



HUAXUE FENXI GONGCHENGSHI SHIYONG JISHU CONGSHU

化学分析工程师实用技术丛书

GUANGPU FENXI
YIQI SHIYONG

光谱分析仪器 使用与维护

刘崇华 主编

黄宗平 副主编



化学工业出版社

本书全面、系统地介绍了目前市面上流行的各类光谱分析仪器使用与维护,每类仪器主要从仪器定性定量原理、仪器结构与组成、仪器安装与调试、仪器操作与使用、仪器维护与保养、仪器维修与故障排除等方面进行阐述,重点在于介绍仪器一线操作人员多年来的有关仪器操作和维护保养、故障排除等方面的经验,同时,对于仪器操作过程中一些注意事项也做了介绍。

本书适合于我国专业检测机构和企业检测等分析行业实验室从事化验、检验工作的中、高级操作人员等检测一线专业技术人员阅读,也可作为高等院校分析化学专业和专业培训机构作为教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

光谱分析仪器使用与维护/刘崇华主编. —北京:
化学工业出版社, 2010. 10
(化学分析工程师实用技术丛书)
ISBN 978-7-122-09323-3

I. 光… II. 刘… III. 光谱仪-基本知识
IV. O6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 158290 号

责任编辑:成荣霞
责任校对:顾淑云

文字编辑:向 东
装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装:北京云浩印刷有限责任公司
720mm×1000mm 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 347 千字 2010 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:49.00 元

版权所有 违者必究

《光谱分析仪器使用与维护》 编委会

主 任 郑建国

副主任 李锦雄 俞 英

委 员 (按姓名笔画排列)

刘江晖	刘崇华	李锦雄	杨振宇	张震坤
陈 建	林少琨	郑建国	俞 英	殷 霞
黄宗平	董清木	游维松	蔡海明	蔡鹭欣

序

分析化学是人们识别物质并获得物质组成和结构信息的科学，这对于生命科学、材料科学、环境科学和能源科学以及产品的质量控制和评价都是必不可少的。因此，分析化学被誉为科学技术的眼睛，是进行科学研究的基础，是人类认识物质和生命的重要手段，也是产品安全质量评价最重要的分析手段。随着社会和经济的迅速发展，各种新型材料不断出现，人体健康、产品安全以及环境污染等方面的问题日益受到社会各界的普遍关注。与此同时，国内外对食品和消费品等产品安全的要求越来越严格，以及检验检疫口岸快速通关的需要，分析化学正朝着“更准、更快、更灵敏、更低成本、更环保”的需求发展。

从分析方法来说，分析化学主要包括经典的化学分析和光谱分析、色谱分析、质谱分析以及各种联用技术等仪器分析。近年来，分析仪器的不断创新和发展极大程度推动了分析化学的发展，使得分析化学的应用领域更为广泛。在现有的国际标准、我国国家标准和行业标准中分析仪器的方法越来越多，越来越普及，这也是分析化学的发展趋势。因此，熟练掌握各类分析仪器使用与维护方法已成为每一位化验员必备的技能。虽然现代分析仪器操作和使用越来越自动化、智能化，仪器的安装、操作和维护更加简便和快捷，但这并不意味着可以忽视分析仪器的使用和维护。相反，由于分析仪器种类繁多，技术日益先进复杂，要使分析仪器的功能得到充分发挥，需要使用者具备扎实的基础知识、熟练的操作和维护技能。

为了帮助我国从事化学检测的技术人员更好地操作、使用和维护分析仪器，最大程度发挥分析仪器的功能，减少故障率，降低使用成本，化学工业出版社组织广东出入境检验检疫局、华东理工大学等单位共同编写这套《化学分析工程师实用技术丛书》。该“丛书”紧密结合社会发展的需求，突出实用性，着重经验、技能和技巧的传授，内容精练，可操作性强。在介绍各类分析仪器使用与维护时，重点选择了一些使用广泛、型号新颖且具有代表性的分析仪器加以阐述。该“丛书”共分四册，包括《化验员必备知识与技能》、《色谱分析仪器使用与维护》、《光谱分析仪器使用与维护》和《电化学分析仪器使用与维护》。

参与编写人员都是长期从事仪器分析的一线技术骨干和专家，他们希望凭借该“丛书”的出版与广大读者分享他们的经验和成果。希望该“丛书”的出版有助于一线的化学检测人员和高等院校分析化学专业的学生更多地了解分析仪器基本原理和应用，掌握分析仪器的操作和维护技能，以适应社会发展的需要。

郑建国

(国家质检总局化矿金属材料专业委员会主任委员 研究员)

2010年8月

前言

随着国际社会对食品等消费产品安全、环境监测、生命科学及人体健康等的日益重视，各行各业进一步加强了产品的质量管理，加大了保护环境力度，以保证人们的身体健康。与此同时，分析仪器在我国工业生产的质量控制和国家质量管理中发挥着日益重要的作用。其中，光谱仪器作为当前世界上产量最大、应用最多的分析仪器（几乎所有的综合性检测实验室都配备了光谱分析仪器），在地质、冶金、矿山、机械、环境、医药、卫生、质检等各领域中正发挥着主力军的作用。

一台好的仪器必须配备好的操作人员，否则难以发挥其作用，甚至得出错误的测试结果。随着我国经济的快速发展，越来越多的实验室配备了先进的检测设备，据统计，我国仪器的60%都是进口仪器。然而，相当部分实验室没有重视对仪器的操作和维护保养。

虽然现代分析仪器操作和使用也越来越自动化、智能化，相当多的仪器安装、基本操作和维护都更加简便和快捷，但这并不意味着可以忽视分析仪器的使用和维护。相反，要想使分析仪器真正充分发挥其应有的作用，在很大程度上更需要使用者具备扎实的基础知识、熟练的基本技能和良好的分析素质，而这些都必须通过不断地操作仪器，在实践中积累经验来实现。

为了帮助我国专业检测机构和企业检测等分析行业实验室从事化验、检验工作的中高级操作人员和专业技术人员了解目前光谱仪器发展的最新动态，更好地操作和使用仪器，发挥仪器的功能，减少仪器的故障率，降低仪器的使用成本，由广东出入境检验检疫局、厦门出入境检验检疫局及中山大学、华南师范大学等有关单位光谱分析仪器检测技术专家对目前市面上流行的各型号新仪器有关技术发展、仪器特点、操作和使用、维护保养等进行了仔细的总结，并编写本书。

有关各类光谱分析仪器的分析原理的教材有很多，特别是目前大学仪器分析课程都有各类光谱分析方法的介绍，有的甚至对光学分析也有专门的教材，但这些书籍均重点以介绍各类分析方法的定性定量原理为主，而针对分析仪器的内容较少，特别是关于仪器安装、调试、技术指标、操作与应用、维护与保养、故障与排除等内容则更少。同时，由于光谱分析仪器技术发展迅速，技术更新快，传统的教材有关仪器介绍的内容也一般较旧，难以跟上仪器技术发展的步伐，一直以来业界缺乏一本以讲解目前市面上流行的光谱分析仪器操作或维护为主要内容的书籍。本书旨在提供一本全面系统介绍目前市面上流行的光谱分析仪器操作与维护的书籍，编写时以光谱分析仪器类别为线索。每类仪器首先从简要介绍各个主要光谱分析仪器的基础知识，包括仪器技术发展历史、特点和定性定量原理；然后着重介绍了目前光

谱分析仪器的结构和组成，对仪器硬件做介绍；最后重点介绍光谱分析仪器的安装与调试，仪器主要性能指标及测试方法，仪器一般开机和关机步骤，仪器软件操作方法，仪器工作参数选择和优化方法。同时为使广大光谱仪器操作人员和仪器设备管理人员加深对仪器的理解，在每一章的后面还专门列出了每类仪器的维护保养方法和经验，同时，给出了日常使用过程中仪器常见故障及其相应的排除方法。编写重点放在如何安装仪器、调试仪器、方法开发、仪器维护等实用技术方面，注意从“实用”出发，着重经验、技能和技巧的传授，内容精炼，可操作性强。另外书中所选仪器型号均为目前市面上流行的、比较新颖的仪器。

本书共分 11 章，其中第 1 章、第 2 章、第 6 章、第 7 章由刘崇华编写；第 3 章由董清木编写；第 4 章由殷霞编写；第 5 章由陈建编写；第 8 章由蔡鹭欣编写；第 9 章由黄宗平编写；第 10 章由蔡海明、刘崇华编写；第 11 章由刘江晖、游维松编写。全书由刘崇华统稿。

本书适用于各专业检测机构和企业检测等分析行业实验室从事化验、检验工作的中高级操作人员和专业技术人员。对从事有关光谱仪器的操作技术人员和光谱仪器管理人员掌握和了解光谱分析仪器操作和使用要求，指导光谱分析仪器安装、调试、软件硬件操作、仪器的应用、维护与保养以及常见故障排除等工作具有重要意义，是光谱分析仪器实验室一本必备的技术资料和工具书。同时本书也适合于高等院校分析化学专业和专业培训机构作为教材使用。

在编写过程中，引用了一些公开发表的文献，在此向文献的作者们表示感谢。同时要感谢化学工业出版社责任编辑为本书付出的辛勤劳动，感谢广东出入境检验检疫局、厦门出入境检验检疫局、珀金埃尔默仪器（上海）有限公司、赛默飞世尔科技公司等仪器生产商相关部门和人员给予的大力支持！

由于编者水平有限，加之时间非常仓促，难免存在不足和遗漏，恳请广大读者在使用过程中多提宝贵意见，以便日后进行修订。

编 者

2010 年 6 月 20 日于广州

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 光谱分析导论	1
1.1.1 光谱分析的历史及进展	1
1.1.2 电磁辐射及其基本性质	1
1.1.3 光谱分析的特点	3
1.2 光谱分析原理	3
1.2.1 光谱分析的定性原理	3
1.2.2 光谱分析的定量原理	4
1.3 光谱分析方法及其分类	4
1.3.1 光谱法与非光谱法	4
1.3.2 光谱的种类	5
1.3.3 光谱分析方法的分类	6
1.3.4 原子光谱法的种类	6
1.3.5 发射光谱法和吸收光谱法的种类	7
1.3.6 Raman 散射光谱	7
1.4 光谱分析仪器	8
1.4.1 光谱分析仪器的结构和组成	8
1.4.2 仪器的主要性能指标	11
1.4.3 仪器的定量分析校正	12
1.4.4 光谱分析仪器的种类	13
参考文献	14
第 2 章 紫外可见分光光度计	15
2.1 概述	15
2.1.1 发展历史	15
2.1.2 特点	15
2.2 工作原理	16
2.2.1 紫外可见吸收光谱的产生	16
2.2.2 定性原理	16
2.2.3 定量原理	17

2.3 结构及组成 17

2.3.1 仪器的组成 17

2.3.2 仪器的类型 19

2.3.3 典型型号仪器介绍 20

2.4 安装调试和校准 21

2.4.1 安装的基本要求 21

2.4.2 主要技术指标 22

2.4.3 主要技术指标测试方法 23

2.4.4 仪器校准方法 24

2.5 操作和使用 26

2.5.1 硬件的基本操作 26

2.5.2 软件的基本操作 28

2.5.3 工作参数条件的选择 30

2.5.4 操作注意事项 31

2.6 维护保养及其故障排除 31

2.6.1 仪器的维护保养 31

2.6.2 比色皿的维护保养 32

2.6.3 定期调整仪器 33

2.6.4 故障排除 33

参考文献 35

第3章 傅里叶变换红外光谱仪 36

3.1 概述 36

3.1.1 红外光区的分类 36

3.1.2 发展简史 36

3.1.3 特点 37

3.2 原理 38

3.2.1 产生红外吸收的条件 38

3.2.2 工作原理 39

3.2.3 定性分析原理 41

3.2.4 定量分析原理 42

3.3 组成 42

3.3.1 红外光源 43

3.3.2 干涉仪 44

3.3.3 检测器 45

3.3.4 光阑 46

3.3.5 典型仪器介绍 46

3.4	安装调试和校准	48
3.4.1	主要性能指标	48
3.4.2	仪器安装的基本条件	50
3.4.3	验收调试的主要内容	52
3.4.4	校准和期间核查	53
3.5	操作与使用	54
3.5.1	试样的制备	54
3.5.2	操作使用	55
3.5.3	数据处理	56
3.6	维护保养及故障排除	62
3.6.1	维护保养	62
3.6.2	常见故障及排查方法	63
	参考文献	66

第4章	荧光分光光度计	67
4.1	概述	67
4.1.1	发展历史	67
4.1.2	特点	67
4.2	基本原理	68
4.2.1	荧光的产生	68
4.2.2	激发光谱与发射光谱	68
4.2.3	定性原理	70
4.2.4	定量原理	71
4.3	结构与组成	72
4.3.1	组成	72
4.3.2	仪器工作过程	74
4.3.3	分类	74
4.3.4	典型型号仪器简介	74
4.4	安装与调试	75
4.4.1	安装前的准备	75
4.4.2	仪器安装与调试	76
4.4.3	主要性能指标及测试方法	77
4.4.4	荧光光谱的校正	80
4.5	操作和使用	81
4.5.1	硬件操作	81
4.5.2	软件操作	81
4.5.3	工作参数条件的选择	83

4.5.4 测试注意事项	84
4.6 维护保养和故障排除	85
4.6.1 保养与维护	85
4.6.2 常见故障排除	87
参考文献	88

第5章 拉曼光谱仪	89
5.1 概述	89
5.1.1 历史与进展	89
5.1.2 基本原理	90
5.1.3 特点	90
5.1.4 分类	91
5.2 工作原理	92
5.2.1 拉曼光谱的产生	92
5.2.2 定性分析	92
5.2.3 定量分析	93
5.3 组成及典型仪器简介	93
5.3.1 结构及组成	93
5.3.2 典型仪器简介	95
5.4 安装调试和校准	97
5.4.1 实验室基本条件	97
5.4.2 实验室温湿度	98
5.4.3 电源	98
5.4.4 光学平台和冷却水	98
5.4.5 重要技术指标的测试方法	98
5.5 操作和使用	99
5.5.1 开机关机步骤	99
5.5.2 工作参数条件的选择	103
5.6 日常维护和常见故障	103
5.6.1 实验室环境的要求	103
5.6.2 光学系统的维护和保养	103
5.6.3 探测系统的维护和保养	104
5.6.4 计算机系统的维护	104
5.6.5 实验记录	104
5.6.6 一般故障及处理	104
5.6.7 常见问题解答	105
参考文献	109

第 6 章 原子吸收光谱仪	110
6.1 概述	110
6.1.1 历史	110
6.1.2 特点	110
6.2 工作原理	111
6.2.1 原子吸收光谱的特征	111
6.2.2 定量原理	112
6.2.3 仪器工作原理	112
6.3 结构及组成	113
6.3.1 仪器的组成	113
6.3.2 主要配套附件	115
6.3.3 仪器的类型	115
6.3.4 典型型号仪器介绍	116
6.4 安装调试和校准	117
6.4.1 安装的基本要求	117
6.4.2 安装与调整	119
6.4.3 主要技术指标	120
6.4.4 主要技术指标测试方法	122
6.4.5 仪器校准方法	123
6.5 操作和使用	124
6.5.1 硬件的基本操作	125
6.5.2 软件的基本操作	125
6.5.3 工作参数条件的选择	128
6.5.4 操作注意事项	130
6.6 维护保养及其故障排除	131
6.6.1 维护保养	131
6.6.2 故障排除	133
参考文献	135
 第 7 章 电感耦合等离子体原子发射光谱仪	 136
7.1 概述	136
7.1.1 历史和进展	136
7.1.2 特点	137
7.2 工作原理	137
7.2.1 原子发射光谱的产生	137
7.2.2 定性原理	138
7.2.3 定量原理	138

7.2.4	电感耦合等离子体的形成及工作原理	138
7.3	结构及组成	139
7.3.1	仪器的组成	139
7.3.2	主要配套附件介绍	142
7.3.3	仪器的分类	142
7.3.4	典型型号仪器介绍	143
7.4	安装调试和校准	145
7.4.1	安装的基本要求	145
7.4.2	安装调试	147
7.4.3	主要技术指标	149
7.4.4	几个主要技术指标测试方法	149
7.4.5	仪器校准方法	150
7.5	操作和使用	151
7.5.1	硬件的基本操作	152
7.5.2	软件的基本操作	152
7.5.3	工作参数条件的选择	154
7.5.4	操作注意事项	157
7.6	维护保养及其故障排除	158
7.6.1	维护保养	158
7.6.2	故障排除	160
	参考文献	162

第 8 章	直读光谱仪	163
8.1	概述	163
8.1.1	发展简史和进展	163
8.1.2	分类	164
8.1.3	特点	164
8.2	工作原理	165
8.2.1	直读光谱的产生	165
8.2.2	光谱定性、半定量分析	165
8.2.3	光谱定量分析	165
8.3	结构及组成	166
8.3.1	激发系统	166
8.3.2	色散系统	167
8.3.3	检测系统	168
8.3.4	典型型号的仪器	169
8.4	安装调试和校准	176

8.4.1	安装前的准备和安装注意事项	176
8.4.2	性能指标的测试及验收	176
8.4.3	仪器检定方法	177
8.5	操作和使用	179
8.5.1	开关机步骤	179
8.5.2	光谱定量分析方法	180
8.5.3	工作参数条件的选择	182
8.5.4	测试质量控制	185
8.6	维护保养和故障排除	187
8.6.1	维护保养	187
8.6.2	常见故障排除方法	189
	参考文献	193

第9章 原子荧光光谱仪

9.1	概述	194
9.1.1	发展简史和最新进展	194
9.1.2	分类	195
9.1.3	特点	196
9.2	原理	196
9.2.1	原子荧光光谱的产生、类型和定量基础	196
9.2.2	荧光猝灭和荧光量子效率	197
9.2.3	氢化物发生-原子荧光光谱法 (HG-AFS)	197
9.2.4	工作原理	197
9.3	组成	198
9.3.1	氢化物发生系统	198
9.3.2	激发光源	199
9.3.3	原子化器	200
9.3.4	光学系统	200
9.3.5	检测系统	201
9.3.6	数据处理系统	201
9.3.7	气路系统	201
9.4	安装调试和校准	202
9.4.1	安装的一般要求及注意事项	202
9.4.2	主要性能指标	202
9.4.3	仪器的验收和测试	204
9.4.4	校准及期间核查	205
9.5	操作和使用	206

9.5.1	开关机顺序	206
9.5.2	光路调节	206
9.5.3	仪器工作参数的选择	206
9.5.4	样品的前处理	209
9.5.5	仪器操作步骤	209
9.5.6	定量分析方法	209
9.5.7	分析注意事项	210
9.6	维护保养和常见故障排除	210
9.6.1	维护保养	210
9.6.2	常见故障诊断及排除方法	211
	参考文献	214

第 10 章	X 射线荧光光谱仪	215
10.1	概述	215
10.1.1	发展历史	215
10.1.2	特点	215
10.2	工作原理	215
10.2.1	X 射线荧光光谱的产生	215
10.2.2	定性原理	216
10.2.3	定量原理	217
10.3	结构及组成	217
10.3.1	结构和组成	217
10.3.2	波长色散型和能量色散型仪器的比较	219
10.3.3	典型型号仪器技术参数	220
10.4	安装调试和校准	221
10.4.1	安装的基本要求	221
10.4.2	仪器的安装步骤	223
10.4.3	仪器的性能指标	224
10.4.4	性能指标的测试方法	225
10.4.5	仪器的验收	227
10.4.6	仪器的校准	227
10.5	操作和使用	228
10.5.1	硬件的基本操作	228
10.5.2	软件操作	229
10.5.3	工作参数和条件的选择	230
10.5.4	样品的测定步骤	232
10.5.5	微区扫描型仪器的操作与使用	234

10.6 维护保养和故障排除	236
10.6.1 维护保养	236
10.6.2 故障排除	238
参考文献	239
第 11 章 电感耦合等离子体质谱仪	241
11.1 概述	241
11.2 工作原理	242
11.3 结构及组成	244
11.3.1 结构和组成	244
11.3.2 典型仪器主要性能	247
11.4 安装调试和校准	248
11.4.1 安装前的准备	248
11.4.2 调试和校准	250
11.5 操作和使用	252
11.5.1 开、关机步骤	252
11.5.2 分析方法	253
11.5.3 分析方法的测量方案	255
11.6 维护保养和故障排除	258
11.6.1 维护保养	258
11.6.2 常见故障与排除	266
参考文献	268

第1章 绪论。

1.1 光谱分析导论

1.1.1 光谱分析的历史及进展

人们对光谱的研究可追溯到较久远的历史。早在 1666 年, 牛顿通过玻璃棱镜将太阳光分解成从红到紫的各种颜色的光谱, 并由此发现白光是由各种颜色光组成的复合光, 这是最早对光谱的研究。

1802 年, W. H. Wollaston 观察到了光谱线, 其后在 1814 年, J. Fraunhofer 发现了太阳光谱中的暗线。1859 年, G. Kirchhoff 与 R. Bunson 将光谱应用于分析研究, 他们证明光谱学可以用作定性化学分析的新方法, 并利用这种方法发现了几种当时未知的元素, 证明了太阳里也存在着多种已知的元素。

随后, 光谱分析随着光谱学研究的逐步深入而不断发展, 从研究最简单的氢原子光谱一直到今天的量子力学理论, 无不对光谱分析理论的完善和实践的进步有十分重要的意义。也正是在这过程中, 各种新的光谱现象被发现, 不同的光谱分析方法也相继建立, 并出现相应的商品化光谱分析仪器。这些发现都为光谱分析发展甚至是产生一种新的光谱分析方法起了十分重要作用。如 1928 年, 印度物理学家拉曼发现: 当单色光通过静止透明介质时, 产生一些散射光。在散射光中, 含有一些与原光波波长不同的光, 即拉曼效应, 拉曼效应的发现造就了一种新的光谱分析方法的产生, 并由此出现了拉曼光谱仪。

目前, 光谱分析已成为现代分析化学手段最多、应用最广泛、功能最强大的分析方法之一。光谱分析从原理上得到长期研究, 理论上已经趋于完善, 近年来的仪器发展很难有重大的技术突破, 主要发展在于进一步提高仪器测定的稳定性和分析性能, 提高分析速度和灵敏度以及自动化程度, 拓宽其应用范围, 作为商品仪器还要适应现代检测的需要, 不断向实用化、小型化、普及化等方面发展。

1.1.2 电磁辐射及其基本性质

(1) 光谱与电磁辐射 复合光(如太阳光)经过色散系统(如棱镜、光栅)分光后, 将分成红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫的按波长由大到小依次排列的彩色图案, 这就是早期光谱的概念。这种由红色到紫色的光谱, 相应于波长由 $770 \sim 390\text{nm}$ 的区域, 是人眼所能感觉的光谱, 称为可见光。随着人们对光谱的进一步研究发现, 红光之外为波长更长的还有红外光, 紫光之外则为波长更短的还有紫外光, 虽然这些光都不能为肉眼所觉察, 但能用仪器记录, 这样光谱的概念就由可见

光扩展到一波长区间更宽的“光”，随着人们对光更深入的研究发现，光是一种电磁辐射，具有电磁辐射的性质，因此，有时甚至直接用电磁辐射的概念来描述更广义范围的“光谱”。将各种电磁辐射按照波长或频率的大小顺序排列所成的图或表称为电磁波谱，电磁波谱波长范围及其跃迁类型见表 1-1。

表 1-1 电磁波谱波长范围及其跃迁类型

辐射类型	波长范围	跃迁类型
γ 射线	$10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ nm}$	核能级
X射线	$10^{-3} \sim 10 \text{ nm}$	内层电子
紫外区	$10 \sim 200 \text{ nm}$	价电子
近紫外区	$200 \sim 380 \text{ nm}$	价电子
可见区	$380 \sim 780 \text{ nm}$	价电子
近红外区	$0.78 \sim 2.5 \mu\text{m}$	分子的转动和振动
中红外区	$2.5 \sim 50 \mu\text{m}$	分子的转动和振动
远红外区	$50 \sim 1000 \mu\text{m}$	分子的转动和振动
微波	$0.75 \sim 3.75 \text{ mm}$	分子的转动
电子自旋共振	3 cm	磁场中电子的自旋
核磁共振	$0.6 \sim 10 \text{ m}$	磁场中核的自旋

(2) 电磁辐射的波动性 随着光谱学深入研究的发现，光的本质是一种电磁辐射，一种以极大的速度（在真空中为 $2.99792 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ）通过空间，而不需要以任何物质作为传播媒介的能量形式。电磁辐射有共同的性质，既具有波动性又具有粒子性。

光的波动性表现在光是一种电磁波，可以用周期 T 、频率 ν 、波数 $\bar{\nu}$ （或 σ ）等波参数来描述。光的波动性具体表现在具有反射、折射、散射、干涉、衍射和偏振等现象。

① 反射和折射 光从一种介质（介质 A）入射到另外一种介质（介质 B）的界面，其中一部分光在介质 A 中改变其传播方向，另一部分光在介质 B 中改变其传播方向，前者称为反射光，后者称为折射光，两者能量（光强度）分配取决于介质的种类和入射光的角度，一般反射光强度随入射角的增大而增加。

② 干涉和衍射 频率、振幅相同，周相等或相差恒定的两光波产生的相关波互相叠加产生明暗相间条纹的现象称为干涉现象。当两列波相互加强时可得明条纹；当两列波互相抵消时则得到暗条纹。若两光波光程差为 δ ，波长为 λ ，则当光程差等于波长 λ 的整数倍时，两波将互相加强到最大程度。光波绕过障碍物而弯曲地向它后面传播的现象，称为波的衍射现象。

(3) 电磁辐射的粒子性 光的粒子性表现在光的光电效应、康普顿效应、拉曼效应等，黑体辐射也说明光具有粒子性。1889 年，法国科学家赫兹发现光电效应，即当光照射金属时有电子逸出（光电子）。1905 年，爱因斯坦提出光量子学说，将光的波动性与光粒子性很好地统一起来，光可以看作具有一定能量的粒子流，光子