

物理所等在EuTe₂中发现压致超导与共存反铁磁序的同步增强现象

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/18765.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

凝聚态物理中的许多反常现象，如近藤效应、重费米子行为和巨磁阻效应等，源于局域磁矩与巡游电子之间的相互作用。在适当条件下，巡游电子在低温形成库珀对并与局域磁矩共存，体系会进入磁性超导态。由于磁有序与超导往往相互排斥，磁性超导体比较少见，而一旦形成，磁性自由度的参与会使超导态具有非常规的配对机制或呈现反常物理现象。因此，探索新的磁性超导体对于探究非常规超导机制和发现新奇物性具有重要意义。

中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心怀柔研究部HX-EX6组博士后杨芃焘与刘子儀在副研究员王铂森和研究员程金光的指导下，与上海科技大学教授郭艳峰课题组合作，针对最近发现的新型巨磁阻材料EuTe₂开展了高压调控研究，充分发挥综合极端条件实验装置六面砧高压实验站的独特优势，通过高静水压下的电输运、交流磁化率和交流比热测量，率先在EuTe₂中发现压致超导电性，并观察到超导与反铁磁序的共存和反常的同步增强现象。

EuTe₂具有CuAl₂型晶体结构，其中具有局域磁矩的Eu²⁺离子（4f⁷, S = J = 7/2）层与提供传导电子的[Te₂]²⁻层沿c轴交替堆叠，形成天然的三明治结构（图1a）。常压下，EuTe₂呈现半导体特性，并在T_N = 11 K发生反铁磁相变，形成A型反铁磁结构，即c轴取向的Eu²⁺磁矩在层内铁磁排列，而在层间反铁磁排列（图1b）。在T < T_N施加c轴方向的外磁场时，Eu²⁺磁矩会首先在H_c^{SF} = 2.3 T发生突然的自旋翻转，转变为倾斜反铁磁结构（图1c，此时在c轴方向将产生净铁磁分量），然后在更高磁场H_c^{SP} = 7.6 T实现完全铁磁极化。磁电阻测试表明，Eu²⁺晶格的磁结构变化会引起电输运性质的突变，即自旋翻转的同时电阻陡降，造成低温下出现磁场

是研究局域磁矩（Eu²⁺-4f⁷）与传导电子（Te-5p）

强烈耦合且结构非常简单的材料体系。关于EuT

e₂常压下的详细物性表征，可参考中山大学王猛教授课题组[Phys. Rev. Mater. 4, 013405

(2020)]和中科院宁波材料技术与工程研究所研究员李润伟和钟志成等的成果[Phys. Rev. B 104,

214419 (2021)]。

考虑到EuTe₂在常压下的能隙只有14-16 meV，高压是调控该体系自旋-电荷耦合及磁电基态的有效手段。图2a给出了EuTe₂单晶在0-11.5 GPa范围内不同压力下的电阻率 $\rho(T)$ 曲线。可以看出，电阻率随着压力增加而逐渐减小，11.5 GPa时仍保持半导体行为；根据 $\rho(T)$ 上的反常（箭头所示）所定义的 T_N 随压力增加而单调升高，11.5 GPa时已升至约30 K。高压下交流磁化率（图2c）和交流比热（图2d）测试结果也进一步确认了 T_N 随加压而逐渐升高的变化规律。对EuTe₂施加 $P > P_c$ 6 GPa的压力时， $\rho(T)$ 在3-5 K出现超导转变，并随加压逐渐向高温移动（图2a插图），而此时正常态 $\rho(T)$ 仍保持半导体型的导电特征。通过高压下的交流磁化率测试并对比EuTe₂和Pb的抗磁信号（图2b），排除了杂质超导的可能，确认EuTe₂中观察到的超导态为体超导。

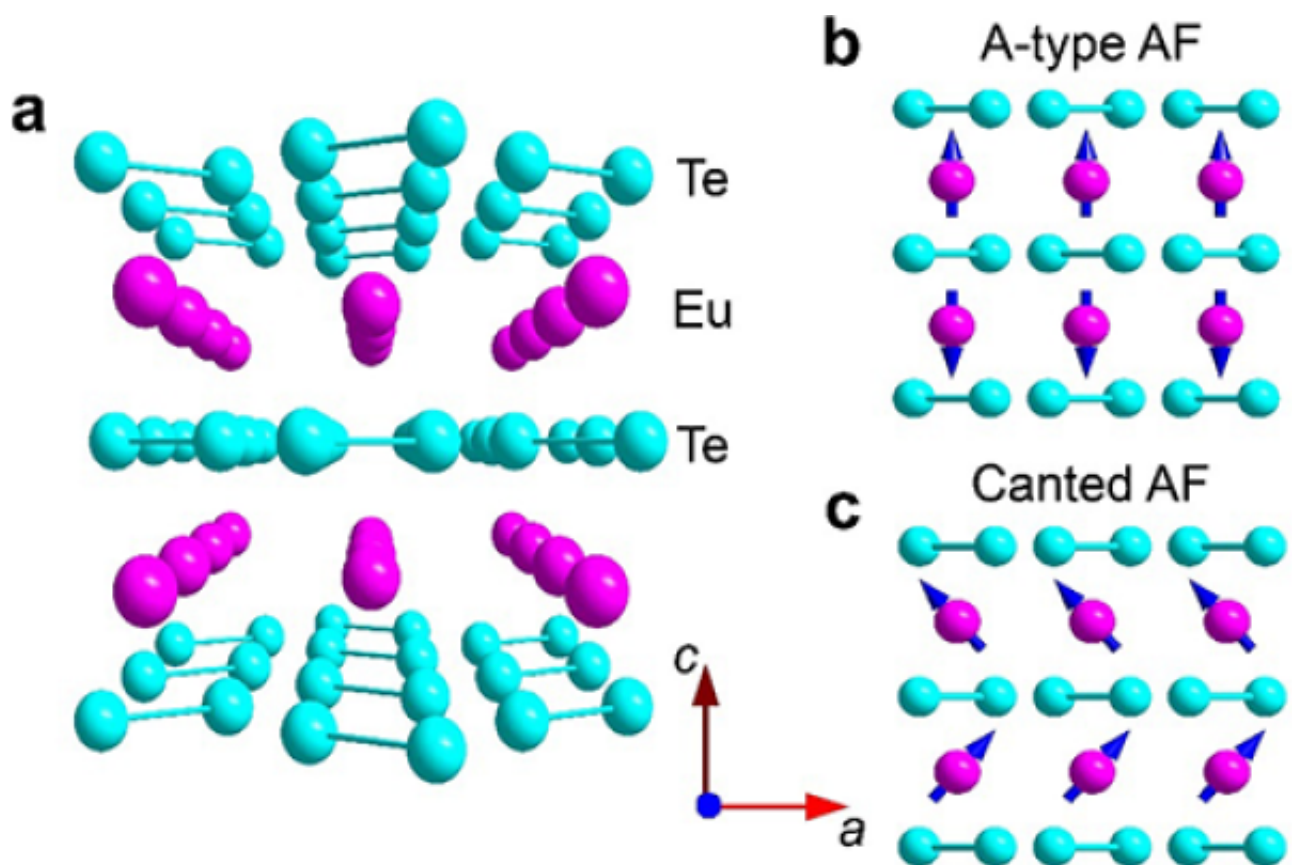
为了进一步探究高压下的磁基态以及外磁场对正常态和超导态的影响，科研人员在 P_c 附近详细测试了不同磁场下的 $\rho(T)$ 和不同温度下的 $\rho(H)$ 曲线，发现磁场仍会造成半导体-金属转变（图3a）和电阻的陡降（图3b）。这表明EuTe₂在 P_c 附近的高压下仍具有A型反铁磁结构，但 H_c^{SF} 会随压力增加而逐渐升高。磁场对电阻转变的逐渐抑制进一步验证了超导电性，同时在具有净铁磁分量的倾斜反铁磁态超导仍可存在（图3c），这表明其具有较大的上临界磁场 H_{c2} 。如图3d所示，无论是采用Ginzburg-Landau (G-L) 公式还是Werthamer-Helfand-Hohenberg (WHH) 模型进行拟合， P_c 附近超导态的零温 $H_{c2}(0)$ 都非常接近甚至超过弱耦合的泡利顺磁极限 $H_p = 1.84T_c$ ，这说明EuTe₂中的超导态具有强耦合或非正规配对机制。此外，图3d中的 $H_{c2}(T)$ 数据点在 ~ 7 K发生了不连续侧移，这来源于Eu²⁺晶格的自旋翻转贡献了额外的内磁场，进一步表明局域磁矩对超导态具有调制作用。

综合上述实验结果，研究绘制了EuTe₂单晶的温度-压力/磁场相图。如图4a所示， $T_N(P)$ 随压力增加而升高，其斜率 dT_N/dP 在 P_c 6 GPa发生显著改变，即从0.85 K/GPa提高至3.7 K/GPa，而超导恰好在 P_c 附近出现，且 $T_c(P)$ 也随加压而单调升高。因此，EuTe₂中发现的压致超导不仅与反铁磁序共存，而且二者表现出反常的同步增强现象。此外，从 P_c 附近(~ 7 GPa)的温度-磁场相图（图4b）可以看出，超导态还可以与具有净铁磁分量的倾斜反铁磁序共存。由于高压下的同步辐射XRD测试结果排除了在 P_c

附近发生结构相变的可能，研究认为高压下EuTe₂的物性演化与Te-5p能带的展宽和Eu²⁺磁交换作用的增强密切联系，即加压使Te-5p能带提供了更多的载流子，这些载流子在高温时通过间接交换作用增强了Eu²⁺离子之间的交换作用，同时在低温又形成库珀对。这可以解释超导的出现伴随着反铁磁序的同步增强，而磁性自由度的参与也可以理解超导态的反常性质。EuTe₂中发现的这些新奇物理现象值得深入研究，并为揭示磁性超导体中的配对机制和反常物性提供了新的材料研究平台。

近日，相关研究成果发表在《自然-通讯》（Nature Communications）上。研究工作得到北京市自然科学基金重点专题项目、国家重点研发计划、国家自然科学基金、中科院战略性先导科技专项（B类）和中科院青年创新促进会等的支持。物理所EX6组副研究员孙建平、SC4组研究员董晓莉和副研究员张华、T06组研究员胡江平和特聘研究员蒋坤，以及日本东京大学教授Yoshiya Uwatoko等参与研究。

[论文链接](#)



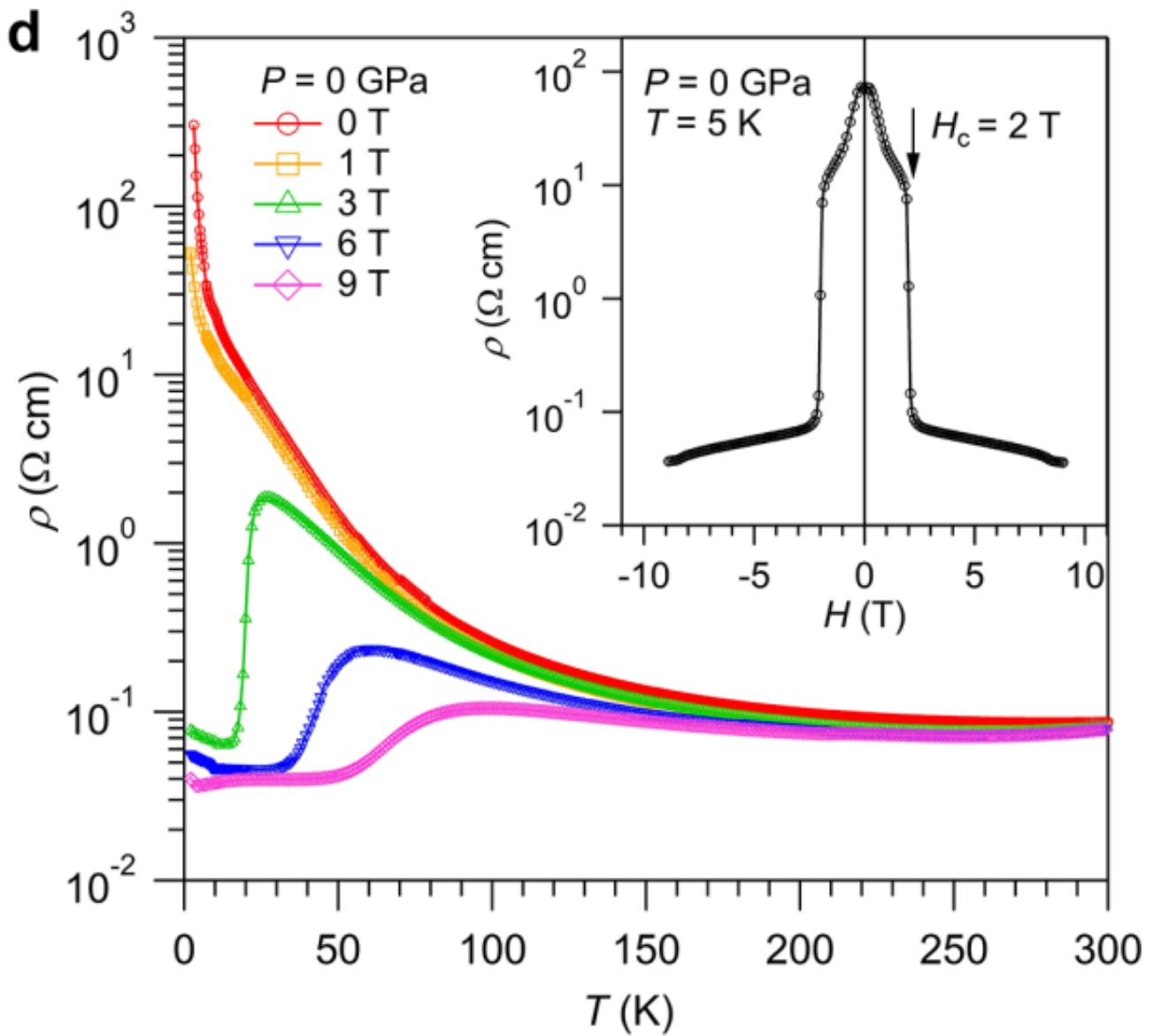


图1. EuTe_2

常压下的结构和物性：a、晶体结构示意图，b、A型反铁磁结构，c、倾斜反铁磁结构，d、不同磁场下的电阻率曲线，插图为5K时的磁阻曲线。

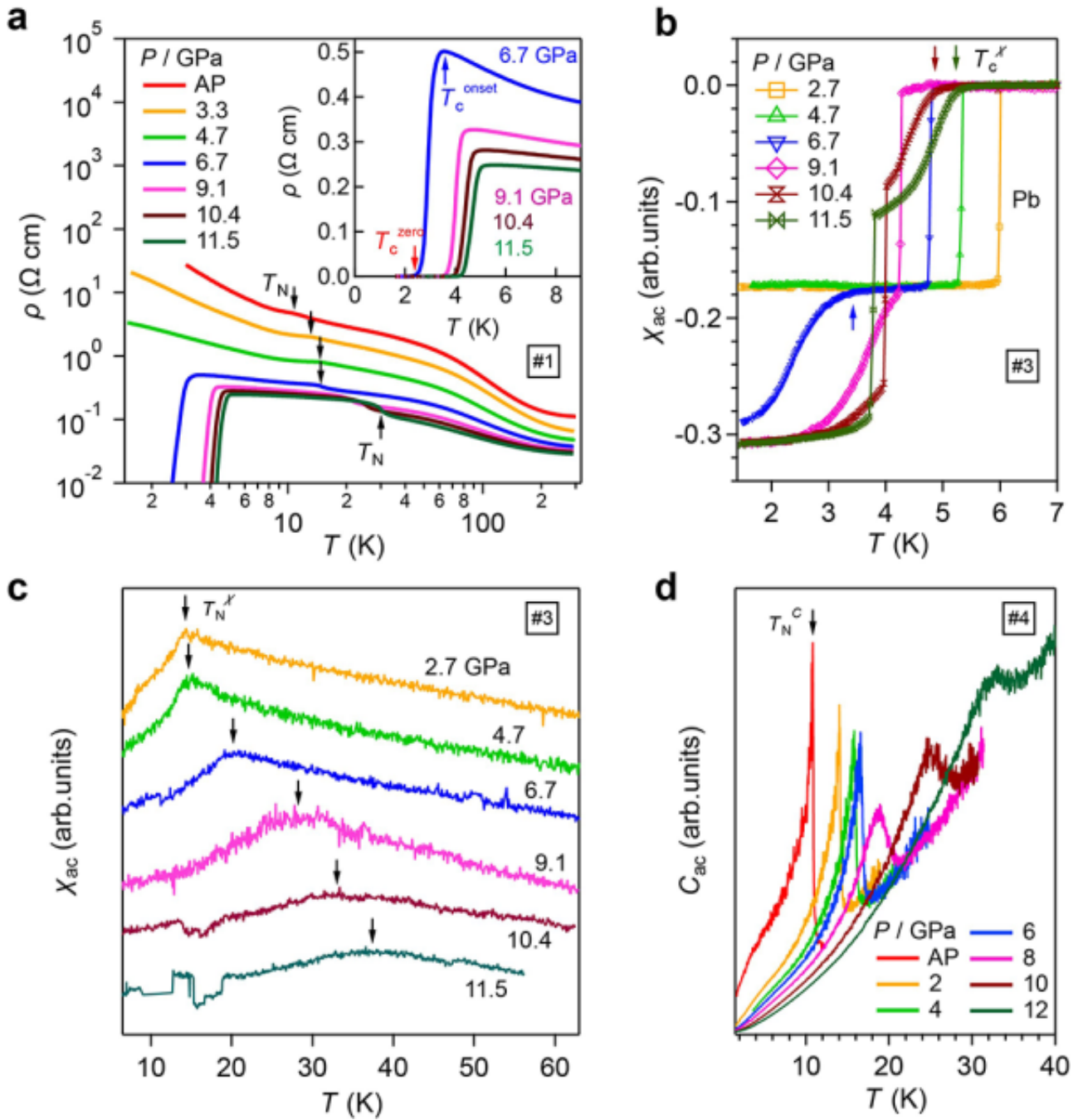


图2. EuTe_2

高压下的物性：a、电阻，b、低温区交流磁化率，c、高温区交流磁化率，d、交流比热。

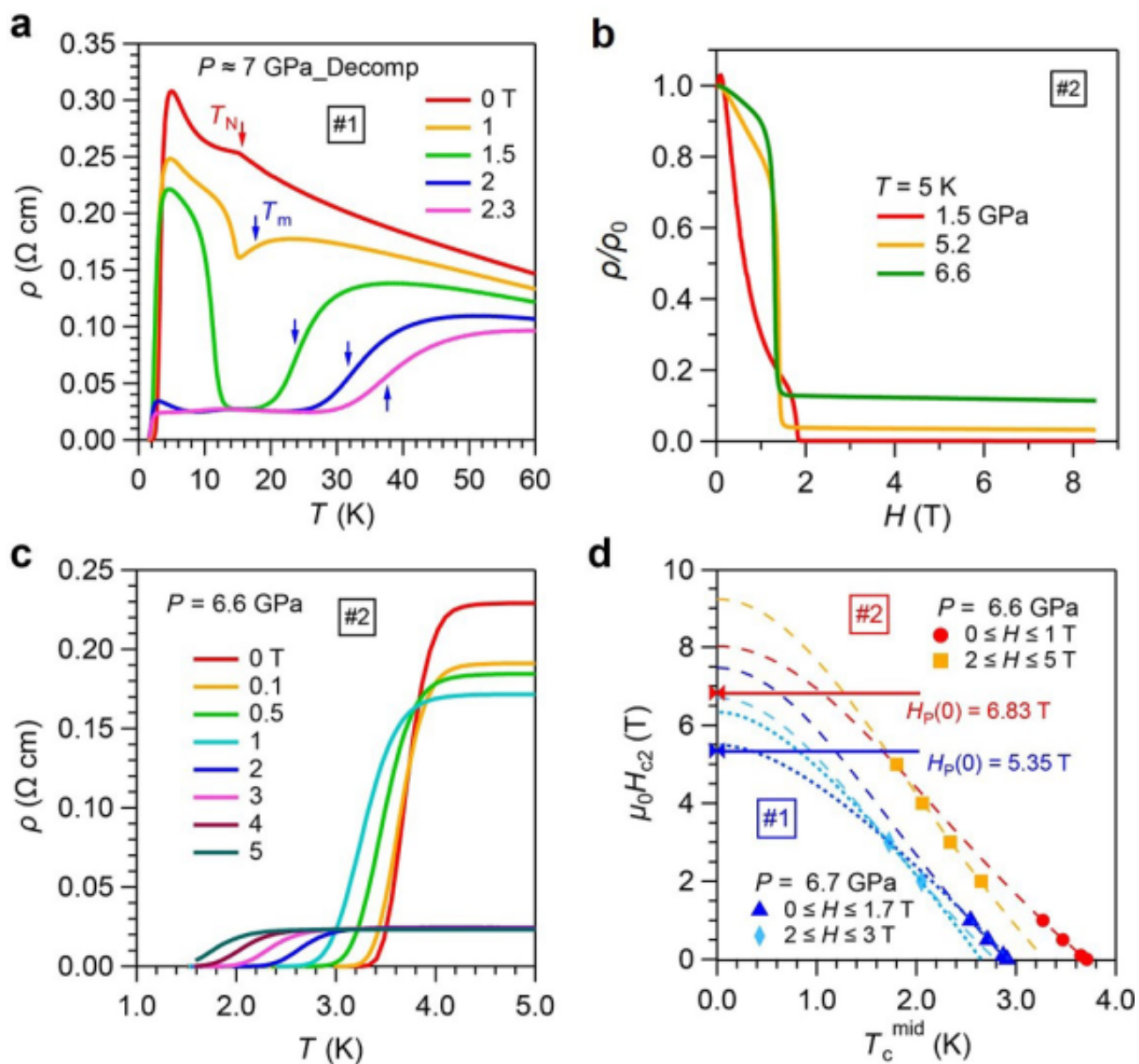


图3.a、EuTe₂在~7 GPa压力和不同磁场下的电阻曲线，b、不同压力下的5 K电阻-磁场曲线，c、EuTe₂在6.6 GPa压力和不同磁场下的低温电阻曲线，d、临界压力附近的上临界磁场拟合，长虚线和短虚线分别表示Ginzburg-Landau (G-L) 和Werthamer-Helfand-Hohenberg (WHH) 模型拟合曲线，水平横线是两个样品的泡利顺磁极限H_p(0)。

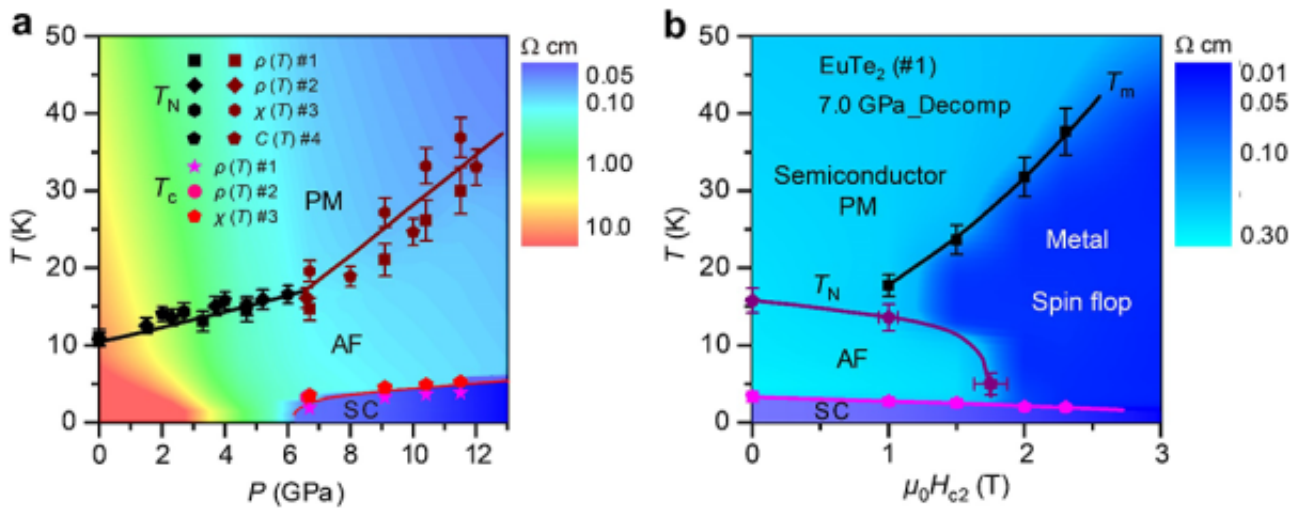


图4.EuTe₂的 (a) 温度-压力相图和 (b) 7 GPa的温度-磁场相图。

研究团队单位：物理研究所

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://www.iikx.com)转发