

# 寻找磁单极子

(中国科学院物理研究所 万蔡华 韩秀峰 编译自 Arttu Rajantie. *Physics Today*, 2016, (10): 40)

电和磁遍布现代社会方方面面，构成了现有大部分科学技术的基础。因此大家倾向于认为这些效应已经被充分理解，不存在基础物理层面的未解之谜。诚然，在绝大多数应用场合，这些磁电效应可以用 James Clerk Maxwell 在 1864 年归纳的 Maxwell 方程描述。从更深的层次上，这些效应可以从量子电动力学的角度——粒子物理标准模型的一部分，得到自洽解释。该理论工作如此之好以至于它能准确给出电子磁偶极矩的前 10 位有效数字。尽管如此，现有电磁学还存在一个我们所不能理解的基础问题——有关磁单极子的问题。

经验显示磁体总存在着两个磁极：南极和北极。然而我们不知为何磁单极子——一种只包含单一北极或南极的磁体理论上不能存在的根源。是因为我们现有理论还缺失某些关键部分？抑或磁单极子存在，只是我们还没能通过实验手段

发现它们？

## 磁学之谜

经典电动力学并不排斥磁单极子，相反磁单极子的存在使得该理论更对称。正如 Maxwell 方程所示，描述电和磁的规律在真空中具有对偶对称性(duality symmetry)——电参量和磁参量可互换而不影响方程的形式。这种对称性在电流和电荷存在时被打破。它们没有对等的磁参量与之对应。但是如果存在磁单极子，与电荷和电流对应的磁参量便可存在——整个 Maxwell 方程恢复对偶对称性。从审美角度出发，人们期待磁单极子的存在。

对偶对称性可给出磁单极子的一些特征。磁单极子的行为与带电粒子完全一致：磁荷守恒，因此最小的磁单极子将是稳定存在的粒子；相反极性的磁单极子会相互吸引而相同极性的磁单极子相互排斥；它们的运动轨迹会在电场中弯

曲；等等。实际上，一个电荷被磁荷所完全替换的虚拟宇宙与我们所处的真实世界，并无二致。当然，磁单极子将会带来很多更加奇异的磁电现象。

既然 Maxwell 的电动力学理论完美兼容磁单极子，为何他不将其纳入其中？答案或许因为当时的实验并没有给出磁单极子存在的证据。以现在的观点来看，当时的实验条件非常简单。但是即使当下的实验条件获得了天翻地覆的提升，Maxwell 将磁单极子排除在方程之外的假设似乎依然成立。另外，虽然我们对基础物理的理解与时俱进，取得了显著进展，但我们依然不知磁单极子存在与否。

## 量子困境

直觉上，磁单极子与量子力学不兼容。这是因为电磁场必须由标势  $\phi$  和矢势  $\mathbf{A}$  描述。磁场由矢势的旋度给出， $\mathbf{B}=\nabla\times\mathbf{A}$ ，因此磁场必须是无源场， $\nabla\cdot\mathbf{B}=0$ 。换言之，磁力线不能有端点。在这种情况下，磁单极子如何存在呢？

1931 年，英国物理学家保罗狄拉克(Paul Dirac)创造性提出：磁力线封闭的条件不必然排斥磁单极子的存在。量子力学允许它们共存，条件是磁荷需满足某种量子化条件。在狄拉克模型中(图 1)，每一个磁北极与一个磁南极通过一根称之为狄拉克弦的线相连。这根弦可视作没有截面却能将磁力线从南极导向北极的理想螺线管。它保证了磁力线封闭条件的满足。在经典物理

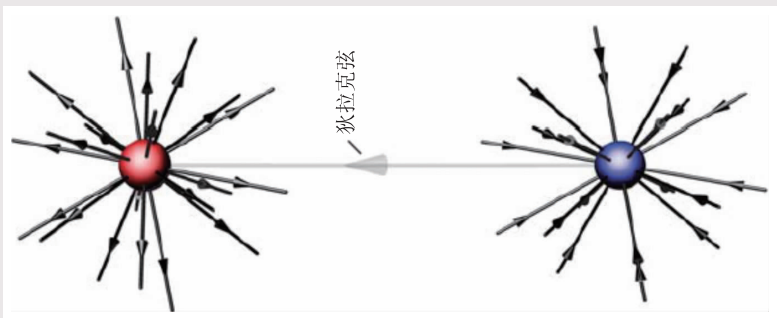


图1 狄拉克磁单极子。北极(红球)与南极(蓝球)通过一条奇异的线——狄拉克弦相连。这根弦将磁力线从南极导向北极，使得磁力线封闭条件得以满足。如果磁荷数值满足狄拉克量子化条件，那么狄拉克弦将不可探测，也不会影响与之对应磁单极子的运动或行为

中，这根弦很容易探测，因为它会对运动电荷施加影响。但在量子物理中，如果磁单极子的磁荷 $g$ 满足如下量子化条件——狄拉克量子化条件，带电粒子将不受其影响：

$$g = \frac{2\pi\hbar}{\mu_0 e} n,$$

此处 $e$ 是用于探测弦的带电粒子的电荷， $\hbar$ 是约化普朗克常数， $n$ 是整数。如果所有磁单极子均满足狄拉克条件，那么狄拉克弦不能被任何实验所探测。因此，狄拉克宣称这条弦不是物理实在，仅为理论而生，是纯数学产物。只有弦两端的磁极是真实存在的。物理上，这两个磁极仿佛两个独立粒子——自由磁单极子。

由狄拉克量子化条件可导出若干重要结果。首先，它表明磁单极子的磁荷间作用力应该非常强，单位磁单极子( $g_D=2\pi\hbar/\mu_0 e$ )间的力将会是两个电子间库仑力的4700倍。第二，该条件暗示如果磁单极子存在，电荷必须量子化。换言之，所有带电粒子均需含有整数倍的元电荷 $e_0=2\pi\hbar/\mu_0 g_D$ 。事实上，这正是我们的观测结果。因此电荷量子化现象某种程度上可视作磁单极子存在的证据。

### MoEDAL时刻

磁单极子在宇宙中的数量低至难以探测，人们因此尝试在对撞实验中将它们制造出来，就像通过对撞实验制造希格斯玻色子一样。因为磁荷守恒定律，磁单极子总是成对产生。拥有13 TeV最大对撞能量的大型强子对撞机(LHC)理论上可以产生若干 $\text{TeV}/c^2$ 质量以下的磁单极子。

自从2010年以来，ATLAS尝试



图2 MoEDAL实验装置。该装置用于从质子对撞机产生的碎片中寻找磁单极子。2012年，该设备开展了短期试运行。去年该设置正式投入使用(图片来自CERN)

从8 TeV的质子对撞实验的碎片中寻找磁单极子存在的证据。该实验只对磁荷等于1个狄拉克磁荷的磁单极子敏感。假设Drell—Yan机制主导产生散射截面，那么ATLAS的结果则对磁单极子的质量做了如下约束：对于自旋为1/2的磁单极子，质量不低于 $1340 \text{ GeV}/c^2$ ；对于自旋为0的磁单极子，质量不低于 $1050 \text{ GeV}/c^2$ 。

经过升级，现在LHC能实现更高能量(13 TeV)的对撞实验，因此也能产生更大质量的磁单极子。现在也有一个新的专门用于寻找磁单极子及其他稳定的高度电离粒子的实验装置(MoEDAL，磁单极子及未知粒子探测器)安装在LHCb线站上(图2)。该装置使用了两种检测方法：塑性核子轨迹探测器和铝俘获探测器。

核子轨迹探测器阵列总计400块，每块含6层轨迹探测器，每个探测器 $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ 。该阵列放置在LHCb旁边。如果一个磁单极子生产出来并飞过探测器，它会留下一条可观测的轨迹，通过后续的“显影”过程以及显微镜观测得到。

MoEDAL俘获探测器由一些800 kg的铝条构成。当磁单极子经过Al时，因为Al原子核有异常高的

磁矩，它将会损失能量并最终与Al原子核绑定在一起。被俘获的磁单极子随后可通过灵敏的超导磁强计探测到。磁单极子若存在，将引起磁强计电流的跳变。如果一个异常电流被探测到，同样的测试还可进行多次以减小错误测量发生的概率。

### 继续磁单极子的探索

磁单极子的发现必将对物理学产生深远影响。它不仅提供了对超出标准模型的新物理定律的惊鸿一瞥，它的特殊性质还将允许我们探索新的物理领域。而这是其他粒子所不能提供的。因为磁单极子很稳定，能与电磁场相互作用，它们可以很方便地被俘获探测器捕捉，因此还可用于更进一步的实验。考虑到电磁学的重要性，磁单极子很有可能具有某些特殊的实用价值，即使成本很高。

磁单极子的研究还激发了凝聚态物理学家的灵感，启发后者在自旋冰和玻色爱因斯坦凝聚现象中发现与磁单极子效应类似的基态和激发态。然而，尽管这些外延的效应对各自领域都很重要，但它们并没有直接回答有关磁单极子存在性的基本问题。对磁单极子的探索，还在继续。