

# 中美团队联手首次实现分子、原子之间量子纠缠

传统的信息处理器会将信息在不同物理载体中流转，这些载体可以是伴随计算机科学一路走来的各种存储设备，例如磁盘、光盘以及闪存等等。

同样的，量子信息技术也涉及信息在不同载体之间的操作。只不过承载量子信息的载体就有些不同了，科学家们通常采用量子系统承载信息，而量子系统的不同量子态就是信息的最终表达方式。

最简单的量子系统是一个量子比特 (qubit)，一般有两个状态——“0”和“1”，但是不同于经典数位状态只编码两种信息，一个二状态量子比特实际上可在任何时间为两个状态的叠加态，也就是说可以编码很多信息，而这也是量子比特能够承载更多信息的缘由。

就最新的发展来看，由单原子和单分子构成的复合型量子纠缠系统已经诞生，对未来考虑使用分子进行量子信息处理产生推动作用。

这项工作的论文在线发表于学术期刊《Nature》上，由中美科学家联合完成，题为《Quantum entanglement between an atom and a molecule》。论文第一作者与通讯作者、中国科学技术大学物理学院近代物理系教授林毅恒，曾师从2012年诺贝尔物理学奖得主David Wineland教授，并于美国国家标准技术研究所担任访问研究员。

## 首次原子和分子之间的量子纠缠

文中不但介绍了迄今为止最小

的量子系统——单原子量子比特和单分子量子比特的制作，并介绍了如何在其中建立量子纠缠。最终实验检测的结果显示，该系统的量子纠缠可靠性已经超过阈值，着实让人眼前一亮。

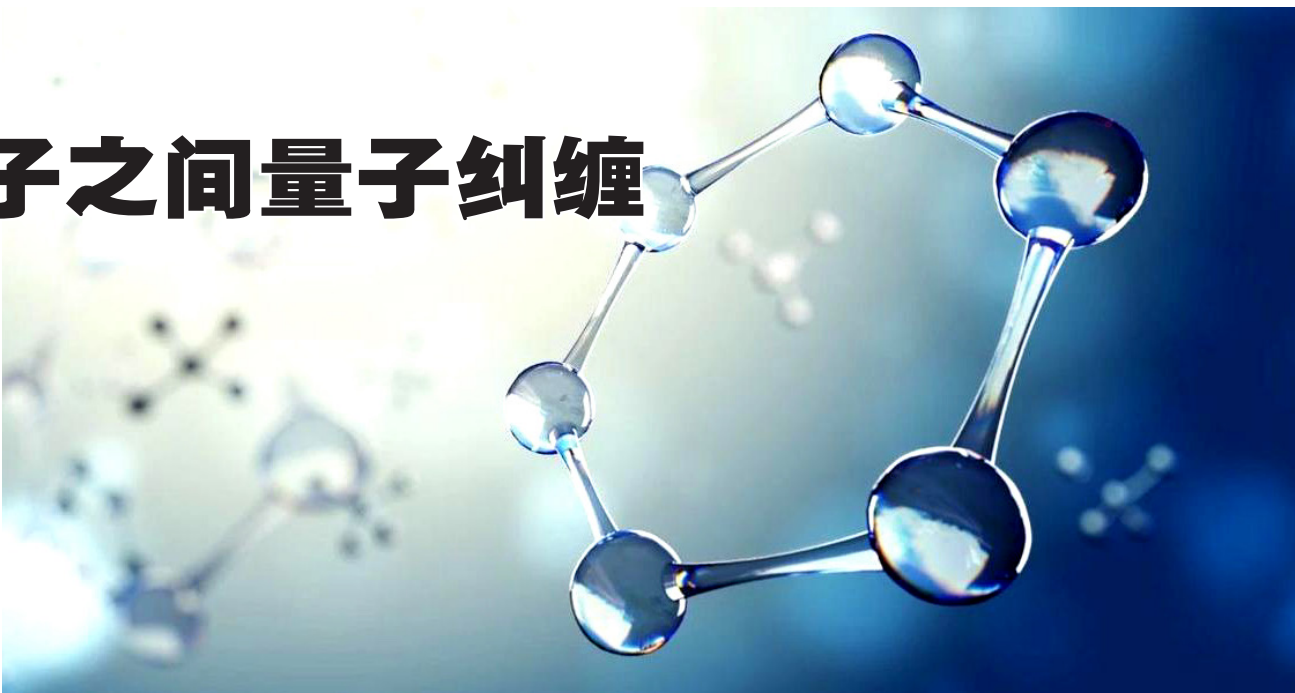
以单原子和单分子作为量子系统，其实存在很大难度和风险，更别说还要在其中建立高可靠性的量子纠缠了。

那研究团队为何还想要采用这样的量子系统？

原因在于，若采用单原子或单分子作为量子系统，能够在其中进行高频率范围的信息编码，其量子比特频率的范围能从几千赫兹到几百太赫兹。

物理层面上来说，单原子或者单分子量子比特呈现的频率与其量子态的跃迁 (transition) 有关。在高中物理课本上的氢原子光谱是氢原子内的电子在不同能级跃迁时发射或吸收不同波长、能量之光子而得到的光谱，根据频率与波长的公式我们不难算出，其频率在几百太赫兹的范围。也就是说，仅仅靠单原子的跃迁谱线并不足以拓展量子比特的频率范围。

研究团队别出心裁地将单分子的震动和转动自由度加入“战局”，具体来说将引入“超精细跃迁” (hyperfine transitions，几个G赫兹)，“转动跃迁” (rotational transitions，几个太赫兹) 以及“分子中电子振动跃迁” (vibrational and electronic transitions，几百个太赫兹)，成功将量子比特的频率范围变宽。



他们采用 Ca + 离子和 CaH + 离子作为量子比特，并在 Ca + 离子的量子态和 CaH + 离子转动跃迁之间建立量子纠缠。这就形成了一个复合的量子纠缠系统，除了有广阔量子比特频率范围的优点之外，还能在量子纠缠的两侧得到不同的量子比特频率，也就是存在两侧信号不一样的性质，从而为制造特殊的量子器件和量子传感器提供可能。

举个最简单的例子，我们熟悉的三极管或者放大器就是拥有输入输出端信号幅值不同这样的性质，并且有着十分广泛的应用，同理，传感器的原理也是将声、光、热、力等信号转化成为电信号。

### 量子信息技术新方向

量子纠缠建立的本质就是建立两个量子系统之间的联系，而单原子和单分子之间应该如何建立联系？

团队找到最直接的方式——库

仑力。

两个正离子建立量子比特，联系两个正离子最普通的方式就是它们之间的库仑力，表现为斥力。具体而言，研究团队先将 Ca + 离子和 CaH + 离子用 Pauli 离子势阱共同限制在一起，两个离子之间的库仑力就会将它们各自的运动联系在一起，一旦一个量子比特的状态发生改变，那么另一个的量子状态也会发生改变。

接着，研究团队进行了量子纠缠的验证。他们在将 Ca + 离子的量子态和 CaH + 离子的量子态初始变化之后，采用 729nm 的激光改变 Ca + 离子的量子态，并用特殊方式读取 CaH + 离子的量子态变化。

结果显示，CaH + 离子的量子态发生了 13.4kHz 和 855GHz 的跃迁变化，并且相应取得了 0.87 和 0.76 的高可靠性，表明量子纠缠已经成功建立。

此外，值得一提的是，研究团

队在建立量子比特和量子纠缠中，采用了如今最先进的激光冷却、俘获以及原子分子量子态可控技术，并都取得相应突破。

团队在文中还提到，未来的研究如果要进一步提高量子纠缠可靠性，可以从优化基态冷却以及减少外界环境微扰的角度去开展工作，例如提高真空度及减小外加磁场的波动等等。

团队实现了一个复合型的量子纠缠系统，体现了其在量子信息技术中的尖端技术的成熟把控，也将对于未来的量子信息科学研究、量子传感器及相关器件研究、基础和应用物理研究，以及可控量子化学研究有重要意义。

将原子和分子做成量子比特，并在它们之间建立量子纠缠确实开创了量子信息技术的又一个研究方向，也许会成为该领域研究的新热点。

(麻省)

# 智能分子提升储存能力或成未来计算机关键

近日，研究人员发现了一种单分子“开关”，它具有和晶体管相似的特性，并且具有提供存储二进制信息 (如经典计算中使用的 1 和 0) 的潜力。该分子的大小约为 5 平方纳米。这意味着，仅在一根人的头发的横截面上就可以安装超过 10 亿个分子。研究人员认为，该分子及其他类似分子可以提供 250 兆比特每平方英寸的信息密度，这大约是目下硬盘存储密度的 100 倍。虽然研究人员并不预期他们发现的特殊分子会被用于真正的硬盘，但该项研究是一个重要的概念证明，它使我们更接近真正的分子电子学的崭新世界。

在该研究中，研究人员使用了一种有机盐分子，通过输入较小的电脉冲，可使其在亮色和暗色之间切换，从而提供二进制信息。最重要的是，这些信息可以在室温 and 正常气压下写入、读取和擦除。这些都是分子电子学在计算存储设备中实际应用的重要特征。在此之前，类似应用的分子电子学研究大多是在真空和极低的温度下进行的。研究人员表示：“只有同时具备所有期望特性的分子才有可能用于分子存储器。除了能在室温条件下进行双向切换，它还必须能保持明暗状态的长期稳定，同时必须能自发地形成只有一个分子厚的高度有序层，即自组装。我们所采用的分子就是满足所有以上特性的例子。”

在实验中，研究人员在扫描隧道显微镜中使用微弱的电脉冲，将单个分子进行从明到暗的切换。他们还能在切换明暗后，读取和擦除这些信息。在切换过程中，电脉冲改变了有机盐中的阳离子和阴离子的堆叠方式，不同的堆叠方式会使分子呈现出亮色或暗色的亮度变化。除了人为切换之外，分子的自发排序也很关键：通过自组装，分子可以自发地形成一个高度有序的结构 (二维晶体)，而不像目前电子学应用那样需要昂贵的制造工具。研究人员表示：“通过化学，我们能够从巨大数量的分子中制造出具有复杂功能和原子级精度的分子，因此，分子电子学将具有非常广阔的前景。”

(刘或宽)

# 在火星上，我们能种哪些菜？

为了研究人类移民火星，美国维拉诺瓦大学天体生物学的学生开始了“火星花园项目”的研究，该项目旨在研究哪些植物和蔬菜可以在富含铁的火星模拟土壤 (MSS) 中生长。

流行病在未来可能会越来越普遍，而人类的身体可能会对它们毫无抵抗力。此外，地球还有可能面临其他灾难性的危险，如小行星或彗星的撞击、全球性核武器或生化武器战争，以及全球变暖带来的长期影响。为了减轻这些灾难对人类的影响，我们可能需要离开地球，前往别的星球如火星。

从过去到现在，地球的飞行器去火星最基本的原因是，探索和寻找生命迹象。此外，当地球上发生罕见的毁灭性灾难时，火星还能对人类提供安全的避难所。去往火星并非不切实际的想象，美国国家航空航天局 (NASA) 受命要在 2033 年前要将人类送上火星，目前 NASA 正在研究如何在这颗红色星球上建造人类居住地。SpaceX 也在 2016 年公开了在火星上建造的居住地蓝图，并提出建造高容量的运载火箭。这一任务分为两阶段，能在 2026 年前将人类送上火星。

为了研究人类移民火星，维拉诺瓦大学天体生物学的学生开始了“火星花园项目”的研究，该项目旨在研究哪些植物和蔬菜可以在富含铁的火星模拟土壤 (MSS) 中生长。从 2017 年项目开始以来，他们已经对超过 45 种不同的植物进行了实验。考虑到他们都是大学生，实验的植物还包括了啤酒花和大麦。

他们还在相同的环境下种植盆栽植物，作为对照组。模拟火星土壤大部分来自于莫哈韦沙漠 (Mojave Desert) 的火山岩。根据 NASA 对火星样本的化学分析，这种模拟火星土壤 (MSS) 的密度会更大。此外，真正的火星表层土含有对人类有害的高氯酸盐，因此，如果去火星，我们在使用土壤之前，必须将其中的这种化合物清除掉。另外，火星表面的太阳光照强度更弱，会影响植物的生长。因此，维拉诺瓦大学的学生考虑了尽可能多的变量，并采取了一系列正确的措施来复制火星温室的条件。他们的研究工作都是为了回答这个问题：植物能在较弱的光照强度下，在火星土壤中生长吗？

在回答这个问题之前，让我们先来看看火星的全景图。可以肯定地说，火星的环境并不宜居，总体来看，火星很小 (约为地球质量的 1/10)、很寒冷 (平均温度为 -50°C) 而且很荒凉。它的大气层非常稀薄，密度只有地球的 1/90 且富含二氧化碳。火星距太阳大约 2.28 亿千米 (而地球距太阳最远为 1.521 亿千米)，这意味着火星表面最高的光照强度只有地球表面的 43%。然而，较弱的光照强

度或许是一件好事，在火星大气中，二氧化碳和氮气的占比分别为 95% 和 2.6%，但其大气中没有臭氧，因此无法阻挡有害的紫外线辐射。

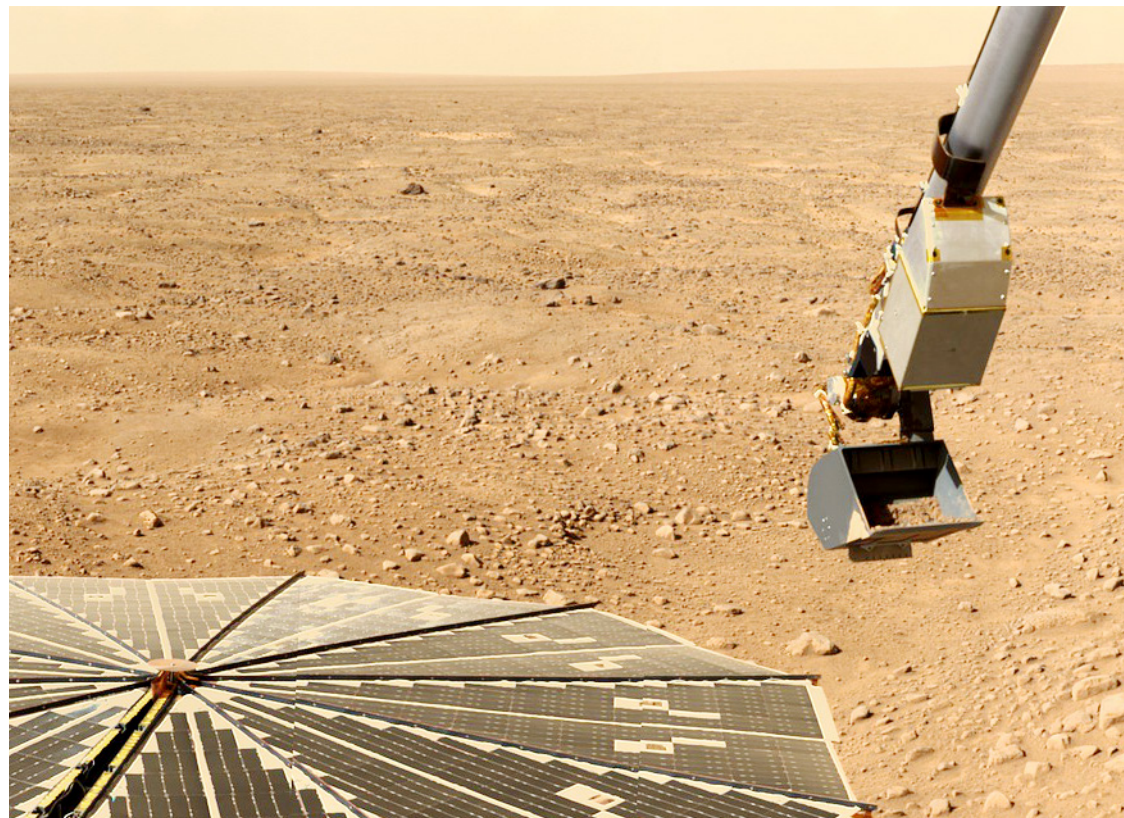
数十亿年前，火星的环境更加宜居，有海洋、温和的气候，很可能还存在生命。但自那以后，火星逐渐失去了大部分的大气和水资源。目前，火星的表面已经没有水了，只有一些水 (或冰层) 存在于地表之下和两极区域。在这些苛刻的条件下，所有植物都必须种植在加热、加压的火星温室中，还需要补充关键的空气、湿度和水分。

在温室实验中，这些大学生通过大量的努力，创造了一个既适合植物生长又类似于火星温室的环境。例如，他们确保植物接受到与在火星表面大致相当的光照条件。此外，这些学生还尝试了用水培法种植一些植物。他们发现可通过两种措施提高种植的成功率：使用多波长的 LED 灯增加植物的光照强度，以及混入盆栽土或蚯蚓粪让模拟火星土壤更加疏松。

基于上述的环境条件，学生们可以将一些蔬菜排除在外。例如，火星上较弱的光照不利于需要充足阳光的植物生长，包括西红柿、豆科植物、玉米及许多根茎植物。胡萝卜也不符合要求，因为它们在粘土状的模拟火星土壤中容易发育不良，土豆在模拟火星土壤和较弱的光照条件下长势较差，但红薯长势好一些。

另外，学生们发现，蒲公英可以在火星上茂盛生长，而且这种植物有许多优点：它们生长速度很快，每个部分都是可食用的，而且有很高的营养价值。其它长势较好的植物还包括微型绿植、生菜、芝麻菜、菠菜、豌豆、大蒜、紫甘蓝和洋葱。

这颗星球并不是我们天然的家园，因此在那里种植食物将会是十分复杂的挑战。然而，这也并非不可能，而且能在如此遥远的地方实现人类的食物供给，将是一件十分令人欣慰的事。当然，能够种植啤酒花和大麦也不是什么坏事。(辛文)



# 俄科学家论证硅基光电子学中离子注入的巨大前景

| 郑发松

近日，俄罗斯罗巴切夫斯基大学利用硅离子辐照硅样品的表面层，然后再对其进行退火处理，在硅表面层中获得高浓度的位错；最终，引入位错的硅在外部激发下发射波长接近 1.5 微米的光。为了解决位错相关光致发光器件的发光热稳定性差的问题，研究人员再进行掺杂硼离子，最终发光热稳定性得到了较大改善。该项研究为研制高性能的硅基光发射器提供了参考。

硅是电子工程中最重要材料之一。硅基光电子在现代信息和计算技术中扮演着关键角色，其应用领域包括：计算机、通信、航天、生物医学和机器人等。俄罗斯罗巴切夫斯基大学物理与技术研究所实验室主任阿列克谢·米哈伊洛夫 (Alexey Mikhaylov) 表示，传统集成电路运行速度提升的主要障碍是电信号在金属互连线路中的传播速度受到限制。因此，为了克服这一限制，需要用光波导代替金属互连线，使传统电子学向光电子学过渡，而在光电子学中，有源元件是光发射器和接收器，而不是晶体管。

硅基器件作为光接收器表现出了优异的性能，但与三五族半导体器件 (注) 不同，由于硅具有间接带隙，因此这类器件作为光发射器时的性能受限。严格意义上讲，根据量子力学原理，硅基光发射器电子结构的这一特征阻碍了外部激发下的光发射 (发光)。罗巴切夫斯基大学首席研究员戴维·泰特鲍姆 (David Tettelbaum) 教授指出，在光电子学发展的新阶段丢弃硅是非常不可取的，因为丢弃硅就相当于抛弃了一种用于大规模生产集成电路最完美的技术方案。如果利用三五族材料来制作半导体器件，这将大幅增加制造成本，而且会带来环境污染问题。

为了解决硅基光发射器的光发射受限问题，科学家们正在尝试通过使用纳米晶体硅或在硅衬底上镀其他发光材料膜的方法。然而，纳米晶体硅的光发射率 (发光效率) 仍然不足以满足实际应用；此外，纳米晶体硅在可见辐射的“红光”边缘区域发光，而在许多技术应用中，特别是在光纤通信技术中，需要更长的波长 (约 1.5 微米) 的光。在硅衬底上镀“外来”发光材料层与传统硅技术的兼容性也很差。解决上述问题的有效方法是在硅中引入一种特殊的线性缺陷，即位错。

研究人员通过实验研究表明，通过利用能量为 100 千电子伏特量级的硅离子辐照硅表面层，然后在高温下再对其进行退火，可以在硅表面层中获得高浓度的位错；最终，引入位错的硅在外部激发下发射波长接近 1.5 微米的光。阿列克谢·米哈伊洛夫表示，发光强度似乎取决于离子注入和退火条件。然而，位错相关光致发光所面临的主要问题是：在低温下 (特别是在 25 开尔文以下)，发光强度与温度成正比；但在较高温度下，随着温度的升高发光强度迅速衰减。因此，探究一种提升位错相关发光热稳定性的方法是非常重要的。

为了解决上述问题，罗巴切夫斯基大学与俄罗斯科学院固态物理研究所和 Alekseev 州立技术大学联合进行了研究，并在俄罗斯基础研究基金会的支持下取得了重大进展。

先前的研究已得出结论：在硅样品中实现位错相关光致发光的一种方法是将硅离子注入到硅中 (自注入)，然后进行退火。当发现额外的硼离子掺杂后可以增强发光强度时，罗巴切夫斯基大学的研究团队认为实现光致发光并不是注入技术的唯一好处。然而，仅增强发光强度这一特性仍然不能解决主要问题。而且，仍然不清楚硼离子掺杂如何影响发光热稳定性 (这是一个关键参数)，以及在什么条件下这种影响将最为明显。

在这项研究中，科学家已通过实验证实了硅掺杂硼离子后发光热稳定性有所提高。而且，该影响并非单调地取决于硼掺杂浓度，在一定掺杂浓度范围内，在发光强度与温度的关系曲线上，在 20 开尔文区域的温度范围内出现了通常的低温发光强度最大值，而在 90 开尔文至 100 开尔文温度范围内则出现了第二个明显的发光强度最大值。泰特鲍姆教授表示：重要的是，硼的“有益”作用是独特的，因为用另一种离子代替硼离子则不会产生上述效果。利用硅离子辐照形成位错相关光致发光的硅样品，再进行硼离子掺杂和热处理优化后，我们发现：使用先前实验的最高剂量的硼离子，并在 830°C 进行额外热处理，可以在室温下实现硅器件可测量的发光水平。在未来的实验中，我们将进一步优化离子注入和热处理条件，将为光电子学中的硅应用提供广阔的前景。

注：除了四价的硅之外，从化学元素周期表也可以看到，还有三五族半导体元素 (三族的元素包含：硼 (B)、铝 (Al)、镓 (Ga)、铟 (In)、铊 (Tl)，五族的元素包含：氮 (N)、磷 (P)、砷 (As)、锑 (Sb)、铋 (Bi))。

这些三五族元素也具有许多特点，具有快速的电子传输速度，可被运用在半导体晶体的制造过程中，提升晶体管的效能。此外，三五族材料因为具有良好的光电/光电转换效率，因此被大量运用在 LED 行业，比较常用的一种就是砷化镓。