

β^- 粒子在穿越铜狭缝中的横向台阶分布

朱永强¹, 郝建宇²

(1. 复旦大学物理系, 上海 200433; 2. 天阳工业有限公司, 山西大同 037006)

[摘要] 文章研究了电子高速运动时所产生的横向振动。实验方法是利用半圆聚焦 β^- 谱仪上 ^{90}Sr 源 β^- 粒子在不同磁场下对于相同弯曲半径下 β^- 粒子具有不同的能量和动量的特性, 研究这些 β^- 粒子在通过不同宽度的铜狭缝(厚 8 mm)时的粒子数 n 和铜狭缝宽度 δ 的函数关系, 发现不管 β^- 粒子具有什么能量和动量, 都具有横向运动的趋势和在铜狭缝中出现了台阶分布。其原因可能是 β^- 粒子本身具有横向振幅 A 和周围真空起伏能量的相互作用。

[关键词] β^- 粒子的横向振动; 铜狭缝宽度; 横向台阶分布

[中图分类号] O412 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)08-0081-06

1 半圆聚焦 β^- 谱仪实验原理和仪器^[1]

1.1 实验原理

一电荷为 e 、速度为 v 的电子在磁感应强度为 B 的磁场中运动时, 其运动方程为

$$d(m\vec{v})/dt = -e\vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

式中, 电子高速运动的质量 $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$, m_0 为电子的静止质量。当电子在垂直于均匀磁场的平面中运动时, 式(1)变为

$$mV^2/R = eVB \text{ 或 } P = mV = eBR \quad (2)$$

式中, P 为电子动量, R 为电子运动轨道的曲率半径。基于式(2)中 P 和 BR 间的简单比例关系, 在磁谱仪中常以 BR 值(以 $\text{Gs} \cdot \text{cm}$ 为单位)来表示电子的动量。可以看出, 若 B 保持不变, 则不同 R 值对应于电子的不同动量; 或者 R 保持不变, 则不同的磁感应强度 B 将对应于不同的电子动量。可见, β^- 磁谱仪是一个进行动量分析的仪器。

1.2 实验仪器

实验装置系统见图 1。

在实验中使用的 $^{90}_{38}\text{Sr}\beta^-$ 源能提供的能量为 0 ~ 2.274 MeV 的 β^- 粒子。实验使用 200 μm 厚的铝窗筒 NaI(Tl) 闪烁体探头配合微机多道组成 γ 能

谱仪来测定 β^- 粒子的能量。本实验装置采用不同铁镍体永磁材料构成空间为 390 mm \times 180 mm \times 30 mm 的近似均匀磁场, 其强度分别为 265 Gs, 633 Gs, 800 Gs。本实验配有一套低真空系统, 由一个可插入磁场的活动真空盒及一台机械泵组成, β^- 粒子入射和出射的条孔用涤纶薄膜密封。薄膜对 β^- 穿透能量损失可忽略, 而对 200 μm 厚铝窗的修正可由能量修正曲线确定, 在高能量 2 MeV 的修正一般为 3%, 在低能量 0.54 MeV 的修正一般为 11%。

1.3 在闪烁体前加一个可调节宽度的铜狭缝 (宽为 8 mm)

为了使 β^- 粒子压缩在铜狭缝中运动尽可能多的时间, 铜狭缝应该有较宽的宽度, 而铜狭缝的宽度通过两个螺旋测微器同时调节, 一个螺旋测微器转一周, 宽度改变 0.5 mm。在本实验中铜狭缝最小宽度为 0.02 mm, 最大宽度超过 4 mm。

2 实验方法

2.1 β^- 粒子在 265 Gs 下当弯曲半径为 9.75 cm 时穿入铜狭缝的横向分布

实验过程如图 3 所示, 铜狭缝离 $^{90}_{38}\text{Sr}\beta^-$ 粒子源 19.5 cm, 在磁场下 $^{90}_{38}\text{Sr}\beta^-$ 源能粒子完成半个圆圈

[收稿日期] 2006-10-9

[作者简介] 朱永强(1947-), 男, 江苏无锡市人, 复旦大学物理系副教授

进入到可调节的铜狭缝内,当闪烁体后光电信增管高压稳定在 714 V 时,闪烁体收到的 β^- 粒子的能量道数为 308 道,此时用铯¹³⁷Cs 的 γ 光子定标(0.662 MeV - 702 道,0.184 MeV - 205 道)可计算得 308 道的 β^- 粒子能量为 0.287 MeV,动量和光速的乘积

$PC = eBRC = 0.0265 \times 0.0975 \times 300 = 0.775 \text{ MeV}$, 由于此时 β^- 粒子的峰位和本底峰位太近会影响实验,不得不提高光电信增管的高压为 724 V,此时 0.287 MeV 能量的 β^- 粒子提高到 318 道。

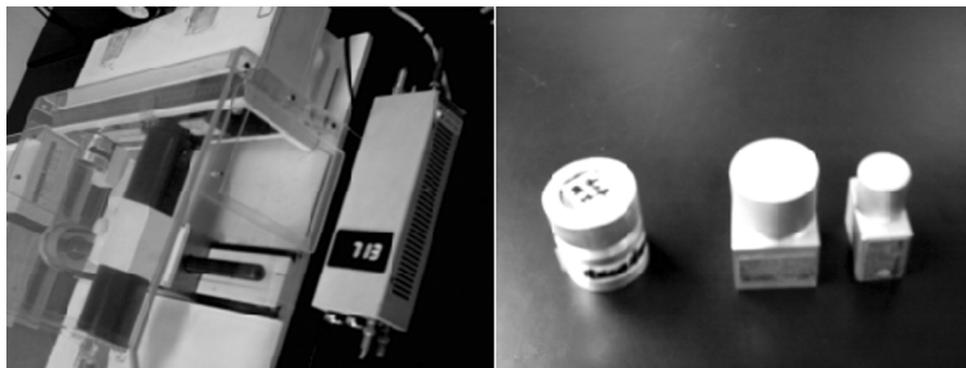


图 1 实验装置和 β^- 源、 γ 定标源

Fig. 1 The experiment installation, β^- source and γ source for a demarcation

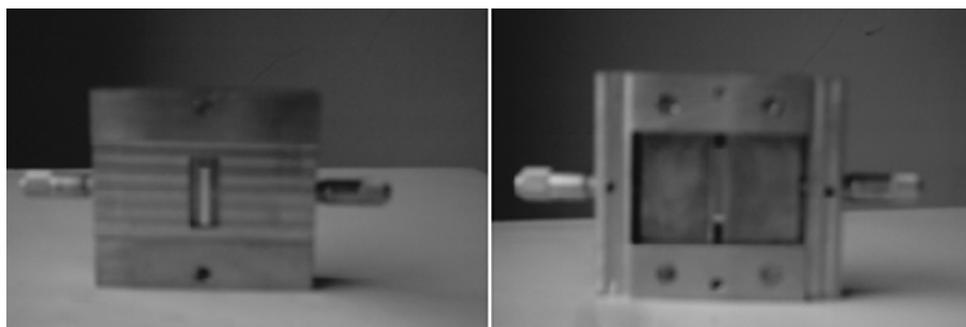


图 2 可调节宽度的铜狭缝的正反面

Fig. 2 The positive and negative of the copper narrow slot which can adjust the wide

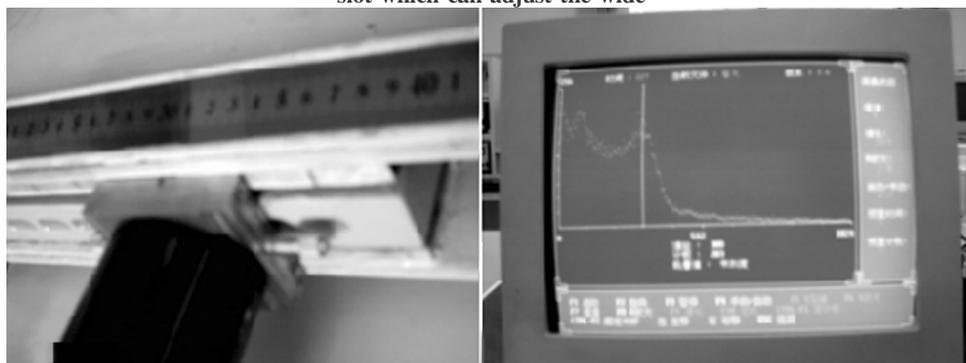


图 3 在 265 Gs 下进入铜狭缝的 β^- 粒子能量为 0.287 MeV

Fig. 3 On 265 Gs the β^- particles's energy is 0.287 MeV which fly into the copper narrow slot

为了克服涨落引起的误差实验,采用 200 s 内计算 316 道、317 道、318 道、319 道和 320 道等 5 道

内 β^- 粒子的平均值 \bar{n} 和狭缝宽度 δ 的函数,关系如表 1 所示。

表 1 在 265 Gs 下 0.287 MeV 能量的 β^- 粒子在铜狭缝内的横向分析

Table 1 On 265 Gs the horizontal distribution of the β^- particles which fly into the copper narrow slot when they have 0.287 MeV's energy

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| δ | 2.2 | 2.0 | 1.8 | 1.6 | 1.4 | 1.2 | 1.0 | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.6 | 0.5 |
| \bar{n} | 80.2 | 77.8 | 62.4 | 60.6 | 47.8 | 44.6 | 35 | 34.4 | 29.8 | 26.6 | 30.8 | 27.6 |
| δ | 0.45 | 0.4 | 0.35 | 0.30 | 0.25 | 0.20 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.02 |
| \bar{n} | 28.4 | 20.2 | 20.0 | 17.8 | 19.6 | 21.0 | 20 | 20 | 15.8 | 16.2 | 18.4 | 17.4 |

从表 1 中可看出,随着狭缝宽度 δ 的变化, \bar{n} 的变化出现了不少台阶:2.2 - 2.0(80.2 - 77.8);1.8 - 1.6(62.4 - 60.6);1.4 - 1.2(47.8 - 44.6);1.0 - 0.9(35 - 34.4);0.8 - 0.7 - 0.6 - 0.5 - 0.45(29.8 - 26.6 - 30.8 - 27.6 - 28.4);0.4 - 0.35 - 0.30 - 0.25 - 0.20 - 0.15 - 0.10(20.2 - 20.0 - 17.8 - 19.6 - 21.0 - 20 - 20);0.05 - 0.04 - 0.03 - 0.02(15.8 - 16.2 - 18.4 - 17.4)。根据这个台阶分布可以认为,当铜狭缝为 2.2 mm 时,0.287 MeV 能量的 β^- 粒子在 200 s 内一共通过了 80 个,这 80 个粒子在空间的横向分布如图 4 所示。

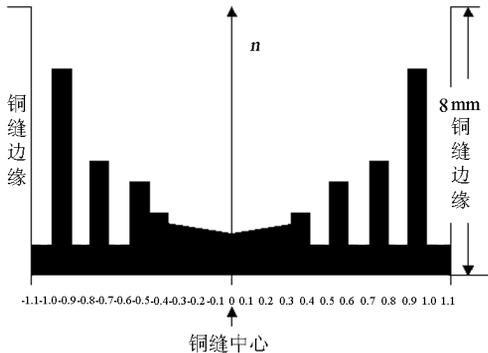


图 4 在低能量 β^- 粒子穿过铜狭缝时的横向分析

Fig. 4 The horizontal distribution of the β^- particles which fly into the copper narrow slot when they have less energy

2.2 β^- 粒子在 633 Gs 下当弯曲半径为 9.75 cm 时穿入铜狭缝的横向分析

实验过程如图 5 所示。铜狭缝离铯⁹⁰Sr β^- 粒子源为 19.5 cm,在磁场 633 Gs 下 β^- 粒子完成半个圆圈进入到可调节的铜狭缝内,当闪烁体后光电信增管高压稳定在 621 V,闪烁体收到的 β^- 粒子的能量道数为 390 道,此时用钴⁶⁰Co 的 γ 光子定标(1.22 MeV - 369 道,1.17 MeV - 317 道)和铯¹³⁷Cs

的 γ 光子定标(0.62 MeV - 177 道,0.184 MeV - 39 道)可计算得 β^- 粒的能量为 1.406 MeV(动能和光速的乘法为 $PC = eBRC = 0.0633 \times 0.0975 \times 300 = 1.851$ MeV)。

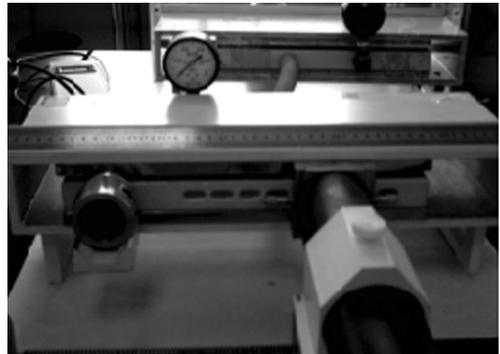


图 5 在 633 Gs 下进入铜狭缝的 β^- 粒子能量为 1.406MeV

Fig. 5 On 633 Gs the β^- particles's energy is 1.406 MeV which fly into the copper narrow slot

为了克服涨落引起的误差,实验采用 200 s 内计算 388 道、389 道、390 道、391 道、392 道等 5 道内 β^- 粒子数平均值 \bar{n} 和铜缝宽度 δ 的正数,关系如表 2 所示。

表2 在 633 Gs 下 1.406 MeV 能量 β^- 粒子在铜狭缝内的横向分析

Table2 On 633 Gs the horizontal distribution of the β^- particles which fly into the copper narrow slot when they have 1.406 MeV's energy

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| δ | 2.4 | 2.2 | 2.0 | 1.8 | 1.6 | 1.4 | 1.2 | 1.0 | 0.90 | 0.80 | 0.70 | 0.60 | 0.50 |
| \bar{n} | 1064 | 898.4 | 818.2 | 702.4 | 594.4 | 456.6 | 383.6 | 326.8 | 312.8 | 276.6 | 205.6 | 186.4 | 142 |
| δ | 0.45 | 0.40 | 0.35 | 0.30 | 0.25 | 0.20 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | |
| \bar{n} | 115.6 | 74.4 | 66.2 | 68.0 | 45.2 | 29.0 | 22.0 | 19.2 | 13.4 | 11.0 | 12.0 | 7.0 | |

从表2可以看出,当 β^- 粒子数比较多时,与表1一样有2种趋势。一种趋势是,在靠近铜狭缝边缘部分总是集中了比较多的 β^- 粒子;另一种趋势是,当粒子数多时这种台阶效应变得比较密集了,这从它们的前项减后项的差数来看就很明显:165.6,80.2,115.8,108,137.8,73,56.8,14,36.2,71,22.2,41.4,26.4,41.2,8.2,-1.8,22.8,16.2,6.8,3,5.8,2.4,-1,5,从这里可粗略地看出,有9个台阶分布总是一高一低地交替。

2.3 β^- 粒子在 800 Gs 下当弯曲半径为 9.75 cm 时穿入铜狭缝的横向分布

实验过程如图6所示。铜狭缝离钷 $^{90}_{38}\text{Sr}\beta^-$ 粒

子源为 19.5 cm,在强度为 800 Gs 的磁场下, β^- 粒子完成半个圆周进入到可调节的铜狭缝内,当闪烁体后光电信增管高压稳定在 617 V 时,闪烁体收到 β^- 粒子的能量道数为 691 道,此时钴 ^{60}Co 的 γ 光子定标(1.33 MeV - 460 道,1.17 MeV - 401 道)和铯 ^{137}Cs 的 γ 定标(0.662 MeV - 224 道,0.184 MeV - 61 道)可算得 β^- 粒子的能量为 1.998 MeV(动量和光速的乘法 $PC = eBRC = 0.00800 \times 0.0975 \times 300 = 2.340 \text{ MeV}$)。



图6 在 800 Gs 下进入铜狭缝的 β^- 粒子能量为 1.998 MeV

Fig. 6 On 800 Gs the β^- particles's energy is 1.998 MeV which fly into the copper narrow slot

为了克服涨落引起的误差,实验采用 200 s 内计算 688 道、689 道、699 道、691 道、692 道等 5 道内

β^- 粒子平均值 \bar{n} 和狭缝宽度 δ 的函数,关系如表3所示。

表3 在 800 Gs 下 1.998 MeV 能量的 β^- 粒子在铜狭缝内横向分析

Table3 On 800 Gs the horizontal distribution of the β^- particles when they have 1.998 MeV's energy

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| δ | 2.2 | 2.0 | 1.8 | 1.6 | 1.4 | 1.2 | 1.0 | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.6 | 0.5 |
| \bar{n} | 39 | 30.6 | 25.2 | 26.2 | 17.0 | 16.0 | 12.4 | 10.4 | 11.0 | 5.8 | 4.6 | 2.2 |
| δ | 0.45 | 0.4 | 0.35 | 0.30 | 0.25 | 0.20 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.02 |
| \bar{n} | 3.4 | 3.4 | 1.2 | 2 | 1.0 | 0.6 | 0.4 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 |

从表3可以看出,当 β^- 粒子能量比较大(1.998 MeV)的情况下,相应 β^- 粒子的横向运动趋势就更强烈,所以在靠近铜狭缝的表面就会依附较多的 β^- 粒子,同时在狭缝内部也会出现台阶效应。此外当 β^- 粒子能量较大时,由于它的横向运动趋势还会直接进入铜狭缝内部,使得当狭缝宽度小于

0.10 mm 时几乎没有一个 β^- 粒子能穿过铜狭缝。从表3可以看出,当 δ 为 2.2 ~ 0.15 mm, δ 缩小了 14.66 倍, β^- 粒子数则缩小了 $39/0.4 = 97.5$ 倍;从表2可以看出,当 δ 为 2.2 ~ 0.15 mm 时, β^- 粒子数缩小了 $898.4/22.0 = 40.8$ 倍;从表1可以看出,当 δ

为 2.2 ~ 0.15 mm 时, β^- 粒子数缩小了 $80.2 / (20 - 17.0) = 30.8$ 倍, 其中 17.0 为本底计数。由此可见, β^- 粒子能量越大, 它的横向运动趋势越大, 就越不容易穿过铜狭缝。

根据表 3 可以画出当 $\delta = 2.2$ mm 时, 39 个 β^- 粒子在铜狭缝内的分布状况如图 7 所示。

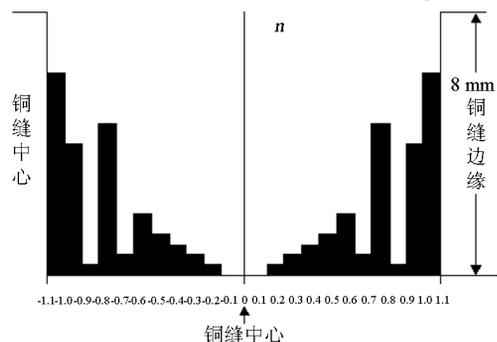


图 7 在高能量 β^- 粒子穿过铜狭缝时的横向分析
Fig. 7 The horizontal distribution of the particles which fly into the copper narrow slot when they have high energy

3 实验结果

3.1 β^- 粒子横向测不准关系决定其横向分布状态

通常认为, 一个 β^- 粒子共有 eBR 的动量 mv , 在任何时刻都是沿着它的 V 方向, 而沿着它的横向运动方向则没有动量存在, 根据德布罗意波长公式 $\lambda = h/p$ 可知, λ 也是沿着它 V 方向的平面波的波长, 对于一个 β^- 粒子的德布罗意波平面波在空间的 $|\Psi|^2$ 的分布是不确定的。在本实验中, β^- 粒子的能量从 0.287 MeV 到 1.998 MeV, 即动量 PC 从 0.775 MeV 到 2.340 MeV, 它们所对应的德布罗意波长 λ 经计算仅仅为 λ_1 到 λ_2 , 即

$$\lambda_1 = \frac{hC}{p_1 C} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{12.42 \times 10^{-7} \times 10^{-9}} = 1.6 \times 10^{-10} \text{ cm}$$

$$\lambda_2 = \frac{hC}{p_2 C} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{37.50 \times 10^{-7} \times 10^{-9}} = 0.530 \times 10^{-10} \text{ cm}$$

由于 λ_1 和 λ_2 大大小于铜狭缝的宽度, 所以可认为 β^- 粒子在铜狭缝内台阶分布和它的德布罗意波长没有关系。

笔者认为, β^- 粒子在铜狭缝内的台阶分布是由于 β^- 粒子在运动过程中横向动量不为零, 根据测不准关系

$$\Delta P_x \cdot \Delta x = h \quad (3)$$

式中, 设 Δx 方向就是铜狭缝的宽度方向。

根据玻尔兹曼统计学, ΔP_x 大的几率总是比

ΔP_x 小的几率小, 所以当 ΔP_x 小的时候 Δx 可获得最大值的几率也大, 因此在图 4 和图 7 中靠近铜狭缝台阶内的 β^- 粒子数比较多。图 4 和图 7 中的台阶分布也表示了当一个或几个 β^- 粒子在通过铜狭缝时在空间出现的几率, 这就是说 β^- 粒子不是直接穿过铜狭缝, 而是通过不规则的折线运动。

3.2 β^- 粒子横向测不准关系产生于 β^- 粒子的横向振幅 A ^[2]

一般理论认为, 当一个 β^- 粒子沿着某一折线运动时, 其可能性仅仅是因为 β^- 粒子与气体的原子核发生了康普顿散射, 但是在发生康普顿散射的过程中 β^- 粒子的能量必定会降低, 这时固定在某通道道址的接收口就肯定收不到这个 β^- 粒子, 因此不得不排除这一种可能性。要使 β^- 粒子一方面作测不准的折线运动时又保持它的能量和动量始终不变, 那么它的唯一可能性就是真空的量子效应或测不准关系。在气泡室里能看到 1 mm 粗的带电粒子(直径一般为 10^{-13} cm)可能也和它的折线运动有关。

如果一个 β^- 粒子始终在沿 V 方向直线运动的过程中, 那么它的横向就很难受到真空微观起伏能量的影响, 因此笔者认为 β^- 粒子的运动过程中必定是带有横向振幅 A , 在文章《对狭义相对论质速关系式的否定》^[2] 中提出了把德布罗意物质波概念与牛顿力学中的动量、动能公式相结合, 导出了新的表达式: $P = m_0 v \sqrt{\lambda^2 + 16A^2}$, $K = \frac{1}{2} m_0 \lambda^2 v^2 + 8m_0 A^2 v^2$ 和新的德布罗意关系式 $h = m_0 \lambda v \sqrt{\lambda^2 + 16A^2}$, 在这里德布罗意波 $\lambda = h/p$ 也同时成立, 但是引入 β^- 粒子在直线运动过程中还会带有横向振幅 A , 计算^[2] 结果见表 4。

表 4 电子的能量和横向振幅 A 的关系

Table 4 The relationship between electron's energy and horizontal amplitude A

| 序号 | 电子通过的电势差/V | 电子获得的速度/($m \cdot s^{-1}$) | 电子获得的振幅/m |
|----|-----------------|------------------------------|------------------------|
| 1 | 1×10^4 | 5.845×10^7 | 5.26×10^{-13} |
| 2 | 6×10^4 | 1.337×10^8 | 5.29×10^{-13} |
| 3 | 1×10^5 | 1.643×10^8 | 5.33×10^{-13} |
| 4 | 6×10^5 | 2.663×10^8 | 5.56×10^{-13} |
| 5 | 1×10^6 | 2.822×10^8 | 5.67×10^{-13} |
| 6 | 8×10^6 | 2.994×10^8 | 1.97×10^{-12} |

通过上表可以得知, 0.287 MeV 到 1.998 MeV 电能量的 β^- 粒子的 A 值约为 $5.33 \times 10^{-13} \sim 1.97 \times$

10^{-12} m, β^- 粒子的能量越大, 横向振幅就越大, 它的横向测不准关系变化就越剧烈, 这从图 4 和图 7 的比较中可以明显看出。 β^- 粒子在图 7 中更靠近铜的狭缝边缘, 这是因为它的横向运动趋势在能量大的时候也就来得越大, 而且当狭缝是足够狭时 (≤ 0.10 mm), β^- 粒子通过横向测不准运动会进入到铜狭缝内部, 使得在这些道址收不到 β^- 粒子。

4 结语

实验表明, β^- 粒子在穿越铜狭缝中有横向台阶的几率分布, 这种横向台阶几率分布的形成是由于 β^- 粒子在运动过程中还带有横向振幅 A , 由于横向振幅 A 的存在造成了横向动量的测不准关系 $\Delta P_x \cdot \Delta x = h$ 和折线运动。 β^- 粒子的能量越大, 横

向振幅 A 就越大, 它的横向扩散作用就越强, 它就越不容易穿过铜狭缝。

致谢 感谢复旦大学物理系基础物理实验中心提供了实验设备, 感谢实验室主任马世红教授的支持, 感谢唐志明副教授为笔者加工了铜狭缝, 感谢上海市田林街道老教授季灏、沈福民、胡昌伟共同参加实验。

参考文献

- [1] 沈元华, 陆中龙. 基础物理实验 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005
- [2] 郝建宇, 宋正海, 杨金城. 时空理论新探, 对狭义相对论质速关系式的否定 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005

The horizontal distribution of a flight of steps when the β^- particles fly across the copper narrow slot

Zhu Yongqiang¹, Hao Jianyu²

(1. Physics Department of Fudan University, Shanghai 200433, China;

2. Tianyang Industry Company, Datong, Shanxi 037006, China)

[**Abstract**] This paper researches the electrons horizontal vibration when the electrons have high velocity. Its experimental method is using the characteristics that β^- particles of ^{90}Sr source in different magnetic fields by half circle - focus β^- spectrum and in the same radius have different energy and momentum to study the functional relationship between the particle number (n) and the width of the copper narrow slot (δ) when the particles fly across the copper narrow slots with different widths (thickness is 8 mm) and find that the β^- particles have the horizontal movement tendency no matter what energy and momentum the β^- particles have, and when they fly across the copper narrow step there is the distribution of a flight of steps. The reason may be that β^- particles have the horizontal amplitude A and the interaction of energy fluctuation in vacuum.

[**Key words**] the horizontal vibration of β^- particles; the width of copper narrow slot; horizontal distribution of a flight of steps