

四色全彩



光与影的魔幻乐园：

有趣的透镜

(日) 桑嶋 干/著

潘路军/译



相机镜头怎样成像？

眼睛与眼镜如何让我们看清世界？

从丰富多彩的透镜中

体验最先进的光学技术……

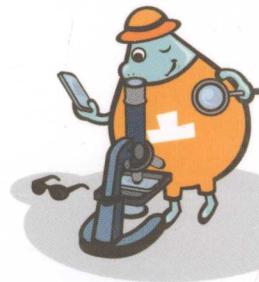
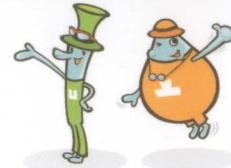


科学出版社



光与影的魔幻乐园：

有趣的透镜



这是一个色彩斑斓、变幻莫测的光学世界。

相机镜头是如何成像的**?**

眼睛与眼镜有何机理?****

复印机、激光打印机包括什么**光学器件?******

从多姿多彩的**透镜到光学**的尖端技术……

透镜的神奇世界，欢迎充满好奇心的你！

科学出版社 东方科龙公司
联系电话：010-82840399
E-mail：boktp@mail.sciencep.com
有关网址：<http://www.okbook.com.cn>

销售分类建议：科普/通俗读物

www.sciencep.com

ISBN 978-7-03-031885-5

9 787030 318855 >

定 价：32.00元



光与影的魔幻乐园：

有趣的透镜

(日)桑嶋 干/著
潘路军/译



科学出版社
北京

内 容 简 介

在我们生活的世界中,各种各样的事物和现象,其中都必定包含着“科学”的成分。在这些成分中,有些是你所熟知的,有些是你未知的,有些是你还一知半解的。面对未知的世界,好奇的你是不是有很多疑惑、不解和期待呢?!“形形色色的科学”趣味科普丛书,把我们生活和身边方方面面的科学知识,活灵活现、生动有趣地展示给你,让你在畅快阅读中收获这些鲜活的科学知识!

对眼镜、照相机、复印机、激光打印机等仪器设备来说,透镜、镜子等光学器件绝对不可或缺!本书正是为那些对光学和透镜感兴趣的人们特别准备的。有趣的科学、实用又先进的技术、清新愉悦的阅读体验,欢迎到这座神奇的光影魔幻乐园畅游一番!

本书适合青少年读者、科学爱好者以及大众读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

光与影的魔幻乐园:有趣的透镜/(日)桑嶋 干著;潘路军译.—北京:
科学出版社,2011

(“形形色色的科学”趣味科普丛书)

ISBN 978-7-03-031885-5

I. 光… II. ①桑… ②潘… III. 透镜-普及读物 IV. TH74-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 143834 号

责任编辑:唐璐 王炜 赵丽艳 / 责任制作:董立颖 魏谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:柏拉图创意机构

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

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>

北京美通印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 8 月第一 版 开本: A5(890×1240)

2011 年 8 月第一次印刷 印张: 7

印数: 1—6 000 字数: 196 000

定 价: 32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛书序



拥抱科学，拥抱梦想！

伴随着20世纪广域网和计算机科学的诞生和普及，科学技术正在飞速发展，一个高度信息化的社会已经到来。科学技术以极强的渗透力和影响力融入我们日常生活中的每一个角落。

“形形色色的科学”趣味科普丛书力图以最形象生动的形式为大家展示和讲解科学技术领域的发明发现、最新技术和基本原理。该系列图书色彩丰富、轻松有趣，包括理科知识和工科知识两个方面的内容。理科方面包括数学、理工科基础知识、物理力学、物理波动学、相对论等内容，本着“让读者更快更好地掌握科学基础知识”的原则，每本书将科学领域中的基本原理和基本理论以图解的生动形式展示出来，增加了阅读的亲切感和学习的趣味性；工科方面包括透镜、燃料电池、薄膜、金属、顺序控制等方面的内容，从基本原理、组成结构到产品应用，大量照片和彩色插图详细生动地描述了各工科领域的轮廓和特征。“形形色色的科学”趣味科普丛书把我们生活和身边的方方面面的科学知识，活灵活现、生动有趣地展示给你，让你在畅快阅读中收获这些鲜活的科学知识！

愉快轻松的阅读、让你拿起放不下的有趣科学知识，尽在“形形色色的科学”趣味科普丛书！

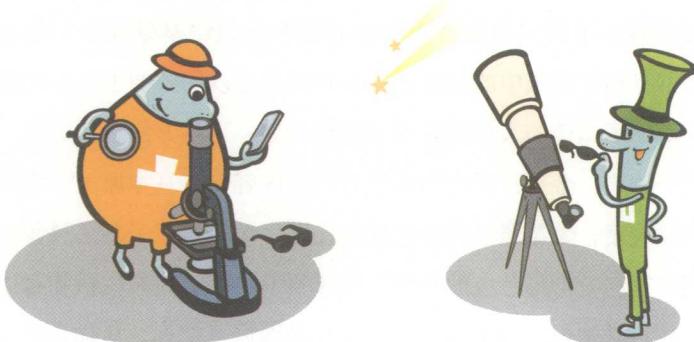
出场人物介绍

★ 青蛙：跳跳



本书的主角。擅长制作各种小玩意儿，对任何事物都抱有浓厚的兴趣。渴望着将来亲自制造出具有划时代意义的产品。

★ 向导



小凸透镜（爱称胖仔）

天真烂漫的性格，擅长总结性思考。以收藏眼镜而自豪，和瘪肚是要好的伙伴。

小凹透镜（爱称瘪肚）

虽有些神经质，但实际上擅长于将事情放大了来解释。是不可貌相的“大肚汉”。和胖仔在一起时，具有矫正辅正的技能。

前　言

在我们身边,有许多利用光的产品,如照相机、望远镜、CD/DVD 播放器、复印机、激光打印机等。透镜和反光镜等光学部件就是支撑这些光学仪器的关键器件。当今透镜是支撑先进技术的基础性工具,肩负着必须在新技术诞生之前先行进化的使命。因此,透镜是随着人类智慧的发展而不断进化的工具。

大家拿到这本书,可能是因个人对透镜感兴趣而希望学习的,也可能是因为工作关系必须要了解透镜的。查找有关透镜的书,可以发现有许多专业书籍,而简单的入门书籍则很少见。利用光学的入门书籍也可以学到透镜的原理和功用,但它们毕竟不是以透镜为主题,学不到有关透镜的全面综合的知识。因此本书是考虑到对非透镜专业的人,即使自认为对物理知识不那么精通的人,作为一本能浅显易懂地学习从光学的基础知识到透镜的基础知识及其应用的入门书而执笔的。

笔者曾在 2005 年得到写作『図解入門 よくわかる最新プラスチックの仕組みとはたらき』(秀和 System)这一入门书籍的机会,这本书极力避免和透镜无关的光学知识以及有关透镜复杂应用例子的解说,取而代之的是想要更深入地挖掘和解释在透镜学习上所必需的知识。同时,由于本书是彩色版的,因此在作图顺序的说明上下了功夫。对于各位读者朋友而言,本书若能够起到打开透镜世界之门的作用,或者起到连接透镜专业书的桥梁作用的话,我将无比欣喜。

最后,对给予本书的执笔机会,承担编辑工作的 SOFTBANK Creative(软银创作)的中右文德先生及各位同仁致礼。

桑嶋　千





有趣的透镜

目录

第1章 浅谈透镜

001	透镜是巧妙利用光的折射而发明的工具	2
002	透镜的历史	4
003	将小物体放大观察的显微镜的历史	6
004	将远处的物体移近观察的望远镜的历史	8
005	记录透镜所成像的照相机的历史	10

COLUMN 透镜(lens)的词源

12

第2章 光的行为举止

006	光的直线传播和可逆性	14
007	光的反射定律	16
008	光在平面镜上的反射	18
009	光的漫反射	20
010	通过透明物体的光	22
011	光在物质的界面弯曲 光的折射	24
012	光选择什么样的路径传播 费马原理	26
013	斯涅尔定律①	28
014	斯涅尔定律②	30
015	空气的扰动使光弯曲① 阳炎和逃逸之水的原理	32
016	空气的扰动使光弯曲② 海市蜃楼和蒙气差的原理	34
017	通过三棱镜得到的彩带 光的色散	36
018	天空中飘起光的彩带 彩虹的形成原理	38
019	彩虹为什么是圆弧形的	40
020	光的本性是波还是粒子① 光的衍射	42
021	光的本性是波还是粒子② 光的干涉	44

022	光的衍射和干涉所引起的彩虹 肥皂泡和CD盘上的彩虹原理	46
023	光是纵波还是横波 偏振①	48
024	偏振眼镜和布儒斯特定律 偏振②	50
025	光是电磁波的成员	52
026	光速是多少	54
027	考虑到光的行为举止的几何光学和波动光学	56

COLUMN 近场光——突破光的衍射极限的光

58

第3章 透镜的原理和作用

028	点光源发出的光是怎样传播的	60
029	影子的形成方式	62
030	针孔成像	64
031	针孔照相机成像	66
032	透镜的基本原理	68
033	凸透镜和凹透镜的基本功能	70
034	透镜的焦点和焦距	72
035	透镜的主点和主平面	74
036	薄球面透镜焦距的计算方法	76
037	光通过透镜后的传播方式	78
038	凸透镜成的实像	80
039	从无穷远处传来的光通过凸透镜后在哪儿成像	82
040	凸透镜成的虚像	84
041	遮住半个凸透镜后实像和虚像如何变化	86
042	物体位于焦点的位置上时实像和虚像如何变化	88
043	凹透镜成的虚像	90
044	透镜的成像公式和放大率① 凸透镜成实像的情况	92
045	透镜的成像公式和放大率② 凸透镜成虚像的情况	94



046	透镜的成像公式和放大率③ 凹透镜成虚像的情况	96
047	透镜成像公式的总结	98
048	计算透镜放大率的另一个方法	100
049	透镜成像作图的技巧① 从光轴上的一点发出射向 凸透镜的光线	102
050	透镜成像作图的技巧② 以任意倾角射向凸透镜的光线	104
051	透镜成像作图的技巧③ 光线通过凹透镜的情况	106
052	通过两片透镜的光线	108
053	凹面镜和凸面镜的原理	110
054	由凹面镜和凸面镜反射的光线	112
055	透镜的分类方法	114
056	利用界面折射的透镜① 球面透镜	116
057	利用界面折射的透镜② 非球面透镜	118
058	利用界面折射的透镜③ 柱面透镜	120
059	利用界面折射的透镜④ 环面透镜	122
060	利用界面折射的透镜⑤ 菲涅尔透镜	124
061	非利用界面折射的透镜① 格林(GRIN)透镜(渐变 折射率透镜)	126
062	非利用界面折射的透镜② 衍射透镜	128

COLUMN 光学超物质——具有负折射率的物质

130

第4章 透镜的性能

063	制作透镜的光学玻璃所需的特性	132
064	光学玻璃的折射率	134
065	光学玻璃的阿贝数	136
066	光学玻璃的分类	138
067	玻璃之外的光学材料① 天然或人造晶体	140
068	玻璃之外的光学材料② 光学塑料	142

069	透镜制作① 球面透镜的制作方法	144
070	透镜制作② 非球面透镜的制作方法	146
071	什么是像差	148
072	什么是球差	150
073	球差的矫正	152
074	彗差和像散	154
075	像场弯曲和畸变	156
076	位置色差和倍率色差	158
077	像的大小和亮度	160
078	F 值和有效 F 值	162
079	数值孔径 NA 和透镜的分辨力	164
080	光阑和光瞳	166
081	光阑的位置和焦阑	168
082	焦深和景深	170

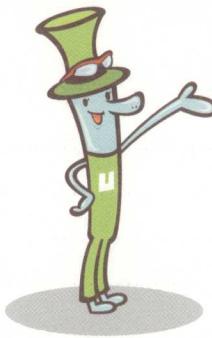
COLUMN 玻璃为什么是透明的

172

第 5 章 使用透镜的身边物品的原理

083	人眼的构造	174
084	眼睛的原理和功用	176
085	近视和远视	178
086	老花眼和散光	180
087	隐形眼镜的原理	182
088	放大镜原理	184
089	放大镜的放大率	186
090	光学显微镜的原理① 基本原理	188
091	光学显微镜的原理② 放大率和分辨力	190
092	望远镜的原理① 基本原理	192
093	望远镜的原理② 开普勒式望远镜的光路	194

094	望远镜的原理③	荷兰式望远镜的光路	196
095	望远镜的原理④	望远镜的放大率	198
096	望远镜的原理⑤	为什么要对焦	200
097	照相机的原理①	F 值和快门速度	202
098	照相机的原理②	像角和焦距	204
099	照相机的原理③	数码相机的像角和焦距	206
100	进化的透镜	流体透镜的原理	208
COLUMN 像反转系统——将倒立像变为正立像来观察			210
参考文献			211



第 1 章



浅谈透镜

刚开始我们不谈复杂的话题，先简单确认一下透镜到底是什么样的东西，接着简单回顾一下我们人类利用透镜的历史。



001

透镜是巧妙利用光的折射而发明的工具

我们身边有许多利用透镜的工具，比如眼镜、放大镜、照相机、望远镜、显微镜等。此外，利用光技术的装置大多都使用透镜。例如CD、DVD等的驱动器、激光打印机和复印机等设备中透镜都是作为部件组装进去的。激光也被称为是“光技术的支柱”。

透镜是由玻璃或塑料等透明的物质制作而成的。透镜一般是圆形的，其单面或双面呈球面。球面外凸的叫凸透镜，球面内凹的叫凹透镜。凸透镜有聚光的作用，而凹透镜有散光的作用。

透镜的作用基于光的折射。比如装水的杯子里直的吸管看上去是弯折的，澡盆中手或指头看上去较短。像这样光从一种物质射入另一种不同物质时，在其界面具有改变传播方向的性质。这种现象叫光的折射。利用光的折射性质而自由自在地聚光或散光的工具就是透镜。

透镜的主要功用就是使光折射，从而聚光、散光和成像。放大镜之所以能将物体放大观察，还可以聚光，就是因为凸透镜可以使光折射，将光的前进方向向汇聚方向改变的缘故。反过来凹透镜具有使光发散的作用。根据使用目的的不同，改变透镜的大小及球面的形状，或将多片透镜组合起来，人们就可以主动地决定光的集聚方式、发散方式及像的放大率。透镜可以说是人类巧妙利用光的折射而发明的工具。

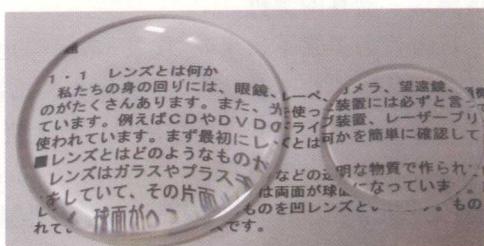
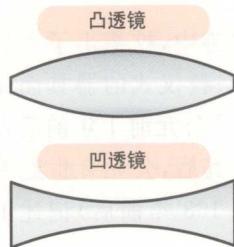


- 中心部位凸出的透镜叫凸透镜，凹进的透镜就叫凹透镜
- 透镜是利用光的折射现象聚光或散光的工具

图1 DVD驱动器的读写部位



图2 凸透镜和凹透镜

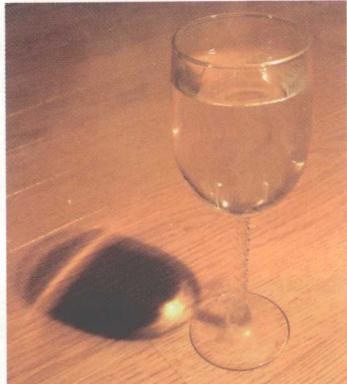


凸透镜将文字放大

图3 看上去弯折的吸管



图4 聚光的葡萄酒杯



002

透镜的历史

清晨观察植物时,可以看到树叶上有许多水滴排列着附在叶尖。这样的水滴称为露珠。露珠和雨停后的水滴及大气中的水蒸气遇冷凝结出的霜不同,它是一种植物生理现象,是从叶子的水孔排出多余的水分而形成的水滴。临近细看一下露珠,会看到被放大了的叶子表面,或注意到其映照着倒立的景色。露珠,简直可以说是大自然造出的透镜。我们的祖先于远古时代也应该发现了露珠,只是他们将这种现象当成是日常之事,自然地接受了吧。然而和光的折射有关的各种现象,无疑是人类创造出透镜这一器具的契机。

从古代的美索不达米亚、埃及、希腊等地的遗迹中,挖掘出了水晶球或玻璃球。但那些不是透镜,而是作为装饰品或宗教仪式的器具而使用的。最初记述水晶球和玻璃球还可以放大观察的是公元前1年前后古代罗马的哲学家塞内加(Lucius Annaeus Seneca)。其后,公元2世纪前后希腊的托勒密(Claudius Ptolemaeus,83年前后~168年前后)记述了玻璃球的放大作用及光的折射。

11世纪前后,阿拉伯学者阿尔哈曾^(注1)(Alhazen-Haitham,965~1039)详细地总结了人眼的构造及光的折射。13世纪前后,英国修道士罗杰·培根(Roger Bacon,1214~1294)推进了透镜的应用^(注2),使凸透镜作为放大镜而被广泛使用。人年纪大了都会眼花,越来越看不清近处的东西。在最初的时候,特别是知识分子阶层的人们对放大镜有需求。15世纪前后,在意大利的威尼斯迎来了玻璃制造的全盛期。在意大利可以制造出老花镜和近视眼镜,并扩大到了世界各地。



- 凸透镜作为放大镜的使用是透镜被广泛应用的契机
- 早期的放大镜是用水晶和绿柱石制成的高价贵重的物品

注1:被称为光学之父。

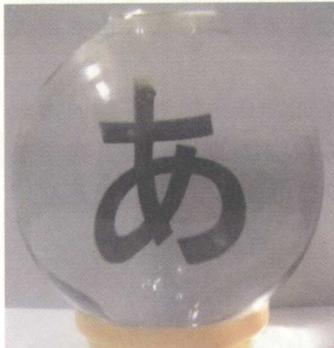
注2:还考虑了利用两片透镜制作显微镜和望远镜的原理。

图1 植物制成的自然透镜



露珠 (照片提供者: 岩槻秀明 あおぞら☆めいと <http://wapichan.sakura.ne.jp/>)

图2 正立像



用装水的圆底烧瓶观看近处的文字

图3 倒立像



通过装水的圆底烧瓶观看一段距离以外的钟表



003

将小物体放大观察的显微镜的历史

显微镜比望远镜领先一步,由荷兰的杨森父子于1590年前后发明的,但是其发展要比望远镜缓慢。因为当时作为将物体放大观察的工具,有一片凸透镜制成的放大镜或许就足够了^(注1)。

英国的罗伯特·胡克(Robert Hooke,1635~1703)使用2片透镜制成了放大率为数十倍的复式显微镜,对各种动植物进行了观察。他发现软木中有无数小房间,并给这些房间起名叫cella^(注2)。他在1665年出版的《显微图集》一书中,登载了100多张动植物的绘图。同期,荷兰的安特尼·范·列文虎克(Antoni van Leeuwenhoek,1632~1723),使用一个玻璃球做透镜制成的单式显微镜对微生物进行了观察。他于1674年发现了微生物,于1676年发现了细菌。他的显微镜结构虽然很简单,但放大倍率达到了200倍以上。

由于光具有波动的性质,要用显微镜观察和光的波长同样大小物体,光线就会发散,物体看上去要模糊,这是发生了衍射的现象。德国的阿贝(Ernst Karl Abbe,1840~1905)和蔡司(Carl Friedrich Zeiss,1816~1888)仔细研究了衍射现象,成功地使光学显微镜的分辨率有了飞跃性的提高。然而只要是利用光来观察,可以确定光学显微镜的放大倍率最大到数千倍就是极限了。

1931年发明了电子显微镜,可以用来观察光学显微镜看不到的微观世界。电子显微镜的放大倍率可达10万倍以上,能看到病毒等。光学显微镜虽然达不到电子显微镜的倍率,但结构和操作很简单,目前仍然被广泛使用,其性能也在不断提高。



- 具有一片透镜的为单式,具有数片透镜的为复式
- 光学显微镜的倍率一般为数十到数百倍,数千倍则为极限

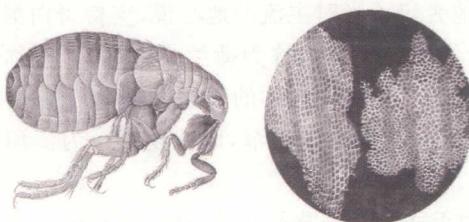
^{注1}: 显微镜与其说是作为科学工具,不如说是作为高级工艺品而传播开来的。

^{注2}: 拉丁语,是细胞的意思,英语为cell。

图1 罗伯特·胡克的显微镜

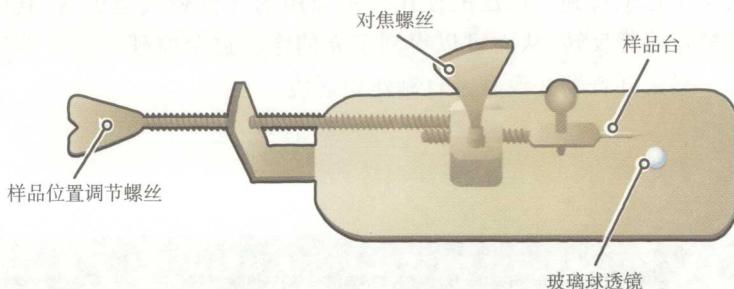


图2 跳蚤和软木的绘图



摘自《显微图集》(罗伯特·胡克著、永田英治·板仓圣宣翻译、假说社)

图3 列文虎克的显微镜



1608年荷兰的眼镜工匠汉斯·利伯希(Hans Lippershey, 1570~1619)将凸透镜(物镜)和凹透镜(目镜)嵌入筒的两端制成了望远镜,向荷兰政府申请了专利。荷兰政府对利伯希的望远镜给予很高的评价,并给了他奖金。其后,利伯希开始了制造和贩卖实用的望远镜,他被称为是望远镜的发明者^(注)。

意大利的伽利略(Galileo Galilei, 1564~1642)改良了荷兰发明的望远镜,独自制作了天文望远镜。他在1609年进行了天体观察,发现了木星及土星的卫星、月球的环形山、太阳黑子的运动、金星的盈亏等。从这些观察结果出发,他否定了当时主流的地心说,支持哥白尼的日心说。凸透镜和凹透镜组合而成的望远镜称为荷兰式望远镜(或称伽利略式望远镜)。这种望远镜能够看到放大物体的正立像而且结构简单,但是其缺点在于增大倍率时视野会变得极端狭窄,因此现在作为实用的望远镜几乎不再被使用了。

1611年德国的天文学家开普勒(Johannes Kepler, 1571~1630)为了解决荷兰式望远镜视野狭窄的缺点,设计出用两片凸透镜组合的望远镜。这种望远镜称为开普勒式望远镜。这种望远镜虽然看到的是放大物体的倒立像,但视野宽,可以提高倍率,而且倒立像在实用上也没有问题,因此作为天文望远镜得到了广泛的使用。地面用的开普勒式望远镜,其内部放入三棱镜将像反转,从而可以得到正立的像。这个原理也是开普勒设计出的。只是开普勒并没有亲自制作望远镜。



- 望远镜的发明人一般认为是汉斯·利伯希
- 望远镜分为荷兰式望远镜和开普勒式望远镜

注:有关望远镜的发明者有诸多说法,尚不清楚最初设计望远镜的人是谁。

图1 荷兰式（伽利略式）望远镜

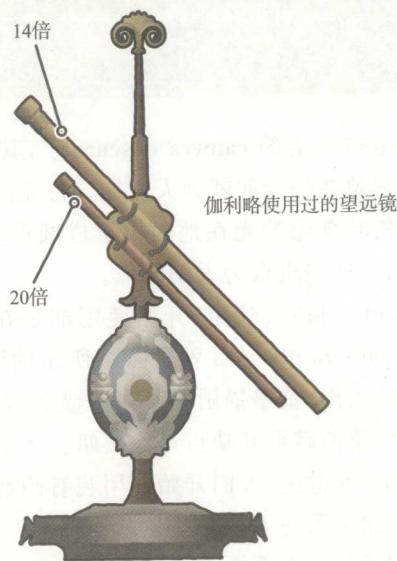
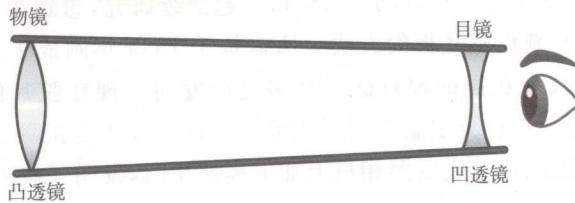
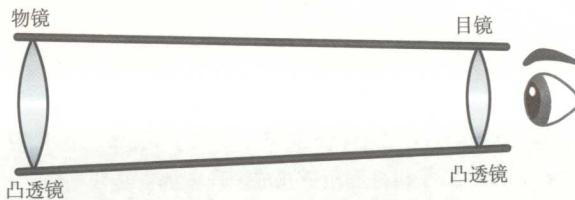


图2 荷兰式（伽利略式）望远镜和开普勒式望远镜的区别

荷兰式（伽利略式）望远镜



开普勒式望远镜



记录透镜所成像的照相机的历史

照相机的语源是拉丁语的 **camera obscura**^(注)，其原理是光的针孔成像现象。针孔成像现象在公元前就为人所知。公元前4世纪希腊的亚里士多德注意到穿过树叶缝隙的光在地面上形成圆形光斑，在日食时圆光斑出现欠缺，从而确认这些斑点为太阳的像。

而 camera obscura(暗室、暗箱)开始使用却是在约2000年后的15世纪前后。初期的 camera obscura 就是图2所示的漆黑的暗室，其目的是用来观察日食时的太阳，临摹描画投影在墙壁上的景色等。

利用针孔成像现象的暗箱其缺点是像很暗。为了解决这个问题人们使用了凸透镜。到了16世纪，人们开始使用装有凸透镜的暗箱。由于使用了透镜，暗箱就更加实用化了。

暗箱只能使人看到像，而不能作为照片留下来。1826年法国的约瑟夫·尼普斯(Joseph Nicéphore Niépce, 1765~1833)用天然沥青做感光材料成功地进行了摄影。其后尼普斯和同样是法国人的达盖尔(Louis Jacques Mandé Daguerre, 1787~1851)一起继续研究，想到在镀银铜板上发生碘反应而制成感光板的方法。达盖尔于1839年制成了达盖尔型银版照片。1871年英国的理查德·马多克斯发明了现在胶片的原型溴化银明胶干板后，这种方法就成为了主流。这种干板感度高，只需数秒的曝光就可以拍出照片。之后照相机上加上高速快门，发明了胶片，照相机就普及大众了。



- 初期的照相机是利用针孔成像现象的针孔照相机
- 在照相机上使用凸透镜后就得到了明亮的像

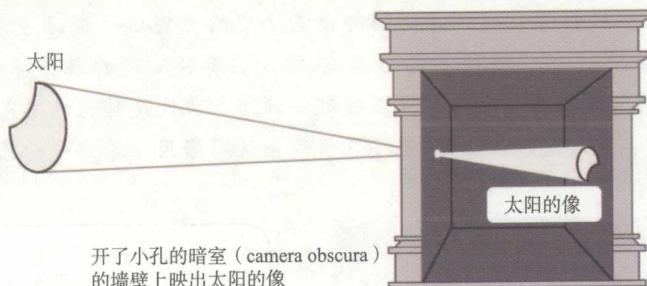
注：camera 是房间的意思，obscura 是黑暗的意思。

图1 针孔成像现象



日食时透过树叶的阳光。在地面呈现欠缺的太阳像

图2 初期的暗室



开了小孔的暗室（camera obscura）
的墙壁上映出太阳的像

图3 装有凸透镜的暗箱（camera obscura）



透镜

调节皮腔折盒
的长度来对焦

屏幕映出的像



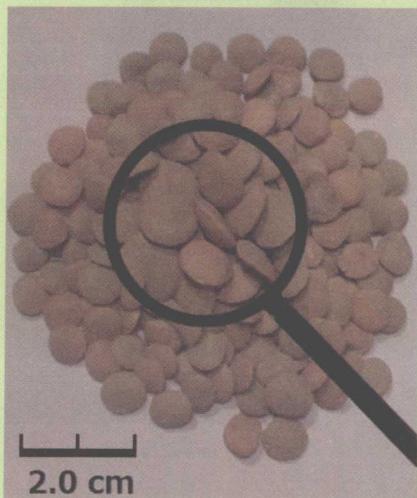
COLUMN

透镜(lens)的词源

镜子的英语为 mirror, “mir-”有“吃惊地看”的意思。可见对于古代人来说，镜子是不可思议的贵重物品。

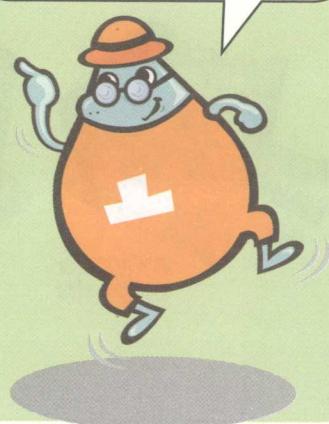
透镜和镜子一样是和光有关的装置，但实际上透镜一词并没有聚光、放大观察等的意思。透镜这一名称是来源于扁豆(Lens culinaris)这个名称。由于凸透镜的外形和扁豆相似，就被命名为透镜(lens)。扁豆原产于地中海沿岸，是人类从公元前就开始作为食物而栽培的植物。

透镜的日语是レンズ(和英语的发音相同，译者注)，不是什么特别的名称。第二次世界大战时使用的却是汉语中的透镜这两个汉字，现在(在日本，译者注)レンズ虽然不再叫透镜，但是装有レンズ的器具，如眼镜、显微镜、望远镜的名称中至今仍使用镜这一汉字。可能是作为利用光的器具，镜子的历史要比透镜长，人们习惯将镜这一汉字沿用在透镜中的缘故吧。



扁豆

扁豆的英语为lentil，拉丁语为lens，希腊语为phakos。透镜的英语为lens，由于白内障而引起的晶状体的缺损称为opakia(无晶状体症)，这些都是源于扁豆的词语



第 2 章



光的行为举止

透镜是控制光的器具，要理解透镜的基本原理和功能，就必须了解有关光的行为举止的知识。这一章我们就来了解和确认光的基本性质。





006

光的直线传播和可逆性

我们身边有许多发光的物体。发光物体有本身发光的物体，还有反射光的物体。像太阳和电灯那样本身就发光的物体称为光源。夜空中明亮的月亮只是反射太阳光，因此不是光源。

我们可以看到太阳或电灯等光源^(注)。本身不发光的物体，用光源照射后也可以看到。**图1**所示，我们之所以能看到太阳或电灯等光源，是因为从光源发出的光射入了我们的眼睛内。而我们之所以能看到本身不发光的物体，是因为从光源发出的光照射在该物体上，在物体表面向四面八方反射的光进入了我们的眼睛。所以我们看物体是需要光的。在没有一点光的黑暗之处我们是看不到任何物体的形状和颜色的。

我们都看到过从云缝或百叶窗的缝隙中笔直射入的光线，或汽车的前灯平直向前照射的光线吧。**图2**的相片所示，在烟雾中打开手电筒或激光笔时可以清晰地看到光的路径。

像这样光具有笔直前进的性质称为光传播的直线性。光的行走轨迹称为光线，用直线和箭头表示。光线在没有烟雾和尘埃等微粒的真空中是看不见的。我们之所以可以看到光线，就是因为**图3**所示的光被微粒散射(漫反射)的结果。

然而，面对面的两个人可以目光相接意味着从己方眼睛发出的射向对方眼睛的光和对方眼睛发出的射向己方眼睛的光是沿着同一路径而相互交错的。另外在镜子中可以看到自己的面容，意味着在某一路径上行进的光反向后，光会沿着传来的路径原路返回。也就是说，光的行进方式是可逆的，这称为光传播的可逆性。



- 光的轨迹称为光线，光线是不能直接看见的
- 光是直线前行的，其行进方式是可逆的

注：太阳或发出强光的电灯，注意不要直接用眼观看。

图1 物体的观察方式和光的行进方式

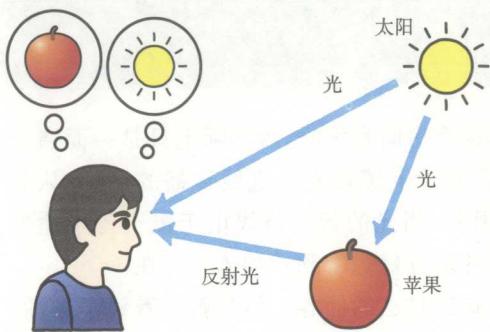


图2 直线前进的光



图3 可看到激光笔光线的原因

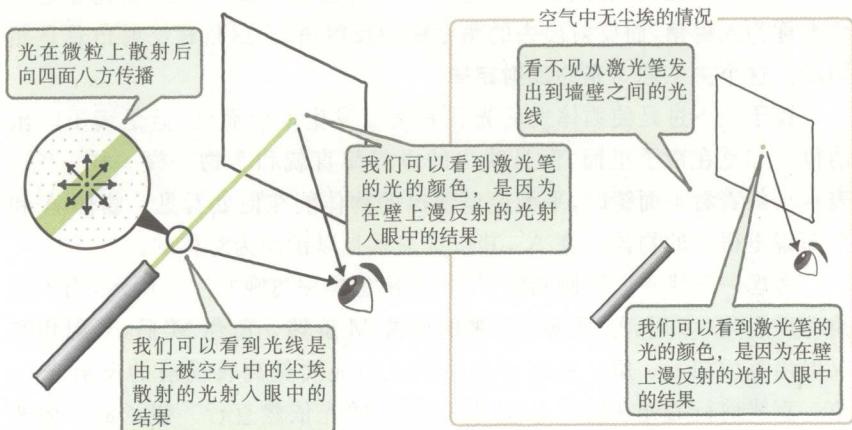
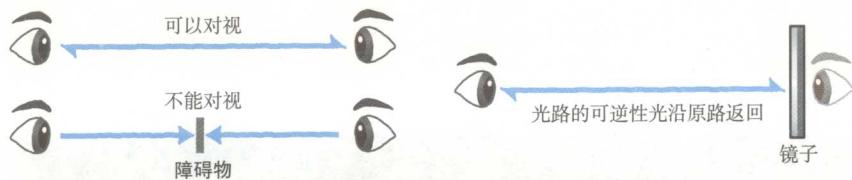


图4 光的路径是可逆的



007

光的反射定律

你可能有过这样的经历吧,这个房间真大呀,可实际上只是一面墙上贴上了大镜子而已。由于我们在经验上感知光是直线传播的,总是认为光源或物体在光传来的方位。因此,当光的行进路线由于镜子等中途弯折后,人们总会在原本没有物体的地方好像看到了物体的存在。

从正面观看平面镜,镜子里映出自己的面容。但是斜着看镜子的话,镜子里映出的不再是自己的面容,而是其他的场景。如图1所示,光垂直照射在镜面上时,光将从射来的方向返回,但是倾斜入射时,就会倾斜地折返出去。因此,斜着照镜子时是看不到自己的脸的。光照在镜面上的角度称为入射角,而反射出去的角度称为反射角,入射角和反射角总是相同的。这个关系称为光的反射定律。

镜子只不过是使物体发的光在其表面发生反射而已,但是镜子映出的世界却是在镜子里面,而且映出的世界简直就是和实物一模一样。图2表示出斜着看平面镜时,平面镜里映出的物体能在何处看见。物体A和平面镜里得到的物体像A',其位置关系是以镜面为对称的。

考虑一下将平面镜倾斜时,反射光将怎样偏离呢?图3所示,当入射角=反射角= θ 时,平面镜从原来的位置M旋转 α 角到M'后,入射角和反射角都增加了 α 角。从而转动后的反射光要偏离转动前的反射光 2α 角。直线前行的光在镜子上反射,反射后的光依然直行。镜子的方向改变后,光的前行方向也发生变化,但光的直线前进性却不会改变。



- 光在物体表面反射时,入射角=反射角
- 物体和在平面镜中成的像是以镜面为对称面而相互对称的

图1 光在平面镜上的反射

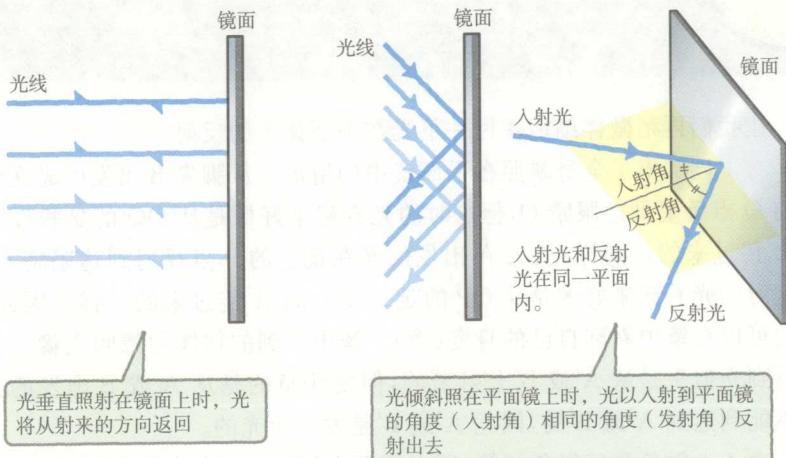


图2 平面镜中的像的观察方法

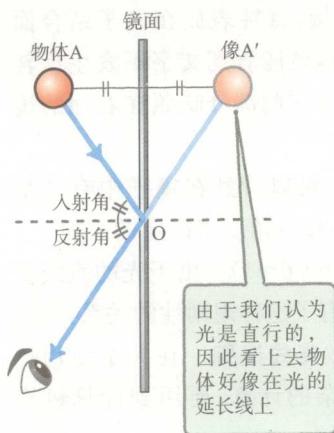
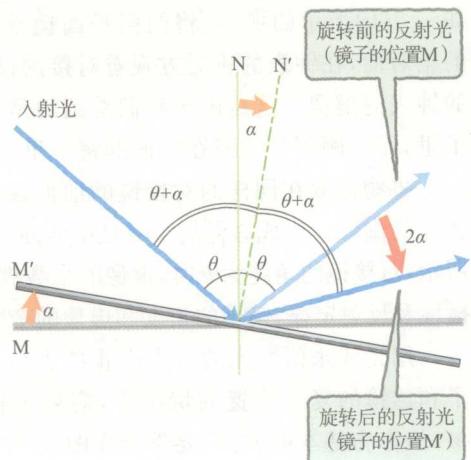


图3 平面镜倾斜时的光路



008

光在平面镜上的反射

让我们再稍微详细地探讨一下光在平面镜上的反射⁽¹⁾。

图1显示出了全身映照在平面镜中的情形。从脚尖B出发的光在镜子的Q点反射到达眼睛O,但这时的光看起来好像是从OQ的延长线上的B'传过来的。同样,从头A出发的光在镜子的P点反射到达眼睛O,但这时的光看起来好像是从OP的延长线上的A'传过来的一样。因此,人们可以在镜中看到自己的身姿(像)。镜中看到的物体的像叫虚像。我们看到光似乎是从A'或B'上射来的,但要注意的是从A或B出发的光是不能到达A'或B'的,因此A'或B'是发不出光的。

由于入射角和反射角相等,所以要照出物体全身所需镜子的大小,与物体和镜子间的距离无关,是物体大小的1/2。

如图2(a)所示,在平面镜前放置一个钟表,则映出的文字是反转的。如图2(b)所示的那样,将两面平面镜垂直对接,将钟表放在镜子结合面的正对面,在钟表的正后方观看对接的镜子时,就能看到文字不发生反转的钟表的虚像。这是由于我们看到的是钟表的左侧部分映照在右面的镜子里,而右侧部分映照在左面的镜子里。

将物体放在同样的对接镜的前面观察时,可以看到在镜子中有3个物体的虚像。所成虚像的个数是由两面镜子对接的角度来决定的。如图3所示,对接镜的角度为θ时,虚像的个数就是($360/\theta - 1$)。由于光的直线传播性和反射定律,镜子的角度和虚像的个数就有了这样规则性的关系。

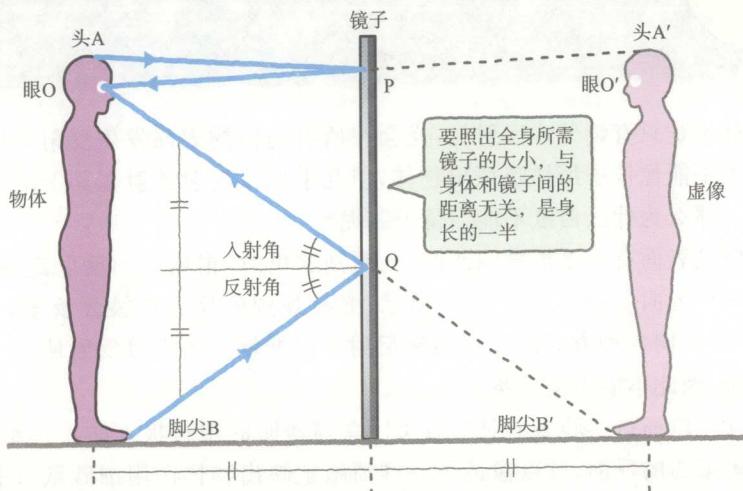
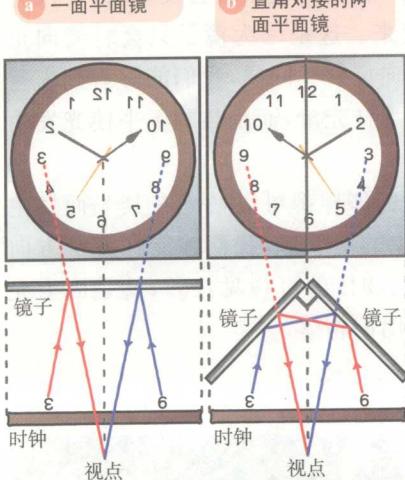
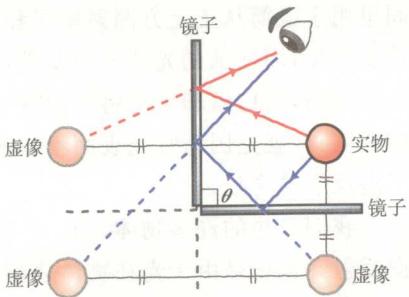
用光线来研究光的行为举止的方法,叫做光线追踪。在大量使用镜子和透镜的复杂装置的情况下,需要进行复杂的计算,要用到计算机模拟,但作为基本的方法,要学会作图。



- 在镜子中看到的像是虚像
- 用光线来研究光是怎样行进的方法叫光线追踪

注:表面是球面的镜子叫凸面镜或凹面镜。有关凸面镜和凹面镜的作用在第3章说明。

图1 全身映照在平面镜中时的光路

图2 用对接镜(90°)映照时钟时的观察方式图3 对接镜(90°)所成的虚像

$$\text{虚像的数目} = (360/\theta - 1)$$

90° 时有3个

60° 时有5个

30° 时有11个

009

光的漫反射

并不是只有镜子才反射光，光会在所有物体的表面发生反射。比如白纸虽不能像镜子那样映照出物体，但几乎可以反射照射在其上的所有的光。那么为什么白纸不能当镜子照呢？

白纸表面有许多细微的凸凹，光照到这里时，根据光的反射定律，光将向各个方向反射。如图1(a)所示，光有规则的反射叫镜面反射，图1(b)所示光向各种方向的反射叫漫反射。白纸就是由于漫反射使光线相互混杂，因此不能当镜子照。

这可以通过实验来验证。在CD盒等透明的塑料板上贴上黑纸，在贴有黑纸面的反面，可以像镜子一样清晰地映出物体。用细砂纸打磨这个表面的话，该表面会发白，就映照不出物体了。这是由于塑料的表面磨出了细小的凸凹从而发生了漫反射的缘故。

我们在观看物体时，漫反射是非常重要的。如图2所示，在黑暗的房间里用手电筒从正上方照射镜子和白纸，在侧旁观察就会发现，镜子没有什么变化，而白纸的光照部分却明亮起来。这是因为镜子只会将光向正上方反射，而白纸却可以将光向各个方向反射。同样，我们能够看到夜空中的明月，就是因为月亮表面不像镜子那样光滑，而是凸凹不平使光发生了漫反射的缘故。

我们身边的许多物体，如图3所示的那样都可以使光在其表面发生漫反射。也正是由于光在物体表面发生的漫反射，我们才能在各个方向上看到物体的形态和颜色。镜子或透明物体的可视见性差，就是因为光在镜子上发生了镜面反射，或穿过了透明的物体。



- 光在物体表面向各个方向的反射称为漫反射
- 我们能够看到物体就是由于漫反射的缘故

图1 光的正反射和漫反射

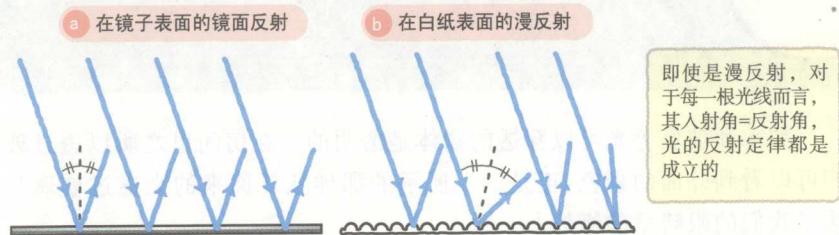
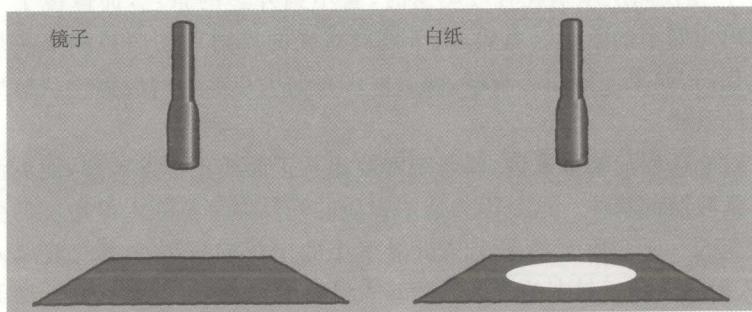


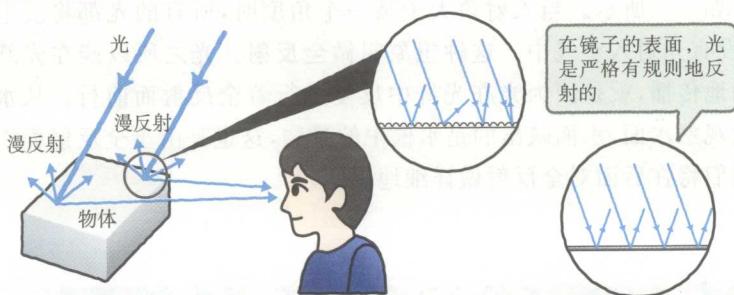
图2 用手电筒照射白纸和镜子的情形



从看不到光源在镜子里的映像的地方观察，即使用光照射镜子表面，镜子也依旧是黑的

可看到白纸表面上光照射的地方是明亮的

图3 物体发生漫反射而可见的情况



透明的冰被打成冰块后，其表面看上去发白；细波荡漾的湖面也映照不出景物，就是由于光的漫反射造成的

010

通过透明物体的光

如水和玻璃等光可以穿透的物体是透明的。在房间里之所以透过玻璃可以看到外面的景色，正是图1所示的那样从外面来的光透过玻璃到达了我们的眼睛里的缘故。

光入射到透明物体时，如图2所示，或在物体的表面反射，或射入物体^(注)。在夜间从屋里观看玻璃窗时，看不到外边的景色，而像镜子一样映照出房间中的景物。当然，由于玻璃对光的反射率在白昼和夜晚是没有变化的，如果注意用心观察，就会发现在白天也能看到玻璃中映照出房间中的景物。

对于透明的物体来说，斜着观察要比从正面或正上方观察，能更清晰地看到映照的物体。这是因为透明物质的光反射率是随入射角度的变化而改变的。图3所示的是光从折射率小的空气向折射率大的玻璃入射时，入射角 θ 和反射率的关系。随着入射角的增大，反射率增高。摩天大楼上部的玻璃窗像镜子一样映射出蓝天白云，远处平静的湖面或池塘的水面可以清晰地映出周围的景物，就是因为看到的是入射角(反射角)大的光线。

光从折射率大的玻璃向折射率小的空气入射时，入射角 θ 和反射率的关系如图4所示。当入射角大于某一个角度时，所有的光都将发生反射，而没有光射入空气中。这种想象叫做全反射。光之所以能在光纤中无泄漏地传播，就是因为光在光纤中反复进行着全反射而前行。从水槽的侧面观察水面，水面映出的是水槽中的景物，这也是由于全反射而引起的。我们将在后面对全反射做详细地说明。



- 透明物质对光的反射率因入射角而不同
- 光不透过透明物质而全部反射的现象叫全反射

注：在图2中，入射光进入玻璃时，光在空气和玻璃的界面发生弯折，这将在(011)中说明。

图1 由于光可以透过玻璃，因此可以看到外面的景色

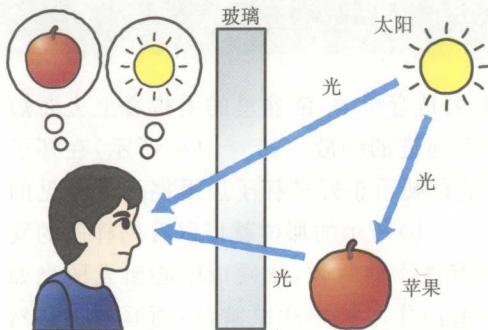


图2 光从空气向玻璃入射时的情形

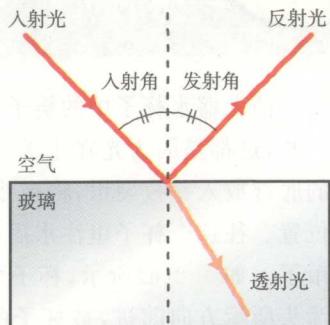
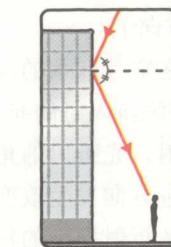
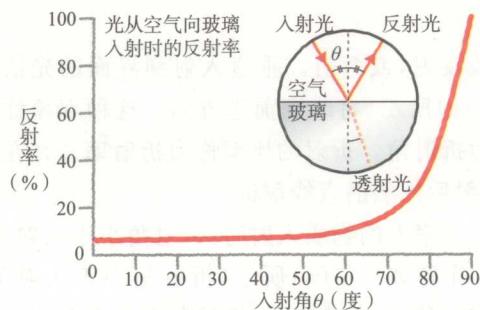
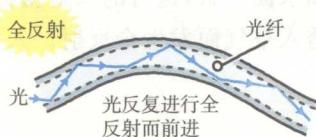
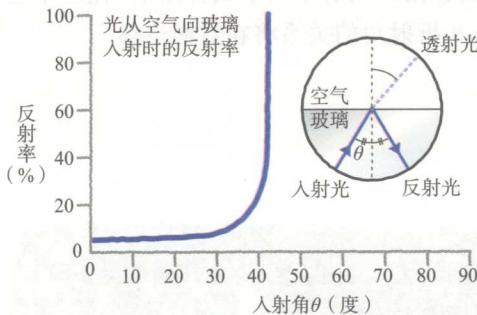


图3 入射角和玻璃的反射率的关系①



从摩天大楼高处的玻璃上反射来的光其入射角(反射角)大,因此反射率高

图4 入射角和玻璃的反射率的关系②



011

光在物质的界面弯曲 光的折射

插入盛水杯子中的筷子看上去是弯折的,浴盆里的手指看上去要短一些,这都是因为光在水面弯折而前进的缘故。如图1(a)所示,在杯子的底部放入一枚硬币,将视线固定在硬币正好被杯子边沿挡住看不见的位置。往这个杯子里注水后,如图1(b)所示的那样就可以看到杯底的硬币了。如图2(a)所示,杯子里没有注水的时候,从硬币中心出发的光如箭头所示方向前进,被杯子的边沿挡住不能到达眼睛,因而看不见。然而,如图2(b)所示,杯子里注入水后,从硬币中心出发的光在水面弯曲,可以到达眼睛。这时我们看到硬币好像位于沿从眼睛出发的逆行光线OP'的方向上。

光在空气和水的界面上或反射,或弯折。垂直入射到界面的光依然直行,但倾斜入射的光,如图3(a)所示,将改变前进方向。这种现象称为光的折射。光折射的角度称为折射角。折射的比率称为折射率。光在折射时前进方向发生改变,但折射后依然沿直线前进。

光从折射率小的物质向折射率大的物质入射时,折射角小于入射角。从而光从空气向水中入射时,光路如图3(a)所示,折射角小于入射角。反之,光从水中向空气中入射时,如图3(b)所示,折射角大于入射角。如图3(c)所示的那样,增大入射角,使折射角正好达到 90° ,折射光的方向和水面一致,这时的入射角称为临界角。入射角大于临界角后,光就不会透入空气而发生全反射。入射角和折射角的关系将在后面论述。



- 折射角<入射角(折射率小→大); 折射角>入射角(折射率大→小)
- 光发生全反射时的入射角叫做临界角

图1 杯子底部的硬币



图2 从硬币发出光线的路径

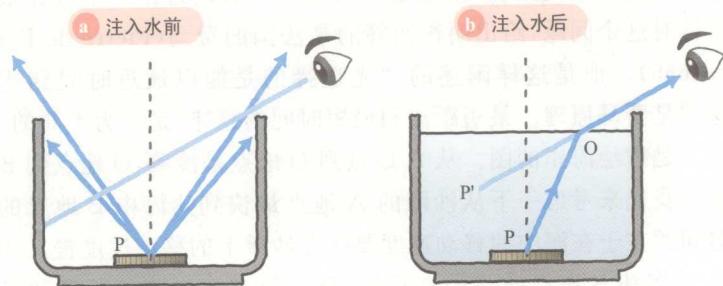
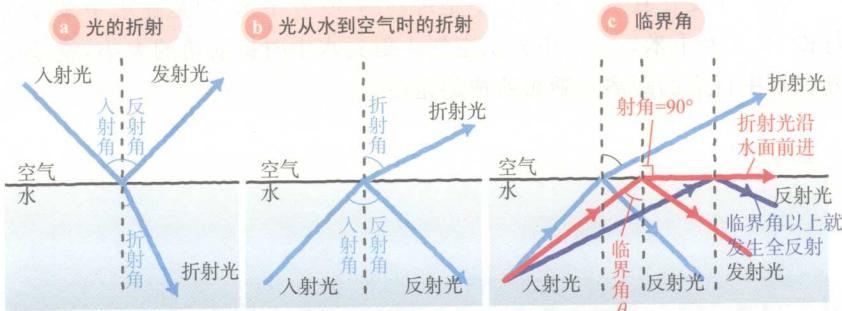


图3 光的折射和全反射



012

光选择什么样的路径传播 费马原理

光在镜面反射,或在水面折射,其传播方向发生改变,但之后都是沿直线前进的。到底光选择什么样的路径传播呢?

在图1中,从A地点到B地点有无数的路径。例如可以从A地点经由O地点到B地点,也可以从A地点曲曲折折地到B地点等。但是,一般来说我们会选择直线连接A地点和B地点这一距离最短的路径吧。

光在同一种物质中传播,或从一种物质中垂直射入另一种物质中时,都是沿距离最短的路径前进的。但是如图2所示,光倾斜射入另一种物质时并不是选择最短路径,而是在界面弯折。那么为什么不选择最短路径呢?针对这个问题,给出明快回答的是法国的费马(Pierre de Fermat, 1601~1665)。他是这样阐述的:“光选择的是能以最短时间到达的路径。”这就是费马原理。最短距离和最短时间的意味,是大为不同的。

图3是描绘海岸的图。从A地点到O地点是沙滩,O地点到B地点为海水。我们来考虑一下从沙滩的A地点最快到达海中B地点的路径吧。但问题在于在海中的移动速度要比在沙滩上的移动速度慢。用直线连接A地点和B地点的路径①是最短的,但在海中跑的距离却是最长的。从而能最快到达B地点的是经由O地点的路径②。

光的速度在真空中或空气中是每秒约30万千米,但是在水中减慢到每秒22.6万千米。图2中光从空气入射到水中时折射角的大小,就是使光在水中行走的距离为最短所成的角度。



要点
CHECK!

- 光以能最短时间到达的路径传播
- 光在折射率连续变化的物质中是弯曲前行的

图1 能以最短距离到达的路径

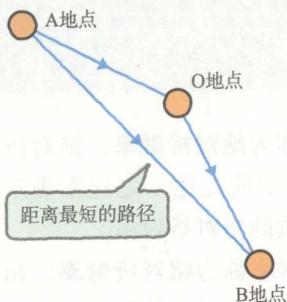


图2 光折射时的路径

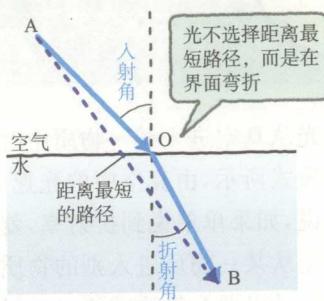
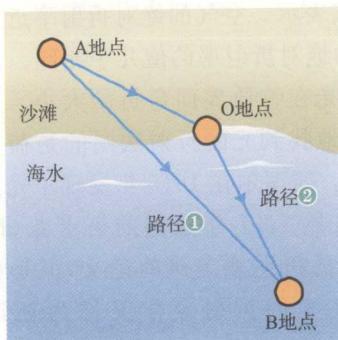


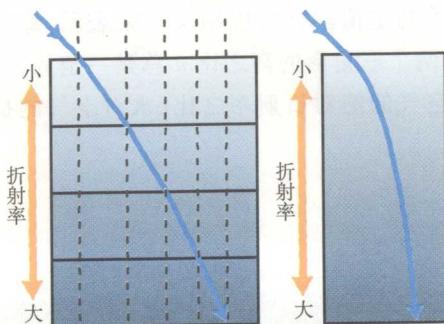
图3 可最短时间到达的路径



费马原理

光在真空中或相同物质中使其能以最短距离=最短时间的直线前进，通过折射率不同的物质时，是以最短时间的路径前进的。费马说明了实际观察到的光的路径就是时间最短的路径。费马原理是在1679年由费马的儿子发表的

图4 在折射率不同的物质内通过的光路



直线并不一定是最短距离

光通过由不同折射率的物质层状叠放而成的物体时，光在各界面折射而前进，而光在折射率相同的物质中是直线前进的。如果将各层的厚度减小，则光在一层中直线行进的距离将减小。因此在折射率连续变化的物体中，光在物体内是弯曲着前进的

光从真空进入某一物质中时的折射率称为绝对折射率。绝对折射率，如①式所示，由真空中的光速 c 和在物质中的光速 v 之比来表示。一般来说，如果单单说到折射率，就是指该物质的绝对折射率。

光从某一物质进入别的物质中时的折射率称为相对折射率。相对折射率式是以两个物质的绝对折射率之比来表示的。光从物质1进入物质2时，物质1和物质2的绝对折射率分别是 n_1 、 n_2 ，物质1和物质2中的光速分别是 v_1 、 v_2 ，则相对折射率可用②式表示。空气的绝对折射率近似为1，物质对空气的相对折射率和该物质的绝对折射率的值几乎相同。

知道了物质的折射率，就可以求出光在物质界面弯折的大小。光的折射现象本身古时就为人所知，但定量地找到光的折射法则的是荷兰的斯涅尔(Willebrord Snell, 1580~1626)。斯涅尔在1615年发现了光的折射定律，但并没有作为论文留下来。虽然1637年法国的笛卡儿(Rene DeScArteS, 1596~1650)留下了有关光的折射率定律的论文，但是由于光的折射定律是斯涅尔发现的，现在光的折射定律又称为斯涅尔定律^(注)。

斯涅尔及笛卡儿发现的光的折射定律就是：“入射角的正弦和折射角的正弦之比是和入射角的大小无关的定值。”这可以用图1来表示，即入射光和法线、折射光和法线所成的两个三角形的高之比 n 总是一定的。 n 在此图中是指水的绝对折射率和空气的绝对折射率之比(水对空气的折射率)、也就是水的绝对折射率。



- 可以由折射率求出光在界面弯折的程度
- 入射角的正弦和折射角的正弦之比是不依赖于入射角的定值

注：在法国许多光学书上都记为笛卡儿定律，或笛卡儿·斯涅尔定律。本书中记为斯涅尔定律。

$$\text{绝对折射率 } n = \frac{\text{真空中的光速 } c}{\text{物质中的光速 } v} \quad \dots \dots \dots \text{①式}$$

$$\text{相对折射率 } n_{12} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{\text{物质2的绝对折射率 } n_2}{\text{物质1的绝对折射率 } n_1} \quad \dots \dots \dots \text{②式}$$

表1 各种物质的折射率

物质	对钠黄光D线 (589.3nm) 的 折射率
空气 (0°C)	1.000292
水 (20°C)	1.3330
冰 (0°C)	1.309
乙基乙醇	1.3618
石英玻璃	1.4585
水晶	1.5443
金刚石	2.4195

(出处:『理科年表』国立天文台編、丸善)

图1 斯涅尔及笛卡儿发现的光的折射定律

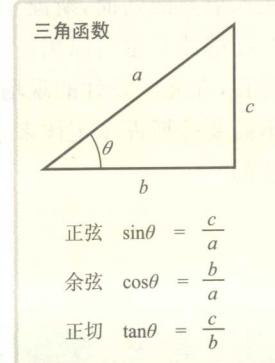
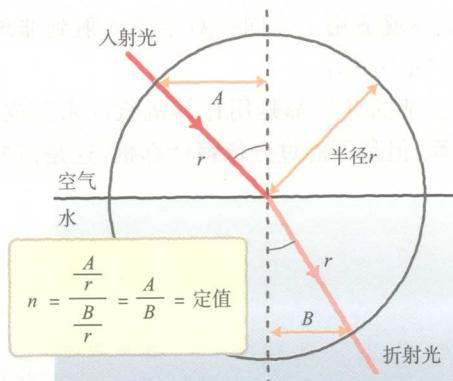


图 1 表明了斯涅尔定律。表 1 总结出了光从空气入射到水中时入射角和折射角的关系。 $\sin\theta_1$ 和 $\sin\theta_2$ 的比值总是一样的, 即空气的折射率。入射角为 0° 时, 光处于垂直水面射入的状态, 这时光是直线前进的, 折射角为 0° 。另外, 入射角为 90° , 光处于沿水面前进的状态。

从光传播的可逆性原理可知, 光从水中射入空气中时入射角和折射角的关系和表 1 得到的结果相同, 只是要将入射角和折射角交换。

图 2 是光从水中射入空气中时用斯涅尔定律求得的发生全反射时的临界角。水的临界角 θ_1 是 48.75° , 即入射角超过 48.75° 后就会发生全发射, 光将不再进入空气中。

图 3 表示的是在水中的潜水员向水面上看时所能看到的景物。从水中向水面望时, 由于临界角的外侧发生全反射, 会像镜子一样映出水中的景物。而能看到水上景色的只有临界角内侧的部分, 因此水上的样子看上去是圆状的。

用斯涅尔定律可以求出光在两个折射率不同的物质界面会有多少角度的弯折。例如在透镜的情况下, 光折射的界面是球面, 如图 4 所示, 但考虑光入射点的切面, 斯涅尔定律就适用了。同样对于光入射到非球面或复杂面的路径也可以用斯涅尔定律来求。

现在, 在光学设计的现场, 复杂的计算都是用计算机软件来完成的。虽然不需要按斯涅尔定律来手算, 但是不能过分依赖计算机, 这是需要我们注意的^(注)。



- 水的临界角是 48.75°
- 利用斯涅尔定律可以求出在各种形状表面的折射角

注: 麻烦的计算交给计算机去做, 和彻底理解理论是两回事。

图1 斯涅尔定律

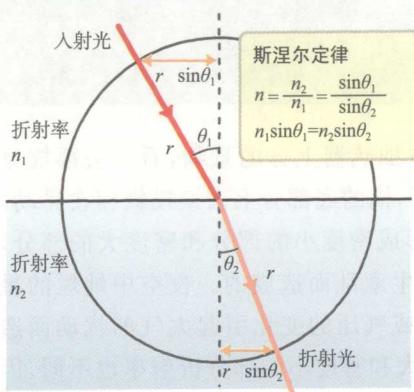


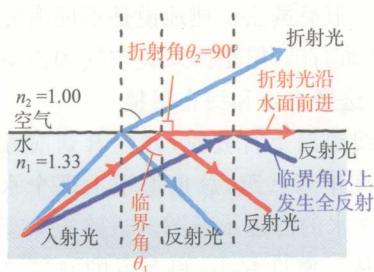
表1 水的折射率的计算

空气 ($n_1=1.0$) 和水 ($n_2=1.33$) 的情况下入射角和折射角的关系

θ_1	θ_2	$\sin\theta_1/\sin\theta_2$
0°	0°	-
15°	11.22°	1.33
30°	22.08°	1.33
45°	32.12°	1.33
60°	40.63°	1.33
75°	46.57°	1.33

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2} \sin\theta_1\right)$$

图2 水的临界角的大小



由于 $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ ，
根据 $n_1=1.33$, $n_2=1.00$, $\theta_2=90^\circ$ 得
 $\sin\theta_1 = \frac{\sin 90^\circ}{1.33} = \frac{1}{1.33}$
 $\theta_1 = 48.75^\circ$

图3 从水中向水面上看的时候

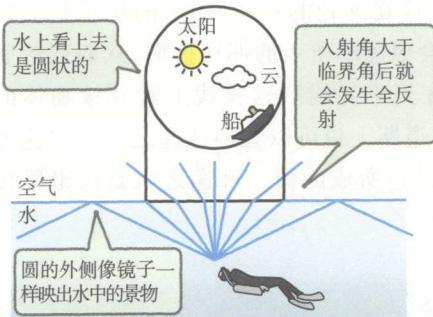
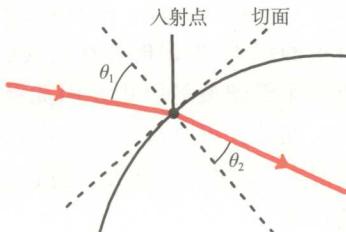


图4 界面是球面的时候



015

空气的扰动使光弯曲①

阳炎和逃逸之水的原理

我们一定看到过蜡烛的火焰及电加热器上方的景物，看上去摇摇晃晃的。还有用煤气炉加热盛水的锅时，锅的底部看上去模模糊糊在晃动。这些现象是由于空气或水被加热后形成密度小的部分和密度大的部分，因此引起光的折射，使其行进方向发生紊乱而造成的。夜空中灿烂的星星看上去一闪一闪的，也是由于气温或气压的变化引起大气的扰动而造成的。像这样，即使相同物质中密度大和密度小的部分折射率也不同，因此物体看上去在晃动。

图1是从喷气式飞机喷出的热气，造成后方的景物看上去在晃动时拍下的照片。这种现象称为阳炎。阳炎虽然单纯地说是不同密度的空气相互混杂在一起，使景色看上去晃动而已，但是如果暖空气和冷空气分层并形成了密度梯度的话，就会造成逃逸之水和海市蜃楼。

暑夏晴朗的日子里开车在直线道路上行驶时，就会看到前方似乎有类似水洼的东西存在。但是无论汽车怎么跑，总也追不上那个水洼。这种现象叫逃逸之水。图2是逃逸之水的原理示意图。道路被太阳光加热后，贴近路面的下方空气被加热，从而密度变小，和上方的空气之间形成了密度的梯度。光具有在密度越高的介质中折射越大的性质，因此光会在空气的密度梯度中弯曲前进。这样在远处的物体（图中的例子是前方行走的汽车）发出的光在空气层中会像图中所示的那样折射，从而到达后方汽车驾驶员的眼中。因此就会在到来光线的延长线上看到该物体的像。在前方没有汽车行走的笔直的道路上也可以看到逃逸之水。在这种情况下，水洼其实是天空或远处的景色所成的像。逃逸之水是海市蜃楼的一种。



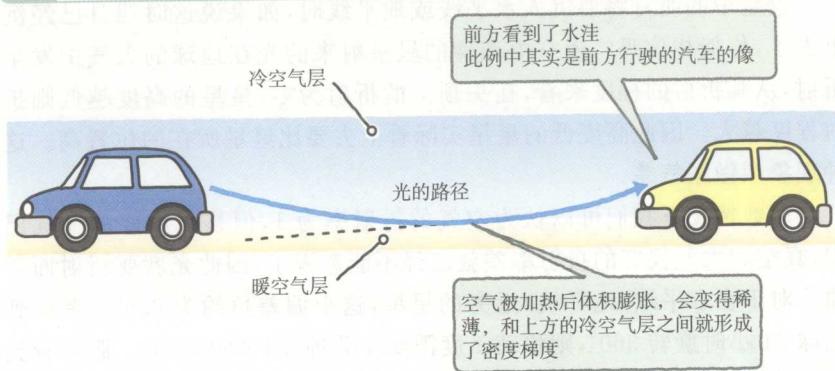
- 即使同一种介质由于密度不同折射率也不同
- 密度梯度形成后折射率的梯度也就形成，光就要弯曲

图1 喷气式飞机所排热气形成的阳炎



发动机后方的景色看上去在晃动

图2 逃逸之水的形成原理



即使同一种介质由于密度不同折射率也要改变，光的前进方式就会发生改变



016

空气的扰动使光弯曲② 海市蜃楼和蒙气差的原理

在中国古代的传说中,有巨大的蛤蜊妖物口吐妖气造了一栋楼阁的故事。同时15~17世纪前后的大航海时代,也有许多海上出现妖物的报告。这些传说或现象的本源就是海市蜃楼。发生海市蜃楼时,存在着上下温度不同的空气层。

图1所示,接近海面,空气变冷,而上方的气温暖时,在远处的某个建筑物看起来会向上延伸。这叫做上现蜃景。反过来,图2海面附近温暖,而上方寒冷时,则建筑物看上去向下延伸,或有浮起来的感觉。这叫下现蜃景。

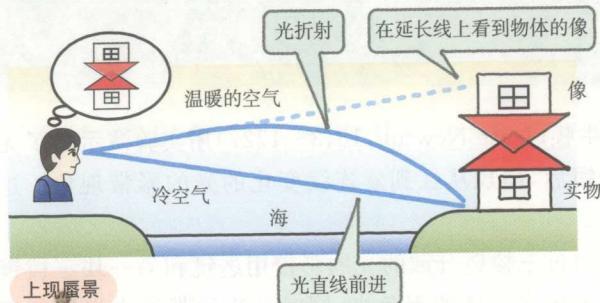
夜空中的明月将要沉入水平线或地平线时,如果说这时明月已经沉下去了,你能相信吗?夜空中璀璨的星星射来的光在地球的大气中发生折射,从其折射的程度来看,在头顶上的折射为零,星星的高度越低则折射程度越大。因此高度低的星星实际看上去要比星星所在的位置高。这种现象叫做蒙气差。

多数情况下我们可以认为空气的折射率为1,但是在厚厚的大气层中,真空和大气仅有的折射率差就已经不能忽视了,因此光就要折射而弯曲。对于在水平线(地平线)近旁的星星,这个偏差角约为 0.6° 。考虑到地球24小时旋转 360° ,则移动1度需要4分钟($24 \times 60 / 360$)。眼睛看到的月球直径,换算成角度的话约为 0.5° ,从月球的最下沿接触地平线到完全沉入地平线需要约2分钟。而月球和地球之间的距离约38.4万km,在月球反射的光约1.28秒后到达地球。从这些事实来看,月球将沉之时,月球的实体已经沉入到地平线以下了。



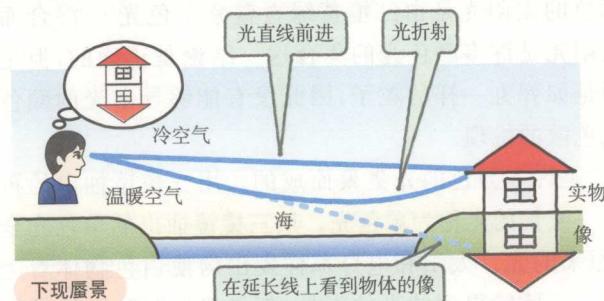
- 温度差造成了空气的折射率梯度(密度梯度)
- 由于光在大气中折射产生蒙气差

图1 上现蜃景的形成原理



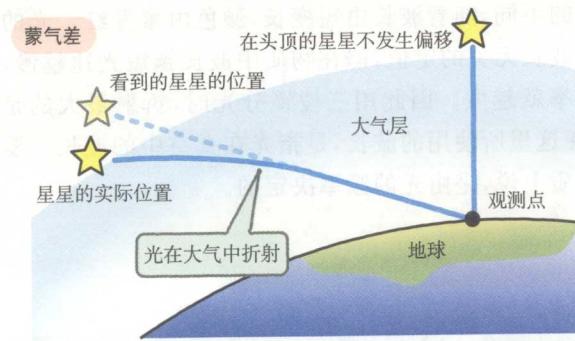
光由于呈上凸型折射而前行，因此很多情况下可以看到被地平线或水平线遮住的建筑物或轮船。在平常什么也看不见的地方会出现风景，这样的蜃景称为上现蜃景

图2 下现蜃景的形成原理



这是经常可以看到的蜃景。(014)中说明的逃逸之水就是下现蜃景。远处的岛屿等看起来好像浮在空中一样的浮岛现象，其本质就是下现蜃景

图3 蒙气差的原理



太阳也是同样的。但是太阳的情况下，太阳距离地球有1.5亿km，光从太阳到达地球需要8分19秒，即使没有蒙气差，太阳的表观位置和真正的位置也是不同的

017

通过三棱镜得到的彩带 光的色散

1666年，英国的牛顿(Isaac Newton, 1643~1727)用实验演示出了无色的太阳光通过三棱镜后，出现从红到紫连续变化的光的彩带现象。这个现象称为光的色散。

牛顿发现如果将通过三棱镜分散的光的彩带用透镜和另一块三棱镜聚集后又恢复到了和太阳光一样的无色光，同时从光的带彩中提取任意2种颜色的光再使其混合后，可以得到其他颜色的光。他给光的彩带取名为光谱。并得出无色的太阳光是由红橙黄绿青蓝紫7色光^(注)混合而成的结论。无色的太阳光是许多颜色光的集合这一结论是正确的，但是牛顿认为光不是波而是如弹丸一样的粒子，因此没有能够导出光的颜色本质及光发生折射或色散的机理。

太阳光或电灯光，是许多颜色的光集聚而成的。用三棱镜抽出的再也分散不了的具有单一波长的光称为单色光。用三棱镜抽出的单色光全部汇集后，又回复到原来的光。太阳和电灯那样发出的使白色物体看上去是白色的光叫白光。三棱镜得到的光的彩带，都是我们眼睛可以感知的光，这个范围的光称为可见光。

光的颜色就是波长的不同，随着波长由短变长，颜色由紫变红。光的速度在真空中虽然是和波长无关的定值，但在物质中波长越短光速越慢，即波长越短物质的折射率就越大。因此用三棱镜分光时，折射最大的是波长短的紫光。另外，在这里所使用的波长，是指光在真空中的波长。要注意的是光的颜色从本质上说，是由光的频率决定的。



- 用三棱镜将光按波长分解的现象叫做光的色散
- 光即使在通过相同物质的时候，也是波长越短折射越大的

注：当时，7是神圣的数字，人们考虑到音乐的音符是从 dao 到 xi 的7个音阶。太阳光也是由7种基色组成的。

图1 三棱镜引起的光的色散，及牛顿所做的实验

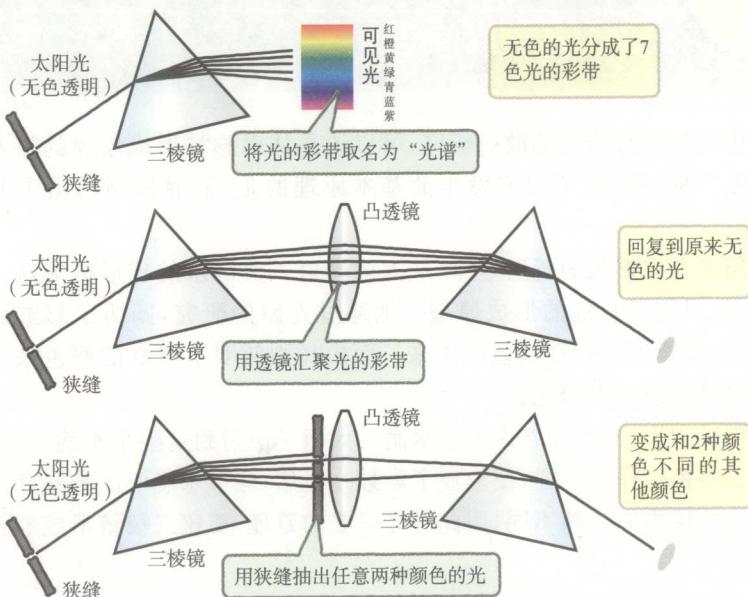
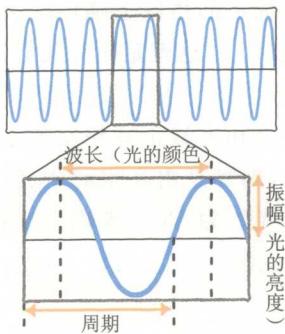
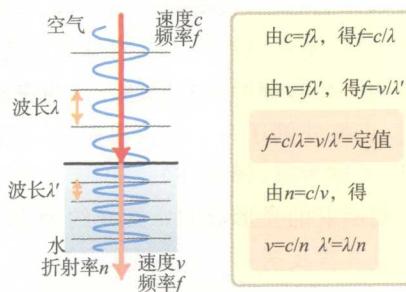


图2 光波的原理



波振动一次的时间称为周期，波在一秒内振动的次数称为频率

图3 从空气中进入水中的光波



光从空气进入水中时，光的速度和波长将减少到水的折射率分之一，但是频率不变

光的颜色由波的频率决定

光从空气射入水中时，速度减小，波长变短。频率无论在空气还是水中都不变。光的颜色是由频率决定的。而光的颜色由波长决定这一说法中的“波长”，含有默认为“真空中”的波长”的意思

018

天空中飘起光的彩带 彩虹的形成原理

由折射引起的光的散射研究,可以说是从对彩虹形成原理的探索开始的吧。最先解释了彩虹发生的基本原理的是,前面提到的笛卡儿和牛顿。

笛卡儿根据光的折射定律,从太阳光射入盛满水的球形玻璃这一实验入手,研究了彩虹的形成原理。他通过光路的研究,阐明了彩虹的成因,但是没能说明彩虹颜色的由来。而牛顿则阐明了彩虹的颜色来源于含有多种颜色的太阳光。

雨后的天空,漂浮着许多小水滴。太阳光照射到这些小水滴上后,水滴和三棱镜的作用一样,便形成了彩虹。当然,球形水滴中的光路和三角形的三棱镜中的光路不同,因此彩虹形成的原理,要比三棱镜形成彩带的原理复杂。

太阳光照到水滴上时,如图1(a)所示,光在水滴表面发生折射,进入水滴内。该光线在水滴内壁反射后,又一次在水滴表面折射而穿出水滴之外。射到外面的光,根据颜色的不同,在某些特定的角度上强度增大。这个角度,对红光来说约为 42° ,对紫光来说约为 40° 。这就是通常我们称之为彩虹的明亮彩带形成的原理。这叫主虹。

同时,主虹外侧还有一条较模糊的、颜色顺序和主虹正好相反的虹,这叫副虹(又称为霓,译者注)。如图1(b)所示,副虹是由在水滴中经过两次反射而出射的光形成的。红光约为 51° ,紫光约为 53° 。理论上存在水滴中经过3次反射而形成的副虹,但反射次数增多时光会减弱,因此我们就看不到了。



要点

CHECK!

- 彩虹是光在空气中飘浮的水滴里折射、反射而形成的
- 我们之所以能够看到彩带,是因为特定颜色的光在特定的角度强度增强的缘故

图1 水滴中的光路

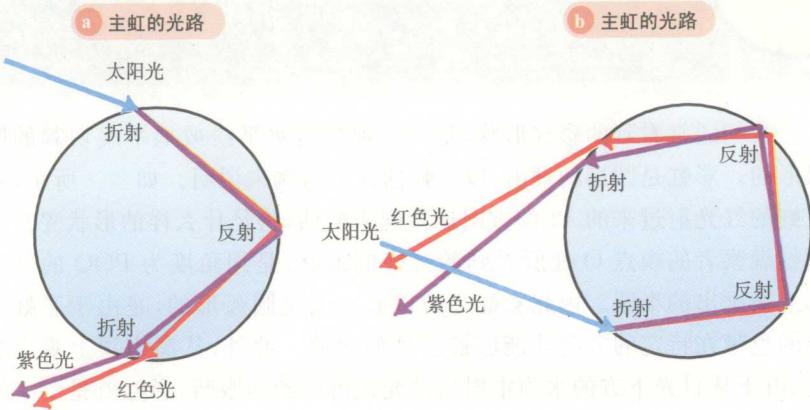
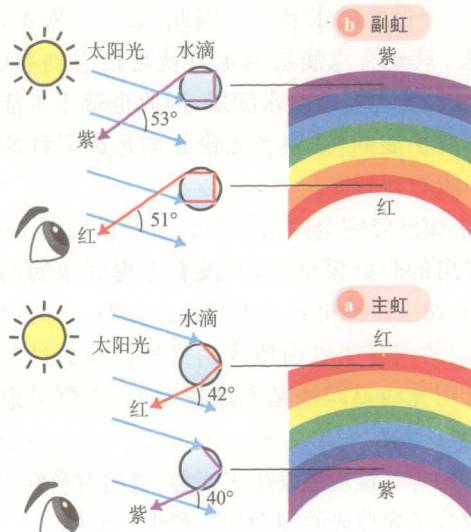


图2 主虹和副虹的形成原理



太阳光在水滴上折射而散射，从而形成光的彩带



主虹和副虹之间的空中景色，比主虹的内侧和副虹的外侧要暗。这个部分叫做暗带。这个部分之所以发暗，是因为这个区间内没有光从水滴中射出的缘故

019

彩虹为什么是圆弧形的

我们通常看到的彩虹形状，是图1那样被水平线或地平线切割的圆弧形的。彩虹是圆形的理由，以主虹的红光为例来说明。如图2所示，将主虹的红光射过来的 42° 的方向连接起来的话，将是什么样的形状呢？从彩虹观察者的视点O处所看到的红带的形状，是用角度为POQ的巨大圆规描画出的半圆。因此彩虹之所以看上去是圆弧形的，是由于彩虹各自的色带在特定的方向才能够被看到的缘故。此外，从高山顶上观看彩虹，由于从目光下方的水滴中射出的光也可以到达眼睛，彩虹就是图3所示的圆形的了。

其次，我们思考一下彩虹不能接近的理由。飘浮在空中可制成彩虹的水滴是无数的，它们形成了一个很厚的水滴层。因此，如图4所示，即使朝所看到的彩虹的方向走去，只要有水滴层的地方就可以看到彩虹。以人们或走或跑的速度，都不能轻易地穿过该水滴层，因此也就不可能接近彩虹。该水滴层是向上下左右扩展的，观察者无论是向远离彩虹的方向移动，还是上下左右移动，都能看到彩虹。

那么，是不是说笛卡儿和牛顿已经完全阐明了彩虹的形成机理了呢？事实上并非如此。在他们所提出的彩虹模型中，并没有考虑到水滴的大小和形状。实际上的彩虹，并非如三棱镜得到的光谱那样鲜明，有时出现的是整体发白的白虹，有时出现的则是主虹内侧或副虹外侧称为过剩虹的一条光的亮线。这种现象仅用光线追踪法是无法说明的，需要考虑光的波动性质。此后英国的托马斯·杨(Thomas Young, 1773~1829)及爱里(George Biddell Airy, 1801~1892)等对该现象发生了兴趣，他们对彩虹的这些不可思议现象的深入探索，成为了导致光的波动理论诞生的契机。



- 彩虹的可见方式是由观察者、水滴和太阳位置的关系决定的
- 彩虹中还有用光的追踪法无法解释的现象

图1 彩虹的照片



图2 主虹中红光的可见方向

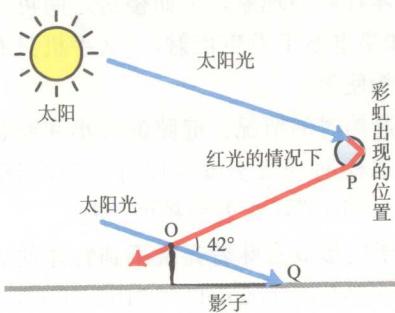


图3 能观察到圆形彩虹的情况

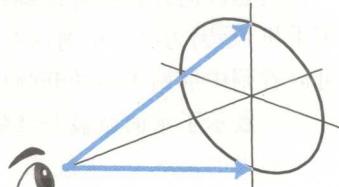
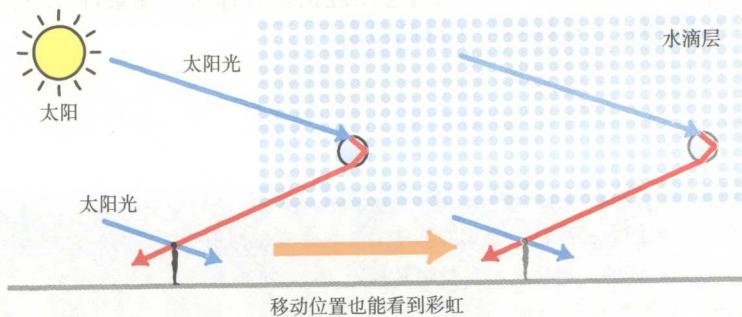


图4 追赶彩虹却总也靠近不了的理由



光的本性是波还是粒子①

光的衍射

17世纪后半叶，牛顿主张光的粒子说。另一方面，荷兰的惠更斯(Christian Huygens, 1626~1695)提出了光的波动说。牛顿从光的直线前进及照在物体上的反射现象出发，认为光是粒子，提出如果光是波的话，则说明不了光的行为举止。对此惠更斯则指出光可以相互交叉前进等的行为只有光是波才能解释。由于惠更斯的说明不完全，更由于牛顿具有绝对的权威，而且当时为人所知的光的直线前进、反射和折射等现象用粒子说也都能勉强解释，人们得出了光是粒子的结论。然而进入19世纪，人们发现了如果光不是波则解释不了的现象。这就是光的衍射和干涉的现象。

衍射是波向外扩展可以绕行到物体背后的现象。例如楼房之间可以使用手机，是因为电波衍射的缘故。如果电波不发生衍射，那么手机只有在可以看到中继站天线的开阔地带才能使用^(注1)。

图3展示了水面波被开缝的平板遮挡时的情况。缝隙的大小和波长相比足够大的情况下，水波像图3(a)那样前行而不改变原有状态，当缝隙的大小约为波长的数倍时，就会像图3(b)那样衍射而扩展前行。

光在物体的后方形成影子。而影子的形成意味着光绕不到物体的后方。但是，意大利的格利马第(Francesco Maria Grimaldi, 1618~1663)在其去世后的1665年出版的论文中，报道了光照到细棒后可以绕射到影子形成的部位这一现象^(注2)。牛顿曾想用理论来解释这一现象，但用其自身提倡的微粒说没有能够给出很好的说明。



- 光照在数倍于波长的物体上时也会发生衍射
- 光的衍射用光的微粒说解释不了

^{注1}: 实际上不只是衍射，反射也能传播电波。

图1 粒子说对光的直线前进和反射的说明

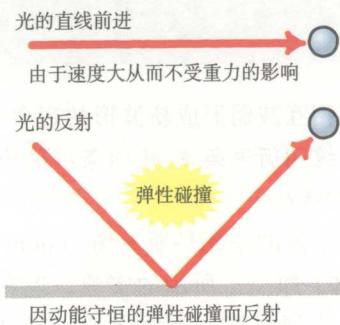


图2 用惠更斯原理说明的光的直线前进

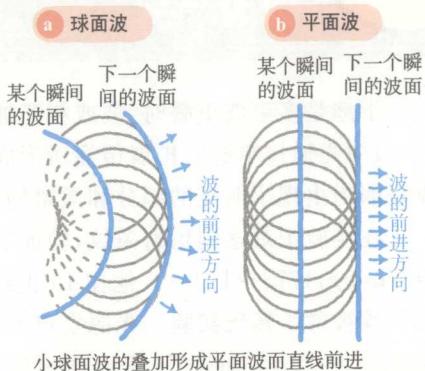


图3 水面波的衍射

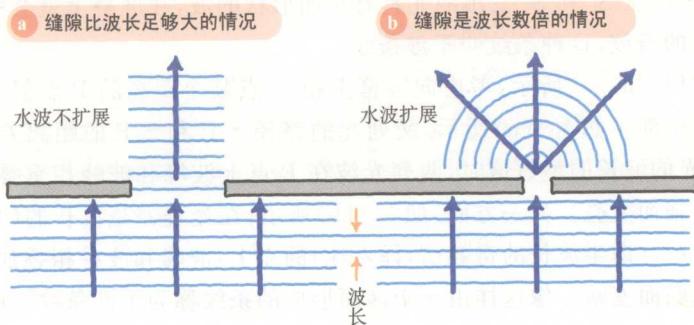
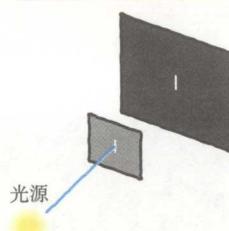


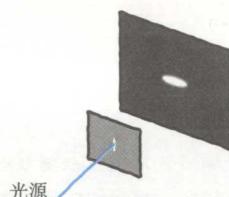
图4 因单缝引起的光的衍射

成为光是波的有力证据

a 本应在屏幕上映出一条光的亮线



b 在屏幕上映出了展宽了的光



光如果是粒子的话，通过单缝的光应该是如图a所示的那样。但是，当缝隙缩小到光的波长的数倍时，如图b那样，光扩展开来，并形成条纹状。由于光的波长很短，因此在日常生活中看不到光的衍射现象。然而，当狭缝的宽度足够小时，就会发现光和水波一样会发生衍射。

注 2: 尽管有格里马第的实验报告，直到光的干涉被确认的 19 世纪为止粒子说依然是主流。衍射 (diffraction)一词，是格里马第首先使用的。

021

光的本性是波还是粒子② 光的干涉

干涉是多束波重叠时，波或相互加强或相互减弱形成新波形的现象。

(020) 中光通过单缝后扩展传播所形成的条纹叫衍射条纹，衍射条纹的形成是因为出现了明亮的部分和黑暗的部分的缘故。

在实验中观察到衍射条纹，验证了光的干涉的是托马斯·杨(Thomas Young, 1773~1829)。他在 19 世纪初做了如图 1 所示的实验。现在该实验被称为杨氏实验。光源发出的光，首先通过第一个狭缝 S_0 。通过 S_0 的光发生衍射而扩展，进而通过后方的 2 个狭缝 S_1 和 S_2 。从这两个狭缝通过的光分别发生衍射而到达屏幕。从 S_0 到 S_1 和 S_2 的距离是相同的，因此从 S_1 和 S_2 发出的光具有相同形状的波，在屏幕上就会映出明暗相间的条纹，这种条纹叫干涉条纹。

这里，如图 2 所示，考虑向屏幕上距 O 点某个距离的 P 点射来的两列波的干涉。如图 3(a)所示，两列光的路径 S_1P 和 S_2P 的距离差(光程差)是光的波长的整数倍时，两列光波在 P 点上波峰和波峰相重叠，从而相互增强而变亮。另一方面，如图 3(b)所示，在光程差是波长的(整数倍 + 波长/2)(即半波长的奇数倍，译者注)的点上，波峰和波谷相叠加，从而互相减弱而变暗。像这样由于干涉而形成的条纹称为干涉条纹。明条纹和暗条纹形成的条件如下所示。根据杨氏实验，得出了光是波的结论。

$$\text{明条纹(光相互增强)} \quad |S_1P - S_2P| = d \frac{x}{L} = m\lambda$$

$$\text{暗条纹(光相互减弱)} \quad |S_1P - S_2P| = d \frac{x}{L} = m\lambda + \frac{\lambda}{2} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

(m 为整数, $m=0, 1, 2, \dots$)



- 光波的峰和峰相叠加时，光波相互增强而变亮
- 光波的峰和谷相叠加时，光波相互减弱而变暗

图1 杨氏实验

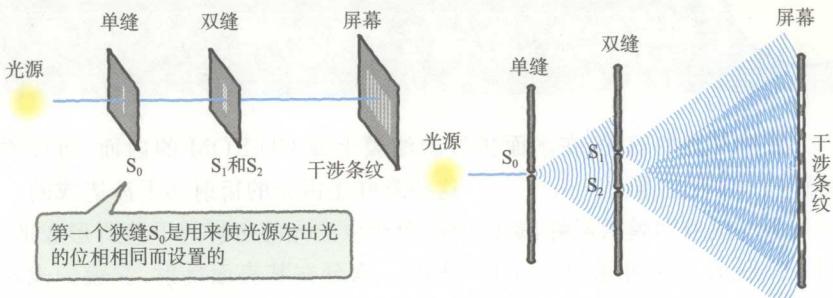


图2 杨氏实验装置简图(注)

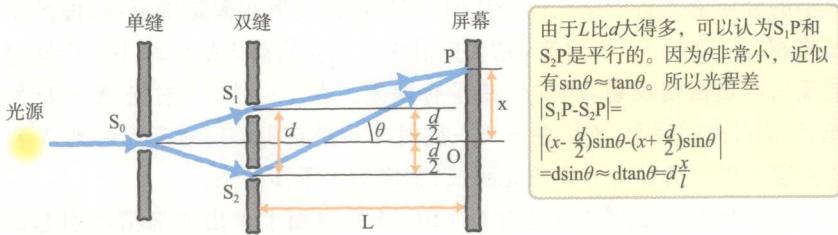
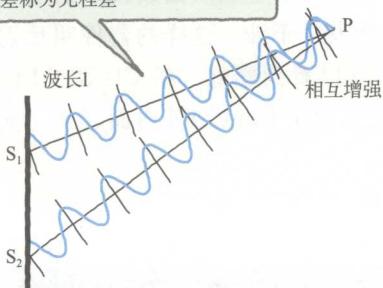


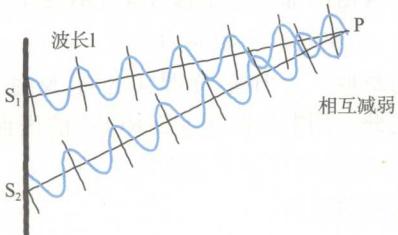
图3 光程差和光波的干涉

a 光程差是波长的整数倍时

干涉的两列光行进路径的路程差称为光程差



b 光程差是波长的(整数倍+λ/2)时



注: 实际的装置要大得多。图2是简图, 狹缝及屏幕的位置关系也和实际装置不同。

022

光的衍射和干涉所引起的彩虹 肥皂泡和 CD 盘上的彩虹原理

在肥皂泡的表面、在水面扩展的油膜上或 CD-ROM 的内面，可以看到彩虹一样的色彩（图 1、图 2）。这些彩虹是由光的衍射和干涉造成的。

肥皂泡或油膜的彩虹，是因薄膜而产生的光的衍射和干涉所形成的。如图 3 所示，光照射在薄膜上时，光的一部分在其表面反射，在膜的表面折射而进入薄膜的光在膜中反射又射回到薄膜外，这两束光相互干涉，形成相互增强或减弱的部分，就可以看到膜有了色彩。光波的反射，从折射率小的介质射入折射率大的介质时，在界面的反射叫固定端反射，波的位相将相差 π （ 180° ）。反过来，光从折射率大的介质射入折射率小的介质时的反射叫自由端反射，波的位相没有偏差。在图 3 中，入射光 A'—反射光 A' 是自由端反射，而入射光 B—反射光 B 是自由端反射。入射光 A' 和 B 从进入膜中到射出为止的光路长，就成为了干涉的条件。

CD-ROM 上的彩虹，是由 CD-ROM 的内面上刻出的细槽而引起的光的衍射和干涉所形成的（图 4）。在（021）中图 2 所示的杨氏实验中，如果使用由许多狭缝规则排列而构成的多缝，就可以得到明暗更鲜明的干涉条纹。在玻璃的表面刻上大量等间距的细槽而制成的器件叫光栅。光在沟槽的部分发生漫反射，不发生透射，但是槽和槽之间的是可以透射的，和狭缝具有相同的作用。同时，在研磨好的金属表面或镜子的表面等间距地刻上细槽，光照在上面，反射光会发生干涉。这样的器件叫反射型光栅。用电灯映照 CD-ROM 的内面，可以看到彩虹。将 CD-ROM 倾斜后，彩虹的模样就会发生各种变化。这是由于 CD-ROM 内面起到了光栅作用的缘故。



- 肥皂泡上的彩虹是由于薄膜的衍射和干涉而形成的
- CD-ROM 内面起到光栅的作用

图1 肥皂泡上的彩虹



图2 CD-ROM内部的彩虹



图3 肥皂泡的薄膜引起的光的干涉

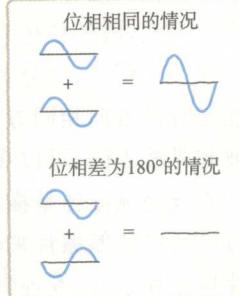
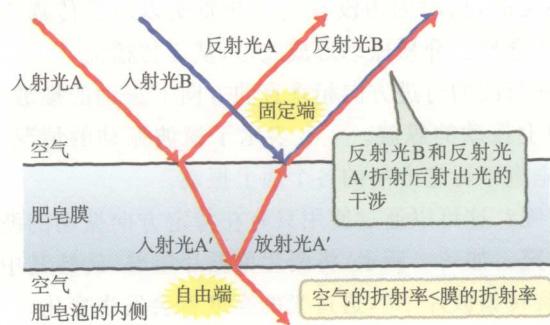


图4 由CD-ROM的内面引起的光的衍射和干涉

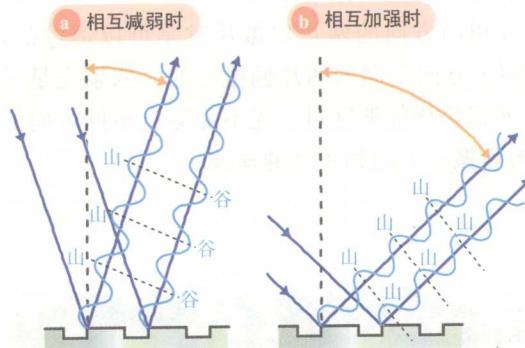
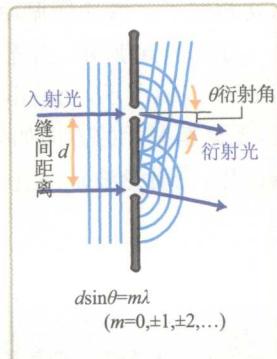


图5 光栅的干涉条件



023

光是纵波还是横波 偏振①

石子儿落进平静的水面后，波纹会扩展开来。这时，如果水面上漂浮有树叶，这些树叶只是在那里摇晃而已。作为传播波的介质水来说，并没有随波一起移动。

弹一下吉他的琴弦，琴弦振动而发出声音。从吉他弦上发出的是声波。声音在真空中是听不见的，这时因为没有空气介质所以声音传播不出去。因此，波的传播需要介质。介质振动形成波形，从而传播波。

如图1所示，波分为在与波的行进方向相垂直的方向上振动的横波，和在与行进方向相同方向上振动的纵波。图2表示了横波振动的情况。横波和纵波不同，可以在垂直于行进方向的各个面上振动。

光波是纵波还是横波呢？这可以通过使用只有在特定方向振动的波才可以通过的偏振片来研究。如图3所示，将两片偏振片重叠，旋转其中一片偏振片，可以发现每旋转偏振片 90° ，透过光的亮度就会发生变化。

太阳或电灯等普通的光叫自然光，在自然光中均衡含有各个振动面的光波。如图4所示，当自然光通过某个方向的偏振片后，光波的振动方向就相同了。像这样振动方向相同的光叫做偏振光。

如图5(a)所示，当光通过相同方向的两片偏振片时是可以透过的，而如图5(b)所示，光是不能穿过方向不同的两片偏振片的。如果光是纵波，无论偏振片的方向如何，光都应该能够穿过。光不能穿过不同方向的偏振片，说明光波是行进方向和振动方向相垂直的横波。



- 自然光含有各个方向振动的光
- 光波是行进方向和振动方向相垂直的横波

图1 纵波和横波的区别

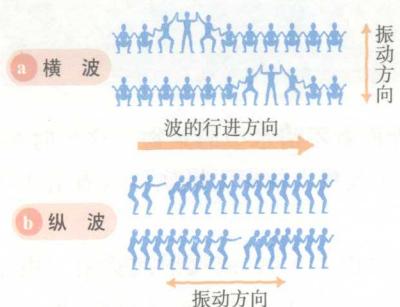


图2 横波的振动面

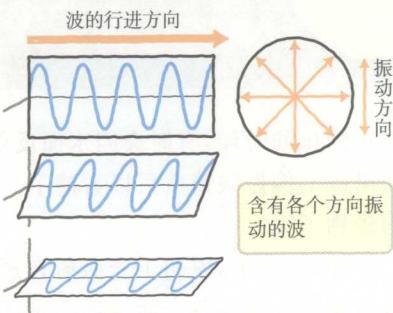


图3 偏振片旋转的情况

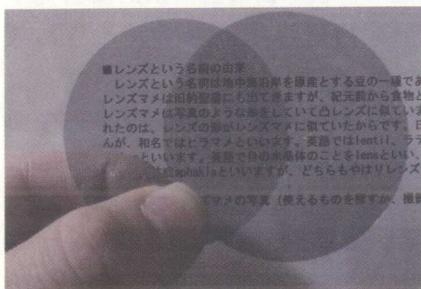


图4 光通过偏振片

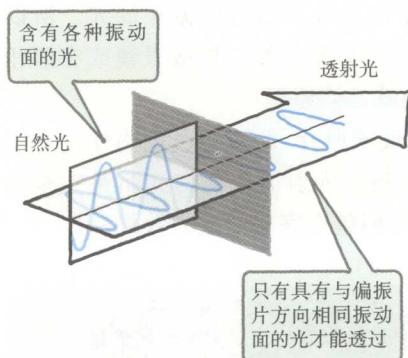
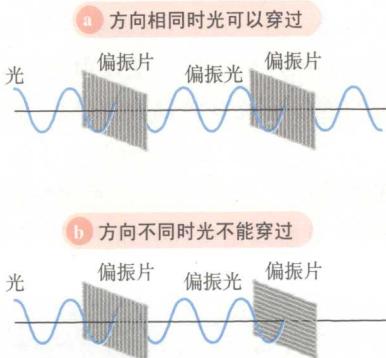


图5 光通过两片偏振片



偏振眼镜和布儒斯特定律

偏振②

钓鱼的时候,有时会因水面反射光而看不清水中的景物。这个时候,如果戴上偏振眼镜就可以看清了。为什么戴上偏振眼镜就可以看清水中的景物了呢?

在(010)中,说明了光照射在透明的物质上时,或反射或折射。由于自然光包含有在各个面振动的光,因此整体上不显示偏振的特性,但是反射或折射的光是有偏重的。这种光的状态称为部分偏振光。部分偏振光在自然光被物体反射时就会变得显著起来。被水面反射回来的反射光中就含有偏振光,因此用偏振眼镜将反射光挡住后,就能够看清水中的景物了。

如图1所示,反射光和折射光成 90° 时,反射光就会成为完全的平面偏振光,即完全偏振光。这被称为布儒斯特定律^(注)。在图1的式子中,将玻璃的折射率1.54代入后, θ_1 就是 57° 。水的情况下,其折射率为1.33,所以 θ_1 就为 53° 。反射光变成完全偏振光的入射角就叫布儒斯特角,或起偏角。

用照相机透过玻璃拍摄景色时,有时会拍到玻璃上映出的房间内的景物。由于玻璃反射的光是部分偏振的,因此反射光内含有透不过偏振片的光。另一方面,从玻璃外射来的光含有可以通过偏振片的光。所以透过偏振片就可以不受反射光的干扰而很好地摄影。偏振眼镜或在照相机的透镜上装有的偏振滤光片,利用的就是该原理。

图3(b)是使用偏振滤光片拍摄的玻璃照片,前面的白色物体没有映在玻璃中。但是,由于在起偏角以外的角度入射而反射的光不是完全偏振光,虽然因角度而有所不同,但不可能期望有完美的滤光效果。



- 在介质界面反射的光成为完全偏振光时的入射角称为起偏角
- 用偏振片可以减轻水面的反射或玻璃的映像

注:为纪念该定律的发现者苏格兰的布儒斯特(David Brewster, 1781~1868)而命名的。布儒斯特也是万花筒的发明人。

图1 布儒斯特定律

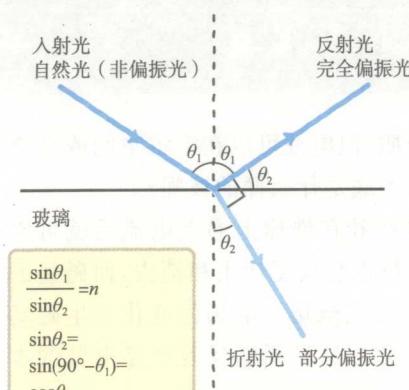
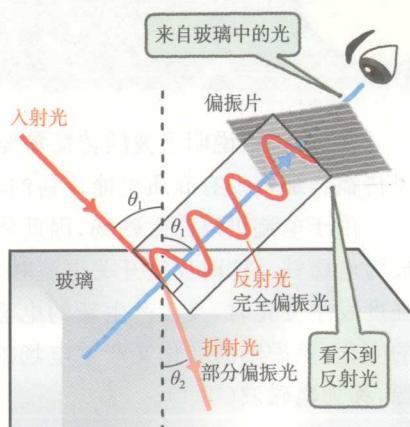


图2 反射光称为完全偏振光



入射角 θ 满足 $\tan \theta = n$ 时，反射光成为完全偏振光

图3 使用偏振滤光片拍摄的玻璃板照片



a 没有使用偏振滤光片



b 使用偏振滤光片

使用偏振滤光片拍摄玻璃前的物体时照不到反射光

025

光是电磁波的成员

在(023)中说明了波的传播需要介质,但电波可以在宇宙空间或真空中传播。那么没有介质也能传播的波,到底是什么样的波呢?

由于电流可以产生磁场,因此将铜线卷在铁棒上通上电流后就可以成为电磁铁。这时反复开关电流时,磁场也会反复产生和消失,而磁场的强度发生变化时,又会产生新的电流而形成电场。电场的变化产生磁场的变化,该磁场的变化又产生电场的变化。这种周期反复就是电波的本源,称为电磁波(图1)。

电磁波是电场和磁场变化的周期反复,即使在没有介质的真空中也能传播。电磁波的存在是1864年由英国的麦克斯韦(James Clerk Maxwell,1831~1879)预言,1888年由德国的赫兹(Heinrich Rudolf Hertz,1857~1894)验证的。

1800年,英国的赫歇尔(Frederick Willian Herschel,1738~1822)用三棱镜将太阳光分光,研究了什么颜色的光温度高,发现红光外侧看不见颜色的部分温度最高。1年以后,德国的里特(Johann Wilhelm Ritter,1776~1810)发现紫光外侧看不见颜色的部分可以使感光剂变色。这些都使人们认识到在红光和紫光的外侧也存在光的成员,分别命名为红外线和紫外线。此后知道了红外线和紫外线是电磁波的成员。

根据麦克斯韦的理论,计算出了真空中电磁波的速度是每秒约30万km。从电磁波的速度和光速一致的结果上,也得出了光是电磁波成员的结论。



- 电磁波是电场和磁场周期变化而传播的波
- 光是电磁波的成员

图1 电磁波

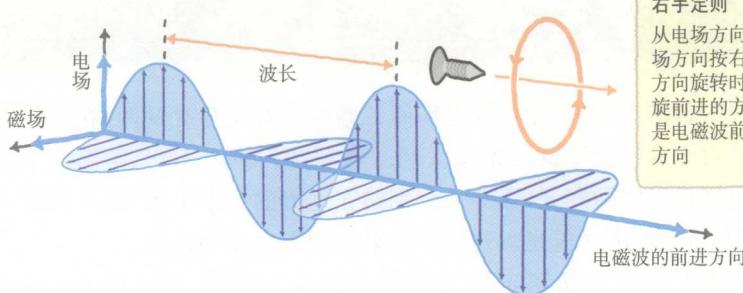
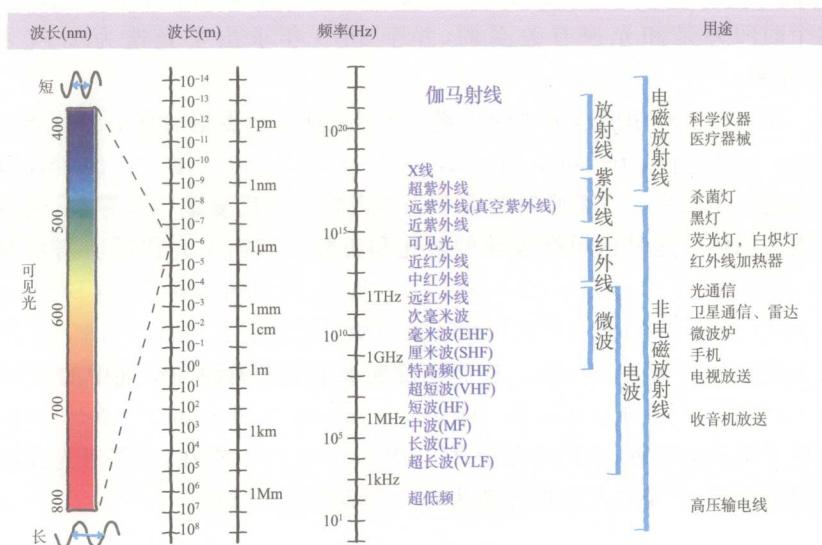


图2 电磁波的种类和波长



现在，人们知道了在红外线和紫外线的外侧，还有看不见的光的成员。电磁波在狭义上是指电波，而广义上包含了光的所有成员





026

光速是多少

古代的希腊学者们，相信光是瞬间传播的。对此存有疑问，在世界上首次试图对光速进行测试的是意大利的伽利略。他在 1607 年用以下方法对光速进行了实际测试，让 2 人分别站在远离的 2 个山顶上，一方送出光后，对方马上发出回应光。这种方法显然测不出光的速度。

在世界上首先成功测定出光速的是瑞典的罗默(Ole Christensen Romer, 1644~1710)。他在观测木星的一个卫星的蚀^(注)时注意到，如图 1 所示，由于地球和木星之间距离的改变，蚀开始的时间有偏差。他认为这个时间差是和光速有关系的，并于 1676 年求出了光速为 $2.27 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

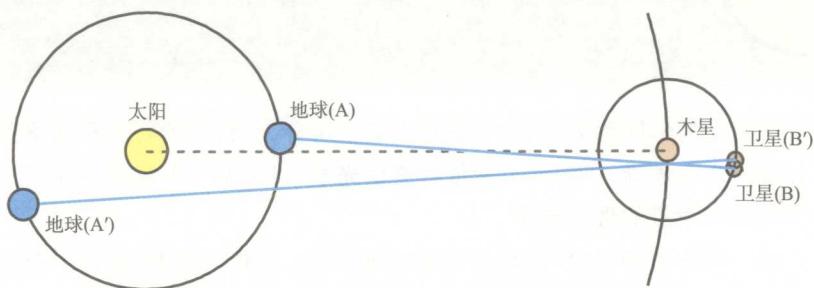
在地球上利用能够测试的距离首次对光速进行测定的是法国的菲佐(Armand Hippolyte Louis Fizeau, 1819~1896)。他使用图 2 的装置对光速进行了测定。齿轮旋转时由于光被齿轮的齿反复遮挡和穿过，光看上去在闪烁。这时他根据齿轮的转速和齿数计算出了光往返所需的时间，从而求出了光速为 $3.12 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。此后，法国的傅科(Jean Bernard Leon Foucault, 1819~1868)用旋转镜代替齿轮测定了光速，于 1850 年求出了光速为 $2.98 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。进而他发现水中的光速约为空气中的 $3/4$ 。约 80 年后，美国的迈克耳孙(Albert Abraham Michelson, 1852~1931)改良了傅科的装置，求出光速为 $2.99798 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。现在，根据激光光线测定的结果，认定真空中的光速为 $2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。



- 真空中的光速 $c=2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$
- 物质中的光速和光的波长 $v=c/n, \lambda'=\lambda/n$

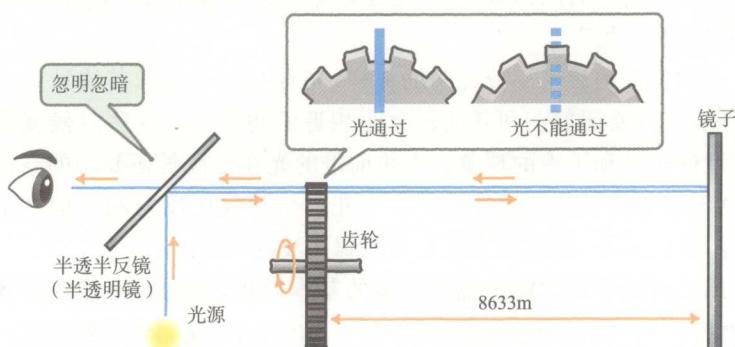
注：木星的卫星被木星遮住看不见的现象。

图1 雷默的光速测定



光从卫星射到地球的时间， $A'B'$ 要比 AB 长，由于 AA' 的距离（地球的公转轨道的直径）而产生时间差

图2 菲佐的光速测定



物质中的光速和波长

光速在真空中和空气中几乎不变，在水中或玻璃等的物质中要比在真空中慢。这时，光波的频率不变。若真空中的光速为 c m/s、波长为 λ m、频率为 f ，则
由 $c=\lambda f$ 得 $f=c/\lambda$

物质中的光速为 v m/s、波长为 λ' m，
由 $v=f\lambda$ 得
 $f=c/\lambda=v/\lambda'=$ 定值
由于物质的绝对折射率 n 为 c/v ，
由 $v=c/n$ 得 $\lambda'=\lambda/n$

027

考虑到光的行为举止的几何光学和波动光学

有关光的学问称为光学，光学在大类上可分为，将光的行为作为光线来考量的几何光学，作为波来考量的波动光学，以及基于电磁学或量子力学的性质来考量的现代光学^(注)。

这一章的前半部分，针对光的直线前进性、反射和折射进行了说明，都是将光的路径看成是光线。光虽然有波的性质，由于波长极短，在宏观上来考察光的行为时，波的性质是可以忽略的。从光源发出的光的前进方式、在物质上反射、透射以及折射时光的前进方式、用透镜成像时光的前进方式，都可以用几何光学来考量。在这一章中已经习惯于用几何光学来考量光的行为的读者们，一定能够照此深入阅读到下面的第3章“透镜的原理和作用”。

正如本章的后半部分说明的那样，光有时要通过和其波长大小相近的狭缝，有时要照射在和其波长大小相近的物体上。这些时候就会表现出所谓的衍射和干涉的现象。直线前进的光在比波长还要小的空间内扩展，就不能忽略光的波动性质。笛卡儿和牛顿仅用反射和折射并不能完全解释彩虹现象，就是因为没有考虑到光波的性质。

用几何光学虽然能够说明透镜的基本原理，但也有不能忽略光波性质的情况。比如在光学显微镜中，由于光的衍射，我们看不到比波长还小的东西。还有，对于CD或DVD，是用透镜汇聚的激光来读取光盘表面细微的沟槽的。即使是激光，由于光的衍射，用透镜汇聚而成的光斑的大小也是有极限的。光的这些波动性质导致了透镜或光学仪器性能的极限。从第4章开始，根据需要也采取一些波动光学的方法。



- 几何光学：光作为几何光线来处理，从而考量其行为
- 波动光学：光作为波动来处理，从而考量其行为

注：本书不涉及现代光学。

图1 光的举止用几何光学来考量

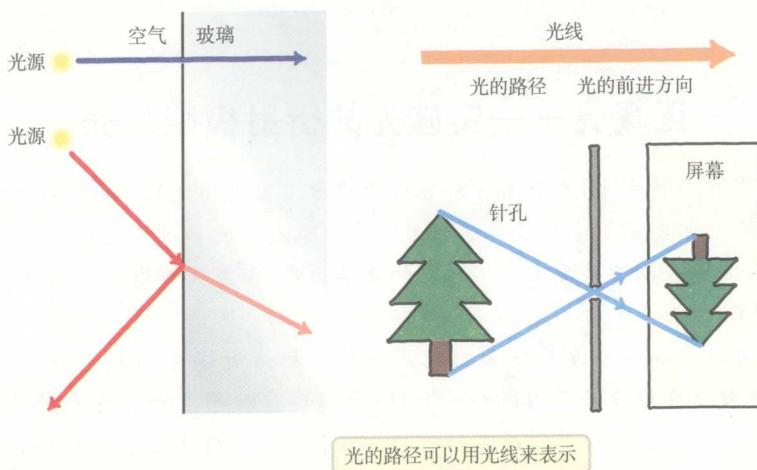
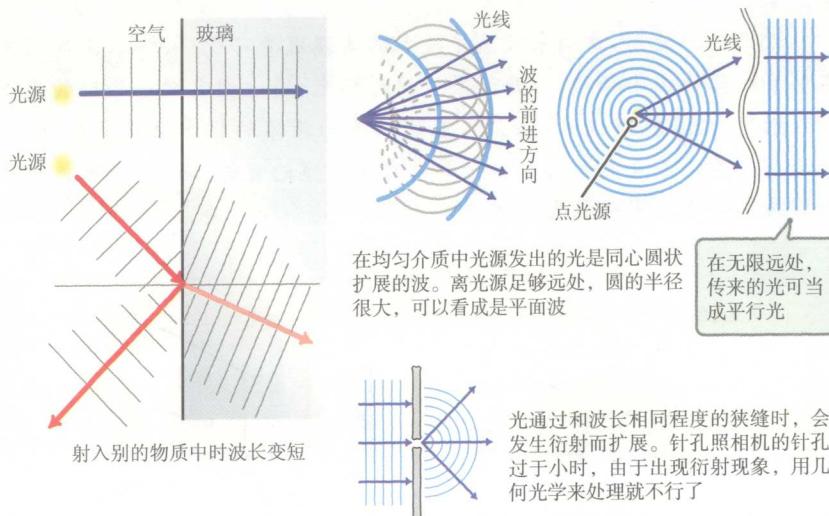


图2 光的举止用波动光学来考量





COLUMN

近场光——突破光的衍射极限的光

在科学技术上，光有着各种各样的用途。但由于光的衍射现象，存在着最小也只能以微米尺度的领域为对象的难点。例如对于最新的电子零部件，需要在纳米尺度上分析物质的化学性质，但是用普通的光来研究就不行了。

突破光的这个波长壁垒的光是一种被称为近场光的光。如图1所示，光照射在比波长小的微粒子上时，会出现在粒子表面产生光的现象。这种光就是近场光，其厚度是粒子的半径程度。实际上要形成近场光，可以在图2所示的覆盖有遮光金属膜的光纤尖端，用特殊的技术开一个数十或数百纳米程度的小孔。向那里导入光后，从尖端上就会有近场光漏射出来。

近场光的使用，使纳米尺度光技术的实现成为可能。例如，用显微镜来观察物体的微小领域，但是如果使用近场光，通过测定微小领域的发光或散射光的光谱，不仅可以观察，也可以得知物体的化学性质。此外，光盘的高密度化以及电路的微细化等都有了实现的可能。近场光可以说是支撑未来科学技术的最尖端之光。

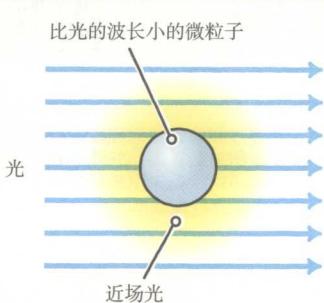


图1 近场光的发生

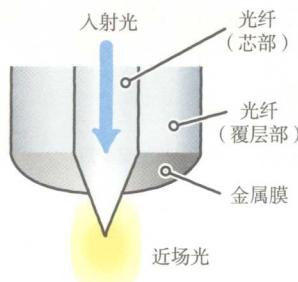


图2 光纤探针

第3章

· · ·

透镜的原理和作用

我们确认了光的基本性质之后，就要学习有关透镜的原理和作用。本章解说了光通过透镜的行进方式、成像方法及各种透镜的原理。



· · ·

本章将对透镜的作用和透射光的行进方式进行说明。在说到透镜之前，我们再一次确认一下光的行进方式。

从物体上的一点发出的光会向四面八方扩展前行。不管是从太阳或电灯等光源表面一点发出的光也好，还是从物体表面一点反射的光也好都是一样的。

和从光源到受光处的距离相比，尺寸足够小乃至可以忽略的光源称为点光源。**图 1** 表示出了从点光源发出的光照在 1m 外幅度为 50cm 的受光面的情况。沿从点光源引出的光轴前进的光和受光面是垂直的，而其他的光线都是倾斜地照在受光面上。照在受光面端部的光和受光面约成 76° 角。

图 2 和 **图 1** 有相同配置，从点光源到受光面的距离为 1.5 亿 km，受光面的幅度为 1.3 万 km 时， θ 就变为 89.998° 。这种情况下，从点光源出发射向受光面的光线，无论照在何处都可以看成是和受光面垂直的。

其实这个数据，和太阳到地球的距离以及地球的直径是相同的。我们常说“太阳光是平行光”，是指从太阳表面的一点发出的光作为平行光到达地球的意思^(注)。

图 3 简单地表示出了点光源发出光的扩展情形。光波扩展到远方时，同心圆状扩展的球面波变成了平面波。从光波的扩展中，沿波的前进方向引出的直线是光线，从无限远处的光源射来的光线就可以当成是平行光线。

考虑通过透镜的光时，也必须考虑光是从有限距离处射来的，还是从无限远处射来的。



- 光源在有限距离处时，光可以作为倾斜的光线射来
- 光源在无穷远处时，光可以作为平行光线射来

图1 光源在近处的情况（光源在有限距离处的情况）

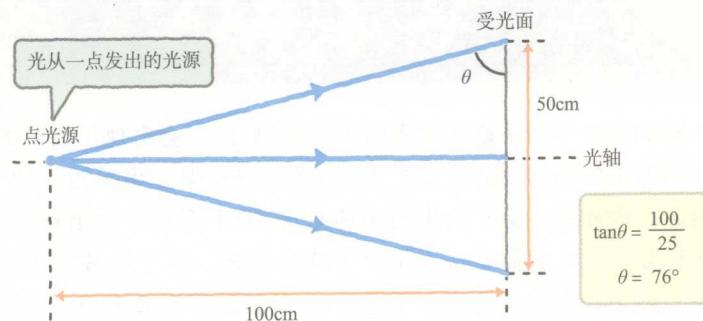


图2 从太阳射到地球的光

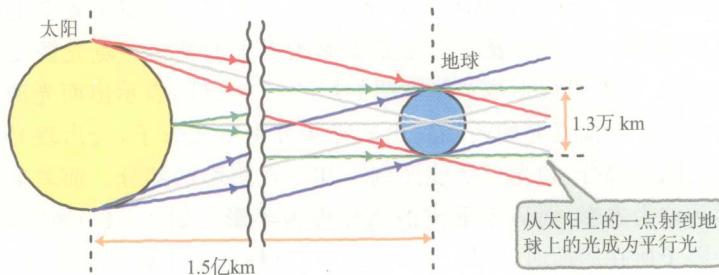
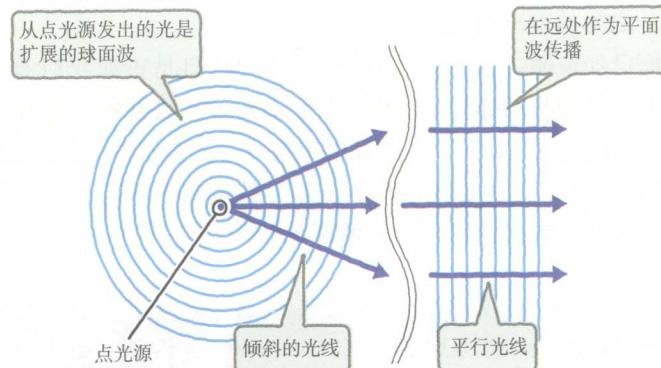


图3 光源在远处的情况（光源在无穷远处的情况）



我们先一下用手遮住射来的太阳光，地面上会出现什么样的影子呢。从太阳射来的光向四面八方扩展并直线前进，但是用手挡住的光却到不了地面。因此在地面上会出现手的影子，即手形影子的出现是因为光的直线传播。**图 1** 就简单地表示出了这个道理。由于光被物体挡住，所以形成了影子。太阳离地球非常遥远，在分析地面形成影子之类的问题时，可以将其看成是点光源。

在荧光灯等大小不可忽视的光源的情况下，浓厚的影子周围会出现不鲜明的淡影。这样的光源称为**面光源**，需要考虑到从整个光源的发光面上发出的光。**图 2(a)** 表示出点光源形成影子的情形。点光源是从一点发出的光，因此可以形成浓厚鲜明的影子。**图 2(b)** 表示出面光源形成影子的情形。从面光源的两端发出的光会分别形成影子，会出现光完全照不到的阴影部分，和光虽然能照到但却出现阴影的部分。前者形成的浓厚影子称为**本影**，而后者形成的淡影称为**半影**。如**图 2(c)** 所示，将物体移近影子所在的面时，半影的部分减少；而移远后半影的部分会增多。也就是说，在物体近旁形成的影子鲜明，而在远处形成的影子会变得模糊。影子到底有多模糊，要视光源的大小、光源和物体之间的距离以及物体和影子之间的距离而定。

前面已经说明了太阳可以看成是点光源，但是正如我们看到在空中炫目的太阳是圆形的那样，太阳并非是点光源。只是在分析地面上形成手影之类的问题时，太阳的大小可以忽略，但是当物体和影子之间的距离增大时，就必须要考虑太阳的大小。**图 3** 是从和平号宇宙空间站上拍摄的日食时地球上映出的月球影子的照片。



- 点光源只形成鲜明的本影
- 面光源可形成本影和半影，在浓厚的影子周围出现淡影

图1 从太阳射到地球的光

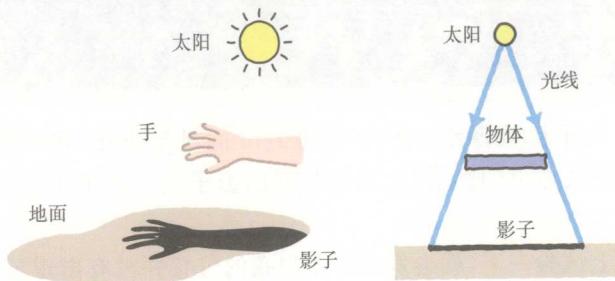


图2 影子的形成方式

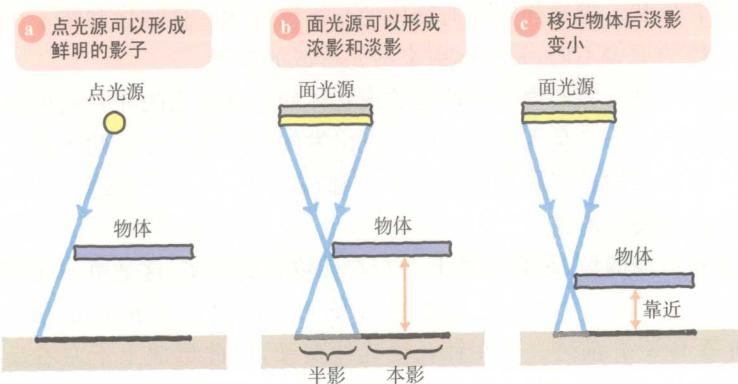


图3 日食时在地球上形成月球的影子



从照片上可知中央附近是黑影，但周围变得灰暗。中心部位是日全食的本影，而周边为日食的半影

照片提供者：
NASA Astronomy Picture of the Day
Looking Back at an Eclipsed Earth
(Mir 27 Crew; Copyright: CNES)

030

针孔成像

如图 1 所示,在厚纸上开一个约 1cm 的星形小孔,在屋顶的荧光灯的照射下形成厚纸的影子,会出现怎样的影子呢? 影子中会出现星形的亮孔吗?

实际上试验一下,就会发现影子中孔的位置并没有出现星形,而是映出了荧光灯管的身形。将孔的形状变成圆形、三角形或四边形,无论孔是何种形状,都会映出荧光灯管的身形。如果灯管是圆形的,就会映出面包圈的灯管形状。像这样映出的物体的身影称为像。这种像和镜子中所看到的物体的虚像不同,是实际射来的光所成的实像。

在(028)中,我们说明了从光源或物体的一点发出的光是向四面八方扩展前进的。图 2 是从物体上的一点出发的光线进入针孔的情形。从物体上一点出发的扩展前行的光基本上都被遮住,只有能穿过针孔的光在屏幕上形成物体的像。

针孔所成的像,是和原物上下左右反转的倒立像,这是由于光直线前进的缘故。如图 3 所示,从物体的 ABXY 出发射向针孔的光穿过针孔后,向 A'B'X'Y' 前进。即在针孔处光线交叉,因此形成上下左右反转的像。利用针孔成像现象而制成的照相机,就是第 1 章中说明的暗箱,即针孔照相机。

和针孔一样,用镜子也可以在屏幕上成像。太阳光在镜面上反射照在屏幕上,镜子和屏幕距离短时只是映出明亮的光;当距离拉长时,就会映出图 4 所示的太阳的像。针孔是让光通过而形成像,而镜子则是将光的行进方向反转而形成像。



- 针孔或镜子所成的实像,是上下左右反转的倒立像
- 针孔或镜子之所以能成实像,是由于光直线前进的缘故

图1 针孔所形成的荧光灯像

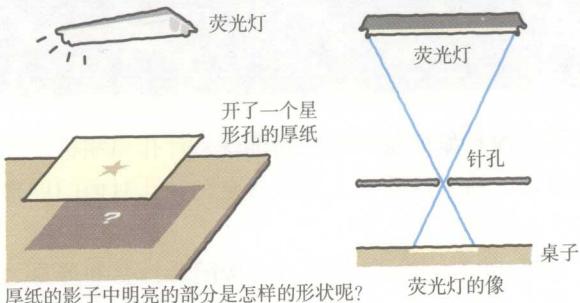


图2 通过针孔的光线

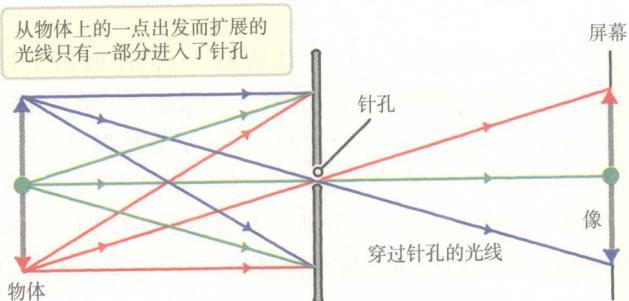


图3 因针孔而上下左右反转

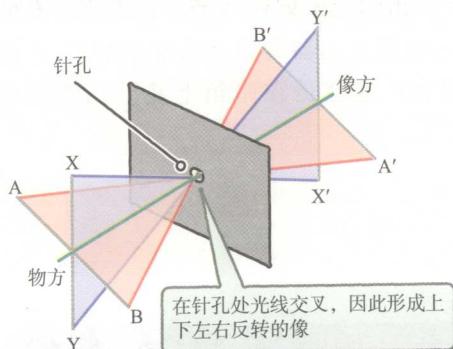
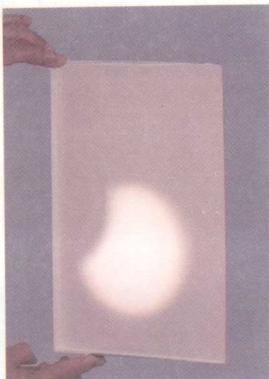


图4 日偏食时的太阳经由镜子形成的反射像





031

针孔照相机成像

利用针孔成像现象而制成的照相机就是针孔照相机。图 1 给出了针孔照相机的原理。通过针孔进入暗箱的光在针孔对面的屏幕上或印图纸上形成倒立像。

针孔照相机，如图 2 所示，其所成的像随着针孔和屏幕之间距离的增大而放大。要在屏幕上形成鲜明的像，就要根据针孔到屏幕的距离远近对针孔的大小进行优化，而对于可携带型针孔照相机，0.5mm 左右就可以了。

针孔所成的像，虽然说针孔越小越清晰^(注)，但同时由于进入的光量减少，像会变暗。反过来将针孔增大，由于光量增多，像会变得明亮。然而，如图 3 所示，从 A 点发出的光会映在 A~A' 的范围里，从 B 点发出的光会映在 B~B' 的范围里，因此像就会变得模糊了。这和(029)中所说的半影很相似，但针孔大时，光到达的地方会出现色彩不均匀的现象。

总之，使用针孔照相机可以简单地成像，但是这种照相机只是利用了 1 点发出的光中进入针孔的那部分光，因此光量少，所成的像非常暗。要得到明亮的像，就必须增大针孔。但是针孔增大又会使像模糊。

要得到鲜明的像，需要将 A 点发出的光聚集到 A' 点。因此在针孔的部位需要装一个收集光的器具。这种聚光的器具是什么呢？对了，在放大镜等上使用的凸透镜就可以聚光。这就是在暗箱上装上凸透镜的理由。



- 针孔小则像发暗，针孔大则像模糊
- 在针孔的部位装上凸透镜，像就鲜明了

注：将针孔的尺寸减小到波长的数倍程度时，由于光发生衍射现象而发散，从而形成模糊的像。

图1 针孔照相机的原理

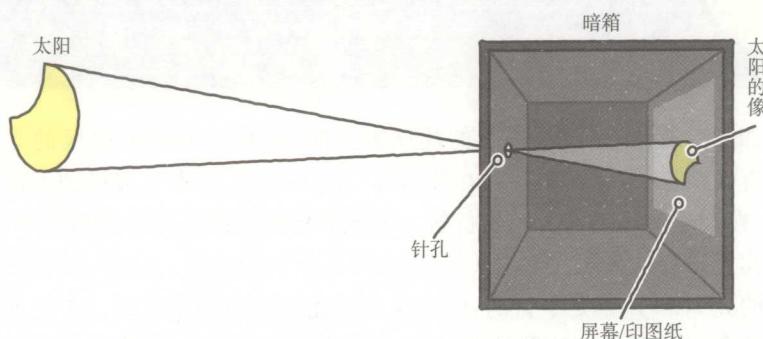


图2 针孔离屏幕越远像就越大

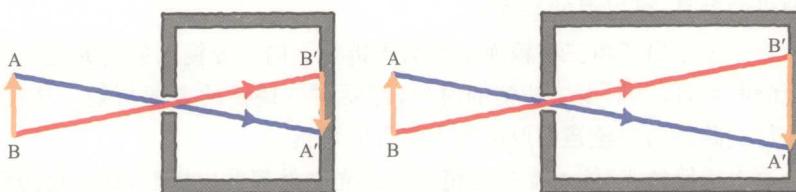
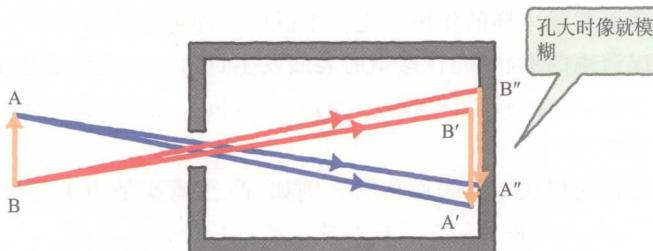
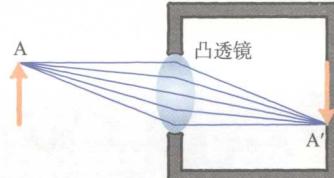


图3 针孔增大时像变得模糊



在针孔的部位装上凸透镜后，从A点发出的进入针孔的光都能汇聚到一点



如图 1 所示,光照在平坦的玻璃板上时,垂直入射到玻璃板的光 A 依然直线前进,但是倾斜照射在玻璃板上的入射光 B,进入玻璃和射出玻璃时,在玻璃的表面都会发生折射。该玻璃板的表面任何部位都是平面,因此相互平行的入射光 B 和 B'发生相同的折射而前进。这时,从玻璃板射出的光 B 和 B'都是平行的,因此这两条光线是不能相交的。不改变入射光的角度而要使两条出射光相交,就必须有目的地改变玻璃表面的形状,从而使各自的光路发生改变。为达到此目的对玻璃板表面进行加工而制成的器具,可以说就是透镜。

图 2 表示出了由三棱镜而引起的光折射。向三棱镜入射的光进入三棱镜的时候,以及射出三棱镜的时候,都要在三棱镜的表面折射。这时,光的行进路径向三棱镜的厚度变大的方向弯折。

通过透镜的光,除了穿过透镜中心的光之外都发生折射,如果把透镜看成是由许多三棱镜汇集起来的器具来考虑就容易理解了。图 3 描绘了入射到细微分解了的凸透镜上的平行光线的折射情况。可以看到每一个部分都发挥着棱镜一样的作用使光发生折射。即可以认为许多小棱镜连续排列形成透镜的形状,光在透镜的表面发生折射。经透镜折射的光路,和三棱镜一样,也是向透镜厚度变大的方向弯折。光弯折的程度,越往透镜的边缘去越大。

透镜的作用取决于其表面形状。例如,凸透镜就是为了使平行光线向一点汇聚,人为地将玻璃板表面制成中心部位凸出的球面。



- 透镜是人为改变玻璃表面的形状,从而改变光路的器具
- 透镜可以看成是棱镜的集合体

图1 通过玻璃板的光

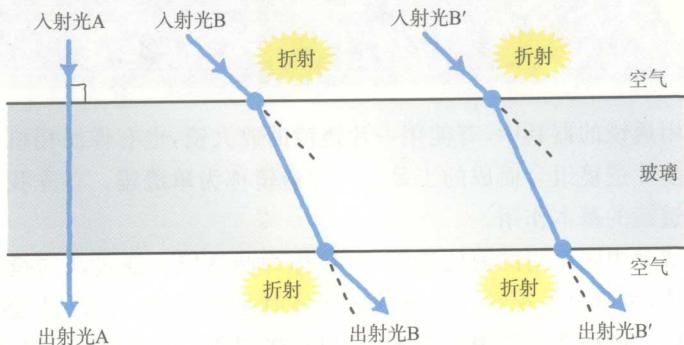


图2 通过三棱镜的光

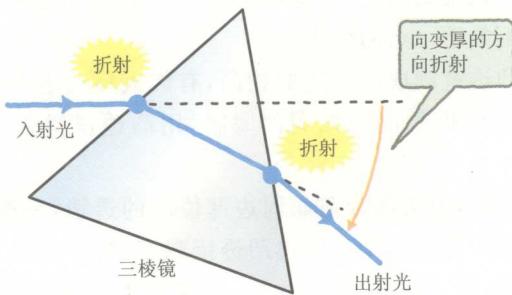
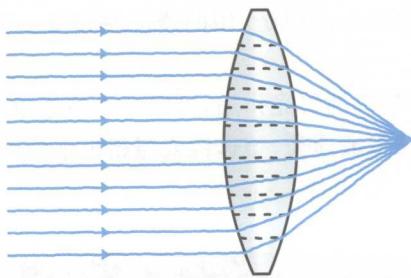


图3 将透镜细微分解的话



使用透镜的器具中,有使用一片透镜的放大镜,也有像照相机的镜头那样由多片透镜组合而成的工具。一片透镜称为单透镜。首先我们考察一下单透镜的基本作用。

形状为中间厚周围薄的透镜,一般称为凸透镜。通过凸透镜观察近处的物体,可以放大观看。看远处的物体时是倒立的。同时凸透镜有聚光的作用。用凸透镜汇聚太阳光,可以点燃黑纸。凸透镜除了是聚光的器具之外,也可以说是聚热的器具。大型凸透镜可以汇聚大量的光,汇聚的光要比小型凸透镜更明亮,温度也更高。这些现象,是源于凸透镜发挥着使光折射而汇集于一点的作用。

使用一片凸透镜制成的身边的物品,有放大镜或老花镜等。老花镜是用于因花眼而使折射能力减弱的眼睛,用凸透镜增强其聚光能力的器具^(注1)。

和凸透镜相反,中央部分薄而周边部位厚的透镜,一般称为凹透镜。凹透镜也有使光折射的作用。通过凹透镜观察物体时,不论是近处的物体,还是远处的物体,看上去都变小了。这是因为凹透镜有使光发散的作用。凹透镜没有聚光的作用。

用一片凹透镜制成的身边的物品,有近视眼镜。近视眼镜是用于因近视而使折射能力增强的眼睛,用凹透镜使光发散而减弱其聚光能力的器具^(注1)。

另外,利用凹透镜的扩光作用,可以减小凸透镜的焦点偏移。因此为了得到更清晰的实像或虚像,望远镜或照相机中的镜头,是由凸透镜和凹透镜组合而成的^(注2)。



- 凸透镜具有聚光的作用
- 凹透镜具有扩光的作用

^{注1}: 在第5章详细说明。

^{注2}: 在第4章详细说明。

图1 凸透镜和凹透镜的基本作用

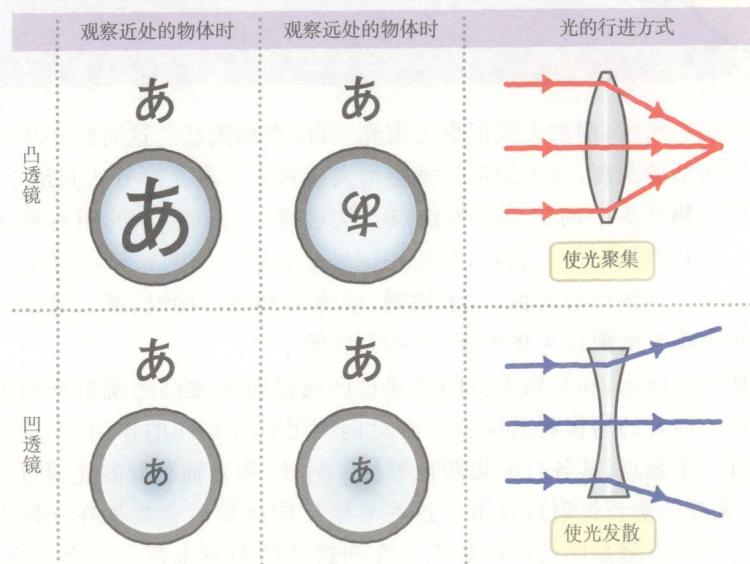


图2 确认一下老花镜和近视眼镜所使用的透镜种类



如图1所示,用放大镜汇聚太阳光,可以点燃黑纸。这时减小或增大放大镜和纸的距离,聚光的部分就会增大或减小。聚光部分达到最小、光的亮度和热度集中的位置称为焦点。从透镜中心到焦点的距离称为焦距。一般焦点用记号F表示,焦距用记号f表示。如图2所示,垂直于透镜面而穿过透镜中心的轴,叫透镜轴,或称为光轴。同时,通过透镜的焦点和光轴垂直的面称为焦平面,或称为焦面。

如图3所示,和光轴平行的光通过凸透镜时光被凸透镜折射而汇聚于焦点。通常的透镜将透镜正反面对调使用也有相同的作用,在透镜两侧各有一个焦点,其各自的焦距也等长。另外,和光轴平行的光通过凹透镜时,光被凹透镜折射后发散。这些光线反向延长后会集聚在光轴上的一点。这个点就是凹透镜的焦点。在凹透镜的两侧也都有一个焦点,其各自的焦距也等长。

人们约定凸透镜的焦距f为正值,而凹透镜的焦距f为负值。另外,凹透镜的焦点实际上并没有光的聚集,也没有光的发出,因此也称为虚焦点。

透镜的焦点位于透镜的两侧,眼镜或望远镜等的透镜,是由光的入射方向而定的。图4表示出了凸透镜和凹透镜的焦点。光从透镜的前方(图中是左侧)入射,从后方(右侧)射出。在凸透镜的情况下,位于光射出一侧的焦点称为后方焦点,位于入射一方的焦点称为前方焦点。凹透镜的情况下,光入射一方的焦点称为后方焦点,而射出一方的焦点称为前方焦点。



- 和光轴平行的光通过透镜后汇聚的一点叫焦点
- 透镜中心到焦点的距离叫焦距

图1 凸透镜的焦点

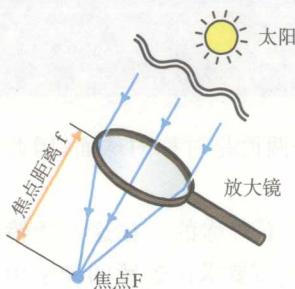


图2 凸透镜的原理

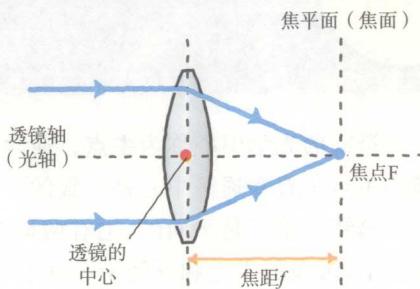


图3 凸透镜和凹透镜的焦点和焦距

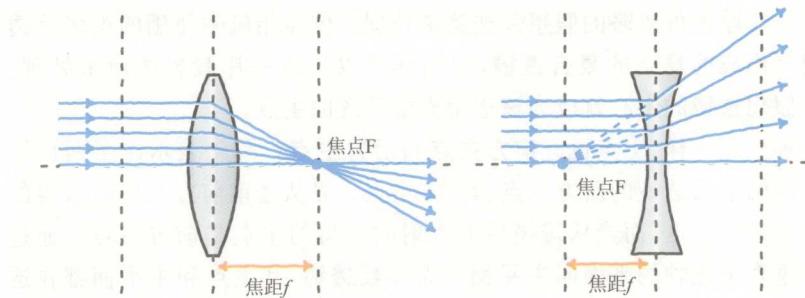
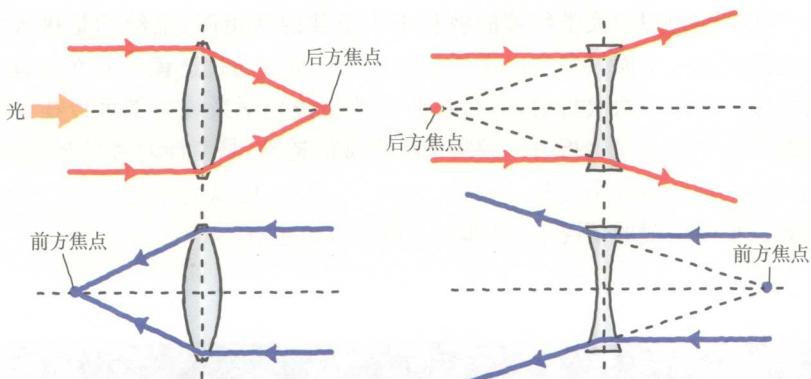


图4 凸透镜和凹透镜的前方焦点和后方焦点



035

透镜的主点和主平面

透镜的光学中心称为主点。通常的透镜，两面是对称的球面，因此透镜的主点位置和透镜中心是一致的。

透镜有单面是平面的，也有两面是球面但不对称的。在这些透镜的情况下，透镜的主点和透镜中心就不一致了，就需要求出透镜的光学中心在哪里^(注)。

实际上无论什么样的透镜，考虑到入射光和出射光的行为，都可以当成是一片厚度可忽略的假想薄透镜来处理。像照相机中使用的由多片透镜组合而成的复杂的复合透镜，也同样可以当成一片假想透镜来处理。这个假想透镜的中心就成为该透镜光学系统的主点。

和焦点一样，主点也有前方主点和后方主点。图 1 表示出了两面形状不同的平凸透镜的后方主点和前方主点。光从透镜前方入射时求得的主点是后方主点，而光从透镜后方入射时求得的主点是前方主点。通过主点垂直于光轴的平面叫主平面。大多数透镜，其主点和主平面都在透镜的中心，但是表面弯曲的透镜、或凸透镜和凹透镜组合而成的透镜，也有在透镜的外侧的。

在中学物理和大学物理的教科书中登载的透镜图，描绘的是进入透镜的光线在主平面只发生一次折射的情况。虽然通过透镜的光在透镜表面上实际上发生了两次折射，但是在所有的透镜光学系统中都可以描绘成光线在主平面上发生折射。教科书中登载的透镜，是两面对称的形状，因此前方主点和后方主点是一致的。如图 2 所示，可以简单地求出主点的位置。平凸透镜的情况下，可如图 3 所示求出主点。



- 透镜的光学中心称为主点
- 无论何种透镜的光学系统，都可以将透镜看成是假想的薄透镜

注：透镜的焦距定义为主点到焦点的距离。

图1 平凸透镜的后方主点和前方主点

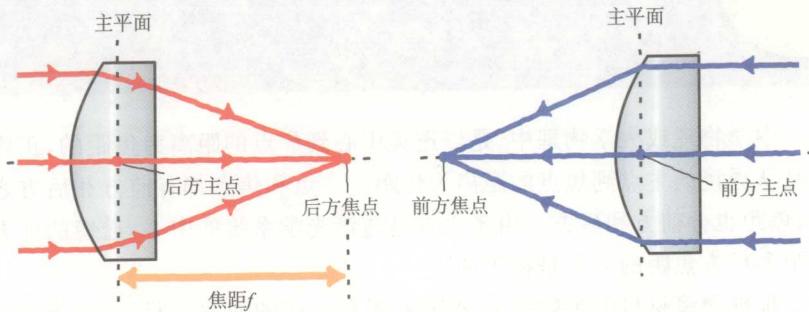


图2 薄透镜的主点

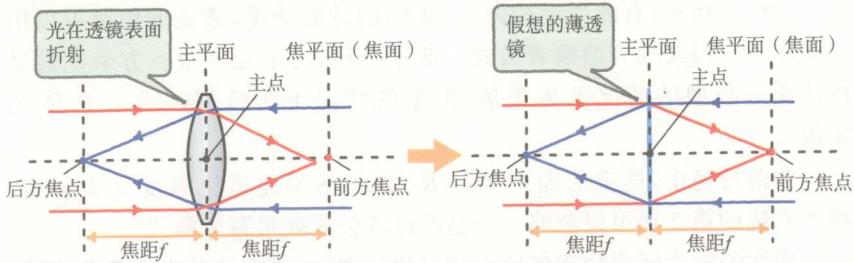
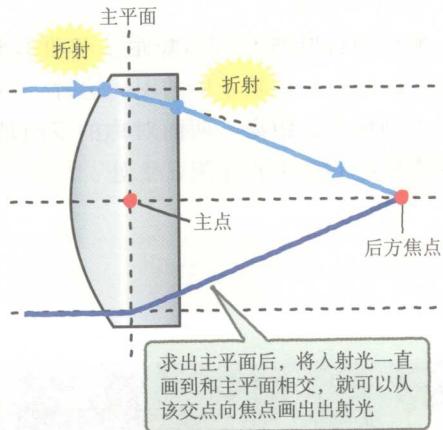
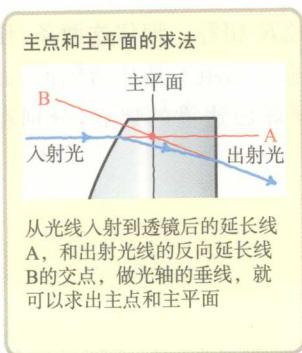


图3 平凸透镜的主点和主平面的求法



036

薄球面透镜焦距的计算方法

中学物理或大学物理中,是以透镜中心到焦点的距离为焦距的,正确的是从透镜的主点到焦点的距离为焦距。主点和焦点都有前方和后方之分,焦距也分前方和后方。由于主点是透镜光学系统的中心,透镜的前方焦距和后方焦距的大小是相等的。

根据透镜材料的折射率 n 、透镜表面和后面的曲率半径^(注1) R_1 和 R_2 、透镜的厚度 d ,就能够求出球面透镜的焦距 f 。

如图 1 所示,有曲率半径为 R_1 和 R_2 的球面透镜,透镜的焦距可以用①式求出。①式称为磨镜者公式。曲率半径,对于光入射一方来说透镜的球面是凸型的情况下为正值,凹型的情况下为负值。图 1 中 R_2 为负值。

在薄透镜中,透镜的曲率半径 R_1 和 R_2 的要比透镜厚度 d 大得多,①式右边的第 2 项可以忽略。于是磨镜者公式就可写成②式。

通常的放大镜或物理实验中使用的凸透镜,两面是对称的双凸透镜,因此 R_1 和 R_2 的大小相等。 R_1 为正值而 R_2 为负值,写成 $R_1 = R$ 、 $R_2 = -R$,就得到③式。

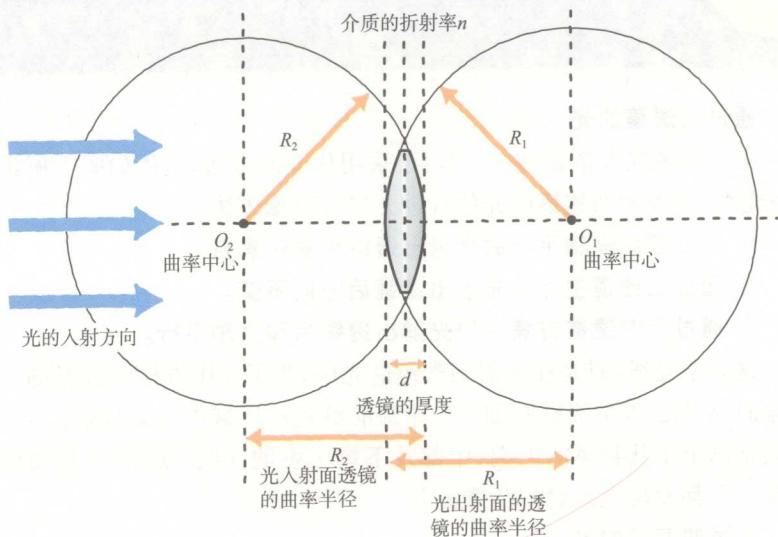
玻璃的折射率为 1.5,焦距 f 和曲率半径 R 相等。记住这两条,便于透镜作图时画出比较正确的图。这时,不要忘了焦距不是从透镜面,而是从主点到焦点的距离。两面对称的双凸玻璃球面透镜的焦点,分别在透镜曲率中心 O_1 、 O_2 的外侧 $d/2$ 处^(注2)。



- 薄透镜的焦距是由材质的折射率及球面的曲率半径决定的
- 两面对称的薄球面透镜的焦距和曲率半径基本相等

注 1: 曲率半径是将曲线看成是某个圆的一部分时该圆的半径。曲率半径越小曲线就越弯。和弯道的曲率 R 相同。

图1 平凸透镜的后方主点和前方主点



磨镜者公式

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{d(n-1)^2}{nR_1 R_2} \quad \text{.....①式}$$

薄透镜的情况下

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{.....②式}$$

两面是对称形的双凸透镜的情况下

$$\frac{1}{f} = \frac{2(n-1)}{R} \quad \text{.....③式}$$

平凸透镜的情况下，平的一面的曲率半径可视为无穷大

注 2: 随玻璃的折射率而变化。

通过凸透镜的光

中学物理或大学物理中,学习了采用作图的方法,运用如图 1 所示的 3 条光线,来表示凸透镜中光的行进方式和成像方法。

- ① 和凸透镜光轴平行的光射出透镜后通过焦点。
- ② 通过凸透镜主点的光射出透镜后方向不变。
- ③ 通过凸透镜前方焦点的光射出透镜后和光轴平行。

这 3 条光线,只是在入射到透镜的光中,为了作图方便而选择的。从物体的 A 点出发的光线在如图 2 中涂有红色的区域中有无数条。在图 2 中只是画出了从物体的上端、中部及下端出发的光线,实际上,从物体的所有面上都发出光入射到凸透镜上。

通过凹透镜的光

凹透镜的情况下,我们来考虑图 3 所示的 3 条光线。

- ① 和凹透镜光轴平行的光射出透镜后如同在后方焦点射出的光一样前进。
- ② 通过凹透镜主点的光射出透镜后方向不变。
- ③ 射向凹透镜前方焦点的光射出透镜后和光轴平行。

射入凹透镜的光,射出凹透镜后发散前进,在光的反向延长线上得到虚像。凹透镜的这 3 条光线,也只是为作图方便而选择的。和表示凸透镜中光的行进方式的图 2 相同,从物体的 A 点出发射入凹透镜的光线有无数条。

根据上述的 3 条光线可以理解透镜的基本作用,但是要注意的是过于拘泥于这 3 条光线,有时也会妨碍理解。



- 从物体的一点出发向透镜入射的光线有无数条
- 对于透镜中光的行进方式而言,可以考虑有代表性的3条光线

图1 通过凸透镜的3条光线

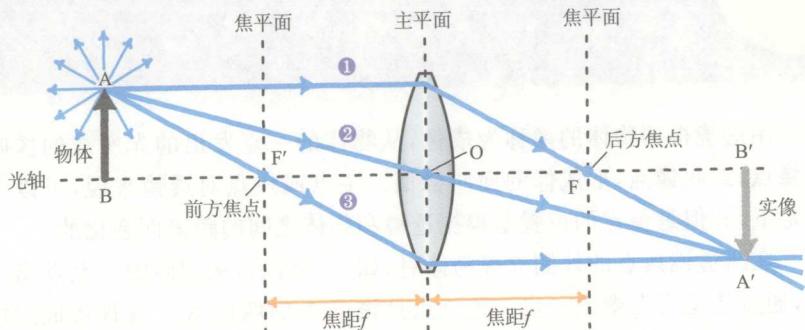


图2 通过凸透镜的光

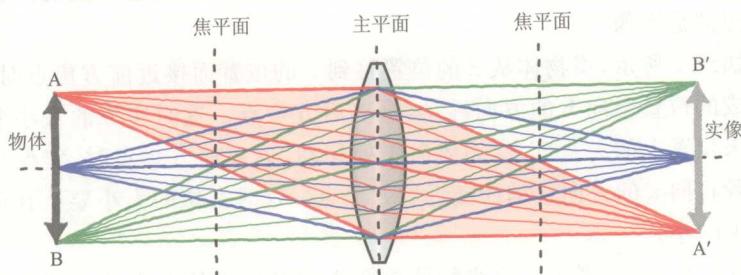
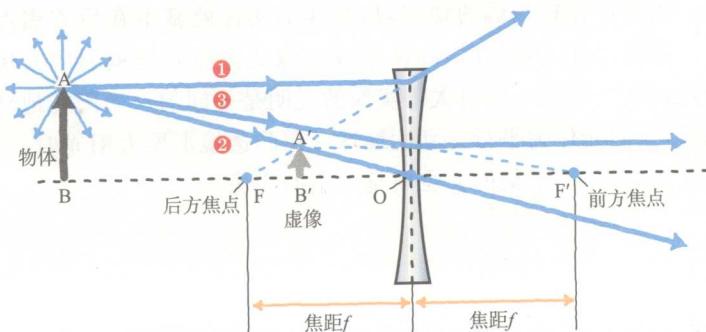


图3 通过凹透镜的光



用透镜得到物体的像称为成像，从物体的一点发出的光所成的像叫成像点，或叫像点，形成像的面叫像面。主点或焦点对透镜来说，可以立刻定下来，但是像点的位置是根据透镜和物体之间的距离而变化的。

在凸透镜焦点的外侧放置物体时，如图 1 所示，从物体的一点发出的光，通过透镜后汇聚到一点。这一点是物点 A 的像点 A'。在像形成的位置上放置屏幕后，就会在屏幕上映出一个上下左右反转的倒像。这个倒像是光汇聚而成的实像。举身边的例子来说，投影仪或电影院的屏幕上的映像都是实像。

如图 2 所示，将物体从 2 的位置移到 3 的位置而接近前方焦点时，实像形成的位置会向 b 的方向移动，远离后方焦点。这时实像的大小要比在原来位置上的大。反之，物体向 1 处移动，远离前方焦点时，实像形成的位置将向 a 的方向移动而接近后方焦点。这时实像的大小要比在原来位置上的小。

在这里，我们考虑一下将物体放在离透镜更远的地方的时候实像将在哪里形成呢？随着物体远离凸透镜，实像的形成位置，就会逐渐靠近后方焦点。当物体在相当远的地方时，物体的实像就基本在后方焦点的位置上了。即物体在无限远时，物体形成实像的像面和透镜的后方焦面是一致的，这和(034)图 1 中对太阳实像的说明是相同的。太阳在地球无限远的地方，太阳光作为平行光到达地球。用凸透镜汇聚太阳光时，会汇聚在凸透镜的焦点上，聚集的光也就是太阳的实像。



- 凸透镜所成的实像，是光汇聚而成的倒立像
- 改变物体放置的位置，实像的形成位置和实像的大小也会变化

图1 凸透镜成的实像

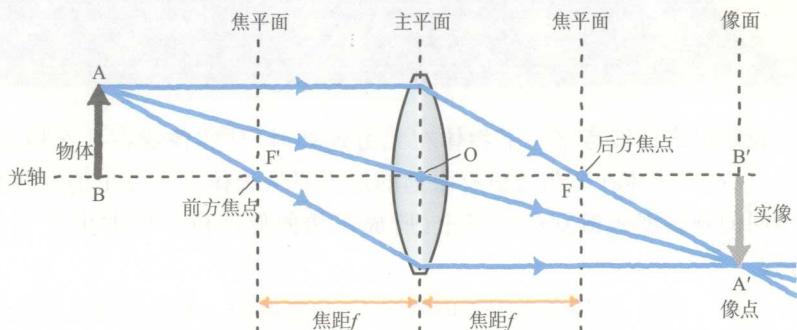


图2 物体的位置和实像形成位置的关系

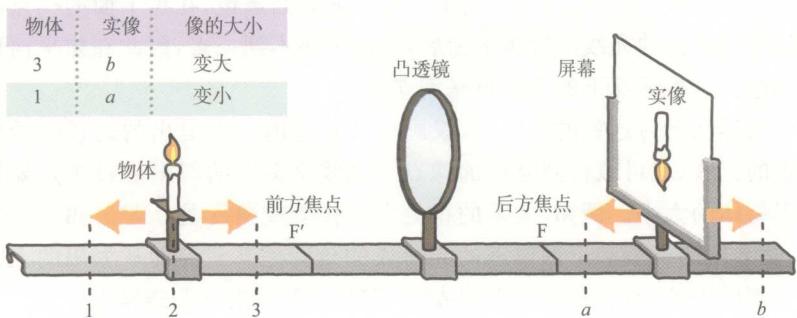
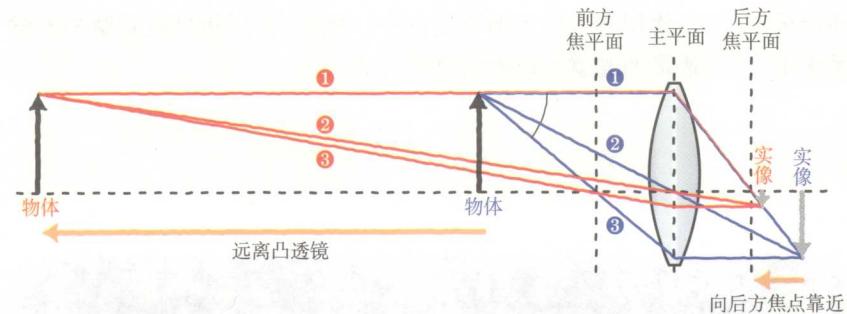


图3 物体远离凸透镜时



039

从无穷远处传来的光通过凸透镜后在哪儿成像

我们再来详细考察一下物体在无穷远处时，其实像成在什么地方。如图 1 所示，物体在离凸透镜有限远的地方时从物体一点发出的光各自以不同的倾斜度入射到凸透镜上，所成实像的像面位于后方焦点 F 的外侧。

如图 2 所示，物体在无穷远的情况下，从物体的一点射来的光作为平行光入射到透镜上。从物体中心射出的光线（绿）作为和光轴平行的光入射到透镜，在后方焦点处汇集。从物体的上侧射来的光线（红）和下侧射来的光线（蓝），各自作为倾斜的平行光入射到凸透镜，在焦平面的一点汇聚。红、绿、蓝的光线经过焦平面后，再也汇集不到一点，因此在焦平面形成实像。这种情况下的实像也是倒立像。

物体在无穷远处的情况下，仅画出从物体的一点射出的通过凸透镜主点的光线，就可以得到对应的像点。光线呈多大的斜率通过主点要取决于物体的大小。例如，太阳的视见大小换算成角度是 0.5° 。如图 3 所示，从太阳的上侧和下侧射来的光所成的角度是 0.5° 。即从太阳的上侧和下侧射来的光，各自以和光轴成 0.25° 的斜度入射到凸透镜上。

即使物体在有限距离处，如果凸透镜的直径和物体到凸透镜间的距离相比足够小的话，从物体的一点射来的光也可以看成是平行光。在这种情况下，可以使用图 2 所示的作图方法。例如，在照相机或眼睛的光学系统中，进入透镜的光就可以看成是平行光。



- 从无穷远处的物体的一点射出的光作为平行光入射到凸透镜上
- 入射到凸透镜的光看成是平行光的时候，像面和焦平面是一致的

图1 物体在有限远的地方时

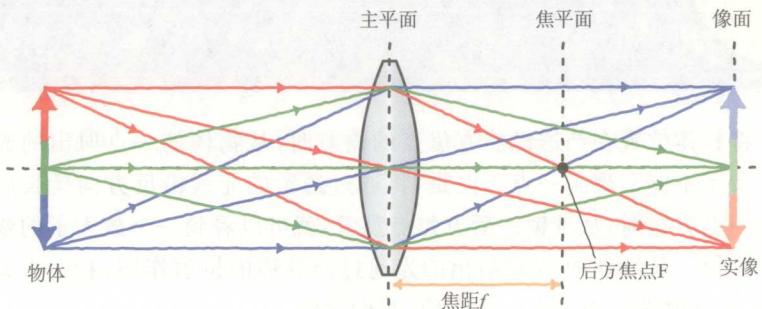


图2 物体在无穷远处时

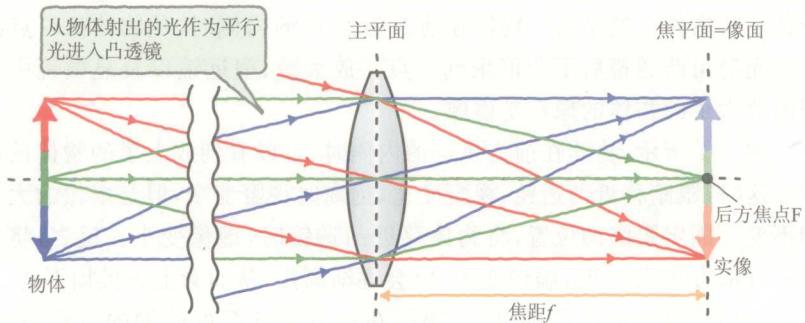
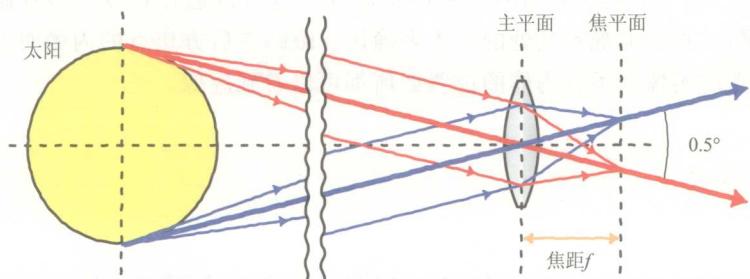


图3 凸透镜所成的太阳的实像



将物体放置在凸透镜前方焦点的内侧时,从物体的一点射出的光如图1所示不能汇聚到一点。但是,将通过透镜的光线沿反方向延长后可交于一点。这时,从透镜的后方焦点观看,就可以看到一个放大了的物体的正立像。从物体的A点射出的光通过凸透镜的折射作用,看上去就像是从A'点射来的光一样。这个像,叫做虚像。

虚像,并不是光汇聚而成的像,因此在形成虚像的位置放一个屏幕,在该屏幕上也不会映出像。此外,在物体的相反方放置屏幕,也不会在该屏幕上映出像。这是由于物体在前方焦点F'的内侧时,从物体的一点射出的光射出凸透镜后不会汇聚到一点。放大镜、望远镜以及显微镜中看到的放大了的物体的像都是虚像。

如图2所示,物体在前方焦点的内侧时,可以看到放大了的物体的虚像。这时,眼睛移近凸透镜,视野变宽,远离时视野变窄,但是虚像的大小却不变。固定眼睛的位置,将物体移近凸透镜时,虚像变小。反之,将物体移近前方焦点F'时,虚像变大,但会逐渐离焦,从而看上去模糊不清。

物体在前方焦点F'的外侧,眼睛在后方焦点F的外侧的时候,看到的不是虚像而是实像。同时,即使物体在前方焦点F'的外侧,而眼睛在后方焦点F的内侧的时候,看到的是虚像。这可以通过将放大镜像眼镜一样贴在眼睛上观看远处的物体来确认。眼睛在后方焦点的内侧时看不到倒立的实像。不管物体的位置如何都可以看到虚像。



- 通过凸透镜看到的正立像叫虚像
- 虚像不是光汇聚而成的像

图1 凸透镜成的虚像

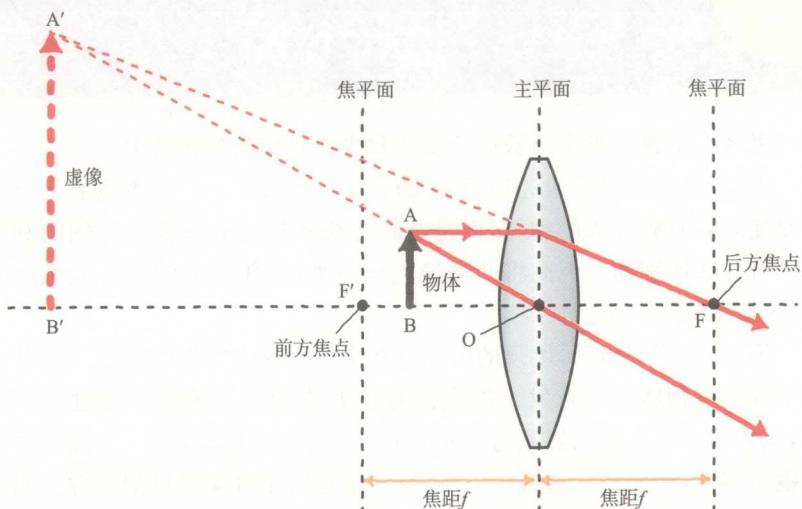
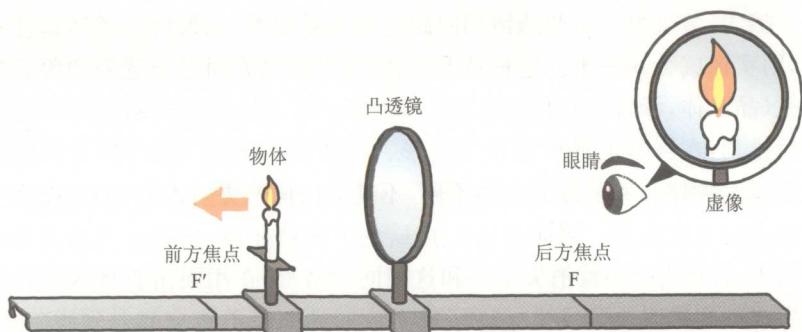
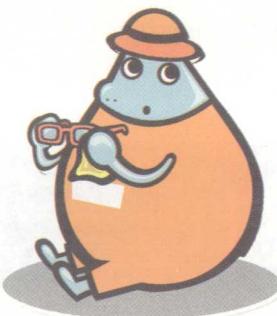


图2 物体和眼睛的位置以及虚像的观察方法



凸透镜所成的虚像虽然映不到屏幕上，但人们可以透过凸透镜看到虚像，这是因为眼睛的晶状体起到凸透镜的作用，在视网膜上形成了实像

透过透镜可以看到虚像，原来是因为眼睛的晶状体起到凸透镜的作用，在视网膜上形成了实像的缘故啊



041

遮住半个凸透镜后实像和虚像如何变化

思考一下遮住半个凸透镜后实像和虚像是如何变化的呢？

虚像，只是直接看通过透镜射来的光而看到的。由于透镜的折射作用而使眼睛看到放大的物体，但是观察方法和透过玻璃看另一侧的物体是没有什么区别的。因此将凸透镜遮住一半，遮住部分的光不能到达眼睛，虚像就缺了一半。

那么，如图2所示，屋顶的荧光灯在桌子上映出实像的情况下是什么样子呢？从物体上一点发出的光的行进方式如图3所示。通过图3可知，从物体一点出发入射到透镜的光中，一部分被挡板遮住，一部分穿过透镜。因此，即使遮住透镜的一半，桌子上也会出现荧光灯的实像。只是从图3可知，通过透镜的光线减少了。这意味着形成实像的光量减少，因此在屏幕上得到的实像，比原来的实像发暗。

接着，透过另一个凸透镜用眼睛直接去看实像，如果将凸透镜遮住一半，则实像就会缺一半。这种情况下，需要考虑到光通过凸透镜和眼睛的透镜（晶状体，译者注）时的方式。图4表示出了将焦距相同的两片透镜前后排列，在屏幕上形成实像的情形。凸透镜 L_1 形成的实像（对凸透镜 L_2 来说是物体），和实际的物体不同，不是向四面八方射出光，而只能在特定的方向上射出光。因此将凸透镜 L_1 的下侧挡住后，从物体上侧发出的射入 L_2 的光线（红）就消失了。和这相同的情形，在用眼睛直接观察凸透镜所成的实像时也会发生。 L_1 所成实像的光如果不能全部射到眼睛上，就只能看到欠缺的实像。因此，这时移动眼睛的位置，可看到的实像的范围就会发生变化^{（注）}。



- 将凸透镜一半遮挡时，屏幕上实像的形状不变但亮度变暗
- 将凸透镜一半遮挡时，虚像和直接用眼看到的实像都会欠缺一半

注：移动视线，可看见遮挡部分的实像。

图1 凸透镜被遮住一半时虚像的情形

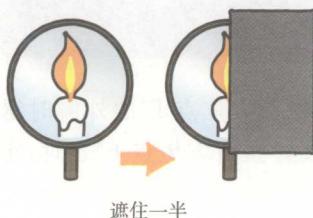


图2 凸透镜被遮住一半时实像如何变化?

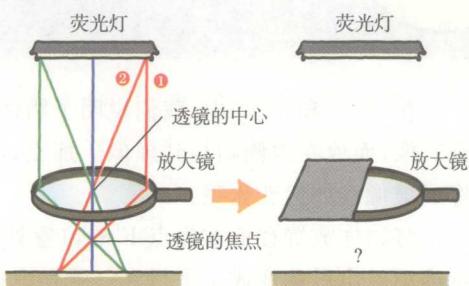


图3 用挡板将凸透镜的一半遮住

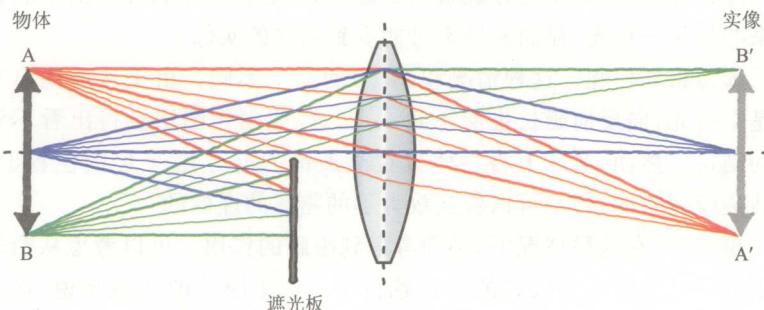
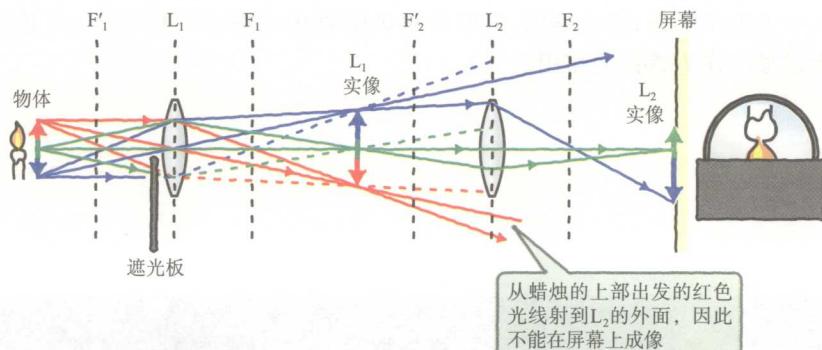


图4 用两片凸透镜形成的实像



042

物体位于焦点的位置上时实像和虚像如何变化

在(039)和(040)中,我们说明了物体放置在前方焦点 F' 的外侧时得到实像,而放在内侧则得到虚像。那么,物体放置在前方焦点 F' 处时,实像或虚像会如何变化呢?

将物体放置在前方焦点 F' 的位置处时,物体发出的光,如图 1 所示,从透镜射出后就变成了平行光。就是说物体的一点发出的光射出透镜后不能汇聚。因此无论屏幕放在何处,也不能映出实像。

那么,从物体的相反方观察该凸透镜时,能看到什么呢?由于从透镜出来的光是平行光,显而易见不可能看到倒立的实像。

虚像将如何呢?这种情况和(040)的图 1 不同。由于从透镜出来的光是平行光,向反向延长也交不到一点。因此用作图法会得出看不到虚像的结论。然而,实际上将物体放在凸透镜的前方焦点 F' 的位置上,透过凸透镜观察的话,是可以看到放大了的物体的虚像的。

事实上,在这种情况下,必须考虑到眼睛的作用。可以考虑从凸透镜射出的平行光射入到眼睛的透镜就行了。对于眼睛的透镜来说,该平行光和从无限远处物体的一点射来的光是等同的。而实际上无穷远处并没有物体的存在。将平行光反向延长就会在无穷远处看到物体的虚像^(注)。

无论是实像,还是虚像,只要是用眼睛直接观察像的情况下,就必须考虑眼睛作为透镜的作用。



- 将物体放置在凸透镜的前方焦点 F' 上时, 得不到实像
- 将物体放置在凸透镜的前方焦点 F' 上时, 可以看到无穷远处的虚像

注: 在第 5 章中将作为“放大镜的原理”予以详细说明。

图1 将物体放置在凸透镜的前方焦点F'上时

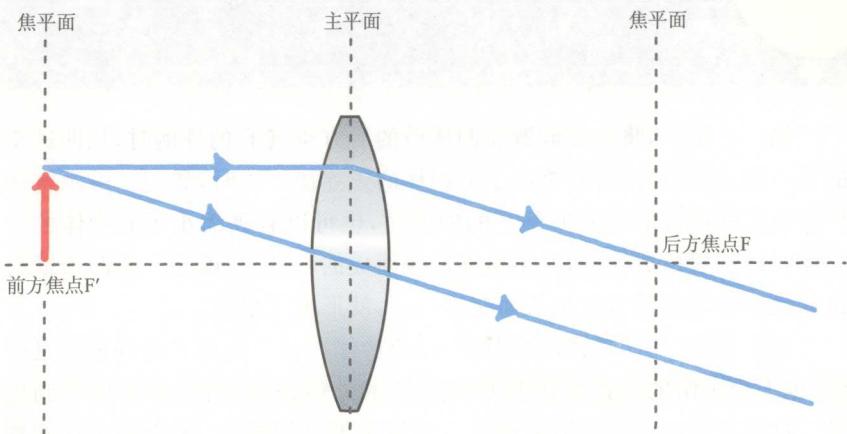
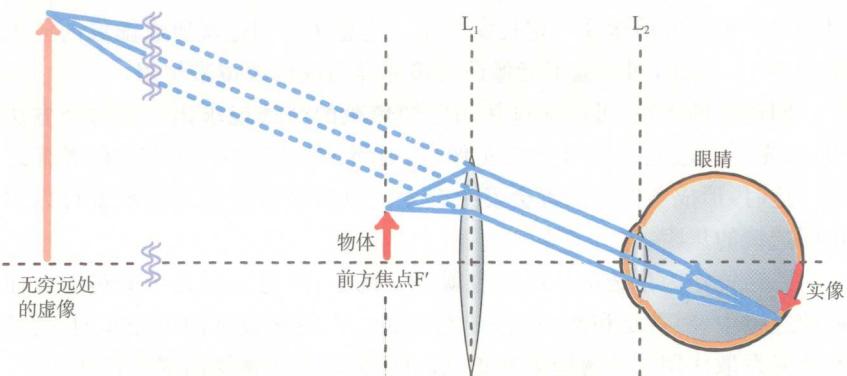


图2 将物体放置在前方焦点F'时看到的虚像



由于眼睛的作用，可以使物体的虚像在视网膜上形成实像呀



043

凹透镜成的虚像

如图1所示,将物体放置在凹透镜的后方焦点F的外侧时,从凹透镜的另一侧观看,可以看到缩小了的物体的正立像。同时,如图2所示将物体放置在凹透镜的后方焦点F的内侧时,也可以看到缩小了的物体的正立像。凹透镜所成的像,并不是光汇聚而成的,所以是虚像。从凹透镜射出的光线分别向反方向延长而交于一点,就形成了虚像。

如上所述,在凹透镜的情况下,无论物体在后方焦点F的内侧还是外侧,也无论眼睛的位置是在前方焦点F'的外侧还是内侧,都可以看到虚像。这可以通过近视眼镜来确认。近视眼镜是凹透镜,无论看多远的物体,或将眼镜远离眼睛来看物体,都只能看到正立的虚像。

从图1和图2可知,凹透镜所成的虚像随物体靠近凹透镜而变大。但是凹透镜所成的虚像一定比实物小。这意味着凹透镜所成虚像的放大率小于1。因此,凹透镜不能像凸透镜那样当成放大镜来使用。

凹透镜的焦距,可以通过使用已知焦距的凸透镜求出。在这个方法中,首先用凸透镜在屏幕上成实像,然后将凹透镜放在凸透镜和屏幕之间。这时,形成实像的位置会发生改变。根据该位置的该变量就可以求出凹透镜的焦距。

凹透镜作为单透镜使用的也就是眼镜了,但是在由几个透镜组合而成的透镜中,经常是和凸透镜一起使用的。凸透镜发挥的聚光作用,用具有使光发散作用的凹透镜来补正,就可以提高整个透镜的成像特性^(注)。



- 凹透镜所成的像是虚像,不能成实像
- 凹透镜所成虚像的放大率小于1

注:在第4章“球差”中将详细说明。

图1 凹透镜所成的虚像（物体在后方焦点的外侧时）

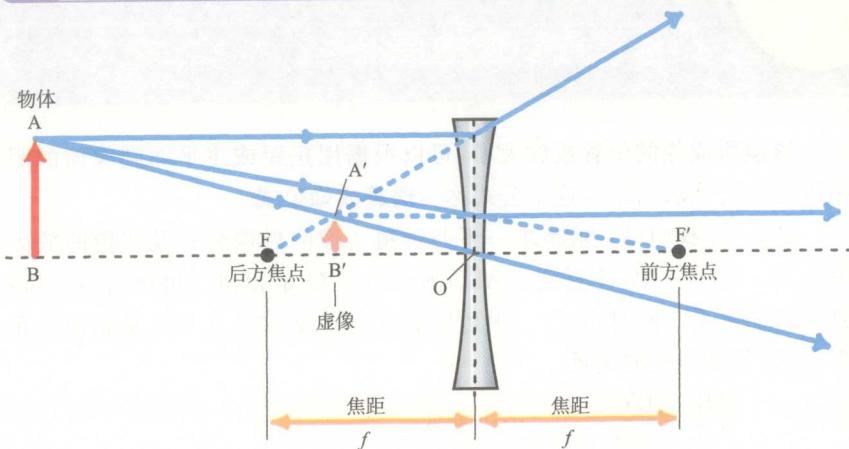
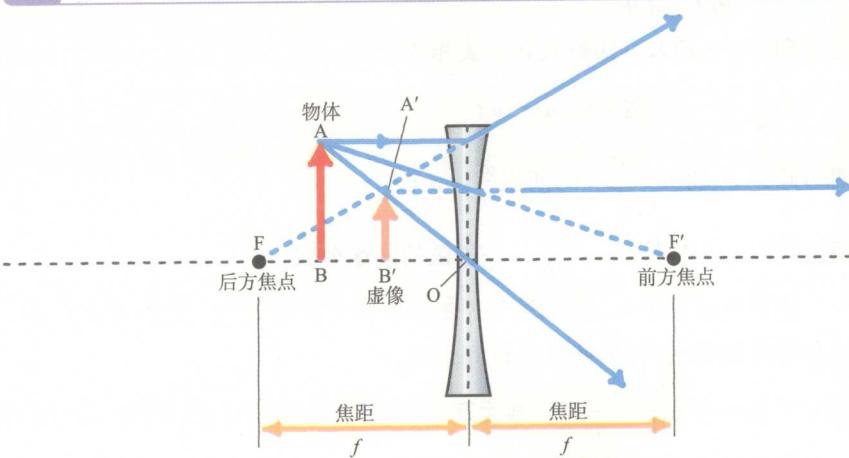


图2 凹透镜所成的虚像（物体在后方焦点的内侧时）



对凹透镜来说，无论物体或眼睛的位置在哪里，都只能看到虚像



044

透镜的成像公式和放大率①

凸透镜成实像的情况

透镜所成像的位置或放大率,可以根据用焦距或主平面到像面的距离表达的公式求出来。这个公式称为透镜成像公式。

那么,让我们马上就来求一下凸透镜实像的成像公式及实像的放大率公式。在图1中,注意到 $\triangle ABO$ 和 $\triangle A'B'O$ 是相似三角形,就可以得到①式的关系。同时,在图2中可以看到 $\triangle POF$ 和 $\triangle A'B'F$ 是相似三角形,就会得到②式的关系。

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{B'O}{BO} = \frac{b}{a} \quad \dots\dots \text{①式}$$

$$\frac{A'B'}{PO} = \frac{B'F}{OF} = \frac{b-f}{f} \quad \dots\dots \text{②式}$$

注意到 $AB=PO$,可知①式和②式相等。

$$\text{由 } \frac{b}{a} = \frac{b-f}{f}, \text{ 得 } bf = ab - af$$

$$\text{两边除以 } f, \text{ 得 } b = \frac{ab}{f} - a, \text{ 所以 } \frac{ab}{f} = a + b$$

$$\text{两边除以 } ab, \text{ 得 } \frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \dots\dots \text{透镜的成像公式}$$

透镜的放大率 m 是实像的高度和物体的高度之比,就是 $A'B'/AB$ 。这和①式是相同的,因此可以得到下式。

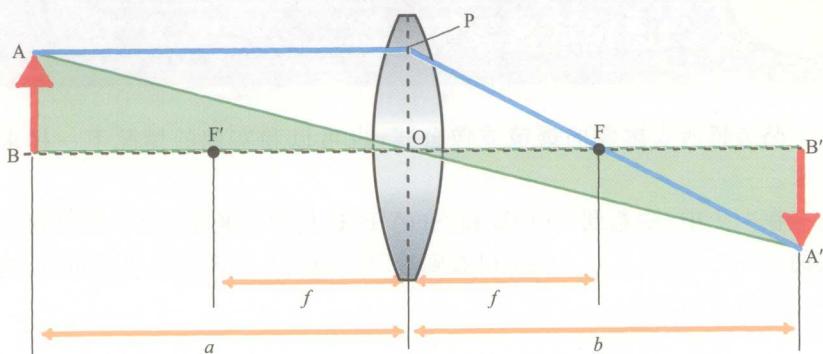
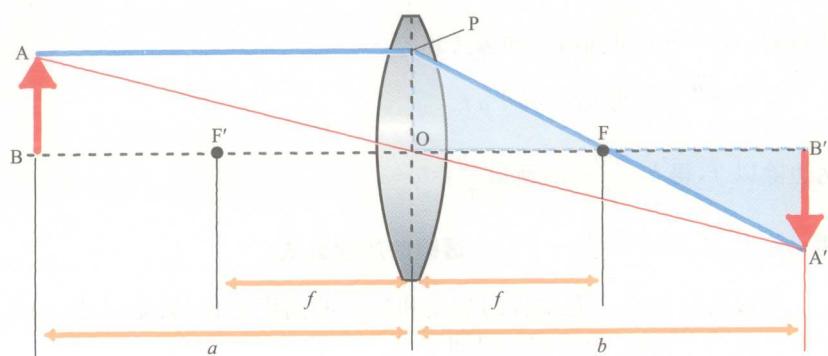
$$m = \frac{A'B'}{AB} = \frac{b}{a} \dots\dots \text{放大率}$$

如上所述,透镜的成像公式和放大率,从图1或图2的三角形相似的关系上就可以导出。



- 凸透镜的成像公式—实像的情况下

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad \text{透镜的放大率: } m = \frac{b}{a}$$

图1 凸透镜所成的实像 $\triangle ABO \sim \triangle A'B'O$ 图2 凸透镜所成的实像 $\triangle POF \sim \triangle A'B'F$ 

透镜的成像公式虽说要背下来，但从图上也可以求出哟



045

透镜的成像公式和放大率②

凸透镜成虚像的情况

凸透镜所成虚像的透镜成像公式,也可以和实像的情况下一样求出来。

在图1中,注意到 $\triangle OAB$ 和 $\triangle OA'B'$ 是相似三角形,就可以得到①式的关系。同时,在图2中可以看到 $\triangle FPO$ 和 $\triangle FA'B'$ 是相似三角形,就会得到②式的关系。

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{B'O}{BO} = \frac{b}{a} \quad \dots\dots \text{①式}$$

$$\frac{A'B'}{PO} = \frac{B'F}{OF} = \frac{b+f}{f} \quad \dots\dots \text{②式}$$

注意到 $AB=PO$,可知①式和②式相等。

$$\text{由 } \frac{b}{a} = \frac{b+f}{f}, \text{ 得 } bf = ab + af$$

$$\text{两边除以 } f, \text{ 得 } b = \frac{ab}{f} + a, \text{ 所以 } \frac{ab}{f} = b - a$$

$$\text{两边除以 } ab, \text{ 得 } \frac{1}{f} = \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \dots\dots \text{透镜的成像公式}$$

透镜的放大率 m 是虚像的高度和物体的高度之比,就是 $A'B'/AB$ 。这和①式是相同的,因此可以得到下式。

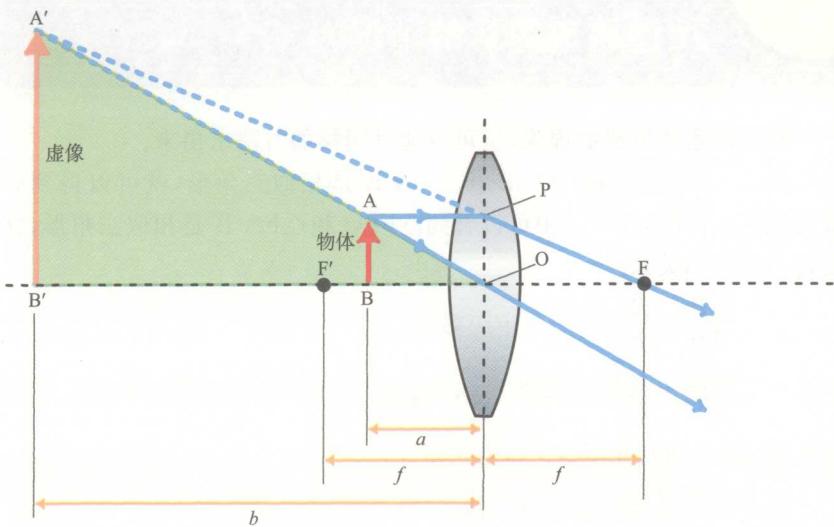
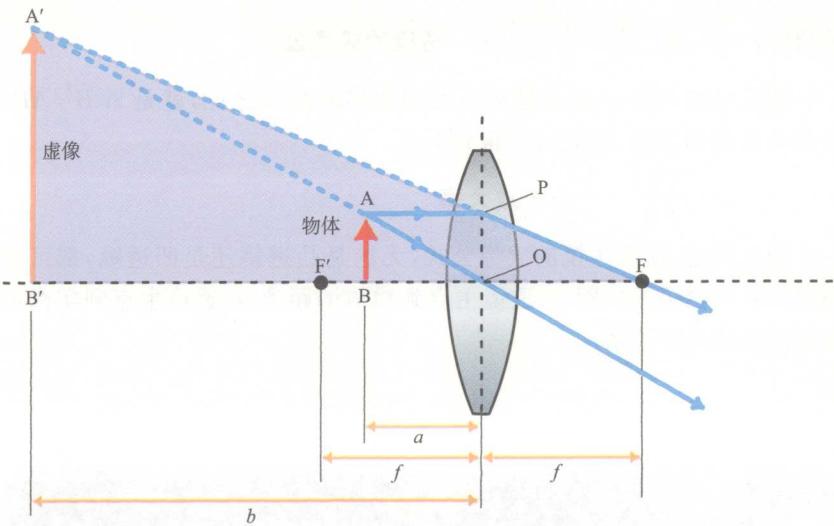
$$m = \frac{A'B'}{AB} = \frac{b}{a} \dots\dots \text{放大率}$$

如上所述,和实像的情况一样,可以从图上导出透镜的成像公式和放大率。



- 凸透镜的成像公式—虚像的情况下

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} - \frac{1}{b}, \text{ 透镜的放大率: } m = \frac{b}{a}$$

图1 凸透镜所成的虚像 $\triangle OAB \sim \triangle OA'B'$ 图2 凸透镜所成的虚像 $\triangle POF \sim \triangle A'B'F$ 

透镜的成像公式和放大率③ 凹透镜成虚像的情况

对于凹透镜所成的虚像,也可以通过同样的方法求出来。

在图1中,注意到 $\triangle OAB$ 和 $\triangle OA'B'$ 是相似三角形,就可以得到①式的关系。同时,在图2中可以看到 $\triangle FPO$ 和 $\triangle FA'B'$ 是相似三角形,就会得到②式的关系。

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{B'O}{BO} = \frac{b}{a} \quad \dots\dots \text{①式}$$

$$\frac{A'B'}{PO} = \frac{B'F}{OF} = \frac{f-b}{f} \quad \dots\dots \text{②式}$$

注意到 $AB=PO$,可知①式和②式相等。

$$\text{由 } \frac{b}{a} = \frac{f-b}{f}, \text{ 得 } bf = af - ab$$

两边除以 f ,得 $b = a - \frac{ab}{f}$,所以 $-\frac{ab}{f} = b - a$

两边除以 ab ,得 $-\frac{1}{f} = \frac{1}{a} - \frac{1}{b}$ $\dots\dots$ 透镜的成像公式

透镜的放大率 m 是虚像的高度和物体的高度之比,就是 $A'B'/AB$ 。这和①式是相同的,因此可以得到下式。

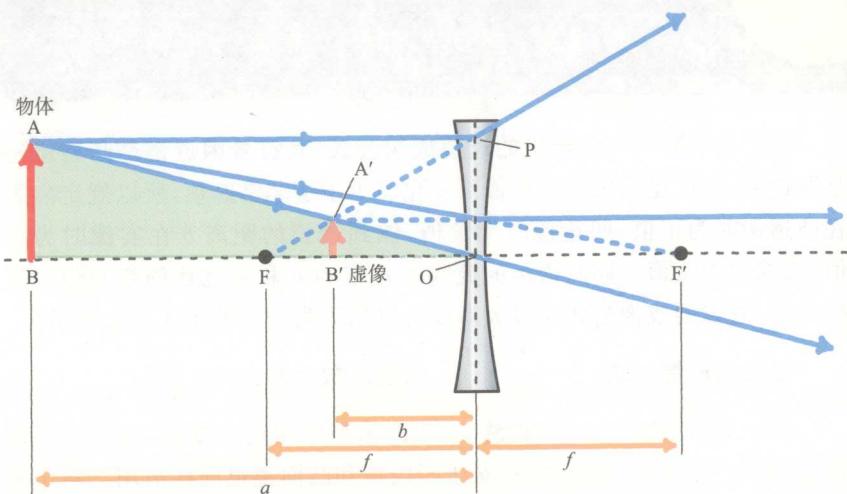
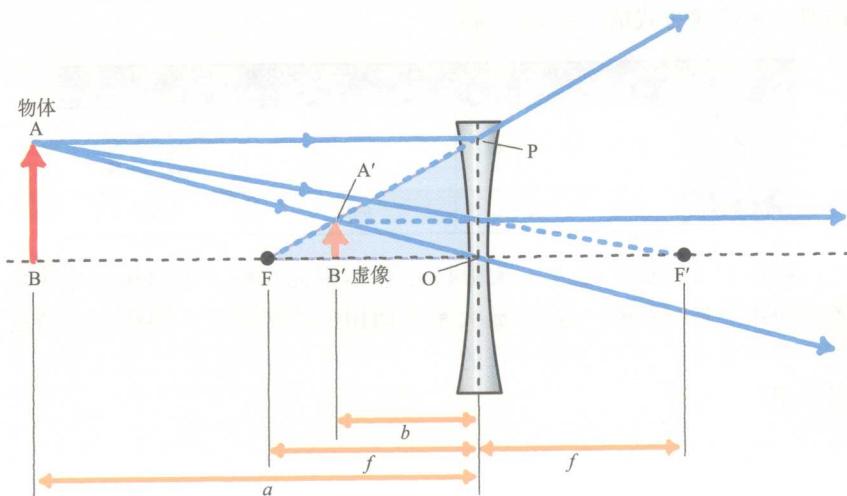
$$m = \frac{A'B'}{AB} = \frac{b}{a} \quad \dots\dots \text{放大率}$$

如上所述,使用透镜的成像公式,无论是凸透镜还是凹透镜,都可以简单地求出透镜的焦距 f 、透镜主点到物体的距离 a 、透镜主点到实像或虚像的距离 b 的关系。



- 凹透镜的成像公式—虚像的情况下

$$-\frac{1}{f} = \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \quad \text{透镜的放大率: } m = \frac{b}{a}$$

图1 凹透镜所成的虚像 $\triangle OAB \sim \triangle OA'B'$ 图2 凹透镜所成的虚像 $\triangle FPO \sim \triangle FA'B'$ 



047

透镜成像公式的总结

在(044)到(046)中导出的透镜成像公式,其符号因透镜是凸透镜还是凹透镜,成的是实像还是虚像而变化。由于这非常麻烦,所以规定焦距在凸透镜时为正值,凹透镜时为负值,像到透镜的距离 b 在实像时为正值,虚像时为负值。同时透镜的放大率规定为 b 和 a 之比的绝对值。这样的话,透镜的成像公式和放大率就可以用下列的一般化式子来表示。

$$\text{透镜的成像公式: } \frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad \text{透镜的放大率: } m = \left| \frac{b}{a} \right|$$

无论是凸透镜,还是凹透镜,也无论像是实像还是虚像,这个式子都可以使用。另外,不仅是透镜,对于凹面镜和凸面镜也同样适用。对于复数个透镜组合而成的复合透镜以及透镜和镜子组成的复杂光学系统,只要光学系统整体的主点和焦距能求出来的话,就可以使用该公式。 f 、 a 、 b 的符号和成像方式的关系如下所示:

	f	a	b	成像方式
凸透镜	$f > 0$	$a > 0$	$a > f \quad a < f$ $b > 0 \quad b < 0$	$a > f \quad a < f$ 实像 虚像
凹透镜	$f < 0$	$a > 0$	$b < 0$	虚像

物体在无穷远处时, $1/a$ 无限趋近于0,因此焦距 f 和透镜到成像位置的距离 b 是一致的。这时,放大率不能用上式来定义。物体在无穷远处时放大率的求法,将在第4章的(077)“像的大小和亮度”及第5章中予以说明。



- 通用的透镜成像公式和放大率

$$\text{透镜的成像公式: } \frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad \text{透镜的放大率: } m = \left| \frac{b}{a} \right|$$

问题1

物体放置在焦距为50cm的凸透镜前75cm处，试求该物体所成实像的位置和放大率

解：

将焦距 $f=50\text{cm}$ 、凸透镜到物体的距离 $a=75\text{cm}$ 带入到透镜成像公式中。

$$\text{由 } \frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad \text{得} \quad \frac{1}{50} = \frac{1}{75} + \frac{1}{b}$$

$$\frac{1}{b} = \frac{3}{150} - \frac{2}{150} = \frac{1}{150}$$

$$\text{由 } m = \left| \frac{b}{a} \right| \quad \text{得} \quad m = \left| \frac{150}{75} \right| = 2$$

实像的位置 $b=150\text{cm}$, 放大率 $m=2$ 倍

问题2

焦距为50cm的凹透镜所成的虚像在透镜前40cm处，试求物体的位置和放大率

解：

将焦距 $f=-50\text{cm}$ 、凹透镜到虚像的距离 $b=-40\text{cm}$ 带入到透镜成像公式中。

$$\text{由 } \frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad \text{得} \quad \frac{1}{-50} = \frac{1}{a} + \frac{1}{-40}$$

$$\frac{1}{a} = \frac{5}{200} - \frac{4}{200} = \frac{1}{200}$$

$$\text{由 } m = \left| \frac{b}{a} \right| \quad \text{得} \quad m = \left| \frac{-40}{200} \right| = 0.2$$

物体的位置 $a=200\text{cm}$, 放大率 $m=0.2$ 倍

不要忘了 f 和 a 的符号，是根据透镜是凸透镜还是凹透镜，成的像是实像还是虚像而变化的



计算透镜放大率的另一个方法

像平凸透镜那样透镜的主点和透镜中心不一致的情况下，根据透镜成像公式来求物体的位置或像的位置就要麻烦一些了。在此，我们可以考虑使用前方焦点 F' 到物体的距离 a' 和后方焦点到成像位置的距离 b' 来计算。

在图 1 中，注意到 $\triangle AF'R$ 和 $\triangle F'QO$ 是相似三角形，就可以得到①式的关系。同时， $\triangle A'FS$ 和 $\triangle FPO$ 是相似三角形，可得到②式的关系。

$$\frac{F'R}{QO} = \frac{a'}{f} \quad \dots\dots \text{①式} \quad \frac{FS}{PO} = \frac{b'}{f} \quad \dots\dots \text{②式}$$

由于 $\gamma = F'R = PO$ 、 $\gamma' = FS = QO$ ，①式和②式分别为

$$\frac{\gamma'}{\gamma} = \frac{a'}{f} \quad \frac{\gamma'}{\gamma} = \frac{b'}{f}$$

γ/γ' 就是放大率，因此得到下式

$$a' = \frac{f}{m} \quad b' = fm$$

从这两个式子可知，当物体形成放大的实像时 $m > 1$ ，这时 $a' < f$ ， $b' > f$ 。当得到缩小的实像时 $m < 1$ ，这时 $a' > f$ ， $b' < f$ 。当物体形成等大的实像时 $m = 1$ ，这时 $a' = f$ ， $b' = f$ 。从此可知， $m = 1$ 时，物体和实像之间的距离最短。要注意 a' 和 b' 不是从透镜中心，而是从各自到前方焦点和后方焦点的距离。



- 前方焦点到物体的距离： $a' = \frac{f}{m}$
- 后方焦点到实像的距离： $b' = fm$

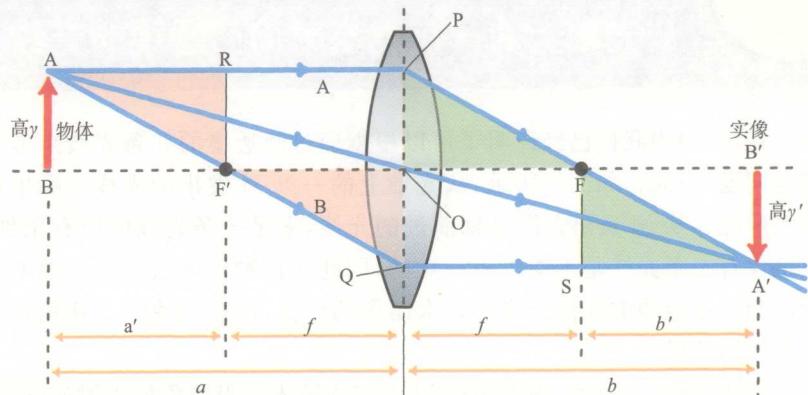
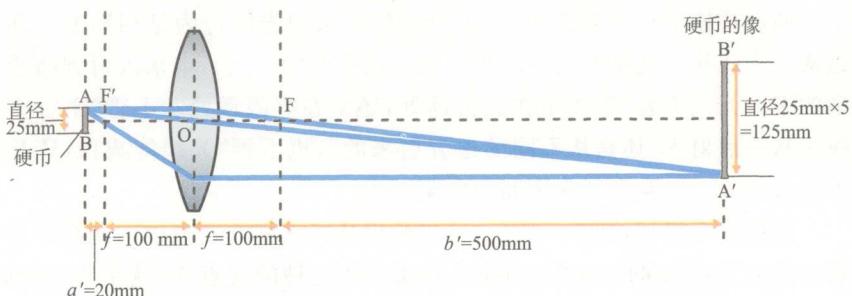
图1 凸透镜所成的实像 $\triangle AFR \sim \triangle F'QO$ $\triangle AFS \sim \triangle FPO$ 

图2 凸透镜所成的放大5倍的硬币的实像



直径为25mm的硬币通过焦距为100mm的凸透镜在屏幕上形成放大5倍的实像时， a' 和 b' 按下式计算

$$a' = \frac{f}{m} = \frac{100}{5} = 20\text{mm}$$

$$b' = fm = 100 \times 5 = 500\text{mm}$$

即将硬币放置在前方焦点前20mm处，在透镜的后方焦点外侧500mm处就会形成硬币的像

物体向前方焦点靠近时，可知实像会成在距离后方焦点的位置上。电影院的屏幕离放映机很远，就是因为要使放大许多倍的像映在屏幕上啊



049

透镜成像作图的技巧①

从光轴上的一点发出射向凸透镜的光线

在(037)中我们已经说明了可以根据通过凸透镜的3条光线来考虑成像问题。那么,如图1所示,从光轴上的一点M发出的光线在哪里形成实像呢?从M点出发沿光轴前进的光线,满足3条光线的所有条件,但是仅有一条光线是不能求出交点的,因此用这种作图法得不到像的位置。当然用透镜的成像公式可以求出像的位置,但这里我们不使用数式而用作图法试一下。

首先,如图2所示,画出通过M点和透镜成适当倾角的入射光线①。其次,画出平行于光线①而且通过透镜主点O的光线②,一直画到焦平面为止。光线②是辅助线,使用铅笔来画,以后能擦掉就行了。

向凸透镜平行入射的光,和无穷远处射来的光的行为是相同的。即这两条光线从凸透镜射出后应当汇聚于焦平面的一点。本来入射到凸透镜的平行光线不管“物体是在无穷远处,还是在有限远处”,不管“平行光线是从一点射来,还是从不同的地方射来的”,也不管“光线能成像,还是不能成像”,一定会交于焦平面上的某一点。

根据这个原理,如图3所示,可以画出从光线①的P点射向光线②和焦平面的交点Q的光线③。此时,光线③和光轴的交点M'就是M点所成实像的位置。找出这样的窍门之后,即使不使用透镜的成像公式,也可以简单地求出M点所对应的像点M'。

如上所述,着眼于通过透镜主点的光依旧直线前进的特点,将这条光及平行于该光线的光结合起来考虑的话,就能简单地追踪通过透镜的光线。



- 通过透镜主点的光和平行于该光的光在焦平面上汇聚
- 通过这个关系,可以求出从光轴上的一点射出的光线的成像点

图1 光轴上的一点发出的光在何处成像呢?

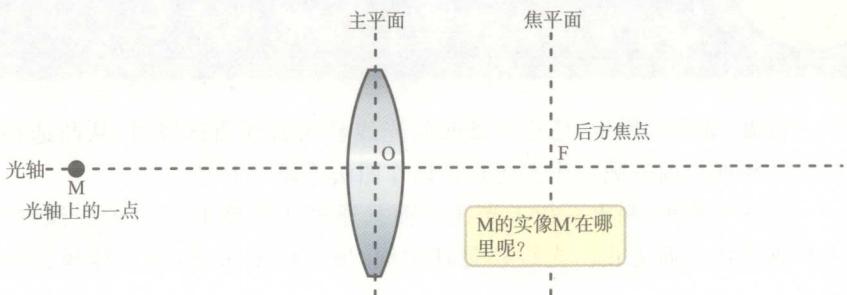


图2 画出光线①和光线②

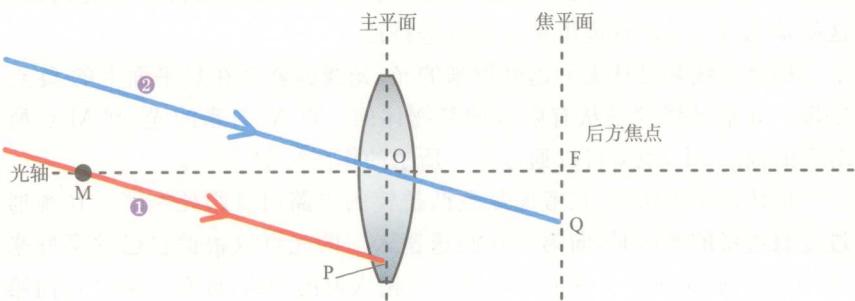
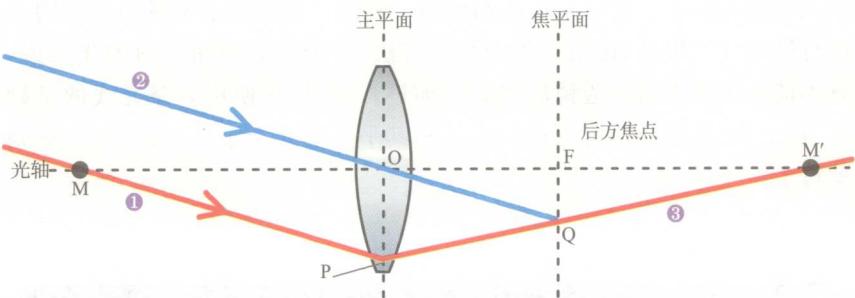


图3 从光线①画出光线③



050

透镜成像作图的技巧②

以任意倾角射向凸透镜的光线

接着,如图1所示,任意一条倾斜光线①入射到凸透镜时,从凸透镜射出后将如何前进呢?我们还是仅以作图法考虑一下吧。

如图2所示,画出平行于光线①而且通过凸透镜主点O的光线②,一直画到焦平面为止。光线②是辅助线,使用铅笔来画,以后能擦掉就行了。

由于光线①和光线②是平行光,所以在焦平面上汇聚。根据这个原理,可以画出从光线①的P点射向光线②和焦平面的交点Q的光线③。这就是光线①从凸透镜出来后的行进路径。

如果光线①是从无穷远处射来的光,光线①就会在焦平面上的Q点成像。如果光线①是从有限远的某物体的一点M射来的光,则M点所对应的像点M',也就可以通过图3所示的作图法求出^(注)。

记住这个方法后,在考虑复数凸透镜的光路时就很便利了。在画通过复数透镜的光线时,向第1片凸透镜入射的光可以根据自己的喜好来画,但是在画穿过第1片向第2片凸透镜入射的光线,或穿过第2片向第3片凸透镜入射的光线时就不行了,肯定需要考量任意一条斜入射光线的光路。使用上述方法,可以一步一步地求出通过第2片、第3片凸透镜的光的前进路径。在(037),我们说明了利用3条光线来考量凸透镜的光的行进方式。但是,使用3条光线的方法,对于任意倾角入射的光来说,就不能求出它射出凸透镜后将如何前进。这里,在使用3条光线的基础上,再记住“通过凸透镜主点的光及和其平行的光交于焦平面”这一规则就行了。



- 以任意倾角入射到凸透镜的光,与和其平行并通过凸透镜主点的光交于焦平面。利用这个关系,可以进行光线追踪

注:当然,不使用这个方法,仅用3条光线也能求出像点。

图1 以任意倾角入射到凸透镜的光线将如何前进?

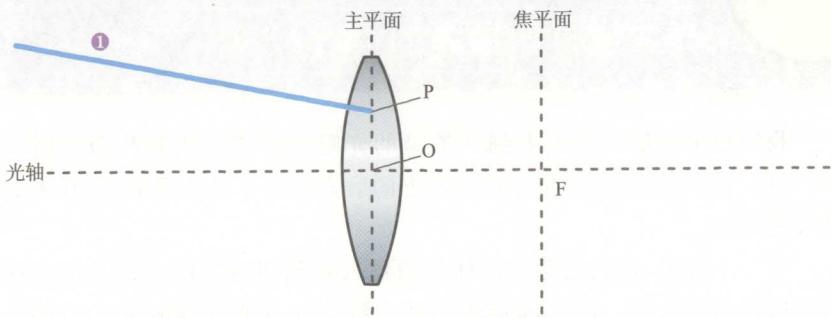


图2 画出光线②和光线③

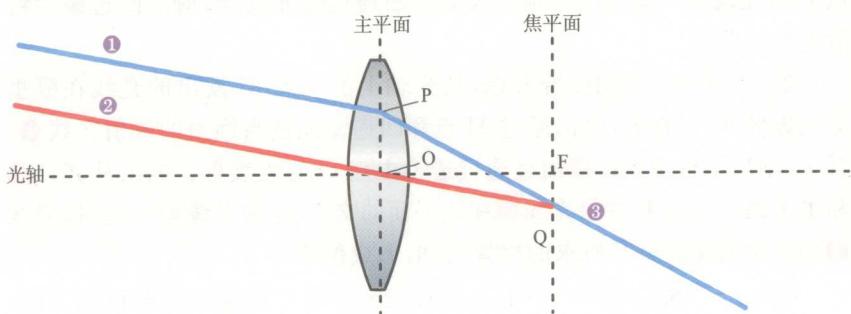
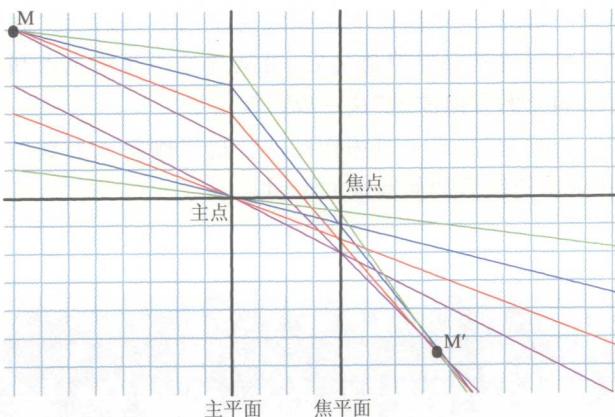


图3 光线①是从有限远物体的一点射出的情况下



051

透镜成像作图的技巧③

光线通过凹透镜的情况

我们也来考量一下入射到凹透镜的光吧。思考方法和凸透镜时一样,但在凹透镜的情况下位于透镜前方的后方焦点F的焦平面,在作图时是很重要的。

如图1所示,我们先考虑以任意倾角入射到凹透镜的光线①射出凹透镜后将如何前进。首先,画出平行于光线①而且通过透镜主点O的光线②。其次,画出从光线②和焦平面的交点Q射向光线①和主平面的交点P的光线③。即以任意倾角入射到凹透镜的光线①,射出凹透镜后将沿光线③前进。

如图2所示,我们接着考虑,从光轴上的一点M发出的光线在哪里形成虚像M'。首先,画出通过M点和凹透镜成适当倾角的入射光线①。其次,画出平行于光线①而且通过透镜主点O的光线②。画出从光线①和主平面的交点P射向光线②和焦平面的交点Q的光线③。这时,光线③和光轴的交点就是所求的虚像M'的形成位置。

在(037),我们说明了利用3条光线来考量凹透镜的光的行进方式。但是,使用3条光线的方法,对于任意倾角入射的光来说,就不能求出它射出凹透镜后将如何前进。

在凹透镜的情况下,在使用3条光线的基础上,再记住“和通过凹透镜主点的光相平行的光射出凹透镜后,沿从通过凹透镜主点和后方焦平面的交点射来的光的方向前进”这一规则就行了。

到此为止,我们就完成了对用作图法分析以倾斜入射到凸透镜或凹透镜的光,在射出透镜后如何前进的说明。



- 和通过凹透镜主点的光相平行的光射出凹透镜后, 将沿着通过凹透镜主点和后方焦平面的交点射来的光的方向前进

图1 以任意倾角入射到凹透镜的光线将如何前进?

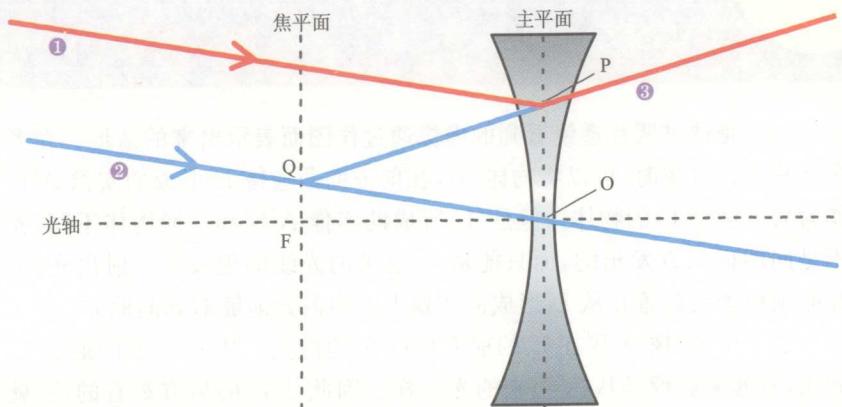
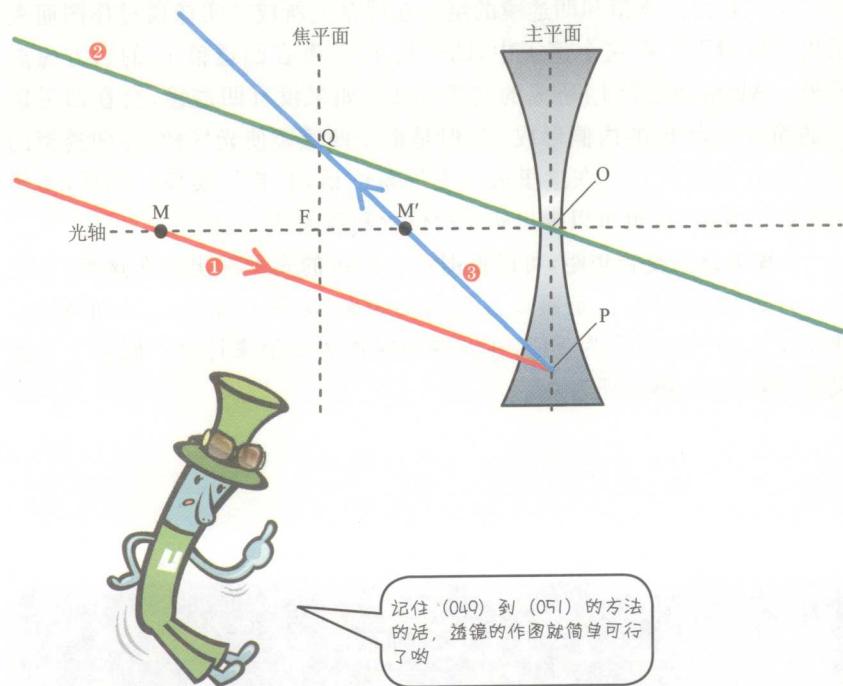


图2 光轴上的一点发出的光在何处形成虚像呢?



记住(049)到(051)的方法的话，透镜的作图就简单可行了哟



图 1 是透过两片透镜看到的虚像通过作图而表示出来的情形。在考虑 2 片透镜成像时,可以将物体 AB 在前方的凸透镜 L_1 形成的实像 $A'B'$ 作为后方透镜 L_2 的物体。但是, L_1 所成的实像 $A'B'$ 和一般物体不同, 光不是向四面八方发出的, 而只能从 L_1 射来的光线的延长线上射出光, 因此必须将透镜放置在从 L_1 形成的实像上发出的光能够射到的地方。

图 1 中, 实像 $A'B'$ 在 L_2 的前方焦点 F_2 的内侧。从 A' 出发的通过 L_2 的光, 看起来就像是从 A'' 射来的光一样。因此从 L_2 的后方观看的话, 就可以放大的虚像 $A''B''$ 。 L_1 所成实像的位置、 L_2 所成虚像的位置可以分别由透镜的成像公式求出。像的放大率为 L_1 和 L_2 放大率的乘积。

图 2 是由凸透镜和凹透镜的组合在屏幕上所成的实像通过作图而表示出来的情形。在这个例子中, 凹透镜 L_2 放置在凸透镜 L_1 的后方焦点 F_1 处。AB 由凸透镜 L_1 所成的实像 $A'B'$, 如果没有凹透镜, 会在凹透镜 L_2 的前方焦点 F_2 的内侧形成^(注), 但是由于凹透镜使光发散, 在凹透镜的后方形成实像 $A''B''$ 。在这里放一面屏幕的话, 会映出实像。同样, 使用透镜的成像公式, 也可以求出实像的位置和放大率。

2 片透镜的复合焦距, 可以根据图 3 所示的式子求出。在这里, f_1 是第 1 片透镜的焦距, f_2 是第 2 片透镜的焦距, d 是 L_1 和 L_2 之间的距离。焦距 f 在凸透镜时作为正值, 在凹透镜时作为负值来计算。假定 2 片透镜完全重合时, 第 3 项为 0。



- 2 片透镜的放大率 $m = m_1 \times m_2 = \left| \frac{bb'}{aa'} \right|$
- 复合透镜的焦距可以作为复合焦距来求

图1 通过2片透镜的光（观看虚像的情况下）

$$L_1 \text{ 所成实像的位置 } \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f_1} \quad L_2 \text{ 所成虚像的位置 } \frac{1}{a'} + \frac{1}{b'} = \frac{1}{f_2} \quad \text{像的放大率 } m = \left| \frac{b b'}{a a'} \right|$$

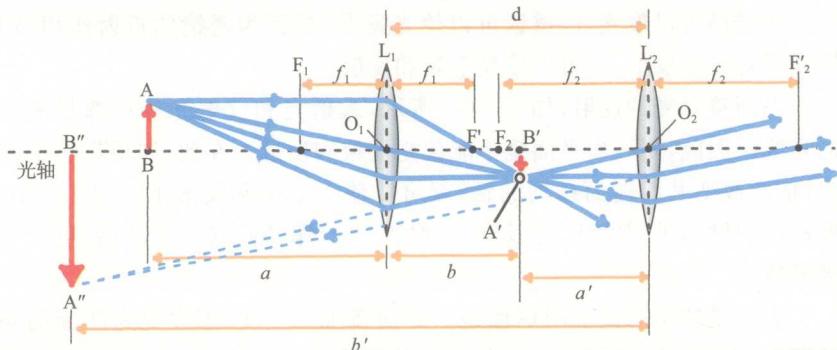


图2 通过凸透镜和凹透镜的光（成实像的情况下）

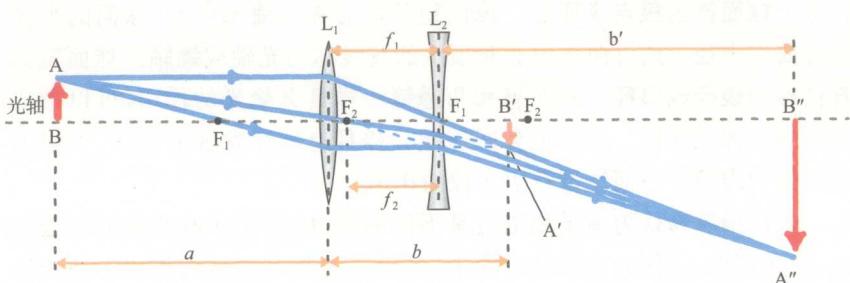


图1和图2用(049)和(050)中说明的方法来作图

图3 求2片透镜的复合焦距的方法

$$\text{复合焦距 } \frac{1}{f_{12}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 \times f_2}$$

3片透镜的情况下，首先计算2片透镜的复合焦距，然后从2片透镜的复合焦距和第3片透镜的焦距，求出3片透镜的复合焦距。4片以上的情况下也可以照此计算

凸透镜可以聚光,凹透镜可以使光发散,是因为透镜的折射作用,利用镜子对光的反射,也可以使光汇聚和发散。

平面镜对光的反射,如图1(a)所示,入射光和反射光各自都是平行的光线。因此,用一面平面镜不能使光汇聚和发散。在此,如果许多平面镜,依次改变其朝向而排列的话,就可以使光汇聚和发散了。像图1(b)那样向内倾斜排列的话,可以聚光;像图1(c)那样倾斜排列的话,可以使光发散。

表面是球面的镜子叫球面镜。球面镜如图1(b)那样成为凹面的叫凹面镜;如图1(c)那样成凸面的就叫凸面镜。

图2以凹面镜为例简单地表示出球面镜的构成。球面镜的反射面中心称为球面镜的极点或顶点。球面镜的球心称为曲率中心,球面的半径称为曲率半径。通过曲率中心和顶点的直线称为光轴或镜轴。球面镜的直径称为镜径或口径。凹面镜和凸透镜一样具有聚光的作用,可以形成物体的实像或虚像。凸面镜和凹透镜一样具有使光发散的作用,可以形成物体的虚像。凸面镜没有成实像的作用。

人们很容易认为镜子和透镜是不同的器具,然而在改变光的前进方向、使光汇聚、或使光发散的方面上,可以认为具有同样的作用。凸透镜和凹透镜是由于折射的作用使光通过并改变其传播方向,而凹面镜和凸面镜则是由于反射的作用使光反转而改变其传播方向。



- 凹面镜和凸透镜具有相同的作用
- 凸面镜和凹透镜具有相同的作用

图1 凹面镜和凸面镜的基本原理

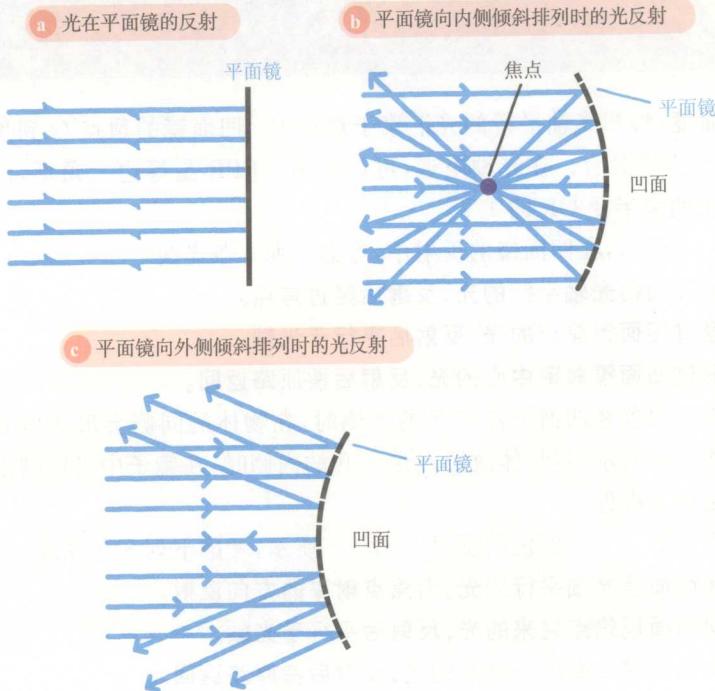
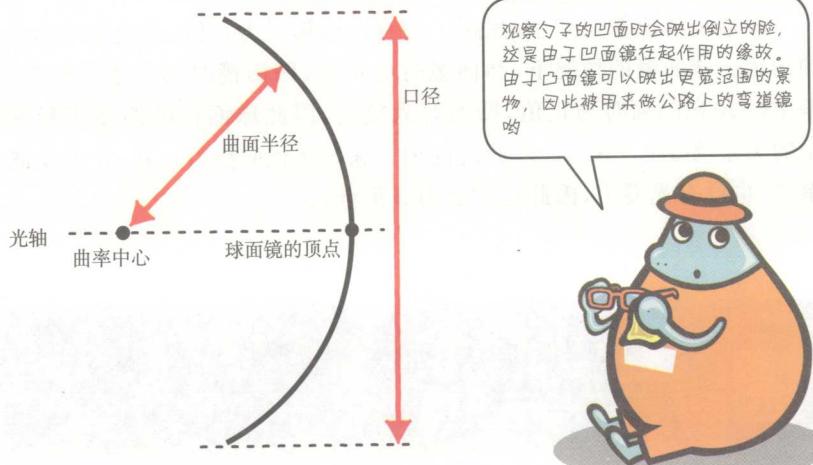


图2 球面镜的基本构成（凹面镜的情况下）



凹面镜，将和光轴平行的光汇聚于焦点 F。凹面镜的顶点 O 到焦点的长度，就是焦距 f。在光轴附近，可以认为 $\triangle FPR$ 是等边三角形，因此焦距 f 是曲率半径 OR 的 $1/2$ 。

如图 1 所示，在凹面镜的反射中，考虑下列 3 条光线^(注)。

- ① 和凹面镜光轴平行的光，反射后经过焦点。
- ② 通过凹面镜焦点的光，反射后平行于光轴。
- ③ 通过凹面镜曲率中心的光，反射后按原路返回。

将物体放置在凹面镜焦点 F 的外侧时，在物体的同侧会形成倒立的实像。如图 2 所示，将物体放置在焦点 F 的内侧时，在镜子中可以映出放大的物体的虚像。

下面考虑一下凸面镜的反射。如图 3 所示，考虑下列 3 条光线^(注)。

- ① 和凸面镜光轴平行的光，沿焦点射来的方向反射。
- ② 向凸面镜焦点射来的光，反射后平行于光轴。
- ③ 向凸面镜曲率中心射来的光，反射后按原路返回。

在凸面镜的前面放置物体时，在镜子中可以映出缩小了的物体的虚像。凸面镜的情况下，其焦距 f 也是曲率半径 OR 的 $1/2$ 。

在透镜的成像公式中，焦距 f 有在凸透镜时为正值，凹透镜时为负值的约定。球面镜的情况下，凸面镜时为负值，凹面镜时为正值。同时，曲率半径 R 在凸面时为正值，凹面时为负值，因此球面镜的曲率半径和焦距的关系为 $f = -R/2$ 。凸面镜的焦点和凹透镜的焦点一样，在那里既不聚光，也没有光发出，因此也称之为虚焦点。



- 凹面镜的焦距 f 是正值；凸面镜的焦距 f 是负值
- 球面镜的放大率： $m = \left| \frac{b}{a} \right|$

注：凸面镜和凹面镜都可以根据(049)到(050)的同样方法作图。

图1 凹面镜成实像

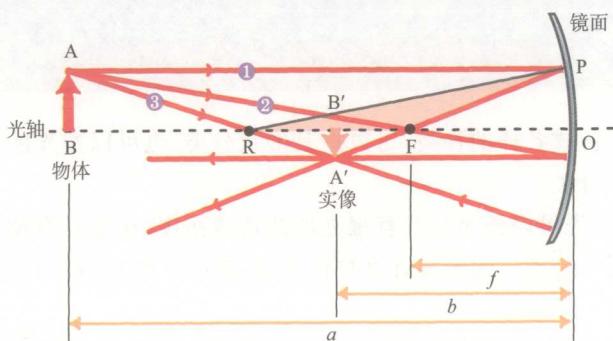


图2 凹面镜成虚像

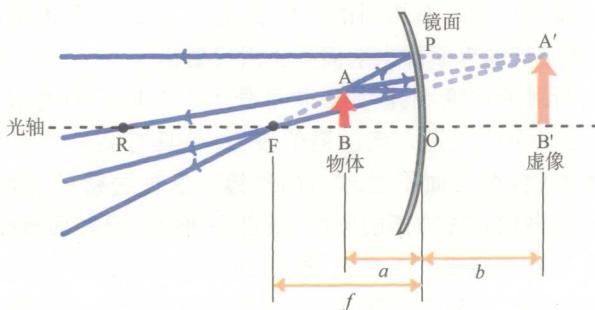
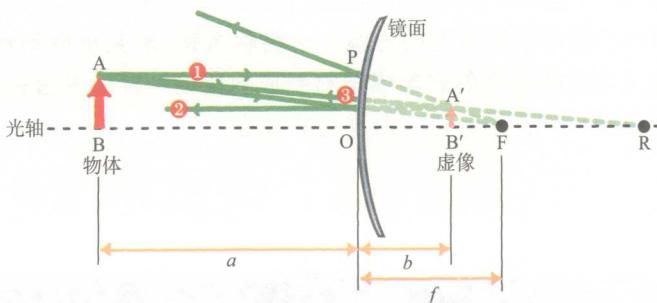


图3 凸面镜成虚像



透镜有各式各样的种类,可以按其形状分类,也可以按光的前进方向如何改变而分类。

透镜,首先可以按照是具有聚光的凸透镜作用,还是具有使光发散的凹透镜作用来分类。无论是什么样的透镜,根据其作用,都可以分为凸透镜或凹透镜。

大多数透镜,在透镜的表面或内面使光折射。图1是通常的双凸透镜,射入透镜的光,首先在和空气的界面,即入射面上折射后进入透镜内部。通常的透镜是由折射率相同的介质制成的,因此光在透镜内直线前进。然后,在和空气的界面即出射面处折射后射出。

利用表面折射的透镜,根据其形状可分为表1所示的类型。**①球面透镜**,即表面是球面的透镜。该透镜的表面,是具有某一曲率半径的球面。**②非球面透镜**,即表面不是球面的透镜。这种透镜的表面,是抛物面、椭圆面、根据多项式等加工的曲面、或自由曲面。**③柱面透镜**,即切割圆柱的侧面而形成的透镜。**④环面透镜**,即类似于啤酒桶的侧面被切割下来的形状的透镜。**⑤菲涅尔透镜**,即在塑料表面上加工成像锯齿般阶梯状的透镜。

在透镜中,也有不利用表面折射而使光汇聚或使光发散的透镜。表1也列出了不利用表面折射的透镜。**⑥格林透镜(渐变折射率透镜)**,即使用具有非均匀折射率的玻璃或塑料制成的透镜。**⑦衍射透镜**,即利用光的衍射现象而使光的行进方向改变的透镜。



- 根据其作用,透镜可分为凸透镜和凹透镜
- 可以根据透镜的形状来分类

图1 光在表面折射的原理

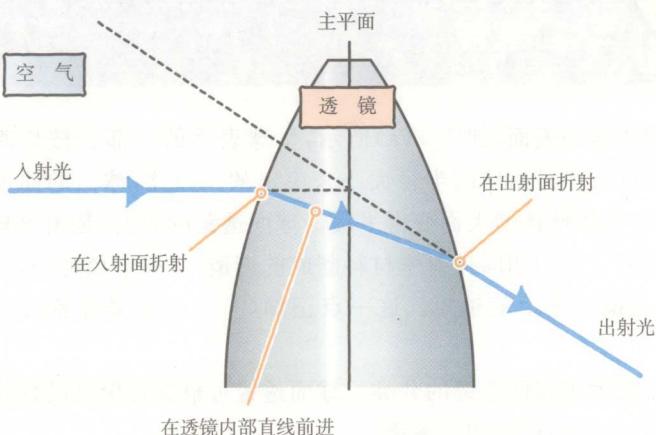


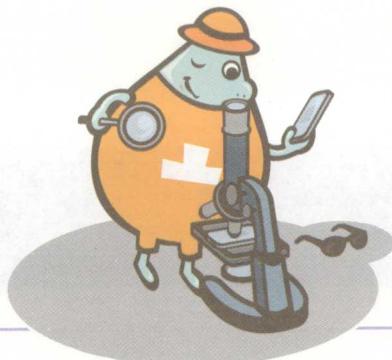
图2 透镜的分类

利用表面折射的透镜

- ① 球面透镜
- ② 非球面透镜
- ③ 柱面透镜
- ④ 环面透镜
- ⑤ 菲涅尔透镜

表面折射以外的透镜

- ⑥ 格林透镜(渐变折射率透镜)
- ⑦ 衍射透镜



利用界面折射的透镜①

球面透镜

球面透镜的表面,如图1(a)所示,呈球表面的一部分被切割下来的形状。球的大小是由球的半径大小来决定的。因此,球面的曲度随着半径的增大,导致球体增大而变得平缓。球面透镜的表面,是由该球的曲率半径决定的。使用相同折射率材料制成的透镜,曲率半径越小,球面的曲度越大,透镜的焦距就越短。这一点正如(036)中的磨镜者公式所示的那样。

图2表示出球面透镜的分类。球面透镜可根据是聚光的作用还是散光的作用,分为凸透镜和凹透镜。

双凸透镜是两面都是凸面的透镜,而双凹透镜是两面都是凹面的透镜。平凸透镜和平凹透镜,是有一面为平面的透镜,平面可以视为曲率半径为无穷大的球面,因此将其归纳于球面透镜。同时,双凸透镜和双凹透镜,其两面不限于相同的球面。在这个意义上说,平凸透镜和平凹透镜,也可以认为是双凸透镜和双凹透镜中的一员。

凸凹透镜,是新月形的透镜,透镜的一面是凸面,另一面是凹面。凸凹透镜,尽管具有凸面和凹面,也可以分为凸透镜和凹透镜,但这是根据透镜的整体作用是凸透镜还是凹透镜来决定的。凸凹透镜为凸透镜时,其中央部分比周围部分厚,具有聚光作用;而凸凹透镜,为凹透镜时,其中央部分比周围部分薄,具有使光发散的作用。通常的薄透镜,其主点在透镜的内部,而凸凹透镜的主点在透镜的外部。虽然是透镜的一种变形,眼镜上使用的透镜就是凸凹透镜。



- 球面透镜的焦距随曲率半径的减小而变短
- 平面可以看成是曲率半径为无穷大的球面

图1 球面透镜的表面

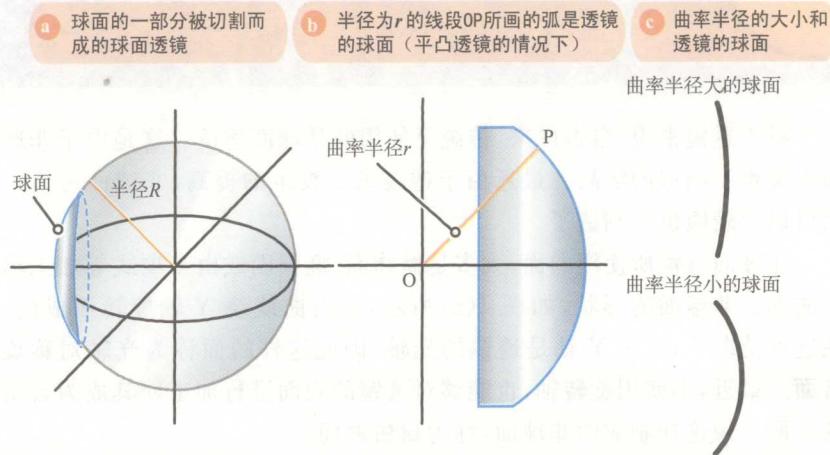
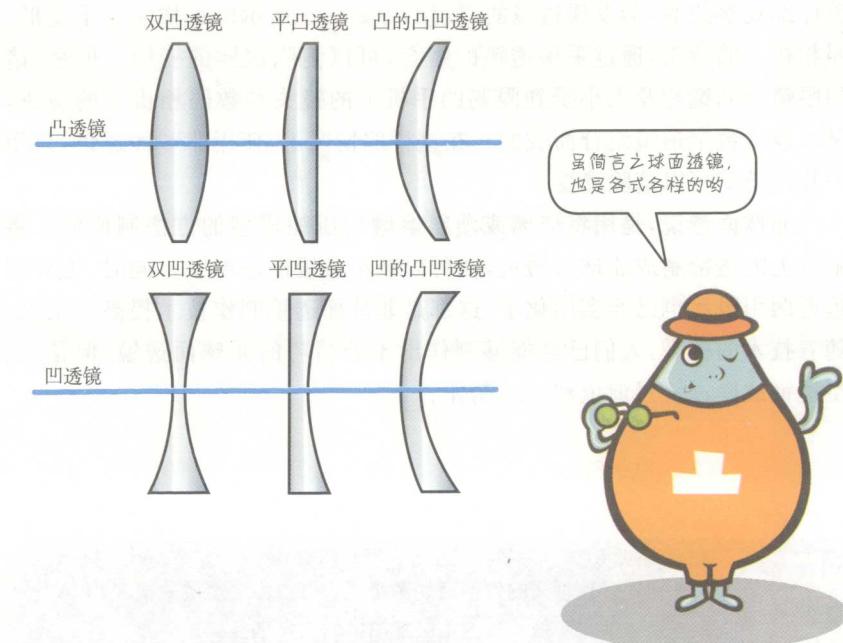


图2 球面透镜的分类



利用界面折射的透镜②

非球面透镜

对于透镜来说,自古以来,传统上使用的是球面透镜。这是由于非球面透镜难于制造的缘故。最近由于透镜加工技术的提高,非球面透镜开始可以比较廉价地制造了。

非球面透镜所使用的面,大多是抛物面、椭圆面或由多项式等加工出的曲面。非球面的形状,如图1(a)所示,是由曲线绕Y轴旋转而成的。在这种情况下,由于Y轴是透镜的光轴,因此这样的面称为光轴对称旋转面。最近,不使用旋转轴,也能够对透镜的表面进行加工使其成为自由的曲面。像这样制成的非球面,称为自由曲面。

非球面透镜,在设计和制作上要比球面透镜困难得多。尽管如此也要使用非球面透镜,是因为球面透镜存在球差的问题。比如,透过球面透镜仔细观察的话,会发现透镜的周边部分如图2所示的那样发生了变形。照相机上的镜头,通过采用透镜的组合,可以消除这样的变形。但是,诸如眼镜上的镜片及大小受到限制的手机上的镜头和数码相机上的镜头,是不能将数个透镜组合而成的。在这样的情况下,使用非球面透镜,只用一片透镜就可以消除形变。

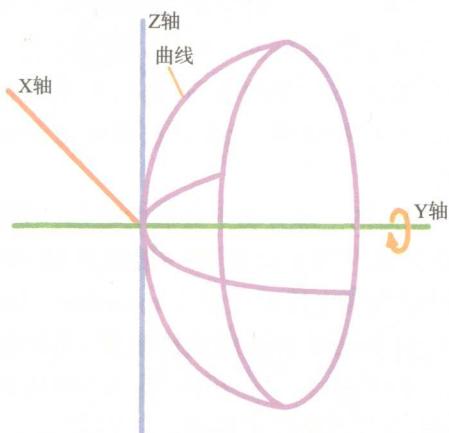
非球面透镜,是用将玻璃或塑料熔融后压缩成型的方法制成的。将眼镜上的透镜制成非球面透镜,就可以减小透镜的厚度了。同时,无界面远近两用眼镜也已经实用化了,这都是非球面透镜制作技术提高的结果。随着技术的提高,人们已经能够制作出十分精巧的非球面透镜,但是,大型透镜或厚透镜目前依然难以制作。



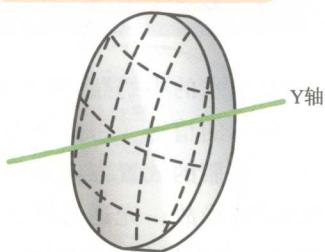
- 有利用旋转轴来制作镜面的透镜,也有自由曲面的透镜
- 使用非球面透镜,可以消除球面透镜产生的球差

图1 各种各样的非球面透镜

a 椭圆曲线绕Y轴旋转的例子



b 旋转对称型非球面透镜



c 由自由曲面制成的非球面透镜

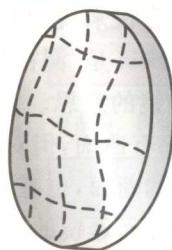
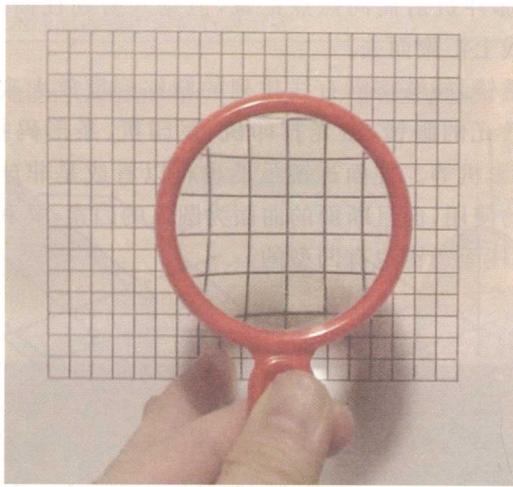


图2 由球面透镜引起的像的变形



利用界面折射的透镜③ 柱面透镜

透过装水的牛奶瓶，观察平假名的“あ”（日语字母，译者注），可以看到图1所示的情形。将牛奶瓶竖直放置时字母左右反转，横躺时上下反转。因牛奶瓶的放置方向不同而导致观察结果的不同，是由于牛奶瓶是“圆柱形”的缘故。光通过圆柱形的透明物质时，光虽然在圆柱的表面折射，但是还存在不发生折射的方向。

如图2所示，形状类似将圆柱侧面的一部分切下而成的透镜，叫柱面透镜。从其形状来说，俗称“鱼糕透镜”（日本的鱼糕一般呈柱状，译者注）。cylindrical是“圆柱状”的意思（英语中柱面透镜为 cylindrical lens，而 lens 是透镜的意思。译者注）。对于通常的球面透镜来说，无论怎么切，其断面都有曲面，但对于柱面透镜来说，如图2所示，有AB剖面那样包含有曲面的断面，也有CD剖面那样没有曲面的断面。

平行于柱面透镜的光轴入射的光，如图3所示前行。沿柱面透镜光轴上的A面入射的光，不发生折射照常直行。而沿着和A面平行的B面入射的光要发生折射。入射到球面透镜的平行光，无论入射到那个部分，都要像图3(b)那样折射而向焦点汇聚，但是入射到柱面透镜的平行光，则是向一条直线上汇聚而去。

使用柱面透镜，能够将沿直线排列的精细刻度放大来读数。柱面透镜可用于矫正散光的眼镜、激光打印机、复印机、条形码扫描器、全息装置、以及激光投影机等。柱面透镜虽然也可以看成是非球面透镜，但是，由于自古以来的使用，而且断面的曲面为圆弧的因素，又和非球面透镜区分开来。另外，柱面透镜也有凹型的。



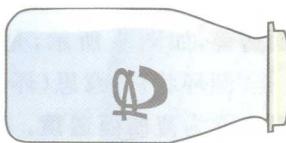
- 柱面透镜具有被切割下来的圆柱形状，有光发生折射的方向和不发生折射的方向
- 和光轴平行的光汇聚于一条直线上

图1 透过装水的牛奶瓶观察“あ”时

あ

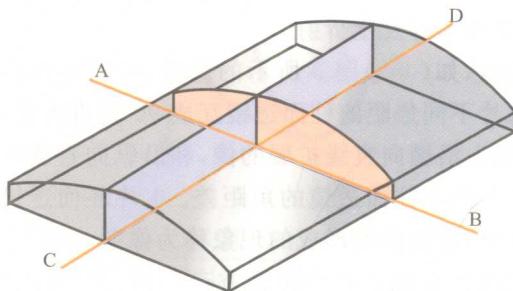


左右反转



上下反转

图2 柱面透镜



AB剖面

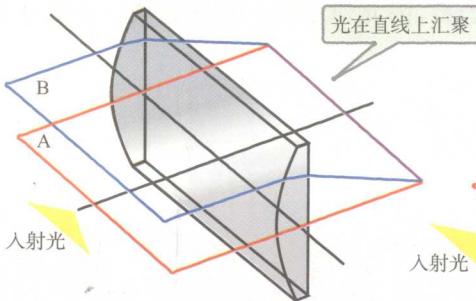
有曲面，具有透镜作用

CD剖面

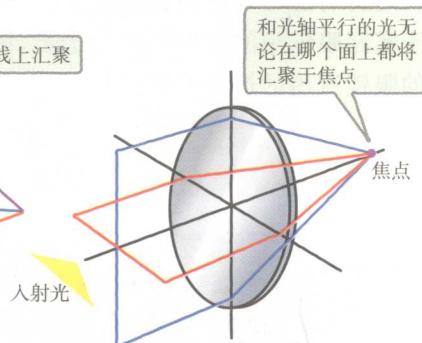
无透镜作用

图3 柱面透镜和球面透镜中光的行进方式

a 柱面透镜中光的行进方式



b 球面透镜中光的行进方式



059

利用界面折射的透镜④

环面透镜

环面透镜,如图1所示,是呈面包圈被切下的那部分形状的透镜。toroidal是“圆环状”的意思(环面透镜在英语中为 toroidal lens,译者注)。环面透镜也称为复曲面透镜。环面透镜的表面,呈啤酒桶或面包圈侧面的形状,如图2所示,具有纵向和横向的曲率半径不同的曲面。也就是说,环面透镜的纵向和横向的焦距不同。

环面的纵向和横向无论哪一个面的曲率半径变为无穷大时,该面成为平面,就变成了柱面透镜。柱面透镜有光发生折射的方向和不发生折射的方向,而环面透镜在两个面上都发生折射。

当平行光透过柱面透镜后,如(058)图3所示的那样,可以形成在光轴上沿直线扩展的像。将两片不同焦距的柱面透镜互成90°垂直放置,分别射入平行光,可形成在光轴上沿横向直线扩展的像,和沿纵向直线扩展的像。各自的像之间的距离是两片柱面透镜的焦距差。1片环面透镜就可以实现相同的作用。像这样,像偏移而形成的现象称为像散^(注)。

对于通常的透镜来说像散是在偏离光轴的地方产生的,而使用环面透镜可以人为地在光轴上形成像散。

身旁环面透镜的应用例子,就是矫正散光的眼镜。散光是由于角膜的纵向和横向的折射能力不同而引起的。为了矫正散光,需要将纵向和横向的折射能力调整到相同。在(058)中说到使用柱面透镜来矫正散光。由于实际眼镜用的镜片是凸凹透镜,因此使用的是环面透镜。即矫正散光的眼镜所用的透镜是环面的。



- 环面透镜的纵向和横向的折射率不同
- 环面透镜用来矫正散光

注:参照第4章(074)中的图2。

图1 环面透镜的形状

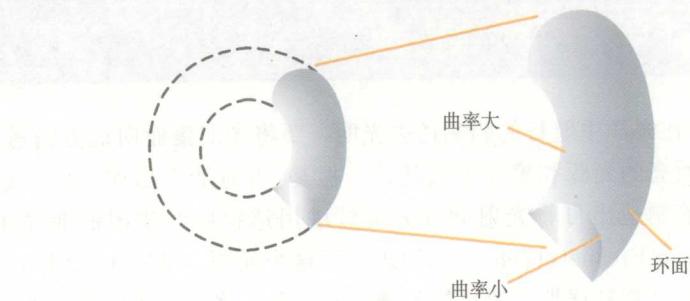


图2 圆弧形成的环面

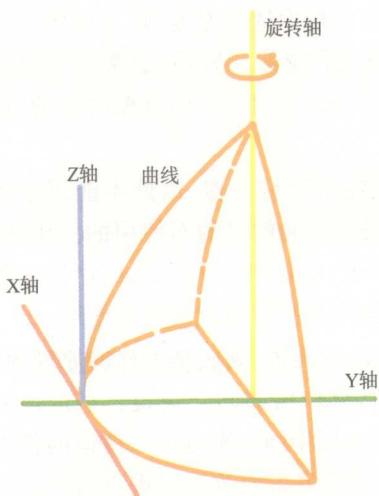
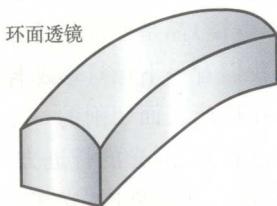
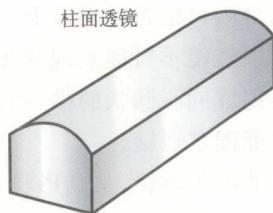


图3 环面透镜



圆弧形成的环面

绕和圆弧在同一面内(YZ面)，不通过圆弧的曲率中心并和Y轴正交的轴旋转得到的面

利用界面折射的透镜⑤

菲涅尔透镜

灯塔，给在海洋中航行的船舶送去光明。要将光汇集而向远方输送，就必须有大而亮的光源和聚光的大透镜。但是，古时造不出如此大的透镜。如何才能制造出可将光射到远方的灯塔用透镜呢？法国的菲涅尔（Augustin Jean Fresnel, 1788～1827）思考了这个问题。他在1822年，考虑了在玻璃板上刻制锯齿状的阶梯形透镜的方案。这种透镜称为菲涅尔透镜。

菲涅尔透镜，如图1所示，其剖面如同将通常的球面透镜的表面进行精细分解再配置在平面上一样。因此，比球面透镜厚度薄，可以实现通常的球面透镜不可能实现的焦距比口径小的特性。另外，通常的菲涅尔透镜是刻成同心圆状的槽，和柱面透镜一样只在同一方向刻槽的透镜，称为线性菲涅尔透镜。

菲涅尔透镜，从其形状上来看，不能清晰地成像，因此不能用于望远镜和显微镜等上。无论怎么说，它多是以聚光的目的而使用的。比如，在照相机的闪光灯前装入的齿状的透明板，幻灯机上放置幻灯片的透明板（投影透镜）都是菲涅尔透镜。而且，也经常在简易放大镜中使用。

我们看一下像灯塔那样的大型菲涅尔透镜，到底是怎样的原理呢（图2）。在玻璃表面切削的一个一个的齿，其作用如同三棱镜。在透镜的中心附近和外围，光的行进方式不同。在中心附近，光通过三棱镜的折射而改变方向，而在外围，光在三棱镜内发生全发射而改变行进方向。



- 菲涅尔透镜的用途不在于成像，而在于聚光
- 菲涅尔透镜可以制成各种焦距的薄透镜

图1 菲涅尔透镜的原理

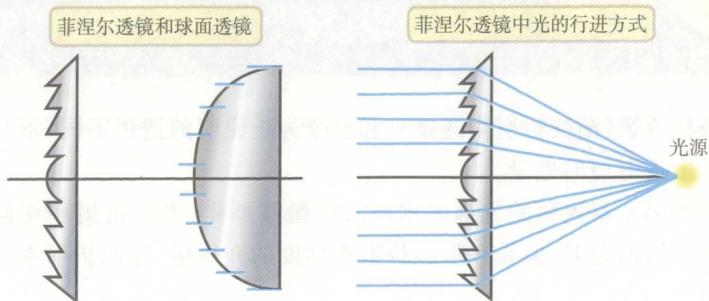


图2 灯塔用大型菲涅尔透镜

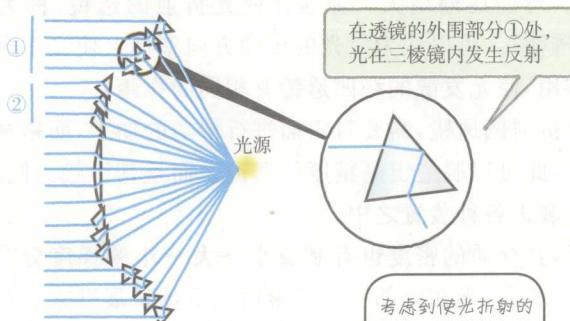
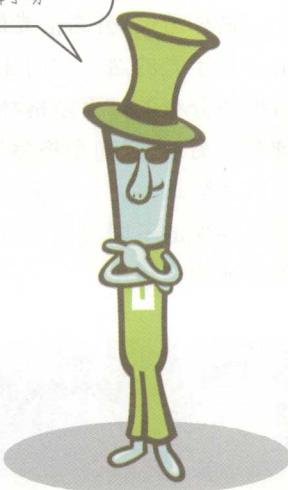


图3 灯塔的透镜



非利用界面折射的透镜①

格林(GRIN)透镜(渐变折射率透镜)

格林透镜(渐变折射率透镜),和至今为止说明的透镜不同,不是光在表面发生折射型的透镜。

正如第2章说明的逃逸之水或海市蜃楼那样,光在折射率相同的介质中是直线前进的,但是在形成折射率梯度的介质中,光向折射率大的部位弯曲。

如图1所示,在圆筒状的玻璃或塑料内部形成折射率梯度后,随着光从左向右前进,弯曲逐渐增大。像这样使光折射的透镜,称为格林透镜(渐变折射率透镜)。可以认为沿光的传播方向整体上使光汇聚的和凸透镜有相同的作用,使光发散的和凹透镜有相同的作用。

光在表面折射的透镜,需要对表面进行精巧的加工,而格林透镜不需要表面加工,因此可以制造出高精度的透镜。而且其形状为圆筒状,也可以很容易地组装进各种装置之中。

格林透镜,其介质的密度也有制成小→大→小的梯度分布的。这样做的话,如图2所示,光在内部一点汇聚后又重新扩展开来。通过这个办法,用一块格林透镜可以得到正立的像。

格林透镜,分为沿光的通过方向建立折射率梯度的轴向型格林透镜、沿垂直于光的通过方向建立折射率梯度的径向型格林透镜、和具有球状折射率分布的球面型格林透镜。轴向型格林透镜可以消除曲率面引起的球差。另外,径向型格林透镜,由于在垂直方向具有折射率的变化,因此可以消除球差。格林透镜是使材料的内部拥有折射能力,因此具有根据产品性能的不同自由进行光学设计的特点。格林透镜已被应用于光通信仪器或内窥镜中。



- 格林透镜是由于透镜材料具有折射率梯度而使光折射的透镜
- 可以根据产品性能的不同自由设计

图1 轴向型格林透镜的原理

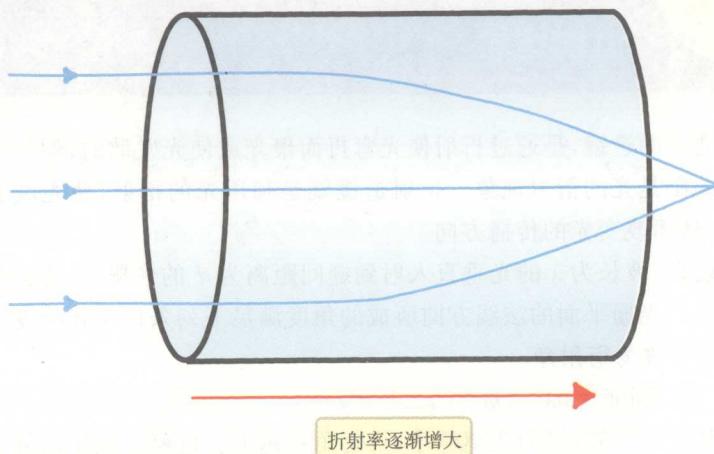


图2 折射率成小→大→小变化的轴向型格林透镜

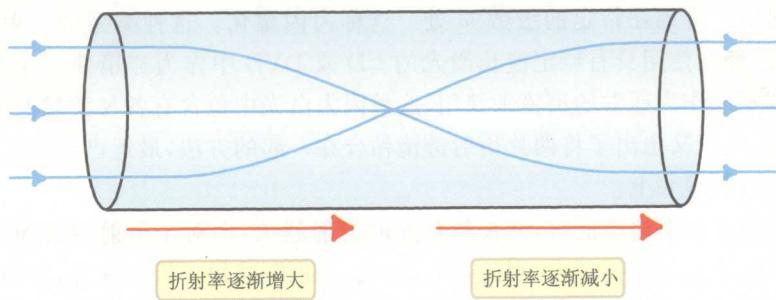
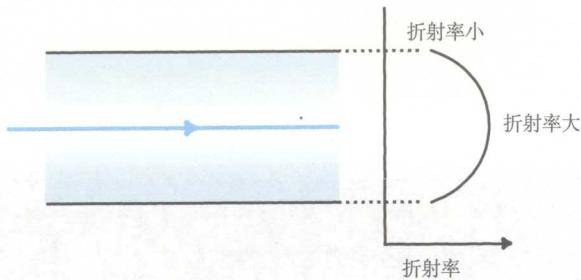


图3 径向型格林透镜



非利用界面折射的透镜② 衍射透镜

通常的透镜，是通过折射使光弯折而聚光或使光发散的，但衍射透镜利用的则是光的衍射现象。衍射透镜就是利用光的衍射，使光波叠加或相消，从而改变光的传播方向。

现在，波长为 λ 的光垂直入射到缝间距离为 d 的光栅上，透射光的行进方向和光栅平面的法线方向所成的角度满足下列条件时光会变亮。这个角度 θ 称为衍射角。

$$d \sin\theta = m\lambda \quad (m=0, \pm 1, \pm 2 \dots)$$

从此式可知，缝间距离越小，衍射角就越大。也就是说使用缝间距离连续变化的衍射光栅，就可以聚光。但是，从衍射光栅射出的光不止一条。因此，将衍射光栅的槽做成锯齿的形状来调节光的光程差，使衍射后射出的光排列在特定的级数 m 处。这称为闪耀化。这种类型的衍射透镜，已经在使用具有特定波长激光的CD或DVD中作为透镜使用了，但是却不能作为通常的透镜来使用，这是因为白光中包含有各种波长的光。在此，人们又想出了将两片衍射透镜粘合在一起的方法，最近已经用在了照相机的镜头上。

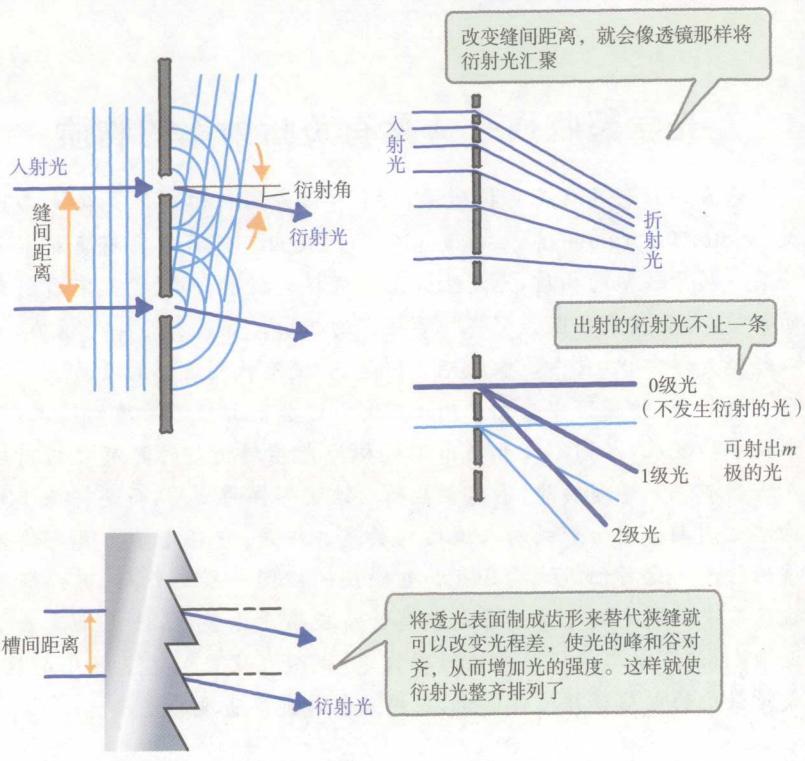
对于折射透镜而言，波长越短光的折射越大，而对于衍射透镜而言，波长越长光的弯折越大，因此光的波长越长焦距越短。折射透镜，对由于波长不同而形成焦距偏移的修正，是通过凸透镜和凹透镜的组合来实现的，而衍射透镜和折射透镜的组合，由于其特性相反，因此整体上在减小厚度的同时，又能修正焦距的偏移。



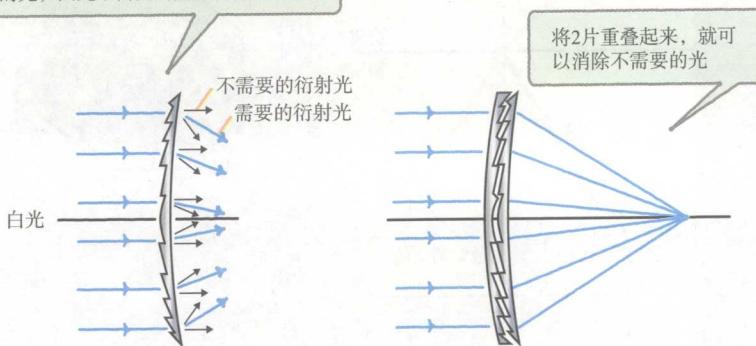
要点
CHECK!

- 衍射透镜是利用缝间距离连续变化的衍射光栅的透镜
- 光的波长越长，衍射角越大，焦点越短

图1 衍射透镜的原理



对于激光等波长单一的光来说，可以将需要的衍射光抽出，但是通常的光由于含有各种波长的光，因此不需要的光也会衍射出来



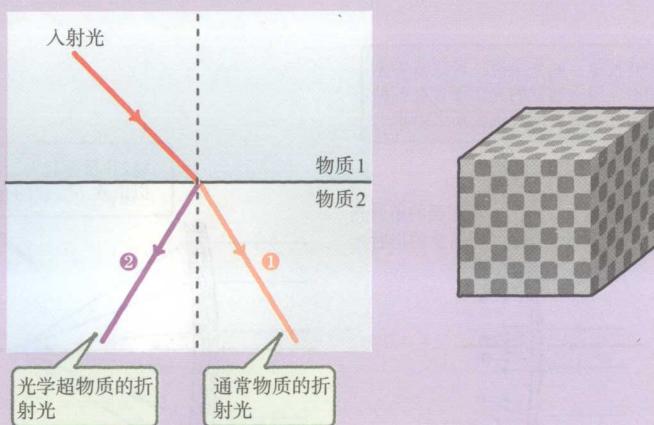


COLUMN

光学超物质——具有负折射率的物质

通常的材料具有正的折射率,1967年,俄国科学家维克托·韦谢拉戈(Victor Georgievich Veselago,1929~)提出可能存在具有负折射率的物质。对于通常的物质,光发生如图①那样的折射,而对于具有负折射率的物质,光会发生如图②那样“<”字形的折射。如果有这样的物质,就可以超越光学常识,自由地操纵光。但是,并没有找到这样的物质。

近年来,随着可以在纳米($\text{nm}, 10^{-9}\text{ m}$)水平上操纵物质的技术,即纳米技术的发展,人们已经开发出了被称为光学超物质的具有负折射率的人造物质。光学超物质,不是食盐粒或铁块那样的物质,而是将微小的结构单元周期排列而形成的人造结构物质。但是,它在光学上具有均匀介质的行为。这种细微结构具有和电磁铁的线圈一样的作用,可以通过电磁感应来控制光的行为。将光学超物质应用于透镜时,使用比波长小的近场光,就可以期待超越光的衍射极限,或观察比光的波长还小的区域,或对微细的电路模样进行曝光,或用来制作更高密度的光盘。



第4章

· · ·

透镜的性能

我们理解了透镜的基本原理之后，开始学习透镜的性能。在这一章中我们将对作为透镜原料的光学材料、透镜的制作方法、透镜的球差和性能进行解说。



· · ·

透镜是使光透射、折射、汇聚于一点或使其发散,从而成像的器具。因此,要求在透镜上使用的玻璃,具有普通玻璃所没有的优秀光学性质。普通玻璃虽然可以用来制作简单的放大镜,但却不能在精巧的光学仪器上使用。望远镜或照相机等光学仪器中的透镜或三棱镜等所使用的特殊玻璃,称为光学玻璃。

窗户玻璃等使用的极普通的透明玻璃,看上去很均匀。可以鲜明而清晰地看到外面的景物,而且也没有变形。和光学玻璃相比,似乎看不出有什么大的区别。但是,对于光而言,普通玻璃和光学玻璃是有很大区别的。

普通玻璃在制造过程中将玻璃熔化再凝固时,玻璃内部会形成被称为脉理的不均匀部分。由于存在这种脉理,在玻璃内部会形成折射率的不均匀分布。而光学玻璃在制造时防止出现脉理,无论在玻璃的任何部位检测折射率,都能得到几乎相同的数值。同时,在玻璃的制造过程中,还要特别注意,防止气泡或异物的进入。

普通的玻璃板在正面看是透明的,但是其断面看上去是绿色的。这是由于玻璃中含有的杂质对光的吸收而造成的。**图1**是将两片1.5cm厚的玻璃重叠起来拍摄的照片。虽然左右的厚度差是1.5cm,但左侧带有绿色而且发暗。这样的玻璃数片重叠在一起后,会逐渐变暗,最后根本就不透光了。光学玻璃和普通玻璃相比,有极好的透光性,不吸收光。光纤可以将光输送到很远的地方,就是由于使用了透光性优异的石英玻璃的缘故。



- 透镜或棱镜等所使用的玻璃是光学玻璃
- 光学玻璃所要求的基本性质是透光性和均质性

表1 制造透镜的材料所要求的基本性质

光学性质	
透光性	吸光少，光通过时不变弱
均质性	在玻璃的任何部位折射率都相同
耐环境性和加工性能	
化学性质	耐热性、耐水性、耐药品性等
机械性质	强韧性、硬度等

在光学玻璃所需要的性质中，除了光学性质之外，还要求和透镜用途相适应的耐环境性、提高透镜的制造性所需的优异的加工性等

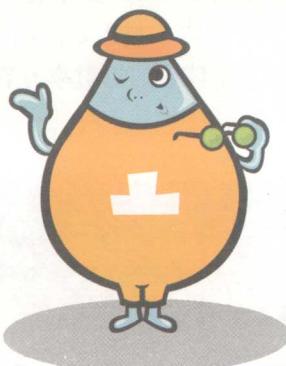
图1 玻璃的透明度



左侧部分的厚度：3cm
右侧部分的厚度：1.5cm

透镜中所使用的光学玻璃，光透过而不变弱。如果用透光性差的玻璃制作透镜的话，照相机所照出的相片就会发暗，投影仪在屏幕上映出的影像也会发暗

总认为普通玻璃是透明的，但还是吸收了这么多的光啊





透镜所引起的光的折射，是由透镜表面的形状和作为透镜材料的光学玻璃的折射率决定的。无论多么精巧地研磨透镜的表面，如果作为透镜素材的光学玻璃质量低劣的话，也不能制作出优良的透镜。另外，透镜是光学仪器的部件，作为产品必须保证相同型号的透镜具有相同的性能。因此，光学玻璃的制造是在严格的质量管理下进行的。

在第2章中，我们说明了当白光通过玻璃三棱镜后，会如图1那样色散开来。这种现象，是由于玻璃的折射率因波长的不同而改变所引起的。

翻开光学玻璃的产品目录，可以看到上面记载有许多波长下光的折射率。因制作厂家的不同折射率所对应的波长段会有一些差异，一般来说，经常使用的光的种类和波长如表1所示。

光学玻璃的折射率，通常是用氦原子所发出的波长为587.562nm的d线的折射率 n_d 来表示的。这个波长叫标准波长， n_d 叫标准折射率。这个波长的光，位于人类眼睛感度好的区域，在可见光波长领域(380~780nm)的几乎正中间的位置。

标准波长的光，原来使用的是钠原子所发出的波长为589.294nm的D线，但是由于在其近旁有别的波长的光存在^(注)，容易产生误差，因此现在改用d线了。另外，D线的折射率用 n_D 来表示，有时候也会和 n_d 一起列出来。

大多数光学玻璃，如果是同一材质的话，其折射率会保证在 $n_d \pm 0.0005$ 的范围内。如果是高精度的，也有保证到 ± 0.0002 的范围内的。可以看到光学玻璃的折射率有着极为精确的管理。



- 光学玻璃的折射率使用的是波长为587.562nm的 n_d
- 光学玻璃的折射率有着极为精确的管理

注：D线有589.294nm的D₁线和588.995nm的D₂线。

图1 玻璃三棱镜引起的光的色散

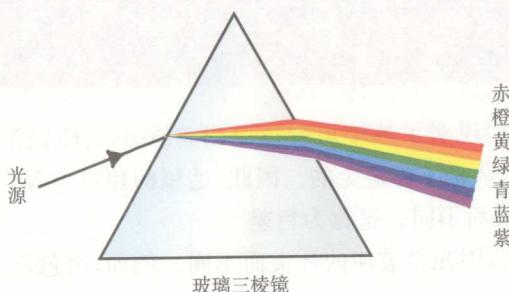


表1 光学玻璃的产品目录中经常记载的光的种类和波长

谱线	波长(nm)	光源
t (红外线)	1013.98	Hg
s (红外线)	852.11	Cs
A' (红色)	768.195	K
r (红色)	706.519	He
C (红色)	656.273	H
C' (红色)	643.847	Cd
He-Ne (红色)	632.816	He-Ne激光
D (黄色)	589.294	Na
d (黄色)	587.562	He
e (绿色)	546.047	Hg
F (蓝色)	486.133	H
F' (蓝色)	479.992	Cd
g (蓝色)	435.835	Hg
h (紫色)	404.656	Hg
i (紫外线)	365.015	Hg

各种波长光的折射率
有着非常严格的管理
哟



第3章中,我们说明了透镜可看成是由许多小三棱镜汇集而成的。这也意味着光的色散是不可避免的。因此,透镜的焦点位置,实际上如图1所示,因光的波长而不同。这称为色差^(注)。

光的色散程度,因光学玻璃的种类而不同。例如,由色散大的光学玻璃制成的三棱镜所产生的光的色带幅度宽。反之,由色散小的光学玻璃制成的三棱镜所产生的光的色带幅度窄。波长短的光(蓝色)和波长长的光(红色)的折射率之差大的光学玻璃叫色散大的光学玻璃,差小的叫色散小的光学玻璃。

- 色散的大小如图2所示,是用“对F线的折射率 n_F 和对C线的折射率 n_C 之差(主色散)”和“对d线的折射率 n_d 减去1的值”之比来表示的。最近也使用“对F'线的折射率 $n_{F'}$ 和对C'线的折射率 $n_{C'}$ 之差(主色散)”和“对e线的折射率 n_e 减去1的值”之比来表示。使用这些式子,可以量化表示出光学玻璃因波长不同而引起的折射率变化。

在评价透镜对光的色散时,实际上使用色散的倒数。这个值称为阿贝数(逆色散率),用希腊字母 ν 表示。 ν 越小,意味着因光的颜色引起的折射率的变化率越大。因此用 ν 值小的光学玻璃制成三棱镜时,就意味着光带的幅度宽。 ν 表示了透镜色散的大小程度。

大多数的光学玻璃,如果是同一材质的话, ν 可以保证在±0.8%的范围内,高精度的可达到±0.3%的保证范围。



- 阿贝数表示光学玻璃色散的大小程度
- 阿贝数小的光学玻璃色散程度大

注:色差将在本章的后面论述。

图1 光的色散引起的焦点位置的偏移

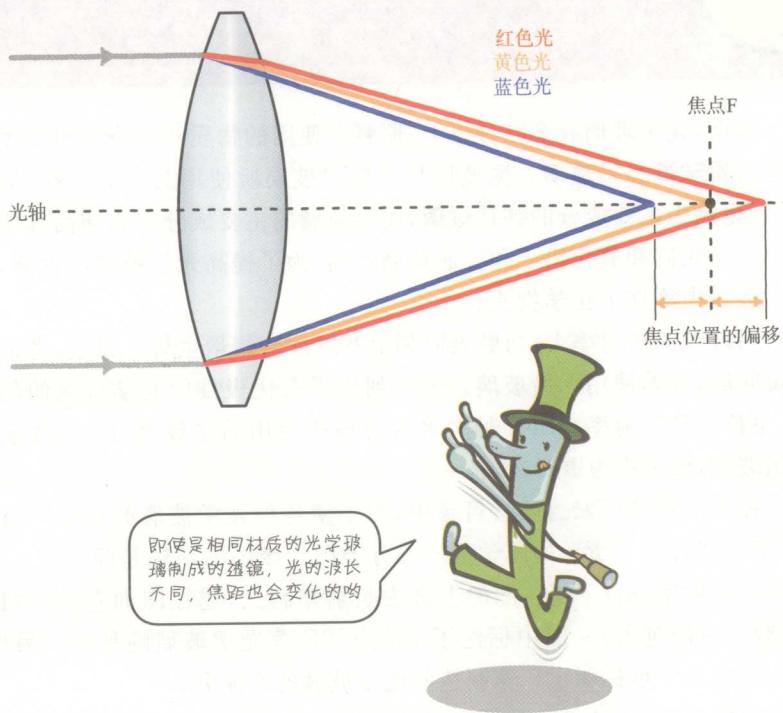


图2 色散和阿贝数

$$\text{色散} = \frac{n_F - n_C}{n_d - 1} \quad \text{阿贝数 } v_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$$

n_d : 对波长为587.562nm的光的折射率

n_F : 对波长为486.133nm的光的折射率

n_C : 对波长为656.273nm的光的折射率

$$\text{色散} = \frac{n_F - n_C}{n_e - 1}, \quad \text{阿贝数 } v_e = \frac{n_e - 1}{n_F - n_C}$$

n_e : 对波长为546.047nm的光的折射率

n_F : 对波长为479.992nm的光的折射率

n_C : 对波长为643.847nm的光的折射率

现在,光学玻璃有200种以上,原料上使用的物质约70种,但大体上可分为冕玻璃和铅玻璃。冕玻璃是以窗户玻璃所使用的二氧化硅、氧化钠、氧化钙为主要成分的钠钙玻璃,而铅玻璃的主要成分是装饰品等所使用的二氧化硅和氧化铅。和普通玻璃不同,为了提高光学玻璃的性能,在光学玻璃中添加了化学物质。

铅玻璃的折射率大,切磨表面刻上花纹后会熠熠生辉。最近,考虑到环境问题,开始使用无铅玻璃。**表1**列出了有代表性的光学玻璃的阿贝数、主色散和折射率。BK7是大多数透镜所使用的冕玻璃,F2是代表性的铅玻璃,SF1称为重铅玻璃。

在光学玻璃厂家的产品目录中,为了使各种光学玻璃的特征一目了然,都记载有**图2**所示的光学玻璃的分类图。该图的横轴是阿贝数(v_d),纵轴是折射率(n_d)。越往图的上方去折射率越大,越往图的右边去阿贝数越小(色散越大)。图中标注了BK、F、SF等光学玻璃的种类。另外,实际的目录中也标明了厂家制造的光学玻璃的产品名。

用颜色表示的区域,是按光学玻璃开发年代的大致分类。属于下方区域的光学玻璃,是到19世纪中叶为止开发的旧式玻璃;属于正中区域的光学玻璃,是从19世纪末到20世纪初开发的新式玻璃;属于上方区域的光学玻璃,是从20世纪至今开发的新型玻璃。近年来,人们已经可以制造出折射率大、色散小的玻璃了。



- 冕玻璃: 折射率小, 阿贝数大(色散小), 质硬而轻
- 铅玻璃: 折射率大, 阿贝数小(色散大), 质软而重

表1 代表性光学玻璃的阿贝数、主色散和折射率

代码 ^(注)	名称	阿贝数		主色散	
		v_d	v_e	$n_f - n_c$	$n_f - n_e$
517642	BK7	64.17	63.96	0.008054	0.008110
620364	F2	36.37	36.11	0.017050	0.017284
717296	SF1	29.62	29.39	0.024219	0.024606

折射率							
n_c	n_e	n_D	n_d	n_e	n_f	n_g	n_f
1.51432	1.51472	1.51673	1.51680	1.51872	1.52238	1.52283	
1.61503	1.61582	1.61989	1.62004	1.62408	1.63208	1.63310	
1.71035	1.71144	1.71715	1.71736	1.72308	1.73457	1.73605	

注：用6位数字来标记。最初的3位表示折射率 n_d 的小数点后3位数，后面的3位表示阿贝数 v_d 的前3位数

(参考：SCHOTT公司产品目录的数据表)

图1 光学玻璃的分类图



(参考：株式会社住田光学玻璃的分类图)
<http://www.sumita-opt.co.jp/ja/goods/data/catalog.htm>

玻璃之外的光学材料①

天然或人造晶体

透镜的材料并不只有玻璃。人们也使用天然和人造晶体、塑料等。首先看一下天然或人造晶体吧。表1汇集了玻璃之外的主要光学材料。

石英,是二氧化硅(SiO_2)结晶化了的矿物。特别是结晶度高的石英称为水晶。水晶虽然是天然矿物,但是透光性和均质性很高,质硬而且耐热性很强。由于从紫外线到中红外线都能很好地透过,自古以来就是作为优异的光学材料来使用的。现在,人们使用的一般是人造的**合成石英**。

萤石是以氟化钙(CaF_2)为主要成分的矿物,从紫外线到远红外线都能很好地透过,阿贝数大色散小,因此可以制作在宽泛的波长领域中焦点的偏移小色差小的透镜。但天然萤石只是小的晶粒,存在材质柔软难于加工的问题。现在,人们已经开发出人造萤石的制造方法,并能够在照相机用的大型镜头上使用。人们还在开发具有和萤石相似性质的**ED玻璃**^(注1)。

岩盐(NaCl)、硅(Si)、锗(Ge)晶体,都能很好地透过红外线。岩盐虽有不耐湿度的弱点,但红外线透过性很好,长久以来被用于使用红外线分析物质等的设备中。硅和锗虽然是半导体材料,但由于红外线透过性好,也被用于使用红外线仪器的透镜中。另外硅和锗还有不透过可见光的特征。

最近,出现了用折射率超过2的透光性陶瓷^(注2)制成的透镜。由于折射率大,因此,透镜可以制得更薄。



- 根据使用目的(透过的波长范围、折射率、阿贝数)的不同而选择材料
- 萤石或ED玻璃可以使色差变小

注1:特殊的低色散玻璃。

注2:陶瓷是指广义的全体陶瓷器具。

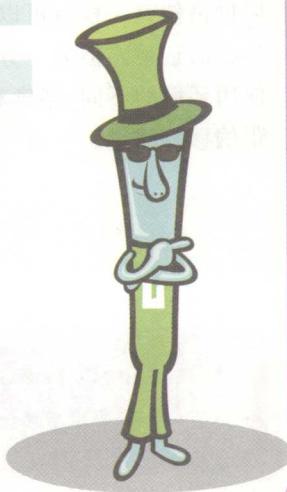
表1 玻璃之外主要的光学材料

物质名称	化学式	透过波长范围(μm)
氟化锂	LiF	0.11~9
氟化镁	MgF ₂	0.11~7.5
氟化钙	CaF ₂	0.13~12
氟化钡	BaF ₂	0.15~15
二氧化硅(石英)	SiO ₂	0.15~4.5
蓝宝石	Al ₂ O ₃	0.23~5
氯化钠(岩盐)	NaCl	0.21~26
氯化钾	KCl	0.21~30
溴化钾	KBr	0.21~40
硒化锌	ZnSe	0.55~22
硅	Si	1.2~15
锗	Ge	1.8~23
碘化铯	CsI	0.24~70

表2 电磁波的种类和波长

电磁波	波长范围(μm)
超紫外线	0.001~0.01
真空紫外线	0.01~0.2
近紫外线	0.2~0.4
可见光	0.4~0.8
近红外线	0.7~2.5
中红外线	2.5~4
远红外线	4~1000

透不过可见光的硅或锗在我们的眼中是不透明的，但是对了红外线照相机来说是透明的哟



玻璃之外的光学材料②

光学塑料

现在，眼镜用镜片或手机的照相机镜头等，许多都是用塑料制成的。由于塑料重量轻而且不易碎，成型也简单，很早以前就被想到可以作为透镜的材料来使用。但是，由于初期的透明塑料没有能和玻璃匹敌的高折射率，同时又容易被划伤等原因，因此并不适合做透镜。

直到进入20世纪，用于透镜的塑料才被开发出来。美国的PPG产业公司于20世纪40年代开发出的CR-39(聚双烯丙基二甘醇二碳酸酯，被称为ADC的热硬化性塑料)开始被用来作透镜材料。现在所使用的塑料透镜，只有玻璃透镜重量的一半，却具有和玻璃匹敌的透明度，而且表明硬度高，耐磨性也好。在热塑性塑料方面，人们常使用的是丙烯系列的PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)。隐形眼镜就是基于PMMA制成的。最近，具有优秀的耐热性和耐水性的聚碳酸酯和聚烯烃系列的塑料也在使用。至今为止人们开发出各种光学塑料，但其种类和玻璃相比较少，约有20种。透明塑料有着用有机物制成的玻璃的意思，因此也被称为有机玻璃。

塑料透镜和玻璃透镜不同，由于可以用模具成型，可以大量生产，所以价格便宜。模具可以做成球面的或非球面的，也可以制成表面是自由形状的透镜。但另一方面，塑料有着易受温度和湿度影响的缺点。由于使用环境的不同，温度和湿度变化时其折射率也发生变化，因此存在着焦距偏移等问题。



- 塑料透镜可以成型为自由形状
- 光学塑料大约有20种

表1 塑料的长处和短处

长处	短处
<ul style="list-style-type: none"> · 比玻璃轻 · 耐冲击不易碎 · 表面可以自由加工 · 可以大量生产 	<ul style="list-style-type: none"> · 易划伤 · 种类少 · 和玻璃相比折射率低，因此透镜厚度大 · 和玻璃相比易膨胀，折射率随温度变化大

表2 凸玻璃BK7和CR-39、PMMA的物理特性值的比较

	折射率	阿贝数	密度g/cm ³
BK7	1.517	64	2.52
CR-39	1.498	58	1.32
PMMA	1.492	58	1.19

热硬化性塑料和热塑性塑料

热硬化性塑料，是将若干种原料放入模具中加热而制成的塑料。是通过加热使原料发生化学反应而形成的塑料。热塑性塑料，是将原料加热熔化然后注入模具中冷却制成所需形状的塑料。在工厂中，只是将预先制好的塑料原料融化后凝固，因此可以大量制造质量稳定、价格便宜的塑料制品。

将热塑性塑料再加热时，可以回到黏稠的熔融状态，但是热硬化性塑料再加热后，回不到原有的原料状态。这是热硬化性塑料和热塑性塑料的最大区别

由于塑料可以根据目的和用途的不同制成所需性质的物品，人们期待着它在各种各样的领域中成为有用的材料啊



透镜制作①

球面透镜的制作方法

透镜，是由图1所示的流程制造出来的。首先调配好光学玻璃材料的原料，在高温下加热使其熔化。完全熔化后，为防止脉理和气泡的出现而慢慢地长时间冷却。然后从形成的玻璃中切出均质的部分，作为透镜材料。接着，将取出的玻璃加工成透镜的大小，形成圆盘状玻璃板。在这个阶段，虽然形成了透镜的形状，但是表面仍然是平的⁽¹⁾。

粗磨使圆盘状的玻璃表面逐渐变成透镜形状。如图2所示，使用曲线成形机，用人造金刚石制的磨石将透镜切削成球面。粗磨完成后，进行砂磨(细磨)。用沙粒或人造金刚石的球状小颗粒打磨透镜表面，使其逐渐光滑。通过这些操作，可以形成和最终尺寸接近的透镜。

在这个阶段，透镜还不是透明的，类似于毛玻璃。细磨完成后，就要开始研磨了。在这一道工序中，使用研磨剂将透镜表面研磨到次微米(万分之一米)的精度。如何将透镜的表面精密地研磨是至关重要的。研磨如果不能确切地进行的话，光入射到透镜表面的位置不同，就会产生焦点的偏移。

研磨完成后，透镜就成为透明的了。将做好的透镜清洗，检验透镜表面的制作是否正确。研磨后的透镜要进行定心，切削外围使光轴成为透镜的中心。

最后，为了抑制光的反射，要在透镜的表面镀上一层薄膜。这是为了防止光的反射而造成透射率的降低，以及反射光再绕射回来形成多余像的问题。镀膜，使用的是真空蒸镀的方法进行的，就是在真空装置中将涂镀材料蒸发，使其沉积在透镜表面形成膜。



- 在透镜的制造工序中研磨是至关重要的工序
- 这种制造方法制出的透镜是球面透镜

注：将熔解的玻璃直接注入模具中直至成型的方法叫直接成型；将玻璃再熔解后注入模具中成型的方法叫二次成型。两种方法都不需要加工工序。

图1 透镜的制造工序

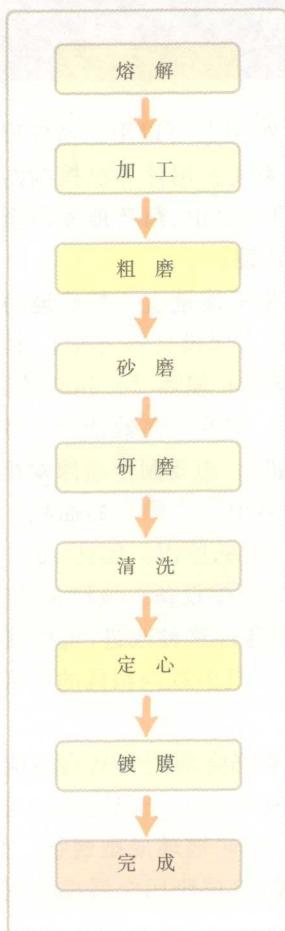


图2 曲线成型机

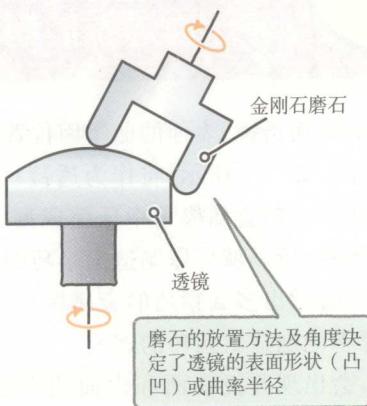
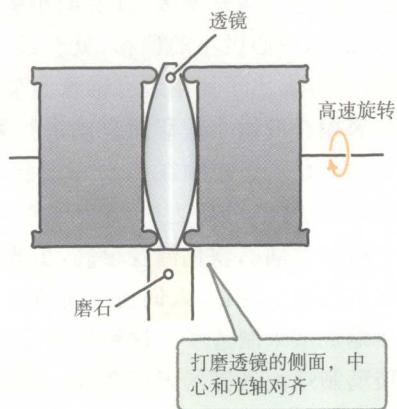


图3 透镜的取芯



对于想详细了解透镜的制造工序的人

佳能株式会社在互联网上开放了“虚拟的透镜工厂”的网页。在这里可以观看光学玻璃的材料加工工序，透镜加工工序，透镜组装工序的录像。

网址：http://web.canon.jp/Camera-muse/tech/l_plant/index.html

透镜制作②

非球面透镜的制作方法

非球面透镜，表面的曲率因位置的不同而不同，可以用压缩成型的方法制作。如图1所示，将作为透镜材料的塑料夹在用计算机控制的超精密车床制成的金属模具中压缩成型。由于可以自由、精巧地做出金属模具的形状，所以就可以制造出小巧的非球面透镜。

不管做出多么精巧的金属模具，模具如果不能笔直而精确地吻合的话，都不能制造出精巧的透镜。在图1所示的金属模具的情况下，模具吻合时，会出现透镜表面和内面的中心和透镜中心偏离 $2\sim3\mu\text{m}$ 的问题。将此问题极端化而描绘出的情形如图2所示。这在大多数情况下没有什么问题，但如果是用在小透镜的手机数码相机上，想要制作高像素相机时就会有问题。像素增多，就要减小感光传感器中每个像素的面积。这样的话，透镜中心微小的偏移，就会成为像变模糊的原因。因此，如图3所示，人们开发出了使用装有轴承的金属模具的压缩设备。该设备，能够感知金属模具的微小偏移而自动进行微调节。通过这种改进，透镜表面和内面的偏移可以控制在 $0.5\mu\text{m}$ 量级以下，使手机中数码相机的像素得到飞跃性的提高，可高达1000万像素^(注)。

由于玻璃的软化温度很高，出现了容易损伤金属模具从而不能压缩成型的问题。现在，人们使用耐热性优异的陶瓷模具，玻璃透镜也可以通过压缩成型来制造了。这种方法制造出的透镜叫玻璃成型透镜。此外，在玻璃制球面透镜的表面覆盖一层薄塑料膜，这层膜用金属模具制成非球面的，就形成了复合非球面透镜(图4)。



- 非球面透镜可以用压缩成型的方法来制造
- 压缩成型的玻璃透镜称为玻璃成型透镜

注：这项技术是由日本宫崎县的东伸精工（现为マクセルファインテック（Maxell Finetech））株式会社发明的。

图1 非球面透镜的压缩成型

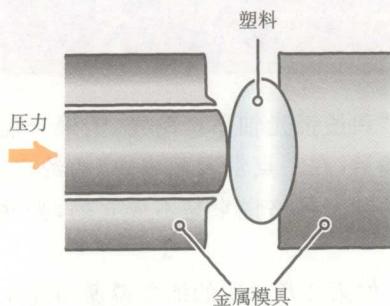


图2 中心偏移的透镜

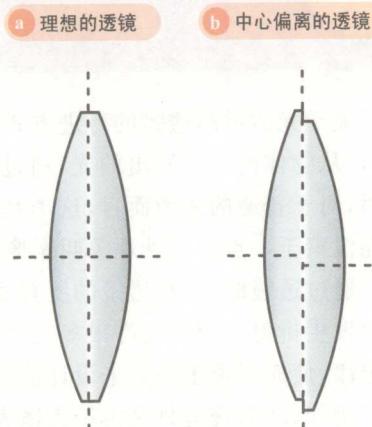


图3 使用轴承的金属模具

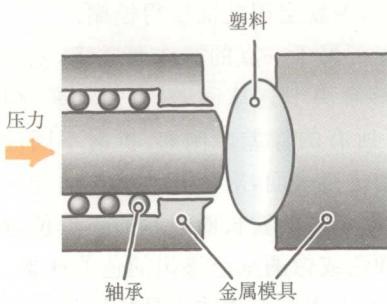
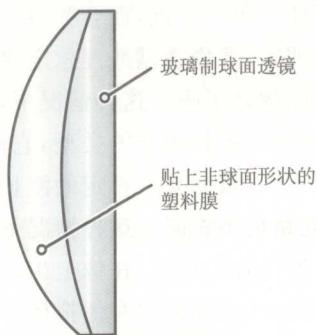
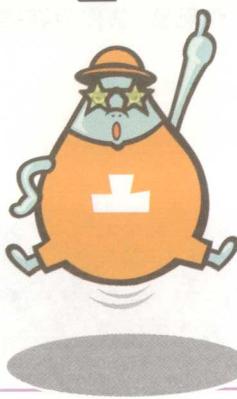


图4 复合非球面透镜



通过各种改进，可以
制造出精密的非球面
透镜了



071

什么是像差

关于光通过凸透镜的行进方式,有“和透镜光轴平行的光,汇聚于焦点”,“从物体的一点发出的光,通过透镜后,在一点汇聚而成像”的约定。然而,对于普通的透镜而言,这个基本的约定严格说来是不成立的,光并不能汇聚于一点。这种现象叫做像差。

通过透镜的光,在透镜的所有面上,如第2章说明的那样遵循斯涅尔定律发生折射。因此或许很多人会认为,透镜表面的性状,也是按照斯涅尔定律,使光汇聚于一点来设计的。但是,实际上并非如此。

例如,球面透镜只是由于透镜表面容易加工而做成球面的。实际上,平行于透镜的光轴通过球面透镜的光路用斯涅尔定律计算的话,可知通过透镜中心和周边的光,其焦点位置是偏离的。焦点位置的偏离,就是说光不能汇集于一点,而会弥散成某一大小,像就会因此而变得模糊。

那么,严格遵循斯涅尔定律可以使光汇聚于一点的非球面透镜,就不会引起像差了吗?这种情况下,当然能够解决上述球面透镜的像差。但是,像差有各种各样的类型,它解决不了所有的像差。例如,折射率因波长而不同,根据某一特定的波长所设计的透镜表面,对于其他波长的光来说,光路也不相同。这种情况下,会产生由于光的波长而引起的焦点位置和成像位置的偏移、在像上出现多余的颜色或像的颜色渗出的色差现象。

此外,在像差中有像拖尾的现象、像发生变形和物体不是相同形状的现象等。这些现象,总称为赛德的5种像差。



- 对于透镜而言,其表面无论多么正确地研磨,像差都不可避免
- 像差中有因形状和波长的不同所发生的像差

表1 像差的分类

像差	单色像差	球差	光在光轴上不能汇聚于一点
		慧差	离开光轴的地方像点（注）拖尾
		像散	像在纵向和横向的位置发生偏移
		像场弯曲	成像面不是平面而是弯曲的
		畸变	离开光轴后像发生变形
	色差	位置色差	由光的波长引起的成像位置不同
		倍率色差	由光的波长引起的成像大小不同

注：物体的一点对应的像称为像点。点光源的像是像点。

赛德的5种像差

像差有球差、慧差、像散、像场弯曲、畸变、位置色差和倍率色差。最初的5种像差，是单色光发生的像差，称为单色像差。1856年德国的数学家和天文学家赛德（Philipp Ludwig von Seidel, 1821—1896）将该理论体系化，因此称之为“赛德的5种像差”。

后面的2种像差，是因光的波长不同而引起的像差，称为色差。无论什么样的透镜都有像差，只是程度不同而已。同时，像差的大小，是根据透镜的大小或像的大小而变化的。

图1 色差的例子



用色差大的透镜拍摄照片时，就会拍出渗色的照片呀



图1表示的是和球面平凸透镜的光轴相平行的光入射时的情形。光在透镜的表面遵循斯涅尔定律发生折射,但在透镜中央部位和周边部位光的行进方式是不同的。通过中央部位的光①②汇聚于光轴上的焦点F,但是通过透镜周边的光③④则汇聚于焦点的前方。因此在焦点收集的光弥散成圆形。像这样由于透镜的表面为球形而引起的像差称为球差(球面像差的简称,译者注)。不管怎样正确地研磨透镜表面,只要表面是球形,球差就不可避免。可以说球差是球面透镜的宿命。

如图2所示,向透镜各部分入射的光线,根据它们各自射到像面的位置所画出的图称为点列图。球差的点列图呈同心圆的形状。另外,图2中向透镜入射的光平行于光轴,因此像面和焦平面是一致的。该图表示出了位于无穷远处光轴上的点光源所发出的光,在像面上不能严格地汇聚为一点的情形。

球差是由于通过透镜中心附近的光和通过周边的光的焦点偏移所造成的,因此对于相同曲率半径的透镜,透镜的口径越小,因球差而引起的像的弥散就越小。该口径称为透镜的有效口径。照相机的情况下,镜头的有效口径可以通过光圈来调节。即使镜头上没有光圈,实际上还有固定透镜的边框,因此透镜的有效口径一般比透镜的口径小。

虽然球差随透镜的有效口径的缩小而急剧减小,但是透镜的有效口径缩小时,又会产生进入透镜的光量减少之类的其他问题。



- 由于透镜的表面是球面而引起的像差叫做球差
- 描绘像面上所汇集光点的图叫点列图

图1 因球差而引起的焦点位置的偏移

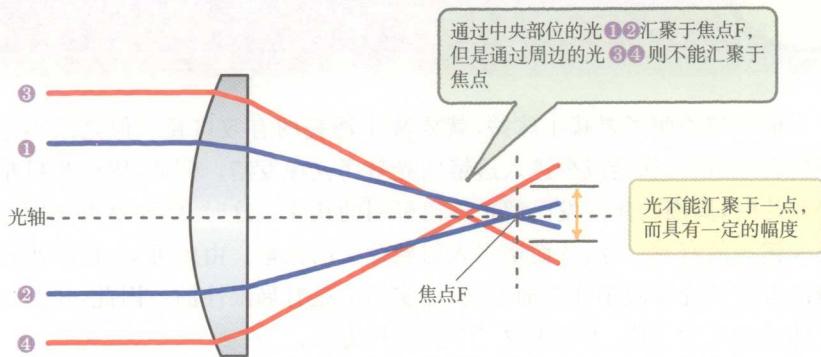


图2 点列图

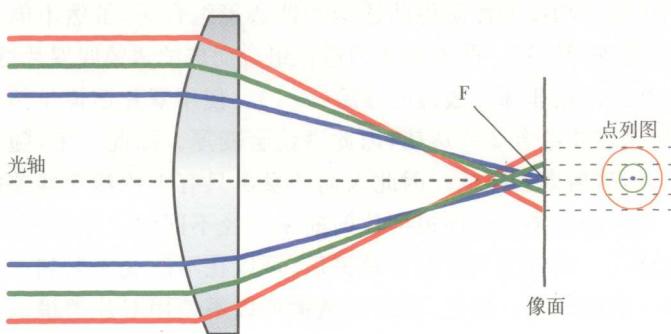
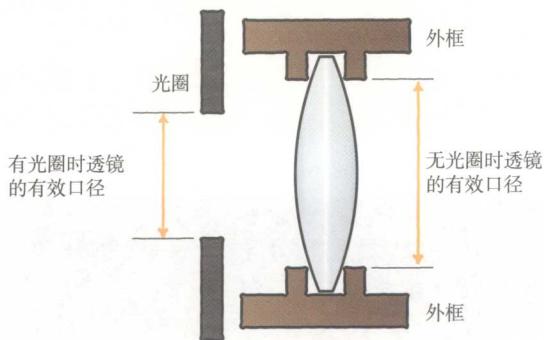


图3 透镜的有效口径





前一节说明了要减小球差，就要减小透镜的有效口径。但是减小透镜的有效口径，就会减少进入透镜的光量而使像发暗。例如，用照相机拍摄照片时，周围的光线发暗就拍不出鲜明的相片。这时，就要增大光圈以增大镜头的有效口径，从而增多入射到镜头的光量。由此可知，用减小透镜的有效口径来减小球差的方法，在实用上是有局限性的。因此，作为减小球差的有效手段，人们采取了下列两种方法。

第一是将凸透镜和凹透镜组合使用的方法（图1）。凸透镜具有聚光的作用，凹透镜具有使光发散的作用。凸透镜和凹透镜引起的球差是相反的。利用这种相反的性质将凸透镜和凹透镜组合后，虽然不能完全消除球差，但能进行矫正。凸透镜和凹透镜组合而成的透镜叫双片透镜。

另一种是使用非球面透镜的方法（图2）。使用双片透镜虽然可以减小球差，但是需要组合2片透镜，因此透镜会变厚。如此一来，随着透镜尺寸的增大，透射率会降低。因此人们开发出只有1片却无球差的非球面透镜。使用透镜中央和周边部位的曲率半径不同的非球面透镜，可以完全消除球差。而且使用非球面透镜后，可以在不改变入射到透镜的光量的前提下消除球差。总之，非球面透镜可以不使用双片透镜而减小球差，就是说可以将透镜减少到1片，这样也就可以实现照相机等的小型化和轻量化。



- 减小透镜的有效口径可以减小球差，但是会使像发暗
- 使用双片透镜或非球面透镜可以矫正球差

图1 双片透镜对球差的矫正

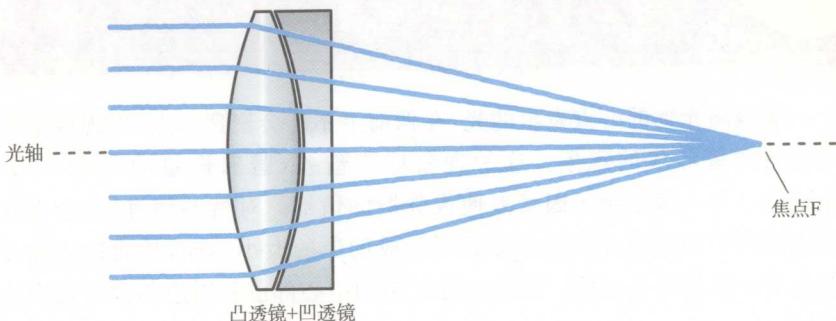
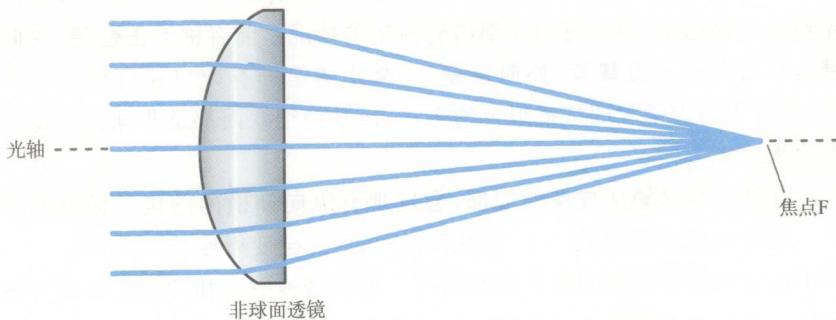


图2 非球面透镜对球差的矫正



球差也会在球面的凸面镜和凹面镜上产生哦



从偏离光轴的一点发出的光，在像面上不能会聚到一点，出现像拖着尾巴的彗星形状的现象。这种现象称为彗差（彗形像差的简称，译者注）^(注1)。图1表示出了因彗差使像弥散的情形。对彗差而言，由于光通过透镜的中心部位和周边部位后所形成的像的大小不同，从而造成像点像拖着尾巴的彗星似的。这意味着透镜的中心部位和周边部位的放大率不同。

彗差的点列图是如图1右侧像的形状。像小的一方是彗星的头部，大的一方是彗星的尾部。头部的像明亮而尾部的像昏暗。该图中，像向光轴的外侧拖尾，但也有向光轴内侧拖尾的情况。前者称为正彗差（内向彗差），后者称为负彗差（外向彗差）。减小透镜的有效口径可以改善彗差，还有用凸透镜和凹透镜组合的方法，以及使用双面都是非球面透镜的方法来矫正彗差。

仔细观察透镜所成像的端部，会发现有纵向和横向的焦点偏移的现象。这种现象称为像散^(注2)。存在像散时，像点会变得瘦长，或粗短。图2表示出了像散所引起的像的弥散情况。连接透镜中心和像的光线称为主光线。像点本来应当在主光线到达的地方，然而，如图所示。在透镜的纵向和横向，像的位置发生了偏移。因此，像就弥散了。减小透镜的有效口径虽然可以改善像散，但由于其状态和没有对好焦相似，并不能从根本上消除像散。通过适当调节透镜两面的曲率，可以使像散减小。

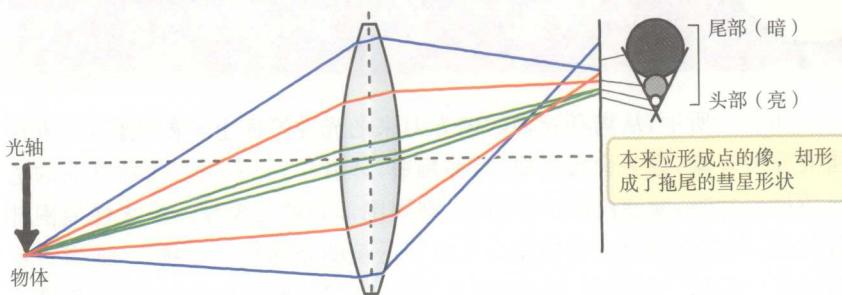


- 彗差是偏离光轴地方的像点拖尾的像差
- 像散是在纵向和横向成像位置偏移的像差

^{注1}: coma(= comatic aberration, 英语是彗差)的意思是“彗星之尾”。

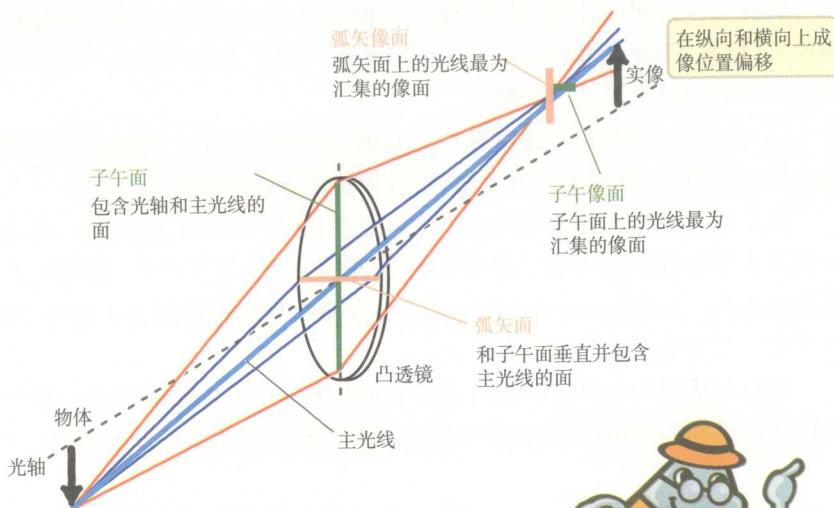
^{注2}: 彗差和像散都是在光轴外发生的光特有的现象，因此也称为轴外像差。

图1 蕙差

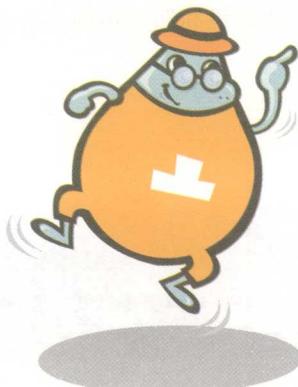


消除球差和彗差叫做齐明化，消球差和彗差的透镜叫齐明透镜。

图2 像散



眼睛的散光是角膜的纵向和横向的折射率不同而产生的像散。详细参见第5章的(080)



如图1所示,从离开光轴的地方射来的光在平面上不能成像,出现弯曲成像的现象,称为像场弯曲(简称场曲,译者注)。使用有像场弯曲的透镜拍摄照片时,要使画面中心对焦,则周围部分就会模糊。反之使周围部分对焦,则中心部分就会模糊。入射到透镜的光的倾斜度越大,或者透镜的有效口径越大,像场弯曲就越大。减小透镜的有效口径,在某种程度上可以减小像场弯曲,但是,和像散一样都是类似于离焦的状态,因此无法从根本上消除像场弯曲。要矫正像场弯曲,就要想办法改变透镜的形状,或改变光阑的位置等。

到此为止说明的球差、彗差、像散和像场弯曲,都是产生使像变模糊的像差,但是,歪曲像差则是像发生变形使物体看上去形状发生了畸变的像差。因此歪曲像差又称为畸变。

图2是透过有畸变的透镜看到的围棋盘畸变的情形。物体和像理想来说应是相似形,但对于有畸变的透镜,周边的像就会变形。

越往周边去像就越收缩的畸变称为桶型(又称负畸变,译者注),而越往周边去像就越扩展的畸变称为枕型(又称正畸变,译者注)。桶型畸变容易发生在广角透镜上,而枕型畸变容易发生在望远镜透镜上。另外,还有合成了桶型和枕型的阵笠型畸变。

畸变与透镜的有效口径没有关系,因此缩小光阑也不能改善。可以使用凸透镜和凹透镜的组合,或使用非球面透镜来改善。



- 像场弯曲是像面为曲面的像差
- 畸变是像发生变形使物体看上去形状发生了畸变的像差

图1 像场弯曲

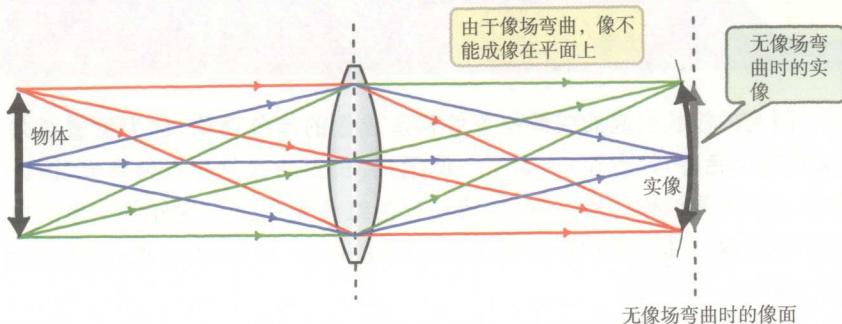
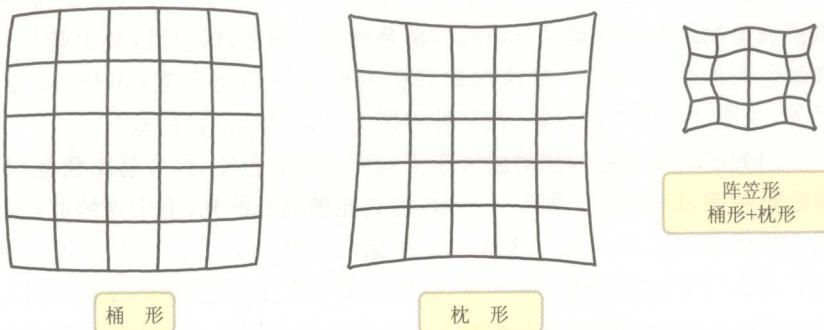


图2 畸 变



枕 形

阵笠形
桶形+枕形

第3章(057)中图2的“由球面透镜引起的像的变形”就是枕形畸变哟

因光的波长引起的成像位置偏移造成像的渗色现象,称为位置色差(又称轴向色差,译者注)。如图1所示,波长短的蓝色光折射率大,因此在焦点的内侧汇聚。另一方面,波长长的红色光在焦点的外侧汇聚。由于光学透镜的折射率定义为 n_d ,因此在焦点F汇聚的光是波长为587.562nm的d线。

位置色差,在使用阿贝数大的低色散光学材料时会减小,但是只用1片透镜是不能消除的。1733年英国的霍尔(Chester Moore Hall,1703~1771)发明了用低折射率、低色散冕玻璃制成的凸透镜和高折射率、高色散铅玻璃制成的凹透镜组合而成的消色透镜。消色透镜可以减少蓝色光和红色光的位置色差。对这两种颜色的修正称为消色差(Achromat)。另外,减小透镜的有效口径,在某种程度上可以减轻位置色差。

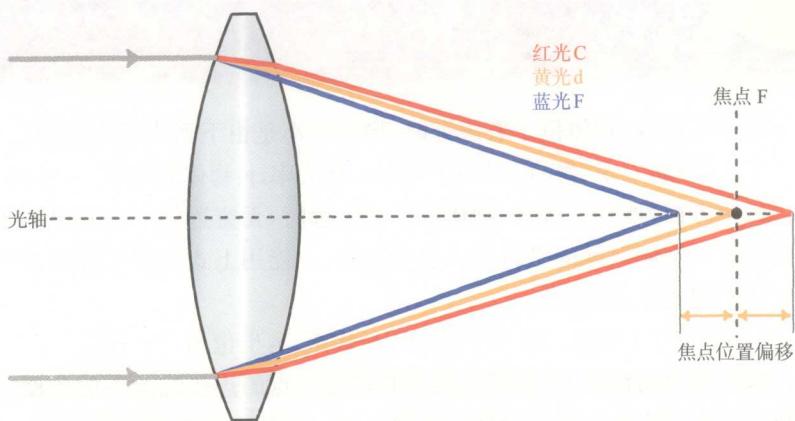
因光的波长引起的像的放大率不同而形成的色差,称为倍率色差(又称垂轴色差,译者注)。如图2所示,射到光轴以外的光,由于光的波长不同造成像点位置的不同。这意味着在像面成像的高度因波长而发生变化。用有倍率色差的透镜成的像,其周边部分发生颜色偏移,在像上可以看到带颜色的边。倍率色差也是由于光的波长不同引起的光学玻璃折射率不同而形成的现象。

仅用1片透镜也不能消除倍率色差。和位置色差一样,可以通过采用性质不同的光学玻璃制成的透镜组合来修正。倍率色差不能通过减小透镜的有效口径来解决,但是可以通过调整光阑的位置来减少。



- 色差是由于光的色散而造成的像差
- 色差可以通过采用性质不同的凸透镜和凹透镜的组合来修正

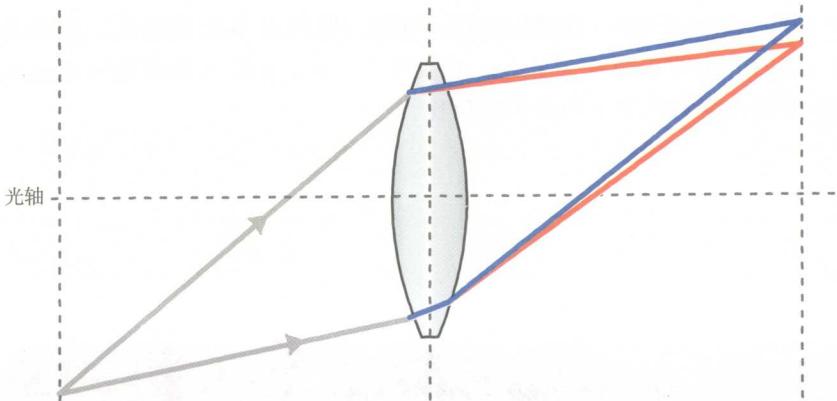
图1 位置色差



异常色散玻璃

在消色散 (Achromat) 中，尚残留有红和蓝之间的中间色的色差。因此人们常使用被称为异常色散玻璃的光学玻璃。通常玻璃，其折射率增高后色散增大，但异常色散玻璃中有的是低折射率而长波长一侧高色散的，还有的是高折射率而短波长一侧低色散的。将异常色散玻璃组合起来后，可以进行红、蓝及其中间色的三色修正从而消除色差。这种修正叫复消色差。萤石，就是自古以来就为人熟知的可作为低折射低色散的材料之一。

图2 倍率色差





如图 1 所示,物体位于有限远时,像的大小是由下列式子决定的。

$$\gamma' = m\gamma \quad \gamma':\text{像的大小}, m(=b/a):\text{放大率}, \gamma:\text{物体的大小} \cdots \cdots ①$$

另一方面,如图 2 所示,物体位于无限远时,无穷远处一点发出的光,作为具有一定倾斜度的平行光入射到透镜,不能用上式来定义像的大小。这里用下列式子来定义。

$$\gamma' = f \cdot \tan\theta \quad \gamma':\text{像的大小}, f:\text{焦距}, \theta:\text{半像角} \cdots \cdots ②$$

这里所说的像角,是指像的两端和透镜主点的连接线所夹的角度,是用角度表示的像面上映出物体的范围。其一半的大小叫半像角。

像的亮度是由射入透镜的光量来决定的。因此透镜的有效口径越大,光阑开得越大,像就越亮。直径为 D 的圆的面积为 $(\pi/4)D^2$,因此透镜的有效口径扩大 2 倍的话,透镜的面积就扩大 4 倍。即像的亮度是和透镜有效口径的平方成正比的。

像的亮度还和放大率有关。用凸透镜成实像时,随着像的放大像会变暗。提高放大率使像放大,成像的像点也随之增大。因此,即使入射的光量相同,单位面积的亮度也会变暗。像的大小变为 2 倍时,亮度就变为 $1/4$ 了。由 ② 式可知,透镜的焦距 f 越长,像的大小 γ' 就越大。也就是说,像的大小和焦距 f 成正比。由此可知,对于有效口径相同的透镜来说,像的亮度和焦距 f 的平方成反比。



- 像的亮度和透镜有效口径的平方成正比
- 像的亮度和焦距 f 的平方成反比

图1 物体在有限远时像的大小

像的大小和物体大小的关系

$$\text{放大率 } m = \frac{b}{a}$$

$\triangle OAB$ 和 $\triangle OA'B'$ 相似

$$\frac{b}{a} = \frac{r'}{r}$$

$$\text{因此 } r' = mr$$

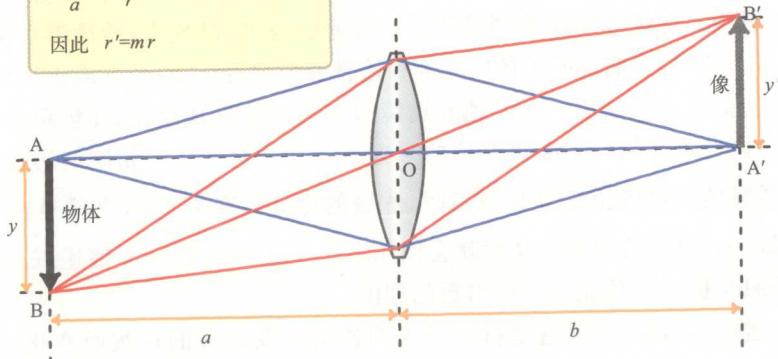


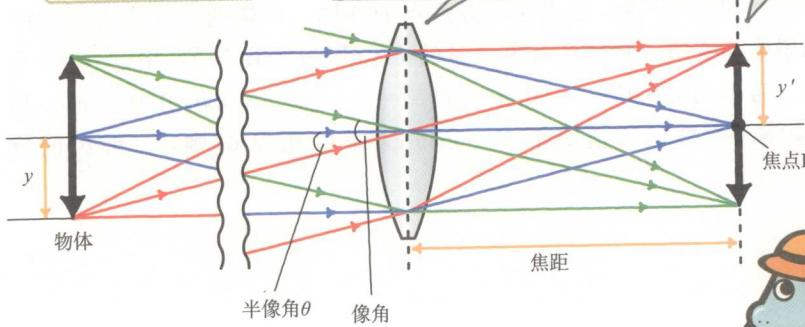
图2 物体在无穷远时像的大小

像的大小 (像的半径)

$$r' = f \cdot \tan \theta$$

从物体发出的光作为平行光入射到透镜

物体位于无穷远处时，像在焦点的位置形成



像的亮度和像的大小 y' 的平方成反比，因此和焦距 f 的平方成反比。





078

F 值和有效 F 值

照相机镜头上写有 F1.4 或 F5.6 之类的数字。这就是 F 值或光圈值, 表示镜头的明亮度。对于一片透镜来说, 如图 1 所示, F 值是焦距 f 除以透镜的有效口径 D 所得的值。F 值越小, 表明 D 越大, 透镜越明亮。

(077) 中, 我们说明了像的亮度和透镜有效口径 D 的平方成正比, 和焦距 f 的平方成反比。而 F 值和透镜的有效口径 D 成反比, 和焦距 f 成正比, 因此可知像的亮度和 F 值的平方成反比。对于焦距相同的透镜来说, 透镜的有效口径变为 $1/\sqrt{2}$ 倍时, 透镜的亮度就变为 $1/2$, 也就是说, F 值每增大 $\sqrt{2}$ 倍, 透镜的明亮度就会以 $1/2, 1/4, 1/8, 1/16 \dots \dots$ 倍递减。这就是照相机的 F 值是 1.4 的倍数的理由。

透镜的明亮度, 因透镜材料对光的透射率及透镜的片数而变化。F 值并没有考虑到这些因素, 相同 F 值的透镜也会出现明亮度不同的情况。因此有时也使用在 F 值的基础上考虑到光的透射率 t 的 T 值。由于透射率是随波长变化的, 因此 T 值也是随波长变化的。

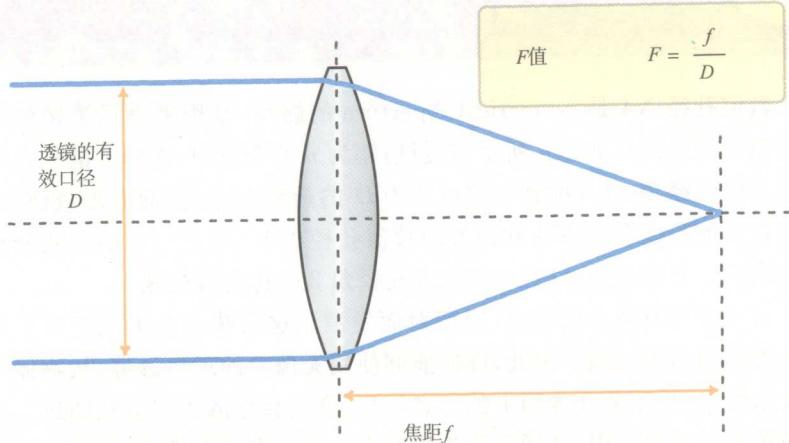
F 值是当物体在无穷远的情况下使用的。物体在有限远的情况下, 焦平面和像面不一致, 像成在后方焦点的外侧。即像的亮度随着偏移距离的增大而变暗。物体在有限远时的 F 值称为实效 F 值, 用记号 Fe 来表示。考虑到第 3 章(048)中说明的 $b' = fm$, 如图 3 所示可求出 Fe 。另外, 物体在无穷远的情况下 $b' = 0$, 放大率可视为 0, 则 Fe 和 F 的值一致^(注)。



- F 值表示像的亮度
- 物体在有限远时使用实效 F 值 Fe

注: 不管透镜和物体的距离是多少都可以使用 Fe 。

图1 F值



f 增大时像变暗，这时 F 变大
 D 增大时像变亮，这时 F 变小

图2 F值和T值

 $F\text{值}$

$$F = \frac{f}{D}$$

 $T\text{值}$

$$T = \frac{F}{\sqrt{t}} \times 10$$

图3 实效F值 Fe

由于 $Fe = \frac{f+b'}{D}$, 将 $D = \frac{f}{F}$ 、 $b' = fm$ 代入后得

$$Fe = (f + b') \frac{F}{f} = (1 + \frac{b'}{f}) F = (1 + m) F$$

* m : 放大率

F 值不同的透镜形成放大率不同的像时，
可以用实效 F 值来比较其亮度的差异

数值孔径 **NA** 是 Numerical Aperture 的缩写,是用来表示透镜的明亮度和分辨力的。如图 1 所示,在折射率为 n 的介质中,光轴上的一点发出的光以孔径角 2θ 入射到有效口径为 D 的透镜上,在像面上形成像点,此时物方的数值孔径 NA 和像方的数值孔径 NA' ,用图 1 中的①式和②式来定义。和孔径角 2θ 对应的像方孔径角 $2\theta'$,称为聚光角。

由于光具有波动的性质,因衍射而发散。这意味着光不能汇聚于和波长大小相当的区域。因此,即使能够使用无像差的理想透镜,从物体一点发出的光,也不能在像面上的一点汇聚,像点会弥散成圆盘状的斑。这个现象称为衍射极限,该圆斑称为爱里斑。图 2 表示出像点的强度分布。爱里斑看上去中心明亮,周围有数条同心圆。对于没有像差的透镜,爱里斑的半径 r ,可以用图中的③式或④式求出。这称为透镜的**分辨率**^(注1)。由④式可知,NA 越大,分辨力就越微小。这意味着 NA 越大,像就越清晰明亮。

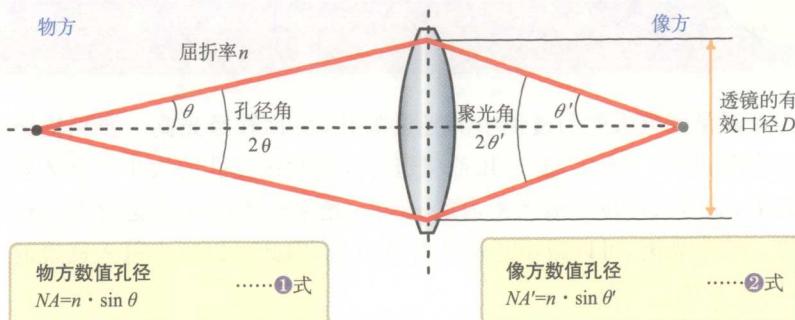
另外,像方的 $NA(NA')$ 和实效 F 值之间,有⑤式的关系,因此从实效 F 值可以简单地求出 NA' 和聚光角 $2\theta'$ 。例如,实效 F 值 = 2.8 时,
 $NA' = 0.18, 2\theta' = 20.5^\circ$ 。

同时,透镜的**分辨本领** R_0 是指 1mm 上的最大分辨条数,如⑥式所示由分辨力的倒数来定义。



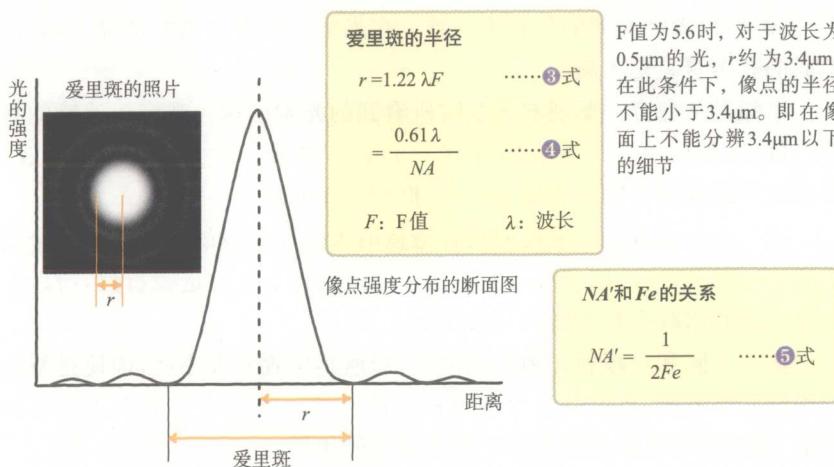
- NA 表示透镜的明亮度和分辨力
- 在高分辨力的光学系统中,需要考虑光的衍射现象

图1 数值孔径NA



显微镜的物镜中还有浸满折射率较大的油的浸油透镜。由于折射率可以增大，因此可以增大 N_A 。而增大 N_A 就可以提高像的亮度和分辨本领。

图2 爱里斑



$$R_0 = \frac{1}{r} = \frac{1}{1.22 \lambda F} = \frac{NA}{0.61 \lambda} \quad (\text{条/mm}) \quad \dots \dots \text{⑥式}$$

分辨力为 $10\mu\text{m}$ 时，其 R_0 的值为 $1/0.01 = 100$ 条。
即具有 1mm 内最大分辨 100 条的分辨本领^(注2)

光阑是调整入射到透镜中的光量的孔，也称孔径光阑。照相机镜头上的光圈，如图1所示，通过几条羽翅可以连续改变孔的大小。物体发出的光中，能射入透镜的是光阑内的光线。光阑外侧的光线是射不到透镜内的。缩小光阑，可以减小透镜的有效口径，因此可以减少射入透镜的光量，增大F值(f/D)。

从光学系统之外看到的光阑的像，称为光瞳。光瞳是由光阑形成的，光在入射方形成的光瞳叫入射光瞳(简称入瞳，译者注)，而光在出射方形成的光瞳叫出射光瞳(简称出瞳，译者注)。

入瞳是从物方一侧观看透镜时所看到的光阑的像。照相机的情况下，由于光圈在镜头中，入瞳就是镜头所形成的光圈的虚像。这种情况下，入瞳的位置和光圈的位置不一致。在光阑前没有透镜的情况下，光阑形成的孔本身就是入瞳。

出瞳是从像方一侧观看透镜时所看到的光阑的像。观察望远镜的目镜，可以看到在黑色的圆的内部有一个明亮的圆。这个亮圆就是出瞳。黑色的圆是固定物镜的边框，这个边框相当于光阑。

图2表示出有3片透镜的复合透镜的入瞳和出瞳的位置。在这个例子中，光阑在中央的凹透镜后面。由于通过透镜的光被透镜折射，所以上去入瞳和出瞳都在光线的延长线上。

由于入瞳和出瞳和光阑是相似形，知道其位置和大小后，即使是复杂的透镜光学系统，也可以画出透过透镜的光线。光瞳在考虑射入透镜的光量、像的分辨率以及像差时发挥着重要的作用。



- 入瞳是从物方一侧观看光学系统时所看到的光阑的像
- 出瞳是从像方一侧观看光学系统时所看到的光阑的像

图1 光阑的作用

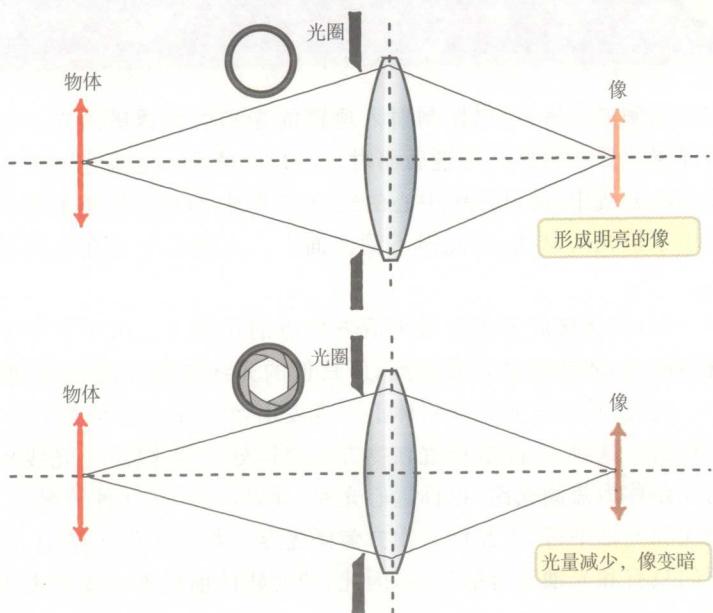
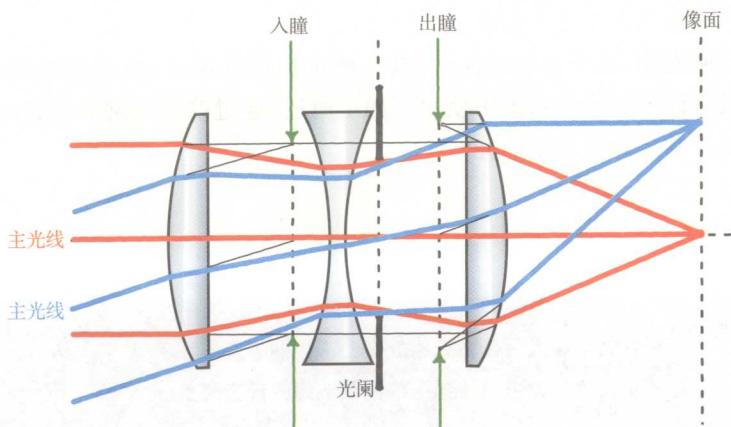


图2 入瞳和出瞳





改变光阑的位置,可以控制射入透镜的光和射出透镜的光。图1表示出将光阑放置在紧靠凸透镜后面时光的行进情况。远离光轴的物体上一点发出的光线中,通过透镜中心的也通过光阑,而通过透镜上部和下部的光线由于被光阑遮挡,因此射不到像面上。入瞳看上去在入射光的延长线上。

图2中,光阑被放置在凸透镜后方焦点的位置上。由于只有平行入射到透镜的光,才能通过后方焦点,而其他的光线则被光阑遮挡,射不到像面上。因此,从远离光轴的物体上一点发出而能够成像的主光线,是和光轴平行的。这时,入瞳的位置在物方无穷远处。像这样,主光线和光轴平行的光路称为焦阑光路(也称远心光路,译者注)。在这种情况下,物方的主光线和光轴平行,因此称为物方焦阑光路。物方焦阑光路中,由于通过光阑的只有和光轴平行的光线,因此,即使物体前后移动像的大小也不会改变。

图2中,光阑被放置在凸透镜前方焦点的位置上。通过前方焦点的光线,射出凸透镜后是平行前进的。这种光路称为像方焦阑光路。像方焦阑光路中,由于从透镜射出的只有和光轴平行的光线,因此,即使像面前后移动像的大小也不会改变。

焦阑光路,由于这些特征,可以在测量物体的尺寸、或需要极力抑制像的尺寸误差的光学系统中使用。如上所述,通过改变光阑的位置,可以巧妙地控制入射到透镜的光^(注)。



- 物方焦阑光路是将光阑放在凸透镜的后方焦点上
- 像方焦阑光路是将光阑放在凸透镜的前方焦点上

注:还有物方和像方焦阑组成的双方焦阑光路。

图1 光阑的作用

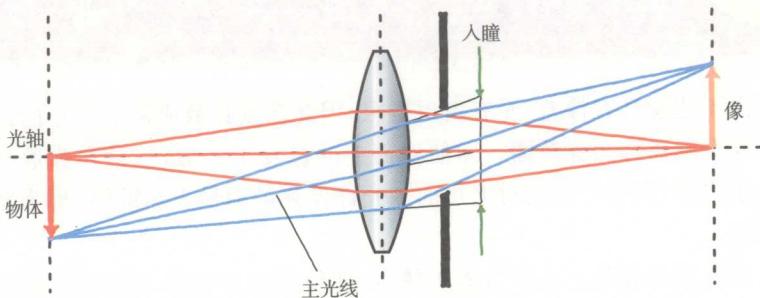


图2 物方焦阑光路

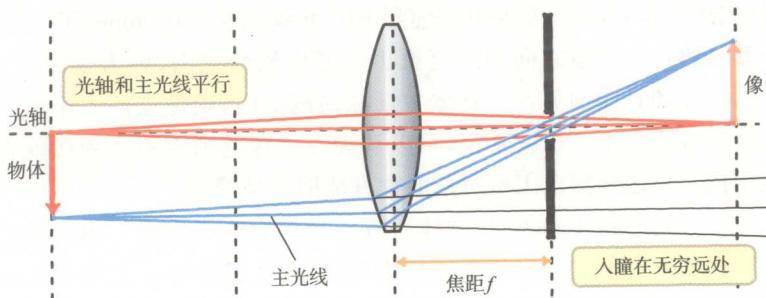
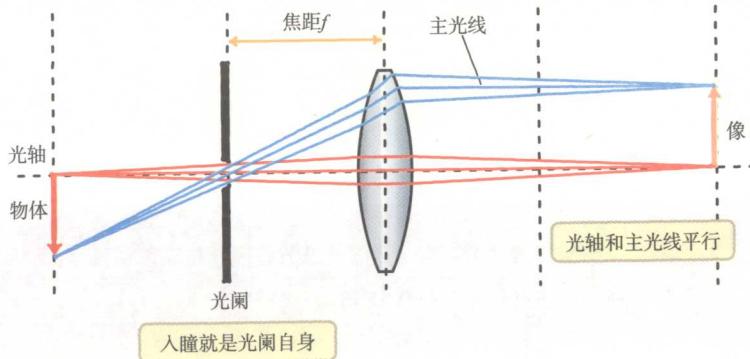


图3 像方焦阑光路





由于透镜具有像差,光有衍射极限,因此像点弥散成某个大小的圆盘状。这个圆盘称为弥散圆。即使像面上的像发生弥散,但是在弥散到某一大小之前,看上去还是对上焦的。允许像弥散的最大弥散圆,称为容许弥散圆。

用透镜在屏幕上映出物体的像时,即使透镜和屏幕之间的距离多少移动一点,也还是有一个像不变模糊的范围。这个范围称为焦点深度(简称焦深,译者注)。焦深源于弥散圆的大小小于容许弥散圆。焦深和F值成正比。例如,一般的照相机镜头,容许弥散圆约为0.03mm,对于F2.8而言,其焦深为0.17mm。如果孔径缩到F16,焦深就变为0.96mm了^(注)。

改变物体和透镜之间的距离像也不变模糊的范围,称为景深。图2表示出焦深和景深的关系。物体在景深的范围内,则像点的大小就会处于容许弥散圆之下。也就是说,可以认为在景深范围内物体的像就在焦深范围内。反之焦深范围所对应的物方范围就是景深。

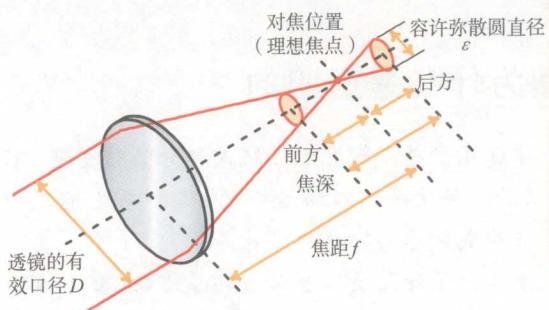
对着远处的物体调焦时,物体后方的景深变为无穷远。像这样能够将无穷远的位置纳入景深的最短摄影距离,称为超焦距。当照相机对着比超焦距远的地方调焦时,从那里往前1/2的距离都可以对上焦。像这样拍摄照片的手法称为全焦点对焦。超焦距可以用下面的式子求出。

$$\text{超焦距} = \frac{f^2}{\epsilon \cdot F}$$



- 像不变模糊的物方范围是景深,像方范围是焦深
- 景深大时从近到远都能对上焦

图1 焦深和容许弥散圆



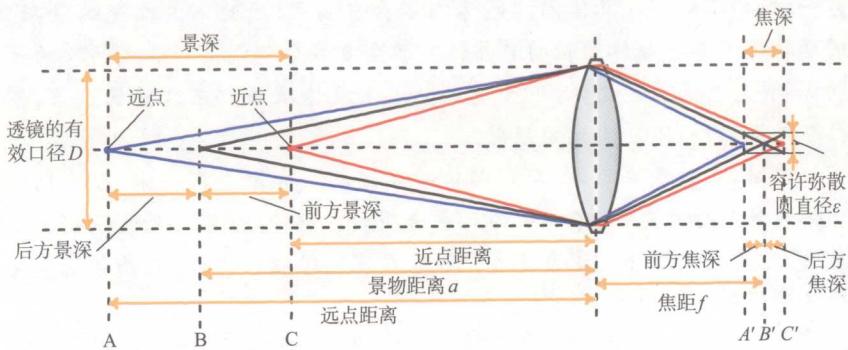
F值、焦深以及容许弥散圆直径 ε ，由三角形相似的关系可以表示为下式。

$$F = \frac{f}{D} = \frac{\text{焦深的 } 1/2}{\text{容许弥散圆直径 } \varepsilon}$$

因此，焦深可以由下式求得。

$$\text{焦深} = 2\varepsilon \cdot F = \pm \varepsilon \cdot F$$

图2 焦深和景深的关系



$$\text{前方景深} = \frac{a^2 \cdot \varepsilon \cdot F}{f^2 + a \cdot \varepsilon \cdot F}$$

$$\text{后方景深} = \frac{a^2 \cdot \varepsilon \cdot F}{f^2 - a \cdot \varepsilon \cdot F}$$

表1 景深和焦距、光阑及景物距离的关系

景深	浅(狭窄)	深(宽广)
焦距	长	短
光阑	张开	收缩
景物距离	近	远



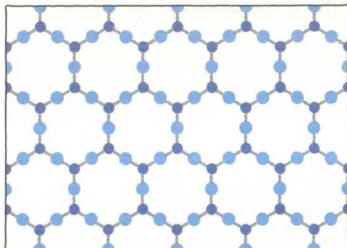
COLUMN

玻璃为什么是透明的

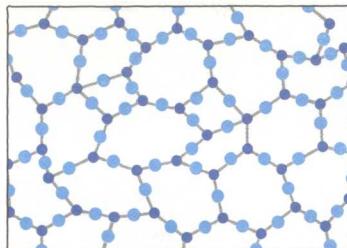
一般来说，透明是指物体在几乎整个可见光区域或部分区域透光，可以透过物体看到另一侧的状态。要使物体成为透明的，需要满足光在物体表面或内部不散射，光不被构成物体的物质所吸收等条件。

在固体中，有由许多原子或分子规则地结合而成的晶体，也有不规则地结合起来不能形成晶体的非晶体。固体物质中，还有许多由小的单晶体大量积聚而成的多晶体。在多晶体里，有被称为晶界的晶体界面。晶界的大小和波长相同或在其之上时，光在晶界上发生散射，就不透明了。另一方面，不能形成晶体的非晶体内不存在晶界，因此不发生光的散射。玻璃就是不具有晶体结构的非晶体。其主要成分二氧化硅连成网状的结构，其样态与其说是固体，不如说更贴近于液体状态。在这种状态下，不存在晶界，因而不发生光的散射。

同时，更为重要的是，二氧化硅不吸收光。尽管是非晶体，只要构成物体的物质吸收光，就不能成为无色透明的。另外，光穿过无色透明的物质时，光的速度下降。这意味着光和物质发生了相互作用，光并非是单纯地从透明的物质中穿插而过。



晶体结构



非晶体结构

第5章

：

使用透镜的身边物品的原理

在我们身边，有许多使用透镜的物品。

本章中我们将讲解使用透镜的器具，特别是我们身边的物品的基本原理。





我们是通过5种感觉(视觉、听觉、嗅觉、味觉和触觉)来获得各种情报并进行判断和行动的,其中80%依赖于视觉。对我们来说,眼睛是非常重要的感觉器官。人类之所以成为视觉优先的动物,据分析是由于我们祖先的生活空间,在具有复杂的三维空间的树上所造成的。

图1是人类右眼眼球自上而下的纵向剖面图。眼球呈被巩膜包覆的结构,里面充满了折射率约为1.34的玻璃体。眼睛的前方有透明的角膜和晶状体。角膜的直径约为12mm,折射率约为1.38。角膜和晶状体之间的前房里,充满了折射率约为1.34的水状液。晶状体的直径约为8mm,折射率约为1.4,呈凸透镜的形状。

到达眼睛的光,首先在和空气交界的角膜上发生较大折射后进入眼睛。此时,虹膜可以根据光的亮度大小,通过改变瞳孔的大小来调节进入眼睛的光量。通过瞳孔的光,穿过前房射入晶状体。眼睛在看近处或远处的东西时,通过睫状体的收缩来调节晶状体的厚度,使像成在视网膜上。图3表示出当看到远方的鸟时,光进入眼睛的行进方式,以及在视网膜上成像的情形。视网膜上映出物体的倒立像^(注)。在观察景物的时候,近处的物体看上去大,而远处的物体看上去小。图4表示出观看近处物体和远处物体时的情形。物体OA和物体O'B具有相同大小,但是离眼睛的远近不同,因此进入眼睛的光线角度发生改变,从而在视网膜上成像的大小也就改变了。所以,眼睛是根据光射来的角度来捕捉物体的。



- 光在和空气交界的角膜上发生的折射最大
- 眼睛是根据光射来的角度来掌握物体的大小的

注:人们可以看到正立的物体是由于脑的作用。

图1 眼睛的构造

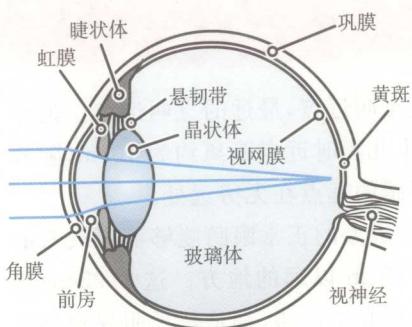


图2 日本鹿的晶状体和玻璃体



图3 在视网膜上成像

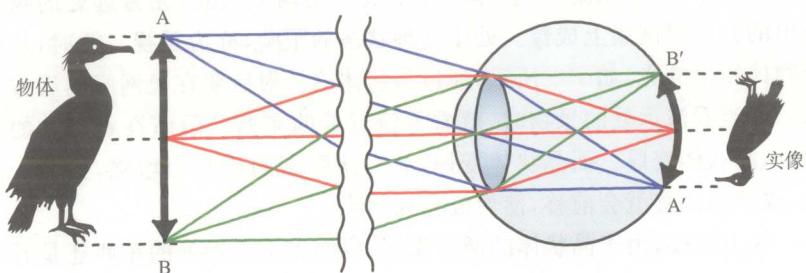
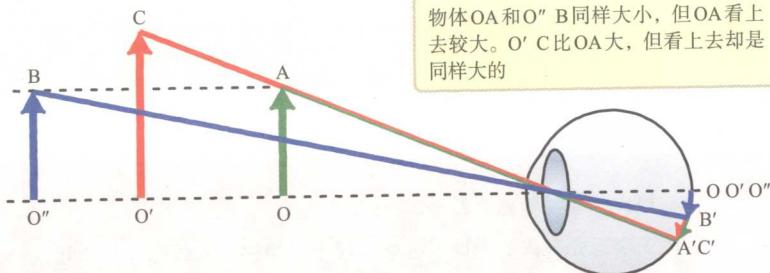


图4 观看物体的方式





如图 1 所示,用眼可以对焦的最近点叫近点,最远的点叫远点。近点和远点之间的范围称为明视区域。二十几岁时近点距离约为 10cm,随着岁数的增大而增长。另一方面,正常眼睛的远点在无穷远处。

眼睛不能向比近点近的地方对焦。成人的正常眼睛能够清晰观看的范围,虽然存在个体差,是在距离眼睛 25cm 以远的地方。这个 25cm 被称为明视距离。眼镜、放大镜及望远镜等光学仪器,都是基于明视距离为 25cm 来作图和计算的。

眼睛在观看远处的物体时,睫状体是松弛的,晶状体处于无调节状态,此时厚度是最薄的。在观看近处的物体时,睫状体紧张,晶状体变厚。如图 2 所示,正常眼睛,晶状体的厚度处于无调节状态,无穷远处的物体发出的光在视网膜上成像。处于这种状态的眼睛,称为正视。此时,从近处物体发出的光,如图 3 所示,通过晶状体的折射后要在视网膜的后方成像。即当看清远处的景物时,就看不清近处的东西。眼睛在看近处的东西时,晶状体变厚。而晶状体变厚,就会使眼睛的屈光力增强,如图 4 所示,成像的位置就会前移,使像成在视网膜上。

综上所述,由于晶状体的调节作用,我们无论看近处的东西还是看远处的东西,都可以很好地对焦而看清。近视、远视、老花和散光的眼睛,就不能很好的发挥这个调节作用。因此需要借助眼镜的力量。不能使像很好地成在视网膜上的状态称为眼睛的屈光不正。



- 成人的明视距离为 25cm
- 无穷远处射来的光能够在视网膜上成像的正常眼睛,称为正视

图1 近点和远点

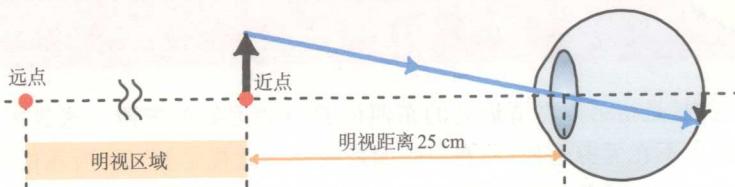
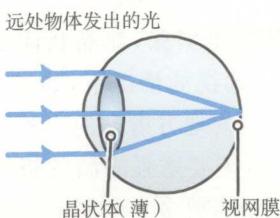
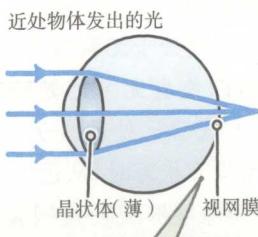


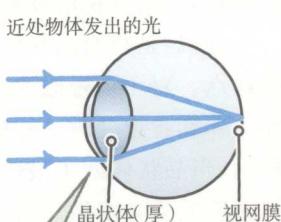
图2 正 视



正视（正常的眼睛）
从无穷远处射来的光在视网膜上成像



看远处的景物时，近处的东西就会模糊不清，这是由于从近处射来的光要在视网膜的后方成像的缘故



看近处的景物时，晶状体变厚，折射能力增大，从而在视网膜上成像

屈光度

眼睛屈光不正的程度，是用矫正所需的透镜的度数(折射能力)来表示的。这个度数称为屈光度，是由下式决定的。

$$D = \frac{1}{f} \quad f: \text{焦距(m)}$$

由此式可知， D 越大焦距越短。1D的透镜，是指焦点在透镜后1 m处的凸透镜。凹透镜的情况下用负值表示，写成-1D。由于近视

是用凹透镜来矫正的，因此眼镜的度数是负值。矫正-2D的近视，要使用-2D的凹透镜。该透镜的焦距为0.5 m，因此对于-2D的近视眼来说，0.5 m处是能看清的最远处，也就是说是远点。

另外，由于正视的远点为无穷远，因此 D 为0



近视，是指可以看清近处的东西而看不清远处的东西。这是因为近视的远点不在无穷远处，而在眼睛的近前方。近视是如图1所示的状态，当晶状体处于最薄无调节状态时，从远点以远的地方射来的光在视网膜的前方成像，而在原本应当成像的视网膜上弥散，使物体看上去模糊不清。为了使像能够成在视网膜上，需要减弱眼睛的折射能力。因此要矫正近视，就可以使用具有使光发散作用的凹透镜。至于需要多大焦距的凹透镜，是由近视的度数决定的。

远视，是指当晶状体的厚度处于无调节状态时，不存在可以看清物体的远点。对于远视眼来说，即使看无穷远处睫状体也紧张，使晶状体变厚。即和看近处时一样的方式看远处就是远视。远视的情况下，如图2所示，当晶状体处于最薄无调节状态时，从远点以远的地方射来的光要在视网膜的后方成像。为了使像能够成在视网膜上，需要增强眼睛的折射能力。因此可以使用具有聚光能力的凸透镜。至于需要多大焦距的凸透镜，是由远视的度数决定的。

如图3所示，近视分为角膜和晶状体的折射能力过强而引起的折射性近视，和由于眼轴的前后距离过长而引起的轴性近视。一般来说，轴性近视源于遗传，但是大多数近视被认为是适应环境所造成的折射性近视^(注1)。平常总是看近处的东西，睫状体持续紧张，晶状体就会逐渐难于从厚的状态回复到原来薄的状态。不久就会形成折射性近视。远视，也有角膜和晶状体的折射能力不足而引起的折射性远视，和由于眼轴的前后距离短而引起的轴性远视^(注2)。



要点 CHECK!

- 近视的远点在眼前，矫正是将远点移到无穷远处
- 远视无远点，矫正是将远点放到无穷远处

^{注1}: 有关近视的原因有诸多学说，到目前为止还没有解释清晰。

^{注2}: 大多数的远视被认为是轴性远视。

图1 近视及其矫正

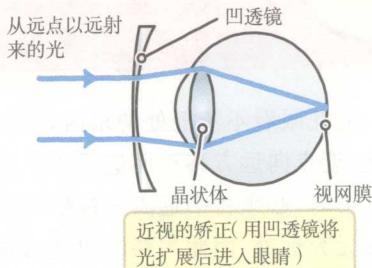
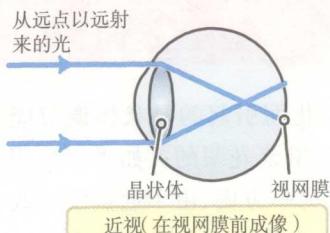


图2 远视及其矫正

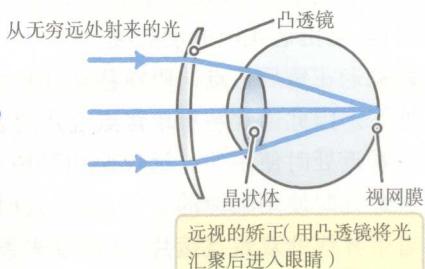
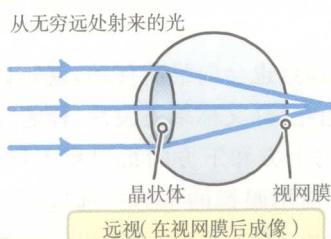
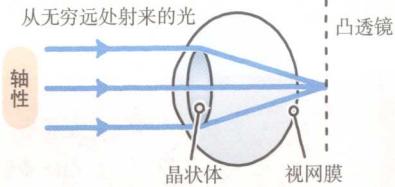
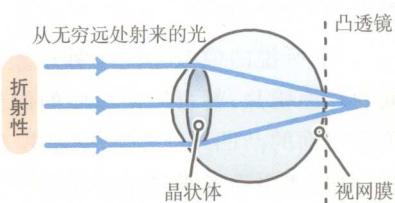
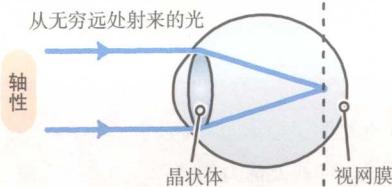
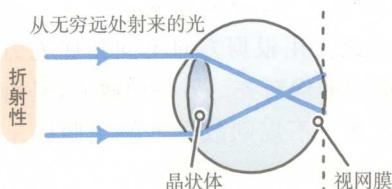


图3 近视和远视的种类



老花眼看不清近处的东西，是由于老化而引起的晶状体调节能力的退化，近点向远方移动而造成的。因此，患有老花眼的人如果不使用老花镜读书时，必须将书远离正视眼的近点。另一方面，由于远点没有改变仍然在无穷远处，因此用裸眼也能看清远处的景物。近视和远视是远点发生变化的眼睛屈光不正，但是老花眼则是近点发生变化的眼睛屈光不正。对于老花眼而言，如图1所示，从近处射来的光在视网膜的后侧成像，因此要矫正老花眼，就要使用具有聚光作用的凸透镜。至于需要多大焦距的凸透镜，是由老花眼的度数决定的。

佩戴老花镜后近点向眼前移动，同时远点也会向眼前移动，就难以看清远处了。因此通常装有单焦点镜片的老花镜（又称单光镜片，译者注），只是在看近处时使用的。远近两用眼镜的上方和下方的折射率不同（图2）。看远处时使用眼镜的上方，看近处时使用眼镜的下方。远近两用眼镜中有带界线的双焦点镜片（又称双光镜片，译者注）和没有界线的屈光力渐进镜片（又称渐进多焦点镜片，译者注）。

散光表现在看东西是双重的，或因观看方向不同而观看方式不同。散光是由角膜的纵向和横向的屈光能力不同而引起的屈光不正。这样的散光称为规则散光。如图3所示，规则散光中，像成在两个地方。这和（074）中所说的像散是同一种现象。在此使用根据方向不同其屈光力不同的环面镜片，就可以使纵向的像和横向的像对齐。另一种散光，是由于角膜表面的凸凹不平引起的不规则散光。不规则散光不能用眼镜来矫正，而是使用隐形眼镜来矫正的^{（注）}。



- 老花眼的矫正，是将近点移近到明视距离的25cm处
- 散光的矫正，是消除角膜纵横方向屈光能力的差异

注：隐形眼镜和角膜之间充入泪液，就可以消解角膜的凸凹。

图1 老花眼及其矫正

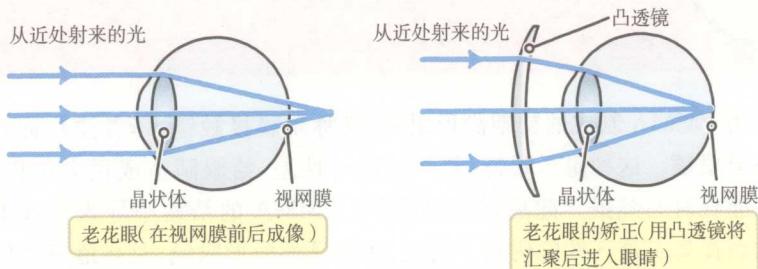
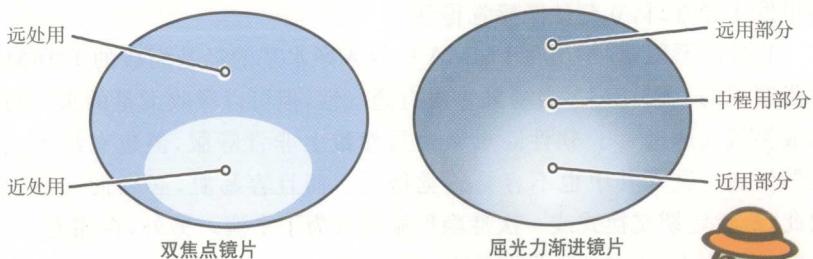


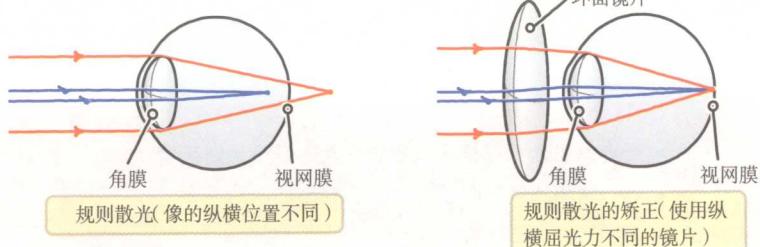
图2 远近两用的老花镜



近视眼由于近点靠前，因此近视的人成为老花眼时，摘掉近视眼镜就能看清近处的东西了



图3 散光及其矫正





用 PMMA 制成的初期隐形眼镜(又称角膜接触镜,译者注),称为硬性隐形眼镜。这种隐形眼镜,氧气的透过性差,给眼睛造成很大负担,因此不能长时间佩戴。此后,开始使用在 PMMA 的结构中导入硅或氟元素从而提高了透气性的树脂。现在,提到硬性隐形眼镜,是指透气性隐形眼镜,已经不使用 PMMA 了。硬性隐形眼镜,由于质地硬,容易上下移动,因此存在使眼睛有异物感,或容易沾上灰尘等缺点。但优点在于当眼睛里发生异常时,立刻就能感觉得到。

软性隐形眼镜,是用在 PMMA 中导入亲水基的羟基而成的 PHEMA 树脂制成的。PHEMA 自身几乎没有透气性,但可以吸收大量的水,通过泪液使氧气透过^(注)。软性隐形眼镜虽然戴上非常舒服,但也有缺点,就是即使灰尘进入其中也不容易感觉得到。而且容易脏,必须彻底清洗。因此,最近定期交换式或一次性隐形眼镜成为了主流。另外,在屈光不正的矫正能力上,比硬性隐形眼镜差。

隐形眼镜中也有远近两用的。**图 2** 所示的是交替视型和同时视型镜片。交替视型镜片中,有看远处的远用部分和看近处的近用部分,根据视线的移动使远近分开使用。使用同时视型镜片时,从远用部分和近用部分进入的光同时在视网膜上成像,当眼睛看远处时,近处的物体就模糊;看近处时,远处的物体就模糊,但是人脑是选择在视网膜上对焦了的像来观看的。



- 严重的屈光不正是很难用软性隐形眼镜来矫正的
- 远近两用的隐形眼镜分为交替视型和同时视型

注:PHEMA 干燥后变硬,容易破损。因此软性隐形眼镜必须浸泡在专用的保存液中。

图1 在隐形眼镜中使用的树脂结构

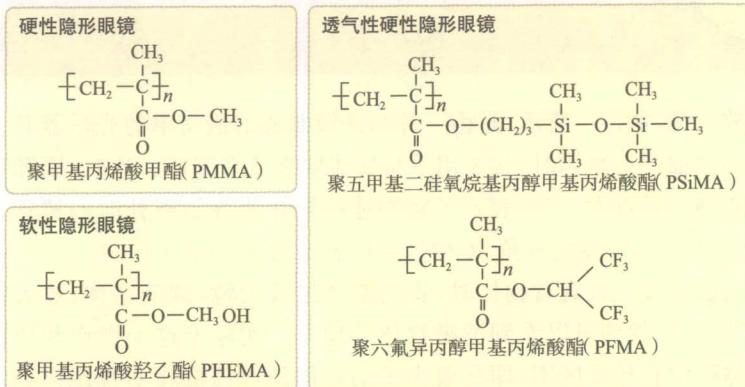


图2 远近两用隐形眼镜

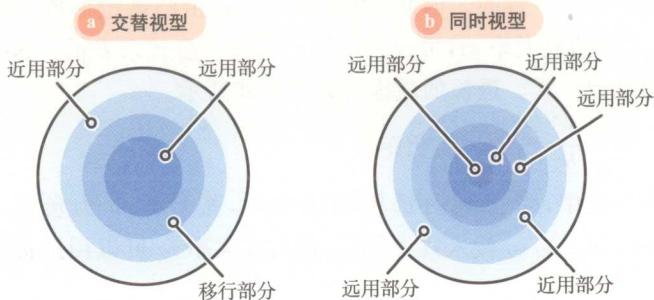
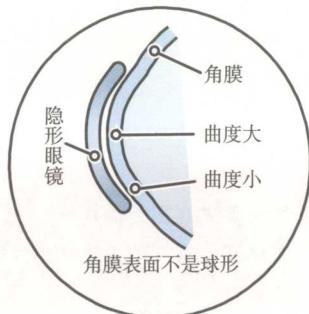


图3 角膜形状和隐形眼镜



人类眼睛的角膜表面不是球形，中央部位曲度大而周边部位曲度小，上下左右都是非对称的。最近的隐形眼镜按照使用者的角膜形状契合的非球面型增多。通过镜片和角膜形状的契合，可以消解对角膜的局部压迫感，减轻不适感，使泪液容易渗入。此外，还能减少像的形变。



088

放大镜原理

放大镜,如图1所示,是由一片凸透镜制成的最简单的光学器具。我们想要仔细观察物体时,就要用手将物体取来放在眼前。这时,眼和物体的距离须比近点大,图2表示了将物体放置在明视距离处的情形。物体的大小为 γ ,物体的视角为 θ 时,可以表示为 $\gamma=250 \cdot \tan\theta$ 。

用放大镜放大观看物体时,我们要透过放大镜,调节物体、放大镜和眼睛的位置,找到可以看到清晰物体的地方。实际上这个操作和用肉眼看物体时没有什么区别,即将放大了的物体的虚像成在明视距离处。图3表示出将放大镜充分靠近眼睛,来观察在明视距离处形成的虚像的情形。在这种情况下,由于放大镜和眼睛非常近,可以认为凸透镜的中心和晶状体的中心是一致的。因此,物体的大小 γ 、由凸透镜形成的虚像的大小 γ' 、放大镜的放大率 m ,可分别由图3的①~③式来表示。这里回忆一下透镜的成像公式。透镜的成像公式如下式所示。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (f: \text{焦距})$$

成像公式中,考虑到凸透镜的虚像时,按规定 b 为负值。将 $b=-250\text{mm}$, $a=250/\text{m}$ 代入式中,放大镜的放大率 m 可以用透镜的焦距来表示。

$$\text{放大镜的放大率 } m = \frac{250}{f} + 1 = \frac{250+f}{f} \approx \frac{250}{f}^{\text{(注)}}$$



- 放大镜是用一片凸透镜来观看物体的放大虚像的器具
- 用放大镜来观察物体的虚像时,物体要放置在前方焦点的内侧

注:放大率大的放大镜其凸透镜的焦距比明视距离小得多,因此 $250+f$ 可以近似为250。

图1 放大镜的原理

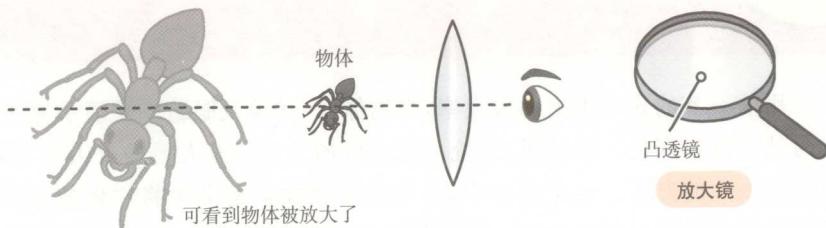


图2 将物体放在明视距离处时观察物体的方式

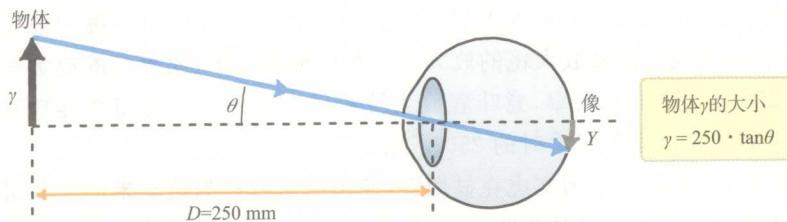
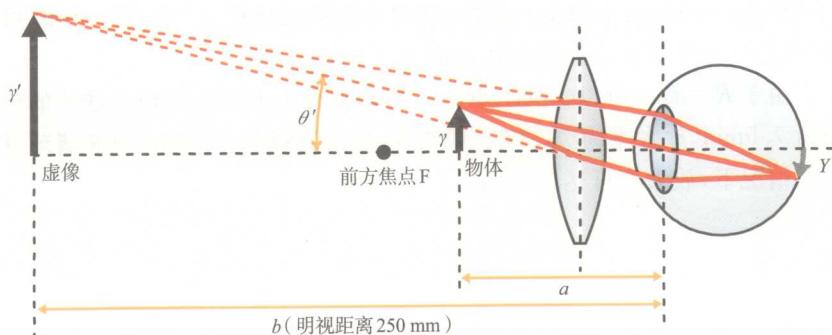


图3 观看明视距离处成虚像的情况



物体的大小
 $y' = 250 \cdot \tan \theta' \dots \text{②式}$

放大率 $m = \frac{y'}{y} = \frac{250}{a} \dots \text{③式}$



用前一节的式子求出的放大率,当物体、凸透镜及眼睛的位置关系变化时就会发生变化。在这里,要统一定义市场上卖的放大镜的放大率,可以使用图1的方法。这个方法中,放大镜的放大率定义为将物体放在凸透镜的前方焦点时的放大率。将物体放在凸透镜的前方焦点时,从物体一点发出的射入凸透镜的光,从凸透镜射出后,成为具有一定倾角的平行光(参照042)。这束平行光射入眼睛,在视网膜上成像。也就是说,眼睛在观看位于无穷远处的虚像。采用这个方法,即使凸透镜和眼睛之间的距离发生变化,放大镜的放大率也不变。通过将物体放在凸透镜的前方焦点,就可以统一定义放大镜的放大率。在这种情况下,放大镜的放大率 m 为 $250/f$ 。这个放大率,意味着放大镜所成虚像的大小是将物体放在明视距离处直接用眼观看时的 $250/f$ 倍。

在(003)中说明的列文虎克显微镜,使用的是直径为数毫米的一片玻璃球透镜。玻璃球透镜的焦距,可以用第3章(036)中说明的磨镜者公式求出。在薄透镜的情况下,右边的第2项可以忽略,但是在玻璃球透镜的情况下就不能忽略。同时,在玻璃球透镜的情况下, $R_1=R_2$, $R_2=-R$, $d=2R$,玻璃的折射率为1.5的话,玻璃球透镜的焦距 $f=1.5R$ 。由此可知,玻璃球透镜的焦点在距球体表面 $R/2$ 的地方^(注)。

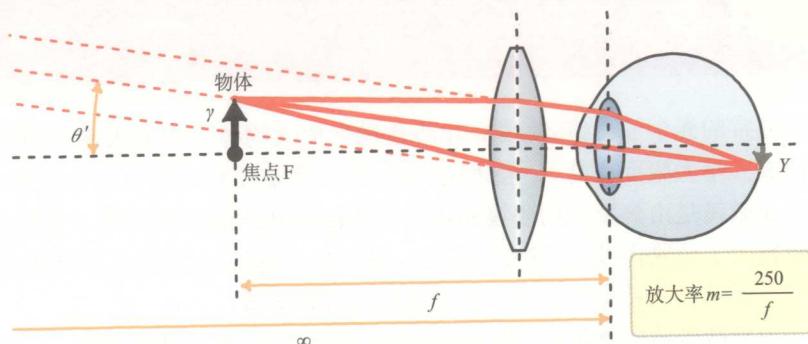
由于 $R=d/2$,所以 $f=1.5R=0.75d$,直径为10mm的玻璃透镜的焦距为7.5mm,放大率为 $250/7.5$ 即约33倍。直径为1.5mm的玻璃球透镜的情况下,放大率可达220倍。



- 将物体放在前方焦点时就可以统一定义放大镜的放大率
- 玻璃球透镜的放大率随玻璃球直径的减小而增大

注:将玻璃球作为放大镜使用时,需要将物体放在玻璃球近旁。

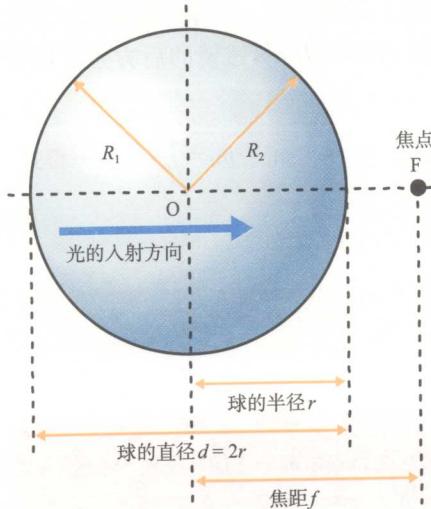
图1 放大率的放大率



通过用凸透镜观看在凸透镜前方焦点放置的物体时的角度 θ' ，和用裸眼观看在明视距离处放置的物体时的角度 θ 之比，来计算放大率。考虑到图1中的 $\gamma=f \cdot \tan\theta'$ 和前一节图2中物体的高度 $\gamma=250 \cdot \tan\theta$ 是相等的

$$m = \frac{\tan\theta'}{\tan\theta} \approx \frac{\theta'}{\theta} = \frac{250}{f} \quad (\theta \text{很小时}, \tan\theta \approx \theta)$$

图2 玻璃球透镜的焦距和放大率



玻璃球透镜的焦距

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{d(n-1)^2}{n R_1 R_2}$$

若 $R_1=R$ 、 $R_2=-R$ 、 $d=2R$ 则

$$\begin{aligned} \frac{1}{f} &= (n-1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{-R} \right) + \frac{2R(n-1)^2}{nR^2} \\ &= \frac{2(n-1)}{R} - \frac{2(n-1)^2}{nR} \\ &= \frac{2n(n-1) - 2(n-1)^2}{nR} \\ &= \frac{2(n-1)}{nR} \end{aligned}$$

$$f = \frac{nR}{2(n-1)}$$

光学显微镜的原理①

基本原理

通常的光学显微镜，使用 2 片凸透镜来放大物体。其放大率比放大镜的放大率大幅度提高，一般来说，可以放大到数十倍至数百倍来观察。光学显微镜是由焦距小的物镜和焦距大的目镜组合而成的结构。实际的显微镜为了消除像差，物镜和目镜使用的是复合透镜，显微镜的基本原理如图 2 所示。这种类型的光学显微镜称为有限远型。

用显微镜放大物体时，物体放置在物镜的下面，透过目镜观看。由于物镜的作用，物体被放大的实像位于目镜前方焦点的内侧 A 的位置上。目镜，和将 A 处形成的实像作为物体时的放大镜是相同的。透过目镜观察时，就可以看到在 B 处形成的放大的虚像。通过调节物体和物镜之间的距离便可以对焦。

显微镜的放大率是物镜放大率和目镜放大率的乘积。一般常用目镜的放大率为 10 倍左右，物镜的放大率为数倍至 100 倍左右。例如，使用 10 倍目镜和 50 倍物镜的显微镜，其放大率就是 500 倍。物镜的放大率，可以考虑使用在 (048) 中说明的透镜的成像公式。若物镜的放大率为 m_1 ，焦距为 f_1 ，透镜的前方焦点距物体的距离为 a' ，透镜的后方焦点距像的距离为 b' ，则有以下关系。

$$a' = \frac{f_1}{m_1} \quad m_1 = \frac{f_1}{a'} \quad \dots \dots \text{①式} \quad b' = f_1 m_1 \quad m_1 = \frac{b'}{f_1} \quad \dots \dots \text{②式}$$



- 显微镜是将物镜所成的实像化为目镜所成的虚像来观察的
- 显微镜的放大率是物镜和目镜放大率的乘积

图1 光学显微镜的原理

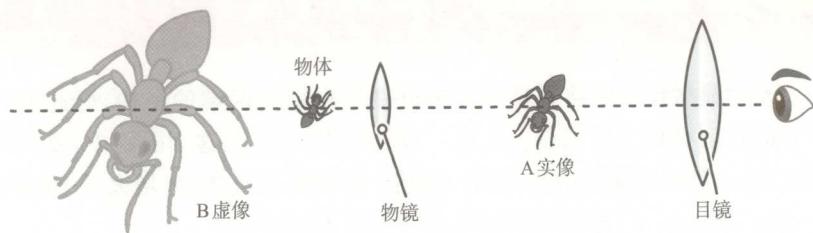
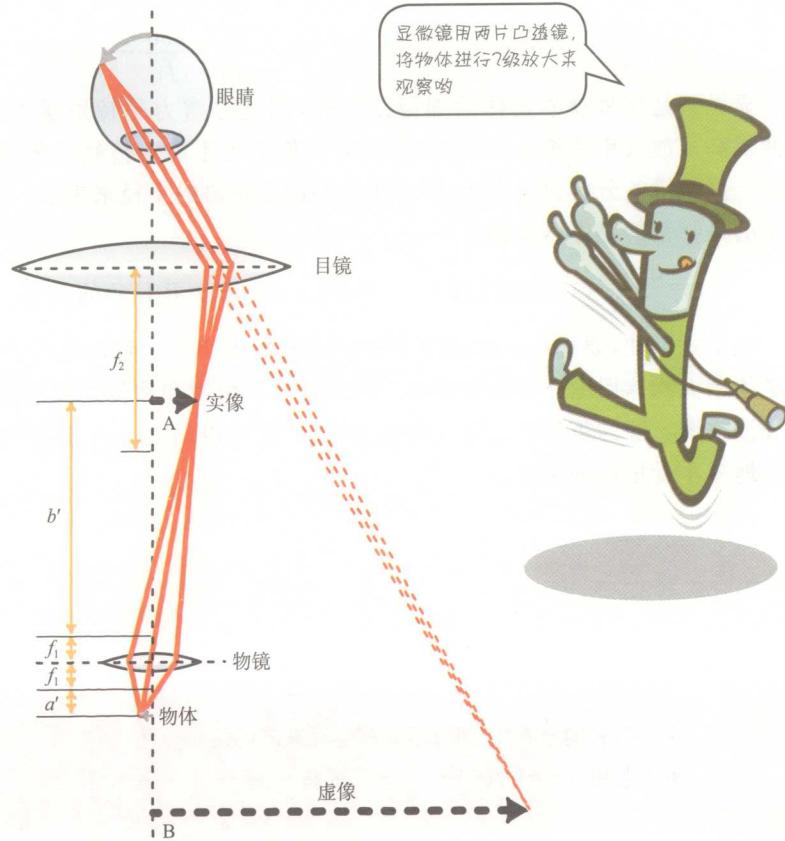


图2 有限远型光学显微镜的原理



光学显微镜的原理②

放大率和分辨力

光学显微镜具有将物镜和目镜分别装在镜筒两端的结构,因此前一节 b' 的长度必然受到限制。从前一节的②式可知,在这个限制中,要提高放大率 m ,就必须减小 f_1 。同时,从前一节的①式可知,为增大 m 而减小 f_1 ,就必须减小 a' ,即要将物体放在前方焦点的近旁。

目镜的放大率 m_2 ,和放大镜的放大率相同,目镜的焦距为 f_2 时,就变为③式。因此,显微镜的放大率根据前一节的②式和③式,可以用④式来定义。

$$m_2 = \frac{250}{f_2} \quad \dots \dots \text{③式} \quad m = m_1 \cdot m_2 = \frac{b'}{f_1} \times \frac{250}{f_2} \quad \dots \dots \text{④式}$$

显微镜是用来观察物体的细微结构的,因此分辨力是特别重要的。即使提高了放大率使像变大,但如果分辨力低下也不能看清物体的细微结构。显微镜的分辨力可以用(079)中说明的爱里斑的半径来表示。NA 使用的是物镜的物方 NA 值。

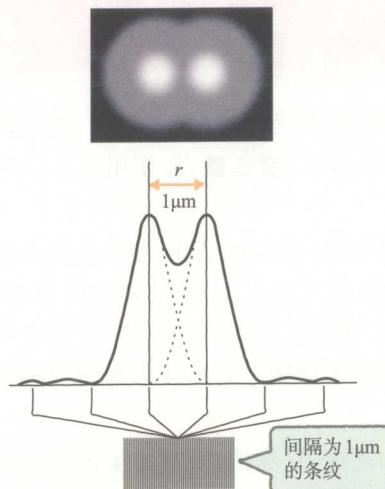
$$r = \frac{0.61\lambda}{NA} (\lambda: \text{光的波长}) \quad NA = n \cdot \sin\theta (\theta: \text{孔径角的 } 1/2)$$

从上式可知,要提高显微镜的分辨力需要增大 NA。而要增大 NA,就必须增大物体周围介质的折射率。因此就有了物镜和物体之间充满油的浸油物镜。油的折射率比空气的折射率大,就可以增大 NA,这样就能相应地减小爱里斑的半径。



- 显微镜的分辨力是用爱里斑的半径来定义的
- 显微镜的分辨力随NA的增大而提高

图1 显微镜的分辨率



2个点排列时，可以作为2个点被观察到的极限。这时当2个像点相距 r 排列时， r 就是分辨率

需要用显微镜分辨间隔为 $1\mu\text{m}$ 的条纹时，若光(n_d)的波长为 590nm ，

$$\text{由于 } r = \frac{0.61}{NA} ,$$

$$\text{所以 } NA = \frac{0.61 \times 0.59 (\mu\text{m})}{1 (\mu\text{m})} = 0.36$$

即 NA 要达到0.36以上

空气中的 r 和 NA 的关系

$r (\mu\text{m})$	NA
3.6	0.1
0.7	0.5
0.36	1.0

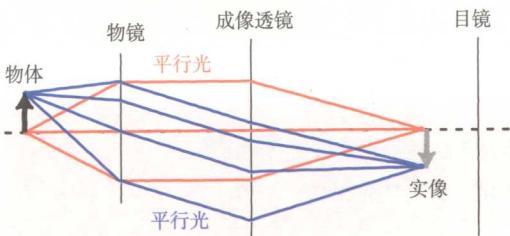
折射率和 NA 的关系

孔径角 $2\theta=100$ 度时，在折射率为1的空气中 NA 是0.77，在折射率为1.5的油中 NA 是1.15

图2 无限远型显微镜的原理

无限远型显微镜

无限远型显微镜的情况下，从物体发出的光通过物镜后成为平行光。该平行光由成像透镜汇聚而成实像，在目镜中可观察到该实像所成的放大虚像。无限远系显微镜中，物镜和成像透镜之间的长度无限制



放大率的计算方法

$$m_1 = \frac{\text{成像透镜的焦距}}{\text{物镜的焦距}}$$

$$m_2 = \frac{250}{\text{目镜的焦距}}$$

$$m = m_1 \times m_2$$



望远镜的原理①

基本原理

望远镜是将远处的物体放大，移到近处来观察的光学仪器。望远镜中有使用凸透镜和凹透镜的荷兰式(伽利略式)望远镜，和使用2片凸透镜的开普勒式望远镜。

荷兰式望远镜，如图1所示，由凸透镜A(物镜)汇聚的光线经凹透镜B(目镜)形成虚像而被观察到。可以看到放大的正立像，结构也简单，现在仍然用于简易的地面用望远镜或看戏用的小望远镜。但是，缺点在于随着放大率的增大，视野会变得非常狭窄，不能用于必须在广阔的视野中搜索目标的天体观测或对野鸟的观察。

开普勒式望远镜，如图2所示，由凸透镜A(物镜)形成的实像经凹透镜B(目镜)形成虚像而被观察到。虽然看到的是放大的倒立像，但视野宽，可以提高放大率。同时，倒立像在天体观测上也没有问题，因此作为天文望远镜得到了广泛的使用。地面用开普勒式望远镜中，有的在其内部放入三棱镜后可以得到正立的像。现在所使用的望远镜，大多数都是利用开普勒式望远镜的原理制成的。

无论是荷兰式望远镜还是开普勒式望远镜，其物镜和目镜都按照其相距为各自焦距之和来配置的。因此，如果物镜 L_1 和目镜 L_2 的距离为 d ，各自的焦距为 f_1 和 f_2 ， d 和 f_1 、 f_2 有图3所示的关系。望远镜的光学系统，是按平行入射到 L_1 的光从 L_2 平行射出的方式来配置透镜的。因此，透过目镜观察时，可以看到物体的虚像在无穷远处。这样的光学系统称为无焦光学系统。



- 天文望远镜和地面用望远镜都是开普勒式望远镜
- 望远镜的光学系统是无焦光学系统

图1 荷兰式(伽利略式)望远镜的原理

荷兰式(伽利略式)望远镜

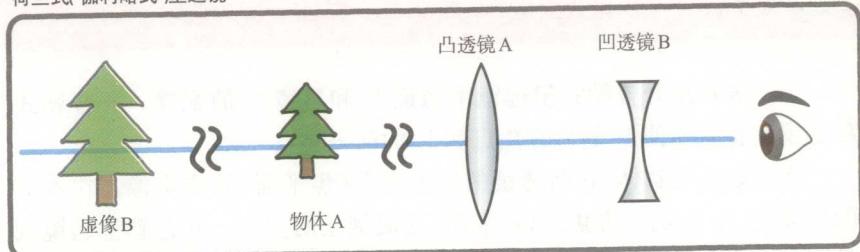


图2 开普勒式望远镜的原理

开普勒式望远镜

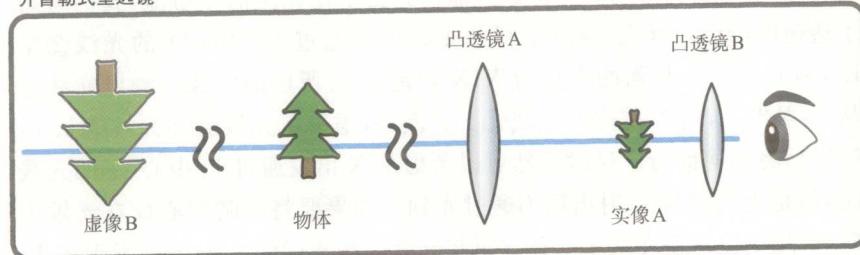
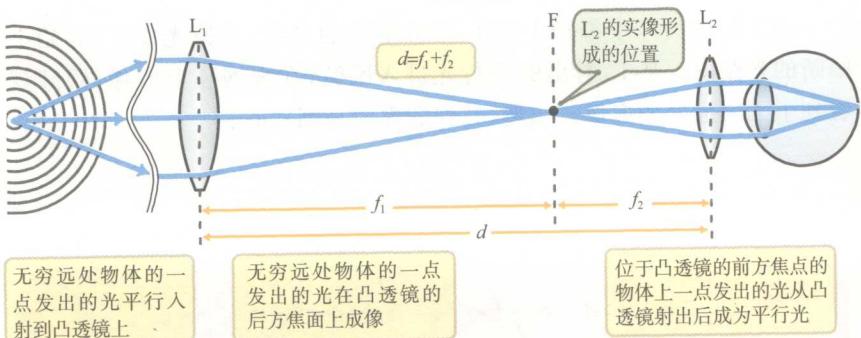


图3 无焦光学系统(开普勒式望远镜的情况下)





093

望远镜的原理②

开普勒式望远镜的光路

图 1 表示出开普勒式望远镜中物镜 L_1 和目镜 L_2 的配置。开普勒式望远镜配置时要使 L_1 的后方焦点和 L_2 的前方焦点一致。

无穷远处的物体，在凸透镜的后方焦点（焦平面）处成实像。在本节的情况下，在 L_1 的后方焦点（焦平面）处成倒立的实像。开普勒望远镜就是通过 L_2 将这个倒立的实像放大而观察的。这时，由于 L_1 的实像在 L_2 的前方焦点（焦平面）上，因此从 L_1 的实像出发的光射出 L_2 后平行前进。

图 2 表示的是开普勒式望远镜的作图方法^(注)。我们考虑一下以任意角度入射到 L_1 的光线①将如何前行。为了使光路清晰易懂，我们省略了透镜的图绘。首先，画出平行于光线①并通过 L_1 中心 O_1 的光线②至 L_2 ，和 L_1 的后方焦面的交点为 X，X 就是由 L_1 所成的实像。画出光线①从 L_1 射出后，向 X 前进的光线③。其次，考虑一下光线②和光线③从 L_2 射出后将如何前行。这时虽然可以考虑从 X 出发通过 L_2 中心 O_2 的光线④，但是光线④从 L_2 射出后不通过光轴。如果要将眼睛中心放在光轴上时，就用不上这条光线了。在这里将光线④画成虚线。从 X 出发射向 L_2 的光线，从 L_2 射出后都将平行于光线④前行。顺着光线②和光线③画出光线⑤和光线⑥。由于光线⑤原本是射入 L_1 的中心 O_1 的光线②，因此将眼睛中心放在光线⑤和光轴的交点上。

图 3 是在**图 2** 中添加上从 L_1 下方射入的光线，去掉光线④，并画上眼睛的光路图。从 L_2 射出的平行光进入眼睛，在视网膜上成像，眼睛就看到了无限远处的虚像。当然，看到的虚像是倒立的。



- 开普勒式望远镜是使用了2片凸透镜的望远镜
- 用开普勒式望远镜看到的放大像是倒立的

图1 开普勒式望远镜的透镜配置

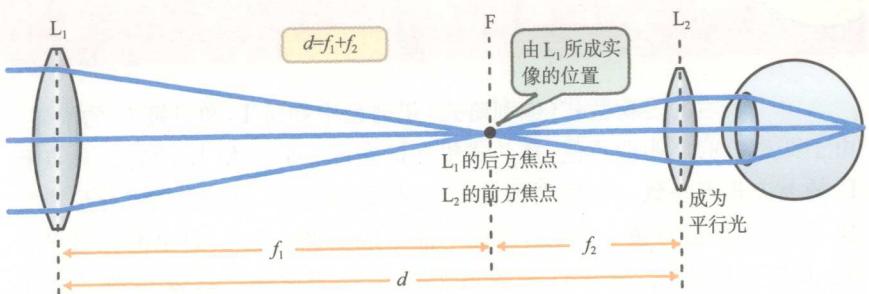


图2 开普勒式望远镜的作图方法

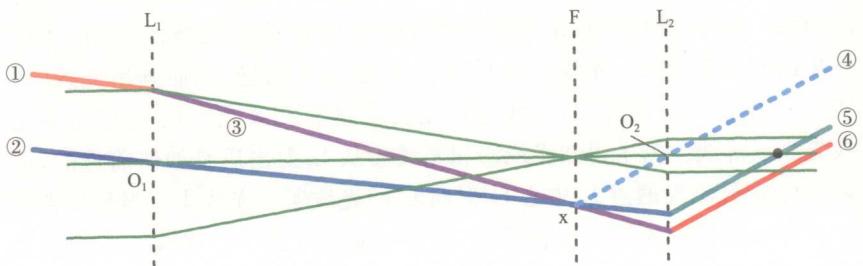
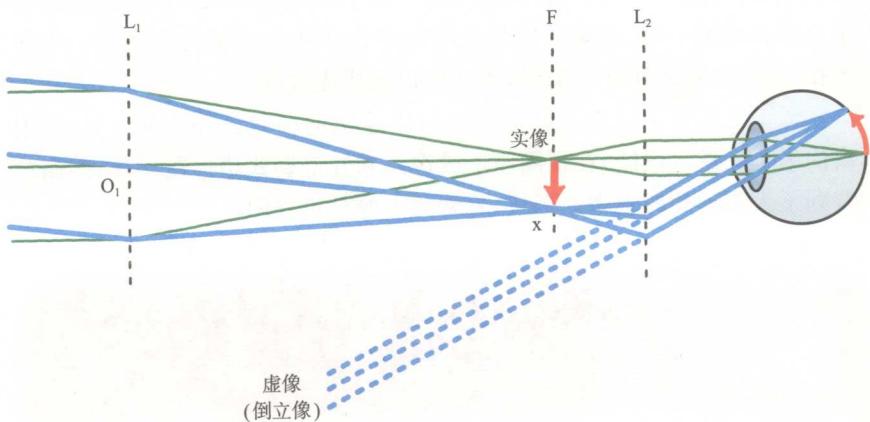


图3 开普勒式望远镜的原理





094

望远镜的原理③

荷兰式望远镜的光路

图1表示的是荷兰式(伽利略式)望远镜中物镜 L_1 和目镜 L_2 的配置。由于凹透镜的焦距取负值,荷兰式望远镜在配置时要使 L_1 的后方焦点和 L_2 的前方焦点一致。入射到物镜 L_1 的光线,要在 L_1 的后方焦点处形成实像,但实际上被目镜 L_2 扩展,从而不能形成实像。从 L_2 射出的光是平行光,观察这束光线,就可以看到放大的正立的虚像。这就是荷兰式望远镜。

图2表示的是荷兰式望远镜的作图方法。我们考虑一下以任意角度入射到 L_1 的光线①将如何前行。为了使光路清晰易懂,我们省略了透镜的图绘。首先,画出平行于光线①并通过 L_1 中心 O_1 的光线②,和 L_1 的后方焦面的交点为X。光线①从 L_1 射出后也向X前进,因而画出光线③。实际上由于有 L_2 的存在,光线②和光线③到不了X点。从 L_2 射出的光线先画成虚线。为了得知光线②和光线③从 L_2 射出后是如何前进的,可以考虑从X出发通过 L_2 中心 O_2 射向 L_1 的光线④。光线④应当是和光线①及光线②平行并射入 L_1 的光线,这样就画出光线⑤。光线②和光线③从 L_2 射出后平行于光线④前行,这就是光线⑥和光线⑦。这样我们就可以作图求出从无穷远处的一点发出的以任意角度入射到 L_1 的光线通过 L_2 后是如何前进的了。但是光线⑥和光线⑦不通过光轴。如果要将眼睛中心放在光轴上时,就要选择和光线④平行并通过光轴的光线⑧。光线⑧在 L_2 之前是要射向X的光,因此可以画成光线⑨。

图3是选择了通过光轴的光线而描绘出的荷兰式望远镜。从 L_2 射出的平行光进入眼睛,在视网膜上成像。和开普勒式望远镜一样,眼睛就看到了无限远处的虚像。当然,看到的虚像是正立的。



- 荷兰式(伽利略式)望远镜是使用了凸透镜和凹透镜的望远镜
- 用荷兰式(伽利略式)望远镜看到的放大像是倒立的

注:图2和图3可以使用第3章的(050)、(051)中说明的方法作出。

图1 荷兰式（伽利略式）望远镜中的透镜配置

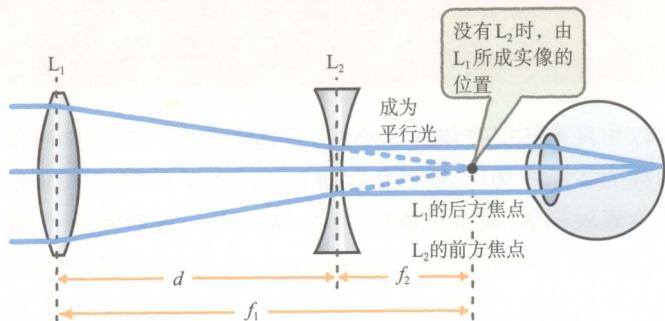


图2 荷兰式（伽利略式）望远镜的作图方法

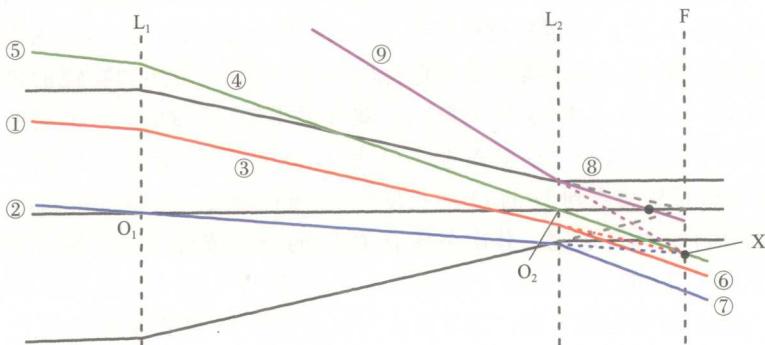
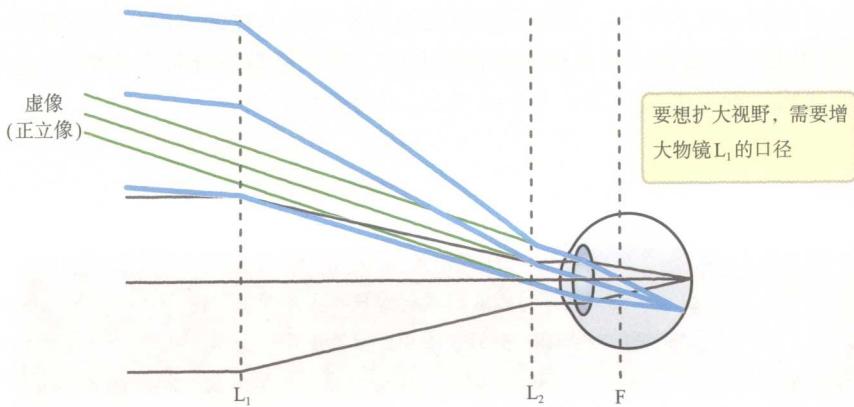


图3 荷兰式（伽利略式）望远镜的原理



望远镜的原理④

望远镜的放大率

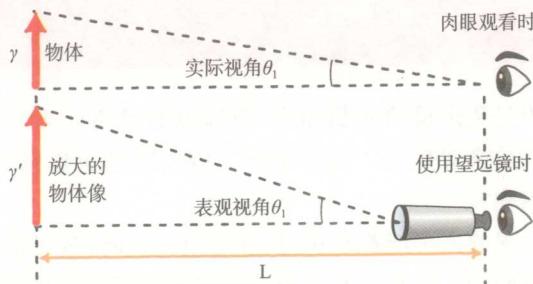
眼是以角度来捕捉物体的大小的，望远镜也是一样。肉眼能看到物体的范围称为**实际视场(实际视角)**，而在相同场所，用望远镜能看到物体的范围称为**表观视场(表观视角)**。现在，若到物体的距离为 L ，物体的大小为 γ ，用望远镜看到的放大物体的大小为 γ' ，则望远镜的放大率就可以用表观视角和实视角之比求得(图1)。另外，望远镜的放大率，部分开普勒式和荷兰式，都定义为物镜和目镜的焦距之比^(注1)。

以图2为例考虑一下望远镜的放大率^(注2)。和物镜 L_1 成 θ_1 角入射的光汇聚在A点。物镜所成的实像AB被目镜 L_2 放大。这时，进入眼睛的光的角度为 θ_2 。由于实像AB的大小为 $f_1 \cdot \tan\theta$ ，可知和物镜的焦距成正比，得知 θ_1 的大小(实际视角)后，就可以得知AB的大小，也就可知 θ_2 (表观视角)的大小。这里将通过 O_1 和A的光延长，求出和 L_2 的主平面的交点，若从交点到 L_2 的 O_2 的长度为 h ，则有①式。由①式可知， θ_2 和 θ_1 之比等于 a 和 b 之比。其次考虑有关 L_2 的透镜成像公式。穿过光轴上 L_1 的中心 O_1 的光从 L_2 的 h 点射出之后，在和 L_2 相距 b 的晶状体中心 O_3 上又重新回到光轴上来。这可以认为和物体在 O_1 处其实像成在 O_3 处是相同的。由②式求出 $1/b$ ，两边乘以 a ，再考虑到 $a = f_1 + f_2$ ， a/b 就变为③式。 a/b 就等于 θ_2/θ_1 ，由于这就是望远镜的放大率 m ，因此 f_1/f_2 也就是望远镜的放大率 m 。虽然望远镜的放大率可以通过透镜的组合任意提高，但是和显微镜一样分辨力是很重要的。放大率高但分辨力小的话，远处的物体看上去也只能是大而模糊，看不到细微的部分。



- 望远镜的放大率可以通过表观视角和实际视角求得
- 望远镜的放大率定义为物镜和目镜的焦距之比

图1 望远镜的实际视角和表观视角

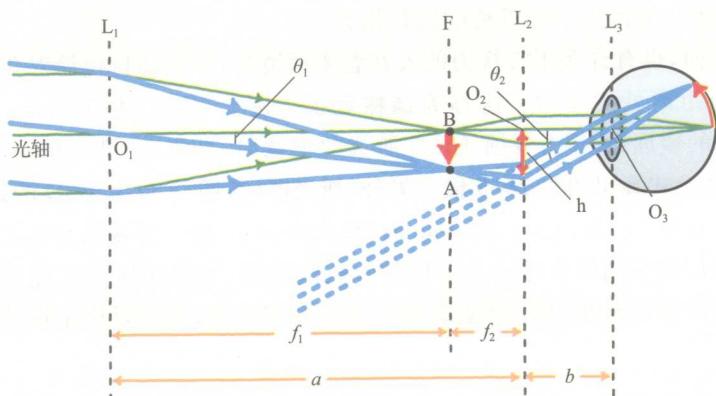


$$\text{望远镜的放大率 } m = \frac{\gamma'}{\gamma} = \frac{L \cdot \tan \theta_2}{L \cdot \tan \theta_1} = \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} \approx \frac{\theta_2}{\theta_1}$$

$$\text{望远镜的放大率 } m = \frac{\text{物镜的焦距}}{\text{目镜的焦距}} = \frac{f_1}{f_2}$$

从远处物体射来的光其角度很小，因此可以近似认为 $\tan \theta \approx \theta$ 。
 θ_2/θ_1 称为角放大率

图2 开普勒式望远镜的放大率



由
$$h = a \cdot \tan \theta_1 = b \cdot \tan \theta_2 \quad \dots \dots \text{①式}$$

可得
$$\frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} \approx \frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{a}{b}$$

由透镜的成像公式
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f_2} \quad \dots \dots \text{②式}$$
 可得

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{a}$$

两边同乘以 a 得

$$\frac{a}{b} = \frac{a}{f_2} - 1 = \frac{f_1 + f_2}{f_2} - 1 = \frac{f_1}{f_2} \quad \dots \dots \text{③式}$$

望远镜的原理⑤

为什么要对焦

实际使用过望远镜的人都知道，望远镜的镜筒如图1所示的那样是通过滑动目镜筒来对焦的。我们说明了望远镜是无焦光学系统，那么为什么还要对焦呢？

近视或远视的人可能都经历过，在看望远镜时，戴眼镜和不戴眼镜其观看方式是不同的。眼睛也是具有透镜的光学系统，近视或远视的人在看 L_1 和 L_2 固定的望远镜时是对不上焦的。因此，通常的望远镜通过滑动目镜筒达到对焦的目的。同时，做成这样的结构，还具有能够组装照相机的优点。

望远镜正确的放大率，由图2中的①式来定义的。这里， k 是眼睛中心到虚像的距离。观看无穷远的虚像时， k 为无穷大，放大率为 f_1/f_2 。近视的情况下，不能对焦到无穷远处，就需要调焦以便看到在有限距离 k 处的虚像。 k 的大小和近视的度数相关。

然而，也有许多正常视力的人在看望远镜时，常移动目镜筒对焦来观察有限距离处的虚像。这称为器械近视。例如，用 f_1 为500mm， f_2 为25mm的望远镜，观看眼前1m处所成的虚像时，即 $k=-1000\text{mm}$ ，放大率 m 从①式算出约为20.5倍。另外，屈光度（参照084）为-2D的近视，其远点在0.5m处， $k=-500\text{mm}$ 时，放大率为21倍。近视眼和在正常眼上戴上度数相同的凸透镜是一样的。该凸透镜，和②式所示的使目镜焦距缩短的作用是相同的，因此即使是相同的望远镜，近视要比正视的放大率高。



- 望远镜是通过移动物镜筒和目镜筒来对焦的
- 对于正视和近视来说，同一台望远镜的放大率是不同的

图1 望远镜的物镜筒和目镜筒

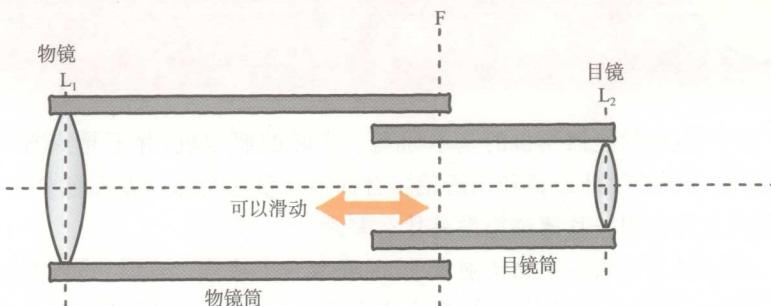
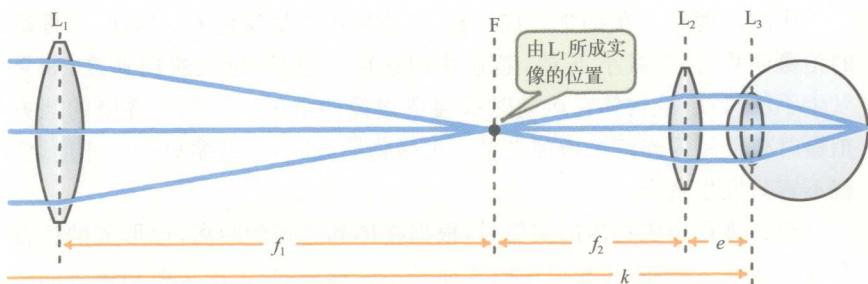


图2 开普勒式望远镜的放大率



$$\text{望远镜的放大率 } m = f_1 \left(\frac{1+e/k}{f_2} - \frac{1}{k} \right) \approx f_1 \left(\frac{1}{f_2} - \frac{1}{k} \right) \quad \dots \dots \text{①式}$$

f_1 : L_1 的焦距 f_2 : L_2 的焦距

e : 眼睛中心到目镜中心的距离

(眼睛靠近目镜, e 和 k 相比足够小时, $e/k=0$)

k : 眼睛中心到虚像的距离

目镜和近视眼的复合焦距 f'_2

$$\text{复合焦距 } \frac{1}{f'_2} = \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} - \frac{d}{f_2 f_3} \approx \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} = D_2 + D_3 \quad \dots \dots \text{②式}$$

f_2 : L_2 的焦距 f_3 : 具有 L_3 的近视度数的凸透镜焦距

d : 透镜间的距离(眼睛贴在目镜上时, $d=0$)

D_2 : 目镜的屈光度 D_3 : 和近视度数相同的凸透镜的屈光度

f_2 为25mm的目镜 D_2 其屈光度为40D, 和具有-2D的近视度数的凸透镜($D_3=2D$)的复合焦距 f'_2 为42D, 合23.8mm。

照相机的原理① F 值和快门速度

图 1 表示的是照相机的基本原理。实际的照相机，并不是只有一片透镜，而是由数片凸透镜和凹透镜组合而成为设法消除球差和色差等，但是原理上和使用一片薄透镜没有什么差别。

照相机用镜头收集物体射来的光，在胶片上成像。这时，进入照相机中的光量，使用由 F 值决定的光圈来调节。同时，胶片感光的时间由快门的速度来决定。某一定量的光照射在胶片上称为曝光。照射胶片的光量称为 EV 值，EV 值如表 1 所示，由 F 值和快门速度的组合来决定。

像的亮度和 F 值的平方成反比，F 值越小光量就越大。因此，在昏暗的拍摄照片时，要减小 F 值，延长快门速度。但是，延长快门速度，如果发生手的抖动，或物体在运动时都会造成像的重影。因此在昏暗的地方拍摄时要使用闪光灯来增加光量。被摄物明亮时，可以缩短快门速度，像就不容易发生重影。

凸透镜在形成物体的实像时，根据物体和透镜的距离，像形成的位置会发生变化。然而，照相机中胶片面是不能移动的，无论物体和镜头的距离有多少，都要在胶片面上形成鲜明的像。在这里，照相机的调焦，是通过前后移动镜头的位置来实现的^(注)。调节镜头的焦距，从而使胶片的位置(082)落在焦深的范围之内。增大 F 值，可以增大焦深。



- 胶片上像的亮度是由 F 值和快门速度决定的
- 照相机是通过前后移动镜头来对焦的

注：一次性照相机的情况下，镜头是固定的，不能改变焦距。因此要减小镜头使焦深增大。

图1 照相机的基本原理

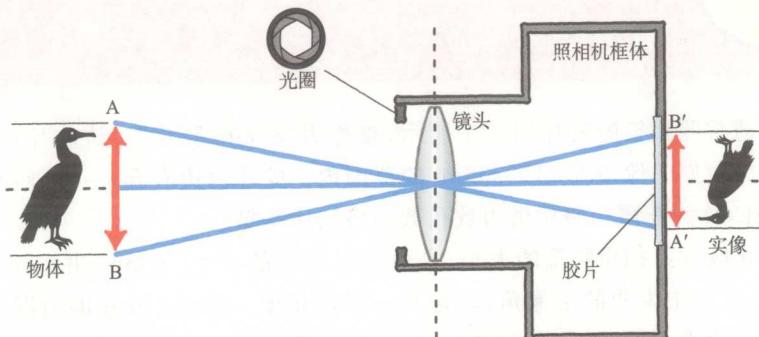


表1 EV值和F值及快门速度的关系

		F值										
		1	1.4	2.0	2.8	4	5.6	8	11	16	22	32
快门速度	8	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
	4	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1/2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1/4	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	1/8	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	1/15	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	1/30	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	1/60	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	1/125	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	1/250	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	1/500	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	1/1000	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

EV值大致基准

EV16：晴朗的海·山·雪景
EV12：薄云·背阴处EV15：晴朗
EV11：云EV14：晴
EV8：明亮的室内EV13：朗云
EV6：昏暗的室内

照相机的原理② 像角和焦距

通常照相机的胶片如图1所示,被称为“35mm 胶片”。该胶片可以将镜头所成的像摄入 $24 \times 36\text{mm}$ 的范围内。胶片两边有孔,一帧画面有8个孔,称为孔眼。照相机边数孔数边将胶片卷起。

在胶片上拍摄物像的大小,是由图2所示的 $\gamma = f \cdot \tan\theta$ 决定的。 θ 是在(077)中说明的半像角,即像角一半的角度。35mm 胶片的情况下,胶片所能摄入的范围,是胶片的对角线长度 43.3mm ,其一半 21.65mm 就是 γ 的最大值。对于焦距为 50mm 的镜头而言,像角 2θ 为 46.8° 。这个角度和人在看一点时所能看到的清晰范围是大致相同的。同样的胶片,其 γ 的最大值是不变的,因此使用焦距不同的镜头时 θ 值发生变化。

照相机的镜头中,有标准镜头、广角镜头、长焦(距)镜头和变焦(距)镜头4种。标准镜头是焦距为 50mm 的镜头。比标准镜头焦距短的镜头称为广角镜头,比标准镜头焦距长的镜头称为长焦镜头。广角镜头由于焦距短,能增大像角。因此有利于拍摄宽广范围的景色或集体照。长焦透镜焦距长,在将远处的景物放大拍摄时使用。在放大远处景物的同时像角要相应减小,能够摄影的范围就要变窄。焦距固定的镜头称为单焦点镜头,与此相对,焦距可变的镜头称为变焦镜头。变焦镜头如图3所示,改变镜头的位置,从而改变焦距。采用这种方法,通过镜头整体的作用可以从广角镜头变为长焦镜头^(注)。



- 在胶片上能够摄入的范围称为像角
- 镜头的焦距改变后像角也随之改变

注:变焦镜头的放大率定义为长焦方和广角方的焦距之比,长焦方的焦距越长照相机的放大率越高。

图1 35mm胶片的原理

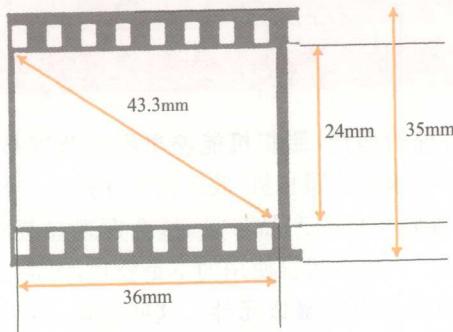


图2 像角和焦距

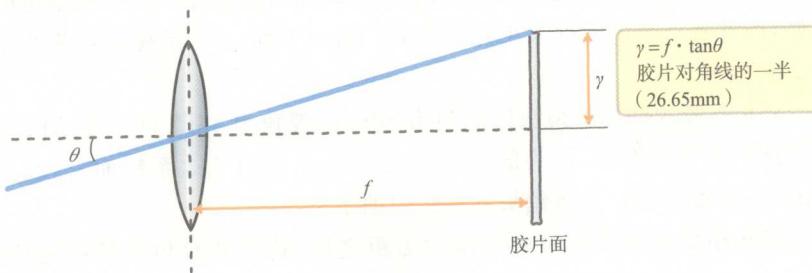
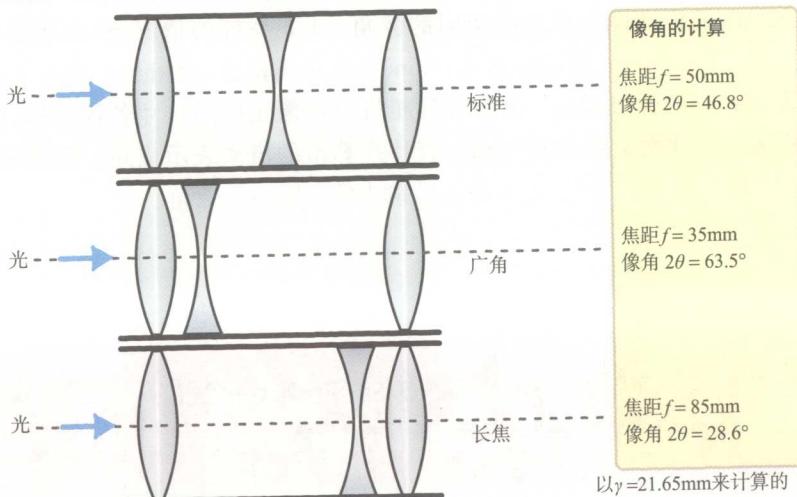


图3 3组变焦镜头的例子





正如前一节所说的那样，照相能够摄影的范围是由像角决定的。使用 35mm 胶片的普通银盐照相机，胶片的尺寸是一定的，像角由焦距决定。但是，在查看数码相机的产品目录时，会发现登载有镜头的焦距和 **35mm 胶片换算值**^(注)。数码相机使用的不是胶片，而是 CCD 图像传感器或 CMOS 图像传感器之类的摄像元件。这些摄像元件并非像 35mm 胶片一样有固定的大小。摄像元件的尺寸有 APS-C 或 4/3 系统等规格(图 2)，APS-C 规格的摄像元件的对角线约为 28mm，但是并不是严密制定的规格，因此各厂家的元件大小有所不同。另一方面，4/3 系统的对角线定为 21.6mm。

35mm 胶片的标准镜头的焦距为 50mm，像角为 46.8 度。在 APS-C 上要达到同样的像角，镜头的焦距就是 32mm，而对 4/3 系统而言，就是 25mm。标准、广角、长焦镜头的焦距归纳于表 1。

各规格成相同像角时所对应的焦距之比，就是其对角线长度之比。例如，使用 APS-C 规格摄像元件的数码相机中，装入焦距为 32mm 的镜头后，就和在 35mm 胶片的照相机中装入焦距为 32mm 的 1.5 倍即焦距为 50mm 的标准镜头时具有相同的像角。4/3 系统的情况下，由于是 2 倍关系，装入 42mm 的镜头后，经 35mm 胶片换算后，就相当于装入了焦距为 85mm 的长焦镜头。由于数码相机中摄像元件的尺寸各种各样，所以用人们习惯而又熟悉的 35mm 胶片换算出的值来表示焦距。因此，用 35mm 胶片换算的焦距，表示的不是镜头的焦距而是像角。



- 对于数码相机而言，像角是不能用焦距统一决定的
- 35mm 胶片换算的焦距，表示的是像角

注：银盐照相机的 4×5 规格胶片或 120 胶片也都使用这个值。

图1 CCD图像传感器

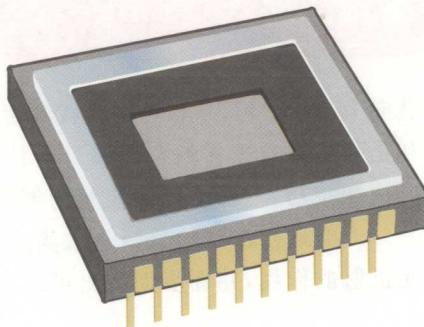


图2 35mm胶片·APS-C规格·4/3系统的大小比较

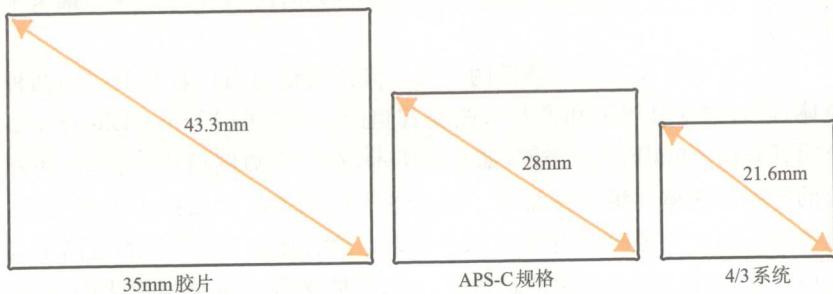


表1 像角和焦距

像角(2θ)	焦距		
	35mm 胶片	APS-C	4/3
46.8°(标准)	50mm	32mm	25mm
63.5°(广角)	35mm	23mm	17mm
28.6°(长焦)	85mm	55mm	42mm

由 $\gamma = f \cdot \tan\theta$, 得 $f = \gamma / \tan\theta$ (γ : 对角线长度的1/2 f : 焦距)

计算例子: 广角·APS-C $f = (28mm/2) / \tan(63.5/2) = 23mm$

对于具有相同像角的各规格来说, 其焦距之比为 $43.3 : 28 : 21.65 \approx 2 : 1.5 : 1$

进化的透镜 流体透镜的原理

人类自古以来就向大自然学习,从自然中寻找到便利的事物,然后作为器具来使用。最初是直接将自然界的东西作为器具来使用的,然后逐渐想出各种各样的办法和技巧,发明了更为便利的器具。透镜就是这样发展而来的器具之一。人类最初遇到的透镜是水滴或水晶球,注意到水滴或水晶球具有使光折射的作用,并逐步创造出可以自由自在地使光折射的透镜这一器具。

眼睛是非常优异的透镜。晶状体最引人注目的地方,就是在(083)中说明的那样,能够通过调节晶状体的厚度来改变焦距。通常的透镜是做不到这一点的,比如说照相机是如图1所示的那样,通过前后移动镜头来对焦的。

最近正在开展对流体透镜的开发。流体透镜使用折射率不同的两种流体,通过改变其厚度和形状来改变其焦距。荷兰的Philips Electronics公司开发的FluidFocus透镜,如图2所示,在一个短圆筒中,封入互不相溶的导电性流体和绝缘性流体。加上电压后流体的表面张力发生变化,流体的界面在很短时间内变成下方凸型。这种流体透镜,正如眼睛的晶状体一样是可以改变焦距的透镜^(注)。如果能将流体透镜实用化的话,由于1片透镜的焦距可变,因此能够缩小整个透镜光学系统的大小。同时,也可以实现短时间内对焦。

透镜原本是将玻璃表面研磨成球面的简单器具,其基本原理也只不过是光的折射,但是在新材料开发以及加工技术发展的背景下,正在不断地进化。这也是人类的聪明才智在透镜上的结晶吧。



- 流体透镜可以自由改变焦距
- 透镜是在人类的智慧下进化的器具

注:实际上是由凹透镜向凸透镜演变。

图1 照相机的对焦

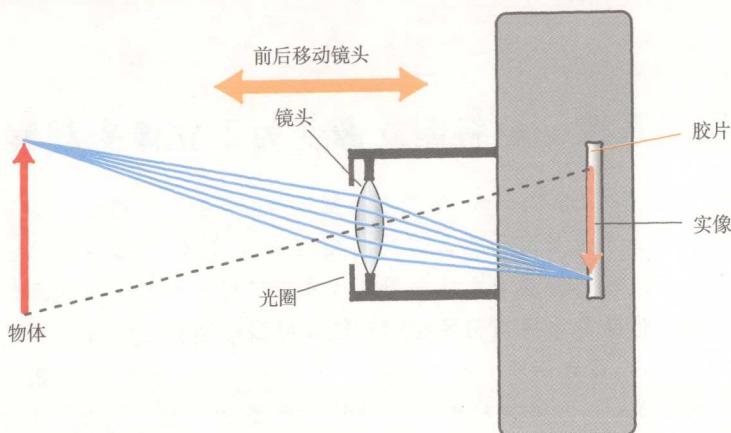
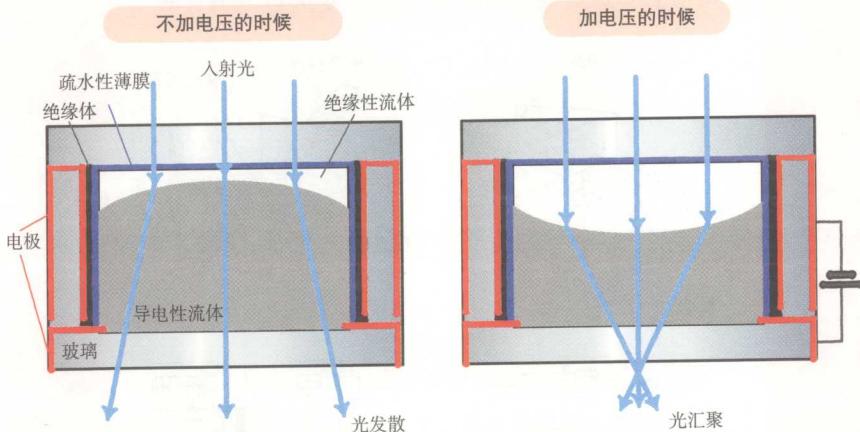
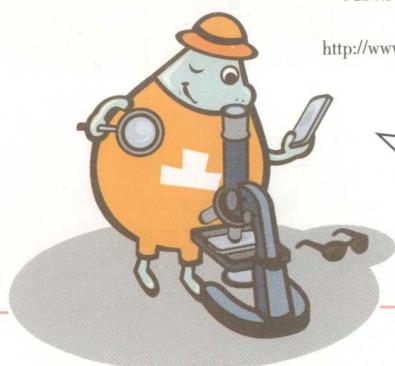


图2 流体透镜的原理



(参考)Philips Research-Techmologies / FluidFocus

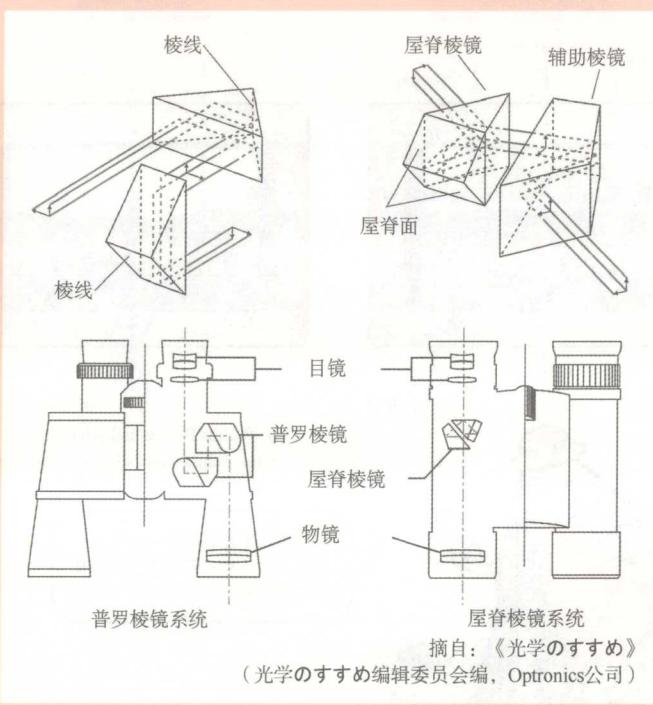
<http://www.research.philips.com/technologies/projects/fluidfocus.html>



COLUMN

像反转系统——将倒立像变为正立像来观察

双筒望远镜或 Fieldscope(尼康单筒望远镜,译者注),都是开普勒式地面望远镜。由于是使用两片凸透镜的望远镜,按这样的结构就只能看到倒立的景物。因此开普勒式地面望远镜采用了将倒立像转为正立像的像反转系统。像反转系统有普罗棱镜系统和屋脊棱镜系统。普罗棱镜系统如下左图所示,是由两块直角三棱镜组合而成的。另一方面,右图所示的屋脊棱镜系统,是由屋脊棱镜和辅助棱镜组成的。屋脊棱镜(英语为 Daha prism 或 Roof prism,译者注)中的 Daha,是源于德语,意思是“屋脊形”。开普勒式地面望远镜,由于装入了像反转系统,就能够看到正立的景物了。下侧图表示的是将棱镜组装进双筒望远镜中的方式。



参考文献

书籍

- 『図解入門 よくわかる最新レンズの基本と仕組み』 桑嶋 幹 著(秀和システム、2005年)
- 『図解レンズがわかる本』 永田信一 著(日本実業出版社、2002年)
- 『光とレンズ』 鶴田匡夫 著(日本工業新聞社、1985年)
- 『光学のすすめ』 「光学のすすめ」編集委員会 編著(オプトロニクス社、2006年)
- 『よくわかる光学とレーザーの基本と仕組み』 潮 秀樹 著(秀和システム、2005年)
- 『ユーザーエンジニアのための光学入門』 岸川利郎 著(オプトロニクス社、2004年)
- 『ヘクト光学1 基礎と幾何光学』 ユージン・ヘクト 著、尾崎義治、朝倉利光 訳(丸善、2004年)
- 『ヘクト光学2 波動光学』 ユージン・ヘクト 著、尾崎義治、朝倉利光 訳(丸善、2004年)
- 『光学設計のための基礎知識』 河合 滋 著(オプトロニクス社、2006年)
- 『光学系の仕組みと応用』 オプトロニクス社編集部 編著(オプトロニクス社、2004年)
- 『光学の知識』 山田幸五郎 著(東京電機大学出版局、2000年)
- 『新版 屈折望遠鏡光学入門』 吉田正太郎 著(誠文堂新光社、2005年)
- 『光と色の100不思議』 桑嶋 幹、川口幸人 編著、左巻健男 監修(東京書籍、2001年)
- 『光技術入門』 堀内敏行 著(東京電機大学出版局、2005年)
- 『光工学入門』 小川 力、若木守明 著(実教出版、1998年)
- 『実用光キーワード事典』 日本光学測定機工業会(朝倉書店、2005年)
- 『プラスチックの仕組みとはたらき』 桑嶋 幹、工藤保広、木原伸浩 著(秀和システム、2005年)
- 『レンズ INAX BOOKLET』 高山 宏、他 著(INAX出版、1989年)
- 『カメラ・オブスクラ年代記』 ジョン・H・ハモンド 著、川島昭夫 訳(朝日新聞社、2000年)
- 『光と電波』 好村滋洋 著(培風館、1990年)
- 『光学入門』 青木貞雄 著(共立出版、2002年)
- 『レンズ設計』 高橋友刀 著(東海大学出版会、1994年)
- 『新・物理IB・II』 (数研出版、1995年)

参考网页网址 (URL)

- 株式会社 住田光学ガラス <http://www.sumita-opt.co.jp/>
- SCHOTT <http://www.schott.com/english/index.html>
- シグマ光機株式会社 <http://www.sigma-koki.com/>
- キヤノンカメラミュージアム <http://web.canon.jp/Camera-muse/tech/index.html>
- キヤノンEFレンズスペシャル <http://cweb.canon.jp/ef/special/lens/index.html>
- Philips Research - Technologies FluidFocus <http://www.research.philips.com/technologies/projects/fluidfocus.html>

提供照片的网页网址

- 北海道理科学サークルWisdom96 <http://www.wisdom96.com/>
- あおぞら☆めいと <http://wapichan.sakura.ne.jp/>