• 科学技术史 •

牛顿“判决性实验”判决了什么？

What had been Sentenced by Newton's *Experimentum Crucis*?

樊小龙 /FAN Xiaolong[1]　袁江洋 /YUAN Jiangyang[2]

（1.中国科学院自然科学史研究所，北京，100190；2.中国科学院大学人文学院，北京，100049）
(1.The Institute for the History of Natural Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190;
2.School of Humanities and Social Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049)

摘　要：判决性实验是理解实验在理论构建和检验过程中作用的关键，本文通过重新检视牛顿三棱镜实验，指出：1）牛顿最初是在培根意义上提出其“判决性实验”的，重在说明其在牛顿个人内心的多种理解进路之间的一种“内部判决”作用；2）该实验在牛顿和胡克等人的光色理论之间同样做出了有效的判决：确立了牛顿的日光异质理论，否决了各种版本的修正理论；3）该实验并不直接判决光的微粒说与波动说，以实验“判决”形而上学假说是不当的，这只能导致对判决性实验这一概念的否定。

关键词：牛顿　判决性实验　牛顿光色理论　修正理论　胡克

Abstract: Crucial Experiment is among the central issues when discussing the function of experiments in the building and falsifying of a theory. By re-examining Isaac Newton's "*Experimentum Crucis*", this article points out that: 1) Newton proposed his "*Experimentum Crucis*" initially in the meaning which, coined by Francis Bacon, mainly indicated how a crucial experiment helps an investigator excluding irrelevant clues while founding a pertinent one; 2) Newton's "*Experimentum Crucis*" did make an effective sentence between Newton's & Hooke's theories of light and color, that is, confirmed Newton's basic theoretic commitments of the heterogeneity of sunlight & unchangeability of various monochromatic lights, and falsified Hooke and other's modification theories of light; 3) Newton's "*Experimentum Crucis*" was not mean to directly test the corpuscular hypothesis and wave hypothesis of light, and it is not proper to judge a metaphysical disputation by one crucial experiment, as this kind of judgment can only improperly lead to an negation of the concept of crucial experiments.

Key Words: Newton; *Experimentum Crucis*; Newton's theory of light and color; Modification theory of light and color; Hooke

中图分类号：N0　　**文献标识码：**A　　DOI:10.15994/j.1000–0763.2016.02.010

判决性实验是否存在？这一问题对于理解科学的合理性问题至关重要，但自迪昂–奎因“整体论”及汉森“观察负载理论”等命题出现以来，科学哲学界始终难以就这一问题形成一致看法：波普尔、格伦鲍姆（A. Grünbaum）是判决性实验的坚定拥护者，库恩、费耶阿本德则明确拒斥，此外，拉卡托斯，亨普尔等人持相对中庸的看法：一方面否认实验的即时判决性或绝对判决能力，另一方面又承认在实践的意义上存在着实验对于科学研究方向的相对决定作用。牛顿的三棱镜判决性实验是这一主题的经典历史案例，但有关的争论亦未达成明确共识。[1],[2],[3] 本文拟重新检视这一案例，试图回答牛顿判决性实验判决了什么以及这一判决如何可能等问题。

收稿日期：2014年4月22日

作者简介：樊小龙（1987–）男，陕西咸阳人，中国科学院自然科学史研究所助研，研究方向为科学史。Email: fanxl@ihns.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，科学文化等。Email: yjy@ihns.ac.cn

鉴于牛顿对于“判决性实验”这一概念的使用发生在距今三百多年前，同今天科学哲学中的用法可能存在差异，因而有必要在此对其历史背景做一简单回顾。1620年，培根在《新工具》一书中罗列了27类享有优先权的科学实验的事例，其中第14类为判决性事例（Crucial Instances），又称路标的事例，被认为是判决性实验这一概念的起点。[4]1665年，《显微术》出版，罗伯特•胡克引用该术语，在“观察IX”（白云母和其他薄片物体）中将其所发现的薄膜颜色现象视为培根判决性实验的一个范例，指出该实验与笛卡尔的理论不符，进而构造了新的理论解释。[5]然而颜色问题并未因胡克的判决性实验而告终止，牛顿继之在其1672年《关于光和颜色的新理论》一文中重提这一术语，推出了三棱镜判决性实验，而该实验所要否决的对象在很大程度上正是胡克的理论。

胡克判决性实验的具体命运如何诚然是另一个饶有趣味的话题[6]，不过可以肯定的是，其所获得的肯定较之牛顿实验远为轻易，而所遭遇的阻力则远为轻微。可以说，牛顿实验在科学史上第一次真正检验了判决性实验的有效性。

一、牛顿判决性实验及其新理论

1672年初，英国皇家学会《哲学会刊》刊载牛顿的光学论文《关于光和颜色的新理论》[7]，文章开篇介绍了一个实验（图1）：

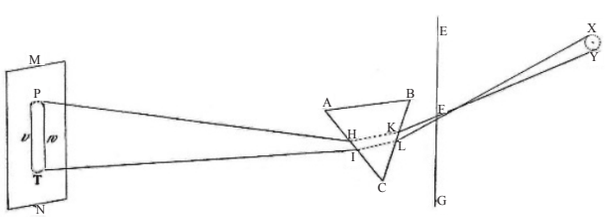

图1 牛顿发现日光组成的实验（[8], p.28）

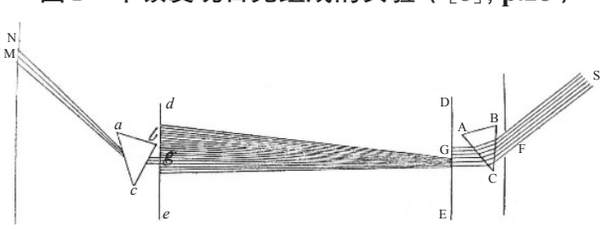

图2 牛顿的光学判决性实验（[8], p.47）

在入射光束各部分具有相同的入射角的情况下，三棱镜折射后在墙壁上所成的像的长宽之比达到5倍之多——“而根据公认的折射定律，我原本料想其应该是圆形”，如此夸张的反常激发了牛顿的好奇心。此时，科学探索来到了一个微妙的转折点，其中可能潜伏着科学发现的契机，但真相仍需要小心检验，在该事例中，“不同折射”的可能原因无外乎两种，其一是外部折射条件的差异，否则即是入射光自身的差异。通常的看法是前一种，但牛顿通过实验排除了各种可能外因，并在这一过程的终点设置了判决性实验（图2）。牛顿自己将该实验看作是其论文的重中之重。([9], p.187)

在该实验中，牛顿使第一次的折射光线沿光谱纵向，逐部分次第穿过刻有小孔的挡板，随即通过另一块三棱镜发生第二次折射，观察墙壁上的新的光斑发现：

> 经第一块三棱镜得到的光束其中一端的光线（紫端）在第二次棱镜折射中的偏转确实比之另一端的光线来得更厉害①。

牛顿由此得出结论：“光斑拉长的原因不在于别的什么，而就在于日光是由具有不同折射能力的光线组成。”

但牛顿的发现并不止于此，他接着介绍了自己的颜色理论：颜色是单色光本来具有的，而不是由光与影混合引起的，也不是白光在物体作用下发生了性质改变。这些内容无疑是牛顿光色理论的重要部分，但是在牛顿的判决性实验中地位则远逊于可折射性，故而在此搁置不论。

回顾牛顿的行文，能够看出其所描述的“发现过程”当中存在若干疑点。首先，牛顿声言是排除过程指引其到达了最后的判决性实验，然而这是不合逻辑的，除非牛顿脑海中业已存在某些特殊的形而上学配置——在此我们几乎不自觉地产生关于牛顿的光微粒说的联想，否则这一跳跃在任何其他研究者（设若是胡克而非牛顿本人）身上都难以自动发生。其次，相比于此前的排除过程，牛顿明显区别对待其判决性实验一步的检验，如将其安排在排除过程结束之后而不是更早，以及不事先挑明其对实验结果的预判。此外，牛顿只在其论文中不甚关键的地方提及胡克，其他地方则使用诸如“人们通常认为”之类的说法，这对于一篇观点极具革命性的论文而言实属奇怪。

①牛顿在描述判决性实验结果时并未提及光的颜色问题，这曾引起夏皮罗、萨布拉（A. I. Sabra）等人的关注。

综合上述疑点，不难推知牛顿是在刻意“安排”其发现过程，试图给读者一个源于偶然、止于必然的理想发现案例，一个合乎培根式的科学发现过程的标准案例——判决性实验在其中扮演关键角色，以此来为其光色理论的可靠性辩护，同时竭力避免同其他竞争理论的正面冲突。尽管如此，判决性实验在牛顿发现过程中的作用仍不容置疑。国内学者朱丽君认为牛顿正是凭借该实验为其理论增添了强大的解释力。[10] 而夏皮罗（A. Shapiro）在研究牛顿光学发现的过程指出，该发现过程经历了两个阶段，在三一笔记（*Quaestiones*）阶段（1666年之前），牛顿已经发现了单色光的不同折射率的现象[11]，这一步虽然关键但仍不圆满；而正是在随后的1666年初，牛顿才正式完成了其日光组成发现。[12] 这其中，三棱镜实验功不可没，在某种程度上引起一种“内部判决作用”，使牛顿在个人内心中同光色研究的古老传统以及当时流行的修正理论彻底决裂，转而笃信折射率和颜色是光的原始属性以及日光是混合的而非均一的，并由此出发建立了自己的新的光色学说。而随着牛顿光学论文的发表，争论接踵而至，判决性实验无疑有了新的职责：在证明的语境中，对胡克等人的理论作出判决。

二、笛卡尔、波义耳和胡克的修正理论

表1　笛卡尔、波义耳、胡克和牛顿的基本光色理论①

	对光的理解	本体论类型	对颜色的理解	理论类型
笛卡耳	以太压力	波动论	微球自旋速度变化	修正理论
波义耳	（同种）微粒	微粒论	（光微粒结构微小变化）	修正理论
胡克	均匀以太波	波动论	复杂波动/脉冲	修正理论
牛顿	（多种微粒）	（微粒论）	单色光及其混合	不变理论

为了更客观地理解牛顿与胡克的光学论争，在正式进入这场争论的探讨之前，有必要对于争论的另一方的立场和观点做一简单梳理。自亚里士多德始，颜色一贯被理解为光与阴影通过各种方式混合造就，而在牛顿理论问世之际，这一传统遭遇了严重的危机，笛卡尔等人的工作使得颜色研究被纳入了机械论自然哲学，而胡克等人也依据这一思路建立了新的理论。表1从笛卡尔、波义耳、胡克和牛顿四位光学家的光和颜色的形而上学基本假定（在公开表述程度有别）入手，列出了其光色理论的基本架构②。

笛卡尔将光看作是气状元素中传播的以太压力、运动或运动倾向，将颜色对应于以太微球的旋转效应，光在折射或者反射时可能引起旋转速度的改变，从而造成颜色。（[9], p.405）

胡克批判地继承了笛卡尔的光学思想，他将光看作是以太的均匀振动或脉冲，三棱镜颜色对应于静止媒介（折射面）对光束不同部位光线施加不同强度的作用所引起（相对于原光波振动方向）光波的倾斜。（[5], p.101）

笛卡尔和胡克两人的颜色理论都属修正理论[13]，都持有两个彼此相辅相成的基本信条：

1. 日光是纯净、均匀、单一的；

2. 日光受物体作用发生改变（修正），各种颜色是日光的不同变种③。

虽然这些理论已带有强烈的机械论哲学的特征而明显有别于亚里士多德的理论，但在另一方面，它们仍旧和后者处于同一阵营，即都属光的修正理论。就像亚里士多德以光和影的混合来解释颜色那样，笛卡尔和胡克等人代之以红和蓝或者黄和蓝的混合。此外，尽管笛卡尔和胡克都是光的修正论者，但两个版本的修正理论之间也存在不同之处，这主要表现在其对于光的改变及外部作用引起这种（差异性）改变的机制的理解上，笛卡尔构造了“旋转微球”的图景，胡克则设想“倾斜振动”。

波义耳对于光与物的颜色变化问题有过较系

①表中加注“（）”的内容属于光学家未以明确的命题形式予以断言的内容，如牛顿常用“光的微粒”这一概念，但他往往只是在推测性的探讨中谈论光是不是物体并倾向于给出肯定答案，这类探讨在他而言，绝非有如建基于实验之上的“日光由多种光线组成”等命题那样确凿。

②惠更斯也是当时的重要光学家，但他对于分光和颜色现象涉猎不多，故在此未予讨论。此外，格里马尔迪、帕蒂斯（I. G. Pardies）等也是比较重要的人物，则囿于本文篇幅，亦略去不论。

③两人都持有光的波动论立场，而波动惯常被认为是易变的，这同修正理论的第二条核心假定是一致的。

统的实验研究，著有《颜色的实验史》，其中有许多重要实验构成了牛顿光学实验研究的直接基础，但他没能构造出完整的微粒论解释机制，他和牛顿一样将光理解为微粒（[13], p.691,695），却又倾向于认同颜色的修正理论解释（[13], p.689,695），将颜色的原因笼统地归结为不同结构的物质表面对光的不同作用所引起的光线与阴影的形形色色的混合。[14]

可见，尽管当时条件下持有波动立场的研究者往往对色散现象给出修正解释，但是，在本体论意义上持有光的微粒论立场，并不能保证一定得到牛顿式的光色理论，也可能导致波义耳式的微粒论版本的修正理论。

三、光学论战与理论判决

前文所述牛顿理论同其他理论的根本差别注定了一场论战。牛顿论文发表以后，质疑和责难纷至沓来。胡克一马当先，在其评论文章开头部分先是将牛顿的理论说成是“可能的而非唯一的假说”，接着又直接评价牛顿的判决性实验并没有牛顿宣称的说服力。由于胡克是当时的光学权威，并且与牛顿发生过最激烈也属最深入的争论，最能说明牛顿的判决性实验及其光色理论在同别的经验和理论交锋时的历史际遇，因而本文选择予以专门讨论。[15],[16]此外，他们的光学论争内容庞杂，以下只择取同判决性实验相关的日光的单一/异质性问题及光的修正/不变问题加以讨论。

日光是异质的还是简单的这一问题是牛顿试图通过三棱镜实验来回答的首要问题，也是他同胡克光学争论的首要问题。牛顿断定日光是异质的，然而胡克认为，根据波的性质来推断（和牛顿不同，胡克在此不是直接从经验出发，而是通过假设演绎得到的），任何形式的振动在数学上都可以理解为多种振动的叠加，反过来，多种振动的组合也总能够看作是同一种振动。如果光是振动，那么光也就可以被理解为多种波的混合体，只不过这样的理解是多余的。在波动论视角下，根本不存在“异质”的概念，或者说，这一概念从理论上被消解了，因为任何波动，既可以被理解成单一的波，也可被理解为异质的波。但牛顿意识到胡克在这里将物理和数学搞混了：一个运动在数学上固然能够以任意不同方式理解成多个运动的叠加，但在物理中却是难于做到的，况且在三棱镜色散现象中光仅表现出的特定的而非任意的“可叠加性”，牛顿反驳道：

> 1.我想象不出来一组直线运动经一个介质面折射以后通过什么技法能够无限分裂成为一个面；2.而这种分裂缘何只限于这样小的角度；3.不同的运动相遇以后怎样合并成为一个统一的运动，而重新分裂以后又恢复成原来的特定运动，并可自由地如此反复；（[9], p.201）

胡克看到了自己理解当中的困难，转而指控牛顿不愿或不敢提及（牛顿解释背后）诸如光的本性之类的话题，是因为牛顿怕自己的微粒论假说碰到比波动说更多的诘难。在胡克看来，牛顿和自己一样是从一个本体论假定（微粒论）出发推出其光色理论的，如果自己能驳倒其本体论主张，则可以说牛顿光色理论也是错的。但牛顿强调自己的理论纯粹出自实验，形而上学假说在自己的自然哲学中没有地位。从这一点来看，胡克的反驳确属误入歧途①。

其次，胡克指责牛顿通过其判决性实验也并不能够证明单色光先在于白光之中以及折射率和颜色是该单色光的固有属性，在他看来，单色光的颜色及其稳定性也可被理解为是光在折射过程中获得的。对于这种不无特设性假定意味的质疑，牛顿指出，如果在三棱镜之后设置凸透镜则能在透镜焦点附近看到重新恢复的白光——这种白光的所有性状与日光完全相同，而在更远处又发散为各种单色光（图3）。可见“色散是由于每一种光线各自单独服从确定的折射定律引起的。（[9], pp.169–170）”至此，牛顿基于实验充分论证了日光只是各种单色光的简单的混合体。

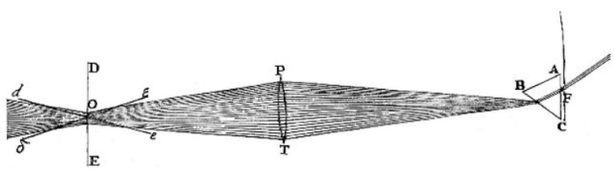

图3 牛顿单色光聚合恢复白光实验（[8], p.115）

①事实上，牛顿并非纯粹的光的微粒论者，在方法论意义上，他还是对波动论思路作了大量借鉴，使之成为自己光学理论体系的一个有机的内在组成要素，可以说，撇开波动论就不能够真正全面和准确地把握牛顿的整体光学思想。

光是否可变是其争论中的另一个核心议题。牛顿指出，自然界只有单色光的混合而没有单色光的改变；而胡克认为光作为波动不仅是可分解的，还是可改变（修正）的，事实上分解可被看作是修正的特殊形式。而修正的起因有两种，其一是静止以太对光的作用，其二是光线之间的相互作用。胡克据此解释日光的三棱镜色散现象，将其说成是静止以太与光、光与光之间相互作用引起的劈裂或稀薄化作用。但是胡克所承认的光发生修正的现象只限于第一次折射。尽管他承认单色光在后续的折射中稳定葆有其折射率和颜色等属性不变，但仅将其看作一种特例。

对于这一解释，牛顿称其1672年论文中所给出的倒立三棱镜实验业已给出了否定回答，此外，他又推出了十字交叉三棱镜实验（[9],p.178），同样能够证明：

> “毗邻的静止以太在折射及其随后的过程中不对光线的性质造成任何影响。……对于具有异质性的光而言，它不过是多种同构性光的组合，没有其中任何一种因为处于组合之中而比之单独存在的时候具有任何不同，因为光线之间不发生相互作用。”（[9], pp.293–294）

在牛顿–胡克的争论中，牛顿的步步紧逼与胡克的节节退让之间形成了鲜明的对比。1675年初，胡克在写给牛顿的信中对于牛顿的低头不可谓不诚恳：

> 您（牛顿）以各种方式圆满、订正和革新了我的稚嫩的研究，我相信再也没有人比您更为合适和更能胜任这一主题的研究工作。（[9], p.412）

可以说，判决性实验确立了牛顿自己的光色理论的优越性，同时有效判决了一切形式的光的修正理论的死亡，使之自此开始逐渐淡出了光学家的话语和实践，即使后来光的波动论再度复兴，光的修正思路也没有随之复活[①]。

四、结　　论

通过以上对于牛顿1672年光学论文及牛顿–胡克光学争论的解析，本文得到以下结论：

1.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。

2.牛顿光色理论与胡克理论的核心假定并不是微粒论假定或波动论假定，前者的核心假定是，日光是异质的且单色光是基本的、不变的；后者的是，日光是基本、均一及可变的，其他颜色的光线由此衍生而成。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。

3.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。将判决性实验的裁决能力错误地延伸到形而上学界面，最终只能得到“不存在判决性实验”这一不当结论。牛顿在光的本性问题上的确持微粒论立场，而且这种立场的确或正向或反向地启发了他个人的实验探索，但波义耳的事例表明，在微粒论思路下也可以容纳修正理论解释。胡克的确持波动论立场，而且他在论战过程中也的确曾从波动论假定出发进行推演，但牛顿指出，即便将光理解为波动，也未必一定要求修正理论，也可以容纳日光异质假定。这就是说，在微粒论或波动论与日光的异质假定或修正假定之间，可能因人而异地出现任意组合。在本案例中，能与实验发生直接关联的并不是形而上学，而是具体的光色理论，而这些理论，按照实验哲学的基本原则，若与实验发生冲突，则有可能被实验否决。

［参 考 文 献］

[1] Westfall, R. S. 'The Development of Newton's Theory of Color'[J]. *Isis*, 1962, 3: 354.

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

[3] 桂起权、姜琳. 判决性实验的相对确定性与判决效力——以光的判决性实验为例[J]. 山东科技大学学报（社会

①歌德《论颜色》一书及其所引起的风波或许不乏历史价值，但从未在主流光学界引起重大影响。

科学版）, 2006, 8（1）: 1–6.

[4] Bacon, F. *The New Organon*[M]. edited by Jardine, L., Silverthorne, M. Cambridge(U. K.), New York: Cambridge University Press, 2000, 159.

[5] Hooke, R. *Micrographia: or, Some Physiological Descriptions of Minute Bodies made by Magnifying Glasses* [M]. London: Martyn, J., Allestry , J., 1665, 96.

[6] Dumitru, C. 'Crucial Instances and Crucial Experiments in Bacon, Boyle, and Hooke'[J], *Society and Politics*, 2013, 7(1): 45–61.

[7] Newton, I. 'A Letter of Mr. Isaac Newton, Professor of the Mathematicks in the University of Cambridge; Containing His New Theory about Light and Colors: Sent by the Author to the Publisher from Cambridge, Febr. 6. 1671/72; In Order to be Communicated to the R. Society'[J], *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1671, 72(80): 3075–3087.

[8] Newton, I. *Opticks or, a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections, and Colours of Light*[M]. London: Willams Innys, 2010.

[9] Newton, I., etc. 'Isaac Newton to Henry Oldenburg, 2 February 1671/72'[A]. Turnbull, H. W., F.R.S. edited, *The Correspondence of Isaac Newton*[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1959, Vol. I.

[10] 朱丽君 . 牛顿科学研究方法的修辞学意义 [J]. 科学技术与辩证法 , 2009, 26（2）: 43–48.

[11] McGuire, J. E. *Certain Philosophical Questions, Newton's Trinity Notebook*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003, 333–489.

[12] Newton, I. *The Optical Papers of Isaac Newton, Vol. 1, The Optical Lectures 1670-1672*[M]. edited by Alan E. Shapiro, Cambridge: Cambridge University Press, 1984, 11.

[13] Nakajima, H. 'Two Kinds of Modification Theory of Light: Some New Observations on the Newton–Hooke Controversy of 1672 Concerning the Nature of Light'[J]. *Annals of Science*, 1984, 41(3): 261–278.

[14] Boyle, R. *The Works of the Honourable Robert Boyle*[M]. Edited by Thomas Birch, six volumes, Hildesheim: George Olms, 1966, Vol. 1: 694–695.

[15] Westfall, R. S. 'Newton's Reply to Hooke and the Theory of Colors'[J]. *Isis*, 1963, 54(1): 82–96.

[16] Hall, A. R., Westfall, R. S. 'Did Hooke Concede to Newton?'[J]. *Isis*, 1967, 58(3) : 402–405.

［责任编辑　王大明 柯遵科］