

β^- 衰变中容许跃迁和禁戒跃迁的衰变规律

张绍庆 谢娟 张小平 支启军

Decay law of allowed and forbidden transitions in β^- -decay half-lives

Zhang Shao-Qing Xie Juan Zhang Xiao-Ping Zhi Qi-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 092101 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.092101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.092101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

等待点 $N=82$ 附近核素 β -衰变寿命的研究

β -decay half-lives for waiting point nucleiaround $N = 82$

物理学报.2014, 63(16): 162301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.162301>

超新星爆发环境核素 $^{56,57,59,60}\text{Co}$ 的电子俘获

Electron capture of nuclides $^{56,57,59,60}\text{Co}$ in supernova explosive surrounding

物理学报.2013, 62(7): 072301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.072301>

β^- 衰变中容许跃迁和禁戒跃迁的衰变规律*

张绍庆¹⁾²⁾ 谢娟¹⁾ 张小平³⁾ 支启军^{1)2)†}

1)(贵州师范大学物理与电子科学学院, 贵阳 550001)

2)(贵州师范大学天文研究与教育中心, 贵阳 550001)

3)(澳门科技大学月球与行星科学实验室, 澳门 519020)

(2015年11月18日收到; 2015年12月28日收到修改稿)

在考虑容许跃迁和禁戒跃迁的基础上, 对远离 β 稳定线附近原子核的 β^- 衰变寿命进行了系统的研究, 发现对于远离 β 稳定线的原子核的 β^- 衰变寿命, 其容许跃迁和禁戒跃迁寿命($T_{1/2}$)与母核的质子数和中子数之间存在指数规律. 利用这个规律, 计算了 β^- 衰变中的容许跃迁和禁戒跃迁(包括一级禁戒跃迁和二级禁戒跃迁)的衰变寿命, 理论计算结果与实验值符合得很好. 在此基础上, 对于一些核素的 β^- 衰变寿命进行预言, 这对于核物理和天体物理中 β^- 衰变研究具有重要意义.

关键词: β 稳定线, 指数规律, 容许跃迁, 禁戒跃迁

PACS: 21.10.Tg, 23.40.-s

DOI: 10.7498/aps.65.092101

1 引言

从1896年Becquerel发现天然放射性开始, 物理学家们就对 β 衰变进行了研究, 并发现了一种被称为弱相互作用的基本相互作用. 1956年, Lee和Yang^[1]发现弱相互作用下宇称不守恒; 20世纪30年代, Fermi^[2]首先提出了 β 衰变的理论. 此后, 很多科学家对于 β 衰变做了大量理论研究. 如: 1958年, Feynman和Gell-Man^[3], Sudarshan和Marshak^[4]发现四费米子的V-A理论等. 这些理论模型用在描述实验数据方面有一定的成功之处. 然而, 在计算 β 衰变半衰期方面, 目前主要有Möller等^[5]的半经典的有限力程液滴模型结合准粒子无规相近似(FRDM+QRPA, FRDM), Borzov^[6]的微观DF3密度泛函结合QRPA (DF3+QRPA, DF3), Engel

等^[7]的Hartree-Fock-Bogoliubov理论结合QRPA (HFB+QRPA, HFB)和Zhi等^[8, 9]的壳模型等计算 β 衰变寿命等理论模型. 但在研究 β 衰变寿命时由于要涉及到计算跃迁矩阵元, 加之我们对于原子核多体系统的复杂性和对于弱相互作用理论^[10-16]研究得不够, 这给我们的研究工作带来了极大的不便. 因此, 对于 β 衰变寿命的研究成为许多物理学家关注的热点^[9, 17, 18]. 在 β 衰变的唯象研究方面, Kratz等^[19, 20]提出了基于单能级费米理论的Kratz-Herman公式. Takahashi和Yamada^[21]提出了gross理论. 近来, Zhang和Ren^[22]对于远离稳定线 β^+ 衰变的半衰期的大量实验数据进行了系统地分析和研究之后, 发现了一种新的计算 β^+ 衰变的半衰期的指数规律, 同时区分了容许跃迁和禁戒跃迁^[23-25]的情况. 后来Zhang等^[26]又对于 β^- 衰变半衰期进行了研究, 发现对于 β^- 衰变来说也

* 国家自然科学基金(批准号: 11565010, 11165006, 11365006)、贵州省科技创新人才团队(批准号: 黔科合人才团队(2015) 4015号)、贵州省普通高等学校创新团队项目资助(批准号: 黔教合人才团队字[2014]35)、贵州省优秀青年科技人才培养计划(批准号: 2011-29)、贵州省国际科技合作计划(批准号: 20117026)、贵州省科学技术厅和贵州师范大学联合科技基金项目(批准号: 黔科合J字LKS[2011]17号)、贵州省留学人员科技活动计划(批准号: 2013-03)和澳门科技发展基金(批准号: 068/2011/A, 048/2012/A2, 091/2013/A3, 020/2014/A1)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qjzhi@gznu.edu.cn

有类似于 β^+ 衰变的指数规律,但并未区分容许跃迁和禁戒跃迁的情况.然而随着科学飞速发展,近些年的研究发现原子核的禁戒跃迁显得非常重要而必须加以考虑^[8,9].因此,本文在文献^[26]的基础上,重新计算研究原子核的 β^- 衰变寿命,重点区分 β^- 衰变中的容许跃迁和禁戒跃迁(包括一级禁戒跃迁和二级禁戒跃迁),找到容许跃迁和禁戒跃迁的拟合参数,并计算和预言了部分远离稳定线附近核素的 β^- 衰变寿命.从而找到 β^- 衰变寿命中容许跃迁和禁戒跃迁的规律,进而全面掌握原子核 β^- 衰变寿命规律和对原子核 β^- 衰变寿命进行准确和有效的理论描述,为原子核 β^- 衰变寿命的研究和天体物理核素合成研究提供理论参考.

2 指数规律

在前面的工作中,Zhang等^[26]已经对 β^- 衰变寿命进行了细致研究,这里不再赘述.本部分我们主要考虑区分容许跃迁和禁戒跃迁(包括一级禁戒跃迁和二级禁戒跃迁),找到 β^- 衰变寿命更为准确的描述.需要指出的是,本文主要讨论跃迁的类型,没有考虑壳及奇偶效应的影响^[22,26];同时,我们主要集中在讨论远离稳定线附近的核素,这些核素主要是形变核.基于实验数据^[27],我们给出了不同原子核的同位素链上的原子核的 β^- 衰变寿命的对数($\log_{10} T_{\text{exp}}^{\beta^-}$)与其中子数(N)的关系,见图1—图3.

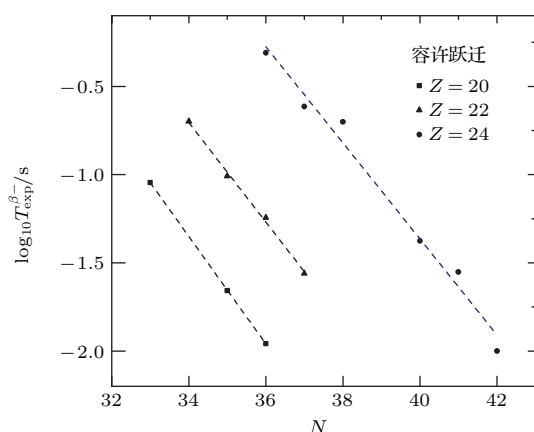


图1 $Z = 20, 22, 24$ 的容许跃迁中 β^- 衰变半衰期实验值的对数(以10为底)与其母核中子数的关系

Fig. 1. Experimental β^- -allowed transitions half-lives (in $\log_{10}$ scale) plotted vs the neutron numbers of the parent nuclei with $Z = 20, 22$, and 24 .

从图1—图3中可以看出,无论是容许跃迁,一级禁戒跃迁还是二级禁戒跃迁,在同位素链上 β^-

衰变的实验值的对数($\log_{10} T_{1/2}$)与其母核中子数(N)成线性关系,这种关系可以用下面的公式来描述:

$$\log_{10} T_{1/2} = aN + b, \quad (1)$$

式中的 $T_{1/2}$ 是半衰期的实验值; a, b 是待定常量; N 是母核同位素链上的中子数.(1)式表明: β^- 容许跃迁和禁戒跃迁中实验半衰期的对数($\log_{10} T_{1/2}$)与母核中子数(N)成线性关系,这与不区分容许跃迁和禁戒跃迁的结果一样^[26].我们对图1—图3中不同原子核的同位素链上的数据用最小二乘法进行拟合,可以得到拟合参数 a, b 的值,其线性拟合的标准差 σ 的表达式为

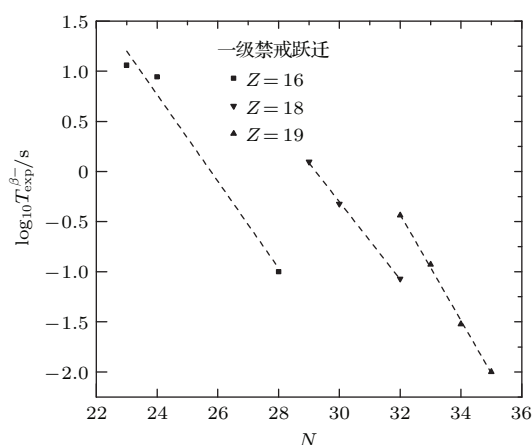


图2 $Z = 16, 18, 19$ 一级禁戒跃迁中 β^- 衰变半衰期的实验值的对数(以10为底)与其母核中子数的关系

Fig. 2. Same as Fig. 1. but for the first β^- decay of the parent nuclei with $Z = 16, 18$, and 19 .

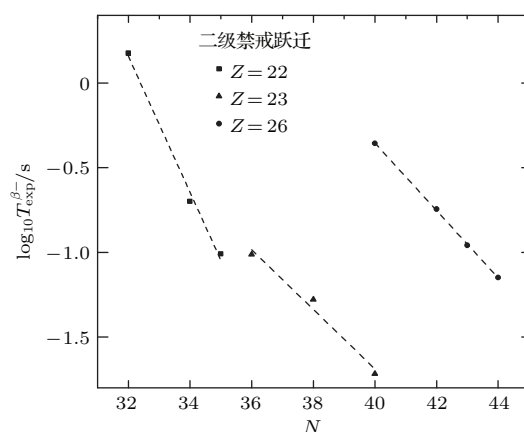


图3 $Z = 22, 23, 26$ 二级禁戒跃迁中 β^- 衰变半衰期的实验值的对数(以10为底)与其母核中子数的关系

Fig. 3. Same as Fig. 1. but for the second forbidden β^- -decay of the nuclei with $Z = 22, 23$, and 26 .

表1 不同级次的 β^- 衰变半衰期实验值的线性拟合参数 a , b 及标准差 σ 的比较Table 1. The fitting parameters a , b and the standard deviation σ for the β^- -decay half-lives of allowed, first forbidden and second forbidden transitions.

衰变方式	Z	a	b	σ
容许跃迁	20	-0.30452 ± 0.00121	9.00256 ± 0.04189	0.0015137
	22	-0.28204 ± 0.01106	8.88444 ± 0.39272	0.0174835
	24	-0.27225 ± 0.01773	9.52538 ± 0.69261	0.0766111
一级禁戒跃迁	16	-0.43328 ± 0.06102	11.16699 ± 1.53115	0.131815
	18	-0.38695 ± 0.01153	11.30503 ± 0.3499	0.0126604
	19	-0.52816 ± 0.01584	16.47132 ± 0.53084	0.0250409
二级禁戒跃迁	22	-0.40104 ± 0.0316	12.99104 ± 1.06474	0.0394174
	23	-0.17587 ± 0.02481	5.34666 ± 0.9437	0.040517
	26	-0.19895 ± 0.0026	7.60361 ± 0.10985	0.00627749

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K [\log_{10} T_{1/2}^i(\text{exp}) - \log_{10} T_{1/2}^i(\text{cal})]^2}, \quad (2)$$

其中, K 是同位素链上的数据个数, $T_{1/2}^i(\text{exp})$ 是 β^- 衰变半衰期的实验值, $T_{1/2}^i(\text{cal})$ 是理论计算的 β^- 衰变半衰期. 其拟合参数 a , b 及标准差 σ 的值列于表1.

3 计算结果

在上面的讨论中我们发现, 对于每一个同位素链上的核素来说, 远离稳定线的 β^- 衰变的容许跃迁和禁戒跃迁的寿命($T_{1/2}$)与其中子数(N)存在一个指数规律. 对于不同的同位素链来说, 类似于Zhang等^[22,26]对于 β 衰变寿命的处理一样, 可以用一个如下的指数公式来计算:

$$\log_{10} T_{1/2} = (c_1 Z + c_2) N + c_3 Z + c_4, \quad (3)$$

上式中, c_1 , c_2 , c_3 和 c_4 是待定的拟合参数, Z 和 N 分别是原子核的质子数和中子数, $T_{1/2}$ 是原子核的半衰期. 利用最小二乘拟合方法, 用(3)式分别对于容许跃迁(23个原子核)、一级禁戒跃迁(31个原子核)和二级禁戒跃迁(28个原子核)进行拟合(本文中我们主要对于轻核区域进行研究, 而重核区域尚未进行研究. 所选取的拟合的核是由于在其同位素链上同类型的跃迁核素相对较多, 便于实验分析), 拟合参数 c_1 , c_2 , c_3 和 c_4 的数值见表2.

利用(3)式和表2中得到的拟合参数, 我们对一些核素 β^- 衰变中的容许跃迁、一级禁戒跃迁和二级禁戒跃迁的寿命进行了理论计算, 并与Möller等^[5]的计算结果进行比较, 分别列在表3—表5中.

表2 最小二乘法拟合法得到的 c_1 , c_2 , c_3 和 c_4 Table 2. The values of c_1 , c_2 , c_3 and c_4 obtained by using least square method.

衰变方式	c_1	c_2	c_3	c_4
容许跃迁	-4.89615×10^{-4}	-0.21584	0.40284	-1.8004
一级禁戒跃迁	0.00244	-0.40767	0.41021	3.22268
二级禁戒跃迁	9.62131×10^{-4}	-0.14975	0.15631	0.34516

从表3—表5中可以看出, 我们利用拟合得到的参数对于容许跃迁、一级禁戒跃迁和二级禁戒跃迁半衰期进行计算, 并将得到的计算结果与实验值及Möller等^[5]的计算结果进行比较. 发现总体而言, 利用指数计算公式计算的结果与实验值符合得很好. 这表明我们提出的考虑容许跃迁和禁戒跃迁的指数公式具有较高的可靠性和有效性, 可以为原子核 β^- 衰变的实验研究和天体物理计算输入提供理论参考.

我们利用表2中得到的拟合参数分别计算容许跃迁和禁戒跃迁的部分远离稳定线附近核素(不包括拟合的核素)的 β^- 衰变寿命, 并将得到的理论计算值与Möller等^[5]理论计算值和Zhang等^[26]考虑壳效应的计算结果进行比较, 结果列在表6中.

表3 β^- 衰变中容许跃迁半衰期的计算Table 3. Calculated half-lives for the allowed β^- transitions.

Z	A	T_{exp}/s	T_{cal}/s	$T_{\text{Moller}}/\text{s}^{[5]}$
20	53	0.090±0.015	0.0646	0.0156
20	55	0.022±0.002	0.0229	0.0116
20	56	0.011±0.002	0.0136	0.0300
22	56	0.200±0.005	0.2277	0.8214
22	57	0.098±0.005	0.1351	0.0542
22	58	0.057±0.010	0.0802	0.1523
22	59	0.0275±0.0025	0.0476	0.0213
24	60	0.49±0.01	0.4726	3.6898
24	61	0.243±0.011	0.2798	0.7550
24	62	0.206±0.012	0.1657	0.4111
24	64	0.042±0.002	0.0581	0.1539
24	65	0.028±0.003	0.0344	0.1006
24	66	0.023±0.004	0.0204	0.0710
26	63	6.1±0.1	1.6500	0.9808
26	64	2.0±0.2	0.9723	25.4054
26	65	1.12±0.15	0.5744	1.3266
43	109	0.86±0.04	0.7705	0.3783
43	111	0.350±0.021	0.2588	0.1908
43	114	0.090±0.020	0.0504	0.0878
45	106	30.07±0.35	65.6402	> 100
45	107	0.0217±0.0004	0.0380	> 100
45	108	16.8±0.5	21.9493	46.7471
45	112	3.45±0.37	2.4543	2.2262

表4 β^- 衰变中一级禁戒跃迁半衰期的计算Table 4. Calculated half-lives for the first forbidden β^- -transitions.

Z	A	T_{exp}/s	T_{cal}/s	$T_{\text{Moller}}/\text{s}^{[5]}$
18	46	8.4±0.6	2.6391	> 100
18	47	1.23±0.03	1.1421	0.7502
18	48	0.475±0.040	0.4943	0.2459
18	50	0.085±0.030	0.0926	0.0452
19	50	0.472±0.004	0.6547	3.9399
19	51	0.365±0.005	0.2849	0.2368
19	52	0.118±0.006	0.1240	0.0106
19	53	0.030±0.005	0.0540	0.0071
19	54	0.010±0.005	0.0235	0.0059
36	92	1.840±0.008	1.2016	0.4164
36	93	1.286±0.010	0.5753	0.6245
36	95	0.114±0.003	0.1319	0.4637
36	96	0.080±0.006	0.0632	0.1963
37	93	5.84±0.02	4.2326	0.1862
37	95	0.3775±0.0008	0.9814	0.0783
37	96	0.203±0.003	0.4725	0.0789
37	101	0.032±0.005	0.0122	0.0291
38	94	75.3±0.2	14.9094	8.8353
38	95	23.90±0.14	7.2196	9.5064
38	96	1.07±0.01	3.4959	1.1080
38	97	0.429±0.005	1.6928	1.4002
38	98	0.653±0.002	0.8197	0.7216
38	100	0.202±0.003	0.1922	0.4707
38	101	0.118±0.003	0.0931	0.3919
49	130	0.29±0.2	0.968	0.2064
49	133	0.165±0.003	0.1323	0.1405
50	133	1.46±0.03	1.0533	10.2903
50	134	1.050±0.011	0.5456	3.5410
50	136	0.25±0.03	0.1464	0.9523

表5 β^- 衰变中二级禁戒跃迁半衰期的计算Table 5. Calculated half-lives for the second forbidden β^- -transitions.

Z	A	T_{exp}/s	T_{cal}/s	$T_{\text{Moller}}/\text{s}^{[5]}$	Z	A	T_{exp}/s	T_{cal}/s	$T_{\text{Moller}}/\text{s}^{[5]}$
22	54	1.5±0.4	0.4670	32.7051	42	108	1.09±0.02	0.4940	2.1681
22	55	1.3±0.1	0.3472	0.1530	42	110	0.27±0.01	0.2986	1.8202
22	56	0.200±0.005	0.2580	0.8214	43	106	0.0356±0.0006	1.7324	> 100
22	57	0.098±0.005	0.1921	0.0128	43	110	0.92±0.03	0.6385	0.3209
23	59	0.097±0.002	0.2218	0.0527	47	120	1.23±0.04	1.1509	0.5645
23	61	0.0526±0.0042	0.1232	0.0269	47	121	0.78±0.02	0.9047	0.4057
23	63	0.0192±0.0024	0.0685	0.0178	47	122	0.529±0.013	0.7112	0.2027
26	66	0.440±0.060	0.2629	2.6220	49	126	1.53±0.01	1.2698	0.5388
26	67	0.40±0.04	0.1973	1.1389	49	128	0.84±0.06	0.7916	0.4516
26	68	0.180±0.019	0.1480	0.7673	49	129	0.61±0.01	0.6250	0.3185
26	69	0.110±0.006	0.1111	0.4021	49	131	0.28±0.03	0.3897	0.1471
26	70	0.071±0.010	0.0833	0.2453					

表6 利用表2的拟合参数计算部分远离稳定线的原子核的 β^- 衰变寿命, 及其与 Möller 等^[5]的计算结果和 Zhang 等^[26]考虑壳效应的结果的比较

Table 6. Calculated β^- -decay half-lives of nuclei far from stability with the new parameters. The β^- -decay half-lives calculated by Möller *et al.*^[5] and Zhang *et al.*^[26] are listed for comparisons.

衰变类型	Z	A	T_{exp}/s	T_{cal}/s	$T_{\text{Moller}}/\text{s}^{[5]}$	$T_{\text{Zhang}}/\text{s}^{[26]}$
容许跃迁	21	56	0.026 ± 0.006	0.0556	0.0138	0.0672
	23	56	0.216 ± 0.004	0.9352	0.2028	2.4001
	23	58	0.191 ± 0.010	0.3287	0.0524	0.4537
	23	61	0.0526 ± 0.0042	0.0685	0.0269	0.0710
	25	60	0.28 ± 0.02	1.9417	0.5617	3.0615
	25	61	0.67 ± 0.04	1.1484	0.2406	1.5613
	25	63	0.275 ± 0.004	0.4018	0.0923	0.4811
	25	64	0.090 ± 0.004	0.2376	0.0415	0.2805
	37	97	0.1691 ± 0.0006	0.1170	0.0462	0.2261
	37	99	0.054 ± 0.004	0.0399	0.0418	0.0669
一级禁戒跃迁	16	39	11.5 ± 0.5	20.3025	4.7477	0.5720
	16	40	8.8 ± 2.2	8.6880	48.4648	0.3942
	16	44	0.100 ± 0.01	0.2913	1.1112	0.1858
	17	43	3.13 ± 0.9	4.7349	1.1195	0.6789
	17	44	0.56 ± 0.11	2.0376	0.6050	0.5998
	17	45	0.413 ± 0.025	0.8769	0.7549	0.4800
	25	67	0.051 ± 0.004	0.0828	0.0250	0.0677
	27	69	0.229 ± 0.024	0.8773	0.0766	0.4618
	27	71	0.080 ± 0.003	0.1818	0.0394	0.2251
	43	107	21.2 ± 0.2	30.5993	>100	7.4327
二级禁戒跃迁	21	53	2.4 ± 0.6	0.3035	0.1538	0.9680
	21	54	0.526 ± 0.015	0.2252	0.0152	0.3568
	21	55	0.096 ± 0.002	0.1672	0.0314	0.1458
	23	57	0.32 ± 0.03	0.3992	0.1434	0.9825
	25	62	0.671 ± 0.005	0.4001	0.1585	0.8496
	25	65	0.084 ± 0.008	0.1679	0.0289	0.1682
	25	69	0.018 ± 0.004	0.0528	0.0141	0.0329
	48	126	0.0515 ± 0.017	0.5885	5.3689	0.4341
	48	127	0.37 ± 0.07	0.4637	2.5072	0.2574
	48	128	0.28 ± 0.04	0.3653	1.0021	0.1624

从表6中列出的用表2中拟合参数计算部分原子核(共30个核素)的容许跃迁、一级禁戒跃迁和二级禁戒跃迁的 β^- 衰变寿命发现, 我们的理论计算值与实验值的计算值符合得很好, 而与

Möller 等^[5]的计算值和 Zhang 等^[26]计算值大体符合, 但有些核(如 $Z = 16$, $A = 39$ 这个核, 实验值是 Zhang 等计算值的19倍; $Z = 16$, $A = 44$ 这个核 Möller 等的计算值是实验值的11倍)差距

很大. 这再次表明我们提出的考虑容许跃迁和禁戒跃迁的指数公式具有较高的可靠性和有效性.

基于我们理论计算的可靠性和有效性, 利用 (3) 式对 $Z = 53$ — 56 同位素链上远离 β 稳定线的 β^- 衰变寿命进行了理论预言, 结果见表 7.

表 7 利用 (3) 式预言远离稳定线的原子核的 β^- 衰变寿命 ($Z = 53$ — 56), 及其与 Möller 等 [5] 的计算结果和 Zhang 等 [26] 考虑壳效应的结果的比较

Table 7. Using the formula (3) predicted that far from the stable line of β^- -decay life-lives ($Z = 53$ – 56). The β^- -decay half-lives calculated by Möller *et al.* [5] and Zhang *et al.* [26] are listed for comparison.

Z	A	$T_{\text{allow}}/\text{s}$	$T_{\text{first}}/\text{s}$	$T_{\text{second}}/\text{s}$	$T_{\text{Moller}\beta^-}/\text{s}$ [5]	$T_{\text{Zhang}}/\text{s}$ [26]
53	146	0.0224	0.1195	0.2787	0.0288	0.0163
53	147	0.0145	0.0629	0.2220	0.0309	0.0094
53	148	0.0093	0.0332	0.1769	0.0288	0.0054
53	149	0.0060	0.0175	0.1409	0.0338	0.0031
54	149	0.0181	0.1456	0.3129	0.1050	0.0148
54	150	0.0116	0.0770	0.2498	0.0704	0.0085
54	151	0.0075	0.0408	0.1994	0.0364	0.0049
54	152	0.0048	0.0216	0.1592	0.0371	0.0029
55	152	0.0145	0.1810	0.3543	0.297	0.0135
55	153	0.0093	0.0964	0.2835	0.0495	0.0078
55	154	0.0060	0.0514	0.2269	0.0424	0.0045
55	155	0.0038	0.0274	0.1815	0.0327	0.0026
56	154	0.0180	0.4300	0.5049	0.0955	0.0213
56	155	0.0115	0.2304	0.4049	0.0768	0.0123
56	156	0.0074	0.1234	0.3247	0.0613	0.0071
56	157	0.0048	0.0661	0.2604	0.0561	0.0041

表 7 中, 第 1 列是质子数, 第 2 列是原子核的质量数, 第 3 列是用容许跃迁的拟合参数计算的半衰期; 第 4 列的是用一级禁戒跃迁的拟合参数计算的半衰期; 第 5 列是用二级禁戒跃迁的拟合参数计算的半衰期; 第 6 列是 Möller 等 [5] 的计算结果; 第 7 列是 Zhang 等 [26] 的计算结果. 从表中可以看出, 对于同一核素而言, 考虑不同跃迁方式的计算结果是不同的, 有些相差 50 倍, 可见这些核素的寿命主要由不同的跃迁方式 (容许或禁戒) 决定; 由于没有准确的实验数据, 无法判断哪一种更为准确. Zhang 等 [26] 的结果与本文容许跃迁的值较为接近, 与 Möller 等 [5] 的结果的差异在 10 倍左右. 若把考虑跃迁类型的理论计算结果与 Möller 等 [5] 的结果比较, 发现有些核素的容许跃迁与 Möller 等的接近 (如对于 $Z = 53$ 同位素链上 $A = 146$ — 147 的核素来说, 容许跃迁与 Möller 等的结果较为接近). 有些

禁戒跃迁则相对更好 (如对于 $Z = 53$ 同位素链上 $A = 148$ — 149 的核素来说, 一级禁戒跃迁与 Möller 等的结果较为接近). 总的来说, 考虑跃迁类型的三种计算结果为这些核素的 β^- 衰变寿命提供了理论范围, 这对今后原子核和天体物理中 β^- 衰变寿命更为精确的研究具有重要的理论意义.

4 结 论

本文在区分 β^- 衰变中容许跃迁和禁戒跃迁 (包括一级禁戒跃迁和二级禁戒跃迁) 的基础上, 对远离 β 稳定线的 β^- 衰变寿命进行了系统的研究. 发现在远离 β 稳定线的 β^- 衰变中的容许跃迁与禁戒跃迁的半衰期的实验值 ($T_{1/2}$) 与其母核质子数 (Z) 和中子数 (N) 之间存在指数规律. 我们利用这个规律对远离稳定线的 β^- 衰变寿命进行拟合, 再

将得到的参数对于容许跃迁与禁戒跃迁的半衰期进行理论计算,发现计算结果与实验值符合得很好.在此基础上,我们还对部分远离 β 稳定线的 β^- 衰变的原子核的半衰期进行预言.这对于原子核 β^- 衰变和天体物理中弱相互作用主导的天体物理过程具有重要的意义.

参考文献

- [1] Lee T D, Yang C N 1956 *Phys. Rev.* **104** 254
- [2] Fermi E 1934 *Z. Phys.* **88** 161
- [3] Feynman R P, Gell-Mann M 1958 *Phys. Rev.* **109** 193
- [4] Sudarshan E C G, Marshak R E 1958 *Phys. Rev.* **109** 1860
- [5] Möller P, Nix J R, Kratz K L 1997 *At. Data Nucl. Data Tables* **66** 131
- [6] Borzov I 2006 *Nucl. Phys. A* **777** 645
- [7] Engel J, Bender M, Dobaczewski J, Nazarewicz W, Surlan R 1999 *Phys. Rev. C* **60** 014302
- [8] Ni D D, Ren Z Z, Zhi Q J 2011 *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* **55** 2397
- [9] Zhi Q J, Caurier E, Cuenca-García J J, Langanke K, Martínez-Pinedo G, Sieja K 2013 *Phys. Rev. C* **87** 025803
- [10] Nabi J U, Klapdor-Kleingrothaus H V 2004 *At. Data Nucl. Data Tables* **88** 237
- [11] Vogel P, Zirnbauer M R 1986 *Phys. Rev. Lett.* **57** 3148
- [12] Koonin S E 1991 *Nature* **354** 468
- [13] Haxton W C, Johnson C 1990 *Phys. Rev. Lett.* **65** 1325
- [14] Langanke K, Martínez R, Guerra E M 2005 *Eur. Phys. J. A* **24** 193
- [15] Sarriuren P, Álvarez-Rodríguez R, Guerra E M 2005 *Eur. Phys. J. A* **24** 193
- [16] Pantis G, Šimkovic F, Vergados J D, Faessler A 1996 *Phys. Rev. C* **53** 695
- [17] Zhi Q J, Zheng Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 102301 (in Chinese) [支启军, 郑强 2011 物理学报 **60** 102301]
- [18] Zhang Y M, Xu F R 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4826 (in Chinese) [张玉美, 许甫荣 2008 物理学报 **57** 4826]
- [19] Kratz K-L, Herrmann G 1973 *Z. Phys.* **263** 435
- [20] Pfeiffer B, Kratz K L, Möller P 2002 *Prog. Nucl. Energy* **41** 39
- [21] Takahashi K, Yamada M 1969 *Prog. Theor. Phys.* **41** 1470
- [22] Zhang X P, Ren Z Z 2006 *Phys. Rev. C* **73** 014305
- [23] Lu X T, Jiang D X, Ye Y L 2000 *Nuclear Physics* (Vol. 2)(Beijing: Atomic Energy Press) pp129–146 (in Chinese) [卢希庭, 江栋兴, 叶沿林 2000 原子核物理 (北京: 原子能出版社) 第129—146页]
- [24] Smith C M H 1965 *A Textbook of Nuclear Physics* (Vol. 1)(Oxford: Pergamon) pp140–145
- [25] Evans R D 1955 *The Atomic Nucleus* (Vol. 1)(New York: McGraw-Hill) pp200–210
- [26] Zhang X P, Ren Z Z, Zhi Q J, Zhang Q 2007 *J. Phys. G* **34** 2611
- [27] National Nuclear Data Center On-line Retrieval System 2014 *Nuclear Structure β -Decay Data* (New York: Brookhaven National Laboratory)

Decay law of allowed and forbidden transitions in β^- -decay half-lives*

Zhang Shao-Qing¹⁾²⁾ Xie Juan¹⁾ Zhang Xiao-Ping³⁾ Zhi Qi-Jun¹⁾²⁾†

1) (School of Physics and Electron Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

2) (School of Astronomy Research and Education, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

3) (Lunar and Planetary Science Laboratory, Macau University of Science and Technology, Macau 519020, China)

(Received 18 November 2015; revised manuscript received 28 December 2015)

Abstract

β^- -decay half-lives are not only important parameters for studying the structures and decay properties of the exotic nucleus far from stability, but also basic parameters for understanding the astrophysical phenomenon. Astrophysicists need exact data of β^- -decay half-lives as input to build nucleosynthesis models for understanding the elements abundances of our universe and solar system. For nuclei far from stability, experimental synthesis and further measurements on their half-lives are rather difficult due to the rarity and radioactivity of target material for synthesizing these nuclei. In theoretical respect, although there are many models such as finite-range droplet model plus quasi-particle random-phase approximation (QRPA), microscopic density functional theory plus QRPA, Hatree-Fock-Bogoliubov theory plus QRPA, and shell model etc., it is still a challenge to calculate β^- -decay half-lives in a reliable way for nuclei far from the β^- -stable line, partly because of the intrinsic complexity of nuclear multi-body problem. In empirical respect, Sargent made an empirical study of β^- -decay half-lives in 1933 and discovered a law which is consistent with the Fermi β^- -decay theory proposed one year later. From then on, there have been a few parametric models based on some of real physical behaviors, which describe complex quantum many-body systems, such as the Kratz-Herrmann formula and the gross theory. Recently, Zhang et al. discovered an exponential law describing β^- -decay half-lives and the nucleon number (Z , N) of parent nuclei far from the stable line. A formula is proposed to calculate the β^- -decay half-lives of nuclei far from stability, which can describe experimental data reasonably well. However, the differences between allowed transitions and forbidden transitions are not fully considered in this formula. Zhang et al. used a set of parameters to describe both allowed transitions and forbidden transitions. In this paper, we consider the different β^- -decay half-lives of allowed transitions and forbidden transitions, and propose an updated parameterization of this formula. A set of parameters is obtained through fitting experimental data of different kinds of transitions with a least-square method. With these new parameters, the theoretical calculation results are in good agreement with the experimental values. The calculation accuracy is improved compared with previous version. By comparison with the complicated and time-consuming microscopic calculation, the improved exponential formula can give the results of β^- -decay half-lives for the allowed transitions and the forbidden transitions in an effective and reliable way. According to the updated formula, we predict half-lives of β^- -decay half-lives of some unknown nuclei far from the β^- -stable line. These predictions are very useful references for the experimental study of β^- -decay of nuclei far from stability and for astrophysical applications.

Keywords: β^- -decay half-lives, exponential law, allowed transitions, forbidden transitions

PACS: 21.10.Tg, 23.40.-s

DOI: 10.7498/aps.65.092101

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11165006, 11565010, 11365006), Guizhou Province Science and Technology Innovation Talent Team, China (Grant No. (2015) 4015), the Innovation Team Foundation of the Education Department of Guizhou Province, China (Grant No. [2014]35), the Training Program for Excellent Young Talents in Science and Technology of Guizhou Province, China (Grant No. 2011-29), the International Science and Technology Cooperation Program of Guizhou Province, China (Grant No. 20117026), Science and Technology Department of Guizhou Province, and Scientific and Technological Cooperation Projects of Guizhou Normal University, China (Grant No. LKS[2011]17), the Scientific Research Program for the Returned Overseas Chinese Scholars of Guizhou Province, China (Grant No. 2013-03), and the Foundation for Development of Science and Technology of Macau, China (Grant Nos. 068/2011/A, 048/2012/A2, 091/2013/A3, 020/2014/A1).

† Corresponding author. E-mail: qjzhi@gznu.edu.cn