

丰质子核性质的研究

陈宝秋

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论研究中心 兰州 730000)

摘要 用相对论平均场理论研究了 $2s1d$ 壳丰质子核及其镜核的性质, 理论计算结果与实验数据很好地符合.

关键词 相对论平均场理论 丰质子核 质子皮

1 引言

近年来在放射性核束装置上实验的新进展开辟了核物理研究的崭新领域. 在这些研究中已发现了许多新的物理现象, 主要可概括为三个方面: 1) 某些轻核中存在的中子晕, 如 ^{11}Li , ^{11}Be , ^{14}Be , ^{17}B 等; 2) 双满壳奇异核, 如 ^{10}He , ^{78}Ni , ^{100}Sn ; 3) 超重元素, 如 $Z = 110, 111, 112$. 这些发现引起国内外核物理学家的高度重视. 放射性核束装置还将为我们提供非常丰富的新的物理现象. 如何理解和解释这些新的物理现象既是对核理论的挑战, 也是机遇. 因为传统的核理论模型和反应机制都是在符合稳定线附近核的性质基础上建立起来的, 当这些模型与反应机制推广到远离 β 稳定线时, 它们的适用程度需要加以检验, 需要修正或发展现有的理论模型.

中子晕机制^[1,2]和中子滴线附近核的性质^[3]在过去几年已有较多的研究, 但是对质子晕及质子滴线核的性质的研究还很少. 尽管有关质子晕是否存在的问题目前在实验上还有争议^[4], 近来理论上预言了 $2s1d$ 壳可能存在质子晕^[5]. 因此从理论上研究某些质子滴线核的性质和可能存在的质子晕变得更加重要. 由于相对论平均场理论(RMF)在描述核物质和有限核的性质取得了很大的成功^[6], 它作为核多体的强有力的工具被广泛地应用到许多核物理问题中, 如超核^[7], 超形变^[8]及相对论夸克模型^[9], 特别是被广泛地应用于远离 β 稳定线核性质的研究. 本文的目的是用相对论平均场理论系统研究 $2s1d$ 壳丰质子核及其镜核的性质, 与实验数据比较, 并预言质子滴线附近核的性质, 同时检验相对论模型在这个区域的适用程度.

2 相对论平均场理论

相对论平均场理论是从有效的拉格朗日量 \mathcal{L} 出发,

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \bar{\psi}(i\gamma^\mu\partial_\mu - M - g_\sigma\sigma - g_\omega\gamma^\mu\omega_\mu - g_\rho\tau^a\gamma^\mu\rho_\mu^a)\psi + \\ & \frac{1}{2}\partial^\mu\sigma\partial_\mu\sigma - \frac{1}{2}m_\sigma^2\sigma^2 - \frac{1}{3}g_2\sigma^3 - \frac{1}{4}g_3\sigma^4 + \frac{1}{4}c_3(\omega_\mu\omega^\mu)^2 + \\ & \frac{1}{2}m_\omega^2\omega^\mu\omega_\mu - \frac{1}{4}W^{\mu\nu}W_{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_\rho^2\rho^{a\mu}\rho_\mu^a - \frac{1}{4}R^{a\mu\nu}R_{\mu\nu}^a - \\ & \bar{\psi}e\gamma^\mu A_\mu \frac{1}{2}(1 - \tau^3)\psi - \frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} W^{\mu\nu} &= \partial^\mu\omega^\nu - \partial^\nu\omega^\mu, \\ R^{a\mu\nu} &= \partial^\mu\rho^{a\nu} - \partial^\nu\rho^{a\mu} + g_\rho\epsilon^{abc}\rho^{b\mu}\rho^{c\nu}, \\ F^{\mu\nu} &= \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu, \end{aligned} \quad (2)$$

上式 ψ 和 M 表示核子场和核子质量, σ , ω_μ , ρ_μ 和 m_σ , m_ω , m_ρ 分别表示 σ , ω 和 ρ 介子的场和它们的质量, A_μ 是电磁场矢量, g_2 和 g_3 是 σ 介子的自相互作用的耦合常数, c_3 是 ω 介子的自相互作用的耦合常数. 在本工作中采用两组常用的相对论平均场的有效相互作用 TM2^[10] 和 NL-SH^[11]. NL-SH 考虑了非线性 σ 介子的自相互作用, 而 TM2^[10] 同时包含了非线性 σ 介子以及非线性 ω 介子的自相互作用. 为了节省篇幅, 在此不列出这两组参数, 详细可参考文献 [10, 11].

3 结果和讨论

我们采用非线性 σ 和 ω 的相对论平均场理论研究了 $2s1d$ 壳丰质子核和它们镜核的性质. 表 1 列出 S, P, Si 丰质子同位素及其镜核的平均结合能, 其中第 3 和第 7 列表示采用 TM2 参数计算的结果, 而第 4 和第 8 列是采用 NL-SH 参数计算的结果. 为了与实验数据比较, 相应的实验值^[12] 在第 2 列和第 6 列给出. 从表上列出的 36 个核素, 可看出相对论平均场理论采用这两组参数计算的核子平均结合能与实验数据很好地符合, 特别是非线性 σ 和 ω 模型计算的结果更接近实验值. 表中带 * 的数对实验而言表示实验上系统趋向的估计值, 对理论而言则表示理论预示该核不束缚.

表 2 和 3 分别给出 $^{26-30}\text{S}$ 和 $^{25-29}\text{P}$ 同位素的结合能, 均方根半径, 质子皮厚度 ($R_p - R_n$), 及单粒子能级. 采用这两组参数的理论计算给出的这些核的总结合能与实验值符合得较好, TM2 和 NL-SH 得到的总结合能相差约 3MeV, 例如 ^{27}S 核, 实验值为 187.90MeV, TM2 和 NL-SH 参数得到的结合能分别为 187.34MeV 和 183.68MeV. 而 TM2 给出的均方根半径比 NL-SH 得到的略大. 计算得到这些丰质子核的质子皮厚度约在 0.2 到 0.5fm 之

表1 S, P和Si同位素及它们镜核的结合能 (MeV)

Nucleus	Exp.	RMF	RMF	Mirror nucleus	Exp.	RMF	RMF
	E/A	TM2 E/A	NL-SH E/A		E/A	TM2 E/A	NL-SH E/A
²⁶ S	-6.591*	-6.519*	-6.396	²⁶ Ne	-7.754	-7.672	-7.578
²⁷ S	-6.959*	-6.939	-6.803	²⁷ Na	-7.959	-7.896	-7.787
²⁸ S	-7.479	-7.337	-7.194	²⁸ Mg	-8.272	-8.098	-7.978
²⁹ S	-7.749	-7.717	-7.569	²⁹ Al	-8.349	-8.281	-8.151
³⁰ S	-8.123	-8.078	-7.928	³⁰ Si	-8.521	-8.445	-8.308
³¹ S	-8.282	-8.175	-8.051	³¹ P	-8.481	-8.358	-8.240
²⁴ P	-6.249*	-6.374*	-6.248*	²⁴ F	-7.464	-7.563	-7.466
²⁵ P	-6.847*	-6.790*	-6.652	²⁵ Ne	-7.841	-7.781	-7.666
²⁶ P	-7.198	-7.188	-7.037	²⁶ Na	-8.006	-7.977	-7.847
²⁷ P	-7.664	-7.566	-7.406	²⁷ Mg	-8.264	-8.154	-8.010
²⁸ P	-7.908	-7.925	-7.758	²⁸ Al	-8.310	-8.311	-8.156
²⁹ P	-8.251	-8.266	-8.095	²⁹ Si	-8.449	-8.450	-8.284
²² Si	-6.111	-6.283	-6.164	²² O	-7.365	-7.516	-7.423
²³ Si	-6.562	-6.694	-6.553	²³ F	-7.620	-7.725	-7.607
²⁴ Si	-7.167	-7.086	-6.929	²⁴ Ne	-7.993	-7.913	-7.774
²⁵ Si	-7.480	-7.460	-7.289	²⁵ Na	-8.101	-8.080	-7.923
²⁶ Si	-7.925	-7.814	-7.633	²⁶ Mg	-8.334	-8.227	-8.055
²⁷ Si	-8.124	-8.149	-7.960	²⁷ Al	-8.332	-8.355	-8.170

表2 质子晕核²⁶⁻³⁰S的结合能, 单粒子能级 (MeV), 质子皮, 均方根半径RMS(fm)

Nucleus	²⁶ S	²⁶ S	²⁷ S	²⁷ S	²⁸ S	²⁸ S	²⁹ S	²⁹ S	³⁰ S	³⁰ S
Exp.	171.37	171.37	187.90	187.90	209.41	209.41	224.71	224.71	243.68	243.68
RMF	TM2	NL-SH	TM2	NL-SH	TM2	NL-SH	TM2	NL-SH	TM2	NL-SH
B/MeV	169.49	166.29	187.34	183.68	205.43	201.44	223.78	219.51	242.35	237.83
R_c	3.44	3.39	3.42	3.33	3.37	3.29	3.34	3.26	3.32	3.24
R_p	3.35	3.29	3.32	3.23	3.27	3.19	3.24	3.16	3.22	3.14
R_n	2.80	2.74	2.86	2.80	2.91	2.85	2.95	2.89	2.99	2.93
R_p-R_n	0.54	0.55	0.46	0.43	0.37	0.34	0.29	0.27	0.23	0.21
Proton										
$1s_{1/2}$	39.97	39.63	41.75	41.38	43.47	43.09	45.15	44.76	46.79	46.39
$1p_{3/2}$	21.44	21.18	23.29	22.98	25.09	24.75	26.85	26.47	28.57	28.16
$1p_{1/2}$	14.74	15.02	16.61	16.78	18.43	18.52	20.23	20.25	22.01	21.95
$1d_{5/2}$	4.67	4.38	6.24	5.94	7.80	7.48	9.34	9.00	10.87	10.51
$2s_{1/2}$	-0.08	0.16	0.61	0.86	1.30	1.61	2.02	2.38	2.76	3.18
Neutron										
$1s_{1/2}$	54.92	54.56	55.46	55.20	55.95	55.74	56.35	56.20	56.69	56.60
$1p_{3/2}$	35.69	35.31	36.12	35.80	36.50	36.21	36.81	36.55	37.06	36.84
$1p_{1/2}$	28.87	29.02	29.41	29.55	29.90	30.01	30.33	30.42	30.72	30.80
$1d_{5/2}$	17.75	17.31	18.06	17.72	18.35	18.05	18.58	18.32	18.77	18.55

表3 质子晕核 $^{25-29}\text{P}$ 的结合能,单粒子能级(MeV),质子皮,均方根半径RMS(fm)

Nucleus	^{25}P	^{25}P	^{26}P	^{26}P	^{27}P	^{27}P	^{28}P	^{28}P	^{29}P	^{29}P
Exp.	171.18	171.18	187.15	187.15	206.94	206.94	221.42	221.42	239.29	239.29
RMF	TM2	NL-SH	TM2	NL-SH	TM2	NL-SH	TM2	NL-SH	TM2	NL-SH
B	166.79	166.29	186.90	182.96	204.28	199.95	221.90	217.23	239.70	234.75
R_c	3.32	3.26	3.29	3.22	3.26	3.18	3.23	3.16	3.21	3.15
R_p	3.21	3.16	3.19	3.11	3.15	3.08	3.13	3.06	3.11	3.04
R_n	2.78	2.73	2.84	2.78	2.90	2.83	2.93	2.87	2.97	2.91
R_p-R_n	0.43	0.43	0.35	0.33	0.26	0.25	0.19	0.18	0.14	0.13
Proton										
$1s_{1/2}$	40.58	40.24	42.43	42.04	44.21	43.81	45.94	45.53	47.64	47.22
$1p_{3/2}$	21.84	21.54	23.74	23.38	25.59	25.19	27.39	26.96	29.16	28.69
$1p_{1/2}$	15.43	15.64	17.39	17.49	19.30	19.32	21.18	21.12	23.05	22.90
$1d_{5/2}$	4.82	4.50	6.43	6.08	8.02	7.66	9.60	9.21	11.17	10.76
$2s_{1/2}$	-0.15	0.14	0.56	0.86	1.26	1.62	1.99	2.42	2.76	3.24
Neutron										
$1s_{1/2}$	54.20	53.79	54.70	54.36	55.14	54.85	55.50	55.27	55.81	55.63
$1p_{3/2}$	35.22	34.77	35.62	35.22	35.96	35.59	36.24	35.91	36.47	36.17
$1p_{1/2}$	28.64	28.73	29.19	29.26	29.68	29.72	30.12	30.14	30.53	30.52
$1d_{5/2}$	17.09	16.62	17.38	16.98	17.63	17.27	17.84	17.52	18.00	17.73

间. 当中子数减少,核的质子皮厚度增加,在质子滴线,核(如 ^{27}S)的质子皮厚度最大. 这表示在质子滴线的核可能是质子晕核. 比较计算得到的单粒子能级,对于束缚很深的单粒子态,两组参数得出的能级几乎相等,而中间的单粒子态,给出的单粒子能级略有不同. 然而对于丰质子核的费米面附近的质子单粒子态($2s_{1/2}$),两组参数得到的单粒子能级很不相同,采用 TM2 参数得到质子的 $2s_{1/2}$ 态比采用 NL-SH参数给出的更为弱的束缚. 这也是为什么 TM2 预示的核的均方根半径比 NL-SH得到的略大.

表4 S, P同位素及它们镜核的一个粒子分离能(MeV)

Nucleus	Exp.	RMF	RMF	Mirror nucleus	Exp.	RMF	RMF	Exp.	RMF	RMF
	S_p	TM2	NL-SH		S_n	TM2	NL-SH		S_{np}	TM2
^{26}S	0.19	-0.26	0.003	^{26}Ne	5.580	4.958	5.379	5.39	5.218	5.376
^{27}S	0.75	0.446	0.723	^{27}Na	6.749	5.764	6.238	6.00	5.318	5.515
^{28}S	2.47	1.149	1.487	^{28}Mg	8.503	6.581	7.121	6.03	5.432	5.634
^{29}S	3.287	1.884	2.274	^{29}Al	9.436	7.426	8.020	6.149	5.542	5.746
^{30}S	4.400	2.646	3.083	^{30}Si	10.61	8.286	8.930	6.209	5.639	5.847
^{31}S	6.133	4.198	4.605	^{31}P	12.31	9.863	10.46	6.178	5.664	5.858
^{24}P	-0.94	0.969	-0.770	^{24}F	3.86	3.83	4.220	4.8	4.799	4.990
^{25}P	-0.824	-0.325	-0.016	^{25}Ne	4.184	4.608	5.073	5.01	4.933	4.769
^{26}P	0.145	0.397	0.722	^{26}Na	5.616	5.421	5.952	5.47	5.024	5.231
^{27}P	0.894	1.114	1.503	^{27}Mg	6.444	6.263	6.858	5.550	5.149	5.354
^{28}P	2.065	1.868	2.320	^{28}Al	7.725	7.126	7.785	5.660	5.259	5.465
^{29}P	2.748	2.653	3.166	^{29}Si	8.474	8.011	8.716	5.726	5.358	5.550

表 4 列出 S, P 同位素和它们的镜核的单核子的分离能. 表 4 左边给出用两组参数的理论计算得到的²⁶⁻³¹S, ²⁴⁻²⁹P 同位素核的单个质子的分离能(S_p), 并与实验值比较. 表的中间给出它们的镜核的单个中子的分离能(S_n). 表的右边列出单个中子分离能与单个质子分离能的差 $S_{np} = S_n - S_p$. 这两组参数得到的分离能都能与实验值基本符合. 但计算得到的 S 同位素的单核子的分离能与实验值差别大于 P 同位素, 这是由于 S 同位素的丰质子核是具有两个质子晕^[5].

表 5 列出 S, Si 同位素与它们的镜核的两个核子的分离能. 理论计算值与实验符合很好. 特别是两个中子分离能与两个质子分离能的差与实验符合得相当好.

表5 S, Si 同位素及它们镜核的两个粒子分离能(MeV)

Nucleus	Exp.	RMF	RMF	Mirror nucleus	Exp.	RMF	RMF	Exp.	RMF	RMF
	S_{2p}	TM2	NL-SH		S_{2n}	TM2	NL-SH		S_{2n2p}	TM2
²⁶ S	-0.634	-0.585	-0.013	²⁶ Ne	9.764	9.566	10.45	10.40	10.15	10.46
²⁷ S	0.895	0.843	1.445	²⁷ Na	12.37	11.18	12.19	11.48	10.34	10.75
²⁸ S	3.364	2.263	2.990	²⁸ Mg	14.95	12.84	13.98	11.59	10.58	10.99
²⁹ S	5.352	3.749	4.594	²⁹ Al	17.16	14.55	15.80	11.81	10.80	11.21
³⁰ S	7.148	5.299	6.249	³⁰ Si	19.08	16.30	17.65	11.94	11.00	11.40
³¹ S	11.73	8.373	9.286	³¹ P	23.63	19.39	20.69	11.90	11.02	11.41
²² Si	-0.018	3.134	2.435	²² O	10.66	13.58	13.11	10.68	10.44	10.68
²³ Si	1.722	6.494	5.748	²³ F	12.77	17.06	16.55	11.05	10.57	10.80
²⁴ Si	3.426	9.868	9.078	²⁴ Ne	14.07	20.52	19.96	10.64	10.65	10.88
²⁵ Si	5.280	13.23	12.39	²⁵ Na	15.97	23.93	23.33	10.69	10.70	10.94
²⁶ Si	7.789	16.57	15.68	²⁶ Mg	18.42	27.31	26.65	10.63	10.73	10.97
²⁷ Si	13.77	19.88	18.94	²⁷ Al	24.42	30.62	29.91	10.65	10.74	10.97

我们用包含非线性 σ 和 ω 自相互作用的相对论平均场理论系统地研究了 2s1d 壳的一系列丰质子核及它们的镜核的结合能, 均方根半径, 质子皮厚度, 单粒子能级, 及一个和两个核子分离能. 采用两组参数的理论计算结果与实验值较好地符合. 从以上的计算结果分析, 可以看出相对论平均场理论推广到 2s1d 壳丰质子核的描述是适用的, 包含非线性 ω 自相互作用的 TM2 参数更适合质子滴线核性质的描述.

参 考 文 献

- 1 Tanihata I. J. of Phys. G: Nucl. Part. Phys., 1996, 22:157
- 2 Ren Zhongzhou, Xu Gongou, Chen Baoqiu et al. Phys. Lett., 1995, B351:11
- 3 Maharana J P, Warriar L S, Gambhir Y K. Ann. of Phys., 1996, 250:237; Lalazissis G A, Farhan A R, Sharma M M. Nucl. Phys., 1998, A628:221
- 4 Negoita F, Borcea C, Carstoiu F. Phys. Rev., 1996, C54:1787; Obuti M M, Kobayashi T, Hirata D et al. Nucl. Phys., 1996, A609:74
- 5 Ren Z Z, Chen B Q, Ma Z Y et al. Phys. Rev., 1996, C53:R572; Chen B Q, Ma Z Y, Gruemmer F et al. J. of Phys. G: Nucl. Part. Phys., 1998, 24:97

- 6 Serot B D, Walecka J D. *Adv. Nucl. Phys.*, 1986, **16**:1; Reinhard P G. *Rep. Prog. Phys.*, 1989, **52**:439; Gambhir Y K, Ring P, Thimet A. *Ann. of Phys.*, 1990, **198**:132
- 7 Ma Z Y, Speth J, Krewald S et al. *Nucl. Phys.*, 1996, **A608**:305
- 8 Ring P. *Prog. Part. Nucl. Phys.*, 1996, **37**:193
- 9 Saito K, Tsushima K, Thomas A W. *Nucl. Phys.*, 1996, **A609**:339
- 10 Sugahara Y, Toki H. *Nucl. Phys.*, 1994, **A579**:557
- 11 Sharma M M, Nagarajan M A, Ring P. *Phys. Lett.*, 1993, **B312**:377
- 12 Audi G, Wapstra A H. *Nucl. Phys.*, 1993, **A565**:1

Investigation of Properties of Proton-Rich Nucleus

Chen Baoqiu

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

(Center of Nuclear Theoretical Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000)

Abstract The properties of proton-rich and their mirror nucleus in $2s1d$ shell have been investigated by relativistic mean field theory. The results obtained by relativistic mean field theory are in good agreement with experimental data.

Key words relativistic mean field theory, proton-rich nucleus, skin thickness of proton