

技术新突破：用量子学打造小型化电感器

吴成勋

IBM Thomas J. Watson 研究中心

电感器等电子器件很难小型化，因为它们的有效性尺寸成正比。基于量子力学的方法可以克服这个问题，提供许多潜在的应用。

电感器是电路的基本组成部分之一，它提供电感（与电流变化相反）。传统的电感器由缠绕在中心磁芯上的导线线圈组成。不幸的是，由于这种器件的电感与它们的横截面积成正比，因此难以在保持合理高电感的同时将它们小型化。Yokouchi 等人在《自然》杂志中报告了一种量子机械电感器，被称为“涌现电感器 (emergent inductor)”，它利用由电流驱动的动力学所产生的电场，来观察磁体中复杂的磁矩（自旋）结构。值得注意的是，该器件的电感与面积成反比，并且不需要线圈或铁芯，这是实际应用中非常需要的特性。

涌现 (emergent) 电磁是指这样的电磁，其中所产生的电磁通量由量子力学中称为贝里相的概念来描述。表现出电磁力的物理系统包括具有非共线自旋结构的磁系统，从而磁化方向随自旋位置而变化。当电子沿着这种结构流动时，它们可以与自旋的局部排列紧密耦合，并获得贝里相。然后，该相充当有效的电磁场，被称为涌现 (emergent) 磁场。

例如，当电子流过所谓的拓扑非共线自旋结构时，就会出现一个新的磁场，这些结构具有特殊的拓扑结构，使它们对小畸变或微扰具有鲁棒性。产生的磁场会带来电压测量中的额外信号（称为霍尔测量），该信号是由拓扑霍尔效应物理现象引起的。考虑到此类自旋结构的复杂性，此电压信号提供了一种探索广泛材料中拓扑磁态的便捷方法。

相比之下，非共线自旋结构的动力学会产生电场。例如，当磁场驱动畴壁 (domain wall) 的运动时就会产生这样的磁场，畴壁是磁性材料中具有不同磁化方向的畴之间的边界。在 2019 年，理论证明非共线自旋结构的电流驱动动力学也可能产生紧急电场。更引人注目的是，据预

测该磁场将产生与电流密度变化率成比例的电感。由于该密度与器件的截面积成反比，因此不同于普通电感器，它的电感将随面积的减小而增加（图 1）。

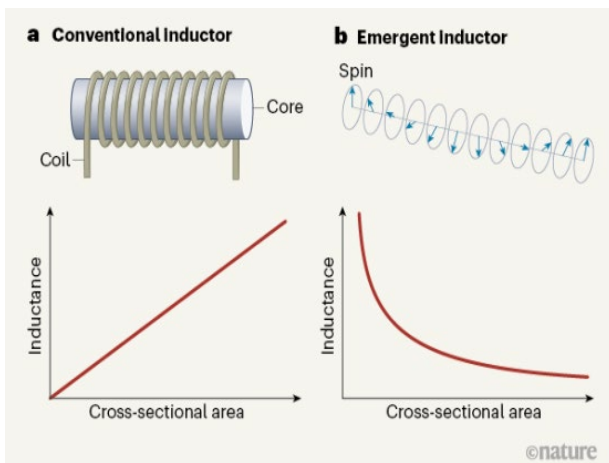
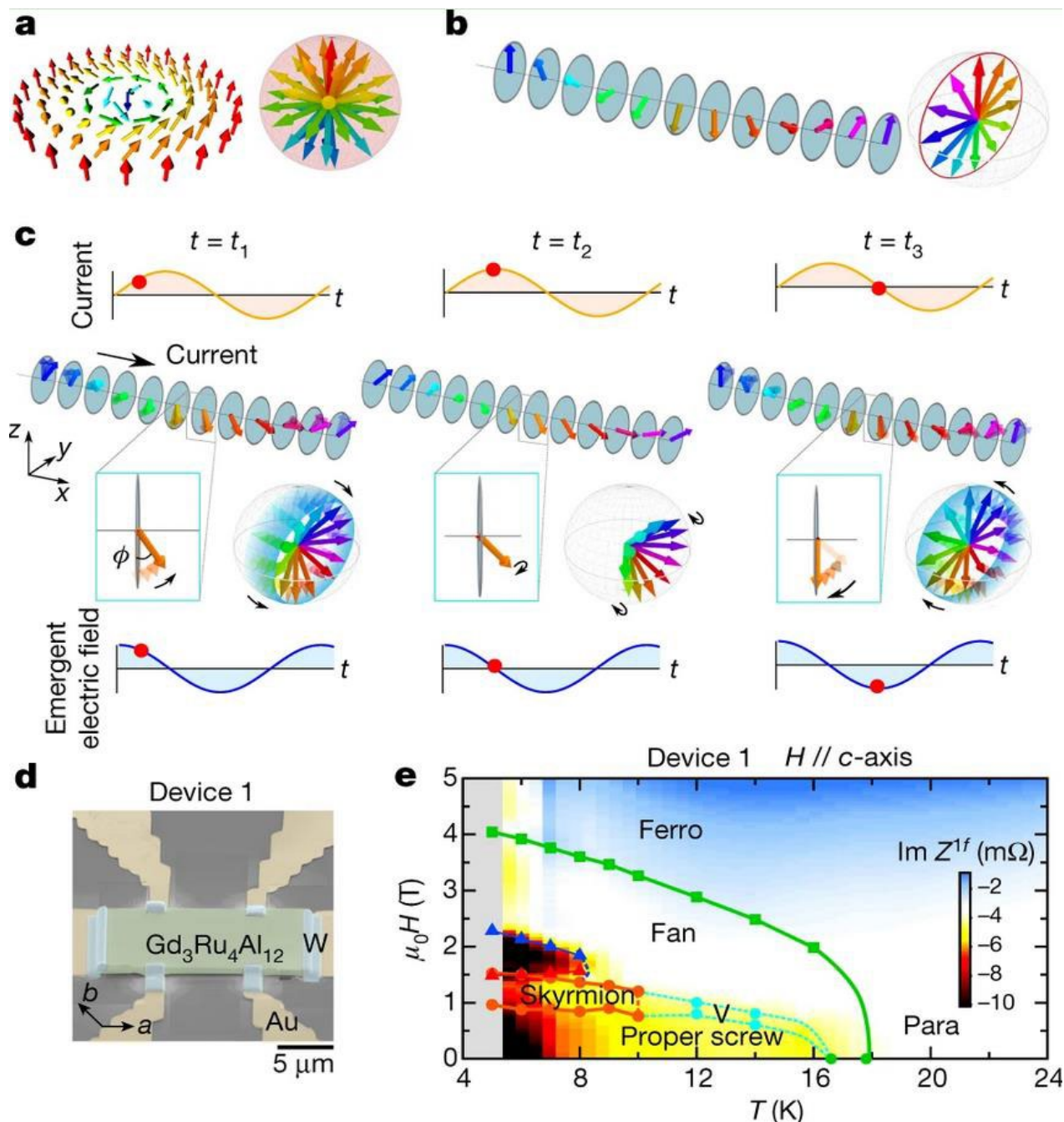


图 1. 常规电感和涌现电感。a. 常规电感器包括缠绕在中心磁芯上的导线线圈，并且具有与其截面积成比例的电感。b. Yokouchi 等人研发出一种“涌现电感器”，它使用磁体中复杂的磁矩（自旋）结构。

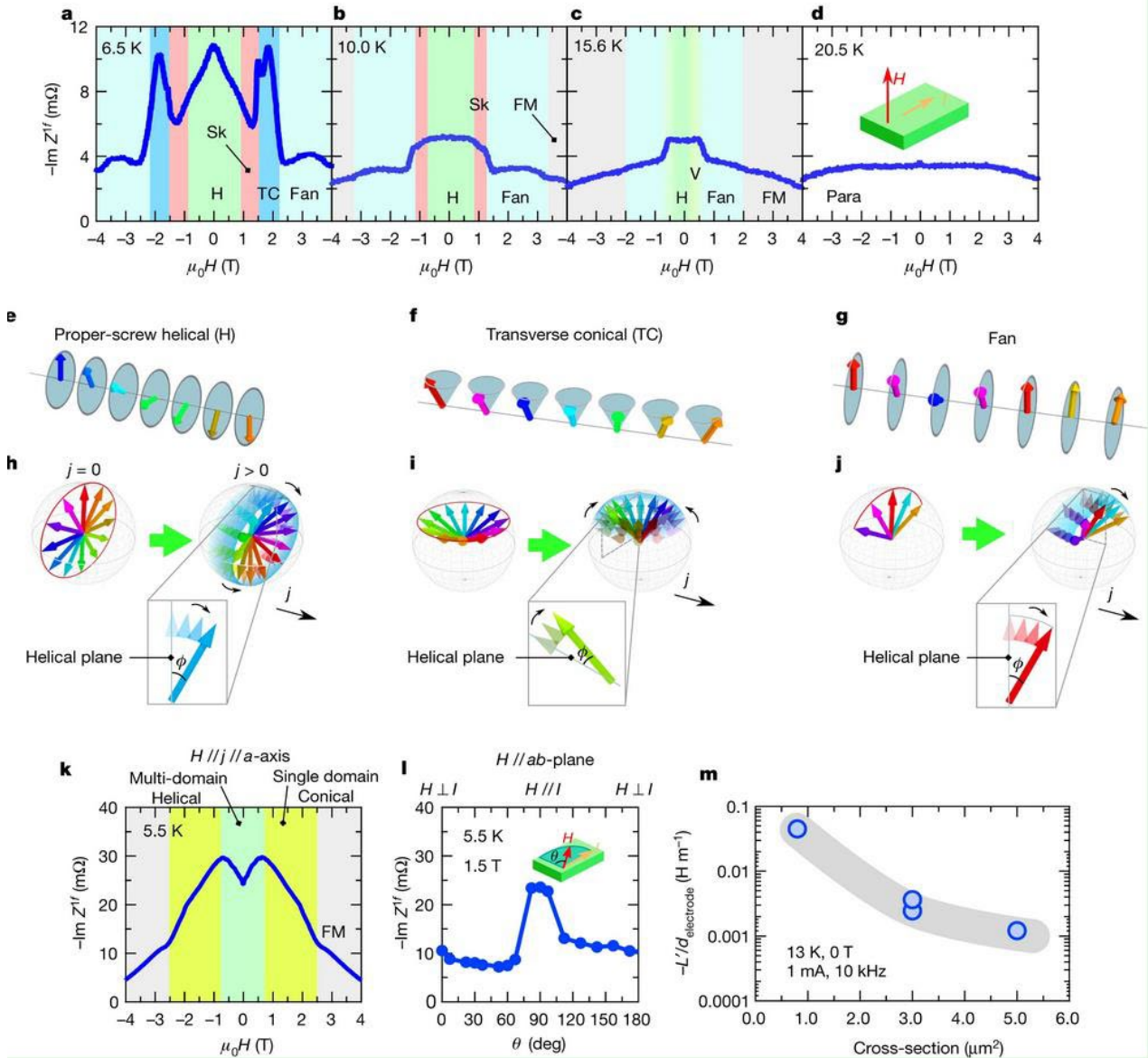
Yokouchi 及其同事使用了一种由 Gd₃Ru₄Al₁₂ (钆、钌、铝) 制成的微米级磁体，该磁体包含各种非共线的自旋结构，例如螺旋、圆锥形和扇形结构。他们之所以选择这种材料，是因为它的磁各向异性很弱（磁特性的方向依赖性），并且它的自旋结构的螺距很短（空间周期性）。在弱的磁各向异性下，自旋可以相对自由地运动，并且出现的电感与节距长度成反比。

作者使用一种所谓锁定检测的技术研究了其电感器的涌现电感。他们通过改变施加的磁场的温度和强度来控制设备的自旋结构状态，并对不同状态进行测量。他们还改变了设备的长度，宽度和厚度，以确认可重复性，并排除了观察到的信号是由外部因素（例如接触电极）引起的可能性。



最惊人的是, Yokouchi 等人观察到一个大的涌出电感 (约 -400 纳亨), 与传统电感器相当, 但涌现电感的体积约为传统电感的百万分之一。通过改变器件的自旋结构状态, 作者阐明了出现的电感与自旋结构的非共线性和动力学之间的对应关系。前面提到的应急电感机制很好地解释了这种对应关系。

例如, Yokouchi 及其同事发现, 螺旋形自旋结构的电流驱动动力学是产生大电感的原因。相反, 扇形结构产生的电感要低得多, 因为它们的局部角度变化远小于其他结构。此外, 作者发现, 通过控制自旋结构运动的方向, 可以在正负之间切换正激电感的符号, 这与普通电感器形成鲜明对比。



Yokouchi 和同事的工作很重要, 原因有几个。首先, 它提供了一种可扩展的方法来开发小型化的高电感电感器, 该电感器可用于许多微米或纳米级的电子设备和集成电路。这种电感器的设计也将比常规电感器简单得多, 因为不需要线圈和铁芯。其次, 这项工作为构建高效的混合自旋电子电路和系统提供了令人兴奋的机会。第三, 它证明了量子力学中的一个基本概念(贝里相)可以转化成实际应用。但是, 这种涌现电感的实际应用还需要进一步突破。一个主要的挑战是要开发一种在室温下工作的电感器, 而

当前器件的工作稳定约为 10 开尔文。克服这一局限性将需要对潜在材料进行广泛的探索, 特别是要找到一种磁铁, 其中短节距的非共线自旋结构可以在室温下轻松稳定和操纵。同时, 开发将这些电感器添加到集成电路的方案也必不可少。尽管如此, Yokouchi 等人已经做出了一项重要发现, 这可能会为未来电子器件、电路和系统方面的工程工作带来新的突破, 同时在量子力学世界和现代电子学之间建立起令人鼓舞的桥梁。