

相对论连续谱Hartree-Bogoliubov理论对 Dy偶同位素链的研究*

倪绍勇¹⁾ 石筑一²⁾ 赵行知 童红

(贵州民族学院物理系 贵阳 550025)

摘要 基于相对论连续谱Hartree-Bogoliubov(RCHB)理论,在NL-SH参数下,研究了从质子滴线到
中子滴线Dy的整个偶同位素链的基态特性.首先,计算的核结合能和核均方根半径结果,在有实验
数据进行比较的范围内,相当好地与已有实验数据值符合;其次,在中子数为 $N=82-126$ 的壳层里,
在 $84-92, 94-126$ 之间有明显的子壳层结构; ${}^{250}_{66}\text{Dy}_{184}$ 核是中子滴线核;在 ${}^{240-250}_{66}\text{Dy}_{174-184}$ 范围内
有晕核的典型特征,这里很可能存在有巨晕核.

关键词 相对论连续谱Hartree-Bogoliubov(RCHB)理论 中子子壳层 滴线核 巨晕核 Dy偶
同位素链

1 引言

核物理创建初期,在研究低能核结构问题时,人们普遍认为相对论性是不重要的.因为核子的最大动能 $T_{\max} \approx 38 \text{ MeV}$,最大速度是 $v = 0.29c$.以后,由于相对论性的核模型在解决一系列问题上,如远离稳定核和稳定核的很多核性质、有限核的基态性质、核物质的饱和性等,显得比非相对论性的模型更为成功.在其自身方案的不断改进和完善中,相对论平均场(RMF)理论最终发展成为一种强有力的研究工具^[1-10].

RMF理论的出发点,是把核子描述为在介子(σ, ω, ρ)和光子提供的平均场中运动的Dirac旋量粒子;通过经典变分原理导出核子与介子场的运动方程.因此,它是介子水平上的微观核理论.

但是,一个更为完整的核理论应该包含对连续态的恰当处理,从而对稳定核和不稳定核都能进行描述.把RMF理论和Bogoliubov准粒子变换联合在一起,就

产生了相对论连续谱Hartree-Bogoliubov(RCHB)理论^[7, 8]. RCHB理论在研究滴线原子核结构,包括 ${}^{11}\text{Li}$ 晕核的描述、巨晕的预言、晕核的形成与壳结构的关系、赝自旋对称性的解释、自旋轨道分裂与势能位垒弥散、经典禁止区的粒子与晕核的关系、超重元素的性质及结构等方面,都取得了很大的成功^[7-18].

2 RCHB理论

关于RCHB理论的细节及数值求解方法可参见文献^[8, 16].为了本文表述方便,这里只给出其大致的理论框架.

首先, RMF将核子视为Dirac粒子,核子通过交换介子和光子发生相互作用.其中标量介子 σ 描述中程吸引核力、矢量介子 ω 描述短程排斥核力作用、同位旋矢量介子 ρ 描述中子和质子差别;标量介子 σ 在自作用场 $U(\sigma) = \frac{1}{2}m_{\sigma}^2\sigma^2 + \frac{1}{3}g_2\sigma^3 + \frac{1}{4}g_3\sigma^4$ 中运动.这样,描述体系的拉氏量就可以写为

* 贵州省高校自然科学类重点项目(2004123)和贵州省教育厅自然科学类项目(2004218)资助

1) E-mail: nsyong_49@163.com

2) E-mail: shizhuyi@vip.sina.com.cn

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i \not{\partial} - M)\psi + \frac{1}{2} \partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma - U(\sigma) - \frac{1}{4} \Omega_{\mu\nu} \Omega^{\mu\nu} - g_\sigma \bar{\psi} \sigma \psi + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_\mu \omega^\mu - \frac{1}{4} \mathbf{P}_{\mu\nu} \cdot \mathbf{P}^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\rho^2 \mathbf{r}_\mu \cdot \mathbf{r}^\mu - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - g_\omega \bar{\psi} \not{\omega} \psi - g_\rho \bar{\psi} \not{\boldsymbol{\rho}} \cdot \boldsymbol{\tau} \psi - e \bar{\psi} \not{A} \psi,$$

式中 M 是核子质量, m_σ , m_ω , m_ρ , g_σ , g_ω , g_ρ 是介子质量及其与核子的作用常数.

由经典变分原理导出核子与介子场的运动方程是耦合的非线性的量子场方程组, 精确求解极其困难. 当引入平均场近似, 即用期待值来代替介子场算符后, 核子则独立地在经典介子场中运动. 而耦合的方程组可以通过迭代自洽地求解.

为了导出对相互作用, 必须量子化介子场, 从而导出一个含两体相互作用的Hamiltonian. 遵循Bogoliubov变换的标准步骤, 则可导出一个Dirac Hartree-Fock-Bogoliubov方程. 从而得到统一描述相对论平均场和对关联的RHB方程组.

为了描述束缚态、连续谱以及它们之间的耦合, 上面的RHB方程必须在坐标空间求解, 这就是相对论连续谱HB理论(RCHB). 这样, RCHB不仅适用于束缚态, 而且可以用于描述连续谱. 考虑球对称性, RHB方程可以约化为径向方程.

当引进零程的与密度相关的 δ 力:

$$V(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = V_0 \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \frac{1}{4} [1 - \sigma_1 \sigma_2] \left(1 - \frac{\rho(r)}{\rho_0} \right)$$

表 1 NL-SH参数值

M/MeV	m_σ/MeV	m_ω/MeV	m_ρ/MeV	g_σ	g_ω	g_ρ	g_2	g_3
939.0	526.05921	783.0	763.0	10.44355	12.9451	4.38281	-6.90992	-15.83373

表 2 用NL-SH参数值计算出的Dy偶同位素的基态性质

质量数 A	中子数 N	核半径/ fm					结合能/ MeV		分离能 S_{2n}/MeV
		$R_{c,\text{exp}}^{[22]}$	R_n	R_p	R_m	R_c	$E_{b,\text{exp}}^{[21]}$	E_b	
132	66		4.783	4.878	4.831	4.943		-1003.756	
134	68		4.815	4.884	4.849	4.949		-1031.863	28.106
136	70		4.846	4.891	4.868	4.956		-1059.427	27.564
138	72		4.876	4.898	4.886	4.963	-1097.100(.552)	-1086.503	27.077
140	74		4.905	4.906	4.906	4.971	-1121.120(.560)	-1113.136	26.633
142	76		4.934	4.915	4.925	4.979	-1144.520(.426)	-1139.347	26.211
144	78		4.963	4.924	4.945	4.989	-1167.219(30.672)	-1165.131	25.784
146	80	5.052(.203)	4.991	4.935	4.966	4.999	-1189.332(27.156)	-1190.422	25.290
148	82	5.054(.203)	5.020	4.943	4.986	5.008	-1210.780(10.656)	-1214.326	23.905
150	84	5.077(.206)	5.058	4.964	5.017	5.028	-1228.380(4.950)	-1229.411	15.085
152	86	5.100(.213)	5.094	4.986	5.047	5.050	-1245.330(5.168)	-1244.260	14.849
154	88	5.127(.228)	5.130	5.008	5.078	5.071	-1261.746(7.700)	-1258.914	14.653
156	90	5.163(.256)	5.164	5.031	5.108	5.094	-1278.020(6.552)	-1273.383	14.470
158	92	5.181(.272)	5.198	5.056	5.139	5.119	-1294.045(3.476)	-1287.605	14.221
160	94	5.194(.284)	5.233	5.068	5.165	5.130	-1309.454(2.560)	-1299.704	12.100

或含有参数 μ_i , W_i , B_i , H_i 和 M_i ($i = 1, 2$) 的Gogny有限程核力:

$$V(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \sum_{i=1,2} e^{((r_1-r_2)/\mu_i)^2} (W_i + B_i P^\sigma - H_i P^\tau - M_i P^\sigma P^\tau)$$

之后, RHB方程就约化成为数字可求解的耦合微分方程组.

3 计算结果与讨论

3.1 结合能和双中子分离能

利用RMF相互作用参数NL-SH^[19,20](见表1), 在步长为 $\Delta = 0.1$ fm, 半径为 $R = 20$ fm的盒子中用Shooting方法数值求解了RCHB方程. 对势中用的力为 δ 力, 其强度由相应的Gogny力确定, $V_0 = -650 \text{ MeV} \cdot \text{fm}^{-3}$. 计算出的Dy偶同位素链的结合能与实验值^[21](其后括号中的数字是实验误差值)列在表2中, 双中子分离能随中子数的变化在图1中给出.

(续表2)

质量数 <i>A</i>	中子数 <i>N</i>	核半径/ fm					结合能/ MeV		分离能 <i>S</i> _{2n} /MeV
		<i>R</i> _{c,exp} ^[22]	<i>R</i> _n	<i>R</i> _p	<i>R</i> _m	<i>R</i> _c	<i>E</i> _{b,exp} ^[21]	<i>E</i> _b	
162	96	5.207(.003)	5.267	5.080	5.191	5.142	-1324.105(2.592)	-1311.341	11.637
164	98	5.221(.002)	5.300	5.092	5.217	5.155	-1338.034(2.460)	-1322.679	11.338
166	100		5.333	5.104	5.243	5.167	-1350.794(2.490)	-1333.773	11.095
168	102		5.365	5.117	5.269	5.179	-1362.911(13.994)	-1344.651	10.878
170	104		5.396	5.129	5.294	5.191	-1374.110(0.170)	-1355.325	10.674
172	106		5.426	5.142	5.319	5.204	-1384.428(0.344)	-1365.806	10.481
174	108		5.456	5.156	5.344	5.217		-1376.106	10.300
176	110		5.486	5.169	5.369	5.231		-1386.242	10.136
178	112		5.516	5.182	5.395	5.244		-1396.230	9.988
180	114		5.545	5.195	5.420	5.257		-1406.082	9.852
182	116		5.575	5.208	5.445	5.269		-1415.809	9.727
184	118		5.605	5.220	5.470	5.281		-1425.415	9.606
186	120		5.635	5.231	5.495	5.292		-1434.898	9.483
188	122		5.666	5.241	5.521	5.302		-1444.249	9.351
190	124		5.698	5.250	5.546	5.310		-1453.457	9.208
192	126		5.730	5.257	5.572	5.318		-1462.492	9.035
194	128		5.766	5.276	5.604	5.336		-1463.018	0.525
196	130		5.802	5.294	5.636	5.354		-1463.581	0.563
198	132		5.837	5.313	5.667	5.373		-1464.188	0.607
200	134		5.871	5.331	5.699	5.391		-1464.840	0.653
202	136		5.906	5.349	5.730	5.408		-1465.537	0.696
204	138		5.940	5.366	5.760	5.425		-1466.275	0.738
206	140		5.975	5.382	5.791	5.441		-1467.044	0.769
208	142		6.010	5.396	5.822	5.455		-1467.841	0.797
210	144		6.046	5.409	5.854	5.468		-1468.649	0.808
212	146		6.084	5.421	5.886	5.479		-1469.460	0.811
214	148		6.123	5.431	5.918	5.490		-1470.265	0.805
216	150		6.164	5.440	5.952	5.499		-1471.058	0.794
218	152		6.206	5.448	5.987	5.507		-1471.839	0.780
220	154		6.249	5.456	6.022	5.514		-1472.606	0.767
222	156		6.291	5.463	6.057	5.522		-1473.361	0.755
224	158		6.333	5.471	6.092	5.529		-1474.102	0.741
226	160		6.373	5.478	6.125	5.536		-1474.828	0.726
228	162		6.412	5.486	6.158	5.544		-1475.534	0.706
230	164		6.449	5.495	6.190	5.553		-1476.214	0.680
232	166		6.483	5.504	6.220	5.562		-1476.848	0.634
234	168		6.512	5.515	6.247	5.572		-1477.398	0.550
236	170		6.535	5.528	6.270	5.586		-1477.814	0.416
238	172		6.553	5.545	6.289	5.602		-1478.091	0.277
240	174		6.568	5.562	6.308	5.619		-1478.271	0.180
242	176		6.583	5.580	6.326	5.637		-1478.397	0.126
244	178		6.598	5.599	6.343	5.656		-1478.500	0.103
246	180		6.613	5.618	6.361	5.674		-1478.604	0.104
248	182		6.629	5.637	6.380	5.693		-1478.728	0.124
250	184		6.644	5.656	6.398	5.713		-1478.886	0.158
252	186		6.749	5.656	6.481	5.712		-1476.498	-2.388
254	188		6.851	5.655	6.561	5.711		-1474.174	-2.323
256	190		6.950	5.654	6.640	5.711		-1471.911	-2.264
258	192		7.030	5.654	6.705	5.710		-1468.597	-3.314
260	194		7.107	5.654	6.768	5.710		-1465.338	-3.258
262	196		7.182	5.654	6.829	5.710		-1462.127	-3.212
264	198		7.257	5.653	6.891	5.710		-1458.945	-3.182

从表2看到, 在有实验值的区域内($A=144-148$), $^{144-156}_{66}\text{Dy}$ 的理论计算值在实测值的误差范围内; $^{158-168}_{66}\text{Dy}$ 的理论计算值比实测值稍高, 其最大偏差没有超过12.865MeV, 相对误差也没有超过0.96%(在 $^{162}_{66}\text{Dy}$). 因此, 至少在能与实验值进行比较的范围内, 理论计算值较好地与实验值相符合.

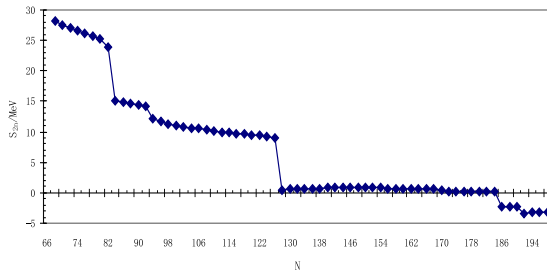


图1 应用参数NL-SH计算出的Dy偶同位素链的双中子分离能

另外, 从图1和表2, 可以得出如下结论:

- 1)在中子数为 $N=82-126$ 的壳层中, 在 $N=84-92$ 和 $N=94-126$ 区间有明显的中子壳层结构.
- 2)在 $N \geq 186$ 处, $S_{2n} < 0.00 \text{ MeV}$, $^{250}_{66}\text{Dy}_{184}$ 很可能就是中子滴线核^[7, 9, 18].

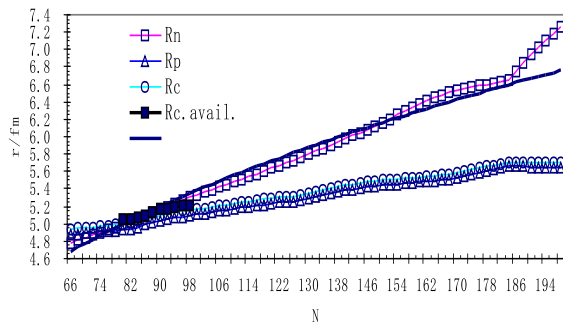


图2 应用参数NL-SH计算出的Dy偶同位素核半径值与实验值的比较

- 3)在 $N=128-172$ 区间, $S_{2n} \approx 0.28-0.82 \text{ MeV}$, 双中子分离能变化很小, 在 $N=174-184$ 区间, $S_{2n} \approx 0.10-0.18 \text{ MeV}$, 双中子分离能不仅变化很小,

而且非常接近零, 这与Zr和Ca同位素链中丰中子同位素双中子分离能随中子数增加而变化的趋势相同, 因此推测在 $^{240-250}_{66}\text{Dy}_{174-184}$ 区域内很可能存在巨晕核^[7, 9, 16].

3.2 核均方根半径

计算出的Dy偶同位素链的核均方根半径(rms)值与电荷半径实验数据^[22](其后括号中的数字是数据误差)列在表2中, 其相应的函数图画在图2上. 从图2和表2, 可以看到:

- 1)对于中子: 在 $N=66-170$ 区域, 均方根半径单调增加, 增幅近似不变; 在 $N=172-184$ 区域, 均方根半径增幅变慢; 从 $N=186$ 以上, 均方根半径急剧增加, 核子分布弥散程度加剧. 与前述3.1的结论2)自洽. 而且遵从规律 $r_n = 1.16N^{1/3} \text{ fm}$ (黑线所示).
- 2)对于质子: 在 $N=66-184$ 区域, 质子均方根半径单调增加.
- 3)核电荷半径与质子均方根半径有相同的变化趋势, 在能与实验数据进行比较的范围内($N=146-164$), 计算值与实验符合得相当好.

4 结论

综上所述, 我们在RCHB理论框架下使用RMF相互作用参数NL-SH, 完成了从质子滴线到中子滴线的整个Dy偶同位素链基态的一系列计算. 计算结果表明, 在有实验数据进行比较的范围内, 核结合能和核均方根半径的理论计算值与实验值数据符合得相当好. 对计算结果的进一步分析可以得出如下结论: 1)在中子数为82-126的壳层里, 在 $N=84-92$ 和 $N=94-126$ 区域中有明显的中子壳层结构; 2) $^{250}_{66}\text{Dy}_{184}$ 核是中子滴线核; 3)在 $^{240-250}_{66}\text{Dy}_{174-184}$ 范围内有典型的晕核特征, 这里很可能存在有巨晕核.

感谢孟杰教授和周善贵博士阅读了本文的初稿, 以及对本工作的关心和帮助.

参考文献(References)

- 1 丁大钊, 陈永寿, 张焕乔. 原子核物理进展. 上海科学出版社, 1997, 473—513
- 2 MENG J et al. Prog. Part. Nucl. Phys., 将发表; 孟杰. 原子核理论讲义, 未发表
- 3 Walecka J D. Ann. Phys., 1974, **83**: 491—529
- 4 Serot B D, Walecka J D. Adv. Nucl. Phys., 1986, **16**: 1—327
- 5 Ping P. Prog. Part. Nucl. Phys., 1996, **37**: 193—263
- 6 Kucharek H, Ring P. Z. Phys., 1991, **A339**: 23—35
- 7 MENG J, Ring P. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**: 3963—3966
- 8 MENG J. Nucl. Phys., 1998, **A635**: 3—42
- 9 MENG J, Ring P. Phys. Rev. Lett., 1998, **80**: 460—463
- 10 MENG J, Tanihata I, Yamaji S. Phys. Lett., 1998, **B419**: 1—6
- 11 MENG J, Tanihata I. Nucl. Phys., 1999, **A650**: 176
- 12 MENG J. Phys. Rev., 1999, **C57**: 1229—1232
- 13 MENG J, Toki H, ZENG J Y et al. Phys. Rev., 2002, **C65**: 041302R
- 14 MENG J, Sugawara-Tanabe K S, Yamaji S et al. Phys. Rev., 1998, **C58**: R628—R631
- 15 MENG J, Sugawara-Tanabe K S, Yamaji S et al. Phys. Rev., 1999, **C59**: 154—163
- 16 ZHANG S Q, MENG J, ZHOU S G. Science in China, 2003, **G46**: 632—658
- 17 ZHANG S Q, MENG J, ZHOU S G et al. HEP & NP, 2003, **26**(1): 252—258(in Chinese)
(张双全, 孟杰, 周善贵等. 高能物理与核物理, 2003, **26**: 252—258)
- 18 MENG J et al. Acta Scientiarum Naturalium U. P. 2003, **39**: s.s 38—43(in Chinese)
(孟杰等. 北京大学学报(自然科学版), **39**: s.s 38—43)
- 19 Lalazissis G A, König J, Ring P. Phys. Rev., 1997, **C55**: 540—543
- 20 Bender M et al. Phys. Rev., 1999, **C60**: 034304
- 21 Audi G, Wapstra A H, Thibault C. Nucl. Phys., 2003, **A729**: 337—676
- 22 Angeli I. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 2004, **87**(2): 185—305

Even Dy Isotopes in Relativistic Continuum Hartree-Bogoliubov Theory*

NI Shao-Yong¹⁾ SHI Zhu-Yi²⁾ ZHAO Xing-Zhi TONG Hong

(Department of Physics, Guizhou Institute for Nationalities, Guiyang 550025, China)

Abstract We study the ground state properties of even Dy isotopes, from the proton drip line to the neutron drip line, in the Relativistic Continuum Hartree-Bogoliubov theory with the NL-SH parameters. Firstly, our results show that theoretical binding energies and nuclear root mean square radii are in good agreement with the available experimental data. Secondly, we draw the following conclusions by investigating the calculated results: 1. within the neutron shell on $N = 82—126$, there is an obvious sub-shell between the ranges of $N = 84—92$ and $N = 94—126$; 2. the predicted neutron drip line nucleus is ${}_{66}^{250}\text{Dy}_{184}$; 3. characteristics of halos and giant halos appears in ${}^{240—250}_{66}\text{Dy}_{174—184}$ nuclei, among which there may be the giant halos.

Key words relativistic continuum Hartree-Bogoliubov (RCHB) theory, neutron sub-shell, neutron drip line nucleus, giant halo, even Dy isotopes chain

* Supported by Science Foundation of the Education Department of Guizhou Province China(2004123) and (2004118)

1) E-mail: nsyong_49@163.com

2) E-mail: shizhuyi@vip.sina.com.cn