



DIAFRAMMI ED OTTURATORI

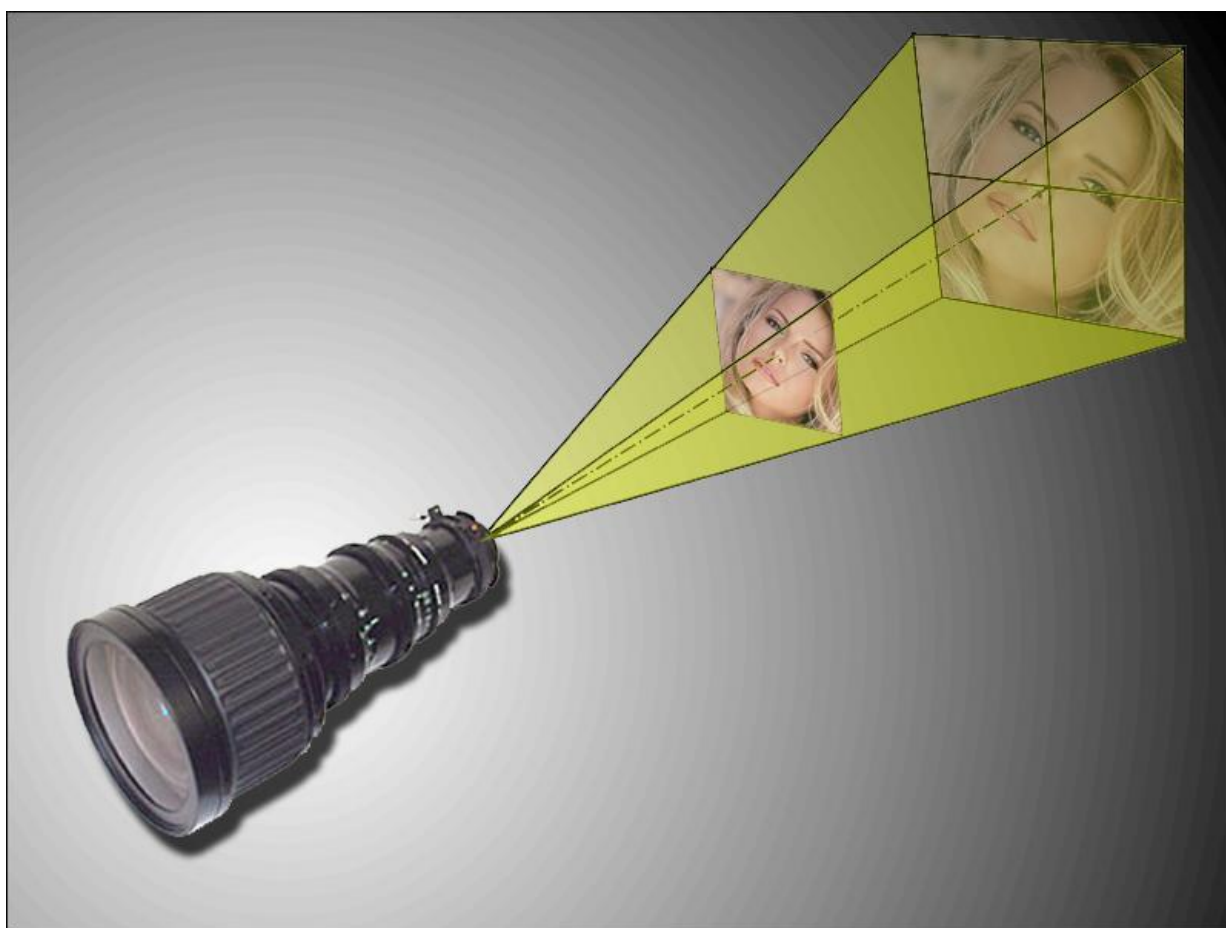
Sommario

| | |
|--|----|
| Diaframma | 2 |
| Scala standard dei diaframmi | 10 |
| Vignettatura | 12 |
| Otturatore fotografico..... | 18 |
| Otturatore centrale..... | 19 |
| Sincronizzazione flash dell'otturatore centrale | 22 |
| Otturatore sul piano focale | 23 |
| Sincronizzazione flash dell'otturatore sul piano focale..... | 30 |
| Distorsione delle immagini con l'otturatore sul piano focale | 30 |

Diaframma

Una caratteristica importante degli obiettivi è la loro capacità di raccogliere la luce, nota come **luminosità o apertura o rapidità**.

Poiché la lunghezza focale dell'obiettivo e le dimensioni dell'immagine prodotta sul piano focale sono direttamente proporzionali, il raddoppio della lunghezza focale, ad esempio, comporta il raddoppio anche delle dimensioni dell'immagine a parità di altre condizioni. Infatti, la stessa quantità di luce viene distribuita su di una superficie quadrupla ed ogni punto del piano focale riceverà un quarto dell'intensità precedente.

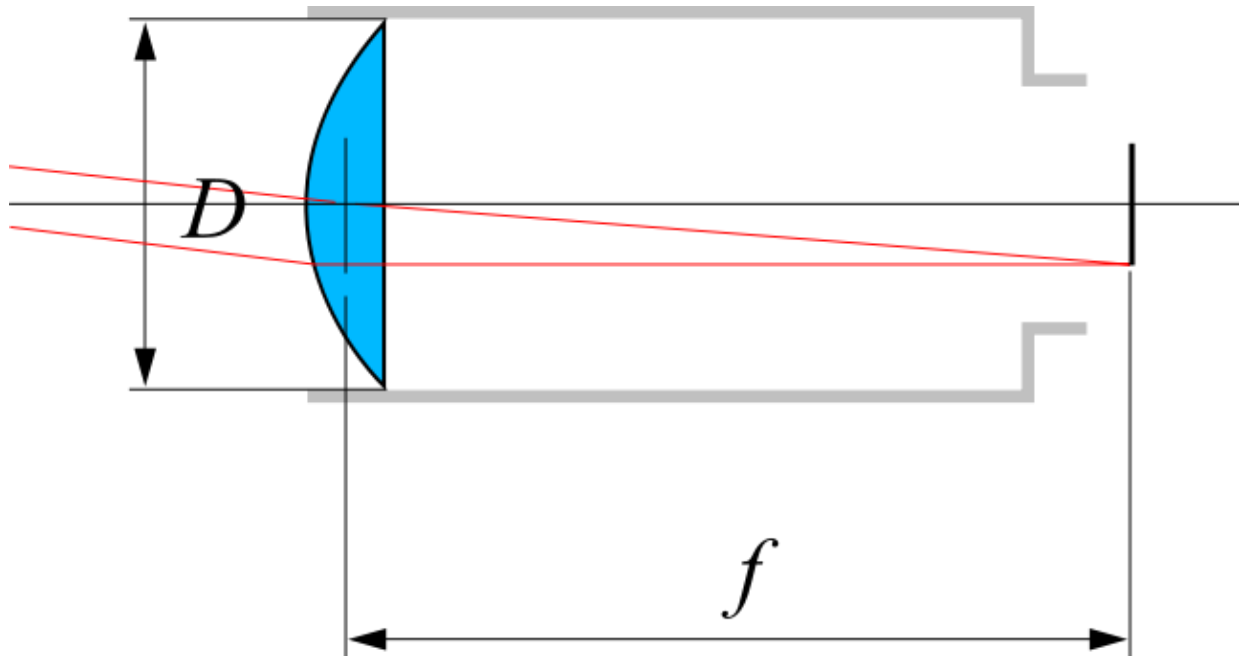


Per ristabilire le condizioni iniziali, l'obiettivo dovrà raccogliere quattro volte più luce, in altri termini, si dovrà raddoppiarne il diametro. Quindi, dal punto di vista della luminosità, obiettivi diversi con lo stesso rapporto tra diametro utile (apertura del diaframma) e lunghezza focale sono equivalenti.

Generalmente, la luminosità di un obiettivo è indicata come:

$$\text{luminosità geometrica} = f/N$$

dove N è il rapporto tra la lunghezza focale e il diametro massimo utile dell'obiettivo (**diaframma alla massima apertura**):



$$N = f/D$$

con la luminosità che aumenta al diminuire di N . Ad esempio, un'ottica $f/10$ ha un'apertura pari a $1/10$ della sua focale.

Nelle ottiche professionali la luminosità è indicata come:

$$\text{luminosità effettiva} = t/N$$

dove t tiene conto dell'**assorbimento dovuto ad imperfetta trasparenza delle lenti**. Ad esempio, se un obiettivo riporta le indicazioni $f/3.5$ e $t/4$, significa che ha una luminosità effettiva corrispondente a quella di un obiettivo senza attenuazione luminosa con $f/4$.

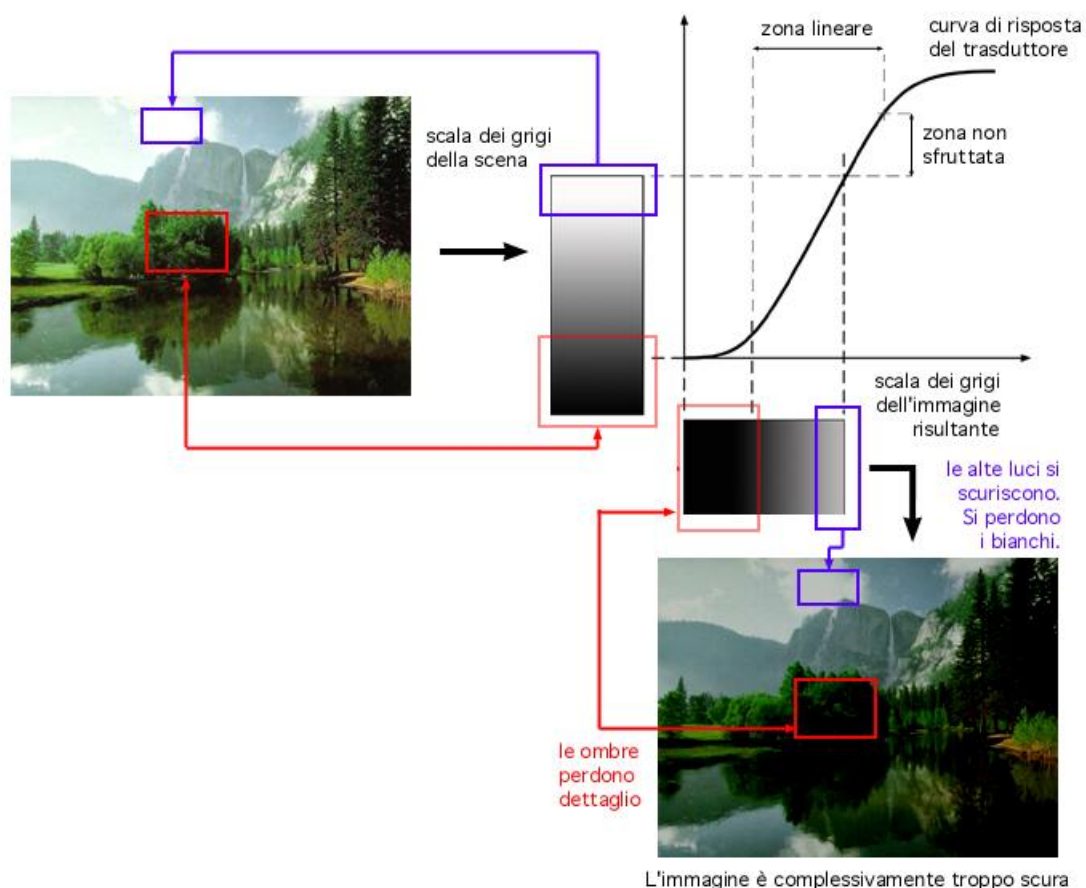
Qualsiasi materiale fotosensibile (ad esempio, pellicola o CCD) fornisce i migliori risultati all'interno di una gamma limitata di luminosità dell'immagine. Al di sotto del livello minimo di luminosità, non viene generato alcun segnale; al di sopra del livello massimo, il segnale rimane costante avendo raggiunto il livello di saturazione. Inoltre, in prossimità di

questi estremi, il comportamento è di tipo non lineare, cioè non c'è più proporzionalità diretta tra segnale ed intensità luminosa.

Per ottenere una riproduzione di elevata qualità, si deve fare in modo che la gamma di luminosità della scena sia compresa esattamente entro i limiti di risposta del trasduttore.

Sottoesposizione

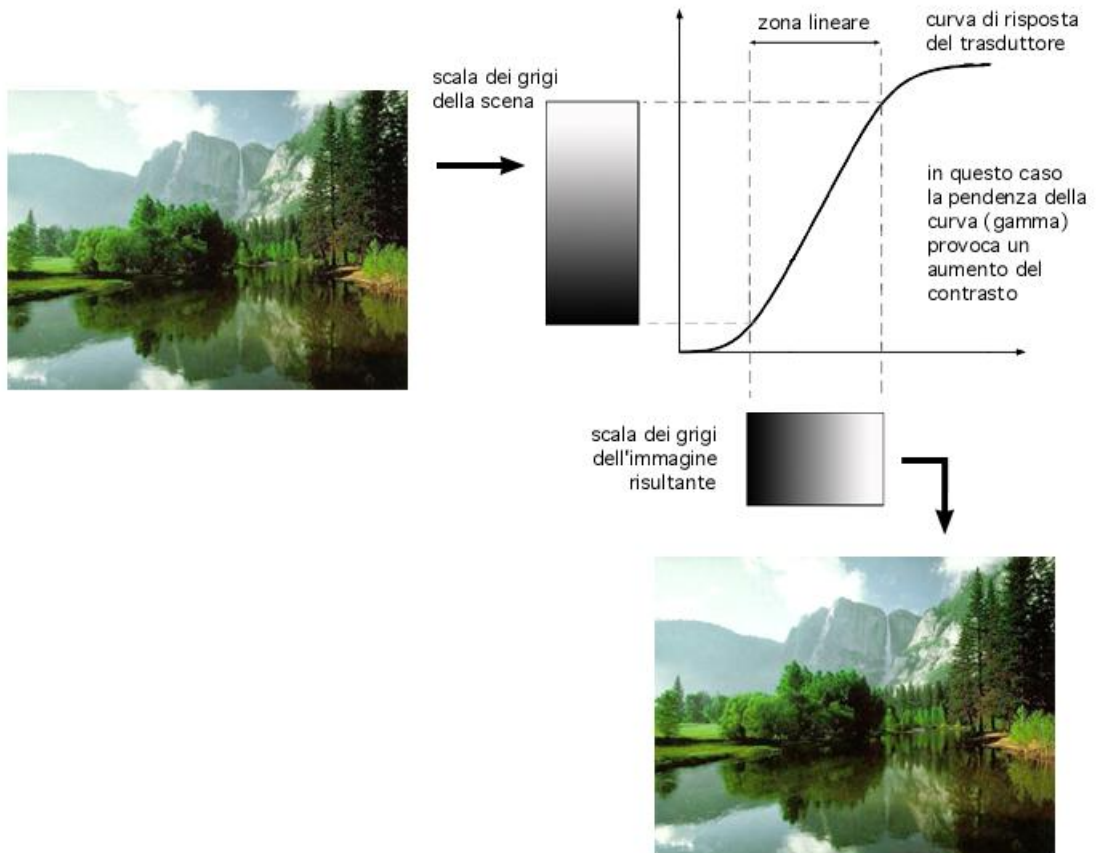
Si sfrutta solo la parte inferiore della curva del trasduttore. Le ombre risultano nere e senza dettagli e mancano completamente i bianchi nelle alte luci. L'immagine è complessivamente troppo scura e può comparire una granulazione dovuta al rumore dei trasduttori.



Esposizione corretta

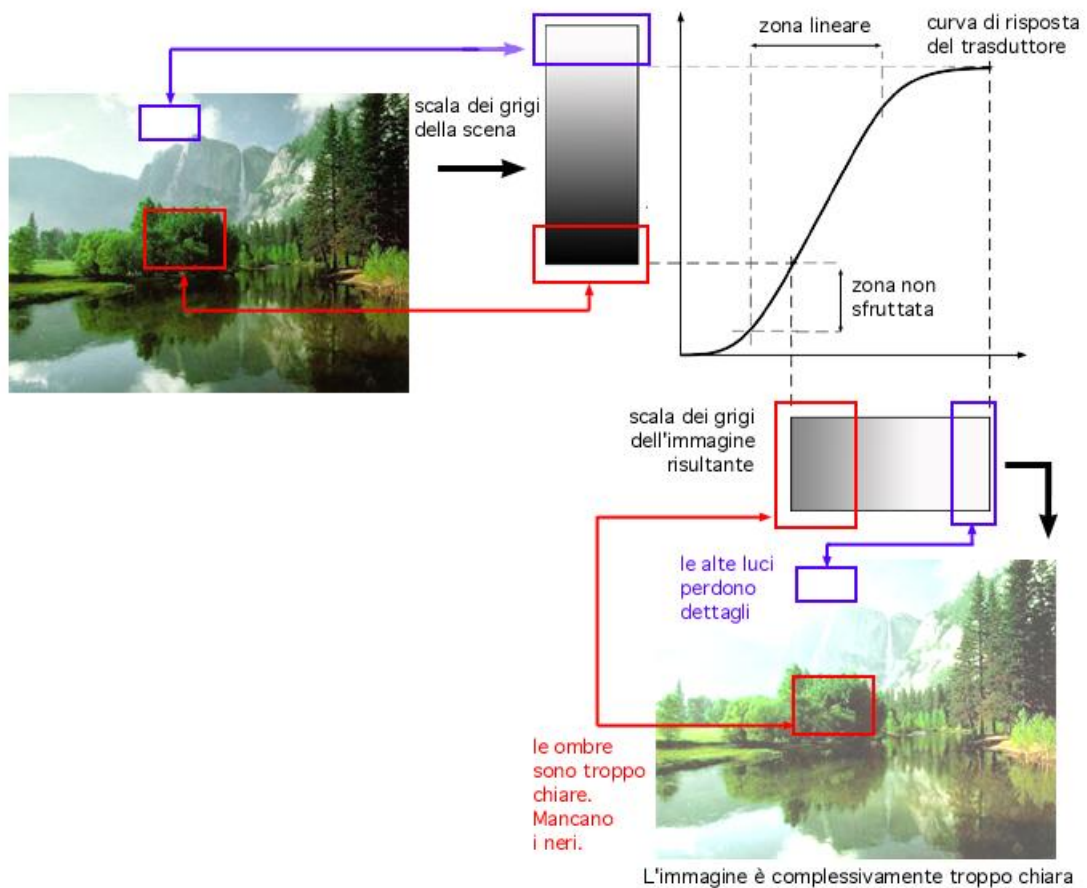
Si sfrutta completamente la parte lineare della curva del trasduttore. Le ombre risultano scure ma dettagliate; le alte luci mantengono i dettagli e

arrivano sino al bianco puro. In funzione della pendenza della curva di risposta del trasduttore, l'immagine può essere più o meno contrastata della scena originale.



Sovraesposizione

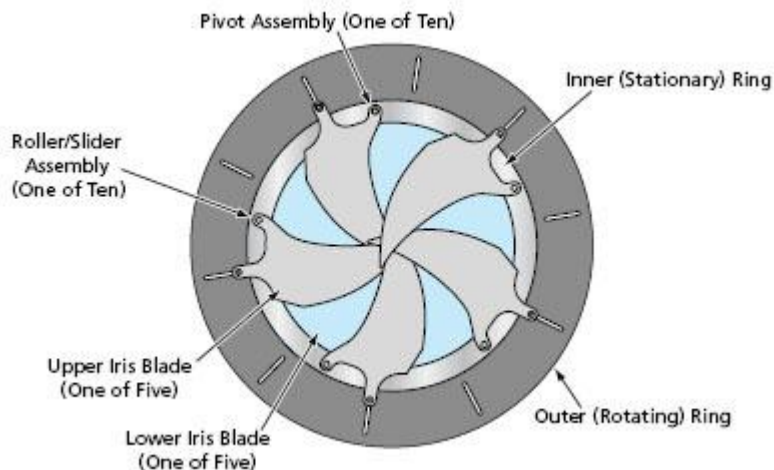
Si sfrutta solo la parte superiore della curva del trasduttore. Le ombre risultano slavate, in quanto mancano completamente di nero. L'immagine è complessivamente troppo chiara.



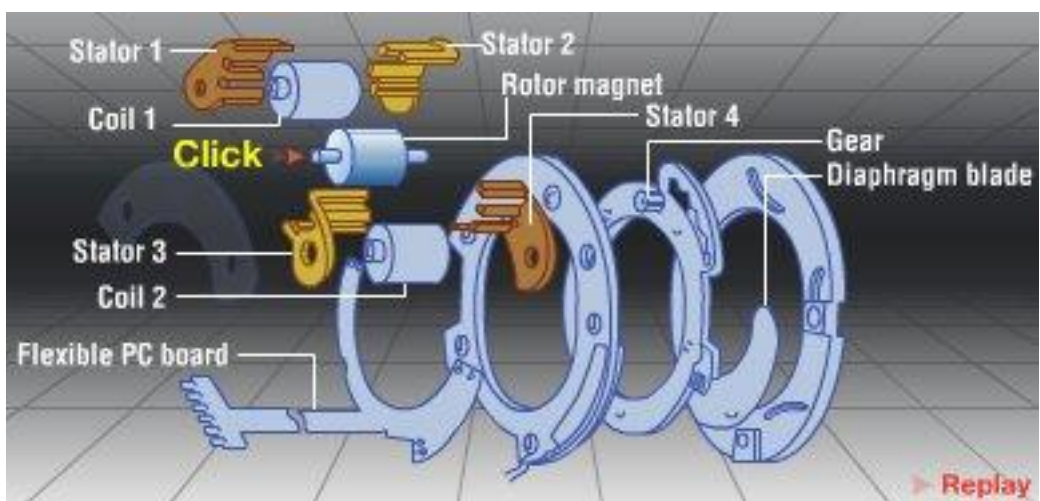
La quantità di luce che raggiunge il piano focale viene regolata modificando il valore di diaframma. In fotografia ed in ottica, il diaframma è un'**apertura circolare o poligonale**, regolabile in ampiezza (analogamente all'iride dell'occhio umano) ed in asse con il sistema ottico, che permette il passaggio della luce attraverso una lente semplice o un obiettivo fotografico.



Il dispositivo di diaframmazione è costituito da lamelle metalliche incernierate ognuna ad un anello interno fisso e ad un anello esterno rotante, per modificare la loro inclinazione e quindi il diametro dell'apertura, e dotate di trattamento superficiale nero ad alto assorbimento di luce, per evitare riflessi indesiderati.



Il numero delle lamelle, generalmente compreso tra cinque e nove e dipendente dal diametro delle lenti, ed il loro profilo curvo permettono di avere un'apertura di forma quanto più possibile circolare, in modo da evitare la formazione di spike nelle riprese in controluce. L'anello mobile può essere sia ad azionamento meccanico (manuale) sia ad azionamento elettromeccanico (manuale/automatico).



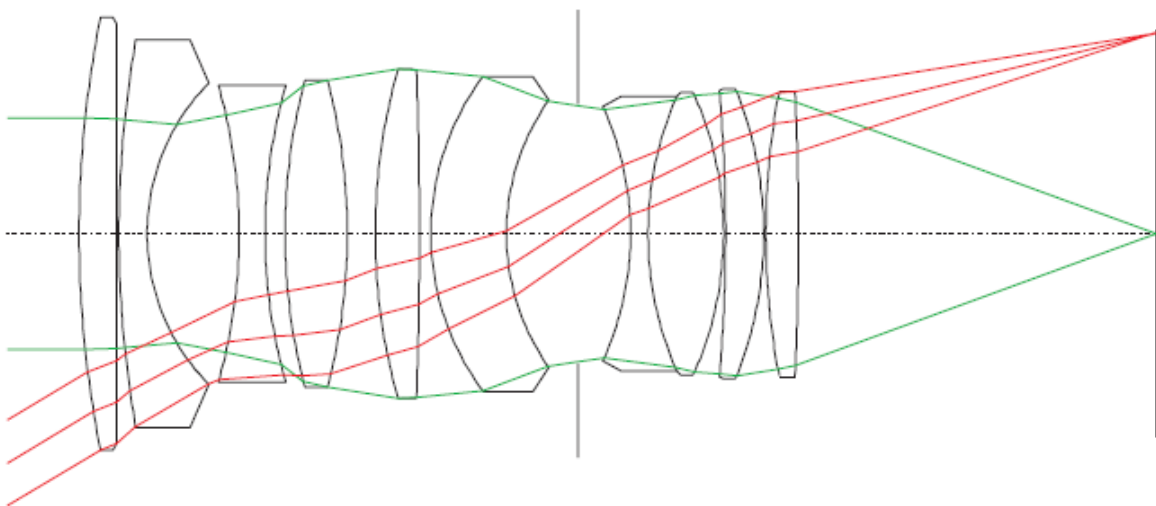
In ogni caso, al fine di agevolare la scelta dell'inquadratura e la messa a fuoco indipendentemente dall'apertura impostata ed in condizioni di scarsa luminosità della scena, il diaframma viene chiuso automaticamente al

valore di lavoro solo al momento dello scatto o quando si desidera controllare la profondità di campo.

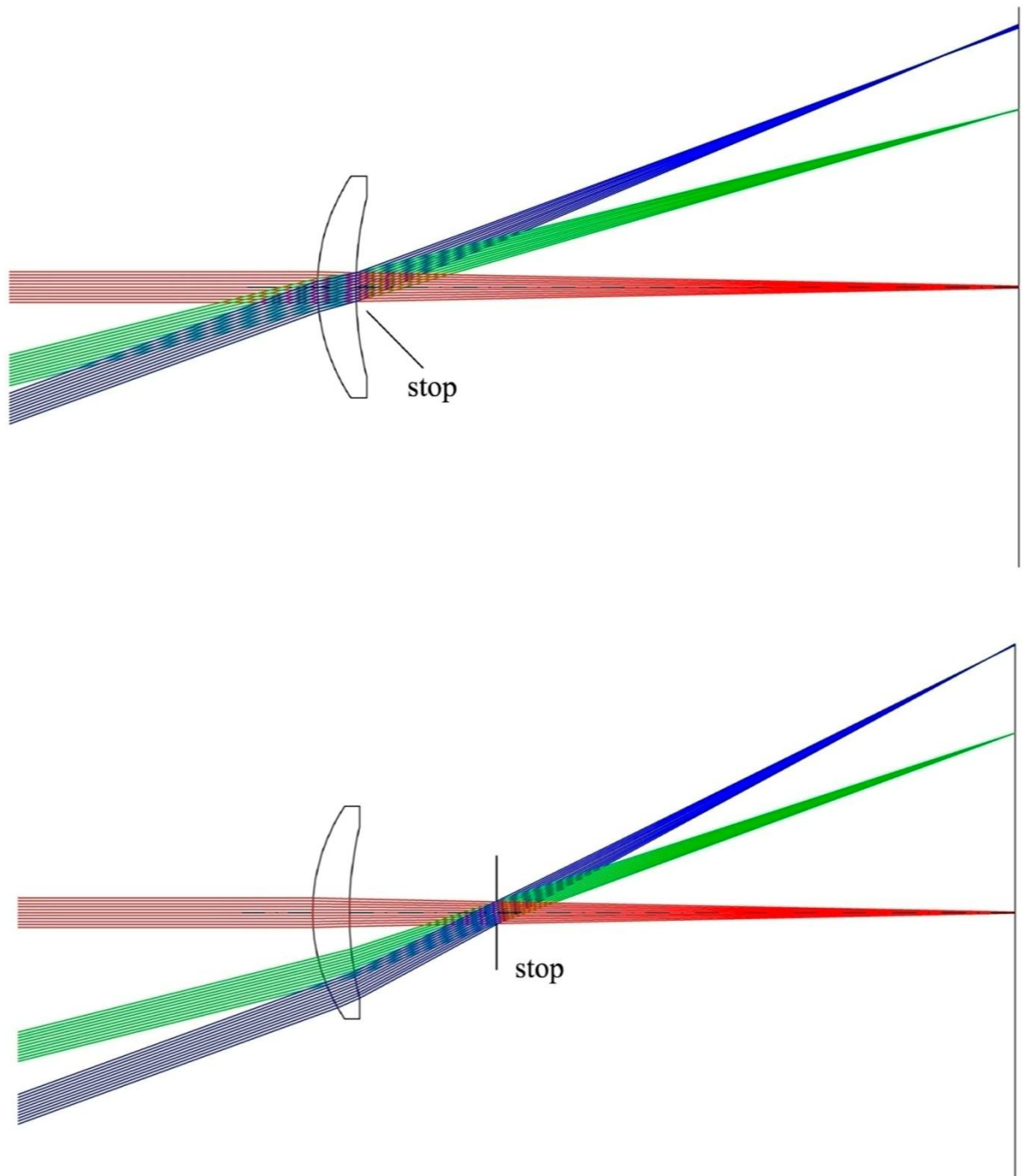
Al fine di minimizzare gli effetti negativi sull'immagine derivanti da distorsione e vignettatura, il diaframma viene collocato in una posizione centrale nello schema ottico, generalmente in corrispondenza del piano dove il fascio luminoso in transito assume il diametro minore.



— LEICA SUMMILUX-R 35 mm f/1.4



Il posizionamento del diaframma all'interno del sistema ottico è un utile grado di libertà che permette di controllare la qualità dell'immagine e la dimensione dei componenti ottici, come evidenziato nelle due figure seguenti.



Insieme al tempo di esposizione, l'apertura del diaframma determina la quantità di luce che transita attraverso l'obiettivo e che va quindi ad impressionare il materiale fotosensibile. In modo dipendente dalla rapidità del materiale fotosensibile, la quantità di luce incidente su di esso determina l'esposizione del fotogramma.

Al diminuire dell'apertura, si ha un progressivo miglioramento della correzione di alcuni tipi di aberrazioni ottiche dell'obiettivo, ma contemporaneamente aumentano gli effetti negativi della diffrazione e dell'interferenza sulla nitidezza dell'immagine. Compatibilmente con le

esigenze di ampie profondità di campo e di fuoco, è quindi preferibile non chiudere il diaframma ai valori massimi.

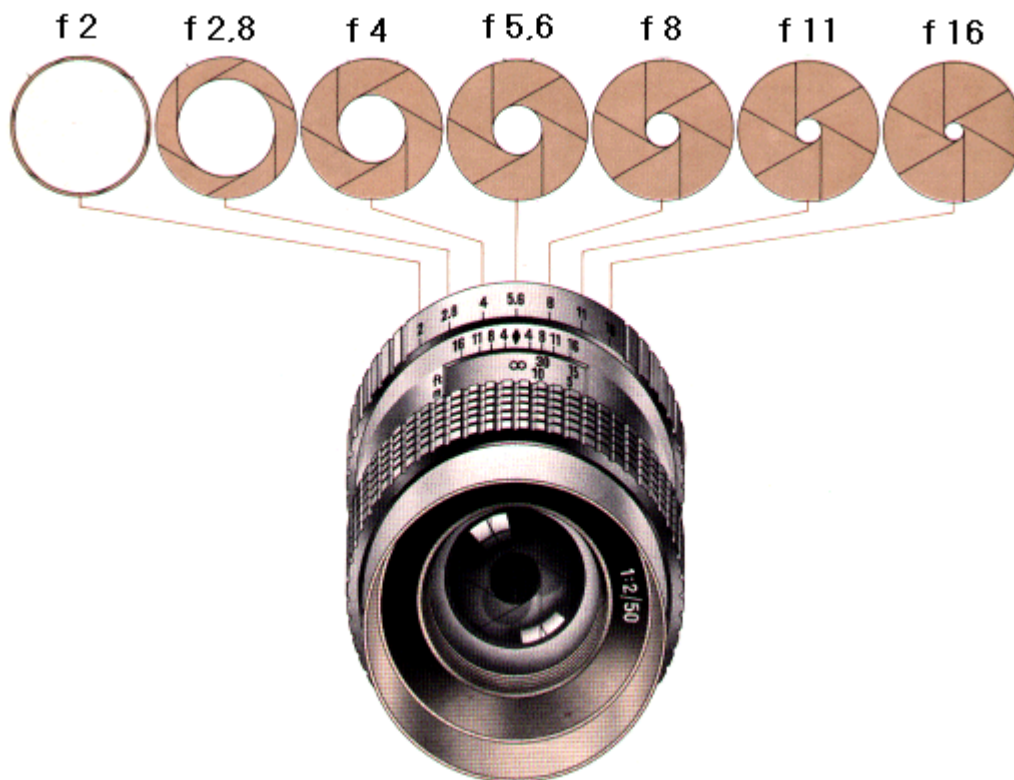
Inoltre, se la chiusura dell'apertura aumenta le profondità di campo e di fuoco, i tempi di otturazione necessari a mantenere invariata l'esposizione diventano più lunghi, comportando un maggior rischio di mosso a causa di soggetti in moto più o meno rapido o di movimenti involontari impugnando a mano la fotocamera.

Scala standard dei diaframmi

Il diaframma può essere aperto a diverse ampiezze, distribuite regolarmente su una scala di intervalli detti **stop o f-stop**. La sequenza dei valori di stop è una progressione geometrica di ragione $\sqrt{2}$ ($\approx 1,4$) standardizzata al congresso di Liegi nel 1905, con l'eventuale eccezione dello stop iniziale corrispondente alla luminosità massima dell'obiettivo (ad esempio, f/3.5):

| Scala dei valori di diaframma | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-----|-------|-----|-------|-----|------|------|------|------|------|------|
| f/1 | f/1.4 | f/2 | f/2.8 | f/4 | f/5.6 | f/8 | f/11 | f/16 | f/22 | f/32 | f/45 | f/64 |

A valori più bassi corrispondono aperture di diaframma più ampie. Ad esempio, passare da f/2 a f/2.8 significa dimezzare la quantità di energia luminosa che attraversa l'obiettivo, mentre passare da f/11 a f/8 significa raddoppiarla.



I numeri sopra riportati sono identici indipendentemente dalla lunghezza focale dell'obiettivo. In realtà, il rapporto $f/4$, ad esempio, indica che un teleobiettivo con $f = 200$ mm ha un diametro dell'apertura dato da:

$$\text{diametro apertura} = 200/4 = 50 \text{ mm}$$

mentre un grandangolare con $f = 35$ mm ha un diametro dell'apertura dato da:

$$\text{diametro apertura} = 35/4 = 8,75 \text{ mm}$$

Ricapitolando, impostare ad 8 il valore del diaframma di un qualunque obiettivo equivale ad aprire il foro di transito della luce ad un diametro pari a $1/8$ della sua lunghezza focale. Tale regola ha valore per gli obiettivi non retrofocus con lunghezza focale di oltre 35 mm.

Vignettatura

In fotografia ed ottica, la vignettatura indica la perdita di luminosità dell'immagine dal centro verso la periferia (soprattutto agli angoli) ed è riconducibile a quattro tipologie fondamentali.

Vignettatura ottica

Gran parte degli obiettivi fotografici è affetta in varia misura da questo tipo di vignettatura. L'effetto è maggiore a tutta apertura e scompare chiudendo il diaframma di qualche stop. Il graduale oscuramento dell'immagine verso gli angoli passa sovente inosservata, ma può diventare evidente quando la scena inquadrata presenta ampie superfici di colore o luminosità uniformi. Il contrasto gioca un ruolo importante, in quanto un suo incremento comporta un effetto più pronunciato.

La prima figura illustra la vignettatura ottica generata da un obiettivo Planar 50/1.4 con un soggetto piatto, in tutti i sensi, quale un muro di mattoni. A tutta apertura, l'immagine presenta una tipica vignettatura ottica (fotografia a sinistra). Se si diaframma a $f/5.6$, la perdita di luminosità scompare restituendo un muro illuminato uniformemente (fotografia a destra).



Nota anche come **vignettatura artificiale**, trae origine dal fatto che gli obiettivi presentano una **lunghezza non trascurabile**. La luce che incide obliquamente usufruisce di un'apertura inferiore a quella disponibile per i raggi paralleli all'asse ottico. La seconda figura riporta il Planar 50/1.4 regolato su due differenti aperture e ripreso da due diversi punti di vista. Le aperture bianche nelle illustrazioni superiori mostrano la **pupilla di entrata**, che è l'immagine del diaframma osservato attraverso le lenti anteriori e da un punto lungo l'asse ottico. La pupilla di entrata è l'apertura libera per la luce che entra nell'obiettivo diretta al centro dell'immagine.



Le illustrazioni inferiori mostrano l'obiettivo visto da un'angolazione pari a metà dell'angolo di campo. In questo caso, le aperture bianche corrispondono all'apertura libera per la luce diretta al bordo dell'immagine. A $f/1.4$, l'apertura libera è significativamente minore rispetto a quella disponibile per i raggi paralleli all'asse ottico: la pupilla di entrata è parzialmente schermata dal barilotto dell'obiettivo. Più precisamente, l'apertura

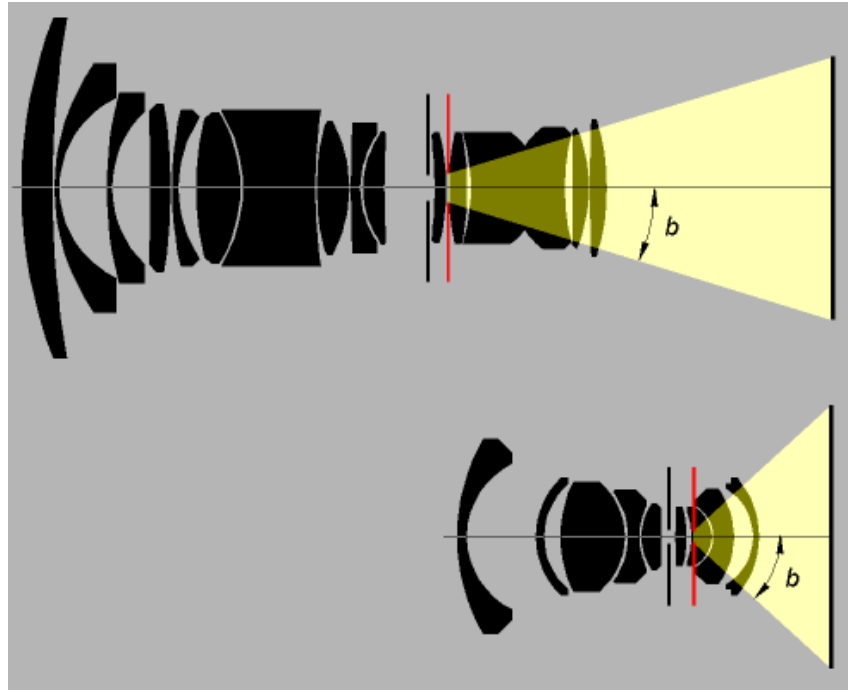
è delimitata dagli anelli di fissaggio delle lenti anteriore e posteriore. Per valori di apertura piccoli, l'obiettivo raccoglie meno luce extrassiale rispetto a quella assiale e l'immagine risulta quindi più scura ai bordi. A $f/5.6$, la pupilla di entrata è più piccola e non è più schermata dal barilotto. Di conseguenza, l'apertura è praticamente la stessa sia per la luce incidente extrassiale sia per quella assiale e la vignettatura ottica sparisce.

Vignettatura naturale

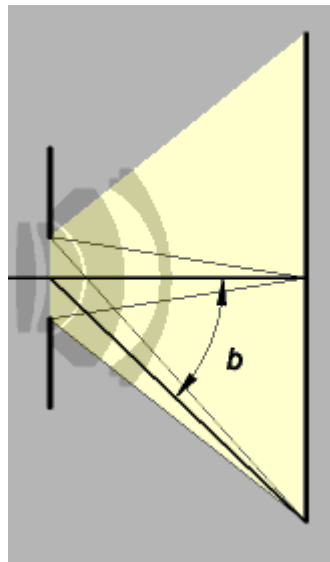
È inerente allo schema ottico di ciascun obiettivo ed assume grande rilevanza nei grandangolari. Dipende dalla legge di attenuazione della luminosità in funzione di $\cos^4(\theta)$, dove θ è l'**angolo di incidenza sul materiale fotosensibile dei raggi uscenti dall'obiettivo**.

Se gli obiettivi a corta focale sono tendenzialmente più corretti dei corrispondenti grandangolari retrofocus, in particolare per la distorsione ed il colore laterale, presentano però una maggiore perdita di luminosità ai bordi.

La figura seguente riporta gli schemi ottici dei grandangolari Carl Zeiss Distagon 21/2.8 e Biogon 21/2.8. Il primo obiettivo ha uno schema retrofocus asimmetrico per fotocamere Contax SRL, mentre il secondo ha uno schema simmetrico per fotocamere Contax a telemetro. Le linee verticali nere indicano il diaframma ad apertura variabile e quelle rosse la **pupilla di uscita**, che è l'immagine del diaframma osservato attraverso le lenti posteriori.



La pupilla di uscita illumina il materiale fotosensibile e delinea il cono di luce incidente in un punto dell'immagine.



Mentre nell'obiettivo per fotocamere a telemetro la pupilla di uscita dista dal materiale fotosensibile all'incirca quanto la lunghezza focale, nell'obiettivo retrofocus viene allontanata unitamente al gruppo ottico. Di conseguenza, l'angolo b del Biogon è significativamente più grande di quello del Distagon.

La seconda figura, contenente un ingrandimento della parte terminale dello schema ottico del Biogon, riporta due coni: uno illumina un punto lungo l'asse ottico (centro dell'immagine) e l'altro illumina un punto fuori asse (angolo dell'immagine). L'illuminazione ai bordi è inferiore a quella al centro dell'immagine per tre motivi:

- la luce deve percorrere un tragitto più lungo per raggiungere i bordi e l'illuminamento decresce con il quadrato della distanza, corrispondente ad un fattore $\cos^2(b)$;
- la pupilla vista da un punto fuori asse è ellittica ed ha un'area minore rispetto alla pupilla rotonda osservabile lungo l'asse, corrispondente ad un fattore $\cos(b)$;
- mentre la luce incide con angolo nullo al centro dell'immagine, giunge sui bordi con un angolo b , corrispondente ad un altro fattore $\cos(b)$.

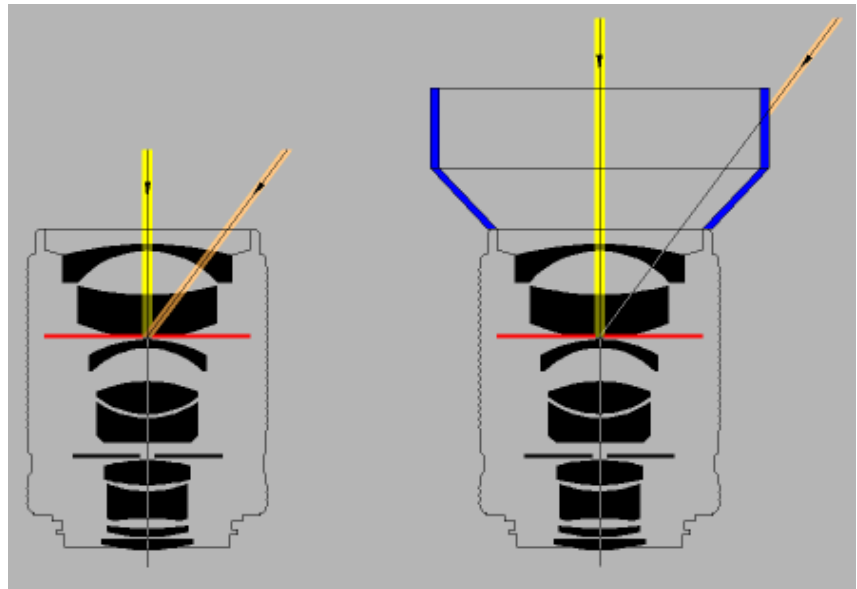
L'effetto combinato dei tre fattori è una perdita di luminosità ai bordi dipendente da $\cos^4(\theta)$. È bene precisare che questa dipendenza non è una vera e propria legge, bensì una combinazione di fattori coseno che può non essere sempre presente in una data situazione.

**Vignettatura
meccanica (fisica)**

Eventuali componenti ottico-meccanici (ad esempio, filtri, lenti aggiuntive e paraluce), aggiunti alla parte anteriore dell'obiettivo, possono protendersi nell'angolo di campo bloccando la luce altrimenti destinata a raggiungere i bordi estremi (angoli) del materiale fotosensibile. Il rimedio è ovvio: utilizzare accessori adatti. Poiché la montatura di un singolo filtro può già essere in grado di vignettare un grandangolo, vale la pena di verificare gli effetti di filtri e paraluce prima di procedere al loro acquisto. La figura sottostante illustra un tipico caso di vignettatura meccanica.



L'immagine è stata ripresa con un Distagon 28/2 dotato di paraluce metallico Contax n.3, che risulta eccessivamente lungo per questo obiettivo. Il motivo risulta evidente se si analizzano gli schemi ottici della figura successiva.



Se si mette a fuoco all'infinito il Distagon chiudendolo a $f/11$, un angolo dell'immagine viene illuminato dal fascio luminoso arancione, proveniente dall'infinito e diretto verso la pupilla di entrata (in rosso). L'angolo formato con l'asse ottico è metà dell'angolo di campo, quindi pari a circa 37° . In mancanza del paraluce, il raggio obliquo è in

grado di giungere sulla pupilla di entrata. In presenza del paraluce, il raggio viene invece bloccato prima di entrare nell'obiettivo, cosicché nell'angolo non si forma alcuna immagine.

Vignettatura digitale

Si manifesta solo con le fotocamere digitali, in quanto è originata dalla profondità dei pozzi fotonici che catturano la luce nei fotosensori a stato solido. Così come una maggiore quantità di luce raggiunge il fondo di un pozzo quando il sole è allo zenit, la luce che colpisce un pozzo fotonico ad angolo retto è più efficace di quella che lo colpisce in obliquo. La maggior parte delle fotocamere digitali compensa automaticamente sia la vignettatura ottica sia quella digitale quando convertono i dati grezzi del sensore ad un formato standard come JPEG o TIFF.

Otturatore fotografico

L'otturatore è un sistema meccanico o elettronico che consente il controllo del tempo di esposizione, cioè l'intervallo temporale durante il quale si consente alla luce di raggiungere la pellicola o il CCD/CMOS all'interno della fotocamera.

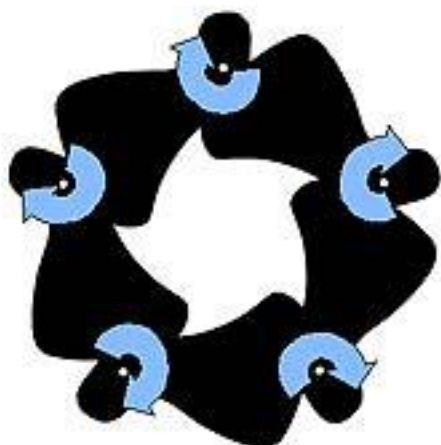
Agli inizi della fotografia, essendo i tempi di esposizione molto lunghi a causa delle basse sensibilità delle lastre fotografiche dell'epoca, era sufficiente servirsi di un metodo molto primitivo per controllare la durata di esposizione alla luce: togliere e mettere il coperchio dell'obiettivo. Gli attuali materiali fotosensibili disponibili, analogici o digitali che siano, permettono di utilizzare tempi di posa minimi dell'ordine del millesimo o decimillesimo di secondo. Poiché è comunque necessario poter regolare l'esposizione con elevata precisione, un risultato impossibile da ottenere manualmente, non si può prescindere dall'uso dell'otturatore.

La vita utile e l'affidabilità degli otturatori assumono un'importanza fondamentale in fase di progettazione, viste le elevate accelerazioni sui loro componenti mobili, soprattutto con i tempi di esposizione più brevi.

I moderni otturatori fotografici sono essenzialmente di due tipi: **otturatore centrale ed otturatore sul piano focale o a tendina**.

Otturatore centrale

Gli otturatori centrali consistono in una serie di lamelle (generalmente tre o cinque) complanari imperniate su due anelli concentrici che ruotano in direzioni contrapposte.



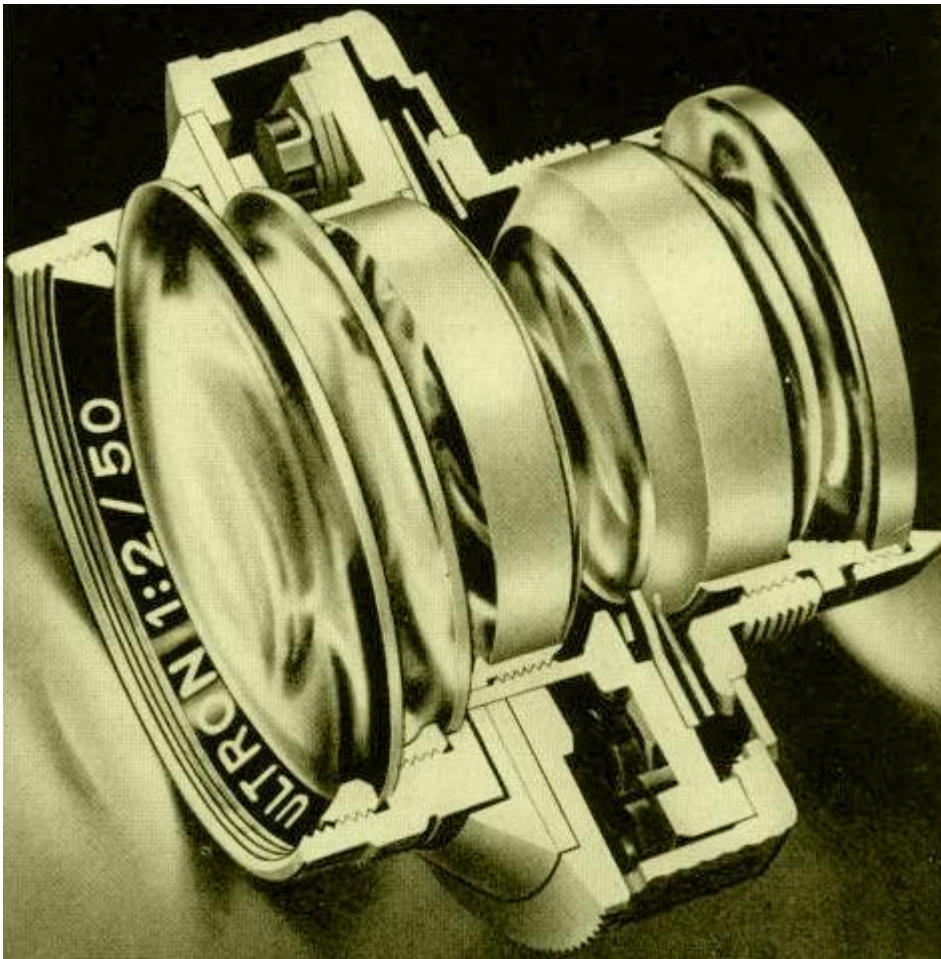
Azionando lo scatto, si toglie il blocco e l'anello più interno ruota provocando lo spostamento delle lamelle verso l'esterno e consentendo alla luce di passare; successivamente, un'altra molla provvede alla richiusura del sistema.



Negli ultimi anni, i modelli ad azionamento meccanico sono stati affiancati da modelli a controllo elettronico, dove il movimento delle lamelle è attuato mediante elettromagneti.



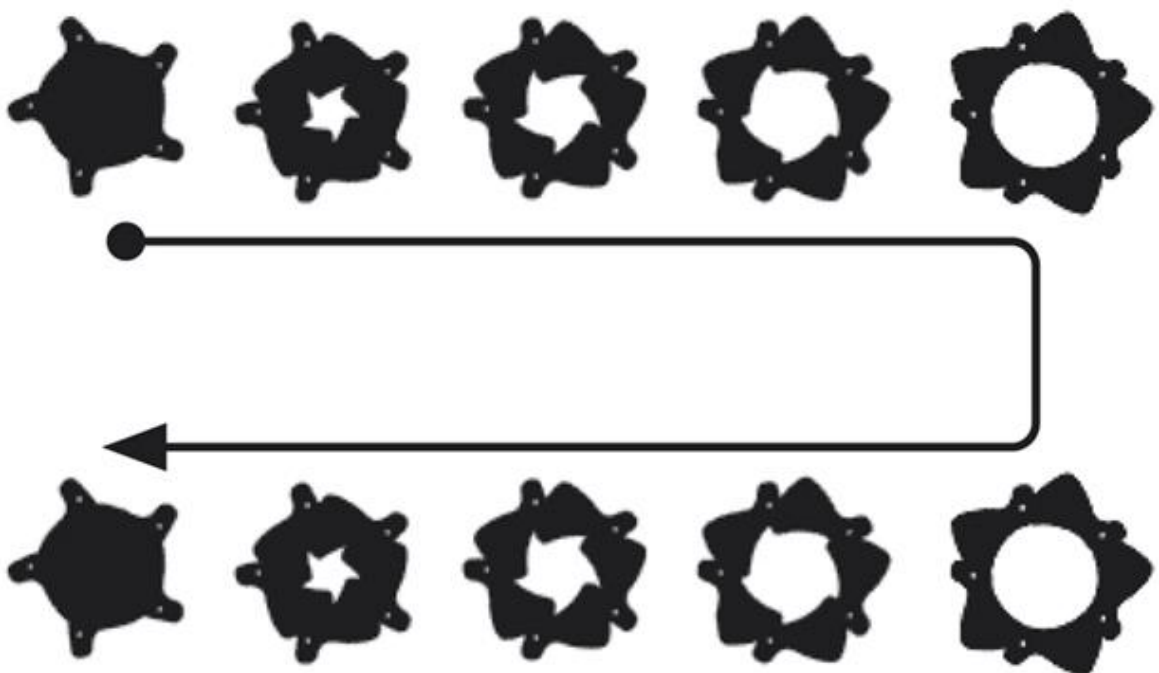
Di norma, l'otturatore centrale viene posizionato tra le lenti ed adiacente, per quanto possibile, al diaframma attraverso cui passa la luce incidente in ingresso alla fotocamera.



Per un numero abbastanza circoscritto di applicazioni, è invece previsto il suo posizionamento dietro l'obiettivo ed indipendente da esso, consentendo l'utilizzo di normali ottiche intercambiabili prive di otturatore.

Le fotocamere analogiche ad obiettivi intercambiabili dotati di otturatore centrale, ma non quelle digitali, dispongono di un otturatore secondario che ha la funzione di impedire la velatura della pellicola fotografica in rullo durante la sostituzione dell'ottica.

L'otturatore centrale presenta vantaggi di ordine pratico di cui tenere conto in fase di scelta del sistema fotografico e derivanti dall'apertura e dalla chiusura simmetriche in senso radiale.



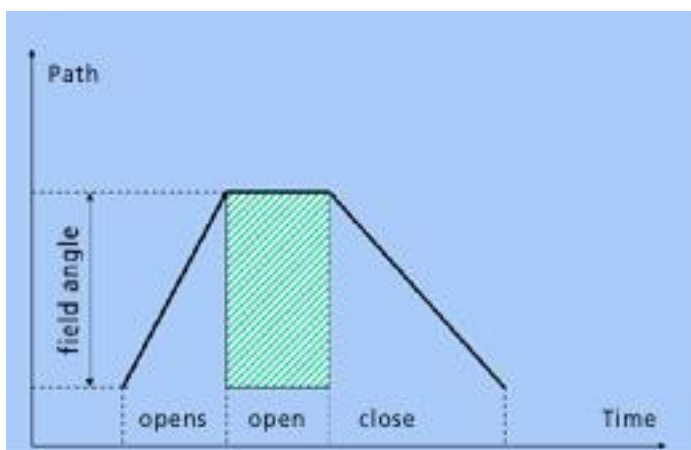
I principali vantaggi dell'otturatore centrale rispetto a quello sul piano focale sono i seguenti:

- costruzione relativamente semplice,
- costi di produzione contenuti,
- sincronizzazione flash con tutti i tempi di otturazione disponibili,
- ingombri ridotti in virtù del posizionamento dove il fascio luminoso in transito è più stretto (normalmente in corrispondenza del diaframma),
- sistema di caricamento eventualmente indipendente dal meccanismo di avanzamento della pellicola, anche al fine di facilitare le esposizioni multiple,
- elevata silenziosità in virtù del numero e delle masse limitate delle parti in movimento,

- assenza di distorsioni geometriche nelle immagini di soggetti in rapido movimento,
- elevata vita utili.

Sincronizzazione flash dell'otturatore centrale

Come accennato, la sincronizzazione flash non rappresenta un problema per l'otturatore centrale, che si apre fino all'apertura massima indipendentemente dal tempo di esposizione impostato. Di conseguenza, l'istante di emissione del lampo coincide con il raggiungimento dell'apertura massima dell'otturatore, per quanto breve sia la sua permanenza in questa condizione. È così possibile garantire l'illuminazione contemporanea dell'intera superficie del fotogramma anche a 1/500 s.



I principali svantaggi dell'otturatore centrale sono viceversa i seguenti:

- necessità dell'inserimento dell'otturatore in ciascun obiettivo intercambiabile,
- velocità di otturazione normalmente limitate a 1/500 s o, in caso di costruzioni meccaniche particolarmente curate, fino a 1/1000 s,
- sistema di caricamento eventualmente indipendente dal meccanismo di avanzamento della pellicola, che rende possibili esposizioni multiple accidentali.

Otturatore sul piano focale

Introdotta originariamente nelle fotocamere Leica 35 mm, come lascia intuire la sua denominazione, è posto immediatamente davanti al materiale fotosensibile ed è costituito da un sistema a tendine che scorrono in orizzontale o in verticale, parallelamente al piano dell'immagine.



Tra i principali vantaggi di questo dispositivo sono da sottolineare la sua collocazione all'interno del corpo delle fotocamere ad obiettivi intercambiabili, che non necessitano quindi di otturatore centrale, ed il suo meccanismo relativamente semplice ma capace di assicurare velocità di otturazione molto rapide e precise.

Le tendine sono due e restano accostate fino al momento dello scatto, quando si separano dando origine ad una fessura la cui larghezza è regolata dal tempo di esposizione impostato sulla fotocamera e che scorre nel modo più regolare possibile davanti alla pellicola o al CCD/CMOS, esponendone progressivamente ogni parte. Quando si ricarica l'otturatore, le tendine ritornano alla posizione di partenza, rimanendo accostate per non esporre il successivo fotogramma.

Il funzionamento per tempi di esposizione medio-lunghi è illustrato dalla seguente sequenza di funzionamento di un otturatore sul piano focale a scorrimento orizzontale:

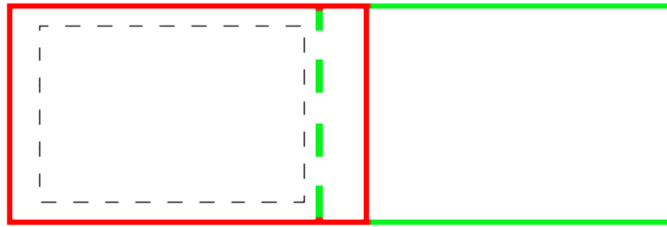


Fig. 1

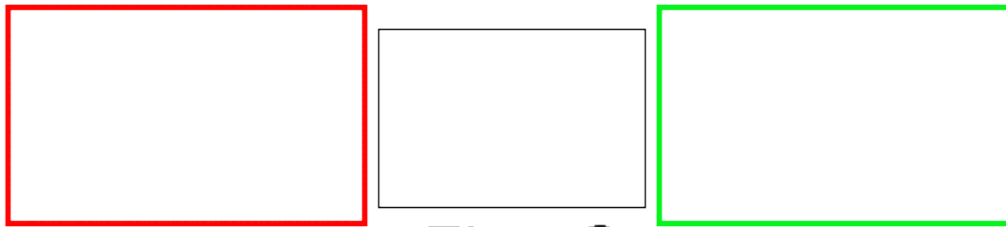


Fig. 2

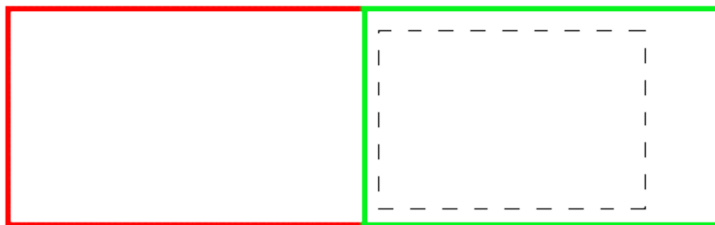


Fig. 3

- Figura 1:** Il rettangolo nero rappresenta il fotogramma da esporre. La prima tendina dell'otturatore, in rosso, copre il fotogramma, mentre la seconda tendina, in verde, è accostata lateralmente.
- Figura 2:** In seguito all'attivazione dello scatto, la prima tendina trasla scoprendo completamente il fotogramma, consentendone così l'esposizione. Nel caso di utilizzo del flash, è in questo momento che si ha l'emissione del lampo.
- Figura 3:** Una volta raggiunto il livello di esposizione prefissato, la seconda tendina trasla per coprire il fotogramma.

Per tempi di esposizione brevi, è necessario che la seconda tendina inizi il proprio movimento prima che termini quello della prima tendina, come illustrato dalla successiva sequenza di funzionamento. In altri termini,

l'intervallo temporale che intercorre tra le partenze della prima e della seconda tendina corrisponde al tempo di otturazione impostato; si forma così una fessura che trasla davanti al fotogramma.

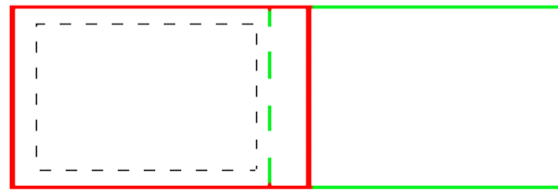


Fig. 1

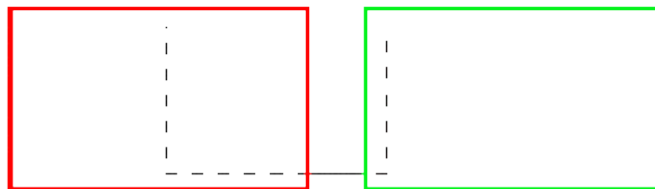


Fig. 2

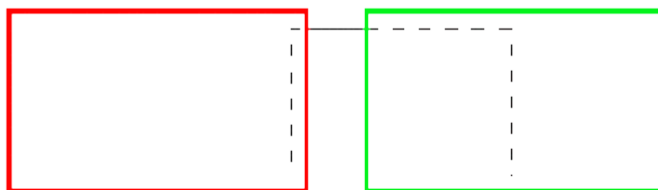


Fig. 3

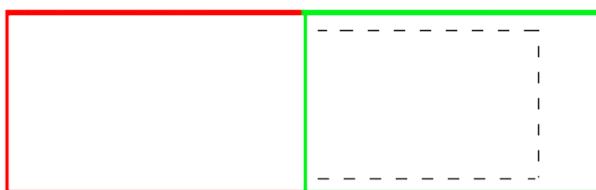


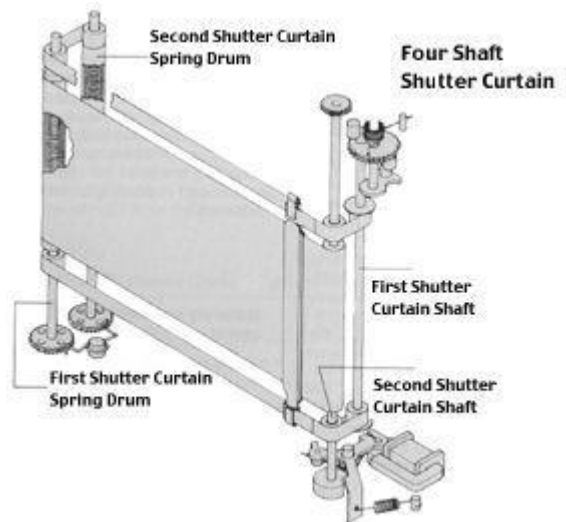
Fig. 4

Poiché in un otturatore con velocità di scorrimento delle tendine indipendente dal tempo di otturazione la larghezza della fessura diminuisce con la durata dell'esposizione, il tempo minimo utilizzabile è limitato non da problemi meccanici, ma dagli effetti di diffrazione ed interferenza che si manifestano quando la fessura diventa eccessivamente stretta, con conseguente degrado dell'immagine. Per eliminare questo inconveniente, gli otturatori sul piano focale attualmente in produzione sono in grado di aumentare la velocità di scorrimento delle tendine al diminuire del tempo di

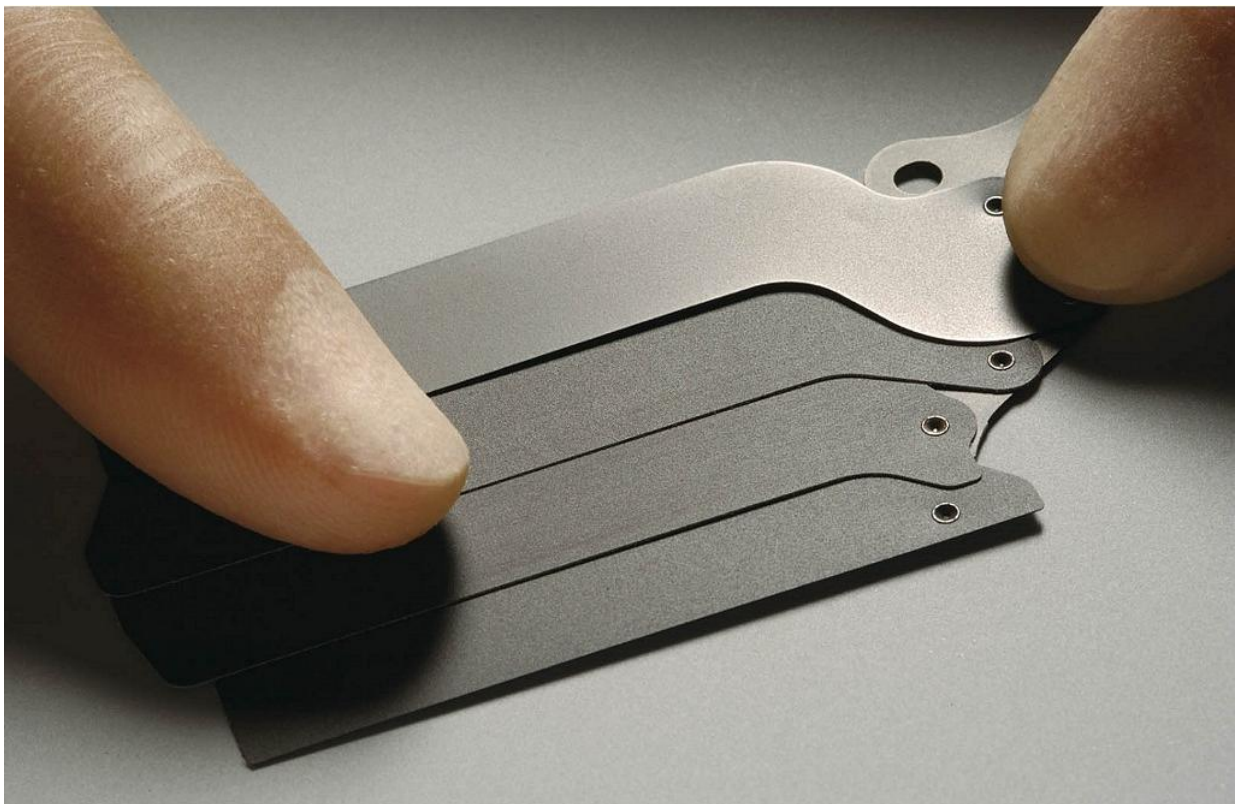
otturazione, come evidenziato da questo esempio relativo a tendine a scorrimento verticale:



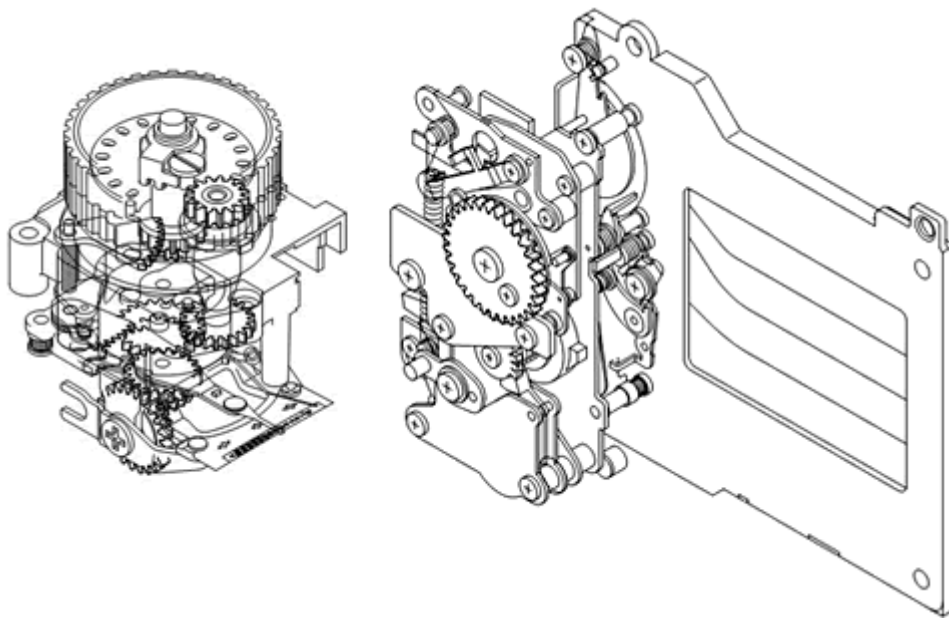
Fino all'inizio degli anni '90 del XX secolo le tendine erano realizzate in tela gommata, e quindi avvolgibili su rocchetti, con direzione di scorrimento orizzontale nella grande maggioranza degli otturatori, come nel caso dell'otturatore meccanico della Nikon F3:



Viceversa, quelle attuali sono costituite da lamelle metalliche parallele, sovrapponibili una dietro l'altra (eliminando così i rocchetti di avvolgimento) e realizzate generalmente in titanio o leghe di alluminio e in qualche caso anche in kevlar e fibre di carbonio, con direzione di scorrimento verticale.



Le immagini seguenti illustrano l'otturatore elettromeccanico Copal della Nikon FM3A:



Quello che segue è invece l'otturatore elettronico a lamelle metalliche montato nella fotocamera digitale Nikon D3:

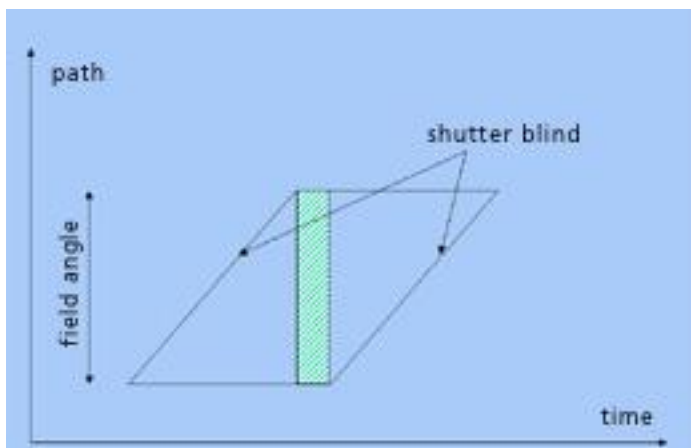


Mentre la prima soluzione permetteva di raggiungere tempi di otturazione minimi non inferiori a $1/2000$ s, la seconda ha portato il limite inferiore a $1/4000$ s per le fotocamere a telemetro e le reflex di fascia medio-alta e a $1/8000$ s per le reflex professionali (ma, a livello di prototipi, si arriva anche a $1/12000$ s). Le attuali fotocamere reflex ed a telemetro 35 mm, sia analogiche sia digitali, utilizzano infatti otturatori a lamelle metalliche a scorrimento verticale. Il funzionamento è analogo a quello degli otturatori a tendine orizzontali ma, grazie alla minore distanza da percorrere (24 mm invece di 36 mm) ed alla maggiore velocità di traslazione consentita dalla costruzione metallica, le lamelle attraversano l'area del fotogramma in meno tempo. Di conseguenza, gli otturatori più recenti sono in grado di fornire con elevata accuratezza ed affidabilità tempi di posa e di sincronizzazione flash più brevi, come spiegato qui di seguito.

Sono in fase di studio e messa a punto anche otturatori a controllo e funzionamento completamente elettronici e basati sui cristalli liquidi; il loro impiego su scala commerciale è però subordinato all'eliminazione della trasparenza residua, non nulla anche se molto bassa, che caratterizza questo tipo di dispositivi.

Sincronizzazione flash dell'otturatore sul piano focale

Se il vantaggio essenziale degli otturatori sul piano focale è dato dalla possibilità di ottenere tempi di esposizione significativamente più brevi di quelli degli otturatori centrali, lo svantaggio principale consiste invece nella sincronizzazione limitata con i lampeggiatori elettronici, ottenibile solo con tempi di solito non inferiori a $1/125$ s o $1/250$ s. Infatti, anche gli otturatori sul piano focale di ultima generazione, nonostante siano in grado di raggiungere tempi di esposizione più brevi, possono essere sincronizzati con i flash solo fino ad una velocità massima di $1/250$ s (ed anche meno in quelli più datati: $1/125$ s o addirittura $1/60$ s). Come visto in precedenza, questa limitazione è dovuta al loro principio di funzionamento, in quanto la superficie del fotogramma rimane completamente scoperta, e quindi esposta all'immagine, solo per tempi di otturazione pari o superiori a quello di sincronizzazione. In caso contrario, il flash si limiterebbe ad esporre la striscia di fotogramma scoperta al momento dell'emissione del lampo e caratterizzata da una larghezza decrescente al ridursi del tempo di otturazione.

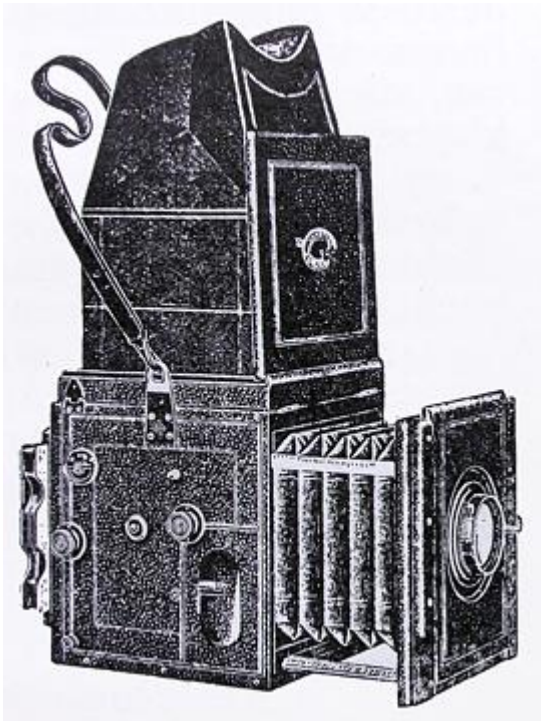


Distorsione delle immagini con l'otturatore sul piano focale

Si consideri la seguente celeberrima fotografia scattata da Jacques-Henri Lartigues al Gran Premio di Francia, svoltosi a Dieppe il 26 giugno 1912, che ritrae una vettura da competizione Delage:



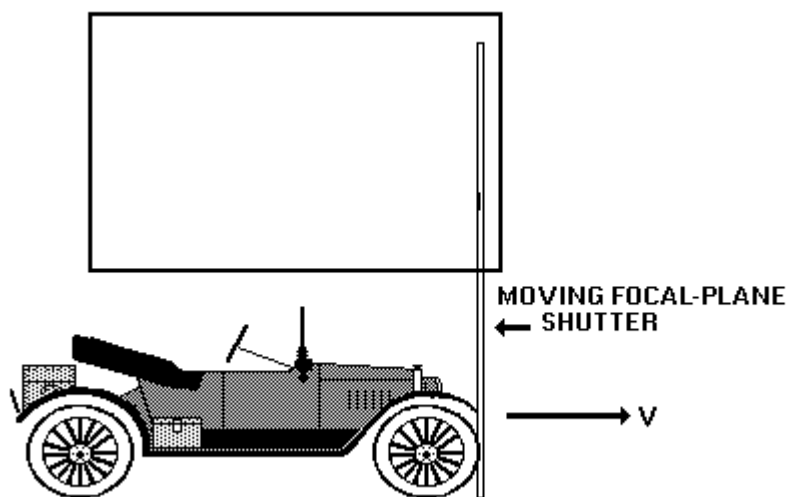
Le fonti dell'epoca riportano che Lartigues riprese l'auto in rapido movimento utilizzando una Ica Reflex della ICA di Dresda, dotata di otturatore sul piano focale.



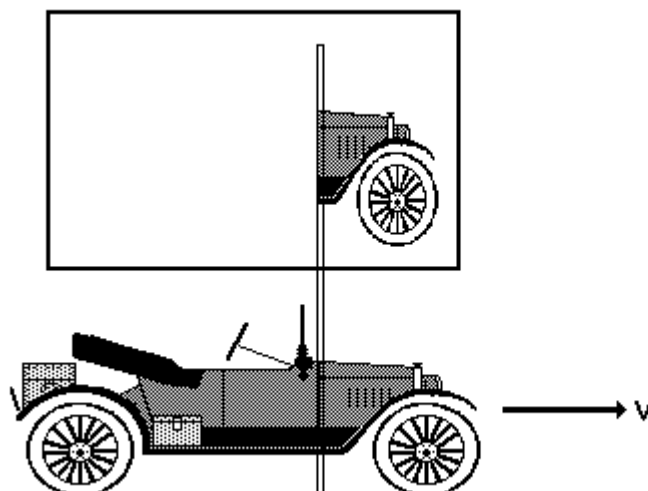
Il fotogramma fu esposto a partire dal basso. Quando la fessura raggiunse la parte superiore della ruota, l'auto si era già spostata in avanti rispetto alla posizione che aveva all'inizio dell'esposizione. In base all'inclinazione contrapposta degli spettatori e dei pali in posizione fissa sullo sfondo, si deduce che Lartigues mosse la fotocamera verso destra (panning) nel tentativo di mantenere l'auto nell'inquadratura. Infatti, i piedi degli spettatori furono esposte per prime, mentre le loro teste furono riprese quando la fotocamera era in movimento. La scena inquadrata fu quindi

ripresa in momenti diversi e la combinazione della traslazione orizzontale dell'auto e della traslazione verticale della fessura dell'otturatore porta a "stirare" diagonalmente i vari soggetti della ripresa.

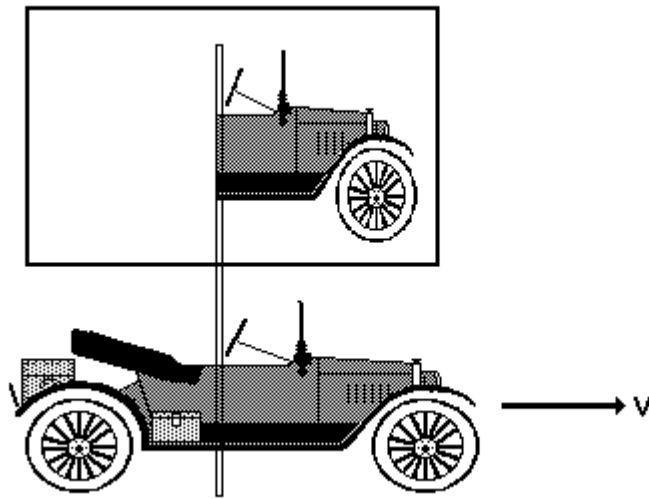
Un altro esempio dell'effetto fotografico derivante dalla combinazione dei movimenti del soggetto e della fessura dell'otturatore è quello riportato nella sottostante sequenza di figure, dove il rettangolo rappresenta il fotogramma e la fessura sovrapposta è quella dell'otturatore che trasla con verso contrario a quello dell'immagine dell'autoveicolo. La prima figura rappresenta la parte anteriore dell'auto mentre viene esposta sul materiale fotosensibile attraverso la fessura:



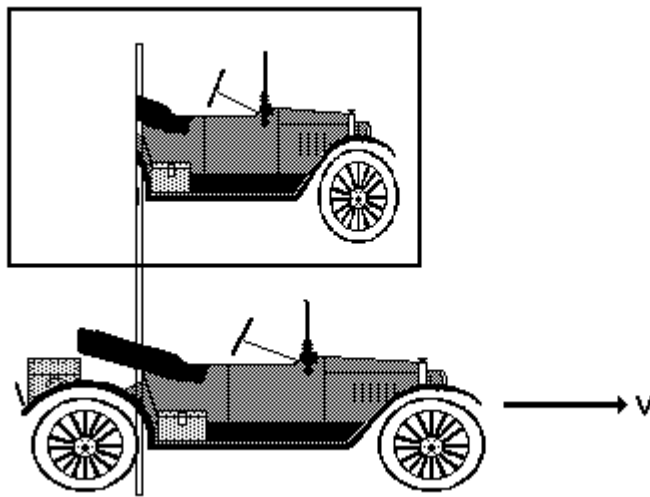
La seconda figura rappresenta la prosecuzione dell'esposizione in un istante successivo, con l'auto che nel frattempo si è spostata verso destra di alcune decine di centimetri e la fessura dell'otturatore verso sinistra di alcuni millimetri:



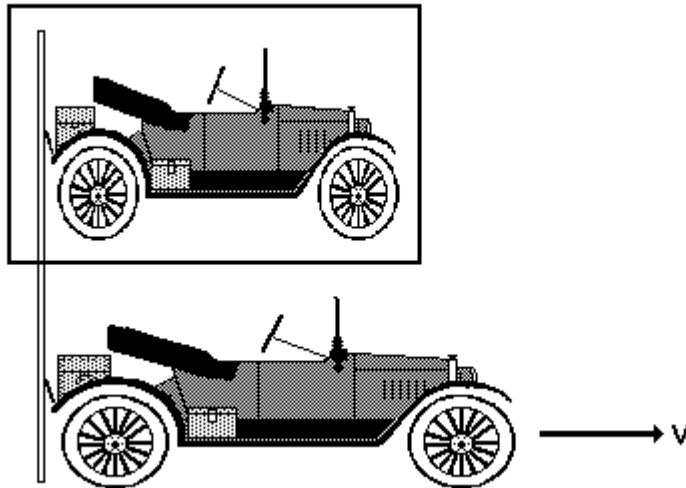
ed ancora ...:



ed ancora ...:



ed infine:



Il risultato finale di questi movimenti orizzontali contrapposti è l'immagine schiacciata in senso longitudinale dell'autoveicolo, con la deformazione evidenziata dalla forma ad ellisse verticale assunta dalle ruote. Qualora i due movimenti avvenissero nello stesso verso, l'immagine dell'autoveicolo risulterebbe allungata e le ruote sarebbero delle ellissi orizzontali.

Il grado di distorsione introdotto dall'otturatore sul piano focale quando i due movimenti sono ortogonali, come nel caso della fotografia di Lartigues, è determinato dalla velocità di scorrimento delle tendine:

- Con le elevate velocità di scorrimento delle tendine degli otturatori di ultima generazione, la distorsione passa pressoché inosservata. Ad esempio, si consideri un autoveicolo che si muove alla velocità di 100 km/h (27,8 m/s) ed una fotocamera 35 mm posta alla distanza di 10 m con otturatore a scorrimento verticale impostato su 1/4000 s. Se il tempo di sincronizzazione flash è di 1/250 s, la velocità di scorrimento delle tendine è pari a $24 \text{ mm}/(1/250 \text{ s}) = 6000 \text{ mm/s} = 6 \text{ m/s}$. Con un grandangolare da 25 mm di focale, questa velocità proiettata sul piano del soggetto equivale a $(10 \text{ m}/0,025 \text{ m}) \cdot 6 \text{ m/s} = 2400 \text{ m/s}$. Il rapporto tra la velocità dell'autoveicolo e la velocità proiettata dell'otturatore è pari a $(27,8 \text{ m/s})/(2400 \text{ m/s}) = 1/86$. Questo significa che la distorsione verticale dell'immagine corrisponde a 1 parte su 86, cioè circa $0,6^\circ$. Se si dimezza la distanza di ripresa o si raddoppia la focale dell'obiettivo, la distorsione raddoppia a circa $1,2^\circ$: l'effetto è presente, ma non è immediatamente rilevabile.
- Con otturatori più datati, l'effetto è maggiore a causa della velocità di traslazione inferiore. Rifacendosi all'esempio precedente, se il tempo di sincronizzazione flash è di 1/60 s, quindi quattro volte maggiore, la

distorsione con l'ottica da 25 mm passa a $4 \cdot 0,6^\circ = 2,4^\circ$ e raggiunge il valore di $4,8^\circ$ dimezzando la distanza di ripresa o raddoppiando la focale. Con questi otturatori, la distorsione è tale che ben difficilmente passa inosservata.