

文章编号: 1007-4627(2010)03-0267-07

核外环境对衰变率的影响*

周书华

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要:核衰变速率是否受核外环境影响,一直是核物理研究的热点问题。这一问题不仅对核物理基础研究很重要,而且与天体物理、地质年代学、凝聚态物理和核废物处理等都有重要关系。旨在对这方面研究工作的进展做一介绍。

关键词:衰变率;环境效应;原子核放射性

中图分类号: O571.32⁺² **文献标识码:** A

1 引言

在普通的教科书中放射性原子核的衰变率是用“衰变常数”来描述的。但是力图验证衰变常数是否真的不会变化,可否通过核外环境(如物理或化学条件)的作用使原子核的衰变率发生变化则是自从放射性现象发现一百多年以来,科学家们不断研究的课题。这方面的研究工作可分为 3 个阶段:1947 年以前的初期研究工作、1947 年到 20 世纪 90 年代主要对电子俘获及内转换过程的研究和 20 世纪 90 年代以来的新的研究进展。

1947 年以前的实验工作没有给出证据说明放射性活度会受环境影响。1947 年 Segree^[1] 和 Daudle^[2] 提出外界环境引起原子核周围电子密度的变化会对电子俘获过程或内转换过程的速率产生可观测到的影响。随后有一批实验得到肯定的结果,所观测到的衰变率的变化在 0.1% 的数量级。20 世纪 70 年代之前,关于这方面的实验与理论研究工作可参阅评论性文献[3—8]及这些文献所引的文献。

此后,由于所观测到的衰变率的变化很小,又因实验技术的限制,测量精度较差,研究工作没什么进展。直到近十几年来,由于原子核衰变率对于天体物理、放射性废物处理、辐射年代学及固体物理等领域的研究工作的重要性被人们所注意,加之实验技术的改进,试图用物理与化学的手段改变原子核衰变率的研究工作又兴盛起来,在理论上和实验上均取得值得关注的进展。

本文将对核外环境对原子核衰变率影响的研究情况做一介绍,侧重于近期的研究进展。

2 早期的研究情况

放射性现象发现不久,Bequerel 就进行了一项实验^[9],将铀冷却到 $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$,并没有观察到铀的衰变率有所变化。此后,出现了一大批检验原子核放射性是否受环境影响的实验研究工作。其中包括将放射性物质放到温度降低到 $-255\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和升高到 $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境中、放到强磁场或强电场中、放到不同的海拔高度上、放到 2000 atm 的环境中、将放射性物质加速到 970.000 g、将其高速旋转,以及用 X 射线、 β 射线及 γ 射线辐照等。例如, Curie 和 Kammerlingh-Onnes^[10] 将镭制品放在液氢的沸点温度下,所观测到的镭的活度变化不到 0.05%,小于他们实验的探测极限。Rutherford 和 Petavel^[11] 将镭样品放入装有无烟火药的钢壳中,预计该装置爆炸时温度达到 $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$,压力达到 1200 atm,却没有观察到衰变率的变化。有些实验偶尔测到的半衰期变化都可解释为测量过程中辐射源位置的变化或放射性衰变链中挥发性成员的损失等原因。

Segree^[1] 和 Daudle^[2] 于 1947 年分别提出,原子核电子俘获过程的衰变常数正比于核附近电子波函数模的平方 $|\psi|^2$ 。若像 ${}^7\text{Be}$ 这样的轻元素处于不同的化合物中, $|\psi|^2$ 的大小可有明显不同,因而在不同化合物中 ${}^7\text{Be}$ 的半衰期会发生相应的改变。

* 收稿日期: 2009-12-16

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10305020)

作者简介: 周书华(1941—),男(汉族),浙江镇海人,研究员,从事实验核物理研究; E-mail: shzhou@ciae.ac.cn

Daudle 还指出, 对于内转换过程也会受到类似的影响, 从而同质异能态的衰变率会改变。这一理论的提出激发了新的实验研究热潮。Segre 等^[12] 和 Leininger 等^[13] 首先报道了衰变率变化的肯定结果。截至 1970 年发表的有关 ^7Be 的实验结果列于表 1。

表 1 早期测量的 ^7Be 在不同化合物中衰变率的变化

对照化合物	文献	衰变率的变化 ($\times 10^{-3}\lambda$)
$\lambda(\text{Be}) - \lambda(\text{BeO})$	[12]	0.15 ± 0.09
	[14]	0.131 ± 0.05
$\lambda(\text{BeO}) - \lambda(\text{BeF}_2)$	[13]	0.69 ± 0.03
	[14]	0.609 ± 0.055
	[15]	0.130 ± 0.058
$\lambda(\text{Be}) - \lambda(\text{BeF}_2)$	[14]	0.741 ± 0.047
	[16]	1.2 ± 0.1
$\lambda(\text{BeS}) - \lambda(\text{Be})$	[17]	0.53 ± 0.06
$\lambda(\text{BeO}) - \lambda(\text{BeBr}_2)$	[15]	1.472 ± 0.063
$\lambda(\text{BeO}) - \lambda(\text{Be}(\text{C}_5\text{H}_5)_2)$	[15]	0.795 ± 0.074
$\lambda(\text{BeO} + (\text{OH}_2)_4) - \lambda(\text{BeO})$	[15]	0.0374 ± 0.077
$\lambda(\text{Be}_4\text{O}(\text{CH}_3\text{COO})_6) - \lambda(\text{Be}(\text{C}_5\text{H}_5)_2)$	[15]	0.724 ± 0.057
$\lambda(\text{Be} + (\text{OH}_2)_4) - \lambda(\text{Be}(\text{C}_5\text{H}_5)_2)$	[15]	1.169 ± 0.106
$\lambda(\text{Be}_4\text{O}(\text{CH}_3\text{COO})_6) - \lambda(\text{BeF}_2)$	[15]	1.852 ± 0.082

Hensley 等^[18] 对 ^7BeO 加以 2.70×10^{10} Pa 的高压, 测量到 ^7Be 的衰变率增加了 0.59%。电子环境的变化导致的同质异能态衰变率的变化现象, 最先由 Bainbridge 等^[19] 对处于不同化学状态中的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的内转换进行了检验, 观察到 KTcO_4 中 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的衰变常数比电沉积在 Cu 上的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 要大 $1 + 0.0030 \pm 0.00010$ 倍。而 Tc_2S_7 中 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的衰变常数比电沉积在 Cu 上的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 要大 $1 + 0.00031 \pm 0.00012$ 倍。Slater^[20] 对此提出了理论解释, 支持 Bainbridge 等的结果。随后出现一批对同质异能态(如 $^{235\text{m}}\text{U}$, $^{990\text{m}}\text{Nb}$, $^{125\text{m}}\text{Te}$, $^{131\text{m}}\text{Xe}$, $^{179\text{m}}\text{Hf}$, $^{77\text{m}}\text{Se}$ 和 $^{197\text{m}}\text{Au}$ 等)的测量(参见文献[7]中的表 1)。

考虑到由于核周围电子密度的改变可能引起库仑位垒的变化, 因而影响原子核 α 和 β 衰变的速率。理论上给出了不同的估计^[21, 22]。Alder 等^[21] 计算化学效应对 β 衰变率的影响在 $10^{-4} - 10^{-5}$ 之间, 但没有肯定的实验结果。

3 近期的研究进展

此前的实验研究主要使用电离室或 NaI 探测器来测量核衰变放出的 γ 射线, 给出的误差在 1%—10% 之间。对于衰变率所产生的微小变化不灵敏, 限制了测量的精度。20 世纪 70 年代后约有 20 年的时间, 对核外环境对衰变率影响的研究工作几乎没有进展。直到 20 世纪末, 由于高纯锗探测器的应用, 同时对于原子核衰变率在天体物理、固体物理、放射性废物处理和地质年代学等领域中的重要性受到重视, 有关的理论和实验研究又重新活跃起来。

Liu 等^[23] 测量到 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 胶体在 4.00×10^{10} Pa 的压强下衰变常数增加了 1%。Huh^[24] 测量了 ^7Be 在 $\text{Be}^{2+}(\text{OH}_2)_4$, $\text{Be}(\text{OH})_2$ 和 BeO 中的半衰期, 结果分别为 $T_{1/2} = 53.69, 53.42$ 和 54.23 d。其中, 衰变率的变化达到 1.5%。而 Tossell^[25] 计算了 Be 的几种不同氧化物中 Be 核处的电子密度, 发现电子密度的变化仅在 0.1%—0.4% 的水平上。这一结果对 Huh 等的实验结果提出了质疑。而 Tossell 估算的 $\text{Be}(\text{OH})_4^{2-}$ 中 Be—O 键压缩对 Be 核处的电子能量与密度的影响表明, 几个 10^{10} Pa 的压强可以使电子密度增加 1% 以上, 这与 Liu 等的实验结果定性一致。

Ray 等^[26] 提出将 ^7Be 注入到具有高的电子亲和势(EA)的介质材料中时, 由于周围介质原子的作用, Be 会失去相当一部分 2s 电子, 他们测量了注入到具有高电子亲和势的 Au 以及具有较低亲和势的 Al_2O_3 中 ^7Be 的衰变常数的差别。发现前者比后者的衰变常数小 $(0.72 \pm 0.07)\%$ 。Ray 等还用 linear muffin-tin orbital(LMTO)方法与 Hartree 计算对他们的以及别人的实验结果进行了分析, 定性地解释了这些结果。Ray 等宣称他们的结果意味着所预言的 ^8B 的太阳中微子通量应比标准值低 1.9%。

Norman 等^[27] 测量了注入到石墨(graphite), BN, Ta, Au, LiF 和 Al 中的 ^7Be 的衰变率。得到半衰期值分别为 $53.107 \pm 0.022, 53.174 \pm 0.037, 53.195 \pm 0.052, 53.311 \pm 0.042, 53.12 \pm 0.07$ 和 53.17 ± 0.02 d。在这些介质材料中 ^7Be 衰变率的变化最多为 0.38%。也就是 Ray 等所观察到的 ^7Be 在 Au 和 O_3Al_2 中衰变率变化的一半左右。因而认为由于 ^7Be 在不同介质材料中衰变率不同所引起的修正远比竞争反应 $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$ 速率的实验测量误差

小得多。因而所观察到 ${}^7\text{Be}$ 衰变率的变化不足以改变对 ${}^8\text{B}$ 太阳中微子通量的预言值。此外,还对 ${}^{40}\text{K}$ 在不同材料中的衰变率进行了测量,结果在1%的实验精度内没有发现变化。对于Norman等的结果,Ray等^[28]认为两家实验结果明显的差别是由于所选用的参考样品不同所致,而且在Norman利用重离子束注入 ${}^7\text{Be}$ 的情况,材料晶格结构的辐射损伤也可能有影响。

为了检验 ${}^7\text{Be}$ 在具有不同电子亲和势的材料中衰变率的变化,刘志毅等^[29]利用 ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ 反应将 ${}^7\text{Be}$ 分别注入到 $\text{Be}(EA = -0.19 \text{ eV})$ 和 $\text{Au}(EA = 2.308 \text{ eV})$ 中,在0.12%的实验精度内没有观察到 ${}^7\text{Be}$ 衰变率的差别。作者提出 Be 和 Au 的晶格结构明显不同,在考虑对 ${}^7\text{Be}$ 衰变率的影响时,应将材料的晶格结构与电子亲和势的影响一同考虑。

Souza等^[30]测量了注入到 Li 和 Ta 中的 ${}^7\text{Be}$ 衰变率的差别。得到的结果: $\Delta\lambda/\lambda = (0.71 \pm 0.31)\%$,比由 Ta 和 Li 的电子密度($\rho_e(\text{Ta}) \approx 30 \rho_e(\text{Li})$)预计的 ${}^7\text{Be}$ 衰变率的变化要小。作者推测变化小的原因可能是因为价电子在核附近密度的变化被交换与重叠修正因子的变化所抵消。Boruta和Makariunas^[31]对此做过计算。

Nir-EI等^[32]测量了注入到 Cu , Al , 蓝宝石(Sapphire)和 PVC 4种不同材料中的 ${}^7\text{Be}$ 衰变率,在 1σ 的实验误差范围内没有发现衰变率变化。

已有3篇论文涉及 ${}^7\text{Be}$ 在 C_{60} 中的衰变率。Ohtsuki等^[33]比较了 ${}^7\text{Be}$ 在 C_{60} 与在金属 Be 中的衰变率。测量到 ${}^7\text{Be}$ 在 C_{60} 中(${}^7\text{Be}@\text{C}_{60}$)的半衰期 $T_{1/2} = (52.68 \pm 0.05) \text{ d}$,比在金属 Be 中的半衰期短0.83%。他们认为,这是由于 C_{60} 中的特殊环境,如:大量的 π 电子和 C_{60} 内部电子的特殊动力学条件。后来又测量了液氮温度($T = 5 \text{ K}$)下(${}^7\text{Be}@\text{C}_{60}$)中 ${}^7\text{Be}$ 的半衰期为 $(52.47 \pm 0.04) \text{ d}$,比在 $T = 293 \text{ K}$ 时短0.34%,而比室温下在金属 Be 中的半衰期短1.5%。同时,并根据计算出的 C_{60} 中 ${}^7\text{Be}$ 附近的电子密度很好地解释了这些结果^[34]。Ray等^[35]测量了两种 C_{60} 化合物——外衍(exohedral)富勒烯和内嵌(endohedral)富勒烯中的衰变率,发现 ${}^7\text{Be}$ 在后者中的半衰期比在前者中短1%。利用LMTO方法分析实验结果表明大部分注入到 C_{60} 的 ${}^7\text{Be}$ 处在离最近的 C_{60} 分子中心 0.5 \AA 处,形成外衍富勒烯化合物,而进入 C_{60} 内部的 ${}^7\text{Be}$ 则处于 C_{60} 的中心,形

成内嵌富勒烯化合物 $\text{Be}@\text{C}_{60}$ 。

考虑到Rai等^[36]在金属环境中观察到的 $d(d, p)t$ 中的电子屏蔽效应, Pd 与 Au 具有不同的屏蔽势($U_e(\text{Pd}) = (800 \pm 90) \text{ eV}$, $U_e(\text{Au}) = (280 \pm 50) \text{ eV}$);所提取出的围绕在 Pd 中氩核附近的电子密度(6.3 ± 1.3)大于在 Au 中的密度(0.9 ± 0.3)。中国原子能科学研究所的小组测量了注入到 Pd 和 Au 中的 ${}^7\text{Be}$ 衰变率的变化^[37, 38]。 Pd 和 Au 具有不同的电子亲和势($EA(\text{Pd}) = 0.56 \text{ eV}$, $EA(\text{Au}) = 2.31 \text{ eV}$)却有相似的晶格结构,因此实验结果中可以消除晶格结构不同的影响,而电子屏蔽效应和电子亲和势都有利于 ${}^7\text{Be}$ 在 Pd 中的衰变率大于在 Au 中的衰变率。实验中使用了 28.4 MeV 的 ${}^7\text{Be}$ 束流分别照射 Pd 和 Au 样品。照射后对样品进行了退火处理,以消除重离子造成的晶格损伤。使用了两组高纯锗探测器同时分别测量 ${}^7\text{Be}$ 在 Pd 和 Au 中的衰变率。测量54 d后交换样品又测量81 d。结果观测到的衰变率显示 ${}^7\text{Be}$ 在 Pd 中的衰变常数比在 Au 中增加 $(0.8 \pm 0.2)\%$ 。

Limata等^[39]为研究金属中的准自由电子对电子俘获衰变率可能产生的影响,测量了 Pd , W , Zr , 和 Ta 中 ${}^7\text{Be}$ 的半衰期,在0.4%的实验误差范围内没有观察到 ${}^7\text{Be}$ 半衰期的变化。

将Debye-Huchel模型用于 α 衰变,Raiola等^[40]预言在冷却的金属环境中, ${}^{238}\text{U}$ α 的衰变半衰期将缩短3.2倍。Kentner等^[41]预言由于德拜电子对带正电的粒子加速作用, α 衰变与 β^+ 衰变的半衰期将变短,而由于德拜电子对带负电的粒子的减速作用, β^- 衰变与电子俘获过程的半衰期将变长。因此,在冷却到 4 K 的金属中,半衰期为 138 d 的 ${}^{210}\text{Po} \rightarrow \alpha + {}^{206}\text{Pb}$ 的半衰期将缩短到 0.5 d ;原半衰期为 1600 a 的 ${}^{226}\text{Ra} \rightarrow \alpha + {}^{222}\text{Rn}$ 衰变半衰期将变为 1.3 a 。对于 α 衰变受环境影响问题,还有着不同的理论预言^[42-46]。例如,Zinner^[42]使用量子力学隧道效应计算显示,虽然电子屏蔽效应使得有效屏蔽势低于纯的库仑位垒,并因而缩短了隧穿长度,但是屏蔽效应也使 α 衰变能降低,这样又使隧穿长度增加。所以 α 衰变半衰期即使有所缩短的话,也是很少的。Liolis^[43]预言超强的磁场和高密度的天体等离子体环境可能使 α 衰变核的半衰期缩短许多数量级。在这种环境中,通常的Geiger-Nuttall定律应加以修正,因此所有相关的半衰期都将大大缩

短。Czerski 等^[44]使用由氘聚变反应定出的电子屏蔽能以及动力学屏蔽方法计算得出在金属环境中 α 衰变概率要比在绝缘体中增加百分之几。Eliezer 等^[45]使用压力电离模型 (pressure ionization model) 估算了注入到金属材料中放射性原子核附近的自由电子数随金属材料密度的变化, 指出只是温度的改变对 α 衰变半衰期的影响不大, 而在液氦温度和 5 atm 下, 半衰期的变化可缩短 20%。

受到 α 半衰期缩短会对放射性废物处理带来巨大效益的鼓舞, 一些实验室进行了或正在计划对注入到 12 K 左右的低温金属中的放射性核的半衰期进行测量, 以检验等离子体德拜模型的预言。王宝祥等^[47]测量了冷却到 12 K 的金属与非金属中 ^7Be 的半衰期, 观察到 ^7Be 在 Pd 中的半衰期增加了 $(0.9 \pm 0.2)\%$, 在 In 中增加了 $(0.7 \pm 0.2)\%$, 而在 Li_2O 中没有变化。这些结果的趋势与等离子体德拜模型预言相符, 但半衰期变化的数值要比德拜模型预言值小得多。作者讨论了作为受主的金属中德拜电子本身以及 O 或 H 污染可能的影响。Limata 等^[48]在实验中发现注入冷却到 12 K 的 Pd 中的 ^{22}Na 的 β 衰变半衰期缩短了 $(1.2 \pm 0.2)\%$, 当冷却到 15 K 时, 缩短 $(0.46 \pm 0.14)\%$ 。注入到 90 K 的 Al 中则缩短 $(0.70 \pm 0.45)\%$ 。在文献^[49, 50]中报导了在冷却到 12 K 的 Au 中 ^{198}Au 的 β 衰变的半衰期比文献值长了 $(4.0 \pm 0.7)\%$ 。连钢等^[51]测量了注入到 Pd 中 ^{22}Na 的 β^+ 衰变半衰期, 观察到在温度为 15 K 时的半衰期比在室温时短 $(0.46 \pm 0.14)\%$, 与 Limata 等的结果^[48]一致。Riola 等^[52]比较了室温和 12 K 温度下在铜中 ^{210}Po 的 α 衰变半衰期, 他们的结果显示在 12 K 时半衰期比室温下短 $(6.3 \pm 1.4)\%$ 。

在上述实验观察到放射性半衰期明显变化的同时, 也有越来越多的否定实验。Jeppesen 等^[53]在室温条件下测量了注入到 Au, W, Si 和 PE 中的 ^{221}Fr 的 α 衰变半衰期, 给出在这些介质中半衰期变化的上限为 1%。Stone 等^[54]通过对已发表的温度低到 25 mK 的低温核定向实验 (LTNO) 结果的分析, 没有发现注入到金属材料中放射性半衰期在温度降低时发生变化的迹象, 给出半衰期变化的上限为 1%。Severijns 等^[55]测定了嵌入 Fe 中的 ^{253}Es 的半衰期, 温度在 4 K—50 mK 之间, 结果在 2% 的范围内与文献中给出的室温下的半衰期值一致, 在温度变化

几乎为两个数量级的范围内 ^{253}Es 的半衰期与温度无关。

Goodwin 等^[56]测量了在金属环境中 ^{198}Au 的 β 衰变, 发现在 19 K 以及室温下 ^{198}Au β 衰变半衰期在 0.04% 以内是相同的。Kumar 等^[57]在 0.350—293 K 范围内几种不同温度下同时测量了 ^7Be 在 Cu 中的电子俘获衰变率以及 ^{198}Au 在 Al-Au 合金中的 β^- 衰变率。在实验精度 0.1% 内, 没有观察到温度在 12.5 和 293 K 时 ^{198}Au 的半衰期的差别。在这个温度范围内, ^7Be 与 ^{198}Au 的活性比在实验精度 0.16% 内保持不变。

Ruprecht 等^[58, 59]测量了室温和 10 K 温度下在 Al 中的 ^{22}Na 及在 Au 中的 ^{198}Au 和 ^{196}Au 的半衰期。没有发现这些核的半衰期有任何变化。这与 Limata 等^[48]以及 Spillane 等^[49]的测量结果不符, 也与 Debye-Huchel 模型的预言^[40, 41]相差甚远。

Fallin 等^[60]利用 4.40 MeV 的氘束在天然高纯度 Cu 中引起的 $^{63}\text{Cu}(d, p)^{64}\text{Cu}$ 反应, 测量了 12 K 和室温下 ^{63}Cu 中生成的 ^{64}Cu 的半衰期。在 0.25% 的精度内, 没有发现 ^{64}Cu 半衰期有任何变化。

Goodwin 等^[61]测量了 19 K 和室温下金属中 ^{97}Ru 的电子俘获半衰期和 ^{103}Ru 与 ^{105}Rh 的 β^- 衰变半衰期。在实验误差范围 (^{97}Ru 和 ^{103}Ru : 0.1%; ^{105}Rh : 0.2%) 内也没有观察到在两种温度下半衰期的差别。

除了上面提及的物理与化学环境以及 Debye-Huchel 模型预言的低温金属环境中的电子屏蔽效应外, 还有一些考虑其他的物理因素可能改变放射性衰变速率的实验。Mikheev 等^[62]考虑到将 ^{212}Po 注入到 ^{208}Pb 中时, ^{212}Po 的 α 衰变子体也是 ^{208}Pb , 因此 ^{212}Po 与介质 ^{208}Pb 波函数的相干可能改变 ^{208}Pb 的 α 衰变速率, 他们观察到在 Pb 中的 ^{212}Po 衰变率比在 Ni 中快约 0.2%。Ray 等^[63]观察到 ^{109}In 和 ^{110}Sn 注入到较小的 Au 晶格中与注入到较大的 Pb 晶格中相比, 轨道电子俘获速率分别增加 $(1.00 \pm 0.17)\%$ 和 $(0.48 \pm 0.25)\%$ 。这种现象被解释为放射性原子在较小的 Au 晶格中由于空间限制而受到更大的压缩, 使放射性核附近的电子密度增加所致。

近年来关于不同物理和化学环境下放射性衰变率变化的实验结果示于表 2。

4 结论

总之，试图改变放射性核素半衰期的工作主要分为两类，一类是考虑不同物理与化学环境下核附

近电子密度的变化及不同受主材料电子亲和势及结构的不同对电子俘获或内转换过程的影响；另一类是在低温金属中等离子体电子对于衰变过程产生的

表 2 近年来关于不同物理和化学环境下一些核素的放射性衰变率变化的实验结果

环境条件	文献	衰变率的变化
⁷ Be@Be(OH) ₂ 胶体在 4×10 ¹⁰ Pa 的压强下	[23]	衰变常数增加 1%
⁷ Be@Be ²⁺ (OH ₂) ₄	[24]	T _{1/2} (d) = 53.69
Be(OH) ₂		53.42
BeO		54.23
⁷ Be@Au-Al ₂ O ₃	[26]	Δλ/λ = -(0.72±0.07)%
⁷ Be@石墨(graphite)	[27]	T _{1/2} (d) = 53.107±0.022
BN		53.174±0.037
Ta		53.195±0.052
Au		53.311±0.042
LiF		53.12±0.07
Al		53.17±0.02
⁴⁰ K @ K ₂ CO ₃ K ₂ Cl, K ₂ SO ₄ , KNbO ₃ , KTaO ₃		无变化
⁷ Be@Be-Au	[29]	无变化
⁷ Be@Ta-Li	[30]	Δλ/λ = (0.71±0.31)%
⁷ Be@铜、铝、蓝宝石(Sapphire)、PVC4	[32]	无变化
⁷ Be@C ₆₀ -Be	[33]	ΔT _{1/2} /T _{1/2} = -0.83%
⁷ Be@外衍富勒烯-内嵌富勒烯	[34]	ΔT _{1/2} /T _{1/2} = 1%
⁷ Be@Pd-Au	[37, 38]	Δλ/λ = (0.8±0.2)%
⁷ Be@Pd, W, Zr, Ta	[39]	<0.4%
⁷ Be@Pd 12 K-室温	[47]	ΔT _{1/2} /T _{1/2} = (0.9±0.2)%
⁷ Be@In 12 K-室温		ΔT _{1/2} /T _{1/2} = (0.7±0.2)%
⁷ Be@Li ₂ O 12 K-室温		无变化
²² Na@Pd 12 K-室温	[48]	ΔT _{1/2} /T _{1/2} = -(1.2±0.2)%
²² Na@Pd 15 K-室温	[48, 51]	ΔT _{1/2} /T _{1/2} = -(0.46±0.14)%
²² Na@Al 90 K-室温	[48]	ΔT _{1/2} /T _{1/2} = -(0.70±0.45)%
¹⁹⁸ Au@Au 12 K-室温	[49, 50]	ΔT _{1/2} /T _{1/2} = -(4.0±0.7)%
²¹⁰ Po α12 K-室温	[52]	ΔT _{1/2} /T _{1/2} = -(6.3±1.4)%
²²¹ Fr@Au, W, Si, PE	[53]	ΔT _{1/2} /T _{1/2} < 1%
²²⁴ , ²²⁵ Ra, ²²⁷ Ac@Fe 25 mK-室温	[54]	ΔT _{1/2} /T _{1/2} < 1%
²⁵³ Es@Fe 4 K-50 mK-室温	[55]	ΔT _{1/2} /T _{1/2} < 2%
¹⁹⁸ Au 19 K-室温	[56]	ΔT _{1/2} /T _{1/2} < 0.04%
¹⁹⁸ Au@Al-Au 合金 12.5 K-室温	[57]	ΔT _{1/2} /T _{1/2} ≤ 0.1%
⁷ Be@Cu/ ¹⁹⁸ Au@Al-Al 合金 0.35 K-室温		比值无变化
²² Na@Al; 10 K-室温	[58, 59]	ΔT _{1/2} /T _{1/2} < 0.04
¹⁹⁸ Au@Au 10 K-室温		ΔT _{1/2} /T _{1/2} < 0.03%
¹⁹⁶ Au@Au 10 K-室温		ΔT _{1/2} /T _{1/2} < 0.5%
⁶⁴ Cu@ ⁶³ Cu 12 K-室温	[60]	ΔT _{1/2} /T _{1/2} < 0.25%
⁹⁷ , ¹⁰³ Ru@金属 19 K-室温	[61]	ΔT _{1/2} /T _{1/2} < 0.1%
¹⁰⁵ Rh@金属 19 K-室温		ΔT _{1/2} /T _{1/2} < 0.2%
²¹² Po@Pb/ ²¹² Po@Ni	[62]	衰变率增加:0.2%
¹⁰⁹ In@Au/ ¹⁰⁹ In@Pb	[63]	衰变率增加(1.00±0.17)%
¹¹⁰ Sn@Au/ ¹¹⁰ In@Pb		衰变率增加(0.48±0.25)%

加速或减速作用。目前测到的半衰期最大的变化也只在 1% 的数量级上。理论工作方面, LMTO 方法可以用于估计在不同材料中电子俘获衰变速率的变化, 而等离子体德拜模型明显过高地估计了低温金属中电子屏蔽效应对放射性衰变率的影响, 反映出描述金属中聚变反应截面增强的等离子体电子屏蔽德拜模型不适用于描述衰变过程。从不同的实验结果来看, 也存在着矛盾, 说明对放射性半衰期微小变化的测量需要设计更精确的实验验证。

致谢: 作者在搜集资料过程中得到刘志毅和白希祥的帮助, 特此表示感谢。

参考文献 (References):

- [1] Segre E. *Z Physic*, 1947, **71**: 274.
- [2] Daudel R. *Rev Sci*, 1947, **85**: 162.
- [3] Daudel R. *J Phys Rad*, 1952, **13**: 557.
- [4] De Benedetti F, Barros F D, Hoy G R. *Ann Rev Nucl Sci*, 1966, **16**: 31.
- [5] Emery G T. *Ann Rev Nucl Sci*, 1972, **22**: 165.
- [6] Freedman M S. *Ann Rev Nucl Sci*, 1974, **24**: 209.
- [7] HaHn H P, Born H J, Kim J I. *Radiochimica Acta*, 1976, **23**: 23.
- [8] Dostal K P, Nagel M, Pabst D. *Z Naturforsch*, 1977, **32**: 345.
- [9] Becquerel H. *Compt Rend Acad Sci*, 1901, **133**: 199.
- [10] Curie M, Kammerlingh-Onnes H. *Le Radium*, 1913, **10**: 181.
- [11] Rutherford E, Petavel J E. *Abstract of the British Association Report*, 1907, 456—457.
- [12] Segre E, Wiegand C E. *Phys Rev*, 1949, **75**: 39.
- [13] Leininger R F, Segre E, Wiegand C E. *Phys Rev*, 1949, **76**: 897; **81**: 280.
- [14] Kraushaar J J, Wilson E D, Bainbridge K T. *Phys Rev*, 1953, **90**: 610.
- [15] Johlige H W, Aumann D C, Born H J. *Phys Rev*, 1970, **2**: 1616.
- [16] Bouchez R, Tobailem J, Robert J, *et al.* *J Phys Radium*, 1956, **17**: 363.
- [17] Bainbridge K T, Baker E. *Bull Am Phys Soc*, 1959, **4**: 278.
- [18] Hensley W K, Basset W A, Huizenga J R. *Science*, 1973, **181**: 1164.
- [19] Bainbridge K T, Goldharber M, Wilson E. *Phys Rev*, 1951, **84**: 1260.
- [20] Slater J C. *Phys Rev*, 1951, **84**: 1261.
- [21] Alder K, Baur G, Raff U. *Phys Lett*, 1971, **A34**: 163.
- [22] Ruinson Wand, Perlman M L. *Phys Lett*, 1972, **B40**: 352.
- [23] Liu Lingun, Huh Chihan. *Ear and Plan Sci Lett*, 2000, **180**: 163.
- [24] Huh Chihan, Ear and Plan Sci Lett, 1999, **171**: 325.
- [25] Tossell J A. *Ear and Plan Sci Lett*, 2002, **195**: 131.
- [26] Ray A, Das P, Saha S K, *et al.* *Phys Lett*, 1999, **B455**: 69.
- [27] Norman E B, Rech G A, Browne E, *et al.* *Phys Lett*, 2001, **B519**: 15.
- [28] Ray A, Das P, Saha S K, *et al.* *Phys Lett*, 2002, **B531**: 187.
- [29] Liu Zhiyi, Li Chengbo, Wang Siguang, *et al.* 2003, **20**: 829.
- [30] Souza D J, Kegel G H R, Egan J J, *et al.* *Jour of Nucl Sci and Tech*, 2002, **2**(Suppl.): 470.
- [31] Boruta J, Makariunas K. *Phys Lett*, 1979, **A71**: 47.
- [32] Nir El Y, Haquin G, Yungreiss Z, *et al.* *Phys Rev*, 2007, **C75**: 102801.
- [33] Ohtsuki T, Yuki H, Muto M, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2004, **93**: 112501.
- [34] Ohtsuki T, Ohno K, Morisato T, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2007, **98**: 252501.
- [35] Ray A, Das P, Saha S K, *et al.* *Phys Rev*, 2006, **C73**: 034323.
- [36] Raiola F, Migliadi P, Gang L, *et al.* *Phys Lett*, 2002, **B547**: 193.
- [37] Zhou S, Liu Z, Zhou J, *et al.* *Chin Phys Lett*, 2005, **22**: 565.
- [38] Li Chengbo, Liu Zhiyi, Zhou Shuhua, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2007, **24**(3): 200(in Chinese).
(李成波、刘志毅、周书华, 等. 原子核物理评论, 2007, **24**(3): 200.)
- [39] Limata B N, Fulop Z, Schurmann D, *et al.* *Eur Phys J*, 2006, **A27**: 193.
- [40] Raiola F, Burchard B, Fulop Z, *et al.* *J Phys*, 2005, **G31**: 1141.
- [41] Kettner K U, Becker H W, Strieder F, *et al.* *J Phys*, 2006, **G32**: 489.
- [42] Zinner N T. *Nucl Phys*, 2007, **A781**: 81.
- [43] Liolis T E. *Phys Rev*, 2003, **C68**: 015804.
- [44] Czernski K, Heide P, Huke A, *et al.* *Acta Physica Polonica*, 2009, **B40**: 903.
- [45] Eliezer S, Martinez Val J M, Piera M. *Phys Lett*, 2009, **B672**: 372.
- [46] Mehedinteanu S. *Acta Physica Polonica*, **B38**: 3288.
- [47] Wang B, Yan S, Limata B, *et al.* *Eur Phys J*, 2006, **A28**: 375.
- [48] Limata B, Raiola F, Wang B, *et al.* *Eur Phys J*, 2006, **A28**: 251.
- [49] Spillance T, Raiola F, Zeng F, *et al.* *Eur Phys J*, 2007, **A31**: 203.
- [50] Zeng Sheng, Spillane T, Raiola F, *et al.* *At Energy Sci Technology*, 2009, **43**: 481(in Chinese).
(曾晟, Spillane T, Raiola F, 等. 原子能科学技术, 2009, **C43**: 481.)

- [51] Lian Gang, Su Jun, Wang Baoxiang, *et al.* Chin Phys Lett, 2008, **25**: 70.
- [52] Riola F, Spillane T, Limita B, *et al.* Eur Phys J, 2007, **A32**: 51.
- [53] Jeppesen H B, Byskov-Nielsen J, Wright P, *et al.* Eur Phys J, 2007, **A32**: 31.
- [54] Stone N J, Stone J R, Lindroos M, *et al.* Nucl Phys, 2007, **A793**: 1.
- [55] Severijns N, Belyaev A A, Erzinkyan A L, *et al.* Phys Rev, 2007, **C76**: 024304.
- [56] Goodwin J R, Golovko V V, Iacob V E, *et al.* Eur Phys J, 2007, **A34**: 271.
- [57] Kumar V, Hass M, Nir-EL Y, *et al.* Phys Rev, 2008, **C77**: 051304.
- [58] Ruprecht G, Vockenhuber C, Buchmann L, *et al.* Phys Rev, 2008, **C77**: 065502; **C78**: 039901.
- [59] Ruprecht G, Vockenhuber C, Ruiz C, *et al.* J Phys, 2008, **G35**: 014017.
- [60] Fallin B A, Grabow B G, Tornow W. Phys Rev, 2008, **C78**: 057301.
- [61] Goodwin J R, Golovko V V, Iacob V E, *et al.* Phys Rev, 2009, **C80**: 045501.
- [62] Mikheev V L, Morozov V A, Morozova N V. Phys of Part and Nucl Lett, 2008, **5**: 371.
- [63] Ray A, Das P, Sahara S K, *et al.* Phys Lett, 2009, **B679**: 106.

Survey on the Impact of Environment on Nuclear Decay Rate^{*}

ZHOU Shu-hua¹⁾

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

Abstract: The possible change of nuclear decay rates in different environments has long been an interesting topic due to its importance not only in nuclear physics but also in astrophysics, geological dating, condensed matter physics, disposal of nuclear waste etc. The progresses in the investigation of variations in nuclear decay rates are reviewed.

Key words: decay rate; environmental effect; nuclear radioactivity

* Received date: 16 Dec. 2009

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China (10305020)

1) E-mail: shzhou@ciae.ac.cn