

**FERDINANDO CATALANO**

Fondamenti di  
**OTTICA DELLA VISIONE**

**PICCIN**

Tutti i diritti sono riservati

È VIETATA PER LEGGE LA RIPRODUZIONE IN FOTOCOPIA  
E IN QUALSIASI ALTRA FORMA

È vietato riprodurre, archiviare in un sistema di riproduzione o trasmettere sotto qualsiasi forma o con qualsiasi mezzo elettronico, meccanico, per fotocopia, registrazione o altro, qualsiasi parte di questa pubblicazione senza autorizzazione scritta dell'Editore.

ISBN 978-88-299-2345-8

Stampato in Italia

*A mio fratello Mino*

*“Dove viene, che la natura non fa nulla invano  
e da dove deriva l’ordine e la bellezza che vediamo  
nel mondo? [...] Fu l’occhio costruito senza alcuna  
conoscenza dell’ottica e l’orecchio  
senza alcuna conoscenza dei suoni ? ...”*

Isaac Newton, Ottica, Questione n. 28

*“Supporre che l’occhio con tutti i suoi inimitabili congegni  
per l’aggiustamento del fuoco a differenti distanze, per il  
passaggio di diverse quantità di luce, e per la correzione  
della aberrazione sferica e cromatica, possa essersi formato  
per selezione naturale, sembra, lo ammetto francamente,  
del tutto assurdo.”*

Charles Darwin, L’origine delle specie

---

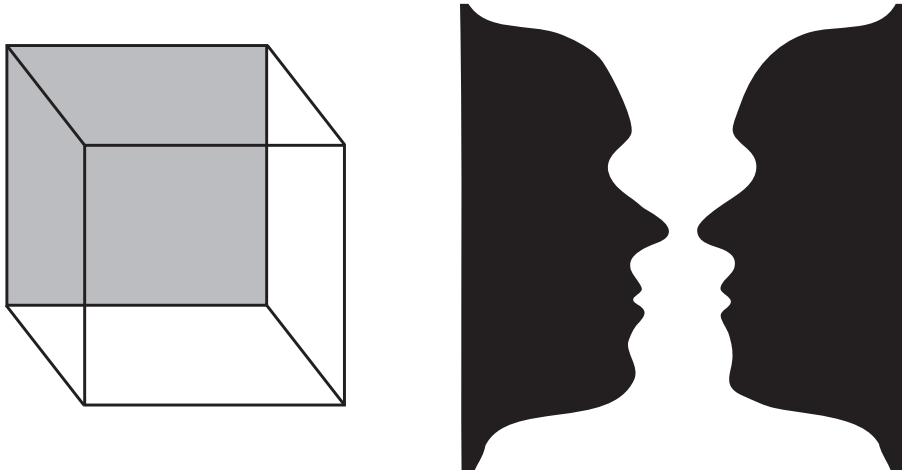
# PREFAZIONE

Secondo una definizione del tutto personale, l'ottica visuale studia attraverso le leggi dell'ottica geometrica e ondulatoria, il funzionamento dell'occhio umano inteso come sistema ottico costituito da una successione di mezzi e diottri oculari. Secondo la definizione che ne ha dato Millodot (1990), l'ottica visuale è *“La branca dell'ottica e dell'optometria che ha a che fare con il sistema diottrico dell'occhio e con la sua correzione”*. Un'altra definizione, dovuta a Neil Chairman in Aims of “Visual Optics”, UMIST, recita che l'ottica visuale è *“Lo studio delle caratteristiche ottiche dell'occhio in relazione alla performance della visione e all'ottica delle lenti correttive”*.

Alla luce di queste definizioni, si potrebbe pensare che i risultati cui perviene l'ottica visuale mediante l'impiego degli algoritmi propri dell'interazione tra la radiazione elettromagnetica e un sistema ottico, debbano avere carattere rigoroso e definitivo. In realtà le cose non stanno proprio così per almeno due ordini di motivi.

- 1) Nello studio della propagazione della radiazione luminosa attraverso il sistema ottico, ai parametri geometrici e ottici dei mezzi e dei diottri oculari si attribuiscono convenzionalmente valori standard ottenuti attraverso indagini statistiche compiute su un campione significativo di occhi. Ne consegue che i risultati ottenuti applicando le note relazioni dell'ottica geometrica e ondulatoria avranno anch'essi un carattere statistico. A titolo di esempio, nella valutazione del potere risolutivo angolare dell'occhio emmetrope, si assume per convenzione che il diametro pupillare in visione fotopica (cioè con livelli di illuminamento compresi tra 0,01 lux e 100.000 lux) sia di 2 mm. Conseguentemente il potere risolutivo assume il valore di  $\cong 1'$ . È del tutto evidente come il risultato ottenuto non possa avere carattere universale, potendo ciascun individuo avere una capacità di risoluzione che si discosti per difetto o per eccesso da quella standard. Fatta questa doverosa precisazione, è utile tuttavia tenere presente che i risultati del calcolo ottico applicato all'occhio, pur avendo valore approssimato, non si discostano di molto da ciò che il singolo soggetto percepisce in termini di forma e dimensione dell'immagine e, in ogni caso, costituiscono una base indispensabile per un primo approccio alla comprensione del funzionamento del sistema visivo nel suo insieme.
- 2) Ciò che comunemente chiamiamo visione è un processo molto complesso il cui risultato finale, la percezione e l'interpretazione delle immagini, dipende dal delicato rapporto tra la propagazione della radiazione ottica attraverso i mezzi e i diottri oculari da una parte e l'elaborazione cerebro-psichica dall'altra. In questa seconda fase del processo visivo, la componente psicologica ha talvolta carattere soggettivo. L'intero processo visivo acquista dunque un significato più ampio di quello semplicemente fisico-fisiologico e cioè la percezione di una realtà esterna visualizzata attraverso il sistema visivo, ma mediata e interpretata dalla mente. La soggettività dell'interpretazione di ciò che si vede è ben messa in evidenza nel caso delle cosiddette “immagini bistabili” di cui ci occuperemo più approfonditamente nel Capitolo 16. Il nostro occhio è finalizzato a selezionare un ogget-

to e fissarvi l'attenzione. Il resto diventerà, almeno momentaneamente, sfondo. Secondo il costruttivismo, in questo caso si formerebbero due percetti, entrambi ugualmente probabili, ma che si escludono a vicenda. Esempi classici sono il cubo di Necker e il vaso di Rubin. In quest'ultimo è possibile riconoscere due volti di profilo, oppure un vaso, ma mai contemporaneamente.



Nel cubo di Necker la faccia colorata può essere percepita frontalmente o posteriormente, mentre nel vaso di Rubin ciò che si percepisce dipende solo dalla volontà dell'osservatore di concentrarsi sui volti o sul vaso.

Ciò che si vuole sottolineare con queste sintetiche riflessioni preliminari è la sostanziale differenza tra percepire e vedere. La percezione visiva attiene all'interazione della radiazione luminosa con il sistema ottico dell'occhio e costituisce la componente fisica e fisiologica del processo visivo, mentre la visione concerne l'elaborazione e l'interpretazione dell'immagine ottica e costituisce la dimensione psichica e psicologica del fenomeno.

Il presente lavoro intende occuparsi degli aspetti fisici del processo visivo per la comprensione dei quali non si può tuttavia prescindere dalla descrizione dei contenuti anatomo-fisiologici dell'apparato visivo, anche se riservata ai soli mezzi e diottri oculari e limitata allo stretto indispensabile. Per ulteriori approfondimenti e ampliamenti si rinvia alla letteratura specifica.

FERDINANDO CATALANO

---

# RINGRAZIAMENTI

Come scrive il saggio Salomone nel Qoelet:

*“Al fare molti libri non c’è fine,  
e la molta dedizione ad essi  
è faticosa per la carne”.*

La realizzazione di questo libro ha richiesto, oltre alla produzione del testo, l’elaborazione e la revisione di diverse centinaia di immagini, foto, grafici, tabelle e formule ed è stata una “vera fatica per la carne”. Non solo per me ma anche per tutti coloro che, a vario titolo, hanno contribuito alla realizzazione dell’opera.

Desidero pertanto rivolgere un particolare ringraziamento, per la preziosa e competente collaborazione, alla Redazione della Casa Editrice Piccin (Dott.ssa Marcella Morin e Dott.ssa Carla Criconia).

Ringrazio altresì il Sig. Alex Tironi che ha curato la revisione delle immagini, il Dott. Francesco Arduini per alcune preziose puntualizzazioni storico-teologiche contenute nel Capitolo 1 e la casa produttrice NIDEK per il materiale fotografico relativo all’autorefrattometro.

Un ringraziamento speciale va alla Dott.ssa Lucia Invernici che ha curato con grandissima attenzione e pazienza certolina la revisione di alcuni capitoli del testo.

Anticipatamente ringrazio quanti vorranno segnalarmi eventuali errori e/o omissioni, nella personale consapevolezza di non aver esaurito tutto quanto si può scrivere su una materia così vasta e in così rapida evoluzione.





---

# INDICE GENERALE

<b>1</b>	<b>CENNI STORICI</b> .....	<b>1</b>
	1.1 ■ Dalle origini ai Greco-Romani .....	1
	1.2 ■ La Scuola Araba .....	3
	1.3 ■ Il Medio Evo .....	4
	1.4 ■ Dal Medio Evo all'Età Moderna .....	6
	1.5 ■ L'Età Moderna e Contemporanea .....	9
	Bibliografia .....	12
<b>2</b>	<b>CENNI DI ANATOMIA DELL'OCCHIO</b> .....	<b>13</b>
	2.1 ■ Apparato della vista .....	13
	2.2 ■ Occhio esterno .....	14
	2.3 ■ Occhio interno .....	16
	Bibliografia .....	19
<b>3</b>	<b>RICHIAMI DI OTTICA GEOMETRICA</b> .....	<b>21</b>
	3.1 ■ Rifrazione su una superficie piana. Legge di Snell .....	21
	3.2 ■ Equazione del diottro sferico .....	23
	3.3 ■ Punti e distanze focali .....	25
	3.4 ■ Potere rifrattivo .....	26
	3.5 ■ Vergenza .....	27
	3.6 ■ Costruzione delle immagini di sorgenti estese .....	27
	3.7 ■ Ingrandimento laterale e ingrandimento angolare .....	28
	3.8 ■ Lenti sottili .....	29
	3.9 ■ Rifrazione della luce attraverso una lente sottile .....	30
	3.10 ■ Punti e piani focali .....	31
	3.11 ■ Punti e piani principali .....	33
	3.12 ■ Punti nodali. Centro ottico .....	36
	3.13 ■ Equazione degli ottici .....	38
	3.14 ■ Potere di una lente sottile .....	39
	3.15 ■ Equazione gaussiana e newtoniana delle lenti sottili .....	39
	3.16 ■ Ingrandimento trasversale e ingrandimento angolare di una lente ..	40
	3.17 ■ Lenti spesse .....	42
	3.18 ■ Formula di Gullstrand .....	42
	3.19 ■ Potere frontale di una lente spessa .....	43
	3.20 ■ Ricerca dei punti e dei piani principali di una lente spessa .....	44
	3.21 ■ Potere di una lente spessa immersa in mezzi di diverso indice di rifrazione .....	45
	Bibliografia .....	46

<b>4</b>	<b>RICHIAMI DI OTTICA ONDULATORIA</b> . . . . .	<b>47</b>
	4.1 ■ Generalità sul fenomeno della diffrazione della luce . . . . .	47
	4.2 ■ Diffrazione della luce attraverso un foro circolare . . . . .	49
	Bibliografia . . . . .	50
<b>5</b>	<b>MODELLI E GEOMETRIE DELL'OCCHIO</b> . . . . .	<b>51</b>
	5.1 ■ Sviluppo storico dei modelli dell'occhio . . . . .	51
	5.2 ■ Il nostro modello di riferimento: l'occhio di Gullstrand . . . . .	52
	5.3 ■ Assi, angoli e punti notevoli . . . . .	54
	5.4 ■ Punto remoto . . . . .	57
	5.5 ■ Punto prossimo . . . . .	58
	5.6 ■ Pupilla d'entrata . . . . .	59
	Bibliografia . . . . .	61
<b>6</b>	<b>OTTICA DEI MEZZI E DEI DIOTTRI OCULARI</b> . . . . .	<b>63</b>
	6.1 ■ Film lacrimale . . . . .	63
	6.2 ■ Ottica della cornea . . . . .	64
	6.3 ■ Eccentricità corneale. Formula di Wilms . . . . .	66
	6.4 ■ Ottica del cristallino . . . . .	69
	Bibliografia . . . . .	70
<b>7</b>	<b>LA RIFRAZIONE ATTRAVERSO I MEZZI E I DIOTTRI OCULARI</b> . . . . .	<b>71</b>
	7.1 ■ Rifrazione aria-cornea . . . . .	72
	7.2 ■ Rifrazione cornea-umore acqueo . . . . .	72
	7.3 ■ Rifrazione umore acqueo-cristallino . . . . .	72
	7.4 ■ Rifrazione cristallino-umore vitreo . . . . .	72
	7.5 ■ Il potere totale dell'occhio . . . . .	73
	7.6 ■ Ricerca dei piani principali dell'occhio . . . . .	73
	7.7 ■ Ricerca dei punti nodali . . . . .	75
	Bibliografia . . . . .	76
<b>8</b>	<b>ACCOMODAZIONE</b> . . . . .	<b>77</b>
	8.1 ■ Generalità sull'accomodazione . . . . .	77
	8.2 ■ Capacità accomodativa – LAG . . . . .	78
	8.3 ■ Ampiezza accomodativa . . . . .	81
	8.4 ■ Misura dell'ampiezza accomodativa . . . . .	83
	8.5 ■ Accomodazione e convergenza . . . . .	85
	8.6 ■ Tipologie dei movimenti oculari . . . . .	87
	Bibliografia . . . . .	88
<b>9</b>	<b>POTERE RISOLUTIVO DELL'OCCHIO E ABERRAZIONI</b> . . . . .	<b>89</b>
	9.1 ■ Generalità sul problema della risoluzione di un sistema ottico . . . . .	89
	9.2 ■ Potere risolutivo lineare e angolare . . . . .	93
	9.3 ■ Il potere risolutivo lineare dell'occhio . . . . .	95
	9.4 ■ Il potere risolutivo angolare dell'occhio . . . . .	95
	9.5 ■ Acuità visiva . . . . .	97

9.6 ■ Potere risolutivo e aberrazione sferica dell'occhio: una notevole proprietà . . . . .	98
9.7 ■ Limite di Rayleigh e diametro pupillare . . . . .	102
9.8 ■ Potere risolutivo bistigmatico e polistigmatico . . . . .	103
9.9 ■ Aberrazione cromatica . . . . .	104
9.10 ■ Test bicromatico . . . . .	105
Bibliografia . . . . .	107
<b>10</b> <b>OTTICA DELLA PERCEZIONE LUMINOSA . . . . .</b>	<b>109</b>
10.1 ■ Soglia di sensibilità . . . . .	109
10.2 ■ Capacità di adattamento. Coefficiente di percettibilità . . . . .	110
10.3 ■ Velocità di percezione . . . . .	112
10.4 ■ Abbagliamento . . . . .	113
10.5 ■ Curva di visibilità. Effetto Purkinje . . . . .	114
10.6 ■ Sensibilità al contrasto . . . . .	116
10.7 ■ La funzione di sensibilità al contrasto . . . . .	118
10.8 ■ La funzione di trasferimento del contrasto . . . . .	119
Bibliografia . . . . .	121
<b>11</b> <b>PROFONDITÀ DI CAMPO E DISTANZA IPERFOCALE . . . . .</b>	<b>123</b>
11.1 ■ Le caratteristiche ottico-geometriche dell'occhio . . . . .	123
11.2 ■ Criterio di indistinguibilità o del quarto d'onda . . . . .	125
11.3 ■ Profondità di campo e distanza iperfocale dell'occhio umano . . . . .	126
Bibliografia . . . . .	127
<b>12</b> <b>LE AMETROPIE . . . . .</b>	<b>129</b>
12.1 ■ Ametropia sferica . . . . .	129
12.2 ■ Il sistema lente-occhio nella correzione delle ametropie sferiche . . . . .	134
12.3 ■ Astigmatismo . . . . .	136
Bibliografia . . . . .	139
<b>13</b> <b>LA DIMENSIONE DELL'IMMAGINE RETINICA . . . . .</b>	<b>141</b>
13.1 ■ Immagine retinica di un occhio sferico non corretto . . . . .	141
13.2 ■ Immagine retinica per un occhio ametropo corretto con occhiale . . . . .	143
13.3 ■ Immagine retinica di un occhio ametropo corretto con lente a contatto . . . . .	144
13.4 ■ Anisometropia e aniseiconia . . . . .	144
13.5 ■ Misura dell'aniseiconia. Eiconiometro di Ames e Agle . . . . .	147
13.6 ■ Eiconiometro a comparazione diretta (test) . . . . .	151
13.7 ■ Biprisma come eiconiometro . . . . .	152
13.8 ■ Lenti aniseiconiche . . . . .	153
Bibliografia . . . . .	154
<b>14</b> <b>ELETTROCHIMICA DEL PROCESSO VISIVO . . . . .</b>	<b>155</b>
14.1 ■ Dalla radiazione luminosa al segnale elettrico . . . . .	155
14.2 ■ I fotorecettori . . . . .	156

14.3 ■ L'azione del mediatore cGMP . . . . .	157
14.4 ■ Caratteristiche elettrochimiche della visione spettrale . . . . .	161
Bibliografia . . . . .	162

## **15** OTTICA DELLA VISIONE CROMATICA . . . . . 163

15.1 ■ Premessa . . . . .	163
15.2 ■ Caratteri distintivi del colore . . . . .	164
15.3 ■ Composizione additiva. Legge di Grassmann . . . . .	165
15.4 ■ Curve di specificazione . . . . .	167
15.5 ■ Coefficienti tricromatici. Diagramma cromatico . . . . .	168
15.6 ■ Purezza e tinta di un colore . . . . .	171
15.7 ■ Le porpore. Colori complementari . . . . .	172
15.8 ■ Colore dei corpi . . . . .	174
15.9 ■ Spettrofotometro . . . . .	176
15.10 ■ Metodo sottrattivo di combinazione dei colori . . . . .	178
15.11 ■ Cenni sulle anomalie della visione cromatica . . . . .	181
Bibliografia . . . . .	186

## **16** LA VISIONE TRIDIMENSIONALE E LE ILLUSIONI OTTICHE . . . . . 187

16.1 ■ Tridimensionalità e senso della profondità . . . . .	187
16.2 ■ La visione prospettica . . . . .	189
16.3 ■ Le illusioni ottiche . . . . .	191
16.4 ■ Le immagini bistabili . . . . .	194
16.5 ■ Illusioni di colore e contrasto . . . . .	198
Bibliografia . . . . .	199

## **17** OTTICA DEGLI STRUMENTI OFTALMICI . . . . . 201

17.1 ■ Frontifocometro . . . . .	201
17.2 ■ Principio ottico di funzionamento del frontifocometro . . . . .	202
17.2 ■ Oftalmometro . . . . .	206
17.3 ■ Cheratoscopio – Disco di Placido . . . . .	212
17.4 ■ Topografo corneale . . . . .	213
17.5 ■ Raggiometro per lenti a contatto . . . . .	215
17.6 ■ Biomicroscopio . . . . .	217
17.7 ■ Strumenti accessori . . . . .	227
17.8 ■ Tonometro . . . . .	228
17.9 ■ Pachimetro . . . . .	229
17.10 ■ Oftalmoscopio . . . . .	233
17.11 ■ Schiascopio . . . . .	237
17.12 ■ Foroptero . . . . .	242
17.13 ■ Proiettore di test . . . . .	243
17.14 ■ Interpupillometro . . . . .	243
17.15 ■ Perimetro-Campimetro . . . . .	244
17.16 ■ Esoftalmometro . . . . .	246
17.17 ■ Tearscope . . . . .	247
17.18 ■ Aberrometro . . . . .	249
17.19 ■ Autorefrattometro . . . . .	253
Bibliografia . . . . .	254

---

<b>18</b>	<b>IL LASER E LE SUE APPLICAZIONI NELLA CHIRURGIA OFTALMICA</b> . . . . .	<b>257</b>
	18.1 ■ Cenni storici. MASER . . . . .	257
	18.2 ■ Effetto LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) . . . . .	258
	18.3 ■ Applicazioni LASER in medicina . . . . .	263
	18.4 ■ Applicazioni LASER in oftalmologia . . . . .	264
	Bibliografia . . . . .	268
	<b>INDICE ANALITICO</b> . . . . .	<b>269</b>

