

# 近代物理实验I

2023 - 2024学年秋季学期

主讲教师：何琛娟

上课教师：廖红波，熊俊，聂家财，  
王海波，熊昌民，张金星，  
蒋楠，陈荣艳，马宇翰

技术支持：熊俊，弓文平，李多

# 实验课环节

预习（预习报告）

实验（提问、讲解、实验）

总结（实验报告）

# 近代物理实验要求（预习）

- 预习要求：
  - 课前认真预习实验讲义，捋清线索，提取重要信息。

物理原理

实验原理

仪器原理

# 以氢氖光谱实验为例

非线性电路

光学多道与氢氖同位素光谱

He-Ne激光器模式分析与模分裂

- 物理原理（概念、图像）
  - 光谱 (定性、定量)
  - 氢光谱 (有什么规律？为什么？)
  - 氢氖光谱 (有什么相似点？有什么不同点？为什么？)
  - .....
- 实验原理
  - 如何得到光谱？
  - 如何记录光谱？
  - 如何测量光谱？
  - .....

## • 仪器原理

- 光谱仪结构？
- 各部件的作用？
- 仪器参数的选择？
- 多道？单道？
- .....



# 近代物理实验要求（预习）

- 预习要求：
  - 课前认真预习实验讲义，捋清线索，提取重要信息。
  - 注意相关内容的联系（与其他理论/课程、与其他实验项目）
  - 预习报告：
    - 实验目的
    - 原理（物理、实验、仪器）
    - 实验内容
    - 关于思考题

**不看字数！看关键点！**

# 实验课

阅读实验说明牌，仪器说明书等。  
关注“注意事项”。

讲解

(检查预习报告、提问)

实验(思考、尝试、讨论、记录)

## 变温霍尔效应实验说明

### 安全注意事项:

1. 湿手不能触及过冷表面、液氮漏斗，防止皮肤冻结在保冷表面上，造成严重冻伤，灌液氮时一定要戴厚棉手套，如果发生冻伤，请立即用大量自来水冲洗，并接烫伤处伤口。
2. 注入液氮时，先注入一部分液氮，待容器冷透后再将液氮补满。
3. 实验时要注意室内通风。
4. 实验完毕，一定要拧松、提起中心杆，防止热膨胀胀坏恒温器。

### 实验方法及实验步骤

#### 1、抽真空

- 1) 连接真空系统和样品池之间的真空活扣；
- 2) 关上真空阀 2；
- 3) 合上墙上真空泵开关；
- 4) 打开复合真空计开关；
- 5) 拧开样品池上方的真空阀 1；
- 6) 复合真空计指示 1Pa 后，关上样品池上方的真空阀 1、真空泵开关；
- 7) 拧开真空阀 2，放气后，打开真空活扣，准备测试。

#### 2、磁场的测定:

用高斯计测量永磁铁的磁场强度。

#### 3、室温下的霍尔测量:

开机预热，调整样品电流到 10.00 毫安，选择样品 2，按下开关  $K_1$ ，测霍尔电压  $U_H$ ，如果电压较小，改在 200 毫伏或 20 毫伏档；按电流换向开关，测  $U_H$ ；缓慢旋转永磁铁 180° 之后，测  $U_H$ ；电流换向，测  $U_H$ 。

#### 4、变温测量:

首先将温控仪的温度设定在 80K，取出恒温器中心杆，将杯型漏斗插入恒温器，并将中心杆放在漏斗中，以便预冷，缓慢注入液氮直至装满为止，等待样品冷却到最低温度后再次注入液氮直至装满为止，取出漏斗，插入中心杆并旋至最低位置，再回旋转约 180° ~ 720°，即可通过温控仪设定控温了。

控温时顺时针转动中心杆至最低位置，再回旋转约 180° ~ 720° 即可通过温控仪设定控温了。等温度控制稳定后(温度波动小于  $\pm 1.5^\circ\text{C}$ )，重复测量过程 3，测得此温度点的各项霍尔参数，改变设定温度，测另一个温度点的霍尔参数，温度控制范围为 80K 到 300K，80K-180K，每隔 5K 测一点，180K-300K，每隔 10K 测一点如果发现某一区域的数值变化很快，可以缩小测量间隔至 2K。

中心杆旋高则冷却量增大，适于快速降温 and 较低温度的实验，控温精度与 PID 参数有关，请适当调整中心杆高度，以提高不同区区的控温精度。

#### 5、关机

- 1) 实验完毕，一定要拧松、提起中心杆，防止热膨胀胀坏恒温器。
- 2) 关温控仪和测试仪开关。

# 实验报告的格式

## 实验题目

学号：

姓名：

【摘要】（用100-200字描述本次实验的目的、方法、结果和结论）

关键词：（三到五个词，主要用于检索）

一、引言：用简短的语言介绍实验的相关背景

二、原理：在理解的基础上，用简明扼要的语言

三、实验：介绍实验的仪器、实验方法和主要

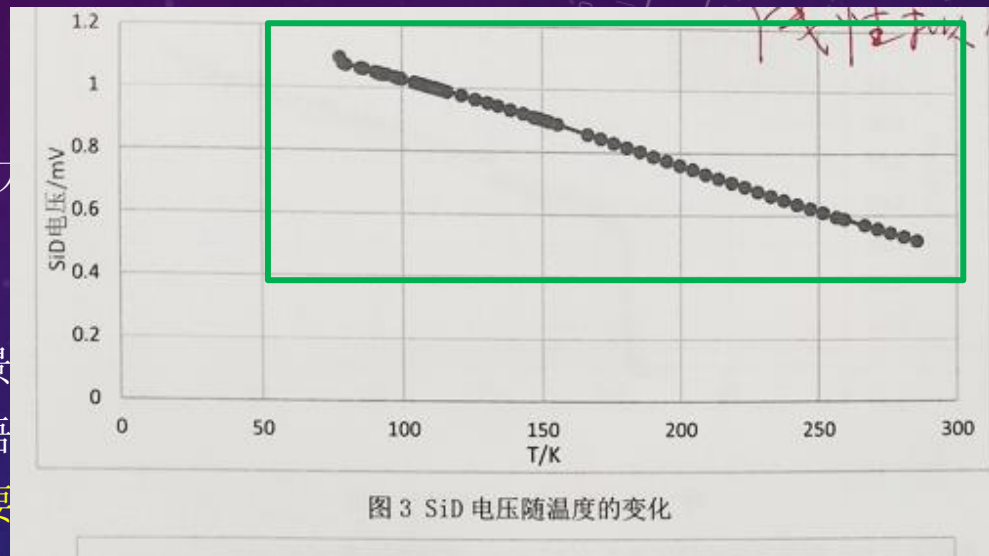
四、结果与分析讨论：介绍结果（定性、定量），分析规律，讨论成因

- 1、以图、表的形式结合语言展示实验结果（数据、现象）；
- 2、分析实验结果呈现出来的规律，进一步处理；
- 3、结合原理，比较实验结果与理论预期，对实验中观测到的现象和实验结果进行合理的解释；
- 4、分析影响实验结果因素和造成实验误差的原因。

五、结论和建议（总结）：总结全文（主要方法，主要结果，主要结论），提出建议

六、参考文献：

- 1、书的格式：作者. 书名. 出版地. 出版社. 出版时间
- 2、文献的格式：作者, 论文题目, 期刊题目. 期刊的年、卷、期





# 实验报告的规范

## • 图的规范

- 报告中的所有的图要统一编号。
- 所有的图必须有图题。
- 数据图的纵、横轴必须表明其物理意义和单位。

## • 表格的规范

- 报告中所有的表格也要统一编号。
- 所有的表格必须有题目，并表明每一栏数据的物理意义和单位。

## • 公式的规范

- 所有的公式也要统一标号。
- 公式中出现的符号在第一次出现时一定要标明其物理意义和单位。

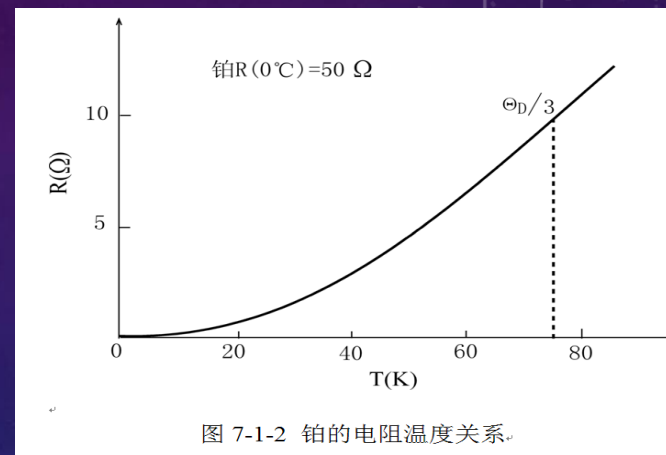


表 6-2-1 考虑相对论修正前后，电子波波长  $\lambda$  与电压  $U$  的关系。

$U(\text{KV})$	$\lambda(\text{\AA})$ (修正前)	$\lambda_r(\text{\AA})$ (修正后)	$U(\text{KV})$	$\lambda(\text{\AA})$ (修正前)	$\lambda_r(\text{\AA})$ (修正后)
20	0.0867	0.0851	40	0.0613	0.0590
25	0.0776	0.0757	45	0.0573	0.0554
30	0.0708	0.0682	50	0.0548	0.0535
35	0.0656	0.0634	55	0.0523	0.0496

设电子到达阳极时的速度为  $v$ ，有

$$eU = \frac{1}{2}m_0v^2 = \frac{P^2}{2m_0}, \quad (6-2-3)$$

式中  $e$  为电子电量， $U$  为加速电压， $m_0$  为电子的静止质量， $P$  为电子动量。将此式代入 (6-2-2) 式，则电子波的波长  $\lambda$  与



**摘要:**法布里-珀罗腔(F-P)通常是由2面平行放置的反射镜组成,光场会在反射镜间多次来回反射,经过干涉相长过程光场被增强,形成干涉与谐振腔内模式产生的工作原理.基于F-P腔设计了可分辨激光模式过实验观察拉盖尔-高斯光束,测量了F-P腔的自由光谱区、相邻模频率. **关键词:**法布里-珀罗腔;拉盖尔-高斯模式;自由光谱区;激光模式

中图分类号:O436.1 文献标识码:A DOI:10.1965

法布里-珀罗(F-P)腔通常是由2面平行放置的反射镜组成的多光束干涉仪,是制作镀膜镜片、滤光片、波分复用器、光纤传感器、激光器等光学器件的重要基础元件<sup>[1]</sup>.通过将激光器输出频率锁定到外部参考F-P腔的共振频率,可实现稳频激光<sup>[2-4]</sup>,这在引力波探测<sup>[5]</sup>、光学原子钟<sup>[6]</sup>、精密光谱学<sup>[7]</sup>等领域有广泛的应用.

将入射光束耦合进入F-P腔,光场会在反射镜间多次来回反射,经过干涉相长过程,腔内光场被增强,最终形成稳定腔内光场.该过程相当于对传输光场施加边界条件,导致光场被约束在腔内的有限空间,只存在一系列特定的本征态,每个光场本征态对应1种激光模式.

F-P腔的模式分为纵模和横模.本文基于F-P腔的基本工作原理,设计了可分辨不同激光模式的实验装置.通过实验,学生能直观而全面地理解激光模式的输出特性,加深对多光束干涉原理的认识,提高学生在光路设计与调节、光电信号探测、数据处理与分析等方面的动手能力.

**1 F-P腔的基本原理**

F-P腔是由2面高反射率腔镜组成,当入射

其中, $\lambda$ 为激光波长.通常入腔角度很小,可认为 $\cos \theta \approx 1$ .同时,F-P腔内介质是真空或空气时,折射率 $n \approx 1$ .对于真空中传输的光束,其传播速度为 $c=299\,792\,458\text{ m/s}$ ,激光频率可直接由测量的激光波长读取.

定义 $I_t$ 为透射光强, $I_i$ 为入射光强,不考虑腔镜的吸收损耗,得到入射光的透射函数

$$T(\delta) = \frac{I_t}{I_i} = \frac{1}{1 + \frac{4R \sin^2(\delta/2)}{(1-R)^2}} \quad (3)$$

选用反射率 $R$ 不同的腔镜,透射函数随相位 $\delta$ 变化的线型如图2所示.对于不同 $R$ ,F-P腔透射峰的线宽也不同. $R$ 越高,F-P腔透射峰的线宽越窄,光谱分辨本领也越强.当相位满足 $\delta = 2\pi q$  ( $q$ 为正整数),入射光会在F-P腔反射镜之间干涉增强形成驻波.这种在腔内沿光传输方向建立的光场称为F-P腔的纵模, $q$ 称为纵模数.对于给定腔长 $L$ ,当透射函数达到极大值时,光学腔内2个相邻共振峰的频率差就是F-P腔的自由光谱区(free spectral range,FSR):

$$\Delta\nu_{\text{FSR}} = \nu_{q+1} - \nu_q = \frac{c}{2L} \quad (4)$$

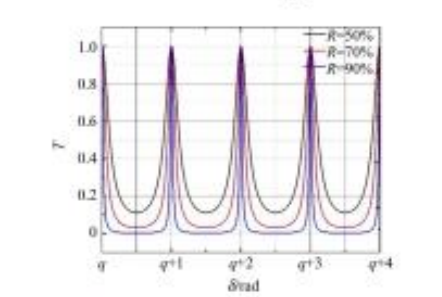


图2 多光束干涉的透射光强函数

F-P腔的腔镜除了会在传输方向上限制光场,形成纵模,也会在垂直于传输方向的平面上形成横模.横模的产生可以借助“孔阑传输线”进行理解:将腔镜视为有限孔径的孔阑,光在谐振腔内的来回反射相当于通过一个个孔阑,光场由于衍射效应不断被整形,最终实现稳定的横向光场输出,称为谐振腔的“自再现模”.该过程可通过迭代算法求解基尔霍夫-菲涅耳衍射公式得到<sup>[8]</sup>.对于圆形镜面F-P腔,用近轴波动方程近似可求得具有拉盖尔-高斯函数形式的光场<sup>[9]</sup>.不同拉

盖尔-高斯模式的频率为

焦距 $f=100\text{ mm}$ 的透镜进行光场模式匹配.激光器的频率由波长计读取.F-P腔后放置光电探测器探测透射信号,由CCD相机记录激光模式的空

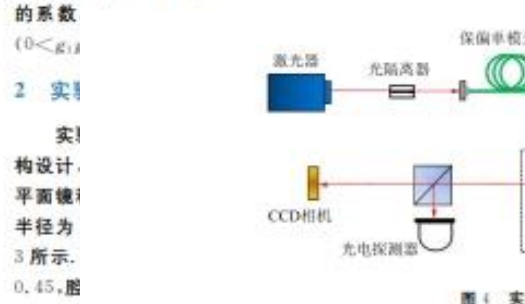
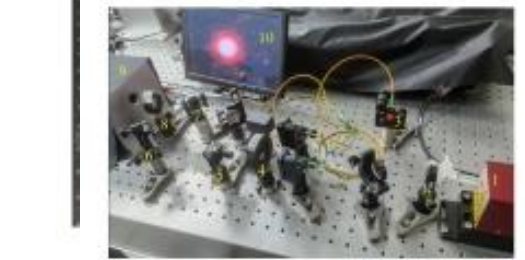


图4 实验装置示意图



1. 半导体激光器 2. 光隔离器 3. 保偏单模光纤 4. 半波片 5. 偏振分束镜 6. 反射镜 M1 7. 反射镜 M2 8. 透镜 9. F-P腔 10. 显示屏

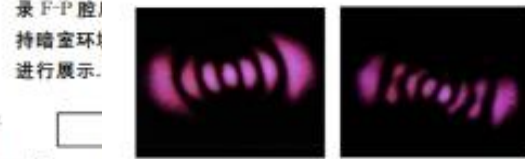
图5 实验装置实物图

### 3 F-P腔耦合输出模式与结果分析

采用“Walking the beam”方法,调节入腔的反射镜 $M_1$ 和 $M_2$ ,即精细调节光束入腔的角度和位置,使入射激光束尽可能以正入射的方式从前腔镜的中心位置射入F-P腔.如果光束调节的精度不够,会导致F-P腔耦合输出的横模不够清晰明亮,且不稳定.选择透镜的聚焦位置,使入射光束与F-P腔模式匹配,同时扫描激光频率与F-P腔共振,使耦合入腔的基模光强最强.

根据式(5),不同的激光模式具有不同的共振频率.调谐激光频率,由CCD相机记录F-P腔耦合输出的横模,如图6所示.实验过程中,频率调谐是由电流调节与压电陶瓷调节共同配合完成.

具体实验装置实物图如图5所示.由于在记录F-P腔时,保持暗室环境,以便清晰地进行展示.



(a) TEM<sub>00</sub> (b) TEM<sub>01</sub>

图6 F-P腔耦合输出的不同空间模

这些横模具有典型的拉盖尔-高斯光束特征.基模为圆形光斑,而高阶模在镜面上出现径向和角向方向的波节线.由波长计读取不同模式的频率,如表1所示.纵模数 $q$ 可结合光电探测器所探测的透射峰进行分辨.

表1 不同模式的频率差值			
纵模数	$\Delta\nu/\text{GHz}$		
	TEM <sub>00</sub>	TEM <sub>01</sub>	TEM <sub>10</sub>
$q$	0	0.639	1.292
$q+1$	2.502	3.181	3.850
$q+2$	5.076	5.746	6.436
$q+3$	7.640	8.326	9.002
$q+4$	10.221	10.910	11.610

对多个相邻的基模频率进行线性拟合,如图7所示.可知F-P腔的自由光谱区为 $(2.566 \pm 0.001)\text{ GHz}$ ,与理论计算值的偏差为3.5%.对于同一纵模,角向两相邻横模之间的频率差为 $(0.673 \pm 0.020)\text{ GHz}$ ,而径向两相邻横模之间的频率差为 $(1.350 \pm 0.036)\text{ GHz}$ ,相比于式(5)的理论计算值,偏差分别为7.0%和7.4%.

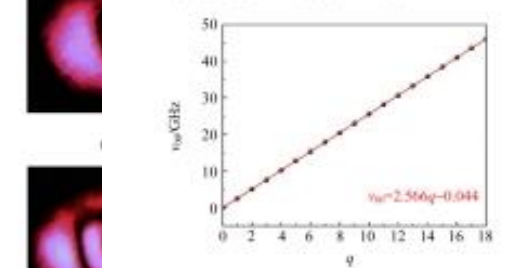


图7 F-P腔的自由光谱区

自由光谱区和模式频率间隔与理论计算结果之间存在频率偏差,主要来源于F-P腔的腔长抖

动而引起的共振频率偏移(环境温度波动及振动噪声导致),以及激光器自身的频率漂移.此外还包括波长计测量精度的限制、腔长的测量误差、腔内杂质等.

### 4 结束语

基于F-P腔设计了激光模式分析装置,通过对透射信号空间光场分布和光强的测量分析,有助于学生直观理解激光的横模和纵模.实验测量F-P腔自由光谱区相比于理论计算值的偏差为3.5%,径向相邻横模频率间隔约为角向相邻横模频率间隔的2倍.实验结果与理论分析相符.作为面向本科生的实验教学课程,本实验教学有助于培养学生的动手实践能力,并加强学生对光学、激光原理、电学等相关知识的理解与掌握.

致谢:感谢王志远同学帮助设计F-P腔,感谢柳奎博士与李宗阳博士帮助筹建实验平台.

### 参考文献:

- [1] 郭振华. F-P多光束干涉仪的发明者——法布里和珀罗[J]. 物理, 2004, 33(4): 293-297.
- [2] Matei D G, Lagro T, Halmer S, et al. 1.5  $\mu\text{m}$  lasers with sub-10 mHz linewidth [J]. Physical Review Letters, 2017, 118(26): 263202.
- [3] 王彬宇, 王南超, 刘震, 等. 基于法布里-珀罗干涉仪的激光谱线特性测量研究[J]. 物理实验, 2019, 39(8): 1-8.
- [4] Zeng X Y, Ye Y X, Shi X H, et al. Thermal-noise-limited higher-order mode locking of a reference cavity [J]. Optics Letters, 2018, 43(8): 1690-1693.
- [5] Luo J, Chen L S, Duan H Z, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector [J]. Classical and Quantum Gravity, 2016, 33(3): 035010.
- [6] 郑科, 张浩, 石晓晖, 等. 基于量子逻辑技术的铝离子光频标研究进展[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46(7): 073004.
- [7] Grinin A, Matveev A, Yost D C, et al. Two-photon frequency comb spectroscopy of atomic hydrogen [J]. Science, 2020, 370(6520): 1061-1066.
- [8] 姚启钧. 光学教程[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 45-50.
- [9] 梁铨超. 物理光学[M]. 4版. 北京: 电子工业出版社, 2012: 160-163.
- [10] 周炳琨, 高以智, 陈侧峰, 等. 激光原理[M]. 5版. 北京: 国防工业出版社, 2004: 61-63.



# 单个实验的考核方案（100）

- 预习情况（20）

- 预习报告：写在实验记录本上，简述实验目的、实验原理、实验方法与实验内容
- 回答问题：对实验的思考、理解及对实验内容的掌握

- 实验操作（50）

- 实验态度和纪律
- 操作的规范性（低温、激光、放射性等的操作规范）
- 分析问题和解决问题的能力
- 实验内容的完整性和数据的合理性
- 实验记录的规范性（过程、条件、结果的完整性，整洁，有效数字，表格设计等）

- 实验报告（30）

- 是否符合“论文”要求的格式
- 叙述是否简洁、清楚
- 公式、图表是否规范
- 实验过程描述是否清楚
- 数据处理中的有效数字、单位是否正确
- 实验分析和讨论是否深入

# 近代物理实验要求（实验常规）

- 每位同学必须准备一个实验记录本。预习报告和实验过程都记录在本子上，实验记录不要使用铅笔。
- 进入实验室后，先阅读实验说明书和相关操作规范，对照讲义和操作说明熟悉实验仪器，**未经老师许可不能自行打开实验仪器**。
- 就餐时，同组的同学轮流去，最好不要同时离开实验室，出去前请告诉指导教师。实验室内不允许吃东西喝饮料，可带饮用水。
- 实验结束后，实验数据必须由老师签字确认之后，才能关闭实验仪器。
- 离开实验室前，一定要填写实验记录登记本。离开前还应整理好实验仪器并清洁实验室，经老师同意后才能离开。



# 近代物理实验要求（考勤）

- 不迟到。迟到**15分钟**以内的，任课教师将按情况对本次实验进行扣分。迟到**15分钟**以上者，不准做实验，该实验成绩为**0**分。
- 不早退。认真完成实验要求，只有当教师检查完实验室并认可后，才可以离开实验室。
- 不拖堂。学生应在规定的上课时间内完成实验，教师根据规定时间内完成情况给分，仪器出现故障时例外。
- 不无故旷课。无故旷课者，不补做实验，该实验成绩为**0**分。并记入最后成绩之中。
- 实验中，未经老师同意擅自离开实验室半小时以上，以旷课处理。
- 请假制度。有急事先提交有辅导员签字的假条，病假必须要有医院的证明，准假后可补选实验。
- **如果有迟到15分钟和无故旷课时，其零分将计入最后成绩中。**

# 近代物理实验要求（实验报告）

- 实验报告需在实验结束后两个星期内提交。晚两周扣5分。
- 无故缺实验报告，则该次实验最高不超过60分。
- 严禁抄袭他人报告。一经发现，抄者和被抄者的实验报告成绩均按0分论处。
- 若发现实验原理全文拷贝网上电子讲义（不论哪个学校的），原理部分成绩为0分。
- 实验报告必须附上原始数据。可复印, 或拍照打印，大小和清晰度要求能看清数据和老师的签名。
- 实验报告的总长度建议控制在5—8页（五号字，A4纸，1.5倍间距）。
- 实验报告要求当面交给老师，尤其是第一个。

# 课程安排

- 关于任课教师

- 关于上课时间

星期一 13:30-19:30

星期四 8:00-14:00

星期五 13:30-19:30

$45 \times 8 = 360(\text{min}) = 6(\text{h})$

就餐时间

实验名称	星期一	星期四	星期五
非线性电路211	聂家财	马宇翰	张金星
高温超导205			
液晶物性818	何琛娟	何琛娟	王海波
塞曼效应811			
光泵磁共振802/804	熊昌民	陈荣艳	蒋楠
光纤性质与应用806/808			
激光模式分析801	廖红波	廖红波	熊俊
光学多道810			



## 2023~2024学年 第一学期校历

月份	周次	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五	星期六	星期日	内 容
2023年 8月		21	22	23	24	25	26	27	1. 2023年8月21日全体教师正式上班，8月21日至8月25日为教师培训与学术交流周；
	1	28	29	30	31	1	2	3	
9月	2	4	5	6	7	8	9	10	2. 8月26日为本科生二、三、四年级和研究生二、三年级注册日；
	3	11	12	13	14	15	16	17	
	4	18	19	20	21	22	23	24	
	5	25	26	27	28	29	30	1	
10月	6	2	3	4	5	6	7	8	3. 8月27日为本科生、研究生新生报到日，8月28日举行本科生、研究生新生开学典礼；
	7	9	10	11	12	13	14	15	
	8	16	17	18	19	20	21	22	
	9	23	24	25	26	27	28	29	
	10	30	31	1	2	3	4	5	
11月	11	6	7	8	9	10	11	12	4. 中秋节、国庆节：9月29日至10月6日（共8天）放假、全校停课；10月7日至8日正常上班、教学正常进行；
	12	13	14	15	16	17	18	19	
	13	20	21	22	23	24	25	26	
	14	27	28	29	30	1	2	3	
12月	15	4	5	6	7	8	9	10	5. 元旦放假安排待国务院办公厅公布2024年节假日安排后另行通知；
	16	11	12	13	14	15	16	17	
	17	18	19	20	21	22	23	24	
	18	25	26	27	28	29	30	31	
	19	1	2	3	4	5	6	7	6. 2024年1月8日学生放寒假；
									7. 2024年1月15日教师放寒

### • 校历安排：

- 上课周：1—17周
- 考试周：18—19周

### • 课程安排：

- 大课：1周
- 实验：2—17周
- 答疑：17周
- 考试：18/19周

### • 每个同学本学期做7个实验

# 实验总成绩的计算方法

- 总成绩（100） = 期末成绩×20% + 平时成绩×80%
- 平时成绩（100） =  $\Sigma$  单个实验成绩 / 7 （注意！）
- 期末成绩（100）
  - 笔试（试卷，内容包括原理、仪器、实验方法、问题解决、实验设计、数据处理等）
  - 总结、调研报告、仪器介绍小视频

# 说明!

- 关于实验课时间：
  - 按教务系统选课时间
  - 分组（按选课班级）
  - 轮次表
- 关于时间内容的调换
  - 提前找老师
  - 提前找同学

近代物理实验 2023 秋季学期实验安排（周一）

日期 实验	第 2 周 9 月 4 日	第 3 周 9 月 11 日	第 4 周 9 月 18 日	第 5 周 9 月 25 日	第 6 周 10 月 2 日	第 7 周 10 月 9 日	第 8 周 10 月 16 日	第 9 周 10 月 23 日
非线性电路 科技楼 C211	王憬一							
	仇亦昕							
	贾文慧							
	努尔·买买提							
高温超导 科技楼 C205	林祺辉							
	董梓语							
	李婉仪							
液晶物性 科技楼 C818	李昕璐							
	王俊康							
	孔欣慧							
塞曼效应 科技楼 C811	张黎阳							
	易艺							
	蔡潇							
光学多道 科技楼 C810	甄晨杨							
	巩伊鸿							
	杨硕							
	莫子夜							
光纤/应用 科技楼 C806&808	董昊霖							
	张棚钰							
	曹柳斌							
光泵磁共振 科技楼 C802&804	吴贝安							
	王彦皓							
	袁尚玉							
模式分析 科技楼 C801	瓦尔斯·阿不都拉							
	原子涵							
	郑萍娜							