

几何光学

高等教育出版社

高等學校教學用書



几 何 光 学

Г. Г. 斯留薩列夫 著
赵文桐 刘亞里 譯
王 勉 校

高等教育出版社

本書系根据苏联技术理論書籍出版社 (Гостехиздат) 出版的斯留薩列夫 (Г. Г. Слюсарев) 著的“几何光学” (Геометрическая оптика) 1946 年版譯出的。

本書共分十四章, 內容主要講解几何光学和光学仪器的發展, 光具組理論的基础, 各种光具組, 光具組的計算, 象差理論等等。

本書可供高等学校物理系學生及有关光学仪器制造的技术人員參考。

几 何 光 学

Г. Г. 斯留薩列夫著

赵文桐 刘亞里譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺 7 号

(北京市書刊出版業營業許可証出字第 054 号)

京华印書局印刷 新华書店發行

統一書号 13010·565 開本 850×1168¹/₃₂ 印張 101⁹/₁₆ 插頁 2

字數 253,000 印數 1—7,500 定價(6) 1.20

1959 年 3 月第 1 版 1959 年 3 月北京第 1 次印刷

作者序言

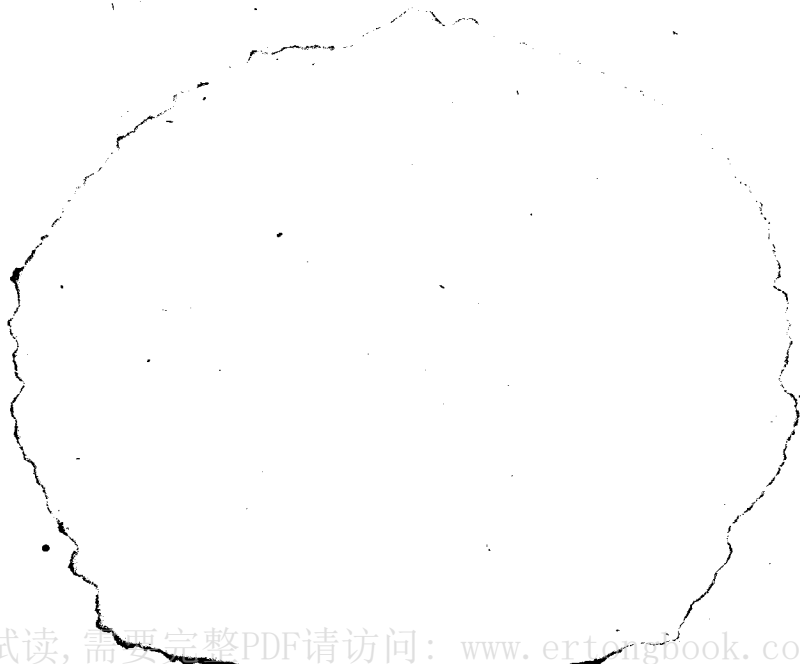
几何光学的近代文献有以下几方面：一方面，是供各級学校学生用的許多教本和教程。另一方面，是为光学專家用的参考書，例如：M. 洛尔著“光学仪器中的成象”(M. Rohr: Bilderzeugung in Optischen Instrumenten); 查耳斯基-爱平斯坦著“光学仪器理論的要点”(Czapski-Eppenstein: Grundzüge der Theorie der Optischen Instrumenten); 盖革-希耳著“物理学手冊”第18卷(Geiger-Scheel: Handbuch der Physik, m. 18); 維恩-哈姆斯著“实验物理学手冊”第20卷(Wien-Harms: Handbuch der Experimental Physik, m. 20); H. D. 泰勒著“应用光学的一个系統”(H. D. Taylor: A System of applied Optics); A. И. 屠达罗夫斯基著“光学仪器理論”(А. И. Тудоровский: Теория оптических приборов); 康拉第著“应用光学”(Conrady: Applied Optics); Г. Г. 斯留沙列夫著“光具組計算法”(Г. Г. Слюсарев: Методы расчета оптических систем)。最后是專論，这些專論只詳細闡明范围狹窄的一些几何光学問題，并且主要是反映作者自己的工作，例如：赫尔伯格耳著“光綫光学”(M. Herzberger: Strahlenoptik); 卡拉替奧多力著“几何光学”(Caratheodory: Geometrische Optik)。

在本書作者面前存在着一个任务，就是要在相当易懂的敘述中，从光的波动本性的观点和光束的几何結構方面，來闡明几何光学上的一些原則性的問題。在这两种本質上不同的观点間，已經架起两道桥梁：一道是德拜关于当波長无限小时从物理光学过渡到几何光学的証明，一道是經過基尔霍夫發展后的惠更斯-菲涅耳

原理。

現在，光具組計算法已發展成為應用幾何光學獨立的一個分支，它的原理在這裡很概括地加以敘述，但是通常所忽略的光具組獨立參量的意義和由於象差而產生的光具組可能性的限制，則都着重敘述。象的質量問題在現今都認為有最重大的意義，這使作者不得不用許多篇幅來講象差理論和象的衍射理論，這裡敘述這些理論比通常更加深入，並且討論在光學教程中所沒有談到的光具組各種缺點對象質量的影響問題，這一點可以作為擬定公差制度的根據之一。

在編著本書時，也注意到使讀者知道相當多種的具體材料，這些材料可以作為現代光學儀器理論的基礎。



目 录

作者序言

第一章 几何光学和光学仪器的发展	1
第二章 光具組理論的基础	13
1. 一般概念	13
2. 波动方程式	15
3. 从波动光学过渡到几何光学	19
4. 光的直綫傳播. 惠更斯—菲涅耳原理	25
5. 基尔霍夫方程式	28
6. 折射定律	31
a) 斯涅耳—笛卡兒定律	31
б) 費馬原理	33
B) 光綫的曲率半徑	37
r) 馬呂斯定律	40
л) 笛卡兒定律的分析表式	40
e) 向量形式的折射定律	42
第三章 光束与波面的結構	44
1. 一般概念	44
2. 直綫系	44
a) 法綫系	45
б) 法綫系的特征	51
3. 象函数	55
第四章 理想光具組与实际光具組象的概念	61
1. 理想光具組的定义	61
2. 一般理想象的規律(根据卡拉替奥多力)	62
3. 共綫光学	64
a) 定义	64
б) 共綫象的一般性質	65
r) 共軛平面	68
r) 对应方程式	69
л) 同向性	71
e) 具有对称軸的光具組	72

м) 光具组的放大率	74
4. 西摩松的直线相称术	76
a) 原点位移	78
б) 数值例子	80
5. 近轴光线的高斯光学	84
a) 过渡到近轴区域	84
б) 近轴光学的基本公式	85
в) 共轴光具组的基点	90
г) 光学不变量	94
д) 光具组的放大率	94
e) 关于基点的注意	96
第五章 最简单的光具组·透镜·反射镜·平面镜	99
1. 透镜	99
a) 无限薄透镜	99
б) 有限厚透镜	101
в) 在同一轴上的几个透镜的组合	103
2. 平面平行板	105
3. 平面镜	106
a) 物和象的同向性	106
б) 平面镜组的旋转	107
第六章 球面光具组	112
1. 表面的形状对光具组的光学性质的影响	112
2. 通过共轴球面光具组的光线路径的计算	114
3. 象散光束的焦点位置的计算	116
a) 象散光束焦点的确定	116
б) 确定象散光束位置的阿贝公式	118
4. 波象差的计算	122
第七章 光具组中光束的限制	123
1. 光束限制的原因·晕映	123
2. 光瞳和經由光具组的透視傳遞	127
3. 清晰成象空间的深度(景深)	131
4. 光束的能量学	134
a) 光管·亮度	134
б) 推广的拉格朗日—亥姆霍兹定律	137
в) 通过光具组的光通量所产生的照度	139
г) 单位制	141
д) 应用本章的公式的例子	143
5. 光束通过光具组时能量的损失	147

a) 菲涅耳公式	147
6) 减少玻璃的反射损失	149
b) 由于吸收的损失	150
6. 通过光具组观察的物象的亮度	151
第八章 光具组的象差	155
1. 平行板的象差	155
2. 平行板的三級象差	158
3. 共軸光具組的三級球面象差	158
4. 象差的一般理論	165
a) 三級象差公式的一般形式	165
6) 波面方程式	168
b) 波面方程式的正則形式	171
r) 有象差存在时物点的象	174
5. 共軸光組三級象差系数的确定	187
a) 特別情形下的象差系数的确定	196
6. 正弦定律	202
7. 由广角光具組产生的象的照度	209
8. 色散与色差	210
a) 波長和折射率	210
6) 色差	212
9. 象差的圖形表示	219
第九章 眼及其性質	222
1. 眼的光学示意图	222
a) 眼光具組的缺点	224
6) 眼球的旋轉	225
2. 双目视觉	226
3. 适应	229
4. 眼的分辨本领	234
5. 视觉器官的慣性	237
6. 網膜上的象和腦所接受的知覚間的关系	238
第十章 光具組所产生的象的質量	240
1. 点的象	241
a) 当衍射不出現时照度的分布	241
6) 当象差不出現时照度的分布	246
b) 在一般情形下照度的分布	253
2. 理想光具組的分辨本领	258
a) 望远光組的分辨本领	260
6) 显微镜的分辨本领	261

B) 在显微镜中象的理论: 相干光和不相干光	262
第十一章 光具组计算法	268
1. 对光具组的要求	269
2. 光具组的参量	269
3. 光具组的尺度计算	272
4. 关于光具组最常应用部分的象差的先决数据	280
a) 简单透镜	281
b) 由两个透镜粘合而成的光组	282
B) 目镜	288
5. 象差的消除	285
6. 最简单的光具组的计算	286
a) 由两个透镜组成的薄物镜	286
b) 目镜	290
B) 照象物镜	291
7. 玻璃的光学性质和光具组的计算	293
第十二章 不完善的光具组	294
1. 对正确形状的偏差	294
2. 对对称性的偏差	299
a) 轴偏	299
b) 玻璃的不均匀	301
B) 反射棱镜角的不正确性	303
第十三章 没有对称轴的光具组	308
1. 有一个对称平面的光具组	308
a) 在单色光中棱镜的象差	309
b) 棱镜的色散	316
2. 具有两个对称平面的光具组	318
a) 柱面透镜	319
b) 畸变镜	321
B) 非共轴光具组的参量数目的意义	324
第十四章 具有对称轴的非球面曲面	325
1. 非球面曲面的确定	325
2. 非球面光具组的三级象差	327
参考文献	330

第一章 几何光学和 光学仪器的发展

由于自然界听任我們支配的可能性是很广的，在人的所有感觉中，视觉比其他感觉更深刻地把我們和自然联系起来。无论是听觉，嗅觉或味觉，都不能使我們对于周圍所發生的事物获得这样詳細而多方面的知識。同时，视觉所及的远度，是任何人所想象不到的，它使我們能知道遥远的——远到我們必須用特殊的單位(例如光年)来計算距离——地球上的一些情况。

人类和动物的视觉器官是经过好几百万年逐漸發展而来的，这是光和生活物質間密切互相作用的結果。视觉器官已达到高度的完善，这种完善程度，我們由于習慣而觉察不到。相反的，由于一系列不同起源的缺点(关于这些缺点以后将要談到)，我們总是把我們的眼估計过低，并給它以不公正的批評。著名物理学家亥姆霍茲發表过他的意見，他認為眼是不好的工具，并說他若在上帝的地位上就会把它創造得更完善。比較正确的見解是說，在视觉器官中，所有它的品質和缺点是很成功地平衡起来了的，以致任何一种改良都将引起它的全面改造。以后我們就会見到，人类在光学方面(在这里所指的光学，应按很广泛的意义来理解)所有一切最聪明的發明，都是以某种形式在眼中實現了的。

人类有充分理由以現代照象术的成就而自豪。但是使用最新照象材料以最新技术成就装备起来的最完善的照象机，也沒有人眼那样的本領，而且，設計照象机时和照象机工作时所利用的一切原理，在眼的视觉系統中却都利用了。

眼这个美妙机构中的許多东西，我們还不了解，并且可以有信心地說，当我們能探究到眼的那些尚未被了解的特性时，光学仪器

技术将愈来愈改进。

但是不能否認，我們的眼器官的工作受到許多方面的限制。我們既看不見太远的东西，也看不見太近的东西，既看不見太暗的东西，也看不見太亮的东西；我們的眼只能够感觉到非常狹窄的光譜区間，而不能感觉紅外和紫外輻射。

光学的研究对象是光的本性和光的現象。几何光学則研究光在透明介質和人工造成的光介質組合——光学仪器——中的傳播問題。几何光学的任务，是要論証光具組的理論，說明視覺器官工作受限制的原因，从而闡述这种器官的可能放大的範圍和改善我們視覺(广义的)的办法。眼鏡，放大鏡，显微鏡消除眼的缺点及它在調節上的不足并使它可以看見最小尺度的物体；天文望遠鏡使天体到我們的距离縮短到几百分之一甚至到几千分之一；双筒鏡，体視望遠鏡把我們的眼的分辨本領和深度感觉扩大了好几倍；測距仪使我們的視覺器官的銳敏度使用到最大限度，就能以最大的精确度确定遙远物体的距离。分光鏡和攝譜仪把光輻射分解成單色的組成部分，因而給予我們关于光的成分及其結構的概念，以及关于这些輻射的起源的許多知識；照象机把目前的現象和事件記錄下来，而电影机把它們按時間先后分別攝取。探照灯，施照器把因黑暗而看不見的物体的照度增大；按照潛望鏡的原理构造的光学医疗器械可用来深察人体，發現了并治好了許多种疾病。

光学的發展是跃进式的。光的学說固然是最古老的科学之一，但是只有到 16 世紀，当出現了第一批显微鏡和望遠鏡时，它才开始产生最初的具体成果。从很古的时代起(到底是什么年代，我們尚难确悉)，如光的直进，光的折射和反射等惹人注目的事实，就已經为人們所知道了。自古以来，人們学会了熔化玻璃；在古代遗迹的發掘中發現了玻璃，水晶及其他透明材料的制品；如虹霓等的大气現象自古以来就把人們的注意力轉到了光的本性問題上。

从亞理斯多德那里可以找到古代关于光现象的见解的最初报道。这些见解以其极端含糊为特点，它们归结为下述问题的一般性的想法，光可能是什么呢？是性质还是实体？例如，亞理斯多德认为虹霓，晕，幻日等是光在雨或雾的小滴上的反射引起的，这些小滴造成太阳的不完善的象，只复现太阳的颜色而不复现它的形状，因为这是由每一个小滴构成的无数个小象相加的结果。

可以从亞理斯多德的同时代人那里找到同类的模糊见解。人们很模糊地怀疑着视觉以某种方式和光相联系(鲁克里底斯，伊壁鸠鲁，阿基米德)。塞奈卡曾经指出充满水的玻璃球的放大作用，但是从他对这个现象的解释，可知当时的哲学家一点也不知道折射现象与物体外观的放大间有什么关系，而折射现象则是他们所熟知的。

督伊德教徒知道借助于这些球或水晶透镜能够点燃各种物体，但是丝毫没有把透明材料的这个性质和折射联系起来。

可是到了欧几里德的时代，则已累积许多有关光学现象的材料，这些材料成为他撰写真正光学论文的根据，顺便提下，在这篇光学论文中研究了平面镜所产生的象。到了这时，光和视觉间的关系开始比较明白，但在物理学家思想中占优势的是类似于触觉的投射学说，这个学说认为光从眼传播到被观察的物体并返回眼睛。天文学家托勒密(纪元后 150 年)详细地研究了折射现象，并把他的研究结果应用到大气折射上。

罗马帝国倾复以后，在欧洲开始了千年以上的科学活动衰落期。阿剌伯几何学家阿耳伽金(Аль-Газен)在七世纪收集了他所知道的全部光学材料，加上他自己的发现写成一本有价值的著作，在这著作里第一次详细地研究了关于视觉和视觉器官的问题，并且在这里创立了视觉过程的最初理论；阿耳伽金在折射问题上，特别是大气折射问题上同样也比他的先驱者更为深入。他完全弄明

白了折射和由凸曲面圍成的透明体的放大間的关系，并且可以假定他的这个意見引起了最初的眼鏡透鏡的出現。在任何情形下都毫无疑义，阿耳伽金开辟了光学發展中的新时代，那就是以維特利奧(Вителлио)，拍卡馬(Пеккама)，伯康(Бэкон)(八世紀)的工作而著名的时代。以上三人加深了折射理論；發現了(維特利奧)光在折射和反射时的損耗；改进了虹霓的理論；說明了星的閃爍，鏡的燃燒作用，鏡的放大性質等等。伯康提出了用鏡和透鏡可能使任何远物变近的見解，由于这一点有时錯誤地把望远鏡的發明归功于他。

同时，在上述光学家的工作的某种影响下，出現了最初的眼鏡[亞历山大·斯皮納(Александр Спина)，沙耳文努斯·阿耳馬突斯(Сальвинус Арматус)(?)等人]，这种眼鏡的作用無論誰都还弄不明白，虽然馬夫罗利克(Мавролик)为解决这个問題貢獻了許多劳动。就伯康來說，他还没有明确地把視觉和光联系起来，并且古代对視觉所做的假設(即假定眼放射出微粒，这些微粒到达被观察物体，然后又折回眼中)，在他看来也是完全可以接受的，从这一点看来，可以見到在視觉理論的發展中进步是如何地微不足道。

然而，光学在理解光的本性方面虽然發展很慢；可是在透視的研究和光傳播直进性的应用方面的發展是很成功的。馬夫罗利克第一个正确地解釋了由任意形状的小孔所产生的日影形状。馬夫罗利克的同时代人冉·巴替斯特·坡耳塔(Жан Баттист Порта)發明了暗箱，而这种暗箱在他解釋眼睛的瞳孔在眼的工作中的作用时給他以大的帮助。从暗箱到幻灯这一步是基耳赫耳(Кирхер)完成的。坡耳塔和基耳赫耳都醉心于超距离燃燒光具組的問題，对这个問題他們提出了論文，作过实验。坡耳塔在这个問題上的見解很使我們想起許多轟动一时的燃燒仪器(見第七章)的發明者的議論。

十五世紀末和十六世紀初是光学史上的轉捩期；它与眼鏡透鏡，放大鏡，稜鏡，凸鏡和凹鏡的普及，以及暗箱和幻灯的出現有关。在那时光学家的手中發現許多有价值的仪器，或者更确切地說，發現了許多零件，从这些零件可以造成最复杂的光具組。怪不得光学理論开始以日益增長的速度發展。

約在 1590 年造成了第一个望遠鏡 [雅金 (Янзен)，李坡赫 (Липпергейм)]；稍迟，在十七世紀初造成了最初的复式显微鏡 [丰塔拿 (Фонтана)]。望遠鏡和显微鏡的發現是偶然的。事实上，通过透鏡的光綫路徑理論还没有形成，而“象”的概念也剛剛产生；有意識地构造复杂光具組只有象伽利略那样的卓越物理学家才做得得到。伽利略造成了几种仪器，他用望遠鏡观测天空，發現了許多天空現象，即發現了木星周圍有衛星，而且这些衛星繞木星轉动，發現了金星的周相等。这使他在維護哥白尼关于地球繞日運轉的假定时有了最有力的論証。

然而，甚至伽利略都没有对显微鏡和望遠鏡的作用做出满意的說明，他既不了解目鏡的作用，也不了解眼的工作原理。

光学仪器和眼器官的理論是天才的科学家开普勒創立的；他在光学中掀起了一个变革，相当于牛頓以其万有引力定律在天文学中所掀起的变革、以其微分法在数学中所掀起的变革。开普勒收集了他以前的学者的零散的光学材料，把它們从不必要的雜質中精煉出来；他給全部理論以坚固的基础——折射定律——并循序漸進地發展了望遠鏡、显微鏡和眼的理論。他的“光綫屈折学” (1611) 無論在形式上和內容上都和現代几何光学教本很少有別，并且与他以前的学者 (有时甚至是他以后的学者) 的同类論文对比起来是很惊人的。

虽然开普勒沒有求得折射定律的精確公式，并且在一些不成功的實驗后停留在折射角和入射角間的比例性定律上，但他从它

导出正确的結論，并首先指出如何求得透鏡所生的象。他正确地說明了目鏡在望遠鏡中和在顯微鏡中的作用；他了解水晶体和網膜在眼中的作用，而不象他以前的大多數學者一樣為物體在網膜上的倒象所困惑；他注意到眼的調節和適應，注意到光滲等。與光綫的力能學有關的問題，亦即與光束在通過光具組而折射的行徑有關的問題，是開普勒首先以極曖昧的形式提到的。他指出了坡耳塔關於超距離燃燒的議論中的錯誤。

在第四章中將說明為什麼不精確的折射定律公式沒有妨害開普勒對透鏡的作用得到正確說明。然而全部光具組象差理論都只能建立於這個定律的嚴格公式上；這個嚴格公式是在十七世紀中由斯涅耳和笛卡兒彼此獨立地提出的。斯涅耳根據實驗得到這個公式，而笛卡兒則是根據關於光的本性的一般見解得到的，這種見解現在已經失傳。笛卡兒根據他所發現的定律第一次給出了虹霓（虹和霓）的正確說明，而只是不能說明它的顏色；他指出消球差透鏡應有的形狀，他認為這種球面象差是透鏡產生的象之所以不清晰的原因；他甚至設計出磨光非球面曲面的車床。只是在笛卡兒以後才有可能建立光學儀器的嚴格理論，至少在幾何光學（就是不考慮衍射現象）領域中有可能建立。偉大的數學家費馬指出笛卡兒的定律能夠從他的最短光程原理推得。

在十七世紀中，目視望遠鏡和天文望遠鏡的製造技術有了發展。天文學家用這些望遠鏡得出許多重要結果，特別是，使羅麥（Ромеэ）能根據木星衛星的觀察確定了光的速度。但是上述的進步不是原則性的進步而只涉及物鏡直徑的逐漸增大。顯微鏡停留在相當低的水平上。

笛卡兒以後的幾何光學成為幾何學的一個分科。它為數學家（牛頓的老師巴魯和青年時代的牛頓本人）所占有。他們把它當作用幾何學解決問題的新場所；某些光學問題（例如焦散面的求得，

細光束焦点的确定) 密切地联系于誕生中的微分學。巴魯和牛頓在他們的“光綫屈折學”中給出不少公式, 其中大多數已經失傳, 但是有些很有意義。近軸光學的基本公式是牛頓的貢獻; 他求得計算一個球面的球面象差的公式, 他指出用怎樣的方法可以構成無限細象散光束的焦點。

然而牛頓的主要功績是發現了色散。他指出; 正是這種色散使天文望遠鏡物鏡所生的象不清晰, 而以前認為這種不清晰原因是由於球面象差(笛卡兒)。他計算了透鏡的色差。同時他也犯了大錯, 他認為部分相對色散 $\frac{n-1}{\Delta n}$ 是對所有透明介質都相同的普適常數。他從這裡得出結論: 消除物鏡的色差是不可能的。牛頓既認為透鏡物鏡的進一步改良是不可能的, 於是轉到反射鏡上, 他一方面研究了反射鏡用的合金, 同時也研究了磨光拋物面的方法。最初的良好質量的反射望遠鏡是牛頓制成的, 他的同時代人格雷果里也提出了圖案但沒有制成。在牛頓以後透鏡物鏡的發展停頓了有半個世紀, 但同時反射望遠鏡却開始迅速地普及和改良了。

關於光的本性的一般概念, 牛頓傾向於微粒說^④。因為用這個理論不能很好地說明衍射現象和干涉現象, 所以我們將不再討論它。牛頓的同時代人惠更斯在 1678 年提出了他的有名的波動說(詳細敘述見第二章)。這個理論在惠更斯所敘述的形式中是很不完善的; 然而它的基本觀念卻極有成效, 只要稍作補充, 就可以直到現在還用來支配光能和電能的傳播現象, 特別是支配全部光學儀器理論(至少在與光的傳播和象的形成有關的部分是如此, 因為它最精細地說明了所得到的複雜花樣)。

無論光的波動說的意義是如何巨大它也不能影響到幾何光學的進一步發展, 因為後者和它沒有聯繫; 它也影響不到儀器構造的

④ 關於牛頓在光的本性上的見解, 見 С. Н. 瓦維洛夫的書“伊薩克·牛頓”。

进步，这一点很直观地证明了在光学仪器中衍射现象只有次要的意义。相反的，在开普勒和牛顿以后开始迅速发展和深入的几何光学理论却在光学仪器的构造中造成了革命，并且理论和实际间的关系开始越来越密切。

制造用在天文望远镜上的大直径透镜的，有意大利的第纹尼(Дивини)，坎潘尼(Кампани 1660)，法国的包勒耳(Борель)，奥祖(Озу)，英国的奈耳(Нейль)，德国的奇林高金(Чирнгаузен)等人。与此同时确定了焦散概念(惠更斯，奇林高金，И. 伯努利，Я. 伯努利，罗皮塔耳(Лопиталь))研究了象差的性质。

生理光学经罗伯特·斯米特(Роберт Смит)和尤林(Джурин)的研究后有显著的进步；第一次提出了关于眼的分辨本领的问题，虽然是以很不完善的形式提出的。

在十八世纪中叶，欧勒怀疑牛顿关于不可能得到消色差物镜的结论，建议构造复杂的物镜，用水作中间介质。经克林金斯替林(Клингенштиерн)的研究(1750—1755)和多朗德的研究后，多朗德制造消色差物镜成功；除以上列举的发明者以外，研究过它的还有克勒罗(Клеро)和达朗贝尔(д'Аламбер)，可见这一问题的意义的重大。奇怪的是，和牛顿一样，欧勒在解决他所研究的问题时的出发点也是不正确的观念，就是认为人眼是消色差的。后来证明人眼有巨大的色差，但是视觉器官用某种方法把它消除了，就象消除网膜的盲点一样。

夫斯(Фусс)和德利巴耳(Дельбарр)根据欧勒的指示开始把消色差原理应用于显微镜中(1769)，引起了这种几乎二百年以来一直停留在很低水平的仪器在性能上有了显著的改进；在这以前这种仪器多半被当作玩具而不当作科学仪器。

光度学的产生[布格(Буге)，朗伯(Ламберт)]也是在这个时期；光度学的基本概念，亮度概念，光强概念和照度概念确立了；并在