

河北省高校重点学科建设项目资助

近代物理 开发研究与创新

编著 张志东 魏怀鹏
展 永 张 勇



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

河北省高校重点学科建设项目资助

近代物理开发研究与创新

编著 张志东 魏怀鹏
展 永 张 勇

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书根据“高等工业学校物理实验课程教学基本要求”、普通高等学校理科“近代物理实验课程教学大纲”编写而成,立意新颖,内容具有时代感,突出综合性、应用性、设计性、研究性、创新性以及物理量的测量,便于开放性实验教学.内容包括:核物理及核磁共振、原子物理、半导体物理、电子学、光学、热学测量、低温技术及超导、液晶、纳米材料特性测试技术、全息、激光与光纤传输技术、传感器、微弱信号检测技术、微波、超声、磁悬浮技术、计算机模拟仿真技术、A/D、D/A与计算机应用技术等方面的实验.书后附录有主要物理量测量的常用仪器量具、技术参数、原理及特点等简介.

本书可作为普通理工科大学物理专业的教材以及非物理专业的大学物理和近代物理提高性、开放性、研究性、创新性课程的教学参考书,也可供研究生及其他相关的教学、科研和技术人员选用、参考.

图书在版编目(CIP)数据

近代物理开发研究与创新/张志东等编著. —天津:天津
大学出版社,2007.3

ISBN 978-7-5618-2409-2

I. 近... II. 张... III. 物理学—研究 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 028222 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 河北省迁安万隆印刷有限公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm × 260mm
印 张 10.5
字 数 263 千
版 次 2007 年 3 月第 1 版
印 次 2007 年 3 月第 1 次
印 数 1—3 000
定 价 15.00 元

前 言

《近代物理开发研究与创新》一书得到了河北省高校重点学科建设项目的资助,并根据“高等工业学校物理实验课程教学基本要求”、普通高等学校理科“近代物理实验课程教学大纲”编写而成.本书立意新颖,突出综合性、设计性、开放性、研究性、创新性以及物理量的测量;选材以一些著名的经典实验和在近代物理实验技术中有广泛应用价值的实验为主,使本书具有时代感、新颖性、立体性等特色.

本书努力遵循河北工业大学“工学并举”的办学理念,系统体现“授人以渔”的教学思想,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.首先,选择那些具有综合性、设计性、开放性、研究性、创新性的内容,并能反映在研究目标前提下的开放和动态发展过程,能够承载“渔”之方法的知识体系.其次,力求能够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,为培养学生形成研究该学科的方法体系而努力.另外,强调学习与探索过程的相互渗透,把比较新颖、涉及知识面较广的内容和传感技术、计算机应用技术等恰当地结合起来,充分体现了现代科学技术成就具有多学科交叉和相互渗透的特点.在教材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,形成其“学科意识”.同时,强调教材与科技发展的前沿相结合.用科技发展的最新观念与成果去阐释、佐证、更新传统教学内容之内涵,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,让科研进课堂、进教材,增强知识面的深度和广度,引领学生逐步进入学科前沿,明了所学之所用,激发求知与探索的兴趣.

本书在吸收兄弟院校经验的基础上,进行了多次修订补充,力图能够适应现代高等教育发展的需要,适应 21 世纪高等院校教材发展的趋势.本书内容涵盖:核物理及核磁共振技术、原子物理、半导体物理、低温技术、微波技术、光学与激光技术、传感器技术、超声技术、磁悬浮技术、A/D、D/A 与计算机应用技术等诸多方面.书后附录有主要物理量测量的常用仪器量具、技术参数、原理及特点等的简介.

与同类书比较,本书具有以下特点.

(1)在选题上,突出综合性、应用性、设计性、研究性和自主学习与创新训练的内容特色.尽可能地用最新科技前沿成果去组织传统教学内容,并列出了大量相关科技文献.如高温超导、核磁共振、磁悬浮、液晶电光效应、计算机技术的物理应用等,在培养应用近代物理知识、开拓创新思维、解决实际问题能力的同时,了解物理学及相关科技前沿的发展动态.

(2)在实验手段上,力求多采用新技术.把电子技术与计算机技术引入实验教学中,采用这些新的技术手段,实现数据自动采集,快速处理实验结果,有的还可控制实验过程.这样不仅提高了实验的精度和效率,而且为学生应用计算机解决实际问题提供了一个锻炼平台.

(3)在理论与实践相结合方面,将科研和教学研究成果转化为实验项目,自行设计、研究制作实验题目及其仪器设备,是本书的又一个显著特色.学生利用我们自己设计、研究、亲手制作的仪器设备,进行科学实验,这本身对学生就是一个最好的鼓励创新、动手动脑、综合应用、设

计、开放的教学范例,将最新的科技发展观念与成果应用到教学内涵中,对于引领学生步入学科前沿,知所学之所用,激发求知与探索兴趣,具有十分现实的科学意义。

(4)在教与学方面,具有立体化和相互渗透的特色。如开放性、设计性与研究性课题、自主学习与创新训练实验设计、计算机技术的物理测量应用及其数据采集、处理方法等系列措施和项目,力图贯彻“工学并举”的办学理念和“授人以渔”的教学思想,强调在“干”中“学”,加强对实际科研活动的体验,冲破对科学的神秘感和敬畏感,达到学以致用目的。

本书配备有多媒体光盘,并正在筹建网上教学平台,采用多媒体、立体化的教学方式,更增强了其综合性、开放性、研究性、创新性,使教与学有更大的选择余地和发挥空间,更适应不同层次的需要。

教学实践表明,该书不仅能使学生掌握如何应用实验方法,观察物理现象,研究物理规律,更能够让学生了解近代实验技术在许多科学研究领域与工程实践中的广泛应用;它有助于开阔学生视野,培养学习兴趣和实践动手能力,有助于培养理论联系实际、刻苦好学的钻研精神。

张志东、魏怀鹏和展永负责本书的整体选材、内容设计与编排、初稿编著,魏怀鹏负责全书统稿。

参加本书部分编写工作的(顺序不分先后)还有:王永学(近代物理综合实验),刘金伟(核物理、近代物理综合实验、低温与超导技术),韩彦辉(传感器技术、近代物理实验等),陈宏图、安莉(近代物理实验,磁悬浮技术等),邢红玉、叶文江(液晶光电效应等),赵晓安(A/D、D/A 传感器技术),马磊、张岩、王文纪、牛丽静、刘娜录入整理、绘图等,安莉做了大量的校对工作。

本书是在多年来各位同仁团结协作、努力工作基础上的总结编著而成的,同时,还参阅了兄弟院校的有关教材,并且在编写过程中得到物理实验中心各位同仁和杨国琛教授、赵晓安教授等的支持与帮助。本书请深圳市拓扑微科技开发有限公司(www.topwaydisplay.com)张永进先生作序,在此我们一并表示衷心的感谢。

我们相信,本书对今后物理实验教学的改革能起到重要的推动作用,并在实践中得到充实和完善。由于编者的知识水平和教学经验有限,加之时间仓促,书中难免有不足之处,望读者批评指正,以便再版时加以完善。

编者

2006 年 10 月

序 言

20 世纪物理学的蓬勃发展,使人类对物质世界的认识深入到新的层次和领域,为现代自然科学和技术科学提供了理论基础.同时,由物理学研究衍生的新技术、新方法及新手段层出不穷,其中包括新能源技术、核技术、半导体技术和微电子技术、信息技术、空间技术、激光技术、材料技术、极端物理技术、生物医学技术、农业技术等.以这些高技术的重大进步和创新为基础,支撑着高技术产业群的形成和发展,并迅速向经济和社会各领域渗透,推动社会生产力的飞跃发展,从而导致人类生活方式及人们观念的深刻变化.

当代最为人们瞩目的诺贝尔奖的宗旨是奖给有最重要发现或发明的人.因此,诺贝尔物理学奖标志着物理学中划时代的里程碑级的重大发现和发明.从 1901 年第一次授奖至今有近百年的历史,已有得主近 150 名,其中主要以实验物理学方面的发现或发明而获奖者占 73% 强.华裔物理学家、诺贝尔奖获得者丁肇中在 2006 年中国科协年会期间对媒体表示,在他所认识的诺贝尔奖物理学家中,很少有考试第一名的,“考试第一也是重复别人,而科学需要创新”.“科学研究不问结果”.丁肇中所研究的新阿尔发磁谱仪将于 2008 年升空,寻找反物质、暗物质,这也是人类第一次把磁铁放在天上寻找这一类东西.有记者询问实验将会寻找到什么?如果找不到怎么办?丁肇中坦言,绝大多数的理论物理学家认为这种实验很困难,几乎不可能成功,“就像我过去 40 年所做的实验一样,几乎所有人都反对;但结果做出来就和原来想像的不一样”,他同时指出,自己最主要的任务是尽最大努力把实验做好,而不管结果如何.

或许上面的谈论局限到了物理学研究的专门领域.在全球这个平台上,以美国为例,在过去大半个世纪里,正是由于非凡的创意扭转了美国的命运,从原子弹的发明到电脑技术突破,从“博弈理论”到“全球化理论”,都使美国成为主宰全球的力量.再回到国内,创新是提高行业、企业竞争力的关键.面对新的形势,各行业和企业都在进一步强化创新意识,提高创新能力,推动行业持续、快速、健康的发展.创新具体到各个行业、部门,又有理念创新、技术创新、管理创新等多种多样的形式.

在全民创新的大潮下,或许在大学本科教育阶段,应当更加注重“创新意识”的建立、“创新精神”的培养和“创新能力”的提高.但所有这些,都不可能是“从天上掉下来的礼物”,需要大学教育工作者和大学生通过每一个教育环节,做坚持不懈的努力.最后,在不远的将来,当中国国家创新平台不断提升的时候,当中国国内不同规模的企业各自研发能力不断加强的时候,当你还正在校园中但已经可以看到全球一体化这个经济舞台的时候,你准备怎样上台展现自己?借此谨用加塞罗尔的治学名言与本书读者共勉:“求学的三个基本条件是:多观察,多吃苦,多研究”(The three foundations of learning: seeing much, suffering much and studying much——Catherall).

张永进

2007 年 1 月

目 录

第 1 章 核物理及核磁共振技术	(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	(15)
第 2 章 近代物理综合性实验	(20)
2.1 塞曼效应实验及计算机数据采集处理系统	(20)
2.2 弗兰克 - 赫兹实验及计算机数据采集处理系统	(26)
2.3 CCD 密立根油滴实验	(30)
2.4 电子荷质比测定	(34)
2.5 费米 - 狄拉克分布实验	(39)
2.6 爱因斯坦方程验证及普朗克常数测定	(43)
2.7 小型棱镜摄(读)谱仪测氢光谱及里德伯常数	(49)
第 3 章 低温与超导、液晶、纳米等材料特性测试技术	(54)
3.1 高 T_c 超导材料特性测量设计及研究	(54)
3.2 高温超导转变温度测定及其计算机处理数据方法	(58)
3.3 纳米微粒的制备及其特性和应用研究	(62)
3.4 半导体 PN 结的物理特性及弱电流测量	(65)
3.5 居里点温度的测定	(71)
3.6 液晶电光效应实验研究与应用设计	(75)
第 4 章 超声技术与声速测量技术	(80)
4.1 超声波特性及主要参数的测量	(80)
4.2 超声波技术应用设计	(85)
4.3 声速测量及其应用研究	(85)
第 5 章 磁悬浮技术及应用设计	(91)
5.1 磁悬浮技术实验及应用设计	(91)
5.2 超导材料磁浮力的测量	(93)
5.3 超导磁悬浮技术应用设计——超导磁悬浮列车装置模型设计	(95)
第 6 章 传感器技术综合应用与设计	(97)
6.1 温度传感器的特性及应用研究	(97)
6.2 电阻应变式传感器的特性研究及应用	(100)
6.3 霍尔开关(传感器)的特性及应用设计	(105)
6.4 光纤传感器的静态与动态特性测量	(108)
6.4.1 光纤位移传感器的静态特性测量	(108)

6.4.2 光纤位移传感器的动态特性测量	(109)
6.5 硅光电池特性研究与应用设计	(110)
6.6 气敏传感器(MQ ₃)应用设计实验	(113)
6.7 湿敏电阻(R_H)应用设计实验	(115)
6.8 多普勒效应综合实验研究	(117)
第7章 A/D 与 D/A 转换技术	(123)
7.1 A/D 转换器的研究	(123)
7.2 D/A 转换器的研究	(127)
7.3 利用 A/D 转换器进行模数转换	(132)
7.4 利用 D/A 转换器进行数模转换	(134)
第8章 计算机在物理实际问题中的应用设计与创新训练	(137)
8.1 计算机在物理实际问题中的应用概述	(137)
8.2 应用实验设计方案简介	(137)
8.3 非电量电测技术应用简介	(138)
8.4 传感器和实验数据采集装置	(140)
8.4.1 传感器的工作原理及传感器放大电路的设计	(140)
8.4.2 传感器的计算机接口技术——温度传感器	(143)
8.4.3 计算机实验数据采集仪应用设计与创新训练	(144)
8.5 计算机在物理问题中的应用设计与创新训练	(147)
8.5.1 计算机在光学测量中的应用与设计	(147)
8.5.2 计算机在综合测量中的应用与设计	(151)
8.5.3 计算机在电磁学测量中的应用与设计	(151)
8.5.4 计算机在力学测量中的应用与设计	(153)
8.5.5 计算机在热学测量中的应用与设计	(153)
8.5.6 计算机在声学测量中的应用与设计	(154)
附 录	(155)
附表一 温度测量	(155)
附表二 压力测量	(156)
附表三 物理学常量表	(157)
参考文献	(160)

第 1 章 核物理及核磁共振技术

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.

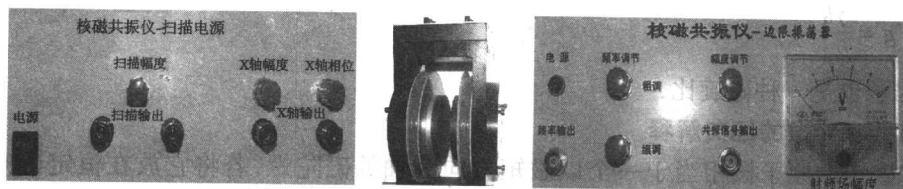


图 1-1-1 仪器设备

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \text{则} \quad \omega &= \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{1}{|p| \sin \theta} \cdot \frac{|\Delta p|}{\Delta t} = \frac{1}{|p| \sin \theta} \cdot |L| \\ &= \frac{1}{|p| \sin \theta} \cdot |\mu \cdot H \sin \theta| = \frac{|\mu|}{|p|} \cdot |H| = \gamma H \end{aligned} \quad (1-1-11)$$

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

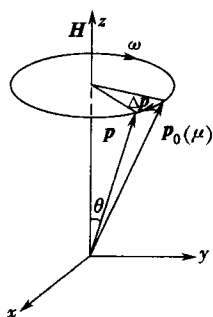


图 1-1-2 $p_0(\mu)$ 在磁场中的进动

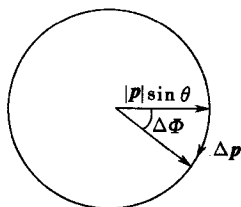


图 1-1-3 p 端点做圆周运动

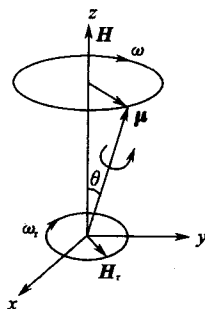


图 1-1-4 旋转磁场的作用

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(xy 面)对已做着进动的原子核, 再加上一个弱旋转磁场 H_r 的作用, 设 H_r 的旋转角频率为 ω_r , 当 $\omega_r = \omega$ 时, 即旋转磁场 H_r 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_r 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

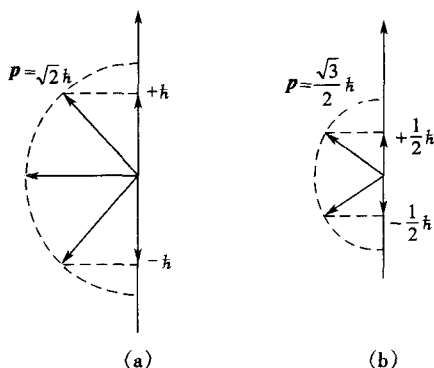


图 1-1-5 p 的空间量子化

(a) $I=1$ (b) $I=\frac{1}{2}$

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

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)的其角频率为 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,这也是所谓的核磁共振.

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.

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,线圈在这里兼做高频磁场的发射线圈,又做共

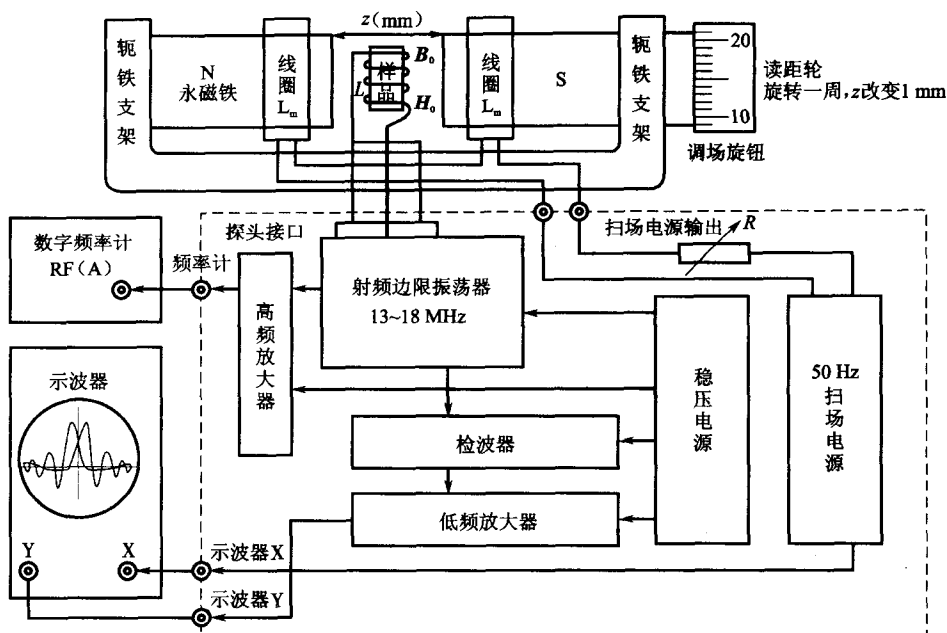


图 1-1-6 NMR 实验装置组成方框图

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,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 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_π ,即

$$U_\pi = U_m \sin \omega_r \quad (1-1-21)$$

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

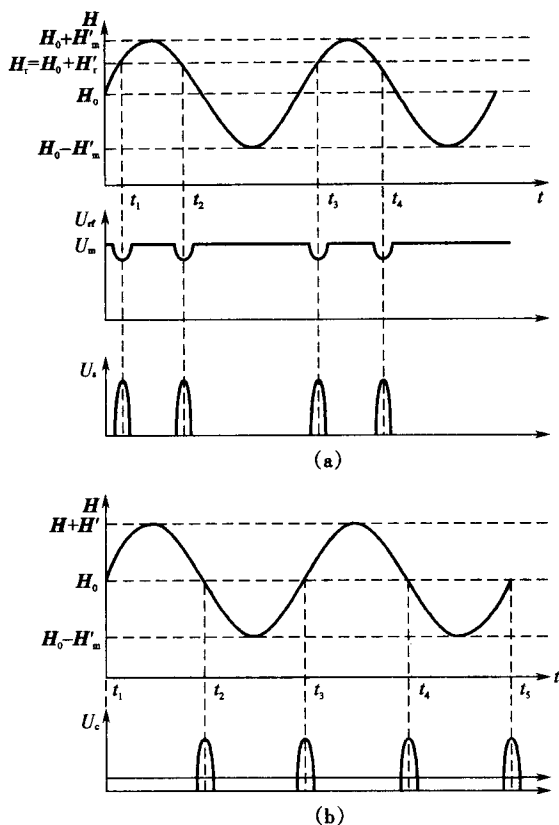


图 1-1-7 共振峰的位置与扫描磁场的关系

(a) $\omega_r = rH_t$ NMR 峰不等距 (b) $\omega_r = rH_0$ NMR 峰等距

$$H_t = H_0 + H'_t \quad (1-1-22)$$

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.

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

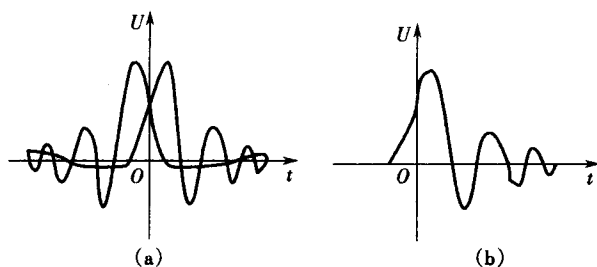


图 1-1-8 核磁矩的弛豫时间引起共振尾波
(a)示波器上观察到的 NMP 波形 (b)带尾波的共振信号

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 $B_0 - z$ 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 $\gamma_{^1\text{H}} = 42.5759$ 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 $B_0 - z$ 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 $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05457266 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 。

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 H 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 $\frac{\gamma^1_H}{2\pi} = 42.5759 \text{ MHz/T}$ 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 γ^1_H 及测得的 f^{19}_F 、 f_H 值计算出 ^{19}F (对应自旋量子数为 $I = 1/2$) 的磁旋比 γ^{19}_F 、 g^{19}_F 因子和核磁矩 $(\mu_z)^{19}_F$ 。

(4) 重复前三个步骤,进行多次测量,求出 γ^{19}_F 、 g^{19}_F 及 $(\mu_z)^{19}_F$ 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 1-2-1 所示。

三、实验原理

(一) 核自旋

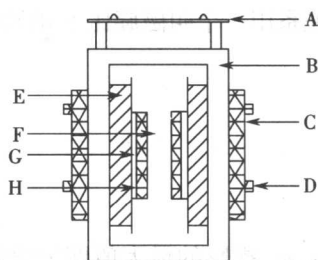
原子核具有自旋,其自旋角动量为



(a)



(b)



(c)

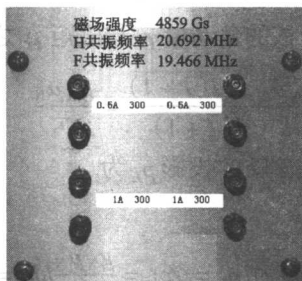


图 1-2-1 仪器装置

(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—螺丝: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:钕铁硼稀土永磁铁 H—纯铁:主要用来提高磁场

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

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.