楚地看出是否存在晕结构, 图 3 给出了采用 PK1 计

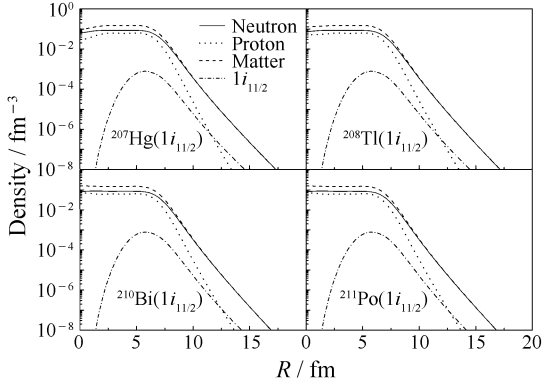


图 3 ²⁰⁷Hg, ²⁰⁸Tl, ²¹⁰Bi 和²¹¹Po 基态密度分布
实线、点线、短划线和点划线各为中子、质子、物质和最后一个中子占据 $1i_{11/2}$ 基态能级密度分布, 相互作用参数为 PK1。

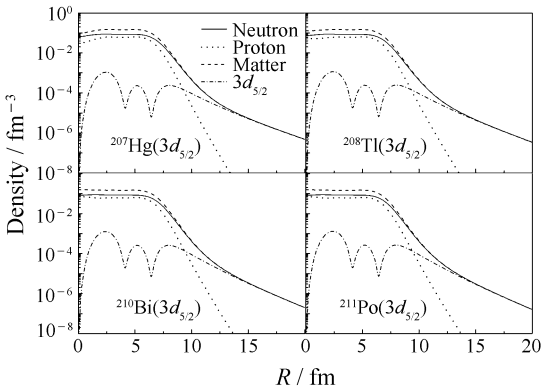


图 4 与图 3 类似, ²⁰⁷Hg, ²⁰⁸Tl, ²¹⁰Bi 和²¹¹Po 激发态的密度分布, 最后一个中子占据在激发态 $3d_{5/2}$ 能级上

算所得出的中子、质子、物质和最后一个中子占据在 $1i_{11/2}$ 能级的密度分布。从图 3 可以看出中子比质子的尾部稍微大一些, 表明²⁰⁷Hg, ²⁰⁸Tl, ²¹⁰Bi 和²¹¹Po 的基态没有出现奇特结构, 但当最后一个中子被激发到 $3d_{5/2}$, $4s_{1/2}$ 和 $3d_{3/2}$ 能级时, 情况就完全不同了。图 4—图 6 给出了中子、质子、物质和最后一个中子分别占据 $3d_{5/2}$, $4s_{1/2}$ 和 $3d_{3/2}$ 能级时的密度分布, 从图 4—图 6 可以清楚地看出 4 个核的中子分布出现了宽大的尾部, 表明²⁰⁷Hg, ²⁰⁸Tl, ²¹⁰Bi 和²¹¹Po 在激发态 $3d_{5/2}$, $4s_{1/2}$ 和 $3d_{3/2}$ 时可能存在一个中子晕结构。

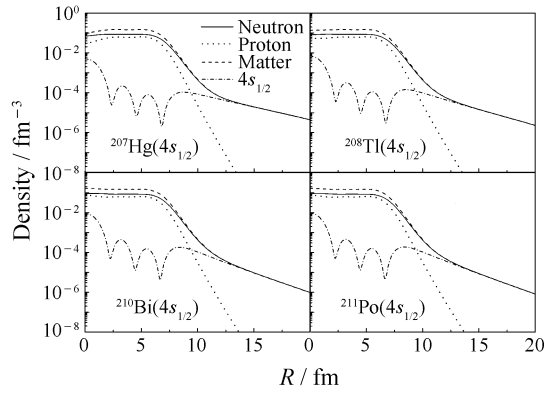


图 5 与图 3 类似, ²⁰⁷Hg, ²⁰⁸Tl, ²¹⁰Bi 和²¹¹Po 激发态的密度分布, 最后一个中子占据在激发态 $4s_{1/2}$ 能级上

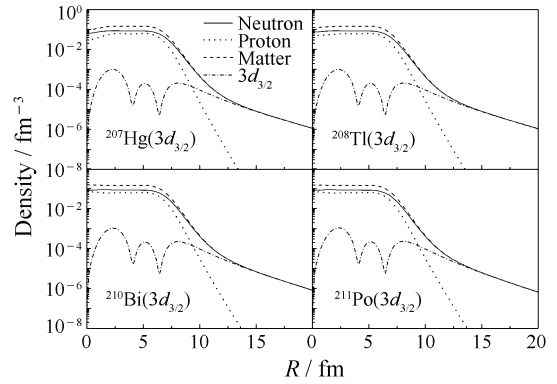


图 6 与图 3 类似, ²⁰⁷Hg, ²⁰⁸Tl, ²¹⁰Bi 和²¹¹Po 激发态的密度分布, 最后一个中子占据在激发态 $3d_{3/2}$ 能级上

4 结论

用非线性的 RMF 理论系统研究了 $N=127$ 同中子核素 ²⁰⁹Pb, ²⁰⁷Hg, ²⁰⁸Tl, ²¹⁰Bi 和²¹¹Po 的基态和低激发态结构。计算的结合能与实验值符合得较好, 尤其是采用 PK1 参数组, RMF 计算的结合能与实验值的偏差在 1 MeV 以下。采用 PK1 和 NL3 计算, 结果都表明 ²⁰⁹Pb 在激发态 $3d_{5/2}$, $4s_{1/2}$ 和 $3d_{3/2}$ 可能存在一个中子晕结构, 和已有的实验分析结果一致。与 ²⁰⁹Pb 类似, ²⁰⁷Hg, ²⁰⁸Tl, ²¹⁰Bi 和²¹¹Po 同中子核素, 在激发态 $3d_{5/2}$, $4s_{1/2}$ 和 $3d_{3/2}$ 也可能存在一个中子晕结构。这些奇特结构的理论预言还需要实验的进一步检验。

参考文献 (References):

[1] Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O, *et al.* Phys Rev Lett, 1985, 55: 2676.
[2] Riisager K. Rev Mod Phys, 1994, 66(3): 1105.

- [3] Ozawa A, Kobayashi T, Suzuki T, *et al.* Phys Rev Lett, 2000, 84(24): 5493.
- [4] Ren Zhongzhou, Mittig W, Sarazin F. Nucl Phys, 1999, A652: 250.
- [5] Ren Zhongzhou, Mittig W, Chen Baoqiu, *et al.* Phys Rev, 1995, C52: R20.
- [6] Ren Zhongzhou, Faessler Amand, Bobyk A. Phys Rev, 1998, C57: 2752.
- [7] Chen Jingen, Cai Xiangzhou, Zhang Huyong, *et al.* Chin Phys Lett, 2003, 20: 1021.
- [8] Zhang Huyong, Shen Wenqing, Ren Zhongzhou, *et al.* Chin Phys Lett, 2003, 20: 1462.
- [9] Yu Miao, Zhang Pengfei, Ruan Tunan, *et al.* Modern Phys Lett, 2006, A21: 2751.
- [10] Ren Zhongzhou, Jiang Weizhou, Cai Xiangzhou, *et al.* Commun Theo Phys, 2002, 38: 470.
- [11] Chen Jingen, Cai Xiangzhou, Shen Wenqing, *et al.* Eur Phys J, 2005, A23: 11.
- [12] Liu Zuhua. Chin Phys Lett, 2001, 18: 1024.
- [13] Ring P. Prog Part Nucl Phys, 1996, 37: 193.
- [14] Long Wenhui, Meng Jie, Giai Nguyen Van, *et al.* Phys Rev, 2004, C69: 034319.
- [15] Lalazissis G A, König, Ring P. Phys Rev, 1997, C55: 540.

Research on Excited States in $N=127$ Isotones with Relativistic Mean Field Theory^{*}

SUN Qin, GUO Jian-you[#]

(School of Physics and Material Science, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: Properties of the ground state and the excited states in $N=127$ isotones are investigated with relativistic mean field theory with the interactions PK1 and NL3. By analyzing the rms of proton and neutron, the single particle levels of valence nucleon and the density distributions of neutron, proton and the last neutron, it can be found that there exists a neutron halo in the excited states of $3d_{5/2}$, $4s_{1/2}$ and $3d_{3/2}$. It is also predicted that there exists a neutron halo in the excited states of $3d_{5/2}$, $4s_{1/2}$ and $3d_{3/2}$ in ^{207}Hg , ^{208}Tl , ^{210}Bi and ^{211}Po .

Key words: relativistic mean field; isotone; halo in excited state

* Received date: 20 Oct. 2008; Revised date: 8 Jun. 2009

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10475001, 10675001); Program for New Century Excellent Talents in University of China(NCET-05-0558); Talents Cultivation Foundation of Anhui Province(2007Z018); Education Committee Foundation of Anhui Province(KJ2009A129)

Corresponding author: Guo Jian-you, E-mail: jianyou@ahu.edu.cn