

## Conferenza sui test interferometrici

Questa mia relazione si propone di rendervi partecipi delle mie esperienze nel campo dei test ottici con un particolare riguardo ai test interferometrici e ai suoi sviluppi.

Farò anche un breve accenno alle nuove tecniche di misurazione dei fronti d'onda col metodo di Shack-Hartmann.

La luce è una vibrazione del campo elettromagnetico, la parte visibile, cioè quella a cui la nostra retina è sensibile, ha una lunghezza d'onda che va da circa 400 a 700 nanometri.

La luce che l'occhio umano percepisce come bianca è un miscuglio caotico di lunghezze d'onda comprese in questo intervallo, quando invece vediamo dei colori vuol dire che prevale la presenza di una o più lunghezze d'onda, che mescolate insieme, possono dare la sensazione di una infinità di tonalità di colori.

E' abbastanza raro avere una conferma diretta della natura ondulatoria della luce.

Il fenomeno che maggiormente lo mette in evidenza è l'interferenza, ma perchè due sorgenti di luce interferiscano è necessario che siano coerenti tra loro.

Uno dei più celebri esperimenti che dimostrarono la natura ondulatoria della luce è stato quello di Young, facendo passare della luce monocromatica su due fenditure molto sottili vicine tra loro si vede proiettata su uno schermo una figura di interferenza con righe alternate chiare e scure.

Questo fenomeno è dato dal fatto che i due fronti d'onda incontrandosi interferiscono.

Nelle zone in cui le onde sono in opposizione di fase si eliminano vicendevolmente, mentre in quelle dove sono in fase si sommano.

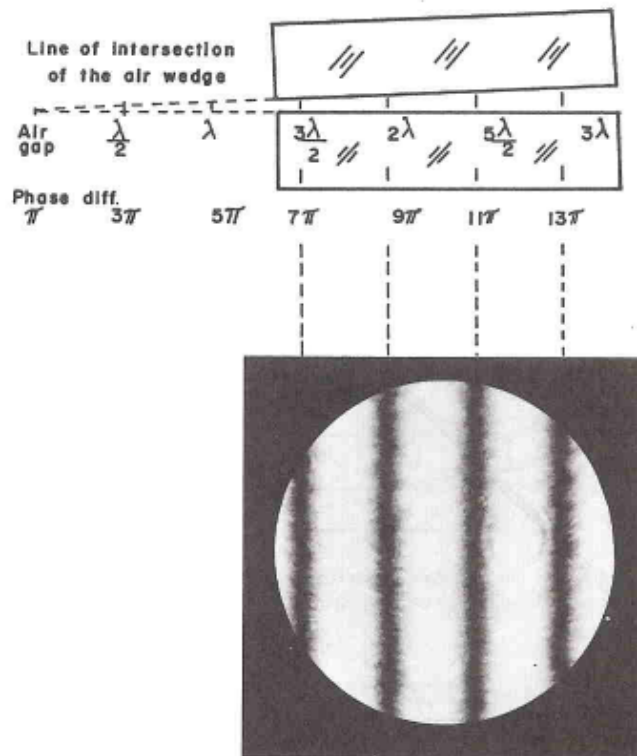
Il fenomeno è particolarmente evidente se la luce è monocromatica, ma si può vedere anche in luce bianca con le frange leggermente colorate.



Mettendo a contatto due superfici di vetro si possono osservare delle frange di interferenza che furono osservate anche da Newton e che per questo vengono chiamate frange di Newton.

Nella figura potete osservare un esempio di questo fenomeno.

Da questo principio prende il nome l'interferometro di Newton, che è forse il più semplice e il più usato mezzo di controllo di superfici ottiche a disposizione del costruttore di lenti e specchi ottici.



Il principio con cui si formano le frange è esposto in questa figura.

In questo caso si suppongono le due superfici perfettamente piane con un piccolo angolo tra loro.

Le frange si trovano ad ogni variazione della distanza di  $\frac{1}{2}$  di lunghezza d'onda e sono parallele all'intersezione dei due piani.

Le frange nere sono in corrispondenza dei punti in cui le onde riflesse dalle due superfici quasi a contatto sono in opposizione di fase e quindi si annullano.

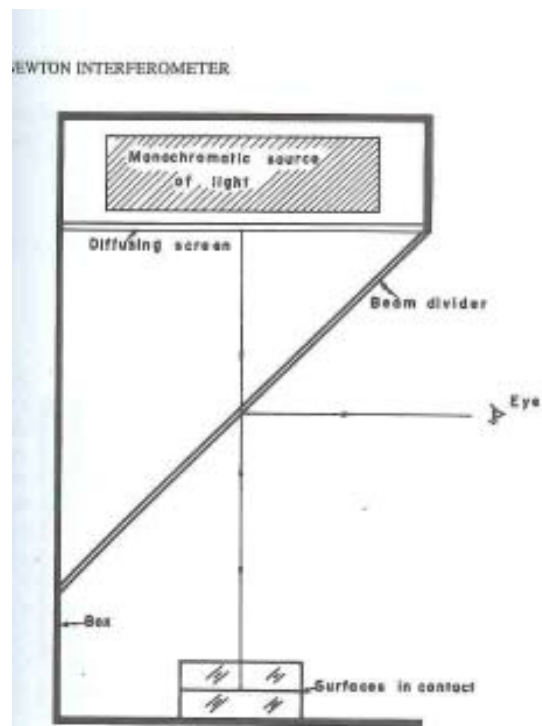
Il contrasto delle frange è favorito dal fatto che l'intensità delle due onde è uguale.

Un qualsiasi errore nella pianeità di una delle due superfici si manifesta con una forma differente da questa.

L'attrezzatura per vedere nel modo più corretto le frange è esposto nella figura seguente, bisogna disporre di una sorgente di luce monocromatica e di un calibro interfrenziale, cioè di un disco di materiale trasparente con una delle due superfici piana entro almeno  $\frac{1}{10}$  di lunghezza d'onda.

E' evidente che questo tipo di interferometro si presta maggiormente al controllo di superfici piane, ma viene usato anche per controllare superfici sferiche con raggi di curvatura piuttosto lunghi.

In questo caso il calibro dovrà avere una superficie sferica di raggio uguale, ma di segno opposto a quella da controllare. Il box dovrà avere le pareti interne dipinte di nero per assorbire il più possibile la luce diffusa, il divisore di fascio può essere costituito da un semplice vetro piano.



Le sorgenti di luce monocromatica più usate:

Table 1.2. Characteristics, Such as Wavelength, of Various Lamps Suitable as Sources in Newton's Interferometer

Serial Number	Lamp Type	Wavelength(s) Normally Used ( $\text{\AA}$ )	Remarks
1	Sodium vapor	5893	The wavelength is the average of the doublet 5890 and 5896. Warm-up time is about 10 min.
2	Low-pressure mercury vapor	5461	Because of other wavelengths present, the fringes must be viewed through the green filter, isolating the 5461- $\text{\AA}$ line. There is no warm-up time. Tube lights without fluorescent coating can be used.
3	Low-pressure helium discharge	5876	Because of other wavelengths present, a yellow filter must be used to view the fringes. There is no warm-up time.
4	Thallium vapor	5350	Characteristics are similar to those of the sodium vapor lamp. Warm-up time is about 10 min.
5	Cadmium vapor	6438	Red filter to view the fringes is required. Warm-up time is about 10 min.

materiale con cui si possono costruire i calibri

Table 1.3. Materials Used for Making Optical Flats and Their Properties

Serial Number	Material	Coefficient of Linear Expansion	Remarks
1	BK7, BSC	$75\text{--}80 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$	These are borosilicate glasses that can be obtained with a high degree of homogeneity.
2	Pyrex	$25\text{--}30 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$	This is also a borosilicate glass but has higher silica content. Several manufacturers make similar type glass under different brand names. This is a good material for making general quality optical flats and test plates.
3	Fused silica or quartz	$6 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$	This is generally the best material for making optical flats. Different grades of the material are available, based mainly on the degree of homogeneity.
4	CerVit, Zerodur	$0\text{--}1 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$	This material and similar ones made by different companies under different trade names have practically zero expansion at normal ambient temperatures.
5	ULE fused silica	$0\text{--}1 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$	This is a mixture of silica with about 7% titania.

Le tipiche figure di interferenza che si ottengono con un interferometro di Newton:

6

NEWTON, FIZEAU, AND HAIDINGER INTERFEROMETERS

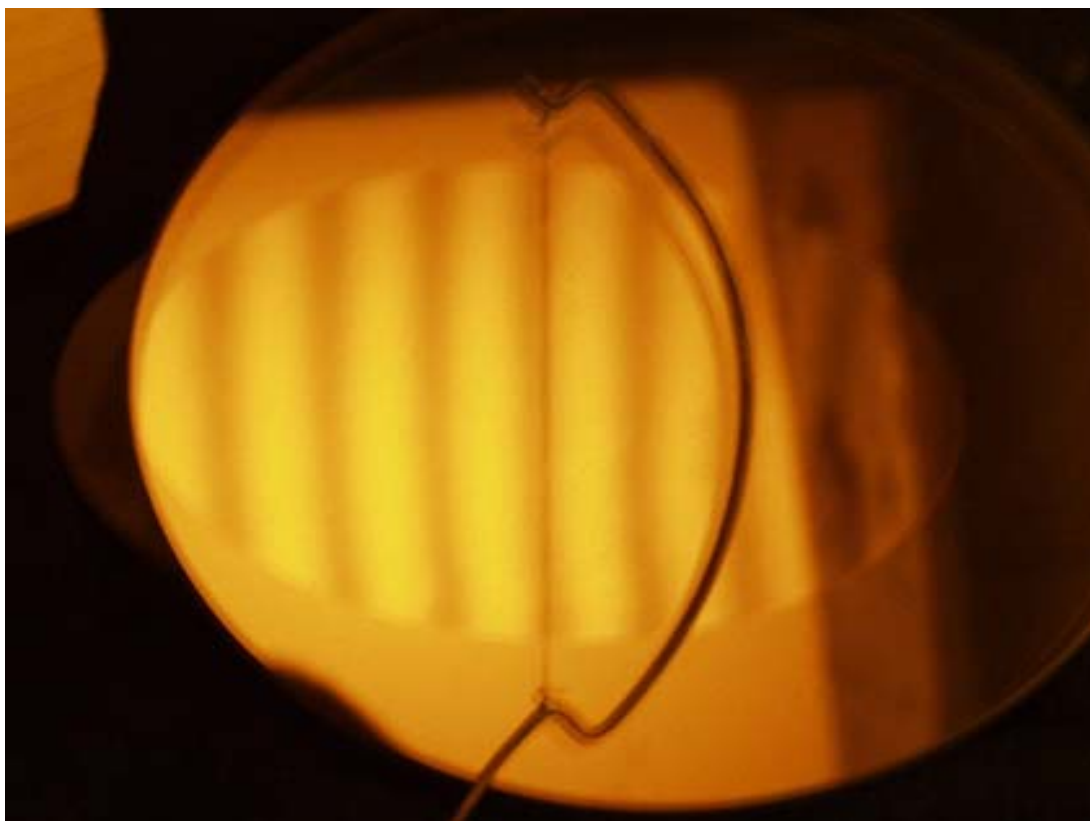
Figure 1.5. Appearance of the Newton fringes when a surface of long radius of curvature is kept on a good optical flat. This situation is for a surface deviating by  $\lambda/4$  from the plane at its maximum. The center of symmetry of the fringes is outside the aperture of the surfaces, and hence only arcs of circles are seen.



Figure 1.6. Same as Fig. 1.5 except that the maximum error is  $\lambda/8$ .



interferogramma di uno specchio piano ellittico da 100 mm.



Un interferometro molto simile è dovuto a Fizeau

Questa soluzione differisce da quella di Newton per il fatto che la sorgente di luce monocromatica viene collimata dopo il passaggio attraverso un forellino, che in ottica viene chiamato filtro spaziale.

Normalmente viene volutamente lasciato un piccolo angolo tra le due superfici del calibro, in questo modo il riflesso della superficie superiore che potrebbe disturbare l'osservazione viene bloccato da un altro filtro spaziale vicino al punto di osservazione.

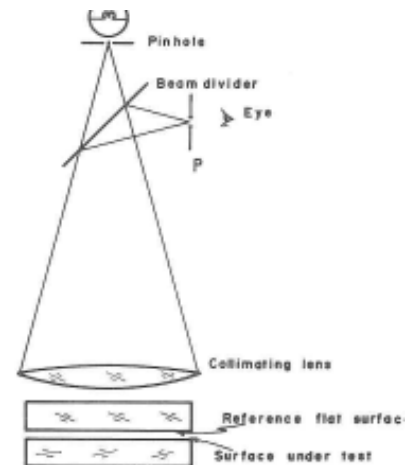
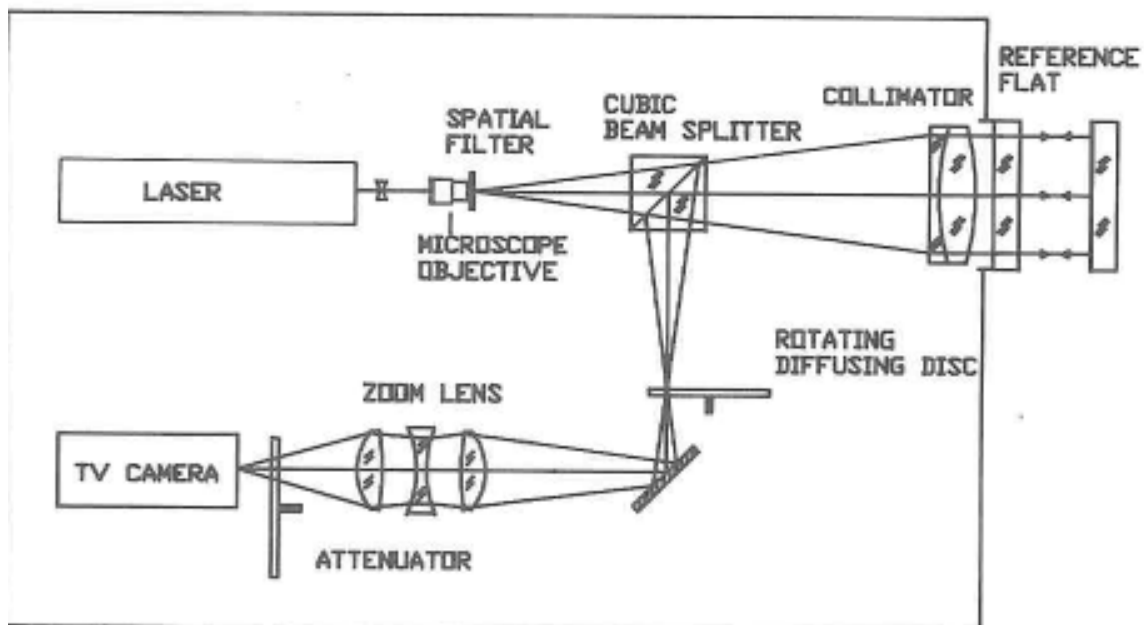


Figure 1.16. Schematic arrangement of a Fizeau interferometer using a lens.

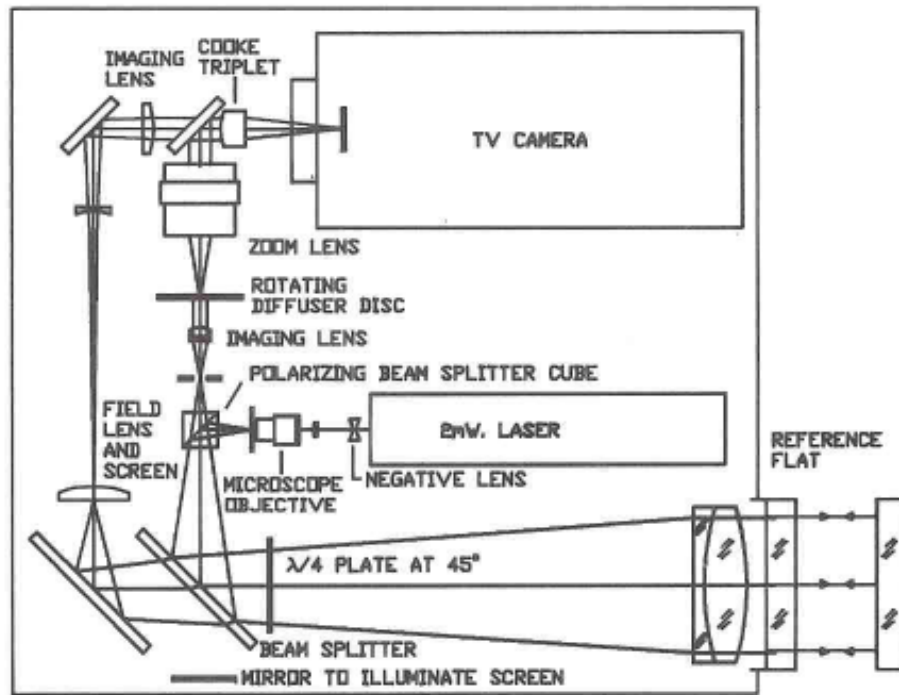
Con sorgenti di luce laser che hanno un grado di coerenza molto più grande può essere possibile osservare le frange anche con una separazione tra le due superfici maggiore.

Da questa soluzione derivano parecchi interferometri, uno è quello costruito dalla Wyco che è praticamente lo stesso con la particolarità di usare un laser elio-neon che ha un'ottima coerenza del fascio di luce e di un piccolo prisma beam-splitter per recuperare l'immagine delle frange al sistema di ripresa con una piccola videocamera.



Anche il seguente più complesso prodotto da Zygo Corporation è derivato da questo progetto. Interessante è la soluzione di usare un beam-splitter polarizzatore per dividere il fascio di luce in due con la polarizzazione opposta e dell'introduzione della lamina a  $\frac{1}{4}$  d'onda per far cambiare il piano della polarizzazione del fascio di ritorno.

Questa soluzione consente di recuperare circa il 50% di luce che al ritorno al beam-splitter passa tutta invece di suddividersi in due fasci di cui uno viene disperso.

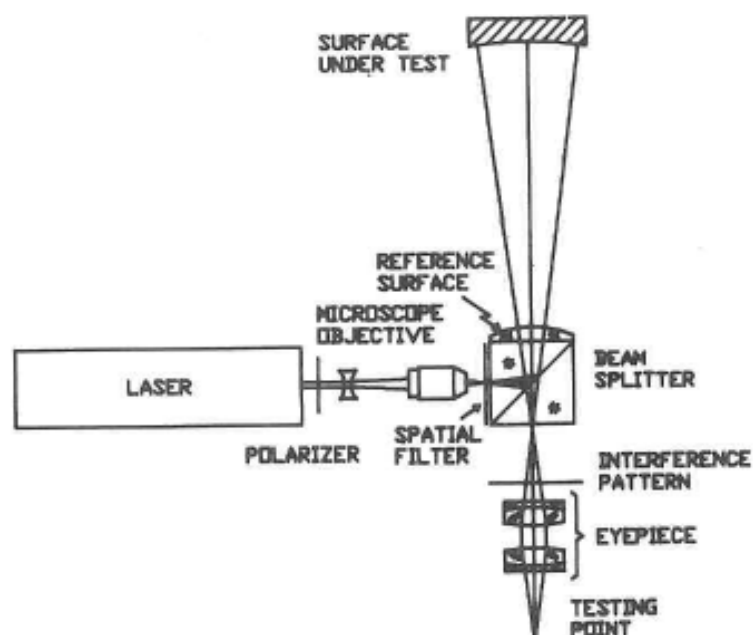


Come anche per tutti i precedenti interferogrammi bisogna notare che in questo modo si confrontano le due superfici e non le onde riflesse come avviene in altre soluzioni.

Tutti gli interferometri che ho citato fino ad ora sono adatti al controllo di superfici piane, in questo caso lo scopo è quello di verificare se la superficie in esame è eventualmente concava o convessa.

Quando invece si vuol vedere se ci sono errori in un fronte d'onda, è il caso di un telescopio, è necessario confrontare questo fronte d'onda con uno di riferimento e diventa trascurabile l'eventuale curvatura che è insita nella natura di un'onda che proviene da un sistema obiettivo.

Un disegno molto interessante è quello proposto da Shack, che è illustrato nella figura seguente.





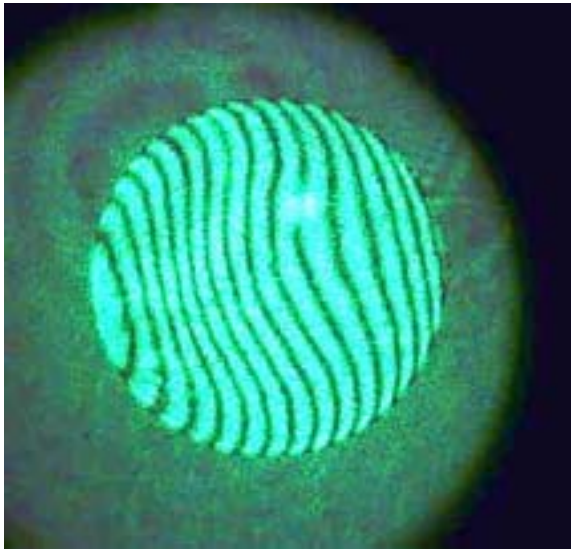
L'ho voluto mostrare perché è molto semplice ed efficace e ho avuto occasione di realizzarne un prototipo che ha funzionato molto bene.

Questo disegno appartiene alla categoria degli interferometri a cammino diseguale in cui le due onde, quella che viene misurata e quella che funziona da onda di riferimento, fanno percorsi differenti.

Ciò li espone maggiormente a tutti i problemi che possono derivare dalla presenza della turbolenza dell'aria del laboratorio in cui si opera e soprattutto dalle anche minime vibrazioni delle parti ottiche.

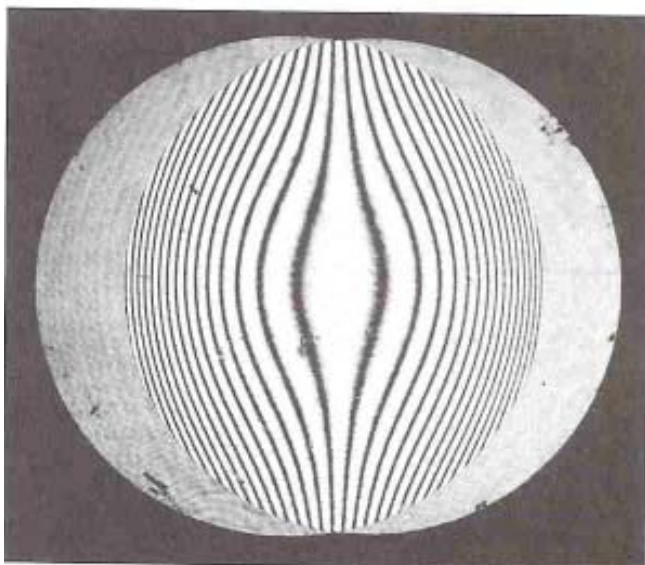
Ho potuto constatare che anche vibrazioni impercettibili rendono le frange confuse e irregolari. In questo caso l'interferenza che si forma quando le due onde riflesse, una dallo specchio concavo in esame e una dalla superficie di riferimento costituita dalla lente piano convessa cementata al piccolo beam-splitter, si incontrano, mostra l'errore del fronte d'onda e non della superficie.

Con questo schema si possono realizzare interferogrammi anche di specchi di grandi dimensioni a patto di usare sorgenti coerenti come laser elio-neon.



Un interferogramma fatto con un mio interferometro tipo Fizeau con disegno Shack

In questo caso si tratta di uno specchio parabolico al centro di curvatura e quella deformazione che si vede corrisponde all'aberrazione sferica nel senso della sovracorrezione.

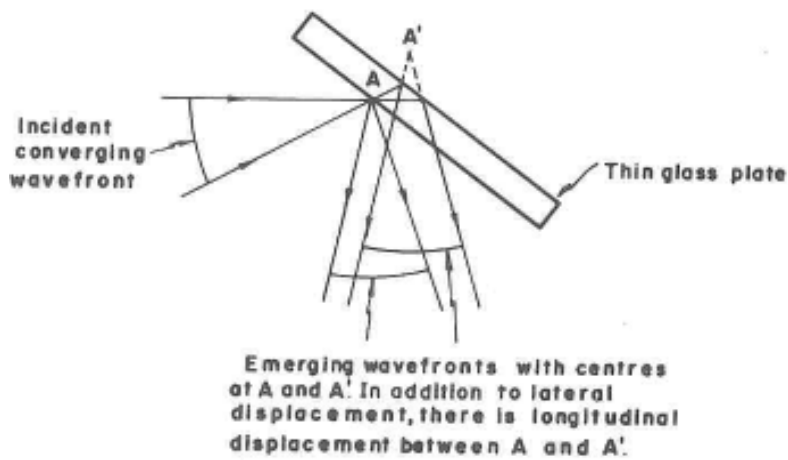


E' a percorso diseguale anche quello chiamato Twyman-Green o il tipo Fizeau proposto da Peter Ceravolo.

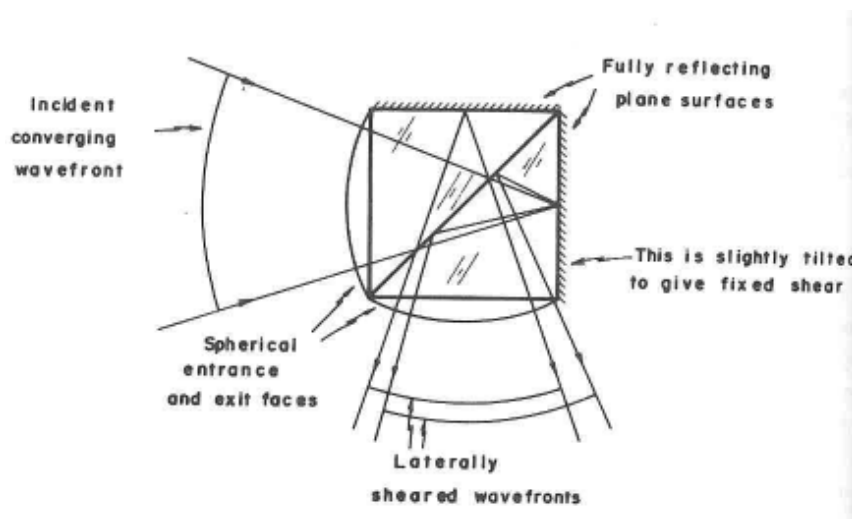
Sono invece a percorso comune e degni di nota i progetti detti a lateral shearing termine che si potrebbe tradurre come a taglio laterale.

Il principio è semplice, l'onda da analizzare viene suddivisa in due parti leggermente spostate lateralmente. Quando interferiscono, cosa che è favorita dal fatto che l'intensità delle due parti è uguale, i difetti della sfericità si evidenziano come si vede chiaramente dalla figura in cui si vede un'onda distorta da sferica di terzo ordine.

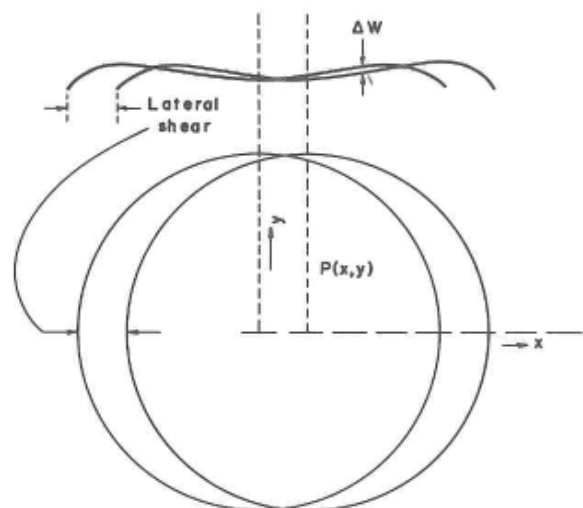
Per realizzare interferogrammi lateral shearing esistono un grande numero di soluzioni che vi risparmio, la più semplice è quella di usare una lastrina piano parallela come nella seguente figura.



Un'altra soluzione è quella esposta nella figura seguente:

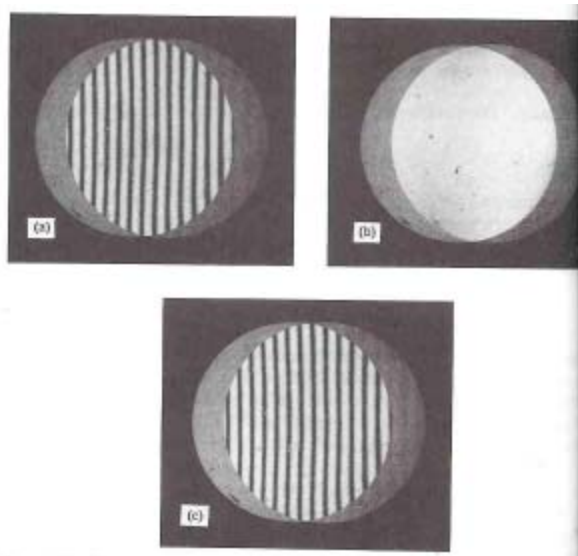


Un beam splitter cementato in olio con le due facce anteriori sferiche per non introdurre aberrazioni, e quelle posteriori alluminare, ruotando leggermente uno rispetto all'altro i due prismi si possono dividere le due onde che interferiscono.

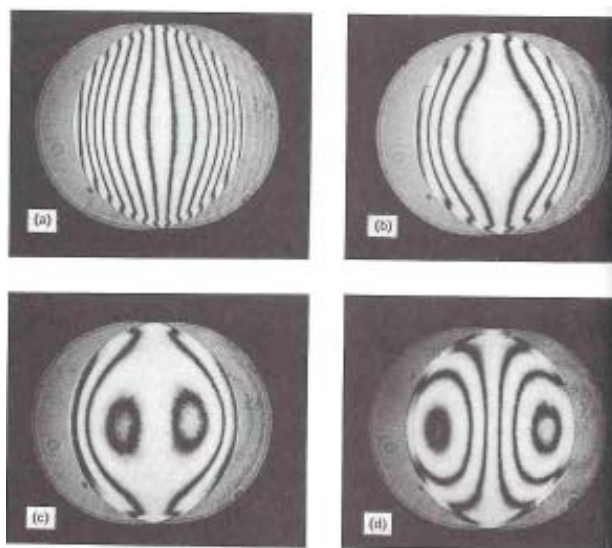




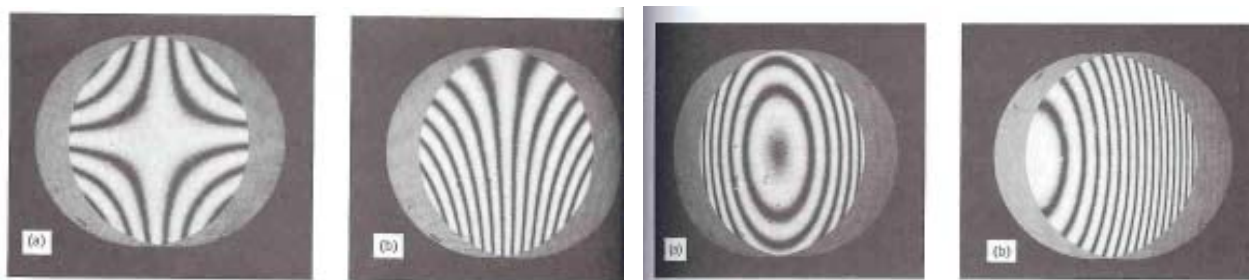
Questi sono tipici interferogrammi lateral shearing:



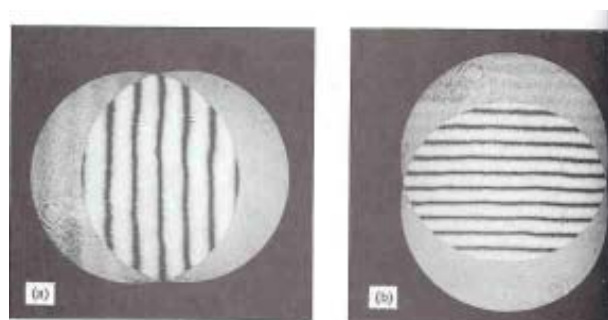
di un'onda senza aberrazioni



in presenza si aberrazione sferica, il tentativo mal riuscito di correggere un bordo ribattuto

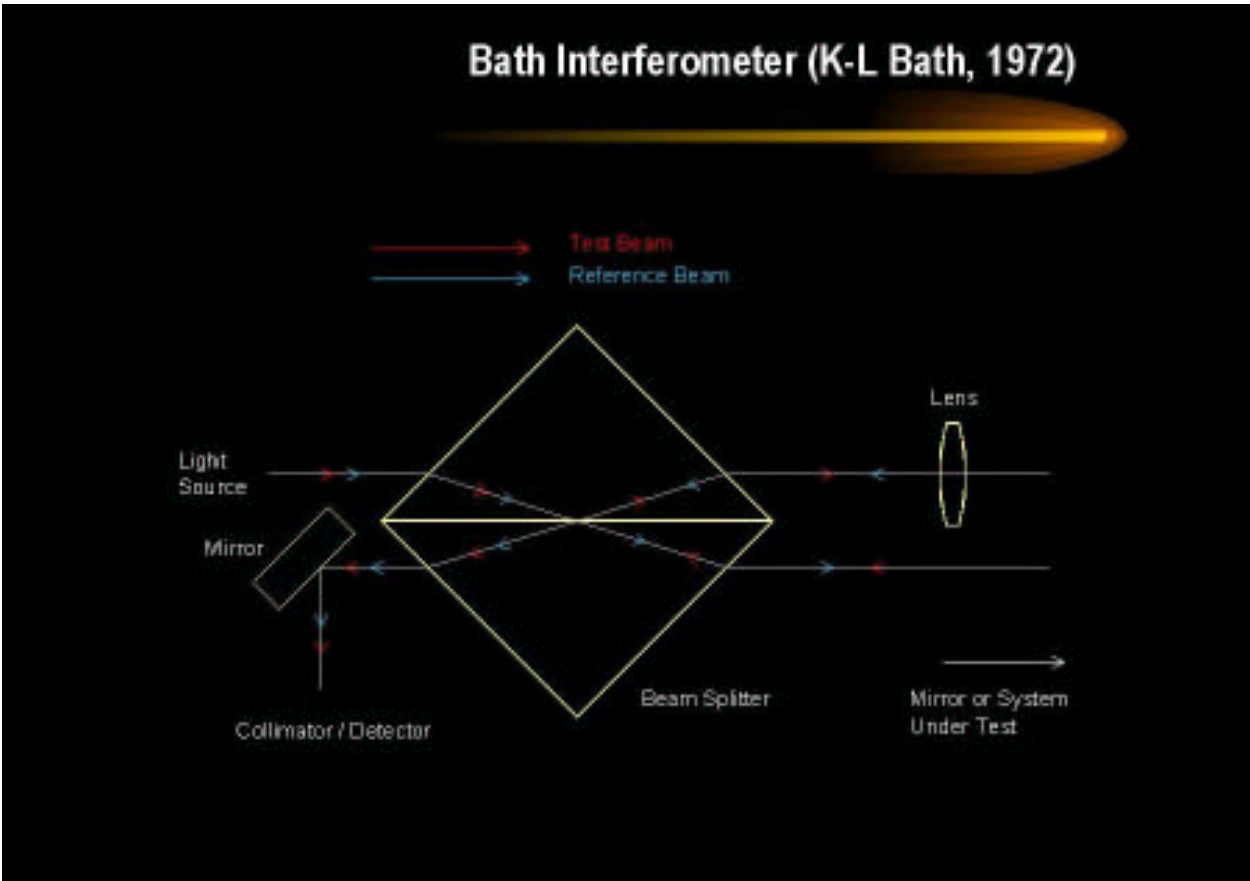


in presenza di coma in direzione sagittale e tangenziale

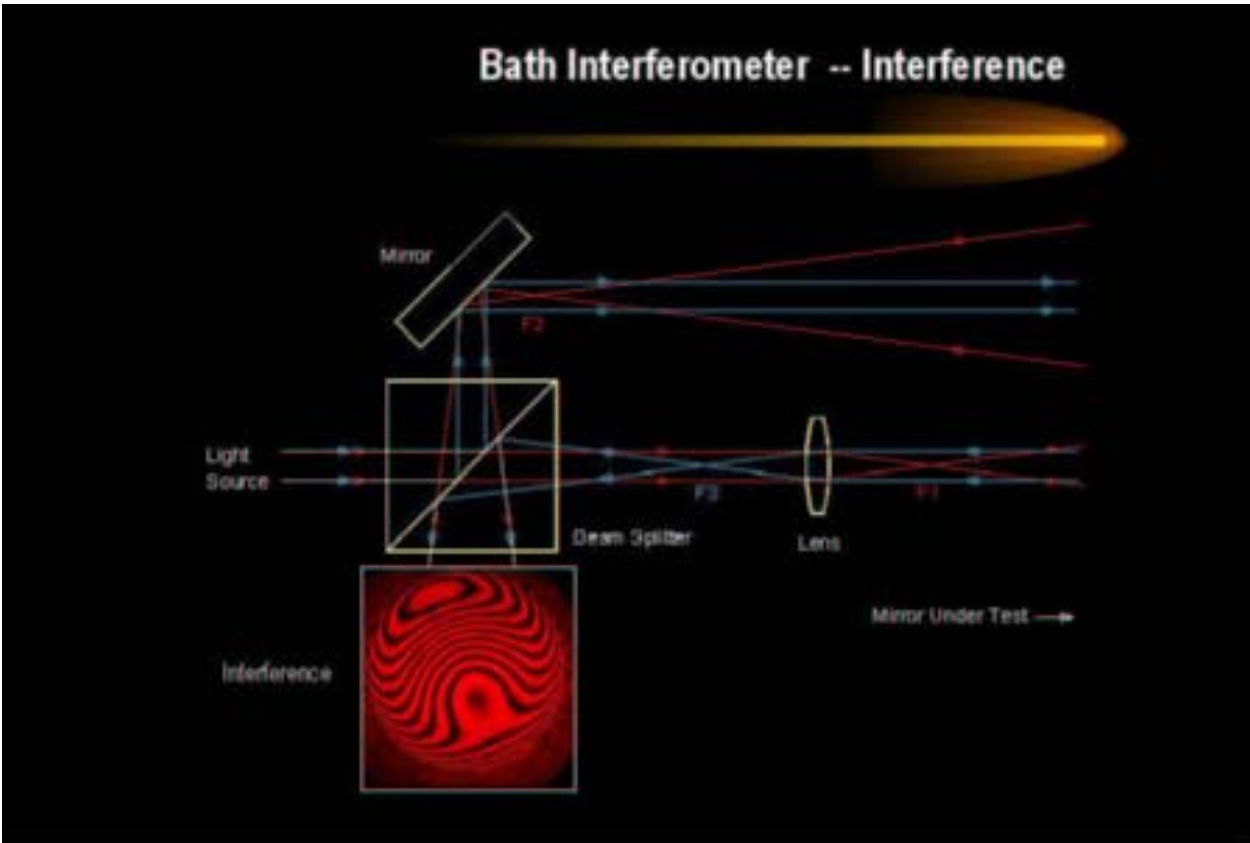


con astigmatismo

Bisogna però osservare che questi interferogrammi sono di difficile interpretazione perché in realtà sono il confronto di due onde ugualmente distorte.



Schema di interferometro Bath



Altra disposizione possibile in un tnterferometro Bath

Da relativamente poco tempo è apparso un disegno di interferometro a percorso comune molto semplice da realizzare proposto da Karl Ludvig Bath.

Un fascio laser collimato viene fatto passare in un piccolo beam splitter che lo divide in due fasci paralleli, uno di questi passa attraverso una piccola lente biconvessa formando una sorgente puntiforme, l'altro viene direttamente inviato allo specchio in esame e al ritorno passa a sua volta la stessa lente formando così l'onda di riferimento che può interferire con l'onda formata dallo specchio in esame.

Un piccolo specchietto devia lateralmente l'immagine che può essere fotografata o raccolta da una web-cam.

È naturalmente necessario disporre di un sistema di posizionamento micrometrico nei tre assi x-y-z per ottenere la voluta disposizione e il numero delle frange.

Infatti per avere un numero di frange né troppo piccolo né troppo grande le due onde devono essere posizionate con una piccola angolazione.

Il fatto che i due fasci lavorano leggermente fuori asse introduce un certo valore di astigmatismo che può essere calcolato ed eventualmente sottratto alla misura, è per questo che si preferisce usare come beam splitter prismi piuttosto piccoli per contenere la distanza tra i due fasci entro pochi mm.

Il valore dell'astigmatismo è in  $\lambda$  uguale a:  $-D^2 d^2 ( 16 \lambda R^3 )$ .

L'effetto è comunque grande solo per specchi piccoli e molto aperti.

Con questo tipo di interferometri si ottengono interferogrammi con un buon contrasto e con i contorni netti, inoltre dato che sono a percorso comune sono meno sensibili alla turbolenza e alle vibrazioni.

Si possono usare come sorgenti laser elio neon o anche a laser a stato solido come quelli dei comuni puntatori. Io ho usato soprattutto quelli a luce verde a 532 nm di lunghezza d'onda.

Veniamo ora però alla parte più interessante del discorso.

Mentre è relativamente facile interpretare la deviazione delle frange nel controllo di uno specchio piano con un interferometro di Newton stimando di quanto si discosta da una linea ideale rettilinea, è molto più complicato tradurre in una misura certa un interferogramma di uno specchio che può avere insite molte più aberrazioni rispetto a un'ottica ideale.

I test ottici finalizzati a determinare la precisione di uno specchio parabolico erano fino a non molto tempo fa soprattutto il metodo della lama di Foucault con l'integrazione grafica delle letture delle aberrazioni longitudinali con la maschera di Couder, oppure nel caso di paraboloidi del test di Foucault o di Ronchi in autocollimazione con un piano forato al centro. Anche uno star test, cioè l'osservazione di una stella a forte ingrandimento poteva dare una risposta molto significativa delle qualità di un'ottica. Tutti questi sistemi, però ad eccezione di quello con la maschera di Couder, non sono quantitativi, non danno una misura esatta dell'errore residuo presente in un'ottica.

In questo caso dopo un test in autocollimazione con lama di Foucault e con una stella artificiale, si può essere certi di aver raggiunto una qualità dell'ottica molto buona, ma non è possibile quantificare esattamente l'eventuale errore residuo.

Negli ultimi anni la possibilità di usare la grande capacità di calcolo dei moderni computer ha reso possibile usare algoritmi matematici sempre più complessi e raffinati nell'analisi delle superfici ottiche.

Un passo estremamente importante è stato fatto con l'analisi proposta da Zernike che permette nell'analisi di un interferogramma di scindere le varie aberrazioni separandole una dalla altre in un'equazione polinomiale in cui ad ogni coefficiente corrisponde una singola aberrazione. Questo, unitamente al fatto che un interferogramma ha nella sua stessa natura la caratteristica di essere una misura quantitativa, la separazione delle frange dipende esclusivamente dalla lunghezza d'onda della luce utilizzata, ha reso questo tipo di indagine sulle ottiche un mezzo estremamente potente e poco soggettivo.

Fino a non molto tempo fa i programmi adatti ad analizzare gli interferogrammi erano destinati ad un uso esclusivamente professionale con costi molto elevati, ho visto prezzi dell'ordine di alcune decine di migliaia di euro, ma da qualche anno anche appassionati hanno elaborato ottimi programmi che sono ora alla portata anche di astrofili o di artigiani.

Voglio citare soprattutto l'ottimo programma di analisi AtmosFringe scritto da Massimo Riccardi.

Il programma permette l'analisi di immagini di interferogrammi sia di specchi sferici che di specchi parabolici o con altri coefficienti di deformazione con la funzione di nulling artificiale potendo introdurre il coefficiente Z8 della sferica di terzo ordine calcolato appositamente in base al diametro e alla esatta focale dello specchio in esame, per un parabolico il coefficiente è:

$$- Z8 = D^4 / (384 \lambda R^3)$$

Il programma ricava, da un'immagine di un interferogramma, i vari coefficienti di Zernike, i profili del fronte d'onda, i valori dell'errore P-V, il valore RMS e lo strehl ratio con una grafica molto efficace.

Ecco ad esempio una schermata di un'analisi fatta con AtmosFringe 3.3

E il relativo report da cui risulta una precisione Peak to Valley di 1/9.3 waves

The screenshot shows the AtmosFringe 3.3 software interface. The main window displays a table of Zernike coefficients and their corresponding aberrations. The table has columns for Order, Coefficient, and Description. The coefficients are listed in a column, and the descriptions are in another. The table is titled 'Reference Zernike'.

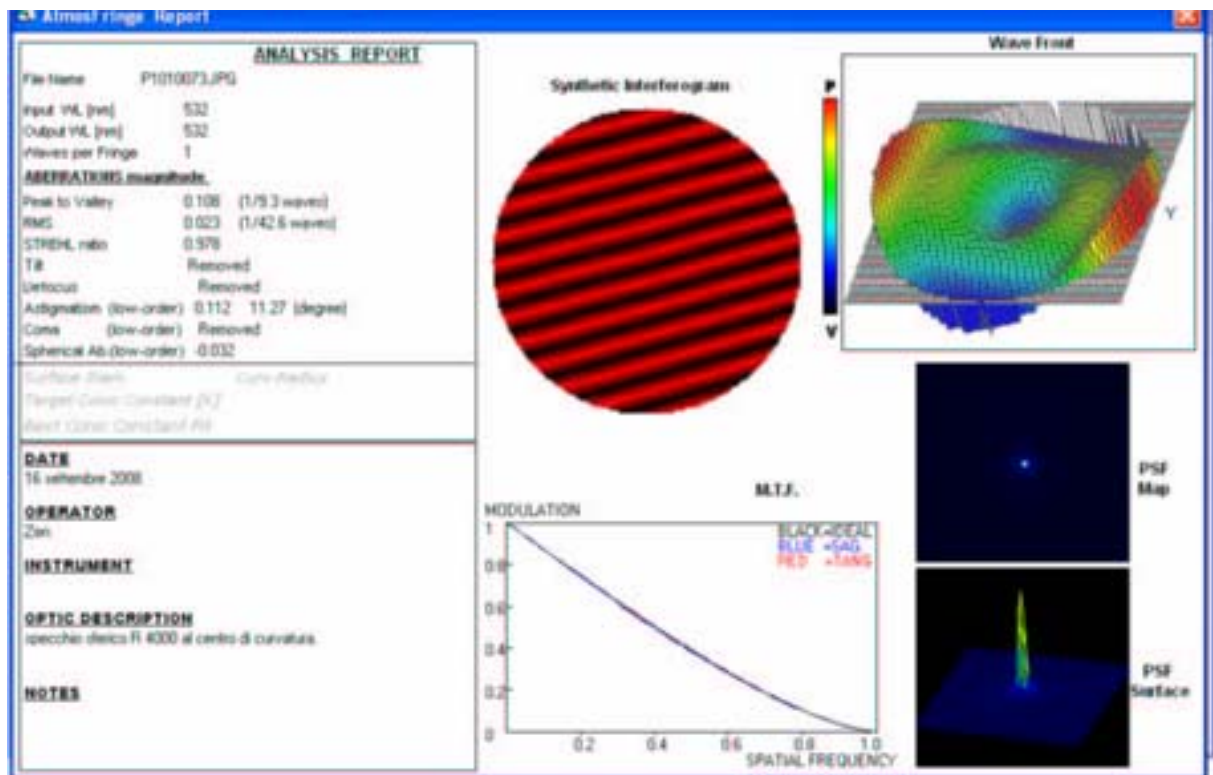
Order	Coefficient	Description
0	5.200066	Piston (Bias)
1	1.521182	Tilt about X axis
1	5.549522	Tilt about Y axis
2	2.250009	Power
3	0.01881	Astigmatism X axis
3	0.21522	Astigmatism Y axis
3	-0.00146	Primary Coma along X axis
3	0.04016	Primary Coma along Y axis
3	-0.05315	Primary Spherical Aberration
3	0.43236	Triangular Astig. Tilted X
3	0.04094	Triangular Astig. Tilted Y
3	-0.13113	Secondary Astig. X
3	0.028	Secondary Astig. Y
3	-0.0029	Secondary Coma X
3	-0.02562	Secondary Coma Y
3	0.12641	Secondary Spherical
3	-0.01769	Ashby Astig. Tilted X
3	-0.00722	Ashby Astig. Tilted Y
3	0.02584	Secondary Tilted X
3	0.04601	Secondary Tilted Y
3	-0.11352	Tertiary Astig. X
3	0.07775	Tertiary Astig. Y
3	0.01617	Tertiary Coma X
3	0.06953	Tertiary Coma Y
3	-0.11012	Tertiary Spherical
3		Pentastol X
3		Pentastol Y
3		Secondary Tilted X

Key metrics displayed in the interface:

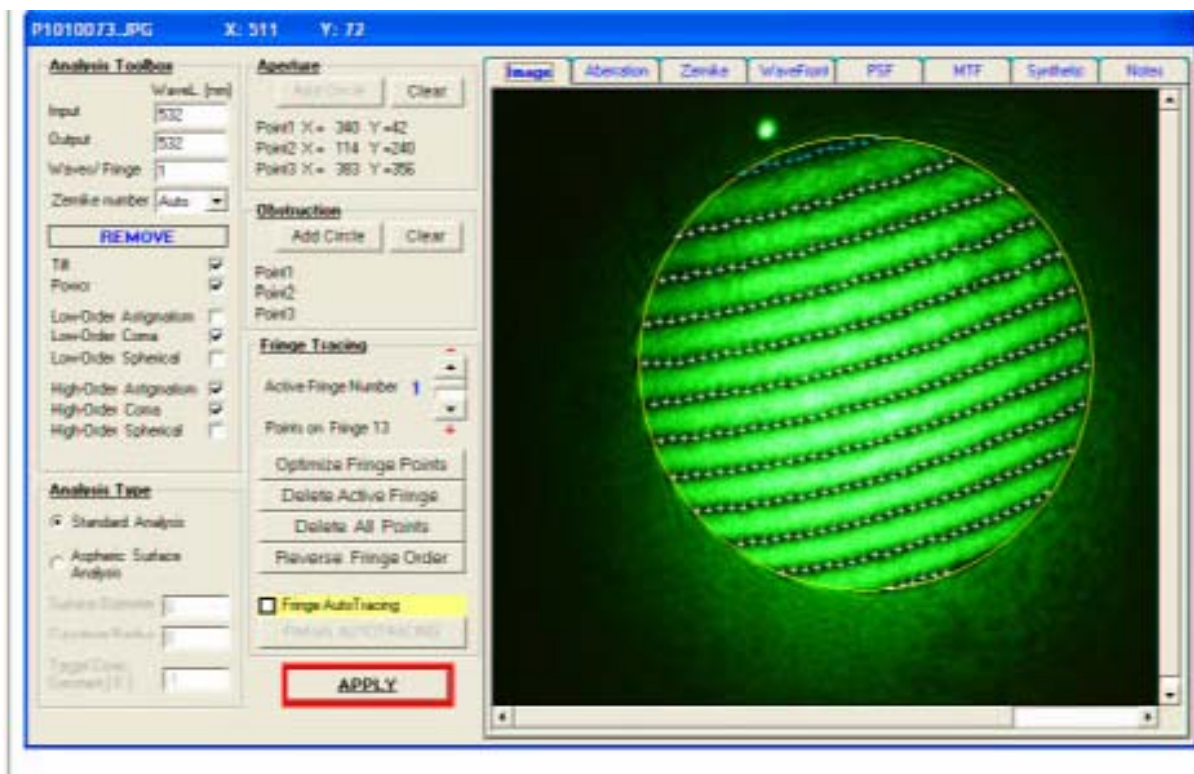
- P-V: 0.108 (1/9.3)
- RMS: 0.023 (1/42.6)
- Strehl Ratio: 0.978

Possono essere annullati alcuni coefficienti se si pensa che derivino da errori di collimazione. Di solito si porta a zero il coma.



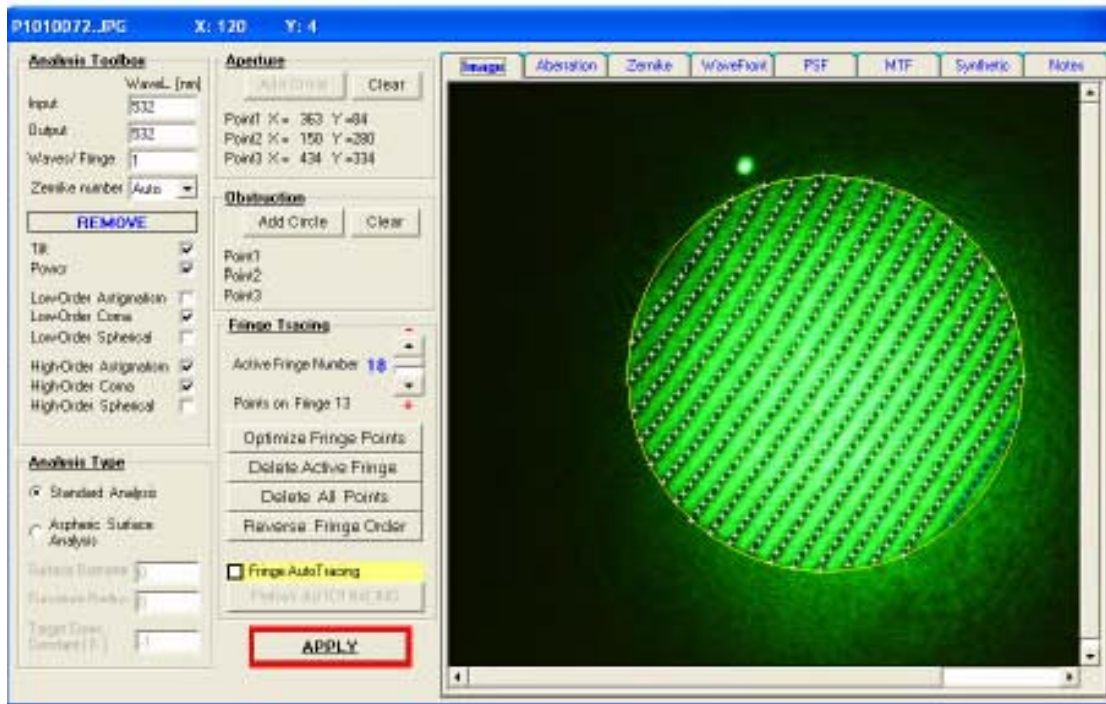


Questa è la schermata con l'immagine dell'interferogramma

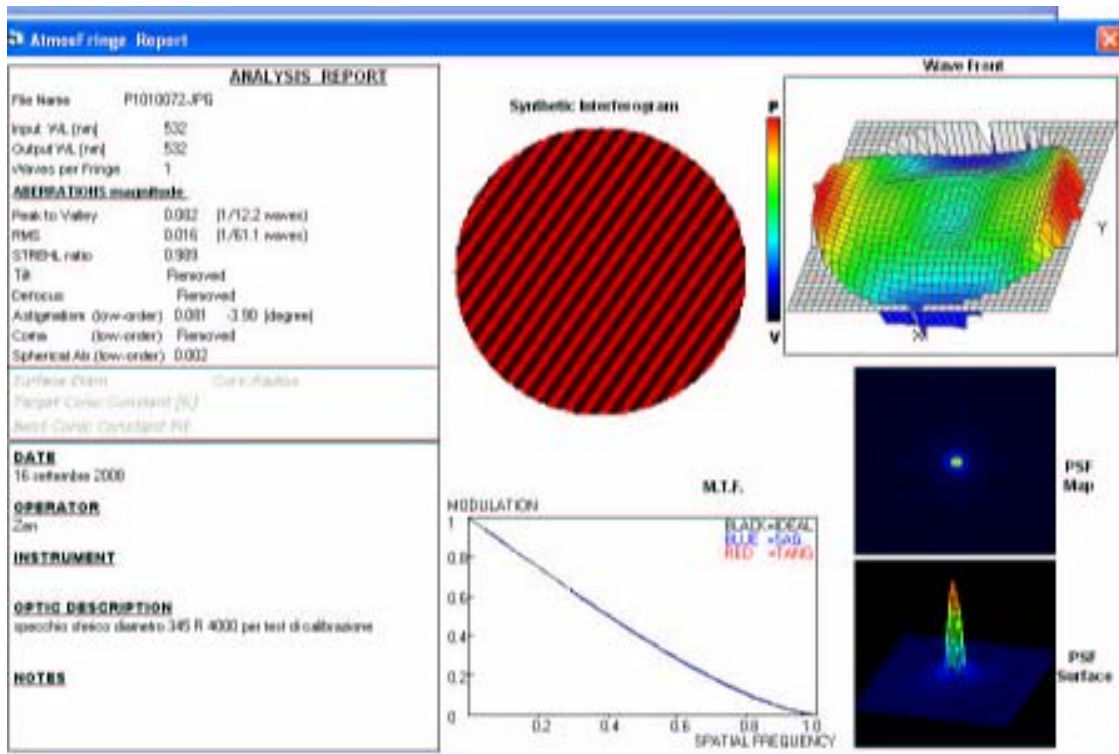


Bisogna però a questo proposito fare alcune osservazioni che sono doverose a questo riguardo. Anche questi risultati devono essere presi con grande cautela come suggerisce anche Daniel Malacara nel suo testo, OPTICAL SHOP TESTING, la bibbia di chi si interessa di interferometria.

Nel tredicesimo capitolo dove si prende in esame appunto l'interpretazione e la digitalizzazione dei fronti d'onda, Malacara mette in guardia dal considerare oro colato le misure fatte da una



Con un'altra immagine dello stesso specchio la precisione risulta 1/12.2 lambda

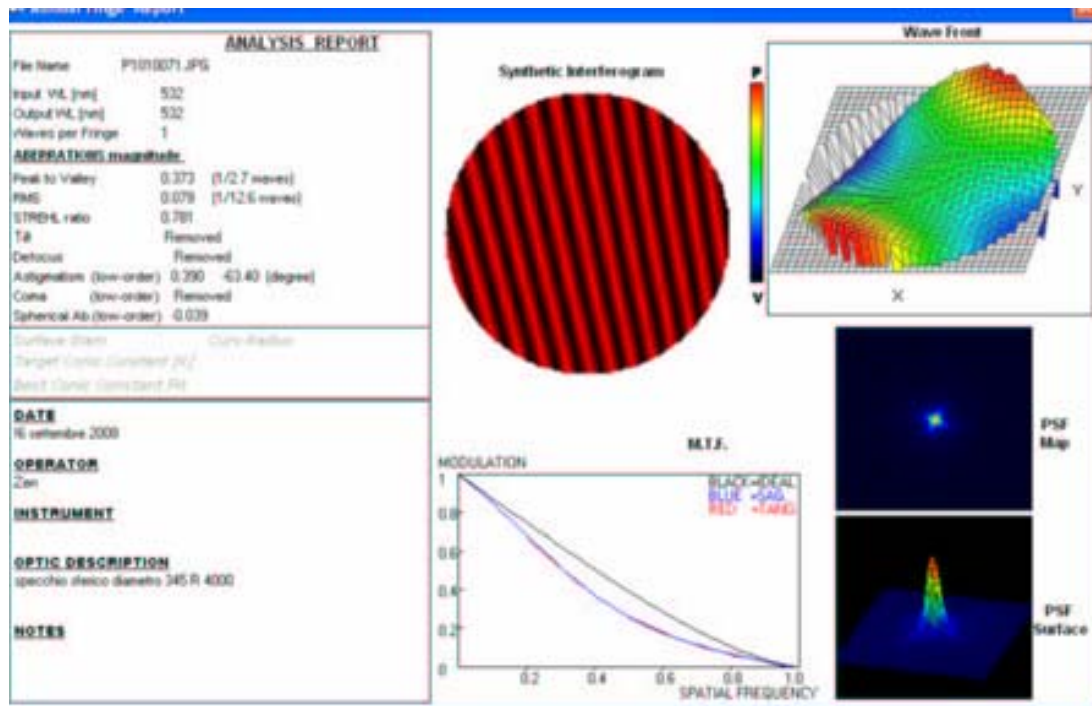


singola immagine di frange, in opposizione invece col metodo del “ phase shifting interferometry “ che si basa invece sull’esame di immagini multiple.

Anche nelle mie esperienze con questo tipo di analisi ho riscontrato che singole immagini dello stesso specchio nelle stesse condizioni possono dare risultati molto diversi.

Lo stesso specchio di cui avete visto nella figura precedente un errore P-V di 1/9.3 d’onda, con un'altra foto fornisce un errore di 1/12.2 lambda e con un'altra foto presa anche questa nelle stesse condizioni senza toccare lo specchio e variando solo il numero delle frange l’errore è valutato 1/2.7 d’onda.





Lo specchio in esame ha un diametro 345 mm con il raggio di curvatura 4000.

La stessa cosa è successa con altre ottiche sia di piccolo che di grande diametro con variazioni nei risultati molto significative soprattutto nella presenza o meno di astigmatismo.

Probabilmente la piccola lente che serve per formare l'onda di riferimento può introdurre se non perfettamente in asse non solo un certo valore di coma, ma anche di astigmatismo per cui risulta molto difficile stabilire quale sia quello eventuale dell'ottica e quale quello introdotto dal sistema.

Anche la turbolenza dell'aria nel laboratorio può influire sulle misure, ho realizzato invece che una foto un video di alcuni secondi e si vedono chiaramente le frange muoversi con leggere ondulazioni.

Forse la strada giusta potrebbe essere quella di prendere, invece di una istantanea, un breve video che poi potrebbe essere elaborato con un programma che ne faccia la media come si fa per le immagini planetarie.

La soluzione migliore però potrebbe essere quella di prendere almeno dieci interferogrammi variando anche l'orientamento dello specchio sul suo supporto e di fare la media dei risultati.

## L'analisi Shack-Hartmann

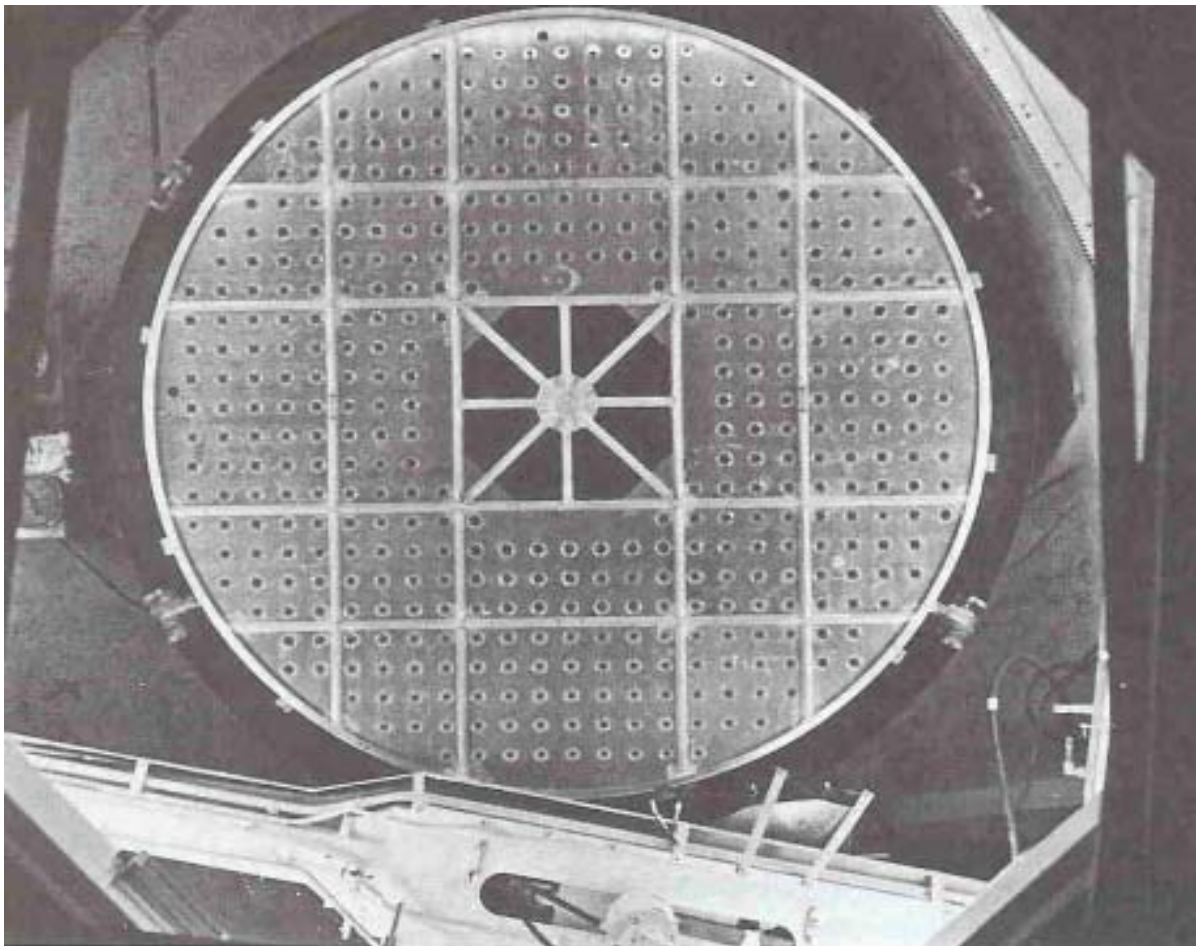
Per testare ottiche professionali molto grandi si usa di solito l'Hartmann test che vi accenno brevemente.

Ponendo una maschera con un grande numero di fori davanti allo specchio da misurare e facendo una fotografia dell'immagine in posizione leggermente intrafocale o anche extrafocale si ottiene un'immagine composta di punti luminosi la cui posizione può dare un'idea molto precisa delle aberrazioni presenti sullo specchio.

Nella figura seguente si vede la maschera usata per testare lo specchio da 4 metri del Kitt Peak. La riduzione dei dati delle posizioni di ciascun punto prese con la massima precisione possibile richiede tempi molto lunghi, ma permette di ottenere una mappa dettagliata di tutta la superficie dello specchio in esame.

Nella figura seguente la mappa realizzata con l'Hartmann test dello specchio da 4 metri del Kitt Peak, ritenuto uno dei migliori al mondo vede errori anche di 4-6 lunghezze d'onda.

Forse sarete sorpresi di vedere errori così grandi, ma si tratta di uno specchio di 4 metri di

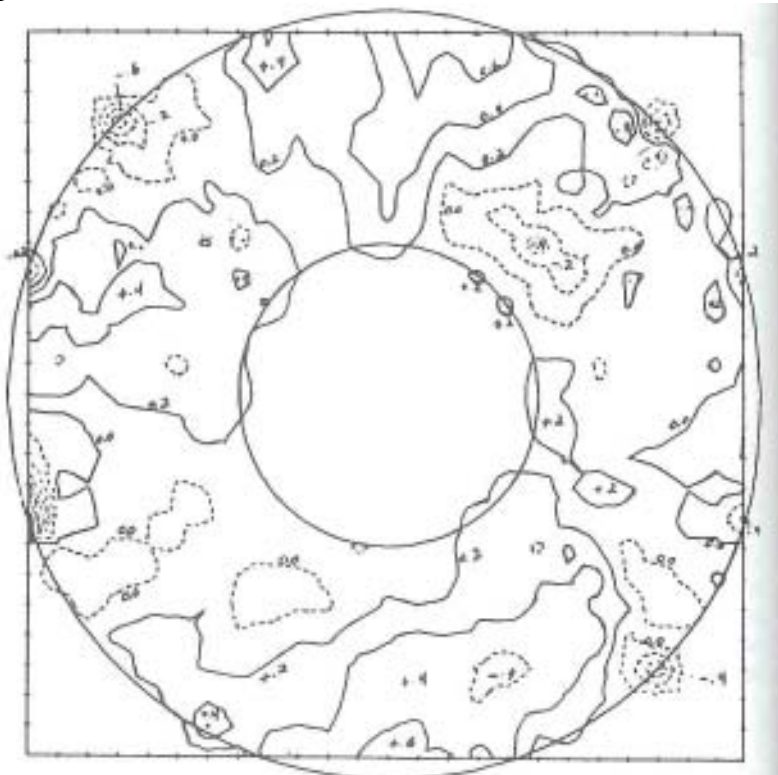


diametro.

E qui apro una parentesi: è doveroso notare che per specchi molto grandi con un diametro superiore al metro non ha senso parlare di precisione in frazioni di  $\lambda$ , visto che la



turbolenza atmosferica non permette mai di arrivare al limite di risoluzione teorica, è preferibile definire la qualità di uno specchio in percentuale di luce entro una frazione di secondo d'arco, una misura che assomiglia molto di più al RMS dello specchio che tiene conto non solo della profondità di un errore, ma soprattutto dell'area interessata e di quanta luce viene deviata dalla posizione ideale al fuoco.



Da questa tecnica deriva un nuovo tipo di analisi del fronte d'onda che è stato sviluppato inizialmente per i sistemi di correzione in tempo reale delle deformazioni nei grandi telescopi. Grazie alla enorme velocità di calcolo dei moderni computer è stato possibile, in frazioni di secondo, analizzare il fronte d'onda, in modo che, deformando opportunamente un elemento, così da annullare o limitare grandemente le aberrazioni sia delle deformazioni statiche dell'ottica, sia quelle causate dalla turbolenza.

Anche con questa tecnica il fronte d'onda viene analizzato matematicamente con le equazioni di Zernike, e ciascuna aberrazione è separata una dalle altre.

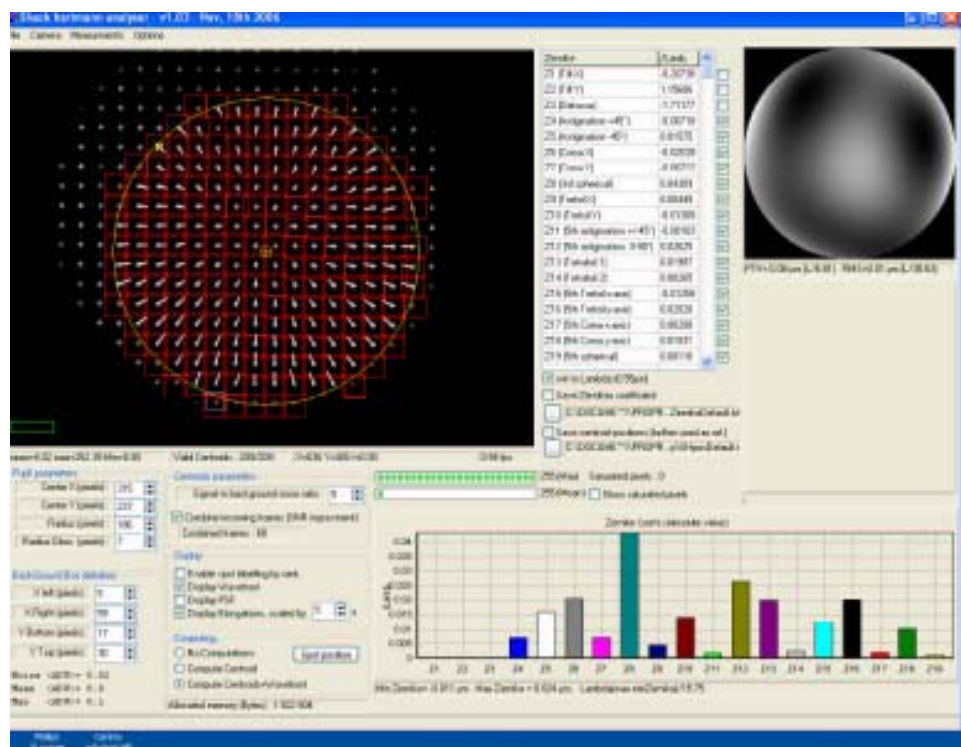
Un astrofilo francese Cyril Cavatore, molto esperto nella programmazione informatica, ha sviluppato un programma che ha chiamato Shack Hartmann Analyzer che permette di analizzare il fronte d'onda di ottiche direttamente puntate in cielo su una stella.

A differenza dell'analisi interferometrica che si effettua su una singola immagine l'analisi viene fatta su un insieme di centinaia di frames per cui è possibile annullare o limitare enormemente l'effetto della turbolenza durante la misura.

Il principio di funzionamento è semplice: l'immagine di una stella viene ricollimato da un

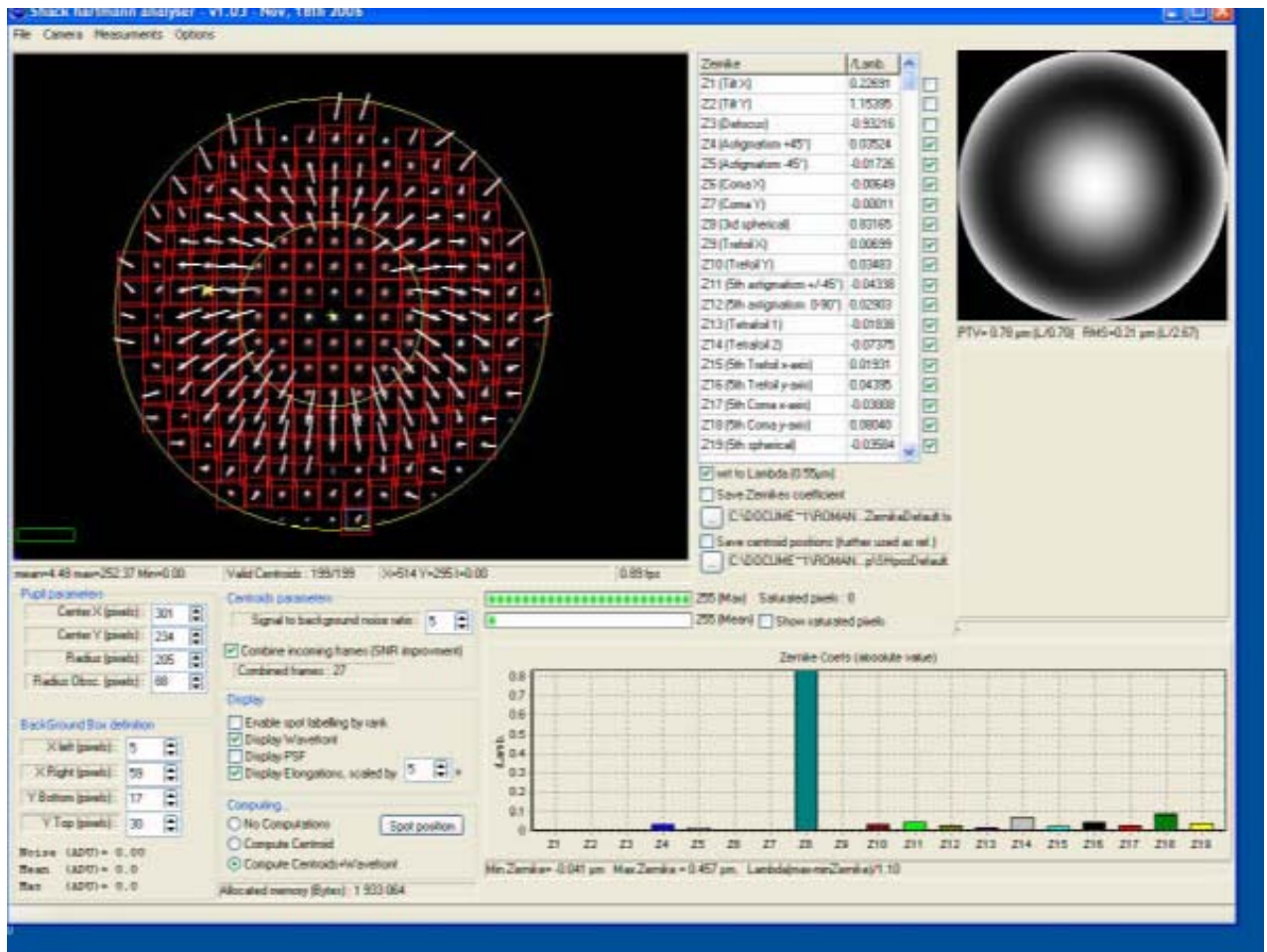


La testa di misura Shack-Hartmann

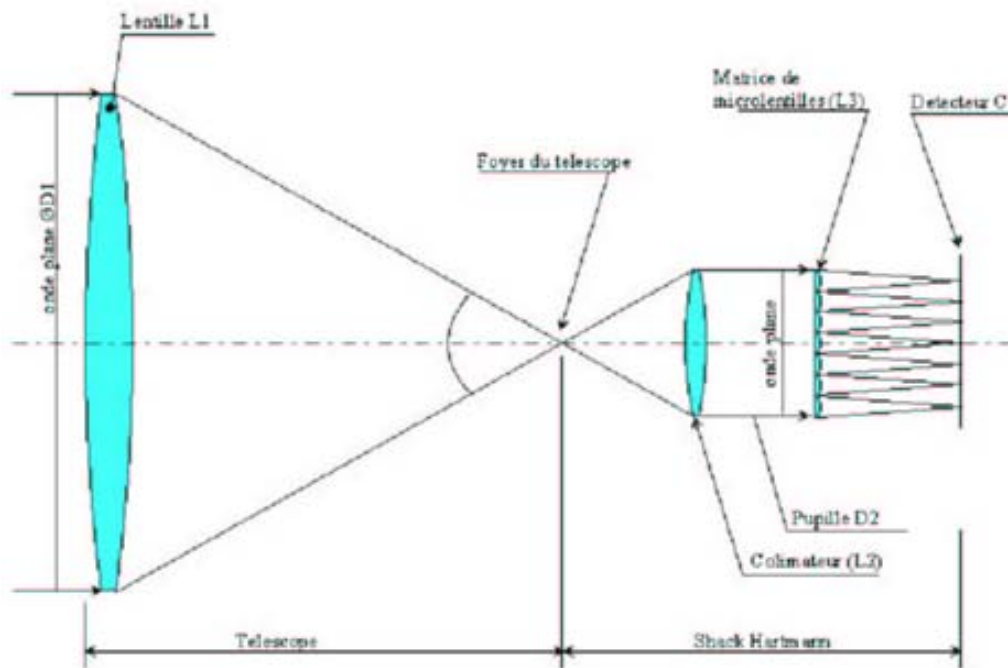


Schermata di un test fatto in cielo di un rifrattore acromatico da 150 mm F1000





Un test per la calibrazione dei parametri della testa S-H fatta in laboratorio. Viene evidenziato il coefficiente Z8 della sferica dato che lo specchio sferico è posto in autocollimazione.



Lo schema di funzionamento di un'analisi S-H

collimatore che riproduce un fronte d'onda piano di pochi mm di diametro, questo fronte viene focalizzato tramite una matrice di microlenti in una matrice di punti immagine su un sensore ccd. Se il fronte d'onda ha delle deformazioni i punti immagine saranno spostati rispetto alla posizione teorica e tramite algoritmi matematici queste deformazioni sono evidenziate con i rispettivi coefficienti di Zernike, gli stessi che risultano nell'analisi interferometrica.

Una testa di misura S-H è quindi composta da un collimatore, funzione questa che può essere assolta da un oculare, da una matrice di microlenti, forse l'elemento più costoso del sistema e da un sensore ccd, di solito di pochi mm di lato.

I dati dell'analisi vengono memorizzati in un file che poi viene confrontato con uno analogo realizzato con un'onda di riferimento un po' come avviene in un interferometro.

Io ho sviluppato un metodo per usare lo stesso principio anche in laboratorio usando un beam splitter in modo da fare il confronto delle due onde, quella in analisi e quella di riferimento senza che le eventuali aberrazioni prodotte dal collimatore o dai piccoli difetti della matrice di microlenti influenzino al misura.

I risultati sono molto promettenti con una corrispondenza ottima tra i valori ricavati da un'analisi interferometrica e una con S-H soprattutto riguardo l'aberrazione sferica che è quella meno influenzata da errori di collimazione come accennavo prima.

Il sistema poi permette di testare ottiche anche molto grandi, difficili da spostare, direttamente in osservatorio verificando anche il livello di collimazione e l'eventuale presenza di deformazioni date dalla cella dello specchio.

Vi ringrazio dell'attenzione.