

# 2025 年度陕西省科学技术奖提名公示

## (自然科学奖)

### 一、项目名称

长程自旋极化超流输运性质研究

### 二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

量子信息技术是一种高速运算、储存、处理信息的新型计算技术，其中量子输运和量子计算能够在人工智能领域加速数据处理和算法运行。当前计算机的计算和硬盘读写仅仅利用了电子的电荷特性。铁磁/超导异质结将超导体的零电阻特性与铁磁体中的自旋极化电流结合在一起形成可以远距离传输的自旋极化超流。这为电子自旋在实际中的应用提供了一种有效的方法和途径，并在自旋电子学和量子信息中表现出了非常诱人的应用前景。

该项目研究团队数年来一直致力于铁磁/超导异质结中自旋操控和超流输运研究，为研制自旋相关的固态量子纠缠器件和超导量子比特提供理论储备，推动超导自旋电子学的发展。相关研究成果共发表学术论文 10 余篇，其中在国际 TOP 期刊 *Physical Review B* 上发表 2 篇，在国内著名期刊《物理学报》上发表 1 篇。项目负责人先后主持并结题国家自然科学基金 2 项(青年项目、理论物理专项)；2022 年获陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖二等奖。

提名该项目为陕西省自然科学奖 二等奖。

### 三、项目简介

量子信息技术是一种高速运算、储存、处理信息的新型计算技术，其中量子输运和量子计算能够在人工智能领域加速数据处理和算法运行。当前计算机的计算和硬盘读写仅仅利用了电子的电荷特性，为了提高计算速度和精度人们希望将电子的自旋自由度引入到量子计算和存储当中。但是，单粒子自旋流在铁磁体内仅能传输几到十几纳米，这完全达不到实际应用的要求。令人兴奋的是，最近实验发现由自旋相同的三重对形成的自旋极化超流(*spin-polarized supercurrent*)可以在强铁磁体和半金属(*half-metal*)中传播几百纳米，这种极化超流在低能耗的高速信息处理方面具有巨大的应用潜力。铁磁/超导(F/S)异质结可以将铁磁体中的自旋极化电流与超导体的零电阻特性结合在一起形成可以远距离传输的自旋极化超流，这为自旋特性在实际中的应用提供了一种有效的方法。作为一个新的研究领域，它在自旋电子学和量子信息中表现出了非常诱人的应用前景。

本项目主要研究铁磁/超导异质结中长程自旋极化超流的输运性质，主要研究内容包括：(1)超导/铁磁/超导结构中铁磁中心非共线磁畴引起的长程 Josephson(约瑟夫森)电流；(2)超导/铁磁-绝缘势垒-铁磁/超导(S/F-I-F/S)结构中电流的共振隧穿效应；(3)三层非共线铁磁 Josephson 结(S/FL-F-FR/S)中自旋混合 Cooper(库珀)对引起的 Josephson 电流；(4)受压石墨烯的非常规超导导电性；(5)量子纠缠动力学过程中的量子隧穿效应。具体的研究内容详述如下：

(1)超导/铁磁/超导结构中铁磁中心非共线磁畴引起的长程 Josephson 电流。研究发现铁磁中心处的非共线磁畴可以引起一个自旋翻转散射(spin-flip scattering)过程，该过程反转了自旋单重 Cooper 对的自旋取向，同时改变了配对电子动量的符号。若磁畴两边的铁磁层具有相同的特征，就会形成长程超流。这是因为单重 Cooper 对可以产生精确的位相抵消效应，它们在穿过整个铁磁区时会获得一个额外的  $\pi$  相移。另外，自旋相同的三重对只存在于磁畴区域，不能扩散到另外两个铁磁层中。因此，超流主要来自单重 Cooper 对，而不涉及自旋相等的三重对。该结果为产生长程超流提供了一种有效途径。

(2)超导/铁磁-绝缘势垒-铁磁/超导(S/F-I-F/S)结中超流的共振隧穿效应。研究发现当两个铁磁层反平行时绝缘势垒会引起一个反常的行为——Josephson 临界电流随着铁磁层厚度和交换场强度的增加而发生振荡。比较有趣的是，在较小的交换场和厚度范围内铁磁体的磁性能够促使临界电流增强。以上奇特的效应仅在低温时较为显著，并在临界温度  $T_c$  附近消失。若用自旋活性(spin-active)势垒替代绝缘势垒则可以观察到传统的  $0-\pi$  转变，这与均匀铁磁 Josephson 结的情形类似。令人惊奇的是，若两个铁磁层的磁矩平行，自旋活性势垒能够使临界电流恢复上述反常行为。

(3)三层非共线铁磁 Josephson 结(S/FL-F-FR/S)中自旋混合 Cooper 对引起的 Josephson 电流。研究发现具有非共线磁矩的 FL 和 FR 界面能够产生自旋混合和自旋翻转效应，该效应能够将 S 内一部分自旋单重对转化为 F 内自旋相同的三重对。对于短 S/FL-F-FR/S 结，F 层内同时存在自旋单重对和自旋相同的三重对。于是，随着铁磁交换场和界面磁矩偏转角度差的增加，临界电流在一个基准面上振荡。若 F 转变为半金属，则 F 内仅剩自旋相同的三重对，临界电流的振荡特征消失。此外，FL 和 FR 界面还能起到普通势垒的作用。这将导致临界电流随着铁磁厚度的增加展现出双重振荡行为，其中长波振荡源于铁磁体内自旋单重对的位相变化，短波振荡是由自旋单重对和自旋相同的三重对经过两个界面势垒时的共振隧穿效应引起的。

(4)基于受压石墨烯的非常规超导态的研究。主要研究受压石墨烯中平能带结构导致的各种电子竞争序的共存相图，非常规超导态的出现等。此项研究从理论上提出了人们一直寻找的对密度波超导态的实验实现方案，并具体研究了其性质和内在物理机制，这为石墨烯材料超导电性的理解和运用提供了理论支持。

(5)量子纠缠动力学过程中的量子的隧穿效应。主要研究连续体系下耦合粒子的量子纠缠动力学产生过程，通过纠缠轨线展现量子纠缠的非定域性和单条轨线对量子纠缠的影响。研究发现量子隧穿效应会显著降低单条轨线对线性熵的贡献，并且通过纠缠轨线直观地展现了量子纠缠的非定域性特征。另外，该研究还显示了耦合粒子通过量子关联和经典关联转移能量的情况。该研究成果有利于理解量子物理独特的效应并为其应用提供理论基础。

本项目是在国家自然科学基金(11604195, 11447112)的支持下完成的。这些研究有助于揭示铁磁/超导异质结中自旋操控和超流输运的基本规律, 为研制自旋相关的固态量子纠缠器件和超导量子比特提供理论储备, 推动超导自旋电子学的发展。

## 四、客观评价

1. 项目组在 2014 年研究了超导/铁磁/超导结构中铁磁中心非共线磁畴引起的长程超流, 该项研究提出了一种新颖的结构来产生长程的 Josephson 电流。该工作最早发布于康奈尔大学 (Cornell University) 的预印本文库 arXiv 上(网址: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1405.1951>), 论文题目为: “Peculiar long-range supercurrent in SFS junction containing a noncollinear magnetic domain in the ferromagnetic region”, 索引为: arXiv:1405.1951。论文发布后很快被 M G Blamire and J W A Robinson 的专题评论(Topical Review)文章“The interface between superconductivity and magnetism: understanding and device prospects, J. Phys.: Condens. Matter 26, 453201 (2014)”所引用, 并给出了如下评价:

“...Under some of the conditions described [140] the two Ni layers should be parallel and hence the Gd forms a  $360^\circ$  domain wall: this scenario has recently been analysed by Meng and Wu [141] who show that the bulk of the conductance is likely to be via singlet pairs, with the triplet contribution confined to the domain wall region. A similar result is contained an analysis in the ballistic regime...”

[141] Meng H and Wu X 2014 Condens. Matter arXiv:1405.1951.

后来该项工作正式发表于 2015 年, 发表文章如下:

Hao Meng, Xiuqiang Wu, Yajie Ren, Peculiar long-range supercurrent in superconductor-ferromagnet-superconductor junction containing a noncollinear magnetic domain in the ferromagnetic region, Journal of Applied Physics 117, 023903 (2015).

2. 项目组在 2019 年研究了超导/铁磁-绝缘势垒-铁磁/超导(S/F-I-F/S)结中超流的共振隧穿效应, 该项工作采用纯量子的 Andreev 能谱法计算 Josephson 电流, 修正了准经典近似方法中的缺陷。另外, 将传统的 Andreev 能谱法由一维超导弱连接扩展到三维结构, 这使得计算出的 Josephson 电流与实验测量结果更加相符, 实现了方法上的创新。随后, 其他研究组引用和借鉴了该计算方法, 例如, Nikoli 等人在文章“Interference phenomena in Josephson junctions with ferromagnetic bilayers: Spin-triplet correlations and resonances, Phys. Rev. B 106, 054513 (2022)”中做了如下描述:

(1) “...A simple realization of a Josephson junction with an inhomogeneous ferromagnet is the SF<sub>1</sub>F<sub>2</sub>S heterostructure with two monodomain ferromagnets having noncollinear inplane magnetizations [19-30]...”

(2) “...In subsequent papers using the same approach [29, 30], the interplay between the geometric resonances and spin-triplet correlations was not studied explicitly...”

(3) “...The model and methods are the same as in the previous papers [20, 29, 30]...”

[30] H. Meng, Y. Ren, J. E. Villegas, and A. I. Buzdin, Josephson current through a ferromagnetic

bilayer: Beyond the quasiclassical approximation. Phys. Rev. B 100, 224514 (2019).

除了以上评价外，其它一些论文也引用了我们的研究成果。在这些论文中，有的在“研究背景”中介绍了我们的工作，有的在文章“主要理论”和“讨论部分”对我们研究成果给出了正面的评价。引用我们成果的学术论文分别发表在 Physical Review B、Physics Letters B 等国际知名期刊上，这说明我们的研究成果受到了国内外研究者的关注和认可。

## 五、代表性论文专著目录

| 序号           | 论文专著名称   | 刊名   | 作者  | 年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)    | 发表时间             | 通讯作者         | 第一作者     | 国内作者                   | SCI 他引次数 | 他引总次数 | 知识产权是否归国内所有 |
|--------------|--|--|---|--------------------------|------------------|--------------|----------|------------------------|----------|-------|-------------|
| 1            | Peculiar long-range supercurrent in superconductor-ferromagnet-superconductor junction containing a noncollinear magnetic domain in the ferromagnetic region | Journal of Applied Physics                 | Hao Meng, Xiuqiang Wu, Yajie Ren                                  | 2015 年 117 卷 2 期 023903  | 2015 年 1 月 9 日   | Hao Meng     | Hao Meng | 孟豪, 吴修强, 任亚杰           | 1        | 2     | 是           |
| 2            | Josephson current through a ferromagnetic bilayer: Beyond the quasiclassical approximation   | Physical Review B                          | Hao Meng, Yajie Ren, Javier E. Villegas, A. I. Buzdin             | 2019 年 100 卷 22 期 224514 | 2019 年 12 月 24 日 | A. I. Buzdin | Hao Meng | 孟豪, 任亚杰                | 4        | 7     | 是           |
| 3            | 自旋混合库珀对引起的 Josephson 电流  | 物理学报                                       | 孟豪, 吴修强   | 2023 年 72 卷 22 期 227402  | 2023 年 7 月 18 日  | 孟豪           | 孟豪       | 孟豪, 吴修强                | 0        | 0     | 是           |
| 4            | Strain-induced superconducting pair density wave states in graphene  | Physical Review B                          | Feng Xu, Po-Hao Chou, Chung-Hou Chung, Ting-Kuo Lee, Chung-Yu Mou | 2018 年 98 卷 20 期 205103  | 2018 年 11 月 02 日 | Feng Xu      | Feng Xu  | 徐峰, 周博豪, 钟崇厚, 李定国, 牟中瑜 | 8        | 13    | 是           |
| 5            | Quantum Tunneling Effect in Entanglement Dynamics  | International Journal of Quantum Chemistry | Feng Xu, Lei Zhang, Liyun Jiang, Lifu Bao, Hao Meng               | 2016 年 116 卷 7-12        | 2016 年 01 月 05 日 | Feng Xu      | Feng Xu  | 徐峰, 张磊, 姜立运, 包立夫, 孟豪   | 3        | 4     | 是           |
| 补充说明 (视情填写): |  |  |   |                          |                  |              |          |                        |          |       |             |

## 六、主要完成人情况

姓名：孟豪

排名：1

行政职务：无

技术职称：教授

工作单位：陕西理工大学

完成单位：陕西理工大学

**对本项目贡献：** 在项目研究中，作为项目负责人先后主持并结题国家自然科学基金 2 项 (11604195, 11447112)，主要完成了铁磁/超导异质结中长程自旋极化超流输运性质的研究，该研究具有一定的创新性。以第一作者发表代表性论文 1、2、3。

姓名：徐峰

排名：2

行政职务：无

技术职称：副教授

工作单位：陕西理工大学

完成单位：陕西理工大学

**对本项目贡献：** 作为本项目的重要参与者，主要负责理论推导和分析工作，先后完成了量子纠缠动力学中的量子隧穿效应和受压石墨烯非常规超导态的研究，以第一作者发表代表性论文 4、5。

## 七、主要完成单位情况

单位名称：陕西理工大学

**对本项目主要学术贡献：** 本项目依托单位为陕西理工大学，学校图书馆可提供较全面的中英文专业期刊数据库，其中包括：Springer Link、Elsevier Science、EBM 外文电子书数据库、维普科技期刊、中国知网、万方数字化期刊等多种电子期刊数据库，这些资源有利于申请人及时了解最新的科研发展动态。陕西理工大学物理与电信工程学院配备了高性能的工作站和并行服务器，这为本项目的研究提供了必要的工作条件。综上，本项目是在陕西理工大学的有利保障和支持下完成。

## 八、完成人合作关系说明

本项目所有完成人均为陕西理工大学在职教师，在陕西理工大学物理与电信工程学院的同一科研团队，共同开展了本项目的研究工作。第 1 完成人孟豪教授负责项目的整体计划和实施，主要承担了铁磁/超导异质结输运部分的研究工作，撰写了代表性论文 1、2、3。

第 2 完成人徐峰副教授协助制定相关研究方案、负责科学计算部分，主要承担了受压石墨

烯超导电性部分的研究工作，撰写了代表性论文 4。

第 1 和第 2 完成人共同合作完成了量子纠缠动力学中量子遂穿效应的研究，合作撰写发表代表性论文 5。