

# 康普顿效应验证实验

隋源\*

北京大学物理学院 学号: 2000011379

本实验以  $^{137}\text{Cs}$  为放射源, 测定了 662keV 的  $\gamma$  射线被铝棒散射后的光子能量及相对微分散射截面关于散射角的变化关系。结果表明, 散射光子能量及相对微分散射截面均随散射角增大而递减, 结果与理论分析基本一致, 验证了康普顿效应, 并简要分析了二次散射对实验结果可能带来的误差。

**关键词:** 康普顿散射, 能谱, 散射截面

## I 引言

20 世纪早期, 诸多实验迹象表明, 被物质散射后的 X 射线能量减小 [1]; 而经典电动力学的预测表明, 散射波的能量应当与入射波一致。

1923 年, 康普顿 (A. H. Compton) 采用光量子假定, 结合狭义相对论的动力学, 成功地解释了散射能量的变化 [2]。康普顿散射进一步确认了光子正是传递电磁场相互作用的粒子。1928 年, Oskar Klein 和 Yoshita Nishina 根据狄拉克 (Paul Dirac) 的量子电动力学 (QED) 推导出了散射的微分截面, 即 Klein-Nishina 公式。它在低能极限下表征经典的弹性散射 (汤姆逊散射), 而在高能情形下对应康普顿散射。

如今, 康普顿散射仍是研究基本粒子结构的一个重要方法。本实验通过测定  $\gamma$  射线的能谱, 分析能量及相对微分散射截面随散射角的变化, 以验证康普顿效应。

## II 理论

考虑高能极限的情况下, 由相对论性能动量守恒可得散射后的光子能量

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{mc^2}(1 - \cos\theta)} \quad (1)$$

其中  $m = 0.511\text{MeV}/c^2$  是电子的静质量,  $\nu, \nu'$  是散射前后的光子频率。

---

\*suiyuan@stu.pku.edu.cn

微分散射截面的计算由 Klein-Nishina 公式 [3] 描述

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \frac{1 + \cos^2 \theta}{2[1 + \alpha(1 - \cos \theta)]^2} \times \left[ 1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta)(1 + \alpha - \alpha \cos \theta)} \right] \quad (2)$$

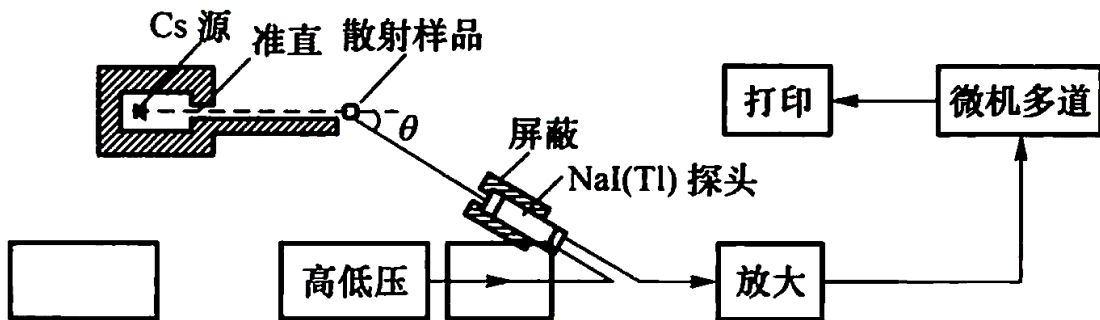
其中  $r_0$  为电子经典半径,  $\alpha = h\nu/mc^2$ 。在实际测量过程中, 微分散射截面由下式决定

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \frac{N(\theta)}{R(E)\eta(E)} \quad (3)$$

其中  $N(\theta)$  为实测光电峰值计数,  $R(E)$  和  $\eta(E)$  分别是探测过程中的峰总比和探测效率, 它们都是光子能量  $E = h\nu'$  的函数, 从而依赖散射角度进行变化。为了研究微分散射截面的变化趋势, 本次实验处理数据时采用计算相对值, 即考察  $(\frac{d\sigma}{d\Omega})_\theta / (\frac{d\sigma}{d\Omega})_{\theta_0}$

### III 实验

本实验使用  $^{137}\text{Cs}$  放射源, 能量为 0.662MeV 的  $\gamma$  射线经准直后打在铝棒上, 以 NaI (Tl) 探头测得不同角度的能谱信号, 经高压放大后通过微机多道处理数据得到散射光子能量与相对微分散射截面随角度的变化关系。NaI(Tl) 探头能够以散射棒为中心而转动, 从而通过改变散射角测得不同角度下的散射光子能谱。能量的测量值由能谱峰道址给出, 而光电峰值计数由去除本底的计数给出, 约定选取峰面积时取 1/3 高宽进行计算。在测量开始之前需要进行能量标定, 通过  $^{137}\text{Cs}$  的 0.662MeV 峰、 $^{60}\text{Co}$  的 1.17MeV 和 1.33MeV 峰的峰道址拟合计算道增益实现。



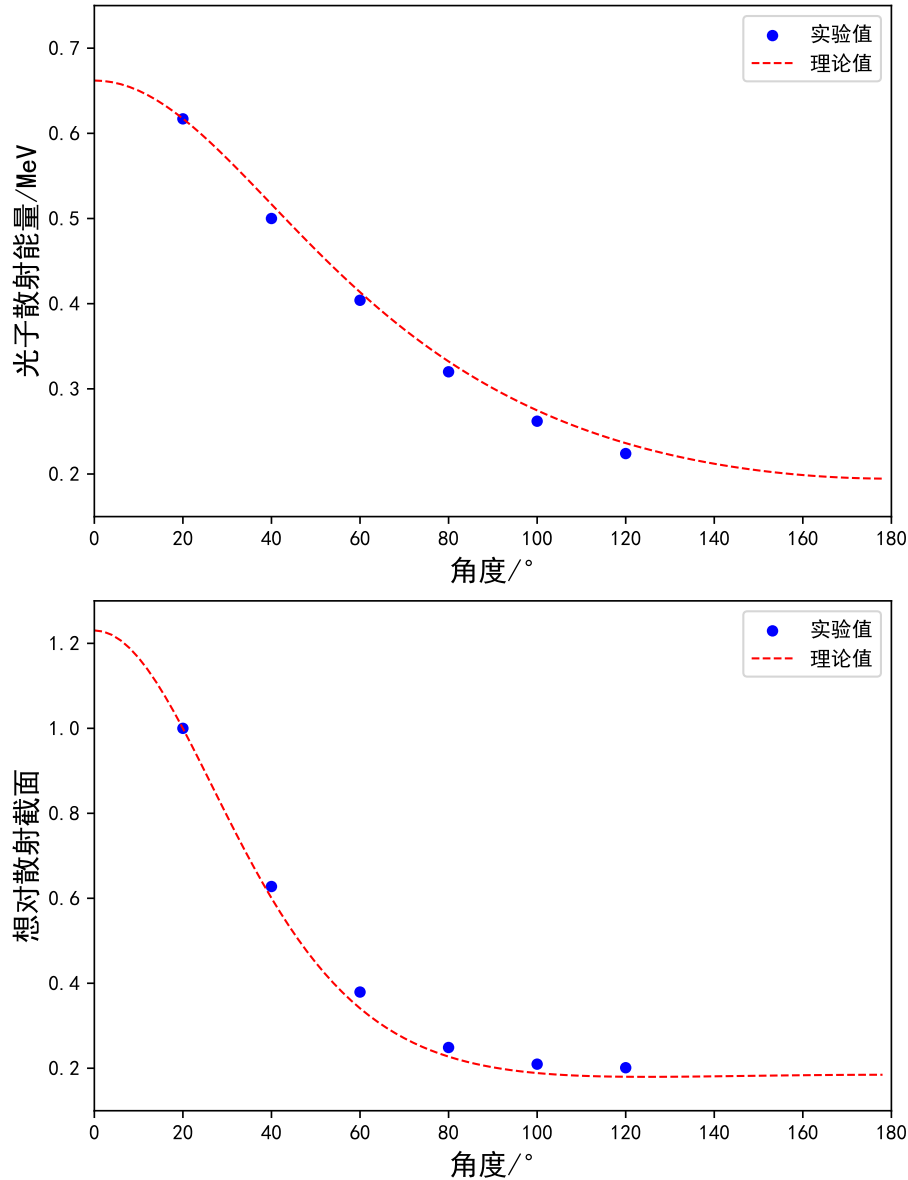
图一: BH1307 型康普顿散射仪示意图 [3]。仪器由北京核仪器厂封装, 包括放射源、铝棒样品、NaI(Tl) 探测器、微机多道分析器和高压放大。其中放射源置于铅盒内, 可通过手柄开关控制出射通量大小, 铝棒可从基座上取下。高压调节电路设定在 675 V, 增益 1.0。仪器转盘在测量点 20°, 40°, 60°, 80°, 100°, 120° 处有阻尼, 保证散射和本底测量处在同一角度。

## IV 结果与讨论

利用  $^{137}\text{Cs}$  (半开) 的 0.662MeV 和  $^{60}\text{Co}$  1.17MeV, 1.33MeV 峰进行能量定标, 能量  $E$  和道址  $x$  的关系为

$$E = (1.378x + 11.721)\text{keV} \quad (4)$$

相关系数  $r = 0.999998$  足够好。在此基础上测定不同散射角的散射能谱和本底能谱, 计算散射后光子能量和相对散射截面与散射角度的关系并绘制图表如下。



图二：光子散射能量和相对散射截面关于散射角度的变化关系。实验值由在  $20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ, 100^\circ, 120^\circ$  测量的散射能谱和本底能谱处理后给出：散射能量由散射谱峰道址根据道增益计算得到，光电峰计数由散射能谱和本底能谱的峰面积之差给出， $R(\theta), \eta(\theta)$  由参考表 [3] 中的数据进行插值计算；理论值由式 (1) 和式 (2) 计算得到：相对散射截面由各测量点的散射截面和  $20^\circ$  处的值之比给出。

表一：散射光子能量和相对散射截面实验值及与理论值偏差

角度/ $^{\circ}$	散射光子能量/keV	与理论值偏差	相对散射截面	与理论值偏差
20	617	0.5%	1.000	N/A
40	500	-1.5%	0.628	4.8%
60	404	0.5%	0.379	12%
80	320	<0.5%	0.249	10%
100	262	<0.5%	0.210	12%
120	224	<0.5%	0.201	12%

从图像和表中数据可知，实验值和理论值的变化趋势和具体数值基本符合，验证了康普顿效应。其中，光子散射能量的实验值与理论值符合的较好，但相对散射截面的实验结果较理论预测明显偏大。

分析可知误差的来源有很多方面，但主要是由实验环境造成的二次散射引起的。由于实验环境不甚空旷，仪器附近物质中的电子均可参与散射过程，从而对散射能谱造成影响。这一影响往往不能通过去除本底而完全消除：加上铝棒后，散射导致光子的角分布比未加铝棒时范围更广，从而四周对光子的二次散射效应增强，导致了额外的散射截面。其他因素造成的误差见附录。

## V 结论

本实验以  $^{137}\text{Cs}$  为放射源，考察了 662keV 光子散射后的能量角分布及相对微分散射截面角分布，结果与康普顿效应理论符合得较好，验证了康普顿效应。实验简要分析了可能的误差来源，尤其是周围非空旷物质环境带来的二次散射影响。

## VI 致谢

感谢楼建玲老师对实验原理的细致讲解和实验安全事项的提醒，以及对实验操作的耐心指导。

---

[1] TAYLOR J R, DUBSON M A, ZAFIRATOS C D. Modern physics for scientists and engineers[M]. [S.l.]: Prentice-Hall, 2004.

[2] COMPTON A H. A quantum theory of the scattering of x-rays by light elements[J].Physical review, 1923, 21(5): 483.

[3] 吴思诚, 苟坤. 近代物理实验 [M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2015.

## 附录 I: 思考题

### 1. 分析本实验的主要误差来源，试述有限立体角的影响和减少实验误差的方法。

二次散射影响。由于实验环境不甚空旷，仪器附近物质中的电子均可参与散射过程，从而对散射能谱造成影响。这一影响往往不能通过去除本底而完全消除：加上铝棒后，散射导致光子的角分布比未加铝棒时范围更广，从而四周对光子的二次散射效应增强，导致了额外的散射截面。这部分误差属系统误差，影响较大。

测量过程中产生的误差和仪器自身允差。包括比如能量定标过程中用到的只有三个峰道址带来的误差；转盘每次转角的误差；人为选择峰区域时对峰面积造成的误差；Na(Tl) 探测器的允差等。这部分误差属随机误差，影响较小。

有限立体角影响。由于探测器占据一定大小的立体角，因此实际测量结果是一定宽度的立体角的加权平均值。但在实验中已经规定好峰面积的选取（峰值 1/3 处）且实验中测得的峰都比较锐利，因此这部分系统误差影响较小。

### 2. 讨论实验值和理论值不完全符合的原因。

实验误差。包括上面提到的二次散射影响、测量过程中产生的误差和仪器自身允差和有限立体角影响等，这部分是最主要原因。

$R(\theta), \eta(\theta)$  的取值。由于参考数据表只有零散数据点，因此实际计算时采用插值算法，应当带来一定影响。

理论计算中可能涉及的近似及其他可能的影响。

## 附录 II: 实验记录

2022.9.2

康普顿散射

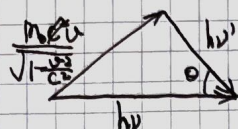
实验预习报告

[实验原理]

1. 康普顿散射

相对论能量守恒:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)}$$



2. 微分截面

散射到 $\theta$ 方向单位立体角的几率, 记作  $\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega}$

克莱因-仁科公式:

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} = r_0^2 \left[ \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right]^2 \left[ \frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right] \left[ 1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos\theta)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right]$$

微分散射截面定义式:

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} = \frac{N_p(\theta)}{R(\theta)\eta(\theta) 4\pi N_0 N_{ef}}$$

相对微分散射截面:

$$\frac{d\sigma(\theta)/d\Omega}{d\sigma(\theta)/d\Omega} = \frac{N_p(\theta)}{R(\theta)\eta(\theta)} / \frac{N_p(0)}{R(0)\eta(0)} \quad (\text{测量 } N_p(\theta), \text{ 查表 } R(\theta), \eta(\theta))$$

[实验装置]

康普顿散射实验台 (主架, 导轨, 铅屏蔽块, 铅棒)

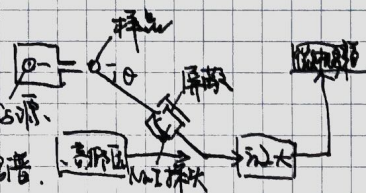
$^{137}\text{Cs}$  放射源, NaI(Tl) 闪烁谱仪, 微机系统, 示波器 等.

$^{137}\text{Cs}$  源射出 $\gamma$ 光子, 经准直打在铅棒上.

用 NaI(Tl) 探测器探测散射光, 屏蔽  $^{137}\text{Cs}$  源.

经线性放大器放大幅度, 微机系统读出数据.

(通过转 NaI(Tl) 探测器绕样品中心转动改变散射角 $\theta$ )



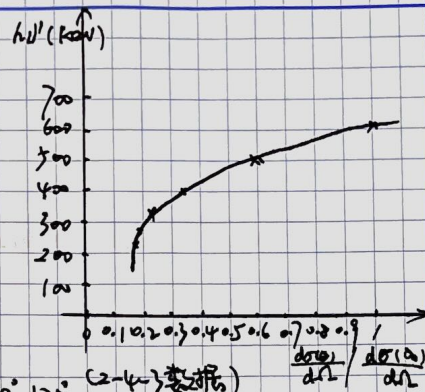
[实验目的]

学习康普顿效应的测量技术, 验证康普顿散射的 $\gamma$ 光子能量及微分截面与散射角的关系.



## 实验内容

1. 连接仪器, 预热, 进入测量程序
2. 取下铅棒, 屏蔽背景, 分别测量<sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co的 $\gamma$ 射线能谱, 定出0.662MeV, 1.17MeV和1.33MeV三峰对应参量。
3. 插上铅棒, 散射角取20°, 40°, 60°, 80°, 100°, 120° (2-4-3数据)
- 记录光电峰峰位, 峰面积, 上下道位置。
4. 取下铅棒, 测本底面积并扣除。
5. 导出  $\frac{dN}{d\Omega} / \frac{dN}{d\Omega} - 0$  和  $\theta - 0$  关系。



## 实验笔记

### 实验步骤

1. 检查仪器连接, 归零高压旋钮, 开启电源和放射源 (先开至屏蔽位置)
- 打开计算机测量程序, 取下铅棒。
2. 调节探头高压 HV=675V, GAIN=1.0. 预热10分钟. 设置测量软件时间为10分钟。
3. 点击开始进行测量, 测量结束后选取峰大致区域并点击峰击寻峰”得到全能峰的有峰道数 (0.662MeV)
4. 关闭<sup>137</sup>Cs源, 从铅室取出<sup>60</sup>Co用透明胶黏剂探测器端口, 设置测量时间为10分钟. 并同样操作定出1.17MeV和1.33MeV的有峰道数放回<sup>60</sup>Co源
5. 根据得到的三个峰道数最小二乘法做能量刻度。
6. 插上铅棒, 全开<sup>137</sup>Cs源, 依次调整角度为20°, 40°, 60°, 80°, 100°, 120°测量全谱. 找出峰位, 道址, 画点区总面积。
7. 取下铅棒, 同样操作测量本底计数。计算每个角度的净峰面积。
8. 根据实验原理求出  $E_\gamma - 0$  和  $\left(\frac{dN}{d\Omega}\right)_{\theta=0}$  关系, 计算理论值/实验值偏差。
9. 降高压, 关放射源上锁, 关计算机和仪器, 关电源。



# [实验数据]

能量	道址	左道址	右道址	该点区点面积	道计数	左道计数	右道计数
0.662 MeV	472	448	496	1077570	30423	10605	10673
1.17 MeV	840	799	873	141133	2699	900	909
1.33 MeV	957	918	994	108829	2035	<del>2035</del>	692
20° Al	439	402	465	15255	<del>2035</del>	119	121
40° Al	354	327	393	12009	295	98	94
60° Al	285	251	310	9478	235	72	74
80° Al	224	196	246	8362	247	82	80
100° Al	182	160	201	8586	314	122	104
120° Al	154	135	170	9470	398	131	133
20°		402	465	893			
40°		327	393	513			
60°		251	310	430			
80°		196	246	508			
100°		160	201	566			
120°		135	170	776			

$y = 0.662 \quad 1.17 \quad 1.33$   
 $x = 472 \quad 840 \quad 957$

$\bar{x} = 1.054$   
 $\bar{y} = 156.3$

$$y = 426.6x + 306.7$$

$$x = \frac{y - 306.7}{426.6}$$

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{\sum xy - 3\bar{x}\bar{y}}{\sum x^2 - 3\bar{x}^2} \\
 &= \frac{2568 - 3 \times 1.054 \times 156.3}{3.576 - 3 \times 1.054^2} \\
 &= \frac{176.6}{0.414} = 426.6 \\
 a &= \bar{y} - \bar{x}R = 306.7
 \end{aligned}$$

$\theta$	道址	E/MeV	$R(\theta)$	$g(\theta)(10^{-4})$
20°	439	0.305	0.4169	6.81
40°	354	0.500	0.4912	7.37
60°	285	0.404	0.5836	8.08
80°	224	0.320	0.6964	8.96
100°	182	0.262	0.7846	9.64
120°	154	0.224	0.8456	10.10