

文章编号: 1007-4627(2006)04-0431-03

质子放射性寿命的新规律*

许 昌², 任中洲^{1,2}

(1 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000;

2 南京大学物理系, 江苏 南京 210008)

摘 要: 对球形核和变形核质子放射性的半衰期进行了系统的分析和研究, 提出了新的计算质子放射性寿命的解析公式。通过对公式计算寿命和实验测量值的系统比较, 发现两者之间符合得非常好, 说明新公式十分准确并具有良好的预言能力。

关键词: 质子放射性; 半衰期; 新公式

中图分类号: O571.3 **文献标识码:** A

质子放射性是不稳定原子核的一种重要衰变模式^[1-6]。研究质子放射性可以获得质子滴线外原子核的核结构信息^[1-6]。这对于现有的建立在稳定核基础上的理论模型的进一步发展有着非常重要的作用。由于质子发射核的最后一个质子是准束缚的, 所以这方面的研究还对发展多体系统的准束缚量子理论有益。目前对质子放射性的计算通常是复杂的量子力学计算, 这涉及到大型的数值计算程序。为了对质子放射性的实验进行快速和准确的预言, 我们基于 Gamov 的量子隧穿理论, 推导出一个新的关于质子发射寿命的解析公式, 这对于将来的质子放射性方面的实验非常有用。

不稳定核的质子发射实质上是三维的量子隧穿过程, 这一过程和 α 衰变类似^[7,8], 但质子放射性寿命的计算没有预形成几率这一因素的影响, 其大小主要取决于质子衰变能 Q_p 和出射质子的轨道角动量 L 。对于球形质子发射核, 出射质子和子核之间的总的作用势 V_{total} 包括吸引的核势、排斥的库仑势和离心势, 假定 V_{total} 仅为最后一个质子径向坐标 r 的函数, 通常存在着标记质子进入和离开子核势垒的两个经典转折点 r_2 和 r_3 , 其数值由方程 $V_{\text{total}} = Q_p$ 计算。根据 Gamov 的量子隧穿理论, 质子发射的衰变宽度一般可以写成^[9,10]

$$\Gamma = N \exp\left[-2 \int_{r_2}^{r_3} dr K(r)\right], \quad (1)$$

这里 N 是一个常数, 指数项即 Gamov 因子, 其中 $K(r)$ 的表达式为^[9]

$$K(r) = \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2} [Q - V_{\text{total}}(r)] - \frac{L(L+1)}{r^2}}, \quad (2)$$

最后, 利用衰变宽度 Γ , 寿命 $T_{1/2}$ 可以表示为^[9]

$$T_{1/2} = \hbar \ln \frac{2}{\Gamma}. \quad (3)$$

仿照 α 衰变中的近似, 假定在 $r \geq r_2$ 的区域, 长程的库仑势 ($V_c = Ze^2/r$) 和离心势占主要作用, 衰变宽度中的 Gamov 因子可以近似写成 $G = \exp[-(c'_1 Z + c'_2) Q^{-1/2} - c'_3 L(L+1) - c'_4]$, 因此球形核的质子放射性寿命可以表示为

$$\log_{10}(T_{1/2}) = (c_1 Z + c_2) Q^{-1/2} + c_3 L(L+1) + c_4, \quad (4)$$

这里 c_1, c_2, c_3 和 c_4 均为参数。方程(4)类似于 α 衰变中 Geiger-Nuttall 规律和 Viola-Seaborg 公式, 该方程中包含了离心势的影响, 这对于质子放射性寿命的计算是非常重要的。图 1 给出了 $ZQ^{-1/2}$ 项和公式其它项之间的线性关系。

公式(4)中 4 个参数数值由现有的 28 个球形发射核的实验寿命确定。通过最小二乘法拟合得到:

* 收稿日期: 2006-05-29

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10535010); 教育部博士点基金资助项目(20010284036); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000077400)

作者简介: 许 昌(1981-), 男(汉族), 江苏大丰人, 博士研究生, 从事原子核物理理论研究; E-mail: changxu@htomail.com

$c_1 = 0.3301$; $c_2 = 5.1656$; $c_3 = 0.1275$; $c_4 = -30.3023$ 。对于 28 个球形发射核, 公式计算结果

验点基本重合在一起, 这表明新公式对于球形核质子放射性寿命的计算是非常准确的。

新公式是基于球形核的假定并通过拟合球形核实验数据得到的。对于变形核, 公式也应该是有效的。在对变形核质子放射性的分析中, 我们发现通过引入一个整数因子 1, 公式给出的变形核质子发射的理论寿命也与实验符合得很好, 因此, 变形核的计算公式写成:

$$\log_{10}(T_{1/2}) = (c_1 Z + c_2) Q^{-1/2} + c_3 L(L+1) + c_4 + 1, \quad (5)$$

这里 4 个参数的数值和球形核的参数相同。利用方程(5), 对现有的 12 个变形核质子放射性计算得出的平均偏差为 0.304, 说明公式和实验寿命在 2 倍以内符合。图 3 给出了变形核的实验和理论寿命的比较。从图 3 中可以看出, 公式和实验之间最大的偏差也仅为 5 倍(^{121}Pr), 说明新公式对变形核也十分有效, 其中所含的深层次的物理因素值得进一步探讨。

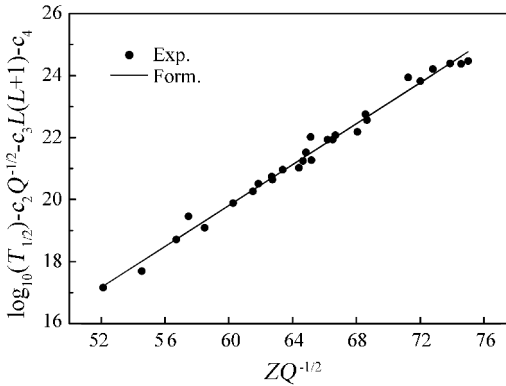


图 1 质子放射性中 $ZQ^{-1/2}$ 和 $\log_{10}(T_{1/2}) - c_2 Q^{-1/2} - c_3 L(L+1) - c_4$ 之间存在的线性关系

和实验测量值之间的均方根偏差和平均偏差分别为

$$S_1 = \frac{\sum_{i=1}^{i=28} |\log_{10} T_{1/2}^{\text{Exp.}}(i) - \log_{10} T_{1/2}^{\text{Form.}}(i)|}{28} = 0.159,$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=28} [\log_{10} T_{1/2}^{\text{Exp.}}(i) - \log_{10} T_{1/2}^{\text{Form.}}(i)]^2}{28}} = 0.214.$$

平均偏差 S_2 为 0.159 说明实验和公式之间的符合程度在 1.5 倍以内。图 2 分别给出了 28 个球形发射核的实验寿命和公式计算寿命, 其中直线连接的两个点分别表示同一个母核基态和激发态的质子发

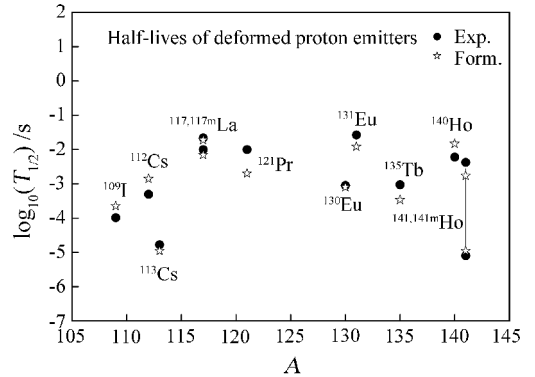


图 3 变形核质子放射性的实验寿命 ($T_{1/2}^{\text{Exp.}}$) 和公式计算寿命 ($T_{1/2}^{\text{Form.}}$)

总之, 本文系统研究了球形核和变形核质子放射性的半衰期, 提出了一个新的计算质子放射性寿命的解析公式。通过对公式计算得到的寿命和实验测量值的系统比较, 发现两者之间符合得非常好, 对于球形核, 半衰期的实验值和公式计算结果的平均偏差在 2 倍以内; 对于变形核, 半衰期的实验值和公式计算结果在 5 倍以内符合。新公式可以为将来质子放射性方面的实验提供准确和快速的预言。

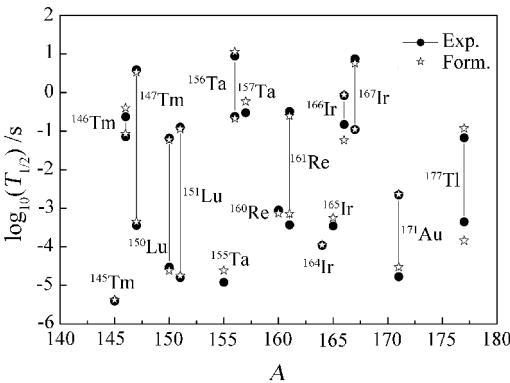


图 2 球形核质子放射性的实验寿命 ($T_{1/2}^{\text{Exp.}}$) 和公式计算寿命 ($T_{1/2}^{\text{Form.}}$)

射。从图 2 可以看出, 虽然质子发射的寿命变化范围非常大 ($10 \mu\text{s} - 100 \text{s}$), 但绝大部分理论值和实

参 考 文 献:

- [1] Hofmann S, Reisdorf W, Münzenberg G, *et al.* Z Phys, 1982, **A305**: 111.
- [2] Woods P J, Davids C N. Annu Rev Nucl Part Sci, 1997, **47**: 541.
- [3] Sonzogni A A. Nuclear Data Sheets, 2002, **95**: 1.
- [4] Gurvitz S A, Kalbermann G. Phys Rev Lett, 1987, **59**: 262.
- [5] Buck B, Merchant A C, Perez S M. Phys Rev, 1992, **C45**: 1 688.
- [6] Åberg S, Semmes P B, Nazarewicz W. Phys Rev, 1997, **C56**: 1 762.
- [7] Viola V E, Seaborg G T. J Inorg Nucl Chem, 1966, **28**: 741.
- [8] Gallagher C J, Rasmussen J O. J Inorg Nucl Chem, 1957, **3**: 333.
- [9] Ren Zhongzhou, Xu Chang, Wang Zaijun. Phys Rev, 2004, **C70**: 034 304.
- [10] Ren Zhongzhou, Xu Chang. Nucl Phys Rev, 2005, **22**: 344.

New Formula for Proton Radioactivity Half-lives^{*}

XU Chang², REN Zhong-zhou^{1, 2}

(1 *Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China;*

2 *Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008, China*)

Abstract: Systematic calculations on proton radioactivity half-lives of both spherical and deformed nuclei are carried out. A new formula with only four parameters is proposed for proton radioactivity half-lives. The half-lives calculated by using the new formula are in good agreement with the experimental ones. The new formula is simple but accurate, which is very useful for further experiments.

Key words: proton radioactivity; half-live; new formula

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (10535010); Doctoral Fund of Education Ministry of China (20010284036); State Key Development Program of Basic Research of China(G2000077400)