

## Ottica adattiva. Cos'è e come funziona

Una sorgente luminosa si propaga nello spazio sotto forma di onde sferiche, Ogni punto di un fronte d'onda costituisce la sorgente di un'onda sferica secondaria della stessa frequenza della primaria, l'involuppo di tutte le onde secondarie determina il nuovo fronte d'onda, la cui forma e posizione è determinata dagli eventuali ostacoli presenti. (principio di Huygens)



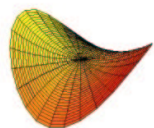
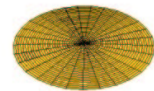
Se la sorgente luminosa è posta all'infinito, come nel caso di una stella, per approssimazione possiamo considerare che i raggi, provenienti da essa, arrivano a colpire l'atmosfera siano paralleli, e che viaggiando nel vuoto, non essendo disturbati da alcun elemento, formano un fronte d'onda piano. Quando la luce penetra l'atmosfera per arrivare poi allo strumento di rilevazione questi raggi vengono deformati da diversi tipi di elementi influenzanti. Tutte queste deformazioni prendono il nome di aberrazioni.

L'ottica adattiva è nata appunto con la finalità principale di correggere queste aberrazioni cercando di ricostruire il fronte d'onda originario. Il grado di sofisticazione di questi strumenti è direttamente correlato al tipo di aberrazioni che sono in grado di correggere. Per capire cosa l'ottica adattiva può correggere bisogna capire quali sono questi tipi di aberrazione e se possono essere corrette, per ciò che riguarda le riprese di oggetti astronomici possiamo analizzare principalmente le aberrazioni generate da:

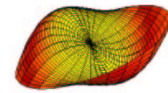
- **Ottica**
- **Atmosfera**
- **Meccanica**

L'aberrazione **Ottica** è classificata in ordini:

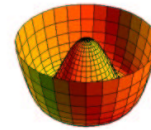
- Ordine zero:; fronte d'onda piano indisturbato
- Primo ordine: fronte d'onda piano ma inclinato rispetto all'asse ottico: l'immagine stellare viene spostata rispetto al suo baricentro, questa aberrazione viene detta "Tip-Tilt";
- Secondo ordine: fronte parabolico in entrambi gli assi o in uno solo di essi: produce rispettivamente lo sfocamento e l'astigmatismo nelle direzioni x ed y;



- Terzo ordine: esprime il coma e l'aberrazione a trifoglio nelle due direzioni x ed y;



- Quarto ordine: esprime l'aberrazione sferica;

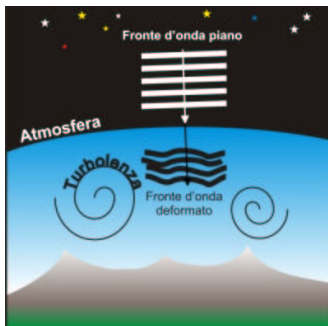


- Ordini superiori al quarto: descrivono deformazioni più complesse, che non hanno nomi corrispettivi nell'ottica classica.

Ad ogni tipo di queste aberrazioni è possibile applicare una superficie ottica in grado di correggerla, è a questo scopo che sono state create ottiche adattive con specchi deformabili, cioè in grado di assumere una superficie tale da compensare la relativa aberrazione.

Sistemi con specchi deformabili però sono adottati solo in campo professionale, e non sono ancora alla portata degli amatori. I sistemi più semplici sono costituiti solo da specchi piani oscillanti che riescono a correggere (in parte) solo la componente tip/tilt di primo ordine.

L'aberrazione generata dall'**Atmosfera** è comunemente conosciuta con il nome di seeing.



Tutte le riprese astronomiche effettuate da terra soffrono della turbolenza atmosferica che disturba il fronte d'onda proveniente dalle stelle, infatti se questo attraversa strati ad alto indice rifrattivo esso viene ritardato rispetto a quello che attraversa zone di indice differente. Il risultato è che se prima di attraversare l'atmosfera il fronte d'onda si presenta piatto successivamente sotto l'influenza degli strati di turbolenza questo si deforma.

Oltre al diverso indice rifrattivo anche gli strati d'aria di diversa temperatura e diversa densità influiscono sul fronte d'onda creando delle aberrazioni variabili temporanee. Questi tipi di turbolenza possono generarsi in qualunque punto del percorso eseguito dalla luce all'interno dell'atmosfera, ed hanno due caratteristiche molto importanti che influiscono sull'impiego di un Ottica Adattiva:

- *Velocità di variazione*
- *Disomogeneità*

*Velocità delle variazioni*

L'atmosfera è sempre in movimento, se si osserva un immagine puntiforme (stella) ad alti ingrandimenti si nota come questa varia nella forma, nella sua posizione e per alcuni istanti l'immagine può apparire sfocata. La velocità di queste variazioni è più alta quando le condizioni del seeing sono cattive mentre si abbassa in condizioni di seeing migliore.

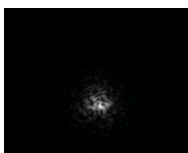


Figura 2 seeing pessimo

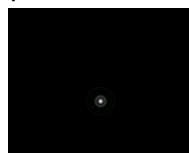
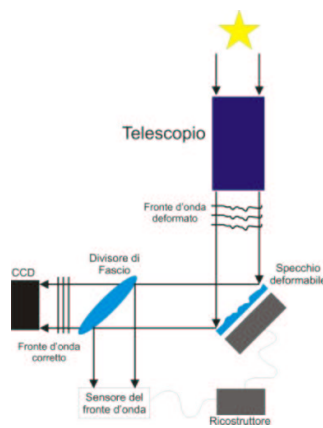


Figura 1 seeing buono

Una parte delle variazioni appena descritte sono riconducibili alla classificazione considerata precedentemente, ad esempio la variazione di posizione del punto luminoso rispetto al suo baricentro può essere considerata come l'aberrazione di ottica di 1°Ordine chiamata componente tip-tilt. Questa componente ha la caratteristica di essere più lenta rispetto alle altre variazioni; e proprio per questo è l'unica componente che può essere corretta in percentuale da sistemi di AO amatoriali, ma solo quando le condizioni di seeing sono medio buone. Per correggere tutte le altre aberrazioni dovremmo effettuare correzioni con frequenze molto alte, anche nell'ordine di qualche centinaia di HZ, capacità che sono alla portata solo di strumenti professionali.

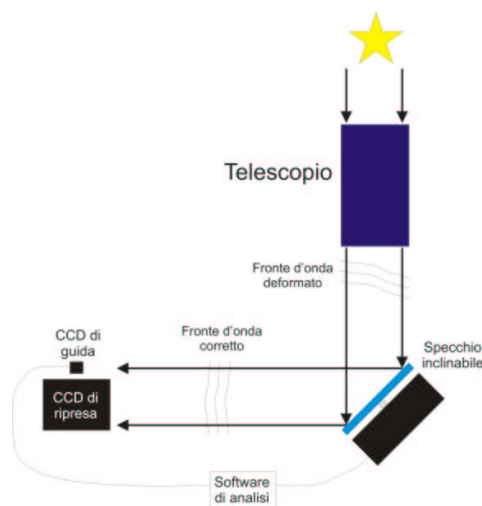
Per raggiungere queste prestazioni il sistema di un AO professionale è generalmente costituito da.

- Correttore
- Sensore di fronte d'onda
- Ricostruttore



E funziona in questo modo: il fronte d'onda proveniente dall'oggetto dopo aver attraversato il sistema ottico incontra il correttore (cioè l'elemento ottico dell'AO, tipicamente lo specchio deformabile), successivamente il segnale viene separato da un Beam Splitter (Divisore di fascio) che lascia passare il segnale destinato al ccd di ripresa deviando una parte restante verso il sensore che analizza il fronte d'onda, questo sensore, analizzando il segnale della stella di riferimento, ricava le informazioni riguardanti le deformazioni dell'onda e le trasferisce ad un altro apparato (ricostruttore) che imposta la "forma" che il correttore deve assumere per correggere le deformazioni.

Le ottiche adattive amatoriali invece hanno un sistema molto più semplice, qui il segnale dopo aver attraversato il telescopio arriva sul "correttore" che è costituito da un elemento ottico piano basculante (specchio o lente).



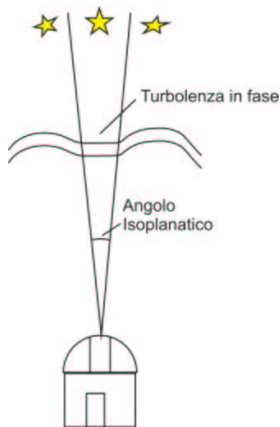
Questo elemento è abbastanza ampio da coprire il campo interessato dal chip di guida e quello di ripresa. Attraverso il chip di guida il segnale viene analizzato, in questa fase viene preso in considerazione il baricentro della stella di guida, misurandone il suo PSF (Point Spread Function), se questo si sposterà viene eseguita una flessione dello specchio per compensare l'errore, in modo che il baricentro della stella ritorni nella posizione corretta. In questo modo lo specchio agisce contemporaneamente sia sul chip di guida che su quello di ripresa.

Affinchè tutto il sistema funzioni a dovere è necessario che il campo inquadrato sia piano fino a coprire il sensore di guida, è molto importante che il centroide della stella rilevato dal chip di guida sia preciso, se così non fosse è possibile che il sistema introduca correzioni non necessarie peggiorando la qualità delle riprese.

La velocità di correzione di un AO amatoriale è limitata a causa dei tempi morti di elaborazione, infatti un comune ciclo di eventi che un AO deve compiere prevede quattro fasi:

acquisizione – download – analisi - intervento.

In pratica se con un ottica adattiva amatoriale volessimo raggiungere la frequenza di correzione di 50 hZ, dovremmo effettuare delle esposizioni con il ccd di guida con tempi nell'ordine del millesimo di secondo. E' chiaro che stelle rilevabili con tempi così brevi devono essere molto luminose, oltre che come già accennato poste nelle vicinanze dell'oggetto di ripresa, e ciò si realizza molto raramente. Oltre a questo aspetto bisogna evidenziare che se si usa il ccd di guida interno, caratteristica tipica di alcuni CCD amatoriali, la luminosità della stella di guida è soggetta anche all'uso dei filtri che vengono interposti tra l'Ottica Adattiva e il chip di guida. Questo è un fattore limitante soprattutto se si utilizzano filtri a banda stretta. Questi problemi possono essere superati facendo uso di un chip di guida esterno, che viene posizionato prima dei filtri, in modo da Rccogliere tutto il segnale possibile.



La vicinanza all'oggetto della ripresa ci introduce ad un'altra questione fondamentale che è quella della:

Disomogeneità del campo

Per comprendere questo fenomeno prendiamo in esempio la luce proveniente da due oggetti separati tra loro da un piccolo angolo, questa se nel suo percorso, ad una certa altezza interseca uno strato di turbolenza atmosferica, viene deformata rispetto alla sua traiettoria originale di un piccolo valore  $x$ .

Quando questo valore  $x$  è sufficientemente grande, le perturbazioni atmosferiche che influenzano la luce proveniente dai due oggetti differiscono, ed il risultato sarà quello di rilevare due immagini diverse. La separazione angolare al di sopra della quale le perturbazioni atmosferiche che influiscono sulla luce proveniente dalle due stelle diventano non-correlate è chiamata **angolo isoplanatico**. Normalmente l'angolo isoplanatico per le aberrazioni di ordine elevato è molto piccolo, nell'ordine di qualche arcosecondo.

E' per questo motivo (oltre che per creare una stella sufficientemente brillante affinché l'AO funzioni correttamente), che alcuni degli apparati di ripresa all'avanguardia fanno uso del laser, proprio per generare una stella artificiale da poter essere posizionata a piacimento nelle vicinanze dell'oggetto di ripresa.

Il fatto che l'angolo isoplanatico sia così piccolo ci fa comprendere meglio come un ottica adattiva amatoriale non sia in grado di correggere un'ampia gamma di aberrazioni. Infatti normalmente questa sfrutta come riferimento la stella di guida del chip di guida, interno od esterno alla camera a seconda delle configurazioni, questo chip è generalmente posizionato ad alcuni arcominuti dal target di ripresa, per cui anche se in grado di effettuare correzioni velocissime l'AO andrebbe a correggere variazioni e turbolenze estranee all'oggetto della nostra ripresa.

L'aberrazione dovuta alla meccanica è quell'insieme di errori riconducibili alla parte meccanica del telescopio:

- errori di guida
- vibrazioni dello strumento dovute al vento, a parti meccaniche o provenienti dal suolo
- backlash del sistema motore – problemi di accoppiamento vite senza fine- corona
- errori di stazionamento

Tutta questa serie di problematiche legate in parte alle qualità delle attrezzature ed in parte alle capacità di calibrazione dell'utente sono quasi del tutto risolvibili dai sistemi di ottica adattivi amatoriali. Vediamo perché.

Durante le normali operazioni il software gestisce contemporaneamente i movimenti dello specchio e la guida del telescopio attraverso la montatura. Nelle riprese senza AO il software gestisce i motori della montatura direttamente comunicando a quest'ultima le correzioni da effettuare dopo aver esaminato la PSF della stella guida attraverso il chip di guida. Effettuando una gestione diretta molto facilmente si possono avere dei ritardi di risposta della montatura dovuti agli accoppiamenti delle parti meccaniche ed elettroniche. L'Ottica adattiva risolve completamente questi problemi perché grazie alla sua velocità di correzione gli errori rilevati vengono corretti, rispetto alla gestione diretta, pressoché istantaneamente. Per fare in modo che il software non gestisca sempre entrambe gli apparati è stata introdotta una regolazione che stabilisce il limite entro il quale nessun comando di correzione è comunicato alla montatura. Infatti è possibile impostare un limite di deflessione dell'elemento ottico entro il quale le correzioni vengono effettuate esclusivamente dall'AO.

In ogni caso le regolazioni di guida possono essere effettuate contemporaneamente sia dalla montatura che dall'AO, questo non crea problemi perché come abbiamo visto l'AO corregge più rapidamente della guida.

Durante la fase operativa il software di controllo usa il ccd di guida per misurare la posizione della stella di guida, rilevando l'errore comunica all'apparato meccanico dello specchio il valore di deflessione giusto per correggerlo, aspetta che lo specchio si muove e inizia di nuovo una esposizione per la guida. Mentre questo avviene il ccd di ripresa cattura continuamente la luce. Prendendo ad esempio l'ottica adattiva Sbig AO7 il produttore dichiara che con un esposizione di 1 millisecondo tutto il ciclo dura 10millisecondi con questo tempo l'unità può raggiungere un rate di 50 frames al secondo.

Con una esposizione di 10 millisecondi il tempo totale arriva 29 millisecondi che corrispondono ad un rate di 34 frames al secondo.

Con tempi di guida così veloci si migliorano principalmente due fattori fondamentali per le riprese astrofotografiche:

- la definizione
- la sensibilità dello strumento

Miglioramento della definizione

E' stato misurato che in condizioni di seeing medie l'ottica adattiva contribuisce a migliorare la risoluzione dell'immagine di circa un 25-30%, questo significa che

supponendo di avere un seeing medio di circa 3 arcosecondi sulle immagini risultanti potremmo essere in grado di misurare un FWHM di 2.5 arcosecondi. Non in tutte le condizioni di ripresa si può apprezzare questo miglioramento, questo perché per sfruttare al meglio l'incremento in risoluzione è necessario sovracampionare il segnale. Sovracampionare il segnale significa avere più informazioni per eseguire le misurazioni. Ciò si ottiene aumentando la nostra scala d'immagine. In pratica per misurare correttamente un FWHM di 2.5 arcosecondi, noi dobbiamo avere una scala d'immagine di circa 0.83 arcosecondi per pixel. Per raggiungere questo valore con una camera le cui dimensioni dei pixel sono ad esempio di 7.4 micron, la nostra focale equivalente dovrebbe essere di poco superiore a 1800mm. Questo esempio ci indica che per focali basse gli incrementi che l'Ottica adattiva può fornirci sono minimi se non irrilevanti, ma più si allunga la focale maggiore è il suo contributo

### Sensibilità dello strumento

Migliorare la risoluzione dell'immagine significa diminuire il valore di FWHM (in pratica la misura del seeing) misurato sulle nostre immagini, questo contribuisce, in parte, ad aumentare la sensibilità; per rendersi conto di questo aspetto dobbiamo considerare in quale modo influisce il seeing sul rapporto Segnale/Rumore delle nostre immagini. Senza entrare nello specifico delle formule possiamo affermare che per calcolare il Segnale si considera la radiazione ricevuta dalla superficie del telescopio nell'unità di tempo; mentre il calcolo del rumore prende in considerazione diversi fattori fra i quali il segnale del fondo cielo, il rumore termico, il diametro del telescopio ed in parte anche il valore dell'FWHM, diminuendo il valore dell'FWHM si diminuisce il valore del rumore, e di conseguenza aumenta la distanza tra il segnale ed il rumore.