



牛顿第三定律的研究

谢卫军

(九江师范高等专科学校物理与信息工程系 江西 九江 332000)

1 引言

牛顿第三定律是牛顿力学的重要基础之一. 在物理教学中, 往往会碰到牛顿第三定律不能给予正确的解释的例子, 如两个运动电荷之间的相互作用. 下面我们就这一问题进行一些探讨.

2 两个运动电荷之间的相互作用力

牛顿第三定律对于物体彼此直接接触情况下的接触相互作用及彼此之间有一定距离的静止物体之间的相互作用是严格成立的.

一个看似违反牛顿第三定律的例子是如图1所示的互相垂直运动着的两个带正电的粒子 q_1 和 q_2 所组成的系统, 由于它们之间的万有引力与电磁力相比是微不足道的, 所以我们研究两者间的相互作用时仅考虑电力和磁力.

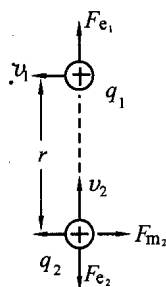


图1

(1) $v_1, v_2 \ll c$ 的情况

当两个带电粒子 q_1 和 q_2 的运动速度 v_1 和 v_2 均远小于光速 c 的时候, q_1 和 q_2 在各自对方位置产生的电场强度大小分别为

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \\ E_2 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r^2} \end{aligned} \quad (1)$$

其电相互作用力大小相等, 方向相反, 成对出现, 应为

$$F_{e1} = F_{e2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2)$$

显然, 它们之间是遵守牛顿第三定律的.

现看一下运动电荷 q_1 和 q_2 之间的磁相互作用力. 运动电荷 q_1 在 q_2 处产生的磁场大小为

$$B_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_1 v_1}{r^2}$$

其方向垂直纸面向外, 而运动电荷 q_2 在 q_1 处产生

的磁场为零, 即 $B_2 = 0$, 于是, q_1 作用于 q_2 的磁力

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_1 q_2 v_1 v_2}{r^2}, \text{ 而 } q_2 \text{ 作用于 } q_1 \text{ 的磁力 } F_{m1} = 0.$$

显然, 运动电荷 q_1 和 q_2 的磁相互作用力不是成对出现, 更谈不上大小相等, 方向相反, 即牛顿第三定律在这种情况下不适用. 同样综合考虑运动电荷的电力和磁力, 它们之间的相互作用力同样是不满足牛顿第三定律的.

(2) v_1, v_2 接近光速 c 的情况

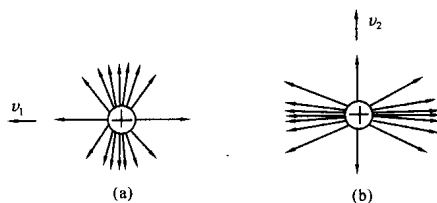


图2

当两个带电粒子 q_1 和 q_2 的运动速度 v_1 和 v_2 均接近于光速 c 时的电磁场就要考虑相对论效应了. 由相对论电磁学知道, 运动电荷 q_1 产生的电场失去了原来的对称性, 变成沿运动方向对称了. 在垂直运动方向上的场强将显著大于运动方向上离电荷同样远处的场强. 如图2(a)所示^[1-2].

同理, q_2 产生的电场如图2(b)所示, 这时场强大小将由如下公式决定^[1-2]

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \frac{1 - \frac{v^2}{c^2}}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2} \sin^2 \theta\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

由公式(3)和图2不难看出, 运动电荷 q_1 在 q_2 处产生的场强 E_1 和运动电荷 q_2 在 q_1 处产生的场强 E_2 分别为

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2 \left(1 - \frac{v_1^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad \left(\text{当 } \theta = \frac{\pi}{2}\right)$$

$$E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2 \left(1 - \frac{v_2^2}{c^2}\right)}{r^2} \quad \left(\text{当 } \theta = 0\right)$$

故 q_1 和 q_2 受到的电力分别为

$$F_{e_1} = q_1 E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2 \left(1 - \frac{v_2^2}{c^2}\right)}{r^2} \quad (4)$$

$$F_{e_2} = q_2 E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2 \left(1 - \frac{v_1^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

不难看出 $F_{e_1} \neq F_{e_2}$, 即它们之间电相互作用力也不满足牛顿第三定律了, 而磁相互作用力当然还是遵守牛顿第三定律的. 把电力和磁力综合在一起考虑, 牛顿第三定律同样是不适用的.

3 讨论

(1) 两个相隔一定距离的运动电荷之间的电磁相互作用是通过它们之间的电场和磁场来实现的. 上面谈到的运动方向互相垂直的两个运动电荷 q_1 和 q_2 , 电荷 q_1 通过在运动电荷 q_2 处产生的磁场 B_1 对运动电荷 q_2 施加了一个磁力 F_{m_2} , 反之则不然, 由于运动电荷 q_2 在运动电荷 q_1 处产生的磁场为零, 即 $B_1 = 0$, 因而无法对它施加磁力, 它们之间的磁相互作用不能成对出现, 故牛顿第三定律在此观察中不能严格成立.

现再比较一下运动电荷 q_2 的受力情况, q_2 受到两个力, 一个电力 F_{e_2} , 一个磁力 F_{m_2} , 磁力 F_{m_2} 和电力 F_{e_2} 之比为

$$\frac{F_{m_2}}{F_{e_2}} = \epsilon_0 \mu_0 v_1 v_2 \quad (6)$$

由于电磁波在真空中的传播速度, 即光速 $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$, 将其代入(8)式可得

$$\frac{F_{m_2}}{F_{e_2}} = \frac{v_1 v_2}{c^2} \quad (7)$$

因为 $v_1 \ll c, v_2 \ll c$, 故磁力 F_{m_2} 比电力 F_{e_2} 小很多, 即 $F_{m_2} \ll F_{e_2}$, 因此, 作用于运动电荷上的磁力 F_{m_2} 是可以忽略不计的, 这时可以说, 当运动方向互相垂直的两个运动电荷 q_1 和 q_2 之间的电磁相互作用力在 $v_1 \ll c, v_2 \ll c$ 的情况下, 牛顿第三定律实际上是适用的, 但不是严格成立的. 顺便说一下, 这亦表明运动电荷之间的磁相互作用是一种相对论效应.

(2) 在 v_1, v_2 均接近光速 c 的情况下, 互相垂直的两个运动电荷 q_1 和 q_2 , 它们之间的电磁相互作用力, 即电力和磁力, 牛顿第三定律均不能成立, 因为它们所在处电场和磁场均要考虑其相对论效应的影响.

(3) 两个运动电荷 q_1 和 q_2 以相同速度 v 沿两条平行直线运动时, 在相同速度 v 远小于光速 c 情况下, 它们之间的电磁相互作用力(即电力和磁力), 牛顿第三定律始终是正确的. 即使在 v 接近光速 c 的情况下, 由于它们各自位置处产生的相对论性电场和磁场的相似性和某种对称性, 牛顿第三定律对它们之间的电磁相互作用力也是严格成立的.

(4) 对于运动方向成某个任意角度(包括 v_1 和 v_2 不在同一平面)的两个运动电荷 q_1 和 q_2 的电磁相互作用的情况下, 一般情况, 牛顿第三定律均不适用, 这一点只要稍许分析计算一下就不难得出结论.

(5) 即使对两个电中性的、相隔一定距离的质点来说, 若其中一个质点静止, 一个质点以接近光速 c 运动, 或两个质点均以接近光速 c 运动的情况下, 它们之间的万有引力相互作用在质点运动中的瞬间或停止在某一位置后的某极短时间内, 牛顿第三定律均不适用.

(6) 总之, 对于两个相隔一定距离的运动物体无论其是带电的, 还是电中性的, 由于它们之间的相互作用是通过电磁场或引力场来实现的, 因此, 牛顿第三定律并不总是严格成立的^[3], 哪怕是在 $v \ll c$ 的情况下, 所以我们要特别注意这一点.

(7) 牛顿第三定律仅仅是在牛顿力学即在物体运动速度 $v \ll c$ 的情况下是正确的. 凡是通过场产生的相互作用力, 比如在经典的麦克斯韦电磁理论中的电磁相互作用即使运动物体速度 $v \ll c$ 的情况下也不一定是严格成立的, 因为场扰动的传播速度不是无限大的, 而是以光速 c 传播的, 这一点是很重要的. 通过上述讨论, 我们对牛顿第三定律适用范围, 才会产生更深刻的认识, 而不至于大惊小怪, 这也是我们目前用三大守恒定律(动量、能量、角动量)为中心来研究牛顿力学的一个很重要的原因. 实际上, 由于牛顿第三定律和动量守恒定律是等效的. 在讨论上述问题时, 把两个变化的场也包括在系统之中, 在计算系统的动量变化时, 也考虑到两个变化的场的动量变化, 这时系统内部在相互作用时动量就守恒, 牛顿第三定律因而成立.

参考文献

- 1 诸葛向彬. 工程物理学. 杭州: 浙江大学出版社, 2001
- 2 (美)E·M·珀塞尔. 电磁学. 北京: 科学出版社, 1979
- 3 (苏)N.B. 萨韦利耶夫. 普通物理学(第一卷). 钟金城, 何伯珩, 译. 北京: 高等教育出版社, 1992

