

# 低温金属环境中 $^{198}\text{Au}$ 半衰期的测量

曾 晟<sup>1</sup>, T. Spillane<sup>2</sup>, F. Raiola<sup>2</sup>, C. Rolfs<sup>2</sup>

(1. 中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413; 2. 鲁尔大学, 鲁尔 44780)

**摘要:** 利用德国鲁尔大学 DTL 实验室的中子源, 通过 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$ 反应得到 $^{198}\text{Au}@Au$ 样品, 在室温( $T=293\text{ K}$ )和低温( $T=12\text{ K}$ )条件下交替测量金属 Au 环境中 $^{198}\text{Au}$ 的 412 keV 特征  $\gamma$  射线, 通过分析得到不同温度下 $^{198}\text{Au}$ 的半衰期。实验结果表明, 与文献值  $T_{1/2}=(2.694\ 3\pm 0.000\ 8)\text{ d}$  相比,  $T=293\text{ K}$  时 $^{198}\text{Au}$ 的半衰期变长 $(0.4\pm 0.7)\%$ ;  $T=12\text{ K}$  时变长 $(4.0\pm 0.7)\%$ 。这一变化趋向与德拜等离子体模型的预言相符, 但其幅度显著小于模型的估计值。

**关键词:**  $\beta^-$  衰变半衰期; 金属环境; 温度效应; 德拜等离子体模型

中图分类号: O571.423

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)06-0481-04

## Measurement of $^{198}\text{Au}$ $\beta^-$ -Decay Half-Life in Metal Au at Low Temperature

ZENG Sheng<sup>1</sup>, T. Spillane<sup>2</sup>, F. Raiola<sup>2</sup>, C. Rolfs<sup>2</sup>

(1. *China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-46, Beijing 102413, China;*

*2. Ruhr University, Ruhr 44780, Germany*)

**Abstract:** The  $^{198}\text{Au}@Au$  sample was produced via  $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$  reaction. The relative activities of 412 keV characteristic  $\gamma$ -ray from the  $^{198}\text{Au}@Au$  sample were measured at room temperature  $T=293\text{ K}$  and low temperature  $T=12\text{ K}$ , alternately. The  $\beta^-$ -decay half-life of  $^{198}\text{Au}$  in Au metallic environment was observed to be longer by  $(0.4\pm 0.7)\%$  at  $T=293\text{ K}$  and by  $(4.0\pm 0.7)\%$  when the metal was cooled to  $T=12\text{ K}$ , both compared to the literature value of  $T_{1/2}=(2.694\ 3\pm 0.000\ 8)\text{ d}$ . The result is consistent qualitatively with, but clearly lower than, the prediction of the Debye plasma model.

**Key words:**  $\beta^-$ -decay half-life; metal host; temperature effect; Debye plasma model

外部环境对原子核衰变的影响是典型的交叉学科研究课题, 一直受到核科学和核天体物理学界的重视。原子核衰变在恒星演化的各阶段和核合成过程中起非常重要的作用。为研究天体环境中的核过程, 只研究纯粹核物理的规

律是不够的, 还需探讨物理环境对它的影响。研究不同介质环境对原子核衰变的影响可间接获得有重要价值的天体物理信息。近来有学者根据不同介质中低能带电粒子反应电子屏蔽效应的实验结果预言, 金属环境中的准自由价电

收稿日期: 2008-09-01; 修回日期: 2008-10-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(G200077400); 国家自然科学基金资助项目(10375096, 10575137, 10575136)

作者简介: 曾 晟(1977—), 女, 四川绵阳人, 助理研究员, 博士, 粒子物理与原子核物理专业

子会对各种衰变过程产生更为显著的影响<sup>[1]</sup>。

1987年以来,在一系列低能带电粒子反应的实验中观测到了核外束缚电子的屏蔽效应<sup>[2-4]</sup>。该效应导致反应截面增大,倍增因子为:

$$f_{\text{lab}}(E) = E(E + U_e)^{-1} \exp(\pi\eta U_e/E) \quad (1)$$

其中: $E$ 为质心系能量; $U_e$ 为电子屏蔽势能; $\eta$ 为索末菲参数。

近年来,C. Rolfs教授领导的波鸿大学国际合作组系统测量了多达58种注氦金属、绝缘体和半导体靶中D(d,p)T反应的电子屏蔽效应<sup>[5-9]</sup>及其温度相关性<sup>[10-11]</sup>。实验结果表明,绝缘体和半导体环境中的电子屏蔽势能与气体氦靶( $U_e$ 约为25 eV)的情况相近,而金属环境中的电子屏蔽势能却显著升高(约300 eV)。将经典的德拜等离子体模型用于金属中的准自由价电子,可以解释观测到的高屏蔽势能及其随温度的变化<sup>[7,9]</sup>。按照该模型,这些准自由价电子在原子核周围集聚成1个半径为 $R_D$ (德拜半径)的动态球壳形电子云。以 $T$ 、 $n_{\text{eff}}$ 和 $\rho_a$ 分别表征准自由电子的温度(K)、每个金属原子核周围的准自由电子数和金属的原子密度( $\text{m}^{-3}$ ),则环绕注入到金属晶格中氦核的准自由电子云的 $R_D = 69(T/n_{\text{eff}}\rho_a)^{1/2}$ (约为氢原子玻尔半径的1/10)。以德拜能量 $U_D$ 表征入射氦核与晶格中氦核的电子云的库仑相互作用能,由于它显著高于中性原子束缚电子的屏蔽势能,因而近似等于金属环境中的总电子屏蔽势能,对于D(d,p)T反应,其典型值在300 eV左右。

系统比较金属环境中D(d,p)T(入射粒子与靶核的核电荷数 $Z_i = Z_t = 1$ ), ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$ 及 ${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}$ ( $Z_i = 1, Z_t = 3$ )<sup>[12]</sup>、 ${}^9\text{Be}(p, \alpha){}^6\text{Li}$ 及 ${}^9\text{Be}(p, d){}^8\text{Be}$ ( $Z_i = 1, Z_t = 4$ )<sup>[13]</sup>、 ${}^{50}\text{V}(p, n){}^{50}\text{Cr}$ ( $Z_i = 1, Z_t = 23$ )及 ${}^{176}\text{Lu}(p, n){}^{176}\text{Hf}$ ( $Z_i = 1, Z_t = 71$ )<sup>[1]</sup>和D( ${}^3\text{He}, p$ ) ${}^4\text{He}$ ( $Z_i = 2, Z_t = 1$ )<sup>[9]</sup>各反应的测量结果可以看出, $U_D$ 与 $Z_i$ 和 $Z_t$ 成正比。考虑温度相关性的实验结果<sup>[10-11]</sup>后,得出 $U_D \propto Z_i Z_t T^{-1/2}$ 规律。上述测量结果验证了德拜等离子体模型的预言,并表明德拜能量仅与入射道相关。这一规律对原子核衰变的过程也会产生影响。

## 1 ${}^{198}\text{Au}$ 在金属Au中半衰期变化的估计

德拜模型在某种程度上也可能适用于原子核衰变。可以预期,当母核处于金属环境中时,由于金属中的准自由价电子形成的德拜电子云对母核库仑场的屏蔽作用, $\beta^-$ 衰变的半衰期会变长。为了验证这一预言,C. Rolfs教授领导的波鸿大学国际合作组开展了低温金属Au环境中 ${}^{198}\text{Au}$ 半衰期的测量工作。

对于 ${}^{198}\text{Au}$ ,假定在 $T < 293\text{ K}$ 的前提下 $U_D \propto T^{-1/2}$ 的关系仍成立,则有:

$$U_D = Z_e Z_i U_e (d+d) \cdot (T_0/T_1)^{1/2} \quad (2)$$

其中: $U_e(d+d)$ 采用金属环境中D(d,p)T反应 $U_e$ 的典型值300 eV; $T_0$ 为室温; $T_1$ 为目标温度。

在 $T_1 = 12\text{ K}$ 的金属环境中,由式(2), ${}^{198}\text{Au}$ 衰变倍增因子估计为:

$$U_D = 1 \times 79 \times 300 \text{ eV} \times (293/12)^{1/2} \approx 110 \text{ keV}$$

$$f_{\text{lab}} \approx ((Q - U_D)/Q)^5 = 0.66$$

估计低温时 ${}^{198}\text{Au}$ 的半衰期增长34%。同理可以得出室温下将增长8%。

## 2 ${}^{198}\text{Au}$ 在金属Au中半衰期的测量

实验采用的测量方法是在常温和低温条件下测量 ${}^{198}\text{Au}$ ( $Q = 1\,370\text{ keV}, T_{1/2} = (2.694\,3 \pm 0.000\,8)\text{ d}$ <sup>[14]</sup>)衰变放出的412 keV特征 $\gamma$ 射线,得到衰变曲线,导出半衰期的变化。实验装置示于图1,主要由低温装置、温度与真空监测系统 and 探测器与获取系统3部分组成。

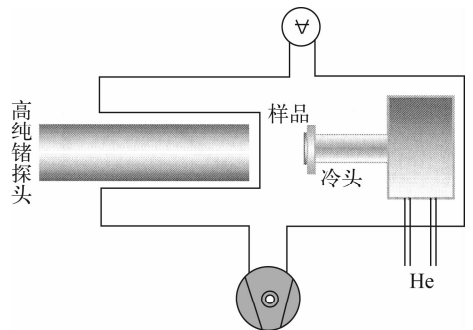


图1 低温测量装置

Fig.1 Experimental setup

${}^{198}\text{Au}$ 样品是通过 ${}^{197}\text{Au}(n, \gamma){}^{198}\text{Au}$ 反应得

到的,将厚度为 0.5 mm、面积为  $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$  的  $\text{Au}(\text{O},\text{H})$  杂质含量低于  $10^{-6}$ ) 用中子源照射 3 周后,测量 412 keV  $\gamma$  射线,得到样品活度约为 3 kBq。 $^{198}\text{Au}$  样品通过一厚度为 20 mm 的圆柱形铜块与低温装置的冷头紧密连接,在铜块上面安装了 1 个硅二极管,用来测定  $^{198}\text{Au}$  样品温度,此装置可使样品的温度稳定地保持在 12 K。选用 1 套 HPGGe  $\gamma$  谱仪测量  $^{198}\text{Au}$  衰变的 412 keV 特征  $\gamma$  射线。HPGe 探测器放置在  $0^\circ$  (低温装置的轴线上),其探测的相对效率为 100%。探测器前表面与  $^{198}\text{Au}$  样品前表面的垂直距离为 18 cm。为了屏蔽天然的  $\gamma$  射线本底,在低温装置的周围放置了 5~10 cm 厚的铅砖。另外,为了对数据获取过程中的死时间进行修正,谱仪中加进了 1 个 50 Hz 的脉冲产生器。在本实验中,死时间修正量为 0.1% 左右。

测量分 3 步进行:1) 测量室温下的环境本底;2) 在  $T=293\text{ K}$ 、真空好于  $2\times 10^{-6}\text{ Pa}$  的状态下,逐小时测量  $^{198}\text{Au}$  412 keV  $\gamma$  射线的相对活度,测量时间约为 3 d;3) 制冷机开启 3 h 后,冷头的温度降至并稳定地保持在 12 K,真空度达到  $1\times 10^{-7}\text{ Pa}$ ,重复上述相对活度的测量。然后,关闭制冷机,约 12 h 后,冷头温度恢复至室温。为减小实验的统计误差,步骤 2、3

独立地实施了 3 次。实验测量 1 h 后得到的 412 keV 附近的  $\gamma$  射线效应谱和本底谱示于图 2。

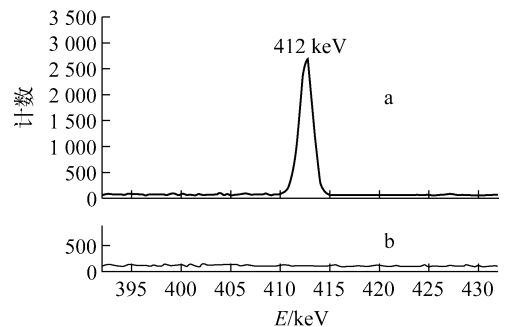


图 2 412 keV 附近 1 h 内的  $\gamma$  射线谱  
Fig. 2  $\gamma$ -ray spectra near 412 keV  
obtained over a running time of 1 h  
a—— $^{198}\text{Au}@Au$  样品装在冷头上时的效应谱;  
b—— $^{198}\text{Au}@Au$  样品取走后的本底谱

### 3 数据分析及结果

实验交替测量了  $T=293\text{ K}$  和  $T=12\text{ K}$  时的衰变曲线,  $A=A_0\exp(-t\ln 2/T_{1/2})$ 。对曲线进行  $\chi^2$  拟合后得到不同温度下  $^{198}\text{Au}$  的半衰期(图 3)。图 3 中的虚线为根据文献中给出的半衰期假定在相同初始活度下  $^{198}\text{Au}$  的衰变曲线。

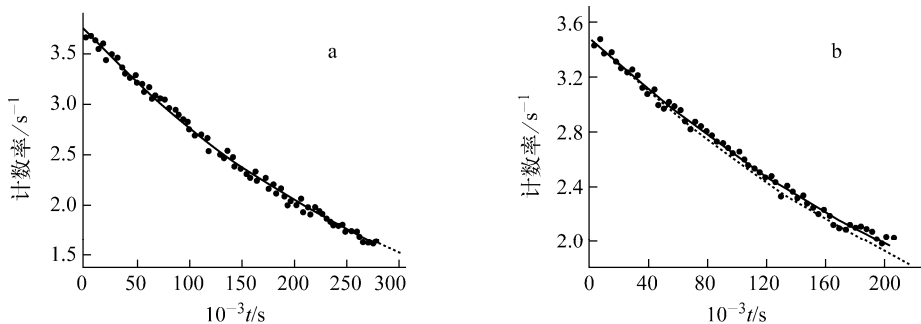


图 3 293 K(a)、12 K(b)时金属 Au 中  $^{198}\text{Au}$  的衰变曲线

Fig. 3 Decay curves of  $^{198}\text{Au}$  decay in metal Au at  $T=293\text{ K}$  (a) and  $T=12\text{ K}$  (b)

测量不同样品所得的半衰期列于表 1,加权平均后得到  $^{198}\text{Au}$  的半衰期,  $T=293\text{ K}$  时,  $T_{1/2}=(2.706\pm 0.019)\text{ d}$ ,与文献值  $T_{1/2}=(2.6943\pm 0.0008)\text{ d}$  相比较,变长  $(0.4\pm 0.7)\%$ ,在误差范围内一致。  $T=12\text{ K}$  时,  $T_{1/2}=(2.802\pm 0.020)\text{ d}$ ,与文献值相比变长了  $(4.0\pm 0.7)\%$ 。

表 1  $^{198}\text{Au}$  半衰期测量结果

Table 1 Results of  $^{198}\text{Au}$  half-life

样品	半衰期( $T=293\text{ K}$ )/d	样品	半衰期( $T=12\text{ K}$ )/d
1	$2.698\pm 0.022$	4	$2.817\pm 0.023$
2	$2.669\pm 0.017$	5	$2.755\pm 0.035$
3	$2.730\pm 0.013$	6	$2.830\pm 0.050$
	$(2.706\pm 0.019)$		$(2.802\pm 0.020)$

注:括号内为加权平均值

由于文献[14]中的 $^{198}\text{Au}$ 的半衰期同样是金箔活化后在室温下测量的,所以, $T=293\text{K}$ 时的实验值与文献值在误差范围内一致是可以预期的。当 $T=12\text{K}$ 时,与文献值相比,半衰期变长了 $(4.0\pm 0.7)\%$ 。这一变化的趋向与德拜等离子体模型预言的相符,但其幅度显著小于模型的估计值,表明该模型定性地适用于 $\beta^-$ 衰变。尽管上述实验测到的变化小于德拜模型的预言,但至少可以表明,金属环境中温度对 $^{198}\text{Au}$ 半衰期的影响是可观测到的。

### 参考文献:

- [1] KETTNER K U, BECKER H W, STRIEDER F, et al. High-Z electron screening: The cases  $^{50}\text{V}(\text{p}, \text{n})^{50}\text{Cr}$  and  $^{176}\text{Lu}(\text{p}, \text{n})^{176}\text{Hf}$  [J]. J Phys G: Nucl Part Phys, 2006, 32: 489-495.
- [2] ASSENBAUM H J, LANGANKE K, ROLFS C. Effects of electron screening on low-energy fusion cross sections[J]. Z Phys A, 1987, 327: 461-468.
- [3] ROLFS C E, RODNEY W S. Cauldrons in the cosmos [M]. Chicago: University of Chicago Press, 1988.
- [4] 白希祥. 低能带电粒子聚变反应中的静电屏蔽效应[J]. 原子核物理评论, 2002, 19(1): 7-12.  
BAI Xixiang. Electrostatic screening effect in the charged-particle induced fusion reactions at low energies[J]. Nuclear Physics Review, 2002, 19(1): 7-12.
- [5] RAIOLA F, MIGLIARDI P, GYURKY G, et al. Enhanced electron screening in  $\text{D}(\text{d}, \text{p})\text{T}$  for deuterated Ta [J]. Eur Phys J A, 2002, 13: 377-382.
- [6] RAIOLA F, MIGLIARDI P, LIAN G, et al. Electron screening in  $\text{D}(\text{d}, \text{p})\text{T}$  for deuterated metals and the periodic table [J]. Phys Lett B, 2002, 547: 193-199.
- [7] BONOMO C, FIORENTINI G, FÜLÖP Z, et al. Enhanced electron screening in  $\text{D}(\text{d}, \text{p})\text{T}$  for deuterated metals: A possible classical explanation [J]. Nucl Phys A, 2003, 719: 37c-42c.
- [8] 连钢. 低能聚变反应中的电子屏蔽效应 [J]. 原子能科学技术, 2004, 38(2): 97-104.  
LIAN Gang. Electron screening effects in fusion reactions at low energies [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2004, 38(2): 97-104 (in Chinese).
- [9] RAIOLA F, LIAN G, BONOMO C, et al. Enhanced electron screening in  $\text{D}(\text{d}, \text{p})\text{T}$  for deuterated metals [J]. Eur Phys J A, 2004, 19: 283-287.
- [10] RAIOLA F, BURCHARD B, FÜLÖP Z, et al. Electron screening in  $\text{D}(\text{d}, \text{p})\text{T}$  for deuterated metals: Temperature effects [J]. J Phys G: Nucl Part Phys, 2005, 31: 1 141-1 149.
- [11] 曾晟, RAIOLA F, BURCHARD B, 等. 低能带电粒子核反应中电子屏蔽效应的温度相关性 [J]. 高能物理与核物理, 2005, 29(12): 1 131-1 135.  
ZENG Sheng, RAIOLA F, BURCHARD B, et al. Temperature dependence of electron screening at low energy [J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2005, 29(12): 1 131-1 135 (in Chinese).
- [12] CRUZ J, FÜLÖP Z, GYÜRKY G, et al. Electron screening in  $^7\text{Li}(\text{p}, \alpha)^4\text{He}$  and  $^6\text{Li}(\text{p}, \alpha)^3\text{He}$  for different environments [J]. Phys Lett B, 2005, 624: 181-185.
- [13] ZAHNOW D, ROLFS C, SCHMIDT S, et al. Low-energy  $S(E)$  factor of  $^9\text{Be}(\text{p}, \alpha)^6\text{Li}$  and  $^9\text{Be}(\text{p}, \text{d})^8\text{Be}$  [J]. Z Phys A, 1997, 359: 211-218.
- [14] MIGNONSIN E P. Determination of half-lives by  $\gamma$ -ray spectrometry: Improvement of procedure and precision [J]. Appl Radiat Isot, 1994, 45: 17-24.