

Ottica della Contattologia I

L'Aberrometria

Dr. Fabrizio Zeri
zeri@fis.uniroma3.it

La aberrazioni

Le "deviazioni" dall'ottica Gaussiana (basata sull'approssimazione parassiale: $\sin(\theta) \approx \theta$) per cui un punto oggetto viene riprodotto in un punto immagine sono dette aberrazioni ottiche.

Il seno può essere descritto con lo sviluppo in serie di Taylor: $\sin(\theta) = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \dots$

Si dividono in:

- **aberrazione cromatica** (si verifica anche nella regione parassiale)
- **aberrazioni monocromatiche** (si verificano fuori la regione parassiale)
Aberrazioni che stuccano e diminuiscono il contrasto (astigmatismo, sferica, coma)
Aberrazioni che deformano le immagini (distorsione e curvatura di campo di Petzval)

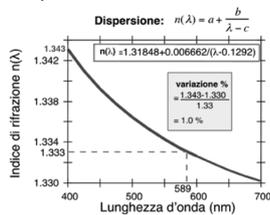
Queste 7 aberrazioni (sferica, coma, astigmatismo, distorsione e curvatura di campo + le 2 cromatiche) sono anche dette aberrazioni di Seidel, perché Ludwig Seidel è stato il primo a studiarle (1856).

Lac.12012/2013

F.Zeri

L'aberrazione cromatica

E' causata dalla dispersione: poiché l'indice di rifrazione varia a seconda della lunghezza d'onda le immagini vengono formate in posizioni e con dimensioni diverse a seconda della loro composizione spettrale.

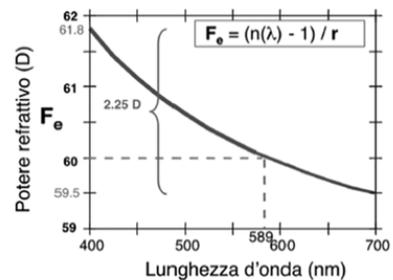


Variazione dell'indice di rifrazione dell'acqua (1%) nello spettro del visibile. (Thibos e Calossi, 2012)

Lac.12012/2013

F.Zeri

L'aberrazione cromatica



Aberrazione cromatica longitudinale in un occhio ridotto (Thibos e Calossi, 2012)

Lac.12012/2013

F.Zeri

L'aberrazione cromatica

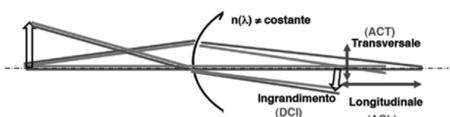
E' causata dalla dispersione: poiché l'indice di rifrazione varia a seconda della lunghezza d'onda le immagini vengono formate in posizione e con dimensioni diverse a seconda della loro composizione Spettrale.

Aberrazione cromatica longitudinale o assiale:

Radiazioni ottiche di diversa lunghezza d'onda sono focalizzate a distanze diverse.

Aberrazione cromatica trasversale o laterale:

Radiazioni ottiche di diversa lunghezza d'onda sono focalizzate in posizioni diverse sul piano focale.

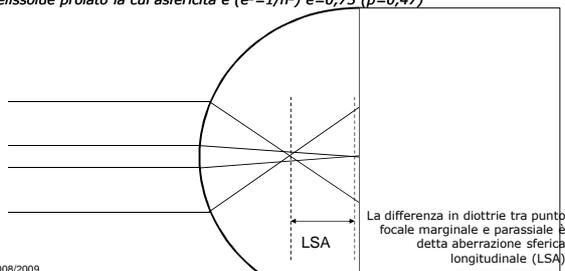


Lac I 2012/2013

F.Zeri

La aberrazioni monocromatiche

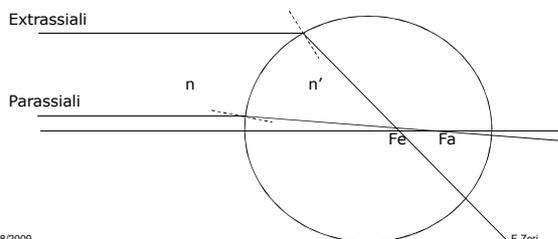
L'aberrazione sferica L'aberrazione sferica è un'aberrazione simmetrica che consiste nel fatto che i raggi passanti nella zona pupillare parassiale vengono messi a fuoco ad una distanza diversa da quelli provenienti dalla pupilla marginale (extrassiali). Una superficie ottica che separa due mezzi omogenei avrà aberrazione sferica nulla quando la sua forma è uguale all'ovale di Cartesio che corrisponde ad un'ellissoide prolato la cui asfericità è $(e^2 = 1/n^2)$ $e = 0,73$ ($p = 0,47$)



Lac I 2008/2009

La aberrazioni monocromatiche

L'aberrazione sferica Per convenzione l'aberrazione sferica è considerata positiva quando i raggi passanti nella zona pupillare parassiale cadranno dopo di quelli provenienti dalla pupilla marginale (extrassiali). L'aberrazione sferica si verifica quando un fascio di luce colpisce una superficie rifrangente appunto sferica. Visto che l'angolo d'incidenza dei raggi di luce è diverso per punti della superficie parassiali o extrassiali anche l'angolo di rifrazione sarà diverso (sen i: sen r = n': n).



Lac I 2008/2009

F.Zeri

La aberrazioni monocromatiche

L'aberrazione di coma. E' un'aberrazione off-axis che interessa sistemi ottici simmetrici da un punto di vista rotazionale. L'immagine di un punto luminoso posto appena fuori dall'asse di una lente ha un aspetto che richiama quello di una cometa, con un nucleo centrale, dove si concentra la maggiore quantità di energia luminosa, ed una coda di sfuocamento laterale.

Aberrazione di coma visibile nell'immagine di un punto fuori asse in un sistema privo di altre aberrazioni. (da Atchison e Smith, 2000)

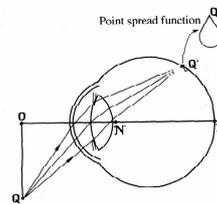


Figure 15.9. The retinal image of a point object produced by coma.

Lac I 2008/2009

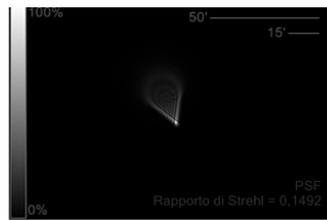
F.Zeri

La aberrazioni monocromatiche

L'aberrazione di coma.

Può anche essere causata, per punti oggetto posti sull'asse ottico, da una perdita di simmetria rispetto all'asse di riferimento.

La distribuzione di luce nell'immagine non è uniforme ma è massima al punto estremo finale.

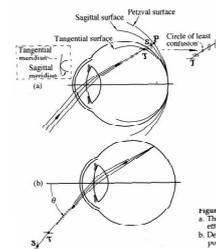


Lac.1 2008/2009

F.Zeri

La aberrazioni monocromatiche

L'astigmatismo: *E' la differenza di vergenza fra i raggi provenienti da diversi piani di un punto posto fuori dall'asse, per un sistema otticamente simmetrico intorno all'asse di riferimento (astigmatismo da incidenza obliqua o di Seidel), o anche per punti posti sull'asse ottico che incontrano un sistema privo di simmetria ottica rotazionale (caratterizzato da superfici toriche). L'immagine creata da una condizione di astigmatismo è asimmetrica intorno all'asse ottico.*



(da Atchison e Smith, 2000)

Figure 15.6 on Sagittal, tangential and field curvature errors and their effect on the point spread function.
a. The sagittal, tangential and field curvature errors and their effect on the point spread function.
b. Determining the magnitude of the sagittal and tangential power errors in object space.

Lac.1 2008/2009

F.Zeri

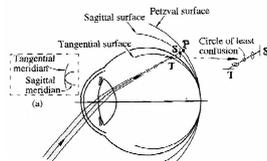
La aberrazioni monocromatiche

La curvatura di campo: *E' un'altra aberrazione off-axis. E' l'effetto per cui con un'apertura ampia è possibile ottenere un'immagine nitida solo su un piano immagine curvo (la superficie di Petzval che è dietro la retina). Per un punto oggetto si ha un punto immagine, ma non sul piano previsto dall'ottica parassiale (piano immagine Gaussiano)*

Un oggetto perpendicolare all'asse ottico viene focalizzato su una superficie piana solo nella regione parassiale.

Questa aberrazione è chiamata anche curvatura di campo di Petzval.

Può essere considerata come un semplice defocus che aumenta con la distanza dalla fovea.



(da Atchison e Smith, 2000)

Lac.1 2008/2009

F.Zeri

La aberrazioni monocromatiche

La distorsione: *E' un'altra aberrazione off-axis. E' simile alla curvatura di campo nel senso che per un punto oggetto si ha un punto immagine, anche nel piano immagine gaussiano, ma in una posizione diversa (più lontano, positiva, o più vicino dell'asse ottico, negativa)*

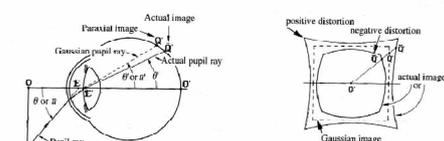


Figure 15.13. Pupil ray angles and distortion.

Figure 15.14. The effect of distortion on the image of a square centred on the optical axis.

(da Atchison e Smith, 2000)

Lac.1 2008/2009

F.Zeri

Come rappresentare le aberrazioni

Aberrazione d'onda:
rispetto ad un fronte
d'onda ideale.

Aberrazione Trasversale:
rispetto ad un raggio ideale
sul piano immagine

Aberrazione longitudinale:
rispetto all'intersezione di
un raggio con il raggio di
riferimento (errore di
vergenza)

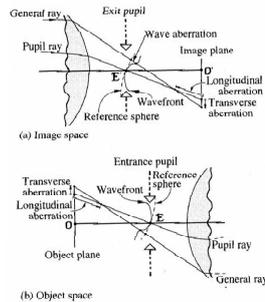


Figure 15.3. Wave, transverse and longitudinal aberrations:
a. For a general optical system.
b. For the eye, when these must be determined in object space.
Note that longitudinal aberration occurs for a ray only

Lac I 2008/2009

Come rappresentare le aberrazioni

Aberrazione d'onda:
differenza di distanza ottica
($OEE'O'$)-(OBO')

Aberrazione Trasversale:
 OH'

Aberrazione longitudinale:
 $O'G=\delta l'$

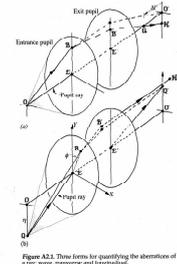


Figure A2.1. Three items for quantifying the aberrations of a ray: wave, transverse and longitudinal.

(da Atchison e Smith, 2000)

Lac I 2008/2009

F. Zeri

L'Aberrometria: come misurare le aberrazioni

PASSATO: le imperfezioni ottiche dell'occhio erano viste come semplici errori di refrazione: defocus, astigmatismo, difetti prismatici.

Si studiavano inoltre solo in ambito teorico altre imperfezioni ottiche: le aberrazioni (di coma, sferica, ast obliquo...)

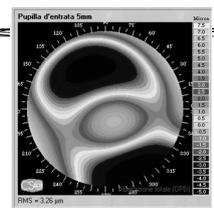
Perché solo teoricamente ???

Lac I 2008/2009

F. Zeri

L'Aberrometria

Perché queste aberrazioni di ordine superiore non erano misurabili clinicamente nell'occhio umano e neanche correggibili!



OGGI: le aberrazioni di una superficie ottica o di un sistema ottico complesso possono essere misurate e visualizzate per esempio attraverso una mappa bidimensionale del piano pupillare che esprime i valori di OPD (mappa aberrometrica)

L'Aberrometria Totale

è la valutazione dell'errore ottico di un sistema rispetto ad una superficie focale.

Dipende da:

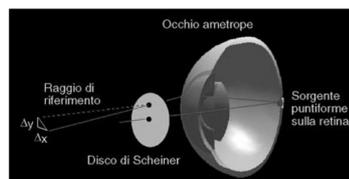
- 1) Superficie corneale e lenticolare
- 2) Indice di rifrazione dei diversi mezzi diottrici
- 3) Posizione Fovea
- 4) Grandezza della pupilla

L'aberrazione corneale è solo una componente dell'aberrazione totale

L'Aberrometria Totale

Essendo un sistema ottico chiuso non è possibile misurare le aberrazioni all'interno dell'occhio (nello spazio immagine) ma nello spazio oggetto.

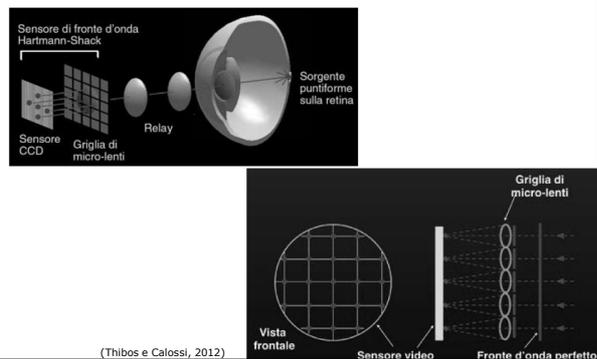
La tecnica oggettiva più diffusa per la misura clinica delle aberrazioni oculari totali è il sensore di fronte d'onda di Shack-Hartmann (che deriva concettualmente dall'Optometro di Scheiner, 619)



(Thibos e Calossi, 2012)

L'Aberrometria Totale

sensore di fronte d'onda di Shack-Hartmann



(Thibos e Calossi, 2012)

L'Aberrometria Corneale

Perché l'aberrometria corneale, pur essendo solo una componente dell'aberrometria totale è così considerata?

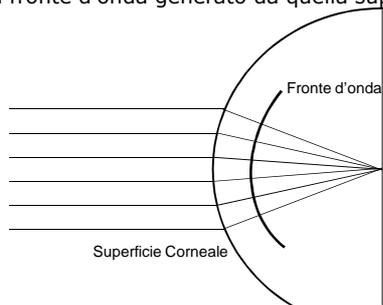
- 1) E' una componente maggioritaria
- 2) E' stabile
- 3) E' facilmente misurabile
- 4) Le aberrazioni corneali sono le dominanti fino ad una certa età (40/50 anni) e soprattutto sono quelle dominanti nelle ectasie e in chirurgia refrattiva.

Lac.12008/2009

F.Zeri

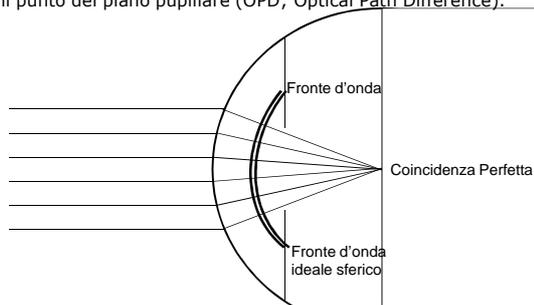
L'Aberrometria Corneale

L'analisi della superficie corneale anteriore effettuata da un topografo di nuova generazione consente di calcolare il fronte d'onda generato da quella superficie.

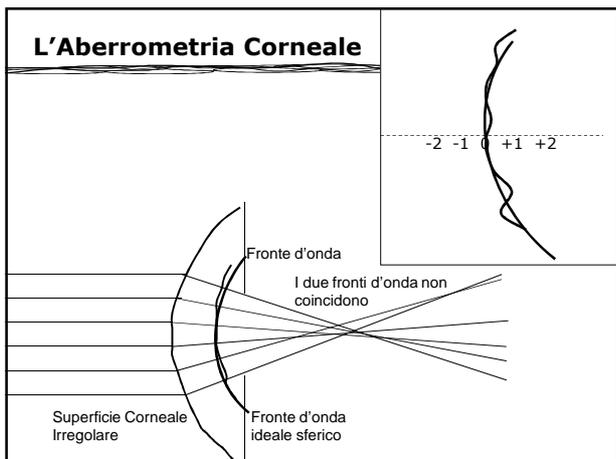


L'Aberrometria Corneale

La superficie corneale o il fronte d'onda generato da essa possono essere paragonati ad una superficie "ideale" (ovale di Cartesio) o ad un fronte d'onda "ideale" (sferico) trovando le differenze (μm) per ogni punto del piano pupillare (OPD; Optical Path Difference).

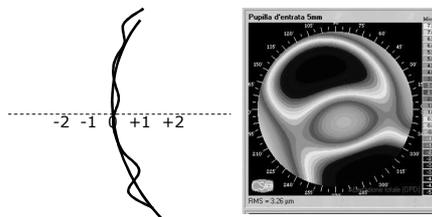


L'Aberrometria Corneale



L'Aberrometria Corneale

Tali differenze possono essere visualizzate attraverso una mappa colorata bidimensionale e analizzate attraverso una procedura matematica detta Analisi di Zernike, che scompone l'aberrazione totale in componenti semplici. Ogni componente è espressa da un polinomio. L'entità di ogni singola aberrazione o di quella di una singola componente è espressa con l'RMS.



L'Aberrometria Corneale

Quanto una irregolarità di superficie e quindi un'aberrazione è accettabile?

Otticamente, secondo il principio di Raleigh, è possibile accettare come perfetta una superficie d'onda se l'aberrazione del fronte d'onda da essa prodotto non supera $\frac{1}{4}$ della lunghezza d'onda della luce.

Considerando che il picco di sensibilità fotopica nell'uomo è di circa 555nm allora l'errore del fronte d'onda corneale accettabile non deve superare 0.14 μm ,

che corrisponde ad una irregolarità di superficie di 0.37 μm

Lac I 2008/2009

F.Zeri

L'analisi di Zernike

-Attraverso l'analisi di Zernike una superficie qualsiasi può essere descritta come sommatoria pesata di forme tipiche rappresentate da polinomi.

--I polinomi sono classi di funzioni ad una variabile (somme pesate di potenze non negative della variabile indipendente)

$$y = f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$$

Lac I 2008/2009

F.Zeri

L'analisi di Zernike

-La serie di polinomi è in ordine crescente e potenzialmente infinita.

-Più polinomi si utilizzano più dettagliata sarà la rappresentazione della superficie che si studia.

-I polinomi sono indipendenti l'uno dall'altro.

-Il peso di ogni singola componente può essere considerato indipendentemente

Lac I 2008/2009

F.Zeri

Aberrometria Corneale: l'analisi di Zernike

-Negli aberrometri corneali l'analisi di Zernike viene applicata allo studio dell'errore del fronte d'onda o della superficie corneale rispetto ad un fronte o ad una superficie di riferimento.

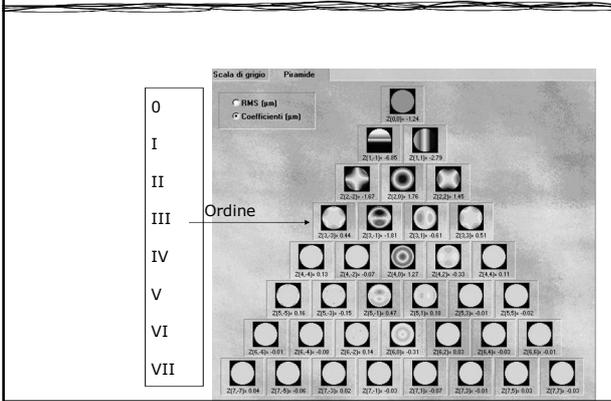
-L'aberrazione dipende dal diametro pupillare

-Si possono valutare aberrazione singole (Sferica, coma, Astigmatismo regolare, sferica, trifoglio...).

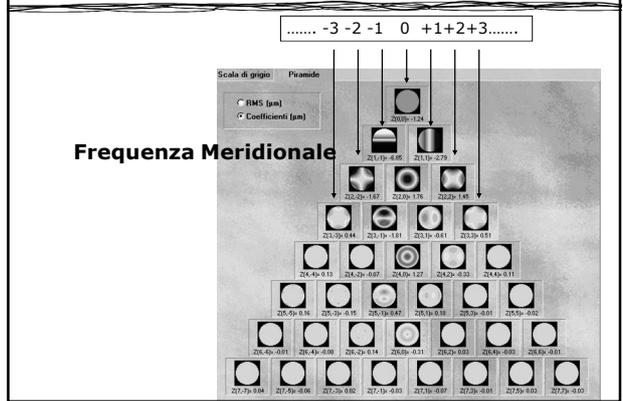
-Si possono prendere in esame gruppi di aberrazioni (Ordini pari, Ordini Dispari, Aberrazioni di basso ordine correggibili con occhiali (fino al II ordine), Aberrazioni di alto ordine non correggibili con occhiali dal III ordine in poi)

-Il valore delle aberrazioni viene espresso in genere in RMS (scarto quadratico medio) dell'errore dell'OPD in micron.

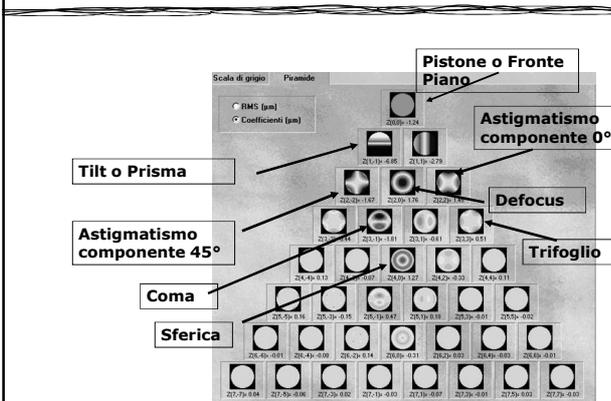
Aberrometria Corneale: la piramide di Zernike



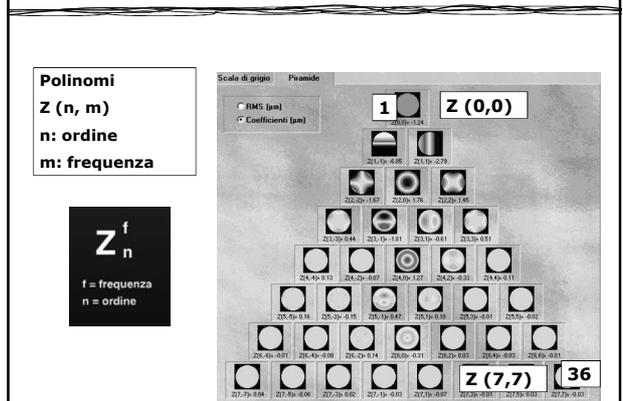
La piramide di Zernike



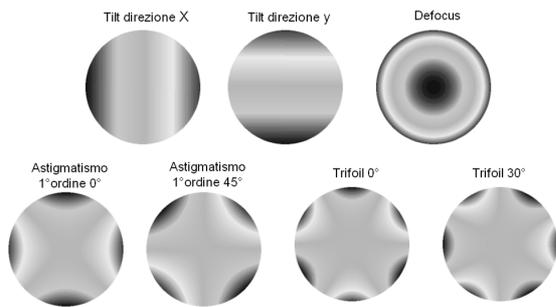
Aberrometria Corneale: la piramide di Zernike



Aberrometria Corneale: la piramide di Zernike



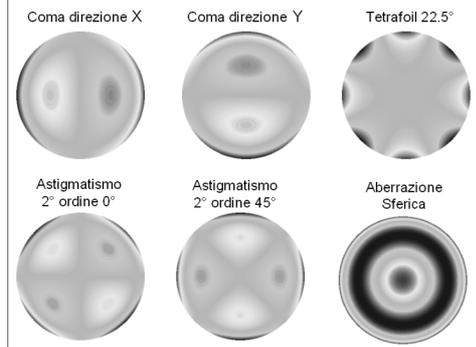
Rappresentazione bidimensionale polinomi



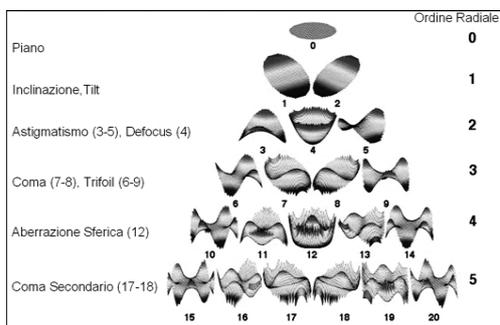
Lac.12008/2009

F.Zeri

Rappresentazione bidimensionale polinomi



Rappresentazione tridimensionale polinomi



La qualità dell'immagine retinica

I fattori ottici che determinano la qualità dell'immagine retinica sono:

-Errori di rifrazione

-Aberrazioni Oculari

-Diffrazione

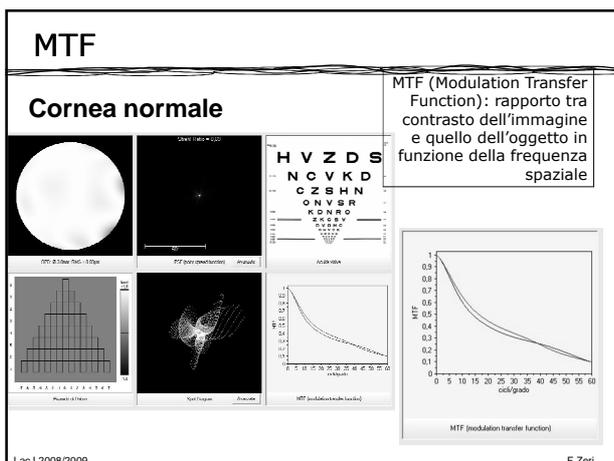
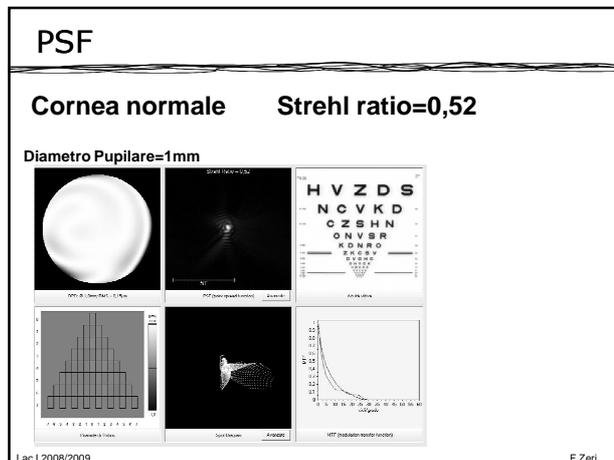
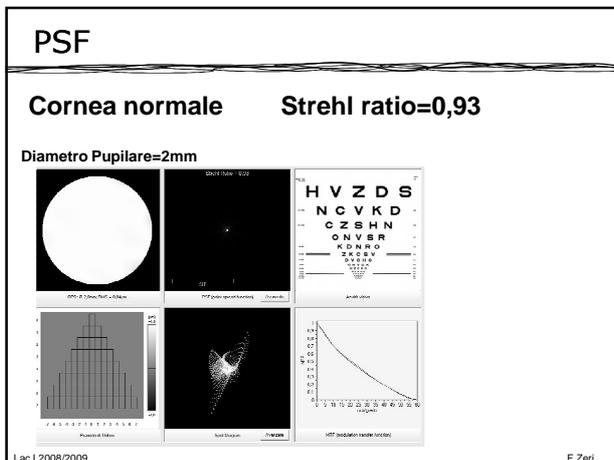
-Dispersione

Il livello è legato alla lunghezza d'onda e al diametro pupillare

Il livello è legato alla torbidità dei mezzi refrattivi.

Lac.12008/2009

F.Zeri



L'esame topografico e aberrometrico

TESTI PRINCIPALI DI RIFERIMENTO:

- Mandell RB "Contact lens practice" Thomas Sp Ed 1989
- Phillips A. Speedwell L. Contact Lenses" 5th Ed. Butterworths-Heinemann 2007
- Sanders e Koch "An Atlas of corneal Topography. Slack 1993
- MacRae SM, Kruger RR, Applegate RA. Ablazione Corneale personalizzata. Verduci 2001.
- Calossi A. La qualità ottica della Cornea. In a cura di Caimi e Brancato. Gli aberrometri. Fabiano 2002
- Zeri F, Calossi A, Fossetti A, Rossetti A. Ottica Visuale. Editrice Universo Roma, 2012.

Lac I 2008/2009 F.Zeri