

对硬 β 放射性的切仑科夫计数

王 遗 宝 张 国 强 沈 国 卫

(上海市农业科学院作物育种栽培研究所)

一、原 理

1934 年瓦维洛夫和切仑科夫发现, 高速带电粒子通过透明媒质时, 发出微弱的连续可见光, 这种光通常称为切仑科夫辐射。随后, 塔姆和弗朗克应用经典电磁理论作出了解释。切仑科夫辐射是具有连续光谱的平面偏振光, 光量十分微弱, 发光时间为毫微秒级, 且具有鲜明的方向性。当快速带电粒子通过一透明媒质时, 产生切仑科夫辐射的条件为:

$$v > \frac{c}{n} \text{ 或 } \beta > \frac{1}{n} \quad (1)$$

辐射的方向与粒子运动方向的夹角 θ 有如下的关系:

$$\cos \theta = \frac{c}{v \cdot n} = \frac{1}{\beta n} \quad (2)$$

在以上两式中, v 为带电粒子在媒质中的运动速度, c 为真空中光速, n 为光在该媒质中的折射率。

随着核物理科学的发展, 切仑科夫计数器被广泛地应用于高能粒子的探测, 成为一种十分重要的探测器。切仑科夫计数器主要由辐射体、光收集系统、光电倍增管、放大器、分析器和定标器等组成。这与一般的闪烁计数器十分类似, 所不同的就是利用产生切仑科夫辐射的辐射体(气体、液体或固体)代替了闪烁计数器中的闪烁体。因此我们考虑用液体闪烁计数器作为切仑科夫探测器, 测量 β 放射性。

由(1)式可知, 对于折射率为 n 的透明媒质, 只有当 β 射线的最大能量 $E_{\beta \max}$ 大于某一能量 $E_{\beta \text{阈}}$ 时, 才能产生切仑科夫辐射。下面我

们以媒质水为例, 讨论 β 射线在水中产生切仑科夫辐射的阈值能量。由相对论原理知道, 对 β 射线其能量关系如下:

$$E_{\beta} = m_l c^2 - m_{ol} c^2$$

$$\text{或 } E_{\beta} = m_{ol} c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right]。$$

式中, m_l 为电子质量, m_{ol} 为电子静止质量, $\beta = \frac{v}{c}$ 。

等号右面按级数展开后即有

$$E_{\beta} = m_{ol} c^2 \left(\frac{1}{2} \beta^2 + \frac{3}{8} \beta^4 + \frac{5}{16} \beta^6 + \dots \right) \quad (3)$$

按(3)式可以得出 β 射线的能量 E_{β} 与 β 粒子运动速度的函数关系, 如表 1 所示:

表 1 关于电子的数据

$\beta \left(\frac{v}{c} \right)$	E (千电子伏)	$\beta \left(\frac{v}{c} \right)$	E (千电子伏)
0.60	127.7	0.71	214.4
0.61	133.8	0.72	225.3
0.62	140.2	0.73	236.4
0.63	147.0	0.74	248.5
0.64	154.1	0.75	261.4
0.65	161.3	0.7519	264.0
0.66	169.2	0.76	275.2
0.67	177.2	0.77	289.7
0.68	185.8	0.78	305.6
0.69	194.9	0.79	322.3
0.70	204.3	0.80	340.5

已知媒质水的折射率 $n = 1.33$, 由(1)式知道, β 射线在水中产生切仑科夫辐射的条件为:

$$\beta > \frac{1}{n} = 0.7519。$$

查表 1 对应的能量为 $E_{\beta_{\text{阈}}} = 0.264$ 兆电子伏。显然, 只有当 β 放射性的最大能量 $E_{\beta_{\text{max}}}$ 大于 $E_{\beta_{\text{阈}}}$ 时, 才能产生切仑科夫辐射, 而小于 $E_{\beta_{\text{阈}}}$ 时就不能产生切仑科夫辐射。实验证明由于切仑科夫辐射十分微弱, 加之媒质对辐射光的吸收及光收集系统的损失等种种原因, 探测到水中产生切仑科夫辐射的阈能显然高于 0.264 兆电子伏。

由上面讨论可知, 切仑科夫计数器显然只能探测硬 β 放射性, 但它与液体闪烁计数器相比, 却具有以下几个优点: (1) 不需昂贵的闪烁液。(2) 没有化学淬灭。(3) 可测的样品量大。(4) 能排除低能辐射的干扰。(5) 荧光与温度有很大关系, 而切仑科夫辐射与温度则没有任何关系。

二、仪器和材料

1. 放射源

考虑到一般生物学、医学和农业科学研究中同位素应用的特点, 我们选择了以下两种 β 放射源: (1) $^{32}\text{P}:\text{NaH}_2^{32}\text{PO}_4$ 溶液, (2) $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$: 锶-镱标准溶液。

2. 辐射媒质

(1) 蒸馏水, (2) 无水乙醇 (AR), (3) 甲苯 (AR), (4) 甲苯 (AR) + 波长转换剂 POPOP。

3. 仪器

采用 262 厂生产的 FJ-353 双道液体闪烁计数器, 该仪器是带相加放大器的双管快符合型液闪谱仪, 具有上、中、下三个甄别器, 经分析选择开关, 可组成双道脉冲分析系统, 并由双道自动定标器显示测量结果。探测器一次可容纳 25 个样品, 采用半自动换样。测量杯材料为低钾玻璃。该仪器适于对低能软 β 放射性 (例如 ^3H 、 ^{14}C 等) 进行液闪测量。

三、实验和结果

1. 测量条件的选择

经选择, 仪器的工作点为: 高压 (H. V.): 1250 伏, 放大器衰减: A 为 $\frac{1}{8} \times$, B 为 $\frac{1}{8} \times$

为了决定甄别阈的大小, 我们对 ^{32}P 放射源在水和甲苯中产生切仑科夫辐射的脉冲信号, 进行幅度分析, 结果见图 1。

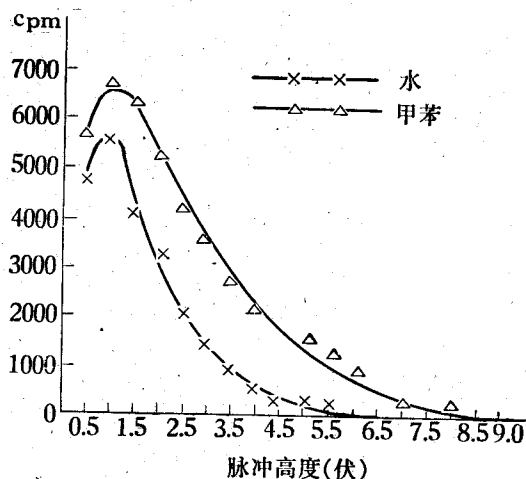


图 1 ^{32}P 放射源在媒质水和甲苯中产生切仑科夫辐射能谱曲线

H. V. = 1250 伏, A, B 衰减 $\frac{1}{8} \times$, 道宽 0.5 伏

^{32}P 在媒质水和甲苯中产生的切仑科夫辐射信号很小, 其谱线与 ^3H 在闪烁液中产生荧光的谱线十分相近, 因此测量时上甄别阈置于 5 伏处为宜, 这与一般液闪测量 ^3H 时相同, 测量道为 0.5 伏—5 伏。当使用波长转换剂时, 由于信号幅度发生了变化, 仪器的工作点也应相应改变。

2. 不同媒质的计数效率

用 15 毫升水、乙醇和甲苯作媒质, 加 10 微升放射源 ^{32}P (其强度为 1×10^5 dpm) 或 $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ (其强度为 2.25×10^5 dpm), 进行切仑科夫计数。结果见表 2:

表 2 不同媒质的计数效率

媒质	折射率	计数效率 (%)		本底 (cpm)
		$^{32}\text{P}(E_{\beta_{\text{max}}} = 1.71 \text{ 兆电子伏})$	$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}(E_{\beta_{\text{max}}} = 0.544 \text{ 兆电子伏})$	
水	1.33	28.1	19.0	34.4
乙醇	1.36	28.1	19.1	38.7
甲苯	1.49	36.1	23.2	50.0

本底测量时间为 10 分钟

由表 2 可见, 甲苯中计数效率最高, 乙醇和水则相近。这是由于 $n_{\text{甲苯}} > n_{\text{乙醇}} \approx n_{\text{水}}$ 。 β 粒子

在甲苯中产生切仑科夫计数所需的阈能比在水和乙醇中的小。但是，甲苯中的本底也高于水和乙醇。以水为媒质，其计数效率和品质因素虽不及甲苯，但成本低廉，因而有实际应用意义。

3. 媒质体积与计数效率的关系

采用不同体积的蒸馏水为媒质，加 10 微升放射源 ³²P (其强度为 1 × 10⁵ dpm)，结果见表 3。

表 3 媒质体积与计数效率的关系

体 积 (毫升)	5	7	10	12	15	17	20
效率(%)	25.5	27.8	29.7	28.2	28.1	27.9	23.9

可见，³²P 放射源在以水为媒质进行切仑科夫计数时，其计数效率与媒质体积在一定范围内关系不大，以 10—15 毫升为宜。

4. 不同样品容器的比较

由于低钾玻璃的闪烁测量杯价格较贵，从节约起见，我们用普通青霉素瓶作样品容器，以水为媒质，在不同媒质体积情况下，对 ³²P (1 × 10⁵ dpm，体积 10 微升) 放射源进行测量，并与低钾玻璃测量杯作比较，其结果见表 4。可见，普通青霉素瓶比低钾玻璃样品瓶的计数效率略低，本底稍高。

表 4. 不同容器的计数效率

媒质体积(毫升)	5	7	10	12	本 底 (cpm)
低 钾 测 量 杯	25.5%	27.8%	29.7%	28.2%	34.4
青 霉 素 瓶	25.3%	25.1%	24.9%	23.9%	106.1

本底测量时间为 10 分钟

5. 低能 β 放射性对切仑科夫计数的干扰

由前面分析可知，当某种 β 放射性的最高能量 E_{βmax} 小于在媒质中产生切仑科夫辐射的阈能时，则该种放射性同位素不能引起切仑科夫计数。为此我们在“³²P-媒质水”中分别加入 2 微居里的 ¹⁴C 和 ⁴⁵Ca 放射源 (¹⁴C-Na₂¹⁴CO₃，比强 20 微居里/毫升，体积 100 微升；⁴⁵Ca-CaCl₂，比强 40 微居里/毫升，体积 50 微升) 测量，结果见表 5：

表 5 低能 β 对切仑科夫计数的影响

样 品	计 数
³² P + 10 毫升水	16656 ± 129
³² P + 10 毫升水 + 2 微居里 ¹⁴ C	16431 ± 128
³² P + 10 毫升水	17777 ± 133
³² P + 10 毫升水 + 2 微居里 ⁴⁵ Ca	17321 ± 132

表中计数差异均在放射性统计误差范围内，可见，¹⁴C 和 ⁴⁵Ca 对“³²P-水媒质”的切仑科夫计数无影响，没有干扰作用。这是由于 ¹⁴C 和 ⁴⁵Ca 的 E_{βmax} (¹⁴C 为 0.156 兆电子伏，⁴⁵Ca 为 0.252 兆电子伏) 均小于 β 粒子在水中产生切仑科夫辐射的阈能值 (0.264 兆电子伏)。

6. 甲苯中加入波长转换剂 POPOP 对切仑科夫计数效率的影响

为了提高切仑科夫计数效率，我们在甲苯媒质中加入 POPOP，试验结果表明：加入 POPOP 能明显地提高计数效率，且信号幅度也变大。为此，我们对不同浓度的 POPOP 甲苯溶

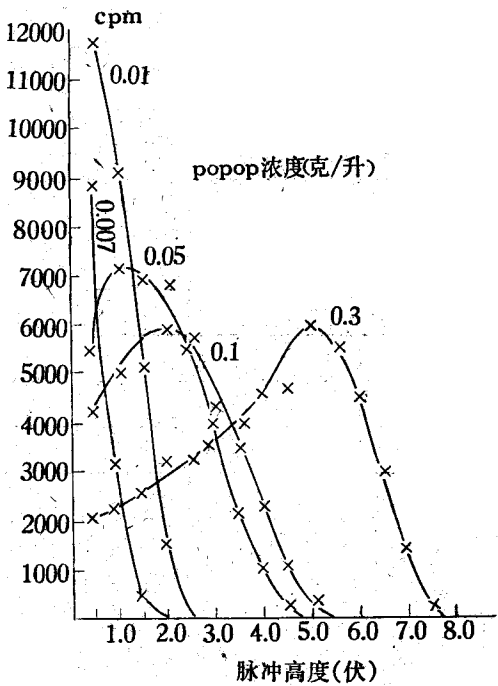


图 2 ³²P 在媒质甲苯中加不同浓度 POPOP 的切仑科夫辐射信号能谱曲线
H.V. = 1250 伏，A, B 衰减均为 1/64 × 1，道宽 0.5 伏

液产生切仑科夫辐射的脉冲信号进行分析,发现信号谱线随 POPOP 浓度的提高而明显变宽且右移(见图 2)。试验表明:当仪器在某一固定工作点工作时,对 ^{32}P 放射源,在甲苯媒质中加入 POPOP 的最佳浓度为 0.05—0.1 克/升,此时测量道仍为 0.5—5 伏,其计数效率最高。不同 POPOP 浓度与计数效率的关系见表 6。

表 6 不同浓度的 POPOP 与计数效率的关系

浓度(克/升)	0.01	0.05	0.07	0.10	0.30
计数效率(%)	32.7	45.8	48.5	47.9	35.1
本底(cpm)			58.6	49.3	

7. 实验举例

为了提高上海地区磷肥施用的效果,需研究上海郊区的土壤施用磷肥后,磷肥中磷素形态的转化。采用 ^{32}P 示踪进行试验,具体做法如下:将上海郊区四种不同类型的土壤 12.5 公斤进行水稻盆栽,每盆加过磷酸钙 10 克,其中含有 500 微居里的 $\text{NaH}_2^{32}\text{PO}_4$ 。12 天后取样,对 1 克风干土采用杰克逊无机磷分级法,每只土壤样品共提取四次,每次获得水溶液 50 毫升,再将该提取液 12 毫升进行切仑科夫计数,测量结果见表 7。

表 7 不同磷酸盐提取液测量脉冲数(样品量 12 毫升)

测量脉冲数 cpm 土壤类型	样品名称 磷酸铝	磷酸铁	磷酸钙	水溶性磷
黄泥头(金山县八二大队)	557.3	446.7	89.7	79.0
青紫泥(青浦县城东大队)	487.3	413.7	192.7	62.0
沟干泥(嘉定县徐行大队)	497.0	274.7	135.7	67.0
夹沙泥(南汇县人民大队)	454.7	226.0	252.0	106.7
本底(提取液空白)	49	39	50	48

工作电压 1220 伏,放大器衰减 $A \frac{1}{8} \times 1$, $B \frac{1}{4} \times 1$, 测量道 0.5 伏—5 伏

由表 7 可见,土壤中施用磷肥后,大部分以磷酸铝,磷酸铁的形态存在,且不同类型土壤中各种磷素形态数量是有差异的,这可为上海郊

区不同土壤施用磷肥提供参考。试验中,采用经离心机分离后的提取液直接进行测量,显然采用切仑科夫计数法较其他方法优越。用空白提取液加已知放射性作为标准样品对计数效率进行校正。发现三种提取液对计数效率影响不大。

四、小 结

1. 据有关资料报道,国外采用 S-11 型光阴极的光电倍增管,以水为媒质的 ^{32}P 水溶性样品的切仑科夫计数效率为 25%。加波长转换剂可达 50%。(见 The Current Status of Liquid Scintillation Counting 1970。)本试验用国产 FJ-353 液体闪烁计数器,以水为媒质的 ^{32}P 放射源的计数效率达 28.1%,对脂溶性样品,可用甲苯作媒质,再加入一定浓度的 POPOP,效率可达 48.5%,效果尚能满足。

2. 试验表明,对硬 β 射线进行切仑科夫计数,其品质因素 θ 不大于 $100 \left(\theta = \frac{E^2}{B} \right)$,但由于目前液闪仪器自动化程度很高,一般都能自动换样、自动数字打印,而且探测器每次可容纳样品量很大,有的仪器每次可放样品杯达 400—500 只之多,这比使用浸入式 G-M 管或井型塑料闪烁体等对液体样品进行计数,速度快且测量方便。

3. 试验还讨论了低能 β 粒子对切仑科夫计数的干扰问题,这对于生物学、医学及农业科学中的同位素示踪所常用的 ^3H — ^{32}P , ^{14}C — ^{32}P 等双标记的测量有特殊意义。

参 考 文 献

[1] 王祝翔著:《核物理探测器及应用》。
 [2] 中国医学科学院分院:《放射医学》,1973 年第 3 期,1976 年第 1 期。
 [3] 双道液体闪烁谱仪试制小组:《原子能科学技术》,1976 年第 3 期。
 [4] 国营 262 厂:《FJ-353 双道液体闪烁计数器说明书》。
 [5] E. 施拉姆等著:《有机闪烁探测器》。

[本文于 1977 年 8 月 20 日收到]