

相对论验证实验中实验条件的探讨

皮少华 (复旦大学 材料科学系)

摘要: 通过在真空状态和大气状态分别测量 β 粒子动能, 得出 β 粒子在空气中损失动能的经验公式, 从而使实验能在大气条件下进行。

关键词: 相对论验证 大气条件 动能损失

一、引言

相对论验证实验中, 以快速电子即 β 粒子作为实验对象, 验证其动量与动能满足线性关系以验证相对论及其推论的正确性。

在伽利略变换中, 动量与动能的关系为:

$$E_k = \frac{1}{2} \frac{p^2}{m_0} \quad (1)$$

而在洛伦兹变换中, 动量与动能的关系为:

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

式 (1), (2) 的动量~动能的函数曲线如图 (一) 所示, 本实验同时测定 β 粒子的动量和能量, 并证明两者间确有具有 (2) 式所表示的相对论关系。

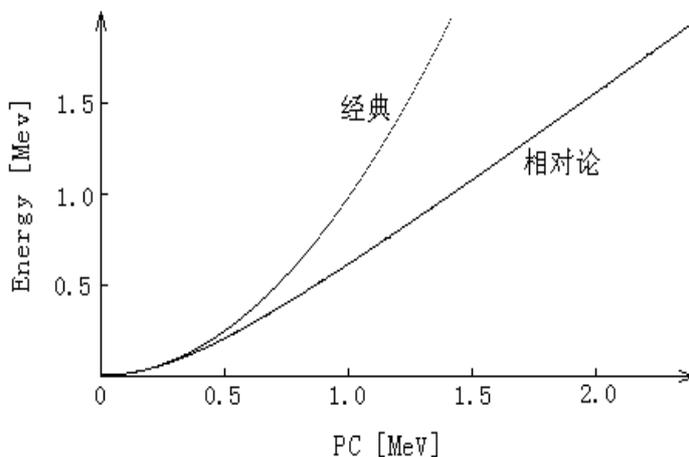
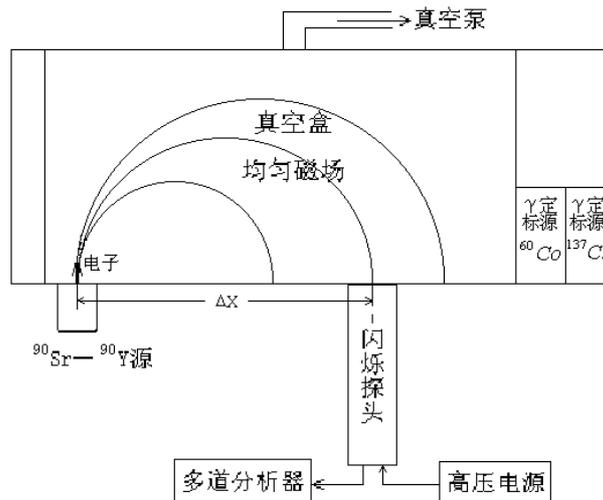


图 (一) 经典力学与狭义相对论的电子动量与动能关系

实验中, 利用图 (二) 所示装置测定 β 粒子的动量和能量。 β 源射出的高速 β 粒子经准直后垂直射入一均匀磁场中 ($V \perp B$), 粒子因受到与运动方向垂直的洛伦兹力的作用而作圆周运动。如果不考虑其在空气中的能量损失, 则粒子具有恒定的动量数值而仅仅是方向不断变化。这时粒子的动量 P 和它作圆周运动的轨道半径 R 有 $P = BeR$ 的关系。

在磁场外距 β 源 X 处放置一个 β 能量探测器来接收从该处出射的 β 粒子, 则这些粒子的能量 (即动能) 即可由探测器直接测出, 而粒子的动量值即为: $p = eBR = eB\Delta X / 2$ 。由于 β 源 ${}_{38}^{90}\text{Sr} - {}_{39}^{90}\text{Y}$ ($0 \sim 2.27\text{MeV}$) 射出的 β 粒子具有连续的能量分布 ($0 \sim 2.27\text{MeV}$), 因此探测器在不同位置 (不同 ΔX) 就可测得一系列不同的能量与对应的动量值。这样就可以用实验方法确定测量范围内动

能与动量的对应关系，进而验证相对论给出的这一关系的理论公式的正确性。



图（二）实验装置示意图

二 实验过程

^{90}Sr 的放射源的位置为 $X=10\text{cm}$ 。

1. 在大气条件下，高压为选择 640V ，放大器增益为 3.00 ，采样时间为 200s 。

(1) 探头的位置取 $X=32.6\text{cm}$, $X=30.0\text{cm}$, $X=27.6\text{cm}$, $X=25.0\text{cm}$, $X=22.4\text{cm}$, $X=19.8\text{cm}$ ，在这些位置处分别测量 β 粒子的能谱，确定谱峰对应的通道数。

(2) 分别用 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 作为标准源，测量它们的能谱，记下能量为 0.662MeV , 1.17MeV , 1.33MeV 的光电峰对应的通道数，建立通道数与能量值的对应关系。

2. 开启真空泵，待真空度下降到 0.5torr 时开始测量，选择高压为 630V ，放大器增益为 3.00 ，采样时间为 200s 。

(1) 探头的位置取 $X=32.6\text{cm}$, $X=30.0\text{cm}$, $X=27.6\text{cm}$, $X=25.0\text{cm}$, $X=22.4\text{cm}$, $X=19.8\text{cm}$ ，在这些位置处分别测量 β 粒子的能谱，确定谱峰对应的通道数。

(2) 分别用 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 作为标准源，测量它们的能谱，记下能量为 0.662MeV , 1.17MeV , 1.33MeV 的光电峰对应的通道数。建立通道数与能量值的对应关系。

三 实验结果

1. 空气状态下的探头位置与道数为：

X/厘米	32.6	30.0	27.6	25.0	22.4	19.8
CH/道数	407	350	300	233	164	100

能量定标记录为：

CH/道数	151	282	333
能量 E/MeV	0.662	1.17	1.33

根据定标记录拟合的定标曲线如图（三）

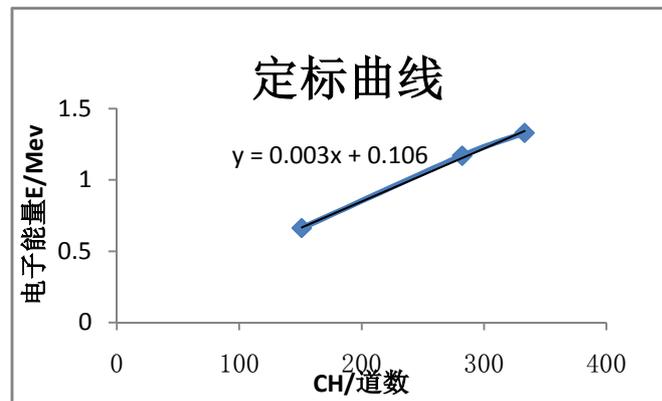


图 (三) 空气状态下的定标曲线

将能谱峰的道数代入定标曲线，得到探测器探测到的 β 粒子动能 E_f ，这个能量还要加上穿过铝膜损失的能量和封装真空室的有机塑料薄膜对电子的吸收，利用线性插值的方法分别反推求出 β 粒子在未通过铝膜的动能 E_{i1} 和在真空室里的能量 E_{i2} （具体公式见附录 I 及附录 II）。表（一）中 $P_c = \frac{c}{2} eB\Delta X$ ，是粒子的理论动量值， PCT 是根据 β 粒子在真空室的能量 E_{i2} 求出的实际 P_c 值。 DCP 是这两个 P_c 值的相对误差。

X/厘米	CH/道数	E_f /MeV	E_{i1} /MeV	E_{i2} /MeV	P_c	PCT	DCP
32.6	407	1.327	1.413	1.421	2.192	1.863	-15.01%
30	350	1.156	1.245	1.252	1.940	1.687	-13.04%
27.6	300	1.006	1.096	1.103	1.707	1.531	-10.33%
25	233	0.805	0.892	0.899	1.455	1.314	-9.68%
22.4	164	0.598	0.688	0.696	1.203	1.094	-9.08%
19.8	100	0.406	0.503	0.515	0.951	0.890	-6.44%

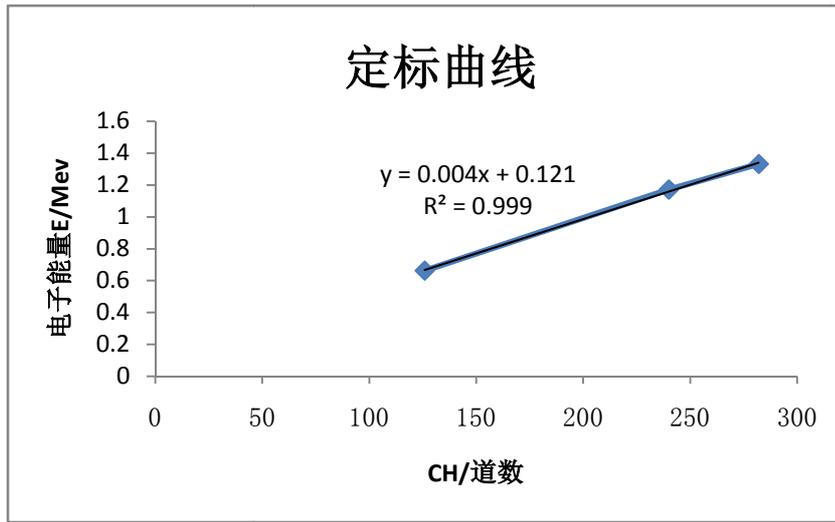
2.真空状态下的探头位置与道数为：

X/厘米	32.6	30.0	27.6	25.0	22.4	19.8
CH/道数	379	323	266	204	142	80

能量定标记录为

CH/道数	126	240	282
能量 E/MeV	0.662	1.17	1.33

根据定标记录拟合的定标曲线如图（四）

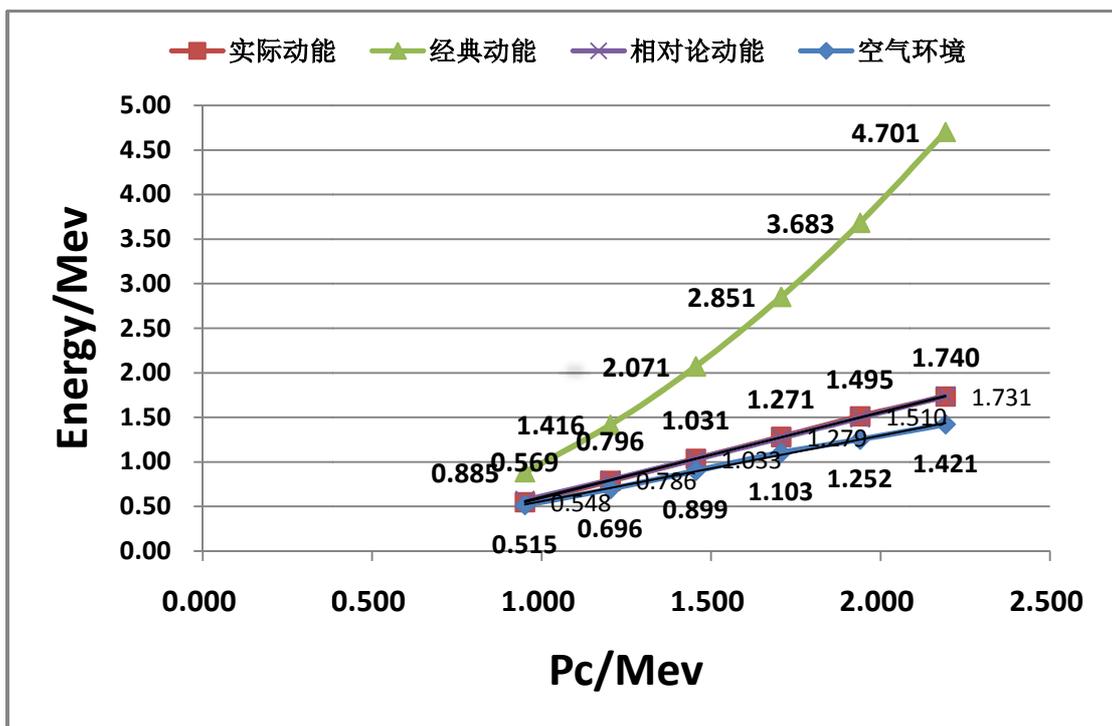


图（四）真空状态的定标曲线

与在空气状态下进行相同的操作，得到表（二）

X/厘米	CH/道数	Ef/MeV	Ei1/MeV	Ei2/MeV	Pc	PCT	DCP
32.6	379	1.637	1.726	1.731	2.192	2.183	0.40%
30.0	323	1.413	1.501	1.510	1.940	1.956	-0.80%
27.6	266	1.185	1.272	1.279	1.707	1.715	-0.49%
25.0	204	0.937	1.026	1.033	1.455	1.457	-0.12%
22.4	142	0.689	0.779	0.786	1.203	1.192	0.91%
19.8	80	0.441	0.536	0.548	0.951	0.927	2.59%

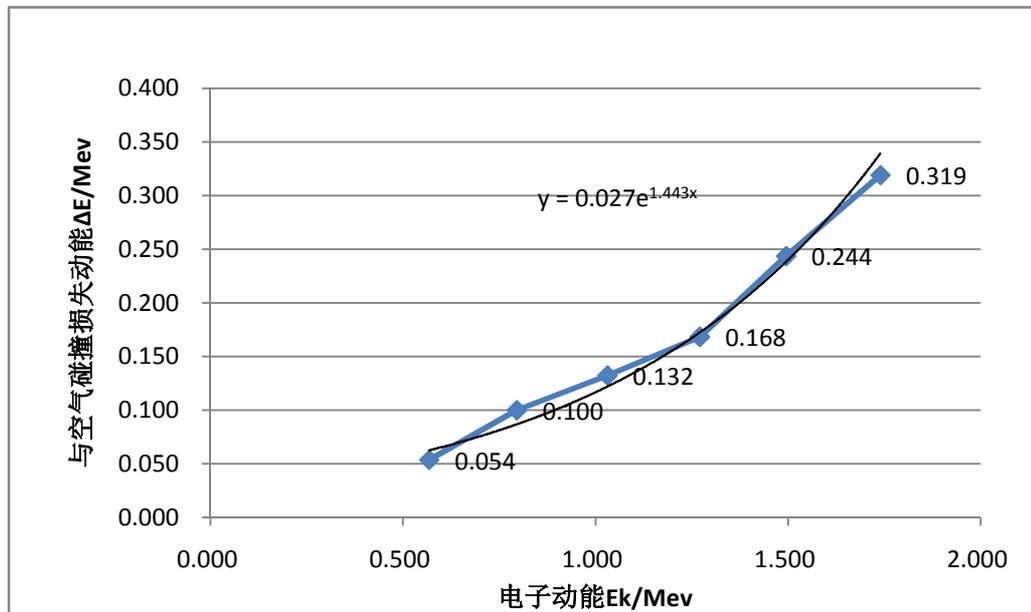
利用 pc 值得出经典动能和相对论的理论动能，观察各动能值随 pc 的变化关系，得图（五）



图（五）动能与 pc 的关系

四 实验分析

可以看出真空状态下粒子的实际动能值与相对论理论值符合的很好，而空气状态与动能理论值差的较大，这主要因为空气对 β 粒子散射和吸收导致粒子的动能值减小，也就是说，在空气状态下，还要考虑 β 粒子在空气中损失的动能。图（六）是 β 粒子在空气中损失的动能 ΔE 与 β 粒子的动能值的关系图。



图（六） β 粒子在空气中损失动能 ΔE 与粒子动能 E_k 的关系

从图中我们可以看出 β 粒子在空气中损失的动能 ΔE 与 β 粒子的动能值有着良好的指数关系，最小二乘法拟合的曲线方程为 $\Delta E = 0.027e^{1.443E_k}$ ，这个经验公式比较好的给出了 β 粒子在空气中损失的动能 ΔE 的快速计算方法。

五 实验结论

通过在真空状态和大气状态分别测量 β 粒子动能，得出 β 粒子在空气中损失动能的经验公式，六个数据点太少，使得偶然误差增大，多测量几组数据点，就可以降低偶然误差，得到的经验公式也更接近于实际值，从而可以将得到的经验公式推广，使实验能在大气条件下进行，避免了真空系统带来的许多不便。

致谢：

感谢实验过程中所有近代物理实验任课老师所给予的帮助与指导！

参考文献：

- 1.近代物理实验补充讲义.复旦大学物理教学实验中心.
- 2.杨福家. 原子物理学（第三版）. 北京：高等教育出版社，2000.
- 3.陈玲燕、秦树基、张哲、汤学峰、李雅、顾牡“工科物理”1998.5 《改进型验证相对论效应实验装置》
- 4.郭慧民、周会：北京师范大学学报(自然科学版) 2002.2. 《 β 粒子验证相对论动量—能量关系实验中的一些问题》

附录 I Al 膜中入射动能 E_1 和出射动能 E_2 之间的对应关系

$E_1(\text{MeV})$	$E_2(\text{MeV})$	$E_1(\text{MeV})$	$E_2(\text{MeV})$	$E_1(\text{MeV})$	$E_2(\text{MeV})$
0.317	0.200	0.887	0.800	1.489	1.400
0.360	0.250	0.937	0.850	1.536	1.450
0.404	0.300	0.988	0.900	1.583	1.500
0.451	0.350	1.039	0.950	1.638	1.550
0.497	0.400	1.090	1.000	1.685	1.600
0.545	0.450	1.137	1.050	1.740	1.650
0.595	0.500	1.184	1.100	1.787	1.700
0.640	0.550	1.239	1.150	1.834	1.750
0.690	0.600	1.286	1.200	1.889	1.800
0.740	0.650	1.333	1.250	1.936	1.850
0.790	0.700	1.388	1.300	1.991	1.900
0.840	0.750	1.435	1.350	2.038	1.950

附录 II β 粒子在有机塑料薄膜中的能量损失修正

$E_k(\text{MeV})$	0.382	0.581	0.777	0.973	1.173	1.367	1.567	1.752
$E_0(\text{MeV})$	0.365	0.571	0.770	0.966	1.166	1.360	1.557	1.747