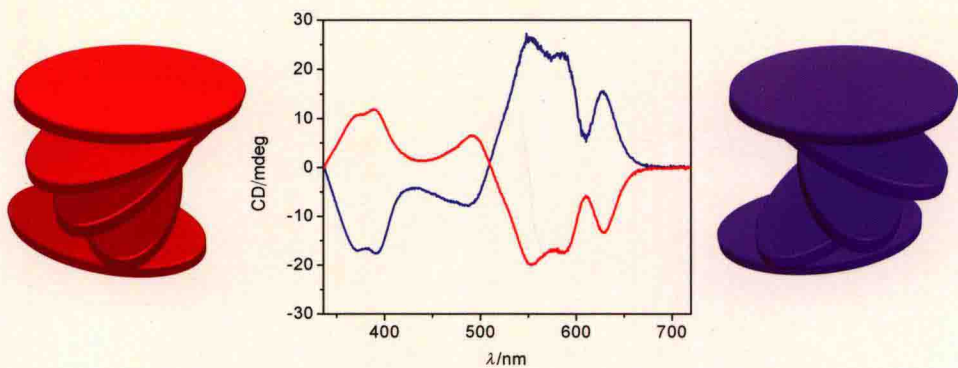


圆二色谱的 原理及其应用

王克让 李小六 编著



科学出版社

圆二色谱的原理及其应用

王克让 李小六 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

手性是自然界中普遍存在的现象。圆二色谱由于其对手性分子信号的敏感性,在研究生物大分子(蛋白质、DNA和多糖等)、超分子和手性小分子等方面具有重要的应用。本书主要介绍了圆二色谱的原理,及其在蛋白质研究、DNA分子研究、手性超分子化学研究和手性有机小分子研究等方面的应用。

本书可作为从事化学生物学、超分子化学及其相关专业的高年级本科生和研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

圆二色谱的原理及其应用/王克让,李小六编著. —北京:科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-053464-4

I. ①圆… II. ①王…②李… III. ①色谱法 IV. ①O657.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 124149 号

责任编辑:周巧龙/责任校对:何艳萍

责任印制:张伟/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年6月第一版 开本:720×1000 B5

2017年6月第一次印刷 印张:11

字数:219 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

现代测试技术与表征已成为科学技术发展的重要组成部分，其中圆二色谱法是研究和开拓手性化合物的必要手段之一，在生命科学、材料科学、环境科学等方面都发挥着重要的作用。虽然已有一些有关圆二色谱方面的书籍，但是针对高年级本科生以及硕士研究生的专门介绍圆二色谱的原理及其应用的相关书籍几乎没有。

该书作者作为我的博士研究生，毕业后从事了一部分圆二色谱方面相关的工作，并在河北大学有机化学专业开设了“圆二色谱的原理及实验”的硕士研究生课程，积累了一定的资料，为《圆二色谱的原理及其应用》一书的出版奠定了基础。该书内容全面、系统、图文并茂、深入浅出，内容涵盖基础知识和最新进展；共分成五章，分别介绍了圆二色谱的原理及其在 DNA、蛋白质、超分子化学和有机小分子等方面的应用，并列举了大量的研究实例。该书的特点之一是多学科交叉，内容不仅涉及 DNA、蛋白质等生物大分子，而且涉及超分子化学和有机小分子；特点之二是读者可以从所举大量实例中学习圆二色谱的应用，理论与实践相结合，通俗易懂、使用方便。

该书作为高年级本科生和研究生教材，可以使学生了解圆二色谱的原理，及其在多学科交叉方面的应用；对于化学、超分子化学和化学生物学等相关领域的研究者来说，也是一本完备的实用性很强的参考书。

谨将此书推荐给广大读者，希望对相关领域的研究人员在科研和教学工作上有所帮助！

刘 育
南开大学

前 言

手性是自然界中普遍存在的现象。生物体的三大基础物质——蛋白质、核酸和糖类都是手性物质，并且自然界的手性分子有其存在的特点，如天然的氨基酸都是 L-型，而天然的糖类都是 D-型。研究手性分子的结构特征对于其功能的研究具有重要的意义。圆二色谱由于其对手性分子信号的敏感性，在生物大分子（蛋白质、DNA 和多糖等）、超分子和手性小分子等方面具有重要的应用。

从 2009 年开始我一直从事 DNA 分子、蛋白质分子和手性超分子的研究工作，在诱导圆二色谱研究方面积累了丰富的经验。我们课题组所在“药物化学与分子诊断”教育部重点实验室和河北省化学生物学重点实验室中，从事 DNA 分子、蛋白质分子和药物分子相互作用方面的研究人员较多，但对于圆二色谱的原理和应用的知识欠缺。因此，从 2012 年开始，我给河北大学有机化学专业的硕士研究生开设了“圆二色谱的原理及实验”课程。通过讲授圆二色谱的原理及其应用，结合我们课题组正在开展的研究项目开展了相关的实验，理论与实验相结合的授课模式得到老师和同学们的良好反馈。然而，我在授课过程中发现国内没有专门介绍圆二色谱的书籍。因此，经过多年的授课积累，我将授课内容整理写成《圆二色谱的原理及其应用》这本书，希望本书能抛砖引玉，为正在开设相关课程的老师，以及从事化学生物学、超分子化学和其相关专业的本科生和研究生提供帮助。

本书共分为五章，重点介绍了圆二色谱与紫外光谱的关系、产生原理和圆二色谱的常用概念；蛋白质二级结构的圆二色特征，以及诱导圆二色信号在小分子与蛋白质作用中的应用；DNA 分子不同构象的圆二色特征，以及小分子与 DNA 分子不同作用模式的圆二色特征；主客体分子络合、氢键组装和自组装等手性超分子体系的圆二色特征。

尽管我们在撰写过程中力求尽善尽美，但由于水平和时间所限，虽经多次修改，本书在编写上可能仍然存在不少疏漏之处。另外，本书编写过程中所取资料较多的是与我们的研究方向相关的，所以书的内容难免存在一定的局限性。对此欢迎广大读者批评指正，以便我们今后改进。

最后，感谢河北大学化学与环境科学学院在本书出版过程中的大力支持，感

谢河北大学“二级学院综合改革试点”项目和河北省高等学校“综合改革试点”项目出版经费的支持，感谢河北省教改项目“多平台协同驱动的化学‘双创’人才培养模式的研究与实践”（项目编号：2016GJJG014）的支持！

王克让

目 录

序	
前言	
第一章 圆二色谱的原理	1
第一节 紫外-可见光谱	1
一、光的波粒二象性	1
二、光谱学	2
三、光谱学的发展历程	3
四、紫外-可见吸收光谱	5
第二节 圆二色性	6
一、平面偏振光	6
二、椭圆偏振光和圆二色性	8
第三节 圆二色谱的参数和特征	11
一、圆二色谱与紫外-可见吸收光谱的关系	11
二、圆二色谱的特征及影响因素	13
三、圆二色谱的溶剂选择及测试注意事项	15
第四节 圆二色谱仪	16
一、圆二色谱仪的构造	16
二、圆二色谱仪的生产厂家及特点	17
第五节 本章小结	17
参考文献	18
第二章 圆二色谱在蛋白质研究方面的应用	19
第一节 蛋白质的组成、结构及圆二色谱特征	19
一、蛋白质的组成	19
二、蛋白质的结构	21
三、蛋白质的圆二色信号产生的原因及其特征	24
四、蛋白质的二级结构特征及其相应的圆二色谱	27
第二节 化学生物学中圆二色谱的应用	34
一、天然蛋白质和提取蛋白质的圆二色谱研究	34
二、蛋白质与药物分子作用研究	37

三、蛋白质的热变性实验	49
第三节 本章小结	51
参考文献	52
第三章 圆二色谱在 DNA 分子研究方面的应用	55
第一节 DNA 分子的结构	55
第二节 DNA 分子和 RNA 分子, 及其与化合物作用的圆二色谱特征	64
一、不同 DNA 和 RNA 构象的圆二色谱	64
二、不同化合物与 DNA 作用的圆二色谱	71
第三节 圆二色谱在 G-四链体 DNA 分子研究方面的应用	84
一、G-四链体 DNA 分子的圆二色谱特征	84
二、G-四链体结合剂与 G-四链体 DNA 分子相互作用的研究	91
第四节 本章小结	98
参考文献	99
第四章 圆二色谱在超分子化学方面的应用	102
第一节 环糊精分子包结客体分子诱导圆二色谱的规律及应用	102
一、环糊精分子包结客体分子诱导圆二色谱的规律	102
二、圆二色谱在环糊精分子与客体分子相互作用方面的应用	106
第二节 圆二色谱在手性超分子组装体方面的应用	108
一、圆二色谱在氢键组装方面的应用	109
二、圆二色谱在主客体分子络合方面的应用	116
三、圆二色谱在离子自组装方面的应用	123
四、圆二色谱在 π - π 自组装方面的应用	125
第三节 本章小结	151
参考文献	151
第五章 圆二色谱在有机小分子方面的应用	155
第一节 圆二色谱在平面扭曲手性化合物方面的应用	155
第二节 圆二色谱在手性天然产物结构确定方面的应用	159
第三节 圆二色谱在手性配位化合物方面的应用	160
第四节 圆二色谱在基于氮原子手性化合物方面的应用	161
第五节 圆二色谱在轴手性化合物方面的应用	162
第六节 圆二色谱在手性大环化合物方面的应用	162
第七节 本章小结	164
参考文献	164

第一章 圆二色谱的原理

圆二色谱是一种特殊的吸收谱^[1],用于检测手性小分子、生物大分子(如 DNA 分子、蛋白质和多糖)等的构象信息,广泛应用在化学、生物、材料和药学等领域。

手性是实物和其镜像不能重叠的现象,手性分子的分子式完全相同,但其原子或原子团在三维空间的排布不同。手性化合物的熔点、沸点、溶解度等物理性质在非手性环境中基本完全相同,但其旋光性不同。另外手性分子在手性环境中,尤其在生理条件下表现出不同的生理性质。

从手性小分子到 DNA 分子、蛋白质和多糖等生物大分子都具有手性^[1]。研究手性化合物的方法有 X 射线单晶衍射,核磁共振,旋光和圆二色谱等。其中圆二色谱法具有样品量少、对测试样品纯度要求低、测试样品分子量范围宽、仪器操作简单等特点。

圆二色谱与紫外-可见光谱存在紧密的联系。圆二色谱的谱带范围与紫外-可见光谱一致,即只有具有紫外-可见光谱的手性化合物才可能具有圆二色谱的特征。因此要理解圆二色谱的原理必然首先掌握紫外-可见光谱的原理及特征,以及影响因素^[2]。

本章将从紫外-可见光谱的原理及特征、圆二色性、圆二色谱和圆二色谱仪等四方面介绍。

第一节 紫外-可见光谱

一、光的波粒二象性

光是能量的一种传播方式。光源之所以发出光,是因为光源中原子、分子的运动,而原子和分子运动方式主要有三种,即热运动、跃迁辐射(包括自发辐射和受激辐射)和光辐射(物质内部带电粒子加速运动产生)。热运动是生活中最常见的,跃迁辐射主要用于激光,光辐射又分为紫外辐射、可见光辐射和红外辐射。

在科学定义上,光有时候是指所有的电磁波。光是一种肉眼可以看见(接收)的电磁波(可见光谱)。光是由一种称为光子的基本粒子组成的。具有波动性和粒子性,即波粒二象性。

波动性:可用波长(λ)、频率(ν)和波数(σ)来描述,如式(1.1)所示:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = c\sigma \quad (1.1)$$

式中： ν 为频率，单位为 Hz； c 为光速，其量值为 $3 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ； λ 为波长，单位为 nm； σ 为 1 cm 长度中波长的数目。

粒子性：可用光量子的能量来描述，如式(1.2)所示：

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.2)$$

式中： E 为光子能量，单位为 J； h 为普朗克常数，其值为 $6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

二、光谱学

光谱学是涉及物理学和化学的一门交叉学科，光谱被用来研究电磁波与物质之间的相互作用。光是一种由各种波长(或频率)的电磁波叠加起来的电磁辐射。光谱是复色光经棱镜或光栅等色散系统分光后，被色散开的单色光按波长(或频率)大小而依次排列的图案，全称为光学频谱。光谱与电磁波的关系、产生原理及检测方法见表 1.1。

表 1.1 光谱与电磁波的关系、产生原理及检测方法

		波长										
		0.005 nm	0.1 nm	10 nm	200 nm	400 nm	800 nm	2.5 μm	15 μm	300 μm	1 m	1000 m
区间	γ 射线	X 射线	远紫外线	紫外线	可见光	近红外线	中红外线	远红外线	微波	无线电波		
激发类型	核	内层电子跃迁	σ 电子跃迁	n、 π 电子跃迁		振动与转动			分子转动 电子自旋	原子核自旋		
光谱方法		X 射线光谱法	真空紫外光谱法	紫外-可见光谱法		近红外光谱法	红外光谱法和拉曼光谱法	远红外光谱法	电子自旋波谱法	核磁共振波谱法		

随着科学技术的发展，光谱学所涉及的电磁波波段不断拓展，基本覆盖了整个电磁波波段(从 0.005~1000 m)，如表 1.1 所示，包括 γ 射线、X 射线、远紫外线、紫外线、紫外-可见区、红外线区、微波，以及无线电波等。根据光与物质的作用形式，光谱一般分为吸收光谱、发射光谱和散射光谱等。其中，吸收光谱是指物质吸收光子，从低能级跃迁到高能级而产生的光谱，如紫外-可见光谱。发射光谱是指物体发光直接产生的光谱，如荧光光谱。散射光谱是指光照射到物质上，会发生非弹性散射，在散射光中与激发光波长相同的弹性成分叫瑞利散射，而比激发光波长短的成分叫拉曼效应。

通过研究光谱学，人们可以解析原子与分子的能级与结构、特定化学过程的反应速率、某些物质在太空中特定区域的浓度分布等多方面的微观和宏观信息。

另外，人们可利用物质的特定组成结构来产生具有特殊光学性质的光谱，如特定频率的激光等。光谱学不仅是一门基础科学，也是一种重要的定性、定量测量方法，例如分析水质中各项物质含量，通过分析血液中蛋白质的含量进行疾病预防与检测，使用最优波段进行光纤通信等。自 20 世纪中叶激光被发现以来，人类对于光的控制达到了新的阶段，可以产生具有前所未有的亮度、频率分布以及时间分辨率的电磁辐射，开启了通向非线性光学与非线性光谱学的大门，使得光谱学进入了新的时期。

三、光谱学的发展历程

光谱学的研究已有三百多年的历史。最早研究光谱学的是英国物理学家牛顿，1666 年，牛顿把太阳光通过玻璃棱镜后分成从红光到紫光的各种颜色的光谱，发现白光是由各种颜色的光组成的(图 1.1)，由此发展了颜色理论。

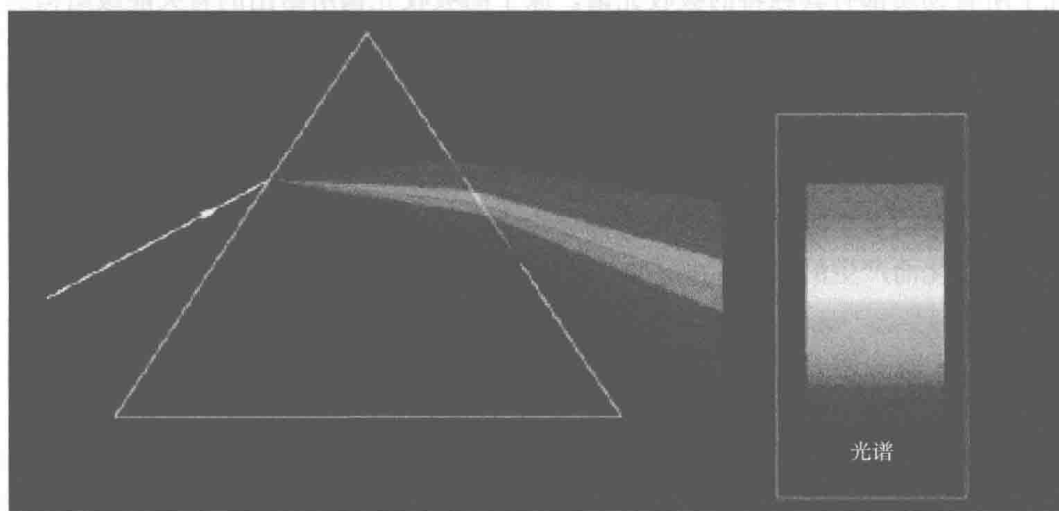


图 1.1 白光通过棱镜后分成从红光到紫光的光谱

1802 年，渥拉斯顿发现太阳光谱暗线。1814 年，夫琅和费利用阳光照亮的窄缝作为白光光源通过棱镜也观察到了光谱暗线。进而，他又制备了光栅，第一个观察到光栅光谱。每条谱线只代表一种“颜色”的光。这里颜色一词是广义的。牛顿之所以没有能观察到光谱线，是因为他使太阳光通过圆孔而不是通过狭缝。在 1814~1815 年，夫琅和费公布了太阳光谱中的许多条暗线，并利用衍射原理测出它们的波长，将 576 条暗线编制成表，并用字母 A、B、C、D、...、I 等将其主要的线命名，其中有些命名沿用至今，此后便把这些线称为夫琅和费暗线。此外，他还在星光中发现了某些谱线。他用这些谱线测量了各种光学玻璃的折射率，达到以前从未有过的精度，解决了大块高质量光学玻璃制造的难题。他用几

何光学理论设计和制造了消色差透镜以取代过去盲目试验的方法，还首创用牛顿环方法检查光学表面加工精度及透镜形状。他还制造了大型折射望远镜等光学仪器，使当时光学技术的权威由英国转移到德国，推动了精密光学工业的发展。1821年，他发表了平行光单缝衍射的研究结果(后人称平行光衍射为夫琅和费衍射)，做了光谱分辨率的实验，第一个定量地研究了衍射光栅，制成由 260 条平行线组成的光栅，并用它测量了光的波长。1823 年他又用金刚石刀刻制了玻璃光栅(3200 条/巴黎寸)，给出了至今通用的光栅方程。

19 世纪 60 年代，基尔霍夫和本生发展了实用光谱学，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还不为人所知的元素，并且证明在太阳里存在着多种已知的元素。

当一束具有连续波长的光通过一种物质时，光束中的某些成分便会有所减弱，当经过物质而被吸收的光束由光谱仪分成光谱时，就得到该物质的吸收光谱。几乎所有物质都有其独特的吸收光谱。原子的吸收光谱所给出的有关能级结构的知识同发射光谱所给出的是互为补充的。

吸收光谱的光谱范围大约从 10 nm 到 100000 nm(图 1.2)，其中可见光区为 390~770 nm。在 200 nm 到 800 nm 的光谱范围内，可以观测到固体、液体和溶液的吸收，这些吸收有的是连续的，称为一般吸收光谱，即紫外-可见光谱；有的显示出一个或多个吸收带，称为选择吸收光谱。所有这些光谱都是由于分子的电子态的变化而产生的。

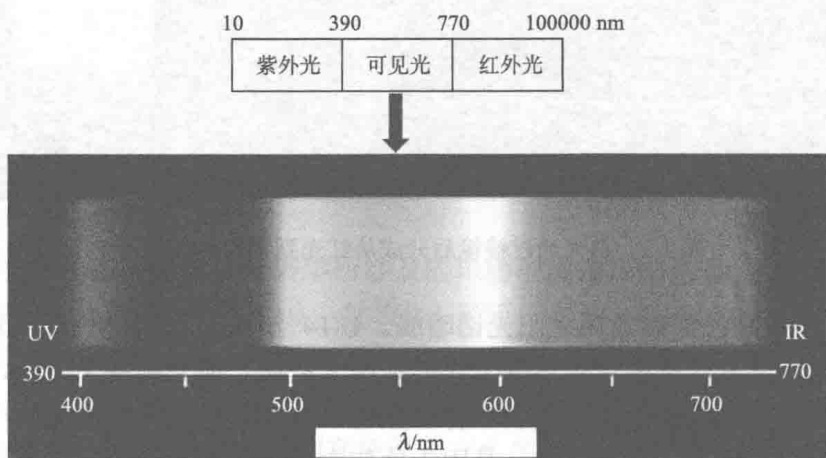


图 1.2 吸收光谱的光谱范围及其可见光区

选择吸收光谱在有机化学中有着广泛的应用，包括对化合物的鉴定、化学过程的控制、分子结构的确定、定性和定量化学分析等。

四、紫外-可见吸收光谱

紫外-可见吸收光谱(ultraviolet and visible spectroscopy, UV-Vis)是由价电子的跃迁而产生的。紫外-可见吸收光谱是利用物质的分子和离子对紫外和可见光的吸收所产生的光谱及吸收程度对物质的组成、含量和结构进行分析、测定和推断的分析方法。一般有机化合物中存在三种电子之间的跃迁,即 σ 电子、 π 电子和 n 电子。从基态向激发态跃迁,主要有 4 种跃迁形式,这 4 种跃迁所需能量大小为: $n \rightarrow \pi^* < \pi \rightarrow \pi^* < n \rightarrow \sigma^* < \sigma \rightarrow \sigma^*$, 如图 1.3 所示。

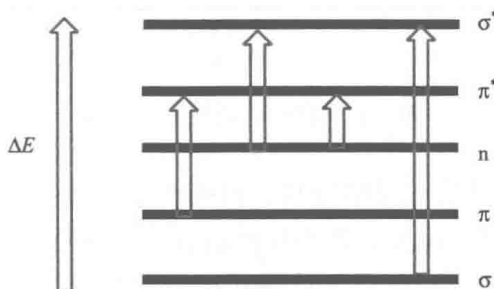


图 1.3 有机化合物中电子跃迁的种类

$\sigma \rightarrow \sigma^*$ 跃迁, 所需能量最大, 在远紫外区 (100~200 nm);

$n \rightarrow \sigma^*$ 跃迁, 大部分也在远紫外区 (100~200 nm);

$\pi \rightarrow \pi^*$ 跃迁, 外端在近紫外区, 有助色团存在时会使 $\pi \rightarrow \pi^*$ 跃迁红移, 另外随着共轭体系的生长, 吸收波长向长波长方向移动, 并且吸收强度增大;

$n \rightarrow \pi^*$ 跃迁, 一般吸收强度较弱。紫外-可见吸收光谱通常研究的是 $n \rightarrow \pi^*$ 跃迁和 $\pi \rightarrow \pi^*$ 跃迁。

紫外-可见吸收光谱遵循朗伯-比尔定律, 如式 (1.3) 所示:

$$A = -\lg \frac{I}{I_0} = \varepsilon cl \quad (1.3)$$

式中: A 是吸光度; ε 是消光系数; c 是溶液的摩尔浓度; l 是样品池的长度。

将不同波长的光透过某一固定浓度和厚度的样品溶液时, 测量每一波长下样品溶液对光的吸收程度, 即吸光度, 然后以波长为横坐标, 以吸光度为纵坐标作图, 可得一条曲线。这条曲线描述了物质对不同波长的光的吸收能力, 称为吸收曲线或吸收光谱(图 1.4)。紫外-可见吸收光谱图中, 横坐标一般为吸收光的波长, 单位为纳米 (nm), 纵坐标可以是吸收光的强度 (A)、透过率 (T)、吸收率 ($1-T$) 或消光系数 (ε) 中的任何一个。吸收曲线表示化合物的紫外-可见吸收情况, 曲线最大吸收峰的横坐标为该吸收峰的位置, 对应的纵坐标为该吸收峰的吸收强度。

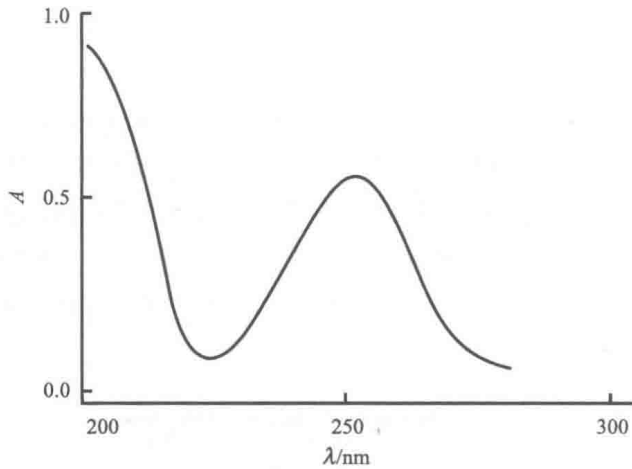


图 1.4 紫外-可见吸收光谱图

紫外-可见吸收光谱具有灵敏度高、准确度高、选择性好、操作方便和分析速度快等特点。利用紫外-可见光谱不仅可进行定量分析，还可利用吸收峰的特征进行定性分析和简单的结构分析，此外还可用于测定平衡常数以及配合物配位比等。

第二节 圆二色性

一、平面偏振光

如前所述，光是一种电磁波，它的电场或磁场振动的方向与光前进的方向垂直。在普通光中，光波可以在垂直于前进方向的平面上的任何方向振动^[3]。因此，光波的传播方向就是电磁波的传播方向，如图 1.5 所示。振动方向对于传播方向的不对称性叫做偏振，它是横波区别于其他纵波的一个最明显的标志，只有横波

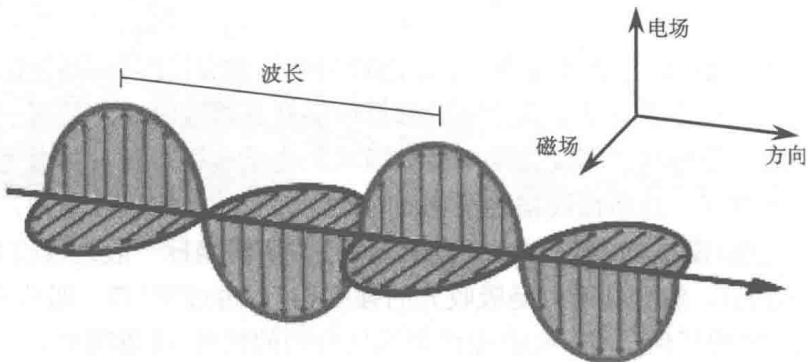


图 1.5 光波的振动及传播

才有偏振现象。光波电矢量振动的空间分布对于光的传播方向失去对称性的现象叫做光的偏振。光波中的电振动矢量 E 和磁振动矢量 H 都与传播速度 V 垂直，光波是横波，具有偏振性。而具有偏振性的光就称为偏振光。

1808年，马吕斯在实验中发现了光的偏振现象。在进一步研究光的简单折射中的偏振时，发现光在折射时是部分偏振的。1811年，布吕斯特在研究光的偏振现象时，发现了光的偏振现象的经验定律。

通常，光源发出的光波，其光波矢量的振动在垂直于光的传播方向上做无规则取向，但从统计平均来说，在空间所有可能的方向上，光波矢量的分布可看做是机会均等的，他们的总和与光的传播方向是对称的，即光矢量具有轴对称性，均匀分布、各方向振动的振幅相同，这种光称为自然光。当自然光通过一个由方解石制成的尼科尔棱镜时，只有振动方向和棱镜晶轴平行的光才能通过，所得到的光只在一个平面上振动。这种只在一个平面上振动的光叫做平面偏振光，如图 1.6 所示。

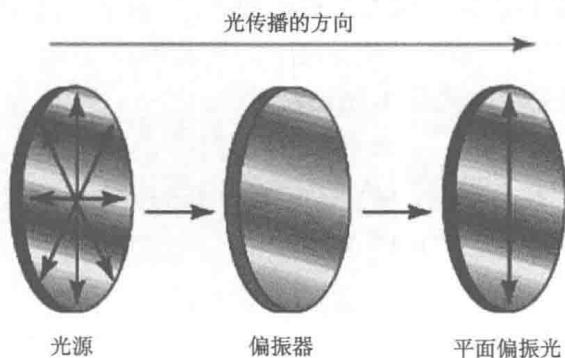


图 1.6 平面偏振光的产生

平面偏振光可分解为振幅、频率相同，旋转方向相反的两圆偏振光。其中电矢量以顺时针方向旋转的称为右旋偏振光，以逆时针方向旋转的称为左旋偏振光。两束振幅、频率相同，旋转方向相反的偏振光可以合成一束平面偏振光。如果两束偏振光的振幅(强度)不同，则合成一束椭圆偏振光。众所周知，当一束平面偏振光通过介质时，介质对左圆偏振光 L 和右圆偏振光 R 可能产生不同的折射率 (n_L 和 n_R) 及不同的吸收 (ϵ_L 和 ϵ_R)。如果 $n_L = n_R$ ，则从介质中透射出来的平面偏振光的方向与入射偏振光方向相同。如果 $n_L \neq n_R$ ，平面偏振光通过介质时， L 和 R 产生位相差，因此合成的平面偏振光的振动方向将与入射的平面偏振光的方向发生一定角度的偏离，即产生了旋光现象，如图 1.7 所示。

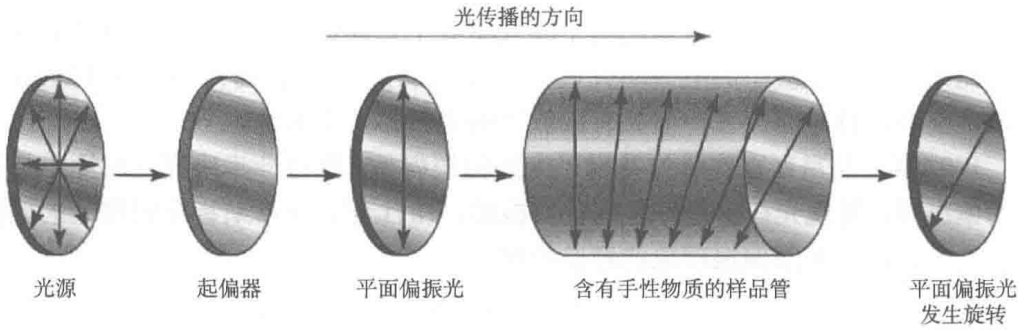


图 1.7 旋光现象的产生及检测，在光传播的方向(direction of light propagation)上，自然光(normal light)经偏振器(polarizer)产生平面偏振光(plane-polarized light)，平面偏振光通过含有手性物质的样品管(sample tube containing a chiral compound)，导致平面偏振光发生旋转(the plane polarization has been rotated)

旋光活性物质使偏振光振动平面旋转的角度，用“ α ”表示，称为旋光度。使平面偏振光平面向左旋转，称为左旋，用“-”表示；使平面偏振光平面向右旋转，称为右旋，用“+”表示。旋光度 α 与溶液的浓度 ρ_B 、样品管的长度 l 、温度 t 和光的波长 λ 有关，如式(1.4)所示：

$$\alpha = f(\rho_B, l, t, \lambda) \tag{1.4}$$

在一定温度和波长条件下，样品管长度为 1 dm，样品浓度为 $1 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时测得的旋光度称为比旋光度，用“ $[\alpha]$ ”表示，如式(1.5)所示：

$$[\alpha]_{\lambda}^t = \frac{\alpha_{\lambda}^t}{l \times c} \tag{1.5}$$

式中： α_{λ}^t 为实际观测的旋光度； t 为测试时的温度； l 为样品管长度(dm)； λ 为测试时的波长； c 为样品浓度($\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)。

因为折射率 n 是波长的函数，所以旋光变化也是波长的函数，即旋光色散(optical rotatory dispersion, ORD)。产生旋光现象的原因是左旋和右旋偏振光通过介质时保持振幅相等，当二者通过旋光物质时，由于传播速度不同，叠加产生的平面偏振光的振动面就会发生旋转。

二、椭圆偏振光和圆二色性

对着光前进的方向观察时，一束光波的电场矢量(或磁场矢量)端点在空间的轨迹是以光传播方向为轴的圆形螺旋，即在平面上的投影为圆形，称为圆偏振光。其中，电矢量方向沿逆时针方向旋转的，称为左圆偏振光，如图 1.8 所示。电矢量方向沿顺时针方向旋转的，称为右圆偏振光，如图 1.9 所示。

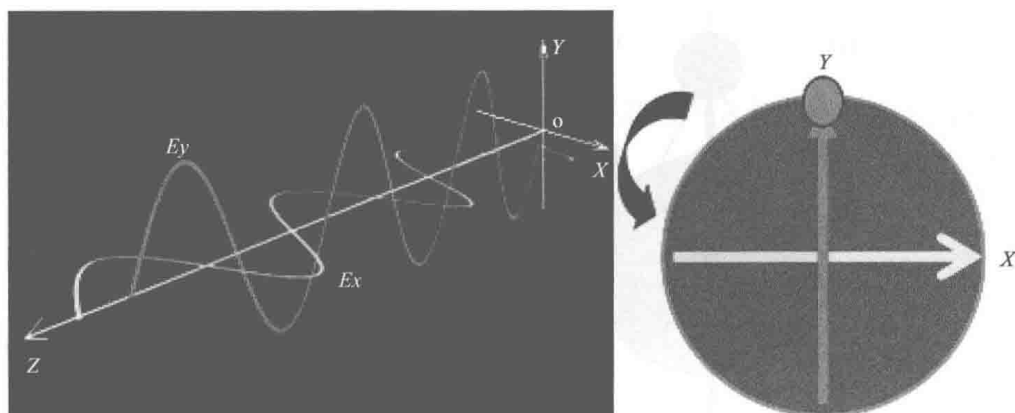


图 1.8 左圆偏振光

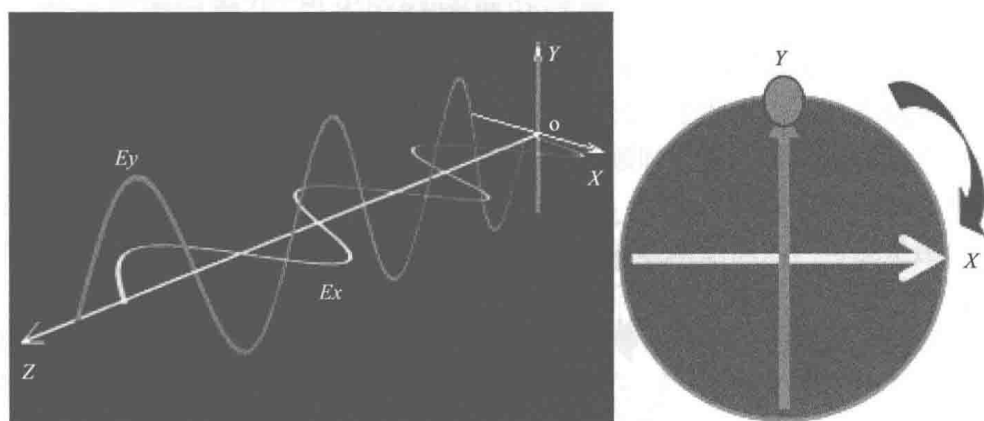


图 1.9 右圆偏振光

常见的几种偏振光的关系如下：

频率相同，方向相反，振幅相同，位相相同，左右圆偏振光合成线性偏振光 [图 1.10(a)]。

频率相同，方向相反，振幅相同，位相不同，左右圆偏振光合成线性偏振光 [图 1.10(b)]。

频率相同，方向相反，振幅不同，位相不同，左右圆偏振光合成椭圆偏振光 (图 1.11)。

其中，椭圆偏振光中的角度 α 为位相不同的光与参照面的夹角之差的 $1/2$ ，如式(1.6)所示：

$$\alpha = (\phi_2 - \phi_1) / 2 \quad (1.6)$$

式中： ϕ_1 和 ϕ_2 分别为位相不同的光与参照面的夹角。

椭圆偏振光的椭圆度 θ 与振动能量相关，如式(1.7)所示：