

康普顿散射实验报告

本实验中，我们在了解康普顿散射的基本原理和一些基本结论的基础上，测得了一些角度下散射光子的能量和散射截面，与理论值比较，并进行了误差因素的分析。

关键词：康普顿散射，散射光子能量，散射截面

I. 引言

康普顿效应是射线与物质相互作用的三种效应之一，康普顿效应是指入射光子与物质原子中的核外电子产生非弹性碰撞而被散射的过程。碰撞时，入射光子把部分能量转移给电子，使它脱离原子成反冲电子，而散射光子的能量和运动方向发生变化。康普顿的X射线散射实验从实验上证实了光子是具有能量和动量的粒子，在微观的光子与电子的相互作用过程中，能量与动量守恒仍然成立。历史上的散射实验在研究核辐射粒子与物质的相互作用时发挥了重要的作用。在高能物理方面它至今仍是研究基本粒子结构及其相互作用的一个强有力的工具，并且为独立测定普朗克常量提供了一种方法。物理学家吴有训在1924-1926年间以出色的实验和理论分析对康普顿效应进行了验证，证实和发展了康普顿的量子散射理论。

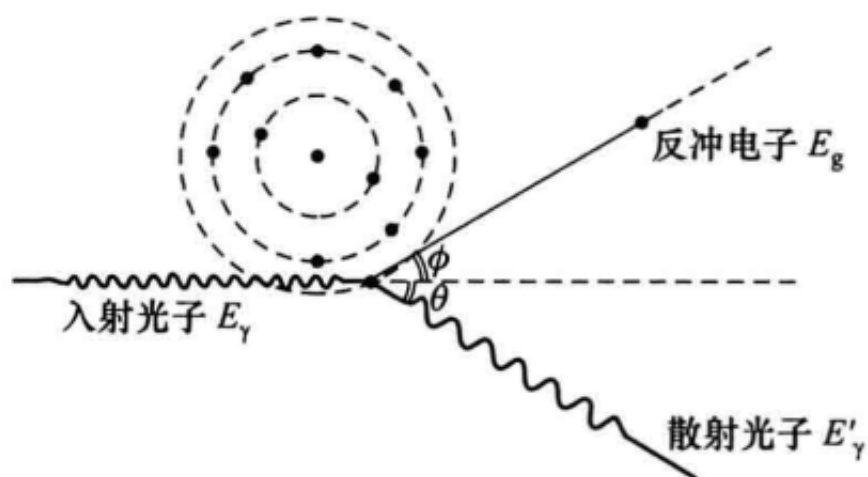


图 1. 康普顿效应示意图

II. 理论

1. 康普顿散射如图1所示, $h\nu$ 是入射光子能量, $h\nu'$ 是散射光子能量, m_0 是电子质量, 散射后电子速度为 v , $\beta = v/c$, 能动能守恒有

$$m_0c^2 + h\nu = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} + h\nu'$$

$$h\nu/c = h\nu' \cos \theta / c + \frac{m_0v}{\sqrt{1-\beta^2}} \cos \phi$$

$$h\nu' \sin \theta / c = \frac{m_0v}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin \phi$$

可以得到

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

2. 康普顿微分散射截面康普顿散射的微分散面的定义是: 一个能量为 $h\nu$ 的入射光子与原子中的一个核外电子作用后被散射到 θ 方向单位立体角里的概率, 记作 $\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega}$, 根据克莱因——仁科公式, 康普顿散射的微分散面表达式为:

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

我们要在实验上测微分散射截面, 根据定义, 当 N_0 个光子入射, 与样品中 N_e 个电子发生相互作用, 忽略多次散射和自吸收, 散射到 θ 方向, 相对样品所张立体角 Ω 的光字数 $N(\theta)$ 为

$$N(\theta) = \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} N_0 N_e \Omega f$$

f 是自吸收因子, 为常量。实验中我们已知晶体对点源的总探测效率 $\eta(\theta)$, 以及晶体的峰总比 $R(\theta)$ 的情况下, 经过复杂推导, 我们得出微分散射截面公式

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

我们通常测的是相对微分散射截面, 设 θ_0 处微分散射截面为 1, 则其他角的散射截面表达式为

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} / \frac{d\sigma(\theta_0)}{d\Omega} = \frac{N_p(\theta)}{R(\theta)\eta(\theta)} / \frac{N_p(\theta_0)}{R(\theta_0)\eta(\theta_0)}$$

III. 实验装置

图2是本实验使用的实验装置示意图, 本实验是由 ^{137}Cs 放射源出射光子, 经准直孔打在实验台上的铝散射棒上, 产生的散射光子用 NaI 探测器接收, 然后输出的脉冲信号, 经线性放大器适当放大脉冲幅度, 送到微机多道, 测出散射光子的能谱. NaI 探测器能够以散射棒为中心而转动, 这样不断改变散射角, 就可以测到不同 θ 角度下的散射光子能谱

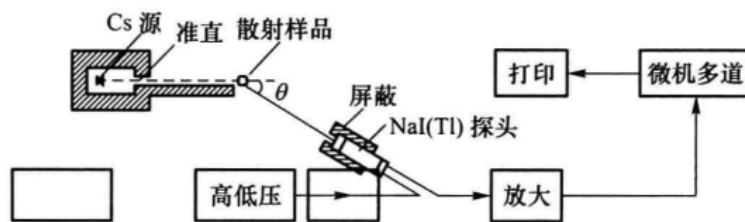


图 2. 康普顿效应实验装置

表 I. 定刻度三点数据

道峰	道计数	能量 (MeV)
460	41379	0.662
813	2614	1.17
930	1958	1.33

IV. 实验及数据分析

首先我们取下散射棒，使用 ^{137}Cs 放射源和 ^{60}Co 对多道分析器进行定标，实验数据如表I所示，第一行是 Cs 的能峰，后两行是 Co 的两个峰。做线性拟合，我们得出道址与能量对应关系为

$$E = 1.425 \times 10^{-3} - n + 7.275 \times 10^{-3}(\text{MeV})$$

相关系数 $r=0.99995$ ，而后我们安装散射棒，记录探测器在不同角度时的峰道址，峰计数，峰计数 1/3 对应的左右道址，左右道址之间的总面积，然后我们取下散射棒再测以下这些角度下，相同左右道址之间的本底面积，前后两次面积的差作为光电峰计数。数据如表II所示

然后可以利用净面积和峰道址求能量和散射截面，其中总探测效率和峰总比使用插值进行估计。数据如表III表示

能量的理论实验对比图如图3所示，散射截面的理论实验对比如图4所示，可见实验测得的能量十分准确，而散射截面误差很大，其相对误差随角度增大而增大，当 120 度时甚至达到了 20%。这一点我们在思考题中讨论。

表 II. 探测数据

theta	峰道址	峰计数	左道址	右道址	总面积	本底面积	净面积
20	422	672	395	453	26377	1175	25202
40	349	483	318	379	20579	633	19946
60	282	431	247	305	16620	595	16025
80	219	454	197	240	14002	562	13440
100	182	571	159	198	14881	674	14207
120	156	696	133	169	17151	1000	16151

表 III. 散射能量和散射截面的理论值和实验值比较

theta	E 实验 (MeV)	E 理论 (MeV)	散射截面	散射截面理论值
20	0.608798	0.61415	1.00E+00	1
40	0.504743	0.50835	6.36E-01	0.6011
60	0.40924	0.40219	3.94E-01	0.3414
80	0.31944	0.32018	2.46E-01	0.2276
100	0.266699	0.26308	2.18E-01	0.1888
120	0.229639	0.22533	2.20E-01	0.1802

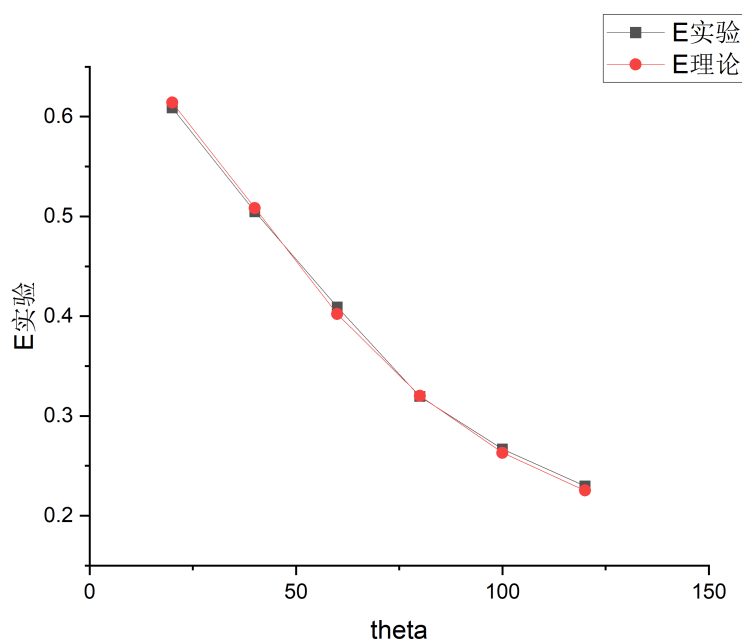


图 3. 能量理论实验对比图

V. 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, 讨论实验值与理论值不完全符合的原因.

对于微分散射截面的测量, 实验的主要误差来源于墙壁对光子的来回反射, 可以看到相对微分散射截面实验值比理论值大, 随着角度增加其相对误差也变大, 这是由于实验台的接收端背靠墙壁, 当角度较小时, 一次反射回来的光子不容易被探测器探测, 当角度增大, 探测口朝向一次反射回来的光子的面积变大, 一次相对微分散射截面比理论值有一个增大, 并且角度越大, 吸收的本不应该被吸收的反射光子越多.

实验中还有一个立体角的来源是有限立体角, 这一点我们从能量曲线上可以看出, 因为能量曲线受墙壁反射光子的影响较小, 因此主要误差来源是有限立体角. 因为探测器将一定角度之内的能量平均值作为中心角度能量的近似, 因此带来误差, 可以看出, 当角度较小时实验能量小于理论能量, 这是因为理论上这一段能量随角度的变化曲线是

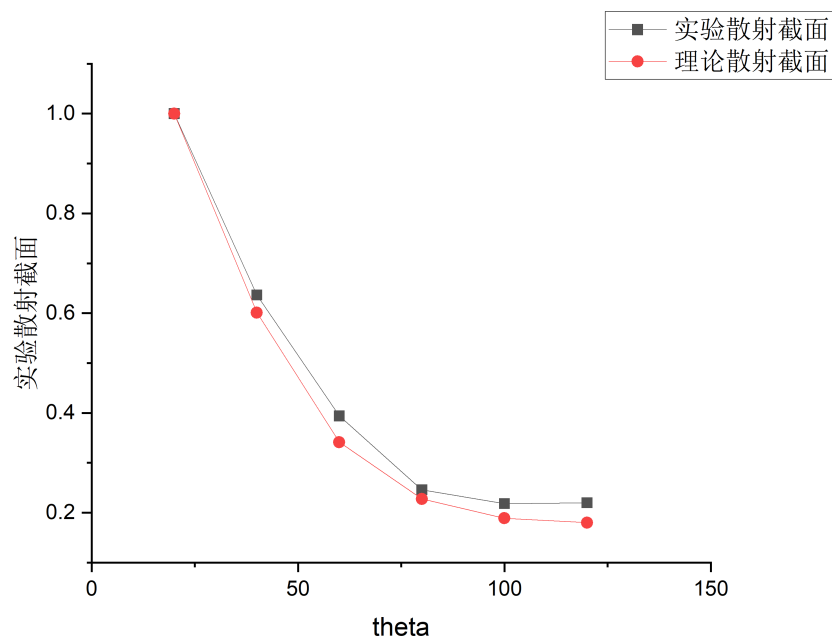


图 4. 散射截面理论实验对比图

上凸函数，而角度较大时实验能量大于理论能量，这是由于理论上这一段曲线是下凸函数。

实验中还有的误差来源还有辐射的涨落，插值估计的误差，用峰计数的 $1/3$ 确定左右道址时的误差以及其带来的计算面积时的误差，但这些对实验结果影响不大。

VI. 结论

本实验中，我们从理论上理解了康普顿散射的基本原理和一些基本结论，利用相关参数在实验上的计算公式，采用合理的实验实验仪器，方法和步骤，测得了一些角度下散射光子的能量和散射截面，并与理论值比较，得出了在现有实验仪器与环境下，能量测量比较准确，散射截面由于墙体反射测出的误差较大的结论。并讨论了其他因素比如有限立体角，峰面积计数等带来的误差。

VII. 致谢

玆老师在实验中的耐心辅导，以及他提供的充分资料对于我对实验的领悟有重要帮助，在此致谢。