

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento
di Fisica
e Astronomia
Galileo Galilei

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

**Analisi della luce diffusa di uno strumento
stereo-iperspettrale per l’ esplorazione planetaria**

Relatore

Prof. Giampiero Naletto

Laureando

Andrea Scardigno

Anno Accademico 2023/2024

Sommario

L'osservazione planetaria eseguita con satelliti remote sensing richiede spesso la convergenza dell'informazione proveniente da un sistema di imaging con quella ottenuta da uno spettrometro, con conseguenti problemi di disomogeneità originati dalla diversità degli strumenti. Lo strumento HYPERSOS (HYPerspectral Stereo Observing System) è il primo dispositivo in grado di produrre dati 4D, cioè che contengono sia l'informazione spaziale in tre dimensioni, sia quella spettrale del target osservato, ed è quindi in grado di minimizzare questa criticità. Lo strumento consiste di 2 canali ottici affiancati che consentono una visione stereoscopica del target, e che alimentano un singolo spettrometro. Uno dei problemi da risolvere nella configurazione ottica di HYPERSOS è quello del "cross-talk" tra i due canali, ovvero quello di evitare che la luce che entra da un canale illumini il piano focale dell'altro. In questa tesi si è studiato come eludere questo problema inserendo degli opportuni setti lungo il cammino ottico, e si è analizzato il contributo di luce diffusa che ne è conseguito con un opportuno software di simulazione ottica, per valutare il rapporto segnale-rumore così ottenuto.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	HYPPOS: innovazione nel panorama dell'esplorazione planetaria	1
1.2	Alcune grandezze radiometriche	3
2	Descrizione di HYPPOS	4
2.1	Funzionamento	4
2.2	Struttura	5
3	Analisi della luce sul piano focale del telescopio	8
3.1	Il problema del cross-talk tra i canali ottici	8
3.2	Detector e sorgenti	10
3.3	FoVs nominali	11
3.4	FoVs che potrebbero produrre cross-talk	15
3.5	Analisi con luce di sorgente estesa	18
3.6	Rapporto segnale/rumore	20
4	HYPPOS come futuro strumento di realizzazione di point clouds iperspettrali per studi geologici	22
5	Conclusioni	24

1. Introduzione

1.1 HYPPOSOS: innovazione nel panorama dell'esplorazione planetaria

Per ottenere informazioni dettagliate di una superficie planetaria o lunare, sonde e satelliti si avvalgono in genere di uno strumento di *imaging*, cioè un apparecchio che mappa l'area osservata, e di uno *spettrometro*, ovvero uno strumento che misura le proprietà dello spettro della radiazione elettromagnetica proveniente dalla superficie in termini delle lunghezze d'onda di cui è formato. Questi due strumenti operano spesso indipendentemente l'uno dall'altro.

Ad esempio, per tracciare il profilo della cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, la sonda Rosetta, lanciata nel 2004, si è avvalsa sia del sistema OSIRIS (Optical, Spectroscopic, and Infrared Remote Imaging System) [1] per l'imaging, sia dello spettrometro VIRTIS (Visible InfraRed and Thermal Imaging Spectrometer) [2]. Mentre il sistema di imaging è in grado di fornire informazioni morfologiche del terreno osservato, lo spettrometro risulta essere di grande utilità per l'analisi della composizione superficiale. Dal primo, si può ricavare una conoscenza della struttura della superficie, dell'attività di erosione e della craterizzazione del suolo, mentre dal secondo si trovano essenziali informazioni sulla mineralogia di una superficie, sulla sua storia geologica, sul clima e persino sulla ricerca di condizioni favorevoli alla vita, principale interesse dell'astrobiologia.

In particolare, per acquisire anche un modello digitale del terreno (DTM) osservato, lo strumento di imaging può essere dotato di capacità *stereoscopiche*, cioè finalizzate alla ricostruzione tridimensionale della superficie. Per la realizzazione di un DTM, è necessaria l'osservazione della stessa regione d'interesse da almeno due prospettive diverse. Infatti, nelle immagini acquisite da un satellite, la terza dimensione non sarà esplicitamente presente, ma dovrà essere ricavata grazie alle differenze esistenti tra immagini multiple ottenute da diversi campi di vista, operando una triangolazione per determinare la dimensione mancante.

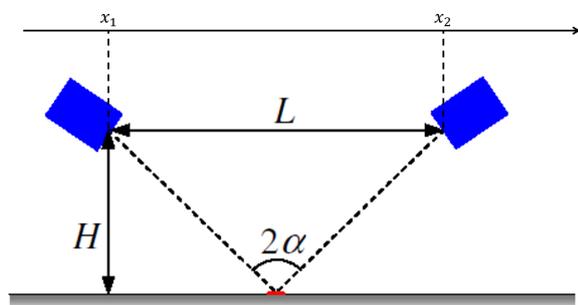


Figura 1.1

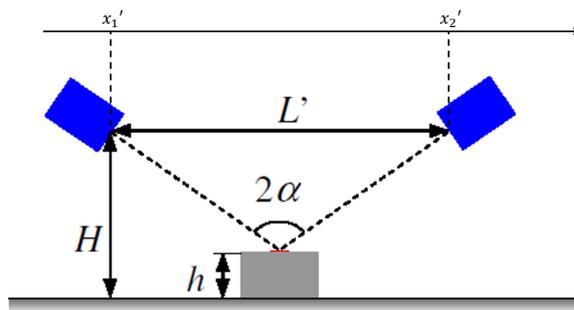


Figura 1.2

Figura 1.3: Rappresentazione semplificata del metodo di ricostruzione dell'informazione 3D di un apparecchio stereoscopico.

Volendo esprimere semplicemente il modo in cui si opera per la ricostruzione di un DTM, si prendano in esame le figure 1.1 e 1.2. Si supponga di osservare lo stesso punto superficiale in due istanti diversi, durante i quali il satellite (in blu), si trova in due posizioni differenti, che per comodità sono rappre-

sentate contemporaneamente e che sono chiamate x_1 e x_2 . Conoscendo la distanza L che separa le due diverse posizioni del satellite, e l'angolo di fase 2α tra satellite (in x_1) - superficie - satellite (in x_2), si può determinare l'altezza dal suolo $H = \frac{L}{2 \tan \alpha}$. Si ipotizzi che, in un secondo punto di osservazione, sia presente un rilievo (o una depressione) di cui si vuole determinare l'altezza h . Pertanto, si fa in modo che l'angolo di fase tra satellite (in x'_1) - rilievo - satellite (in x'_2), sia uguale a quello trovato in precedenza, cioè pari a 2α . La distanza tra la posizione in cui viene registrata la prima immagine e quella in cui viene registrata la seconda sarà ora L' . In questo modo, si potrà determinare h come:

$$h = H - \frac{L'}{2 \tan \alpha} \quad (1.1)$$

È dunque frequente, soprattutto per sistemi spaziali che operano in esplorazione planetaria o lunare, trovare a bordo sia uno strumento di ricostruzione stereoscopica, sia uno di analisi spettrale. Purtroppo, l'unione dell'informazione proveniente dai due strumenti non è quasi mai agevole, dato che le loro differenti caratteristiche (campi di vista, aberrazioni, sensibilità, etc.) conducono inevitabilmente a set di dati non omogenei, con conseguenti problemi eventualmente risolvibili da sistemi di calibrazione incrociata che sono, però, di difficile costruzione [3].

Per bypassare queste criticità, è stato ideato HYPSONS (HYPERspectral Stereo Observing System) [3] [4] [5], dotato di due canali ottici affiancati che consentono una visione stereoscopica del target e che alimentano un singolo spettrometro. HYPSONS è sostanzialmente in grado di trarre le informazioni spettrali da una stereo-camera iperspettrale, in cui la luce entra da due canali ottici, operanti con metodo *push-broom*.

Il metodo *push-broom* [6] è una modalità di acquisizione d'immagine per mezzo della quale il sistema di imaging a bordo del satellite acquisisce una porzione lineare di campo di vista, perpendicolare alla direzione di volo del satellite stesso. Dopo un certo intervallo di tempo τ , equivalente allo spostamento a terra del campo di vista istantaneo, si acquisisce un'altra porzione lineare di campo di vista. Così facendo, man mano che il satellite procede, viene mappata tutta l'area di interesse, così come mostrato in figura 1.4.

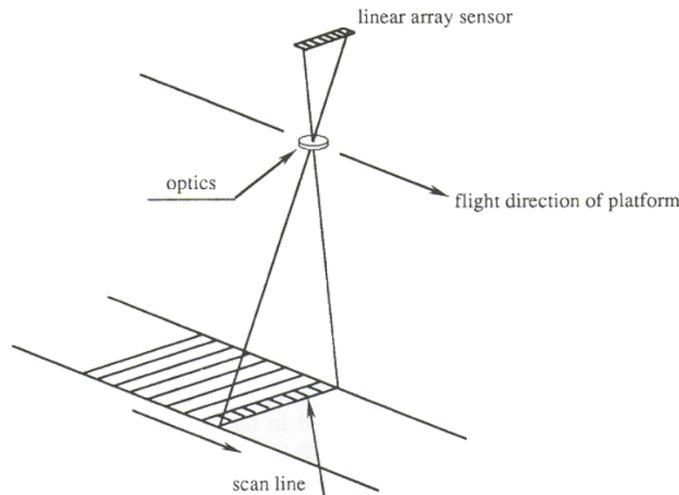


Figura 1.4: Rappresentazione del metodo *push-broom*: una fila di sensori acquisisce un array di superficie perpendicolare alla direzione di moto del satellite, mappando tutta l'area d'interesse man mano che esso procede lungo la sua orbita. Fonte: http://sar.kangwon.ac.kr/etc/rs_note/rsnote/cp2/cp2-11.htm

In questo modo, HYPSONS è capace di ricostruire un DTM con informazione spettrale (dunque uno Stereo DTM o SDTM), con set di dati quadridimensionali (tre spaziali e uno spettrale).

Uno dei principali problemi che sorgono in questa innovativa configurazione, è quello di evitare il fenomeno del *cross-talk* tra i due canali ottici dell'apparato [3], ovvero quella situazione per cui la luce, proveniente da un canale di osservazione, illumina il piano focale dell'altro. In questa tesi si è

studiato come è possibile eludere questa criticità, inserendo degli opportuni setti separatori lungo il cammino ottico e, mediante il software di simulazione ottica Ansys Zemax OpticStudio, si è analizzato il contributo di luce diffusa sul piano focale del telescopio, a seconda dei campi di vista adoperati. Inoltre, si è valutato il rapporto segnale/rumore che ne è derivato, al fine di dare una prima valutazione delle potenzialità e della competitività di HYPSONS.

1.2 Alcune grandezze radiometriche

Nelle prossime pagine, verranno nominate e adoperate alcune grandezze radiometriche, ognuna delle quali è espressione di una particolare grandezza fisica. Vengono date qui le loro definizioni:

- **Flusso radiante** Φ : o potenza radiante, è l'energia emessa, riflessa o trasmessa nell'unità di tempo. Si misura in W.
- **Irradianza** E : è la grandezza fisica che quantifica la potenza luminosa che incide su una superficie, si misura in W m^{-2} ed è espressa dalla relazione:

$$E = \frac{\partial\Phi}{\partial A} \quad (1.2)$$

dove Φ è il flusso radiante (o potenza radiante) e A è l'area della superficie sulla quale incide la radiazione.

- **Intensità radiante** I : è definita come il rapporto tra flusso luminoso Φ e l'angolo solido Ω interessato in una data direzione, considerando la sorgente come l'origine delle coordinate. Si misura in W sr^{-1} e la sua formula differenziale è:

$$I = \frac{\partial\Phi}{\partial\Omega} \quad (1.3)$$

- **Radianza** L : è una grandezza radiometrica che quantifica il flusso di energia elettromagnetica Φ irradiato da una superficie, per unità di angolo solido Ω e per unità di superficie apparente della sorgente $A \cos\theta$, dove θ è l'angolo tra la normale alla superficie e la direzione di vista dell'osservatore. Si misura in $\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-2}$ e la sua formula differenziale è:

$$L = \frac{\partial^2\Phi}{\partial\Omega\partial(A \cos\theta)} \quad (1.4)$$

2. Descrizione di HYPSSOS

2.1 Funzionamento

Come detto nell'introduzione, per ottenere un modello stereo-spettrale del terreno, HYPSSOS si articola in due sistemi ottici accoppiati: il telescopio, ovvero una stereocamera pushbroom, che proietta l'immagine acquisita da due canali ottici separati sul piano focale del telescopio (*telescope focal plane*); il sistema di imaging spettrale, che ha l'apertura (una doppia fenditura) sul piano focale stesso e che disperde la luce su un sensore bidimensionale. La figura 2.1 mostra la proiezione al suolo del campo di vista dei due canali di HYPSSOS: grazie al moto orbitale del satellite e a una opportuna sincronizzazione dell'elettronica del rivelatore, si può acquisire il segnale di una porzione bidimensionale di suolo da due diversi punti di vista, ottenendo così una visuale stereoscopica.

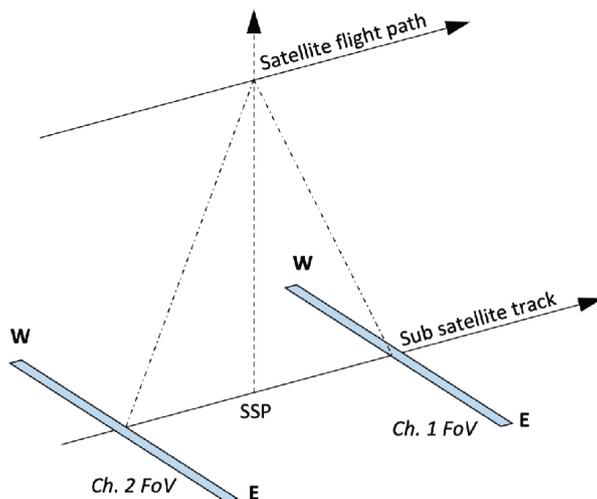


Figura 2.1: Proiezione a terra del campo di vista di una stereocamera push-broom. SSP sta per Sub Satellite Point. Fonte: [4]

L'apparato ottico di HYPSSOS, oltre a essere in grado di combinare l'analisi spettrale con quella stereoscopica, ha come obiettivo anche la compattezza, in quanto l'applicazione di un tale dispositivo potrebbe essere estremamente adatta per nano-sat¹ di pochi chilogrammi finalizzati tanto all'esplorazione planetaria quanto all'osservazione della superficie terrestre.

HYPSSOS è un *nadir pointing satellite*, dunque la sua direzione geometrica visiva è rivolta sempre direttamente sotto di esso (così come si vede in figura 2.1), perpendicolarmente al suolo, così come per molti satelliti *remote sensing*, ovvero satelliti che acquisiscono le informazioni a distanza, ad esempio tramite l'osservazione della radiazione diffusa dalla superficie del target. Orbitando attorno al pianeta di interesse, HYPSSOS è in grado di tracciare due spettri della superficie mediante il metodo push-broom. I due spettri vengono acquisiti per mezzo di due canali ottici separati che, relativamente alla direzione di volo del satellite, si trovano uno rivolto in avanti e uno indietro, rispettivamente il Channel 1 e il Channel 2 della figura 2.1.

¹I nano-sat sono satelliti miniaturizzati, con massa in genere compresa tra 1 kg e 10 kg.

2.2 Struttura

La struttura di HYPPOS trae le fila dall'esperienza della STereo Camera SIMBIO-SYS [7] della sonda Bepi-Colombo², lanciata nell'ottobre del 2018 con l'obiettivo di studiare la geofisica, la magnetosfera e la composizione di Mercurio. SIMBIO-SYS è lo strumento di imaging nel visibile e vicino infrarosso della missione, e consta di una High Resolution Imaging Channel (HRIC), di un Visible and near-Infrared Hyperspectral Imaging channel (VIHI) e, per l'appunto, di STC. In virtù dell'esperienza raggiunta con il modulo di STC di SIMBIO-SYS, si è scelto di progettare HYPPOS con una struttura simile: i due canali ottici di cui è dotato il telescopio sono direzionati a $\pm 20^\circ$ dalla direzione del nadir [8].

Di seguito, in figura 2.2, si propone uno schema del modello ottico di HYPPOS [3] nella banda del visibile (da 400 nm a 800 nm), ma c'è la possibilità di estendere lo spettro anche al range dell'infrarosso, superando così i limiti imposti dalla STC di SIMBIO-SYS [4].

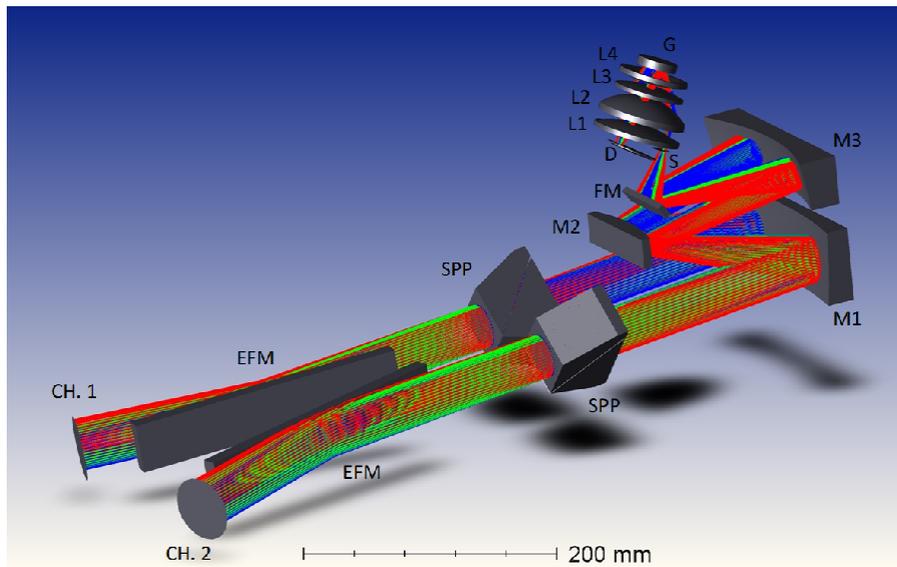


Figura 2.2: Modello ottico di HYPPOS, con tre campi di vista rappresentativi dello spettro. Fonte: [4]

In principio, la luce viene raccolta a $\pm 20^\circ$ rispetto al nadir da due specchi piani (EFM), e indirizzata a due prismi Schmidt-Pechan (SPP) che ruotano il campo di vista dello strumento di 90° . La necessità di questi due rotatori d'immagine sta nel fatto che, se non ci fossero, l'immagine dei campi di vista sul piano focale del telescopio sarebbe quella mostrata a sinistra in figura 2.3.

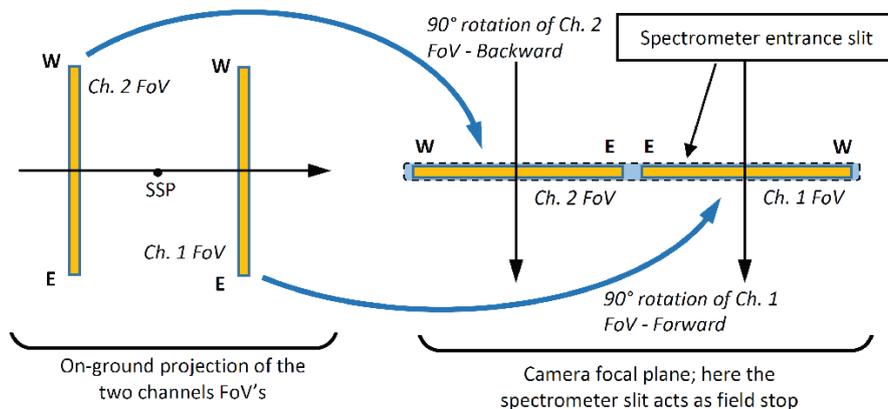


Figura 2.3: Sulla sinistra, la proiezione dei campi di vista sul piano focale del telescopio nel caso di assenza dei rotatori di immagine; sulla destra, la proiezione degli stessi campi di vista viene ruotati di 90° per effetto della presenza dei rotatori. Fonte: [4]

²ESA (European Space Agency) e JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency).

Questa configurazione, però, renderebbe più complicata la realizzazione dello spettrometro, che dovrebbe avere a questo punto due entrate separate. Così facendo, aggiungendo i prismi Schmidt-Pechan, è possibile ruotare di 90° i campi di vista, ottenendo sul piano focale del telescopio un'immagine come quella mostrata a destra in figura 2.3. È chiaro ora che la proiezione avviene su una singola entrata [3]. Questa operazione permette, inoltre, di ottenere due spettri indipendenti, ammesso che non ci sia cross-talk tra i due canali. Il problema del cross-talk verrà dibattuto più avanti, nel paragrafo 3.1.

Dopo aver attraversato i prismi, la luce è indirizzata all'unità comune di HYPPOS. A differenza, però, di quella di STC, che è un telescopio Schmidt modificato³, l'unità comune di HYPPOS ha la configurazione di un *three mirror anastigmat* (TMA), cioè un telescopio costruito con tre specchi curvi in grado di ridurre quattro aberrazioni: coma⁴, aberrazione sferica, astigmatismo e curvatura di campo⁵. Il TMA è rappresentato dagli specchi M1, M2 e M3. Questo apparato porta i fasci provenienti dai due canali (la parte stereometrica per la ricostruzione 3D) a riflettere su di uno specchio piano (flat mirror: FM). Da qui, la luce converge in un'unica fenditura dello spettrometro (S), che si trova sul piano focale del telescopio. In questo momento, la luce entra nello spettrometro. In seguito, l'apparato (lenti L1, L2, L3, L4) conduce i raggi verso un reticolo riflettente concavo (G), e infine a un detector bidimensionale (D) [3] [4] [5].

Un'altra possibile configurazione di HYPPOS (che non verrà discussa nelle righe di questa tesi), è quella in cui, a livello dello specchio piano FM, è presente un filtro interferenziale⁶ in grado di indirizzare la componente visibile e quella infrarossa in due spettrometri separati [4]. In questo consiste la potenzialità del satellite di fornire informazioni in uno spettro più ampio di quello in cui lavora la camera STC di SYMBIO-SYS.

I campi di vista adottati nel modello mostrato in figura 2.2 sono direzionati a $\pm (20.125^\circ - 22^\circ)$ rispetto al nadir. Nell'analisi fatta nei capitoli seguenti, gli specchi EFM sono stati rimossi, e si è adottata la configurazione con FoVs a $\pm (0.125^\circ - 2^\circ)$ rispetto al TMA. Ci si concentrerà sul cammino che i raggi compiono fino alla fenditura. Infine, in tabella 2.1 si riportano alcuni dei parametri usati nella costruzione del prototipo di HYPPOS [5].

Elemento	Informazioni
M1	Raggio di curvatura: 467 mm Superficie iperbolica concava
distanza M1-M2	135 mm
M2	Raggio di curvatura: 141 mm Superficie sferica convessa
distanza M2-M3	135 mm
M3	Raggio di curvatura: 117.5 mm Superficie oblata ellissoidale concava
distanza M3-FM	225 mm
distanza FM-piano focale	41.73 mm
S	due fenditure coassiali (ognuna di $22 \mu\text{m} \times 8 \text{ mm}$) con 1 mm di separazione centrale
L1	Menisco R1: 562.77 mm, R2: 61.1 mm spessore: 13 mm

³telescopio in cui la luce, dopo aver attraversato una lente correttrice asferica, incide su di uno specchio sferico, riducendo in questo modo l'astigmatismo del fascio.

⁴o aberrazione comatica, è un'aberrazione che si verifica quando i raggi paralleli provenienti da un oggetto formano un angolo non nullo rispetto all'asse di una lente. I raggi che passano per il centro della lente sono focalizzati sul piano focale a una certa distanza dall'asse, mentre quelli che passano lontani dal centro sono focalizzati a distanze diverse.

⁵aberrazione che si verifica a causa della natura curva degli elementi ottici, i quali portano un oggetto piatto a risultare curvo nella sua immagine, impedendone una perfetta focalizzazione su un piano d'immagine piatto.

⁶un filtro interferenziale, o filtro diecrico, è un filtro che riflette alcune lunghezze d'onda e ne trasmette altre con un assorbimento quasi nullo. Opera sul principio di interferenza da lamine sottili.

Elemento	Informazioni
L2	Lente pianoconvessa R: 50.78 mm, spessore: 19 mm
L3	Lente pianoconvessa R: 91.84 mm, spessore: 7.4 mm
L4	Menisco R1: 104.4 mm, R2: 64.8 mm spessore: 3.2 mm
G	Reticolo concavo sferico R: 83.7 mm, densità: 6781 lines/mm

Tabella 2.1: Alcuni parametri del prototipo di HYPPOS.

3. Analisi della luce sul piano focale del telescopio

3.1 Il problema del cross-talk tra i canali ottici

Come già accennato, HYPSSOS è in grado di ottenere due spettri indipendenti della superficie osservata. Purtroppo, i cammini ottici dei due canali, inizialmente ben separati, si avvicinano notevolmente in prossimità del piano focale del telescopio. Di conseguenza, pur essendo i due campi di vista nominali (cioè quelli nel range utile di osservazione) fisicamente separati, i campi di vista non nominali di un canale (cioè quelli fuori dal range) interferiscono con quelli nominali dell'altro canale, creando una situazione di *cross-talk*, come mostrato in figura 3.1. Prendendo in considerazione il canale 2, che ha campo di vista $+ (0.125^\circ - 2^\circ)$, i fasci di luce che producono cross-talk sono quelli con campi di vista minori di 0° , mentre per il canale 1, che ha campo di vista $- (0.125^\circ - 2^\circ)$, saranno quelli con angoli maggiori di 0° . L'obiettivo è, dunque, quello di evitare questa condizione.

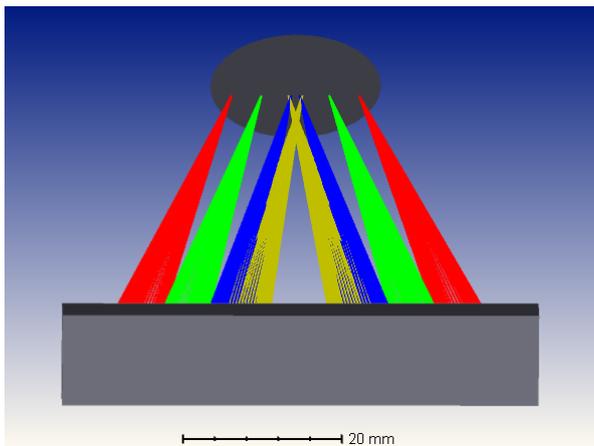


Figura 3.1: Esempio di cross-talk: rispetto al canale 2, i campi a $+ 0.125^\circ$ (blu), $+ 0.1^\circ$ (verde) e $+ 1.875^\circ$ (rosso) giungono nella propria metà di piano focale, mentre il campo a $- 0.2^\circ$ (giallo) produce cross-talk; visuale da FM a S.

La prima modifica che permette di ridurre l'interferenza, è quella di impostare dei diaframmi sugli specchi M1, M2, M3 e FM, di modo da limitare il numero di raggi di FoVs non nominali che arriva sul piano focale del telescopio. I diaframmi sono anche chiamati aperture, e hanno l'obiettivo di regolare la quantità di luce in ingresso. Per fare ciò, si possono prendere in esame i campi di vista a $+ 0.125^\circ$, $+ 1.0^\circ$ e $+ 2.0^\circ$ e si fa in modo che la superficie effettiva degli specchi sia approssimativamente pari all'area di incidenza dei raggi luminosi di questi campi sugli stessi. Per M1, M2, M3 si usano diaframmi di superficie ellittica, mentre per FM si adopera una superficie rettangolare.

Successivamente, si può inserire tra il flat mirror (FM) e il telescope focal plane (S), un oggetto di separazione che agisca come ostacolo per i raggi dei campi di vista responsabili di cross-talk. La realizzazione dell'oggetto richiede, nel codice di *ray tracing* (tracciamento dei raggi), il passaggio dalla configurazione sequenziale a quella non sequenziale del software. Questo separatore non solo deve bloccare i raggi che producono cross-talk, ma deve avere anche un alto tasso di assorbimento (quindi

scarso potere riflettente), in modo che la maggior parte di essi non venga riflessa. Inoltre, deve anche essere potenzialmente realizzabile, quindi avere forme e dimensioni non limitanti da un punto di vista tecnico.

In prima battuta, si può pensare a un tronco di piramide a base rettangolare, su cui si imposta un rivestimento ideale che abbia una bassa riflettanza e coefficiente di trasmissione nullo. In figura 3.2 si può vedere come questo setto è stato schematizzato nel codice di ray tracing, che simula il cammino ottico dei raggi luminosi. Si vede che le basi del tronco di piramide sono molto vicine rispettivamente al piano focale del telescopio (5 mm) e al folding mirror FM (6.7 mm). Il tronco di piramide ha altezza pari a 30 mm, la base maggiore ha semiapertura x di 1.18 mm e semiapertura y di 0.45 mm, mentre la base minore ha semiapertura x pari a 5.5 mm, semiapertura y di 2.6 mm e decentramento in Y di 1.93 mm rispetto alla base maggiore. Entrambe le basi sono parallele al piano focale del telescopio.

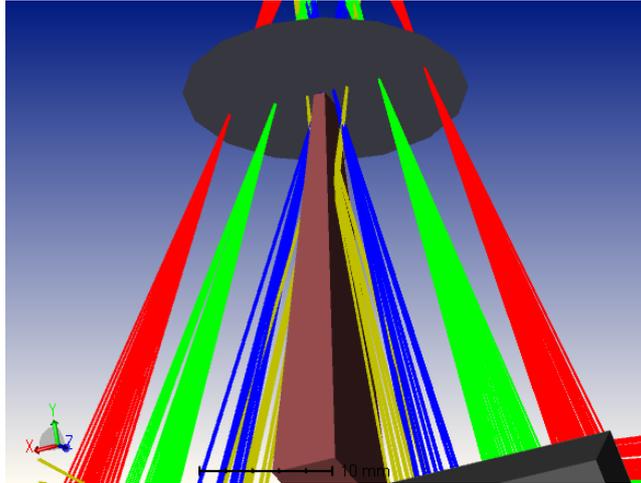


Figura 3.2: Risoluzione del cross-talk: contrariamente a quanto succede in figura 3.1, il campo di vista a -0.2° viene bloccato in seguito all'introduzione del setto separatore avente facce con 5 % di riflettanza, e non interferisce con l'altro canale; visuale da FM a S.

Si ricordi che, per ogni corpo, esistono dei coefficienti di assorbimento (α), riflessione (ρ) e trasmissione (τ), tali per cui:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (3.1)$$

e il coefficiente di riflessione, o riflettanza, è dato dal rapporto tra flusso luminoso riflesso e flusso incidente sulla superficie: $\rho = \frac{\phi_r}{\phi_{inc}}$. La riflettanza, che in questo caso è ideale e che, realisticamente, sarebbe funzione della lunghezza d'onda e dell'angolo di incidenza, è posta pari al 5 % su tutte le facce dell'oggetto, in quanto questo è circa il valore che ci si aspetterebbe per un buon black coating, con luce in incidenza radente [9].

È inoltre possibile impostare nel codice di ray tracing le caratteristiche di riflettanza delle superfici che definiscono questo setto. Nel caso in questione, è stato imposto che tutte le superfici si comportino come dei diffusori ideali lambertiani. In ottica, una superficie *lambertiana*, come quella mostrata in figura 3.3, è una superficie che, vista da ogni angolazione, ha la stessa radianza L (si veda Eq. 1.4), e che diffonde la radiazione in modo che l'intensità radiante I (si veda Eq. 1.3) segua una legge (legge di Lambert) che dipende dall'angolo θ tra la direzione del fascio diffuso e la normale alla superficie, secondo la relazione:

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta \quad (3.2)$$

dove I_0 è l'intensità nella direzione della normale.

Una superficie totalmente lambertiana ha sempre la stessa radianza da ogni angolo di vista perché, così come l'intensità dipende da $\cos \theta$, anche l'area apparente ha la stessa dipendenza, dunque nel rapporto le due dipendenze si elidono (si veda la definizione di radianza data nel paragrafo 1.2). A questo proposito, si sottolinea che la riflessione sul separatore del fascio (in giallo) con campo di vista

a - 0.2° che si vede in figura 3.2, è solo una visualizzazione grafica, dato che in realtà la riflessione avviene con scattering lambertiano totale, e non c'è dunque riflessione speculare.

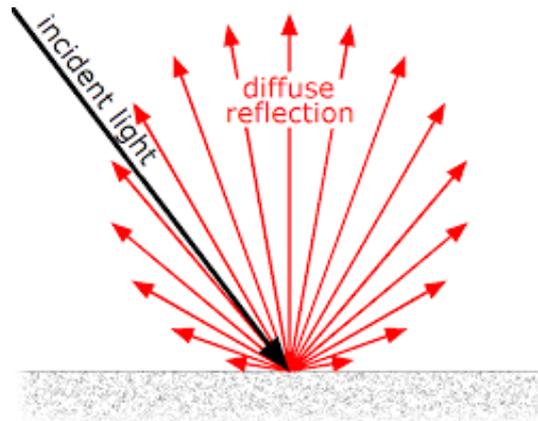


Figura 3.3: Comportamento di una superficie lambertiana: l'intensità radiante segue la legge $I(\theta) = I_0 \cos \theta$. Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Lambertian_reflectance

Una volta impostato correttamente il separatore, si può procedere all'analisi delle configurazioni di luce prodotte dai raggi con campi di vista nominali (che non incidono sul separatore) e non nominali (che vengono bloccati dalle superfici del separatore e scatterati sul piano focale del telescopio).

3.2 Detector e sorgenti

Per visualizzare qual è l'effetto del setto separatore sui FoVs che nominalmente produrrebbero fenomeni di cross-talk, si può analizzare il valore dell'irradianza sul piano focale del telescopio.

Nel ray tracing si è utilizzata la superficie *detector* per visualizzare l'incidenza dei raggi sul telescopio focal plane, sul quale è in effetti presente la fenditura dello spettrometro (come si vede in figura 2.3). Siccome la fenditura sul piano focale del telescopio è in realtà divisa in due parti, una per canale, separate da una porzione centrale di lunghezza pari a 1 mm che blocca la radiazione incidente, nella simulazione è stata sovrapposta al detector una superficie completamente assorbente rettangolare di larghezza 1 mm al centro del campo di vista dello strumento, al fine di bloccare i raggi nominali con campi di vista tra - 0.125° e + 0.125°, come si vede in figura 3.4.

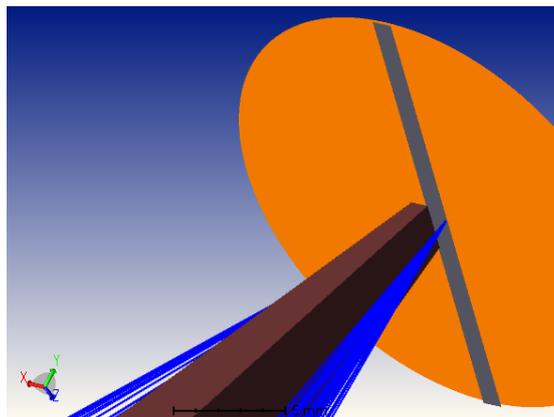


Figura 3.4: Introduzione della superficie assorbente rettangolare sul detector: il fascio a $\pm 0.1^\circ$ (blu) viene correttamente bloccato e non incide sul rivelatore.

La superficie detector è divisa radialmente e angularmente a partire dal suo centro, e ogni ray tracing eseguito tiene conto della polarizzazione e dello scattering della luce. La grandezza mostrata a lato di ogni rappresentazione grafica del detector si chiama *Incoherent Irradiance*, ed è l'irradianza calcolata semplicemente come somma delle intensità di ogni raggio che colpisce un pixel del detector diviso l'area

di quel pixel¹. Il codice di ray tracing, per dei vincoli posti nella simulazione della configurazione ottica, permette di visualizzare l'irradianza sul detector per un solo canale. Tuttavia, data la simmetria della configurazione, questo non è un problema, in quanto si assume lo stesso comportamento anche per l'altro canale. Per quanto riguarda le sorgenti, esse sono tutte di forma circolare ($R = 17.5$ mm, distanza da SPP = 44.8 mm), e in grado di irraggiare completamente la pupilla di ingresso dei due canali dello strumento.

Nei prossimi paragrafi vengono riportati dei valori simulati di alcune grandezze, come irradianza e potenza. Questi risultati numerici, indicati con un elevato numero di cifre decimali, sono forniti dai diversi ray tracing eseguiti su OpticStudio in ognuno dei casi di interesse. Lunghi dall'essere valori effettivamente misurabili da un comune apparecchio di analisi, essi sono dei dati rappresentativi di fenomeni, come la perdita di potenza o l'effetto della diffusione della radiazione, che avvengono in HYPPOS. Per semplicità, questi valori sono stati riferiti così come mostrati dal programma, e, nel caso in cui si siano calcolate delle medie, non si è tenuto conto dell'errore da associarvi.

3.3 FoVs nominali

Prima di tutto, si è osservato qual è l'effetto sul detector dato dai campi di vista nominali, ovvero quelli che sono effettivamente interessanti per l'analisi stereo-spettrometrica. A guisa d'esempio, si mostrano in figura 3.5 i risultati di irradianza prodotti dai campi a 0.125° , 0.2° , 1.0° e 2.0° , mentre in figura 3.6 sono riportati gli ingrandimenti della sezione di detector su cui incidono i raggi per ogni campo di vista. Come si osserva, gli spot sono ben localizzati e definiti sulla superficie del detector. L'analisi per ogni campo di vista adoperato è stata eseguita con 1×10^6 raggi e 1 W di potenza. Servendosi dei dati raccolti con divisione del detector in 250 zone radiali e 500 zone angolari, si è calcolata la media dei valori di irradianza non nulli registrati dal detector su ogni pixel di divisione, per ognuno dei quattro campi di vista utilizzati. Il programma fornisce anche il valore della potenza totale dispersa sul detector dai fasci. I risultati sono in tabella 3.1.

FoV [°]	Irradianza [W cm^{-2}]	Potenza [W]
0.125	2.20×10^3	0.52
0.2	3.17×10^3	0.53
1.0	9.22×10^3	0.54
2.0	5.49×10^3	0.48

Tabella 3.1: Valori dell'irradianza e della potenza misurata per alcuni campi di vista nominali.

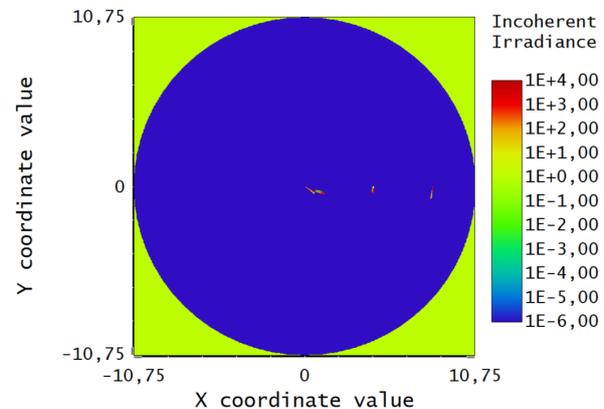


Figura 3.5: Detector view sul piano focale del telescopio, campi a 0.125° , 0.2° , 1.0° e 2.0° ; detector diviso in 250 zone radiali e 500 angolari.

Dato che l'irradianza è una misura della potenza per unità di superficie, è interessante ricavare questo valore per ogni campo di vista impostato. Il calcolo dell'irradianza da parte del programma OpticStudio, però, non viene eseguito tenendo in considerazione l'area effettiva dello spot su cui vengono focalizzati i raggi di questi FoVs, bensì tutta la superficie della divisione del detector sulla quale essi giungono. Questa zona ha un'area che dipende dalla divisione angolare e radiale che è stata fatta per il detector prima che venisse eseguito il ray tracing. Pertanto, per avere contezza dell'irradianza

¹si usa questo valore in quanto non si ha a che fare con radiazione coerente, in cui la differenza di fase di due (o più) onde luminose è una costante, bensì la radiazione è prodotta con differenza di fase casuale.

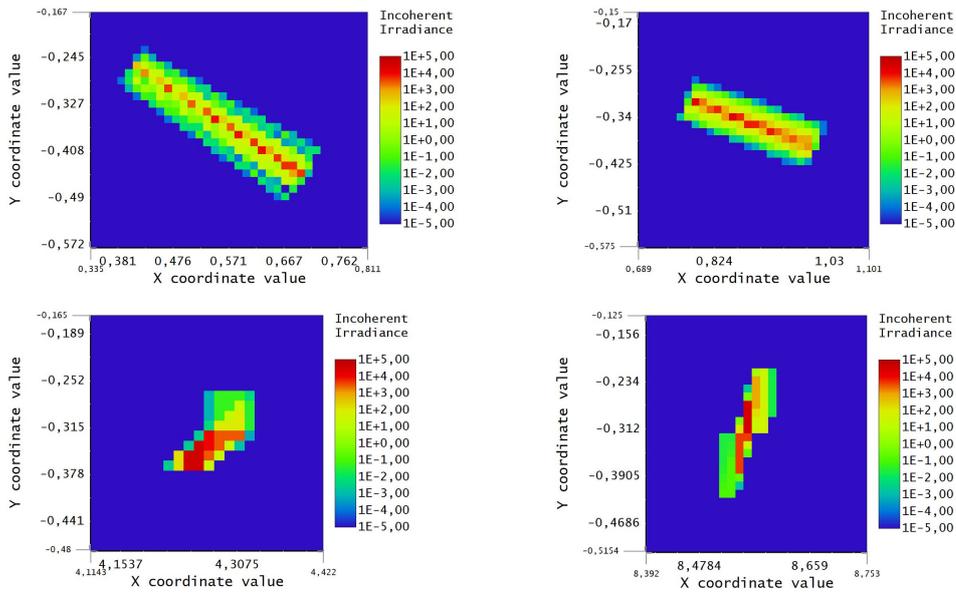


Figura 3.6: Ingrandimento, zone del detector su cui incidono i raggi dei campi di vista a $+0.125^\circ$ e $+0.2^\circ$ (in alto a sinistra e destra) e $+1.0^\circ$ e $+2.0^\circ$ (in basso a sinistra e destra); detector diviso in 250 zone radiali e 500 zone angolari.

relativa all'area degli spot dei fasci sul piano del telescopio, bisogna prima di tutto conoscere il valore di quest'area. Passando in modalità sequenziale, si può visualizzare lo *spot diagram*, cioè la rappresentazione degli spot di luce per ogni campo di vista, sul piano focale del telescopio.

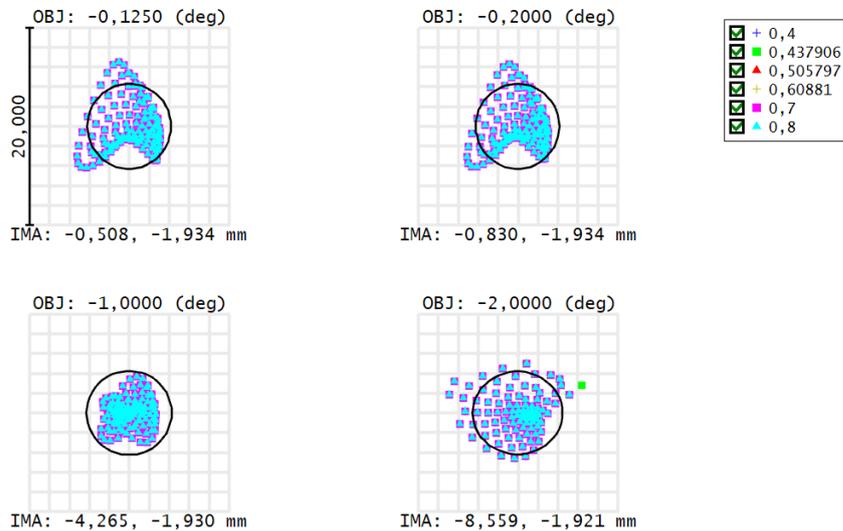


Figura 3.7: Spot diagram sul piano focale del telescopio per i campi di vista a $+0.125^\circ$, $+0.2^\circ$, $+1.0^\circ$ e $+2.0^\circ$.

In figura 3.7 sono riportati gli spot diagram per ogni campo di vista, e le unità in grafico sono in μm , come anche i valori in legenda che rappresentano le lunghezze d'onda di riferimento. Si può osservare che gli spot sono piuttosto concentrati e approssimativamente ben localizzati all'interno del disco di Airy², rappresentato in ogni riquadro da un cerchio nero centrale.

²il disco di Airy è un valore di riferimento che descrive, in ottica, il minor diametro possibile che può avere uno spot in un sistema ottico privo di aberrazioni. È calcolato dal programma usando la lunghezza d'onda primaria.

FoV [°]	Raggio RMS [μm]	Area spot [μm^2]
0.125	3.363	142.12
0.2	3.244	132.24
1.0	2.023	51.43
2.0	3.151	124.77

Tabella 3.2: Valori del raggio RMS e dell'area degli spot.

Per calcolare l'area degli spot, si è utilizzata un'approssimazione circolare, servendosi del valore del raggio dato dalla radice della media quadratica (RMS) delle distanze, a partire dal centroide, di ogni intersezione tra i raggi e il piano focale del telescopio. Questo valore è consigliabile nel caso di sistemi in cui l'ottica non produca vignettatura³, e si avvale di un metodo con quadratura gaussiana. Pertanto, è stata scelta come superficie dello spot l'area data da $\pi(2r_{RMS})^2$, dato che entro i $2r_{RMS}$ si trova il 95 % dei punti. Il suo valore, per ogni FoV, è riportato in tabella 3.2 insieme a quello del raggio.

Dato che, a parità di potenza, il prodotto tra irradianza e area deve essere lo stesso, è possibile trovare l'irradianza E_{spot} relativa all'area A_{spot} dell'immagine di ogni fascio sul piano del detector come $E_{spot} = \frac{P_{detector}}{A_{spot}}$, dove $P_{detector}$ è la potenza luminosa totale che incide sul detector per ogni campo di vista, i cui valori sono riportati in tabella 3.1. In tabella 3.3 sono riportate, invece, le misure di irradianza relative agli spot luminosi dei FoVs adoperati.

FoV [°]	Irradianza spot [W cm^{-2}]
0.125	3.66×10^5
0.2	4.00×10^5
1.0	1.04×10^6
2.0	3.85×10^5

Tabella 3.3: Valori dell'irradianza degli spot dei fasci di alcuni campi di vista nominali.

Si osserva che questi valori di irradianza sono un paio di ordini di grandezza maggiori rispetto a quelli trovati con la divisione delle superfici eseguita dal detector (tabella 3.1), a conferma del fatto che, data la concentrazione degli spot sul piano focale del telescopio, i valori di irradianza misurati dal detector sono una sottostima.

Si nota anche (sempre dalla tabella 3.1) che, per ogni campo di vista, arriva su quest'ultimo circa la metà della potenza iniziale. Per capire dove viene persa la potenza, è stato preso in esame, a guisa d'esempio, il FoV a $+1.0^\circ$. Si può osservare che la potenza è persa in gran parte all'interno dei prismi Schmidt-Pechan. Infatti, aggiungendo un detector all'uscita del prisma, si vede che la potenza totale registrata è inferiore di circa il 32 % di quella immessa. La ragione sta nel fatto che, coerentemente con il caso reale, l'analisi in configurazione non sequenziale tiene conto dello splitting subito dai raggi luminosi quando essi attraversano mezzi fisici con indice di rifrazione diversi (in questo caso vuoto e vetro di tipo N-BK7), come prescritto dalle leggi di Fresnel.

Dette $E_{r,t,i}$ le componenti rispettivamente riflessa, trasmessa e incidente del campo elettrico di un'onda elettromagnetica, e definiti i coefficienti di riflessione e trasmissione $r = \frac{E_r}{E_i}$ e $t = \frac{E_t}{E_i}$, si possono ricavare i loro valori a seconda della polarizzazione dell'onda che attraversa la superficie di separazione tra i mezzi con indici di rifrazione n_1 e n_2 (come in figura 3.8). Applicando la legge di Snell-Descartes $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$ e la condizione di continuità di E_{\parallel} alla superficie di separazione, si trova, per polarizzazione σ , in cui il campo elettrico è sempre perpendicolare al piano di incidenza:

$$r_{\sigma} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (3.3)$$

³la vignettatura è quella condizione, di solito indesiderata, per cui un'immagine appare più luminosa nel suo centro e meno alla periferia.

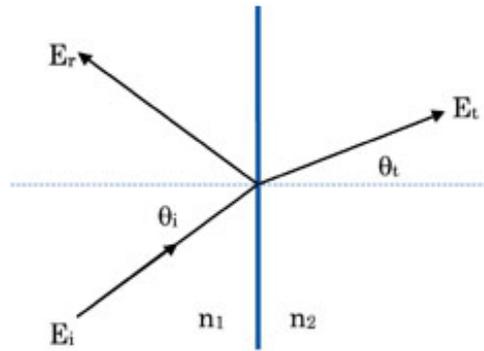


Figura 3.8: Schematizzazione di un raggio di luce all'interfaccia tra due mezzi con diverso indice di rifrazione.

Invece, per polarizzazione π , in cui il campo elettrico oscilla nel piano di incidenza, si trova che:

$$r_\pi = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} = \frac{\tan(\theta_t - \theta_i)}{\tan(\theta_t + \theta_i)} \quad (3.4)$$

A questo punto, detto $R = \frac{P_r}{P_i}$, il coefficiente di riflessione di Fresnel per la potenza P , si ha che:

$$R = \frac{I_r \cos \theta_r}{I_i \cos \theta_i} = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{E_r}{E_i} \right)^2 = r^2 \quad (3.5)$$

E infine l'indice di trasmissione T sarà pari a $1 - R$. Nel caso di luce naturale, si può pensare che ci sia la stessa potenza in polarizzazione σ e π , quindi si userà un $R_{eff} = \frac{R_\sigma + R_\pi}{2}$. Si propone di seguito un ragionamento semplificato per comprendere cosa succede ai raggi all'interno del prisma.

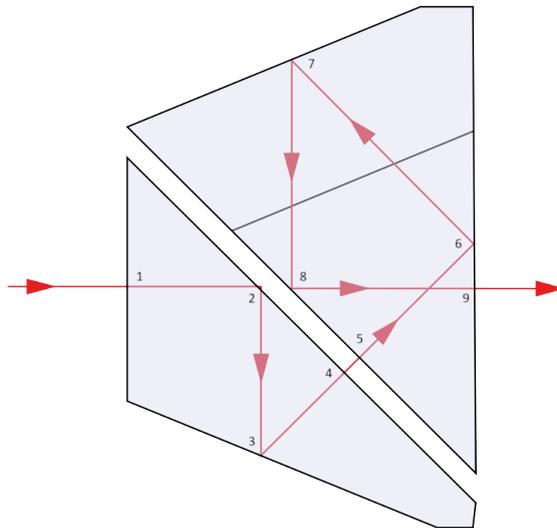


Figura 3.9: Modello schematico del prisma Schmidt-Pechan all'interno dell'apparato ottico di HYPPOS. Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Schmidt%E2%80%93Pechan_prism

Si assuma per ipotesi che le superfici su cui avvengono le riflessioni 3 e 7 (si faccia riferimento alla figura 3.9) siano totalmente riflettenti (tendenzialmente si usano rivestimenti con materiali come l'alluminio che hanno alte riflettività), che i raggi incidenti siano perpendicolari alla pupilla d'ingresso del prisma e che l'indice di rifrazione del vetro possa essere approssimato a 1.5^4 . Dunque si può porre $r = 0.2$ e $T = 0.96$. Da un'analisi con ray tracing, si vede che l'effetto combinato della pupilla circolare d'ingresso,

⁴in realtà, l'indice di rifrazione dipende dalla specifica lunghezza d'onda del raggio interessato. Per il vetro N-BK7 e per il range ($400\mu m - 800\mu m$) si va $n_{400} = 1.53$ a $n_{800} = 1.51$.

che lascia passare un certo numero di raggi, con l'indice di trasmissione del vetro, è quello di avere una potenza luminosa entrante nel prisma (1) pari a circa l'80 % di quella iniziale. In seguito, per ognuna delle interfacce di separazione 4, 5 e 9 si può assumere un fattore di trasmissione del 96 %, mentre le riflessioni nelle posizioni 2, 6 e 8 sono totali perché l'angolo di incidenza è superiore all'angolo critico, pari a circa 41° . Di conseguenza, si può porre il fattore di trasmissione all'uscita del prisma Pechan pari a $0.8 \times 0.96^3 = 0.71$, valore che torna con le aspettative, se si considerano le approssimazioni fatte e l'aver trascurato altri fenomeni come l'attenuazione dell'intensità della luce nel vetro, che segue la legge di Lambert-Beer $T = e^{-\alpha d}$, dove T è il fattore di trasmissione, α il coefficiente di assorbimento (che, in generale, dipende dalla lunghezza d'onda) e d il cammino percorso nel vetro.

Il resto della potenza persa tra il prisma e il detector finale è data da errori di ray tracing (circa 5 %) e dal non perfetto allineamento degli specchi del TMA. Per quanto probabilmente questa potenza calcolata sia un'approssimazione rispetto a quella che effettivamente si registrerebbe in un caso realistico, essa risulta un utile valore se confrontato con quello ottenuto nel caso dei campi di vista non nominali, cioè quelli responsabili del fenomeno del cross-talk se non fosse presente l'oggetto separatore.

3.4 FoVs che potrebbero produrre cross-talk

In seguito, si è osservato cosa succede per i campi di vista che, se non opportunamente limitati dal setto introdotto prima del piano focale, potrebbero produrre fenomeni di cross-talk. Si usa un ray tracing con FoVs da -0.1° a 0.7° a passi di 0.1° . Ogni campo ha potenza di 1 W e 5×10^5 raggi adoperati nell'analisi. Anche in questo caso, si è scelto di dividere il detector 250 zone radiali e 500 zone angolari. Si trova che i raggi vengono diffusi dal setto sulla porzione del piano focale corrispondente al canale del fascio di radiazione incidente, evitando così il problema del cross-talk. Tuttavia, adesso questi raggi introducono un background diffuso che contribuisce a ridurre il rapporto segnale/rumore sul piano focale del telescopio, come si vede in figura 3.10. Diversamente dal caso nominale, in cui la luce era ben concentrata sul detector, nel caso non nominale i raggi di un canale sono scatterati su tutto il semipiano di rivelazione. Di conseguenza, per la misura dell'irradianza, non si potrà più fare riferimento al metodo usato in precedenza.

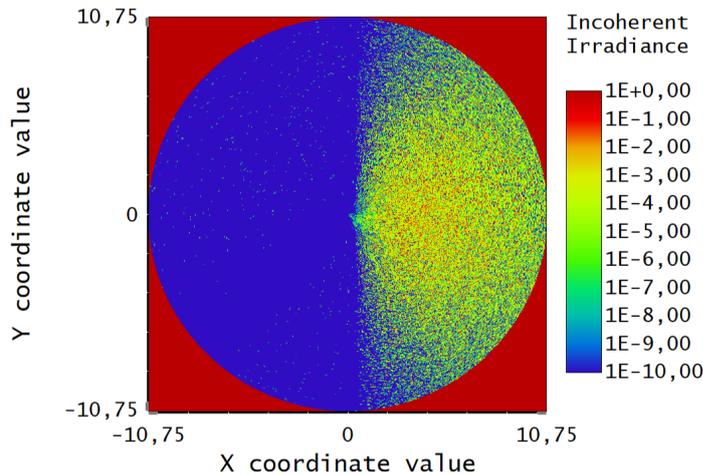


Figura 3.10: Detector view sul piano focale del telescopio, campi da -0.1° a 0.7° a passi di 0.1° ; detector diviso in 250 zone radiali e 500 zone angolari.

Si forniscono, in prima battuta, i dati relativi alla potenza totale misurata sul detector per ogni campo di vista impostato (tabella 3.4). Il massimo valore di potenza registrato è quello relativo al FoV a -0.1° ed è circa due ordini di grandezza minore di quelli trovati nel caso nominale (tabella 3.1), a causa della riflettività posta pari al 5 % delle facce del setto e dell'estensione limitata del detector, che, a differenza del caso nominale, raccoglie solo una parte della radiazione diffusa dal separatore (il quale diffonde su un angolo solido pari a 2π sr, mentre la superficie del detector è sottesa da un angolo solido decisamente inferiore). I valori decrescono per angoli sempre più distanti da 0° .

FoV [°]	Potenza totale [W]
- 0.1	5.07×10^{-3}
- 0.2	2.78×10^{-3}
- 0.3	1.45×10^{-3}
- 0.4	7.65×10^{-4}
- 0.5	3.54×10^{-4}
- 0.6	1.58×10^{-4}
- 0.7	5.13×10^{-5}

Tabella 3.4: Valori della potenza totale sul detector misurati per alcuni campi di vista non nominali.

Data la presenza di un background diffuso, invece di valutare l'irradianza degli spot luminosi come fatto precedentemente, si è calcolata l'irradianza media registrata, per ognuno dei FoVs adoperati, nella regione di detector in cui dovrebbe trovarsi la fenditura d'ingresso dello spettrometro. In realtà, si tratta di due fenditure coassiali, una nella parte destra e una in quella sinistra del piano del telescopio, ma siccome l'analisi viene fatta per una sola delle due metà, è stata considerata solo la parte destra del detector. La fenditura può essere visualizzata come un rettangolo di 8 mm di lunghezza e $22 \mu\text{m}$ di altezza, traslato di 0.5 mm nelle x e - 0.33 mm nelle y relativamente al piano focale (le stesse misure verranno usate nella raffigurazione della fenditura nel paragrafo 3.6 dedicato al calcolo del rapporto segnale/rumore).

Per far ciò, è stata calcolata, per ogni campo di vista, la somma dei valori della potenza registrati dal detector nella regione limitata dalla fenditura, avente dunque un'area $A = 22 \mu\text{m} \times 8 \text{ mm} = 0.176 \text{ mm}^2$. In tabella 3.5 sono riportati i valori della potenza totale nella regione della fenditura P_{fend} e della relativa irradianza, calcolata come $\frac{P_{fend}}{A}$.

FoV [°]	Potenza sulla fenditura [W]	Irradianza [W cm^{-2}]
- 0.1	1.16×10^{-4}	6.57×10^{-2}
- 0.2	4.44×10^{-5}	2.52×10^{-2}
- 0.3	1.77×10^{-5}	1.00×10^{-2}
- 0.4	1.16×10^{-5}	6.57×10^{-3}
- 0.5	6.02×10^{-6}	3.42×10^{-3}
- 0.6	2.70×10^{-6}	1.53×10^{-3}
- 0.7	1.09×10^{-6}	6.17×10^{-4}

Tabella 3.5: Valori della potenza totale e dell'irradianza sulla regione della fenditura dello spettrometro.

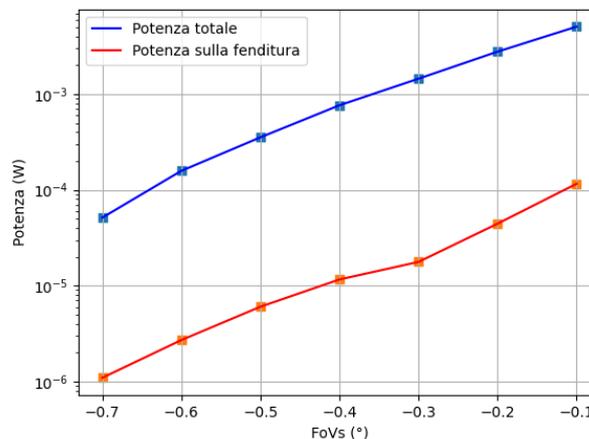


Figura 3.11: Valori della potenza totale sul detector e della potenza sulla fenditura rispetto al FoV utilizzato.

Seppur si tratti di una stima approssimativa, si vede come i valori di irradianza calcolati in questo caso, cioè con fasci di luce che incidono sul separatore e dunque producono un background di rumore diffuso sul detector, sono almeno circa sette ordini di grandezza inferiori rispetto ai valori trovati per i campi di vista nominali. Questa evidenza è un buon presupposto per il successivo calcolo del rapporto segnale/rumore sulla fenditura.

L'andamento della potenza su questa zona selezionata di detector, relativamente al campo di vista utilizzato, è mostrato in figura 3.11, insieme ai valori della potenza totale della tabella 3.4. L'asse delle ordinate è in scala logaritmica. È stato spiegato che il motivo alla base della riduzione di un fattore ~ 100 della potenza registrata tra i casi nominali (tabella 3.1) rispetto a quella totale per il campo di vista a -0.1° (prima riga della tabella 3.4) si può spiegare in virtù della riflettanza del setto separatore e dell'area limitata del detector. Coerentemente, considerando solo l'area della fenditura, la potenza registrata risulta ancora minore. Si osserva però che, qualitativamente, i dati seguono un andamento che decresce esponenzialmente con l'aumentare della distanza dei FoVs considerati dall'angolo di 0° , e questo vale sia per i valori di potenza totale misurata sul detector, sia per quelli della potenza registrata solo sull'area della fenditura. I contributi principali alla base della diminuzione del flusso radiante sono due:

- Con l'aumentare della distanza dei FoVs dall'angolo di 0° , i fasci incidono su porzioni del separatore sempre più distanti dal piano focale del telescopio, dunque la distanza tra il centro diffusore e il detector aumenta. Di conseguenza, dato che la diffusione è lambertiana e che il detector ha una superficie limitata, l'angolo solido in cui esso è sotteso sarà sempre minore. Pertanto, è prevedibile che il flusso radiante registrato dal detector sarà minore per angoli (negativi) più distanti da 0° . Il ragionamento è puramente qualitativo, dato che bisognerebbe prendere in esame altri fattori altrettanto rilevanti, come l'inclinazione della faccia laterale del separatore, la grandezza degli spot su esso e la non uniformità della distribuzione della potenza sull'area della fenditura.
- C'è poi un altro effetto dato dalla vignettatura dei fasci. Come accennato nella sezione 3.3, la vignettatura è una condizione ottica per cui un'immagine risulta più luminosa al centro e meno ai bordi. In termini tecnici, questo significa che, mentre i raggi dei campi di vista ad angoli centrali (prossimi a 0°) giungono in buona percentuale sul piano dell'immagine, di quelli relativi ad angoli più obliqui ne arriva solo una frazione. In modalità sequenziale, è possibile vedere qual è la vignettatura per tutti i campi, sia per quelli non nominali selezionati (da -0.1° a -0.7°), che per quelli nominali del paragrafo 3.3 ($+0.125^\circ$, $+0.2^\circ$, $+1.0^\circ$ e $+2.0^\circ$). Però, dato che la modalità sequenziale lavora solo con propagazione geometrica dei raggi, senza tenere in conto fenomeni come quelli di separazione e diffusione dei raggi, l'analisi è stata condotta rimuovendo il setto separatore, cioè permettendo a tutti i fasci di arrivare sul piano del telescopio. In altre parole, si è valutato il solo effetto dell'aver inserito su M1, M2, M3 e FM quei diaframmi, introdotti nel paragrafo 3.1, che ottimizzano il sistema affinché lavori nei campi di vista nominali, e che contribuiscono alla perdita di flusso non nominale lungo il cammino ottico.

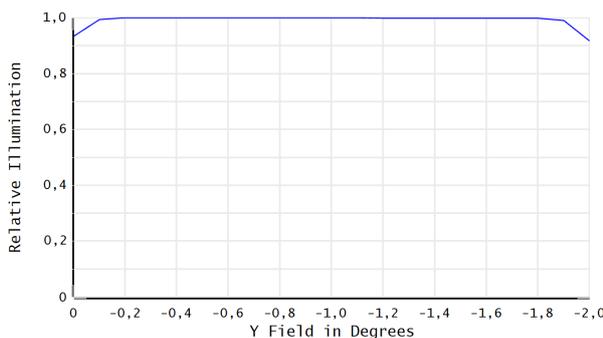


Figura 3.12: Relative Illumination sul piano focale del telescopio; campi nominali.

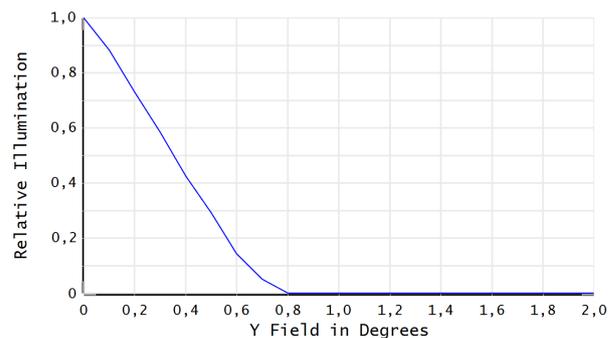


Figura 3.13: Relative Illumination sul piano focale del telescopio; campi non nominali.

Nelle figure 3.12 e 3.13 sono riportati i valori della *Relative Illumination* rispettivamente per i campi nominali e non nominali. Questo valore è calcolato come il rapporto tra numero di raggi che superano la pupilla d'ingresso di HYPSON (cioè quella dei prismi Schmidt-Pechan) e quelli che incidono sul piano focale del telescopio. Sull'asse delle ascisse, sono riportati gli angoli dei FoVs, che sono con segno opposto rispetto a quelli finora considerati, dato che in modalità sequenziale si è lavorato con il canale 1. Di conseguenza, i FoVs nominali hanno angoli negativi, quelli non nominali hanno angoli positivi. Si vede come, mentre da un lato (figura 3.12) il rapporto è abbastanza omogeneo e pari a 1^5 , indice che il sistema è correttamente ottimizzato sui campi di vista nominali, dall'altro (figura 3.13) i valori diminuiscono circa linearmente con l'aumentare della distanza dall'angolo di 0° dei FoVs. Con l'introduzione del separatore, la potenza degli spot dei fasci non nominali sulle facce con 5 % di riflettanza, seguirà, dunque, un profilo simile a quello mostrato in figura 3.13.

3.5 Analisi con luce di sorgente estesa

Uno studio ulteriore può essere condotto prendendo in esame sorgenti estese, cioè sorgenti che simulino meglio il comportamento di una superficie. HYPSON è pensato, infatti, per analizzare le superfici planetarie che sono verosimilmente illuminate dalla luce del Sole o di una stella, dunque che si comportano come sorgenti secondarie. La radiazione luminosa che si può raccogliere con uno strumento ottico a bordo di un satellite dipende in gran misura dall'angolo di fase, cioè l'angolo relativo tra Sole - superficie⁶ - satellite [10] [11]. Tuttavia, data la relativa limitatezza della superficie osservata da strumenti del genere, di solito, in un'osservazione, non si hanno variazioni significative dell'angolo di fase, né dell'angolo tra la normale alla superficie osservata e la direzione del satellite. Di conseguenza, si può assumere che una tale sorgente emetta in modo uniforme e isotropo sull'apertura del canale ottico. Dato che i raggi vengono scatterati in ogni direzione, è opportuno procedere con un'analisi di luce diffusa in cui i campi di vista seguono una distribuzione continua.

Per osservare la luce dei campi nominali, ovvero quelli a cui è associato il segnale utile, è stata simulata una sorgente (un disco di raggio pari a 17.5 mm, ruotato di 1.0625° nelle x) angolarmente estesa, tale da illuminare la sola porzione del piano focale corrispondente a una fenditura $0.9375^\circ \times 18.5''$, e in grado di riempire completamente la pupilla di ingresso di uno dei due canali dello strumento. In questo modo, è possibile simulare il range di campi di vista $\pm (0.125^\circ - 2^\circ)$ e che si disperdono su tutta l'area di ingresso delle fenditure coassiali dello spettrometro S.

Per valutare viceversa i campi non nominali, cioè il contributo dei raggi che producono luce diffusa, si è impostata una sorgente, sempre a forma di disco di raggio di 17.5 mm, ma ruotata di -0.4° nelle x e angolarmente più estesa ($0.35^\circ \times 0.40^\circ$), al fine di simulare i campi di vista che non focalizzano sulla fenditura e che impattano sul setto divisore. L'apertura angolare nelle x di 0.35° è usata in modo da comprendere anche i raggi che colpiscono il setto separatore in tutta il suo spessore in y e non solo nella direzione ortogonale al piano del telescopio (si veda sempre la figura 3.2 per comprendere meglio).

Così facendo, si riescono a produrre due diverse configurazioni di irradianza sul piano del detector. Prima di passare, però, alla simulazione con sorgenti estese per dare una valutazione più appropriata del rapporto segnale/rumore (SNR), è necessario fare alcune considerazioni di carattere teorico. Si è detto che la sorgente ipotizzata deve diffondere la luce in modo isotropo sull'apertura del canale ottico dello strumento. Ciò significa che essa deve emettere, in ogni direzione, la stessa intensità radiante I (si veda Eq. 1.3).

⁵questo non significa che tutta la potenza nominale immessa nel sistema arriva sul piano del telescopio: come visto alla fine della sezione 3.3, ci sono vari fattori che contribuiscono alla perdita di potenza anche nel caso nominale, molti dei quali non considerati dalla modalità sequenziale.

⁶con un modello semplificato, una superficie planetaria può essere approssimata a emettitore lambertiano, che diffonde la radiazione con un'intensità radiante che segue la legge 3.2, mentre altri modelli, come quello di Lommel-Seeliger, prendono in esame anche il modo in cui la luce penetra nella superficie. Inoltre, su casi di studio specifici, vanno considerate altre variabili come gli angoli di diffusione privilegiati, la composizione della superficie del pianeta e l'eventuale presenza dell'atmosfera.

La scelta di selezionare uno specifico range di campi di vista nei due casi (nominale (1) e non nominale (2)) è una limitazione sull'angolo solido considerato, e impone pertanto dei vincoli sul flusso radiante (cioè la potenza) delle due sorgenti. Bisognerà fare in modo di impostare nei due casi (nominale e non) due diverse potenze di emissione Φ , in modo che sia rispettata la proporzione:

$$\frac{\Phi_1}{\Omega_1} = \frac{\Phi_2}{\Omega_2} \quad (3.6)$$

Si è proceduto a questo punto studiando separatamente le sorgenti nominali e non nominali all'interno di un detector polare con apertura di 3° : è stata impostata una sorgente puntiforme al centro e si è fatto in modo che i valori dell'intensità radiante misurata nei due casi fossero uguali. Si suppone che, nel passaggio dalla sorgente puntiforme alla sorgente estesa, questa considerazione non perda di validità, dato che ogni punto del disco luminoso emette come se fosse una sorgente puntiforme.

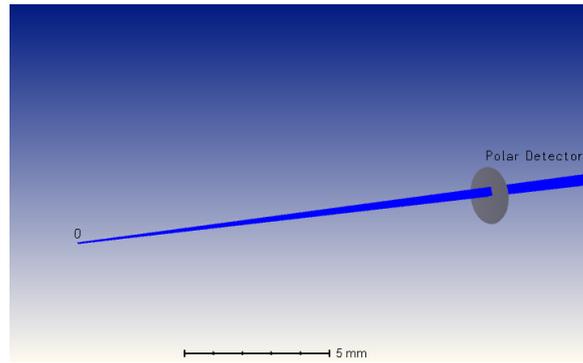


Figura 3.14: Detector polare con sorgente puntiforme dei campi di vista non nominali.

All'inizio, è stato impostato 1 W di potenza in entrambi i casi e, mediando sui valori diversi da zero di intensità radiante, si è ottenuto: $I_{nominale} = 46335 \text{ W sr}^{-1}$ e $I_{non\ nominale} = 5701 \text{ W sr}^{-1}$, con un rapporto $\frac{I_{nominale}}{I_{non\ nominale}}$ pari a 8.13. Di conseguenza, per raggiungere una condizione di illuminazione uniforme, se si imposta $\Phi_1 = 1 \text{ W}$ come potenza del caso nominale, occorrerà impostare $\Phi_2 = 8.13 \text{ W}$ nel caso non nominale.

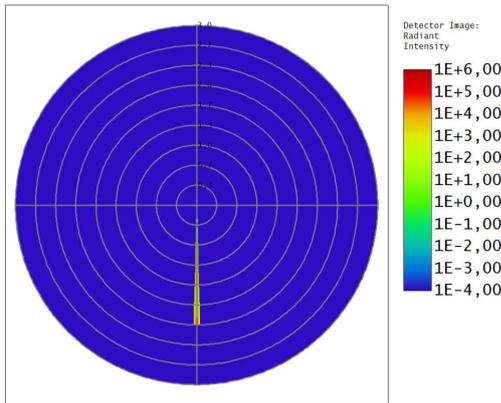


Figura 3.15: Detector polare, intensità radiante per campi nominali da sorgente puntiforme.

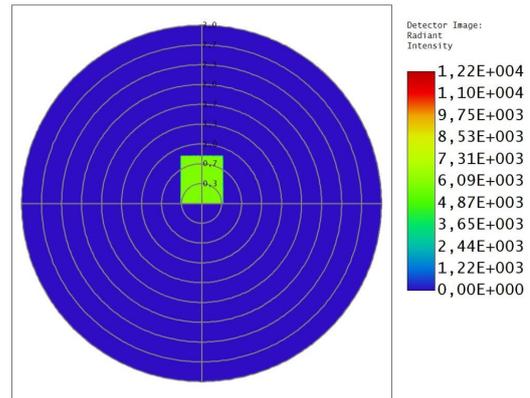


Figura 3.16: Detector polare, intensità radiante per campi non nominali da sorgente puntiforme.

Dato che questa configurazione riguarda solo la sorgente luminosa, senza considerazioni sul resto dell'apparato del telescopio, non è nemmeno presente l'effetto di rotazione di 90° dato dal prisma Schmidt-Pechan, dunque le immagini 3.15 e 3.16 presentano i segnali dei campi di vista rispettivamente nella metà inferiore e superiore del detector, invece che in quella destra e sinistra come ci si sarebbe potuti aspettare. I valori sull'asse delle ordinate sono quelli relativi all'angolo θ azimutale nel sistema di coordinate polari.

3.6 Rapporto segnale/rumore

Fatte queste considerazioni, si è proceduto al calcolo del rapporto segnale/rumore. Per farlo, è stato diviso il detector in 500 zone radiali e 1000 zone angolari, in modo da avere maggiore precisione nella registrazione. In virtù della necessità di isotropia nell'emissione tra le sorgenti nominali e non nominali discussa poco fa, è stata impostata sulla sorgente estesa a forma di disco una potenza di 1 W per i campi nominali, e di 8.13 W per quelli che produrrebbero fenomeni di cross-talk in assenza del separatore. In questo modo, con due ray tracing di 1×10^6 raggi ciascuno, si sono ottenute le configurazioni di irradianza mostrate in figura 3.17 e 3.18.

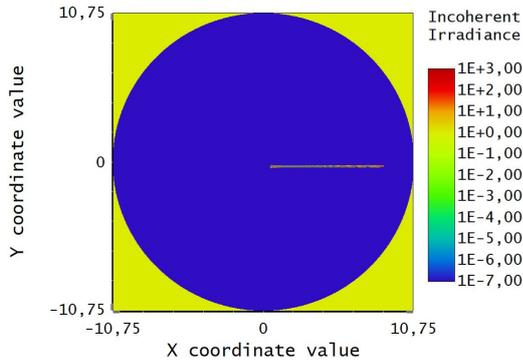


Figura 3.17: Detector view sul piano focale del telescopio; campi nominali; detector diviso in 500 zone radiali e 1000 zone angolari.

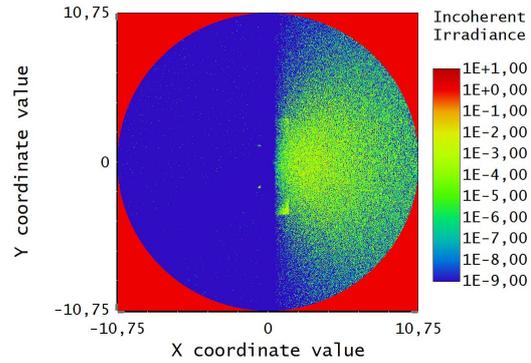


Figura 3.18: Detector view sul piano focale del telescopio; campi non nominali; detector diviso in 500 zone radiali e 1000 zone angolari.

Si ricordi che la visualizzazione riguarda solo uno dei due canali ottici, dato che, per simmetria, l'altro canale ha una visualizzazione sul piano del detector analoga, ma speculare. Per ogni sezione del detector, è stato calcolato dunque il rapporto segnale/rumore SNR, definito come:

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{nominale}}}{P_{\text{non nominale}}} \quad (3.7)$$

dove P indica la potenza registrata su una determinata sezione del detector, definita dalle divisioni angolari e radiali impostate.

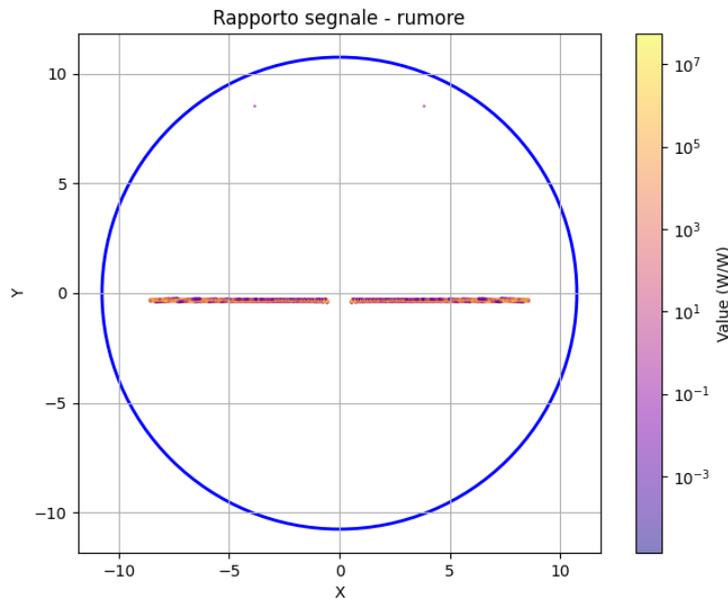


Figura 3.19: SNR tra FoVs nominali e non nominali sul piano focale del telescopio.

In figura 3.19 si mostra il rapporto segnale/rumore sul detector del piano focale del telescopio (racchiuso dal bordo in blu), mostrando cosa succede per entrambi i canali ottici di HYPSSOS. Come auspicato, il segnale viene proiettato sulla sezione d'ingresso della fenditura dello spettrometro, rappresentata da due entrate coassiali separate da 1 mm di distanza. Con uno zoom (figura 3.20), si nota che la lunghezza orizzontale del segnale è compatibile con quella delle entrate della fenditura, lunghe 8 cm ciascuna, e che l'apertura delle fenditure, pari a $22 \mu\text{m}$, è correttamente posizionata nella regione dove il rapporto segnale/rumore assume i valori maggiori, superiori a 10^4 W/W . Si può dunque affermare che il rumore si trova ben sotto la soglia di rivelazione.

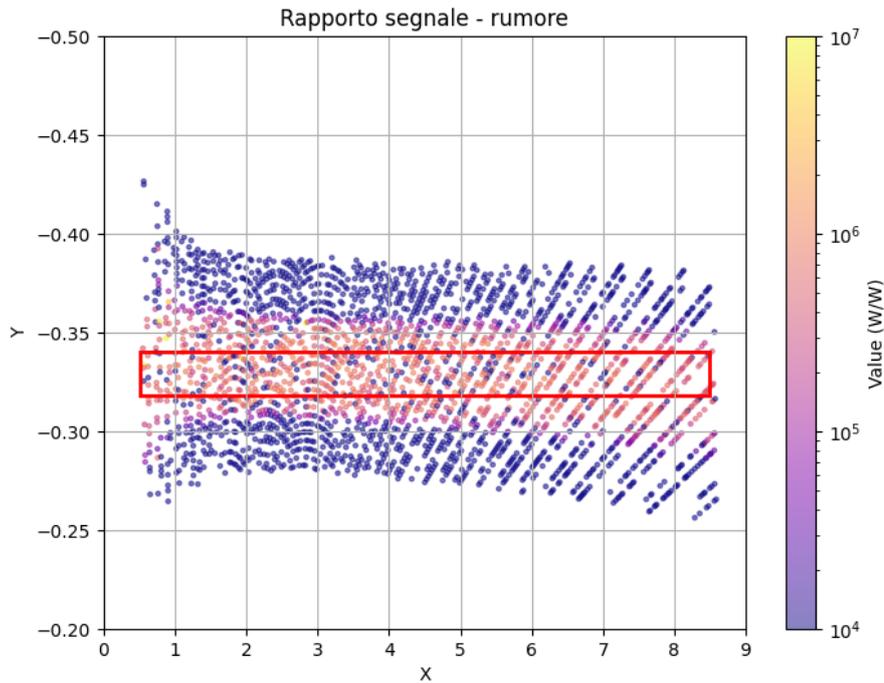


Figura 3.20: SNR, zoom sulla parte destra del detector e visualizzazione della fenditura dello spettrometro (in rosso).

Occorre anche considerare che, per come è stato progettato HYPSSOS, il sensore finale, responsabile della registrazione dell'immagine, non si trova sul piano della fenditura. Come detto nel paragrafo 2.2, dedicato al disegno ottico dello strumento, la fenditura rappresenta l'ingresso dello spettrometro, mentre il sensore è posizionato al termine di esso, dopo le lenti L1, L2, L3 e L4 il reticolo G. Presumibilmente, dunque, mentre i raggi dei campi di vista nominali verranno focalizzati sul piano focale dello spettrometro, quelli dei campi di vista non nominali saranno ulteriormente attenuati al suo interno, non seguendo il cammino nominale. Pertanto, ci si può aspettare che il SNR sul piano del sensore sia ancora maggiore di quello ottenuto nella regione della fenditura. Ecco che, l'effettivo SNR di HYPSSOS non sarà presumibilmente limitato dalla luce diffusa dal separatore, bensì da altri fattori di rumore (come quello intrinseco della sorgente e del detector).

4. HYPPOS come futuro strumento di realizzazione di point clouds iperspettrali per studi geologici

La mappatura delle superfici è una componente essenziale di molteplici studi fisici e geologici, come analisi minerarie e composizionali di un determinato territorio. I sistemi finora adoperati per questo genere di attività si articolano in immagini iperspettrali bidimensionali e ricostruzioni geometriche 3D. Nelle scienze terrestri, la morfologia territoriale è spesso tracciata con nuvole di punti¹ ad alta e altissima risoluzione, che talvolta contengono anche informazioni su colore e riflettività delle strutture litologiche. Il problema è che, ad esempio, esistono molti tipi di rocce distinguibili solo mediante specifici tratti nel visibile e vicino infrarosso (400 nm - 1000 nm) o medio infrarosso (1000 nm - 2500 nm), pertanto sono spesso richiesti set di dati iperspettrali.

L'imaging iperspettrale è una tecnica molto innovativa per mappature del terreno non invasive, e l'applicazione di sistemi che realizzino set 4D di dati delle superfici è recente e ancora in fase di evoluzione. In questo panorama, HYPPOS risulta essere un possibile candidato per la nuova frontiera tecnologica, essendo in grado di convergere l'informazione spettroscopica con quella stereometrica per la ricostruzione tridimensionale. La stereometria infatti, insieme ad altre tecniche come la LIDAR², può essere abbinata a strumenti di imaging (ad esempio con metodo push-broom, come accade per HYPPOS) per la realizzazione di nuvole di punti iperspettrali [12] [13] [14].

Una delle applicazioni più innovative per HYPPOS, potrebbe essere ad esempio quella dell'esplorazione mineraria, in vista soprattutto del significativo aumento di domanda di materiali grezzi finalizzati a una quanto più rapida transizione ecologica (come definito dalle normative dell'Unione Europea [15]) e a un futuro low-carbon. Uno di questi materiali è il litio, che si trova primariamente in depositi salini e giacimenti di roccia dura come le pegmatiti³. Rispetto a satelliti con sistemi di visione multi-spettrale, che non sono in grado di descrivere direttamente la mappatura dei materiali contenenti litio negli affioramenti di pegmatite esposti alla superficie [16], è stato osservato come sistemi che realizzano nuvole di punti iperspettrali sono notevolmente più accurati e riescono a dare un contesto tridimensionale molto utile per caratterizzare litologie geologiche che possono essere adoperate poi durante le attività minerarie.

È stato visto in Namibia, Sud Africa, con un'intrusione di pegmatite lunga 1.2 km nella cintura mineraria da Cape-Cross a Uis [16], dove da tempo sono state identificate diverse centinaia di intrusioni di pegmatite esposte alla superficie. In questo contesto, è stato dimostrato che, innanzitutto, la realizzazione di nuvole di punti iperspettrali, opportunamente corrette e processate, è in grado di fornire un utile panorama tridimensionale, che risolve il problema della misura della corretta distanza tra due siti che si avrebbe in una visualizzazione di dati iperspettrali 2D.

In figura 4.1 si vede come, quando si visualizzano dati iperspettrali 2D, due pixel possono apparire adiacenti, quando le esatte geolocalizzazione delle superfici interessate potrebbero essere anche distanti

¹le nuvole di punti sono insiemi di punti tridimensionali che ricostruiscono la geometria di un oggetto o un territorio.

²laser Imaging Detection and Ranging: la struttura della superficie è determinata misurando il tempo trascorso tra l'emissione dell'impulso laser e la ricezione del segnale retrodiffuso.

³rocce ignee che formano alla fine dello stadio di cristallizzazione del magma.

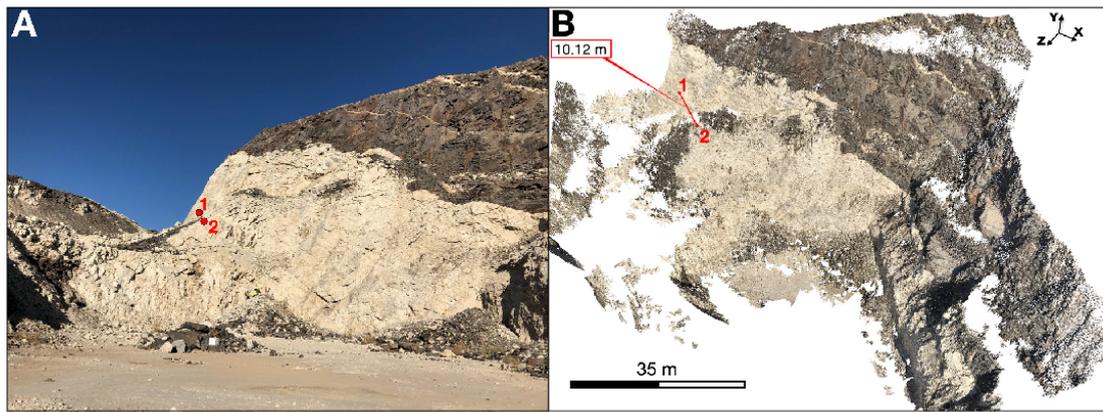


Figura 4.1: Posizione geografica di due pixel in un'immagine iperspettrale 2D (sinistra) vs in una nuvola di punti 3D (destra). Fonte: [16]

una decina di metri, e con le nuvole di punti iperspettrali si riesce ad acquisire questo genere di informazione.

Inoltre, un altro vantaggio dell'imaging iperspettrale, è che è possibile osservare complessi aspetti secondari delle pegmatiti su macro scale, come ad esempio sostituzioni mineralogiche che avvengono in seguito ad alterazioni idrotermiche o ricristallizzazioni. In genere, questo tipo di analisi si conduce tramite mappature dettagliate, microscopia, o micro-spettrofotometria XRF (X-ray fluorescence)⁴, che sono processi tendenzialmente lenti, dispendiosi e in grado di coprire solo piccole aree di campioni manuali [16].

Alla luce di queste considerazioni, è lecito ipotizzare che l'applicazione di HYPPOS a una scala metrica o decametrica, come quella degli affioramenti rocciosi di interesse geologico, possa rappresentare una tecnologia minimamente invasiva e decisamente conveniente. In questo caso, lo strumento risulterebbe adatto per applicazioni geologiche (ma potrebbe esserlo anche per alcune di tipo agricolo e climatico) di fotogrammetria satellitare o, più plausibilmente, da UAV (Unmanned Aerial Vehicle) [4] [17], con l'intento di fornire una ricostruzione 4D delle superfici osservate.

⁴analisi chimica non distruttiva, che consiste nell'irraggiare un minerale con radiazione, fino a promuovere un elettrone in uno stato più energetico, creando dunque una lacuna. Quando un altro elettrone colma questa lacuna, viene emessa energia sotto forma di un fotone di fluorescenza, col quale si può determinare la natura del materiale.

5. Conclusioni

In questa tesi è stata presentata un'analisi della luce diffusa di HYPPOS, innovativo satellite remote sensing, in grado di unire le potenzialità di una camera push-broom con quelle di uno spettrometro. In questo modo, HYPPOS realizza set di dati 4D che eludono i problemi di correlazione frequenti nei comuni strumenti di osservazione satellitare, dove spesso lo strumento di imaging e lo spettrometro sono separati e operano indipendentemente. Il focus della tesi è stato quello di valutare gli effetti dell'introduzione di un separatore fisico che impedisse il fenomeno del cross-talk, ovvero la situazione per cui la luce, proveniente da uno dei due canali ottici, produce interferenza con il piano focale dell'altro. Il separatore adoperato è un tronco di piramide a base rettangolare le cui facce hanno riflettività al 5%, che simulano quelle di un black coating con luce in incidenza radente.

Attraverso l'uso del programma di simulazione ottica Ansys Zemax OpticStudio, sono stati analizzati i valori di irradianza e di potenza che fasci di luce con diversi campi di vista generano sul piano focale del telescopio, su cui è stato inserito un detector di rivelazione. Mentre i raggi con campi di vista nominali generano spot di luce concentrati, quelli con campi di vista non nominali, cioè che produrrebbero fenomeni di cross-talk se non ci fosse il separatore, vengono diffusi da esso e generano un background di rumore. L'obiettivo è stato quello di valutare, dapprima con divisione angolare discreta dei campi di vista, e poi utilizzando un range continuo, le diverse configurazioni di luce sul detector, fino al calcolo del rapporto segnale/rumore (SNR) dell'apparato, che ha restituito valori soddisfacenti per il potenziale che HYPPOS rappresenta nel panorama degli strumenti per l'osservazione e l'esplorazione planetaria. In particolare, i valori del SNR sul piano focale del telescopio, nella regione dove si trova la fenditura di ingresso dello spettrometro, sono superiori a 10^4 , dunque il rumore da luce diffusa è plausibilmente sotto la soglia di rivelazione.

Inoltre, alla luce di quanto esposto, è auspicabile che uno strumento talmente avanguardistico possa essere anche largamente utilizzabile non solo per l'esplorazione spaziale, ma anche per obiettivi civili. Integrato su piccoli satelliti, HYPPOS può realizzare osservazioni finalizzate ad applicazioni agricole, di esplorazione mineraria e controllo climatico. Inoltre, data la sua compattezza, sarebbe estremamente adatto anche per l'installazione su nano-sat di piccole dimensioni, un ulteriore ampliamento del range di potenzialità di questo strumento.

Bibliografia

- [1] H. U. Keller, C. Barbieri, P. Lamy, H. Rickman, R. Rodrigo, K. P. Wenzel, H. Sierks, M. F. A'Hearn, F. Angrilli, M. Angulo, M. E. Bailey, P. Barthol, M. A. Barucci, J. L. Bertaux, G. Bianchini, J. L. Boit, V. Brown, J. A. Burns, I. Büttner, J. M. Castro, G. Cremonese, W. Curdt, V. Da Deppo, S. Debei, M. De Cecco, K. Dohlen, S. Fornasier, M. Fulle, D. Germerott, F. Gliem, G. P. Guizzo, S. F. Hviid, W. H. Ip, L. Jorda, D. Koschny, J. R. Kramm, E. Kührt, M. Küppers, L. M. Lara, A. Llebaria, A. López, A. López-Jimenez, J. López-Moreno, R. Meller, H. Michalik, M. D. Michelena, R. Müller, G. Naletto, A. Origné, G. Parzianello, M. Pertile, C. Quintana, R. Razzoni, P. Ramous, K. U. Reiche, M. Reina, J. Rodríguez, G. Rousset, L. Sabau, A. Sanz, J. P. Sivan, K. Stöckner, J. Tabero, U. Telljohann, N. Thomas, V. Timon, G. Tomasch, T. Wittrock, and M. Zaccariotto. OSIRIS The Scientific Camera System Onboard Rosetta. , 128(1-4):433–506, February 2007.
- [2] A. Coradini, F. Capaccioni, P. Drossart, G. Arnold, E. Ammannito, F. Angrilli, A. Barucci, G. Bellucci, J. Benkhoff, G. Bianchini, J. P. Bibring, M. Blecka, D. Bockelee-Morvan, M. T. Capria, R. Carlson, U. Carsenty, P. Cerroni, L. Colangeli, M. Combes, M. Combi, J. Crovisier, M. C. De Sanctis, E. T. Encrenaz, S. Erard, C. Federico, G. Filacchione, U. Fink, S. Fonti, V. Formisano, W. H. Ip, R. Jaumann, E. Kuehrt, Y. Langevin, G. Magni, T. McCord, V. Mennella, S. Mottola, G. Neukum, P. Palumbo, G. Piccioni, H. Rauer, B. Saggin, B. Schmitt, D. Tiphene, and G. Tozzi. Virtis: An Imaging Spectrometer for the Rosetta Mission. , 128(1-4):529–559, February 2007.
- [3] G. Cremonese, G. Naletto, C. Re, M. Tordi, I. Dornach, C. Doria, R. La Grassa, A. Meneguzzo, L. Agostini, F. Brotto, M. Faccioni, L. Lessio, C. Bettanini, F. Capaccioni, E. Giovine, F. Lazzarotto, L. Marinangeli, F. Mattioli, P. Palumbo, M. Pertile, A. Petrella, G. Salemi, A.C. Tangari, and M. Zusi. The hyperspectral stereo observing system. *Memorie della Società Astronomica Italiana*, 75:282–287, 2023.
- [4] Giampiero Naletto, Livio Agostini, Gabriele Cremonese, Emanuele Desirò, Igor Dornach, Chiara Doria, Matteo Faccioni, Riccardo La Grassa, Francesco Lazzarotto, Luigi Lessio, Andrea Meneguzzo, Cristina Re, Massimiliano Tordi, Carlo Bettanini, Fabrizio Capaccioni, Stefano Debei, Ennio Giovine, Lucia Marinangeli, Francesco Mattioli, Maria Teresa Melis, Pasquale Palumbo, Marco Pertile, Amedeo Petrella, Anna Chiara Tangari, and Michele Zusi. In-lab characterization of HYPSSOS, a novel stereo hyperspectral observing system: first results. In Kyriaki Minoglou, Nikos Karafolas, and Bruno Cugny, editors, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 12777 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 127775C, July 2023.
- [5] Giampiero Naletto, Livio Agostini, Francesca Brotto, Gabriele Cremonese, Matteo Faccioni, Luigi Lessio, Cristina Re, Massimiliano Tordi, Carlo Bettanini, Fabrizio Capaccioni, Maria Teresa Capria, Stefano Debei, Ennio Giovine, Lucia Marinangeli, Francesco Mattioli, Marco Pertile, Amedeo Petrella, Giuseppe Salemi, Anna Chiara Tangari, and Michele Zusi. Laboratory characterization of HYPSSOS, a novel 4D remote sensing instrument. In Sachidananda R. Babu, Arnaud Hélière, Toshiyoshi Kimura, and Steven P. Neeck, editors, *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXV*, volume 11858 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 118580E, September 2021.

- [6] R. Gupta and R.I. Hartley. Linear pushbroom cameras. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(9):963–975, 1997.
- [7] G. Cremonese, F. Capaccioni, M.T. Capria, A. Doressoundiram, P. Palumbo, M. Vincendon, M. Massironi, S. Debei, M. Zusi, F. Altieri, M. Amoroso, G. Aroldi, M. Baroni, A. Barucci, G. Bellucci, J. Benkhoff, S. Besse, C. Bettanini, M. Blecka, D. Borrelli, J.R. Brucato, C. Carli, V. Carlier, P. Cerroni, A. Cicchetti, L. Colangeli, and V. Da Deppo. Simbio-sys: Scientific cameras and spectrometer for the bepicolombo mission. *Space Science Reviews*, 216(75):1–78, 2020.
- [8] Vania Da Deppo, Giampiero Naletto, Gabriele Cremonese, and Luciano Calamai. Optical design of the single-detector planetary stereo camera for the bepicolombo european space agency mission to mercury. *Appl. Opt.*, 49(15):2910–2919, May 2010.
- [9] Martin R. Dury, Theo Theocharous, Neil Harrison, Nigel Fox, and Moira Hilton. Common black coatings – reflectance and ageing characteristics in the 0.32–14.3um wavelength range. *Optics Communications*, 270(2):262–272, 2007.
- [10] Bonnie J. Buratti and Joseph Veverka. Photometry of rough planetary surfaces: The role of multiple scattering. *Icarus*, 64(2):320–328, 1985.
- [11] T. P. Lester, M. L. McCall, and J. B. Tatum. Theory of Planetary Photometry. , 73:233, October 1979.
- [12] Deep Inamdar, Margaret Kalacska, J. Pablo Arroyo-Mora, and George Leblanc. The Directly-Georeferenced Hyperspectral Point Cloud: Preserving the Integrity of Hyperspectral Imaging Data. *Frontiers in Remote Sensing*, 2:675323, April 2021.
- [13] Sandra Lorenz, Sam T. Thiele, Moritz Kirsch, Gabriel Unger, Robert Zimmermann, Pierpaolo Guarnieri, Nigel Baker, Erik Vest Sørensen, Diogo Rosa, and Richard Gloaguen. Three-dimensional, km-scale hyperspectral data of well-exposed zn–pb mineralization at black angel mountain, greenland. *Data*, 7(8), 2022.
- [14] Alfonso López, Juan M. Jurado, J. Roberto Jiménez-Pérez, and Francisco R. Feito. Generation of hyperspectral point clouds: Mapping, compression and rendering. *Computers Graphics*, 106:267–276, 2022.
- [15] European Commission, Entrepreneurship Directorate-General for Internal Market, Industry, SMEs, G Blengini, C El Latunussa, U Eynard, C Torres De Matos, D Wittmer, K Georgitzikis, C Pavel, S Carrara, L Mancini, M Unguru, D Blagoeva, F Mathieux, and D Pennington. *Study on the EU’s list of critical raw materials (2020) – Final report*. Publications Office of the European Union, 2020.
- [16] René Booyesen, Sandra Lorenz, Samuel T. Thiele, Warrick C. Fuchsloch, Timothy Marais, Paul A. M. Nex, and Richard Gloaguen. Accurate hyperspectral imaging of mineralised outcrops: An example from lithium-bearing pegmatites at Uis, Namibia. *Remote Sensing of Environment*, 269:112790, February 2022.
- [17] Samuel T. Thiele, Zakaria Bnoukacem, Sandra Lorenz, Aurélien Bordenave, Niccolò Menegoni, Yuleika Madriz, Emmanuel Dujoncquoy, Richard Gloaguen, and Jeroen Kenter. Mineralogical mapping with accurately corrected shortwave infrared hyperspectral data acquired obliquely from uavs. *Remote Sensing*, 14(1), 2022.