

远离 β 稳定线奇异核性质的理论研究*

任中洲 徐躬耦 沈姚崧
(南京大学物理系 南京 210008)

朱志远 蔡延璜
(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

陈宝秋 马中玉
(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 回顾了对远离 β 稳定线奇特核性质的理论研究现状,并用相对论平均场理论研究了远离 β 稳定线奇特核的性质,包括轻核的中子晕和质子晕、远离 β 稳定线核的壳效应和超重核的性质等.

关键词 远离 β 稳定线奇特核 中子晕 相对论平均场理论

分类号 O571.2

1 引言

近年,在国内外许多重离子加速器上建成了次级放射性束流线,这使得研究远离 β 稳定线奇特核的性质成为可能.一系列实验研究发现^[1],远离 β 稳定线核有奇特性质.例如, ^{11}Li 、 ^{11}Be 、 ^{14}Be 和 ^{19}C 有中子晕,这些核有新的衰变模式,如 β 缓发的多中子发射现象等.对中等质量核,法国 GANIL 和德国 GSI 实验室成功地合成了最重的 $Z=N$ 双幻核 ^{100}Sn .对超重核, $Z=110$ 、 111 、 112 三种新元素于 1995 年和 1996 年在德国 GSI 实验室合成.这些实验研究改变了人们对原子核结构的看法,将沿同位旋自由度,对传统的核物理研究带来新的冲击.

理论上,根据一些宏观模型的预言,自然界中存在约 7 000 种寿命长于 μs 的核素,而当前仅仅观测到了约 2 000 多种核素,其中 β 稳定线附近的稳定核素约 270 种.所以,对远离 β 稳定线核的合成和研究工作还刚刚开始,人们尚不清楚一些传统的核结构模型是否还有效?是否存在新现象和新规律?

当前的理论研究主要集中在解释丰中子轻核 ^{11}Li 和 ^{14}Be 的中子晕,人们用三体模型成功地解释了 ^{11}Li 和 ^{14}Be 核的中子晕,也解释了有中子晕核参加的核反应实验结果^[2,3].但三体模型本身也有不足之处^[2,3],它不能统一地解释远离 β 稳定线奇特核和 β 稳定线附近核的性质.因此,有必要发展现有的平均场理论,其中也包括一些重要因素的影响,如核的四极形变和对关联,来统一研究远离 β 稳定线奇特核和 β 稳定线附近核的性质.

2 奇特 C 核基态性质的理论研究

实验研究发现,C 同位素链上一些核性质比较特殊.例如,实验发现, ^{15}C 的基态为 $(1/2)^+$. ^{17}C 的基态可能是 $(3/2)^+$,并且 ^{17}C 没有中子晕^[4]. ^{19}C 的基态为 $(1/2)^+$,并且有单中子晕^[4].C 同位素链也是轻核中 ($Z < 10$) 一个最长的同位素链^[5],为此,将用相对论平均场理论研究 C 同位素链的基态性质,详细的理论计算见文献^[5],这里仅给出部分结果.

在相对论平均场理论中,核子-核子作用通过传递 σ 、 ω 、 ρ 介子和光子实现^[5].在 C 同位素链的计算中,还考虑了形变自由度的

* 国家自然科学基金资助项目,中国科学院近代物理研究所(兰州)HIRFL-CSR 预研项目.
1996 - 11 - 28 收稿.

影响. 计算中的输入量为 NL-SH 力参数: $M=939.0 \text{ MeV}$, $m_\sigma=526.059 \text{ MeV}$, $m_\omega=783.0 \text{ MeV}$, $m_\rho=763.0 \text{ MeV}$, $g_\sigma=10.4436$, $g_\omega=12.9451$, $g_\rho=4.3828$, $g_2=-6.9099 \text{ fm}^{-1}$, $g_3=-15.8337^{[5]}$. 这里, M 、 m_σ 、 m_ω 和 m_ρ 分别为核子质量, σ 、 ω 、 ρ 介子的质量, g_σ 、 g_ω 、 g_ρ 、 g_2 和 g_3 , 分别为 σ 、 ω 与 ρ 介子和核子的耦合常数及 σ 介子的自作用耦合常数. 计算中还考虑

了对关联的影响^[5]. 计算结果见表 1, 其中 $B(\text{exp})$ 为核结合能实验数据, $B^{\text{NL-SH}}$ 为结合能理论结果. R_p 、 R_n 、 R_m 、 R_c 为核子密度分布的均方根半径计算值, 分别对应质子、中子、物质和电荷半径. $R_n(\text{exp})$ 和 $R_m(\text{exp})$ 分别为中子和物质分布半径的实验结果. β_p 和 β_n 分别为质子和中子的四极形变参数.

由表 1 看出, 理论结合能和实验结合能

表 1 C 同位素的基态性质

	$B(\text{exp})/\text{MeV}$	$B^{\text{NL-SH}}/\text{MeV}$	R_p/fm	R_n/fm	R_m/fm	R_c/fm	β_p	β_n	$R_n(\text{exp})/\text{fm}$	$R_m(\text{exp})/\text{fm}$
⁹ C	39.03	42.66	2.60	2.11	2.45	2.72	0.32	0.43		
¹⁰ C	60.32	59.55	2.52	2.26	2.42	2.64	0.42	0.67		
¹¹ C	73.44	73.58	2.40	2.28	2.34	2.53	0.25	0.33	2.41 ± 0.55	2.46 ± 0.30
¹² C	92.16	84.49	2.32	2.30	2.31	2.45	0.00	0.00	2.49 ± 0.16	2.48 ± 0.08
¹³ C	97.11	97.47	2.35	2.45	2.40	2.48	0.00	0.00	2.35 ± 0.41	2.42 ± 0.24
¹⁴ C	105.28	106.40	2.38	2.55	2.48	2.51	0.00	0.00	2.70 ± 0.10	2.62 ± 0.06
¹⁵ C	106.50	107.57	2.40	2.72	2.60	2.53	0.15	0.29	2.94 ± 0.15	2.78 ± 0.09
¹⁶ C	110.75	110.88	2.43	2.86	2.70	2.56	0.27	0.53	2.89 ± 0.09	2.76 ± 0.06
¹⁷ C	111.48	113.11	2.45	2.94	2.77	2.57	0.28	0.53	3.29 ± 0.17	3.04 ± 0.11
¹⁸ C	115.67	115.74	2.46	3.01	2.84	2.59	0.30	0.54	3.06 ± 0.29	2.90 ± 0.19
¹⁹ C	115.83	116.30	2.46	3.14	2.94	2.59	0.26	0.42	2.82 ± 1.4	2.74 ± 0.96
²⁰ C	119.17	117.27	2.46	3.21	3.01	2.59	0.21	0.29		
²¹ C	118.84 #	119.00	2.45	3.23	3.03	2.58	0.12	0.15		
²² C	120.29 #	121.53	2.45	3.30	3.09	2.58	0.00	0.02		

符合很好. 核电荷半径的电子散射实验结果为: ¹²C 半径 $R_c=(2.47 \pm 0.02) \text{ fm}$, ¹³C 半径 $R_c=(2.44 \pm 0.03) \text{ fm}$, ¹⁴C 半径为 $R_c=(2.56 \pm 0.05) \text{ fm}$. 这些实验数据与表 1 中 ¹²C、¹³C 和 ¹⁴C 电荷半径计算值一致. 表 1 中中子和物质均方根半径计算值也与实验结果在误差范围内一致.

此外, ¹⁵C、¹⁷C 和 ¹⁹C 的基态有长椭球形变, 所以最后一个中子将分别填充形变的单粒子能级 $(1/2)^+$ 、 $(3/2)^+$ 和 $(1/2)^{+[5]}$, 故这些

核有反常基态, 这和实验数据一致^[5]. 由于 ¹⁹C 中最后一个中子的形变能级 $(1/2)^+$ 来源于球形能级 $2s_{1/2}$, 这导致了 ¹⁹C 有单中子晕^[5,6]. 表 1 中 ¹⁹C 的结合能大于 ¹⁸C 的结合能, 说明 ¹⁹C 对发射中子稳定, 与实验一致. 而壳模型给出的 ¹⁹C 结合能小于 ¹⁸C 结合能, 与实验并不一致^[4]. 核子密度分布的计算结果也表明, ¹⁹C 最后一个中子形成中子晕^[5]. 此外, 相对论平均场理论计算还预言 ²²C 核是一个球形核, 有两中子晕, 这还有待于实验证实^[5].

3 用相对论平均场理论研究 Mg

最近,对 Na 和 Mg 同位素的研究引起了人们极大的兴趣. 壳模型计算预言对 Na 和 Mg 同位素,当 $N=20$ 时,会突然出现大的形变,导致 $N=20$ 幻数的消失. 实验上,发现 Na 同位素有厚中子皮. 电子散射实验测量了 Na

同位素的核半径,未发现 $N=20$ 会出现大的核形变^[7]. 这里将用相对论平均场理论研究 Mg 同位素的基态性质,详细计算可参考文献 [7]. 对 Mg 同位素的实验研究将在法国 GANIL 国家实验室进行.

表 2 为相对论平均场理论的结果,输入量为 NL-SH 为参数,对能隙取自 Möller-Nix

表 2 Mg 同位素的基态性质

	$B(\text{exp})/\text{MeV}$	$B(\text{th})/\text{MeV}$	R_p/fm	R_n/fm	R_m/fm	R_c/fm	β	Q_p/fm^2	$B[5]/\text{MeV}$	$B[17]/\text{MeV}$
²⁰ Mg	134.47	135.30	3.02	2.56	2.84	3.12	0.03	4.58		
²¹ Mg	149.20	149.96	3.04	2.68	2.89	3.14	0.32	36.0		
²² Mg	168.58	166.88	3.05	2.87	2.97	3.16	0.38	41.9		
²³ Mg	181.72	181.65	3.06	2.95	3.00	3.16	0.45	48.8		
²⁴ Mg	198.26	194.72	3.04	3.00	3.02	3.15	0.45	50.0		
²⁵ Mg	205.59	205.11	3.03	3.05	3.04	3.13	0.42	47.7		
²⁶ Mg	216.68	213.94	2.99	3.07	3.03	3.10	0.34	39.4		
²⁷ Mg	223.12	222.01	2.98	3.10	3.05	3.08	0.27	33.9		
²⁸ Mg	231.63	229.23	2.99	3.17	3.09	3.09	0.29	37.1		
²⁹ Mg	235.34	235.16	2.99	3.22	3.13	3.10	0.28	36.6		
³⁰ Mg	241.63	240.17	2.99	3.27	3.16	3.09	0.21	30.9	242.06	240.73
³¹ Mg	244.04	245.08	2.98	3.30	3.18	3.09	0.10	16.7	243.86	243.98
³² Mg	249.69	250.44	2.99	3.34	3.21	3.10	0.02	2.36	248.36	249.12
³³ Mg	251.76	252.33	3.00	3.40	3.26	3.10	0.09	13.7	249.60	250.59
³⁴ Mg	256.59	255.96	3.04	3.48	3.33	3.15	0.30	43.7	254.49	255.14
³⁵ Mg	255.72 [?]	259.26	3.07	3.54	3.38	3.17	0.37	51.9	255.36	256.90
³⁶ Mg	260.27 [#]	262.34	3.09	3.59	3.43	3.19	0.41	57.4	254.35	258.49
³⁷ Mg		263.48	3.10	3.64	3.47	3.20	0.41	58.2		
³⁸ Mg		264.42	3.11	3.68	3.51	3.21	0.41	58.4		
³⁹ Mg		265.55	3.12	3.74	3.56	3.22	0.42	59.3		
⁴⁰ Mg		266.74	3.13	3.79	3.61	3.23	0.44	60.5		

公式. 表 2 中 $B(\text{exp})$ 为核结合能实验数据, $B(\text{th})$ 为工作计算结果, $B[5]$ 与 $B[17]$ 为其他模型计算值, 详细说明见文献 [7].

从表 2 可以看出, 理论结合能和实验值符合得很好. 电子散射实验测得的 ²⁴Mg、²⁵Mg

和 ²⁶Mg 的核电荷分布均方根半径分别为 $(3.08 \pm 0.05)\text{fm}$ 、 $(3.11 \pm 0.05)\text{fm}$ 和 $(3.06 \pm 0.05)\text{fm}$, 也与我们的计算值符合. ²⁴Mg 和 ²⁵Mg 实验电四极矩分别为: $Q_p = 57 \text{ fm}^2$ 和 $Q_p = 50 \text{ fm}^2$, 与我们的理论值 $Q_p = 50 \text{ fm}^2$ 和 Q_p

$= 48 \text{ fm}^2$ 接近.

从表 2 中还可以看出,对质子滴线附近的单幻核 ^{20}Mg ,形变几乎为零,说明 $N=8$ 是一个好的幻数.对 ^{32}Mg ,相对论平均场预言它的四极形变也很小,故 $N=20$ 幻数存在, ^{32}Mg 基本上球形.对中子滴线核 ^{40}Mg ,形变 $\beta=0.44$,是一个大形变核,幻数 $N=28$ 不再存在, $N=28$ 球形壳结构消失.

此外,还研究了不同对力强度下 ^{32}Mg 的形变情况^[7],发现 ^{32}Mg 基态形变并不大, $N=20$ 幻数基本上存在.

4 ^{26}P 和 ^{27}S 的质子晕

虽然实验上发现轻的丰中子核如 ^{11}Li 、 ^{14}Be 和 ^{19}C 等有中子晕,但丰质子轻核是否有质子晕,目前实验上还没确定.已有的研究表

明^[6,8],中子晕的出现与外层中子反常占据 $2s_{1/2}$ 能级有关,微观原因在于原子核束缚中子的饱和性^[6,8].故我们将研究质子滴线附近轻核 ^{26}P 和 ^{27}S 是否有质子晕.根据壳模型,它们中最后一个质子将填充 $2s_{1/2}$ 单粒子能级.

用相对论平均场理论计算了 ^{25}Si 、 ^{26}P 和 ^{27}S 的基态性质,发现 ^{26}P 的最后一个质子和 ^{27}S 的最后两个质子束缚很弱,将形成质子晕.这三个核的密度分布如图所示.可以看出, ^{26}P 有一个质子晕, ^{27}S 有两质子晕,详细情况见文献^[9]

如果实验证实了 ^{26}P 和 ^{27}S 质子晕的存在,将对核内晕现象的研究带来新的冲击.由于质子晕带有电荷,将会引发一些新的核结构和核反应现象,人们也有可能通过电子散射研究质子晕.

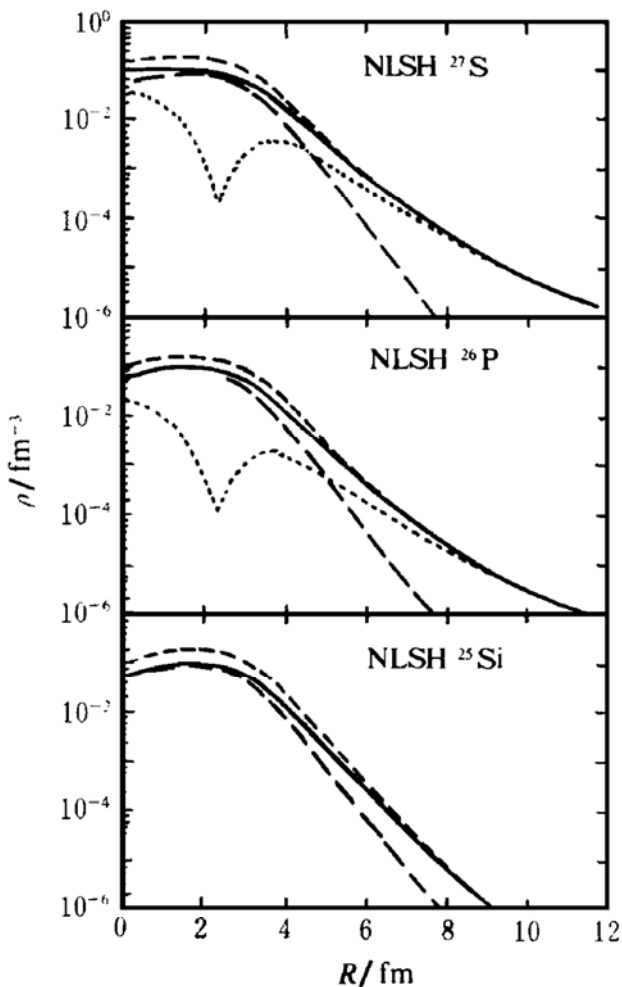
5 超重核 $Z=114$ 的理论研究

近两年来,在合成超重核方面取得了很大进展.1995年和1996年,在德国GSI实验室成功地合成了 $Z=110$ 、 111 和 $Z=112$ 三个新元素.合成新核素 $Z=114$ 的工作也正在进行中.

笔者用形变的相对论平均场程序计算了 $Z=114$ 同位素链的性质,结果发现, $Z=114$ 和 $N=184$ 核是双幻核,形变几乎为零. $Z=114$ 核的理论结果如表3所示,表中还列出了宏观核质量公式给出的结合能实验数据.可以看出,利用相对论平均场的计算结果与质量公式结果接近.

6 小 结

简单回顾了对远离 β 稳定线奇特核的研究现状,并用相对论平均场理论初步计算了这些核的性质.目前对于远离 β 稳定线核来说,实验数据还比较少,尚不能检验一些理论模型的正确性.一些理论模型本身还有待于进一步完善和发展,以包括核子-核子关联,同位旋自由度的影响等.



图示 ^{25}Si 、 ^{26}P 和 ^{27}S 的密度分布.实线、长条线、短条线和点线分别为质子、中子、物质和晕质子密度分布

主要介绍了用相对论平均场理论研究远离 β 稳定线核的性质, 相对论平均场理论还可用于研究超核和中子星的性质, 这方面工作也在进行中. 它也可用于核反应计算^[10].

此外, 近来研究发现, 在 Skyrme-Hartree-Fock 理论框架下, 考虑到同位旋自由度的影响及引入密度依赖的对作用力, 也可成功解释远离 β 稳定线奇特核性质^[11,12].

表 3 超重核 $Z=114$ 的基态性质

	$B(\text{th})/\text{MeV}$	R_p/fm	R_n/fm	R_m/fm	R_c/fm	β_p	β_n	$B[20]/\text{MeV}$	$B[21]/\text{MeV}$
$^{298}114$	2112.2	6.19	6.47	6.39	6.24	0.00	0.00	2121.8	2123.8
$^{296}114$	2102.2	6.18	6.45	6.35	6.23	0.02	0.02	2111.7	2113.8
$^{294}114$	2091.9	6.17	6.43	6.33	6.23	0.04	0.04	2100.7	2103.0
$^{292}114$	2081.5	6.17	6.41	6.32	6.22	0.06	0.06	2089.2	2091.7
$^{290}114$	2070.4	6.16	6.39	6.30	6.21	0.07	0.07	2076.8	2079.5
$^{288}114$	2059.0	6.15	6.37	6.28	6.21	0.08	0.08	2063.8	2066.7
$^{286}114$	2047.1	6.15	6.35	6.27	6.20	0.10	0.10	2050.4	2053.5
$^{284}114$	2034.6	6.15	6.35	6.27	6.21	0.15	0.15	2036.2	2039.5
$^{282}114$	2022.1	6.15	6.33	6.26	6.20	0.16	0.16	2021.8	2025.3
$^{280}114$	2008.7	6.14	6.31	6.24	6.19	0.17	0.16	2006.9	2010.6
$^{278}114$	1994.2	6.13	6.29	6.22	6.18	0.17	0.17	1990.9	1994.9
$^{276}114$	1979.2	6.12	6.27	6.21	6.17	0.18	0.18	1974.0	1978.2
$^{274}114$	1963.8	6.11	6.25	6.19	6.17	0.19	0.19	1957.6	1962.0
$^{272}114$	1948.0	6.11	6.24	6.18	6.16	0.20	0.20	1940.4	1945.2
$^{270}114$	1931.6	6.11	6.22	6.17	6.16	0.21	0.21	1922.9	1927.8

总之, 对远离 β 稳定线奇特核的研究, 将对传统的核物理带来新的机遇和挑战, 业已受到了人们的广泛注意和重视.

参 考 文 献

- 1 Tanihata I. Phys Rev Lett, 1985, 55:2676~2679
- 2 Ren Zhongzhou, Xu Gongou. Phys Lett, 1990, B237:1~2; B252:311~313
- 3 Zhukov M V. Phys Repts, 1993, 231:151~242
- 4 Bazin D. Phys Rev Lett, 1993, 74:3569~3573
- 5 Ren Zhongzhou. Nucl Phys, 1996;A605:75~86
- 6 Ren Zhongzhou. Phys Lett, 1995,B351:11~17
- 7 Ren Zhongzhou. Phys Lett, 1996,B380:241~246
- 8 Ren Zhongzhou. Phys Rev, 1995,C52:R1764~R1767
- 9 Ren Zhongzhou. Phys Rev, 1996,C53:R572~575
- 10 Li Baoan, Ren Zhongzhou, Ko C M et al. Phys Rev Lett, 1996,76:4492~4495
- 11 Shen Yaosong, Ren Zhongzhou. Phys Rev, 1996,C54:1158~1164
- 12 Shen Yaosong, Ren Zhongzhou. Z Phys, 1996,A335:247~253

Theoretical Studies on Properties of Exotic Nuclei far from Stability

REN Zhongzhou XU Gongou SHEN Yaosong

(*Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008*)

ZHU Zhiyuan GAI Yanhuang

(*Shanghai Institute of Nuclear Research, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

CHEN Baoqiu MA Zhongyu

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

Abstract The present situation of studies on exotic nuclei far from the β -stable line is simply reviewed and then the relativistic mean-field study on these nuclei has been carried out. This includes studies on neutron halos and proton halos in light nuclei, on nuclear shell effects of nuclei far from the stability, and on the properties of superheavy nuclei.

Key Words exotic nuclei far from stability neutron halo relativistic mean-field theory

(上接第 56 页)

olithic in South China, *Radiocarbon*, 1995, 37:245~249

Dating of Ancient Human Bones in Missing Layers.

4 Yuan Sixun, Guo Zhiyu, Wang Jianjun et al. *AMS ^{14}C*

NIM, 1996, B113:477~478

Accelerator Mass Spectrometry (AMS) ^{14}C Dating

LI Kun GUO Zhiyu

(*Department of Technical Physics, Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871*)

Abstract The method of accelerator mass spectrometry (AMS) ^{14}C dating, some AMS ^{14}C dating work in Peking University during the recent three years and the project of Xia-Shang-Zhou chronology are introduced.

Key Words accelerator mass spectrometry (AMS) ^{14}C dating tree ring correction fractionation correction project of Xia-Shang-Zhou chronology