

光的波粒二象性

GUANGDEBOLIERXIANGXING

天津人民出版社

光的波粒二象性

程 路

*

天津人民出版社出版

(天津市赤峰道124号)

天津市第一印刷厂印刷 天津市新华书店发行

*

开本787×1092毫米 1/32 印张 4 1/8 字数85,000

一九七九年三月第一版

一九七九年三月第一次印刷

印数 1—30,000

统一书号, 7072·1093

每 册, 0.27元

目 录

前 言	(1)
第一章 古代人们对光的认识及光的微粒说	(5)
§1. 关于光的性质的最早记载	(5)
§2. 定量的研究——反射和折射	(8)
§3. 微粒说及其遇到的困难	(10)
§4. 历史的回顾	(15)
思想方法小结	(16)
第二章 光的波动说	(18)
§1. 由微粒流到波动——质的飞跃	(18)
§2. 惠更斯原理	(21)
§3. 用惠更斯作图法解释反射和折射定律	(22)
§4. 对惠更斯作图法的理解及演示	(26)
§5. 在什么情况下波动与光线所得结果是严格一致的? ...	(28)
思想方法小结	(31)
第三章 干涉	(33)
§1. 单振子与平面波表达式	(33)
§2. 双波场干涉 将位相转化为光强而表现出来	(41)
§3. 固定位相差——发生干涉的重要条件	(47)
§4. 时间相干性	(51)
§5. 扩展光源 波场的空间相干性	(58)
§6. 干涉条纹的定位	(62)
§7. 波的独立传播、干涉及一个设想	(66)
思想方法小结	(68)

第四章 衍射	(69)
§1. 菲涅耳-基尔霍夫公式	(69)
§2. 单缝衍射 圆孔衍射	(72)
§3. 不等幅的完整波面的衍射效应	(77)
§4. 干涉与衍射的概念区别	(80)
§5. 几何光学与波动光学在哪些区域差异明显	(81)
思想方法小结	(84)
第五章 光是电磁波	(85)
§1. 光波与电磁波的统一	(85)
§2. 电磁波分类谱	(88)
§3. 在一般情况下可作标量波处理	(90)
思想方法小结	(92)
第六章 基本粒子的量子性	(93)
§1. 光电效应 经典理论遇到的困难	(93)
§2. 量子概念的提出	(98)
§3. 微弱光流的起伏现象	(101)
§4. 数学准备	(102)
§5. 机枪、水波与光子枪	(105)
§6. 概率波	(111)
§7. 测不准关系	(114)
§8. 粒子、波动与几何光学	(115)
思想方法小结	(117)
第七章 光子	(118)
§1. 光子及其性质	(118)
§2. 光子与其他粒子的转化	(123)
结束语	(125)

前 言

这个“前言”是正文完稿以后才想要写的。可以说，这主要是因为，在撰写这本小册子时，一开始有着某种程度的任务观点，只是要把事情和道理陈述清楚；但写着写着，下面这样一个意识逐渐加强起来：应该把方法性的东西尽量添进去——诸如开阔的联想、深一步的追问、对模型的理解与想象、以及如何把握不同概念之间质的差异等等。尽管自己水平不高，还是作了一些尝试。对惠更斯作图法的深一步理解（见第二章 § 4）和关于若干波场联合通过障碍（第三章 § 7）就是两个例子。在我看来，尽管这些内容还不严密、成熟，但是如果我们在学习过程中经过自己的思考劳动能得出这一类的体会和收获，那是比记住十条现成的知识条文还要宝贵的。本书各章末尾所作的方法性小结，其目的亦在于此（恕我在最后一章之末没写这种小结，因为，由于水平所限，这末一章的内容不过是罗列了一些现成的知识条文罢了）。

总之，在这个前言里，我想说的仍是强调一下学习和研究中方法的重要性。在研习的过程中，每隔一定阶段，除了系统地总结知识内容本身外，专用一些时间来进行方法性的小结是很值得的。

让我举一个例子来说明，有时提出一个大胆而且貌似奇怪（但决不是荒诞）的问题来动一番脑筋，对于启发我们的思路和深入理解事物的本质会有多么有益的效果。

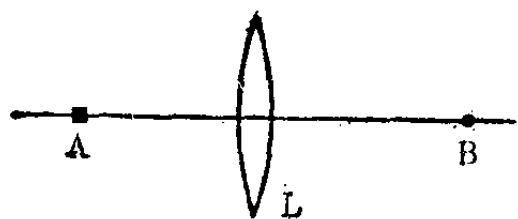


图 01

问题①：设有一个透镜 L，A、B 是一对物象共轭点（如图 01）。试问：若 A 处放一块冷物（例如摄氏负二、三十度的干冰），B 处是否会比其周围凉些？

此问题乍看颇似荒唐：只有发光物经过透镜成象之说，哪有冷物成一个“冷象”的理呢？

但是请不要如此简单地就下结论。我们不妨从热辐射和热平衡这样普遍的观点来考究一下透镜的“成象”作用。大家知道，世上万物，只要它的温度不是处于绝对零度，则都是不断地向外界发出热辐射的（热辐射与光一样同属于电磁波，见第五章）；物体同时又不断地吸收外来的辐射，各个物体就是处在这种互相发收辐射的动态状况之中。当某一物体的温度比周围其他物体高时，它在单位时间里向其他物体辐射的能量将多于从其他物体吸收的辐射能量；反之，当某一物体的温度比其他物体低时，它辐射出去的能量将少于从别的物体吸收的能量，直至达到热平衡（即大家都处于同一温度）为止，这时每个物体在单位时间内辐射出去和吸收进来的能量相等。

现在来看图 01，先假定没有透镜 L，这时由于 A 处的干冰比周围温度低，它将从周围物体吸收较多的热辐射，而向外给出的辐射是较少的。从另一方面说，干冰周围的温度都比干冰高，所以各处都在给予干冰较多的辐射能，却从

① 这个问题是丁大同同志向我提出的。

干冰获得较少的能量。就是说，干冰周围大量物质都在同干冰进行着不平衡的热辐射交换^①。

而热辐射的交换是象几何光学中的光线(见第二章 § 5)那样沿射线进行的。当没有透镜L时(图02, a), B点向四

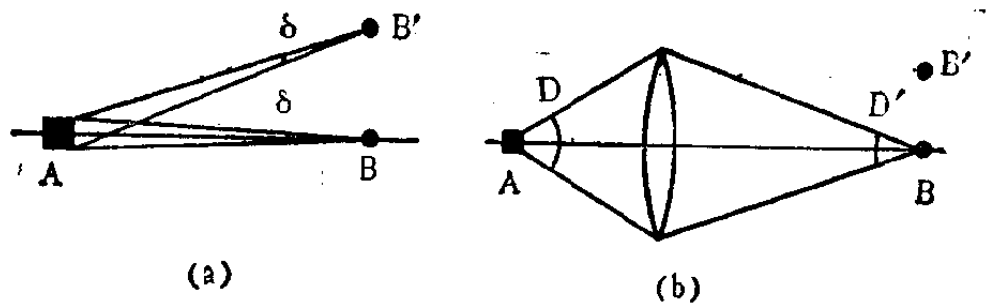


图 02

周的辐射中，只有在一个小立体角 δ 的范围内的那一部分给予干冰，而在相应的小张角内从干冰吸收更少热能，因而B与A的不等量热交换是微量的。同样，B点附近的各个B'点也都跟A进行着微量的不等量热交换。其结果是：干冰迅速地吸收热量，而周围大量物质极为缓慢地降温。

现在把透镜放上(图02,b)。这时从B向四周发出的辐射中，处于一个相当大的立体角 D' 中的那部分皆可被干冰A所吸收(当然从A发出的较弱辐射中，也有立体角D那么一部分给予了B)。总之现在B与A的不等量热交换是在一个比(a)图中的 δ 大得多的立体角范围内进行的，所以它们之间交换热量之差额已不再是微量的，而是个可观的量了。这将导致B点的一定量的降温。但是，由于放置透镜之故，B点以外的B'点与干冰A的热交换辐射通道不存在了，因而B'

^① 在此我们暂不讨论象传导和对流那样的热交换。

点将不因干冰 A 而降温。于是，B 点将比周围凉些^①。

经过以上的分析，我们对于透镜成象这件事的物理实质理解得深入多了：任何二物体都在互相交换辐射能量，当透镜成实象时（为什么要规定成“实”象，请读者思考），透镜的作用乃是扩大了物、象二者之间的辐射线交换通道的立体角范围。因此，无论是成亮象（“热象”）还是成暗象（“冷象”）在原理上都是成立的。

最后让我表明，无论在前言中或在正文中，免不了有些内容是值得商榷甚或是错误的，热切地希望读者提出批评和指正。

程 路

一九七八年六月

^① 在以上的讨论中不言而喻，透镜须是能透过热辐射线（红外线）的，且 A、B 互为物象共轭关系亦是对于红外线而言。

第一章 古代人们对光的认识 及光的微粒说

§ 1. 关于光的性质的最早记载

我们知道，人是靠触觉、味觉、嗅觉、听觉和视觉等器官来感知客观世界的。其中以触觉最为简单直接，不过依靠触摸只能感知近在身边的东西。借助嗅觉和听觉能够感知稍远一些的事物，但距离仍很有限。获得关于外部世界的知识的首屈一指的器官，要算是视觉了。我们用眼睛可以看到大小、远近的各个物体以至于遥远的星球，而且视觉给我们提供了关于物体的形状、位置、颜色等多方面的信息。有人作过统计，在各种器官给人们提供的关于客观世界的知识中，来自视觉的占70%以上。

视觉的感知，是由光来实现的。因而在古代，我们的祖先就试图回答“人为什么能够看到周围物体”这样的问题。这就是人类对光的研究的开始。

人们对某种事物的认识，起初往往是很天真的。例如古希腊的一些科学家认为，眼睛之识别物体，在某种程度上类似于用手对物体的触摸。照他们看来，从人的眼睛向被观察物体伸展着某种好象触须的东西。所谓“天真”，就是把事物作了简单类比，亦即，把对触觉的理解简单地套用到视觉方面。不过请别笑话他们，我们今天不是还常常使用“视线探

索”、“目光穿过”这类流行的比喻吗？

同样在古希腊，也曾有过光是从物体发出的这种观点。

眼睛发出触须的说法被淘汰了，因为它不能回答下面的简单问题：为什么有些物体是亮的，有些是暗的，而不管眼睛的触须是否伸向它们？为什么一件东西对着太阳时就亮些，背着太阳时就暗些？而认为光是从物体发出的观点却毫不费力地解释了这些现象。

于是这样的概念形成了：客观世界中，有些物体是光源，它们发出光，光在空间传播，当光射入眼睛时就引起视觉；另一些物体不发光，但它们可以把外来的光反射出去，从而被我们看见。

在我国先秦时代（公元前470—400）的《墨经》里，有着关于光的传播性质的最早记载。《墨经》中有八条是关于光学方面的。第一条叙述影的定义与生成；第二条说明光与影的关系；第三条则畅言光进行的直线性；第四条说明光有反射的性能；第五条论述的是依光和光源的关系以确定影的大小；第六、七和八条则分别叙述了在平面镜、凹球面镜和凸球面镜中物和象的关系。其中光的直线传播是核心内容。

《墨经》中以描述一个针孔成象实验来说明光的直线进行。经说云：“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。”意思是说：小孔成象时（见图1），光向人照去犹如射箭一样。从下部B处照去的光射向暗箱的上部B'处，从上部A处照去的光射向暗箱的下部A'处。脚遮住下面的光所以成影于上面，头遮住上面的光所以成影于下面。这段简洁的文字可以说是关于光的直线传播的最早实验记录。古希腊的学者

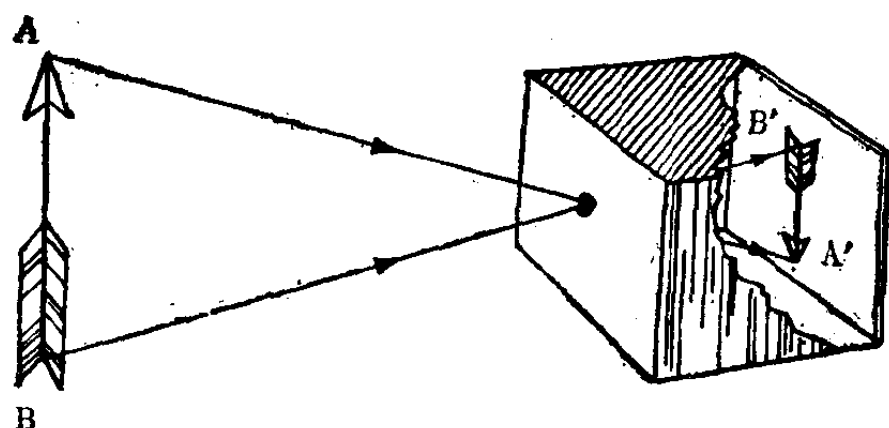


图 1

（例如欧几里德，Euclid，公元前330—260）也曾注意到光传播的直线性，但要比《墨经》晚一百来年，并且叙述得不及《墨经》完整。

总之，两千多年前，人们就发现了光是直线传播的这一特性。

在此，不妨讨论一下究竟什么是“直线”这样一个具有思辩性质的问题。关于一条线怎样谓之“直”，并不存在一个先验的绝对标准。人们最早认为把一条轻细柔软的线绳拉紧时，就接近于一段直线。当发现光的进行路径与拉紧的线绳一致时，便说光是沿直线行进的。然后又从这个观念出发加以推广，对于距离甚远不能拉线的两点，就把光从这点传到那点所经的路径叫做直线。这样一来，究竟直线的定义本身与光沿直线进行的结论孰先孰后，其间的逻辑关系便不甚了了。这种逻辑上的不严格对于一般实用问题影响不大；然而，当要确定几何学的严格基础时，这就不行了。用光传播的路径来定义几何学中直线这个基础概念，不能满足数学体系完整性的要求。这就无怪乎在高等几何学中，将点、

线、面等概念都作为抽象的研究对象来处理；并且首先建立一门几何学的公理体系。如果公理体系中有这样一条——在平面上过一直线外一点存在且仅存在一条直线与之平行，则由此推演出欧几里德几何学。这是我们容易接受的。上述关于光线与直线的哲理性的追根问底，有助于我们对下面两条公理的理解：在一平面上，过直线外一点至少存在两条（由此推证出无数条）直线与之永不相交——由此演绎出罗拔契夫斯基几何学；另一条是：在一平面上，过直线外一点不存在与之永不相交的直线——导致黎曼几何。关于这些内容，有兴趣的读者可参阅《高等几何学》，Н.В. Ефимов 著，裘光明译（高等教育出版社，1954年），第三章。

§ 2. 定量的研究——反射和折射

除了光在均匀介质中的直线传播特性外，古代科学家也从实验测量中归纳出光的反射定律。当光从物体表面法线之一侧射到表面上时，将从法线另一侧反射出来（图2）。入射线与反射线位于同一平面上，入射角 i 等于反射角 i' ：

$$i = i' \quad (1.1)$$

这就是反射定律。

光从一种介质（例如空气）进入另一种介质（例如水）的折射现象，虽然也早已发现，但是入射角 i_1 与折射角 i_2 （图3）之间的规律，却不象反射定律中（1.1）式那样容易找到，而是经过了一千多年的漫长岁月。

希腊科学家托勒密（Ptolemy，公元85—165）曾把测得的空气中的入射角 i_1 和水中的折射角 i_2 的对应关系列成一

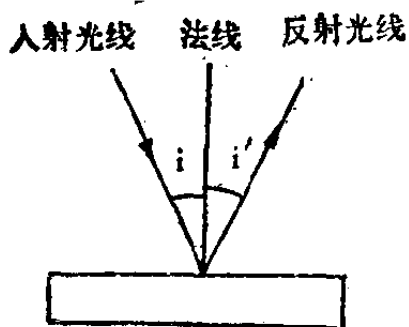


图 2

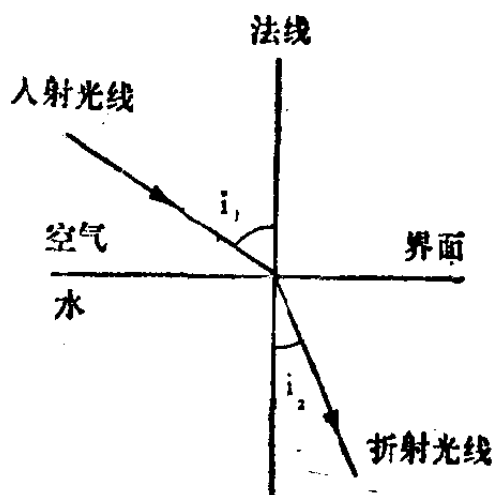


图 3

个表格如下：

i_1	i_2
10°	8°
20°	$\left(15 - \frac{1}{2}\right)^\circ$
30°	$\left(22 - \frac{1}{2}\right)^\circ$
40°	28°
50°	35°
60°	$\left(40 - \frac{1}{2}\right)^\circ$
70°	45°
80°	50°

把实验数据列成表格，这在两千年前的科学记载中是很罕见的（通常都说古希腊科学家从未做过任何实验，然而很难想象，在不知折射定律的情况下，若不做实验，怎么能得到表中的数据。不过应该指出，所有数据不一定是经过一一测量

而得的，可能是仅根据少量数据而作了内插，因为所有数值完全满足一条抛物线）。

在发现物理定律的各种途径中，下述步骤居于重要地位：首先是看到某种现象，然后我们对它进行测量并将数据列成表格（或画成曲线），然后去寻找事物彼此之间存在的规律。尽管上表在公元140年就出现了，但直到1621年，才有人终于找到了两列角度之间的关系！这个关系是荷兰数学家施耐耳（Snell, 1591—1626）发现的，他归纳出如下规律：若 i_1 是空气中光线的角度， i_2 是水中光线的角度，则 i_1 的正弦值等于 i_2 的正弦值乘上某一常数 n ：

$$\sin i_1 = n \sin i_2 \quad (1.2)$$

对于水和空气的情况，此常数 n 约等于1.33。

现在我们知道，当界面两侧的介质折射率分别为 n_1 和 n_2 时，（1.2）式的普遍形式为

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (1.3)$$

并且入射光线、法线与折射光线位于同一平面，这就是折射定律。

§ 3. 微粒说及其遇到的困难

直到十七世纪前半叶，人们关于光的认识仅限于上述这点内容。就是说，只不过弄清了光线的几何性质；至于光的本性是什么？亮度和颜色是怎么回事？人们还无从回答。再者，（1.2）式所表示的关系，究竟是数学的巧合呢，还是由物理规律支配的必然结果？亦在疑问之中。

在十七世纪前半叶，虽然也提出了对于光的本性进行探

讨的要求，但是，由于尚无充分的实践经验来为某种比较完美的假说奠定基础，所以这时期只是处于揣测阶段。即便有人也发一通议论，意在说明：与其在未掌握事实之前进行哲理性的探讨，莫若掌握事实之后再从事理论研究来得有力量云云，然而这不过是一些空谈而已。

十七、十八世纪是自然科学突飞猛进的时期。在生产斗争需要的激励下，人民群众在力学方面已经积累了丰富的知识，经过伽利略（Galileo, 1564—1642）、牛顿（Newton, 1642—1727）等人的总结，遂使经典力学成为一门完整的、系统的学科。随着生产力的发展和科学的进步，关于光的本性的探讨终于提到日程上来了。

1678年，惠更斯（Huygens, 1626—1695）在一篇论文中用波动原理解释了一些人们常见的现象。虽然把光理解为一种波动对当时人们来说是十分陌生的，但由于惠更斯的推理说服力强，他的解释简捷明了，而且他的实验结果与理论也非常符合，所以波动说本来是可以被人们较快地广泛接受的。但是，在当时并未引起人们的重视。原因是在惠更斯学说提出的前十年，正当牛顿由于力学和天文学方面的成就而初享威望之时，他开始了光学方面的研究，并且提出了这样一个观点：光是由很小的物质颗粒组成的，这些质点从发光体飞射出来，犹如一群飞行的枪弹。这种微粒在均匀介质中按力学定律作匀速直线运动。光微粒是如此之轻^①，以致于地球对它的引力根本表现不出来。牛顿认为，这些微粒能够自由地穿过透明物质，它们撞在视神经上就引起视觉——这

① “光”在英语中是light，与“轻的”是同一个词。

就是光的微粒说。

把光在界面上的反射解释为光颗粒象小球一样撞在板上而被反弹回来，还未遇上什么困难。可是解释折射定律就牵强了。按照牛顿的说法，须得假想，当光微粒撞击在光密介质界面上的那一刹那，光密介质会对微粒施加一下瞬时的吸引力，从而使微粒偏离原来的飞行方向。从力学观点出发，牛顿假定这种瞬间吸引力只改变粒子在界面法线方向上的分速度，即 v_{1n} 改变为 v_{2n} ，而切向分速度不变，即 $v_{1t} = v_{2t}$ (图4a)，

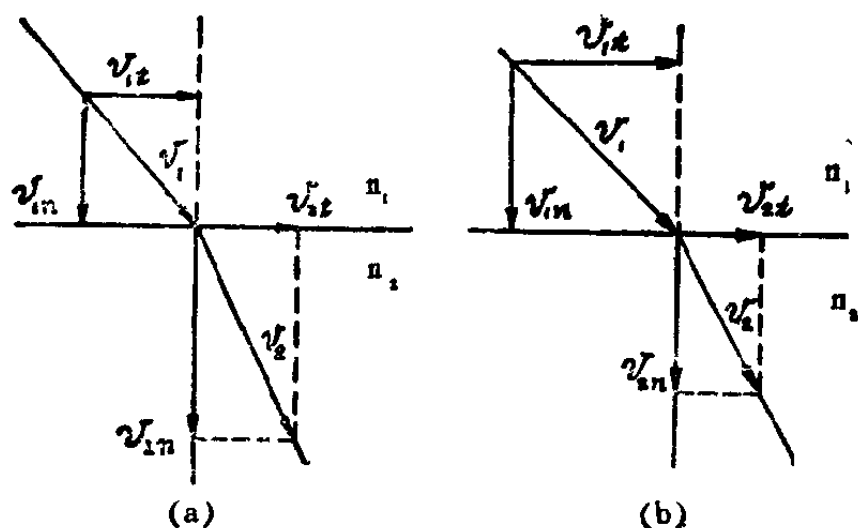


图 4

由此得出如下关系式：

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_{1t}/v_1}{v_{2t}/v_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (1.4)$$

将此式与折射定律 (1.3) 式比较，得

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.5)$$

其中 n_1 ， n_2 分别是界面两侧物质的折射率。

在牛顿以前，数学家笛卡儿 (Descartes, 1596—1650)

还曾提出过另一种设想来解释折射定律。即两种介质的分界面如同一层不结实的纱布，光微粒就象打出的网球，当它们射在这层纱布上而将纱布击穿时，因克服阻力而改变速度。他假定“纱布”仅会使光微粒的水平分速度变小，而不影响其垂直分速度（见图4b），由此得出的关系式为：

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_{1t}/v_1}{v_{2t}/v_2} = \frac{v_{1t} \sqrt{v_{2t}^2 + v_n^2}}{v_{2t} \sqrt{v_{1t}^2 + v_n^2}} \quad (1.6)$$

由于当时对于光在真空中或在介质中传播的速度都无法测量，所以不能确定（1.5）和（1.6）式是否正确。在第二章 §3 中将见到，后来对光的速度的测量证明，这两个关系式都不正确，而由波动观点导出的关系式是正确的。

牛顿曾观察过太阳光通过三棱镜折射后，投在屏上形成一个色彩按一定顺序排列的光带（图 5），牛顿称之为光谱。

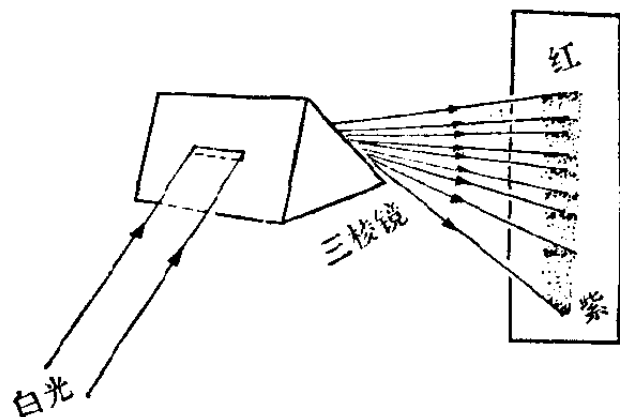


图 5

他把这种现象解释为：不同颜色的光对应于不同大小的微粒。这些微粒混合在一起成为白色。较大的颗粒到达界面时受到的瞬时力大，故偏折得厉害（紫色）；红色光的颗粒小，故偏折得少。

在这些构想中，牛顿显然是把引力理论中的一些东西生