

相对论验证实验中的数据修正讨论

——by 06300300072 李枫

Abstract

In the experiment to verify the relativistic relationship of momentum-energy with β particals, the data we picked from the computer should be corrected. The energy of β particals have been absorbed by Al film and organic plastic film. Observe the graph of $E_k - \Delta E$ to study the relationship between them. The factor of β energy absorption is discussed. The graph is satisfied with the given theory.

Keywords

The experiment to verify the relativistic relationship of momentum-energy with β particals; β energy absorption; data correction

Introduction

相对论是 20 世纪物理学史上最重大的成就之一，它包括狭义相对论和广义相对论两个部分，狭义相对论变革了从牛顿以来形成的时空概念，提示了时间与空间的统一性和相对性，建立了新的时空观。狭义相对论最重要的结论是使质量守恒失去了独立性。它和能量守恒原理融合在一起，质量和能量可以互相转化。如果物质质量是 M ，光速是 C ，它所含有能量是 $E=MC^2$ 。自相对论诞生以来，对其的非议也由来已久，但随着一些实验验证相对论的成功（如康普顿效应，电子偶的产生与湮灭，穆斯堡尔效应，引力红移， γ 射线的红移与蓝移，地面上的 μ 子流， π 介子寿命， π 介子的 γ 衰变，雷达回波延迟实验，水星近日点的进动，中微子的发现， π 介子寿命等）相对论的正确性也逐渐得到大家的公认。在本实验中，我们把实验测得的高速 β 粒子的动能-动量关系图与理论图相比较，以此验证相对论。但是由于实验中 β 粒子的能量会不可避免地被 Al 膜以及有机塑料膜所吸收，所以实验测得的 β 粒子动能需要用线性插值法进行修正。本文对实验数据的修正进行论述，并从中探讨 β 粒子在穿过物质时能量损失的情况。

Theory parts

在经典力学中动量值与动能的关系为

$$E_k = P^2/2m$$

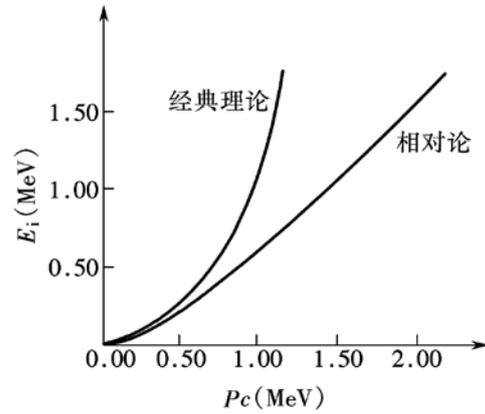
当物体接近光速时，就要涉及到相对论，这时动量值与动能的关系为

$$E_k = E - E_0 = \sqrt{c^2 p^2 + m_0^2 c^4} - m_0 c^2$$

本实验以 β 粒子为研究对象，得到其 $E_k - Pc$

图，验证其是否符合右图对应的相对论的理论图形。

但是由于实验设备原因（防止探测器闪烁体 NaI(Tl) 潮解的 Al 膜以及包装真空室的有机塑料薄膜都会对 β 存在一定的能量吸收，所以最后实验收集测得的能量并非 β 粒子的动能，故而虚对其值进行修正。



I β 粒子在铝膜中的能量损失修正

设 β 粒子在铝膜中穿越 Δx 的动能损失为 ΔE ，则：

$$\Delta E = \frac{dE}{\rho dx} \rho \Delta x \quad (1)$$

其中 $\frac{dE}{\rho dx}$ ($\frac{dE}{\rho dx} < 0$) 是 Al 对 β 粒子的能量吸收系数 (ρ 是 Al 的密度)， $\frac{dE}{\rho dx}$ 是关于 E 的

函数，不同 E 情况下 $\frac{dE}{\rho dx}$ 的取值可以通过计算得到。可设 $\frac{dE}{\rho dx} \rho = K(E)$ ，则

$\Delta E = K(E)\Delta x$ ；取 $\Delta x \rightarrow 0$ ，则 β 粒子穿过这个铝膜的能量损失为

$$E_2 - E_1 = \int_x^{x+d_1} K(E) dx \quad (2)$$

$$\text{即 } E_1 = E_2 - \int_x^{x+d_1} K(E) dx \quad (3)$$

其中 d_1 为薄膜的厚度， E_2 为出射后的动能， E_1 为入射前的动能。

由公式 (3) 可以看出 β 粒子在穿越铝膜中的能量损失 ΔE 与粒子入射能量 E_1 及铝膜的厚度 d_1 有关。实验中 $d_1 = 200 \mu$ 固定不变。

II β 粒子在有机塑料薄膜中的能量损失修正

实验表明，封装真空室的有机塑料薄膜对 β 粒子存在一定的能量吸收，尤其对于小于

0.4MeV 的 β 粒子吸收接近 0.02MeV。

实验中按书上已给的参考表用线性

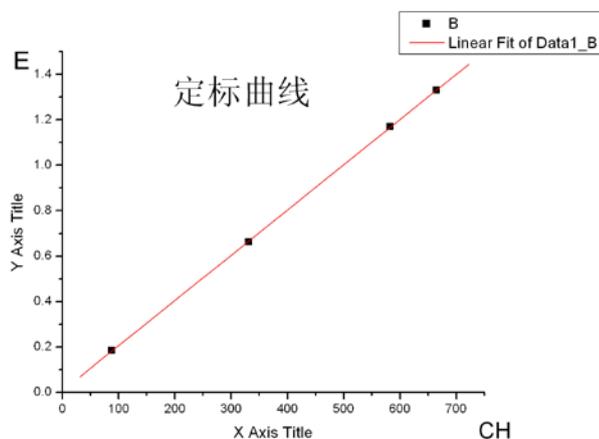
插值法从 E_2 反求 E_1 进行数据修正。

修正时应注意先修正铝膜的能量吸收再修正有机塑料膜的能量吸收。

因为 β 射线由放射源射出后先在真空室内被包装真空室的有机塑料薄膜吸收能量后再被能量探测器中的 Al 膜吸收能量，而数据修正

应是个拟过程。 β 射线经过两次修正后才是其动能的原始量。

由定标曲线求出测得的能量

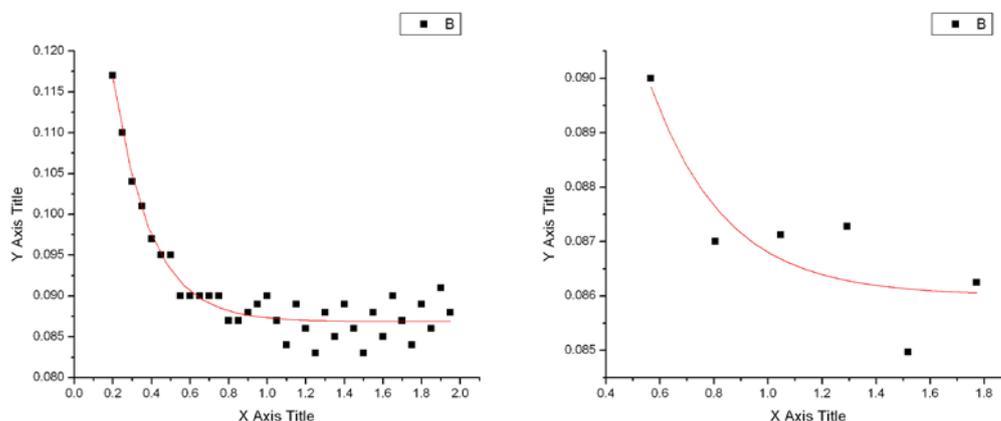


CH	281	401	523	646	760	887
E/MeV	0.5663	0.80515	1.04798	1.2928	1.5197	1.77249

再用线性插值法进行数据修正（单位为 Mev）

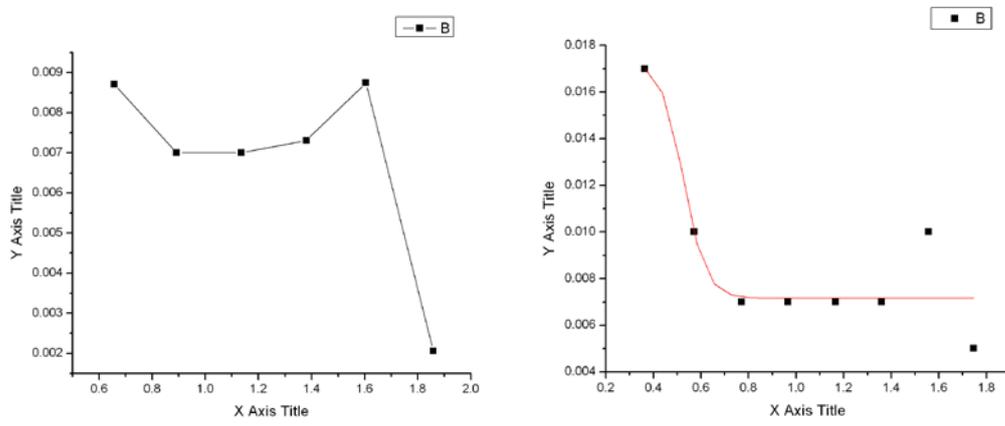
E_0 (定标曲线所得能量)	E_1 (Al 膜能量修正)	ΔE	E_2 (塑料薄膜能量修正)	ΔE
0.5663	0.6563	0.09	0.66501	8.71×10^{-3}
0.80515	0.89215	0.087	0.89915	7×10^{-3}
1.04798	1.1351	0.087112	1.1421	7×10^{-3}
1.2928	1.38008	0.08728	1.38739	7.31×10^{-3}
1.5197	1.60467	0.08497	1.61342	8.75×10^{-3}
1.77249	1.85874	0.08625	1.8608	2.06×10^{-3}

用 origin 拟合，横坐标是电子能量，纵坐标是膜吸收的能量



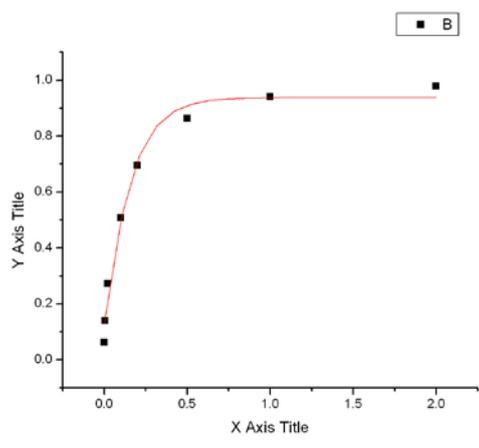
左上图是根据书上已给的参考表得到的 E_k -Al 膜吸收 ΔE 图，右上图是实验所得的 E_k -Al 膜吸收 ΔE 图。比较两图的曲线拟合图，类似对数函数的图形，在低能区膜吸收的能量较高，在 0.08-0.09MeV 波动。

右下图是根据书上已给的参考表得到的 E_k -塑料膜吸收 ΔE 图，左下图是实验所得的 E_k -塑料膜吸收 ΔE 图。比较两图可以看出实验所得的图是右图的右半部分。从右下图的拟合曲线可以看出塑料膜在 β 射线低能区吸收的能量 ΔE 比在 0.7MeV 后吸收的能量要高出许多，曲线在 0.7MeV 后 ΔE 基本不变。但两图中在 1.6MeV 附近 ΔE 都突然升高后又急速下降。



综上所述我们可以看出无论是 Al 膜还是有机塑料薄膜，其在 β 粒子低能区的能量吸收都比较明显，而在高能区的能量吸收基本不随能量的增加而增加，而是保持一个平稳的值或是在一个区间内波动。观察下表 β 粒子与速度的关系，并做出拟合图：

E/MeV	0.001	0.005	0.020	0.100	0.200	0.500	1.000	2.000
V/c(c=3×10 ⁸ m/s)	0.062	0.139	0.272	0.548	0.695	0.863	0.941	0.979



左图是 β 粒子的速度-能量关系图，从图中可以看出当在 β 粒子能量达到 0.8MeV 时速度增长速度变缓，而这个时候物质对 β 粒子能量的吸收也减少到一个常值左右。为此我们对物质对 β 粒子能量吸收的影响因素经行探讨。

Results and Discussion

本实验的 β 粒子的最大能量不超过 2.8MeV。主要和物质中的原子或分子起电磁相互作用，原子核只是作为库仑场的中心来起作用。在目前所讨论的情况中，射线和原子核发生原子核反应的几率是相当小的，就不予考虑了。 β 粒子和物质的电磁作用使它改变方向和损耗能量。前者主要是由于多次库仑散射，这里不是我们讨论的对象。 β 粒子损耗能量的方式随着它的速度大小而有所不同，它们的能量损耗主要用于使物质中分子或原子的电子受到激发或电离，这种方式的能量损耗就是所谓电离损耗。当 β 粒子处于能量较低时，容易与物质中的原子或分子发生电磁作用，而当处于高能区时，物质已无法俘获其能量，从而使能量损耗降低。实验的结果表明，相对论性速度粒子的能量损耗随着 β 粒子的能量增大而减小，而后大致成一个常数，不再随着 β 粒子的速度增加而改变了。这是由于介质极化所产生的屏蔽效应的后果，它减低入射粒子的电离损耗。这个效应在低能区的情形下可以忽略，不过在入射粒子有相对论性速度时则相当显著。在粒子速度非常高时电离损耗的饱和值和它的最低数值之差，显然和吸收物的极化特性有关，所以 Al 膜与有机塑料薄膜的能量吸收是有差别的。

从实验中我们还知道 β 粒子穿过物质的能量损失与物质厚度以及 β 粒子本身的能量大小有关。由于 β 粒子和吸收物质中原子的电子的非弹性碰撞而引起的每个原子的能量转移是非常小的。即使入射电子能量很高，原子激发的可能性还是要比电离大一些，所产生的次级电子的平均动能只有几电子伏。所以 β 粒子经过一定厚度的吸收片后的总能量损耗是很多次小量损耗累积的结果。所以物质的厚薄直接影响 β 粒子的能量损失情况。

但是在 E_k -塑料膜吸收 ΔE 图中，无论是自己实验所得还是由书上的参考表所得的图像中，在 1.6MeV 附近 ΔE 都突然升高，与上述理论不符。推测也许是由于韧致辐射所致，韧致辐射非常接近线性的随着能量的增大而增大，但是为何在 1.6MeV 后又下降了。这个问题还有待研究。

Summary

在对相对论验证实验经行必要的的数据修正时研究讨论了 β 粒子在穿过物质时被物质能量吸收的情况。研究发现 β 粒子在与物质表层经行非弹性碰撞时会造成能量损失，这与物质厚度有关。当 β 粒子在相对论性速度时由于介质极化所产生的屏蔽效应可以降低入射粒子的电离损耗，所以 β 粒子只有在低能区能量损耗才比较明显。

References

- (1) 近代物理实验补充讲义 复旦大学物理教学实验中心
- (2) β 和 γ 放射性 梅镇岳 1964 年 04 月第一版