

NaI(Tl) 闪烁谱仪

实验者：余钊焕 合作者：朱 可

(中山大学理工学院，物理学专业 2006 级，学号 06324043)

2009 年 6 月 4 日

【实验目的】

1. 加深对 γ 射线和物质相互作用的理解
2. 了解 NaI(Tl)闪烁谱仪的工作原理及其使用。
3. 学会测量和分析 γ 能谱的谱形。
4. 学会测定 γ 谱仪的能量分辨率、线性、探测效率曲线。
5. 测定未知放射源的能量和活度。

【实验装置】

NaI(Tl)闪烁探头、高压电源、多道脉冲幅度分析器、计算机、放射源 5 个、铅砖若干。

【实验内容】

1. 调整谱仪参量，选择并固定最佳的工作条件。
2. 测量 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{133}Ba 、 ^{22}Na 等标准源的 γ 能谱，确定谱仪的 γ 谱仪的能量分辨率、线性、探测效率曲线。
3. 测量求知 γ 源的能谱，确定各条 γ 射线的能量。

【实验原理】

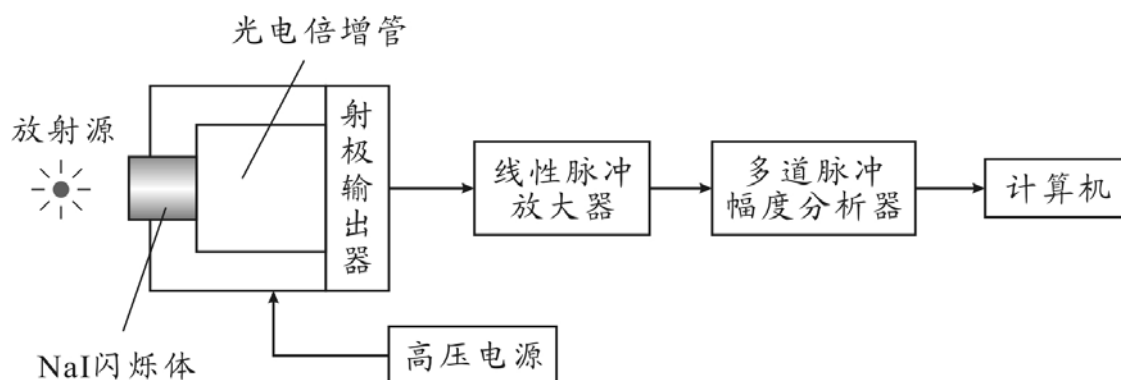


图 1 NaI(Tl)闪烁谱仪装置示意图

NaI(Tl)闪烁谱仪由 NaI(Tl)闪烁探头、光电倍增管、射极输出器、和高压电源以及线性脉冲放大器、多道脉冲幅度分析器、定标器等电子学设备组成。图 1 为 NaI(Tl)闪烁谱仪装置的示意图。该谱仪对 γ 射线探测效率高，分辨时间短，既能对辐射强度进行测量，又可作辐射能量的分析。

当 γ 射线入射到闪烁探头时，发生如下三种基本相互作用过程。

①光电效应： $\gamma + \text{原子} \rightarrow \text{原子（或离子）激发} + \text{电子}e^-$ ，次级电子获得能量 $T = E_\gamma - E_B$ ，其中 E_B 为该层电子的结合能。

②康普顿散射： $\gamma + \text{电子}e^- \rightarrow \gamma' \text{（散射）} + \text{反冲电子}e^-$ ，次级电子获得能量 $T = \frac{E_\gamma r(1 - \cos\theta)}{1 + r(1 - \cos\theta)}$ ，从 0 至最大能量 $\frac{2E_\gamma r}{1 + 2r}$ 连续分布，其中 $r = \frac{E_\gamma}{m_0 c^2}$ ， θ 为散射角， m_0 为电子的静质量。

③电子对效应： $\gamma + \text{原子} \rightarrow \text{原子} + \text{正电子}e^+ + \text{电子}e^-$ ，电子对均分能量 $E_\gamma - 2m_0 c^2$

过程①和②中产生电子，过程③中出现正负电子对。这些次级电子获得的能量将消耗在闪烁体中，使闪烁体中的原子电离，激发，而后产生荧光。光电倍增管的光阴极将收集到的这些光子转换成光电子，光电子再在光电倍增管中倍增，最后这些经过倍增的电子在管子阳极上收集起来，通过阳极负载电阻形成电压脉冲信号。 γ 射线与物质的三种作用所产生的次级电子能量各不相同，因此对于一条单能量的 γ 射线，闪烁探测器输出的次级电子脉冲幅度仍有一个很宽的分布，分布的形状为三种相互作用的贡献所决定。

根据 γ 射线在 NaI(Tl)闪烁体中总吸收系数随 γ 射线能量变化的规律， γ 射线能量 $E_\gamma < 0.3 \text{ MeV}$ 时，光电效应占优势；随着 γ 射线能量升高，康普顿散射的几率增加；在 $E_\gamma > 1.02 \text{ MeV}$ 以后，则有出现电子对效应的可能性，并随着 γ 射线能量的继续增加而变得更加显著。

在 γ 射线能区，光电效应主要发生在 K 壳层。在击出 K 层电子的同时，外层电子填补 K 层空穴而发射 X 光子。在闪烁体中，X 光子很快地再次光电吸收，将其能量转移给光电子。上述两个过程几乎是同时发生的，因此它们相应的光输出必然是叠加在一起的，亦即，由光电效应形成的脉冲幅度直接代表了 γ 射线的能量 E_γ ，而不是 E_γ 减去 K 壳层电子结合能 E_B 。这一脉冲对应的谱峰称为全能峰。

一台闪烁谱仪的基本性能由能量分辨率、线性和稳定性来衡量。探测器输出

脉冲幅度的形成过程中存在着统计涨落。即使是确定能量的粒子的脉冲幅度，也仍具有一定的分布，其分布示意图如图 2 所示。通常把分布曲线极大值一半处的全宽度称为半宽度（FWHM），有时也用 ΔE 表示。半宽度反映了谱仪对相邻脉冲幅度或能量的分辨本领。因为有些涨落因素与能量有关，使用相对分辨本领即能量分辨率更为确切。一般谱仪在线性条件下工作，因此也 η 等于脉冲幅度分辨率，即

$$\eta = \frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta V}{V}, \quad (1)$$

E （ V ）和 ΔE （ ΔV ）分别为谱线对应的能量（幅度值）和谱线的半宽度（幅度分布的半宽度）。

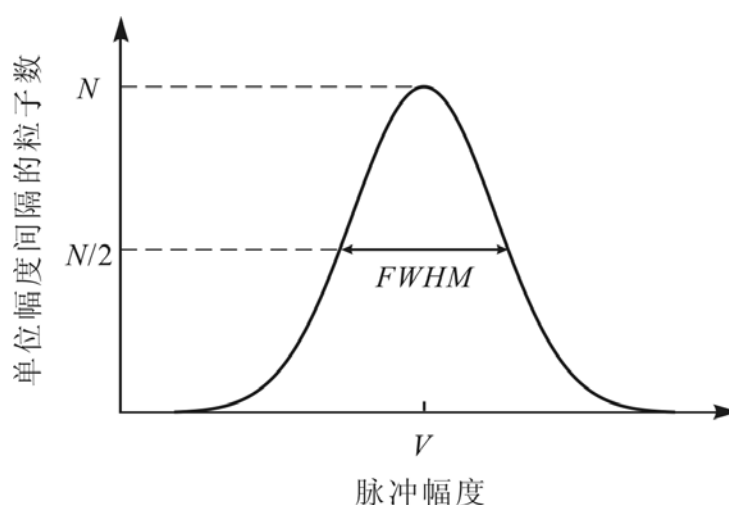


图 2 单能粒子脉冲幅度分布示意图

闪烁探测器输出脉冲幅度的涨落是由很多因素决定的。理论计算指出，选择发光效率高的闪烁体、使用光电转换效率高的光阴极材料以及提高光电子第一次被阴极收集的效率等均有利于改善能量分辨率。在实验中需要考虑下列因素，进行必要的调整，以期达到一台谱仪可能实现的最好分辨率。

- ①闪烁体与光电倍增管光阴极之间保持良好的光学接触；
- ②参考光电倍增管高压推荐值，作适当调整，使得在保持能量线性条件下，输出脉冲幅度最大；
- ③合理选择多道分析器的道宽。
- ④根据放射源的活度，选择源与闪烁体之间合适的距离。

谱仪对入射 γ 射线的能量和它产生的脉冲幅度之间的对应关系称为能量线性。一般 NaI(Tl)闪烁谱仪在较宽的能量范围内（100 keV 到 1300 keV）是近似线性的，这是利用该谱仪进行射线能量分析和判断未知放射性核素的重要依据。通常，在确定的实验条件下分别测量系列 γ 标准源的 γ 能谱，由已知 γ 射线能量全

能峰的峰位对相应的能量作图，所得曲线称为能量刻度曲线。典型的能量刻度曲线是一条不通过原点的直线，即

$$E(x_p) = Gx_p + E_0, \quad (2)$$

其中 x_p 为全能峰峰位， E_0 为直线的纵截距， G 为增益，即每伏（或每道）相应的能量。实验中若要得到较理想的线性，还需要注意到放大器及多道分析器甄别阈的线性，进行必要的检验和调整。此外，实验条件发生变化时，应重新进行刻度。

显然，确定求知 γ 射线能量的正确性取决于全能峰峰位的正确性，这与谱仪的稳定性、能量刻度线原点及增益漂移有关。

【实验步骤】

（第一次实验）

1. 检查线路，确认无误后开低压电源，预热几分钟。熟悉多道脉冲幅度分析器数据采集软件的使用。

2. 选择不同的高压、放大倍数、测量道数等参数，观察 γ 能谱曲线的变化。

1) 把放射源放在托盘上。调节高压从 350 V 变化到 700 V，保持其它条件不变，观察 γ 能谱曲线的变化。

2) 调节改变放大倍数，保持其它条件不变，观察 γ 能谱曲线的变化。

3) 调节改变测量道数，保持其它条件不变，观察 γ 能谱曲线的变化。

4) 把放射源 ^{60}Co 放在托盘上，调节参数，使两个全能峰都能清楚看见，并使 γ 能谱的能量范围约为 0 ~ 1.5 MeV。

5) 把放射源 ^{137}Cs 放在托盘上，测量它的 γ 能谱，解释能谱曲线形状，进一步理解 γ 射线和物质之间的相互作用过程。

（第二次实验）

4. 固定 NaI(Tl)闪烁探头的位置，注意在下面进行更换放射源的操作时也要保持放射源与探头之间的相对位置不变。

5. 测量能谱。

1) 选定实验条件。把放射源 ^{60}Co 放在托盘上，设置测量道数为 1024，调节参数，使两个全能峰都能清楚看见，并使 γ 能谱的能量范围约为 0 ~ 1.5 MeV。

2) 测量本底、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{133}Ba 、 ^{22}Na 及未知放射源的 γ 能谱。

6. 进行数据分析：查阅已知源的衰变纲图，根据测量到的能谱曲线确定各峰对应的射线能量；得出谱仪的能量分辨率，作出能量刻度曲线，分析其线性；计

算出当前已知源的活度，得出探测效率曲线；计算未知放射源的射线能量，判断它的种类；计算未知放射源的活度。

【测量数据和数据处理】

（一）第一次实验

1) 把放射源 ^{133}Ba 放在托盘上。设置放大倍数为 5.70，道数为 1024，甄别阈为 52~999，测量时间为 100 s，调节高压分别为 400 V、500 V、600 V、700 V，测得的 γ 能谱曲线如图 3 所示。

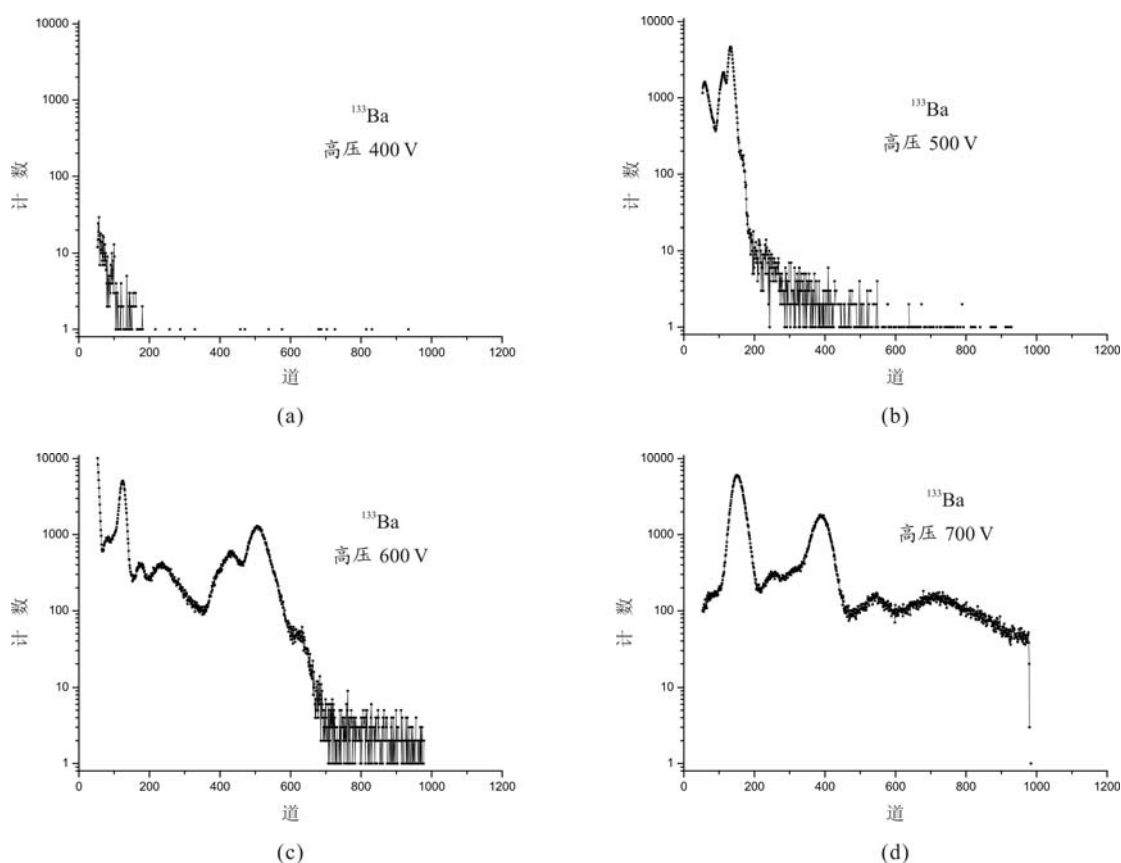


图 3 不同高压下 ^{133}Ba 的 γ 能谱曲线

可以看到，增大高压， γ 能谱曲线在横轴方向上被整体“拉伸”的程度随之增大，而同一个道域所对应的能量减小。谱峰随高压的增大而被展得更宽，从而导致同一个谱峰的峰高（峰值所在道域上一定时间的计数）随之减小。因此，实验时应当选择适当的高压，以保证 γ 能谱曲线落在适当的能量范围上。

2) 仍用 ^{133}Ba 作放射源，设置高压为 500 V，道数为 1024，甄别阈为 52~999，测量时间为 100 s，调节放大倍数分别为 5.00、5.40、5.70、6.00、6.50、7.00，测得的 γ 能谱曲线如图 4 所示。

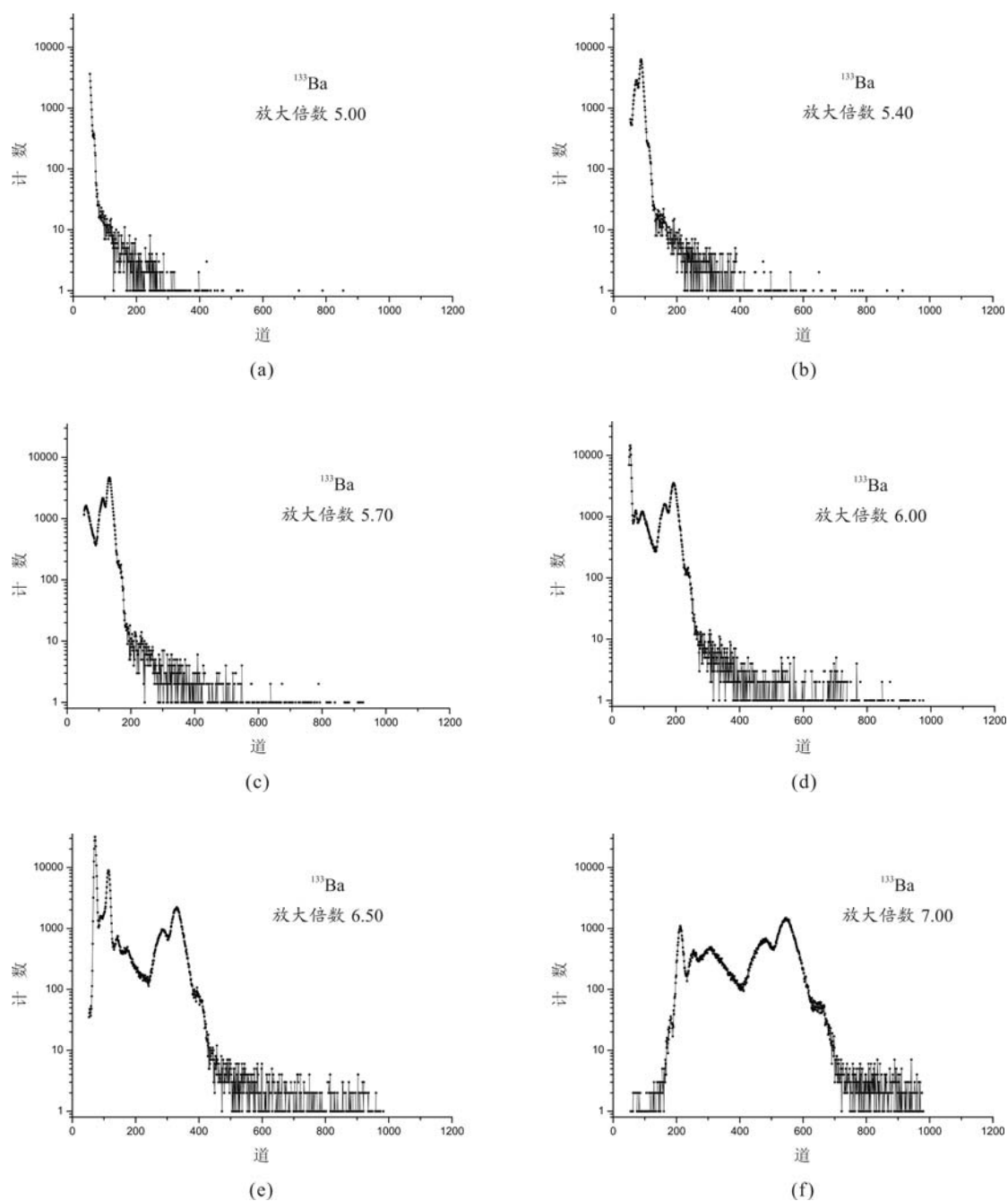


图 4 不同放大倍数下 ^{133}Ba 的 γ 能谱曲线

可以看到，增大放大倍数，与增大高压的情况类似， γ 能谱曲线在横轴方向上被整体“拉伸”的程度随之增大，而同一个道域所对应的能量减小。谱峰随高压的增大而被展得更宽，从而导致同一个谱峰的峰高（峰值所在道域上一定时间的计数）随之减小。从细节上看，增大放大倍数与增大高压对 γ 能谱曲线的影响不完全相同。因此，实验时应当在考虑适当高压的同时选择适当的放大倍数，以保证 γ 能谱曲线落在适当的能量范围上。

3) 仍用 ^{133}Ba 作放射源, 设置高压为 500 V, 放大倍数为 5.70, 甄别阈为 52~999, 测量时间为 100 s, 调节道数分别为 256、512、1024、2048、4096, 测得的 γ 能谱曲线如图 5 所示。

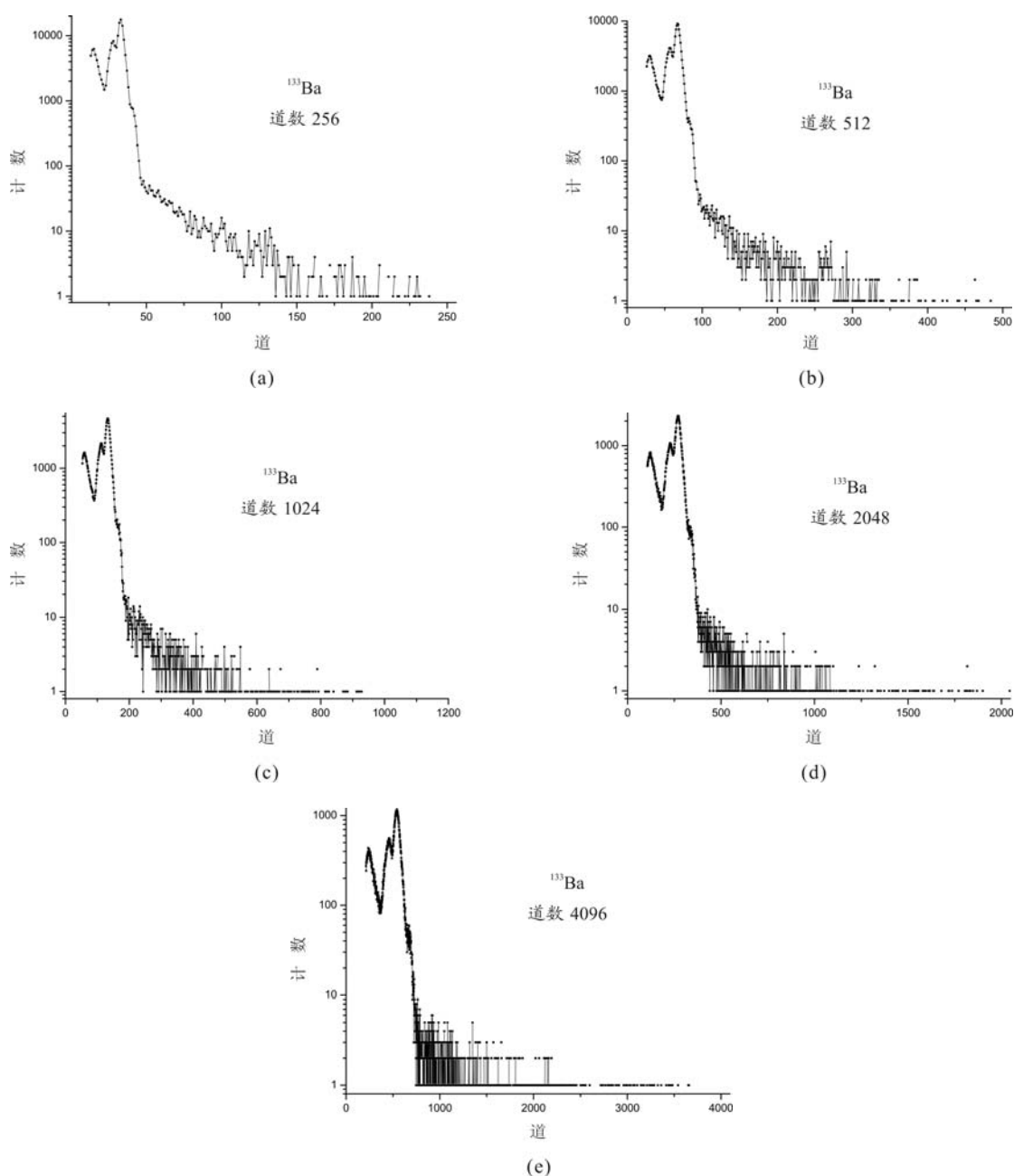


图 5 不同道数下 ^{133}Ba 的 γ 能谱曲线

可以看到, 增大道数, 可以增加 γ 能谱曲线的精细程度, 但曲线的形状几乎不会改变。由于增大道数后, 每一道对应的能量宽度变小了, 从而每一道的计数率会下降, 导致在一定的测量时间内计数的统计涨落增大。因此, 实验时应从曲线的精细程度和统计涨落两方面综合考虑, 选择适当的道数, 一般以可调范围中间的道数为好。

4) 把放射源 ^{60}Co 放在托盘上, 调节高压为 474 V, 放大倍数为 6.66, 道数为 1024, 甄别阈为 52~999, 测量时间为 200 s。在此条件下 ^{60}Co 的两个全能峰都能清楚看见, 并且 γ 能谱的能量范围约为 0 ~ 1.5 MeV。测量得到 ^{60}Co 的 γ 能谱曲线如图 6(a) 所示。再把放射源 ^{137}Cs 放在托盘上, 测量它的 γ 能谱, 如图 6(b) 所示。

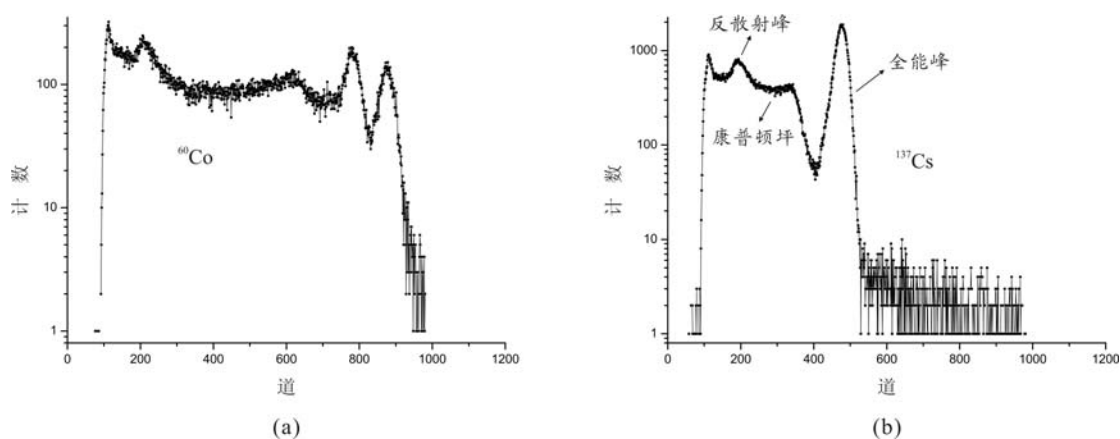


图 6 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 的 γ 能谱曲线

从 ^{137}Cs 的 γ 能谱看到, 在第 200 道附近有一个反散射峰, 它是反散射光子(透过闪烁体的射线在管子光阴极上发生康普顿反散射或射线在源及周围物质上发生康普顿反散射时产生的)被闪烁体吸收形成的, 能量约为 200keV; 在第 475 道附近有一个全能峰, 它是在 γ 射线能量被晶体全部吸收的情况下形成的, 因而放大器输出的全能峰电脉冲幅度与 γ 射线能量的成正比; 在第 250 道至 350 道之间有一个康普顿坪, 它是 γ 射线与闪烁体中的电子发生康普顿作用时, 散射光子逃逸了, 只有部分能量被吸收而形成的。

(二) 第二次实验

把放射源 ^{60}Co 放在托盘上, 调节高压为 474 V, 放大倍数为 6.66, 道数为 1024, 甄别阈为 52~999, 测量时间为 1000 s。在此条件下 ^{60}Co 的两个全能峰都能清楚看见, 并且 γ 能谱的能量范围约为 0 ~ 1.5 MeV。

分别测量本底、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{133}Ba 、 ^{22}Na 及未知放射源的 γ 能谱。

测量得到的本底 γ 能谱如图 7 所示。扣去本底后, ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{133}Ba 、 ^{22}Na 的 γ 能谱如图 8(a) ~ (d) 所示。

查阅已知源的衰变纲图, 根据测量到的能谱曲线确定各峰峰位对应的射线能量, 标示在图 8 中, 列于表 1。

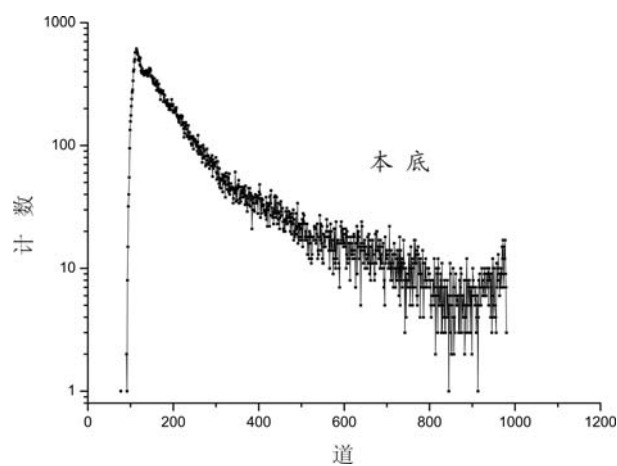
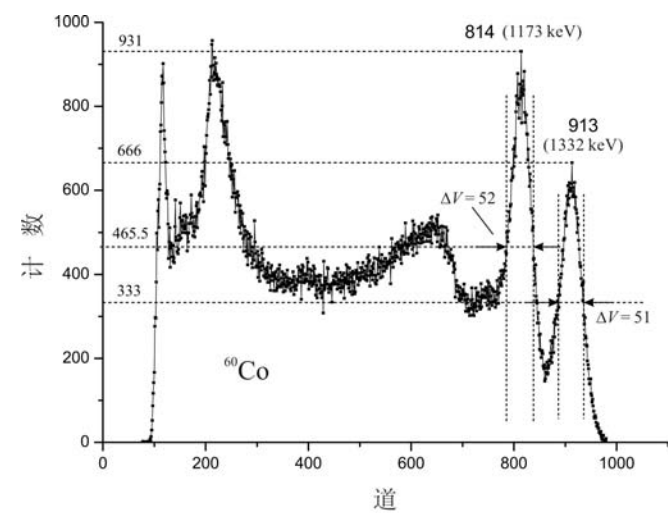
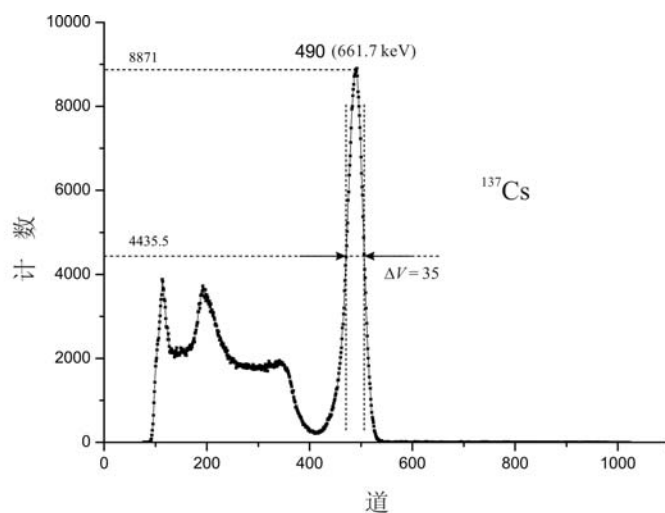


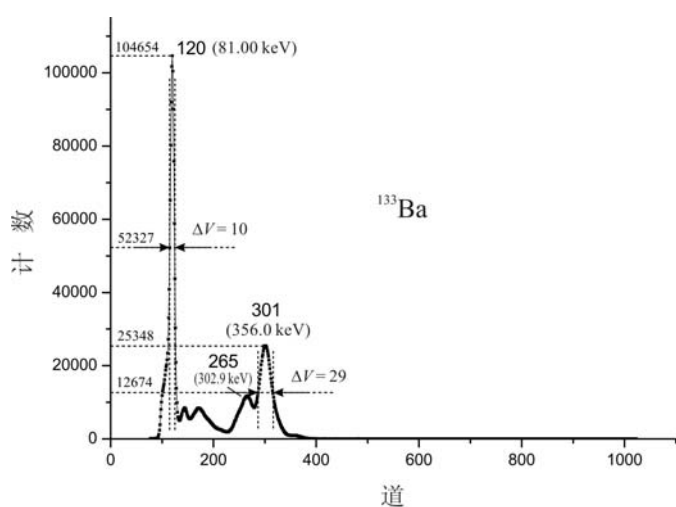
图7 本底 γ 能谱曲线



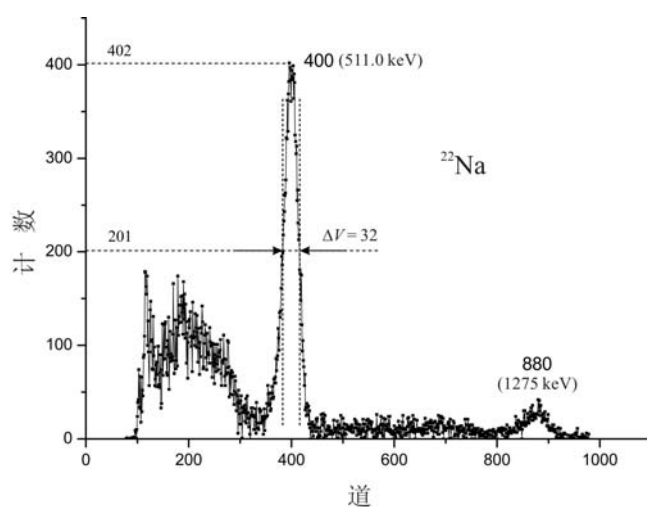
(a)



(b)



(c)



(d)

图8 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{133}Ba 、 ^{22}Na 的 γ 能谱曲线与谱峰的半高宽

表 1 各峰峰位及其对应的射线能量

各峰峰位 / 道	120	265	301	400	490	814	880	913
对应射线能量 / keV	81.00	302.9	356.0	511.0	661.7	1173	1275	1332

用上表中的数据绘点，作出 γ 谱仪的能量刻度曲线，如图 9 所示。

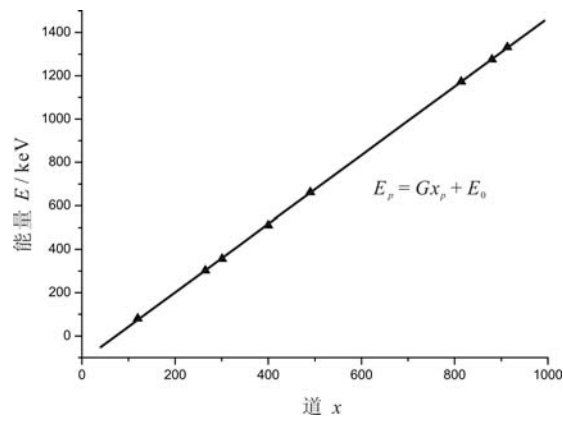


图 9 γ 谱仪的能量刻度曲线

根据式 (2)，作线性拟合，拟合结果如下。

Linear Regression:

$$E = E_0 + Gx_p$$

Parameter	Value	Error

E_0	-115.7134	3.33749
G	1.58219	0.0056

R	SD	N P

0.99996	4.54152	8 <0.0001

亦即，拟合结果为

$$E = -(115.7 \pm 3.3) + (1.5822 \pm 0.0056)x, \tag{3}$$

其中能量 E 的单位为 keV。

测得谱仪的能量线性非常好，线性相关系数达到 0.99996，因此 (1) 式中能量分辨率 $\eta = \Delta V / V$ 的关系成立。确定各能谱中比较明显的全能峰的半高宽，和

峰位一起标示在图 8 中，列于表 2，并计算能量分辨率 η 。

表 2 各峰峰位、半高宽及谱仪的能量分辨率

射线能量 / keV	81.00(¹³³ Ba)	356.0(¹³³ Ba)	511.0(²² Na)	661.7(¹³⁷ Cs)	1173(⁶⁰ Co)	1332(⁶⁰ Co)
峰位 V / 道	120	301	400	490	814	913
半高宽 ΔV / 道	10	29	32	35	52	51
能量分辨率 η	8.33%	9.63%	8.00%	7.14%	6.39%	5.59%

应当注意的是，⁶⁰Co 的 1173 keV 与 1332 keV 双峰(峰位为 814 和 913)、¹³³Ba 的 302.9 keV 与 356.0 keV 双峰（峰位为 265 和 301）相互交叠的区域较大，可能会对半高宽的测量造成较大的误差影响。¹³⁷Cs 的 661.7 keV 全能峰非常明显，用它计算得到的能量分辨率 η 应该比较准确。

利用式（3），将图 8 的 γ 能谱曲线的横坐标换算为能量 E ，绘出图 10。用实测数据计算各个谱峰的面积（谱峰的计数） S ，标示在图 10 中。

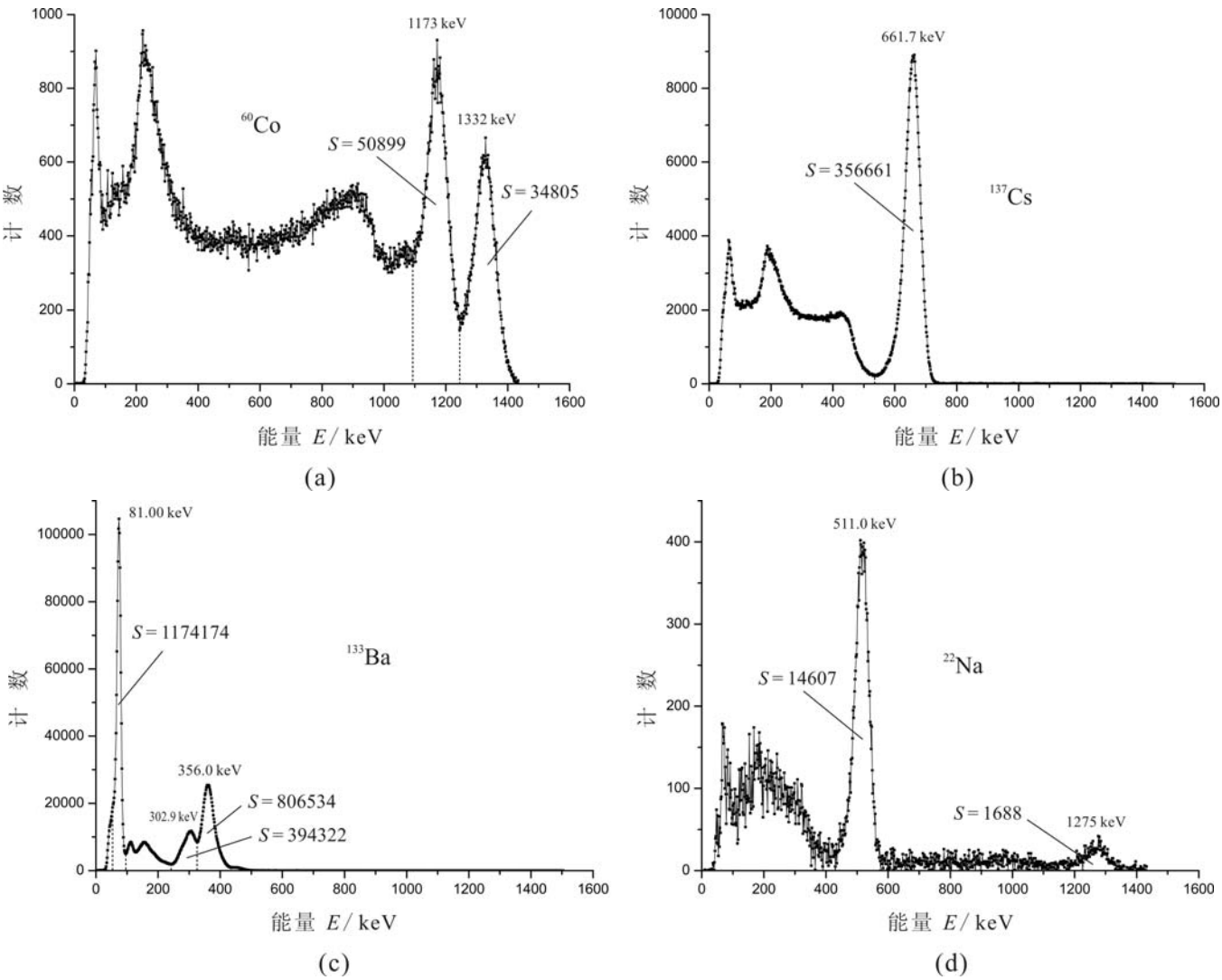


图 10 ⁶⁰Co、¹³⁷Cs、¹³³Ba、²²Na 的 γ 能谱曲线与谱峰面积 S

从实验室查到各放射源在 1991 年 7 月 1 日（实验日期为 2009 年 5 月 19 日，相距 17.88 年）测得的活度 A_0 和半衰期 $T_{1/2}$ ，计算实验时各放射源的活度

$$A = A_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{17.88}{T_{1/2}}} \quad (4)$$

A 。从衰变纲图中查到各个谱峰对应的 γ 射线的产额 b ，与谱峰面积 S 和测量时间 $T = 1000 \text{ s}$ 一起代入谱仪探测效率 $\varepsilon(E)$ 的计算公式

$$\varepsilon(E) = \frac{S(E)}{TA b}, \quad (5)$$

计算出谱仪的探测效率 $\varepsilon(E)$ ，列于表 3。

表 3 放射源活度、谱峰面积及谱仪探测效率

放射源	A_0/kBq	$T_{1/2}/\text{年}$	A/kBq	E/keV	S	b/Bq^{-1}	$\varepsilon/10^{-2}$
^{60}Co	71.8	5.27	6.836	1173	50899	0.998	0.746
				1332	34805	1.00	0.509
^{137}Cs	48.0	30.17	31.83	661.7	356661	0.851	1.317
^{133}Ba	127.0	10.59	39.405	81.00	1174174	0.341	8.738
				302.9	394322	0.183	5.468
				356.0	806534	0.620	3.301
^{22}Na	40.2	2.60	0.342	511.0	14607	1.81	2.360
				1275	1688	0.999	0.494

用上表数据绘制谱仪的探测效率曲线，如图 11 所示。

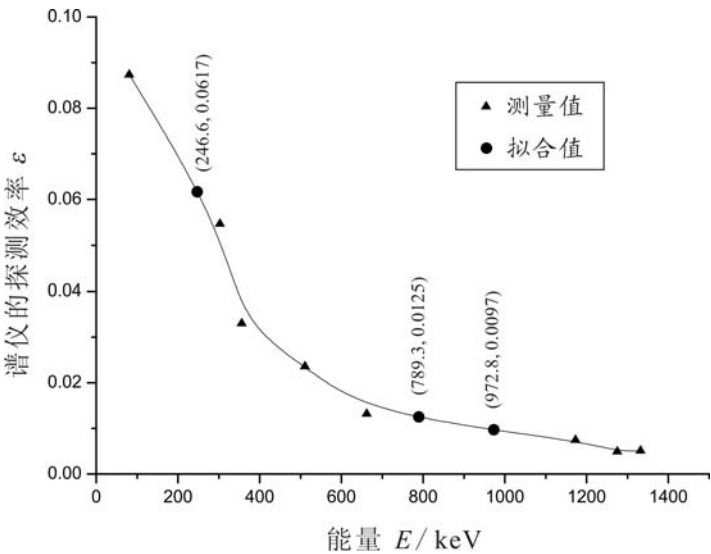


图 11 谱仪的探测效率曲线

利用式 (3)，将未知源 γ 能谱曲线的横坐标换算为能量 E ，绘出图 12。

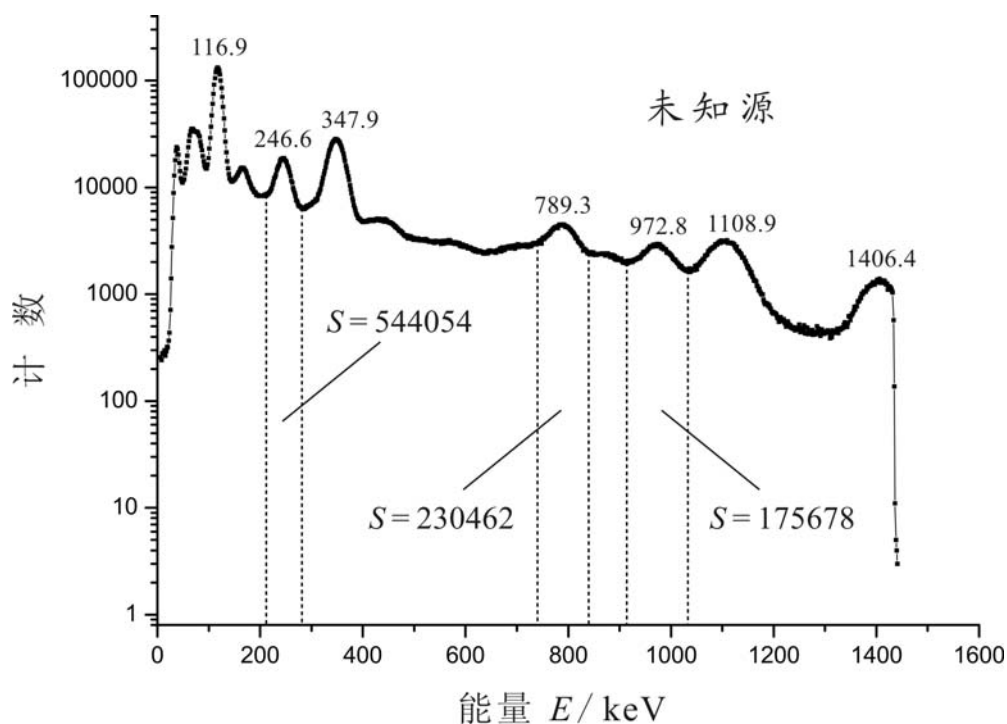


图 12 未知源的 γ 能谱曲线

从未知源的 γ 能谱曲线中检出各峰（实测峰位），标示于图 12 中，与 ^{152}Eu 的衰变纲图中的某些 γ 射线能量（理论峰位）进行比较，列于表 4。

表 4 实测峰位与 ^{152}Eu 理论峰位的比较

实测峰位 / keV	116.9	246.6	347.9	789.3	972.8	1108.9	1406.4
理论峰位 / keV	121.8	244.7	344.3	778.9	964.1	1112	1408

由上表可见，实测峰位与 ^{152}Eu 的理论峰位比较接近，因此推测未知源为 ^{152}Eu 。

从实测峰位中挑出 246.6、789.3、972.8 keV，用测量数据计算它们分别对应谱峰的面积 S ，再由衰变纲图查出它们分别对应的理论 γ 射线的产额 b ，并从图 11 谱仪的探测效率拟合曲线中拟合它们对应的探测效率 ε 。然后，将式（5）变

形为 $A = \frac{S(E)}{\varepsilon(E)Tb}$ ，注意测量时间 $T = 1000\text{s}$ ，计算 ^{152}Eu 的活度 A 。列于表 5。

表 5 谱峰面积、谱仪探测效率与放射源 ^{152}Eu 活度

实测峰位 / keV	理论峰位 / keV	S	b / Bq^{-1}	$\varepsilon / 10^{-2}$	A / kBq
246.6	244.7	544054	0.0761	6.17	115.9
789.3	778.9	230462	0.13	1.25	141.8
972.8	964.1	175678	0.146	0.97	124.0

上表中，由 3 个不同的谱峰计算得到的 ^{152}Eu 活度大致相符，可以接受。

【思考题】

1. 若有一单能 γ 源，能量为 2 MeV，试预言其谱形。

答：此单能 γ 源的谱形中包含一个全能峰，峰位在 2 MeV 处；包含一个康普顿坪，能量比全能峰低一些；还包含一个反散射峰，能量比康普顿坪低一些。其谱形与 ^{137}Cs 的谱形类似，只是各峰和康普顿坪的能量不同。

2. 试根据你测量的 ^{22}Na 、 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 的能谱，求出相应于 0.511、0.662 和 1.33 MeV 的 γ 射线全能峰的半宽度，并讨论半宽度随 γ 射线能量变化的规律。

答：表 2 中已给出这些全能峰的半宽度，0.511、0.662 和 1.33 MeV 的 γ 射线全能峰半宽度分别为 32、35 和 51。

由于 $\frac{32}{\sqrt{0.511}} = 44.8$ 、 $\frac{35}{\sqrt{0.662}} = 43.0$ 、 $\frac{51}{\sqrt{1.33}} = 44.2$ 三者几乎相等，可以猜测，

半宽度可能与 γ 射线能量的平方根成正比，即 $FWHM \propto \sqrt{E}$ 。

3. 在你测得的 ^{137}Cs 0.662 MeV γ 射线全能峰峰位处，作一垂线为对称轴，将会发现对称轴低能边计数明显地多于对应的高能边的计数，试分析全能峰不完全对称的原因。

答：全能峰对称轴低能边计数明显地多于对应的高能边的计数的原因是，在闪烁体电子吸收体中发生小角度康普顿散射时，散射辐射会进入闪烁体，这一辐射的能量稍小于全能峰的能量，因而分布在全能峰低能边处，使峰谷比降低，峰形不对称。