

单粒子势模型下价核子的密度分布*

林承键 张焕乔 刘祖华 吴岳伟 杨 峰 阮 明

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

(2002 年 3 月 29 日收到, 2002 年 7 月 21 日收到修改稿)

依据实验事实, 利用单粒子势模型, 计算了一些核态外层价核子的密度分布, 计算给出了价核子在核外部分布的概率和贡献, 以此作为晕核态的判断标准. 通过研究均方根半径随结合能变化的规律, 指出了晕核态存在的条件, 尤其是质子晕核态存在的条件. 这些对判断和寻找晕核态有现实的指导意义.

关键词: 单粒子势模型, 价核子, 密度分布, 中子晕核态, 质子晕核态

PACC: 2410F, 2500, 2570, 2160

1. 引 言

自从晕核现象报道^[1]以来, 其奇特的核性质受到人们的关注. 迄今实验上发现了较多不同类型的晕核, 推动了晕核理论的发展. 在众多的理论中, 值得一提的是唯象的单粒子势模型. 该模型源自 Hansen 和 Jonson 描述晕核的核芯 + 价粒子图像^[2]. 此后 Fedorov, Jensen 和 Riisager 等^[3, 4]运用该图像, 利用球方势阱研究了中子晕核的基本性质, 并给出晕核存在的充要条件. 他们采用方势阱的主要原因是 Schrödinger 方程存在解析解, 通过求解方程可得到价中子在 s, p, d 态时均方半径的规律:

$$\frac{\langle r^2 \rangle}{R_{\text{an}}^2} \cong \begin{cases} 0.25 \hbar^2 (S_n \mu R_{\text{an}}^2) & l = 0; \\ 0.59 \hbar (S_n \mu R_{\text{an}}^2)^{1/2} & l = 1; \\ 1.40 & l = 2, \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\langle r^2 \rangle$ 为外层价中子分布的均方半径, S_n 为该中子的分离能, l 为该中子所处核态的轨道角动量, μ 为体系约化质量, R_{an} 为方势阱 V_{an} 的半径.

$$\frac{\int V r^3 dr}{\int V r dr} = \frac{\int V_{\text{an}} r^3 dr}{\int V_{\text{an}} r dr} = \frac{R_{\text{an}}^2}{2}. \quad (2)$$

这样, 如果价中子有 50% 以上的概率处于势阱外, 即 $\langle r^2 \rangle / R_{\text{an}}^2 \geq 2$, 该核态即可判断为晕核态. 因此对于 $l=0$, $\mu = m$ (m 为核子质量) 情况, 形成晕的条件为 $S_n R_{\text{an}}^2 \leq 5.2 \text{ MeV} \cdot \text{fm}^2$. (1) 式表达了中子晕形

成的必要条件. 从式中可以知道, 对于 $l=2$ 的 d 态, 不可能存在晕结构.

2. 单粒子势模型

单粒子势模型, 简捷地说, 就是假设核由核芯和外层单个价粒子组成. 通过求解束缚态 Schrödinger 方程, 得到价粒子的波函数, 从而算出其密度分布和均方根半径. 现有的单粒子势模型相互作用势中仅考虑了核相互作用项, 不能处理价粒子为带电粒子的情况. 本文采用更加普遍的相互作用势, 即

$$U(r) = V_C(r) + V_r f(x_r) + i V_i \frac{d f(x_i)}{dr} - \left(\frac{\hbar}{m_\pi c} \right)^2 V_{\text{so}} \frac{1}{r} \frac{d f(x_{\text{so}})}{dr} \frac{l \cdot s}{s}, \quad (3)$$

式中 $V_C(r)$ 为库仑势, V_r , V_i 和 V_{so} 分别为实、虚势和自旋-轨道耦合势, $f(x)$ 为 Woods-Saxon 势形状因子. 各项势参量选用标准参量. 在解束缚态方程的过程中, 调节实势深度, 使得能够重现实验的结合能值.

概言之, 对单粒子势模型的改进有以下几点: 1) 采用了更加自然的 Woods-Saxon 形状因子, 因此结果更符合实际情况; 2) 考虑了库仑势的作用, 使之适用于价粒子为带电粒子的情况, 如质子的情况; 3) 考虑了自旋-轨道耦合势的影响. 一般而言, 自旋-轨道耦合势的影响较小, 但在某些情况下不可忽视, 尤

* 国家重点基础研究发展规划项目(批准号: G2000077400)和国家自然科学基金(批准号: 19875087, 10075077 和 10105016)资助的课题.

其是那些高自旋和高轨道角动量的情况.

在研究晕核基本性质时,采用 Woods-Saxon 势更加符合实际情况.图 1 显示了用不同的势抽取 ^{11}Be ($=^{10}\text{Be} + n$)外层价中子在 $1p_{1/2-}$ 和 $2s_{1/2+}$ 态上波函数的情况.其中实线、虚线是用 Woods-Saxon 势(参量不同);点线是用方阱势,抽取的波函数都不一样.本文采用了更加自然的 Woods-Saxon 势,并选用了标准参量. Sherl^[5]利用 Woods-Saxon 势计算了从 ^6He 到 ^{20}C 基态核的价中子均方根半径和核物质的均方根半径,其结果与已有的实验数据非常符合,从而验证了单粒子势模型的正确性.

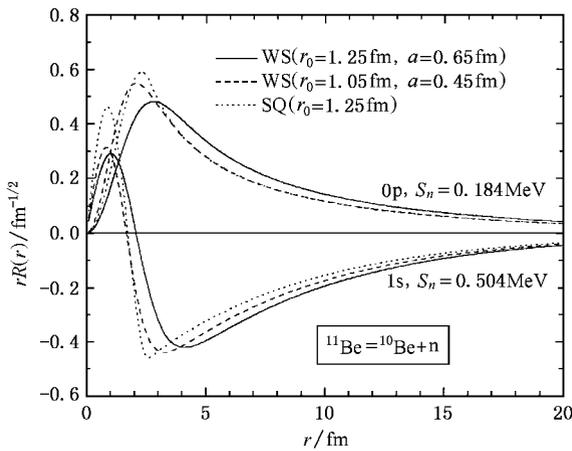


图 1 不同的势及势参量计算 ^{11}Be 价中子在 $2s_{1/2+}$ 和 $1p_{1/2-}$ 态上的波函数

3. 价核子分布及其在核外部的贡献

利用单粒子势模型,计算了一些核的价核子分布.下面将利用列表形式给出计算结果.在这些表中,Mode 表示核芯+价核子的组成模式^[6];Level 表示价核子所处的能级; S_v 为价核子的分离能,核的 J^π 值也列在表中.需要说明的是:1)核态的能级、组态等由实验决定,计算包含了一些激发的核态.对于组成模式或者组态不明确的核态,几种可能性分别考虑.2)价核子可以是集团和多核子的情况.对于集团粒子,可以当作单粒子;对于多核子,认为每个核子所处地位是一样的,仅对其中的一个核子进行计算,分离能平均分配.3)均方根半径的定义为

$$\langle r^2 \rangle^{1/2} = \left[\int_0^\infty r^4 \varphi_{cv}^2(r) dr \right]^{1/2}, \quad (4)$$

式中 φ_{cv} 为解 Schrödinger 方程得到的归一化单粒子波函数,脚标 c, v 分别代表核芯(core)和价核子(va-

lence particle).4)表征核外部贡献的 D_1, D_2 定义为

$$D_\lambda(R_N) = \left(\frac{\int_{R_N}^\infty r^{2\lambda} \varphi_{cv}^2(r) dr}{\int_0^\infty r^{2\lambda} \varphi_{cv}^2(r) dr} \right)^{1/\lambda}, \quad (5)$$

式中核相互作用半径为 $R_N = r_0(A_c^{1/3} + A_v^{1/3})$ fm, $r_0 = 1.25$ fm.显然 $D_1 \geq 50\%$ 为晕核态.

3.1. 中子晕、皮核

限于篇幅,仅给出从 ^4He 到 ^{22}C 的计算结果,并对结果作一些简单讨论.在这个区域里,主要是中子晕、皮核.少数几个丰质子核可能形成质子皮结构.

1) He 同位素

表 1 He 同位素核外价粒子分布的均方根半径

核	J^π	模式	能级	S_v/MeV	$\langle r_v^2 \rangle^{1/2}/\text{fm}$	$D_1/\%$	$D_2/\%$
^4He	0+	$^3\text{He} + n$	$1s_{1/2}$	20.58	1.92	6.9	25.5
		$^3\text{H} + p$	$1s_{1/2}$	19.81	1.93	7.1	26.1
		$^2\text{H} + ^2\text{H}$	$1s_{1/2}$	23.85	1.65	2.3	11.5
^6He	0+	$^4\text{He} + 2n$	$1p_{3/2}$	0.49	4.83	51.0	88.4
		$^5\text{He} + n$	$1p_{3/2}$	1.86	3.66	37.5	73.6
(1.797 MeV)	2+	$^5\text{He} + n$	$1p_{1/2}$	0.07	7.54	59.2	95.8
^8He	0+	$^4\text{He} + 4n$	$1p_{3/2}$	0.78	4.35	47.3	84.9
		$^6\text{He} + 2n$	$1p_{3/2}$	1.07	4.10	39.0	77.5
^{10}He	0+	$^4\text{He} + 6n$	$1p_{1/2}$	0.34	5.19	52.6	90.4
		$^6\text{He} + 4n$	$1p_{1/2}$	0.27	5.55	50.5	89.7

讨论:① ^4He 考虑了 3 种组合模式,其中 d+d 模式结合得比另外两种紧,得出的均方根半径为 1.65 fm;Tanihata 等^[7]得出 ^4He 核物质分布均方根半径为 1.59 fm;这是价核子分布与物质分布的区别.由核芯均方根半径 r_c 和价核子均方根半径 r_v 可计算物质的均方根半径 r_m 为

$$r_m^2(A) = \frac{A-1}{A} \left(r_c^2 + \frac{1}{A} r_v^2 \right). \quad (6)$$

② ^6He 是一个双中子晕,这是已知的事实.此处考虑了一种人们认为不存在的情况,即 $^5\text{He} + n$,因为 ^5He 不是一个束缚的核.但是,在 ^6He 核场中, ^5He 是否存在?此外, ^6He 存在一个 1.797 MeV 的激发态,比 $^5\text{He} + n$ 的分离能低.如果 $^5\text{He} + n$ 的模式存在,那么将形成一个激发态的单中子晕结构.③ ^{10}He 此处考虑了 $^4\text{He} + 6n$ 和 $^6\text{He} + 4n$ 两种组合.不论是那种组合,都是晕核态.

2) Li 同位素

表 2 Li 同位素核外价粒子分布的均方根半径

核	J^π	模式	能级	S_v/MeV	$\langle r_v^2 \rangle^{1/2}/\text{fm}$	$D_1/\%$	$D_2/\%$
${}^6\text{Li}$	1+	${}^5\text{Li} + \text{n}$	$1p_{3/2}$	5.66	2.92	22.9	52.6
		${}^5\text{He} + \text{p}$	$1p_{3/2}$	4.59	2.98	24.2	54.9
		${}^4\text{He} + \text{d}$	$1p_{3/2}$	1.47	3.22	24.4	58.5
		(3.563 MeV) $0+$	${}^5\text{Li} + \text{n}$	$2s_{1/2}$	2.10	4.59	63.0
${}^7\text{Li}$	$3/2-$	${}^6\text{Li} + \text{n}$	$1p_{3/2}$	7.25	2.83	16.5	41.9
		${}^6\text{He} + \text{p}$	$1p_{3/2}$	9.98	2.63	12.0	32.7
		${}^4\text{He} + \text{t}$	$1p_{3/2}$	2.47	2.81	13.0	37.8
${}^8\text{Li}$	2+	${}^7\text{Li} + \text{n}$	$1p_{3/2}$	2.03	3.68	32.2	67.3
		(0.981 MeV) $1+$	${}^7\text{Li} + \text{n}$	$1p_{1/2}$	1.05	4.15	38.2
${}^9\text{Li}$	$3/2-$	${}^8\text{Li} + \text{n}$	$1p_{3/2}$	4.06	3.25	22.2	51.8
		(2.691 MeV) $1/2-$	${}^8\text{Li} + \text{n}$	$1p_{1/2}$	1.37	3.96	34.2
${}^{11}\text{Li}$	$3/2-$	${}^9\text{Li} + 2\text{n}$	$1p_{1/2}$	0.15	6.46	51.5	91.3
			$1d_{5/2}$	0.15	4.17	33.3	69.7
		$2s_{1/2}$	0.15	11.06	85.6	99.1	

讨论: ①从 ${}^5\text{Li} + \text{n}$ 和 ${}^5\text{He} + \text{p}$ 组合可以看出 ${}^6\text{Li}$ 外层质子和中子的分布是一样的. 如果将外层 n 和 p 当作 d 核, 计算表明 ${}^6\text{Li}$ 外层不存在 d 的集团晕. 值得注意的是 ${}^6\text{Li}$ 的第二激发态(3.563 MeV)外层中子正好落在 $2s_{1/2}$ 能级上, 形成一个激发态晕结构. ② ${}^{11}\text{Li}$ 是最早发现的晕核之一. 其实验数据已经非常的丰富. 但是不同方法得到的均方根半径值有较大出入, 差别甚至达 1 fm 以上. 有人认为两个中子处于 $1p_{1/2}$ (61%), $1d_{5/2}$ (26%)和 $2s_{1/2}$ (13%)能级的混合组态^[8,9], 因此对这 3 个组态都做了计算, 得到加权的均方根半径约为 6.5 fm. 但是, 破裂(${}^9\text{Li} + 2\text{n}$)动量分布的实验^[10]得出其外层双中子均方根半径约为 5 fm, 与此处计算结果相差较大.

3) Be 同位素

讨论: ① ${}^{10}\text{Be}$ 外层中子在 $1p_{3/2}$ 能级上满壳, 基态为正常核态. 值得注意的是它的第四激发态是两个中子激发到 $2s_{1/2}$ 能级上, 形成了双中子晕核态. ② ${}^{11}\text{Be}$ 是人们熟知的单中子晕态. ③ ${}^{12}\text{Be}$ 外层两个中子在 $1p_{1/2}$ 能级上达到满壳, 第一激发态是单中子激发到 $2s_{1/2}$ 能级, 形成单中子晕结构; 第二激发态是双中子同时激发到 $2s_{1/2}$ 态, 成为双中子晕结构. 注意到第二激发态 J^π 尚无实验值, 根据($2s_{1/2}$)²组合, 推测为 0^+ . ④ ${}^{14}\text{Be}$ 基态双中子处于 $2s_{1/2}$ 能级, 形成双中子晕, 这也是人们所熟知的.

表 3 Be 同位素核外价粒子分布的均方根半径

核	J^π	模式	能级	S_v/MeV	$\langle r_v^2 \rangle^{1/2}/\text{fm}$	$D_1/\%$	$D_2/\%$
${}^6\text{Be}$	$0+$	${}^5\text{Li} + \text{p}$	$1p_{3/2}$	0.59	4.05	41.6	79.7
${}^7\text{Be}$	$3/2-$	${}^6\text{Li} + \text{p}$	$1p_{3/2}$	5.61	2.90	18.0	44.8
		${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$	$1p_{3/2}$	1.59	2.87	14.2	41.0
${}^8\text{Be}$	$0+$	${}^7\text{Be} + \text{n}$	$1p_{3/2}$	18.90	2.40	5.7	17.8
		${}^7\text{Li} + \text{p}$	$1p_{3/2}$	17.26	2.42	6.0	18.6
		${}^6\text{Be} + 2\text{n}$	$1p_{3/2}$	14.79	2.47	8.4	24.6
		${}^6\text{He} + 2\text{p}$	$1p_{3/2}$	13.62	2.49	8.8	25.6
${}^9\text{Be}$	$3/2-$	${}^8\text{Be} + \text{n}$	$1p_{3/2}$	1.67	3.88	33.6	69.3
${}^{10}\text{Be}$	$0+$	${}^9\text{Be} + \text{n}$	$1p_{3/2}$	6.81	2.99	14.6	37.8
		${}^8\text{Be} + 2\text{n}$	$1p_{3/2}$	4.24	3.22	21.6	50.8
	(3.368 MeV) $2+$	${}^9\text{Be} + \text{n}$	$1p_{1/2}$	2.55	3.49	26.6	60.4
	(5.958 MeV) $2+$	${}^8\text{Be} + 2\text{n}$	$1p_{1/2}$	1.26	4.03	35.2	72.7
	(5.960 MeV) $1-$	${}^9\text{Be}^* + \text{n}$	$2s_{1/2}$	2.54	4.43	49.7	80.8
	(6.179 MeV) $0+$	${}^8\text{Be} + 2\text{n}$	$2s_{1/2}$	1.15	5.49	65.0	91.6
${}^{11}\text{Be}$	$1/2+$	${}^{10}\text{Be} + \text{n}$	$1p_{1/2}$	0.50	4.98	42.3	82.0
		(0.320 MeV) $1/2-$	${}^{10}\text{Be} + \text{n}$	$2s_{1/2}$	0.18	10.23	83.3
${}^{12}\text{Be}$	$0+$	${}^{11}\text{Be} + \text{n}$	$1p_{1/2}$	3.17	3.45	20.7	50.7
		${}^{10}\text{Be} + 2\text{n}$	$1p_{1/2}$	1.84	3.78	28.0	63.2
	(2.102 MeV) $2+$	${}^{11}\text{Be} + \text{n}$	$2s_{1/2}$	1.07	5.67	61.6	90.0
(2.702 MeV) $?$	${}^{10}\text{Be} + 2\text{n}$	$2s_{1/2}$	0.49	7.23	73.9	96.0	
${}^{14}\text{Be}$	$0+$	${}^{12}\text{Be} + 2\text{n}$	$2s_{1/2}$	0.67	6.55	67.2	93.2

4) B 同位素

表 4 B 同位素核外价粒子分布的均方根半径

核	J^π	模式	能级	S_v/MeV	$\langle r_v^2 \rangle^{1/2}/\text{fm}$	$D_1/\%$	$D_2/\%$
${}^8\text{B}$	$2+$	${}^7\text{Be} + \text{p}$	$1p_{3/2}$	0.14	4.52	40.4	80.5
${}^{10}\text{B}$	$3+$	${}^9\text{Be} + \text{p}$	$1p_{3/2}$	6.59	2.92	13.2	35.0
		${}^9\text{B} + \text{n}$	$1p_{3/2}$	8.44	2.87	12.1	32.7
		${}^8\text{Be} + \text{d}$	$1p_{3/2}$	6.03	2.62	5.4	17.8
${}^{11}\text{B}$	$3/2-$	${}^{10}\text{Be} + \text{p}$	$1p_{3/2}$	11.23	2.71	7.5	22.3
		${}^{10}\text{B} + \text{n}$	$1p_{3/2}$	11.45	2.75	8.2	23.9
		(1.674 MeV) $2-$	${}^{11}\text{B} + \text{n}$	$2s_{1/2}$	1.70	4.97	53.7
(2.621 MeV) $1-$	${}^{11}\text{B}^* + \text{n}$	$2s_{1/2}$	1.70	4.97	53.7	84.4	
${}^{13}\text{B}$	$3/2-$	${}^{12}\text{B} + \text{n}$	$1p_{1/2}$	4.88	3.21	14.5	38.9
		${}^{11}\text{B} + 2\text{n}$	$1p_{1/2}$	4.12	3.28	17.4	44.6
		(3.535 MeV) $?$	${}^{12}\text{B} + \text{n}$	$2s_{1/2}$	1.34	5.32	56.2
(3.681 MeV) $?$	${}^{11}\text{B} + 2\text{n}$	$2s_{1/2}$	2.28	4.60	48.2	79.8	
${}^{14}\text{B}$	$2-$	${}^{13}\text{B} + \text{n}$	$2s_{1/2}$	0.97	5.86	62.2	90.4
		$1d_{5/2}$	0.97	3.93	27.1	57.4	
		(0.740 MeV) $1-$	${}^{13}\text{B} + \text{n}$	$2s_{1/2}$	0.23	9.43	79.9
${}^{15}\text{B}$	$3/2-$	${}^{14}\text{B} + \text{n}$	$2s_{1/2}$	2.77	4.45	41.8	73.8
		$1d_{5/2}$	2.77	3.61	19.4	43.5	
		${}^{13}\text{B} + 2\text{n}$	$2s_{1/2}$	1.87	4.89	51.1	82.3
$1d_{5/2}$	1.87	3.71	23.2	50.3			
${}^{17}\text{B}$	$3/2-$	${}^{15}\text{B} + 2\text{n}$	$2s_{1/2}$	0.70	6.51	64.4	91.9
${}^{19}\text{B}$	$3/2-$	${}^{17}\text{B} + 2\text{n}$	$2s_{1/2}$	0.25	6.58	48.4	88.4

讨论 ①¹²B 基态是正常核态,其中子分离能较低,在第二、三激发态形成晕结构.这已经得到实验证实^[11,12].②¹³B 外层两个中子在 1p_{1/2} 能级上满壳.其第一激发态是核芯 p 激发,第二、三激发态分别是 1p_{1/2} 能级上的一个或两个中子激发到 2s_{1/2} 能级上,形成单中子晕或双中子晕(皮)结构.③¹⁴B 是满壳外加一个中子,它有一个很低的激发态(0.740 MeV).这两个束缚态的外层单中子可能处于 2s_{1/2} 或者 1d_{5/2}.不论什么情况,当中子处于 2s_{1/2} 能级上时,将形成晕结构.因此,可以说¹⁴B 基态或者第一激发态是晕核态.④¹⁵B, ¹⁷B 和 ¹⁹B 非常相似,当外层两个中子处于 2s_{1/2} 能级上时,将形成双中子晕(皮)结构.其中,¹⁷B 的双中子晕人们已经了解.

5) C 同位素

表 5 C 同位素核外价粒子分布的均方根半径

核	J ^π	模式	能级	S _v /MeV	$\langle r_v^2 \rangle^{1/2}$ /fm	D ₁ /%	D ₂ /%
¹² C	0+	¹¹ C + n	1p _{3/2}	18.72	2.55	3.9	12.8
		¹¹ B + p	1p _{3/2}	15.96	2.59	4.4	14.1
¹³ C (3.089 MeV)	1/2+	¹² C + n	1p _{1/2}	4.95	3.20	14.3	38.5
		¹² C + n	2s _{1/2}	1.86	4.88	50.4	81.9
¹⁴ C (3.854 MeV)	5/2+	¹² C + n	1d _{5/2}	1.09	3.84	25.3	55.1
		¹³ C + n	1p _{1/2}	8.18	2.94	9.4	27.3
¹⁵ C (6.094 MeV)	1-	¹⁴ C + 2n	1p _{1/2}	6.56	3.03	11.2	31.8
		¹³ C + n	2s _{1/2}	2.08	4.75	49.0	80.6
¹⁶ C (6.589 MeV)	0+	¹² C + 2n	2s _{1/2}	3.27	4.23	39.4	71.2
		¹⁴ C + n	2s _{1/2}	1.22	5.51	57.0	87.1
¹⁷ C (0.740 MeV)	5/2+	¹⁴ C + n	1d _{5/2}	0.48	4.20	29.1	61.8
		¹⁵ C + n	1d _{5/2}	4.25	3.48	14.9	35.3
¹⁸ C (1.766 MeV)	2+	¹⁴ C + 2n	1d _{5/2}	2.73	3.61	19.4	43.7
		¹⁵ C + n	2s _{1/2}	2.48	4.59	42.1	74.4
¹⁹ C (3.027 MeV)	0+	¹⁴ C + 2n	2s _{1/2}	1.22	5.51	56.9	87.1
		¹⁶ C + n	1d _{5/2}	0.73	4.17	25.6	56.2
²⁰ C (0.295 MeV)	1/2+	¹⁶ C + n	2s _{1/2}	0.43	7.59	69.6	94.7
		¹⁷ C + n	1d _{5/2}	4.18	3.56	14.9	34.9
²¹ C (1.620 MeV)	2+	¹⁷ C + n	2s _{1/2}	2.56	4.59	40.5	72.8
		¹⁸ C + n	2s _{1/2}	0.16	8.63	42.9	92.8
²² C	0+	¹⁹ C + n	1d _{5/2}	3.34	3.73	16.5	37.9
		²⁰ C + 2n	2s _{1/2}	0.56	6.25	51.2	86.7

讨论 ①¹³C 第一激发态为晕核态,这得到实验证实^[12-14].②¹⁵C 基态外层中子落在 2s_{1/2} 能级上,是

一个晕态,第一激发态中子处于 1d_{5/2} 能级,为正常核态.③¹⁶C 基态是正常态,第一、二激发态分别是一个和两个中子激发到 2s_{1/2} 能级,形成厚的单中子皮态和双中子晕态.④¹⁷C 的第一激发态为一个中子激发到 2s_{1/2} 能级,为单中子晕态.⑤²²C 外层两个中子处于 2s_{1/2} 能级上,形成双中子晕结构.

3.2. 质子晕、皮核

由于库仑势的存在,形成质子晕、皮核要困难得多.当然,越重的核,其库仑势越强.因此,较重的核不能形成质子晕的结构.可能形成质子晕的最佳核是⁸B.计算表明,⁸B 仅仅是一个质子皮核.从上面的讨论中可以看出,中子在 2s_{1/2} 能级形成晕、皮核的可能性很大;其次是 1p_{1/2} 和 1p_{3/2} 能级.这是离心势导致的结果.当然,对质子而言也是一样.这样,最可能形成质子晕、皮核的为 Z = 1(X) 和 Z = 1(S),即相应于质子分布在 2s_{1/2} 能级.当然激发到 2s_{1/2} 核态上可能形成质子晕、皮核,这主要分布在 Z = 9(F) 到 Z = 14(Si) 的丰质子核区,如¹⁷F 的第一激发态.下表给出了目前已知的和可能形成质子晕、皮核的价粒子分布.

表 6 质子晕、皮核价粒子分布的均方根半径

核	J ^π	模式	能级	S _v /MeV	$\langle r_v^2 \rangle^{1/2}$ /fm	D ₁ /%	D ₂ /%
⁸ B	2+	⁷ Be + p	1p _{3/2}	0.14	4.52	40.4	80.5
¹² N	1+	¹¹ C + p	1p _{1/2}	0.60	3.85	26.4	62.3
¹³ O	3/2-	¹² N + p	1p _{1/2}	1.52	3.49	19.4	49.6
		¹¹ C + 2p	1p _{1/2}	1.06	3.65	23.6	57.2
¹⁷ F (0.495 MeV)	5/2+	¹⁶ O + p	1d _{5/2}	0.60	3.75	18.4	43.1
		¹⁶ O + p	2s _{1/2}	0.10	5.39	48.1	82.5
¹⁷ Ne	1/2-	¹⁶ F + p	1d _{5/2}	1.48	3.59	15.3	36.8
²⁰ Mg	0+	¹⁶ O + 4p	1d _{5/2}	1.71	3.59	15.3	36.7
²³ Al	3/2+	²² Mg + p	1d _{3/2}	0.13	3.73	13.5	35.3
²⁶ P	3+	²⁵ Si + p	2s _{1/2}	0.14	4.68	30.9	64.1
²⁷ P	1/2+	²⁶ Si + p	2s _{1/2}	0.90	4.39	26.7	57.3
²⁸ P	3+	²⁷ Si + p	2s _{1/2}	2.07	4.12	20.2	46.8
		²⁶ P + p	2s _{1/2}	0.76	4.38	26.3	56.9
²⁷ S	5/2+	²⁵ Si + 2p	2s _{1/2}	0.45	4.53	28.8	60.8
		²⁷ P + p	2s _{1/2}	2.46	4.02	18.2	43.2
²⁸ S	0+	²⁶ Si + 2p	2s _{1/2}	1.68	4.18	23.0	51.3
		²⁸ P + p	2s _{1/2}	3.29	3.92	16.4	39.7
²⁹ S	5/2+	²⁸ P + p	2s _{1/2}	3.29	3.92	16.4	39.7
		²⁷ Si + 2p	2s _{1/2}	2.68	4.02	18.2	43.2
²⁸ S + n		¹ d _{5/2}	15.30	3.35	3.3	9.3	

讨论:①从表 6 中可以看出:严格地说,不存在质子晕核态.由于库仑势的影响,仅能形成一些厚、薄程度不同的质子皮.这也许是至今尚未在质子晕、皮中发现 $2s_{1/2}$ 和 $1d_{5/2}$ 能级翻转的原因.② ^{17}Ne 和 ^{20}Mg 价质子分布并不宽,仅在中子层外露出薄薄的质子皮而已.③在这些丰质子核中,由于质子的费米面比中子的费米面高出许多,中子被束缚的很紧.一般说来,中子在核外的贡献小于 10%.表 6 中最后一行列出 ^{29}S 中子分布的情况.目前我们研究组正在寻找 ^{27}S 、 ^{28}S 、 ^{29}S 的质子晕(皮)态,为此将它们外层双质子 ($^{25}\text{Si} + 2p$ 模式)以及核芯内中子密度分布显示在图 2 中.④对于一些关于质子晕的实验和理论结果,主要是由于目前对晕核的判据不够严格所致,比如 ^{27}P 、 ^{28}P 等.

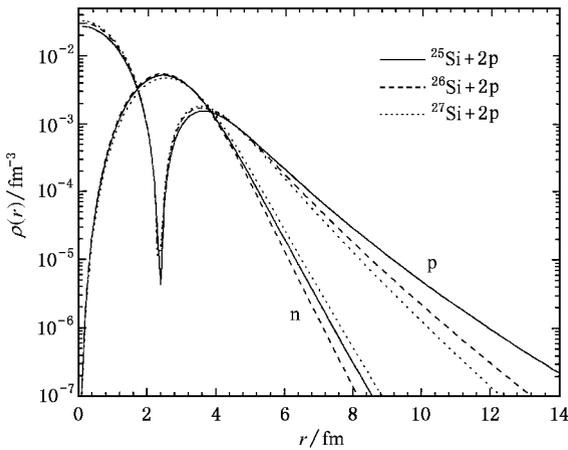


图 2 ^{27}S 、 ^{28}S 、 ^{29}S 外层双质子及核芯中子密度分布

3.3. 中重核及重核中子晕、皮核态

目前所找到的晕核态,都在较轻的核区.那么,在 $A > 40$ 中重及重核区是否存在中子晕、皮核态呢?当然,寻找这种核态,最佳选择是在满壳附近丰中子的核.为此,用单粒子势模型计算了 ^{49}Ca 和 ^{209}Pb 外层单中子的均方根半径,结果列在表 7 中.表 7 中所列的核态,都是实验上确证的单粒子态, E_{ex} 表示核态的激发能.

从表 7 中可以看出, ^{49}Ca 有 4 个核态形成了中子皮态, ^{209}Pb 仅有一个激发态形成了中子皮.为了显示 ^{49}Ca 激发态形成中子皮核的情况,选择了几个核态外层中子的密度分布以及 ^{49}Ca 内核质子密度分布显示在图 3 中.

表 7 质子晕、皮核价粒子分布的均方根半径

核	E_{ex}/MeV	组态	S_v/MeV	$\langle r_v^2 \rangle^{1/2}/\text{fm}$	$D_1/\%$	$D_2/\%$
^{49}Ca	0	$2p_{3/2-}$	5.147	4.55	17.3	38.9
	2.023	$2p_{1/2-}$	3.123	4.92	24.1	50.3
	3.351	$1g_{9/2+}$	1.796	4.53	10.0	21.6
	3.585	$1f_{5/2-}$	1.562	4.14	7.2	20.1
	3.991	$1f_{3/2-}$	1.156	4.19	7.9	22.0
	4.010	$1g_{7/2+}$	1.137	4.58	10.9	23.4
	4.072	$2p_{3/2-}$	1.075	5.96	40.5	72.4
	4.261	$2p_{1/2-}$	0.886	6.15	42.5	74.7
	4.416	$2d_{5/2+}$	0.731	5.79	38.9	68.8
	4.767	$2d_{3/2+}$	0.380	6.13	42.6	73.8
4.885	$1g_{9/2+}$	0.262	4.67	12.4	26.6	
^{209}Pb	0	$2g_{9/2+}$	3.937	6.50	9.7	21.0
	0.779	$1i_{11/2+}$	3.158	5.37	0.1	0.4
	1.423	$1j_{15/2-}$	2.514	5.23	0.0	0.1
	1.567	$3d_{5/2+}$	2.369	7.11	23.4	46.9
	2.032	$4s_{1/2+}$	1.904	7.78	34.5	62.9
	2.491	$2g_{7/2+}$	1.446	6.65	11.8	25.7
	2.538	$3d_{3/2+}$	1.399	7.48	27.7	53.5
	2.589	$(1h_{11/2-})$	1.348	6.14	2.5	6.2
	3.052	$(1j_{15/2-})$	0.885	5.25	0.0	0.1

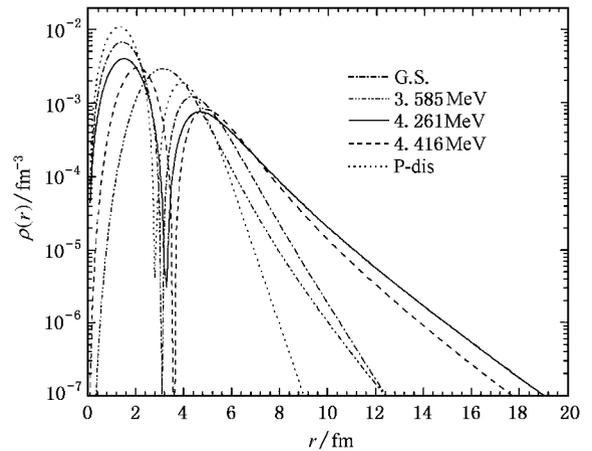


图 3 ^{49}Ca 某些激发态外层中子以及核内质子的密度分布

4. 晕核形成的基本条件

根据单粒子势模型的计算,可以归结出在 Woods-Saxon 势形式下核外价核子分布的规律,从而得知晕、皮核形成的条件,并且与方势阱的结论作比较.

4.1. 中子晕核实际形成条件

所计算的一些轻核价中子的均方根半径随束缚能变化显示在图 4 中.

从图 4(a) 可以明显看出计算点分布在 3 条线上, 说明不同 l 值的均方根半径变化有着各自的规律. 为此, 将不同 l 值显示在图 4(b)(c) 和 (d) 中, 并对它们做了拟合, 如实线所示. 图 4 中虚线代表用方势阱抽取的规律, 即 (1) 式. 实际的分布规律和方势阱的情况有很大不同. 注意到 (1) 式可以写成更适用的形式

$$\frac{r^2}{R_{an}^2} \cong \begin{cases} 10.44 \text{MeV} \cdot \text{fm}^2 (S_n R_{an}^2) & l = 0; \\ 3.65 \text{MeV}^{1/2} \cdot \text{fm} (S_n R_{an}^2)^{1/2} & l = 1; \\ 1.40 & l = 2. \end{cases} \quad (7)$$

为了与上式比较, 采取的拟合形式为 $y = a/x^b$. 这样, 得到的分布规律为

$$\frac{r^2}{R_{an}^2} \cong \begin{cases} 13.53 (S_n R_{an}^2)^{0.667} & l = 0; \\ 4.377 (S_n R_{an}^2)^{0.446} & l = 1; \\ 1.427 (S_n R_{an}^2)^{0.180} & l = 2. \end{cases} \quad (8)$$

这就是在 Woods-Saxon 势阱下均方根半径与分离能之间的关系. 通过这个关系, 可以得到实际晕形成的条件为

$$S_n R_{an}^2 \leq \begin{cases} 17.6 \text{MeV} \cdot \text{fm}^2 & l = 0; \\ 5.79 \text{MeV} \cdot \text{fm}^2 & l = 1; \\ 0.153 \text{MeV} \cdot \text{fm}^2 & l = 2. \end{cases} \quad (9)$$

与方势阱下给出的条件相比, 实际条件要宽松得多. 而且, 在 d 态存在形成晕的可能, 只是条件非常的苛刻.

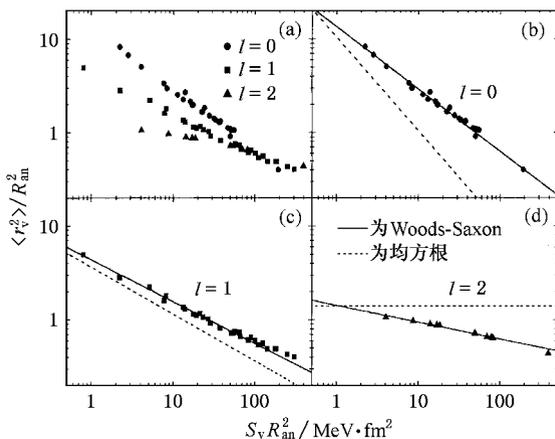


图 4 核外价中子分布的均方根半径随分离能的变化

4.2. 质子晕核实际形成条件

价质子的均方根半径随束缚能变化显示在图 5 中.

与价中子分布规律不同的是, 对于质子分布, $l = 1$ 和 $l = 2$ 可以用同样的线拟合, 即

$$\frac{r_p^2}{R_{cn}^2} \cong 1.73 (S_p / S_{cn})^{0.246} \quad l = 1, l = 2. \quad (10)$$

对于 $l = 2$ 的态, 由于仅有 3 个点, 难以得出可靠的拟合结果 (如图 5 中虚线所示), 而且在 d 态形成晕的可能性极小, 在此不予讨论. 注意到, 由于库仑势垒的存在, 一些能量大于零, 但低于库仑位垒高度 V_B 的共振态, 有一定的存活寿命, 因此, 有可能成为质子晕的共振核态. 因此, 对质子晕核而言, 实际形成晕结构的必要条件为

$$-0.551/R_{cn} \text{MeV} < E_p < V_B, \quad (11)$$

式中 E_p 为价质子的能量.

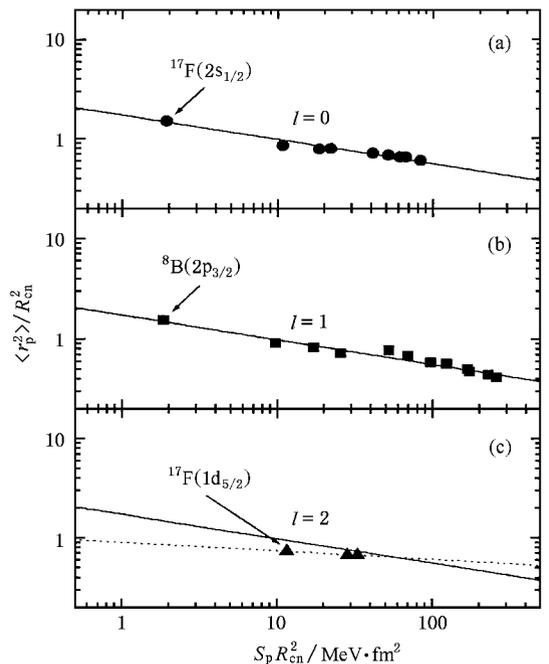


图 5 核外价质子分布的均方根半径随分离能的变化

5. 结 论

利用单粒子势模型对一些具体的核态进行了计算. 计算中采用较为真实的 Woods-Saxon 势, 并考虑了库仑势和自旋-轨道耦合势的影响. 用列表的形式

给出计算结果,并作了一些简单的讨论,预言了一些可能存在晕、皮核结构的核态.特别值得提出的是,在中重和重核区存在形成晕、皮核态的可能性,这大大扩展了现有晕核研究的范围.

此外,根据均方根半径随价粒子的变化规律,给出了形成单中子晕的实际条件,比方阱势给出的条件要宽松,首次给出质子晕形成的必要条件,这些对

寻找新的晕、皮核态有现实的指导意义.

值得指出的是,在轻核体系中, $2s_{1/2}$ 能级对晕态形成扮演了重要角色.形成晕结构的核态,其 $2s_{1/2}$ 能级比 $1d_{5/2}$ 能级还要低.这样,与其上的能级形成了较大的距离,因此在形成晕结构的弱束缚体系中, $N=16$ 的地方可能形成新的幻数.这值得理论和实验上进一步的研究.

- [1] Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O *et al* 1985 *Phys. Lett. B* **160** 380; 1985 *Phys. Rev. Lett.* **55** 2676
- [2] Hansen P G and Jonson B 1987 *Europhys. Lett.* **4** 409
- [3] Fedorov D V, Jensen A S and Riisager K 1994 *Phys. Rev. C* **49** 201; 1994 *Phys. Rev. C* **50** 2372; 1993 *Phys. Lett. B* **312** 1
- [4] Jensen A S and Riisager K 2000 *Phys. Lett. B* **480** 39
- [5] Sherr R 1996 *Phys. Rev. C* **54** 1177
- [6] Satchler G R 1983 *Direct Nuclear Reactions* (Oxford: Oxford University Press)
- [7] Tanihata I, Kobayashi T, Suzuki T *et al* 1992 *Phys. Lett. B* **287** 307

- [8] Benenson W 1995 *Nucl. Phys. A* **588** 11c
- [9] Zinser M, Humbert F, Nilsson T *et al* 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 1719
- [10] Orr N A, Anantaraman N, Austin S M *et al* 1995 *Phys. Rev. C* **51** 3116
- [11] Lin C J, Liu Z H, Zhang H Q *et al* 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 1183
- [12] Liu Z H, Lin C J, Zhang H Q *et al* 2001 *Phys. Rev. C* **64** 034312
- [13] Liu Z H, Lin C J *et al* 2001 *Chin. Sci. Bull.* **46** 45
- [14] Lin C J, Liu Z H, Zhang H Q *et al* 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 1446

Density distributions of valence nucleons under single-particle potential model^{*}

Lin Cheng-Jian Zhang Huan-Qiao Liu Zu-Hua Wu Yue-Wei Yang Feng Ruan Ming

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

(Received 29 March 2002; revised manuscript received 21 July 2002)

Abstract

Using the experimental results, we have calculated the density distributions of valence nucleons in terms of the single-particle potential model. The outside probabilities and contributions of valence nucleons given by these calculations are considered as the criterion of halo states. By studying the variation of root-mean-square radius with the separation energy, conditions for the existence of halo states are pointed out, especially of the proton halo states. These have realistic meanings for judging and searching the halo states.

Keywords: single-particle model, valence nucleon, density distribution, neutron halo state, proton halo state

PACC: 2410F, 2500, 2570, 2160

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. G2000077400) and by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 19875087, 10075077 and 10105016).