



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

Università degli studi di Padova

Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei"

**Corso di Laurea Triennale in Ottica e Optometria**

TESI DI LAUREA

**L'AUTOREFRATTOMETRO: PRINCIPI E DESCRIZIONE IN  
TERMINI OTTICI**

Relatore: Prof. Michele Merano

Laureanda: Sofia Ferraro

Matricola: 1129885

Anno Accademico 2019/2020



## INDICE

Introduzione.....	pag. 3
Capitolo 1. Refrazione, refrattometria e autorefrattometro.....	pag. 4
1.1. L'esame della refrazione.....	pag. 4
1.2. La refrattometria.....	pag. 4
1.3. L'autorefrattometro: nascita e storia dello strumento.....	pag. 5
Capitolo 2. Il sistema ottico oculare e le ametropie.....	pag. 7
2.1. Il sistema ottico oculare e l'occhio schematico.....	pag. 7
2.2. Le ametropie e la loro compensazione oftalmica.....	pag. 9
Capitolo 3. Principi dell'autorefrattometro.....	pag. 12
3.1. Diplopia da doppio foro stenopeico (principio di Scheiner).....	pag. 12
3.2. Optometro di Porterfield.....	pag. 13
3.3. Analisi della qualità dell'immagine (lente di Badal).....	pag. 14
Capitolo 4. Analisi del funzionamento dell'autorefrattometro in termini ottici.....	pag. 17
4.1. Descrizione e funzionamento dell'autorefrattometro.....	pag.17
4.2. Analisi ottica dell'autorefrattometro: il 6600 Autorefractor.....	pag. 20
Conclusione.....	pag. 25
Bibliografia.....	pag. 26

## Introduzione

Nel mio elaborato di tesi ho deciso di affrontare questo argomento, in quanto sono sempre stata incuriosita dal fatto che uno strumento potesse ricavare, in maniera rapida e tutto sommato precisa, l'errore refrattivo di un soggetto. Un'altra tecnica utilizzata oggi è la retinoscopia. Sussiste però una differenza importante tra l'autorefrattometro e il retinoscopio, sebbene si basino sugli stessi principi ottici. Infatti, per utilizzare quest'ultimo è fondamentale la partecipazione dell'ottico-optometrista, il quale deve svolgere il lavoro "sporco". Ci vogliono anni di studio per riuscire a comprendere il funzionamento di base dello strumento e ricavare così l'errore di refrazione di un soggetto. Con l'autorefrattometro, invece, è necessario soltanto far accomodare il soggetto alla postazione e al massimo centrare lo strumento sulla pupilla. Dopo aver premuto un tasto, si otterranno le misurazioni in tempi brevissimi.

La tesi inizierà trattando in breve la refrazione e la pratica della refrattometria per riuscire a contestualizzare l'uso e la nascita dell'autorefrattometro. In seguito, verranno illustrati i principi ottici che stanno alla base del funzionamento. Lo scopo finale sarà quello di riuscire a comprendere come lo strumento è in grado di ricavare il potere refrattivo dell'occhio umano con un solo click, vincendo così tutti i problemi che si erano presentati nei refrattometri costruiti precedentemente.

## Capitolo 1. Refrazione, refrattometria e autorefrattometro

In questo capitolo verrà fatta un'introduzione generale riguardo la refrazione intesa come esame della qualità visiva. Questo sarà utile al fine di capire l'utilità dell'autorefrattometro e perché sta alla base della pratica optometrica. Inoltre, si comprenderanno le origini di questo strumento.

### 1.1. L'esame della refrazione

Con refrazione si intende la valutazione quantitativa, e in parte qualitativa, delle caratteristiche refrattive dei mezzi ottici oculari e della posizione dell'immagine sulla retina. <sup>(1)</sup> Le anomalie dei mezzi ottici oculari, infatti, possono alterare in modo significativo l'immagine che arriva alla retina. Tale termine viene inteso come esame dell'ottica oculare (*rifrazione* è invece il fenomeno fisico).

Esistono due tipi di tecniche per valutare la refrazione oculare, le tecniche oggettive e le tecniche soggettive. Le prime non richiedono una partecipazione attiva del paziente e si basano sulle valutazioni dell'esaminatore, cioè non si chiede al soggetto esaminato di dare risposte, valutazioni o stime. Esse rappresentano il miglior metodo per approssimarsi alla definizione di un problema refrattivo. Le tecniche soggettive, invece, richiedono la partecipazione del soggetto. Solitamente la valutazione soggettiva avviene dopo quella oggettiva, adattando i dati ottenuti alle sensazioni del soggetto e alle sue richieste visive. La valutazione soggettiva della correzione è assolutamente necessaria per due motivi: controllare l'efficacia ed effettuare gli adattamenti alla correzione oggettiva o per definire totalmente la correzione in base alle sensazioni del soggetto.

### 1.2. La refrattometria

La pratica della refrattometria è alla base delle analisi oggettive che è possibile eseguire ad un soggetto che necessita di un controllo optometrico. Negli anni, questo particolare processo ha subito molte evoluzioni grazie alle nuove tecnologie messe in atto e all'avanzamento dello studio nel campo dell'ottica. Il principio del funzionamento di base è quello di valutare oggettivamente la focalizzazione di una mira sul fondo oculare, osservandola attraverso la pupilla <sup>(1)</sup>. Questo tipo di analisi è compresa in quelli che sono i test oggettivi, in quanto considerano l'occhio umano come un sistema ottico e valutano errori di focalizzazione dell'immagine come aberrazioni, diffrazione e diffusione.

- **Aberrazione:** è una deviazione dell'immagine realmente ottenuta rispetto alle predizioni della teoria del primo ordine. L'aberrazione non è dovuta a difetti di costruzione delle lenti o degli specchi, ma è una semplice conseguenza delle leggi di rifrazione e riflessione su superfici non piane.
- **Diffrazione:** è un fenomeno in cui il carattere ondulatorio della luce prevale sulla descrizione dell'ottica geometrica. È tipica di ogni genere di onda, come le onde elettromagnetiche (luce). Gli effetti di diffrazione sono rilevanti quando la lunghezza d'onda è comparabile con la dimensione dell'ostacolo: in particolare, per la luce visibile (lunghezza d'onda attorno

a  $0,5 \mu\text{m}$ ), si hanno fenomeni di diffrazione quando essa interagisce con oggetti di dimensione sub-millimetrica.

- Diffusione (scattering): è un'ampia classe di fenomeni di interazione radiazione-materia in cui onde o particelle vengono deflesse, ovvero cambiano traiettoria, a causa della collisione con altre particelle o onde. La deflessione avviene in maniera disordinata e in buona misura casuale. Per questo la diffusione si distingue dalla riflessione e dalla rifrazione, che invece cambiano le traiettorie in maniera regolare e determinata dalla legge di Snell.

Tali errori rendono il sistema ottico oculare imperfetto: la diffrazione e la diffusione non possono essere corrette, in quanto non sono dipendenti da fattori fisiologici, come la curvatura corneale o l'inclinazione del cristallino. Questi errori sono dovuti alla luce che ha natura ondulatoria. Le aberrazioni derivano, invece, da una deviazione del fascio luminoso rispetto a quello prodotto da un sistema ottico ideale. Generalmente queste vengono divise in aberrazioni di basso (LOA) ed alto (HOA) ordine. Le prime possono essere corrette da lenti oftalmiche o lenti a contatto di opportuno potere. La compensazione delle seconde, invece, risulta molto più difficoltosa ed è tuttora oggetto di studi. L'esigenza di effettuare una refrattometria nasce originariamente per velocizzare i tempi di impiego sia dell'operatore e sia del soggetto e, nonostante la possibilità di errore dato da fattori che più in avanti verranno analizzati, rimane uno dei test più adatti, soprattutto in caso di individui facilmente stancabili o capaci solo di breve attenzione.

### **1.3. L'autorefrattometro: nascita e storia dello strumento**

L'autorefrattometro è uno strumento computerizzato attraverso il quale viene misurato oggettivamente il potere refrattivo dell'occhio. Esso offre un punto di partenza importante per la refrazione soggettiva quando gli specialisti della visione sono tenuti a svolgere un esame completo della vista entro un tempo relativamente breve. L'autorefrattometro è costituito fondamentalmente da una sorgente di luce ad infrarossi, una mira di fissazione e un sistema di lenti di Badal. Esistono diversi modelli di autorefrattometri, in quanto non tutti si basano sugli stessi principi ottici.

Gli autorefrattometri nascono a partire dal 1970 circa, in sostituzione ai refrattometri ottici tradizionali manuali, che in Italia non si sono mai diffusi. Questi strumenti avevano il compito di ricavare l'errore refrattivo dell'occhio umano, in presenza di miopia o ipermetropia, attraverso la focalizzazione di una mira sull'occhio. Tutto ciò era possibile grazie un sistema di lenti e principi ottici differenti a seconda dello strumento. Esistono due tipi di refrattometri: *soggettivi* e *oggettivi*, anche se oggi vengono utilizzati quasi unicamente quelli oggettivi.

- Soggettivi: sono strumenti in cui nell'utilizzo è fondamentale la partecipazione del soggetto in quanto è lui che deve riferire all'esaminatore quando la mira appare nitida per permettere di ricavare

l'errore refrattivo. I più importanti strumenti sono: il disco di Scheiner e l'optometro di Badal.

- Oggettivi: il soggetto deve partecipare soltanto passivamente all'esame visivo, focalizzandosi sulla mira, mentre l'esaminatore ricava i risultati. Un esempio di strumento oggettivo è il Topcon infrared objective optometer.

Nel periodo che va dal 1895 al 1920 gli strumenti erano solamente soggettivi. Quelli oggettivi iniziarono a svilupparsi successivamente utilizzando come riferimento questi. Infatti, molti erano i problemi legati all'utilizzo dei primi refrattometri manuali e soltanto riuscendo a risolverli e a perfezionare il loro funzionamento, ci fu uno sviluppo tecnologico. <sup>(2)</sup> Una svolta avvenne nel 1959, quando F.W. Campbell e J. G. Robson svilupparono il primo refrattometro che sfruttava una radiazione infrarossa e si basava sul principio del disco di Scheiner: il *Topcon infrared objective optometer*. <sup>(3)</sup> Questo fu il punto di partenza che permise di arrivare alla costruzione, intorno al 1970, del primo refrattometro oggettivo automatico: l'autorefrattometro moderno. Questi refrattometri rimangono comunque fondamentali in quanto i principi che li hanno caratterizzati, che analizzeremo nei capitoli successivi, vengono sfruttati ancora oggi.

Gli ultimi modelli di autorefrattometri moderni, che hanno subito sempre più migliorie e innovazioni, sono inoltre in grado di fornire misurazioni cheratometriche, visualizzando la mappatura corneale, e rilevare irregolarità corneali. L'autorefrattometro si può trovare sia in formato fisso che mobile, per cui può essere facilmente impiegato anche con i bambini e/o in situazioni più complesse, ad esempio, con pazienti con scarsa mobilità. Questo strumento è utile sia nella pratica clinica ordinaria che nell'attività di screening, poiché permette una rilevazione rapidissima dello stato refrattivo dell'occhio. Ogni risultato viene successivamente integrato e raffinato attraverso le diverse tecniche soggettive.



Fig. 1. Autorefrattometro

## Capitolo 2. Il sistema ottico oculare e gli errori di refrattivi

Prima di descrivere l'ottica dell'autorefrattometro, bisogna analizzare il sistema ottico dell'occhio umano, in modo tale da comprendere i principi di base, il funzionamento e le difficoltà che si sono incontrate inizialmente nella costruzione di questo strumento e degli strumenti che lo hanno preceduto.

### 2.1. Il sistema ottico oculare e l'occhio schematico

L'occhio si serve di un sistema ottico per creare un'immagine nel piano retinico. Questo è formato dalle seguenti strutture: film lacrimale, cornea, umore acqueo cristallino e umore vitreo. Esse complessivamente formano un sistema positivo di 60 D circa, in grado di creare sul piano della retina un'immagine capovolta e reale. Il fuoco del sistema ottico oculare si forma normalmente sul piano retinico nel soggetto *emmetrope*, ciò significa che un oggetto posto all'infinito forma un'immagine nitida sulla retina. Per comprendere questa definizione bisogna esplicitare che, in ottica, viene considerato *oggetto* quell'elemento da cui divergono o convergono i raggi incidenti sul sistema ottico e *immagine* quell'elemento da cui divergono o convergono i raggi trasmessi dal sistema ottico. Se invece il sistema non è in grado di formare un'immagine nitida sulla retina si verifica una condizione detta *ametropia*. Le ametropie, otticamente parlando, sono due: *miopia* e *ipermetropia*. L'occhio, inoltre, è in grado di mettere a fuoco oggetti posti a distanze diverse grazie al meccanismo dell'*accomodazione*, che è la capacità del cristallino di modificare il suo potere diottrico in modo da consentire la messa a fuoco sul piano retinico di oggetti posti a diverse distanze. L'occhio emmetrope, solitamente, è in grado di focalizzare sulla retina le immagini nitide di oggetti posti tra il punto remoto dell'occhio, cioè l'infinito, e il punto prossimo, cioè il punto più vicino di messa a fuoco che dipende dall'ampiezza accomodativa.

(1)(4)

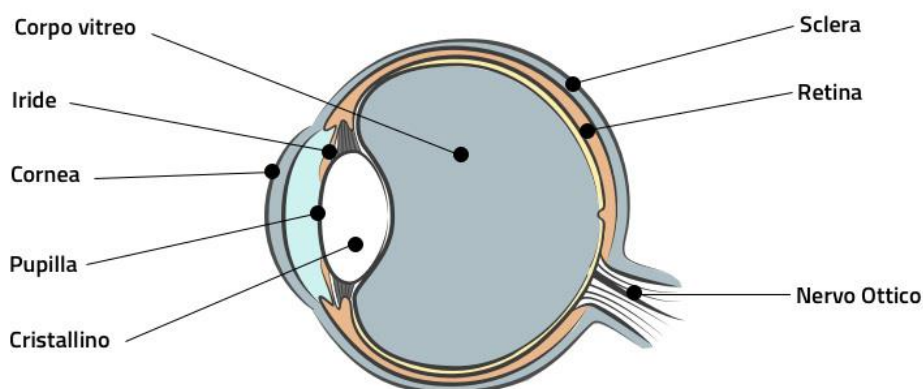


Fig. 2. Immagine del sistema ottico oculare.

Per discutere il funzionamento del sistema ottico oculare, in termini geometrici e oftalmici, è utile introdurre il modello schematico dell'occhio, cioè un occhio



“ideale” da prendere come riferimento per semplificare lo studio teorico dei vari fenomeni. In questo caso verrà utilizzato l'*occhio schematico ridotto di Emsley*, grazie al quale sarà possibile fare semplici calcoli di ottica geometrica, ad esempio, la stima delle dimensioni dell'immagine sulla retina oppure la posizione dei fuochi coniugati. Ogni sistema ottico centrato ha sei *punti cardinali*: punti focali F e F', punti principali P e P', punti nodali N e N'.

- Punti focali F e F': sono i punti focali anteriore e posteriore (oggetto e immagine) della lente. La luce che viaggia parallela all'asse ottico, proveniente dall'infinito, forma l'immagine su F', coincidente con la retina. L'*asse ottico* passa tra i centri di curvatura di cornea e cristallino e contiene tutti i punti cardinali. Non interseca la retina a livello della fovea, ma di norma a circa 1 mm nasalmente e superiormente rispetto ad essa. <sup>(5)</sup>
- Punti principali P e P': sono i punti di intersezione dei piani principali con l'asse ottico. I piani principali si trovano con opportune convenzioni geometriche. Le intersezioni si trovano sull'asse ottico. Per ogni oggetto posto in uno dei due punti principali si formerà un'immagine della stessa dimensione nell'altro punto principale (i punti principali nell'occhio schematico di Emsley coincidono con il vertice della cornea).
- Punti nodali N e N': sono quei punti con la caratteristica per cui un raggio passante per il punto nodale anteriore, ad un dato angolo dall'asse ottico, esce dal punto nodale posteriore con lo stesso angolo (raggi paralleli, non deviati). Nell'occhio schematico di Emsley i punti nodali sono coincidenti col centro di curvatura della cornea. <sup>(6)</sup>

L'occhio ridotto di Emsley è emmetrope e ha una sola superficie refrattiva, la cornea, dal potere P=+60 D. Per mantenere un potere simile all'occhio reale Emsley modificò delle misure anatomiche, ridusse il raggio di curvatura della cornea e la lunghezza assiale totale. Il vertice dell'occhio coincide con il punto principale e il centro di curvatura con il punto nodale. Altre caratteristiche principali dell'occhio schematico ridotto sono:

- Unico indice di rifrazione interno  $n=1,333$
- Lunghezza assiale di 22,22 mm
- La pupilla d'entrata si trova sul piano della superficie ridotta. <sup>(7)</sup>

Per calcolare le due focali dell'occhio ridotto usiamo la formula che lega P (potere), f (focale) e n (indice di rifrazione) di un diottro:

$$P=n/f$$

con f distanza focale cioè la distanza dal primo fuoco F al primo punto principale P (la distanza tra il secondo fuoco F' e il secondo punto principale P' è detta seconda distanza focale e si indica con f'). Quindi:

- Focale anteriore  $f=-16,67$  mm
- Focale posteriore  $f'=22,22$  mm <sup>(6)(8)</sup>

Per calcolare il raggio di curvatura corneale invece utilizziamo la formula:

$$r = (n' - n) / P$$

quindi:

- Raggio di curvatura corneale  $r = 5,55$  mm.

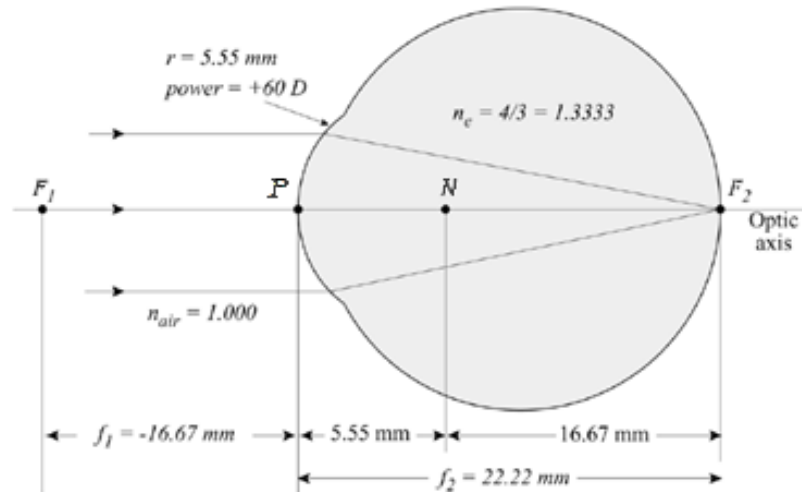


Fig.3. Occhio schematico ridotto di Emsley.

## 2.2. Le ametropie e la loro compensazione oftalmica

Come già visto, un sistema ottico con visione nitida all'infinito in riposo accomodativo, è detto emmetrope. Questa condizione è rappresentata dall'occhio schematico di Emsley. Quando, un sistema non è in grado di formare un'immagine nitida sulla retina, si verifica una condizione detta ametropia. Le ametropie possono essere *sferiche* o *astigmatiche*.

- Sferiche: lungo ogni meridiano abbiamo la stessa condizione refrattiva. Le ametropie sferiche sono *miopia* e *ipermetropia*. Possono essere, inoltre, refrattive o assiali: se l'occhio ha una lunghezza nella norma, si attribuisce l'errore ad un potere diottrico inadeguato (ametropia refrattiva), se l'occhio invece ha un potere diottrico nella norma, si attribuisce l'errore ad una lunghezza inadeguata del bulbo oculare (ametropia assiale).
- Astigmatiche: sono ametropie in cui un singolo punto oggetto non forma un punto immagine. In questa condizione refrattiva, chiamata *astigmatismo*, esistono variazioni di potere nei differenti meridiani dell'occhio.

### *Miopia*

La miopia è una condizione che si verifica quando l'immagine di un oggetto puntiforme, posto sull'asse ottico all'infinito, ad accomodazione rilassata, si forma prima del piano della retina. Tra i segni principali della miopia è presente ovviamente la difficoltà nel riconoscere oggetti lontani con adeguata chiarezza,

ma anche la tendenza a socchiudere gli occhi per rendere migliore la messa a fuoco.

### *Ipermetropia*

L'ipermetropia è una condizione che si verifica quando l'immagine di un oggetto puntiforme, posto sull'asse ottico all'infinito, ad accomodazione rilassata, si forma dopo il piano della retina. Il potere dell'occhio non accomodato è troppo debole rispetto alla lunghezza assiale e, se l'oggetto di sguardo non è all'infinito, l'immagine diventa ancora più sfuocata. Per poter essere rifratti sulla retina, i raggi incidenti sulla cornea devono arrivare già convergenti. Nei soggetti giovani con buona capacità accomodativa, non sono presenti sintomi, mentre negli altri compare l'astenopia, cioè affaticamento oculare.

### *Astigmatismo*

L'astigmatismo è una condizione che si verifica quando le superfici rifrattive non hanno la stessa curvatura lungo tutti i meridiani. C'è un potere diverso nelle diverse sezioni e la focalizzazione di un punto oggetto è distribuita in un intervallo spaziale. Per astigmatismi lievi la visione è pressoché normale, invece è ridotta negli astigmatismi elevati. Inoltre, essa non migliora ad una specifica distanza, gli oggetti sono percepiti distorti o allungati e, a lungo andare, provoca anche astenopia data dall'uso frequente dell'accomodazione.

### *Compensazione oftalmica delle ametropie*

La compensazione ottica delle ametropie avviene ponendo davanti all'occhio ametropo una lente correttiva di potere e posizione adeguati, tale da spostare sulla retina la posizione del fuoco immagine. Il potere della lente correttiva viene calcolato in modo che il suo fuoco immagine corrisponda con il punto remoto (PR) dell'occhio. Si noti che la distanza tra l'apice corneale e il punto remoto equivale alla differenza tra la focale della lente e la sua distanza dall'apice corneale (DAC). Pertanto, nel caso della lente *positiva*:

- Se essa è posta più vicino all'occhio è necessario che il suo potere sia aumentato
- Se essa è posta più lontano dall'occhio è necessario che il suo potere sia diminuito.

Nel caso della lente *negativa* accade il contrario. La relazione matematica che consente l'esatto calcolo di queste variazioni è la seguente:

$$P_L = A / (Ad - 1)$$

con  $P_L$  = potere della lente correttiva,  $A$  = valore dell'ametropia (in diottrie) e  $d$  = distanza apice corneale-lente (in metri).<sup>(9)</sup>

Per quanto riguarda la compensazione ottica in caso di miopia, per spostare il fuoco sulla retina è necessario modificare la vergenza dei raggi luminosi entranti, questi si divergono usando lenti negative.

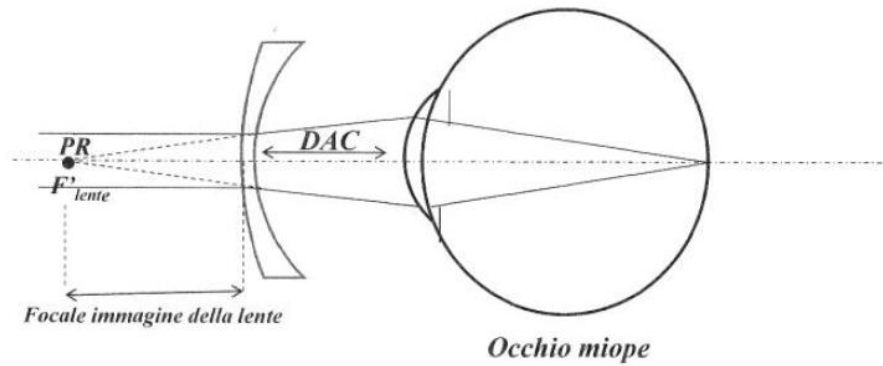


Fig. 4. Lente negativa che diverge i raggi provenienti dal punto remoto sulla retina.

Nel caso dell'ipermetropia per spostare il fuoco bisogna utilizzare una lente che faccia convergere i raggi provenienti dall'oggetto, si usa perciò una lente positiva.  
(10)

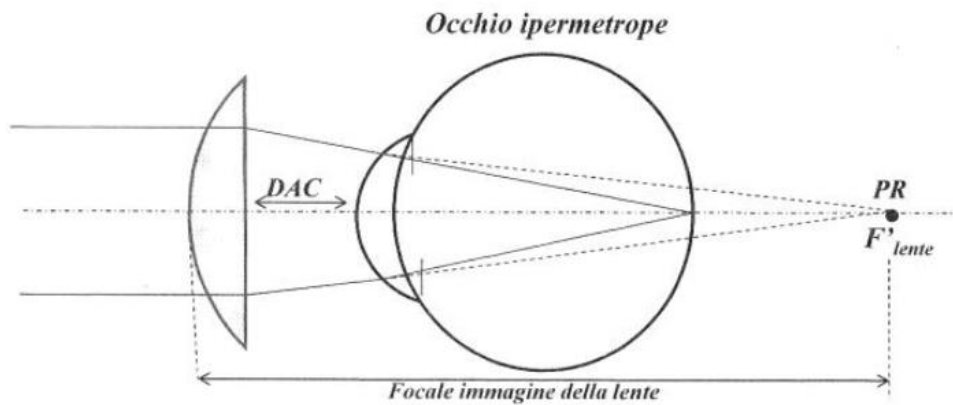


Fig. 5. Lente positiva che converge i raggi provenienti dal punto remoto sulla retina.

### Capitolo 3. Principi ed evoluzione dell'autorefrattometro

Nel seguente capitolo verranno descritti i principi ottici utilizzati nei primi refrattometri manuali fino a quelli automatici. Analizzeremo i principi fondamentali che sono: quello dell'analisi della qualità dell'immagine (lente di Badal) e quello della diplopia da doppio foro stenopeico (principio di Scheiner).

#### 3.1. Diplopia da doppio foro stenopeico (principio di Scheiner)

Nel 1619, Scheiner, fisico vissuto in Germania nel XVII secolo, scoprì che l'errore refrattivo dell'occhio può essere determinato grazie a un disco con un doppio foro stenopeico di diametro 1.2mm ciascuno, il *disco di Scheiner*. Si posiziona questo davanti all'occhio del soggetto in modo tale che i fori siano verticali, mentre l'altro occhio viene occluso, e si utilizza come mira una sorgente luminosa posta a distanza dal disco. Dopo aver attraversato il disco, si formano due fasci di luce paralleli. Il soggetto in caso di emmetropia dovrebbe percepire i fasci come un unico punto nella retina, grazie alla convergenza data dalla superficie oculare. Se invece è presente un'ametropia, si possono presentare due casi:

- In caso di miopia i due fasci si incrociano prima di raggiungere la retina. Perciò, il soggetto vedrà due piccoli punti di luce.
- In caso di ipermetropia i raggi si focalizzano dopo la retina. Di nuovo il soggetto vedrà due piccoli punti.

Per capire in quale caso ci troviamo, bisogna occludere uno dei due fori del disco. Occludendo quello posto in alto:

- se il soggetto è miope, continuerà a vedere il foro inferiore
- se il soggetto è ipermetrope, vedrà quello superiore.

Il valore dell'ametropia potrà essere misurato posizionando una lente sferica davanti all'occhio, dovranno essere fatte più prove con lenti di poteri diversi, fino a che il soggetto arrivi a vedere un singolo punto luminoso.

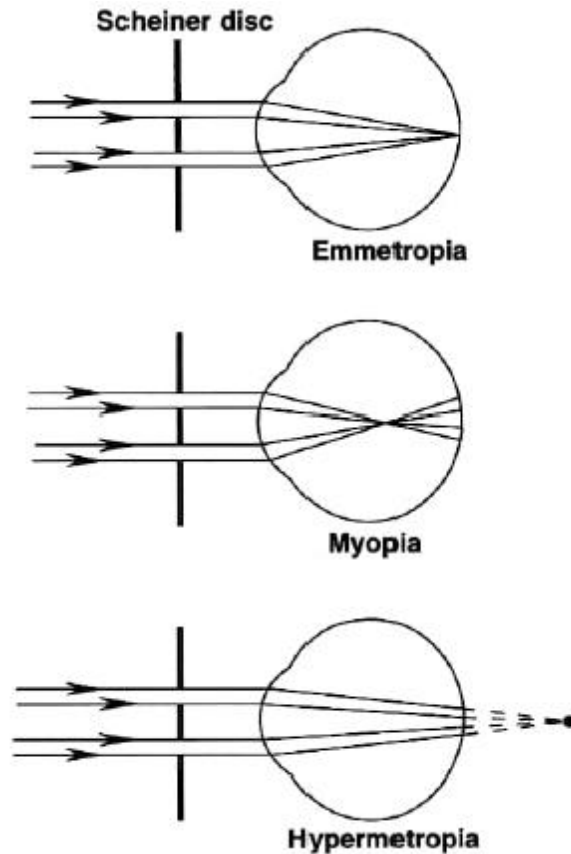


Fig. 6. Focalizzazione dei raggi, provenienti dalla sorgente, sulla retina con il dico di Scheiner.

### 3.2. Optometro di Porterfield

Un primo refrattometro manuale basato su questo principio fu costruito nel 1759 da W. Porterfield, un chirurgo oftalmico. Questo strumento utilizza una singola lente convergente con potere  $P=+10$  D posizionata alla distanza della propria lunghezza focale dall'occhio ( $f=n/P=1/+10=0.1\text{m}$ ). Inoltre, viene posizionata una mira dopo la lente, dalla parte opposta dell'occhio. I raggi provenienti dalla mira penetrano nell'occhio con vergenza ( $X$ ) differente a seconda della posizione della mira. Con *vergenza* si intende l'inverso della distanza che separa una sezione di un fascio di raggi luminosi dal loro fuoco (il potere della lente è la diottria, che è uguale a  $1/d$  e per definizione è la *vergenza*). Infatti:

$$X=n/d$$

con  $d$ =distanza mira-lente. Per ricavare la vergenza immagine  $X'$ :

$$X' = X + P$$

La vergenza  $X'$  rappresenta il potere della correzione ed è linearmente correlata allo spostamento del bersaglio. Viene realizzata così una scala graduata che mostra il numero di diottrie di correzione. Per ricavare l'errore di rifrazione, il soggetto sposta la mira, affinché la sua immagine diventi nitida: in caso di miopia il soggetto dovrà avvicinare la mira all'occhio, in caso di ipermetropia la dovrà allontanare. Questo è un esempio di refrattometro manuale soggettivo. <sup>(6)(3)</sup>

### 3.3. Analisi della qualità dell'immagine (lente di Badal)

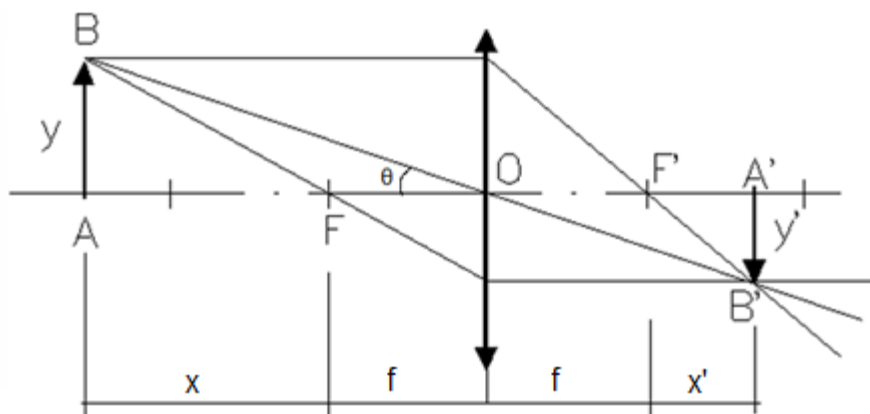


Fig. 7. Schema della formazione di un'immagine in coordinate Newtoniane.

Per discutere del principio dell'analisi della qualità dell'immagine, analizzeremo l'optometro di Badal (1876). Esso è composto da una lente positiva fissa, chiamata appunto lente di Badal, che rende l'immagine di una mira (M) a grandezza e scala costante, a differenza dell'optometro di Porterfield, precedentemente analizzato, in cui al variare della posizione della mira, cambia la vergenza dei raggi. Il principio di Badal dice che se l'occhio è coniugato con il secondo fuoco della lente di Badal, abbiamo che: la vergenza immagine della mira ( $X'$ ) è proporzionale alla distanza della mira dal primo fuoco della lente e che la dimensione angolare ( $\theta$ ) dell'immagine è indipendente dalla vergenza dei raggi. Dalla posizione della mira dipende dunque la misura. Il principio di funzionamento consiste nella variazione della distanza della mira fino al momento in cui l'immagine di essa viene a formarsi sul piano retinico e appare quindi nitida. La lente e la posizione dell'occhio rimangono invariati. Quindi un soggetto *emmetrope* percepirà nitidamente l'immagine della mira senza che avvengano spostamenti, in quanto è posta nel fuoco della lente di Badal.

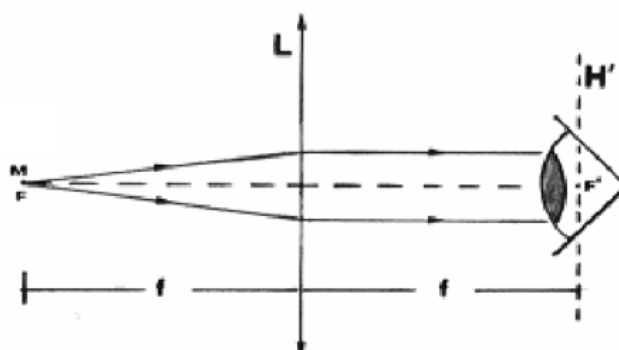


Fig. 8. Schema dell'optometro di Badal nell'occhio emmetrope. <sup>(11)</sup>

In caso di un soggetto miope, il punto remoto a distanza finita si focalizza davanti alla retina e per potere osservare la mira in modo nitido, il soggetto dovrà avvicinare la mira all'occhio.

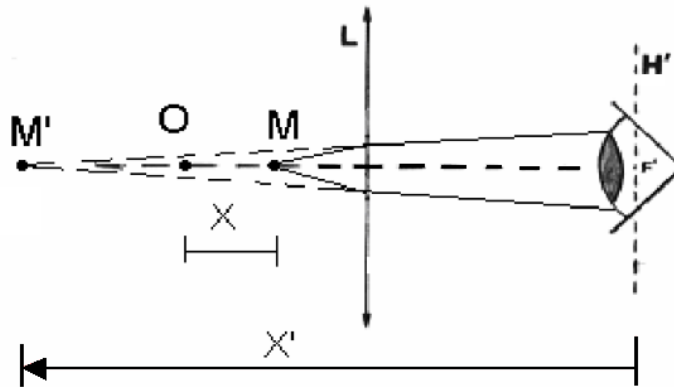


Fig. 9. Schema dell'optometro di Badal nell'occhio miope. (11)

In caso di un soggetto ipermetrope, il punto remoto a distanza finita è dietro alla retina e per potere osservare la mira nitida la si dovrà allontanare dall'occhio.

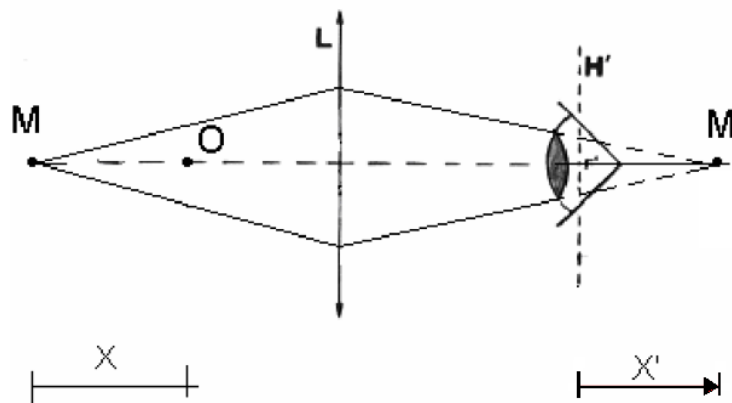


Fig. 10. Schema dell'optometro di Badal nell'occhio ipermetrope. (11)

Questo è dimostrabile attraverso l'equazione Newtoniana (nell'aria):

$$xx' = -1/F^2$$

con  $F$  = vergenza della lente di Badal e  $x$  e  $x'$  sono le distanze dell'oggetto e dell'immagine della mira, dai rispettivi punti focali. Quindi ricaviamo la vergenza dell'immagine:

$$X' = -x F^2$$

Questa equazione mostra che la vergenza dell'immagine  $X'$  è linearmente proporzionata alla distanza della mira dal fuoco della lente di Badal. Questa dimostrazione è importante in quanto ci permette di calibrare lo strumento in modo tale da ricavare l'errore refrattivo. Tutto ciò si può dimostrare anche in termini di diottrie:

$$xx' = f^2$$

con  $f$  = distanza focale della lente di Badal. Il piano  $H'$  rappresenta il piano principale dell'occhio che è posto a circa 1,5 mm dall'apice corneale. Esso è posizionato in



prossimità del fuoco immagine della lente e quindi è possibile affermare che la distanza  $x'$  rappresenta la distanza tra occhio ed immagine.

Sia nel caso in cui il soggetto sia miope che ipermetrope,  $x'$  indica la distanza del punto remoto. La formula di Newton può essere riscritta in termini di diottrie:

$$\frac{1}{x'} = \frac{x}{f^2}$$

Definendo il potere dell'occhio con  $P_O=1/x'$  e il potere della lente con  $P_L=1/f$ , espressi in diottrie, l'equazione diventa:

$$P_O = x P_L^2$$

Questa relazione ci conferma che la variazione del potere dell'occhio  $P_O$  sia legata in modo lineare allo spostamento della mira  $x$ .

Per quanto riguarda la *dimensione angolare* sappiamo che quella dell'immagine della mira, vista dal secondo punto focale della lente di Badal, non dipende dalla vergenza ed è:

$$\theta' = y'/x'$$

dove  $y'$  è la grandezza lineare dell'immagine. Grazie alla definizione di ingrandimento ( $y' = -x'yF$ ) possiamo dire che:

$$\theta' = -yF$$

Questa equazione (segno meno è trascurabile) conferma che la dimensione angolare  $\theta'$  dell'immagine è indipendente dalla posizione della mira. <sup>(12)(13)</sup>

## Capitolo 4. Analisi del funzionamento dell'autorefrattometro in termini ottici

In questo capitolo verrà descritto l'autorefrattometro, strumento che prese piede a partire dal 1970 circa, e il suo funzionamento. In particolare, verrà affrontato il funzionamento in termini ottici, grazie ai principi già discussi nel capitolo precedente. Questi principi, come già visto, ci consentono di capire il comportamento delle lenti e come avviene la focalizzazione delle immagini sulla retina.

### 4.1. Descrizione e funzionamento dell'autorefrattometro

Come abbiamo già visto, l'autorefrattometro è uno strumento computerizzato formato principalmente da una sorgente infrarossa, un sistema di lenti di Badal e una mira di fissazione, con il quale l'esaminatore deve valutare la focalizzazione della mira sul fondo oculare, osservandola attraverso la pupilla. <sup>(1)</sup> Lo strumento, per fare ciò, si basa su uno o più principi, che sono gli stessi dai primi modelli fino a quelli più recenti.

Oggigiorno i sistemi automatizzati sfruttano diverse tecnologie, ma la radiazione che viene utilizzata maggiormente è quella *infrarossa*, con lunghezza d'onda compresa tra i 780-950 nm <sup>(2)</sup>. Viene usata la radiazione infrarossa in quanto è invisibile all'occhio umano e quindi non vi è alcun effetto sul comfort del soggetto, sul diametro della pupilla e sull'accomodazione. Infatti, questa radiazione permette di evitare la miosi pupillare riflessa, che sarebbe inevitabilmente provocata da una radiazione visibile. I raggi infrarossi, inoltre, riescono ad attraversare la cornea e il cristallino, venendo così riflessi dal fondo oculare, in modo tale da essere utilizzati come fonte secondaria di radiazione elettromagnetica e non solo primaria. Infatti, analizzando il loro percorso e il loro comportamento, possiamo risalire al potere refrattivo dell'occhio. Gli autorefrattometri filtrano la luce infrarossa dal sistema di misurazione e rilevano il punto remoto mediante un rilevatore di messa a fuoco elettronico. L'uso delle radiazioni infrarosse richiede però una taratura particolare che tenga conto dell'aberrazione cromatica dei mezzi oculari. Infatti, la rifrazione dell'occhio ai raggi infrarossi differisce significativamente dalla rifrazione dell'occhio alla luce visibile. Questa differenza è di 0.50-1.50 D di ipermetropia in più con i raggi infrarossi, cioè il punto remoto è coniugato dietro alla retina. <sup>(14)</sup> I produttori, quindi, calibrano empiricamente gli strumenti per correlare i risultati clinici soggettivi considerando i valori medi, inducono così una misura errata in alcuni soggetti. <sup>(15)</sup> Gli autorefrattometri, inoltre, lavorano secondo due principi, che si basano sullo studio della radiazione infrarossa secondaria (riflessa dal fondo oculare):

- Nulling principle: l'autorefrattometro lavora neutralizzando il difetto refrattivo dell'occhio, fino a raggiungere il punto remoto.

- Open-loop principle (non-nulling): per trovare l'errore refrattivo l'autorefrattometro si basa sull'analisi della velocità di movimento del riflesso prodotto fondo oculare. <sup>(16)</sup>

Il bisogno di identificare gli assi dei principali meridiani in presenza di astigmatismo ha ostacolato la diffusione dell'uso dell'autorefrattometro fino al 1960, anno della scoperta della *refrazione per meridiani*. <sup>(16)</sup> Gli autorefrattometri moderni funzionano effettuando una misurazione per meridiani e la ripetono per varie sezioni fino a completare una sezione di 180°. Lo strumento deduce quindi i massimi e i minimi relativi alla refrazione in ogni meridiano valutato e li converte in una sferocilindrica (come quelle a cui un ottico è abituato), attraverso un'equazione matematica. Il potere in diottrie di un potere conosciuto (P) su un meridiano, posto ad un angolo  $\alpha$  dal suo asse, può essere calcolato con la formula:

$$P_{\alpha} = P \sin^2 \alpha$$

L'autorefrattometro quindi deve soltanto calcolare il potere in minimo tre meridiani, scelti per ottenere la sferocilindrica usando la funzione seno-quadrato. Le tre misurazioni della potenza nei tre rispettivi meridiani forniscono tre punti nel grafico della funzione seno-quadrato. Da qui si estrapola il resto della curva al fine di trovare i principali piani focali. <sup>(17)</sup>

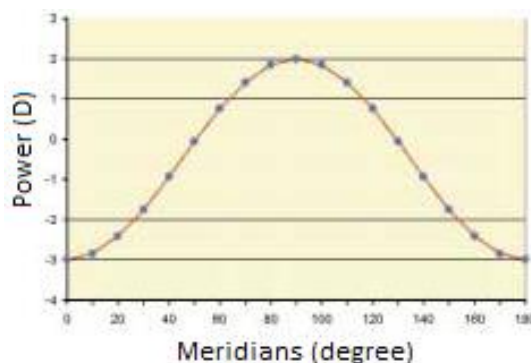


Fig.11. Grafico funzione seno-quadrato.

La necessità di scandire per meridiani il sistema dell'occhio, porta i progettisti, essenzialmente, a due strategie:

- Rendere numerose le scansioni
- Velocizzare la misurazione complessiva.

Nel primo caso, scansioni più fitte raccoglieranno dati in più sezioni vicine e ciò può permettere di approssimare maggiormente la corretta entità dell'astigmatismo. Nel secondo caso, le scansioni effettuate sono meno numerose e la misura si fa più rapida a discapito, però, della precisione. <sup>(1)</sup>

Un altro problema che non aveva permesso la diffusione dell'autorefrattometro prima degli anni '60, era collegato all'accomodazione. Infatti, lo strumento non è in grado di fare una distinzione tra l'occhio accomodato o meno.

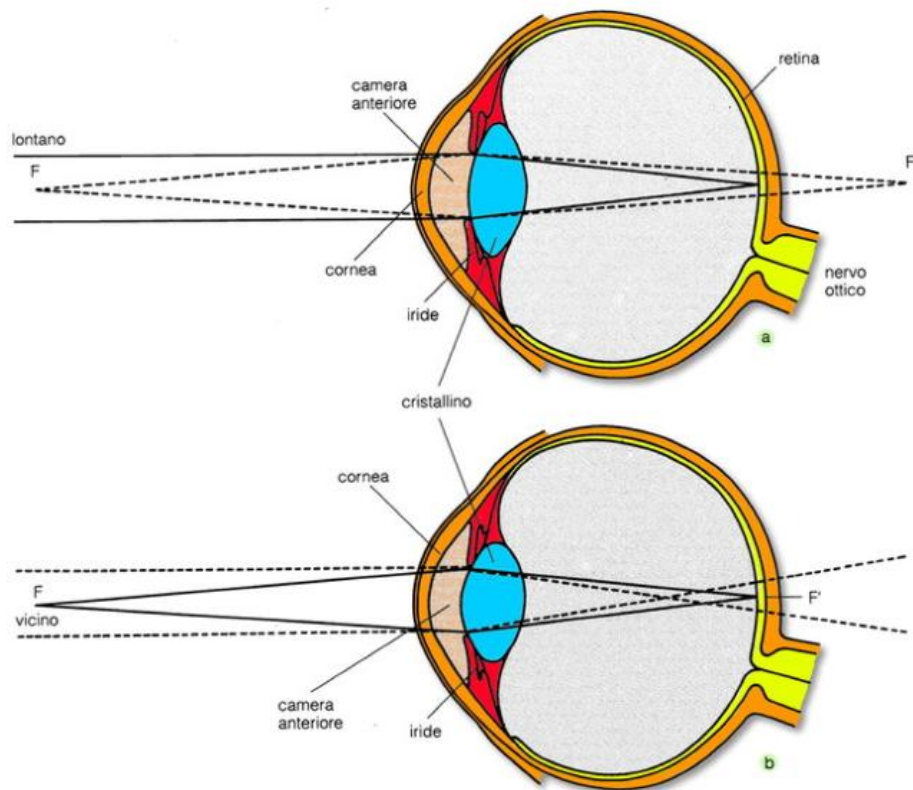


Fig. 12. L'accomodazione dell'occhio. (a) Occhio in riposo accomodativo, curvatura del cristallino minima. (b) Occhio in accomodazione per la visione da vicino, curvatura massima del cristallino.

Per ovviare a questo problema si utilizza la tecnica dell'*annebbiamento automatico*.<sup>(18)</sup> Prima della misurazione del potere refrattivo, la mira viene sfuocata, in modo tale da rilassare l'accomodazione del soggetto. Solitamente vengono utilizzate come mire di fissazione, delle fotografie colorate di scene all'aperto viste in lontananza, con un'immagine centrale. L'accomodazione, inoltre, risulta più rilassata se la mira ha una bassa frequenza spaziale e se il paziente identifica l'immagine come una scena familiare.



Fig. 13. Esempio di mira utilizzata nell'autorefrattometro.

L'autorefrattometro a mira interna è progettato per minimizzare il rischio di errore dovuto all'accomodazione prossimale. Il soggetto che guarda la mira all'interno dello strumento (che otticamente è posta all'infinito) è consapevole però che tale mira non è realmente all'infinito e attiva una quantità, seppur minima, di accomodazione che rende maggiormente negativi i valori sferici espressi dalla misura. <sup>(1)(19)</sup>.

Un altro problema da risolvere è quello dell'ottenimento di dati refrattivi più vicini possibile alla realtà. Questo diventa possibile utilizzando una mira esterna allo strumento, una cosiddetta *mira ambientale*. Purtroppo, il criterio ambientale non è applicato nella maggior parte dei sistemi in commercio. Un autorefrattometro ideale, infatti, dovrebbe permettere la refrazione binoculare simultanea durante l'osservazione in ambiente libero. Un sistema "ambientale" è ora prodotto: il soggetto guarda nell'ambiente attraverso uno specchio semitrasparente (misura monoculare). Un sistema simile evita l'effetto tubo e permette anche misure oggettive prossimali (per un dato di riferimento per la correzione da lettura) e altre misure in condizioni particolari (es. miopia notturna). Gli autorefrattometri sono concepiti per l'uso da parte di personale non specializzato, solitamente è sufficiente posizionare alcuni riferimenti per ottenere la misura. <sup>(1)</sup>

Un sistema automatizzato per la refrazione dà un valore di refrazione oggettiva (analogo a quello della schiascopia) e non la correzione finale. Nonostante gli autorefrattometri attuali abbiano sistemi che danno una misura molto vicina a quella del vero errore di refrazione dell'occhio, è buona regola verificare con test soggettivi nel quadro dell'esame completo. Utilizzando un autorefrattometro di qualità si ha il vantaggio di risparmiare tempo, in quanto la lente montata sull'occhiale di prova o sul forottero sarà già quella giusta per correggere in modo perfetto l'occhio del soggetto. Per ottenere la massima velocizzazione della visita oggi sono utilizzabili i sistemi connessi: autorefrattometro, ottotipo e forottero automatico. Una simile soluzione può essere di interesse nello screening, mentre per un controllo visivo accurato si preferisce ricorrere comunque ai metodi ambientali, in cui le condizioni visive d'esame si discostino il meno possibile da quelle reali. <sup>(1)</sup>

Inoltre, negli strumenti più recenti, il software dello strumento permette varie funzioni accessorie quali la misurazione della distanza interpupillare, la valutazione della trasparenza dei mezzi diottrici, la valutazione di lenti intraoculari in situ (IOL) e l'identificazione di edemi corneali indotti da lenti a contatto. <sup>(19)</sup>.

#### **4.2. Analisi ottica dell'autorefrattometro**

Per capire come viene ricavato l'errore refrattivo dell'occhio, analizzerò l'ottica del secondo autorefrattometro entrato in commercio nel 1969: il 6600 Autorefractor. Comprendere il funzionamento di questo refrattometro automatizzato è importante in quanto, ancora oggi, viene utilizzato come riferimento. Infatti, le migliorie che sono state apportate a questo modello hanno permesso la costruzione di strumenti sempre più precisi e affidabili, in grado di sostenere le esigenze sempre più elevate dei professionisti della visione.

## 6600 Autorefractor

Questo strumento utilizza i principi base dell'autorefrattometro: il disco di Scheiner e il principio delle lenti di Badal. Due piccole sorgenti  $S_1$  e  $S_2$ , sono riflesse nella pupilla del soggetto come  $S'_1$  e  $S'_2$ . La mira è un'apertura circolare, la quale, in caso di emmetropia, dovrebbe posizionarsi nel primo punto focale  $F_2$  della lente  $L_2$ . Questa lente  $L_2$  funziona come lente dell'optometro di Badal. Con un potere equivalente di +10 D, ogni movimento della mira di 10 mm, rappresenta 1 D di ametropia, che può essere vista grazie all'equazione ricavata nel capitolo precedente:  $X' = -xF^2$ . ( $F = +10$  D,  $x = 10$  mm  $\rightarrow$  0.01 m;  $X' = 100$  (1/m<sup>2</sup>)  $\times$  0.01 (m) = 1 D) Il range di misurazione va da +15,75 D fino a -8,25 D, quest'ultimo è limitato quando la mira incontra la lente  $L_2$ .

Le luci provenienti dalle sorgenti  $S_1$  e  $S_2$  vengono accese e spente alternativamente e rapidamente in modo che, se il bersaglio si trova sull'impostazione zero su  $F_2$ , la retina sarà illuminata da una o due punti di luce, alternati a seconda dell'assenza o della presenza di ametropia.

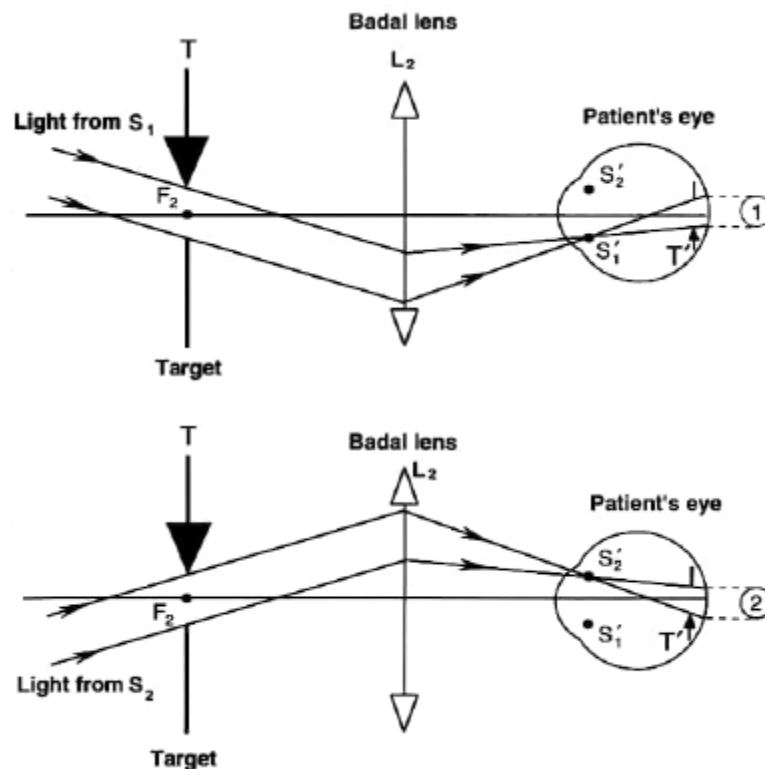


Fig. 14. Schema del funzionamento della lente di Badal in caso di Miopia. <sup>(3)</sup>

Tutta la luce che passa attraverso l'apertura della mira, deve passare attraverso la sua immagine  $T'$ , che sarà di fronte alla retina in un occhio miope, quando  $T$  si trova nel primo punto focale della lente di Badal  $L_2$ . Pertanto, i due cerchi di luce formati da  $S_1$  e  $S_2$  nella retina, in caso di miopia e ipermetropia, saranno come in figura:

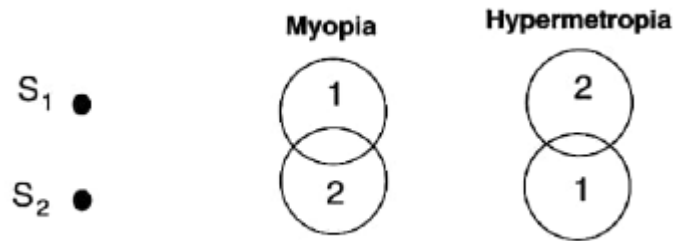


Fig. 15. Come si presentano i cerchi luminosi formati nella retina quando  $S_1$  e  $S_2$  vengono illuminati alternativamente e la mira T si trova nel primo punto focale  $F_2$  della lente di Badal  $L_2$ .<sup>(3)</sup>

Se la mira T viene spostata fino a quando la sua immagine non si trova sulla retina, i cerchi di luce riflessi sulla retina, si fonderanno in uno e la posizione di T determinerà quindi l'ametropia.

Lo strumento deve essere in grado di rilevare ciò che accade sulla retina per spostare il bersaglio in quella posizione, al fine di produrre un singolo cerchio di luce sulla retina. La luce riflessa dalla retina colpisce un *beam-splitting cube* (BSC) (un dispositivo ottico, costituito da due prismi triangolari incollati alla loro base, che divide un raggio di luce, *beam*, in due parti) che, a sua volta, la riflette su uno specchio, la cui immagine arriva alla lente  $L_4$  attraverso la lente  $L_3$ .

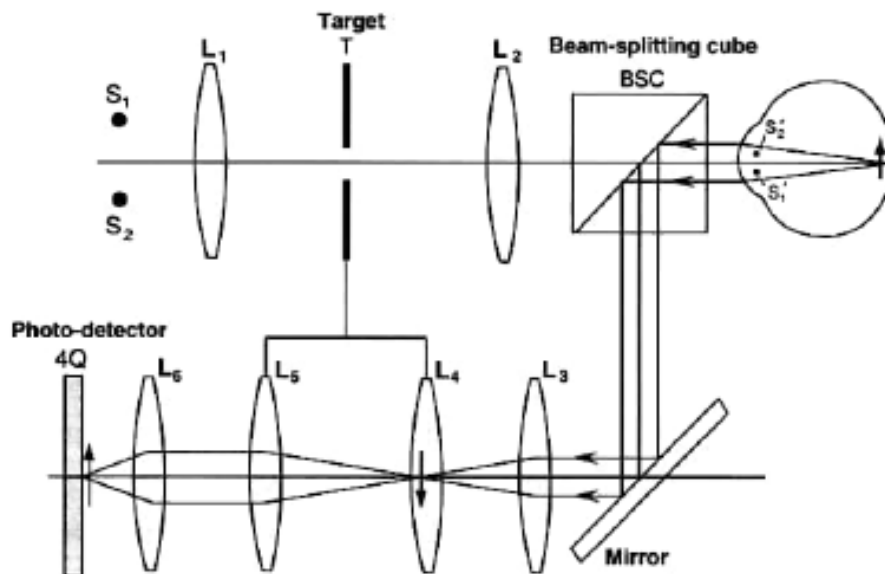


Fig. 16. Sistema di misurazione del 6600 Auto-refractor.<sup>(3)</sup>

Si noti che il movimento delle lenti 4 e 5 è orientato dal movimento della mira. La luce passa attraverso le lenti  $L_5$  e  $L_6$  ed è focalizzata su un fotorilevatore a quattro quadranti (4Q).

Quando l'immagine della mira,  $T'$ , è sulla retina non ci sarà alcun movimento dell'immagine coniugata su 4Q, poiché i due cerchi di luce coincideranno. Se però la mira non è focalizzata nella retina, il fotorilevatore 4Q sperimenterà un'immagine sfuocata quando le sorgenti  $S_1$  e  $S_2$  si alternano.

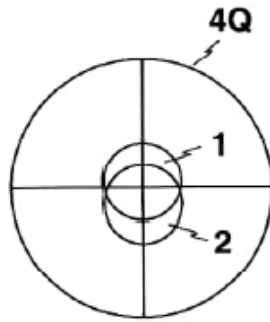


Fig. 17. Il fotorelevatore 4Q e l'immagine dei cerchi di luce retinici 1 e 2. <sup>(3)</sup>

Quando i cerchi luminosi si sovrappongono, nel fotorelevatore viene registrato un segnale nullo, in caso contrario, nei quadranti, essi generano diversi segnali.

L'errore del segnale, cioè la differenza tra i segnali provenienti da  $S_1$  e  $S_2$ , può essere positivo o negativo. Se il segnale è positivo, guida la mira in una direzione, mentre quando se negativo la guida nella direzione opposta. Quando i due cerchi luminosi si sovrappongono sul fotorelevatore 4Q, la mira si ferma e viene registrato il valore dell'ametropia. Questo in caso di ametropia sferica.

L'autorefrattometro ha altre due sorgenti di luce  $S_3$  e  $S_4$ , che stanno sul meridiano a  $90^\circ$  rispetto a quello che attraversa le sorgenti  $S_1$  e  $S_2$ . Nel fotorelevatore il segnale si annulla quando  $S_3$  e  $S_4$  giacciono lungo l'asse del cilindro. La rotazione del fotorelevatore e il movimento della mira si fermano simultaneamente quando le immagini dei cerchi luminosi formati dalle sorgenti 3 e 4 giacciono in modo simmetrico sulla linea che separa le due metà del rilevatore, e quando le immagini delle sorgenti 1 e 2 sono sovrapposte.

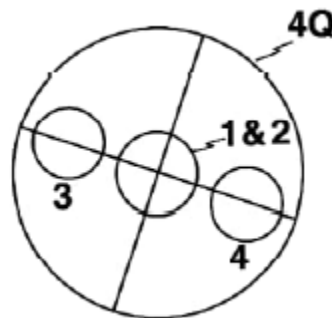


Fig. 18. Per determinare il meridiano principale vengono utilizzate due sorgenti  $S_3$  e  $S_4$ . Nel rilevatore 4Q, vengono viste come cerchi luminosi. Si verifica un segnale nullo quando le luci giacciono lungo l'asse del cilindro. <sup>(3)</sup>

La distanza tra i cerchi luminosi formati dall'immagine di  $S_3$  e  $S_4$  sul fotorelevatore mi darà il valore dell'errore, che sarà proporzionale al valore del potere cilindrico. Affinché ciò funzioni, la mira immagine  $T'$  deve essere di dimensioni costanti, questa è la ragione per cui si utilizza il principio dell'optometro di Badal.

Per concludere possiamo dire che il sistema di lenti da Badal è fondamentale per il funzionamento dell'autorefrattometro in quanto ha due vantaggi: c'è una relazione lineare tra la distanza delle lenti di Badal e il potere refrattivo



dell'occhio, e in secondo luogo, l'ingrandimento della mira rimane costante indipendentemente dalla posizione delle lenti di Badal (come analizzato nel capitolo 3).

Le sorgenti utilizzate in questo strumento sono radiazioni infrarosse che operano a una lunghezza d'onda di 935 nm, per non influenzare l'accomodazione del soggetto. La misurazione viene effettuata in 2 sec, in modo tale da ridurre i movimenti oculari del soggetto, la scarsa fissazione e i cambiamenti nell'accomodazione. Il 79% dei risultati ottenuti in un paziente normale hanno un errore  $\pm 1.00$  D rispetto al potere effettivo (Pappas 1978).<sup>(3)</sup>

## Conclusione

Abbiamo visto come funziona e su che principi si basa l'autorefrattometro, in modo tale da capire i suoi pregi e i suoi difetti e quindi in che circostanze ci è utile questo strumento. Il pregio principale di questi sistemi è la rapidità: una singola misurazione richiede una frazione di secondo e ciò permette di eseguire diverse rilevazioni e ottenere un risultato di media. Ciò è utile per soggetti facilmente stancabili o capaci solo di breve attenzione. Gli autorefrattometri sono d'aiuto nelle anomalie di refrazione elevate, quando l'indagine schiascopica diviene difficoltosa e faticosa da sostenere da parte sia del paziente che dell'esaminatore. L'attendibilità delle misurazioni, dubbia per i primi modelli, è ora buona. L'autorefrattometro però può dare ancora errori, anche se limitati, in caso di:

- Astigmatismi elevati
- Riflessioni anomale dei mezzi oculari o delle lenti presenti
- Bias (pregiudizio) della misurazione a causa dell'effetto tubo (o miopia strumentale) che dà maggiore miopia e minore ipermetropia, alterando però il solo valore sferico.
- Errori di taratura, in relazione alla singola condizione del soggetto, dovuti all'uso della radiazione infrarossa che danno differenze sia sulla sfera che sul cilindro, molto meno sull'asse.

Per evitare scelte correttive errate è necessario quindi analizzare la refrazione oggettiva inserendola nell'insieme dell'esame completo, cioè comparandola agli altri risultati tra cui acuità e refrazione soggettiva. <sup>(1)(20)</sup>

## Bibliografia

- (1) Rossetti A., Gheller P.; Manuale di optometria e contattologia; Zanichelli; Bologna; 2003; pp.262
- (2) <https://www.slideshare.net/DrSamarthMishra/autorefractometry-principle-and-procedure>
- (3) Tunnaclyffe A. H., A.G. Hirst; Optics; Association of British Dispensing Opticians; 1981; pp. 273-274, 248-249 & 274-276
- (4) Bucci M. G.; Oftalmologia; SEU; Roma; 1993
- (5) Lucarini G.; Oftalmologia; argomenti di diottrica oculare;2013; 3; 56-57; Tratto da: <https://www.libreriauniverso.argomenti di diottrica oculare.it> pdf
- (6) Ortolan D.; Dispense di Ottica Oftalmica e Visuale; Università degli Studi di Padova; anno accademico 2016
- (7) Villani S.; Ottica oftalmica: i difetti dell'occhio corretti con le lenti; Istituto politecnico centro studi in ottica e optometria "Vasco Ronchi"; Geo edizioni, la biblioteca scientifica; 2005; pp. 94-98
- (8) Atchinson D. A.; Smith G.; Optics of the Human Eye; Butterworth-Heinemann; Bath, Gran Bretagna; 2000; pp. 45
- (9) Vergellini F., Dispense di Ottica oftalmica, Istituto Zaccagnini; anno accademico 2016
- (10) Sears F. W.; Ottica; Casa Editrice Ambrosiana; Milano; 1982; pp. 137 & 141
- (11) <https://studylibit.com/doc/5321991/funzionamento-optometro-badal>
- (12) [http://schorlab.berkeley.edu/passpro/oculomotor/html/chapter\\_18.html](http://schorlab.berkeley.edu/passpro/oculomotor/html/chapter_18.html)
- (13) Tunnaclyffe A. H.; Introduction to Visual Optics; ABDO College of Education; 1993; pp. 577-579
- (14) A. R. Elkingston, H. J. Frank, M. J. Greaney; Clinical optics; Blackwell Publishing; 1999; pp. 250-252
- (15) Charman W. N., Herron G., Fluctuations in accommodation: a review; Ophthal. Physiol.; 1988; Opt. 8; pp. 153-164
- (16) Benjamin W. J.; Borish's clinical refraction; Butterworth-Heinemann-Elsevier; 2006
- (17) <http://www.oculistanet.it/ottica-fisiop/ottica-fisiop-8.htm>
- (18) Trusit D.; Automated refraction: design and applications; Optometry today; 2004; pp. 28-32
- (19) A. Ravasi A. e Maffioletti S.; Strumenti ottici in evoluzione; Il mondo dell'ottica n.39; Università degli Studi di Milano Bicocca; pp. 40-45

(20) Yanoff M., Duker J. S.; Ophthalmology; Saunders; 2013