

光学新世界

——非线性光学浅说

GUANG XUE XIN SHI JIE

7

光学新世界

——非线性光学浅说

雷仕湛

科学普及出版社

内 容 提 要

本书是科普出版社1980年出版的《光的世界》的姐妹篇。激光在科学技术研究、工业生产、医疗卫生等领域的应用越来越广泛，越来越多的人需要了解其奥妙所在，本书就是为了满足这些人的要求而编写的。它由普通光学常识出发，由浅入深地系统介绍了在高强度光束作用下才出现的各种光学现象，如：自变透明、自变吸收、多光子吸收、光倍频和光混频、自聚焦和自散焦、光回波、受激布里渊散射、受激喇曼散射……等等。对强光的获得也作了简要介绍。

光 学 新 世 界

——非线性光学浅说

雷 仕 湛

责任编辑：陈金凤

封面设计：韩 林

●
科学普及出版社出版（北京海淀区白石桥路32号）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京燕山印刷厂印刷

●
开本，787×1092毫米1/32 印张，7.875 字数，175千字
1987年7月第1版 1987年7月第1次印刷
印数：1—3,600册 定价：1.35元
统一书号：13051·1528 本社书号：1449

ISBN 7-110-00088-5/TN·4

序 言

我们在《光的世界》(科学普及出版社一九八〇年出版)里介绍了光的传播、反射、折射等光学现象。在那里谈论这些现象的时候,我们都撇开了光束的强度,也不管在介质中是否还有别的光束同时在传播。

本世纪六十年代,人类发明了激光器。激光器可以输出功率很高、脉冲宽度非常窄的光束。利用激光束来做光的传播、反射、折射等光学实验,使人们观察到了许多在《光的世界》中所没有的新奇现象。如自变透明、自变吸收、多光子吸收、光倍频和光混频、自聚焦和自散焦、光回波、受激布里渊散射、受激喇曼散射……等等。所有这些新光学现象都是在高强度的光束作用下才出现的。因此,人们把这些新现象称为强光光学现象,也叫做非线性光学现象。

本书把强光光学现象叫做新光学现象,因而,书名称为“光学新世界”。但是,这并不是意味着,这里介绍的光学现象都是激光器发明之后才发现的。事实上,早已有人对光的迭加原理产生怀疑。例如,苏联科学家瓦维洛夫,在激光器出现以前就曾经用当时最强的实验室光源——高压火花,研究了光束通过铀玻璃的吸收系数。他和他的助手观察到了迭加原理受到破坏的迹象。

但是,在实验室的条件下,能够明显地观察到迭加原理被破坏,让人们非常明显地观察到随之而出现的各种现象,还只有在激光器发明之后才成为可能。我们所说的“新”,是

包含着这种意义的。

强光与物质相互作用的现象还在不断发现。在已观察到的现象中，随着研究的深入，也会揭示出新规律，甚至改变人们原先的看法。所以，本书介绍的内容是有局限的。加上作者本人水平有限，有些地方可能是错误的。我衷心希望读者不吝赐教。

何明芳同志绘制了全书插图，作者在此表示真诚的感谢。

雷仕湛

目 录

第一章 光的本性

两种学说	(1)
干涉和衍射	(7)
微粒说复兴	(11)
原子模型	(15)

第二章 奇怪的吸收现象

布格尔定律	(22)
自变透明	(25)
根源所在	(27)
自变吸收	(31)
双光子吸收	(33)
科学价值	(38)

第三章 自聚焦和自散焦

折射现象与折射率	(53)
透镜聚光和散光	(58)
自聚焦和自散焦	(63)
奥妙所在	(70)
介质波导	(74)
焦点移动模型	(79)

热聚焦和热散焦.....	(83)
不受欢迎的现象.....	(87)

第四章 光频率变换

牛顿的光学实验.....	(90)
光倍频现象.....	(94)
光的混频.....	(97)
科学价值.....	(106)
相位匹配.....	(109)
90°相位匹配	(120)
液体和气体中的相位匹配.....	(124)
理想的激光束和倍频材料.....	(127)
非线性极化.....	(131)

第五章 受激散射

光的散射.....	(136)
瑞利散射.....	(140)
布里渊散射.....	(144)
重要应用.....	(150)
喇曼散射.....	(153)
受激喇曼散射.....	(156)
反喇曼散射.....	(166)
相干反斯托克斯喇曼散射.....	(170)
喇曼感应克尔效应.....	(175)
喇曼激光器.....	(179)
自旋反转喇曼激光器.....	(182)
彼此的竞争.....	(184)

第六章 瞬态相干现象

瞬态受激喇曼效应.....	(187)
光回波.....	(193)
受激光回波.....	(201)
自感应透明.....	(205)
皮秒技术.....	(213)

第七章 强光的获得

调Q技术	(218)
锁模技术.....	(227)
被动锁模.....	(232)
主动锁模.....	(234)
同步泵浦染料激光器.....	(236)
超短脉冲的选取.....	(237)
自锁.....	(238)
脉冲宽度的测量.....	(239)

第一章 光的本性

光，我们每天都接触到，都在应用着它。有了光，我们才能看见周围的东西。没有光，我们就不可能享受到颜色的美。大自然中的青山绿水，五彩缤纷的花朵，它们是靠光打扮起来的。生物的生存也有赖于光。植物就是依靠光合作用制造养分而生长起来的，它为人类提供食物；为动物提供饲料。没有光，就没有生物，也就没有我们这个生气勃勃的世界。

这普通然而又是十分重要的光，它究竟是什么呢？人们很早就开始研究它，并提出了种种假设，逐步形成

两种学说

太阳、火把、油灯、电灯，它们发射出来的、照射在物体上发亮的是什么？或者说，我们为什么能看见东西？希腊人首先提出一种重要的见解，认为在我们眼睛所见到的物体和照亮这些物体的灯之间，有一种东西在传播着。这样一种见解引出了种种争辩。其中一种意见认为，光象从救火车水龙头喷射出来的水注那样，从人的眼睛射向物体。我们能感觉到物体存在，就是这一股流注击中了它的结果，这与瞎子靠着他手里那条拐杖触到了物体就感觉到有物体存在相象。这种见解可以解释为什么人只能看见对面的东西，以及闭上眼睛就什么也看不见。但是，这种见解无法解释在暗的地方



图 1-1 眼睛看见物体的原始假设

什么也看不见。为了克服这个困难，又有人提出另外一种见解，认为那股流注是从灯发射出来的而不是从人的眼睛发射出来的。流注洒到物体上去之后就立刻弹散开，其中一些流注散粒射入人的眼睛，引起人们的感觉，于是就知道对面有物体存在。

既然光是作为发光体发射出来的流注，那么，它是什么形状的呢？它有多大？它喷射的速度如何？它不能穿透过一张薄纸，为什么却能透过厚厚的玻璃呢？

到了十六世纪，把各种各样的争辨归纳起来，大体上形成两种意见：一种认为，光是从发光物体上发射出来的粒子流，叫做光的“微粒说”；另一种认为：光是从发光体发射出来的波，叫做光的“波动说”。

光的微粒说学派是以英国科学家牛顿为首领的。牛顿根据光是一群微粒的见解，解释了光的直线传播，光的反射和

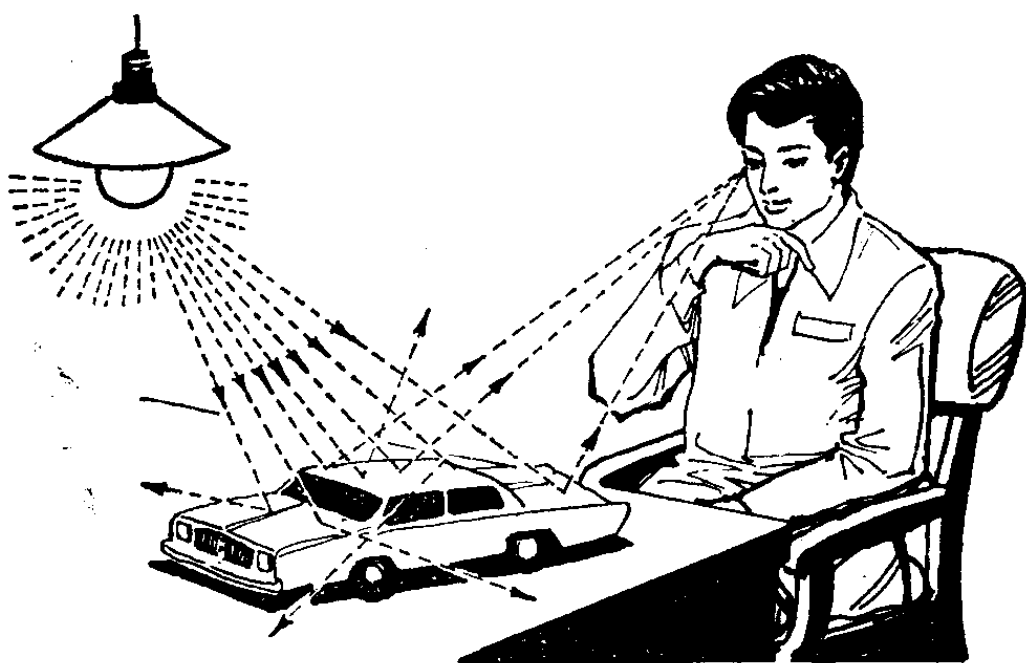


图 1-2 光是从光源发射出来的流注

折射等现象。

光是直线传播的，这是人们很早就认识到的光学现象。平时我们看到从窗口射进房间里来的太阳光，就是笔直的一条光柱。物体都有和自身相似的影子，这也是说明光是直线传播的依据。把光看作一群微粒流，便很容易说明光是直线行走的道理。我们知道，抛出的小球由于受到重力的影响，它在空中飞过的路径是一条弯曲的线。但是，如果小球飞行的速度越快，路径弯曲程度就越小，越接近一条直线。我们可以想象，组成光的这群微粒，当它们以很高的速度飞行时，它们走过的路径当然就是一条直线。与此同时，持有微粒说见解的科学家也以此来反驳波动说：如果光是一种波动，波怎么会是直线传播的呢？波是能够绕过障碍物的。我们在房间里，能够听见在走廊上的人谈话的声音，因为声波能绕过拐角传播。但是，我们是决不能在障碍物的后面看见传播着的光束的。

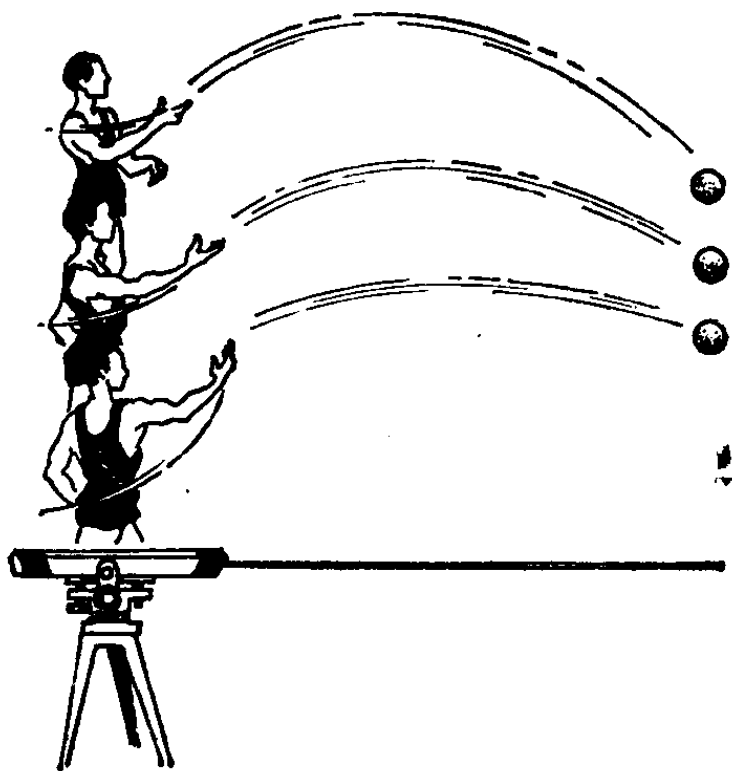


图 1-3 球的抛射轨迹和光的直线传播

光的反射也是常见的光学现象。一束光射到光滑的表面上，就有部分光线被反射回来。用微粒说(弹性微粒)也很容易说明发生这个现象的道理。一只只小乒乓球投到球台上，它们就从台面上反弹回来。光束中的微粒在碰到光滑的表面时也是一样的，所以便形成了反射的光束。图1-4是乒乓球和光微粒在界面上产生反射的类比。

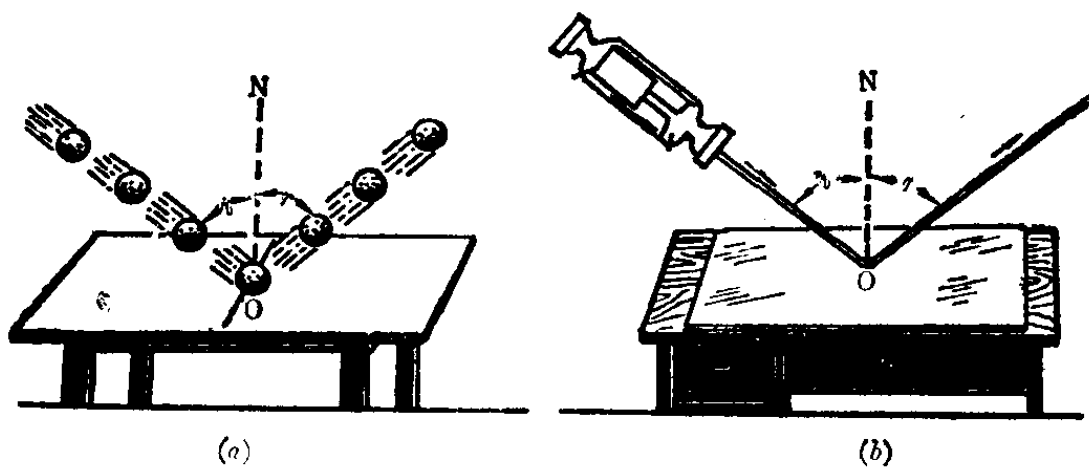


图 1-4 小球在光滑表面上的反射和光的反射

牛顿利用微粒说也解释了光的折射现象。他先用小钢球从一个平面滑到另一个平面的情形来作类比。安排两块水平放置的平面，一块在上面，一块在下面，它们的边缘用一块斜放的板连结起来。一只小钢球从上表面向边缘滚动，并沿斜面往下滚，然后在下表面滚动。由于有重力的影响，小球在沿斜面下滚的时候获得加速度运动，到达下表面时，它的运动速度比在上表面时快。

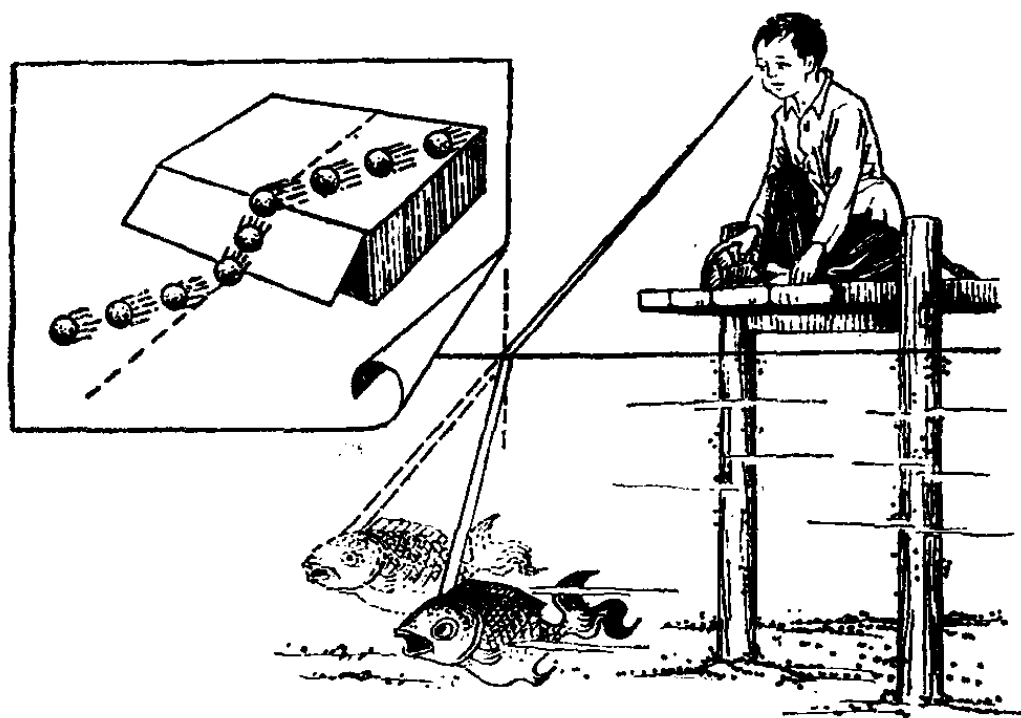


图 1-5 钢球的滚动和光的折射

假定小球在上表面滚动时，是以和边缘的垂线（称为法线）成一定角度往斜面滚来的，那么，由于在斜面上往下滚动时受重力作用，到达下表面时，小球滚动的方向与边缘法线所组成的角度便要减小。光的折射类似于这种状况。这时候，把上表面看作空气，下表面看作密度较大的介质，比如水、玻璃等，它们的界面相当于刚才讲到的那个斜面。光束从空气进入玻璃，在界面上光微粒由于受到密度大的介质的重力作用，因而，它到了玻璃里面之后，传播的方向就发生了

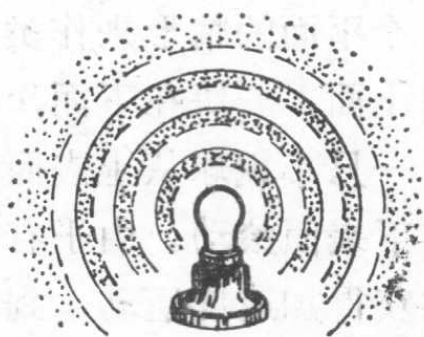


图 1-6 光波和水波

变化，也就是说，发生了光的折射现象。

光的“波动说”是荷兰数学家、物理学家和天文学家惠更斯所倡导的。他认为，光和投入池塘里的石头所激发起来的水波相似，它是从发光体发出来的一列列波，叫做光波。

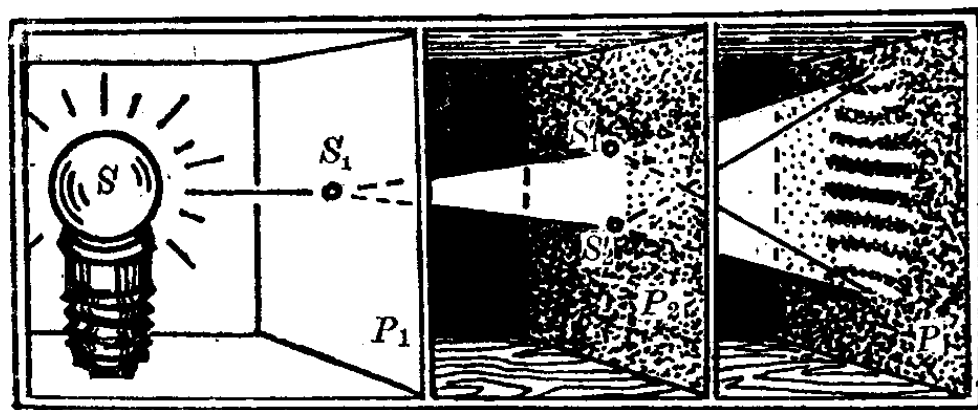
波动说也能够完满地解释光的反射和折射现象。持有波动说的科学家反问微粒说学派，光的迭加原理是大家都公认的，几束交叉在一起的光束，并不会互相影响原来的传播方向。光要是微粒流的话，那么，它们在相交的地方，为什么不发生互相碰撞？相交之后的各束光为什么会保持原来的方向呢？

光的微粒说和波动说，它们各自都有些道理，谁也说服不了谁，争论了整整一个多世纪，谁胜谁负，未见分晓。但是，到了十九世纪，一系列的科学实验似乎证实了光具有波

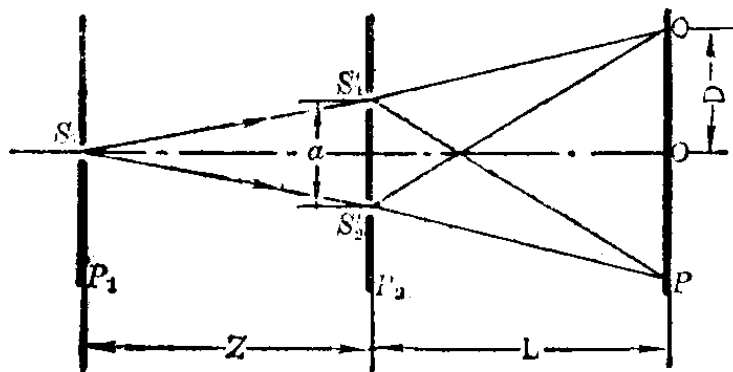
的性质，即出现了

干涉和衍射

到1801年，物理学家T·杨做了一个著名的实验，图1-7是他的实验示意图。S是一个单色点光源，板 P_1 的中央开有一个小孔 S_1 。板 P_2 上面开有二个小孔 S_1' 和 S_2' ，并且把板 P_2 作这样的安排：使得板上那两个小孔 S_1' 和 S_2' 到 P_1 板上的小孔 S_1 的距离相等，即让 $S_1S_1' = S_1S_2'$ 。从点光源S发射出来的光束通过小孔 S_1 ，再投射到板 P_2 。从小孔 S_1' 和 S_2' 上出来的光束再投射到观察屏幕P上。杨氏仔细地观察从 S_1' 和 S_2' 上出来的两束光在屏幕P交迭区域上出现的现象。他惊奇地发现：



(a)



(b)

图 1-7 杨氏实验

在那里出现了明暗相隔的条纹!!如果把板 P_2 换上有两狭缝的板,那么,在观察屏幕 P 上就看到与狭缝相平行的亮条纹和暗条纹。如果不是用单色光源,用普通的电灯做实验,则还看到除了中央那一条亮纹没有颜色外,其余的条纹都带些彩色。

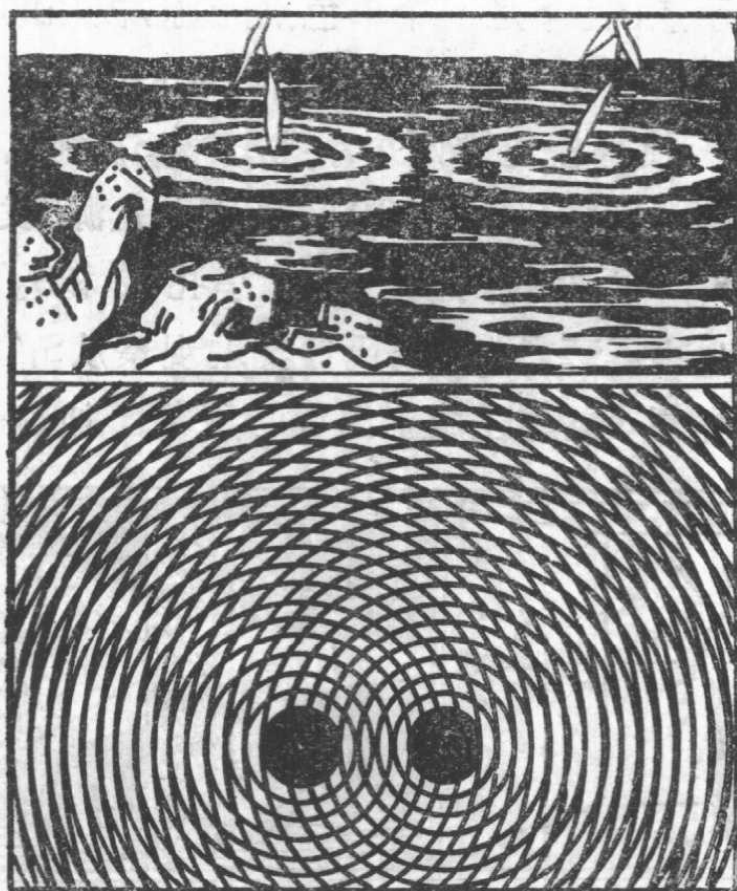


图 1-8 波的干涉

杨氏的实验结果,用光的微粒说无论如何也是无法解释清楚的。按照微粒说,从小孔 S_1' 和 S_2' 出来的两股微粒,它们在观察屏幕相交会的地区,光微粒的数目应该增加,理应更为明亮,何以会出现暗的区域呢?在这些暗的条纹里,光微粒跑到哪里去了呢?然而,这种现象都是波动说能解释的,并且也是波动说预料中要出现的现象,这就是波的干涉现象。凡是波动,都有干涉的性质。比如,在水池中同时投下

两块石头，它们激起的那一圈圈往外传播的水波，在彼此相遇的区域便出现了干涉的花样：一些地方的水波振荡得更加剧烈，而另一些地方却更加平静了。

杨氏还利用他的干涉实验测量出光波的波长。假定板 P_2 和 P 之间的距离记为 L ，小孔 S_1' 和 S_2' 之间的距离记为 a 。在观察屏幕 P 上，从中央 O 点数起第 k 条亮纹离开 O 点的距离记为 D 。那么，光波波长 λ 就可以由下面的式子计算出来：

$$\lambda = \frac{2Da}{kL} \quad (1-1)$$

上面式子中的 D 、 a 、 L 、 k 是实验时能够测量出来的数值。因此，根据公式(1-1)，我们就可以计算出光波的波长 λ 。

杨氏根据实验测量出来的光波波长非常短。可见光这一部分，光波波长数值在4000埃到7000埃之间(1埃等于一亿分之一厘米)。由此可见，光波波长比起我们通常见到的物体的尺寸，小得多。根据对波动发生衍射(或者叫绕射)现象的研究结果，只有当波的波长比物体的尺寸还长一些，或者起码和物体的尺寸大小相接近，我们才会比较明显地看见波动所发生的衍射现象。既然光波的波长这样短，也就难怪我们平时总是看不到光的衍射现象，而只觉得光是直线传播的。

到1816年，法国的物理学家菲涅尔还作了一个著名的单缝实验。他让一束光通过一条很窄的缝，然后投射到观察屏幕上。结果，在观察屏幕上也看到有些类似于杨氏实验时所看到的那种明暗相间的条纹。这个现象用微粒说也是无法解释的。而只有承认光是一种波，按照波的衍射规律来处理，才能得到合理的解释。

其实，早在十七世纪，人们就已经觉察到，物体影子的