教育部科学研究优秀成果奖（自然科学和工程技术）

# 自然科学奖提名项目公示内容

（2025年度）

### 项目基本情况

|  |  |
| --- | --- |
| 提名者 | 浙江大学 |
| 项目名称 | 中文名 | 重费米子超导和量子相变 |
| 英文名 | **Superconductivity and Quantum Phase Transitions in Heavy-Fermion Systems** |
| 主要完成人 | 袁辉球，刘洋，焦琳，Michael Smidman，路欣，曹超，张勇军 |
| 主要完成单位 | 浙江大学 |

### 三、项目简介

|  |
| --- |
| （限1页，限1200字）重费米子源自局域电子与巡游电子的近藤杂化，主要存在于镧系或者锕系金属间化合物。在重费米子化合物中，电荷、自旋、轨道、晶格等自由度强烈耦合，使其成为发现新颖量子态的摇篮。重费米子超导体CeCu2Si2是第一个超越BCS超导理论的非常规超导体，其发现开启了非常规超导研究浪潮。后续发现的铜基和铁基等高温超导体同属非常规超导体，表现出许多共性，其超导与磁性密切相关。相比之下，重费米子体系的特征能量低，易于调控，在研究超导与磁性相互作用等方面具有独特优势。另一方面，重费米子化合物中还发现了超越Hertz-Millis-Moriya量子相变理论的新型非常规量子相变以及奇异金属和隐藏序等新颖量子态。重费米子体系中量子相变的普适性及其与超导的关系既是重要的基础科学问题，又有助于高温超导机理研究，对推动物理学的发展发挥了重要作用。重费米子研究通常涉及综合极端条件下的多种物性测量，研究难度大，周期长，在很长一段时间，我国重费米子研究远落后于西方发达国家。近年来，随着实验条件的改善和青年人才的引进，在国家重点研发计划以及国家自然科学基金委等项目的连续资助下，项目组成员在重费米子超导与量子相变等方面取得了多项突破，奠定了在国际重费米子研究领域的地位。代表性成果包括：1. 打破先前学界关于本征铁磁量子相变不存在的普遍共识，首次在纯净的重费米子化合物CeRh6Ge4中发现了铁磁量子临界性，并在量子临界点附近观察到了奇异金属行为。随后，项目组成员实验发现，该化合物表现出局域铁磁性、准一维近藤杂化和磁各向异性等独特性质，为理解其铁磁量子临界性的起源奠定了基础。为了解释这些实验发现，国际上多名量子相变研究专家提出了他们的理论模型。
2. 通过压力、磁场等参量调控，构建了反铁磁重费米子化合物CeRhIn5的多参量相图，发现该化合物在不同参量调控下，其反铁磁量子相变呈现出多样性，并且可以通过费米面性质进行普适分类；给出了CeIrIn5位于反铁磁量子临界点的直接证据，澄清了这一长期具有争议的问题，并发现了该化合物表现出独特的超导无序效应。
3. 通过极低温磁场穿透深度测量，发现重费米子超导CeCu2Si2的超导能隙没有节点，表明其超导序参量不是先前学界普遍认可的简单d-波超导；发展了样品解离技术，首次通过角分辨光电子能谱测定了CeCu2Si2的三维费米面，确定了费米面嵌套与反铁磁自旋涨落的关系；提出了一种新颖的两能带d+d波超导配对机制，合理解释了现有实验现象。

该项成果发表在Nature、PNAS、PRL等学术期刊，并应邀在Rev. Mod. Phys. 撰写关于CeCu2Si2超导的综述论文。基于这些研究成果，项目负责人袁辉球入选美国物理学会会士（2021年）,并获得2021-2022年度中国物理学会叶企孙物理奖。此外，项目成员应邀在APS march meeting、国际强关联电子会议、国际超导材料与机理会议、国际低温物理会议和国际磁学会议上做邀请报告20余次。 |

### 六、代表性论文（专著）目录（不超过5篇）

|  |  |
| --- | --- |
| 序号 | 论文（专著）名称/刊名/作者 |
| 1 | Strange-metal behaviour in a pure ferromagnetic Kondo lattice/Nature/ 沈斌, 张勇军, Yashar Komijani, Michael Nicklas, Robert Borth, 王安, 陈晔, 聂志勇, 李蕊, 路欣, Hanoh Lee, Michael Smidman, Frank Steglich, Piers Coleman, 袁辉球 |
| 2 | Fermi surface reconstruction and multiple quantum phase transitions in the antiferromagnet CeRhIn5/PNAS/ 焦琳, 陈晔, Yoshimitsu Kohama, David Graf, E. D. Bauer, John Singleton, Jian-Xin Zhu, 翁宗法, 庞贵明, 商恬, 张警蕾, Han-Oh Lee, Tuson Park, Marcelo Jaime, J. D. Thompson, Frank Steglich, Qimiao Si, 袁辉球 |
| 3 | Fully gapped d-wave superconductivity in CeCu2Si2/PNAS/ 庞贵明, Michael Smidman, 张警蕾, 焦琳, 翁宗法, Emilian M. Nica, 陈晔, 江文兵, 张勇军, 谢武, Hirale S. Jeevan, Hanoh Lee, Philipp Gegenwart, Frank Steglich, Qimiao Si, 袁辉球 |
| 4 | Revealing the Heavy Quasiparticles in the Heavy-Fermion Superconductor CeCu2Si2/PRL/ 吴中正，方圆，苏杭，谢武，李鹏，吴毅，黄耀波，沈大伟, Balasubramanian Thiagarajan, Johan Adell, 曹超, 袁辉球, Frank Steglich, 刘洋 |
| 5 | Localized 4f-electrons in the quantum critical heavy fermion ferromagnet CeRh₆Ge₄/ Science Bulletin/ 王安, 杜锋, 张勇军，David Graf，沈斌，陈晔，刘洋，Michael Smidman，曹超，Frank Steglich, 袁辉球 |

### 八、主要完成人情况表（根据实际人数自行添加此页）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | 袁辉球 | 排名 | 1 |
| 技术职称 | 高级 |
| 工作单位 | 浙江大学 |
| 完成单位 | 浙江大学 |
|
| 对本项目重要科学发现的贡献：（限300字）作为团队的主要负责人，袁辉球教授主导了重费米子超导与量子相变相关项目的研究，负责项目方案的整体设计、实施和实验数据的解释，是代表工作1,2,3,5的通讯作者。搭建了国际领先的TDO磁场穿透深度测量系统，在CeCu2Si2中实现毫开尔文温区超流密度的精确测量；搭建了多参量调控低温物性测量平台，在纯净材料体系CeRh6Ge4中发现了铁磁量子临界点存在的证据，并组织团队成员研究了其产生机制；构造了CeRhIn5的多参量相图，发现了磁致反铁磁量子相变与费米面重构，构造了CeIrIn5的掺杂-温度相图，发现超导位于反铁磁量子临界点。 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | 刘洋 | 排名 | 2 |
| 技术职称 | 高级 |
| 工作单位 | 浙江大学 |
| 完成单位 | 浙江大学 |
|
| 对本项目重要科学发现的贡献：（限300字）刘洋教授的核心贡献为角分辨光电子谱（ARPES）技术在重费米子体系中的创新性应用以及电子结构的微观解析：代表工作4（通讯作者，PRL）：在CeCu2Si2中实现了三维费米面的精确测量，确认了反铁磁自旋涨落的来源及其与非常规超导的关系。代表工作5（共同作者，Science Bulletin）：参与CeRh6Ge4量子震荡实验结果的分析及其与ARPES结果的对比研究。主导CeRh6Ge4的ARPES测量和电子结构研究，揭示其各向异性的导带与4f电子的近藤杂化现象【PRL 2021, 通讯作者】。 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | 焦琳 | 排名 | 3 |
| 技术职称 | 高级 |
| 工作单位 | 浙江大学 |
| 完成单位 | 浙江大学 |
|
| 对本项目重要科学发现的贡献：（限300字）焦琳研究员在本项目中聚焦重费米子超导与量子相变的实验表征，其核心贡献体现于低温输运技术、量子振荡测量与磁化率分析的技术创新与应用。代表工作2（第一作者，PNAS）在反铁磁体系CeRhIn₅的研究中，开展了强磁场下的多种实验测量，发现了磁场诱导的费米面重构以及反铁磁量子相变。代表工作3（通讯作者，PNAS）搭建了极低温磁场穿透深度测量系统，指导研究生完成了CeCu₂Si₂极低温磁场穿透深度的测量并分析了其超导能隙结构。  |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | Michael Smidman | 排名 | 4 |
| 技术职称 | 高级 |
| 工作单位 | 浙江大学 |
| 完成单位 | 浙江大学 |
|
| 对本项目重要科学发现的贡献：（限300字）Michael Smidman是代表作1的通讯作者，代表作3、5的主要作者。负责CeRh6Ge4的中子散射和muSR测量，指导学生分析了CeRh6Ge4的高压数据；指导学生开展超导对称性的分析；撰写相关论文。 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | 路欣 | 排名 | 5 |
| 技术职称 | 高级 |
| 工作单位 | 浙江大学 |
| 完成单位 | 浙江大学 |
|
| 对本项目重要科学发现的贡献：（限300字）路欣教授是代表工作1 的共同作者，指导学生开展部分高压测量；负责Cd掺杂CeIrIn₅中的高压研究，发现压力抑制反铁磁序后超导态重新出现，且其特性与纯CeIrIn₅相似。通过量子振荡与比热测量，提出自旋液滴模型，揭示了量子临界点附近杂质诱导的非均匀电子态对长程磁序的影响机制。 【PRL 2015（通讯作者）】 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | 曹超 | 排名 | 6 |
| 技术职称 | 高级 |
| 工作单位 | 浙江大学 |
| 完成单位 | 浙江大学 |
|
| 对本项目重要科学发现的贡献：（限300字）曹超教授是代表工作4、5的共同作者，对本项目核心贡献主要体现在CeCu2Si2和CeRh6Ge4等重费米子材料体系的电子结构计算。通过第一性原理计算，系统研究了铁磁近藤晶格材料CeRh6Ge4的电子结构，揭示了该材料中各向异性与铁磁量子临界间的关系。通过第一性原理计算与实验的深度交叉验证，在动量空间尺度上揭示了CeCu2Si2的重费米子超导微观机制。 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | 张勇军 | 排名 | 7 |
| 技术职称 | 副高级 |
| 工作单位 | 湖北师范大学 |
| 完成单位 | 浙江大学 |
|
| 对本项目重要科学发现的贡献：（限300字）张勇军是代表作1的共同第一作者，代表作3和5的共同作者，其主要贡献是重费米子超导及铁磁量子临界材料的探索；主导了CeRh6Ge4等材料生长和表征工作。 |