

反符合屏蔽低本底 NaI(Tl) γ 谱仪

宋绍仪 李民万 程冠生 郭明强 哈继录

(中国科学院原子能研究所)

本文报告了一台全 NaI(Tl) 晶体的反符合屏蔽低本底 γ 谱仪。采用交替物质屏蔽, 选用含放射性杂质少的结构、屏蔽材料, 采用反符合、符合技术等措施降低谱仪的本底。主探测器在井形探测器反符合屏蔽条件下, 在 0.05—2.0 兆电子伏能量范围内, 谱仪的积分本底为 35 计数/分。对 ^{137}Cs γ 射线的康普顿减少因子为 3.5。当样品和本底测量时间分别为 1,000 分钟, 置信水平为 95% 时, 对单一的 ^{137}Cs 点源的探测灵敏度为 7×10^{-13} 居里。本谱仪较大地提高了低水平 γ 放射性测量工作的质量; 可用于外环境生物样品和人体尿、粪、血液样品的分析, 亦可用于其它弱 γ 放射性样品的测量。

一、引言

为了迅速准确地用 γ 谱仪分析测量含有微量放射性核素的样品, 例如测定环境样品中放射性核素的浓度, 要求 γ 谱仪有高的探测灵敏度和好的能量分辨率。NaI(Tl) γ 谱仪的相对灵敏度通常用“优质因数”—— η^2/B 来估计 (η 是全能峰的探测效率, B 是全能峰内的本底)。要灵敏度高就要探测效率高、本底低。提高探测效率的方法一般是增大探测器的体积, 或把探测器做成井形, 或把样品做成井形。减少本底的方法一般是采用物质屏蔽, 选用含放射性杂质少的结构、屏蔽材料, 采用反符合、符合技术。反符合探测器通常采用盖革计数器, 流气式计数器, 液体闪烁计数器, 塑料闪烁计数器和 NaI(Tl) 闪烁计数器。采用反符合屏蔽可以把 0.1—4.0 兆电子伏能量范围内的本底减少 2—10 倍。特别是采用后三种反符合探测器作反符合屏蔽时, 还能把 ^{137}Cs 的 γ 射线的康普顿端减少 2—18 倍^[1-3]。由于 NaI(Tl) 晶体对 γ 射线的探测效率较高, 因此用它做反符合探测器的也较多。近年国外报道的一些反符合屏蔽低本底 γ 谱仪, 对 ^{137}Cs γ 射线的探测灵敏度约为 1×10^{-12} 居里。

采用 Ge(Li) 半导体探测器可以提高能量分辨率。

它对 1,332 千电子伏的 γ 射线的能量分辨率 (全能峰的半宽度) 约为 2—3 千电子伏。但是, 目前它的体积还不能做得很大, 而且要在低温条件下使用和保存。因此, 在分析测量含微量放射性核素环境样品的工作中, 反符合屏蔽低本底 NaI(Tl) γ 谱仪仍占很重要地位。

为了分析测量含微量放射性核素的样品, 我们研制了一台全 NaI(Tl) 晶体的反符合屏蔽低本底 γ 谱仪。下面分别介绍这台谱仪的结构、电子学仪器、主要性能和定性鉴别某些环境样品的结果。

二、结构和电子学仪器

谱仪的探头由主探测器、符合探测器和环探测器组成。主探测器是直径为 80 毫米、厚为 80 毫米的 NaI(Tl) 晶体, 加直径为 80 毫米、厚为 80 毫米的纯 NaI 光导, 密封在一个具有石英玻璃窗的不锈钢封装盒中, 用一只光电倍增管收集光信号。纯 NaI 光导主要用于减少来自光电倍增管的放射性本底。符合探测器是直径为 80 毫米、厚为 80 毫米的 NaI(Tl) 晶体, 密封在一个具有石英玻璃窗的不锈钢封装盒中; 或是直径为 80 毫米、厚为 0.5 毫米的塑料闪烁体; 也用一只光电倍增管收集光信号。不锈钢封装盒的顶部厚为 0.2 毫米, 周围厚为 0.5 毫米。NaI(Tl) 晶体和不锈钢

封装盒之间填充 3 毫米厚的氧化镁反射剂。主探测器和符合探测器的晶体、光电倍增管都密封在不锈钢的屏蔽套中。为了降低本底，主探测器和符合探测器的 NaI 晶体的原料都经过去钾提纯，其钾含量约为百万分之一。

环探测器是三块外径为 200 毫米、内径为 100 毫米、厚为 100 毫米的 NaI(Tl) 晶体叠加在一起，密封在一个不锈钢封装圆环体中，上面用 8 个光电倍增管收集光信号，其窗是 K-8 玻璃。不锈钢封装圆环体的内壁厚为 0.25 毫米，外壁厚为 1 毫米。在不锈钢封装圆环体的周围和 NaI(Tl) 晶体之间，贴一层喷铝涤纶薄膜反射层。圆环体的周围和底部还加填了 3 毫米厚的氧化镁反射剂。环晶体和其上的光电倍增管密封在一个不锈钢的圆筒中。图 1 是环晶体和环探测器的照片。

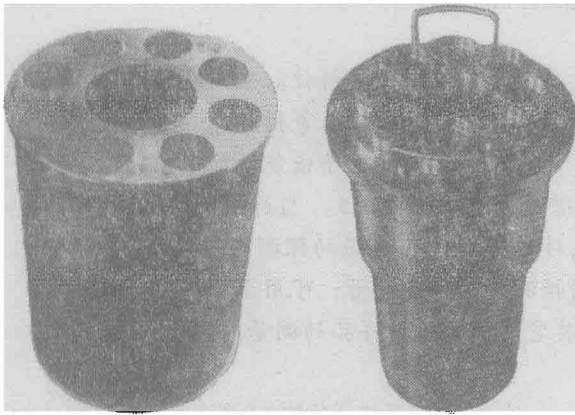


图 1 环晶体和环探测器

主探测器和符合探测器放在环探测器中心孔道内，主探测器在下，符合探测器在上，测量样品放在主探测器和符合探测器之间。测量样品的体积可允许达 400 立方厘米。谱仪整个探头的照片示于图 2 中。

谱仪的探头放在壁厚为 145 毫米的钢、25 毫米的铅、5 毫米的不锈钢和 5 毫米的有机玻璃的圆柱体物质屏蔽中。探头和物质屏蔽的示意图见图 3。

谱仪电子学仪器的方框图见图 4。主要的电子学仪器包括射极跟随器，九道和两道幅度相加器，放大甄别成形电路，符合、反符合电路，单道脉冲幅度分析器，线性放大器，线性门电路，多道脉冲幅度分析器，低压电源和高压电源。主探测器的光电倍增管单独用一台高压电源。符合探测器和环探测器的所有光电倍增管，通过一个高压分配盒共用一台高压电源。

主探测器、符合探测器和环探测器都输出负的脉冲信号。主探测器输出信号的上升时间为 170 毫微秒，宽度(最大幅度 1/10 处)为 1.2 微秒。当主探测器光电倍增管的高压为 900 伏时， ^{137}Cs 射线产生的脉冲幅度约为 1 伏。主探测器电子学线路的线性范围为

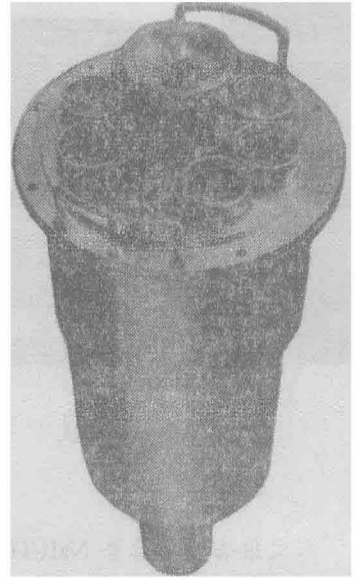


图 2 谱仪探头

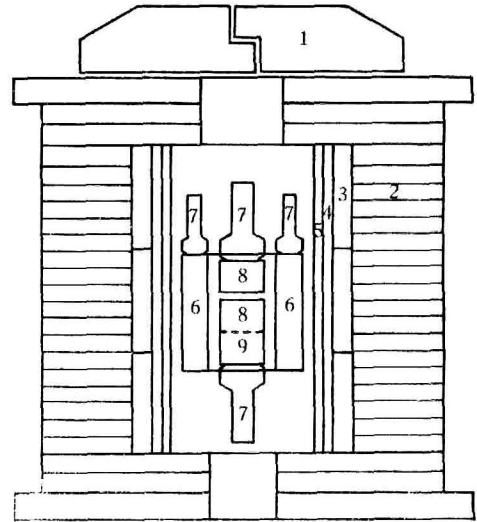


图 3 探头和物质屏蔽结构示意图

1——可滑动的上盖；2——145 毫米钢屏蔽体；3——25 毫米铅屏蔽体；4——5 毫米不锈钢屏蔽体；5——5 毫米有机玻璃屏蔽体；6——NaI(Tl) 环晶体；7——光电倍增管；8——NaI(Tl) 主、符合晶体；9——纯 NaI 光导

0—5 伏，噪声最大值小于 10 千电子伏。

主探测器的信号经过射极跟随器后分为两路，一路输入主道放大甄别成形电路和符合、反符合电路，作为线性门的开门控制信号；一路延迟 2 微秒后，输入线性放大器、线性门和多道脉冲幅度分析器。环探测器的信号经过射极跟随器，输入九道幅度相加器，再输入反符合道放大甄别成形电路，进入反符合电路与主道

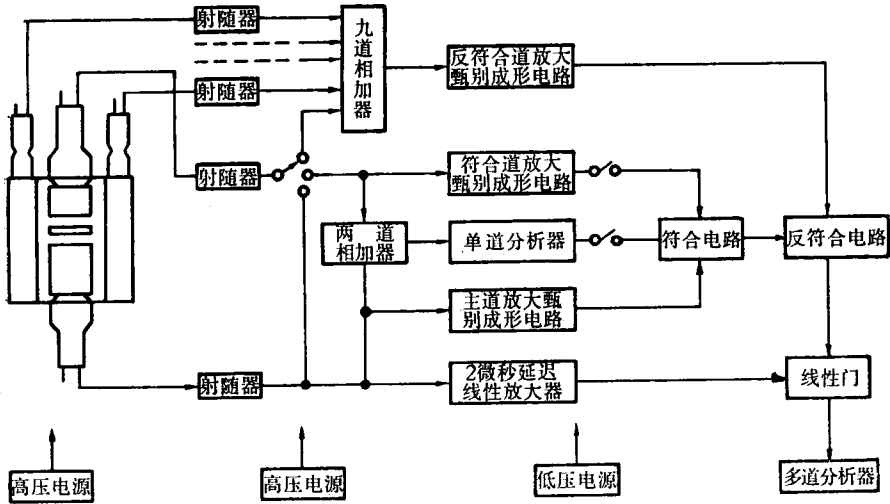


图4 谱仪电子学仪器方框图

信号反符合。经过符合、反符合电路的信号被延迟1.5微秒。符合探测器的信号，根据不同的工作方式，输到不同的电路中去作控制信号和分析信号。

三、谱仪的主要性能

根据不同的测量对象和要求，谱仪可以有三种不同的工作方式。一是在井形探测器（环探测器加符合探测器）反符合屏蔽条件下，用主探测器分析测量。二是在环探测器反符合屏蔽条件下，用主探测器加符合探测器作高效率的分析测量。三是在环探测器反符合屏蔽条件下，用主探测器和符合探测器作 γ - γ 符合或 γ - β 符合分析测量。下面主要介绍谱仪在第一种工作方式时的一些主要性能。

1. 环探测器的性能

环探测器对在它孔道轴线中心位置的 ^{137}Cs 和 ^{141}Ce 点源的总探测效率，分别为 74% 和 83%。对在它孔道轴线上不同位置的 ^{137}Cs 点源的相对探测效率（用在中心位置的探测效率归一化）示于图 5 中。从这个图中可以看出，在环探测器中心位置附近的探测效率，基本上变化不大。在中心位置 -2.5—5 厘米范围内，相对探测效率的变化小于 3%。

环探测器对在它孔道轴线中心位置的 ^{137}Cs 点源的能量分辨率为 45%。当源的位置偏离中心位置时，能量分辨率变坏。

环探测器在没有任何屏蔽的条件下，以及在壁厚为 145 毫米钢、25 毫米铅、5 毫米不锈钢、5 毫米有机玻璃的圆柱体物质屏蔽下，在 0.07—2.5 兆电子伏能量范围内的积分本底，分别为 139,074 计数/分和 3,376 计数/分。

2. 能量分辨率和积分线性

主探测器对 ^{137}Cs γ 射线的能量分辨率为

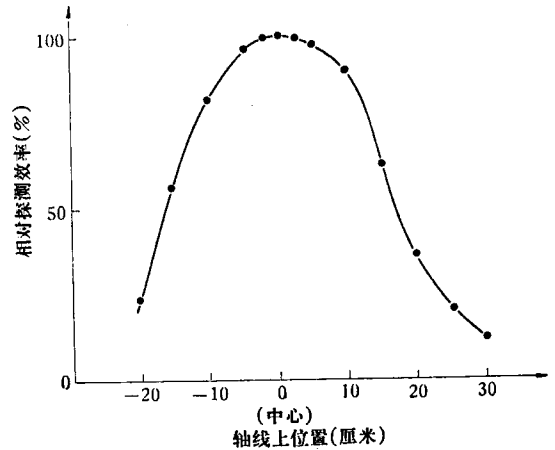


图5 环探测器对在其轴线上不同位置的 ^{137}Cs 点源的相对探测效率

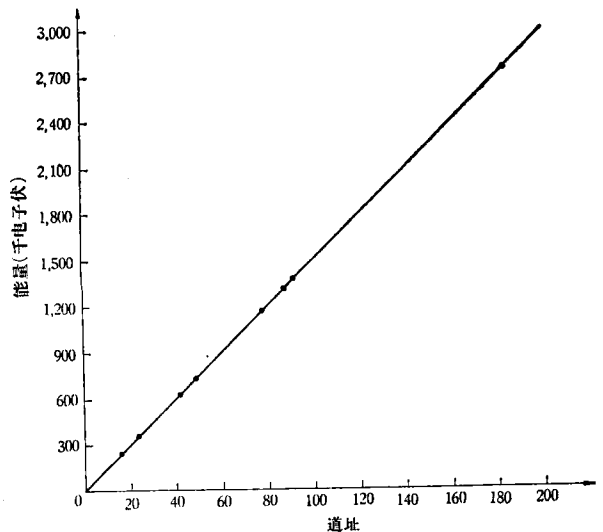


图6 能量和道址关系曲线

11.2%。

谱仪在 0.07—2.8 兆电子伏能量范围内，能量与道址的关系曲线如图 6，其绝对积分线性小于 1%。

3. 探测效率

主探测器在井形探测器反符合屏蔽条件下，对直接放在它上面的、不同能量的点源 γ 射线全能峰的探测效率列在表 1 中。

表 1 主探测器对全能峰的探测效率

放射性核素	^{141}Ce	^{203}Hg	^{137}Cs	$^{95}\text{Zr}/^{95}\text{Nb}$	^{60}Co	$^{40}\text{K}^*$
能量(千电子伏)	145	279	662	~750	1,332	1,460
探测效率(%)	21.2	13.0	9.1	6.5	0.97	2.0

* ^{40}K 是直径为 65 毫米、高为 30 毫米的 100 克 KCl 源

4. 康普顿散射

NaI(Tl) 环探测器作反符合屏蔽的主要作用之一，是能减少 γ 射线的康普顿散射。主探测器在没有和有井形探测器反符合屏蔽时，探测 ^{137}Cs 射线的能谱示于图 7 中。

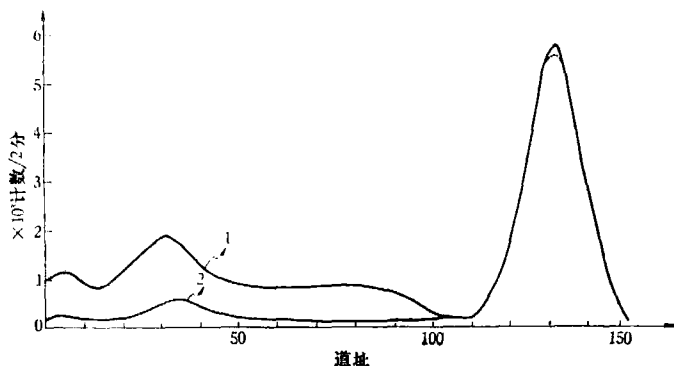


图 7 没有和有井形探测器反符合屏蔽时 ^{137}Cs γ 射线的能谱

1—无井形探测器反符合屏蔽； 2—有井形探测器反符合屏蔽

从这个图中可以看出， ^{137}Cs 射线的康普顿散射，在有井形探测器反符合屏蔽时有很大的减少。康普顿散射减少的性能，通常用康普顿减少因子(康普顿散射的积分比，或康普顿端计数比)或(和)峰康比来表示。 ^{137}Cs 射线的康普顿减少因子(康普顿散射的积分比)为 3.5，峰康比为 34。 ^{60}Co 射线的康普顿减少因子为 14.8。康普顿散射的减少，对提高测量含多个核素样品中的低能核素的灵敏度有很大帮助。图 8 是主探测器在没有和有井形探测器反符合屏蔽时，探测 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 混合源的 γ 射线能谱图。可以看出有井形探测器反符合屏蔽时，比没有反符合屏蔽时 ^{137}Cs 射线的全能峰更明显。通常用峰值显著性因子 P_f 来表征这一性能。 P_f 定义如下：

$$P_f = \frac{2P}{A+B} - 1$$

式中， P 是全能峰的最大值， A 和 B 分别是峰值左右两

边峰谷的最小值。主探测器在没有和有井形探测器反符合屏蔽时， ^{60}Co 和 ^{137}Cs 混合源的峰值显著性因子列在表 2 中。

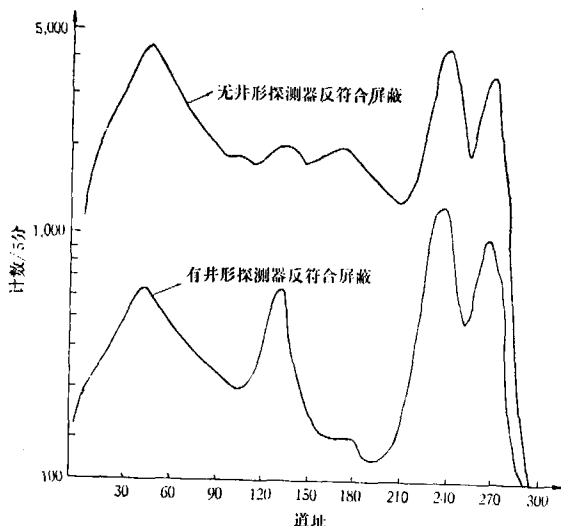


图 8 没有和有井形探测器反符合屏蔽时 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 混合源的 γ 射线能谱

5. 本底

主探测器在各种屏蔽条件下的积分本底列在表 3 中，微分能谱示于图 9 中。

可以看出，主探测器没有物质屏蔽和有物质屏蔽条件下，在 0.05—2.0 兆电子伏能量范围内的积分本底之比约为 100 多倍。没有反符合屏蔽与有井形探测器反符合屏蔽下，积分本底之比约为 5 倍。在有全部物质屏蔽条件下，加 NaI 光导后使积分本底减少约 30%。在环探测器反符合屏蔽条件下， γ - γ 符合和 γ - β 符合，在 0.05—2 兆电子伏能量范围内的积分本底，

表 2 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 混合源的峰值显著性因子

γ 射线能量 (千电子伏)	P_f 值		$\frac{P_f \cdot \text{有反符合}}{P_f \cdot \text{无反符合}}$
	无反符合	有反符合	
1,332	2.56	2.70	1.05
1,173	1.77	2.88	1.63
662	0.19	1.64	8.6

分别为 2.2 计数/分和 0.6 计数/分。有井形探测器反符合屏蔽后，剩余本底来源的估计列在表 4 中；可以看出，主要是来自探头结构材料和元件中放射性杂质的贡献。特别是环探测器上面的 8 个光电倍增管中的 ^{40}K ，对本底的贡献较大。

6. 探测灵敏度

谱仪的探测灵敏度，我们采用两个量来表示^[6,7]。

表3 主探测器在各种屏蔽条件下的积分本底
(0.05—2.0兆电子伏)

屏蔽条件	无NaI 光导			有NaI 光导		
	无任何屏蔽	145毫米钢屏蔽	145毫米钢+25毫米铅屏蔽	145毫米钢 25毫米铅 5毫米不锈钢 5毫米有机玻璃 5厘米NaI(Tl)环晶体屏蔽	145毫米钢 25毫米铅 5毫米不锈钢 5毫米有机玻璃 5厘米NaI(Tl)环晶体屏蔽	145毫米钢 25毫米铅 5毫米不锈钢 5毫米有机玻璃 5厘米NaI(Tl)环晶体 井形探测器反符合屏蔽
本底(计数/分)	29,607	452	342	249	173	35

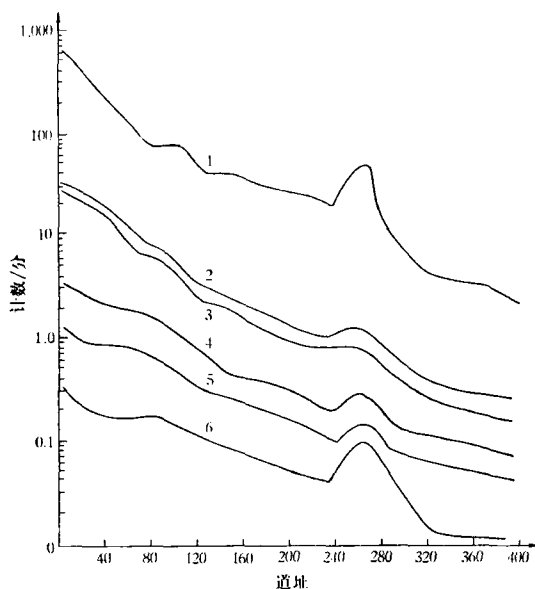


图9 各种屏蔽条件下的本底能谱

1—无任何屏蔽(无 NaI 光导); 2—145 毫米钢屏蔽(无 NaI 光导); 3—145 毫米钢+25 毫米铅屏蔽(无 NaI 光导); 4—145 毫米钢+25 毫米铅+5 毫米不锈钢+5 毫米有机玻璃+50 毫米 NaI 晶体屏蔽(无 NaI 光导); 5—屏蔽条件同 4, 有 NaI 光导; 6—屏蔽条件同 4, 有 NaI 光导, 有井形探测器反符合屏蔽

一个是临界水平 A_1 :

$$A_1 = \frac{2.33}{\eta} \sqrt{\frac{B}{T}}$$

式中, 2.33 是相应于置信水平为 95%, 测量样品和本底的时间相等时的一个常数; η 是探测效率; B 是本底计数率; T 是测量样品和本底的时间。

另一个是定量测定极限 A_{11} :

表4 剩余本底来源的估计

本底来源	本底计数率(计数/分)	百分比(%)
NaI(Tl) 晶体	5	14.4
晶体封装盒和 MgO 反射剂	4	11.4
光电倍增管	12	34.3
宇宙射线	2	5.7
屏蔽材料	8	22.8
不明成分	4	11.4
合计	35	100

$$A_{11} = \frac{50}{\eta T} [(1 + 0.08TB)^{1/2} + 1]$$

式中, 50 和 0.08 是相应于要求测量的相对标准误差为 10% 时的常数。

对单一的 ^{137}Cs 点源, 主探测器在井形探测器反符合屏蔽条件下, 取全能峰半宽度 1.4 倍的能量范围内的探测效率 (8%) 和本底 (2.8 计数/分), 测量样品和本底的时间均取 1,000 分钟时, A_1 为 7×10^{-13} 居里, A_{11} 为 4.5×10^{-12} 居里。

7. 稳定性

在连续 24 小时内, 对谱仪的本底和 ^{137}Cs 的全能峰的稳定性进行了考验。 ^{137}Cs 全能峰在连续 24 小时内漂移小于 $\pm 1.5\%$ 。在连续 24 小时内, 主探测器在井形探测器反符合屏蔽条件下, 测量了 17 次本底, 每次测量时间为 50 分钟, 我们用 χ^2 分布检验了在 0.01—2.0 兆电子伏能量范围内本底计数的稳定性。 χ^2 值列在表 5 中。

表5 实验和理论的 χ^2 值

能量范围(千电子伏)	10 —100	105 —300	305 —500	505 —800	805 —1,100
χ^2	15.7	20.7	19.9	9.1	13.9

能量范围(千电子伏)	1,105 —1,600	1,605 —2,000	10 —2,000	理论值	
				χ^2 0.05, 16	χ^2 0.95, 16
χ^2	13.4	13.3	21.9	26.3	79.6

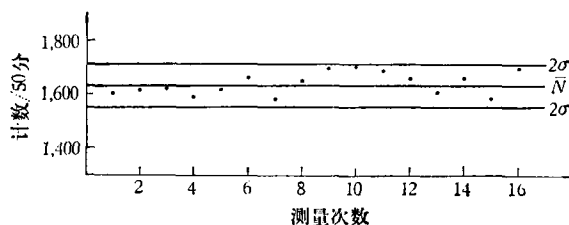


图10 10—2,000 千电子伏能量范围内本底计数的统计涨落

所列能量范围内的 χ^2 实验值都在理论值 7.96 和 26.3 之间,说明在上述能量范围内的本底计数在 24 小时内是稳定的。

10—2,000 千电子伏能量范围内本底计数的统计涨落见图 10。24 小时内 17 次测量的本底计数,都在平均计数的二倍标准误差范围内涨落,这也说明了本底是稳定的。

四、几种环境样品的分析结果

用这台谱仪在井形探测器反符合屏蔽条件下,对几种环境样品进行了定性分析鉴别。

第一种样品是 1962 年采集的 100 克土壤;第二种样品是 1966 年采集的一种野草,经灰化后的 37 克灰。

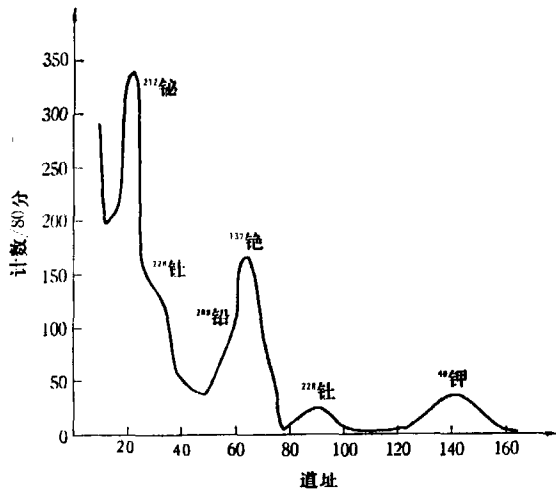


图 11 土壤样品的能谱

这两个样品的能谱图见图 11 和图 12。

由图可以明显地看出,其中都含有 ^{137}Cs 、 ^{40}K 和 ^{232}Th 的子体等放射性核素。由于野草经过了灰化浓缩,与土壤比较,其放射性核素的强度要大的多。

五、结 论

本谱仪的一个特点是可以根据不同的测量对象和要求,采取不同的工作方式,提高测量灵敏度和分辨本领;在降低康普顿散射和本底等性能方面,是较好的。主要缺点是 NaI(Tl) 晶体的能量分辨率较差。表 6 比较了本谱仪和国外类似的两台谱仪的几个主要性能指标。

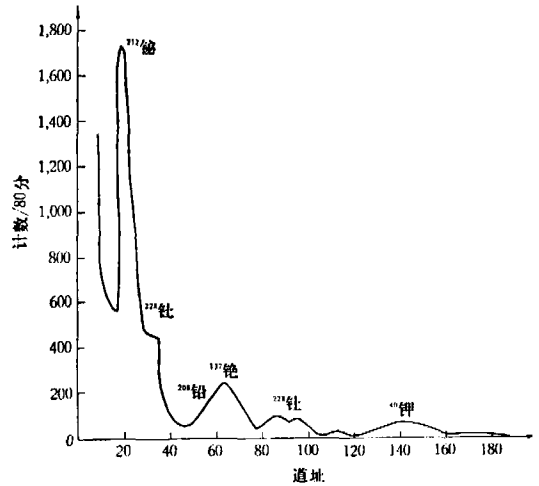


图 12 野草样品的能谱

表 6 几台谱仪的康普顿减少因子和本底

国 别	主 晶 体 (毫米)	环 晶 体 (毫米)	物 质 屏 蔽	分 辨 率 (%)	康普顿减少 因子 (积分比)	本 底 (计数/分)		
						无反符合	有反符合	无反符合 有反符合
中 国 (本谱仪)	80×80 NaI(Tl)	200×300 NaI(Tl)	145 毫米钢, 25 毫米铅, 5 毫米不锈钢, 5 毫米有机玻璃	11.2	3.53	(0.05—2 兆电子伏)		
						173	35	4.9
美 国	76×76 NaI(Tl)	238×216 NaI(Tl)	100 毫米铅	7.3	3.57	(0.20—2 兆电子伏)		
						173*	73*	2.4
印 度	76×76 NaI(Tl)	380×380×300 塑 料	150 毫米铅	9.5*	2.08	(0.05—1.6 兆电子伏)		
						395	140	2.8

* 根据资料报道的图形的估算值

从一些样品定性分析鉴别结果可以看出,对于放射性含量较高的某些环境样品(如土壤等),特别是对被放射性事故污染的环境样品,不需作任何浓缩处理,就可以用这台谱仪直接分析测量其中放射性核素的含

量。对于放射性含量较低的某些环境样品(如蔬菜、粮食等),只需作简单的浓缩处理(如脱水压缩或灰化),也可以用这台谱仪分析测量其中放射性核素的含量。

[本文于 1974 年 9 月 23 日收到] (参考资料见第 10 页)

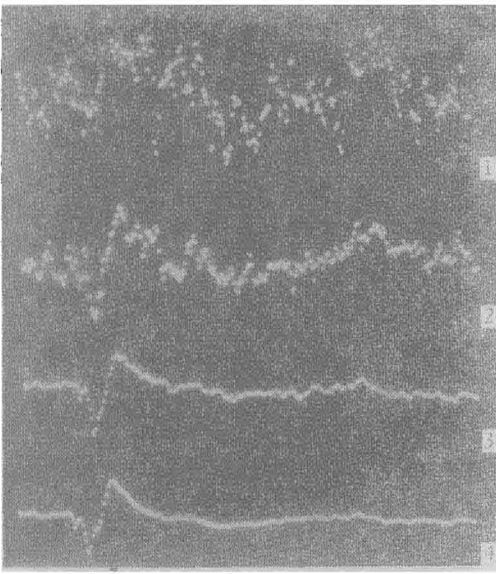


图6 家兔深神经在延脑内侧网状结构的诱发电位

X轴: 每点2毫秒, 共256点
 1——叠加1次, Y范围= 2^8 ;
 2——叠加4次, Y范围= 2^{10} ;
 3——叠加32次, Y范围= 2^{13} ;
 4——叠加128次, Y范围= 2^{15}

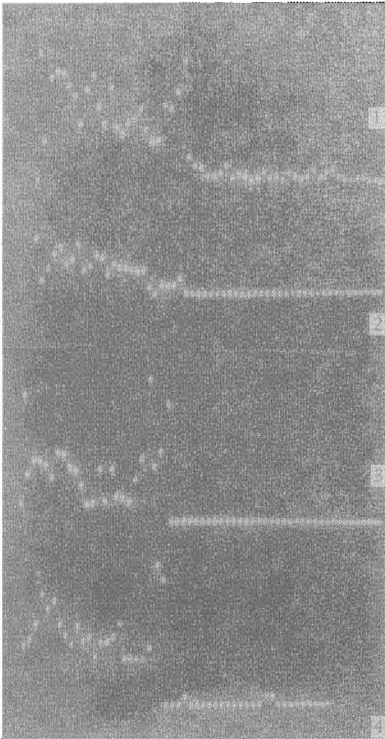


图7 用脉冲密度序列曲线表示痛觉反应

X轴: 每点200毫秒, Y范围= 2^6
 1——针刺前; 2——针刺时;
 3——停针后; 4——停针后5分钟

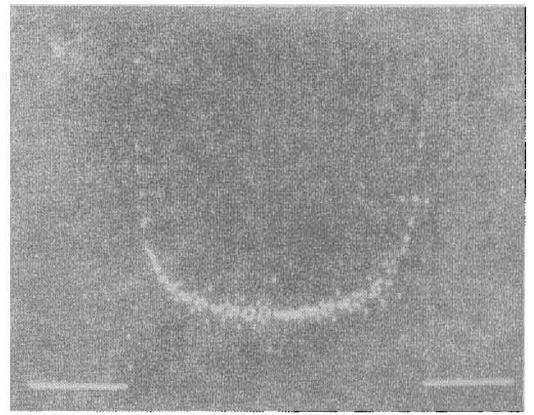


图8 正弦波的幅度分布曲线

X轴: -1.28 伏— $+1.28$ 伏(满刻度),
 中点为零点; Y范围= 2^8

电图及视网膜电图等。在植物生理研究方面,可以利用这种计算机的幅度分布分析功能,如对稻田的上视图照片(一平方米地面积即可)进行光点扫描,在照片的另一方用光电管接收其信号后加以分析处理,以测知阳光是如何分布在叶面积上的。这样,就有可能估计产量;或设法通过模拟,找出决定密植程度及株型等的最有利安排。……这种计算机的叠加功能,应用于核磁共振,可以测出试样的更精细的化学结构;应用于地震、探矿方面,可以观测到最轻微的回波,从而更深入地了解地层结构状况。

五、结 语

数字化及电子计算机技术应用于生物医学,可以提高实验精度,可以快速完成实验数据的处理分析,实时地得出实验结果,再据以指导实验,从而大大提高实验效率。电子计算机可以承担繁琐而庞大的工作量,节省人力物力。因此这是生物医学研究技术的一个发展方向,必须充分加以注意。在毛主席无产阶级革命路线的指引下,可预期我国定将更多更快的试制成更完善、更精密的生物医用计算机,定型生产、推广使用。

我们决心继续努力,为加速发展我国社会主义的科学技术事业作出贡献。

[本文于1974年9月23日收到]

(上接第16页)

参 考 资 料

- [1] Busuoli, G.: *N.I.M.*, **22**, 324, 1963.
- [2] Perkins, R.W.: *N. I. M.*, **33**, 71, 1965.
- [3] Sethi, S. K.: *N. I. M.*, **91**, 397, 1971.
- [4] Stenberg, R.: *N.I.M.*, **96**, 289, 1971.
- [5] Cooper, J.A. et al: *N. I. M.*, **99**, 125, 1972.
- [6] Roedel, W. et al: *N. I. M.*, **61**, 41, 1968.
- [7] Currie, L.A.: *Analytical Chemistry*, **40**, 586, 1968.