

重费米子材料中的反常物性*

杨义峰[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2013-10-30收到

[†] email: yifeng@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20140201

Anomalous properties of heavy fermion materials

YANG Yi-Feng[†]

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

摘要 重费米子研究对探索强关联电子体系新奇量子现象的组织原则具有重要的意义。文章介绍了作者近年来对重费米子材料正常态反常性质的研究进展,揭示了重电子的普适温度演化行为和Fano干涉效应,为理解重费米子物理和探索非常规超导机理提供了新的思路。

关键词 重费米子, 二流体模型, 近藤液体, Fano干涉

Abstract Heavy fermion research is of great importance for exploring the organization of exotic quantum phenomena in strongly correlated electron systems. Our recent studies on the anomalous normal state properties of heavy fermion materials reveal a universal temperature evolution governing the emergence of heavy electrons and the presence of the Fano interference effect. Our work provides a new avenue for understanding heavy fermion physics as well as the underlying mechanism of unconventional superconductivity.

Keywords heavy fermion, two-fluid model, Kondo liquid, Fano interference

1 重费米子物理简介

物质质量的起源是当代物理学的基本问题。由于欧洲大型强子对撞机发现了Higgs粒子,2013年的诺贝尔物理学奖授予了比利时理论物理学家Francois Englert和英国理论物理学家Peter W. Higgs,奖励他们“为理解亚原子粒子的质量起源的一种机制所做出的理论发现”。在粒子物理标准模型中,其他基本粒子均因为和背景真空中的Higgs场相互作用而获得质量。

在凝聚态物理中也有一大类材料,其中自由

运动的导带电子与背景晶格上的自旋场耦合,也能获得高于本身上百倍、甚至超过 μ 子的有效质量,并产生众多的奇异量子现象。这类材料被称作重费米子(电子)材料^[1],它们一般为包含Ce, Yb, U等稀土或锕系元素的金属间化合物,以及少量的d电子体系,如最近发现的CaCu₃Ir₄O₁₂^[2]。图1(a)给出了两种典型重费米子材料CeCoIn₅和URu₂Si₂的晶格结构。这两种材料都是层状结构,由包含了Ce或U的比较局域的f电子层和其他元素构成的导带电子层交替叠加而成,两层电子之间存在反铁磁自旋耦合(近藤耦合),并诱导了f电子层上局域自旋之间的所谓Ruderman—Kittel—Kasuya—Yosida(RKKY)交换相互作用。形象地说,Ce或U层的局域f电子可以近似地描述为一个自旋晶格(如图1(b)所示)^[3],低温下呈现出很强

* 国家自然科学基金(批准号: 11174339)和中国科学院“百人计划”资助项目

的自旋涨落，导带电子受到强烈的相干散射而使自身的运动变得迟缓，形成“重”电子。

重电子的影响首先体现在这些材料具有很高的低温比热系数上。如CeCoIn₅在常压下是超导体，超导转变温度为2.3 K，外加磁场将超导抑制后，发现比热系数随温度降低呈对数发散，在极低温度下，比热系数可以达到1 J/mol·K²，而一般金属如铜则只有1 mJ/mol·K²左右。在费米液体理论中，比热与电子的有效质量成正比，这就意味着材料中的电子具有很大的有效质量。

重电子在极低温度下会形成各种奇异量子态。1979年，德国物理学家Frank Steglich在CeCu₂Si₂中发现了非常规超导^[4]。如今，重费米子材料与后来发现的铜氧化物、铁基和一些有机超导材料一起，组成了非常规超导的大家族。30多年过去了，新的重费米子超导材料仍然层出不穷，图1(a)中的每个点都代表了一个新的重费米子超导材料被发现^[5]，这些材料不但为研究非常规超导提供了重要的实验基础，而且更呈现出其他多种多样尚不为人们所理解的奇异现象。我们只举以下几个例子：

(1)价态涨落引起的超导：CeCu₂Si₂在压力下有两个超导相，常压下的超导源自于反铁磁自旋涨落，而在高压下，Ce离子的价态发生改变。伴随着价态转变的同时，出现了一个新的高压超导相，一般认为这是由价态涨落导致的电子配对所

引起^[6]。这种新颖的配对机制极大地扩展了人们对超导形成机理的认识。

(2)超导/反铁磁共存：CeRhIn₅常压下是反铁磁体，高压下出现d波超导，反铁磁被完全抑制。但在1 GPa到1.8 GPa之间出现了反铁磁相和超导相的均匀共存，由于CeRhIn₅中Ce为+3价，只有一个4f电子，这个电子如何同时参与反铁磁和超导是一个很有意思但目前尚未明了的问题^[7]。

(3)隐藏序：早在上世纪80年代人们就发现了重费米子材料URu₂Si₂在17.5 K有个非常明显的二阶相变，但迄今没有找到与低温有序相对应的序参量，因而被人们称为“隐藏序”^[8]。和高温超导铜氧化物中的赝能隙问题类似，隐藏序研究也已经成为重费米子领域的一个独特风景，目前已经有不下二三十种理论方案，莫衷一是。

(4)拓扑表面态：SmB₆中的重电子在低温下会产生能隙成为半导体，但在更低温度下(几个开尔文)能隙间又会出现一些新的电子态，这一现象长期以来一直没有好的解释。拓扑绝缘体的发现为此提供了一个思路，最新研究认为，SmB₆的绝缘体态具有拓扑性质，能够产生无能隙的表面激发，这或许可以解释之前的实验观测^[9]。

此外还有如非费米液体行为、非常规的量子临界行为等等，限于篇幅不再逐一介绍^[10]，如何理解这些奇异现象是重费米子领域以及强关联电子领域的前沿和核心问题。我们认为，这些现象

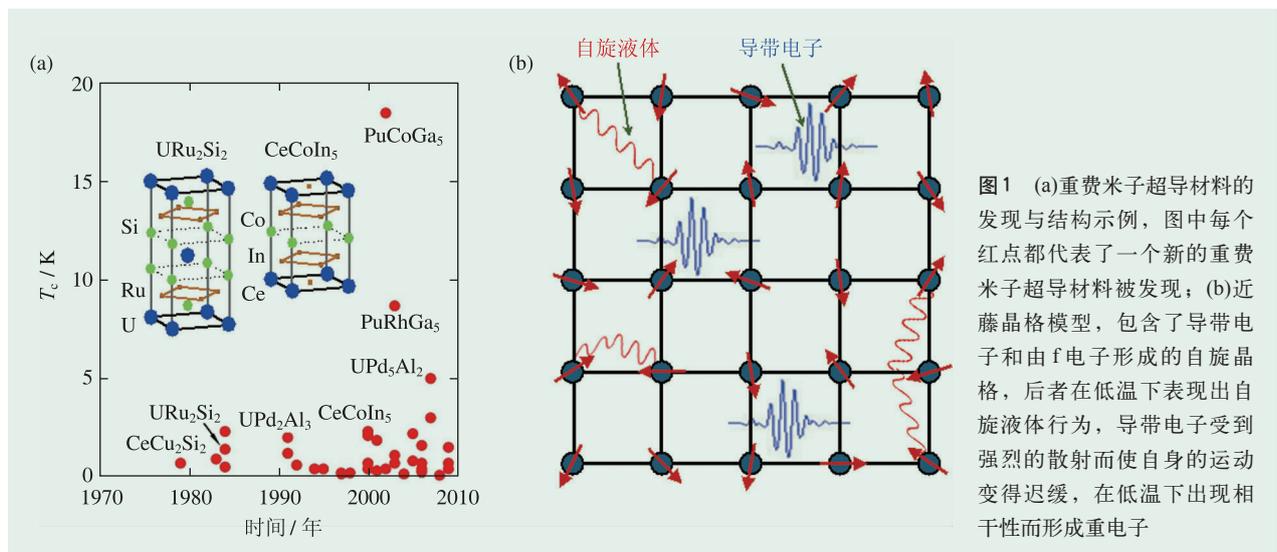


图1 (a)重费米子超导材料的发现与结构示例，图中每个红点都代表了一个新的重费米子超导材料被发现；(b)近藤晶格模型，包含了导带电子和由f电子形成的自旋晶格，后者在低温下表现出自旋液体行为，导带电子受到强烈的散射而使自身的运动变得迟缓，在低温下出现相干性而形成重电子

是由正常态重电子在低温下的不稳定性导致的，因而和重电子的物理性质密切相关，要彻底理解这些奇异现象背后的物理机制，必须首先研究重电子的行为特征。但是在一般的重费米子材料中，由于导带电子和晶格自旋涨落之间很强的耦合作用，使得材料的正常态也表现出非常复杂的行为，不能完全用基于单电子图像的能带理论或平均场近似处理，因此，对正常态重电子的微观描述目前还是一个尚未解决的问题，可能需要发展新的理论概念^[11]。为此，我们首先从实验出发，让实验数据告诉我们这些复杂现象背后的基本组织原则，以便更好地理解重电子的物理起源，最终建立起重费米子材料的比较全面的理论描述。

2 重电子研究

最近几年，得益于新材料的发现和扫描隧道谱等实验技术在重费米子研究中的应用，对重电子本身行为的认识也获得了突破性的进展，发现了一些原来所没有预期到的重要性质，即重电子的普适温度演化和Fano干涉效应。

2.1 重电子的普适温度演化

重电子的普适温度演化体现在众多物理量的

测量中。图2(a)和图2(b)分别给出了一些重费米子材料中奈特位移和霍尔系数的测量结果，两个物理量随温度的变化都具有与具体材料无关的普适性。

在核磁共振实验中，由于原子核自旋与周围电子的自旋之间的超精细相互作用，外加磁场下电子的自旋极化导致核自旋能级发生额外的劈裂，这就是奈特位移。在一般金属中，奈特位移与电子的磁化率成正比^[12]，而在大多数重费米子材料中，这一线性关系只在高温下成立，在低温下会出现反常的偏离，迄今为止，大多数文献中将此偏离归结为f电子受到晶体场效应的影响。如图2(a)所示，我们对大量材料进行了类比分析，出乎意料的是，偏离的大小随温度的变化具有普适的标度行为，不依赖于每个材料的细节^[13, 14]，因而不能用随材料复杂多变的晶体场效应来解释。

图2(b)给出了CeCoIn₅和CeRhIn₅两种材料在不同外加压力下的霍尔系数随温度的变化，我们发现了同样的普适温度依赖行为。类似的普适行为在点接触谱、拉曼谱中也都存在，具有很好的抗干扰性，不受压强、掺杂、或晶体场效应的影响^[13]，从而证实了重电子的这一行为是重费米子材料普遍存在的内禀特征。这是先前所没有预料到的，迄今也没有比较好的微观解释，无法纳入以单电子近似为基础的平均场理论的图像，反映

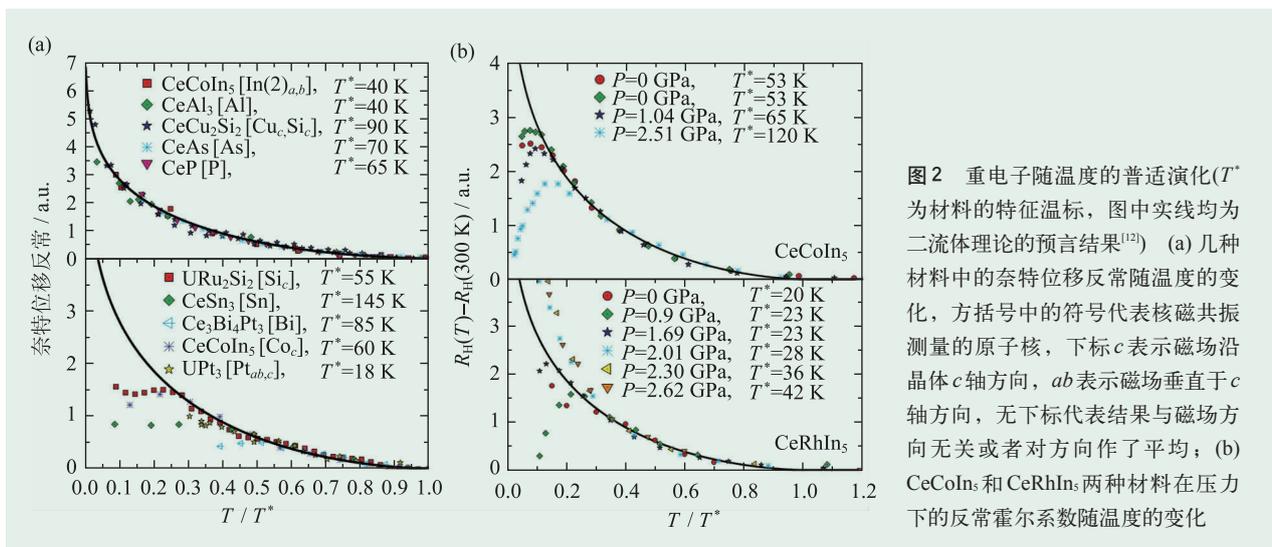


图2 重电子随温度的普适演化(T^* 为材料的特征温标，图中实线均为二流体理论的预言结果^[12]) (a) 几种材料中的奈特位移反常随温度的变化，方括号中的符号代表核磁共振测量的原子核，下标c表示磁场沿晶体c轴方向，ab表示磁场垂直于c轴方向，无下标代表结果与磁场方向无关或者对方向作了平均；(b) CeCoIn₅和CeRhIn₅两种材料在压力下的反常霍尔系数随温度的变化

重电子的产生是导带电子和晶格自旋集体行为的结果，具有尚不为我们所知的深刻物理根源。

我们发现，这一反常的普适标度律可以用二流体(two-fluid)模型唯象理解^[13-15]。导带电子和自旋晶格的耦合虽然会修正晶格自旋之间的相互作用，并阻滞导带电子的运动而产生重电子的行为，但整个体系仍然可以被近似地描述为两个共存的流体：一个是由晶格自旋构成的修正的自旋液体，另一个是由巡游重电子形成的流体(称为近藤液体)。在奈特位移中，假设两种流体与原子核自旋之间分别具有不同的超精细耦合常数 A 和 B ，它们对实验测量的磁化率 χ 和奈特位移 K 会有不同的贡献，即 $\chi = \chi_l + \chi_h$ 和 $K = K_0 + A\chi_l + B\chi_h$ 。其中 χ_l 和 χ_h 分别代表自旋液体和近藤液体的磁化率， K_0 是一个常数。如图 3(a) 所示，在高温下，由于不存在重电子($\chi_h = 0$)，两者都只探测自旋液体的磁化率，从而 $K = K_0 + A\chi$ ，符合线性关系。而当在低温下重电子出现后，由于两种流体对磁化率和奈特位移具有不同贡献，必然要导致两个物理量之间对其高温时的线性关系的偏离，即奈特位移反常，其幅度可以简单计算为 $K_{anom} = K - K_0 - A\chi = (B - A)\chi_h$ 。在一般情况下， $A \neq B$ ，奈特位移反常恰好正比于近藤液体的磁化率，因而实验上发现的普适标度律恰恰反映了重电子的普适温度演化^[13, 16]，我们可以利用奈特位移反常来探测重电子的行为规律。

2.2 重电子引起的反常现象

重电子的普适演化及二流体行为为理解重费米子材料中的大量反常现象提供了统一的思路。以霍尔系数为例，在 1987 年，法国科学家 A. Fert 和美国科学家 P. M. Levy 考虑了晶格上的局域自旋对导带电子的斜散射(非对称散射)，推导出霍尔系数正比于磁化率和电阻的乘积^[17]。对于大多数材料，这一关系在高温区与实验符合，但在低温下，重电子产生后即偏离了理论预期。可是由于其温度依赖关系的复杂性，长期以来缺乏进一步的理论进展。令人意外的是，在 Ce115 系列材料

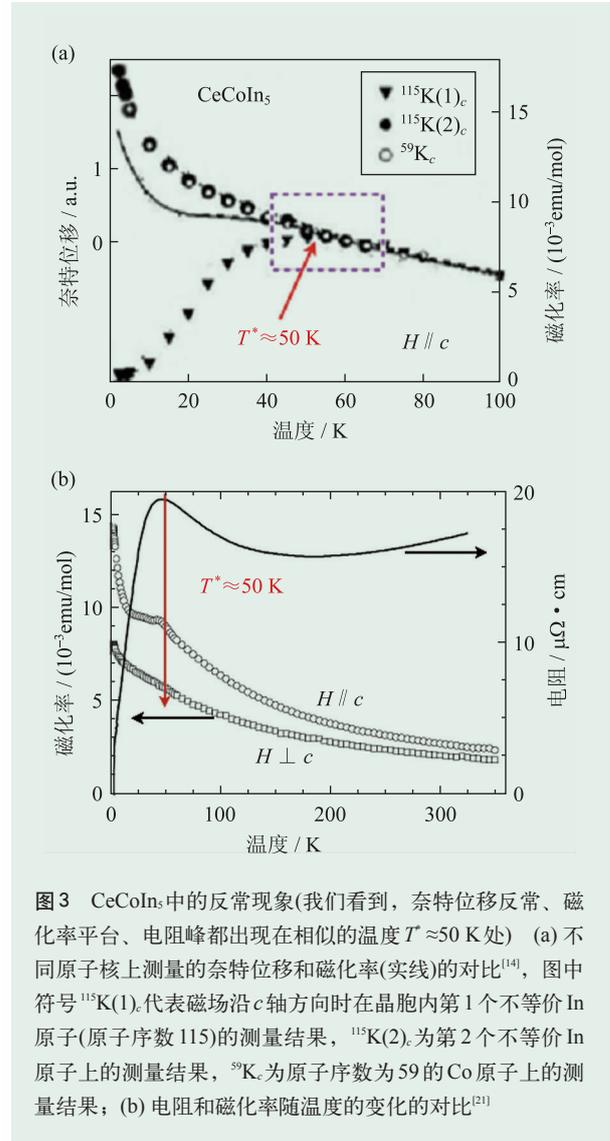


图3 CeCoIn₅中的反常现象(我们看到，奈特位移反常、磁化率平台、电阻峰都出现在相似的温度 $T^* \approx 50 \text{ K}$ 处) (a) 不同原子核上测量的奈特位移和磁化率(实线)的对比^[14]，图中符号 $^{115}\text{K}(1)_c$ 代表磁场沿 c 轴方向时在晶胞内第 1 个不等价 In 原子(原子序数 115)的测量结果， $^{115}\text{K}(2)_c$ 为第 2 个不等价 In 原子上的测量结果， $^{59}\text{K}_c$ 为原子序数为 59 的 Co 原子上的测量结果；(b) 电阻和磁化率随温度的变化的对比^[21]

中，无论加压还是掺杂，霍尔系数和图 2(b) 中看到的类似，在 T^* 之上都几乎不随温度变化，意味着该类材料中斜散射的贡献可以忽略^[18, 19]。为什么会出现这种抑制现象，其原因目前尚不明瞭，但这一结果使得我们发现，在 T^* 下霍尔系数随温度的变化具有和奈特位移反常相同的普适行为，从而证明了重电子对霍尔系数的贡献，表明霍尔系数也具有和奈特位移类似的二流体行为^[20]，即一部分源于晶格上局域自旋的斜散射贡献，符合 Fert 和 Levy 提出的理论，一部分源自巡游重电子自身的贡献，与普适磁化率成正比。这一发现定量地解释了重费米子材料中的霍尔系数随

温度的演化,但其背后的微观物理根源尚有待进一步研究。

除了奈特位移和霍尔系数外,重电子的产生也体现在其他众多的“反常”现象中,如电阻从绝缘行为到金属行为的转变,磁化率对居里—外斯行为的偏离,磁性熵的抑制,光电导中的杂化能隙,核磁共振自旋—晶格弛豫随温度变化的斜率改变,点接触电导谱正负偏压的非对称性,等等^[21]。这里我们以CeCoIn₅为例,简要介绍一下电阻和磁化率两种常见物理量的特征行为,图3(b)给出了以下相关的实验结果:

(1)电阻:在高温下,晶格自旋对导带电子的自旋翻转散射使得大多数重费米子材料表现为绝缘行为,即其电阻随温度下降而增加;而在低温下,随着重电子的产生,晶格自旋对导带电子的散射作用减弱,电阻转变为随温度下降而下降,呈现金属行为;当温度在 T^* 附近时,电阻出现峰值,反映了相干散射的发生和重电子的出现,因而 T^* 又被称作相干温度^[22]。

(2)磁化率:在重费米子材料中,对磁化率的主要贡献来自于局域f电子,在高温时,f电子近似独立,因而磁化率遵循通常的居里—外斯行为,其倒数与温度成线性关系。在温度为 T^* 时,重电子出现,意味着导带电子和晶格自旋发生强烈耦合,磁化率开始偏离居里—外斯行为,即出现反常现象。在图3(b)中,CeCoIn₅的磁化率在 T^* 处出现平台,而在其他一些材料中则出现磁化率峰。在二流体模型中,这些 T^* 附近的不同行为反映了重电子生成效率的不同,从而与更低温度下体系中出现反铁磁或费米液体基态具有密切关联^[23]。

这些各式各样的反常行为虽已早为人们所熟知,但是由于具体材料和实验的复杂性以及长期以来传统理论导致的偏见,阻碍了人们对其共同特征的认识。我们通过大量的实验分析发现,这些反常都发生在近似相同的温度处,从而为每个重费米子材料定义了一个统一的特征温标 T^* ,其起源与重电子的产生机制直接相关。对f电子的磁性熵的研究表明,正是在 T^* 之

下,晶格自旋之间才开始呈现出关联效应,这意味着重电子的产生与晶格上的自旋关联效应密切相关。由于重费米子材料中自旋相互作用都源自最基本的导带电子和晶格自旋之间的近藤耦合 J_k ,将 T^* 与 J_k 对比,就可获得有关 T^* 的物理起源的信息。而 J_k 可以通过对材料的掺杂减少晶格自旋的数目来获得,比如在CeCoIn₅材料中,用La替代Ce,当Ce的数目减少到1%以下时,晶格上的局域f电子自旋之间的近邻耦合可以忽略,低温下导带电子对每个局域f电子自旋单独地发生集体屏蔽,表现为单杂质近藤效应,其特征温度 T_k 可以通过对磁化率、比热、电阻等基本物理量的测量获得。从理论上讲, T_k 与 J_k 之间存在近似公式 $T_k = \rho^{-1} e^{-1/J_k \rho}$,其中 ρ 是导带电子的态密度,可以从对应的非磁性材料(如LaCoIn₅)的低温比热系数估计。对十多种重费米子材料的系统分析表明^[21], T^* 起源于晶格上局域自旋之间的近邻交换相互作用, $T^* = c J_k^2 \rho$,其中 $c \approx 0.45$ 是一个由材料细节决定的常数。这是第一次在重费米子材料中通过系统分析而得以确定的基本能标,并且不同于传统理论所假想的 T^* 源于某种晶格修正后的近藤温度。我们的研究表明,重电子是导带电子由于与晶格自旋涨落耦合出现费米面不稳定而产生的集体行为,重费米子物理的基本组织原则是晶格上局域自旋之间的近邻交换相互作用^[21]。

2.3 重电子的Fano干涉效应

重电子由导带电子和晶格自旋激发耦合产生,本质上是一种复合粒子,因而在实验上也表现出一些与其复合性质相关的奇特行为。在平均场理论近似中,复合性体现在重电子的能带由很宽的导带电子能带(导带)和很平坦的f电子能带杂化产生。因而在点接触和扫描隧道实验中(如图4(a)所示),类似于光的双缝干涉实验,入射电子可以通过导带和f电子能带两个不同的通道进入并发生干涉,在特定的偏压下干涉相消,微分电导被抑制,呈现出著名的Fano干涉效应^[24]。

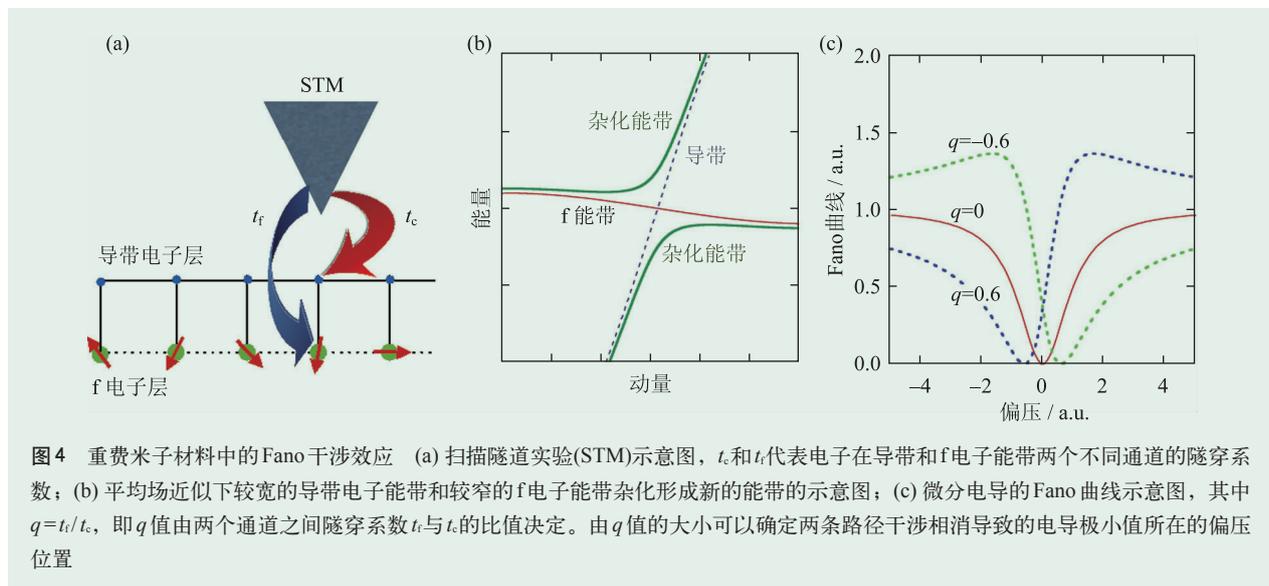


图4(b)给出了一个能带杂化的示意图，图4(c)给出了微分电导随偏压变化的Fano曲线的示意图，其中 q 是电子通过两个通道的隧穿系数之间的比值。实际材料中的微分电导曲线要更为复杂一些，必须考虑到电子整体态密度和关联效应的影响。受到CeCoIn₅材料中点接触实验的启发，我们首先从理论上提出了重电子的Fano干涉效应^[25]，这一发现在随后对URu₂Si₂的隐藏序和SmB₆的表面态等现象的点接触和扫描隧道实验研究中起到了重要作用^[26, 27]，但是迄今为止尚缺乏一个有效的微观理论能够同时解释重电子的普适行为和干涉效应。

2.4 重电子的超导凝聚

我们希望能够通过对正常态重电子的研究来认识材料在低温下涌现出来的各种各样的奇异量子态(特别是超导态)的物理机理。根据二流体图像，重费米子材料中存在晶格自旋液体和重电子近藤液体，因而其低温基态必然取决于这两种液体之间的共存和竞争^[23, 28]，其中自旋液体在低温下的不稳定性可以导致长程的局域磁性序，而近藤液体在低温下则会形成超导态，从而使二流体模型能够定性解释在很多重费米子材料中出现的反铁磁和超导共存这一奇异现象^[7]。

为了得到重电子超导凝聚的明确的实验证实，我们将奈特位移的测量扩展到超导态^[29]，借助于和前面类似的分析，我们可以从奈特位移反常中得到重电子在超导转变温度 T_c 之下的行为，并发现这行为也具有同样的普适性，不依赖于具体测量的原子核(如CeCoIn₅中的Co或In)，并且符合传统的Bardeen—Cooper—Schrieffer(BCS)理论对非常规d波超导的预言。那么是什么诱导了重电子的超导凝聚?前面我们讲到重电子的产生源自导带电子和晶格自旋激发之间的耦合，因而重电子继承了晶格上自旋之间的内禀的反铁磁交换关联，可以诱导电子在低温下产生超导配对。进一步对核磁共振实验中自旋—晶格弛豫的测量结果的分析也揭示了重电子内禀的磁性量子临界涨落现象，证实了上述图像。这种以反铁磁交换关联为媒介的超导配对机制是非常规超导的典型特征，不同于常规超导体中的电子—声子耦合机制。

我们进一步注意到，由于近藤液体具有统一的特征温标 T^* ，并且 T^* 起源于反铁磁交换耦合，因而其超导转变温度 T_c 与 T^* 之间必然存在直接的关联。图5将一些重费米子、铜氧化物和铁基超导材料的 T_c 与 T^* 或反铁磁交换作用 J_{ex} 对比，证实了在非常规超导体中两者之间确实存在比较普遍的近似比例关系^[30]。这一发现为探索新的超导材料提供了一个思路，那就是取具有强自旋交换相

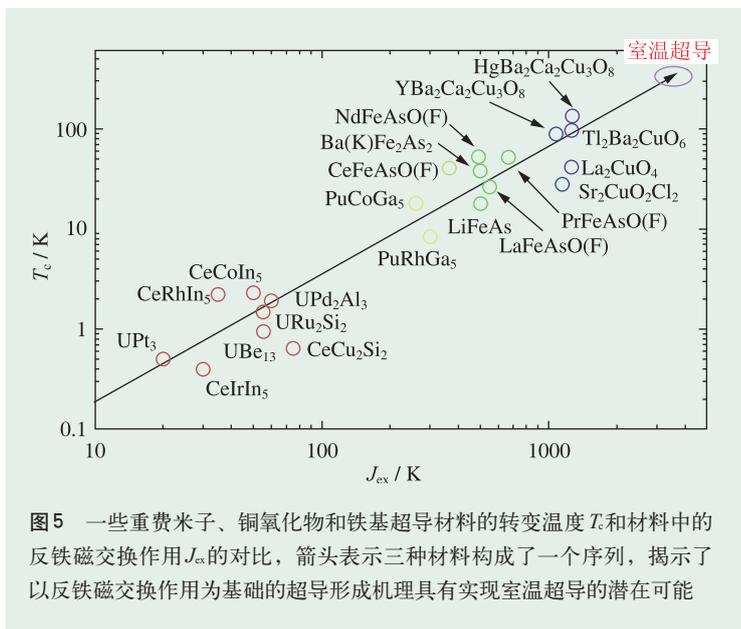


图5 一些重费米子、铜氧化物和铁基超导材料的转变温度 T_c 和材料中的反铁磁交换作用 J_{ex} 的对比, 箭头表示三种材料构成了一个序列, 揭示了以反铁磁交换作用为基础的超导形成机理具有实现室温超导的潜在可能

互作用的反铁磁材料为母体, 借助掺杂或加压等手段使其超导, 或许有可能得到更高转变温度的新的超导体。

3 展望

前面我们简要介绍了重电子的普适温度演化、复合本性及超导凝聚现象, 新材料和新实验技术的应用在这些现象发现过程中起到了关键的作用: 就材料而言, 每一种新材料的发现都为深入理解重费米子物理提供了新的可能。在重电子普适行为的发现中, Ce115材料起到了不可或缺的作用。由于目前尚未明了的原因, Ce115材料直观地揭示了重电子的普适温度演化, 使得这一发现

成为可能, 并得以扩展到对其他材料的研究分析中^[13]。就新实验技术的应用而言, 随着技术的进步, 一些复杂的实验手段也逐渐开始应用于极端条件下的重费米子研究。2010年以来, 扫描隧道显微术/扫描隧道谱(STM/STS)和分子束外延生长(MBE)技术先后应用于重费米子研究, 揭示了重电子的复合性质和空间维度对其低温基态的影响, 这些技术的应用直接影响着此领域的未来发展。

重费米子研究目前正处于一个关键时期, 重电子这些奇异行为的发现, 为建立完备的重费米子理论提供了一个全新的实验基础。二流体模型为分析繁杂的实验数据和揭示重电子的这些奇

特性提供了一个简单易行的方法。如何理解重电子的微观起源以及由之产生的非常规超导等众多复杂量子现象, 都是摆在我们面前的重要问题。最新研究表明, 铜氧化物和铁基超导材料中电子的行为也具有类似的二流体特征, 从而为其赋予了更加广泛的意义。作为强关联电子在微观尺度上的局域和巡游双重性的外在表现, 二流体行为有可能是构建强关联电子体系的基本理论所要考虑到的一个重要因素。

致谢 特别感谢加州大学 Davis 分校的 D. Pines 教授和 N. J. Curro 教授, 加州大学 Irvine 分校的 Z. Fisk 教授, 以及 Los Alamos 国家实验室的 J. D. Thompson 教授长期以来的讨论和合作。

参考文献

[1] Fisk Z, Sarrao J L, Smith J L *et al.* Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America, 1995, 92:6663
 [2] Cheng J G, Zhou J S, Yang Y F *et al.* Physical Review Letters, 2013, 111:176403
 [3] Kasuya T. Progress of Theoretical Physics, 1956, 16:45
 [4] Steglich F, Aarts J, Bredl C D *et al.* Physical Review Letters, 1979, 43:1892
 [5] Pfeleiderer C. Review of Modern Physics, 2009, 81:1551
 [6] Yuan H Q, Grosche F M, Deppe M *et al.* Science, 2003, 302:2104
 [7] Park T, Ronning F, Yuan H Q *et al.* Nature, 2006, 440:65
 [8] Mydosh J A, Oppeneer P M. Review of Modern Physics, 2011, 83:1301
 [9] Lu F, Zhao J, Weng H *et al.* Physical Review Letters, 2013, 110:096401
 [10] Si Q, Rabello S, Ingersent K *et al.* Nature, 2001, 413:804

[11] 张广铭, 于绿. 物理, 2010, 39: 543
 [12] Curro N J. Reports on Progress in Physics, 2009, 72: 026502
 [13] Yang Y F, Pines D. Physical Review Letters, 2008, 100: 096404
 [14] Curro N J, Young B L, Schmalian J *et al.* Physical Review B, 2004, 70: 235117
 [15] Nakatsuji S, Pines D, Fisk Z. Physical Review Letters, 2004, 92: 016401
 [16] Curro N J, Simovic B, Hammel P C *et al.* Physical Review B, 2001, 64: 180514(R)
 [17] Fert A, Levy P M. Physical Review B, 1987, 36: 1907
 [18] Hundley M F, Malinowski A, Pagliuso P G *et al.* Physical Review B, 2004, 70: 035113
 [19] Nakajima Y, Shishido H, Nakai H *et al.* Journal of the Physical Society of Japan, 2007, 76: 024703
 [20] Yang Y F. Physical Review B, 2013, 87: 045102
 [21] Yang Y F, Fisk Z, Lee H *et al.* Nature, 2008, 454: 611
 [22] Petrovic C, Pagliuso P G, Hundley M F *et al.* Journal of Physics:

Condensed Matter, 2001, 13: L337
 [23] Yang Y F, Pines D. Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America, 2012, 109: E3060
 [24] Fano U. Physical Review, 1961, 124: 1866
 [25] Yang Y F. Physical Review B, 2009, 79: 241107(R)
 [26] Aynajian P, da Silva Neto E H, Parker C V *et al.* Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America, 2010, 107: 10383
 [27] Zhang X H, Butch N P, Syers P *et al.* Physical Review X, 2013, 3: 011011
 [28] Shirer K R, Shockley A C, Dioguardi A P *et al.* Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America, 2012, 109: E3067
 [29] Yang Y F, Urbano R, Curro N J *et al.* Physical Review Letters, 2009, 103: 197004
 [30] Pines D. The Journal of Physical Chemistry B, 2013, DOI: 10.1021/jp403088e

三角形单层二硫化钨发光

美国科学家首次成功生成单层原子的二硫化钨(WS_2)。这种材料具有不寻常的光致发光特性, 可用于激光和发光二极管一类的光学装置。

二维材料与相应的三维材料相比, 具有极其不同的电子学与机械性能, 可用在许多新奇的装置中。但是, 至今为止, 该领域中大多数的工作都集中在人们最熟知的二维材料——石墨烯的研究方面。然而石墨烯缺少直接电子带隙, 因此科学家开始考虑其他的二维材料。

美国宾夕法尼亚州立大学的 Mauricio Terrones 和 Vincent Crespi 领导的团队设法沉积了少量的厚度不到 1 nm 的二氧化钨晶体, 然后让这些晶体通过 850 °C 的高温硫蒸汽。所生成的单层二硫化钨排列成由一些三角形组成的蜂巢形结构, 这些三角形由束缚在硫原子上的钨原子组成。

研究人员意外地发现, 这些三角形结构的边缘强烈地发光。此前从未报道过这种边缘光致发光效应。

物理新闻和动态

图 1 为二硫化钨发光三角体照片。

二维材料本质上不同于相应的三维材料, WS_2 也不例外。三维材料是一种间接带隙半导体, 而单层的二维材料具有直接带隙。半导体中的直接带隙是很重要的, 用这种半导体材料制成的装置发光效率高。研究人员计划研制具有不同光学与电子学特性的其他二维材料, 其中包括 $MoSe_2$, NbS_2 和 WSe_2 等, 并试图用这些三角形结构组成多组元的装置。有关论文发表在 2012 年 9 月号的 *Nano Letters* 上。



图 1 二硫化钨发光三角体

(树华 编译自 *Physics World News*, 13 February 2013)