“从现象中推理”：重审牛顿光–色新理论建立过程

“Reasoning from Phenomena”: A Reexamination of the Establishment of Newton’s New Theory of Light and Colours

王大同 /WANG Datong　　袁江洋 /YUAN Jiangyang

（中国科学院大学人文学院，北京，100049）
(School of Humanities, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049)

摘　要：牛顿光–色研究是在其粒子论物质理论背景下展开的，但是，牛顿采用归纳推理的形式从实验出发书写其“光–色新理论”，并非出于修辞学上的考虑，而是因为他始终拒绝笛卡尔式的从概念出发构造理论的做法。牛顿的关键实验有二，一是双三棱镜实验，其作用是引导牛顿通过溯因推理直接猜测出日光的异质组成并引出其“光线”概念——这一概念对于牛顿新理论具有类似于理论实体的意义；另一是三棱镜–凸透镜实验，其作用在于检验与证明单色光线的不变性。牛顿“从现象中推理”的基点是从经验归纳得到的具有定律地位的“光的不变性”认识，最终牛顿在《光学》“疑问27”中终结了一切形式的光的修正理论，并在“疑问29”明确说出光线只能是物体。

关键词：牛顿光–色新理论　关键实验　“从现象中推理”　光的不变性　物质理论

Abstract: Newton’s research on light and colour was conducted within the framework of his corpuscular theory of matter; however, his decision to write his “New Theory of Light and Colours” using inductive reasoning based on experiments was not driven by rhetorical considerations but by his consistent rejection of Descartes’ approach of constructing theories from concepts. Newton conducted two crucial experiments: The first, using two prisms, led him through abductive reasoning to infer the heterogeneous composition of sunlight and to introduce his concept of “rays of light”—a quasi-theoretical entity within his new theory. The second experiment, which used a prism and a convex lens, served to test and demonstrate the immutability of monochromatic rays. Newton’s foundational principle of “reasoning from phenomena” stemmed from his empirically derived, law-like recognition of “the immutability of light”. Ultimately, in “Query 27” of *Opticks*, Newton dismissed all formal modification theories of light, and in “Query 29”, he declared that rays of light must be bodies.

Key Words: Newton’s New Theory of Light and colours; Crucial experiments; Deducing from Phenomena; Immutability of light; Theory of matter

中图分类号：B811.23; N09　DOI: 10.15994/j.1000–0763.2026.01.009　CSTR: 32281.14.jdn.2026.01.009

牛顿光–色新理论建立过程曾得到夏皮罗（Alan E. Shapiro）、萨布拉（A. I. Sabra）等科学史家的高度关注和仔细研究。夏皮罗认为，确定“白光是由能发生不同程度的折射的光线组成的”是确定“日光是由不同的颜色的色光组成的”的先决条件，因此，牛顿建立其光–

基金项目：国家社会科学基金中国历史研究院重大历史问题研究专项“近代以来的科技进步与社会变迁”（项目编号：22VLS017）。
收稿日期：2025年2月12日
作者简介：王大同（1976–）男，河南郑州人，中国科学院大学人文学院博士研究生，研究方向为科学思想史、科学文明史。Email: wangdatong22@ucas.ac.cn
袁江洋（1964–）男，湖北松滋人，中国科学院大学人文学院教授，研究方向为科学史、科学哲学。Email: yjy@ucas.ac.cn

色理论经历以下两步，其一，确定折射率是辨别色光的根本依据，然后用三棱镜实验确定并呈现出色散现象。[1] 萨布拉则判定，牛顿的关键实验（experimentum crucis）是无效的，它们并不能给他的论证带来真正的确定性，因为它们并不能回答以下两个问题：“为什么第二个棱镜对色光的作用会与第一个棱镜对白色光束的作用相同？为什么白光通过第一次折射获得的特性在经过多次折射后不能保持不变？”[2]

本文将重审牛顿三棱镜实验研究探索进程，重构牛顿“从现象中推演（to deduce from phenomena）”的推理结构及其以“光的不变性”为基点的推理过程，并且解答何以波义耳与牛顿在持有极其相似的物质论及三棱镜实验结果的情形下却在光的本性问题上分别持修正说与不变说。

一、“新理论”的叙事结构

“新理论”的叙事结构是科学史家们曾着重讨论的一个话题。受排斥经验论思维的柯瓦雷科学思想史纲领的影响，萨布拉认为，牛顿刻意采用培根关键事例（instantiae crucis）的叙事方式撰写其“光与颜色的新理论”（后简称“新理论”），这种书写模式在打击笛卡尔等对手的同时，严重损害了牛顿对自己这一伟大成就之结构的洞察力。（[2]，p.15）进入21世纪，后现代思潮深深地渗入学术研究，英国科学史家法拉（Patricia Fara）从修辞学角度解说“新理论”，声称牛顿的“新理论”写得天花乱坠，但牛顿的实验不可重复，牛顿是凭其修辞技巧捍卫着他缺乏充足实验支撑的新理论，“在同时代人眼中，牛顿是个嚣张而又有才华的新人。他关于光的激进新理论令人感到刺激——但其提供的实验描述并不足以完全支撑该理论。若得知牛顿如今已成为享誉国际的科学天才（浪漫主义时期之前尚无此类称谓），他们定会大吃一惊。”[3] 意大利米兰大学牛顿学者圭恰迪尼（Niccolò Guicciardini）则致力解析这类后现代牛顿研究的荒诞之处，他认为，16世纪已发生“天空失谐”，牛顿“新理论”不宜放在天文与音乐之间的新毕达哥拉斯式的和谐的框架之下理解，牛顿的确尝试运用他在《原理》明确定义的方法论原则“自然之类似”于光–色理论研究，但他考虑的是人的视觉与听觉之间的可能的类似而非开普勒式的“天上的和谐”。[4] 因此，本文重新解读牛顿“新理论”一文，着重揭示牛顿“基于现象推演”的推理模式。

牛顿于1672年初通过巴罗（Isaac Barrow）将其制作的反射式望远镜提交皇家学会，赢得巨大成功并由此当选皇家学会成员，随即又向学会提交“光与颜色的新理论”一文。该论文先是得到包括波义耳和胡克（Robert Hooke）在内的5位专家的好评，但在第二周奥尔登堡（Henry Oldenburg）转来了胡克的批评意见，由此引发了历时3年的光学论战。[5]

牛顿“新理论”的叙述始于其数年前做过的一个令人惊奇的、有待解释的实验：牛顿让日光从小孔入射贴近小孔的三棱镜，让折射出来的光于对面相距22英尺的墙上成像，由此观察到一个两端呈圆弧状的长条形的、长宽比为5倍的像。由此，牛顿转入培根排除归纳法的实验进程，以实验排除想象中的可能造成此结果的种种原因——这些可能的原因大多是符合波动说的解释。譬如，牛顿设想，如果光微粒像笛卡尔设想的（牛顿在文中未提及笛卡尔的名字）那样有如旋转着前进的网球则会对两侧空气产生不同的压力，但是，事实却是光沿直线而非弧线传播。

排除归纳进程结束时，牛顿引出其关键实验——双三棱镜折射实验，如图1所示。牛顿通过旋转第一个三棱镜，让色光依次通过木板上的小孔并到达第二个三棱镜，“我发现，第一个棱镜折射到图像的一端［指紫端］的光线，在第二个棱镜中受到的折射要比另一端的光线［指红端］大得多。因此，造成这个像的长度的真正原因不是别的，而是因为光是由折射率不同的光线组成，这些光线，若不考虑入射角的差异，则根据它们的折射程度，传播到墙壁的不同部位。”（[5]，pp.94–95）（为下文探讨方便，我们在此将此陈述记为双三棱镜实验观

察语句，在下文中以ODPE（An observation of the double-prism experiment）语句指称之。）

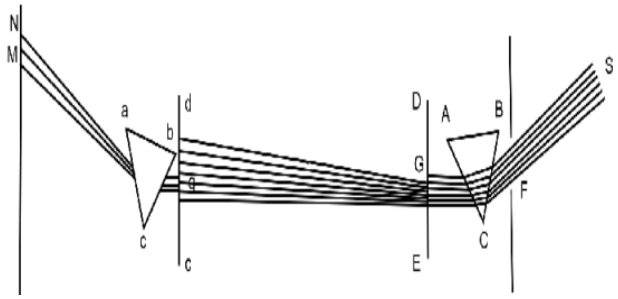

图1 牛顿双三棱镜实验示意

随后牛顿介绍了他在此基础上制作反射式望远镜及显微镜的过程，再回头谈论其关键实验，以更清晰的句子总结其判断说："日光并不相似，也不均匀，而是由不同的光线组成，其中一些光线比另一些光线更易折射"。（[5]，p.96）（牛顿引入"光线"概念重述ODPE语句，记为ADPE（An abduction based upon the double-prism experiment）语句，ADPE语句系由对ODPE语句进行溯因推理而得到。）

至此，牛顿的论证才真正开始。他先陈述其论文所采用的论证逻辑："我现在要向你们介绍的是它的光线中另一个更显著的不同之处，其中涉及到颜色的起源。一个自然主义者不敢奢望研究这些颜色的科学变得数学化，但我敢肯定它与光学的任何其他部分具有的同样的确定性。因为我将讲述的关于它们的东西不是假说，而是最严格的结论，不仅仅是基于'它所以是这样，是因为它不是别样［指培根排除归纳法］'这样的推测，也不是因为它解释了所有现象（哲学家们奉行的一般规则［指笛卡尔假说-演绎法］），而是以可直接给出结论且没有任何疑点的实验为中介给出证明。"（[5]，p.97）（牛顿光–色研究方法论陈述语句，记为MC（Methodological claim）语句。）[①]

继之，牛顿分别阐述13个命题以求对前述判断给出"理解和说明"。

其命题1是说，"由于各种光线的折射程度不同，所以它们表现出这种或那种特定颜色的倾向也不同。颜色，（正如人们普遍认为的那样）来源于自然物体的折射或反射，虽不是光的认证凭证，但却是光的原始的先天的性质，在不同的光线中是不同的。有些光线呈现红色且不呈现其他颜色……"。（[5]，p.97）（颜色本质判断语句，记为JNC（A judgement on the nature of colours）语句）。）

命题2强调"颜色和可折射性之间的类似是非常精确和严格的"。

命题3指出，"据我观察，任何一种光线的颜色种类和折射程度，都不会因为折射、自然物体的反射或任何其他原因而改变。"（[5]，p.97）（色光不变性归纳语句，记为IIL（An induction of the immutability of light）语句）

命题4–6区分原色光与复合色光，描述种种单色光叠加于一点时出现新颜色现象，如黄和蓝混合生成绿；红和黄混合生成橙；橙和黄绿混合生成黄等。

命题7指出："但是，白色的构成是最令人惊讶和最奇妙的，没有任何一种光线能单独表现出这种效果。它是由所有上述原色按适当比例混合而成的。"（[5]，p.98）（白光非单色光但由之混合而成，它是一个排除归纳语句，EIW（An exclusive induction about whiteness）语句）

命题8指出，"白光系由日光光谱上的所有色光混合而成"，若某种色光在混合过程中占优势，则视在颜色呈现为该色光的颜色。（[5]，pp.98–99）

命题9解释三棱镜下呈现日光光谱的过程：日光中不同色光折射程度不同，出现在不同位置，它们的像相互叠加，形成日光光谱。

命题10利用前述命题解释彩虹。

命题11–13利用前述命题即根据物体对日光反射或透射的程度解释树叶、金箔等自然物的颜色（有的例子取材于其早年的学生笔记"哲学问题"）以及天上出现的种种颜色现象，其中专门提到并解释胡克《显微术》中的一个实验。

①法拉推测说，此一方法论陈述系奥尔登堡在编辑文稿时添加的。我们不认可此说，因为此陈述与牛顿《原理》《光学》方法论完全一致。

命题陈述结束，牛顿声称，“既然如此，黑暗中是否有颜色，它们是不是我们所看到的物体的特质，光是不是一个物体，这些都勿须再争论了。因为，既然颜色是光的特质，以光的射线为其全部和直接的主体，我们怎么能认为这些射线也是特质呢，除非一种特质可以成为另一种特质的主体并维持另一种特质；这实际上就该把它叫做实体。”（[5],p.100）（牛顿光–色研究本体论语句，OC（Ontological claim）语句）并且承认，“此外，谁曾想到任何一种特质会像光那样是一种异质的集合体呢？但是，要更绝对地确定光是什么，光以什么方式折射，光通过什么方式或作用在我们的头脑中产生各种色彩的幻像，就不那么容易了。我不会把猜想和事实混在一起。”（[5]，p.100）（牛顿光–色研究数学化可能性判断语句，JPM（An judgement on the possibility of mathematization of optics）语句）

最终，牛顿说，“我发现这些论述本身就会引出各种实验，足以对其进行检验”。（[5]，p.100）（牛顿对实验作用之判断语句，记为JUE（An judgement on the usefulness of experiments）语句）随即引出另一个具有检验意义的关键实验，即三棱镜–凸透镜组合实验，如图2所示。该实验以具象的方式展现了凸透镜焦点左端色光逐渐汇聚变白而后又于右端逐渐发散为色光的过程，由此揭示白光是交织在一起的各种色光在人眼中引起的视觉效应。（[5]，pp.100–101）（与双三棱镜实验ODPE语句和ADPE语句相关的检验实验及光–色机制呈现实验语句，EPCE（An examination based upon the prism-convex experiment）语句）

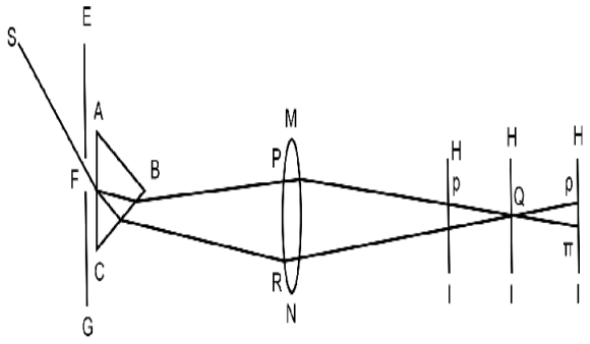

图2　牛顿三棱镜–凸透镜组合实验示意

二、牛顿如何“从现象中推理”？

“新理论”论文宣读不久，胡克提出异议：他虽然大致认同牛顿的实验，但他认为牛顿未能提供无可否认的证据证明其“拯救颜色现象的假说”，他重做了牛顿的实验和观察，但在他看来，牛顿的关键实验并不能证明光的异质性（heterogeneity of light），反倒是证明了胡克自己已在《显微术》中提出的理论，该理论认为，光不是别的，而是一种在匀质的、均一的透明的媒介即以太中传播的脉冲或运动；颜色不是别的，而是在折射时光束前端与后端在折射面上受到不同强度的作用而发生倾斜，结果一端发蓝另一端偏红；[6] 胡克宣称他的理论与牛顿的理论一样都能解释牛顿的关键实验；他最难以接受的是牛顿说的“光是一种物体”，胡克还告诫牛顿多做实验少做理论。[7]

围绕牛顿光–色新理论的论战由此爆发。在光学论战中，牛顿一人独对胡克等欧洲光学家，没有作任何让步或妥协。牛顿对胡克的论战策略是：（1）牛顿反复强调其关键实验与检验实验乃至由它们领衔的整个实验系统只能由自己的光–色新理论解释，而胡克的假说既缺乏经验依据，也不能解释牛顿的关键实验，且牛顿将矛头不但指向胡克的假说，还指向一切形式的光的修正理论；（2）从方法论层面上反对哲学家们普遍采用的基于没有经验依据的假说展开无限推理的假说–演绎法，坚持自己的理论是从实验中直接推理出来的；（3）在光的本性问题上，他声明他并非以“光是一种物体”为前提展开推论并得到“新理论”，但他承认从结果上看他的论文有着承认光是有形物体（corporeity）的倾向。

在解析牛顿光–色研究的智力构架时，夏皮罗、萨布拉以及特恩布尔（H. W. Turnbull）均基于ODPE语句强调牛顿注重光的折射率而无视光的颜色。夏皮罗，作为牛顿《光学讲义》的编辑者，从牛顿《光学讲义》中看到年青的卢卡斯数学与自然哲学讲座教授牛顿曾一度致力于光学的数学化，据此，他将基于光的

折射程度或折射率辨识光视为揭示日光异质性的逻辑前提。特恩布尔，作为《牛顿通信集》的编辑者，在编辑牛顿“新理论”一文时加入注11提示读者注意牛顿ODPE语句“丝毫未提及光线的颜色”。（[5]，p.104）而作为牛顿光学及光学史研究专家的萨布拉，或许是出于与夏皮罗相似的理由，或许是出于思想史传统科学革命学说对“空间的几何化”概念的重视以及对培根纲领的蔑视，不但将牛顿的培根体叙事策略视为弄巧成拙的失当之举，而且否认牛顿关键实验对于其光–色理论的支撑或确证作用——如本文开头所述。

无疑，夏皮罗等三位学者均无视牛顿的JNC语句和JPM语句。现代光学告诉我们，就光而言，光的颜色直接取决于光的频率，是光的基本性质，而光在光疏–光密介质间发生折射时出现的折射程度差异是次级性质。牛顿的JNC语句分明表明，牛顿清楚地知悉，颜色是“光的原始的先天的性质”。而JPM语句则告诉我们，牛顿知道在当时光学发展水平和条件下要彻底弄清光的本质以及光发生折射的机制是十分困难的。其实，夏皮罗在探讨牛顿的光学数学化进路乃至其实验进路之后也曾发现，牛顿在这两方面皆面临着难以逾越的障碍，因而不得不一再降低其研究目标。[8]

樊小龙曾对以上三位学者在解释牛顿光–色理论与其关键实验之间的关系问题时所持的唯数学化倾向提出异议：“牛顿的观察陈述［即本文所言之ODPE语句］并未提及可折射性的可数学化特征——事实上，后者仅对牛顿的颜色理论是不可或缺的，而在判决性实验中，对牛顿而言唯一重要的是不同光线在可折射性上稳定葆有的差异性，是否能够精确度量无关宏旨，这是一种定性描述。”[9] 樊小龙和袁江洋还指出，“牛顿的光学判决性实验是在发现的语境中提出的，该实验帮助牛顿在其内心预先构造的多种可能解释之间甄别优劣，为他指点迷津。牛顿在论文中通过使用这一术语刻画了一个符合培根发现模式的科学发现过程。这种培根意义上的‘判决’并不完全等价于通常的假说–演绎模式下的理论裁决，但却在事实上在牛顿与胡克之间引发了这样一场理论裁决。”“牛顿的光色理论仅限于以精确的方式刻画日光色散现象的数学规律，是一种直接从实验现象出发得到的解释；但未进一步就这一现象的物理机制给出解释。”“牛顿的判决性实验并不就光的本性问题或者说在光的微粒论与波动论之间给出判决。”[10]

如果牛顿的MC语句是对牛顿光–色新理论及实验研究方法的如实陈述，那么牛顿的“从现象中推理”到底是如何展开的？

首先，我们认为，“光的不变性”是一个比“日光的异质性”更直观、更深刻、更基本的经验判断。牛顿的色光不变性归纳语句即IIL语句是一个直接由实验和观察得到的陈述。牛顿所描述的是，由第一个棱镜产生的色光，在通过第二乃至第N个三棱镜、凸透镜或平面镜作用的过程中，始终维持不变，这是一个归纳语句，也可视为一个经验定律。在以经验归纳确立色光不变性后，回头再探讨牛顿的双三棱镜实验观察语句即ODPE语句及ADPE语句。比较ADPE语句与ODPE语句，可知两者并不完全等价，但ADPE语句可视为基于ODPE语句的一个高度可能的溯因推理，即最佳说明推理，而EPCE语句则为ADPE语句中的溯因推理提供了明确的检验和支撑。EPCE语句描述的是，由第一个三棱镜产生的各种色光在凸透镜焦点前端附近逐渐汇聚，在成像挡板上，从牛顿看到的日光光谱逐渐转变为胡克所看到的一端偏红另一端偏蓝的像，随后在焦点上出现正白色的像，当挡板继续后移，白色的像又随之逐渐出现胡克所描述的图像，终而发散为日光光谱。这一过程不但将胡克的实验观察容纳于自己的实验观察之中，而且生动地证明了原色光不变且呈现了白光系由原色光混合而成的机制，当色光穿过焦点时还是色光并没有被反向修正为白光；同时它还证明，所谓白色，不过是三棱镜下的各种色光汇聚到一起时在人眼中引起的视觉效应。因此，牛顿有充足理由归纳得到，从遥远处的太阳射来的日光很可能亦是如此。最终，牛顿将由色光叠加的系列实验归纳而致的IIL语句与EPCE语句归纳在一起，

可以给出日光异质性归纳语句即IHS语句。

从总体上看，牛顿“新理论”采纳了以下叙事进程：惊奇现象“矩形的像”描述——对原因的培根排除归纳叙述——关键实验（双三棱镜折射实验）陈述（ODPE语句）——解释望远镜制作的动因及效果——基于高度可能的溯因推理引出ADPE语句——给出自己的具有挑战意味的光–色研究方法论陈述——在此背景下陈述其13个命题，引出诸多相关新的实验和观察——宣示自己在光–色的本体论立场（OC语句：物体本身无颜色，颜色由光与物体相互作用产生，光很可能是物体），并坦承光学研究数学化的高度困难——在当时所遇到的困境中只能走现实的实验进路，并且认为实验可引出新实验，最终发展出三棱镜–凸透镜组合实验，展现实验所呈现光–色演变机制，得到EPCE语句，以此检验并支撑ODPE语句与ADPE语句，并最终证明最初看到的太阳的矩形的像乃是由诸多色光所成之圆形的像叠加而成。

牛顿在光–色研究中所持的本体论立场无疑贯彻这一探索的全部过程之中，从以ADPE语句引入“光线”概念开始，“光是物体”的想法就已然悄悄进入其思考进程。与之相对的是，胡克在致奥尔登堡的质疑信中完全没有使用“the rays of light”及类似术语。从ODPE语句到ADPE语句，牛顿从观察现象引出日光由具有不同折射程度的光线组成之判断，这一判断是由溯因推理达成的，而且这一溯因推理又是在其对于光的本性的本体论判断的引导下完成的。牛顿在术语上选用“光线”而非直接使用“光粒子流”，是因为前者相对于后者而言更为直观。然而，“光线”一词看似直观，却与波动假说完全不相容，因此引来论敌的质疑。在答复帕迪斯（Ignace Gaston Pardies）的质疑时，牛顿给出其对光线的定义：“在我的理解中，光线的最小的或无限小的部分是彼此独立的，同样地，发光物体均是沿直线同时或相继发射所有那些光线。”[11]

在我们今天看来，牛顿的确是想从粒子论角度推进光学数学化，为此，他需要先行构建一个光的物理模型，再将之抽象为数学模型，最终回到光学解释具有显著粒子论特征的三棱镜实验和光的直线传播现象并同时解决具有波动论特征的牛顿环、衍射、干涉等现象——如同他后来在《自然哲学之数学原理》中所采用的从物理学到数学再从数学返回物理学的方法论一样。但是，当时的光学发展还远不具备20世纪才具备的完成光学数学化所必需的充足而全面的经验基础以及相关的数学工具，因此，牛顿难以完成从物理学模型到数学模型的学科转移证明，更谈不上从数学回到物理学解释全部现象。最终的结局是，牛顿光–色新理论可以解释三棱镜实验，但却难以解释他在三棱镜实验进程中观察到的牛顿环现象，也难以解释当时已知的衍射、干涉现象。后来，牛顿曾尝试构想“粒子以太”假说，构想光线投入粒子以太并引起振动，引发所谓“阵发（fits）”并呈现出牛顿环现象，他想以此统一解释光的粒子论现象和波动论现象，并以此探讨引力机制问题，但这种尝试最终也只能以失败而告终。

概括地说，牛顿“从现象中推理”是基于实验及观察的归纳推理和有限扩展推理，这种推理包括溯因推理在内，并非必然推理，但是牛顿能将其关键实验、相关的三棱镜–凸透镜实验以及由它们统率的其他实验如色光叠加实验及颜色产生的观察，合理地组合在一起，最终得到以下两个归纳命题：（1）IIL语句：色光在折射、反射过程中，在透镜、棱镜、平面镜作用下保持不变。（2）IHS语句：日光不是基本光而是混合的色光，将红、绿、蓝三基光或三棱镜产生的全部色光合在一起，则它们可在人眼中呈现为白色。

其次，我们认为，牛顿–胡克之争的实质并不在于“日光的异质性”，而在于“[原色]光的不变性”。争论初期，胡克等人并没有认真地理解牛顿“新理论”的论证逻辑，他们坚决捍卫各自版本的波动说，或像胡克那样宣称自己的理论也能解释牛顿的实验，或从实验角度挑剔，或对牛顿所用的主要概念进行质疑。起初，他们关注的焦点的确是“日光的异质性”问题，但是，随着争论的展开，争论的焦点不可避免地转移到了“光的不变性”这一问题上。

然而，论战的双方胡克与牛顿均承认培根归纳法，且牛顿将其光–色理论陈述约束在经验发现与归纳的界面之内，在此情形下，胡克只能趁牛顿开始考虑粒子以太假说之机作出退让，主动致信牛顿终结论战，[12] 牛顿也貌似礼貌地回复说“如果自己看得更远些，那是因为站在巨人的肩上”。[13]

在进一步的考察中，我们须将视线转向捷克光学家马尔奇（Jan Marek Marci）的工作。崔曼琪、袁江洋反驳了否认马尔奇作为牛顿光–色研究前驱的见解，[14] 将马尔奇的探索视为通向光的不变性的重要台阶。马尔奇于1648年出版《彩虹之神的女儿，一本关于彩虹及其颜色的性质、由来和成因的书》，[15] 他将光视为有形的微粒，具有大小、形状和重量，他也做了双三棱镜实验，并且给出定理18和定理20：“定理18：不同颜色的彩色光各自唯一地对应着不同的折射角”；“定理20：一束彩色光在经过进一步的折射之后它的颜色不会发生改变。”更有意味的是，在其著作出版后，马尔奇与其同事康莱德（Balthasar Conrad）这两位教授在捷克也上演了一场论战，论战的焦点也是彩虹和棱镜彩色光谱的成因问题。康莱德，作为亚里士多德修正理论的坚实拥护者，认定彩色光是白光和阴影的混合物，坚决反对马尔奇提出的“月下世界光不变说”。[16]

回到本文开头所述之萨布拉的两个问题，即三棱镜下的色光为什么不变，白光在三棱镜下获得的特性为什么不能保持不变，我们的答案是，对于前一个问题，牛顿心中自有其从物质论角度考虑的答案，但是，这一答案只是发诸于其物质论的一种无法最终证明的猜测，因此，牛顿在公开场合不予回答，而是将之作为一个由归纳得出的经验事实或定律——后来，牛顿也以同样的方式应对笛卡尔派和莱布尼茨派围绕引力原因和机制提出的质疑。对于后一个问题，即如果色光不变那么白光为什么不同样不变之问题，牛顿当时不需要回答，其实，这一问题在牛顿看来就不能这样问，因为白光不是基本光；若非要问的话，则牛顿也会将之视为一个吹毛求疵的枝节问题，他可以回答说，只有将与色光相关的特性或问题全部研究清楚后，才有可能在此基础上就此枝节问题给出某种答案，正如牛顿在当时只须研究牛顿环，而不能跳过牛顿环研究（解释明暗相间的色环现象）直接研究胡克版的日光在薄板实验下呈现的色环交替出现的周期性现象（解释周期性的色环现象）。

三、为什么是牛顿而不是波义耳？

牛顿对粒子论的认同以及对波动论的拒斥始于其三一学院学生笔记“哲学问题”，在写于1664–1665年间的“哲学问题”中，牛顿判断说“并非只有压力才能产生色彩”，[17] 而在其后不久的手稿MS Add 3996中则进一步判定，“光不可能是由压力产生的”。[18] 此后一生，牛顿从未考虑“光是波”或光由压力或波动构成之类的假说。因此，“新理论”ADPE语句、IIL语句和IHS语句，在牛顿而言，均要求假定光是粒子，因为只有粒子论才能解释“光的不变性”。因此，牛顿私下的、实际的探索过程无疑是在粒子论背景中展开的。

关于牛顿三棱镜实验的灵感来源，袁江洋在1997年曾指出：“牛顿全面而系统地接受了波义耳的微粒哲学，并像波义耳一样将其作为一种深层次的、近乎于信念的基本假设运用于自然哲学的各个研究领域之中。就牛顿1666年的光学研究而言，他开始将阳光视为一种“混合物”、开始将颜色视为光线的固有性质，这些都不但得益于实验所给予他的启示，而且得益于他所采纳的理性视角——微粒论视角。”[19] 类似地，牛顿炼金术研究专家纽曼（William R. Newman）从“化学光学”角度理解牛顿的光–色研究，他将波义耳的化学分析–化合方法与牛顿的光–色研究加以比较，认为牛顿将三棱镜视为分析工具，将日光视为化合物，将色光类比于先在地存在于化合物之中的元素。[20]

17世纪中后期欧洲光学已在阿拉伯光学的基础上取得诸多进展，几乎所有的显著光学现象均已被发现。笛卡尔、马尔奇、波义耳、惠更斯、胡克等均曾致力于折射及彩虹现象研究，

笛卡尔在折射实验中使用的是直角三角形形状的玻璃，胡克使用的是装满了水的三角锥瓶，惠更斯使用的是长方体及斜方晶体，而马尔奇和波义耳使用的是三棱镜。

令人奇怪的是，罗森菲尔德（Léon Rosenfeld）曾专门撰文论证马尔奇不是牛顿光学研究的思想先驱，他认定，尽管马尔奇也做过诸多精确的光学实验，但他的光学研究仍属于经院哲学的范畴，而与牛顿富于革命气息的光学研究有着完全不同的类型。[14] 而我们完全不同意此论。马尔奇与巴罗是朋友，曾将其首版《彩虹之神的女儿》赠与巴罗，这本书至今仍收藏于三一学院图书馆中。我们今天没有理由和必要排除马尔奇的工作对牛顿存在着重要影响。

波动论者没有得到牛顿式的“新理论”是无足为怪的，奇怪的是，波义耳作为微粒哲学的构建者，作为牛顿光学实验和炼金术实验的直接前驱，何以仍采用一种微粒论版本的修正理论而不曾提出类似于牛顿“新理论”的见解？须知，波义耳在其《颜色的实验史》中曾专门描述其暗室三棱镜实验，如图3所示，清楚地观察一束光入射进入三棱镜发生第一次折射、经内反射后发生第二次折射，再经二次内反射又发生第三次折射的现象，折射出来的光均呈现为发散状态的五彩颜色的“彩虹（iris）”。[21] 这一实验与牛顿所做的水晶球折射实验如出一辙，如图4所示。牛顿“哲学问题”后部及随后的光学、炼金术笔记MS Add 3975大篇幅地摘抄或探讨波义耳的光学及炼金术实验，同时也记录着牛顿在此基础上进行重复实验及独立实验的过程。

波义耳持光微粒论，但在颜色理论上持修正理论——他倾向于认为白光由均质微粒构成，但光微粒在与物体如三棱镜发生相互作用会出现微小变化并呈现彩虹现象，就如同汞微粒在参与多种化学反应时会发生微小变化而历经诸多颜色变化一样，在《怀疑的化学家》中他经常使用“disguise”一词描述这种并没有破坏微粒基本结构但可导致颜色变化或其他性质变化的微小变化，并且相信只有炼金术才可真正破坏金、汞或银等微粒的基本结构。[22]

牛顿的粒子论物质学说的基本构架直接取自于波义耳微粒哲学，尽管他最初在“哲学问题”中接触到原子论是通过查尔莱顿（W. Charleton）及伽桑狄（Pierre Gassendi），但从后来牛顿“论酸的性质”[23] 和《光学》“疑问31”乃至所有公开陈述来看，牛顿的物质层系构成与波义耳完全一致，但在论及每一物质层次之性质时存有一定差别，如表1所示。

关于“最大的微粒/粒子”，波义耳与牛顿均认同，（1）它们是构成各种物体的基本单元；（2）它们规定着物体的可感性质/特殊性质；（3）其结构在化学过程中保持稳定不变，唯有炼金术可能破坏其结构。

在光学思考中，波义耳无疑将光微粒与火微粒均置于最大的微粒层面，因此，对于金属置于密闭容器煅烧所得产物之重量增加现象，他推测说，这是因为火微粒穿过玻璃壁与金属结合在一起所致，同时，对于三棱镜折射中出现的彩虹现象，他用“disguise”之类的术语描述之，即他还是承认白光是基本光这一修正理论的前提。而牛顿认定颜色是光的原始的先天的性质，如JNC语句所示，因而他将光的粒子置于最大的粒子层面以上且很可能非常接近最

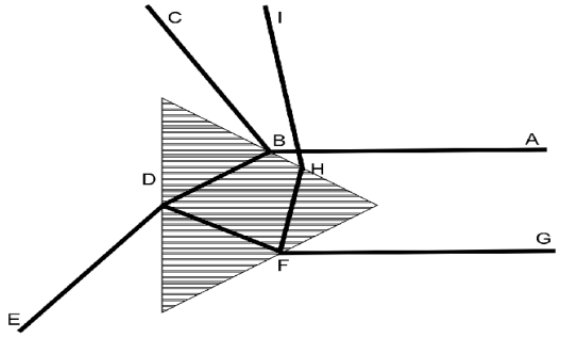

图3　波义耳三棱镜折射实验示意

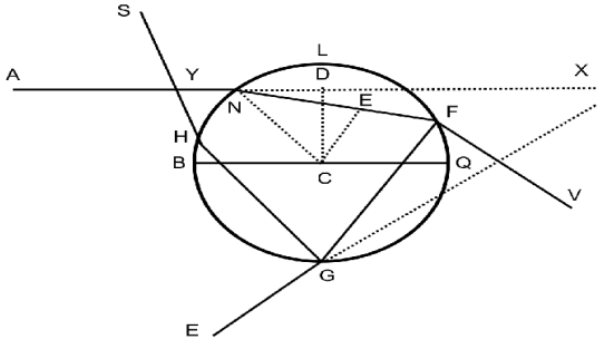

图4　牛顿水晶球折射实验示意

表1 牛顿和波义耳的物质理论对比

波义耳微粒哲学	牛顿物质理论	对应的性质	
		波义耳	牛顿
最小自然质（minima naturalia）均一且不可分，可凝结为第一凝结物乃至万物	最小的微粒（the smallest particle），均一且不可分	大小、形状和运动	普遍性质：最稳定
第一凝结物，最简单的微粒（prima mixta, simplest corpuscles），有结构	粒子，有结构	大小、形状和运动	中间程度性质，非常稳定
微粒（corpuscles），有结构	粒子，有结构	大小、形状和运动	中间程度性质，稳定
……	……	……	中间程度的性质
最大的微粒，有结构	最大的微粒，有结构	有结构可干性质	

小的粒子层面的某一层面上，因此，光具有不变性。终而牛顿在《光学》“疑问27”这样写道：“迄今为止，通过对光线进行新的修正来解释光现象的所有假说，难道不都是错误的吗？因为这些现象并不像人们想象的那样取决于新的修正，而是取决于光线原有的、不可改变的特性。”[24]在“疑问29”中，他明确声言，“除非光线是物体”，否则难以想象它们如何具有某种“永久的效能”。（[24]，pp.348–349）

牛顿个人意义上的实际的光–色研究乃至整个光学研究无不是在其独特的粒子论的物质论背景下展开的，但是，牛顿的方法论及其公开陈述的原则禁止从光粒子或粒子流假定开始构造其光–色理论，所以牛顿“新理论”始终采用归纳推理从经验出发展开陈述。牛顿的“新理论”、《光学》与其《原理》遵循同样地探索进路，即在承认物理学科自主性的前提下采纳从物理学到数学再回到物理学的探索进路，只是他没有条件完成光学的数学化，但在《原理》中他站在开普勒等人肩上凭借自己发明的流数术而取得了辉煌的成功。“光线”概念在牛顿光–色理论而言具有类似于理论实体的地位，它是以最佳说明推理的形式从关键实验即双三棱镜实验推演而来；关键实验是一个在前人实验基础上发展起来的近乎完美的实验，它直接向牛顿提示着真理所在的方位和有待证明的最后答案，但是牛顿“从现象中推理”的过程是一个归纳推理的过程，推理的基点并非关键实验给出的“日光光谱”，而是通过经验归纳得到的具有定律地位的“光的不变性”认识，其完整的推理过程并不是必然的逻辑过程，但却是皇家学会的光学专家们共同认同的归纳论证过程，最终牛顿以“疑问27”彻底结终结了一切形式的光的修正理论，包括波义耳微粒论版本的修正理论。

［参 考 文 献］

[1] Shapiro, A. E. (Ed.) *The Optical Papers of Isaac Newton*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1983, 11.

[2] Sabra, A. I. *Theories of Light, from Descartes to Newton*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1981, 250.

[3] Fara, P. 'Newton Shows the Light: A Commentary on Newton (1672) “A Letter... Containing His New Theory About Light and Colours...”'[J]. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, 373(2039): 1–11.

[4] Guicciardini, N. 'The Role of Musical Analogies in Newton’s Optical and Cosmological Work'[J]. *Journal of the History of Ideas*, 2013, 74(1): 45–67.

[5] Newton, I. 'Newton to Oldenberg, 6 Feb.1671/2'[A], Turnbull, H. W. (Ed.) *The Correspondence of Isaac Newton*[C], Vol.1. 1661–1675, Cambridge: Cambridge University Press, 1959, 92–107.

[6] Hooke, R. *Micrographia*[M]. London: Printed by Jo. Martyn, and Ja. Allestry, 1665.

[7] Hooke, R. 'Hooke to Oldenberg, 15 Ferb.1671/2'[A], Turnbull, H.W. (Ed.) *The Correspondence of Isaac Newton*[C], Vol.1. 1661–1675, Cambridge: Cambridge University Press, 1959, 110–116.

[8]Shapiro, A. E. 'Experiment and Mathematics in Newton's Theory of Color'[J]. *Physics Today*, 1984, 37(9): 34–42.
[9]樊小龙. 牛顿光学思想与实验研究[D]. 北京：中国科学院大学, 2015, 24.
[10]樊小龙、袁江洋. 牛顿“判决性实验”判决了什么?[J]. 自然辩证法通讯, 2016, 38（2）: 61–66.
[11]Newton, I. 'Newton to Oldenberg for Pardies, 10 June 1672'[A], Turnbull, H. W. (Ed.) *The Correspondence of Isaac Newton*[C], Vol.1. 1661–1675. Cambridge: Cambridge University Press, 1959, 164.
[12]Hooke, R. 'Hooke to Newton, 20 Jan. 1675/6'[A], Turnbull, H. W. (Ed.) *The Correspondence of Isaac Newton*[C], Vol.1. 1661–1675, Cambridge: Cambridge University Press, 1959, 412–413.
[13]Newton, I. 'Newton to Hooke, 5 Feb. 1675/6'[A], Turnbull, H. W. (Ed.) The Correspondence of Isaac Newton[C], Vol.1. 1661–1675, Cambridge: Cambridge University Press, 1959, 416–417.
[14]Rosenfeld, L. 'Marcus Marci's Investigations of the Prism and Their Relation to Newton's Theory of Color'[A], Cohen, R. S., Stachel, J. J. (Ed.) *Selected Papers of Léon Rosenfeld*[C], *Boston Studies in the Philosophy of Science*, Vol.21. Dordrecht: Springer, 1979, 49–54.
[15]Marci, J. M. *Thaumantias, Liber de Arcu Coelesti Deque Colorum Apparentium Natura, Ortu et Causis*[M]. Prague: Typis Academicis, 1648.
[16]崔曼琪、袁江洋. 通向光的不变性的台阶——捷克光学家马尔奇的三棱镜实验及光–色理论[J]. 自然辩证法研究, 2020, 36（1）: 95–100.
[17]McGuire, J. E., Tamny, M. (Ed.) *Certain Philosophical Questions: Newton's Trinity Notebook*[M]. New York: Cambridge University Press, 1983, 337–345.
[18]Newton, I. MS Add. 3996, 103v.[Z]. Cambridge: Cambridge University Library.
[19]袁江洋. 思想之网：哲人科学家——牛顿[M]. 福州：福建教育出版社, 1997, 88.
[20]Newman, W. R. 'Newton's Early Optical Theory and Its Debt to Chymistry'[A], Jacquart, D., Hochmann, M. (Ed.) *Lumière et Vision Dans Les Sciences et Dans Les Arts: De L'Antiquité au XVIIe Siècle*[C], Geneva: Droz, 2010, 283–307.
[21]Boyle, R. 'The Experimental History of Colours, Chap. V.'[A], Birch, T. (Ed.) *The Works, Six Volumes*[C], Baden-Baden: Georg Olms Verlagsbuchhandlung Hildesheim, 1965, (1): 691–695.
[22]波义耳. 怀疑的化学家[M]. 袁江洋 译, 武汉：武汉出版社, 1993.
[23]Newton, I. 'De Natura Acidorum'[A], Harris, J. (Ed.) *Lexicon Technicum, or, An Universal English Dictionary of Arts and Sciences. Vol.II.*[C], London: Printed for Dan. Brown, and 9 Others, 1704–1710, 21–23.
[24]Newton, I. *Opticks: or, a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*[M]. The Third Edition, Corrected by Sir Isaac Newton. London: Printed for William and John Innys at the West End of St. Paul's, 1721, 336.

[责任编辑　王大明　柯遵科]