

光学仪器理论

第四分册

著者：А.И.Тудоровский

中国科学院

光学精密机械仪器研究所 翻印

1957.5

光学儀器理論

第四册 (目录)

第十五章 眼的视觉

§ 192	人眼的构造	1
§ 193	把眼睛作光学系统；示意眼和简眼	4
§ 194	眼之调节、调节范围	8
§ 195	眼按其折光的分类	10
§ 196	眼的象差	12
§ 197	对眼睛的光刺激所决定的光度学量。适应	14
§ 198	眼的光谱敏感度 波至涅效应 日间视觉和夜间视觉	19
§ 199	视觉绝对阈；眼的敏感度	22
§ 200	眼的区分敏感度	27
§ 201	眼的分辨能力（视觉敏锐度）	31
§ 202	光的周期刺激感 Talbot 定律	36
§ 203	单眼的空间感觉	38
§ 204	双眼视觉	39
§ 205	实体视觉	42
§ 206	实体镜	47
§ 207	眼折光缺陷之校正	64
§ 208	眼轴上的象散校正；圆柱透镜和双曲率透镜	67
§ 209	眼镜的形式；消象散透镜	70

第十六章 照象镜头

§ 210	照象镜头概述	76
§ 211	照象物镜焦距的测量	77
§ 212	有效光阑和入射光瞳的直径；象深	83

§ 213	象底照度；物镜底几何集光本领和 物理集光本领 亮度的损失.....	88
§ 214	在视场内不同点的象底照度	96
§ 215	照相物镜底象差；球差.....	105
§ 216	在照相物镜中的正弦条件或慧差	110
§ 217	象散和象 面底弯曲	119
§ 218	照相物镜的畸变	124
§ 219	照相物镜的色差，为消色差的光线选择.....	132
§ 220	照相物镜象差的测量.....	142
§ 221	完善的照相物镜在两个发光点情况下的分辨本领.....	148
§ 222	在光栅情况下物镜的分辨本领和象底衬度	151
§ 223	在光栅象面中衬度的结果公式及某些应用.....	156
§ 224	照相感光层黑度的特性曲线.....	162
§ 225	感光层的分辨本领	167
§ 226	照相物镜的成像品质和鉴别本领	174
§ 227	用脱述马恩 (Twyman) 干涉仪研究照相物镜.....	190
§ 228	最主要的几种物镜概述	197
§ 229	具有大视场的镜头 (广角镜头).....	207
§ 230	大集光本领的镜头.....	210
§ 231	望远镜头.....	214
§ 232	可变焦距镜头.....	217
§ 233	空中摄影用镜头.....	221

或玻璃液。玻璃体的透明膜与所谓网膜 n_2 相紧贴。网膜处在脉络膜上，是由眼神经末梢所组成。眼神经 e 在光轴 AB 旁靠鼻的一边进入眼腔内。

这些神经末梢由 S 点向外分散，直到网膜边缘 OO 。它在 S 点的厚度为 $0.20—0.22\text{ mm}$ ；越到边缘越薄，以至厚 0.004 mm 。

网膜之复杂结构如图 268 所示。部分神经纤维组成 X 层，而与玻璃体相接触；这些神经纤维的端点由神经细胞组成——神经元。这些细胞充满了以后由 IX 至 III 的七层。光由

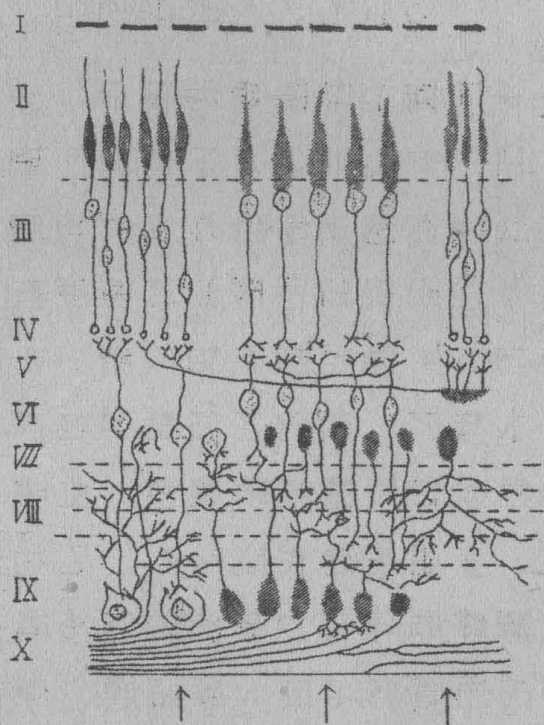


图 268

玻璃体射入的方向如图中箭头所示，经过开始的八层不吸收亦不引起刺激，因而这些层不感光。第九层在图中标以数字 II 者，由所谓圆柱细胞和圆锥细胞组成。圆柱细胞圆柱状，由二部分组成；其全长约 $0.065—0.081\text{ mm}$ ；它靠里面的部分直径为 0.0018 mm 。锥状体亦由二部分组成；它的里面部分扩大成梨形；锥状体之全长近 0.035 mm ，扩大部分的直径在 0.0045 至 0.0065 之间。

圆柱细胞和圆锥细胞的向外部分，由强烈吸收光的物质组成。在吸收光的同时，发生物质的化学分解作用，这就是视觉刺激的基本步骤；这刺激由网膜上和这吸收光的细胞相联结的神经纤维传至大脑。

圆柱细胞的吸光物质具暗玫瑰红色或紫红色，称为视紫红质。在光之作用下这物质就褪色，重现色，开始现黄色，而后成为

淡灰色。在暗处时视紫红质完全还原。视紫红质的化学性质已研究得很好，这是由于这种物质较易于从动物网膜取得之故。对于圆锥细胞吸收光以及产生刺激之过程，还研究得很少。

圆柱细胞和圆锥细胞在网膜上的分布并不均匀。在视神经进入眼内腔的点，即图 267 中点 5 附近的网膜上既无圆柱细胞亦无圆锥细胞。这地方完全不感光，因而称为盲斑。通常盲斑为椭圆形；其水平轴和垂直轴长之比平均为 5:4；斑的尺寸在 1.4 至 2.7 mm 之间；相应视角在水平方向由 $3^{\circ}30'$ 至 8° ，垂直方向由 4° — $8^{\circ}40'$ 。



图 269

以下述实验可证实盲斑之存在。遮住左眼而以右眼看着图 269 的十字。把眼先靠近图面而后渐渐离开，就可以发觉那样的位置，那时在视场的边缘的黑色圆消失不见。这就是由于这点成像在盲斑上之故；若十字和黑圆之间距为 70 mm ，则消失的位置约离 20—22 cm ，通常我们感不到盲斑之存在是由于眼很活动的缘故。

距盲斑中心 $15^{\circ}5'$ 在向太阳穴的方向是一长圆形部分之中心，即图 267 的 f 点，这斑点的水平直径约 1 mm ，有时达 3 mm ，其垂直方向的直径则近 0.8 mm ，而相应视角通常近 2.25° 。这斑点黄色，因而称为黄斑。在黄斑的中心处，通常为椭圆形凹陷称中央凹，其水平直径 0.5 mm ，垂直直径为 0.2 mm ，在这地方网膜之厚不超过 0.08—0.1 mm ；组成图 268 中几层的细胞在此完全或大部分没有了；感觉层仅由稍长些的圆锥细胞组成，圆锥细胞紧密分布并组成六角形镶嵌状单元柱状细胞在中央凹以外的黄斑内部的一部分也是没有的。仅有圆锥细胞而无柱状细胞的范围，约为直径 0.4 mm 的圆，但有时直径大到 0.8 mm 。而相应视角

約 2° 。在所指区域以外，单位面积内的圆柱细胞和圆锥细胞之比漸々增加，到网膜之边缘时为 1:10。

圆锥细胞总数估計有 7000,000 个；其中 13,000 处于黄斑中，而 4,000 个在中央凹。圆柱细胞有 75,000,000；某些研究者认为有 170,000,000 个。

在网膜之感光层之后，相接着为暗而不透明的物质称为皮层。这二层相互渗透，其渗透的程度依网膜上之照度而异。皮层之存在使得通过前面的层而未被吸收的光全部吸收而不散射，此外皮层之存在看来对于圆柱细胞视紫红质还原有很大的意义。

眼球近乎对称，其对称轴之端点在角膜方面通过角膜之最凸点（在图 267 中的点 A 稍高），经瞳孔中心后射到眼后壁上稍低于 B 的点；这轴之长度对成人的平均值等于 24.3 mm ，对眼的光学系统而言，重要的不是对称轴而是直视线，即图 267 中的 A B，此线经眼光学系统的节点及黄斑中央凹之中心 f；当眼观察任一空间物体时，由眼之肌肉 m 的作用，使眼转动而使直视线经过所观察的点，使其象落在中心 f；所有空间点之象不在黄斑上时，眼都看作是“边缘视觉”。眼的运动能力是很大的，它无论何时都不静止，以保持空间视察部升的位置。眼之运动可视为转动，因而眼球中存在不动的点，此点位于对称轴上，距角膜顶点 13.5 mm 。在鼻的方向距离直视线 1.6 mm 。

瞳孔大小对于每个不同的人是不同的，其直径在 1.5 至 8 mm 之间，而对于每个人，由于照度不同及不同的环境；神经系统的状况，滴入眼中的药剂等々亦几乎能在同样这个范围内，作直径的变化。在较强照度时，瞳孔直径减少以至极小值，而当照度很弱时则有最大值；这些变化全是自动的反射，而不是有意识控制的结果。

§ 193 把眼看作光学系统；示意眼和简眼

眼之光学系统犹如照像机。物体在眼中成像之光路如图 270 所示：

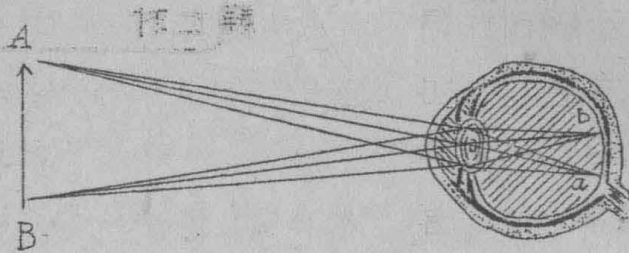


图 270

由物体 AB 的点 A 及 B 发出的光线，经角膜及水晶体的折射，而成象于网膜上。由水晶体之表面曲率之改变，使在各种距离的物体，成象精确地处在网膜感光层上；这种步骤称为调节。刺激圆锥细胞和圆柱细胞的亮度，由象上各点亮度不同而异，这样所受的刺激，由视神经传至大脑。

眼的光学常数，或是对活人的眼或是对标本测量，都可由特殊的仪器量出。眼的折射面曲率半径之决定，基于对这些面为反射象的测量，用作这种重度的仪器称作眼膜曲率计。

大量测量的结果，便能定出眼之各常数之平均值，这些常数之整体称为示意眼。按 A. Gullstrand 的结果，由下列数值表示这数值由于肌肉的不同状况及水晶体变形而异。

Gullstrand 的示意图

(所有数量均以 mm 为单位)

	静止时	最大调节时
折射率		
角膜		1.376
水样液和玻璃液		1.336
水晶体		1.386
至角膜顶点的距离		
角膜前点		0
角膜后点		0.5
水晶体前表面	3.6	3.2
水晶体后表面		7.2
曲率半径		
角膜前面		7.7
角膜后面		6.8
水晶体前面	10	5.33
水晶体后面	-6	-5.33
对整了眼		
光焦度 (屈光度)	58.64	70.57
第一主点距	1.348	1.772
第二主点距	1.602	2.086
第一焦点距	-15.707	-12.397
第二焦点距	24.387	21.016
前焦距	-17.055	-14.169
后焦距	22.785	18.930
中心凹距		24
入射光瞳距	3.047	2.668
出射光瞳距	3.667	3.212
瞳孔位置放大率	0.909	0.941
最近点距		-102.3

在眼静止时，第一节点至角膜顶点距为 7.079 mm ，而第二节点为 7.333 mm ；由此可见节点相互重合，并与水晶体之后表面相重合。

在很罗情形下，用示意眼作各种近似的计算是不方便的，这一方面是由于其复杂，另一方面由于眼的运动使实际数值和平均值间有很大差异；因而将示意眼通常简化为所谓简眼。

由于眼之主点间距离不大，可以认为相互重合，并且认为是由一种物质组成；这单一折射面曲率半径之大小选择使其焦距与示意眼相同；简眼在网膜上成像的大小和示意眼相同，在图 271 中所示为简眼的结构；点 C 为折射面的中心，当示意眼与简眼网膜位置相重时，图中虚线位置为示意眼的角膜位置。

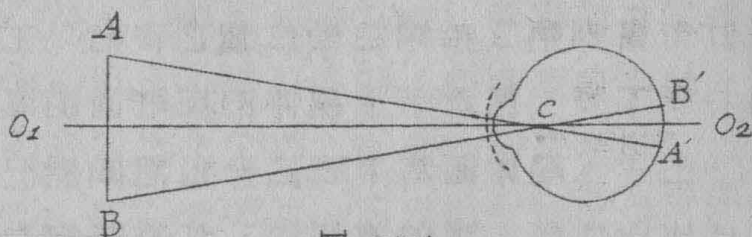


图 271

由一些作者所作的各种简眼中，选取 *A. Gullstrand* 的设计。

Gullstrand 的简眼

折射率	$1\frac{1}{3} - 1.33$
折射面半径	5.77 mm
第一焦距	-17.1 mm
第二焦距	22.8 mm
光焦度 (屈光度)	58.48 mm
网膜曲率半径	9.7 mm

对于示意眼的评述及其他简眼可在 *C. B. Khabkoba* (2) 书中找到。关于 *Gullstrand* 的工作可看 *H. V. Helmholtz* 的书。

§ 194. 眼之調節、調節範圍

已在前節講到，由眼之光焦度改變可使各種距離的物體成像在網膜上，光焦度變化亦即眼之後焦距的變化；由前面示意眼的表可見變化範圍約為 20%。眼這種本能，以及這種變化的過程稱為調節；眼肌肉之縮短使水晶體的曲率增加，主要是前一面變化；眼肌肉之張力減少使前一面的曲率變小。在前一情形，較近的物體成像在網膜上，第二情形，則較遠的物體成像。

水晶體表面曲率之變化，可用下述方法觀察。在暗室觀察發光體之象時，可看到由眼所反射所成的三個象：二丁正象乃角膜及水晶體第一面所成，一個倒象為水晶體的第二面所成。在眼調節時可看到第二和第三象位置之變化，尤其是第二象變化很大；第一象不變；這表示水晶體的反射面曲率半徑之變化。

由於水晶體曲率半徑之變化範圍是已知的，因而眼能看到的物體距離處在一定的範圍內，這範圍稱為調節範圍。當肌肉完全鬆弛，即完全靜止時，所清楚看到的點稱為明視遠點。當肌肉最緊張時，眼所能看到的點稱為明視近點，這距離與所謂明視距離分別開來。對正常的眼明視距離約為 250 mm；這距離是通常在好的照明（約 50 勒克司）及正常的鉛字大小時，閱讀及作其他工作的距離；他是由工作的舒適及習慣而決定的。

用下述的方法可測定眼的近點。在眼瞳孔前放一紙板，紙板上有二小孔其間距小於瞳孔的直徑；通過這二小孔看間隙，當間隙近到一定距離時，間隙就升成二丁，這是由於眼的肌肉調節已到達極限，間隙通過二丁小孔的小光束成了二丁象在網膜上。當然，要決定物體在什麼地方開始升為二丁是不容易準確的，因此上述史耐爾方法的意義只在於較快地看出現象來。

對於遠點也可用同樣的方法。先在眼中注射麻醉性物質（*atropin*）使眼處於靜止狀態，那時眼通過紙板看遠點處的物體

才不升为二丁；故在纸板前放一透镜，在透镜的焦点附近放一间隙，重出象升为二丁的位置再知道透镜的焦距，就很容易标出远点的位置。

远点的距离决定眼的折光力；通常用距离（用米为单位）的倒数作为折光力的单位；显然折光力就是表示眼的远点会聚度的值而以屈光度为单位（§86）。距离自然是指第一主点到远点的距离，假使距离不是从主点起标而从角膜顶点起标，则此时的折光力，称为眼的顶点折光力。

运用特殊的仪器（折光计）来测定眼的折光力，可以得出比史耐尔方法准确得多的结果。眼科医生多数采用眼膜曲率镜方法，这方法极为简单合用但须要熟练的技巧；用反射镜将光束射入被检查的眼中，经反射镜中心小孔观察眼瞳中明暗的边界；当反射镜转动时由阴影变动的方向就能决定光源的象究竟在网膜之前、在网膜上或在网膜之后；在该眼上戴以适当的眼镜可使光束收敛在网膜上，这样就决定了眼的折光度，并具有实用上足够的精度。

以 P 表示眼的第一主点到近点的距离的米数；以 r 表示到远点距的米数；故 $\frac{1}{p}$ 和 $\frac{1}{r}$ 即为相应的收敛度 P 和 R 之屈光度数；因我们所取的计标条件规定了： $p < 0$, $r < 0$ ；故一般而言：

$$P = -\frac{1}{p} \text{ 和 } R = -\frac{1}{r};$$

小于零。二收敛度之差称为调节范围（有时也称为调节能力）；以字母 A 表示之：

$$A = P - R. \quad (194.1)$$

对每个人来说，在整个生活过程中近点距和远点距以及调节范围并不是保持不变的；当年龄增大时由于近点变远而使调节范围之绝对值变小。在下面列出正常眼的调节范围与年龄的关系。

年 龄 (年 数)	p (厘 米)	P 屈 光 度	r (厘 米)	R (屈 光 度)	$-A$ (屈 光 度)
10	-7.1	- 14	∞	0	14
15	-8.3	- 12	∞	0	12
20	-10.0	- 10	∞	0	10
25	-11.8	- 8.5	∞	0	8.5
30	-14.3	- 7.0	∞	0	7.0
35	-18.2	- 5.5	∞	0	5.5
40	-22.2	- 4.5	∞	0	4.5
45	-28.6	- 3.5	∞	0	3.5
50	-40.0	- 2.5	∞	0	2.5
55	-66.6	- 1.5	400	0.25	1.75
60	-200	- 0.5	200	0.5	1.0
65	+400	+ 0.25	133	0.75	0.5
70	+100	+ 1.00	80	1.25	0.25
75	+ 57	+ 1.75	57	1.75	0.0
80	+ 40	+ 2.5	40	2.5	0.0

从表中数字可以看出：儿童时期的近点在眼之前，以负数表示，并在近距离处，远点则为无限远；到40至45岁之间近点处在明视距离，即250 mm处；当大于55岁时不用肌肉拉力已看不到无限远处的东西，此时远点已处在眼之后（55岁时处于眼后400 cm）。到65岁时近点也处于眼后了，眼用调节既不能看清明视距离处的点也不能看清无限远点。近70岁时眼就完全丧失调节能力。

45岁以后的眼的状况称为老性远视或老视。

§195. 眼按其折光的分类

若远点在无限远处则眼称为正常，若不合乎这条件，则称为眼反常。

由前节表中可见，所有正常眼至45岁至50岁间开始反常。若远点在眼前有限距离（ $r < 0$ ）则眼称为近视；若远点在眼后（ $r > 0$ ）则称远视。

在图272中，a为正常眼的光路图，无限远点经折射后成像在网膜上 S' 点，该点亦即正常的第二焦点 F' 。图272b为近视眼的图，第二焦点处于网膜之前，远点 S 处在有限距离时其象在网膜上的 S' 点，图272B则为远视眼的图示。第二焦点 F' 在网膜后面，虚远点 S 之象方才在网膜上。在所有这三个情况中

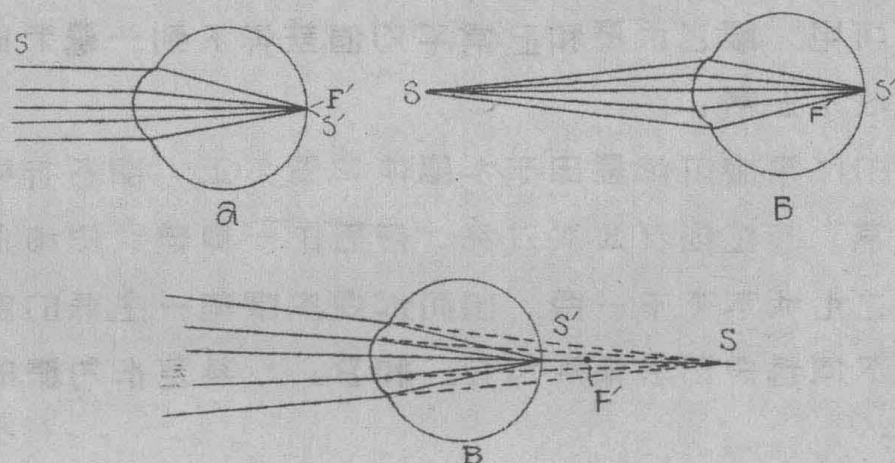


图 272

调节肌肉没有张力，即是静止的。

眼反常可能由于下列各种原因。若不是由于眼球的物理性质或其他结构不正常的话，眼反常的原因时常是由于眼球长度不正常。设正常眼的常数由 *Gullstrand* 的表而定（§193）。由公式 (80.4)、(81.4) 可得：

$$\frac{n'}{a'} = \frac{n'}{f'} + \frac{1}{a} ;$$

如前，令远点到第一主点的距离为 R ；若 a 、 a' 及 f' 以毫米为单位，则 $\frac{1000}{a} = R$ 。升式 $\frac{1000 n'}{f'}$ 为眼的光焦度，即等于58.64屈光度。若眼的长度即角膜顶点至网膜距离为 ℓ ，则由第二主点

起点的 $a' = \ell - 1.602$ 故得：

$$(58.64 + R)(\ell - 1.602) = 1.336.$$

由此式求出的结果，列表在下面：

R (屈光度)	ℓ (毫米)	R (屈光度)	ℓ (毫米)	R (屈光度)	ℓ (毫米)
6	22.27	-2	25.19	-10	29.07
4	22.92	-4	26.05	-12	30.24
2	23.63	-6	26.98	-14	31.53
0	24.38	-8	27.98	-16	32.94

由表可见，眼之长度和正常平均值差异不到一毫米时，已可使眼显著地不正常。

其他的反常眼可能是由于水晶体位置不正，眼各折射面曲率半径不正常，及这些表面不对称。最后的一种情形使细光束的二个主截面之光线不交于一点，因而远点离眼第一主点的距离也不同；这二不同远点的会聚度为 R_1 和 R_2 ，其差作为眼的散光的量度 A_s ；

$$A_s = R_1 - R_2 \quad (195.1)$$

眼散光之存在可用图表验出，图表上画有不同方向的黑白线条，由于存在象散，不同方向的线条就不能同时看清，画有放射形线条也一样；例如只有某个方向的线条特别黑些。微弱的象散至 0.5 屈光度是常见的，通常也不注意它；象散由 0.5 至 5 屈光度，也并不是稀有的。

反常眼中有所谓缺睛环眼，即由于水晶体不透明而只能动手取出水晶体者。经这手术之后，象散有时至于 8 屈光度以至更大。

§ 196. 眼的像差

在 §192 末曾提及眼球形状是近乎对称的。相对于眼的最外二折射面之对称轴而言，眼睛光学系统的折射面并不完全几何地对称也并不完全同轴。虽然不对称的程度是很小的，但仔细的量度还可以量出来；在另一面它们的存在实际上并不影响眼睛光学系统之成像质量；因之可以认为是对称的同轴的，并把上述的轴作为眼睛光学系统的对称轴。在 §192 中又讲到过，被观察物点的象常是成在黄斑中央凹附近；因此这个直视线所通过的点是视场中心，光轴和直视线都通过眼睛光学系统的第二节点，二者交角为 5° ；因而沿直视线方向的元光束不是单心光束。在瞳孔直径 2 mm 时，中心光束因这个原因而引起的象散并不大；按 *Gullstrand* 的估计是 0.1 屈光度；相应的象散差 (§4) 等于 0.038 mm ，而每一象散线之长约为 0.003 mm 。可以认为这种大小的中心视场象散实际上并不影响眼的分辨能力。

眼睛的光学系统有相当大的相对孔径，但轴上和近光轴部分的球差不大；眼的各个折射面偏离球面恰使各面折射时产生的球差相互抵消；这种抵消的很大一部分还是由于水晶体物质折射率各点不同的缘故；中心部分折射率高于边缘的。但是眼睛的球差还是能用各种方法看出来；例如在眼前近点附近放一小字体印出的书板，然后在瞳孔之前拦以小孔以使瞳孔直径人为地缩小，因为球差所引起的弥散盘同时减小的缘故，就使读这书板成为可能了*。

眼睛光学系统的慧差不大；在所有情况下小到这样的程度以致对于一定范围内的象没有影响，所指的象虽在黄斑上而不在光

* 这种实验方法似乎把眼由于肌肉调节能力不够而引起的弥散也混在一起了；实际上，加小孔可以把眼的调节范围变大。由于加小孔可得近点变近的效果，可以认为这小孔是一种“放大器”——译者

轴上也是如此。

象面的曲率及畸变的影响由于象成在网膜的球面上而消除。

因此，眼的光学系统虽不是理想的，但相悖于直视区域即黄斑的范围内的单色象差相当小；在这区域内的点象缺陷在分辨能力方面，对于充分利用网膜感光层并无妨碍。由于眼的视场极大在这区域之外眼的象差渐增，至视场边缘时象的质量显著变坏。假若光线不为头部所拦阻的话，就是和光轴垂直的光线也能进入眼内即视场可达 180° 。在太阳穴方面水平（孤立）截面之视角达 95° ，在鼻方向的视角则为 65° ；在垂直截面内上方极限角等于 60° ，下方为 -72° 。

眼的色差很大，既有位置色差亦具倍率色差；色差的精确数值还没有，但可以认为D线和F线的焦点距离差为 0.28 mm ，这二光线的光焦度则各为59.0屈光度和59.946屈光度，即相差相近1屈光度。C线和G线的光焦度差，则达2.25屈光度。眼睛的色差可以用大家知道的表演实验显示出来：用一很好的物镜将棱镜析出的连续光谱投影于白屏上，令观者于数米远处来看它；多数观者把光谱的红色部分看得很清楚的时候，光谱的紫色部分就显得有些模糊散成燕尾状。

由于眼对于光谱边缘的光线不很敏感（§24，图30），虽然眼的色差很大但色差对眼的机能底影响并不大；光谱中间部分的色差不象边缘部分那样大。因之为表露眼的色差时，须在被观察的白光光源上加以适当的滤光片以除去光谱的中央部分，而留下红色及紫色的光线；这样一来，在远距离处，由 30 m 至 60 m ，观察点光源（信号灯）时，我们将看到是红色的发光点而围有紫色的边，在近距离时，同一光源好象是紫色而围红边的，仅在某种距离上才好象是一色的。

§197. 对眼睛的光刺激所决定的光度学量。适应