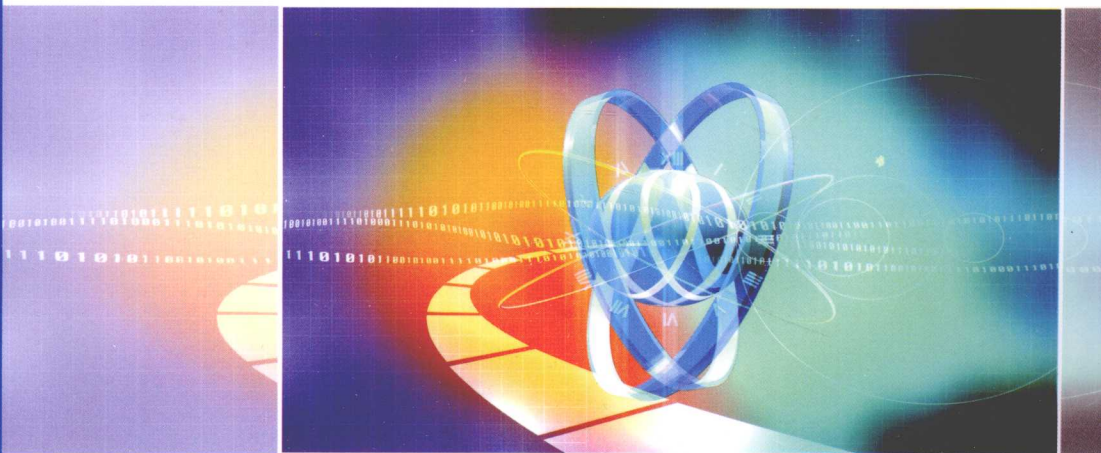




Modern Physics Experiment

近代物理实验

● 主编 魏怀鹏 张志东



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

近代物理实验

主 编 魏怀鹏 张志东



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是在总结多年近代物理实验教学改革的实践经验的基础上,参考借鉴国内外教学实践的成功经验,以原教材为基础,汲取物理学科、实验技术及计算机技术的一些新成果,在编排上做了一些新的尝试及增删修订,新编写而成.立意新颖,具有一定时代感,突出综合性、应用性、设计性、研究性以及物理量的测量.内容包括:核物理及核磁共振、原子物理、半导体物理,电学、光学、热学、声学测量,超导、液晶、纳米材料特性测试技术,全息、激光与光纤传输技术,微波、传感器技术、微弱信号检测技术,计算机模拟仿真技术、A/D、D/A 与计算机技术在物理等问题中的应用实验等.附录主要包括物理量测量的常用仪器量具、技术参数、原理、特点简介,物理量测量的常用数据、参数等.

本书可作为高等学校物理类专业本科生以及非物理专业本科生或研究生的“近代物理实验”课程教学参考书,也可供相关的教学、科研和技术人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

近代物理实验/魏怀鹏,张志东主编. —天津:天津大学出版社,2010.8

ISBN 978-7-5618-3546-3

I. ①近… II. ①魏…②张… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①O41—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 124712 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
网 址 www.tjup.com
印 刷 河北省昌黎县第一印刷厂
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm × 260mm
印 张 13.75
字 数 343 千
版 次 2010 年 8 月第 1 版
印 次 2010 年 8 月第 1 次
印 数 1—1 000
定 价 24.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

序 言

21 世纪是中华民族复兴的时期. 肩负着这一空前历史重任的人民, 必须具有与之相适应的素质. 这就对我们的高等教育提出了新的任务和要求. 特别是在教育部提倡教学要大力鼓励设计性、创新性的背景下, 编著《近代物理实验》这样一本提高性的书籍, 其重要性自不待言. 本著作主要作者长期在高校的教学岗位上辛勤耕耘, 积累了丰富的理论与实验经验, 特别是近些年来教学改革经验, 其中许多内容是作者经验的总结. 本书就是这些老师们长期耕耘的成果.

本书有以下特点.

一、在内容上, 既注重基础实验的系统、全面介绍, 又重视科学的发展、技术的进步对近代物理实验的影响. 同时创意新颖, 选材广泛. 不仅选编了一些历史上著名的经典实验, 而且也编入了不少有广泛应用价值并具有时代感的“近代物理实验”.

二、在编排上, 突出综合性、实用性、设计性, 并着重物理量测量的方法. 结合作者的实际教学与科学研究实际, 在书中讲述了一些具有一定的创新和特色的实例. 这些不仅有利于培养学生掌握和灵活应用物理基本知识、基本概念以及更好地理解相关科技前沿发展动态, 而且有利于激发学生积极开拓创新思维, 提高解决实际问题的能力. 同时把电子技术与计算机应用技术、计算机数据实时采集与处理等, 尽可能多地引入到实验教学中, 增加了实验的可视性, 进一步提高了实验效率.

三、在教学上, 注重理论与实践相结合, 贯彻“工学并举”方针, 体现出既重视基本实验技能训练, 又重视综合实验能力、实验创新能力的培养. 因此, 增加了不少综合应用实验及设计实验, 同时辅以多媒体技术, 并给学生留有自行设计、自己钻研制作的空间, 有利于激发学生的求知欲与探索研究的兴趣.

本书是近年来高等学校近代物理实验课程的一本好书, 可作为本科生以及研究生的实践性课程的教材, 同时, 也可作为相关专业人员的参考书.

杨国琛

2010 年 1 月

前 言

“近代物理实验”一书根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》、普通高等学校“近代物理实验”课程教学大纲的指导思想和原则,借鉴国内外院校教学实践的成功经验,在总结本校 1982 年以来,教学实践、教学改革经验及教训的基础上,在《近代物理实验综合应用与设计》、《近代物理实验研究开发与创新》基础上,在编排上做了一些新的尝试,进行了多次修订、增删,新编写而成。本书选材以一些著名的经典实验、有广泛应用价值的近代物理实验为主;力图能够适应现代高等教育发展的需要;本书立意新颖,内容具有一定时代感,注重突出综合性、应用性、设计性、研究性,以及物理量的测量。

本书力图把“实验技能”、“理论思维”和“科学计算”三大现代科学素质的训练有机地结合起来。力求较系统地归纳物理学科的普通研究方法,将知识结构体系的学习,作为这些方法成功应用的典型事例,阐述研究方法在建立学科知识结构体系过程中的重要作用。强调学习与探索过程的相互渗透。努力把传统内容和比较新颖、涉及知识面较广的内容(如实验技术、传感技术、计算机技术等)结合起来;在书中留出一定探索与设计、研究空间,让学生感知、体验人类认知的真实过程。同时,在教材与科技发展的前沿相结合原则上,努力用科技发展的新观念与成果去阐释、佐证、更新传统教学内容之内涵;引导学生随时掌握时代技术发展的脉搏,了解现代检测技术,开阔眼界,拓展知识面;探索让科研进课堂、进教材,引领学生触摸学科前沿,明了学之所用,激发求知与探索兴趣。

内容包括:核物理及核磁共振、原子物理、半导体物理、电学、光学、热学、声学测量,超导、液晶、纳米材料特性测试技术,全息、激光与光纤传输技术,微波、传感器技术、微弱信号检测技术,计算机模拟仿真技术、A/D、D/A 与计算机技术在物理等问题中的应用实验等。附录内容较丰富,包括物理量测量的常用仪器量具、技术参数、原理、特点简介及物理量测量的常用数据、参数等。

本书选材编写由魏怀鹏、张志东教授负责,全书整理、统稿由魏怀鹏教授负责完成。

参加本书编写工作的有(顺序不分先后):张勇(力学、热学、光学、激光、全息、仿真等),李晓会、史晓丽(空气折射率、交流谐振、力学、电学等),王永学、韩彦辉、贾肖婵、陈鸿图(微波技术、计算机技术、力学、热学、光学、电学等),赵晓安(传感器技术、计算机技术在物理等实际问题中的应用),刘金伟、曹天光、李佳、邢红玉、叶文江、淮俊霞,刘铭、李海颖(核物理及核磁共振、原子物理、低温与超导、传感器技术等),安莉、王有柱、王彤、瞿浩、刘斌、任树喜、房正纪、段雪松、孔祥明、王双进、范闪闪(计算机仿真、光纤传输、力学、热学、电学、光学、液晶、高温超导、传感器技术等),安莉对本书的整理、制表、绘图等做了大量工作。

实验教学是一项集体事业,从实验室建设、教材编写到课程内容的不断完善与改进,都是作者和几代教师,长期在高等学校的教学岗位上辛勤耕耘、呕心沥血、持续积累和不断总结的结果。本书编写得到本校和兄弟院校很多老师、专家和领导的大力支持与帮助,得到河北工业大学及国家级物理教学团队、河北省高校重点学科、省级精品课程、省级和国家级物理实验教学示范中心等建设项目的资助。也凝集了很多未能直接参加本书编写的老师们多年的劳动与奉献,一并表示诚挚的感谢!

本书编写中难免有一些错误和不当之处,敬请各位读者批评指正。

编者

2010 年 2 月

目 录

第 1 章 原子物理及核物理实验	(1)
1.1 核磁共振技术实验	(1)
1.2 核磁共振磁旋比和核磁矩测量	(8)
1.3 核衰变的统计规律实验研究与设计	(14)
1.4 塞曼效应实验	(19)
1.5 夫兰克 - 赫兹实验	(23)
1.6 密立根油滴实验及 CCD 在实验中的应用	(26)
1.7 电子荷质比测定	(30)
1.8 费米 - 狄拉克分布实验	(35)
1.9 爱因斯坦方程验证及普朗克常数测定	(38)
1.10 小型棱镜摄(读)谱仪测氢光谱及里德伯常数	(43)
第 2 章 超导、液晶、纳米等技术实验	(47)
2.1 高 T_c 超导材料特性测量设计及研究	(47)
2.2 高温超导转变温度测定及其计算机处理数据方法	(51)
2.3 磁悬浮技术实验及应用设计	(53)
2.4 超导材料磁浮力的测量	(55)
2.5 超导磁悬浮技术应用设计	(57)
2.6 纳米微粒的制备及其特性和应用研究	(57)
2.7 半导体 PN 结的物理特性及弱电流测量	(60)
2.8 居里点温度的测定	(65)
2.9 液晶电光效应实验研究与应用设计	(68)
第 3 章 微波、超声波、激光、全息等信息技术实验	(72)
3.1 微波技术及其光特性研究	(72)
3.2 超声波特性及主要参数的测量	(75)
3.3 超声波技术应用设计	(80)
3.4 声速测量及其应用研究	(80)
3.5 像面全息图与彩虹全息图实验	(85)
3.6 全息透镜的设计制作	(86)
3.7 全息光栅的设计制作	(90)
3.8 气体激光器放电特性、输出功率和效率特性的测量	(90)
3.9 半导体激光器电学、光学特性参数的测量	(93)
3.10 设计利用激光器测距离	(96)
3.11 光纤通信技术	(97)
第 4 章 传感器技术应用与设计实验	(103)
4.1 温度传感器的特性及应用研究	(103)
4.2 电阻应变式传感器的特性研究及应用	(106)
4.3 霍尔开关的特性及应用设计	(110)
4.4 光纤传感器的静态、动态特性与测速设计	(113)
4.5 硅光电池特性研究与应用设计	(115)

4.6	气敏传感器应用设计实验	(118)
4.7	湿敏电阻应用设计实验	(119)
4.8	多普勒效应综合实验研究	(120)
4.9	PN 结温度传感器测温设计	(125)
4.10	热敏电阻应用设计实验	(126)
4.11	压力传感器特性及应用设计	(127)
4.12	光电传感器的特性及应用设计	(129)
第5章	电学、热学、力学、光学测量及应用设计	(131)
5.1	控制电路原理及其应用设计	(131)
5.2	交流电桥原理及测量实验	(133)
5.3	非平衡电桥的原理和应用	(136)
5.4	非线性电路的混沌现象研究	(140)
5.5	气体比热容比 C_p/C_v 的测定	(145)
5.6	落球法测定液体变温黏滞系数	(147)
5.7	动态悬丝法测定金属材料杨氏模量	(149)
5.8	光的干涉实验应用设计	(153)
5.9	光的衍射实验应用设计	(157)
5.10	设计组装显微镜、望远镜、幻灯机及放大倍数的测量	(161)
5.11	光速测量	(165)
第6章	计算机技术在物理等实际问题中的应用	(167)
6.1	计算机在物理等实际问题中的应用概述	(167)
6.2	应用实验设计方案简介	(167)
6.3	非电量电测技术应用简介	(168)
6.4	A/D 转换器简介	(170)
6.5	D/A 转换器简介	(172)
6.6	利用 A/D 转换器进行模数转换	(177)
6.7	利用 D/A 转换器进行数模转换	(179)
6.8	传感器和实验数据采集装置	(181)
6.9	计算机在物理等实际问题中的应用设计	(188)
6.10	计算机模拟仿真技术	(190)
6.11	计算机数值模拟与数据处理实验	(192)
附 录		(194)
附表 1	物理量测量器具、原理、特点等简介	(194)
附表 2	物理学常量表	(203)
附表 3	液体的表面张力系数	(205)
附表 4	常用光源的谱线波长 λ (单位: nm)	(205)
附表 5	液体黏滞系数	(206)
附表 6	部分固体和液体的比热容	(206)
附表 7	常见物质的密度	(206)
附表 8	海平面上不同纬度处的重力加速度	(207)
附表 9	基本单位、辅助单位和某些导出单位	(207)
附表 10	某些金属和合金的电阻率及温度系数	(208)
附表 11	在 20 °C 时部分金属的杨氏模量	(208)
参考文献		(209)

第 1 章 原子物理及核物理实验

1.1 核磁共振技术实验

核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)是指具有磁矩的原子核在恒定磁场中由电磁波引起的共振跃迁现象. 1945 年 12 月, 美国哈佛大学的珀塞尔(Purcell)等人, 报道了他们在石蜡样品中观察到质子的核磁共振吸收信号; 1946 年 1 月, 美国斯坦福大学布洛赫(Bloch)等人, 也报道了他们在水样品中观察到质子的核感应信号. 两个研究小组用了稍微不同的方法, 几乎同时在凝聚物质中发现了核磁共振. 因此, 布洛赫和珀塞尔荣获了 1952 年的诺贝尔物理学奖.

1953 年后, 核磁共振发展到应用阶段, 其方法和技术向着两个方向发展, 即“连续法”(又称稳态方法或扫描方法)和“脉冲波法”(又称暂态方法或自由进行方法), 由此形成核磁共振波谱学. 核磁共振波谱学的发展促进了物理学本学科的发展以及物理化学、分子生物学和医药学等其他边缘学科的发展, 在许多科学研究和工业领域得到了广泛的应用, 已成为物理、化学、生物和医学研究中的一项重要实验技术. 它是测定原子核的磁矩和研究核结构的直接而又准确的方法, 也是精确测量磁场的重要方法之一.

一、目的要求

- (1) 核磁共振的基本原理和实验方法.
- (2) 用核磁共振稳态吸收法测量磁场强度.
- (3) 测量氟核 ^{19}F 的磁旋比及其磁矩, g 因子等结构参数.

二、仪器装置

核磁共振仪, 频率计, 示波器, 可调永久磁铁, 游标卡尺, 试样 A: ^1H (硫酸铜水溶液), 试样 B: ^{19}F (聚四氟乙烯棒), 数据处理软件. 仪器设备如图 1-1-1 所示.

三、实验原理

(一) 原子核的自旋与磁矩

泡利(Pauli)在 1924 年首先提出原子核具有磁矩, 并认为是带电的核做自旋运动而产生的. 此理论成功地解释了原子光谱的超精细结构.

由经典力学推出的核磁矩 μ 和核自旋角动量 p 的关系为

$$\mu = \frac{Q}{2mc} p \quad (1-1-1)$$

式中: Q 为原子核的总电荷量; m 为原子核的总质量; c 是光速.

式(1-1-1)给出的经典理论关系与实验值不符. 这是因为, 原子及原子核内部的微观运动只能用量子力学来解释. 原子核内部结构很复杂, 其中质子和中子都有自己的磁矩(实际测量得到自由质子磁矩 $\mu_p = 2.7896 \times \frac{e\hbar}{2m_p c}$; 中子的磁矩 $\mu_n = -1.9103 \times \frac{e\hbar}{2m_p c}$, 它们对于整个原子

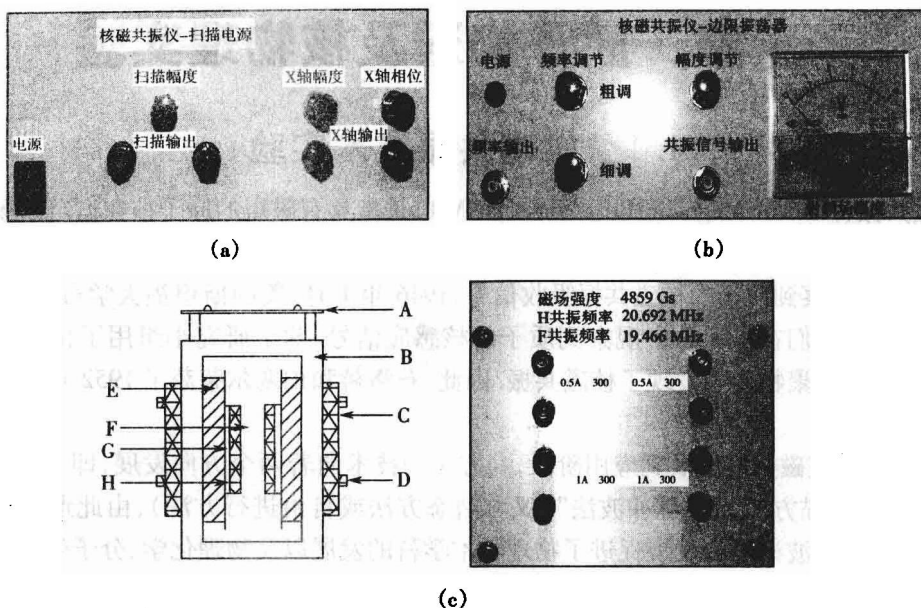


图 1-1-1 仪器装置

(a) 扫描电源 (b) 边限振荡器 (c) 磁铁结构图

A—面板: 上有线圈引线的四组接线柱, 实验时, 可以任选其中一组 B—主体: 起支撑线圈和磁钢以及形成磁回路的作用 C—外板: 用于调节磁隙及中间磁场均匀度 D—螺钉: 一面有六个, 通过其微调磁场 E—线圈: 通过其施加一个扫描磁场 F—间隙: 有效的工作区, 样品置于其中 G—磁钢: 钦铁硼稀土永磁铁 H—纯铁: 主要用来提高磁场

核的总磁矩的关系, 至今还不十分清楚), 为了正确表达原子核的磁矩与角动量的关系, 在式 (1-1-1) 中引入一个无量纲的 g 因子作为修正, 表示为

$$\mu = g \frac{Q}{2mc} p \quad (1-1-2)$$

g 因子也叫朗德因子 (Lande factor), 对于不同的核它有不同的值, 它反映了核内部自旋和磁矩的实验关系。

实际工作中, 常常用磁旋比 γ (Magnetogyric ratio) 这个物理量, 且定义为原子核的磁矩与其自旋角动量的比值, 即

$$\gamma = \frac{\mu}{p} \quad (1-1-3)$$

如果用核磁子 $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p c}$ 为核磁矩的单位, 用 $\hbar$ 约化普朗克常数 (Planck constant) 表示动量的量子单位, 式 (1-1-2) 可写为

$$\mu = g \frac{\mu_N}{\hbar} p \quad (1-1-4)$$

$$g = \frac{\mu}{\frac{\mu_N}{\hbar} p} \quad (1-1-5)$$

由此得 g 因子与磁旋比 γ 的关系为

$$g = \frac{\gamma \hbar}{\mu_N} \quad (1-1-6)$$

可见, g 因子也是一种磁旋比.

(二) 核磁共振的经典解释

具有磁矩的原子核相当于一个以磁矩方向为轴的磁陀螺, 若将它放在恒定(静)磁场 H 中, 取空间坐标轴 z 轴与 H 重合, 如图 1-1-2 和图 1-1-3 所示. 磁场的作用对磁陀螺产生一转矩 L , 即

$$L = \mu \times H \quad (1-1-7)$$

$$\text{或} \quad |L| = |\mu| \cdot |H| \sin \theta \quad (1-1-8)$$

其中, θ 为磁矩与 z 轴的夹角. 该转矩 L 使原子核的角动量发生 Δp 变化, 即

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = L \quad (1-1-9)$$

结果 p 做进动. 如果没有阻力, p 和 H 间的夹角 θ 维持不变.

进动的角速度 ω 与磁场 H 有一定的关系. 由图 1-1-2 自上而下观看时, 将看到 p 的端点做一圆周运动. 如图 1-1-3 所示, 其圆的半径为 $|p| \sin \theta$, 在 Δt 时间内划过 $\Delta \Phi$ 角度为

$$\Delta \Phi = \frac{|\Delta p|}{|p| \sin \theta} \quad (1-1-10)$$

$$\text{则} \quad \omega = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{1}{|p| \sin \theta} \cdot \frac{|\Delta p|}{\Delta t} = \frac{1}{|p| \sin \theta} \cdot |L|$$

$$= \frac{1}{|p| \sin \theta} \cdot |\mu| \cdot |H| \sin \theta = \frac{|\mu|}{|p|} \cdot |H| = \gamma H \quad (1-1-11)$$

$$\text{即} \quad \omega = \gamma H \quad (1-1-12)$$

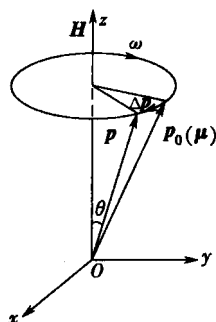


图 1-1-2 $p_0(\mu)$ 在
磁场中的进动

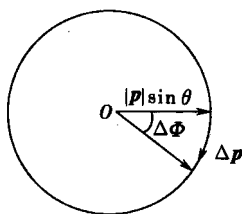


图 1-1-3 p 端点
做圆周运动

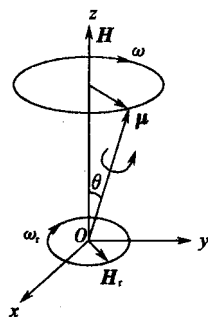


图 1-1-4 旋转
磁场的作用

式(1-1-11)、式(1-1-12)即原子核的拉摩尔(Larmor)进动公式, ω 也称拉摩尔角频率, 它与磁矩对磁场的取向无关, 仅与磁旋比及磁场强度有关.

若在垂直于 H 方向的平面内(xOy 面)对已做着进动的原子核, 再加上一个弱旋转磁场 H_1 的作用, 设 H_1 的旋转角频率为 ω_1 , 当 $\omega_1 = \omega$ 时, 即旋转磁场 H_1 与进动着的核磁矩 μ 在运动中总是同步, 可设想建立一个旋转的参考坐标系, 其旋转轴为 z , 与图 1-1-4 中 z 轴重合, 则从旋转坐标系来看, H_1 对 μ 的作用恰似恒定磁场, 它必然要产生一个附加转矩, 使 θ 角改变, 如图

1-1-4所示. 根据磁位能 $E_{\text{磁}}$ 的表达式

$$E_{\text{磁}} = \mu H \cos \theta \quad (1-1-13)$$

可知, θ 的改变将引起核的磁位能变化, 即发生核磁共振现象.

(三) 核磁共振的量子力学解释

微观粒子的能量交换是量子化的, 空间取向 (即 θ) 也是量子化的. 因此, 核磁共振也只能从量子力学理论出发, 才能获得准确的解释. 根据量子力学, 任何微观粒子的角动量 (原子核的角动量在内) 都可表示为

$$|p| = \hbar \sqrt{I(I+1)} \quad (1-1-14)$$

当研究对象是原子核时, 上式中 I 即为核自旋量子数, 只能取零、半整数或整数. 而角动量在某一选定的方向 (如 z 方向) 上的投影也只能取一些不连续的数值

$$p_z = m\hbar \quad (1-1-15)$$

式中, p_z 是 p 对 z 轴的投影; m 为磁量子数, $m = I, (I-1), (I-2), \dots, -(I-2), -(I-1), -I$, 共 $2I+1$ 个值.

图 1-1-5 表示 $I=1/2$ 和 $I=1$ 的两种空间取向与投影的关系. 由于自旋仅以投影值出现, 所以常常以投影的最大值表示核自旋.

将式 (1-1-15) 代入式 (1-1-3), 核磁矩可表示为

$$\mu_z = \gamma m \hbar = g \mu_N m \quad (1-1-16)$$

核磁矩在磁场内所具有的磁位能公式 (1-1-13)

相应表示为

$$E_{\text{磁}} = -\mu H \cos \theta = -\mu_z H = -\gamma \hbar H m \quad (1-1-17)$$

式中, $m = I, (I-1), (I-2), \dots, -(I-2), -(I-1), -I$.

由此可见, 核磁矩由于磁场的作用能级发生对称分裂, 两相邻能级差 ΔE 为

$$\Delta E = \gamma \hbar H \quad (1-1-18)$$

按照量子论的观点, 一个横向 (相对于磁场 H) 的、角频率为 ω_r 的交变磁场作用于原子核系统, 就相当于原子核受到一种能量为 $\omega_r \hbar$ 的光量子的作用, 只要满足

$$\omega_r \hbar = \Delta E = \gamma \hbar H \quad (1-1-19)$$

$$\omega_r = \gamma H = \omega \quad (1-1-20)$$

便可引起这种磁场分裂能级之间的跃迁, 即产生感应吸收和感应辐射, 也即所谓的核磁共振.

一般被测的样品是一个处于热平衡状态下的包含着大量原子核的系统, 原子核在低能级与高能级之间的分布是服从玻尔兹曼分布的. 另外高能级的原子核数总是比低能级的少, 所以感应吸收比感应辐射占优势. 如果由于某些原因使两个能级上的原子核数目相等时, 将看不到共振现象, 在核磁共振实验中, 我们将利用大量原子核系统 (样品) 内部的矛盾运动和控制测量环境条件, 以增强吸收, 方便观测, 避免出现“饱和”.

四、实验方法

实验装置方框图如图 1-1-6 所示. 整个实验系统由永磁铁 (亦可用电磁铁) NS、NMR 实验

仪、数字频率计及通用示波器等组成。

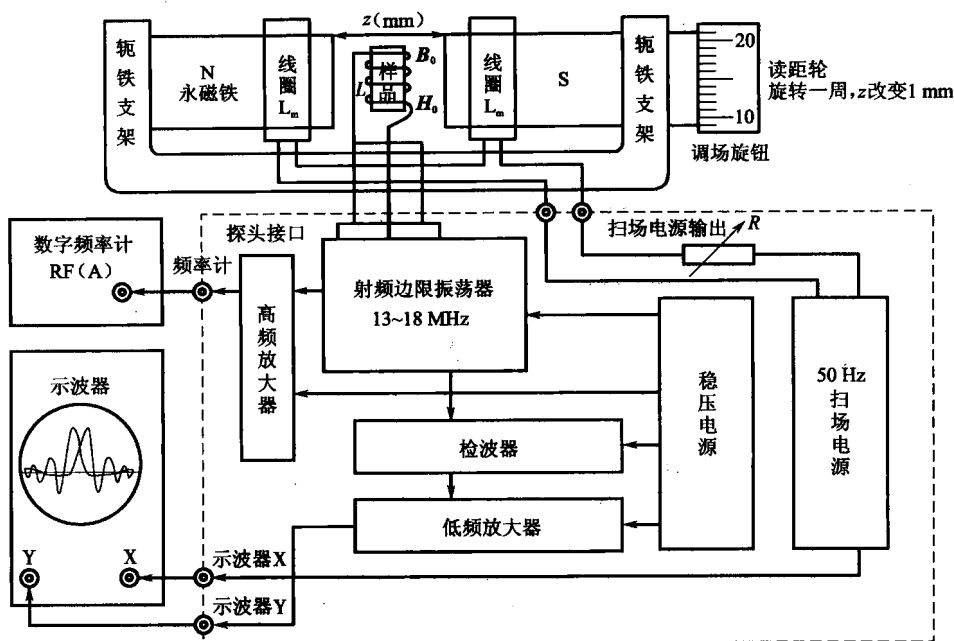


图 1-1-6 NMR 实验装置组成方框图

恒定磁场 H_0 由永磁铁产生， H_0 的大小由改变永磁铁两磁极间距进行调节。

旋转磁场 H_1 由射频边限振荡器提供，其振荡线圈伸进永磁铁 NS 内，其轴线与 H_0 垂直，被测样品直接放在振荡线圈内。这样，线圈对样品施加一个直线振动的高频磁场，这直线振动磁场是等效于两个垂直于磁场 H_0 方向的平面内沿相反方向旋转的圆偏振磁场，其振幅为直线性振幅的一半，两者之一必与原子核的拉摩尔旋进方向相同，只要其频率相同，便产生核磁共振。另一反向旋转的圆偏振磁场则不产生作用，线圈在这里兼作高频磁场的发射线圈，又作共振信号的接收线圈。

共振时高频磁场频率的测量是将射频振荡信号经高频放大器放大后送至数字频率计进行。

共振信号观察，是根据 NMR 条件 $\omega_r = \gamma H_0$ 采用连续波方式产生 NMR 信号。将示波器同步选择开关调到“line”，即 50 Hz 电源同步位置，使共振信号波形稳定。同时还通过串联电阻 R 接至两个分别套在磁铁极头上的扁平线圈 L_m ，改变 R 就可以使流过 L_m 的交流电的幅值得到不同的调制幅度 H_m ，如图 1-1-7 所示。这微小的调制磁场 $H' = H'_m \sin \omega_r t$ 的使用，目的在于帮助我们比较容易找到共振信号并判断信号的真伪和确定对应于恒定磁场 H_0 的共振频率，以下对此做一简单说明。

从核磁共振条件 $\omega_r = \gamma H_0$ 可知，若恒定磁场已经给定，那么，要产生 NMR 信号，就必须调节放置磁场的角频率 ω_r ，以满足 NMR 条件；反之，若旋转磁场的角频率 ω_r （即线圈 L 内的高频振荡磁场的频率 f_r ）已经给定，那就需要调节恒定磁场 H_0 的值使其满足 NMR 条件。前者一般称为扫频方法，后者则称为扫场（磁场扫描）方法。在实验中，既用到扫频，又要用到扫场。因为，需要通过寻找对应于恒定磁场 H_0 的角频率 ω_r 来求出有关的核参数，这就要用到扫频的方

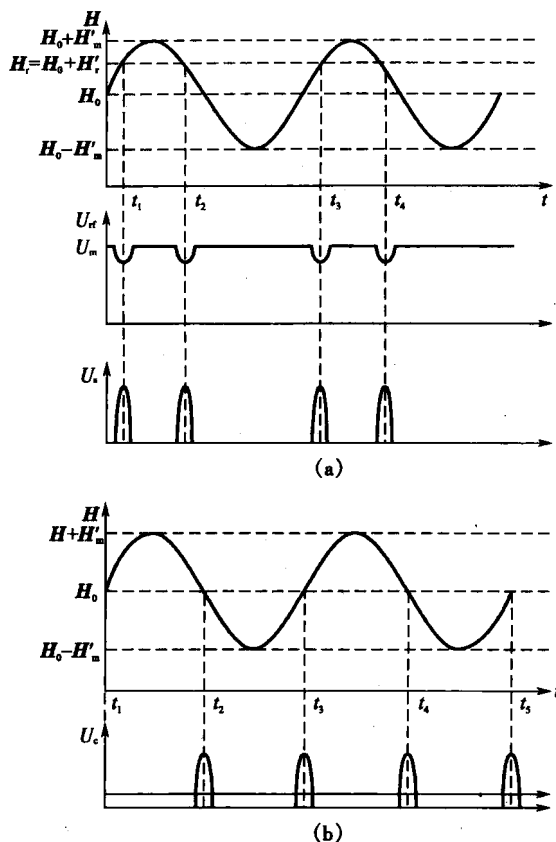


图 1-1-7 共振峰的位置与扫场磁场的关系

(a) $\omega_r = \gamma H_r$ NMR 峰不等距 (b) $\omega_r = \gamma H_0$ NMR 峰等距

法. 但我们所用的仪器是通过手调改变频率的, 这就很难找到满足 NMR 条件的频率 ω_r , 因此, 在恒定磁场 H_0 上叠加一微小的调制磁场 $H' = H'_m \sin \omega_r t$, 使磁场在一定范围内变动. 那么, 旋转磁场的角频率调到一定范围之内就可以产生 NMR 现象, 这样通过示波器观察易于找到共振信号. 当施于样品的旋转磁场的角频率为 ω_r , 其高频振动输出电压为 U_r , 即

$$U_r = U_m \sin \omega_r t \quad (1-1-21)$$

式中 U_m 为电压幅值, 此时对应的核磁共振所必需的外加磁场为 H_r , 即

$$H_r = H_0 + H'_m \quad (1-1-22)$$

即为原子核的拉摩尔频率适合旋转磁场的频率所必需的外加磁场强度. 从图 1-1-7(a) 可知, 在时刻 t_1, t_2, t_3, t_4 等处才出现共振吸收, 在振荡器输出电压的波包曲线上对应时刻处显示微小的振幅变化, 经检波放大后可得图 1-1-7(a) 表示的共振信号 U_r . 如果调制磁场的幅值改变, 则 t_1, t_2, t_3, t_4 等时刻的间隔便会改变, 从示波器上看到信号 (吸收峰位) 移动. 若“信号”没有跟随移动, 则这些信号一般不是真的 NMR 信号. 可以设想, 如果振荡器输出频率改变, 使得磁场 H_0 本身已满足 NMR 条件, 那么在示波器上看到的 NMR 信号 (吸收峰) 出现的位置将与调制磁场的幅值大小无关, 而 t_1, t_2, t_3, t_4 等始终处在调制磁场瞬时值过零的位置, 显然, 这时的吸收峰是等间距的, 如图 1-1-7(b) 所示. 反过来, 利用改变调制磁场的幅值, 可以帮助确定对应恒定磁场 H_0 的振点 (共振频率 ω_r) 是否已得到精确调准.

在示波器上所观察到的信号波形,通常是如图 1-1-8(a)、(b)所示的样子(即出现一些次级衰减振荡,俗称尾波),这是由于市电 50 Hz 的扫描速度还是稍快了一些,对于某些核磁矩的弛豫时间比较长的情况,将出现这种波形.实用的核磁共振往往取 30 Hz 以下的扫描频率,或在样品中加入一些顺磁性介质,以缩短弛豫时间.

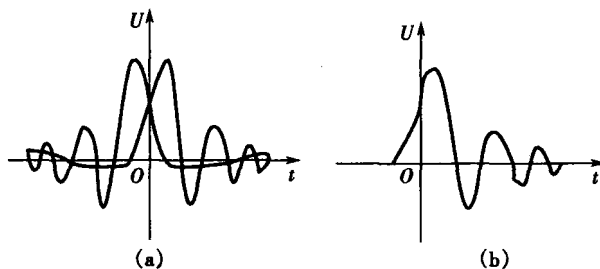


图 1-1-8 核磁矩的弛豫时间引起共振尾波
(a)示波器上观察到的 NMR 波形 (b)带尾波的共振信号

五、实验内容和步骤

(1)在实验前,务必熟读核磁共振实验仪使用方法和有关技术资料,切实弄清有关操作使用方法,在熟悉 NMR 实验原理和实验系统组装、操作技术的基础上,以稀的硫酸铜水溶液为样品,观察 ^1H 核的 NMR 现象,练习调频、调场和改变调制磁场幅度来确定共振点的方法,归纳共振点观察方法要点.

(2)练习用 NMR 方法测量小型永磁铁的不同磁极距离 z 时,磁极间中心部位的磁场强度(或磁感应强度 B_0),绘制 $B_0 - z$ 曲线.

用 NMR 法测磁场强度时,选用含 ^1H 质子的溶液的样品, ^1H 核的磁旋比 $\gamma_{1\text{H}} = 42.5759 \text{ MHz/T}$ (兆赫兹/特斯拉)为已知,只要测出对应的共振频率 $f_{1\text{H}}$ 便可由公式

$$B_0 = \frac{f_{1\text{H}}}{\gamma_{1\text{H}}} \quad (1-1-23)$$

计算出被测磁场强度 B_0 (单位为 T),式(1-1-23)中的 $f_{1\text{H}}$ 的单位为 MHz.

绘制 $B_0 - z$ 曲线时,可把用高斯计测得的相应磁极距离时的 B'_0 值在同一坐标系中绘出 $B'_0 - z$ 曲线,并进行比较.

(3)测定 ^{19}F 的核磁矩、磁旋比 $\gamma_{19\text{F}}$ 和 $g_{19\text{F}}$ 因子.选用样品为聚四氟乙烯(固态)或氢氟酸(溶液).装入样品线圈内,先按上述步骤(2)的方法测出磁场强度 B_0 、 ^{19}F 核的 NMR 频率 $f_{19\text{F}}$,便可由下面的公式求出 ^{19}F 的 $\gamma_{19\text{F}}$ (单位为 MHz/T),即

$$\gamma_{19\text{F}} = \frac{f_{19\text{F}}}{f_{1\text{H}}} \gamma_{1\text{H}} \quad (1-1-24)$$

再由式(1-1-6)求 $g_{19\text{F}}$ (单位为 10^6 ,无量纲),即

$$g_{19\text{F}} = \frac{\gamma_{19\text{F}} \hbar}{\mu_N} \quad (1-1-25)$$

式(1-1-25)中,核磁子 $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p c} = 5.0507864 \times 10^{-27} \text{ J/T}$,约化的普朗克常数 $\hbar = \frac{h}{2\pi} =$

$$1.054\,572\,66 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}.$$

根据式(1-1-16),自旋量子数 $I=1/2$ 时 ^{19}F 的磁矩(单位与核磁子相同)为

$$(\mu_z)_{^{19}\text{F}} = \gamma_{^{19}\text{F}} m_I \hbar = g_{^{19}\text{F}} \mu_N m_I = \pm \frac{1}{2} g_{^{19}\text{F}} \mu_N \quad (1-1-26)$$

六、核磁共振实验仪的使用方法

NMR实验仪是一台专供近代物理实验教学的小型NMR仪,可做观察质子 ^1H 的NMR吸收信号,测定 ^{19}F 的核磁矩及用NMR法测磁场强度等实验.

(一) 仪器与配套仪器的连接和测试方法简介

(1)NMR实验仪背面的“频率计”、“扫场线圈”、“示波器X轴”及“示波器Y轴”等插口,用电缆分别与频率计的“A输入”、磁铁侧面的插口及示波器 Y_1 、 Y_2 插口连接.把背面上的接地“接线柱”与磁铁上的接地“接线柱”用导线连接起来,保持公共零电位.

(2)把探头(由线圈L及其支撑和引线屏蔽的金属管组成)拧到仪器右侧的插口上,此时,应特别注意:只能拿住金属管部分,不准挤捏或转动探头前部的线圈和被测样品,否则会损坏仪器!拧紧时应保持线圈L和样品管轴与地面垂直.

(3)把探头伸入磁场,采取平移整个仪器并调节仪器右下方的支脚螺旋,使样品处于磁铁两极间的中心部位,探头的任何部分都不要触及磁头.

(4)就本实验而言,由于磁铁间隙的细调比频率的细调方便得多,因而往往先估算出共振频率(按关系式 $f_r = \frac{\gamma}{2\pi} H_0$,对质子 $\frac{\gamma_{^1\text{H}}}{2\pi}$ 来估算 f_r),并把射频振荡频率调在这个值附近,在微量调节磁铁间隙改变 H_0 以调出准确的共振吸收波形.加上调制场技术的采用,本实验既可观察吸收波形是否等距离均匀分布,又可以变动扫场幅度观察吸收峰是否会跟随着移位,以判断吸收峰的真伪和是否与 H_0 准确地共振.

(二) 观察 ^1H 核、 ^{19}F 核NMR

用稀的硫酸铜溶液观察 ^1H 核的NMR,用聚四氟乙烯(棒状塑料制品)观察 ^{19}F 核的NMR,具体步骤如下.

(1)放好氟的样品,把频率尽可能地调低,再细心调节磁极间隙(不要调得过小,以免挤坏样品!)找到准确的共振信号,记下这个频率 f_F ,并保持磁铁间隙不变.

(2)换上质子 ^1H 的样品(稀硫酸铜溶液样品管),细调频率以找到准确的共振频率 f_{H} .把样品从磁场中移出又重新放入磁场中,再测 f_{H} ,由多次测量求得 f_{H} 较准确的平均值.

(3)由已知的 $\gamma_{^1\text{H}}$ 及测得的 $f_{^{19}\text{F}}$ 、 $f_{^1\text{H}}$ 值计算出 ^{19}F (对应自旋量子数为 $I=1/2$)的磁旋比 $\gamma_{^{19}\text{F}}$ 、 $g_{^{19}\text{F}}$ 因子和核磁矩 $(\mu_z)_{^{19}\text{F}}$.

(4)重复前三个步骤,进行多次测量,求出 $\gamma_{^{19}\text{F}}$ 、 $g_{^{19}\text{F}}$ 及 $(\mu_z)_{^{19}\text{F}}$ 较准确的平均值.

本节详见参考文献14.

1.2 核磁共振磁旋比和核磁矩测量

一、目的要求

(1)进一步掌握核磁共振的基本原理和方法.

(2) 观察核磁共振稳态吸收现象.

(3) 测量 ^1H 的磁旋比 γ 因子、 g 因子和核磁矩 μ .

二、仪器装置

核磁共振仪, 频率计, 示波器等. 仪器装置如图 1-1-1 所示.

三、实验原理

(一) 核自旋

原子核具有自旋, 其自旋角动量为

$$p_I = \sqrt{I(I+1)} \hbar \quad (1-2-1)$$

式中, I 是核自旋量子数, 其值为零、半整数或整数. 当质子数和质量数均为偶数时, $I=0$; 当质量数为偶数而质子数为奇数时, $I=1, 2, \dots$; 当质量数为奇数时, $I=n/2$ ($n=1, 3, 5, \dots$). $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.054\,572\,66(63) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 是约化普朗克常数, 用来表示动量的量子单位.

(二) 核磁矩

原子核带有电荷, 因而具有自旋磁矩, 其大小为

$$\mu_I = g \frac{e}{2m_N} p_I = g\mu_N \sqrt{I(I+1)} \quad (1-2-2)$$

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_N} \quad (1-2-3)$$

式中: g 为原子核的朗德因子, 对质子, $g = 5.586$; m_N 为原子核质量; μ_N 为核磁子, $\mu_N = 5.050\,9 \times 10^{-27} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$; e 为原子核电荷量. 令

$$\gamma = \frac{e}{2m_N} g \quad (1-2-4)$$

显然有

$$\mu_I = \gamma p_I \quad (1-2-5)$$

式中: γ 称为原子核的旋磁比; μ_I 称为原子核的自旋磁矩; p_I 为原子核的自旋角动量.

(三) 核磁矩在外磁场中的能量

核自旋磁矩在外磁场中会进动, 进动的角频率为

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (1-2-6)$$

式中, B_0 为外恒定磁场.

(四) 核磁共振

自旋角动量 p_I 不等于零的原子核都具有自旋磁矩 μ_I , 核磁矩 μ 在静磁场 B_0 作用下, 将以一定夹角 α 和角频率 ω_0 围绕 B_0 做进动. 由式 (1-2-2) 可知, 核磁矩的绝对值为 $|\mu| = g_N \mu_N \sqrt{I(I+1)}$, 原子核的角动量 p 与磁矩 μ 之间关系用一个叫磁旋比 γ 的物理量联系起来:

$$\gamma = \frac{|\mu|}{|p|} = \frac{g_N \mu_N \sqrt{I(I+1)}}{\hbar \sqrt{I(I+1)}} = \frac{g_N \mu_N}{\hbar} \quad (1-2-7)$$

自旋角动量 p_I 在 z 轴的投影 p_{Iz} 为

$$p_{Iz} = m\hbar \quad (1-2-8)$$

原子核磁矩的投影为 $\mu_z = \gamma p_z = \frac{g_N \mu_N}{\hbar} \hbar m = g_N \mu_N m$, 投影的最大值即为通常所说的核磁矩

$$\mu = g_N \mu_N I \quad (1-2-9)$$

如果有一射频场 B_1 , 其工作频率为 f , 以与 B_0 垂直的方向作用于核, 且其频率满足共振条件

$$f = \frac{\gamma B_0}{2\pi} \text{ 或 } \gamma = \frac{2\pi f}{B_0} \quad (1-2-10)$$

则将发生核磁矩对射频能量的共振吸收, 该核吸收此旋转磁场能量, 实现能级间的跃迁, 即发生核磁共振, 此时

$$\Delta E = \omega_0 \hbar = \gamma B_0 \hbar \quad (1-2-11)$$

式中, h 为普朗克常数, $h = 6.626\,075\,5(40) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

表 1-2-1 列出了一些原子核的自旋量子数、磁矩和进动频率.

表 1-2-1 核自旋量子数、磁矩和进动频率

核素	自旋量子数 I	磁矩 $\mu(\mu_N)$	进动频率 ($\text{MHz} \cdot \text{T}^{-1}$)
^1H	1/2	2.792 70	42.577
^2H	1	0.857 38	6.536
^3H	1/2	2.978 8	45.414
^{12}C	0	—	—
^{13}C	1/2	0.702 16	10.705
^{16}C	0	—	—
^{14}N	1	0.403 57	3.076
^{15}N	1/2	-0.283 04	4.315
^{17}O	5/2	-1.893 0	5.772
^{18}O	0	—	—
^{19}F	1/2	2.627 3	40.055
^{31}P	1/2	1.130 5	17.235

核自旋角动量 p_I 的空间的取向是量子化的. 设 z 轴沿 B_0 方向, p_I 在 z 方向分量只能取

$$p_{Iz} = m\hbar \quad (m = I, I-1, \dots, -I+1, -I) \quad (1-2-12)$$

$$\mu_{Iz} = \gamma p_{Iz} \quad (1-2-13)$$

则核磁矩所具有的势能为

$$E = -\mu_I \cdot B_0 = -\mu_{Iz} B_0 = -\gamma \hbar m B_0 \quad (1-2-14)$$

对于氢核 (^1H), $I = \frac{1}{2}$, $m = \pm \frac{1}{2}$, $E = \mu \frac{1}{2} \gamma \hbar B_0$, 两能级之间的能量差为

$$\Delta E = \hbar \omega_0 = \gamma \hbar B_0 = g \mu_N B_0 \quad (1-2-15)$$

ΔE 正比于 B_0 , 由于原子核质量 m_N 约等于电子质量的 $1/1\,840$, 故在同样的外磁场 B_0 中, 核磁能级裂距约为电子自旋能级裂距的 $1/1\,840$, 这表明核磁共振信号比电子自旋共振信号弱得多, 观测起来更困难.

四、实验内容与方法

(一) 仪器工作原理

当发生核磁共振时, 原子核系统对射频场产生能量吸收, 为了观察到磁共振现象, 必须把吸收的能量转化为可以观察到的电信号. 检测核磁共振现象的基本原理如图 1-2-1 所示.