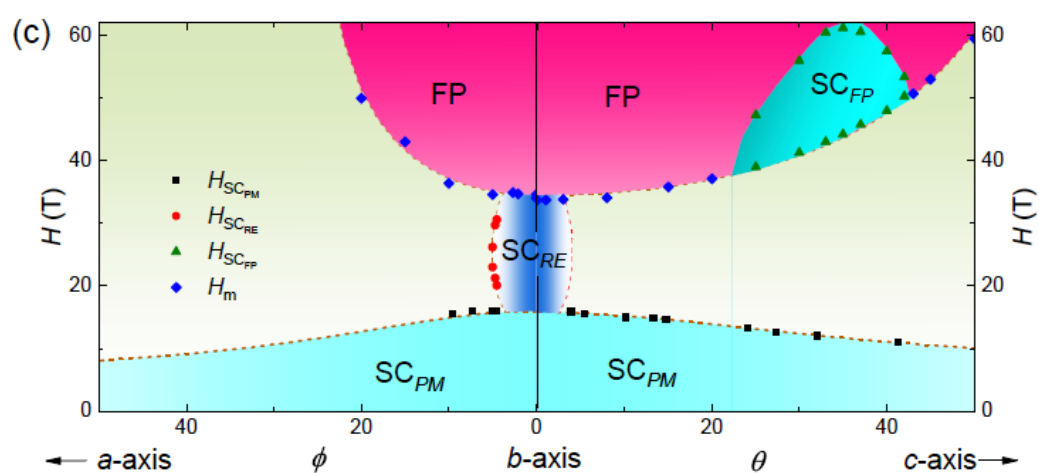


国内外强磁场实验室 科研动态

2019 年第四季度



中国科学院强磁场科学中心·科研办

2020/2/2



前 言

本科研动态的宗旨是为强磁场领域的科研技术人员提供国际上最新的科研成果以及各强磁场实验室发展动向，每季度发布一期。以下是美国、欧洲、日本和中国的强磁场实验室简介。

美国国家强磁场实验室

National High Magnetic Field Laboratory 又称 MagLab，是目前世界上规模最大，实验设施最全，用户最多的强磁场实验室。其稳态场部分位于 Tallahassee，脉冲场部分位于 Los Alamos，另有一个 high B/T 组位于 Gainesville。MagLab 于 1994 年建成并不断升级改造，创造并保持了多项世界纪录。

欧洲强磁场实验室

European Magnetic Field Laboratory (EMFL) 是由法国 Grenoble 的稳态场、Toulouse 的脉冲场、荷兰 Nijmegen 的稳态场以及德国 Dresden 的脉冲场实验室于 2015 年组合而成，有统一的用户申请入口。

日本强磁场实验室

日本的强磁场实验室没有整合在一起。比较著名的实验室有东京大学的 MegaGauss 实验室，东北大学的超导材料高场实验室 (HFLSM) 和 NIMS 的筑波磁体实验室 (TML)。

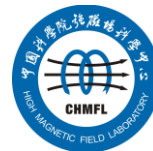


武汉脉冲强磁场科学中心

武汉的强磁场实验室隶属于华中科技大学，全称为国家脉冲强磁场科学中心（筹），其磁体装置 2014 年通过国家验收，建有 12 个三种类型的系列脉冲磁体，最高场强达到 90.6 T，位居世界第三、亚洲第一。

中国科学院强磁场科学中心

中国科学院强磁场科学中心位于合肥科学岛，其建设的稳态强磁场实验装置 2017 年通过国家验收，是世界上仅有的两个稳态磁场超过 40T 的实验室之一。稳态强磁场实验装置有 3 台水冷磁体创造世界纪录，混合磁体最高磁场达到 42.9T，磁体技术和综合性能处于国际领先地位。



科研动态

1. 美国国家强磁场实验室

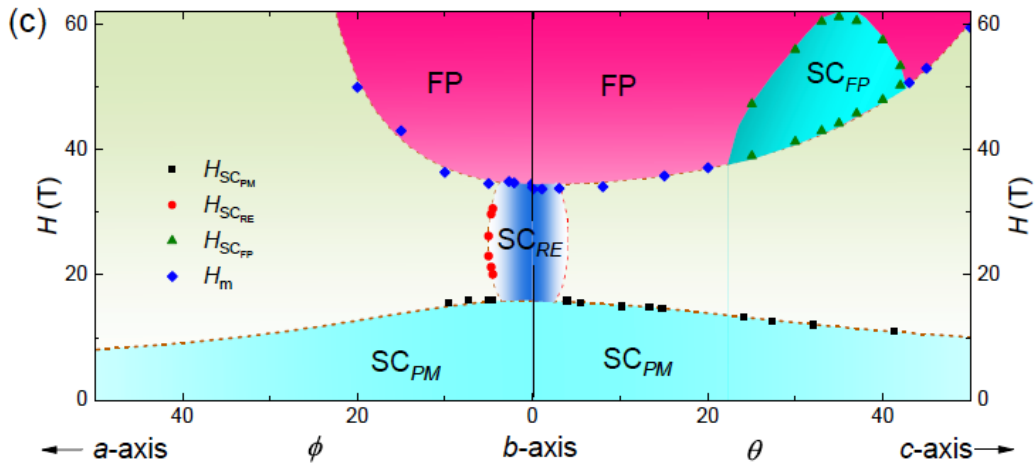
● 罕见的“拉扎勒斯超导”

Nick Butch 稍早前在 Science 报道了 UTe_2 的自旋三重态超导，揭开了该化合物的冰山一角。本次 Butch 团队通过进一步研究发现了 UTe_2 更多惊人的物性。

通常强磁场会破坏超导，至少在绝大部分材料中是如此，但是 UTe_2 会出现被称为拉扎勒斯效应的再入超导现象（拉扎勒斯是圣经中记载的死而复生的人），而且该体系中的“拉扎勒斯超导”不只出现一次，而是两次。

在 16T 磁场下，材料的超导基本被破坏，唯独在某个特定角度附近能观察到。这种现象一直持续到 35T。在这么高的磁场下，不仅所有的超导消失不见，电子自旋的方向也进行了重排，进入了一个新相。继续升高磁场，在某些角度下又出现另一个超导相，一直持续到 65T。这是第一次发现两个场致超导相存在于同一个样品中。美国强磁场实验室主任 Boebinger 评论到：“在如此高磁场下发现‘拉扎勒斯超导’是我们实验室成立 25 年来最重要的发现之一。”

事实上，课题组是在合成其它铀化合物时偶然得到的 UTe_2 ，而通过文献调研可以发现 UTe_2 看起来非常无趣——早已研究过、没有磁性也没有其它有意思的物性。但当团队将该化合物放到低温下试图获得一点低温磁性的数据时，超导出现了。随着研究的深入，更多的宝藏被发现。

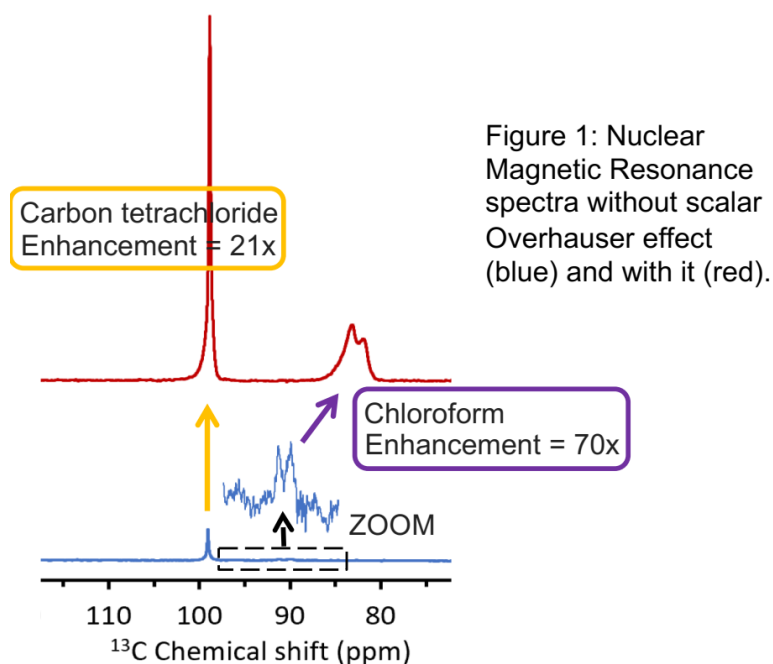


Cite: [S. Ran, et al. Science 365, 684-687 \(2019\)](#); [S. Ran, et al. Nature Phys. 15, 1250-1254 \(2019\)](#)

装置：水冷磁体，脉冲磁体

● 液态 DNP 高场核磁

MagLab 开发出液态 DNP 高场核磁技术。这一技术是利用 scalar Overhauser 效应，特别适用于药理学、生物学和化学需要检测的小分子。与不用 DNP 技术的谱线相比，信号增强明显（最大 70 倍）。



Cite: T. Dubroca et al. Phys. Chem. Chem. Phys. 21, 21200-21204 (2019)

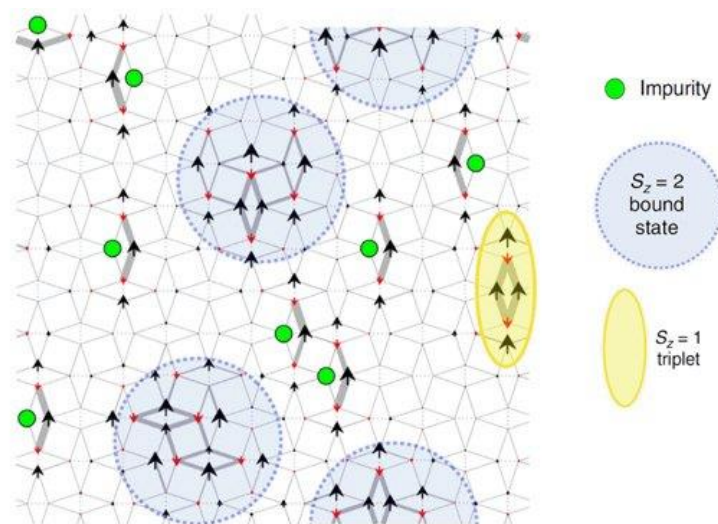
装置：超导磁体（600MHz/89mm 核磁）

● 化学掺杂量子磁体中的呈展态

用少量 Mg 替代 $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ 晶体中的 Cu 会产生呈展磁态，其中 Mg 杂质与自旋三重束缚态耦合。这导致在两个磁场阈值 H_{c3} 和 H_{c2} 处出现局部束缚态，在 H_{c1} 和 H_{c0} 处产生配对的杂质态。

实验和数值结果非常吻合，证实我们发现了一个罕见例子，即使很小的掺杂浓度也会显著改变阻挫量子磁体的基态，其稳定的杂质对在强磁场下诱导出新的自旋态。

理解这些化学掺杂材料中的杂质效应为实现一些长期寻求的物质量子态（如共振价键超导体，量子相变等）开辟了前景。



Cite: Z. Shi, et al. Nature Comm. 9, 2439 (2019)

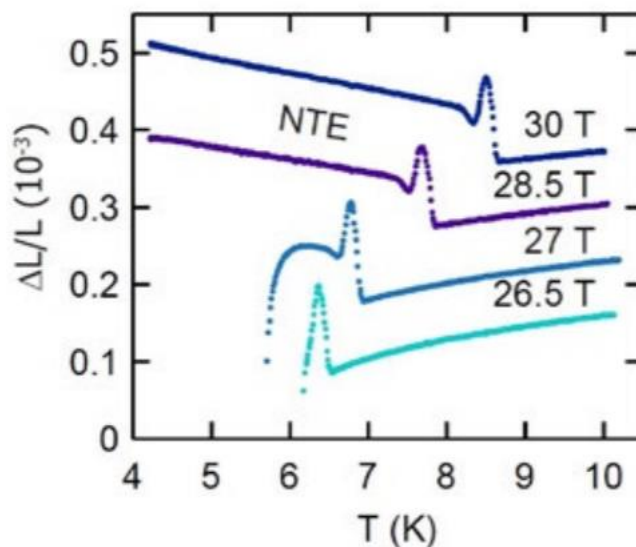
装置：水冷磁体、脉冲磁体

2. 欧洲强磁场实验室

● 磁阻挫尖晶石中的负热膨胀

阻挫磁体是无法同时满足自旋相互作用的材料。尽管这些材料已成为诸如量子自旋液体等新物相的游乐场，但它们也展现出与技术相关的特性，例如多铁性和增强的磁热效应。负热膨胀（NTE）是在阻挫磁体中观察到的另一种不寻常的现象，这意味着晶体在冷却时会膨胀，这可能为控制热膨胀提供了一条途径，以确保高精度设备的性能。

如果自旋和晶格自由度之间存在很强的耦合，则磁场和自旋-晶格耦合之间的相互作用会产生新相，使阻挫得以部分缓解，这种效应被称为“畸变序”。铬尖晶石提供了这种行为的范例，其表现出许多不同的磁有序相。这一体系中的许多成员都具有 NTE，包括 CdCr_2O_4 ，其在零磁场中即有 NTE。这表明异常的热力学行为可能有共同的起源。但是，迄今为止，对该现象及其与自旋-晶格耦合的联系尚无全面的了解。此外，为了获得尖晶石中 NTE 的完整解析，还需要对磁场诱导的有序相进行高精度测量。





荷兰强磁场的研究人员测量了 CdCr_2O_4 在高达 30 T 的磁场中的热膨胀和磁致伸缩。相图与从自旋-晶格耦合的微观模型得出的相图匹配。与理论相比，高场半磁化平台相具有增强的热稳定性，这是强自旋-晶格耦合的特征。此状态还显示出明显的 NTE，与零场中观察到的 NTE 不同。提出了一种 NTE 的微观理论并确定其来源。这些结果为烧绿石晶格和阻挫磁体中的 NTE 建模和预测提供了通用范式。

Cite: [L. Rossi, et al. Phys. Rev. Lett. 123, 027205 \(2019\)](#)

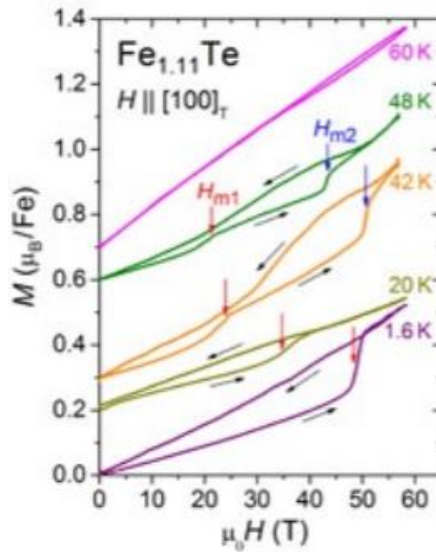
装置：水冷磁体

● Fe_{1+y}Te 中的磁性形状记忆效应和磁结构耦合

近年来，铁基硫系化合物在凝聚态物理界引起了相当大的关注，这主要是由于 FeSe 超导的发现而引起的。 Fe_{1+y}Te 并不超导，而是具有几种不同寻常的结构和磁性相变。最近，来自德累斯顿不同机构的研究人员在这种神秘化合物中发现了两种不同类型的磁性形状记忆效应。这是非同寻常的现象，在磁性致动器或传感器中有巨大的潜在应用价值。

通常在反铁磁体中不会观察到磁性形状记忆效应，目前还没有很好地理解驱动这种效应的确切机制。因此，鉴定出可以观察到结晶固体中这些类型的转变的新型材料有望提供新的和令人期望的见解。实验结果清楚地表明，磁性形状记忆效应发生在 Fe_{1+y}Te 的低温反铁磁相中 ($y = 0.11, 0.12$)。反铁磁单斜基态受磁场诱导发生孪晶的重定向，这在磁化曲线和磁致伸缩测量中都得以证明。在更高磁场下 (52T)，观察到第二个各向同性的转变，这就需要不同的

解释。然而，其不可逆行为也表明记忆效应的存在。通过密度泛函理论（DFT）的计算，我们可以估算磁晶各向异性的强度和易磁化轴的方向。



Cite: [S. Rößler, et al. PNAS 116, 16697 \(2019\)](#)

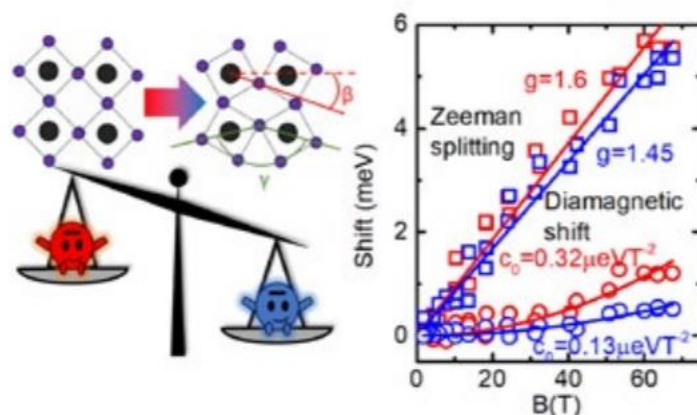
装置：脉冲磁体

● 二维钙钛矿材料中的载流子质量增大

因其在高性能光伏中的快速发展和成功应用，有机-无机卤化物钙钛矿已成为新兴半导体材料中的“下一件大事”。然而，它们对于水分的固有不稳定性仍然是这些材料的关键挑战。这引导了科学界对钙钛矿衍生物的关注，例如二维（2D）钙钛矿。这些材料更加稳定，并且具有更高的性能可调性，从而将其应用领域从通过 LED 的能量收集扩展到了单一材料的白光发射器等。

来自图卢兹的研究团队在高达 67T 的磁场中研究了二维钙钛矿材料 $(C_nH_{2n+1}NH_3)_2PbI_4$ ($n=4, 6, 8, 10, 12$) 的光谱。除观察到声子有关的带边性质外，该材料的高/低温相的抗磁平移明显不同，这表明在相变过程中载流子有效质量和/或介电屏蔽显著改变，意味着八面体变形。由于相变温度接近室温，意

味着可通过珀尔帖 (Peltier) 效应实现冷却, 为 2D 钙钛矿工程应用提供了另一种途径。



Cite: *M. Baranowski, et al. ACS Energy Letters 4, 2386 (2019)*

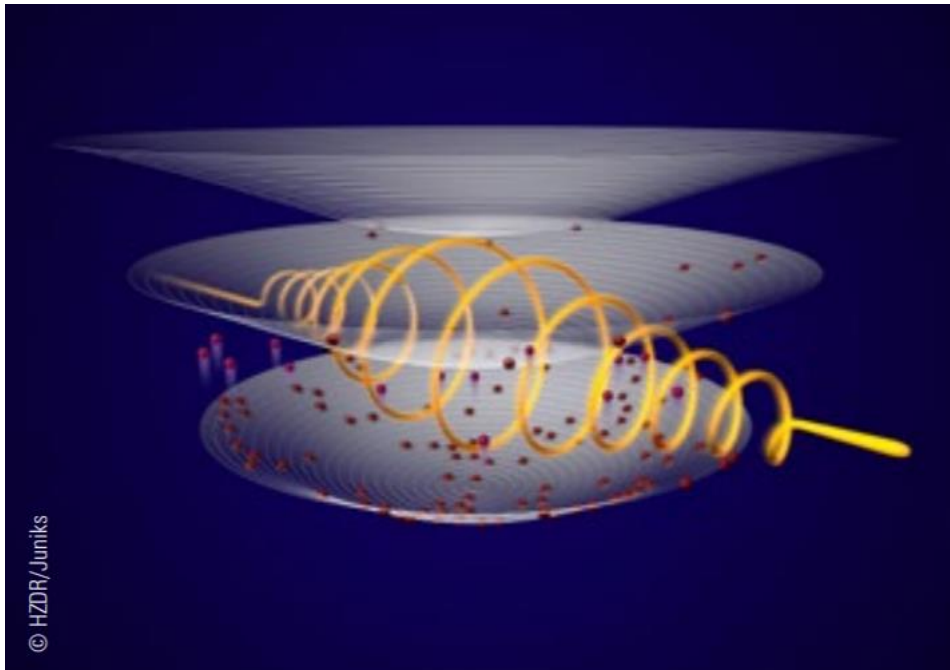
装置: 脉冲磁体

● 无质量凯恩电子的红外/太赫兹回旋辐射

当磁场施加到固体上时, 电子态的连续密度转化为一组离散的能级, 称为朗道能级。在这种“梯子”中激发的电子可能会复合, 同时伴随着光子的发射。这个过程可以看作是回旋加速共振的逆过程, 被称为“回旋辐射”。通过受激回旋辐射来构造朗道能级激光器的设想与第一个激光器的历史一样古老, 并具有波长可调谐的巨大优势。该频率通常位于远红外 (THz) 范围。因此, 成功实现朗道能级激光器将填补所谓的太赫兹间隙。然而到目前为止, 这种吸引人的概念尚未发展为可靠的实验设计。这是因为朗道量子化电子的俄歇散射在迄今研究过的所有材料上都超过了回旋辐射, 包括常规半导体以及具有无质量电子的石墨烯。

最近, 欧洲多国的研究人员探索了一种具有三维无质量凯恩电子的无能隙化合物 HgCdTe 中的俄歇过程和回旋辐射。他们发现俄歇过程得到了显著抑制,

被激发的朗道量子化的无质量凯恩电子的寿命达到了纳秒级，这比石墨烯或常规半导体中的电子寿命长两到三个数量级。这一性质来自于无能隙 HgCdTe 中朗道能级的特殊间距。相应地观察到了无质量凯恩电子产生的自发回旋辐射。因此，拥有无质量凯恩电子的体系有望成为朗道能级激光器的工作介质。该激光器将在 THz 和红外光谱范围内工作，并可通过非常低的磁场进行广泛调谐。



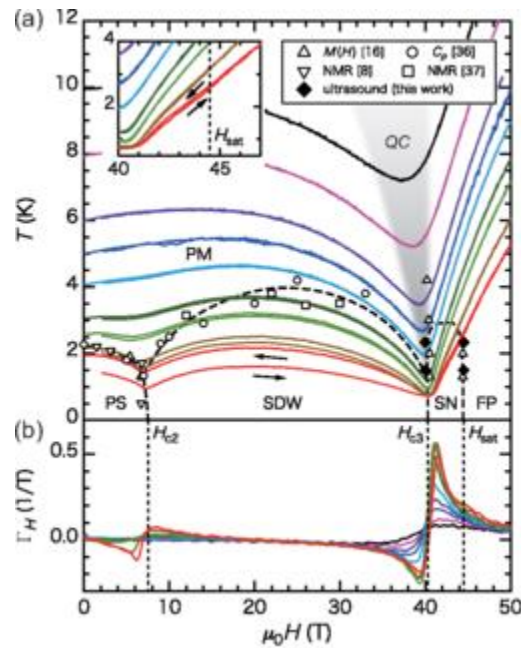
Cite: [*D. B. But, et al. Nature Photonics 13, 783 \(2019\)*](#)

3. 日本强磁场实验室

- **LiCuVO₄ 自旋向列态的磁热效应和自旋应变耦合**

通过阻挫的准一维自旋 1/2 化合物 LiCuVO₄ 的磁热效应和超声研究，证明了自旋向列态。磁性 Grüneisen 参数在自旋向列相的相变处($\approx 40\text{T}$)发散，表明量子临界性伴随着熵积累。观察到的声学特性的高场异常清楚地证明了晶格强

烈参与了自旋动力学。基于双极和四极贡献的交换限制耦合的理论方法，自旋偶极应变和四极应变的相互作用决定了 LiCuVO_4 的自旋向列性。

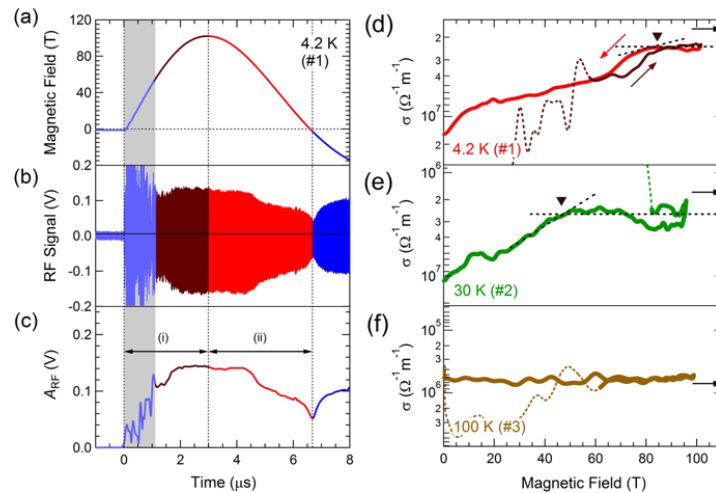


Cite: [M. Gen, et al. Phys. Rev. Research 1, 033065 \(2019\)](#)

装置：脉冲磁体

● 高温超导材料 $\text{La}_{1.84}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$ 的泡利极限上临界场

在高达 102T 的磁场中进行高频自谐振非接触电导率测量，研究了一种铜酸盐高温超导体 $\text{La}_{1.84}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$ 的上临界场。在 85 T 处观察到不可逆转变 ($T = 4.2\text{K}$)，定义为上临界场。根据 Werthamer-Helfand-Hohenberg 理论，探讨了与温度依赖的上临界场。用自旋轨道耦合贡献很小的泡利极限拆对过程解释了在低温下观察到的具有回滞现象的一阶相变。



Cite: [D. Nakamura, et al. Sci. Rep. 9, 16949 \(2019\)](#)

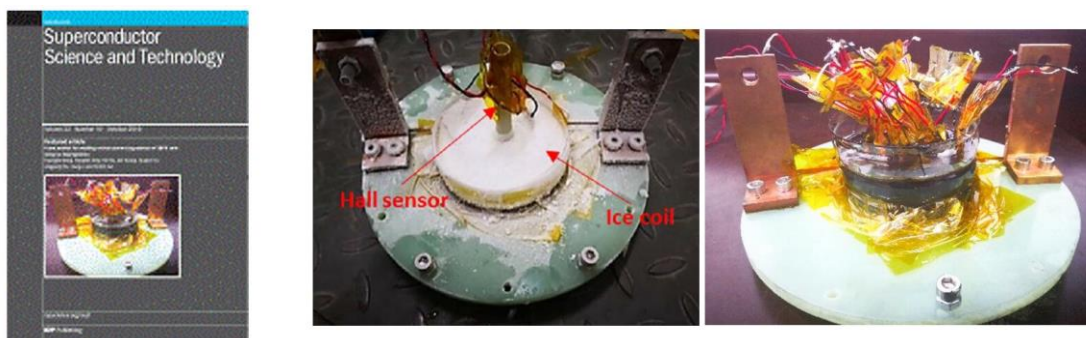
装置：脉冲磁体

4. 武汉脉冲强磁场科学中心

● 工程团队提出超导磁体浸渍新工艺

近年来，随着生产工艺的提高，二代高温超导带材得到了快速发展，相比低温超导带材，二代高温超导体可在高磁场下承受更高的电流密度和机械强度，因此其越来越多地被应用到超导磁体的绕制中。在高场磁体中，环氧树脂经常被用来加固磁体。但是由于环氧树脂和高温超导带材的热收缩率相差很大，环氧树脂在冷却过程中产生较大的热应力，会导致涂层结构的二代高温超导带材临界电流降低。大量研究显示，环氧浸渍的高温超导磁体在多次热循环后会出现不同程度的临界电流性能衰退，这会严重影响超导磁体的效率和寿命。现在常用的无绝缘线圈绕制技术虽然可以解决临界电流降低的问题，但是其层间不存在加固，在高场下的应用受到很大的限制。

为了解决这个问题，强磁场中心工程团队首次尝试将冰浸渍技术应用到高温超导线圈中。冰浸渍技术最早应用于脉冲磁体，李亮教授在他的博士论文中，进行了一系列冰浸渍脉冲磁体的研究，脉冲磁场最高可达 62T，冰浸渍线圈的冷却时间可以达到常规环氧浸渍线圈的 1/3。团队研究发现，超导冰线圈在冰浸渍完成后没有临界电流的衰减，在多次热循环后也不会出现临界电流的性能降低，而与之对应的环氧浸渍线圈在 14 次热循环后出现明显的性能衰退。线圈降温过程和整体失超实验的结果显示，冰浸渍线圈相比环氧浸渍线圈具有更好的热稳定性。冰浸渍线圈的制作工艺简单，成本低廉，冰浸渍过的带材可以重复使用，是一种非常有前景的超导线圈加固技术。该项工作受到了业内同行的高度认可和极大兴趣。

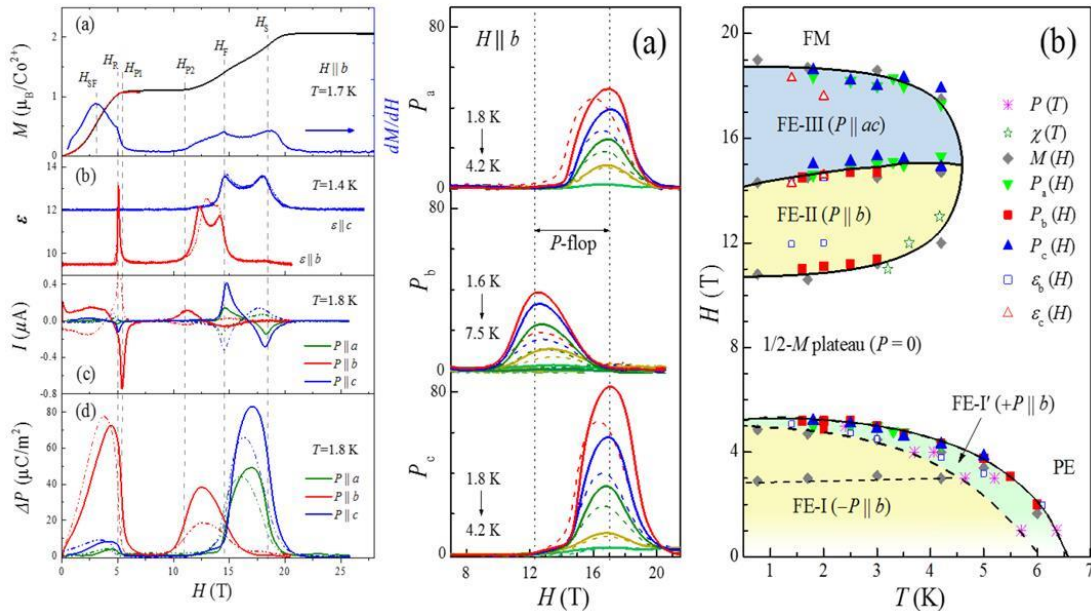


Cite: [G. Wang, et al. Supercond. Sci. Tech. 32, 105011 \(2019\)](#)

● 材料物理组在多铁材料研究上取得新进展

具有准一维螺旋自旋链结构的 $\text{Co}_2\text{V}_2\text{O}_7$ 单晶是典型的低维阻挫系统，在磁场诱导下呈现丰富的物理现象，如强自旋-轨道耦合、磁各向异性、1/2 和 3/4 量子磁化平台等。 $\text{Co}_2\text{V}_2\text{O}_7$ 也是一种新型的第二类多铁材料，具有磁场诱导的多铁态。研究发现，其低场和高场铁电态分别位于 1/2 量子磁化平台两边，预示着波色-爱因斯坦凝聚态的出现。进一步研究发现， $\text{Co}_2\text{V}_2\text{O}_7$ 单晶的铁电极化

方向在强磁场作用下出现连续跳转（180 度极化反转和 90 度极化翻转），这两种新奇的磁电开关效应被认为是由 $\text{Co}_2\text{V}_2\text{O}_7$ 独特的晶体结构、磁结构以及磁对称性变化所导致。



Cite: [R. Chen, et al. Phys. Rev. B 100, 140403\(R\) \(2019\)](#)

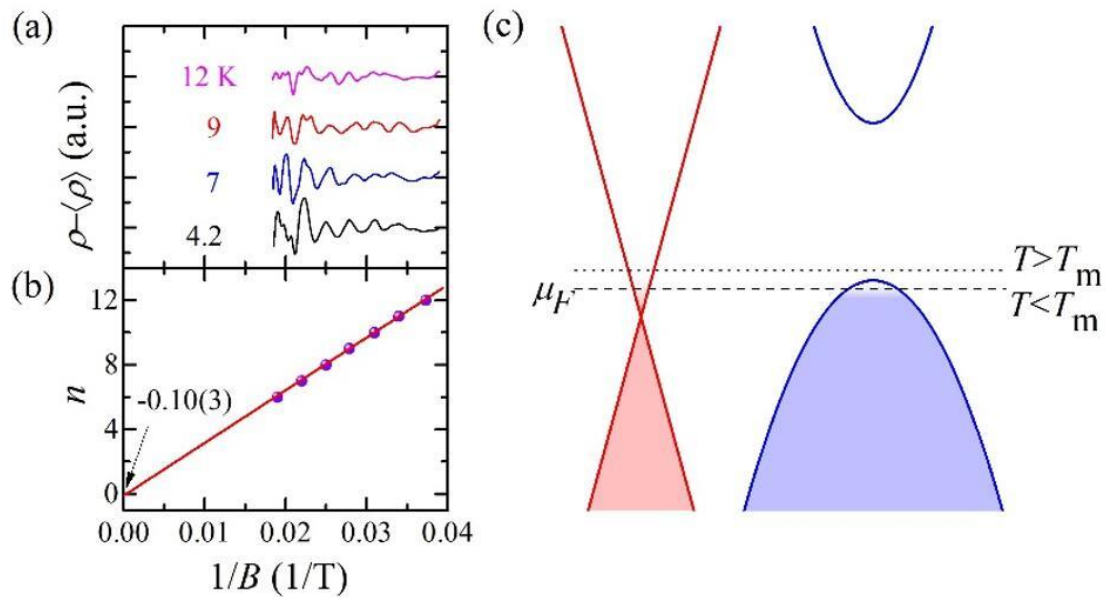
装置：脉冲磁体

● 拓扑半金属 W_2As_3 的 Lifshitz 相变研究进展

最近，武汉强磁场中心研究人员与杭州师范大学、中科院强磁场中心合作，研究了拓扑半金属 W_2As_3 的磁阻性质。通过研究样品在磁场中转角的磁阻变化，发现在 40K 以上，其形貌是一个横向的哑铃形，而在 30K 以下则是一个纵向的莲花形。角向磁阻的这种变化表明材料的费米面结构可能在 40-30K 的温区内发生了巨大的改变，这一假想也通过热电势和能斯特效应的测量得到进一步证实。

通过测量 W_2As_3 在 53T 强磁场下的量子振荡，描绘其对应的朗道能级图，发现其中存在拓扑非平庸的能带。在这些实验结果的基础上，他们对其电子结

构作出合理猜测。该体系同时具有一个拓扑非平庸的电子带和拓扑平庸的空穴带；随着温度增加，化学势上移。当温度增加到 30-40K 以上时，化学势移出了空穴带，导致 Lifshitz 相变、角向磁阻轮廓的变化。值得注意的是，其拓扑保护机制在 40K 以上仍然存在，但材料基本上不再显示巨大磁阻。该实验表明在这个材料中电子-空穴补偿效应对巨大磁阻起了重要作用。



Cite: [J. Wang, et al. npj Quantum Mater. 4, 58 \(2019\)](#)

装置：脉冲磁体

● 自旋半金属材料的内禀反常能斯特效应研究进展

$\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 作为一种铁磁半金属材料，存在着巨大的内禀反常霍尔效应，同时也具有非常大的反常能斯特效应。朱增伟教授团队利用化学气相运输的方法生长出了高质量单晶样品，并通过磁电阻以及霍尔效应的测试定量分析，发现不同质量单晶样品只是样品的迁移率发生了变化。通过对这些样品进行热电运输测量发现， $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 的能斯特信号中的正常能斯特效应与样品的迁移率成正相关，这与之前报道中能斯特效应与迁移率的关系是相符合的。进一步分析



发现, $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 样品的反常能斯特效应是由内禀的贝里曲率决定的, 并且与样品的电子平均自由程成反相关, 这是该团队首次观察到反常能斯特效应与迁移率成反相关, 为研究具有非平凡拓扑结构的电子对热梯度的响应提供了新的见解。

Cite: [*L. Ding et al. Phys. Rev. X 9, 041061 \(2019\)*](#)

5. 中科院强磁场科学中心

- 强磁场中心在人工斯格明子的规模合成与探测中取得重大进展
- 强磁场安徽省实验室召开首届理事会和学术委员会第一次会议
- 强磁场下 ZrTe_5 的反常热电效应研究取得新进展
- SHMFF 助力北大莫凡洋研究团队取得系列科研成果
- 强磁场中心研制成功国际首个无液氦干式超导磁体插杆式扫描隧道显微镜
- 第八届国际磁科学会议召开
- 新型肿瘤临床精准用药技术对肝癌临床验证试验取得突破性进展

详见: <http://www.hmfl.cas.cn/xwzx/tt/>