

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea Triennale di Astronomia

Tesi di Laurea

**Rassegna ragionata di
coronografi da Terra e dallo
Spazio**

Relatore:

Prof Roberto Ragazzoni

Laureando:

Stefano Sironi

Indice

1. Introduzione

2. Descrizione sintetica di un coronografo

2.1 Caratteristiche

2.2 StageFourier Filtering

2.3 Suddivisione per posizione occultatore

2.3.1 Occultatore esterno

2.3.2 Occultatore interno

2.4 Suddivisione per estinzione della luce

2.4.1 Beam Splitters

2.4.2 Stop in immagine

2.4.3 Stop in pupilla

3. Mappare coronografi nello spazio dei parametri

3.1 Occultatore esterno

3.2 Coronografi interferometrici

3.3 Coronografi con Pupilla Apodizzata

3.4 Miglioramenti del modello di Lyot

3.4.1 Maschere d'ampiezza

3.4.2 Maschere di fase

4. Un caso particolare (PIAACMC)

4.1 Phase Induced Amplitude Apodization Complex Mask Coronagraph

4.2 Confronto in dettaglio

5. SHARK

5.1 Large Binocular Telescope

5.2 SHARK-NIR

5.2.1 Lyot Gaussiano

5.2.2 Shaped Pupil

5.2.3 Apodized Pupil Lyot Coronagraph

5.2.4 Apodized Phase Plate Coronagraph

5.2.5 Four-Quadrant Phase Mask

5.2.6 Vortex Coronagraph

5.2.7 Considerazioni

6. Coronografia ed esopianeti

6.1 Resistenza alla dimensione angolare della stella

6.1.1 Modi

6.2 Comportamento dei coronografi a piccole separazioni angolari (λ/D)

6.3 Sistemi di correzione

6.4 Luce zodiacale ed extrazodiacale

7. Conclusioni

8. Bibliografia

1. Introduzione

L'astronomia è una scienza che più di tante altre si è impegnata per sviluppare metodi di osservazione quanto più raffinati possibile. La resilienza all'errore e la sensibilità della strumentazione la rendono un esempio di efficienza e precisione. Dall'osservazione ad occhio nudo del movimento apparente degli astri ai telescopi con ottiche di svariati metri l'evoluzione ha sempre avuto lo stesso scopo: vedere sempre più lontano e sempre meglio.

Più in avanti lanciamo il nostro sguardo, più dobbiamo ingegnarci nel trovare soluzioni innovative alle limitazioni fisiche a cui il nostro corpo ed il nostro ambiente ci sottopongono.

Il primo fu Galileo, che nel 1609 con due lenti ed un tubo diede vita al primo strumento ottico artificiale per l'osservazione astronomica, il cannocchiale.

Da lì in avanti le soluzioni si susseguirono ai problemi, dando continua prova dell'acume e della fantasia dell'essere umano.

Dalla metà del Diciannovesimo secolo era chiaro a tutti che la Corona Solare fosse una parte del Sole. Nei successivi 100 anni gli astronomi tentarono diversi approcci per creare un'eclisse solare artificiale attraverso strumenti ottici così da non dover più vincolare l'osservazione della Corona ad eventi di eclisse solare naturale. Dopo alcuni tentativi falliti da parte di altri astronomi, lo scienziato francese Bernard Lyot risolse il problema.

La soluzione ideata da Lyot fu quella di posizionare un cono di metallo su una lente del telescopio utilizzato, che impedisce alla luce del disco solare di disturbare l'osservazione della luce proveniente dalla corona, oggetto dello studio. Una differenza importante tra un'eclisse ed il coronografo di

Lyot è che nella prima l'occultatore è esterno, mentre nella seconda è interno al telescopio, questa sostanziale differenziazione sarà la prima di una serie di diversi approcci nell'ideazione dei coronografi che porteranno alla suddivisione in varie famiglie, oggetto della presente rassegna.

Al giorno d'oggi, anche se l'osservazione non riguarda più né la nostra stella né la sua corona, il nome coronografo ancora indica un dispositivo che si applica sulle ottiche di un telescopio per coprire una fonte luminosa così da poter studiare gli oggetti nel suo intorno, esempio principe è lo studio degli esopianeti.

Di seguito una panoramica dei più importanti stadi dello sviluppo dei coronografi

1930	B. Lyot inventa il coronografo a occultamento interno, pensato per osservatori in alta quota.
1948	J. Evans inventa il coronografo a occultamento esterno (externally occulted solar aureola photometer).
1960	G. Newkirk e I. Eddy effettuano il primo esperimento coronografico su pallone stratosferico, 25 km sul livello del mare. L'occultatore era costituito da un solo disco. L'immagine della corona fu sovrastata dalla luce diffusa.
1963	Mediante un coronografo fotografico compatto installato su un razzo sonda per una missione sub-orbitale, il gruppo del Naval Research Laboratory (NRL) guidato da R. Tousey ottiene la prima storica immagine della corona estesa non in coincidenza con una eclisse di Sole. Il coronografo usava un occultatore esterno a dente di sega.

1964	Il gruppo del High Altitude Observatory (HAO), guidato da D. Bohlin e G. Newkirk, ottiene la prima immagine della corona estesa con un coronografo occultato esternamente mediante un sistema a 3 dischi. Il "Coronascope II" vola su un pallone aerostatico.
1965	NRL effettua il primo tentativo spaziale per un coronografo compatto con occultamento esterno a 3 dischi, sul satellite OSO-2.
1967	Prima osservazione della corona IR (R.M. MacQueen) con un coronografo a triplo occultatore esterno lineare e fotometro a scansione IR, trasportato da un pallone aerostatico.
1967-1968	Il gruppo francese guidato da A. Dollfus ottiene foto della corona intermedia usando una pellicola sensibile al vicino IR e un coronografo con occultatore esterno a dente di sega, su pallone aerostatico.
1963-1972	Vengono lanciati con successo diversi razzi sonda dal gruppo NRL. A bordo sono installati due coronografi montati a specchio per superare il problema dovuto al vignettamento del sostegno dell'occultatore.
1971-1974	Prime osservazioni ininterrotte della corona mediante il coronografo NRL montato sul satellite OSO-7. Il rivelatore è un SEC Vidicon. Si osserva per la prima volta un' eruzione coronale (Coronal Mass Ejection, CME) indotta da un brillamento.
	In questo contesto ci preme ricordare Dave Roberts, uno dei tecnici che partecipò alla missione e che contribuì a tutte le missioni solari NRL da allora fino al recente lancio di HERSCHEL/SCORE , il prototipo di Metis (vedi più avanti). Ha sempre sostenuto di essere stato il primo uomo a osservare una CME e di aver pensato inizialmente a un' anomalia del rivelatore. Dave ci ha lasciato nel 2014.

1973-1974	Durante la missione Skylab operò il coronografo in luce bianca del HAO montato su ATM (Apollo Telescope Mount). Furono portate a Terra più di 35000 foto calibrate ad alta qualità.
1976	Primo successo per un coronografo sovietico su razzo sub-orbitale dell'Università di Kiev.
1976	Progetto di una nuova famiglia di coronografi leggeri occultati esternamente, in risposta a un bando per esperimenti da far volare sulla International Solar Polar out-of-ecliptic (OOE) Mission (ISPM).
1979-1985	Lunga serie di osservazioni coronali effettuate con un coronografo NRL a bordo del satellite della difesa con orbita polare P-78-1. Furono scoperte le comete Sun-grazing.
1980	Inizio delle osservazioni con un coronografo di nuova generazione a bordo della sonda SMM (Solar Maximum Mission). Nel 1984, grazie alla prima missione spaziale per manutenzione in orbita, il coronografo viene riparato e reso nuovamente operativo. Continuerà a funzionare fino al 1989.
1993	Prime osservazioni della corona UV con la missione Spartan-201. La missione include un coronografo in luce bianca (il primo a implementare un CCD come rivelatore) e un prototipo di SOHO/UVCS (vedi più avanti).
1995	Lancio della missione SOHO Solar and Heliospheric Observatory). Si tratta di un osservatorio spaziale che orbita intorno al punto lagrangiano L1 e quindi in grado di osservare il Sole con continuità. A bordo si trovano, fra gli altri, 3 coronografi in luce bianca (LASCO/C1, C2 e C3) e il Ultraviolet Coronagraph Spectrometer (UVCS). LASCO C2 e C3 sono ancora in funzione.

2006	<p>Lancio della missione STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory), costituita da due satelliti quasi identici con orbita diversa: uno che anticipa la Terra, l'altro che la segue. Ha fornito la prima immagine stereoscopica del Sole. A bordo di entrambi, fra gli altri strumenti, ci sono due coronografi in luce bianca (Cor-1 e Cor-2) e un telescopio eliosferico (Heliospheric Imager, HI).</p>
2009	<p>Viene lanciato con successo il razzo sonda con a bordo la missione HERSCHEL (HElium Resonant Scattering in the Corona and HELiosphere). Del carico scientifico fanno parte un coronografo dedicato all'osservazione della corona nella riga HeII 30.4 nm (HeCor) e un prototipo del coronografo Solar Orbiter/ Metis (SCORE, Sounding CORonagraph Experiment), in grado di effettuare immagini multibanda della corona esterna (visibile, HI LyA 121.6 nm e HeII 30.4 nm). La missione ha fornito la prima mappa globale della corona solare nella riga HeII</p>

2. Descrizione sintetica di un coronografo

La struttura standard di un telescopio con coronografo di Lyot (Figura 1) prevede una pupilla di entrata (a) dove passa la luce del sistema osservato, un disco di occultamento posizionato sul piano focale (b) che blocca la luce della sorgente luminosa lasciando passare quella dell'area di studio, uno stop di Lyot nel piano della pupilla di uscita (c) che limiterà gli effetti aberrativi del disco di occultamento sul detector (d) dove verrà analizzata la luce entrata.

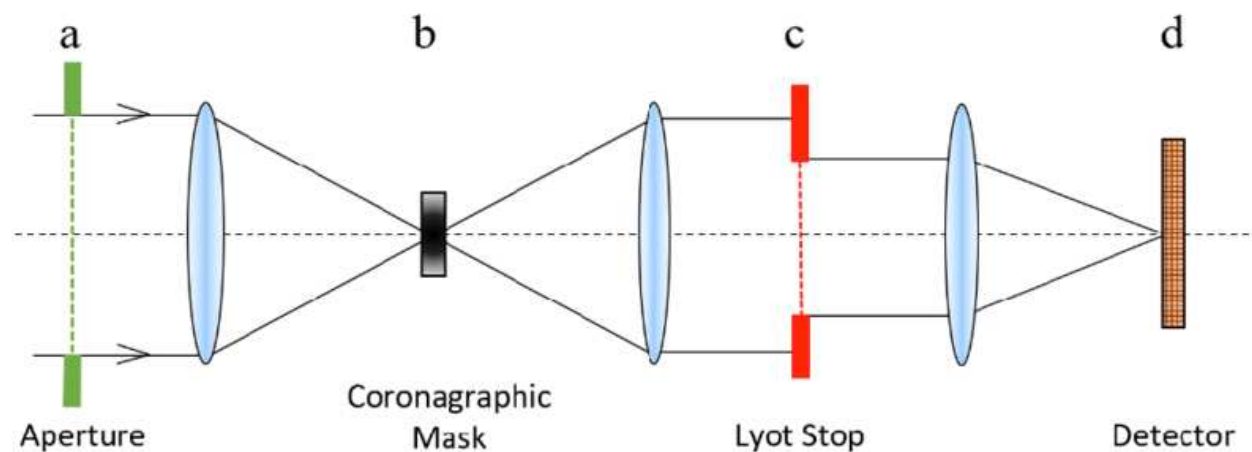


FIGURA 1

Questo sistema è l'archetipo che ha aperto la strada negli anni all'ideazione di una moltitudine di diversi coronografi con diversi

meccanismi, che vanno dal controllo ampiezza luminosa alla fase dei raggi entranti.

2.1 Caratteristiche

I coronografi possono essere descritti attraverso alcune proprietà oggettive che ne permettono il confronto, così da trovare il migliore modello per il migliore utilizzo. Non esiste il coronografo perfetto, ogni soluzione ha punti di forza e punti di debolezza, starà all'utente scegliere il migliore per lo specifico lavoro che dovrà eseguire.

Inner Working Angle (IWA): questa misura indica quanto una debole sorgente luminosa può essere vista vicino alla stella. IWA è definito solitamente come la distanza in (λ/D) dall'asse ottico alla quale la portata del flusso del pianeta è il 50% della portata massima.

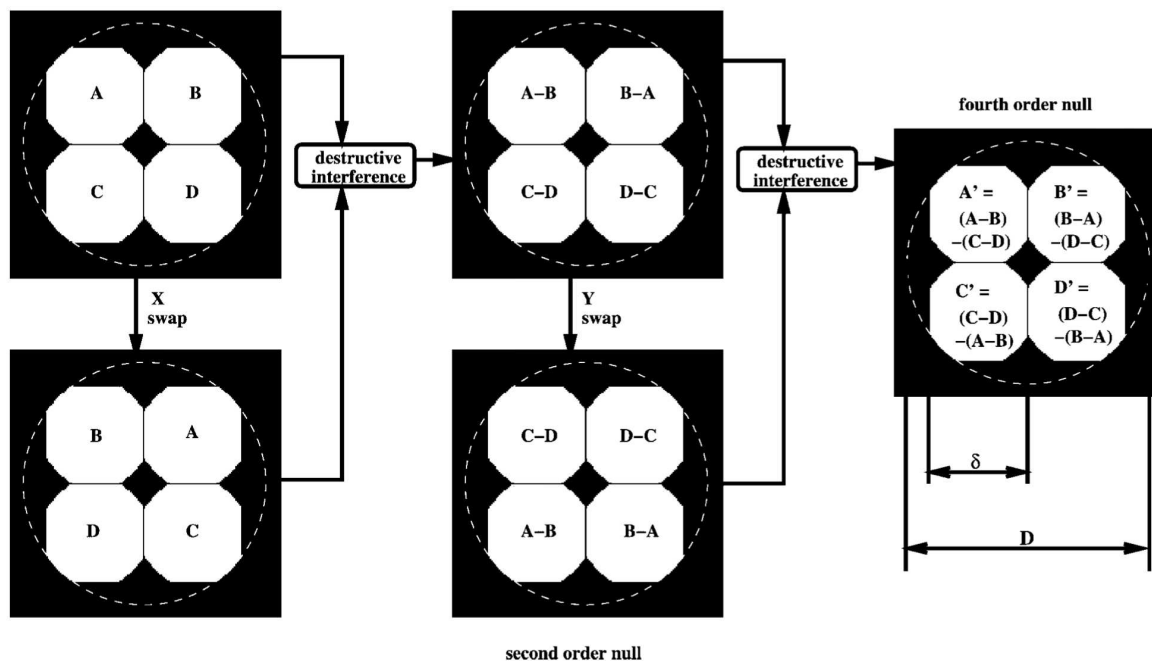


FIGURA 2

Null Order (NO): quantifica la portata del coronografo come funzione della separazione angolare rispetto all'asse ottico (Figura 2)

Raw Contrast (RC): rapporto tra la luminosità della superficie locale e la luminosità del picco del Point Spread Function (PSF).

Useful Throughput (UT): definito come la massima quantità di luce del pianeta che può essere usata per il suo rilevamento. Il criterio di separazione è la distanza dall'asse ottico alla quale la luce del pianeta e la luce residua della stella hanno la stessa intensità (Figura 3).

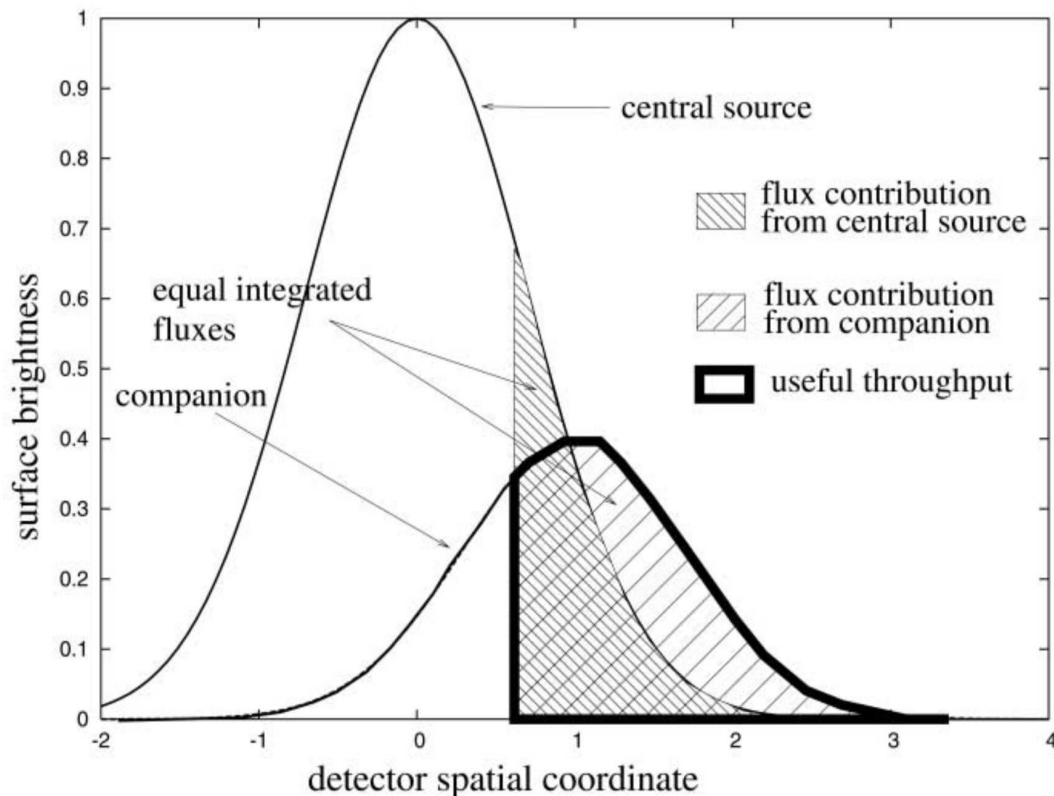


FIGURA 3

Qui di seguito verrà proposta una prima suddivisione che presenta i punti chiave dei vari approcci utilizzati nelle famiglie di coronografi, ma prima servirà introdurre il concetto di StageFourier Filtering.

2.2 StageFourier Filtering

Consideriamo sistema ottico seguite (Figura4), abbiamo il primo piano che contiene la pupilla di un telescopio ideale con perfetta focalizzazione del campo elettromagnetico (EM da qui in avanti) nel punto focale. il secondo piano, chiamato Piano di Fourier (o piano focale), conterrà la maschera focale. Il terzo piano invece, conterrà il rivelatore del nostro telescopio. Tramite calcoli saremo in grado di identificare il campo EM sul rivelatore

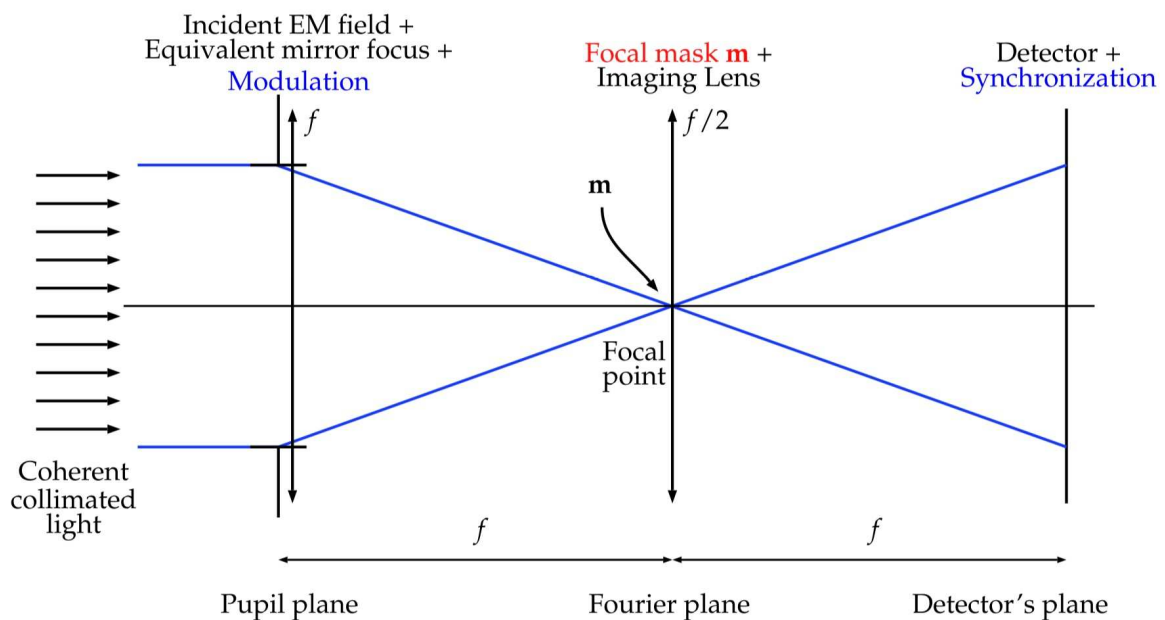


FIGURA 4

come una funzione che sarà uguale alla convoluzione della funzione che descrive il campo EM sul piano della pupilla e una trasformata di Fourier che descrive l'effetto della maschera nel piano focale.

L'utilizzo della maschera permetterà di codificare la fase del flusso entrante. Nel piano focale, che è lo spazio di Fourier associato al piano della pupilla, avremo una separazione delle frequenze del flusso EM entrante, dove vicino all'asse ottico si avranno le frequenze più basse, mentre le frequenze più alte saranno nelle zone più lontane dall'asse. Tramite questa distribuzione saremo in grado di rimuovere o valorizzare le frequenze che vogliamo.

2.3 Suddivisione per posizione occultatore

La prima classificazione sarà tra coronografi con occultatore interno (come la stragrande maggioranza dei casi) e occultatore esterno.

2.3.1 Occultatore esterno

L'idea di questa configurazione (Figura 5) è quella di bloccare la luce della sorgente luminosa prima che entri nel nostro apparecchio di osservazione, così da rendere più facile l'osservazione dell'oggetto studiato ed avere meno disturbo da parte della luce diffratta della stella. Durante un'eclisse solare, la Luna agisce da occultatore esterno, bloccando la luce solare e

permettendo di osservare la Corona Solare, altrimenti soverchiata dal rumore del Disco Solare.

La teoria di questo sistema è stata sviluppata negli ultimi 10 anni dalla NASA, e prevede l'utilizzo di almeno due veicoli spaziali, uno trasportante l'occultatore ed uno il telescopio con gli strumenti di analisi della luce e stoccaggio dei dati. Siccome l'occultatore dovrebbe essere posizionato a grande distanza dal telescopio e dovrebbe essere più grande dell'apertura del telescopio per motivi di convenienza geometrica, nello sviluppo teorico si calcola che dovrebbe avere diverse decine di metri di diametro. Purtroppo i moderni razzi per il trasporto spaziale di materiale non raggiungono ancora queste misure, per cui la maschera dovrà essere spedita impacchettata e solo quando si troverà nello spazio potrà spiegarsi e raggiungere la forma utile alla missione. Infine, essendo la luce diffratta dai bordi il principale elemento di disturbo (assieme alla luce zodiacale) alle osservazioni, l'occultatore dovrà avere una precisa e particolare forma, così da minimizzarne il rumore trasmesso.

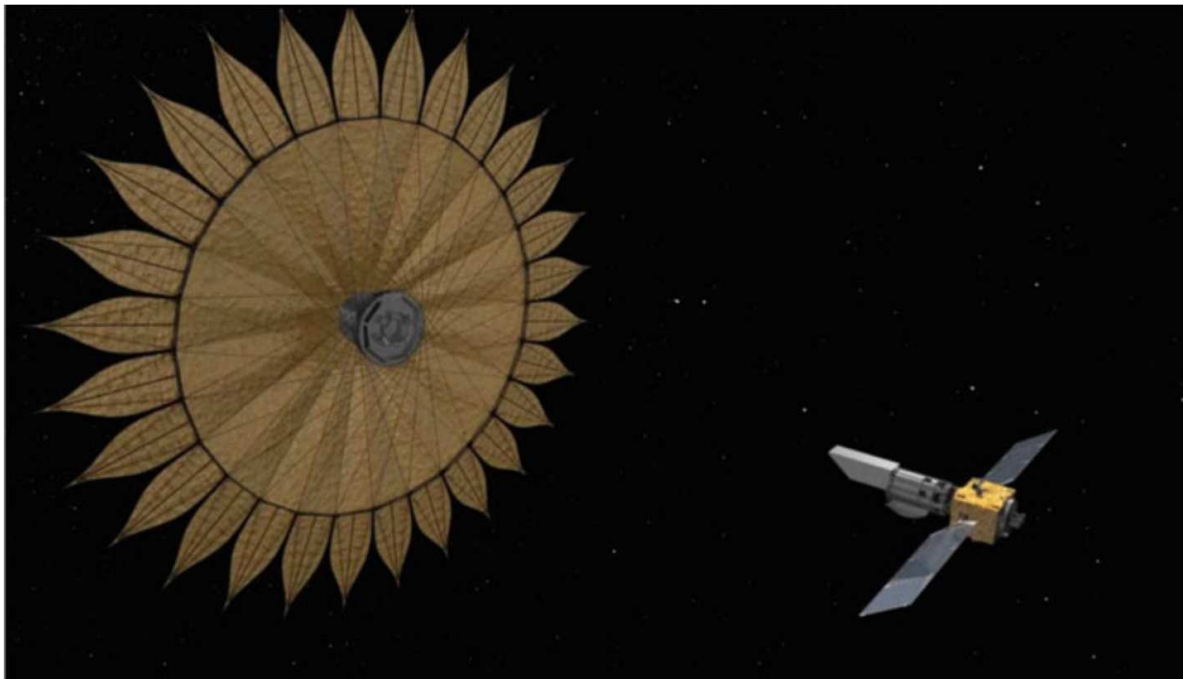


FIGURA 5

2.3.2 Occultatore interno

Come discusso nell'introduzione, il fondamentale modello per i coronografi con occultatore interno è quello di Lyot, ma da esso possiamo identificare tre principali rami in cui gli sviluppi si sono separati:

- **Coronografi interferometrici**, che utilizzano dei Beam Splitters per separare il flusso entrante nel telescopio così da far interferire distruttivamente la luce sull'asse ottico (dove è presente la sorgente luminosa disturbante) e costruttivamente la luce al di fuori di un certo raggio (IWA) per poter osservare il pianeta studiato;
- **Apodizzazione della pupilla**, che consiste nel modellare la pupilla d'entrata del telescopio per far sì che la diffrazione data dai bordi della pupilla sia minore possibile e quindi il rumore disturbi il meno possibile l'osservazione del pianeta;
- **Potenziamento del modello di Lyot**, che avviene attraverso l'utilizzo di una maschera, la quale agirà sulla fase o sull'ampiezza dell'onda. Questo metodo migliora il rendimento del modello di Lyot dato che esso tende ad avere della luce che fuoriesce dal sistema, più è piccola la maschera focale più luce verrà dispersa.

2.4 Suddivisione per estinzione della luce

Un altro efficace criterio per la suddivisione dei coronografi è da ricercare nel modo in cui scartano la luce della stella centrale.

Questa distinzione vale solamente per i coronografi con occultatore interno, il modello con occultatore esterno è stato già presentato nella precedente suddivisione.

In questo caso abbiamo tre famiglie che si vengono ad identificare: Beam Splitters, Stop in immagine e Stop in pupilla.

2.4.1 Beam Splitters

Ovvero i coronografi interferometrici, che ricalcano il gruppo descritto nella precedente suddivisione.

Un esempio di questo tipo è l'Achromatic Interferometric Coronagraph (AIC). Questo modello è fondamentalmente un Interferometro di Michelson (IM) con un braccio modificato dall'inserimento di uno sfasatore di una fase π e una rotazione della pupilla di 180° (Figura 6). entrambi questi cambiamenti sono eseguiti da un retroriflettore ad occhio di gatto, posizionato al termine di un braccio dell'interferometro, invece del normale specchio piatto del modello classico.

Solitamente, nel IM, una fonte non risolta che entra nel sistema con un fascio collimato porterà ad un immagine di massima intensità quando la Differenza di Cammino Ottico (DCO) è nulla. Questo avviene sia per i raggi sull'asse ottico sia per quelli al di fuori. Inserendo solo uno sfasamento di π si avrebbe una completa estinzione dell'immagine a

DCO nulla, poiché l'interferenza è distruttiva sia sull'asse che al di fuori. Aggiungendo invece in un braccio una rotazione della pupilla di 180° impediremo l'interferenza distruttiva fuori dall'asse mantenendo quella sull'asse, portando sul rivelatore una coppia gemella dell'immagine del pianeta.

Il processo di estinzione della luce in questo tipo di coronografi è ben diverso dagli altri metodi. Non si tratta di occultare un'area del piano immagine e lasciare la luce passare oltre, ma piuttosto di portare a zero il solo contributo della stella rispetto a tutto il piano immagine. Questo significa che in condizioni ideali solamente i coronografi Beam Splitters possono rimuovere completamente la luce della sorgente luminosa, semplicemente perché i fotoni non raggiungono il piano immagine.

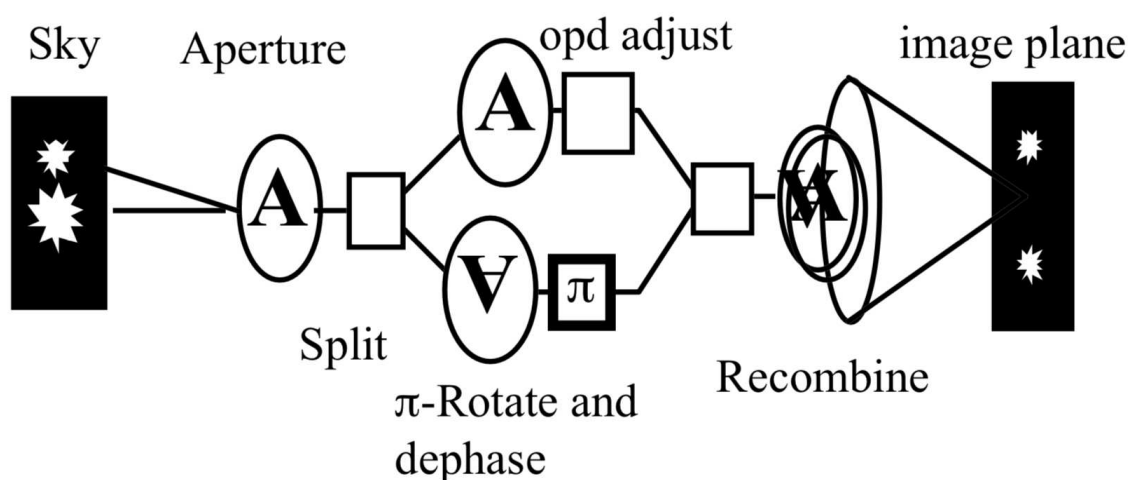


FIGURA 6

2.4.2 Stop in immagine

I coronografi con stop in immagine sono una categoria che prevede solamente uno stadio di filtro di Fourier. In questo caso si ha

l'applicazione di un metodo per il rimodellamento del campo EM in entrata attraverso particolari conformazioni delle ottiche del telescopio, le quali permetteranno di ridistribuire la luce in maniera da contenere la PSF della sorgente centrale e poter garantire un contrasto sufficiente anche a pochi λ/D dall'asse ottico.

Questo sistema prevederà uno scarto della luce direttamente sul piano d'immagine del detector, dove la luce del pianeta potrà essere studiata con meno rumore possibile dato dalla stella.

Un esempio per questo sistema è il Phase Induced Amplitude Apodization (PIAA).

I classici sistemi di apodizzazione della pupilla prevedono l'utilizzo di una maschera inserita nel piano pupilla per modificare l'ampiezza del campo EM e quindi ridurre la larghezza della PSF della sorgente centrale.

Nel PIAA, invece, l'apodizzazione della pupilla può essere ottenuta operando una ridistribuzione del campo EM attraverso la riflessione di due specchi, accuratamente modellati, le cui aberrazioni di fase permettono di produrre una pupilla d'uscita che riduce significativamente la propagazione della luce della sorgente nel piano d'immagine (Figura 7).

Nello schema ottico mostrato il ruolo dello specchio primario è principalmente quello di modificare la distribuzione della luce attraverso la pupilla, mentre la funzione del secondo specchio è di correggere l'aberrazione di fase introdotta dal primo, anche se queste due diverse funzioni sono in realtà condivise da entrambi gli elementi ottici.

Se vengono utilizzati degli specchi per questa apodizzazione, la pupilla formata dalla tecnica PIAA è perfettamente acromatica. Questa acromaticità è dovuta semplicemente alle leggi geometriche della riflessione di uno specchio. Siccome le ottiche del coronografo mantengono una DCO nulla, la tecnica PIAA non introdurrà nessuna aberrazione di fase, indipendentemente dalla lunghezza d'onda considerata. Perciò la PSF ottenuta dal coronografo, a parte un fattore di scala proporzionale alla lunghezza d'onda, sarà uguale ad ogni lunghezza.

Phase Induced Amplitude Apodization

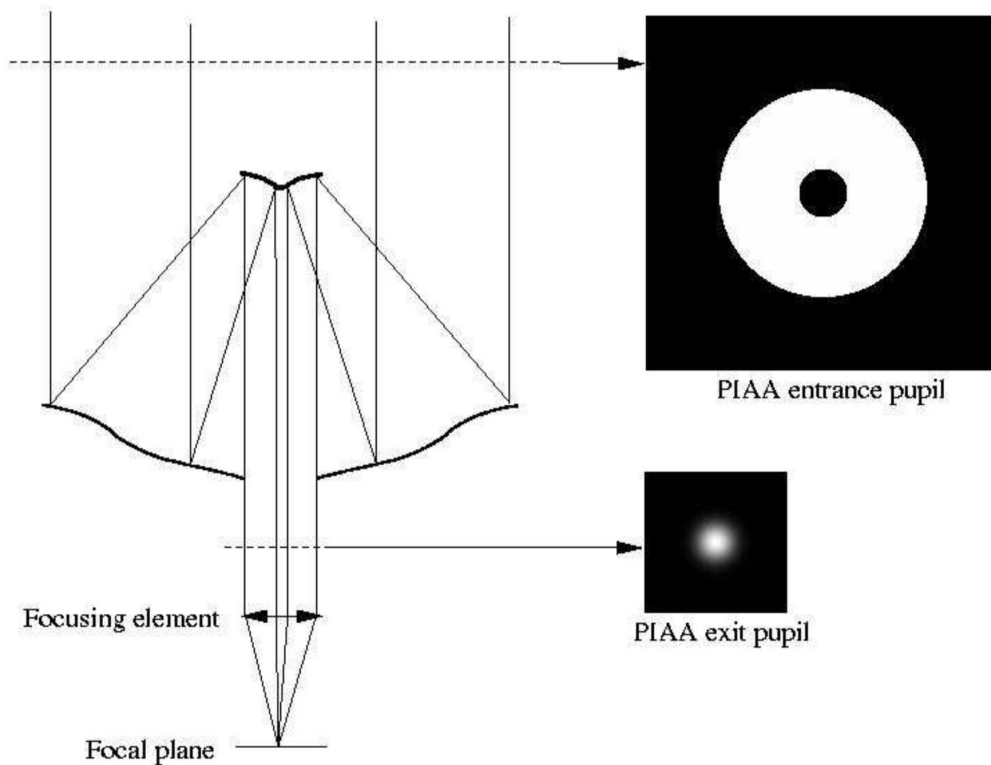


FIGURA 7

2.4.3 Stop in Pupilla

I cronografi con Stop in Pupilla prevedono due o più stadi di filtro di Fourier. Questa necessità è data dal diverso approccio nella manipolazione dei raggi luminosi entranti. In questa configurazione avremo una pupilla d'entrata che provvederà ad un altro F/D (flusso/diametro) rateo per un'altra quantità di fotoni, questa pupilla concentrerà

poi i raggi nel piano focale, dove viene posizionata una maschera detta appunto maschera focale. Questo strumento può agire sui raggi in modo diverso a seconda del tipo di coronografo utilizzato, alcuni modelli agiscono modificando la fase dell'onda EM, altri invece agiscono sull'ampiezza, ma lo scopo è sempre quello, come nel caso delle pupille della categoria precedente, di liberare la zona del campo di vista dove vogliamo cercare e studiare i deboli oggetti celesti attorno alla stella dal suo stesso rumore.

Questo punto corrisponde al primo stadio di filtro di Fourier, dopodiché avremo una pupilla che, nel caso di un coronografo a doppio stadio di Fourier, riallinea i raggi parallelamente i raggi provenienti dal piano focale. Successivamente avremo uno stop di Lyot, con un'apertura più piccola della pupilla, che bloccherà così la luce diffratta. A questo punto un'ulteriore pupilla formerà l'immagine rielaborata sul ricevitore.

Un esempio popolare di questo modello, oltre al classico coronografo di Lyot, è il 4 Quadrant Phase Mask (4QPM):

Questo coronografo si basa sull'utilizzo di una maschera di fase quadrata, dove il piano della maschera viene diviso in 4 sezioni uguali formando quattro quadrati. Due di questi quadrati, su una diagonale, avranno fase nulla, mentre gli altri due avranno una fase pari a π (Figura 8). I quattro raggi luminosi così creati si combineranno sull'asse ottico così da formare una solida interferenza distruttiva ad un ideale punto infinito, che viene trovato nel punto focale, e la luce stellare verrà espulsa al di fuori dell'area della pupilla, con un forte contributo vicino ai bordi. Successivamente uno stop di Lyot rimuoverà la luce diffratta.

Questo conclude la suddivisione generale dei coronografi, nella prossima sezione vedremo una mappa dei coronografi più conosciuti e come sono suddivisi in base ai parametri presentati.

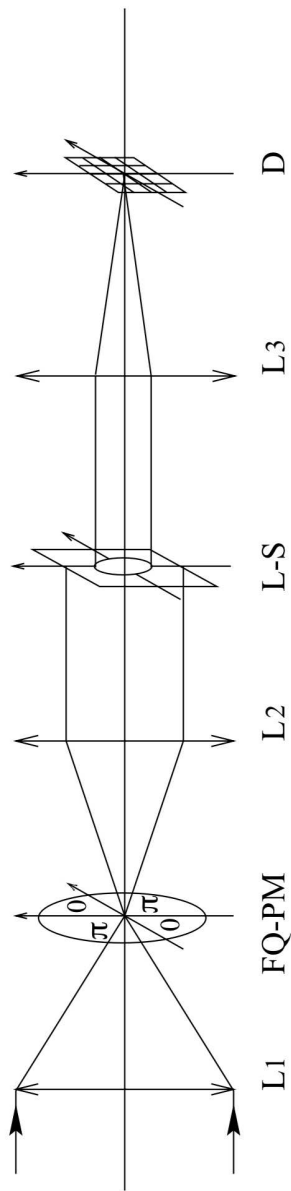


FIGURA 8

3. Mappare coronografi nello spazio dei parametri

La seguente mappa (Figura 9) fornisce una panoramica dei vari modelli di coronografi studiati nella pratica o anche solo nella teoria.

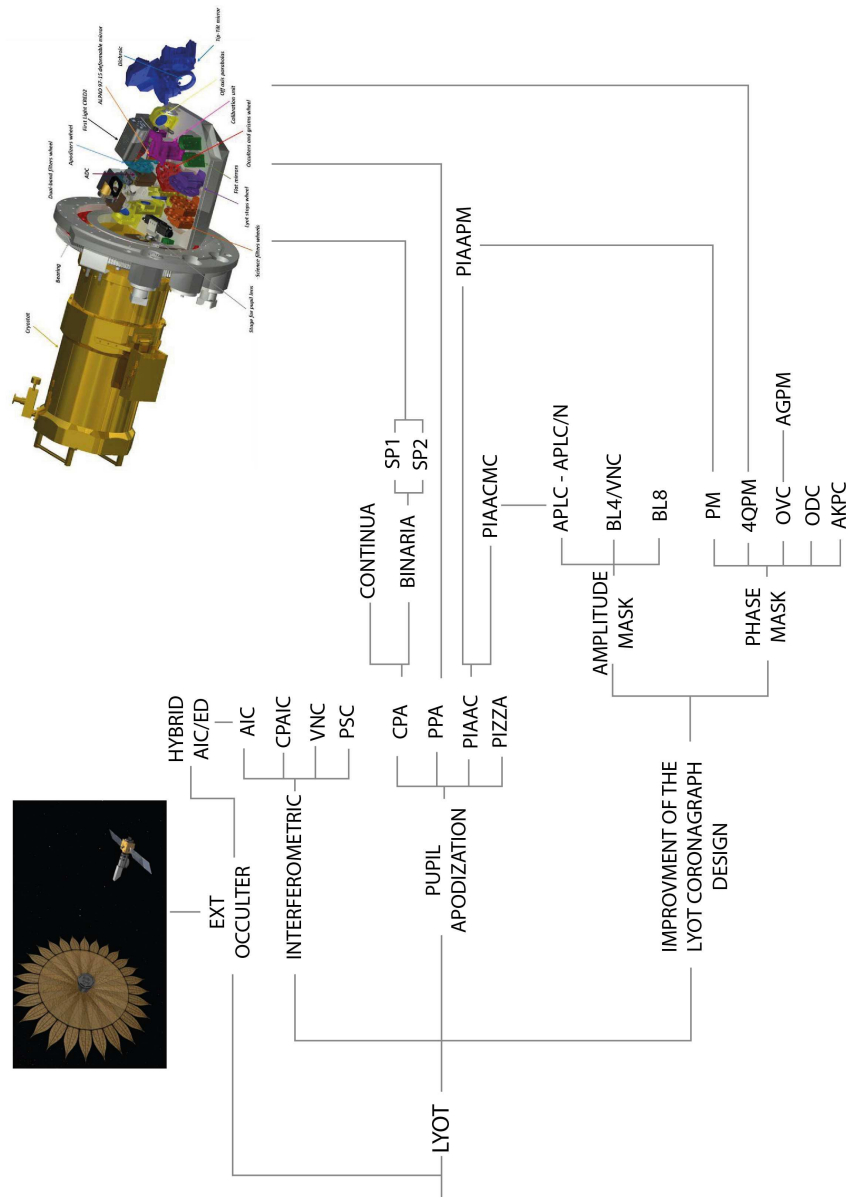


FIGURA 9

3.1 Occultatore esterno

La prima famiglia, ovvero i coronografi con occultatore esterno, sono stati descritti nella precedente sezione. Questa configurazione solo ipotetica è stata oggetto di studio teorico ma al momento non è considerata conveniente.

3.2 Coronografi Interferometrici

Achromatic Interferometric C: descritto in precedenza, prevede la combinazione costruttiva e distruttiva dei raggi a seconda della distanza dall'asse ottico, l'immagine finale presenta un'ambiguità di 180° , che potrebbe essere rimossa al prezzo di perdere acromaticità.

Common Path Achromatic Interferometric C: stesso concetto del precedente AIC, costruendo uno sfasamento di π tra i diversi fasci, con la differenza che questi fasci di luce hanno un percorso comune, quindi questa configurazione è più robusta nel mantenere una DCO nulla.

Visible Nulling C: due ottiche in successione con direzioni perpendicolari producono 4 fasci di luce di cui 2 con sfasamento π che, quando ricombinati, portano ad un annullamento del 4° ordine (ovvero la combinazione distruttiva dei 4 raggi tramite interferometria) nel piano della pupilla. Così facendo possiamo oscurare la sorgente sulla'asse ottico e valorizzare quelle al di fuori.

Pupil Swapping C: in questo modello la pupilla viene suddivisa in 4 parti uguali e vengono fatte interferire con delle loro immagini speculari rispetto agli assi X e Y, prima uno e poi l'altro, così da creare interferenze distruttive del 4° ordine. Questo sistema permette di evitare la perdita di portata dei raggi entranti presente nei modelli precedenti.

3.3 Coronografi con Pupilla Apodizzata

Conventional Pupil Apodization: In questo caso abbiamo un'apodizzazione introdotta da una maschera, che agisce sull'ampiezza, inserita nel piano della pupilla d'entrata, la quale può essere continua (ovvero con una percentuale di flusso passante che va da 0 a 100 a seconda del punto) o binaria (dove in ogni punto il flusso passante è totale o nullo). Il vantaggio delle maschere binarie è la loro acromaticità e la significativa facilità nella costruzione rispetto alle maschere continue, questo avviene però al costo di una diminuzione nelle prestazioni nella ricerca di pianeti: nelle maschere continue la quantità di luce passante la pupilla è vicina al 100%, mentre nelle maschere binarie avremo solo il 50%; inoltre nelle maschere continue la luce è diffratta eviterà un'ampia regione attorno al centro della PSF, mentre nella maschera binaria la diffusione della luce sarà più disturbante.

Pupil Phase Apodization: come nel caso precedente abbiamo una maschera che agisce sul piano della pupilla di ingresso, ma in questo caso agisce sulla fase della luce entrante e non sulla sua ampiezza, consentendo disturbare solo metà del CDV, per via della differenza di fase creata. Per contenere gli effetti aberrativi nella zona d'interesse si dovrà diminuire la quantità di luce trasmessa nei bordi della maschera, anche se ciò

inquinerà una parte del nostro campo di indagine, ciò riduce ulteriormente il CDV.

Phase Induced Amplitude Apodization C: questa configurazione è già stata discussa. I vantaggi rispetto ad altre tecniche come CPA comprendono una trasmissione della luce del 100%, un guadagno in risoluzione angolare, fondamentale nell'individuazione di esopianeti e un CDV che comprende tutta l'immagine.

Phase Induced Zonal Zernike Apodization: questa tecnica di apodizzazione prevede l'inserimento di una maschera focale con sfasamento di $\pi/2$ leggermente allontanata dal piano focale, affinché agisca solamente sulla sorgente sull'asse ottico. Ciò influenzerebbe solamente la sorgente sull'asse ottico lasciando invariato tutto il resto del CDV. Questa tecnica consente di aver ottime prestazioni nello studio esopianeti, al costo però di una forte dipendenza della qualità del fronte d'onda, quindi per raggiungere il contrasto necessario dovrebbe sempre essere accoppiata ad un sistema di correzione del fronte d'onda.

3.4 Miglioramenti del modello di Lyot

3.4.1 Maschere d'ampiezza

Nel coronografo di Lyot la pupilla del telescopio e la maschera focale non sono fatti per lavorare insieme al meglio, il che provoca una forte perdita di luce nel sistema. Per ovviare a questo problema si possono seguire due strade:

- **Apodized Pupil Lyot Coronagraph:** si può adattare la pupilla ottimizzandola per lavorare con la maschera focale, così da evitare di avere troppe perdite nel sistema. La pupilla d'uscita del coronografo

potrebbe essere usata come pupilla d'entrata di un altro con la stessa configurazione, così da crearne in serie e migliorare il contrasto.

- **Band-Limited Mask:** si può adattare la maschera focale ottimizzandola per la pupilla utilizzando una maschera a banda limitata, dove la luce sull'asse ottico passa attraverso la maschera e viene diffratta sugli estremi dell'immagine dove lo Stop di Lyot la può bloccare, mentre la luce al di fuori dell'asse ottico viene lasciata passare e passa in larga parte attraverso lo Stop. Solitamente le maschere hanno una struttura a strisce oppure ad anelli e possono garantire fino ad un 80% di portata per la luce di un pianeta fuori dall'asse. A questa configurazione si associa un numero che corrisponde al NO del coronografo.

3.4.2 Maschere di fase

Questi modelli introducono uno slittamento di fase nel piano focale, così da raggiungere IWA inferiori rispetto ai APLC e BL.

Phase Mask: coronografo che induce una maschera a sfasamento circolare di fase pi oltre che una leggera apodizzazione d'ampiezza per aumentare il contrasto.

Four-Quadrant Phase Mask: modello già discusso, risulta essere meno influenzato da turbolenze atmosferiche, quindi resiste meglio allo sfasamento del fronte d'onda indotto dall'atmosfera. Risulta influenzato dalla cronicità dell'onda EM.

Achromatic Phase Knife C: prevede una maschera nel piano focale che produce una forte interferenza distruttiva nel piano di pupilla coniugato. Consiste nel disperdere e sfasare di pi il fronte d'onda sull'asse

ottico lungo due direzioni ortogonali in due piani focali consecutivi. La distribuzione dell'intensità mostra un'interferenza distruttiva quasi perfetta. Dal punto di vista teorico, una maschera infinitamente grande in un telescopio con capacità di trasmissione del 100% ed un'onda monocromatica porterebbe ad una completa remissione della luce sull'asse ottico, ma nella realtà le limitate dimensioni della maschera focale come le altre condizioni non ideali portano del rumore nel sistema dovuto all'aberrazione della luce, e così ad un aumento di rumore nel sistema.

Optical Vortex C: modello che prevede l'utilizzo di una maschera di fase a vortice, con una differenza di fase ellittica nel piano x, y e con l'asse z corrispondente all'asse ottico. Questo sistema consente un forte profilo d'intensità lontano dall'asse mentre porta ad una zona centrale oscurata, così da eliminare la luce della stella.

Annular Groove Phase Mask C: maschera focale composta da una rete circolare concentrica con separazione dell'ordine della lunghezza d'onda del campo EM, che induce uno sfasamento differenziale nel fronte d'onda. Adatto alla luce visibile.

Optical Differentiation C: tecnica simile alla precedente, ma in questo caso la maschera è calibrata secondo una funzione linearmente crescente con la distanza dall'asse ottico la quale aumenta l'ampiezza trasmessa del campo EM.

4. Un caso particolare

Prendiamo in esame una configurazione ibrida che implementa due differenti tecniche coronografiche per un aumento delle prestazioni.

4.1 Phase Induced Amplitude Apodization Complex Mask Coronagraph (PIAACMC)

Come nella tecnica PIAA, in questo modello avremo avremo un'apodizzazione prodotta da una coppia di specchi che modificano il fronte d'onda senza perdite di portata o risoluzione angolare oltre che ad un IWA molto piccolo, ed in combinazione a questa tecnica avremo una maschera focale parzialmente trasmittente e con uno sfasamento di π che porterà un occultamento della sorgente centrale. La curva di prestazioni del PIAACMC, indicata dal livello di UT fornito dalla configurazione scelta, dipende solamente dalla grandezza della maschera focale, mentre è completamente indipendente dal contrasto dell'immagine. Si avrà una leggera diminuzione delle prestazioni all'aumentare della maschera della sua opacità. Come ogni altro modello di coronografo, avremo una forte dipendenza del UT nei confronti delle dimensioni della sorgente luminosa. Il caso ideale che prevede una sorgente puntiforme ci fornisce i valori ideali, ma non appena introduciamo una sorgente risolta ecco che le prestazioni calano con discreta rapidità.

Il PIAACMC è particolarmente interessante in alternativa al PIAA quando il contrasto cercato e la dimensione angolare della sorgente permettono un IWA più piccolo di circa $2.0 \lambda/D$. Questo modello è perciò molto efficiente per la ricerca di giovani pianeti massivi da terra.

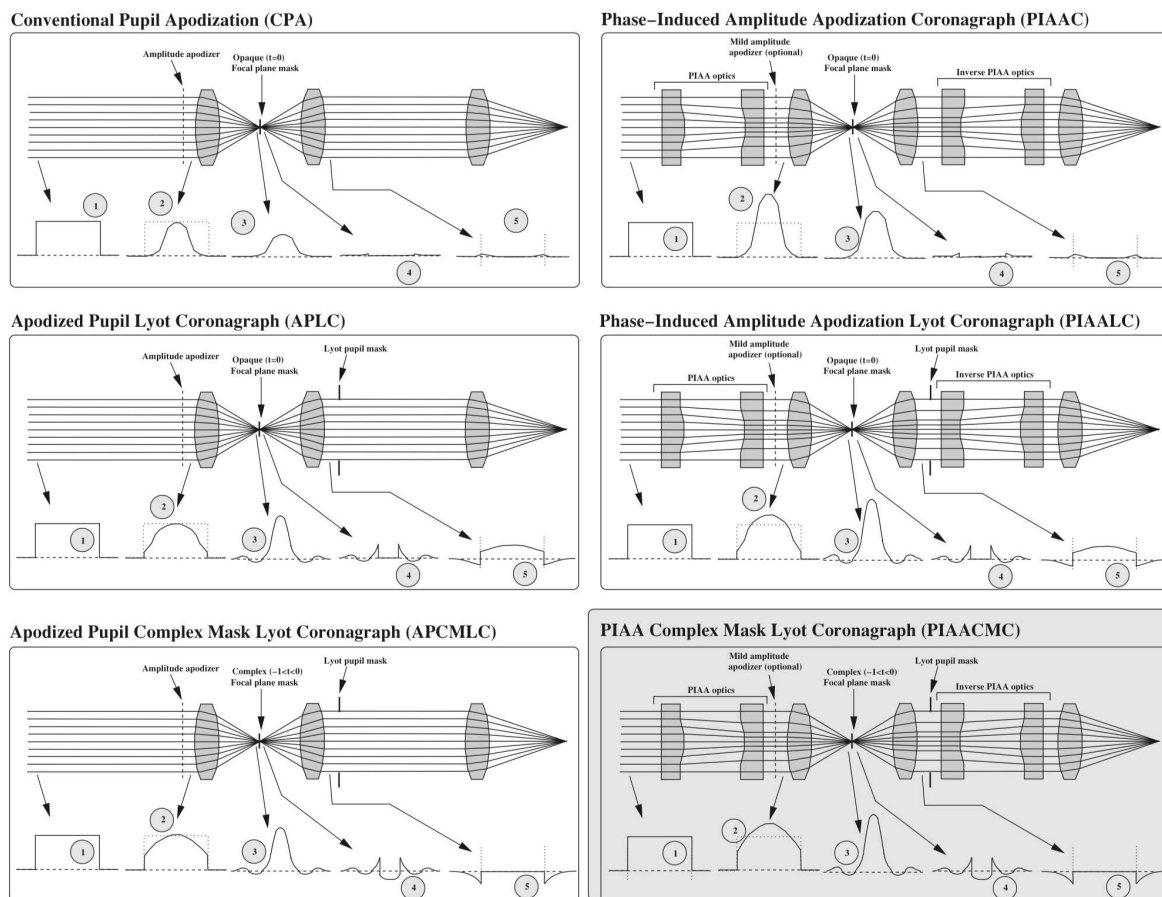


FIGURA 10

4.2 Confronto in dettaglio

Nella Figura 10 si possono apprezzare le varie architetture che precedono concettualmente il PIAACMC e la forma del fronte d'onda ad ogni stadio dei vari sistemi. (1) pupilla d'entrata del telescopio, (2) pupilla dopo l'apodizzazione, (3) piano focale prima della maschera focale, (4) piano focale dopo la maschera focale, (5) pupilla d'uscita prima dello Stop di Lyot.

In alto a sinistra abbiamo il CPA, dove l'effetto coreografico è fornito solamente dall'apodizzatore sul piano della pupilla d'entrata e dalla maschera focale, si può notare che, una volta passato la maschera (binaria in questo caso), il fronte d'onda perda molta portata.

Le prestazioni sono migliorate nel APLC, al centro a sinistra, in cui introducendo uno Stop di Lyot nel piano della pupilla d'uscita nel migliorai contrasto bloccando la luce aberrata dalla maschera focale. Un ulteriore avanzamento delle prestazioni si ha rimpiazzando la maschera focale binaria opaca nel piano focale con una maschera parzialmente trasmettente, così da non perdere portata del flusso EM e quindi diminuire il SNR.

La parte destra della figura 10 mostra lestezze configurazioni appena discusse ma con l'apodizzazione indotta non più nel piano della pupilla da un apodizzatore classico ma da un'ottica PIAA, che garantisce nessuna perdita di portata nel sistema.

Passiamo ora a trattare la tecnologia coronografica di SHARK (System for coronagraph with High order Adaptive optics from R to K band), in particolare di SHARK-NIR

5. SHARK

SHARK-NIR e SHARK-VIS sono i due strumenti coronografici proposti per il Large Binocular Telescope (LBT).

Questi due apparecchi, operati nel vicino infrarosso il primo (0.96 μ m-1.7 μ m, nelle bande Y, J, H) e nel visibile il secondo (0.5 μ m-1 μ m, nelle bande V, R, I) offrono la possibilità di fare osservazioni binoculari combinando immagini dirette, immagini coronografiche e spettroscopia in un'ampia banda.

5.1 Large Binocular Telescope

L'LBT (Large Binocular Telescope), è un telescopio ottico di tipo binoculare costituito da due specchi primari parabolici di 8.4m di diametro ciascuno e ottimizzato per l'interferometria e l'osservazione ad ampio campo.

E' posizionato sul Monte Graham, in Arizona, a circa 3.200m slm e fa parte dell'Osservatorio Internazionale del Monte Graham.

L'LBT é il risultato di una collaborazione internazionale che vede la partecipazione degli Stati Uniti attraverso enti governativi e università, della Germania con il Max Plank Institute e altri istituti universitari e dell'Italia, attraverso l'INAF (Istituto Nazionale di Astrofisica).

5.1.1 Caratteristiche del Telescopio LBT

Il Large Binocular Telescope (Figura 11) è un telescopio ottico-infrarosso unico nel suo genere poiché costituito da due telescopi su un'unica montatura altazimutale (ottimizzato per interferometria di Fizeau), con specchi primari a nido d'ape, che ne garantiscono la rigidezza, mantenendoli, al contempo, snelli nel peso, estremamente veloci e con ottiche adattive integrate nel telescopio.

La struttura del telescopio LBT è stata dunque progettata per poter alloggiare 3 coppie di specchi principali: 2 specchi primari monolitici da 8.4m di diametro ciascuno, provvisti di ottiche attive, quindi in grado di correggere gli effetti delle deformazioni dovute al loro stesso peso; 2 specchi secondari adattivi concavi di 0.91m di diametro, in grado di lavorare sia come strumenti di ottica attiva che adattiva, quindi in grado di correggere gli effetti delle deformazioni causate dall'atmosfera, e 2 specchi terziari piani, montati su bracci meccanici in grado di dirigere il fascio di luce a seconda delle esigenze, verso l'interno della struttura.

L'LBT è stato studiato per ottenere un'area collettrice pari a quella di uno specchio singolo da 11.9m di diametro.

Il principale obiettivo che ha guidato la realizzazione di questi strumenti è la ricerca e caratterizzazione di esopianeti, ma lo studio di galassie ed oggetti extra galattici è tenuto in considerazione nell'utilizzo di LBT.



FIGURA 11

5.2 *SHARK-NIR*

Lo strumento prevede due piani pupilla intermedi e tre piani focali per ospitare molteplici tecniche coronografiche, selezionate per massimizzare il contrasto a varie distanze dalla stella (Figura 12).

La risoluzione raggiungibile da un telescopio dell'ordine dei 10m di diametro permette di accedere, nel dominio del vicino infrarosso, alla rilevazione di giganti gassosi della dimensione di Giove o più grandi, che è ancora una sfida importante in astronomia, grazie all'alto contrasto fornito e alla vicinanza con la stella ospite.

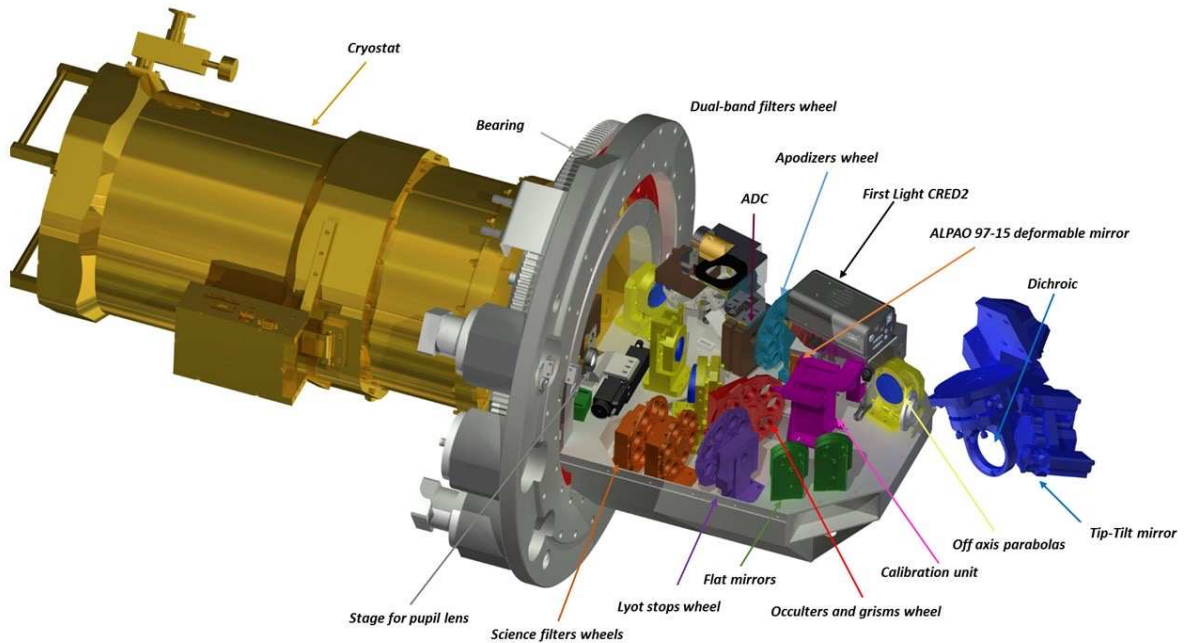


FIGURA 12

L'idea di fondo di SHARK-NIR è quella di una camera per coronografia e spettroscopia diretta, utilizzando il fronte d'onda corretto fornito dal ASM (Adaptive Secondary Mirror), operato attraverso uno dei LBTI AO WFS (LBT Interferometers Adaptive Optics Wave Front Sensing). Normalmente la ruota contenente le varie maschere utilizzate nelle varie tecniche prescelte andrebbe posizionata direttamente nel piano della pupilla, in questo caso, invece, avremo al suo posto un DM (Deformable Mirror) utilizzato per le correzioni aberrative e la correzione degli errori Tip-Tilt. Ciò significa che la nostra ruota dovrà essere posizionata a 50mm dal piano pupilla, il che dovrebbe portare a degli errori trascurabili se le maschere apodizzanti tengono in considerazione questo spostamento.

Andiamo ora a vedere tipi di coronografi scelti per SHARK-NIR e le loro caratteristiche

5.2.1 *Lyot Gaussiano*

Il Lyot Gaussiano adotta la stessa configurazione di base del Lyot classico, con una maschera focale ed uno Stop di Lyot, con la principale differenza che la trasmissione di ampiezza della maschera non è binaria, con 0 nello spazio dell'immagine occupato dalla maschera e 1 altrove, ma provoca una modulazione del campo EM che segue un profilo Gaussiano,

$$M(r) = 1 - e^{-(r/a)^2}$$

Dove M è l'ampiezza, r la distanza dall'asse ottico e a un parametro libero.

Dato un certo IWA si può calcolare il corrispondente vale di a .

L'obiettivo sarà quello riavere un IWA di circa 150 mas (milliarcsec), per cui, considerando l'intervallo di lunghezza d'onda dello strumento, una buona scelta potrebbe essere $3 \lambda/D$ ad una lunghezza d'onda di 1.6 μm . Nella pupilla d'uscita, successivamente, ci sarà bisogno di uno stop di Lyot, la cui dimensione è stata trovata tramite una simulazione, anche se la dimensione ideale cambia a seconda dei parametri di IWA e seeing (rumore provocato dall'atmosfera sul fronte d'onda) scelti.

5.2.2 *Shaped Pupil*

Questa tecnica consiste nel modellare la pupilla del telescopio così da generare un'area oscura nel piano focale tramite un'interferenza distruttiva.

In questo caso il rimodernamento della pupilla limiterà i valori di trasmissione dell'ampiezza del campo EM attraverso la pupilla ad polarizzarsi attorno ai valori 0 o 1. Ciò significa che, attraverso l'ottimizzazione dei valori, possiamo considerare l'apodizzazione della

pupilla come quasi binaria, la quale diventerà totalmente binaria con un'ultima elaborazione.

In principio, la sola maschera binaria sarebbe sufficiente per ottenere un alto contrasto, però ci sono due limitazioni importanti. La prima è che la PSF della sorgente luminosa è molto piccata nel suo centro, il che significa che può facilmente saturare il rivelatore. La seconda limitazione è che il flusso del NCPA (Non Common Path Aberration) del coronografo contribuisce a delle macchie quasi statiche sull'immagine, poiché la luce della stella è solo ridistribuita e non bloccata.

Per mitigare questi effetti, si vede necessaria l'introduzione di un occultatore nel piano focale che blocchi la luce del centro della PSF della stella. Inoltre uno Stop di Lyot nel secondo piano della pupilla bloccherà la luce diffratta dall'occultatore, come nel classico Lyot.

Questa tecnica permette di avere un contrasto migliore rispetto alla semplice configurazione con pupilla apodizzata.

L'apodizzatore è disegnato una volta che l'IWA e OWA (Outer Working Angle) sono stabiliti, così da poter scegliere le dimensioni della maschera focale che permetta di bloccare la luce che cadrebbe fuori da queste due regioni spaziali. La maschera è quindi composta da un occultatore della dimensione del IWA e uno Stop delle dimensioni del OWA. Siccome questi limiti dipendono dalla lunghezza d'onda, bisogna fare una scelta a priori della banda d'osservazione in cui operare. Nel caso di SHARK-NIR sceglieremo la banda H (centrata a $1.65\mu\text{m}$). Questa banda è quella designata per la ricerca di esopianeti.

Per perseguire questo tipo di obiettivi con questo coronografo dobbiamo raggiungere l'IWA di circa 100 mas di IWA. Per raggiungere questi livelli dobbiamo necessariamente cedere a qualche compromesso: o il contrasto dovrà abbassarsi oppure il CDV dovrà ridursi.

Se scegliamo di perseguire la via della riduzione del CDV, troveremo un apodizzatore ottimizzato per le prestazioni richieste con un CDV di 110° , e non più 360° come in precedenza. Questa configurazione è in grado d

raggiungere un contrasto di 5×10^{-6} a 130mas di distanza dall'asse ottico, con una portata del 25%, molto più alta del suo analogo a 360° . Bisognerà però accoppiare questa pupilla alla sua 'gemella' che coprirà anch'essa 110° , che si sovrapporrà parzialmente al CDV della precedente per aumentare il campo di vista totale.

Detto ciò, tre maschere con valori caratteristici diversi sono presentati come le configurazioni più convenienti per questo tipo di coronografo: SP1, SP2, SP3. (Tabella 1)

Specifiche	SP1	SP2	SP3
IWA (λ/D)	2.6	3.5	5.3
OWA (λ/D)	8	8	8
Contrasto	2×10^{-5}	1×10^{-7}	2×10^{-7}
Portata	22%	26%	38%
Campo di Vista	360°	220°	360°
Tolleranza spostamento	0.5%	0.5%	0.5%

TABELLA 1

SP1 è pensata per un contrasto modesto ma un IWA minore.

SP2 è l'unica con una forma non simmetrica circolarmente, ha un alto contrasto leggermente più lontano dalla stella.

SP3 è pensata per per un contrasto estremo ad un grande IWA, e nonostante il suo alto contrasto soffre di una lieve degradazione per via dell'ampio IWA.

5.2.3 Apodized Pupil Lyot Coronagraph

Rispetto alla Shaped Pupil, questo tipo di coronografo utilizza un'apodizzazione continua. Non lavora da sola come nel caso della semplice SP, ma piuttosto libera la pupilla dalla luce della stella quando combinata ad una maschera focale.

Nel processo di ottimizzazione di questo modello, il problema principale è quello di gestire l'aberrazione provocata dai bracci del telescopio che sorreggono le ottiche. Si è visto che si ottengono risultati interessanti utilizzando un'apodizzazione a doppia pupilla.

La larghezza di banda, in questo caso, sarà molto importante nell'ottimizzazione della configurazione. La larghezza di banda del coronografo qui presentato hanno una parziale sovrapposizione con le bande J e H. Tuttavia la maschera avrà comunque grandezze diverse per le due diverse sovrapposizioni, quindi si vede necessaria l'utilizzo di una maschera per tipo al fine di evitare troppi effetti cromatici che potrebbero ridurre il contrasto.

Qui di seguito le specifiche del APLC utilizzato per SHARK-NIR:

Specifiche	Valori
IWA (λ/D)	3
OWA (λ/D)	17
Contrasto	1×10^{-6}
Portata	20%
Campo di Vista	360°

TABELLA 2

Questa configurazione permette di avere ottime prestazioni in condizioni ideali, ma soffre di tre problemi principali:

- L'apodizzatore non è sulla pupilla ma, come nel caso precedente, spostato di 50mm;
- Siccome l'apodizzatore è spostato rispetto al piano pupilla, genera delle aberrazioni cromatiche laterali nel piano Second piano pupilla, dove il secondo apodizzatore è posizionato;
- L'allineamento del secondo apodizzatore è difficile da raggiungere, avevo esso una struttura morfologia complessa.

5.2.4 Apodized Phase Plate Coronagraph

Questo modello prevede un'ottica che trasmette il fronte d'onda con fase modificata al piano pupilla. La maschera modifica la PSF di tutti gli oggetti nel campo levandoli la luce da 180° dall'immagine, conferendo la classica forma a "D" della figura. Questo modello presenta diversi vantaggi: è richiesta una singola ottica, il IWA è tipicamente piccolo e la portata è alta e costante con la separazione angolare. Inoltre il coronografo è insensibile all'aberrazione dovuta alle vibrazioni. Dall'altro lato, il CDV è ridotto a solo una parte della PSF e la larghezza di banda è tipicamente stretta.

Non essendoci nessuna maschera focale, la PSF rimane uguale su tutto il CDV. In principio, si potrebbe aggiungere anche in questo caso una maschera focale e uno Stop di Lyot, ma questa opzione non è stata esplorata per APP.

Assumendo di usare l'apodizzatore di fase da solo, potrebbe essere posizionato nel secondo piano di pupilla, eliminando così il problema dei 50mm di spostamento presente nel primo piano di pupilla.

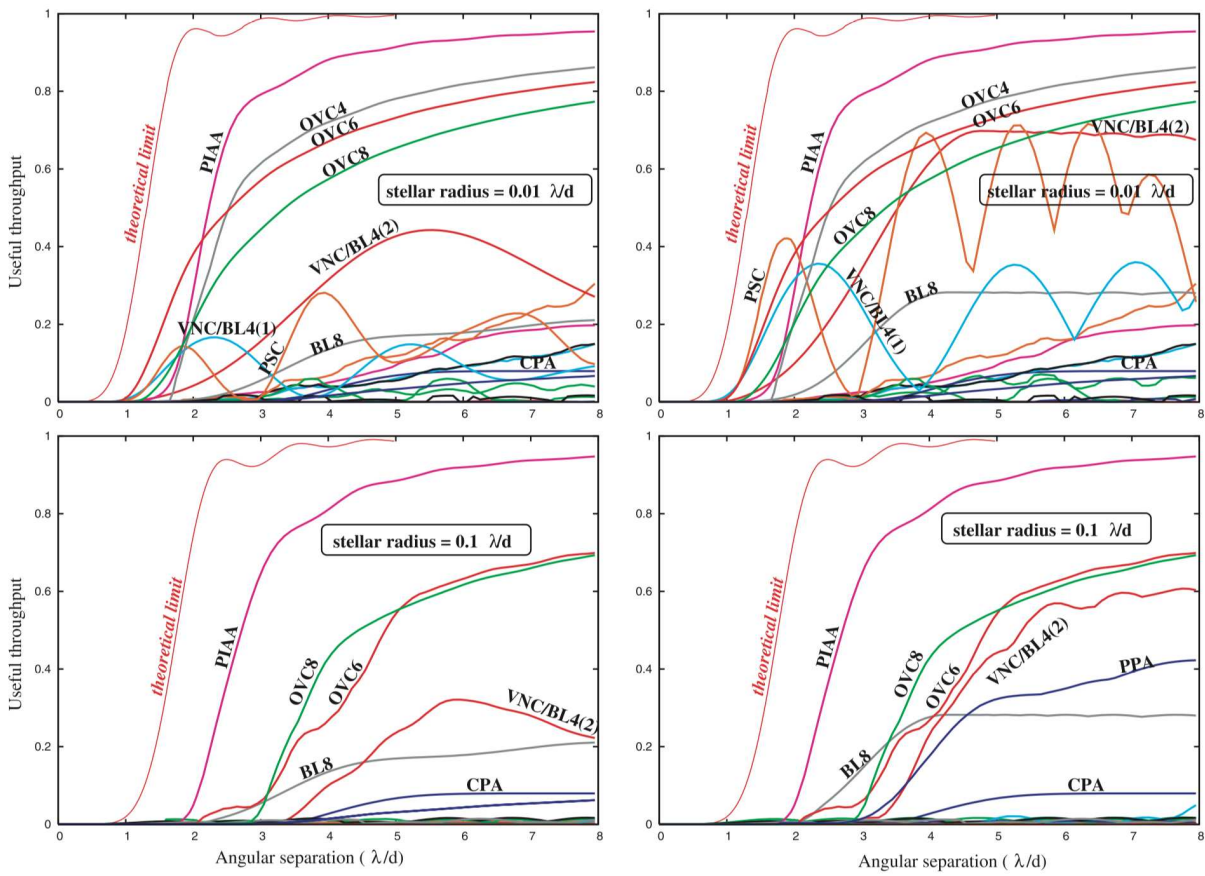


FIGURA 13

Specifiche	Valori
IWA (λ/D)	2.1
OWA (λ/D)	12
Contrasto	3×10^{-7}
Portata	30%
Campo di Vista	180°

TABELLA 3

5.2.5 Four-Quadrant Phase Mask

Come già descritto, questo cronografo sopprime la luce sull'asse ottico dividendo l'immagine in 4 quadranti e facendo interferire la luce sull'asse. I due maggiori compromessi di questa tecnica sono la sua alta sensibilità all'apertura geometrica e gli errori dati dalla vibrazione. Il primo deriva dalla luce diffratta nelle regioni di discontinuità fra i quadranti, provocando così in una degradazione del contrasto proporzionale all'area oscurata. L'aberrazione Tip-Tilt invece provoca un'incoerenza nello slittamento della luce nei quattro fasci, minando l'interferenza distruttiva del centro.

La configurazione prevede una maschera focale ed uno Stop di Lyot. l'IWA è fissato a $1 \lambda/D$, l'unico componente da ottimizzare è lo Stop di Lyot.

Dopo le dovute analisi sia optato per un sopprimere del 20% del flusso, con una dimensione del 98% della pupilla.

5.2.6 Vortex Coronagraph

Come nel caso precedente, si ha una maschera focale, con la differenza che questa volta induce un sfasamento continuo ellittico, che diffrange la luce a di fuori dell'immagine, dove può essere bloccata da uno Stop di Lyot.

Le limitazioni di questa tecnica sono le stesse della precedente: sensibilità dalla geometria della pupilla e aberrazione Tip-Tilt.

La carica topologica è impostata a 2, così da mantenere lo stesso IWA del 4QPM e lo Stop è ottimizzato nella stessa maniera.

Lo Stop di Lyot è uguale al precedente.

5.2.7 Confronto delle prestazioni

L'unico coronografo che presenta prestazioni migliori del 4QPM e Vortex in regime di altro rapporto di Strehl (rapporto tra picco PSF ideale e aberrato) è lo Shaped Pupil. SP1 è il migliore a bassi IWA (130 mas), SP2 è il migliore tra 160-200 mas dalla stella, mentre SP3 lo è tra 250-300 mas. Mentre APLC e APP non sono ottimali nessuna separazione angolare.

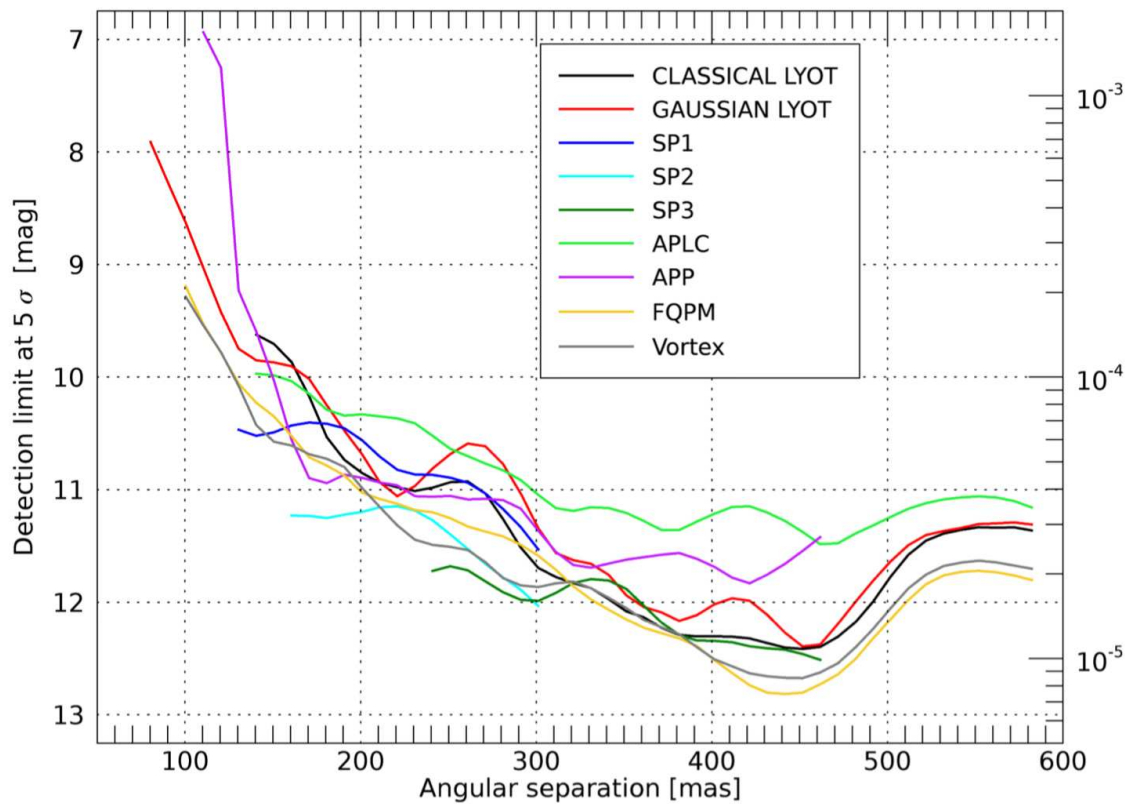


FIGURA 14

Guardando alle curve di rilevazione, sono stati scelti il Lyot Gaussiano, 4QPM, SP1 e SP2.

Di seguito (Tabella 4) le specifiche dei vari coronografi selezionati per SHARK-NIR

Specifiche	IWA	OWA	Contrasto (200 mas)	Portata	Campo di Vista	Banda
G Lyot	120	-	1×10^{-4}	56%	360°	J, H
SP1	100	320	2×10^{-5}	22%	360°	H
SP2	100	320	1×10^{-7}	26%	220°	H
4QPM	40	-	1×10^{-4}	95%	360°	H

TABELLA 4

6. Coronografia ed esopianeti

Passiamo ora alla discussione sui vantaggi e svantaggi dei vari coronografi nella ricerca di pianeti extrasolari. Questo campo è particolarmente prolifico negli ultimi decenni, con decine di pianeti scoperti ogni anno e migliaia già trovati.

Ogni coronografo ha però dei punti di forza e di debolezza. A seconda delle varie tecnologie sfruttate nella loro configurazione ogni modello avrà una maggiore o minore resistenza ad elementi di disturbo che allontanano le prestazioni del coronografo dal limite teorico raggiungibile per un'ottica.

6.1 Resistenza alla dimensione angolare della stella

In condizioni ideali, ovvero con la stella completamente irrisolta, si possono apprezzare le differenze di prestazioni tra i vari coronografi nel fornire un certo UT all'aumentare della separazione angolare.

Nel grafico a pagina seguente (Figura 15) si considera un contrasto di 10^{10} .

Un metro di paragone adottabile per confrontare i vari modelli di coronografi introdotti è la dipendenza delle prestazioni quando si aumenta il diametro apparente della stella ospite. Nel limite teorico la stella centrale su cui è puntato il nostro telescopio è un unico pixel irrisolto, che acquisisce la forma del disco di Airy per via degli effetti

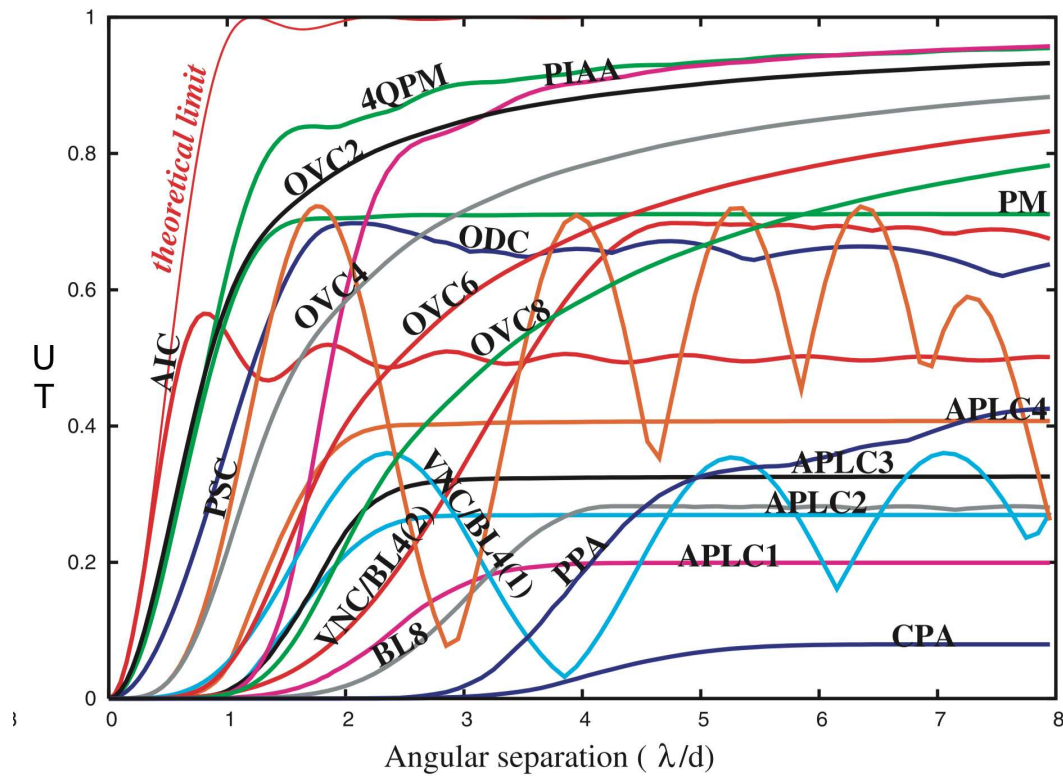


FIGURA 15

aberrativi della luce. In questo caso, invece, la stella sarà un oggetto risolto.

Molti coronografi non sono in grado di mantenere il contrasto di 10^{10} richiesto per il rilevamento di pianeti terrestri extrasolari (ETP). Possono tuttavia essere utilizzati nella ricerca di pianeti gioviani con orbita nell'ordine di poche AU, i quali richiedono un contrasto minore.

Possiamo suddividere i nostri coronografi in 3 gruppi principali:

- Alta sensibilità dal raggio della stella (AIC, 4QPM, PM, OVC2, ODC). Questi coronografi non riescono a mantenere un alto contrasto neanche con una stella dal raggio di $0.01 \lambda/D$. Questi modelli sono difficilmente utilizzabili in ricerca di ETP.

- Sensibilità moderata al raggio della stella (VNC/BL4(1) con piccolo IWA, PSC, APLCs, OVCN con grandi valori di N). Questi coronografi possono essere usati efficientemente su telescopi dal ‘piccolo’ diametro, per i quali la stella ha un raggio di $0.01 \lambda/D$ o anche meno.
- Bassa sensibilità al raggio della stella (PIAAC, VNC, BL4(2) con grande IWA, BL8, CPA). Questi coronografi sono i più adatti per la rilevazione diretta e la caratterizzazione di ETPs, poiché tollerano anche stelle risolte dal raggio di $0.1 \lambda/D$.

CORONAGRAPH CHARACTERISTICS FOR 10^{10} CONTRAST

CORONAGRAPH NAME	THROUGHPUT		ANGULAR RESOLUTION ^a	DIFFRACTIVE EFF. FACT. ^b	IWA ^c	IWA(5%) WITH STELLAR RADIUS ^d			
	Average	Peak				$0\lambda/d$	$0.001\lambda/d$	$0.01\lambda/d$	$0.1\lambda/d$
AIC.....	0.50	0.57	1.0	0.5	0.38	0.15	6.14	>8.0	>8.0
VNC/BL4(1).....	0.09	0.36	1.65 ^e	0.37 ^e	1.49	1.27	1.27	1.43	>8.0
PSC.....	0.18	0.73	1.0 ^f	0.5 ^f	1.13	0.79	0.79	3.24	>8.0
CPA.....	0.08	0.08	1.81	0.31 ^g	4.20	4.42	4.42	4.42	4.47
PPA.....	0.08 ^h	0.33 ^h	1.35	0.18	3.91	3.29	3.29	3.30	4.02
APLC.....	0.20	0.20	1.22	0.67	2.41	2.01	2.17	4.02	>8.0
APLC2.....	0.27	0.27	1.11	0.81	1.64	1.26	1.78	4.71	>8.0
VNC/BL4(2).....	0.35	0.70	1.19	0.71	3.02	2.17	2.20	2.21	3.77
BL8.....	0.26	0.28	1.86	0.29	2.96	3.04	3.04	3.04	3.05
PM.....	0.71	0.71	1.0	1.0	0.69	0.23	2.94	3.59	>8.0
4QPM.....	1.0	1.0	1.0	1.0	0.84	0.28	2.39	>8.0	>8.0
OVC2.....	1.0	1.0	1.0	1.0	0.84	0.21	2.21	>8.0	>8.0
OVC4.....	1.0	1.0	1.0	1.0	1.62	0.62	0.66	1.74	>8.0
OVC6.....	1.0	1.0	1.0	1.0	2.45	1.02	1.02	1.19	2.87
OVC8.....	1.0	1.0	1.0	1.0	3.26	1.41	1.42	1.42	3.01
ODC.....	... ⁱ	0.70	1.18 ^j	0.72 ^j	0.97	0.50	4.59	>8.0	>8.0
PIAA.....	1.0	1.0	1.0	1.0	1.88	1.28	1.38	1.66	2.0
ICC6.....	1.0	1.0	1.0	1.0	1.32	0.76	0.76	0.76	1.76

TABELLA 5 - Confronto prestazioni dei diversi modelli di coronografi studiati.

La resistenza di BL4 nel terzo gruppo rispetto al secondo è tutta da ricercare nel più ampio IWA scelto. Come per VNC, c'è un forte compromesso tra IWA e sensibilità.

Per molti coronografi, aumentare il diametro della stella compromette il contrasto a piccole separazioni angolari. Anche i più resistenti, come PIAA e VNC/BL4(2) perdono portata del flusso EM a bassi λ/D .

Il CPA e BL8 risultano essere estremamente robusti all'aumentare della taglia della stella: le loro curve di UT, come si vede nella figura seguente, sono praticamente identiche nei due casi presi in esame, con raggi $0.01 \lambda/D$ e $0.1 \lambda/D$.

6.1.1 Modi

I Modi sono delle funzioni dello spazio dell'immagine che servono ad imitare il rumore prodotto dal passaggio del fronte d'onda attraverso l'atmosfera.

In linea teorica, il fronte d'onda sarebbe piatto, perpendicolare rispetto

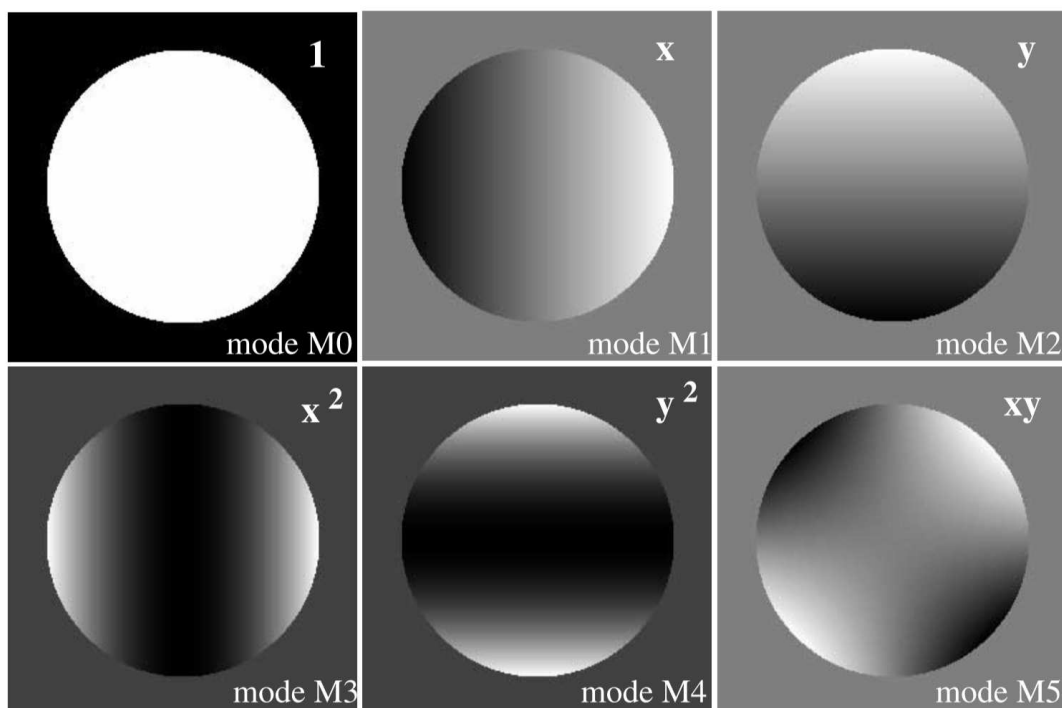


FIGURA 16

alla direzione di osservazione, ma quando la luce passa attraverso i vari strati d'atmosfera, con le loro zone a diversa intensità, il fronte d'onda si degrada e quindi l'osservazione diventa meno accurata.

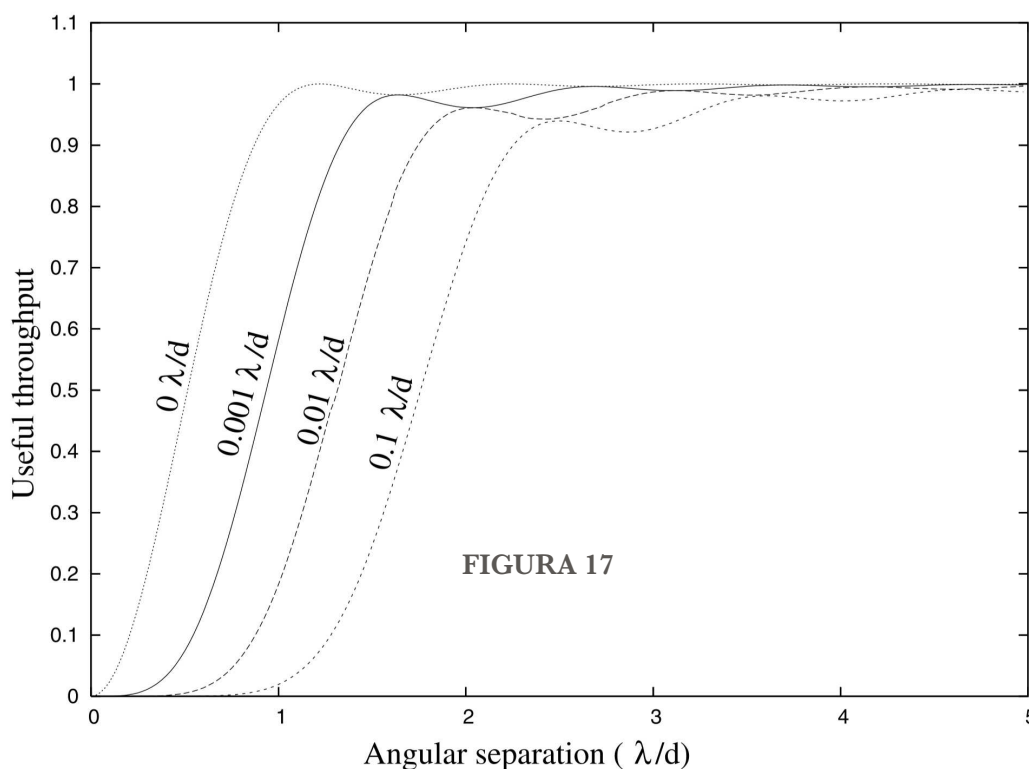
Tramite i vari gradi dei modi, siamo in grado di simulare il disturbo provocato dall'atmosfera e quindi di limitarne l'effetto.

Questi modi vengono simulati tramite delle semplici funzioni polinomiali, il cui grado indica il tipo di correzione fornito. Più alto sarà il grado, più elaborato sarà il tipo di correzione applicato al fronte d'onda.

Sono illustrati (Figura 16) i primi 5 modi ottenuti tramite una rappresentazione teorica di un'osservazione della superficie luminosa di un disco perfettamente uniforme.

Il confronto tra le curve di UT del caso ideale e quello con la stella risolta rivela una triste verità: i coronografi con le migliori prestazioni nel caso puntiforme (AIC, PM, 4QPM, OVC2) performano tutti molto male quando la grandezza angolare della stella è considerata.

Questo comportamento è indotto da qualche legge fisica oppure c'è speranza di trovare un coronografo con base IWA che non sia



drammaticamente sensibile alla grandezza della stella?

Nel caso puntiforme, il 50% della portata può essere raggiunto entro $0.5 \lambda/D$ di un coronografo ideale. Man mano che la sorgente cresce di raggio, la soglia ideale del 50% di portata si allontana dal centro, ma non in maniera lineare come ci si potrebbe aspettare. Più il diametro della stella cresce, più modi di ordine superiore devono essere rimossi dal fronte d'onda. Ogni ordine di modo aumenta le dimensioni della 'zona buia' di circa $(\lambda/D)^2$ area nel piano focale.

6.2 Comportamento dei coronografi a piccole separazioni angolari (λ/D)

I coronografi con i più piccoli IWA descritti (AIC, 4QPM, PM) rimuovono tutti il modo di ordine 0 (M0) dal fronte d'onda entrante, però lasciano tutti passare, almeno parzialmente, i modi di ordine superiore (principalmente M1 e M2). Nel regime di piccole distanze angolari, quindi, il fronte d'onda trasmesso sarà una funzione di M1 e M2.

I coefficienti di questa combinazione saranno proporzionali alla distanza dall'asse ottico.

Questo tipo di coronografi sono denominati come 'Coronografi del secondo ordine' poiché trasmettono solo questo ordine di modi'.

Altri coronografi con piccolo IWA sono ad esempio l'Interferometric Combination Coronagraph (ICC6) la cui ricombinazione dei vari fasci creati dai beam splitters corregge i primi 6 modi, trasmettendo però gli altri.

Un altro è il PIAAC, il quale è in grado di rimuovere buona parte dei primi 6 modi, senza però riuscire ad eliminarli completamente.

A piccolissime distanze angolari ($10^{-3} \lambda/D$) il modo M0 è l'unico dominante. Crescendo in separazione ($0.01 \lambda/D$) si iniziano ad avere dei contributi da M1 e M2, mentre da $0.1 \lambda/D$ in su nessun modo è realmente dominante, ma si trova una combinazione di tutti.

6.3 Sistemi di correzione

Elementi attivi, come specchi deformabili che 'aggiustano' il fronte d'onda, possono essere utilizzati per creare un alone anti imperfezioni che corregge tutta la luce indesiderata nel piano focale tramite interferenza distruttiva.

Gli elementi ottici attivi introdurranno nel front d'onda uno sfasamento che dovrà essere l'opposto (stessa ampiezza ma fase π di differenza) di quello causato dagli elementi di disturbo.

Nel caso, però, di coronografi con annullamento del secondo ordine una correzione tramite ottica attiva può portare a moltiplicare l'errore sull'immagine per via della differenza di fase rispetto al precedente errore. Ad ogni punto del disco stellare corrisponde un punto egualmente brillante sull'altro lato dell'asse ottico, per cui queste tecnologie non possono ridurre le perdite del coronografo in modello del secondo ordine.

Errori di puntamento, invece, producono una perdita coerente che può essere soppressa da un sistema di controllo del fronte d'onda. Bassi ordini di aberrazione possono essere misurati in base alla perdita di luce che producono.

Una strategia efficace è quella di catturare la luce aberrata prima che inizi ad aumentare il disturbo lungo il coronografo prima che utilizzi la luce bloccata dal coronografo. Questo può essere fatto reindirizzando la luce in questione, così da isolarla.

Si nota che il controllo delle macchie e la loro soppressione necessitano di una banda stretta, poiché le macchie diventano incoerenti nella luce bianca: la banda spettrale potrebbe dover essere divisa in diverse bande così da semplificarne la pulizia.

6.4 Luce zodiacale ed extrazodiacale

Lo UT quantifica le prestazioni del cronografo nella situazione ideale di un sistema stella-pianeta. Nella realtà però un pianeta è sempre osservato attraverso un'incoerente luce zodiacale ed extrazodiacale di fondo. Per la maggior parte degli obiettivi da studiare, il contributo dato da questi due elementi di disturbo sarà il principale attore del rumore ottenuto e porterà ad un agente del tempo di esposizione richiesto per ottenere un Signal to Noise Ratio (SNR) sufficientemente alto per la rilevazione di ETPs.

Di seguito una tabella delle caratteristiche dei principali coronografi ad un contrasto di 10^{10} dove si possono apprezzare le differenze di prestazioni dei vari modelli. La portata in una direzione generica e nella direzione ottimale (i coronografi con simmetria circolare presenteranno lo stesso valore), la risoluzione angolare (radice quadrata della più piccola superficie del piano focale contenente metà della portata del flusso del pianeta), IWA e per ultimo la separazione angolare alla quale lo UT del pianeta raggiunge il 5% del raggio della stella mostrato.

7. Conclusioni

Per quanto detto, i migliori coronografi utilizzabili per il rilevamento di pianeti terrestri extrasolari sono i seguenti: PIAAC e OVC6, seguiti a distanza poi da VNC/BL4, BL8 e CPA.

Questi due modelli di coronografo sono in grado di performare anche al contrasto richiesto in questo specifico caso, senza perdere troppe prestazioni in termini di capacità del flusso e IWA, garantendo un adeguato livello di correzione del fronte d'onda senza avere bisogno di tempi d'osservazione non realistici.

Per questi coronografi, due importanti sfide devono essere risolte:

- Controllo del fronte d'onda ad un livello inferiore dell'Angstrom, grazie all'ampio numero di fotoni stellari disponibili, il recente sviluppo nel campo dei rilevatori e la prospettiva che un telescopio spaziale possa essere sviluppato per offrire un fronte d'onda relativamente stabile, è ragionevole sperare per questo livello di correzioni.
- Effetti cromatici, i quali possono seriamente limitare la banda spettrale utilizzabile. In aggiunta agli effetti cromatici, il fascio fornito dal telescopio è atteso essere cromatico in ampiezza e DCO. Una tecnica per ridurre gli effetti, come già descritto, può essere quella di suddividere la luce studiata in vari fasci di banda più stretta.

Anche se il modello che ha dimostrato di riportare i migliori risultati è il PIAACMC, che offre significativi miglioramenti in termini di prestazioni

che si avvicinano notevolmente al caso ideale. Le alte prestazioni sono fornite dalla combinazione dei vantaggi del modello APLC, PM e PIAA. Nel caso della sorgente irrisolta, il PIAACMC con una maschera di sfasamento nel piano focale offre prestazioni molto vicine al limite teorico. Con sorgenti luminose parzialmente risolte questo modello può essere ottimizzato per portare anche in questo caso le prestazioni vicine al limite.

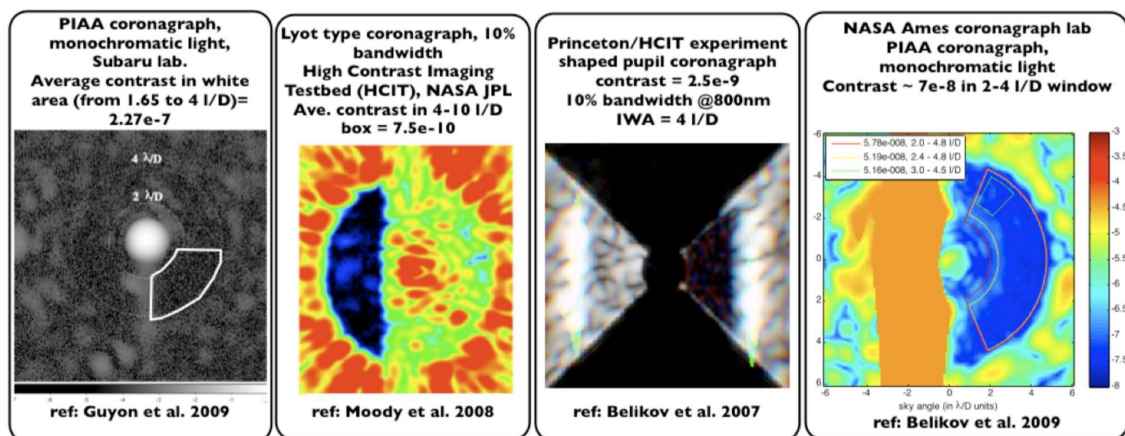


FIGURA 18. Esempi di coronografi combinati con sistemi di controllo del fronte d'onda

Mentre i coronografi testati in laboratorio sono stati in grado di raggiungere alti livelli di contrasto (10^9 nel vuoto) i modelli attuali sono fortemente limitati dall'aberrazione residua del fronte d'onda, e la maggior parte dei passi in avanti nelle prestazioni sono attesi proprio dal controllo dei fronti d'onda e dalle tecniche di calibrazione. Aberrazioni di basso ordine sono proprio quelle che limitano maggiormente le prestazioni, imponendo limiti sul IWA raggiungibile.

In osservatori terrestri, l'arrivo di sistemi di Extreme Adaptive Optics (ExAO), che combina per la prima volta ottica adattiva con nuove

tecnologie coreografiche, migliorerà significativamente le prestazioni dei telescopi.

La coronografia è molto importante per l'esplorazione di esopianeti, la ricerca in questo ambito è molto attiva, con nuovi modelli che si avvicinano sempre più al limite teorico anche in condizioni sempre più lontane da quelle ottimali. Molti progetti e missioni pianificate per il prossimo futuro allargheranno i nostri confini di conoscenza di formazione planetaria ed esopianeti grazie a queste nuove tecniche.

8. Bibliografia

Abe L. et Al, (2003), *Phase Knife coronagraph -II- Laboratory Results*. A&A, vol. 400, pp. 385-392.

Farinato J. et Al, (), *SHARK-NIR, the coronagraphic camera for LBT, moving toward construction*. arXiv:1808.00364 (astro-ph.IM).

Fauvarque O. Et Al, (2016), *General formalism for Fourier-Based wave front sensing*. Optica, vol. 3, No. 12, 1440-1452.

Fisher R., (1995), *Coronagraphs*. NASA, <https://umbra.nascom.nasa.gov/spartan/coronagraphs.html>.

Guyon et Al, (2006), *Theoretical limits on extrasolar terrestrial planet detection with coronagraphs*. ApJ, vol. 167, pp. 81-99.

Guyon O. And Shao M., (2006), *Pupil Swapping Coronagraph*. Astronomical Society of the Pacific, vol. 118, No. 844, pp. 860-865.

Guyon et Al, (2009), *High Contrast Imaging and Wavefront Control with a PIAA Coronagraph: Laboratory System Validation*. Astronomical Society of the Pacific, arXiv:0911.1307 [astro-ph.IM].

Guyon et Al., (2010), *High performance PIAA coronagraphy with complex amplitude focal plane masks*. ApJS, vol. 190, pp. 220-232.

Guyon O., (2011), *High performance coronagraphy for direct imaging of exoplanets*. EDP Sciences, 03001, pp. 1-7.

Guyon O., (2018), *Phase-Induced Amplitude Apodization of Telescope Pupils for Extrasolar Terrestrial Planet Imaging*. A&A manuscript, pp.1-7.

Hatzes A. And Liseau R., (2018), *Future Exoplanets Space Missions: Spectroscopy and Coronagraphic Imaging*, part of Springer Nature, pp. 1343-1353.

Kuchner M. & Traub W., (2002), *A coronagraph with a band-limited mask for finding terrestrial planets*. ApJ, vol.570, pp. 900-908.

Lloyd J. And Sivaramkrishnan A., (2004), *Tip-Tilt Error in Lyot Coronagraphs*. ApJ, vol. 621, pp. 1153-1158.

Lyot B., (1939), *A study of the solar corona and prominences without eclipses*. MNRAS, vol. 99, pp. 580-602.

Marcuzzi E. And EIE Group, (1993), *Large Binocular Telescope - Il telescopio*, <https://www.eie.it/progetti/lbt-telescope>.

Martinez P. et Al, (2011), *Laboratory comparison of coronagraphic concepts under dynamical seeing and high-order adaptive optics correction*. Mon. Not. R. Astron. Soc., vol. 414, pp.2112–2124.

Mawet D. et Al, (2005), *Annular groove phase mask coronagraph*. ApJ, vol. 663, pp. 1191-1200.

Quirrenbach et Al, (2004), *Coronagraphic Methods for the Detectin of Terrestrial Planets*. Leiden University, pp. 1-105.

Rabbia Y. Et Al, (1999), *Achromatic Interfero Coronagraphy Ngst*. ResearchGate, pp. 1-7.

Roddiier & Roddiier, (1997), *Stellar Coronagraph with Phase Mask*.
Astronomical Society of the Pacific, vol. 109, pp. 815-820.

Rouan D. et Al, (2000), *The Four-Quadrant Phase-Mask Coronagraph I. Principle*. Astronomical Society of the Pacific, vol. 112, pp. 1479-1486.

Valle et Al, (2019), *Digital Coronagraphy: application to space telescope images*.
OSA Continuum, 2(6):2038.