2023 本科物理课程

# 光学

主讲：何海燕

## 普通物理

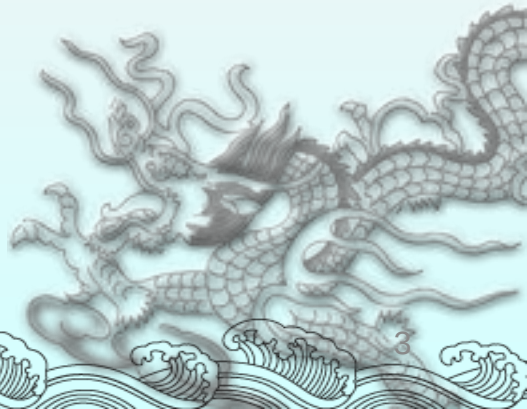
- 力学
- 热学
- 电磁学
- 光学
- 原子物理

## 理论物理

- 理论力学
- 热力学
- 统计物理学
- 电动力学
- 量子力学
- 量子光学
- 量子电动力学
- …

# 联系方式

- 主讲教师：何海燕 (物理系凝聚态物理)
- 办公室：物质楼C605
- 电邮：hyhe@ustc.edu.cn
- 助教：沈俊杰
- 电邮：jun233@mail.ustc.edu.cn
- 电话：15967580848
- 助教：袁哲恒
- 电邮：yuanzheheng@sina.com
- 电话：18069059982



授课方式：讲授为主 ，结合适量的课堂讨论

课程要求：课前预习； 良好的课堂秩序；认真听课

按时按量独立完成作业

答疑：固定答疑时间，也可多种方式随时联系

考试方式：闭卷考试

成绩计算：平时成绩 （作业、平时表现）

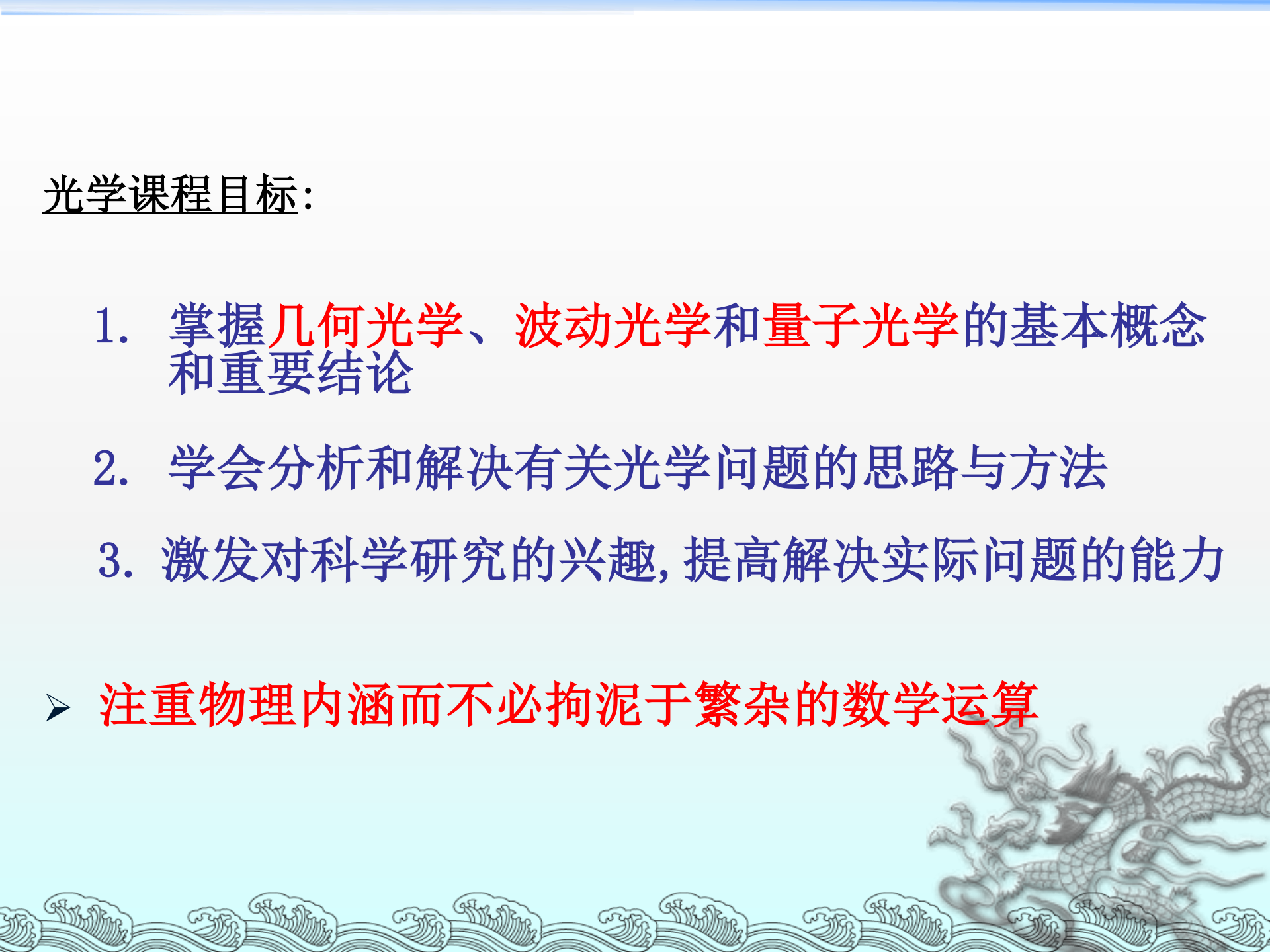
考试成绩

**课堂测试若干次：加分**

光学课程目标：

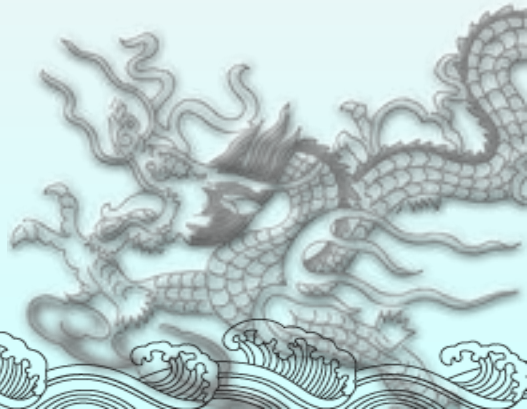
1. 掌握几何光学、波动光学和量子光学的基本概念和重要结论
2. 学会分析和解决有关光学问题的思路与方法
3. 激发对科学研究的兴趣，提高解决实际问题的能力

- 注重物理内涵而不必拘泥于繁杂的数学运算



# 教学内容

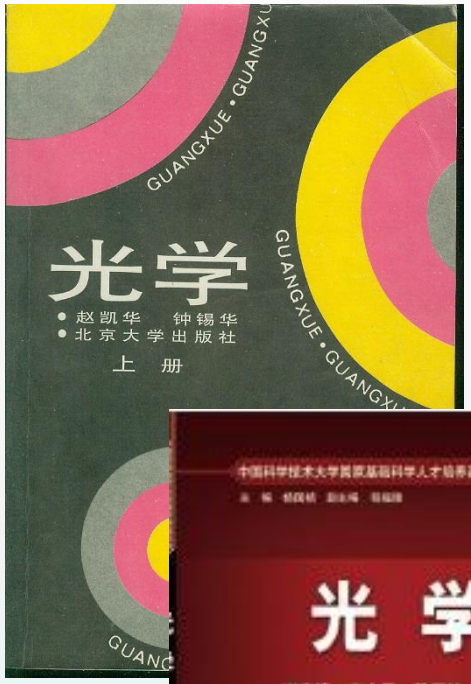
- 绪论 光是什么
- CH1 光的几何描述及成像
- CH2 光的电磁描述及叠加
- CH3 光的干涉
- CH4 光的衍射
- CH5 光的双折射
- CH7 光的量子性

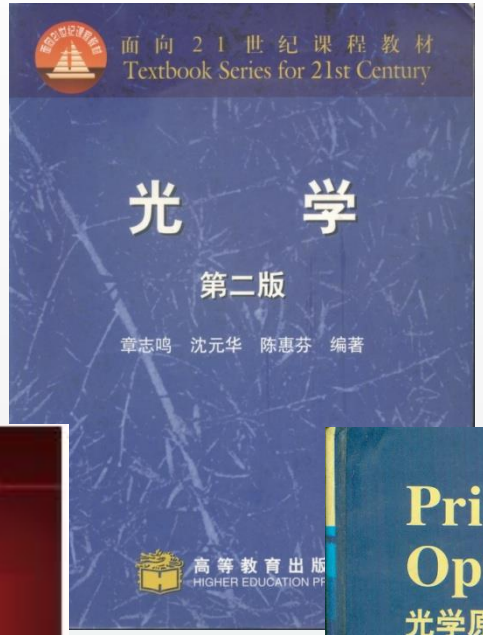


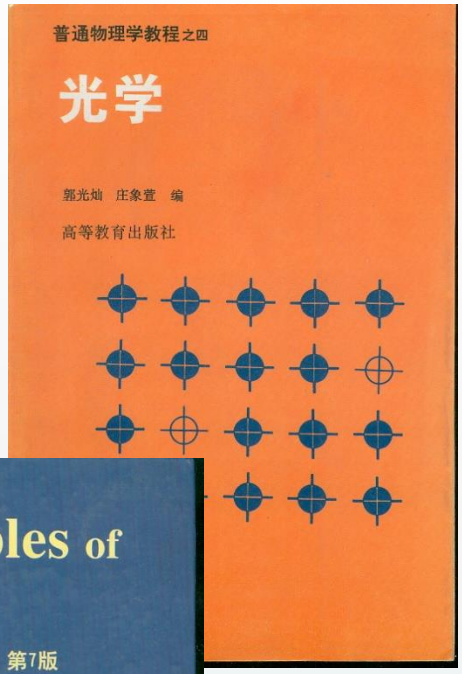
# 《光学》教材

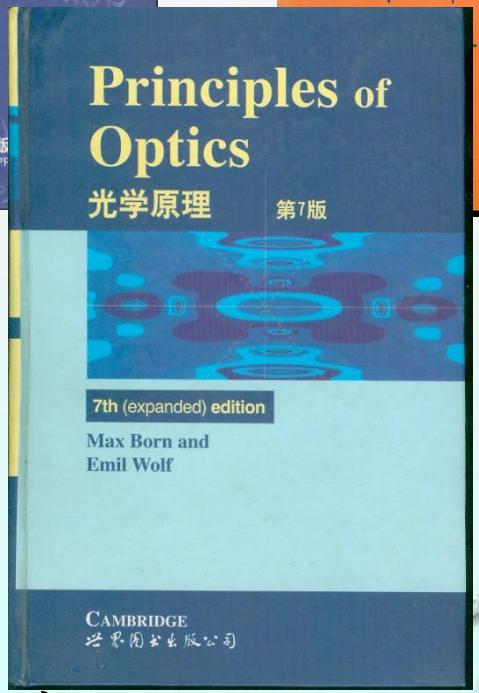
中国科学技术大学
交叉学科基础物理教程
主编 侯建国 副主编 程福臻 叶邦角
光 学
王 沛 鲁拥华 编著
中国科学技术大学出版社

# 《光学》参考书





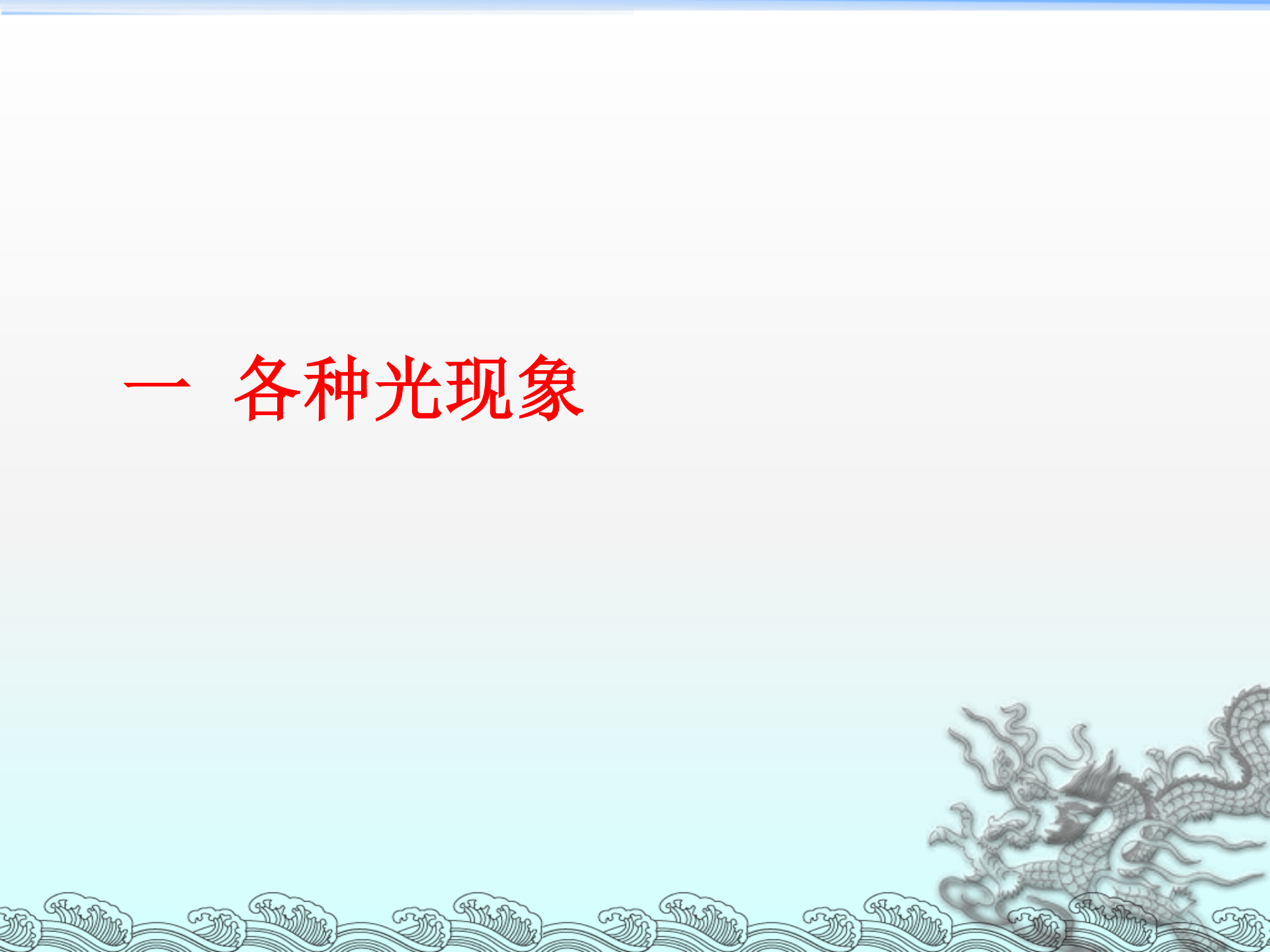

赵凯华 章志鸣 郭光灿 崔宏滨

Born & Wolf 〈Principles of Optics〉

# 绪　　论

- 各种光现象
- 光是什么
- 光学发展简史
- 光的本性
- 光学的研究范围

# 一　各种光现象



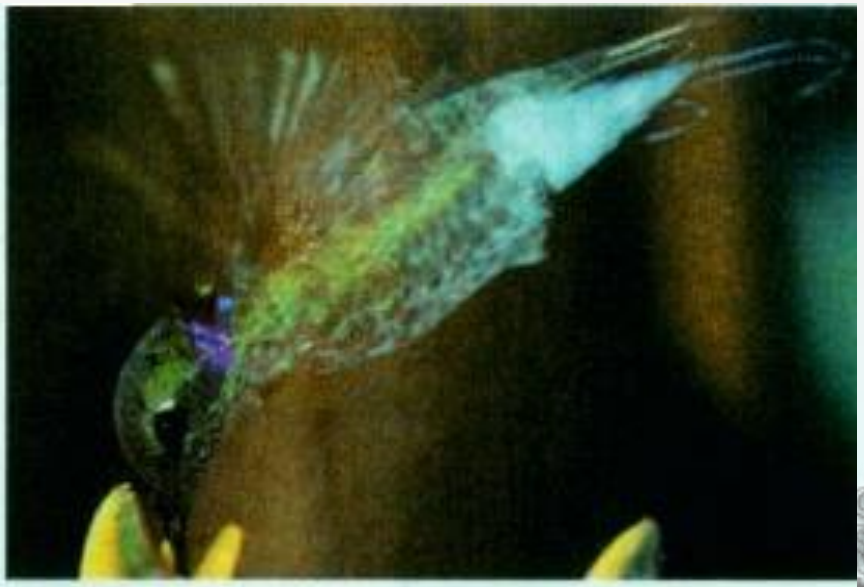
典型光学现象: 彩虹

日晕

海市蜃楼

# 自然界光干涉现象

## 水面上的油膜映射的美丽彩色条纹

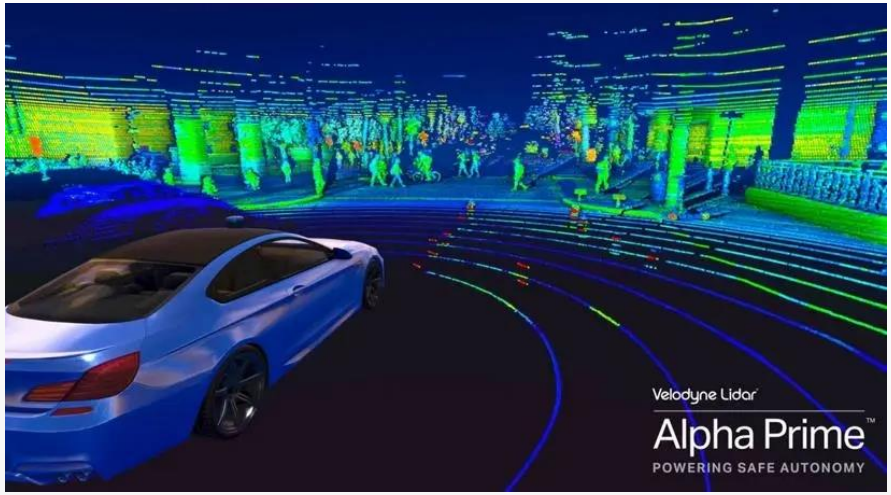


蜂鸟颈部的羽毛上有一层漂亮的彩色光泽

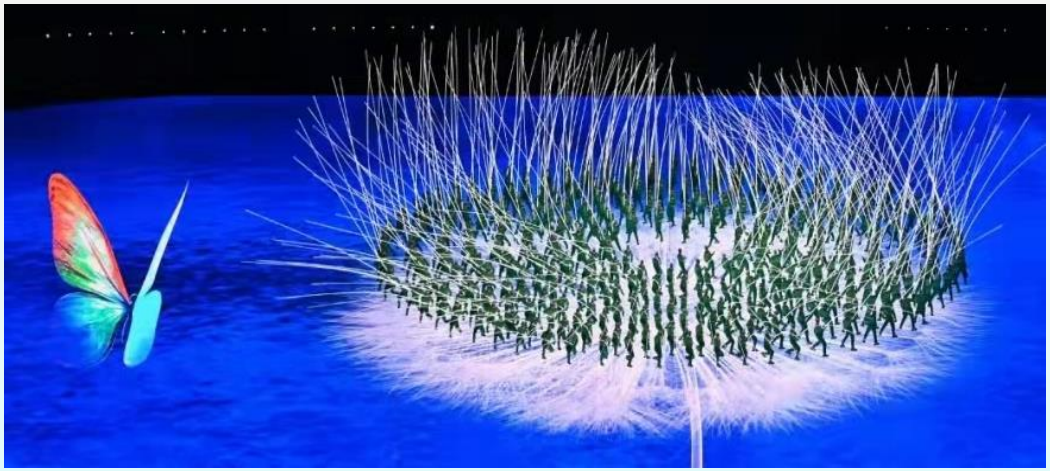
# 身临其境的3D电影

# 现代科技与光的完美结合

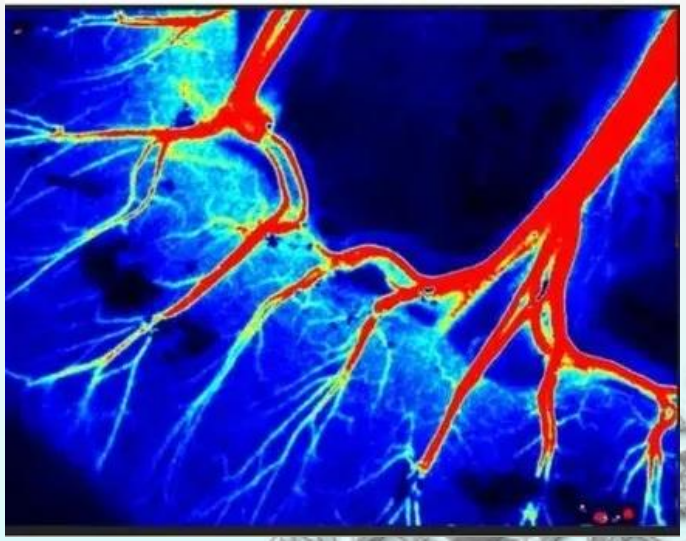
水幕电影




无人驾驶：激光雷达传感器



人工智能+光



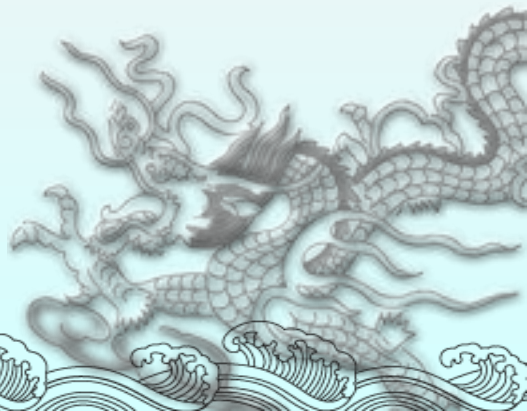
高分辨激光血流成像

# 二 光是什么

- 对光的认识仍**不全面**
- 学习的内容仅是**现阶段对光的认识**
- 爱因斯坦：我花了50年也没想清楚光量子是什么
- 研究光的本质，必须从其**现象**开始
- 光的现象则表现在**光的产生**、**光的传播**和**光与物质的相互作用中**
- 光在与不同物质的相互作用中，表现出不同的性质
- 不同的时期对光的认识不同
- 认识光是一个漫长的过程，还将继续下去

# 三 光学发展简史

- 萌芽时期（公元前500-公元1500）
- 几何光学时期 （1500-1800）
- 波动光学时期（1800-1900）
- 量子光学时期（1900-1950）
- 现代光学时期 （1950-）

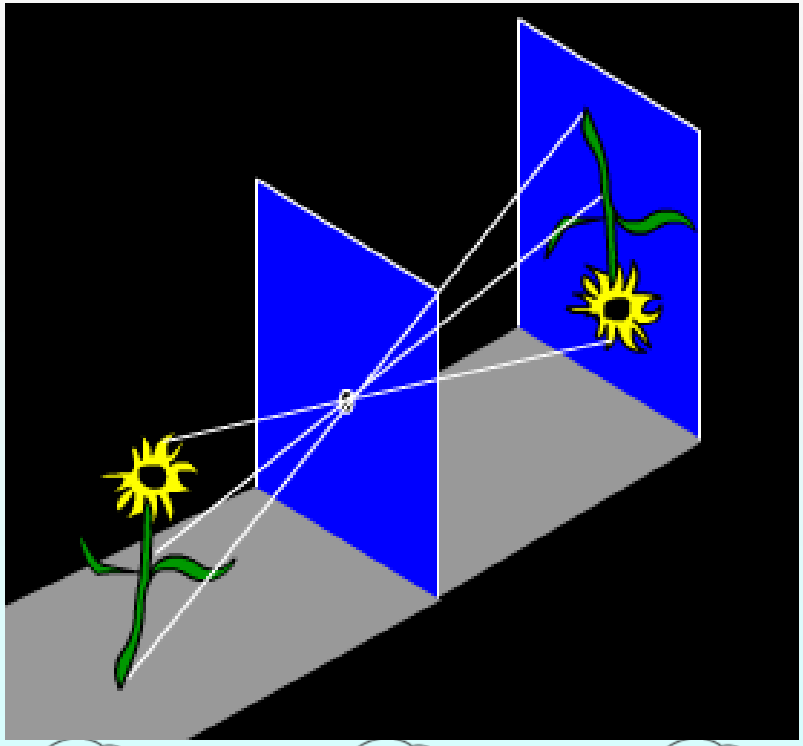


公元前4世纪，中国春秋战国时期哲学家墨子：

➢最早发现和研究“小孔成像”

《墨经》光八条

《墨经》的八条光学资料”
—世界光学史上最早的光学记录



“景，光之人，煦若射；下者之人也高，高者之人也下。足蔽下光，故成景于上，首蔽上光，故成景于下。”

……

公元前3世纪,古希腊数学家欧几里德（几何之父）在他的《光学》著作里总结了到他那时为止已有的关于光现象的知识和猜测。

欧几里得(公元前330年—前275年）

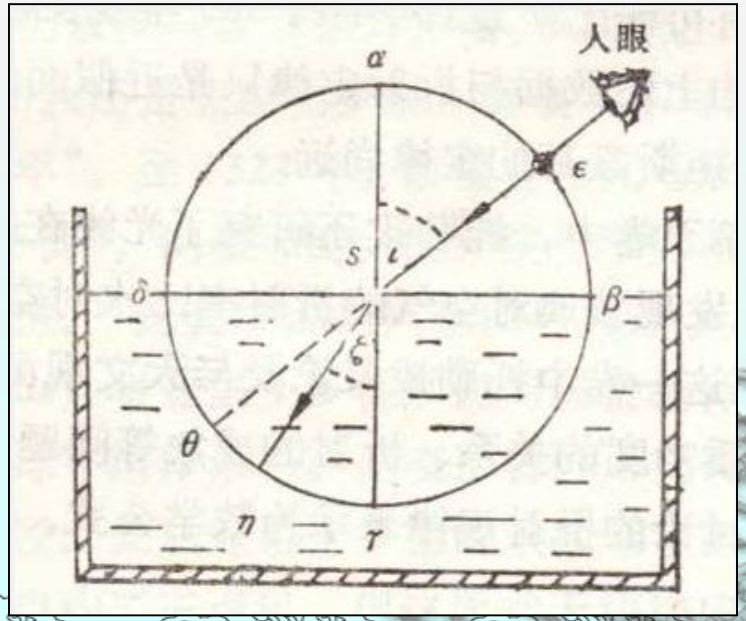
光的直线传播定律和光的反射定律：

- 在眼睛和被观察物体之间行进的光线是直线
- 当光从一个平面反射时,入射角和反射角相等。

公元2世纪,古希腊天文学家、地理学家和光学家托勒密最早做了光的折射实验，在他的重要著作《光学》中：

- ✓提出和说明了各种基本原理，依靠经验发现了折射规律，
- ✓绘出了光线以各种入射角从光疏媒介进入水的折射表
- ✓但没有得出精确的折射定律。

托勒密
（公元90～168）



公元11世纪，我国北宋政治家、科学家沈括在《梦溪笔谈》中，论述了凹面镜、凸面镜成像的规律，指出虹的成因。

沈括（1031~1095）

公元13世纪，英国唯物主义思想家、伟大的科学家罗吉尔·培根对光学的贡献：

- 研究了凸透镜的放大效果以及光的反射和折射规律。
- 证实了“虹”是太阳光照射空气中的水珠而形成的自然现象。

培根（1214~1292）

公元15-16世纪，意大利科学家（博学家）达·芬奇对光学贡献：

- 描述了光是如何通过不同表面反射的
- 光投射在物体上是如何产生阴影的

公元17世纪，德国天文学家数学家开普勒对光折射现象的研究

- 对于两种给定的媒质，小于30度的入射角同相应的折射角成近似固定的比，对于玻璃或水晶，这个比约为3:2
- 这个比对于大的入射角不成立。
- 开普勒试图通过实验发现精确的折射定律，却没有得到其中有规律性的联系
- 其研究为后来斯涅耳得出折射定律起到了启示作用。

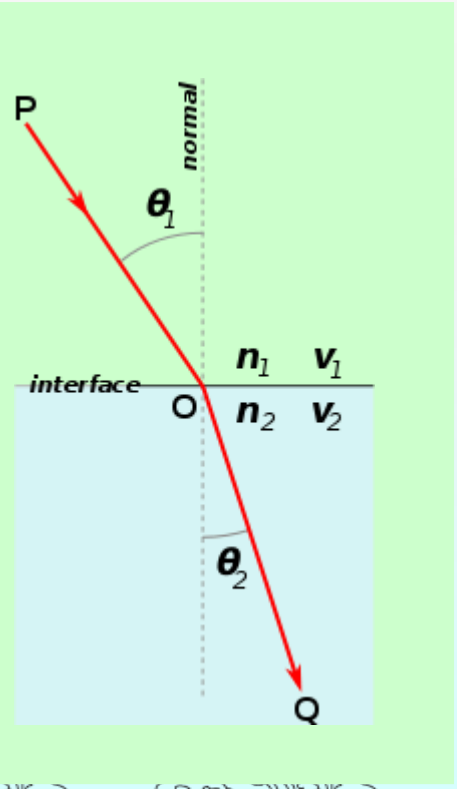
现代实验光学的奠基人

1621年，荷兰数学家、物理学家斯涅耳在实验中注意到了水中的物体看起来象漂浮的现象，由此引出了他对折射现象的研究，并发现了光的折射定律—“斯涅耳定律”，但当时未做任何理论推导，是实验定律。

斯涅耳（1591～1626）

1637年，法国数学家、物理学家、哲学家笛卡尔在他的《屈光学》书中提出了著名的折射定律。他从一些假设出发，并从理论上进行了推导，即光的入射角与折射角的正弦之比为常数，由此而奠定了几何光学的基础。

笛卡尔
(1596—1650)




1679年，法国科学家费马得到了光在介质中传播时所走路径的光程取极值的原理，即著名的费马原理。

费马
(1601—1665)

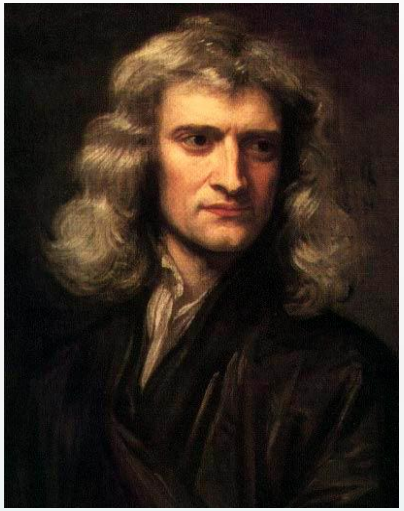
# 光的本性研究

## 光的微粒说

笛卡尔最早提出光的微粒模型，后来牛顿成为微粒说的代表人物。

他们认为光是一种微粒流，微粒从光源飞出来，在均匀介质内遵循力学定律做等速直线运动。

微粒说能够解释光在真空中传播、光的直线传播、光的反射和折射定律。



牛顿
（1643～1727）

# 光的波动说

## 最早的光波动说

**1655年，意大利物理学家格里马尔迪在实验中提出：**

“光可能是一种类似水波的波动”

认为，物体颜色的不同，是因为照射在物体上反射光的光波频率不同引起的。

格里马尔迪
（1618-1663）

## 英国物理学家胡克对“光波动说”的贡献

“光是以太的一种纵向波”的假说，认为光的颜色是由其频率决定的。

胡克
（1635-1703）

# 光的波动说-惠更斯假设

惠更斯（1629～1695）

荷兰物理学家、天文学家和数学家**惠更斯**发展了光的波动说，认为“**光同声一样，是以球形波面传播的**”，并且认为光振动是在一种特殊介质——“以太”中传播的“弹性脉动”，“以太”充满整个宇宙空间。

1690年，**惠更斯**提出假设，波传播时，波阵面上的任一点都可看成是新的次波源，发射次波，**惠更斯原理。**

波动说成功地解释了**光的反射**和**折射**现象，还解释了**晶体的双折射现象**。

# 光的本性— 波动说与微粒说的对立

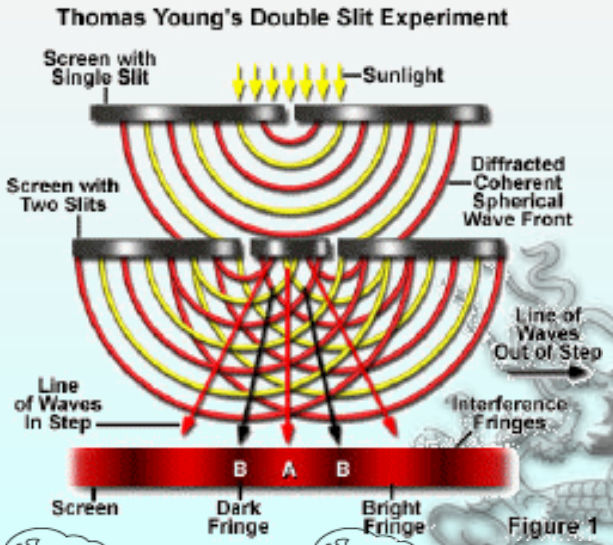
牛顿的“微粒说”与惠更斯的“波动说”构成了关于光的两大基本理论，并由此而产生激烈的争议和探讨，科学家们就光是波动还是微粒这一问题展开了一场旷日持久的拉锯战。整个18世纪，微粒说与波动说之间的争论一直持续，因牛顿在学术界的权威和盛名，“微粒说”一直占据着主导地位。波动说基本上处于停滞状态，微粒说占据统治地位。

# 波动说的发展

1801年，英国物理学家托马斯-杨进行了著名的**杨氏双缝干涉**实验。实验所使用的白屏上明暗相间的条纹证明了光的干涉现象，证明了光是一种波。托马斯-杨进而提出了“光的干涉”概念和光的“干涉定律”。

1803年，托马斯-杨根据光的干涉定律对光的衍射现象作出了解释。

托马斯-杨
（1773～1829）



1809年，法国物理学家**马吕斯**在试验中发现了光的偏振现象。他发现光在折射时是部分偏振的。

**1811年，英国物理学家布儒斯特在研究光的偏振现象时发现了光的偏振现象**经验定律。

因为波动说认为光是一种纵波，而纵波不可能发生这样的偏振。这一发现成为了反对波动说的有利证据，使当时的波动说陷入了困境。

# 波动说的发展

面对微粒说的挑战，**托马斯-杨**对光学进行了更深入的研究。

1817年，他放弃了惠更斯的光是一种纵波的说法，提出了**光是一种横波的假说**，比较成功的解释了光的偏振现象,建立了新的波动说理论。

# 波动说的发展

1819年，法国物理学家菲涅耳成功的完成了对由两个平面镜所产生的相干光源进行的光的干涉实验，继杨氏干涉实验之后再次证明了光的波动说。

菲涅耳（1788～1827）

菲涅耳在惠更斯波动说的基础上，定量描述了光的传播，建立起了以他们的姓氏命名的“惠更斯－菲涅耳原理”。

定性 ➡ 定量

同时，对光的偏振现象加以研究，建立了双折射理论，奠定了晶体光学的基础。

# “以太”及有关假说

至此，新的波动学说牢固的建立起来了，光的弹性波动理论既能说明光的直线传播也能解释光的干涉和衍射现象，并且横波的假设又可解释光的偏振现象。看来似乎十分圆满了，微粒说开始转向劣势。

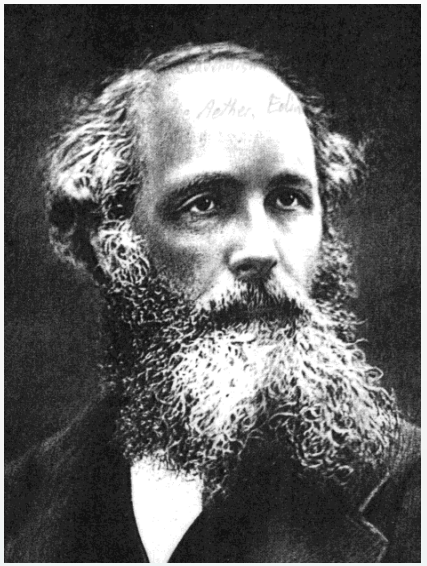
但这时仍把光的波动看作是“以太”中的机械弹性波动，至于“以太”究竟是怎样的物质，尽管人们赋予它许多附加的性质，仍难自圆其说。

这样，光的弹性波理论存在的问题也就暴露出来了 ，于是各种假说纷纷提出。

# 光的电磁理论

1846年，英国物理系家、化学家法拉第发现光的振动面在磁场中发生旋转，表明光学现象与磁学现象有联系 。

1860年，英国物理学家、数学家麦克斯韦将光和电磁现象统一起来，认为光就是一定频率范围内的电磁波，从而确立了波动说的地位。



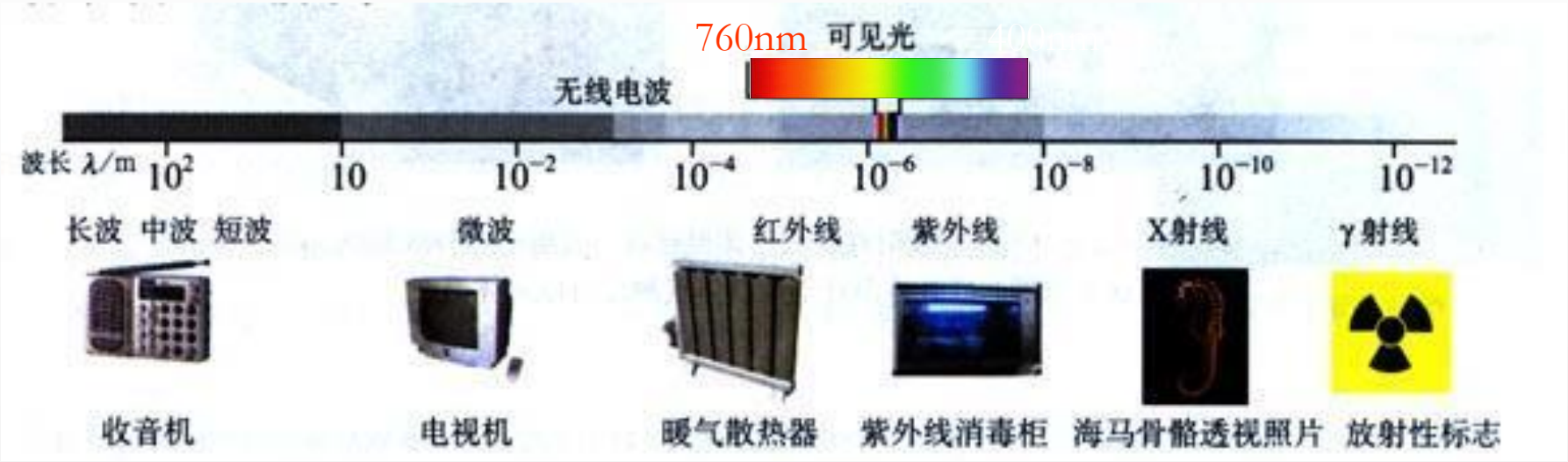
麦克斯韦（1831～1879）

1887年，德国物理学家赫兹用实验证实了电磁波的存在，也证实了光其实是电磁波的一种。

实验又证明，红外线、紫外线和X光都是电磁波，其区别只是波长不同。

# 电磁波谱

$(1\mu m=10^3 nm=10^4 Å)$




红外线：760nm~十分之几毫米；紫外线：400-5nm

近红外：1~2μm；中红外：2~10μm; 远红外：>10μm

## 可见光波长范围

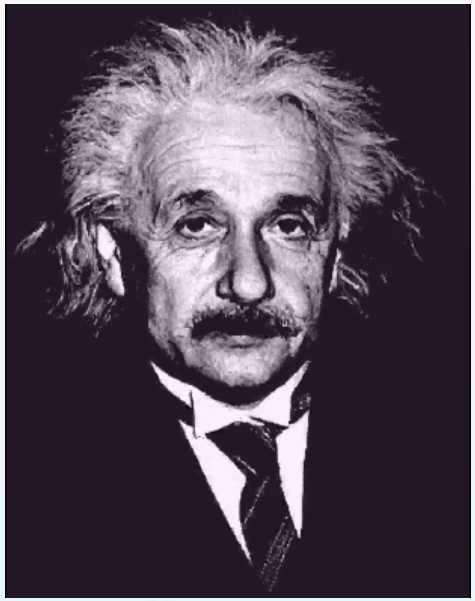
760 630 600 570 500 450 430 400 (nm)

红 橙 黄 绿 青 蓝 紫

# 光的电磁理论

1905年9月，爱因斯坦提出了**光速不变原理和狭义相对论**，从根本上抛弃了“**以太**”的概念，圆满地解释了运动物体的光学现象。

这是人们才认识到：**电磁波的传播不需要任何物质，电磁本身就是一种物质，它携带着能量以波的形式传播着，所以电磁波是一种物质波。**

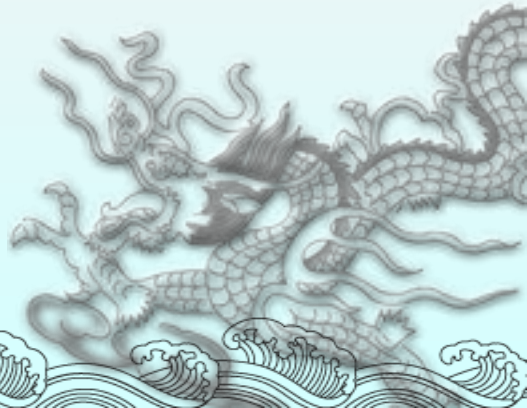


爱因斯坦
（1879～1955）

# 光的电磁理论面对的问题

◆ 黑体辐射问题：黑体会向外辐射电磁能量，电磁能量按波长是如何分布的呢？按照经典电磁理论研究的结果，与实验观测结果不符！**“紫外灾难”**

◆ 光电效应：实验上观察到，光照在金属表面上,逸出电子的能量与光的强度无关，但与光的频率有关。对此，经典理论也无法解释！

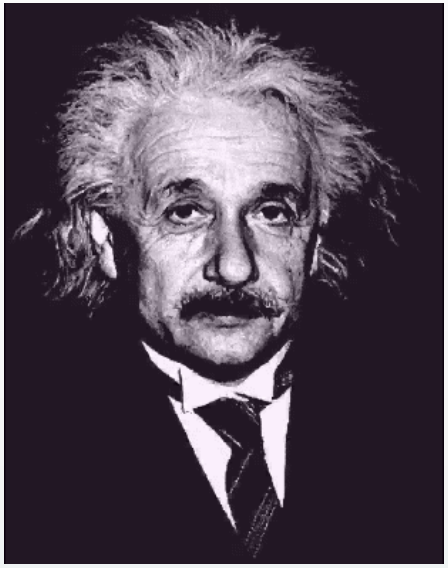


# 光的量子假说

1900年，为了解释光的黑体辐射，德国物理学家普朗克提出了物质辐射（或吸收）的能量只能是某一最小能量单位（能量量子）的整数倍的假说，即量子假说，即并在此基础上导出了黑体辐射的能量按波长（或频率）分布的公式，称为普朗克公式。

普朗克（1858～1947）

# 光子假设的提出



爱因斯坦
（1879～1955）

1905年，为了解释光电效应，德国科学家、哲学家、思想家爱因斯坦提出了光（量）子假设，当光束与物质相互作用时，其能流并不像波动理论所描述的那样是连续分布的，而是一份一份的集中在一些叫做光子的粒子上。光子只能被整个地吸收和发射。基于这个光子假说，爱因斯坦成功地解释了光电效应。

# 现代光学

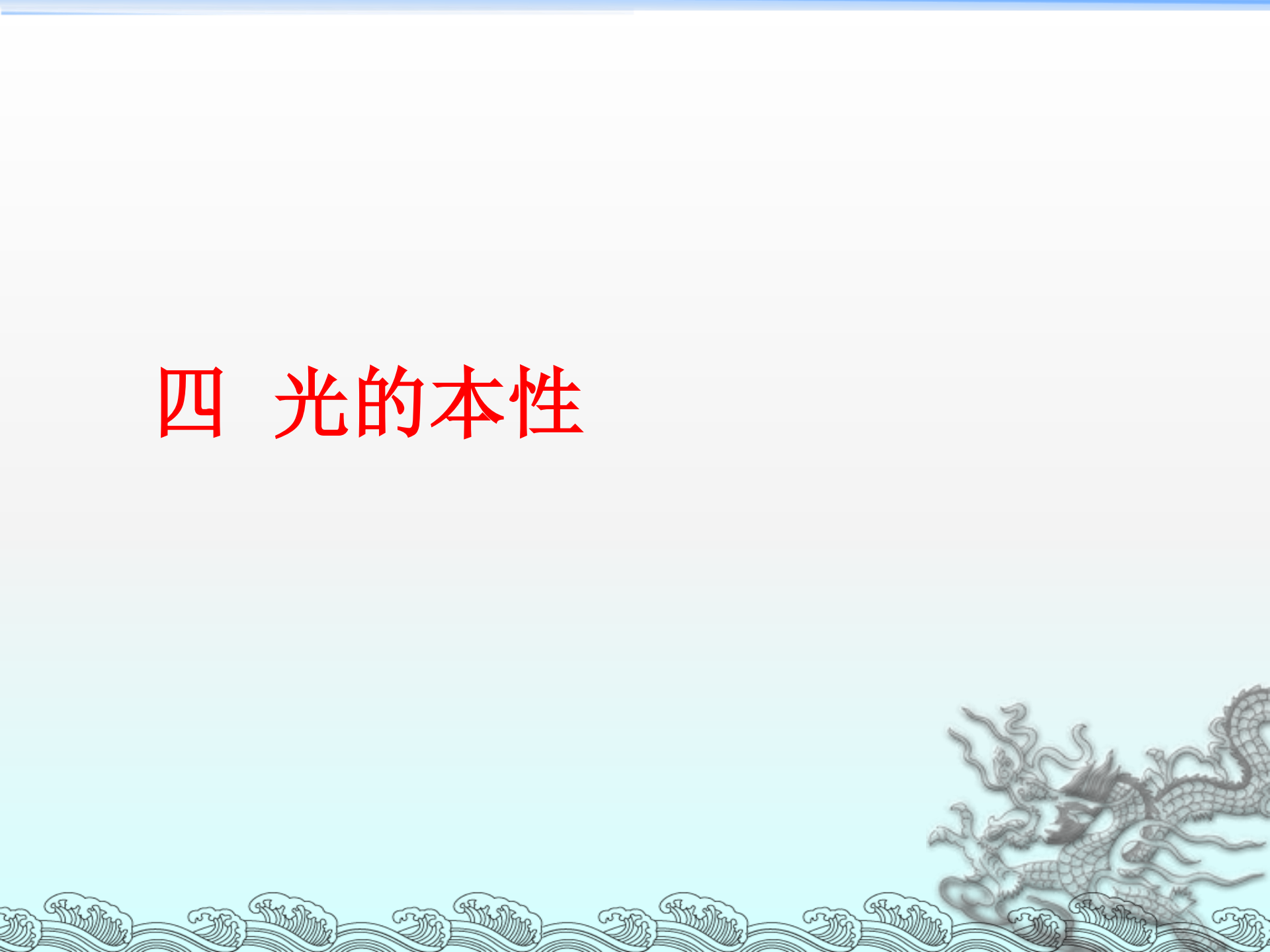
博里叶光学: 20世纪50年代以来，数学、电子技术和通信理论与光学结合起来，引入了频谱、空间滤波、载波、线性变换及相关运算等概念,更新了经典成像光学。

光电子学:60年代，激光器的问世，由此发展了光放大、混频和倍频的技术，电子学的基本技术被扩展到光波波段来,形成光电子学。

80年代以来，光纤通信与光纤传感技术得到了快速发展。

光学的发展趋势：光子学——研究光子的产生、传输、控制和探测，应用于能量产生、通信、信息处理。

# 四　光的本性



光与**不同材质、不同尺度**的物质相互作用时，表现出**不同的特性**，因而在不同的研究阶段，人们对光的认识是不同的。

光学现象层次的分类

几何光学（射线光学）

波动光学 ┐

量子光学 ┘（物理光学）

现代光学观点：光是量子化的电磁场

**量子电动力学理论**能够严格、合理地解释一切光学现象。

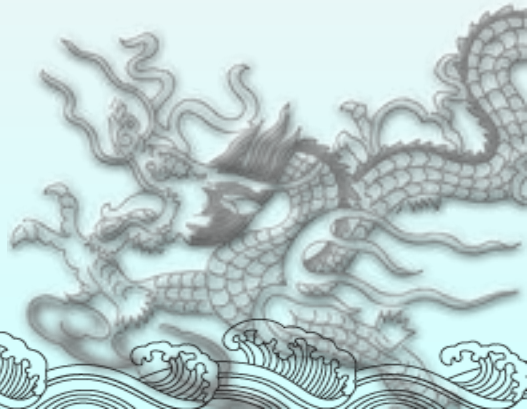
# 1. 几何光学——光的宏观表现

## 三大定律——直接来自于实验

- **直线传播定律**：均匀介质中，光沿直线传播
- **独立传播定律**：两束光相遇，各自保持原来传播方向而不受影响。
- **反射定律和折射定律**：$i'=i$，$n\sin i=n'\sin i'$

在几何光学中，基本概念是光线，即光是由一束束光线组成。

光线模型



## 2. 波动光学——光与小尺度物质的作用

- 光的干涉
- 光的衍射
- 光的偏振
- 光是电磁波

光的电磁波模型

## 3. 量子光学-在原子尺度上的表现

- 光具有波粒二象性，这也是一切量子现象的基本属性。
- 波：几率波，具有线性叠加性
- 粒：分立的能量子，$E=h\nu=\hbar\omega$，$p=h\nu/c=h/\lambda$
- 与几何光学时期惠更斯与牛顿的波动性和粒子性有根本的不同

光量子模型

光的本性— 波粒二象性

$h=6.6256\times10^{-34}$ J·s

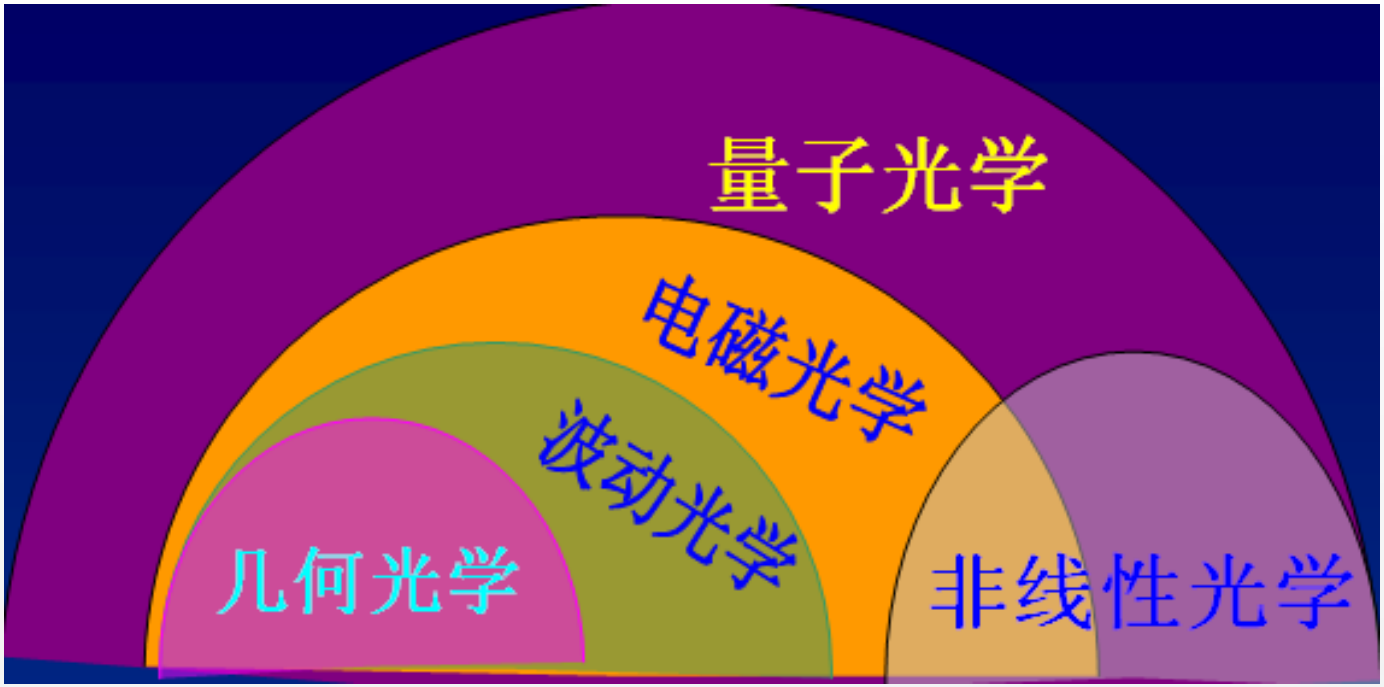
λ＝nm~10μm

## 光学现象的分类（h－λ）：

| 分类 | 理论基础 |
| --- | --- |
| 1. h~0,λ~0 | |
| 几何光学 | 费马原理 |
| 2. h~0,λ≠0 | |
| 波动光学 | 惠更斯原理<br>麦克斯韦方程组 |
| 3. h≠0,λ≠0 | |
| 量子光学 | 量子理论 |

# 五 光学的分类

# 光学的分类




几何光学、波动光学　研究光的传播

电磁光学　研究光的电磁特性

非线性光学　研究光与物质作用理论

量子光学　研究光的量子特性

# 六 学习光学的重要性

- 光是一种很重要的自然现象，它与人类生活和社会实践密切相关。
- 光学的发展为生产技术提供了许多精密、快速的实验手段、观察手段和重要的理论依据。
- 光学是经典物理向近代物理过渡的桥梁。