

走进科学殿堂·物理篇

艺术中的物理学

(美) Pupa Gilbert 著
Willy Haerberli

秦克诚 译

清华大学出版社

走 进 科 学 殿 堂 · 物 理 篇

艺术中的物理学

(美) Pupa Gilbert 著
Willy Haerberli

秦克诚 译

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书主要介绍美术和音乐中用到的物理学概念。全书共 21 章,内容包括光和光波,反射和折射,透镜,眼,照相术,色和色觉,加法混色,颜色产生机制,周期振荡,简谐运动,阻尼振荡和共振,拍与谐音,声波,音调、响度和音色,耳,弦的振动,管,傅里叶分析,音阶,乐器。本书适合艺术类、人文类等非物理专业的本科生学习,也可供对艺术中的物理学感兴趣的读者阅读。

Physics in the Arts

Pupa Gilbert, Willy Haeberli

ISBN: 978-0-12-374150-9

Copyright © 2008 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN: 9789812723611

Copyright © 2011 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Printed in China by Tsinghua University Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd.. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予清华大学出版社在中国大陆地区(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)发行与销售。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2010-6373

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

艺术中的物理学/(美)吉尔伯特(Gilbert, P.), (美)海尔伯利(Haeberli, W.)著;
秦克诚译. —北京:清华大学出版社 2011 4

(走进科学殿堂·物理篇)

ISBN 978-7-302-24299-4

I. ①艺… II. ①吉… ②海… ③秦… III. ①物理学—普及读物 IV. ①O4-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 252772 号

责任编辑:邹开颜 洪 英

责任校对:赵丽敏

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62795954, jsjcc@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京市世界知识印刷厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:148×210 印 张:10 字 数:306 千字

版 次:2011 年 4 月第 1 版 印 次:2011 年 4 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:39.00 元



中文版序

很

多人都喜欢欣赏艺术品：绘画、雕塑，还有音乐。另一方面，许多学生认为科学是一门有用但却相当枯燥的科目，和艺术没有多少关系。但是我们必须认识到，艺术家用来创作或演奏艺术作品的工具是物质的客体，如颜料、照相机、乐器以至声带等，它们遵从物理学定律。因此懂得一些科学知识能够加深我们对视觉艺术和音乐的欣赏和理解。

我们很高兴本书现在有了中译本。本书是为选修“艺术中的物理学”这门课的大学生写的。在书中我们想要说明，光学的定律如何与颜色、颜料混合、照相机里的镜头甚至与眼睛相联系；乐器中的力学振动如何产生不同的声音，不同的乐器发的声音为什么不一样，还有声音感觉（响度、音高）如何与压强振动的物理特征相联系。“艺术中的物理学”这门课主要是为非物理专业的学生开设的，如主修语言、历史、新闻、社会学或心理学的学生，当然也包括学习音乐或绘画的学生。课程有一个重要方面在书中没有反映到，那就是课堂演示实验和一个教学实验室，内容为光学和声学中的实验。

我们非常荣幸同本书的译者——北京大学的秦克诚教授一道工作。感谢他指出了本书英文原版中的许多错误，这些错误得以在中文版中得到改正。

艺术和科学是不同国家和不同文化之间的神奇的桥梁。我们希望读者能喜欢这本书。

Willy Haeberli

Pupa Gilbert

2010年9月

目 录

1	引言	
4	第 1 章 光和光波	
	1.1 光的速率	8
	1.2 电磁波谱	8
	1.3 偏振	10
13	第 2 章 反射和折射	
	2.1 光的镜面反射	13
	2.2 光的折射	17
	2.3 全内反射	20
	2.4 钻石中的反射和折射	23
	2.5 虹	26
	问题	29
31	第 3 章 透镜	
	3.1 棱镜	31
	3.2 会聚透镜和发散透镜	32
	3.3 焦距	34
	3.4 成像——实像和虚像	37
	3.5 三条容易跟踪的光线	40
	3.6 透镜公式	42
	3.7 透镜的像差	47
	问题	51
55	第 4 章 眼	
	4.1 眼睛的调焦	57
	4.2 眼镜	59

62

第 5 章 照相术

- 4.3 近视眼 60
- 4.4 远视眼 60
- 4.5 散光眼 61
- 5.1 照相机 62
- 5.2 照相机的聚焦 63
- 5.3 选择曝光时间 65
- 5.4 选择光圈 66
- 5.5 景深 67
- 5.6 胶片 71
- 5.7 数码照相 73
- 5.8 把学到的综合在一起：拍一张照片 74
- 问题 77

79

第 6 章 色和色觉

- 6.1 颜色 79
- 6.2 人眼的感色灵敏度 81
- 6.3 物理颜色与心理颜色 87
- 6.4 色彩的三要素：色调、饱和度和亮度 88
- 6.5 光与物体的相互作用 90
- 6.6 散射或漫反射 90
- 问题 96

97

第 7 章 加法混色

- 7.1 三原色 97
- 7.2 原色的相加 98
- 7.3 原色三角形 101
- 7.4 低亮度颜色 104
- 7.5 光谱色 106
- 7.6 非光谱色 109
- 7.7 总结 111
- 7.8 绘画中的加法混色 112
- 问题 115

116

第 8 章 减法混色

- 8.1 滤光片 116
- 8.2 减法混色的原色 118
- 8.3 彩色照相 122
- 8.4 色素 124
- 8.5 饱和度的改变 126
- 8.6 为什么蓝色加黄色得出绿色 127
- 8.7 色调的改变 129
- 问题 132

134

第 9 章 颜色产生机制

- 9.1 照明光 134
- 9.2 色素 134
- 9.3 结构色：虹彩 135
- 9.4 由虹彩引起的更多的颜色产生机制 137
- 9.5 宝石中的颜色 140
- 9.6 由电荷转移引起的矿物颜色 142
- 9.7 由色心引起的矿物颜色 142
- 9.8 由光的带隙吸收引起的宝石颜色 143

145

第 10 章 周期振动

- 10.1 位移曲线图：位置 x 随时间 t 变化 148
- 10.2 周期 T 与频率 f 149
- 10.3 大数和小数 150
- 10.4 运动的速率 150
- 问题 152

154

第 11 章 简谐运动

- 11.1 弹簧常量 156
- 11.2 简谐运动的振动频率 157
- 11.3 简谐运动的波形 159
- 11.4 相角 161
- 问题 162

163	第 12 章 阻尼振荡和共振	
	12.1 阻尼振荡——“阻尼时间”的概念	163
	12.2 共振	165
	12.3 乐音的建立和衰减	170
	12.4 在音乐中的应用——乐器中的共鸣器	170
	问题	172
174	第 13 章 声源的相加：拍与谐音	
	13.1 叠加原理	174
	13.2 两个同频的纯音	175
	13.3 拍	177
	13.4 和谐	179
	13.5 真好玩：李萨如图形	180
	问题	183
185	第 14 章 声波	
	14.1 脉冲的传播	185
	14.2 纵波和横波	188
	14.3 空气中的声波是纵波	189
	14.4 空气中的声速	190
	14.5 波长和频率	191
	14.6 声音的传播	193
	14.7 声波的干涉	194
	14.8 音乐厅声学	196
	问题	199
201	第 15 章 声音感觉：音调、响度和音色	
	15.1 响度和振幅	202
	15.2 响度和频率	205
	15.3 音高的鉴别	208
209	第 16 章 耳	
	16.1 耳的各个部分	209
	16.2 音调感觉的地点理论	211

- 16.3 听觉神经告诉大脑什么 212
- 214 第 17 章 弦的振动
- 17.1 单模 214
 - 17.2 更高的振动模式 216
 - 17.3 行波和驻波 217
 - 17.4 发声公式 218
 - 17.5 振动模式与音乐有什么关系 219
 - 17.6 高次分音的阻尼 221
 - 17.7 被弹拨的弦：缺失的分音 221
 - 17.8 演奏谐音 222
 - 17.9 真实的弦有一定的劲度 223
- 问题 223
- 225 第 18 章 管
- 18.1 管中的压强脉冲 225
 - 18.2 开管和闭管中的反射 226
 - 18.3 开管中的驻波 227
 - 18.4 开管的基频 228
 - 18.5 开管的高次振动模式 229
 - 18.6 闭管的基频 230
 - 18.7 闭管的高次振动模式 232
 - 18.8 在管乐器上演奏乐调：指孔和泛音吹法 233
 - 18.9 别种形状 234
 - 18.10 声学长度 234
- 问题 235
- 236 第 19 章 傅里叶分析
- 19.1 傅里叶定理 236
 - 19.2 声谱 237
 - 19.3 傅里叶分析器(声分析器) 242
 - 19.4 傅里叶合成 243

	19.5	为什么不能合成出音乐家演奏的精品	246
		问题	247
248	第 20 章	音阶	
	20.1	音程	249
	20.2	协和性(和谐): 简单整数比	250
	20.3	大三和弦	252
	20.4	构建一个音阶: 自然音阶	252
	20.5	全音和半音	255
	20.6	音程的名称	256
	20.7	移调: 为什么要黑键	258
	20.8	被牺牲的完美: 等程音阶	259
	20.9	大调音阶和小调音阶	265
	20.10	整数音阶	266
		问题	267
268	第 21 章	乐器	
	21.1	乐器的结构	268
	21.2	激发机制	269
	21.3	演奏一支曲子	271
		问题	275
277		习题解答	
299		汉英对照索引	
309		译后记	

引言



光和声

我们通过光和声感知这个世界。我们已经完善了几种相互交流的手段,这些手段的大多数要么用光,要么用声,或者二者并用。交流的最高形式是艺术,大部分艺术用光和(或)声作为它们的表达媒介。视觉艺术用光,因此我们能够看到艺术作品;音乐用声,因此我们能够听见它;而芭蕾、电影及伴有计算机图像的音乐视频作品则二者并用。

对于光和声的物理学以及我们的眼和耳如何探测它们的深刻而易懂的分析,不仅在精神上令人愉悦,而且有助于理解和解释我们身在其中的世界和在我们周围发生的一切现象以及我们如何感知它们——一句话,我们如何同我们这个行星、它的居民及其创造物交往。懂得光和声的物理学也能提高我们对艺术作品的欣赏能力,激励读者群中的艺术家加深他们关于所用媒介的知识,也许还能激发他们新的灵感。

物理学的英文名称 physics 来自希腊文 φυσικα(自然界),它是研究自然发生的有关能量或物质的现象的科学。如果我们能够理解一种自然现象,我们就对人类的总的知识作出了贡献;进一步我们常常还能利用它,用它为我们自己和地球上的其他人开发出一种更好的生活。我们认为这个令人激动的观念可以推广到艺术,通过理解支撑着艺术产品的物理现象激励艺术作品的创作。正是这个想法激发起我们的愿望,想要对艺术类和人文类专业的学生教授物理学,用简单的话语向一般的听众介绍物理学概念。

光和声二者都是波动现象。它们是不同的类型的波动——声是力学波,而光是电磁波,但二者都像一块石头扔进水塘之后的水面那样振荡。牛顿首先造出可见光的光谱这个词,并把可见光分解为七种颜色。为什么是七种?这个选择完全是随意的,这是牛顿与音阶的七个音类

比而选的。现在我们知道，正常的人眼能够分辨几乎一百万种不同的颜色！但是，我们仅把可见光谱分解为三种基本色：红、绿、蓝，后面我们将解释缘由。

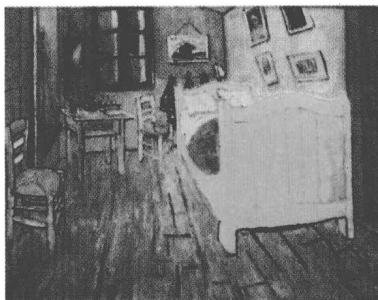
你是不是曾感到过奇怪，为什么人眼对叫做“光”的特殊辐射灵敏？虽然太阳发射的辐射经过大气层过滤之后含有可见部分，但也还有大量的红外光和紫外光到达地球表面。为什么我们不能看见这些部分呢？可见范围内的辐射能量与世界上的物体相互作用的效率最高，因此它最佳地告诉我们有关我们周围物体的结构和行为的信息。

可测量的电磁波谱从高能 γ 射线一直延伸到低频的无线电波。它的频率(或能量,或波长)覆盖了大约30个数量级。从我们所说的可见波段的开始到末端(从紫光到红光),频率的变化仅2倍。在音乐中,一个八度音程的频率就加倍。在可测量的电磁波谱中,频率加倍了100次($2^{100} \approx 10^{30}$)。用诗的语言说,我们仅能在一台理想化的有100个八度的电磁钢琴键盘上“看见一个八度”！但是在这个狭窄的区域里发生了这么多事情,因为这些能量的辐射与电子强烈地相互作用,产生出崎岖的、有趣的吸收光谱,后者又生成上百万种我们能分辨的颜色。

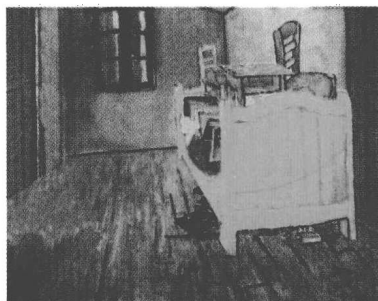
与光相比,我们听到的声音的频率范围要大得多。可以听见声音的频率范围是每秒20~20000次振动或20~20000 Hz。更高的频率或超声用于医学成像(10 MHz),以及被海豚(最高到170 kHz)、鲸类(最高到200 kHz)和蝙蝠(最高到120 kHz)用于交流。更低的频率或次声由地震、雪崩、火山爆发、核试验以至大象来产生——大象用来和10 km距离内的其他大象交流。

我们所感觉的颜色和声音不但依赖于物理的、可测量的激励,还依赖于我们的眼睛、耳朵和大脑对这些激励的生理和心理响应。因此,颜色和声音由一些心理-物理参量最佳地描述。这些参量我们将在后面详细讲述,描述颜色的参量是色调、饱和度和亮度,描述声音的参量是音高(音调)、响度和音色。一听就可以区分长号和中提琴的演奏,哪怕它们演奏的是完全相同的音。区分它们的属性叫做音色(“声音的颜色”——与光类比)或音品。

本书的目的并不是对艺术进行清理,使艺术理性化,用科学术语来解释艺术。做这件事的另有高明,请看下图。我们的目的是在对艺术的享受中增添一种成分——物理学。了解乐器的形状和功能有助于欣



卧室, 油画, 凡·高(1853—1990)
1888 年作。



清理凡·高在 Arles 的卧室,
Ursus Wehrli 作。

赏音乐。类似地,了解颜色、色觉和混色法只会扩展视觉艺术家的调色板的功能和增加一切观看他们的艺术的人的精神享受。

本书的两位作者在本书所有部分都是合作的,不过,Pupa Gilbert 对光学部分负主要责任,而 Willy Haerberli 则对声学部分负主要责任。我们希望你读得愉快!

光和光波

我们都有关于光和它的颜色、光强的变化、反射、折射、聚焦以及光在均匀介质中沿直线传播这些特性的体验。但是，我们缺乏对光的物理本性的直觉：它是由什么构成的，还有它的习性。在这一章，我们要讨论光的双重本性——它的行为怎样又像波又像粒子，我们还要讨论电磁波谱、不同介质中的光速和偏振。

在 17 世纪初之前，所有的人都以为光是由粒子组成的。17 世纪初，牛顿(Isaac Newton)和惠更斯(Christiaan Huygens)提出了两个相互挑战的光理论：惠更斯主张光是波，而牛顿坚持光是粒子。争论持续着，直到 20 世纪初大家才同意，组成光的粒子——光子的行为有时更像粒子，有时更像波。但是，它们在同一时刻永远既是粒子又是波。这叫做光的二象性。有几种现象可以把光考虑成波来解释，另外一些现象则把光考虑成粒子来解释更好。^①

如果你站立在浅的海水中，也许会注意到，你无法用身体阻挡波，波将会从身旁绕过。这个现象叫做衍射，它让波几乎不受打搅地绕过障碍物。波也会穿过一个小孔，并且似乎从小孔向四面八方发散，如图 1.1 所示。还有，当两条船的尾波结合在一起时，可以生成驻波。水面上，在两个尾波都是波峰的地方，生成一个两倍高的波峰；若一个地方两个尾波都是波谷，就生成一个两倍深的波谷。但是，在一个尾波为波峰而另一个尾波为波谷的地方，水面则不涨不落，在那里没有上下振动出现。这个现象叫做干涉。相长干涉产生两倍强度的波峰或波谷；相消干涉使波峰和波谷抵消。如果考虑两条狭缝，产生两组圆形波，将

^① 在一切包含有衍射、干涉、反射和折射的实验中，光的行为像波。在爱因斯坦的光电效应、普朗克热辐射和康普顿散射中，光的行为像粒子。

会看到类似的干涉效应。在图 1.2 中,两条黑线(波谷)或两条红线(波峰)相交的地方,发生相长干涉(实心圆点);一条红线和一条黑线相交的地方,发生相消干涉(空心圆点)。

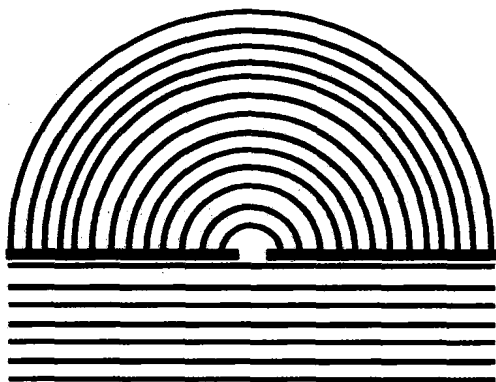


图 1.1 水面上的波的图示(俯视)。红线表示波峰,黑线表示波谷。一个平面波由图的下方向上传播。当它到达一堵带孔的墙之后,它便作为一个以小孔为圆心的圆形波传播。

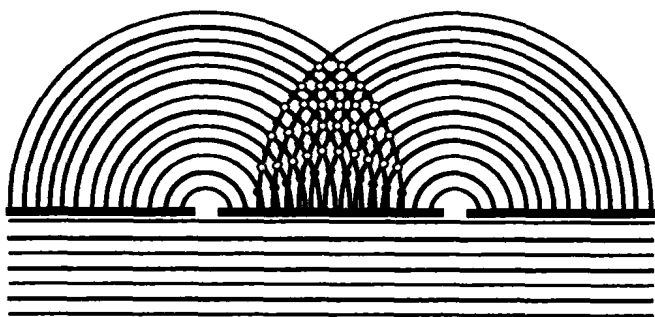


图 1.2 穿过两个小孔的同一个波发生干涉的图示。在两条红线相交处,生成一个两倍高度的波峰,在两条黑线相交处,生成一个两倍深度的波谷,这些都属于相长干涉(实心圆点)。在红线与黑线相交处,相消干涉使两个波相互抵消,水面不涨不落(空心圆点)。

杨(Thomas Young)在 1801 年做了一个著名的实验,在这个实验中,他用光代替水面波,用两个光束产生出非常相似的干涉现象。杨氏实验首次证明,光是由波组成的。在他的实验里,用一面镜子反射太阳

光,经过一块红色滤光镜过滤后,光束穿过一个针孔,投射到一间暗室中。在这里,用一张厚约 1 mm 的扑克牌,把它像图 1.3 所示那样放进光束中,将光束分为两束。两束光发生如图 1.2 所示的相长干涉和相消干涉,生成如图 1.3 所示的图样。

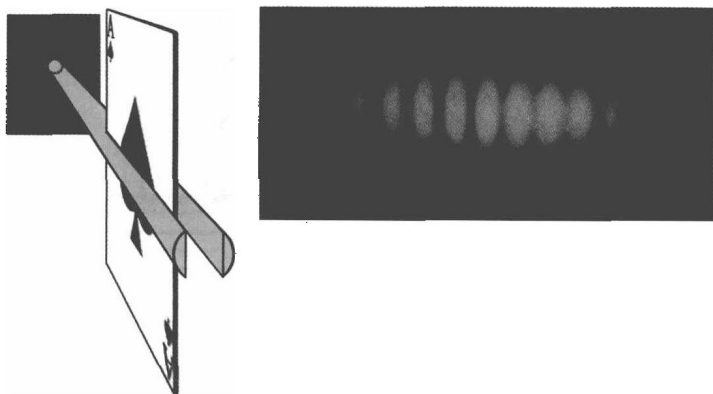


图 1.3 证明光的波动本性的杨氏实验。令一束太阳光经红色滤光镜(未画出)过滤后通过一个针孔,把一张扑克牌的边对着光束,使红光束分成两束(左图),两束光在扑克牌后产生的干涉图样(右图)。

人们常常以为杨是用两条狭缝做这个实验的。但事实上这种双缝做法很久以后才做出来。读者很容易重做图 1.3 中的实验,用一支激光笔或者太阳光(如果太阳光明亮)做光源并需要一个黑暗的房间。在用太阳光的情形下,重要的是要用一个有色的滤光镜;一定要用单色(单一波长)的光。

想不出有什么方法,能够使粒子在一处堆积很多,而在另一处堆积很少,以生成图 1.3 中的干涉图样。因此杨氏实验首次证明,光的行为的确像波。

在这个实验和其他把光解释为波更好的实验里,光与水面波或沿着弦行进的波的峰和谷有相似之处。对于光,振荡的是电场和磁场。它们都在垂直于行进方向的平面内振荡。我们对这些场都比较熟悉。磁场就是使一块磁铁吸铁的场,而电场则是使小纸片被吸向与羊毛(或干燥的头发)摩擦过的梳子的原因。

随着这些场在光波中振荡,向上的电场最强的地方、向下的电场最强的地方和电场为零的地方交替变动。整个图样与在水面波上看到的相似:光以一个传播速度 v 运动,并且和所有别的波一样,它有一个振幅、一个频率和一个波长,如图 1.4 所示。

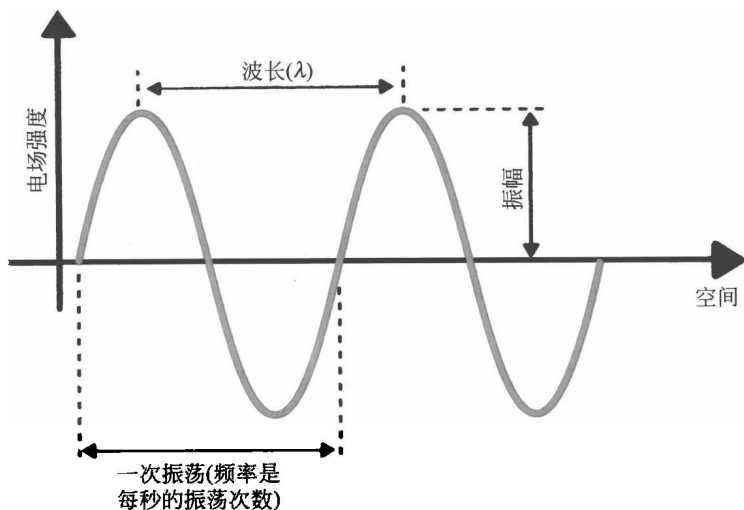


图 1.4 行进的光波在空间振荡。其半高度叫做振幅,相邻的两个波峰之间的距离是波长,用希腊字母 λ 表示,频率是 1 s 内的振荡次数。

不同颜色的光,波长不同。例如,蓝光的波长比红光短,如图 1.5 所示。

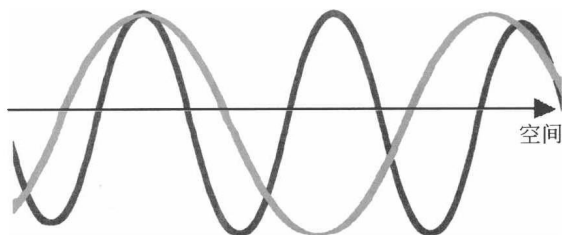


图 1.5 两个光波一边传播一边振荡。两个波的振幅相同,但蓝光的波长比红光的波长短。