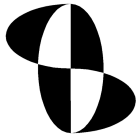


*DISPENSE DI*

PROGETTAZIONE OTTICA  
PROGETTAZIONE DI STRUMENTI OTTICI

Cap.4 – SISTEMI OTTICI

Ing. Fabrizio Liberati



## **Cap. 4 SISTEMI OTTICI**

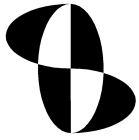
### **4.1 Obiettivi per uso fotografico**

Gli obiettivi per uso fotografico devono garantire prestazioni eccellenti per una immagine di dimensioni molto estese. Su tutta la pellicola, il cui formato più comune è di 24 x 36mm, la risoluzione del sistema ottico non deve limitare la nitidezza della fotografia. Dato che le dimensioni dei grani fotosensibili possono essere di pochi micron, l'MTF deve avere valori elevati a centinaia di coppie di linee per millimetro. La correzione cromatica deve essere effettuata per tutto lo spettro visibile. Il sistema deve poter mettere a fuoco oggetti la cui distanza può andare dall'infinito fino a mezzo metro circa mantenendo prestazioni elevate; nel caso particolare degli obiettivi macro, è richiesta una elevata risoluzione per forti ingrandimenti, cioè con l'oggetto a pochi centimetri di distanza. L'obiettivo deve comprendere un diaframma di apertura con possibilità di ridurre la luminosità a f#22 o oltre. Le pellicole consentono una notevole differenza di esposizione (*latitudine di posa*) che viene sfruttata alle aperture maggiori con un parziale *vignettamento* dei campi più esterni. Per gli obiettivi normali, cioè con campo di vista intorno a 40°, si utilizzano di solito schemi tipo Doppio Gauss o Biotar, pressoché simmetrici intorno allo stop per annullare alcune aberrazioni. Per ingrandimenti superiori si utilizzano i teleobiettivi, cioè schemi in cui la lunghezza del sistema ottico è inferiore alla distanza focale. Molto usati sono anche obiettivi *zoom*, in cui è possibile cambiare distanza focale spostando lungo l'asse ottico alcuni elementi ma mantenendo elevate prestazioni e la posizione dell'immagine sulla pellicola.

### **4.2 Obiettivi per CCD e CMOS**

Gli obiettivi per CCD e CMOS hanno caratteristiche simili a quelli per fotografia. Negli ultimi anni la tecnologia ha consentito una riduzione delle dimensioni degli elementi fotosensibili (i *pixel*) sino a pochissimi micron, per applicazioni in nuovi mercati quali quello dei telefoni cellulari o della sicurezza. Ormai le dimensioni standard dei sensori sono 1/3 e 1/4 di pollice (corrispondenti a 4.8x3.6mm e 3.2x2.4mm), anche se sono disponibili da 1/6 di pollice; solo per sensori di diversi megapixel si usano formati maggiori. Questo comporta una riduzione proporzionale delle distanze focali degli obiettivi a medio campo di vista.

A differenza degli obiettivi per uso fotografico, l'interfaccia tra obiettivo e telecamera è normalizzata e consiste in una filettatura che, avvitata a fondo, pone il piano sensibile sul coniugato di oggetti all'infinito. L'interfaccia di questo tipo più utilizzata era l'*attacco C*, consistente in una filettatura da 1 pollice/32 filetti e distanza tra il piano di riferimento meccanico di battuta dell'obiettivo e il piano focale di 17.526mm. Riducendosi nel tempo le dimensioni dei pixel e degli obiettivi, questa interfaccia è risultata scomoda e si è prima ridotto il *tiraggio* a 12.5mm circa (*attacco CS*), poi si è ricorsi a interfacce più piccole e non ancora normalizzate (filettature 12mmx1 o 10mmx1)



### 4.3 Sistemi afocali

I sistemi afocali sono costituiti da due lenti o gruppi di lenti posizionati in modo che i piani focali dei due gruppi coincidano, cioè in posizione *confocale*. La distanza focale risultante è infinita in quanto un fronte d'onda piano in ingresso emergerà dal sistema ottico nominalmente piano, a parte le aberrazioni che in questo caso si intendono angolari. I due gruppi costituenti il sistema afocale possono essere entrambi positivi o uno positivo e l'altro negativo; nel primo caso il sistema focalizza al suo interno un'immagine reale, mentre nel secondo l'immagine comune ai due gruppi è virtuale. Se le focali dei due gruppi sono diverse, come si verifica normalmente, il sistema afocale produce un *ingrandimento* oppure una *riduzione angolare* che è pari al rapporto tra le focali oppure all'inverso dei rapporti tra i diametri delle pupille. Questa proprietà viene utilizzata per ridurre l'angolo di divergenza dei fasci laser, oppure per ottenere un fascio di proprietà ottiche migliori, mettendo nel fuoco comune un forellino (pin-hole) che filtra le parti spurie del laser. Altre frequenti applicazioni dei sistemi afocali sono i *telescopi galileiani* e i moltiplicatori di focali. La figura 4.1 riporta gli schemi di un sistema afocale a due gruppi positivi con pin-hole per filtraggio di un laser e riduzione della divergenza e a gruppo negativo e positivo per beam expander semplice o per un telescopio galileiano.

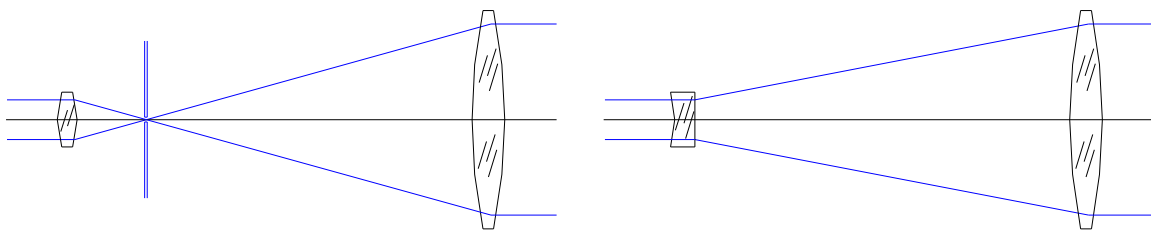


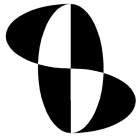
figura 4.1

Rispetto al beam expander, il progetto del telescopio è più complesso perché ha un campo di vista ampio e perché occorre una correzione cromatica completa che si deve realizzare per ciascuno dei due gruppi utilizzando più materiali di dispersione diversa.

### 4.4 Sistemi riflessivi e catadiottrici

I *sistemi ottici riflessivi* sono costituiti da specchi dotati di potenza con eventuali elementi rifrattivi per la correzione delle aberrazioni. Nei *sistemi catadiottrici* sono presenti anche lenti con contributo in termini di diottrie non trascurabile.

I sistemi riflessivi sono esenti da cromatismo e possono avere prestazioni eccellenti per aperture anche elevate, ma per piccoli campi di vista, mentre i catadiottri possono essere corretti per campi ampi e si utilizzano anche in fotografia. Nel caso di doppio rinvio il rapporto tra focale ed ingombro è per entrambi molto favorevole.



I sistemi riflessivi comportano spesso l'inconveniente dell'ostruzione nella zona centrale dell'apertura che li rende inutilizzabili in molte applicazioni.

Spesso si ricorre a schermaggi per evitare che la luce anziché subire le rifrazioni e le riflessioni previste penetri direttamente disturbando l'immagine primaria (*stray light*).

Per quanto riguarda le tolleranze di costruzione, occorre dire che gli errori di forma delle superfici riflettenti sono più critici di quelli del vetro: mentre per un materiale con indice di rifrazione 1.5 la deformazione del fronte d'onda che lo attraversa è circa la metà dell'errore di forma, per gli specchi è doppia.

L'applicazione tipica è quella astronomica, ma sono frequenti anche gli utilizzi nell'infrarosso, ove occorrono aperture notevoli e i materiali trasparenti sono costosi.

Di solito gli specchi sono di vetro, per l'esperienza e la relativa facilità di lavorazione, ma possono essere anche di metallo, in leghe o materiali compositi leggeri. In questo caso, se il materiale che costituisce lo specchio è lo stesso della struttura e il sistema è solo riflessivo, l'obiettivo è insensibile alle variazioni termiche in quanto lo spostamento dell'immagine ne segue esattamente le deformazioni.

Gli schemi riflessivi più comuni ed un esempio di sistema catadiottro sono raffigurati in figura 3.7.

#### **4.5 Teleobiettivi**

Lo schema del teleobiettivo si usa quando vogliamo una focale più lunga dell'ingombro disponibile per il sistema ottico. Questo si ottiene ponendo dopo un gruppo positivo un elemento negativo che ne riduca la potenza, in modo da allontanare la posizione dell'immagine; come detto la distanza focale equivalente si ottiene prolungando i raggi marginali che hanno attraversato il sistema ottico sino all'intersezione con gli stessi raggi indisturbati che non lo hanno ancora raggiunto: il sistema equivale ad una lente semplice di focale pari alla distanza da questa intersezione al piano immagine (figura 4.2).

Occorre precisare che se si vogliono ottenere anche prestazioni elevate, il rapporto tra la focale e la lunghezza del sistema ottico non dovrà superare  $1.5 \div 2$ .

I campi di vista non possono essere elevati sia per la lunga focale, sia perché sono limitati dalle dimensioni del gruppo negativo. Questo schema si usa molto in fotografia e negli altri casi in cui si debbano contenere gli ingombri di un sistema di focale lunga.

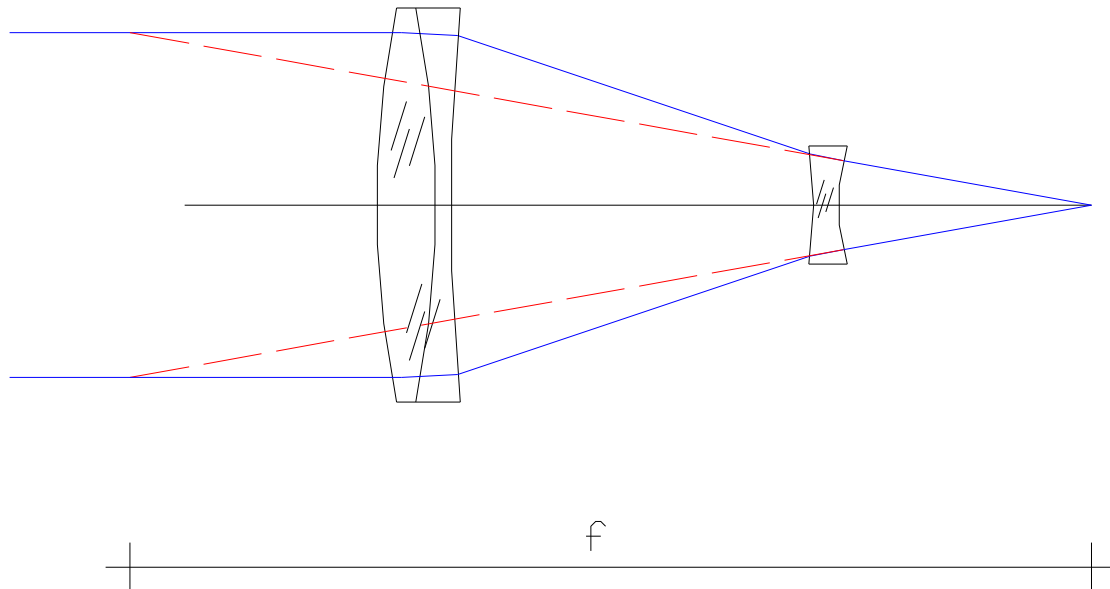
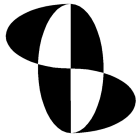


Figura 4.2

Nei teleobiettivi generalmente la pupilla di ingresso è posta nelle vicinanze della prima lente, mentre la pupilla di uscita risulta nello spazio oggetto, esternamente al sistema ottico (si veda di nuovo la figura 4.2).

#### 4.6 Sistemi telecentrici

I sistemi *telecentrici* sono caratterizzati dal fatto che la pupilla di ingresso si trova nominalmente all'infinito. Naturalmente la posizione dell'oggetto non può coincidere con quella della pupilla di ingresso, e quindi si deve trovare a distanza finita. Per ottenere la condizione di telecentricità, il diaframma di apertura si deve trovare nel piano focale della parte di sistema ottico che lo precede. Dato che la pupilla di ingresso è all'infinito, il raggio principale è parallelo all'asse ottico e il campo inquadrato è di poco inferiore alle dimensioni della prima lente del sistema ottico. Da questo fatto deriva la proprietà per cui vengono utilizzati i sistemi telecentrici: al variare della distanza tra l'oggetto e il sistema ottico, il raggio principale resta lo stesso. Pertanto l'allontanarsi dell'oggetto non determina una variazione delle dimensioni dell'immagine e quindi dell'ingrandimento che il sistema ottico ne produce, ma semplicemente la sua immagine passerà attraverso il fuoco migliore. L'apertura numerica nello spazio oggetto risulta di solito bassa, altrimenti le lenti dell'obiettivo (almeno la prima lente) crescerebbero a dismisura. Il grado di telecentricità si misura con l'angolo che il raggio principale, cioè quello che passerà attraverso il centro del diaframma di apertura, forma con l'asse ottico.

I sistemi telecentrici sono impiegati sempre più largamente nei sistemi di visione su CCD ed in particolare per la misura dimensionale automatica. La figura 4.3 ne mostra un esempio.

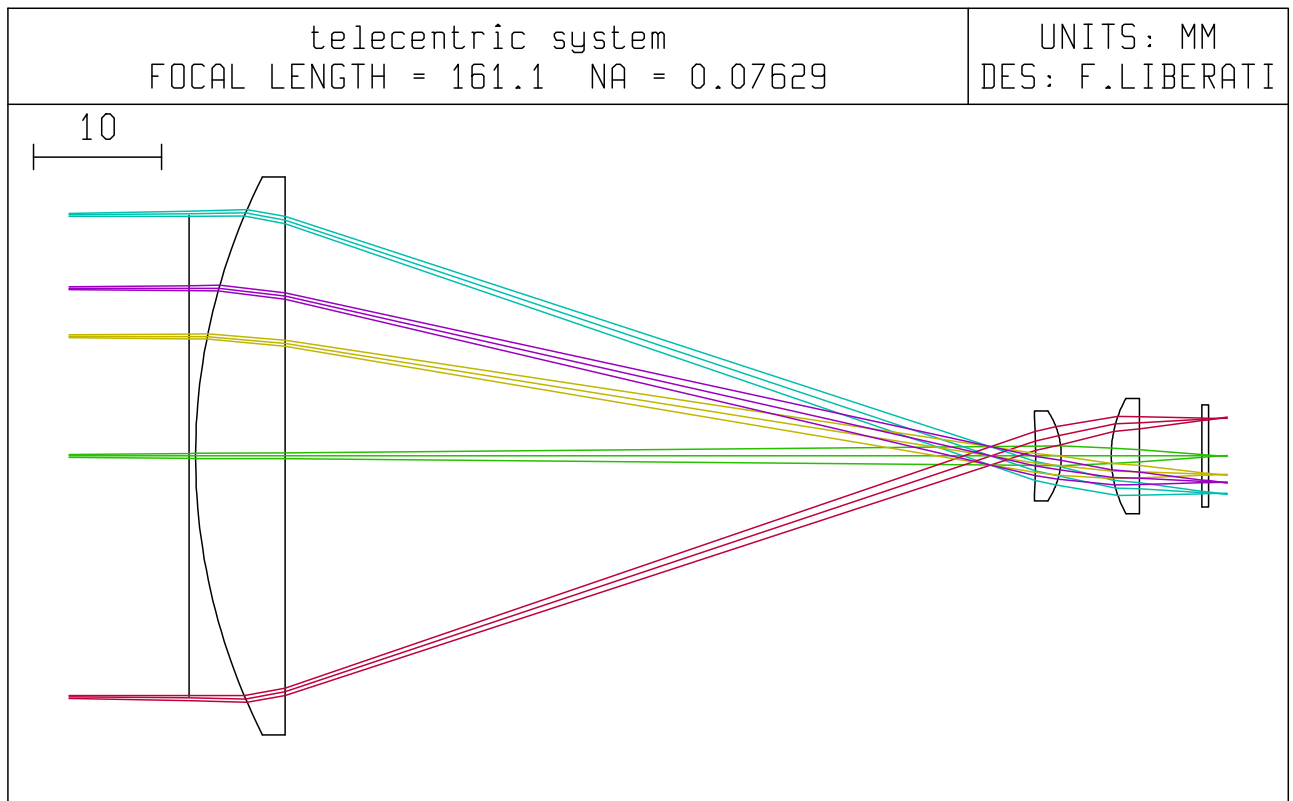


Figura 4.3

#### 4.7 Grandangoli

Gli obiettivi *grandangolari* sono utilizzati soprattutto in fotografia per riprese a campo di vista molto esteso. Per questo motivo la distanza focale è molto corta. Nello schema sono caratterizzati dal fatto di avere come primo elemento ottico più esterno un gruppo negativo, necessario a convogliare verso il diaframma di apertura, sempre posto all'interno del sistema ottico, fasci di luce provenienti da un ampio campo di vista. Per il particolare schema ottico sono anche detti *teleobiettivi invertiti* (*reverse telephoto* o *retrofocus*). Nei grandangoli la distorsione è una aberrazione è notevole. Gli obiettivi *fish-eye* ne rappresentano l'estremizzazione riuscendo a raggiungere campi vicini o superiori ai 180° totali: in questo caso gli elementi negativi esterni possono anche essere due o più e molto potenti. I fish-eye non solo sono affetti da distorsione molto accentuata, ma addirittura senza di essa non potrebbero fisicamente raggiungere campi di vista così ampi in quanto le dimensioni dell'immagine tenderebbero all'infinito.

La figura 4.4 riporta un esempio di fish eye.

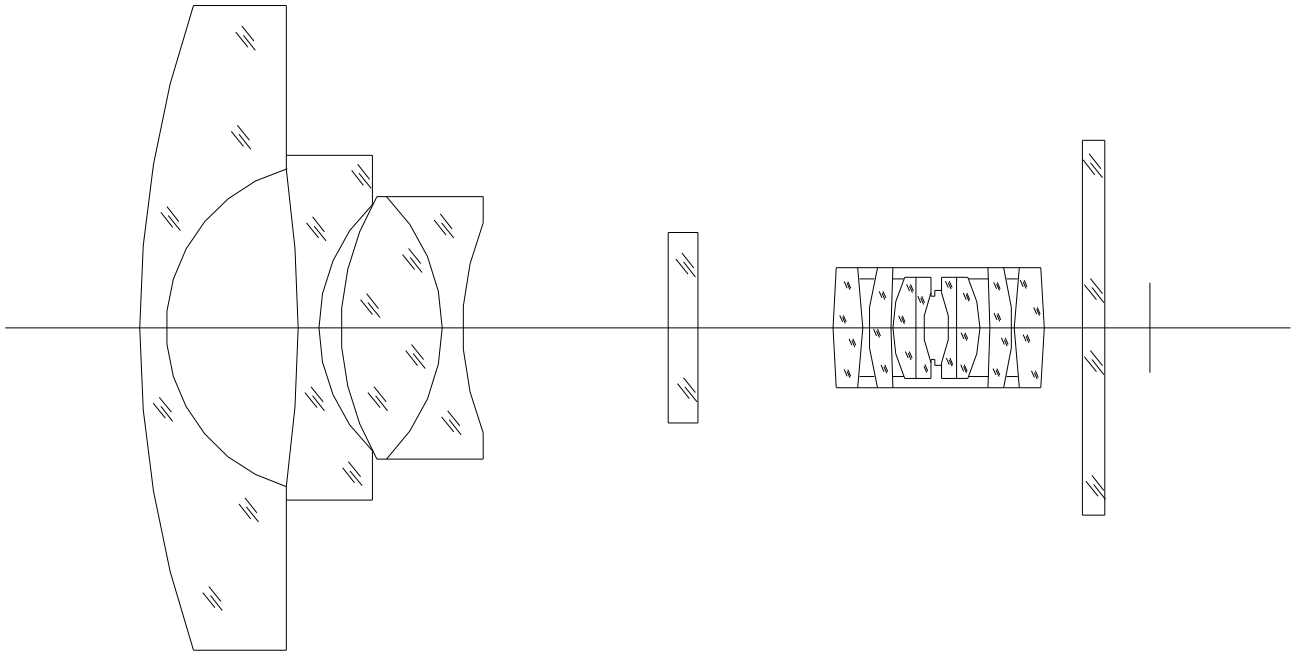


Figura 4.4

#### 4.8 Zoom

Con gli obiettivi *zoom* si possono ottenere diverse distanze focali traslando lungo l'asse ottico alcuni elementi o gruppi di elementi mantenendo invariata la posizione dell'immagine. I gruppi che costituiscono lo schema ottico sono posti nell'ordine positivo o negativo seguendo lo schema di base di un teleobiettivo o grandangolo a seconda che si tratti di un sistema la cui focale intermedia sia più o meno lunga. Uno degli schemi più usati, in quanto consente una ampia escursione focale, è quello che prevede una parte anteriore zoom afocale costituita da tre gruppi positivo, negativo e positivo (+ - +), seguita da un sistema di focalizzazione posteriore fisso e che perciò mantiene la posizione dell'immagine. Spostando il gruppo negativo e quello positivo lungo l'asse ottico, si realizza un ingrandimento angolare variabile che viene trasformato dal gruppo di focalizzazione in una dimensione dell'immagine variabile. La figura 4.5 mostra lo schema di uno zoom in due diverse posizioni e lo spostamento effettuato dai gruppi per raggiungere la seconda configurazione.

Da quanto le macchine fotografiche sono state dotate di sistemi di messa a fuoco automatica, non è più necessario che l'obiettivo al variare della focale mantenga rigorosamente il fuoco, in quanto questa funzione è assolta in tempo reale dal sistema stesso; pertanto gli obiettivi zoom si sono relativamente semplificati come progettazione e come costruzione e si parla più propriamente di obiettivi *multifocale* anziché di zoom.

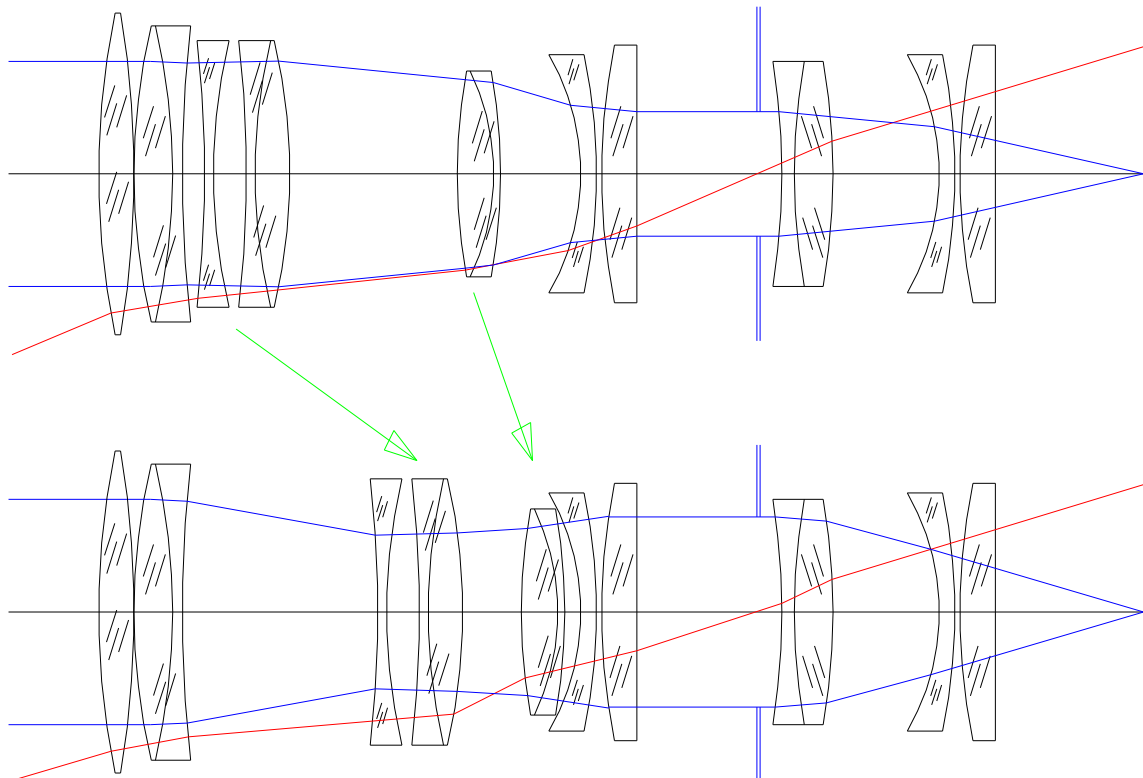
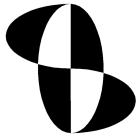


Figura 4.5

Gli zoom utilizzati nel cinema o in fotografia hanno un numero rilevante di elementi in quanto devono risultare corretti per le aberrazioni in tutte le posizioni. Ciascun gruppo deve essere acromatizzato singolarmente e tutto il sistema lo deve essere anche per la cromatica laterale.

Per la progettazione di sistemi zoom, i programmi di calcolo hanno una sezione a parte detta multiconfigurazione. Tra le diverse configurazioni (o posizioni di zoom) è possibile variare alcuni parametri costruttivi (distanze tra gli elementi o altro) e alcuni requisiti (come ad esempio la distanza focale richiesta). Il programma esegue l'ottimizzazione parallelamente, in base ad una funzione di merito globale che viene costruita per l'insieme delle posizioni di zoom volute.