折光之谜

张克 编著

中学物理教与学参考用书

科学普及出版社

中学物理教与学参考用书

折 光 之 谜

张 克 编著

科学普及出版社

内 容 提 要

本书内容包括光折射定律发现史；揭示落日奇观、海市蜃楼、天空彩虹、日月成晕以及宇宙透镜等折光的自然之谜；探索棱镜、透镜、眼睛和光纤等折光器件的光路规律及其应用，并展望折光技术的灿烂前景。

本书内容丰富、图文并茂、通俗易懂，令读者兴趣盎然。

本书是中学物理光学部分教与学很好的参考用书，又是一本光学科普读物。尤其适合青少年学生和从事光学工作的青年工人作为有益的读物之用。

(京)新登字026号

中学物理教与学参考用书

折光之谜

张 克 编著

责任编辑：王正藩

封面设计：王 福

正文设计：王 洁

*

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

北京昌平百善印刷厂印刷

*

开本：787×1092 毫米 1/32 印张：5.125 字数：113千字

1992年3月第1版 1992年3月第1次印刷

印数：1—2 520册 定价：2.50元

ISBN 7-110-02205-6/O·56

前　言

光折射——大千世界里最迷人的现象之一。

提起光线，人们脑海里对它总浮现着直线传播的认识。其实并不然，在两种媒质界面上，不均匀媒质内掠过的光线就不是直线行进。由于光的弯折，造成人们视线的错觉，泛起式样繁纷的自然之谜，诸如落日奇观、星星闪烁、海市蜃楼、天空彩虹、日月成晕、双象移动以及宇宙透镜等等。本书运用折射规律，通过现象观察、实验演示、数学推证以及人工模拟，期望在各位面前展示一幅幅清晰而逼真、严密且准确的折光图景，逐一揭开光折射的自然之谜。

光具有波动与微粒两象性。本书仅从微粒论出发撩开折光之谜的本质。至于光的波动说的解释在本书只是偶尔呈现，则是稀客。书中涉及较深奥的数学知识皆用附录形式于后列出，供读者自己查阅。

鉴于编者水平有限，书中不妥之处。敬请各位专家、读者批评赐教。在多年编写过程中，始终得到张斌如先生的教诲和无微不至的关怀。另外本书技术插图绘制得到文湘北、叶菁、李申等的热忱帮助，在此一并致谢。

编者　1991．1．

目　录

第一章　扑朔迷离的光折规律

光的折射，是鲜为人知的光学现象、人类对它的观察、实验以及规律的发现，经历了漫长而又曲折的过程，本章将介绍这个长达2000年的探索史、推导光折射定律并揭示它的微观的统一内涵。

一、古人之谜

回溯远古，希腊学者亚里士多德（公元前385～前323年）在他的书中记载着这样一个小实验："若取一个侧壁不透明且不太深的容器，它可以是盂、铁盒或锅 等(图1-1)。把 圆环放在容器底部，观察者从某一角度观看底部，看不到圆环，假如往容器里注入水，且不移动容器。当水面上升到某一高度时，观察者可看见放在底部的圆环。"

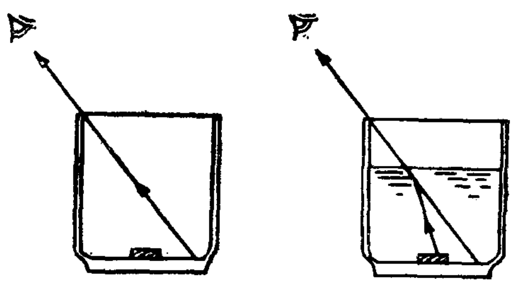

图 1-1

这段内容出自法文版的亚里士多德《反射学》一书。此书是反射学专论，上述实验都是折射现象，况且亚里士多德

时代的反射学称为物象学，折射研究则称为“屈光学”。故有人推测也许这段记录是翻译者在译成法文时另行增补。不过，我们还可以从公元前50年的卡尔迈《流星循环论》一书中找到考据。他写道：“……透过空气层的光线难道不会弯折吗？这现象与圆环在深槽底部看不到，水注入后浮现的情况，岂不是如出一辙吗？”因此毋庸置疑这个小实验在2000年前已经完成。亚里士多德或他的同代人已领略到圆环的呈现是光在水与空气界面上发生折射的缘故，至于这种折射是什么，它有何规律，他们感到困惑不解，或许他们记下这个观察，让后人以释其谜。

二、重演实验

500个春秋匆匆逝去，亚里士多德的科学哑谜一直无人问津，公元2世纪希腊的托勒密才重操这个实验。他通过观察首次建立入射角i和折射角γ的概念，并测定它们之间的数量关系式。

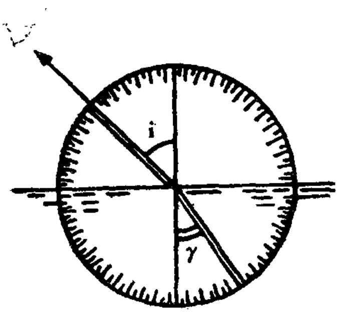

图 1-2

托勒密巧妙地使用一个划分为360等分的圆盘(图1-2)，在盘心处固定着两支直尺的端点，它们能绕着中心转动，且圆盘的一半浸没水中，让视线沿上端直尺望去，使两直尺处于一直线上。他找到上端直尺各个不同位置（即不同的入射角i值）和相应的下端直尺各个位置（即不同的γ值）。他从这些实验数据中指出：“入射角i和折射角γ之间有一个简单的正比关系（表1），但由于精确度不高，

表 1

入射角 i	折射角 γ	i/γ
10°	6.7°	1.50
20°	13.3°	1.50
30°	19.6°	1.53
40°	25.2°	1.59

且入射角较大就偏离这个比值，于是这个纪元前的科学之谜，中世纪重演实验，仍然不了了之。

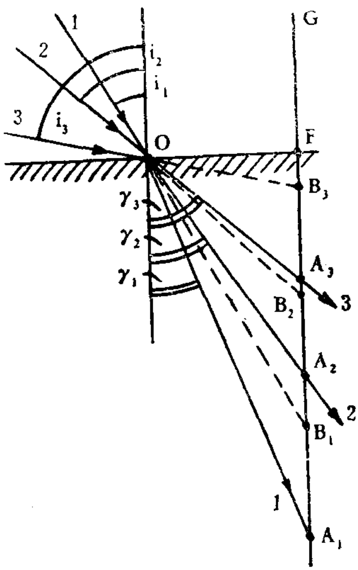

图 1-3

三、初获成功

光阴荏苒，千载一瞬。1626年荷兰数学家斯涅耳基于托勒密的实验构想，着手改进测量方法，提高精确度。终于成功地归纳出光折射定律。他的实验分析如图1-3所示。令FO为两种媒质界面，几束光线投射在界面的O点上。观察图中三条光线1、2和3。其入射角为i_1，i_2和i_3；γ_1、γ_2和γ_3则是它们相应的折射角。在分界面上任选一点F作它的垂线FG。用A_1、A_2和A_3表示折射线1、2和3与该垂线的三个交点，

而以B_1、B_2和B_3表示入射线1、2和3的延长线与该垂线的三个交点（图中这些延长线为虚线）。他细心地分析多组实验数据找到如下的关系式：

$$\frac{OA_1}{OB_1}=\frac{OA_2}{OB_2}=\frac{OA_3}{OB_3}$$

由上式可见，各折射线从O点到与FG的交点的长度跟与入射线的延长线从O点到FG的交点的长度之比，对于照射在界面上各光线均相等。亦即

$$\frac{OA_n}{OB_n}=\text{常数} \qquad (1-1)$$

（式中n表示任意一条光线）。由（1-1）式立即展示这个折射规律的一般公式。因为$OA_n\sin\gamma_n=FO$，$OB_n\sin i_n=FO$。所以（1-1）式可写成：

$$\frac{\sin i_n}{\sin \gamma_n}=\text{常数} \qquad (1-2)$$

由此可见，在两种媒质的分界面上，任意的入射光线的入射角正弦与折射角正弦之比，对于这两种媒质是常量。

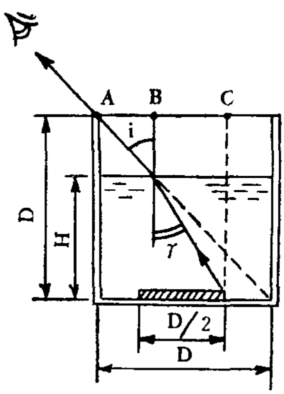

图 1-4

那么亚里士多德这个千古之谜，将如何运用这个折射规律加以解释呢？设有一个圆柱形容器，其高与底部直径相等。在底面中央置一个圆环，它的直径为底面直径的一半。观察者只看到底部边缘，看不到圆环。若要让他看到圆环的边缘，应往容器注入多高的水？水的折射率$n=4/3$。

令D表示容器底部直径，H为观察者看到圆环边缘时，容器内水面的高度（图1-4）。根据斯涅耳定律可知：

$$\frac{\sin i}{\sin\gamma}=n \tag{1-3}$$

用（$D-H$）$\mathrm{tg}i+H\,\mathrm{tg}\gamma=\frac{3}{4}D$，或（根据题意：$\mathrm{tg}i=1$）

$$\frac{D}{H}=4(1-\mathrm{tg}\gamma) \tag{1-4}$$

表示$AB+BC=AC$。由$\mathrm{tg}\gamma$化为$\sin\gamma$，且利用（1-3）式得

$$\mathrm{tg}\gamma=\frac{\sin\gamma}{\sqrt{1-\sin^2\gamma}}=\frac{\sin i}{\sqrt{n^2-\sin^2 i}}$$

$$=\frac{1}{\sqrt{2n^2-1}} \tag{1-5}$$

把（1-4）式代入（1-5）式，得

$$\frac{D}{H}=4\left(1-\frac{1}{\sqrt{2n^2-1}}\right)$$

因为$n=4/3$，所以$H/D=0.67$。由此可见当注入水的体积达到整个容器的0.67倍时，观察者临能看到圆环的边缘。

接着谈谈光全反射现象及其临界角计算。在讨论光在两媒质界面上折射，应同时涉及光的反射。法国学者O。菲涅耳（1788～1827）圆满地解决这个课题。在考虑到入射光强度、入射角以及偏振等因素的影响，建立入射光与折射光强度之间的关系式。这些关系式称谓菲涅耳公式。菲涅耳公式不是本书涉及范围。因为解释它，要用光的电磁理论，例如光偏振特征应有专论。因此下面讨论光从折射率较大媒质（光密媒质）进入折射率较小媒质（光疏媒质），只谈折射

光强与反射光强之间关系，撇开其性质的论述。

如图1-5所示入射角i不同的四种情况。当光在两种媒质界面上，从折射率为n_2的媒质进入折射率为n_1的媒质时，且$n_2>n_1$。若逐渐增大入射角，可看到折射光线强度逐渐减少，反射光强却增强。在入射角增至某一极值：

$$c=\arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \tag{1-6}$$

时，其折射角变为90°。该式由折射定律$\frac{\sin i}{\sin\gamma}=\frac{n_1}{n_2}$直接导出。其中$c$角叫做**临界角**。在$i$趋近$c$过程中，折射光强度逐渐减弱（图1-5b）。当$i=C$时，折射光强为零（图1-5c）；当$i>c$时，光束在界面产生全反射（图1-5d）。

必须强调一点，当入射角一旦到达临界角时，似乎光折射线会突然"跃迁"为反射线，事实上并无任何突变。当i角接近临界角c时，折射光线强度不断减弱，直至零。而反射光强逐渐增大，直至等于入射光强。

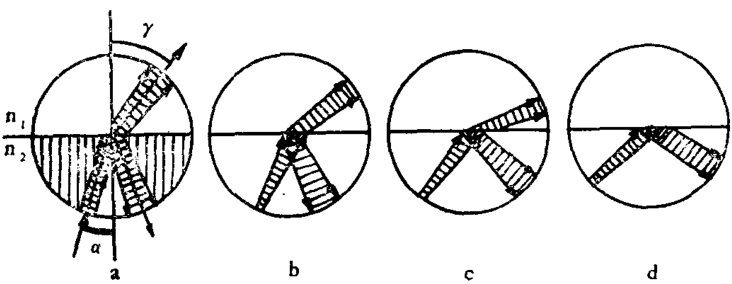

图 1-5

从光强的角度上分析，全反射仍然比特殊装置的金属镜反射要完善些，因为镜子里或多或少总会吸收一部分光能。

潜水员沉入水底常常遇到全反射现象。例如一位身高为

h的潜水员处于深度为H的水底，这位潜水员由站立处到他能够看到水底的最小距离多大？设水折射率$n=4/3$。

令L表示待求距离，A表示由于全反射潜水员能看到的最靠近他的小底的点。光线从A出发到达潜水员的眼睛的过程如图1-6所示。其临界角C值由下式给出：

$$\sin C=\frac{1}{n} \tag{1-7}$$

从图可见

$$L=h\text{tg}C+2(H-h)\text{tg}C \tag{1-8}$$

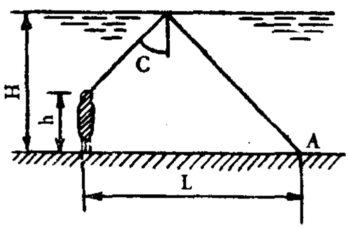

图 1-6

因为$\text{tg}C=\dfrac{\sin C}{\sqrt{1-\sin^2 C}}$，且利用（1-7）式。把(1-8)式演化为 $L=\dfrac{(2H-h)}{\sqrt{n^2-1}}$，则得 $L=\dfrac{3}{\sqrt{7}}(2H-h)$。

最后介绍一种折射线作图法。如图1-7所示一种折射线的简便作图法。上图表示光线从低折射率n_1射入高折射率n_2的情况。下图则表示光线行进相反情形。图里令$n_1=1.4$，$n_2=1.8$。

观看上图。图里画出在媒质分界面上以O点为共同圆心的两圆，其半径依次用两媒质折射率值表示。如图1是正比

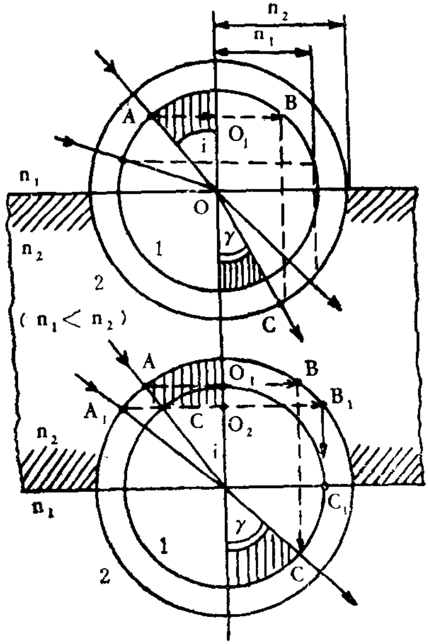

图 1-7

于n_1值为半径的圆，而圆2为与n_2值成正比的值为半径的圆。设入射角为i的入射光线与圆1的交点为A点，过A作一水平线交于圆1的另一点B，尔后由B向下作一垂线交于圆2的C点，那么待求折射线必将过C点。参照图可知下列各式，不难证明这点：

$$\sin i=\frac{AO_1}{AO} \qquad \sin\gamma=\frac{O_1B}{OC}$$

$$\frac{\sin i}{\sin\gamma}=\frac{OC}{AO}=\frac{n_2}{n_1}$$

看看图1-7，圆1和圆2的题设一样，只是图1-7A点和B点不

位于圆1，而是位于圆2上。且C点不在圆1上，而在圆2 上。设入射线以C角进入，使得光线与圆2交点到垂线OO_1的距离（线段A_1O_2）等于圆1的半径、可见折射光线必通过C_1点。

则角C就是临界角。即 $\sin C=\frac{A_1O_2}{A_1O}=\frac{n_2}{n_1}$。

四、一桩悬案

在光学发展征程上，斯涅耳总结出光折射定律。他似乎已经到达成功彼岸，可惜在他生前并没有发表他的科学见解，且他的论文只推导至（1-1）式。然而率先公诸（1-2）式于世，并宣布导出正弦之比为常数值的是法国著名学者笛卡尔。笛卡尔一生从事物理、数学和哲学研究，他信奉自由突出个性。他的治学作风为不少同代人所尊重。笛卡尔在1637年论文发表后，人们纷纷指责他偷袭斯涅耳的科学成果，于是，在欧洲科坛上掀起旷日持久的轩然大波——折射定律的专利权纠纷案。这件科学悬案至今已过3百多年还没公断。故在习惯上把光折射定律叫做斯涅耳定律，而法国的教科书则称为笛卡尔定律。

尽管笛卡尔是否知道斯涅耳的论文，人们对他的非难似乎不公。因为笛卡尔导出折射公式是从光的微粒概念，在今天看来十分模糊和幼稚。他把光的传播看作压力在周围充满着以太物质的物体内传递过程。他在论文《屈光学》里写道："因为自然界没有真空，且所有物体都有气孔，所以为让这些气孔充满着十分稀薄和流动的物质，必须从天体到地球不断地传递这些物质……光不是别的，正是某些运动或很稀薄的充斥在其他物体气孔的物质获得作用"在研究光折射时，笛卡尔把它比喻成扔在水中的球，他相信"光线作用如球的

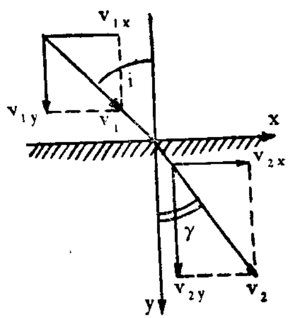

图 1-8

运动一样”[1]。不妨看一看笛卡尔观点，如图1-8所示。设v_1——光在第一媒质内光压传递速度，v_2——在第二媒质内光压传递的速度。他把这两个速度分别沿平行于界面（X—坐标轴）与界面垂直的方向（Y坐标轴）分解，他指出当光线从一种媒质进入另一媒质时，只改变Y分量的矢量，而且在较密媒质内，这个分量比较疏媒质大，亦即

$$v_{1x}=v_{2x} \qquad v_{1y}<v_{2y} \tag{1-9}$$

由图可知：

$$\frac{\sin i}{\sin\gamma}=\frac{v_{1x}/v_1}{v_{2x}/v_2}=\frac{v_2}{v_1} \tag{1-10}$$

笛卡尔成功地导出常数项，却犯了一个原则性错误：光在光密媒质的传播速度较光疏媒质快，一般称（1-10）式为斯涅耳公式。

几个世纪以来科学界对此桩悬案的审查无暇顾及。旋即转向修正笛卡尔理论模型的错误观点，提出新的理论，诸如费马原理和惠更斯方法。用它去推证光的反射和折射定律，验证它的正确性，从而推动光学理论的发展。

---

[1] 笛卡尔经典质点力学观点在1982年《物理教学》3月号上《笛卡尔，牛顿和斯涅耳定律》一文给予肯定。该文指出，笛卡尔错误不是他的指导思想，而是他落实假设用错条件。