

相对论验证实验 β 粒子双峰分析

关键字：相对论 β 粒子 X 特征辐射

1. 引言：

简单介绍相对论验证实验的思想，即以快速电子即 β 粒子作为实验对象，验证其动量与能量满足线性关系，验证相对论及其推论的正确性。并对 β 粒子能谱图中的第一个峰作出一些较详细的分析，也对此峰的成因作较合理的推测。

2. 实验原理

2.1 基本原理：

经典力学给出的运动物体（或粒子）的动量 P ，动能 E_k 间的关系为：

$$\begin{aligned}p &= m_0 v \\ E_k &= \frac{1}{2} m_0 v^2 \\ E_k &= \frac{p^2}{2m_0}\end{aligned}$$

由此可见， E_k 是 P 的二次函数。

根据相对论力学，粒子的动量，能量之间的关系为：

$$\begin{aligned}p &= m(v)v \\ E &= m(v)c^2 \\ E_k &= E - E_0 \\ E_0 &= m_0 c^2\end{aligned}$$

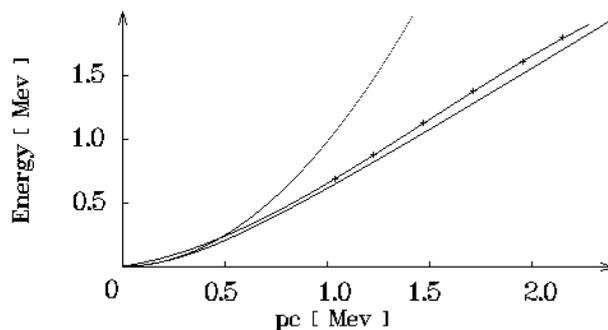
其中 m 有

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

由以上可得，在相对论效应下动量 P 是动能 E_k 的一次函数。

$$E_k = \frac{c^2}{v} p - m_0 c^2$$

本实验就是通过测量高速电子的动量与动能,看其是满足于二次关系还是满足于线性关系。由实验数据得到下图,证明了动量与动能满足于线性关系



Ek 与 P 的关系图

2.2 Ek 与 p 的测量

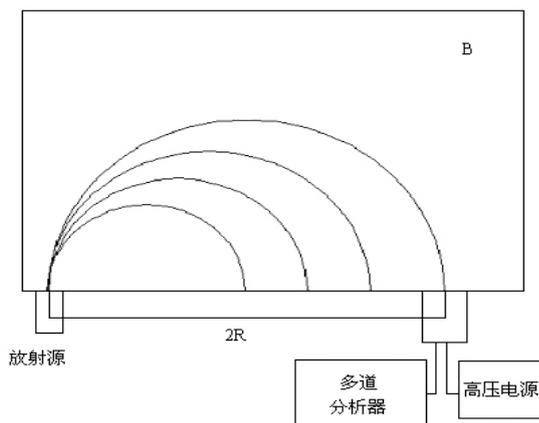
放射源放出的 β 粒子经准直后垂直射入一均匀磁场中,由于受到洛伦兹力的作用而作圆周运动,其半径为 R 。设磁感应强度为 B , β 粒子的速度为 v ,则:

$$f_{*} = eBv = \frac{mv^2}{R}$$

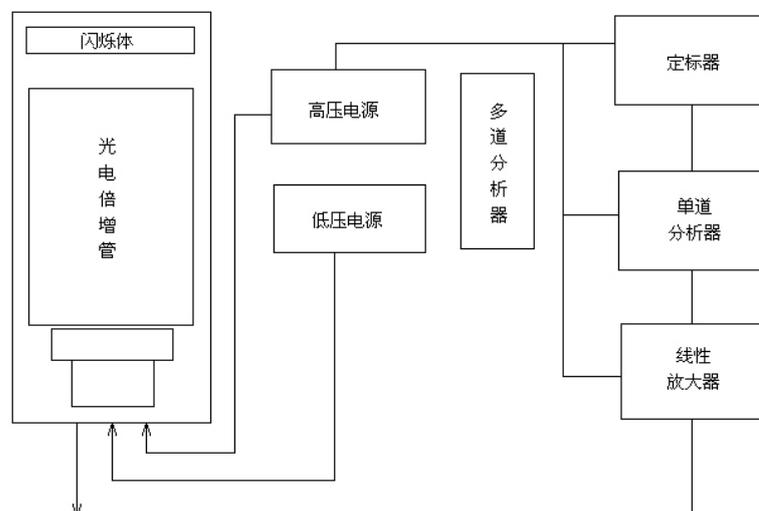
$$p = eBR$$

只要知到 B 和 R ,就可以求出 P 。而 B 是已知的, R 也可以从 β 谱仪上直接读出,所以动量的测量是相对简单的。

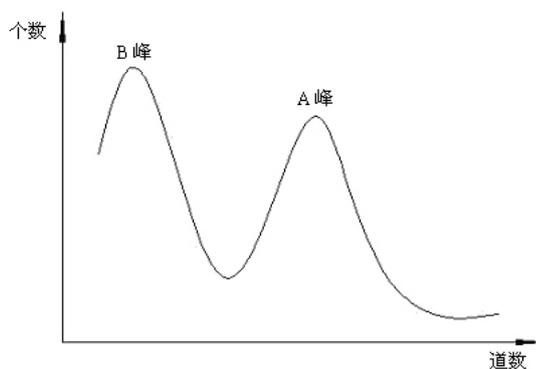
粒子的动能的测量比较复杂,本实验中 β 粒子的动能 E_k 是通过闪烁体探测器与多道分析器所构成的能谱仪测量的。其实验装置如下图:



闪烁体能谱仪框图：



通过测量可以得 β 粒子的能谱图：



曲线中纵坐标为粒子数，横坐标为能谱仪道数。通过对 ^{60}Co 与 ^{137}Cs 能量定标即可得到 A 峰的能量，即 β 粒子对应的能量。

3. B 峰的特点分析

如果说 A 峰代表的是 β 粒子的能量，那么，B 峰又是从哪里来的呢。事实上，在对不同动量（不同 x 处）的 β 粒子测到的能量图中都有 B 峰。而在能量定标时 ^{60}Co 与 ^{137}Cs 的能量谱图中都发现了 B 峰的存在。

对于不同动量 β 粒子的谱图，我们纪录各图中 B 峰的道数、强度与对应 A 峰的强度，而对定标所用的谱图中，则记录 B 峰的道数、强度与全能峰的强度。

所得的数据如下表格 1, 2, 其中表格 1 关于不同动量 β 粒子的谱图统计，表格 2 为关于定标所用的谱图统计。

X/cm	B 峰道数	B 峰强度/s	A 峰强度/s
21.0	32	3.43	2.81
23.0	36	2.77	3.05
25.5	37	2.03	2.63
28.0	34	1.47	1.70
30.5	34	0.98	0.96
32.5	34	0.76	0.40

表格 1

	B 峰道数	B 峰强度/s	全能峰强度/s
6 0Co	32	1.38	0.253
1	34	36.5	23.6

37Cs			
------	--	--	--

表格 2

通过对这两个表格的观察，我们发现 B 峰有一个最显著的特点，即 B 峰的道数基本保持在 33（32-37）附近不变。这很让人怀疑是本底造成的干扰。

为此，我们进行不放干涉源，直接通过能谱仪来观测谱图的实验。发现谱图上还是存在两个紧挨在一起的峰，下面的表格 3 即纪录在无放射源下两峰的道数和强度。

发现，道数为 34 的峰 1 与 B 峰的道数完全吻合，只是强度低了很多。这说明，B 峰在本底中也是存在的。

	道数	强度/s
峰 1	34	0.068
峰 2	65	0.130

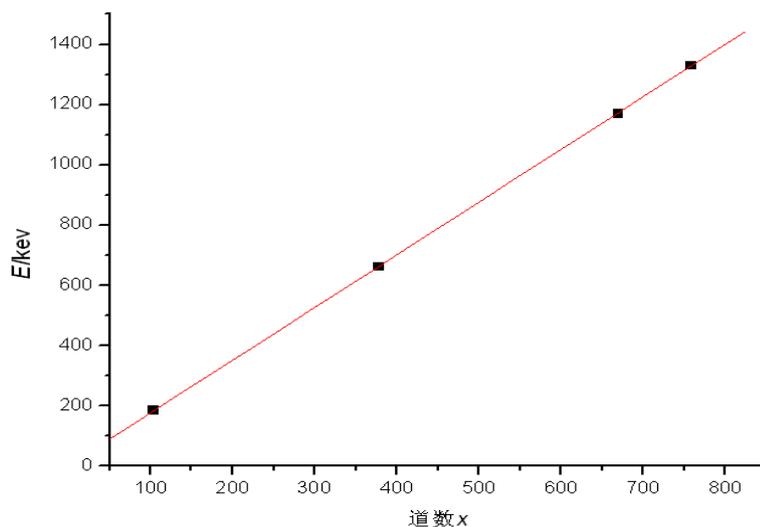
表格 3

我们比较上述三个表格的 B 峰强度和在同一谱图中另一峰的强度，发现 B 峰的强度大致随入射粒子的强度增加而增加，并发现 B 峰即使在不放射源的情况下也依然存在。

由于 B 峰的强度随入射粒子的密度正相关，虽然 B 峰的道数固定，但可以排除 B 峰就是本底干扰的可能。

4. B 峰的能量

为了研究 B 峰的成因，很有必要计算出 B 峰代表的能量。为此，我们应先进行能量



定标。

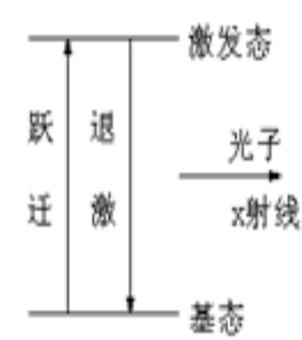
能量与道数的线形拟合

得到拟合公式 $E=1.75*x+1.85$

对于 B 峰，以 33 道作为 B 的道数，代入拟合公式，得到能量 E 为 59.6keV。但是，对于低能区域，存在着较大的道数漂移，有必要对其能量进行修正。以 ^{137}Cs 中的 X 特征峰作为参考（6 道，32keV），得到 B 峰修正后的能量 $E=32+(33-6)*1.85=77.5\text{keV}$ 。这个能量属于 X 射线的范畴。

5. X 特征辐射

快速电子撞击到原子内层电子时，内层电子离开原来的壳层，成为自由电子，原子外层的电子从激发态上退激发放出能量，以 X 光光子的形式释放，产生 X 特征辐射。



不同原子产生的特征辐射的能量是特定的；同种原子的 X 特征辐射中 $K\alpha$ 的辐射占了绝大部分。

6. B 峰的成因

从 X 特征辐射的特点中可以看到，一种原子受快速电子（或 γ 光子）碰撞后就会产生主

要是 $K\alpha$ 线的 X 特征辐射，这和 B 峰能量不变的特点很吻合。而 X 特征辐射的强度也和入射粒子的强度有关，这也符合 B 峰和入射粒子强度正相关的特点。

具体得说，便是 β 粒子（或 γ 光子）在闪烁体中与原子碰撞，产生特定能量的 X 特征辐射，此 X 光再度在闪烁体中作用，产生次级电子，激发荧光，最后在多道探测仪上形成了 B 峰。

在粒子进入闪烁体后，能发生作用的物质主要有：Al 膜，它离 NaI 晶体很近，产生的 X 光能进入到晶体中，NaI (Tl) 晶体。

通过查阅资料得到，上述元素的 $K\alpha$ 线 X 特征辐射能量为：

Al: 1.487keV, 1.486keV

Na: 1.041keV

I: 28.6keV, 28.3keV

Tl: 72.9keV, 70.8keV

通过对比发现，Tl: 72.9keV, 70.8keV 的 X 特征辐射和 B 峰代表的能量 77.5KeV 很接近，可以猜想，B 峰就是由高能粒子与 Tl 作用产生的 $K\alpha$ 线 X 特征辐射。

至于其他的元素没有产生对应的 X 谱线是因为它们的 X 射线能量太低，激发的荧光光子个数有限，没有超过阈值，不会被计数器统计。

另外，无外加源时的 B 峰一部份是环境噪声形成的，一部分于是自然下的辐射引发的 X 特征辐射造成的。

7. 小节

通过前文对 B 峰道数的统计，能量的计算，X 特征辐射的特点分析与对比，我们发现铊 (Tl) 的 $K\alpha$ 线 X 特征辐射能量与 B 峰的能量较吻合，也可以以此来解释 B 峰能量固定，强度随入射粒子强度变化的特点。所以可以初步判断，B 峰即为铊 (Tl) 的 $K\alpha$ 线 X 特征辐射。

8. 衷心感谢王煜的耐心而又详细地指导，感谢同组朱睿超的合作。

参考文献

- 1 《近代物理实验及补充讲义》 2008 版 复旦大学物理系
- 2 《常用核辐射数据手册》 强亦忠译 原子能出版社
- 3 《浅述 X 射线荧光光谱仪的应用》 余荣台 余祖发 《佛山陶瓷》2006 年 09 期

4 《NaI(Tl)闪烁谱仪谱漂移原因分析》 屈国普 凌球 郭兰英 赵立宏 陈坚祯 《南
华大学学报》 2005 年 01 期

5 《NaI(Tl)晶体的性能研究》 吕海江 蔡康松 焦铮 程和平 李铮 《安徽师范大学
学报》 2006 年 05 期