

文章编号: 1007-4627(2010)02-0150-05

Pb 附近奇 A 核同质异能态半衰期的简单规律^{*}

钱以斌¹, 任中洲^{1, 2, 3}, 倪冬冬¹

(1 南京大学物理学系, 江苏 南京 210008;

2 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;

3 中国科学院卡弗里理论物理研究所, 北京 100190)

摘要: 对 Pb 附近 $Z=78-82$ 奇 A 核同质异能态 IT 衰变(或称为同质异能跃迁包括 γ 跃迁和内转换)的实验数据进行了系统的分析, 发现了奇 A 核同质异能态 IT 衰变半衰期的一个简单的规律: 同位素链上角动量和宇称相同的同质异能态, 半衰期的对数随质量数之间符合二次曲线关系。这说明了 IT 衰变的半衰期和质量数 A 之间有着一个指数关系。对这一段同质异能态衰变中跃迁多极性的分析可让人们有关物理性质有更清楚的认识。对发现的简单规律也给出了可能的物理解释。

关键词: 奇 A 核; IT 衰变半衰期; 简单规律

中图分类号: O571.3 **文献标识码:** A

1 引言

α 衰变和 β 衰变所形成的子核除了稳定的基态, 往往还有大部分处于激发态。核反应所形成的原子核情况也是如此。这些激发态是不稳定的, 它们要直接退激或者级联退激到基态。通常, 将原子核通过发射 γ 光子从激发态跃迁到较低能态的过程, 称为 γ 跃迁或称为 γ 衰变。除发射 γ 光子外, 原子核还可以通过发射电子来完成从激发态到较低的能态或基态的跃迁。研究表明, 这种电子通常不是来自原子核, 而是来自原子的电子壳层, 即跃迁时可以把核的激发能直接交给原子的壳层电子而发射出来。这种现象称为内转换。有些核的激发态寿命比较长, 甚至比对应的基态寿命还要长, 我们就称这些核的激发态为同质异能态。

同质异能态衰变主要通过 γ 跃迁和内转换(统称为同质异能跃迁或 IT 衰变, 本文中用 IT 衰变), 也有一部分是通过 β 衰变, 还有少量的是通过 α 衰变。同质异能态寿命较长而且一般内转换系数较大, 使得人们可以较详细地研究它们许多性质以及推断 γ 跃迁的多极性, 所以对同质异能态的研究有很重要的意义, 同时对同质异能态 IT 衰变的研究

也可以给人们提供探究原子核结构的机会。

人们对 α , β 衰变已经有了大量的研究, 并且也有很简单的公式计算半衰期^[1-3], 而对于 IT 衰变半衰期的研究还比较稀少。对于 γ 跃迁和内转换, 文献[4]论述了 Weisskopf 等人对 γ 跃迁的半衰期和跃迁能量及跃迁多级性之间的关系, 用其给出的模拟公式, 再利用查得的内转换系数^[5-8]可以得到 IT 衰变半衰期。本文是通过系统分析实验数据得到 IT 衰变半衰期的简单规律, 可以方便地得到 IT 衰变半衰期。

Pb 附近 $Z=78-82$ 奇 A 核同质异能态 IT 衰变已经积累了足够多的实验数据, 这给人们研究同质异能态 IT 衰变半衰期提供了一个很好的机会。我们发现同自旋和宇称的同位素链上奇 A 核 IT 衰变的半衰期和质量数之间有着开口向下的抛物线关系。根据跃迁的多极性, 我们对发现规律的物理性质有了更清楚认识。

本文主要分为以下几部分: 第 2 节中提出了奇 A 核同质异能态 IT 衰变半衰期对数(以 10 为底)和质量数的二次曲线关系, 而后通过分析 IT 衰变中跃迁的多极性对其中的物理性质有了更清楚的认

* 收稿日期: 2009-07-16; 修改日期: 2009-10-09

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10535010, 10675090, 10775068, 10735010); 教育部博士点基金资助项目(20010284036); 国家重点研究发展规划资助项目(G2000077400)

作者简介: 钱以斌(1989-), 男(汉族), 安徽天长人, 硕士研究生, 从事原子核物理理论研究;

E-mail: qybl05@software.nju.edu.cn

识;第 3 节对发现的规律给出可能的物理解释;最后是小结。

2 Pb 附近奇 A 核 IT 衰变半衰期和质量数的关系

同质异能态的半衰期是可观测的,它们分布在 10^{-18} s 到 10^{16} a 这样一个很大的范围内,直接从半衰期出发去探究它的规律是十分困难的,考虑到半衰期的对数是在一个较窄的范围内,我们去分析 IT 衰变半衰期对数和质量数的关系。值得指出的是,我们的研究对象是同位素链上的同质异能态,所以 IT 衰变的半衰期对数和质量数的关系等同于和中子数的关系。

在 Pb 附近的同位素链上奇 A 核同质异能态的角动量和宇称一般都相同,而且其中较多是通过 IT 衰变,给分析这些数据提供了一个很好的机会。本文中使用的半衰期实验数据都是来自于文献[5]。图 1 给出了 Tl 和 Pb 奇 A 核同质异能态 IT 衰变半衰期对数(以 10 为底)随质量数变化的图像,中间缺的点是因为那些核没有通过 IT 衰变,如 ^{189}Tl 和 ^{191}Tl 都是通过 β^+ 衰变。

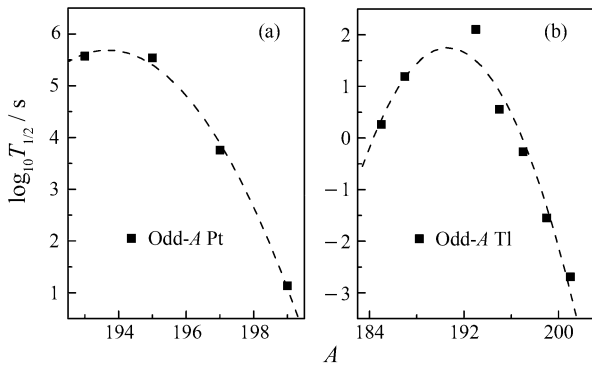


图 1 Pt 和 Tl 同位素链上奇 A 核 IT 衰变半衰期对数(以 10 为底)随质量数变化图像

(a)黑框是实验数据,虚线是理论曲线;(b) ^{193}Tl 误差偏大。

Pt, Au, Tl 和 Pb 同位素链上奇 A 核半衰期对数和质量数间的抛物线关系可写成:

$$\log_{10} T_{1/2} = a + bA + cA^2, \quad (1)$$

其中 a , b 和 c 是由实验数据确定的 3 个参数, A 是质量数。

标准偏差由下式计算得到:

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

其中 K 是同位素链上的同质异能态实验数据的数目。

通过最小二乘法拟合得到参数 a , b 和 c , 并列在表 1 中。表中第 1 列是质子数,而后是对应的参数和标准差,计算结果列在表 2 中,和实验数据也进行了比较。

表 1 Pt, Au, Tl 和 Pb 对应参数 a , b , c 的值和偏差以及标准偏差 σ

Z	a	b	c	σ
78	-6070.4537	62.74757	-0.162	0.167
79	-7564.28533	77.91517	-0.2006	0.567
81	-1597.37601	16.77734	-0.04401	0.196
82	-4874.40978	49.09295	-0.12354	0.241

接着分析 IT 衰变中跃迁的多极性(由 γ 跃迁中 γ 光子的角动量 L 和 γ 辐射的宇称决定)。由文献[4]可知内转换与 γ 光子的角动量 L 也是有关的。将所得结果列在表 2 中,其中也包括由式(1)计算的结果。在表 2 中,最后 1 列是 IT 衰变所占该核总衰变的比例,没有注明的是 %IT=100 或 ≈ 100 , 以上的实验数据来自于文献[5—8]。

由表 2 可以清楚看出,奇 A 核角动量和宇称都相同的同位素链上的同质异能态,对应跃迁的多极性基本相同,此时它们的半衰期和质量数之间有着抛物线关系。分析 Hg 和 Po 同质异能态实验数据时,发现也有类似的规律,但实验数据不多于 3 个,所以没有给出,但第 3 部分中分析半衰期对数和跃迁能关系时用到了 Hg。由 $\log_{10}(T_{1/2}^{\text{Cal},m}/T_{1/2}^{\text{Exp},m})$ 可以比较计算结果和实验数据,如图 2 所示。Tl 和 Pt 奇 A 核同位素链上同质异能态分别是 E3 和 M4 跃迁,其中 ^{199}Pt 是 E3 跃迁,但根据 Weisskopf 的估算,对于 ^{199}Pt E3 和 M4 跃迁的差别不大,所得半衰期在同一量级,实验数据可用。它们的半衰期对数随质量数很好地满足式(1);而 Pb 每个核主要是 M4 跃迁^[6],但不完全通过 M4 跃迁,所以误差稍大,但其半衰期对数随 A 变化还是趋向于二次曲线,其中 ^{205}Pb 通过 E2, M3 和 M4 跃迁,由 Weisskopf 的估算, E2, M3 跃迁的概率远小于 M4 跃迁概率,同时跃迁极性为 M4 时半衰期最接近实验数据, ^{205}Pb 仍主要通过 M4 跃迁; Au 情况类似。

表 2 Pt, Au, Tl 和 Pb 奇 A 核 IT 衰变中跃迁的多极性, 始末态的角动量和宇称, 还有跃迁能 E_γ (以上数据主要来自文献[5]), 以及同质异能态半衰期(实验和计算)和 IT 衰变所占总衰变的比例

Z	A	始态 J^π/h	终态 J^π/h	多极性	跃迁能 E_γ/KeV	$T_{1/2}^{\text{Exp.}m}$	$T_{1/2}^{\text{Cal.}m}$	$T_{1/2}^{\text{Cal.}m}/T_{1/2}^{\text{Exp.}m}$	%IT
78	193	(13/2) ⁺	(5/2) ⁻	M4	135.5	4.33 d	3.57 d	0.82	
78	195	(13/2) ⁺	(5/2) ⁻	M4	129.5	4.02 d	2.17 d	0.54	
78	197	(13/2) ⁺	(5/2) ⁻	M4	346.5	95.41 min	95.82 min	1.00	
78	199	(13/2) ⁺	(7/2) ⁻	E3	391.93	13.6 s	8.9 s	0.65	
79	191	(11/2) ⁻	(5/2) ⁺	E3	13.7	920 ms	265 ms	0.28	
79	193	(11/2) ⁻	(5/2) ⁺	E3	32.21	3.9 s	15.6 s	4.00	
		(11/2) ⁻	(3/2) ⁺	M4	289.8				
79	195	(11/2) ⁻	(5/2) ⁺	E3	56.80	30.5 s	22.8 s	0.75	
		(11/2) ⁻	(3/2) ⁺	M4	318.60				
79	197	(11/2) ⁻	(5/2) ⁺	E3	130.2	7.73 s	0.83 s	0.11	
		(11/2) ⁻	(3/2) ⁺	M4	409.15				
79	199	(11/2) ⁻	(7/2) ⁺	M2, E3	55.150	440 μs	746 μs	1.70	
81	185	(9/2) ⁻	(3/2) ⁺	E3	168.8	1.83 s	1.54 s	0.84	
81	187	(9/2) ⁻	(3/2) ⁺	E3	35	15.60 s	10.02 s	0.64	%IT<99.9
81	193	(9/2) ⁻	(3/2) ⁺	E3	<13	2.11 min	21 s	0.17	%IT≤75
81	195	(9/2) ⁻	(3/2) ⁺	E3	99.0	3.6 s	5.3 s	1.47	
81	197	(9/2) ⁻	(3/2) ⁺	E3	222.45	540 ms	597 ms	1.11	
81	199	(9/2) ⁻	(3/2) ⁺	E3	382.8	28.4 ms	29.8 ms	1.05	
		(9/2) ⁻	(5/2) ⁺	M2	29				
81	201	(9/2) ⁻	(3/2) ⁺	E3	588.0	2.035 ms	0.663 ms	0.33	
82	197	(13/2) ⁺	(5/2) ⁻	M4	234.4	43 min	4.6 min		%IT=19
82	199	(13/2) ⁺	(5/2) ⁻	M4	424.1	12.2 min	10.0 min	0.82	
82	201	(13/2) ⁺	(5/2) ⁻	M4	629.1	61 s	136 s	2.23	
82	203	(13/2) ⁺	(5/2) ⁻	M4	825.3	6.3 s	3.2 s	0.51	
		(13/2) ⁺	(7/2) ⁻	E3	5.3				
82	205	(13/2) ⁺	(9/2) ⁻	M2	26.2	5.54 ms	7.52 ms	1.36	
		(13/2) ⁺	(7/2) ⁻	E3	310.3				
		(13/2) ⁺	(5/2) ⁻	M4	1013.7				

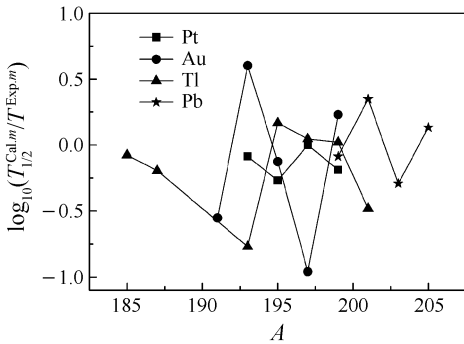


图 2 公式计算半衰期和实验数据的比值对数(以 10 为底)

同时, 由表 2 可发现奇 A 核角动量和宇称都相同的同位素链上的同质异能态 IT 衰变的跃迁能在几十到几百 keV, 最大的是 ²⁰⁵Pb M4 跃迁能 1013.7 keV, 同时对其它一些同质异能态的实验数据分析得到最大跃迁能也在 1000 keV 左右, 所以 Pb 附近

Z=78—84 的奇 A 核同质异能态 IT 衰变的跃迁能都在几十到几百 keV。对更高或更低能量的 IT 衰变需要进一步的去研究。

3 跃迁能的讨论和可能的物理解释

对于 IT 衰变, 不论是 γ 跃迁还是内转换都会与跃迁能有关, 我们分析了这些奇 A 核同质异能态 IT 衰变跃迁能的实验数据。由图 3(a)可以清楚地看出, 在 Tl 奇 A 核同位素链上跃迁能随质量数呈现二次曲线关系^[9-11]:

$$E_\gamma = m + nA + pA^2, \quad (3)$$

其中 m, n, p 是参数。

由式(1)和(3)可以推测 IT 衰变半衰期对数和跃迁能之间有联系。

从图 3(b)和图 4 中可以清楚看到半衰期的对数和跃迁能之间存在线性关系：

$$\log_{10} T_{1/2} = d_1 + d_2 E_\gamma, \quad (4)$$

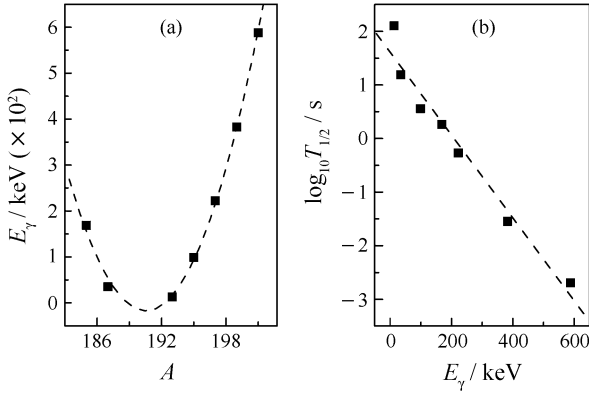


图 3 (a)是 Tl 奇 A 核同质异能态 IT 衰变跃迁能随质量数变化图像, (b)是其半衰期对数和跃迁能之间的图像, 其中最左边的点对应¹⁹³Tl, 实验上没有给出一个准确的跃迁能, 只给出了上限, 同时由于该核的衰变并不完全是 IT 衰变, 所以偏差稍大

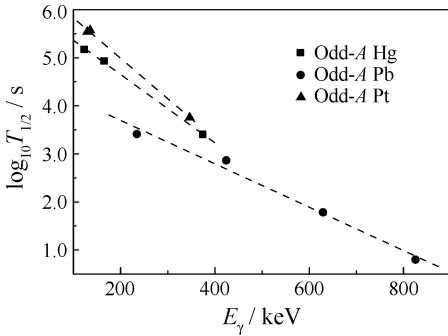


图 4 Pt, Hg, Pb IT 衰变半衰期对数和跃迁能的关系(点为实验数据, 虚线是近似直线)

本文中的研究对象是奇 A 核, 由文献[4]可以根据单粒子模型得到 IT 衰变的半衰期：

$$T_{1/2}^{-1} \propto (1 + \alpha) E_\gamma^{2L+1}, \quad (5)$$

其中 α 是总内转换系数, 是各电子层内转换系数之和; 根据文献[4]中的近似计算, 内转换系数是 E_γ 半整数的幂级数; L 是 γ 辐射的角动量。以 K 壳层为例：

$$\alpha_K(EL) \propto \left(\frac{2m_e c^2}{E_\gamma} \right)^{L+2+1/2}, \quad (6)$$

$$\alpha_K(ML) \propto \left(\frac{2m_e c^2}{E_\gamma} \right)^{L+1+1/2}, \quad (7)$$

其中 $(2m_e c^2/E_\gamma)^{1/2}$ 是公共项可提出, 这时总内转系数和跃迁能之间的关系可写为

$$\alpha \approx e_1 E_\gamma^{-L_1} + e_2 E_\gamma^{-L_2} + \dots, \quad (8)$$

其中, L_1, L_2, \dots 是整数, 跟 L 有关, e_1, e_2, \dots 是系数, 跟 Z, L, E_γ 有关, 则式(5)可近似为

$$T_{1/2}^{-1} \propto E_\gamma^{2L+1} + e_1 E_\gamma^{2L+1-L_1} + e_2 E_\gamma^{2L+1-L_2} + \dots, \quad (9)$$

另外由式(4)可得：

$$T_{1/2}^{-1} = 10^{-d_1} e^{-2.303d_2 E_\gamma}, \quad (10)$$

做级数展开：

$$T_{1/2}^{-1} = 10^{-d_1} \left[1 + (-2.303d_2 E_\gamma) + \frac{(-2.303d_2 E_\gamma)^2}{2!} \dots + \frac{(-2.303d_2 E_\gamma)^n}{n!} + \dots \right]. \quad (11)$$

对于 Tl 奇 A 核同位素链, $d_2 = -0.0077$, E_γ 一般是几十 keV 到几百 keV, 所以在式(11)中, 级数从 $(-2.303d_2 E_\gamma)^9/9!$ 开始截断, 由表 2, L 一般取 3 和 4, 式(9)和式(11)形式上是一致的, 本文得到的简单公式是符合由单粒子模型给出的近似的理论推导的。

4 小结

主要分析了 Pb 附近 $Z=78-82$ 的奇 A 核同质异能态 IT 衰变的实验数据, 发现同位素链上的 IT 衰变半衰期对数和质量数间有开口向下的抛物线关系, 这可以简单方便地得到这些同位素链上 IT 衰变的半衰期; 通过对 IT 衰变中跃迁的多极性的分析, 对其中的物理性质有了更清楚的认识。奇 A 核角动量和宇称都相同的同位素链上的同质异能态, 对应跃迁的多极性基本相同, 此时它们半衰期和质量数之间有着抛物线关系。同时 IT 衰变半衰期的对数随跃迁能也近似于线性关系, 接着对发现的简单规律进行了解释和讨论。其它范围的同质异能态 IT 衰变半衰期是否适用上述简单规律需进一步研究。

参考文献 (References)

[1] Zhang Xiaoping, Ren Zhongzhou. Phys Rev, 2006, **C73**:

- 014305.
- [2] Ni Dongdong, Ren Zhongzhou, Dong Tiekuan. *Phys Rev*, 2008, **C78**: 044310.
- [3] Xu Chang, Ren Zhongzhou. *Nuclear Physics Review*, 2006, **23**(4): 431 (in Chinese).
(许昌, 任中洲. *原子核物理评论*, 2006, **23**(4): 431.)
- [4] Lu Xiting. *Nuclear Physics*. Beijing: Atomic Energy Press, 2000, 165—202(in Chinese).
(卢希庭. *原子核物理*. 北京: 原子能出版社, 2000, 165—202.)
- [5] Audi G, Bersillon O, Blachot J. *Nucl Phys*, 2003, **A729**: 3.
- [6] Jung B, Andersson G, Stenstrom T. *Nucl Phys*, 1962, **A36**: 31.
- [7] Doebler R E, MacHarris Wm C, Gruhn C R. *Nucl Phys*, 1968, **A120**: 489.
- [8] Linden C G, Bergstrom I. *Z Phys*, 1976, **A277**: 273.
- [9] Kim Doohan, Ha Eunja, Cha Dongwoo. *Nucl Phys*, 2008, **A799**: 46.
- [10] Fan Zheyong, Ren Zhongzhou, Xu Chang. *Chin Phys Lett*, 2007, **24**(9): 2555.
- [11] James J C. *Nucl Instr and Meth*, 2007, **B261**: 960.

Simple Formula for Isomer Half-lives around Pb^{*}

QIAN Yi-bin^{1, 1)}, REN Zhong-zhou^{1, 2, 3}, NI Dong-dong¹

(1 *Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008, China*;

2 *Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, Lanzhou 730000, China*;

3 *Kavli Institute for Theoretical Physics China at Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: We have investigated and analyzed the experimental data of the odd A nuclear IT (isomeric transition) decay around Pb. We find a simple law for the IT decay half-lives of the odd A nuclear isomer; there is a parabolic law between the logarithm of the half-lives of the isomer with the same angular momentum and parity along the isotopic chain. This shows there is an exponential law between the half-lives of IT decay and the mass number A . The analysis of the multipolarity of the IT decay could make us have a clear recognition for the physical properties. We have also discussed the possible physics behind this simple law.

Key words: odd A nucleus; IT decay half-life; simple law

* **Received date:** 16 Jul. 2009; **Revised date:** 9 Oct. 2009

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10535010, 10675090, 10775068, 10735010); Doctoral Fund of Education Ministry of China(20010284036); Major State Basic Research Development Program of China(G2000077400)

1) E-mail: qyb105@software.nju.edu.cn