

重费米子系统及其超导电性

章 立 源

(北京大学物理系)

一、概 述

1975年发现了一个化合物 CeAl_3 ^[1], 其低温电子比热系数 (γ) 达 $1620\text{mJ/mol} \cdot \text{K}^2$, 这比以往已知的材料的 γ 值大两个数量级。由于

$$\gamma \propto N(E_F)$$

(其中 $N(E_F)$ 为费米能处的态密度), 而 $N(E_F)$ 又与电子质量成正比(按自由电子模型), 所以大 γ 值意味着电子的有效质量大, 人们称这些材料为重费米子系统。

1979年, 西德 Darmstadt 的 F. Steglich 及其小组在重费米子系统 CeCu_2Si_2 ^[2] 中发现了超导电性。这个材料 $\gamma = 1100\text{mJ/mol} \cdot \text{K}^2$, 电子有效质量 $m^* \sim 10^2 m_e$ (m_e 代表电子质量, 其值为 $9.109 \times 10^{-31}\text{kg}$), 化合物中铈原子间距为 4.1\AA 。这个化合物在高温下磁化率 (χ) 服从居里-韦斯定律, 推知其有效原子磁矩 $\mu_{\text{eff}} = 2.68 \mu_B$ (μ_B 为玻尔磁子)。这样, 按照一般固体物理概念, 本可预期有相当强的磁相互作用, 从而不会出现超导电性。但是在 0.5K 附近, 实验发现了比热跃变以及块体迈斯纳效应, 肯定了超导电性的存在。这一发现使人们对重费米子系统普遍关注起来, 在 1984 年于西德召开的第 17 届国际低温物理大会上以及 1985 年美国物理学会年会上均成为热门的议题。

回过头来我们再谈 1983 年, 这时发现了第二个重费米子超导体 UBe_{13} ^[3], $T_c = 0.9\text{K}$ 。化合物中铀原子间距离为 5.13\AA 。这个重费米子超导体的发现有一段曲折的历史。早在 1975 年, Bucher 等人^[4] 早就研究了 17 个 MBe_{13} 型化合物, 其中元素 M 包含 U。他们在 0.97K 发现

UBe_{13} 有超导电性。但他们误认为这是沉淀的 U 丝状物引起的。他们对 UBe_{13} 的比热测量一直进行到 1.8K 的低温, 但可惜他们未用 ^3He 稀释致冷机作到更低温度测量比热, 否则, 就可以比 1983 年早五年开始进行重费米子系统的超导电性的研究。

1984 年, 美国 Los Alamos 小组发现第三个重费米子超导体 UPt_3 , $T_c \sim 0.5\text{K}$ ^[5]。

这些发现表明, 重费米子超导电性不是什么偶然的新奇事物, 它是人们在七十年代末和八十年代深入探索具有 f 电子金属间化合物的长途中所发现的一个窗口, 这仅仅是个开端。

与此同时, 还发现了在低温下出现磁有序三个重费米子系统 NpBe_{13} ^[6], U_2Zn_{17} ^[7], UCd_{11} ^[8]。还有, CeCu_6 也被发现为重费米子系统^[9], 但直到 0.050K 才出现磁有序, 前面提到的 CeAl_3 也属这种情况。

如果把 $\gamma > 400\text{mJ/mol} \cdot \text{K}^2$ 时的物质系统称为重费米子系统, 那么目前发现的共有八个, 其中三个有超导电性质。表 1 列出了它们的 Ce (或 U) 原子间距离 d , 磁化率以及电子比热系数等性能参数。为比较起见, 末三个并非重费米子系统, 也列在表 1 中。

总起来讲, 重费米子系统的共性是:

(1) 具有大的 γ 值, 从而有效电子质量很大。

(2) 包含有 f 电子。

(3) 稀土(或 U) 原子间距大于 4\AA , 这大大超过了 Hill 极限。Hill 在 1970 年指出的极限是 $3.25-3.50\text{\AA}$, Hill 指出, 当原子间距比这大时, 就不再有 f 电子之间的波函数的重迭。

(4) 它们都具有较大的磁化率, 但在 $T \rightarrow$

表 1

化合物	$d(\text{Å})$	$\chi(0)$ (10^{-3}emu/mol)	$\gamma(0)$ ($\text{mJ/mol}\cdot\text{K}^2$)
CeCu ₂ Si ₂	4.1	7	1100
UBe ₁₃	5.13	15	1100
UPt ₃	4.1	7	450
NPBe ₁₃	5.13	56	900
U ₂ Zn ₁₇	4.39	12.5	535
UCd ₁₁	6.56	38	840
CeAl ₃	4.43	36	1600
CeCu ₆	4.83	27	~1600
USn ₃	4.63	10	169
UGe ₃	4.21	1.3	23.4
UPt ₃	5.25	5.7	85

0K 时为有限值。在 100—300K 温度范围内服从居里-韦斯定律。

二、重费米子系统比热及磁化率的典型行为

先谈比热。大家知道在一般金属材料下,对于

$$T < \frac{1}{50} \Theta_D \text{ 或 } \frac{1}{10} \Theta_D$$

(Θ_D 表示德拜温度)的低温情况,比热与温度的关系为

$$c = \gamma T + \beta T^3. \quad (1)$$

第一项代表电子比热,第二项代表晶格比热。在正常金属情况下,在上述温度范围内, γ 和 Θ_D 都与温度关系不大。然而对重费米子系统比热出现明显反常。图 1 表示出 CeCu₂Si₂ 与 UBe₁₃ 的 $\frac{c}{T}$ 对 T^2 之关系。图 2 则是 UPt₃ 的相应关系。令人惊奇的是,在 1.5—8K 温度区间内, CeCu₂Si₂ 与 UBe₁₃ 的 $\frac{c}{T}$ 对 T^2 曲线几乎重合。而 UPt₃ 的曲线则属另一类型,分析其实验数据表明, UPt₃ 的比热可用下式表达:

$$c = \gamma T + \beta T^3 + \delta T^3 \ln T. \quad (2)$$

有 $T^3 \ln T$ 这一项存在,表明在 UPt₃ 中有较强的自旋涨落^[10]。就三个具有超导电性的重费米子系统而言,这可能是 CeCu₂Si₂, UBe₁₃ 这两者

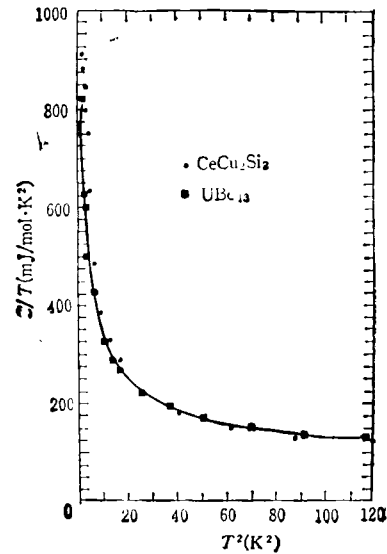


图 1

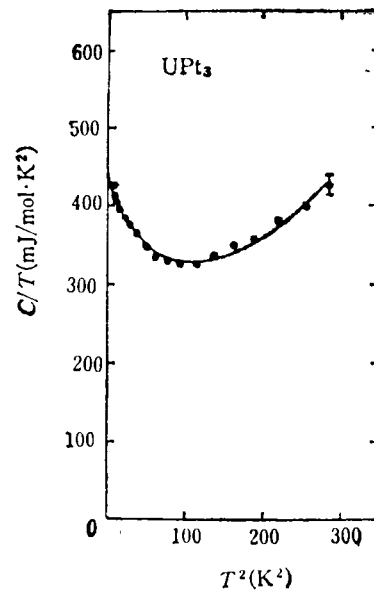


图 2

与 UPt₃ 的基本差异之一。

当 CeCu₂Si₂ 与 UBe₁₃ 处于超导态时,其电子比热与超导 BCS 理论的结果显著不符,如图 3 所示。对 UPt₃ 目前还没有相应的充分数据。

总的讲,重费米子系统的比热温度依赖关系有三种类型:(1)例如 UPt₃,它是在正常金属

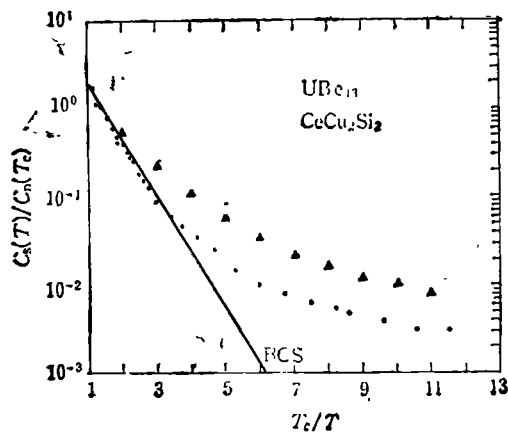


图 3

的关系(1)式上加入自旋涨落项 $T^3 \ln T$, 并有大 γ 值。应该指出, (2)式这种类型的关系并非重费米子系统所独有。 UAl_3 , $TiBe_2$ (非重费米子系统) 也有这种关系。然而 UPt_3 新奇之点在于: γ 值很大, 而且同时有自旋涨落与超导。(2) U_2Zn_{17} 与 UCd_{11} 在其磁有序温度之上(1)式也成立, 它们与非重费米子系统的区别只在于具有大 γ 值。(3) $CeCu_2Si_2$, UBe_{13} , $NpBe_{13}$, $CeAl_3$, $CeCu_6$ 等重费米子系统的 c/T 在 10K 之下均急剧增加。例如对于 UBe_{13} , 在从低温实验数据扣除其高温下(1)式的贡献之后发现, 扣除后的实验数据在 8K 之下随温度以 $T^{-1.6}$ 而变化。在低温下比热这个现象仍是个谜。

我们转而谈磁化率问题。所有八个重费米子系统在磁化率上都极相似。这表现在: (1) 随温度有很大变化, 靠近室温时磁化率服从居里-韦斯定律:

$$\chi \propto (T + \Theta)^{-1} \quad (\Theta < 0), \quad (3)$$

而在低温下 χ 值很大。为资比较列出表 2。

材 料	$T = 0K$ 下的 χ $\left(\frac{emu}{mol \cdot G} \right)$
$CeCu_2Si_2$	8×10^{-3}
Pd	0.75×10^{-3}
Pu	0.5×10^{-3}

(2) 从居里-韦斯定律可以得知, 重费米子系统具有很大的有效磁矩 ($> 2\mu_B$)。

重费米子系统磁化率很大使人们认为, 他们是强重正化准粒子所组成的费米液体。而 $T \sim 0K$ 时具有高 χ 值的非磁态(除去 $NpBe_{13}$, U_2Zn_{17} , UCd_{11} , 它们在低温下发生磁有序) 则被认为, 由于某种尚不明确的机制, 于低温下局域矩被破坏。一般认为, 重费米子系统的行为比简单局域的、独立的 f 自旋系统要复杂得多。

三、重费米子系统超导电性之谜

重费米子系统及其超导电性不只引起了全世界实验物理学工作者的兴趣, 而且提出了新的理论课题。重费米子系统电子的有效质量这样大的起因何在? 究竟哪些超导性质与 BCS 理论有不同? 这里有没有新的超导机制? 目前除需要进一步从实验上大力探索外, 在理论上则存在两派观点。一派认为 BCS 超导基本机制仍成立, 即电子对仍是自旋单重态配对(总自旋为零)^[11]。在这方面提出初步理论的有文献[12]等。另一派意见认为重费米子系统超导电性与 3He 的 A, B 相超流态类似, 其电子配对态的自旋是自旋三重态, 总自旋等于 1^[11]。提出三重态超导理论的有文献[13, 14]。文献[14]则以三重态超导(或称 p 波超导)机制解释图 3 曲线。总的看来, 问题还有待于深入展开实验及理论研究。Anderson 最近又发表文章说^[15], 看来简单地从 3He 情况外推是不对的; 另外, 从实验情况看来, $CeCu_2Si_2$ 、 UBe_{13} 两者与 UPt_3 可能是有区别的。

参 考 文 献

- [1] K. Andres et al., *Phys. Rev. Lett.*, **35**(1975), 1979.
- [2] F. Steglich et al., *Phys. Rev. Lett.*, **43**(1979), 1892.
- [3] H. R. Ott, H. Rudigier, *Phys. Rev. Lett.*, (1983), 1595.
- [4] E. Bucher et al., *Phys. Rev. B*, **11** (1975), 440.
- [5] G. R. Stewart et al., *Phys. Rev. Lett.*, **52** (1984), 679.
- [6] G. R. Stewart et al., *Phys. Rev. B*, **30**(1984), 1249.

(下转第 60 页)