

狄拉克的神来之笔——磁单极假设

岳 德 鑫

1986年5月,杨振宁在北京所作的一次学术报告中,特别称赞狄拉克的磁单极假设是他的“神来之笔,”欲明真谛,实难言简意赅.其深邃的理论基础,关键在于彻底贯彻电现象和磁现象的对称性.

人们很早就把磁现象和电现象相提并论.我国汉代王充(公元27—104年)所著《论衡》一书中就有“顿牟掇芥,磁石引针”的记载.公元1269年,佩列格利纳斯引进磁极概念,也是按照与电荷概念的相似.1785年,库伦发现了磁和电的形式完全相同的相吸或相斥定律.

然而,一旦深入考虑磁和电的对称问题,就会注意到磁现象和电现象之间的对称不是完全的.磁针总是同时具有性质相反的两极.无论磁针被分割成多少部分,每一部分仍然是两极对立而并存.从来没有发现过单独存在的磁极——磁单极.特别是,1780年,伽伐尼发现了电流;1820年奥斯特发现了电流的磁效应——能使磁针转动;1822年,安培发现载电流螺线管两端分别具有最强的磁吸引力和磁排斥力,即同时具有性质相反两磁极磁场效应.而螺线管并非由正负磁单极组成.安培假磁场由分子电流——等效的闭合电流引起,用闭合电流来解释磁性起源,根本排除了磁单极和磁荷的存在.电荷的运动产生磁场,这样的磁场效应与磁荷是否存在无关.闭合电流产生的磁场,其方向与电荷运动的方向恒构成右手螺旋关系.螺线管正负磁极间磁力线的方向与正负磁荷间的磁力线方向相反.螺线管无论怎样短,总是具有异性两极磁场效应.而正负磁荷趋于重合时,其合磁效应趋于零.螺线管无论多长,其异性两极总是同时并存,并非可以略去其任一极的作用,另一极就可成为带有磁荷的磁单极.而正负磁单极作为带磁荷粒子,却可以分别自由存在.所以,磁单极的自由存在与通常磁体的异性两极的相互对立和相互依存不相干.但因此,物理学中也就形成了一种相当牢固的概念,认为磁单极和磁荷只不过是辅助性概念,其引进纯粹是虚构的.

虽然,1831年,法拉第发现了电磁感应现象.任何随时变化的电场都同时产生相应变化的磁场.反之亦然.这种相互关联而变化着的电场和磁场形成统一的电磁场,反映了磁现象和电现象的相似性.但更揭示了它们的差异性,电磁场中的电场和磁场都是涡旋场,其电力线和磁力线都是闭合的,以闭曲线的形式分别围绕着磁力线和电力线.这种电磁场中每一点都不

具有一定的势值,都不能用极矢量表示,而只可以用轴矢量表示.差异在于,电场既可以为涡旋场,也可以为势场,在电荷的静电场中,电力线总是起始于正电荷,而终止于负电荷,或延伸至无限远,其方在电荷处不是连续转变,因而每一点都有一定的势值,能用极矢量表示.电磁场中的磁场和电流的磁场都只具有涡旋性质.载电流螺线管磁场的磁力线是闭合的,其方向在螺线管的内部和外部是连续转变的.未见有磁荷的静磁场,也未见磁流的电场.因此,麦克斯韦在建立电磁统一理论时,虽也曾考虑过磁单极,却终于未能把它引入电磁场方程.所以,在经典电动力学中磁荷和磁流是不存在的.

明确了通常的磁现象和电现象不表现深刻的相似性,无非在于没有发现磁单极.如果承认磁单极,则磁荷的静磁场为势场,能用极矢量表示.磁流的电场与电流的磁场也是相似的.这就保证了磁现象和电现象的完全对称性.于是,狄喇克理所当然地宣称:“如果自然不应用这种可能性,则是令人诧异的”^[1].

1931年,狄喇克发挥了他的“神来之笔”.他根据电动力学和量子力学的合理推广,以新的势头把磁单极作为一种新粒子(磁单极子)提出来,使麦克斯韦方程具有完全对称的形式,并且,导出磁荷与电荷相互关联的公式:

$$eg = n \frac{\hbar c}{2}, \quad n = \text{整数} \quad (1)$$

$n = 1$ 时,得基本磁荷

$$g = \frac{\hbar c}{2e} = \frac{\hbar c}{2e^2} e = \frac{1}{2\alpha} e = 68.5e. \quad (2)$$

式中 $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$ 是精细结构常数.由此揭示了磁荷和电荷的不连续性,解释了物理学中一直悬而未决的电荷量子化难题.以电子、质子的电荷 e 为基本单位时,一切电荷都只能为基本电荷的整数倍.自然,(1)式表明的电荷和磁荷的量子化条件,并不排斥分数电荷和相应的分数磁荷的存在.

经典电动力学是以电荷为基础的,由电(荷)动生磁(场),产生电磁感应.1865年,麦克斯韦提出了概括电磁现象的微分方程,由此导出电磁波的波动方程为

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

考虑到磁现象和电现象的完全对称,如果以磁荷

为基础,由磁荷动生电场,产生磁电感应,则用上述同样方法,导出磁电波的波动方程:

$$\nabla^2 H + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0 \quad (4)$$

由此可见,(3)和(4)是完全对称的.

费米也曾经从理论上考察过磁单极,一直认为“它的存在是可能的”. 杨振宁和吴大峻特别由规范场出发,自然地导出了(1)式,为磁单极的存在提供了深邃的理论基础. 杨振宁同陈省身谈到磁单极、规范场、和纤维丛的联系时说:“这既令人惊奇,又令人困惑,因为你们数学家能无中生有地幻想出这些概念”. 陈省身则强调:“这些概念并不是幻想出来的,它是自然的,而又真实的”. 这种信念反映了人们探索磁单极的原动力.

由(2)式,有 $\frac{g^2}{e^2} = 4692.25$ 这表明,磁荷之间的

相互作用比电荷之间的相互作用强 10^3 量级,属于超强作用. 这一量变的重要特征,使得磁单极起作用的过程将不同于通常的磁现象. 而且,如果磁单极同时具有电荷和磁荷,将同时具有磁矩(自旋磁矩和轨道磁矩)和电矩(自旋电矩和轨道电矩). 复杂的相互作用过程也将不同于通常的电磁现象. 对于同性电荷系统的稳定性,轻子结构,轻子和强子的统一组成,轻子和夸克的对称等难题,都可能因磁单极的存在而得到解释. 并且,设想亚磁单极层次问题也势将不足为奇.

电荷的不连续性是伟大的法拉第在1833年发现的,他曾提示过:“这里没有什么太不可思议. 无论什么,如果符合自然规律,它就是真实的. 实验是确定同客观实际相符合的最好手段”. 磁单极的研究不仅将为探索它的存在而提供新的实验原理,而且开发粒子相互作用的新认识.