

应 用 光 学

〔苏联〕B. B. 費 菲 洛 夫 著

北京工业学院仪器系应用光学教研组译



中 国 工 业 出 版 社



应 用 光 学

〔苏联〕Б. Б. 費 菲 洛 夫 著
北京工业学院仪器系应用光学教研组译

中 国 工 业 出 版 社

本书詳細地叙述了几何光学的理論，其中包括光学成象缺点的探討，以及与此有关的三級象差理論的詳尽分析。同时，叙述了大多应用于测量工作的光学仪器的基本类型，并分析了其光学结构的特点。

本书可作为高等学校光学机械仪器专业学生的光学参考书，同时，也可以作为光学仪器工厂有关工作人員和有关测量工作人員的光学理論参考书。

本书由丁汉章、于美文、甘子光、王鏐、馮义濂、盛尔鎮同志翻譯；馬士修同志审校。

проф. Б. В. Фефилов

ПРИКЛАДНАЯ ОПТИКА

ГЕОДЕЗИЗДАТ МОСКВА 1947

* * *

应用光学

北京工业学院仪器系应用光学教研組譯

(根据測繪出版社紙型重印)

*

国家測繪总局測繪书刊編輯部編輯 (北京三里河国家測繪总局)

中国工业出版社出版 (北京佟麟閣路丙10号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第110号

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张 $30 \frac{3}{4}$ ·字数691,000

1959年9月北京第一版

1962年10月北京新一版·1965年1月北京第三次印刷

印数1,150—2,199·定价(科五) 3.50元

*

統一书号: K15165·1350 (測繪-17)

目 录

原 序.....	9
----------	---

第一部分 几 何 光 学

第一篇 一般部分.....	11
第一章 几何光学的基本定律	11
§ 1. 几何光学的对象及其与其他课程的关系	11
§ 2. 发光点和光线概念	11
§ 3. 同心光束和象散光束。点象	12
§ 4. 焦散线和焦散面	13
§ 5. 光的直线传播定律	14
§ 6. 诸光束的独立性定律	14
§ 7. 反射定律	15
§ 8. 折射定律。折射率	15
§ 9. 全反射	18
§ 10. 光的色散	19
§ 11. 光学玻璃及其特性	19
§ 12. 光线经过稜镜时在稜镜主截面内的折射	23
§ 13. 光线经过稜镜时在主截面外的折射	25
§ 14. 光线经过折射角很小的稜镜时的折射。楔形镜	27
§ 15. 折射率的测量方法。分光计和折射计构造的概述	28
第二章 光线经过球面和球面系统时的折射。光线经过平面和平面系统时的折射。球面反射	34
§ 16. 计算折射光线通过球面时所经行路程的三角公式	34
§ 17. 细微光束光线经过球面折射后所成的象点。零位或近轴光线的概念。零位光线光路的公式。零不变量	38
§ 18. 粗大同心光束经过球面折射时所成的象点。齐明点	39
§ 19. 细微光束经过球面折射时，光轴外的点所成的象。拉格朗日-赫姆霍斯公式	42
§ 20. 共轴折射球面系统。零位光线经过折射球面系统时象的位置和大小的计算。拉格朗日-赫姆霍斯公式	44
§ 21. 折射球面系统的线性或横向放大率	46
§ 22. 折射球面系统的纵向或轴向放大率	46
§ 23. 角度放大率	47
§ 24. 折射球面系统诸放大率间的关系	48
§ 25. 粗大和零位光束经过媒质界面时的折射	48
§ 26. 光线经过平行平板玻璃时的折射	49
§ 27. 光线在球面上的反射	51
§ 28. 轴线和球面轴线构成有限角的微光束的折射。阿贝公式。微光束光线通过球面、平面、平行平板玻璃和在球面上反射时的象散现象	52

第三章 共軸光学系統內光路的三角計算	58
§ 29. 关于共軸光学系統內光路的三角計算的总述	58
§ 30. 从系統光軸上物点发出的子午光綫光路的三角計算	59
§ 31. 通过折射面系統的近軸光綫的光路計算	61
§ 32. 計算軸綫对系統光軸傾斜角度很大的微光束的三角公式	65
§ 33. 計算微象散光束的兰格公式	75
§ 34. 外子午光綫或斜光綫光路的三角計算	81
第四章 理想光学系統理論	87
§ 35. 理想光学系統。高斯光学	87
§ 36. 綫性或橫向放大率	88
§ 37. 共軸光学系統的主点、主平面和焦距	88
§ 38. 按系統焦点确定光軸上共軛点的公式（牛頓公式）。橫向放大率公式	89
§ 39. 按主点确定光軸上共軛点的公式（高斯公式）	90
§ 40. 拉格朗日 - 赫姆霍斯公式。焦距的比例	91
§ 41. 理想光学系統的放大率公式	92
§ 42. 焦平面、焦点、主平面和主点的性質。节平面和节点	94
§ 43. 理想光学系統的焦距公式	95
§ 44. 通过光学系統的点 and 綫的共軛象的作图法	96
§ 45. 具有公共軸的两光学系統的組合	98
§ 46. 具有公共軸的若干个光学系統的組合	100
§ 47. 望远系統	104
§ 48. 光綫的会聚度。系統的光焦度。屈光度	105
§ 49. 有一定厚度的透鏡。焦距公式。透鏡的形式	106
§ 50. 无限薄透鏡。由无限薄透鏡組成的等效系統	110
§ 51. 复杂情况下的实际光学系統的基本量計算	111
第五章 光束在光学系統內的限制	115
§ 52. 关于光学系統光闌的概念。有效光闌或孔径光闌。入射光瞳和出射光瞳。主光綫	115
§ 53. 視場光闌。窗或孔。漸暈	117
§ 54. 摄影物鏡及其光瞳和窗的确定	119
§ 55. 刻卜勒望远鏡。伽利略望远鏡。刻卜勒及伽利略望远鏡內的光瞳和窗的确定	120
§ 56. 空間点在平面上的成象。主光綫及入射光瞳和出射光瞳的中心之意义	122
§ 57. 平面上所成的空間象的不清晰度。成象空間的深度	123
§ 58. 主光綫的焦闌光路	128
第六章 光能的計算	130
§ 59. 光通过媒質及其界面时所发生的現象	130
§ 60. 光流。立体角及其測量。微光管及其反射和折射	130
§ 61. 折射时光由于反射的損失。折射光束的亮度	133
§ 62. 光由于媒質吸收的損失	136
§ 63. 光学仪器中亮度損失的計算	137

§ 64.	通过具有一定大小的入射光瞳的光学系统的光流。象的照度。入射和出射光瞳的孔径	139
§ 65.	摄影物镜的光强度。象的照度在视场边缘的减弱	141
§ 66.	肉眼所感觉到的象的主观亮度	144
§ 67.	具有仪器装备的眼睛所感觉到的象的主观亮度	145
第二篇	光学系统成象的缺陷。三级象差理论	155
第七章	光学系统光轴上诸点的球面象差	155
§ 68.	关于光学系统光轴上诸点的球面象差概念。纵向和横向球面象差	155
§ 69.	按照三角公式计算纵向球面象差。纵向球面象差的图形表示	156
§ 70.	计算共轴系统纵向球面象差的近似公式	158
§ 71.	第一赛特和 S_I 及其兰格转换	163
§ 72.	纵向球面象差近似计算公式的精度	165
§ 73.	各种特殊情况下的球面象差	166
§ 74.	消除空气内薄透镜系统的球面象差的近似公式	170
§ 75.	计算平行平板玻璃和与其等效的稜镜的纵向球面象差之公式	172
§ 76.	区域象差	174
§ 77.	球面象差对于成象的影响。最小弥散圆。具有球面象差的系统的最好成象平面	177
第八章	正弦定律和齐明条件	178
§ 78.	拉格朗日 - 赫姆霍斯的普遍公式	178
§ 79.	宽光束在垂直于系统光轴的微面上所成的象。球形折射面的齐明点的正弦条件	180
§ 80.	表面系统的正弦定律	182
§ 81.	普遍的正弦定律或里果茨基 - 史捷布列等量条件。第二赛特和 Π	184
§ 82.	阿贝正弦定律和无穷远物体的等量条件	193
§ 83.	盖尔谢尔条件。光轴上存在有两对对齐明点的不可能性	197
§ 84.	兰格公式内的第二赛特和	199
§ 85.	平行平板玻璃和与它等效的稜镜的第二赛特和 Π	200
§ 86.	当入射光瞳和光学系统重合时, 互相接触的薄透镜系统的第二赛特和 Π	202
§ 87.	由第二条辅助光线高度 $\frac{y_v}{y_1}$ 过渡到第一条辅助光线高度 $\frac{h_v}{h_1}$ 的赛特公式	202
§ 88.	贝列克的第二赛特和	204
§ 89.	当光学系统由空气内薄透镜组成时公式 $\sum_{\nu=1}^{\nu=k} \left(\frac{h_v}{h_1} \right)^2 Q_{s\nu} \Delta \left(\frac{1}{ns} \right)_\nu$ 的变换	207
§ 90.	按纵向球面象差的大小和不适合等量条件的程度计算子午彗差的公式	209
第九章	象散。象场的弯曲	211
§ 91.	子午和弧矢截面的曲率半径之近似公式。象散	211
§ 92.	象散公式。伯兹瓦尔方程式。各个和之间的关系。诸公式的几何解释	217
§ 93.	空气内薄透镜系统的伯兹瓦尔和 S_4	221
§ 94.	场曲和象散的兰格公式	222
§ 95.	平行平板玻璃和稜镜的象散。在此情况下的场曲及象散的和	222
§ 96.	场曲和象散的贝列克求和公式	223

§ 97. 空气内薄透镜的场曲及象散的和之展开	224
§ 98. 子午和弧矢象的场曲和象散的表示	226
§ 99. 象散和场曲对成象的影响	227
第十章 象的畸变	229
§ 100. 图面上的象比。无畸变条件。系统的无畸变检验。形变的曲线。象的畸变公式	229
§ 101. 当主光线的倾斜角很小时消除畸变的近似条件之推导	236
§ 102. 用兰格公式计算第五赛特和 S_V	242
§ 103. 平行平板玻璃及与其等效稜镜的第五赛特和 S_V	242
§ 104. 贝列克公式内的第五赛特和	243
§ 105. 空气内的薄透镜系统的和 S_V	244
§ 106. 摄影物镜和望远系统示出的象的畸变	244
第十一章 彗差	255
§ 107. 宽斜光束所成的点象。象平面上的散射图形	250
§ 108. 子午彗差及其三角算法。子午彗差的图示法	252
第十二章 赛特三级象差公式及其变换	255
§ 109. 折射前和折射后子午面外光线位置的确定。展开象差成级数。关于高级象差的概念	255
§ 110. 计算子午面外光线的子午和弧矢分象差的赛特公式	257
§ 111. 从象差公式导出的结论	272
第十三章 色象差	283
§ 112. 光学系统的色象差及其分类	283
§ 113. 象的位置色象差及其精确计算	285
§ 114. 折射球面系统的纵向位置色象差的近似计算公式	287
§ 115. 兰格形式的第一个色象差和数	290
§ 116. 空气内薄透镜系统的纵向色象差的近似公式	290
§ 117. 平行平板玻璃及与其等效稜镜的位置色象差	294
§ 118. 放大率色象差或放大率色象差现象	295
§ 119. 横向放大率 β 的色象差的近似公式	298
§ 120. 位于空气内的薄透镜系统的第二个色象差和 S_{LxP} 与按照兰格方法求其表达式	302
§ 121. 在所选择的象平面内两种不同颜色的光线的放大率色象差	302
§ 122. 系统放大率色象差的检验	305
§ 123. 二级光谱	306
§ 124. 光学系统的象差色象差	309
§ 125. 纵向色象差和放大率色象差对于成象的影响。依据系统的用途来消除这些误差	311
第十四章 象的几何理论与波动光学的关系	313
§ 126. 发光点的象。波面的概念和波象差。衍射的扩散圆	313
§ 127. 光学系统的鉴别本领和象的质量	319
§ 128. 在具有球面象差的情况下的波面。从纵向球面象差过渡到波象差和相反地从	

波象差过渡到球面象差	322
§ 129. 按照波象差評定象的質量	328

第二部分 光 学 仪 器

第十五章 眼睛和視觉	332
§ 130. 眼睛的解剖結構	332
§ 131. 作为光学系統的眼睛。簡略眼和簡約眼	334
§ 132. 眼睛的調节。眼睛的折射及其缺陷的矯正。眼睛光学系統的特性	335
§ 133. 眼睛的銳敏度。眼睛的鑑別本領（視觉的銳度）	338
§ 134. 单眼視觉。双眼視觉	341
第十六章 仪器的光学零件	343
§ 135. 概述	343
§ 136. 各种透鏡。透鏡結構的要素；厚度及斜稜	343
§ 137. 平面鏡	347
§ 138. 平行平板玻璃	348
§ 139. 各种稜鏡和稜鏡系	351
§ 140. 望远系統的物鏡	366
§ 141. 望远系統的目鏡。集光鏡。轉象系統	367
第十七章 摄影光学	372
§ 142. 摄影物鏡	372
§ 143. 摄影物鏡光束的限制及象的深度	376
§ 144. 象的照度。摄影物鏡的几何光强度和物理光强度	378
§ 145. 摄影物鏡的象差	380
§ 146. 摄影物鏡的鑑別本領和象的質量	385
§ 147. 摄影物鏡的分类。大地測量和航空摄影測量工作中所用物鏡的概述	389
第十八章 放映仪器	395
§ 148. 放映仪器的分类	395
§ 149. 透射放映。幕上的照度。照明裝置	395
§ 150. 反射放映。两射放映机	401
§ 151. 光学糾正仪	404
第十九章 放大鏡和显微鏡	407
§ 152. 放大鏡及其放大率。光束的限制和視場。放大鏡的类型	407
§ 153. 显微鏡及其构造。显微鏡的放大率。显微鏡的簡述	414
§ 154. 显微鏡的光束限制、光瞳和窗	419
§ 155. 显微鏡的鑑別本領和有效放大率	421
§ 156. 物体的成象深度	422
§ 157. 显微鏡的光学部分。照明裝置。物鏡和目鏡	424
§ 158. 各种特殊領域內使用的显微鏡	432
§ 159. 大地測量仪器上用的測量显微鏡和讀数显微鏡	437
第二十章 望远系統	443

§ 160.	望远系統的理論	443
§ 161.	伽利略望遠鏡	445
§ 162.	刻卜勒望遠鏡	448
§ 163.	正象望遠鏡	451
§ 164.	具有內調焦透鏡的望遠鏡	451
§ 165.	瞄准望遠鏡	457
§ 166.	單筒光學視距儀	460
第二十一章	立體觀測儀器	463
§ 167.	立體視覺、視差、比塑及其測量在立體鏡觀察下的立體象片和比塑	463
§ 168.	稜鏡式雙筒望遠鏡、剪形鏡	469
§ 169.	體視測距儀	473
名詞索引		475

原 序

在測量學院航空攝影測量和光學機械專業中，應用光學是一門獨立講授的課程。此外，莫斯科土地規劃工程學院大地測量系的学生也學習這門課程。測量學院中不同的專業對本課程提出了不同的要求。在莫斯科大地、航測和製圖工程學院^①光學機械系的教學計劃中，應用光學是一門主要的專業課程。上述專業的應用光學全部課程的大綱中包括下列各個部分：（1）幾何光學；（2）光學成象的缺點和象差理論；（3）光學儀器；（4）常數的測定和光學部件的試驗；（5）裝配和校正的方法及（6）課程設計。

本書主要供光學機械專業的学生使用，在該專業中應用光學課程的時數和內容均最多。書內包括上述大綱里前三個主要部分的內容；而大綱里其餘三個部分的內容則未列入本書之內。

關於大綱中的“常數的測定和光學部件的試驗”一部分，1941年蘇聯測繪出版社曾出版過技術科學碩士B.A. 阿法納西耶夫所著的“光學實驗室實驗指南”一書。這本參考書系根據莫斯科測繪工程學院光學機械系的教學大綱編寫而成，因而它和應用光學課程大綱里的各個部分符合。

光學儀器裝配和校正的方法，以及課程設計的教材（光學計算基礎）未列入本書內，因為要想適當地發揮大綱內的上述部分，需要編寫專門的指南，其內容在本書的篇幅里是難以容納的。此外，這些部分的內容應在計算—設計方面作專門的研究，並且它是同光學儀器製造工藝過程有密切聯系的。

論其內容，本書是應用光學專業課程的緒論，它應符合於莫斯科測繪工程學院光學機械系的大綱的其餘部分。本書內容包括兩部分：第一部分（幾何光學）討論光學成象的一般理論和研究共軸球面系統成象的缺點的象差理論。在象差理論中，主要是闡明作為課程設計緒論的理論材料。第二部分（光學儀器）是敘述一般包括在光學課程中，但在研究天文—大地測量儀器和攝影測量儀器的光學部分方面較為專門的材料，因此，縮減了軍用光學儀器的內容。

編寫本書時，曾考慮到莫斯科測繪工程學院光學機械專業要單獨地學習大地測量學、天文學和攝影測量學等課程，而學生在這些課程中可詳盡地熟悉有關的儀器和器械的光學部分的構造。

考慮到補充理論課程時要編寫習題集和單獨的練習材料^②，所以本書中很少例舉說明某些公式和方法實際應用的例子。成象缺點和賽特三級象差理論一篇發揮得比較全面。這對於保證進行專業設計是必要的。

①以下簡稱莫斯科測繪工程學院。

②其中關於幾何光學的一般部分，1938年內務部人民委員會測繪總局編輯出版局曾出版了本書著者的“應用光學習題集”。

在象差理論的講述中，著者在方法观点上作了部分的重复。虽然象差理論公式的推导乍看并不显得特别困难，但是，要掌握象差理論对学生来说却是一个相当繁重的工作。著者多年的教学經驗証明，講授象差理論时应本着循序渐进的原則，必要时可作部分的重复。

赛特三級象差理論的公式的全部推导是按照凯尔別尔(1909年)的理論用三角函数展开成級数的方法，而不是用光程函数法。下面的情况迫使著者只有这样做：在俄文文献中没有按照凯尔別尔理論的三級象差公式的展开式，而在Г.Г.斯留沙列夫所著的“光学系統計算方法”（1937年版）一書中，上述公式又是按照史瓦尔茨西尔特的理論用光程函数法推导的；除此之外，著者个人的教学經驗也証明，用三角函数展开成級数的方法推导象差公式学生容易理解，而且易于接受。同时在講課时最好不要完整无遺地講述推导过程中所碰到的許多的数学换算。考虑到具体学生和他們对講授材料的接受能力，教师可以縮减推导，在許多情况下，可限于引証一下过去已講过的类似之处。

除生产上采用的計算公式外，本書尚推导和提出不同于生产部門采用的公式和略图。这样做的目的，是在于保持从前光学書籍的傳統和便于熟悉专业杂志（例如外国的）。本書未研討公差問題和有关破坏光学系統共軸性的現象。所有这些問題将是上面提到的專門指南講述的对象。

学习应用光学課程应加强学生的課外作业。莫斯科測繪工程学院講授应用光学的經驗証明，为了牢固地巩固光学知識，需要解算大量的練習題。同时，精确的繪图，并在图上註出作为习题条件的全部数据和計算結果是有很大的帮助的。

通过實驗巩固学生的知識同样是极其重要的。光学實驗室的實驗特別有益地影响着学生眼界的扩展和促进他們的創造性的成长。實驗应与講課平行地或者是在講完需做實驗的相应部分后进行。为了激发学生的創造主动性，必須力求布置給学生能够發揮最大限度独立性的實驗，而指导教师的責任只是一般的监督和技术輔導。

著者認為，本書对其他非測量学院的光学机械专业，以及从事光学仪器工作的广大人員是一本有益的指南。

著者有責任向大力帮助著者准备付印手稿的莫斯科測繪工程学院前高級实验員 Н. В. 尤魯什金娜和光学机械工程师 М. И. 阿平科致以真誠的謝意。著者謹向审查和校閱本書时，予以极大重視并提供了許多宝贵意見和指示的 А. С. 契巴塔廖夫教授、博士表示特別的感謝。

同样應該指出Г. Г. 斯留沙列夫博士和 М. М. 魯新諾夫博士所給予的帮助，他們的批評性的意見大大地促进了手稿的完善，为此著者也致以特別的謝意。

感謝莫斯科測繪工程学院前任主任講師 С. П. 波利亚科夫积极参加編写本書第二十章的工作。最后，謹向科学院通訊院士、国立光学研究所和全苏計算工作的組織者 А. И. 图托洛夫斯基教授致以特別的謝意。他所著的可貴的“光学仪器理論”一書對本書的出版起了极其重要的作用。

技术科学博士 В. В. 費菲洛夫教授

第一部分 几何光学

第一篇 一般部分

第一章 几何光学的基本定律

§ 1. 几何光学的对象及其与其他课程的关系

几何光学在研究光学现象时是利用光线为直线的概念。用实验方法确立的几个原理是几何光学的基础。进一步深刻地研究光学现象证明，所有的光学现象并非都能用几何光学的方法来解释，当解决有关光的传播和光学成像的广泛问题时，几何光学的原理仅是近似的。

几何光学不考虑光的衍射和干涉现象，因此，许多与光学成像有关的问题，不能完全利用几何光学来解决。以后我们可以看到，这样的问题包括有：光学仪器的鉴别本领或分辨本领，显微镜的成像理论，光学系统的品质等。为了妥善地研究上述问题，除光线光学外，尚需利用波动光学的方法。

几何光学本身具有很大的实用意义，因为它的原理与光学仪器内许多被观察到的，有时是复杂的现象正好相符合；几何光学借助于简单的数学方法不仅能解释这些现象，而且能得出光学仪器设计和计算的方法。

根据几何光学的定律制造的光学仪器具有极其完美的品质，并且在科学和技术各个领域内获得了各种不同的应用。所以，对于光学专家，研究几何光学是非常重要的。它为了了解光学仪器的构造和作用奠定了坚实的基础。

§ 2. 发光点和光线的概念

几何光学利用发光点的基本概念，将发光点理解为一个没有大小的光的辐射源。因为发光点是光能的来源，显然它本身的体积密度应为无穷大；这个假设与能量的基本物理概念相矛盾。任何的物点皆具有有限的大小和体积；它所显现的大小随着物点和观察者间的距离不同可能较大或较小。由经验得知，人眼有着一定的鉴别本领，观察者眼睛所看到的圆状物体，当视角约为 $1'$ 时，就好象观察到一个点。可见几何光学的发光点实际上并不存在，它的概念是按照数学的方式而引入的。

关于几何光线的概念也发生同样的矛盾。在几何光学里将几何光线理解为横截面没有大小的几何线状的光束。显然，在这种情况下，沿着光线流动的光能的体积密度应为无穷大，实际上这是不可能的。

几何光学的光线也是一个实际上并不存在的数学形象。它可以用以下的方法去理解光线。设想在发光体的表面上选出一微面 ΔS_1 。从微面发出的光能向各方向传播。如在距微面 ΔS_1 的某处(图1)放置第二个微面 ΔS_2 ，那末光流将充满微面 ΔS_1 和 ΔS_2 的周边直纹表面所限的空间。这个空间可称为光管。因为可以设想面 ΔS_1 和 ΔS_2 为二个微面，所以这样的管可以叫做物理光线。几何光学中把光线理解为这个光管的轴线 O_1O_2 。如果在图1上放置两个带孔的不透明光阑A和B，并使孔的大小与光管的横截面符合，则在光阑B的后面生成阴影，但微面 ΔS_2 上的光斑仍旧不变。逐渐缩小光阑孔A和B时， ΔS_2 上的光斑开始缩小，此后再继续缩小光阑孔径时，便开始增大，这样就使光在光束外的几何阴影范围内出现，而破坏了光的直线性。这种现象叫做光的衍射。

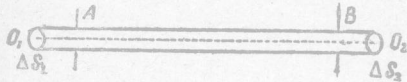


图 1

总之，几何光学的发光点和光线乃是由试验中抽象出来的一些数学概念。

从波动光学的观点上看来，球形的波面就相当于点的辐射，辐射源位于此球的中心。能量沿着波面法线或几何光学的光线的方向传播。波面可以当作波动位相相同的几何点的位置来确定。波面的法线相当于几何光学内的光线。

§3. 同心光束和象散光束。点象

从发光点发出的光线向四面八方传播，构成所谓不受限制的光束。如果在光源外面的光路上放置一个带孔的不透明光阑，则我们就得到一限制的光束。从一个共同中心——发光点——发出的光束称为发散同心光束。球形波面相当于一同心光束。球面的法线就是同心光束的光线。反之，如果光束向光束的中心会聚，则称这个光束为会聚同心光束。每一个光学仪器的任务在于：使一个发散（会聚）同心光束经反射和折射后转换为另一个会聚（发散）同心光束。在此情况下，光束中心S和S'（图2）分别称为物和象。在保持同心性的情形下，每个光源点（物点）都给出一个象点。这样的象称为点象或斑点象。如果想象倒转象S'的光路方向，则光学系统就将入射光束变为具有光源中心S（物）的光束。这样相互转变的两个点和两个光束称为相对于光学系统的共轭点和共轭光束。

如果光束的同心光线（而不是其延长线）实际相交于其几何中心，则称该象点为实点。反之，如果光束的光线实际不经过此点，而在此点相交的只是光线的几何延长线，则称该象点为虚点或虚象。实象可在光屏上或照象板上得到；虚象不能投射到光屏上，在眼睛感觉着它好象是一个实发光点。

在大多数的情况下，光学系统常改变原来球形波面的形状；光经过光学系统后，波面不再是球形，因此破坏了光束的同心性和斑点性。变形波的法线并不能交于一点。

图3所示的 $M_1M_2Q_1Q_2$ 为变形波面的一小部分。假定直线 OF 。 F_1 为面中心O点的法线。在波面上可选择二条互相垂直的截线，其中一条的曲率半径最大，而另一条的最小。曲率半径最大的波面截线 M_1OM_2 的曲率中心位于 F_1 点；曲率半径最小的波面截线 Q_1OQ_2 的曲率中心位于 F_2 点。无限接近截线 M_1OM_2 的截面法线，例如在中間截线

一边的截綫 $N_1Q_1N_2$ 和另一边的截綫 $P_1Q_2P_2$ 的法綫在无限接近中心点 F_1 的曲率中心处相交，它們的交点位于某一小段直綫 $F_1'F_1F_1''$ 上。无限接近截綫 Q_1OQ_2 的光波截面的法綫，例如 $N_1M_1P_1$ 和 $N_2M_2P_2$ 的法綫在接近曲率中心 F_2 点处相交，并且位于一小段直綫 $F_2'F_2F_2''$ 上。这样，微波面 $M_1M_2Q_1Q_2$ 上所有点的法綫都通过无限小的直綫 $F_2'F_2F_2''$ ，然后分开，穿过 F 点的正方形后又重新通过一小段直綫 $F_1'F_1F_1''$ 。



图 2

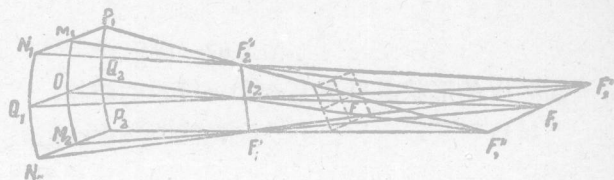


图 3

因为波面的法綫就是光綫，很明显，所討論的光束的光綫無論在何处也不能会聚于一点。光綫是沿着两条分別叫做第一和第二焦綫的两小段直綫相交。这种結構的光束称为象散光束。平面 $M_1F_1M_2$ 与平面 $Q_1F_2Q_2$ 垂直，乃是光束的主截面。直綫 OF_2F_1 就是光束的軸綫。两小段焦綫之間的距离 F_1F_2 称为象散差。象散差愈小，則光束愈接近同心光束。随着象散差 F_1F_2 的消失，光束就变成了同心光束。

§ 4. 焦散綫和焦散面

变形波面具有比上节所討論的波面和相应的象散光束更为复杂的形状。图 4 所示，

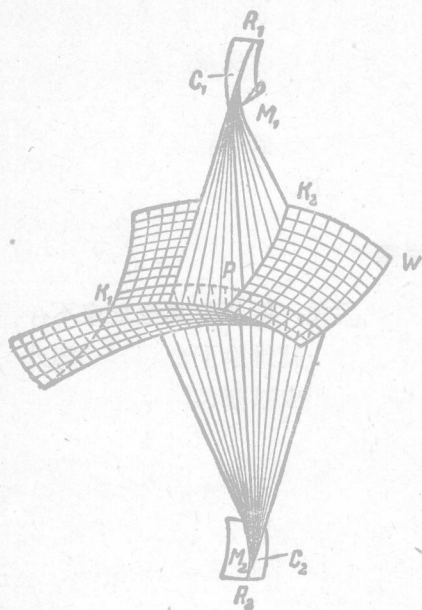


图 4

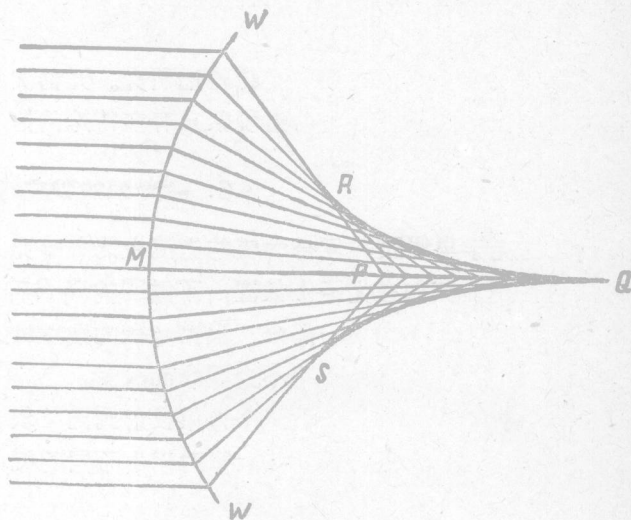


图 5

为波面 W 的一部分。在此表面上，可以找出曲率半径最大和最小的两个主要方向的截綫。曲率中心位在波面的各方。在表面 W 上繪有两組称为曲率綫的曲綫。在 K_1 和 K_2 两

条曲率綫上的所有点上作出波面的法綫，法綫当中就有主截綫的曲率半径；两组法綫形成二直紋面 M_1PK_2 和 M_2PK_1 。两小段綫 K_1 和 K_2 的曲率中心則形成两条直綫 R_1M_1 和 R_2M_2 ，这两条直綫叫做焦散綫。如果对波面 W 上的所有曲率綫完成上述作图，我們就得到两部分曲率中心的几何軌跡，叫做焦散面。

如果波面为繞軸綫 MQ 的迴轉面 WW （图5），这时焦散面 RQS 也是焦散綫 RQS 繞軸綫 MQ 迴轉时所形成的迴轉面；在这种情况下，焦散綫是曲綫 WW 的漸曲綫，而另外的一部分焦散面則变为对称軸上的一段直綫 PQ 。焦散面 RQS ，以及第二部分焦散面根据波面 WW 的形状具有更复杂和更简单的結構。

在焦散面最狹窄的地方发生光能的集中；这就是称它做焦散面或焦面的原由。有关焦散面在某一垂直于軸的平面截面内的能量分配問題，用物理光学的方法始能解决，因为需要估計到光的干涉現象：光綫在焦散面截面上的几何分配可能与光能在光束截面上的实际分配全不相符。

§ 5. 光的直綫传播定律

几何光学里認為，光在透明而均匀的（各向同性的）媒質中是沿着直綫传播的。日常的經驗使我們确信这一定律的正确性。从某些宇宙現象的觀察，例如日蝕或月蝕，确定了光传播的直綫性。利用最精密的大地測量方法，例如根据精密測角仪器測量三角网中一三角形三內角的结果能使人更深信这一定律的正确性。当观测很仔細时，測得的三角形三內角的总和与实际的总和（ $180^\circ + \epsilon'$ ）間的差值总是在与測角仪器的精度相关的可能的观测誤差范围以内。当光束通过窄孔或在光路上放置不透明的小障碍物时，光传播的直綫性便遭到破坏。在这种情况下，便产生了以上指出的衍射現象，此时光进入几何阴影的区域以内。

衍射現象在物理光学内要詳細地研究。几何光学完全不考虑衍射現象，因为在一般使用光学仪器的条件下，衍射現象只有在特殊的情况才能显出。

§ 6. 諸光束的独立性定律

几何光学里假設，复合而成的光流中的各个光束彼此无关，就好象其他光束不存在似的传播着。例如在光路上放置一不透明的屏 R 后（图6），就排除了光束組成部分中的某一部分。根据光綫的独立性定律，我們應該認為，未通过屏的光綫的作用不会因此而改变。

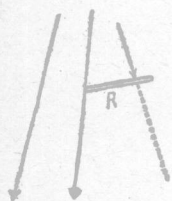


图 6

如果两个光束投射到同一块平面上，則此二光束的作用叠加。光綫的独立性定律对于由不同的輻射中心发出的光束始終是正确的。

当两个光束从同一个輻射中心发出，以不同的途径到达某一点，并在該处发生光的减弱或完全消灭的現象（产生黑暗），按照光的独立性定律，此时两个光束的共同作用代替了期待的光的加强。这种現象叫做光的干涉。评价象的品質时，必須考虑到这种現象。

在以前討論焦散面时曾指出，由于波面发生变形，点象能具有复杂的形状，显現为

圓形或更复杂的散射图形。散射图形上的光能分布能由光綫交点在图形上的集中情况判断。但是可能出现这种情况：当某些光綫投射到平面上的同一点时，由于彼此干涉而削弱，并产生暗影。因此，在光学仪器理論解决照度沿散射圆分布的問題时，不能局限于几何光学的原理，而应该注意到干涉现象。

§ 7. 反 射 定 律

若光綫在它传播的路途上遇到两媒質的拋光分界面，則它将按照反射定律改变自己的方向。在图 7 內 PP 为两媒質間的拋光分界面， NA ——此界面上入射点 A 处的法綫， SA ——入射光綫， AS' ——反射后光綫的方向。等于角 i 的入射光綫与法綫的夹角 SAN 称为入射角；等于角 i' 的反射光綫与法綫的夹角 $S'AN$ 称为反射角。由是得反射定律如下：入射光綫，分界面的法綫和反射光綫在同一平面上；入射角和反射角的絕對值相等，但由于两光綫位于法綫的兩側，故符号相反。

$$i = -i'$$

(1)

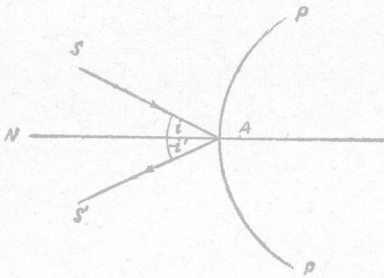


图 7

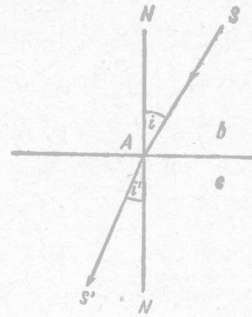


图 8

如果入射角和反射角由法綫按順針方向构成的，則其值为正，反之(逆时針方向)，則为負。在图 7 內，入射角 i 为正，反射角 i' 为負。很显然，如果入射光綫沿着 $S'A$ 方向，則反射光綫的方向将是 AS ，这就是說，入射光綫与反射光綫的作用可以互換。

§ 8. 折 射 定 律。折 射 率

当光綫由一种透明均匀的媒質进入另一种透明均匀的媒質內时，在两媒質間的拋光分界面上，光綫在它和第二种媒質的相遇点 A 处改变了方向，构成所謂光的折 射 (图 8)。入射光綫和法綫的夹角 $SAN = i$ 是入射角；折射光綫和法綫的夹角 $S'AN = i'$ 称为折射角。

折射定律确定，当光綫由一种媒質 b 进入另一种媒質 c 时，入射光綫、法綫和折射光綫在同一平面上；入射角 i 和折射角 i' 的正弦之比与这些角度的大小无关(只与两接触媒質 b 和 c 的性質有关)，同时对于一定波长的光綫，当媒質的溫度和密度一定时，它是一个常量。角 i 和 i' 的符号規則与反射定律所采用者相同。这样，从图 8 有 $i > 0$

和 $i' > 0$ 。所以根据定义可以写成:

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = n_c^b. \quad (2)$$

n_c^b 之比叫做媒質 c 对于媒質 b 的相对折射率。

試驗証明, 入射光綫和折射光綫的作用可以互換。因此, 如果入射光綫沿着 SA 方向以入射角 i 射入媒質 c 內, 則媒質 b 內的折射光綫將沿着 AS 方向进行, 而且与法綫构成一折射角 $NAS = i$; 若用 n_b^c 表示媒質 b 对于媒質 c 的相对折射率, 則同样可以写成:

$$\frac{\sin i'}{\sin i} = n_b^c. \quad (3)$$

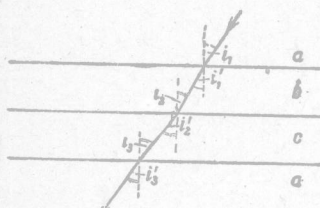
将 (2) 和 (3) 比較就建立了下面的关系式:

$$n_c^b = \frac{1}{n_b^c}. \quad (4)$$

关系式 (4) 指出, 入射光綫和折射光綫的方向可以直接相反的变换, 光綫的作用互換, 但光綫与法綫的夹角仍旧不变。因此, 几何光学里可以利用光程可逆的原理。

图 9 所示, 为三种透明均匀的媒質, 它們的分界面彼此平行。用符号 a 表示第一种与最末一种媒質。这样我們就有两个由媒質 b 和 c 組成的平面平行板, 位于媒質 a 之間。

由試驗可以証明, 第一界面上的入射角 i_1 等于第三界面上的折射角 i'_3 。对于第一、第二和第三界面上的折射, 按照公式 (2) 可以写出下列的等式:



$$\left. \begin{aligned} \frac{\sin i_1}{\sin i'_1} &= n_b^a, \\ \frac{\sin i_2}{\sin i'_2} &= n_c^b, \\ \frac{\sin i_3}{\sin i'_3} &= n_a^c. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

图 9

将等式 (5) 逐項連乘, 并注意到 $i'_3 = i_1$ 的条件, 就求出三个相对折射率 n_b^a 、 n_c^b 和 n_a^c 的乘积等于 1, 即

$$n_b^a \cdot n_c^b \cdot n_a^c = 1, \quad (6)$$

由此得出

$$n_c^b = \frac{1}{n_b^a \cdot n_a^c}. \quad (7)$$

考虑到 (4) 式, 可以将 (7) 式写成:

$$n_c^b = \frac{n_a^c}{n_b^a}. \quad (8)$$