

自然材料：磁单极子发现？几分可信？

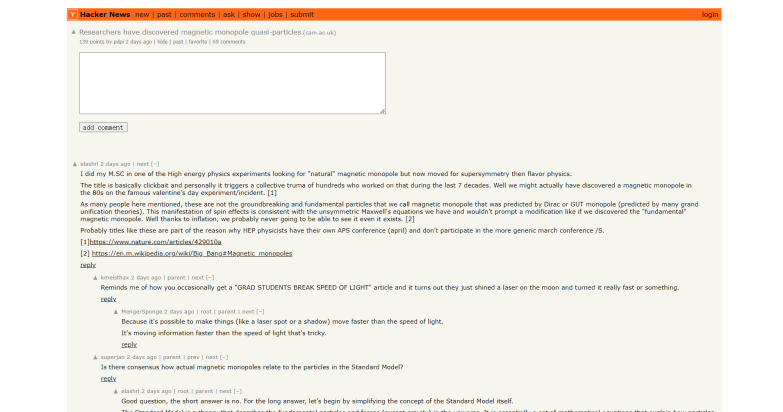
罗逸群

2025 年 5 月 17 日

2023 年 12 月 5 日，《自然·材料》（《自然》杂志子刊）发表了一篇剑桥大学工作组文章。剑桥大学新闻网页上如此写着共同作者（同时也是通讯作者）Paolo Radaelli 教授的评价：“理论上已经预测了单极子，但这是我们第一次在天然磁体中实际看到二维单极子。”¹

这篇工作一经发布便引发了广泛的讨论，从正经的学术交流网站

¹Monopoles had been predicted theoretically, but this is the first time we've actually seen a two-dimensional monopole in a naturally occurring magnet.



到各个公众号的漫天飞舞的消息

首次观测到自然发生的磁单极子；多个气候临界点可能在2030年代被打破 | 环球科学要闻

Original | 环球科学 | 环球科学 | 2023-12-05 22:56

将环球科学**设为星标**

周一至周五

第一时间掌握

最新鲜的全球科技资讯

• • • • •

• 物理学 •

首次观测到自然磁体中的磁单极子准粒子

根据麦克斯韦方程，磁性粒子只能以偶极子的形式成对出现，不存在只有“南”极或“北”极的磁单极子。但曾有理论物理学家预测了带有孤立“磁荷”的基本粒子存在，后来人们在实验室中首次观测到具有磁单极子性质的准粒子出现，不过科学家一直未能在天然材料中发现它。近日，[剑桥大学](#)的研究人员在赤铁矿（主要成分与铁锈相同）中发现了磁单极子，这是科学家首次在天然磁体中观测到磁单极子，相关研究发表于《[自然-材料](#)》（*Nature Materials*）。

如果学习过一些基本的电磁学的知识，那你一定知道自然界中不存在磁单极子。于是看起来这篇工作是个大新闻，虽然很大

可能被无法证实？或者说，我们如何理解这篇工作？

玄机出现在磁单极子的定义上。

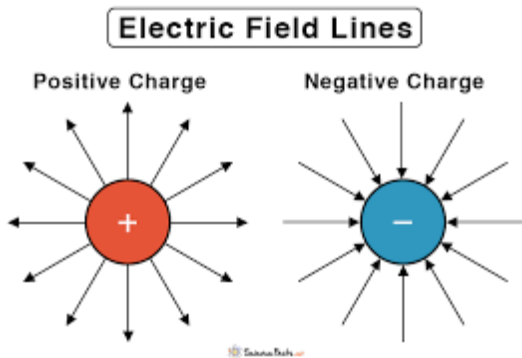
1. 在磁单极子最初的定义中，它是一个粒子。但是磁单极子的概念后来被泛化成也可以指大量粒子的集体行为，而非单个基本粒子。**物理上为了描述方便，会用准粒子 (quasi-particle) 的概念来描述大量粒子集体行为。**
2. 不存在最初定义的磁单极子意味着磁感应强度的散度为 0: $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$. 而在泛化了的磁单极子概念中，相应的公式变为了一个与 \mathbf{B} 相类似的量散度为 0.

PS: 我是一名在读物理博士，不是磁学的专家。如有错误之处欢迎讨论。

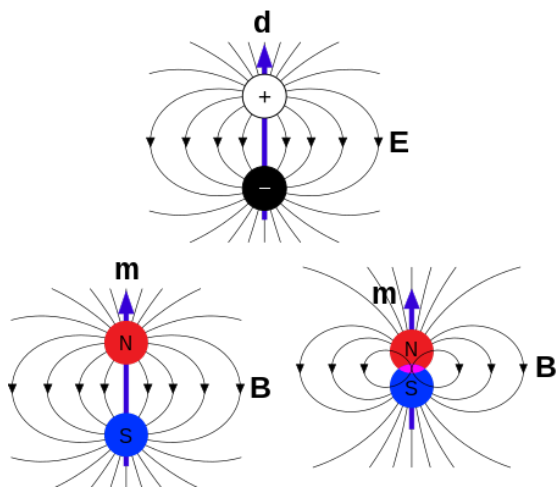
1 磁单极子背景

这个部分介绍磁单极子的背景。清楚的小伙伴可以直接跳到下一章2.

如果你接触过电磁学，那么你一定知道电场由单个可正可负的电荷形成，例如长下面这样。



而如果一对正负电荷聚集在一起，电场会长这样：



你可以想象“磁荷”形成的磁场应该类似。可是实验告诉我们，如果用磁荷的角度解释磁场，那么磁场都是由一对南北磁荷在一起组成的，如上又图所示。我们没有办法找到单个的南磁荷

或者北磁荷。这种一对磁荷叫做磁偶极子，而单个出现的磁荷则被叫做磁单极子。

磁单极子不存在，用磁感应线的语言来说，磁感应线不能从某个地方开始或者结束。它必须形成一个环，或者从无穷远来到无穷远去。

或者如果用公式描述，这个条件为麦克斯韦方程组中的一个

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (1)$$

然而，磁单极子并不存在只是实验上的结果，而并非广泛接受的基本理论预言的结果。事实上，在很多理论中，磁单极子确实存在。

狄拉克在 1931 年指出，如果磁单极子存在，那么电荷及磁荷的量子化可以被很好地解释。很多大一统模型指出在宇宙早期存在出现磁单极子的条件，只是磁单极子质量过大以致于难以被发现。

人们寻找磁单极子的努力尝试了百年，其中最著名的莫过于 1982 情人节的实验。人们发现用于探测磁单极子的线圈中有电流生成，但始终没有复现。那到底那天探测到了磁单极子吗？可能只有磁单极子自己知道了。

2 文章工作

这篇工作应用满足反作用可忽略的高灵敏矢量磁场传感需求 的金刚石量子磁力测量技术 (diamond quantum magnetometry), 探测出了赤铁矿 ($\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$, 主要成分与铁锈相同) 中的

二维拓扑反铁磁自旋涡度织构 (vorticity texture). 很多这种二维材料具有有趣的拓扑自选织构, 内部磁矩不像简单的铁磁性或者反铁磁性那样排列。进一步地, 文章指出了通过对偶关系类比的磁荷形成了包括磁单极子在内的各种集体行为。

听起来比较复杂? 下面有简单版本, 仅拎出与本文有关的主线。

如果学过一些本科普通物理电磁学的知识, 可能会碰到一种电磁对偶的解磁场题目的技巧。电荷及电场的处理无疑更为简单。于是, 为了解体系的磁场强度 \mathbf{H} , 不妨利用磁化性质 $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$ 将 (1) 式作一个变换: $\nabla \cdot \mathbf{H} = -\nabla \cdot \mathbf{M}$, 其中 \mathbf{M} 为磁化强度, 于是可将磁场强度 \mathbf{H} 类比为电场强度, 将磁化强度的负散度 $-\nabla \cdot \mathbf{M}$ 类比为电荷。人们通常称呼 $-\nabla \cdot \mathbf{M}$ 也为磁荷, 用 ρ_M 表示:

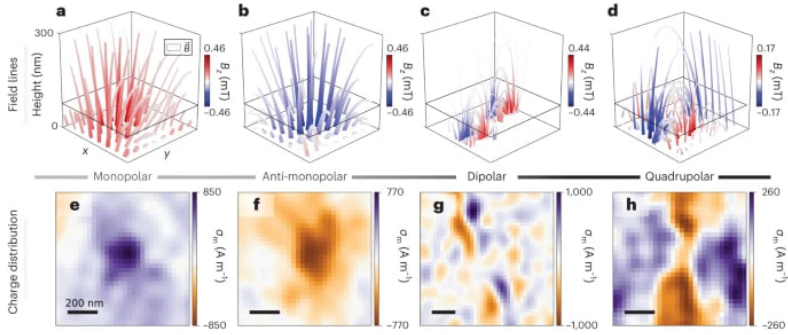
$$\rho_M = -\nabla \cdot \mathbf{M} \quad (2)$$

于是, 结合对称性, 便可以直接利用电场的结论解出体系的磁场。

没有接触过普通物理? 也问题不大。总之, 在数学上, 为了处理一些问题的方便, 人们会将介质的磁化类比为磁荷。

是的, 你没有看错! 同样的名称: 磁荷, 但却指向不同的概念, 一个是物理上的基本粒子 (下称物理的磁荷), 一个是数学上的类比 (下称数学的磁荷)。当然, 进一步的, 数学上的磁荷也有其磁单极子及磁偶极子。诡异之处就由此产生。

回到文章。这篇工作精确地测量了二维赤铁矿附近的一系列磁场, 并且反推出其中的数学的磁荷分布, 具体所示。



在一些织构中，出现了基本只有一种数学的磁荷存在的情况，例如上 a 图（只有正磁荷）及 b 图（只有负磁荷）。

当然，对于要求严格的小伙伴，也可以从公式理解上图的含义。对于这个体系

$$B_z = \alpha * \nabla \cdot \mathbf{M}_{xy} \quad (3)$$

$$M_z = 0, \quad (4)$$

其中 \mathbf{B} 为磁感应强度， \mathbf{M} 为磁化强度， $*$ 代表卷积， α 可以当表征 \mathbf{B} 与 \mathbf{M} 相对强度的系数。于是 z 方向磁感应强度 B_z 直接与磁化强度 \mathbf{M} 的散度 $\nabla \cdot \mathbf{M}$ 联系。该实验探测到了非 0 的 B_z ，意味着 $\nabla \cdot \mathbf{M}_{xy} \neq 0$ 。再结合 (2) 式，便可得到数学上的磁荷不为 0。

当然，为了直观的理解数学上的磁荷，它的微观机制是一种半子 (meron)。半子，如前述也可看出，是大量粒子的集体行为，而非一种基本粒子。

3 最后的讨论

正如前所说，相关的概念发生了泛化，文章所用的数学的磁荷已经不再是物理的磁荷。

这里的磁单极子是半子。它是一种准粒子，是大量粒子的某种集体行为，而不是一种基本粒子。

同时，这篇文章也没有违反 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ 。文章指出散度为 0 的只是一个相关的物理量磁化强度 \mathbf{M} ，而非 \mathbf{B} 本身。事实上，这篇工作自己也指出，磁感应强度 \mathbf{B} 的散度仍然为 0。或者换句话说，文章能验证的是数学的磁荷存在磁单极子，而并非物理的磁荷存在磁单极子。

于是，显然地，这篇工作对于基础理论也没有期望的洞见。

事实上，之前也有其他关于作为准粒子的磁单极子存在的工作，其中最有名的或许是自旋冰，以及 旋量波色-爱因斯坦凝聚 (spinor Bose-Einstein condensate)。

但这篇文章仍然有其价值。就像它摘要里说的，它讲高精度的金刚石量子磁力探测技术应用的二维赤铁矿上，并且发现了作为准粒子的二维磁单极子。

最后的一点碎碎念。凝聚态领域经常会有借用听起来很玄幻的概念的情况... 我不知道其他领域如何，但这在强调类比的同时使得概念变得容易混淆。当然，借助现有玄幻的概念肯定是炒作自己工作的好方法。

第一次写科普文。真心不容易。或许对于本科的同学，看我的科普文章觉得原文工作非常平凡，但是各种文章总是会借用玄幻的写作提升自己的逼格，就像人为设置的原本不必要的谜团，需要你自己化简开。同时，物理的文章，一个不同的小领域就需

要重新理解大量概念。

感谢读到最后！