

# β 粒子验证相对论动量-能量关系 实验中的一些问题

郭慧民<sup>1)</sup> 周 会<sup>2)</sup>

(1)北京师范大学低能核物理研究所、北京师范大学射线束技术与材料改性教育部重点实验室、100875,北京;

2)北京师范大学物理学系、100875,北京//第一作者 22岁、男,硕士生)

**摘要** 讨论了β粒子验证相对论动量-能量关系实验中实验曲线比理论曲线偏低的原因,并对测β粒子能谱时低能部分本底和干扰计数的来源及扣除方法做了论述.修正之后,得到了较好的实验结果.

**关键词** 动量-能量关系;β能谱;本底

**分类号** O 412.1

用β粒子验证相对论动量-能量关系是一个重要近代物理实验.实验使用多道分析仪测量β粒子的能量,用β粒子磁谱仪测量β粒子的动量,从而得到其动量-能量满足相对论的关系

$$E_k = \sqrt{p^2 c^2 + m_e^2 c^4} - m_e c^2, .$$

而不是满足经典关系

$$E_k = p^2 / 2m_e,$$

式中  $m_e$  为电子的静止质量.

验证高速粒子的运动规律应该用相对论力学描述<sup>[1-3]</sup>.在实验中存在2个主要的问题:1)用坐标纸人工工作图得到的实验曲线总比理论的曲线要低一些,不能完全符合;2)磁谱仪低能区本底和干扰计数造成的影响极为严重,使β粒子全能峰的峰位和面积测量不准确.本文分析了问题产生的原因,并给出了较准确的本底和干扰计数的扣除方法.

## 1 实验方法

实验中使用的β粒子磁谱仪自粒子入口向右共有7个出口,依次编号为1~7.β粒子在其中做半圆周运动,能量越低的β粒子将从编号越小的出口飞出.β粒子在磁谱仪中高速运动,将会通过3种形式损失部分能量:1)由磁谱仪射出时穿过1层有机塑料密封膜损失能量;2)与磁谱仪中空气摩擦损失能量;3)穿过探头上的金属密封片损失能量.实验中我们测量了前2部分的能量损失,β粒子穿过金属密封片的能量损失参考了文献[4].我们在原有1层膜的基础上又加了2层完全相同的膜,测定了β粒子通过3层后的能量损失,折合成单层膜,得到穿过1层有机塑料密封膜损失的能量.用机械泵对β磁谱仪抽气,使磁谱仪中气压降为2 Pa,测得抽气后每个出口处的β粒子全能峰,与未抽气时各出口处的全能峰比较,得到空气对粒子能量的影响.

收稿日期:2001-09-19

## 2 实验结果与讨论

**2.1 密封膜对  $\beta$  粒子能量的影响** 图 1 是塑料膜造成的能量损失  $\Delta E$  和入射粒子能量  $E$  的关系. 可见密封膜造成的能量损失和入射粒子能量的关系基本上近似为指数衰减形式. 指数拟合公式为  $\Delta E = 0.00677 + 0.01482 \lambda \cdot \exp[-(E - 0.225)/0.50281]$ . 粒子的最大能量损失可达入射能量的 10%.

**2.2 空气对  $\beta$  粒子能量的影响** 抽气后  $\beta$  粒子出射的能量比未抽气时要高, 在空气中  $\beta$  粒子损失的能量  $\Delta E$  和入射  $\beta$  粒子能量  $E$  的关系如图 2 所示. 多项式拟合公式为  $\Delta E = 0.03402 - 0.02553E + 0.07201E^2 - 0.01954E^3$ . 比较图 1 和 2 中的能量损失, 发现密封膜造成的能量损失只有在低能区(第 1, 2 出口)比较明显, 高能区的损失几乎可以忽略不计, 而空气造成的能量损失在每一出口处都是主要的, 且能量损失随  $\beta$  粒子能量的增加而增大. 能量损失全部超过入射能量的 5%, 最大可达 10%. 以上数据分析, 可以为编制与实验相关的计算软件时扣除空气状态和密封膜的存在引起的误差提供依据. 扣除以上 2 项误差和  $\beta$  粒子穿过探头上的金属密封片时损失的能量后, 各点实验值与理论值的相对误差最大为 0.7%, 最小为 0.1%. 实验曲线与理论曲线符合得较好.

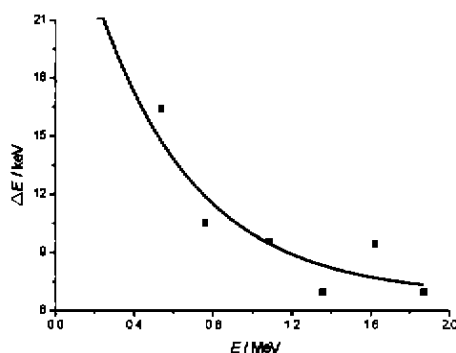


图 1  $\beta$  粒子通过 1 层有机塑料密封膜的  
能量损失  $\Delta E$  与入射能量  $E$  的关系

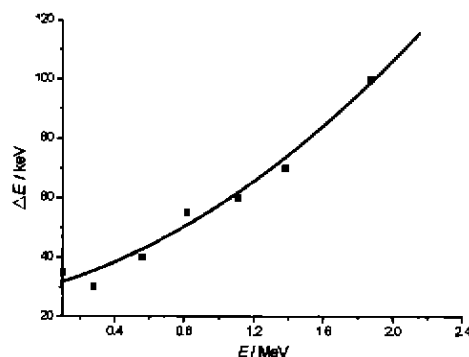


图 2  $\beta$  粒子在空气中损失的能量  $\Delta E$   
与入射能量  $E$  的关系

### 2.3 空气中能量损失原因的讨论

1)  $\beta$  粒子在空气中损失的能量主要是由于非弹性碰撞(即电离和激发)和韧致辐射 2 种, 但在空气中, 电子能量在几十 MeV 以下还是以电离为主<sup>[4]</sup>. 本实验的  $\beta$  粒子的最大能量不超过 2.8 MeV, 故绝大部分的能量损失是由于  $\beta$  粒子电离了空气中的分子. 射线与物质相互作用时, 平均电离能的数值与入射射线的种类、能量大小无关, 只与物质的性质有关. 不论何种射线, 在空气中每产生 1 个离子对平均损失的能量为 33.75 keV<sup>[5]</sup>. 以第 5 出口处的  $\beta$  粒子(能量约为 1.38 MeV)为例, 损失的能量为 70 keV, 由  $\beta$  粒子源到射出  $\beta$  磁谱仪,  $\beta$  粒子所走的轨迹长度(半圆)为  $s = \pi d/2 = 262.3$  mm, 则平均每毫米长度所产生的离子对约为 7.9 个. 这与文献 [5] 中所述的 1.5 MeV 的  $\beta$  粒子在空气中平均每毫米长度所产生的离子对约为 5 个基本一致, 所以在空气中损失能量主要为电离所致.

2) 抽气前后比较, 不仅  $\beta$  能谱峰的位置后移, 而且  $\beta$  峰形也有变化. 例如, 相同条件(相同放大倍数、计数时间为 120 s)下, 抽气前第 4 出口处( $\beta$  粒子的能量约为 1.1 MeV)峰的半高宽

为 29.56 道, 计数为 599 个; 抽气后峰的半高宽为 25.32 道, 计数为 856 个. 即峰形变高变锐了, 如图 3 所示. 分析其原因,  $\beta$  粒子在空气中运动时会受到空气中分子的多次散射, 从而使运动方向大大偏转, 只要偏转角大于  $90^\circ$ ,  $\beta$  粒子就不能被探测器记录, 所以在计数上, 抽气前比抽气后有明显的减少. 由于空气分子散射的存在, 使本来较为单一能量的  $\beta$  粒子的能量范围变大, 使半高宽变大.

**2.4 本底和干扰计数的来源及扣除方法** 在测量  $\beta$  粒子的能谱时, 要计算在磁谱仪的不同出射位置  $\beta$  粒子的全能峰的峰位和面积. 但在第 1 出口处本底和干

扰计数造成的影响极为严重, 使峰位偏移, 峰位和峰的面积难以用正常的方法测量准确, 所以必须合理地扣除本底和干扰计数. 本底和干扰计数的来源如下: 1) 当光电倍增管无光照时阳极会产生微弱的电流, 称为暗电流, 它来源于 a) 光阴极材料的热电子发射; b) 电极间绝缘材料的

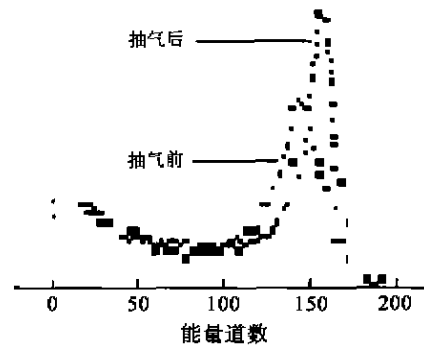


图 3 抽气前后粒子全能峰的比较

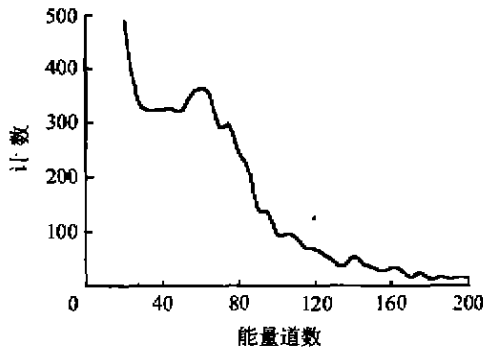


图 4 第 1 出口处的  $\beta$  粒子全能峰

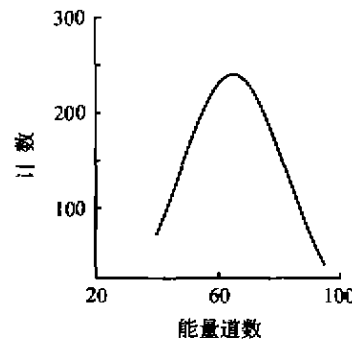


图 5 拟合得到的高斯峰

漏电; c) 场致发射, 即管内电极的尖端和棱角处由于电场很强而发射电子; d) 残余气体的电离. 当管子的电压较高和放大倍数很大时, 残余气体的电离的影响将表现得特别严重. 以上各种原因形成的计数, 称为本底脉冲. 2) 如前所述, 由于  $\beta$  粒子在低能时在空气中的射程与所须走的轨迹长度相近, 必然会在低能区形成杂乱的谱, 破坏高斯峰, 形成干扰计数. 3) 由于  $\beta$  粒子在空气中和探测器中经过原子核会发生韧致辐射, 放出 X 射线, 使低能区出现大量的干扰计数.

本底和干扰计数的扣除采用实验近似和理论拟合 2 种方法: a) 实验测量, 通过反复分析比较, 把第 1 出口处全能峰范围能谱与第 5 出口处全能峰范围能谱相减, 得到全能峰的形状近似为高斯分布, 所以可以认为第 1 出口处与第 5 出口处的本底和干扰计数分布近似相等. 这种方法比较粗糙, 但结果比修正前准确得多, 而且简单易行. b) 理论拟合, 第 1 出口处能谱(图 4)可以看作 2 个曲线的叠加(图 5、图 6), 其中

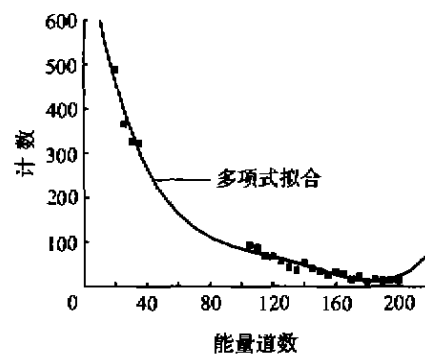


图 6 拟合得到的本底曲线

图5应为高斯分布. 因此, 对数据作适当的处理, 先选择谱中的扣除高斯峰所在位置的一部分数据, 拟合成多项式曲线, 然后用原实验曲线与拟合的曲线相减, 得到的曲线近似为高斯分布, 可以将本底和干扰计数与峰分开.

得到的本底和干扰计数分布的拟合为

$$N = 778.36486 - 20.20669X + 0.2285X^2 - 0.00118X^3 + (2.25458 \times 10^{-6})X^4,$$

其中  $X$  代表能量道数,  $N$  代表粒子计数. 通过理论拟合方法修正后, 测量得到的  $\beta$  粒子的能谱与文献[6]中的曲线一致, 说明这种方法可以合理地扣除本底和干扰计数, 较准确地测得全能峰.

本文得到了北京师范大学物理学系汪华英教授和王海燕老师的悉心指导, 深表感谢.

### 3 参考文献

- [1] 陈玲燕, 蔡卫国, 谢筱羽, 等. 相对论效应实验及装置[J]. 物理实验, 1987, 7(4): 13
- [2] 陈玲燕, 顾牧, 秦树基, 等. 相对论效应实验谱仪的系列教学实验[J]. 物理实验, 2000, 20(3): 3
- [3] Pages L, Bertek E, Joffre H, et al. Energy loss range and bremsstrahlung yield for 10 keV to 100 MeV electrons in various elements and chemical compounds [J]. Atomic Data, 1972, 4: 1
- [4] 蒋明. 原子核物理导论[M]. 北京: 原子能出版社, 1984: 167-185
- [5] 吴思诚. 近代物理实验[M]. 北京: 北京大学出版社, 1995
- [6] 林木欣. 近代物理实验教程 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 231-233

## A STUDY ON PROBLEMS IN THE EXPERIMENT TO VERIFY RELATIVISTIC RELATIONSHIP OF MOMENTUM-ENERGY WITH $\beta$ PARTICLES

Guo Huimin<sup>1)</sup> Zhou Hui<sup>2)</sup>

(1) Institute of Low Energy Nuclear Physics, Key Laboratory of Beam Technology and Materials Modification of Ministry of Education; 2) Department of Physics, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

**Abstract** Why the experimental curve is lower than the theoretical curve in the experiment to verify the relativistic relationship of momentum-energy with  $\beta$  particles is discussed. The main causes and the method to subtract the background from the  $\beta$  energy spectrum are also presented, and satisfied results are obtained with the method.

**Key words** relationship of momentum-energy;  $\beta$  energy spectrum; background