第 15 卷 第 7 期　　高能物理与核物理　　Vol. 15, No. 7
1991 年 7 月　　HIGH ENERGY PHYSICS AND NUCLEAR PHYSICS　　July, 1991

对缺中子核（$A<70$）质子衰变的预言*

徐晓冀　区秀兰
（中国科学院近代物理研究所，兰州 730000）

程　远
（清华大学，北京 100084）

摘　要

在质量区 $A<70$ 范围内，对远离 β 稳定线的缺中子核质子衰变的可能性进行了理论预言，计算基于 Kelson-Garvey 核力电荷对称质量关系和同位旋相似态质量公式，给出了预言的核素图，将预言计算与实验结果进行了比较，对绝大多数已发现的核，质子能量在 300keV 以内符合得很好．计算同时指出双质子、三质子衰变的可能性，并给出了目标核．

一、引　言

目前，在质量数 $A<70$ 范围，对缺中子远离核的探索已经接近了质子滴线．在质子滴线附近的核，由于有很反常的中子、质子比，即原子核是很丰质子的，使核系统具有很高的能量，其 β 衰变能可达 20MeV．一般说来，这样高能量的核不可能通过一次衰变达到稳定的基态，而往往是在 β 衰变后，原子核仍处于较高的激发态．如果激发态高于核的粒子结合能，则核 β 衰变后再发射质子、α 及氘等核粒子将是可能的，这就是所谓的 β 延迟粒子发射．在延迟粒子发射之前进行 β 衰变的核称为先驱核（Precursor）．此外，正如重核中的 α 衰变一样，轻核或中重核区的丰质子核，也可能进行基态（或同质异能态）的直接质子、双质子衰变．（图 1）只有远离 β 稳定线的核素才具有这种独特的衰变模式，这些核也常常被称为奇异核（exotic nuclei）．奇异核的不同的粒子衰变方式反映了核粒子在原子核内的存在形式与其间的相互作用，对于这种独特的核衰变的探测已成为发现远离 β 稳定线核素的重要手段，例如：$T_z=-3/2$（$T_z=(N-Z)/2$ 为原子核同位旋量子数第三分量）、$A=4N+1$ 系列的核从 ^{9}C 到 ^{61}Ge 几乎都是通过探测其 β 延迟质子发射而发现的[1]，而 ^{35}Ca 是通过其 β 延迟双质子衰变被发现[2]．通过探测手段的不断完善和改进，可对这些核的衰变进行更加精密的测量，从而可得到核结构的重要信息．

缺中子奇异核 β^+ 衰变（或电子俘获）后，如处于子核的较高的激发态（$E^*>B_p$，E^*

本文 1990 年 8 月 18 日收到．
* 国家自然科学基金资助课题．

为激发态能量，B_p 为粒子结合能)，其最可几的衰变分支将是超允许 β^+ 跃迁，此时子核处于母核的同位旋相似态，它正是这些核延迟粒子发射的重要来源．本文阐述了对这些核($A<70$)的粒子衰变性质的预言计算，计算基于 Kelson-Garvey 电荷对称质量关系和同位旋相似态理论．早在 1966 年，I. Kelson 和 G. T. Garvey 就提出了根据已知核的质量去预言未知核的质量的方法[3]，1976 年，J. JÄNECKE 将 Kelson-Garvey 质量关系分类成丰中子核和丰质子核两部分，1988年，他和 P. J. MASSON 对于 5600 个 $2\leqslant Z\leqslant 103$，$4\leqslant N\leqslant 157$ 和 $N\geqslant Z$(除去 $A<40$，$N=Z=$ 奇数)的丰中子核进行了质量剩余计算，并和其中已知核的质量剩余对比，得出标准偏差 $\sigma_m\approx 103$keV；对 250 个丰质子核，也作了质量剩余计算，得 $\sigma_m\approx 231$keV[4]．根据同位旋相似态理论，相邻核之间同位旋相似态质量差等于这两个核的库仑能差和中子-质子的质量差，M. S. Antony 等人[5]给出了半经验公式，并对 $T_z<0$ 的同量异位核相似态激发能作了理论计算．

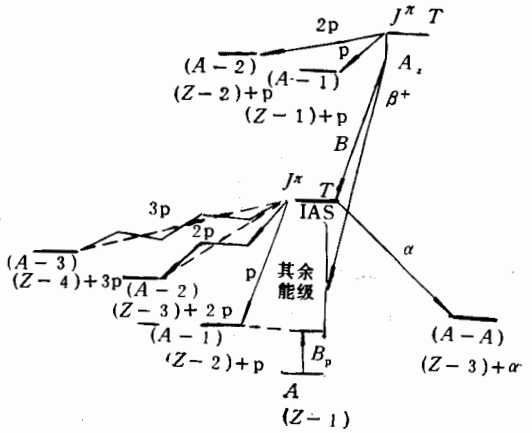


图 1　丰质子奇异核可能的衰变方式

本文的贡献是将 Kelson-Garvey 电荷对称质量关系和同位旋相似态质量关系结合起来，并和 β^+ 衰变子核的粒子结合能进行了对比，计算了原子核经超允许 β^+ 跃迁后发射各种粒子的可能性，计算了延迟粒子发射的能量和分支比，也指出了原子核直接粒子发射的可能性，特别是首次提出 β^+ 延迟三质子、β^+ 延迟 α 粒子以及 β^+ 延迟 α 粒子和质子的可能性和粒子能量，并给出了计算结果和计算结果与实验的比较．

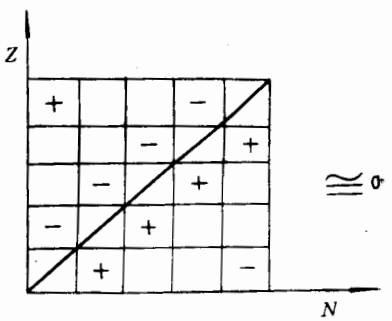
二、计 算 步 骤

1. 先驱核质量剩余 M：

采用电荷对称 Kelson-Garvey 质量关系：

$$M(A,T_z)-M(A,-T_z)$$
$$=\sum_{i=1}^{2T_z}[M(A-2T_z-1+2i,1/2)$$
$$-M(A-2T_z-1+2i,-1/2)].$$

或以图解来表示(右图)．



图内的正负号意思为：应加上(+)或减去(−)在此公式中具有相应 Z 和 N 值的核的质量(即质量剩余)．此质量关系的意义是：一对镜核之间的质量差等于此对镜核原子序数 Z 之间的几对相邻镜核的质量

图 例

$^{A}_{Z}E_{N}$	S_p	
	S_{2p}	
M	$T_{1/2}$	B
E_p	E_{2p}	E_{3p}
E_d	E_α	$E_{\alpha p}$

E 元素符号

A 质量数

Z 原子序数

N 中子数

M 质量剩余

$T_{1/2}$ 半衰期(秒)

B 跃迁分支比

E_p 延迟质子能量

E_{2p} 延迟双质子能量

E_{3p} 延迟三质子能量

E_d 延迟 d 核能量

E_α 延迟 α 粒子能量

$E_{\alpha p}$ 延迟 α 粒子及质子能量

									$^{22}_{14}Si_8$		-1.168
											-0.017
									32.133	0.030	0.020
									8.400	5.072	2.921
									$^{21}_{13}Al_8$		11.881
											9.682
									26.011	0.040	0.018
									6.821	4.490	
			$^{18}_{12}Mg_6$		-3.885	$^{19}_{12}Mg_7$		8.686			
					0.388			1.173			
			43.469			32.231	0.020	0.006			
			14.342	12.175		14.420	10.111				
			$^{17}_{11}Na_6$		4.273	$^{18}_{11}Na_7$		1.648			
					4.203			0.159			
			35.551			25.417	0.020	0.003			
			12.711	12.293		11.534	10.322				
$^{15}_{10}Ne_5$		1.256	$^{16}_{11}Ne_6$		-0.070	$^{17}_{11}Ne_7$		-1.490			
		4.237			1.404			-0.950			
41.926			28.989	0.050	0.005	16.480	0.109	0.00895			

S_p 质子分离能

S_{2p} 双质子分离能

注：能量及质量剩余单位均为 MeV　半衰期数值取自 K. Takahashi 等人[21].

		$^{32}_{21}Sc_{11}$	3.926								$^{36}_{21}Sc_{14}$	3.256		
			8.778									4.115		
		70.738									15.227	0.010	0.040	
			25.115								11.638	11.230		
		$^{31}_{20}Ca_{11}$	4.853		$^{32}_{20}Ca_{12}$					$^{34}_{20}Ca_{13}$	−0.048		$^{35}_{20}Ca_{14}$	−1.140
			7.271			5.431					2.309			−0.516
		59.524			41.885					14.707	0.020	0.071	4.682	0.020	0.060
										11.582	8.088		8.734	4.080	1.860
														2.241	1.915
		$^{30}_{19}K_{11}$	4.419							$^{33}_{19}K_{14}$	2.356		$^{34}_{19}K_{15}$	0.624
			6.874								−0.043			−2.715
		49.382								7.465	0.020	0.074	−1.467	0.030	0.069
		20.339	22.255							6.792	5.104		5.657	3.343	
		$^{29}_{18}Ar_{11}$	2.455		$^{30}_{18}Ar_{12}$	0.304		$^{31}_{18}Ar_{13}$	−0.524				$^{33}_{18}Ar_{15}$	−3.340
			5.260			3.108			0.191					−4.910
		37.674			21.876	0.015	0.032	11.609	0.015	0.029			−9.380	0.173	0.296
		19.172	16.245		11.060	7.609		11.778	7.193	4.530			3.193		
									3.240	2.365					
		$^{28}_{17}Cl_{11}$	2.804		$^{29}_{17}Cl_{12}$	2.864		$^{30}_{17}Cl_{13}$	0.715					
			4.620			0.455			−2.573					
		27.930			14.283	0.020	0.003	4.844	0.030	0.042				
		14.830	13.445		7.940	5.739		8.374	5.521					

						10.440	10.840		5.613	4.959		5.701	4.528										
$^{38}_{22}Ti_{16}$	−0.387			$^{39}_{22}Ti_{17}$	−0.427			$^{40}_{22}Ti_{18}$	−2.285			$^{41}_{22}Ti_{19}$	−2.460										
	2.589				0.785				−1.582				−3.000										
10.727	0.020	0.097		2.203	0.015	0.068		−9.064	0.040	0.17		−15.690	0.080	0.323									
8.951	5.845			9.400	4.836	3.209		3.582				4.578											
					3.250	3.293																	
$^{37}_{21}Sc_{16}$	2.976			$^{38}_{21}Sc_{17}$	1.212			$^{39}_{21}Sc_{18}$	0.703														
	0.415				−1.811				−3.847														
3.825	0.020	0.075		−4.659	0.020	0.07		+4.069	0.040	0.13													
6.720	4.957			5.719	3.805			0.736															
$^{36}_{20}Ca_{16}$	−2.560			$^{37}_{20}Ca_{17}$	−3.023																		
	−2.640				−4.689																		
−6.440	0.100	0.289		+3.159	0.175	0.47																	
2.546				3.073																			

图　2-3

																		0.115					
									$^{52}_{28}Ni_{24}$	−2.559		$^{53}_{28}Ni_{25}$	−2.321		$^{54}_{28}Ni_{26}$	−3.860							
										−2.784			−3.770			−5.450							
									−22.676	0.020	0.22	−29.380	0.045	0.48	−39.210	0.10							
									1.464			2.030											
$^{50}_{27}Co_{23}$	−0.544			$^{51}_{27}Co_{24}$	−0.224		$^{52}_{27}Co_{25}$	−1.449															
	−3.000				−4.372			−6.330															
−17.726	0.010	0.096		−27.405	0.020		−34.378	0.020															
3.999	1.921																						
$^{49}_{26}Fe_{23}$	−2.540			$^{50}_{26}Fe_{24}$	−4.150																		
	−4.490				−6.230																		
−24.470	0.075	0.60		−34.470	0.100																		
1.968																							
$^{48}_{25}Mn_{23}$	−2.035																						
	−6.806																						
−29.303	0.030																						

图　2-4

			$^{69}_{36}Kr_{33}$ −1.059 / −0.531			
			−32.60 / 0.010 / 0.30			
			3.780			
			1.180			
	$^{65}_{34}Se_{31}$ −1.103 / −0.769	$^{66}_{34}Se_{32}$ −2.498 / −1.996	$^{67}_{34}Se_{33}$ −1.866 / −4.815			
	−33.346 / 0.010 / 0.21	−41.848 / 0.040	−46.647 / 0.100			

			3.617											
$^{63}_{33}As_{30}$	1.440		$^{64}_{33}As_{31}$	0.334		$^{65}_{33}As_{32}$	0.501							
	−1.141			−2.111			−4.528							
−33.609	0.015	0.29	−39.532	0.015	0.28	−46.640	0.100							
1.192			0.048											
$^{62}_{32}Ge_{30}$	−2.581		$^{63}_{32}Ge_{31}$	−2.445										
	−2.731			−5.390										
−42.338	0.050		−47.155	0.200										
$^{61}_{31}Ga_{30}$	−0.150													
	−5.271													
−47.046	0.100													

图 2-5

差之和.

2. 相邻核之间同位旋相似态的质量关系:

$$M_{z>} - M_{z<} = \Delta E_C + \Delta_{hn}$$

$M_{z>}$、$M_{z<}$ 分别为相邻核同位旋相似态的质量剩余，$Z_>$ 为Z大者，$Z_<$ 为Z小者.

$$\Delta_{hn} = -\Delta_{nh} = -0.782\text{MeV},$$

Δ_{nh} 为中子与质子的质量差.

ΔE_C 为原子核的库仑位移能.

对于 $9 \leqslant A \leqslant 60$

$$\Delta E_C = 1.4408 \cdot (\bar{Z}/A^{1/3}) - 1.0263\text{MeV}.$$

因而,

$$M_{z>} = 1.4408 \cdot (\bar{Z}/A^{1/3}) - 1.8083 + M_{z<}.$$

对于 $44 \leqslant A \leqslant 239$

$$\Delta E_C = 1.412 \cdot (\bar{Z}/A^{1/3}) - 0.861\text{MeV}.$$

因而,

$$M_{z>} = 1.412(\bar{Z}/A^{\frac{1}{3}}) - 1.643 + M_{z<}.$$

3. β^+ 衰变能 Q_β、同位旋相似态能量 E^*、粒子能量及发射分支比

$$Q_\beta = M - M^G_{z<},$$
$$E^* = M_{z<} - M^G_{z<}.$$

$M_{z<}$、$M^G_{z<}$ 分别为 β 衰变子核的同位旋相似态及基态质量.

粒子能量:

$$E_p = (E^* - B_p) \cdot (A - A_p)/A.$$

B_p 为 β^+ 衰变子核中粒子结合能、A 及 A_p 分别为先驱核及所发射粒子的质量数. 乘因子 $(A - A_p)/A$ 是根据动量守恒与能量守恒,扣除了粒子发射中的反冲核动能.

粒子发射分支比 B: 原子核同位旋相似态之间的跃迁为超允许 β^+ 跃迁,对于超允许 β^+ 跃迁，$\log ft$ 在 2.9 至 3.7 之间,我们假定 $\log ft \cong 3.3$ 并借助于 β 衰变 $\log f$ 函数表,从而可得 $B = t_{1/2}/t$，t 为部分半衰期.

4. 原子核双质子放射性的估计

根据苏联科学家 V. I. Gol'danskii 的预言[6]，在远离 β 稳定线的缺中子核区，有可能存在这样的现象：由于质子对能的影响,一些奇异核其单质子结合能为正,而双质子结合能为负,即这些核对单质子来说是稳定的,但对双质子来说是不稳定的,这样,它就有可能发射双质子而不发射单质子,条件是:

$$B_p = B_{even-p} > 0,\ B_{2p} = -Q_{2p} < 0,\ Q_{2p} > 0.$$

$$0 < B_{even-p} < \frac{1}{2} E_{pair},\ E_{pair} = B_{even-p} - B_{odd-p}.$$

$$E_{2p} = Q_{2p} \cdot (A - 2)/A$$

B_{even-p}、B_{odd-p} 分别为偶、奇原子核的质子结合能。

E_{pair} 为质子对能，

E_{2p} 为直接双质子发射能量。

5. β^+ 延迟三质子等奇特衰变模式的估算：

奇异核 β^+ 衰变后，如处于子核中高于三质子结合能的激发态，则发射三质子的可能性是存在的，最近，法国 GANIL 已观察到了 ^{31}Ar 的 β^+ 延迟三质子衰变[7]，本文也给出了这种可能的衰变模式及其候选核。

三、预言计算的结果

见预言的核素图：图(2-1)到图(2-5)。

四、计算与实验结果的比较：见表 1.

表 1　核参数预言值与实验值的比较

核素＼参数	核参数预言值						核参数实验值						
	Q_β	E^*	B	E_p	E_{2p}	E_{3p}	Q_β	E^*	B	E_p	E_{2p}	E_{3p}	文献
^{17}Ne	14.529	11.014	0.895%	9.8			14.565	11.197	0.71%	9.97			[8]
^{21}Mg	13.103	8.9	2.48%	6.161 4.604*			13.093	8.970	2.79%	6.225 4.669*			[9]
^{22}Al	18.372	13.753	2.78%	7.88 7.56*	5.295 3.812*		18.493	14.044	2.9%	8.149 7.839*	5.636 4.139*		[10]
^{24}Si	10.81	5.875	6.08%	3.837			10.802	5.955	~7%	3.913			[11]
^{25}Si	12.742	7.898	11.3%	5.4 4.088*			12.30	7.90	12.51%	5.40 4.091*			[12]
^{26}P	18.314	13.07	1.6%	7.26 6.827*	4.874 3.611		18.311	13.08	~1.9%	7.269 6.827	4.875 3.611		[13]
^{29}S	13.791	8.34	18.3%	5.4 3.682*			13.79	8.38	18.3%	5.437 3.7196*			[14]
^{31}Ar	18.679	12.461	3.0%	11.778	7.262	4.530		12.340			7.580	4.87	[7]
^{33}Ar	11.624	5.57	29.57%	3.193			11.605	5.55	34%	3.17			[8]
^{35}Ca	15.850	9.068	15.4%	8.734	4.080 3.314*		15.621	9.053	20%		4.089 3.287*		[2]
^{36}Ca	10.985	4.2845	28.9%	2.54			10.986	4.258	~20%	2.519			[15]
^{37}Ca	11.639	5.0158	47%	3.073			11.640	5.047	46.74%	3.103			[16]
^{40}Ti	11.463	4.214	17%	3.582			11.737	4.30	16%	3.84			[17]
^{41}Ti	12.953	5.778	32.3%	4.578			12.86	5.939	24.25%	4.734			[16]
^{45}Cr	12.415	4.709	29.2%	1.93*			12.32	4.83	25%	2.10*			[18]
^{49}Fe	13.141	4.91	60%	1.968*			13.02	4.90	~60%	1.96*			[18]
^{53}Ni	13.259	4.519	48%	2.03*			12.96	4.39	~45%	1.90*			[19]
^{57}Zn	14.65	5.414	55.66%	4.59 1.979*			14.54	5.35	~50%	4.57 1.92*			[19]
^{61}Ce	12.989	3.333	67.8%	3.131			13.05	3.25	~80%	3.11			[20]

* 为激发态能量

五、结果与讨论

从预言值与实验值的比较来看，对绝大多数的核来说，质子能量的预言值与实验值在300keV范围内符合得很好，同位旋相似态激发能 E^* 和粒子发射分支比 B 的预言值与实验值也基本一致，某些核的预言值与实验值达到了惊人的一致，这为实验上由探测质子能谱的特征谱线来指定远离 β 稳定线新核素提供了有力的根据。随着原子核越远离 β 稳定线，其超允许 β 跃迁的同位旋相似态能级也越低，这从 $T=-3/2$，$A=4N+1$ 系列核的同位旋相似态随 A、Z 的变化可以清楚看出(图 3)，一般说来，到这些态的 β 衰变能也越大，而衰变几率 $\lambda \propto E_\beta^5$($E_\beta$ 为衰变能)，因而，相应的跃迁分支比也越大，这也由我们的计算和实验基本符合所证实，图 3 也反映了这些同位旋相似态的 β^+ 跃迁分支比分布。值得注意的两个核是 ^{65}Se 与 ^{69}Kr，它们都属于著名的 $T_z=-3/2$，$A=4N+1$ 系列，理论预言也应是 β 延迟质子先驱核，GROSS 理论预言其半衰期约为 10 毫秒[21]。据此，我们算出其超允许 β 跃迁分支比分别约为 21% 和 30%，但从分支比的系统性趋势来看，此值是偏低了，由此可以预期其实际分支比可能比预料的大一倍，或者其半衰期比 GROSS 理论预言的要长一倍，这为实验上搜寻这些核带来较乐观的前景，我们已作好实验上探测这些核的准备[22]。

本预言计算指出，在此质量区内有 ^{46}Mn、^{50}Co 等约 12 个核具有 β 延迟双质子放射

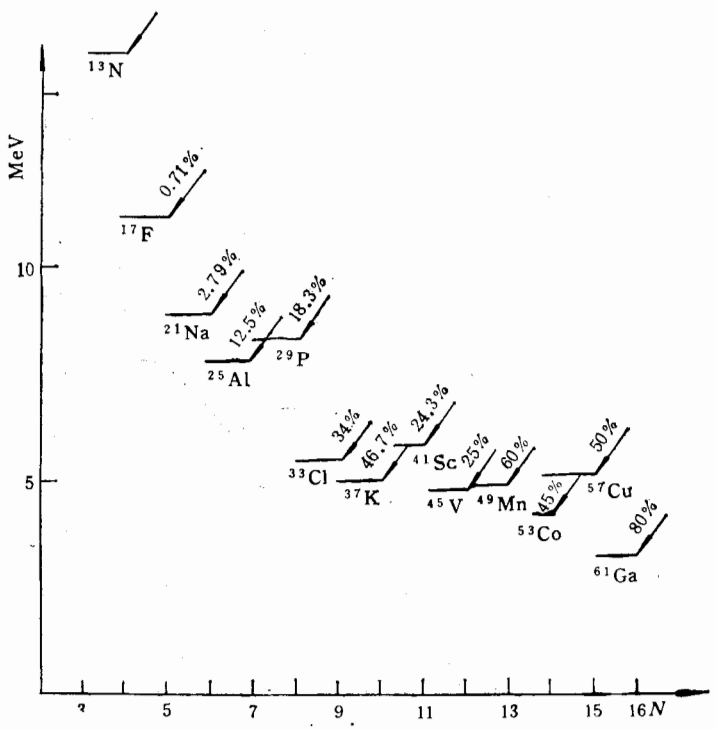


图 3 $T_z=-3/2$ $A=4N+1$ 系列核同位旋相似态能级及跃迁分支比分布

性，其中已有 ^{22}Al、^{26}P、^{35}Ca 及 ^{31}Ar 在实验上被证实．计算还指出有 ^{31}Ar、^{39}Ti 等 7 个核具有 β 延迟三质子放射性． 最近在法国召开的重离子碰撞会议上，D. Bazin 等人报告已探测到了 ^{31}Ar 的 β 延迟三质子衰变[7]．根据 V. I. Gol'danskii 预言提的判断，^{39}Ti、^{31}Ar、^{42}Cr 等约 6 个核可能是基态双质子发射核，但据最近法国 GANIL 的 M. Lewitowicz 等人[17]对 ^{39}Ti 双质子放射性的实验探索，其结果是否定的．此外我们的计算还指出 ^{9}C、^{31}Ar 等 5 个核可能具有 β 延迟 α 放射性，而 ^{23}Si、^{35}Ca 等 7 个核具有 β 延迟质子及 α 粒子放射性．总之，奇异核的多粒子衰变方式是一个非常诱人的问题，它的独特性足以将它与其它原子核区别开来，从而被唯一的认定．本预言计算给实验上搜索这些核提供了明确的目标，实验结果的肯定与否，将为现有核结构理论的拓广提供根据和检验．

参　考　文　献

[1] Joseph Cerny and J. C. Hardy, *Ann Rev. Nucl. Sci.*, **27**(1977), 333—351.

[2] J. Aysto, D. M. Moltz, X. J. Xu et al., *Phys. Rev. Lett.*, **55**(1985), 1384.

[3] G. T. Garvey and I. Kelson, *Phys. Rev. Lett.*, **16**(1966), 197.

[4] J. JANECKE and P. J. MASSON, *ATOMIC DATA AND NUCLEAR DATA TABLES*, **39**(1988), 265—271.

[5] M. S. Antony, J. Britz and A. Pape, *ATOMIC DATA AND NUCLEAR DATA TABLES*, **34**(1986), 279—299.

[6] V. I. Goldanskii, JETP, **12**(1961), 348.

[7] D. Bazin, J. -P. Dufour, A. Fleury et al., Reported on Second 1 N 2 P3-RIKEN Symposium on heavy-ion collisions, April 1990.

[8] J. C. Hardy, J. E. Esterl, R. G. Sextro, J. Cerny, *Phys. Rev.*, **C3**(1971), 700—718.

[9] R. G. Sextro, R. A. Gough, J. Cerny, *Phys. Rev.*, **C8**(1973), 258—268.

[10] M. D. Cable, J. Honkanen et al., *Phys. Rev.*, **C26**(1982), 1778.

[11] J. Aysto, D. M. Moltz et al., *Phys. Lett.*, **82B**(1979), 43.

[12] P. L. Reeder, A. M. Poskanzer et al., *Phys. Rev.*, **147**(1966), 781—788.

[13] J. Honkanen, M. D. Cable et al., Phys. Lett., **133B**(1983), 146.

[14] D. J. Vieira, R. A. Gough, J. Cerny, *Phys. Rev.*, **C19**(1979), 177.

[15] J. Aysto, M. D. Cable et al., *Phys. Rev.*, **C23**(1981), 879.

[16] R. G. Sextro, R. A. Gough, J. Cerny, *Nucl. Phys.*, **A234**(1974), 130—156.

[17] M. Lewitowicz, C. Detraz et al., GANIL Report. P (1989), p. 1—9.

[18] K. W. Allen, *Phys. Lett.*, **49B**(1974), 341.

[19] D. J. Vieira, D. F. Sherman et al., *Phys. Lett.*, **B60**(1976), 261—264.

[20] M. A. C. Hotchkis, J. E. Reiff et al., *Phys. Rev.*, **C35**(1987), 315.

[21] K. Takahashi, M. Yamada and T. Kondoh. *ATOMIC DATA AND NUCLEAR DATA TABLES*, **12**(1973), 101—142.

[22] 徐晓冀，郭俊盛等，第七次全国核物理大会论文汇编(三)，1988 年 10 月．

The Prediction of Proton Decay for Neutron Deficient Nuclei with $A<70$

XU XIAOJI OU XIULAN

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou* 780000)

CHENG YUAN

(*Qing Hua University, Beijing* 100084)

ABSTRACT

The possibility of proton decay for neutron deficient nuclei far from β stability is predicted in the mass region with $A<70$. The prediction calculation was based on kelson-Garvey mass relation and the mass formula of isospin analog state. The predicted nuclear chart was given. The comparisons between the predictions and the experimental results have been made. The possibility of two proton and three proton decay was also indicated.