

-
- Filtri RGB (Red, Green, Blue): impiegati con sensori monocromatici per acquisire separatamente le tre componenti cromatiche fondamentali, successivamente ricombinate in fase di elaborazione per la ricostruzione dell'immagine a colori naturali.
 - Filtri a banda larga (broadband): permettono il passaggio di un'ampia porzione dello spettro visibile, escludendo selettivamente lunghezze d'onda specifiche. Adatti per la ripresa di oggetti celesti di debole luminosità superficiale in presenza di un moderato inquinamento luminoso.
 - Filtri a banda stretta (narrowband): trasmettono esclusivamente porzioni limitate dello spettro, tipicamente con larghezza della banda inferiore a 10nm, corrispondenti alle righe di emissione H-alpha (656,3 nm), O-III (495,9 e 500,7 nm) e S-II (671,6 nm). Questi filtri isolano efficacemente il segnale proveniente dalle nebulose a emissione e dall'inquinamento luminoso. [9]

Il **sensore astrofotografico CCD monocromatico** regista l'intera intensità luminosa su ciascun pixel senza compromessi cromatici. L'utilizzo combinato con la ruota portafiltri consente di acquisire separatamente diverse lunghezze d'onda specifiche, mantenendo la massima risoluzione e sensibilità del sensore.

La montatura utilizzata dall'Osservatorio Schiaparelli è una **montatura equatoriale motorizzata su entrambi gli assi**, in cui si ha l'allineamento dell'asse principale (AR) con l'asse di rotazione terrestre, ottenuto inclinando opportunamente la struttura in modo che risulti in parallelo all'equatore celeste.⁵ Il motore AR compensa la rotazione terrestre con un movimento continuo, mentre il motore in DEC interviene per applicare correzioni necessarie a mantenere l'oggetto perfettamente centrato. [10]

1.2 Acquisizione iniziale delle immagini

L'acquisizione di immagini astronomiche presenta sfide tecniche significativamente diverse e più complesse rispetto alla fotografia classica. La debole intensità dei segnali luminosi provenienti dagli oggetti celesti, unita alla loro suscettibilità alle perturbazioni atmosferiche, rende necessaria un'accurata pianificazione e preparazione delle sessioni osservative.

⁵ L'equatore celeste è la proiezione dell'equatore terrestre sulla sfera celeste, costituendo il piano di riferimento del sistema di coordinate equatoriali utilizzato per la localizzazione degli oggetti celesti.

Diversi fattori concorrono a determinare la qualità delle riprese astronomiche. Le condizioni ambientali, come la turbolenza atmosferica e l'inquinamento luminoso, influenzano il rapporto segnale/rumore delle immagini acquisite. I limiti strumentali, quali le aberrazioni ottiche, determinano ulteriormente la capacità di registrare segnali deboli. Infine, il moto apparente degli oggetti celesti sulla sfera celeste, dovuto alla rotazione terrestre, impone l'utilizzo di sistemi di inseguimento precisi e tecniche di acquisizione multipla per l'ottimizzazione del rapporto segnale/rumore mediante l'integrazione di più fotogrammi.

1.2.1 Condizioni ambientali

Le prestazioni dell'astrofotografia sono fortemente condizionate dalle caratteristiche del sito osservativo e dalle condizioni atmosferiche locali. La qualità delle immagini acquisite dipende in misura determinante dalla combinazione di diversi parametri ambientali. La selezione di siti caratterizzati da cieli bui, elevata trasparenza atmosferica e condizioni meteorologiche stabile costituisce pertanto un prerequisito fondamentale per massimizzare le potenzialità dell'immagine acquisita. [6]

Inquinamento luminoso

Secondo Daniele Gasparri, “La madre di tutte le difficoltà, [...], è data dal fatto che tutti i soggetti astronomici, a parte la Luna, il Sole e qualche pianeta, sono milioni di volte più deboli di qualsiasi scena diurna”. [11] Questa debolezza dei soggetti astronomici rende l'inquinamento luminoso uno degli ostacoli più significativi che un astrofotografo deve affrontare per ottenere immagini di qualità del cielo notturno.

Nella fotografia del profondo cielo, la qualità del cielo viene quantificata attraverso la misura della sua brillanza superficiale, espressa in magnitudini per secondo d'arco quadrato ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$). [6] La scala delle magnitudini è logaritmica, quindi, anche differenze numeriche apparentemente piccole comportano variazioni notevoli di luminosità. La relazione quantitativa è espressa dalla formula

$$\Delta L = 10^{0,4\Delta m}$$

dove:

- Δm : differenza in magnitudine,
- ΔL : rapporto di luminosità.

Quindi, una differenza di 5,0 mag/arcsec² corrisponde a una variazione di luminosità di un fattore 100. [12]

Un cielo perfetto, completamente privo di contaminazione da luci artificiali e caratterizzata da un'elevata trasparenza atmosferica, presenta una brillanza superficiale di circa 22 mag/arcsec². Nel contesto italiano, anche sotto i cieli considerati migliori, i valori massimi raggiungibili si attestano tra 21,5 e 21,6 mag/arcsec², evidenziando come sul territorio italiano non esistano più località completamente incontaminate da luci artificiali. Nelle zone di campagna, con cieli considerati bui, si registrano tipicamente valori compresi tra 20,5 e 20,7 mag/arcsec², risultando un cielo circa quattro volte più luminoso di un cielo ideale. Le luci artificiali non hanno un effetto puramente locale: illuminano gli strati atmosferici fino a 50 chilometri in altezza, rendendo il loro impatto percepibile fino a 200 chilometri di distanza. Questo fenomeno di diffusione atmosferica estende significativamente l'area geografica interessata dall'inquinamento luminoso dei centri urbani. [6]



Figura 3: Livello di inquinamento luminoso sul territorio italiano. Fonte:
<https://lightpollutionmap.app/it/?lat=45.878521&lng=8.898014&zoom=9>, consultato il 23/08/2025.

Le differenze nella qualità del cielo dovute all'inquinamento luminoso si manifestano in modo evidente nella fotografia astronomica. Un aspetto critico è che la perdita di profondità non può essere compensata semplicemente incrementando il tempo di esposizione. Questo limita la capacità di raggiungere magnitudini elevate in presenza di inquinamento luminoso significativo. [6]

Per la valutazione dell'inquinamento luminoso, la comunità astronomica utilizza comunemente la Scala di Bortle, uno strumento di classificazione che quantifica la luminosità del cielo notturno in una località specifica. Sviluppata da John E. Bortle, questa scala è stata concepita per assistere gli astronomi dilettanti e professionisti nella valutazione dell'oscurità di un sito osservativo. [13]

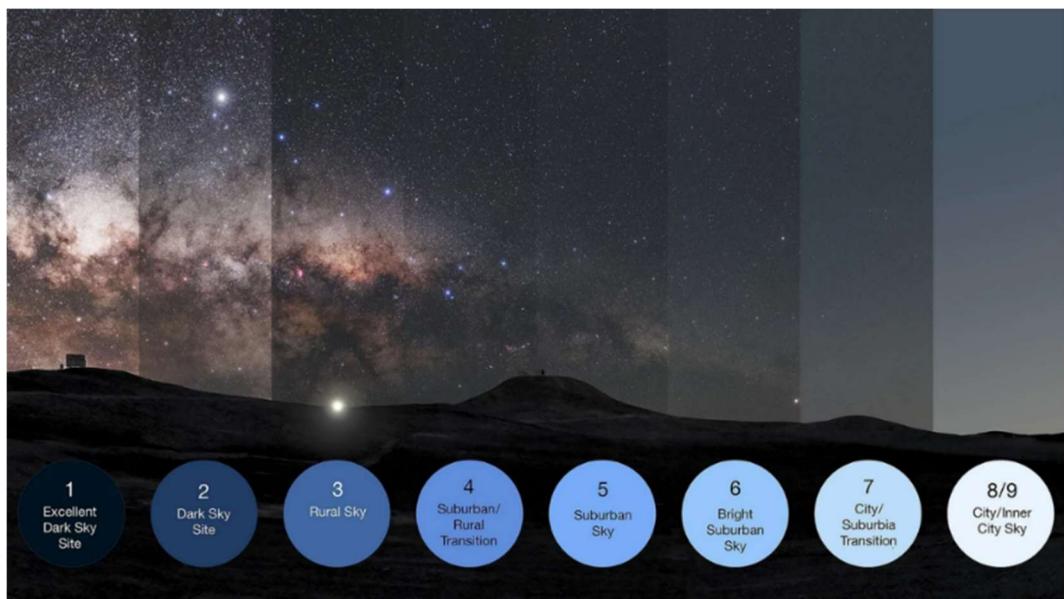


Figura 4: Scala di Bortle. Fonte: <https://www.tensixphotography.com/eclipse-blog/frlju22fyq0drtkg3s9nt4jzzujene>, consultato il 13/08/2025.

La scala si articola in nove classi classificano progressivamente in nove classi che classificano progressivamente l'oscurità del cielo notturno e la visibilità dei fenomeni celesti. La Classe 1 rappresenta i cieli più scuri disponibili, mentre la Classe 9 corrisponde ai cieli tipici dei centri urbani più inquinati. Questo sistema di classificazione permette agli astrofili di quantificare oggettivamente l'osservabilità degli oggetti celesti e le interferenze causate dall'inquinamento luminoso. [13]

La metodologia di applicazione è relativamente semplice. Ogni classe propone specifici oggetti celesti di riferimento da osservare: se l'osservatore riesce a visualizzare l'oggetto celeste di riferimento, il cielo viene classificato a quel livello, altrimenti si procede alla classe successiva, corrispondente a un maggior livello di inquinamento luminoso. [13]

Classe	Titolo	Descrizione
1	Sito con cielo buio eccezionale	Rappresenta le condizioni ottimali osservabili sulla Terra. La luce zodiacale ⁶ e il gegenschein ⁷ sono chiaramente visibili, con M33 evidente a occhio nudo. La magnitudine limite visuale raggiunge 7,6-8,0.
2	Sito con cielo buio tipico	La Via Lattea estiva appare altamente strutturata e M33 è facilmente osservabile con visione diretta. Numerosi ammassi globulari Messier ⁸ sono visibili a occhio nudo. La magnitudine limite visuale è 7,1-7,5.
3	Cielo rurale	Sono presenti alcune indicazioni di inquinamento luminoso lungo l'orizzonte. La Via Lattea mantiene un aspetto struttura e ammassi globulari come M4, M5, M15 e M22 sono distinti a occhio nudo. La luce zodiacale è evidente in primavera e autunno. La magnitudine limite visuale è 6,6-7,0.
4	Confine cielo rurale/suburbano	Cupole di inquinamento luminoso sono evidenti sopra i centri abitati. La luce zodiacale è visibile ma non si estende oltre metà strada verso lo zenith. La Via Lattea perde la maggior parte delle strutture e M33 diventa difficile da osservare. La magnitudine limite visuale è 6,1-6,5.
5	Cielo suburbano	Solo accenni della luce zodiacale sono visibili nelle migliori notti. La Via Lattea è molto debole o invisibile vicino all'orizzonte. Le sorgenti luminose sono evidenti in molte direzioni e le nuvole appaiono più luminose

⁶ Raggi del sole che illuminano le polveri del sistema solare formando un alone visibile lungo le costellazioni zodiacali.

⁷ Debole luminosità visibile in cielo nella direzione esattamente opposta al Sole, causata dalla riflessione della luce solare sulle polveri del sistema solare

⁸ Nome dato agli oggetti del catalogo Messier

		del cielo. La magnitudine limite visuale è 5,6-6,0.
6	Cielo suburbano	Non è visibile alcuna traccia della luce zodiacale. La Via Lattea è percepibile solo verso lo zenith e il cielo entro 35° dall'orizzonte presenta un bagliore grigio-biancastro. M33 è impossibile da vedere senza binocolo e M31 è solo moderatamente evidente. La magnitudine limite visuale è circa 5,5.
7	Confine cielo suburbano/urbano Luna piena	L'intero sfondo del cielo presenta una tonalità grigio-biancastra con sorgenti luminose evidenti in tutte le direzioni. La Via Lattea è totalmente o quasi invisibile. Gli oggetti Messier più luminosi appaiono come ombre anche con telescopi di medie dimensioni. La magnitudine limite visuale è 5,0.
8	Cielo urbano	Il cielo presenta un bagliore grigio-biancastro o arancione. Solo gli oggetti Messier più luminosi sono rilevabili con telescopi modesti e alcune stelle delle costellazioni sono assenti. La magnitudine limite visuale è 4,5.
9	Cielo Centro città	L'intero cielo è illuminato anche allo zenith. Molte stelle sono invisibili insieme alle costellazioni più deboli. Gli unici oggetti apprezzabili sono la Luna, i pianeti e alcuni ammassi stellari. La magnitudine limite visuale è 4,0 o inferiore.

Tabella 2: Classi della Scala di Bortle in dettaglio. Fonte: John E. Bortle, The Bortle Dark-Sky Scale, 2001, consultato il: 24/10/2025.

Sebbene la Scala di Bortle costituisca uno strumento utile per una valutazione qualitativa dell'inquinamento luminoso, la sua natura soggettiva e la precisione approssimativa rappresentano limitazioni significative per applicazioni che richiedono misurazioni quantitative rigorose. Per ottenere dati oggettivi e comparabili, ci si può avvalere di strumenti di misurazione dedicati che permettono una quantificazione strumentale della brillanza del cielo.

Lo Sky Quality Meter (SQM) rappresenta uno strumento diffuso per la misurazione quantitativa dell'inquinamento luminoso. Lo SQM contiene un fotodiodo che permette di determinare in modo istantaneo la brillanza del cielo notturno. Una piccola ottica integrata nell'apparecchio limita la porzione di cielo considerata per la misura a un cono con apertura di circa 10° , sebbene anche sorgenti luminose che incidono direttamente sull'ottica con angoli maggiori possano influenzare le misurazioni. Solitamente, si analizza la porzione di cielo intorno allo zenit, il punto più distante dall'orizzonte e dalle sorgenti di inquinamento luminoso. [12]

Un esperimento effettuato da PrimaLuce Lab nel 2018 evidenzia gli effetti dell'inquinamento luminoso nell'acquisizione delle immagini: sono state effettuate due acquisizioni della nebulosa Pellicano (IC5070) nella costellazione del Cigno in due ambienti differenti. Il primo luogo, a basso inquinamento luminoso, sulle Prealpi a 700m sul livello del mare, con un valore dell'SQM di 20.8. Il secondo luogo, con un maggior livello di inquinamento luminoso, in pianura, presentava un valore dell'SQM DI 19.4. [14]

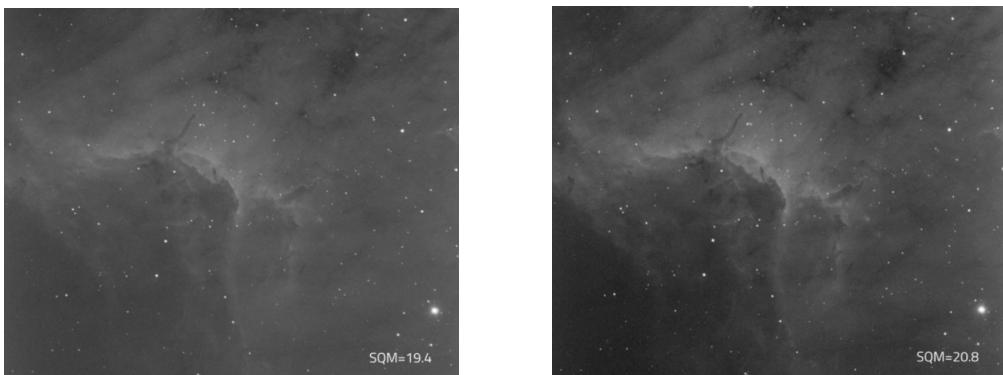


Figura 5: Astrofotografia e inquinamento luminoso: confronto tra le due immagini. Fonte: <https://www.primalucelab.it/blog/astrofotografia-ed-inquinamento-luminoso-astrophotography-and-light-pollution/>, consultato il 23/08/2025.

La sovrapposizione delle due immagini ha mostrato una migliore definizione dei contorni e nitidezza dei dettagli nell'immagine con un valore migliore di SQM. La differenza tra le due immagini evidenzia come la presenza di inquinamento luminoso possa nascondere dettagli che potrebbero rivelarsi fondamentali per lo studio e la ricerca dei corpi celesti.

L'oscurità del cielo è una condizione necessaria ma non sufficiente per ottenere immagini astrofotografiche di qualità. Risulta indispensabile un cielo caratterizzato anche da un'un'elevata trasparenza atmosferica. Una strategia per ottimizzare entrambi i parametri consiste nell'aumentare l'altitudine dei siti osservativi: all'aumentare della quota si registra un miglioramento sia della

trasparenza atmosferica sia della qualità del cielo, portando gli astrofotografi a preferire luoghi in aree montane e ad alta quota per ricercare cieli scuri e trasparenti. [6]

Seeing

Il termine seeing, o turbolenza atmosferica, indica la quantificazione del disturbo nelle immagini astronomiche causato dalla presenza dell'atmosfera terrestre. Questo fenomeno produce distorsioni che impediscono di raggiungere la risoluzione teorica massima con telescopi di diametro superiore ai 15 cm e impongono limiti significativi nelle riprese a lunga esposizione. È importante precisare che un “ottimo seeing” indica una bassa turbolenza atmosferica: valori elevati di seeing corrispondono quindi a condizioni favorevoli. Non si deve confondere il seeing con la qualità del cielo in termini di brillanza superficiale, poiché si tratta di fenomeni distinti che influenzano diversi aspetti dell’osservazione astronomica. [6]

La turbolenza atmosferica è presente in ogni punto della superficie terrestre e deriva da due componenti principali: la turbolenza locale, dovuta al tubo ottico e all’ambiente circostante il punto di osservazione, e la turbolenza degli strati più alti della troposfera⁹. L’effetto è percepibile anche a occhio nudo attraverso il fenomeno della scintillazione delle stelle¹⁰. Dal punto di vista fisico, la turbolenza consiste in movimenti di masse d’aria caratterizzate da temperature, pressioni, densità e spessori differenti, che si spostano in modo casuale e turbolento. Queste masse d’aria, dette anche celle atmosferiche, possiedono indici di rifrazione diversi a causa delle differenze termiche e di densità. La variazione dell’indice di rifrazione è il meccanismo responsabile dello spostamento, deformazione e sfocamento dell’immagine astronomica. L’effetto di distorsione varia rapidamente nel tempo, rendendo il seeing una condizione altamente dinamica. [6]

L’impatto della turbolenza atmosferica sulle riprese a lunga esposizione si manifesta principalmente come un limite alle dimensioni dei dettagli più piccoli rilevabili e al diametro apparente delle stelle. L’entità di questo effetto è strettamente correlata al tempo di esposizione: durante un’esposizione di un secondo, è probabile che davanti all’oggetto osservato si susseguano diverse celle atmosferiche con differenti indici di rifrazione, ciascuna delle quali contribuisce a degradare l’immagine finale. Per mitigare gli effetti del seeing esistono dispositivi chiamati ottiche adattive, progettati per correggere in tempo reale le distorsioni indotte dall’atmosfera sulla luce che entra nel telescopio. Nel contesto amatoriale, le ottiche adatte risultano particolarmente utili

⁹ Fascia più bassa dell’atmosfera terrestre, dove si concentrano i fenomeni meteorologici

¹⁰ Cambiamento di splendore e variazione di colore delle stelle guardate a occhio nudo. [24]

nell'autoguida, permettendo di evitare che la montatura effettui correzioni superflue dovute al seeing piuttosto che a reali errori di inseguimento. [6]

La valutazione quantitativa del seeing avviene tramite scale di misurazione standardizzate. Le due scale più utilizzate dalla comunità astrofila sono quelle ideate da E.M. Antoniadi e W.H. Pickering, entrambi osservatori planetari che hanno dato un contributo fondamentale alla planetologia. La scala di Antoniadi, utilizzata principalmente nell'osservazione planetaria, utilizza una suddivisione da I a V dove I indica il seeing ideale, descritta in dettaglio da Martin Mobberley: [15]

- I. Seeing perfetto, senza un tremito.
- II. Lieve tremolio dell'immagine, con momenti di calma che durano alcuni secondi.
- III. Seeing moderato, con tremolii dell'aria che sfocano l'immagine.
- IV. Seeing scarso, con ondulazioni fastidiose e costanti dell'immagine.
- V. Seeing molto cattivo, insufficiente per permettere di fare anche solo uno schizzo del pianeta.

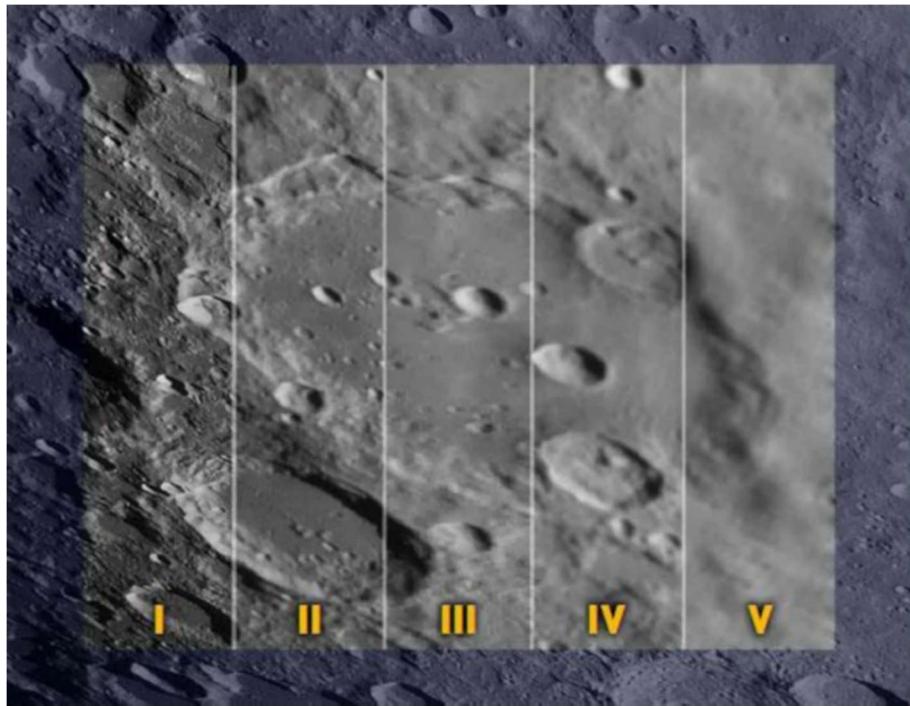


Figura 6: Scala di Antoniadi. Fonte: <https://sky-route.ru/shkala-antoniadi/>, consultato il 23/09/2025.

La scala di Pickering, più comunemente utilizzata nell'osservazione del profondo cielo, è suddivisa in livelli da 1 a 10 ed è considerata più rigida rispetto alla scala di Antoniadi. Questa scala si basa sull'analisi dell'immagine di diffrazione delle stelle. descritta in dettaglio da Martin Mobberley: [15]

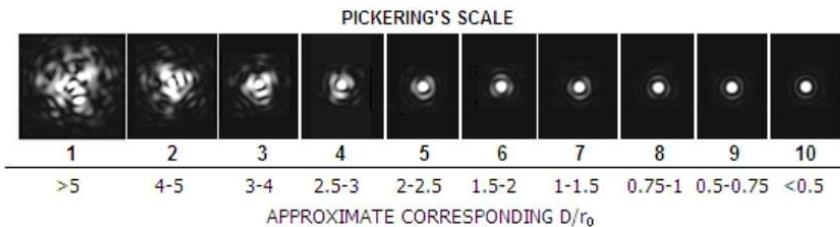


Figura 7: Scala di Pickering. Fonte: <https://www.cloudynights.com/topic/349405-pickeringseeing-scale/>, consultato il 23/09/2025.

1. Di solito l'immagine di una stella è due volte il diametro del terzo anello di diffrazione (se si può vedere l'anello); l'immagine stellare ha un diametro di 13 secondi d'arco.
3. Le immagini si mostrano occasionalmente con due volte il diametro del terzo anello (13").
4. Immagine con lo stesso diametro del terzo anello (6",7) e più luminosa al centro.
5. Il disco di diffrazione di Airy è spesso visibile; talvolta sulle stelle più luminose sono visibili gli archi degli anelli di diffrazione.
7. Disco di Airy sempre visibile; archi visti frequentemente sulle stelle più luminose.
8. Disco di Airy sempre visibile; brevi archi visti frequentemente.
9. Disco talvolta ben definito; anelli di diffrazione visti come lunghi archi o cerchi completi.
10. Disco sempre ben definito; anelli visti come lunghi archi o cerchi completi.
11. L'anello di diffrazione interno è stazionario. Anelli esterni momentaneamente stazionari.
12. La struttura di diffrazione è completa e stazionaria.

Condizioni Meteorologiche

Il seeing è influenzato da diversi fattori ambientali e geografici, tra cui le condizioni meteorologiche, l'umidità, la temperatura locale e la posizione geografica del sito osservativo, inclusa la sua altitudine. La comprensione e il monitoraggio di questi parametri permettono di identificare i momenti e i luoghi più favorevoli per l'osservazione astronomica. [6]

Le condizioni meteorologiche ideali per ottenere un buon seeing si verificano tipicamente durante periodi di alta pressione atmosferica, caratterizzati da cielo sereno, assenza di vento significativo e stabilità atmosferica. Invece, condizioni meteorologiche perturbate o instabili e la presenza di forti venti contribuiscono alla formazione di regioni turbolente a diverse altitudini, deteriorando la qualità delle osservazioni.

La correlazione tra seeing e condizioni meteorologiche viene sfruttata da alcuni servizi meteorologici per elaborare previsioni specifiche per le applicazioni astronomiche. Le previsioni di seeing fornite includono tipicamente diversi parametri chiave:

- Copertura nuvolosa stratificata, presenza di nubi alte, medie e basse in percentuale variabile;
- Indici di seeing, qualità della turbolenza atmosferica su una scala da 1 (seeing scarso) a 5 (seeing ottimo);
- Presenza e intensità di correnti a getto in quota: jet stream che costituiscono un indicatore delle condizioni atmosferiche sfavorevoli;
- Presenza di bad layers, strati atmosferici in grado di innescare turbolenza e degradare la qualità di seeing.

Le previsioni del seeing, pur utilizzando modelli avanzati, mantengono un margine approssimativo a causa della variabilità dei fenomeni atmosferici. Tali previsioni devono quindi essere considerate come strumenti di supporto piuttosto che indicatori assoluti delle condizioni meteorologiche effettive. Alcuni fenomeni meteorologici locali, quali la formazione della nebbia o la presenza di nubi molto basse, possono non essere rappresentate in queste previsioni. [16]

1.2.2 Tecniche di acquisizione

La fase di acquisizione un ruolo fondamentale nel processo, in cui si determina la qualità finale dell’immagine astrofotografia. Il successo dell’intero processo astrofotografico è dovuto alla validità di questa fase preliminare. Infatti, anche il più avanzato processo di elaborazione non può ripristinare le informazioni perse a causa di carenze ed errori durante l’acquisizione, dove è importante considerare diversi parametri tecnici quali la sensibilità del sensore, il tempo di esposizione e la gestione del rumore. [6]

L’intero processo astrofotografico si articola in tre fasi sequenziali e interconnesse:

- Acquisizione: raccolta dei dati grezzi dal sensore;
- Calibrazione: preparazione dei dati grezzi tramite l’utilizzo dei frame di calibrazione e dell’allineamento dei singoli scatti.
- Elaborazione: Miglioramento estetico e informativo dell’immagine

La concatenazione di queste fasi è fondamentale: ogni passaggio successivo si basa sulla qualità del precedente. In particolare, l’acquisizione di dati di qualità stabilisce il limite superiore dei dati raggiungibili dall’immagine finale.

Sensibilità del sensore

Un sensore digitale possiede una sensibilità intrinseca, denominata efficienza quantica, determinata dalle sue proprietà fisiche e costruttive e pertanto non modificabile. I diversi valori ISO selezionabili su una fotocamera non alterano la risposta del sensore ma influenzano esclusivamente il modo in cui l'elettronica di controllo elabora e restituisce l'immagine finale. [6]

Nelle fotocamere reflex digitali, l'elettronica applica una soglia di taglio al segnale delle basse luci quando vengono impostati bassi valori ISO, eliminando i segnali che secondo la sensibilità impostata non dovrebbero essere rilevabili, con conseguente perdita effettiva di informazione.

Nelle camere CCD astronomiche dedicate, non è presente il concetto di ISO: le immagini acquisite dal sensore vengono trasferite al computer in forma grezza, senza alcuna amplificazione o attenuazione del segnale da parte dell'elettronica di controllo. Le camere CCD monocromatiche sono caratterizzate da un'efficienza quantica superiore al 50%, con valori variabili in funzione della tecnologia costruttiva impiegata: [6]

- Le camere CCD dotate di porta anti-blooming¹¹ raggiungono tipicamente il 60%;
- Le camere CCD prive di porta anti-blooming possono raggiungere valori fino al 80%;
- Le camere CCD “back-illuminated” rappresentano la tecnologia più avanzata, con efficienze quantiche fino al 99%, consentendo la rilevazione di quasi tutti i fotoni incidenti sulla superficie del sensore.

Tempi di esposizione

A prescindere dalla sensibilità intrinseca del sensore, è necessario tenere in considerazione il tempo di esposizione per impostare correttamente le sequenze di ripresa. Il tempo di esposizione determina la frazione temporale durante la quale il sensore risulta esposto alla luce convogliata dall'obiettivo. Questo parametro dipende dalle condizioni di illuminazione ambientale del soggetto: in pieno sole, un soggetto ben illuminato richiede tempi di esposizione molto brevi, nell'ordine dei millisecondi, mentre la fotografia del cielo notturno necessita di tempi progressivamente più lunghi, che variano da alcuni secondi fino a diversi minuti o ore. [17]

A livello indicativo, per riprese a 800 ISO in condizioni di cielo con una magnitudine superiore a 21 mag/arcsec², è raccomandato un tempo di esposizione minimo di circa 60 secondi. Per sistemi ottici con rapporto focale inferiore a f/5, il tempo ottimale si attesta tra 3 e 5 minuti, mentre per

¹¹ Canale di drenaggio che impedisce a un pixel saturo di traboccare nei pixel adiacenti, prevenendo strisce luminose nell'immagine.

configurazioni con rapporto focale superiore risulta preferibile un intervallo compreso tra 5 e 10 minuti. L'utilizzo di tempi superiori non comporta vantaggi significativi. Nell'utilizzo di fotocamere reflex digitali è opportuno attenersi a limiti temporali raccomandati, invece, i sensori CCD astronomici consentono di estendere i tempi fino a 30 minuti.

Istogramma

L'istogramma di un'immagine costituisce uno strumento fondamentale nell'ambito della fotografia astronomica, utilizzabile in ogni fase del processo: dalla fase di acquisizione all'elaborazione dei dati, includendo le procedure di calibrazione. Si tratta di una rappresentazione grafica che funge da "carta d'identità" dell'immagini, sintetizzandone le caratteristiche fondamentali.

[6]

Dal punto di vista tecnico, l'istogramma rappresenta la distribuzione dei pixel in funzione della loro luminosità, espressa in ADU (Analog-to-Digital Units). Sull'asse orizzontale vengono riportati i livelli di luminosità, mentre sull'asse verticale è indicato il numero di pixel corrispondente a ciascun livello. Nelle immagini astronomiche presenta una distribuzione asimmetrica con un picco pronunciato nella porzione sinistra del grafico, corrispondente ai bassi livelli di luminosità, e code più o meno estese verso destra, rappresentanti i pixel di maggiore luminosità. [6]



Figura 8: Istogramma di un'immagine sovraesposta. Fonte:
<https://lucafornaciarifotografia.com/2019/08/26/astrofotografia-messa-a-fuoco-live-view-istogramma/>, consultato il 30/10/2025.

Quando una porzione significativa dei pixel presenta valori di luminosità che raggiungono o superano il limite massimo consentito dalla dinamica del sensore, solitamente 16 bit nella fotografia astronomica, si verifica una saturazione dell'immagine. L'istogramma risulta "tagliato" sul margine destro, rivelando una sovraesposizione e comportando una perdita irreversibile di informazione relativa agli oggetti più brillanti. [6]

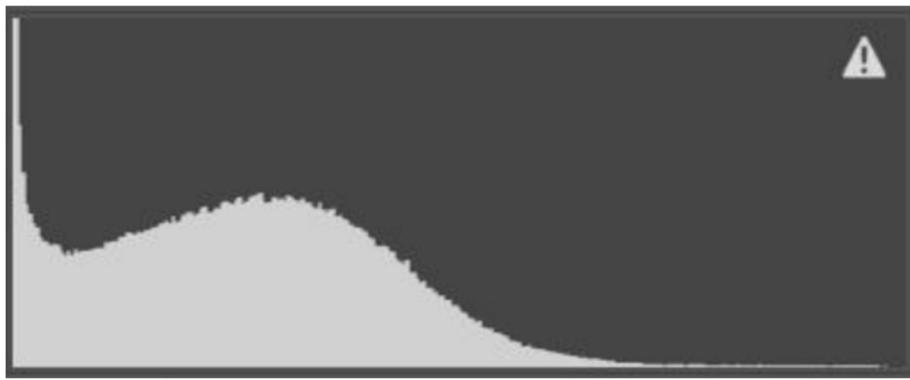


Figura 9: Istogramma di un’immagine sottoesposta. Fonte:
<https://lucafornaciarifotografia.com/2019/08/26/astrofotografia-messa-a-fuoco-live-view-istogramma/>, consultato il 30/10/2025.

Al contrario, quando la maggior parte dei pixel presenta valori di luminosità concentrati nella porzione sinistra dell’istogramma, si è in presenza di un’immagine sottoesposta. È particolarmente frequente nelle riprese effettuate da siti con un’ottima qualità del cielo, ma vengono utilizzati tempi di esposizione insufficienti. [6]

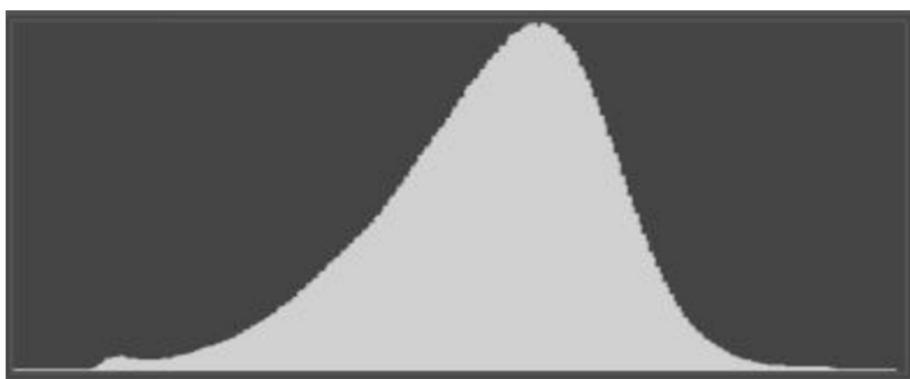


Figura 10: Istogramma di un’immagine ideale. Fonte:
<https://lucafornaciarifotografia.com/2019/08/26/astrofotografia-messa-a-fuoco-live-view-istogramma/>, consultato il 30/10/2025.

Un’esposizione corretta si riconosce da un istogramma in cui la distribuzione dei pixel non risulta troncata né sul margine destro né su quello sinistro. Il picco principale dell’istogramma, nelle riprese di oggetti del cielo profondo, corrisponde invariabilmente al livello di luminosità del fondo cielo, in quanto questo costituisce l’elemento che occupa la maggior parte dei pixel dell’immagine. Una corretta esposizione garantisce che il fondo cielo presenti una luminosità naturale e che i dettagli più luminosi non raggiungano la saturazione. [6]

L’istogramma rappresenta l’unico strumento oggettivo per valutare la correttezza dell’esposizione, la cui distribuzione non deve mai risultare troncata, al fine di preservare tutte le informazioni acquisite. [6]

Rapporto Segnale rumore

Il rapporto segnale-rumore (SNR, Signal to Noise Ratio) rappresenta un parametro fondamentale per definire la qualità una misura: quanto maggiore è il rapporto, tanto migliore risulta la misura. In termini generali, il “rumore” indica l’insieme degli errori che si sovrappongono al segnale che si intende misurare. Nell’acquisizione delle immagini astronomiche tramite sensori CCD, l’obiettivo principale è ottenere il migliore SNR possibile. [18]

Quando si fotografa una stella con un CCD, la sua luce si distribuisce su più pixel formando una macchia approssimativamente circolare, le cui dimensioni dipendono dalle caratteristiche ottiche del telescopio e dalle condizioni di seeing. Ogni pixel raccoglie non solo i fotoni provenienti dalla stella, ma anche provenienti dal fondo-cielo, il quale non è mai completamente nero. Per ottenere il segnale effettivo della stella è necessario sottrarre il contributo del fondo-cielo, utilizzando la formula: [18]

$$S = \sum_{i=1}^n N_i - n * B$$

dove:

- N_i è il numero di elettroni contenuto nell’i-esimo pixel
- n è il numero di pixel nell’area circolare
- B è il valore medio del fondo-cielo per pixel

Oltre alle fonti di natura fisica, il CCD introduce ulteriori tipologie di rumore strumentale: [18] [19]

- Rumore di lettura: generato dall’elettronica che legge i dati del sensore. Ogni operazione di lettura di un pixel si aggiungono approssimativamente dieci elettroni di rumore al segnale.
- Rumore termico: causato dall’agitazione termica degli atomi nel sensore, che genera elettroni anche in assenza di luce. Questo rumore aumenta rapidamente con la temperatura, motivo per cui i CCD astronomici vengono raffreddati, minimizzando la produzione di elettroni per pixel al secondo.

Considerando tutti i contributi di rumore, l’espressione generale del rapporto segnale-rumore è:

$$\frac{S}{N} = \frac{N_*}{\sqrt{N_* + n(N_S + N_D + RN^2)}}$$

dove:

- N_* è il numero di fotoni provenienti dalla stella

-
- N_S è il contributo del fondo-cielo per pixel
 - N_D gli elettroni termici per pixel
 - RN il rumore di lettura

Esprimendo la relazione in funzione del tempo di esposizione t , si ottiene:

$$\frac{S}{N} = \frac{F_* * t}{\sqrt{F_* * t + n(F_S * t + I_D * t + RN^2)}}$$

dove:

- F_* è il flusso di fotoni al secondo
- F_S è il flusso del fondo cielo

L'equazione evidenzia come, per tempi di esposizione molto brevi, il rumore di lettura può risultare dominante, mentre per tempi più lunghi, i contributi prevalenti sono quelli della sorgente e del fondo cielo. Il SNR cresce proporzionalmente alla radice quadrata del tempo di esposizione, non linearmente: per raddoppiare il rapporto segnale-rumore è necessario quadruplicare il tempo di esposizione. [18] [19]

1.2.3 Aberrazioni ottiche

Le aberrazioni ottiche sono uno dei principali fattori limitanti nella qualità delle immagini astronomiche in fase di acquisizione. Quando la luce attraversa un sistema ottico si generano percorsi differenti che causano deformazioni nell'immagine finale.

Le aberrazioni ottiche si possono classificare in base alla loro distribuzione rispetto all'asse ottico:

- Aberrazioni assiali, influenzano principalmente l'area centrale dell'immagine lungo l'asse ottico, sono:
 - Aberrazione sferica
 - Aberrazione cromatica
- Aberrazioni parassiali, aumentano progressivamente verso i bordi del campo visivo, sono:
 - Coma
 - Astigmatismo
 - Distorsione e curvatura di campo

La distinzione delle aberrazioni è fondamentale in astrofotografia, dove è necessario ottenere un'immagine uniforme in tutto il campo inquadrato.

Aberrazione sferica

L'aberrazione sferica si verifica quando si utilizzano lenti o specchi con superficie sferica. I raggi luminosi che colpiscono diverse aree della lente convergono in punti focali diversi lungo l'asse ottico. [18] Le immagini mostrano quindi una riduzione della nitidezza su tutto il campo, diminuendo il contrasto e creando aloni diffusi intorno alle stelle. [19]

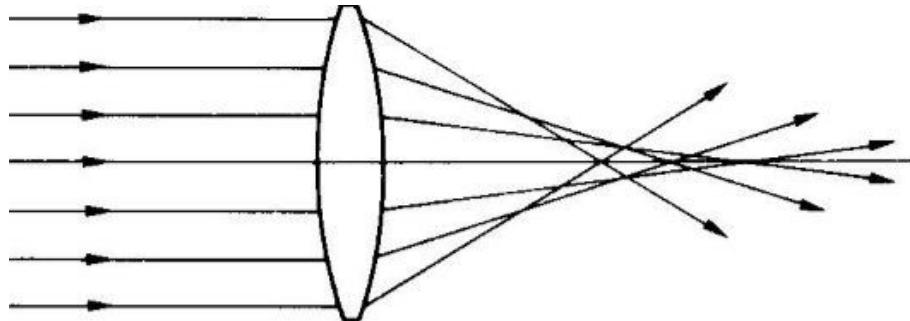


Figura 11: Aberrazione sferica. Fonte: <https://www.fotografareindigitale.com/aberrazione-sferica/10673>, consultato il 31/10/2025.

Le aberrazioni sferiche possono essere corrette mediante l'utilizzo di superfici asferiche nei telescopi riflettori o ottimizzando i raggi di curvatura nei rifrattori.

Aberrazione cromatica

L'aberrazione cromatica deriva dal fatto che l'indice di rifrazione varia al variare della lunghezza d'onda della luce, quindi, diverse lunghezze d'onda, ovvero diversi colori, convergono in punti focali differenti. [19] Questo produce aloni colorati intorno alle stelle brillanti, sfocatura differenti per diverse lunghezze d'onda e artefatti cromatici nelle zone ad alto contrasto. [18]

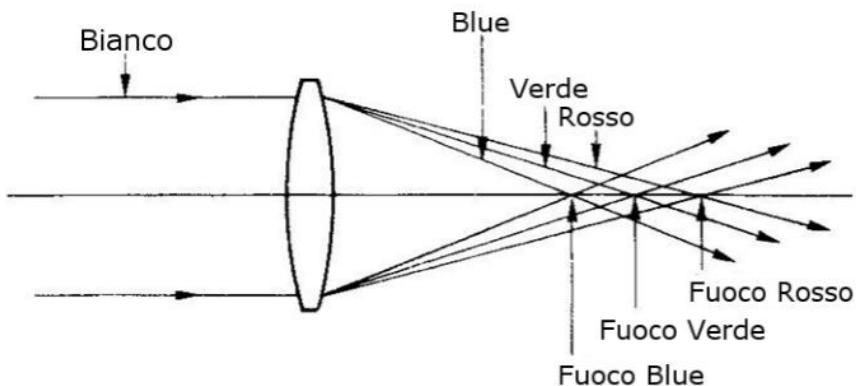


Figura 12 Aberrazione cromatica assiale. Fonte: <https://www.fotografareindigitale.com/aberrazione-cromatica-assiale/10667>, consultato il 31/10/2025.

Le aberrazioni cromatiche possono essere correte utilizzando una coppia di lenti, ottenendo un sistema ottico acromatico. È possibile aggiungere una terza lente per una correzione sulle tre lunghezze d'onda principali, ottenendo quindi un sistema ottico apocromatico. [18]

Coma

Il coma è un'aberrazione provocata dalla presenza di raggi che attraversano la lente seguendo percorsi differenti, non venendo messi a fuoco alla stessa distanza focale. [19] L'immagine delle stelle appare allungata verso l'esterno, aumentando lungo i bordi del campo inquadrato, si ha quindi una deformazione delle stelle nella zona periferica. [18]

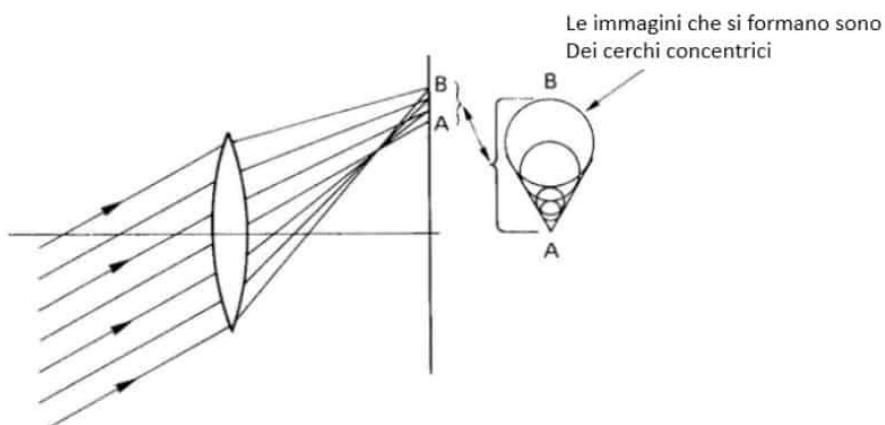


Figura 13: Manifestazione della Coma. Fonte: <https://www.fotografareindigitale.com/cose-la-coma/23900>, consultato il 24/09/25

Il coma può essere ridotto regolando l'apertura del telescopio, limitando i raggi più esterni, o impiegando correttori ci coma dedicati. [18]

Astigmatismo

L'astigmatismo si verifica in presenza di lunghezze focali diverse nei piani tangenziale e sagittale, dovuto a difetti nei piani di simmetria della lente. Le stelle appaiono come croci o segmenti, impedendo di ottenere una messa a fuoco ottimale e peggiorando la qualità dell'immagine. [19]

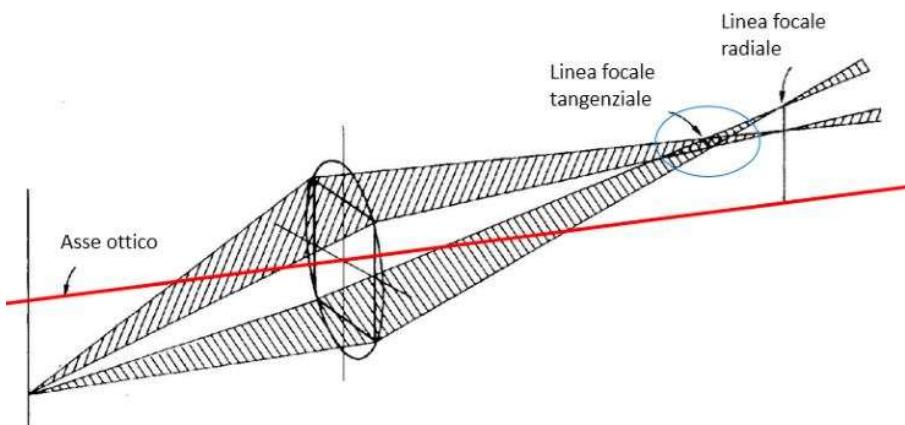


Figura 14: Astigmatismo. Fonte: <https://www.fotografareindigitale.com/aberrazioni-coma-astigmatismo-curvatura-campo/10681>, consultato il 31/10/2025

L'astigmatismo può manifestarsi anche in sistemi con lenti perfette ma montate in modo disallineato. I sistemi ottici corretti per l'astigmatismo sono chiamati anastigmatici. [18]

Curvatura di campo e distorsione geometrica

La curvatura di campo è una conseguenza dell'uso di superfici ottiche sferiche, questa differenza geometrica causa problemi di messa a fuoco che aumentano allontanandosi dal centro.

La distorsione geometrica di presenta in due forme:

- Distorsione negativa, detta anche “a barilotto”: l'ingrandimento diminuisce verso i bordi, dove le linee trasversali mostrano una curva verso l'esterno del campo.
- Distorsione positiva, detta “a cuscinetto”: l'ingrandimento aumenta verso i bordi e le linee trasversali mostrano una curva verso l'interno del campo.

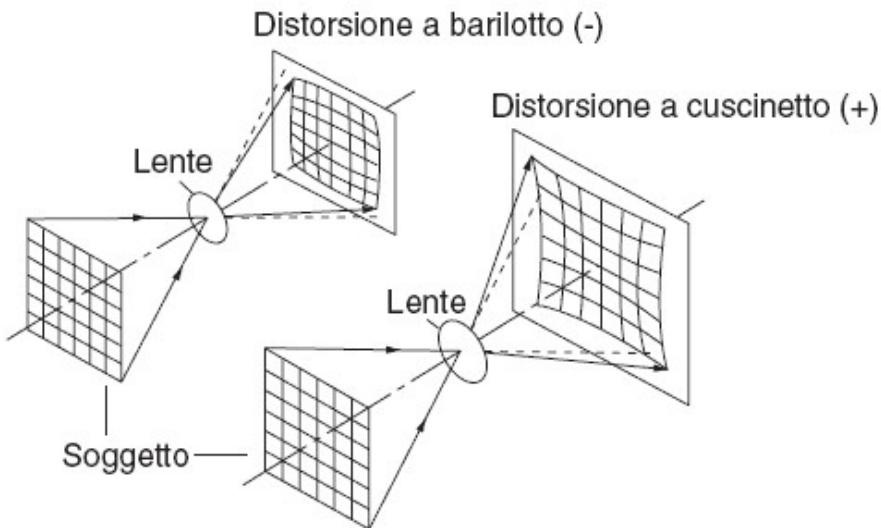


Figura 15: Distorsioni geometriche. Fonte: <https://www.fotografareindigitale.com/le-distorsioni/1421>, consultato il 31/10/2025.

Le distorsioni geometriche impediscono la messa a fuoco simultanea del centro e dei bordi dell'immagine. I sistemi ottici privi di distorsioni sono chiamati ortoscopici. [18]

La comprensione delle aberrazioni ottiche è fondamentale per ottimizzare le procedure di acquisizione in astrofotografia, in cui la scelta dello strumento dipende da sistemi ottici specifici.

1.2.4 Sistemi di inseguimento

La calibrazione dell'autoguida è fondamentale durante l'acquisizione e consiste nell'insegnare al software di controllo l'orientamento degli assi della montatura e la velocità di spostamento del

telescopio. Questa operazione deve essere ripetuta ogni volta che si rimuove o si sposta la camera di ripresa, garantendo la corretta corrispondenza tra il software e i movimenti fisici della montatura.

Per eseguire la calibrazione si effettua un'esposizione di 2-3 secondi con la camera di guida, durante la quale il software analizza il movimento di una stella guida selezionata. È necessario inserire la declinazione approssimata del campo ripreso, parametro che permette al sistema di compensare la diversa velocità apparente degli oggetti celesti a diverse latitudini celesti. Il tempo di esposizione delle immagini di guida riveste particolare importanza e dovrebbe essere compreso tra 2 e 5 secondi. Tempi più brevi, inferiori ai 2 secondi, risultano eccessivamente sensibili alla turbolenza atmosferica, che introduce oscillazioni apparenti nella posizione stellare non causate da reali errori di inseguimento della montatura. Tempi superiori ai 5 secondi potrebbero invece essere eccessivi: in questo intervallo temporale un errore di inseguimento potrebbe già manifestarsi come mosso dell'immagine principale, vanificando lo scopo dell'autoguida.

Utilizzando una reflex è efficace utilizzare una funzione che permetta di ingrandire al massimo l'immagine per valutare con precisione la dimensione della stella. Le camere CCD, invece, richiedono un approccio differente: si impone una sequenza continua di brevi esposizioni e si analizza la FWHM delle stelle, che rappresenta un indicatore oggettivo della qualità della messa a fuoco: valori minori indicano stelle più puntiformi.

Durante la fase di guida attiva, il software permette di regolare i parametri di aggressività, che rappresentano la percentuale di correzione applicata alla montatura relativamente all'errore misurato dal sistema. In condizioni reali, considerando le imperfezioni meccaniche della montatura e l'influenza della turbolenza atmosferica, è necessario impostare valori compresi tra il 60% e l'80%. Il comportamento del sistema fornisce indicazioni sulla correttezza dei parametri. Se si instaura un "effetto pendolo", con l'errore che oscilla tra valori positivi e negativi senza mai annullarsi, l'aggressività è troppo elevata. Al contrario, se sono necessari più scatti consecutivi dell'autoguida per annullare un errore di inseguimento, l'aggressività risulta troppo bassa e le correzioni sono insufficienti.

Per valutare l'efficacia della guida è fondamentale controllare direttamente le immagini scattate con la camera di ripresa: se le stelle risultano puntiformi, con profili circolari e simmetrici, la guida funziona correttamente indipendentemente dall'aspetto del grafico degli errori mostrato dal software.

[6]