

牛頓色光理論的實驗與數學

蘇賢錫

國立臺灣師範大學物理系

牛頓想發明數學性的色光理論（後來在他的劃時代著作「光學論」中放棄）所作長達十年之努力，顯示他對科學理論觀念的非凡見識。

一、前言

1672年1月18日，英國物理學家及數學家牛頓（Sir Isaac Newton, 1642 ~ 1727，圖1係1689年牛頓46歲時，這是他在世最早的肖像）寫信給英國皇家學會（The Royal Society of London for Improving Natural Knowledge）幹事奧登堡（Henry Oldenburg），說他要寄給奧登堡一篇論文。牛頓謙虛地說這篇論文是「根據我的判斷，在截至目前的自然界中，即使不是最重要的發現，至少也是最奇特的發現。」牛頓不是在指他的萬有引力理論——那是十幾年以後的事——而是言及白光與色光的性質之新理論。他發現不同顏色的光線有不同程度的折射性——換言之，折射率隨波長而改變——並且白光與日光是由無數的色光混合而成。不到三星期後，牛頓照其承諾，將其聞名的論文「關於光與顏色的新理論（簡稱新理論）」寄給英國皇家學會。這篇論文立即刊登在英國皇家學會會報（Philosophical Transactions）上。在「新理論」中，他大膽地



圖1

宣布：「自然科學家幾乎沒有指望色光科學會成為數學科學，但是我敢肯定，正如光學的其他部分一樣，確實有這種可能性。因為我將要說的，不是假設，而是最準確的結果，不是僅靠推理或因其滿足一切現象（自然科學家的一般話題）來猜測，而是依靠直接獲得的實驗結論表明，沒有任何可以懷疑之處。」

這是相當強烈的聲明，而本文的第一個目的是，要留意觀察牛頓對他企圖在其「光學講義」中創造數學性的色光科學之可能性的探討，以及實驗在這項努力中所擔任的角色。其次，本文將敘述他為什麼放棄其新數學科學而接受實驗理論。本文也將指出牛頓起初如何企圖使他的「光學講義」成為像其「自然哲學的數學原理（Principia）」或數學論文一樣，然後「光學講義」如何變成實驗論文「光學論」。事實上，本文將表明「光學講義」的數學理論與「自然哲學的數學原理」迥然不同。

二、光學講義

大多數物理學家都是從牛頓的「光學論」獲知其色光理論。「光學論」是牛頓在 1690 年代早期撰寫，而在他發現光學現象後大約三、四十年的 1704 年出版。一部分物理學家也知道「新理論」，但這只不過是他的色光理論之概要。牛頓早期對光學的主要著作是其幾乎不為人知（甚至科學史家也不知）的「光學講義（*Lectioes opticae*）」。

圖 2 表示牛頓親筆的「光學講義」第一版本第一頁。

1669 年秋天，當牛頓年僅 27 歲就被聘為劍橋大學數學教授時，他決定自 1670 年至 1672 年，以其五年來

Add. 4002

Jan. 1669

Lect. 1
1. Inceptio ratio.

Inventio Telescopiorum rupina phorog Geometras
da exerceat, ut nihil in Optica non tritum, nullum inven-
tioni preterea locum alijs reliquis videantur. Et insuper cum
dissertationis quas hic non ita pridem audivisti, tanta rerum
Opticarum varietate, novorum copia, et accuratissimis eorum
demonstrationibus fuerint composita; frustaneis fortè idea-
lar conatus et labor inutilis, si ego scientiam hanc ibi
tractandam susceperem. Verum cum Geometras in quadam
popritate, quæ ad Refractionis spectat hucusq; hallucinantes
videat, dum demonstrationibus suis Hypothesin quadam Physi-
cam hanc hinc stabilitam tacitè supponant, non ingratum
me facturum iudico, si principia Scientia hujus examini severi-
ori subijciam, et quæ ego de ijs simul excogitari, et
experientia multiplici habeo comprobata, subnectam ijs, quæ
Reverendus meus Antecessor hic loci postrema dixit.

Imaginatur sibi Dioptrici stadia, quod Perspicilla ad
qualitè perfectionis gradum produci possent modo vitris dum
perpolitur. geometricam, quam vellent, figuram communicari
concederetur. Et in eam firmè instrumenta varia fuerint
excogitata, quibus vitra in figuras Hyperbolicas vel etiam Pa-
rabolicas converterentur; sed exacta figurarum istarum for-
matio mihi penitus successit. Sicque arabit lithis; et
in labore suo in ergo despirato diutius insumant, ijs
adeo sponte, quod licet omnia fierent proquam felicitate,
nihil minus tamè quam volis suis responderet: etiam
vitra licet offerretur secundum figuras in istam formam
optimas, quæ possunt excogitari, tamen non duplo plus
prestant quam spherica, apud politissimè perfecta. Hac
autem non ita liquor, quasi precalum sit, a scriptoribus
Opticis confutatum; illi enim omnia pro intentione de-
monstrationum suarum accurati quidem et vicissimè di-
xerunt, sed aliquid tamè ipsi maxime generali viligen-
rant postis insinuant. Subiecta in refractionibus inviga-

圖 2

所開發的折射與色光理論為題，發表一系列的就職講課。這是牛頓的第一篇物理論文，也是他所提出的論文中對色光理論說明最詳盡的。這篇論文充當其「新理論」的直接資料，並且二十年後又充當「光學論」第一卷的基礎。

「光學講義」有兩種版本，第二版是第一版予以大幅增訂且重新組織的。兩種版本均以拉丁文撰寫。1672年早期，牛頓企圖出版修訂版，但他立刻決定不出版，然而，依照大學的規則，1674年10月他將一本書寄存在大學圖書館，於是出現很多翻印書。

一如「新理論」，牛頓的「光學講義」起自其理論的中心概念之證明，換言之，日光由折射性不相等的光線所組成。要證實這項發現的基本實驗是，使光線經過稜鏡，將其影像或光譜投射在幕上。在17世紀，利用稜鏡光譜的實驗非常普遍，但是牛頓的安排是，讓狹窄圓形光束以最小偏向透過稜鏡，這是獨創性的安排（見圖3）。牛頓推斷，在這種情況之下，如果所有光線的折射性均為相等（正如當時一般所公認），則影像應該幾乎是圓形的。然後，他測量光譜，發現影像是扁長的，長度是寬度的五倍左右。這就是基本要點——測量與計算。當然，他必須除去造成扁長的其他可能原因，但他一旦證實，除了日光由折射性不相等的光線所組成以外，沒有其他原因時，他似乎對色光已有數學量度：折射性的程度。一方面，這也使數學的色光理論之開發具有可能性。另一方面，這項實驗也提供了牛頓色光理論的基本實驗及觀念上的工具。它給他分析或分解的方法；即利用不相等的折射性來分離不同顏色的光線。

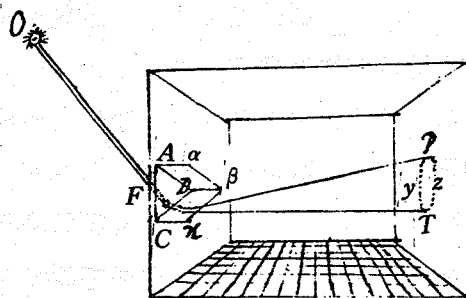


圖 3

三、數學的主張

在增訂且重新編排的「光學講義」第二版中，牛頓證實不相等的折射性之後，我們看到與第一版最顯著的改變，因為牛頓把折射的數學部分與色光的實驗部分互換，把數學部分放在前面。然而，這兩種版本，他引進其實驗理論的命題之後，他總是就其證明法聲明，使我們能窺看他對科學理論觀念的見識。為了證實自己對色光的數學討論，牛頓作下列的主張，而這主張充分顯示在整個「光學講義」中引導他的那些觀念特徵上。（此處我們可以將牛頓的措詞「幾何學」與「哲學」分別換成「數學」與「物理學」來解釋）：

「……顏色的產生包括許多幾何學，而對顏色的理解可從很多證據中獲得支持，因此，我能企圖稍微延伸數學的範圍，猶如天文學、地理學、航海學、光學、以及力學，雖然都是討論物質世界，却是事實上被認為均和數學科學一樣……所以雖然顏色可能屬於物理學，但其科學必須被認為是數學的，只要用數學推理來處理顏色。誠然……我希望證明——用我的例子——數學在自然哲學中是怎樣地有價值。因此，我極力主張幾何學家必須更嚴密地研究大自然，並且極力主張專心從事自然科學的人首先要去學習幾何學。因此，幾何學家不應該把他們的時間完全花在對人類生活沒有價值的思索中，而自然科學家也是一樣，不應該利用荒謬的方法來孜孜不倦地研究，而無法達成目標。然而，由於哲學幾何學家與幾何哲學家的幫助，最後我們將完成由偉大的證據所支持的自然科學，而不是由到處流行的猜測與成算所支持的自然科學。」

如此，由其生涯的開端，牛頓就切盼改革自然科學與科學本身的方法。在朝向這方向進行時，牛頓公開宣布：「這些命題不應該用假設或推算的方法來處理，應該用實驗或證明的方法來處理。」在上列一段引用文句中，他除了含糊的引用「證據」以外，只提列數學而沒有提列實驗。牛頓希望建立更確實的新科學，他沒有清楚地分開這項改革的兩個不同的觀點——數學的引進與「假設式物理學」的消除。「假設式物理學」是早期科學革命時，法國哲學家及數學家笛卡爾（René Descartes, 1596～1650）以及其他機械哲學家引進的。機械哲學家主張，正如亞里斯多德學派的學者所相信，我們不能真正明白自然界的運作，我們頂多只能建立能夠闡明該現象的適當說明——「假設式物理學」確實根據猜測出來而看不見的心理過程以建立任意模型。牛頓的目標是要更換這些定性的可能說明，而建立新的確實性與真實性，利用數學並且直接根據現象或實驗與觀察來描述自然界。

四、實驗的色光理論

在牛頓的時代，色光的研究根本不容易用統合數學方法來處理。除了這個本質上的問題而外，他所企圖之數學的色光理論，其主要弱點可能是他的理論與其實驗理論以及任何實驗或觀察之間的關係不太密切。這兩種理論幾乎沒有共同的原理。為了明白二者的關係，本文將簡單敘述它們，先從實驗的理論開始。由於這個理論比較為人所知，本文僅僅指出牛頓的最重要結論，而只間接提及他用來證明的那些廣泛實驗，本文的概略記述將合成他的早期三種著作——兩種版本的「光學講義」與「新理論」——並且指出其間的重要差異。

牛頓完全接受機械哲學的基本假設，即光線沒有彩色，視其物理成分而產生不同顏色的感覺。然而，爲了方便起見，本文將說紅光、黃光等（牛頓也往往這樣說）——而不用牛頓那種更加正確却是不方便的使成紅色的光線、使成黃色的光線等術語。

日光由折射性不相等的各種光線所組成。本文早已指出牛頓證明這個原理的要點。這個原理是兩種理論的基礎。

折射性與顏色之間有一對一的對應。牛頓暗中假設，這種對應與折射物質無關。這個命題使數學的色光理論之建立有其可能性，因爲它在原則上指派一種度量目標給顏色。雖然如此，因其證明與應用只是定性的——換言之，只觀察到紅光永遠被折射得最少、紫光最多等等，所以這個命題不能嚴密建立，也不能寫成數學公式。然而，在「新理論」中，牛頓（錯誤的）宣稱，這種對應「非常準確而且嚴密。」。

顏色不因折射、反射、穿透或任何其他方法而改變。這個命題必須限制在單色，同時顯示起初牛頓在對單色與複色光下適當的定義時發生困難。他在「光學講義」第二版中首次提出這個命題，而當時他認定這個命題可以用來證明顏色是日光固有的。

色光可分成兩類，即「單色光」與「複色光」。例如，橙色光可能是單純光譜中的橙色光或紅色與黃色光線所組成的複合橙色光。這兩種色光的感覺相同，但在物理上可以辨別，因爲複色光可以利用稜鏡來分解。牛頓逐漸澄清這個觀念。在「光學講義」第一版中，這兩種色光，連定義也沒有定下來，但在 1673 年，他爲荷蘭物理學家海更斯（Christiaan Huygens, 1629 ~ 1695）重新應用公式闡明他的理論時，他用折射性來對兩種色光下嚴密的定義，終於解決這個問題。

外觀類似單色的顏色，可以由其兩側的顏色混合而成。這也是增加在「光學講義」第二版中的命題，顯示牛頓愈來愈關心顏色的組成。

牛頓在「新理論」中說明：「但是最驚人最奇異的是白色的組成。白色永遠是複色……」，換言之，白光，特別是日光，是各種顏色的光線之混合。牛頓認爲任何人都不能直接用實驗來證明顏色是日光固有的，而支持這個原理的那些牛頓實驗，大多數都是根據類似性論據：利用各種（往往是智巧的）方法，他混合很多種單色光來組成白光，並且證明其一切性質均類似日光。（見圖 4）。牛頓在其「光學論」中認爲白光也可能用較少種類的單色光來組成，或許其種類可以少至三種。

雖然牛頓根據實驗而發展的理論確實有問題——例如，不準確且循環性的定義，未經證實的理想化與一般化——但無疑地，它穩定地依據實驗與觀察。它經過實驗而得到證明，其基本觀念（例如，不相等的折射性，單色光，複色光）是從實驗中導出來，而

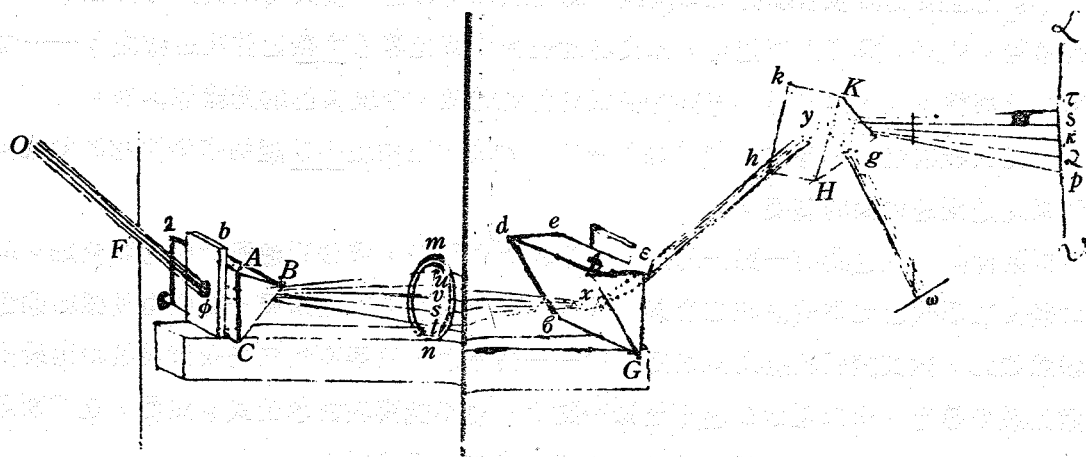


圖 4

且是可以操作的。反之，下列的數學理論則幾乎不需要依據實驗與觀察

五、數學的色光理論

折射性不相等的光線是日光中所固有的成分，1666年牛頓就發現了這件事實，然後，他開始把數學應用在這新現象上；他計算平凸透鏡的色像差；他發展折射與色散的數學物理模型來計算各種單色光在各種物質的界面（例如，空氣與水，或空氣與玻璃）的折射問題。本文將前者那種數學的應用視作定量性應用，以便與數學的理論加以區別：在定量性方法中，要利用傳統的幾何光學連同各種折射率的假設，來測定特殊效應。牛頓是卓越的數學物理學家，在這方面的努力，他完全成功。折射率的計算，至少在原則上可以代表本文所謂數學的理論，而牛頓渴望實現這理論：即從一些基本的數學物理定律，使任何人都可以推論各種現象。

牛頓計畫要發展數學的色光科學，這不僅是一個計畫，而且必須由他的「光學講義」來重新建立。其基礎是折射性，亦即折射率，而牛頓發現折射率直接與色光互相對應。首先，他假設折射正弦定律，亦即斯涅耳定律對每一種單色光都是有效。雖然他提議一種實驗來證明，但他又認為沒有必要而予以廢棄。其次，爲了描述折射程度隨色光的變化情形（亦即色散），牛頓建立一種折射模型。今天，我們知道這模型是根據笛卡爾的早期粒子模型，認為光粒子通過折射面時受到一種衝量。然而，牛頓在其「光學講義」中，細心消除其機械論基礎的一切痕跡，而完全以數學定律的形態呈現出來。該模型

假設，當光斜向入射兩不同介質的界面時，一切色光的光線（或粒子），其速度均在沿界面的法線方向上增加相同的量（見圖 5）。這模型提供所謂牛頓的二次色散定律：

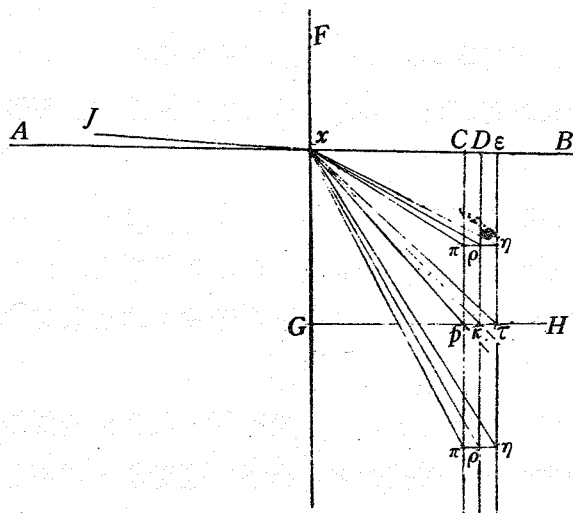


圖 5

$$\frac{\Delta n}{\Delta n'} = \frac{(1/n)(n^2 - 1)}{(1/n')(n'^2 - 1)}$$

在這比例式中， Δn 是特定介質中的色散，亦即最遠的紅光與最遠的紫光的折射率之差， n 是平均折射率，而分號（'）表示第二介質。雖然我們不一定關心該定律的正確形式，但是我們必須注意，該公式是建立在一個簡單却是錯誤的假設上：即色散與折射物質的性質無關，色散完全是光的本性。因為一旦這模型的參量被測定出來——而且一種物質只需三次測量——該物質的折射率之值可以令人決定其一切折射狀況。牛頓對這種特色非常得意，甚至自誇說，只要有這個定律，任何人都不必「為重新設計實驗而操心」。

六、折射三原理

牛頓的目標顯然是要發展合理的色光科學：

- 正弦定律闡釋特定介質中任意入射角的各光線之折射現象。
- 色散定律闡釋各色光線的折射率，只要已知任一色光的折射率。
- 相對折射率定律早已週知，但是牛頓將其推廣到不同折射性的光線。相對折射率

定律可以提供任何兩個介質的折射率，不必另作測定，只要已知其對某種共同介質（例如空氣）的折射情況即可。

如此，牛頓發展出一個理論，只需最少次數的測量即可描述任何色光在各種介質中的折射現象。當他在其「光學講義」中陳述其折射模型時，他直率地承認：

「雖然我還沒有從實驗導出這個命題的確實性，但是我並不懷疑它的普遍性……在此際，我滿意這個假設，雖然我並沒給予理由。」

正如後來牛頓寫信告訴英國物理學家及天文學家虎克（Robert Hooke, 1635～1703），上列折射三原理是要充當其數學性的色光科學之基礎。雖然牛頓在該信件中考慮過不同的色散定律，但重要的是要注意，實際採用的色散定律對這計畫沒有關係，只是這種定律的存在才是重要的。

現在，我們已經看出，牛頓的數學性色光科學，其目標是要描述色光的現象，而不是要說明其原因。他的方法較像傳統的幾何光學或運動學，而不像物理光學或動力學。這又好像後來牛頓企圖從刻卜勒定律，而不是從牛頓定律與中心力來導出天體力學一樣。

「光學講義」的其他部分，主要是牛頓企圖（後來才知這是徒勞的）從折射三原理（尤其是其色散定律）中，推論出一個命題來形成其數學的色光科學。（下面，本文不得不忽略牛頓最著名的光學成就，這成就在於單色光的傳統幾何光學方面。）在不同的起始條件之下，在平面折射的不同顏色光線，首先他致力為這些光線的相對次序與偏向角而開發許多命題。這在物理學上是毫無趣味的工作。然後，在含有一些複雜數學的兩篇相關講義中，他著手研究色散隨折射率的變化。例如，他證明色散增加的速率較折射率為大。這個命題是錯誤的，正如這些講義中的其他命題一樣（其中只有一個命題是對的），因為除了一個命題以外，其他一切命題都是根據他的二次色散定律。然而，牛頓應該能夠簡單地考驗這個命題——例如，比較普通玻璃與松脂——來發現這個命題不能成立。雖然在這兩篇長文講義中，他曾經一度建議一種實驗來考驗，卻又認為它不夠靈敏而廢棄了。

同樣地，在第一版關於稜鏡折射（他整個理論的基礎實驗技術）的簡短結論中，八個命題中有兩個是錯誤的。特別值得注意的是，其中一個命題甚至不能成立，即角色散的最小量（亦即被折射的最遠紅光與最遠紫光所成的角度）發生在光線對稱通過稜鏡時。不但是最小量的位置錯誤，而且就牛頓所用的大角度稜鏡而言，根本沒有最小量。要區別偏向的變化與角色散的變化，雖然有點困難，但是牛頓是智力敏銳的觀察者，而且這個實驗他做了好多次：在「光學論」中的一項觀察，他修正了這個錯誤。牛頓似乎不

很注意利用實驗來考驗他的數學結構與實際世界的關係。

七、牛頓修訂「光學講義」

當牛頓修訂其「光學講義」時，他互換了兩部分，使折射的數學部分出現在色光部分之前。這種新的次序顯然反映他愈來愈想在折射的基礎上致力發展數學性的色光理論，但是這種安排似乎對數學性的或實驗性的理論以及這兩種理論的相互關係沒有重大的影響。依照牛頓自己的說法，色散定律依然未被考驗，雖然他將其數學性的色光理論略作修訂與重新安排，但在本質上則完全沒有改變。他沒有——或不能——推進基礎數學理論，但是他增加了有關球面折射的精彩章節。該節包括探討多色光的兩項重要計算：透鏡的色像差與彩虹的寬度。

牛頓最重要（即使不是最適當）的增訂是光譜的音樂區分（見圖6）。他把紅光到紫光的光譜分成七個「比較突出的」色光，並且發現這種光譜的區分是：

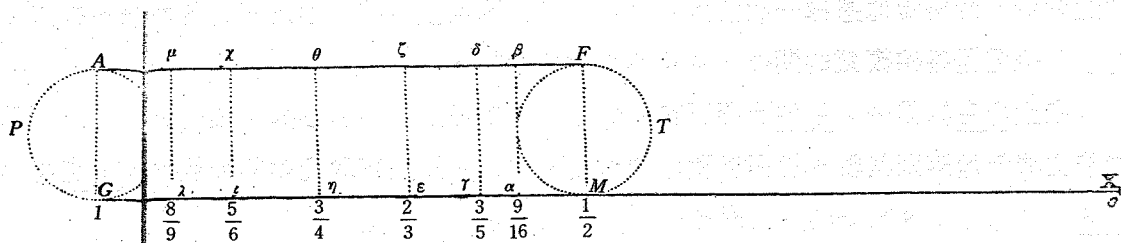


圖 6

「……正比於弦音的區分，以產生第八度音程的各個音度……可是，我不能精確觀察以及下定義，因而不得不承認，或許也可以用不同的方法來構成……。」

雖然如此，他因為相信聲音的諧音與色光的諧頻之間有類似之點而選擇音樂區分。說到此處，牛頓只是在古代有關諧音的尋求方面追加一個新的創意而已，但他接著說明，利用近似法，將兩個最遠色光之間的折射率依照光譜的比例來區分，即可找出各個色光的折射率。這種音樂區分立刻提供另外一個（錯誤的）色散定律，暫且稱為牛頓一次色散定律：

$$\Delta n / \Delta n' = (n - 1) / (n' - 1)$$

正如牛頓早期的二次色散定律，這次的色散也與折射物質的性質無關，因為平均折射率相同的任何兩個介質，其色散情形相同。雖然牛頓在其「光學講義」中沒有推論這個新

定律，但在幾個月後他在寄給虎克的信中簡潔地採用它。

八、互相矛盾的色散定律

就牛頓所研究的那些範圍極其有限之物質與折射率而言，在量的方面，這個一次定律與早期的二次定律沒有太大的不同。然而，其所含的基本物理意義則不同，而且與二次定律互相矛盾。牛頓根據其二次定律所發展的折射動力學理論，而且後來還利用力的觀念，進一步發展成為「自然哲學的數學原理」。他把一次定律直接放在其色光理論——色光與折射性的不變性——的基礎上，因為一次定律意指一切光譜中，各個色光所佔光譜的比率均為相同。如此，牛頓從基本理論原理導出這兩個定律，而他對這基本理論原理從未懷疑。因此，首先，對牛頓來說，兩者之間的選擇不是實驗上的問題；而至少這可能就是為什麼他從來沒有利用實驗來對這定律做有系統考驗的一部分原因。最後牛頓寫信答覆虎克時，他隻字不提他的色散定律，而往後的三十年間，他對這問題未曾公開討論過。最後當他選擇一次色散定律在其「光學論」中時，他用捏造的實驗證據來支持它，但這是錯綜複雜的問題，本文不在此處討論。

在致虎克的信中，牛頓已經正在放棄他在「新理論」中所強烈主張的確實性，因為他能更清楚地辨別其數學性與實驗性的理論，並且承認其實驗理論的偶然性。虎克指控牛頓的理論「不像數學的證明那樣確實」，而牛頓的答覆是：

「我確實說過色光的科學是數學性的，和其他任何部分的光學一樣具有確實性；但誰不知道光學和很多其他數學科學也依靠物理原理和數學證明？科學的絕對確實性不能超過其原理的確實性。現在，我在色光的命題所用的證據是從實驗而不是從物理來表達的；因此，命題本身可以看做只不過是科學的物理原理而已。而如果這些原理是這種原理，數學家就可以決定折射所引起的一切色光現象……我想色光的科學應該被認為是數學性，而且是和任何部分的光學一樣具有確實性。」

然而，甚至這種讓步也有點使人誤解牛頓對新科學的描述，因為牛頓的數學理論是根據其折射三原理，正如他在致虎克的回信中所說，而不是根據其實驗理論的「物理原理。」事實上，他的實驗與數學理論只有一個半共同原理，即日光由折射性不相等的光線所組成，以及折射性與色光之間有對應，但是，這個原理，他只作定性的開發，所以只能算是半個原理。

為什麼牛頓緩和其主張到實驗理論的確實性，而使其與數學理論發生差別？當然，

直接的原因是虎克的反對，結果迫使牛頓更加仔細考慮科學理論的性質，特別是他自己理論的推演方法與數學列式的結構。同時，或許牛頓希望能隔開這兩個理論，因為他發展數學性的色光科學，其目標已經陷入困難的立場。這種猜測是根據下列三點理由：

- 第一，牛頓缺少色散定律——或許可以說他有兩個色散定律——而正確的科學必須具有某種基礎。
- 第二，令人難以相信的是，經過「光學講義」兩種版本之後，牛頓自己竟然沒有認出他在發展以實體為模型的基礎理論方面，實際上他沒有多大進展。他的數學理論幾乎是其智慧的自由結構。雖然這種方法可能使牛頓失敗，但是我們必須認識清楚，他要建立普遍性數學物理定律而且在各分野上追尋，這種意願與能力，顯示科學方法的膽大與智性掌握的寬宏，否則他無法成功。
- 第三，牛頓愈關心色光的組成，或許他就愈認清他只完成色光理論的一部分，即不相等折射性的理論，能夠說明色光的空間分佈或間隔，但是不能說明其感知上的外觀。即使牛頓的數學理論比較成功，這一點可能也使他感到煩惱。

九、放棄數學理論

不論真正理由是什麼，牛頓確實放棄了他的數學理論。他沒有發表「光學講義」中的數學部分。不到四個月後，他寄發「新理論」，他決定暫時停止出版其「光學講義」，因為「新理論」的出現與跟著發生的爭論非常擾亂他的寧靜。1675 年末期，他恢復平靜時，他又判斷世人願意接受他的光學理論，但是這時「光學講義」的內容，大部分已經過時。那時，牛頓計畫新著作，其內容很像後來的「光學論」。為了這著作，他想重做「光學講義」中的色光實驗部分，使成為「論稜鏡的色光」一節，同時刪掉「光學講義」中的數學部分，再加上他最近完成的有關薄膜顏色的論文。1704 年，牛頓終於出版「光學論」（見圖 7，係第 1 頁，牛頓親筆撰寫）時，從「光學講義」中，他只採用一些具體的定量結果，而他甚至認為必須在序言中否認其「光學講義」。

1672 年，牛頓的實驗理論也遭遇到嚴重的意外障礙，威脅其確實性。在修訂「光學講義」時，他發現嶄新而且邏輯上很嚴密的證明方法，證實色光是日光固有的。這種證明是依靠色光不變性原理，其主要內容如下：因為色光絕對不變，而日光被折射後產生色光，所以這些色光必然是折射之前就是日光固有的，即使在折射之前我們看不見這些色光。

A.
Add 39707

工 13.3

The first Book of Opticks.

It is my design in this Book, to explain the properties of Light by Hypotheses but to propose & prove them by reason & experiments. In order to which I shall premise the following Definitions & Axioms.

DEFINITIONS.

Defin. I

By the Rays of Light I understand its least parts & those as well successive in the same lines as contemporaneous in several lines. For it is manifest that Light consists of parts both successive & contemporaneous, because in the same places you may stop that will come one moment & let pass that will come presently after, & in the same time you may stop it in any one place & let it pass in any other. For that part of Light will is stop cannot be the same, with that which is let pass. The least Light or part of Light will may be stopt alone without the rest of the Light or propagated alone or so or suffer any thing alone with the rest of Light will not or suffer not, I call a ray of Light.

Defin. II

Refrangibility of the rays of Light is their disposition to be refracted or turned out of their way.

圖 7

不久，牛頓發現，很難用實驗來證明，而在 1673 年，他開發另外一種方法。他繼續設法建立這項證明的確實性，1690 年代早期重新研究，1703 年再度研究，但他最後終於承認，無論他如何明確地表達，要用實驗來證明日光中所含色光的不變性，是一件不可能的事，因而色光是固有的，問題是，折射之前，日光看起來是白色，而折射之後，它顯示光譜的一切色光；而如果比較前者與後者，顏色看來改變了。讀者仔細查看「光學論」就會注意到，牛頓保留一切，他只放棄證明「日光由一切色光所組成」的企圖，他在文中只花較弱的九行來敘述它，但他花了十六頁來證明類似日光的白光可能由一切色光所組成。離開「新理論」所說的「最準確的結果」，這實在是一段漫長的路程。

現在，我們可以從牛頓的背景與其早期對確實而數學的色光科學之希望來看「光學論」，並且察知他寫「光學論」的最謙虛第一行時，他一定很失望，因為這一段就是他

早期充滿自信的主張的微弱回聲：「本書的目的不是要用假設來說明光的性質，而是要用推理與實驗來做命題與證明。」的確，因為我們沒有把這樣嚴格的限制加在科學理論的確實性上，所以我們應該可以判斷，「光學論」是科學革命的偉大實驗著作之一。然而，如果我們想好好欣賞牛頓的「光學論」，我們必須理解其在歷史上的前後關係與來龍去脈，尤其是必須理解「光學論」與牛頓的另外一本才氣煥發却是有瑕疵的「光學講義」之關係。

十、附錄：色散的最新知識

透過晶格振動的激發，透明玻璃可以吸收一些紅外光。這種晶格包括原子之間的鍵。透過原子與分子內的電子之激發，玻璃也可以吸收一些紫外光。這些吸收現象，導致折射率的大幅度變化（見圖 8），而可見光部分的變化則比較緩和。此處的折射率 n 隨波長 λ 的變化，通常可用下列二項或三項塞邁爾（Sellmeier）公式來表示：

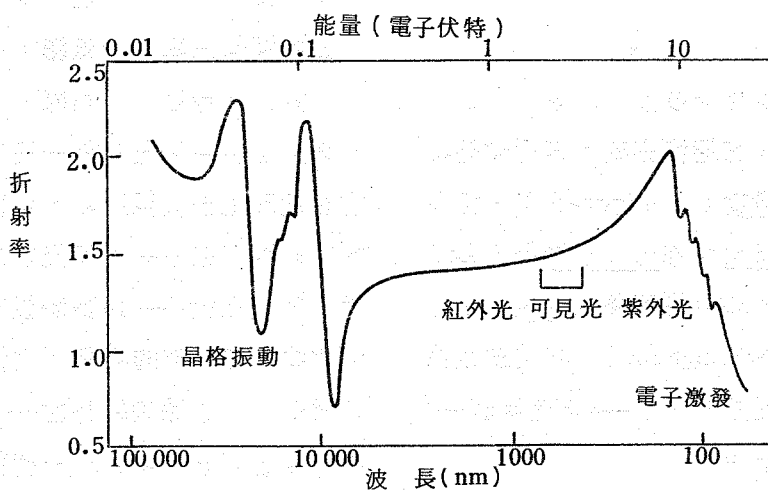


圖 8

$$n^2 = 1 + \sum_i \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2}$$

式中， λ_i 是吸收的波長，而 A_i 是吸收強度。這種情況可以以古典阻尼振子模型來解釋。只有在真空傳播時，光才沒有色散，因為真空沒有吸收現象。

參考資料：PHYSICS TODAY/SEPTEMBER, 1984.