

## 表面原子的自旋

(清华大学 季帅华 编译自 Andreas Heinrich. *Physics Today*, 2015, (3): 42)

原子物理和固体物理作为物理学的两个分支几乎是平行发展的。原子物理始于20世纪20年代，主要致力于理解气相中原子的光学和磁学性质；而固体物理是在研究材料纯化的过程中成长起来的，并导致了今天的电子器件。这两个领域实验和理论的概念通常大相径庭。如前者通过量子自旋态来描述磁性，而后者是通过能带的形成来解释固体的磁性。

周期表中半数元素具有奇数个电子，所以一半元素在气相中具有磁性，然而磁性的固体却很稀少。通常只有过渡族金属和稀土金属具有磁性。20世纪50和60年代，科学家们研究了磁性杂质在非磁性绝缘体中的电子自旋共振效应。近年来，自旋共振研究又恢复了生机，主要得益于金刚石中的氮原子—空位缺陷在量子计算和探测方面的潜在应用价值。

实验物理学家已经通过平面隧道结来研究磁性原子，并且观察到小偏压电流电压曲线偏离了欧姆定律。然而，隧道结中磁性原子位置不可控和不同原子局域环境的变化使得要研究清楚这个问题变得异常困难。

### 寻找单个自旋

1981年，Gerd Binnig 和 Heinrich Rohrer 发明了扫描隧道显微镜 (STM)，并因此获得了1986年的诺贝尔物理学奖。STM可以局域地将电子通过单个原子，是研究隧道结中单个磁性原子性质的最重要的工具。

STM发明5年之后，Donald Eigler 成功地将低温物理实验技术应用到表面物理需要的超高真空环境中，并且制造了第一台能够在液氦温度下工作的STM。Eigler用低温STM完成两项伟大的突破性工作：(1)精确移动单个原子，在原子尺度上构筑人工结构；(2)低温下，在单个原子上测量高能量分辨率的电导谱。

永磁体的磁性主要来自未配对的电子自旋。没有磁场时，量子自旋的能级是简并的，如气相原子的自旋。当外加磁场时，自旋会发生塞曼劈裂。在固体中或者分子中，自旋的劈裂会受到局域环境的影响而改变。

### 磁性测量

STM可以测量出单个原子的塞曼劈裂效应吗？为了达到必要的能量分辨率，粗略估算表明，实验需要达到几个特斯拉的磁场和低于1 K的温度。低温STM也需要进一步

改造以保证系统在高磁场下的稳定性。在极低温和高磁场下，大部分材料会显示部分磁性，为了防止和周围超导磁体耦合，所以大量的工作是用磁性较少的材料去替换原有STM的组件。1998年10月份，Andreas Heinrich 加入了 Eigler 的研究组，接受了这个具有挑战性的工作。

通过5年的努力，Andreas和他的同事发展了能够工作在0.5 K和7 T下的STM，并成功地测量了表面单个磁性原子的塞曼劈裂效应。在首次实验中，他们将Mn原子放在非常薄的氧化铝薄膜上，以阻止原子的磁矩和铜衬底中大量的传导电子相互混合。图1描述了他们工作中自旋激发谱的工作机理。由于表面Mn原子之间距离较大，而整个隧穿电流流过了单个Mn原子，磁性的信号变得出人意料得强。其中原子自旋态翻转的非弹性隧穿电流大约达到了总电流的25%。

另一种STM磁性测量的方法是，在针尖尖端粘上磁性原子，并在磁场下测量微分电导。这种方法的中心思想是，隧穿结的电导会随着隧穿结两边磁性材料的相对自旋方向而改变，即隧穿磁电阻效应。这种方法是大家所知的自旋极化扫描隧道显微镜。上世纪90年代，Roland Wiesendanger 和他在汉堡大学的研究组第一次应用了这种方法，研究了体材料和薄膜样品的磁性。后来，Heinrich的研究组在2002年提出了单个自旋的自旋激发谱。

从这些单个自旋隧穿实验中学到了什么？首先，尽管有些磁性原子

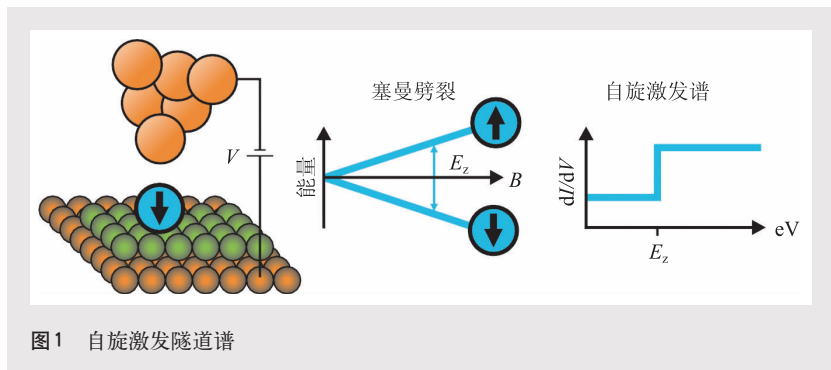


图1 自旋激发隧道谱

在金属表面，由于和衬底电子之间的关联效应，显示出复杂的电导变化，但是在可控的隧道结中并没有观察到零偏压反常。平面隧道结中零偏压反常可能是宏观隧道结中各种不同的导电通道在空间上平均的效果。

其次，这些实验也揭示了从固体的磁性到原子尺度上量子自旋的转变是复杂而丰富的。直到今天，单个磁性原子或者磁性团簇在隧道结中的自旋特性还没有被完全理解。尽管如此，可控的单个磁性原子和纳米结构简化了隧道结，使得人们对它们的电子输运特性有了深入的理解。

### 自旋链

单原子STM隧道谱和精确原子操纵相结合，使得人们可以在原子尺度上研究人工纳米结构，如一维自旋链，逻辑门和自旋存储器等。自旋链物理通常研究具有很强各向异性的体材料，这种各向异性会造成它们的磁性等效于一维体系。但是表面原子组成的自旋链允许精确控制：每个自旋都可以被制备和翻转，自旋的相互作用强度(交换能)可以被直接测量。

图2(a)显示的是由STM在薄绝缘层上组装的铁原子链。当非磁性针尖去扫描，每个铁原子看上去都是全同的一个小的凸起。但是当用自旋极化的针尖扫描时，其中4个原子显示得矮一些，而其余4个显示得高一些。这是因为，当自旋极化针尖沿着原子链移动，遇到不同自旋方向的原子时，隧道电流会发生变化。

反铁磁的原子链表现出两个状态。其中一个，最左边的原子显示自旋向上的态(较高)，相邻的原子自旋向下(较矮)，剩下原子的自旋按照反铁磁顺序上下交替排列。原子链的另一个状态具有相反的自旋排列顺序。这两个具有镜像关系的态经常被称为奈尔态。考虑到原子

链中每个原子自旋指向上或者下，可以认为它是经典的。在任何时候，一个经典的自旋链会处在两个简并自旋态的其中一个。

然而在量子世界，一个自旋可以同时处在向上和向下的两个态，更准确的说是两者的叠加态。由10个Mn原子组成的直线原子链(图2(b))是这样-一个例子。和铁原子链不同，它是处在量子相干的基态。这个自旋链的总自旋 $S_T$ 和磁化强度 $m_s$ 都是零，这说明链是没有磁性的。扫描隧道谱证实了它的量子相干性。自旋链被激发到三重态时，自旋链作为一个整体，净自旋 $S_T$ 为1。自旋激发所需的能量随着原子链的长度变化，并且在磁场下劈裂成3个不同的激发能量(三重态劈裂)。

这两种自旋链的区别是，铁原子的自旋有很强的空间轴取向性，即有易磁化轴，而Mn原子几乎是各向同性的。因此Mn原子链几乎符合理想的海森伯自旋相互作用模型，而铁原子链遵循伊辛模型。

自旋链的理论模拟是当前一个活跃的领域。尽管Fe原子链和Mn原子链通常都放置在一层绝缘层上，但是衬底的导电电子仍然会破坏相干性，而这些细节都还没有解决。

### 器件和未来的方向

原子尺度上的自旋链或者自旋阵

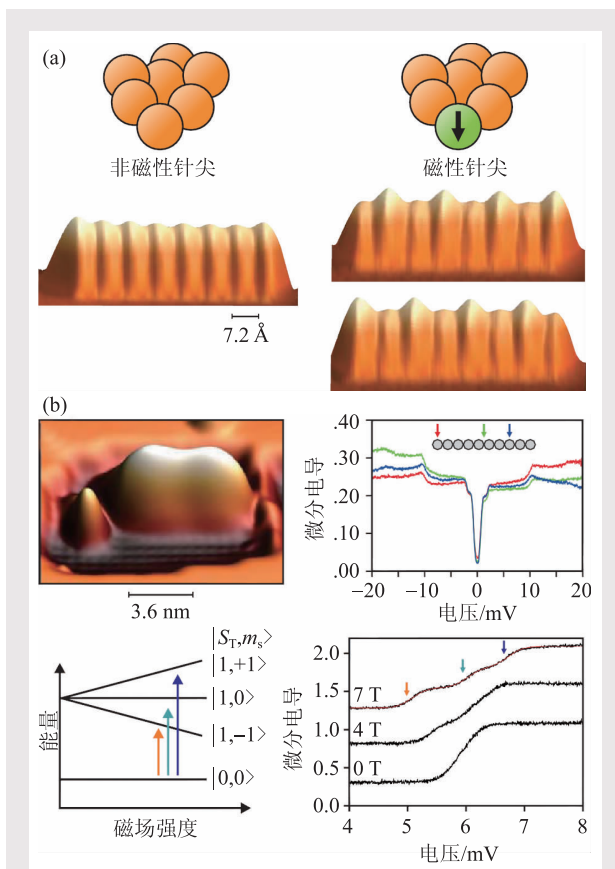


图2 (a)经典反铁磁自旋链；(b)量子反铁磁自旋链

列，可以在磁性数据存储方面得到应用。这些原子链有两个同样稳定的基态，其中一个可以作为0，另一个作为1。通过加短电压脉冲，STM可以转换原子链的记录状态。最近，Wiesendanger研究组在原子尺度上还漂亮地实现了原子自旋链的逻辑操作。

实验室在原子尺度的数据存储和计算方面的成就揭示了器件小型化是极具前景和诱惑力的。许多科学家都努力想利用量子效应来实现现代计算机的运算过程。不同尺度的方案是否可行有待更多的工作，但是毫无疑问，在原子尺度上控制物质将有助深入理解自然界的运行机理。同时固体中丰富的研究内容，例如自旋冰中发现的复杂体系、电子关联材料和其他体系也将毫无疑问继续启迪人们发明新型器件。