

《光学》

(两学分)

肖云峰 (物理西楼 446)

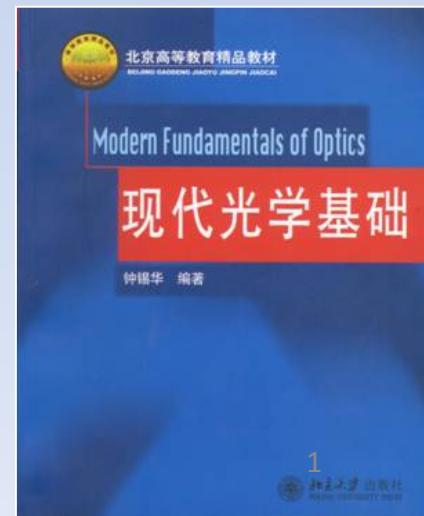
Email address: yfxiao@pku.edu.cn; Tel: 62765512

Research Group URL: www.phy.pku.edu.cn/~yfxiao/

教材: 《现代光学基础》 钟锡华

参考教材: 《光学原理》 波恩、沃耳夫

Office Hour: Friday 3:30 pm – 4:30 pm



This class

成绩组成

作业: 15%

报告: 15%

WHY?

期中: 35%

期末: 35%

这门课的目的是什么 ?

传授知识 ? 激发(保持)兴趣 ?

学生能力 (知识)

- 每人期中、期末两次报告 (各10分钟)
- 期末考试前提交一个简介性论文 (5-10页)
- 期末考试包含部分报告内容 !

印象画派的光的运用

色彩的奥秘

初音演唱会的光学原理

从近视矫正手术看激光技术的发展

形形色色的3D技术

墨镜的历史与工作原理

个性化办公室 - 色彩照明设计

相机成像的部分影响因素

卡片机真的走到穷途末路了吗 ?

隐身技术

飞秒激光

光纤

两学分光学课程内容

第一章 光学导言 (3)

- 1、光与自然
- 2、惠更斯原理与费马原理

第二章 波动光学引言 (3)

- 1、光波的认识（电磁波）
- 2、光波的数学描述
- 3、波前函数

第三章 光的干涉 (6)

- 1、概述
- 2、光波的叠加和干涉
- 3、分波前干涉—杨氏干涉
- 4、其他分波前干涉装置
- 5、分振幅干涉—薄膜干涉（等倾和等厚干涉）
- 6、迈克耳孙干涉仪和马赫-曾得尔干涉仪
- 7、驻波和多光束干涉
- 8、时间相干性和空间相干性

第四章 光的衍射 (4)

- 1、惠更斯-菲涅耳原理
- 2、圆孔和圆屏菲涅耳衍射、波带片
- 3、夫琅禾费单缝衍射
- 4、夫琅禾费圆孔衍射和光学仪器的分辨本领
- 5、位移-相移定理
- 6、一维光栅、二维光栅
- 7、三维光栅—x射线晶体衍射

第五章 傅立叶变换光学引言 (4)

- 1、波前变换和相因子分析
- 2、余弦光栅的衍射场
- 3、傅立叶变换光学大意
- 4、阿贝成像原理与空间滤波
- 5、泽尼克的相衬法
- 6、全息术原理

第六章 光的偏振和光在晶体中的传播 (4)

- 1、自然光和偏振光
- 2、起偏器与检偏器、马吕斯定律
- 3、反射和散射光的偏振态
- 4、双折射现象
- 5、惠更斯作图
- 6、波片和补偿器
- 7、偏振光的干涉
- 8、人为双折射
- 9、旋光性，测糖术

第七章 吸收、色散、散射 (2)

第八章 光子动量 (2)

第九章 光学与光子学新进展 (结合选修学生所属学科, 报告) (8)

共36学时

总学时：32学时

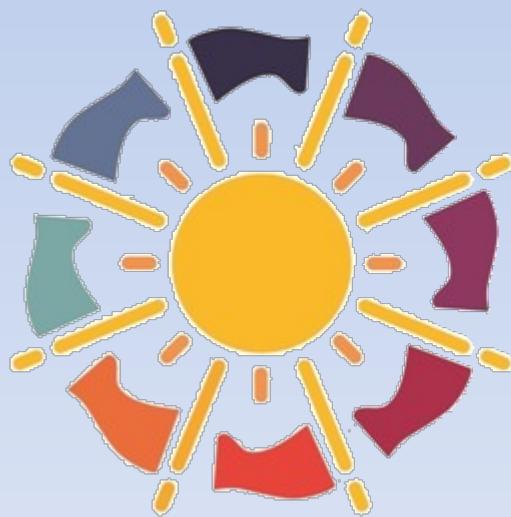
实际：15次课（含其中考试）

课程号	课程名	课程类别	学分	周学时	总学时	班号	开课单位	上课时间教室
00431144	光学	专业必修	2.0	2.0	32.0	2	物理学院	1~16周每周周一3~4节三教206
00431148	光学习题课	专业必修	0.0	2.0	32.0	8	物理学院	1~16周每周周四10~11节一教104
00431149	光学讨论班	全校必修	2.0	0.0	0.0	5	物理学院	1~16周每周周二10~11节文史214

第一章 光学导言

2015年？

2015年：光和光基技术国际年（国际光年）



INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015



联合国教育、
科学及文化组织

执行局

第一九〇届会议

190 EX/47

巴黎, 2012年9月26日
原件: 英文

临时议程项目 47

由联合国宣布 2015 年为国际光年的建议

概 要

应加纳、墨西哥、新西兰以及俄罗斯联邦的要求, 该项目已列入执行局第一九〇届会议的临时议程。

现将解释性说明连同建议作出的决定附后。

希望执行局采取的行动: 见第 14 段中建议做出的决定。

I. 引言

1. 光在人类生活中发挥着极为关键的作用。从最基本的层面看，通过光合作用，光是生命的起源，光在医学、传播、娱乐及文化的诸多应用使社会发生革命性的变化。
2. 光产业是经济的重要推动力，各种光基技术通过提供信息访问、促进可持续发展以及改进社会卫生与福祉，直接满足人类的需要。
3. 光基技术正在为解决全球挑战问题，特别是能源、教育、农业和社区医疗卫生等挑战，提供越来越多的解决方案。光基技术的应用帮助提高发展中国家的生活质量，而且是实现和超越千年发展目标的关键推动力。
4. 由于光已经成为二十一世纪科学和工程学的一个主要的跨学科领域，世界各国人民必须充分认识到对光的科学的研究以及把光基技术应用于全球发展所具有的重要意义。让最有才华的年轻人投身于这一领域的科学与工程事业也至关重要。

II. 国际光年的背景与目标

5. 国际光年将：

- 让公众更好了解光和光基技术如何影响人们的日常生活以及对未来的全球发展产生关键作用；
- 通过针对年轻人的科学活动，促进世界各地的教育能力建设，帮助解决性别平衡问题，特别侧重于发展中国家和新兴经济体；
- 宣传光基技术在可持续发展中的作用，特别是在医疗卫生、农业和通信领域的应用，推动教育机会的普及和提高全世界生活质量；
- 突出并解释光与艺术之间的紧密联系，推动光学技术在保护文化遗产方面发挥日益重要的作用；
- 协调学术界、教育机构与产业界之间的活动，加强国际合作，特别注重发展中世界的新型伙伴关系与倡议；
- 建立持久伙伴关系，确保这些活动、目标和成就能延续到国际光年之后。

6. 2015 年将纪念光学历史上发生的一系列重大事件（分别为 200 年、150 年、100 年和 50 年前）。1815 年，法国的菲涅耳提出了波动光学理论；1865 年，英国的麦克斯韦提出了光的电磁理论；1915 年，德国的爱因斯坦提出了广义相对论，确认光在宇宙和时间中的核心地位；1965 年美国的彭齐亚斯和威尔逊发现了宇宙微波背景辐射（对宇宙诞生理论的支持）。2015 年纪念这些里程碑事件将为世界各地的教育活动提供一个极好的机会。

联合国

A/68/440/Add.2



大 会

Distr.: General
9 December 2013
Chinese
Original: English

第六十八届会议

B. 决议草案 A/C. 2/68/L. 13 和Rev. 1

8. 在 11 月 6 日第 32 次会议上，墨西哥代表以智利、以色列、墨西哥、新西兰、俄罗斯联邦、斯里兰卡和美利坚合众国(中国、古巴和乌克兰加入)的名义介绍了题为“2015 光和光基技术国际年”的决议草案(A/C. 2/68/L. 13)，内容如下：

“大会，

“认识到光和光基技术对世界民众的生活以及全球社会多层面未来发展的重要性；

“强调指出提高全球对光科学技术的认识和加强这方面的教育，对于发达国家和发展中国家应对可持续发展、能源、社区保健和提高生活质量的挑战至关重要；

“考虑到光科学技术的应用对现有和未来医药、能源、信息和通信、光纤学、天文学、建筑、考古、娱乐和文化进步至关重要，考虑到从当前关于确定 2015 年后发展议程的讨论角度看，光基技术提供获取信息的机会，增进社会健康和福祉，直接满足人类需求；

“注意到 2015 年恰值光科学历史上一系列重要的里程碑周年纪念，包括 1015 年伊本 · 海赛姆的光学著作、1815 年菲涅尔提出的光波概念、1865 年马克斯韦尔提出的光电磁传播理论、1905 年爱因斯坦的光电效应理论和 1915 年通过广义相对论将光列为宇宙学的内在要素，以及 1965 年彭齐亚斯和威尔逊发现宇宙微波背景；

“考虑到 2015 年为这些发现举办周年纪念活动将提供一个重要的机会，可突出宣传科学发现在不同领域的连续性，特别强调在青年和妇女、特别是发展中国家的青年和妇女中推广科学教育；

“注意到经济及社会理事会 2013 年实质性会议已在“科技创新和文化潜力促进可持续发展和实现千年发展目标”主题下安排其年度部长级审查工作；

“重申经济及社会理事会关于国际年和周年纪念的 1980 年 7 月 25 日第 1980/67 号决议以及大会关于宣布国际年的 1998 年 12 月 15 日第 53/199 号决议和 2006 年 12 月 20 日第 61/185 号决议；

“又重申 2012 年 6 月 20 日至 22 日在巴西里约热内卢举行的可持续发展大会题为“我们希望的未来”的成果文件；

“1. 欢迎联合国教育、科学及文化组织执行局第 190 届会议期间赞同该倡议；

“2. 决定宣布 2015 年为光和光基技术国际年；

“3. 邀请秘书长与联合国教育、科学及文化组织合作，并考虑到经济及社会理事会第 1980/67 号决议附件的规定，采取适当步骤组织该国际年活动，并就在各级开展活动协助会员国落实该国际年提出必要提案；

“4. 邀请联合国教育、科学及文化组织考虑到经济及社会理事会第 1980/67 号决议附件的规定，与各国政府、联合国系统有关组织、国际科学理事会和其他相关非政府组织合作，为落实该国际年提供便利，并邀请联合国教育、科学及文化组织随时向大会通报这方面取得的进展；

“5. 强调指出，因执行本决议而可能产生的所有活动费用应由自愿捐款支付，但须以具备和提供此用途专项自愿捐款为前提；

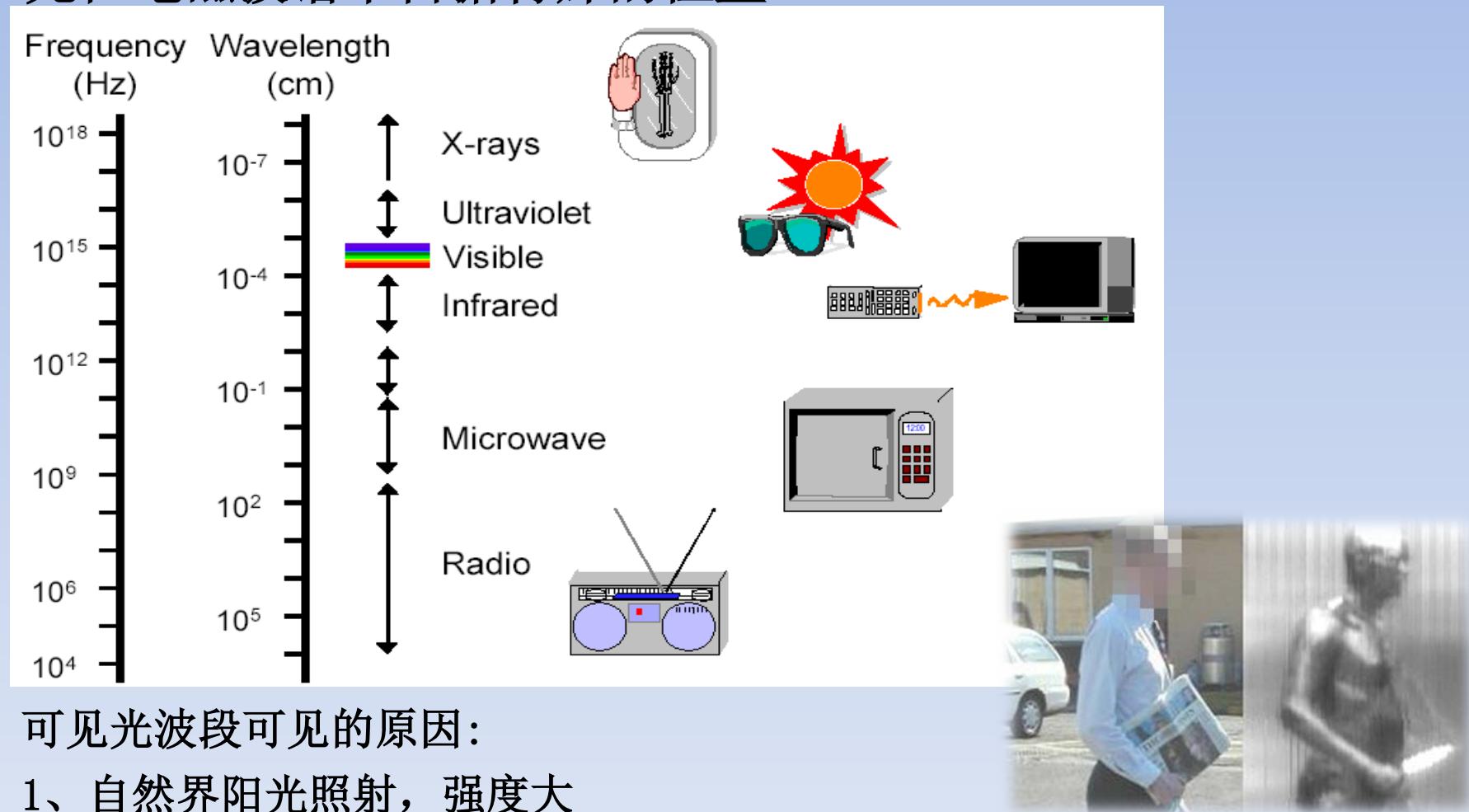
“6. 鼓励所有国家、联合国系统和所有其他行为体利用该国际年推动在各级采取行动，包括开展国际合作，并提高公众对光科学、光学和光基技术，以及推广新知识和相关活动的重要性的认识；

“7. 请秘书长向大会第七十一届会议提出一份关于本决议执行情况的报告。”

诺贝尔科学奖（物理、化学、生物医学）中的光学？

1. 光与自然

- 光在电磁波谱中占据特殊的位置

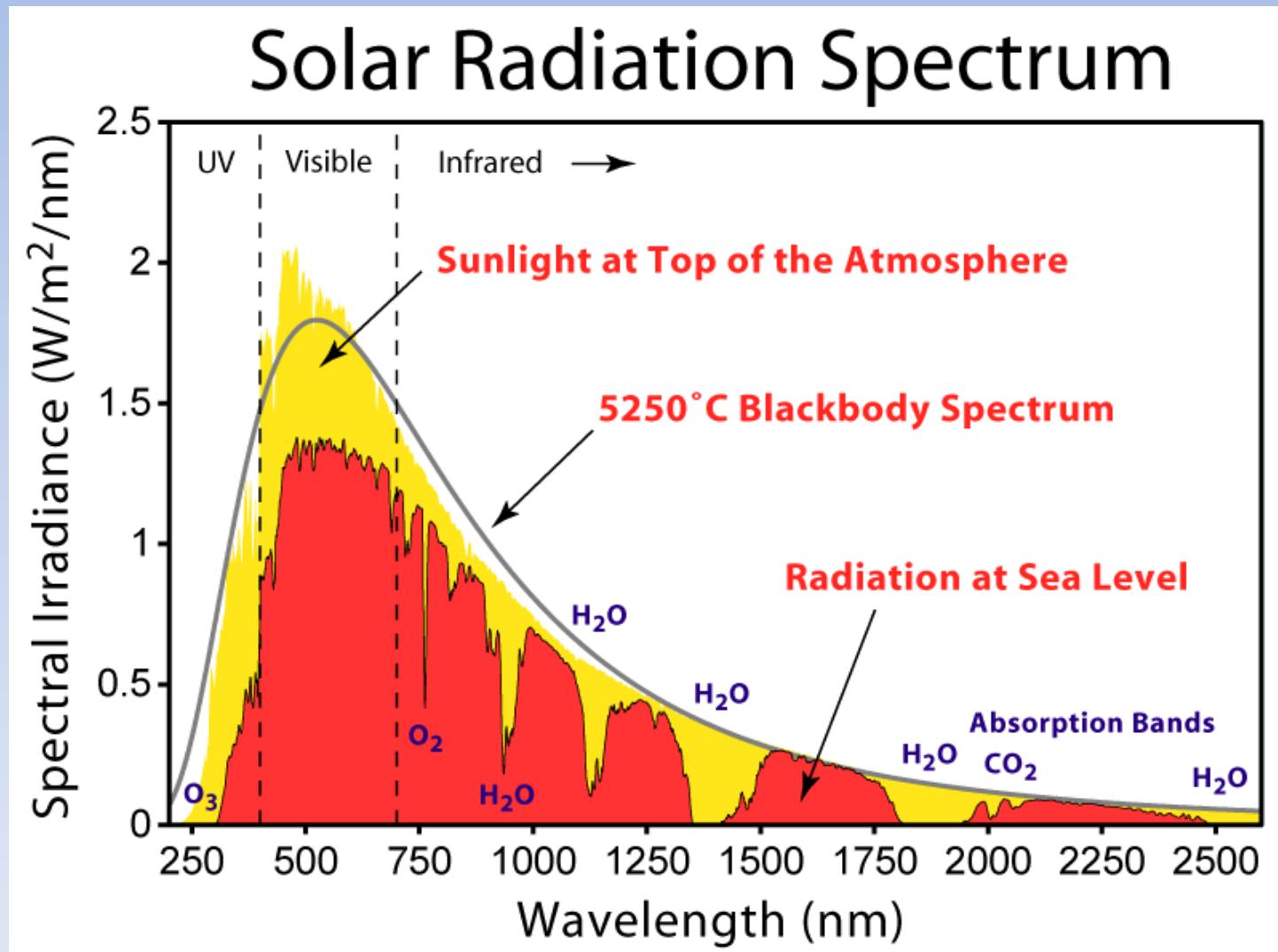


可见光波段可见的原因：

- 1、自然界阳光照射，强度大
- 2、是有机物分子的吸收波长，可以实现光电转换，触发神经成像。

1. 光与自然

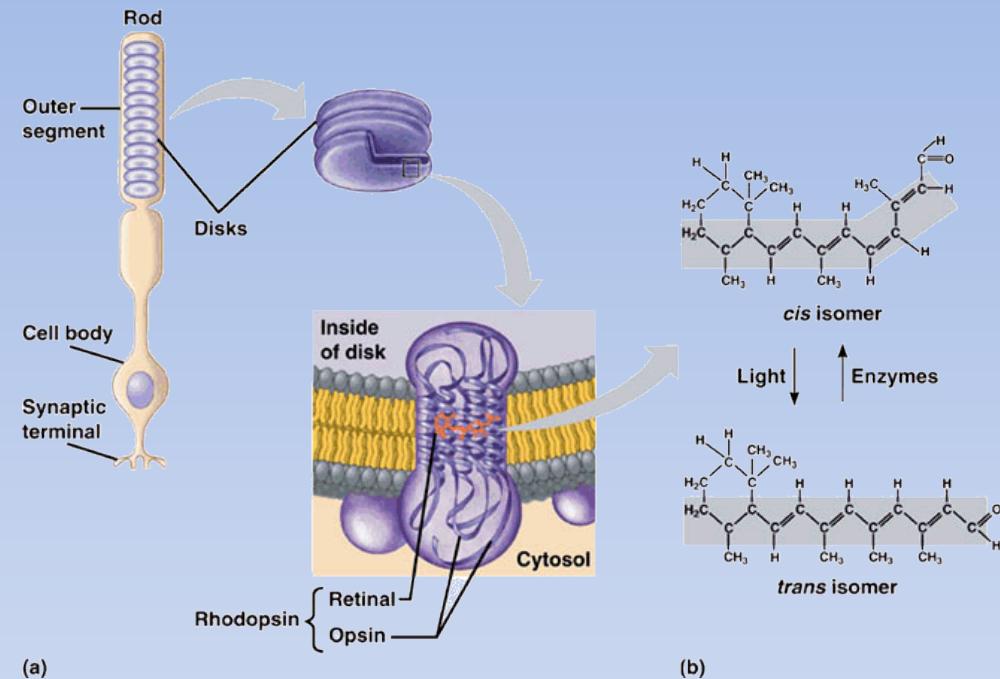
- 太阳光谱



1、光与自然

• 视觉的产生

视觉是由眼接收外界光刺激，通过视神经、大脑中的视觉中枢的共同活动来完成的。外界物体发出或反射的光线，从眼睛的角膜、瞳孔进入眼球，穿过如放大镜的晶状体，使光线聚焦在眼底的视网膜上，形成物体的像。图像刺激视网膜上的感光细胞，产生神经冲动，沿着视神经传到大脑的视觉中枢，在那里进行分析和整理，产生具有形态、大小、明暗、色彩和运动的视觉。



视网膜上有两类感光细胞。一类叫视杆细胞，它含有一种感光物质——视紫红质。视紫红质对弱光非常敏感，微弱的光就能使它分解，从而引起它的兴奋。但它对强光和颜色的敏感性较差。另一类感光细胞叫视锥细胞，它适合接受强光和感受颜色。视锥细胞中含有三种不同的视色素，分别对红、绿及蓝紫颜色敏感。视锥细胞中要是缺少某一种色素，或者全部缺乏，那么对颜色的感觉就不那么完善甚至完全失去，这就成了色盲。

人既有视杆细胞，又有视锥细胞，所以既能在夜间看到物体的形态，又能在白天看到物体的颜色。猫头鹰只有视杆细胞，没有视锥细胞，所以它在夜间视觉敏锐，一到白天就什么也看不见，它也不能感觉色彩，是个十足的色盲。与猫头鹰相反，鸽子却只有视锥细胞，没有视杆细胞，所以是天生的夜盲。

1. 光与自然

- 自然界绚丽的光学现象



1. 光与自然

- 自然界绚丽的光学现象



1. 光与自然

- 自然界绚丽的光学现象

菩萨蛮 大柏地
赤橙黄绿青蓝紫，谁持彩练当空舞？雨后复斜阳，关山阵阵苍。
当年鏖战急，弹洞前村壁。装点此关山，今朝更好看。



菩萨蛮 大柏地

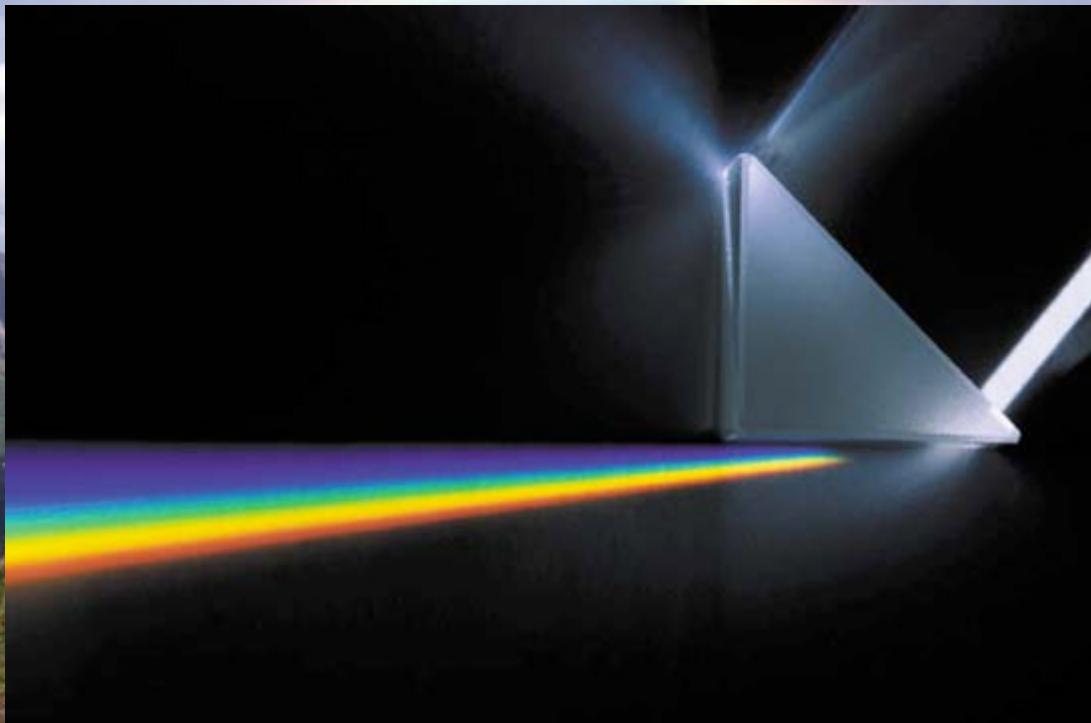
赤橙黄绿青蓝紫，谁持彩练当空舞？雨后复斜阳，关山阵阵苍。
当年鏖战急，弹洞前村壁。装点此关山，今朝更好看。

1933年，粉碎“第四次围剿”后行军途经大柏地时写下此词。

这首词的大意是：美丽的彩虹出现在天边，好像有谁手持彩带在空中挥舞。雨后初晴，夕阳之下，群山苍翠。看到残留在村前墙壁上的弹痕，不由得想起当年激战歼敌的情景。正是经过战火洗礼的河山，今天看来才更加美丽可爱。

1. 光与自然

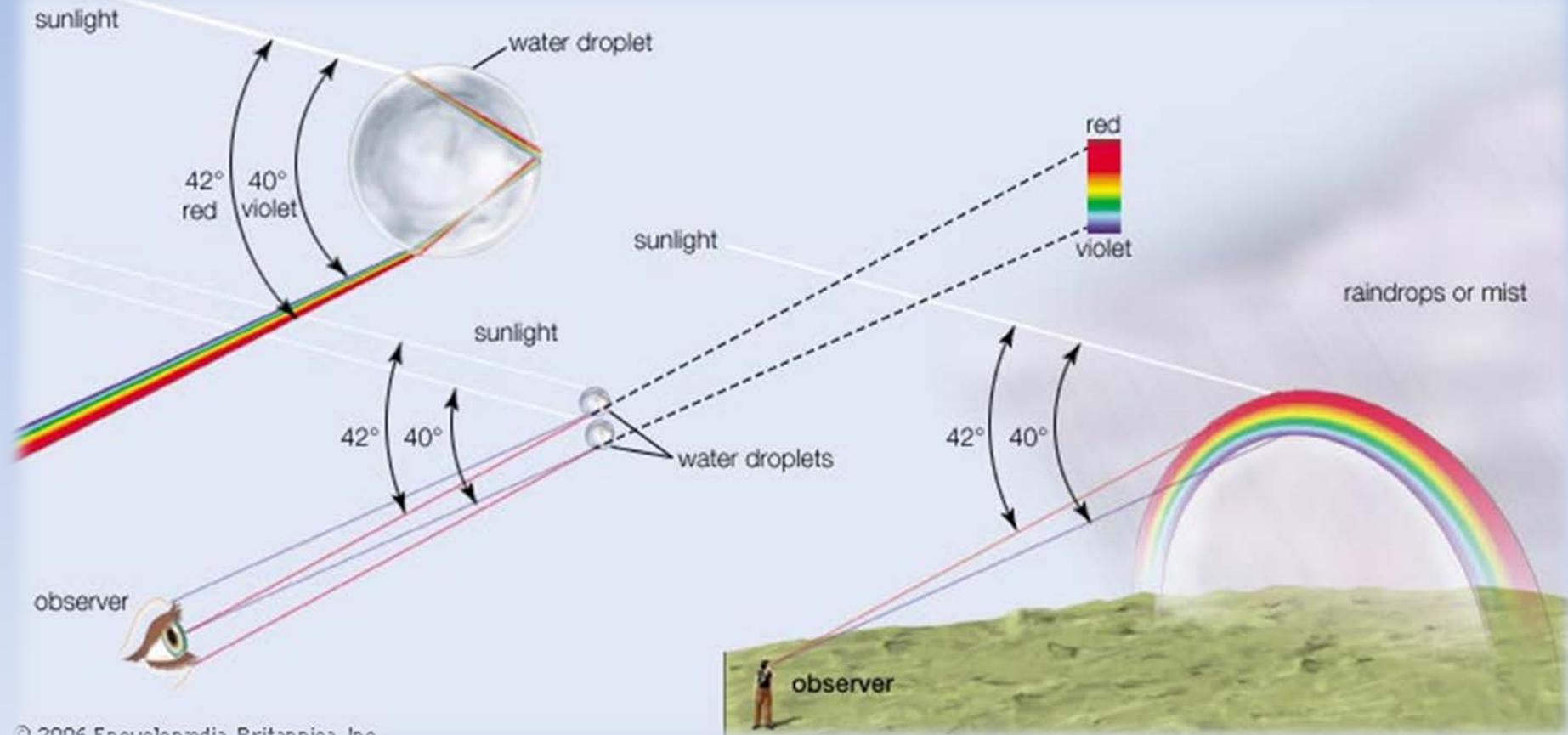
- 自然界绚丽的光学现象



唐初孔颖达（574-648）“若云薄漏日，日照雨滴则虹生。”₂₁

1. 光与自然

- 自然界绚丽的光学现象



© 2006 Encyclopædia Britannica, Inc.

1、光与自然

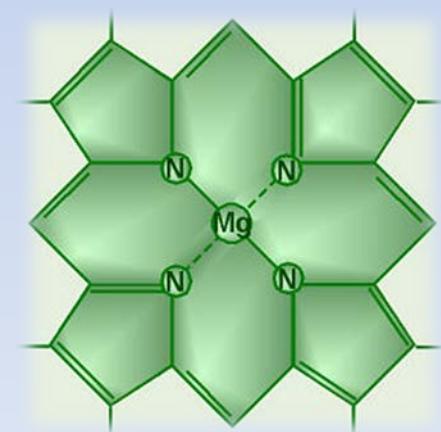
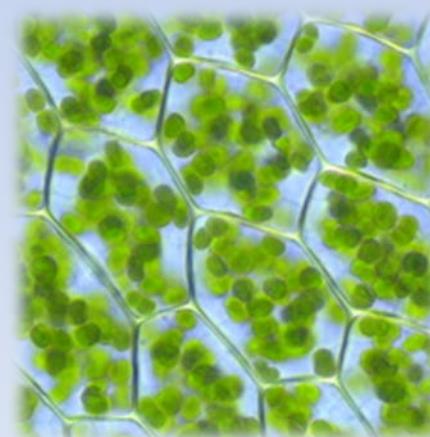
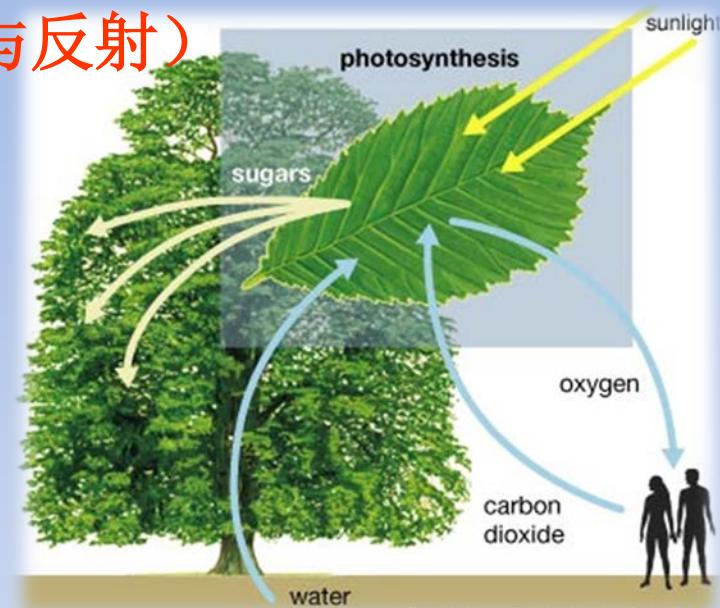
- 自然界绚丽的光学现象



南宋程大昌《演繁露》中记载到：“凡雨初霁，或露之未晞，余点缀于草木枝叶之末，欲坠不坠，则皆聚为圆点，光莹可喜。日光入之，五色俱足，闪烁不定。是乃日之光晶著色于水，而非雨露有此五色也。”

1. 光与自然

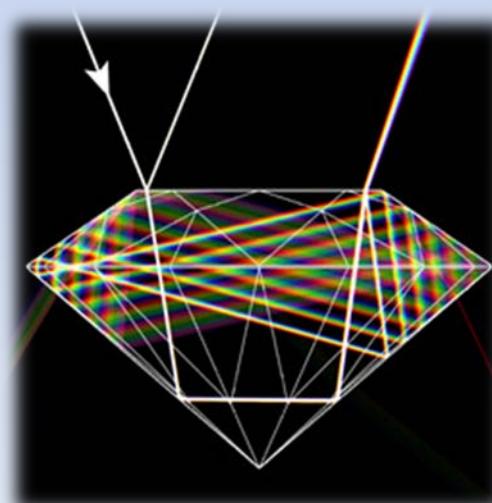
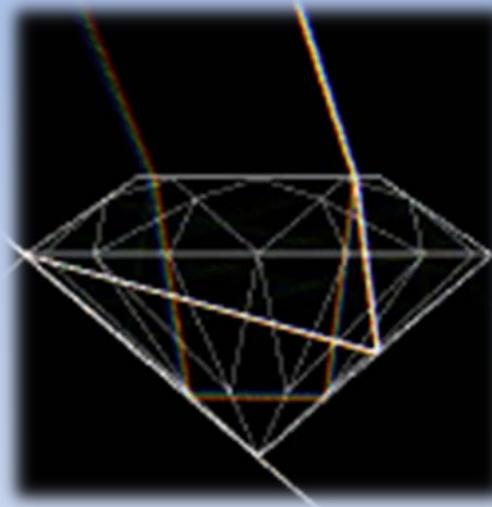
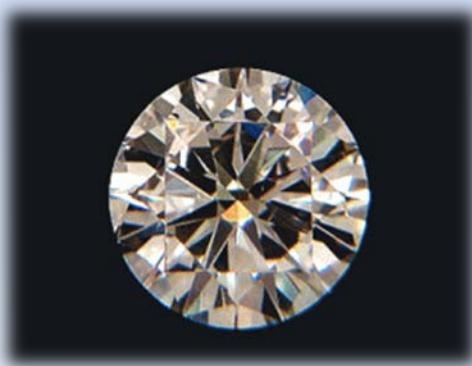
• 色彩的秘密 (*) 色素颜色（吸收与反射）



1、光与自然

- 色彩的秘密

折射色彩（色散）

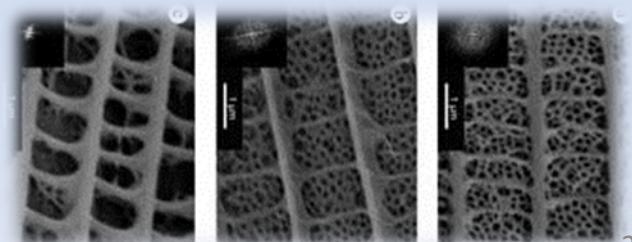
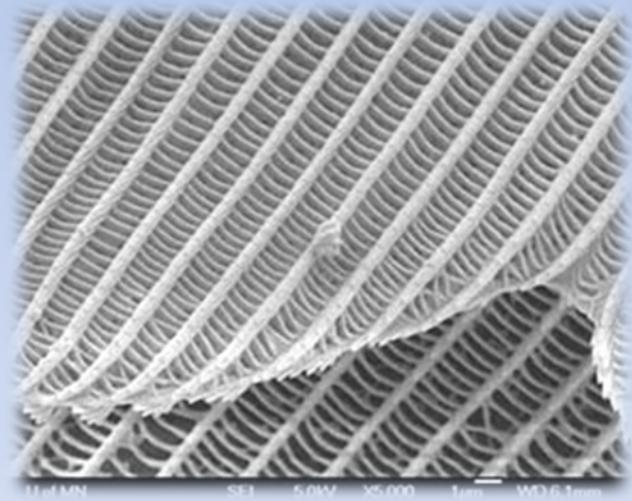
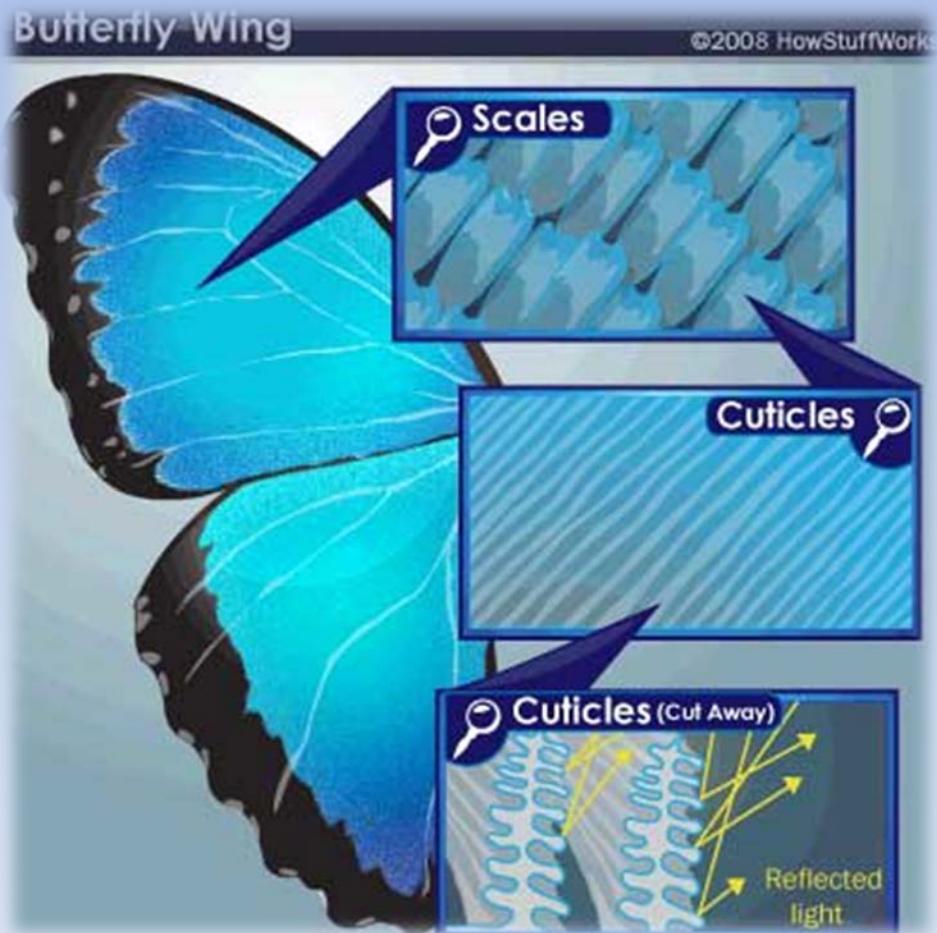


钻石的折射率是2.417，内入射角为24度时即可发生全反射，而普通玻璃折射率是1.5，需要42度才能发生全反射。

1. 光与自然

• 色彩的秘密

结构颜色（光学衍射）



水表面的油膜呈现五颜六色，是什么颜色？

2、现代光学的应用



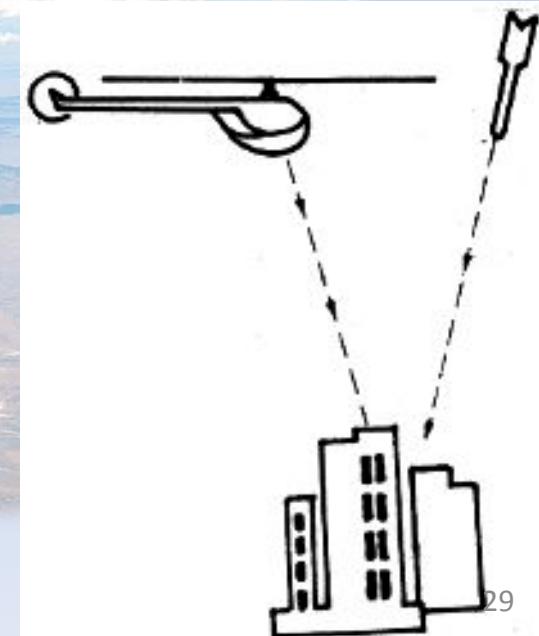
除了自然界中表现出的美丽以外，光学极大的改变了我们的生活。

2009年诺贝尔奖授予光纤之父 - 高锟，是第九位获得诺贝尔奖的华人。

2. 现代光学的应用



2. 现代光学的应用



2. 现代光学的应用



2. 现代光学的应用



The optical data link test between the Artemis satellite and the SPOT-4 satellite required microradian precision, as the satellites were 30,000 km apart, traveling at a relative speed of 7 km/s.

2、现代光学的应用

激光是二十世纪60年代发展起来的一门新兴科学，它是20世纪与原子能、半导体、计算机齐名的四大发明之一。

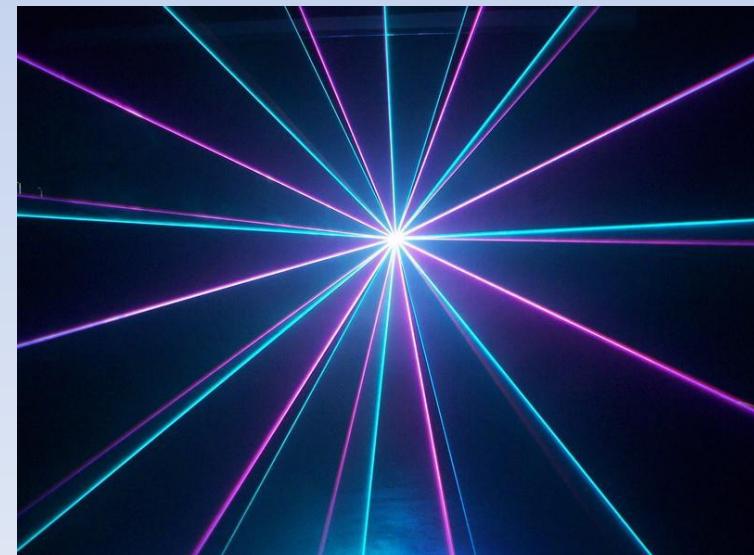
它的出现标志着人们掌握和利用光波进入一个新的阶段，可以说它开启了光学物理的大门。

微纳光学

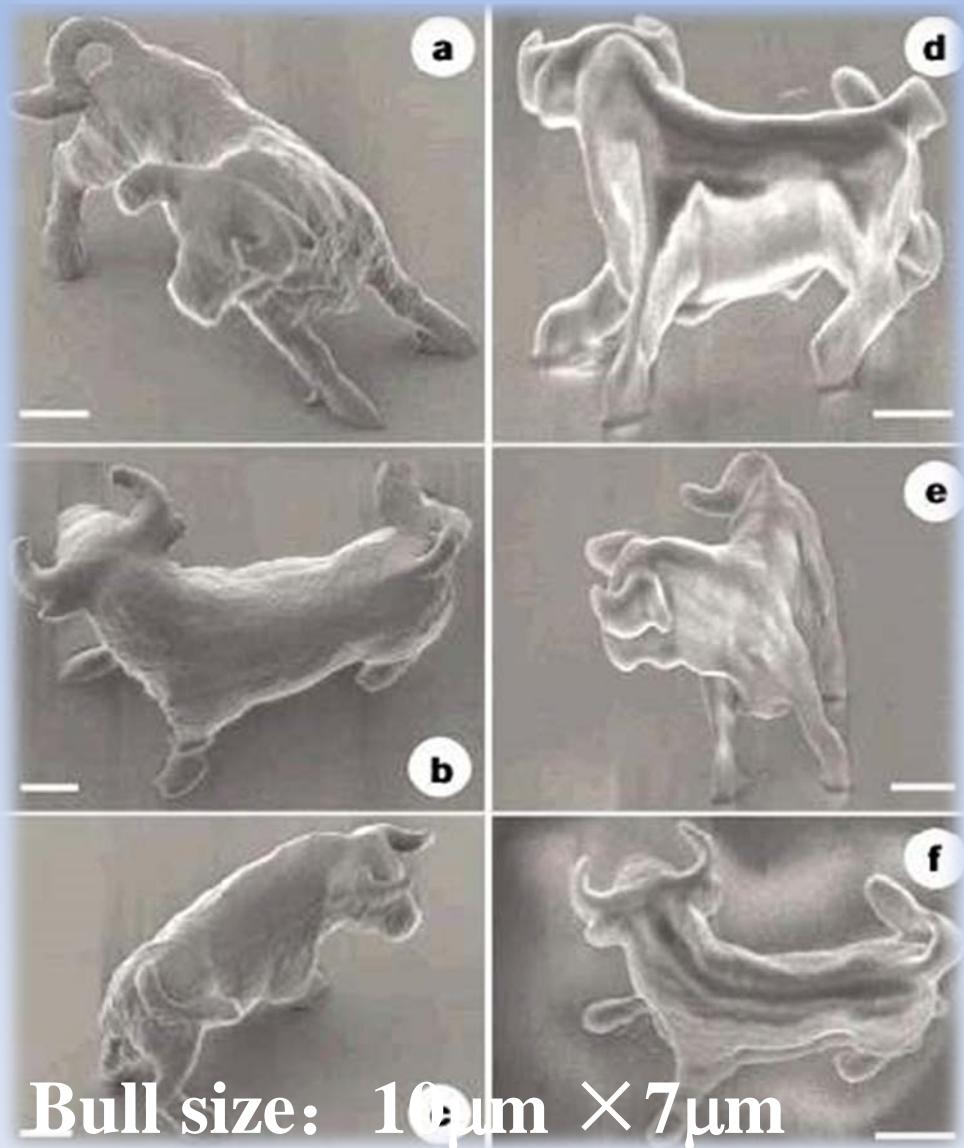
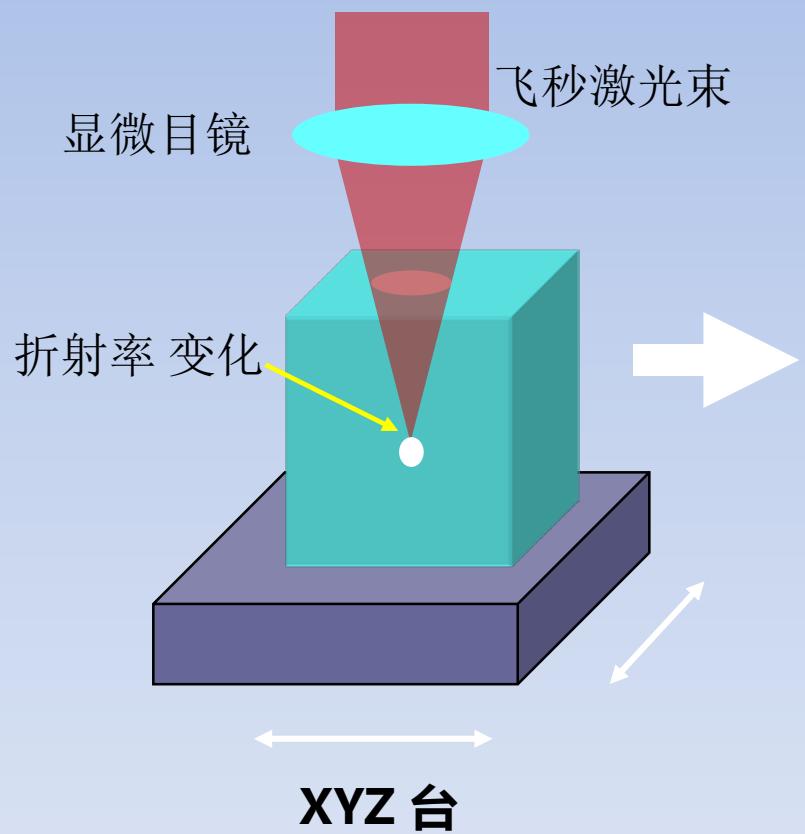
量子光学

飞秒激光

.....



2. 现代光学的应用



3. 光学历史

- 几何光学



《礼记》 “左佩金燧”、“右佩木燧”
《玉篇》 “燧，以取火于日”

3、光学历史

- 几何光学



公元前215年，古罗马帝国派强大的海军，乘战舰攻打古希腊名城叙拉古。小小的叙拉古难敌来势汹汹的古罗马大军，舰队浩浩荡荡来攻城了，国王和百姓都着了慌。人们就把希望寄托于居住在岛上的阿基米德身上，当时年过古稀的阿基米德，虽然没有绝世的武功，却有聪明的头脑，人们请求阿基米德运用他的非凡智慧，找到败敌之术。留着大胡子的阿基米德这位科学巨匠深知太阳能的巨大威力，他挺身而出，发动全城的妇女拿着自己锃亮的铜镜来到海岸边。在烈日下，阿基米德拿起一面镜子，让它反射的太阳光恰好射到敌舰的船帆上，阿基米德一声令下，他高喊着：“让镜子的反射光照到这里！”不计其数的妇女学着阿基米德的样子，一起用镜子把太阳光集中反射到船帆上。顿时，³³敌舰起火，不可一世的罗马海军大败而归。

3、光学历史

- 几何光学



在古希腊人那里，几何光学有了较充分的发展。亚里士多德直接提出这样的问题：“为什么插入水中的棍子好像是折断了。”欧几里德研究了反射现象，提出了光的反射定律，并把这个定律用于平面镜和球面镜。那时欧几里德已知道了凹面镜的聚焦作用，并假定其焦点在球心或在球心与镜面之间。

3、光学历史

- 光的本质



And God proceeded to say: "Let light come to be." Then there came to be light.
---Bible: Genesis

3、光学历史

- 光的机械论认识—粒子光学



笛卡儿 (**1596-1650**) 《屈光学》中提出光的粒子假说，并用以推出光的折射定律。

费马 (**P.Fermat, 1601-1665**)

英国 牛顿

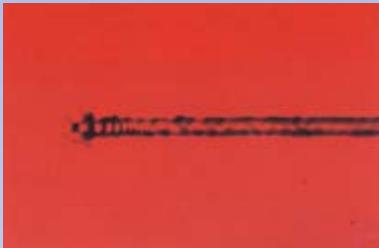
1704年，《光学》一书出版。随着天文学、力学和光学的出现，物理学在十八世纪开始成为科学。

牛顿则持光的微粒说，他认为波动说的最大障碍是不能解释光的直线进行。他提出发光物体发射出以直线运动的微粒子、微粒子流冲击视网膜就引起视觉。它也能解释光的折射与反射，甚至经过修改也能解释F.M.格里马尔迪发现的“衍射”现象。



3、光学历史

- 波动光学



格里马耳迪 (Francesco Maria Grimaldi) 的 *Prysico-mathesis de lumine coloribus et iride* (《光的物理学》) 中描述了光的衍射实验，并表述了他的光波动理论。



胡克和玻意耳各自独立发现牛顿环，在白光下薄膜的彩色干涉图样，胡克提出了光的波动说，他认为光的传播与水波的传播相似。1672年胡克进一步提出光波是横波的概念。



惠更斯在1690年出版的《光论》一书中正式提出了光的波动说，建立了著名的惠更斯原理。在此原理基础上，他推导出了光的反射和折射定律，圆满的解释了光速在光密介质中减小的原因，同时还解释了光进入冰洲石所产生的双折射现象，认为这是由于冰洲石分子微粒为椭圆形所致。

3、光学历史

- 波动光学



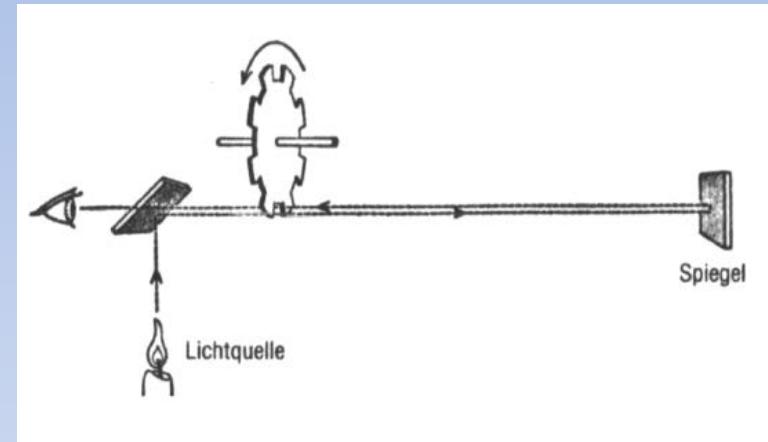
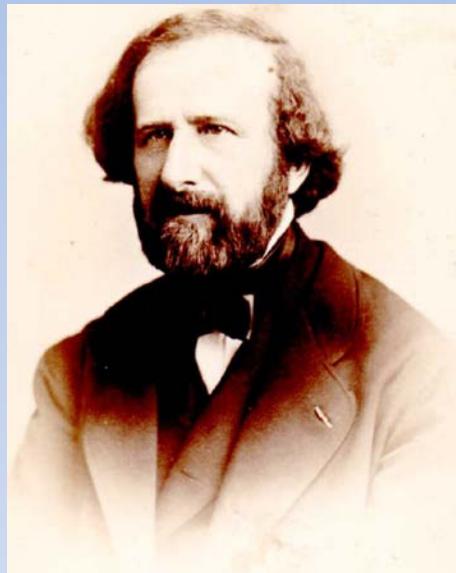
杨氏 (T. Young 1773-1829) 杨氏干涉实验为波动光学的复兴作出了开创性的工作。用干涉原理解释牛顿环的成因和薄膜的彩色，并第一个近似地测定了七种颜色的光的波长，从而完全确认了光的周期性，为光的波动理论找到了又一个强有力的证据。



菲涅耳(1788~1827) 菲涅耳以惠更斯原理和干涉原理为基础，用新的定量形式建立了以他们的姓氏命名的惠更斯—菲涅耳原理。解释了衍射现象，完成了光的波动说的全部理论

3. 光学历史

- 光速测量



1850年两位法國人菲左（Armand Fizeau, 1819~1896）和傅科（Jean Foucault, 1819~1868）分別测出光在空气中及水中的速率，确认在水中的光速较慢，使光的「波动说」得以确立。

3、光学历史

- 对于光波的进一步认识—电磁波



法拉第 (1817–1867)

法拉第由于对电磁学作出的贡献而成为19世纪最伟大的物理学家之一。



麦克斯韦是继法拉第之后，集电磁学大成的伟大科学家，建立了第一个完整的电磁理论体系，不仅科学地预言了电磁波的存在，而且揭示了光、电、磁现象的本质的统一性，完成了物理学的一次大综合。

麦克斯韦 (1831–1879)



赫兹 (1857–1894)

赫兹用实验证实了电磁波的存在，赫兹先求出振荡器的频率，又以检波器量得驻波的波长，二者乘积即电磁波的传播速度。正如麦克斯韦预测的一样，电磁波传播的速度等于光速。1889年在一次著名的演说中，赫兹明确的指出，光是一种电磁现象。

3、光学历史

• 对于光波的进一步认识

19世纪的最后一天，欧洲著名的科学家欢聚一堂。会上，英国著名物理学家汤姆生（即开尔文男爵）发表了新年祝词。他在回顾物理学所取得的伟大成就时说，物理大厦已经落成，所剩只是一些修饰工作。同时，他在展望20世纪物理学前景时，却若有所思地讲道：“动力理论肯定了热和光是运动的两种方式，现在，它的美丽而晴朗的天空却被两朵乌云笼罩了，”“第一朵乌云出现在光的波动理论上，”“第二朵乌云出现在关于能量均分的麦克斯韦-玻尔兹曼理论上。”W. 汤姆生在1900年4月曾发表过题为《19世纪热和光的动力学理论上空的乌云》的文章。他所说的第一朵乌云，主要是指迈克尔逊-莫雷实验结果和以太漂移说相矛盾；他所说的第二朵乌云，主要是指热学中的能量均分定则在气体比热以及势辐射能谱的理论解释中得出与实验不等的结果，其中尤以黑体辐射理论出现的“紫外灾难”最为突出。

3、光学历史

• 紫外灾难

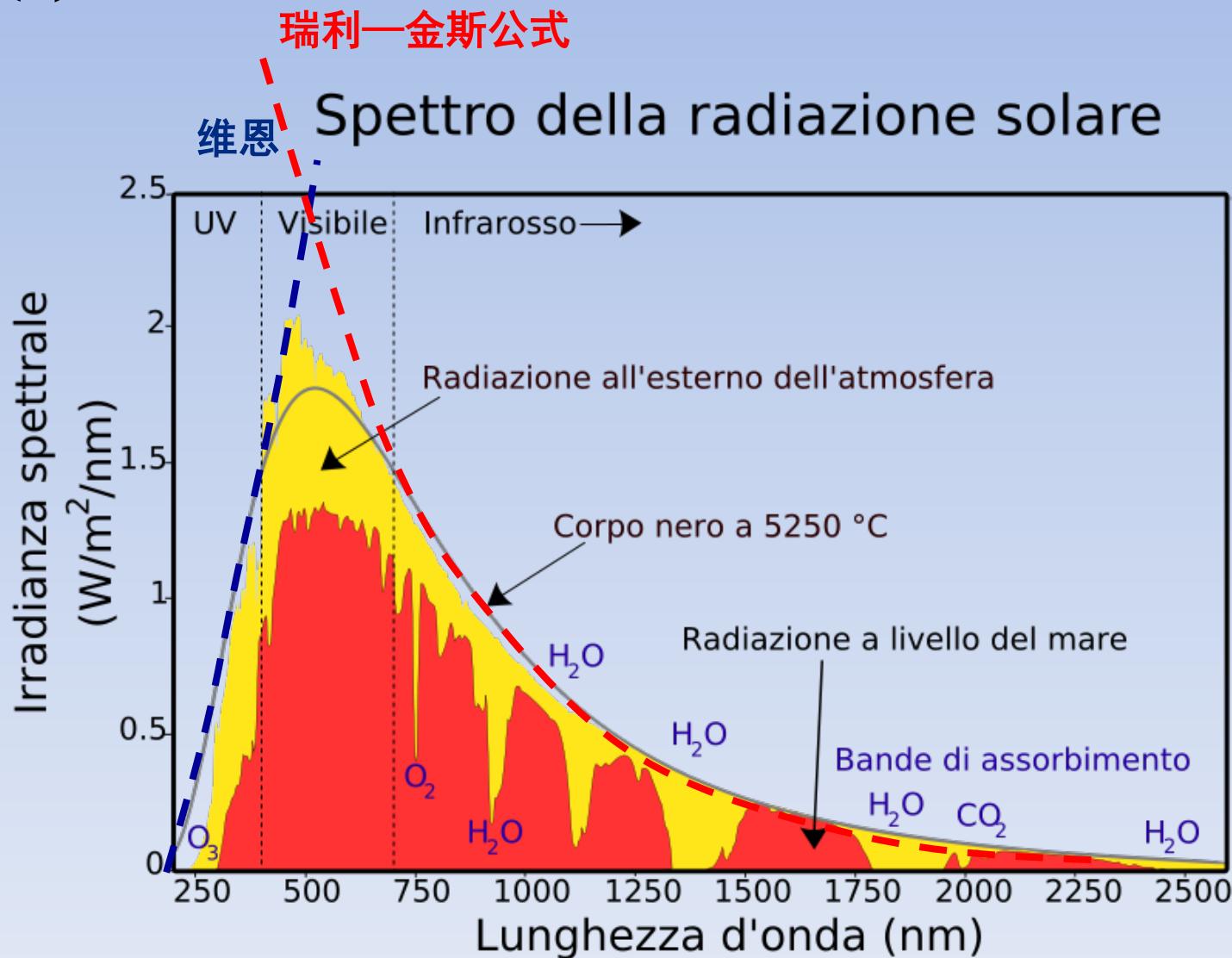
在同样的温度下，不同物体的发光亮度和颜色（波长）不同。颜色深的物体吸收辐射的本领比较强，比如煤炭对电磁波的吸收率可达到80%左右。所谓“黑体”是指能够全部吸收外来的辐射而毫无任何反射和透射，吸收率是100%的理想物体。

19世纪末，卢梅尔（1860–1925）等人的著名实验—黑体辐射实验，发现黑体辐射的能量不是连续的，它按波长的分布仅与黑体的温度有关。从经典物理学的角度看来，这个实验的结果是不可思议的。

怎样解释黑体辐射实验的结果呢？当时，人们都从经典物理学出发寻找实验的规律。前提和出发点不正确，最后都导致了失败的结果。例如，德国物理学家维恩建立起黑体辐射能量按波长分布的公式，但这个公式只在波长比较短、温度比较低的时候才和实验事实符合。英国物理学家瑞利和物理学家、天文学家金斯认为能量是一种连续变化的物理量，建立起在波长比较长、温度比较高的时候和实验事实比较符合的黑体辐射公式。但是，从瑞利—金斯公式推出，在短波区（紫外光区）随着波长的变短，辐射强度可以无止境地增加，这和实验数据相差十万八千里。所以这个失败被埃伦菲斯特称为“紫外灾难”。它的失败无可怀疑地表明经典物理学理论在黑体辐射问题上的失败，所以这也是整个经典物理学的“灾难”。

3. 光学历史

- 紫外灾难



3、光学历史

- 量子光学：光的波粒二象性



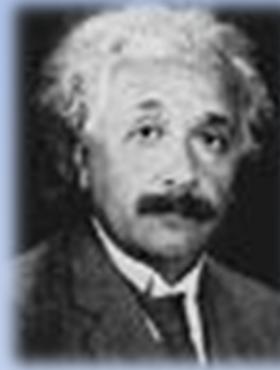
薛定谔
1887–1961



尼尔斯·玻尔
1885–1962



普朗克
1858–1947



爱因斯坦
1879–1955



海森伯
1901–1976

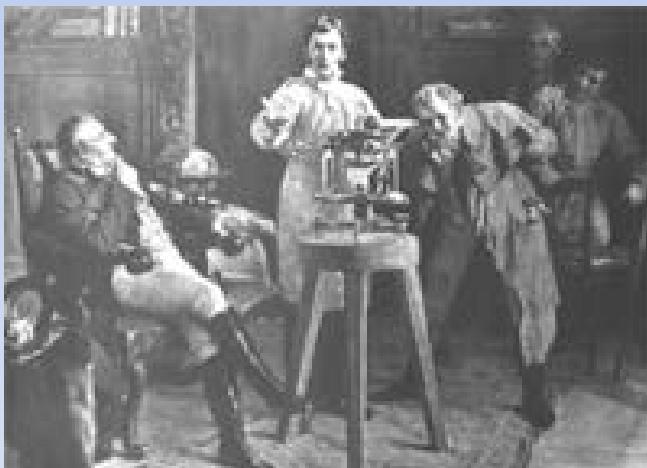
关于黑体辐射强度的计算有另外一条在短波中适用的维恩公式，普朗克使用插值法将两个公式化成了一条公式也即普朗克公式，并为了解释这个半经验公式的准确性提出了能量量子化假设。

爱因斯坦提出光电效应的光量子解释，在光学中提出了自发辐射系数，为激光的发明奠定了理论基础。

3、光学历史

• 光谱学

1815年，夫琅和费
(J. V. Fraunhofer, 1787—1826)
开始用分光镜研究太阳光谱中的暗线。



本生
R. W. Bunsen, 1811-1899

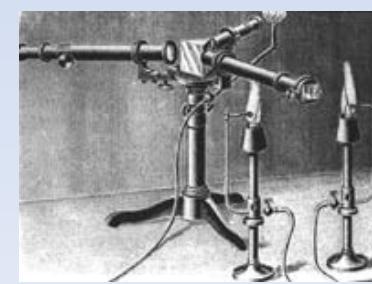


基尔霍夫
G. R. Kirchhoff, 1824-1887

1859年，本生和物理学家基尔霍夫开始共同探索通过辨别焰色进行化学分析的方法。他们决定，制造一架能辨别光谱的仪器。他们把一架直筒望远镜和三棱镜连在一起，设法让光线通过狭缝进入三棱镜分光。这就是第一台光谱分析仪。

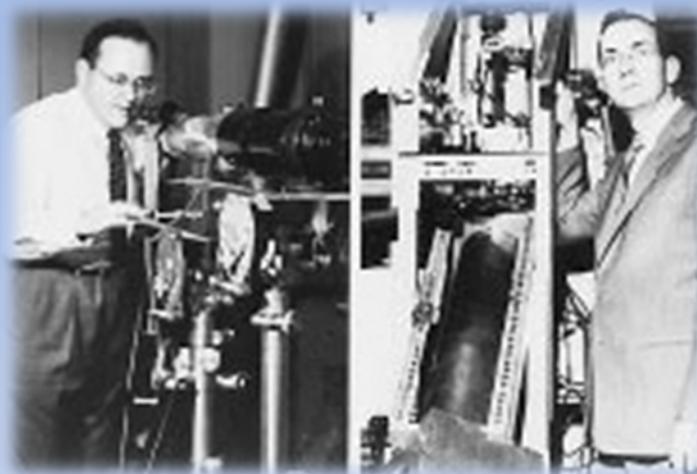
1860年，本生和基尔霍夫用他们创立的光谱分析方法，在狄克海姆矿泉水中，发现了新元素铯；1861年，他们在分析云母矿时，又发现了新元素铷。此后，光谱分析法被广泛采用。

本生和基尔霍夫创造的方法，可以研究太阳及其他恒星的化学成分，为以后天体化学的研究打下了坚实的基础。



3、光学历史

- 非线性光学



1958年，贝尔实验室的Arthur Schawlow和哥伦比亚大学的Charles Townes发表了“红外线和光激励器”--这篇论文为后来激光技术和应用领域的发展开辟了道路，1960年，休斯顿航空公司的Theodore Malman用人造红宝石制造了一个激光器。

20世纪60年代，非线性光学...



4、惠更斯原理

• 惠更斯



Christian Huygens 1629-1695

荷兰物理学家，天文学家，数学家。
1629年4月14日-1695年7月8日
1663年选为英国皇家学会成员。
1666年选为刚成立的法国科学院的成员。

- ✓ 经典物理光学的奠基人。
- ✓ 提出的光的波动理论是以“光是以太媒介中的波动”为前提和波的惠更斯原理为核心的光波理论。
- ✓ 解释了光的反射与折射定律和光的定性的衍射现象，并且定量说明了光在单轴晶体如冰洲石中的双折射现象。
- ✓ 数学方面，1658 年求得摆线（旋轮线）曲线的长度。
- ✓ 天文学方面，他发现了土星的光环、土卫六和猎户星云等。
- ✓ 对空气泵和气压计的改进，提出测微计的初步设想，发明钟表的弹簧游丝，改进测温术，对引力及地球形状的研究，提出各种动力机的设想等工作与成就。
- ✓ 《光论》是他的经典名著。

4、惠更斯原理

• 惠更斯原理 (*)

光扰动同时到达的空间曲面被称为波面或波前，波前上的每一点都可以看成一个新的扰动中心，称为子波源或次波源，次波源向四周发出次波；下一时刻的波前是这些大量次波面的公切面，或称为包络面；次波中心与其次波面上的那个切点的连线方向给出了该处光传播方向。

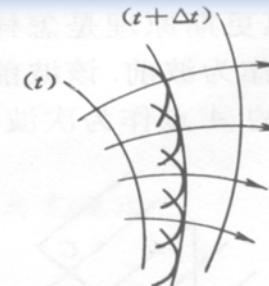
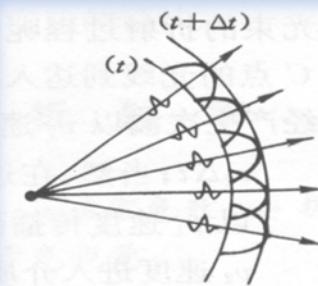
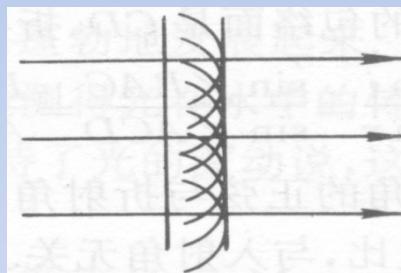
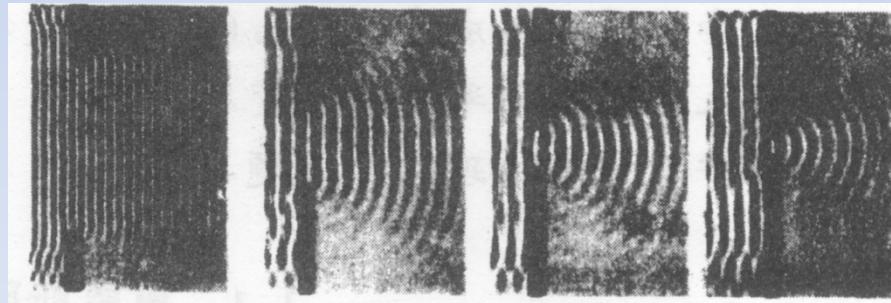


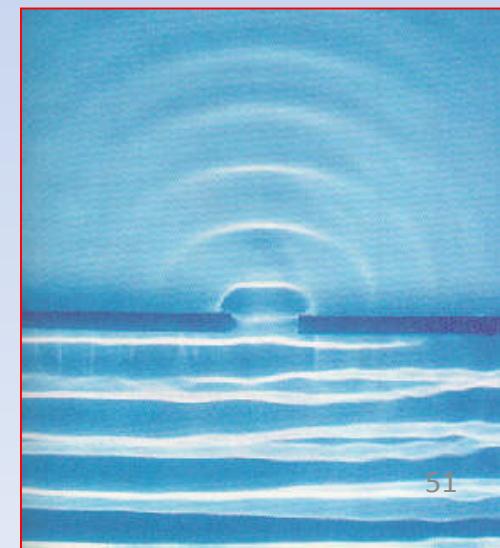
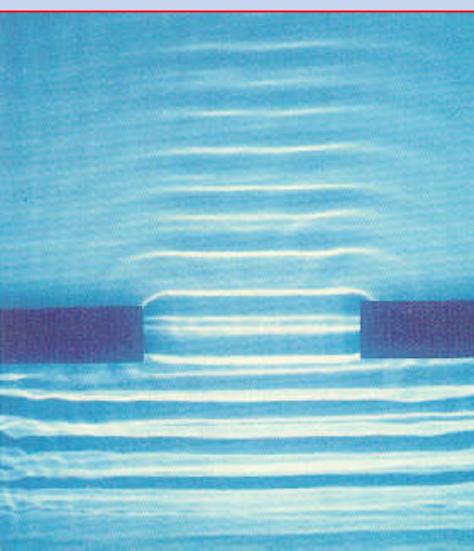
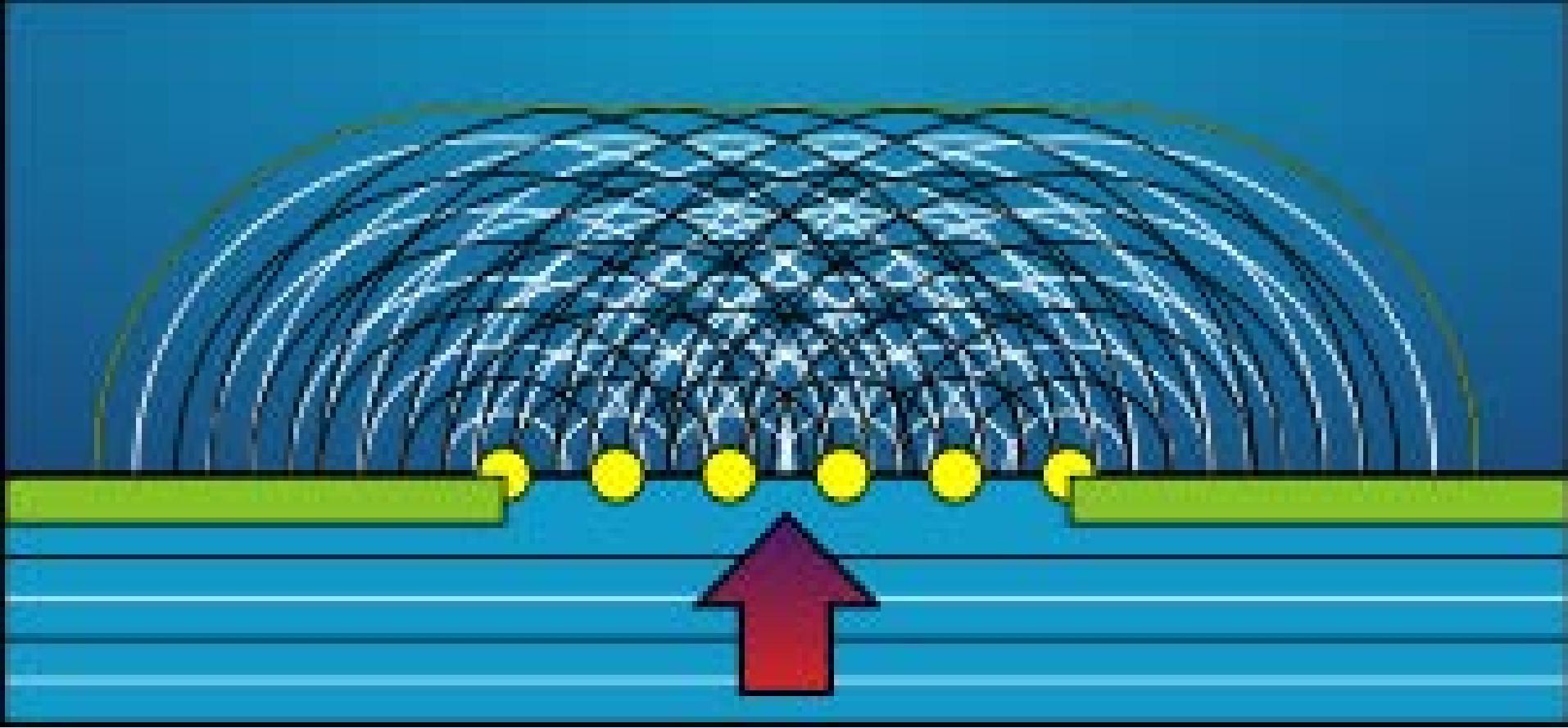
图 1.1 说明惠更斯原理

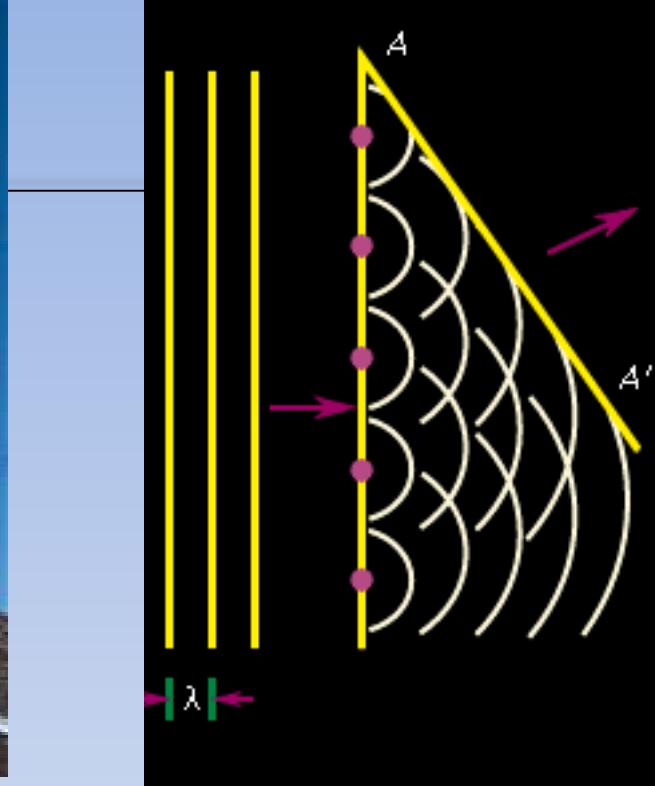
图 1.2 非均匀介质中光线弯曲



水波实验

图 1.4 显示次波源的存在





4、惠更斯原理

- 惠更斯原理导出折射定律 (*)

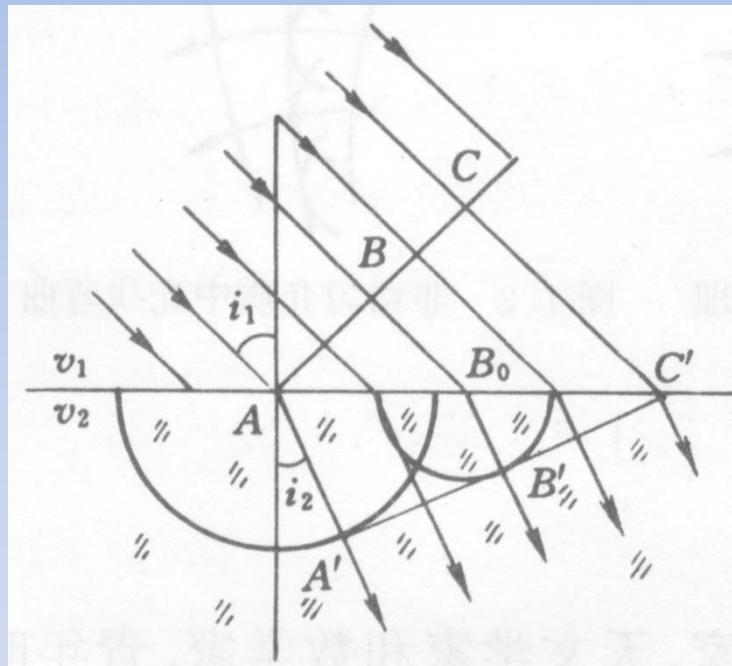


图 1.5 导出折射定律

$$\sin i_1 = \frac{\overline{CC'}}{\overline{AC'}}, \quad \sin i_2 = \frac{\rho_A}{\overline{AC'}} = \frac{v_2}{v_1} \frac{\overline{CC'}}{\overline{AC'}}$$

入射角为 i_1 的平面波，波前为 **ABC**

$C \rightarrow C'$ 的时间： $\Delta t = \frac{\overline{CC'}}{v_1}$

A' 点： $\rho_A = v_2 \cdot \Delta t = \frac{v_2}{v_1} \overline{CC'}$

由 **C'** 点向圆 **A** 作切线 **C'A'**

次波面的公切面：**A'B'C'**

次波中心和切点的连线 **AA'**, **BB'** 为折射光传播方向，折射角 i_2

折射定律

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2} = \text{const}$$

4、惠更斯原理

- 折射定律与光速

折射定律

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2} = const$$

光粒子说：光粒子在界面受到物质的吸引而进入物质，
因此其速度比真空光速要快。

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_2}{v_1} = const$$

1850年傅科和斐索采用旋转棱镜法，比较了光在空气和水中的速度，证明
空气中的光速大于水中的光速，再次确认了光的波动理论的正确性。

4、惠更斯原理

- 惠更斯原理的不足 (*)

1. 不能回答光振幅或光强的传播问题
2. 不能回答光位相的传播问题



惠更斯—菲涅尔原理
光场衍射理论的诞生

惠更斯原理的精华

次波源

4、惠更斯原理

- 折射率与光的传播

折射率 关于介质材料重要光学参数，源于折射率定律：

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{12} = \frac{n_2}{n_1}$$

真空 $n=1$, 玻璃 $n=1.5$, 空气 $n=1.000292$

色散

同一种介质对于不同的波长具有不同的折射率，称为色散。

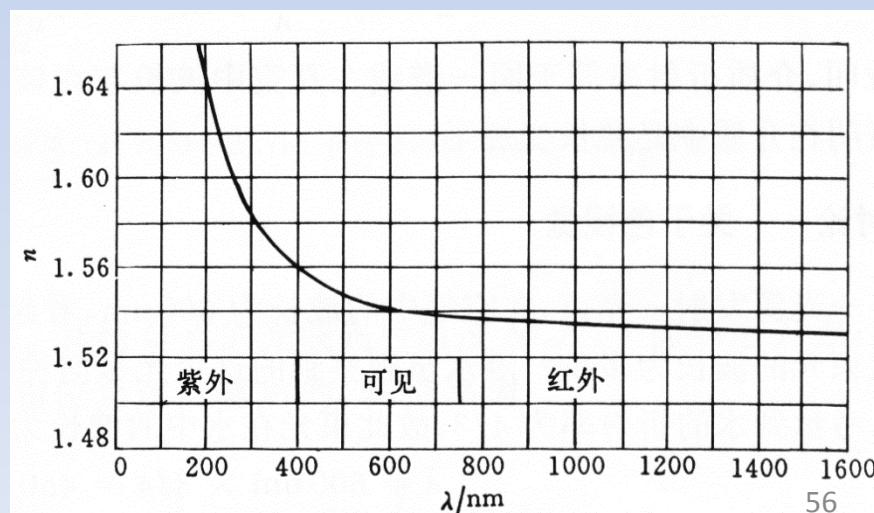


图 1.9 石英的色散曲线

4、惠更斯原理

- 折射率与光速

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

真空的折射率为1，光速为c

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{或} \quad v = \frac{c}{n}$$

例：水中光的速度

$$v = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \div 1.333 = 2.25 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$n(\lambda) \Rightarrow v(\lambda)$$

4、惠更斯原理

- 折射率与波长

波速: $v = f\lambda$ 波速的普适定义

真空中光速: $c = f_0\lambda_0$, 介质中光速: $v = f\lambda$

$$n = \frac{f_0\lambda_0}{f\lambda}$$

在线性光学介质中: $f = f_0$ 所以:

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad \text{或} \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

光波在介质中的波长等于真空中波长除以介质折射率。

4、惠更斯原理

- 折射率与光程

光程: 光线路径的几何长度与所经过的介质折射率的乘积

$$Q \rightarrow P \left\{ \begin{array}{l} \text{同一种均匀介质 } L(QP) = nl \\ \text{透镜组 } L(QP) = n_1 l_1 + n_2 l_2 + \dots = \sum_i n_i l_i \\ \text{变折射率介质 } L(QP) = \int_Q^P n(r) ds \end{array} \right.$$

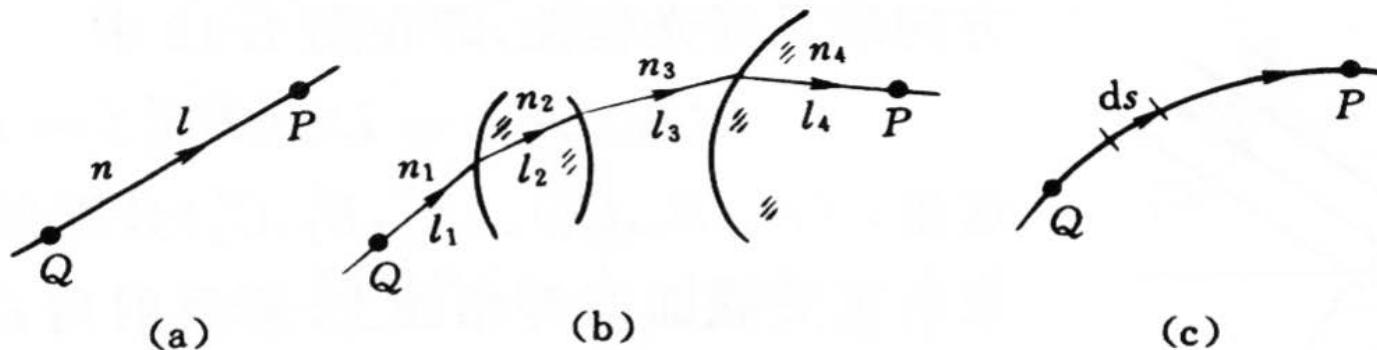


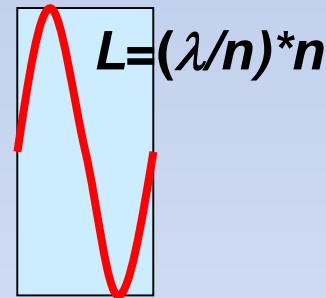
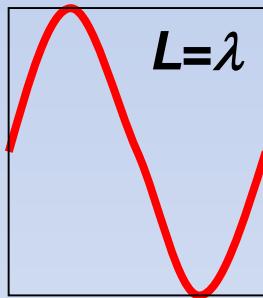
图 1.10 各种场合下的光程计算. (a) 均匀介质, (b) 介质分区均匀, (c) 变折射率场合⁵⁹

4、惠更斯原理

光程概念

光线路径的几何长度与所经过的介质折射率的乘积

$$L(QP) = nl$$

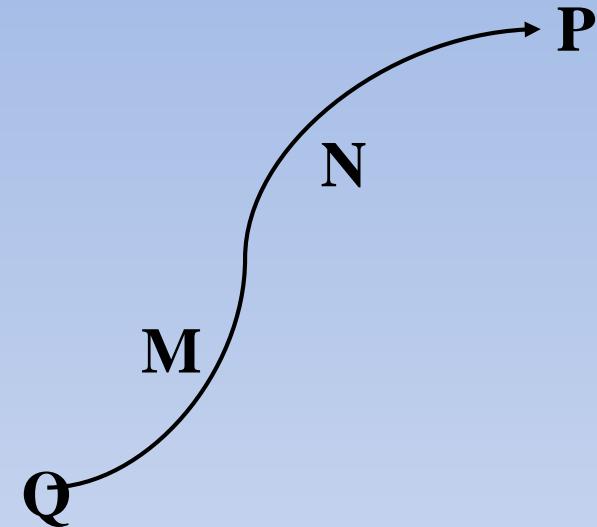


4、惠更斯原理

- 光程与时差

Q→P的传播时间:

$$\Delta t = t_P - t_Q = \sum_i \Delta t_i = \sum_i \frac{l_i}{v_i}$$



介质中光速用真空光速和折射率代替:

$$\Delta t = \frac{1}{c} \sum_i n_i l_i = \frac{1}{c} L(QP) \quad \text{或} \quad L(QP) = c \Delta t$$

光在空间中传播，保持不变的是振荡频率，因此，如果光在不同介质中传播距离不同，只要时间相同，他们就相对于零点振荡了相同多周期，是同位相的。因此光程这个物理量在波动光学中实际表达的是光学震荡的次数。等于振荡次数*波长

4、惠更斯原理

- 光程与相位差

$Q \rightarrow M \rightarrow N \rightarrow \dots \rightarrow P$, 相位逐点落后

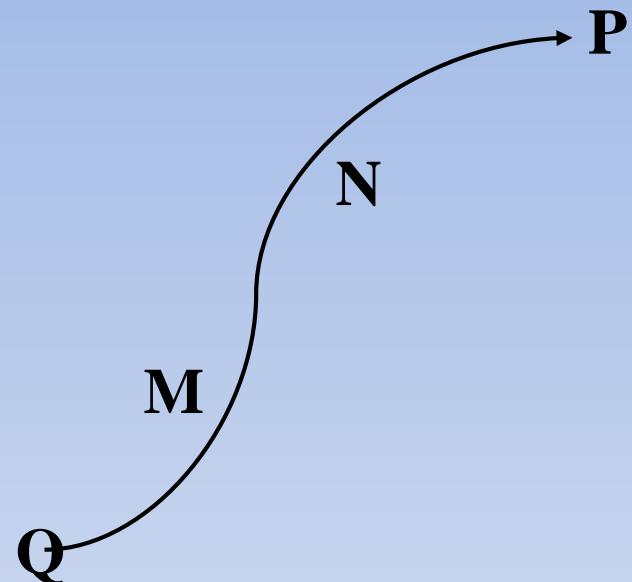
$$\phi(Q) - \phi(P)$$

$$= -\left(\frac{2\pi}{\lambda_1} l_1 + \frac{2\pi}{\lambda_2} l_2 + \dots\right)$$

$$= -\sum_i \frac{2\pi}{\lambda_i} l_i$$

即：

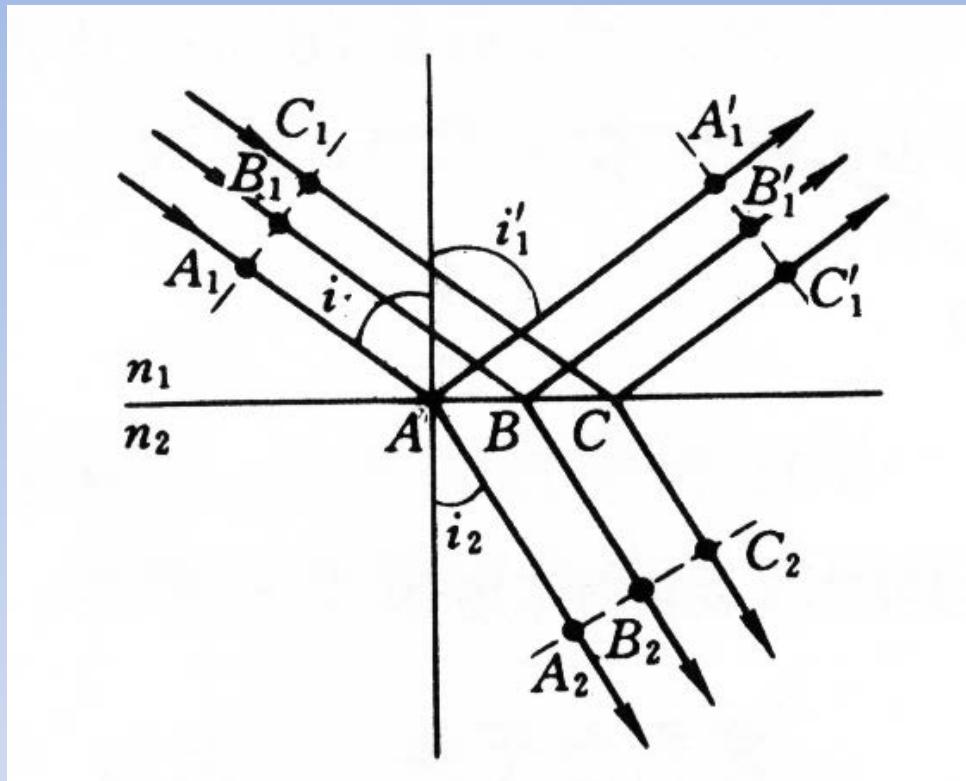
$$\phi(Q) - \phi(P) = -\frac{2\pi}{\lambda_0} \sum_i n_i l_i = -\frac{2\pi}{\lambda_0} L(QP) = -\frac{2\pi}{\lambda_0} c \Delta t$$



光程的另一角度认识

光经历Q和P两点的光程=传播时间×真空光速。
或者=真空波长×振荡次数

思考题：反射光束、折射光束的等光程性



反射光束： $L(A_1AA'_1)=L(B_1BB'_1)=L(C_1CC'_1)$

折射光束： $L(A_1AA_2)=L(B_1BB_2)=L(C_1CC_2)$

反过来，等光程性可以推出折射定律和反射定律

5、费马原理

光程的概念对几何光学的重要意义体现在费马原理中。几何光学的基础是前面所提到三个实验定律，费马却用光程的概念高度概括地把它们归结成一个统一的原理。

- *原理表述
- *数学表达
- *导出反射定律、折射定律
- *费马原理与成像
- *费马原理的评述

5、费马原理



Pierre de Fermat 1601-1665

法国著名数学家
被誉为“业余数学家之王”

费马生性内向，谦抑好静，不善推销自己，不善展示自我。因此他生前极少发表自己的论著，连一部完整的著作也没有出版。他发表的一些文章，也总是隐姓埋名。《数学论集》还是费马去世后由其长子将其笔记、批注及书信整理成书而出版的。

对解析几何的贡献

费马独立于勒奈·笛卡儿发现了解析几何的基本原理。并于1630年用拉丁文撰写了仅有八页的论文《平面与立体轨迹引论》。

对微积分的贡献

费马建立了求切线、求极大值和极小值以及定积分方法，对微积分做出了重大贡献。

对数论的贡献

费马在数论领域中的成果是巨大的，其中主要有：

费马大定理： $n > 2$ 是整数，则方程 $x^n + y^n = z^n$ 没有满足 $xyz \neq 0$ 的整数解。这个是不定方程，它已经由英国数学家怀尔斯证明了(1995年)，证明的过程是相当艰深的！

费马小定理： $a^p - a \equiv 0 \pmod{p}$ ，其中 p 是一个素数， a 是正整数，它的证明比较简单。事实上它是 Euler 定理的一个特殊情况，Euler 定理是说： $a^{\phi(n)} - 1 \equiv 0 \pmod{n}$, a, n 都是正整数， $\phi(n)$ 是 Euler 函数，表示和 n 互素的小于 n 的正整数的个数

对光学的贡献

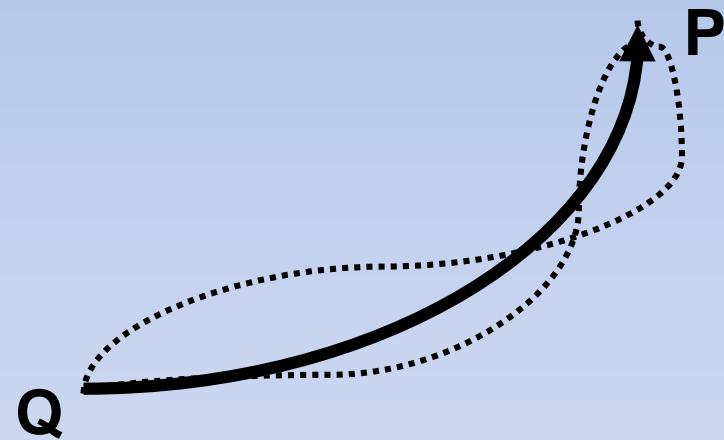
费马在光学中突出的贡献是提出最小作用原理，也叫最短时间作用原理。

5、费马原理

- 表述

费马原理：光线沿光程为平稳值的路径而传播。

$$L(QP) = \int_Q^P n(r)ds \rightarrow \text{平稳值}$$



平稳值的三种基本的含义：

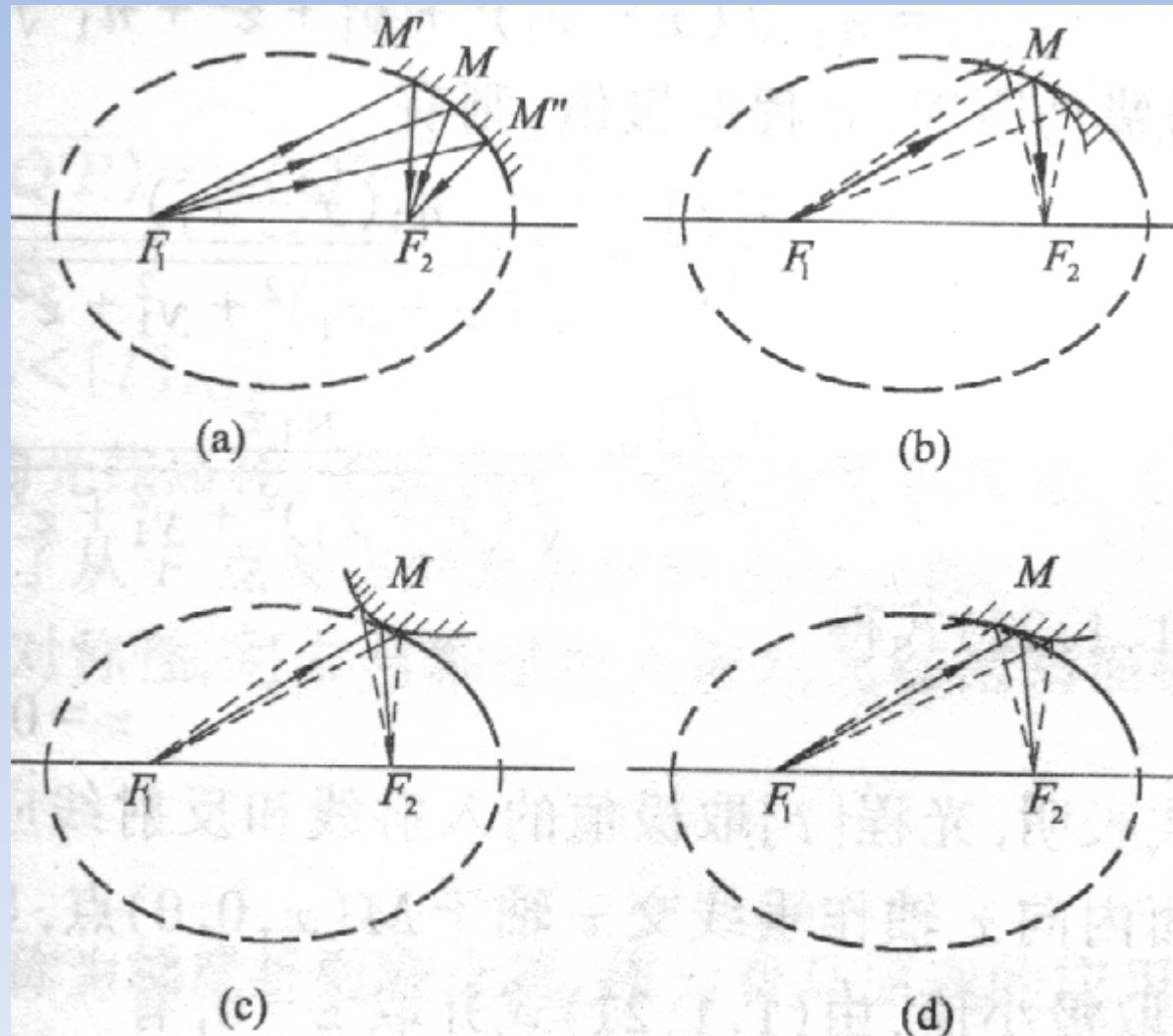
极小值 → 常见情况

常 数 → 成像系统的物像关系

极大值 → 个别现象

5、费马原理

- 费马定理的几个典型的简单实例





5、费马原理

- 费马原理的数学表述

路径积分:
$$L(QP) = \int_Q^P n(r) ds = L(l)$$

是路径 (l) 的函数, 平稳值要求变分为零

$$\delta \int_Q^P n(r) ds = 0, \text{ 或 } \delta L(l) = 0$$

5、费马原理

- 费马原理与三个实验定律 (*)

A) 光在均匀介质中直线传播

B) 反射定律

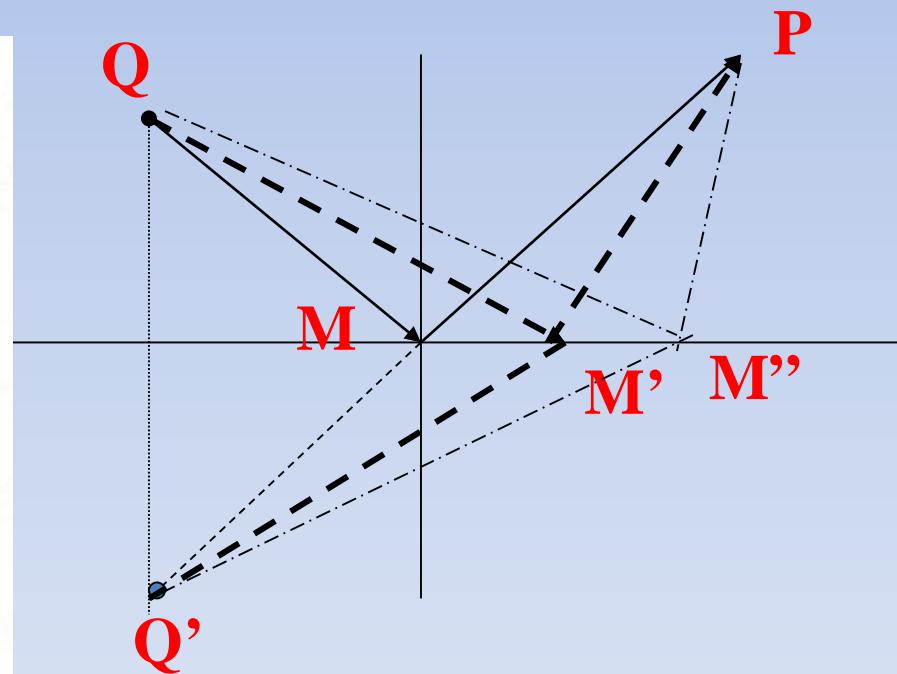
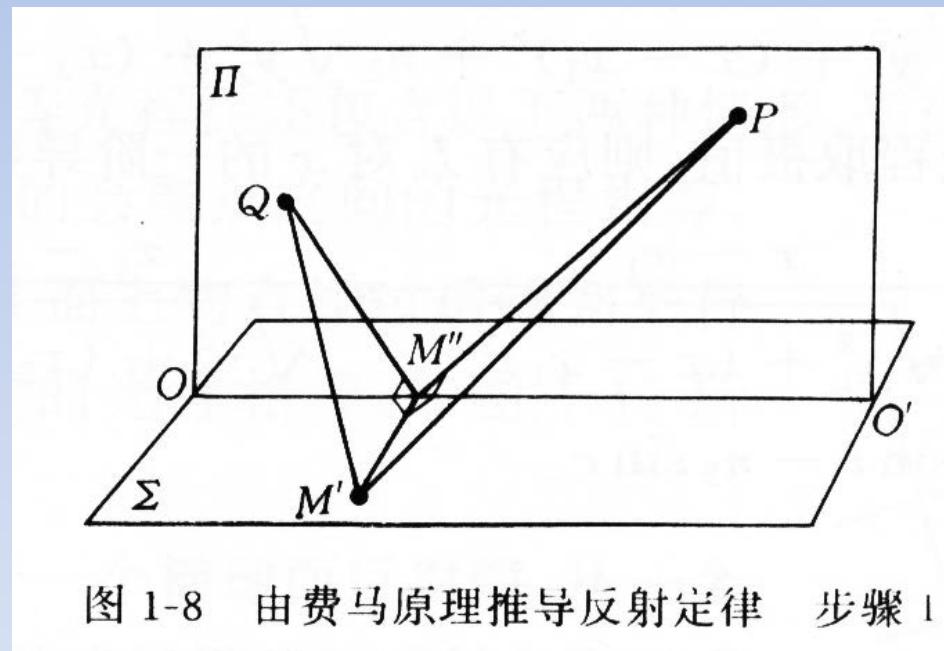


图 1-8 由费马原理推导反射定律 步骤 1

要点：反射光线在入射面，反射角等于入射角，光程最短。

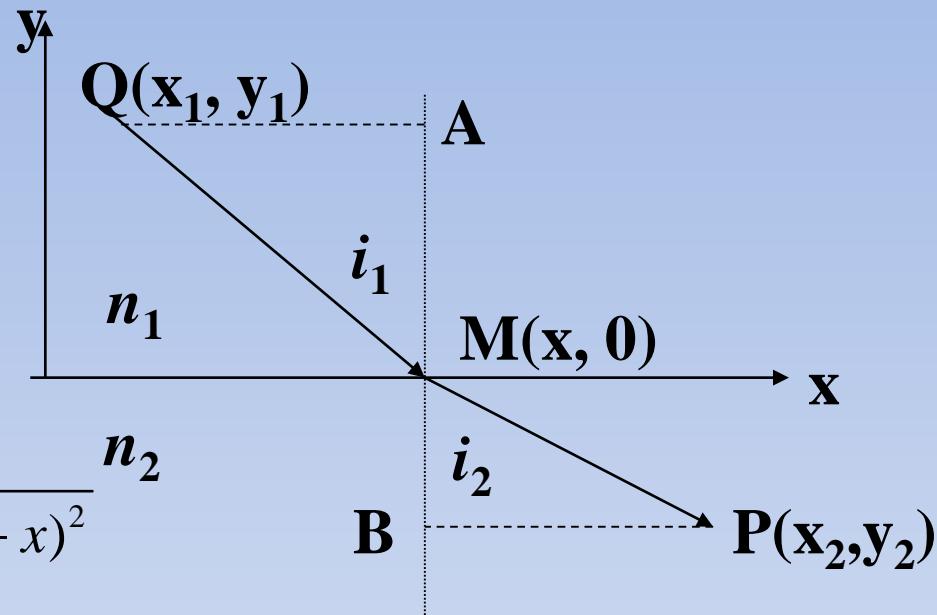
5、费马原理

- 费马原理与三个实验定律

C) 折射定律

$Q \rightarrow M \rightarrow P$ 的光程:

$$\begin{aligned} L &= n_1 \overline{QM} + n_2 \overline{MP} \\ &= n_1 \sqrt{y_1^2 + (x - x_1)^2} + n_2 \sqrt{y_2^2 + (x_2 - x)^2} \end{aligned}$$



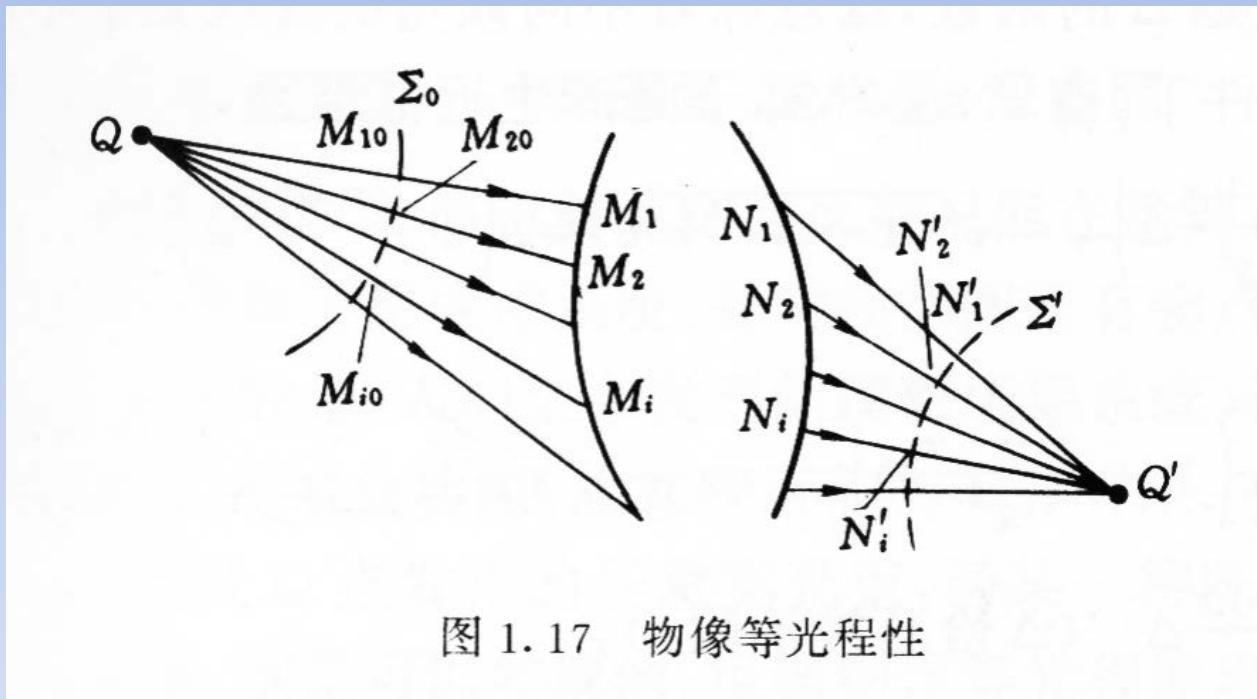
根据费马原理, L 对 x 的一阶导数为零;

$$\frac{dL}{dx} = n_1 \frac{x - x_1}{\sqrt{y_1^2 + (x - x_1)^2}} - n_2 \frac{x_2 - x}{\sqrt{y_2^2 + (x_2 - x)^2}} = 0$$

$$\frac{dL}{dx} = n_1 \frac{\overline{QA}}{\overline{QM}} - n_2 \frac{\overline{PB}}{\overline{PM}} = n_1 \sin i_1 - n_2 \sin i_2 = 0 \quad \rightarrow \quad n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

5、费马原理

- 费马原理与成像 (*)



$$L(QM_1N_1Q') = L(QM_2N_2Q') = \cdots = L(QM_iN_iQ')$$

5、费马原理

• 费马原理与成像

$$\begin{aligned} & L(QM_1N_1) - L(N_1Q') \\ & = L(QM_2N_2) - L(N_2Q') \\ & = \dots \\ & = L(QM_iN_i) - L(N_iQ') \end{aligned}$$

其中： $L(N_iQ') = n' \cdot \overline{N_iQ'}$

等光程与成像：

严格等光程 \Leftrightarrow 严格成像
近似等光程 \Leftrightarrow 近似成像，
非等光程 \Leftrightarrow 不成像，

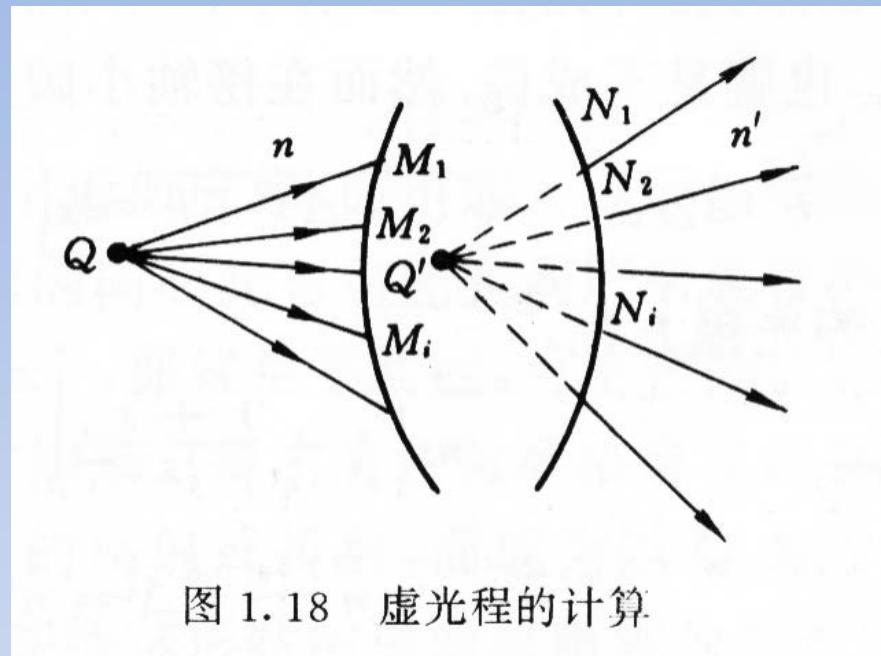


图 1.18 虚光程的计算

5、费马原理

- 费马原理应用例题1--导出球面折射傍轴成像 (*)
等光程:

$$L(QMQ') = L(QOQ')$$

$$\begin{aligned} L(QMQ') &= n\overline{QM} + n'\overline{MQ'} \\ &= n\sqrt{(s+\Delta)^2 + h^2} + n'\sqrt{(x-\Delta)^2 + h^2} \end{aligned}$$

$$L(QOQ') = ns + n'x$$

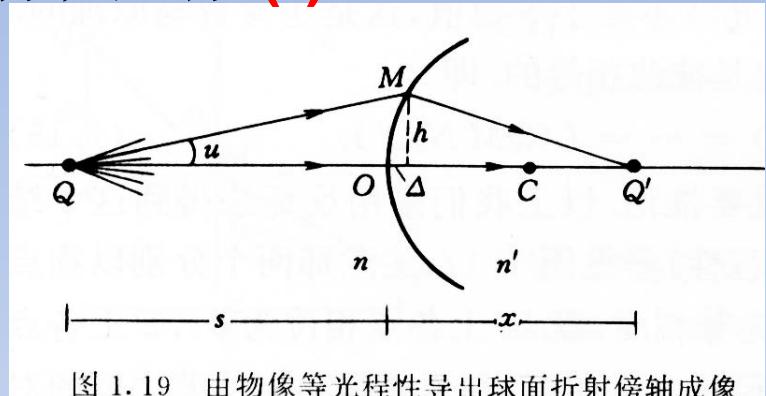


图 1.19 由物像等光程性导出球面折射傍轴成像

傍轴条件: $\Delta \ll s, r, x$

$$h^2 \approx 2r\Delta, \quad \sqrt{(s+\Delta)^2 + h^2} \approx s\left(1 + \frac{r+s}{s^2}\Delta\right), \quad \sqrt{(x-\Delta)^2 + h^2} \approx x\left(1 + \frac{x-r}{x^2}\Delta\right)$$

5、费马原理

- 费马原理应用例题1--导出球面折射傍轴成像

代入等光程: $ns\left(1 + \frac{r+s}{s^2}\Delta\right) + n'x\left(1 + \frac{x-r}{x^2}\Delta\right) = ns + n'x$

$$n\frac{r+s}{s}\Delta = n'\frac{r-x}{x}\Delta \Rightarrow n\frac{r+s}{s} = n'\frac{r-x}{x} \quad \rightarrow \quad \frac{n}{s} + \frac{n'}{x} = \frac{n'-n}{r}$$

$s \rightarrow \infty$, 后焦距 f'

$$f' = \frac{n'}{n'-n} r$$

$x \rightarrow \infty$, 前焦距 f

$$f = \frac{n}{n'-n} r$$

值得指出的两点:

- 单球面傍轴成像公式的获得没有使用折射定律, 结果和利用折射定律所得结果一致。
- 傍轴条件: $\Delta \ll s, r, x$

5、费马原理

• 费马原理应用例题2---双曲透镜聚焦平行光 (*)

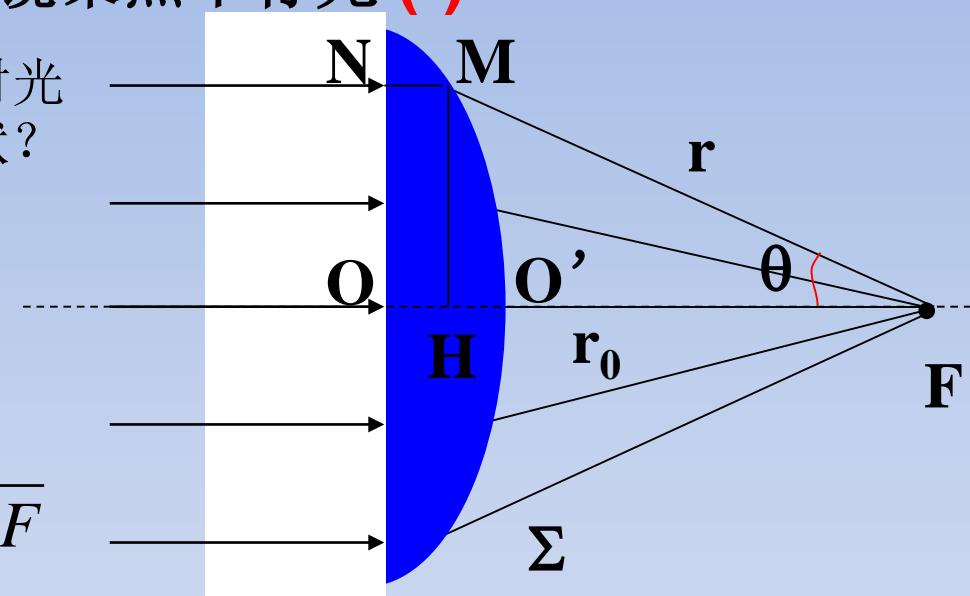
一宽平行光入射于一透镜，要求其透射光线严格聚焦于F点，试问 Σ 应该是何形状？

严格成像 \Leftrightarrow 严格等光程

$$L(NMF) = L(OO'F)$$

$$n \cdot \overline{NM} + \overline{MF} = n \cdot (\overline{OH} + \overline{HO'}) + \overline{O'F}$$

$$\overline{MF} = n \cdot \overline{HO'} + \overline{O'F} \quad \longrightarrow r(\theta) = n \cdot [r(\theta) \cdot \cos \theta - r_0] + r_0$$

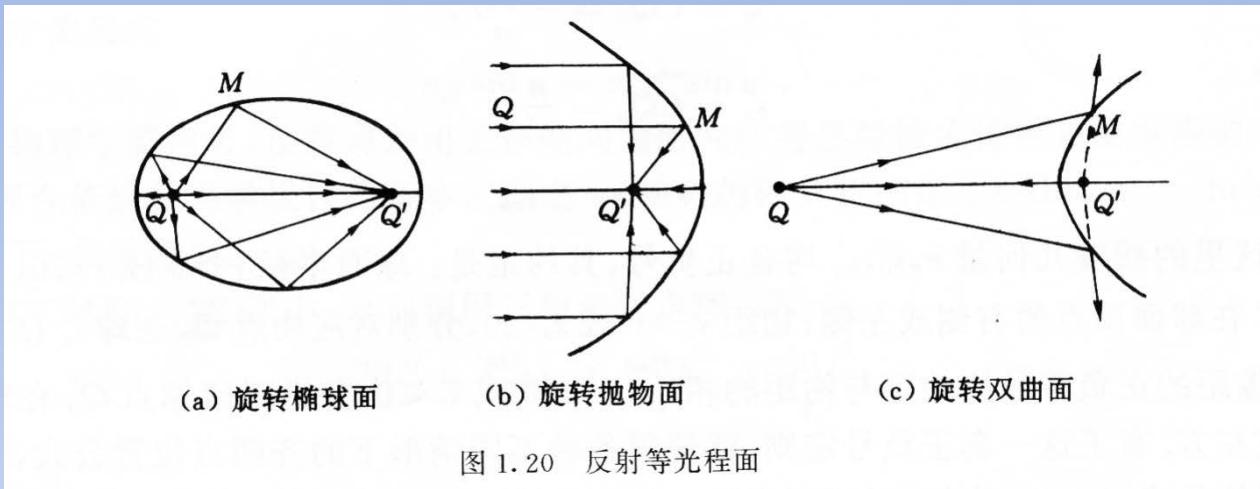


$$\rightarrow r(\theta) = \frac{(1-n)r_0}{1-n\cos\theta} = \frac{n\left(\frac{1}{n}-1\right)r_0}{1-n\cos\theta}$$

二次曲线
曲面是旋转双曲面

5、费马原理

- 评述费马原理 (*)



费马原理的使用限度：

费马原理是几何光学的理论基础，几何光学使用限度也是费马原理的使用限度。

费马原理在物理学发展史上的贡献：

开创了以“路径积分，变分原理”表述物理规律的新思维方式。
(理论力学—最小作用原理或哈密顿原理和费马原理有相同的数学表达式。)

为什么有费马原理？

- 光是没有意识的，也不能感知，光是怎么知道那条路最快（“平稳”）？
- 光又没有走过这条路，甚至不知道目的地在哪里，光怎么走就走了最短路径了？
- 就好比一个瞎子，自动选择一条最快的路走过去一样，是不是有点荒谬？

小结：惠更斯原理，费马原理

作业：1.1, 1.2, 1.3, 1.6

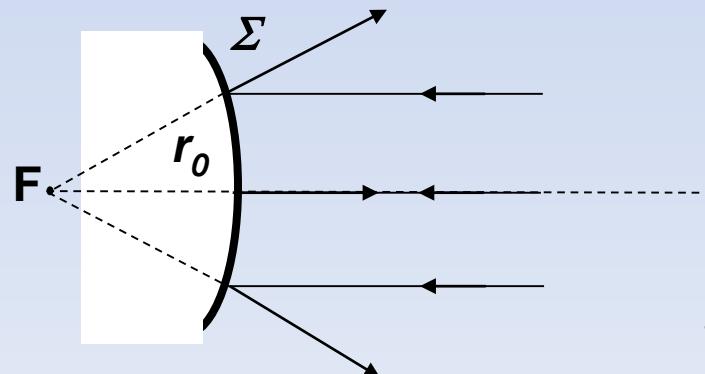
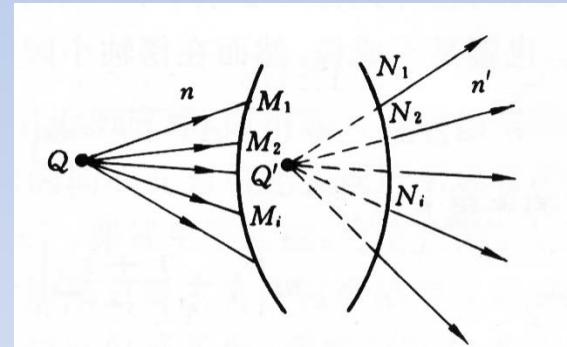
补充题：

(1) 证明：

$$\begin{aligned} L(QM_1N_1) - L(N_1Q') &= L(QM_2N_2) - L(N_2Q') \\ &= \dots \\ &= L(QM_iN_i) - L(N_iQ') \end{aligned}$$

其中： $L(N_iQ') = n' \cdot \overline{N_iQ'}$

(2) 如图所示，一宽平行光入射于一凸面镜，要求其反射光的延长线严格聚焦于F点，试问凸面镜的反射面 Σ 应该是何形状？



一个焦点反射向另一个焦点的光线，显然只有在切点反射的光线是遵从反射角等于入射角的，是实际可能的光线，而其他经该反射面反射的光线的光程与之比较，这条光线的光程最长。

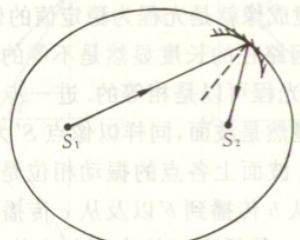


图 1-13 光程为极大值的例子

• 费马原理的启迪

费马原理对于物理学的发展曾经起过重要的推动力作用，它表明关于光的传播规律还存在另外一种表述形式，它摆脱了光传播有如反射、折射、入射面、入射角、反射角、折射角等的一些细节，而是指明实际光线是各种可能的光线中满足某个条件，即光程取极值的那一条。由于它比较抽象和含蓄，因而概括的面也就更广阔，这一点曾启发物理学家探索物理规律的其他形式，于是找到了被称之为最小作用原理（或哈密顿变分原理），它可表述为系统的各种相邻的经历中，真实经历使作用量取极值。这种表述显然也是比较抽象而含蓄的，因而概括的面也比较广阔，不仅适用于机械运动场合，可以导出关于质点运动的牛顿第二定律；而且也适用于电磁场情形，可以导出电磁场的麦克斯韦方程组；甚至还可适用于其他场合，导出其他领域的基本定律。它真可谓综合整个物理学的真正的基本原理，物理学家们利用它来探索未知领域的基本定律。

习 题

1.1 频率为 $4.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 的红光在真空中的波长是多少？在折射率为 1.5 的玻璃中的速率是多大？

1.2 求频率为 $4.9 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 的光在水中的波长，水的折射率

$n=1.33$ 。光在水中传播了距离 $6 \mu\text{m}$ 后，相位滞后了多少？

1.3 对眼睛最敏感的光波 ($\lambda=5500 \text{ \AA}$) 穿过厚度为 0.11 mm 的空气层时，在空气层厚度内包含多少个完整波形？同样的光波穿过同样厚度的熔凝石英片时，在石英片厚度范围内大约包含多少个完整的波形？熔凝石英的折射率 $n=1.46$ 。

1.4 一平面波在坐标原点的振动为 $U=A \cos \omega t$ ，波的传播方向与 x, y, z 轴的夹角分别为 $\alpha=60^\circ, \beta=90^\circ, \gamma=30^\circ$ ，空间一点 P 的坐标为 $(10\lambda, 3\lambda, 6\sqrt{3}\lambda)$ ， λ 为平面波的波长。问 P 点的振动相位比坐标原点落后多少？

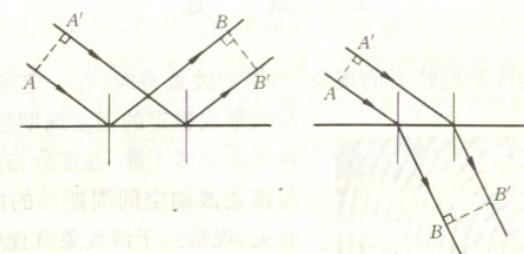
1.5 已知一平面波的波动表示式为

$$U = A \cos \left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\sqrt{3}}{2}x + \frac{1}{2}z \right) \right],$$

(1) 求该平面波传播方向与 x, y, z 轴的夹角；

(2) 空间一点 $P(2\sqrt{3}\lambda, 5\lambda, 9\lambda)$ 的振动相位比原点落后多少？当原点振动的瞬时值是最大时， P 点的瞬时值等于多少？

1.6 试分别证明一束平行光在反射或折射时， AA' 到 BB' 之间各光线都是等光程的。



习题 1.6