

- 568, 1974
- 29, Kannan S: Int J Appl Radiat Isotopes 26: 557, 1975
- 30, Robinson JR: Int J Appl Radiat Isotopes 20: 531, 1969

- 31, Randolph RB: Int J Appl Radiat Isotopes 26: 9, 1975
- 32, Gómez CG et al: Int J Appl Radiat Isotopes 28: 563, 1977
- (赵启仁综述 杨守理校 林 汉审)

用液体闪烁法测量 ^{125}I

一、引言

已有几篇论文报告了内部样品液体闪烁方法测定 ^{125}I 。此外, Ashcroft报告了在载有重金属的闪烁液外部测量 ^{125}I 发射的 γ 射线和X射线。已报告的内部样品计数效率在14~72%之间。在所有这些报告中,都没有对所获得的脉冲高度分布或计数效率作详细的解释。Rhodes仅引证了一个没有发表的通信,此通信叙述了衰变能量有13和40千电子伏两个能量组。在其中一个报告,还把这个分布误认为是由28千电子伏和35.5千电子伏的X射线和 γ 射线终止在闪烁液中引起的。

在本文中,为了说明各种衰变途径、释放的能量和每种衰变途径的几率,详细叙述了 ^{125}I 的衰变图。测得的脉冲高度谱与衰变图有关。在乳浊液型闪烁液中测得的 ^{125}I 计数效率为76%。

二、实验

2.1样品制备

样品用含 Na^{125}I 的 NaI 水溶液的已标定源(Radio-Chemical Centre, Ltd., Amersham, England, $\pm 2.3\%$)制备。该源也用X-X符合技术标定过。该含水的样品被乳化在含16% V/V乳化剂(Beckman BBS-3)的甲苯和丁基PBD(8克/升)及

PBBO(0.5克/升)闪烁体的闪烁液内。

2.2测量装置

所有测量工作都是用两种商品符合型液体闪烁计数器(Beckman LS-250或Beckman LS-100C)中的一个进行的。两种计数器都把从每个光电倍增管来的相加符合脉冲转变成一个正比于相加脉冲的对数的脉冲。这样测量的脉冲正比于激发电子能量的对数。用多道分析器(Nuclear Data Model 1100)测量脉冲高度谱。对数相加脉冲不加修改的直接送入放大器(Nuclear Data ND-532ARC)。液体闪烁计数器符合测定的脉冲被成形,以满足多道分析器输入的要求(展成3 μs 的宽度),然后作为分析脉冲的一个符合选通脉冲。

三、理论

3.1衰变的途径

首先假设碲的KX射线(27.5千电子伏)或35.5千电子伏的 γ 射线没有终止在15毫升的闪烁液内,而所有的低能X射线则完全终止在溶液中(后来事实证明,部分碲的KX射线被吸收)。

图1表示 ^{125}I 衰变途径、每种途径的几率和每种途径在闪烁液内产生的总能量。

为了使衰变途径的讨论简化,这个衰变可分成两部分:(a)电子俘获和(b)35.5千电子伏激发核能的衰变。电子俘获过程包

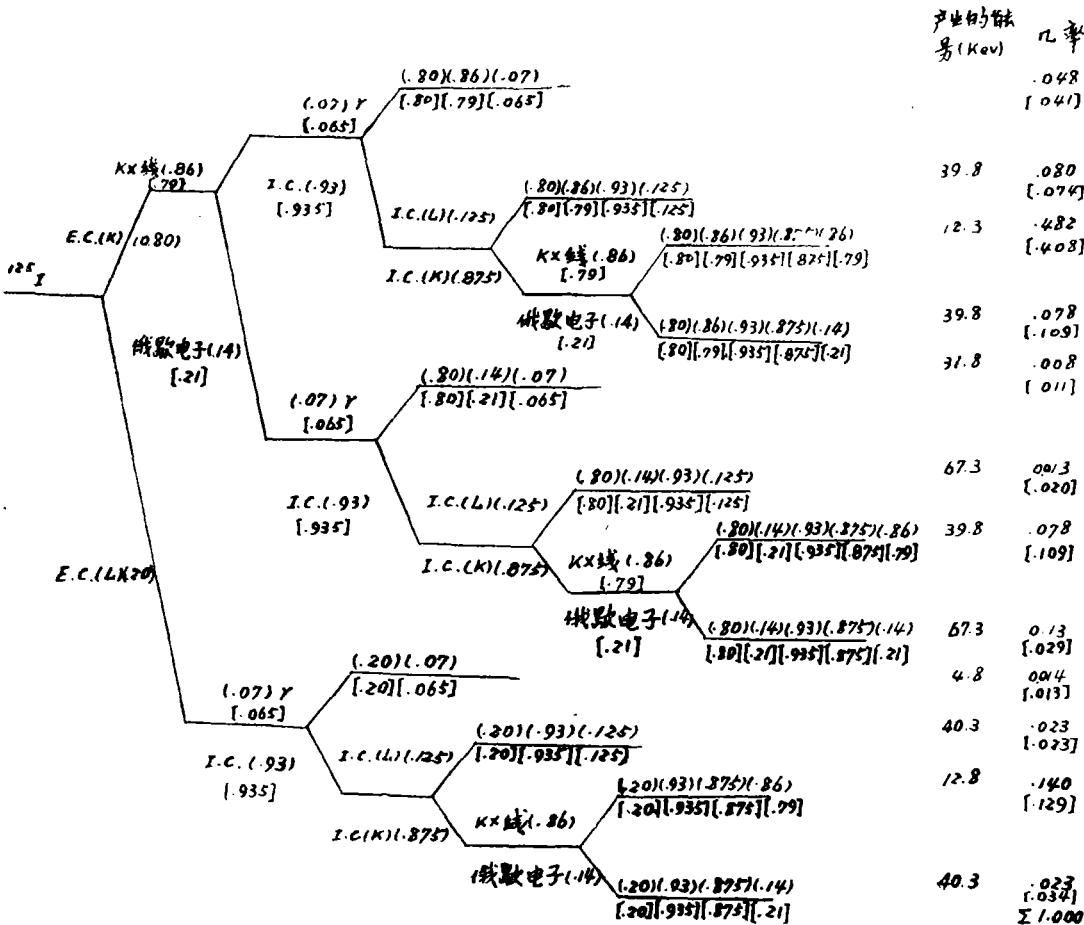
括由于核俘获了核外电子而导致的被俘获的电子壳层产生一个空位。这个空位被轨道电子（核外）重新排列而填充，导致特征X射线和（或）一个或多个称为俄歇电子的单能电子的发射。电子俘获过程，80%的衰变为K层电子俘获，其余20%为L层电子俘获。因为碲的LX射线能量仅3.5千电子伏，所以全部终止在闪烁液内。碲KX射线能量27.5千电子伏，从溶液中逃逸几率高（后来在15毫升甲苯中得到的实际几率为0.92）。

35.5千电子伏激发核能的衰变稍微有点复杂。核有两种衰变方式：（a）发射35.5千电子伏 γ 射线，实际仅占衰变的7%；（b）内

转换，核把它的多余能量给核外电子（不发射 γ 射线），使此电子被抛出，带有的能量等于35.5千电子伏与该电子结合能之差。由于抛出该电子而造成的空位又被发射特征X射线和（或）一个或多个俄歇电子所填充，与下面的电子俘获有同样的过程。

图1的衰变途径（见图园括号内数据）表示出 ^{125}I 核的各种衰变方式所有可能的组合。下面对其一种可能的途径作详细解释。首先K层电子俘获占衰变的80%。当发射一个或多个俄歇电子而释放结合能时，这空位以14%的几率被填充。然后35.5千电子伏激发的 ^{125}Te 原子有93%进行内转换。这其中

衰 变 途 径



又有87.5%出现K层电子发射。这个K层空位以86%的几率被TeK-X射线发射所填充。这个途径的总几率由每个几率的乘积得到。

$$\text{几率} = (0.80)(0.14)(0.93)(0.875)(0.86) = 0.078$$

总衰变中7.8%属于这个特定的途径。每个其他途径可用同样的逻辑来解释。

3.2能量解释

^{125}I 每次衰变释放的能量由最初产生电子俘获的壳层加上激发态 ^{125}Te 原子的35.5千电子伏来确定。电子俘获的产生有80%几率的K电子俘获和20%的L电子俘获。电子俘获后释放的能量，对于K俘获是31.8千电

子伏，L俘获为4.8千电子伏。释放的总能量是：

$$\text{伴随K俘获 } 31.8 + 35.5 = 67.3 \text{ 千电子伏}$$

$$\text{伴随L俘获 } 4.8 + 35.5 = 40.3 \text{ 千电子伏}$$

假设只有27.5千电子伏Te的KX射线和35.5千电子伏的 γ 射线能量强到足以从15毫升闪烁液中逃逸，那么每次衰变产生的能量是总能量减去逃逸能。表1为不同组合衰变产生的不同能量。

这些衰变的途径可分成几个能量近似相等的组。其中每一个组的几率（假设27.5千电子伏X射线或35.5千电子伏 γ 射线没有吸收）从图1中得到。表2概括了这些组，同

表 1 ^{125}I 衰变在闪烁液内消耗的能量

	伴随K俘获 (千电子伏)	伴随L俘获 (千电子伏)
每次衰变的总能量	67.3	40.3
每次衰变逃逸一个KX射线	39.8	12.8
每次衰变逃逸两个KX射线	12.3	a
每次衰变逃逸 γ 射线	31.8	4.8
每次衰变逃逸一个KX射线和 γ 射线	4.3	a

a—没有可能

表 2 ^{125}I 衰变期间产生的电子的能量组

能 量 (千电子伏)	假设没有Te的KX射线 终止在闪烁液内的几率	假设27.5千电子伏TeKX射线和35.5千电子伏 γ 射线都有8%终止在15毫升闪烁液内的几率
4.3~4.8	0.062	0.054
12.3~12.8	0.622	0.537
31.8	0.008	0.011
39.8~40.3	0.282	0.349
6.73	0.026	0.049

时指出进一步分成的两个主要的组。

四、结果

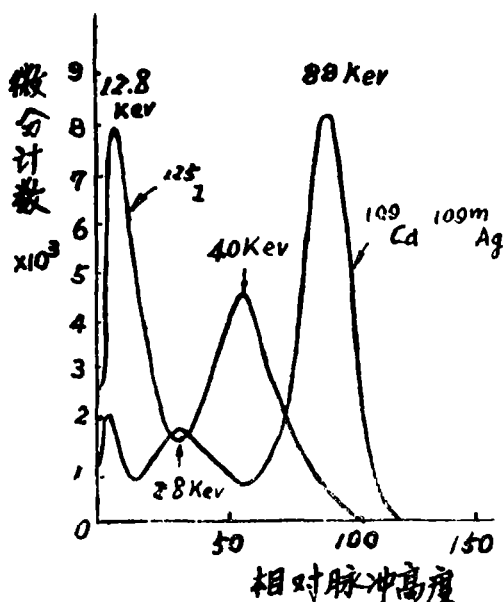
4.1 ^{125}I 脉冲高度谱

为了能量的标定，在图2中把 ^{125}I 脉冲谱与 ^{109}Cd - $^{109\text{m}}\text{Ag}$ 脉冲谱作了比较。用这个标定源得到的计数效率为 $(76 \pm 2)\%$ 。保持闪烁和样品的总体积为15毫升，闪烁液中

水的含量改变从0.05毫升到3毫升，计数效率并不改变。表3中给出了保持总体积为15毫升时，不同水含量下测得的计数效率和淬灭监视值(^{137}Cs - $^{137\text{m}}\text{Ba}$ 源的康普顿边)。

4.2X射线的吸收

在液体闪烁测量中，能量较低电子通常测不到，因为它们产生的可能被探测的光子太少。对较高能量的电子测量的几率是



1.00。对于 ^{125}I 衰变，计数效率低于100%是由于低能组（4.3~12.8千电子伏）电子不能被测到的缘故。脉冲高度谱中的两部分计数之比由下式给出：

$$R = \frac{\text{大于12.8千电子伏部分}}{\text{小于12.8千电子伏部分} - 0.24} \\ = 0.316 / (0.684 - 0.24) = 0.707$$

这里0.24是没有被探测到的部分（即76%计数率）。用十个不同样品从脉冲高度谱中两部分获得的实验比在1.132和1.153之间。

所予期的比值（假设X射线和 γ 射线没有终止在甲苯溶液中）和实验的比值间的差异，是由于散射和光电效应而使部分27.5千电子伏的X射线和35.5千电子伏的 γ 射线终止在闪烁液中的缘故。因为额外吸收的能量与低能事件相符合，这个过程实际上是把假

表3 含水量对 ^{125}I 计数效率和康普顿边淬灭监视值的影响

体积 Na^{125}I (毫升)	水体积 (毫升)	闪烁液体积 (毫升)	计数效率 (%)	康普顿边
0.05	0	15	76.8	185
0.05	0.5	14.5	76.0	183.5
0.05	1.0	14	75.2	183
0.05	1.5	13.5	76.0	182.5
0.05	2.0	13	75.6	182
0.05	2.5	12.5	76.3	184
0.05	3.0	12	75.5	183.5

设产生低于12.8千电子伏能量的事件转变成产生高于12.8千电子伏能量的事件。表4列出了假设27.5千电子伏X射线和35.3千电子

伏 γ 射线在闪烁液中被不同程度吸收时计算的比值。从这个资料中能看到，吸收8% X射线和 γ 射线时给出所得的实验比值。

表4 R比值为KX射线和35.5千电子伏 γ 射线终止在15毫升甲苯闪烁液内的比例的函数

X射线和 γ 线被 吸收的比例	消耗能量 ≤ 12.8 千电 子伏的衰变的比例	消耗能量 > 12.8 千电 子伏的衰变的比例	$R = \frac{\text{大于12.8千电子伏部分}}{\text{小于12.8千电子伏部分} - 0.24}$
0	0.683	0.317	0.707
0.07	0.606	0.394	1.077
0.08	0.591	0.409	1.165
0.09	0.581	0.419	1.229
0.10	0.568	0.432	1.311
0.13	0.544	0.456	1.500
0.15	0.521	0.479	1.701

γ 射线的衰变公式是:

$$I/I_0 = e^{-\mu \rho d}$$

这里 I 是所传送的辐射强度, I_0 是入射的辐射强度, μ 是质量吸收系数(厘米²/毫克), ρ 是吸收介质的密度(毫克/厘米³), d 是介质的厚度(厘米)。不需要考虑那些终止在玻璃瓶壁上的X射线或 γ 射线, 因为它们基本上通过了闪烁液, 因此不产生闪烁。从实验资料:

$$I/I_0 = 0.92 = e^{-\mu \rho d}$$

这里 ρ 是甲苯的密度, 0.867 毫克/厘米³, 而甲苯的平均厚度 d 是测量杯的内径为 1.2 厘米。公式可简化成

$$0.083 = \mu(0.867)(1.2)$$

得到

$$\mu = 0.080 \text{ 厘米}^2/\text{毫克}$$

这个衰减系数值可预言含 ^{125}I 的不同体积甲苯溶液的吸收。

4.3 ^{125}I 衰变的途径

假设 8 % 的 γ 有贡献。

图 1 方括号数据表示衰变的不同途径, 每种途径的几率, 以及当 8 % 的 27.5 千电子伏X射线和 35.5 千电子伏 γ 射线终止在 15 毫升闪烁液内时在其中产生的能量。表 2 中给出衰变的主要的组和几率。给出的计算比值:

$$R = 0.409 / (0.591 - 0.24) = 1.165$$

它与实验求得的平均比值 1.143 基本相同。

4.4 淬灭效应

4.4.1 水

测量样品中水的含量从 0.05 到 3.05 毫升改变, 保持样品和闪烁液总体积不变, 为 15.05 毫升, 从表 3 中可以看到 ^{125}I 计数效率不变。淬灭程度同样以测量 ^{137}Cs - $^{137\text{m}}\text{Ag}$ 源的 662 千电子伏 γ 射线康普顿边的脉冲高度来监视。在水含量的整个变化过程中, 康普顿边的脉冲高度值基本不变。

4.4.2 化学淬灭 (CH_3NO_2)

硝基甲烷 (CH_3NO_2) 作为淬灭剂是因

为它可溶于乳浊液系统的甲苯部分, 该系统能完成能量传递过程。 ^{125}I 计数效率同康普顿边脉冲高度监视的淬灭程度有关。两个不同的实验说明了淬灭曲线的重复性。

4.4.3 颜色淬灭

两种有色试剂用来研究颜色对 ^{125}I 计数效率的影响。甲基橙 (Methyl-orange) 是黄色物质, 而水牛兰黑 (Buffalo blue-black) 是一种很暗的兰色。闪烁溶质发射光子后, 颜色淬灭剂充当光子的吸收体。随着从闪烁液中逃逸的光子数的减少, 闪烁效应减少。

颜色淬灭剂的浓度是这样决定的, 在加到最大淬灭时所需的淬灭剂体积对总体积引起很小的变化。对康普顿边脉冲高度监视而言, 两种颜色的影响没有明显差别。

4.5 淬灭的脉冲高度谱

化学淬灭和颜色淬灭对乳浊液闪烁液中 ^{125}I 的脉冲高度谱的影响: 淬灭量的增加引起响应的减少, 并且谱向较小脉冲高度方向漂移。在最大淬灭时仅测到最强能量 (40 千电子伏) 的衰变。

五、结论

用这里指出的理论的和实验的数据, 对 ^{125}I 的液体闪烁测量作了解释。激发主要是由于 ^{125}I 的衰变过程中产生的俄歇电子和转换电子引起的。 ^{125}I 衰变过程产生的X射线和 γ 射线仅导致较小的贡献 ($\sim 8\%$)。无淬灭溶液的计数效率 (76%) 基本上是所期望的效率。

参考资料 16 篇 (略)

(Horrocks DL: Nucl Instr Meth 133: 293~301, 1976 (英文) 姜尼娜译, 杨宁礼校)