

磁单极子之谜

马守田

在历史上,人们最初认为磁现象是正负磁荷产生的。但是,长期以来,从没有人发现过单独的磁北极或磁南极。因此,传统上认为磁是一种固有的双极现象,即任何一块磁体无论怎样细分,最后每一小块磁体总是显示出两个相反磁性区——磁北极和磁南极,这就是两磁极的不可分性。在安培提出分子电流是物质磁性的基本来源之后,这种不可分性得到了完满的解释。此后又断言,单独的磁荷或磁荷的基本单元——磁单极子是不存在的。这一论断构成了宏观电磁理论的基础,例如磁场的高斯定理就是自然界不存在磁单极子的数学表述。然而,这并不妨碍探索微观领域中是否存在磁单极子成为物理学家很感兴趣的一个课题。自1931年狄拉克在理论上预言存在磁单极子以来,试图证实磁单极子存在的实验研究工作,一直都在进行。

一、磁单极子可能存在的依据

汤姆孙的猜想 自1897年发现电子以后,特别是1909年密立根证实电子电量是电荷的基本单位之后,汤姆孙等人从电与磁之间存在着某些对称性考虑,猜测可能存在磁单极子。既然有带正、负基元电荷的质子和电子,为什么不可能有带相反极性的基元磁荷——磁单极子呢?这是物质运动规律在很多方面表现出的高度对称性所要求的。反映电磁运动基本规律的麦克斯韦方程组就揭示了电与磁的某些对称性:变化的电场要激发磁场,变化的磁场也要激发电场。但是,它揭示出的电与磁的对称性却是不完全的,因为它说电荷激发电场,却没有说磁荷激发磁场;说运动电荷(电流)激发磁场,却没有说运动磁荷(磁流)激发电场。假若磁单极子存在,将麦克斯韦方程组写成如下形式:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot D &= \rho_e, \quad \nabla \cdot B = \rho_m, \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} - j_m, \quad \nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} - j_e. \end{aligned} \quad (1)$$

式中 ρ_e 和 j_e 为电荷密度和电流密度, ρ_m 和 j_m 为磁荷密度和磁流密度,那么麦克斯韦方程组所反映的电与磁的对称性就完全了:电场可由电荷、变化磁场和运动磁荷激发;磁场可由磁荷、变化电场和运动电荷激发。所以,从电磁理论对称性考虑,可能存在

磁单极子。

狄拉克的预言 存在磁单极子的一个有说服力的预言是狄拉克在1931年提出来的。他根据量子力学研究一个磁单极子场中的单个电子时,发现角动量量子化要求基本电荷 e 和基本磁荷 g 之间有如下关系: $eg = \frac{h}{2}$ (其中 $\hbar = h/2\pi$)。这样,磁单极子的存在就能用来解释电荷的量子化。此外,这个狄拉克条件还预言:从一个磁单极子发出的磁通量是 $g(4\pi r^2)/r^2 = 4\pi g = h/e = 2\phi_0$ 。这正好精确地等于超导的磁通量子 ϕ_0 的两倍。这个结果并不奇怪,因为两者的量子化条件都和角动量量子化有关。

大统一理论的支持 1974年特胡夫特和波利雅科夫分别证明,在带有自发破缺的规范理论中,存在磁单极子是必然的。这一结论立刻被引入大统一理论——试图将电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用统一起来的理论。因为在大统一理论中也有所谓的真空自发破缺机制,所以也应当存在磁单极子。而且对称自发破缺之后,可能存在许多不同的真空态,从而将空间分割成很多区域,这些区域交界处的场,可能就是磁单极子的场。这里,磁单极子的磁荷也遵从狄拉克量子化条件,其质量约为质子的 10^{16} 倍。

具有如此巨大质量的磁单极子,只可能在温度极高的宇宙大爆炸初期成对产生。至于它在宇宙早期和现在可能具有的密度,各家看法很不一致。有人认为,在宇宙早期,磁单极子数与质子数差不多,而宇宙膨胀至今,大约10000个重子对应一个磁单极子。这比地球上金元素的含量还高。还有人认为,磁单极子在宇宙早期就很少,至今已几乎没有了。

二、探测磁单极子的意义

如果上述猜想和预言能够得到证实,能在实验中发现或者俘获磁单极子,无论对于理论研究或者实际应用都具有极其重大的意义。

首先,如果确实探测到磁单极子,那么带相反极性的北单极子和南单极子就恰好与带正负电荷的质子和电子相对应。这时麦氏方程组将改写成(1)式的形式,这不仅进一步完善了电磁理论的对称性,而且必将使我们更深刻地理解电磁现象的本质。

其次,量子电动力学是目前解释和预测电磁现象较成熟的理论。但是,至今认为两磁极是不可分的,因此量子电动力学理论就规定磁粒子流的强度恒等于零。如果磁单极子确实存在,这样的规定就不能成立,必需对量子电动力学理论作较大的修正。

第三,我们知道,物质世界中存在电荷的最小单元,其意义是相当深刻的。如果证实了磁单极子存在,狄拉克条件就为电荷量子化的事实提供了很好的解释。

第四,大统一理论认为,如果宇宙按通常认为的速度膨胀,早期应产生大量的磁单极子,而正负磁单极子的湮灭率是有限的,现在仍应有足够多的磁单极子,但是大量实验都没有发现磁单极子。这说明磁单极子即使有也不可能太多。这表明,或者大统一理论有缺陷,或者宇宙膨胀速度应加快,或者某些重要因素没有考虑到。可见,探测磁单极子对宇宙起源理论和统一理论都有重大意义。

如果磁单极子确实存在,并能被俘获和控制,目前对其实际用途还没有做出充分估计。但是已有人认为是,由于磁单极子的磁性很强,可以用来建造比当前能量高得多的粒子加速器。据估计一个约2米长的磁单极加速器,其性能可以超过周长900米的传统圆形加速器。此外,还可以利用磁单极子制造超小型、高效率的电动机和发电机,治疗癌症以及研究新能源。还有人大胆设想,把一些磁单极子放在船上,有可能利用地磁场使船行驶。

三、探测磁单极子实验的进展状况

由于探测磁单极子有重要意义,所以国外不少人员都在想方设法寻找它。各种探测方法都是根据目前在理论上预言的磁单极子的性质而提出的。其性质是:磁性强,容易被外磁场加速;电离能力比宇宙射线强得多;质量很大;正负磁单极子相遇而产生湮灭时会产生许多光子等等。

最初,不少人企图用强磁场抽吸的办法,从岩石中寻找残存的磁单极子。岩样包括海底岩石、月球上的岩石和各种陨石,但都没有成功。也有人利用大型粒子加速器大量观察宇宙射线,试图从中寻找磁单极子留下的径迹。例如1973年美国利用气球在约39千米的高空探测宇宙射线,气球上放置一台由33层塑料薄片、1层照像乳胶和1层照像底片组成的探测器,却并未发现磁单极子的径迹。美国研究人员还在人造卫星上装置探测器,同样也一无所

获。这使很多物理学家对狄拉克的预言持怀疑态度,甚至狄拉克本人也说:“至今我是属于那些不相信磁单极子存在者之列。”但还是有不少物理学家对探测磁单极子极感兴趣。

1975年,一个由美国加利福尼亚大学和休斯敦大学组成的联合小组,在高空气球上安装了一个探测宇宙射线的装置,记录各种宇宙粒子的径迹。他们在对各种径迹进行显微分析后宣布,所观察的径迹中有一条电离性很强的粒子留下的径迹是磁单极子引起的。这个粒子的质量比质子约大200倍。这一事件在物理学界引起了极大轰动。但是,随后有不少人对他们的发现提出了不同看法,认为他们探测到的不是磁单极子,而是像铂这样的重原子核,或很重的反粒子。甚至还有一位参与该试验的研究人员出来证实,上述试验报告的部分论据引用了错误的实验数据,这次事件引起的轰动效应也随之烟消云散。

1982年,美国斯坦福大学的一个研究小组宣布,他们观察到一起“候补磁单极子事件”。他们的探测器是用直径0.005厘米的铈导线绕制成的一个环形线圈,线圈直径5厘米、共4匝,把它用作灵敏磁强计的传感探头。磁强计和线圈都放在一个直径20厘米、长1米的圆筒形超导铅屏蔽之内,然后将它们装在阿姆科铁桶中。这种组合在超导情况下可以屏蔽外界磁场的干扰,如果有一个磁单极子穿过铈线圈,必然引起线圈磁通量的显著变化,从而激发起超导电流。这台探测器运行了38天,在1982年2月14日记录到一些磁通量的突然改变,其改变量恰好与满足狄拉克条件的磁单极子穿过铈线圈时引起的改变相同。为了慎重起见,他们并没有宣称发现了磁单极子,而是报告他们观察到一起“候补磁单极子事件”。此后,他们又启用了更先进的新探测器,但是至今没有听到其重复观测到磁单极子事件的报告。虽然如此,由于那次事件得到的结果与理论预言相符,又不能用磁单极子以外的事件做出较好的解释,因而仍然受到各国科学家的重视。这一事件增强了人们发现磁单极子的信心,所以有关磁单极子的理论研究和实验探索还在不断进行。

然而,最终能否真正探测到磁单极子,仍然是一个谜。

(内蒙古鄂尔多斯教育学院物理系 017000)