



固体物理学

Solid State Physics

冯济

2026 年 3 月 3 日

北京大学 物理学院
量子材料科学中心

1. 课程基本信息
2. 序章: 固体物理学
3. 教学大纲



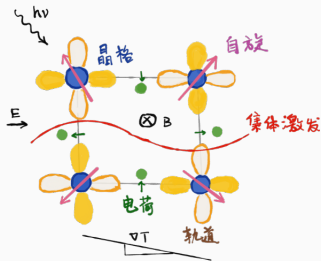
课程基本信息

课程内容

- 教学目标: 阐释固体物质中的基本现象和理论, 介绍前沿研究中的一些话题
- 先修课程: 量子力学, 平衡态统计力学

教学计划

- 早期的固体理论 (4 小时)
- 晶体的结构 (8 小时)
- 晶格动力学 (8 小时)
- 电子的能带理论 (12 小时)
- 输运现象和理论 (12 小时)
- 半导体物理 (10 小时)
- 磁序和磁性 (8 小时)



基本信息

- 教师：冯济
 - ▶ 办公室：物理学院西楼 574
 - ▶ 邮箱：jfeng11@pku.edu.cn
 - ▶ 主页：<http://feng.pku.edu.cn/>
- 助教：王子谦
 - ▶ 办公室：物理学院西楼 524
 - ▶ 邮箱：wangziqian@stu.pku.edu.cn
- 时间地点：三教 507, 周二 7-8/周五 3-4 节
- 信息发布：课程网，课程主页

群聊：固体物理学 '26

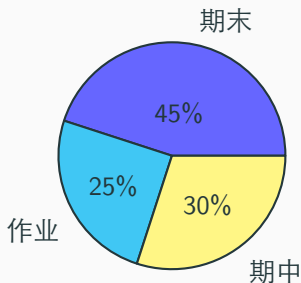


26 年春季《固体物理学》3 班
主要用于**事务性信息**交流
进群的同学请**备注姓名**



作业、考试、评分

- 评分: 作业 25, 期中考试 30, 期末考试 45
- 作业: 每周一次, 一周后在**课前提交**
- 👉 **请按时提交作业, 课后提交按当次作业扣 10/100 分, 之后每推后一周递减 1/100 分**
- 习题课: 双周五 9-10 节, 三教 405
- 期末考试: 6 月 21 日, 周日下午
- 答疑: 周一下午 2-3 点, 物理学院西楼 574

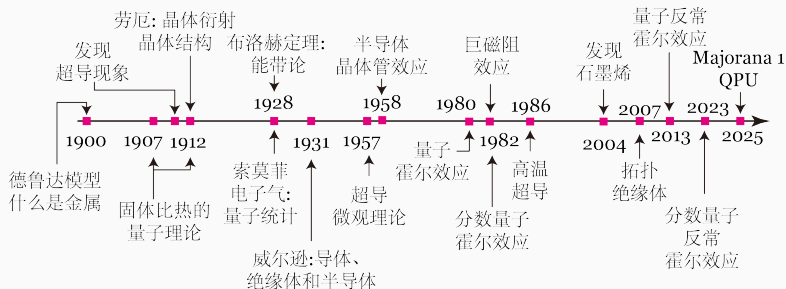


序章：固体物理学

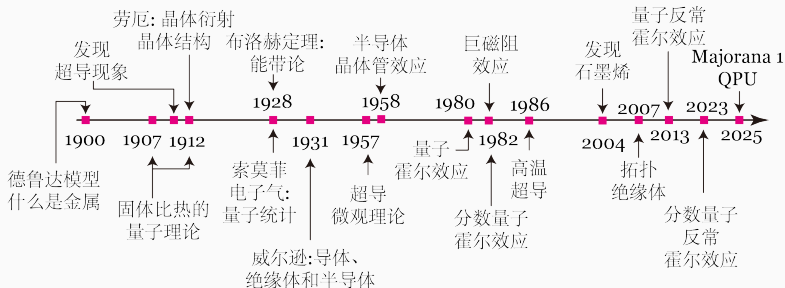
- 固体物理学是研究“物质”的科学：支配固态物质中电子和原子核的基本规律，及涌现的丰富现象
- 微观粒子运动规律：研究固体中电子和原子核的运动和交互，描述其行为的基本原理
 - ▶ 经典和量子力学，统计力学
- 宏观物性：通常宏观材料具有 $\sim 10^{23}$ 数量的粒子。从微观运动规律出发，研究固体在宏观尺度上的物理量，如热力学行为，电磁响应
 - ▶ 热力学，平衡和非平衡统计，电动力学



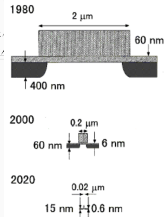
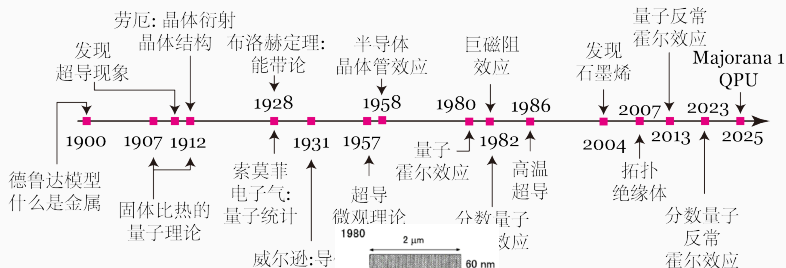
固体物理学：新现象，新原理



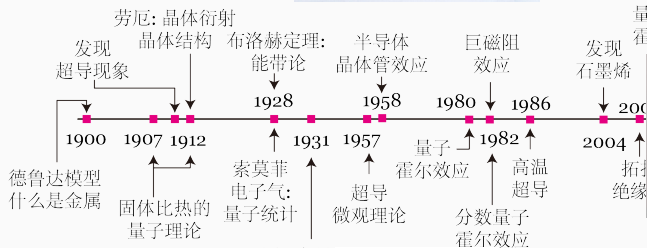
固体物理学：新现象，新原理，新应用



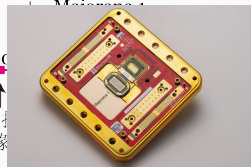
固体物理学：新现象，新原理，新应用



固体物理学：新现象，新原理，新应用

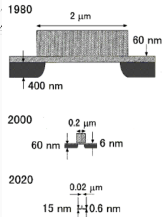


量子反常霍尔效应



量子反常霍尔效应

威尔逊: 导体、绝缘体和半导体



- 完整哈密顿量具有 10^{23} 自由度, 包含复杂相互作用

$$H = \sum_i^{N_e} \frac{\hat{\mathbf{p}}_i^2}{2m} + \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{e^2}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \quad \text{电子哈密顿量}$$
$$- \sum_{i,l} \frac{Z_l e^2}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{R}_l|} \quad \text{相互作用}$$
$$+ \sum_I^{N_p} \frac{\hat{\mathbf{P}}_I^2}{2M_I} + \frac{1}{2} \sum_{I,J} \frac{Z_I Z_J e^2}{|\mathbf{R}_I - \mathbf{R}_J|} \quad \text{原子核哈密顿量}$$

- 复杂的 (经典或量子) 多体问题, 无法求解



演生现象：宏观复杂性的涌现

- Anderson in *More is different*: The main fallacy [...] is that [...]: The ability to reduce everything to simple fundamental laws does not imply the ability to start from those laws and reconstruct the universe. Anderson P.W., Science (1972)
- 演生现象的本质
 - ▶ 尺度分离: 在不同能量/时间/长度尺度上, 系统由不同的关键自由度主导
 - ▶ 层次结构: 每一尺度都拥有其自身的基本定律和概念框架
 - ▶ 不可还原性: 高层行为无法仅通过底层定律简单预测
- 对称破缺 – 宏观物体的对称性可能破坏初始哈密顿量的对称性: 晶体, 超导, 磁序
- 刚性 (对称破缺导致系统对外界扰动的抵抗) 与元激发 (集体运动的量子化激发)



- 固体物理学的惊喜之一：与粒子物理学的思想完美衔接，这是因为两个学科都建立在某些最深刻的物理学原理之上
 - ▶ 对称性：对称性、自发对称破缺
 - ▶ 拓扑：几何相位、拓扑不变量、边缘态
 - ▶ 普适性：相变、重整化群、标度律
 - ▶ 量子场论框架：路径积分、格林函数、关联函数

粒子物理学概念	凝聚态物理学实现
狄拉克方程	石墨烯中的低能电子、拓扑绝缘体表面态
量子场论	声子（晶格振动的量子化）、磁振子
Majorana 费米子	拓扑超导体中的 Majorana 零能模
规范理论	自旋液体、分数量子霍尔效应
Higgs 机制	超导中的 Anderson-Higgs 机制

教学大纲

1. 早期的固体理论

- ▶ 德鲁达和索墨菲的金属理论
- ▶ 爱因斯坦和德拜的固体比热理论

2. 晶体的结构

- ▶ 平移对称性: 布拉维格子, 晶向与晶面, 倒格子
- ▶ 晶体的结构和对称性, 晶体的点群和空间群概念
- ▶ 晶体衍射与结构的测定

3. 晶格动力学

- ▶ 简谐晶体的振动: 一维原子链, 一般的晶体振动问题
- ▶ 简谐晶体振动的量子理论
- ▶ 晶体的热力学; 非谐效应和格鲁奈森参数; 长光波声子

4. 电子的能带理论

- ▶ 能带论基础: 布洛赫定理, 布洛赫函数的一般性质, 能带结构
- ▶ 能带论方法: 近自由电子近似, 紧束缚近似, $k \cdot p$ 方法
- ▶ 常见的模型: 一位原子链, SSH 模型, 石墨烯

5. 电子的输运理论

- ▶ 布洛赫的电子的半经典动力学
- ▶ 玻尔兹曼方程和半经典输运理论
- ▶ 量子效应

6. 半导体物理

- ▶ 常见半导体: 单质和化合物半导体, 基本结构和能带特征
- ▶ 非本征半导体: 掺杂, 载流子浓度
- ▶ 非均质半导体: p - n 结, 金属-半导体结, 晶体管

7. 磁序和磁性

- ▶ 基本的磁结构, 磁响应
- ▶ 交换相互作用, 海森堡模型
- ▶ 磁激发: 自旋波理论

课程教材

1. 《固体物理学》重排版. 黄昆编著, 北京大学出版社
2. 固体物理学讲义, 冯济
3. Solid State Physics. N. W. Ashcroft and N. D. Mermin

主要参考书:

1. Modern Condensed Matter Physics. S. Girvin and K. Yang
2. Introduction to Solid State Physics. C. Kittel
3. Dynamical theory of crystal lattices. M. Born and K. Huang
4. Principles of the Theory of Solids. J.M. Ziman.

谢谢!