

磁单极子的魅影

张 静 刘彩霞 徐元英 杨艳芳

2009年9月,德国和法国的两个科学研究小组在当月出版的《科学》杂志上发表论文,宣布他们在一种特殊的晶体中观察到了“磁单极子”的存在以及这些磁单极子在实际材料中出现的过程。看起来,这几乎是可以改写教科书的重大发现。假如真的发现了磁单极子,那么英国物理学家麦克斯韦在19世纪建立的描述磁场与电场的基本方程就要面临重大修改。在两篇论文中,德国亥姆霍兹材料与能源中心的乔纳森·莫里斯(Jonathan Morris)领导的团队和法国Laue-Langevin研究所汤姆·芬内尔(Tom Fennell)领导的团队分别报告:在自旋冰晶体中观察到了类似磁单极子的“准粒子”。之前的一些研究中已经有迹象显示这种准粒子可能存在,此次两个团队的发现首次确凿地证实了这一点。但是,很多物理学者却认为,这并不是真正地发现磁单极子,他们的“磁单极子”与物理学中由狄拉克预言的磁单极子仍有天壤之别。

磁单极子

磁单极子是科学家在理论物理学弦理论中提出的仅带有北极或南极单一磁极的假设性磁性粒子。这种物质的存在性在科学界时有纷争,可以说是21世纪物理学界重要的研究主题之一。

磁的产生总是与电息息相关。电荷的运动产生磁场,而物质磁性的产生也是和电荷相联系的。我们都有这样的常识,一条磁铁总是同时拥有南极和北极,即便你将它分成两半,新形成的两块磁铁又会立刻分别出现南极和北极,这种现象一直持续到亚原子水平。看上去,南极和北极似乎永远不分家,或者说,磁性粒子通常总是以偶极子(南北两极)的形式成对出现。这同物质的电性有着明显的区别,因为正负两种电荷是可以单独存在的。这样就造成了磁和电的不对称,使描述电磁现象的麦克斯韦方程组也显得不对称,例如电位移矢量的散度为电荷密度,而磁感强度的散度却为零。但是,获得1933年诺贝尔物理学奖的英国物理学家保罗·狄拉克却在1931年首先提出了磁单极子理论,从理论上预言



了磁单极子的存在。他认为既然宇宙中存在着带基本电荷的电子,那么理应有带有基本“磁荷”的粒子存在,从而启发了许多物理学家开始了他们寻找磁单极子的工作。磁单极子这种粒子听起来虚无缥缈,让人难以置信,因为它们完全来自于纸上计算。但是,既然电荷能够被分为独立的正电荷和负电荷,那么磁似乎也应该能被独立出南极和北

极。对于大自然来说,这才是完美的“对称”。后来,在20世纪80年代,物理学家在试图将弱电相互作用和强相互作用统一在一起,以便最终能完成所谓“大统一理论”时,某些理论也预言了磁单极子的存在。

在磁单极子的理论研究方面,也曾提出过多种学说,各有其特点和根据。例如,除狄拉克最早提出的磁单极子学说外,还有磁荷和电荷完全对称并具有新的量子化条件的全对称磁单极子学说;由著名华裔物理学家、诺贝尔物理学奖获得者杨振宁教授等提出的采用纤维丛新数学方法的量子力学磁单极子学说;应用统一规范场理论的规范磁单极子学说;应用爱因斯坦-麦克斯韦耦合场的相对论性耦合场磁单极子学说;应用超弦理论和四维规范模型的超重磁单极子学说;超对称和超弦磁单极子学说等。

磁单极子魅影闪现

磁单极子学说自从1931年提出以来,到现在一直受到实验观测和理论研究的重视。这是因为磁单极子问题不仅涉及物质磁性的一种来源,电磁现象的对称性,而且还同宇宙极早期演化理论及微观粒子结构理论等有关,故成为科学界关注的一个重要课题。例如在实验观测方面,曾利用多种高能加速器进行许多实验,但都未能产生出磁单极子;曾对地球古代大陆岩石和海洋底岩石,从天外降落到地球上的各种陨石,从月球带回地球的月球岩石等进行观测,也未观测到磁单极子及其留下的特征径迹;曾利用高空气球和空间飞行器上的粒子探测器探测磁单极子,在很多次探测中仅观测到一次粒子径迹,经多方面分析研究,认为很可能是磁单极子的径迹,

但至今尚未得到重复验证；还曾多次在地面实验室中利用高灵敏度和高磁屏蔽的超导量子干涉仪式磁强计进行磁单极子的探测，进行了长达 151 天的日夜不停的磁单极子探测，仍仅有一次观测结果，经仔细分析研究，排除了多种干扰，认为是一次磁单极子事例，但是后来虽经多次重复探测，并且改进和增大了测量装置，提高了测量灵敏度，均未能再次观测到磁单极子。总的说来，几十年来经过多方面和大量的关于磁单极子的实验观测，虽然曾有过两次可能是磁单极子的观测事例，但都尚未得到重复的证实。

物理学家们在研究磁单极子的过程中，还发生过许多出人意料的故事。最具典型意义的当数美国斯坦福大学的物理学家布拉斯·卡布雷拉（Blas Cabrera）的一次经历。20 世纪 70 年代，卡布雷拉用电线建造了一个仪器，来探测宇宙射线中的磁单极子。他设想，如果有一个磁单极子穿过超导线圈，那么只要检测到超导线圈上的电流，就可以证明“磁单极子”的存在。当磁单极子穿过超导线圈时，线圈中电流应该怎样变化呢？

由于磁单极子只有一个磁极，在穿过超导线圈的过程中，穿过超导线圈的磁通量先正向增加后反向减小。而从能量角度看，“磁单极子”靠近超导线圈的过程由于同极相斥，所以必须不断地克服安培力做功，当远离超导线圈的过程由于异名磁极相吸，需要继续克服安培力做功。因此，全过程都是克服安培力所做的功转化为超导线圈电磁能的过程，超导线圈中的电流始终不断增大，当“磁单极子”离开后，这个电流被永远地“记忆”在超导线圈中。所以，只要在超导线圈中检测到了这个“记忆”电流，也就意味着探测到了磁单极子的存在。

1982 年的情人节，卡布雷拉没有到实验室工作。而当他再次回到办公室的时候，惊讶地发现仪器恰恰在情人节这天记录到了一个信号，而这一信号恰恰与一个磁单极子穿过线圈引起的“记忆”电流的理论值完全吻合。卡布雷拉信心倍增，他建造了更为大型的探测器，想要寻找更多这样的信号，却再也没有找到。著名物理学家史蒂芬·温伯格在 1983 年的情人节还专门写了一首诗送给卡布雷拉：“玫瑰是红色的，紫罗兰是蓝色的，是时候找到磁单极子了，第二个！”可是直到今天，并没有人再次

找到过磁单极子，卡布雷拉当年的发现也因此令人生疑。物理学家们尝试过在月面物质样本中寻找，也尝试过在粒子加速器的碰撞实验中寻找，但都一无所获。

自旋冰里的发现

2008 年 1 月，美国普林斯顿大学的物理学家希瓦吉·颂提（Shivaji Sondhi）等人在英国《自然》杂志上发表文章指出，“自旋冰”里可能包含磁单极子。自旋冰是一种奇特的物质，它的磁性离子的排列方式与水冰中氢离子的排列方式相近，因而得名。自旋冰的结构是一个一个四面体顶点相接，每个顶点上有一个磁性离子。在接近绝对零度的时候，这些磁性离子的排列遵循“冰法则”，在每个四面体里，必定有两个离子将北极指向内部，另外两个指向外部。如果四面体里的某个磁性离子因为某种原因发生了转向，那么情况可能就变成了，这个四面体里有三个离子指向内部，与它相邻的四面体里则只有一个离子指向内部。这样一来，这两个失去平衡的四面体就像是磁铁的南极和北极了。接下来，如果邻近的四面体中的离子也发生转向，那么这种不平衡性就会传递下去，这样的话，就相当于南极和北极只由一条由离子构成的弦连接，弦中的离子一个指着一个，这就形成了类似磁单极子的人造物。芬内尔等研究人员为了观察这种磁单极子，利用中子去测量自旋冰晶体内离子的散射模式。结果发现，散射的结果与假设磁单极子存在的计算机模型预测的一致。

德国亥姆霍兹研究中心的学者们在德国德累斯顿大学、圣安德鲁斯大学、拉普拉塔大学及英国牛津大学同事的协作下，在柏林研究反应堆中进行了一次中子散射实验。他们研究的材料是一种钛酸镓单晶体，这种材料可结晶成相当显著的几何形状，也被称为烧录石晶格。在中子散射测量过程中，研究人员对晶体施加一个磁场，利用磁场就可影响弦的对称性和方向，将晶体里的弦进行扩展，从而降低弦网络的密度以促成磁单极子的分离。结果，在 0.6K 到 2K 温度条件下，这些弦是可见的，并在其两端出现了磁单极子。研究人员也在热容量测量中发现了由这些单极子组成的气体的特征。这进一步证实了磁单极子的存在，也表明它们和电荷一样以同样的方式相互作用。研究人员认为，此项技术将产生深远的影响，更重要的是，它标志着人们首次

在三维角度观察到了磁单极子的分离。

在此项工作中，研究人员首次证实了磁单极子以物质的非常态存在，即它们的出现是由偶极子的特殊排列促成的。莫里斯对此结果进行了进一步的解释，他认为此项工作正在书写新的物质基本属性。一般来说，这些属性对于具有相同拓扑结构（烧录石晶格上的磁矩）的材料来说都是适用的。

狄拉克曾经预言过“狄拉克弦”，那是一条假想的连接两个磁单极子的一维曲线。莫里斯等人的确探测到了弦的存在，但“狄拉克弦”理论上是无法观测到的，所以二者仍有区别，莫里斯等人获得的磁单极子也非真正的粒子。从这一角度来说，莫里斯和芬内尔所做出的工作，技术意义大于科学意义。物理学家们评价说，“这是一场漂亮的观测”，“学习如何移动磁单极子将带来技术上的进步，比如电路的磁模拟和原子尺度下的磁记录”。

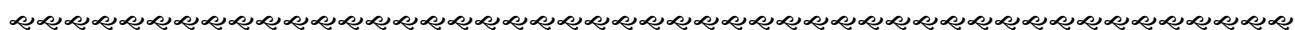
因为狄拉克所预言的磁单极子仍然杳无踪影，对于这次的实验结果，物理学家们难掩失落与遗憾。颂提说，“我希望看到实验中观察到单一的单极子，未来某一天某个人可能会做到的”；“我可能会反对研究人员说‘真正的磁单极子’，因为当你说真正的，

那对我来说就意味着点粒子，但这个不是。它在某个尺度上看着像单极子，但从根本上说它并不真的是单极子”，美国俄克拉荷马大学的物理学家金保·弥尔顿（Kimball Milton）如是说。值得注意的是，在高能物理中，有一批粒子都只是在理论上存在而从未被观测到的，比如任意子（anyon）和轴子（axion）。

几十年来，在大量搜寻未果的情况下，物理学家的注意力开始转向在凝聚态系统中寻找磁单极子的类似物。除了《科学》杂志发表的两篇论文外，一组日本物理学家在2009年5月召开的国际中子散射大会上，也曾报告在自旋冰中观测到了磁单极子类似物存在的证据。科学家什么时候能找到真正的磁单极子，乃至真正的磁单极子是否存在，仍然是个神秘的问号。

总的看来，涉及电磁学、电磁对称、宇宙早期演化和微观基本粒子结构等多方面的磁单极子问题，仍是需要从实验观测和理论方面继续进行研究的前沿课题。

（合肥工业大学电子科学与应用物理学院物理系 230009）



科苑快讯

史前海洋巨兽——梅尔维尔鲸

比利时皇家自然科学研究院（Royal Institute of Natural Sciences）的朗博特（Olivier Lambert）博士最近在秘鲁发现已经灭绝的巨大抹香鲸的下颌和牙齿化石，它们足以捕食不小于自身一半的猎物。由于符合经典小说《大白鲨》（*Moby Dick*）的描述，因此研究者以小说作者梅尔维尔（Herman Melville）命名这种史前海洋巨兽。

梅尔维尔鲸生活于1300万~1200万年前，雄踞当时海洋食物链的顶端。其巨大的咬合力，会给

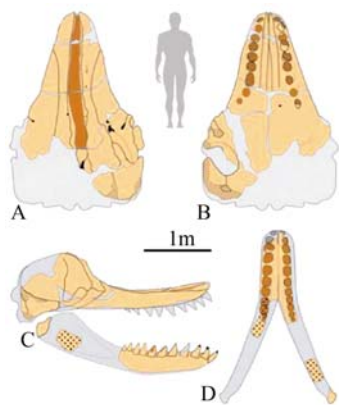


图1 梅尔维尔鲸的头骨——大得足以装下一个人

猎物造成非常深的伤口。古生物学家一直怀疑这种以吸力觅食的海洋巨兽是否存在过。发现于秘鲁皮斯科盆地（Pisco basin）的这些化石（图1）证明了它们并非传说。

朗博特说，这些身长14米的巨兽是当时海洋中的超级猎手，其猎物都是身长七八米的须鲸（图2）。梅尔维尔鲸体形与今天的逆戟鲸或杀人鲸类似，但大小是它们的三四倍。现代的抹香鲸牙齿更

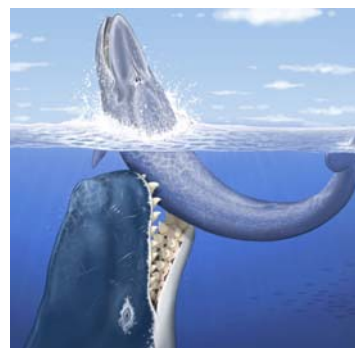


图2 梅尔维尔鲸捕食猎物想象图

小，而且主要集中于下颚——这是为适应捕食乌贼所做的改变。

（高凌云编译自2010年7月1日澳大利亚广播公司科技新闻）