

Come funzionano i telescopi?

L'occhio umano valuta le dimensioni di un oggetto in base all'angolo che esso sottende rispetto alla posizione dell'osservatore. I raggi luminosi provenienti dalle diverse parti dell'oggetto si propagano in linea retta fino alla pupilla, passano attraverso il cristallino e vengono proiettati sulla retina, la parte posteriore dell'occhio che è sensibile alla luce. Maggiore è la separazione angolare tra i raggi luminosi, maggiore è la distanza tra i punti della retina che essi eccitano, e maggiore è la distanza che il cervello giudica esistere tra i punti da cui i raggi provengono. Le dimensioni di un oggetto

percepite dal meccanismo della visione umana sono quindi sempre *dimensioni angolari* o *apparenti*, che dipendono sia dalle dimensioni reali dell'oggetto, sia dalla sua distanza dall'osservatore (figura 1): ad esempio un oggetto grande un centimetro posto alla distanza di un metro apparirà all'occhio con la stessa estensione di un oggetto cento volte più grande (un metro) posto a una distanza cento volte maggiore (cento metri). Così il disco della Luna può essere coperto completamente dal tetto di un campanile, benché naturalmente le dimensioni della Luna siano molto superiori a quelle del campanile: ma anche la sua distanza è molto più grande.

Se si possedesse uno strumento in grado di deflettere i raggi luminosi in modo da aumentare la separazione angolare con cui essi raggiungono l'occhio, avremmo un dispositivo in grado di aumentare le dimensioni apparenti degli oggetti, cioè di farli vedere *ingranditi*: questo è proprio ciò che fanno un cannocchiale o un telescopio (figura 2). Storicamente i primi telescopi hanno usato lenti per deflettere i raggi luminosi, hanno cioè sfruttato la *rifrazione*, il fenomeno fisico per cui un raggio luminoso viene deviato al passaggio tra due materiali trasparenti diversi, come l'aria e il vetro. Questi telescopi vengono perciò detti *rifrattori*; di questo tipo era ad esempio il telescopio usato da Galileo Galilei nel 1609 per eseguire le sue prime osservazioni del cielo¹. Più tardi, a partire dalla fine del XVII secolo, vennero costruiti anche telescopi *riflettori*, cioè strumenti che ottengono un simile effetto di deflessione attraverso la *riflessione* dei raggi luminosi sulla superficie di uno specchio di forma opportuna.

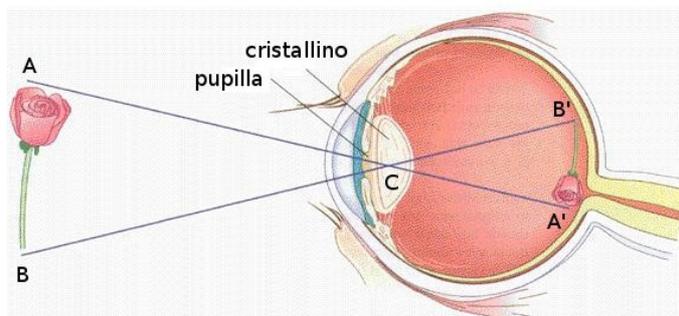


Figura 1: La dimensione dell'immagine di un oggetto (A'B') che si forma sulla retina è proporzionale all'angolo (ACB) con cui i raggi di luce provenienti dalle estremità dell'oggetto giungono al cristallino, angolo che dipende dalle dimensioni reali dell'oggetto (AB) e dalla sua distanza dall'occhio (AC o BC).

¹ Galileo descrisse il risultato di queste sue prime osservazioni nel *Sidereus Nuncius (Il messaggero celeste)*, pubblicato il 12 marzo 1610. Questo breve opuscolo (meno di sessanta pagine) ha rivoluzionato la storia dell'astronomia, perché in esso sono riportate quattro scoperte sconvolgenti, che potevano essere fatte solo grazie al nuovo strumento: il fatto che la superficie della Luna è coperta di valli, montagne e crateri, e quindi non è sostanzialmente diversa dalla superficie terrestre; il fatto che, accanto alle stelle visibili a occhio nudo e conosciute sin dall'antichità, esiste una miriade di altre stelle, visibili solo al telescopio; il fatto che la Via Lattea, che a occhio nudo appare come una fioca nebulosità, è in realtà costituita da una grande quantità di piccole stelle, che l'occhio umano non riesce a vedere singolarmente; il fatto che il pianeta Giove possiede quattro satelliti che gli ruotano attorno, e che quindi non è vero che tutti i corpi celesti ruotino attorno alla Terra. A differenza di altre opere di Galileo, che affrontano argomenti di natura filosofica e utilizzano un linguaggio a volte complesso, il *Sidereus Nuncius* è scritto in uno stile semplice e diretto, da cui traspare l'emozione per la scoperta di fenomeni che nessun occhio umano aveva visto prima di allora; ancora oggi è una lettura affascinante, che consigliamo a tutti gli appassionati di astronomia.

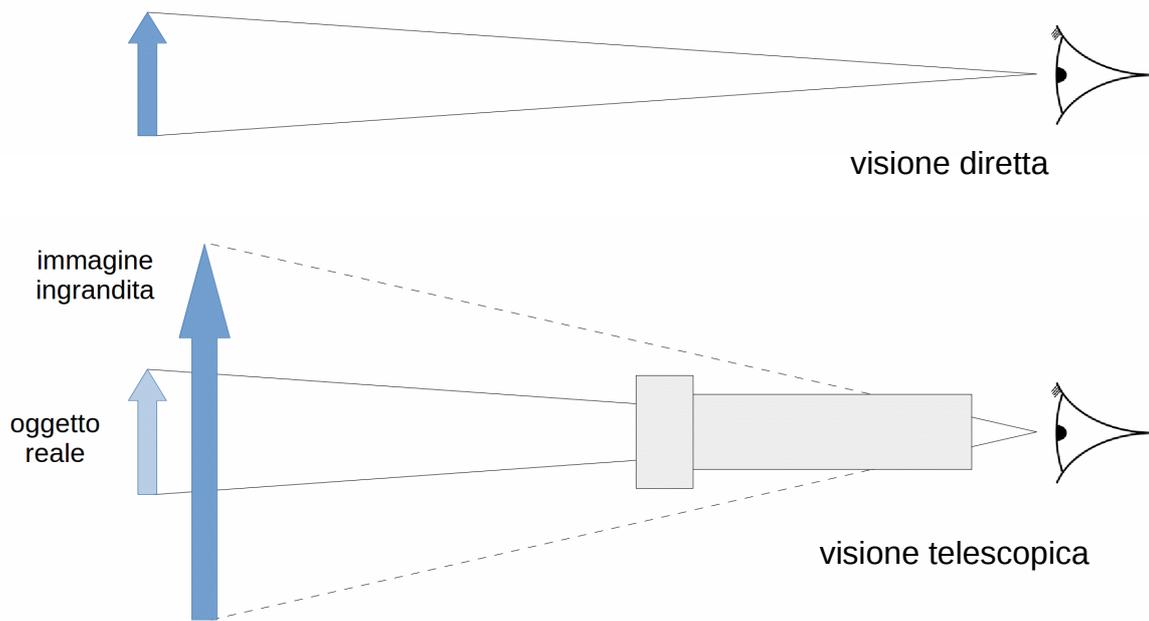


Figura 2: Il telescopio è uno strumento ottico che deflette i raggi luminosi, aumentando la separazione angolare con cui essi giungono all'occhio; esso quindi aumenta la distanza apparente tra i punti che compongono l'immagine, facendola apparire ingrandita.

La rifrazione

La rifrazione è il fenomeno fisico per cui un raggio di luce viene deflesso al passaggio attraverso la superficie che separa due mezzi trasparenti diversi² (ad esempio aria e acqua, o aria e vetro). La proprietà del materiale che determina il modo in cui si comporta rispetto a questo fenomeno è chiamata *indice di rifrazione* ed è indicata con il simbolo n . L'indice di rifrazione ha valore $n = 1$ per il vuoto e in generale aumenta al crescere della densità del materiale: ad esempio vale $n = 1.0003$ per l'aria, $n = 1.33$ per l'acqua e circa $n = 1.5$ per il vetro comune (il valore esatto dipende dalla composizione chimica del vetro)³. La deflessione del raggio di luce è descritta in modo preciso da una formula chiamata *legge di Snell*⁴; per la comprensione di quanto segue è però sufficiente tener presente che la luce viene rifratta in modo che la direzione di propagazione si avvicina alla direzione della

2 Attraversando mezzi omogenei la luce si propaga in linea retta.

3 Oggi sappiamo che l'indice di rifrazione è la misura di quanto la velocità della luce è rallentata nell'attraversare un certo materiale rispetto al vuoto; ad esempio, il fatto che l'indice di rifrazione dell'acqua sia pari a $n = 1.33$ significa che nell'acqua la luce si propaga con una velocità 1.33 volte inferiore di quella nel vuoto (che vale $c = 299792$ km/s). Il valore dell'indice di rifrazione dipende quindi in modo complicato dall'interazione delle onde elettromagnetiche (luce) con gli elettroni delle molecole che compongono la sostanza. Il motivo per cui una variazione della velocità di propagazione della luce produce una sua deflessione (cioè la rifrazione) ha a che vedere con la natura ondulatoria della luce, ed è troppo complesso per essere spiegato in questa sede (vedi ad esempio Feynman, Leighton, Sands, 2007, cap. 26 e 31).

4 Facendo riferimento alla figura 3, la legge di Snell può essere formulata nel modo seguente:

- 1) il raggio rifratto appartiene allo stesso piano definito dal raggio incidente e dalla normale alla superficie di separazione dei due mezzi nel punto di incidenza (NI);
- 2) l'angolo di incidenza θ_1 e l'angolo di rifrazione θ_2 sono legati dall'espressione:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

La paternità della legge è solitamente attribuita all'astronomo olandese Willebrord Snell van Royen (Snellius, 1580-1626), ma in realtà essa è stata scoperta in modo indipendente anche da altri scienziati, tra cui Ibn Sahl (940-1000), Thomas Harriot (1560-1621) e René Descartes (1596-1650).

normale alla superficie di separazione quando il raggio passa da un mezzo con un indice di rifrazione inferiore a un mezzo con indice di rifrazione superiore (ad esempio da aria a vetro), e viceversa se ne allontana nel caso opposto (figura 3). L'entità della deflessione è tanto maggiore quanto maggiore è la differenza tra gli indici di rifrazione, e quanto più il raggio luminoso incide obliquamente sulla superficie, cioè quanto maggiore è l'angolo tra la direzione di incidenza e la normale alla superficie; i raggi che arrivano sulla superficie in direzione ortogonale non vengono deviati.

In tutti i fenomeni di rifrazione e riflessione che sono alla base del funzionamento degli strumenti ottici il cammino ottico dei raggi luminosi è sempre *reversibile*: cioè se un raggio luminoso entra nello strumento da una certa direzione e ne fuoriesce dopo essere stato deviato da più elementi rifrangenti o riflettenti, se un secondo raggio venisse inviato allo strumento dalla direzione in cui è uscito il primo raggio, esso ripercorrerebbe a ritroso lo stesso percorso del primo raggio, e alla fine emergerebbe nella direzione in cui il primo raggio è entrato. In parole semplici, in uno schema che descrive un cammino ottico come la figura 3, è sempre possibile “invertire le frecce” che indicano la direzione di propagazione della luce.

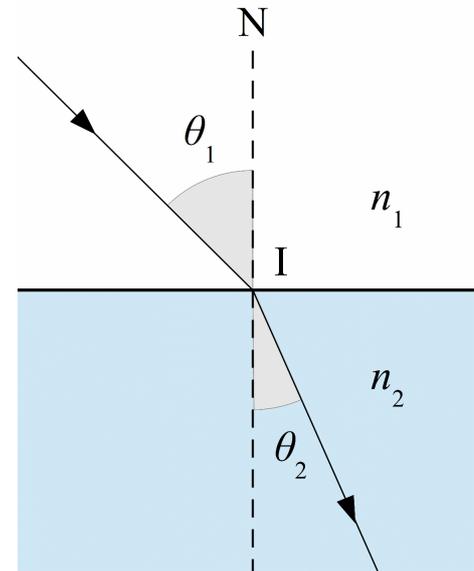


Figura 3: Geometria della rifrazione: passando da un mezzo meno denso (aria, $n_1 \simeq 1$) a uno più denso (vetro, $n_2 \simeq 1.5$) un raggio di luce viene deflesso in modo che l'angolo tra la direzione di propagazione e la normale NI alla superficie di separazione dei mezzi decresce ($\theta_2 < \theta_1$).

Lastre e prismi di vetro

Sfruttando il fenomeno della rifrazione è possibile ottenere sistemi ottici in grado di deviare la luce, usando corpi trasparenti di forma diversa. Quando un raggio di luce passa attraverso una lastra di vetro a facce piane e parallele viene rifratto due volte: una prima volta quando entra nel vetro, attraversando una prima superficie di separazione tra aria e vetro, e una seconda volta quando ne esce. A causa della geometria della lastra, la direzione della normale alla superficie di ingresso è parallela a quella della superficie di uscita: di conseguenza la deflessione che il raggio luminoso subisce in uscita è uguale e contraria a quella d'ingresso⁵, e quindi la sua direzione di propagazione non viene alterata dal passaggio nella lastra (figura 4). L'unica variazione prodotta è che il raggio viene spostato (tra-

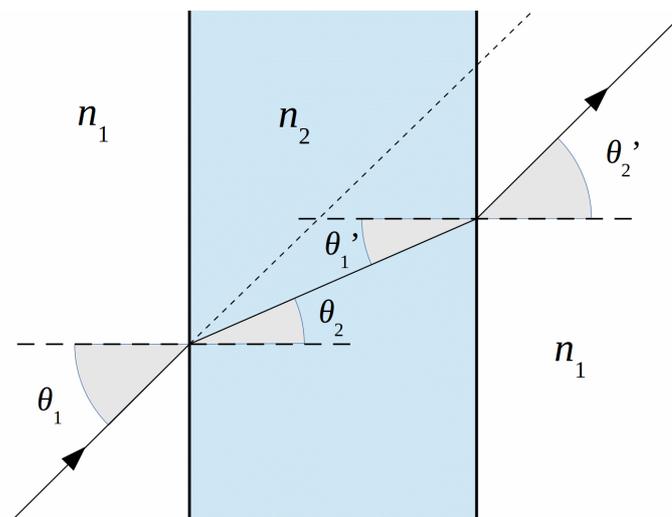


Figura 4: Rifrazione attraverso una lastra di vetro a facce piane e parallele: data la geometria del problema, $\theta_1' = \theta_2$; ne consegue che anche $\theta_2' = \theta_1$ (il raggio che fuoriesce dalla lastra è parallelo a quello entrante).

⁵ È una conseguenza del principio di reversibilità del cammino ottico: l'angolo di incidenza del raggio luminoso all'uscita dal vetro è uguale all'angolo di rifrazione all'entrata, quindi la geometria della rifrazione deve essere la stessa, a meno di un'inversione del senso di percorrenza della luce.

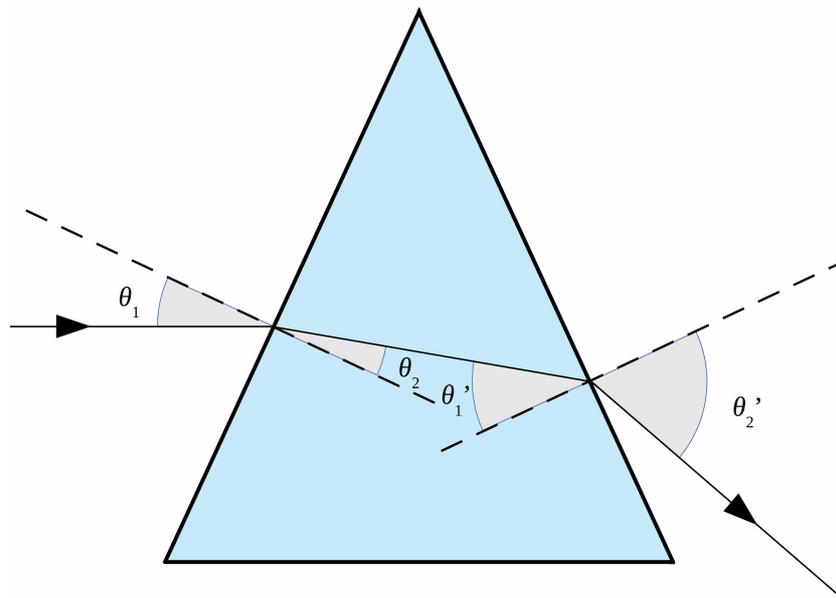


Figura 5: Rifrazione di un raggio di luce attraverso un prisma di vetro; poiché le facce di ingresso e uscita non sono parallele, il raggio viene deflesso di un angolo che dipende dall'angolo di apertura del prisma e dal suo indice di rifrazione.

slato) lateralmente, ma se la lastra è sottile questo effetto è piccolo; è questo il motivo per cui le lastre di vetro delle finestre non deformano l'immagine del mondo esterno. Nel caso di corpi rifrangenti con superfici non parallele (ad esempio un prisma di vetro, figura 5), il raggio luminoso viene deflesso di un angolo tanto più grande quanto maggiore è la differenza di orientazione tra le normali alle superfici di ingresso e di uscita (cioè quanto maggiore è l'angolo di apertura del prisma).

La lente convessa (convergente)

La lente è un corpo rifrangente (solitamente di vetro o materiale plastico trasparente, solitamente di forma rotonda) delimitato da superfici curve di forma tale da focalizzare i raggi luminosi e formare un'immagine. Ad esempio la comune lente da ingrandimento è una lente *biconvessa*, cioè un disco di vetro in cui entrambe le facce hanno forma sferica convessa. Vediamo come una lente convessa ideale deflette la luce, e consideriamo in primo luogo il caso di una sorgente luminosa puntiforme posta a distanza molto grande. I raggi prodotti da una sorgente puntiforme si propagano in linea retta dalla sorgente in direzioni divergenti; tuttavia a distanza molto grande (“infinita”) dalla sorgente, questa divergenza diventa impercettibile e i raggi possono essere considerati paralleli. Se il fascio colpisce la lente ortogonalmente al piano del disco, i raggi luminosi vengono deviati in modo tale da passare tutti per un punto situato sull'*asse ottico* della lente (la retta ortogonale alla superficie della lente che passa per il centro del disco) e che è detto *fuoco*. Questo effetto è prodotto dalla forma particolare della lente, più spessa al centro e più sottile ai bordi. I raggi che passano al centro della lente attraversano due superfici parallele e quindi non vengono deflessi, come i raggi che attraversano i vetri di una finestra; invece i raggi che passano a distanze dal centro via via crescenti incontrano superfici sempre più inclinate tra di loro, come le facce di prismi di apertura sempre maggiore, e quindi vengono deflessi in misura tanto maggiore quanto più sono distanti dall'asse ottico (figura 6); in una lente ideale l'aumento della deflessione è proprio dell'entità necessaria per controbilanciare la maggior distanza dall'asse ottico e a far convergere sempre il raggio luminoso verso il fuoco. La distanza dal centro del disco della lente del punto in cui viene focalizzato un fascio di raggi paralleli è

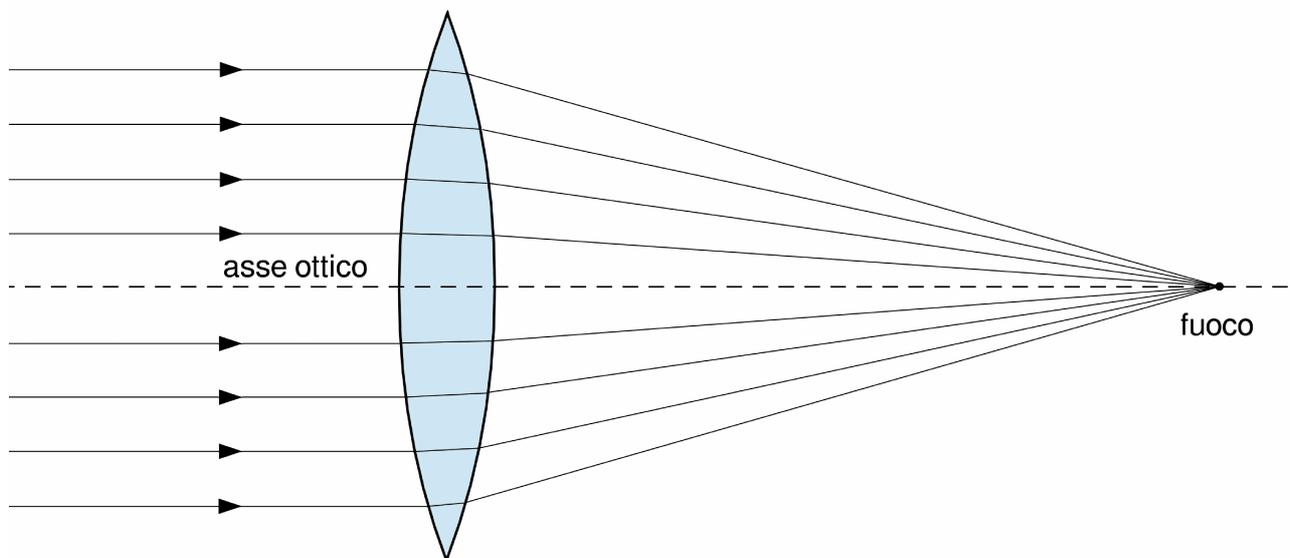


Figura 6: Funzionamento di una lente convergente ideale: tutti i raggi luminosi provenienti dalla direzione parallela all'asse ottico sono concentrati in un unico punto (*fuoco*), situato sull'asse ottico della lente.

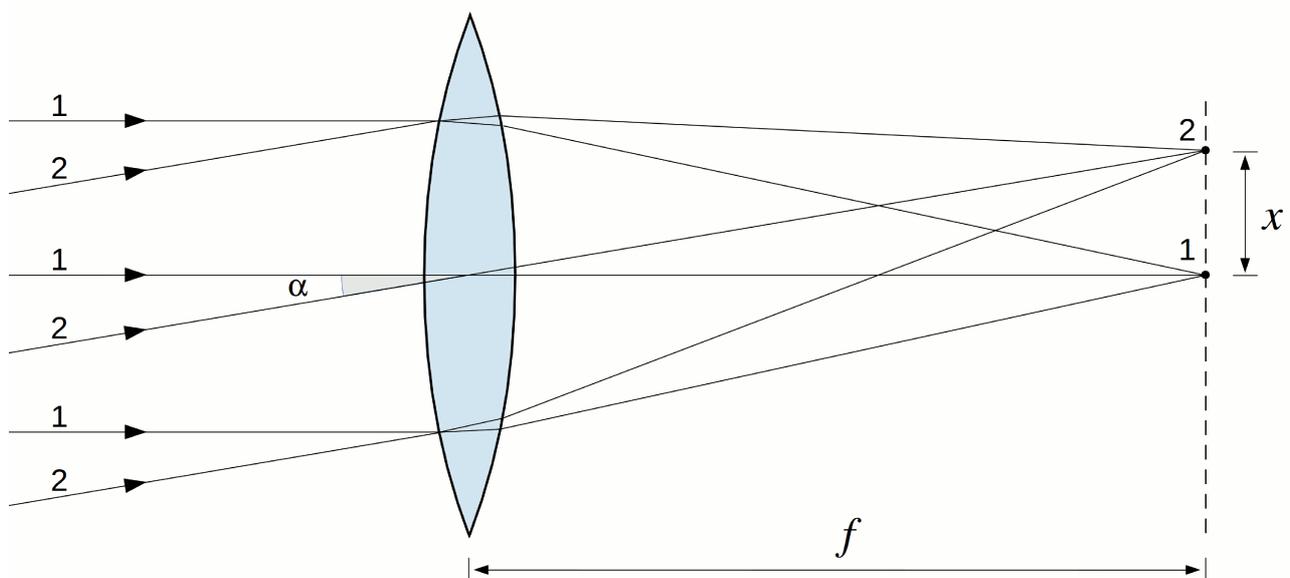


Figura 7: Deflessione da parte di una lente convergente ideale di due fasci di luce, uno proveniente da una sorgente posta sull'asse ottico della lente (1), l'altro da una sorgente posta in una direzione che forma un angolo α con l'asse ottico (2). I due fasci vengono fatti convergere in due punti che si trovano entrambi a una distanza dalla lente uguale alla sua lunghezza focale f , ma a una distanza trasversale x dall'asse ottico che è tanto più grande quanto maggiore sono l'inclinazione α del fascio incidente e la lunghezza focale della lente. Si noti che la posizione dei due punti nell'immagine risulta rovesciata rispetto alla realtà: l'immagine del punto 2, che si trova più in basso del punto 1, si forma più in alto di quella del punto 1.

chiamata *distanza focale*. La distanza focale dipende dall'indice di rifrazione del materiale che costituisce la lente e dalla curvatura della sua superficie: tanto più essa è "bombata" (spessa al centro), tanto più essa deflette la luce e più corta risulta la sua lunghezza focale. Per questo suo comportamento la lente convessa è detta anche *lente convergente* o *positiva*.

Se un fascio di raggi paralleli, provenienti da una sorgente puntiforme posta all'infinito, illumina

la lente non nella direzione dell'asse ottico, ma con un certo angolo rispetto ad esso, i raggi vengono ancora deviati in modo da passare per un unico punto; il fuoco si trova anche in questo caso a una distanza dalla lente pari alla lunghezza focale di questa, ma non è più situato sull'asse ottico (figura 7). La distanza trasversale x del fuoco dall'asse ottico può essere determinata tenendo conto che il raggio luminoso che passa attraverso il centro della lente non viene deflesso⁶: quindi la distanza x è proporzionale alla distanza focale f , ed è tanto maggiore quanto maggiore è l'angolo di incidenza α ⁷. Se esponiamo la lente a una scena illuminata, la luce che proviene da ciascun punto della scena viene focalizzata in un punto diverso del *piano focale*, cioè del piano parallelo alla lente (ortogonale all'asse ottico) posto a una distanza dalla lente uguale alla distanza focale f : su questo piano si forma cioè un'immagine di quanto sta di fronte alla lente, immagine che può essere evidenziata se ad esempio poniamo nel piano focale uno schermo bianco (figura 8). Una lente utilizzata in questo modo viene



Figura 8: Formazione di un'immagine (rovesciata) da parte di una lente convergente, per proiezione su uno schermo bianco. Si noti che anche la superficie della lente riflette un'immagine della stessa scena.

chiamata *lente obbiettiva*, o più brevemente *obbiettivo*. È questo il modo in cui viene usata in una macchina fotografica; essenzialmente questa è costituita da un obiettivo (una lente o un sistema di lenti) che proietta l'immagine del soggetto sul piano focale, dove è posto l'elemento sensibile (pellicola o sensore digitale) che la registra. La grandezza dell'immagine ottenuta (l'ingrandimento fornito dalla fotocamera) è proporzionale alla lunghezza focale della lente; questo fatto è ben noto ai fotografi, che montano obiettivi di focale corta (*grandangolari*) quando vogliono riprendere vedute panoramiche, e obiettivi di focale lunga (*teleobiettivi*) per ingrandire soggetti lontani⁸.

Una lente ideale deflette i raggi luminosi di un angolo che cresce con la distanza radiale del punto di incidenza del raggio dal centro della lente, ma che *non* dipende dall'inclinazione con cui il raggio giunge. Tenendo conto di ciò si può capire cosa succede se la luce, invece di provenire da una sorgente posta all'infinito e giungere sulla lente come un fascio di raggi paralleli, come abbiamo supposto finora, proviene da una sorgente più vicina, e si presenta quindi come un fascio divergente.

6 Invece la distanza del fuoco *dal disco della lente*, cioè la distanza focale f , non può essere determinata in questo modo: come abbiamo visto, essa è legata alle caratteristiche (curvatura e indice di rifrazione) della lente e alla deflessione che essa produce nei raggi luminosi che non passano per il centro.

7 Vale la relazione: $x = f \tan \alpha$; per piccoli valori dell'angolo, la distanza x è proporzionale ad α .

8 Ad esempio con una fotocamera di formato normale (*full frame*), cioè con un fotogramma o sensore di 24×36 mm, un obiettivo da 28 mm di focale fornisce un campo di 46°×65°, contro i 4.6°×6.9° di un obiettivo da 300 mm.

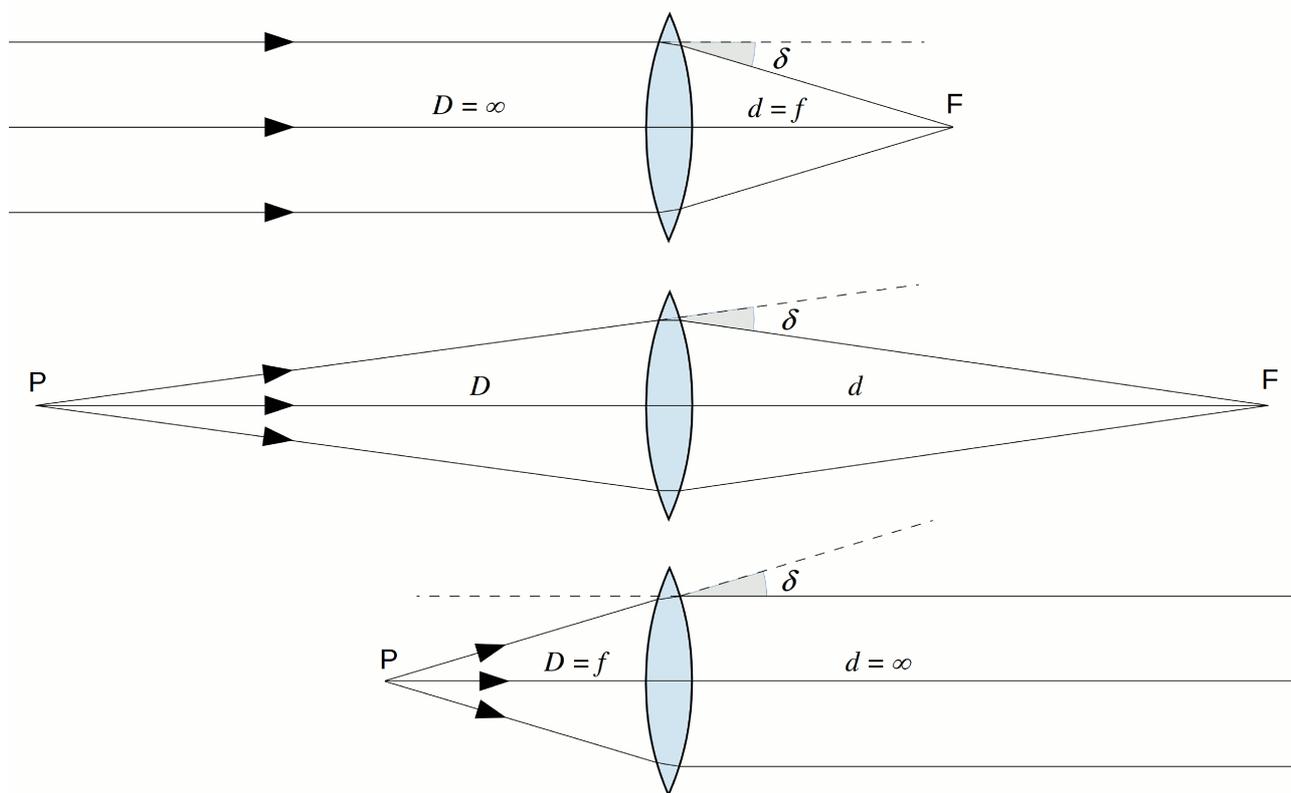


Figura 9: (*In alto*) La luce emessa da una sorgente a distanza infinita arriva alla lente come un fascio di raggi paralleli, che vengono focalizzati in un punto (F) che ha distanza dalla lente d pari alla lunghezza focale f di questa ($d = f$). (*Al centro*) Se la luce proviene da una sorgente P a distanza finita, arriva alla lente come un fascio di raggi divergenti, che viene focalizzato in un punto F che ha distanza dalla lente maggiore della lunghezza focale ($d > f$). Questo comportamento è dovuto al fatto che l'angolo di deflessione δ prodotto dalla lente non dipende dalla direzione di provenienza del raggio luminoso, ma solo dalla distanza dal centro ottico del punto dove esso la attraversa. (*In basso*) Se la sorgente luminosa P è posta nel fuoco della lente, cioè ha una distanza dalla lente uguale alla lunghezza focale di questa ($D = f$), i raggi luminosi vengono collimati in un fascio di raggi paralleli. Si noti che questa configurazione è esattamente simmetrica a quella illustrata nella figura in alto: un esempio di applicazione del principio di reversibilità del cammino ottico.

Poiché l'angolo di deflessione dei raggi rimane lo stesso, nel secondo caso il fascio verrà focalizzato in un punto più lontano dalla lente (figura 9), e la distanza del piano focale dalla lente sarà tanto maggiore quanto più l'oggetto si avvicina⁹. Se la distanza dell'oggetto dalla lente è pari alla lunghezza focale di questa, i raggi deflessi risultano paralleli e non convergono in alcun punto. Una lente usata in questo modo è chiamata *lente di collimazione* o *collimatore*, perché costituisce un dispositivo ottico in grado di eliminare la divergenza dei raggi luminosi, rendendoli paralleli; lenti di collimazione sono spesso usate davanti alle lampadine delle torce elettriche, per limitare la dispersione del fascio di luce e illuminare più lontano¹⁰.

9 La distanza dell'oggetto D , la distanza a cui si forma l'immagine d e la distanza focale della lente f sono legate dalla relazione:

$$\frac{1}{D} + \frac{1}{d} = \frac{1}{f} .$$

Se $D = \infty$, $1/D = 0$ e quindi $d = f$ (la distanza del piano focale dalla lente è uguale alla distanza focale f); se $D = f$ (l'oggetto si trova a una distanza dalla lente uguale alla distanza focale), risulta $1/d = 0$, cioè $d = \infty$ (i raggi deviati dalla lente non convergono in alcun punto, cioè sono paralleli).

10 Nei fari proiettori delle automobili lo stesso effetto di collimazione è ottenuto per mezzo di uno specchio parabolico, nel cui fuoco è posta la lampadina.

La messa a fuoco

Cosa succede se, usando una lente come obiettivo, lo schermo (o la pellicola) che raccoglie la luce, e su cui si forma l'immagine, non è posto sul piano focale, ma a una distanza diversa (maggiore o minore) dalla lente? In questo caso (figura 10), se lo schermo è posto davanti al fuoco (caso A), i raggi luminosi lo illuminano prima di convergere in un'immagine puntiforme; oppure, se lo schermo è dietro il fuoco (caso B), i raggi lo raggiungono dopo aver superato il punto di convergenza, e quindi quando ormai stanno nuovamente divergendo¹¹. In entrambi i casi l'immagine non è puntiforme, ma diventa una macchia di luce che ha un'estensione tanto maggiore quanto più lo schermo è distante dal piano focale; nel caso di una lente circolare, anche la macchia ha forma circolare e viene detta *circolo di confusione*. In queste condizioni le immagini di punti vicini tra di loro nella scena che è davanti all'obiettivo si sovrappongono parzialmente, generando una rappresentazione confusa e priva di dettagli: l'immagine è *sfocata*.

Per evitare questa perdita di nitidezza dell'immagine, gli strumenti ottici (cannocchiali, telescopi, binocoli, fotocamere, microscopi, ecc.) sono dotati di un dispositivo che consente di regolare la *messa a fuoco* cioè, nella maggior parte dei casi, di un congegno meccanico che consente di variare la distanza tra la lente obiettivo e il sensore (o l'oculare, come vedremo nel seguito trattando dei telescopi). In molti strumenti (ad esempio nei binocoli, o nelle macchine fotografiche di qualche anno fa) la messa a fuoco viene eseguita manualmente, cioè valu-

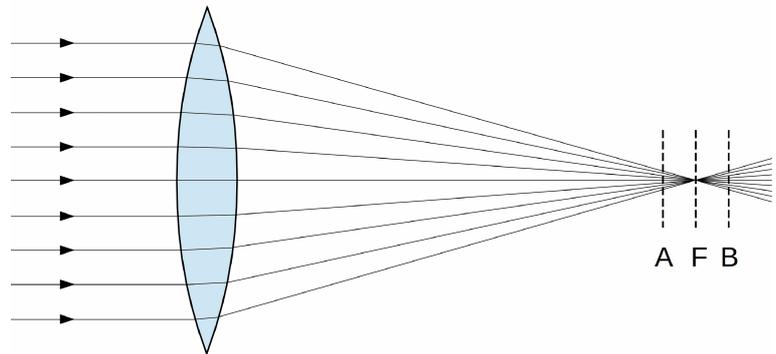


Figura 10: Formazione dell'immagine di una sorgente luminosa a distanza infinita su uno schermo posto davanti (A) o dietro (B) il piano focale (F) di una lente.



Figura 11: Due fotografie della stessa scena, riprese mettendo a fuoco il soggetto in primo piano (*in alto*) oppure lo sfondo (*in basso*).

¹¹ La figura 10 rappresenta il caso di una sorgente luminosa posta all'infinito, ma la stessa situazione si presenta anche per sorgenti a distanza finita: l'unica differenza, come abbiamo visto, è che in questo caso il piano focale si trova a una distanza maggiore dalla lente.

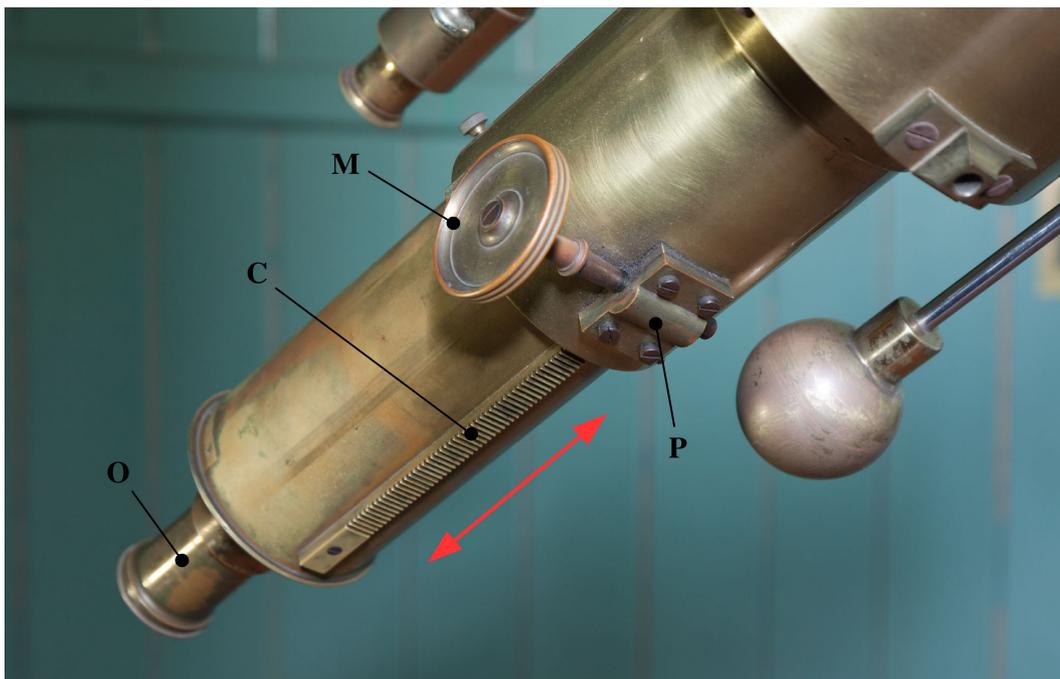


Figura 12: Meccanismo di fuoco del telescopio Merz da 22 cm (cupola Schiaparelli dell'Osservatorio Astronomico di Brera). L'asse della manopola **M** è collegato a una ruota dentata (non visibile, collocata sotto la piastra **P**) che si ingrana sulla cremagliera **C**; ruotando la manopola si fa scorrere il tubo di fuoco dentro e fuori dal tubo del telescopio, variando la distanza dell'oculare **O** dall'obiettivo.

tando a occhio la nitidezza dell'immagine e ruotando la ghiera che regola la posizione dell'obiettivo fino a ottenere una visione soddisfacente; le fotocamere moderne sono dotate di un sistema di messa a fuoco automatico, cioè di un motore che varia la posizione dell'obiettivo fino a quando la nitidezza dell'immagine, misurata da un apposito sensore, risulta ottimale. Poiché, come abbiamo visto, la distanza del piano focale dall'obiettivo dipende dalla distanza dell'oggetto ripreso, non sarà possibile ottenere contemporaneamente una messa a fuoco perfetta per gli oggetti vicini e lontani; un fotografo, quando fa il ritratto di una persona, sa bene che deve scegliere se mettere a fuoco il viso del soggetto in primo piano e lasciare fuori fuoco lo sfondo, oppure viceversa mettere a fuoco gli oggetti lontani e lasciare sfocato il viso (figura 11), e di solito opta per la prima soluzione. Per motivi pratici (di semplicità costruttiva, di ingombro e di costo) tutti i sistemi di messa a fuoco hanno un'escursione limitata, cioè non riescono ad allontanare l'obiettivo dal sensore oltre a una certa distanza massima che, in base a quanto detto precedentemente, corrisponde a una particolare distanza del soggetto. In altre parole ogni obiettivo ha una sua particolare *distanza minima di messa a fuoco*: se il soggetto si trova più vicino di tale distanza, non potrà essere focalizzato correttamente¹².

Potrebbe sembrare che un telescopio astronomico, fatto per osservare oggetti che si trovano tutti a distanza infinita, non abbia bisogno di un sistema di messa a fuoco. Invece non è così, per diversi motivi: la distanza tra obiettivo e oculare può variare a causa delle deformazioni che il tubo subisce (flessioni dovute alle diverse posizioni di puntamento, dilatazione termica); il telescopio può essere

12 La distanza minima di messa a fuoco è uno dei parametri che vengono specificati per gli obiettivi fotografici, e che costituisce un criterio di scelta importante per i fotografi che si dedicano alla *macrofotografia*, cioè alle riprese a distanza ravvicinata di piccoli soggetti (insetti, fiori, ecc.). Esistono particolari obiettivi (denominati *obiettivi per macrofotografia* o più brevemente *obiettivi macro*) che sono progettati appositamente per queste applicazioni, e che quindi hanno una distanza minima di messa a fuoco particolarmente ridotta. Per ridurre la distanza minima di messa a fuoco i fotografi usano anche appositi *tubi di prolunga*, cioè elementi di raccordo vuoti (senza lenti) che, interposti tra l'obiettivo e il corpo della macchina fotografica, aumentano la distanza della lente dal sensore.

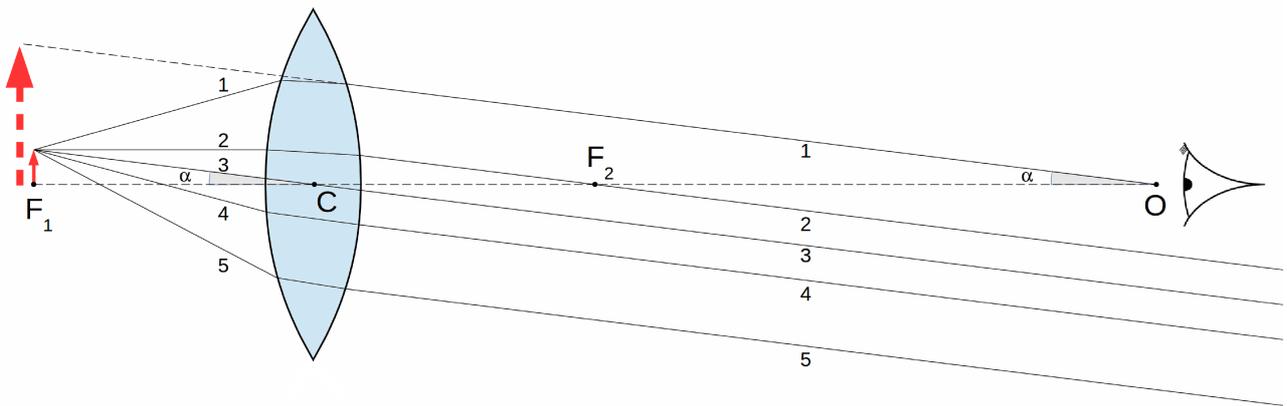


Figura 13: Funzionamento di una lente di ingrandimento: se l'oggetto da osservare (schematizzato dalla piccola freccia continua) è posto nel fuoco anteriore F_1 della lente, tutti i raggi luminosi che si dipartono da esso (1-5) sono rifratti in modo da formare un fascio parallelo. L'inclinazione di tale fascio rispetto all'asse ottico $F_1C F_2$ può essere determinato tenendo conto che il raggio che giunge alla lente parallelamente all'asse ottico (2) viene deviato in modo da passare per il fuoco posteriore F_2 , oppure che il raggio (3) che passa per il centro della lente (C) non viene deviato. L'estensione angolare α con cui l'occhio percepisce l'oggetto è uguale a quella che avrebbe se lo stesse osservando dal centro C della lente: l'immagine dell'oggetto (freccia tratteggiata) è ingrandita.

usato con strumenti diversi (oculari, micrometri filari, spettroscopi), ciascuno dei quali richiede una differente posizione di messa a fuoco; inoltre il meccanismo di fuocheggiamento deve anche compensare possibili difetti di messa a fuoco dell'occhio dell'osservatore (miopia o ipermetropia). Per questi motivi anche i telescopi astronomici sono dotati di meccanismi di fuocheggiamento (figura 12).

La lente di ingrandimento

L'occhio umano funziona approssimativamente come una macchina fotografica: è dotato anteriormente di uno strato di tessuto trasparente (cornea e cristallino) che ha forma di lente e agisce come un obiettivo, deflettendo i raggi luminosi e focalizzandoli sulla parete posteriore del bulbo oculare; questa è ricoperta da un tessuto nervoso sensibile alla luce, che ha la stessa funzione della pellicola o del sensore digitale di una fotocamera (figura 1). A differenza di una macchina fotografica, nell'occhio umano la regolazione della messa a fuoco non viene ottenuta variando la distanza tra obiettivo e sensore, ma modificando la lunghezza focale del cristallino; esso è costituito da un materiale elastico, la cui curvatura può essere variata per mezzo della pressione esercitata da appositi muscoli. Quando il cristallino è a riposo, la sua curvatura è quella giusta per focalizzare sulla retina raggi luminosi che arrivano in fasci paralleli, cioè da oggetti posti all'infinito. Quando i muscoli comprimono lateralmente il cristallino, lo rendono più spesso al centro, facendo diminuire la sua lunghezza focale e permettendogli di focalizzare correttamente il fascio luminoso leggermente divergente prodotto da oggetti vicini. Anche il cristallino, come una fotocamera, ha una capacità di adattamento limitata, con una distanza minima di messa a fuoco di circa 20-25 cm (per un occhio normale). Ciò naturalmente limita anche le possibilità naturali di vedere un oggetto nei suoi dettagli: se avviciniamo l'occhio a una distanza inferiore a 20-25 cm, il cristallino riceve un fascio luminoso troppo divergente e non riesce a metterlo a fuoco¹³.

13 Tutto ciò vale per un occhio normale, privo di difetti visivi. In un occhio affetto da *ipermetropia* la lunghezza focale del sistema cornea-cristallino è troppo grande rispetto alle dimensioni dell'occhio: la retina si trova in una posizione simile al punto A della figura 10 e l'occhio non riesce a mettere a fuoco. Per correggere questo difetto occorre aumentare la convergenza del fascio luminoso per mezzo di *lenti convergenti*. Al contrario in un occhio affetto da

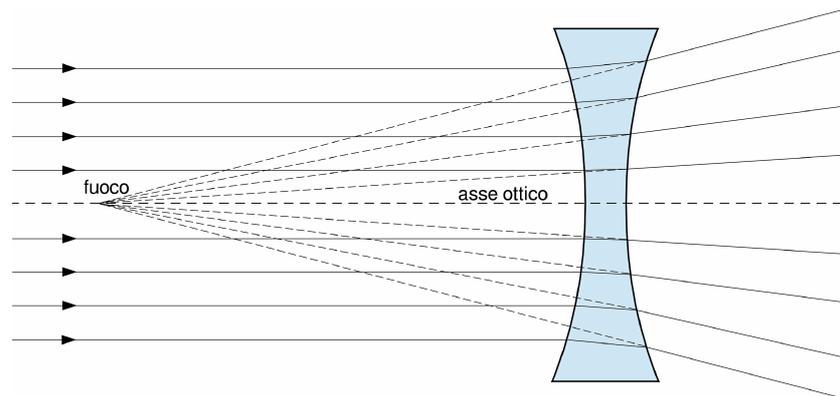


Figura 14: Funzionamento di una lente divergente ideale: i raggi di un fascio incidente parallelo vengono deflessi in modo che sembrano divergere da un unico punto (fuoco) posto sull'asse ottico della lente.

Un modo per superare questa limitazione è quello di usare una *lente di ingrandimento*, cioè una lente convergente di piccola lunghezza focale utilizzata in configurazione di collimatore, cioè ponendo l'oggetto a una distanza dalla lente circa uguale alla lunghezza focale di questa. I raggi luminosi divergenti vengono allora collimati in un fascio di raggi paralleli (figura 9, in basso), condizione questa che l'occhio umano è in grado di focalizzare correttamente. Studiando in dettaglio il modo in cui i raggi vengono deviati dalla lente, è possibile vedere che essa fa apparire l'oggetto con le stesse dimensioni apparenti che avrebbe se l'occhio fosse posto nella posizione della lente, anche se in realtà l'occhio è molto più distante (figura 13): quindi se si utilizza una lente con lunghezza focale inferiore alla distanza minima di messa a fuoco dell'occhio si può “avvicinare” virtualmente l'oggetto a una distanza non accessibile alla visione diretta. Quindi il potere di ingrandimento di una lente usata in questo modo è tanto maggiore quanto minore è la sua lunghezza focale.

La lente concava (divergente)

Una lente *biconcava*, cioè delimitata da due facce concave, è un disco di vetro più sottile al centro che ai bordi. L'inclinazione delle sue superfici è tale che essa deflette i raggi luminosi che la attraversano allontanandoli dall'asse ottico; essa si comporta quindi in modo opposto a una lente convessa, aumentando la divergenza dei raggi, oppure diminuendo la loro convergenza: è una lente *divergente* o *negativa* (figura 14). Quando una lente concava è colpita da un fascio di raggi paralleli, questi non vengono quindi fatti convergere in un punto; è tuttavia possibile anche in questo caso definire un *fuoco* come il punto da cui i raggi sembrano divergere, cioè il punto di intersezione dei *prolungamenti* dei raggi luminosi nella direzione di provenienza. Analogamente si definisce come *distanza focale* della lente la distanza del fuoco nel caso di un fascio incidente parallelo.

Rapporto focale, luminosità e profondità di campo

Ritorniamo alla lente convergente usata come obiettivo (figura 7) e cerchiamo di capire da cosa dipende la luminosità dell'immagine che essa proietta sullo schermo o sensore. La quantità di luce che la lente fa convergere sul piano focale è determinata dall'ampiezza del fascio luminoso che essa

miopia la distanza focale del cristallino è troppo corta e l'immagine di oggetti all'infinito si forma davanti alla retina (che si trova in una posizione simile al punto B della figura 10): il miope non riesce a vedere distintamente oggetti distanti, mentre vede bene quelli vicini (anzi ha una distanza minima di messa a fuoco inferiore a quella di una persona normale). Per correggere la miopia occorre diminuire la convergenza del fascio luminoso con *lenti divergenti*, che sono necessarie solo per la visione distante.

raccoglie, cioè dall'area della sua superficie; quindi in primo luogo la luminosità dell'immagine è proporzionale al quadrato del raggio della lente¹⁴. Tuttavia, come abbiamo visto, le dimensioni lineari (altezza e larghezza) dell'immagine prodotta sono proporzionali alla distanza del sensore dalla lente che, nel caso di un oggetto molto distante messo a fuoco correttamente, è uguale alla distanza focale f della lente. La superficie dell'immagine prodotta è quindi proporzionale al quadrato della distanza focale f , e di conseguenza la luminosità dell'immagine è inversamente proporzionale a f^2 : a parità di luminosità della sorgente, la luce si distribuisce su una superficie proporzionale a f^2 , e quindi la luminosità dell'immagine (quantità di luce per unità di superficie) risulta inversamente proporzionale a f^2 . Ricapitolando, la luminosità dell'immagine è proporzionale a d^2/f^2 , cioè al quadrato del rapporto d/f tra diametro e lunghezza focale della lente, che in breve viene detto *rapporto focale* della lente. Solitamente esso viene espresso con la notazione f/n , dove n è un valore numerico: ad esempio, la notazione $f/4$ significa che la lunghezza focale della lente è quattro volte il suo diametro, cioè che il rapporto focale d/f è uguale a $1/4$ ¹⁵.

In fotografia è essenziale poter regolare la luminosità per ottenere una corretta esposizione dell'immagine. Gli obiettivi fotografici sono quindi generalmente dotati di un diaframma, cioè di un meccanismo a lamelle che permette di restringere l'apertura attraverso cui passa la luce e quindi variare il rapporto focale dell'obiettivo, fino a un valore massimo che è determinato dal diametro della lente stessa. L'utilizzo del rapporto focale semplifica il calcolo dell'esposizione: un obiettivo grandangolare e un teleobiettivo, se entrambi regolati su $f/4$, hanno la stessa luminosità, pur avendo distanze focali molto differenti¹⁶. I fotografi sanno bene che, nel calcolo dell'esposizione, il valore del rapporto focale interviene elevato al quadrato: se ad esempio, impostando il diaframma su $f/4$, il tempo di esposizione richiesto da una certa scena fosse $1/250$ di secondo, utilizzando un diaframma di $f/8$ dovrei allungare l'esposizione di un fattore $(8/4)^2 = 2^2 = 4$, cioè usare un tempo di $1/60$ di se-

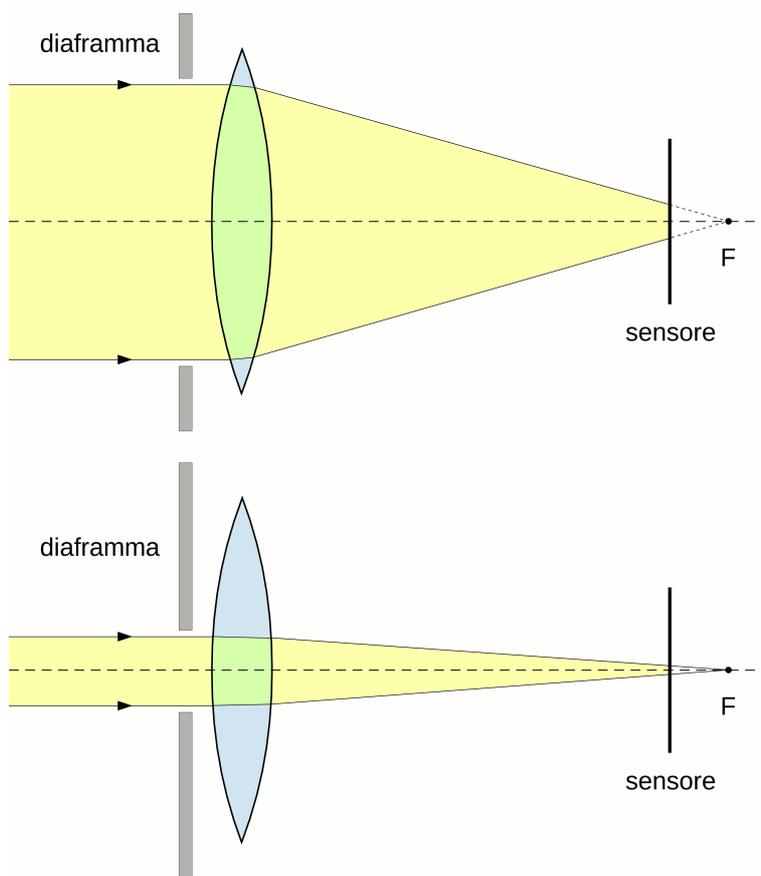


Figura 15: Il rapporto focale di un obiettivo determina l'ampiezza del cono di luce da cui provengono i raggi luminosi che convergono sul fuoco (F) della lente. Se il sensore non è posizionato esattamente sul piano focale, le dimensioni del cerchio di confusione sono tanto più grandi quanto maggiore è il diametro del diaframma, cioè quanto maggiore è il valore del rapporto focale (quanto minore è il numero n nella notazione f/n).

14 L'area della lente, supposta di forma circolare, è uguale a πr^2 , dove r è il raggio della lente, o equivalentemente a $\pi d^2/4$, dove d è il suo diametro.

15 Quindi l'immagine è tanto più luminosa quanto più il numero n che compare nella notazione f/n è *piccolo*: questa è una conseguenza del fatto che la notazione esprime un rapporto, di cui il numero n costituisce il denominatore.

16 Naturalmente ciò significa che il diametro effettivo di apertura del diaframma del teleobiettivo deve essere maggiore rispetto al grandangolare.

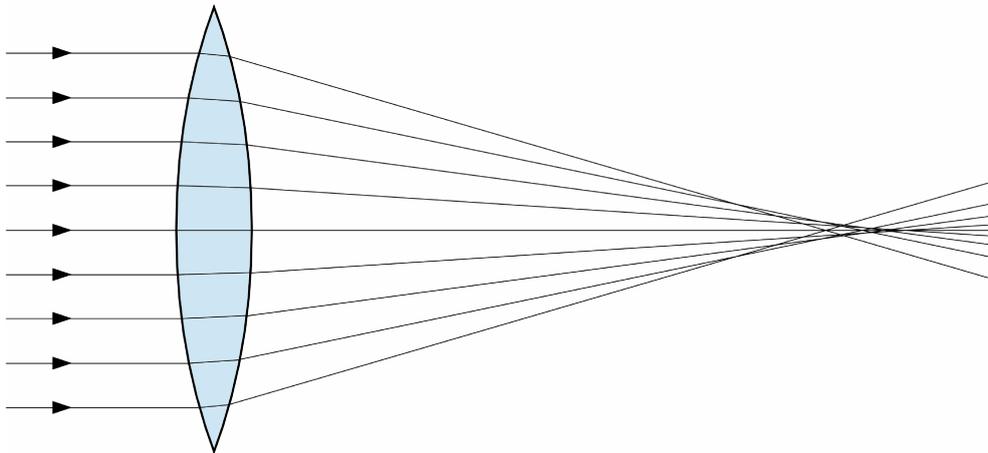


Figura 16: Aberrazione sferica: in una lente convessa a superfici sferiche, i raggi luminosi che attraversano la lente in prossimità dell'asse ottico sono focalizzati a una distanza differente rispetto ai raggi che passano attraverso le parti periferiche della lente.

condo (il valore disponibile più prossimo a $4 \times 1/250 = 1/62.5$).

Il rapporto focale della lente determina anche altre caratteristiche dell'immagine, oltre alla sua luminosità. Tra l'altro esso influisce sull'aspetto delle immagini non a fuoco, perché la dimensione del *circolo di confusione* è proporzionale al rapporto focale (figura 15): ciò significa che, a parità di altre condizioni (e in particolare a parità di distanza tra la posizione del sensore fotografico e il piano focale) il deterioramento della nitidezza dell'immagine dovuto allo sfocamento è tanto più grave quanto maggiore è il rapporto focale. Abbiamo visto come, a rigore, sia possibile mettere a fuoco solo per una certa distanza: tutti gli oggetti che si trovano a distanza diversa saranno sfocati. Tuttavia in pratica esiste un intervallo di distanze, un po' più vicino o un po' più lontano della distanza di messa a fuoco ottimale, in cui la perdita di nitidezza (le dimensioni del circolo di confusione) è così piccola da essere trascurabile: in fotografia questo intervallo viene chiamato *profondità di campo* (sottintendendo: di messa a fuoco accettabile). Da quanto appena detto dovrebbe essere chiaro che la profondità di campo diminuisce al diminuire del rapporto focale: i fotografi sanno che, per ottenere un'immagine in cui siano ragionevolmente a fuoco sia gli oggetti vicini che lo sfondo lontano, è necessario chiudere il più possibile il diaframma dell'obiettivo (ridurre il rapporto focale).

Le aberrazioni

Le descrizioni del funzionamento e delle caratteristiche delle lenti che abbiamo fatto finora si riferiscono, come abbiamo più volte specificato, a *lenti ideali*, cioè a elementi ottici che deflettono i raggi luminosi in modo da formare immagini perfettamente nitide e prive di deformazioni. Le lenti reali possono avvicinarsi più o meno a questo comportamento ideale, ma se ne discostano sempre sotto uno o più aspetti. Le discrepanze del comportamento delle lenti reali da quello ideale vengono chiamate tecnicamente *aberrazioni* (cioè “deviazioni” o “errori”); ne citiamo qui alcune delle più importanti.

Aberrazione sferica. È il difetto per cui una lente convergente focalizza i raggi provenienti da una sorgente puntiforme a distanze differenti a seconda della distanza dall'asse ottico (figura 16): è come se la lunghezza focale della parte centrale della lente fosse differente da quella delle zone periferiche. L'effetto è quello di creare una diffusione delle immagini di oggetti puntiformi e una perdita di definizione simile a una sfocatura.

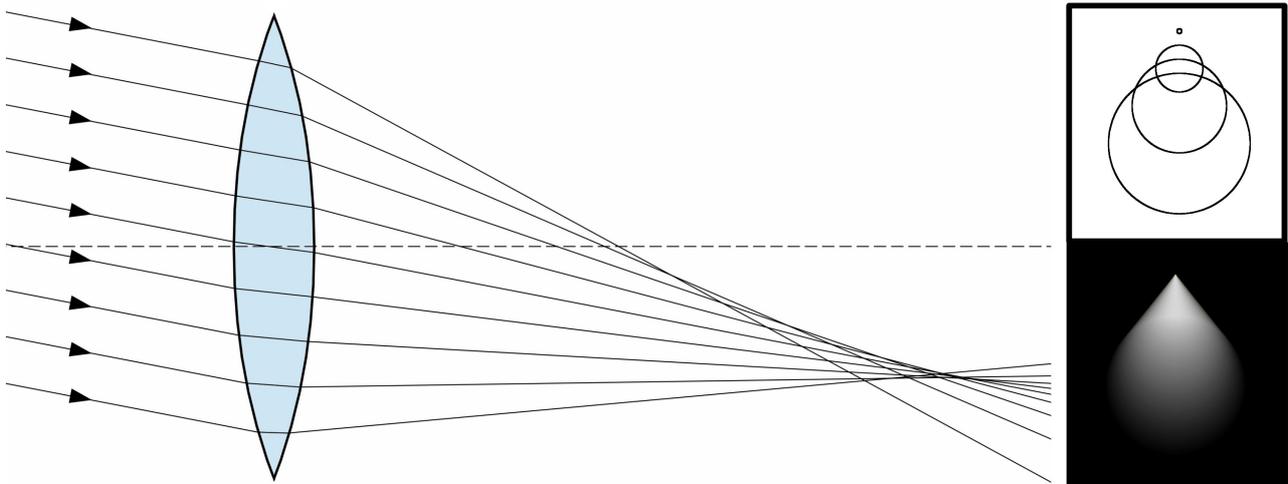


Figura 17: Meccanismo della coma: l'immagine di un oggetto puntiforme fuori asse risulta composta da una sequenza di immagini parziali. Le immagini prodotte dalle zone periferiche della lente risultano più sfocate (circolo di confusione di dimensioni maggiori) e più lontane dall'asse ottico, come illustrato schematicamente nel riquadro in alto a destra. Il riquadro in basso a destra mostra l'effetto risultante dalla sovrapposizione delle immagini parziali.

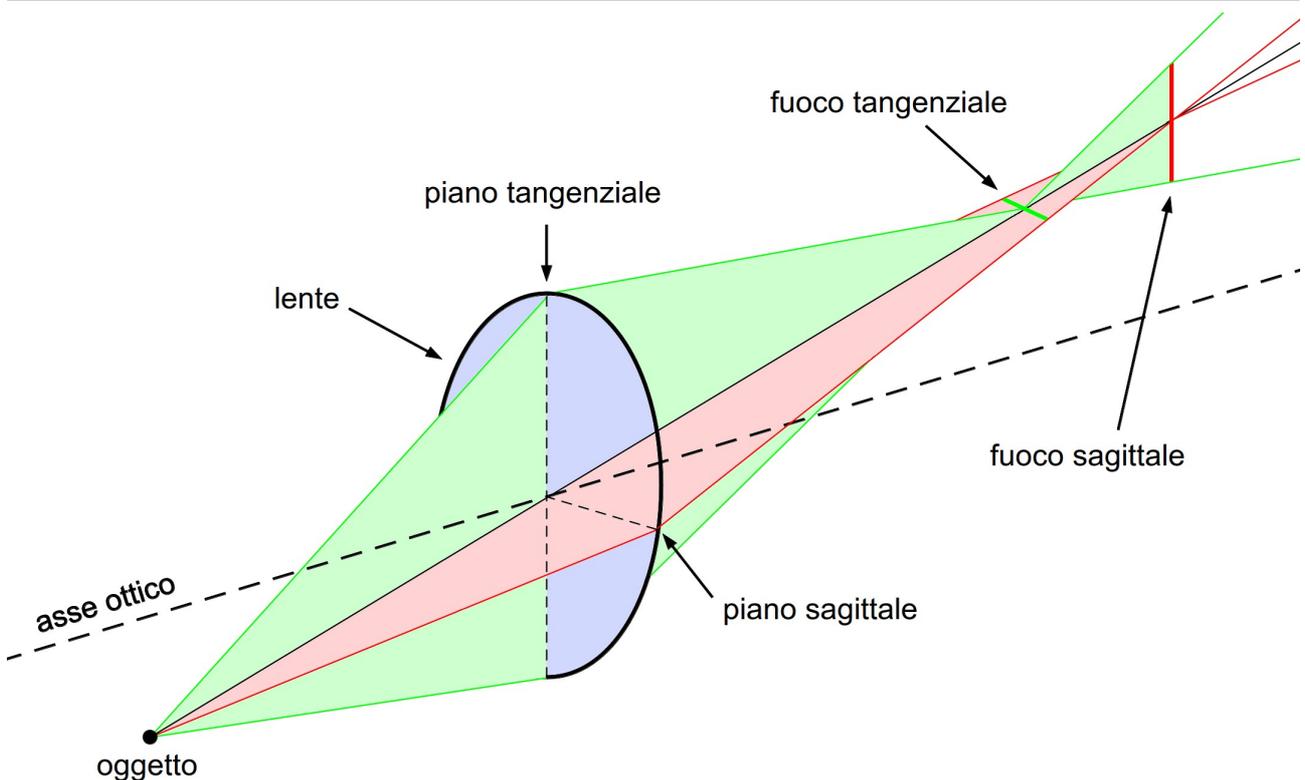


Figura 18: Meccanismo di formazione dell'astigmatismo per un oggetto fuori dall'asse ottico: i raggi luminosi che giungono lungo il piano tangenziale (verticale, in verde) vengono focalizzati a una distanza dalla lente inferiore rispetto ai raggi che appartengono al piano sagittale (orizzontale, in rosso). Se il sensore viene posizionato nel fuoco dei raggi tangenziali, l'immagine di un oggetto puntiforme appare come un segmento orientato in senso sagittale; viceversa l'immagine che si forma nel fuoco sagittale è un segmento in senso tangenziale.

Coma. È un difetto nella formazione dell'immagine di una sorgente puntiforme posta in una direzione inclinata rispetto all'asse ottico, i cui raggi cioè giungono alla lente con una certa angolazione rispetto alla perpendicolare. Come abbiamo visto, in questo caso l'immagine si forma sul piano focale a una certa distanza dall'asse ottico (figura 7), ma per effetto della coma le diverse regioni con-

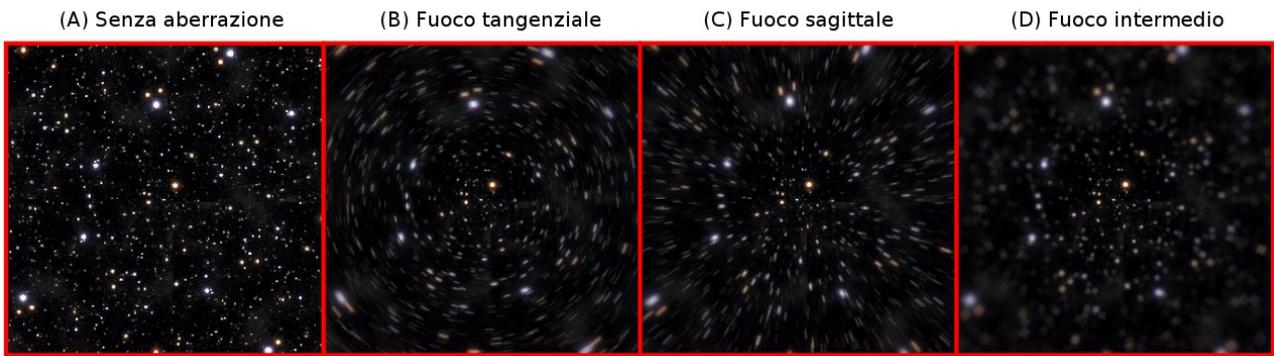


Figura 19: Simulazione di come l'immagine di un campo stellare viene degradata dall'astigmatismo, a seconda della distanza dall'obiettivo in cui viene posto il sensore: (A) Immagine priva di aberrazione. (B) Con il sensore nel fuoco tangenziale, gli oggetti puntiformi appaiono allungati (sfocati) in senso sagittale. (C) Se il sensore è nel fuoco sagittale, le immagini sono allungate in senso tangenziale (radiale). (D) Con il sensore in una posizione intermedia tra i fuochi tangenziale e sagittale, le immagini sono sfocate in entrambe le direzioni ma, in ciascuna direzione, di un'entità inferiore rispetto ai casi estremi precedenti. In tutti i casi l'aberrazione è nulla al centro dell'immagine e aumenta verso i bordi.

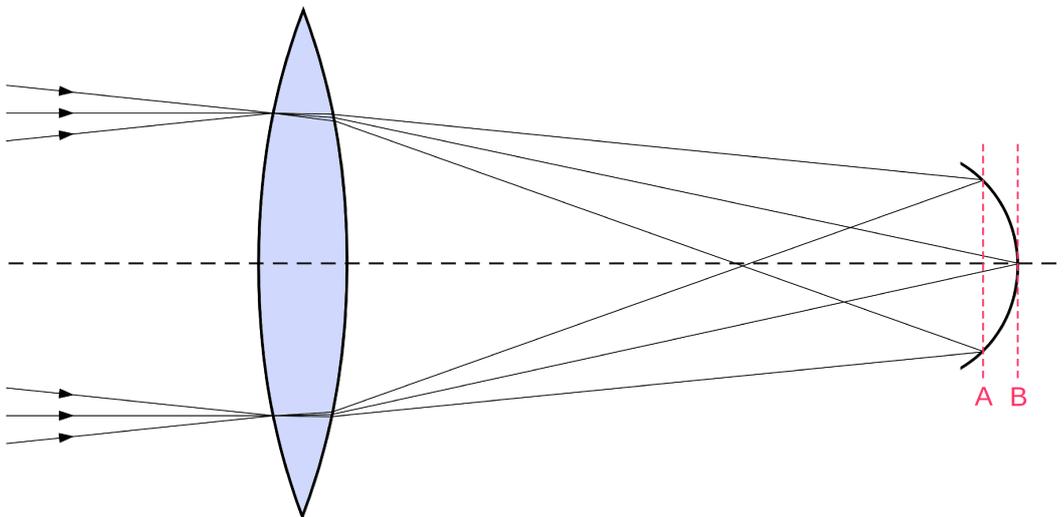


Figura 20: Effetto della curvatura di campo sulla messa a fuoco: su un sensore piano posizionato in A verranno focalizzati in modo nitido i bordi del campo ma non il centro; il contrario avviene con un sensore posizionato in B.

centriche della lente formano immagini a diversa distanza dall'asse ottico; l'immagine della sorgente risulterà quindi formata dalla sovrapposizione di una serie di immagini diverse, disposte lungo un segmento orientato in direzione del fuoco della lente. Inoltre, a causa dell'aberrazione sferica, che solitamente è presente congiuntamente alla coma, le diverse immagini convergeranno a distanza diversa dalla lente, cioè formeranno sul piano focale cerchi di confusione di diametro crescente. L'immagine sarà quindi formata dalla sovrapposizione di immagini circolari di diametro crescente, a distanza crescente dall'asse ottico: il risultato è una figura caratteristica a forma di goccia o di cometa, da cui il nome *coma* dell'aberrazione (figura 17).

Astigmatismo. L'astigmatismo è un'aberrazione che, come la coma, si verifica solo per oggetti posti fuori dall'asse ottico della lente¹⁷. È dovuta al fatto che i raggi incidenti lungo il *piano tangenziale* (il

¹⁷ Non bisogna confondere l'astigmatismo qui descritto con l'omonimo difetto della vista, che si verifica quando il cristallino è asimmetrico, cioè ha curvature diverse nelle diverse direzioni. L'astigmatismo di cui trattiamo qui si verifica anche con lenti simmetriche, che però producono immagini asimmetriche quando l'oggetto si trova fuori dall'asse ottico.

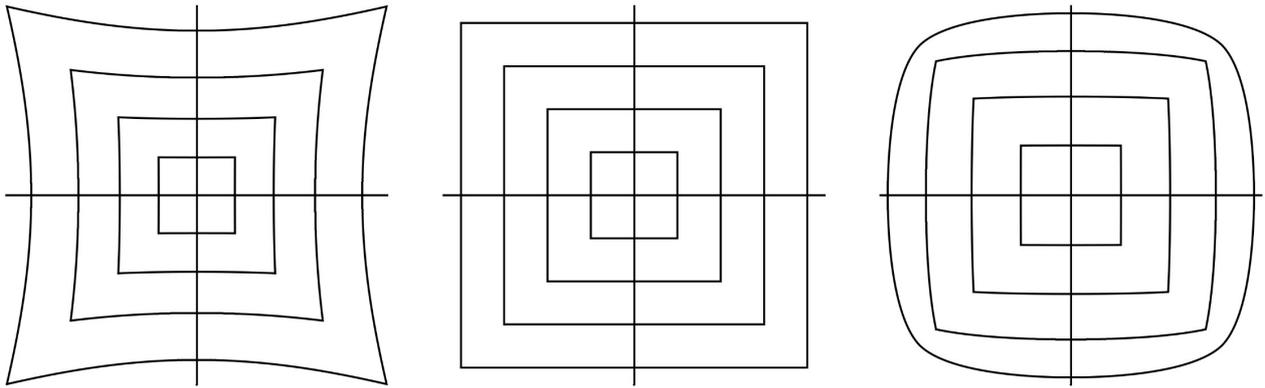


Figura 21: Le distorsioni geometriche: l'immagine di una figura di confronto non distorta (*al centro*) e affetta da distorsione a cuscino (*a sinistra*) e a barile (*a destra*).

piano che contiene l'asse ottico) sono focalizzati a una distanza differente rispetto a quelli che arrivano lungo il *piano sagittale*, cioè il piano ortogonale al piano tangenziale (figura 18). Nei due fuochi, i raggi vengono focalizzati non in due punti, ma lungo due segmenti distinti, ortogonali tra di loro. Come nel caso della coma, risulta quindi impossibile mettere a fuoco contemporaneamente tutti i raggi. L'immagine formata dalla sovrapposizione di raggi tangenziali e sagittali non è puntiforme ma ha estensione finita; la figura di confusione risultante non è circolare ma ha forma ellittica, con il semiasse maggiore orientato in modo diverso a seconda del punto in cui il sensore è posto, più vicino al fuoco dei raggi tangenziali o di quelli sagittali (figura 19).

Curvatura di campo. È l'effetto per cui la superficie su cui viene focalizzata l'immagine non è piana ma curva; se il sensore ha forma piana risulta impossibile mettere a fuoco contemporaneamente tutta l'immagine: se si mette a fuoco la zona centrale risulteranno fuori fuoco i bordi, e viceversa (figura 20). Questa aberrazione può essere ridotta con l'utilizzo di lenti aggiuntive (spianatori di campo). In alcuni tipi di telescopio (ad esempio il telescopio Schmidt) il problema è risolto usando un sensore curvo in modo da seguire la superficie di messa a fuoco.

Distorsioni geometriche. Si verificano quando un oggetto rettilineo, posto in una direzione che forma un angolo con l'asse ottico (non radiale), produce un'immagine non rettilinea; per effetto di questa distorsione (figura 21) un oggetto quadrato può produrre un'immagine in cui i lati della figura appaiono bombati verso l'esterno (distorsione "a barile") o incurvati verso l'interno (distorsione "a cuscino").

Aberrazione cromatica. L'effetto è dovuto al fenomeno chiamato *dispersione*, cioè al fatto che l'indice di rifrazione del vetro varia a seconda della lunghezza d'onda (cioè del colore) della luce; di conseguenza la lunghezza focale di una lente è diversa per raggi luminosi di colore differente. Poiché la luce proveniente da una sorgente luminosa è solitamente composta da una mescolanza di radiazioni di diversa lunghezza d'onda, non è possibile mettere a fuoco contemporaneamente tutti i colori; se, ad esempio, la distanza del sensore dall'obiettivo è tale da foca-

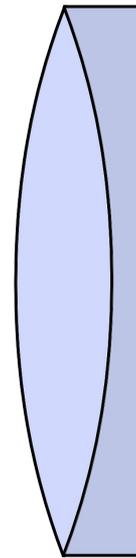


Figura 22: Un doppietto acromatico è costituito da una lente convergente di vetro Crown (a sinistra) accoppiata a una lente divergente di vetro Flint.

lizzare correttamente la luce verde, le radiazioni di altri colori produrranno circoli di confusione di ampiezza diversa; l'immagine di una sorgente puntiforme apparirà come un punto circondato da aloni concentrici colorati; aloni colorati compariranno anche lungo il bordo degli oggetti e lungo i confini tra regioni che hanno un forte contrasto di luminosità. L'aberrazione cromatica può essere corretta utilizzando sistemi di lenti realizzate con materiali (vetri) che hanno differenti proprietà di rifrazione e dispersione. Il metodo più semplice consiste nel costruire un sistema composto da una lente convergente di vetro comune (vetro *Crown*) e una lente debolmente divergente di un vetro con indice di rifrazione più elevato (vetro al piombo o *Flint*); le due lenti sono incollate assieme e si comportano come una singola lente convergente ma, se le curvature degli elementi sono studiate in modo opportuno, l'obiettivo risultante ha un'aberrazione cromatica molto minore di una lente singola. Questa combinazione viene chiamata *doppietto acromatico* (figura 22): la sua invenzione, verso la metà del XVIII secolo, ha costituito un importante progresso nella tecnica costruttiva dei telescopi rifrattori¹⁸.

È importante osservare che le aberrazioni sopra descritte non sono causate da difetti (bolle, crepe, inomogeneità) nel vetro usato per le lenti o da imprecisioni ed errori nella loro lavorazione, ma sono intrinseche nel modo in cui la rifrazione agisce attraverso superfici che hanno una data forma geometrica; esse sono riscontrabili anche nei modelli matematici esatti che descrivono il funzionamento delle lenti. Soprattutto le lenti delimitate da superfici sferiche sono affette da questi

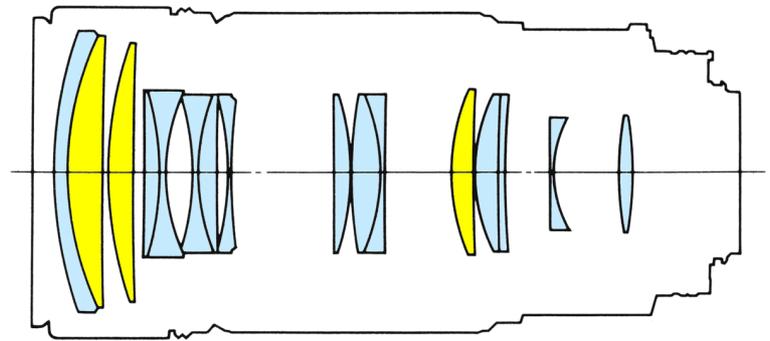


Figura 23: Lo schema ottico di un moderno obiettivo per macchina fotografica.

problemi (a partire dall'aberrazione sferica, che non a caso è stata chiamata con questo nome); le aberrazioni possono essere ridotte utilizzando *lenti asferiche*, cioè lenti il cui profilo si discosta in modo opportuno da quello di una sfera, oppure usando sistemi complessi costituiti da più elementi di forma e materiale differente, in cui alcune lenti agiscono come *lenti correttive* per le aberrazioni degli altri elementi (figura 23). Tuttavia i metodi di calcolo necessari per progettare, e i sistemi di lavorazione necessari per realizzare lenti asferiche o sistemi a più lenti sono piuttosto recenti: nel periodo iniziale di sviluppo dei telescopi (XVII-XVIII secolo) era possibile produrre solo lenti sferiche, e le aberrazioni costituivano una grave limitazione per le prestazioni dei sistemi ottici. Un modo con cui si cercava di limitare questi problemi era quello di realizzare telescopi con elevata lunghezza focale e/o piccoli rapporti focali (cioè con obiettivi di piccolo diametro in rapporto alla lunghezza focale): infatti in generale tutte le aberrazioni tendono a ridursi quando la lente è sottile e poco curva¹⁹. Un altro sistema utilizzato era quello di *diaframmare* il telescopio, cioè di porre davanti

18 Per l'esattezza un doppietto acromatico può essere progettato in modo da focalizzare alla stessa distanza le radiazioni di due sole lunghezze d'onda (colori) diverse; se però queste vengono scelte in modo opportuno, ad esempio agli estremi dello spettro visibile (rosso e blu), l'aberrazione cromatica residua (chiamata *secondaria*) risulta molto ridotta. Per eliminare anche l'aberrazione secondaria è necessario usare un obiettivo formato da più di due lenti; ad esempio un *tripletto* può focalizzare alla stessa distanza le radiazioni di tre colori diversi, che possono essere scelte agli estremi e al centro della banda visibile, rendendo trascurabile l'aberrazione cromatica residua (un obiettivo di questo tipo viene detto *apocromatico*).

19 Quando la curvatura della lente è molto piccola, la deflessione che essa produce sui raggi luminosi segue in modo approssimato tre regole (*approssimazione di lente sottile*) che trascurano qualsiasi forma di aberrazione:

1. un raggio luminoso che passa per il centro della lente non viene deviato;

al suo obiettivo un diaframma opaco a forma di corona circolare che lasciava passare la luce solo nella sua parte centrale, ottenendo una riduzione dell'apertura effettiva della lente (figura 24). Tuttavia neppure i metodi di progettazione più sofisticati del giorno d'oggi permettono di eliminare completamente e contemporaneamente tutte le forme di aberrazione: tutto quello che si può ottenere è una soluzione di compromesso (che a volte può essere ottima) in cui i vari difetti siano minimizzati e mantenuti a un livello accettabile per le applicazioni previste.

Un altro fenomeno che limita le prestazioni di un telescopio è la *diffrazione*; non si tratta propriamente di un'aberrazione, ma di un effetto legato alla natura ondulatoria della luce e al modo con cui le onde elettromagnetiche interagiscono con i bordi delle aperture attraverso cui passano, ad esempio con l'apertura dell'obiettivo del telescopio. A causa di questo effetto l'immagine di una sorgente puntiforme prodotta da un obiettivo circolare appare come un disco diffuso circondato da una serie di anelli concentrici alternativamente oscuri e luminosi (figura 25). La dimensione del disco centrale (chiamato *disco di Airy*) dipende dalla lunghezza d'onda della luce ed è inversamente proporzionale al diametro dell'obiettivo: ad esempio, nel caso di luce di colore giallo-verde, un obiettivo del diametro di un metro produce un disco di Airy del raggio di 0.14 secondi d'arco; se l'obiettivo fosse da 10 cm, il disco di Airy sarebbe di 1.4 secondi. La diffrazione costituisce un limite al potere di risoluzione di un telescopio che è invalicabile, perché non è legato alla tecnica costruttiva delle lenti o degli specchi ma è insito nelle leggi della fisica: se due sorgenti puntiformi sono sepa-



Figura 24: L'obiettivo del telescopio rifrattore da 9 cm di Dollond-Megele (1785), esposto nella galleria del Museo Astronomico di Brera, è dotato di un diaframma che può essere inserito o disinserto per mezzo di una cordicella; a seconda delle necessità dell'osservazione l'astronomo poteva decidere se privilegiare la luminosità (diaframma aperto) o il potere risolutivo dello strumento (diaframma chiuso).

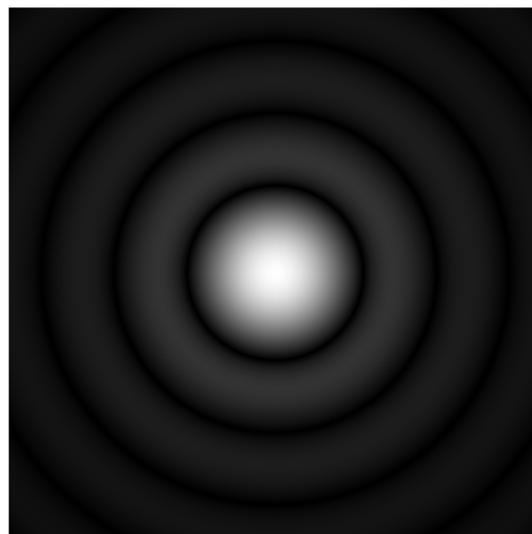


Figura 25: La figura di diffrazione prodotta da un obiettivo di forma circolare, con il disco di Airy (al centro) circondato da frange di interferenza concentriche.

2. un raggio luminoso che giunge alla lente in direzione parallela all'asse ottico viene deviato in modo da passare per il fuoco della lente;
3. un raggio luminoso che giunge alla lente provenendo dal fuoco viene deviato in modo da emergere in direzione parallela all'asse ottico.

Queste semplici regole sono sufficienti a determinare come un oggetto viene riprodotto dalla lente. Basta infatti individuare almeno due raggi luminosi, tra i tre sopra descritti, che si dipartono dall'oggetto: il punto in cui essi si intersecano è la posizione in cui si forma l'immagine; per questo punto passano quindi anche tutti gli altri raggi. È questo il metodo che è stato usato per tracciare molte delle figure che compaiono in questo testo, e in particolare le figure 6, 7, 10, 13, 14, 27 e 28 (ovviamente *non* per le figure 16 e 17, che illustrano forme di aberrazione di cui l'approssimazione di lente sottile non tiene conto).

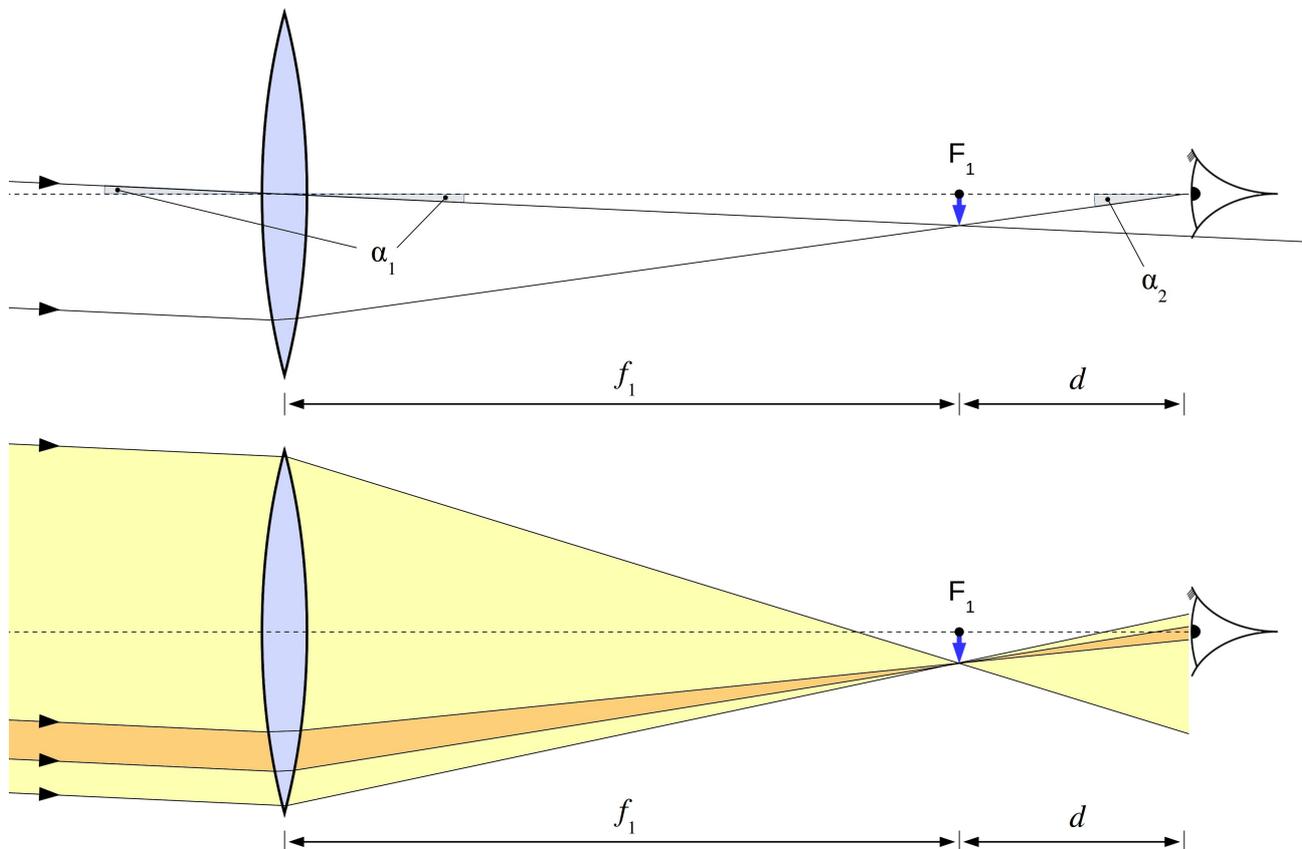


Figura 26: Osservazione di un oggetto lontano attraverso una singola lente convergente. (*In alto*) Il potere di ingrandimento della lente, cioè il rapporto tra le dimensioni angolari α_1 di un oggetto posto davanti all'obiettivo e le dimensioni angolari α_2 della sua immagine, è pari al rapporto tra la lunghezza focale f_1 dell'obiettivo e la distanza d dell'immagine dall'occhio (F_1 è il fuoco della lente). (*In basso*) Il piccolo diametro della pupilla umana limita la luminosità ottenibile da questa configurazione; anche usando una lente di grande diametro, solo una piccola parte del fascio luminoso (quella rappresentata in giallo più scuro) viene raccolta dall'occhio.

rate da una distanza angolare inferiore alla dimensione del disco di Airy, appariranno confuse in un'unica macchia luminosa. La diffrazione limita anche la capacità del telescopio di osservare le stelle più deboli, la cui luce viene ripartita su tutta l'area del disco di Airy: se il disco di Airy è troppo grande, la luminosità della stella, distribuita su una superficie troppo vasta, finisce per perdersi nella luminosità diffusa del fondo del cielo.

Il telescopio rifrattore

Abbiamo visto che una singola lente convergente può essere usata per proiettare l'immagine di un oggetto su uno schermo (o pellicola, o sensore digitale). L'immagine prodotta da un obiettivo può anche essere osservata direttamente, ponendo l'occhio a una distanza opportuna dalla lente, ma una combinazione ottica di questo tipo ha prestazioni piuttosto scarse. Infatti se l'occhio è posto davanti al fuoco della lente (posizione A della figura 10), il fascio di raggi luminosi che lo colpiscono è convergente, una condizione che nella visione normale non si verifica mai e che quindi l'occhio non è in grado di mettere a fuoco²⁰. Dietro al fuoco (posizione B della figura 10) il fascio luminoso deflesso dalla lente si comporta come un fascio divergente proveniente dal punto F, come se nel pia-

²⁰ Come abbiamo visto, la capacità di adattamento del cristallino permette all'occhio di focalizzare correttamente fasci paralleli o debolmente divergenti, provenienti da oggetti posti a una distanza compresa tra 20-25 cm e l'infinito.

no focale della lente ci fosse effettivamente un oggetto; quindi l'occhio è in grado di mettere a fuoco questa immagine solo se si trova a una distanza d uguale o maggiore di $d_{\min} = 20\text{-}25$ cm. Studiando la geometria di una tale configurazione (figura 26, in alto), si ricava che l'ingrandimento che se ne ottiene è pari al rapporto tra la distanza dell'immagine dalla lente (che, per un oggetto a distanza infinita, è uguale alla distanza focale f_1 della lente) e la distanza d tra immagine e occhio (che non può essere minore di d_{\min})²¹. L'ingrandimento massimo sarebbe quindi uguale a f_1/d_{\min} , che non è granché: una lente da un metro di focale usata in questo modo può fornire al massimo 4-5 ingrandimenti. Un altro inconveniente di questa disposizione è la sua bassa luminosità. La pupilla umana ha un diametro massimo²² di circa 8 mm, e quindi, alla distanza di 20 cm dal fuoco, intercetterebbe un fascio luminoso di ampiezza pari a circa 2 gradi: sarebbe inutile usare un obiettivo di grande diametro, potenzialmente più luminoso, perché la maggior parte della luce da esso raccolta cadrebbe fuori dall'occhio (figura 26, in basso).

Per superare entrambe queste limitazioni e ottenere uno “strumento per guardare lontano”, cioè un *telescopio*²³, è necessario trovare un mezzo che permetta all'occhio di “osservare più da vicino” l'immagine prodotta dall'obiettivo; ciò è possibile introducendo un secondo elemento ottico collimatore (*oculare*) che renda paralleli i raggi luminosi provenienti dall'obiettivo, risolvendo i problemi legati alle limitazioni delle capacità di messa a fuoco dell'occhio. Un modo per ottenere questo effetto è quello di interporre nel fascio di raggi luminosi provenienti dall'obiettivo, prima che questi convergano nel *fuoco primario* del telescopio (cioè nel fuoco posteriore dell'obiettivo) una lente *divergente*; perché il fascio di raggi uscenti dall'oculare risulti parallelo, è necessario regolare la distanza tra oculare e obiettivo in modo che il fuoco posteriore dell'oculare coincida con il fuoco primario (figura 27). Uno strumento fatto in questo modo viene chiamato *cannocchiale* (o *telescopio*) *galileiano*, perché questa era la configurazione del cannocchiale che Galilei ha perfezionato²⁴ e utilizzato per le sue osservazioni astronomiche.

Un modo alternativo per ottenere lo stesso effetto è quello di usare come oculare una seconda lente *convergente*, ma posta dietro il fuoco primario, cioè in un punto in cui i raggi luminosi provenienti dall'obiettivo, dopo essersi incrociati, iniziano a divergere nuovamente; in questo caso l'oculare deve essere posizionato in modo che il suo fuoco anteriore coincida con il fuoco primario (figura 28). Questo tipo di telescopio viene detto *kepleriano* perché fu descritto e studiato (e forse anche inventato) da Johannes Kepler, lo scopritore delle famose tre leggi che regolano il moto orbitale dei pianeti.

In entrambi i casi l'ingrandimento che il telescopio produce, cioè il rapporto tra l'angolo α_1 con cui i raggi luminosi arrivano all'obiettivo e l'angolo α_2 con cui emergono dall'oculare, è uguale al rapporto tra la lunghezza focale dell'obiettivo f_1 e quella dell'oculare f_2 , cioè è tanto maggiore quanto più *lunga* la focale dell'obiettivo e quanto più *corta* è la focale dell'oculare. Intuitivamente il fun-

21 Più precisamente dalla figura 26 si ottiene la relazione $\tan \alpha_2 / \tan \alpha_1 = f_1 / d$; per piccoli angoli α_1 e α_2 i valori delle tangenti coincidono con le misure degli angoli espresse in radianti, e quindi si può approssimare $\alpha_2 / \alpha_1 \simeq f_1 / d$.

22 Il diametro della pupilla varia da un minimo di 1.5 mm, in condizione di luce intensa, fino a 8 mm, al buio.

23 Il termine *telescopio* è composto dai vocaboli greci τῆλε (pron. *tele*), “lontano”, e σκοπέω (*skopéo*), “guardare, osservare”; pare sia stato coniato da Giovanni Demisiani, un letterato che faceva parte dell'Accademia dei Lincei, in una riunione in cui Galileo Galilei aveva presentato il nuovo strumento nel marzo del 1611. Il telescopio rifrattore viene anche indicato con il termine *cannocchiale* (“cannone occhiale”, cioè tubo dotato di lenti). Ai tempi di Galilei i due vocaboli erano sinonimi; oggi il termine *cannocchiale* si applica prevalentemente a strumenti per uso terrestre, e *telescopio* a strumenti per osservazioni astronomiche. Il termine *telescopio* viene anche usato per indicare strumenti riflettori, che sarebbe invece scorretto chiamare cannocchiali, in quanto non provvisti di “occhiali” ma di specchi.

24 Il telescopio “galileiano” è stato inventato in modo indipendente da diversi fabbricanti di occhiali olandesi, nella seconda metà del 1608. Galilei, in una lettera del 29 agosto 1609 al cognato Benedetto Landucci, dice di aver appreso la notizia di questa scoperta, proveniente dalle Fiandre, mentre si trovava a Venezia, e di aver trovato il modo di riprodurla e perfezionarla.

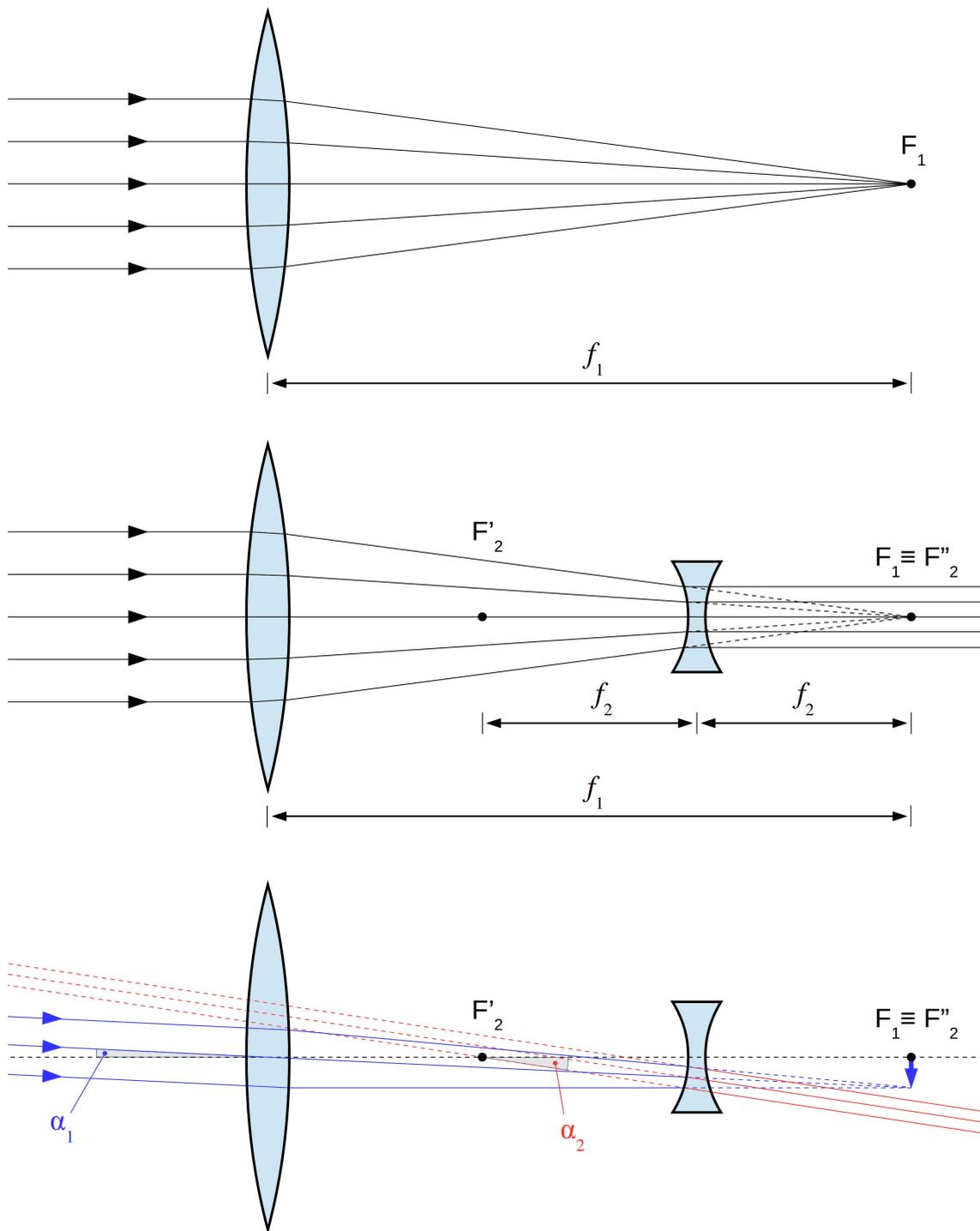


Figura 27: Funzionamento del rifrattore galileiano. (In alto) L'obiettivo è una lente convergente che focalizza i raggi provenienti da una sorgente luminosa a distanza infinita nel fuoco primario F_1 . (Al centro) Aggiungendo prima del fuoco primario una lente divergente come oculare, i raggi luminosi vengono collimati in un fascio parallelo; perché ciò avvenga è necessario posizionare la lente divergente in modo che il suo fuoco posteriore F''_2 coincida con il fuoco primario F_1 . (In basso) Formazione dell'immagine di un punto fuori dall'asse ottico (i raggi luminosi arrivano all'obiettivo con una inclinazione α_1). I raggi in colore blu sono quelli prodotti dall'obiettivo; la parte tratteggiata è quella che si avrebbe se non esistesse l'oculare, con formazione dell'immagine capovolta nel fuoco F_1 (piccola freccia blu). I raggi di colore rosso alla destra della lente divergente sono quelli deviati dall'oculare, che formano un angolo α_2 rispetto all'asse ottico; il loro prolungamento tratteggiato a sinistra della lente mostra la direzione apparente da cui sembrano provenire. Il rapporto tra l'angolo α_2 del fascio emergente dall'oculare e l'angolo α_1 del fascio incidente sull'obiettivo è uguale all'ingrandimento fornito dal telescopio, ed è pari al rapporto tra la lunghezza focale dell'obiettivo f_1 e quella dell'oculare f_2 .

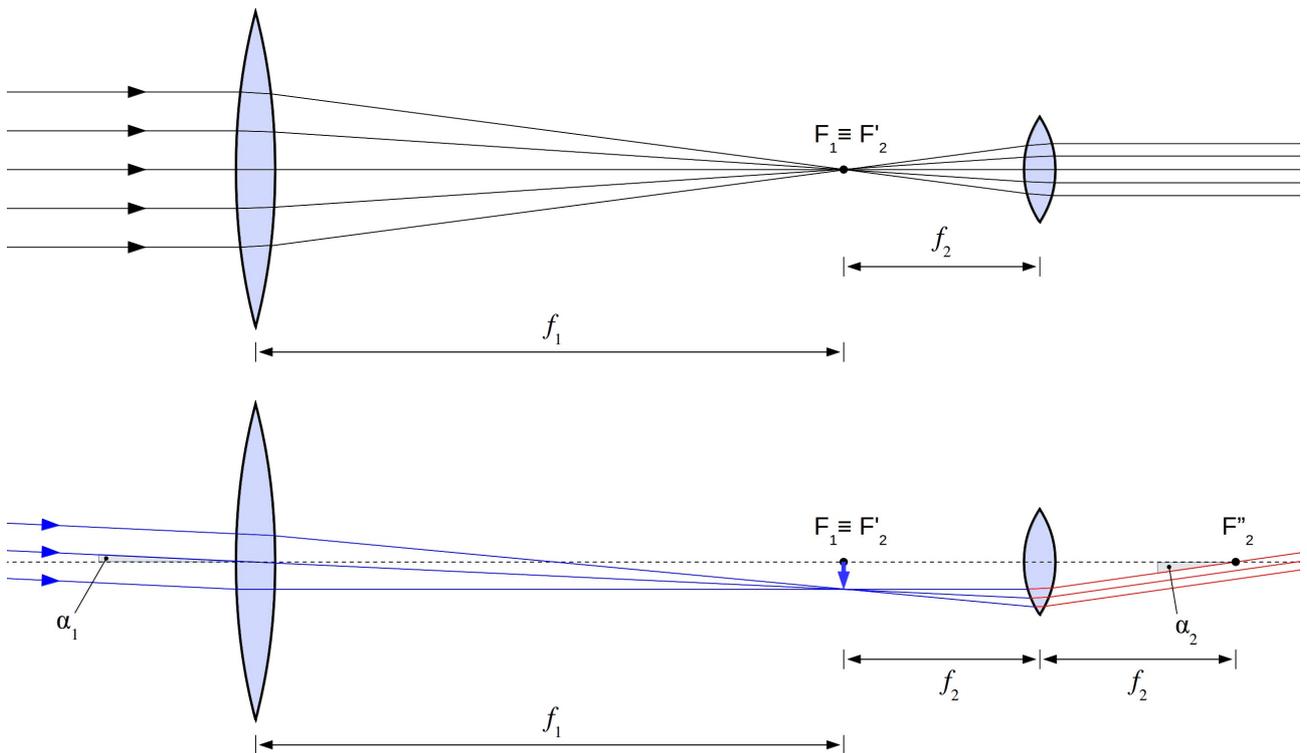


Figura 28: Funzionamento del rifrattore kepleriano. (*In alto*) L'oculare è costituito da una lente convergente posizionata dietro il fuoco primario F_1 , in modo che il suo fuoco anteriore F'_2 coincida con F_1 ; in questo modo il fascio uscente dall'oculare risulta collimato. (*In basso*) Formazione dell'immagine di un punto fuori dall'asse ottico: i raggi luminosi arrivano all'obiettivo con inclinazione α_1 ed emergono dall'oculare inclinazione α_2 rispetto all'asse ottico. Anche in questo caso l'ingrandimento prodotto dallo strumento (il rapporto tra α_1 ed α_2) è uguale al rapporto tra la lunghezza focale dell'obiettivo f_1 e quella dell'oculare f_2 .



Figura 29: Il corredo di oculari del telescopio Merz-Repsold da 49 cm dell'Osservatorio Astronomico di Brera (il telescopio è attualmente esposto nel Museo della Scienza e della Tecnologia *Leonardo da Vinci* di Milano).

zionamento del telescopio kepleriano può essere spiegato in questo modo: come abbiamo visto, l'obiettivo produce sul piano focale un'immagine dell'oggetto che è tanto più grande quanto maggiore è la lunghezza focale della lente, cioè che ha dimensione proporzionale a f_1 . Questa immagine viene osservata attraverso l'oculare che funziona come una lente di ingrandimento, restituendo un'immagine tanto più ingrandita quanto più corta è la focale della lente, cioè avente dimensione proporzionale a $1/f_2$. Perciò l'ingrandimento complessivo del telescopio deve essere proporzionale al prodotto tra i due ingrandimenti parziali, cioè a f_1/f_2 . Alla stessa conclusione si giunge con un ragionamento alternativo: abbiamo già visto (figura 26) che l'ingrandimento prodotto da un obiettivo usato senza oculare è pari al rapporto f_1/d tra la distanza focale dell'obiettivo f_1 e la distanza d tra fuoco primario e occhio. Abbiamo anche visto che una lente di ingrandimento permette di vedere un oggetto con le stesse dimensioni che esso avrebbe se osservato da una distanza pari alla sua lunghezza focale f_2 . Quindi aggiungendo all'obiettivo una lente di ingrandimento (oculare), si ottiene un sistema che fornisce un ingrandimento pari a f_1/d , dove $d = f_2$, cioè appunto f_1/f_2 . L'obiettivo da un metro di focale dell'esempio precedente, se usato con un oculare con focale di 1 cm fornirebbe 100 ingrandimenti.

Ricavare il fattore di ingrandimento per un telescopio galileiano è un po' meno intuitivo: la situazione è più complessa perché l'obiettivo non forma un'immagine *reale* (proiettabile su uno schermo) ma un'immagine visibile solo attraverso la lente, come quella che si vede attraverso uno specchio (in ottica questo tipo di immagine si chiama *virtuale*). Tuttavia si può dimostrare che anche in questo caso vale la stessa relazione: l'ingrandimento prodotto dallo strumento è pari al rapporto tra le lunghezze focali dell'obiettivo e dell'oculare f_1/f_2 .

L'obiettivo e l'oculare del telescopio devono essere montati su una struttura che li mantenga nella posizione corretta, cioè alla giusta distanza reciproca e con gli assi ottici allineati. Quasi sempre questa struttura è costituita da un tubo rigido e opaco, che ha anche la funzione di schermare l'oculare da luci parassite laterali (l'oculare cioè deve essere illuminato solo dai raggi provenienti dall'obiettivo). Per poter ottenere differenti rapporti di ingrandimento, il telescopio è solitamente dotato di oculari intercambiabili di diverse lunghezze focali (figura 29). Poiché la lunghezza focale degli oculari è molto inferiore a quella dell'obiettivo, la lunghezza del tubo è approssimativamente uguale alla focale dell'obiettivo; tuttavia il sistema di fuoco del telescopio (figura 12) deve essere capace di un'escursione sufficiente per poter posizionare alla corretta distanza dall'obiettivo i diversi oculari, ed eventualmente tutti gli altri dispositivi che si potrebbe voler utilizzare (micrometri, spettroscopi, lastre fotografiche o sensori digitali, ecc.).

A differenza del cannocchiale galileiano, il telescopio kepleriano produce un'immagine rovescia-

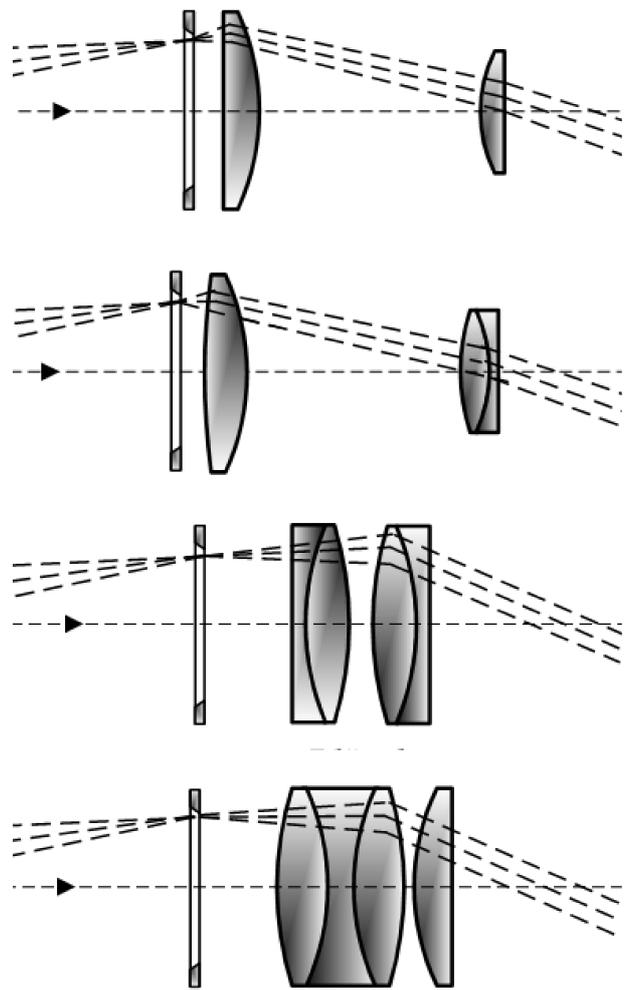


Figura 30: Alcuni dei molteplici schemi ottici usati per gli oculari dei telescopi. Dall'alto: oculare di Ramsden, di Kellner, di Plössl e ortoscopico di Abbe.

ta; nei casi in cui ciò costituisca un problema (ad esempio nelle osservazioni terrestri) è possibile raddrizzare l'immagine inserendo una terza lente tra obiettivo e oculare. Tuttavia il campo di vista di un cannocchiale galileiano è molto più ristretto di quello di un kepleriano di pari ingrandimenti. Inoltre, se nel telescopio kepleriano si inserisce un oggetto nel piano focale dell'obiettivo, questo risulterà a fuoco nella visione all'oculare *contemporaneamente* all'immagine fornita dall'obiettivo; è perciò possibile dotare il telescopio di reticoli di puntamento o di misura o di micrometri filari, possibilità che non esiste nel cannocchiale galileiano. Per questi motivi il cannocchiale galileiano è stato presto abbandonato: a partire dalla metà del Seicento praticamente tutti i rifrattori per uso astronomico sono di tipo kepleriano, e la configurazione galileiana viene oggi utilizzata solo raramente e per strumenti di prestazioni limitate (ad esempio in alcuni binocoli da teatro).

A partire dalla sua invenzione, il telescopio rifrattore è stato sottoposto a una serie di miglioramenti. Per ridurre l'aberrazione cromatica, gli obiettivi costituiti da una lente singola sono stati sostituiti da doppietti o triplette acromatiche. Anche gli oculari semplici sono stati sostituiti da sistemi più complessi in cui gruppi di lenti disposte in modo opportuno riescono a ridurre le aberrazioni dell'obiettivo e a restituire campi più o meno ampi esenti da distorsioni; esiste oggi la possibilità di scegliere tra una gamma di oculari progettati in modo diverso, ciascuno dei quali risulta più o meno adatto a impieghi particolari in base all'ampiezza del campo, alla luminosità o alla focale del telescopio (figura 30).

La riflessione

Le leggi fisiche a cui obbedisce il fenomeno della riflessione sono molto più semplici di quelle della rifrazione: l'angolo che il raggio incidente forma con la normale alla superficie è uguale all'angolo del raggio riflesso (figura 31). Tutte le sostanze che riflettono la luce totalmente (vetri argentati, metalli levigati) o parzialmente (lastre di vetro, superficie dell'acqua) si comportano nello stesso modo: nella riflessione non esiste nulla di paragonabile all'indice di rifrazione. Un'altra differenza rispetto alla rifrazione è che la riflessione avviene nello stesso modo per radiazioni di tutte le lunghezze d'onda (per luce di tutti i colori): nella riflessione cioè non si genera dispersione. Specchi concavi e convessi si comportano come elementi ottici convergenti o divergenti, in modo simile alle lenti (figura 32). In particolare, uno specchio concavo può essere usato, in modo simile a una lente convessa, come obiettivo di un telescopio, con l'ovvia differenza che, mentre la lente focalizza i raggi luminosi "all'indietro" (cioè crea l'immagine dalla parte opposta della lente rispetto alla direzione da cui arriva la luce), lo specchio li focalizza "in avanti". Gli specchi concavi e convessi sono anche soggetti a forme di aberrazione analoghe a quelle delle lenti, con l'eccezione dell'aberrazione cromatica, che negli specchi non esiste. In particolare, uno specchio convergente di forma sferica soffre dell'omonima forma di aberrazione; anche negli specchi è possibile ridurre le aberrazioni utilizzando superfici asferiche o sistemi composti, senza riuscire mai a eliminare contemporaneamente tutte le forme di aberrazione²⁵.

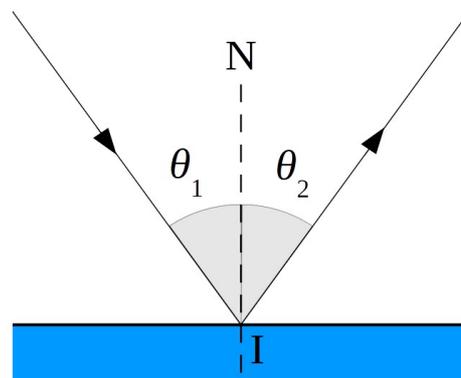


Figura 31: Geometria della riflessione: l'angolo di incidenza θ_1 (l'angolo tra la direzione del raggio incidente e la normale alla superficie dello specchio) è uguale all'angolo di riflessione θ_2 .

25 Ad esempio si può eliminare l'aberrazione sferica usando uno specchio di forma parabolica, che però è soggetto alle aberrazioni extra-assiali (coma e astigmatismo).

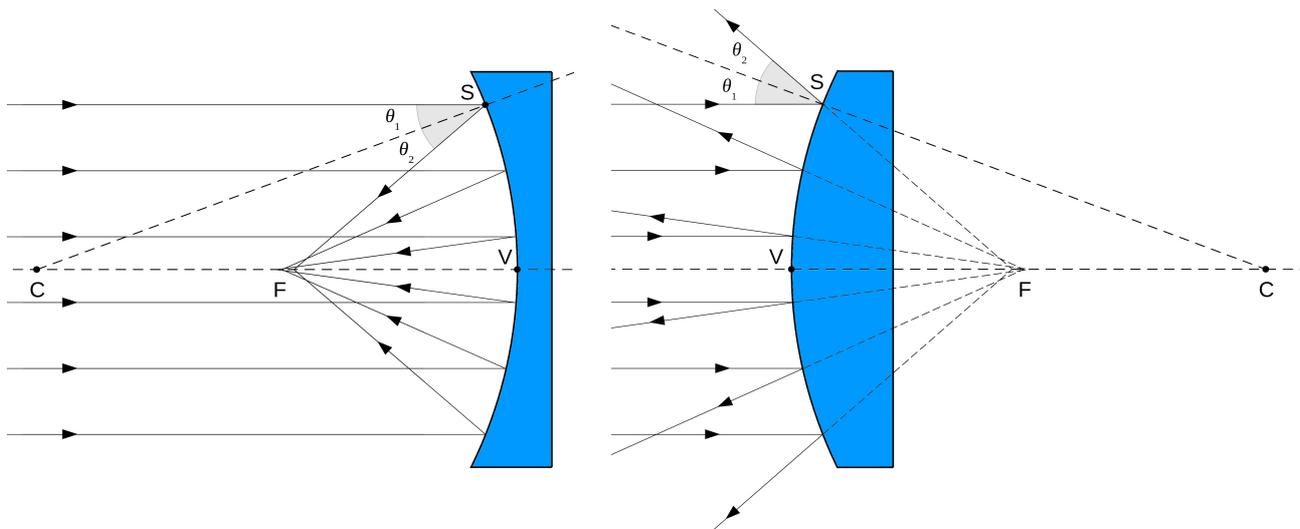


Figura 32: Funzionamento di uno specchio concavo convergente (a sinistra) e convesso divergente (a destra): i raggi luminosi paralleli provenienti da una sorgente a distanza infinita, riflessi secondo la legge $\theta_1 = \theta_2$, sono deviati in un fascio convergente in modo da essere concentrati approssimativamente nel fuoco F dello specchio concavo, o riflessi in un fascio divergente che sembra irradiarsi dal fuoco F dello specchio convesso. In entrambi i casi se le superfici degli specchi hanno forma sferica la convergenza o divergenza non è perfetta: anche lo specchio sferico è affetto dall'aberrazione omonima. In entrambi i casi la normale alla superficie dello specchio nel punto di riflessione S è la retta passante per S e per il centro di curvatura C dello specchio, e i raggi di un fascio parallelo vengono fatti convergere in un fuoco F che è a metà distanza tra C e il vertice V dello specchio; in altre parole la distanza focale è uguale alla metà del raggio di curvatura.

Il telescopio riflettore

A differenza del telescopio rifrattore, il telescopio riflettore utilizza come obiettivo uno specchio convergente: l'immagine che questo produce viene poi ingrandita per mezzo di un oculare costituito da una o più lenti, come nel caso del rifrattore. Teoricamente anche nel caso di un riflettore è possibile utilizzare sia oculari divergenti (di tipo galileiano), sia oculari convergenti (di tipo kepleriano). In pratica però tutti i riflettori per uso astronomico che storicamente sono stati costruiti hanno oculari convergenti, forse perché il telescopio riflettore è stato sviluppato diversi anni dopo il rifrattore, quando ormai gli astronomi si erano convinti della superiorità dello schema kepleriano sul galileiano.

Il fatto che l'immagine primaria si formi nel fuoco davanti allo specchio (punto F nella figura 32 a sinistra) pone un problema di configurazione ottica, perché qualsiasi dispositivo usato per l'osservazione, messo in quella posizione, inevitabilmente interferisce con il fascio luminoso che deve raggiungere lo specchio primario²⁶. Le dimensioni di un portapellicola, di un portastre o di un sensore digitale sono tali da non sottrarre una frazione troppo grande del fascio luminoso, quindi sono spesso utilizzati al fuoco primario dei riflettori, soprattutto in strumenti di diametro abbastanza grande (figura 33A). Il caso di un oculare per la visione diretta è molto più problematico, perché bisogna tener conto dell'ostruzione prodotta non solo dall'oculare e dal relativo sistema di fuoco, ma anche dalla testa e dal corpo dell'osservatore che dovrebbero usarli. A quanto ci risulta, nella

²⁶ Non bisogna cadere nell'errore di pensare che una simile ostruzione abbia l'effetto di occultare una parte (la parte centrale) del campo di vista del telescopio: infatti, poiché il fascio luminoso proveniente da una sorgente lontana è parallelo, anche se una parte dei raggi vengono fermati dall'ostruzione, i raggi rimanenti che provengono dallo stesso oggetto vengono focalizzati nello stesso punto del piano focale in cui sarebbero focalizzati quelli schermati. Quindi l'ostruzione non provoca la perdita di una zona dell'immagine, ma una diminuzione della luminosità pressoché uniforme su tutta l'immagine. Per occultare una zona del campo di vista occorrerebbe porre un diaframma sul piano focale del telescopio e non sul fascio luminoso non focalizzato che illumina lo specchio primario.

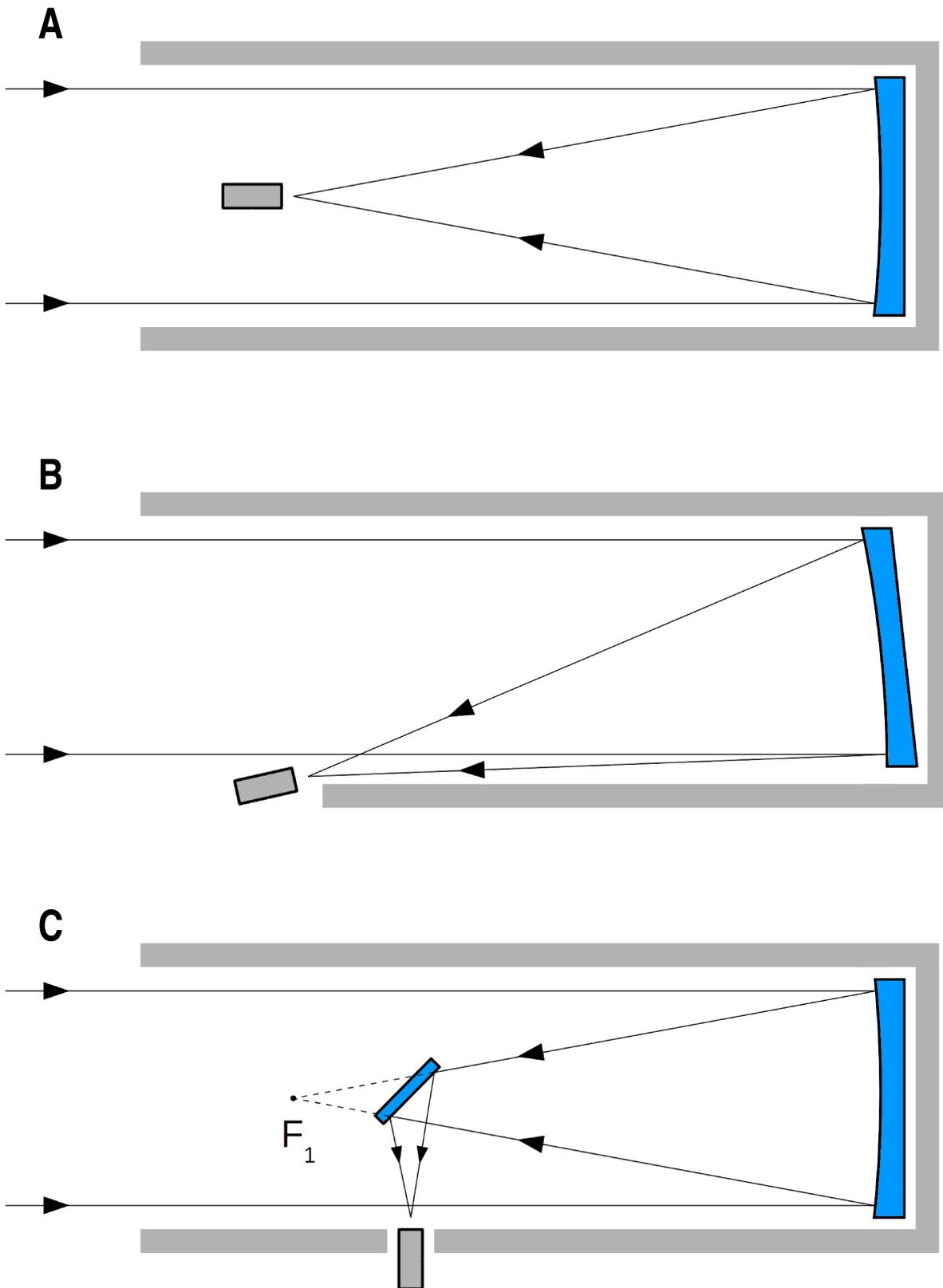


Figura 33 (prima parte): Le più comuni configurazioni ottiche dei telescopi riflettori: riflettore con sensore al fuoco primario (A), riflettore herscheliano (B) e riflettore newtoniano (C). In quest'ultimo caso le linee tratteggiate indicano quale sarebbe il percorso dei raggi luminosi in assenza dello specchio secondario, e la corrispondente posizione F_1 del fuoco primario.

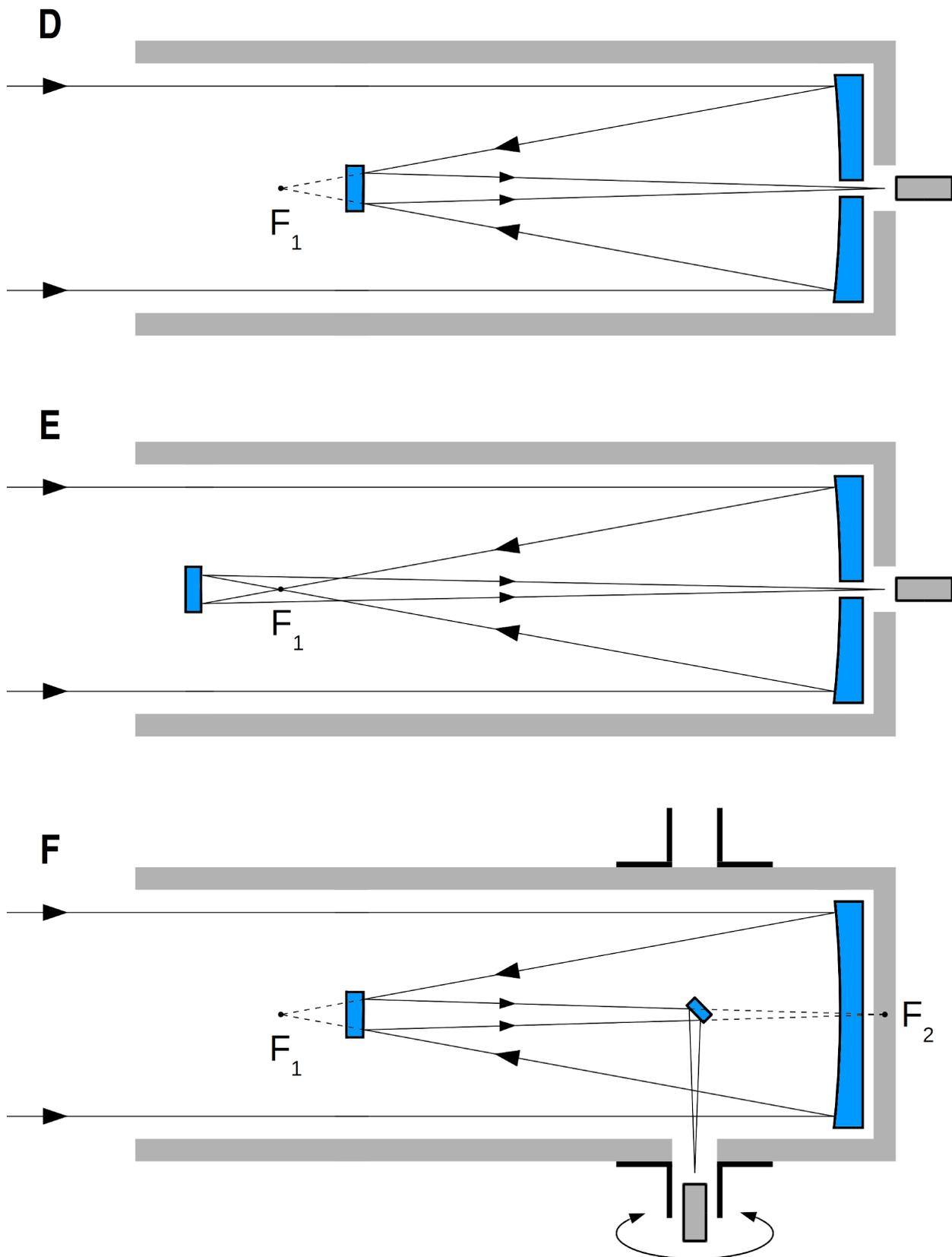


Figura 33 (seconda parte): Le più comuni configurazioni ottiche dei telescopi riflettori: riflettore Cassegrain (D), riflettore gregoriano (E) e riflettore Nasmyth (F). Anche qui le linee tratteggiate indicano quale sarebbe il percorso dei raggi luminosi in assenza degli specchi secondari e terziari, e la posizione F_1 ed F_2 dei fuochi primario e secondario.

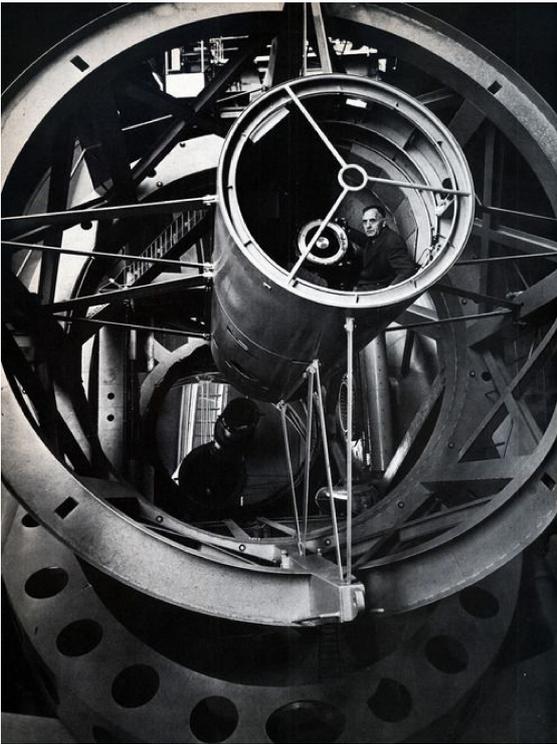


Figura 34: Edwin Hubble all'interno della cabina di osservazione al fuoco primario del telescopio di 5 m di Monte Palomar.

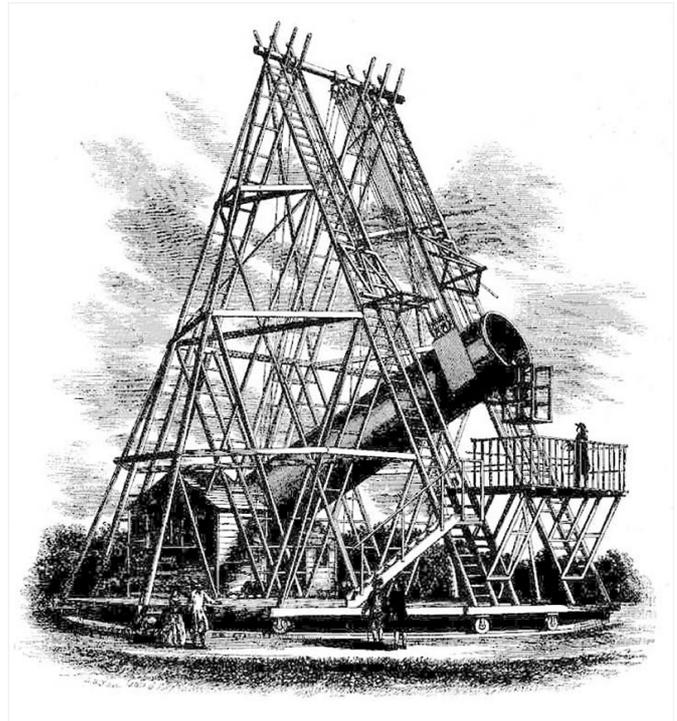


Figura 35: Il telescopio riflettore da 120 cm di diametro e 12 m di focale costruito da Wilhelm Herschel nel 1789; sotto l'estremità superiore del tubo è visibile la gabbia che permetteva all'astronomo di accedere al fuoco "herscheliano".

storia dell'astronomia c'è stato un solo caso di telescopio attrezzato per l'osservazione visuale diretta al fuoco primario, ed è il telescopio *Hale* di 5 m di diametro dell'Osservatorio di Monte Palomar (figura 34), entrato in funzione nel 1949.

Una soluzione poco differente era però già stata adottata da Wilhelm Herschel, che verso la fine del XVIII secolo costruì due grandi telescopi riflettori che avevano lo specchio principale leggermente inclinato rispetto all'asse del tubo, in modo che l'oculare potesse essere posizionato di fianco all'apertura superiore (figura 33B); l'astronomo poteva usare lo strumento sporgendosi leggermente sull'imboccatura del tubo (figura 35). Una simile configurazione aveva una ragione d'essere in un'epoca in cui gli specchi avevano una bassa riflettività e si ossidavano velocemente, e quindi ogni specchio aggiuntivo avrebbe diminuito la luminosità dello strumento, ma aveva il difetto di far lavorare lo specchio principale costantemente fuori dall'asse ottico, e quindi di aumentare l'entità delle aberrazioni extra-assiali (coma e astigmatismo).

In genere si preferisce aggiungere lungo l'asse ottico dello specchio principale uno *specchio secondario*.

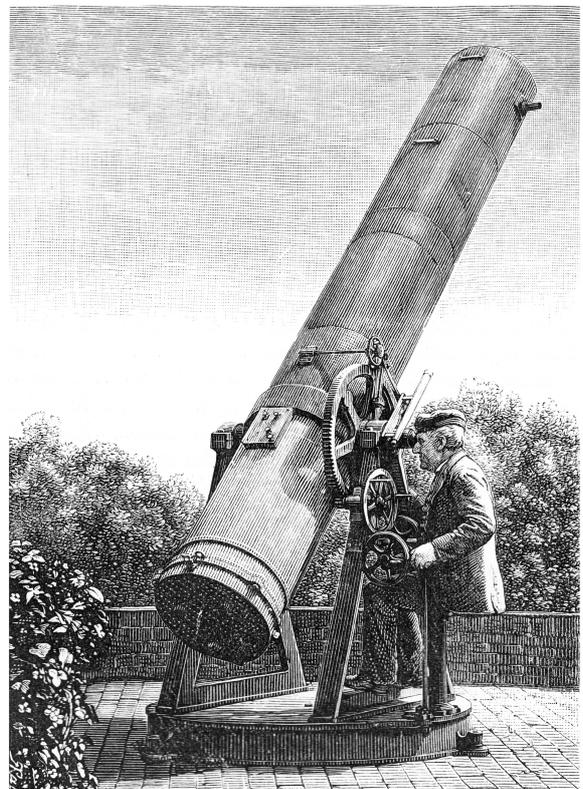


Figura 36: Il telescopio riflettore da 50 cm di diametro costruito da James Nasmyth.



Figura 37: Il fuoco *coudé* è completamente indipendente dai movimenti del telescopio e spesso ha la struttura di un vero e proprio laboratorio di ottica, in cui possono essere utilizzati strumenti molto complessi (nella foto, il *Coudé Echelle Spectrometer* installato al telescopio da 3.6 m dell'*European Southern Observatory* a La Silla, Cile).

rio che defletta i raggi luminosi e porti il fuoco in una posizione più conveniente. Nel *telescopio newtoniano*²⁷ si usa uno specchio piano inclinato di 45° rispetto all'asse ottico, che deflette il fascio luminoso ad angolo retto, portando il fuoco fuori dal tubo del telescopio (figura 33C); l'oculare viene quindi posizionato sul fianco del tubo stesso. In altre configurazioni lo specchio secondario è ortogonale all'asse ottico e riflette la luce all'indietro verso il primario; questo ha un foro al centro in cui viene inserito l'oculare. La più usata tra le configurazioni di questo tipo è la configurazione *Cassegrain*²⁸, in cui lo specchio principale è parabolico mentre il secondario è divergente e ha profilo iperbolico (figura 33D). Il telescopio Cassegrain è privo di aberrazione sferica; la diminuzione della convergenza del fascio luminoso prodotta dallo specchio secondario divergente aumenta la lunghezza focale effettiva del telescopio, che a parità di dimensioni produce un fattore di ingrandimento superiore rispetto a un telescopio newtoniano; inoltre il fatto che il fuoco sia posto dietro lo specchio principale e non in prossimità della parte superiore del tubo rende molto più agevole l'osservazione visuale diretta. Un altro schema ottico di questo tipo è il *telescopio gregoriano*²⁹, che usa anch'esso uno specchio primario parabolico, mentre il secondario è convergente a profilo ellittico, ed è posto dietro al fuoco primario (figura 33E). Due varianti del telescopio Cassegrain sono la configurazione

27 Il primo telescopio di questo tipo fu costruito da Isaac Newton nel 1668.

28 L'idea di questo tipo di telescopio è stata presentata in un articolo su una rivista scientifica francese del 1672, firmato da un tal Cassegrain che non è altrimenti noto (anche il suo nome di battesimo è incerto). Il telescopio Cassegrain non ebbe inizialmente alcun seguito, sia perché l'idea fu aspramente criticata da scienziati autorevoli come Newton e Huygens, sia anche perché all'epoca la costruzione di specchi iperbolici era estremamente difficile. Solo dopo molti decenni gli astronomi impararono ad apprezzarne le caratteristiche, tanto che al giorno d'oggi questa è una delle configurazioni più usate per i telescopi riflettori.

29 Proposto dall'astronomo scozzese James Gregory nell'opera *Optica Promota* del 1663; il primo esemplare fu costruito dal fisico Robert Hooke nel 1673. Lo schema gregoriano ebbe immediato successo ma oggi è utilizzato molto più raramente del Cassegrain.

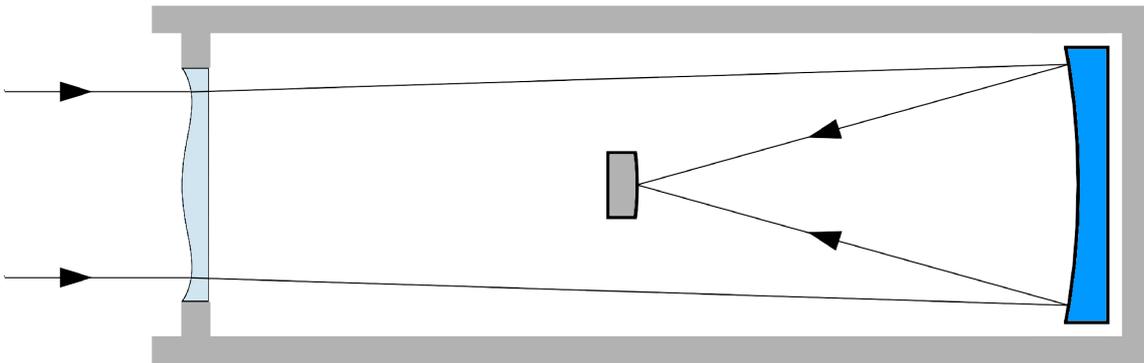


Figura 38: Schema ottico di una camera Schmidt: il sostegno della pellicola (o il sensore digitale) è curvo ed è posto sul fuoco primario al centro del tubo. Poiché la lastra correttiva si comporta ai bordi come una lente divergente, solitamente il diametro dello specchio primario è più grande di quello della lente.

*Nasmyth*³⁰ (figura 33F), che ha un terzo specchio piano, posto dietro il secondario iperbolico, che devia il fascio luminoso all'interno dell'asse attorno a cui ruota il tubo del telescopio (figura 36); e la configurazione *coudé* che, per mezzo di un quarto specchio, fa passare i raggi luminosi anche attraverso il secondo asse del telescopio e quindi porta il fuoco in un punto che rimane immobile comunque il telescopio venga orientato. Queste due configurazioni forniscono lunghezze focali equivalenti ancora maggiori rispetto al Cassegrain tradizionale e sono usate per osservazioni che richiedono forti ingrandimenti e non hanno bisogno di ampi campi di vista; la configurazione *coudé* è spesso utilizzata per strumenti ingombranti e di peso elevato (come gli spettrografi), che comprometterebbero l'equilibrio e le capacità di movimento del telescopio se fossero applicati direttamente al tubo (figura 37).

I grandi telescopi del giorno d'oggi sono solitamente dotati di più fuochi, con specchi secondari mobili che possono essere inseriti e disinseriti in modo da passare rapidamente da una configurazione all'altra, a seconda delle esigenze dell'osservazione in corso. Nel paragonare le diverse configurazioni bisogna tener presente che il potere di ingrandimento non è l'unico parametro da considerare, e a volte un elevato rapporto di ingrandimento non è neppure desiderabile perché, a parità di altre condizioni, implica un campo di vista più ristretto e una minore luminosità. In generale è più semplice ottenere telescopi di grande diametro e di rapporto focale moderato (e quindi dotati di maggior luminosità e ampiezza di campo) usando uno specchio piuttosto che una lente³¹, e questo è uno dei motivi che ha determinato il prevalere dei riflettori sui rifrattori a partire dall'inizio del XX secolo, in un periodo cioè in cui l'astronomia stava passando da un interesse prevalente verso oggetti piccoli e luminosi (stelle doppie, superfici planetarie) a oggetti diffusi e deboli (nebulose, galassie). In questo stesso periodo l'introduzione delle tecniche fotografiche in astronomia ha fatto sorgere la necessità di strumenti a grande campo, che permettessero lo studio degli oggetti celesti non singolarmente ma in modo collettivo e statistico, attraverso la realizzazione di estesi cataloghi³². Uno strumento che

30 Ideata dall'ingegnere scozzese James Nasmyth (1808-1890) con lo scopo di avere un telescopio il cui oculare fosse in una posizione facilmente accessibile all'osservatore.

31 Per evitare deformazioni, all'aumentare del diametro sia le lenti che gli specchi devono avere anche uno spessore maggiore, e quindi un peso più elevato: ciò costituisce un problema maggiore per le lenti, che possono essere sostenute solo lungo i bordi, che per gli specchi, che possono avere sistemi di appoggio su tutta la superficie posteriore. Inoltre lenti di grande spessore assorbono una notevole percentuale della luce che le attraversa. Di fatto nessuno ha mai tentato di costruire un rifrattore più grande di quello da 102 cm installato nel 1897 all'Osservatorio di Yerkes, mentre esistono diversi riflettori con obiettivi del diametro di 8-12 metri.

32 Ad esempio il *Palomar Sky Survey* è un catalogo fotografico di tutta la volta celeste visibile dalla latitudine dell'Osservatorio di Monte Palomar; comprende quasi duemila lastre fotografiche, realizzate tra il 1948 e il 1958

soddisfa queste esigenze è la *camera Schmidt*, un telescopio per uso prevalentemente fotografico ideato dall'astronomo Bernhard Schmidt nel 1930. Questo telescopio fa uso di uno specchio primario di forma sferica, relativamente semplice da costruire ma, come abbiamo visto, soggetto a diverse forme di aberrazione, soprattutto quando usato con rapporti focali piccoli per avere grandi campi. Nella camera Schmidt l'aberrazione sferica, la coma e l'astigmatismo sono però fortemente ridotti per mezzo di una *lastra correttrice*, una grossa lente di forma particolare (convessa al centro e concava ai bordi) che è posta davanti allo specchio (figura 38): il telescopio Schmidt è quindi un ibrido tra un riflettore e un rifrattore. La lastra correttrice non elimina la curvatura di campo, quindi solitamente lo strumento è dotato di un supporto arrotondato su cui viene fissata la pellicola, per mezzo di ganci o di una pompa a vuoto, in modo da deformarla e farle seguire la superficie curva del fuoco primario dello specchio; nel caso, oggi più comune, in cui si usi un sensore digitale, anche esso deve avere una superficie curva (figura 39). Le camere Schmidt hanno un campo di vista che può raggiungere i 10 gradi.

Lo schema originale di Bernhard Schmidt è stato sottoposto a varie modifiche, al fine di migliorarne le prestazioni e ottenere strumenti a campo ancora più ampio. Tra questi citiamo la camera di Baker-Nunn (figura 40), che utilizza tre lenti correttrici asferiche; è stata ideata per campagne osservative che richiedono la sorveglianza di vaste aree di cielo, sia in campo geodetico e militare (osservazione di satelliti artificiali) che astronomico (sciame meteorici).

Riferimenti bibliografici

Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands, *La Fisica di Feynman. Volume 1 – Meccanica, radiazioni, calore*, seconda edizione, Zanichelli, Bologna (2007)

Michael Hoskin, *Storia dell'astronomia di Cambridge*, Biblioteca Universale Rizzoli, Milano

con una camera Schmidt da 122 cm di diametro.



Figura 39: Il satellite *Kepler*, dedicato alla ricerca di pianeti extrasolari, è equipaggiato con una camera Schmidt da 140 cm di diametro; al fuoco primario del telescopio è posto un sensore (nella foto) formato da un mosaico di 42 rilevatori digitali (CCD) disposti su una superficie curva.



Figura 40: Una delle camere Baker-Nunn usate dallo Smithsonian Astrophysical Observatory per l'osservazione di satelliti artificiali durante l'Anno Geofisico Internazionale (1957-58); ha un rapporto focale di $f/1$ e un campo di vista di 30 gradi.

(2001)

Milton Katz, *Introduction to Geometrical Optics*, World Scientific Publishing, Singapore (2002)

Henry C. King, *The History of the Telescope*, Dover Publications, New York (2014; prima edizione 1955)

Vladimir Sacek, *Optical system of a telescope* (consultato nel gennaio 2018)

Fonti delle figure:

- (1) http://2.bp.blogspot.com/_8qsNtrP4oYs/TQekw_dIs8I/AAAAAAAAAGg/HnM6nznrHwU/s1600/retinal-image30.jpg
- (19) <http://www.faculty.virginia.edu/ASTR5110/lectures/optics2/optics2.html>
- (23) <http://www.kenrockwell.com/nikon/images1/80-200mm-f28-af/diagram-1200.gif>
- (24) <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/14/Airy-pattern.svg/2000px-Airy-pattern.svg.png>
- (30) <https://it.wikipedia.org/wiki/Oculare>
- (34) <https://www.pinterest.co.uk/optixwiz/observatory-mt-palomar/>
- (35) <http://uk.businessinsider.com/when-uranus-discovered-william-herschel-2017-3>
- (36) [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LARGE TELESCOPE, ON TRUNNION TURN-TABLE.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LARGE_TELESCOPE,_ON_TRUNNION_TURN-TABLE.png)
- (37) <https://www.eso.org/public/teles-instr/lasilla/coude/ces/>
- (39) <https://www.nasa.gov/content/kepler-multimedia>
- (40) <http://bollerandchivens.com/?p=561>