

近代物理实验

γ 射线系列实验

指导老师：周鲁卫

林庭 08300190047

2011/6/26

γ 射线系列实验

摘要

γ 射线主要与物质发生三种反应：康普顿效应、光电效应和电子对效应。其对应产生能谱曲线中的不同部分，如康普顿平台、湮灭峰等。实验研究了谱线中的本底，发现其主要部分是环境的背景辐射。通过对 Cs、Co 能谱的定标，可以测量 Na 能谱中的峰值对应能量。在康普顿效应中，通过研究反冲电子能量与反射角的对应关系得到反冲电子的角度分布。

关键词：康普顿效应 背景辐射 反冲电子 角分布

Abstract

Gamma rays with three major matter reaction: Compton effect, the photoelectric effect and electron pairing effect. Its correspondingly produce different parts of energy spectrum, such as the Compton platform, annihilating peak, etc. It is found that main part of the background of the spectrum is the environmental background radiation. Through the calibration of the Cs, Co energy spectrum, the corresponding energy of peaks in Na energy spectrum can be measured. In Compton effect, the angular distribution of recoil electron could be obtained through the equation between electronic energy and the reflection angle of recoil electron.

Key words: Compton Effect, background radiation, recoil electron, angular distribution

γ 射线主要和物质发生光电效应、康普顿散射和电子对效应三种反应。其中康普顿散射是量子理论的重要支持证据。同时 γ 射线还广泛地应用于实际的核辐射探测中，诸如核物理研究、放射性分析和同位素测量都有极为重要的应用。

一、基本原理

NaI(Tl)单晶 γ 射线能谱仪通过探测 γ 射线与 NaI 晶体的反应得到相应的能谱。反应主要有：

1、光电效应：原子在外加辐射时释放出电子。

2、康普顿散射：

在康普顿散射中， γ 光子与原子的自由静止电子发生非弹性碰撞，一部分能量转移给电子，使之脱离原子成为反冲电子，而 γ 光子被散射，散射光子的能量和运动方向都发生变化。

根据能量和动量守恒定律，不难证明反冲电子的能量 E_e 为： $E_e = E_\gamma - E'_\gamma$

散射光子的能量 E'_γ 与散射角的关系为： $E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}$

式中 $\alpha = E_\gamma/m_0c^2$ 为入射光子能量与电子静止能量之比。

而反冲电子的能量最大值为 $E_{\text{emax}} = \frac{2\alpha E_\gamma}{(1+2\alpha)}$ ，所以康普顿电子的能量是连续分布的从 0

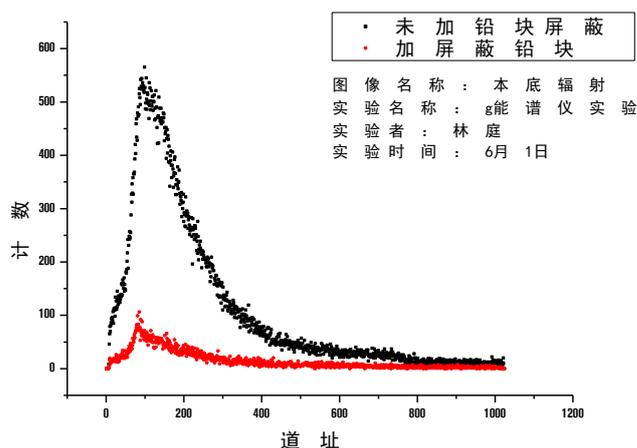
到 $\frac{2\alpha}{(1+2\alpha)}E_{\gamma}$ 。①

3、电子对效应：能量大于 $2m_0c^2$ (约为 1.022MeV) 的 γ 光子在原子核或电子的库仑场的作用下转化为正、负电子对。正电子在能量耗尽时和轨道电子发生湮灭，产生两个能量均为 0.511MeV 、方向相反的 γ 光子。②

二、谱线的本底

γ 射线系列实验中的本底主要包含两部分，分别是背景辐射以及由于暗电流产生的噪声。一般的本底测量的方法是在与放置放射源相同的实验条件下，不放置放射源，得到在相同时间内得到的能谱。但在实验过程中，由于并未将闪烁体放置在由厚铅块组成的屏蔽空间中，使得环境中的背景辐射没有消除。得到的本底图像也难以对背景辐射和暗电流产生的影响作出区分。

实验中通过使用较厚的铅砖构筑一个密闭的屏蔽空间，将闪烁体放置其中，可以将背景辐射的影响消除。此时得到的图像主要是暗电流产生的谱线。对比放置与未放置情况下的谱线，可以比较背景辐射与暗电流在本底中所占比重。



表格 1 本底辐射的对比

	未加铅板	加装铅板
积分面积	115051	14935
峰道址	106	85
峰值计数	565	99

从图像中可以得到表格 1。

从表中可以看出，加装铅板与未加装铅板对比，积分面积有 87.0% 的下降。说明本底中，背景辐射是本底辐射的主要来源。峰值的计数上在不包含背景辐射时也有显著的下降，下降幅度为 81.2%。但这个数据并没有强烈的说服力，因为两峰的道址不同。但仍然可以说明背景辐射在本底辐射中的主要部分。

在实验的数据的处理中，当进行峰面积计算时，直接扣除本底并不是唯一的数据处理方法。还有全能峰面积(TPA)法、科沃尔(Covell)峰面积法、瓦森(Wasson)峰面积等方法。在实验仪器分辨率不高的情况下，全能峰面积法准确度最高。③

三、谱线的定标与 Na 峰值能量的测量

实验中测量了在增益 50，积分 1，微分 0.5，时间 600s，高压 828V 时的 ^{137}CS ， ^{60}Co ，

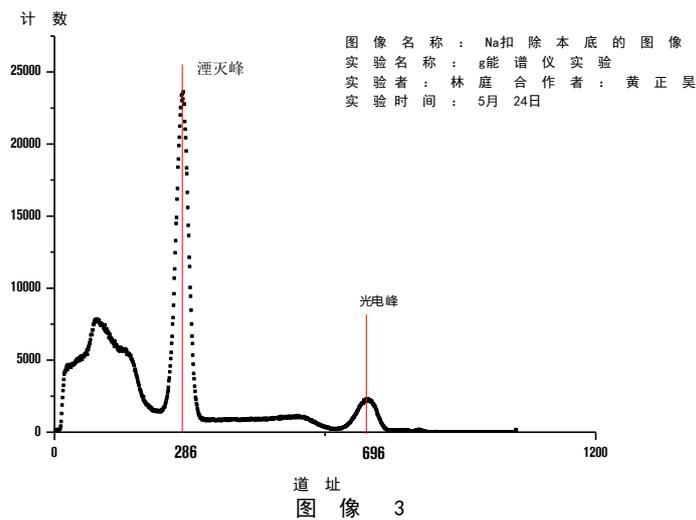
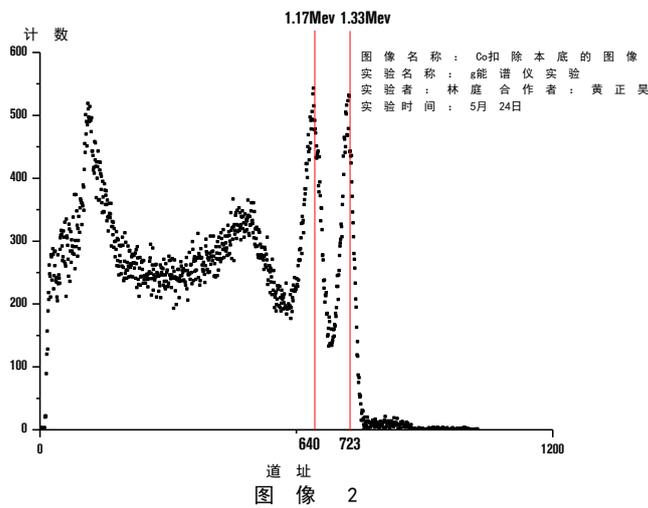
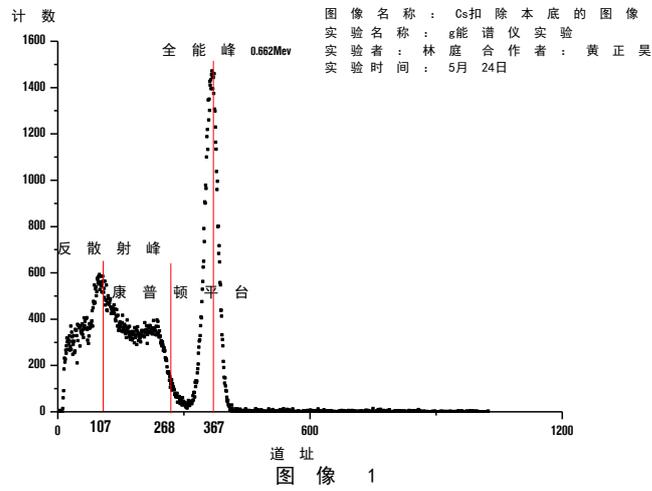
①戴道宣 戴乐山主编：《近代物理实验 第二版》，高等教育出版社，2006 年，第 201 页

②戴道宣 戴乐山主编：《近代物理实验 第二版》，高等教育出版社，2006 年，第 202 页

③邢军亮，《三种不同的本底扣除方法对物质吸收系数 μ 的计算的影响与讨论》

^{22}Na 的辐射图像以及不放置放射源时的本底辐射，实验中数据处理都使用用原数据扣除本底。

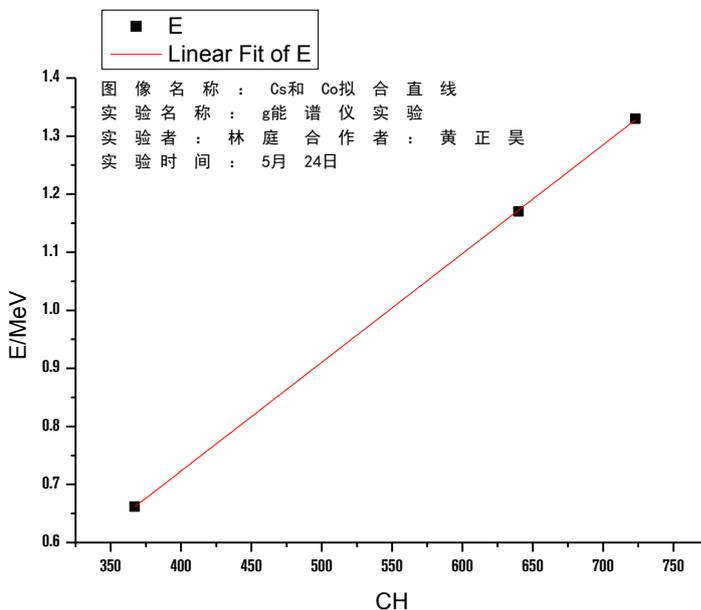
得到能谱如下：



利用 Co 和 Cs 能谱中的全能峰与光电峰进行定标，得到能量与道址的关系。尔后可以根据关系式计算 Na 能谱中的峰能量。

	Co 全能峰	Cs 光电峰	Cs 光电峰
能量/MeV	0.662	1.17	1.33
峰道址	367	640	723

由于康普顿反射电子的能量最大值出现在下降沿的约一半的位置，难以验证所取道址正确与否，也可以通过道址——能量方程对 Cs 能谱中的反射峰和康普顿边缘进行测量。



图像 4

得到能量 E 和道址 N 的关系： $E=0.00187N-0.02582$ (1)，相关系数达到 0.99991，线性关系较好。分别测量 Na 能谱的湮灭峰与光电峰，Cs 的反射峰与康普顿边缘。

表格 2 Na 的峰值测量

	湮灭峰	光电峰
道址	286	696
峰值/MeV	0.509	1.276
理论值/MeV	0.511	1.275
相对误差/%	0.39	0.08

表格 3 Cs 的峰值测量

	反射峰	康普顿边缘
道址	107	268
峰值/MeV	0.174	0.475
理论值/MeV	0.184	0.478
相对误差/%	5.28	0.56

表格 2 和 3 列出了 Na 源和 Cs 源的各峰值测量值，并与理论值进行比对得到了相对误差。可以从表格中看出 Na 的湮灭峰、光电峰以及 Cs 的康普顿边缘都有较好的测量结果，相对误差控制在了 0.6% 以下。但 Cs 的反射峰测量值误差较大。其原因是由于康普顿平台的存在，其从 268 道开始有一定的能谱宽度，使得该部分的能谱实际上包含了反射峰与康普顿平台两部分。从而令反射峰的位置发生移动，影响了对反射峰的道址取值。

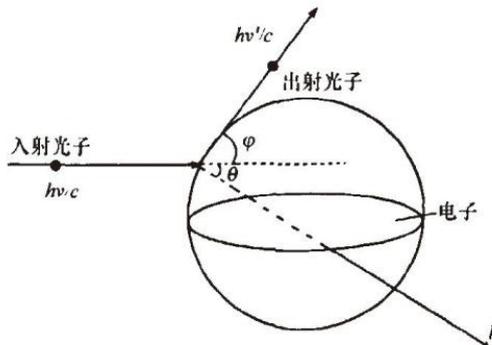
四、康普顿电子的角度分布

设康普顿效应中，γ光子与电子发生弹性碰撞，设光子的散射角为φ，电子反冲角为θ，设散射前光子能量为 $E_0 = h\nu$ ，散射后光子能量为 $E' = h\nu'$ ，反冲后电子的动能为 E_e ，电子的静止质量为 m_0 。通过碰撞前后的动量及能量守恒可以得到电子反冲角与反冲电子动能的关系：

$$\sin^2 \theta = \frac{2a(E_0 - E_e) - E_e}{a^2(E_e + 2m_0c^2)} \quad (2)$$

当散射角 $\varphi = 0^\circ$ 时, $E_e = 0$, 反冲电子能量最小, 即入射电子没有碰撞电子直接掠过; 当 $\varphi = 180^\circ$, 电子与 γ 光子对心碰撞, 电子沿 γ 光子入射方向飞出, 反冲电子能量最大。在康普顿平台, 可以预计电子的计数会有起伏, 随电子反冲角的正大, 计数大小呈正弦变化。^④

其在高压 784V, 增益 125, 微分 0.5, 积分 0 时, 使用点状 Cs 辐射源, 在 600s 的时间范围内记录谱线。相同条件下记录 Na 辐射源的谱线。

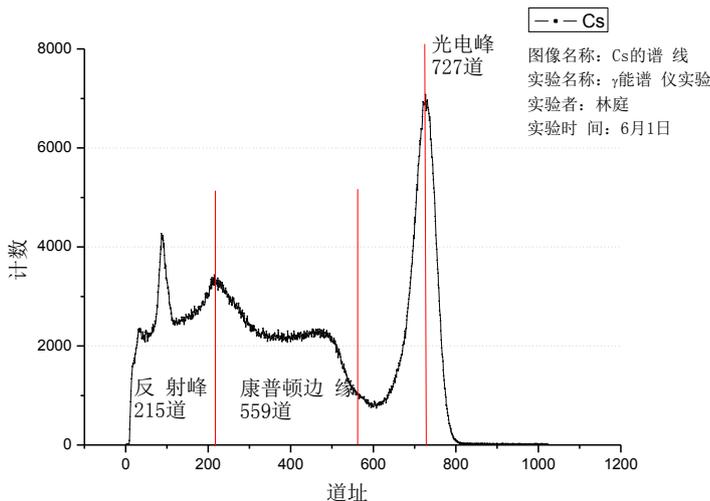


从图像中发现, Cs 光电峰道址为 725, 反射峰为 217, Na 湮灭峰 578, 据此直线拟合, 得到能量与道址的对应关系:

$$E = 8.64 \times 10^{-4} \times N + 0.0013 \quad (3)$$

N 为道址, E 的单位是 MeV, 相关系数为 0.99671。

而反冲电子能量最大值为 0.478MeV, 通过 (2) 式可以确定康普顿平台的最大道址为 559 道, 如下图所示:

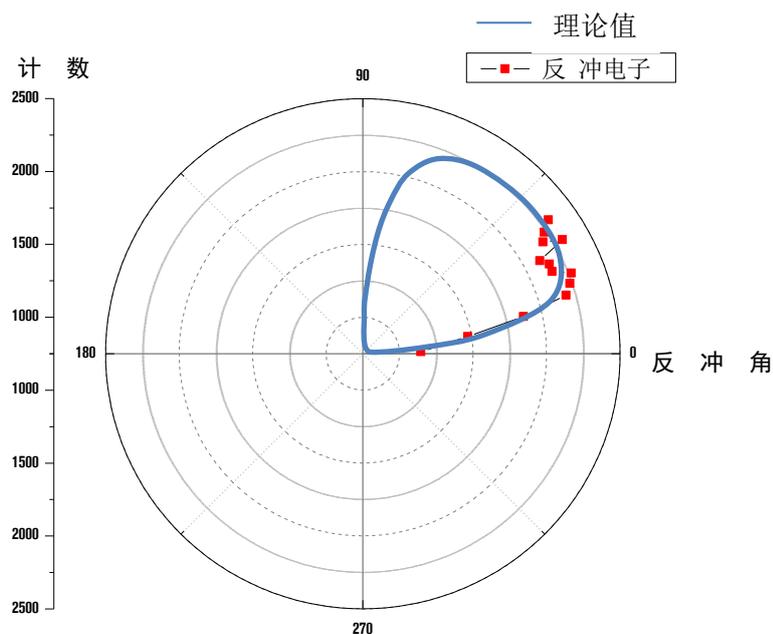


得到数据后, 根据方程 (2) 可以计算出不同道址对应的能量, 以及相应能量对应的反冲角:

道址	550	530	510	490	470	450	430	410
反冲角/°	5.77	10.80	14.26	17.14	19.70	22.07	24.29	26.43
计数	1145	1473	1872	2190	2239	2271	2154	2160
道址	390	370	350	330	310	290	270	250
反冲角/°	28.50	30.53	32.53	34.51	36.50	38.50	40.51	42.57
计数	2112	2317	2195	2239	2310	2461	2764	3016

利用以上数据作反冲电子的角分布:

④



从图中可以看出，在反冲角大小在 $0\sim 40^\circ$ 时，实验图像与理论值符合得较好。但在超过 40° 后，实验所得数据不再相符。选取 550-310 道为实验的研究的康普顿平台，其原因是当反冲角超过 40° 时，反冲电子和散射光子可能已经飞出闪烁体，在屏蔽物质的作用下产生反散射。此时产生的反冲电子能量更小，所以能谱上小于 310 道的谱线上已经开始含有反散射峰的信息，两者混合后，不再是单纯的康普顿平台谱线。因而与理论值在超过 40° 时有所出入。

五、结论

本实验通过 NaI(Tl) 单晶 γ 射线能谱仪得到 Cs、Co、Na 能谱。通过屏蔽背景辐射发现实验中的本底主要来自于背景辐射，暗电流的影响相对较小。而对 Cs 与 Co 定标后，测量得到的 Na 的湮灭峰与光电峰以及 Cs 康普顿平台与理论值接近，相对误差都小于 0.6%；Cs 的反射峰则有较大误差，原因在与康普顿平台与发射峰共同组成能谱，影响取值。在能量、动量及相对论观点下，可以以弹性碰撞模型获得反冲电子的能量与角度的关系，进而结合实验中的计数数据得到反冲电子的角分布图像。由实验图像可见，角度在 $0\sim 40^\circ$ 时，实验数据与理论值吻合得较好，当角度超过 40° 时，部分的 γ 光子逸出而没有被吸收，是的实验数据与理论值出现一定的偏差。