

关于电子 Lorentz 力和能量测量的实验

季 灏

(上海东方电磁波研究所, 202150 上海)

[摘要] 对验证相对论中动量和动能关系的经典实验重新做了实验研究, 发现改变磁场强度后该实验的结果并不符合相对论预言的动量和动能关系。根据实验结果, 指出了狭义相对论的运动方程中, 物体运动时受力(理论值)不变假定是错误的, 并提出物体的受力(理论值)应随着运动速度的增加而减小。通过实验, 还发现原来实验中对能量的定标偏高。

[关键词] 狭义相对论; Lorentz; 磁场; 速度极限

[中图分类号] O412 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)10-0060-06

1 引言

根据 Newton 的经典理论, 两惯性系之间的变换是 Galilei 变换, 物质的质量是不变的, 时间与空间无关^[1]。并且根据 Newton 第二定律 $F = ma$, 物体所受作用力 F 不受物体的运动速度的影响。随着人们对于电磁现象研究的深入和 Maxwell 方程组^[2]的建立, 人们发现描述电磁现象的 Maxwell 方程组无法满足 Galilei 变换, 但是 Maxwell 方程组已经为大量的实验检验而被证明是无误的。为了摆脱困境人们将目光转向于改变 Newton 原有的理论体系。Einstein 正是在这样的情况下在 1905 年提出了狭义相对论的。根据狭义相对论, 两惯性系之间的变换关系为 Lorentz 变换; 物体的运动不再独立于时间与空间。在本文中, 笔者的实验发现狭义相对论运动方程中运动物体受力(理论值)不变假定是错误的。笔者选取了被广泛采用的经典实验——关于验证相对论中的动能和动量关系的实验^[3]而做研究。用 5 个不同磁场强度对 β^- 粒子能量进行测量, 发现该实验的结果并不是通常人们所认为的那样满足相对论的动能和动量关系, 因而认为相对论关于带电粒子在磁场中受力(理论值)不变的假设是错

误的; 笔者的实验表明, 带电粒子在磁场中的受力(理论值)是随着粒子速度的增加而逐渐变小的, 同时还发现, 相对论对能量定标偏高。实验研究的结果很好地验证了笔者关于电子在磁场中运动时有效作用力因子的假设。

2 半圆聚焦 β^- 谱仪实验原理和方法

2.1 实验原理

在过去的教材中^[4], 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

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

其中电子的相对论质量 $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$, 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

$$m \frac{v^2}{R} = evB$$

故得

$$p = mv = eBR \quad (2)$$

其中 p 为电子动量, R 为电子运动轨道的曲率半

径, B 为磁感应强度。基于式 (2) 中 p 和 BR 间的简单正比关系, 在磁谱仪中常以 BR 值 (以 $T \cdot cm$ 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。

由电子的 BR 值可求出电子的动能 E_k , 在经典力学中动量值与动能的关系为

$$E_k = \frac{p^2}{2m} \quad (3)$$

但是, 相对论关系式为:

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 = \sqrt{p^2c^2 + m_0^2c^4} - m_0c^2 \quad (4)$$

式 (3), 式 (4) 的动量—动能的函数曲线如图 1 所示, 我们的实验同时测定 β^- 粒子的动量和动能, 并发现两者间并不具有式 (4) 所表示的关系。

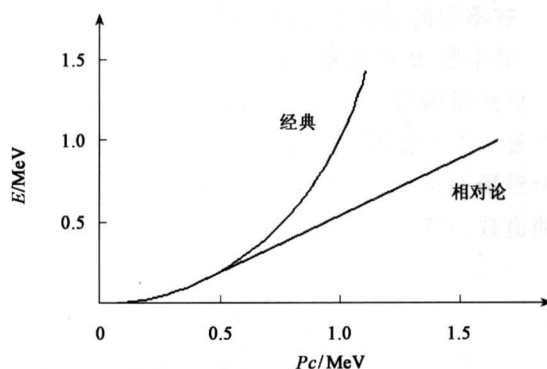


图 1 经典力学与狭义相对论的电子动量—动能关系

Fig.1 Momentum—energy relation of the classical mechanics and the special relativity

2.2 实验仪器

实验装置系统见图 2。

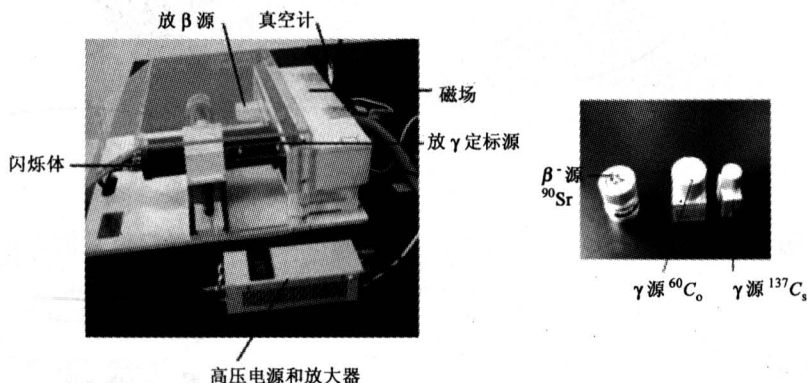


图 2 实验装置

Fig.2 Experiment setup, β source and γ source for calibration

在实验中使用的 ^{90}Sr 的 β^- 源能提供能量为 $0 \sim 2.274 \text{ MeV}$ 的 β^- 粒子。实验使用 $200 \mu\text{m}$ 厚铝窗 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 闪烁体探头配合微机多道系统组成 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尺寸为 $390 \text{ mm} \times 180 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的磁体。近似均匀磁场分别相当于 0.0265 T , 0.041 T , 0.0633 T , 0.08 T , 0.121 T 。实验配有一套低真空系统, 由 1 个可插入磁场的活动真空盒及 1 台机械真空泵组成, β^- 源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 $200 \mu\text{m}$ 厚铝窗的修正可由能量修正曲线确定, 在高能量 2 MeV 时修正一般为 3% , 在低能量 0.5 MeV 的修正一般为 11% 。当磁场在 0.121 T 时, 要考虑到磁场对闪烁体晶体的影响和 β^- 粒子在弯曲

半径小时的同步辐射的损失。

3 实验方法

3.1 测量标准 γ 源 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 的标准能谱

如图 3, 标准能谱的测量和磁场无关, 但和当时闪烁体高压的放大比例有关 (图 3)。

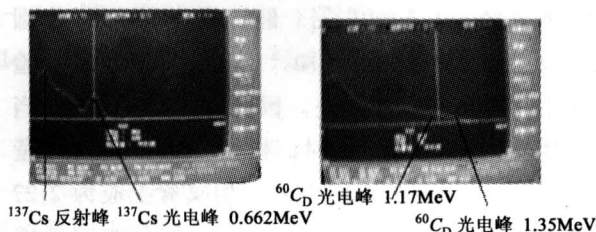


图 3 多道分析器的定标

Fig.3 The calibration of multichannel analyzer

3.2 在不同的磁场下分别测量 ^{90}Sr 的 β^- 粒子弯曲的半径 R 和能量道数

更换磁场架(包括固定铁镍体的铁架),在每一个磁场下的多道分析器的定标都必须重复。在每一个磁场下对于每一个 β^- 粒子出射口都要测 β^- 粒子的道数,然后根据定标曲线计算它的能量,而它

的动量由 R 直接计算,即 $p = eBR, B(T), R(M), p(\text{eV})$ 。而从多道分析器已知 β^- 粒子的能量 E_k 后,根据相对论理论,用式(4)可计算理论值 pc 。但是在0.121 T磁场条件下必须将闪烁体离开出射口40 mm,使磁场不对闪烁体NaI晶体发生影响,这种影响从图4可以清楚地反映出来。

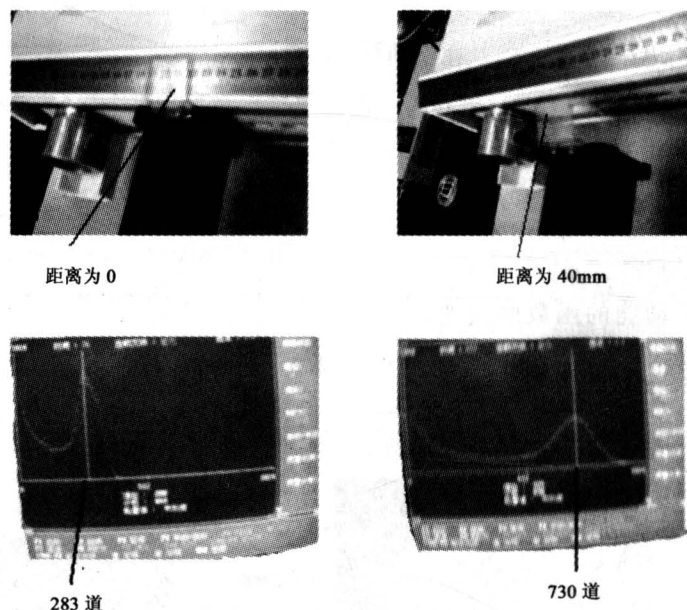


图4 在0.121 T条件下测量 β^- 粒子闪烁体离开出射口位置的比较

Fig.4 The comparison of the ejecting place of the β^- particle flash under 0.121 T

在0.121 T磁场下,为了考虑 β^- 粒子的同步辐射损失,同步辐射功率公式为

$$P = \frac{e^2 c \gamma^4}{6\pi \epsilon_0 R^2} \quad (5)$$

式中 γ 是粒子能量为 $m_0 c^2$ 的倍数($E = \gamma m_0 c^2$), R 为弯曲半径,计算表明,2 GeV的电子在当弯曲半径为5.56 m时它的辐射功率为0.26 MeV。如果电子能量从2 GeV降低到2 MeV,则每个电子辐射功率为 $10^{-12} \times 0.26$ MeV。如果电子弯曲半径从5.56 m降低到0.05 m,则每一个电子辐射功率要增加 1.2×10^4 倍。经计算 β^- 粒子转半圆同步辐射能量为 0.312×10^{-8} MeV,所以在本实验中应不计同步辐射的损失。因此在0.121 T下,当闪烁体离出射口40 mm时,根据多道分析器测量最大 β^- 电子能量为1.94 MeV,但实验上应为2.27 MeV(因为没有同步辐射的损失)。因此当闪烁体与40 mm测出的能量还要做修正:1.94 MeV相当于2.27 MeV(^{90}Sr 源的最大 β^- 粒子能量)。

4 实验结果和分析

我们设计新的实验,分别在磁场强度相当于0.0265 T, 0.041 T, 0.0633 T, 0.08 T, 0.121 T的均匀磁场中测量动能、动量,实验得到如表1~表5所示数据。综合为图5。

表1 0.0265 T β^- 粒子相对论能量—动量关系
Table 1 0.0265 T Relativistic energy—momentum relation of β^- particles

R/cm	E/Mev	pc/Mev	pct/Mev	DPC/%
12.35	0.546	0.982	0.924	-6.2
11.60	0.500	0.922	0.872	-5.7
11.10	0.466	0.882	0.832	-6.0
10.35	0.413	0.823	0.769	-8.2
9.85	0.385	0.783	0.735	-6.5
9.60	0.369	0.763	0.716	-6.6
9.35	0.356	0.743	0.699	-6.2

表 2 0.041 T β^- 粒子相对论能量—动量关系

Table 2 0.041 T Relativistic energy—momentum relation of β^- particles

R/cm	E/MeV	pc/MeV	pct/MeV	DPC/%
12.35	1.045	1.519	1.470	-3.3
11.10	0.913	1.365	1.329	-2.7
9.85	0.775	1.216	1.180	-3.1
8.60	0.613	1.058	1.021	-3.6
7.35	0.499	0.904	0.871	-3.8
6.10	0.338	0.750	0.678	-10.6
5.35	0.267	0.658	0.587	-12.1

表 3 0.0633 T β^- 粒子相对论能量—动量关系

Table 3 0.0633 T Relativistic energy—momentum relation of β^- particles

R/cm	E/MeV	pc/MeV	pct/MeV	DPC/%
12.25	2.025	2.326	2.484	6.4
11.10	1.791	2.088	2.245	7.0
9.75	1.548	1.851	1.993	7.1
8.50	1.301	1.614	1.738	7.2
7.25	1.047	1.376	1.471	6.5
6.00	0.794	1.139	1.201	5.2
4.75	0.552	0.902	0.932	3.2
3.50	0.313	0.666	0.646	-3.1

表 4 0.08 T β^- 粒子相对论能量—动量关系

Table 4 0.08 T Relativistic energy—momentum relation of β^- particles

R/cm	E/MeV	pc/MeV	pct/MeV	DPC/%
9.75	2.142	2.340	2.603	10.1
8.50	1.862	2.040	2.317	12.0
7.25	1.535	1.740	1.981	12.2
6.00	1.199	1.440	1.632	11.8
4.75	0.861	1.140	1.273	10.4
3.50	0.534	0.840	0.911	7.8

表 5 0.121 T β^- 粒子相对论能量—动量关系

Table 5 0.121 T Relativistic energy—momentum relation of β^- particle

R/cm	E/MeV	pc/MeV	pct/MeV	DPC/%
6.50	2.270	2.359	2.733	13.9
6.25	2.149	2.268	2.610	13.1
5.25	1.739	1.905	2.190	13.0
4.00	1.251	1.452	1.686	13.9

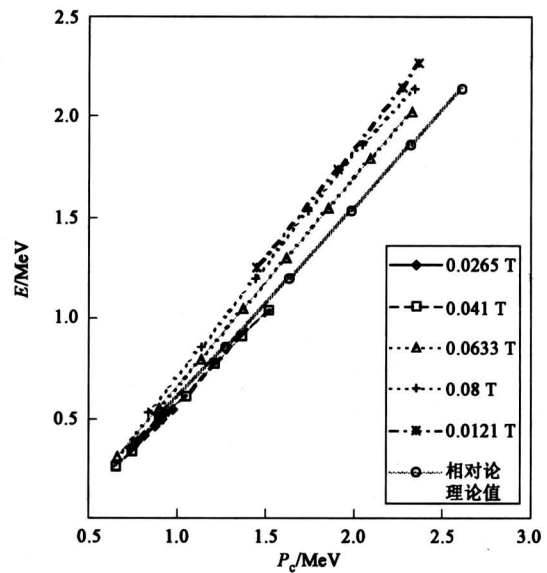


图 5 不同磁场下 β^- 粒子弯曲的能量和动量关系
Fig.5 Momentum-energy relations of β^- particles under different magnetic fields

从实验数据和图 5 中发现：

- 1) 不同的磁场强度，实测的动量值符合相对论的程度不同。
- 2) 不同磁场强度相同能量的电子在磁场强度较低的磁场中实际受到的力小于理论值。

例如，在 0.0265 T 测量中能量为 0.546 MeV 的 β^- 粒子，根据 $F = evB$ 的理论值为：

$$\begin{aligned}
 F &= evB = eBc \times v/c \\
 &= 1.6 \times 10^{-19} \times 265 \times 10^{-4} \times 3 \times 10^8 \times v/c \\
 &= 1.272 \times 10^{-12} v/c \text{ N} \tag{6}
 \end{aligned}$$

实际受到的力为：

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{mv^2}{R} = p \times c/R \times v/c \\
 &= \frac{0.924 \times 1.6 \times 10^{-6} \times 10^{-5}}{12.35} \times v/c \\
 &= 1.19 \times 10^{-12} v/c \text{ N} \tag{7}
 \end{aligned}$$

而在磁场强度较高的磁场中，实际受到的力大于理论值，例如在 0.08 T 测量中，能量为 0.534 MeV 电子根据 $F = evB$ 理论值为：

$$\begin{aligned}
 F &= evB = eBc \times v/c \\
 &= 1.6 \times 10^{-19} \times 800 \times 10^{-4} \times 3 \times 10^8 \times v/c \\
 &= 3.84 \times 10^{-12} v/c \text{ N} \tag{8}
 \end{aligned}$$

实际受到的力为：

$$F = \frac{mv^2}{R} = p \times c/R \times v/c$$

$$= \frac{0.911 \times 1.6 \times 10^{-6} \times 10^{-5}}{3.5} \times v/c$$

$$= 4.16 \times 10^{-12} v/c \quad (9)$$

3) 根据 $p = eBR$, 在同一 R 处, 动量跟磁场强度成正比, 但实际上并不如此。例如对比 0.0633 T 和 0.08 T 测量中, 在同样 3.5 cm 处, 磁场从 0.0633 T 增加到 0.08 T, 磁场强度扩大 1.26 倍, 而动量从 0.646 增加到 0.911 扩大了 1.41 倍。

实验证明, 根据相对论所说的那些能量和动量值没有那么多。如果有那么多, 实测动量值远大于理论值。为解释出现的矛盾现象, 想尽各种办法, 在根据相对论的理论框架内都不能解释。

据此, 笔者判断图 1 中不同磁场强度下 β^- 粒子的动量—动能曲线, 既不靠近 Newton 理论经典曲线, 也不靠近相对论理论预言的曲线。这是因为无论经典理论, 还是相对论, 都依赖带电粒子在磁场中受的 Lorentz 力 $F = evB$ 的不变性。

那么, 实验中为什么会出: a. 磁场强度大概以 0.05 T 为界磁场强度越大和越小都偏离理论值; b. 强度较低的磁场中电子受力小于理论值, 而在强度较高的磁场中电子受力反而大于理论值; c. 同一 R 处动量跟磁场强度并不成比例变化? 笔者认为相对论对电子能量的定义有问题, 如果按照经典动能来定义电子能量, 就不会出现这些反常现象。

为了解释上述矛盾现象, 笔者做了进一步的研究。按经典的动能定义, 由于在磁场强度 0.0633 T 测量中, $R = 12$ cm 处出口的电子速度接近光速, 动能 $E = \frac{1}{2}mv^2 = 0.25$ MeV。根据如此设想, 原测量中的动能相应比例降低, 动能、动量根据计算机提供的值作相应改变如表 6 ~ 表 10 所示。

表 6 0.0265 T β^- 粒子非相对论能量—动量关系

Table 6 0.0265 T Non-relativistic energy—momentum relation of β^- particles

R/cm	E/MeV	pc/MeV	pct/MeV	$F = mv^2 \cdot R^{-1}/N$	$F = evB/N$
12.35	0.065	0.982	0.255	$0.33v/c \times 10^{-12}$	$1.272v/c \times 10^{-12}$
11.60	0.059 5	0.922	0.244	$0.336v/c \times 10^{-12}$	$1.272v/c \times 10^{-12}$
11.10	0.055 5	0.882	0.236	$0.340v/c \times 10^{-12}$	$1.272v/c \times 10^{-12}$
10.35	0.049 2	0.822	0.222	$0.343v/c \times 10^{-12}$	$1.272v/c \times 10^{-12}$
9.85	0.045 8	0.783	0.214	$0.347v/c \times 10^{-12}$	$1.272v/c \times 10^{-12}$
9.60	0.045 1	0.763	0.212	$0.353v/c \times 10^{-12}$	$1.272v/c \times 10^{-12}$
9.35	0.043 5	0.743	0.208	$0.356v/c \times 10^{-12}$	$1.272v/c \times 10^{-12}$

表 7 0.041 T β^- 粒子非相对论能量—动量关系

Table 7 0.041 T Non-relativistic energy—momentum relation of β^- particles

R/cm	E/MeV	pc/MeV	pct/MeV	$F = mv^2 \cdot R^{-1}/N$	$F = evB/N$
12.35	0.124	1.519	0.353	$0.457v/c \times 10^{-12}$	$1.968v/c \times 10^{-12}$
11.10	0.109	1.365	0.330	$0.476v/c \times 10^{-12}$	$1.968v/c \times 10^{-12}$
9.85	0.092	1.216	0.304	$0.493v/c \times 10^{-12}$	$1.968v/c \times 10^{-12}$
8.60	0.073	1.058	0.270	$0.502v/c \times 10^{-12}$	$1.968v/c \times 10^{-12}$
7.35	0.059	0.900	0.244	$0.531v/c \times 10^{-12}$	$1.968v/c \times 10^{-12}$
6.10	0.040	0.750	0.200	$0.525v/c \times 10^{-12}$	$1.968v/c \times 10^{-12}$
5.35	0.032	0.658	0.178	$0.532v/c \times 10^{-12}$	$1.968v/c \times 10^{-12}$

表 8 0.0633 T β^- 粒子非相对论能量—动量关系

Table 8 0.0633 T Non-relativistic energy—momentum relation of β^- particles

R/cm	E/MeV	pc/MeV	pct/MeV	$F = mv^2 \cdot R^{-1}/N$	$F = evB/N$
12.25	0.241	2.326	0.491	$0.641v/c \times 10^{-12}$	$3.03v/c \times 10^{-12}$
11.00	0.213	2.089	0.462	$0.672v/c \times 10^{-12}$	$3.03v/c \times 10^{-12}$
9.75	0.184	1.852	0.429	$0.704v/c \times 10^{-12}$	$3.03v/c \times 10^{-12}$
8.50	0.155	1.614	0.394	$0.742v/c \times 10^{-12}$	$3.03v/c \times 10^{-12}$
7.25	0.125	1.377	0.353	$0.779v/c \times 10^{-12}$	$3.03v/c \times 10^{-12}$
6.00	0.095	1.139	0.307	$0.819v/c \times 10^{-12}$	$3.03v/c \times 10^{-12}$
4.75	0.066	0.902	0.256	$0.862v/c \times 10^{-12}$	$3.03v/c \times 10^{-12}$
3.50	0.037	0.665	0.193	$0.882v/c \times 10^{-12}$	$3.03v/c \times 10^{-12}$

表 9 0.08 T β^- 粒子非相对论能量—动量关系

Table 9 0.08 T Non-relativistic energy—momentum relation of β^- particles

R/cm	E/MeV	pc/MeV	pct/MeV	$F = mv^2 \cdot R^{-1}/N$	$F = evB/N$
9.50	0.255	2.280	0.505	$0.851v/c \times 10^{-12}$	$3.84v/c \times 10^{-12}$
8.25	0.222	1.980	0.471	$0.913v/c \times 10^{-12}$	$3.84v/c \times 10^{-12}$
7.00	0.183	1.680	0.427	$0.976v/c \times 10^{-12}$	$3.84v/c \times 10^{-12}$
5.75	0.143	1.380	0.378	$1.052v/c \times 10^{-12}$	$3.84v/c \times 10^{-12}$
4.50	0.103	1.080	0.320	$1.138v/c \times 10^{-12}$	$3.84v/c \times 10^{-12}$
3.25	0.064	0.780	0.252	$1.241v/c \times 10^{-12}$	$3.84v/c \times 10^{-12}$

表 10 0.1210 T β^- 粒子非相对论能量—动量关系

Table 10 0.121 T Non-relativistic energy—momentum relation of β^- particles

R/cm	E/MeV	pc/MeV	pct/MeV	$F = mv^2 \cdot R^{-1}/N$	$F = evB/N$
6.50	0.270	2.359	0.520	$1.28v/c \times 10^{-12}$	$5.8v/c \times 10^{-12}$
6.25	0.256	2.268	0.506	$1.29v/c \times 10^{-12}$	$5.8v/c \times 10^{-12}$
5.25	0.207	1.905	0.455	$1.39v/c \times 10^{-12}$	$5.8v/c \times 10^{-12}$
4.00	0.149	1.452	0.386	$1.54v/c \times 10^{-12}$	$5.8v/c \times 10^{-12}$

从表中数值对比可以看到, 在同一磁场中, β^- 粒子速度越大受力比率越小。笔者认为, 随着电子运动速度的增加, 作用于电子上的有效力越来越偏离理论值。电子在磁场中运动时, 有效作用力因子 η 应为:

$$\eta = \frac{\sqrt{2Em_0}}{eBR} \quad (10)$$

通过运算证明笔者的观点是对的。实际上, 按照经典的动能定义, 实验现象很容易解释, 实验的结果和理论十分吻合。

5 结语

对相对论和经典力学中关于运动电子在均匀磁场中受力不变的观点提出了质疑。针对现有的验证相对论中动量和动能关系的常见实验, 通过实验发现改变磁场强度后, 结果并不符合相对论预言的动能—动量关系。实验进一步发现根据相对论的能量定标值偏高。通过对实验结果的详细分析, 证明了电子的能量和动量满足经典力学的动量及能量

定义。

致谢 本实验得到复旦大学近代物理实验室的大力支持和帮助。笔者十分感谢近代物理实验室主任马世宏教授、近代物理实验室原主任王煜副教授、姚红英、汪人甫、潘正元等同志的帮助和支持。特别感谢复旦大学近代物理实验室朱永强副教授自始至终协助作者完成全部实验。

参考文献

- [1] Newton I. The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy (Trans. Cohen I B, Whitman A.) [M]. Berkeley, CA: University of California Press, 1999
- [2] Jackson J D. Classical Electrodynamics [M], 3rd ed, New York: Wiley, 1998, 177
- [3] 季 灏. 说说宇宙和相对论 [M]. 香港: 天马图书有限公司, 2000
- [4] 李学慧, 高峰, 孙炳全, 等. 大学物理实验 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005
- [5] 沈元华, 陆龙申. 基础物理实验 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003

On Experiment that Measures the Momentum-Energy Relation of Moving Electrons

Ji Hao

(Oriental Electromagnetic Wave Research Institute, Shanghai 202155, China)

[Abstract] An experimental study on the classical experiment that verifies the momentum-energy relation in the special relativity theory is carried out and it is found that when magnetic intensity varies the experiment results do not confirm to the prediction of the special relativity. By analyzing the results, the paper points out that the postulate of special relativity on the invariance of the force acted on a moving electron is wrong, and further proposes that the Lorentz force (theoretically) acted on the moving electron should decrease as the velocity of electron increases.

[Key words] the special relativity; Lorentz force; magnetic intensity; speed limit