

β^- 粒子在铝中的能量损失的研究

邝悦

(电子科学与技术, 0530120)

摘要: 通过在 β^- 磁谱仪的闪烁探头和电子出射孔间增加不同厚度的铝箔, 测量 β^- 粒子穿过不同厚度铝箔进入 NaI (Tl) 晶体后的能量 E_f , 对 β^- 粒子穿过铝的能量损失 ΔE 与入射能量 E_i 及 Al 膜厚度 d 的关系进行研究, 并用直线拟合求出了一定条件下阻止本领 $S(E)$ 的近似值, 推算出验证相对论所需测量的 β^- 粒子进入 Al 膜前的能量 E_i , 结果表明得出的数值精确度较高。通过对数据进行分析, 还得出在 β^- 粒子能量 $E_0 \approx 1.5 \text{ MeV}$ 时, 铝的阻止本领 $S(E)$ 达到最小值的结论。

关键词: 能量损失 阻止本领 线性拟合 入射能量 E_i 铝箔厚度

1、引言

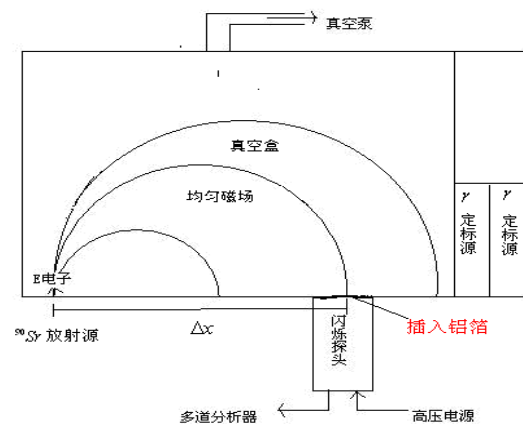
1905 年, 爱因斯坦提出了狭义相对论。在相对论验证实验中, 我们用 β^- 源射出的高速 β^- 粒子验证狭义相对论的动量与动能关系: $E_k = mc^2 - m_0c^2 = \sqrt{P^2c^2 + m_0^2c^4} - m_0c^2$, 其中动量可从探测器狭缝与 β^- 源间的距离 Δx 按公式计算出, 动能要求测量 β^- 粒子进入 Al 膜 ($220 \mu\text{m}$: $200 \mu\text{m}$ 为 NaI (Tl) 晶体的铝膜密封层厚度, $20 \mu\text{m}$ 为反射层的铝膜厚度^[1]) 前的能量 E_i , 而根据能量定标曲线从测得的峰道址求得的能量是 β^- 粒子穿过 $220 \mu\text{m}$ Al 膜之后的能量 E_f , 因此怎样从 E_f 求得 E_i (即能量修正) 是实验中的一个重要问题。

现有资料书中列出了根据理论计算得出的 E_f 与 E_i 数据关系表, 而本文通过在 β^- 磁谱仪的闪烁探头和电子出射孔之间增加不同厚度的铝箔测量出谱峰道数, 由能量定标曲线求得 β^- 粒子穿过不同厚度铝箔后的能量, 由此得出 β^- 粒子的能量损失和铝箔厚度的关系, 通过拟合图求得入射能量 E_i 的大小, 并将实验值与理论值进行对比, 结果表明, 用此方法求出的 E_i 数值精确度很高。另外, 本文也讨论了 β^- 粒子的能量损失与入射能量 E_i 的关系, 计算了一定条件下阻止本领 $S(E)$ 的近似值。

2、实验方法与仪器

实验使用半圆聚焦 β^- 磁谱仪:

(实验时插入铝箔的位置已标出)



实验装置示意图

实验所用的放射源是 $^{90}_{38}\text{Sr} - ^{90}_{39}\text{Y}$ β^- 源。 β^- 衰变是一个中子转变为质子的过程, 在产生电子时还放出一个反中微子 $\bar{\nu}$ 。中微子是一个静止质量近似为 0 的中性粒子。 β^- 衰变释放出的衰变能 Q 在 β^- 粒子、反中微子和子核三者间分配。因为三个粒子的发射角度是任意的,

所以每个粒子所携带的能量并不固定，故 β^- 粒子的动能可以在零至 Q 之间变化，形成一个连续谱。^[2]

β^- 粒子穿过Al膜的能量损失 ΔE 与 β^- 粒子的入射能量 E_i 及Al膜的厚度 d 有关。^[3] 为了研究 ΔE 与 E_i 及铝膜厚度 d 的关系，需要对单能电子和Al的相互作用进行研究，所以首先要得到单能电子。可以用 β^- 磁谱仪对不同动量的电子进行磁分离，不同出射位置的电子动能不同。且根据公式 $P=1/2e \Delta x B$ ，可知探测器狭缝与 β^- 源间的距离 Δx 越大，对应电子的动能越大，故通过将探测器放置在不同 Δx 处，可得到不同能量的单能电子。

能量定标：用NaI (T1) 闪烁探头和微机多道测量标准源¹³⁷Cs和⁶⁰Co的能谱，对能谱仪进行定标。定标峰的已知能量如下：

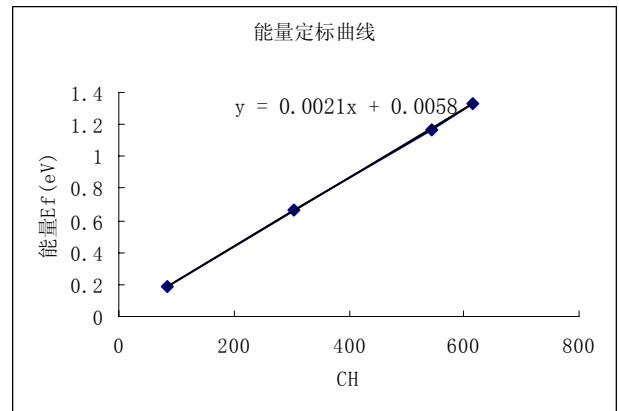
¹³⁷ Cs	光电峰	0.662MeV	反射峰	0.184MeV
⁶⁰ Co	光电峰I	1.17MeV	光电峰II	1.33MeV

测得定标峰峰位后，进行直线拟合得到 β^- 粒子穿过铝箔后的能量 E_f 与道数之间的线性关系，由此求得不同条件下的能量 E_f 。

实验设计：探头的位置分别取 $X=33.6\text{cm}$ ， $X=31.5\text{cm}$ ， $X=29.0\text{cm}$ ， $X=26.5\text{cm}$ ， $X=24.0\text{cm}$ ， $X=21.5\text{cm}$ ， $X=19.0\text{cm}$ ，在这些位置处分别测量探测器和出射孔之间不加铝箔、加 $200 \mu\text{m}$ 铝箔、加 $360 \mu\text{m}$ 铝箔、加 $560 \mu\text{m}$ 铝箔条件下的 β^- 粒子能谱（定时 500s），并确定谱峰所对应的通道数。将谱峰通道数代入定标曲线中得到 β^- 粒子穿过不同厚度的铝箔的能量 E_f ，通过不同 X 值下得出的实验数据分析 ΔE 与入射能量 E_i 的关系；由同一 X 值下不同条件时的四组 E_f 值得出 β^- 粒子的能量损失 ΔE 与 Al 膜厚度的关系，并近似计算阻止本领 $S(E)$ 的值，通过得出的拟合曲线反求 β^- 粒子穿过铝膜前的能量 E_i ，与理论计算值进行比较。

3、实验结果与讨论

高压设定：705V，放大器增益：3.00
根据¹³⁷Cs和⁶⁰Co的定标峰数据得出定标曲线：



将实验数据代入定标曲线计算，得出 β^- 粒子穿过不同厚度的铝箔能量值 E_f 如下表：

表 1

X (cm)	铝箔厚度 $d=220 \mu\text{m}$ 时的 E_f (MeV)	铝箔厚度 $d=420 \mu\text{m}$ 时的 E_f (MeV)	铝箔厚度 $d=580 \mu\text{m}$ 时的 E_f (MeV)	铝箔厚度 $d=780 \mu\text{m}$ 时的 E_f (MeV)
33.6	1.7948	1.7065	1.6644	1.5753
31.5	1.6108	1.5255	1.4882	1.4002
29.0	1.3559	1.2786	1.2211	1.1405

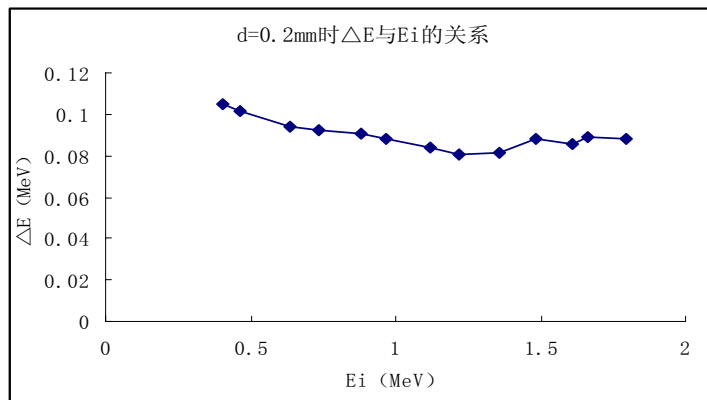
26.5	1.1194	1.0359	0.9636	0.8759
24.0	0.8779	0.7874	0.7374	0.6454
21.5	0.6356	0.5419	0.4659	0.3644
19.0	0.4008	0.2959	0.1927	因峰很不明显所以此数据不采用

3.1 能量损失 ΔE 与 β^- 粒子的入射能量 E_i 的关系

因为 β^- 粒子穿过Al膜的能量损失 ΔE 只与入射能量 E_i 及Al膜的厚度 d 有关，故当 d 不变时， ΔE 是 E_i 的函数。显然，在上表的第二和三列间多增加了厚度为 $200\mu\text{m}$ 的铝片，第四和五列间同样，故当 $d=200\mu\text{m}$ 时，可把第二和四列数据看成入射能量 E_i ，而二、三列的数据差和四、五列的数据差相应作为 ΔE ，对应如下：

E_i (MeV)	1.7948	1.6108	1.3559	1.1194	0.8779	0.6356	0.4008
ΔE (MeV)	0.0883	0.0823	0.0815	0.0835	0.0905	0.0937	0.1049
E_i (MeV)	1.6644	1.4822	1.2211	0.9636	0.7374	0.4659	
ΔE (MeV)	0.0891	0.0880	0.0806	0.0877	0.0920	0.1015	

由表中数据得出铝箔厚度 $d=200\mu\text{m}$ 时， ΔE 与 E_i 的关系图：



由关系图可得：在 β^- 粒子入射能量 E_i 小于 1MeV 时， ΔE 随 E_i 的增大而减小，且减小的趋势随 E_i 的增大趋于平缓；当 E_i 大于 1MeV 时， ΔE 的值变化不大，在 $0.08\text{--}0.09\text{MeV}$ 间波动。这个结果是合理的：

不同能量的 β^- 粒子速度与光速的关系^[4]

能量/MeV	0.001	0.005	0.020	0.100	0.200	0.500	1.000	2.000
v/c	0.062	0.139	0.272	0.548	0.695	0.863	0.941	0.979

由表中数据可知：能量越大的 β^- 粒子对应的速度也越大。当 β^- 粒子的能量小于 1MeV 时，随能量的增大，速度增大明显，且 β^- 粒子的能量越小时速度的增大越明显，而对于速度越大的 β^- 粒子Al箔的阻挡本领越差，^[5]即损失的能量 ΔE 越小，故 ΔE 随 β^- 粒子能量的增大而减小，且能量越小时， ΔE 的变化越明显；而当 β^- 粒子能量为 1MeV 时，其速度已达到 $0.941c$ ，很接近光速，当 β^- 粒子的能量再增大时，其速度变化不大，故同样厚度的铝箔对能量大于 1MeV 的 β^- 粒子造成的能量损失 ΔE 变化很小，由于实验数据存在误差，所以 ΔE 的值会有波动，但大体趋势还是符合理论情况的。

3.2 能量损失 ΔE 与Al箔厚度 d 的关系

由3.1的讨论，可知当 β^- 粒子的能量大于 1MeV 时， ΔE 随 E_i 的变化很小。此时改变

铝箔的厚度 d ，可近似认为 ΔE 只是 d 的函数。对照表 1 中的能量数据，可采用 $X=33.6\text{cm}$ ， $X=31.5\text{cm}$ ， $X=29.0\text{cm}$ ， $X=26.5\text{cm}$ ($E=0.9636\text{MeV}$ 和 0.8759MeV 时， ΔE 相对 $E>1\text{MeV}$ 时的变化还较小，故也认为 $X=26.5\text{cm}$ 时， ΔE 只是 d 的函数) 时的能量值与对应的铝箔厚度 d 进行分析，讨论二者的关系。

为定量研究粒子在靶物质中穿行损失能量的过程，定义“阻止本领”： $S=-dE/dx$ ，它表示带电粒子通过单位路径时的能量损失。阻止本领与入射带电粒子的种类和能量及靶原子的性质有关。^[5] 在本实验中，入射粒子和靶原子确定，故 S 只和 β^- 粒子的能量 E 有关，可表示为 $S(E)$ 。若在 Al 膜中穿过 Δx 能量损失为 ΔE ，则： $\Delta E=S(E)\Delta x$ ，易知 ΔE 随 E_i 的变化即体现在 $S(E)$ 上。而选定的实验数据满足 ΔE 随 E_i 的变化可以忽略，即 $S(E)\approx C$ (常数)，所以对表 1 中的 $X=33.6\text{cm}$ ， $X=31.5\text{cm}$ ， $X=29.0\text{cm}$ ， $X=26.5\text{cm}$ 时的四组数据进行处理，以 β^- 粒子穿过的铝箔厚度 d (μm) 为横轴，对应的能量 E (MeV) 为纵轴，得到的图象应为直线，进行线性拟合后，得到的关系式如下：

$$X=33.6\text{cm时}, E=-3.8224*10^{-4}d+1.8764, R^2=0.9921 ;$$

$$X=31.5\text{cm时}, E=-3.6528*10^{-4}d+1.6888, R^2=0.9893 ;$$

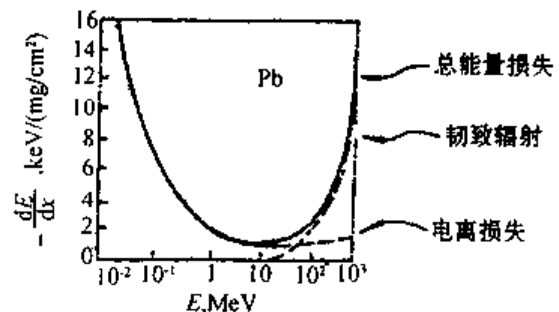
$$X=29.0\text{cm时}, E=-3.8274*10^{-4}d+1.4404, R^2=0.9996 ;$$

$$X=26.5\text{cm时}, E=-4.3611*10^{-4}d+1.2168, R^2=0.9998 ;$$

其中 R^2 为 Excel 自动生成的相关系数，可知以上四条曲线拟合相关系数 R^2 都大于 0.98，这说明拟合曲线能够很好地解释、符合实验数据。

对照理论公式 $\Delta E=S(E)\Delta x$ ，易知拟合公式中的 d 的系数即为阻止本领 $S(E)$ 的值，因为处理数据时近似认为 $S(E)$ 在同一组数据中保持不变，故得到的 $S(E)$ 值只是近似值。故只对其进行定性分析：电子能量在 1.7948MeV 至 1.1405MeV 时， $S(E)$ 变化较慢，随 E 减小，测得的 $S(E)$ 变化为 3.8224MeV/cm 到 3.6528MeV/cm 到 3.8274MeV/cm ，可见 $S(E)$ 的值有个先减小后增大的过程，并由 $X=31.5\text{cm}$ 时， $S(E)\approx 3.6528\text{MeV/cm}$ ，可以估算在 $E_0=1.5\text{MeV}$ 左右时， $S(E)$ 达到最小值；而当 $X=26.5\text{cm}$ 时，对应能量范围为 0.8759MeV 到 1.1194MeV ，此时部分电子能量已达到了 1MeV 以下， $S(E)=4.3611\text{MeV/cm}$ ，比之前三个值增大了较多。说明当电子能量小于 1MeV 时， $S(E)$ 随 E 的减小增大较快，这也验证了 3.1 中的讨论：因为 d 一定时， ΔE 的变化情况只取决于 $S(E)$ 的变化，故测得的 $S(E)$ 近似值变化趋势与 3.1 中的 ΔE 与 E_i 关系图变化趋势一致。

右图是电子在铅中的能量损失与电子能量 E 的关系图^[5]：



由于靶原子不同，此曲线与靶原子为铝时的各点取值有差异，且阻止本领最小时对应的电子能量 E_0 也不同，但该图和电子穿越铝时的大体趋势一致。由右图可发现，在电子能量从 0.2MeV 到 2MeV (实验中测得的 β^- 粒子能量范围) 内，随 E 的增大，阻止本领 $S(E)$ 先较快下降，然后趋于平缓，并在 $1-10\text{MeV}$ 内某个能量值 E_0 处达到最小值，最后又随着 E 的增大

有增大趋势（因为实验中测得的最大电子动能只在 1.8MeV左右，故这个增大趋势不能从实验结果中体现出来）。通过对拟合出的S（E）值的分析，估算出电子在Al中的阻止本领S（E）最小时对应电子的能量 $E_0 \approx 1.5\text{MeV}$ 。

3.3 计算 β^- 粒子进入220 μm Al膜前的能量 E_i ，并与理论值比较

相对论验证实验要求验证高速电子的动能和动量关系，其中动能要为电子在磁场中运动时的能量，故要求出 β^- 粒子进入220 μm Al膜前的能量 E_i 。前面已说明过，当 $X=33.6\text{cm}$ ， $X=31.5\text{cm}$ ， $X=29.0\text{cm}$ ， $X=26.5\text{cm}$ 时，近似认为测得的能量值E与通过的铝箔厚度d成线性关系，故 E_i 的计算可看作是 β^- 粒子穿过了厚度为0的铝箔后的能量，故将 $d=0$ 代入拟合曲线中求得能量值即为 E_i ，根据拟合表达式，易得：

$X=33.6\text{cm}$ 时， $E_i=1.8764\text{ MeV}$ ， $E_f=1.7948\text{MeV}$ ；

$X=31.5\text{cm}$ 时， $E_i=1.6888\text{ MeV}$ ， $E_f=1.6108\text{MeV}$ ；

$X=29.0\text{cm}$ 时， $E_i=1.4404\text{ MeV}$ ， $E_f=1.3559\text{MeV}$ ；

$X=26.5\text{cm}$ 时， $E_i=1.2168\text{ MeV}$ ， $E_f=1.1194\text{MeV}$ ；

E_f 为直接测得的穿过220 μm Al膜后的能量。

理论上可用线性插值的方法从 E_f 反求 E_i ^[3]：

E_i (MeV)	E_f (MeV)	E_i (MeV)	E_f (MeV)	E_i (MeV)	E_f (MeV)	E_i (MeV)	E_f (MeV)
1.184	1.100	1.435	1.350	1.685	1.600	1.834	1.750
1.239	1.150	1.489	1.400	1.740	1.650	1.889	1.800

根据上表，求出 E_i 的理论值，并与实验值比较，求出实验值的相对误差：

X (cm)	E_i 实验值 (MeV)	E_i 理论值 (MeV)	相对误差 u
33.6	1.8764	1.8835	-0.38%
31.5	1.6888	1.6980	-0.54%
29.0	1.4404	1.4415	-0.076%
26.5	1.2168	1.2060	+0.89%

相对误差u都小于1%，说明在电子能量大于1MeV时，采用将电子能量和铝箔厚度进行直线拟合的方法，来求出 β^- 粒子进入220 μm Al膜前的能量 E_i 是可行的，且数据的精准度也很高。

4、结论

在 β^- 粒子入射能量 E_i 小于1MeV时， ΔE 随 E_i 的增大而减小，且减小的趋势随 E_i 的增大趋于平缓；当 E_i 大于1MeV时， ΔE 的值变化不大，在0.08-0.09MeV间波动。在 β^- 粒子能量E大于1MeV时， β^- 粒子穿过铝膜后的能量与Al膜的厚度近似成线性关系，拟合出的线性系数的值即为阻止本领S（E）的近似值。通过分析S（E）值的变化，得出在铝的阻止本领S（E）取最小值时， β^- 粒子的能量 $E_0 \approx 1.5\text{MeV}$ 。通过拟合的 β^- 粒子穿过铝膜后的能量与Al膜的厚度关系图，求出 β^- 粒子进入220 μm Al膜前的能量 E_i ，与理论计算值对照，结果表明得出的数值精确度较高，说明用此方法求 E_i 是可行的。

参考文献

- [1] 相对论验证实验，百度百科
- [2] 《原子物理学》（第二版），杨福家著，高等教育出版社，1997
- [3] 《近代物理实验补充讲义》，复旦大学物理系编
- [4] 《近代物理实验》，同济大学近代物理实验室主编，同济大学出版社
- [5] 《辐射固体物理学导论》，林理彬编著，四川科学技术出版社，2004