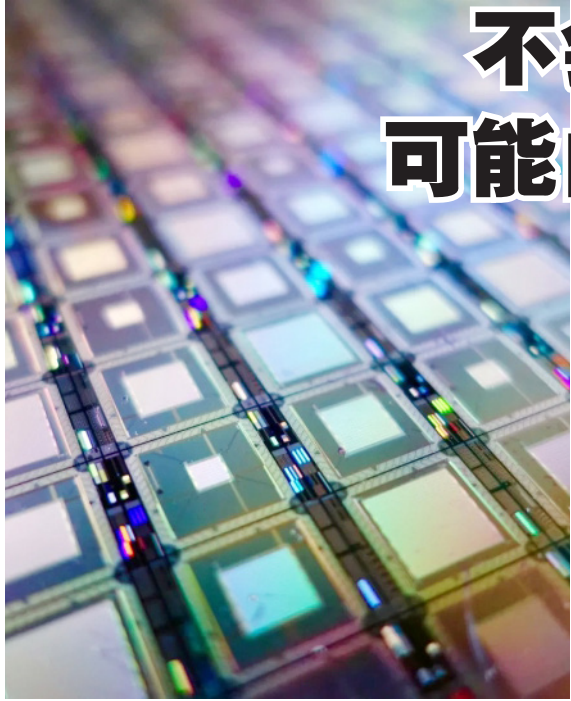


## 不会出错的量子计算机 可能由这种全新超导来实现



态时的能量更低（只有在极低温条件下这才是可能的），电子固有的趋于低能状态的特性就会克服彼此间的排斥作用，使电子结成电子对。

这种（使电子对能量更低的）诱导作用是以物理环境的涨落的形式发生的。在如铅这样的标准超导体中，这种涨落是超导线内铅原子晶格处的振动。然而物理学家尚未确定像二氧化铪这类材料中引起非常规超导性的涨落类型。不过数十年的研究已经发现，电子开始成对的临界点是相变——电子开始自发地重新排布的分水岭。

在量子力学方程中，这些自发有序排列由序参数表示。自旋三重态指的是这些有序排列中三个对称性的自发破坏。序参数与它们的自旋指向（类似磁铁北极）有关，指向上或者下。铁磁序指的是所有的自旋指向相同的方向，而反铁磁序指的是它们交替着上、下排布。在这个被证实的自旋三重态（超流体氦-3）中，序参数的组成至少有18个。

“所有其他的超导性都是自旋单线态，”戴鹏程说，“在自旋单线态超导中，自旋要怎么向上、要怎么向下；如果对其施加磁场，超导性很容易就会被破坏。”这是因为磁场能促使自旋朝向同一个方向。磁场越强，这种效应越明显。

“但二氧化铪的超导性却很稳定，磁感应强度达到40T才会将其破坏。这是个问题，”戴鹏程说，“因为40T的磁感应强度是非常高的。四十年来，人们认为这样的超导性能够出现，唯一的可能是，在施加磁场之时，材料中的电子自旋已经全部指向同一个方向了，意味着这一材料是铁磁性的。”

“具有特定能量和动量的中子可以将库珀对中电子自旋由上-上态转变为上-下态。”戴鹏程说。“这个过程能告诉你库珀对是如何

形成的。你可以通过中子自旋共振确定电子的成对能，以及其他可以描述库珀对量子力学波函数特征的属性他说。

戴鹏程称，这个结果有两种可能的解释：一是二氧化铪不属于自旋三重态超导体，二是自旋三重态超导体是以一种前所未有的方式产生于反铁磁性自旋涨落的。他说，几十年来，实验证据都指向后者，但这又与关于超导性的传统认知相违背。因此，戴鹏程与RCOM的主任、专门研究反常超导体等涌现量子现象的Qimiao Si（这项研究的共同作者之一）展开了合作。

过去五年中，Qimiao Si大部分时间都在与他此前的博士生Emilian M. Nica一起进行研究，他们提出了一个多轨道配对理论，可以解释包括重费米子（如二氧化铪）在内的许多反常超导体与原有认知相悖的实验发现。

在多轨道配对理论中，处于某些原子壳层的电子会比其它电子更可能形成库珀对。Qimiao Si认为，铪的7个轨道中有14种可能量子态的成对电子，能够被贡献出来。

“我最先想到的一种可能就是多轨道（配对）。”他说，“如果只有一个能带或一个轨道（能参与配对），超导性是不可能出现的，但多轨道为非常规超导体配对提供了全新的可能性。它们就像调色板一样。不同的内量子数就像不同颜色的颜料。在基于铪的重费米子材料中，f层电子自然具有这些‘颜色’。它们带来了许多超出‘配对状态周期表’的可能性，自旋三重态配对就是新的可能性之一。”

Qimiao Si和现在任职于美国亚利桑那州立大学的Nica表示，反铁磁关联可以合理地解释电子对创造出低能量的自旋三重态。

“自旋三重态配对在大部分情况下几乎不可能发生，这是由于为了使能量最低，电子会对形成自旋单线态。”Qimiao Si说，“在二氧化铪中，自旋-轨道耦合使量子态的能量发生了改变。这导致相较于自旋单线态，电子出现在自旋三重态配对状态的可能性更高。”（王鹏杰）

据美国莱斯大学（Rice University）2021年12月22日报道，由其主导的一项研究正促使物理学家重新思考二氧化铪的超导性。在建造容错量子计算机的全球竞赛中，二氧化铪是最被看好的材料之一。

二氧化铪被认为具有罕见的“自旋三重态”超导性，但12月22日发表在《自然》（Nature）上的一项研究却给出了令人费解的实验结果，颠覆了对这种材料特性背后机制的主流解释。来自美国莱斯大学、橡树岭国家实验室、加利福尼亚大学圣迭戈分校和佛罗里达州立大学强磁场实验室（NHMFL）的物理学家利用中子散射实验发现了反铁磁性自旋涨落的信号——这种自旋涨落与二氧化铪的超导性密切相关。

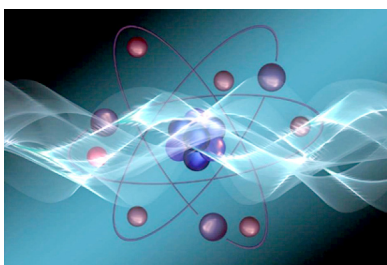
长久以来，物理学家们从未在固体材料中观察到自旋三重态超导性。但他们怀疑，自旋三重态超导性能够在具有铁磁性的有序材料中产生。由于这类材料有潜力承载难以捉摸的准粒子——马约拉纳费米子（可用于制造无错误的量子计算机），近年来寻找自旋三重态材料的竞争持续升温。

“人们已经花费了数十亿美元来寻找它们。”

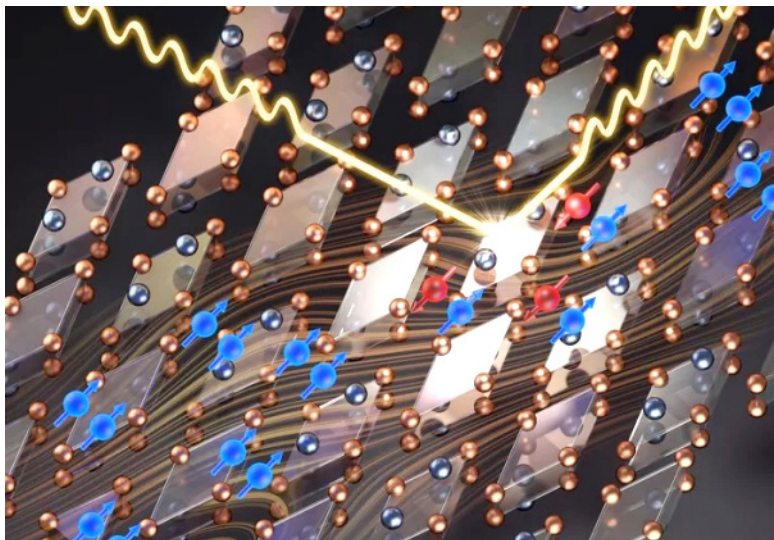
莱斯大学的物理学教授、莱斯量子材料中心（Rice's Center for Quantum Materials, RCMO）和莱斯量子计划（Rice Quantum Initiative）的成员戴鹏程介绍，马约拉纳费米子是一种有待证实的准粒子，可以用来建造拓扑量子比特，后者可免于现有量子计算机中量子位所受的退相干困扰。

“令人期待的是，自旋三重态超导体只要存在，就有用来制备拓扑量子比特的潜力。”戴鹏程说，“这是利用自旋单线态超导体无法做到的，这也是人们对自旋三重态超导体非常感兴趣的原因。”

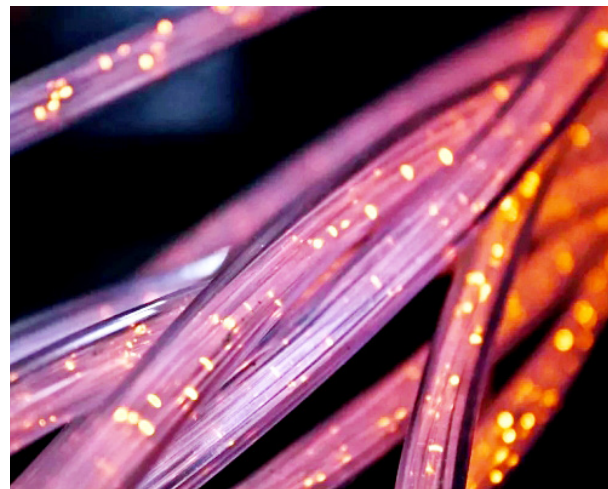
当电子结成电子对（库珀对），像舞池中的一对舞伴一样作为一个整体移动时，就会表现出超导性。电子天生会相互排斥，阻碍电子成对。但如果电子成对能令整个系统的能量比电子都处于自由状



中子撞击二氧化铪的示意图。铪（灰色）和铪（棕色）的晶体被怀疑具有自旋三重态超导性，这种状态以自旋指向相同方向的电子对（蓝色）为特征。在中子散射实验中，射入的中子会使自旋翻转（红色）。



## 世界最长可充电 锂离子电池诞生



可以像普通衣物一样穿在身上，并且能自主供电的通讯装置、传感器和计算装置越来越多。在这些设备中，它们的电池同样也起到结构部件的功能。在了一项概念验证试验中，研究团队制作出了长达140米、世界上最长的柔性纤维电池，以此证明这种材料可以被制作成任意的长度。这项研究发表在《今日材料》（Materials Today）期刊上。麻省理工学院（MIT）博士后Tural Khudiyev（现为新加坡国立大学助理教授）、前MIT博士后Jung Tae Lee（现为韩国庆熙大学教授）和现任职于苹果公司的MIT博士生Benjamin Grenn是该成果的主要作者。

在此之前，包括这个科研团队在内的研究者们已经研发出了许多种包含电子器件的纤维，包括LED、光学传感器、通讯设备和数字化系统。这当中有许多都是可纺织甚至可洗涤的，这使得它们可以用在可穿戴电子设备中。但是目前为止，这些设备都要依赖于外接电源来工作。现在，这种同样可纺织且可洗涤的纤维电池能让上述设备都具有自主供电的能力。

这种新型纤维电池使用先进的电池凝胶和



自带“电源”外壳的玩具潜水艇。

常见的纤维拉伸设备生产。首先将所有的材料组装在一起制成一个大圆柱，然后将其加热到接近熔点。接下来，这些材料会被拉伸穿过一个很细的出口，使得它可以被压缩成很细的纤维，同时各种材料之间的排列方式不会发生变化。

Khudiyev表示，其他人在研发纤维电池时，总试图让最关键的物质处于纤维的外层。而他们开发的纤维将锂离子和关键材料包裹在里面，处于外层的保护之下。这不但稳定，而且防水。这是世界上第一款千米长度的纤维电池，它不仅够长，而且足够耐用。

既然研究者可以制作出140米长的纤维电池，这也就意味着这种电池“不存在明显的长度上限，我们完全可以把它延长到千米尺度。”Khudiyev说。他们还用这种纤维电池制作了一套验证设备，“Li-Fi”通讯系统（一种使用光脉冲传输数据的装置）。它包含麦克风、前置放大器、中继器和二极管。通过这些设备，研究者将两套纤维织成的设备之间构成了光学数据连接。

“当我们把活性材料嵌入纤维中时，也就

这意味着敏感的电池组件具有了良好的密封性，”Khudiyev这样说道，“所有的活性材料都被紧密整合在了一起，在拉伸过程中它们的位置不会发生变化。”除此之外，最后制造出的纤维电池比预想更薄，更柔软，长宽比达到数百万倍，远远高于其他设计方案。这使得它可以被常规的纺织设备加工，制造内嵌了电池和其他电子系统的纺织物。

如他所说，这条140米长的纤维电池目前能储存123毫安时的电能，可以为智能手表或手机充电。它的直径只有几微米，比以往任何纤维电池都要细。

“我们这项方案的优美之处在于，我们可以将多种设备嵌入一根纤维中，”Lee如是说，“这和其他需要聚合多种不同的纤维设备的技术都截然不同。”他们已经成功将LED和锂离子电池融合进了一根纤维里，并且相信未来可以将三种甚至四种不同的设备都安置进这一微小空间内。“我们可以将多种设备融合进一

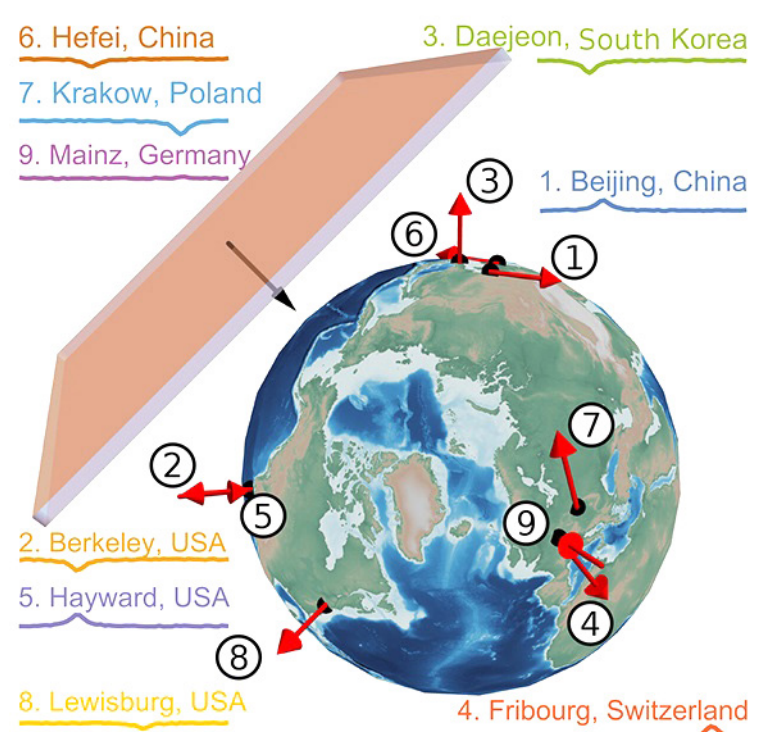
根纤维内，这种整合结构一定可以推动纤维计算机的发展。”

在独立的一维纤维和它纺织而成的二维织物之外，这种材料也可以被3D打印成特定的形状，比如能够给设备供电的外壳。为了证明这种潜力，研究者用这种材料给一只玩具潜水艇制作了一个外壳，能给艇身供电。将能源嵌入到结构部件中可以降低设备的整体重量，提高她的效率，扩大使用范围。

“这是世界上第一款用纤维电池材料3D打印出来的设备，”Khudiyev说道，“如果你想要通过3D打印制作包含电池的装置，目前为止这是唯一可以达成这个目标的技术。打印完成后，你不需要再加装任何东西，因为所有的器件都已经存在于纤维内部了。这是首个一步到位的打印技术。”

这意味着如今“运算单元和Li-Fi可以被装在任何日常物品内”。该研究团队已经就这项技术申请了专利，并且着手继续改进它的容量和多样性。Khudiyev表示，这款纤维电池在未来几年内就可以被用在产品上推向市场。（董丰恒）

## 探索暗物质领域的全球合作

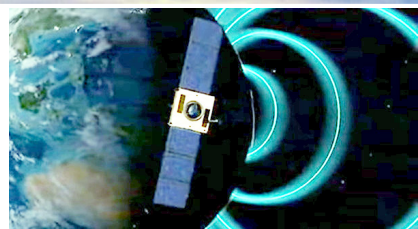


全球 GNOME（用于搜索外来物理现象的光学磁强计全球网络）网络的示意图。

来自美国茨约翰内斯-古腾堡大学（JGU）和美因茨亥姆霍兹研究所（HIM）合作的 PRISMA+ Cluster of Excellence 项目的国际研究小组首次公布了关于使用全球光学磁强计网络寻找暗物质的整合数据。根据科学家们的分析，暗物质会产生具有某种特征性的信号，GNOME 网络的不同站点可以通过相关检测探测到此信号。研究人员分析了来自 GNOME 连续运行一个月的数据，仍未得到相应结果。但他们在发表于《自然·物理学》（Nature Physics）杂志的汇报中指出，该测量结果可以得出关于暗物质特性的限制条件。

GNOME 由多国合作建成，磁强计分别分布在德国、塞尔维亚、波兰、以色列、韩国、澳大利亚和美国等世界各国。研究人员非常希望能通过 GNOME 项目推动对 21 世纪基础物理学中最令人激动的挑战，即暗物质的搜索工作。毕竟，人们很早就知道，暗物质能够解释很多令人困惑的天文观测结果，如星系中恒星的旋转速度或宇宙背景辐射的光谱等问题。

超轻玻色子粒子被认为是当今最有希望的暗物质的候选者之一。其中包括



磁强计可测量行星磁场。

轴子粒子，简称 ALP。在 PRISMA+ 和 HIM（HIM 是美国茨约翰内斯-古腾堡大学和达姆施塔特的 GSI 亥姆霍兹重粒子研究所的联合研究所）兼任的 Dmitry Budker 教授认为，这些轴子类粒子也可以被看作是以一定频率振荡的经典场。根据可能的理论场景，这种波色子场的一个特点是，可以形成物质的某些模式和结构。因此，暗物质的密度可以集中于诸多不同的区域，如离散分布成比星系小却远比地球大的（“粒子”）“墙”。

这种轴子的“墙”若是抵达地球后会在磁力计中产生瞬时的特征信号，那么 GNOME 网络就可以逐渐探测到该信号。该研究的参与者之一 Arne Wickenbrock 博士认为，这些信号在某

些方面存在关联性，关联关系取决于“墙”的移动速度以及它到达每个探测点的时间。

该网络由分布在全球 8 个国家的 14 个磁强计组成。其中的 9 个磁强计已为目前的研究提供了数据。测量原理则是基于暗物质与磁强计中原子的核自旋可以发生相互作用。当原子被一个特定频率的激光激发时，其原子核的自旋则会朝向某个特定方向。而潜在的暗物质场可以干扰这个方向，这样便可以测量到暗物质粒子产生的信号。

Budker 小组的 Hector Masia-Roig 博士做了一个形象的比喻：人们可以把最初在磁强计中的原子想象成在混乱中舞蹈，当它们“捕获到”正确频率的激光时，就会一起旋转。而暗物质粒子可以使跳舞的原子失去平衡。这种扰动可以被精确地测量到。磁强计网络在其中扮演着十分重要的角色：当一定范围的暗物质墙穿过地球时，地球上所有探测点中“跳舞”原子则会逐渐受到干扰。比如，网络中其中一个站点位于美因茨的亥姆霍兹研究所的一个实验室里。Hector Masia-Roig 指出：“只有当我们匹配了所有站点的信号后，才能

评估是什么触发了干扰。”对于一幅由跳舞的“原子”构成的图像而言，比较所有站点的测量结果，我们可以判断出这是一个“勇敢的舞者”的出挑还是源于暗物质“墙”的干扰。

在现阶段的研究中，研究小组分析了 GNOME 连续运行一个月的数据。结果发现，在从一个飞电子伏特（feV）到 100,000feV 的调查范围内没有出现统计学意义上的信号。相反，对比以往的结果，研究人员则可以缩小发现该信号的理论范围。即使正如另一位博士 Joseph Smiga 所言：“尽管我们还不能用全球环形搜索来探测这样的区域暗物质‘墙’，但这对于探测离散暗物质‘墙’的方案而言则是一个重要的结果。”

未来 GNOME 的合作工作将集中于改进磁力计性能以及数据分析，特别是让其运行变得更加连续和稳定。这一点对于持续可靠地搜索时间超过一小时的信号来说至关重要。此外，人们将把磁强计中的碱原子替换为惰性气体原子。研究人员预计这将使未来在搜索暗物质方面的测量灵敏度大大增加。（范嘉豪）