

# 切伦科夫辐射测量方法概述

随着液体闪烁测量仪器和方法的迅速发展,切伦科夫辐射计数方法越来越多地用到生物学、医学、环境科学、卫生学和核物理等学科的研究中。它是硬 $\beta$ 发射体的常规测量方法之一。本文介绍用液体闪烁谱仪测量切伦科夫辐射的方法。

## 一、基本原理

当一个带电粒子通过透明介质(也称切伦科夫发生体)时,若它在介质中的速度大于光在该介质中的速度就产生切伦科夫辐射。

$\beta$ 粒子在任何一种介质中,能够产生切伦科夫辐射的最小能量,称为 $\beta$ 粒子对该介质的切伦科夫阈能:

$$E = 511 \left[ \sqrt{\frac{n}{n^2 - 1}} - 1 \right]$$

对于给定的介质, $n$ (介质的折射率)是一定的,切伦科夫阈能与折射率的关系示于图1〔2,3〕。例如 $\beta$ 粒子在水 $n = 1.332$ 中的阈能是263千电子伏,所以放射核素发射的 $\beta$ 粒子的能量超过263千电子伏,在水中都能直接测量。

切伦科夫辐射还有如下特点:

- (1)有方向性;
- (2)谱的连续性;
- (3)光子产额小;
- (4)切伦科夫辐射与荧光和韧致辐射产生机理不同。光脉冲持续时间小于1毫微秒。

## 二、测量方法

把待测的物质,溶解于适宜的溶剂中,

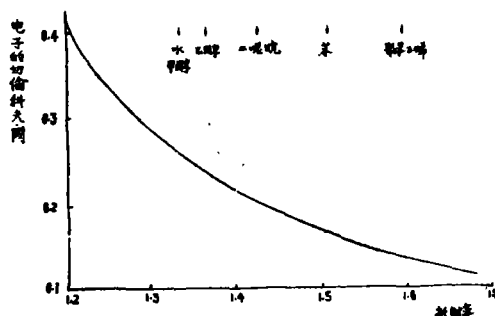


图1 电子的切伦科夫阈能随介质折射率(589毫米的光, 20°C)的变化

再吸取到样品杯内,在液体闪烁谱仪中进行测量。由于切伦科夫辐射计数效率较低和有颜色淬灭,所以测量方法中,主要讨论计数效率的改进和颜色淬灭校准。

### 1. 计数效率及影响因素:

切伦科夫的计数效率与 $\beta$ 粒子能量,溶剂及其折射率、波长转换剂,几何条件及样品杯材料,光电倍增管特性和样品密度等因素有关,根据切伦科夫辐射性质,设法降低切伦科夫阈能或者提高脉冲高度,以达到提高计数效率之目的,是测量方法研究的重要内容之一〔1~10〕。

许多作者研究了计数效率,在同样实验条件下, $\beta$ 发射核的 $\beta$ 谱形状和最大 $\beta$ 能量对计数效率起决定作用。

### (1) 溶剂:

对溶剂的主要要求是:对兰光和近紫外光吸收要少;适合制样需要;避免出现可能引起淬灭的颜色并且价格要便宜。

切伦科夫计数中最广泛使用的溶剂是水,对切伦科夫辐射是高度透明的;对于水溶性样品水是理想的溶剂。但是,对于很多种生物样品,需要使用其它溶剂。表1列出

了在各种溶剂中, 实验测定的 $^{32}\text{P}$ 的相对计数效率<sup>〔11、12〕</sup>。我们的实验结果<sup>〔13〕</sup>表明: 在甲苯、二甲苯、苯、水、无水乙醇、四氯化碳、二噁烷和氯仿中 $^{32}\text{P}$ 的相对计数效率分别是1.39、1.18、1.05、1.00、0.95、0.71、0.66和0.63。表1中的相对计数效率的变化, 主要是因为各种溶剂的折射率不同。正如(1)式和图1所示, 随折射率的增加, 切伦科夫阈能降低。用高折射率的

溶剂, 可使更多的 $\beta$ 粒子能量高于切伦科夫阈能。

表1中的溶剂有很多实际应用。氯仿可以提取类脂化合物; 用甲酸进行组织脱脂和消化蛋白质及各种动物组织; 使用5%丙酮的三氯甲烷, 能够测量有机放射性溴化物; 此外, 还可选择一种高折射率溶剂, 以便测量在水中不能探测的核素。

表1. 在各种溶剂中 $^{32}\text{P}$ 的相对计数效率

溶 剂	体积比(v/v)	相对计数效率	溶 剂	体积比(v/v)	相对计数效率
水		1.00	石 油 醚		1.21
甲 酸		0.96	氯 仿 甲 醇	2/1	1.26
甲酸 - 醋酸丁脂	1/1	1.00	己 烷		1.28
甲 醇		1.08	异 丙 醇		1.29
氯 仿		1.14	异丙醇 - 正庚烷	1/1	1.31
异丙醇 - 水	1/1	1.15	氯仿 - 异丙醇	2/1	1.32
乙 醇	95%	1.16	正 庚 烷		1.38
乙醇 - 水	4/1	1.19	苯		1.59
丙 酮		1.19	甲 苯		1.66

## (2) 增加介质的折射率:

设法增加介质的折射率, 可以降低切伦科夫阈能, 从而改进计数效率。例如: 改变水中糖的浓度, 使折射率从1.33增加到1.44, 硬 $\beta$ 发射体 $^{40}\text{K}$ 和 $^{144}\text{Ce}/^{144}\text{Pr}$ 的计数效率增加7%。但是对于 $\beta$ 能量接近切伦科夫阈能的 $\beta$ 发射体 $^{36}\text{Cl}$ 和 $^{204}\text{Tl}$ , 当折射率增加0.01时, 则计数率增加10%<sup>〔3〕</sup>。Ross<sup>〔2〕</sup>增加水中甘油浓度, 使折射率从1.332增加到1.464,  $^{204}\text{Tl}$ 和 $^{32}\text{P}$ 的计数率分别增加7.1%和0.7%。但只对那些能量较低的 $\beta$ 发射体才有实际意义。因为能量较低的 $\beta$ 谱中, 低于切伦科夫阈能的 $\beta$ 粒子比硬 $\beta$ 发射体的大得多。例如,  $^{36}\text{Cl}$ 、 $^{204}\text{Tl}$ 、 $^{24}\text{Na}$ 和 $^{32}\text{P}$ 的 $\beta$ 谱中低于水中切伦科夫阈能的百分数分别是40、47、16和10。所以降低切伦科夫阈能, 低能 $\beta$ 发射体将有较多的 $\beta$ 粒子超过阈能而被测到。

## (3) 波长转换剂:

切伦科夫辐射的大部分能量集中于紫外

范围, 而Cs-Sb光阴极和双硷性光阴极的最大光谱响应分别在430毫微米和350毫微米左右, 所以光谱响应的匹配不好; 切伦科夫辐射有方向性, 而通常的液体闪烁谱仪, 两只光电倍增管互成180°, 实现符合测量, 这样在一只管上的响应为最大时, 则在另一只管上响应正好是最小; 最后, 玻璃样品杯, 光电倍增管的玻璃窗吸收紫外光。为了解决这三个问题, 把适当的波长转换剂加入溶剂中去吸收紫外光, 从而达到改进计数效率的目的。

使用波长转换剂, 对于能量从 $^{204}\text{Tl}$ (0.77百万电子伏)到 $^{42}\text{K}$ (3.6百万电子伏)的宽范围的 $\beta$ 发射核, 计数效率分别增加100%~30%。最大 $\beta$ 能量比 $^{32}\text{P}$ 小的核素计数率都成倍增长。这是因为当加入波长转换剂后, 总的作用相当于提高脉冲高度或相当于降低甄别阈, 可以测定到更多的 $\beta$ 粒子。此外, 随样品物质量的增加, 由于样品自吸收, 计数效率线性下降, 但加入波长转换剂后, 这

种下降会大大减小。使用波长转换剂的缺点是：制样复杂化了；样品回收困难；这种系统已经不再是纯切伦科夫系统，因而可能出现化学淬灭等。在具体实验中，用不用波长转换剂要全面考虑。

Ross [15] 和很多人研究了波长转换剂 [1, 3, 10, 16]。比较好的有十几种。对波长转换剂的主要要求是：计数效率高，受pH影响小，不出现颜色淬灭，稳定和无荧光现象。常用波长转换剂有 $\beta$ -萘酚、2-萘胺、吖啶、4-甲基缬形酮、2-萘酚-3,6-二磺酸、7-氨基-1,3-萘二磺酸、2-苯酚-6,8-二磺酸、1-萘胺-4-磺酸钠、2-萘胺-6,8-二磺酸等。也有人用了Popop, 水杨酸钠、 $\beta$ -萘胺、2-萘酚和7-羟基-4-甲基香豆素等。

波长转换剂的稳定性与它的种类、浓度及溶液pH有关。制备后很快就用，稳定性影响不大，若用于长时间测量（如测定半衰期等），稳定性就重要了。所列波长转换剂前四种稳定性较好。有的时间长了会变色。

波长转换剂的最佳浓度与被测的 $\beta$ 能量、样品量、溶剂等有关，一般在50~200毫克/升之间。

从计数效率增长，抗pH影响能力和稳定性等多方面看，目前最好的波长转换剂是4-甲基缬形酮，它在水中溶解度为10克/升，呈紫兰色，还可溶于乙醇，在醚中微溶。其次是7-氨基-1,3-萘二磺酸和2-萘胺-6,8-二磺酸。

我们 [13] 用4-甲基缬形酮、2-氨基-6,8-二磺酸和水杨酸钠等几种波长转换剂来改进 $^{32}\text{P}$ 的计数效率。其中4-甲基缬形酮效果最好。在170毫克/升的水溶液的乙醇溶液中， $^{32}\text{P}$ 的计数效率分别比在水中的高1.10和1.25倍。

#### 〔4〕样品杯和光电倍增管

由于切伦科夫辐射的能量主要集中于紫外范围和它有方向性，样品杯材料对本底效

率的影响以及效率随体积的变化都比液体闪烁测量明显。Calf [9] 和其他人 [2, 3, 10, 17~21] 都作了这方面研究。

常用的计数杯有玻璃、聚乙烯和聚四氟乙烯三种。它们的本底依次降低，效率依次升高。这是因为聚乙烯及聚四氟乙烯杯有如下特点：①对紫外直到200微米的波长仍然透明，而玻璃对此有强烈的吸收；②较强的漫射能力，部分地克服了切伦科夫辐射的方向性；③可能有弱的闪烁作用；④含天然放射性，特别是 $^{40}\text{K}$ 少，本底较低；⑤内部反射较弱。

在同一种溶剂中，不同能量的 $\beta$ 发射体的最佳体积是一样的。但是，计数率对体积的依赖程度不同，能量越低效率随体积的变化越大。

同一种 $\beta$ 发射体，都用玻璃杯，不同溶剂的最佳体积不同，我们的实验结果 [13] 是 $^{32}\text{P}$ 在水以及苯、二甲苯、甲苯中的最佳体积分别是8毫升和4毫升。

切伦科夫辐射计数本底主要来源于样品杯，例如：Clausen [10] 指出，空杯、加10毫升及15毫升水的本底分别为 $15.5 \pm 0.7$ ， $15.5 \pm 0.7$ 和 $16.6 \pm 0.7$ ，可见加入15毫升水后，本底只增加约10%。所以为了得到尽量大的灵敏度，使用尽可能大的体积为宜。

使用新型光电倍增管可以改进计数效率，国内已有材料引用了具体数据 [22]。RCA 4501-V<sub>3</sub>光阴极光电倍增管的计数效率都比S11光阴极光电倍增管的高。使用单管液体闪烁计数器时，计数效率较高，但本底亦较高。

#### 〔5〕固体切伦科夫发生体：

原则上任何透明的固体都可以作为切伦科夫发生体。当要使用大体积发生体时，固体就更好些。有机玻璃就是较好的固体发生体，容易加工和光学性质优良。

样品杯本身实际上也是切伦科夫发生体。把承托 $^{32}\text{P}$ 的纸悬在样品杯里，就能够

测量 $^{32}\text{P}$ 在杯壁产生的切伦科夫辐射。 $^{32}\text{P}$ 亦能在硅胶上发生切伦科夫辐射。我们使10微升 $^{32}\text{P}$ 水溶液在玻璃样品杯中自然蒸发变干后,测到的计数效率约为再加入10毫升水测得的计数效率的66.7%,也就是说切伦科夫辐射的相当大一部分是在样品杯上发生的〔13〕。也有人分别把含有 $^{36}\text{Cl}$ 、 $^{42}\text{K}$ 和 $^{86}\text{Rb}$ 的植物组织悬挂在样品杯中,进行直接测量。

其它的固体发生体还有聚乙烯、碘化钠、碘化铯、石英、冰以及很多有机化合物晶体。此外减少样品比重能够增加计数效率。

## 2、淬灭及校准

在切伦科夫辐射测量中,不存在化学淬灭,主要是颜色淬灭校准问题。

由于样品中存在着光学吸收带,特别是当这些吸收带出现在可见光和近紫外波段时,就会使切伦科夫光衰减,引起计数效率下降,这就是颜色淬灭。 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{NO}_2^-$ 离子是很强的紫外光吸收体,可以造成中等到严重程度的淬灭,所以一般很少用硝酸及硝酸盐溶液。看得见的有色溶液,特别是红色和黄色,如血液、肝和脾以及铁氰化物的样品,都能引起颜色淬灭。为减少淬灭,脱色最直接了当,有效而精确。但操作麻烦,有引起化学发光的可能。

许多人〔1、3、17、18、22、23〕研究了颜色淬灭问题,原则上使用液体闪烁测量中的校准方法,如内标准法,样品道比法,外标准法及外标准道比法等都可以用于切伦科夫辐射测量的淬灭校准。有关的原理和方法资料〔22〕中已有充分论述,本文不再赘述。但是因为切伦科夫辐射谱较宽和辐射较弱,也具有自己的特点。下面介绍用的样品道比法和外标准道比法的一些特点。

### (1) 样品道比法

此法优点是快速简便,只要一次计数。缺点是不适于低计数率样品及严重淬灭样品。使用该法的关键是要仔细选择条件

〔17、22、23〕。

实验证明:①在同样测量条件下,对同一种溶剂可以共用一条淬灭校准曲线。例如孔雀绿、甲基橙、苯胺兰等用作淬灭剂,淬灭校准曲线重复很好,计数效率的误差是 $\pm 2\%$ ,用淬灭校准曲线得到的计数效率的偏离 $< \pm 2\%$ 。用甲基红、甲基绿、甲烯兰、溴甲酚紫和甲酚绿等做淬灭剂,得到的淬灭校准曲线重复得也很好,只是当淬灭剂浓度太高时,出现偏离。②用同一种淬灭剂,对不同的溶剂,测得了不同的淬灭校准曲线,所以标准淬灭样品一定要和待测样品是同一种溶剂。③在强淬灭情况下,样品体积对计数效率和道比值都有些影响。

### 〔2〕外标准道比法

把一个 $\gamma$ 源放在样品附近,当它在溶剂和计数杯中产生的康普顿电子的能量大于切伦科夫阈能时,就能产生切伦科夫辐射。 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{133}\text{Ba}$ 外源的 $\gamma$ 射线能量太低,不能使用, $^{226}\text{Ra}$ 效果较好。有人〔23〕介绍了测量条件选择的典型方法。这种方法,效率大约变化 $2\%$ ,外源道比变化仅约 $1\%$ ,不太灵敏。校准的计数效率误差 $< 2\%$ 。最近有人〔24〕为没有外标准源的仪器设计了一个简便的 $^{60}\text{Co}$ 外源系统。

应用外标准道比法应该注意下述几点:

①同一种溶剂,在同样测量条件下,不同的淬灭剂有相同的外标准道比曲线。②对同一种淬灭剂,不同溶剂(如水,乙醇、己烷、丙酮和氯仿等)有不同的外标准道比校准曲线。所以标准淬灭样品的溶剂一定要与待测样品的溶剂相同。③对严重淬灭样品误差大。④空样品杯给出的外源计激率约为装入10毫升水后的70%,所以杯子差异对道比有一定的影响。在通常的淬灭程度,体积变化约 $\pm 10\%$ ,对效率影响很小;在严重淬灭时,特别是体积小于10毫升,体积对效率影响较明显。⑥对高能 $\beta$ 发射体更灵敏。

还有些颜色淬灭特有的校准方法,如光

谱分析法, 隔离内标准法和四线比较法, 文献〔22〕已做了较详细的介绍。此外, 还有“切伦科夫插入物”法, 但只能用于高能 $\beta$ 发射体。

### 三、应 用

切伦科夫辐射计数已经应用到测定硬 $\beta$ 发射体的每个领域。诸如测量植物和动物组织同位素产品、环境物质、反应堆流出物和生物医学液体等样品。若发生了同位素事故, 能够迅速测定脱色后的人尿中的 $^{90}\text{Sr}$ 和 $^{42}\text{K}$ , 而不受 $^3\text{H}$ 和 $^{14}\text{C}$ 等干扰。对 $^{89}\text{Sr}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{91}\text{Y}$ 、 $^{90}\text{Mo}$ 、 $^{140}\text{Ba}$ 和 $^{144}\text{Pr}$ 等放射性流动液进行连续监测〔25〕。在生物医学研究中, 常用来测定 $^{32}\text{P}$ 。如 $^{32}\text{P}$ -三磷酸腺苷的测定〔18, 20, 26〕, 过氧化氢溶液中 $^{32}\text{P}$ 的测定及核苷酸柱层析分离物中 $^{32}\text{P}$ 的测定〔11〕。在植物对无机养份吸收和传输的研究中切伦科夫辐射测量应用很多, 有人作了专题综述〔27〕。测量方法大致分二类: (1) 对样品预先处理: 如对果实、叶和根先提取, 或用浓硫酸先溶解植物材料, 如玉米、大麦的叶和根〔10〕, 然后测量其中的 $^{32}\text{P}$ 。(2) 不作前处理, 把干燥的大麦根和叶等植物材料整个或切碎后, 直接放入7-氨基-1,3-萘二磺酸水溶液中(对 $\beta$ 最大能量大于或小于百万电子伏的核素最佳浓度分别是2.5和5.0毫克分子)进行测量。Läuchli〔10〕测量了 $^{24}\text{Na}$ 、 $^{36}\text{Cl}$ 、 $^{86}\text{Rb}$ 和 $^{42}\text{K}$ 。有人〔28〕测量 $^{32}\text{P}$ 时发现, 有88%的 $^{32}\text{P}$ 浸泡在水溶液中。Kannan〔29〕认为 $^{59}\text{Fe}$ 切伦科夫计数的灵敏度至少为 $\gamma$ 射线的1.5倍。组织中存在天然的 $^{127}\text{I}$ , 经由 $^{127}\text{I}(n, \gamma)^{128}\text{I}$ 反应, 再进行照射后化学处理, 已经测量了毫微克水平的碘。

在存在很强的低能 $\beta$ 发射体的情况下, 能够以很少的干扰甚至没有干扰测量少量的高能 $\beta$ 发射体。依次使用切伦科夫辐射计数

和液体闪烁计数, 可以测量相差较大的同位素, 如鉴定 $^{32}\text{P}$  ( $E_{\max}=1.71$ 百万电子伏) 中的 $^{33}\text{P}$  ( $E_{\max}=0.249$ 百万电子伏) 的含量〔30〕, 测量了刚刚分离掉 $^{90}\text{Y}$ 的 $^{90}\text{Sr}$  ( $E_{\max}=546$ 千电子伏) 和 $^{89}\text{Sr}$  ( $E_{\max}=1463$ 千电子伏) 的混合物〔31〕。若测量在分离后24小时完成,  $^{90}\text{Sr}$ 对 $^{89}\text{Sr}$ 的放射性比在20:1~1:20之间, 测量结果是精确的。在 $^{82}\text{Br}$ 存在的情况下, 以很小干扰测量了 $^{80}\text{Br}$ 和 $^{80\text{m}}\text{Br}$ 。

双标记测量: 在切伦科夫系统中进行双标记物的测量, 其基本原理与液体闪烁测量没有根本区别, 已有人〔22〕作了详细论述。只是切伦科夫辐射谱之间的重叠更严重, 这就要求两种同位素的切伦科夫辐射谱有足够的区别而且测量条件选择要合理。例如Ross〔6〕用准确度函数选择测量条件, 进行了 $^{36}\text{Cl}$ 和 $^{32}\text{P}$ 的双标记测量, 磷与氯放

射性比在 $\frac{1}{1} \sim \frac{10}{1}$ 或 $\frac{1}{1} \sim \frac{1}{10}$ 之间时磷和氯的最大误差分别为 $<3\%$ 和 $<5\%$ 。用性能值 $P$ 来选择测量条件,  $P$ 值越大, 两种同位素分离越好〔22〕。用这种方法评价了 $^{144}\text{Ce}/^{144}\text{Pr}$ - $^{204}\text{Tl}$ 、 $^{144}\text{Ce}/^{144}\text{Pr}$ - $^{36}\text{Cl}$ 、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ - $^{204}\text{Tl}$ 和 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ - $^{36}\text{Cl}$ 四个同位素对的测量, 当低能同位素的放射性比为5~10时, 误差 $\leq 5\%$ 〔32〕。

用切伦科夫辐射计数测量 $\gamma$ 射线: 在水中把一种高有效原子序数的成分加入到水中, 以增加发生体的折射率和降低阈能, 能够测量某些 $\gamma$ 射线产生的康普顿电子。例如Gelsema〔8〕用蒸馏水 ( $n=1.330$ )、95%的丙酸乙醇水溶液 ( $n=1.449$ ) 和碘化钠饱和水溶液 ( $n=1.490$ ) 作发生体, 测量 $^{186}\text{W}$ 、 $^{204}\text{Tl}$ 、 $^{32}\text{P}$ 、 $^{90}\text{Y}$ 、 $^{144}\text{Ce}/^{144}\text{Pr}$ 等 $\beta$ 发射体,  $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{85}\text{Sr}$ 和 $^{54}\text{Mn}$ 等 $\gamma$ 发射核以及 $^{131}\text{I}$ 、 $^{198}\text{Au}$ 、 $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ 、 $^{46}\text{Sc}$ 和 $^{88}\text{Y}$ 等 $\beta$ - $\gamma$ 发射核, 并与液体闪烁和碘化钠并型晶体等测量方法进行了比较。虽

然计数效率比较低,但是对于放射性远高于本底的大体积水溶液样品较上面两种方法有某些优点。

### 参 考 资 料

- 1、Elrick RH and Parker RP: Int J Appl Radiat Isotopes 19: 263, 1968
- 2、Ross HH: Anal Biochem 41: 1260, 1969
- 3、Parker RP and Elrick RH: In "The current status of liquid scintillation counting" (Bran-some ED ed) P 110 Grune and Stratton 1970
- 4、Dyer A: An introduction to liquid scintillation counting, P89, Heyden, 1974
- 5、Kobayashi Y and Maudsley DV: Biological application of liquid scintillation counting P81, Academic Press, 1974
- 6、Ross HH and Rasmussen GT: In "Liquid scintillation counting, recent development" (Stanley PE and Scoggins BA eds) P363, Academic Press, 1974
- 7、Parker RP and Elrick RH: Int J Appl Radiat Isotopes, 17: 361, 1966
- 8、Gelsema WJ et al: Int J Appl Radiat Isotopes 26: 443, 1975
- 9、Calf GE: Int J Appl Radiat Isotopes 28: 736, 1977
- 10、Läuchli A: Int J Appl Radiat Isotopes 20: 265, 1969
- 11、Johnson MK: Anal Biochem 29: 348, 1969
- 12、Havilana RT and Bieber LL: Anal Biochem 33: 323, 1970
- 13、中国医学科学院放射医学研究所同位素室: 液体闪烁测量方法的研究, 全国同位素与射线应用经验交流会资料, 1977
- 14、Ross HH: 同3, P123
- 15、Ross HH: In "Organic scintillators and liquid scintillation counting" (Horrocks DL and Peng C eds) P757, Academic Press, 1971
- 16、Cosme G et al: Nucl Instrum Methods 70: 20, 1969
- 17、Frič F and Palovčič'kova' V: Int J Appl Radiat Isotopes 20: 305, 1975
- 18、Gould JM et al: Anal Biochem 50: 540, 1972
- 19、Clausen T: Anal Biochem 22: 70, 1968
- 20、Cation SC: Anal Biochem 48: 311, 1972
- 21、Robinson JR: Int J Appl Radiat Isotopes 20: 651, 1969
- 22、杨守礼: 见 "同位素技术及其在生物医学中的应用" (中国医学科学院第七研究室主编), P34~68, 68~83, 1977
- 23、Kamp AJ: Anal Biochem 44: 369, 1971
- 24、Nascimento F VF: Int J Appl Radiat Isotopes 28: 789, 1977
- 25、Colomer J et al: In "Liquid scintillation counting" Vol 2 (Crook MA et al eds) p181, Heyden and Sonltd, 1972
- 26、Bais R: Anal Biochem 63: 271, 1975
- 27、Läuchli A: 同15, P579
- 28、Chapin FS ■ and Holleman DF: Int J Appl Radiat Isotopes 25:

- 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 $^{125}\text{I}$

### 一、引言

已有几篇论文报告了内部样品液体闪烁方法测定 $^{125}\text{I}$ 。此外, Ashcroft报告了在载有重金属的闪烁液外部测量 $^{125}\text{I}$ 发射的 $\gamma$ 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 $\gamma$ 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 $^{125}\text{I}$ 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 $^{125}\text{I}$ 计数效率为76%。

### 二、实验

#### 2.1样品制备

样品用含 $\text{Na}^{125}\text{I}$ 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 $\mu\text{s}$ 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 $\gamma$ 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 $^{125}\text{I}$ 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