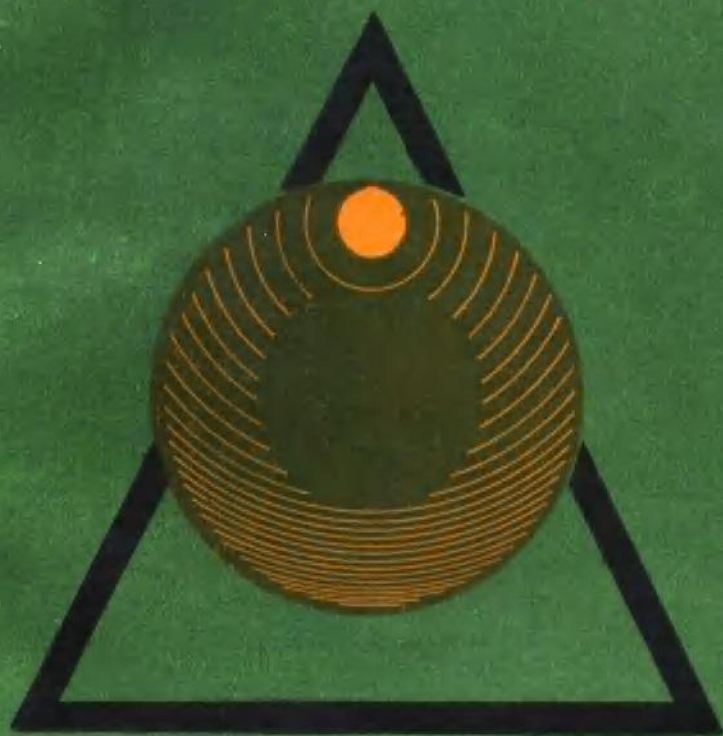
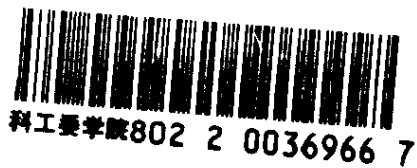


I. 牛 顿

光 学





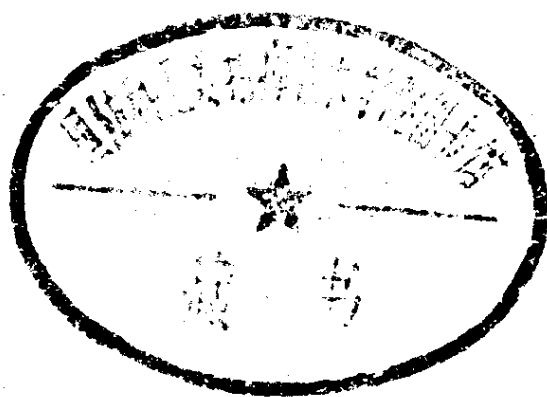
光 学

——关于光的反射、折射、拐折和颜色的论文

I. 牛 顿 著

周岳明 舒幼生 邢 峰 熊汉富 译

徐 克 明 校



科 学 普 及 出 版 社

OPTICKS
OR
A TREATISE OF THE REFLECTIONS,
REFRACTIONS, INFLECTIONS AND COLOURS
OF LIGHT

BY
ISAAC NEWTON G. BELL AND SONS,
LTD. 1931 Reprinted from the Fourth Ed-
ition (1730)

* * *

光 学
——关于光的反射、折射、拐折和颜色的论文

艾萨克·牛顿 著
周岳明 舒幼生 邢 峰 熊汉富 译
徐克明 校

*

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：850×1168毫米1/32 印张：7.75 插页：1 字数：206千字

1988年4月第1版 1988年4月第1次印刷

印数：1—2,650册 定价：2.20元

统一书号：13051·1532 本社书号：1543

ISBN 7-110-00246-2/O·7

序

幸运的牛顿，幸福的科学童年！谁要是有时机和宁静，谁就能通过阅读这本书，再现伟大的牛顿在他青年时代所经历过的那些奇妙事件。对于牛顿来说，自然界是一本打开的书，他能不费力地阅读它的文字。他惯常将经验的素材整理得井然有序的构思，仿佛自发地从经验本身，从那些绝妙的实验中涌流出来；他象安排玩具那样安排这些实验，如今又以富有感情的笔触来详尽描述它们。在阐述中，他把实验家、理论家、技工以及艺术家（并不是不重要的）集于一身。他站在我们面前是那么坚强、自信而又超群：他的每句话和每幅图都显出他在创造中的乐趣和精微的准确性。

反射，折射，透镜成象，眼睛的作用模式，不同种光的光谱分解和再复合，反射望远镜的发明，颜色理论的最初的基础，虹霓的基本理论，从我们身旁列队而过；而最后来的是他对薄膜颜色的观察资料，它是下一个伟大理论进展的起源，尽管这一进展还不得不等待 100 多年后由托马斯·杨（Thomas Young）来实现。

牛顿的时代早已过去而被人遗忘了，他那一代人疑虑重重的努力连同他们的遭遇都已经从我们的认识范围中消失了，而只有少数几个伟大思想家和艺术家的作品还留传下来，使得我们和我们的后人感到欢欣和情愫高尚。牛顿的各种发现都已进入举世公认的知识宝库：他的光学著作的这一新版仍然受到由衷的感激之情的欢迎，因为单是这本书就能使我们一睹这位伟人的个人活动而获得乐趣。

A. 爱因斯坦

导 言

100年前，世人自以为有资格对牛顿在理论物理方面的工作给予最后评判。他的引力定律往往被看作最伟大的科学发现，被认为是终极的和无懈可击的，是一切其它定律都一定要据以构成的典型的定律；自然界的一切最终都以在真空中运动的粒子间的吸引和排斥来解释。然而，提及牛顿的光学著作，我们的先辈们谈起来就不那么热情了；它的许多光辉成就是确凿无疑的，但是普遍认为牛顿由于赞成光的微粒说而使自己受到损害，而微粒说是绝对错误的。因此，在19世纪后半叶，在《原理》的一些部份仍然为年轻人所正规地学习的同时，《光学》却多少被看作一本仅仅对科学史学家感兴趣的书籍。

时代的变化有多大呀！在19世纪中叶，法拉第和麦克斯韦以普适媒质的相邻粒子间的感应的传播取代了带电粒子间的力的库仑定律（它类似于牛顿引力定律）；此后，超距作用（action-at-a-distance）一直命途多舛。1915年牛顿定律本身就败下阵来，并在理论的（虽然不是实践的）意义上为爱因斯坦的广义相对论所代替。甚至欧几里得几何也由于它含有过多的 Fernwirkung（超距作用）的味道而遭到反对。

近些年来光学理论的进展对旧派物理学家来说似乎是更为令人惊讶的。光的微粒观念在消亡一个世纪之后于1905年复活了；当时爱因斯坦借助于普朗克的量子原理解释了光电效应，因而导致假定光“量子”的存在。他的构思被实验特别是被“康普顿效应”充分证实，此效应证明当一个光量子与一个电子碰撞时，遵从碰撞的普通的动力学规律。与此同时，证明光由波组成的较老的实验也没有失效；因此我们被迫承认波动说和微粒说两者都是正确的。

1927年以前，这后一个主张会被看作在关系上的一个矛盾；

事实上这里出了一个类似于 30 年前出现的那样的佯谬 (paradox), 当时迈克耳孙和莫雷证明, 他们的实验室相对于以太的运动在任何时刻均为零, 尽管其运动按通常理解是不断变化的。迈克耳孙—莫雷佯谬通过对空间和时间的根本观念作更严密的考察而解决了, 最终导出〔狭义〕相对论; 同样, 光的波动说和微粒说共存的佯谬通过对基本原理作更严密的考察而无论如何已局部得到解释, 导出了海森伯的测量精度绝对极限定律, 并且导致人们认识到波粒二象性现象, 预计不仅在光的情况下有这种现象, 而且在电子 (它以前仅仅被看作微粒) 的情况下, 甚至在原子的情况下也都有这种现象。

这一切对牛顿光学的修正意见具有影响。在牛顿的著作的某些部份中提出的微粒说与波动说的古怪混合, 对 19 世纪的物理学家来说是一块绊脚石, 却已发现它与现代观点存在着可观的相似性; 而实际上晚近一位著名物理学家在表述他本人的一些杰出工作之后, 最后援引了形成〔本书〕第二编命题 12 较后部份的那段著名的话, 并评论说, “在经过数世代被看作是拯救一种灭亡的理论的人为努力之后, 我证明了牛顿的这一猜测是天才直觉的至高无上的范例。”所以这里再版的这部著作, 在主要被推崇为显示理论和实验本领的奇妙结合的历史里程碑三个世代之后, 现在由于其现有的科学意义而再次被攻读。无论如何, 它总会使人们不得不注意, 因为它的课题是牛顿从中作出了重大发现的最早的也是最后的课题, 并且因为它是仅有的牛顿本人为出版社编写和修改过的并在相继的版本中用新材料充实过的重要科学著作。现在让我们尽我们所能, 来追踪其作者的思想发展。

牛顿通晓光学看来开始于当他还是剑桥大学的一名学生时对开普勒的《屈光学》(Dioptrice) 的学习, 该书出版于 1611 年。正确的折射定律那时还不知道, 只是假定为折射角正比于入射角; 当入射接近于垂直时, 它等价于正确的定律; 而借助于这一假设开普勒给出了透镜和折射望远镜性能的一个正确解释, 同在 1611 年出版了斯帕拉托大主教安东尼奥·德·多明尼斯的《视觉范围和

光度》(De radiis visus et lucis), 它给出了最初的对虹霓的大体正确的解释, 并可能引起了牛顿对大气光学的兴趣。

从科学发现的观点看价值较小, 但也许更有激励作用的, 是笛卡儿的著作, 其《屈光学》(Dioptrique) 和《大气现象》(Météores) 1638 年在莱顿出版。实际上在 17 世纪后半期, 笛卡儿的理论是权威的。按照笛卡儿哲学, 所有空间——甚至在恒星之外最遥远的距离上——都是充满物质的, 所以一个粒子只有通过占据移走的其它粒子的场所才能运动。光被设想成本质上是透过这种粒子的致密集体而被传送的压力; 视觉可以因此比作盲人用他的手杖触到的物体存在的感觉, 压力沿着手杖从物体传送到手, 类似于压力透过充满物质的空间从明亮的物体传送到眼睛。

笛卡儿猜测“光和颜色的多种多样”是由于物体运动的不同方式: 不同颜色与粒子的不同旋转速度相联系, 那些旋转最快的粒子给出红色感觉, 较慢的粒子给出黄色, 而最慢的粒子给出绿色和蓝色。

除了已经提到的著作之外, 从 1664 年起牛顿在剑桥曾接受卢卡斯教授巴罗 (Barrow, Lucasian Professor) 的口头讲授, 他讲的光学课文后来 (1669) 出版了。它在很多方面是极妙的, 但是在第 12 讲末尾巴罗说明他关于颜色的观念却很粗糙: 例如, 红色是发出光比通常更集中的, 但是被暗的间隙所中断; 黄色基本上由白色点缀了一些红色所组成, 如此等等。

另外三部值得注意的著作问世于约在牛顿已开始他的独立研究之时, 即: 詹姆斯·格雷戈里 (James Gregory) 的《光学进展》(Optica Promota, 1663), 表述了他的反射望远镜; 天主教耶稣会神父格里马耳迪 (Jesui Father Grimaldi) 的《物理数学》(Physico-Mathesis, 1665), 包含他的折射发现; 罗伯特·胡克的《显微术》(Micrographia, 1665-7) 中, 他表述了薄片的颜色, 并通过引进干涉观念而解释了它们, 长期以后一个完善的理论就以它为基础。关于颜色和光的本性, 他提出的见解为, 光是媒质的细微和快速的振荡运动, 而且颜色取决于光脉

动的形式：“蓝色是视网膜上的一种倾斜的和混乱的光脉动的印象，其最弱的部份在前而其最强的部份在后”；可是在红色中，是最强的部份在先而最弱的部份在后。

牛顿本人作为一个初期的光学工作者的活动看来开始于1663年，当时他开始磨制透镜并对望远镜的结构和性能感兴趣。他感到降低和消除色差的需要，在1666年初（那时是23岁）他购买了一块玻璃棱镜“以此来试验颜色现象”。为此目的“弄暗我的房间，并在我的护窗板上开一小孔，让适量的太阳光进入，我将我的棱镜放在阳光进入处，于是光会因此折射到对面墙上。”观察彩色光谱的长度比其宽度大许多倍，他在做过更多的实验之后导致这样一种观点，通常的白光确实是每一种不同颜色的光线的混合，光谱的伸长是由于玻璃对这些不同的光线折射本领不同。

“同一可折射性总是属于同一颜色，而同一颜色总是属于同一可折射性。”

这一发现是他的第一篇科学论文的主题，它发表在1672年的皇家学会《会刊》中。它的出现引起了一场尖锐的争论。特别是胡克激烈地指责它；而随它的发表而来的不愉快的结局与后来牛顿曾表示不情愿将他的结果公诸于世很有关系。就象他的追随者麦克劳林（Maclaurin）所说，“在他的青年时代，他的极好的发现所遭到的激烈的反对，使世界多年丧失它们的充分报导，直到在学者中出现了一个较大的接受它们的倾向，和由于在争论中某个出版物上的一种见解可能涉及到他，而导致他起来保持他所作出的其它重要创造。”这时事实上他认真地打算一概放弃研究。“我打算，”他写信给奥尔登伯（Oldenburg）说，“不进一步挂心哲学问题；而因此我希望，如果你发现我不再干那类事的话，你不会为此生气。”

在这场讨论的过程中，牛顿乘机更充分地说明他关于光的本性的观点。胡克持着光是一种物质材料的学说来责难他。事实上牛顿这时非常不喜欢较为猜测性的那类假说，他的目的是创造一种直接基于观测而不含有就事物的隐藏的机制所作的一切想象的

理论。“他常常，”麦克劳林说，“称他的哲学为实验哲学，顾名思义，它与那些仅仅是天才和虚构的产物的体系之间有根本差别。”“假说，”牛顿自己说，“在实验哲学中是不考虑的。”因此，在对胡克的批评的答复中，他断言他关于颜色的观点与光学过程的终极性质的任何特殊构思没有任何联系。然而，为了把它们与胡克的假设联系起来，并确信颜色是光的固有特征，他推断它应该与微粒的某些确定性质或以太振动相联系。他注意到，对应于不同颜色的微粒理应象发出不同音高的发声物体那样，在以太中激起不同类型的振动：而“如果通过任何方法那些不同大小的（以太振动）被互相分离，那么最大的振动引起一种红色感觉，最小的或最短的引起一种深紫色感觉，而中间的振动引起居间的颜色感觉。”

这句话是单色光按本性实质上是周期性的这一原理的第一次阐明，而且周期的不同与颜色的不同相对应。它与声音的类似是显然的：“很大程度上象空气振动的方式，按照它们的不同大小，激起不同的声音感觉。”他说，而不妨顺便注意到，牛顿联系声音的解释而提出的在弹性媒质中周期振动的理论，理应使他有资格在那些在光的理论上发挥最大影响的人中占有一席之地，即使他没有对后一课题作出直接贡献。

甚至牛顿同代人中最卓越者，也极难接受他的光具有无数不同的、独立的、不能互相转变的颜色，并为某一确定的可折射性所表征的学说。它似乎被两种颜色的颜料相混合产生第三种颜色的颜料的实验所驳倒，又被属于颜色视觉的主观生理学理论的其它实验（这里颜色确实由原色所组成）所驳倒。甚至惠更斯在1673年说过，“一个可以解释黄色和蓝色的假说，理应足以解释其余所有的颜色。”

普通的白光是不同可折射性的光线的一种杂色混合这一发现，导致牛顿更充分地理解到消除透镜色差的困难。由于认为所有透明物体具有相同的色散本领，他错过了消色差的发现；并且断言“改善给定长度的折射望远镜希望渺茫”；这导致他转向以反射，而不是以折射作为光学仪器的基本指南。1668年他发明了今

以他的名字命名的反射式望远镜，内中有一块小平面镜与仪器轴倾斜成 45° ，将大球面镜反射的光线在到达焦点之前的邻近处截住，从而把它们投射到镜筒的侧面，它们由此进入目镜：一件样品于 1671 年送交皇家学会。在说明书《关于一种新的反射折射望远镜的说明》中指出“物体被放大约 38 倍，”而“一架长约两英尺的普通望远镜只能放大 13 或 14 倍。”

1675 年年终，牛顿向皇家学会送交一篇论文，在这篇论文中稍微改变了通常反对假说的态度，他指出此时他感到十分倾向于假说。文中假设了“一种以太媒质，结构与空气颇为相同，但远为稀薄、细微得多，却具有更强的弹性。”这样的以太是“一种类似于空气的振动媒质，只是振动得远较迅速和细微”；并且它“弥漫于所有自然物体的空隙”，尽管在那些空隙中要比在自由以太空间中远为稀薄得多。从太阳和各行星进入到空虚的太空的过程中，它不断地变得越来越稠密，由此引起了引力，“每个物体都力图从该媒质的较致密部分走向较稀薄部分。”

然而，不能设想以太本身的振动可以构成光，因为直线传播性无法由此得到解释。“如果光是挤压或运动，那么不管传播是瞬时的还是历时的，它总会弯曲进入阴影。”因此光被看作是“从明亮的物体传播出去的属于某种不同种类的东西。”那么假定光线是“从发光物质向四面八方发射的小物体，”这些小物体“在它们碰撞到任何折射或者反射表的地方，一定是必然地在以太中激起振动，如同石子投入水中必然地在水中激起振动一样”；光通过这些振动将热传送给物体。因此以太是光和有质物体之间的媒介物；例如，折射中一条光线遇到一层以太，密于或稀于该光线前此通过的以太，于是因为一种物质性介质与另一种之间以太密度的差别而一般地使光线偏离其直线路径。显然在这一假说中以太密度所起的作用在很大程度上同于介电常数(dielectric constant)在光的电磁理论中起的作用；而且牛顿关于引力的意见类似于维谢尔特(Wiechert)及其同事们的现代假说，即引力势是一种可以称为以太的电容率(specific inductive capacity)和磁导率

(permeability) 的东西的表达式，这些量因引力物体的存在而受影响；物质（假定其本性是带电的）被吸引到介电常数较大的地方。

此外还假定因实质物体引起的以太的凝聚或疏散从该物体的表面扩展到一小段距离，使得由此引起的拐折事实上是连续的，而不是突变的：这进一步解释了衍射，牛顿认为它“仅仅是一种新的折射，或许是因为在光到达不透明物体附近时外界的以太开始变得比它在自由空间中稀疏些而造成的。”

以太在关于光和引力上所引起的双重作用，在牛顿的思想中引起了对这两门学科的一种肯定关联：尔后的 10 年中当他发现引力可以完整地用这样的定律来描述，即宇宙中每个物质粒子以一个与彼此间距离平方成反比而变化的力吸引每一其它粒子，——定律中没有提及以太——此时他开始把以太假说看作是某种不必要的东西，并希望也从光学中摈弃它。这时反对以太的最有力的论据是以太几乎不能与他的新的天体力学协调起来。“对于流体媒质充满太空的大障碍，来自行星和彗星的有规则而很持久的运动，除非这些媒质是极度稀薄的。因为由此表明，太空没有一切可察觉的阻抗，从而也就没有一切可察觉的物质。”这样虽然牛顿仍然象人们认为的那样保持着他不依赖于所有假说并对它们不感兴趣的正式态度，但是可以公正地说，在他的人生后期，他更明确地倾向于一种纯微粒理论。他以明显赞赏的口吻引述“最古老、最著名的希腊和腓尼基哲学家，他们构思出了真空、原子及原子的重力，这是他们哲学的最早的原理”：从而将自己列为留基伯（Leucippus）和德谟克里特的后继者。“看来对我是可能的，”他在最后的疑问中写道，“上帝在开始创世时将物质造成实心、结实、坚硬、不可入、可运动的粒子。”甚至连光线“看来也是坚硬的物体，”它们在反射与衍射现象中受到一般实质物体的排斥，实质物体的小粒子具有一定的“本领、效能，或者力量，它们借此在一段距上不仅作用于光线上，而且彼此也互相作用，从而产生出一大部分的自然现象。”

牛顿比他意识到的更多地卷入微粒理论，这一点从他在《光学》第一编命题6给出的折射定律的证明中明显可见。他告诉我们证明是“普遍的，并不限定是什么光，或被何种力所折射，或假定比折射物体沿垂直于其表面的直线作用于光线更多的东西”；尽管如此，在考察他的证明时，我们发现它包含着这样的命题（后来在第二编命题10中重复过），即光的速度在透明媒质中比在真空中更大：这是微粒理论的一个显著的标志。

在他的后期，对微粒理论的这种倾向性也表现在他对该学科的两大大问题的处理上：薄膜的颜色和双折射。

关于薄膜的颜色，通过发展胡克原始的干涉概念可以（后来已构思）出一个基于波动原理的满意的解释；然而牛顿采取一条迥然不同的途径，并创造了易于反射和透射的突发理论，这可在《光学》第二编命题12中找到。他假定“每条光线在通过任何折射表面的途径上进入到某个瞬变组态或状态，在光线行进中这些状态以相等的间隔复原，并且每次复原都使光线倾向于容易地透射过下一个折射表面，在两次复原之间则容易被表面反射。”两个依次相连的、易于透射的倾向之间的间隔，即“突发间隔”，他设想依赖于颜色，红光最大而紫光最小。于是如果一条单色光线落在一片薄膜上，就它在这两个表面上的透射与反射而言，其命运取决于突发长度对薄膜厚度的依赖关系；以此为基础，他建立了一个关于薄膜颜色的理论。很明显牛顿的“突发间隔”在一定程度上对应于波动理论中被称为光的波长的量；但是诚如牛顿所说“这是何种作用或属性，究竟它在于光线或媒质，还是别的某些东西的一种圆周运动或是振动，我不在此查究，”基于波动原理对突发的一种有点含糊的解释在疑问17中提出，而后又在疑问28和29中作了进一步的阐发。

关于双折射，它是在1669年由丹麦哲学家伊拉兹马斯·巴托林（Erasmus Bartholin）发现的，并由惠更斯于1690年在他的《光论》（*Théorie de la lumière*）中进行了讨论。牛顿在他1717年出版的《光学》第二版中收入这一问题，并证明惠更斯

的观察造成有必要假定，由双折射获得的一条光线不同于一条寻常光的光线，这就相当于截面为矩形的一条长棒不同于截面为圆的一条长棒；换言之，一条寻常光的光线的性质在与传播方向成直角的所有方向上都是相同的，然而通过双折射获得的一条光线具有与自身方向成直角的特殊方向有关的性质。“每一条光线，”牛顿说，“因此有两个相对的侧面，原先赋有一种反常折射所依赖的性质，而另外两个相对的侧面并不赋有该性质。”这样一条光线在晶体表面的折射取决于其侧面与晶体主平面的关系。

这一卓越的直觉是光的偏振的发现——偏振系——牛顿在疑问 29 中参照磁体两极而取名。不幸的是，通过一系列对于牛顿时代的知识来说是颇为完善的推理，这一伟大的进展却导致他更为决意拒绝波动理论：一条光线竟然具有的这种性质，在他看来对于光是由类似于声波的波组成的假说的一种不可逾越的障碍。“因为压力或者运动，”他说，“从一个发光物体通过一种均匀媒质传播出来，必定在所有侧面都是相同的；然而通过那些实验显示，光线在它们的不同侧面有不同的性质。……至少对我来说，如果光只不过是以太而传播的挤压或者运动，那么这似乎是费解的。”

按这种态度他接近《光论》给出的双折射理论。惠更斯在其书中利用现在以他的名字命名的原理，对正常和反常光线给出了完美的解；此原理即反映任何瞬间的扰动的波前是在任何居先瞬间的波前的各个面元上产生的子波的包络。但是牛顿无心鉴赏任何构想在以太中的波的事情，而在疑问 25 中他给出了反常光线折射的一条准则，实际上它是不正确的。

余下要说的是关于我们面前这一专著的话。它并非是他的初次尝试：因为 1692 年 2 月当他去小教堂时他在他的屋子里留下了燃着的火种，“不知怎么搞的，火烧毁了他的文稿，其中有一部关于光学的巨著，内容包括 20 年的实验和研究。”其后继者，即现在这本著作的第一版，直到 1704 年才问世；就我们所知道的牛顿如何从论战中退缩，我们可以揣测一种与这样一种事实的可

能的联系，即他的最执拗的对手胡克已由于在 1703 年去世而被排除。其它版本，包括附加的“疑问”，在 1717、1721 和 1730 年出版；现在的那个版本是“由作者亲手修订并在他逝世前留给他的书商的”：这次重印就是采用这个版本。

E. T. 惠塔克

声 明 I

部分随后的关于光学的论文,是 1675 年应皇家学会一些先生们的要求而写的,然后送交其秘书,并在其会议上宣读过,而其余的是为了完成这一理论而在约 12 年后增补的;除了第三编以及第二编最后的命题之外,都是以前从散篇的论文中收集起来的。为了避免卷入关于这些问题的争论,我推迟出版至今,并且要是没有朋友们的再三要求说服了我,我一定还会继续推迟下去。如果还有这一学科的任何其它论文出自我手的话,那么它们是不完善的,而且也许是在我做了这里记下的一切实验,并对关于颜色的折射和组成的定律自己感到充分满意以前写的。我在这里发表了我认为是适于出口的内容,没有我的允诺希望不要翻译成其它语言。

我已尽力说明有时出现在太阳和月亮周围的色晕;但是因为缺乏足够的观察,该问题需留待进一步考察。第三编的课题同样留下一些不完善,既没有做完当时我环绕这些问题想做的全部实验,又没有重做那些我已做过的实验中的某一些,直到我自己对它们的全部细节感到满意为止。传播我已做过的实验,将其余的留给他人进一步探究,是出版这些论文的全部目的。

在一封 1679 年写给莱布尼茨先生的、并由沃利斯博士(Dr. Wallis)发表的信中,我曾提到一种方法,利用它我发现了一些关于二次曲线图形的,或者将它们与圆锥曲线或其它可能借以比较的最简单的曲线图形相比较的普遍定理。而一些年前,我借出一份包含这些定理的手稿,以前曾经在转抄中遇到一些问题,我趁此机会加以发表,给它在前面加了一个“导言”并增补了一个关于该方法的“注释”。我还编入了另一关于第二类圆锥曲线图形的短文,它也写于许多年前,并告诉过一些朋友,他们曾要求将它发表。

I. 牛 顿

1704, 4, 1

声 明 II

在这《光学》第二版中，我删去了上一版末尾的数学短文，因为它不属于本书的主题。在第三编末尾，我增补了若干疑问。并且为表明我没有把引力看作物体的基本属性，我已加上了关于它的原因的一个疑问；我所以选定以一个疑问的方式提出它，是因为我由于缺乏实验而对它还不满意。

I. 牛顿

1717, 7, 16

第 四 版 声 明

艾萨克·牛顿爵士的《光学》的这一新版是用第三版精心印刷的，因为它已由作者亲手修订过，并在他逝世前留给他的书商。自从牛顿爵士的《光学讲义》——它由牛顿于 1669、1670 和 1671 年在剑桥大学公开宣读过——最近出版以来，被认为专门在页底用作不同的引证^❶，从那里可以发现作者在这本《光学》中略去的一些论证。

❶ 这部分引证中译本已略去。——译注。