



NaI(Tl)单晶伽马能谱仪实验验证

姓名：朱佩宇 专业：材料物理 学号：0530041

摘要：

了解 NaI(Tl)单晶伽马能谱仪的原理结构和调整方法
 了解伽马能谱图的分析方法，掌握能量定标曲线的绘制方法
 掌握用个人计算机处理能谱数据的方法，掌握用示波器观察脉冲信号

关键词：

伽马射线 光电效应 康普顿散射 电子对效应 质量吸收系数

引言：

波长短于 0.2 埃的电磁波。首先由法国科学家 P.V.维拉德发现，是继 α 、 β 射线后发现的第三种原子核射线。 γ 射线是因核能级间的跃迁而产生，原子核衰变和核反应均可产生 γ 射线。 γ 射线具有比 X 射线还要强的穿透能力。当 γ 射线通过物质并与原子相互作用时会产生光电效应、康普顿效应和正负电子对三种效应。通过对 γ 射线谱的研究可了解核的能级结构。 γ 射线有很强的穿透力，工业中可用来探伤或流水线的自动控制。

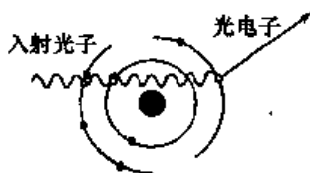
理论：

1、伽马光子与物质的相互作用

特点：伽马光子不带电的中性粒子，作用区别于带电的粒子

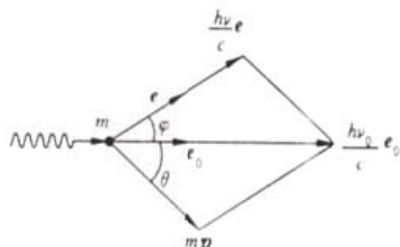
方式：光电效应、康普顿散色、电子对效应

- (1) 光电效应：入射伽马粒子把能量全部转移给原子束缚电子，而把束缚电子打出来形成光电子



由于束缚电子电离能 $E_i \ll E_\gamma$ $E_{\text{光电子}} = E_\gamma - E_i \approx E_\gamma = h\nu$

- (2) 康普顿散色：入射伽马粒子把能量部分转移给原子“静止”与“自由”的电子，得到反冲电子和散射光子。



$$E_{\gamma'} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad \text{另} \alpha = \frac{E_\gamma}{m_0 c^2}$$

其中 $E_e = E_\gamma - E_{\gamma'}$

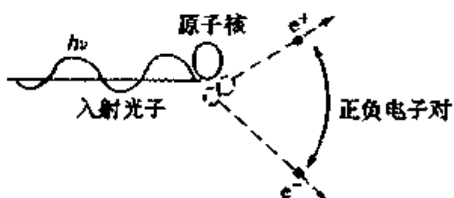
讨论：当 $\theta = 0^\circ$ 时 $h\nu = h\nu'$ ，不发生散射；

$$\text{当} \theta = 180^\circ \text{时 } E_{\gamma' \text{ min}} = \frac{E_\gamma}{1 + 2\alpha}, E_{e \text{ max}} = E_\gamma \cdot \frac{2\alpha}{(1 + 2\alpha)}$$



所以，康普顿电子的能量分布范围为 0 到 $E_{e_{max}}$

(3) 电子对效应：伽马粒子能量大于 1.022MeV 时，受原子核或电子库仑场的作用，可能转化为正负电子对。其中正电子寿命很短，动能耗尽便于轨道电子湮灭而变成一对能量为 0.511MeV 的伽马光子。



2、NaI(Tl)单晶伽马能谱仪工作原理

通过伽马光子与 NaI(Tl)单晶的相互作用探测伽马光子及其能量。其过程可以分为以下四部：

- (1) 不带电的伽马射线在闪烁体内产生光电子、康普顿电子及正负电子对 ($E_\gamma > 1.022\text{MeV}$)，这些电子使闪烁体内分子或原子激发和电离而发光。
- (2) 闪烁体发出的光子汇聚到光电倍增管的管阴极上，打出光电子。光电子在光电倍增管中倍增出大量电子，最后为阳极所接受形成电压脉冲。
- (3) 探测并分析高压脉冲。

由于电压脉冲幅度大小与粒子在闪烁体内消耗的能量及产生光强度成正比，故可根据幅度确定入射粒子的能量。

- (4) 利用单道脉冲分析器或多道脉冲分析器可确定伽马射线的能谱。

NaI(Tl)闪烁探测器的结构如图 2-1-1。整个谱仪由探头(包括闪烁体、光电倍增管、射极跟随器)、高压电源、线性放大器、多道脉冲幅度分析器等组成。

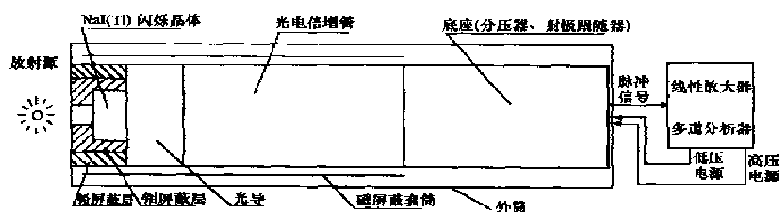


图 2-1-1 NaI(Tl)闪烁探测器示意图

实验：

1、¹³⁷Cs 单能伽马射线能谱分析

(1) 由于¹³⁷Cs 全能峰典型和突出，通常将¹³⁷Cs 作为标准源，一方面可检验伽马能谱仪的能量分辨率，另一方面作为离子能量的测量相对标准。

注意：由于¹³⁷Cs 伽马粒子能量为 0.662MeV，与 NaI(Tl)晶体能发生光电效应和康普顿效应。如下图：

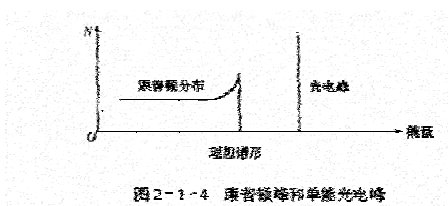


图 2-1-4 康普顿峰和单能光电峰



但由于伽马能谱仪存在着一定的能量分辨率,实际能谱相对于单线存在着一定的能量宽度。实际谱线如下图:

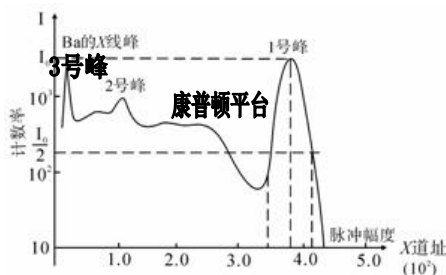


图2 ^{137}Cs 的 γ 能谱

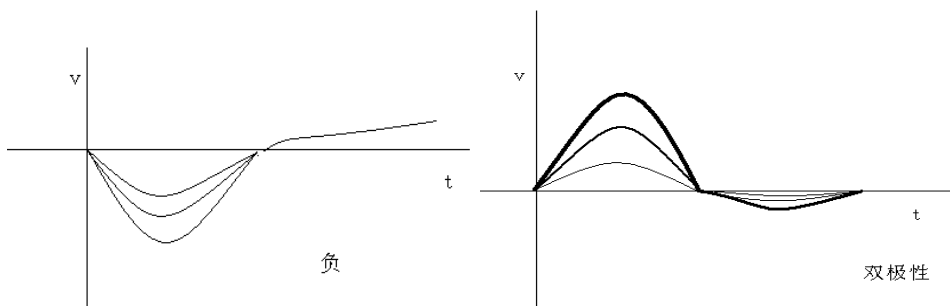
- a> 1 峰称“全能峰”, 能量为 $E_{\text{光电子}}+h\nu'$,是由光电效应产生的光电子和康普顿效应中散射的光子 $h\nu'$ 产生的光电子共同贡献而能的。这就是入射的伽马射线的能量 $h\nu(0.662\text{Mev})$
- b> 平台为康普顿平台, 是由能量为 0 到 0.4771Mev 的康普顿电子形成。
- c> 2 号峰称“反散射峰”, 由入射伽马光子穿过 NaI(Tl) 晶体, 打到光电倍增管上发生 180° 康普顿散射, 反散射光子 $h\nu'$ 又返回晶体中发生光电效应形成。
($E_{\gamma'}=E_{\gamma}-E_{e_{\text{max}}}=0.184\text{Mev}$)
- d> 3 号峰称“特征 X 射线峰”, 是由 ^{137}Cs 的 β 衰变体 ^{137}Ba 退激发时不发生伽马射线, 而是内转换把 Ba 的 K 层电子打出, 导致发生 Ba 的 K 系 X 射线 (能量为 32Kev 左右)。

基于以上的理论、实验基础, 我们通过 NaI(Tl) 单晶伽马能谱仪, 来验证观察 ^{137}Cs 的能谱图及铅块对于伽马穿透的影响。

1、随机脉冲信号的观察

探头 HV 高压线连接高压电源“输出”, 探头“讯号”线连接示波器输入端或线性放大器的输入端, 探头低压接到放大器“前置电压”。将讯号线直接接示波器 Y1 出入端, 通过调节触发极性, 可以在示波器上观察到负脉冲信号和双极性信号。

[分析]在实验中可以观察到最外面一条谱线最亮最宽, 说明其能量比较高, 它是由光电效应形成的, 对应能谱图上的光电峰; 其余几个抖动的窄细亮线是由康普顿效应形成的康普顿电子能量分布造成的振幅抖动, 对应康普顿图上的康普顿平台。



左图表示示波器直接接收到探头光电倍增管中电子形成的脉冲信号, 为负电。

右图表示, 脉冲信号经线性放大器转换为正向信号。但由于线性放大器本身内部电容有充放电滞后效应, 故有图还可看到小范围负电压信号。

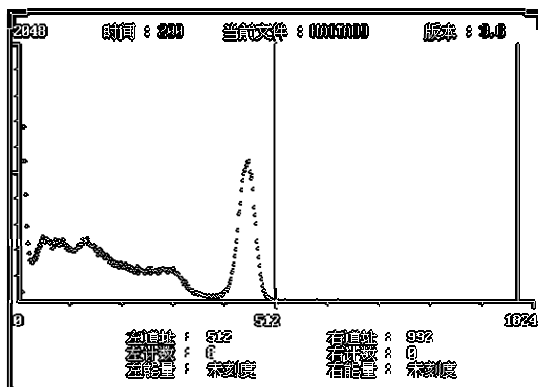
2、能谱仪基本性能测量、能量定标

首先调解仪器的测量范围为 0 到 1.5Mev , 选择 1024 道道数位图谱范围, 即



1024 道对应能量为 1.5MeV,估测 0.662MeV 出现在 450 道左右。手动调节高压电源,使¹³⁷Cs 得全能峰制约出现在 450 道左右, 此时固定电源。

用¹³⁷Cs 源测量, 观察能谱图, 如下:



从图中我们可以看到最明显的是全能峰, 前面已经讨论, 它主要是由于光电效应所产生的。其次是康普顿平台和反散射峰; 特征 X 射线峰很不明显。我们知道“特征 X 射线峰”的能量在 32Kev 左右, 而道值跟能量成正比。我们可以算的“特征 X 射线峰”大概对应的理论道值为: 24 左右。从图中在靠近道值起始点的附近我们是可以看到这个峰的, 由于能量

比较小, 加之仪器的分辨率不是很高, 所以不是很明显。同时由于本底的存在, 使得在能量比较低的范围内电子聚集的比较多。

同样我们利用软件采集数据,

光电峰面积为: 452081 (368—503 道)

半高峰位于: 429—466 道

全能峰道值为: 449

总面积为: 1761549

利用以上数据, 我们可计算的:

$$\text{分辨率 } \eta = \frac{466 - 429}{449} = 8.24\%$$

$$P = \frac{452081}{1761549} \times 100\% = 25.66\%$$

那么, 只有 ¹³⁷Cs 源, 能否对闪烁探测器进行大致的能量刻度? 答案是肯定的, 只有 Cs 可以得到两个峰值, 两点确定一条直线, 也能得到大致能量刻度。而对于 $\eta = \frac{\Delta E}{E} \times 100\%$, 通过测量 ΔCH 和 CH 进行计算 $\eta = \frac{\Delta CH}{CH} \times 100\%$, 与入射粒子的能量和仪器本身有关, 能量分辨率数值越小仪器分辨不同能量的本领越高。

3、用卡全能峰的方法, 求铅对放射线的质量吸收稀疏。

方法: 用¹³⁷Cs 源、实验所用的 5 块铅块, 上面标有质量密度 $\epsilon = 3.03\text{g/cm}^2$, 定时在 200s 进行测量, 读取¹³⁷Cs 光电峰的积分值, 共测七组数据, 包括未放铅片的一次和源取出后的本底测量。

实验数据记录:

	放射源	铅片数	光电峰积分值	lnS
1	无	0	300	5. 704
2	有	0	22306	10. 013
3	有	1	16298	9. 699
4	有	2	12866	9. 462
5	有	3	8349	9. 030
6	有	4	6578	8. 791
7	有	5	4855	8. 488



因为: $\frac{S}{S_0} = e^{-\mu \epsilon}$ 两边取对数: $\ln S = \ln S_0 - \mu \epsilon$

另 $y = ax + b$ 利用最小二乘法, 可以分别求得 a, b

$a = -0.102$ $b = 10.012$

与原始对照得: 吸收系数: $\mu = -a = 0.102 \text{ cm}^2 / \text{g}$

而散色截面: $\sigma = \frac{k - \mu \epsilon - \mu \epsilon - \mu}{n \cdot n \cdot N_A \cdot \epsilon \cdot N_A}$

带入数据得:

$$\sigma = \frac{0.102}{6.023 \times 10^{23}} = 1.693 \times 10^{-29} \text{ m}^2$$

[分析]

- 1、影响谱仪能量分辨率的因素: 谱仪灵敏体积中产生载流子数的统计涨落, 探测器和电子系统的噪声, 因此提高谱仪光电倍增管的高压值, 可以提高分辨率。
- 2、影响谱仪光电峰面积与整个面积之比的 P 的因素: 与探头作用的材料和形状有关。
- 3、用全能峰的方法测量质量吸收稀疏的原理: 全能峰反映的是光电峰的强度, 间接反映光子的吸收比例, 从而可计算吸收系数。

小结:

此实验为验证性实验, 无所谓成功与失败, 但有一点是一定要明确的, 科学的严谨性及不断追求的创造性。通过这个试验, 让我懂得了伽马射线与物质的相会作用的形式, 对 NaI(Tl) 单晶伽马能谱仪有了进一步的了解。以我以后运用 NaI(Tl) 单晶伽马能谱仪验证相对论实验的成功奠定了基础。

致谢:

感谢实验室的老师的指导, 感谢我的搭档的帮助!

参考文献:

- (1) 近代物理实验
- (2) 近代物理, 郑广垣
- (3) 吴思诚、王祖铨 近代物理实验 北京: 北京大学出版社, 1995
- (4) 吴泳华等 大学近代物理实验 北京: 中国科学技术大学出版社, 1992

2007 年 12 月 29 日

于复旦园