



## Sommario

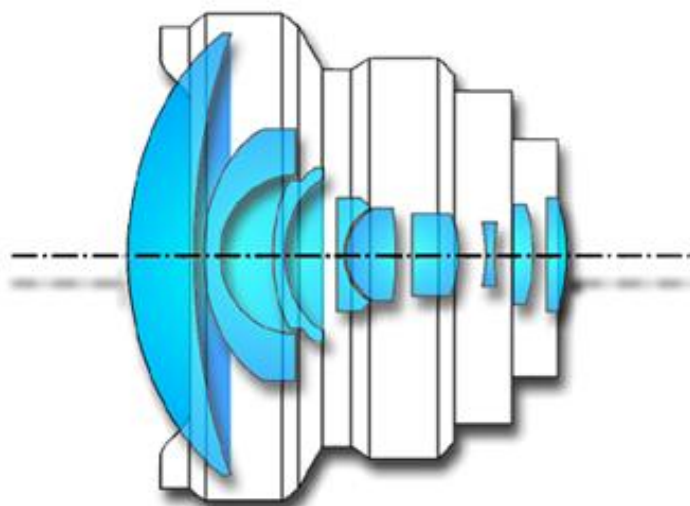
Ottica degli obiettivi.....	3
Sistemi di messa a fuoco interna e posteriore.....	7
Combinazioni di lenti.....	10
Esempi di combinazioni di lenti.....	11
Angolo di campo.....	15
Cerchio di copertura.....	19
Circolo di confusione.....	24
Profondità di campo.....	30
Variabili della profondità di campo.....	32
Calcolo della profondità di campo.....	38
Profondità di fuoco.....	40
Calcolo della profondità di fuoco.....	41
Distanza iperfocale.....	42
Calcolo della distanza iperfocale.....	43
Classificazione degli obiettivi.....	44
Obiettivi a corta focale.....	45
Obiettivi normali.....	53
Obiettivi a lunga focale.....	54
Obiettivi zoom.....	58
Obiettivi basculabili e decentrabili.....	63
Obiettivi macro, da ingrandimento, da proiezione.....	65
Trattamento antiriflesso.....	69

<b>Ottica degli strati antiriflesso.....</b>	<b>72</b>
<b>Deposizione sottovuoto degli strati antiriflesso .....</b>	<b>85</b>
<b>Prospettiva nella ripresa foto-video .....</b>	<b>91</b>

## Ottica degli obiettivi

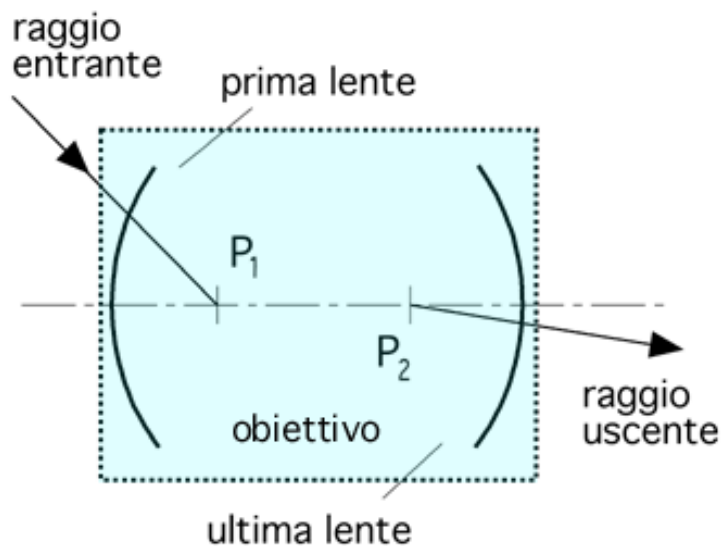
---

Poiché una lente semplice è affetta da aberrazioni che le impediscono di generare immagini corrette, un obiettivo sarà costituito da un insieme di lenti, selezionate al fine di ottenere la migliore correzione possibile, che si comportano globalmente come una lente singola che proietta l'immagine sul piano focale.

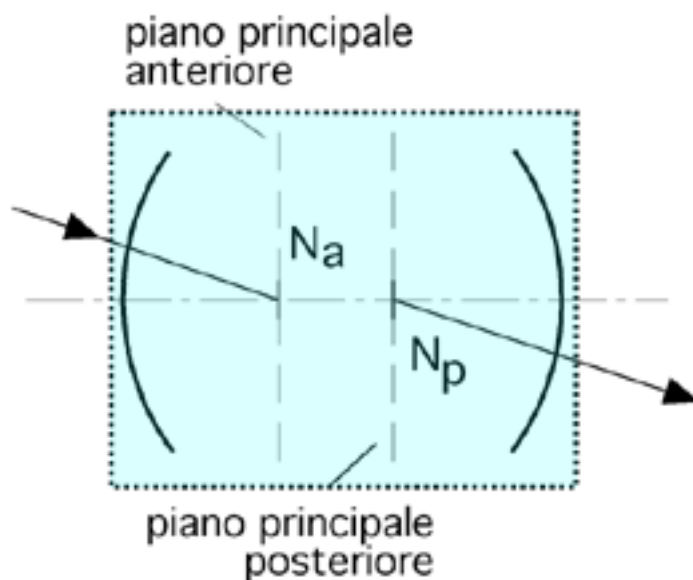


Anche l'obiettivo ha quindi una sua lunghezza focale, positiva. Nel caso delle lenti semplici sottili, si calcola questa distanza rispetto al loro centro, ma la lunghezza di un obiettivo composto non è più trascurabile rispetto alla focale e quindi questa definizione semplificata non è più valida.

Un raggio di luce generico che entra nell'obiettivo ne uscirà dalla parte opposta con un angolo diverso. Se si prolunga la traiettoria sino ad incontrare l'asse ottico, si otterrà un punto  $P_1$ , verso il quale sembra diretto. La stessa operazione sul raggio uscente ci darà il punto  $P_2$ , da cui sembra provenire.

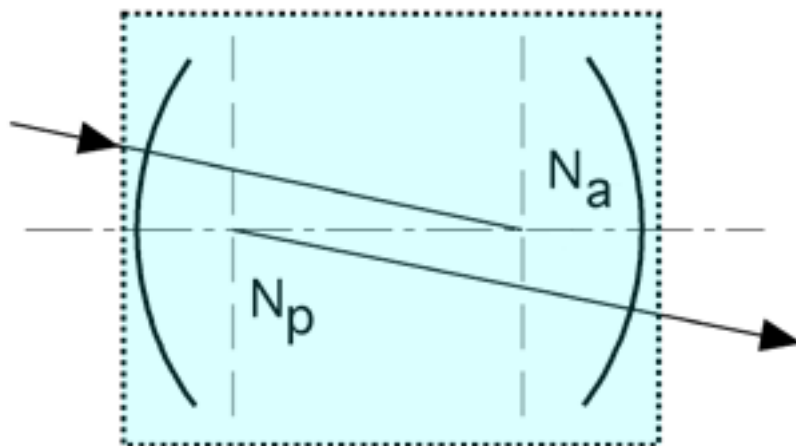


Tra tutti i punti possibili ne esiste uno,  $N_a$ , che gode della proprietà per cui tutti i raggi che lo attraversano riemergono dall'altra parte dell'obiettivo paralleli a loro stessi. I raggi uscenti sembrano provenire dal punto  $N_p$ .



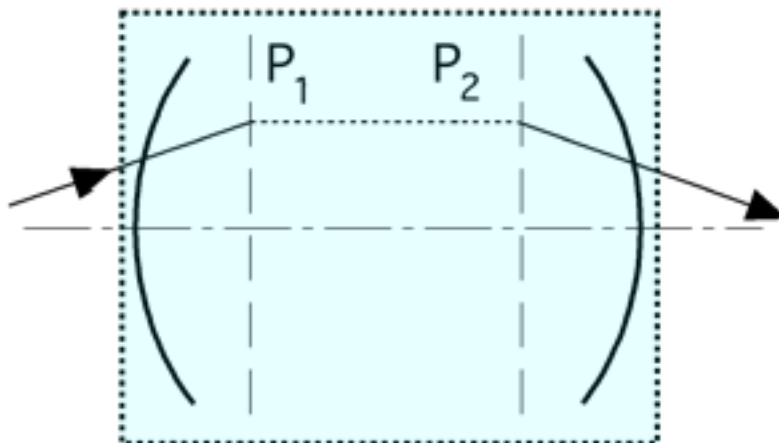
Il punto  $N_a$  è detto **punto nodale anteriore**, mentre il punto  $N_p$  è detto **punto nodale posteriore**. A loro volta, i piani che contengono  $N_a$  e  $N_p$  sono detti, rispettivamente, **piano nodale (o piano principale) anteriore** e **piano nodale (o piano principale) posteriore**.

La definizione "anteriore" e "posteriore" può generare confusione. In effetti, non è detto che il piano anteriore si trovi "davanti" e quello posteriore "dietro"; in realtà non è nemmeno detto che entrambi si trovino all'interno dell'obiettivo.

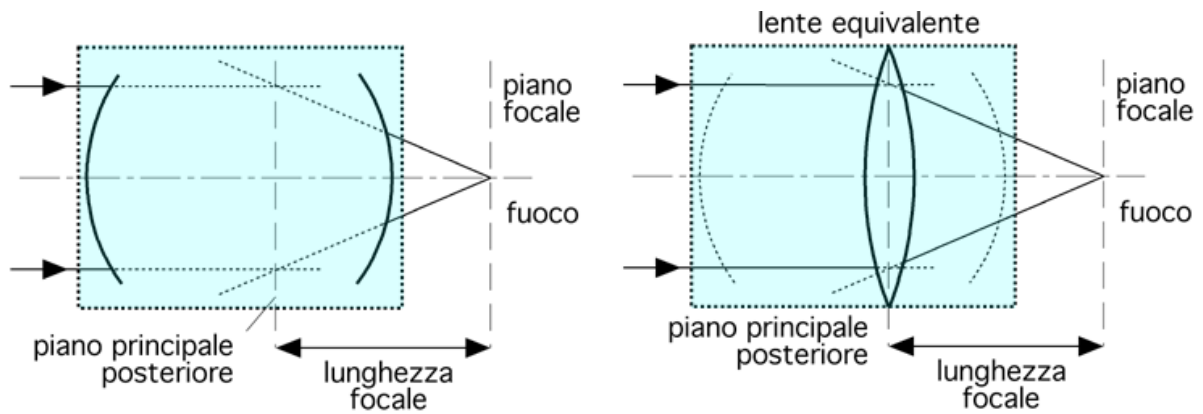


**Il piano nodale anteriore è il piano relativo ai raggi di luce entranti ed il piano nodale posteriore è il piano relativo ai raggi di luce uscenti**, indipendentemente dalla loro posizione effettiva rispetto all'obiettivo.

Il punto di intersezione del raggio entrante con il piano principale anteriore e quello corrispondente dove il raggio uscente interseca il piano principale posteriore sono alla stessa distanza dall'asse ottico.



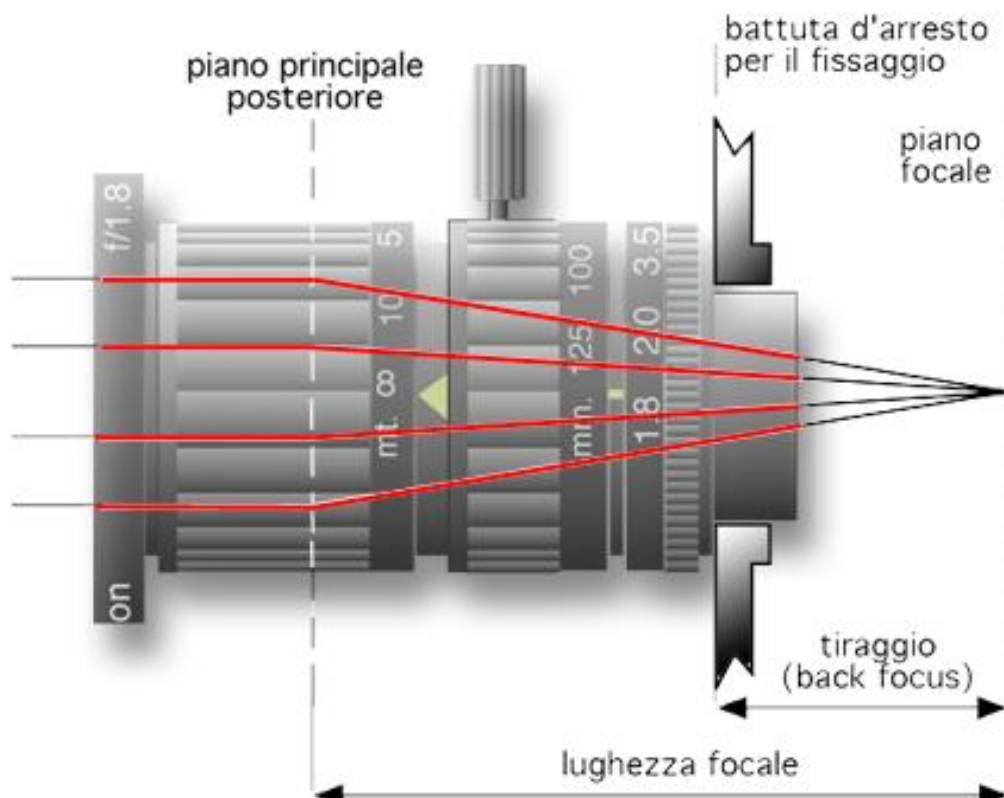
Ora, è possibile ridefinire correttamente il concetto di lunghezza focale equivalente:



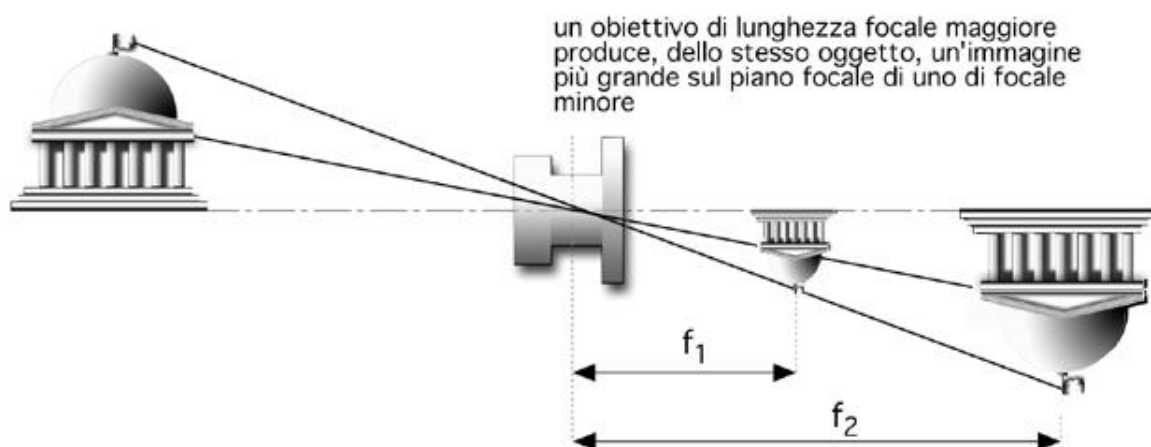
**La lunghezza focale equivalente di un obiettivo è la distanza alla quale vengono fatti convergere (fuoco) i raggi paralleli entranti misurata dal piano principale posteriore.**

Si parla di lunghezza focale equivalente (in breve, lunghezza focale) giacchè qualsiasi obiettivo equivale a una lente semplice convergente di uguale lunghezza focale, posta in coincidenza del piano principale posteriore. Per individuare la posizione del piano principale posteriore, basta semplicemente intersecare i prolungamenti dei raggi entranti e di quelli uscenti.

Il **tiraggio, o back focus**, è la distanza che intercorre tra il piano di fissaggio dell'obiettivo e il piano focale e di solito è molto diverso dalla lunghezza focale.



La lunghezza focale determina il modo in cui l'obiettivo vede la scena ripresa.



## Sistemi di messa a fuoco interna e posteriore

Fino all'avvento dell'autofocus, i progettisti di obiettivi manuali hanno utilizzato schemi ottici e meccanici con **messa a fuoco all-group**, in cui si spostano insieme tutti i gruppi di lenti lungo l'asse ottico, o **front-group**, in cui si muove solo il gruppo frontale.

Inizialmente adottati anche sugli obiettivi autofocus, questi sistemi necessitano però di una maggiore potenza da parte del meccanismo di comando e riducono di fatto le velocità di messa a fuoco automatica. La necessità di gruppi frontali più grandi invece limita la creazione di obiettivi compatti.

La maggior parte degli obiettivi moderni utilizza invece due diversi sistemi di messa a fuoco.

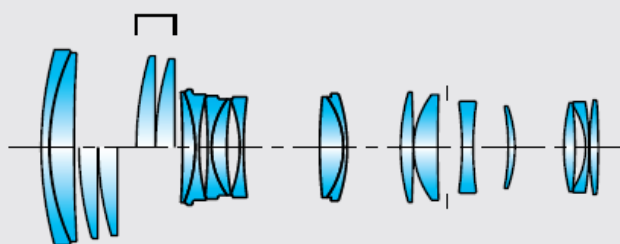
### Messa a fuoco interna

Nota anche come **Internal Focusing (IF)**, necessita di uno schema ottico dove il gruppo mobile di messa a fuoco è posto tra la lente frontale ed il diaframma:



### ● Inner Focus

APO 70-200mm F2.8 II EX DG MACRO HSM



La messa a fuoco interna non modifica l'ingombro esterno dell'obiettivo al variare della distanza del soggetto ripreso. Poiché i movimenti ottici sono confinati all'interno del barilotto di lunghezza fissa, questo sistema ha permesso di progettare teleobiettivi più luminosi, compatti e leggeri.

**Messa a fuoco  
posteriore**

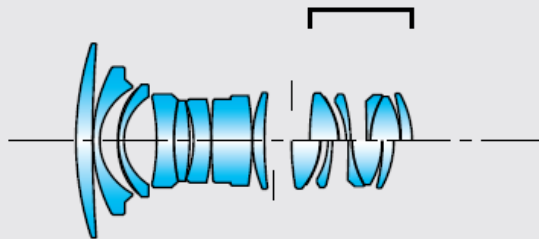
Nota anche come **Rear Focusing (RF)**, necessita di uno schema ottico dove il gruppo mobile di messa a fuoco è posto dietro il diaframma:





#### ●Rear Focus

20mm F1.8 EX DG ASPHERICAL RF



Poiché i gruppi di lenti posteriori sono più piccoli di quelli anteriori, soprattutto nei teleobiettivi molto luminosi, la messa a fuoco posteriore consente di spostare le lenti in modo più preciso e rapido.

L'adozione di questi sistemi ha permesso di ridurre la distanza minima di messa a fuoco degli obiettivi e di semplificare l'utilizzo del filtro polarizzatore, dato che la lente frontale non ruota.

## Combinazioni di lenti

---

Molte applicazioni ottiche obbligano ad impiegare più lenti al fine di ottenere prestazioni di livello accettabile. Uno dei possibili approcci alla combinazione di lenti è di considerare l'immagine formata da ciascuna lente come il soggetto di quella successiva e così via. Benché valido, questo metodo richiede tempo e non è indispensabile.

È più semplice innanzitutto determinare la lunghezza focale equivalente (combinata) e le posizioni dei punti principali e successivamente utilizzare questi risultati nelle equazioni parassiali e nei calcoli dell'invariante ottica.

### **Lunghezza focale equivalente**

Le formule che seguono servono a calcolare la lunghezza focale equivalente e le posizioni dei punti principali per una combinazione di due componenti arbitrari qualsiasi. L'approccio per più di due lenti è molto semplice: si determinano i valori per i primi due elementi, quindi si esegue lo stesso calcolo per questa combinazione con la lente successiva e si continua così fino all'ultima lente del sistema.

Le formule parassiali sono valide per **combinazioni coassiali** di lenti sottili e spesse, immerse in aria o altro fluido con indice di rifrazione indipendente dalla posizione. Si assume che la luce si propaghi da sinistra a destra attraverso il sistema ottico.

L'equazione per la lunghezza focale equivalente non cambia al variare della distanza  $d$  tra le lenti e del segno delle loro focali  $f_1$  e  $f_2$ :

$$f = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_1 + f_2 - d}$$

Più frequentemente, questa relazione è espressa nella forma sottostante:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 \cdot f_2}$$

Si noti che il risultato di questa formula, al contrario delle successive due, non muta scambiando le posizioni per  $d$  costante.

### Posizione del fuoco

Per tutti i valori di  $d$ ,  $f_1$  e  $f_2$ , la posizione del fuoco del sistema combinato ( $s_2''$ ), misurata a partire dal punto principale secondario della seconda lente ( $H_2''$ ), è data da:

$$s_2'' = \frac{f_2(f_1 - d) - d}{f_1 + f_2 - d}$$

La lunghezza focale è evidenziabile nella forma canonica ponendo  $s_1 = d - f_1$ :

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2''}$$

### Posizione del punto principale secondario

Poiché l'approssimazione delle lenti sottili non è valida nella maggior parte dei casi, la capacità di determinare la posizione del punto principale secondario è fondamentale per stabilire in modo accurato il valore di  $d$  qualora si aggiunga un altro elemento. La formula più semplice è quella che permette di calcolare la distanza tra il punto principale secondario dell'elemento finale (secondo elemento) ed il punto principale secondario della combinazione:

$$z = s_2'' - f$$

## Esempi di combinazioni di lenti

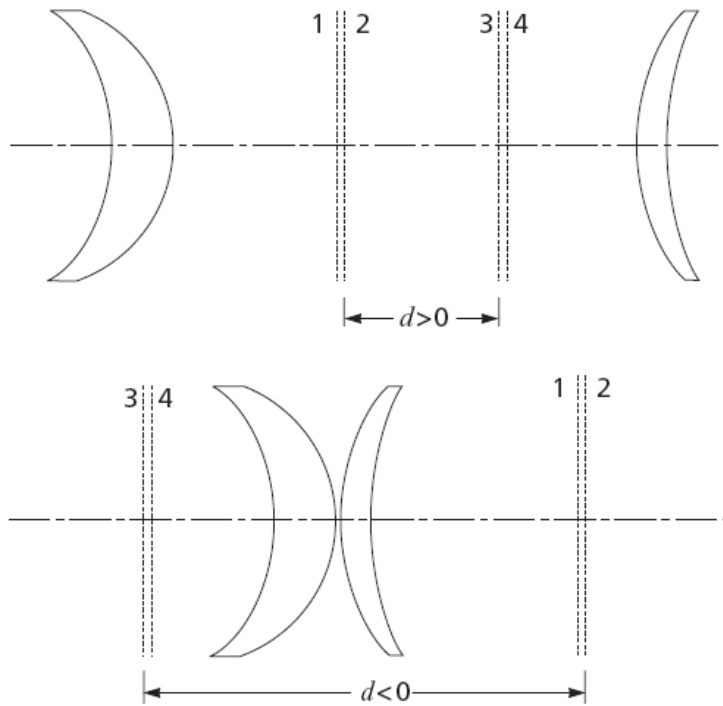
---

Alcune lenti o combinazioni di lenti sono caratterizzate da piani principali in posizione esterna. Questo può portare alla formazione di sistemi ottici caratterizzati da valori negativi di  $d$ .

#### Menischi "estremi"

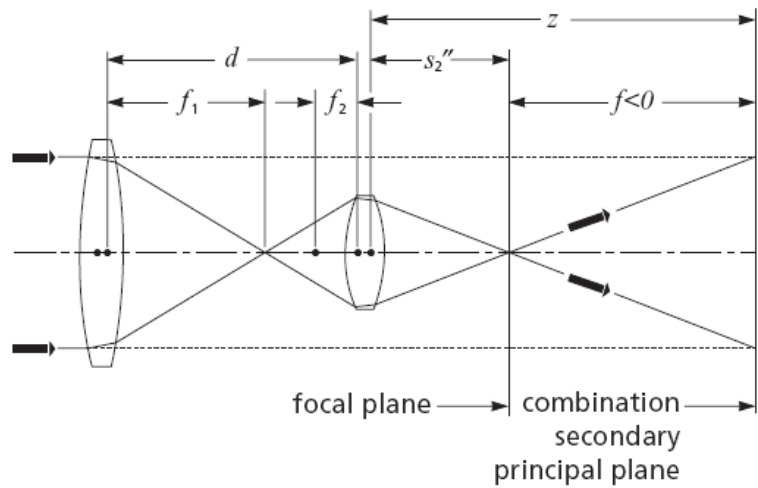
I menischi con superfici a grande curvatura presentano piani principali esterni. Portando a

contatto due di queste lenti, si può ottenere un valore negativo di  $d$  (disegno non in scala).



**Lenti positive con  $d > (f_1 + f_2)$**

$f$  è negativa, mentre  $s_2''$  e  $z$  sono entrambe positive. Non è necessario che le lenti siano simmetriche.

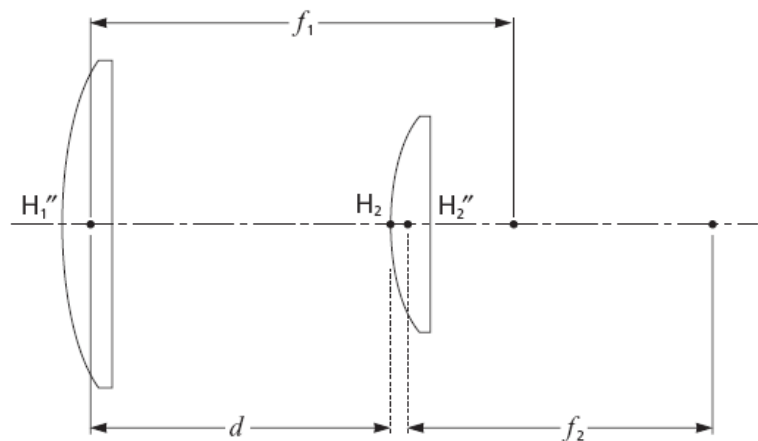


### Combinazione acromatica

Le combinazioni di lenti spaziate in aria possono essere rese pressoché acromatiche, anche qualora entrambi gli elementi siano fatti dello stesso materiale. Per ottenere l'acromatismo nel caso di lenti sottili, è necessario che:

$$d = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

Questa approssimazione è adeguata per la maggior parte delle configurazioni con lenti sottili. I segni di  $d$ ,  $f_1$  e  $f_2$  non sono vincolanti, ma  $d$  deve avere un valore tale che le lenti non siano a contatto. La forma degli elementi non è vincolante e può essere selezionata in funzione della correzione delle altre aberrazioni.

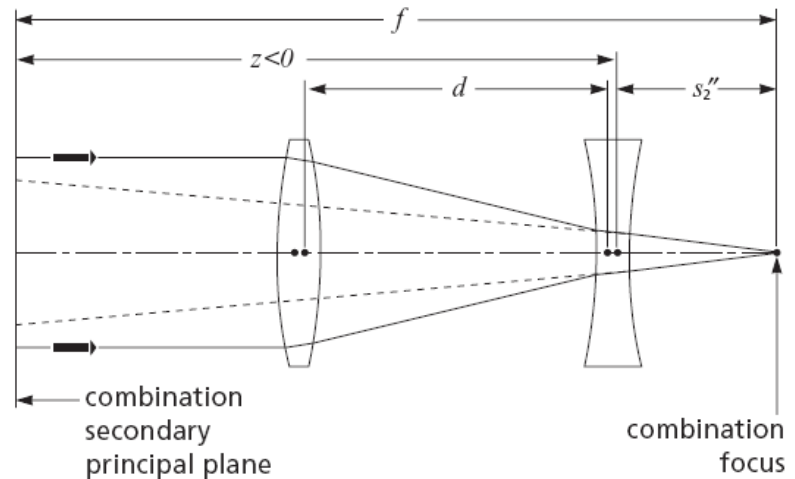


### Configurazione a teleobiettivo

La più importante caratteristica dei teleobiettivi è la possibilità di ottenere una lunghezza focale equivalente maggiore della distanza della prima lente dall'immagine, grazie all'impiego di una lente positive seguita da una lente negativa (non necessariamente caratterizzate dalle forme indicate in figura).

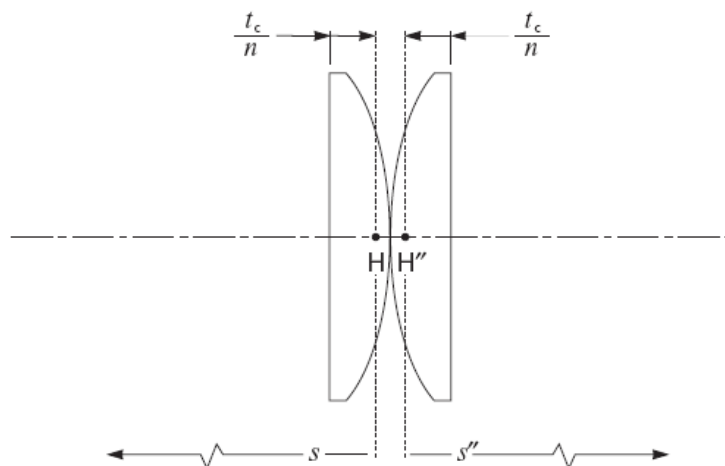
Ad esempio, sia  $f_1 > 0$  e  $f_2 = -f_1/2$ :

- $f < 0$  per  $d < f_1/2$ ,
- $f = \infty$  per  $d = f_1/2$  (come nel telescopio galileiano o in un espansore di fasci ottici),
- $f > 0$  per  $d > f_1/2$ .



#### Configurazione a condensatore

I vertici convessi di due lenti piano-convesse identiche sono a contatto (la coppia può anche essere di tipo asferico). Poiché  $d = 0$ , allora  $f = f_1/2 = f_2/2$ ,  $f_1/2 = s_2''$  e  $z = 0$ . Il punto principale secondario del secondo elemento ed il punto principale secondario della combinazione coincidono in  $H''$ , alla distanza  $t_c/n$  dal vertice della superficie piana del secondo elemento, dove  $t_c$  e  $n$  sono rispettivamente lo spessore centrale e l'indice di rifrazione dell'elemento. Per simmetria, il punto principale primario della combinazione è posizionato analogamente nel primo elemento. Le distanze coniugate della combinazione vanno misurate rispetto a questi punti.

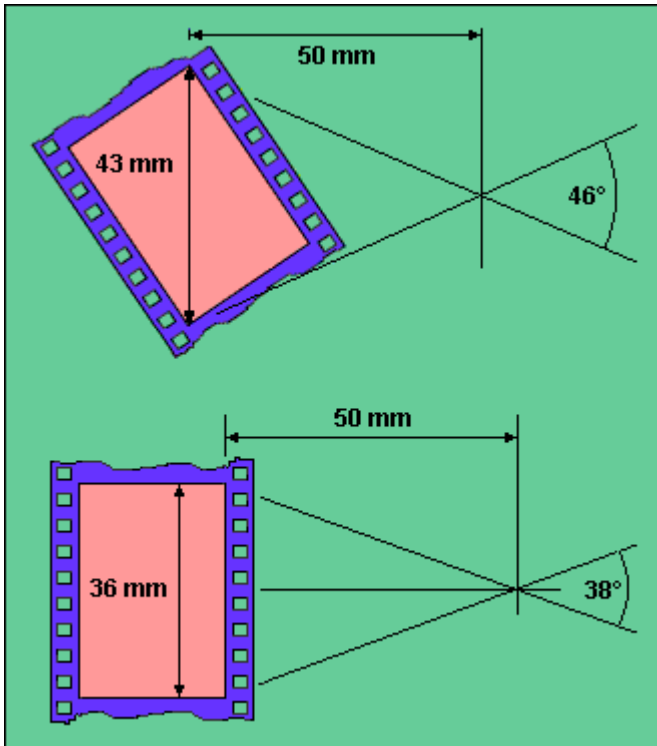


## Angolo di campo

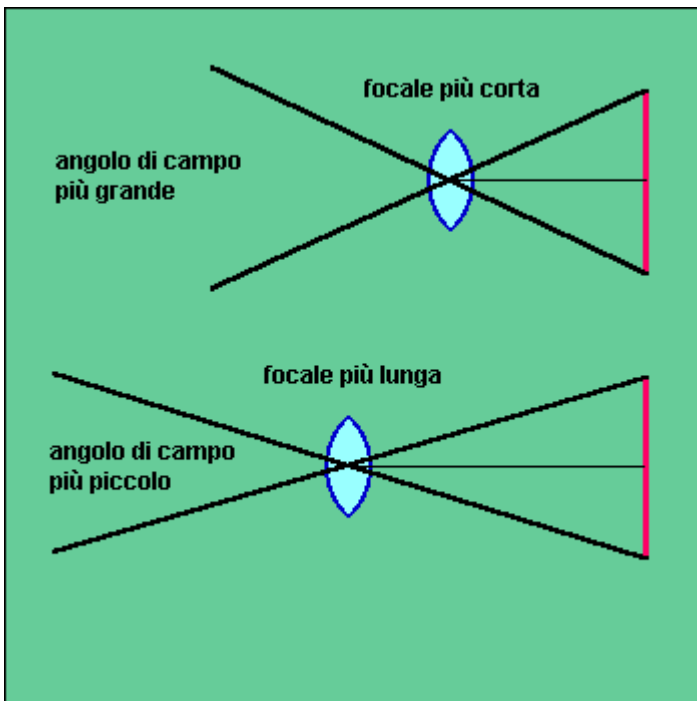
Per un dato **formato di fotogramma**, la **lunghezza focale** di un obiettivo determina il suo **angolo di campo**. È importante notare che l'angolo di campo di un obiettivo non dipende soltanto dalla sua focale, ma anche dalla **grandezza del fotogramma** che esso deve coprire.

Ad esempio, si consideri uno dei formati più diffusi, ossia il 24x36 mm, noto anche come 35 mm, dalla larghezza della pellicola perforata. Con questo formato, l'obiettivo normale ha una lunghezza focale di 50 mm e ricopre la diagonale del fotogramma.

Da semplici considerazioni geometriche si ricava che l'angolo di campo, in questo caso, è circa di  $46^\circ$ . Se invece ci si riferisce al lato più lungo del fotogramma (36 mm), si ottengono  $38^\circ$ ; questo è l'effettivo angolo di campo per inquadrature orizzontali con la focale e il formato suddetti.

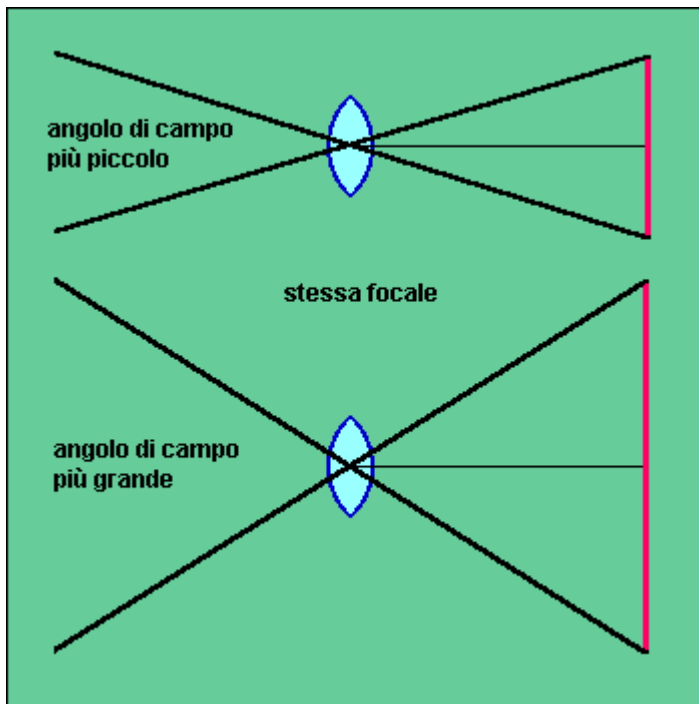


A parità di formato, un obiettivo di focale più lunga è caratterizzato da un angolo di campo più ristretto:



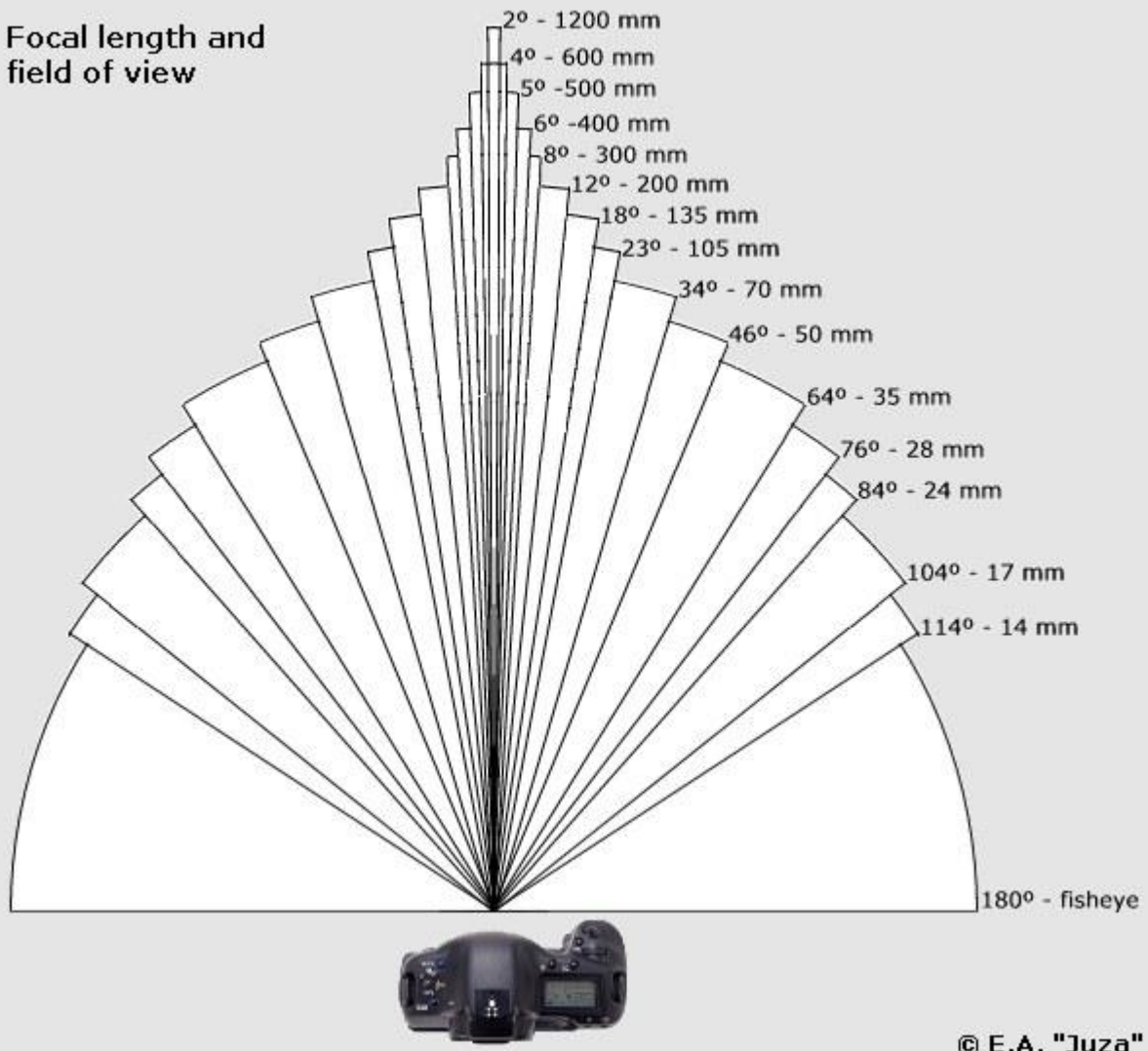
Invece, a parità di lunghezza focale, si ottiene un angolo di campo più ampio usando un formato di fotogramma più grande:

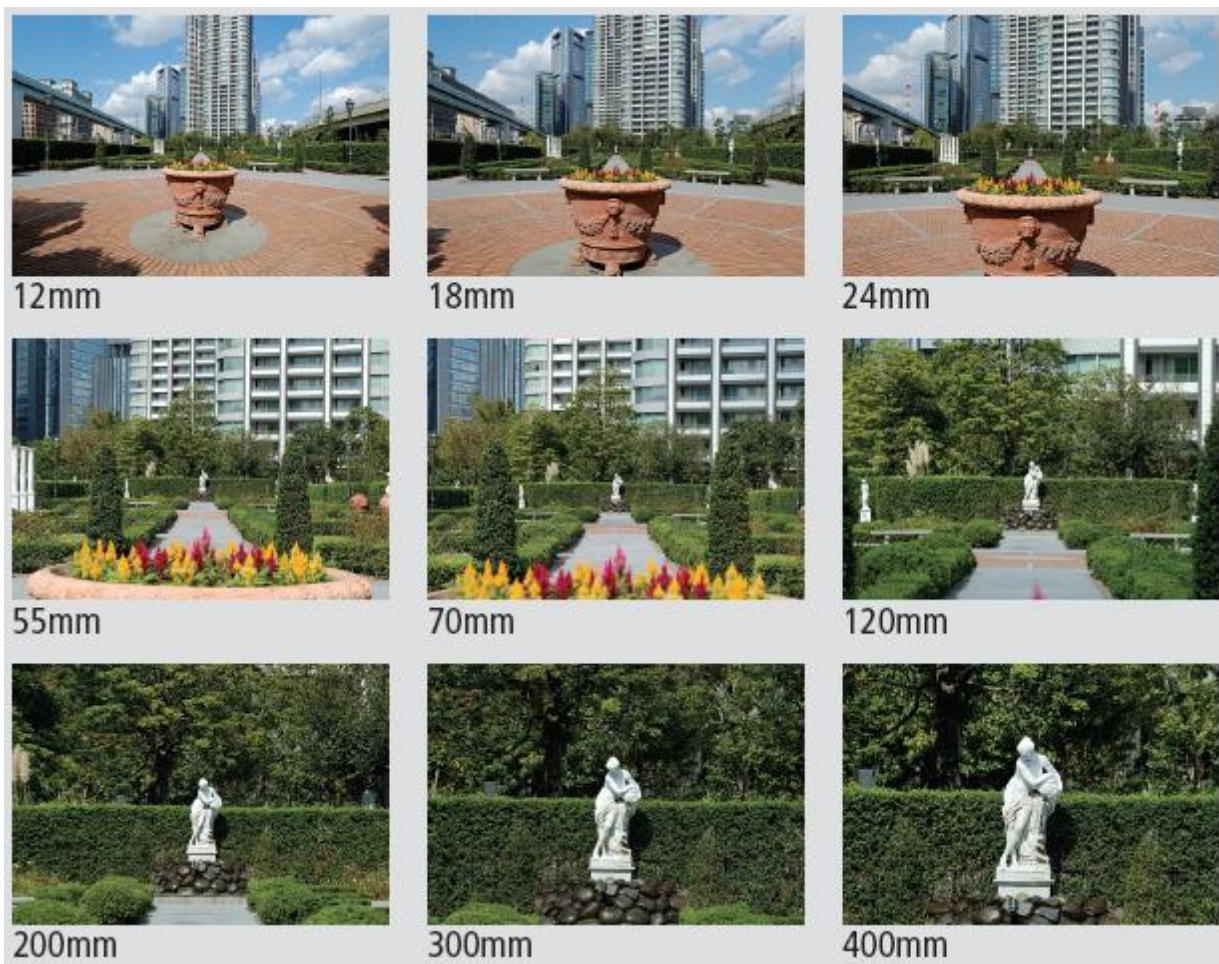




La figura sottostante rappresenta graficamente il variare dell'angolo di campo al cambiare della focale nel formato 24x36 mm.

# Focal length and field of view

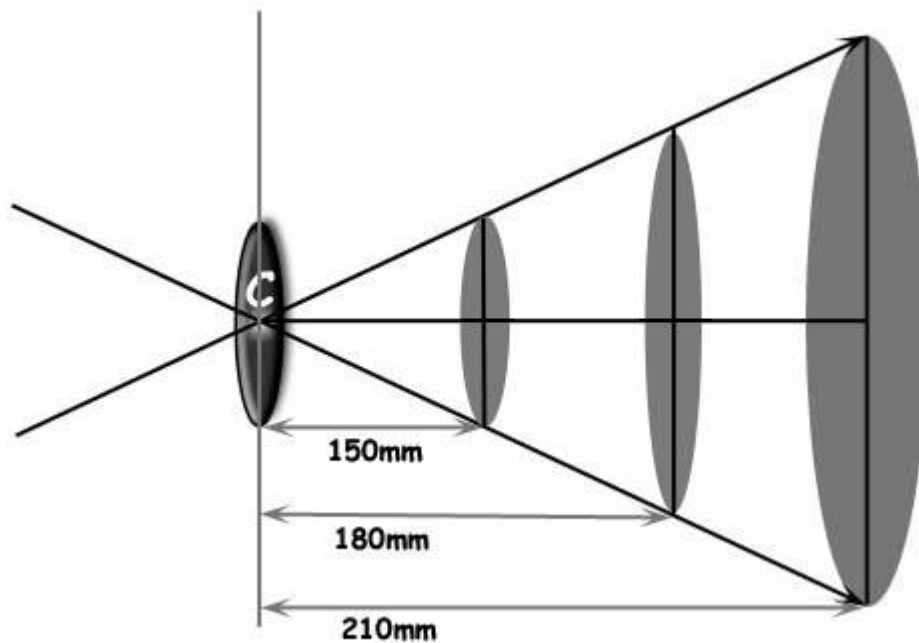




## Cerchio di copertura

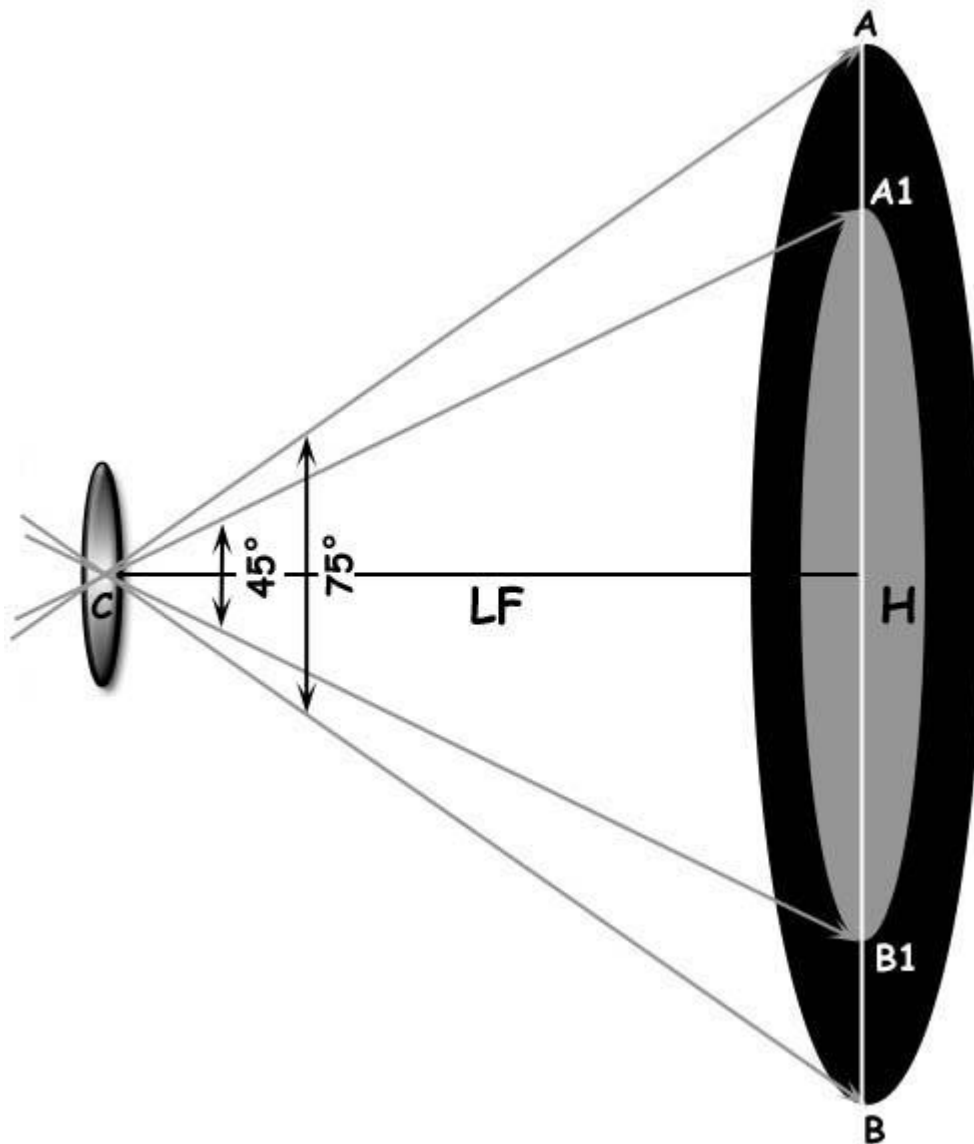
Negli obiettivi destinati agli apparecchi a corpi mobili, l'angolo di campo è indipendente dalla focale e quindi obiettivi di focale diversa possono avere lo stesso angolo di campo. In questo caso, ciò che cambia è il cerchio immagine proiettato sul piano focale, cioè **l'area circolare dell'immagine corretta dalle aberrazioni e con perdita di luminosità accettabile dal centro ai bordi.**

Si supponga di avere tre obiettivi di focale diversa, rispettivamente 150, 180 e 210 mm, caratterizzati dal medesimo angolo di campo.



Cambiando l'altezza del triangolo, e quindi la sezione del cono di raggi, cambia anche la base del triangolo, cioè il diametro del cerchio immagine. Si vede quindi come al crescere della focale cresca anche il cerchio immagine (o cerchio di copertura) dell'ottica. Di conseguenza, si può affermare che, a parità di angolo di campo, le focali maggiori presentano un cerchio di copertura proporzionalmente maggiore. Nel cerchio di copertura generato dall'obiettivo di 150 mm, può essere inscritto un fotogramma più piccolo che nel cerchio di copertura generato dagli obiettivi di focale più lunga; per contro, se un formato coperto dal 150 mm viene inscritto nel cerchio di copertura generato da una focale maggiore, ecco che si manifesta la possibilità di spostare il formato all'interno del cerchio di copertura. È su questo principio che si basano la teoria e la pratica dei decentramenti e dei basculaggi.

A parità di lunghezza focale, angoli di campo diversi generano cerchi immagine differenti.



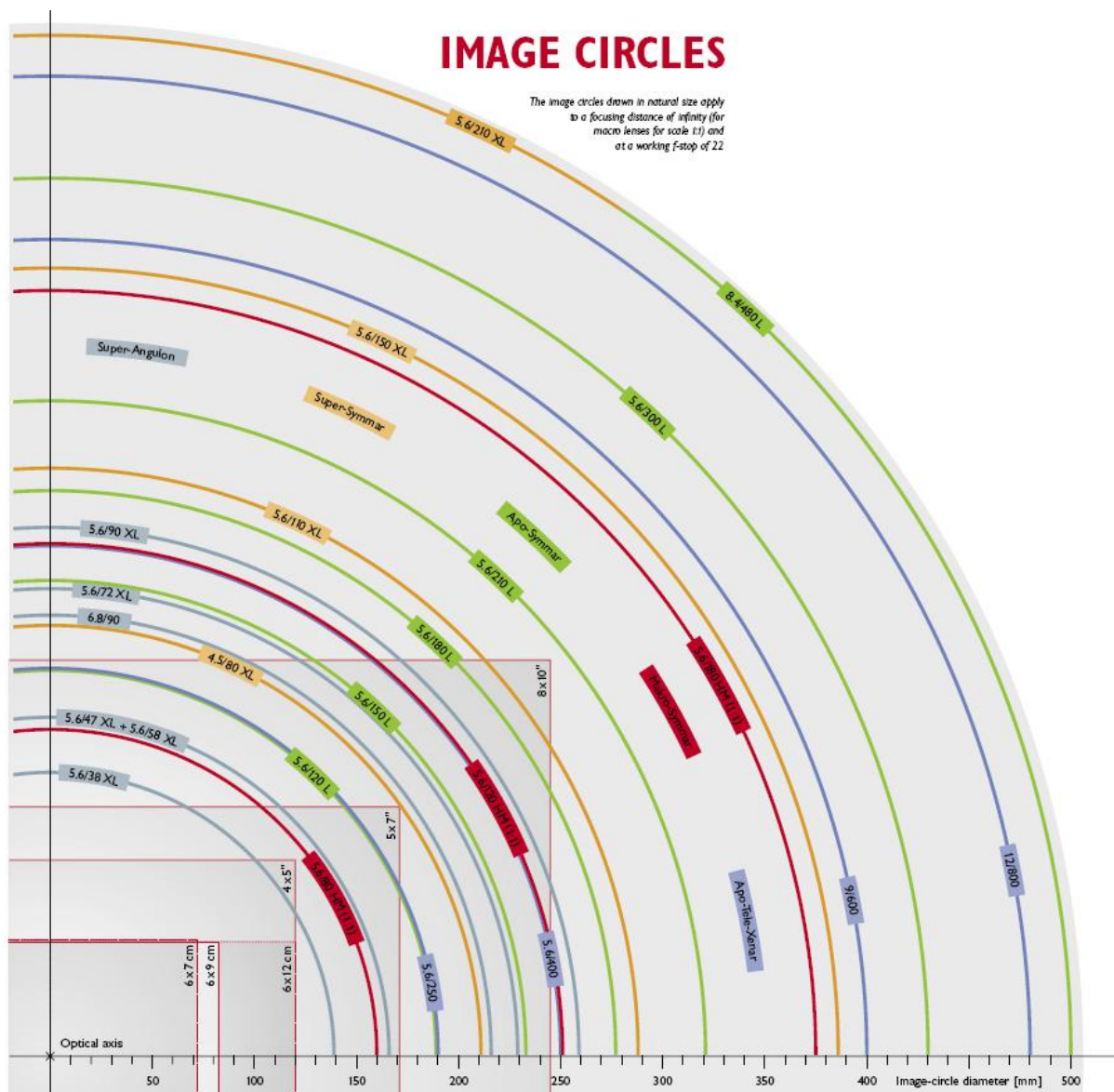
Ne consegue che, a parità di lunghezza focale, l'obiettivo caratterizzato da un maggiore angolo di campo, e conseguentemente da un maggiore cerchio di copertura, può essere usato per coprire formati maggiori.  
 Si considerino, ad esempio, due obiettivi della stessa casa, lo Schneider Apo-Symmar L 150mm f/5,6 con angolo di campo di 75°:



e lo Schneider Super-Symmar XL 150mm f/5,6 con angolo di campo di 105°:

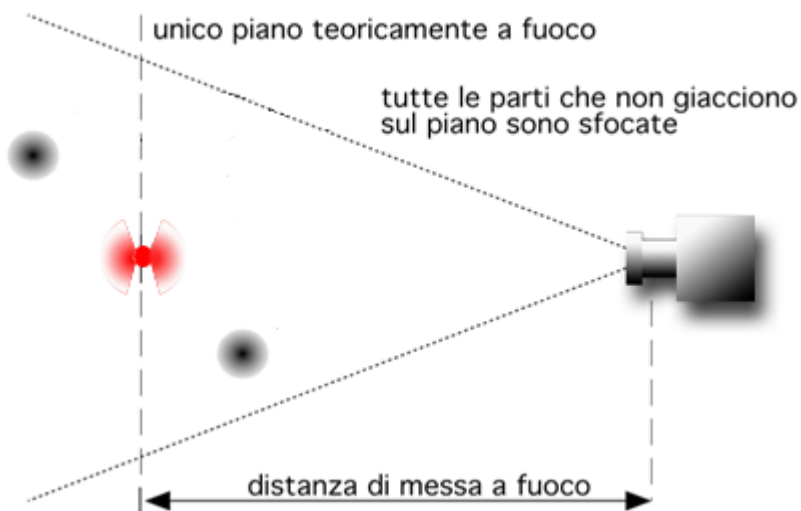


Entrambi possono essere usati sul formato 4x5" (10x12 cm), fornendo immagini identiche come inquadratura e prospettiva. Tuttavia, mentre l'Apo-Symmar, con il suo cerchio di copertura di 233 mm, può coprire il formato 4x5" con movimenti e il 5x7" senza movimenti (su questo formato si comporterà come un grandangolo moderato), il Super-Symmar, con il suo cerchio di copertura di 386 mm, è in grado di coprire il formato 8x10" con movimenti, comportandosi da grandangolare medio.



## Circolo di confusione

In linea teorica solo i punti dell'oggetto che giacciono su di un preciso piano possono dare un'immagine nitida sul piano focale; punti a qualsiasi altra distanza risulteranno sfocati.



Se in teoria questo piano ha uno spessore infinitesimo, in realtà l'immagine appare nitida entro una fascia più o meno profonda della scena.

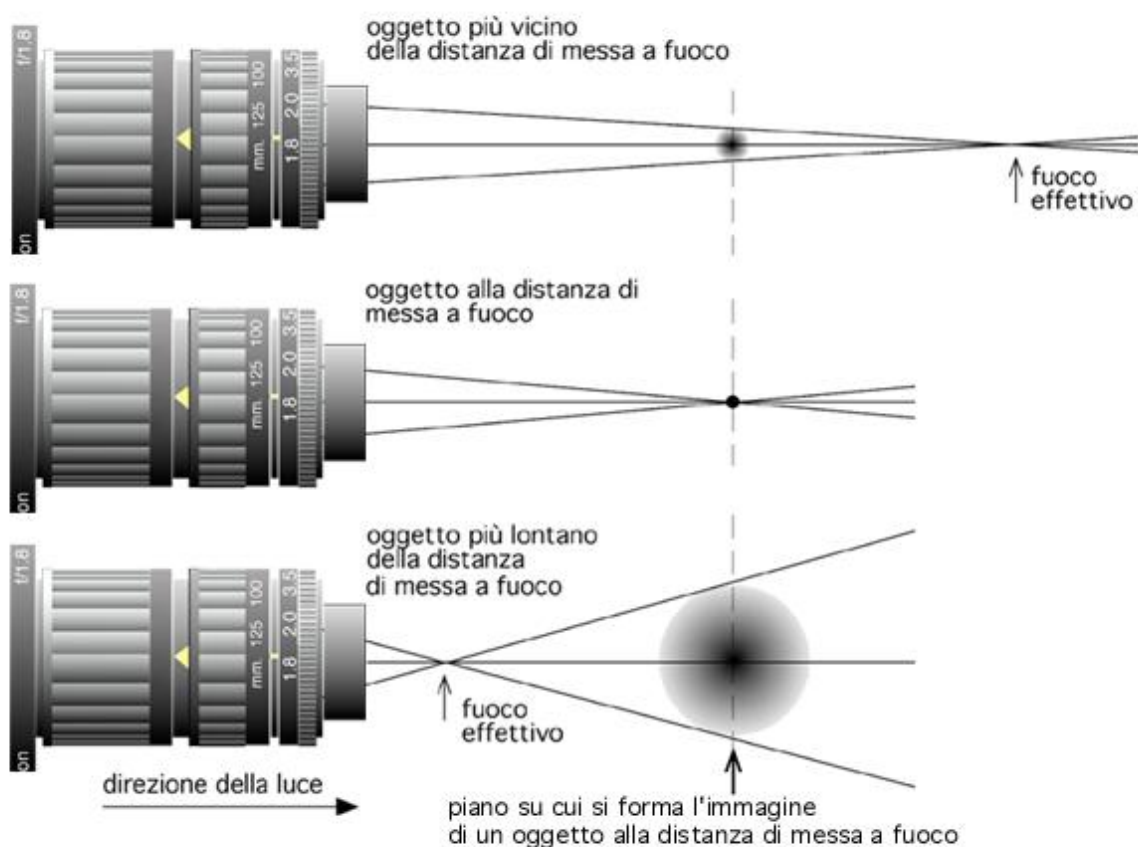




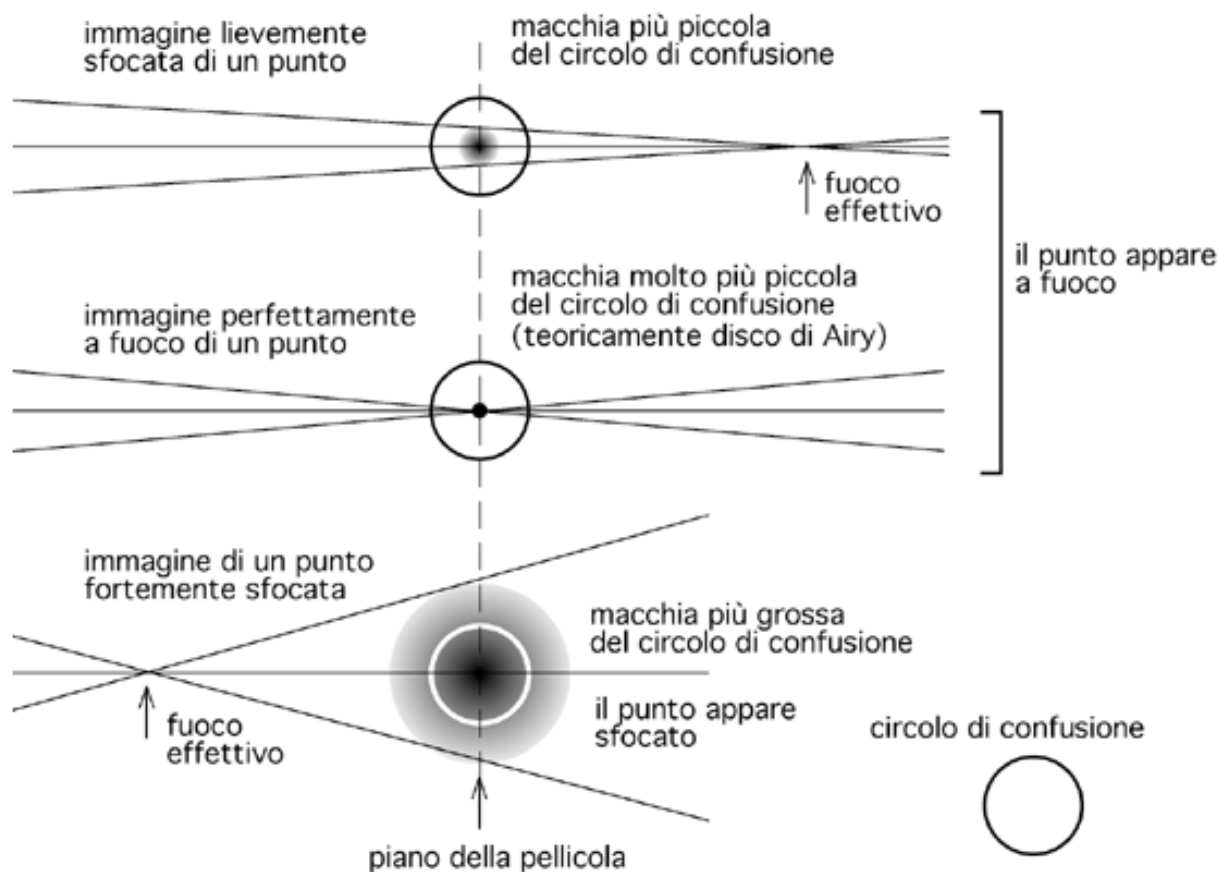
L'ampiezza della fascia che appare nitida sul piano focale è detta **profondità di campo** e dipende dalla distanza dell'oggetto e dall'apertura dell'obiettivo e quindi, a parità di altre condizioni, dalla regolazione del diaframma.

Da un punto di vista strettamente fisico, la profondità di campo non esiste, essendo semplicemente il risultato dei limiti di risoluzione del sistema visivo umano.

Il fascio di raggi luminosi che proviene da un punto della scena, posto a distanza diversa da quella per la quale è stato regolato l'obiettivo, convergerà prima o dopo il piano nel quale si trova il materiale fotosensibile. L'immagine su questo piano sarà una macchia luminosa diffusa.



L'occhio non è in grado di distinguere tra un punto e un disco sufficientemente piccolo; tale disco viene detto **circolo (o cerchio) di confusione**. Si vedranno ugualmente nitidi i punti anche non perfettamente a fuoco, purché il diametro della macchia prodotta sia minore o uguale a quello del cerchio di confusione.



Oggetti che si trovino a distanze diverse, ma per i quali sia soddisfatta la condizione precedente, appariranno ragionevolmente nitidi.

Il concetto di circolo di confusione è importante per due diversi motivi fotografici:

- 1) Per calcolare la **profondità di campo** di una fotocamera, è necessario conoscere il **diametro massimo ammesso del circolo di confusione (o limite del circolo di confusione o criterio del circolo di confusione o, semplicemente, circolo di confusione)**.
- 2) Poiché il livello di aberrazione residua negli obiettivi non è mai nullo e gli effetti della diffrazione non sono più trascurabili con aperture piccole, anche le ottiche migliori non sono in grado di focalizzare perfettamente i raggi luminosi. Il circolo di confusione è quindi il fattore caratterizzante del punto-immagine generato dagli obiettivi.

Nelle ottiche ideali, aventi aperture circolari e capaci di fare convergere i raggi in un punto perfettamente a fuoco, la forma di un punto sfocato è un disco luminoso con bordo netto. Nelle ottiche reali, a causa delle aberrazioni residue, della diffrazione e del diaframma con foro non

perfettamente circolare, il punto sfocato è un disco luminoso con bordo sfumato. Di conseguenza, è necessario definire con precisione il concetto di diametro del cerchio di confusione: tipicamente, è il diametro del cerchio più piccolo che contiene il 90% dell'energia luminosa.

Il diametro massimo ammesso (sul piano focale) del cerchio di confusione dipende essenzialmente da tre fattori:

- **Acuità visiva.** Per la maggior parte delle persone, la **distanza minima di visione confortevole (distanza minima di visione distinta)** è di circa 25 cm. A questa distanza, il sistema visivo umano ha una risoluzione di 5 linee/mm, equivalenti ad un cerchio di confusione limite  $\Phi_{cc}$  pari a 0,2 mm nell'immagine finale.
- **Condizioni visive.** Se si osserva l'immagine finale da circa 25 cm, un  $\Phi_{cc}$  di 0,2 mm risulta sufficiente il più delle volte. La distanza di visione confortevole corrisponde ad un angolo di visione di circa 60°. Ad esempio, è lo stesso che si ha osservando un'immagine 8"×10" dalla distanza di 25 cm. Di conseguenza, un'immagine più grande del formato 8"×10" sarà osservata da una distanza maggiore di 25 cm, consentendo di utilizzare per il  $\Phi_{cc}$  un valore più alto.
- **Ingrandimento dell'immagine di partenza.** Ad esempio, poiché la stampa a contatto di un'immagine 8"×10" non comporta alcun ingrandimento, il  $\Phi_{cc}$  per l'immagine originale sarà anche quello per l'immagine finale. Tuttavia, se si ingrandisce il lato lungo del formato 35 mm portandolo a 25 cm, l'ingrandimento è circa 7× ed il  $\Phi_{cc}$  dell'immagine di partenza dovrà essere pari a  $(0,2 \text{ mm})/7 = 0,029 \text{ mm}$ .

Questi tre fattori sono alla base della seguente formula per il calcolo del diametro limite del cerchio di confusione:

$$\Phi_{cc} [\text{mm}] = \text{distanza di visione} [\text{cm}] / \text{risoluzione di stampa} [\text{linee/mm}] \text{ alla distanza di visione di } 25 \text{ cm} / \text{fattore di ingrandimento} / 25$$

Ad esempio, per supportare una risoluzione di stampa a 5 linee/mm alla distanza di visione di 25 cm quando la distanza di visione prevista è di 50 cm ed il fattore di ingrandimento previsto è pari a 8:

$$\Phi_{cc} = 50/5/8/25 = 0,05 \text{ mm}$$

Poiché le dimensioni finali dell'immagine di solito non sono note al momento della ripresa, è prassi comune assumere un valore standard di 25 cm in larghezza ed un diametro del circolo di confusione convenzionale di 0,2 mm, pari a 1/1250 della larghezza dell'immagine. In alternativa, si può fare riferimento alla diagonale. Se l'immagine originale è da rifilare prima dell'ingrandimento finale o se le dimensioni e la distanza di visione non sono quelle assunte, è necessario ricalcolare la profondità di campo. Usando la cosiddetta **formula Zeiss**, il circolo di confusione è calcolato come:

$$\Phi_{cc} = d / 1730$$

dove d è il valore della diagonale dell'immagine originale, cioè il formato fotografico impiegato. Per il formato 35 mm (24 mm × 36 mm, 43 mm in diagonale), risulta  $\Phi_{cc} = 0,024$  mm.

Una formula di utilizzo più diffuso è la seguente:

$$\Phi_{cc} = d / 1500$$

corrispondente a 0,029 mm nel formato 35 mm, ovvero 5 linee/mm per una stampa con diagonale di 30 cm.

Ai fini pratici, queste due formule forniscono risultati molto simili.

Kodak propone invece un criterio di visione basato sulla risoluzione angolare di 2' d'arco:

$$\Phi_{cc} = f / 1720$$

dove f è la lunghezza focale dell'obiettivo impiegato. Per il formato 35 mm ed un obiettivo normale da 50 mm, risulta  $\Phi_{cc} = 0,0291$  mm. Questo criterio angolare presuppone evidentemente che l'immagine finale sia osservata alla distanza corretta per la prospettiva, corrispondente all'angolo di visione dell'immagine originale:

$$\text{distanza visione} = \text{lunghezza focale obiettivo} \cdot \text{ingrandimento}$$

È tuttavia raro che le immagini siano visionate dalla distanza corretta: di solito, l'osservatore non conosce la lunghezza focale dell'obiettivo utilizzato e la distanza corretta può risultare disagiata, perché troppo corta o troppo lunga. Di conseguenza, al  $\Phi_{cc}$  dei criteri angolari si preferisce un valore fisso legato al formato fotografico di ripresa.

I normali valori adottati per  $\Phi_{cc}$  possono risultare inadatti qualora le condizioni di riproduzione o visione differiscano significativamente da quelle ipotizzate per il loro calcolo. In caso di maggiore ingrandimento o di minore distanza di visione, è necessario ridurre il  $\Phi_{cc}$ . Se invece la fotografia viene stampata o visualizzata servendosi di un dispositivo, come un monitor per computer, che abbassa la nitidezza o la risoluzione, allora occorre aumentare il  $\Phi_{cc}$ , in quanto la rilevabilità della sfocatura è limitata dal mezzo di riproduzione piuttosto che dal sistema visivo umano. Ad esempio, un'immagine 8"×10" visualizzata su CRT può presentare una profondità di campo superiore a quella della sua stampa a contatto, in quanto la risoluzione a video è inferiore e rende quindi visibili solo le sfocature più intense eventualmente presenti.

Le formule per il calcolo della profondità di campo derivate dall'ottica geometrica implicano l'ampliamento arbitrario dell'intervallo di messa a fuoco dipende semplicemente dalla riduzione del  $\Phi_{cc}$ . In realtà, la diffrazione impone rigidi vincoli: il  $\Phi_{cc}$  diminuisce al chiudersi del diaframma, ma, oltre un certo valore di apertura relativa, l'aumento di nitidezza è controbilanciato dall'incremento di sfocatura dovuto alla diffrazione.

<b>Diametro del circolo di confusione in rapporto al formato pellicola</b>		
<b>Formato</b>	<b>Dimensioni fotogramma</b>	<b><math>\Phi_{cc}</math></b>
<b>Piccolo formato</b>		
<b>APS-C</b>	15,0 mm x 22,5 mm	0,016 mm
<b>35mm</b>	24 mm x 36 mm	0,026 mm
<b>Medio formato</b>		
<b>645</b>	42 mm x 56 mm	0,043 mm
<b>6x6</b>	56 mm x 56 mm	0,049 mm
<b>6x7</b>	56 mm x 69 mm	0,055 mm
<b>6x9</b>	56 mm x 84 mm	0,062 mm
<b>6x12</b>	56 mm x 112 mm	0,077 mm

<b>6x17</b>	56 mm x 168 mm	0,109 mm
<b>Grande formato</b>		
<b>4x5</b>	102 mm x 127 mm	0,100 mm
<b>5x7</b>	127 mm x 178 mm	0,135 mm
<b>8x10</b>	203 mm x 254 mm	0,200 mm

***Regola empirica n.1: regolare sempre la messa a fuoco con la massima apertura possibile.***

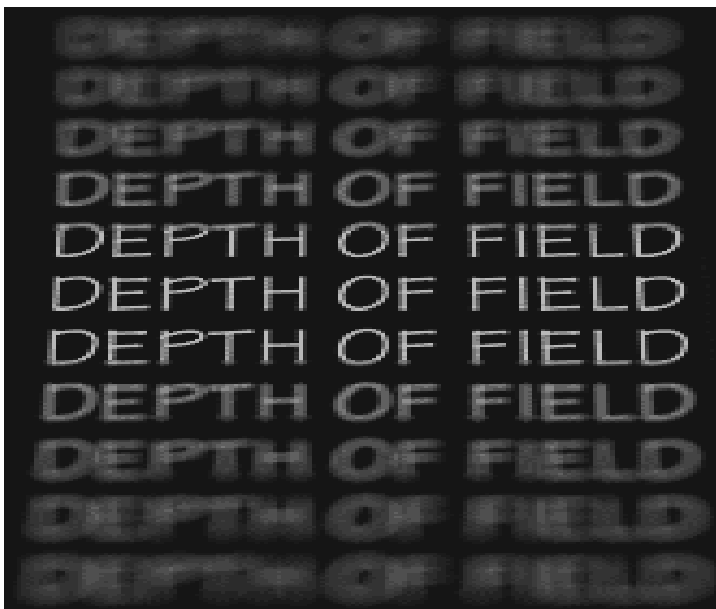
Nelle fotocamere reflex moderne questo avviene automaticamente: infatti l'obiettivo è sempre alla massima apertura (durante la regolazione il valore del diaframma viene simulato per l'esposimetro). Solo al momento dello scatto il diaframma si chiude al valore effettivo.

***Regola empirica n.2: se si impiega un obiettivo zoom, regolare la messa a fuoco sulla focale più lunga a disposizione.***

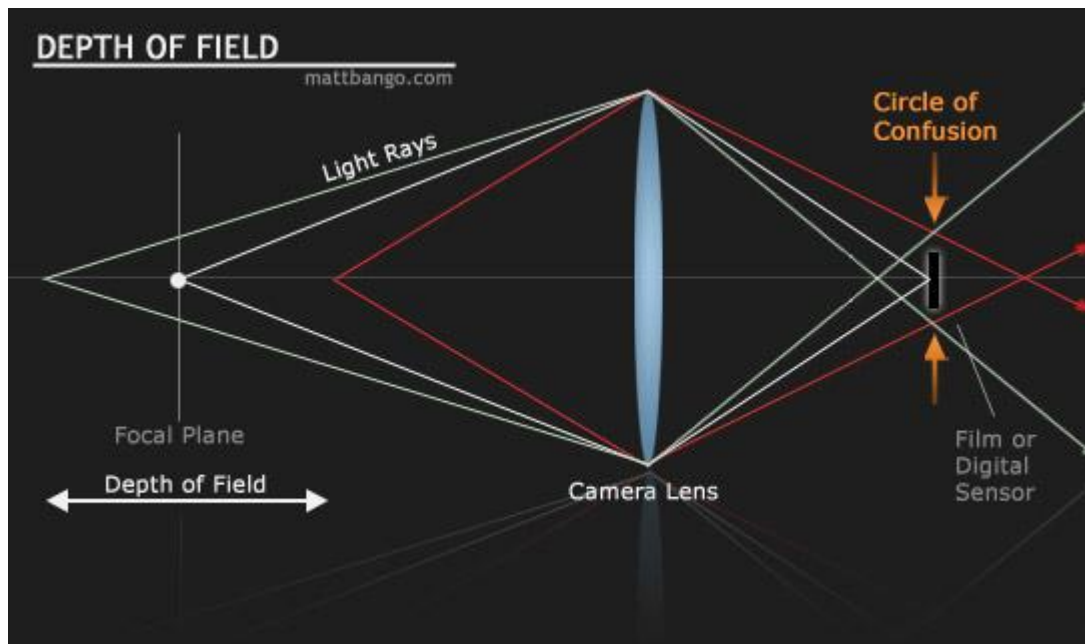
## Profondità di campo

---

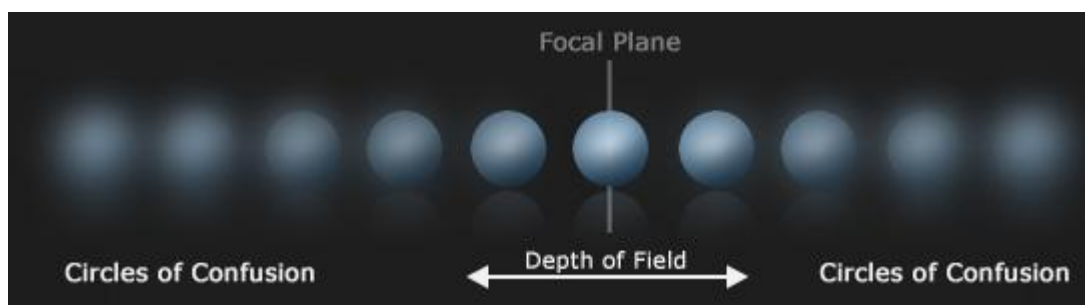
In fotografia, la ***profondità di campo nitido*** o, più semplicemente, ***profondità di campo (PdC)*** è l'intervallo di distanze anteriori e posteriori al soggetto messo a fuoco (soggetto principale) entro cui i particolari dell'inquadratura appaiono nitidi anche se non sono esattamente a fuoco.



Per ogni impostazione dell'obiettivo, esiste uno ed un solo piano messo perfettamente a fuoco; la nitidezza diminuisce gradualmente in avvicinamento al fotografo ed in allontanamento dal fotografo.



Il **campo nitido** è quell'intervallo di distanze davanti e dietro al soggetto entro cui la sfocatura è impercettibile o comunque tollerabile. Per motivi legati all'angolo di incidenza dei raggi luminosi, il campo nitido è sempre più esteso dietro al soggetto a fuoco che davanti; più precisamente, la distanza perfettamente a fuoco si trova grosso modo a un terzo del campo nitido, verso il fotografo. Un punto esterno al campo nitido produce sul materiale fotosensibile un disco sfocato di diametro crescente all'allontanarsi dalla distanza di messa a fuoco.

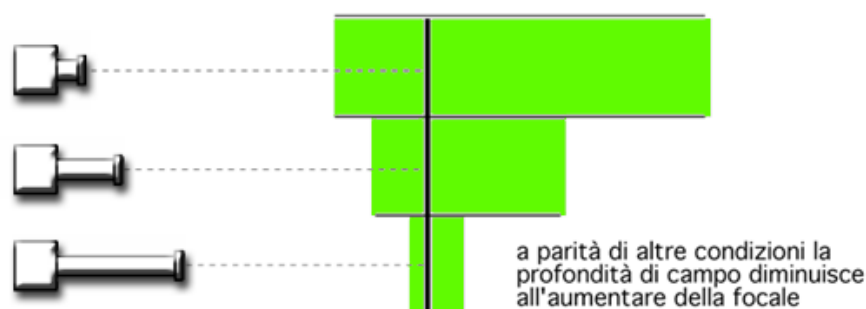


# Variabili della profondità di campo

## Lunghezza focale

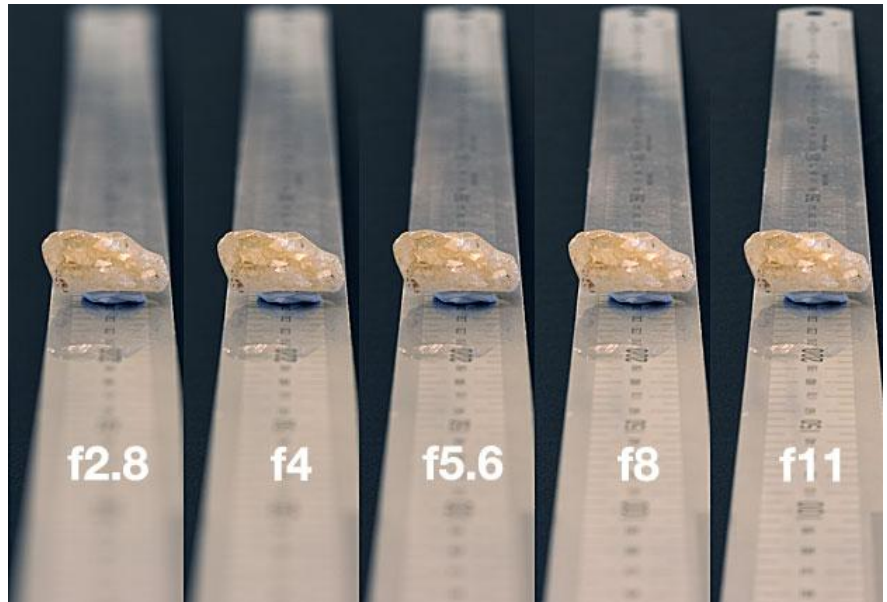
Gli obiettivi con lunghezza focale maggiore, come i teleobiettivi, hanno una profondità di campo minore, e viceversa.

In effetti, questa affermazione richiede una precisazione, poiché la relazione tra profondità di campo e focale è una conseguenza non tanto delle proprietà fisiche degli obiettivi, quanto dei loro utilizzi tipici: focali lunghe per riprendere oggetti distanti, focali corte per soggetti vicini.

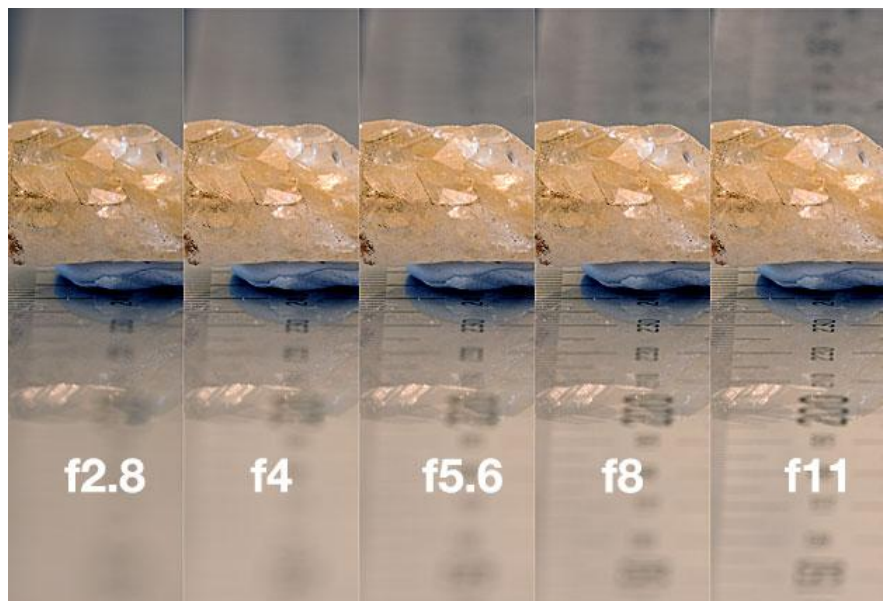


Ad esempio, si consideri un fotografo che usa una focale a 400 mm per riprendere un uccello a 10 m di distanza: un'apertura del diaframma di  $f/2,8$  determina una profondità di campo di 10 cm. Se lo stesso fotografo cambiasse obiettivo passando a un 50mm, la profondità di campo passerebbe a 7,62 m, confermando la suddetta affermazione. Tuttavia, se il fotografo volesse ricomporre l'immagine in modo che l'uccello occupi lo stesso spazio di prima nel fotogramma, dovrebbe avvicinarsi al soggetto fino a una distanza di 1,25 m. A questo punto, la profondità di campo tornerebbe a essere esattamente come prima, ovvero 10 cm.





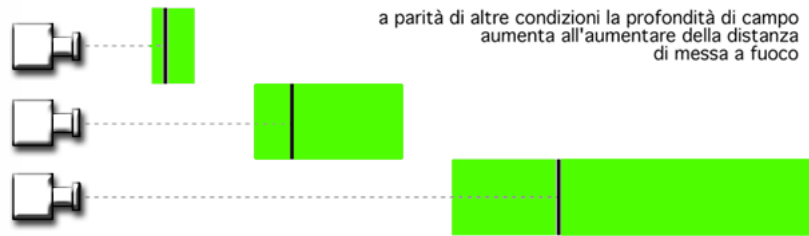
**focale f**



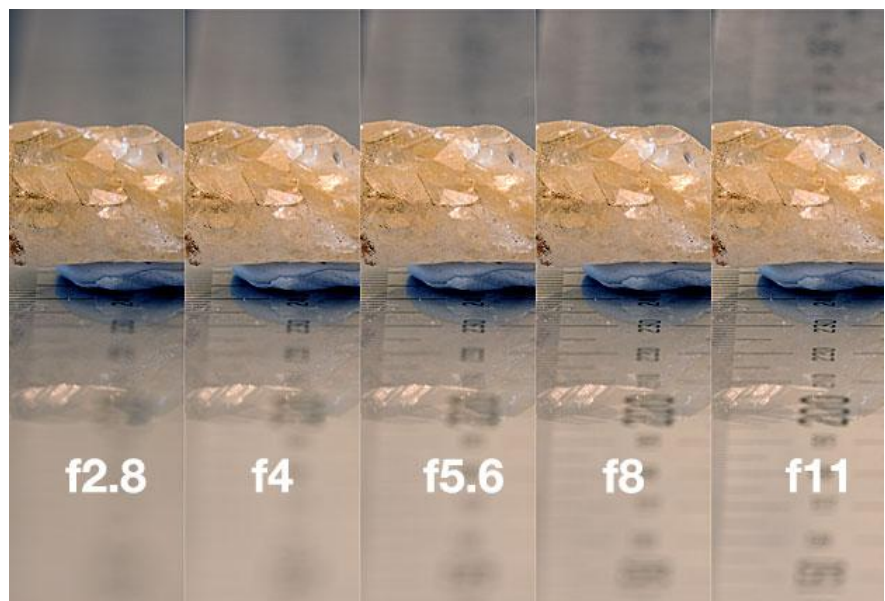
**focale 2f**

**Distanza di messa a fuoco**

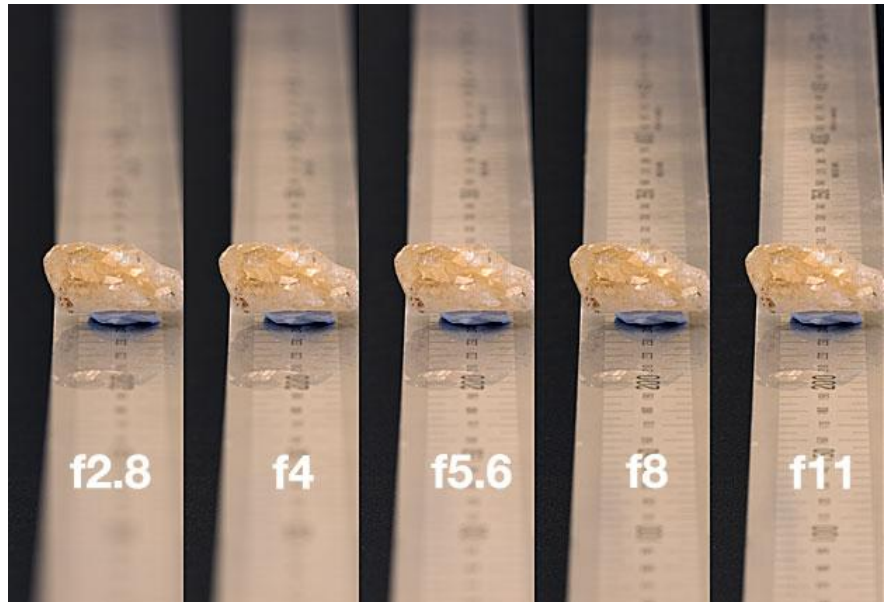
A parità di tutti gli altri parametri di ripresa, la messa a fuoco di un soggetto lontano comporta una maggiore profondità di campo rispetto a quella di un soggetto vicino.



In particolare, per ogni impostazione della fotocamera esiste una distanza iperfocale, e la profondità di campo è tanto maggiore quanto più il soggetto, allontanandosi, si avvicina a tale distanza. Quando il punto a fuoco coincide con l'iperfocale, si raggiunge la massima profondità di campo possibile, che si estende in lontananza fino all'infinito e, verso il fotografo, fino a metà dell'iperfocale (molte fotocamere hanno un'**impostazione variprogram** per l'iperfocale, che massimizza la profondità di campo). Se il punto di fuoco oltrepassa l'iperfocale, la profondità di campo diminuisce, poiché, pur continuando ad estendersi in lontananza all'infinito, aumenta la distanza dalla fotocamera del più vicino soggetto ancora nitido.



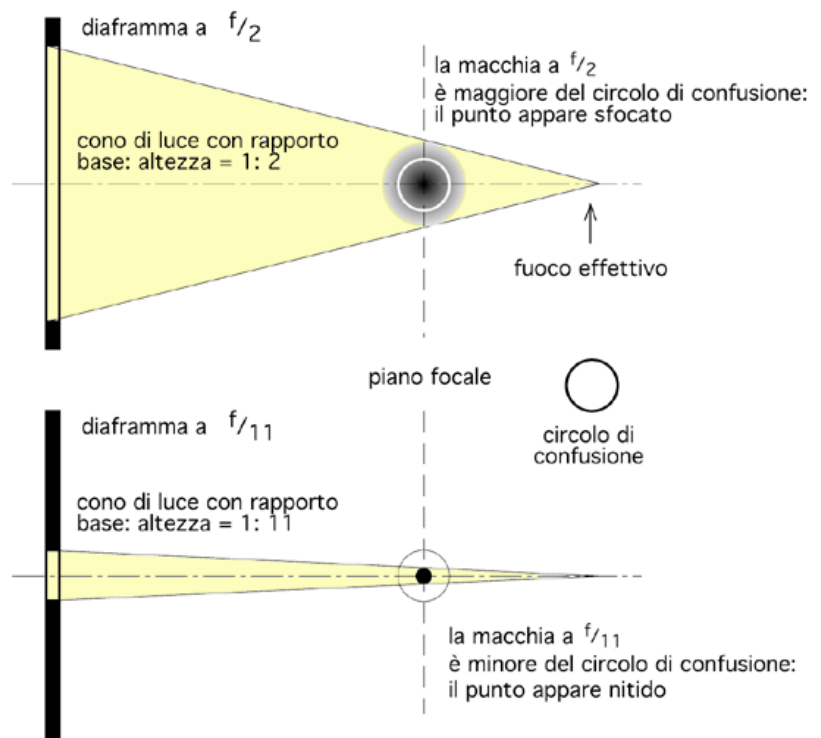
**distanza s**

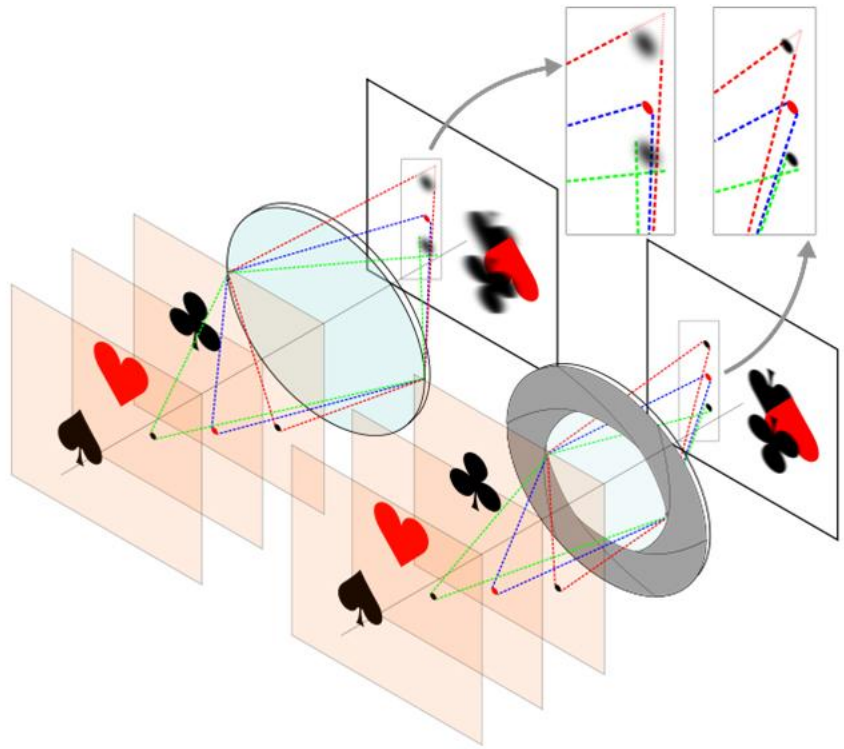


**distanza 2s**

**Apertura diaframma**

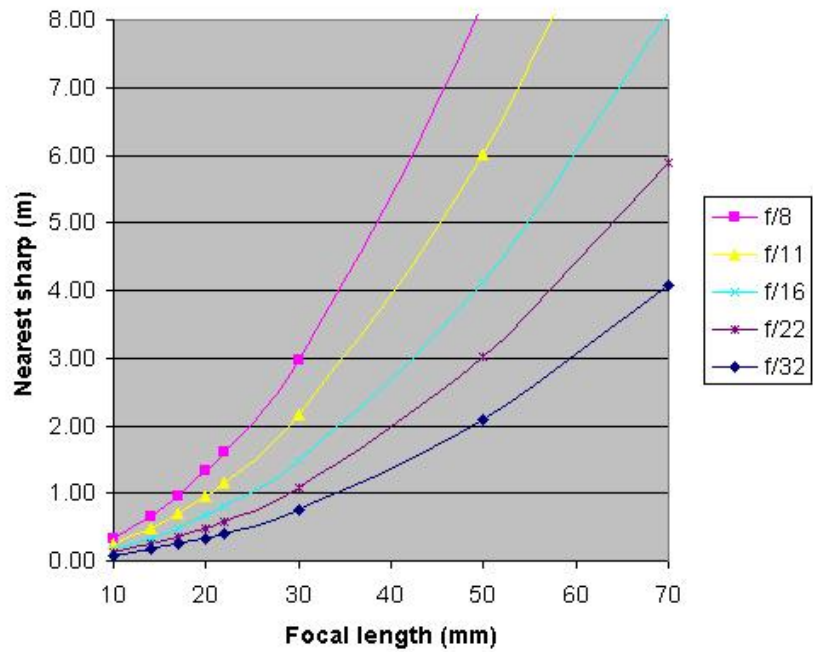
Minori aperture del diaframma corrispondono a maggiori profondità di campo, e viceversa, in quanto il diametro del disco sfocato, sul piano del materiale fotosensibile, viene ridotto al di sotto di  $\Phi_{cc}$ .





Questo effetto è facilmente controllabile sull'obiettivo, osservando come il valore di diaframma impostato sia in grado di ampliare o ridurre l'estensione del campo nitido (e quindi le distanze dei suoi due estremi) a parità di distanza di messa a fuoco.

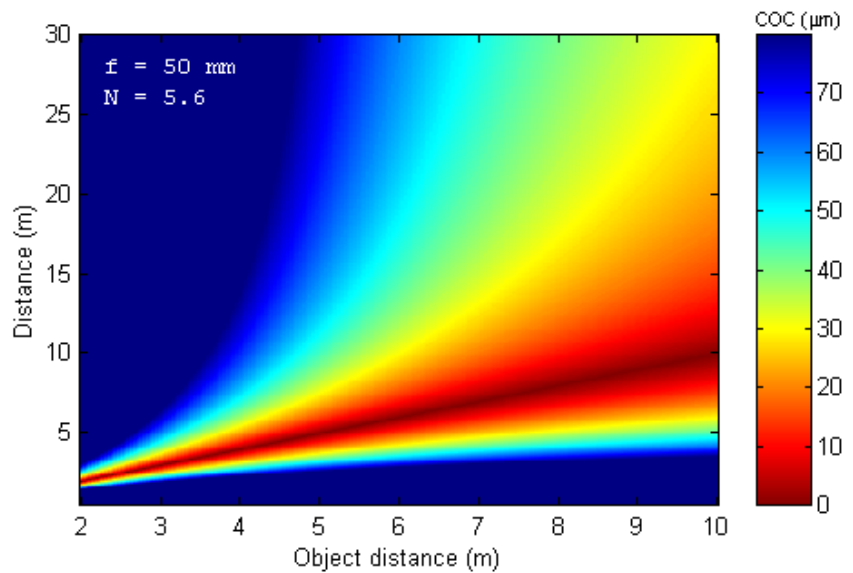




Nella maggior parte dei casi, tenuto conto anche della correzione delle aberrazioni, gli obiettivi danno i migliori risultati ad aperture intermedie.

**Circolo di confusione**

Condizioni di ripresa dell'immagine originale e di visione dell'immagine finale tali da consentire un incremento del valore del  $\Phi_{cc}$  portano ad aumentare la profondità di campo.



## Calcolo della profondità di campo

Per il calcolo esatto della profondità di campo, è necessario tenere conto dell'eventuale asimmetria dell'obiettivo. Un indicatore dell'asimmetria è l'**ingrandimento o fattore pupillare  $P$** , dato dalla seguente relazione:

$$P = \frac{\text{diametro pupilla di uscita}}{\text{diametro pupilla di entrata}}$$

La pupilla di entrata è l'apertura dell'obiettivo osservata dalla parte anteriore, mentre la pupilla di uscita è quella osservata dalla parte posteriore.

Nel caso di obiettivi perfettamente simmetrici, le due pupille hanno lo stesso diametro e  $P=1$ . I teleobiettivi ( $P<1$ ) ed i grandangolari retrofocus ( $P>1$ ) sono invece esempi di schemi ottici asimmetrici.

Oltre che sulla profondità di campo, il fattore pupillare influisce anche sulla profondità di fuoco, sull'apertura effettiva (relativamente all'esposizione) e sull'angolo di campo. Se il fattore pupillare non ha effetti significativi su queste grandezze quando il soggetto è lontano, diventa invece importante per ingrandimenti superiori a 0,1 (tipicamente, nelle riprese macro).

### Distanze di messa a fuoco medio-lunghe

Quando la distanza di messa a fuoco  $s$  è grande rispetto alla lunghezza focale  $f$  dell'obiettivo, il fattore pupillare è trascurabile, cosicché la distanza dell'estremo vicino  $s_v$  e la distanza dell'estremo lontano  $s_l$  della profondità di campo sono date rispettivamente da:

$$s_v = \frac{s \cdot f^2}{f^2 + N\Phi_{cc}(s - f)}$$

$$s_l = \frac{s \cdot f^2}{f^2 - N\Phi_{cc}(s - f)}$$

dove:  $s$  = distanza di messa a fuoco  
 $f$  = lunghezza focale  
 $N$  = apertura relativa  
 $\Phi_{cc}$  = circolo di confusione limite.

L'estensione della profondità di campo è quindi data da:

$$PdC = s_l - s_v$$

Essendo  $s \gg f$ , si può anche usare la seguente formula approssimata:

$$PdC \approx \frac{2s^2 f^2 N \Phi_{cc}}{f^4 - s^2 N^2 \Phi_{cc}^2}$$

**Distanze di messa a fuoco ravvicinate**

Quando la distanza di messa a fuoco  $s$  è paragonabile alla lunghezza focale  $f$  dell'obiettivo, il fattore pupillare non è più trascurabile.

Se l'obiettivo è asimmetrico, la profondità di campo viene espressa in termini di fattore pupillare e di ingrandimento dell'immagine:

$$PdC \approx 2N\Phi_{cc} \frac{1 + m/P}{m^2}$$

dove:  $N$  = apertura relativa  
 $\Phi_{cc}$  = circolo di confusione limite  
 $m$  = ingrandimento  
 $P$  = fattore pupillare.

Come si può notare, la profondità di campo è indipendente dalla lunghezza focale: a parità di ingrandimento e per brevi distanze, tutte le

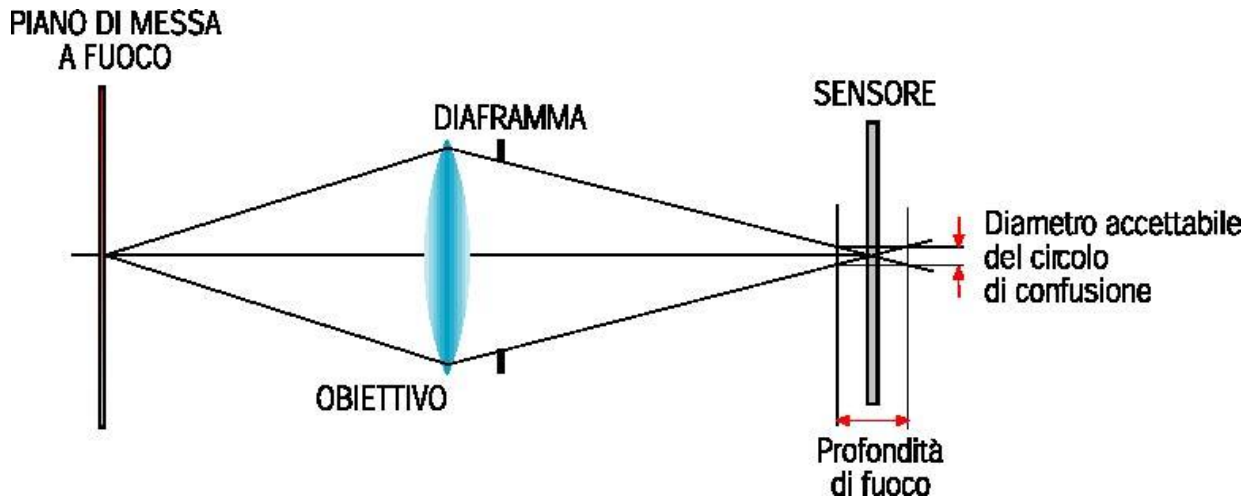
lunghezze focali forniscono approssimativamente la stessa profondità di campo.

Se l'obiettivo è simmetrico, la formula della profondità di campo è ulteriormente semplificabile, essendo  $P=1$ :

$$PdC \approx 2N\Phi_{cc} \frac{1+m}{m^2}$$

## Profondità di fuoco

La **profondità di fuoco (PdF)** indica un intervallo di tolleranza nella distanza fra il piano del materiale fotosensibile ed il piano dell'immagine a fuoco.



Questo concetto viene talvolta confuso con quello (correlato ma diverso) di profondità di campo. La profondità di fuoco si misura generalmente in millimetri o frazioni di millimetro.

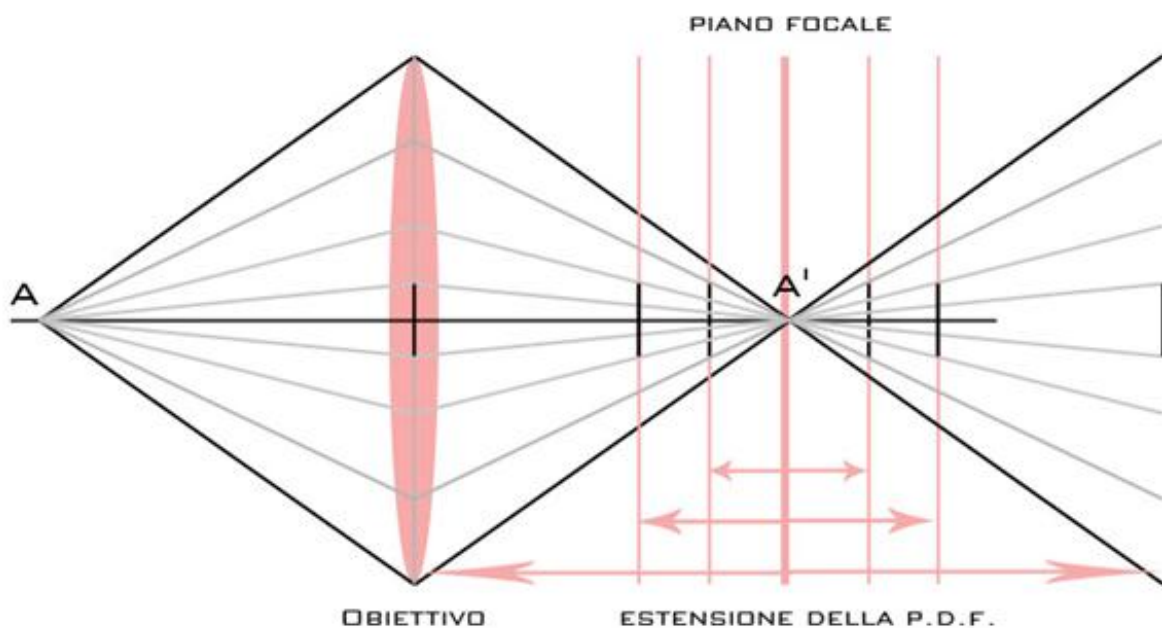
La profondità di fuoco è cruciale per la precisione della messa a fuoco, per le tolleranze di allineamento del sistema fotocamera-obiettivo e per la tolleranza di planarità del materiale fotosensibile. Ad esempio, un incurvamento della pellicola che ecceda l'intervallo della profondità di fuoco, anche se impercettibile ad occhio nudo, porta ad una significativa perdita di nitidezza dell'immagine.

La profondità di fuoco dipende dagli stessi fattori che influenzano la profondità di campo:



- la profondità di fuoco è direttamente proporzionale alla lunghezza focale,
- la profondità di fuoco è inversamente proporzionale alla distanza di messa a fuoco.
- la profondità di fuoco è inversamente proporzionale all'apertura del diaframma,
- la profondità di fuoco è direttamente proporzionale al  $\Phi_{cc}$ .

Ad esempio, l'effetto positivo della progressiva chiusura del diaframma è evidenziato nella seguente illustrazione:



## Calcolo della profondità di fuoco

La profondità di fuoco è definita dalla seguente relazione:

$$PdF = 2N\Phi_{cc} \left(1 + \frac{m}{P}\right)$$

dove:  $PdF$  = profondità di fuoco  
 $N$  = apertura relativa  
 $\Phi_{cc}$  = circolo di confusione limite

$m$  = ingrandimento  
 $P$  = fattore pupillare.

Questa equazione è esatta ed indipendente dalla lunghezza focale dell'obiettivo. Quando l'ingrandimento è unitario ( $m=1$ ), le profondità di campo e di fuoco sono uguali.

Una formula approssimata usata frequentemente per determinare la profondità di fuoco è la seguente:

$$PdF \approx \frac{f \cdot N}{1000}$$

dove:  $PdF$  = profondità di fuoco, con la stessa unità di misura di  $f$   
 $f$  = lunghezza focale  
 $N$  = apertura relativa.

## Distanza iperfocale

---

Per ogni lunghezza focale e per ogni apertura di diaframma esiste una distanza di messa a fuoco, detta **distanza iperfocale, in grado di assicurare la massima profondità di campo possibile**. Regolando l'obiettivo su questa distanza si ha un **campo nitido dall'infinito ( $\infty$ ) a metà dell'iperfocale**.

Se, per qualche ragione, si prevede di non avere il tempo o il modo di effettuare una corretta messa a fuoco, la regolazione dell'obiettivo sull'iperfocale permetterà di eseguire in ogni caso riprese sufficientemente nitide (a patto che l'oggetto non sia più vicino di metà dell'iperfocale stessa).

Nella pratica, la messa a fuoco alla distanza iperfocale è un'operazione semplice e rapida. Infatti, è sufficiente fare coincidere l'estremo lontano della profondità di campo con il simbolo  $\infty$  sulla scala delle distanze: l'indice di messa a fuoco risulta così automaticamente allineato con la distanza iperfocale.



## Calcolo della distanza iperfocale

La distanza iperfocale è definita dalla seguente relazione:

$$h = \frac{f^2}{N\Phi_{cc}} + f$$

dove:  $h$  = distanza iperfocale  
 $f$  = lunghezza focale  
 $N$  = apertura relativa  
 $\Phi_{cc}$  = circolo di confusione limite.

Ai fini pratici, la lunghezza focale è trascurabile rispetto al termine frazionario, cosicché si può procedere alla seguente semplificazione:

$$h = \frac{f^2}{N\Phi_{cc}}$$

dove:  $h$  = distanza iperfocale  
 $f$  = lunghezza focale  
 $N$  = apertura relativa  
 $\Phi_{cc}$  = circolo di confusione limite.

La differenza nei risultati della prima e della seconda formula è minima. Si può anche determinare il valore approssimato dell'iperfocale mediante la seguente equazione empirica:

$$h = 1000 \cdot f/N$$

dove:  $h$  = distanza iperfocale  
 $f$  = lunghezza focale  
 $N$  = apertura relativa.

Ad esempio, la distanza iperfocale di uno zoom regolato per una focale  $f=12$  mm (0,012 m) con un'apertura di  $f/5,6$  varrà all'incirca:

$$h = 1000 \cdot \frac{f}{N} = 1000 \frac{0,012}{5,6} = 2,1 \text{ m}$$

Regolando l'obiettivo su 2 m, sarà ragionevolmente nitido qualsiasi oggetto posto tra 1 m e l'infinito.

## Classificazione degli obiettivi

---

È possibile suddividere gli obiettivi in sei categorie:

- **Obiettivi grandangolari, con lunghezza focale minore della diagonale del formato.** Generano un'immagine rimpicciolita rispetto ai normali, con un angolo di campo superiore a  $50^\circ$ .
- **Obiettivi normali, con lunghezza pari all'incirca alla diagonale del formato.** Generano un'immagine con dimensioni e proporzioni

della scena simili a come le vede l'occhio umano, con un angolo di campo di  $40^\circ - 50^\circ$ .

- **Teleobiettivi, con lunghezza focale maggiore della diagonale del formato.** Generano un'immagine ingrandita rispetto ai normali, con un angolo di campo inferiore a  $40^\circ$ .
- **Obiettivi zoom (trasfocatori), con lunghezza focale variabile.** Sono caratterizzati dalla possibilità di variare la lunghezza focale entro ampi intervalli di valori.
- **Obiettivi basculabili e decentrabili.** Sono dotati di montatura con movimenti di basculaggio e decentramento e sono ottimizzati per elevati angoli di copertura.
- **Obiettivi macro, da ingrandimento, da proiezione.** Sono ottimizzati per rapporti di ingrandimento superiori all'unità.

## Obiettivi a corta focale

---

La caratteristica principale delle ottiche grandangolari è la loro breve lunghezza focale, inferiore alla diagonale del fotogramma (e quindi dipendente dal formato fotografico utilizzato), così da consentire un angolo di ripresa più ampio rispetto alle ottiche con focale superiore.

Gli obiettivi grandangolari vengono utilizzati quando si vuole allargare il campo di ripresa e non è possibile allontanarsi dal soggetto o per ottenere particolari effetti estetici.

Oltre ad allontanare il soggetto ed ingrandire il campo di ripresa, gli obiettivi grandangolari presentano le seguenti particolarità:

- La deformazione delle linee in prossimità dei bordi dell'immagine è l'effetto più evidente delle riprese realizzate con grandangolari. Minore è la lunghezza focale e più evidenti sono le deformazioni.
- Il campo di ripresa viene ampliato sia in orizzontale sia in verticale, rendendo così necessario evitare che il soggetto non si perda all'interno dell'immagine. Questo fa sì che i grandangolari non siano sempre gli obiettivi più adatti alla ripresa di panorami.
- Al contrario delle riprese con teleobiettivi, il senso di profondità tridimensionale risulta esaltato. Soggetti vicini tra loro sembreranno perdersi in lontananza ed i ritratti presenteranno sensibili deformazioni prospettiche.
- La profondità di campo è elevata anche alle aperture di diaframma più elevate. Relativamente al formato 35 mm, già con una focale di 24

mm qualsiasi particolare che disti più di 2 m dall'obiettivo risulta praticamente a fuoco.

- Fotografando con il flash, occorre verificare che l'ampiezza del lampo illumini la totalità del campo di ripresa, al fine di evitare zone buie ai bordi del fotogramma.

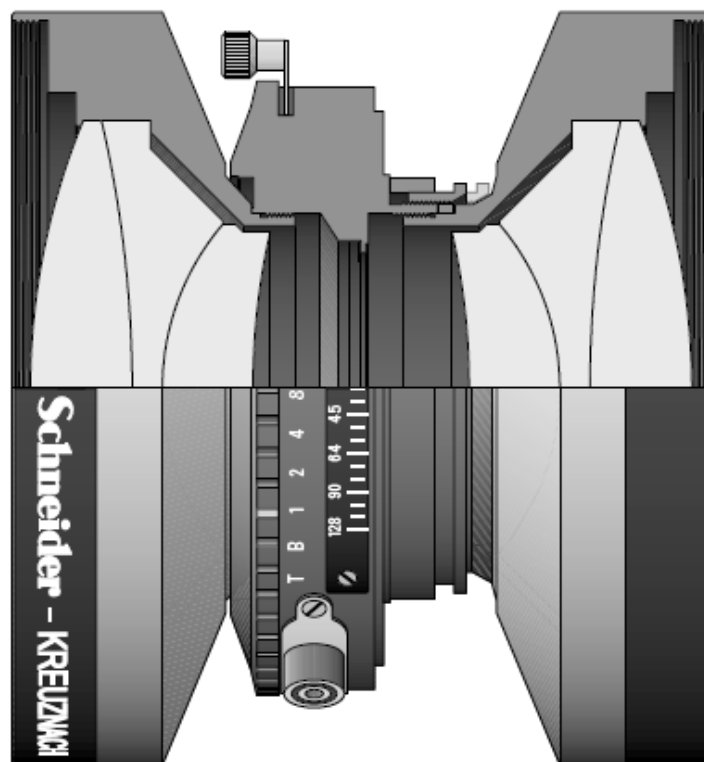
La qualità e, in pratica, il costo di un obiettivo grandangolare sono dati dalla capacità o meno di contenere le deformazioni e la caduta di luminosità ai bordi dell'immagine. In genere, i grandangolari meno spinti, cioè quelli con focale più vicina alla diagonale del formato fotografico, non comportano grosse deformazioni dell'immagine.

Un effetto presente in tutti gli obiettivi, ma particolarmente evidente nei grandangolari, sono le **linee cadenti (o linee di fuga)** che compaiono nelle riprese effettuate con la fotocamera inclinata, in genere verso l'alto, rispetto ai piani della scena.

La focale corta permette anche di utilizzare **tempi di esposizione relativamente lunghi a mano libera**. In genere, si indica come limite un tempo pari al reciproco della lunghezza focale equivalente in 35 mm. Ad esempio, con un 28 mm si può scattare con tempi fino ad 1/30 di secondo. Le tipologie di obiettivi grandangolari sono essenzialmente tre.

#### Grandangolari tradizionali

Sono caratterizzati da uno **schema ottico tendenzialmente simmetrico** rispetto al diaframma, collocato in posizione mediana. Lo schema simmetrico o quasi simmetrico permette di realizzare obiettivi con un elevato grado di correzione delle aberrazioni anche con ampi angoli di copertura e grandi aperture di diaframma, tipici delle **fotocamere a banco ottico**.

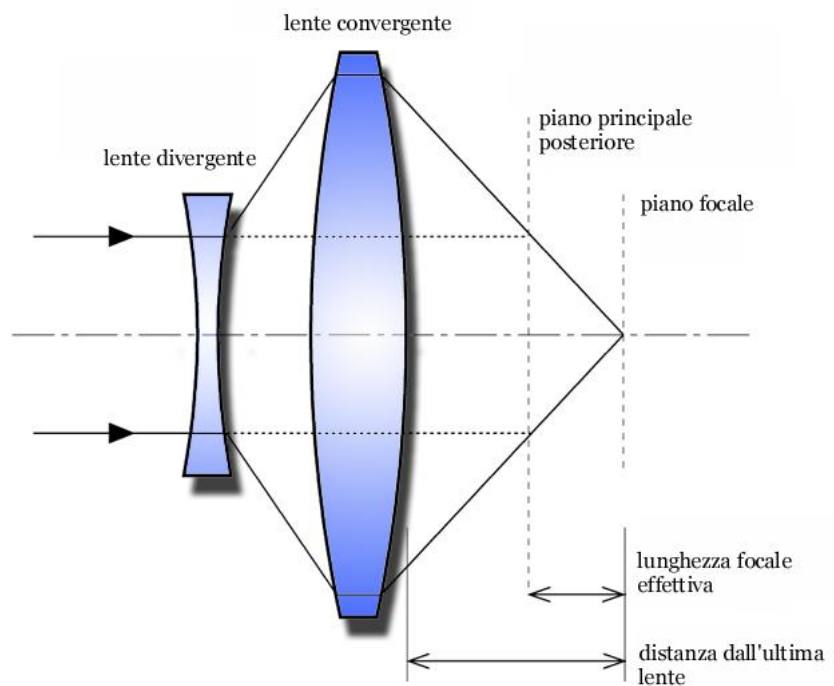


Al diminuire della lunghezza focale, la distanza tra l'ultima lente dell'obiettivo ed il piano focale diminuisce. Di conseguenza, questi grandangolari sono inutilizzabili sulle reflex, salvo utilizzarle con lo specchio bloccato in posizione sollevata (perdendo così tutti i benefici tipici di queste fotocamere). Gli

obiettivi a fuoco corto sono invece ampiamente usati sui banchi ottici.

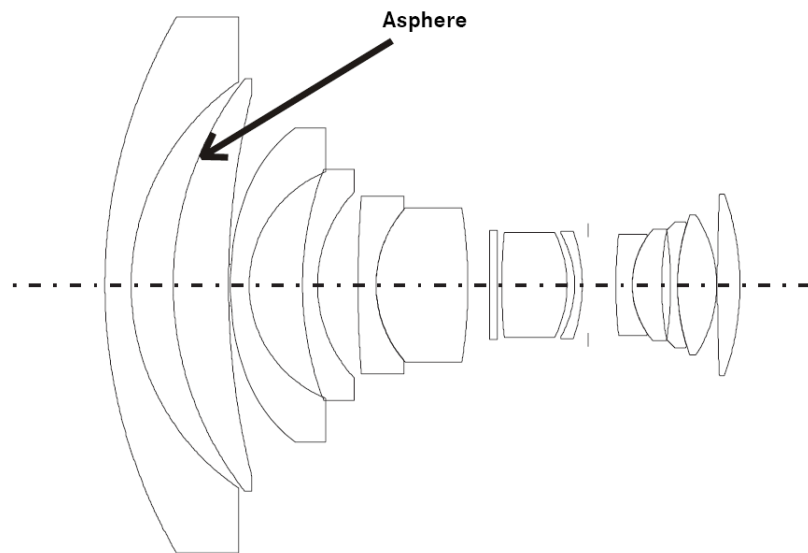
**Grandangolari  
retrofocus**

Nelle **fotocamere SLR (Single Lens Reflex)**, per consentire il movimento dello specchio, si usa lo **schema ottico retrofocus (o teleobiettivo invertito)**, concepito per avere una distanza tra l'ultima lente dell'obiettivo ed il piano focale maggiore della lunghezza focale.



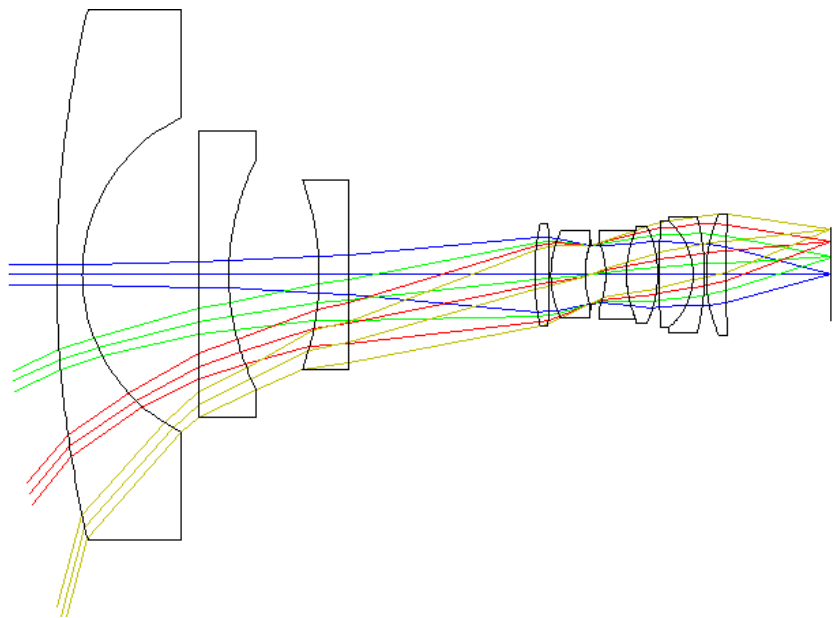
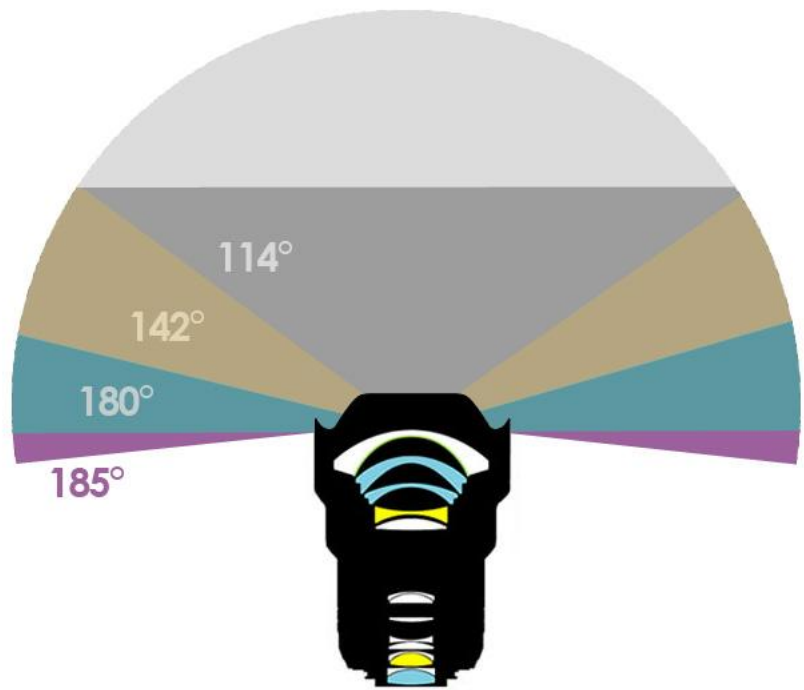
Questo viene ottenuto antepoendo alle lenti principali una lente o un gruppo ottico divergenti.



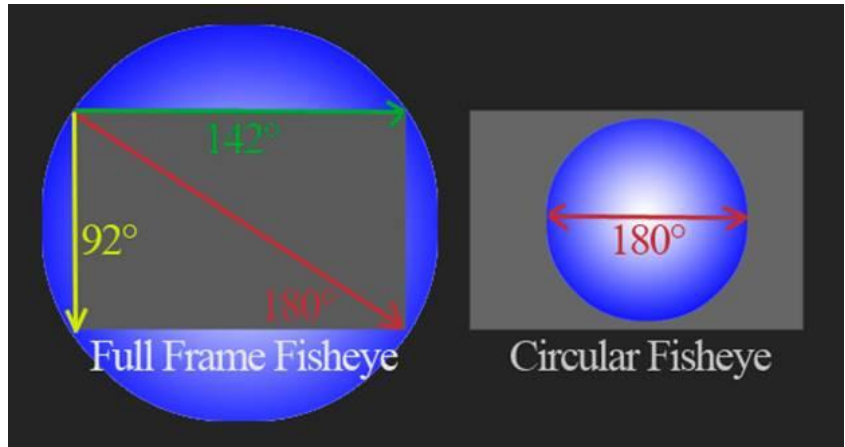


### Grandangolari fisheye

Anche noti semplicemente come ***fisheye***, sono grandangolari estremi non corretti da distorsione ed in grado di raggiungere angoli di campo maggiori di 180°-200° grazie al gruppo anteriore costituito da lenti fortemente divergenti e di grande diametro.



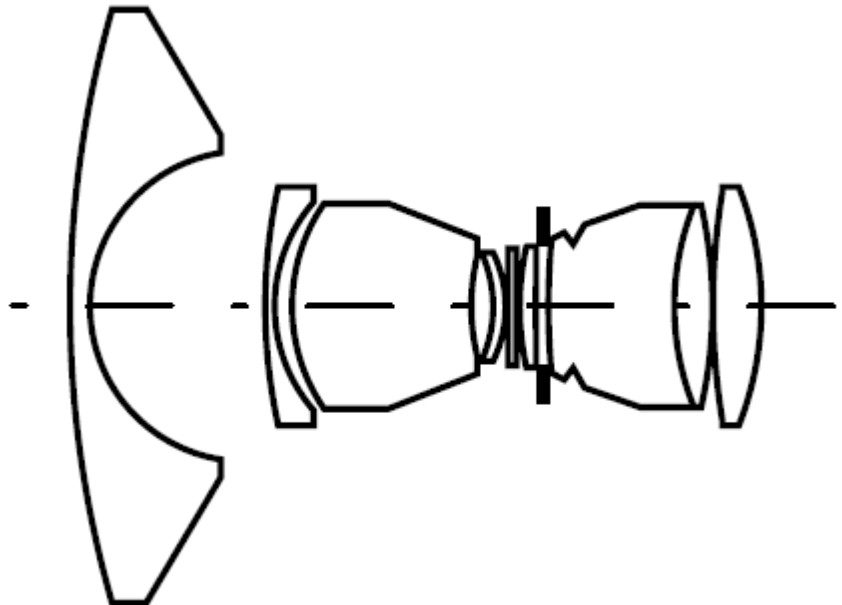
Nati per riprese panoramiche delle saldature all'interno degli oleodotti, producono un'immagine fortemente distorta circolare o a pieno formato.



Hanno un impiego molto limitato con un costo di acquisto assai elevato.



CARL ZEISS Distagon CFI 3.5/30



## Obiettivi normali

---

I principali parametri che caratterizzano un obiettivo sono la lunghezza focale, l'angolo di campo e la luminosità e sono legati al formato della pellicola, ossia al tipo di fotocamera su cui l'obiettivo viene montato.

Per un dato formato di pellicola, si considera normale l'obiettivo che ha una lunghezza focale all'incirca uguale alla diagonale del fotogramma. Per tradizione, l'obiettivo normale del 24x36 mm ha una lunghezza focale di 50 mm, a cui corrisponde un **angolo di campo di 46°**. L'obiettivo normale è tale perché è caratterizzato da una **sensazione prospettica simile a quella dell'occhio umano**.

**Nikon**  
**AF 50mm F/1.4**



In linea generale, la qualità di un obiettivo dipende da numerosi fattori. Spesso, vi è la necessità di fotografare in ambienti poco illuminati, dove torna comodo un obiettivo molto luminoso. Tuttavia, ad un'elevata luminosità corrispondono ingombri, pesi e prezzi elevati, con una correzione delle aberrazioni problematica, soprattutto alle aperture maggiori. Uno dei parametri più importanti è rappresentato dall'**incisività**, ossia dalla capacità di un obiettivo di riprodurre con elevata **definizione e nitidezza** anche i dettagli più piccoli. Altri parametri che concorrono a determinare la qualità dell'ottica sono lo schema ottico, il numero di lenti, le aberrazioni, la resa cromatica, la vignettatura, l'uniformità delle prestazioni dal centro ai bordi del fotogramma e la meccanica ed i materiali del barilotto. In molte situazioni l'obiettivo normale non è soddisfacente; ad esempio, perché offre un angolo di campo troppo ristretto o perché costringe ad avvicinarsi troppo al soggetto.

## Obiettivi a lunga focale

---

### Obiettivi lungofuoco

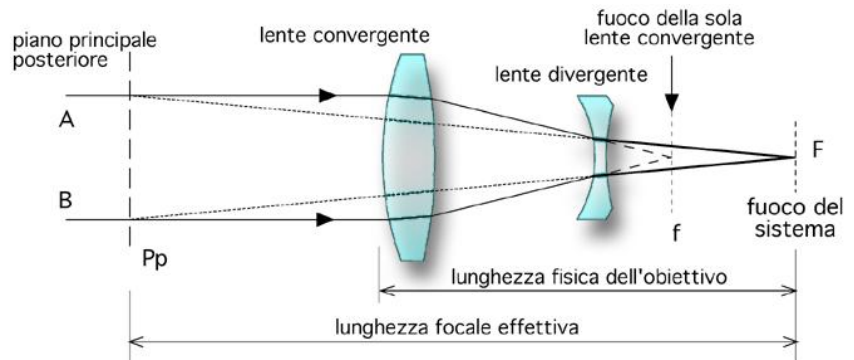
Sono obiettivi di costruzione tradizionale con lunghezza focale elevata. Il loro ingombro è notevole, in quanto la lunghezza fisica dell'obiettivo coincide praticamente con la lunghezza focale e, per questo motivo, sono stati progressivamente soppiantati dai più compatti teleobiettivi, sia diottrici (fino a 1000-1200 mm) sia catadiottrici (sino a 4000 mm ed oltre).

Lo schema tradizionale rimane invece ancora il preferito per i telescopi rifrattori.



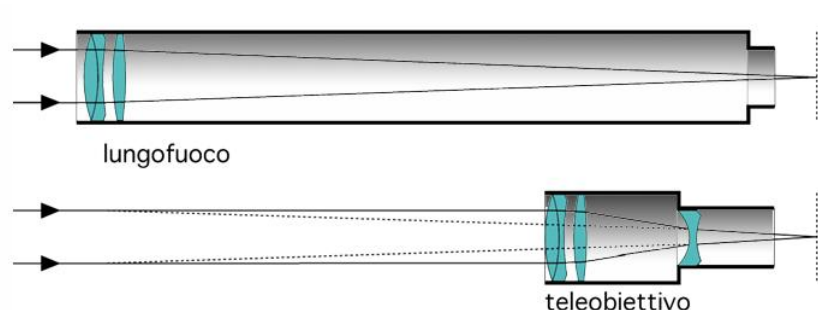
## Teleobiettivi diottrici

Sono obiettivi a lunga focale con un particolare schema ottico che permette di ridurre la lunghezza fisica a una frazione della focale (ad esempio, un 1000 mm di focale può raggiungere i 30 cm di lunghezza).



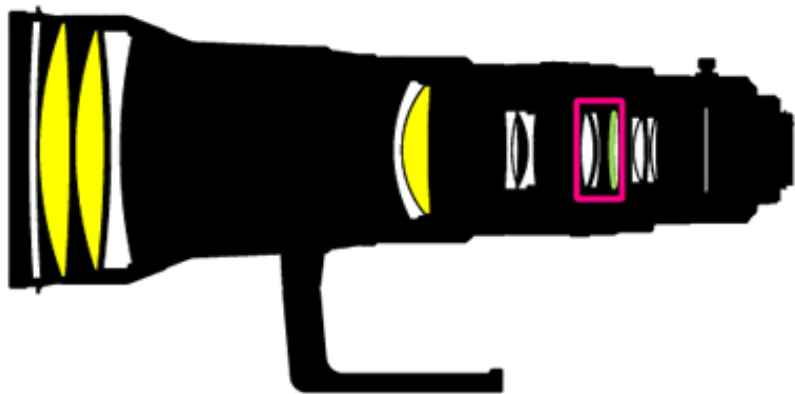
Un elemento divergente distanziato da un elemento convergente produce uno **spostamento in avanti del piano principale posteriore** del sistema ottico risultante. Questo piano, portato davanti all'obiettivo, determina così una **lunghezza fisica più corta della lunghezza focale**.

La differenza di ingombri e pesi appare evidente confrontando un obiettivo lungofuoco ed un teleobiettivo di focale equivalente:





AF-S NIKKOR 600mm f/4G ED VR

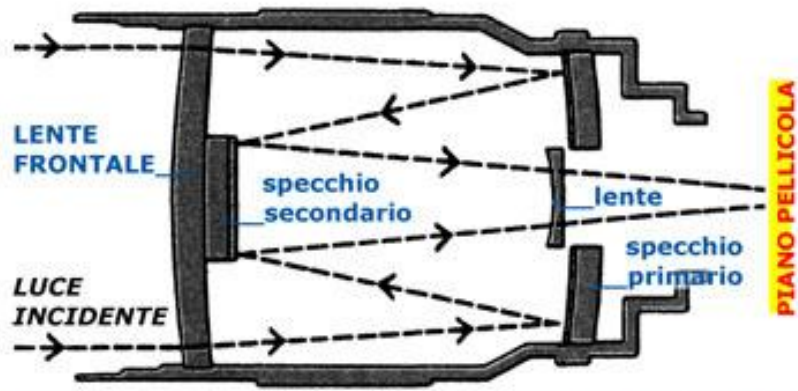


**Teleobiettivi  
catadiottrici**

Sono obiettivi a lunga focale con uno schema ottico costituito sia da specchi curvi sia da lenti, da cui la denominazione.







I vantaggi di questa combinazione sono i ridottissimi ingombri e pesi ed il costo contenuto; gli svantaggi sono rappresentati dall'impossibilità di inserire un diaframma regolabile e dall'apertura relativa piuttosto chiusa (generalmente  $f/8$  per un 500 mm). Un'altra tipica caratteristica di questo tipo di obiettivo è la sfocatura, costituita non più da dischi ma da anelli luminosi. Infatti, il percorso del fascio luminoso incidente sulla lente frontale è parzialmente ostruito dallo specchio secondario. Pertanto, all'interno dell'obiettivo, il fascio luminoso è anulare e se intercetta il materiale fotosensibile prima o dopo il punto di perfetta messa a fuoco, la sua immagine sarà un anello, tanto più grande e meno luminoso quanto maggiore è la sfocatura.



## Obiettivi zoom

---

Sono obiettivi caratterizzati da una **lunghezza focale variabile con continuità**.

Il passaggio da una focale all'altra si ottiene mediante una ghiera da azionare, a seconda dei modelli, con un movimento di rotazione o con uno scorrimento sull'asse dell'obiettivo. La prima soluzione, attualmente la più diffusa, comporta l'impiego di due ghiera due, una per la messa a fuoco e l'altra per il cambiamento di focale:



La seconda soluzione prevede la presenza di una sola ghiera che, scorrendo cambia la focale e, ruotando, regola la messa a fuoco (**zoom one-touch**):



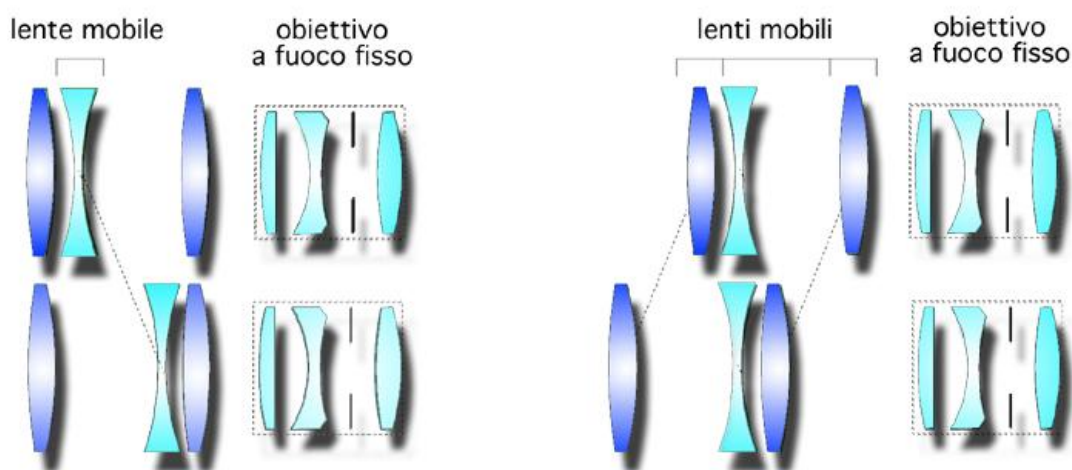
In genere, gli zoom presentano una qualità ottica inferiore a quella delle ottiche a focale fissa, pur avendo in assoluto il maggior numero di lenti e il più alto costo. Sono di difficile progettazione e rappresentano sempre il risultato di una serie di compromessi piuttosto pesanti. Inoltre, la luminosità effettiva ( $t/N$ ) è sempre inferiore a quella teorica, a causa dell'assorbimento introdotto dal gran numero di lenti impiegate.

Per contenerne i costi, la maggior parte degli zoom presenta aperture relative più chiuse degli obiettivi a focale fissa e variabili da un estremo all'altro dell'escursione di focale anche di 2 stop (ad esempio, da  $f/2,8$  a  $f/5,6$ ).

A causa della loro innegabile comodità rappresentano la dotazione standard, e sovente la sola disponibile, delle telecamere. In cinematografia, sebbene abbastanza usati, ad essi si preferiscono ancora gli obiettivi a focale fissa, per la resa superiore che forniscono.

Generalmente, la sigla identificativa di ciascun obiettivo è costituita dall'apertura massima e dalle focali minima e massima (ad esempio,  $f/2,8$ , 70-180 mm).

Gli zoom possono essere descritti come formati da **un gruppo ottico a focale fissa preceduto da un gruppo ottico afocale mobile** (il diametro del fascio luminoso in uscita è maggiore o minore rispetto a quello in entrata) in grado di ingrandire/rimpicciolire l'immagine.



Questo si può realizzare in due modi: spostando l'elemento divergente o il gruppo convergente.

Naturalmente questi spostamenti influiscono profondamente sulle aberrazioni del sistema; in particolare, diviene impossibile la correzione

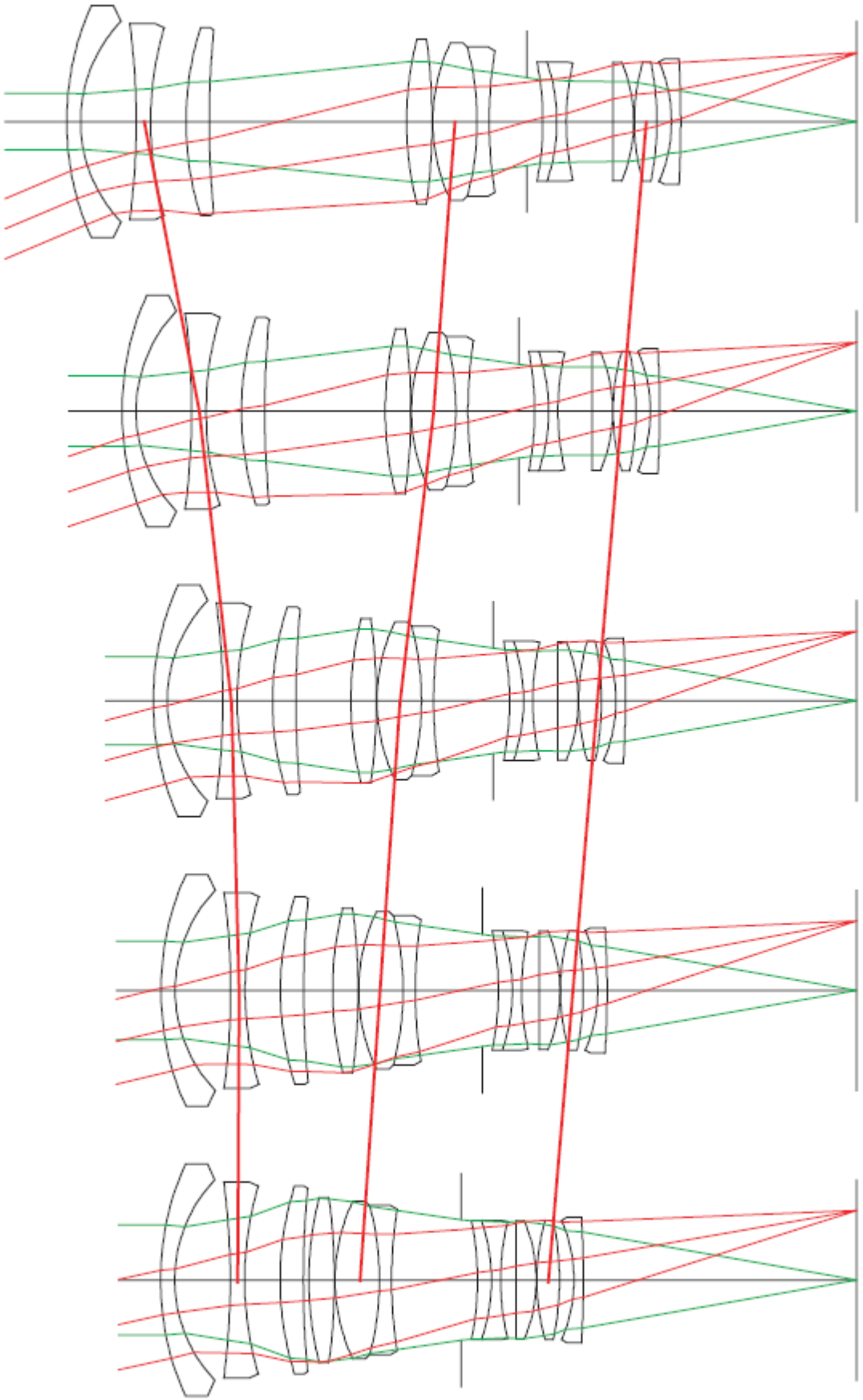
continua dell'aberrazione sferica e del coma su tutta l'escursione di focale. È possibile, tuttavia, effettuare la correzione per un certo numero di valori della focale (da tre a sette, secondo il pregio e il costo dell'ottica). Per eseguire questa correzione, si adottano tre diverse soluzioni:

- Spostamento meccanico di altri gruppi di lenti oltre a quelli indicati (**zoom a compensazione meccanica**). Richiede camme e sistemi di rinvio meccanico di alta precisione. I movimenti non sono lineari, ma seguono un'andamento assai complesso (alti costi di produzione, ottiche di buona/ottima qualità).



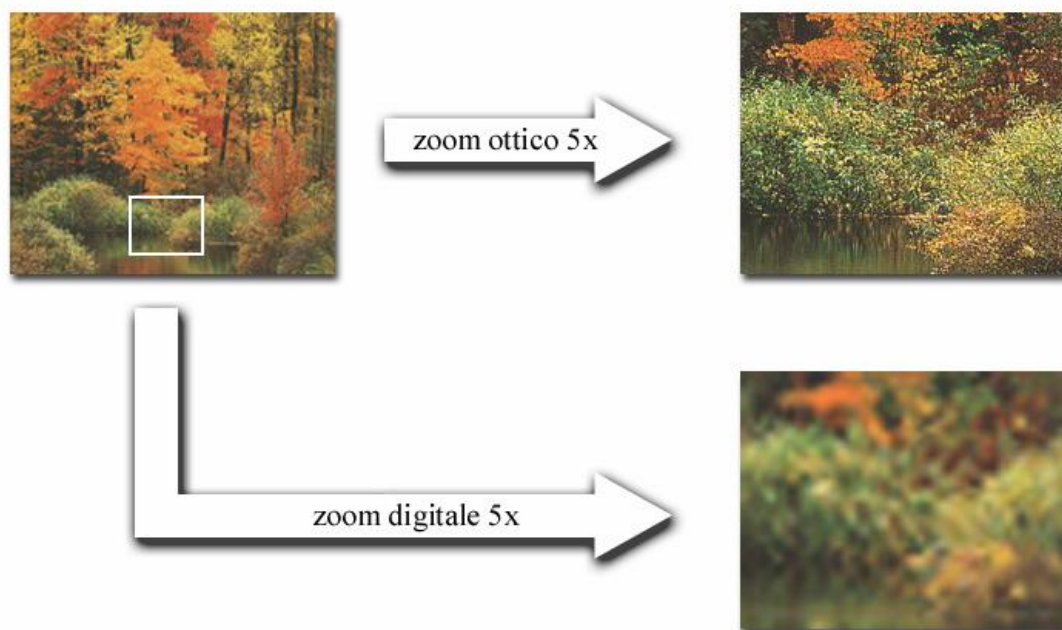
- Progetto ottico ottimizzato per due/tre focali; ai valori intermedi si confida nella profondità di fuoco e nella ridotta apertura (**zoom a compensazione ottica**). Il progetto ottico è complesso, ma i costi di produzione sono minori (ottiche relativamente economiche). I risultati sono potenzialmente inferiori al precedente.
- Combinazione dei due sistemi precedenti (**zoom a compensazione ibrida o mista**). È il sistema migliore, ma comporta costi di progetto e costruzione molto alti, perchiò è impiegato solo nei modelli di fascia alta.





Lo zoom ottico, ingrandendo l'immagine sul piano focale, permette di estrarre i dettagli sino alla sua risoluzione. È come guardare la scena originale con un binocolo: si vedono più dettagli che a occhio nudo.

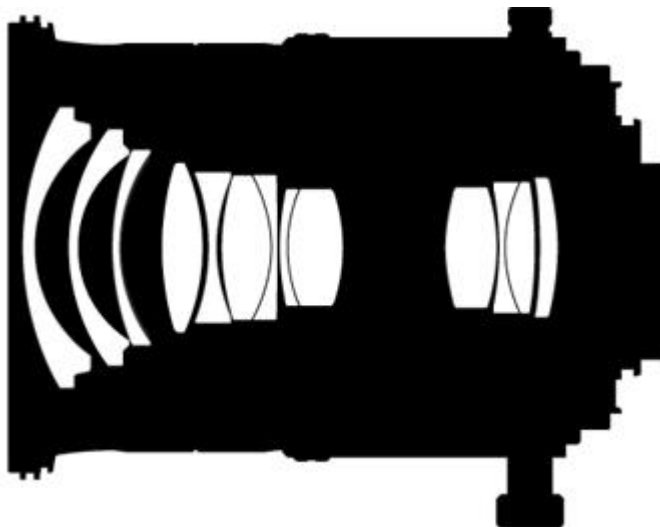
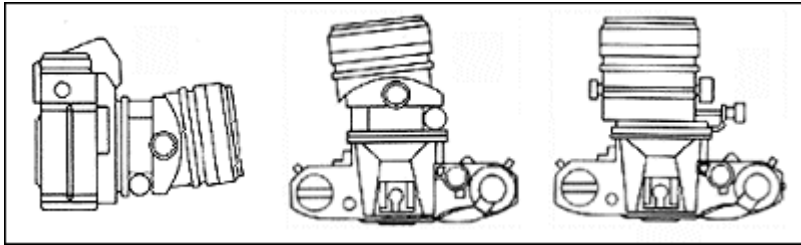
**La qualità dell'immagine è ben diversa (in peggio) per lo zoom digitale**, che si limita a ingrandire i dettagli presenti in origine, interpolando l'immagine per evitare squadrettature troppo evidenti. È come guardare lo schermo televisivo usando un binocolo: si ha un ingrandimento, ma i dettagli non aumentano.



## Obiettivi basculabili e decentrabili

---

Gli obiettivi decentrabili e maculabili (**Tilt & Shift**) sono composti di una parte fissa e di una mobile dotata di meccanismi per il controllo della profondità di campo e della prospettiva. La profondità di campo può venire aumentata inclinando la parte mobile, mentre la prospettiva è variata tramite spostamento sul piano orizzontale. La fuga prospettica eccessivamente convergente può quindi essere raddrizzata e corretta. I grandangolari decentrabili possono essere impiegati anche come obiettivi per soffietto.



A causa dei movimenti della parte mobile, questi obiettivi dispongono esclusivamente di messa a fuoco manuale.



## Obiettivi macro, da ingrandimento, da proiezione

---

Tutti gli obiettivi appartenenti a queste tre tipologie sono specificamente progettati per assicurare la massima qualità ottica in condizioni di ripresa caratterizzate da una ***distanza del soggetto dall'ottica pari o inferiore a quella dell'immagine***. In fase di progettazione, occorre quindi ottimizzare la correzione delle aberrazioni e l'uniformità di illuminazione del fotogramma quando  $s \leq s''$  o addirittura  $s \ll s''$ .

### Obiettivi macro

Sono caratterizzati da un barilotto che consente maggiori allungamenti rispetto a tutte le altre ottiche, al fine di raggiungere ingrandimenti con  $m > 0,5$ . Al tempo stesso non tolgono la possibilità di fotografare, volendo, un soggetto posto all'infinito.



È possibile utilizzarli anche su tubi di prolunga e soffietti, potendo così ingrandimenti anche di molto superiori all'unità.



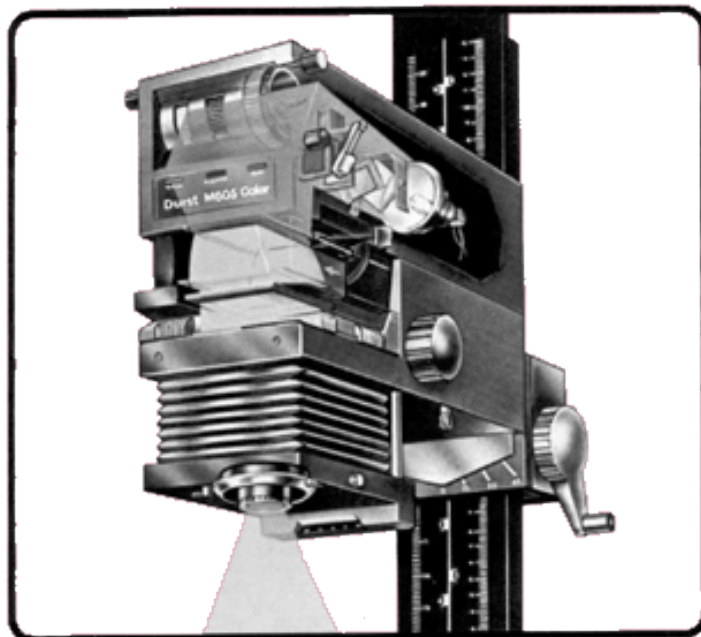
**Obiettivi da ingrandimento**

Sono caratterizzati da un barilotto estremamente compatto, poiché la messa a fuoco viene regolata intervenendo sull'allungamento del soffietto dell'ingranditore ed il diaframma è manuale. Il

numero di lenti dello schema ottico varia da un minimo di 3 per gli obiettivi più economici a 7-8 per quelli di fascia alta, come i grandangolari e gli apocromatici.



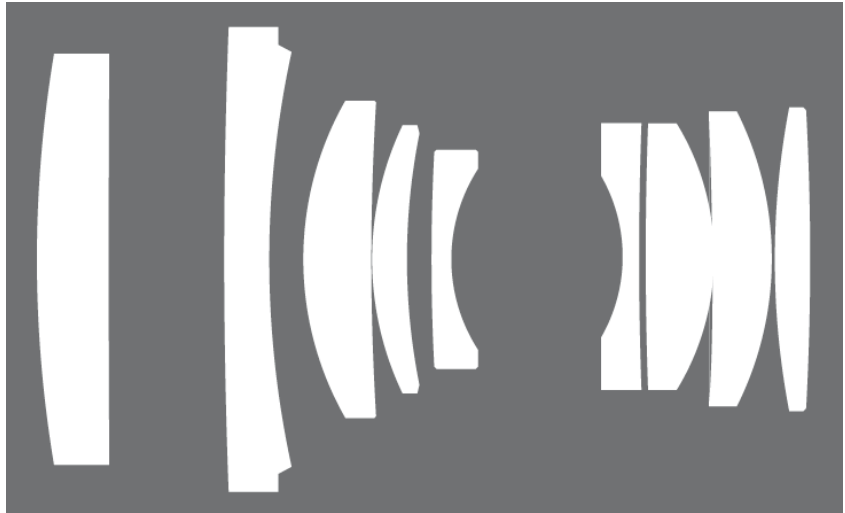
Il tipico obiettivo da stampa fotografica deve assicurare una nitidezza elevata e costante dal centro ai bordi, l'assenza di vignettatura e distorsione, un contrasto elevato e la riproduzione di tutte le sfumature presenti sul negativo.



## Obiettivi da proiezione

Sono caratterizzati da un barilotto estremamente compatto, poiché la messa a fuoco viene regolata esternamente ed il diaframma è manuale o inesistente. Il progetto ottico varia in funzione del tipo di ambiente di visione (home-theater, sala conferenze, sala cinematografica, ecc.). Devono comunque assicurare nitidezza, contrasto e luminosità elevati e costanti dal centro ai bordi ed assenza di vignettatura e distorsioni.

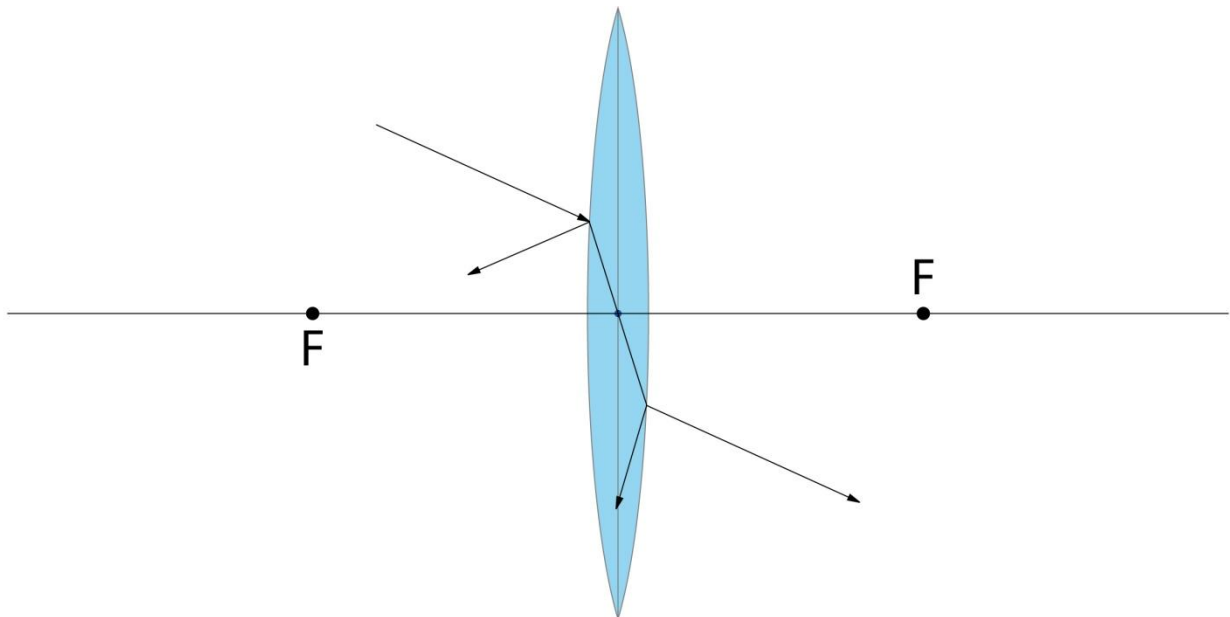




## Trattamento antiriflesso

---

Le lenti non sono soltanto mezzi ottici attraverso cui **la luce transita**, ma anche corpi solidi caratterizzati da superfici su cui **la luce si riflette**. Infatti, quando un fascio luminoso incide su una lente, viene in parte rifratto ed in parte riflesso; allo stesso modo, nel passaggio successivo dal vetro all'aria, il raggio rifratto è, a sua volta, in parte riflesso all'interno della lente. L'illustrazione che segue evidenzia questo fenomeno:



Poiché l'intensità delle immagini riflesse aumenta con l'indice di rifrazione della lente, il trattamento antiriflesso diventa importante al fine di:

- aumentare la trasmissione luminosa,
- migliorare la definizione dell'immagine incrementando il contrasto,
- attenuare le **immagini fantasma riflesse (flare)**.



Ciascuna interfaccia aria-vetro riflette mediamente il 4-5% del fascio luminoso che incide perpendicolarmente sulla superficie di rifrazione, trasmettendo quindi il 95-96%. Moltiplicando quanto descritto per il numero di lenti che costituisce un obiettivo, si può comprendere perché il contrasto e la luminosità dell'immagine possano risultare compromessi. Una prima soluzione al problema consiste nel limitare il numero di lenti che costituisce l'obiettivo. In teoria, un'ottica potrebbe essere costituita semplicemente da una singola lente convergente, ma questa presenterebbe aberrazioni tali da compromettere irrimediabilmente la qualità dell'immagine generata. Poiché l'incremento della qualità ottica degli obiettivi comporta un corrispondente incremento del numero di lenti impiegate, l'esigenza di eliminare le riflessioni interne è di primaria importanza. In alcuni degli attuali obiettivi, in particolare gli zoom, la correzione a livelli ottimali delle aberrazioni impone l'impiego di non meno di 15 lenti, con un conseguente elevato numero di interfacce aria-vetro. Se queste lenti non venissero trattate, le perdite per riflessione dei soli raggi assiali porterebbe ad una caduta di luminosità del 50% circa.

È possibile limitare il numero di lenti dello schema ottico mediante:

- **Progettazione ottica** – La qualità ottica di un obiettivo dipende dal vetro, dalla curvatura e dallo spessore delle lenti, dalla posizione del diaframma e dalla precisione dei centraggi, delle distanze e degli spostamenti dei gruppi ottici.
- **Adozione di lenti asferiche** – L'aberrazione sferica si corregge accoppiando elementi positivi e negativi, con conseguente moltiplicazione del numero di lenti, o utilizzando un solo elemento lavorato secondo una curvatura complessa, in grado di correggere i difetti di rifrazione connessi con le calotte sferiche.
- **Bassa dispersione** – È possibile svincolare l'indice di rifrazione dall'indice di dispersione, grazie all'adozione di vetri speciali come quelli alla fluorite o alle terre rare, caratterizzati da un indice di rifrazione elevato ma da un indice di dispersione molto basso.

Il secondo espediente utilizzato per tenere sotto controllo i riflessi interni è costituito dal trattamento antiriflesso. Una singola sostanza o una miscela di sostanze vengono depositate per sublimazione sulla superficie delle lenti, in modo da formare uno o più strati sottili capaci di eliminare o almeno attenuare la frazione di raggi riflessi.

Il trattamento antiriflesso monostrato fu introdotto per la prima volta dal fisico tedesco A. Smakula nel 1935. Il trattamento antiriflesso multistrato fu invece messo a punto dalla Carl Zeiss non molto tempo dopo, ma venne utilizzato su scala commerciale solo dopo la guerra, essendo considerato segreto militare dalle autorità del Terzo Reich, date le sue superiori prestazioni nell'ambito della fotografia aerea.

Il trattamento antiriflesso, anche se di tipo multistrato, non è comunque in grado di eliminare completamente tutte le lunghezze d'onda riflesse dalla lente ed è per questo motivo che le ottiche così trattate sono caratterizzate da una colorazione residua. I rivestimenti multistrato presentano, infatti, una tinta leggermente verdastra, che permette di distinguerli abbastanza facilmente da quelli monostrato, tendenti viceversa al porpora.



## Ottica degli strati antiriflesso

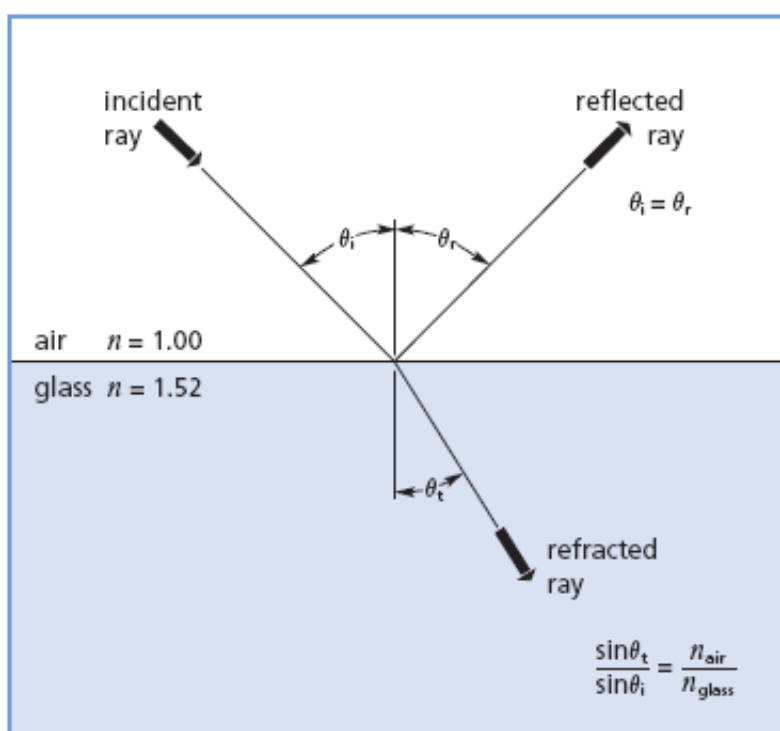
Gli attuali rivestimenti dielettrici multistrato presentano un'elevata durezza ed una lunga vita utile, purché siano manipolati e puliti con attenzione. Infatti, un rivestimento antiriflesso di lunga durata permette di proteggere adeguatamente le superfici di molti vetri ottici ad alto indice di rifrazione, che tendono a deteriorarsi o macchiarsi con facilità.

Il rivestimento ha una durata che dipende da vari fattori ed il suo spessore è ottimizzato non solo per minimizzare i riflessi luminosi, ma anche ridurre le tensioni meccaniche che possono distorcere la superficie ottica o causare effetti polarizzanti indesiderati. I materiali impiegati devono avere un'elevata elasticità e depositarsi in strati uniformi ed omogenei, privi di granulosità.

### **Riflessioni su superfici non trattate**

Quando la luce incide sull'interfaccia tra due mezzi ottici, una parte è riflessa e quella rimanente è trasmessa dal primo al secondo mezzo mediante rifrazione. La direzione, la fase e l'ampiezza relativa del fascio riflesso sono l'espressione di diverse leggi fisiche.

La legge della riflessione afferma che l'angolo di riflessione  $\theta_r$  è uguale all'angolo di incidenza  $\theta_i$ . La figura seguente illustra questa legge nel caso di una semplice interfaccia aria-vetro.





### Intensità luminosa riflessa

All'interfaccia tra due materiali dielettrici, l'ampiezza della luce riflessa dipende dal rapporto tra i rispettivi indici di rifrazione, dalla polarizzazione del fascio luminoso incidente e dall'angolo di incidenza. Quando il fascio luminoso incide perpendicolarmente sulla superficie di separazione, l'ampiezza relativa del fascio riflesso è data da:

$$A_{rel} = \frac{1 - p}{1 + p}$$

dove:  $p = n_1/n_2$  = rapporto degli indici di rifrazione dei due materiali.

L'**intensità luminosa relativa (riflettanza)** è pari al quadrato dell'ampiezza relativa:

$$R = \left( \frac{1 - p}{1 + p} \right)^2$$

La riflessione aumenta al crescere del divario tra i due indici di rifrazione. Per un'interfaccia aria-vetro, con un indice di rifrazione del vetro di 1,5, la luce riflessa sarà pari al 4% della luce incidente.

In un sistema ottico costituito da dieci interfacce aria-vetro, le sole perdite per riflessione ridurranno il fascio luminoso trasmesso approssimativamente al 66% di quello incidente, un risultato che giustifica appieno l'importanza dei rivestimenti antiriflesso per le prestazioni dei sistemi ottici.

### Angolo di incidenza

L'intensità dei fasci luminosi riflessi e trasmessi all'interfaccia dipende anche dall'angolo di incidenza. A causa degli effetti della rifrazione, è

necessario distinguere tra riflessione esterna quando il mezzo di provenienza del fascio luminoso è quello con indice di rifrazione minore (ad esempio, l'aria nel caso di interfacce aria-vetro o aria-acqua) e riflessione interna quando il mezzo di provenienza del fascio luminoso è quello con indice di rifrazione maggiore (ad esempio, il vetro nel caso di interfaccia vetro-aria o il vetro flint nel caso di interfaccia vetro flint-vetro crown) e considerarle separatamente.

### Riflessione esterna all'interfaccia

Le **leggi della riflessione di Fresnel** descrivono le relazioni di ampiezza e fase tra luce incidente e riflessa alla superficie di separazione tra due mezzi ottici.

Nel caso di incidente normalmente in aria, le leggi di Fresnel si riducono alla seguente espressione:

$$R = \left( \frac{n - 1}{n + 1} \right)^2$$

dove:  $n$  = indice di rifrazione del secondo mezzo.

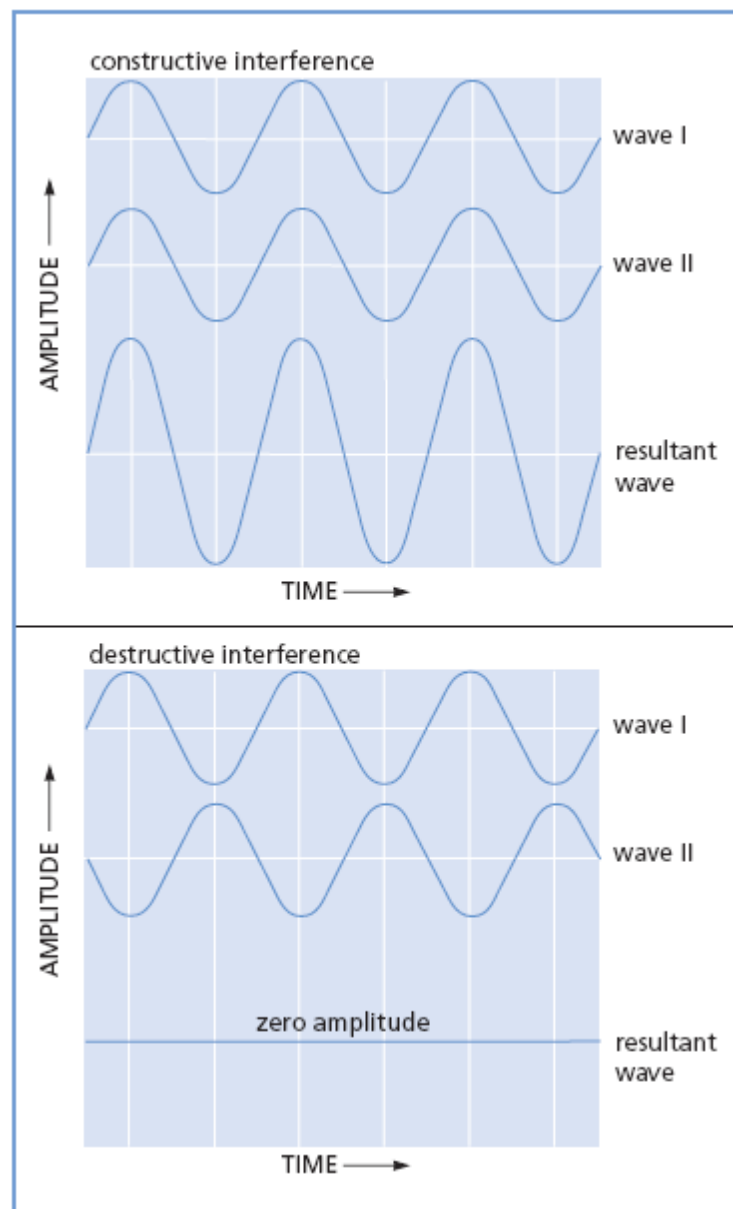
Ad esempio, per un indice di rifrazione pari a 1,52 (vetro crown), la riflettanza è del 4%. Questo risultato conferma che, in generale, il 4% della luce incidente perpendicolarmente ad una superficie aria-vetro sarà soggetto a riflessione.

### Cambiamenti di fase in riflessione

Vi è un'altra più sottile differenza tra riflessione esterna e riflessione interna: la prima comporta uno sfasamento di 180° delle onde luminose, mentre la seconda non porta ad alcuno sfasamento (ad eccezione della riflessione interna totale). Questo è uno dei principi fondamentali alla base del funzionamento dei rivestimenti multistrato.

**Interferenza costruttiva e distruttiva**

Una conseguenza delle proprietà ondulatorie della luce sono gli effetti dell'interferenza: le onde luminose che oscillano in fase generano un'interferenza costruttiva, mentre quelle in opposizione di fase (sfasamento di  $180^\circ$  o  $\pi$  radianti) producono un'interferenza distruttiva, annullando le loro ampiezze.



Se le onde che interferiscono hanno ampiezze diverse, l'ampiezza risultante è pari alla differenza tra le ampiezze di partenza e non è quindi nulla.

## Interferenza su film sottile

I principi dell'interferenza si applicano anche ai film sottili, costituiti da materiali dielettrici o metallici aventi uno spessore con ordine di grandezza pari o inferiore a quello delle lunghezze d'onda della luce visibile.

Quando un fascio luminoso incide su un film sottile, viene riflesso in parte dalla superficie anteriore ed in parte da quella posteriore e, per la parte restante, trasmesso (trascurando gli inevitabili assorbimenti).

Le due onde riflesse possono così interferire.

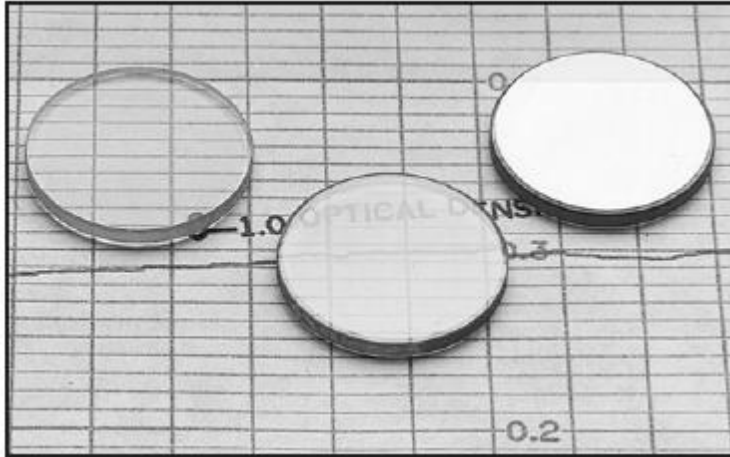
Chiaramente, se la lunghezza d'onda della luce incidente e lo spessore del film sono tali da comportare un'opposizione di fase tra le due componenti riflesse, si avrà un'interferenza distruttiva con un'intensità riflessa minima. Se le due componenti riflesse sono di pari ampiezze, l'intensità luminosa risultante sarà nulla.

In assenza di assorbimento e/o diffusione, il principio di conservazione dell'energia impone che tutta l'**intensità riflessa "perduta"** vada ad incrementare l'intensità del fascio luminoso trasmesso. La somma delle intensità dei fasci riflessi e trasmessi è sempre pari all'intensità del fascio incidente.

Viceversa, quando lo sfasamento è nullo, l'intensità riflessa è massima (come nel caso dei filtri e specchi diecrici) e quella trasmessa è minima o nulla.

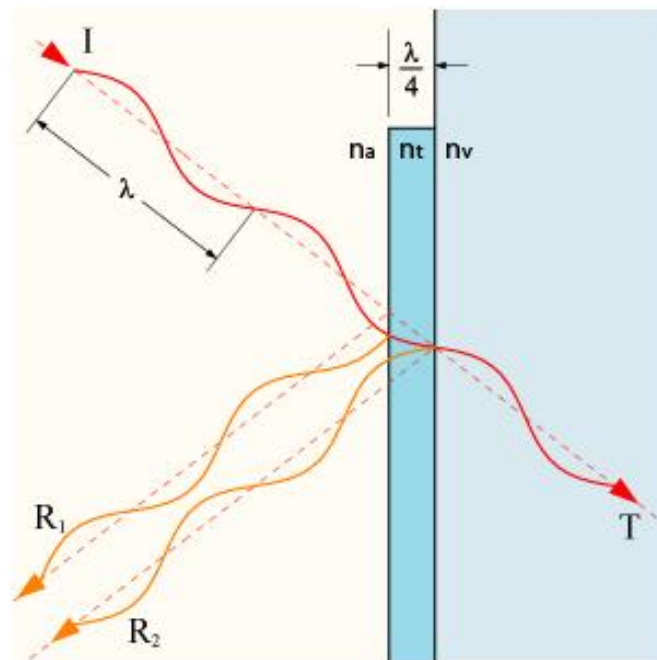
### **Rivestimento antiriflesso monostrato**

Se si riveste il substrato (vetro, quarzo, ecc.) con un film sottile e se le riflessioni alle interfacce aria-film e film-substrato sono di uguale ampiezza e sfasate di  $180^\circ$ , le onde riflesse si annullano vicendevolmente per interferenza distruttiva e l'intensità del fascio luminoso trasmesso è prossima a quella del fascio incidente.



**Spessore**

Per eliminare le riflessioni di una specifica lunghezza d'onda, lo spessore del rivestimento antiriflesso monostrato deve essere un multiplo dispari di  $\lambda/4$ . Questo requisito è illustrato nella figura sottostante.



Le riflessioni sulle interfacce aria-film e film-substrato sono esterne (dall'indice di rifrazione minore a quello maggiore) ed i conseguenti cambiamenti di fase si annullano vicendevolmente. Pertanto, la differenza di fase tra due fasci luminosi riflessi dipende unicamente dalla differenza  $t$  dei loro percorsi ottici.

Riassumendo, si avrà interferenza distruttiva quando risulterà:

$$t = (2k + 1) \frac{\lambda}{4}$$

dove:  $k = 0 \rightarrow d = \lambda/4$

$$k = 1 \rightarrow d = 3\lambda/4$$

$$k = 2 \rightarrow d = 5\lambda/4$$

$$k = 3 \rightarrow d = 7\lambda/4$$

...

I rivestimenti antiriflesso monostrato vengono generalmente depositati con uno spessore pari a  $\lambda/4$ , dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda corrispondente al picco di attenuazione del riflesso.

### Indice di rifrazione

L'intensità del fascio riflesso da una singola superficie per un fascio incidente normalmente è data da:

$$I_r = \left( \frac{1 - p}{1 + p} \right)^2 \cdot I_i$$

dove:  $p = n_1/n_2$  = rapporto degli indici di rifrazione dei due materiali.

Ma la presenza di uno strato antiriflesso comporta due superfici di rifrazione e quindi due fasci riflessi. Affinché questi due fasci luminosi siano di uguale intensità, è necessario che  $p$  assuma il medesimo valore per entrambe le interfacce:

$$\frac{n_a}{n_t} = \frac{n_t}{n_v}$$

dove:  $n_a$  = indice di rifrazione dell'aria  
 $n_t$  = indice di rifrazione del film sottile  
 $n_v$  = indice di rifrazione del vetro (substrato).

Poiché l'indice di rifrazione dell'aria vale 1,0 con buona approssimazione, quello dello strato antiriflesso ideale è ricavabile dalla seguente espressione:

$$n_t = \sqrt{n_v}$$

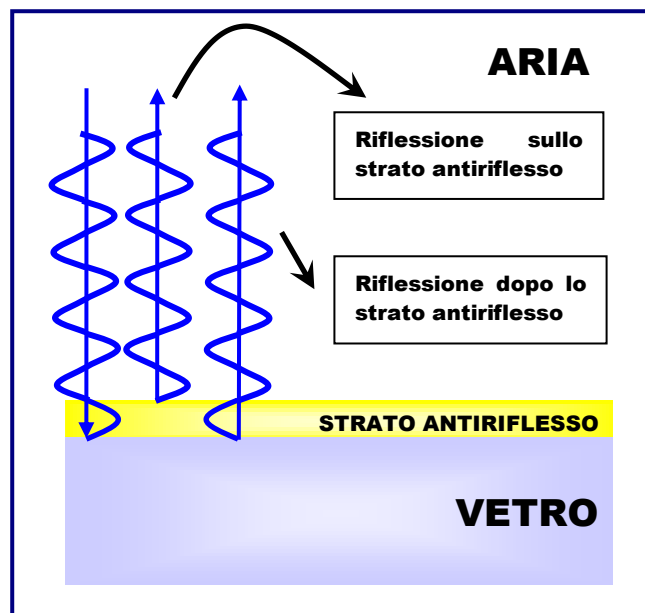
Tipicamente, i vetri ottici hanno indici di rifrazione compresi tra 1,5 e 1,75. Sfortunatamente, non esiste alcun materiale ideale, depositabile in strati sottili durevoli, che abbia un indice di rifrazione così basso da soddisfare esattamente questo requisito (ad esempio,  $n_t = 1,23$  per lo strato antiriflesso ottimale su vetro crown). Tuttavia, il fluoruro di magnesio ( $\text{MgF}_2$ ) è un buon compromesso, in quanto forma strati stabili e di alta qualità ed ha un indice di rifrazione sufficientemente basso ( $n = 1,38$ ) ed un basso assorbimento per  $\lambda = 550 \text{ nm}$ .

### Lunghezze d'onda incidenti

Con qualsiasi tipo di film sottile, la riflettanza e la trasmittanza dipendono dalla lunghezza d'onda della luce incidente per due motivi. Primo, poiché è necessario depositare uno spessore esattamente uguale ad un quarto (o ad un suo multiplo dispari) della lunghezza d'onda prescelta, lo strato antiriflesso non risulta ottimizzato per le luci di colore diverso. Secondo, gli indici di rifrazione del

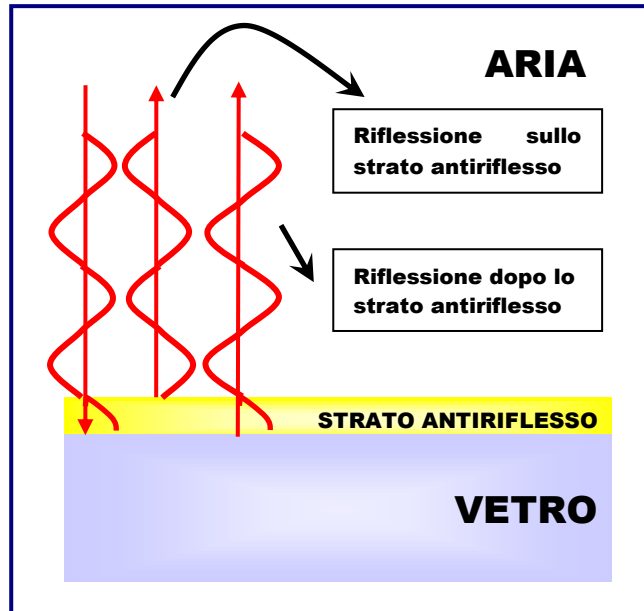
rivestimento e del substrato cambiano in funzione della lunghezza d'onda, ovvero a causa della dispersione. L'esempio che segue illustra, in modo semplificato, questa dipendenza dalla lunghezza d'onda incidente.

Per un dato spessore dello strato antiriflesso, l'onda blu riflessa sulla prima superficie di separazione e quella che riemerge dal suddetto strato dopo essere stata riflessa dalla seconda superficie di separazione sono **in fase**.



Per tale motivo, l'onda complessiva riflessa sarà la somma delle ampiezze delle due singole componenti riflesse e la sua intensità tenderà a rinforzarsi, con conseguente aumento del riflesso. Per lo stesso spessore dello strato antiriflesso, l'onda rossa (che ha una lunghezza d'onda quasi doppia rispetto alla luce blu) riflessa sulla prima superficie di separazione e quella che riemerge dal suddetto strato dopo essere stata riflessa sulla seconda superficie di separazione sono **in opposizione di fase**.

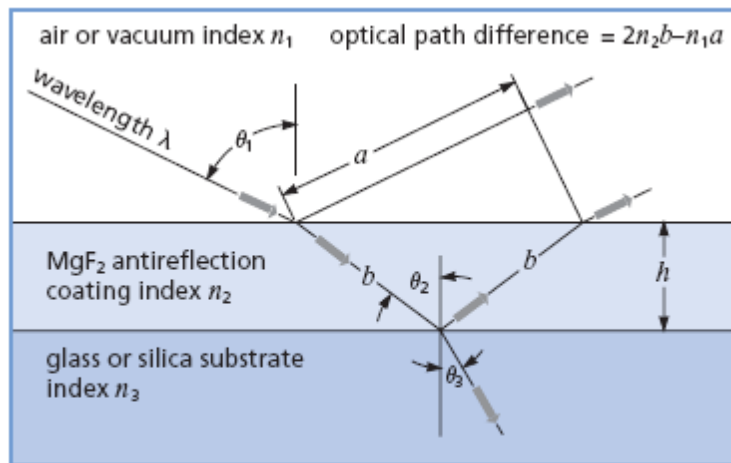




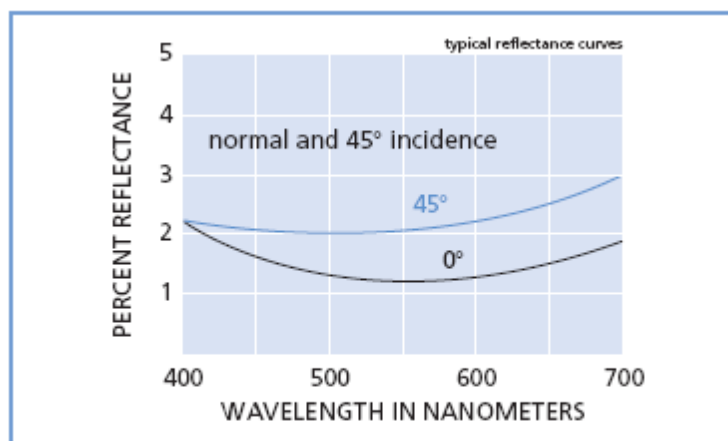
Per tale motivo, l'onda complessiva riflessa sarà la differenza delle ampiezze delle due singole componenti riflesse e la sua intensità tenderà ad annullarsi, con conseguente eliminazione o attenuazione del riflesso. In conclusione, il trattamento antiriflesso dell'esempio sarà in grado di eliminare il riflesso delle radiazioni rosse, mentre non annullerà il riflesso di quelle blu.

### Angolo di incidenza

La differenza di percorso ottico tra le riflessioni sulle superfici anteriore e posteriore del film sottile dipende dall'angolo di incidenza. Infatti, la differenza di percorso ottico aumenta con l'angolo di incidenza a partire da  $0^\circ$  (incidenza perpendicolare alla superficie).



Questo cambiamento della differenza di percorso ottico modifica la differenza di fase tra le due riflessioni interferenti, con conseguente variazione dell'intensità luminosa complessivamente riflessa.

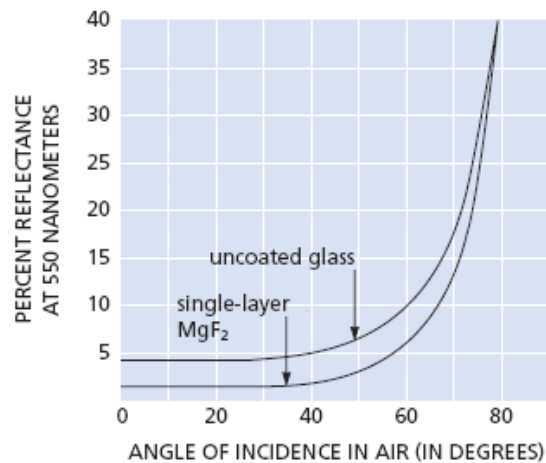
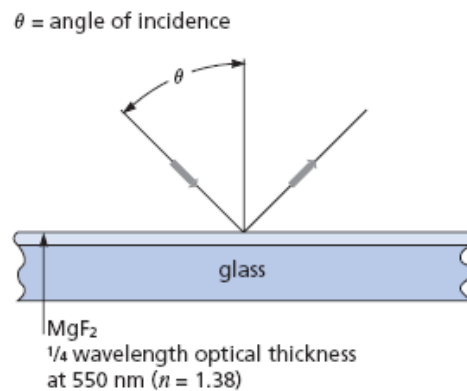


**Fluoruro di magnesio (MgF<sub>2</sub>)**

Probabilmente, è il materiale più utilizzato per i rivestimenti antiriflesso.

I rivestimenti monostrato operano egregiamente su un ampio ventaglio di lunghezze d'onda ed angoli di incidenza, pur se il traguardo della riflessione nulla è conseguibile esclusivamente con angoli di incidenza nulli e con un indice di rifrazione del film sottile esattamente pari alla radice quadrata di quello del substrato. In pratica, il contributo più significativo del rivestimento monostrato di MgF<sub>2</sub> consiste nel miglioramento della trasmissione quando la maggior

parte dei raggi luminosi presenta elevati angoli di incidenza sulle superfici degli elementi ottici.



Ad esempio, per angoli di incidenza nulli, le superfici del vetro crown riflettono tipicamente il 4-5% della luce visibile. Un rivestimento di alta qualità a base di MgF<sub>2</sub> è in grado di ridurre questo valore all'1,5%. Questo miglioramento è sufficiente o addirittura ottimale per un ampio ventaglio di applicazioni, ma gli obiettivi necessitano di prestazioni ancora più elevate, conseguibili solo con rivestimenti multistrato.

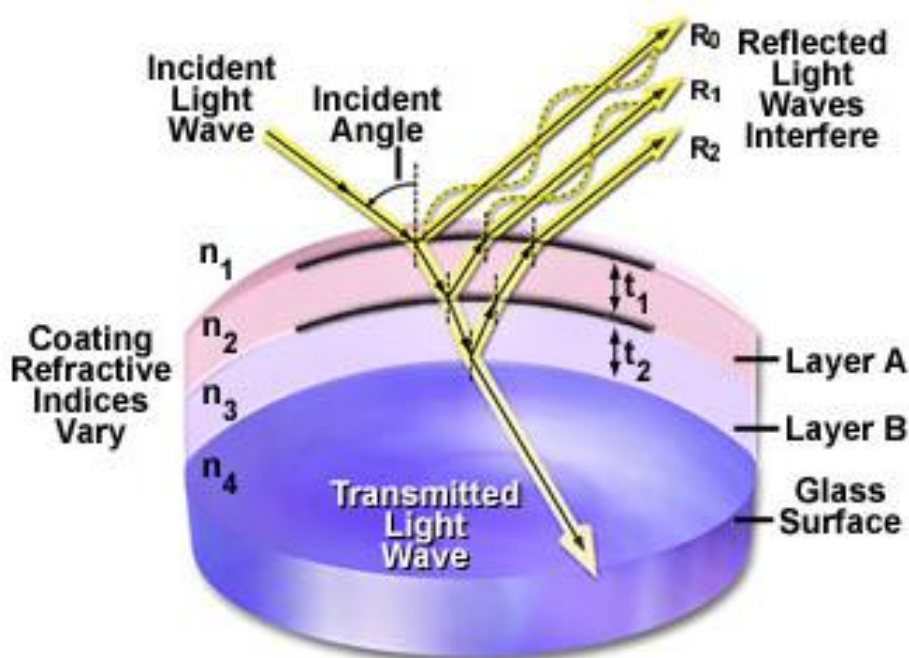
### **Rivestimento antiriflesso multistrato**

Per eliminare o attenuare il riflesso di più lunghezze d'onda, è necessario ricorrere ad un trattamento multistrato, in cui ogni singolo strato esercita la sua azione antiriflesso su una specifica e limitata banda di lunghezze

d'onda. Diventa così possibile raggiungere valori di trasmittanza superiori al 99,9% per le radiazioni dello spettro visibile, minimizzando contemporaneamente il flare.

Alla fine degli anni '60 del XX secolo, Asahi brevettò il metodo **SMC (Super MultiCoating)**, consistente nella stesa di ben sette strati antiriflesso sulla superficie delle lenti. Fuji rispose con il suo sistema **EBC (Electron-Beam Coating)**, che prevedeva ben undici strati; inizialmente applicato ai soli obiettivi cinematografici, il suo uso venne ben presto esteso anche agli obiettivi fotografici. A partire dagli anni '80, il trattamento multistrato è stato progressivamente adottato su tutti i nuovi obiettivi ed attualmente rappresenta uno dei punti di forza dei fabbricanti di ottiche, trovando anche impiego sulle lenti per occhiali da vista (anche se principalmente per motivi estetici).

La figura seguente illustra la riflessione e la trasmissione di luce in una lente trattata con due strati antiriflesso.



La luce incidente colpisce il primo strato (A) con un angolo di incidenza non nullo e viene in parte riflessa ( $R_0$ ) ed in parte trasmessa al secondo strato (B). Qui, un'altra porzione di luce viene riflessa ( $R_1$ ), sempre con lo stesso angolo, ed interferisce con quella riflessa dal primo strato. La parte di luce rimanente raggiunge la superficie di vetro, dove viene ulteriormente suddivisa in luce riflessa ( $R_2$ ) e luce trasmessa. La frazione riflessa dalla superficie di vetro interferisce, sia costruttivamente sia distruttivamente, con le porzioni riflesse dai due strati antiriflesso. Gli indici di rifrazione dei due strati sono intermedi tra quello dell'aria e quello del vetro. In definitiva,

in funzione dell'angolo di incidenza, la maggior parte della luce viene trasmessa attraverso il vetro e focalizzata a formare l'immagine.

## Deposizione sottovuoto degli strati antiriflesso

---

Gli elementi ottici non trattati, ma già lavorati e rifiniti, sono montati su una serie di vassoi rotanti curvi e forati.



I vassoi sono quindi introdotti in una camera sottovuoto, in grado di raggiungere un vuoto di almeno 1,046 mmHg, disposti in modo che ciascun substrato attraversi lo stesso volume a parità di tempo. Sul fondo della camera è posta la fonte del materiale di rivestimento da vaporizzare mediante sublimazione.



**Riscaldamento  
resistivo**

Il metodo di vaporizzazione più semplice, ed in uso da più tempo, si basa sul riscaldamento resistivo di una vaschetta in tungsteno (W), tantalio (Ta) o molibdeno (Mo) contenente una piccola quantità del materiale dielettrico per il rivestimento. Durante il processo di deposizione, la vaschetta è percorsa da corrente elettrica a 10-100 A, con conseguente sublimazione del materiale dielettrico. Poiché la pressione interna è bassissima, il cammino libero a disposizione degli atomi o molecole in fase gassosa è molto lungo ed il vapore sprigionato può raggiungere i substrati in rotazione nella parte

superiore della camera. Qui giunto, viene a contatto con i substrati freddi e risolidifica sulla loro superficie formando un film sottile ed uniforme.

La sublimazione termica comporta vari problemi. Alcune delle sostanze potenzialmente utilizzabili possono reagire con la vaschetta calda, portando alla deposizione di strati contaminati da impurezze in grado di modificarne le proprietà ottiche. Inoltre, molti materiali, in particolare gli ossidi metallici, non possono sublimare in questo modo, in quanto il materiale della vaschetta (tungsteno, tantalio o molibdeno) fonde ad una temperatura a quella della loro vaporizzazione. Ad esempio, invece di un film di ossido di zirconio ( $ZrO_2$ ), il substrato riceverebbe del tungsteno.

Fino all'adozione della vaporizzazione per bombardamento elettronico, era possibile utilizzare per i film sottili solo materiali con temperature di fusione non superiori a 2000 °C. Sfortunatamente, i materiali che sublimano a bassa temperatura sono anche quelli che generano strati antiriflesso teneri e meno durevoli. Di conseguenza, i primi rivestimenti multistrato si deterioravano abbastanza rapidamente e richiedevano grande attenzione durante le operazioni di pulitura impedendo, di fatto, la realizzazione di schemi ottici più performanti e quindi più complessi.

#### **Bombardamento con elettroni**

Il bombardamento con elettroni è un metodo avanzato per la deposizione di film ottici sottili, in grado di vaporizzare anche materiali altofondenti come l'ossido di titanio ( $TiO_2$ ) e l'ossido di zirconio ( $ZrO_2$ ). Poiché prevede l'utilizzo di crogioli raffreddati, previene o elimina possibili reazioni tra il materiale per rivestimenti riscaldato ed il metallo della vaschetta o del crogiolo.

Un cannone elettronico da 1-10 kV invia un intenso flusso di elettroni sul materiale per rivestimenti, contenuto in un crogiolo di rame raffreddato ad acqua. L'elevato riscaldamento localizzato sul

materiale per rivestimenti ne provoca la sublimazione senza causare aumenti di temperatura indesiderati del crogiolo. Per materiali con bassa sublimazione anche ad alta temperatura, è possibile focalizzare il cannone elettronico per intensificarne gli effetti.

L'accurato controllo delle condizioni di temperatura e vuoto è indispensabile per garantire che la maggior parte del vapore sia costituita da singoli atomi e molecole e non da aggregati, al fine di ottenere rivestimenti uniformi, con caratteristiche ottiche superiori e vita utile più lunga.

#### Bombardamento con plasma ionico

La deposizione mediante plasma ionico (**Plasma Ion-assisted Deposition, PIAD**) è una tecnica di rivestimento, utilizzata sovente a basse temperature, in grado di offrire notevoli vantaggi in alcuni tipi di applicazioni. Questo processo comporta una maggiore densità di deposizione di atomi o molecole nei film sottili, aumentandone l'indice di rifrazione, minimizza lo spostamento delle lunghezze d'onda ed assicura i livelli di adesione più alti e di assorbimento luminoso (assorbanza) più bassi.

Poiché il film non presenta vuoti grazie alla sua elevata compattezza, ha una bassissima tendenza ad assorbire il vapore acqueo. L'assorbimento di acqua può, infatti, modificare l'indice di rifrazione dello strato antiriflesso e quindi le sue proprietà ottiche. Inoltre, può portare a modifiche fisiche in grado di causare eventualmente danni al rivestimento.

La deposizione mediante plasma ionico è utilizzabile in processi sia a bassa sia ad alta temperatura. Non essendo più necessario riscaldare i componenti durante la deposizione, è possibile rivestire elementi ottici cementati, come i doppietti acromatici, senza il rischio di danneggiarli.

Il processo PIAD è utilizzato frequentemente per la deposizione di ossidi metallici, nitruri metallici,



metalli puri ed ossidi metallici. È quindi in grado di migliorare significativamente le prestazioni di strati antiriflesso, filtri passa-banda a banda stretta e larga, filtri di selezione, specchi dielettrici, film trasparenti antiabrasione e filtri degradanti. I materiali tipici per questo tipo di deposizione sono i seguenti:

- **$\text{SiO}_2$**  – materiale a basso indice di rifrazione e bassa assorbanza,
- **$\text{TiO}_2$**  – materiale ad alto indice di rifrazione e bassissima assorbanza nel visibile e nell'IR,
- **$\text{Ta}_2\text{O}_5$**  – materiale ad alto indice di rifrazione, bassa assorbanza ed elevata trasmittanza nel visibile,
- **$\text{Nb}_5\text{O}_5$**  – materiale ad alto indice di rifrazione e bassissima assorbanza nel visibile e nell'IR,
- **$\text{HfO}_2$**  – materiale ad alto indice di rifrazione ed elevate prestazioni in applicazioni nell'UV.

**Monitoraggio e controllo spessore**

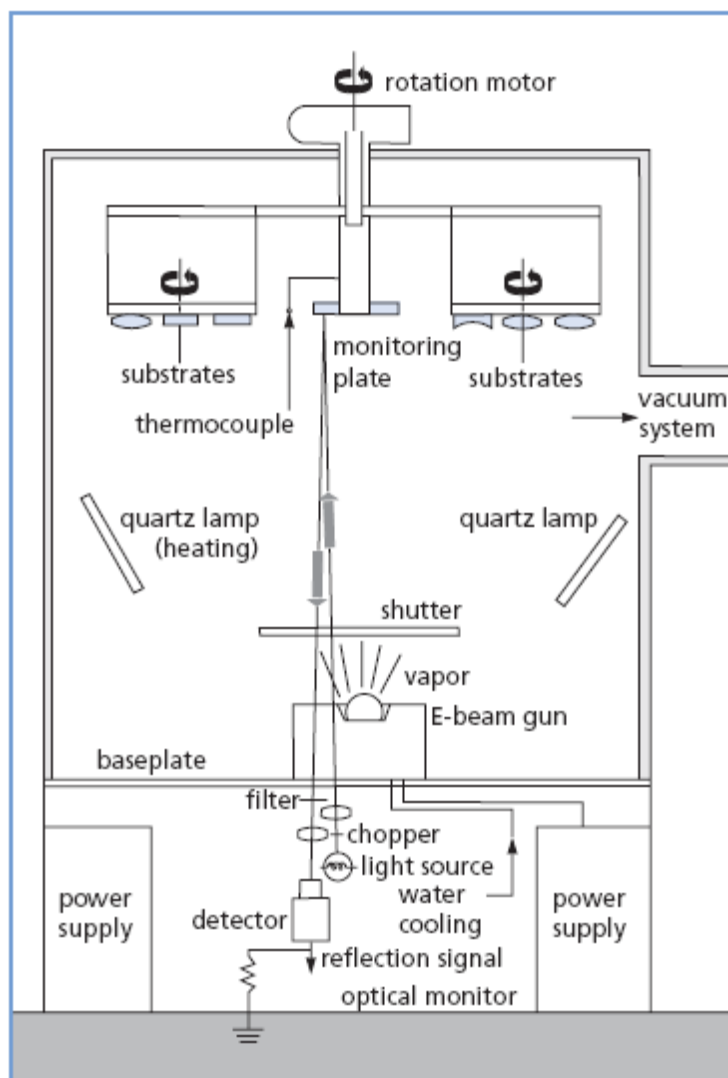
La tipica configurazione per la deposizione multistrato prevede diverse fonti precaricate con differenti materiali per rivestimenti. L'intero rivestimento multistrato viene depositato senza aprire la camera.

Si procede a riscaldare la fonte o ad attivare il cannone elettronico fino a raggiungere la temperatura di fusione. L'otturatore posto sopra la fonte si apre per esporre la camera al material vaporizzato. Quando lo spessore di uno specifico strato raggiunge il valore previsto, si chiude l'otturatore e si disattiva la fonte. Questo processo viene ripetuto anche per le altre fonti.

Il monitoraggio ottico è il metodo di controllo del processo di deposizione utilizzato più frequentemente. Un fotometro monocromatore a doppio raggio monitora, alle lunghezze d'onda specifiche dell'applicazione, le caratteristiche ottiche di un campione di riferimento collocato nella camera sottovuoto. In alcuni casi, il sistema di rilevamento

è in grado di monitorare direttamente la variazione delle caratteristiche ottiche del substrato in trattamento. Durante l'operazione, un fascio luminoso attraversa la camera ed incide sul campione di riferimento o sul substrato da trattare. Si procede al rilevamento della luce riflessa e/o trasmessa mediante fotomoltiplicatori e tecniche di analisi della fase per massimizzare il rapporto segnale/rumore.

Per ogni strato depositato sul campione di riferimento, l'intensità della luce riflessa e/o trasmessa oscilla in modo sinusoidale a causa degli effetti dell'interferenza ottica. Si ha l'arresto della deposizione quando la riflettanza e/o la trasmittanza del campione di riferimento raggiungono i valori prescritti. La massima precisione del monitoraggio ottico è essenziale per la deposizione e l'ottimizzazione delle specifiche proprietà ottiche del rivestimento.



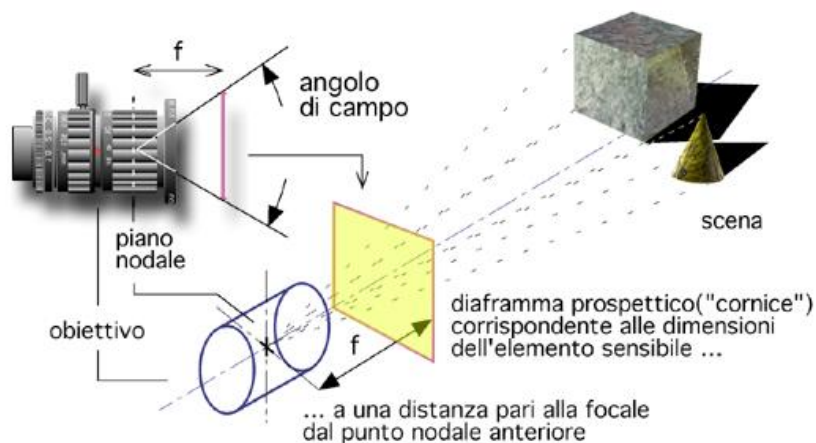
## Prospettiva nella ripresa foto-video

Normalmente, quando si osserva un oggetto, ci si posiziona per vederlo sotto un angolo di circa  $50^\circ$  (**angolo visuale in fissazione**). Per un disegno o una fotografia 18x24 cm, la distanza di visione corrispondente è di circa 25 cm.



In pratica, l'osservatore tende a porsi ad una distanza grosso modo pari al diametro del cerchio che circonda l'oggetto (o alla sua diagonale, se l'oggetto è rettangolare).

***Un obiettivo vede la scena ripresa dal suo punto nodale anteriore, inquadrato in una cornice che ha le dimensioni e la forma del fotogramma, posta a una distanza pari alla lunghezza focale dal punto nodale stesso.***



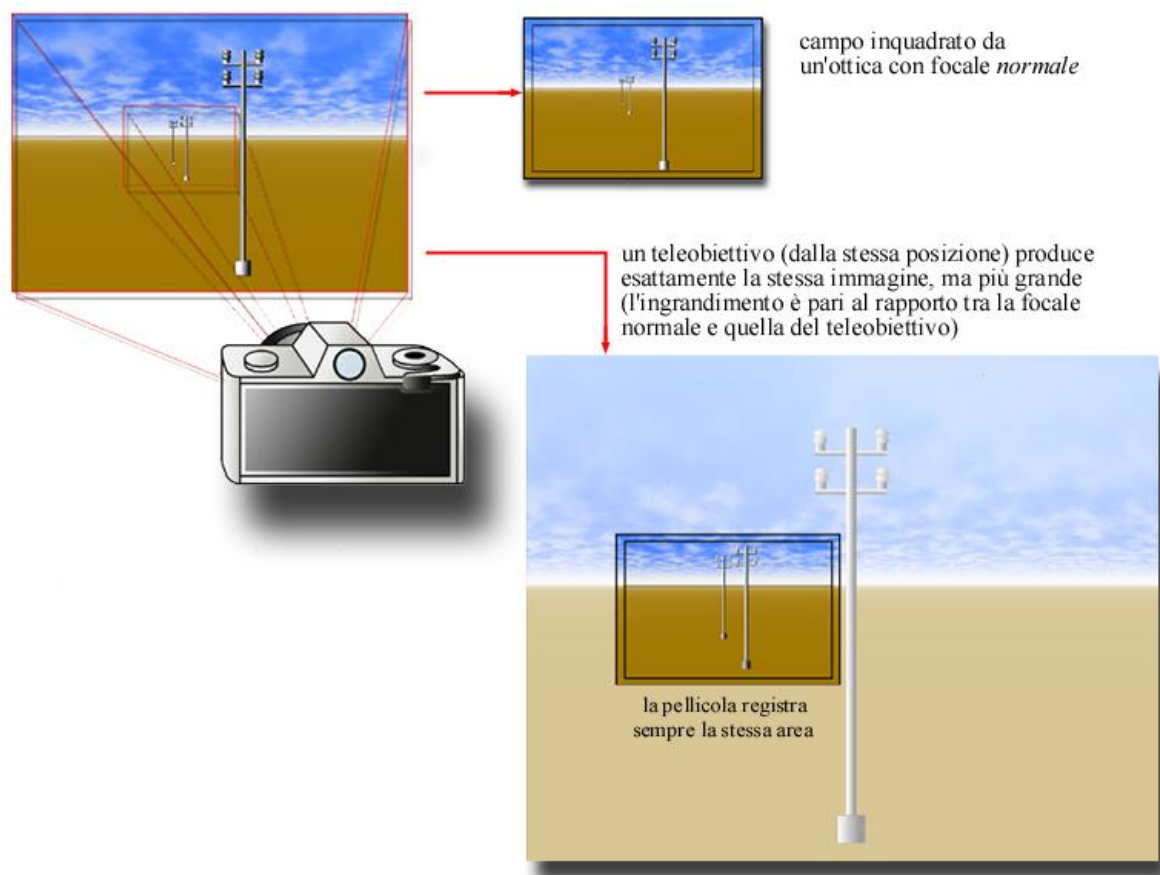
diaframma prospettico  
corrispondente alle dimensioni  
dell'elemento sensibile



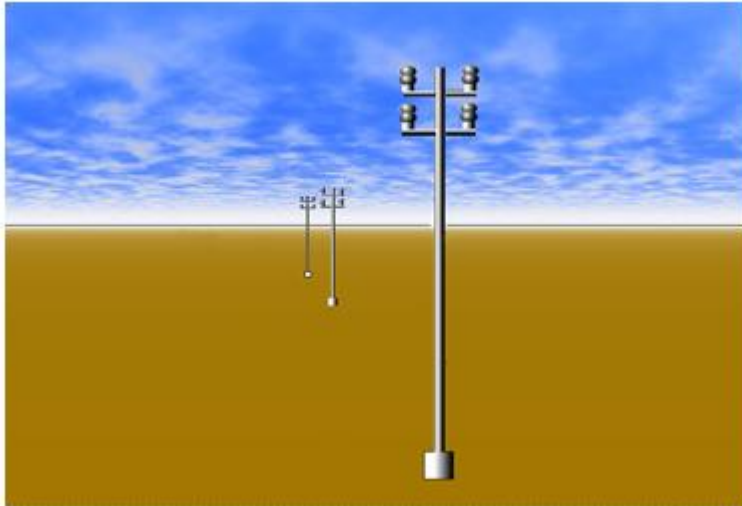
Un'idea piuttosto diffusa, ma errata, è che i grandangolari ed i teleobiettivi modifichino di per se stessi la prospettiva della scena, gli uni esaltando le distanze tra gli oggetti, gli altri comprimendole.

Qualsiasi obiettivo produce un'immagine prospetticamente corretta se osservata alla giusta distanza. Qualsiasi ottica, dalla medesima posizione, produce la stessa resa prospettica. Perché sembri corretta, l'immagine dovrà essere osservata da una distanza proporzionale alla lunghezza focale impiegata per produrla. Se questo criterio non viene rispettato, la prospettiva sembrerà alterata.

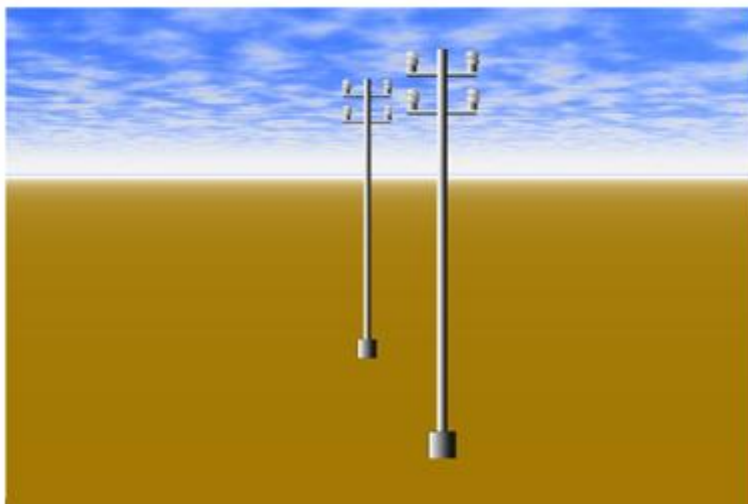
L'unico modo per modificare la prospettiva è cambiare il punto di ripresa.



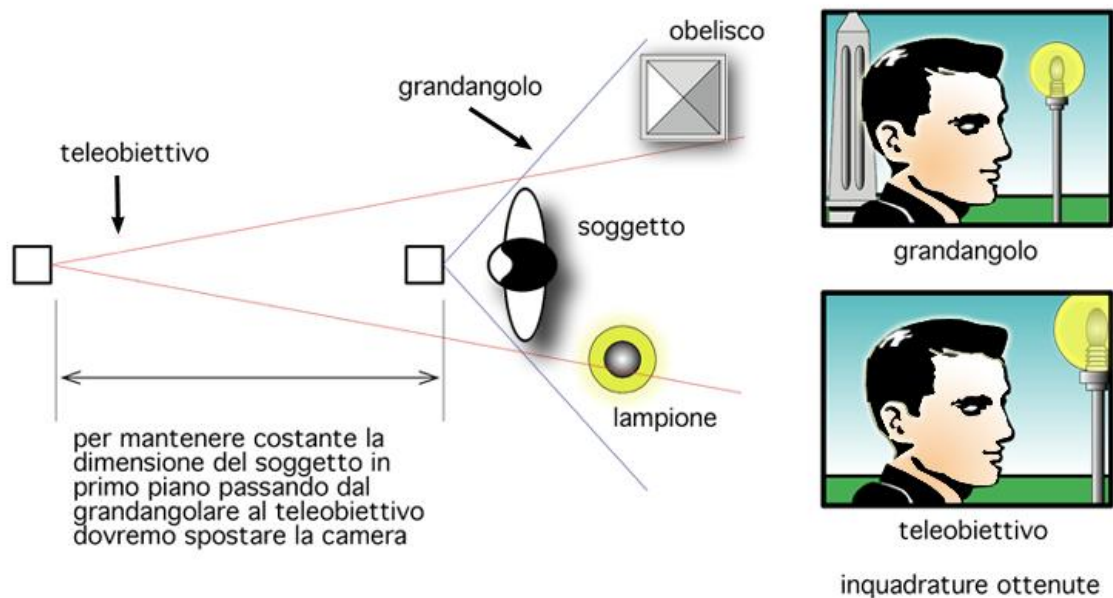
L'immagine finale avrà, in ogni caso, le stesse dimensioni (che sono determinate dal formato del materiale fotosensibile) e sarà osservata dalla medesima distanza.



Nella seconda immagine, i due pali (ingranditi dalla lunga focale) sembreranno molto vicini all'osservatore; la distanza tra loro parrà diminuita per giustificare la somiglianza delle loro dimensioni. La profondità della scena diverrà percettivamente minore: il classico appiattimento dato dalle lunghe focali.



Le stesse considerazioni, invertite, valgono per i grandangolari. Di solito si tende a mantenere costanti, con qualsiasi focale, le dimensioni del soggetto principale. Per fare questo ci si sposta, allontanandosi o avvicinandosi.



Questo produce un cambiamento della prospettiva (e, in casi estremi, l'immagine finale apparirà distorta).



Da quanto detto, non dovrebbe stupire il fatto che zoom e movimento di macchina diano risultati diversi.

Lo zoom permette il passaggio da un **campo lungo** ad un **dettaglio**, producendo risultati del tutto differenti rispetto alla stessa operazione eseguita con una carrellata.



L'uso dello zoom comporta l'ingrandimento del particolare senza modificare la prospettiva, che rimane quella del punto di ripresa.



Viceversa, la carrellata è un cambiamento del punto di ripresa e quindi modifica la prospettiva.



**Carrello**

