

02	世界史重要问题研究	260
03	世界史研究的理论与方法	261
04	世界史基本问题研究	263
05	外国史学名著研读	264
0701	数学一级学科研究生核心课程指南	267
01	微分几何	267
02	复几何	268
03	拓扑学	271
04	代数学	273
05	数论	274
06	泛函分析	275
07	科学计算	277
08	微分方程	279
09	组合数学	283
10	运筹学	284
11	控制理论	287
12	概率论与数理统计	290
0702	物理学一级学科研究生核心课程指南	295
01	高等量子力学	295
02	群论	298
03	现代物理实验	301
04	高等统计物理	303
05	高等电动力学	305
06	量子场论	307
07	广义相对论	308
08	量子多体理论	311
09	固体理论	313
10	凝聚态物理学导论	316
11	介观物理	318
12	粒子物理基础	319
13	原子核理论	321
14	核与粒子物理实验探测与分析	322
15	高等原子分子物理	323
16	原子分子光谱学	325
17	高等光学	326
18	非线性光学	329
19	声学原理	331
20	固体声学	333
21	等离子体基础理论	335
22	等离子体实验与诊断	338
23	激光等离子体物理	343

24	计算物理	344
25	量子光学	347
0703	化学一级学科研究生核心课程指南	350
01	分子光谱学	350
02	高等仪器分析	352
03	高等无机化学	354
04	高等有机化学	357
05	高等有机合成	359
06	高等分离分析	364
07	高等高分子化学	365
08	高分子凝聚态物理	368
09	化学生物学	371
10	化学动力学	373
11	先进材料化学	377
12	高等结构化学	380
13	量子化学	382
0704	天文学一级学科研究生核心课程指南	385
01	天文观测与数据处理	385
02	天体测量学	386
03	广义相对论	389
04	现代天体力学	391
05	天体物理辐射过程	394
06	恒星结构与演化	396
07	星系宇宙学	398
0705	地理学一级学科研究生核心课程指南	401
01	高等自然地理学	401
02	人文地理学研究方法	403
03	遥感科学与技术	409
04	高等地图学	411
05	地理信息科学	414
06	全球变化科学	419
07	国土空间规划理论与实践	422
08	高等经济地理学	425
09	地理计算方法	428
10	GIS 程序与设计	432
11	地理学野外工作方法	436
0706	大气科学一级学科研究生核心课程指南	438
01	理论和计算地球流体力学	438
02	高等大气物理学	441
03	物理气候学	444
04	高等天气学	447

01 高等量子力学

一、课程概述

高等量子力学课程是物理学科研究生课程体系中最重要几门主干基础课和必修课之一,为后续限制性和选修性专业课程的先修课程。

二、先修课程

初等量子力学的基础知识。

三、课程目标

修完本门课程后,要求做到在大学本科量子力学水平之上进一步加强量子理论基础,提高运用量子理论解决具体问题的能力,准确理解一定的专题性内容,体会从非相对论量子力学到相对论量子力学乃至量子场论的过渡。

四、适用对象

物理学硕士或博士研究生。

五、授课方式

由于涉及较多的理论公式推导,课程比较适合采用传统的板书教学,同时适当利用一些现代多媒体信息技术辅助教学。

六、课程内容

第一章 量子力学的数学基础与物理原理

(1) Hilbert 空间的定义,态矢的内积及正交性,右矢和左矢,基矢和子空间,空间的直和与直积。

(2) 关于算符的基本概念和运算,厄米算符的基本特性、算符的本征态矢和本征值,态矢的外积与投影算符。

(3) 量子力学的基本原理(关于量子态、力学量、量子测量、量子态动力学演化及全同粒子的基本假设),不确定关系。

(4) 表象与表象变换。完备力学量集与表象,表象基矢的正交性和完备性,具体表象中量子力学的矩阵形式,表象变换与幺正算符,坐标表象与动量表象。

(5) 谐振子的粒子数表象与相干态表象*, 谐振子相干态及其性质*, 相干态表象中谐振子问题的解*, 谐振子的压缩相干态*。

第二章 量子动力学

(1) 薛定谔方程与时间演化算符, 编时乘积与时间演化算符的级数展开式。量子力学的三个绘景(薛定谔绘景、海森堡绘景和相互作用绘景), 三种绘景下态矢和力学量随时间的演化。

(2) 传播子及其物理意义**, 路径积分的物理思想**, 一维自由粒子和一维谐振子系统传播子的计算**, Feynman 路径积分理论与薛定谔方程的等价性**, 位形空间和相空间的路径积分*。

第三章 量子力学的新进展

(1) 密度算符与密度矩阵, 纯态与混合态, 纯态及混合态的密度矩阵, 密度矩阵中各分量代表的物理意义, 混合态密度算符分解的非唯一性, 密度算符的时间演化(Von Neumann 方程)。复合系统的直积态与纠缠态, 约化密度矩阵, Schmidt 分解*, Von Neumann 熵*。

(2) EPR-paradox, Bell 不等式, 薛定谔猫态佯谬, 纠缠与退相干。

(3) 绝热近似与 Berry 几何相, Aharonov-Bohm 效应。

第四章 角动量理论

(1) 无穷小转动与角动量算符的定义, 从角动量算符的对易关系导出 $(\hat{L}^2, \hat{L}_z)$ 共同本征态及本征值, 角动量算符在 $(\hat{L}^2, \hat{L}_z)$ 表象下的矩阵元。

(2) 角动量的耦合, 耦合表象基矢与非耦合表象基矢, Clebsch-Gordan 系数的若干性质及计算方法。三个角动量的耦合*。

(3) 转动算符表达式的导出, SO(3)和SU(2)群, 欧拉转动, 转动算符的欧拉角表示, 转动算符的若干性质及应用。

(4) Wigner-Eckart 定理, 不可约张量算符(Wigner 的定义与 Racah 的定义), 低阶不可约张量算符的性质, 不可约张量算符的直积**, Wigner-Eckart 定理的证明**, Wigner-Eckart 定理的应用举例**。

第五章 量子力学中的对称性

(1) 空间对称变换(空间反演、平移及空间转动), 空间对称性与守恒量, 连续性对称变换和离散性对称变换, 诺特(Noether)定理。

(2) 哈密顿量的对称性群, 能量简并与对称性的关系, 微扰对能级简并的影响。

(3) 空间反演对称性与宇称。

(4) 时间反演对称性与 Kramers 简并。

第六章 散射理论

(1) 弹性势散射, 散射振幅, 微分散射截面, 求解散射振幅的格林函数方法。

(2) 形式散射理论, Lippmann-Schwinger 方程, 自由格林算符与全格林算符, 格林算符的 Dyson 方程, 波算符, 跃迁算符, 散射算符, 光学定理。

(3) Lippmann-Schwinger 方程的坐标表象, 自由格林算符的坐标表象, 散射振幅的 Born 级数, Born-近似及其成立条件, 汤川势散射与库伦势散射**。

(4) Lippmann-Schwinger 方程的角动量表象, 分波法的导入, 分波的散射振幅及相移, 相移的 Born-近似公式, 中心势散射的逆问题*, 几种简单势场下 s-波散射截面的计算*。

(5) 其他形式的散射 **, 考虑粒子自旋的散射 **, 全同粒子散射, 非弹性散射, 相移的 Born-近似公式 **, 中心势散射 *。

第七章 二次量子化方法

(1) 全同性原理, 交换对称性, 玻色子和费米子。

(2) 全同玻色子系统的二次量子化, 坐标表象中的基矢, 单体算符和二体算符的矩阵元, 粒子数表象中的基矢, 粒子数表象中单体算符和二体算符的构成。

(3) 全同费米子系统的二次量子化, 坐标表象中的基矢, Pauli 不相容原理, 单体算符和二体算符的矩阵元, 粒子数表象中的基矢, 粒子数表象中单体算符和二体算符的构成。

(4) 场算符, 单体和二体算符的场算符表达式 *。

(5) 二次量子化方法的应用 **, 弱相互作用玻色气体模型 **, 相互作用电子气模型 **, 超导 BCS 理论的二次量子化描述 **。

第八章 场量子化

(1) 经典场。弹性场、电磁场。

(2) 场量子化。声子、光子, 零点能和 Casimir 效应。

(3) 物质和场的相互作用, 原子自发辐射, 激光原理, 切伦科夫辐射。

第九章 相对论量子力学

(1) Klein-Gordon 方程, 连续性方程, 负概率与负能量问题, Klein-Gordon 方程的非相对论极限, 电磁场作用下的 Klein-Gordon 方程 *。

(2) Klein-Gordon 场的正则量子化 *。

(3) Dirac 方程的引进, α 与 β 的矩阵表示, 连续性方程, Dirac 的空穴理论, Dirac 粒子的自旋, 体系的守恒量。

(4) 电磁场作用下的 Dirac 方程(非相对论极限), Pauli 方程的导出, 自旋-轨道相互作用算符的导出, Klein 佯谬。

(5) Dirac 方程的两个严格解(自由电子的平面波解, 氢原子的严格解)。

(6) Dirac 场的正则量子化 *。

注: 带 *、** 的章节可视实际教学情况定为选修内容。其中带 ** 的内容相对带 * 的内容更深更难。

■ 重点: 二次量子化、时空对称性、角动量理论、散射理论及 Dirac 方程。

■ 难点: 二次量子化理论中多体算符、时间反演对称性、角动量理论中的用欧拉角描写转动矩阵以及不可约张量、Dirac 方程以及形式散射理论, 尤其形式散射理论通常是学生觉得最困难的知识点。

七、考核要求

本课程的考核方式为笔试, 60 分为合格通过。

八、编写成员名单

朱世琳(北京大学)、郑以松(吉林大学)、吴佳俊(中国科学院大学)

02 群论

一、课程概述

本课程为理论物理学二级学科研究生的专业核心课,及其他相关专业研究生的专业普及课。

二、先修课程

线性代数、量子力学。

三、课程目标

群论是研究系统对称性的有效工具。本课程要学习群论的基本理论及其在物理学中应用的基本方法,重点要求掌握群及其线性表示理论,学习正多面体对称群、三维转动群、置换群、晶体点群和空间群、 $SU(N)$ 群的基本性质。通过本课程的学习,希望学生掌握群论的基本知识,学会用群论研究物理系统对称性质的基本方法。

四、适用对象

物理专业的博士和硕士研究生。

五、授课方式

推荐以板书方式进行课堂讲授,为学生预留思考时间,采取课堂讨论的方式进行课堂互动交流,辅以 ppt 文件帮助学生记录重点内容,每周安排答疑,并适当安排习题课讲解学生在习题中出现的共同问题。

六、课程内容

该课程建议课时数为 60~80。* 号标记内容根据选课学生专业分布和具体教学课时限制适当选取。

绪论 群论与对称性

教学目标:概述对称性的研究在物理学的发展中起着越来越重要的作用,而群论是研究系统对称性的有效工具。简单介绍课程的进行方式和需要的基础知识。

第一章 数学准备

教学目标:综述本课程必备的集合论与线性代数基础知识。

(1) 集合论复习。集合及其映射。满射(surjection),单射(injection)和双射(bijection)。

(2) 线性代数复习。线性空间,矢量和矢量基,线性变换和线性算符。线性算符的不变空间和矩阵形表示。在基底变换时,矢量和线性算符表示矩阵的变换方式。相似变换和矩阵的对角化。矢量的内积。矩阵的直和与直积。几类重要矩阵的定义和性质。

- 重点:线性空间和线性变换。相似变换和矩阵的对角化。
- 难点:熟练掌握矩阵的相似变换和矩阵的对角化。

第二章 群的基本概念

教学目标:学习群的定义和群的各种子集。群之间的同构与同态映射关系。介绍物理上常见的对称变换群。

(1) 对称的概念,通过一个简单例子说明群论方法可以脱离系统的细节,直接研究与系统对称性有关的可与实验比较的精确性质。

(2) 群的定义和性质,有限群的重排定理及乘法表,几个低阶群的乘法表,循环群和群的生成元。

(3) 群的各种子集。子群、循环子群、陪集、不变子群、共轭元素、类、商群及其主要性质。

(4) 群的同构和同态,同态对应的核。

(5) 系统的 N 次固有转动轴,等价轴,双向轴。

(6) 置换,轮换和对换。置换群及其交变子群。

(7) 正多边形对称群和正多面体对称群。

(8) 群的直接乘积, I 型和 P 型非固有点群。

■ 重点:群的定义及其各种子集,群的同构和同态,正多边形对称群和正多面体对称群, I 型和 P 型非固有点群。

■ 难点:置换群,正多面体对称群。

第三章 群的线性表示理论

教学目标:掌握群的线性表示基本理论。学习物理学中常见的有限群的不等价不可约表示及其特征标表。掌握群论在物理中应用的基本方法。

(1) 线性表示的定义,特征标,真实表示、恒等表示、自身表示、么正表示、实正交表示。

(2) 群空间、群函数和群代数。群的正则表示。

(3) 标量函数变换算符。

(4) 群的表示空间,等价表示,有限群表示的么正性。

(5) 群的不可约表示的定义,舒尔定理和正交关系。

(6) 有限群不等价不可约表示的完备性,可约表示的约化。

(7) 群的实表示、自共轭表示和非自共轭表示。

(8) 较简单有限群的不等价不可约表示特征标表的计算。

(9) 分导表示和诱导表示, D_N 群不等价不可约表示。

(10) 定态波函数按对称群表示分类。

(11) 直乘表示的分解,克莱布施-戈登级数与系数。

(12) 维格纳-埃伽定理,不可约张量算符及其矩阵元。

(13) 正则简并与偶然简并,选择定则,物理应用举例(授课教师可以根据学生专业背景选取相应群论在物理研究中的实例展示)。

* (14) 有限群群代数的不可约基, T 群和 O 群的不可约基。

■ 重点:特征标,表示空间,不等价不可约表示,有限群的特征标表,可约表示的约化,克莱布施-戈登级数与系数,维格纳-埃伽定理,不可约张量,群论在物理中应用的基本方法。

■ 难点:标量函数变换算符,有限群群代数的不可约基。

第四章 置换群

教学目标:置换群描写全同粒子系统对称性。置换群是阶很高的有限群,它们的不等价不可约表示通常用杨图和杨算符方法来研究,即用有限群代数不可约基方法来研究。

(1) 理想和幂等元,原始幂等元和等价幂等元的判定,原始幂等元的完备性。

(2) 杨图、杨表、正则杨表和杨算符,杨算符的对称性质和福克条件,正交的正则杨算符架设置换群的完备的原始幂等元。

* (3) 置换群不可约表示的标准基。

* (4) 列表法计算置换群的不可约表示、图解法计算置换群不可约表示的特征表。

* (5) 公式法计算置换群不可约表示的实正交形式(免证明),置换群实正交不可约表示基的计算。

* (6) 置换群不可约表示的内积和外积,李特尔伍德(Littlewood)-理查森(Richardson)规则。

■ 重点:杨图、杨表、正则杨表和杨算符的定义和计算规则,列表法计算置换群的不可约表示,图解法计算置换群不可约表示的特征表,公式法计算置换群不可约表示的实正交形式。

■ 难点:原始幂等元的判定、等价性和完备性,* 李特尔伍德-理查森规则。

第五章 三维转动群和李代数

教学目标:三维转动群是最简单的李群,也是物理上最常用的李群。本章通过对三维转动群及其表示的系统研究,介绍李群和李代数的一些基本概念及其表示理论,半单李代数的分类和 $SU(N)$ 群不可约表示的计算。

(1) 三维空间转动群的定义,绕 $\vec{n}$ 方向 ω 角的转动。

(2) 李群及其组合函数的定义,李群的局域性质和李群的无穷小量,李群不可约表示生成元和微量算符。

(3) 李群的整体性质,群空间的连通性、连通度和紧致李群群上的积分,转动群群空间的双连通性。

(4) 三维转动群的覆盖群, $SU(2)$ 群和 $SO(3)$ 群的同态关系, $SU(2)$ 群群上的积分,欧拉角,把任意转动分解为三个绕坐标轴方向转动的乘积。

(5) $SU(2)$ 群不可约表示及其性质,球函数和球谐多项式, $SU(2)$ 群克莱布施-戈登(C-G)级数与系数。

(6) 李氏三定理。李代数和李群的伴随表示。

* (7) 基林(Killing)型和嘉当(Cartan)判据,半单李代数的概念,嘉当-韦尔基及其满足的正则对易关系,单纯李代数分类(免证明)和邓金(Dynkin)图。

* (8) 李代数不可约表示的性质,权和升(降)算符,谢瓦莱(Chevalley)基。

* (9) A_1 李代数和 $SU(N)$ 群,张量空间的约化和张量杨表,方块权图方法和重权时独立状态基的选择(指盖尔范德(Gelfand)方法), $SU(N)$ 群不可约表示的计算, $SU(N)$ 群不可约表示维数计算的杨图方法。

(10) 标量场、矢量场、旋量场、张量场及其在空间转动下的变换规则。

■ 重点:李群的群空间、组合函数和生成元,李代数, $SO(3)$ 群的覆盖群, $SO(3)$ 群($SU(2)$ 群)的不可约表示,球函数和球谐多项式, $SU(2)$ 群克莱布施-戈登级数和系数,* $SU(3)$ 群不可约

表示及其张量基的计算。

■ 难点:李氏三定理,张量空间的约化和张量杨表,*方块权图方法,* $SU(3)$ 群不可约表示的计算。

第六章 晶体的对称性

教学目标:晶体的对称变换群,晶格点群,晶系和布拉菲格子,空间群及其不可约表示。

(1) 晶体的对称操作,平移群是晶体对称变换群的不变子群。

(2) 晶体允许的点群元素,晶格矢量和倒晶格矢量,晶体的 11 种固有点群和 32 种晶格点群,晶格双点群。

(3) 七种晶系、14 种布拉菲(Bravais)格子和 73 种简单空间群。

* (4) 晶体的对称元,空间群的符号及其对称性质,布洛赫(Bloch)定理,空间群不可约表示简介。

■ 重点:晶系和布拉菲格子,晶体的对称操作,空间群的符号及其对称性质。

■ 难点:晶系和布拉菲格子,*空间群不可约表示。

* 第七章 洛伦兹群

教学目标:初步了解洛伦兹群及其表示。

(1) 齐次洛伦兹群的定义和子群,通过和 $SO(4)$ 群的参数联系计算固有洛伦兹群的不可约表示。

(2) 固有洛伦兹群的覆盖群。

(3) 狄拉克旋量表示。

■ 重点:固有洛伦兹群的表示和覆盖群。

■ 难点:狄拉克旋量表示。

七、考核要求

平时作业、期末闭卷笔试、* 期末小论文。

八、编写成员名单

马中骥(中国科学院大学)、同宁华(中国人民大学)、杨德山(中国科学院大学)

03 现代物理实验

一、课程概述

现代物理实验课程为物理学科各专业研究生,尤其是实验物理专业研究生进一步训练动手能力和掌握相关实验技术而开设。课程内容涵盖薄膜物理实验、量子光学实验、凝聚态物理实验、辐射探测与粒子探测实验等,根据学科发展和科研实际工作设置。本课程所列实验内容为建议实验,具体实验设置可以根据各个学校的实验条件和基础进行相应调整。

二、先修课程

普通物理、基础物理实验。

三、课程目标

通过本课程的学习,希望学生能掌握固体物理、原子分子物理、光学、凝聚态物理、量子信息、粒子物理与原子核物理等领域的近代物理实验方法,提高实验技能,为进一步的专业学习打下基础。

四、适用对象

博士和硕士研究生。

五、授课方式

教师讲解、演示,学生动手操作。

六、课程内容

1. 演示实验(以下实验中选4个,总计8学时)

- (1) 实验室安全讲解。
- (2) 区熔再结晶实验。
- (3) 光电子能谱设备。
- (4) 球差透射电镜观测样品。

2. 操作实验(以下实验中选做8个,每个实验包含原理介绍、实验操作和数据分析三部分,4个学时,总计32学时)

(1) 脉冲白光诱导快速退火实验。测量非晶硅薄膜、氮化硅薄膜等薄膜样品经不同温度的脉冲白光诱导快速退火及退火处理前后其表面形貌和微结构的变化,研究其变化的原因。

(2) 原子力扫描探针显微镜实验。学习 AFM 原理及使用、观测薄膜样品表面形貌并做一定的数据处理。

(3) 扫描隧道显微镜实验。学习 STM 原理及使用,制备探针等,观测样品表面。

(4) 赝热光 HBT 实验。测量赝热光的二阶关联函数,研究其相干时间、相干长度和试验参数的关系,观察其交叉光谱。

(5) 全光纤量子密钥分发实验。理解量子密钥分发原理,知道如何进行量子加密通信及具体操作。

(6) 纠缠态的制备。了解纠缠态的概念,知道利用光子实现纠缠态的方法及具体操作。

(7) Bell 不等式的测量。了解 Bell 不等式,并熟悉实验上验证的方法及具体操作。

(8) 饱和光谱测量。利用饱和光谱技术,获得高分辨的光谱。

(9) 宇宙线探测实验。理解高能粒子的探测原理,熟悉探测器常用的高压及核电子学的使用,掌握信号符合测量方法,利用闪烁体探测器及光电倍增管对宇宙线进行探测,并在此基础上开展宇宙线天顶角分布测量。对学有余力的同学可以进一步开展宇宙线寿命测量,验证相对论

时钟变缓效应。

(10) 细胞迁移观测实验。利用共聚焦显微镜观测细胞的三维运动,学习随机运动的理论描述,理解生物系统动力学的非平衡态特性。

(11) 振动样品磁强计(VSM)实验。理解 VSM 测量材料磁性质的原理,测量磁性样品的矫顽力、剩磁、居里温度、比饱和磁化强度等宏观磁性能,研究复合材料的磁性,如磁性多层膜层间磁耦合性质。

(12) 微弱光电信号的测量。首先利用高精度高增益的仪表放大器探测微弱光信号,并进一步利用锁相放大器(Lock-in)提高信号的信噪比。Lock-in 技术适用于大部分微弱信号探测,是一种通用技术,本实验可结合饱和吸收谱的实验,提高精密光谱测量的信噪比。

七、考核要求

考核方式为课堂实验动手操作,课后提交实验报告。要求在教师指导下能独立完成实验操作,理解实验原理,在实验报告中对实验现象的表述清楚、实验图表呈现清晰美观、对实验数据的分析讨论充分。

八、编写成员名单

刘倩(中国科学院大学)、林晓(中国科学院大学)、郑阳恒(中国科学院大学)

04 高等统计物理

一、课程概述

本课程为物理学一级学科及相关专业研究生的学科基础课,是本科阶段热力学与统计物理课程的后续课程,主要包含了平衡态统计物理、非平衡态统计物理、量子统计物理等学科的基础知识和前沿发展。

二、先修课程

高等数学、线性代数、经典力学、量子力学、热力学与统计物理。

三、课程目标

物理类研究生通过本课程的学习,掌握统计物理领域的基本概念、原理和理论方法,了解相关领域的研究前沿和热点。重点培养科学思维方法和创新意识,初步具备有效运用统计物理理论解决实际问题的能力,为后继课程的学习与未来的科研奠定坚实基础。

四、适用对象

博士和硕士研究生。

五、授课方式

采用多媒体教学与黑板书写结合的方式,以板书为主。

六、课程内容

1. 绪论及系综理论基础

课程简介及统计物理基础知识回顾,相空间和运动方程, Liouville 定理,微正则系综,微正则分布与热力学公式,应用。

2. 正则系综与巨正则系综

系统与热库的平衡,正则系综的配分函数和热力学量;能量均分定理及遍历性问题, Virial 定理,状态方程与集团展式,固体热容量;系统与粒子库的平衡,巨正则系综的巨配分函数和热力学量,应用。

3. 量子统计初步

量子力学的系综理论:密度矩阵,各种系综的统计,应用。

4. 玻色及费米体系

理想玻色气体的热力学行为,玻色爱因斯坦凝聚,超流相变与朗道超流理论;理想费米气体的热力学行为,金属中的电子气体,朗道费米液体理论,超导电性与 BCS 理论。

5. 相变与临界现象

相变模型(气液相变、Ising 模型、渗流模型),连续相变,临界指数, Landau 平均场理论,标度定律;实空间重正化群方法,动量空间重正化群方法;量子相变初步。

6. 统计物理中的数值计算初步

Monte Carlo 概论, Metropolis 算法及 Cluster 算法,物理量计算, 2D Ising 模型,量子 Monte Carlo 初步。

7. 涨落与非平衡态统计初步

涨落的准热力学理论,临界点附近的涨落和关联,布朗运动理论,涨落耗散定理, Onsager 关系,输运理论,经典与量子热化,应用。

8. 非平衡态统计前沿领域简介

远离平衡系统的演化,涨落定理, Jarzynski 等式,耗散结构理论,非广延统计物理,复杂网络。

七、考核要求

平时作业、期末考试、课程论文。

八、编写成员名单

陈焱(复旦大学)、赵鸿(厦门大学)、周昕(中国科学院大学)

05 高等电动力学

一、课程概述

高等电动力学是物理学研究生课程体系中的基础课程之一,是研究生深入学习光与物质(如电介质、导体、等离子体)相互作用、光检测技术(如拉曼散射)、高等光学、量子光学、光通信和粒子加速器等学科必须掌握的重要基础理论知识。

二、先修课程

电动力学及相应的高等数学课程(如数学物理方法、矢量分析、复变函数)。

三、课程目标

熟练掌握麦克斯韦方程组在不同介质(绝缘体、导体、等离子体、磁流体等)和不同坐标系中的求解(矢量平面波、矢量球面波),掌握电磁场能量和动量的应用(如光镊、冷原子晶体),由因果律确定的介电系数实部与虚部之间的关系(Kramers-Kronig 关系),电磁场的多极矩展开。

熟练掌握狭义相对论的时空变换(洛伦兹变换)、电动力学麦克斯韦方程的协变性以及电磁场物理量的狭义相对论时空变换。掌握带电粒子在电磁场中的运动、电磁场的能量-动量张量、运动电荷的电磁辐射等知识。

四、适用对象

物理学或天文学的博士和硕士研究生。

五、授课方式

以课堂讲授为主,结合习题、思考题和大作业等方法,启发研究生对课程内容的兴趣和深入理解。为顾及物理学科不同专业方向研究生的基础知识,本课程大纲的内容比较充实,完全讲授需要 18 周(每周 4 节课)讲课时间。对于每学期 16 周(每周 4 节课)讲课时间的院校,建议根据听课学生的专业情况适当调整讲课内容。例如,对光学、凝聚态等专业的研究生可以少讲后三章;对加速器、高能粒子等专业的研究生可以少讲前三章。

六、课程内容

第一章 麦克斯韦方程

1. 麦克斯韦方程组
2. 矢量势、标量势和规范变换
3. 格林函数和推迟波动方程的解
4. 带电粒子和电磁场能量和动量守恒的坡印亭定理(简介光镊、激光冷原子晶体原理)
5. 具有色散和损耗的线性介质体系的坡印亭定理(本章难点,强调导出公式的适用范围)

6. 电磁场在旋转和时空反演下的变换(强调赝矢量的概念)

7. 电磁体系中的热力学关系及自由能

第二章 波的传播

1. 非导体介质中的平面电磁波及其偏振

2. 导体和损耗介质中的电磁波

3. 介质、导体和等离子体的频率色散

4. 等离子体的随机相位近似(本章难点,介绍带电粒子间相互作用对等离子体集体运动的影响)

5. 磁流体波(本章难点,介绍电极化与麦克斯韦方程联立求解的复杂系统中平面电磁波色散关系和偏振方向的一般确定方法)

6. 波的叠加、群速度和超光速脉冲(superluminality)简介

7. 电位移和电场间的因果律以及 Kramers-Kronig 关系(本章难点,介绍普适的因果律和介质色散之间的重要关系)

8. 导体表面和导体内的电磁波传播

第三章 电磁波辐射系统和电磁波散射

1. 局域振荡电荷电流源的电磁场和电磁辐射

2. 亥姆霍兹方程格林函数的球面波展开(本章难点,由此公式可以得出平面波的球面波展开公式)

3. 无源真空区域电磁场的多极矩展开(本章难点,介绍麦克斯韦方程的矢量球面波解)

4. 长波长光的散射(本章难点,介绍散射截面概念,并讨论周期分布和随机分布粒子对光的散射)

5. 圆形球体对任意波长电磁波的散射(本章难点,电磁场矢量球面波解在电磁波散射中的应用)

6. 汤姆逊散射,瑞利散射,米氏散射

第四章 狭义相对论

1. 狭义相对论基本原理和时空理论(洛伦兹变换,四维速度,速度相加,四维加速度,四维动量,四维力)

2. 相对论力学(本章重点和难点,讨论粒子的相对论能量和动量,要求掌握并能利用相对论四维动量的守恒定律解决实际问题)

3. 洛伦兹变换的张量表示,四维张量(四维零阶张量,四维一阶张量,四维二阶张量,四维二阶混合张量,度规张量及四维微分算符)

4. 相对论电动力学,四维电流密度,四维电磁势矢量及波动方程的张量形式

5. 麦克斯韦方程组的协变形式

6. 电磁场的变换(本章重点)

第五章 相对论性粒子和电磁场的动力学

1. 外电磁场中一个相对论性带电粒子的拉格朗日函数和哈密顿函数,并由此推导出电磁场中相对论性带电粒子的运动方程

2. 利用电磁场中相对论带电粒子的运动方程,讨论带电粒子在均匀静磁场中的运动、在均

匀静磁场和静电场的并合场中的运动、带电粒子在非均匀静磁场中的漂移、带电粒子在绝热变化磁场中的运动

3. 介绍电磁场的变分原理、电磁场的拉格朗日量和哈密顿量

4. 电磁场的能量—动量张量及电磁场守恒定律(即能量守恒、动量守恒及角动量守恒,本章难点)

5. 波动方程的协变解,协变格林函数

第六章 运动电荷的辐射

1. 点电荷的李纳—维谢尔势和场(本章难点)

2. 加速运动电荷辐射功率的协变形式和非协变形式

3. 粒子作直线加速运动、瞬时圆周运动及任意极端相对论运动的辐射角分布、辐射功率,及加速运动粒子辐射能量的频谱分布和角分布(要求了解做瞬时圆周运动相对论带电粒子的辐射频谱分布和角分布的特点)

4. 切伦科夫辐射

七、考核要求

期末课堂考试(时间至少3小时)+平时成绩。

八、编写成员名单

孙弘(上海交通大学)、郑汉青(北京大学)、王青(清华大学)、黎明(中国科学院大学)

06 量子场论

一、课程概述

本课程主要讲述相对论性量子场论的基础内容,主要涉及标量、旋量和电磁场的正则量子化、有相互作用的量子场论微扰论的理论框架、量子电动力学(QED)的基本(树图)过程、QED过程的辐射修正(一圈过程)以及正规化、重整化步骤的介绍。本课程是后面研究粒子物理理论的基础。

二、先修课程

量子力学、电动力学。

三、课程目标

了解量子场论的基本语言并掌握 QED 树图基本过程的计算规则,初步学会量子场论中的正规化、重整化。

四、适用对象

粒子物理、核物理、理论物理、凝聚态物理等方向的一年级的研究生,其他方向的研究生也可选修。

五、授课方式

以传统授课为主,附加以电子课件,和组织研究讨论课。

六、课程内容

第一章 洛伦兹对称性与相对论性场的作用量(洛伦兹群的表示,标量场,外尔、马约拉纳和狄拉克旋量场,矢量场)

第二章 自由场的正则量子化(标量场、旋量场、电磁场)

第三章 有相互作用的量子场与费曼图(相互作用表象,编时格林函数的微扰展开,Wick定理,费曼图与费曼规则,散射截面与S矩阵,LSZ约化公式,S矩阵元及其费曼图表示)

第四章 量子电动力学的基本过程(正负电子到正负 μ 子散射、Bhabha散射和Moeller散射、康普顿散射)

第五章 量子电动力学的一圈过程(电子自能、光子自能、电子顶点函数、QED的一圈结构和重整化、量子电动力学Ward恒等式在重整化中的应用)

七、考核要求

考核综合平时作业以及期末考核,期末考核可采用口试、闭卷笔试或者部分闭卷笔试部分开卷作业等形式。

八、编写成员名单

刘川(北京大学)、郑汉青(北京大学)、马建平(中国科学院大学)、杨海棠(四川大学)、廖益(南开大学)

07 广义相对论

一、课程概述

广义相对论是理论物理方向研究生的专业核心课,探讨关于引力的本质及各种引力现象。广义相对论是近代物理的重要基础,本课程的学习有助于深入理解和掌握量子场论、粒子物理、高等电动力学等相关课程。

二、先修课程

高等数学、线性代数、理论力学、电动力学。

三、课程目标

通过本课程的学习,深入领会引力与时空弯曲的关系,建立相对论的时空观,掌握张量分析、黎曼曲率、流形等数学概念和工具及其在相对论中的应用,掌握和理解引力场方程、黑洞、引力波及宇宙学基础等内容,为进一步在引力及相关领域开展研究打下基础。

四、适用对象

引力及相对论专业方向的硕士、博士研究生,以及其他相关专业的研究生。

五、授课方式

以板书及 ppt 结合的方式授课,鼓励教师与学生课堂互动及学生课后进行自主拓展学习。

六、课程内容

建议授课课时应不少于 40 学时,不少于 2 学分。

第一章 引言

牛顿引力与狭义相对性原理的不兼容,等效原理,引力的几何描述及广义相对论的引入。

第二章 广义相对论的数学基础

1. 流形和切矢场

流形的基本概念,坐标片,切矢量场的意义。

2. 张量场

对偶矢量场(1-形式),张量场,张量运算,张量的例子,能动张量。

3. 度规张量

度规张量的意义,黎曼正则坐标。

4. 导数算符及矢量场沿曲线的平移

导数,仿射联络,黎曼几何基本定理,克里斯托弗符号,平行移动。

5. 测地线

测地线的两种定义,测地线方程。

6. 黎曼曲率张量

曲率的几何意义,曲率张量的定义,黎曼曲率张量的对称性,里奇张量,曲率标量,比安奇等式,爱因斯坦张量。

7. 李导数与 Killing(基灵)矢量场

拉回和推前,李导数的定义,基灵矢量场,守恒量。

8. 微分形式与积分

微分形式的定义,外导数与外微分,张量密度,Levi-Civita 张量,积分元。

9. 斯托克斯定理与高斯定理

斯托克斯定理,高斯定理。

第三章 狭义相对论

1. 平直时空的几何描述

闵可夫斯基时空度规,惯性参考系,类时、类空、类光线元,固有时与坐标时。

2. 尺缩钟慢及双生子效应

结合时空图解释尺缩钟慢及双生子效应。

3. 质点运动学和动力学

质点的静止质量和运动质量,质能关系,4 速度,4 动量。

4. 麦克斯韦方程的张量形式

电磁场张量,4 电流密度,麦克斯韦方程的张量形式,电场、磁场与电磁场张量的关系。

第四章 广义相对论基础

1. 引力与四维时空几何

引力质量与惯性质量,引力与时空弯曲,度规的物理解释。

2. 广义协变性原理与弯曲时空的物理规律

广义协变性原理,等效原理与局部惯性系,用最小替换法则得到弯曲时空的物理规律。

3. 潮汐加速度与测地偏离方程

潮汐加速度,测地偏离方程与时空曲率。

4. 爱因斯坦场方程

爱因斯坦张量与爱因斯坦场方程,场方程的性质和意义。

5. 广义相对论的线性近似和牛顿极限

弱引力场的描述,线性爱因斯坦场方程,规范自由性与洛伦兹规范条件,弱场低速近似条件,牛顿引力的泊松方程,牛顿引力中质点运动方程。

第五章 史瓦西时空

1. 史瓦西真空解

静态球对称时空,史瓦西真空解。

2. 粒子和光子的测地线运动

利用能量、角动量守恒求解测地线方程。

3. 广义相对论的三个经典实验验证

引力红移,水星近日点进动,星光偏折。

4. 最大延拓史瓦西时空

坐标奇点与时空奇点,Kruskal 延拓,史瓦西黑洞的视界和奇点。

5. 史瓦西黑洞的形成

恒星演化过程,钱德拉塞卡极限,奥本海默-沃尔科夫极限。

第六章 带电及旋转黑洞

1. 带电黑洞解

爱因斯坦-麦克斯韦方程,Reissner-Nordstrom 解,柯西视界。

2. Kerr-Newman 黑洞解

Kerr-Newman 解,测地线运动。

3. 最大延拓的 Kerr-Newman 时空

KN 时空的延拓,环状奇点,极端黑洞,宇宙监督假设。

4. 静界、能层及 Penrose 过程

静界,能层,拖曳效应,从黑洞提取能量(Penrose 过程)。

第七章 引力波

1. 引力波解

弱场极限下的引力波方程,规范选择。

2. 引力波的产生

求解引力波方程,引力波产生的条件。

3. 引力辐射与能量损失

引力波能量、动量、张量,引力波辐射能量损失。

4. 引力波探测

探测器对引力波信号的响应,引力波探测原理。

第八章 宇宙学初步

1. 均匀且各向同性宇宙及 Robertson-Walker 度规

宇宙学原理和对应的宇宙时空度规。

2. Friedmann 方程及尺度因子的演化

描述宇宙演化的 Friedmann 方程,尺度因子的演化。

3. 宇宙学红移及距离

宇宙学红移的物理本质,宇宙红移和距离的关系。

4. 宇宙演化史

平衡态热力学,宇宙演化史。

七、考核要求

作业与期中、期末考试相结合。

八、编写成员名单

高思杰(北京师范大学)、陈斌(北京大学)、黄庆国(中国科学院大学)、朴云松(中国科学院大学)

08 量子多体理论

一、课程概述

量子多体理论是一门面向凝聚态物理的量子场论,讲授用场论方法处理和研究有相互作用

的全同粒子体系的物理性质的理论基础、技术和概念。

二、先修课程

经典力学、量子力学、统计物理、固体物理、高等数学、线性代数。

三、课程目标

通过本课程的学习,掌握有关量子多体系统的概念和技术,培养解决凝聚态物理理论前沿研究中的实际问题的能力。

四、适用对象

博士和硕士研究生。

五、授课方式

采用多媒体教学与黑板书写相结合的方式。资料图片和动画展示用投影仪放映,公式推导用板书。

六、课程内容(*部分为可选及参考内容)

第一章 二次量子化

场的概念;经典场及场的量子化(物质场,晶格振动,电磁场);物理量的场算符形式。

第二章 严格或渐近严格可解模型

自由费米子,金属,绝缘体;自由玻色子,玻色凝聚;一维 Luttinger 液体;朗道费米液体。

第三章 零温格林函数

格林函数的定义;格林函数运动方程;格林函数与基态能;格林函数的 Lehmann 展开及其解析性质;格林函数微扰展开(Wick 定理, Dyson 方程,正规自能,正规极化,正规顶角);基于格林函数的平均场理论;简单应用(静电屏蔽、等离子体振荡,关于朗道费米液体理论的理解)。

第四章 路径积分量子化

费米子和玻色子的相干态;基于泛函路径积分的量子化;零温格林函数的路径积分表示;连接格林函数生成泛函及单粒子不可约顶角函数生成泛函。

第五章 有限温度下的松原格林函数

松原函数的定义;松原函数的 Lehmann 展开及其解析性质;松原函数的路径积分表示及其微扰论;有效场与鞍点;简单应用(从 BCS 理论到 Ginzburg-Landau 理论)。

第六章 线性响应理论

非平衡态密度矩阵的演化及 Keldysh 格林函数;线性响应与推迟格林函数;格林函数的解析延拓;涨落耗散定理;隧道电导、Josephson 效应。

第七章 正常态失稳

部分求和(梯形图近似、无规相近似等);有效相互作用及其发散;响应函数及其发散;对称性自发破缺。

第八章 重整化(*)

Wilson 重整化群及普适类; Wetterich 泛函重整化群。

第九章 非微扰方法(*)

一维系统玻色化; 大 N 展开; 变分法; 量子蒙特卡洛。

第十章 拓扑物质态(*)

量子霍尔态、自旋液体、拓扑绝缘体和拓扑超导体。

七、考核要求

期中考试、期末考试、平时作业。

八、编写成员名单

王强华(南京大学)

09 固体理论

一、课程概述

固体理论将系统性地介绍固体量子论的基本概念、方法和模型,是研究凝聚态物理的基础。本课程对于固体中的元激发,如声子、磁振子、等离激元、极化激元、准电子、极化子和激子等做了重点介绍。对于超导电性的微观理论、能带论方法、强关联电子系统等内容也做了详细介绍。此外,本课程还对无序系统、高温氧化物超导体、拓扑物态的基本概念做了专门介绍。

二、先修课程

先修课程主要为本科阶段的“固体物理”,以及研究生阶段的“高等量子力学”。

三、课程目标

修完本门课程后,同学们可以系统地掌握固体量子论的基本概念,以及处理固体物理(包括凝聚态物理)的基本方法,具备进行凝聚态理论与实验研究的能力。此外,还可以深化对量子统计和量子场论的理解,因为它既有只分布于格点之上的离散场,又有分布于样品任意地方的连续场,还有很多自发对称性破缺的实例,有助于增强并提高统计物理与场论等方面的研究本领。

四、适用对象

既适用于硕士研究生,也适用于博士研究生。

五、授课方式

本课程理论性极强,基本上都是公式推导,模型与概念十分抽象,内容需要推导,宜采用板书口授式教学。一些背景性的材料以及各种示意图可以辅以 ppt 播放。

六、课程内容

基本内容包括以下所列的一至八章。九至十三章的内容为可选部分,视实际情况而定。

第一章 周期性结构

主要介绍如何描写分布于周期性结构中的物质场,这里既有离散场,也有连续场。具体内容有:正格矢与倒格矢、平移对称性与平移群、布洛赫定理与布洛赫波函数、布里渊区与能带结构、晶体对称性与波矢群、点阵傅里叶级数、布洛赫表象与瓦尼尔表象、布洛赫表象与瓦尼尔表象中的二次量子化算符。重点为平移对称性。难点为布洛赫定理、布洛赫波函数、布洛赫表象以及瓦尼尔表象。

第二章 声场与声子

主要介绍声场及其场量子(元激发)——声子。声场是仅仅分布于格点之上的离散场。具体内容有:晶格动力学、简正坐标、声学模、光学模、声子、长波方法、极化激元、态密度、范霍夫(Van Hove)奇点、晶格振动的局域模。重点为声场的量子化。难点为场量子的表示以及态密度的计算。

第三章 局域磁性

主要介绍海森堡模型。此模型中,自旋波场也是仅仅分布于格点之上的离散场,其场量子为磁振子。具体内容有:铁磁体的基态、霍斯坦因-普里马可夫变换、布洛赫 T3/2 定律、双子格模型、玻戈留玻夫变换。重点为海森堡模型的建立与推导。难点为玻戈留玻夫变换以及各种自旋波场量子(磁振子)的表示。

第四章 等离激元

讨论固体金属中相互作用电子气体的性质,其元激发为等离激元。具体内容有:等离激元与准电子、相互作用电子系统的哈密顿量、无规位相近似、介电函数、电子系统的元激发谱、静电屏蔽、孔恩异常、夫里德耳振荡、基态能、维格纳晶格、准粒子的寿命与费密面。重点为相互作用电子系统哈密顿量的建立与推导。难点为无规位相近似以及电子系统的元激发谱。

第五章 电子-声子相互作用

引进电子-声子相互作用,目的是建立并导出有效电子-电子相互作用,为后面讨论超导电性的微观机制服务。具体内容有:电子-声子相互作用过程、电子与声频率支声子的相互作用、声子自能的修正、电子与光频率支声子的相互作用、大极化子、中岛变换、有效电子-电子相互作用。重点为有效电子-电子相互作用的建立与推导。难点为中岛变换。

第六章 传统超导电性

将详细讨论 BCS(Bardeen-Cooper-Schrieffer)微观超导理论,作为对应,也讨论金兹堡-朗道唯象超导理论。具体内容有:超导体的基本性质、BCS 约化哈密顿量、库柏对(序参量)与自发对称性破缺、平均场近似、能隙、凝聚能、基态、超导体中的元激发、超电流、相变温度、能隙(序参量)与温度的关系、超导体热力学量、单粒子隧道效应、伦敦-皮帕唯象理论、迈斯纳效应、金兹

堡-朗道方程、伦敦穿透深度与 Higgs 机制、磁通量子化、约瑟夫森效应。重点为 BCS 约化哈密顿量的建立与推导。难点为相变序参量、库珀对、对称性自发破缺以及 Higgs 机制。这是与量子统计、量子场论相互交叉的基本而又重要的概念。

第七章 强关联电子系统

将讨论各种常见的强关联电子系统。具体内容有:① 赫伯德模型:赫伯德哈密顿量、零能带宽度时赫伯德模型的严格解、窄带中的强关联效应、金属绝缘转变。② 局域磁矩理论:安德逊哈密顿量、双时格林函数解法、静态磁化率、局域磁矩存在的判据。③ s-d 交换模型。④ RKKY 相互作用。⑤ 近藤效应:近藤哈密顿量、近藤效应、近藤单态的初步理论。⑥ 巡游磁性:斯通纳理论、金属中的自旋波。重点为赫伯德模型的建立与推导,它是一切强关联电子系统的基础。难点为近似计算方案。

第八章 能带论

简介能带理论的基本方法。具体内容有:平面波法的困难、正交化平面波法、近自由电子近似的赝势证明、元胞法、缀加平面波法、KKR(Korringa-Kohn-Rostoker)方法、紧束缚近似、密度泛函理论。重点为紧束缚近似以及密度泛函理论。难点为 KKR 方法,它涉及格林函数。

第九章 极化子理论

极化子是慢电子与光学模纵声子相互作用系统的准粒子,它出现于离子晶体之中。具体内容有:大极化子与小极化子、大极化子的弗留里希哈密顿量、LLP(Lee-Low-Pines)中间耦合理论、消去电子坐标的正则变换、位移振子变换、极化子的自能、LLP 理论的适用范围、小极化子的哈密顿量、小极化子的能带理论、小极化子的跳跃运动、两种导电机制的转变温度、一维极化子。重点为大小极化子哈密顿量的建立与推导。难点为消去电子坐标的正则变换与位移振子变换。

第十章 激子理论

介绍激子理论的基本知识。激子是绝缘体或半导体中的电子-空穴束缚对,它有一定的空间分布,大半径的为瓦尼尔-莫特激子,小半径的为夫伦克耳激子。具体内容有:激子的概念、瓦尼尔-莫特激子、夫伦克耳激子、电子-空穴作用的多体理论、激子分子与电子-空穴液体。重点为电子-空穴作用的多体理论的建立与推导。难点为两体运动概率幅的运动方程。

第十一章 无序系统

介绍处理无序系统的基本方法。具体内容有:无序的分类、无序系统的模型哈密顿量、无序系统的格林函数、平均 t 矩阵方法、原子的 t 矩阵、单格点近似、相干势近似、单格点近似之下相干势近似的自洽方程、重费密子系统简介、无序重费密子系统的相干势近似理论、安德逊无序模型、安德逊局域化、莫特模型、定程跳跃电导、变程跳跃电导、一维无序系统的定域化特征、定域化的标度理论。重点为相干势近似。难点为安德逊局域化。

第十二章 高温氧化物超导体与各向异性超导电性

主要介绍铜氧化物超导体的基本属性。具体内容有:铜氧化物结构上的共同特征——存在 CuO_2 导电层、相图上的共同特征——存在绝缘性的反铁磁母体化合物、超导态仍是库珀对的相干凝聚态、各向异性的 d 波配对、极端的 II 类超导体、复杂的同位素效应、不同于 BCS 超导的低温特性、广义库珀对、各向异性能隙函数、 $d_{x^2-y^2}$ 波的低频准粒子态密度、 $d_{x^2-y^2}$ 波超导态的低温特性、高温氧化物超导体正常态的反常特征、弱掺杂区正常态之隙隙。重点为各向异性超导。难点为 $d_{x^2-y^2}$ 波配对。

第十三章 拓扑物态基本概念简介

① 整数量子霍尔效应:霍尔效应和整数量子霍尔效应实验事实、边缘态的概念、TKNN 数的定义。② 分数量子霍尔效应:实验事实, Laughlin 波函数, 分数电荷和分数统计的概念。③ 拓扑绝缘体:量子自旋霍尔效应及其边缘态和 Z_2 不变量的概念和实验事实简介、三维拓扑绝缘体及其表面态的基本概念和实验事实简介。

七、考核要求

闭卷考试, 4~6 题。

八、编写成员名单

肖明文(南京大学)、虞跃(复旦大学)、尹澜(北京大学)

10 凝聚态物理学导论

一、课程概述

凝聚态物理学是当代物理学中一门带头性的分支学科。它的成就对其他相关学科有巨大的推动作用, 而且对现代高新技术和物质文明的发展是至关重要的。凝聚态物理学是随着研究对象的扩展, 实验手段的提高和理论处理的深入, 从固体物理学发展而来的。凝聚态物理学从 20 世纪 80 年代以来开始变为一门成熟的学科, 但与固体物理学相比, 凝聚态物理学面对的是更为复杂的多层次的相互作用系统。伴随着从传统固体物理学向凝聚态物理学的转变, 科学工作者发现了许多新奇的物理现象, 为解释这些现象又提出了许多全新的物理概念, 并动用或发展了各种有效的数学工具。初次进入凝聚态物理学领域的年青研究工作者面对浩如烟海的文献资料, 往往会感到困惑而一筹莫展。可以看出, 由于学科的发展, 在传统的固体物理学和科学发展的前沿之间有必要建立一门范围更加广泛、体系更加新颖的凝聚态物理学课程。

二、先修课程

量子力学、统计物理学、固体物理学。

三、课程目标

本课程在把握从固体物理学到凝聚态物理学历史发展脉络的基础上, 为凝聚态物理学建立了一个逻辑上合理明晰的概念体系, 并对学科涵盖的丰富内容进行了全面系统的论述。修完本课程的研究生将对凝聚态物理学领域的理论概念、数学工具和实验手段有比较完整的理解, 并对某些方面有相当深入的掌握, 便于他们在科学的前沿选择合适的课题, 开展创新性的研究工作, 成为具有一定独立能力从事凝聚态物理及相关学科的年青研究人员。

四、适用对象

凝聚态物理、理论物理、生物物理、粒子物理与原子核物理及材料科学等专业的硕士生和博士生。

五、授课方式

根据不同专业方向对课程内容要求上可能存在的差异,课时可以定在周4~6学时之间;用电子教案和黑板书写并重的方式来进行课堂讲授。此外,安排少量课时进行师生讨论和互动,也适时聘请相关领域的专家以讲座的形式介绍有关方面的最新研究进展。

六、课程内容

本课程除绪论外,将凝聚态物理学涉及的诸多方面组织成八编内容,各编分别论述凝聚态物理学的某一侧面,融贯汇总起来才能够凸现整体的面貌。第一编到第三编乃是全方位地将传统的固体物理学进行开拓延伸,从而使其面目焕然一新,构成凝聚态物理学的重要组成部分。在第一编中,从晶体出发,走向晶体之外;从硬物质出发,延伸到软物质。在第二编中,一方面用新内容充实波在周期结构中传播这一传统固体物理学的主题,然后再延伸到周期结构之外,论述定域化等新问题。第三编则紧扣物质电子结构这一主题,在横向将键与能带对照起来探讨,而在纵向则关注电子关联性的增强,从单电子近似逐步逼近关联电子态这一凝聚态物理学尚未彻底解决的核心问题。第四编到第七编的主题为对称破缺与有序化。在第四编中根据 Landau 相变理论框架来理解不同类型的相变,涉及晶体、准晶、液晶、铁电体、磁有序相及超流体与超导体,再用遍历破缺来补充对称破缺,涵盖了另外一些相变。在第五编中越出平均场理论的框架来处理热临界现象、量子临界现象和相关问题。第六编和第七编则分别论述激发态问题,显示了对称破缺相中存在恢复失去的对称性的趋势,以及拓扑行为对一些物理性质的显著影响,论述分为元激发和织构及缺陷两个层次来进行。第八编讨论了非平衡态的众多现象,与物理动理学和非线性科学交叉,进而引导研究生面向复杂性这一具有挑战性的科学领域。本课程所用教材是教育部研究生工作办公室推荐的研究生教学用书,适合凝聚态物理学和材料科学及相关领域等专业的研究生。由于教材的内容广博,而实际的学时有限,故本课程在讲授过程中可以根据需要,突出重点,有所取舍,适当地重新组合,融会贯通第一编到第八编内容,并适时介绍相关方面的最新研究进展,激发研究生的科研兴趣和创造性思维。

七、考核要求

作业、平时测验、期末考试。

八、编写成员名单

金国钧(南京大学)、苏刚(中国科学院大学)、林晓(中国科学院大学)

11 介观物理

一、课程概述

介观体系是指介于宏观和微观之间的体系。体系的尺寸与相位相干长度在相同量级或者更短,这时体系就表现出一些量子相干的性质。但是与微观体系比较,介观体系的粒子数目还是比较多,表现出很多奇特的性质。

介观物理可以作为凝聚态专业研究生的选修课程。

现今,大部分量子器件都是基于介观体系来实现的。通过本课程的学习,同学们能掌握介观体系的一些基本性质和物理效应,对量子器件的设计和研究有作用。

二、先修课程

固体物理、量子力学。

三、课程目标

通过本课程的学习,使同学们掌握介观物理的基本概念以及相关的重要物理效应,培养阅读前沿科学文献的能力,提高用所学知识解决问题的水平。

四、适用对象

凝聚态物理学学科的低年级博士研究生、硕士研究生或者高年级本科生。

五、授课方式

老师课堂传统讲课,并结合 ppt 和多媒体演示等。

六、课程内容

(1) 引论。

(2) 材料基础与实验方法概述。

(3) 电子输运基本概念和理论基础, Kubo 公式和 Landauer-Buttiker 公式,非平衡格林函数方法。

(4) 电子波的干涉、安德森局域化、弱局域化、反弱局域化、AB 及 AAS 效应、介观小环中的持续电流、非局域测量。

(5) 量子输运①。朗道能级与 SdH 效应、整数量子霍尔效应和拓扑序, Dirac 电子的朗道能级及磁输运。

(6) 量子输运②。电子-电子相互作用与分数量子霍尔效应。

(7) 量子输运③。拓扑绝缘体、量子自旋霍尔效应、量子反常霍尔效应。

(8) 经典 vs 量子。磁阻与霍尔效应综述。

(9) 一维介观系统。理论基础、量子点接触及一维纳米线, Luttinger 液体。

(10) 普适电导涨落。

(11) 量子点。库仑阻塞、单量子点及双量子点, 及基于量子点的量子器件。

(12) 超导-半导体复合系统。约瑟夫森效应、安德烈夫反射、超导量子干涉器及马约拉纳费米子, 拓扑量子器件。

(13) 总结与展望。

七、考核要求

开卷考试, 60 分以上及格, 85 分以上优秀。

八、编写成员名单

孙庆丰(北京大学)、常凯(中国科学院大学)、郑庆荣(中国科学院大学)

12 粒子物理基础

一、课程概述

这是一门针对硕士研究生和博士研究生的专业基础课程。通过学习本课程, 学生可以掌握粒子物理学的基本知识、基本概念和基本研究方法。

二、先修课程

量子力学、电动力学。

三、课程目标

通过本课程的学习, 了解和掌握粒子物理学的基本知识、基本概念和基本研究方法。本课程对粒子物理学中新的物理机理、物理概念、物理规律作出直观而准确的讲解, 着重介绍粒子物理学新的重要进展及其发展动向, 使学生了解粒子物理的标准模型(描述自然界基本组成成分的夸克和轻子之间存在的强相互作用, 电磁相互作用, 弱相互作用), 掌握对称性和守恒定律在粒子物理中的应用, 跟踪粒子物理实验的最新进展。

四、适用对象

硕士研究生或博士研究生。

五、授课方式

板书和多媒体结合。

六、课程内容

1. 引言

包括粒子物理学的研究内容、自然单位制、高能物理实验手段、粒子的基本性质、粒子和场、基本相互作用、粒子的分类等。

2. 粒子的运动学性质

包括坐标系变换、快度、不变相空间、反应截面、二体及三体运动学和达利兹图等。

3. 对称性和守恒定律(重点)

包括守恒量的一般性质、Noether 定理、宇称变换、电荷共轭变换、G 变换、CPT 定理、CP 破坏、全同粒子对称性、规范对称性。

4. 强子与强子间相互作用

包括核力和汤川势、核子和 π 介子、同位旋、奇异粒子性质、重子数、盖尔曼-西岛关系和共振态性质等。

5. 强子结构和夸克模型(重点)

包括夸克模型、重子和介子性质、OZI 规则、颜色自由度、渐近自由与夸克禁闭、部分子模型和分布函数及夸克和胶子色相互作用等。

6. 量子电动力学和轻子

包括 Dirac 方程、反常磁矩、轻子的基本性质、轻子数守恒和轻子的普适性、中微子质量问题、中微子振荡和轻子间相互作用等。

7. 电弱相互作用(难点)

包括弱相互作用现象和理论、夸克混合、GIM 机制和 CKM 矩阵、对称性自发破缺、Higgs 机制和电弱统一理论等。

8. 超出标准模型的新物理(介绍性)

包括更高电弱对称性的探寻、大统一及超大统一理论、Technicolor、超对称理论等超出标准模型的理论、超弦和额外维数、粒子宇宙学等。

9. 粒子实验简介

包含加速器与探测器类型等,现有与未来主流大型实验。

七、考核要求

闭卷笔试,百分制评分。

八、编写成员名单

曹庆宏(北京大学)、吕才典(中国科学院大学)、王伟(上海交通大学)、周剑(山东大学)

13 原子核理论

一、课程概述

这是一门针对硕士研究生和低年级博士研究生专业基础课程。通过学习本课程,掌握原子核的结构、衰变和反应的基础知识。

二、先修课程

原子物理、量子力学。

三、课程目标

通过修习本课程,掌握原子核的结构、衰变和反应的基础知识。在此基础上可以进一步对原子核物理的细分方向进行深入探讨,为核物理以及相关的强子物理、粒子物理的前沿研究打基础。

四、适用对象

粒子物理与原子核物理方向的硕士研究生和低年级博士研究生。

五、授课方式

传统授课方式:粉笔黑板,或者用幻灯片方式辅之以黑板。

六、课程内容

第一章 原子核的静态性质

包括原子核的发现历史、核内物质分布、原子核的自旋、宇称和磁矩,原子核的结合能和质量公式等。

第二章 原子核衰变

包括核衰变的一般性质、阿尔法衰变、贝塔衰变和伽马衰变、放射性测龄、穆斯堡尔效应。在贝塔衰变中包括贝塔衰变的一般性质和四费米模型,在伽马衰变中包括原子核的电磁跃迁、辐射的量子理论、辐射多极展开等。

第三章 原子核结构理论

包括壳模型、集体模型、少体模型、自洽场模型、从头计算等。

第四章 原子核反应

包括分波分析、光学模型、复合核模型以及直接反应、裂变、聚变、光核反应、天体核反应和中高能重离子反应等。

第五章 核力与核子相互作用

包括核力的基本性质、氘核的性质、中能和低能核子-核子散射、核力的介子交换模型等。

贝塔衰变、伽马衰变、原子核模型以及原子核反应是重点和难点,需要量子力学的基础知识。

七、考核要求

闭卷考试,百分制评分,60分及格。

八、编写成员名单

王群(中国科学技术大学)、周善贵(中国科学院大学)、赵玉民(上海交通大学)、罗延安(南开大学)

14 核与粒子物理实验探测与分析

一、课程概述

本课程主要讲述核物理与粒子物理实验的基本原理和实验方法,内容包括粒子与物质的相互作用机制、各种辐射的探测方法及各种测量技术等相关知识。要求掌握粒子和辐射与物质相互作用的基本规律以及各种粒子和辐射探测的基本原理;掌握核与粒子物理实验中常用探测器的工作原理,理解同类探测器的共同规律;熟悉粒子探测系统的组成,掌握构建粒子探测系统的一般规律,能够根据实验要求选择探测方法和技术,并进行实验探测系统的初步概念设计。

二、先修课程

模拟电子线路和数字电子线路基础、概率论与数理统计。

三、课程目标

本课程是一门讲授粒子物理与原子核物理实验中各种粒子和辐射探测的原理、技术以及装置的专业基础核心课程,内容包括微观粒子和辐射与物质相互作用的物理机制,粒子和辐射的探测原理,常用的探测方法与技术,离线软件与数据分析,现代粒子探测器系统的构造、规律和设计。本课程围绕粒子和辐射的探测,涵盖了从基本原理和机制,到方法与技术,再到具体装置的各个层次和方面,构成了一个全面和完整体系。通过本课程的学习,可以对粒子和辐射探测、离线软件与数据分析有全面深入的了解,为从事核与粒子物理实验工作打下良好基础。

四、适用对象

粒子物理与原子核物理实验研究方向的博士和硕士研究生。

五、授课方式

多媒体、板书结合。如有条件,可结合宇宙线径迹探测教学实验,并组织参观国内的粒子物

理与核物理相关大科学装置。

六、课程内容

第一章 高能粒子源介绍(反应堆、加速器、对撞机、宇宙线基本知识)、辐射探测与粒子探测的物理基础

第二章 辐射探测、粒子探测及相关数据分析中的一般方法概述和统计规律(参数拟合基本方法介绍)

第三章 探测器类型、相关原理介绍及其应用(重点、难点包括气体探测器、半导体探测器、闪烁探测器、切伦科夫与穿越辐射探测器等)

第四章 实验数据触发及核电子学

第五章 粒子物理与原子核物理前沿实验上的探测器系统集成与实验装置简介(量能器、径迹室以及粒子鉴别系统等)

第六章 大型实验上的探测器刻度、校准和事例重建(重点、难点包括量能器、径迹室以及粒子鉴别系统的刻度,探测器几何位置的校准,长寿命带电荷粒子的径迹重建(飞行时间,带电粒子径迹和动量),中性粒子径迹及能量重建(低能 Gamma 能谱,高能 Gamma 簇射能量),粒子鉴别,事例顶点的重建)

第七章 常用的物理数据分析技术与工具(如何测量物理量,如质量、宽度、寿命、分支比和截面等)

第八章 实验误差分析与处理(重点包括实验测量的目的,测量误差分类(统计误差,系统误差,过失误差),系统误差的来源(如 Monte-Carlo 真实化响应模拟得不好时,会带来系统误差等),测量数据的表示及误差传递方法)。

七、考核要求

随堂测验,结合闭卷考试。

八、编写成员名单

李金(清华大学)、王大勇(北京大学)、郑阳恒(中国科学院大学)、刘倩(中国科学院大学)、王萌(山东大学)

15 高等原子分子物理

一、课程概述

本课程是高等院校原子与分子物理学科方向研究生的专业核心课程。在我国物理学本科和研究生教育的课程体系中,原子物理的内容在原子物理、量子力学和高等量子力学中都会有

所涉及,包括原子结构、原子光谱、原子与电磁场的相互作用,也会包括一些简单的分子理论和原子散射理论的粗略讨论。作为原子分子物理学学科方向的研究生则需要系统地学习现代原子分子物理学的基本内容,本课程的目标就是在统一的量子力学理论框架内,系统教授原子分子物理的基本知识。同时,原子分子物理学具有天然的学科交叉优势,在天体物理、等离子体物理等多门学科中有重要应用,因此,本课程也可以作为相关学科研究生的专业选修课程。

二、先修课程

原子物理、量子力学。

三、课程目标

系统学习现代原子分子物理学的基本内容,包括结构、谱学和碰撞,掌握处理原子分子物理基本问题的常用近似计算方法,了解原子分子物理学科前沿,培养学生分析和解决问题的能力,为以后开展原子分子物理及相关学科的科研工作打下基础。

四、适用对象

适用于原子与分子物理学及相关学科的硕士研究生或硕博连读生,也可以作为高年级本科拔尖班学生的选修课。

五、授课方式

主要以课堂讲授为主,结合学科前沿的调研报告。

六、课程内容

本课程主要介绍现代原子分子物理学的基本内容,主要包括:原子分子物理学的主要研究内容概述、单电子原子的能级结构、双电子原子的能级结构、多电子原子的能级结构、双原子分子能级结构、原子与电磁辐射的相互作用及原子光谱、双原子分子光谱、外场中的原子、原子碰撞的基本概念和势散射、原子与分子物理的新进展、激光与同步辐射光谱学等。

■ 重点:① 单电子原子的能级结构;② 单电子原子与电磁辐射的相互作用;③ 双电子原子的基态和激发态;④ 双原子分子的电子结构和分子轨道理论;⑤ 原子散射理论及近似计算方法。

■ 难点:① 原子与电磁辐射的相互作用;② 原子散射理论。

七、考核要求

课后作业+期末考试+学科前沿的调研报告+学生课堂研讨。

八、编写成员名单

陈向军(中国科学技术大学)、钟志萍(中国科学院大学)、张红(四川大学)

16 原子分子光谱学

一、课程概述

本课程讲授原子分子光谱学的基本原理和技术方法,在物理学一级学科原子与分子物理学硕士研究生课程体系中为必修主干课程之一。

二、先修课程

原子物理学、光学和量子力学的基础知识(大学物理课程)。

三、课程目标

掌握原子分子光谱学的基本原理和基础实验技术,具有利用相关的谱学方法解决原子分子物理问题的基本能力,培养学生创新思维和解决问题的能力,为今后在相关领域的科研工作打下坚实基础。

四、适用对象

适用于相关学科方向的硕士研究生或低年级博士研究生,也可以作为高年级拔尖班本科生选修课程。

五、授课方式

主要为课堂讲授,并适当结合实验室演示和讲解,使学生有充分的机会接触、了解现代谱学技术和测量。

六、课程内容

主要分为三大部分。

第一部分为基础知识,讲授原子分子结构、光辐射及光散射过程等相关的基本概念,为从理论和实验两个方面深入理解原子分子光谱学奠定基础。其中包括单电子体系和多电子体系的原子能级结构,外场对原子能级的影响,原子的精细结构和同位素效应,双原子分子的电子、振动及转动能级,多原子分子能级结构,团簇分子结构,偶极跃迁光谱,拉曼光谱,瑞利散射、米氏散射与拉曼散射等。

作为光谱学的基础之一,关于原子分子中电子与外电场、外磁场相互作用的处理方法,安排为这部分的扩展内容,这种相互作用通过斯塔克效应和塞曼效应导致跃迁光谱线发生变化,其中斯塔克效应在强激光场相互作用中有重要的地位。

第二部分为光谱学,讲述光谱产生、谱线形状及其展宽,光谱测量仪器。具体包括红外-可见-紫外波段的光谱及其涉及的各种光源、光谱色散器件、光探测器等,以及紫外-真空紫外-X射线波段及其X射线光谱、光电子能谱和俄歇电子能谱;及其相关的光源、分光技术、荷电粒子

能量分析器及探测器件等,其中特别强调讲授现代先进光源如先进的同步辐射光源及其应用。重点在于掌握相关谱学方法和技术。

第三部分为激光器、激光光谱学及其应用,讲授激光原理和激光器构成及种类,各种激光光谱学方法的原理和技术方法。包括激光器及其输出激光特性(高斯光束、偏振、相干等),激光模式和单模激光器的波长可控调谐,非线性光学混频技术,以及新型的自由电子激光,双共振光谱学,高分辨激光光谱,时间分辨原子与分子光谱,等等。重点在可调谐激光器、飞秒激光啁啾放大、非线性光学过程及非线性光谱学,以及时间分辨激光光谱学特别是超快光谱学。最后结合实例介绍激光冷却囚禁、精密谱学方法、大气遥感和燃烧诊断等激光光谱学应用。

* 现代碰撞谱学技术部分:处理光子、电子、原子(包括分子和离子)碰撞问题,这部分在理论上的处理应该安排专门课程教授,这里主要讨论实验技术和方法。方法上可以分为弹性碰撞过程和非弹性碰撞过程,其中包括束缚-连续态跃迁及碰撞电离,相关的实验技术主要是动量相关的各种微分截面测量技术,即电子损失能谱、符合测量及成像符合测量方法等。(* 为选讲内容)

七、考核要求

采用开卷或闭卷笔试方式,结合平时课后作业、前沿进展报告综合考核。

八、编写成员名单

丁大军(吉林大学)、金明星(吉林大学)、莫宇翔(清华大学)、朱林繁(中国科学技术大学)、尹航(吉林大学)、张红(四川大学)

17 高等光学

一、课程概述

高等光学是光学专业研究生的专业必修课,是普通物理光学课程的延续和提高课程。课程内容涵盖光波传播、光波的辐射和散射、光波干涉、光波偏振和光强涨落规律,以及相关的光学仪器的工作原理,是学习和掌握从事光学、光电子学和凝聚态光学性质研究所需的光学知识和方法的重要课程。

二、先修课程

光学、电动力学、量子力学、数学物理方法。

三、课程目标

通过本课程的学习,掌握光波传播、辐射和散射的一般规律,掌握光波干涉、偏振以及光强涨落的基本特点,了解相关光学仪器的工作原理。完成本课程的学习后,应该具备分析研究光波传播、光波干涉、光波偏振和光强涨落等问题的能力,掌握处理光传播问题的基本方法,包括几何光学的方法、标量波衍射的方法、求解亥姆霍兹方程的方法;掌握处理光波干涉、偏振和光强涨落的统计光学方法。

四、适用对象

光学专业博士和硕士研究生。

五、授课方式

课堂面授。以教师讲授为主,师生就例题、专题等开展讨论为辅。

六、课程内容

第一章 光波的电磁理论

第一节 Maxwell 方程组

导出真空和各向同性线性介质中电场的波动方程。

第二节 几何光学近似

费马原理;几何光学近似条件,导出费马原理;光线的微分方程;由几何光学近似,或费马原理,导出光线的微分方程。

第三节 标量波近似

给出标量波近似条件、标量波近似下的波动方程与横波条件。

第二章 光波衍射的标量波理论

第一节 Fresnel-Kirchhoff 衍射公式

Kirchhoff 积分定理,Fresnel-Kirchhoff 衍射公式,讨论 Kirchhoff 边界条件。

第二节 Fresnel 衍射与 Fraunhofer 衍射

单缝 Fresnel 衍射,给出 Fresnel 正弦、余弦积分的渐近表达式,圆孔 Fraunhofer 衍射。

第三节 透镜成像的标量波理论

单球面透镜成像,成像系统的点扩散函数,透镜的透射函数。

第四节 光学 Fourier 变换

有透镜时的衍射场,Fraunhofer 衍射与 Fourier 变换,Abbe 成像原理与成像系统的光学传递函数。

第三章 光波在介质界面的折射与反射

第一节 光波在单一介质界面的折射与反射

第二节 光波在多个平行界面的折射与反射

多层介质膜的反射率。

第三节 光波在金属表面的折射与反射

第四章 光波导

第一节 平板型光波导

导波模式,限制因子。

第二节 表面等离子体波

存在条件,光场分布特点。

第三节 TEM 模式

Hermite-Gaussian 模式, Laguerre-Gaussian 模式。

第五章 光在晶体中的传播

第一节 晶体中的单色平面波

Fresnel 方程,折射率矢量,光线矢量,相速度,光线速度。

第二节 单轴晶体

双折射现象。

第三节 双轴晶体

光轴的方位,内锥折射现象,外锥折射现象。

第四节 旋光晶体

旋光的微观机制。

第六章 色散介质与光脉冲

第一节 介质色散的一般规律

Kramers-Kronig 关系,折射率虚部与跃迁速率的关系。

第二节 光脉冲在色散介质中的传播

群速度,相速度。

第三节 光脉冲的展宽与压缩

群速度色散与脉宽变化的关系。

第七章 光波的散射

第一节 米散射

第二节 瑞利散射

偶极子辐射,瑞利散射的特点。

第八章 光场的时间相干性

第一节 分波幅装置的干涉场

第二节 时间自关联函数与功率谱

第三节 功率谱的测量

第九章 光场的空间相干性

第一节 分波前装置的干涉场

第二节 互相干函数

互相干函数的传递,交叉光强与互相干函数的关系,交叉光强的传递规律,互相干函数的极限形式,相干光、非相干光。

第三节 Van Cittert-Zernike 定理

第十章 光场的偏振态与光强

第一节 热光

线偏振热光,非偏振热光。

第二节 部分偏振热光

相干性矩阵,偏振度。

第三节 瞬时光强

瞬时光强的统计规律与偏振态的关系。

七、考核要求

闭卷考试。掌握基础知识者为及格;掌握基础知识、基本方法并能够灵活运用者为优秀。

八、编写成员名单

王若鹏(北京大学)

18 非线性光学

一、课程概述

非线性光学是在 1960 年高相干性高强度光源——激光产生后蓬勃发展起来的崭新的光学分支。非线性光学是研究光与物质的相互作用的一门学科,已经广泛应用于各个领域,如激光器、光通信、生物医学成像等。对于将来从事光学和光技术的研究生,掌握非线性光学的基础知识是非常必要的。

二、先修课程

光学、电磁学、电动力学、量子力学。

三、课程目标

理解光与物质作用的微观机理,能够使用经典和量子理论计算非线性极化率。掌握各阶非线性光学效应的机理和应用。了解目前非线性光学的研究前沿。

四、适用对象

物理学科光学方向的博士和硕士研究生、高年级本科生。

五、授课方式

面授,板书结合多媒体技术。

六、课程内容

1. 非线性光学引言

介绍非线性光学的发展和非线性光学的物理含义,介绍两种类型非线性光学效应,即非线性频率的变换与非线性吸收和场致折射率变化。引入非线性光学极化率,给出非线性极化强度的表达式。由麦克斯韦方程推导出光在非线性介质中的传播的非线性光学波动方程。还介绍了求解超短光脉冲在非线性介质中的传播问题的方法。

2. 非线性光学极化率理论

讨论介质的非线性极化率的微观机理和求解方法。利用经典非简谐振子模型和量子力学模型描述光电场与粒子相互作用,推导非线性极化率。讲解密度矩阵的运动方程,又称为刘维方程,利用密度矩阵求解各阶非线性光学极化率。分析介质体系中分子和分子(或原子和原子)极化的相互作用,给出了极化率的局域场修正方案。分析非线性光学极化率的对称性,以及极化率和晶体的对称性的关系,简化非线性极化率的表示。

3. 光在晶体中传播

讲解光在晶体中传播的性质,包括相位的传播和能量的传播。给出了菲涅耳方程,它描述了相速度(和光线速度)和介电张量之间的关系。引进折射率椭球(和光线椭球),通过作图方法求解给定波矢方向(和光线方向)下的许可 D (和 E) 的偏振方向,和所对应的折射率(和线折射率)。介绍了光在晶体中传播的波法线曲面和光线曲面,并讨论晶体折射行为。为讨论晶体的非线性光学效应打好基础。

4. 线性电光效应和电光调制

采用电场导致晶体折射率椭球变形和二阶非线性极化,解释线性电光效应,给出电光系数和二阶非线性极化率之间的关系。讨论电光效应的应用,如电光相位延迟、电光振幅调制、电光相位调制和电光偏转器等。

5. 三波混频过程

讨论三波混频的耦合方程。讲解包括双折射补偿色散和准相位匹配技术实现相位匹配的方法。分析最佳匹配条件和最大有效倍频系数。介绍二次谐波的应用。

6. 参量振荡过程

介绍和频、差频、参量放大(OPA)和参量振荡器(OPO)。分析OPO的泵浦阈值和调谐方法。

7. 三阶非线性光学过程

介绍各种三阶非线性光学效应的非线性极化率和非线性极化强度。讨论参量过程和非参量过程,及它们对实现相位匹配的条件。

8. 受激散射

讨论受激拉曼散射和受激布里渊散射;分析受激散射的特点和产生机理;介绍受激散射的应用。

9. 三阶非线性折射率

分析三阶非线性折射率导致光束空间和时间分布,频谱、偏振状态发生变化,包括自聚焦、自散焦和自相位调制等效应,介绍这些效应的应用。

10. 相位共轭光学

讲解共轭波的产生,包括二阶非线性光学效应的三波混频和三阶非线性光学效应的四波混频产生共轭波的方法,介绍了共轭波的应用。

11. 光折变效应

介绍光折变效应的发现和发展,给出描写光折变过程的带输运模型,分析二波耦合和四波混频过程,列举光折变效应的一些应用。

12. 光学双稳态

给出光学双稳态的定义和介绍它的应用;分析光学双稳态器件结构的要素,阐述器件的工作原理;讨论光学双稳态的稳定性。

13. 光纤非线性光学

讲解非线性薛定谔方程,群速度色散与自相位调制,时间光孤子和空间光孤子,介绍此领域的研究前沿和应用情况。

14. 非线性光学开关

介绍光学开关的研究现状和应用前景,讲解基于非线性光学耦合器、非线性 Sagnac 干涉仪、非线性 M-Z 干涉仪、非线性光栅等的光开关。

15. 有机非线性材料

探讨非线性极化率和分子结构的关联,从分子层面上设计非线性材料。

七、考核要求

闭卷考试(80%)+平时作业和论文(20%)。

八、编写成员名单

龚旗煌(北京大学)、陈志坚(北京大学)

19 声学原理

一、课程概述

声学原理是在先修课程声学基础上的深化和扩展,通过本课程的学习,使研究生掌握复杂声源的声辐射、复杂介质的声传播、散射和调控的数学理论和方法。本课程是物理学一级学科声学方向研究生的基础课程。

二、先修课程

普通物理(或大学物理)、高等数学(包括微分方程和线性代数)、数学物理方法,以及声学基础。

三、课程目标

掌握复杂声源的声辐射、复杂介质(例如层状介质、耗散介质、运动介质等)的声传播、声散射和声波调控的数学理论和方法,以及相关的应用。

四、适用对象

物理学一级学科声学方向的博士和硕士研究生。

五、授课方式

课堂教学(多媒体教学)。

六、课程内容

1. 理想流体中的声波方程,声场的基本性质

包括:能量关系、互易原理、声场的唯一性、叠加原理、声学中的不确定关系、声场的角谱展开、有限声束和声脉冲在平面界面的反射和透射等。

2. 无限和半无限空间的声辐射

包括:多极子展开、相控阵理论、柱和球坐标中的声辐射、无限大平面前的声辐射、有限束超声场和抛物近似、非衍射波、声波与声源的相互作用等。

3. 声波的散射和衍射

包括:柱体和球体的散射、水中气泡的散射和共振散射、任意形状散射体的散射、非均匀区域的散射、随机分布散射体的散射和等效介质近似、屏和楔的声衍射、周期结构中声波的散射、逆散射和衍射 CT 理论等。

4. 管道和腔体中的声传播和激发

包括:等截面波导中声波的传播、等截面波导中声波的激发、突变截面波导及平面波近似、集中参数模型、缓变截面管道中平面波的传播、模式展开理论、规则形腔中的简正模式、简正模式的微扰近似方法、不规则腔体的变分近似方法、高频近似和扩散声场、扩散体和 Schroeder 扩散体、低频近似和 Helmholtz 共振腔、两腔的耦合等。

5. 非理想流体中声波的传播和激发

包括:黏滞和热传导流体中的声波方程、能量守恒关系和能量密度、耗散介质中声波的传播和散射、耗散介质中微球的散射、管道和狭缝中声波的传播和耗散、微穿孔板的共振吸声和共振频率、热声效应和热声致冷、流体和生物介质中声波的衰减、生物介质中的声衰减和时间分数导数、分数 Laplace 算子、Kramers-Kronig 色散关系等。

6. 层状介质中的声波和几何声学

包括:平面层状波导、Pekeris 波导中的简正模式和 Airy 波、阻抗型边界的层状波导、连续变化平面层状介质、线性变化波导和 Airy 函数、WKB 近似方法和渐近匹配方法、几何声学近似、平面层状介质中的声线、径向分布介质中的声传播等。

7. 运动介质中的声波

包括:匀速流动介质中的声波、能量守恒方程和修正的互易原理、运动声源激发的声波、非

匀速运动的声源、非均匀流动介质中的声波、无旋流介质中的等熵声波和能量守恒、缓变稳定和
非稳定流动介质中的几何声学、湍流产生的声波、Lighthill 理论和八次方定律、漩涡产生的声
波等。

8. 有限振幅声波的传播和物理效应

包括:理想介质中的有限振幅平面波、粘滞和热传导介质中的有限振幅波、色散介质中的有
限振幅声波、有限振幅声束的传播、声辐射压力和声悬浮、声流理论、声空化效应、热效应和高强
度聚焦超声等。

七、考核要求

闭卷,100 分制。

八、编写成员名单

程建春(南京大学)、李晓东(中国科学院大学)、张海澜(中国科学院大学)、刘正猷(武汉大
学)、崔志文(吉林大学)

20 固体声学

一、课程概述

本课程是物理学一级学科声学方向研究生的基础课程,主要讲授固体介质中弹性波的传
播、激发和接收的基本规律和数学方法。

二、先修课程

普通物理(或大学物理)、高等数学(包括微分方程和线性代数)、数学物理方法,以及声学
原理。

三、课程目标

掌握固体介质中弹性波传播、激发和接收的基本规律和数学方法,特别是有限固体结构中
存在的各种复杂波型,以及在不同界面上的转换规律;掌握压电材料中弹性波传播的基本规律,
特别是在体波换能器和表面波换能器制造中的应用。

四、适用对象

物理学一级学科声学方向的博士和硕士研究生。

五、授课方式

课堂教学(多媒体教学)。

六、课程内容

1. 固体中弹性波的基本性质

包括:应力张量、应变张量和本构关系,弹性波的能量守恒定理和功率流矢量、质量守恒方程、动量守恒方程以及弹性波方程等。

2. 不同类型介质中的几种波型

包括:无限大固体中的体声波(压缩波和切变波),半无限大固体表面的表面波,固体-固体界面的 Stonely 波,液体-固体界面的 Scholte 波,固体覆盖层中的 Love 波,固体板结构中的 Lamb 波等。

3. 弹性波在平面界面上的反射和透射

包括:理想连接界面上的反射、透射以及波型转换、Snell 定律,非理想连接界面的反射和透射等。

4. 弹性波的散射

包括:圆柱坐标系中的弹性波方程,入射平面 P 波或 S 波在圆柱缺陷上的散射,球坐标中的弹性波方程、入射平面 P 波或 S 波在球形缺陷上的散射,周期弹性结构中的声传播等。

5. 弹性波的激发

包括:无限大弹性体中的时谐体力源激发,Green 函数方法,互易原理和 Kirchhoff 积分, Lamb 问题,板中 Lamb 波的积分等。

6. 压电介质中的弹性波

包括:压电效应、压电方程,电-弹耦合波动方程,平面波解,典型各向异性晶体中的倒速度图,体波换能器,压电表面波和表面波换能器等。

7. 多孔材料中的声波

包括:多孔介质中的声波类型,Biot 理论,多孔材料声学模型,多孔材料的散射,多孔材料的吸声特性等。

8. 复合材料中的声波

包括:各向异性介质中的声传播,各向异性介质的弹性能,多层复合介质中的声传播等。

七、考核要求

闭卷,100 分制。

八、编写成员名单

崔志文(吉林大学)、刘正猷(武汉大学)、张海澜(中国科学院大学)、程建春(南京大学)、李
晓东(中国科学院大学)

21 等离子体基础理论

一、课程概述

等离子体基础理论是等离子体科学技术的基础课程,也是物理学课程体系的重要组成部分。等离子体物理是一个与高新科学技术和国家重大战略需求紧密结合、具有非常强应用背景的研究领域,在国家的能源开发、空间及航天科技以及电子、信息、材料、生物、环境等诸多高新技术领域占有重要地位,对传统产业、技术的创新研究及技术提升具有关键性的推动作用。另一方面,等离子体物理也是经典力学、经典电动力学、流体力学和非平衡态统计力学的重要应用领域,在物理学课程体系中占有重要地位。

本课程基于物理学基本原理,以宏观磁流体和微观动理学为主要研究方法,以等离子体基本特性和运动模式为主要内容,结合学科的前沿进展和主要应用,讲述等离子体的基本理论和研究方法。通过本课程的学习,使学生掌握等离子体物理基础、了解其相关应用的最新进展,培养学生理论联系实际、在等离子体科学技术和相关领域进一步自主开展学习和研究工作的能力。

二、先修课程

理论力学(包括分析力学)、电动力学、热力学与统计物理、量子力学、数学分析、线性代数、复变函数与积分变换、数学物理方程。

三、课程目标

本课程通过介绍等离子体的基本理论、主要运动模式及研究方法,传授等离子体科学技术的基础知识、基本概念和常用分析方法,并在授课过程中引导学生把握等离子体物理的发展趋势和前沿动态;着重培养学生发现、提出、分析与解决前沿学术科学问题的能力,并帮助学生进一步形成正确的科学观和严谨的科学态度,成为高素质学术创新型科技人才,为其在等离子体物理及相关领域进一步自主开展学术研究和技术研发奠定基础。

四、适用对象

物理学各专业及相关学科专业(空间科学、力学、电气工程、核能工程、航天推进技术、电磁通信技术等)的博士和硕士研究生。

五、授课方式

(1) 以讲授为主,采用启发式教学,通过提问和互动,引领学生探索、思考,拓展视野,培养学生对等离子体物理的兴趣;

(2) 采用模型、视频等辅助方式增强教学的物理直观性,加入必要的数值模拟分析内容并演示结果,加深同学们对物理图像的把握和对关键物理问题的理解;

(3) 采用学、研结合的教学方式,结合专题研讨、组织学生形成三、五人的团队,进行调研、开题、分析研究、课堂成果报告与研讨的系列训练,培养分析和解决学术问题的思维方法和研究能力。

六、课程内容

序号	主要教学内容	教学重点	难点
1	基本概念与基本性质 等离子体定义 等离子体基本性质 等离子体参数及分类 等离子体基本过程 主要描述方法	等离子体基本性质及基本过程 主要描述方法 等离子体基本过程包括	等离子体的定义(与传统的不同,不包含准电中性)
2	单粒子轨道理论 1. 在均匀恒定电场中的运动 2. 在变化磁场中的运动 3. 在均匀恒定磁场、变化电场中的运动 4. 在高频电磁场中的运动 5. 绝热不变量及其应用	漂移运动 绝热不变量	绝热不变量与守恒量的区别
3	碰撞与输运过程 1. 带电粒子间的库仑碰撞 2. 经典输运系数 3. 非弹性碰撞 4. 等离子体输运过程 5. 等离子体中的辐射过程	库仑碰撞 输运方程 辐射能量损失	1. 库仑碰撞与后面自洽场近似的关系,结合动理学描述理解 2. 输运方程与状态方程的关系,结合双流体描述(速度)各阶矩截断来理解
4	流体与磁流体描述 1. 双(多)流体方程组 2. 状态方程与输运方程 3. 电子磁流体近似 4. 霍尔磁流体近似 5. 磁流体近似与磁流体方程组 6. 位力定理及守恒定律 7. 磁流体近似下的坐标变换 *	统计力学方程速度各阶矩的截断方法; 双(多)流体理论的“刚性”(大质量比)问题与解决方法; 磁流体理论的“完美”性	1. 不可压缩条件(对应等容过程, $\gamma \rightarrow \infty$)与等温过程条件 $\gamma = 1$ 不相容; 2. 磁流体近似的适用性
5	均匀等离子体中的磁流体波 1. 波动的描述 2. 非磁化等离子体中的磁流体波 3. 磁化等离子体中的磁流体波 4. 剪切阿尔芬波的重要性质	波动的描述 电磁波与静电波 剪切阿尔芬波的电磁波特性	理解静电波图像、理解为什么磁流体近似忽略了位移电流项仍然会有电磁波(阿尔芬波)存在

续表

序号	主要教学内容	教学重点	难点
6	均匀冷等离子体中的波 1. 等离子体波的双流体理论 2. 非磁化等离子体中的静电波 3. 非磁化等离子体中的电磁波 4. 磁化等离子体的介电张量与波的色散关系 5. 垂直磁场传播的静电波 6. 垂直磁场传播的电磁波 7. 平行磁场传播的高频电磁波	1. 电导率张量与介电张量 2. 寻常波与非寻常波	1. 介电张量在旋转坐标系中对角化 2. 非寻常波的偏振性质
7	等离子体平衡与磁流体稳定性 1. 等离子体力学平衡 2. 稳定性分析方法 3. 简单平衡位形及其稳定性 4. 典型的理想磁流体不稳定性	1. 非均匀等离子体、平衡和稳定性的基本概念 2. 分析稳定性的基本方法 3. 简单的平衡位形与典型的不稳定性	1. 为什么只需要找到最不稳定的那种不稳定性? 2. 所有的不稳定性都是对于特定的平衡位形而言
8	磁流体过程 1. 磁力线的冻结与扩散 2. 磁场的压强与应力 3. 等离子体平衡与扩散 4. 弱电离等离子体的双极扩散	1. 理想磁流体的磁冻结效应 2. 双极扩散	磁力线的实际“测量”
9	等离子体的动理学描述简介 1. 统计力学方程与 BBGKY 链 2. 弗拉索夫方程组 3. 均匀等离子体中波的动理学理论 4. 朗道阻尼 5. 束流不稳定性	1. 弗拉索夫方程组与自洽场近似 2. 朗道阻尼	1. 为什么无碰撞的弗拉索夫方程组怎样包含带电粒子间主要的相互作用 2. 朗道阻尼的物理本质
10	等离子体技术与应用 1. 受控核聚变能源:磁约束与惯性约束 2. 劳森判据 3. 激光与等离子体相互作用 4. 低气压、大气压等离子体放电及应用 5. 航天器等离子体推进 6. 空间与天体等离子体物理	不同等离子体的特征及基本参数范围,及相应等离子体产生方式 了解等离子体在聚变能源、空间天文、材料制备与改性、航空航天、资源与环境、生物医学、化工、农业、食品等领域的应用	劳森判据

七、考核要求

考核环节	所占分值	考核与评价细则
课堂专题成果报告 及平时作业	30	包括课堂专题报告和平时作业
期末考试	70	期末考试 70 分,考试为开卷(可以带参考书)或闭卷

八、编写成员名单

王晓钢(哈尔滨工业大学)、李定(中国科技大学)、刘万东(中国科技大学)、王友年(大连理工大学)、王德真(大连理工大学)

22 等离子体实验与诊断

一、课程概述

等离子体实验与诊断是等离子体物理学科重要的基础课程之一,它的理论和技术已经与力学、热学、光学、统计物理、粒子物理与原子核物理、核能科学与工程乃至整个物理学一级学科的各个领域紧密结合、相互渗透,被用于分析等离子体科研实践中存在的问题。系统地学习并掌握等离子体实验与诊断的基础知识和技术手段,是开展等离子体物理相关实验研究的基础,也是进一步理解和丰富等离子体物理理论及其实践应用的必由之路。随着等离子体科学技术的不断发展及等离子体应用的不断拓展,培养能够理解、掌握等离子体物理、实验、诊断方法与技术的相关人才的需求也在不断提高,等离子体实验与诊断为将要进入该领域工作的研究生提供必要的系统知识与训练指导。

这门课主要向研究生传授等离子体基本参数、分布函数、辐射(包括电子温度、电子密度、德拜长度、黑体辐射、韧致辐射等);等离子体源(真空技术、感性放电、容性放电、电子回旋共振放电、大气压放电等);等离子体特性(等离子体中的波与传播、鞘层、等离子体与壁相互作用、束与等离子体、扩散与输运、等离子体平衡等);等离子体诊断技术(可靠性分析、干扰与噪声、电磁探针、光谱分析、微波诊断、激光诊断、粒子测量等);等离子体模拟与仿真(流体模型、粒子模型、非线性分析等);核聚变装置与工程(托卡马克、磁镜、仿星器、反场箍缩、惯性约束等),同时介绍等离子体应用、激光等离子体、强耦合等离子体等科学内容。

二、先修课程

电动力学、光学、热学、统计物理、等离子体物理导论等。

三、课程目标

本课程的目标是:在知识层面上,使研究生掌握等离子体的基本参数、特性和物理过程,以及常用的分析方法和手段,为后续课程的学习和研究工作的开展打下坚实的基础;在能力提升上,主要是培养研究生的综合理解能力、等离子体实验技能,以及解决实际问题能力;在素质培养上,通过理论分析、科学实验和数据分析等方法培养研究生的科学素养,通过简化归纳、抽象建模、分析综合等实践环节激发研究生解决实践问题的创新意识。

四、适用对象

物理学各专业及相关学科专业(空间科学、力学、电气工程、核能工程、航天推进技术、电磁通信技术等)的博士和硕士研究生。

五、授课方式

将教学方法、教学手段与课程体系结合起来,建立以培养研究生专业能力为中心的教学方式。鉴于本课程是与实际紧密联系的课程,教学主要采用讲授、实践、讨论三结合的方式进行。第一层次为基础概念,以深入理解等离子体学科的基本定义、了解等离子体实验技术、培养学生对等离子体的理解为目的;第二层次为实践感知,主要培养学生对等离子体物理参量测量的综合掌握能力、在实际运用中的动手能力、研究问题的能力;第三层次为前沿教学实验,面向优秀研究生及对等离子体物理有兴趣和潜能的研究生,使他们开阔眼界,满足因材施教的要求。

开发网上开放式实验教学应用系统,实现实验教学在时间和空间的网上开放。搭建虚拟仿真和实验操作两个实验教学平台,学生可以根据自己的学习要求预约实验内容、设计实验方案、选择实验时间进行实验。满足了学生培养的要求,加强了学生发现问题和分析解决问题的能力培养。学生从网上可以调用实验方案设计软件,根据实验要求选择实验方法、装置、测点等实验线路,完成方案设计后提交审阅,审阅无误后到实验室自主完成实验,或观看根据自己设计设计的路线进行模拟实验的流程与结果,调动学生的学习积极性。

在教学理念上做到“以学生为本”;在教学方法上,分层次因材施教;在教学手段上,充分利用现代教育技术,应用网络技术、计算机技术,采用数字化测试系统,使教学适应当代科技的发展。开放式的教学模式的实施有利于学生基本技能的训练,有利于加强学生的实践意识,有利于培养学生综合运用基础知识的能力,培养学生的创造力和研究能力。

六、课程内容

本课程共八章,第一章介绍了普通物理可测量量在等离子体中的表现形式;第二章简要介绍了获得等离子体的不同方式与手段;第三章对等离子体作为“物质的第四态”所特有的物理现象进行了描述;第四章介绍了如何利用技术手段对等离子体内的复杂相互作用进行测量、综合分析,得到人们需要了解的特征参量值;第五章讲述了等离子体在工业界中的常见应用;第六章是等离子体模拟与仿真的入门知识;第七章描述了等离子体在能源领域的前景以及我国在这一领域的努力;第八章是关于等离子体的前沿问题,以及与其他学科的交叉。课程目录如下:

第一章 绪论

1. 等离子体基本参量

- (1) 等离子体密度
- (2) 等离子体温度
- (3) 等离子体频率
- (4) 德拜长度

2. 等离子体辐射

- (1) 黑体辐射
- (2) 韧致辐射
- (3) 复合辐射
- (4) 光谱辐射

3. 等离子体分布函数

第二章 等离子体源

1. 真空技术

2. 直流放电

3. 射频放电

4. 电子回旋共振

5. 中高气压放电

第三章 等离子体特性

1. 等离子体波及其传播特性

- (1) 朗缪尔波
- (2) 离子声波
- (3) 法拉第旋转
- (4) 截止频率

2. 等离子体与其他物质相互作用

- (1) 鞘层
- (2) 等离子体与壁相互作用
- (3) 束与等离子体相互作用

3. 扩散与输运

4. 等离子体平衡性质

第四章 等离子体诊断技术

1. 概述

- (1) 可靠性分析
- (2) 分辨率
- (3) 干扰与噪声

2. 电磁探针

3. 光谱分析

4. 微波诊断

5. 激光诊断

6. 粒子测量

第五章 工业等离子体

1. 刻蚀

2. 表面改性

3. 沉积与注入

4. 其他应用

第六章 等离子体模拟与仿真

1. 单粒子模型

2. 磁流体模型

3. 波与不稳定性

4. 动理学模拟

第七章 核聚变装置与工程

1. 托卡马克

2. 磁镜

3. 仿星器

4. 反场箍缩

5. 惯性约束

第八章 复杂问题

1. 激光等离子体

2. 强耦合等离子体

3. 非中性等离子体

七、考核要求

通过多种方式,对学生掌握等离子体实验与诊断的知识和能力进行全面考核。

(1) 应用试题库。教考分离,考核学生知识掌握程度。

(2) 应用实验考核。考查学生材料力学实验的能力。

(3) 应用等离子体计算程序、等离子体实验设计大作业。考核学生解决实际问题的能力。

(4) 结合课堂教学的讨论和学生回答问题,以及学生提供的小论文。考核学生解决实际问题的能力和素质,科学思维的素养及创新意识。

共四部分综合评价,各分为五个等级,即优、良、中、及格、不及格。具体要求如下:

1. 平时分(40%)

各类作业、实验报告的完整、清楚、条理、及时性等。

优——各类作业格式正确、结构完整、内容具体、条理清楚、文字通顺、物理数学工具使用正确、在规定时间内完成,完全符合要求。

良——格式正确、结构完整、内容具体、条理清楚、文字通顺、及时完成。

中——基本正确、结构基本完备、内容具体、条理清楚、按时完成、书写规范。

及格——基本正确、结构基本完备、内容基本符合要求、按时完成、书写规范。

不及格——不正确、结构不完整、内容不符合要求、不按时完成。

2. 创新分(20%)

各种设计的新颖、操作的实效等。

优——能从不同角度、不同方式考虑设计各种实验的实施方案,思路变通灵活,善于找到根本问题,思维方式多样化,方案切实可行、富有创造性,在短时间内将知识与能力成功结合、灵活运用,并能提出建设性方案。

良——能打破感觉和思维定式,能有效思考和处理方案中存在的不足,集思广益,有意识地提高知识的掌握程度,具有灵活运用知识的能力。

中——能设计出合情合理的方案,并能在实际操作中总结学习,提高认知能力和运用能力,能集思广益,有意识训练创造能力。

及格——能在要求时间内完成内容,达到要求,取得实际效果。

不及格——不能在要求时间内完成内容,遇到问题无法解决,达不到预期效果。

3. 态度分(10%)

参与的积极性,学习的主动性等。

优——能集中注意力,积极主动地面对问题,反复实验解决问题,遇到困难能坚持到底,自始至终保持旺盛的精力,乐于努力投入学习。

良——能以较为饱满的学习状态,积极参与,解决问题,学习作风始终良好。

中——能主动完成学习任务,并积极配合其他成员开展实验。

及格——能按时按量完成计划分配的任务,学习态度较好。

不及格——不能按时完成任务,阻碍了进度,不采取配合的态度。

4. 考试分(30%)

以试题库为基础,在期中、期末进行集中考试。

优——卷面 90 分及以上。

良——卷面 80~89 分。

中——卷面 70~79 分。

及格——卷面 60~69 分。

不及格——卷面 59 分及以下。

以上四部分综合测评成绩即为最终成绩,亦分五个等级——优、良、中、及格、不及格。不及格的学生要补考、重修。

八、编写成员名单

庄革(中国科学技术大学)、张家良(大连理工大学)

23 激光等离子体物理

一、课程概述

本课程为等离子体物理专业的核心基础课程,是从事相关研究工作的基础。对于研究生建立完备的等离子体物理体系起着非常重要的作用。

二、先修课程

普通物理、电动力学。

三、课程目标

通过本课程的学习,掌握激光等离子体物理的基础知识,了解该领域的发展历史、现状和最新发展趋势,为进行本专业的科研奠定基础;同时以此为契机,掌握科学研究的一般方法和基本技能。

四、适用对象

博士和硕士研究生。

五、授课方式

课堂授课。

六、课程内容

第一章 激光等离子体物理概述

主要内容:介绍激光等离子体物理发展简史及主要应用,国际最新进展及我国在本领域的发展。

■ 重点、难点:了解激光技术对激光等离子体科学发展的重要性和引领性,熟悉我国在本领域的发展情况及国际重要研究组的最新进展。

第二章 强激光技术

主要内容:激光振荡原理、飞秒脉冲的产生、测量、传输以及啁啾脉冲放大方法的基础知识,最后将概述超短超强激光的核心科学问题与最新研究进展。

■ 重点、难点:激光脉冲基本参数,理解超短脉冲色散的机理和控制方法,理解色散与啁啾的关联,将传统光学的基本方法运用于超短超强激光的产生、测量和放大。

第三章 激光等离子体物理

主要内容:等离子体基本知识、等离子体的动理学模型和流体模型,激光在等离子体中的传输和吸收,激光有质动力以及激光在等离子体中非线性传输、参量不稳定激发。

■ 重点、难点:等离子体和激光等离子体基本概念,激光在等离子体中传输线性色散关系,碰

撞和无碰撞吸收(共振吸收、 $V \times B$ 加热),各种参量不稳定激发的条件。

第四章 惯性约束聚变物理

主要内容:惯性约束聚变基本模型和原理,基本发展历程和本领域目前国际前沿进展和遇到的主要障碍。

■重点、难点:实现聚变点火的条件和主要方式;理解惯性约束聚变的几个基本模型,了解当前的主要进展,尤其是遇到的困境及各国的发展近况。

第五章 相对论激光等离子体物理

主要内容:单电子在相对论激光场中的运动,激光在等离子体中传输的相对论自聚焦、自调制、自透明效应,激光在稀薄等离子体中激发的激光尾场以及激光尾场加速,强激光与固体靶作用中高次谐波产生、离子加速。

■重点、难点:单电子在相对论激光场中的8字运动,激光在等离子体中传输的相对论自聚焦、自调制、自透明效应,激光尾波以及激光尾波驱动电子加速,强激光驱动离子加速物理机制。

七、考核要求

平时成绩+闭卷考试。

八、编写成员名单

张杰(中国科学院大学)、盛政明(上海交通大学)、李玉同(中国科学院大学)

24 计算物理

一、课程概述

计算物理是物理学一级学科中第八个二级学科。从二级学科的交叉性和功能性来看,它在整个物理学中的地位非常接近理论物理二级学科,但非常依赖于计算机的性能。经过半个多世纪的发展,计算已经与实验、理论形成了三足鼎立之势;从功能和成本两方面来看,在物理学乃至科学技术的发展中,计算物理展现出不可或缺性和不可替代性作用。高等教育、科学研究,以及材料、化学、信息、医药、金融、互联网、大数据和云计算等行业都需要计算物理专业研究生及以上层次的优秀人才。

计算物理专业(研究生)主要是培养从事计算物理的算法、算法优化与软件开发、算法在不同物理前沿领域应用等方面研究的专业人才,包括软件工程师、算法研究员和理论研究与计算方面的研究人员。

计算物理是计算物理二级学科(专业)、理论物理二级学科(专业),以及材料物理、材料化学和生物物理等其他二级学科(专业)从事理论研究方面的硕士或博士研究生必修的一门专业核心课程,也是其他物理二级学科(专业)、材料物理、材料化学和生物物理等其他二级学科(专

业)不从事理论研究的硕士或博士研究生选修的一门专业选修课程。

在修完本科和研究生阶段相关课程的基础上,通过本课程的学习,研究生^①能使用计算物理的算法从事理论物理(含粒子物理、核物理和数学物理)、凝聚态物理、原子分子物理、材料物理及生物物理等二级学科中前沿领域与交叉前沿领域的理论研究,解决这些领域的科学问题,推动相关领域的前沿发展。与此同时,通过学习本课程和从事相关领域的前沿研究,一部分人会在现有算法的基础上,结合前沿交叉领域研究的需要,发展算法,推动计算物理及其交叉学科领域乃至计算机性能的发展与进步。

本课程由两部分组成,每一部分教学工作量为3个学分或48个学时,整个课程为6个学分。各个专业的研究生可根据研究领域选择一部分或两部分学习。每一部分的授课可以有一名或多名教师授课。

二、先修课程

高等数学、高等代数、统计力学、量子力学、计算机语言及其应用、(本科)计算物理^②、高等量子力学等^③。

三、课程目标

通过本课程的学习,理解计算物理的本质——算法(algorithms)、物理和优化三者之间的紧密联系,掌握两个部分中多种技术的基本原理和基本算法,以及这些不同算法的优势和局限性,具备使用这些原理、算法和技术去编程和优化,解决科学问题的能力,同时能理解不同技术发展的瓶颈,具备发展新算法、开发与优化软件的潜质,以及应用于不同的前沿领域和应用领域提出和解决重要科学问题的潜力或能力。

四、适用对象

计算物理二级学科(专业)、理论物理二级学科(专业)以及材料物理、生物物理、计算数学及计算化学等其他二级学科(专业)从事理论研究方面的硕士或博士研究生。

五、授课方式

授课方式主要是课堂教学,包括采用PPT、板书、编写程序、上机运算和数据分析与讨论等形式。

六、课程内容

从内容及其应用的角度来看,本课程包括两个部分。第一部分是基于密度泛函理论,纯粹

① 针对研究生阶段的工作,不包含研究生毕业后的工作。

② 物理专业的本科学习阶段,除了“计算机语言及应用”课程外,应该开设4~6个学分(本科生)“计算物理”课程,针对力学、薛定谔方程、经典相变和分子动力学等,讲授矩阵本征值、常微分方程、偏微分方程、马尔可夫链和变分等问题的数值求解等。

③ 两部分内容相对独立,对先修课程的要求不一样,为了保障质量,可以每一个部分一个人开课,也可以根据师资专业情况,每一个部分几个人分担不同的内容。

从电子-电子、电子-原子(核)之间的库伦相互作用出发,在单电子近似的基础上,进行不同层次的改进和修正,从而得到不同的算法。这些算法主要应用来确定不同元素组成的简单与复杂材料的原子空间结构、电子能带结构,以及相关能量尺度上的物理特性,这类计算物理通常统称为电子结构计算或第一性原理计算或从头算。在这类算法发展的初期,大部分近似方法基本上只适用于不同的、简单的系统。随后,新的研究与需求带来了一系列的新进展,这些进展在算法上包括 LDA、LDA+U、GGA、Car-Parelleno、LDA+DMFT 和 LDA+GA 等,这些算法还在不断发展,在材料探索方面起着越来越重要的作用。这些算法均为本课程第一部分必须讲授的内容。

第二部分是基于量子多体物理理论,从参数化的哈密顿量或者低能有效模型出发,发展各种算法与技术。这一部分的特点是直接面对多体状态或多体相互作用,运用多体物理方法、多体状态的随机抽样,以及机器深度学习等技术,计算多体体系的整体特性,包括基态、低能激发态、基态关联函数、热力学特性以及动力学特性等。因此,这些方法或技术通常被统称为量子多体计算,包括严格对角化方法、量子蒙特卡洛方法、变分蒙特卡洛方法、Wilson 数值重整化群方法、密度矩阵重整化方法、转移矩阵重整化方法以及张量网络方法等,这些方法之间有一定的交叉发展的情景,并有望与机器深度学习结合带来新的发展。这些算法或技术均为本课程第二部分必须讲授的内容。

■ 重点:介绍两类计算方法的基本理论基础、技术路径、技术要素和发展瓶颈,包括算法建立、软件开发和前沿应用等方面的基本问题,同时培养和提升研究生在算法研究、软件开发和物理分析等方面的能力。

■ 难点:两类计算中算法的多样性,每一种算法的复杂性和技术瓶颈,软件开发方面的技术问题。

七、考核要求

考核方式是以编写程序和作业为主,根据程序运行情况和作业完成情况给分,成绩按照不通过、通过、良好和优秀四个等级进行考核。

要求每位研究生掌握基本算法,独立写出一套及以上的程序,并应用于解决一个具体的科学问题,得到正确的结果。由此可获得通过(63~75分);在此基础上,能有效地考虑程序结构优化和并行化计算,可获得良好(76~89分);能够在此基础上,同时可以解决重要的科学问题,并取得能够发表的结果,并撰写出学术论文,或者在算法上有创新性的成果,均可获得优秀(90~100分)。

八、编写成员名单

邓友金(中国科学技术大学)、段文晖(清华大学)、龚新高(复旦大学)、林海青(北京师范大学/北京计算科学研究中心)、王孝群(上海交通大学)、向红军(复旦大学)、向涛(中国科学院大学)

25 量子光学

一、课程概述

量子光学的主要研究内容是辐射场即光场的量子性质、光场与物质相互作用的量子性质,包括:光场的相干性、量子性,光与简单原子体系的相互作用,常见物理体系的量子光学过程。本课程为研究光场量子性、光与物质相互作用方向的基础课程,旨在培养学生掌握在这些方向进行理论或实验研究的基本理论工具。

二、先修课程

普通物理(光学、电磁学、原子物理)、量子力学、电动力学。

三、课程目标

本课程主要目的是通过对光场的相干性、量子性、光与简单原子体系相互作用的讲授使学生掌握量子光学的基本理论和基本研究方法,可以利用这些工具分析光场的复杂干涉特性,了解多光子符合计数探测下的光场干涉新技术,分析常见量子系统中光与物质相互作用的基本量子过程,分析环境干扰不可忽略条件下的量子系统的演化。

四、适用对象

光学专业的硕士研究生,物理学专业冷原子方向和量子信息学方向的硕士研究生。

五、授课方式

主要使用课堂理论讲授,辅助专题报告和专题文献调研。

六、课程内容

量子光学课程的主要内容有如下几个部分:

1. 光场(辐射场)的量子化

通过麦克斯韦方程组的量子化完成自由空间电磁场的量子化,进而提出光子的概念;讲述一些典型光场的量子态的描述,包括粒子数态、相干态、压缩态、热平衡辐射场态,并研究这些态的性质;讲述以相干态波函数为基础进行一般光场描述的方法,即光场的量子分布理论,包括 P 表示、 Q 表示以及 Wigner 表示;讲述光场量子化带来的量子效应,例如 Casimir 效应、Lamb 移动等。

■ 重点:自由空间电磁场的量子化和相干态的性质,难点是光场的量子分布理论。

2. 光场的干涉与相干性的量子理论

通过光的干涉的实例分析,即通过迈克耳孙测星干涉和 Hanbury Brown-Twiss 干涉提出光的一阶与二阶干涉的概念,给出不同阶干涉对应的光场相关函数的定义,分析不同阶干涉的物

理含义;使用相关函数分析一般的干涉;使用正交相位分量探测连续变量光场态;了解典型的高阶干涉,例如 Hong-Ou-Mandel 干涉;研究高阶干涉与光子数统计的关系,分析非经典光场的判据,包括压缩态、反聚束、亚泊松分布等。

■重点:二阶干涉的理解,难点是相关函数在实际干涉中的应用。

3. 光与原子相互作用的理论

从最简单的单模光场与单个二能级原子相互作用的物理模型出发,讲述光与原子相互作用的半经典理论,近共振相互作用条件下的旋转波近似,Rabi 振荡,绝热跟随;经典光场与大量原子相互作用的 Maxwell-Schrodinger 方程、激光的半经典理论;光场量子化后原子与光场相互作用的全量子理论、不同绘景下的方程求解、全量子理论下单个二能级原子同相干态光场相互作用的崩坍-复原效应,自发辐射的 Weisskopf-Wigner 理论;光与原子相互作用的 J-C 模型、大失谐情形的 J-C 模型、Raman 型 J-C 模型。

■重点:单个二能级原子与近共振单模光场相互作用下的 Rabi 振荡,难点是将模型推广到一般情形,例如光场与介质(大量原子)相互作用的 Maxwell-Schrodinger 方程。

4. 开放系统的量子光学方法

系统与环境相互作用的热库理论、马尔可夫近似下的密度算符主方程方法、多模热光场热库下原子系统的消相干、随机波函数方法;Heisenberg-Langevin 方程、非马尔可夫情形关联函数的处理;耗散起伏定理。

■重点:主方程和 Heisenberg-Langevin 方程,难点是一般情形的噪声关联函数的处理。

5. 一般量子光学现象的研究

多光子干涉现象;光子的空间角动量性质;双模和多模压缩态的性质、产生与探测;共振荧光。

6. 原子物理中量子光学的应用

光场对原子的力学效应、原子的路径干涉;激光冷却原子;原子的集体相干现象(暗态,电致感应透明,无反转激光);原子的集体辐射和集体散射(超辐射,亚辐射,自旋波激发/光存储);稀薄碱金属原子气体的玻色-爱因斯坦凝聚和简并费米气体的产生、性质和应用。

7. 常见的光与物质相互作用量子系统及其在量子信息处理中的应用

腔量子电动力学系统(cavity QED)的构造、量子态表征及操作;冷阱束缚离子系统的量子态表征和操作;光机械振子的冷却及与其他系统的耦合;NV 色心的量子态表征及在量子传感中的应用;超导量子线路的量子描述及在量子计算中的应用;线性光学系统中的量子计算和光子纠缠在量子通信中的应用;基本物理理论的验证(Bell 不等式检测、EPR 佯谬的检验、激光观测引力波,电子永电矩的检验等),量子非破坏性测量;原子光钟和干涉;光晶格中的超冷原子和量子模拟。

以上 1~4 部分为量子光学的基础部分,5~7 部分是根据研究方向不同可以选讲的应用部分。

七、考核要求

考核采用试卷考试和前沿专题文献调研相结合。学生应该能掌握本课程的基础理论知识,解决基本的计算问题,通过阅读能基本理解与量子光学相关的前沿研究文献。

八、编写成员名单

郭光灿(中国科技大学)、张永生(中国科技大学)、孙方稳(中国科技大学)