

分类号：

密级：

# 兰州大学

## 研究生学位论文

论文题目（中文） 铁磁石墨烯中近藤效应的数值重整化群研究

论文题目（外文） \_\_\_\_\_

研 究 生 姓 名 \_\_\_\_\_ 李高阳

学 科、专 业 \_\_\_\_\_ 物理学·理论物理

研 究 方 向 \_\_\_\_\_ 凝聚态理论

学 位 级 别 \_\_\_\_\_ 博士

导师姓名、职称 \_\_\_\_\_ 罗洪刚 教授    房铁峰 教授

论文工作起止年月 \_\_\_\_\_ 2015 年 9 月至 2019 年 6 月

论文提交日期 \_\_\_\_\_

论文答辩日期 \_\_\_\_\_

学位授予日期 \_\_\_\_\_

校址：甘肃省兰州市



# 原创性声明

本人郑重声明：本人所呈交的学位论文，是在导师的指导下独立进行研究所取得的成果。学位论文中凡引用他人已经发表或未发表的成果、数据、观点等，均已明确注明出处。除文中已经注明引用的内容外，不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究成果做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_

## 关于学位论文使用授权的声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属兰州大学。本人完全了解兰州大学有关保存、使用学位论文的规定，同意学校保存或向国家有关部门或机构送交论文的纸质版和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权兰州大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用任何复制手段保存和汇编本学位论文。本人离校后发表、使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，第一署名单位仍然为兰州大学。

本学位论文研究内容：

☐ 可以公开

☐ 不宜公开，已在学位办公室办理保密申请，解密后适用本授权书。

(请在以上选项内选择其中一项打“√”)

论文作者签名：\_\_\_\_\_ 导师签名：\_\_\_\_\_

日 期：\_\_\_\_\_ 日 期：\_\_\_\_\_



# 铁磁石墨烯中近藤效应的数值重整化群研究

## 中文摘要

关键词：



## **Abstract**

**Key words:**





# 目 录

中文摘要 .....	I
Abstract .....	III
第一章 引言 .....	1
1.1 量子杂质问题 .....	1
1.2 量子点系统中的近藤效应 .....	2
1.2.1 量子点 .....	2
1.2.2 近藤效应 .....	2
1.2.3 与正常电极连接的量子点 .....	2
1.2.4 与铁磁电极连接的量子点 .....	2
1.3 石墨烯中近藤效应 .....	2
1.3.1 赝能隙 Anderson 模型 .....	2
第二章 全密度矩阵数值重整化群 (FDM-NRG) .....	3
第三章 石墨烯中铁磁增强的近藤效应 .....	5
第四章 受门电压调控的铁磁性石墨烯中的近藤效应 .....	7
第五章 总结与展望 .....	9
5.1 总结 .....	9
5.2 展望 .....	9
在学期间的研究成果 .....	11
第六章 致谢 .....	13
致谢 .....	15



# 第一章 引言

简述量子多体问题，引出量子杂质问题

## 1.1 量子杂质问题

量子杂质问题描述的是一个多体相互作用（通常为库仑相互作用或交换相互作用）发生在单个位点（杂质）上的系统，并且杂质与一个由宏观数量的无相互作用粒子组成的热库相互作用。热库的粒子可以是玻色子（声子、磁振子、粒

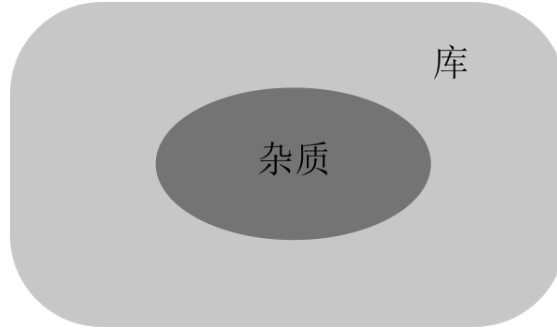


图 1-1: 量子杂质模型的示意图。系统包括了三部分: 杂质部分、库、杂质与库的耦合。

子-空穴对等）也可以是费米子（导带电子等），杂质可以是真实的杂质（如在金 Au 中掺杂的铁 Fe 原子，在石墨烯上吸附的钴 Co 原子），也可能是与电磁场相互作用的二能级原子，或表现为量子点的一块小的受限区域等。它们可以用近藤模型、安德森模型、自旋玻色模型等来描述，一般地表示为  $H = H_{\text{imp}} + H_{\text{bath}} + H_{\text{hyb}}$ ， $H_{\text{imp}}$  为杂质电子哈密顿量， $H_{\text{bath}}$  表示库电子哈密顿量， $H_{\text{hyb}}$  表示杂质电子与库电子的耦合。本文以单杂质安德森模型为例进行说明，对于单杂质安德森模型：

$$H_{\text{imp}} = \sum_{\sigma} \varepsilon_{d\sigma} d_{\sigma}^{\dagger} d_{\sigma} + U n_{d\uparrow} n_{d\downarrow},$$

$$H_{\text{bath}} = \sum_{k\sigma} \varepsilon_{k\sigma} c_{k\sigma}^{\dagger} c_{k\sigma},$$

$$H_{\text{hyb}} = \sum_{k\sigma} (V_{k\sigma} c_{k\sigma}^{\dagger} d_{k\sigma} + H.c.).$$

其中， $d_{\sigma}^{\dagger}(d_{\sigma})$  为杂质电子的产生（湮灭）算符， $\varepsilon_{d\sigma}$  表示杂质  $d$  电子自旋依赖的能级位置， $\sigma$  为系统的自旋指标，取值为  $\uparrow$  或  $\downarrow$ ， $n_{d\sigma} = d_{\sigma}^{\dagger} d_{\sigma}$  为杂质电子的粒子数

算符,  $U$  为杂质能级被又占据时的库仑排斥能。 $c_{k\sigma}^\dagger(c_{k\sigma})$  算符产生(湮灭)一个动量为  $k$ , 自旋为  $\sigma$  的库电子,  $\varepsilon_{k\sigma}$  为库电子的色散关系。最后一项哈密顿量  $H_{\text{hyb}}$  描述了杂质电子与库电子的耦合, 耦合强度为  $V_{kd}$ 。

## 1.2 量子点系统中的近藤效应

### 1.2.1 量子点

### 1.2.2 近藤效应

### 1.2.3 与正常电极连接的量子点

### 1.2.4 与铁磁电极连接的量子点

## 1.3 石墨烯中近藤效应

### 1.3.1 无能隙 Anderson 模型

## 第二章 全密度矩阵数值重整化群 (FDM-NRG)



### 第三章 石墨烯中铁磁增强的近藤效应





## 第四章 受门电压调控的铁磁性石墨烯中的近藤效应



## 第五章 总结与展望

### 5.1 总结

### 5.2 展望



## 在学期间的研究成果

### 发表的论文：

- [1] **Bin-Bin Mao(毛斌斌)**, Maoxin Liu(刘卯鑫), Wei Wu(吴威), Liangsheng Li(李粮生), Zu-Jian Ying(应祖建), Hong-Gang Luo(罗洪刚), *An analytical variational method for the biased quantum Rabi model in the ultra-strong coupling regime*, **Chin. Phys. B**, 2018, 27:054219.

### 参与的项目：

1. 自然科学杰出青年基金 (11325417)：凝聚态理论与数值方法。
2. 自然科学基金 (11174115)：少电子系统中电子关联的大尺度计算研究。
3. 自然科学基金 (11674139)：量子杂质系统中的新奇量子态研究。
4. 教育部创新团队基金 (IRT1251, IRT16R35)。



## 第六章 致谢





## 致 谢

