DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA INFORMATICA

"CALIBRAZIONE DELLO STRUMENTO SPAZIALE PHEBUS"

RELATORE: CH. MO PROF. PIERGIORGIO NICOLOSI
CORRELATORE: DOTT.SA MARIA GUGLIELMINA PELIZZO

Laureando: Nicola Saccozza

ANNO ACCADEMICO 2006-2007

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA INFORMATICA

Tesi di Laurea

“Calibrazione dello strumento spaziale PHEBUS”

Relatore: Ch. mo Prof. Piergiorgio Nicolosi

Correlatore: Dott.sa Maria Guglielmina Pelizzo

Laureando: Nicola Saccozza

Dipartimento di Ingegneria dell’Informazione

Anno accademico 2006-2007

Finito di scrivere il 20 novembre 2007 utilizzando Microsoft Word 2007

Ai miei genitori.

Se guardo il tuo cielo, opera delle tue dita,

la luna e le stelle che tu hai fissate,

che cosa è l'uomo perché te ne ricordi,

il figlio dell'uomo perché te ne curi?

Salmo 8.

Indice

Sommario ..... **i**

Introduzione ..... **iii**

Elenco delle Figure ..... **v**

Elenco delle Tabelle ..... **ix**

Capitolo 1 – La missione spaziale e lo strumento PHEBUS **1**

1. 1 Descrizione della missione spaziale "BepiColombo" 1

1. 2 Cosa farà "PHEBUS" – Gli aspetti scientifici 3

1. 3 PHEBUS – Breve panoramica dello strumento 8

1. 4 I rivelatori di PHEBUS 12

1.4.1 I fotomoltiplicatori MicroChannel Plate 12

1.4.2 Gli anodi del tipo "Resistive Anode Encoder – RAE" 20

Capitolo 2 – La spettroscopia VUV **25**

2.1 Spettroscopia nell'estremo ultravioletto 25

2.2 Il reticolo di diffrazione concavo 26

2.3 Il monocromatore tipo Seya – Namioka 29

Capitolo 3 – Calibrazione **31**

3.1 Obiettivi della calibrazione di PHEBUS 31

3.1.1 Caratterizzazione dei rivelatori 31

3.1.2 Allineamento spettrale dello strumento 33

3.1.3 Caratterizzazione ISRF dello strumento 34

3.1.4 Risposta assoluta dello strumento 34

3.1.5 Caratterizzazione della luce diffusa e del rumore 35

3.1.6 Caratterizzazione della tolleranza e del range dinamico dello strumento 35

3.2 L'attività svolta finora 36

3.3 Filosofia di calibrazione 37

3.3.1 Spot calibration 38

3.3.2 Modello ottico di PHEBUS – Analisi della calibrazione a spot 41

3.3.3 Campo di vista di PHEBUS e luce diffusa 45

3.3.4 Full field calibration 48

3.3.5 Calibrazione del sensore NUV 48

Capitolo 4 – Il sistema da vuoto **51**

4.1 Descrizione del sistema da vuoto 51

4.2 Schema e funzionamento dell'impianto da vuoto 58
4.3 Punti critici per il completamento della facility 64
Capitolo 5 – Il sistema spettrometrico – Intervallo 55÷155 nm 67
5.1 Calibrazione nell'intervallo 55÷155 nm 67
5.2 Stima delle dimensioni dello specchio e del fascio collimato per α = 80° 71
5.2.1 Configurazione 1 – OA = 50 mm 72
5.2.2 Configurazione 2 – OA = 100 mm 73
5.3 Stima delle dimensioni dello specchio per un angolo di incidenza di 83° 76
5.4 Rendimento dello specchio collimatore 76
Capitolo 6 – Il sistema spettrometrico – Intervallo 145÷315 nm 81
6.1 Calibrazione nell'intervallo 145÷315 nm 81
6.2 Calcolo delle dimensioni e del raggio del reticolo 83
6.3 Valutazione delle caratteristiche ottiche del sistema – Reticolo concavo 84
6.3.1 Reticolo concavo – Modello senza fenditure di ingresso e di uscita 85
6.3.2 Reticolo concavo – Modello con la sola fenditura di uscita 89
6.3.3 Reticolo concavo – Modello con entrambe le fenditure 91
6.4 Valutazione delle caratteristiche ottiche del sistema – Reticolo toroidale 94
6.4.1 Reticolo toroidale – Modello senza fenditure di ingresso e di uscita 94
6.4.2 Reticolo toroidale – Modello con la sola fenditura di uscita 96
6.4.3 Reticolo toroidale – Modello con entrambe le fenditure 97
6.5 Stima della potenza in uscita al sistema con reticolo concavo 100
6.5.1 Stima delle potenze 103
6.5.2 Stima della potenza in uscita al sistema monocromatore 105
6.5.3 Un precisazione sul reticolo del monocromatore 107
6.6 Il sistema di calibrazione rapportato a PHEBUS 108
Conclusioni 111
Appendice A 113
Appendice B 114
Appendice C 115
Appendice D 117
Allegato A 117
Allegato B 119
Bibliografia 129
Ringraziamenti I

Sommario

Questa tesi tratta della calibrazione dello strumento PHEBUS, parte integrante della piattaforma spaziale BepiColombo dell'ESA. PHEBUS è uno strumento costituito da due spettrometri UV, l'EUV (Extreme UltraViolet detector) e l'FUV (Far UltraViolet detector), progettati per analizzare la composizione della tenue esosfera di Mercurio in due differenti intervalli spettrali. La sua missione è ambiziosa: approfondire le conoscenze che abbiamo sulle sue origini di Mercurio, la sua formazione, la sua composizione, la sua evoluzione.

L'attività di calibrazione di PHEBUS verrà svolta a Padova, presso il laboratorio "Luxor" del DEI – Dipartimento di Elettronica e Informatica.

In questo documento è riportata una descrizione dello strumento e del programma di missione.

Per facilitare il lettore nella comprensione dei contenuti, viene introdotta brevemente la spettroscopia VUV e vengono analizzati i rivelatori di PHEBUS, descrivendo i fotomoltiplicatori MicroChannel Plate ed i sensori del tipo "Resistive Anode Encoder – RAE".

Successivamente vengono descritte le linee guida del piano di calibrazione che si intende seguire, considerando le attività già svolte e quelle da completare.

Sono riportate le varie fasi di sistemazione ed analisi del sistema di calibrazione che si intende utilizzare. Tale sistema è composto nel dettaglio da:

- la facility di calibrazione, costituita da una camera da vuoto ed un sistema di pompaggio e
- la sorgente UV necessaria per generare il fascio UV di riferimento

Tutto il sistema è interfacciato con una clean room, per permettere di lavorare su PHEBUS e sulla strumentazione in un ambiente controllato, privo di polvere, umidità e agenti contaminati. Questa precauzione è necessaria per non rovinare le delicate parti di PHEBUS e le ottiche impiegate per la sua calibrazione. L'analisi dei singoli elementi che compongono la facility comprende una loro descrizione, che considera sia l'aspetto tecnico che quello del loro utilizzo, oltre alla una stima delle caratteristiche tecniche di tutto il sistema.

Gli ultimi due capitoli riguardano l'analisi ottica delle due sorgenti necessarie per generare la radiazione UV di riferimento per la calibrazione.

Introduzione

L'attuale conoscenza di Mercurio è limitata alle osservazioni effettuare oltre trent'anni fa dalla sonda Mariner 10 della NASA e da misurazioni effettuate da Terra, che non consentono di ottenere risultati molto precisi a causa della distanza che ci separa dal pianeta.

La missione spaziale "BepiColombo" dell'"European Space Agency – ESA" è stata ideata con lo scopo preciso di effettuare un'osservazione dettagliata, a distanza ravvicinata, di Mercurio, per approfondire le nostre conoscenze sulla sua origine, la sua conformazione e geologia, la sua composizione, la sua esosfera, ….

Si tratta di una missione a lungo termine, che si ha obiettivi ambizioni, soprattutto per le condizioni ambientali in cui gli strumenti e le due sonde previste si troveranno ad operare. Si raggiungeranno picchi di oltre 300°C durante le fasi di esposizione alla radiazione solare, mentre durante il transito nella zona d'ombra si raggiungeranno temperature inferiori a –100°C.

Lo strumento spaziale PHEBUS, parte integrante di questa missione, è stato progettato con lo specifico compito di analizzare la composizione della tenue esosfera di Mercurio, in condizioni e punti di osservazione differenti. Lo scopo di queste osservazioni è di acquisire dati sufficienti per poter realizzare un modello che descriva l'esosfera nel suo complesso, modellandone composizione ed evoluzione. Oltre che per l'osservazione dell'esosfera, PHEBUS verrà impiegato per ricercare la presenza di nuove specie chimiche, delle quali si ipotizza l'esistenza, ma non ancora rilevate nelle precedenti osservazioni. Verrà infine impiegato per individuare eventuali tracce di ghiaccio (anidride carbonica o acqua) nei crateri polari del pianeta, che sono le uniche zone potenzialmente al riparo dalla radiazione solare.

Visti i tempi di progettazione e realizzazione della missione, che si estenderà su di un arco di tempo di oltre un decennio, è fondamentale che nessun dettaglio realizzativo venga trascurato, in modo da ridurre al minimo le possibilità di system failure. Particolare attenzione dovrà essere posta durante le fasi di test e calibrazione, per garantire il corretto funzionamento dei singoli componenti dello strumento.

Per quanto riguarda PHEBUS sono previsti numerosi test, sia strutturali che di funzionamento. In particolare, sono previste delle fasi di calibrazione, che a partire dai singoli componenti, termineranno nella calibrazione dell'intero strumento, completamente assemblato. La fase di calibrazione è di importanza fondamentale, per determinare la risposta dei singoli elementi alle grandezze di interesse per la misura.

Nel caso di PHEBUS, la calibrazione finale serve a stabilire alcuni parametri quali:

- risposta dello strumento ad una radiazione di intensità nota,

- influenza della luce diffusa nelle misure,
- campo di vista,
- verifica del corretto funzionamento.

In questa tesi viene trattata la fase preliminare di studio e messa a punto della facility di calibrazione ed i metodi che si intendono seguire per effettuare tale operazione. In particolare, la struttura della tesi è la seguente:

- *Capitolo 1 – La missione spaziale e lo strumento PHEBUS:* in questo capitolo viene introdotta la missione spaziale "BepiColombo" e PHEBUS, fornendo una sua descrizione e considerando in particolare i rivelatori EUV ed FUV, componenti principali dello strumento ed elementi principali della calibrazione.
- *Capitolo 2 – La spettroscopia VUV:* in questo capitolo viene introdotta la spettroscopia VUV, riportandone le caratteristiche e le problematiche, riferite al monocromatore e allo strumento PHEBUS, che opererà nel vuoto interplanetario.
- *Capitolo 3 – Calibrazione:* in questo capitolo viene introdotta l'attività di calibrazione prevista per PHEBUS dal "Ground Calibration Plan" dell'ESA. In particolare, vengono descritti l'attività svolta finora nelle messa a punto della facility, quali sono i punti critici di questa attività e quale filosofia si intende adottare per la calibrazione di PHEBUS ("Spot calibration" e "Full field calibration").
- *Capitolo 4 – Il sistema da vuoto:* viene presa in considerazione la facility di calibrazione nel suo complesso, fornendo una descrizione di ogni sua componente, analizzando in particolare il tank e l'impianto da vuoto, descrivendone la composizione ed il funzionamento. Vengono inoltre riportate le attività svolte finora sull'impianto. La descrizione della sorgente di radiazione UV, che fa sempre parte della facility, viene rimandata ai Capitoli 5 e 6.
- *Capitolo 5 – Il sistema spettrometrico intervallo 55÷155 nm:* in questo capitolo è riportato lo studio della sorgente UV che si intende utilizzare per coprire l'intervallo spettrale di 55÷155 nm (sensore EUV). Vengono descritti i singoli componenti e l'analisi delle caratteristiche ottiche del sistema, fondamentale per ottenere una stima dell'intensità della radiazione disponibile per la calibrazione.
- *Capitolo 6 – Il sistema spettrometrico intervallo 145÷315 nm:* in questo capitolo è presentato lo studio della sorgente UV che si intende utilizzare per coprire l'intervallo spettrale di 145÷315 nm (sensore FUV). Vengono descritti i singoli componenti e l'analisi delle caratteristiche ottiche del sistema, fondamentale per ottenere una stima dell'intensità della radiazione disponibile per la calibrazione.

Elenco delle figure

1.1 Struttura di PHEBUS 8
1.2 Configurazione ottica di PHEBUS 9
1.3 Rivelatore EUV con finestra di protezione chiusa 11
1.4 Rivelatore EUV con finestra di protezione aperta 11
1.5 Schema assonometrico del rivelatore EUV 11
1.6 Fotomoltiplicatore di elettroni a dinodi 15
1.7 Struttura generale di un amplificatore di immagine con MCP 16
1.8 Sezione di un MCP 17
1.9 Quantum Detective Efficiency (QDE) per un fotocatodo GaN,in funzione di λ 18
1.10 Sezione di un singolo canale inclinato 20
1.11 Schema dell'anodo RAE di PHEBUS 23
1.12 Schema dell'anodo RAE di PHEBUS con un ipotetico esempio di righe spettrali 24

2.1 Regione dell'ultravioletto da vuoto VUV 26
2.2 Geometria del cerchio di Rowland 26
2.3 Formazione dell'immagine con un reticolo concavo 27

3.1 Spot calibration: mappatura del baffle d'entrata con un fascio di piccole dimensioni 39
3.2 Possibile mappatura del baffle d'entrata di PHEBUS 40
3.3 Spot delle varie righe spettrali, sul piano del sensore FUV 41
3.4 Immagine delle righe sul rivelatore FUV 42
3.5 Distribuzione dell'intensità luminosa 43
3.6 Simulazione del movimento dello spot sul baffle d'entrata di PHEBUS 44
3.7 Andamento della percentuale di radiazione che arriva sul sensore FUV in base alla posizione del sensore rispetto al centro del baffle d'entrata 45
3.8 PHEBUS con baffle ruotato, per valutare il suo campo di vista 46
3.9 Campo di vista del baffle e luce diffusa 46
3.10 Riflessione dei raggi incidenti da parte del rivestimento interno del baffle 47

4.1 Foto reale della facility, ancora in fase di completamento 52
4.2 Disegno del tank con le sue dimensioni principali 52
4.3 Vista del portello sinistro del tank dove verrà collegata la sorgente UV 53

4.4 Vista frontale del tank e dello strumento, con portello rimosso 54
4.5 Vista laterale del tank e dello strumento 55
4.6 Vista assonometrica del tank e della fascio UV 56
4.7 Vista laterale del tank e del fascio UV 56
4.8 Vista frontale del tank e del fascio UV 57
4.9 Schema del sistema da vuoto 58
4.10 Foto del pannello di controllo del sistema da vuoto 59
4.11 Foto di una delle valvole 60
4.12 Foto di una delle valvole a cassetto 60
4.13 Schema del vacuometro e del ponte di Wheatstone 63

5.1 Spettro di emissione in uscita al monocromatore 68
5.2 Schema meccanico della sorgente UV proposto da McPherson 69
5.3 Schema meccanico della sorgente UV che verrà utilizzata nel range 55÷155 nm 69
5.4 Fascio d'uscita: stima dell'apertura 70
5.5 Geometria del fascio di uscita, vista dall'alto 71
5.6 Schema geometrico dello specchio parabolico collimatore 74
5.7 Modello ZEMAX® dello specchio parabolico 75
5.8 Curva di riflessione con coating in Al-MgF_2 77
5.9 Curva di riflessione con coating in platino 78
5.10 Curva di riflessione con coating in oro 78
5.11 Curva di riflessione con coating in oro e θ=87° 79

6.1 Schema del sistema lampada-monocromatore-collimatore 81
6.2 Spettro di emissione da 110 nm a 170 nm 82
6.3 Spettro di emissione da 150 nm a 400 nm 82
6.4 Modello ZEMAX® del monocromatore 85
6.5 Spot della riga spettrale senza fenditure di ingresso e uscita per λ = 200 nm 86
6.6 Spot della riga spettrale senza fenditure di ingresso e uscita per λ = 150 nm 86
6.7 Spot della riga spettrale senza fenditure di ingresso e uscita per λ = 300 nm 87
6.8 Spot delle righe a 150, 200, 250, 300 nm. Il reticolo seleziona quella a 200 nm 88
6.9 Spot delle righe a 150, 200, 250, 300 nm. Il reticolo seleziona quella a 300 nm 88
6.10 Spot della fenditura di ingresso simulata, prima del reticolo 89
6.11 Spot dopo il reticolo 90

6.12 Spot della riga spettrale, sul piano della fenditura di uscita 90
6.13 Immagine della fenditura di uscita sul piano immagine posto a 50 mm 91
6.14 Spot prima del reticolo 92
6.15 Spot dopo il reticolo 92
6.16 Spot della riga spettrale, sul piano della fenditura di uscita 93
6.17 Immagine della fenditura di uscita sul piano posto a 50 mm 93
6.18 Spot prima del reticolo. λ = 200 nm 95
6.19 Spot dopo il reticolo. λ = 200 nm 95
6.20 Spot della riga spettrale senza fenditura di ingresso e di uscita. λ = 200 nm 96
6.21 Spot dell'immagine a 50 mm dalla fenditura di uscita 97
6.22 Spot prima del reticolo 98
6.23 Spot dopo il reticolo 98
6.24 Spot della riga spettrale sulla fenditura d'uscita 99
6.25 Spot dell'immagine in uscita al sistema, a 50 mm 99
6.26 Immagine in falsi colori in uscita al monocromatore. λ = 200 nm 101
6.27 Curva di riflessione per θ = 0° 102
6.28 Curva di riflessione per θ = 5° 102
6.29 Curva di riflessione per θ = 10° 103
6.30 Schema meccanico dello specchio ottimizzatore 104
6.31 Immagine in falsi colori in uscita al monocromatore. Reticolo toroidale, λ = 200 nm 106

D.1 Uso di un anodo conduttivo in a) e di uno schermo di fosforo in b) 117
D.2 Schematizzazione di come è strutturato un anodo Wedge&Strip 118
D.3 Figura rappresentativa un anodo MAMA 119
D.4 Funzionamento del circuito di readout con schermo di fosforo accoppiato a CCD 120
D.5 Funzionamento del circuito di readout con delay line 121
D.6 Diverse alternative per le linee di ritardo 122
D.7 Schematizzazione di un circuito elettronico di readout con linee di ritardo 122
D.8 a) schema a blocchi di un CFD, b) andamento dei segnali 124
D.9 MCP in test prima della missione 125

Elenco delle tabelle

1.1 Modi operativi di PHEBUS 5
1.2 Riassunto delle caratteristiche dei rivelatori di radiazione luminosa 22

5.1 Conteggi al secondo, a valle dello specchio collimatore, θ=80° 80

6.1 Percentuale di potenza in uscita al monocromatore 100
6.2 Potenze in ingresso e uscita del monocromatore ed in uscita del collimatore 104
6.3 Potenza per unità di superficie 105
6.4 Percentuale di potenza in uscita al monocromatore 106
6.5 Potenze in ingresso e uscita del monocromatore ed in uscita del collimatore 107
6.6 Potenza per unità di superficie 107

Capitolo 1 – La missione spaziale e lo strumento PHEBUS

In questo capitolo viene introdotta la missione spaziale nella quale è inserito il progetto PHEBUS, fornendo una panoramica sugli aspetti scientifici e tecnici dello strumento.

1.1 Descrizione della missione spaziale "BepiColombo"

Il progetto PHEBUS è parte integrante della missione spaziale "BepiColombo"[1]: piattaforma spaziale dell'"European Space Agency (ESA)", in collaborazione con Italia, Giappone e Russia. Il progetto è coordinato dal "Service d'Aéronomie" con il supporto del "Centre National d'Études Spatiales" e vede il contributo dell'"Agenzia Spaziale Italiana (ASI)" tramite il coinvolgimento del Laboratorio "Luxor" e dell'Osservatorio Astronomico di Padova, rispettivamente per quanto riguarda la calibrazione dello strumento e alcune attività scientifiche.

Questa missione ha l'obiettivo ambizioso di studiare in maniera approfondita il pianeta Mercurio. Si tratta di una delle "pietre miliari" del programma scientifico a lungo termine dell'ESA: dopo il Mariner 10 della NASA, è la prima missione ideata per studiare da vicino Mercurio. Una missione che rappresenta una sfida importante sia dal punto di vista scientifico sia dal punto di vista tecnologico. Vediamo di capire perché.

Le sfide tecnologiche della missione sono molte. Basta pensare a quanto dista Mercurio dalla Terra e soprattutto considerare le condizioni ambientali in cui le sonde si troveranno ad operare una volta arrivate a destinazione: gli appartati dovranno essere in grado di sopportare variazioni di temperatura di oltre 400°C. Sono infatti previsti picchi di temperatura superiori ai 300°C durante la fase di esposizione al sole ed inferiori ai –100°C durante in transito nel cono d'ombra del pianeta. È la prima missione ESA verso la cosiddetta "regione calda" del Sistema Solare: quella appunto vicina al sole.

Il progetto "BepiColombo" prevede il lancio di due navicelle, la "Mercury Planetary Orbiter (MPO)" e la "Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO)" progettate per scopi diversi ma complementari, che orbitando attorno a Mercurio dovranno raccogliendo una vasta quantità di dati che permetteranno agli studiosi di approfondire le attuali conoscenze del pianeta. Le due sonde saranno lanciate come un unico velivolo denominato "Mercury Composite Spacecraft (MCO)".

Si tratta di una missione a lungo termine perché il suo sviluppo e la sua concretizzazione richiederanno circa quindici anni. Infatti, considerando il 2007 (anno in cui la missione ha

ottenuto l'approvazione definitiva) quale anno di inizio della fase di progettazione e il 2020 quale fine prevista dal piano di missione, essa avrà una durata di tredici anni. Sono previste una fase di "viaggio" delle sonde che, dal lancio che avverrà nel 2013, durerà circa 6 anni (arrivo previsto nell'agosto 2019) ed un anno di fase operativa vera e propria in orbita attorno a Mercurio della durata di un anno, con la possibilità di estensione di un ulteriore anno. Tuttavia, la storia di questa missione parte molto prima del 2007. Infatti, già nel 1999, l'ESA "Science Programme Committee" ha deciso di intitolare questa missione al Professor Giuseppe Colombo, quale segno di riconoscenza per i suoi numerosi risultati scientifici. Una breve biografia del Professor Colombo è riportata in Appendice C. Di seguito è riportata una breve descrizione del piani di missione.

Dopo il lancio, l'MCO sarà inserito in un'orbita geostazionaria e da qui spostata su di un'orbita cosiddetta di "phasing"[1] tramite la propulsione di razzi standard. Da qui, il piano di volo prevede un flyby[2] con la Luna che le fornirà la spinta e la variazione di traiettoria necessarie per intraprendere il volo verso Mercurio.

Nel suo viaggio verso Mercurio la sonda dovrà frenare per contrastare l'attrazione gravitazionale del sole o meglio dovrà accelerare contro di essa, come nel caso di un viaggio verso le regioni esterne del Sistema Solare. "BepiColombo" realizzerà questo utilizzando l'attrazione gravitazionale della Terra, di Venere e di Mercurio stesso ed utilizzando un sistema di propulsione elettrica solare ("Solar Electric Propulsion" – SEP). Questa innovativa combinazione di un sistema di propulsione a bassa spinta e della gravità è stato testato nella missione SMART-1 dell'ESA.

Nell'avvicinamento a Mercurio, la sonda utilizzerà la gravità del pianeta e razzi convenzionali per inserirsi in orbita attorno ad esso. Durante questa fase l'MMO verrà rilasciata nella sua orbita operativa. Per fare questo lo scudo che fino ad allora avrà protetto le due sonde dalla radiazione solare sarà separato, assieme alla MMO, dall'altra sonda, l'MPO. Quest'ultima, sempre tramite razzi convenzionali, verrà inserita nella sua orbita operativa ad un'altezza inferiore rispetto a quella della MMO.

Come detto in precedenza, lo scopo della missione è quello di approfondire le attuali conoscenze di Mercurio. Gli obiettivi di questa missione sono molti, ma possono essere così riassunti:

- Studio dell'origine ed evoluzione di un pianeta vicino alla sua stella di origine.

[1] Con il termine di orbita di "phasing" si intende, in termini spaziali, un tratto di orbita del velivolo spaziale che serve per sincronizzare la sua posizione spazio-temporale lungo l'orbita di avvicinamento all'obbiettivo

[2] Il termine "flyby" indica in termini spaziali il passaggio ravvicinato di una sonda spaziale, ad alta velocità, vicino ad un pianeta o ad un altro oggetto celeste.

- Studio di Mercurio come pianeta: superficie, composizione interna, struttura, geologia.
- Stabilire perché le misure spettrometriche non rivelano la presenza di ferro, mentre questo elemento è considerato attualmente il principale componente di Mercurio.
- Studio dell'atmosfera di Mercurio: composizione e dinamica.
- Studio della magnetosfera e origine del campo magnetico di Mercurio.
- Test della teoria di Einstein della relatività generale.

Per lo studio di Mercurio e di tutte le caratteristiche sopra elencate è previsto l'utilizzo di numerosi strumenti, progettati per scopi differenti. In particolare, lo strumento PHEBUS, che viaggerà a bordo della MPO, avrà lo scopo di analizzare la tenue atmosfera di Mercurio[3]. Nel Paragrafo 1.3 è riportata la descrizione dello strumento e delle sue caratteristiche principali. Segue ora una breve descrizione degli aspetti scientifici della missione.

1.2 Cosa farà "PHEBUS" – Gli aspetti scientifici

PHEBUS è uno spettrometro in grado di operare nelle regioni del lontano (FUV) ed estremo (EUV) ultravioletto (UV), progettato e costruito per analizzare dettagliatamente la composizione dell'atmosfera di Mercurio.

Si tratta di un'atmosfera molto tenue, con pressione di qualche frazione di bar. Dalle osservazioni effettuare dal Mariner 10 e con i telescopi terresti, essa risulta composta da sei elementi: Ca, Na, K, He ed O. Ci si aspetta inoltre di trovare altri elementi quali H_2 ed OH oppure specie rappresentative della composizione della superficie quali Si^+, O^+ ed Al^+. Si ritiene che l'atmosfera di Mercurio abbia caratteristiche simili a quella lunare, viste le similarità nel processo di formazione dei due corpi celesti. Essa è il risultato di una complessa interazione tra il vento solare, il campo magnetico del pianeta e la superficie rocciosa. Inoltre risulta essere notevolmente variabile nel tempo e nello spazio e caratterizzata da una forte asimmetria tra il lato esposto al sole e quello in ombra ("Day side" e "Night side").

La stima dell'influenza dei singoli processi alla base della formazione dell'atmosfera di Mercurio è difficile a causa dell'attuale scarsa conoscenza della composizione del regolite[4], che

[3] In questo documento si parla in generale di "atmosfera" anche se, più precisamente, si dovrebbe parlare di "esosfera", vista l'estrema rarefazione delle particelle che la compongono ed il range di altitudine che verrà analizzato dallo strumento, che si estende dalla superficie fino ad una quota di 1500 Km dal pianeta.

[4] Con il termine "regolite" si indica uno strato di materiale sciolto e di granulometria eterogenea che copre uno strato di roccia compatta usualmente chiamato roccia madre. Il regolite è presente sulla Terra, sulla Luna, su alcuni asteroidi e su altri pianeti. Sui corpi senza atmosfera il regolite si origina dall'aggregazione gravitazionale di residui derivati dall'impatto con altri oggetti, dando origine a strati graduati con granulometria decrescente dal basso verso l'alto.

potrebbe essere più ricco di sostanze volatili rispetto a quello lunare. Per questo devono essere considerate diverse sorgenti di sostanze volatili, su scale di tempo diverse.

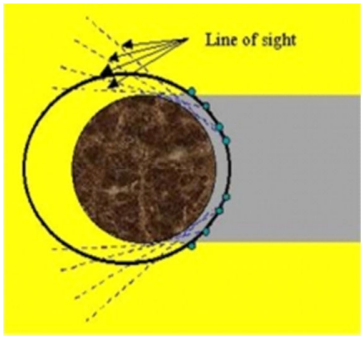
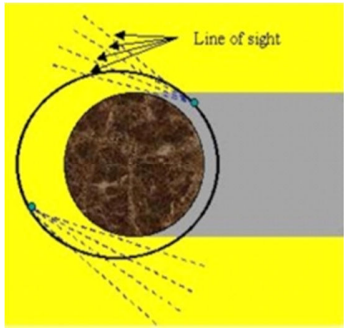
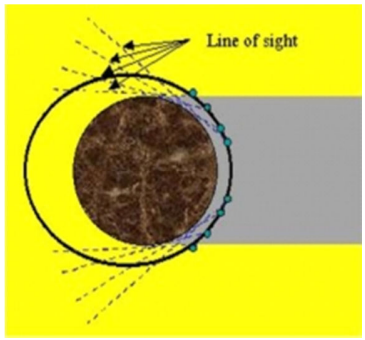
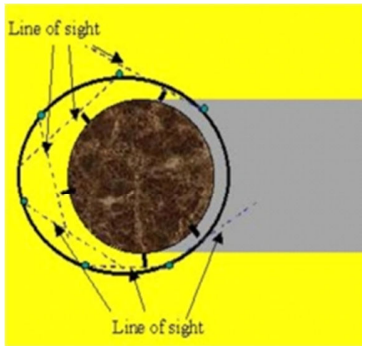
Ad esempio, su intervalli di tempo relativamente brevi (qualche giorno o settimana terresti) ci si aspetta che alcuni componenti dell'atmosfera vengano assorbiti dalla superficie (specialmente durante la notte) e liberati (durante il giorno), in un ciclo continuo e abbastanza regolare. Su intervalli di tempo maggiori (decenni), una parte importante delle particelle emesse non sarà rilasciata direttamente in atmosfera ma sarà riassorbita dal regolite, a causa della natura irregolare del materiale superficiale, composto da piccoli grani. In aggiunta, la materia liberata nell'impatto di meteoriti potrebbe essere parzialmente trattenuta nel regolite prima di essere rilasciata in atmosfera. Infine, materiali volatili quali ad esempio gas nobili, potrebbero essere presenti e diffondere continuamente dal profondo della crosta di Mercurio verso la superficie.Su scale di tempo geologiche (milioni di anni), gli ioni del vento solare e le particelle ad alta energia emesse dal sole che sono state impiantate nel regolite, come è avvenuto sulla Luna, potrebbero essere rilasciate un po' alla volta in atmosfera.

Grazie alle misure spettrometriche di PHEBUS si spera di conoscere con precisione la composizione dell'atmosfera e la sua origine e di capire come i vari fenomeni da cui essa dipende, ne influenzano la composizione e la variazione nel tempo e nello spazio.

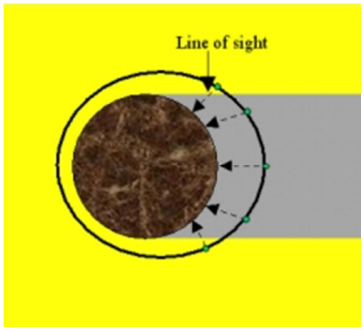
Sono state definite quattro categorie che riassumono i principali obiettivi di misura:

1. Rilevare nuove specie chimiche rispetto a quelle già note considerando metalli (Si, Mg, Fe, ...), atomi volatili (C, N, S, …), molecole e radicali (H_2O, H_2, OH, CO), gas nobili (Ar, Ne), ioni (He^+, Na^+, …), in aggiunta alle specie già individuate in missioni e osservazioni precedenti (Na, K, Ca, O, H, He).
2. Misurare un'atmosfera media, con il maggior numero possibile di specie monitorate contemporaneamente ed in differenti posizioni di Mercurio attorno al sole.
3. Misurare variazioni locali e temporali dell'atmosfera (su scala di poche ore) in posizioni ed istanti di tempo di particolare interesse.
4. Ricercare variazioni di albedo della faccia oscura di Mercurio per individuare possibili segni di giacchio superficiale (dovuto alla presenza di acqua o anidride carbonica allo stato solido) nei crateri polari.

Per assolvere a tutti questi compiti, lo strumento opererà in nove modalità differenti, che permettono di analizzare l'atmosfera da punti di vista, condizioni di illuminazione e profilo sull'orizzonte diversi. La Tabella 1.1 riporta un breve riassunto delle modalità operative di PHEBUS [2]. I termini utilizzati sono gli stessi impiegati negli "Experiment Interface Document" dell'ESA.

MODO 1. TWILIGHT MODE
 Frequenza: 2 osservazioni per orbita. Sunrise case: L'osservazione inizia quando la sonda si trova ancora nel cono d'ombra del pianeta. La linea di osservazione deve essere la più bassa possibile. Termina prima che la luce del sole raggiunga la sonda. Durata 5'. Sunset case: L'osservazione inizia quando la superficie di Mercurio si oscura e non c'è emissione di luce superficiale inclusa nel campo di osservazione. Durata 5'.
MODO 2. VERTICAL SCAN MODE
 Frequenza: 1 osservazione ogni 3 orbite. 90 scansioni verticali di 20 spettri effettuate per ottenere profili verticali in rapida successione sul lato dell'orbita esposto al sole. Queste scansioni forniranno informazioni sulla distribuzione verticale degli elementi e sulla loro variazione in relazione all'angolo di osservazione, con il sole allo zenit. Durata 30'.
MODO 3. FIXED LOS MODE
 Frequenza: 1 osservazione ogni 6 orbite. 1800 spettri individuali acquisiti sul lato esposto al sole, su di una linea di osservazione fissa rispetto alla sonda. In questa maniera si ottiene una lenta scansione verticale grazie alla variazione di altitudine della sonda. Durata 30'.
MODO 4. FEATURE TRACKING MODE
 « LoS variable » Frequenza: 1 osservazione ogni 6 orbite. 1800 spettri individuali acquisiti sul lato esposto al sole. Il sistema di osservazione si muove lentamente, come nel TWILIGHT MODE per effettuare la scansione di un certo intervallo di altitudine lungo l'orbita della sonda. Durata 30'.

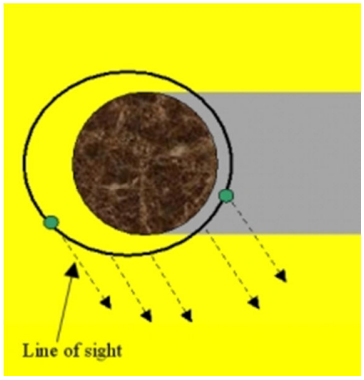
MODO 5. NADIR MODE



Frequenza: 1 osservazione ogni 10 orbite.

Il sistema di osservazione è puntato verso il nadir, sulla faccia oscura dell'orbita e ad elevata altitudine.
Possibilità di avere il sistema di osservazione puntato sulle regioni polari quando la sonda si trova al di fuori del cono d'ombra (vedere la prima e l'ultima nella figura a lato). Durata 10'.

MODO 6. STAR MODE



Frequenza: 1 osservazione ogni TBD orbite.

Lo scopo dello STAR MODE è di stimare l'invecchiamento degli strumenti, tramite l'osservazione di alcune stelle di riferimento nel range 100-300 nm. Il numero di stelle necessarie per tale scopo e disponibili nel campo visivo di PHEBUS è TBD.

MODO 7. DECONTAMINATION MODE

Frequenza: durante la navigazione e ogni TBD orbite.

Lo scopo di questa modalità operativa è di pulire le ottiche dalla contaminazione dovuta alla deposizione di molecole di vario tipo. Durata prevista: più ore.

MODO 8. PARKING MODE

Frequenza: dopo qualsiasi altro modo operativo.

Lo scopo di questo modo operativo è di ruotare il meccanismo di scansione (baffle) in posizione di parcheggio, dove il baffle si trova protetto dall'ambiente esterno. La velocità massima di rotazione del meccanismo è di 5°/sec quindi nel caso peggiore il tempo massimo necessario per entrare in PARKING MODE è di 3 minuti.

MODO 9. STANDBY MODE	
	Frequenza: prima di ogni osservazione. Lo scopo di questo modo operativo è di accendere lo strumento e verificare la corretta inizializzazione di tutti i suoi sottosistemi. Dopo questa fase, della durata di pochi secondi, lo strumento è pronto per operare. Durata: lunga quanto necessario per la corretta inizializzazione dello strumento.

Tabella 1.1 – *Modi operativi di PHEBUS.*

1.3 PHEBUS – Breve panoramica dello strumento

PHEBUS è composto da due spettrometri UV in grado di operare in intervalli di lunghezze d'onda differenti [3]. In particolare i due spettrometri, indicati come EUV e FUV, operano rispettivamente negli intervalli 55÷155 nm e 145÷315 nm. Sono costituiti da un rivelatore di tipo "MicroChannel Plate – MCP" e da un "Resistive Anode Encoder – RAE", con fotocatodo di CsTe per l'FUV e di KBr o CsI per l'EUV (con buona probabilità verrà impiegato un fotocatodo di KBr essendo questo materiale soggetto ad un degrado minore rispetto al CsI. Il tipo finale di fotocatodo è comunque TBD[5]). I fotocatodi sono progettati e forniti dall'Università di Tokio.

Utilizzando l'estensione spettrale in cui può operare l'FUV, è previsto anche il monitoraggio delle righe caratteristiche degli elementi K e Ca (rispettivamente 404,7 nm e 422,8 nm). La strumentazione per l'analisi di queste lunghezze d'onda sarà indicata come NUV.

La rappresentazione di Figura 1.1 mostra lo strumento appoggiato su quello che d'ora in avanti sarà indicato come "piano dello strumento", con baffle ad esso ortogonale.

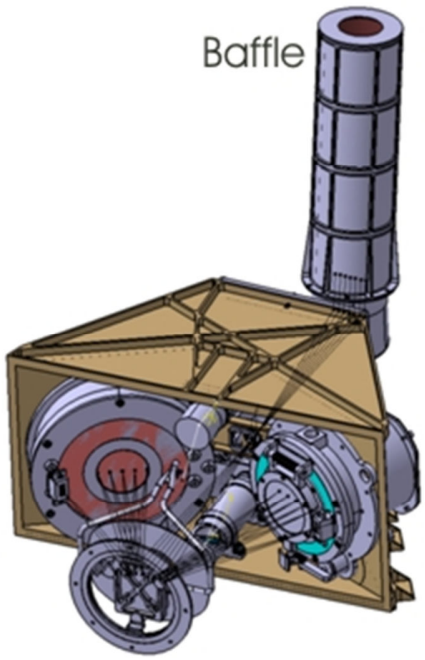


Figura 1.1 – *Struttura di PHEBUS. Sono visibili il baffle, i due spettrometri ed il reticolo.*

[5] TBD = "To Be Defined". Con tale acronimo si intende che il dato in questione non risulta disponibile al momento della stesura del presente documento, perché non ancora definito o non noto.

La parte che subito si nota è il baffle di entrata: è l'unica apertura di cui è dotato lo strumento. Ha il delicato compito di raccogliere la radiazione da analizzare, focalizzandola grazie ad uno specchio posto all'estremità collegata al corpo dello strumento, sulla fenditura di ingresso. Questo dispositivo è in grado di ruotare di 360°: 180° nelle due direzioni rispetto ad una posizione di parcheggio, su di un piano parallelo alla parete dello strumento ed è l'unica parte mobile esterna. Durante le misurazioni esso sarà orientato in modi differenti a seconda del tipo di misura da effettuare. È interessante notare che è prevista una posizione di parcheggio per il baffle, come indicato nel Modo 8 della Tabella 1.1, che serve a proteggere gli elementi interni di PHEBUS durante gli intervalli di inattività, in modo da evitare che possibili contaminazioni dovute a polvere e particelle rovinino i delicati componenti dello strumento.

Nella rappresentazione di Figura 1.1 manca una parte della copertura esterna dello strumento: ciò per permettere di vedere come sono disposti i due spettrometri ed il reticolo di diffrazione e come è configurata l'ottica dello strumento [4]. Ora la analizzeremo più nel dettaglio.

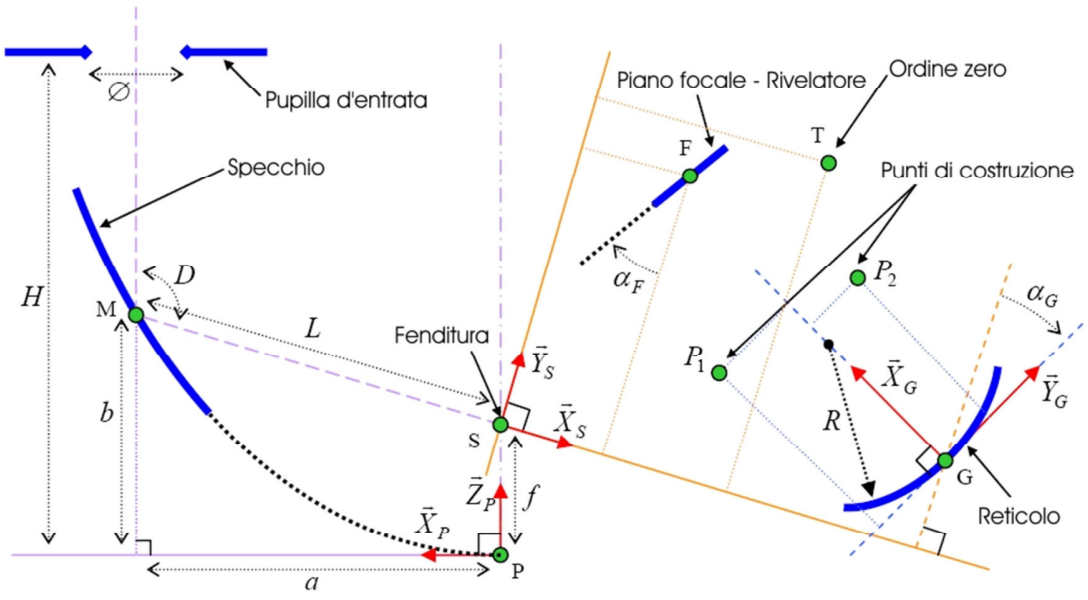


Figura 1.2 – *Configurazione ottica di PHEBUS.*

Come detto in precedenza, si tratta di uno spettrometro UV dotato di due rivelatori distinti. La sua struttura è abbastanza semplice dal punto di vista ottico. Osservando la Figura 1.2 che rappresenta la configurazione ottica, si osservano i seguenti elementi: la pupilla d'entrata

(costituita dall'uscita del baffle d'entrata), uno specchio parabolico per focalizzare la luce raccolta, una fenditura di ingresso, un reticolo ed un piano focale sul quale è posto il rivelatore. La struttura, a parte la pupilla d'entrata e lo specchio, è simmetrica rispetto all'asse ottico del sistema specchio – fenditura. Essendo dotato di due rivelatori che operano in intervalli diversi, PHEBUS è dotato anche di due reticoli distinti, in grado di selezionare e focalizzare lunghezze d'onda diverse.

I due rivelatori di cui è composto PHEBUS si distinguono sostanzialmente per i differenti range operativi.

L'EUV è composto da un reticolo di toroidale caratterizzato da 1200 linee/mm ed è in grado di coprire il range 55÷155 nm. Misure fino a 30 nm sono possibili utilizzando il secondo ordine. Il rivelatore vero e proprio consiste in un contatore di fotoni 2-D del tipo MCP. Le dimensioni del rivelatore sono di circa 40×40 mm^2, contenenti 1024×512 pixel. La fenditura di ingresso sarà mappata nei 60 pixel centrali, mentre il resto del rivelatore sarà utilizzato per la misura della "dark current"[6]. Durante le operazioni a terra, il rivelatore dell'EUV sarà protetto da una finestra rimovibile di MgF_2. Essa serve a proteggere il delicato fotocatodo da possibili contaminazioni durante le operazioni di test e assemblaggio. È composta da MgF_2 per consentire comunque prove di calibrazione senza doverla necessariamente aprire. Essa inoltre è dotata di un meccanismo di apertura del tipo "one shot" che permetterà di aprirla dopo il lancio e mantenerla aperta durante l'intera missione. Visto l'intervallo di lunghezze d'onda che l'EUV dovrà analizzare, è necessario che tra il rivelatore e la fonte di radiazione da analizzare non ci sia interposto nessun mezzo ed è per questo che la finestra deve essere rimossa prima della fase operativa, pena l'assorbimento delle lunghezze d'onda minori di 105 nm. Una rappresentazione di come sarà il rivelatore prima e dopo l'apertura è riporta nelle Figure 1.3 e 1.4.

Il rivelatore FUV è sostanzialmente uguale all'EUV, ma costruito per operare nel range spettrale 145÷315 nm. Il fotocatodo utilizzato è del tipo CsTe. Il sensore è protetto da una finestra di MgF_2 che in questo caso è fissa, al contrario di quanto avviene per l'EUV. Per evitare eventuali contaminazioni e garantire il corretto funzionamento dello strumento, all'interno della camera in cui è alloggiato il rivelatore verrà mantenuto il vuoto durante le operazioni a terra. Il rivelatore ha forma e dimensioni simili a quello rappresentato in Figura 1.3.

[6] Un tipo di rumore che si presenta nel rivelatori sensibili alla luce, tipicamente nei fotomoltiplicatori. Questi infatti emettono un debole segnale anche in assenza di radiazione. Nei fotocatodi è principalmente dovuto all'attività termica, quindi un loro utilizzo a basse temperature può limitare questo fenomeno.

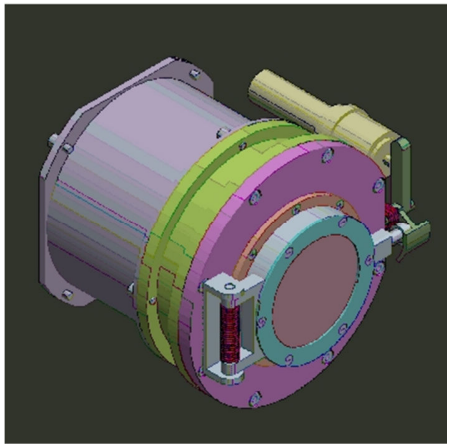


Figura 1.3 – *Rivelatore EUV con finestra di protezione chiusa (prima e durante il lancio).*

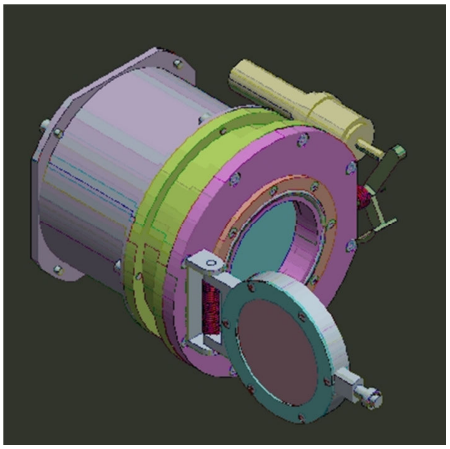


Figura 1.4 – *Rivelatore EUV con finestra di protezione aperta (dopo il lancio).*

In Figura 1.5 è riportato le schema assonometrico del rivelatore EUV.

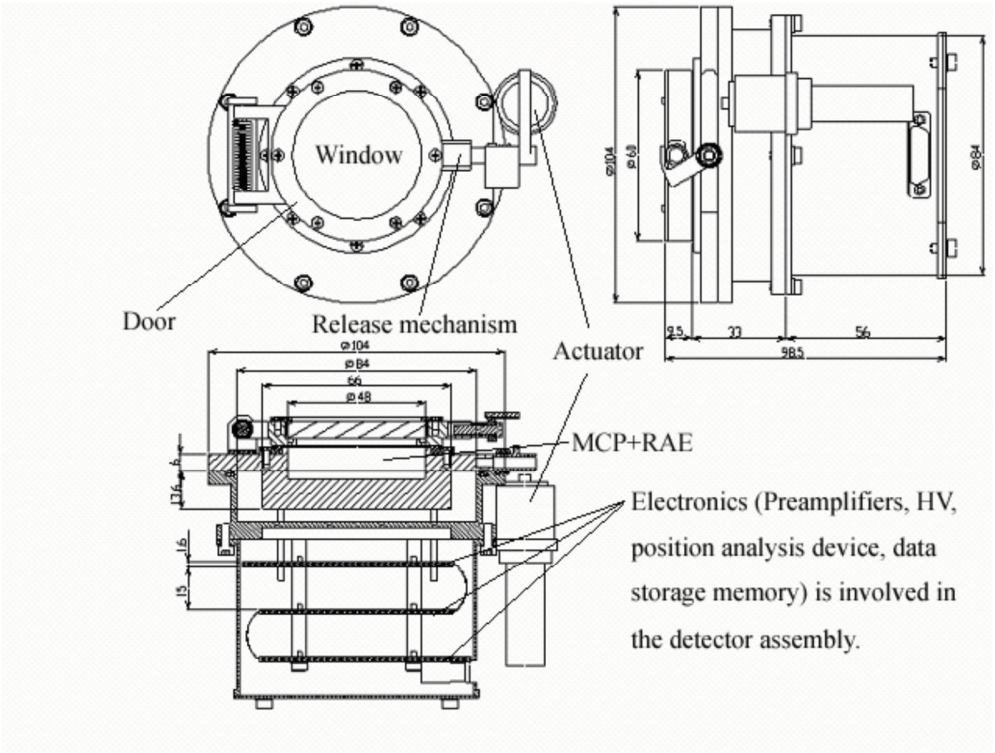


Figura 1.5 – *Schema assonometrico del rivelatore EUV.*

1.4 I rivelatori di PHEBUS

Nel paragrafo seguente è riportata una descrizione sintetica ma esaustiva della tipologia di rilevatori impiegati su PHEBUS. In particolare, sono descritti i fotomoltiplicatori MCP ed i rivelatori RAE, che costituiscono i sensori veri e propri impiegati per la rilevazione della radiazione luminosa.

1.4.1 I fotomoltiplicatori MicroChannel Plate

Un Micro Channel Plate (MCP) è un amplificatore di elettroni composto da migliaia di micro – tubi di vetro, posti uno vicino all'altro. Ciascun tubo, del diametro variabile tra i 10 μm ed i 100 μm, funziona come un mini-amplificatore. Data la loro elevata capacità di amplificazione che permette di raggiungere anche di amplificazione di 10.000:1, i MCP sono impiegati in svariati campi. Proprio grazie a questa loro caratteristica, all'elevata immunità ai disturbi elettromagnetici ed alle ridotte dimensioni, sono stati inizialmente sviluppati per ragioni militari ed hanno permesso di creare sensori e visori portatili e molto efficienti.

Vengono impiegati in astronomia dove, opportunamente accoppiati con dispositivi elettrici ed ottici (ad esempio sensori CCD o RAE), permettono di individuare e analizzare sorgenti molto deboli nel campo dell'infrarosso e dell'ultravioletto.

Possono inoltre rilevare direttamente raggi X, ioni ed elettroni, rendendo possibile il loro impiego in un vasto numero di applicazioni come oscilloscopi, microscopi elettronici, studio della composizione chimica dei materiali, …. In campo spaziale, i MCP sono stati utilizzati sull'EXOSAT (European Space Agency Observatory Satellite), sulla sonda SOHO e sulla sonda Voyager della NASA. Saranno in particolare impiegati come amplificatori di segnale nei rivelatori UV che compongono PHEBUS.

Quali sono i principi che stanno alla base del funzionamento di un MCP? Per comprendere il loro funzionamento conviene prima descrivere il principio fisico che sta alla base di un amplificatore di immagine.

Questo tipo di dispositivo si basa sull'interazione della radiazione elettromagnetica con la materia: questo fenomeno fu spiegato per la prima volta da Einstein nel 1905 ed è noto con il nome di *effetto fotoelettrico*. Il fenomeno è abbastanza semplice da descrivere qualitativamente. Quando un fotocatodo o un elettrodo, carico negativamente, viene colpito da radiazione elettromagnetica avente lunghezza d'onda minore o uguale ad un certo valore critico (in questo caso di parla di frequenza dell'onda elettromagnetica ed il valore minimo è detto *frequenza di*

soglia), il fotocatodo emette elettroni che possono essere catturati da un elettrodo carico positivamente (anodo). La quantità di elettroni emessi dipende dall'intensità della radiazione incidente ma il fatto che siano emessi oppure no, dipende solo dalla lunghezza d'onda. Per molti metalli, la lunghezza d'onda critica ricade nella regione dell'UV ed è per questo che l'impiego dell'effetto fotoelettrico nel campo dell'UV è molto diffuso.

Di seguito è riportata una spiegazione semplificata dell'effetto fotoelettrico, senza la pretesa di essere totalmente esaustivi. La trattazione approfondita di tale argomento esula dagli scopi di questa tesi.

Fu Einstein a proporre una spiegazione del fenomeno ipotizzando la *discretizzazione* dell'energia. Egli assunse l'ipotesi che lo scambio di energia tra la radiazione elettromagnetica (e.m.) e la materia avvenisse per quantità discrete dette *quanti*. Considerò l'onda e.m. come un flusso di pacchetti di energia (i fotoni) dotati ciascuno di energia

$$\varepsilon = h\nu \tag{1.1}$$

dove con ν è indicata la frequenza della radiazione e con h la costante di Plank. Sulla base di queste ipotesi, il processo di fotoemissione risulta il prodotto di innumerevoli processi elementari di interazione fotone-elettrone. Ciascun fotone viene assorbito e cede energia ad un elettrone sotto forma di *lavoro di estrazione*. Se l'energia del fotone è maggiore di quella necessaria ad estrarre l'elettrone, fornisce a quest'ultimo anche energia cinetica.

Il bilancio energetico del processo è il seguente:

$$E_{kin} = h\nu - L \tag{1.2}$$

dove E_{kin} indica l'energia cinetica dell'elettrone ed L il lavoro di estrazione. Si definisce con L_0 il lavoro minimo necessario per estrarre un elettrone, detto *funzione lavoro del metallo*. L'energia cinetica massima per un elettrone estratto si ha quando $L=L_0$. In tal caso infatti

$$(E_{kin})_{max} = h\nu - L_0 \tag{1.3}$$

Sperimentalmente si osserva che, per $\nu>\nu_0$, al crescere dell'intensità della radiazione incidente sul metallo aumenta il numero di elettroni da esso estratti. Questo fenomeno è spiegato assumendo che l'intensità luminosa rappresenti il numero di fotoni che fluiscono nell'unità di tempo attraverso l'unità di superficie. Quindi, all'aumentare dell'intensità luminosa, aumenta il numero di processi elementari di interazione fotone – elettrone che possono dare fotoemissione. Tuttavia, se $\nu<\nu_0$, qualunque sia l'intensità della radiazione incidente non si osserva emissione di elettroni per effetto fotoelettrico dal metallo, in quanto l'energia dei fotoni incidenti non è sufficiente a vincere l'energia che li lega agli elettroni dell'atomo.

Ritornando al problema dell'amplificazione luminosa, in un amplificatore di immagine si sfrutta l'effetto fotoelettrico per convertire un flusso di fotoni in un flusso di elettroni. Un fotone

può stimolare l'emissione di al più un elettrone. A prima vista sembrerebbe che questo fenomeno non sia di nessuna utilità in quanto il rapporto fotoni assorbiti/elettroni emessi è di 1:1. Tuttavia, ciò che rende interessante il fenomeno e che permette di sfruttarlo per realizzare degli amplificatori è proprio il fatto che l'elettrone è dotato di carica non nulla. Infatti gli elettroni possono essere accelerati per mezzo di un campo elettrico, aumentando la loro energia cinetica. In questo modo l'energia totale disponibile per la formazione dell'immagine può essere aumentata varie volte.

Nella sua forma più semplice, un amplificatore di immagine è costituito da un tubo di vetro in cui è stato creato il vuoto e da due elettrodi ai quali è applicata una differenza di potenziale. L'emissione di elettroni avviene nel fotocatodo[7] quando viene illuminato con l'immagine da analizzare e l'intensità dell'emissione varia da punto a punto su di esso, in base alla luminosità dell'immagine in quel punto. Ciascun elettrone, accelerato dall'intenso campo elettrico generato dal potenziale di polarizzazione degli elettrodi (qualche migliaio di Volt), attraversa lo spazio che li separa percorrendo una traiettoria che può essere considerata rettilinea. In questa maniera, il flusso di elettroni che raggiunge l'anodo è proporzionale punto per punto alla luminosità dell'immagine oggetto dell'analisi e la risoluzione spaziale è mantenuta grazie alla vicinanza tra gli elettrodi che non consente deviazioni considerevoli nelle traiettorie degli elettroni.

L'output del sistema è costituito normalmente da uno schermo fluorescente (come quello degli oscilloscopi a tubo catodico): quando gli elettroni colpiscono lo schermo cedono parte della loro energia ai fosfori che la riemettono sotto forma di luce visibile. Quindi l'immagine che si forma sullo schermo è la versione amplificata di quella oggetto dell'analisi. Un altro tipo di output del sistema può essere una pellicola fotosensibile nella quale rimane impressa l'immagine amplificata.

Il fotocatodo è l'elemento più importante di un fotomoltiplicatore perché è quello che determina gran parte della sensibilità dello strumento. Infatti, grazie ad esso viene effettuata la conversione da fotoni ad elettroni per effetto fotoelettrico. Senza voler scendere nella descrizione di uno specifico fotocatodo, si può dire che esso è costituito da un substrato di materiale conduttore, sul quale è depositato un sottilissimo strato di materiale fotoemittente. Poiché l'efficienza di conversione fotoelettrica varia fortemente con la frequenza della luce incidente e con la struttura del materiale, il fotomoltiplicatore deve essere scelto considerando la sua efficienza nell'intervallo di frequenza di interesse.

[7] Viene così indicato l'elettrodo avente potenziale minore, ricoperto di un materiale particolare in grado di emettere elettroni per effetto fotoelettrico alle lunghezze d'onda di interesse.

Vari fenomeni influenzano il rendimento di un amplificatore di immagine. Come detto in precedenza, un fotone può causare l'emissione di un solo elettrone. Considerando che mediamente l'efficienza in emissione di un fotocatodo è del 10% e che solo il 30% dell'energia che colpisce lo schermo è riemessa sotto forma di luce visibile, si capisce che l'efficienza del sistema è bassa. Ciò nonostante, vi è un netto guadagno nell'utilizzo di questo sistema, visto il livello di amplificazione che si riesce a raggiungere, che permette di amplificare ed analizzare immagini aventi scarsa intensità.

A prima vista sembrerebbe che il segnale prodotto da un'immagine focalizzata sul fotocatodo possa essere amplificato a piacimento. Questo è vero solo fino ad un certo voltaggio massimo che dipende dal materiale costituente il fotocatodo e dalle dimensioni fisiche del fotomoltiplicatore. Oltre questo livello, gli elettroni vengono estratti dal fotocatodo direttamente dal campo elettrico applicato, rendendo quindi indistinguibile l'immagine amplificata dal rumore così prodotto.

Il fatto che un fotone possa causare l'emissione di un solo elettrone è il limite fondamentale degli amplificatori di immagine cosiddetti "a tubo". Un interessante fenomeno ha però permesso di superare questa limitazione e di sviluppare un tipo di amplificatore differente. In certi materiali, gli elettroni liberi aventi sufficiente energia possono causare l'emissione di altri elettroni alla stessa maniera dei fotoni. Questo fenomeno è conosciuto come *emissione superficiale secondaria* ed è il fenomeno che sta alla base degli attuali amplificatori di immagine basati su Microchannel Plate e non solo.

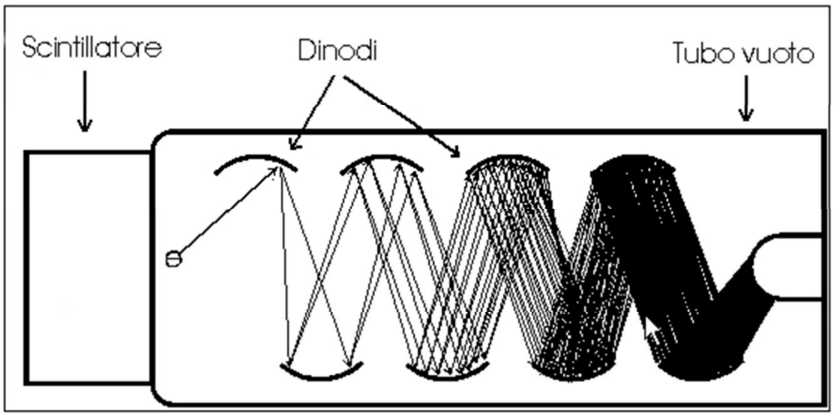


Figura 1.6 – *Fotomoltiplicatore di elettroni a dinodi.*

La scoperta di questo fenomeno ha permesso di costruire dei moltiplicatori di elettroni e di utilizzarli negli amplificatori di immagine. I moltiplicatori di elettroni "classici" (quelli

cosiddetti a *dinodi*) hanno tuttavia una forte limitazione: proprio per il modo in cui sono costruiti, non permettono di mantenere l'informazione relativa alla risoluzione spaziale dell'immagine analizzata perché in essi gli elettroni non descrivono più traiettorie rettilinee come nel caso dell'amplificatore a tubo. Un semplice esempio di amplificatore di elettroni a dinodi è riportato in Figura 1.6.

Attualmente, esistono dei dispositivi che permettono di mantenere le informazioni relative alla distribuzione spaziale dei fotoni: sono i dispositivi Microchannel Plate. In un MCP vengono combinati il vantaggio del guadagno dovuto all'amplificazione di elettroni con quello del mantenimento della risoluzione spaziale.

Questi dispositivi vengono impiegati per costruire i moderni amplificatori di immagine, includendoli in un sistema "a stack", del tipo rappresentato in Figura 1.7.

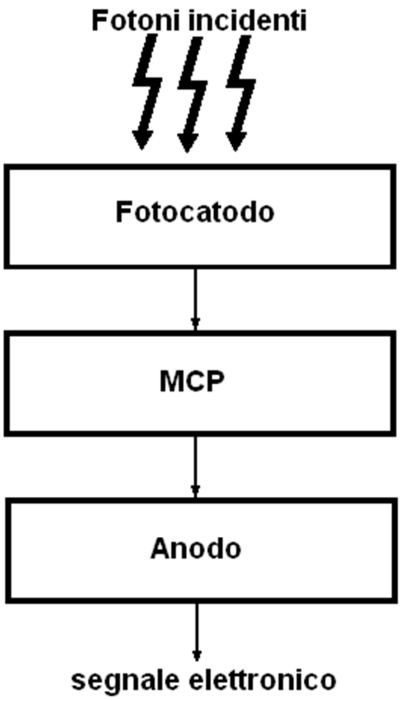


Figura 1.7 – *Struttura generale di un amplificatore di immagine con MCP.*

Il funzionamento delle singole componenti di un amplificatore di immagine può essere così brevemente riassunto:

- Fotocatodo: converte in fotoelettroni i fotoni incidenti sul rivelatore,
- MCP: amplifica gli elettroni fotoemessi dal fotocatodo e conserva l'informazione spaziale relativa alla posizione in cui è arrivato il fotone,

- Anodo: trasforma in segnale elettronico la nuvola di elettroni che proviene dall'MCP fornendo anche l'informazione relativa alla posizione.

I MCP [5] sono dispositivi costituiti da migliaia di piccoli moltiplicatori di elettroni indipendenti, detti *"micro canali"*, posti uno vicino all'altro a formare una griglia bidimensionale. Ciascun micro canale è collegato, alle due estremità, in parallelo agli altri tramite due elettrodi costituiti da un sottile strato metallico che viene depositato operando in alto vuoto, sia sulla superficie di entrata che su quella di uscita. I materiali normalmente utilizzati per gli elettrodi sono Inconel, Ni-Cr oppure Cr. La crescita è un processo che deve essere molto ben controllato: al termine della deposizione lo strato metallico deve avere caratteristiche tali da garantire una resistenza variabile dai 100 ai 200Ω tra i bordi opposti del MCP.

A questi elettrodi viene poi collegato un generatore di alta tensione, avente la funzione di generare il campo elettrico all'interno dei canali. Sulla strato metallico di ingresso del MCP viene poi depositato un materiale avente caratteristiche di fotoemissione nell'intervallo spettrale di interesse: il fotocatodo.

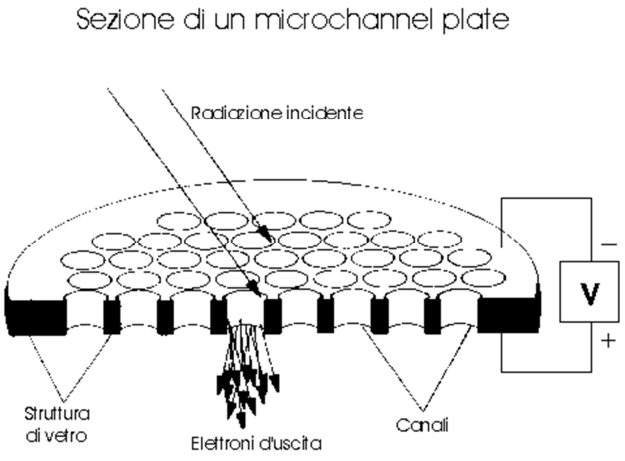


Figura 1.8 – *Sezione di un MCP.*

L'idea innovativa in questo caso è che non si cerca più di mantenere la risoluzione spaziale all'interno di ciascun moltiplicatore (di ciascun canale) ma ognuno di essi ha dimensioni tali da corrispondere ad un singolo pixel o elemento dell'immagine. Quindi l'immagine amplificata risulta costituita da una griglia di punti di intensità diversa: ciascuno di essi ha intensità proporzionale a quella dell'immagine in quel punto. Poiché in un MCP, ogni

canale si comporta come fosse un amplificatore indipendente, il diametro del canale e la distanza tra due canali determinano la risoluzione spaziale del MCP. Un esempio di MCP visto in sezione è riportata in Figura 1.8.

Il funzionamento di questi dispositivi è semplice: un elettrone che entra in uno dei canali viene accelerato al suo interno dalla differenza di potenziale applicata tra l'inizio e la fine del canale stesso ed urtando le pareti causa l'emissione di elettroni secondari. Questi elettroni vengono a loro volta accelerati dal campo elettrico e causano l'emissione di altri elettroni, dando origine ad un processo "a valanga", fino a quando non arrivano all'uscita del canale. Gli elettroni che entrano nel canale possono essere prodotti da particelle cariche (ad esempio elettroni) che urtano la superficie del rivelatore, capace di emettere elettroni per emissione secondaria o nel caso di fotoni, dall'urto con il fotocatodo, che emette elettroni per effetto fotoelettrico.

Il compito del fotocatodo in un rivelatore con MCP è quello di "trasformare" i fotoni incidenti in elettroni. Per aumentare la sensibilità di tale processo nei vari intervalli spettrali dal Soft-X al Vicino-Infrarosso, viene depositato un appropriato materiale con elevata probabilità di fotoemissione nella banda di interesse. Tale materiale viene depositato direttamente sulla parte frontale dei micro canali, in modo che esso vada a depositarsi sui bordi ed in parte all'interno di essi.

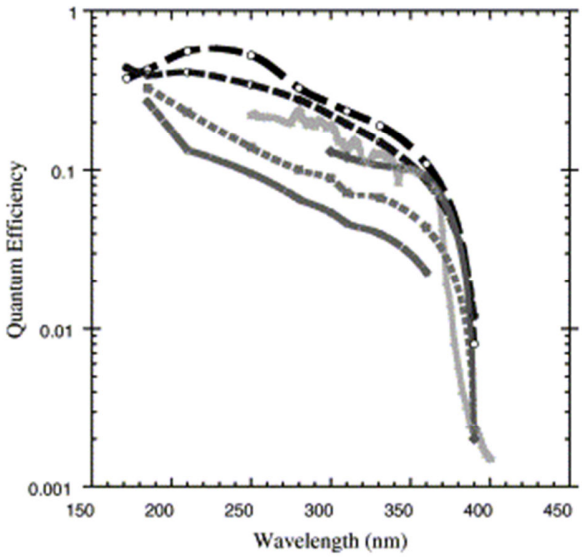


Figura 1.9 – *Quantum Detective Efficiency (QDE) per un fotocatodo GaN,in funzione di λ.*

Gli spessori tipici che si vengono a creare sono di circa 10000Å. Materiali che presentano adeguate finestre di fotoemissione nell'EUV e Soft-X sono ad esempio CsI oppure MgF_2.

Il parametro che quantifica la probabilità di fotoemissione viene detto "Quantum Detective Efficiency – QDE". Un esempio dell'andamento della QDE in funzione della lunghezza d'onda è riportato in Figura 1.9, considerando un fotocatodo di GaN.

I due principali parametri che descrivono le prestazioni di un MCP sono il guadagno *G* e la distribuzione degli eventi detta "Pulse Height Distribution – PHD". Con il termine distribuzione degli eventi si intende l'andamento del numero degli eventi in funzione del guadagno dei canali. Il guadagno *G* e la PHD sono influenzati dal tipo di configurazione usata per costruire il MCP.

Il guadagno di un'MCP è dato da:

$$G = e^{\delta \cdot \frac{l}{d}} \tag{1.4}$$

dove δ è il "coefficiente di emissione" secondaria detto anche "fattore di guadagno" (caratteristico di ogni MCP) mentre l e d sono rispettivamente la lunghezza ed il diametro dei canali. Si osserva sperimentalmente che il guadagno dipende dalla forma e composizione delle pareti e dai campi elettrici nel canale.

I MCP, pur funzionando con lo stesso principio del fotomoltiplicatori tradizionali, hanno rispetto a questi notevoli vantaggi. Sono infatti di dimensioni molto ridotte, presentano una notevole insensibilità ai campi magnetici esterni ed hanno tempi di transito estremamente piccoli. Sono comuni tempi di risposta di 100 ps, caratteristica che permette di rilevare fenomeni aventi durata molto breve, tipici del mondo delle particelle subatomiche.

Per massimizzare il guadagno dei MCP, l'emissione del primo elettrone deve avvenire il più vicino possibile all'entrata del canale. Per questo motivo i vari canali sono spesso inclinati, in modo da estendere la superficie di impatto. In alcuni casi il materiale fotoemittente penetra all'interno del canale per permettere di catturare il maggior numero possibile di fotoni o particelle. In Figura 1.10 è riportata questa situazione. Sul principio impiegato nei canali inclinati sono state sviluppate particolari strutture che permettono di aumentare il rendimento del MCP, ma la loro trattazione esula dagli scopi di questa tesi.

In precedenza nel Paragrafo 1.3, si è accennato alla dark current. Si tratta di un tipo di rumore caratteristico dei rivelatori MCP, dovuto a fenomeni quali:

- emissione termoionica da parte delle pareti dei micro canali,
- correnti disperse,
- contaminazioni radioattive e
- fenomeni ionizzanti.

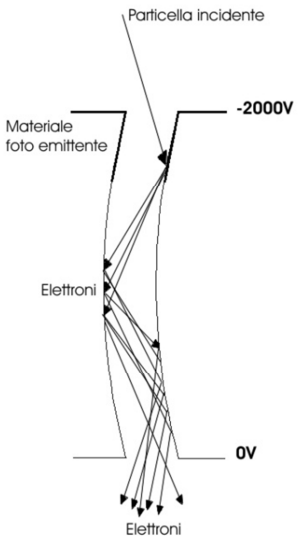


Figura 1.10 – *Sezione di un singolo canale inclinato con materiale fotoemittente che si estende al suo interno.*

L'effetto di tale rumore può essere quantificato misurando la risposta dell'MCP quando non è illuminato da radiazione. In particolare, per i rivelatori EUV ed FUV, la misura della dark current sarà effettuata durante la modalità operativa "PARKING MODE".

Nel caso particolare dello strumento PHEBUS, i MCP sono utilizzati come intensificatori di immagine per amplificare e misurare immagini anche molto deboli. Hanno un guadagno di circa 10^6, valore in grado di produrre un impulso di elettroni di intensità sufficiente da poter essere rilevati dai RAE, posti dietro di loro. Questo guadagno elevato è necessario per effettuare la miglior mappatura possibile della composizione dell'atmosfera di Mercurio. Infatti, poiché le percentuali previste per le varie sostanze sono molto piccole, il loro spettro UV sarà di debole intensità: disponendo di uno strumento dotato di elevato guadagno, sarà possibile rilevare con precisione anche la presenza di queste sostanze.

Per completare la descrizione dei sistemi di amplificazione dei segnali luminosi impiegati su PHEBUS, nel paragrafo seguente è riportata una breve descrizione dei "Resistive Anode Encoder – RAE" utilizzati su PHEBUS.

1.4.2 Gli anodi del tipo "Resistive Anode Encoder – RAE"

È ormai chiaro che su PHEBUS, per la rilevazione della radiazione luminosa, vengono impiegati dei sensori tipo MCP – RAE. I MCP funzionano da amplificatori di segnale mentre i

RAE, che costituiscono l'anodo del sistema di rilevazione dell'immagine. Si tratta di sensori bidimensionali che, utilizzando una struttura a matrice, permettono di analizzare spazialmente il segnale incidente.

I differenti rilevatori possono essere suddivisi in due categorie principali:

- anodi ad integrazione e
- anodi a conteggio di fotoni.

In Tabella 1.2 è riportato un breve riassunto delle caratteristiche dei due tipi di anodi. Una panoramica più ampia è riportata in Appendice D.

Nel caso particolare di PHEBUS, gli anodi sono del tipo RAE e rientrano nella categoria degli anodi a conteggio di fotoni.

Un'altra importante differenza tra i vari anodi risiede nel tipo di sorgenti che possono osservare. Mentre quelli ad integrazione possono essere usati per l'osservazione di sorgenti molto luminose (caratterizzate da un flusso di elettroni abbastanza elevato) grazie alla loro elevata dinamica, quelli a conteggio di fotoni, grazie ad una bassa velocità di conteggio, possono essere utilizzati solo per sorgenti deboli (basso flusso fotoni/sec.). Di questo fatto si dovrà tenere conto durante la fase di calibrazione, per evitare di saturare la strumentazione con un flusso di fotoni troppo intenso.

La funzione dei RAE è quella di catturare gli elettroni emessi dai MCP. In linea di principio si potrebbe usare un anodo costituito da una singola piastra conduttrice: in questo caso si otterrebbe solamente l'informazione relativa all'intensità degli elettroni prodotti per fotomoltiplicazione, ma non si avrebbero informazioni relative alla loro distribuzione nello spazio. In alcuni campi applicativi questo può essere sufficiente, ma nel caso specifico di PHEBUS è fondamentale per poter distinguere le righe spettrali dei singoli elementi.

Per come è costruito lo strumento, sul sensore verranno lette contemporaneamente tutte le righe spettrali presenti e per questo è necessario poter risalire alla posizione di ciascuna riga e di ognuna di esse conoscerne l'intensità. L'intensità di ciascuna riga è molto importante perché è legata direttamente alla quantità di quell'elemento presente in un particolare momento nel campo di vista dello strumento.

Ecco perché invece di un semplice anodo costituito da una singola lamina metallica, vengono impiegati i RAE: questo particolare tipo di anodo permette di ottenere, oltre alle informazioni sull'intensità del flusso di elettroni, la loro distribuzione in un piano 2D. In particolare, il piano del sensore è suddiviso in celle, come in una matrice: la lettura di ogni singola cella permette di ricostruire le righe spettrali, fornendo quindi anche l'informazione sulla distribuzione spaziale degli elettroni.

	Anodi ad integrazione	Anodi a conteggio di fotoni
Caratteristiche	Le cariche fotogenerate vengono accumulate man mano che si formano ed alla fine del tempo di integrazione vengono estratte con una procedura detta di "DC Restoration". Questa procedura ha come risultato un rumore che viene detto di lettura (read out noise). Ne consegue che a bassi livelli di segnale non possiamo considerare la sorgente affetta dal solo rumore di shot ($\sqrt{N}$). Tanto più basso è il rumore di lettura e tanto più possiamo considerare il rivelatore in regime di segnale: $\frac{N}{\sqrt{N}}$	Le cariche fotogenerate nel fotocatodo vengono moltiplicate e si viene a formare una nuvola elettronica che va a colpire un anodo raccoglitore e genera un impulso. Gli impulsi corrispondenti ai fotoeventi vengono quindi contati dopo essere stati discriminati dal rumore prodotto dalla catena elettronica. Proprio per questo tale rivelatore anche a bassi flussi fotonici, si dice che lavora in regime di segnale. Gli impulsi che arrivano richiedono un certo tempo (microsecondi) per poter essere contati. E quindi il rivelatore non è in grado di contare eventi che si succedono velocemente.
Diverse tipologie	Charge Coupled Devices CCD Charge Injection Devices CID Rivelatori Infrarossi HgGdTe Intensified CCD ICCD Emulsione fotografica	Multi-Anode Microchannel Array MAMA MCP + Wedge&Strip WSA MCP + Anodo resistivo RANICON MCP + Fosforo + CCD ICCD

Tabella 1.2 – *Riassunto delle caratteristiche dei rivelatori di radiazione luminosa.*

In Figura 1.11 è riportato lo schema del RAE utilizzato su PHEBUS. L'area curva più esterna nello schema indica l'area totale e la forma del sensore: solo una parte di quest'area viene utilizzata per la rilevazione, a causa delle distorsioni introdotte dai bordi curvi, che affliggono questo tipo di anodi .

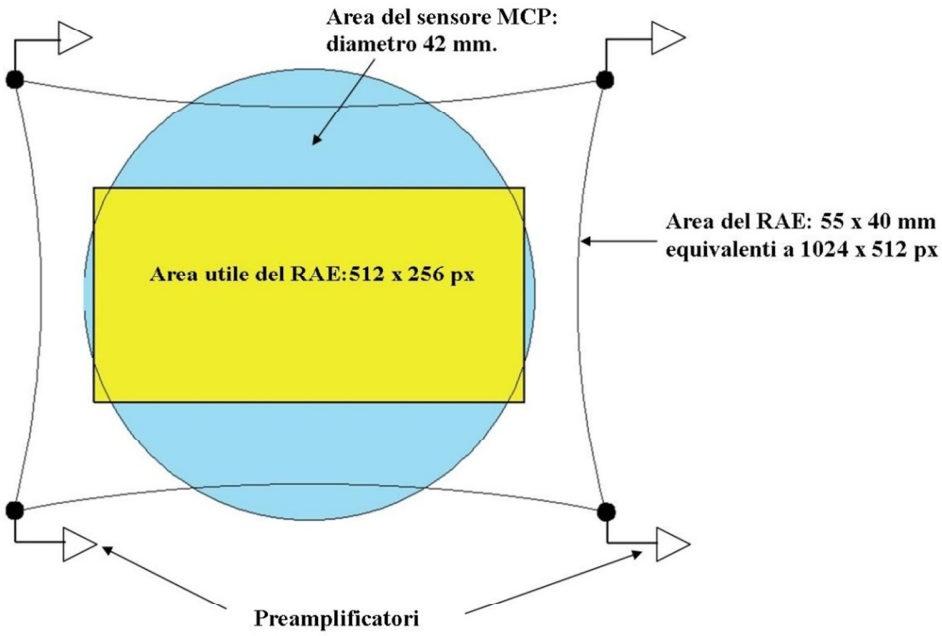


Figura 1.11 – *Schema dell'anodo RAE di PHEBUS.*

La parte di colore azzurro indica l'area totale del MCP, in riferimento alle dimensioni del RAE. Il MCP ha un diametro maggiore dell'altezza del RAE.

Nel caso di PHEBUS, solo una piccola parte del RAE verrà utilizzata per le misurazioni. Questo perchè le righe spettrali prodotte dal sistema hanno le stesse dimensioni della fenditura di ingresso (che è alta 5,67 mm e larga 282 μm), in quanto non vi è ingrandimento o riduzione delle immagini dovuto alle componenti ottiche del sistema. È quindi possibile effettuare la lettura dei dati della misura considerando solo i pixel centrali dell'anodo, gli unici interessati dalla radiazione incidente. Per questo motivo, un'altezza di 256 pixel (si pensa di ridurre tale altezza a 128 pixel) è sufficiente per leggere tutti i dati relativi alle righe spettrali.

Per quanto riguarda la direzione orizzontale, in base alle simulazioni effettuate utilizzando il modello radiometrico di PHEBUS, risulta che una lunghezza di 512 pixel è sufficiente per raccogliere tutte le righe dello spettro di interesse. Un esempio di questa situazione è riportato nella Figura 1.12, in cui è considerata una ipotetica distribuzione delle righe spettrali sul piano del sensore. Come si può osservare è previsto che queste righe cadano all'interno di quella che è definita come "area utile" del RAE. La lettura dei pixel al di fuori di quest'area comporterebbe un inutile spreco di risorse in termini di tempo di acquisizione, di elaborazione e di banda, senza

aggiungere nessuna informazione utile. Questa situazione deve essere attentamente evitata perché le risorse di banda e tempo di calcolo su PHEBUS e in particolare a bordo della BepiColombo sono preziose, soprattutto quando si devono inviare dati a Terra da milioni di kilometri di distanza.

Per completezza, va detto che anche la larghezza di 512 pixel non è ancora definitiva: si sta valutando la possibilità di acquisire 1024 bit, in modo da poter misurare eventuali righe focalizzate al di fuori dell'area utile, oltre alla luce diffusa ed altri disturbi, durante le fasi operative di misura e calibrazione. Si pensa quindi di acquisire la stessa quantità di dati del caso di un'area di 512 x 256 pixel, considerando però una forma differente per l'area utile: 1024 x 128 pixel. Questo dato attualmente è TBD.

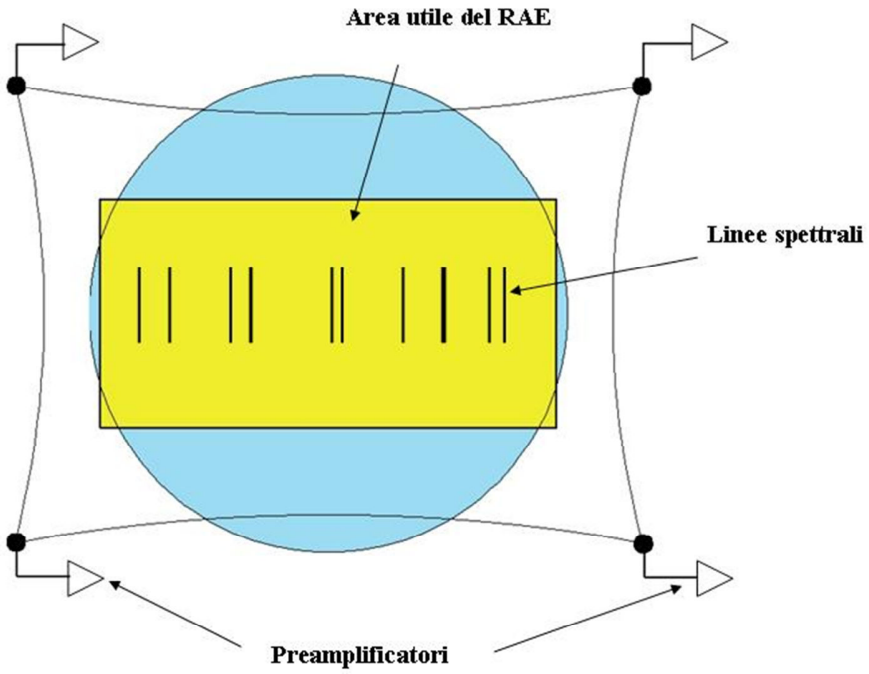


Figura 1.12 – *Schema dell'anodo RAE di PHEBUS con un ipotetico esempio di righe spettrali.*

Capitolo 2 – La spettroscopia VUV

Prima di affrontare la descrizione del sistema che si intende utilizzare per la calibrazione di PHEBUS, si ritiene opportuno introdurre in maniera adeguata l'argomento della spettroscopia nell'estremo UV (Vacuum UltraViolet spectroscopy – VUV) [6].

2.1 Spettroscopia nell'estremo ultravioletto

Come indica il nome stesso, questa materia si occupa dello studio e dell'analisi della radiazione ultravioletta in assenza di un mezzo in cui la essa si propaga: per l'appunto nel vuoto. La presenza di aria limita la lunghezza d'onda delle radiazioni che si propagano a circa 2000 Å. Questa assenza di ostacoli alla propagazione permette la propagazione e quindi lo studio di onde elettromagnetiche aventi lunghezza d'onda più corta, ma pone altri problemi a causa dell'ambiente in cui si è costretti ad operare ed alle problematiche di assorbimento della radiazione da parte della materia, con cui la radiazione comunque interagisce. Infatti, al di sotto dei 1040 Å nessun materiale trasmette la radiazione e quindi non è possibile utilizzare nessuna finestra od elemento di separazione tra la sorgente UV ed il rivelatore. Inoltre, la bassa riflettanza dei reticoli al di sotto dei 300 Å spesso costringe ad utilizzare spettrografi ed elementi di riflessione ad incidenza radente.

Con la sigla VUV si indica generalmente la regione compresa tra i 2000 Å e 2 i Å. Questa regione è a sua volta suddivisa in due sottoregioni conosciute come:

- regione Schumann UV: la parte compresa tra i 2000 Å e i 1250 Å
- regione dell'Estremo UV: la regione compresa tra i 1250 Å e i 2 Å

La regione dell'Estremo UV contiene a sua volta la cosiddetta regione Soft-X, quella compresa tra i 300 Å ed i 2 Å. Una rappresentazione di questa suddivisione dello spettro VUV è riportata in Figura 2.1.

Rispetto al lavoro svolto nell'analisi dello spettro elettromagnetico a lunghezze d'onda maggiori, la spettroscopia VUV ha avuto un progresso più lento. Negli ultimi anni tuttavia, l'interesse per questa area è cresciuto rapidamente grazie all'aumento della ricerca in ambito atmosferico, spaziale e nella fisica dei plasmi, oltre all'impiego sempre maggiore di raggi UV in processi industriali come ad esempio nella fotolitografia per la produzione di circuiti integrati.

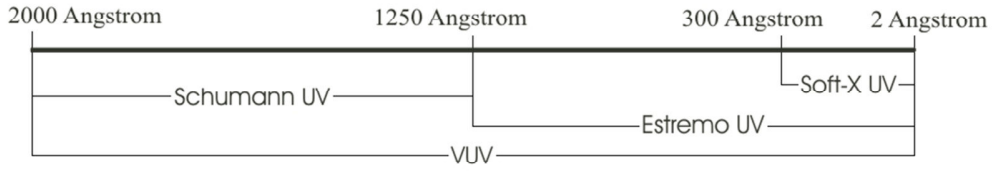


Figura 2.1 – *Regione dell'ultravioletto da vuoto VUV.*

2.2 Il reticolo di diffrazione concavo

Gran parte della moderna spettroscopia nell'estremo UV si basa sostanzialmente sull'idea che il Professor H. A. Rowland ebbe combinando le proprietà di diffrazione di un reticolo piano con le proprietà di focalizzazione di uno specchio concavo.

Egli scoprì che un reticolo concavo ha le seguenti, semplici proprietà di focalizzazione: se esso viene collocato tangente ad un cerchio di diametro uguale al suo raggio di curvatura in modo che il centro del reticolo giaccia sulla circonferenza, lo spettro di un punto sorgente che sta su tale circonferenza sarà focalizzato sul cerchio stesso. Questo cerchio è noto appunto con il nome di "cerchio di Rowland".

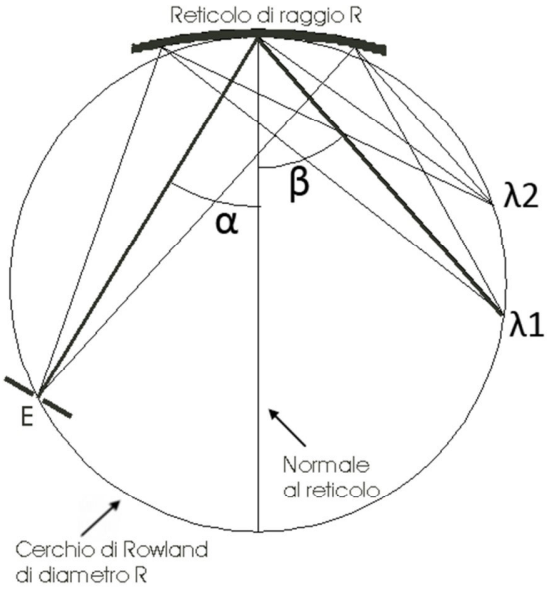


Figura 2.2 – *Geometria del cerchio di Rowland.*

Una rappresentazione geometrica di quanto descritto è riportata un Figura 2.2, dove sono evidenziati il reticolo, il punto sorgente E ed i fuochi delle varie lunghezze d'onda λ1, λ2, ….

Osservando la Figura 2.2 si vede che la radiazione proveniente dal punto E viene focalizzata nei punti λ_1, λ_2, …. Gli angoli α e β sono rispettivamente gli angoli di *incidenza* e di *rifrazione*.

Questo sistema sfrutta la proprietà dei reticoli di deviare la radiazione incidente con angoli che dipendono dalla lunghezza d'onda: radiazioni di lunghezza d'onda diversa che incidono sul reticolo con lo stesso angolo di incidenza subiscono una deviazione angolare che dipende dalla loro lunghezza d'onda. Per questo motivo si ottengono fuochi in posizioni differenti sul cerchio di Rowland, indicate rispettivamente con λ_1, λ_2, ….

La teoria dei reticoli concavi fu sviluppata in gran parte da Rowland stesso. Utilizzando i principi della geometria ottica è possibile determinare le proprietà di focalizzazione del reticolo concavo.

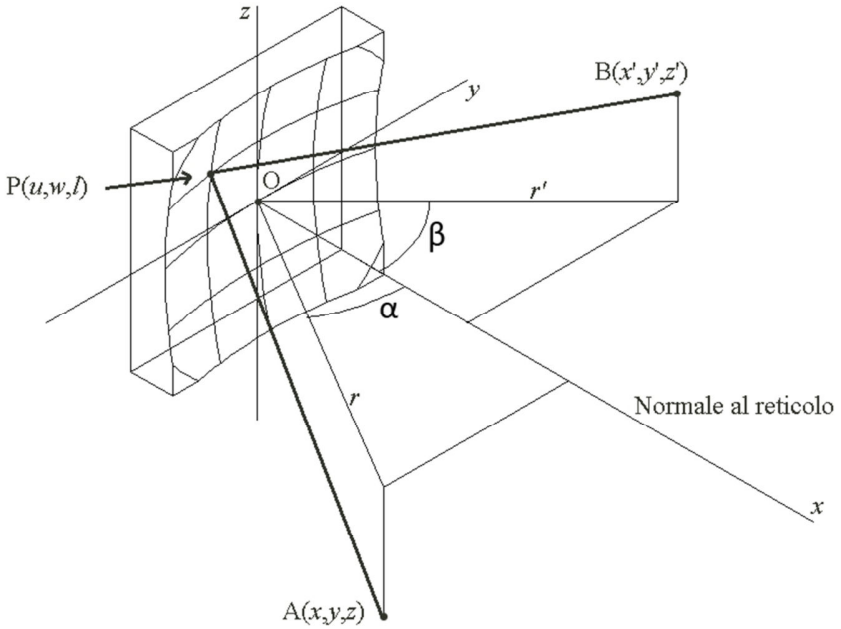


Figura 2.3 – *Formazione dell'immagine con un reticolo concavo.*

Senza scendere nei dettagli della trattazione geometrica del reticolo concavo, sulla base della Figura 2.3 si ricava che, dato un reticolo di raggio R, l'equazione del fuoco orizzontale per un reticolo concavo è la seguente:

$$\frac{\cos^2\alpha}{r} - \frac{\cos\alpha}{R} + \frac{\cos^2\beta}{r'} - \frac{\cos\beta}{R} = 0 \qquad (2.1)$$

Le sue soluzioni sono:

$$r = R\cos\alpha, \quad r' = R\cos\beta \tag{2.2}$$

$$r = \infty, \quad r' = \frac{R\cos\beta}{\cos\alpha+\cos\beta} \tag{2.3}$$

In particolare, l'equazione (2.2) è l'equazione di un cerchio, noto appunto come *"cerchio di Rowland"*, ed è l'unica delle due soluzioni ad avere significato nel caso in esame. Essa esprime il fatto che la luce diffratta di qualsiasi lunghezza d'onda sarà focalizzata orizzontalmente su di una circonferenza di diametro R uguale al raggio di curvatura del reticolo.

Il fuoco verticale del sistema è dato invece dall'equazione

$$\frac{1}{r} - \frac{\cos\alpha}{R} + \frac{1}{r'} - \frac{\cos\beta}{R} = 0 \tag{2.4}$$

le cui soluzioni sono:

$$r = \frac{R}{\cos\alpha}, \quad r' = \frac{R}{\cos\beta} \tag{2.5}$$

$$r = \infty, \quad r' = \frac{R}{\cos\alpha+\cos\beta} \tag{2.6}$$

L'equazione (2.4) è l'equazione di una linea retta tangente al cerchio di Rowland sulla normale al reticolo. Le equazioni (2.3) e (2.6) rappresentano il caso in cui la luce incidente è parallela (sorgente all'infinito) ma non sono di interesse nella nostra trattazione in quanto consideriamo la sorgente E come sorgente puntiforme (in realtà considereremo una fenditura, di dimensioni molto piccole).

Una trattazione accurata dal punto di vista geometrico permette di ottenere un'equazione che descrive il legame tra gli angoli di incidenza e riflessione e la lunghezza d'onda. In particolare, l'equazione che si ottiene è la seguente:

$$\pm m\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta) \tag{2.7}$$

Tale equazione è la cosiddetta *"equazione del reticolo concavo"*. Il segno negativo va considerato quando lo spettro viene focalizzato tra l'immagine centrale ($\alpha = -\beta$) e la tangente al reticolo (normalmente indicato come "Spettro esterno"). Il segno positivo va invece utilizzato quando lo spettro giace tra l'immagine centrale ed il fascio incidente (normalmente indicato come "Spettro interno").

L'equazione (2.7) viene risolta in Appendice B rispetto all'angolo α ed è stata utilizzata nelle simulazioni riportate nel Capitolo 6 per calcolare l'angolo di inclinazione del reticolo necessario a selezionare la lunghezza d'onda voluta. Nello stesso studio viene utilizzato anche un reticolo di tipo toroidale, al posto del reticolo concavo. Questo perché l'utilizzo dei reticoli toroidali permette ti ridurre un problema caratteristico dai reticoli concavi: quello dell'astigmatismo. Per completezza di trattazione, sono riportate le equazioni che descrivono il

comportamento del reticolo toroidale e che sono state impiegate per il calcolo del raggio di curvatura. I valori calcolati sono stati utilizzati nelle simulazioni del sistema ottico .

Per il calcolo della curvatura dei reticoli toroidali è necessario definire due raggi di curvatura: uno sul piano del cerchio di Rowland ed uno sul piano ad esso perpendicolare. Tali raggi sono indicati rispettivamente come R_h ed R_v. Le equazioni dei fuochi verticale ed orizzontale sono rispettivamente le seguenti:

$$\frac{\cos^2\alpha}{r} + \frac{\cos^2\beta}{r'} - \frac{\cos\alpha}{R_h} - \frac{\cos\beta}{R_h} = 0 \qquad (2.8)$$

$$\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} - \frac{\cos\alpha}{R_v} - \frac{\cos\beta}{R_v} = 0 \qquad (2.9)$$

2.3 Il monocromatore tipo Seya – Namioka

Di seguito è riportata una breve descrizione del monocromatore tipo Seya-Namioka [8]: questa descrizione serve a comprendere il funzionamento del monocromatore che verrà impiegato per costruire le sorgenti UV necessarie alla calibrazione. La descrizione del monocromatore come elemento della sorgente di radiazione UV è riportata nei Capitolo 5 e 6.

Come nella spettroscopia da vuoto, anche nel caso dei monocromatori l'uso di un reticolo concavo come elemento disperdente la radiazione richiede che tutti i componenti ottici del monocromatore giacciano sul cerchio di Rowland. Nel caso specifico di un monocromatore, le parti ottiche sono le fenditure di ingresso ed uscita ed il reticolo di diffrazione. Per mantenere un fuoco il più perfetto possibile ed ottenere in uscita al sistema radiazione monocromatica, almeno uno di questi elementi deve muoversi lungo il cerchio di Rowland, oppure il cerchio di Rowland deve ruotare rispetto ad uno di questi elementi. Gli altri due elementi devono essere mossi appropriatamente per rimanere sul cerchio di Rowland e per permettere la messa a fuoco.

Proprio per questo motivo sono stati progettati e costruiti vari tipi di monocromatore, utilizzabili in situazioni diverse, nelle quali vari fattori quali dimensioni, costo di fabbricazione, fenditure di ingresso ed uscita fisse, …, sono specifiche di progetto vincolanti.

Per questo si parla di monocromatori ad incidenza radente, incidenza normale, del tipo "Off – Rowland Circle Mounting" (montaggio al di fuori del cerchio di Rowland). Nel nostro caso, ha interesse il tipo di montaggio detto Seya – Namioka, che rientra nei monocromatori del tipo Off – Rowland circle mounting. Questo tipo di monocromatore impiega il più semplice meccanismo di scansione della radiazione: la rotazione del reticolo rispetto ad un asse verticale che attraversa il centro del reticolo stesso (asse parallelo alle righe del reticolo).

Nel 1952 Seya, con l'intento di costruire un monocromatore per la regione dell'estremo UV, analizzò le condizioni di focalizzazione per una semplice rotazione del reticolo e scoprì che un buon fuoco orizzontale può essere ottenuto su di un ampio range spettrale se le due fenditure sottendono un angolo di circa 70°. Namioka costruì un monocromatore sulla base dei calcoli di Seya e successivamente analizzò questo tipo di montaggio più approfonditamente, ponendo particolare attenzione al suo astigmatismo ed al suo potere risolutivo.

Per un monocromatore Seya-Namioka, valgono le seguenti relazioni:

$$r, r' = costanti \tag{2.10}$$

$$2K = \alpha - \beta_0 = costante \tag{2.11}$$

$$\alpha = K + \theta,\ \beta_0 = \theta - K \tag{2.12}$$

dove r ed r' sono rispettivamente le distanze delle fenditure di ingresso ed uscita dal centro del reticolo, $2K$ è l'angolo incluso tra i raggi principali di ingresso ed uscita, θ è l'angolo di rotazione del reticolo misurato dalla bisettrice dell'angolo $2K$ ed ha lo stesso segno dell'ordine spettrale m, α e β_0 sono rispettivamente gli angoli di incidenza e di diffrazione.

La relazione tra la lunghezza d'onda λ e l'angolo θ è data da

$$\lambda = \left(\frac{2d}{m}\right) \cos K \sin \theta \tag{2.13}$$

dove d è la distanza tra le righe del reticolo ed è chiamata "costante del reticolo". La teoria sul monocromatore Seya – Namioka qui presentata, è stata utilizzata nel modello ottico del sistema, per stimarne le sue caratteristiche ottiche.

Capitolo 3 – Calibrazione

Prima di effettuare il montaggio dello strumento sulla navicella che lo porterà su Mercurio, saranno necessari numerosi test che permettano di capire se lo strumento funziona correttamente, qual è la sua sensibilità e la sua precisione e a valutarne i parametri operativi.

L'attività di calibrazione che verrà svolta a Padova riguarda la calibrazione dello strumento completo e la verifica del suo corretto funzionamento.

3.1 Obiettivi della calibrazione di PHEBUS

La calibrazione di PHEBUS può essere suddivisa in due fase operative. Una fase di calibrazione a Terra, effettuata in un ambiente apposito, costruito per valutare tutti gli aspetti tecnici dello strumento, seguita da una fase di calibrazione in volo che servirà a verificare il corretto funzionamento dello strumento durante la fase operativa vera e propria ed a terminare la taratura dei rivelatori.

La calibrazione a Terra dello strumento, ha i seguenti obiettivi fondamentali:

- caratterizzazione dei rivelatori e dello strumento,
- allineamento spettrale dello strumento,
- caratterizzazione ISRF dello strumento,
- risposta assoluta dello strumento,
- caratterizzazione della luce diffusa e del rumore,
- caratterizzazione della tolleranza e del range dinamico dello strumento.

Nei sottoparagrafi seguenti è riportata una breve descrizione di ciascun punto, così come è previsto dai "PHEBUS Document Interface" dell'ESA [9]. Va sottolineato che solo alcune delle operazioni di calibrazione riportate di seguito sono di competenza del laboratorio "Luxor" di Padova. In particolare, a Padova sarà svolta la calibrazione dello strumento completo e non dei singoli componenti.

3.1.1 Caratterizzazione dei rivelatori

La caratterizzazione dei rivelatori prevede cinque diverse misurazioni, descritte di seguito.

Risoluzione spaziale dei RAE

La risoluzione spaziale dei RAE deve essere verificata ad almeno 9 bit (512 pixel). Sono indicate due possibilità misura:

- misura della MTF (Modulation Transfer Function) con una maschera periodica sul MCP,
- misura della PSF (Point Spread Function) illuminando il sistema con spot sufficientemente piccoli rispetto alla risoluzione prevista.

Luce visibile e rumore

Misura della dark current dei rivelatori EUV ed FUV

- a temperatura ambiente,
- a temperature diverse tra -20°C e +40°C.

Misura della dark current a voltaggi elevati. Misura dell'insensibilità alla luce solare, utilizzando una sorgente di luce visibile di intensità variabile. Queste misurazioni sono possibili in laboratorio per l'FUV mentre per l'EUV è necessaria una camera da vuoto.

Flat field

Illuminando l'intera area dei sensori EUV ed FUV con una luce monocromatica uniforme e per varie lunghezze d'onda all'interno del range spettrale dei rivelatori. Altre lunghezze d'onda al di fuori di tale range possono essere testate per valutare il secondo ordine di diffrazione del reticolo.

Per effettuare tale misura, è possibile:

- illuminare il rivelatore con una sorgente monocromatica puntuale lontana (ad esempio alla distanza di 1 m),
- misurare la risposta di ciascun pixel illuminandolo con la stessa intensità, muovendo uno spot su ciascun pixel (con uno specchio collimatore o con una piastra forata). Sia lo spot che i rivelatori possono essere mossi.

Risposta dei sensori

Devono essere misurate le seguenti proprietà:

- risposta spettrale ad un livello di basso segnale (senza effetti di saturazione)
- non linearità dovute alla limitata capacità di trasmissione degli elettroni, utilizzando una sorgente monocromatica puntiforme di intensità variabile. Andranno verificati alcuni settori di ciascun rivelatore con 2 – 3 lunghezze d'onda differenti.
- non linearità dovute alla limitata frequenza di campionamento elettronico utilizzando più righe spettrali contemporaneamente e aventi intensità variabile.

Invecchiamento dei rivelatori

Per tutta la vita dei rivelatori, tutte le illuminazioni a cui sono sottoposti devono essere riportate in un unico documento, per determinare l'evoluzione della loro risposta in funzione dell'invecchiamento e dell'illuminazione a cui sono stati soggetti. Una prima valutazione della risposta spettrale deve essere effettuata sui rivelatori all'inizio della loro vita, per poterla confrontare con successive misurazioni, per valutare l'invecchiamento dei MCP e dei fotocatodi. Queste misurazioni possono essere effettuate, ad esempio, sulle breadboard dei rivelatori. Come complemento a queste misure, sarebbe opportuno effettuare la stima della variazione del guadagno dei MCP, in funzione del voltaggio. Se possibile, altri parametri dei rivelatori possono essere testati. Ad esempio, il livello di soglia dei RAE, ….

La caratterizzazione dei rivelatori non verrà svolta a Padova. Tutti i test appena elencati, dovranno essere effettuati prima della delivery degli stessi da parte dei costruttori. Alcune operazioni di verifica del loro funzionamento potranno essere effettuate una volta montati nello strumento, ma la loro caratterizzazione deve essere effettuata prima dell'assemblaggio.

3.1.2 Allineamento spettrale dello strumento

Per i rivelatori FUV ed EUV, l'allineamento prevede due punti:

- aggiustamento dell'allineamento e
- risposta del sistema al disallineamento.

Aggiustamento dell'allineamento

L'aggiustamento dell'allineamento sarà effettuato per entrambi i rivelatori utilizzando una sorgente con numerose linee spettrali, nei rispettivi range di funzionamento (da 5 a 10 linee nelle regioni EUV ed FUV più strette delle loro risoluzioni). Il fuoco dovrà essere globalmente corretto per tutte le righe.

Risposta del sistema al disallineamento

L'immagine spettrale prodotta dal sistema sul piano dei rivelatori dovrà essere riprodotta in differenti condizioni di disallineamento della fenditura di ingresso rispetto all'asse ottico dei rivelatori. Questo tipo di misura ha lo scopo di:

- caratterizzare la deformazione delle righe spettrali a causa del disallineamento,
- comparare la perdita di risoluzione spettrale con quella stimata tramite simulazioni radiometriche,
- migliorare le specifiche di allineamento spettrale e affinare le procedure di allineamento ottico durante l'integrazione dei vati componenti.

Per simulare il disallineamento, dovranno essere effettuati vari test considerando larghezze della fenditura differenti e posizionando la sorgente ad angoli diversi rispetto all'asse ottico. Inoltre, sono previsti test dell'influenza della deformazione dello strumento a causa della temperatura, misurando la variazione dei parametri ottici a differenti temperature (intervallo –20 ÷ +40°).

Nel caso del NUV, il segnale prodotto da sorgenti monocromatiche rappresentative delle 2 lunghezze d'onda a 404,7 nm e 422,8 nm dovrà essere studiato in funzione del disallineamento.

3.1.3 Caratterizzazione ISRF dello strumento

Questa sezione riguarda solamente i rivelatori FUV ed EUV. L'immagine spettrale prodotta da alcune sorgenti monocromatiche (puntuali e/o estese) che coprano il range spettrale dei rivelatori (tipicamente 3 per rivelatore) sarà comparata con i risultati del modello radiometrico per:

- misurare direttamente la funzione ISRF a differenti lunghezze d'onda,
- confrontare la misura con i risultati ottenuti con i modelli radiometrici,
- stimare la vera risoluzione spettrale dello strumento, nelle condizioni di osservazione attorno a Mercurio,
- fornire nuove informazioni al produttore dei reticoli, per migliorare le versioni successive.

Questo test dovrà essere effettuato per differenti larghezze della fenditura e diverse posizioni della sorgente rispetto all'asse ottico.

3.1.4 Risposta assoluta dello strumento

Gli obiettivi scientifici di questa missione richiedono una calibrazione della risposta input – output dello strumento di almeno il 30%. Tale parametro sarà misurato per i 3 rivelatori utilizzando delle sorgenti UV calibrate (puntuali e/o estese) a differenti lunghezze d'onda, allo scopo di:

- misurare la risposta di tutto il sistema ottico, in termini di conteggi al secondo in risposta ad un segnale noto,
- confrontare tali risultati con le previsioni del modello radiometrico,
- fornire dati e informazioni per i miglioramenti futuri del sistema ottico.

Poiché lo strumento potrebbe risultare sensibile alla polarizzazione della luce e poiché il sistema ottico potrebbe introdurre polarizzazione nella radiazione da misurare, la risposta assoluta del sistema dovrà essere misurata per valori differenti dell'angolo di scansione (posizione del baffle), in modo da evidenziarne eventuali effetti di polarizzazione della luce.

3.1.5 Caratterizzazione della luce diffusa e del rumore

Differenti tipi di segnale dovranno essere misurati sui tre rivelatori:

- luce diffusa dovuta allo scattering della radiazione UV misurata al livello del reticolo, rispetto al livello assoluto di segnale e al rumore, utilizzando delle sorgenti selezionate (monocromatiche/multi spettro, puntuali/estese) rappresentative del livello di segnale atteso su Mercurio,
- luce diffusa dovuta ai fotoni che raggiungono i fotocatodi, provenienti da una sorgente UV posta a più di 8° di inclinazione rispetto alla linea di vista del baffle, in termini di segnale assoluto e rumore,
- luce diffusa dovuta ai fotoni che raggiungono i fotocatodi, sempre in termini di segnale assoluto e rumore, utilizzando una sorgente che simuli lo spettro solare nel visibile, posta a più di 8° di inclinazione rispetto alla linea di vista del baffle, per testare l'insensibilità dei MCP alla luce solare visibile,
- segnale di dark current.

3.1.6 Caratterizzazione della tolleranza e del range dinamico dello strumento

I test della risposta input – output effettuati sui singoli rivelatori (vedi Paragrafo 2.2.4) dovranno essere effettuati nuovamente sullo strumento completo. Utilizzando una sorgente estesa in grado di produrre varie linee spettrali, ben separate tra loro e di varia intensità, sarà possibile monitorare lo spettro in funzione dell'intensità. Utilizzando i risultati dei test effettuati sui singoli rivelatori ed il modello radiometrico dello strumento, sarà possibile misurare la variazione delle linee misurate in funzione dell'intensità e le interferenze tra le linee (dovute alla limitata frequenza di campionamento dell'elettronica dello strumento). Inoltre, considerando linee di intensità diversa, sarà possibile ottenere informazioni sul range dinamico dello strumento.

In questa fase della calibrazione, andrà inoltre definito il massimo livello di segnale ammissibile, cioè il massimo livello di segnale che non degrada la sensibilità, caratterizzato in

termini di illuminazione e tempo di esposizione. Questo per stabilire la soglia massima di segnale ammissibile dai rivelatori: quella che ne causa la saturazione.

3.2 L'attività svolta finora

Prima di decidere come procedere nella calibrazione, si è provveduto ad analizzare tutti gli elementi necessari per questa attività, cercando di capire come utilizzali ed assemblarli per poterli utilizzare al meglio.

Si parlerà di "calibration facility" o semplicemente "facility" per indicare l'insieme degli strumenti e delle attrezzature che verranno utilizzate. La facility per la calibrazione è composta a grandi linee dai seguenti elementi:

- una camera da vuoto (che verrà indicata anche come "tank") di dimensioni sufficienti a contenere lo strumento e tutta l'attrezzatura necessaria (ad esempio connessioni elettriche e meccaniche, sistemi di controllo, sistemi di acquisizione, ...),
- un sistema di pompaggio per fare il vuoto all'interno del tank, per creare le condizioni adatte alla calibrazione,
- un pannello di controllo per comandare il sistema da vuoto e monitorare i livelli di pressione,
- una sorgente che permetta di generare un fascio di raggi UV caratterizzato da parametri quali lunghezza d'onda della radiazione o intensità determinati e ben controllabili.

La descrizione accurata del sistema da vuoto è riportata nel Capitolo 4 mentre l'analisi della sorgente UV è riportata nei Capitoli 5 e 6.

In particolare, in questa prima fase di studio della facility, le attività svolte finora sono descritte brevemente di seguito.

Intervento sul sistema da vuoto

Sul sistema da vuoto si sono svolte le seguenti attività:

- modifiche sul tank e sua manutenzione,
- studio di fattibilità dell'interfacciamento del tank con una clean room,
- manutenzione straordinaria del sistema da vuoto,
- sistemazione del pannello di controllo e suo completamento.

Questi interventi hanno permesso di rimettere in funzione il sistema da vuoto e di verificarne il corretto funzionamento. Si è trattato di un'attività importante, che ha permesso di capire se il sistema fosse in grado di ospitare lo strumento e garantire i requisiti operativi minimi

(quali ad esempio il livello di vuoto, il livello di pulizia e la funzionalità delle sicurezze in caso di system failure, ...) necessari per effettuare una corretta calibrazione.

Studio degli ingombri

Questa analisi, in base alle caratteristiche di PHEBUS ed a quelle della facility esistente, ha permesso di stabilire per ciascun elemento che la compone il suo posizionamento migliore. In particolare sono stati valutati l'ingombro dello strumento rispetto al tank e quello della sorgente UV, oltre al loro collegamento alla facility. La descrizione di questa fase è riportata nel Capitolo 4.

Studio e disegno della sorgente UV

In questa fase è stata studiata la sorgente di radiazione UV. Questo elemento della facility ha l'importante compito di produrre la radiazione necessaria alla calibrazione. In particolare, la sorgente UV deve essere in grado di simulare nel miglior modo possibile le condizioni operative di PHEBUS: in particolare l'intensità luminosa e le righe spettrali rappresentative delle specie che si prevede di monitorare su Mercurio. Si rimanda ai Capitoli 5 e 6 per la descrizione di questa fase.

3.3 Filosofia di calibrazione

Le caratteristiche ottiche e meccaniche di PHEBUS hanno imposto uno studio approfondito della tecnica di calibrazione da utilizzare. Per effettuare la calibrazione di uno strumento, in generale si deve:

- disporre di una grandezza da misurare avente caratteristiche note con precisione o comunque misurabili,
- disporre di un sistema di misura calibrato che permetta di misurare con la precisione voluta la grandezza di riferimento per la calibrazione, in modo da conoscere il valore della grandezza che si presenta in ingresso allo strumento da calibrare,
- disporre dello strumento da calibrare, conoscendo le sue caratteristiche e le modalità in cui opera,
- effettuare la misura con lo strumento da calibrare e rapportare il valore misurato a quello rilevato in precedenza con il sistema di misura calibrato.

Nel caso di PHEBUS, la grandezza di riferimento sarà un fascio UV, avente caratteristiche note. Ad esempio, di questo fascio si vorrà poter stabilire la lunghezza d'onda della radiazione, le sue dimensioni, la sua intensità.

Sarà necessario utilizzare un fotodiodo calibrato, che permetta di misurare con precisione l'intensità della radiazione che entra nel baffle. Una volta effettuata la misura tramite i rivelatori di PHEBUS, sarà possibile rapportare tale valore a quello effettivo, misurato con il fotodiodo, stabilendo quindi l'efficienza dello strumento e gli errori di cui è affetto.

Poiché i range di frequenza da coprire sono due, uno corrispondente all'intervallo di operatività del sensore EUV e l'altro all'intervallo di operatività del sensore FUV, si è deciso di utilizzare due sorgenti distinte. Inoltre, in fase di studio sono state individuate due differenti tecniche di calibrazione. Una richiede di riempire totalmente il baffle d'entrata con un unico fascio collimato di dimensioni paragonabili al diametro del baffle: questo tecnica sarà indicata come "Full field calibration". L'altra invece prevede di effettuare una mappatura del baffle tramite varie misure, utilizzando un fascio di diametro ridotto, piccolo rispetto a quello del baffle; questa tecnica sarà indicata come "Spot calibration". Entrambe le tecniche, analizzate nei paragrafi seguenti, pongono dei problemi realizzativi.

3.3.1 Spot calibration

Durante l'analisi delle possibili tecniche di calibrazione da impiegare, è emerso il problema di conoscere con precisione l'intensità del fascio UV entrante nel baffle di PHEBUS. Il problema non è banale ed è di difficile soluzione, vista la tipologia di sistema ed il tipo di calibrazione che si deve effettuare. Infatti, si vuole conoscere con esattezza l'intensità della radiazione entrante, mantenendo nel contempo le condizioni operative dello strumento il più possibile simili a quelle reali. Questo implica che deve essere utilizzato un fascio collimato, in modo da simulare una sorgente all'infinito. Lungo il percorso verso il baffle d'entrata non devono essere presenti elementi che possano modificare le caratteristiche del fascio (le sue dimensioni e la sua intensità).

La prima idea a cui si è pensato è stata quella di considerare un unico fascio UV, di diametro sufficiente a riempire tutto il baffle. Questo approccio ha vantaggi e svantaggi. In primo luogo esso simula nella maniera più fedele le condizioni operative dello strumento e permette di effettuare una singola misura per ciascuna lunghezza d'onda di interesse, visto che tutto il baffle è riempito. Tuttavia, pone un grosso problema per quanto riguarda la misura precisa dell'intensità della radiazione entrante in PHEBUS. Infatti, per essere certi di conoscere con precisione tale parametro, è necessario poter misurare l'intensità della radiazione tramite un fotodiodo calibrato. Per fare questo, il fotodiodo deve misurare lo stesso fascio che entra in

PHEBUS: è quindi necessario costruire un diaframma delle stesse dimensioni dell'apertura del baffle, da porre di fronte al fotodiodo per schermare parte della radiazione.

Questa operazione tuttavia, non garantisce una misura precisa: per quanto il fascio UV sia ben collimato, sarà caratterizzato da una piccola divergenza. Poiché non è possibile effettuare la misura del fascio con il fotodiodo nella stessa posizione in cui si trova l'entrata del baffle, a causa di questa imperfezione vi sarà una parte di radiazione (per quanto piccola essa sia) che non entrerà nello strumento. Quindi verrà a mancare un dato fondamentale per eseguire la calibrazione. Inoltre, come si vedrà nei Capitolo 5 e 6, l'intensità della radiazione generata dalla sorgente UV per una particolare lunghezza d'onda, ha in alcuni casi valori molto piccoli. Maggiore è l'area su cui si proietta tale fascio, minore sarà l'intensità per unità di area. Questo potrebbe portare ad avere un segnale troppo debole da misurare.

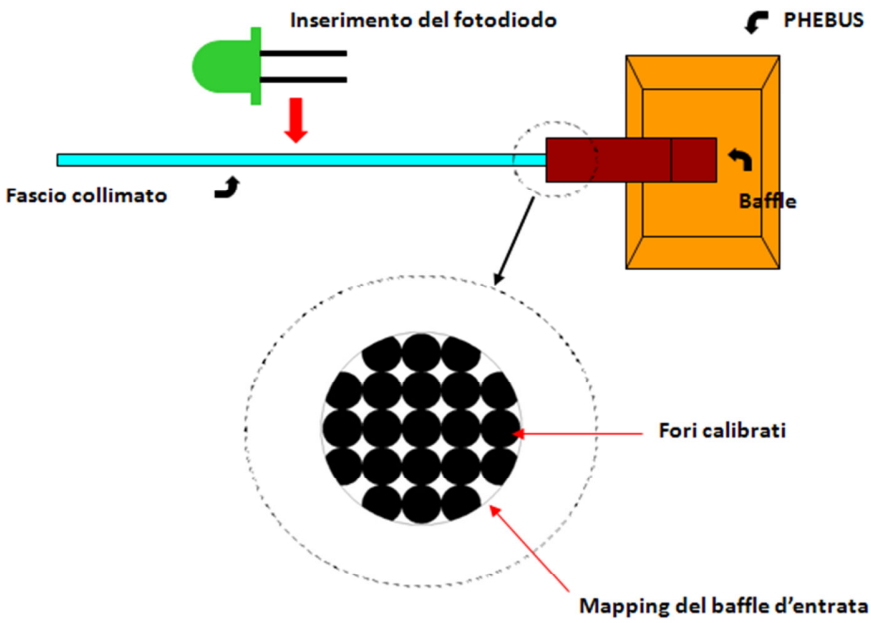


Figura 3.1 – *Spot calibration: mappatura del baffle d'entrata con un fascio di piccole dimensioni.*

Per ovviare a questo problema si è pensato ad una soluzione differente, che considera sempre un fascio collimato, ma avente diametro più piccolo rispetto a quello del baffle. L'utilizzo di un fascio di diametro minore permette di misurarne più facilmente l'intensità e garantisce che tutto il fascio entri nel baffle. In Figura 3.1 è riportata la filosofia di calibrazione considerata per questo tipo di soluzione.

In Figura sono rappresentati PHEBUS con il baffle d'entrata, il fascio collimato UV di dimensioni inferiori a quelle del baffle, l'operazione di inserimento del fotodiodo e nell'ingrandimento, l'operazione di mappature dell'entrata dello strumento.

L'ingrandimento riporta una possibile mappatura del baffle d'entrata, con un fascio UV avente diametro di 5 mm. Tale maschera è riportata anche in Figura 3.2: la figura è in scala.

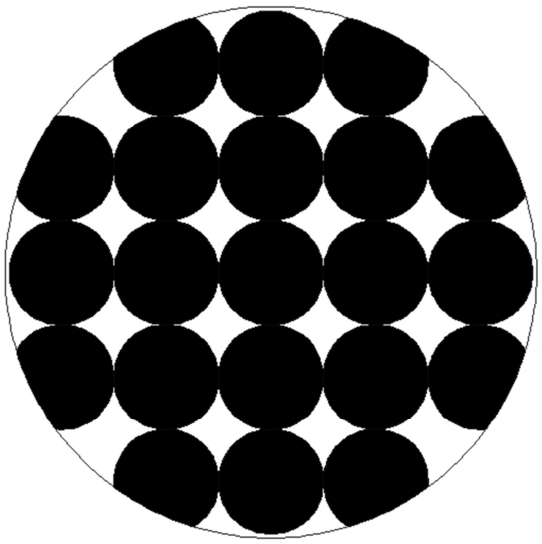


Figura 3.2 – *Possibile mappatura del baffle d'entrata di PHEBUS. I cerchi neri pieni rappresentano le zone illuminate del baffle. La figura è in scala.*

Questo tipo di mappatura permettere di misurare con precisione l'intensità della radiazione entrante nello strumento e consente di concentrare la radiazione prodotta dalla sorgente UV, ottenendo una maggiore intensità per unità di superficie. Inoltre, consente di analizzare gli eventuali effetti di vignetting e luce diffusa dovuti al bordo del baffle.

Per effettuare la mappatura del baffle, sarà necessario costruire una maschera forata, caratterizzata da uno o più fori calibrati meccanicamente e otticamente. Il disegno della maschera è attualmente TBD. Per effettuare la mappatura del baffle sarà necessario traslare lo strumento in modo da illuminare la zona di interesse: di questo andrà tenuto conto nel progetto del supporto per lo strumento.

L'operazione di inserimento del fotodiodo, rappresentata in Figura 3.1, è fondamentale per conoscere l'intensità esatta del fascio utilizzato per la calibrazione. In particolare, il

fotodiodo verrà impiegato per effettuare la caratterizzazione della maschera da porre di fronte allo strumento. Questa operazione sarà effettuata secondo i passi riportati di seguito.

- Per prima cosa verrà misurato con il fotodiodo il fascio UV senza nessun diaframma, in modo da conoscerne l'intensità: indichiamo questo valore con E_{IN}.
- Si provvederà poi a posizionare la maschera di fronte al fotodiodo ed a misurare l'intensità che attraversa il foro: indichiamo questo valore con E_{OUT}.
- Il rapporto E_{OUT}/E_{IN} fornisce la percentuale di radiazione che attraversa la maschera (nell'ipotesi realistica di fascio avente intensità uniforme).
- A questo punto, prima di ogni misura, sarà sufficiente misurare con il fotodiodo il fascio UV che si proietta sulla maschera: conoscendo le caratteristiche di quest'ultima sarà possibile stabilire l'intensità del fascio che la attraversa e che quindi entra nel baffle.

Il vantaggio di questo metodo è che non serve posizionare il fotodiodo dopo la maschera prima di ogni misura: una volta caratterizzata la maschera, sarà sufficiente conoscere l'intensità di tutto il fascio che viene proiettato sul foro per conoscere l'intensità che lo attraversa.

3.3.2 Modello ottico di PHEBUS – Analisi della calibrazione a spot

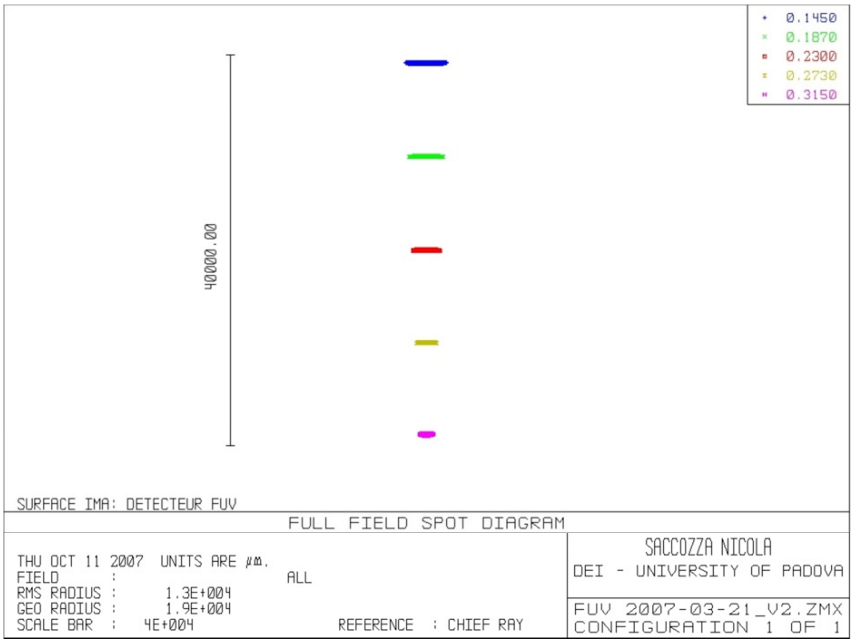


Figura 3.3 – *Spot delle varie righe spettrali, sul piano del sensore FUV.*

Con il programma per ray-tracing ZEMAX®[1], sulla base del modello di PHEBUS fornitoci dai colleghi francesi, è stata effettuata la stima della percentuale di radiazione che arriva al rivelatore FUV, rispetto a quella in entrata al baffle, per avere un'idea del rendimento dello strumento e per stimare la perdita di segnale dall'ingresso del baffle al rivelatore.

Ipotizzando di osservare una sorgente avente forma circolare (di dimensioni uguali a quella prodotta dall'ingresso del baffle) posta all'infinito, è stata ottenuta l'immagine riportata in Figura 3.3. Per quanto riguarda la stima della percentuale di radiazione che arriva al sensore FUV, è stata effettuata l'analisi dell'immagine prodotta sul piano del sensore. Le lunghezze d'onda considerate nell'analisi sono: 145, 187, 230, 273 e 315 nm.

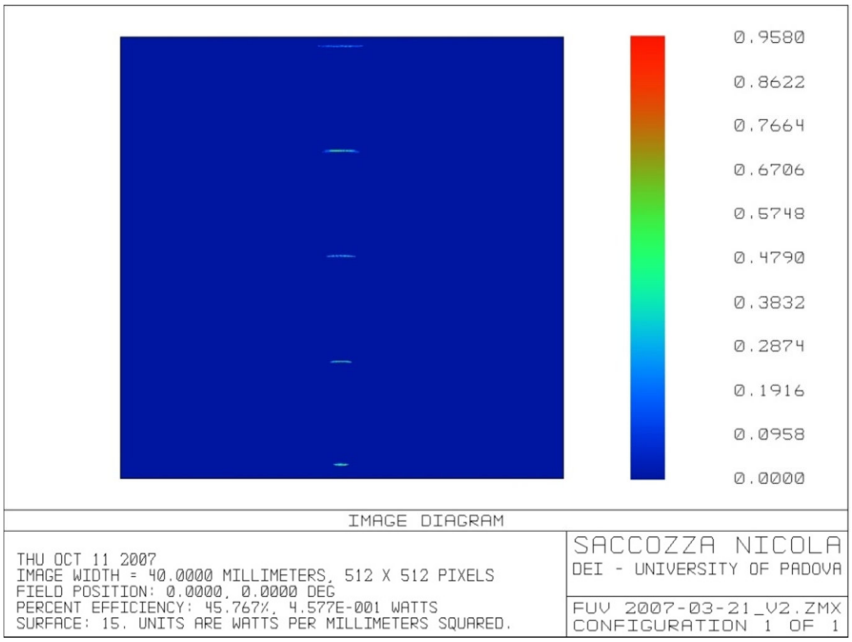


Figura 3.4 – *Immagine delle righe sul rivelatore FUV. L'immagine è in falsi colori.*

Questi valori sono stati scelti in base al file impiegato nel modello ZEMAX® usato per definire i parametri ottici della finestra di MgF_2, che contiene appunto questi valori ed il valore dell'indice di rifrazione per una data λ. L'immagine ottenuta è riportata in Figura 3.4: la scala laterale riporta, a colori, la percentuale di radiazione che raggiunge l'uscita, riferita all'intensità

[1] ZEMAX® è un marchio registrato di ZEMAX Development Corporation.

in ingresso. L'area considerata per il sensore è di 512 x 512 pixel. La distribuzione nello spazio dell'intensità luminosa relativa alla Figura 3.4 è riportata in Figura 3.5, nella quale si osserva che le righe hanno intensità differenti.

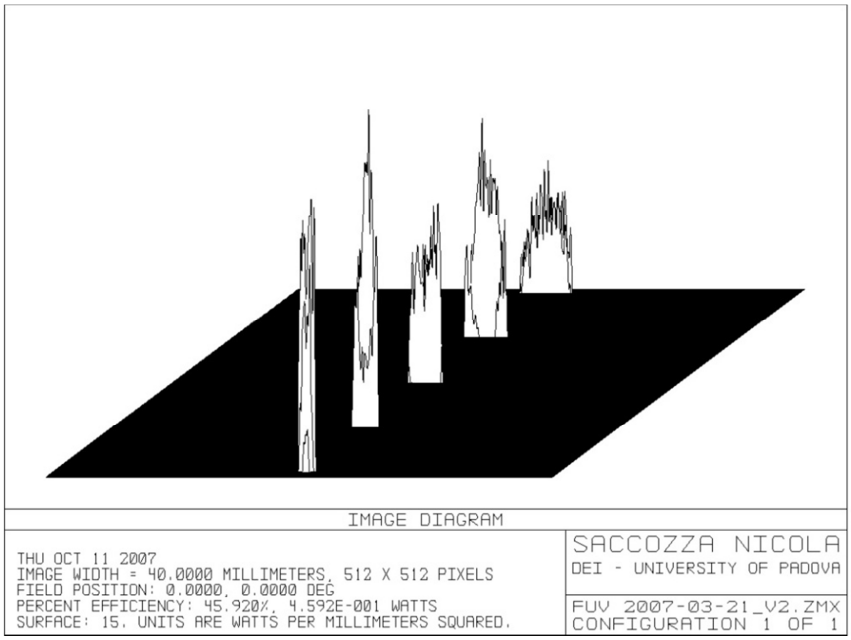


Figura 3.5 – *Distribuzione dell'intensità luminosa.*

Da questa simulazione si ricava che mediamente il 45% della radiazione entrante nel sistema raggiunge il sensore. Va osservato che il sistema PHEBUS è caratterizzato da due reticoli: in base al modello, una percentuale del 45% indica che complessivamente circa il 90% della radiazione entrante nello strumento raggiunge i rivelatori, in quanto viene suddivisa a metà dai due reticoli. L'analisi effettuata in questo caso prende in considerazione un solo rivelatore: l'FUV. L'analisi delle singole lunghezze d'onda, separatamente una per una, non cambia il valore della percentuale trovato.

Per studiare la calibrazione dello strumento a spot è stata effettuata l'analisi dell'immagine usando una sorgente di più piccola rispetto alle dimensioni del baffle, posta in diverse posizioni in entrata al baffle e che riempia quest'ultimo solo in parte. I risultati ottenuti per quanto riguarda la percentuale di radiazione che arriva al sensore sono gli stessi, indicando un funzionamento costante dello specchio collimatore in tutti i suoi punti (questo comportamento era prevedibile in quanto si tratta di uno specchio parabolico, caratterizzato da

un fuoco teorico perfetto). L'unica variazione che si ha è nell'intensità delle righe, che varia a seconda dell'intensità e delle dimensioni del fascio. Ed esempio, ipotizzando di riempire solo metà del baffle, sui rivelatori si avranno righe di dimensioni sostanzialmente identiche a quelle trovate nelle simulazioni ma di intensità doppia, a parità di intensità della radiazione di ingresso, perché in questo caso l'area su cui è proiettato il fascio è la metà di quella del caso con baffle completamente riempito.

Non essendo quindi presenti differenze evidenti nella forma e nelle dimensioni delle righe spettrali in rapporto alla forma della sorgente, è possibile affermare che la calibrazione per spot, cioè andando ad illuminare per zone l'apertura di ingresso del baffle, è realizzabile, ed il risultato complessivo delle varie misure sarà dato dalla somma dei singoli contributi dovuti alle varie zone illuminate.

Per completare l'analisi, è stato simulato il posizionamento dello spot in posizioni differenti lungo una direzione, indicata in Figura 3.6, per ottenere una valutazione della percentuale di radiazione che arriva al rivelatore FUV in funzione dalla posizione dello spot. In particolare, lo spot è stato spostato a passi di 1 mm nell'intervallo 0÷15 mm. Lo spostamento è stato effettuato solo lungo una direzione, nella metà inferiore del baffle (dello specchio focalizzatore) perché solamente questa parte dello specchio focalizza la radiazione sul rivelatore FUV.

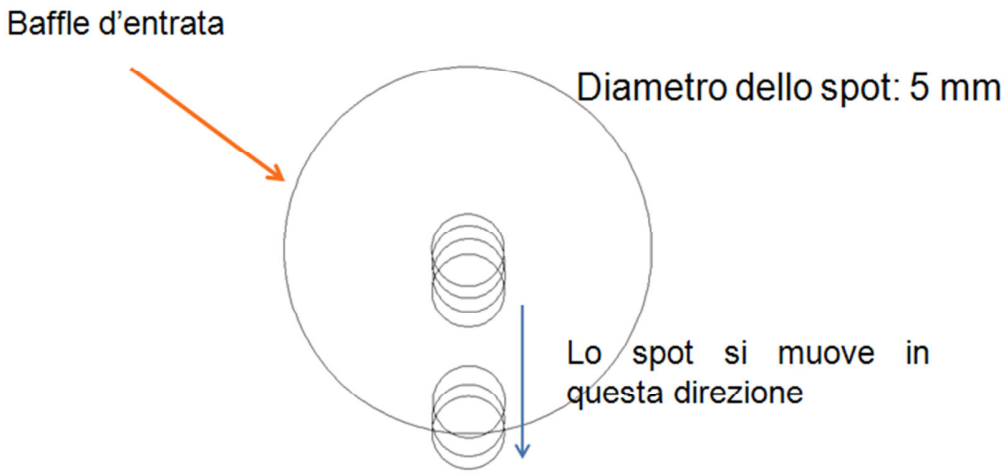


Figura 3.6 – *Simulazione del movimento dello spot sul baffle d'entrata di PHEBUS.*

I risultati ottenuti da questa simulazione sono riportati nel grafico di Figura 3.7 nel quale è rappresentata la percentuale di radiazione entrante nel baffle che raggiunge il sensore FUV, in funzione della posizione dello spot rispetto al centro dello specchio focalizzatore. Si osserva che la percentuale è pari a circa il 90% nel caso degli spot posizionati nel range 3÷12 mm, mentre diminuisce rapidamente per gli spot vicini al centro dello specchio ed al suo bordo, perché parte del fascio non viene focalizzata sul reticolo che riflette sul sensore FUV oppure non entra nel baffle, perché intercettata dal suo bordo.

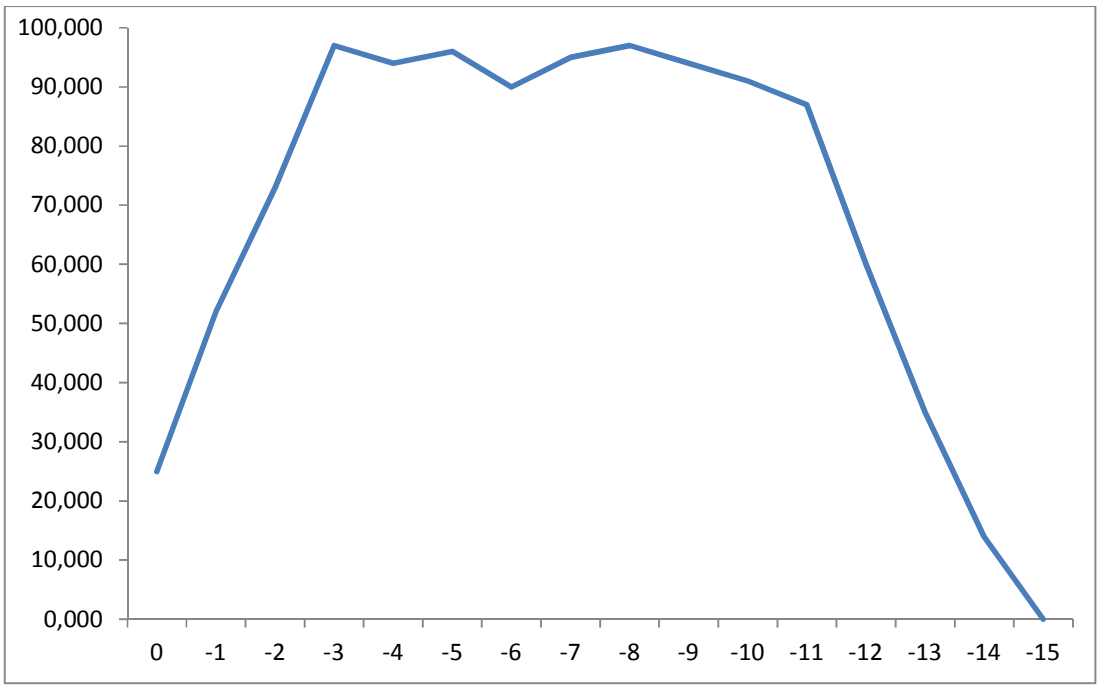


Figura 3.7 – *Andamento della percentuale di radiazione che arriva sul sensore FUV in base alla posizione del sensore rispetto al centro del baffle d'entrata.*

3.3.3 Campo di vista di PHEBUS e luce diffusa

Una volta ultimata la calibrazione dei sensori, EUV ed FUV, procedendo con la calibrazione a spot ed impiegando le sorgenti UV adatte ai due sensori (i due tipi di sorgente UV che si intendono utilizzare per la calibrazione sono descritti nei Capitoli 5 e 6), sarà necessario procedere alla valutazione del campo di vista di PHEBUS e dell'influenza della luce diffusa sulle misure. Per fare questo, sarà necessario illuminare l'entrata dello strumento con un fascio collimato, inclinato rispetto all'asse del baffle. A causa delle caratteristiche costruttive di

PHEBUS e delle sorgenti UV, sarà più comodo mantenere fisso il fascio collimato e ruotare il baffle di PHEBUS dell'angolo voluto, eventualmente traslando lo strumento per centrare il fascio con la precisione desiderata. Questa situazione operativa è rappresentata in Figura 3.8.

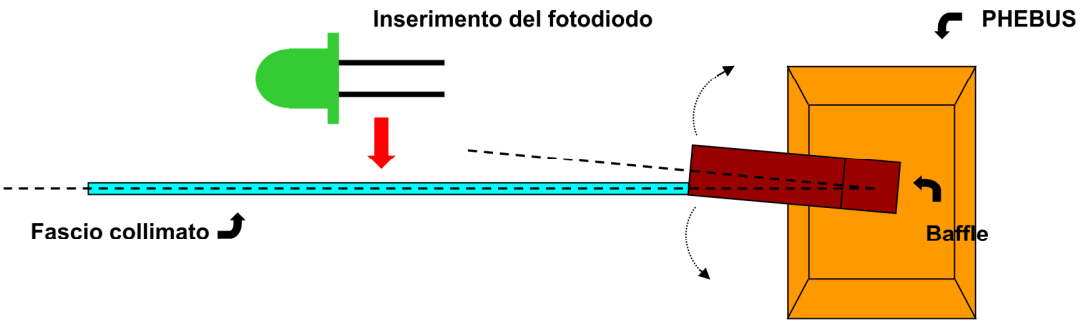


Figura 3.8 – *PHEBUS con baffle ruotato, per valutare il suo campo di vista e gli effetti della luce diffusa.*

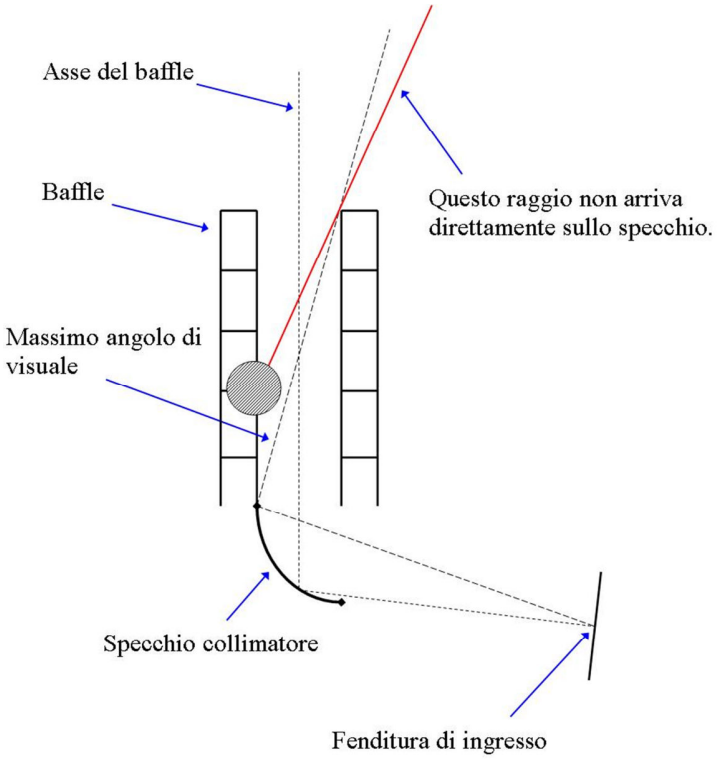


Figura 3.9 – *Campo di vista del baffle e luce diffusa.*

In Figura 3.8si può osservare che il fascio è rimasto nella stessa posizione rappresentata in Figura 3.1 mentre il baffle è stato ruotato di un certo angolo α rispetto all'asse del fascio collimato. Questa configurazione permette di illuminare parte delle pareti interne del baffle: ponendo lo strumento al limite del suo campo di vista è possibile valutare la quantità di radiazione diffusa e la sua influenza sulle misure. La situazione appena descritta è rappresentata in Figura 3.9: oltre un certo angolo di inclinazione del fascio UV rispetto all'asse del baffle, il raggio non colpisce più direttamente lo specchio focalizzatore in ingresso a PHEBUS ma le pareti del baffle stesso. Quest'ultimo, pur essendo verniciato con una particolare colorazione caratterizzata da un assorbimento della radiazione UV molto elevato (ma inferiore al 100%), non assorbe tutta la radiazione che colpisce le sue pareti: una piccola parte di essa viene riflessa. Questa emissione costituisce una sorgente di luce diffusa: durante le operazione di calibrazione, si vuole stimare l'influenza di tale luce diffusa nelle misurazioni. Per completezza, in Figura 3.10 è riportato l'ingrandimento del cerchio tratteggiato indicato in Figura 3.9.

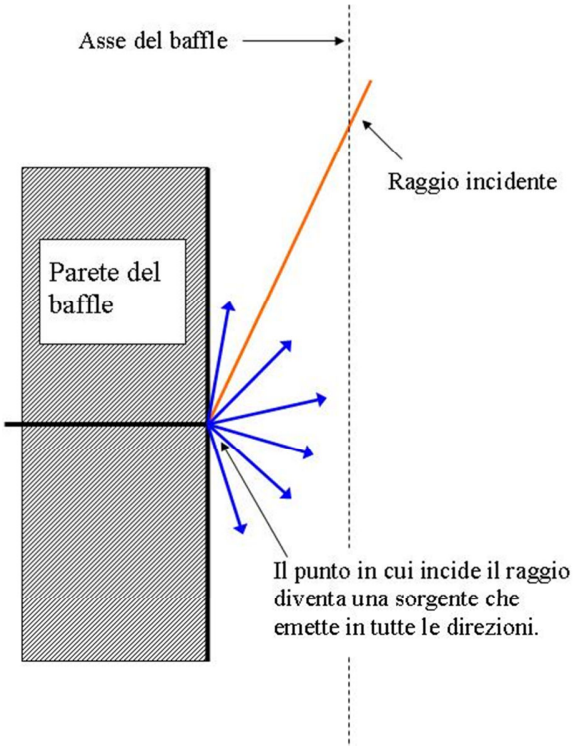


Figura 3.10 – *I raggi che colpiscono la parete del baffle vengono in parte riflessi e ciascun punto diventa una sorgente che emette in tutte le direzioni. Lo specchio focalizzatore si trova in basso nella figura.*

In base agli schemi riportati in questo sottoparagrafo, si intuisce come sia possibile valutare l'influenza della luce diffusa sulle misure. Infatti, inclinando il baffle oltre l'angolo limite del suo campo di vista ed andando ad illuminare le sue pareti interne, è possibile valutare la quantità di radiazione che raggiunge i rivelatori e quindi rapportarla all'intensità di quella in entrata. Una volta in possesso di questi dati, è immediato stimare la percentuale di radiazione diffusa che raggiunge i rivelatori in una misura reale. La stima dell'influenza della luce diffusa è importante per poterla considerare quando si andranno ad analizzare i dati reali raccolti durante la missione. Infatti, durante le varie osservazioni, il baffle osserverà l'esosfera di Mercurio in condizioni molto diverse: in alcuni casi si troverà ad osservare sorgenti molto estese. Queste sorgenti saranno causa di luce diffusa e bisognerà tenerne conto se si vuole mantenere la risoluzione spaziale dello strumento entro i limiti prefissati.

3.3.4 Full field calibration

In base a quanto riportato nella descrizione precedente, si capisce come la tecnica di calibrazione a spot permetta di effettuare una calibrazione precisa dello strumento completo.

Tuttavia la spot calibration è pur sempre un'approssimazione della realtà e quindi non permette di tenere conto di tutti i parametri costruttivi ed operativi di PHEBUS. Per questo motivo, si vuole utilizzare anche un'altra tecnica di calibrazione, in abbinamento alla spot calibration: quella che viene indicata come "Full field calibration".

Questa tecnica consiste nell'utilizzare un fascio UV di diametro paragonabile a quello del baffle di PHEBUS, in modo da riempire totalmente il campo di vista dello strumento.

In realtà, non si tratta di una vera e propria tecnica di calibrazione, ma piuttosto di una verifica del corretto funzionamento dello strumento.

L'utilizzo di un fascio UV in grado di riempire l'intera apertura d'entrata permette, oltre alla verifica del corretto funzionamento, di confrontare e verificare i dati teorici ottenuti con il modello radiometrico con delle misure reali effettuate sullo strumento completo. In particolare, sarà possibile testare la sensibilità dello strumento e valutarne la risoluzione.

3.3.5 Calibrazione del sensore NUV

Come ultima richiesta per la calibrazione, sarà necessario calibrare il rivelatore NUV, per le linee spettrali di interesse. In particolare, tale rivelatore è stato progettato per rilevare le linee a 404,7 nm e 422,8 nm caratteristiche del potassio e del calcio. Sarà necessario disporre di un

fotodiodo calibrato anche per queste lunghezze d'onda. Il modo con cui verrà calibrato questo sensore, a partire dalla sorgente da impiegare fino ad arrivare alla tecnica da impiegare per illuminare l'entrata dello strumento è attualmente TBD.

Capitolo 4 – Il sistema da vuoto

Prima del montaggio definitivo dello strumento sulla sonda che lo porterà su Mercurio, sarà necessario un notevole numero di test per stabilire se esso sia affidabile ed in grado di operare correttamente una volta giunto a destinazione. A questo scopo sono stati previsti (o si stanno definendo) numerosi test strutturali, operativi, del software di controllo, di trasmissione dati e di tutti i sottosistemi.

Test di fondamentale importanza sono quelli che riguardano la calibrazione dello strumento: per poter interpretare correttamente i dati che esso raccoglierà e invierà a Terra è necessario conoscere con precisione le sue caratteristiche di efficienza e precisione. Infatti, conoscendo ad esempio il rendimento in riflessione alle lunghezze d'onda d'interesse, è possibile stabilire quanto il valore misurato sia in realtà diverso dal valore reale a causa di una serie di fenomeni quali attenuazione dovuta al baffle e alle riflessioni, luce diffusa, …. Conoscendo a priori l'entità di questi fenomeni è possibile risalire con precisione al valore reale che si intende misurare.

In questo contesto si inserisce la messa a punto della facility di calibrazione dello strumento, parte integrante di questa tesi e trattata nel presente capitolo.

4.1 Descrizione del sistema da vuoto

Per poter calibrare lo strumento con la maggior precisione possibile senza alterare le misurazioni o danneggiarlo, è necessario lavorare in condizioni che siano il più possibile simili a quelle in cui si troverà una volta arrivato a destinazione. In particolare, una caratteristica fondamentale perché esso possa lavorare correttamente è che si trovi in vuoto. Per questo è necessario disporre di un ambiente che permetta di lavorare in vuoto e che sia sufficientemente ampio da contenere lo strumento e tutto il necessario per la sua calibrazione.

Il laboratorio "Luxor" presso il DEI – Dipartimento di Elettronica e Informatica dell'Università di Padova, è dotato di un tank di acciaio di dimensioni sufficienti a contenere lo strumento. Questo tank è stato usato in precedenza per la calibrazione di un altro strumento spaziale (un altro spettrometro UV) e per questo si è pensato di riadattarlo per la calibrazione di PHEBUS.

Si tratta di un cilindro d'acciaio, lungo circa 2 metri e con diametro di 80 cm, del peso approssimativo di una tonnellata. È dotato di numerose aperture posizionate lateralmente e nella

parte superiore, alle quali sono fissate delle flange che permettono il posizionamento della strumentazione, dei contatti elettrici e dei controlli. Nella sua parte inferiore è collegato il sistema di pompaggio per creare il vuoto.

Una foto reale del tank è riportata in Figura 4.1 mentre una sua vista laterale con indicate le dimensioni principali è riportata in Figura 4.2.

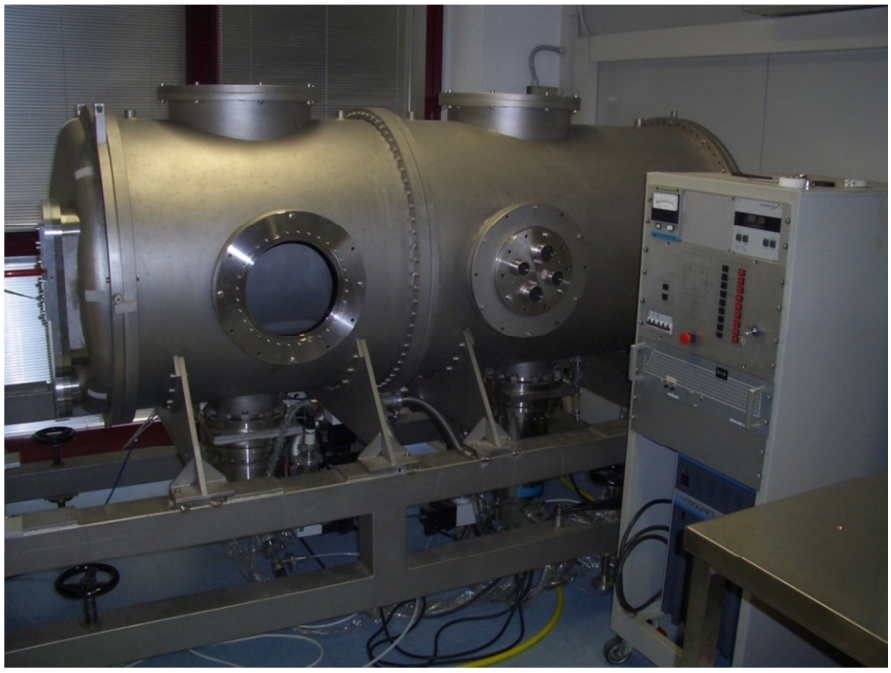


Figura 4.1 – *Foto reale della facility, ancora in fase di completamento.*

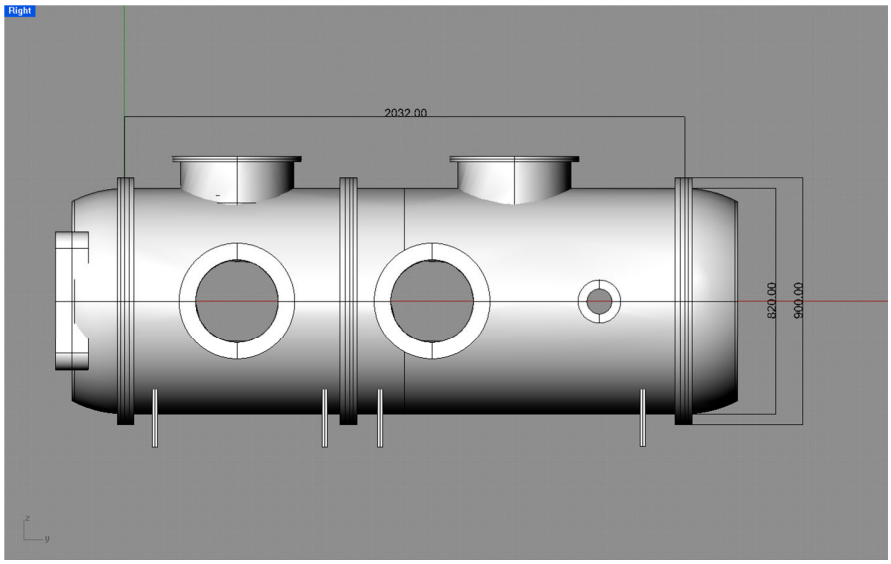


Figura 4.2 – *Disegno del tank con le sue dimensioni principali (la scala è in mm).*

Due portelli posti agli estremi del cilindro permettono un facile accesso al suo interno, per poter effettuare le necessarie regolazioni e la manutenzione della strumentazione. Uno dei due portelli (quello di destra nella Figura 4.1) verrà collegato ad una clean room, in modo da poter operare sugli strumenti in ambiente pulito e controllato, riducendo al minimo le possibilità di contaminazione e di danneggiamento dei dispositivi a causa di polvere e agenti inquinanti. Il portello di sinistra invece si interfaccerà alla fonte di raggi UV, che verrà montata esternamente al tank. Questo è necessario perché essa è dotata di un impianto di pompaggio autonomo che non può essere collocato all'interno della clean room. Una foto del portello dove andrà fissata la sorgente UV è riportato in Figura 4.3.

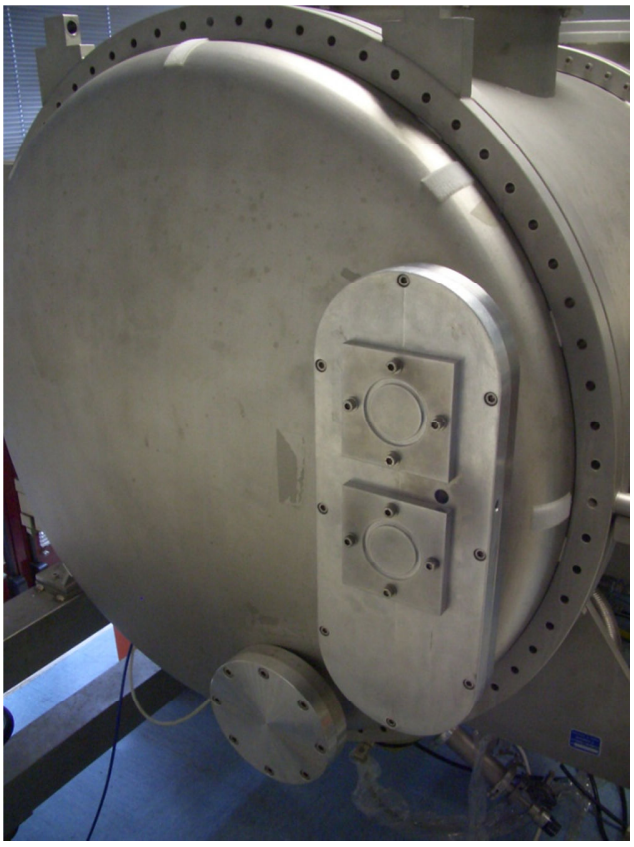


Figura 4.3 – *Vista del portello sinistro del tank dove verrà collegata la sorgente UV.*

Il sistema di pompaggio è collegato al tank nella sua parte inferiore ed è costituito da tre pompe:

- una pompa rotativa,
- una turbina,
- una pompa criogenica.

Tale sistema consente di raggiungere un livello di vuoto dell'ordine dei 10^{-6} mbar. Si tratta di un livello di pressione più elevato di quello del vuoto interplanetario, ma sufficiente per effettuare una simulazione spaziale a terra. Va considerato inoltre che lo strumento opererà in orbita attorno ad un pianeta ed è quindi naturale aspettarsi livelli di vuoto meno elevati di quello del vuoto interplanetario, a causa della presenza di un'atmosfera (per quanto rarefatta essa sia). La sonda su cui verrà installato PHEBUS orbiterà attorno a Mercurio ad un'altitudine variabile tra i 400 e i 1500 km.

Nella prima fase di sistemazione della facility si è provveduto a studiare la migliore collocazione dello strumento all'interno del tank, tenendo conto delle misure che si intendono effettuare e della necessità di collimarlo con una fonte di raggi UV. È stato creato un modello tridimensionale del tank e, prendendo come riferimento il modello vettoriale di PHEBUS fornito dai colleghi dell'ESA, è stato simulato il posizionamento dello strumento all'interno di esso.

Le simulazioni hanno permesso di stabilire che il posizionamento migliore, quello che garantisce un montaggio semplice e che consente di sfruttare al meglio lo spazio a disposizione, è quello con baffle parallelo alla lunghezza del tank. Le Figure 4.4 e 4.5 illustrano questa situazione.

Questo posizionamento, oltre a permettere di alloggiare facilmente lo strumento all'interno del tank, rende semplici le operazioni di allineamento del baffle, che durante le misure per la calibrazione dovrà essere allineato con la sorgente UV.

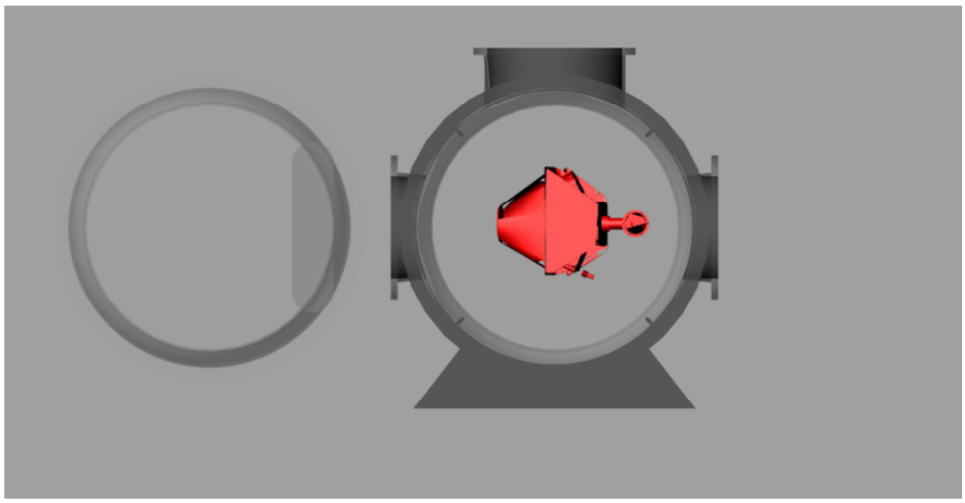


Figura 4.4 – *Vista frontale del tank e dello strumento, con portello rimosso.*

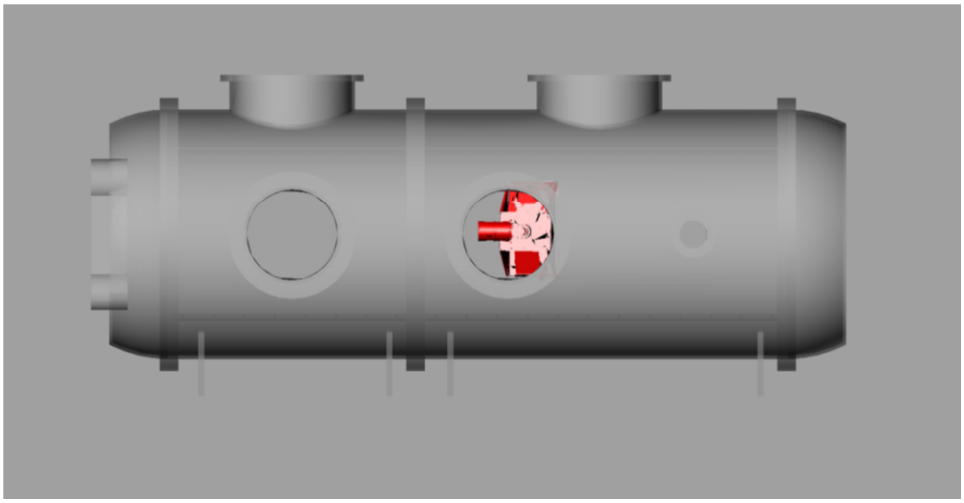


Figura 4.5 – *Vista laterale del tank e dello strumento.*

Per sostenere e allineare correttamente PHEBUS con la sorgente di radiazione UV sarà necessario progettare e costruire un supporto meccanico ad – hoc, dotato di azionamenti elettrici controllabili, che permettano di ruotare e traslare lo strumento in modo da ottenere il posizionamento voluto. Questa parte di progetto è TBD in quanto, al momento della stesura del presente documento, non sono note con precisione le dimensioni definitive delle breadboard[1] di PHEBUS e soprattutto quelle del modello finale.

Per quanto riguarda le misurazioni, si può invece affermare che con buona probabilità saranno effettuate in due posizioni distinte: con baffle ortogonale al piano dello strumento e con baffle parallelo a quest'ultimo, per poter valutare l'eventuale dipendenza della sensibilità dalla posizione del baffle (lo specchio focalizzatore potrebbe introdurre polarizzazione nella radiazione entrante). Sarà quindi necessario poter ruotare lo strumento (ed in contemporanea il baffle tramite il software di controllo di PHEBUS) in modo da mantenere il baffle allineato al fascio UV. Sono inoltre previste misurazioni con baffle leggermente inclinato rispetto al fascio UV, in modo da valutare l'eventuale presenza di luce diffusa e la sua influenza sulle misure. Il controllo degli azionamenti dovrà essere automatizzato e per questo sarà necessario progettare e realizzare un software ad – hoc che consenta di comandarlo.

È stato simulato anche il posizionamento della sorgente UV, considerando un fascio collimato entrante nel cilindro da sinistra, come rappresentato nelle Figure 4.6, 4.7 e 4.8. Come si può osservare da tali figure, il collocamento dello strumento risulta semplice. Inoltre, consente

[1] Con il termine "breadboard" vengono indicati i modelli di pre-produzione, utilizzati durante la fase di sviluppo e di test del modello finale. Infatti, prima di assemblare e calibrare il modello definitivo, vengono effettuati una serie di test su modelli simili a quello definitivo, che permettono di individuare eventuali problemi e di migliorare funzionalmente il prodotto finale.

di ruotare il corpo di PHEBUS, mantenendo allineato il baffle con la sorgente UV, in modo da poter simulare condizioni operative differenti. Questo grado di libertà è di fondamentale importanza per simulare le fasi operative dello strumento: l'assetto dello strumento varierà continuamente durante la sua permanenza in orbita attorno a Mercurio e di conseguenza il baffle dovrà essere ruotato in base al tipo di misura per compensare tale variazione.

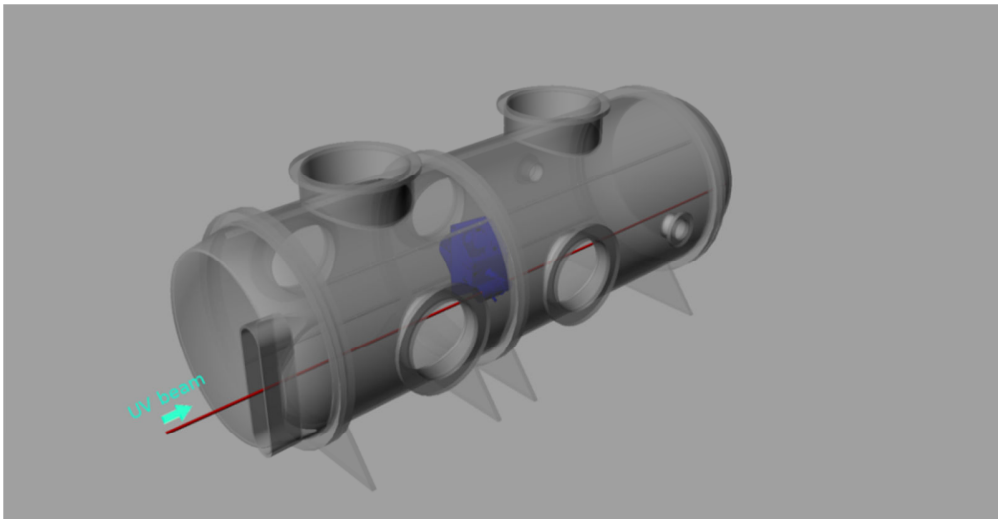


Figura 4.6 – *Vista assonometrica del tank e della fascio UV.*

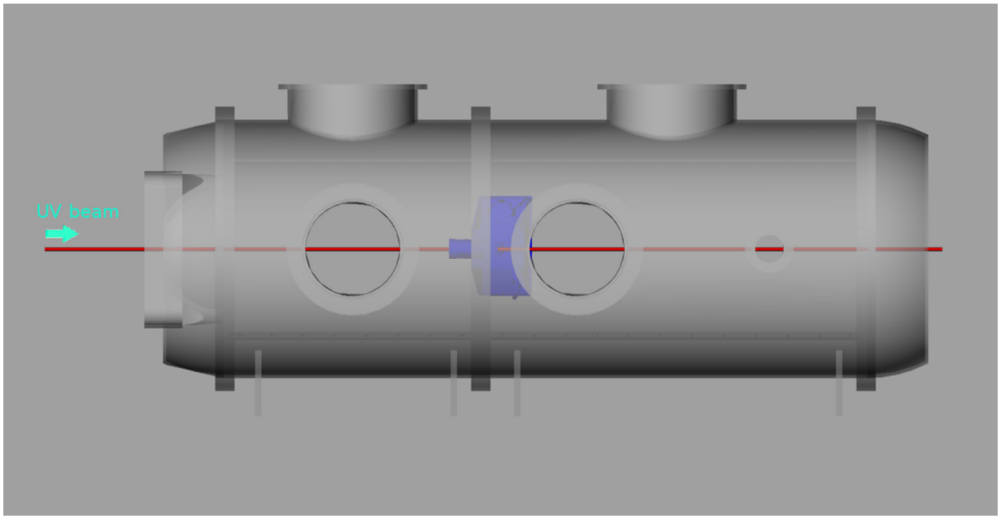


Figura 4.7 – *Vista laterale del tank e del fascio UV.*

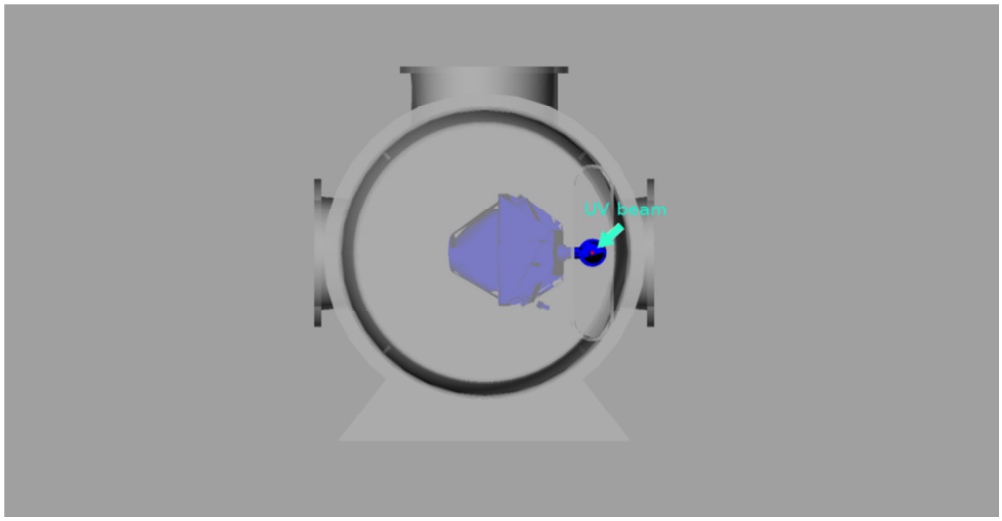


Figura 4.8 – *Vista frontale del tank e del fascio UV.*

La seconda fase di preparazione della facility ha previsto la sua messa in funzione, effettuando le necessarie operazioni di manutenzione sul tank e sul sistema di pompaggio, per renderla adatta ad ospitare lo strumento.

Il tank ha subito una traslazione orizzontale per favorire il collegamento alla clean room, sono stati sistemati gli o-ring di tenuta delle varie flange ed è stato avviato il sistema di pompaggio. Particolare cura è stata posta nei collegamenti dell'acqua per il raffreddamento e dell'aria compressa, in modo da ridurre al minimo la possibilità di malfunzionamenti dovuti a surriscaldamenti od a cattiva tenuta delle valvole. Un eventuale malfunzionamento di una valvola o la rottura di una pompa durante la fase di calibrazione potrebbe causare l'ingresso di aria e polvere nel tank, evento che rovinerebbe quasi certamente lo strumento. La manutenzione dell'intero sistema ha richiesto circa due mesi.

Quale ultima fase della messa in funzione della facility, è prevista un'accurata pulizia, in modo da ridurre al minimo la presenza di elementi contaminanti all'interno del tank. Questa attività andrà eseguita per ultima, prima di cominciare a lavorare direttamente dalla clean room. È necessario effettuare il più tardi possibile la pulizia interna del tank perché attualmente è ancora necessario operare su di esso dall'esterno della clean room, causando quindi l'inevitabile ingresso di polvere. Una volta effettuate tutte le regolazioni, sarà possibile ultimare la sua pulizia, avendo poi l'accortezza di non aprire il portello esterno e le flange, se non in casi eccezionali. Tutte le operazioni di lavoro e manutenzione al suo interno dovranno essere effettuate accedendo dalla clean room.

4.2 Schema e funzionamento dell'impianto da vuoto

Per completare la descrizione della facility di calibrazione, di seguito viene descritto il sistema da vuoto di cui è dotata. Per la sua descrizione si farà riferimento allo schema riportato in Figura 4.9.

Gli elementi che compongono l'impianto sono i seguenti:

- pompa rotativa (MP),
- pompa a turbina (TB),
- pompa criogenica (CR),
- valvole (da V3 a V9),
- valvole del tipo "a cassetto" (V1 e V2),
- vacuometri tipo "Pirani" (A1 e A2),
- vacuometro tipo "Penning" (B).

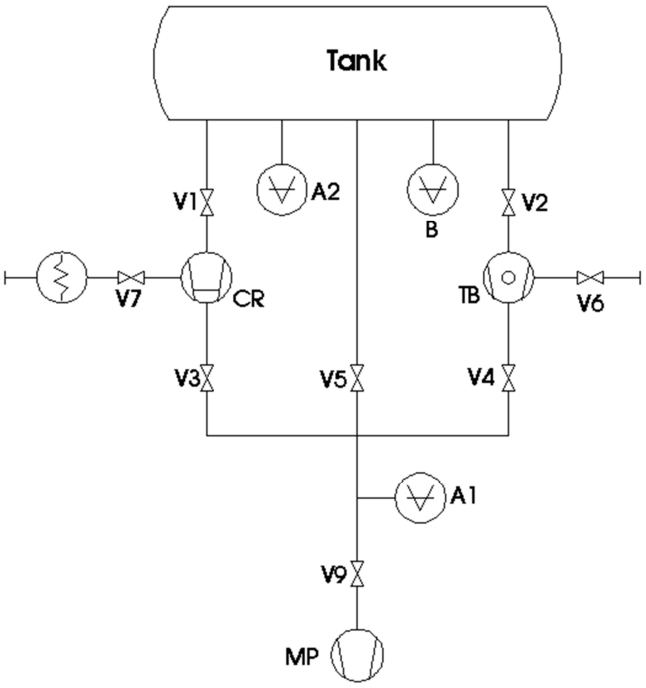


Figura 4.9 – *Schema del sistema da vuoto.*

Tutte le valvole sono controllare elettricamente tramite un quadro di controllo ed azionate meccanicamente tramite aria compressa e da apposite elettrovalvole. L'intero sistema è gestito da un pannello di controllo che permette di comandare ogni elemento e nel contempo di

monitorare i livelli di pressione tramite i sensori A1, A2 e B. Una foto reale del pannello di controllo è riportata in Figura 4.10.

Figura 4.10 – *Foto del pannello di controllo del sistema da vuoto.*

Sono visibili da sinistra in alto, l'indicatore di temperatura della pompa criogenica ed il display per il monitoraggio dei livelli di pressione. Al centro i pulsanti di accensione e quello per effettuare la rigenerazione della pompa criogenica, i pulsanti di controllo, il pulsante di emergenza e la chiave per l'inserimento delle protezioni di funzionamento. Queste protezioni vengono descritte più avanti in questo stesso paragrafo.

Infine, nella parte bassa del pannello, è visibile il comando della turbina con i pulsanti di avvio e spegnimento ed i led indicanti la fase di accelerazione, regime e decelerazione, oltre al contatore del tempo di lavoro complessivo.

Nelle Figure 4.11 e 4.12 sono riportate le foto dei due tipi di valvola presenti nel sistema.

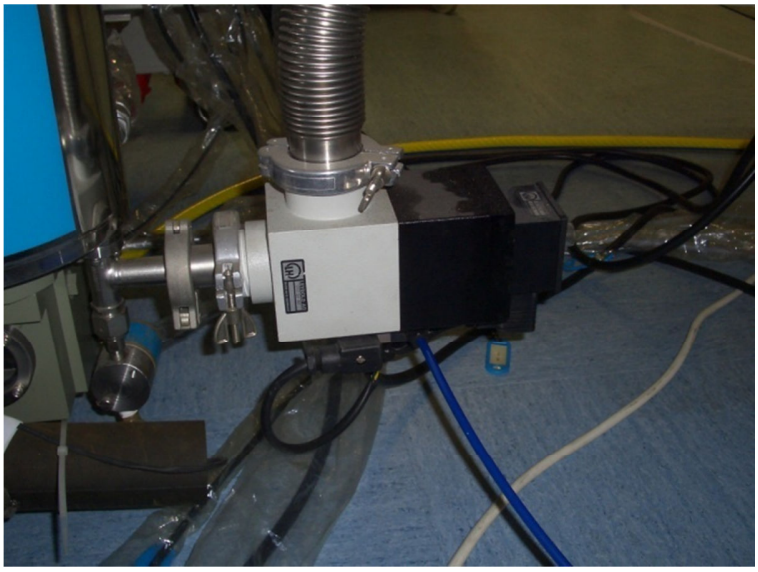


Figura 4.11 – *Foto di una delle valvole.*

Figura 4.12 – *Foto di una delle valvole a cassetto.*

Poiché si tratta di un impianto da vuoto abbastanza semplice, esso richiede alcuni accorgimenti per il suo corretto utilizzo. La sequenza di avviamento è da considerarsi una fase delicata, che deve avvenire seguendo passaggi ben precisi, per evitare danni al sistema e

soprattutto evitare problemi alle apparecchiature che si trovano all'interno del tank. Di seguito è riportata la descrizione della procedura di avvio.

a) Come prima operazione, mantenendo chiuse le valvole V3, V4 e V5, si avvia la pompa rotativa MP che ha la funzione di creare un prevuoto nei condotti a valle della turbina e della pompa criogenica. Raggiunto un livello di vuoto sufficientemente basso (dell'ordine di $10^{-2} \div 10^{-3}$ mbar, limite della pompa) è possibile aprire la valvola V5 in modo da creare il prevuoto anche all'interno del tank. Durante questa operazione le pompe TB e CR rimangono isolate dal resto del circuito perché le valvole V1, V2, V3 e V4 rimangono chiuse.
b) Un volta stabilizzato il livello di vuoto all'interno del tank è possibile chiudere nuovamente la valvola V5 in modo da isolarlo dal resto del circuito. A questo punto si possono aprire le valvole V3 e V4 per portare le pompe TB e CR allo stesso livello di pressione del resto dell'impianto. Una volta stabilizzata la pressione, la valvola V3 va nuovamente chiusa per isolare la criogenica. A questo punto, è possibile accendere la criogenica.
c) Un volta raggiunto il livello massimo di vuoto della rotativa ed isolata la criogenica, sarà possibile avviare la turbo e la criogenica. Poiché il tempo necessario alla criogenica per raggiungere la temperatura operativa di 10°K è di circa 2 ore, conviene avviare la pompa in contemporanea alla turbina, in modo che sia già pronta una volta che il livello di vuoto nel tank si è stabilizzato. Tramite l'indicatore di temperatura posto sul pannello di controllo viene monitorata la temperatura della pompa criogenica.
d) Quando che la turbina sarà a regime, sarà possibile aprire la valvola V2 per pompare il tank. Questa fase di pompaggio permette di raggiungere un livello di pressione in scala 10^{-5} mbar.
e) Quando la criogenica sarà a regime ed il livello di vuoto all'interno del tank si sarà stabilizzato sotto l'effetto della turbina, sarà possibile isolare nuovamente quest'ultima tramite la chiusura della valvola V2, ed aprire la valvola a cassetto V1, in modo da pompare il tank tramite la sola criogenica. Una volta avviata la criogenica, la turbina può essere spenta. Durante la fase di spegnimento della turbina, si dovrà mantenere accesa la pompa rotativa, per mantenerla in vuoto.

A questo punto, seguirà poi una (più o meno lunga) fase di pompaggio, per completare il degassamento dell'intero sistema e raggiungere un livello di pressione dell'ordine dei 10^{-6} mbar.

In precedenza si è accennato ad alcune protezioni di cui è dotato l'impianto da vuoto. Di seguito è riportata la loro breve descrizione. Come detto, si tratta di un impianto relativamente semplice, dotato di sistemi di protezione semplici. Questo concetto deve essere ben chiaro all'utilizzatore del sistema perché una manovra errata durante il suo utilizzo può causare gravi danni all'impianto stesso o, fatto ancora peggiore, alle apparecchiature interne al tank.

Le protezioni automatiche di cui è dotato il sistema sono due. Una riguarda le valvole (solo quelle normali e non quelle a cassetto). Queste infatti sono azionate ad aria compressa e sono del tipo "normale – chiuso". Ciò significa che, in assenza di un comando elettrico, le valve rimangono chiuse. Questo tipo di modalità operativa fa in modo che, nel caso in cui dovesse verificarsi un'anomalia nell'impianto di controllo o nell'impianto dell'aria compressa, le valvole si portino in automatico in posizione di chiusura, mantenendo l'impianto in vuoto ed impedendo quindi l'accesso di aria e polvere al suo interno.

Un secondo tipo di protezione è implementato elettricamente nel pannello di controllo. Esso impedisce di azionare le valvole secondo una sequenza errata. Ad esempio, quando la differenza di pressione tra le due facce delle valvole a cassetto è superiore ad un certo ΔP (la pressione interna al tank deve essere di 10^{-3} mbar). Questo perché un'eccessiva differenza di pressione può causare il grippaggio della valvola, rovinandola e rendendola di fatto inutilizzabile. Un altro esempio di operazione non consentita è quella di mantenere aperte contemporaneamente le valvole V4 e V5. Questo per evitare che la maggior forza aspirante della turbina rispetto alla rotativa risucchi aria all'interno del tank attraverso la rotativa stessa. Questo secondo tipo di protezione va inserita manualmente tramite la chiave posta sulla parte frontale del pannello. La chiave può essere ruotata in due posizioni, descritte brevemente di seguito:

- la chiave in posizione "Sicurezze attive" indica che le sicurezze sono attivate e che non è possibile effettuare certe operazioni sull'impianto (alcuni comandi delle valvole sono disabilitati in determinate situazioni),
- la chiave in posizione "0" indica che le sicurezze non sono attive e che quindi è possibile compiere qualunque operazione, incluse quelle potenzialmente pericolose per l'impianto e che possono causare danni.

Conviene sottolineare il fatto che durante le operazione di calibrazione, è <u>obbligatorio</u> operare con le sicurezze attive.

Per completare la descrizione dell'impianto da vuoto, vengono descritti brevemente i vacuometri impiegati nel sistema [10]. Essi sono di due tipi: Pirani e Penning. Di seguito è riportato un riassunto delle loro caratteristiche principali. Per una descrizione più dettagliata, si rimanda alla letteratura.

Il vacuometro tipo Pirani fa parte della categoria di vacuometri del tipo a conducibilità termica. Questi vacuometri sfruttano la relazione esistente tra pressione e conducibilità termica di un gas al di sotto di un certo livello di pressione. Per un vacuometro tipo Pirani il principio di funzionamento è il seguente: un filamento di metallo ad elevato coefficiente di temperatura è immerso in un involucro cilindrico collegato al sistema da vuoto. Se questo filamento viene riscaldato tramite una corrente elettrica, la temperatura a cui si porterà (e quindi la sua resistenza elettrica) dipenderà dalla velocità con cui il calore viene dissipato dal gas in cui è immerso. Per basse pressioni, la quantità di calore dissipata dipende dalla pressione se il libero cammino medio delle molecole di gas è dello stesso ordine di grandezza (o maggiore) della dimensione dell'involucro.

Se il filamento è inserito in un ramo di un ponte di Wheatstone, la variazione di resistenza (di pressione del gas) porta ad uno sbilanciamento del ponte e tale sbilanciamento può essere misurato con un galvanometro.

Vi sono tre diversi modi di funzionamento possibili:

- a temperatura costante,
- a corrente costante,
- a tensione costante.

Uno schema di un vacuometro tipo Pirani e di un ponte di Wheatstone sono riportati i Figura 4.13.

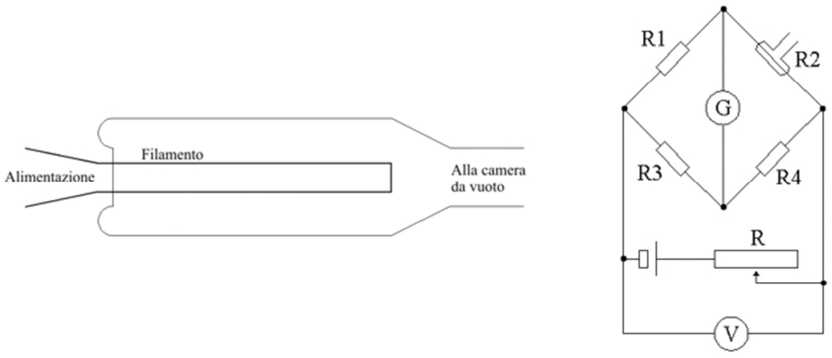


Figura 4.13 – *Schema del vacuometro e del ponte di Wheatstone.*

Il secondo tipo di vacuometro è il vacuometro Penning. Fa parte dei cosiddetti vacuometri a catodo freddo nei quali si causa la ionizzazione del gas tramite una scarica elettrica, in presenza di un opportuno campo magnetico che ha la funzione di allungare il cammino degli elettroni prima che essi cadano sull'anodo, aumentando così la probabilità complessiva di

ionizzazione. In questo caso, la scarica non è ottenuta per effetto termoionico ma direttamente dagli elettroni presenti nel gas, per effetto delle radiazioni naturali o emessi dal catodo per effetto di campi elettrici elevati, specialmente in prossimità dei suoi bordi. La misura della corrente (e quindi della quantità di ioni) permette di misurare la pressione del gas.

4.3 Punti critici per il completamento della facility

Tutta l'attività svolta sulla facility, per la sua definizione e messa a punto, ha permesso di individuare vari punti importanti per il suo completamento. Durante lo studio sono emerse delle carenze di informazioni e di progetto o delle criticità, non previste o non ancora specificate nella documentazione tecnica dell'ESA. Ad esempio, per quanto riguarda la facility nel suo complesso, sono emersi i seguenti punti critici:

Protezioni di PHEBUS

Il sistema da vuoto che verrà utilizzato per la calibrazione è dotato di alcune protezioni automatiche, necessarie per evitare problemi all'impianto e soprattutto alla strumentazione che si trova al suo interno in caso di system failure. Queste protezioni sono state descritte in questa capitolo. Tuttavia, le protezioni operano sull'impianto e non sui dispositivi che si trovano al suo interno. Questo significa che dovranno essere fornite delle protezioni adatte ai dispositivi che verranno utilizzati nella calibrazione, che li proteggano ad esempio da sbalzi di tensione o blackout. Quindi, nel caso specifico di PHEBUS, saranno ad esempio necessari un alimentatore ed un gruppo di continuità costruiti appositamente.

Dimensioni delle breadboard e del modello finale

Per alloggiare PHEBUS e tutti i suoi modelli di pre-produzione all'interno del tank sarà necessario costruire un supporto meccanico. Attualmente, non sono note le dimensioni delle breadboard e quindi non è possibile progettare e costruire tale supporto.

Interfacce elettriche ed elettroniche

Per poter effettuare la calibrazione sarà necessario interfacciare lo strumento con l'ambiente esterno al tank, per fornire la necessaria alimentazione, effettuare le letture dei dati e controllare PHEBUS. Attualmente non sono a noi note le specifiche dell'alimentazione e dei bus di controllo, ma in base a quanto emerso dal secondo "PHEBUS calibration meeting", sarà

possibile utilizzare le interfacce presenti attualmente sul tank per collegare lo strumento. Saranno i colleghi francesi a fornirci i connettori adatti ad utilizzare le nostre interfacce.

Finestra di MgF_2 del rivelatore EUV

Come riportato nel Capitolo 1, il rivelatore EUV è protetto durante le operazioni a Terra da una finestra mobile di MgF_2. Tale finestra è del tipo one-shot ed attualmente non esiste un meccanismo che permetta di richiuderla, una volta aperta. Tuttavia, per calibrare correttamente l'EUV sarà necessario poter aprire tale finestra. In base a quanto emerso dal secondo "PHEBUS calibration meeting" è allo studio un sistema meccanico che permetta di richiudere tale finestra una volta terminare le operazioni di calibrazione, sempre operando in vuoto. Questo sistema attualmente è TBD.

Posizioni di calibrazione

PHEBUS, una volta intorno a Mercurio, si troverà ad operare in condizioni di assetto molto diverse tra loro. In particolare, il suo assetto varierà continuamente e velocemente. La calibrazione dovrebbe tenere conto, almeno in parte, di questa realtà operativa, perché la diversa orientazione del baffle rispetto al piano dello strumento potrebbe introdurre degli effetti di polarizzazione nella radiazione incidente, che probabilmente influenzerebbero la misura. Per questo, si prevede di testare lo strumento in due posizioni differenti: con baffle ortogonale al piano dello strumento e con baffle ad esso parallelo. Per fare questo, si dovrà poter ruotare PHEBUS una volta alloggiato all'interno del tank. L'interfaccia meccanica di sostegno dovrà quindi poter ruotare per permettere di simulare queste due differenti condizioni operative. Purtroppo non sono ancora note con precisione le caratteristiche meccaniche dello strumento e quindi non è ancora iniziato il progetto del supporto.

Capitolo 5 – Il sistema spettrometrico: intervallo 55÷155 nm

Per effettuare la calibrazione di PHEBUS è necessario disporre, oltre all'ambiente adatto, di una sorgente di raggi UV che permetta di selezionare la lunghezza d'onda di interesse, in modo da simulare con precisione le condizioni operative di interesse, per rilevare la risposta dello strumento alle varie lunghezze d'onda.

Allo scopo di riprodurre l'impiego di PHEBUS a bordo della sonda spaziale, la sorgente UV deve produrre un fascio collimato, che simuli una sorgente posta all'infinito. Vista la distanza a cui opererà PHEBUS dalla superficie di Mercurio si tratta di una approssimazione valida.

La sorgente UV che si intende impiegare nell'intervallo 55÷155 nm sarà costituita da una lampada Hollow Cathode, che costituisce la sorgente vera e propria, da un monocromatore che permette di selezionare la lunghezza d'onda desiderata e da un collimatore, necessario per ottenere un fascio collimato delle dimensione voluta.

A causa del range di frequenze abbastanza ampio che lo strumento dovrà coprire, risulta necessario definire due intervalli di calibrazione, che corrispondono agli intervalli di lavoro dei due rivelatori EUV ed FUV. Considerando i due range distinti, sono state individuate due lampade differenti quali sorgenti UV: una lampada Hollow Cathode e una lampada al Deuterio. Tramite queste lampade è possibile coprire entrambi gli spettri. Inoltre, grazie alla Hollow Cathode, si ha la possibilità di scendere fino a 30 nm e ciò consentirà di testare il rivelatore EUV sfruttando il secondo ordine, come previsto dal progetto di PHEBUS. In questo capitolo è riportata l'analisi dell'intervallo 55÷155 nm e del sistema che si intende utilizzare come sorgente UV in tale range. L'intervallo 145÷315 nm è analizzato nel Capitolo 6.

5.1 Calibrazione nell'intervallo 55÷155 nm

Per stabilire se il sistema che si intende utilizzare ha le caratteristiche necessarie per la calibrazione di PHEBUS è stata effettuata una sua analisi dal punto di vista ottico, considerando in particolare il suo rendimento in termini di intensità del fascio prodotto.

Per la calibrazione dello spettrometro EUV di PHEBUS (lunghezze d'onda inferiori a 155 nm) si pensa di utilizzare una sorgente di tipo Hollow Cathode, ed in particolare per questa analisi è stato considerato il modello 629 di McPherson.

Tale modello è costruito per adattarsi direttamente al monocromatore analizzato più avanti, altro elemento fondamentale per la costruzione della sorgente UV. In particolare, il modello qui considerato è il 234/302, sempre prodotto da McPherson.

Nella prima fase di analisi è stata valutata l'altezza delle righe spettrali ottenute sulla fenditura d'uscita del monocromatore, per poter stimare il flusso in uscita al sistema rispetto a quello di ingresso. Per fare questo è stato creato un modello ZEMAX® per il ray-tracing, sulla base delle caratteristiche meccaniche e ottiche del monocromatore.

Il costruttore fornisce lo spettro di emissione della sorgente Hollow Cathode alimentata con He – Ne, in uscita al monocromatore. Lo spettro è riportato in Figura 5.1 ed è fornito in conteggi al secondo. Sulla base di questo spettro è stata effettuata una stima del conteggio di fotoni in uscita al sistema complessivo e disponibili per la calibrazione di PHEBUS. I risultati ottenuti sono presentati di seguito.

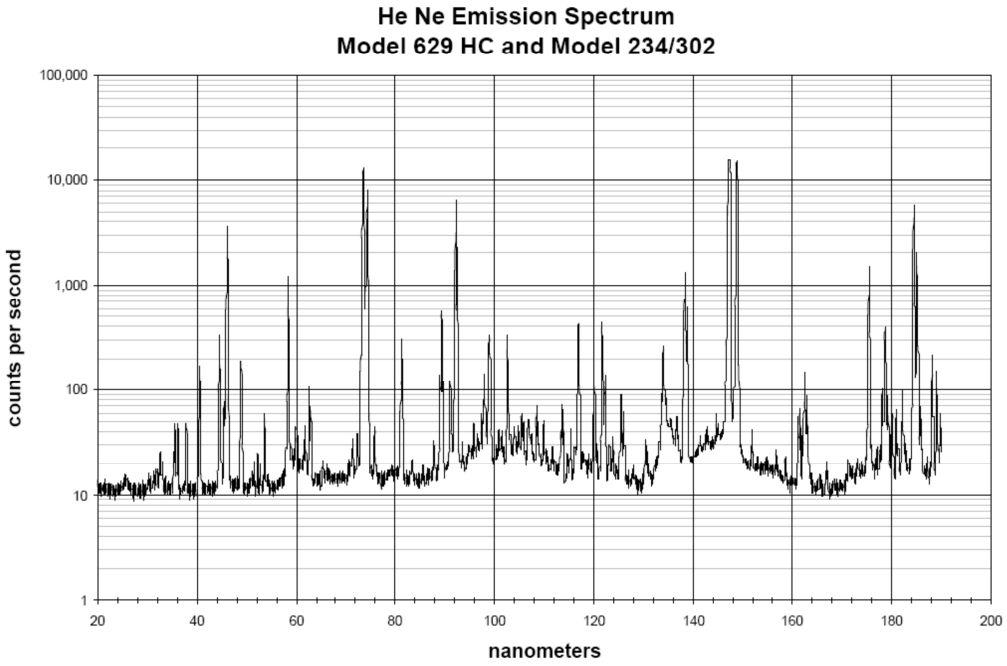


Figura 5.1 – *Spettro di emissione in uscita al monocromatore.*

McPherson propone un suo sistema completo, in grado di operare a frequenze maggiori di 105 nm, costituito da una sorgente al Deuterio, uno specchio ottimizzatore, un monocromatore ed un collimatore. Per il nostro scopo, tale sistema non permette di coprire il range di frequenze di interesse. Tuttavia è possibile adattarlo per renderlo in grado di operare nel range 55÷155 nm.

In particolare, in questa analisi il sistema proposto da McPherson e riportato in Figura 5.2 è stato modificato, togliendo il collimatore e lo specchio ottimizzatore e sostituendo la lampada al Deuterio con una Hollow Cathode.

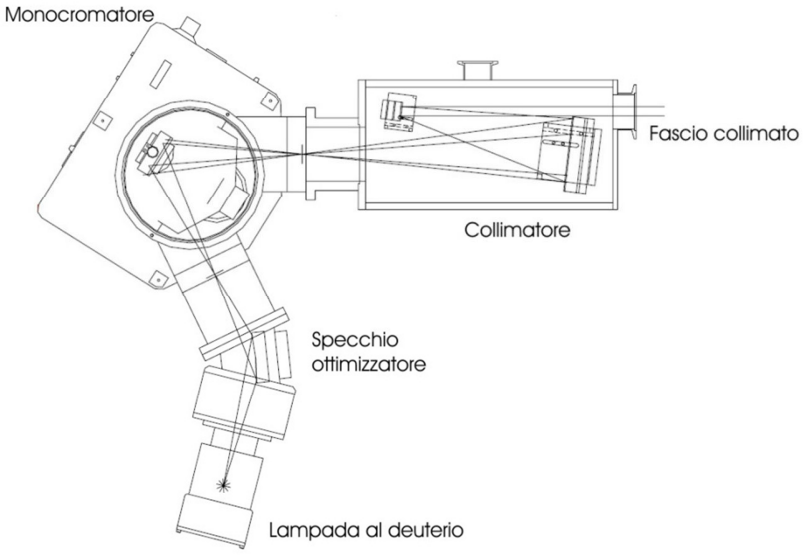


Figura 5.2 – *Schema meccanico della sorgente UV proposto da McPherson.*

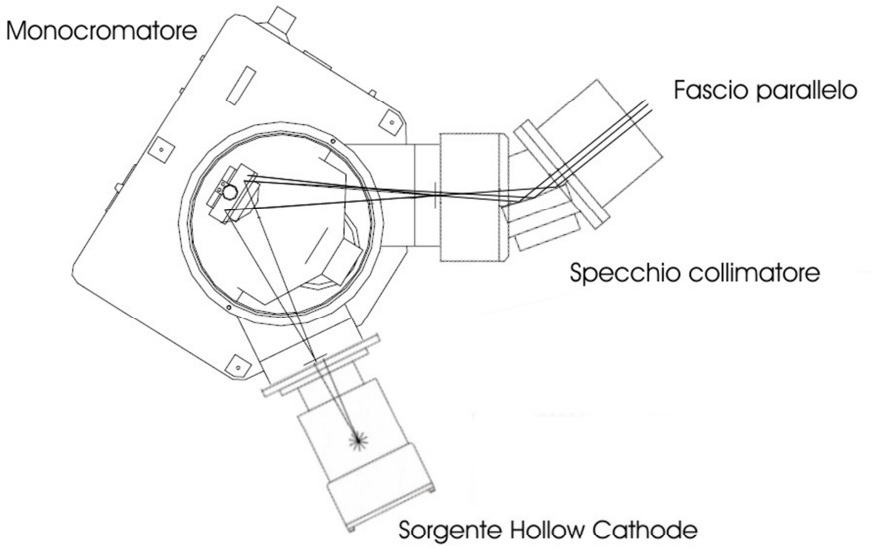


Figura 5.3 – *Schema meccanico della sorgente UV che verrà utilizzata nel range 55÷155 nm.*

In Figura 5.3 è riportato invece lo schema del sistema modificato. Per la collimazione, si intende utilizzare un singolo specchio, a differenza di quanto proposto da McPherson, in quanto il loro collimatore non funziona nel campo dell'EUV a causa dell'elevato assorbimento della radiazione UV. Per questo è necessario operare con una sola riflessione, in modo da evitare di ridurre ulteriormente il già esiguo numero di fotoni disponibili.

Per questo è necessario utilizzare un sistema di collimazione differente, più efficiente in termini di riflettanza. A tale scopo si pensa di utilizzare un singolo specchio che lavori in incidenza radente, come appunto indicato in Figura 5.3.

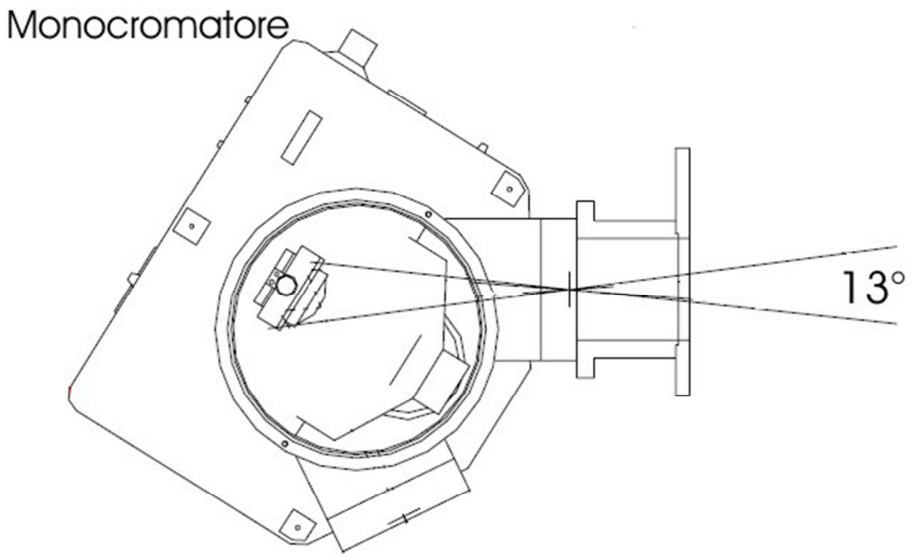


Figura 5.4 – *Fascio d'uscita: stima dell'apertura.*

Per quanto riguarda il monocromatore, sarà necessario sostituire il reticolo standard (caratterizzato da un coating di Al-MgF_2) con uno in Platino, per poter lavorare nel campo dell'EUV.

In questa analisi sono state effettuate semplici considerazioni geometriche, che hanno permesso di ottenere una stima delle dimensioni e del rendimento dello specchio necessari per raccogliere tutta la radiazione uscente dal monocromatore, considerando un angolo di incidenza di 80°. Si sono stimate le dimensioni dello specchio collimatore per avere un'idea del suo ingombro e del diametro del fascio collimato.

Dal disegno CAD del sistema suggerito da McPherson e riportato nel datasheet del monocromatore 232/304 (riportato per comodità in Allegato A), è stato stimato l'angolo di apertura del fascio luminoso di uscita. Tale angolo è risultato di circa 13° (13,52° nei calcoli seguenti). L'angolo considerato è rappresentato in Figura 5.4.

Nel paragrafo seguente sono riportati i calcoli per la stima delle dimensioni dello specchio e del fascio collimato.

5.2 Stima delle dimensioni dello specchio e del fascio collimato per α = 80°

In questa analisi, in riferimento alla Figura 5.5, le dimensioni di interesse risultano essere:

- il segmento BC quale stima delle dimensioni dello specchio e in quanto dimensione minima necessaria per raccogliere tutto il fascio d'uscita,
- il segmento OA quale distanza del centro dello specchio dalla fenditura d'uscita,
- il segmento CD quale stima delle dimensioni del diametro del fascio collimato.

Per comodità di trattazione, lo specchio è considerato piano, anche se nella realtà si tratterà di uno specchio parabolico o di altro tipo. Si tenga presente che la seguente trattazione ha lo scopo di descrivere quantitativamente lo specchio e non ha la pretesa di fornirne specifico progetto.

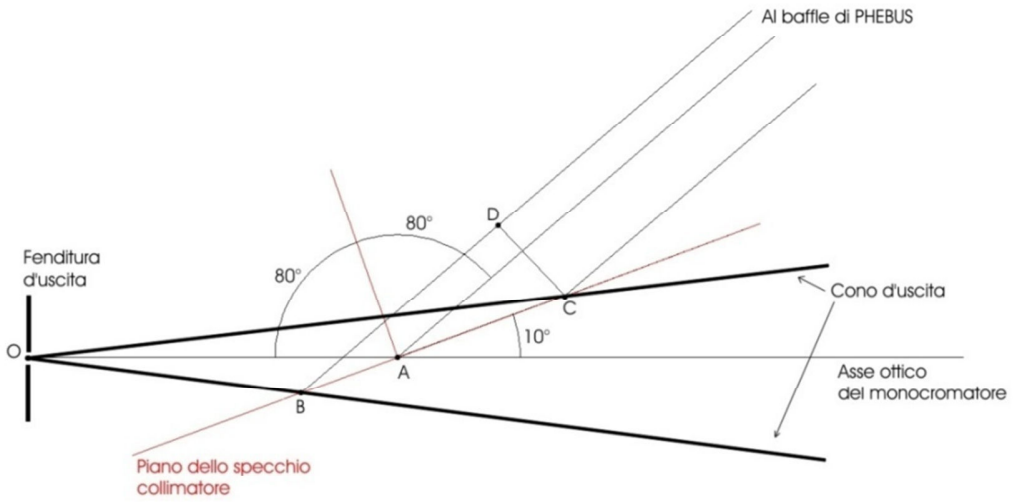


Figura 5.5 – *Geometria del fascio di uscita, vista dall'alto. La fenditura d'uscita del monocromatore è perpendicolare al piano del foglio.*

Di seguito, sono riportati i calcoli utilizzati nella stima della lunghezza BC. In base allo schema rappresentato in Figura 5.5, per calcolare le lunghezze dei segmenti BC e CD è necessario trovare le coordinate dei punti B e C. Prendendo il punto O come origine del nostro sistema di riferimento, le rette che interessano per il calcolo sono: la retta BC, la retta OC e la retta OB. Le equazioni di tali rette sono:

$$BC: y = (\tan 10°)x + q_1 \quad (5.1)$$

$$OC: y = (\tan 6{,}76°)x + q_2 \quad (5.2)$$

$$OB: y = -(\tan 6{,}76°)x + q_3 \quad (5.3)$$

Il valore di q_1 varia in base al valore di OA mentre q_2 e q_3 sono nulli perché le due rette passano per l'origine del sistema di riferimento. Sono state analizzate due configurazioni, fissando a priori la distanza OA, punto dello specchio che giace sull'asse ottico del monocromatore. In particolare i calcoli sono stati effettuati per OA = 50 mm e per OA = 100 mm. Nei Sottoparagrafi seguenti sono riportati i calcoli ed i valori ottenuti.

5.2.1 Configurazione 1 – OA = 50 mm

Fissata la distanza OA = 50 mm, l'equazione (5.1) della retta BC diventa:

$$BC: y = 0{,}176x - 8{,}81 \quad (5.4)$$

Risolvendo i due sistemi costituiti dall'equazione (5.4) della retta BC e dalle equazioni delle rette OB e OC (5.2) e (5.3) si ottengono rispettivamente le coordinate dei punti B e C. In particolare:

$$B = (29{,}88\,;\, -3{,}54) \quad (5.5)$$

$$C = (152{,}44\,;\, 18{,}06) \quad (5.6)$$

A questo punto è immediato calcolare la lunghezza BC:

$$BC = \sqrt{(152{,}44 - 29{,}88)^2 - (18{,}06 - (3{,}54))^2} = 120{,}64\ mm \quad (5.7)$$

La lunghezza di CD si calcola invece come:

$$CD = BC \sin C\hat{B}D \cong 20{,}95\ mm \quad (5.8)$$

dove $C\hat{B}D = 10°$.

Quindi, ipotizzando di collocare lo specchio ad una distanza di 50 mm dalla fenditura, tale specchio, per riuscire a catturare tutto il fascio di uscita, dovrà avere un diametro di circa 120 mm ed il fascio collimato avrà un diametro di circa 21 mm.

5.2.2 Configurazione 2 – OA = 100 mm

Fissata la distanza OA = 100 mm, l'equazione (5.1) della retta BC diviene:

$$BC: y = 0{,}176x - 17{,}63 \tag{5.9}$$

Risolvendo i due sistemi costituiti dall'equazione (5.9) della retta BC e dalle equazioni delle rette OB e OC (5.2) e (5.3) si ottengono rispettivamente le coordinate dei punti B e C. In particolare:

$$B = (59{,}79\,;\ -7{,}09) \tag{5.10}$$

$$C = (305{,}06\,;36{,}16) \tag{5.11}$$

A questo punto è immediato calcolare la lunghezza BC:

$$BC = \sqrt{(305{,}06 - 59{,}79)^2 - (36{,}16 - (-7{,}09))^2} = 241{,}43\ mm \tag{5.12}$$

La lunghezza di CD si calcola invece come:

$$CD = BC \sin C\hat{B}D \cong 41{,}92mm \tag{5.13}$$

dove $C\hat{B}D = 10°$.

Quindi, collocando lo specchio ad una distanza doppia rispetto a quella calcolata nel punto precedente, il diametro dello specchio dovrà essere in questo caso di circa 241 mm mentre il diametro del fascio collimato sarà di circa 42 mm. Si osserva che le dimensioni dello specchio cominciano a diventare importanti, introducendo tutta una serie di problemi legati alla sua eventuale realizzazione e al suo posizionamento. Ciò nonostante, di seguito viene presentato un possibile disegno dello specchio collimatore, ipotizzando di costruire uno specchio parabolico. Viene quindi tolta l'approssimazione di specchio piano. Viene valutato uno specchio parabolico perché la parabola ha la proprietà di focalizzare un fascio parallelo (sorgente all'infinito) in un punto e, precisamente, nel suo fuoco.

È quindi possibile utilizzare uno specchio parabolico per collimare la radiazione uscente dal monocromatore, utilizzando però il cammino ottico inverso: la fenditura di uscita del monocromatore costituisce il punto sorgente, posto nel fuoco della parabola, che viene proiettato all'infinito come fascio parallelo. Lo schema riportato in Figura 5.6 rappresenta la geometria del sistema ottico in esame. Si osserva che la fenditura di uscita del monocromatore è posta nel fuoco della parabola.

Ipotizzando di posizionare lo specchio a una distanza D = 100 mm dalla fenditura di uscita (come nella Configurazione 2) e considerando i parametri ricavati nel Sottoparagrafo 5.2.2, è possibile dimensionare la parabola. Si ottengono i valori seguenti:

$$f = \frac{D}{2}(1 + \cos\alpha) = 1{,}508\ mm \tag{5.14}$$

$$a = D\cos(D - 90°) = 34{,}2\ mm \quad (5.15)$$

$$b = D\sin(D - 90°) = 98{,}64\ mm \quad (5.16)$$

dove

- f è la focale della parabola
- a è la distanza del centro dello specchio dall'asse della parabola lungo l'asse x
- b è la distanza del centro dello specchio dall'asse y
- D è la distanza del centro dello specchio dalla fenditura di uscita, fissata a 100 mm
- α è l'angolo sotteso tra il raggio incidente e quello riflesso che, per costruzione dello specchio è pari a: $\alpha = 2 \times 80° = 160°$.

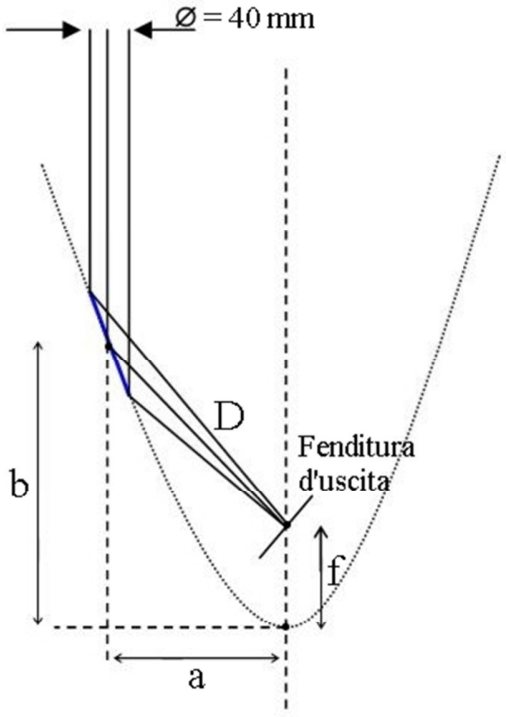


Figura 5.6 – *Schema geometrico dello specchio parabolico collimatore.*

In base ai dati ottenuti con i calcoli precedenti, è stato creato un modello ZEMAX® della parabola, per verificarne il funzionamento. Lo schema geometrico del modello è riportato in Figura 5.6. Come si può osservare, una sorgente puntiforme posta nel fuoco della parabola (ad esempio la fenditura d'uscita del monocromatore) viene riflessa dalla parabola in un fascio collimato. In particolare, in questo caso, è stato disegnato uno specchio che permetta di raccogliere tutta la radiazione uscente del monocromatore e la collimi in un fascio largo circa 42

mm, come stimato nel Sottoparagrafo 5.2.2. Dalla simulazione è emerso che il diametro dello specchio sul piano spettrale è di circa 240 mm, in perfetto accordo con quanto stimato geometricamente.

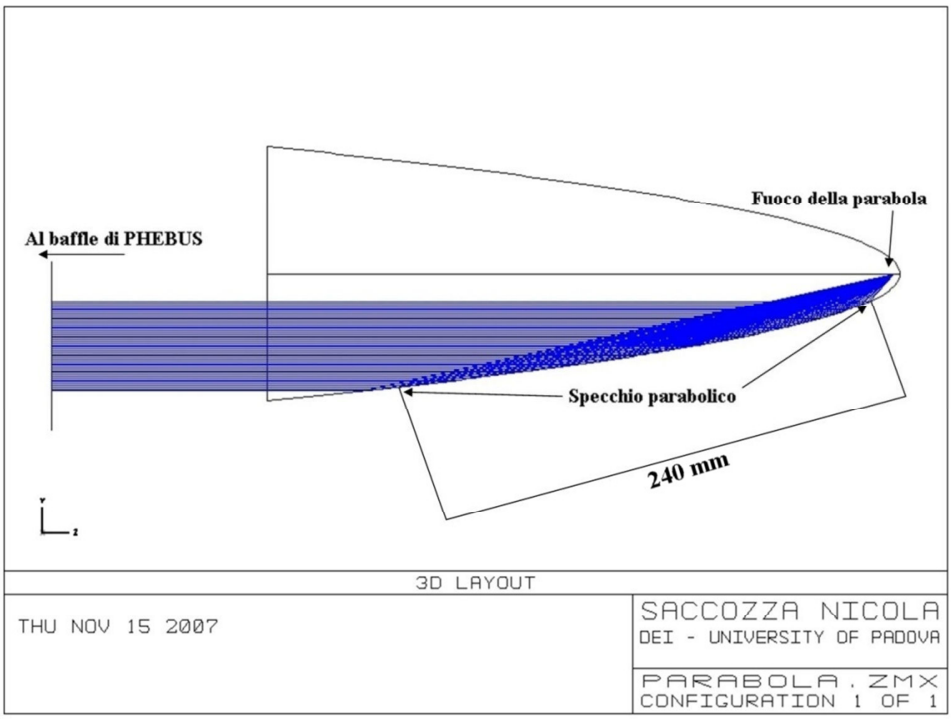


Figura 5.7 – *Modello ZEMAX® dello specchio parabolico.*

Questo tipo di analisi ha permesso di verificare quanto stimato geometricamente riguardo la dimensione dello specchio sul piano spettrale. Si è visto che il risultato ottenuto è in accordo con quanto calcolato. Per il calcolo della dimensione dello specchio sul piano spettrale sono stati impiegati i dati meccanici ed ottici forniti direttamente da McPherson ed è stato quindi possibile realizzare una stima più accurata. Per quanto riguarda l'altra dimensione, quella perpendicolare a tale piano, non è stato possibile effettuare una stima accurata, in quanto non si hanno dati precisi riguardanti la divergenza del fascio in uscita al monocromatore: tale divergenza infatti dipende fortemente dalla dimensione verticale della fenditura. Inoltre, poiché il modello del monocromatore presentato in questa analisi è solo un'approssimazione di quello reale, è naturale aspettarsi notevoli differenze rispetto ai valori stimati. Allo stesso modo, non ha senso effettuare una stima delle aberrazioni.

Tutti i dati stimati andranno ovviamente verificati sperimentalmente, una volta in possesso del sistema reale.

5.3 Stima delle dimensioni dello specchio per un angolo di incidenza di 83°

In base alle caratteristiche geometriche del fascio in uscita al monocromatore, si osserva che la massima inclinazione dello specchio collimatore che permette di catturare tutto il fascio è pari a

$$\alpha_{max} = 90° - 6{,}76 = 83{,}24° \qquad (5.17)$$

Oltre questa inclinazione, si perde parte del fascio, visto che la retta AB risulta più inclinata della retta OC: le due rette non si incrociano più a valle della fenditura d'uscita (semipiano delle *x* positive) ma si incrociano prima della fenditura (semipiano delle *x* negative). È immediato verificare, con calcoli simili a quelli sviluppati in precedenza, che per un angolo di incidenza di 83°, quindi vicino all'angolo limite, le dimensioni dello specchio aumentano in maniera considerevole: si arriva a un diametro dello specchio dell'ordine del metro. Si tratta ovviamente di uno specchio che, oltre ad essere di difficile fabbricazione, non è utilizzabile per i nostri scopi.

Pensando quindi di utilizzare uno specchio con caratteristiche simili a quelle stimate nella Configurazione 1, si ottiene un fascio collimato di dimensioni paragonabili a quelle del baffle di PHEBUS (che ha un diametro di 25,4 mm). È quindi possibile dimensionare lo specchio in modo da ottenere un fascio in grado di riempire tutta l'apertura d'entrata dello strumento. È possibile inoltre costruire uno specchio che permetta di ridurre ulteriormente le dimensioni del fascio. Nel Paragrafo seguente si procede alla stima del rendimento del collimatore.

5.4 Rendimento dello specchio collimatore

Oltre alle dimensioni dello specchio collimatore, un altro dato di interesse per questa analisi è la sua efficienza in riflessione. Visto che si cerca una stima delle caratteristiche del sistema, sono stati considerati tre specchi aventi coating differenti, senza tuttavia ricercare strutture particolari nella loro composizione, come ad esempio specchi multilayer. Una successiva analisi, più approfondita, andrà effettuata in fase di progetto dello specchio.

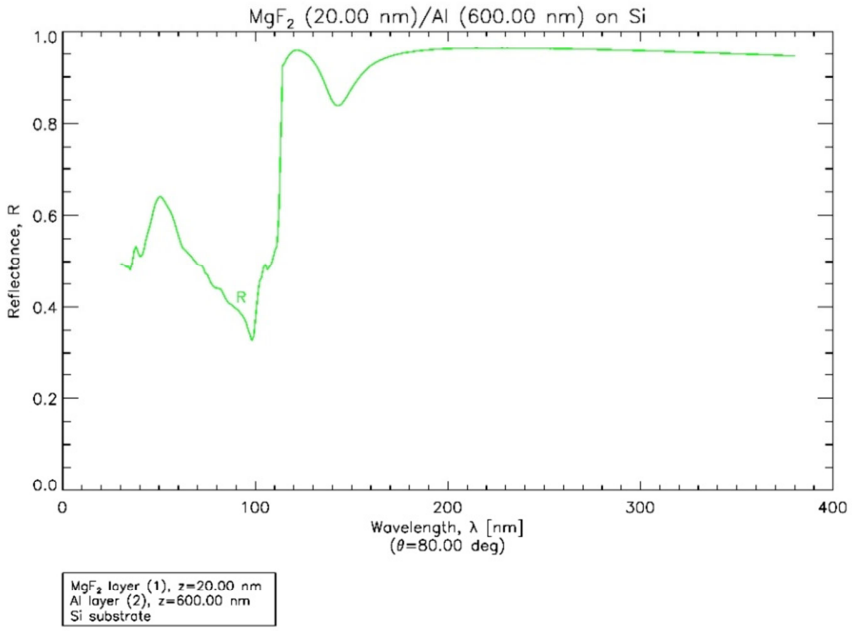


Figura 5.8 – *Curva di riflessione con coating in Al-MgF_2.*

In particolare in questa analisi sono stati considerati tre specchi caratterizzati da coating differenti: uno specchio con coating di alluminio con ricoprimento in fluoruro di magnesio, uno con coating di platino e un altro con coating d'oro, tutti su substrato di silicio. Lo spessore del coating è di 600 nm in tutti e tre gli specchi, con 20 nm di MgF_2 nel caso dello specchio con coating in alluminio. L'angolo di incidenza considerato nell'analisi è di 80°.

Sulla base di dati riportati, sono state simulate le curve di riflessione dei tre specchi. I risultati ottenuti sono riportati nelle Figure 5.8, 5.9 e 5.10. Per quanto riguarda lo specchio con coating in Al-MgF_2 (Figura 5.8), si osserva che al di sotto dei 105 nm, la percentuale di radiazione riflessa cala rapidamente da circa il 95% ad un valore compreso tra il 35% e il 65%, a seconda della lunghezza d'onda.

La riflettanza ha andamento irregolare e mediamente l'efficienza è bassa. Questo fenomeno era prevedibile perché, anche se lo specchio opera in incidenza radente, il MgF_2 tende ad assorbire le lunghezze d'onda superiori a 105 nm.

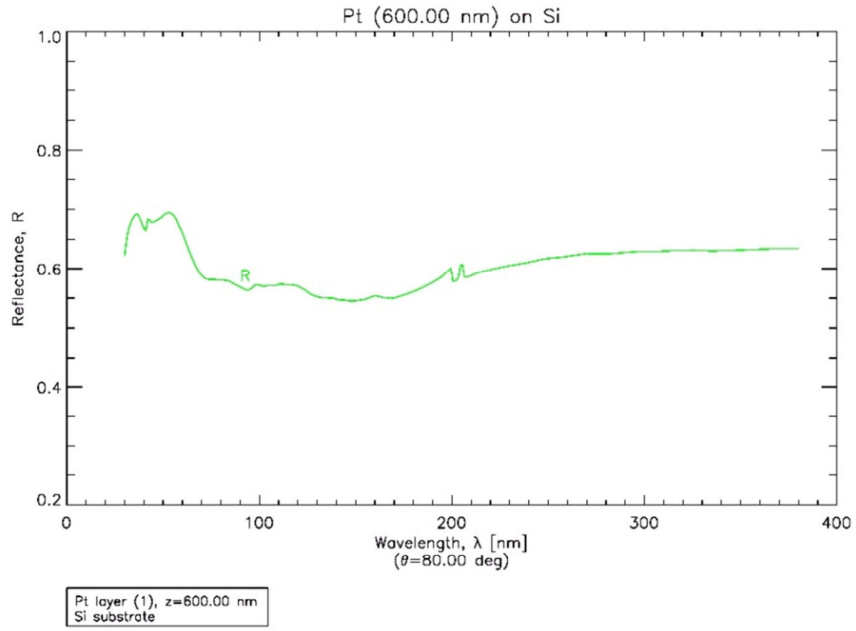


Figura 5.9 – *Curva di riflessione con coating in platino.*

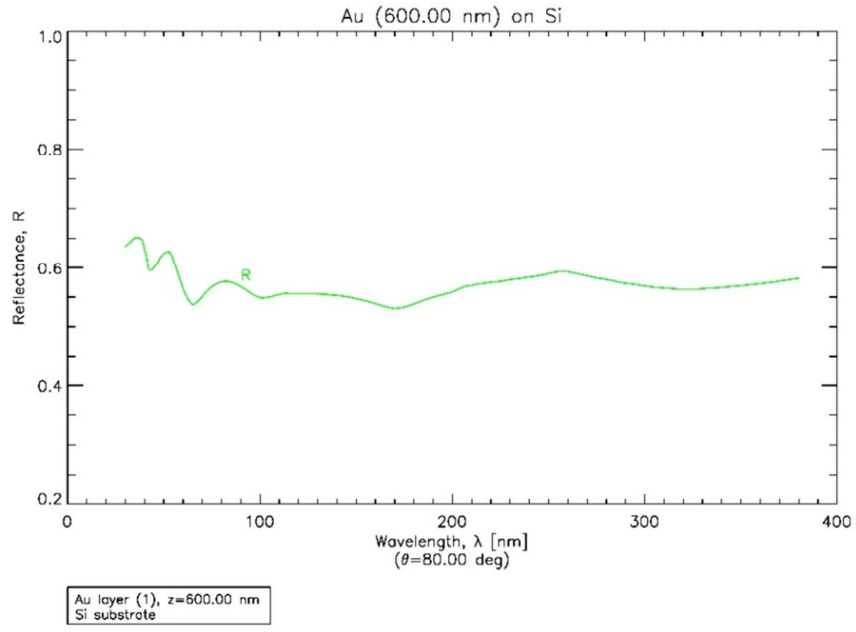


Figura 5.10 – *Curva di riflessione con coating in oro.*

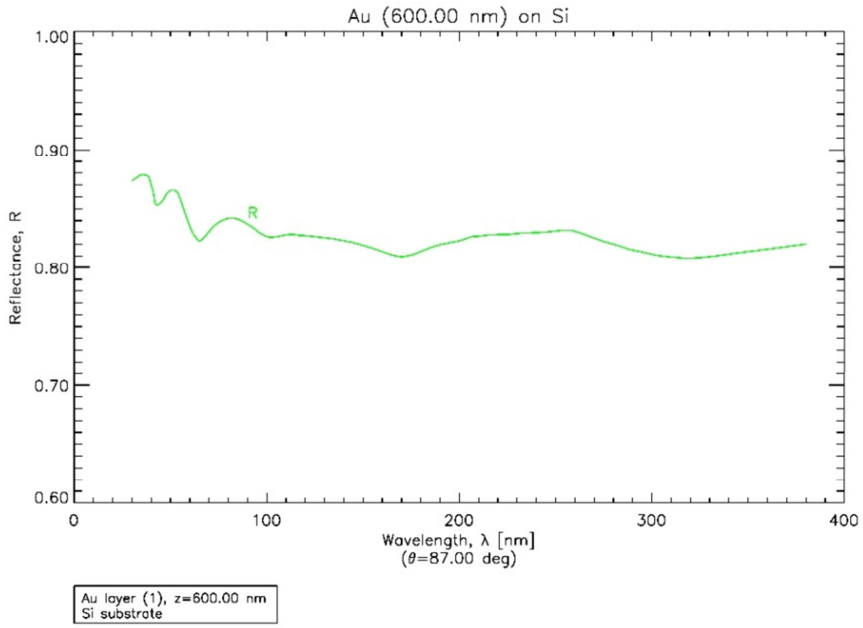


Figura 5.11 – *Curva di riflessione con coating in oro e θ=87°.*

Gli specchi con coating in oro o platino hanno invece prestazioni più costanti su tutto l'intervallo di lunghezze d'onda considerato, anche se la percentuale di radiazione riflessa non supera mai il 70% per il platino ed il 65% per l'oro. Questo fenomeno è da attribuire principalmente all'angolo di incidenza per il quale sono state calcolate le curve di riflessione: un angolo di incidenza maggiore avrebbe fornito una curva spostata verso percentuali maggiori. A titolo di esempio, in Figura 5.11 è riportata la curva di riflessione dello specchio con coating in oro, calcolata per un angolo di incidenza di 87°. Si osserva che la percentuale di radiazione riflessa varia tra l'80% ed il 90%.

Purtroppo, come risulta dall'analisi delle dimensioni dello specchio effettuata in precedenza, nel nostro caso non può essere utilizzato uno specchio che lavori con questo angolo di incidenza, pena la perdita di parte del fascio d'uscita del monocromatore (che di fatto annullerebbe il guadagno introdotto dalla maggiore efficienza in riflessione dello specchio).

Dallo spettro di emissione riportato in Figura 5.1, si osserva che in corrispondenza di alcune lunghezze d'onda (in particolare a circa 46, 74, 92, 147 e 150 nm), si ha un'emissione di fotoni in uscita al sistema lampada – monocromatore pari a circa 10˙000 fotoni al secondo.

Useremo queste lunghezze d'onda per valutare i flussi di fotoni a valle del collimatore. In particolare, nella Tabella 5.1 sono riportati i conteggi al secondo, a valle del collimatore, ottenuti moltiplicando il valore di 10˙000 per la riflettanza alla lunghezza d'onda di interesse.

	Conteggi al secondo a valle del collimatore (fotoni/sec.)		
λ [nm]	Al-MgF2	Au	Pt
46	5˙900	6˙050	6˙800
74	4˙720	5˙650	5˙810
92	3˙860	5˙640	5˙650
147	8˙560	5˙940	5˙450
150	8˙770	5˙470	5˙460

Tabella 5.1 – *Conteggi al secondo, a valle dello specchio collimatore, θ=80°.*

Si osserva che gli specchi con coating di Au o Pt hanno un rendimento abbastanza omogeneo, che si assesta sul 55% – 60%. Ipotizzando di riempire l'intero baffle di PHEBUS, si andrebbe a proiettare il fascio di uscita del collimatore su di un'area di circa 5 cm^2. Mediamente quindi, considerando un'efficienza del 55%, si avrebbero circa 1000 fotoni/cm^2, per ciascuna delle lunghezze d'onda considerate.

Discorso a parte va fatto per le lunghezze d'onda per le quali il numero di conteggi è minore. Considerando infatti 1000 conteggi al secondo e ripetendo il ragionamento fatto per il caso precedente, si ottengono circa 100 conteggi/cm^2.

Nel piano di progetto di PHEBUS, è previsto un numero di conteggi dell'ordine del migliaio, considerando l'osservazione di molte specie contemporaneamente. Confrontando i risultati riportati in Tabella 5.1, si osserva che il numero di conteggi atteso è dello stesso ordine di grandezza di quello previsto durante la fase operativa. Concludendo quindi, in base ai dati forniti da McPherson ed alle stime effettuate, risulta possibile produrre un fascio collimato avente un'intensità sufficiente da permettere di calibrare lo strumento simulando in modo preciso le condizioni in cui opererà lo strumento.

Per Capitolo 6 - Il sistema spettrometrico: intervallo 145÷315 nm

Come è stato fatto nel Capitolo 5 per il sensore EUV, è stata analizzata la sorgente UV da impiegare per la calibrazione del sensore FUV. Di seguito è riportata la sua descrizione, considerando i vari elementi che la compongono. L'analisi ha permesso di valutarne le caratteristiche ottiche, ponendo particolare attenzione alla stima del suo rendimento in termini di flusso di fotoni disponibili per la calibrazione.

6.1 Calibrazione nell'intervallo 145÷315 nm

Per la calibrazione di PHEBUS a lunghezze d'onda maggiori di 145 nm (intervallo operativo del sensore FUV), si intende utilizzare una sorgente UV costituita dai seguenti componenti, in ordine di posizione dalla sorgente all'uscita del sistema:

- lampada al Deuterio modello 632
- specchio ottimizzatore modello 615
- monocromatore modello 243/302
- collimatore.

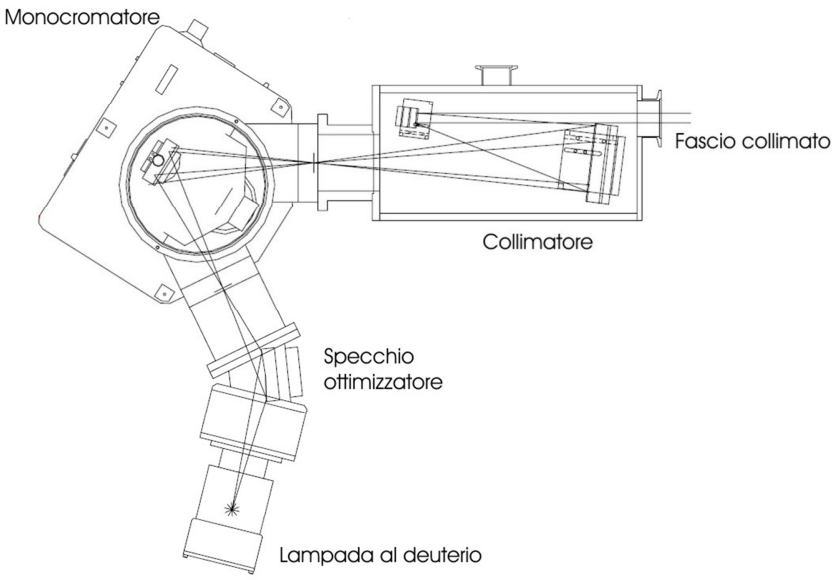


Figura 6.1 – *Schema del sistema lampada-monocromatore-collimatore.*

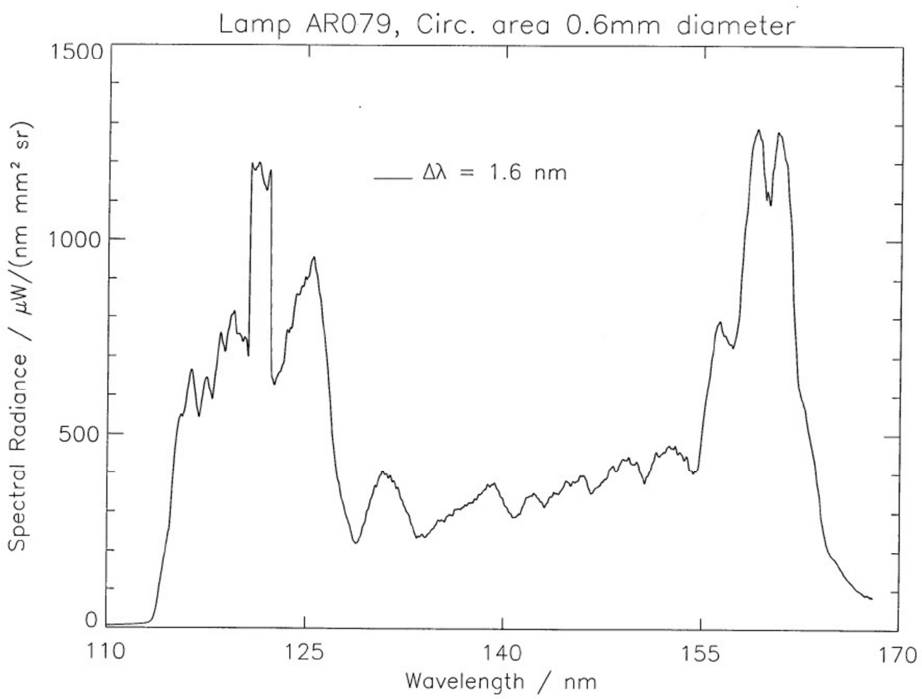


Figura 6.2 – *Spettro di emissione da 110 nm a 170 nm.*

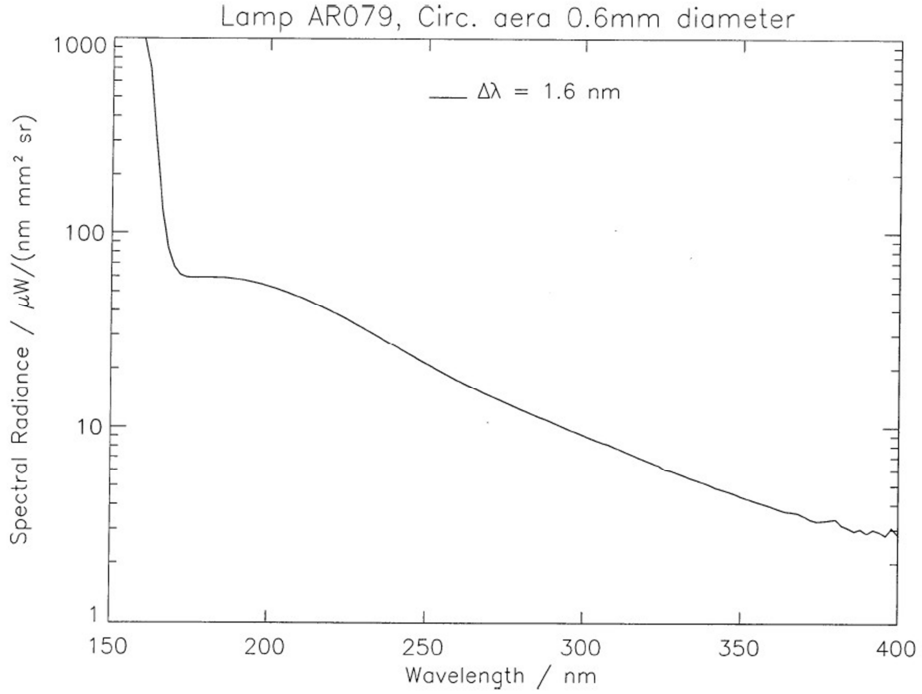


Figura 6.3 – *Spettro di emissione da 150 nm a 400 nm. La scala è logaritmica.*

Il sistema descritto è rappresentato in Figura 6.1. Questo sistema, proposto direttamente da McPherson, permette di selezionare la lunghezza d'onda desiderata e di ottenere un fascio collimato adatto a calibrare il rivelatore FUV di PHEBUS per le righe spettrali di maggiore interesse.

Quale sorgente di raggi UV vera e propria viene utilizzata una lampada al Deuterio , in grado di generare uno spettro continuo che copre l'intervallo 155÷315 nm. In particolare, si fa riferimento al modello 632 di McPherson, dotata di una finestra di MgF_2. Questo modello quindi è in grado di emettere radiazione avente lunghezza d'onda minima di 110 nm, a causa dell'assorbimento delle lunghezze d'onda inferiori da parte del MgF_2. È caratterizzata da una potenza nominale di 30 W ed il suo spettro di emissione copre l'intervallo 110÷400 nm. Tale spettro, fornito da McPherson, è riportato nelle Figure 6.2 e 6.3.

In questo capitolo è riportata l'analisi effettuata per stimare l'efficienza del sistema e dell'intensità della radiazione in uscita al monocromatore. Non essendo in possesso dei componenti in esame, si è provveduto ad effettuare questa analisi introducendo delle inevitabili approssimazioni. Lo scopo di questa trattazione è di capire se l'intensità del fascio entrante nel baffle PHEBUS ha caratteristiche adatte da permettere di effettuare correttamente la calibrazione.

6.2 Calcolo delle dimensioni e del raggio del reticolo

In base alle misure meccaniche riportate nell'Allegato A, è stato stimato il raggio del reticolo impiegato nel monocromatore, ipotizzando che si tratti di un reticolo sferico.

Utilizzando le relazioni caratteristiche del cerchio di Rowland

$$r = R\ \cos\alpha \tag{6.1}$$

$$r' = R\ \cos\beta \tag{6.2}$$

e la relazione

$$\alpha + \beta = k \tag{6.3}$$

dove *k* è una costante caratteristica del sistema in esame e vale 64°, si ricava l'espressione di R in funzione degli angoli α e β, ottenendo:

$$R = \frac{r}{\cos\alpha} = \frac{r'}{\cos\beta} \tag{6.4}$$

Dopo alcuni passaggi e sostituendo i valori r = 198,9074 mm e r' = 182,1434 mm si ottiene per R un valore pari a 225,2139 mm.

Sempre in base alle caratteristiche tecniche riportate nel datasheet McPherson, si è provveduto a stimare le dimensioni del reticolo, considerando la distanza tra il reticolo e la fenditura di uscita pari a f = 187.1434 mm e il valore *f/number* = 4.5.

Dalla formula

$$f/_{\#} = \frac{f}{D} \tag{6.5}$$

si ricava

$$D = \frac{f}{f/_{\#}} = 40{,}47\ mm \tag{6.6}$$

Il valore calcolato è in accordo con quanto riportato nella documentazione tecnica McPherson. I valori di f ed *f/number* utilizzati nel calcolo precedente sono quelli indicati nello schema meccanico e nel datasheet del monocromatore, riportati rispettivamente nell'Allegato A e nell'Allegato B.

6.3 Valutazione delle caratteristiche ottiche del sistema – Reticolo concavo

Per simulare il sistema e stimare i flussi di uscita, è stato costruito un modello per il ray-tracing con ZEMAX®: il valore del raggio e le dimensioni della maschera che copre il reticolo (di dimensioni 40 x 30 mm, caratteristica fornita direttamente da McPherson) sono stati utilizzati in tale modello per valutare in via preliminare le caratteristiche ottiche del sistema.

In Figura 6.4 è riportato il modello ZEMAX® del monocromatore, costituito dalle fenditure di ingresso e di uscita e dal reticolo (concavo) ed il piano immagine posto sullo stesso piano della fenditura di uscita.

Con questo modello è stata stimata l'altezza delle righe spettrali rispetto alla fenditura di uscita. Inoltre ha permesso di avere un'idea delle aberrazioni introdotte dal sistema. In particolare sono state considerate tre condizioni di analisi differenti:

- una senza considerare nel modello le fenditure di ingresso e di uscita,
- una considerando la sola fenditura di uscita e
- una terza considerando entrambe le fenditure.

Questo tipo di analisi è stato effettuato per poter valutare tramite il confronto degli spot ottenuti nelle situazioni sopra indicate, quali siano gli effetti dei singoli elementi sull'immagine in uscita al monocromatore e per valutare l'intensità della radiazione di uscita, in modo da avere una stima dell'efficienza del sistema.

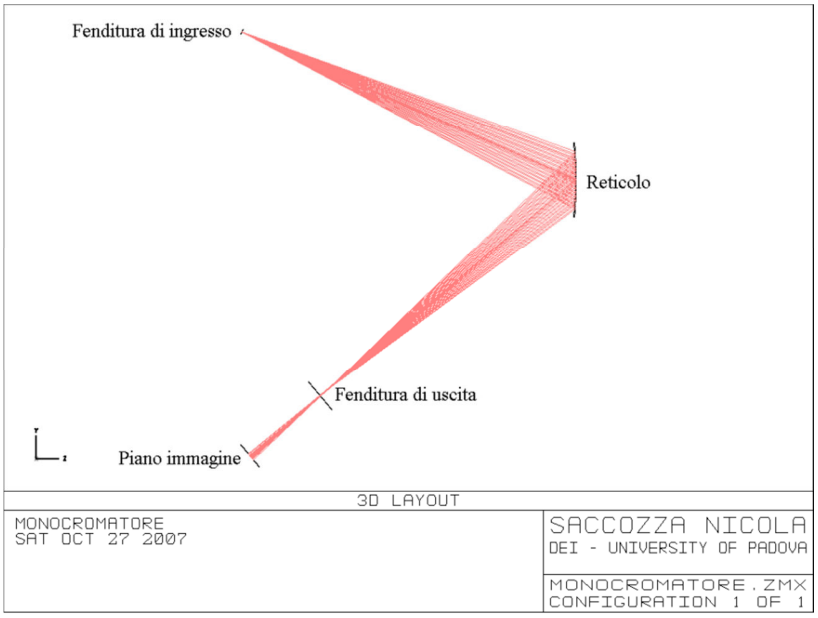


Figura 6.4 – *Modello ZEMAX® del monocromatore. Le fenditure sono perpendicolari al piano del foglio.*

6.3.1 Reticolo concavo - Modello senza fenditure di ingresso e di uscita

Per valutare le dimensioni delle righe spettrali e le aberrazioni del sistema in assenza di entrambe le fenditure, è stata simulata una sorgente "tipo fenditura", considerando una serie composta da 11 sorgenti puntiformi, distanziate tra loro di 0,4 mm e poste una sopra l'altra nel piano perpendicolare al modello, in modo da simulare una fenditura alta 4 mm. Il successivo ray-tracing ha permesso di ottenere l'immagine della riga spettrale corrispondente alla lunghezza d'onda di 200 nm, sul piano della fenditura di uscita. Il risultato ottenuto è riportato in Figura 6.5. L'altezza della riga è di circa 16 mm mentre la larghezza sul piano spettrale è stimata in 250 μm.

Per confronto, nelle Figure 6.6 e 6.7 sono riportati gli spot ottenuti a lunghezze d'onda differenti. Nello specifico, sono state analizzare le lunghezze d'onda di 150 nm e 300 nm. Come si può osservare, gli spot sono simili a quello relativo a λ=200 nm. Questo perché sono stati ottenuti ruotando il reticolo in modo da focalizzare sulla fenditura di uscita la lunghezza d'onda in esame. Tuttavia, al crescere della lunghezza d'onda, le righe spettrali che si ottengono risultano più larghe sul piano orizzontale.

Per prima cosa si è provveduto a simulare il monocromatore senza fenditure di ingresso e di uscita. Tale simulazione ha permesso di avere un'idea delle aberrazioni introdotte dal reticolo e di ottenere una prima immagine del fascio sul piano della fenditura di uscita.

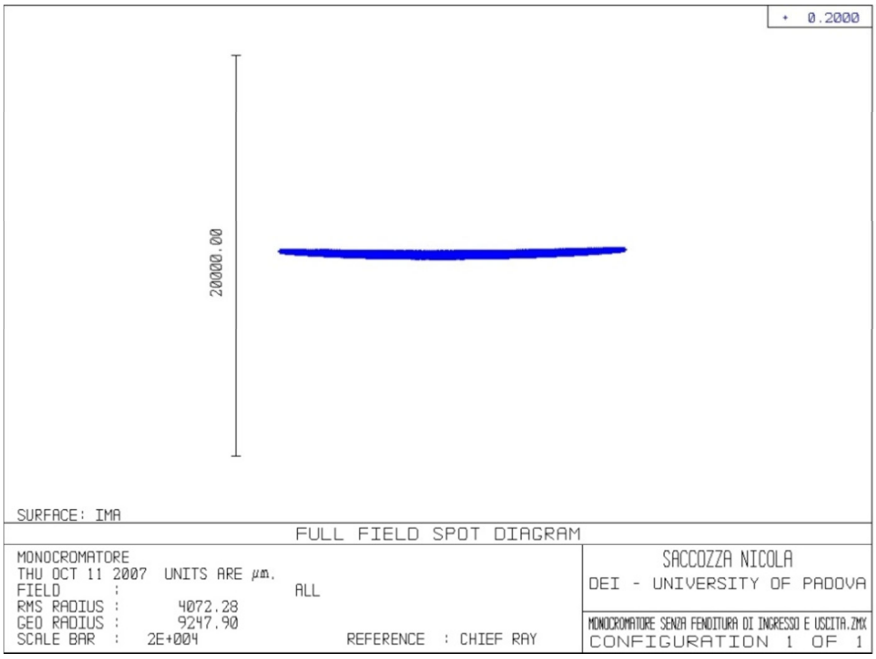


Figura 6.5 – *Spot della riga spettrale senza fenditure di ingresso e uscita per λ = 200 nm.*

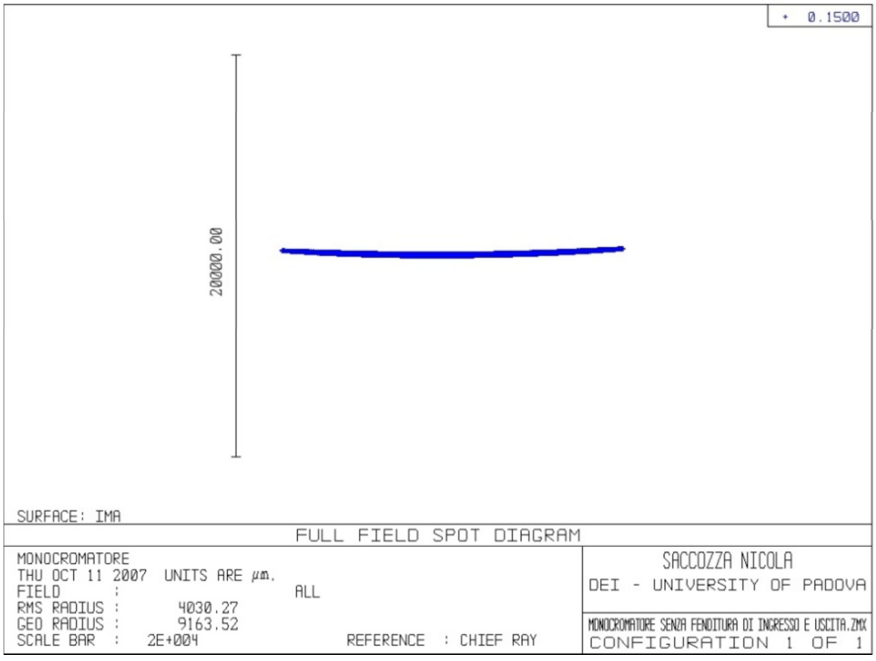


Figura 6.6 – *Spot della riga spettrale senza fenditure di ingresso e uscita per λ = 150 nm.*

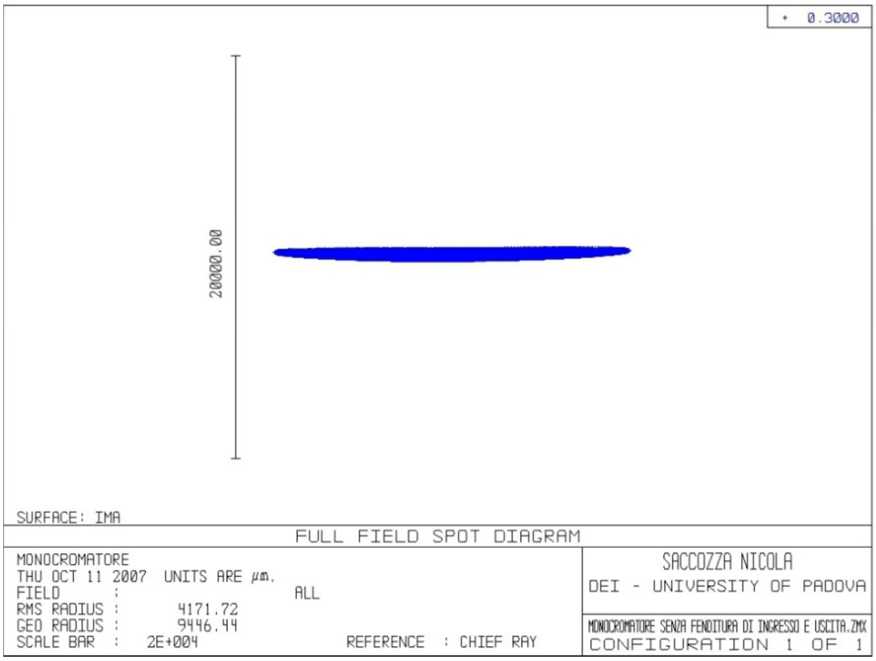


Figura 6.7 – *Spot della riga spettrale senza fenditure di ingresso e uscita per λ = 300 nm.*

Come ultimo confronto, in Figura 6.8 è riportato lo spot ottenuto ruotando il reticolo in modo da mettere a fuoco sulla fenditura di uscita la lunghezza d'onda di 200 nm ma prendendo in considerazione allo stesso tempo le lunghezze d'onda di 150, 250 e 300 nm. Si nota che le righe hanno circa la stessa altezza verticale (piano orizzontale dell'immagine) ma vengono focalizzate in maniera differente nel piano orizzontale, producendo linee più larghe rispetto a quella a 200 nm. Questo perché, quando il reticolo seleziona una data lunghezza d'onda, le altre non vengono correttamente focalizzate sul piano della fenditura d'uscita. Andando quindi ad analizzare tutte le righe spettrali nel complesso, è naturale aspettarsi che una soltanto (quella selezionata dal reticolo) risulti ben focalizzata, mentre le altre risultino non a fuoco, specialmente sul piano spettrale. Inoltre, come era prevedibile in base alla teoria sui reticoli, sono spostate angolarmente rispetto alla fenditura, punto in cui cade il fuoco della lunghezza d'onda di 200 nm. Come si vede dalla Figura 6.8, la riga dei 200 nm ha il miglior fuoco orizzontale rispetto alle altre, che risultano invece più larghe. Ruotando il reticolo, per selezionare ad esempio la riga a 300 nm si otterrà il risultato riportato in Figura 6.9.

Come si può osservare, in questo caso è la riga corrispondente ai 300 nm ad essere focalizzata correttamente sul piano spettrale, mentre le altre sono fuori fuoco.

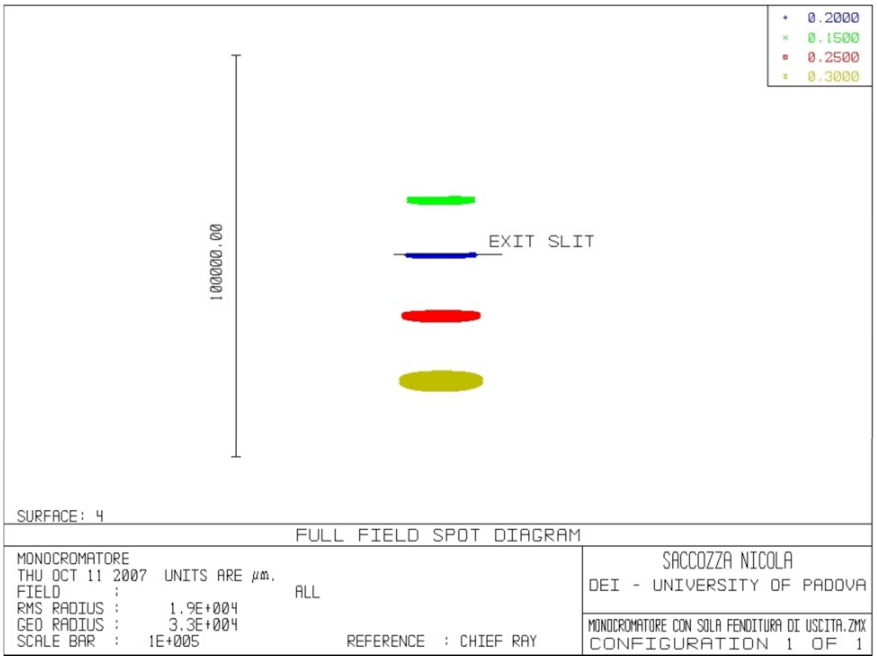


Figura 6.8 – *Spot delle righe a 150, 200, 250, 300 nm. Il reticolo seleziona quella a 200 nm, di colore blu nella figura.*

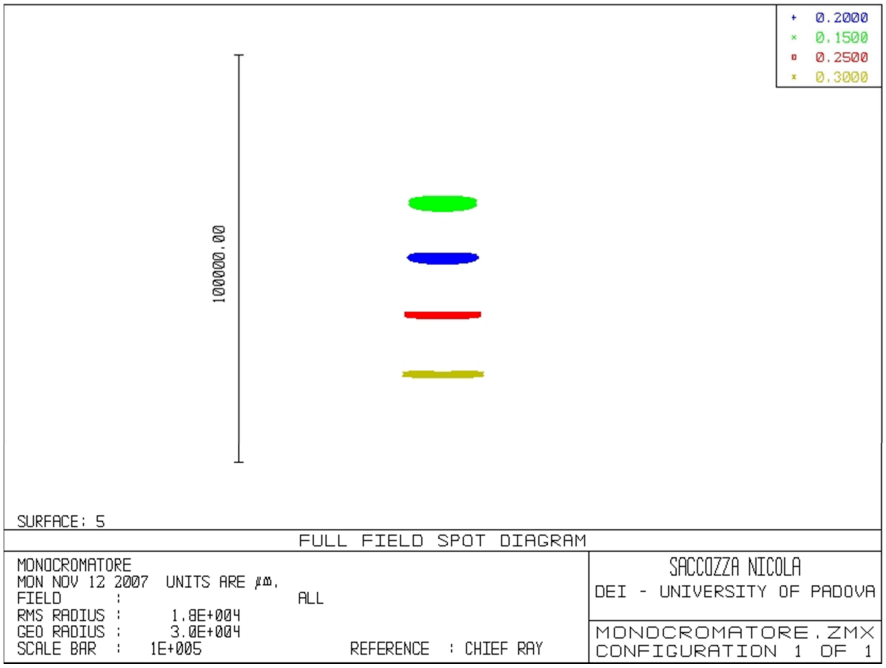


Figura 6.9 – *Spot delle righe a 150, 200, 250, 300 nm. Il reticolo seleziona quella a 300 nm, di colore blu nella figura.*

6.3.2 Reticolo concavo - Modello con la sola fenditura di uscita

La seconda simulazione è stata fatta considerando la sola fenditura di uscita (dimensioni 0,2 mm x 8 mm), simulando quella di ingresso nello stesso modo indicato nel paragrafo precedente, cioè utilizzando sorgenti puntiformi poste sul piano della fenditura di ingresso.

La lunghezza d'onda usata nella simulazione è di 200 nm. In questo caso, si sono confrontati gli spot ottenuti prima del reticolo, immediatamente dopo il reticolo, sul piano della fenditura e su di un piano immagine posto dopo la fenditura di uscita, a 50 mm di distanza. I risultati ottenuti sono riportati rispettivamente nelle Figure 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13.

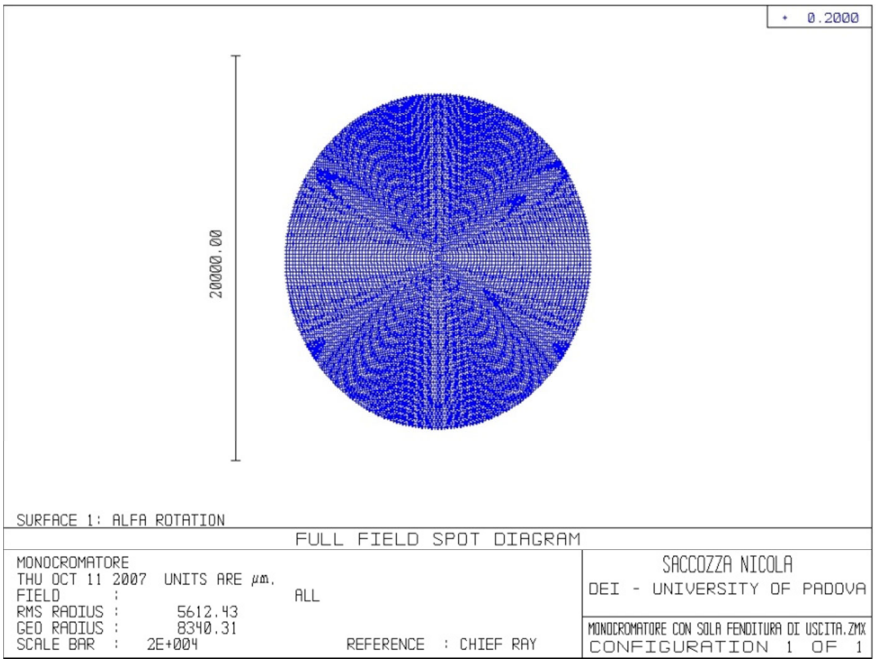


Figura 6.10 – *Spot della fenditura di ingresso simulata, prima del reticolo.*

Come si osserva dalla Figura 6.12, si è ricavata una riga spettrale avente altezza di circa 16 mm e larghezza di 250 µm. Per poter valutare l'effetto della fenditura di uscita sull'immagine prodotta dal sistema, è stata simulata l'immagine ottenuta in uscita al sistema, a 50 mm dalla fenditura di uscita. Il risultato ottenuto è riportato nella figura 6.13. Si osserva che l'immagine della fenditura risulta alta circa 8 mm (come la fenditura di uscita) e larga circa 4 mm.

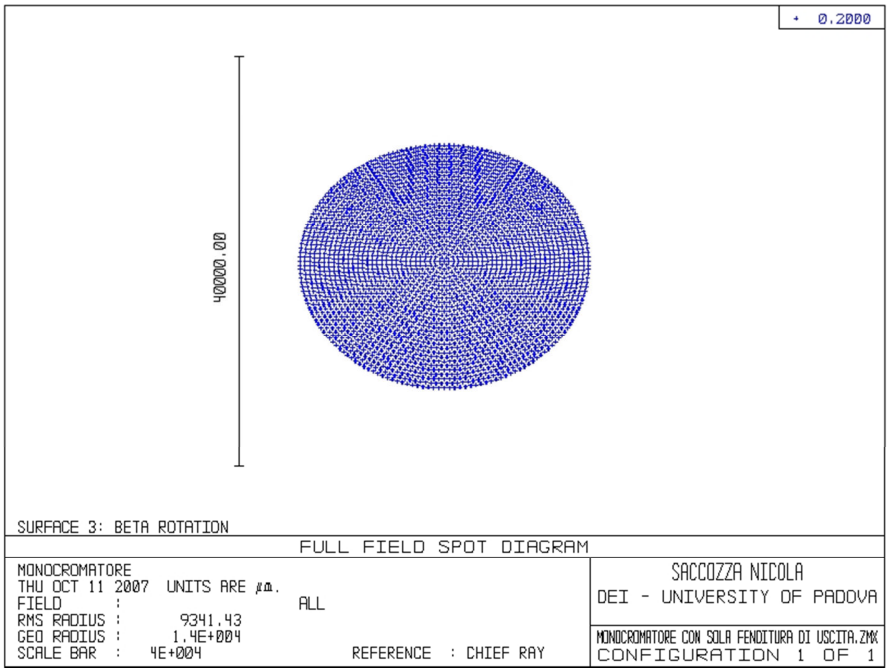


Figura 6.11 – *Spot dopo il reticolo.*

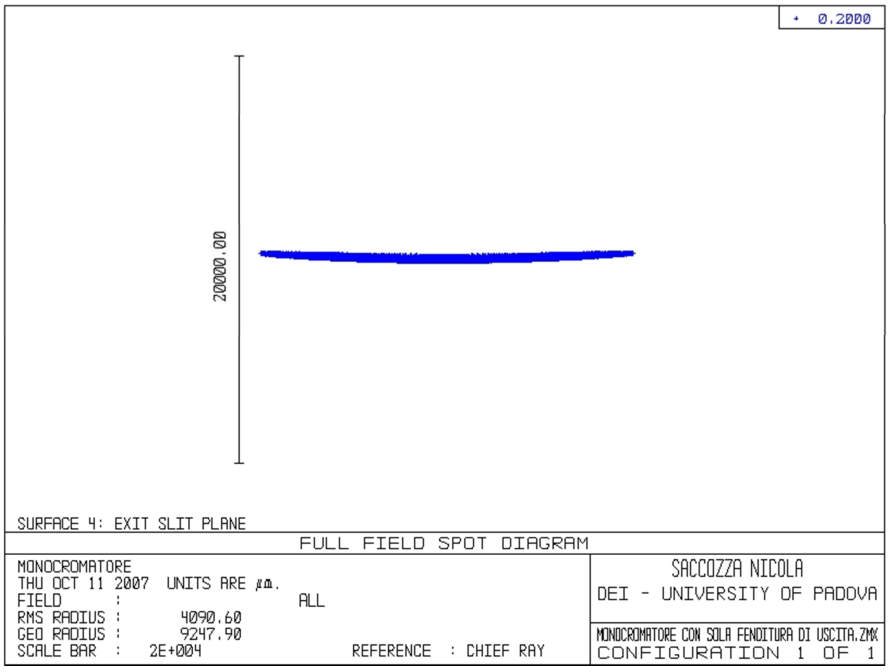


Figura 6.12 – *Spot della riga spettrale, sul piano della fenditura di uscita.*

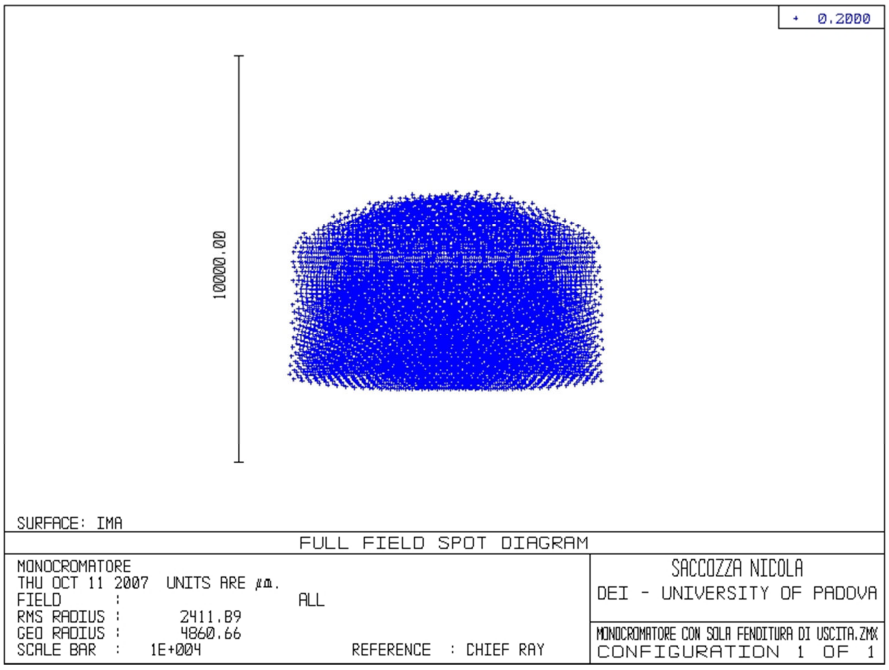


Figura 6.13 – *Immagine della fenditura di uscita sul piano immagine posto a 50 mm.*

6.3.3 Reticolo concavo - Modello con entrambe le fenditure

Per completare l'analisi del monocromatore con reticolo concavo, nell'ultima simulazione è stata inserita anche la fenditura di ingresso. In particolare, è stata considerata una fenditura alta 4 mm e larga 0,2 mm. In queste condizioni e considerando una serie di punti sorgente equi spaziati in ingresso al sistema, sono stati ottenuti gli spot riportati nelle Figure 6.14, 6.15, 6.16 e 6.17.

Si osserva che l'immagine che si ottiene in uscita al sistema è molto simile a quella ottenuta nel paragrafo precedente, simulando la fenditura con una serie di punti. Le sue dimensioni sono: altezza 8 mm, larghezza 4,5 mm. Cioè significa che la simulazione della fenditura di ingresso effettuata considerando una serie di punti sorgente è corretta per simulare la fenditura stessa.

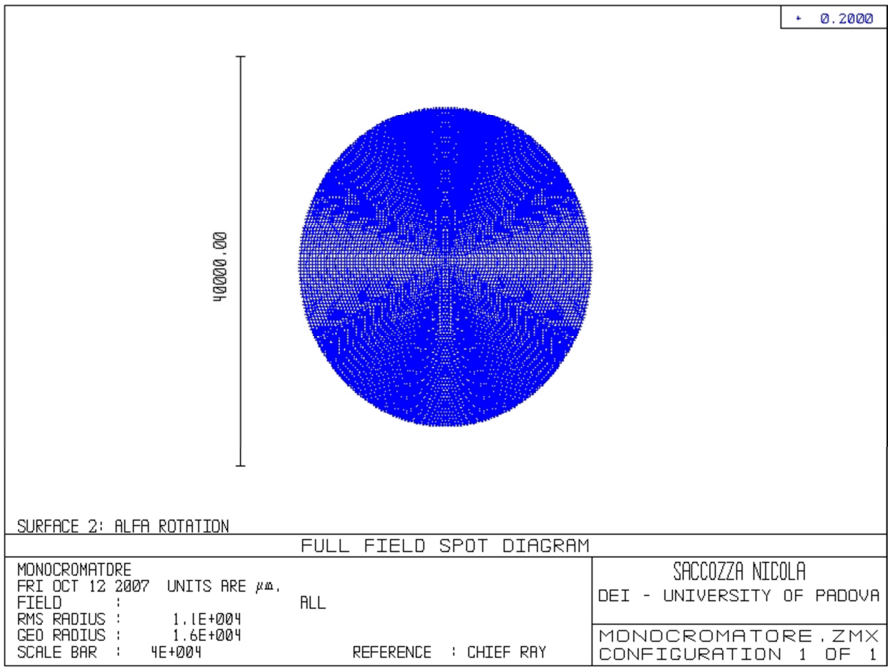


Figura 6.14– *Spot prima del reticolo.*

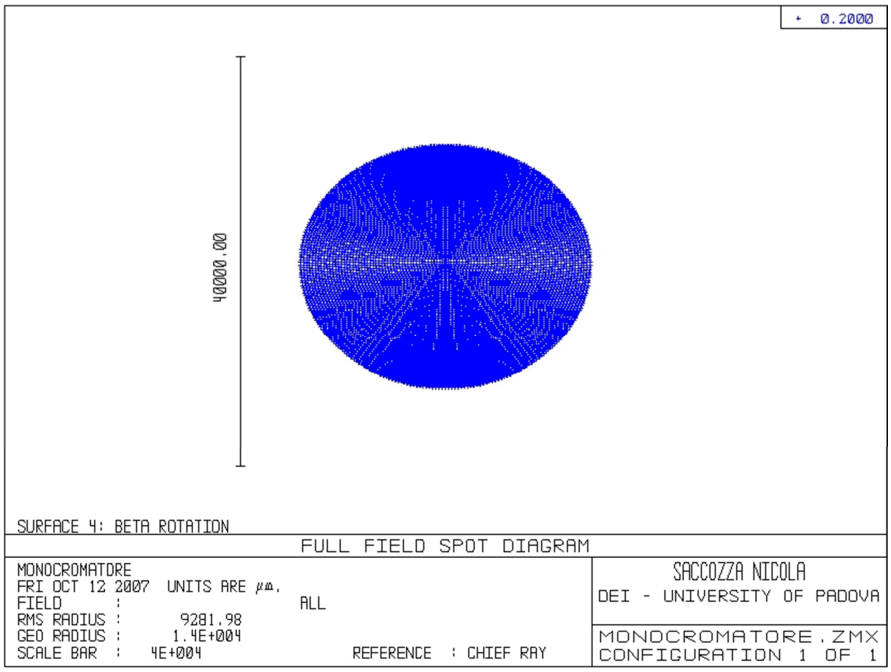


Figura 6.15 – *Spot dopo il reticolo.*

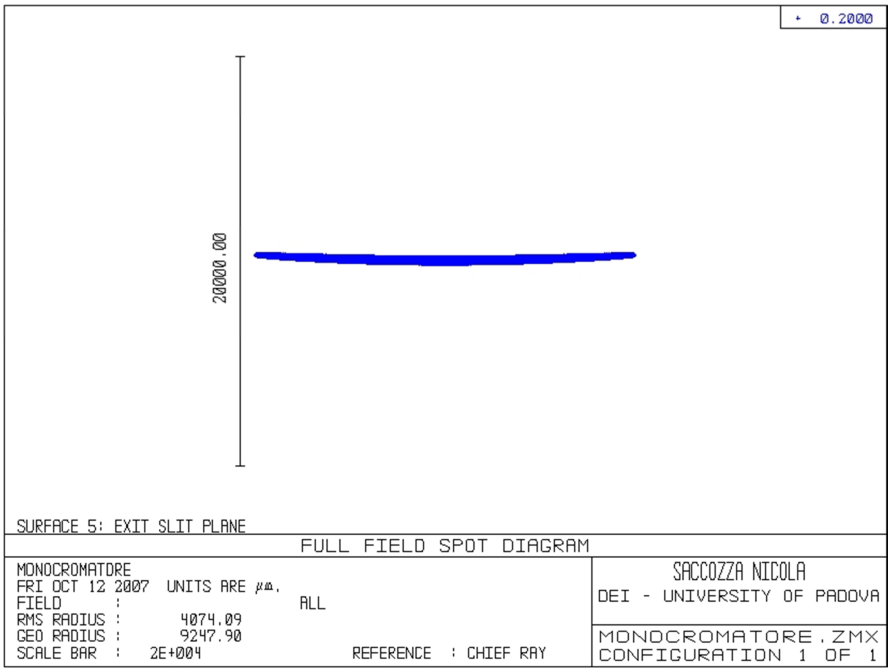


Figura 6.16 – *Spot della riga spettrale, sul piano della fenditura di uscita.*

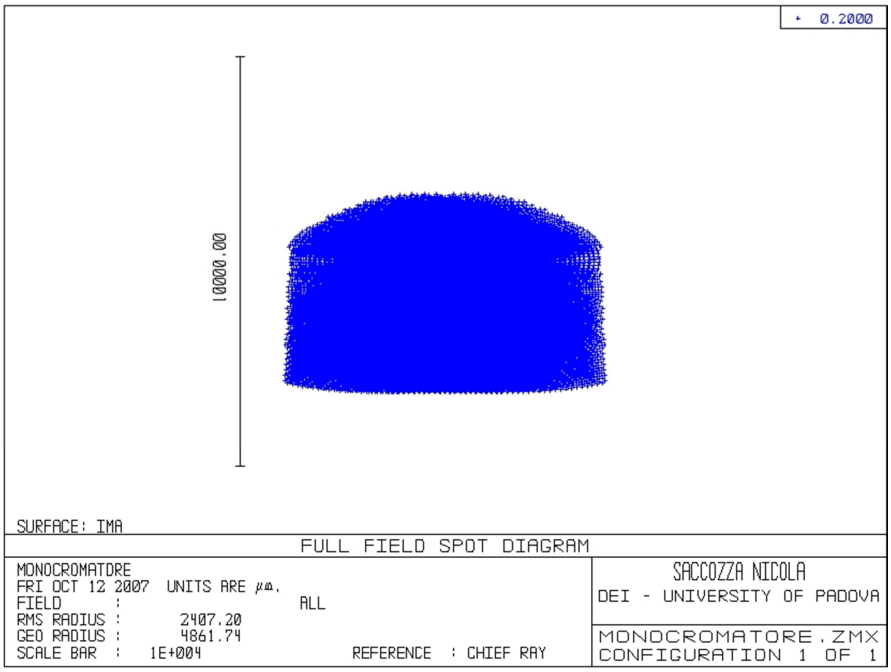


Figura 6.17 – *Immagine della fenditura di uscita sul piano posto a 50 mm.*

6.4 Valutazione delle caratteristiche ottiche del sistema – Reticolo toroidale

Come seconda parte di questa analisi, è stata effettuata una simulazione pensando di sostituire il reticolo sferico con un reticolo toroidale, per mettere a confronto le prestazioni dei due sistemi, in modo da capire se utilizzando un reticolo toroidale al posto di quello sferico si ottengono dei benefici in termini di intensità della radiazione uscente dal monocromatore.

Di seguito è riportata la stima delle dimensioni geometriche del reticolo impiegato nelle simulazioni.

Dalle equazioni del reticolo toroidale:

$$\frac{(\cos\alpha)^2}{r} + \frac{(\cos\beta)^2}{r'} - \frac{\cos\alpha}{R_h} - \frac{\cos\beta}{R_h} = 0 \qquad (6.7)$$

$$\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} - \frac{\cos\alpha}{R_v} - \frac{\cos\beta}{R_v} = 0 \qquad (6.8)$$

sostituendo i dati meccanici riportati nei datasheet e considerando sempre un reticolo di dimensioni 40x45 mm, sono stati ricavati i seguenti valori per il raggio R_h e il raggio R_v:

$$R_h = 224{,}2286\ mm \qquad (6.9)$$

$$R_v = 159{,}3815\ mm \qquad (6.10)$$

Il reticolo toroidale sopra indicato è calcolato per una lunghezza d'onda di 200 nm.

6.4.1 Reticolo toroidale - Modello senza fenditure di ingresso e di uscita

I valori calcolati all'inizio del paragrafo sono stati utilizzati nel modello ZEMAX® per valutare le dimensioni delle righe spettrali e le prestazioni del sistema ottico. Anche in questo caso sono state considerate 11 sorgenti puntiformi, distanziate tra loro di 0,4 mm e poste una sopra l'altra nel piano perpendicolare al modello, in modo da simulare una fenditura alta 4 mm. Per migliorare il modello, si è provveduto ad ottimizzare in maniera automatica con ZEMAX® i parametri geometrici del reticolo, in modo da ottenere il miglior fuoco possibile per la riga spettrale sul piano della fenditura di uscita. In particolare, i valori utilizzati nella simulazione per i due raggi sono:

$$R_h = 226{,}3572\ mm \qquad (6.11)$$

$$R_v = 195{,}5989\ mm \qquad (6.12)$$

Nelle Figure 6.18, 6.19 e 6.20 sono riportati rispettivamente gli spot ottenuti prima del reticolo, subito dopo il reticolo e quello della riga spettrale sulla fenditura di uscita. La lunghezza d'onda considerata è 200 nm, la scala è in micron.

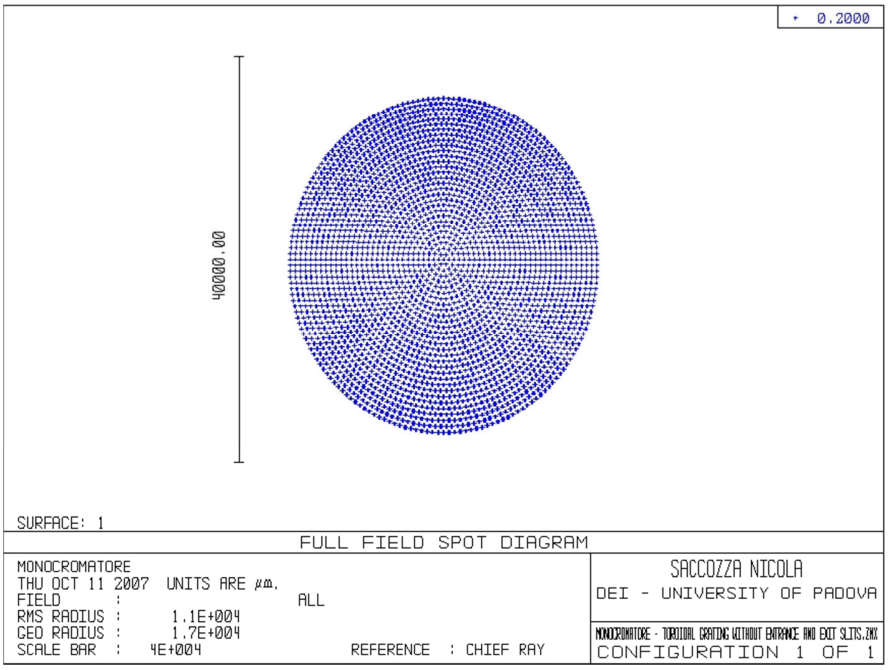


Figura 6.18 – *Spot prima del reticolo. λ = 200 nm.*

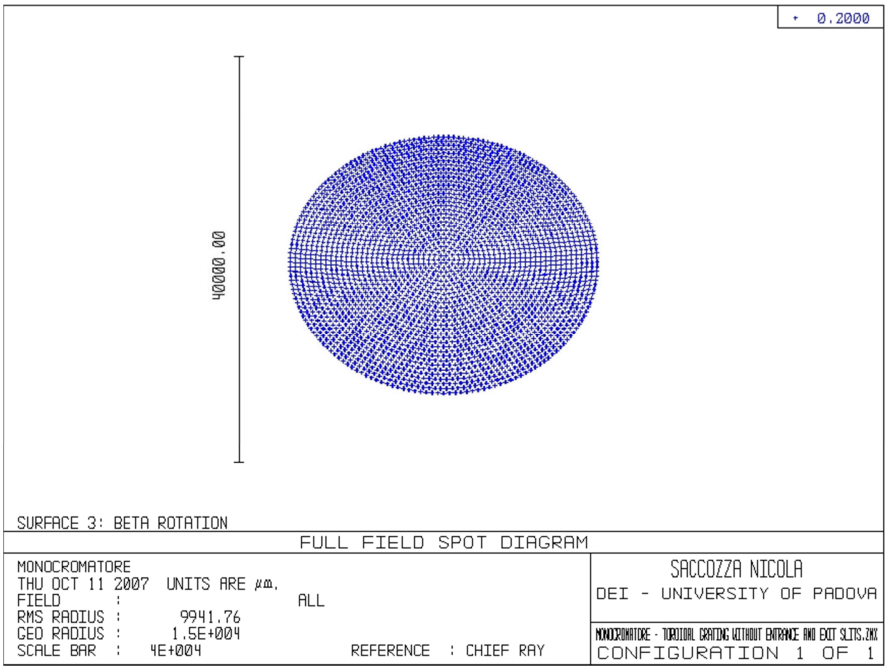


Figura 6.19 – *Spot dopo il reticolo. λ = 200 nm.*

Dalla Figura 6.20 si osserva che la riga ottenuta risulta essere alta circa 9 mm, indicando quindi un migliore fuoco verticale rispetto al caso con reticolo sferico. La larghezza stimata sul piano spettrale risulta essere al massimo di 200 μm (quindi presenta un fuoco orizzontale migliore rispetto al caso del reticolo sferico).

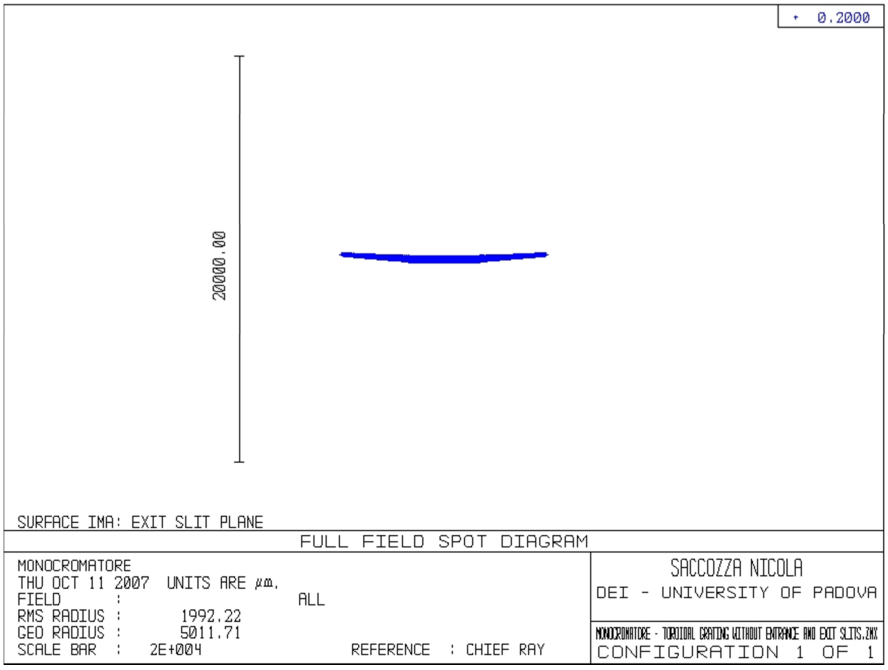


Figura 6.20 – *Spot della riga spettrale senza fenditura di ingresso e di uscita. λ = 200 nm.*

6.4.2 Reticolo toroidale - Modello con la sola fenditura di uscita

Dopo la simulazione del sistema senza le fenditure di ingresso e uscita, è stata effettuata una simulazione inserendo la sola fenditura di uscita (dimensioni 0,2 mm x 8 mm) ed andando ad analizzare l'immagine ottenuta in uscita al sistema. Per quanto riguarda la parte di sistema che precede la fenditura di uscita lungo il cammino ottico, i risultati ottenuti dalla simulazione precedente rimangono invariati. In Figura 6.21 è riportato lo spot dell'immagine della fenditura di uscita ad una distanza di 50 mm da essa.

L'immagine ottenuta risulta circa di dimensioni 6 x 6 mm. Le analisi successive sono servite per valutare il rendimento del sistema ed ottenere una stima della quantità di radiazione che arriva in uscita, considerando nella simulazione considerando anche la fenditura di ingresso.

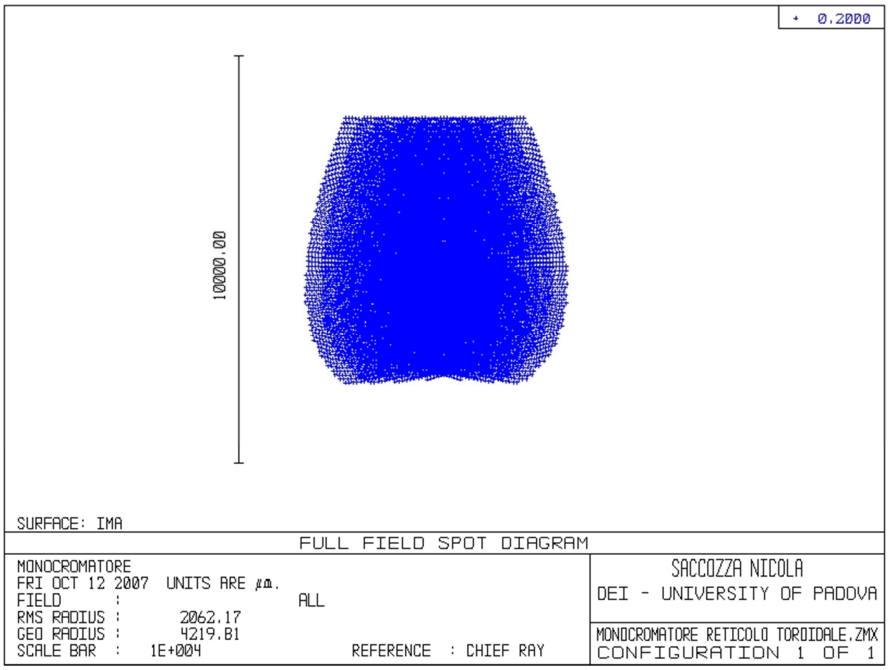


Figura 6.21 – *Spot dell'immagine a 50 mm dalla fenditura di uscita.*

6.4.3 Reticolo toroidale - Modello con entrambe le fenditure

L'ultima simulazione ha preso in considerazione il monocromatore completo, inserendo anche la fenditura di ingresso, alta 4 mm e larga 0,2 mm. Nelle Figure 6.22, 6.23, 6.24 e 6.25 sono riportati gli spot delle immagini ottenuti nella simulazione.

Dalla Figura 6.24 si osserva che la riga spettrale ottenuta sul piano della fenditura d'uscita risulta più piccola rispetto al caso con reticolo concavo. In particolare, l'altezza stimata è di 13 mm. Questo risultato è da imputare alle migliori proprietà di focalizzazione del reticolo toroidale. L'immagine a 50 mm dall'uscita del sistema, riportata in Figura 6.25, risulta invece di dimensioni paragonabili al caso precedente.

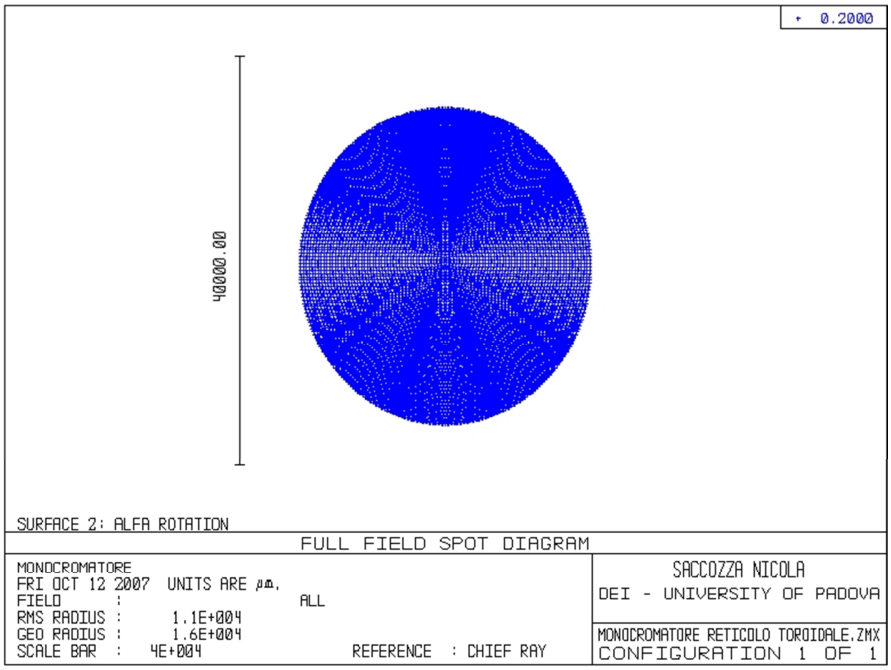


Figura 6.22 – *Spot prima del reticolo.*

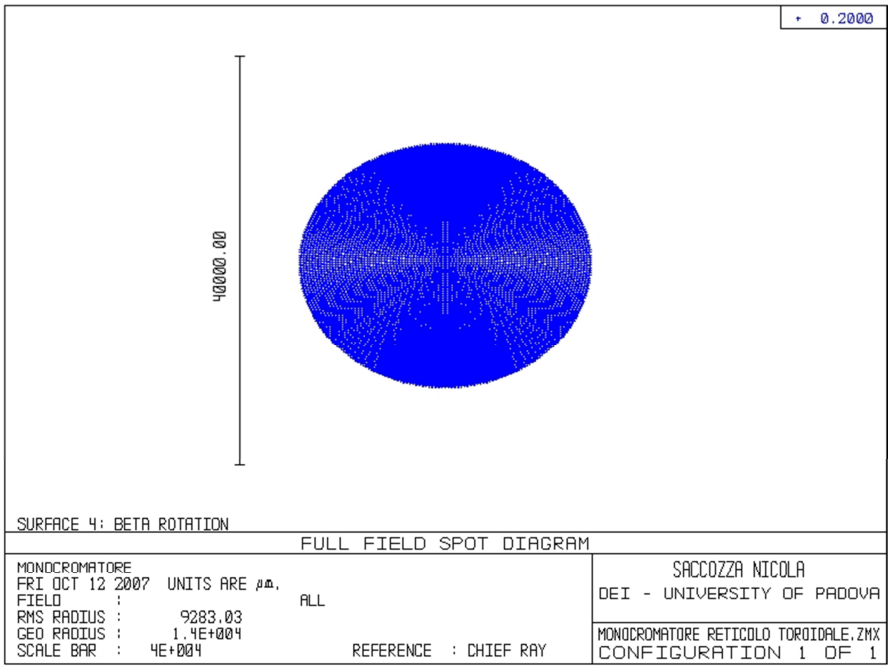


Figura 6.23 – *Spot dopo il reticolo.*

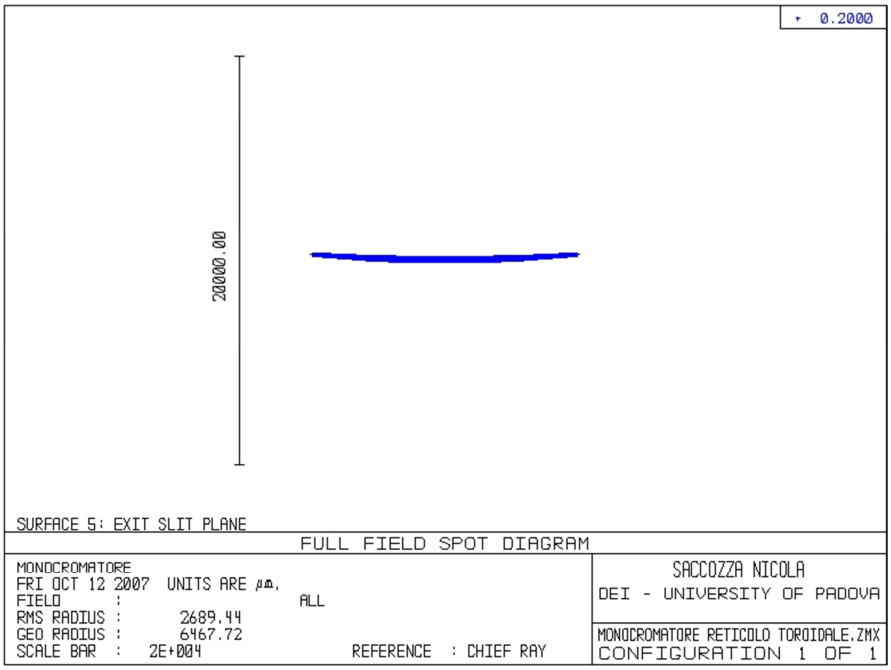


Figura 6.24 – *Spot della riga spettrale sulla fenditura d'uscita.*

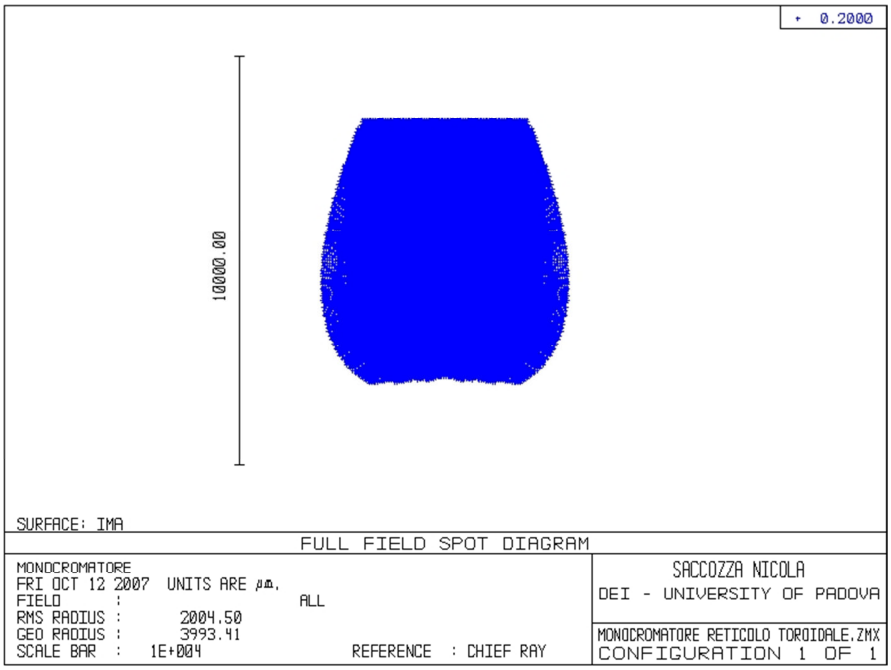


Figura 6.25– *Spot dell'immagine in uscita al sistema, a 50 mm.*

6.5 Stima della potenza in uscita al sistema con reticolo concavo

La simulazione con ZEMAX® è stata realizzata allo scopo di ottenere una stima dei flussi a valle del sistema monocromatore – collimatore. Questo parametro è di fondamentale importanza per stabilire se il sistema in esame può essere utilizzato per la calibrazione di PHEBUS.

L'analisi del monocromatore nella configurazione con sola fenditura di uscita e reticolo concavo ha permesso di stabilire che la percentuale di radiazione uscente dal sistema nell'intervallo 145÷315 nm è costante ed è in media del 42 %. Questa simulazione è stata effettuata considerando in ingresso al sistema una serie di punti sovrapposti, distanziati tra loro di 0,2 mm. In particolare, è stata riempita solo mezza fenditura (la parte posta al di sopra dell'asse ottico) perché, essendo il sistema simmetrico, questo ha permesso di analizzare più nel dettaglio le influenze delle aberrazioni sui punti sorgente posti fuori dall'asse ottico. L'altezza della fenditura di ingresso è di 4 mm e larga 0,1 mm, mentre la fenditura di uscita è alta 8 mm e larga 0,1 mm. I risultati ottenuti da questa simulazione sono riportati in Tabella 6.1 dove sono indicati la distanza del punto sorgente dall'asse ottico e la percentuale della radiazione da esso emessa che arriva in uscita.

λ = 200 nm

Potenza in ingresso: 1 Watt

x = distanza asse ottico [mm]	% in uscita
0	40,532
0,2	41,568
0,4	41,621
0,6	41,568
0,8	41,661
1	40,983
1,2	41,927
1,4	41,694
1,6	41,987
1,8	45,525
2	43,316
Media	42,035

Tabella 6.1 – *Percentuale di potenza in uscita al monocromatore.*

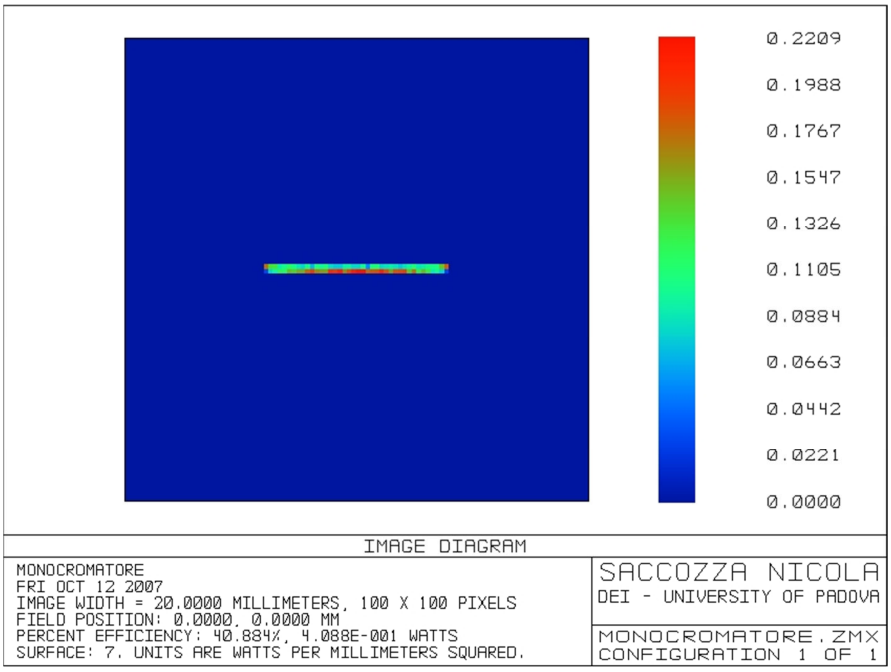


Figura 6.26 – *Immagine in falsi colori in uscita al monocromatore. λ = 200 nm.*

In Figura 6.26 è riportata l'immagine in uscita al monocromatore ottenuta dalla simulazione. L'immagine è in falsi colori e la legenda laterale indica la distribuzione della radiazione, in percentuale rispetto al valore di ingresso del sistema. Il colore rosso indica una maggiore intensità rispetto alle zone colorate di verde e blu.

Il passo successivo dell'analisi è stato quello di determinare il flusso a valle del collimatore proposto da McPherson. In base ai dati forniti, il collimatore è composto da due specchi di Al-MgF_2 e produce un fascio collimato che ha dimensioni 19 x 27 mm (larghezza x altezza) a 280 mm dalla sua uscita. In base a questi dati si osserva che il fascio prodotto non è perfettamente collimato. Questo problema è nella realtà molto difficile da correggere ma tuttavia non introduce problemi per la nostra analisi.

L'ipotesi che viene fatta in questo caso è che tutto il fascio in uscita al monocromatore sia raccolto dal collimatore. Quindi, l'unico parametro che viene considerato per analizzare il rendimento del sistema è l'assorbimento in riflessione da parte degli specchi.

Nello studio effettuato nel Capitolo 5 è stato stimato che l'angolo sotteso dal fascio in uscita al monocromatore è di circa 13°. Considerando quindi, un angolo di incidenza sugli specchi del collimatore variabile tra 0° e 10°, è stata simulata la curva di riflessione di un tipico

specchio con coating Al-MgF_2. Per evidenziare eventuali differenze, tale curva è stata calcolata per angoli differenti: 0°, 5° e 10°. I risultati ottenuti sono riportati nelle Figure 6.26, 6.27 e 6.28.

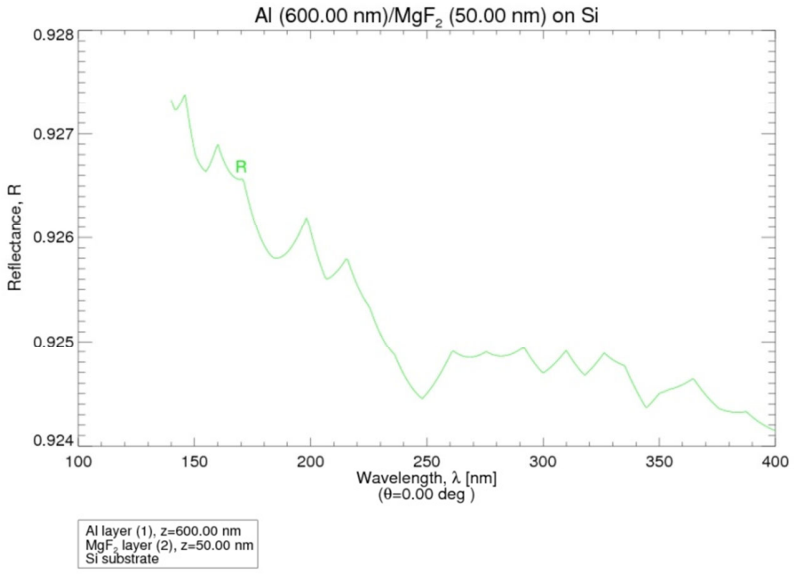


Figura 6.27 – *Curva di riflessione per θ = 0°.*

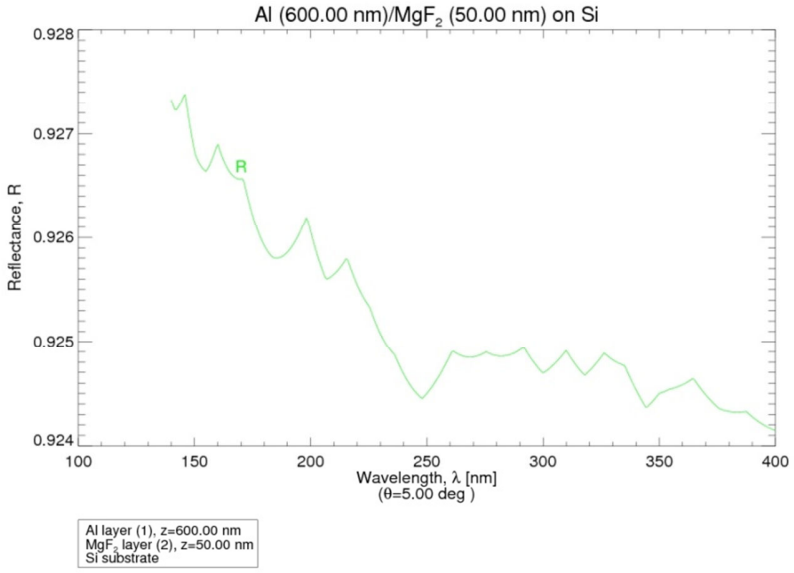


Figura 6.28 – *Curva di riflessione per θ = 5°.*

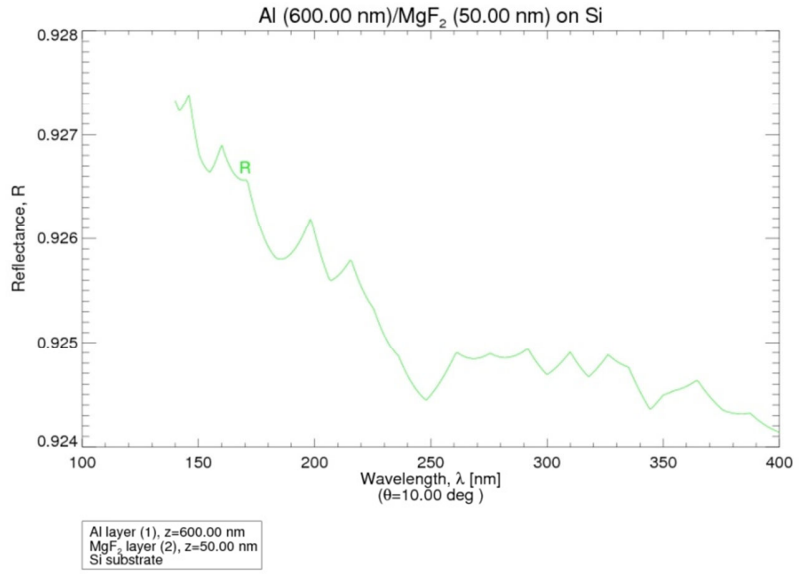


Figura 6.29 – *Curva di riflessione per $\theta = 10°$.*

Si osserva che le curve sono molto simili tra loro, indicando che la percentuale di radiazione riflessa è comunque sempre maggiore del 92 %. Tenendo conto che il collimatore è costituito da due specchi e quindi il fascio entrante è soggetto a due riflessioni, la percentuale di radiazione in uscita ad esso sarà circa l'84 %.

Sulla base di queste osservazioni ed utilizzando i dati forniti da McPherson riguardanti lo spettro di emissione della lampada al Deuterio Modello 632, è stata calcolata la potenza in uscita al sistema monocromatore – collimatore a differenti lunghezze d'onda.

6.5.1 Stima delle potenze

Considerando lo schema meccanico fornito da McPherson, è stata stimato l'angolo solido sotto cui è visto lo specchio ottimizzatore da parte della lampada. Sulla base dello schema meccanico riportato in Figura 6.30, la distanza dall'uscita della lampada a cui è stata considerata la superficie da calcolare è di 117 mm, distanza a cui si trova lo specchio ottimizzatore dalla fenditura d'uscita. McPherson dichiara un valore di f/7 per la sua lampada al Deuterio . In base alla focale del fascio d'uscita e ipotizzando che lo specchio collimatore raccolga tutto il fascio, si ottiene una superficie di diametro

$$\frac{f}{D} = 7 \rightarrow D = \frac{f}{7} = \frac{200\,mm}{7} = 16{,}7\,mm \qquad (6.13)$$

A questo punto è possibile stimare l'angolo solido sotteso dal cono d'uscita della lampada. Infatti, l'area sotto cui è visto lo specchio vale:

$$A = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \pi = 219{,}4\ mm^2 \tag{6.14}$$

L'angolo solido Ω risulta:

$$\Omega = {}^{A}/_{r^2} \cong 0.02\ \text{sr} \tag{6.15}$$

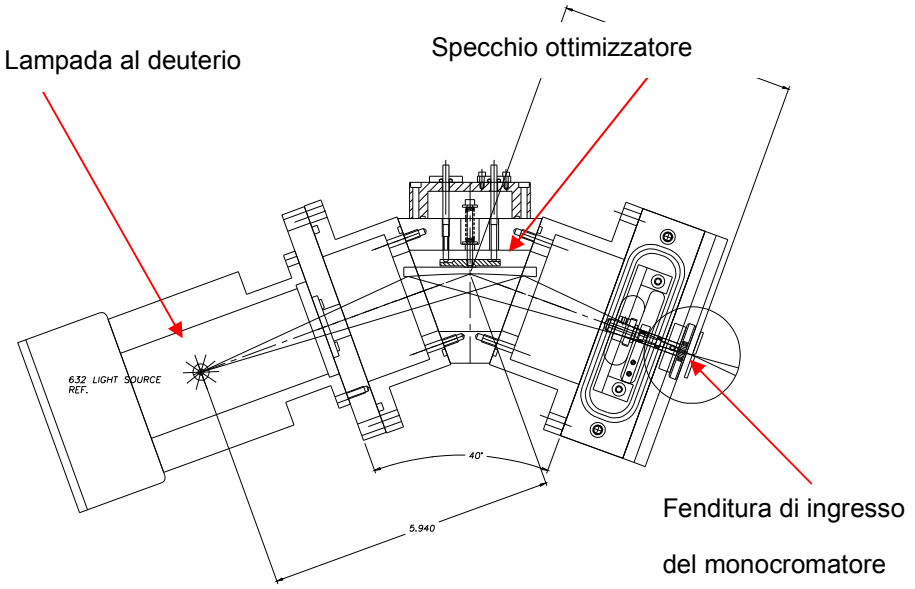


Figura 6.30 – *Schema meccanico dello specchio ottimizzatore.*

Considerando la curva di emissione spettrale per la lampada al Deuterio fornita da McPherson, è stato possibile valutare le potenze disponibile ad una data lunghezza d'onda.

λ [μm]	Radianza spettrale $\left[\frac{\mu W}{(nm\ mm^2 sr)}\right]$	P_{IN} [μW]	P_{OUT} [μW]	P_{FIN} [μW]	Fotoni/sec
0,145	360	13232,42	5557,62	4668,40	3,407E+15
0,187	60	2205,40	926,27	778,07	7,325E+14
0,230	35	1286,49	540,32	453,87	5,255E+14
0,273	15	551,35	231,57	194,52	2,261E+14
0,315	8	294,05	123,50	103,74	1,645E+14

Tabella 6.2 – *Potenze in ingresso e uscita del monocromatore ed in uscita del collimatore. Reticolo concavo.*

La Tabella 6.2 riassume il calcolo delle potenze in tre punti del sistema monocromatore – collimatore: all'ingresso e all'uscita del monocromatore ed in uscita all'intero sistema. Le frequenze analizzate sono le stesse impiegate nel modello ZEMAX® di PHEBUS, per il sensore FUV.

Considerando la sezione del fascio in uscita al collimatore, è possibile valutare la potenza media per unità di superficie, in uscita al sistema. In particolare, in base alle dimensioni del fascio collimato fornite da McPherson, si ricava una sezione pari a 513 mm. I valori di potenza per mm^2 calcolati sono riportati in Tabella 6.3, sempre in riferimento alle lunghezze d'onda riportate in Tabella 6.2.

λ [μm]	Potenza per unità di superficie [$\mu W/mm^2$]	Fotoni/(sec mm2)
0,145	9,10	6,641E+12
0,187	1,52	1,428E+12
0,230	0,88	1,024E+12
0,273	0,38	4,407E+11
0,315	0,20	3,207E+11

Tabella 6.3 – *Potenza per unità di superficie.*

6.5.2 Stima della potenza in uscita al sistema monocromatore con reticolo toroidale

Lo stesso tipo di analisi è stato effettuato nel caso di reticolo toroidale. L'immagine ottenuta dalla simulazione ZEMAX® del sistema, dopo la fenditura di uscita è riportata in Figura 6.31. L'analisi effettuata ha permesso di stimare la percentuale di radiazione che giunge in uscita al monocromatore.

Come nel caso precedente di monocromatore con reticolo concavo, è stata considerata una fenditura di ingresso alta 4 mm e larga 0,1 e una fenditura di uscita alta 8 mm e larga 0,1. Per quanto riguarda i punti sorgente, sono stati considerati dieci punti sorgente, distanti uno dall'altro di 0,2 mm, nella direzione dell'altezza della fenditura. Anche in questo caso, è stata riempita solo metà della fenditura di ingresso per valutare l'effetto delle aberrazioni in funzione della distanza del punto sorgente dall'asse ottico. Le percentuali di radiazione trasmessa per ciascun punto ottenuti dalla simulazione sono riportati nella Tabella 6.4.

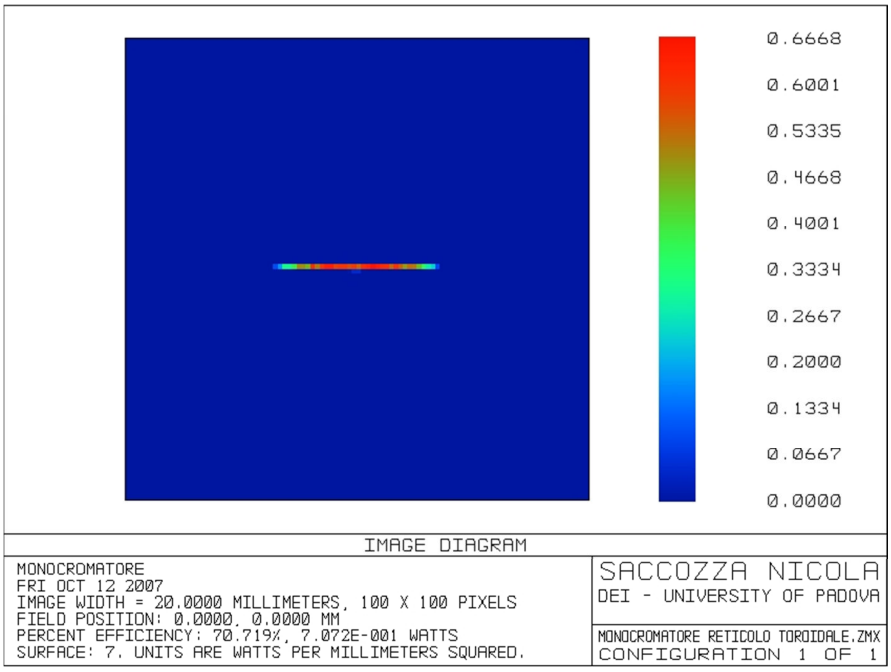


Figura 6.31 – *Immagine in falsi colori in uscita al monocromatore. Reticolo toroidale, λ = 200 nm.*

λ = 200 nm

Potenza in ingresso: 1 Watt

x = distanza asse ottico [mm]	% in uscita
0	71,548
0,2	71,499
0,4	72,028
0,6	73,057
0,8	73,806
1	73,497
1,2	71,978
1,4	71,209
1,6	70,040
1,8	68,302
Media	71,696

Tabella 6.4 – *Percentuale di potenza in uscita al monocromatore.*

Con i dati della Tabella 6.4 sono state calcolate le potenze in tre punti del sistema monocromatore – collimatore e precisamente: all'ingresso e all'uscita al monocromatore e

all'uscita dell'intero sistema. Le frequenze analizzate sono quelle impiegate nel modello ZEMAX® di PHEBUS, relativo al sensore FUV. I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 6.5.

λ [μm]	Radianza spettrale $\left[\frac{\mu W}{(nm\ mm^2 sr)}\right]$	P_{IN} [μW]	P_{OUT} [μW]	P_{FIN} [μW]	Fotoni/sec
0,145	360	12977,95	9214,34	7740,05	5,649E+15
0,187	60	2162,99	1535,72	1290,01	1,214E+15
0,230	35	1261,75	895,84	752,50	8,712E+14
0,273	15	540,75	383,93	322,50	4,432E+14
0,315	8	288,40	204,76	172,00	2,727E+14

Tabella 6.5 – *Potenze in ingresso e uscita del monocromatore ed in uscita del collimatore. Reticolo toroidale.*

È immediato osservare che i valori ottenuti in uscita al collimatore sono più elevati rispetto al caso con reticolo concavo. Ciò è dovuto al fatto che un reticolo toroidale, ottimizzato, permette di ottenere un miglior fuoco sia orizzontale che verticale, aumentando quindi la quantità di radiazione che attraversa la fenditura d'uscita del monocromatore.

Come nel caso di reticolo concavo, anche in questo caso è stata valutata la potenza per unità di superficie del fascio collimato. I risultati sono riportati in Tabella 6.6.

λ [μm]	Potenza per unità di superficie [μW/mm^2]	Fotoni/(sec mm2)
0,145	15,09	1,101E+13
0,187	2,51	2,366E+12
0,230	1,47	1,698E+12
0,273	0,63	8,639E+11
0,315	0,34	5,316E+11

Tabella 6.6 – *Potenza per unità di superficie.*

6.5.3 – Un precisazione sul reticolo del monocromatore

Per completezza di trattazione, va fatta una precisazione sul tipo di reticolo impiegato nel monocromatore proposto da McPherson. In questa analisi sono stati considerati due tipi differenti di reticolo, uno concavo ed uno toroidale, per stimare le caratteristiche della sorgente

UV per l'intervallo 145÷315 nm. Tuttavia, il reticolo impiegato nel monocromatore reale è di tipo differente rispetto ai due considerati. In particolare si tratta di un reticolo olografico corretto per le aberrazioni, di Tipo IV. I reticoli di questo tipo sono progettati per focalizzare uno spettro su di una superficie piana, rendendolo adatti all'utilizzo con rivelatori 2D.

Questi reticoli sono caratterizzati da solchi che non sono né paralleli né equispaziati, ma sono ottimizzati per creare un'immagine quasi perfetta della fenditura di ingresso sul piano del rivelatore o della fenditura di uscita. Grazie alle loro caratteristiche costruttive, permettono di raccogliere in maniera più efficiente la luce ed hanno un rapporto segnale/disturbo molto inferiore rispetto ai tradizionali reticolo concavi impiegati nel montaggio tipo Rowland. Inoltre possono essere impiegati per focalizzare sorgenti distinte sullo stesso piano immagine. Sono praticamente privi di astigmatismo e consentono di costruire uno spettrografo utilizzando un singolo elemento ottico fisso: il reticolo stesso. Nonostante sia possibile costruire un monocromatore mantenendo il reticolo fisso (impiegando un montaggio e una geometria differenti rispetto al Seya-Namioka), nel caso del monocromatore McPherson, il reticolo viene fatto ruotare per selezionare la lunghezza d'onda da focalizzare sulla fenditura di uscita. Questo tipo di funzionamento permette di ottenere comunque un'ottima dispersione ed accuratezza, permettendo nel contempo di mantenere le dimensioni del monocromatore molto ridotte. È quindi possibile costruire un monocromatore leggero e poco ingombrante.

L'analisi presentata in questo capitolo è stata fatta per ottenere una stima delle caratteristiche del sistema ottico, senza la pretesa di calcolare con precisione tutti i suoi parametri di interesse. Infatti, viste le caratteristiche del sistema reale, sicuramente migliori rispetto a quelle di quello considerato nella simulazione, si può affermare che i parametri calcolati costituiscono il caso peggiore: è plausibile pensare che il sistema reale sia più efficiente o abbia al più la stessa efficienza di quello usato nella simulazione.

6.6 Il sistema di calibrazione rapportato a PHEBUS

In base a quanto emerso dall'analisi appena presentata, si può affermare che il sistema in analisi è in grado di produrre le necessarie righe spettrali nel range 145÷315 nm.

L'intensità di tali righe è variabile con la lunghezza d'onda, ma considerando lo spettro di emissione della lampada al Deuterio fornito dal costruttore, si ricava che il sistema è in grado di produrre un fascio di uscita caratterizzato da un'intensità di fotoni dell'ordine di 10^{14}.

In base ai dati a disposizione su PHEBUS, il valore previsto del numero medio di conteggi al secondo durante la fase operativa dello strumento, sull'intera superficie del

rivelatore, risulta essere di 3.000 conteggi. Ciò significa che l'intensità del fascio in uscita alla sorgente UV risulta essere molto superiore a quella prevista una volta in orbita attorno a Mercurio. Sarà quindi necessario attenuare tale fascio, per evitare di saturare lo strumento, rendendo impossibile la calibrazione.

Conclusioni

La trattazione effettuata a proposito dello strumento spaziale PHEBUS ha permesso di analizzarlo nel suo complesso e definire le condizioni operative e la strumentazione necessaria per la sua calibrazione.

L'analisi della facility di calibrazione ha evidenziato i seguenti punti:

- La camera da vuoto presente presso il laboratorio "Luxor" di Padova è tecnicamente in grado di ospitare lo strumento e creare il livello di vuoto necessario a simulare le condizioni operative di PHEBUS, una volta in orbita attorno a Mercurio. Permette di raggiungere un livello di pressione di 10^{-6} mbar, che non è quello del vuoto interplanetario ma è comunque sufficiente a simulare le condizioni operative durante le operazioni a Terra.

  Il sistema di pompaggio inoltre garantisce di operare in sicurezza durante la calibrazione, perché è dotato di controlli e protezioni contro eventuali system failure del sistema di pompaggio.
- Per completare la facility sarà necessario progettare e costruire un supporto ad – hoc per lo strumento, che permetta di collocarlo all'interno del tank e soprattutto ne favorisca l'orientamento: prevedendo di effettuare misurazioni con lo strumento in posizioni differenti sarà necessario poter ruotare PHEBUS facilmente e con precisione, in modo da riuscire ad allineare nella maniera voluta lo strumento con la sorgente UV. Una soluzione dotata di azionamenti elettrici controllati da un apposito software è auspicabile.
- La filosofia di calibrazione "a spot" consente di evitare i problemi di disuniformità del fascio collimato, in modo da illuminare lo strumento con un fascio il più uniforme possibile. La possibilità di impiegare un fascio di ridotte dimensioni permette inoltre di sfruttare al meglio la radiazione uscente dal sistema sorgente: ciò permette di concentrare i fotoni disponibili in un'area più piccola, fornendo quindi una maggior intensità nell'area interessata dal fascio.
- La "full field calibration" permette di verificare il corretto funzionamento dello strumento, una volta calibrato con la calibrazione "a spot".
- Per effettuare la calibrazione "a spot" sarà necessario costruire una maschera forata, da posizionare di fronte al baffle, che permetta di limitare con precisione il fascio che entra nello strumento. Tale maschera dovrà avere dei fori calibrati e dovrà essere

caratterizzata otticamente, definendo la percentuale di radiazione che lascia passare, prima di impiegarla per la calibrazione. Il diametro dei fori previsto è di 5 mm.

- Per la caratterizzazione della maschera sarà necessario utilizzare un fotodiodo calibrato. La scelta del fotodiodo non è ancora stata fatta.
- La caratteristiche stimate della soluzione proposta quale sorgente di radiazione UV da impiegare per la calibrazione del sensore EUV sono sufficienti: prevedendo di impiegare un singolo specchio collimatore (torico o parabolico, con coating in Platino o Al-MgF2) per ottenere il fascio collimato, si dispone di una quantità di fotoni sufficiente per effettuare la calibrazione. Sarà necessario progettare e realizzare uno specchio collimatore di tipo custom, definendo in particolare le dimensioni del fascio UV che si vuole ottenere. Il diametro massimo consigliato per lo specchio è di 120 mm: dimensioni maggiori introducono notevoli problemi realizzativi.
- Le caratteristiche stimate della sorgente proposta per la calibrazione del sensore FUV sono sufficienti: in particolare, dato il conteggio stimato di fotoni molto elevato, sarà necessario pensare ad una soluzione che permetta di ridurre l'intensità del fascio in modo da evitare di saturare il RAE del sensore FUV. La sorgente per la calibrazione dell'FUV prevede l'impiego di componenti standard, commercializzati da McPherson.

Appendice A

Calcolo del raggio di curvatura del reticolo sferico

Di seguito sono riportati i calcoli effettuati per stimare il raggio di curvatura del reticolo sferico utilizzato nelle simulazioni del sistema ottico (monocromatore).

Dato un reticolo di raggio R, l'equazione del fuoco orizzontale per un reticolo sferico è la seguente:

$$\frac{\cos^2\alpha}{r} - \frac{\cos\alpha}{R} + \frac{\cos^2\beta}{r'} - \frac{\cos\beta}{R} = 0 \qquad \text{(A.1)}$$

e le sue soluzioni sono:

$$r = R\cos\alpha, \quad r' = R\cos\beta \qquad \text{(A.2)}$$

$$r = \infty, \quad r' = \frac{R\cos\beta}{\cos\alpha + \cos\beta} \qquad \text{(A.3)}$$

Nel nostro caso, l'unica soluzione che ha significato è la prima. I dati noti per il calcolo di R sono: r ed r'. Vale inoltre la relazione $\alpha + \beta = 64°$. I passaggi matematici sono i seguenti:

$$R = \frac{r}{\cos\alpha} = \frac{r'}{\cos\beta} \qquad \text{(A.4)}$$

$$\frac{r}{\cos\alpha} \times \cos\beta = r' \qquad \text{(A.5)}$$

$$\frac{r}{\cos\alpha} \times \cos(64 - \alpha) = r' \qquad \text{(A.6)}$$

$$\frac{r}{\cos\alpha} \times (\cos 64 + \sin 64 \sin\alpha) = r' \qquad \text{(A.7)}$$

$$r\cos 64\, r + \sin 64 \tan\alpha = r' \qquad \text{(A.8)}$$

Da quest'ultima equazione, risolvendo rispetto ad α e sostituendo i valori r=198,9074, r'=182,1434, si ricavano prima il valore di α e poi quello di β:

$$\alpha = 27{,}97° \qquad \text{(A.9)}$$

$$\beta = 64° - \alpha = 36{,}03° \qquad \text{(A.10)}$$

È immediato a questo punto ricavare il valore di R:

$$R = \frac{r}{\cos\alpha} = \frac{198{,}9074}{\cos 27{,}97°} = 225{,}2139\ mm \qquad \text{(A.11)}$$

Appendice B

Calcolo della rotazione del reticolo per la selezione della lunghezza d'onda

Di seguito sono riportati i calcoli effettuati per stimare il raggio di curvatura del reticolo sferico utilizzato nelle simulazioni del sistema ottico (monocromatore). Partendo dallo schema riportato in Figura 3.2 nel Capitolo 3 e considerando l'equazione del reticolo concavo (B.1)

$$\pm m\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta) \tag{B.1}$$

si ricava il seguente sistema:

$$\begin{cases} \pm m\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta) \\ \beta = \alpha - 2\theta \end{cases} \tag{B.2}$$

Nel caso in esame, ponendo per comodità $c = \frac{\pm m\lambda}{d}$, si ottiene:

$$\begin{cases} \sin\alpha + \cos\beta = c \\ \beta = 2\theta - \alpha \end{cases} \tag{B.3}$$

Sostituendo l''espressione di β fornita dalla seconda equazione nella prima, si ottiene l'equazione che fornisce il valore dell'angolo di inclinazione del reticolo:

$$\sin\alpha + \sin(2\theta - \alpha) = c \tag{B.4}$$

$$\sin\alpha - \sin\alpha\cos 2\theta + \cos\alpha\sin 2\theta = c \tag{B.5}$$

$$\sin\alpha - \sin(2\cos^2\theta - 1) + 2\cos\alpha\sin\theta\cos\theta = c \tag{B.6}$$

$$\sin\alpha \times (1 - 2\cos^2\theta + 1) + 2\cos\alpha\sin\theta\cos\theta = c \tag{B.7}$$

$$-2\cos^2\theta\sin\alpha + 2\cos\alpha\sin\theta\cos\theta = c \tag{B.8}$$

$$2\cos\vartheta \times (-\sin\alpha\cos\theta + \cos\alpha\sin\theta) = c \tag{B.9}$$

$$2\cos\theta\sin(\theta - \alpha) = c \tag{B.10}$$

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{c}{2\cos\theta} \tag{B.11}$$

Si arriva infine all'espressione finale per il calcolo di α:

$$\alpha = \theta - \sin^{-1}\left(\frac{c}{2\cos\theta}\right) \tag{B.12}$$

Sostituendo il calore di *c*, si ricava:

$$\alpha = \theta - \sin^{-1}\left(\frac{\frac{\pm m\lambda}{d}}{2\cos\theta}\right) \tag{B.13}$$

L'equazione (B.13) è quella utilizzata per calcolare l'angolo di inclinazione α utilizzato nelle simulazioni del monocromatore con ZEMAX, riportate nel Capitolo 5.

Appendice C

Breve biografia del professor Giuseppe "Bepi" Colombo

Giuseppe Colombo nacque a Padova il 2 ottobre 1920. Nono di dieci fratelli, partecipò alla campagna di Russia: in seguito alle ferite venne decorato della medaglia al valor militare.

Nel 1944 si laureò in matematica alla Normale di Pisa e nel 1945 divenne assistente di Meccanica Razionale a Padova. Nel 1955 divenne Professore Ordinario di Meccanica Applicata presso la facoltà di Ingegneria di Padova.

Nel corso della sua attività universitaria ha tenuto lezioni di Meccanica Celeste, Geodesia Spaziale[1] (il "Centro di Geodesia Spaziale dell'Agenzia Spaziale Italiana" sito a Matera è a lui intitolato), Meccanica Delle Vibrazioni e Dei Veicoli e Vettori Spaziali. Ha insegnato anche a Catania e a Modena.

Dal 1964 al 1976 ha fatto parte del comitato nazionale del Consiglio Nazionale delle Ricerche. Ha partecipato inoltre a ricerche presso "l'Harvard Smithsonian Center for Astrophysics" presso l'Università di Harvard, al "California Institute of Technology" (Caltech) ed al "Jet Propulsion Laboratory" di Pasadena, California.

Svolse una campagna di promozione della ricerca spaziale presso l'Agenzia Spaziale Italiana e presso l'Aeritalia di Torino e le Università di Padova, Pisa e Torino.

La NASA lo reclutò nel 1961, dopo il lancio del primo satellite artificiale. Nel 1965 era consulente per gli elaboratori IBM della NASA.

Soprannominato «Meccanico del cielo», il suo nome è legato al satellite al guinzaglio (Tethered, un'intuizione di Mario Grossi che Giuseppe Colombo contribuì a sviluppare a partire dai primi anni '70), all'idea di una zattera spaziale creata riutilizzando i serbatoi di propellente lasciati nello spazio dagli Space Shuttle e a quella di lanciare enormi specchi in orbita per concentrare i raggi solari su alcune zone della Terra per allontanare la nebbia.

Da sempre legato all'esplorazione di Mercurio, viene ricordato anche per la pianificazione di flyby multipli con il pianeta nel 1972-73, per aver progettato la missione Solar Probe, per aver promosso l'utilizzo di un nuovo tipo di radiometro e per aver capito che la variazione di luminosità azimutale dell'anello A di Saturno è dovuto alla sua struttura spiraliforme.

Contribuì alla riuscita dell'impresa del Mariner 10 del 1974, tra l'altro proponendo per la prima volta l'uso di una fionda gravitazionale con Venere che permise di far incontrare la sonda

[1] La "geodesia" è una disciplina appartenente alle scienze della Terra che si occupa della misura e della rappresentazione della Terra, del suo campo gravitazionale e dei fenomeni geodinamici (spostamento dei poli, maree terrestri e movimenti della crosta).

con Mercurio per ben tre volte. Scoprì l'accoppiamento esistente tra rivoluzione e rotazione di Mercurio (il pianeta compie tre rotazioni intorno al proprio asse ogni due rivoluzioni intorno al Sole).

Nel 1983 la NASA gli attribuì la medaglia d'oro per i numerosi successi ottenuti durante la sua lunga attività di scienziato. Collaborò al lancio della sonda Giotto, che nel 1986 incontrò la cometa di Halley. Il nome venne proposto da lui, in omaggio alla Natività di Giotto della Cappella degli Scrovegni, in cui è raffigurata la cometa.

Nel 1999, l'ESA ha deciso di intitolargli la missione spaziale che porterà su Mercurio lo strumento PHEBUS.

Morì a Padova il 20 febbraio 1984.

Appendice D

I circuiti di readout

La nuvola elettronica che esce dai micro canali può essere diretta con un opportuno campo elettrico, verso un anodo raccoglitore, e quindi essere letta. In linea di principio, usando un'unica piastra conduttrice, il sistema MCP – anodo si potrebbe ricondurre ad un fotomoltiplicatore di quelli tradizionali, che non tiene conto della forma geometrica della sorgente. Viceversa, usando altri anodi come quelli mostrati in Figura D.1 è possibile individuare la posizione $x - y$ dell'evento e realizzare un rivelatore bidimensionale a conteggio di fotoni. Esistono diverse tecniche per stabilire la posizione della nuvola elettronica che arriva sull'anodo; le più usate sono due:

- uso di un "Anodo Conduttivo", formato da una serie di elettrodi in grado di risentire della carica in modo proporzionale alla posizione,
- uso di uno "Schermo di Fosforo", che trasforma la nuvola elettronica in segnale luminoso che viene letto da un sensore di immagini (CCD o CID).

Al primo gruppo appartengono gli anodi detti *Wedge & Strip*, *Multi Anode Microchannel Array (MAMA)* e *Delay Lines*. Al secondo gruppo appartengono i rivelatori *ICCD* e *ICID*.

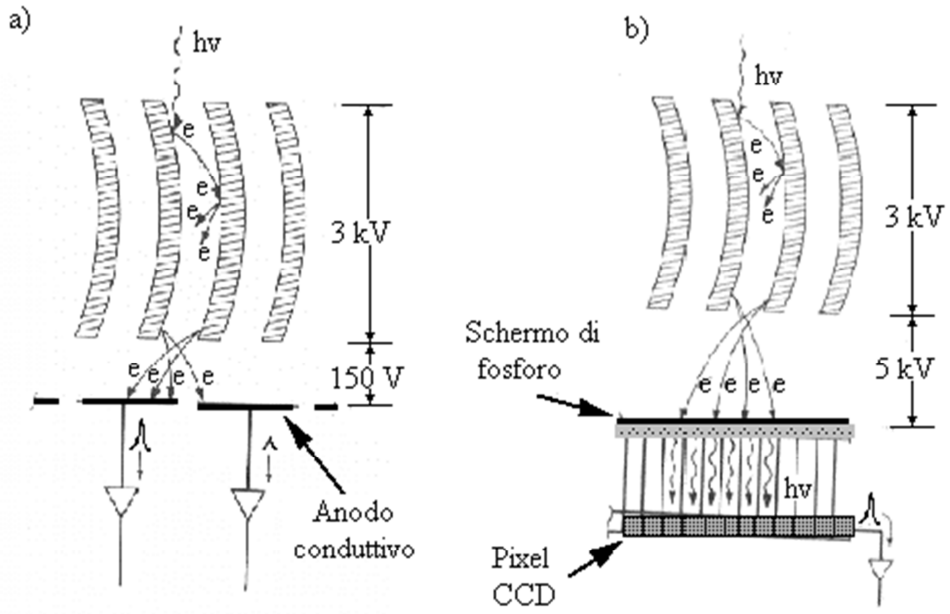


Figura D.1 – *Uso di un anodo conduttivo in a) e di uno schermo di fosforo in b).*

L'anodo "Wedge&Strip" (WSA)

L'anodo WSA è in grado di determinare la posizione X – Y dell'evento utilizzando solamente tre elettrodi, nel modo seguente. La nuvola elettronica che colpisce l'anodo WSA viene ripartita sui tre elettrodi che sono complanari ed hanno ciascuno una forma particolare (*Wedge, Strip e Zig-Zag*). Le coordinate X e Y vengono univocamente determinate dai rapporti tra la carica risentita dagli elettrodi (**Qw** e **Qs**) e la carica totale (**Qz**). Dalla Figura D.2 possiamo notare come lo spessore dell'anodo Strip varia al variare dell'asse *x*, quello dell'anodo wedge varia al variare dell'asse *y* da cui possiamo ricavare le formule per la lettura della carica:

$$x = \frac{2Q_s}{Q_w+Q_s+Q_z} \qquad \text{(D.1)}$$

$$y = \frac{2Q_w}{Q_w+Q_s+Q_z} \qquad \text{(D.2)}$$

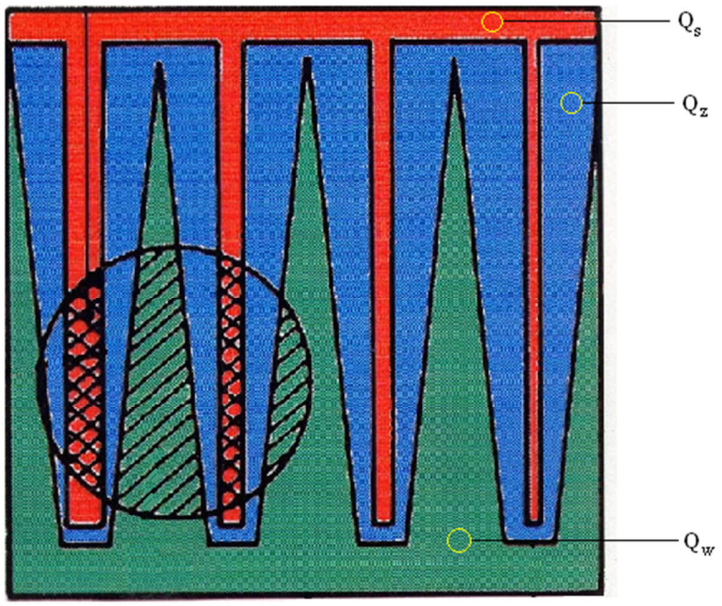


Figura D.2 – *Schematizzazione di come è strutturato un anodo Wedge&Strip.*

Il MAMA

Il MAMA è costituito da tre parti fondamentali:

- un MCP a canali curvi che produce una PHD[2] saturata (FWHM = 50%) ed è libero da "ion feed-back",
- un fotocatodo depositato direttamente sulla superficie di ingresso (eliminando, in tal modo, sistemi di focalizzazione elettromagnetica),
- un anodo formato da una matrice di elettrodi detti "anodi a coincidenza" (coincidence – anode).

Con tale tipo di anodi la risoluzione spaziale viene definita unicamente dalla geometria degli elettrodi. L'anodo a coincidenza nella sua forma più semplice impiega due insiemi di elettrodi per determinare le coordinate X e Y. La nuvola elettronica che arriva su una coppia di elettrodi viene individuata dalla coincidenza dei segnali corrispondenti agli elettrodi. In tal modo, per ottenere una matrice n×m di pixel, occorrono n+m amplificatori e circuiti discriminatori.

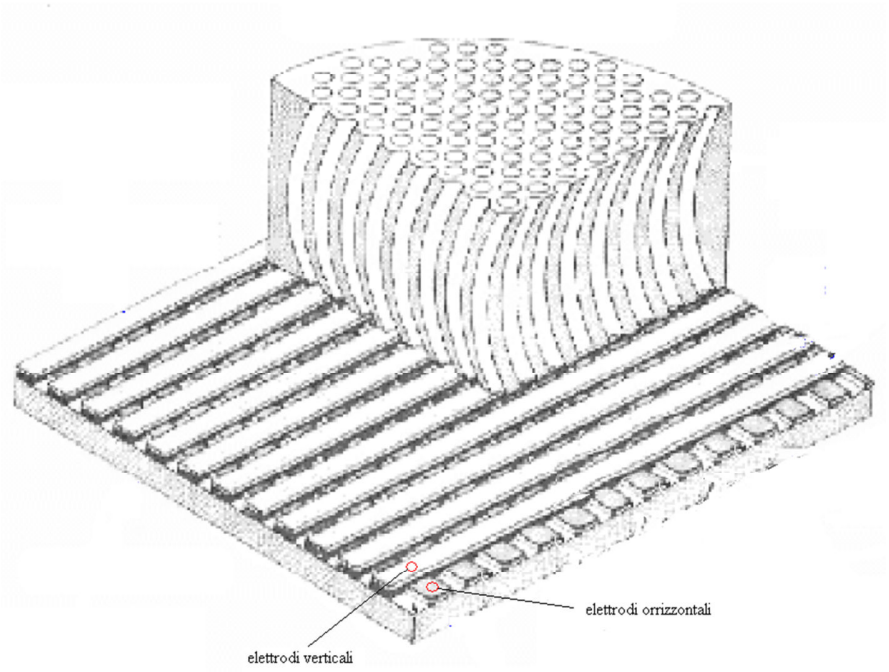


Figura D.3 – *Figura rappresentativa un anodo MAMA.*

MCP con schermo di fosforo accoppiato a CCD

[2] PHD – Pulse Height Distribution: con il termine distribuzione degli eventi si intende l'andamento del numero degli eventi, intesi come impulsi di elettroni, in funzione del guadagno dei canali

Un altro metodo per rivelare la posizione della nuvola elettronica che fuoriesce da un MCP è quello che fa uso di uno schermo di fosforo (che produce un evento luminoso) accoppiato, tramite un'opportuna ottica di trasferimento (anche fibre ottiche), ad un CCD che funziona a scansione televisiva.

Come si vede nello schema a blocchi della Figura D.4, il segnale di uscita del CCD viene collegato ad un circuito elettronico che eseguendo un'elaborazione dell'immagine, riesce ad individuare l'evento luminoso con una precisione che è una frazione di pixel.

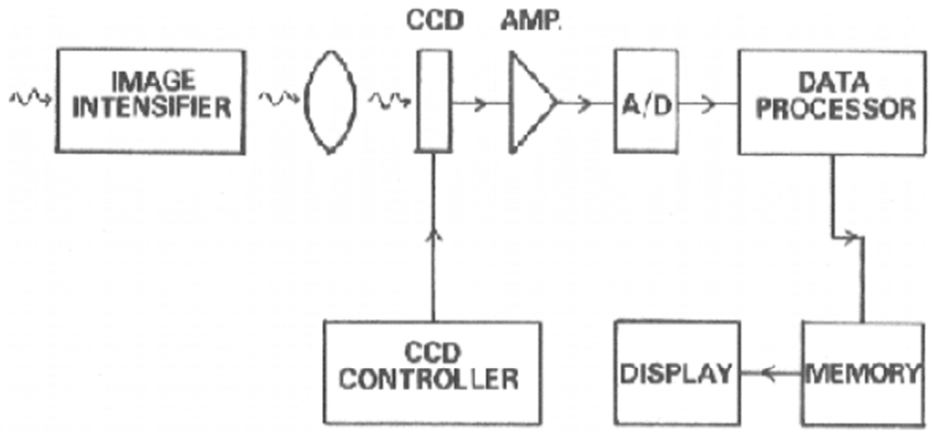


Figura D.4 – *Funzionamento del circuito di readout con schermo di fosforo accoppiato a CCD.*

MCP con readout a linea di ritardo

Un circuito di readout con *"delay line"* riesce ad estrarre l'informazione sulla posizione della nuvola elettronica grazie alla differenza tra i tempi di arrivo del segnale alle due estremità di una linea di ritardo (vedi Figura D.5).

Quando un impulso proveniente da un MCP incide in una specifica posizione della linea di ritardo esso si divide in due impulsi che percorreranno la linea di ritardo nelle due direzioni opposte. La differenza di tempo tra gli istanti di arrivo dell'impulso ai due capi della linea è direttamente proporzionale alla posizione originale nell'anodo ed inversamente proporzionale alla velocità di propagazione dell'impulso all'interno della linea. Per poter minimizzare il più possibile l'errore di lettura della posizione dell'impulso incidente, ottimizzare cioè la risoluzione spaziale, bisogna abbassare la velocità di propagazione degli impulsi all'interno della linea e diminuire l'errore di lettura dei tempi di ritardo. La geometria, la forma ed il materiale della

linea di ritardo determinano la velocità di propagazione mente l'errore di lettura sul tempo dipende dai sensori elettronici che rilevano gli impulsi e dalla forma degli stessi. Questi due fattori non sono completamente indipendenti. Infatti delle linee di ritardo troppo lente possono influenzare la forma dell'impulso e quindi aumentare l'errore di lettura sul tempo.

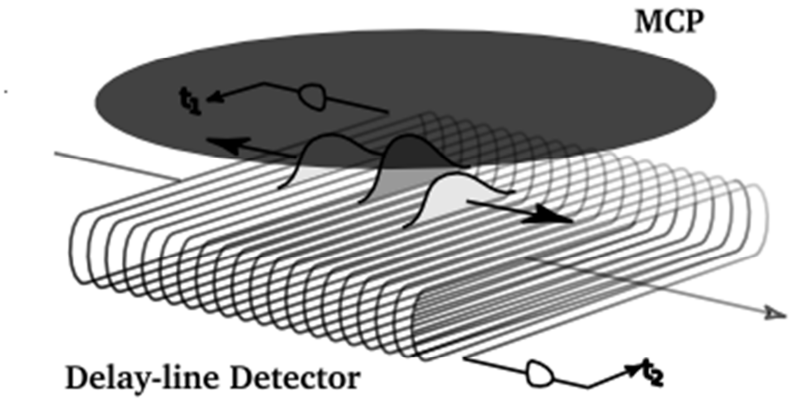


Figura D.5 – *Funzionamento del circuito di readout con delay line.*

Per dare un'idea degli ordini di grandezza dei tempi in gioco, tipiche velocità di propagazione all'interno della linea di ritardo sono $1\,{}^{mm}/_{ns}$ e la durata degli impulsi in uscita è dell'ordine dei $5\,ns$. Perciò per raggiungere accuratezze spaziali dell'ordine dei $25\,ns$ la rilevazione del tempo di arrivo dell'impulso (largo $5\,ns$) deve raggiungere accuratezze dell'ordine dei $5\,ps$. Le forme delle linee di ritardo sono sostanzialmente quattro:

- serpentina
- elicoidale
- double delay line
- XDL

In Figura D.6 si vedono le strutture delle linee corrispondenti alle quattro diverse forme. L'impatto della scelta della forma della linea di ritardo nella risoluzione del circuito è dovuto alla deformazione dell'impulso.

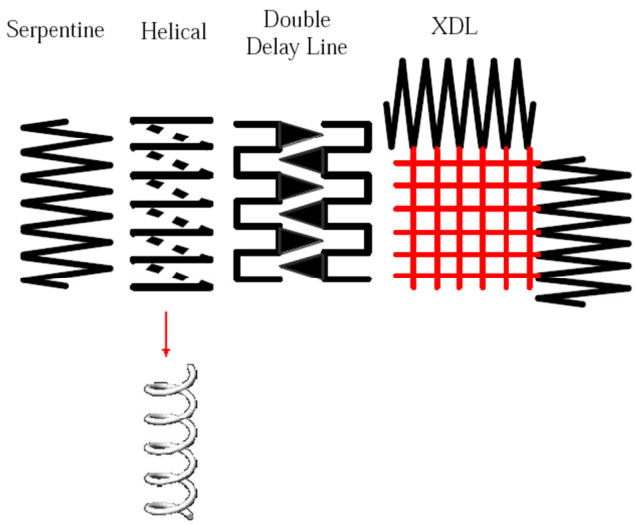


Figura D.6 – *Diverse alternative per le linee di ritardo.*

Una semplice schematizzazione con i principali componenti del circuito elettronico di readout viene raffigurata in Figura D.7.

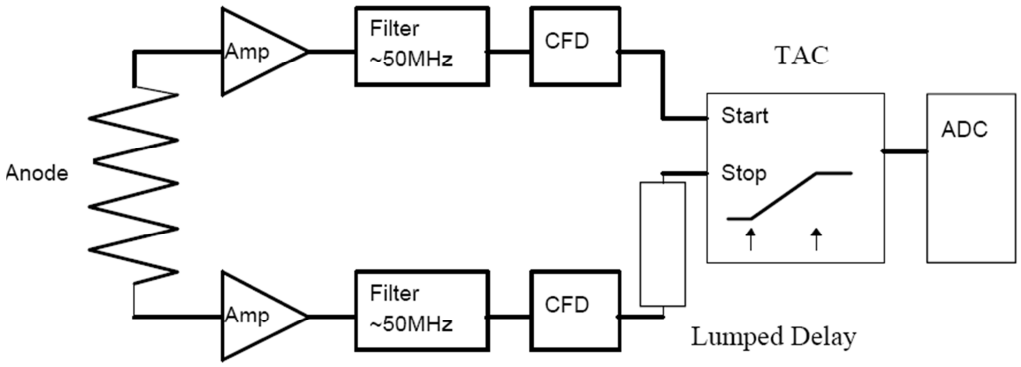


Figura D.7 - *Schematizzazione di un circuito elettronico di readout con linee di ritardo.*

Gli impulsi arrivano provenienti dai due estremi della linea di ritardo (circa 10 mV di picco e 5 ns di durata) sono amplificati e quindi filtrati da filtri passa alto e passa basso. Una volta filtrati, gli impulsi giungono ai "Constant Fraction Discriminator (CFD)"; essi producono

un segnale logico di start e uno di stop. A questo punto il segnale di stop passa attraverso un circuito elettronico ritardatore e poi finisce insieme al segnale di start dentro il "Time to Amplitude Convert (TAC)" la cui uscita è una tensione analogica proporzionale alla differenza di tempo tra i due segnali logici. Tale tensione viene quindi digitalizzata ed essa rappresenta la locazione del pixel dell'impulso incidente. Vediamo ora nel dettaglio il funzionamento delle diverse componenti nella Figura D.7.

Amplificatori e filtri

Amplificatori con alta banda passante e con basso rumore sono necessari per readout con linee di ritardo: in questo modo si possono ottenere le migliori prestazioni in risoluzione. I filtri devono essere aggiunti per ottimizzare la forma dell'impulso prima del suo ingresso nel CFD. La scelta dei filtri ovviamente dipende anche dalla forma dell'impulso. Tipicamente un filtro di Chebyshev a 100MHz è usato per via della sua netta attenuazione alle alte frequenze, mentre per le basse frequenze è usato un semplice filtro RC.

Time to Amplitude Converter (TAC)

Il TAC crea una tensione (Volt) proporzionale alla differenza tra il tempo di arrivo degli impulsi di start e di stop. Si tratta sostanzialmente di un circuito integratore che integra una corrente costante, in un capacitore di alta capacità, nel tempo che intercorre tra il segnale di start ed il segnale di stop.

CFD

Questo componente è praticamente l'elemento più importante del circuito di readout. Il suo compito è quello di ricevere un impulso analogico e generare un impulso logico con un fissato offset nel tempo rispetto all'impulso analogico incidente.

In Figura D.8 a) vediamo uno schema a blocchi di uno dei possibili circuiti di CFD. Ad una funzione F del segnale di ingresso viene sottratto il segnale di ingresso ritardato di un tempo t_0, quando il segnale $F \cdot V(t) - V(t - t_0)$ passa da valori negativi a valori positivi (vedi Figura D.8 b)) allora l'amplificatore in uscita commuta dallo stato logico 0 allo stato logico 1. I parametri F e t_0 sono ottimizzati in funzione dell'impulso amplificato dell'anodo.

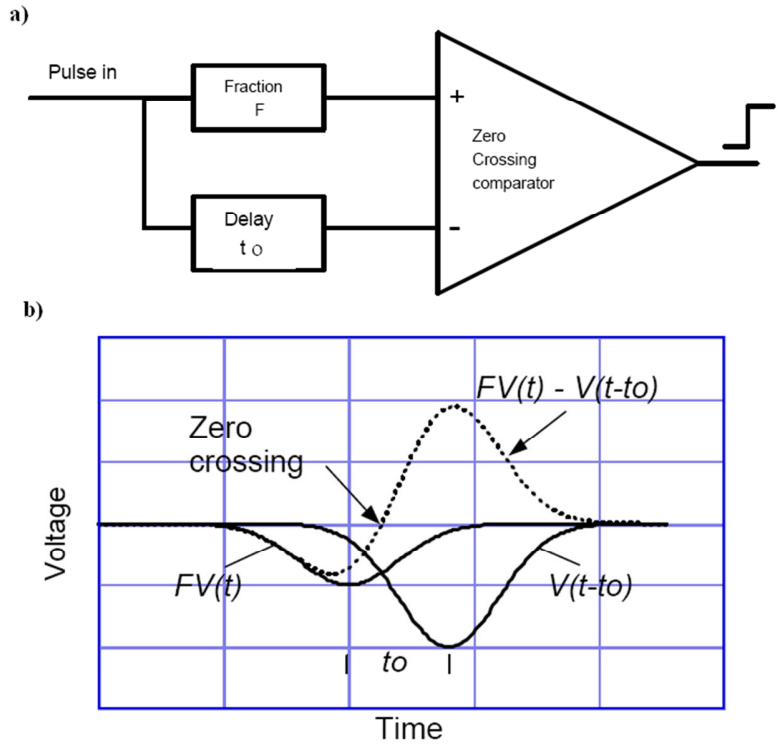


Figura D.8 – *a) schema a blocchi di un CFD, b) andamento dei segnali.*

Esempi applicativi

MAMA: il telescopio spaziale HUBBLE fa uso di un rivelatore a "conteggio di fotoni" MCP di tipo MAMA con un fotocatodo allo Ioduro di Cesio (CsI) ed un anodo a multi elettrodi capace di ottenere una area di 1024 x 1024 pixel con ciascun pixel da 25 μm.

WSA: la missione spaziale EUVE della NASA usa un MCP con readout del tipo WSA, tale rivelatore ha una risoluzione di 120 μm compreso in una superficie circolare il cui diametro è 50 mm.

Delay line: nella missione spaziale ROSETTA, più precisamente nello strumento ALICE (un "Ultraviolet Imaging Spectrograph"), abbiamo un MCP del tipo Z-stack con circuito di readout del tipo delay line DDL. I fotocatodi sono di due tipi KBr (700-1200 Å) e CsI (1230-2050 Å) . Le sue dimensioni sono 35 mm x 20 mm, ed ha un pixel format di (1024 x 32) – pixel. In Figura

D.8 vediamo il contenitore da alto vuoto 10^{-5} Torr con una finestra di MgF_2 che trasmette solo la radiazione con lunghezza d'onda maggiore di 1200 Å, questo per non danneggiare il rivelatore durante i test e le misure fatte a terra.

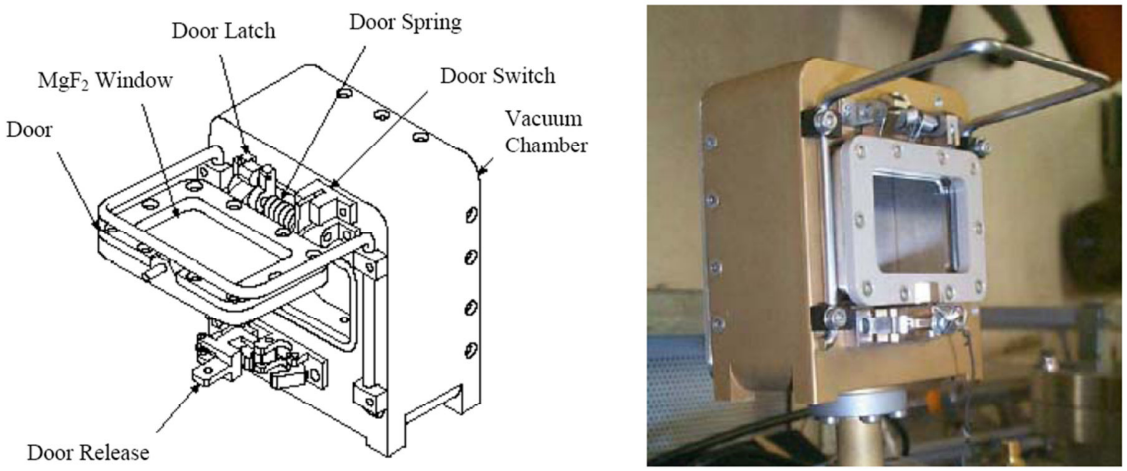


Figura D.8 – *MCP in test prima della missione.*

Allegato A

Compact – Rugged – Lightweight – Low cost

High throughput (f/4.5)

Type IV concave holographic gratings

Aberration corrected optical system for imaging

Multiple port versions available on request

Spectrometer & Spectrograph operation

The optical design is based on the Seya-Namioka, simple grating rotation changes the output wavelength. To make use of special grating technologies a 64° degree included angle is used. A 1200 g/mm type IV aberration corrected concave grating is used for optimum performance.

The concave grating collects, disperses and focuses energy at the exit focal plane. Type IV correction maintains a fixed focal length to the exit slit, which while not perfect, varies less than the depth of focus of the diffracted image. Compensation for spherical aberration is made by utilizing curved rulings. As the grating rotates to longer wavelengths the image height is compressed maintaining good throughput and imaging qualities. Typically this instrument will have one third the astigmatism of a typical Seya-Namioka design.

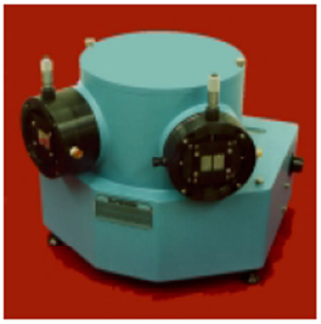


Figure 4. Model 234/302, 0.2 meter focal length vacuum scanning spectrometer.

A compact, lightweight design allows users to mount this instrument directly to experimental chambers. By design, the slit assemblies can support the weight of the entire instrument.

Model 234/302 is popular for use in systems due to its compact design, high throughput and resolution. The system shown below combines a MgF_2 windowed deuterium source, an optimization optic, and a collimating chamber.

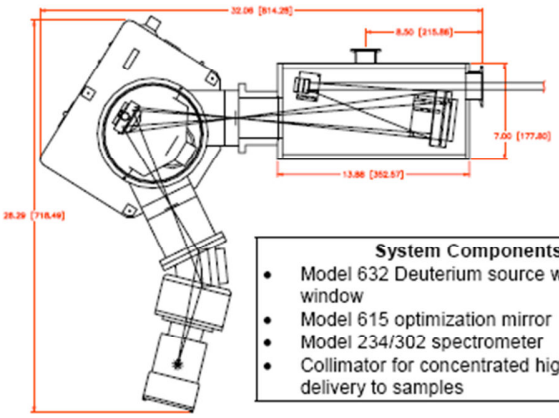
The arrangement shown is commonly used by industrial quality control in crystal growing, thin film / filter measurement, detector response testing, excitation of phosphorescent materials, etc. Note that use of the collimating chamber restricts use of the system to wavelengths longer than 105 nm due to the additional optical surfaces.

Model 234/302
part #: 8183-0234-1

Focal length: 200 mm
Included angle: 64°
f/number: 4.5
Resolution: 0.1 nm***
Dispersion: 3.4 nm/mm**
Accuracy: 0.1 nm
Reproducibility: 0.05 nm
Base vacuum: 1 x 10^{-6} torr

*** with 1200 G/mm, measured with 10 um slits x 4 mm high.**

**** Other gratings available, divide resolution and dispersion values by the difference in grating groove densities.**



System Components:

- Model 632 Deuterium source with MgF2 window
- Model 615 optimization mirror
- Model 234/302 spectrometer
- Collimator for concentrated high energy delivery to samples

If a low cost, multiple purpose vacuum ultraviolet spectro-analytical instrument is what your looking for, the Model 234/302 is the answer. It's size (13" x 13" x 10") and low weight (25 pounds) allow this instrument to be fixed to an experiment or to the slit of a larger instrument for use as a predisperser or narrow band variable filter.

Multichannel Operation

The Model 234/302 uses an aberration corrected grating which produces spectra suitably in focus and flat for interception via planar detectors as microchannel plates (MCP) or back illuminated (or scintillated) CCD detectors. Due to the corrected grating the focal plane lies at an angle of about 30° from the normal, placing mechanical restrictions on the detectors which may be employed.

Model 234/302S
part #: 8183-0234-S

Focal length: 200 mm
Included angle: 64°
f/number: 4.5
Resolution:* 0.1 nm*
Dispersion:* 3.4 nm/mm
Accuracy: 0.1 nm
Reproducibility: 0.05 nm
Base vacuum: 5 x 10^{-7} torr

*** with 1200 G/mm, measured with 10 um slits x 4 mm high.**

Operating MCP's requires a clean vacuum system capable of consistent 10^{-6} torr operation. The Model 234/302S offers a clean, contaminant free finish permitting rapid pump down and insuring a clean operating environment for the MCP's. Wavelength region accessible with MCP intensified detectors is < 300 Å to the far UV with a

Figure 1. Model 234/302S Spectrograph for use with VUV40RN (TM GEO Corp.) microchannel plate intensifier.

CsI photocathode, of course gated operation to 5 ns or better is available. MCP's intensifiers are described in the detector section.

Double Dispersion & Low Stray Light

The Model 234/302 can be configured as a double additive monochromator.

Mechanically linked versions are built for best tracking between gratings. These units must be specified at time of original purchase. Alternately, existing units can be combined and operated synchronously with independent scanning drives. Wavelength tracking is not as accurate over broad spectral regions because two separate wavelength drives are used (local calibration via computer permits improved tracking in specific areas). Figure 6. Shows a high resolution system providing pure excitation energy to semiconductor samples, where

Figure 6. Dedicated vacuum UV double spectrometer, Model 234/302D

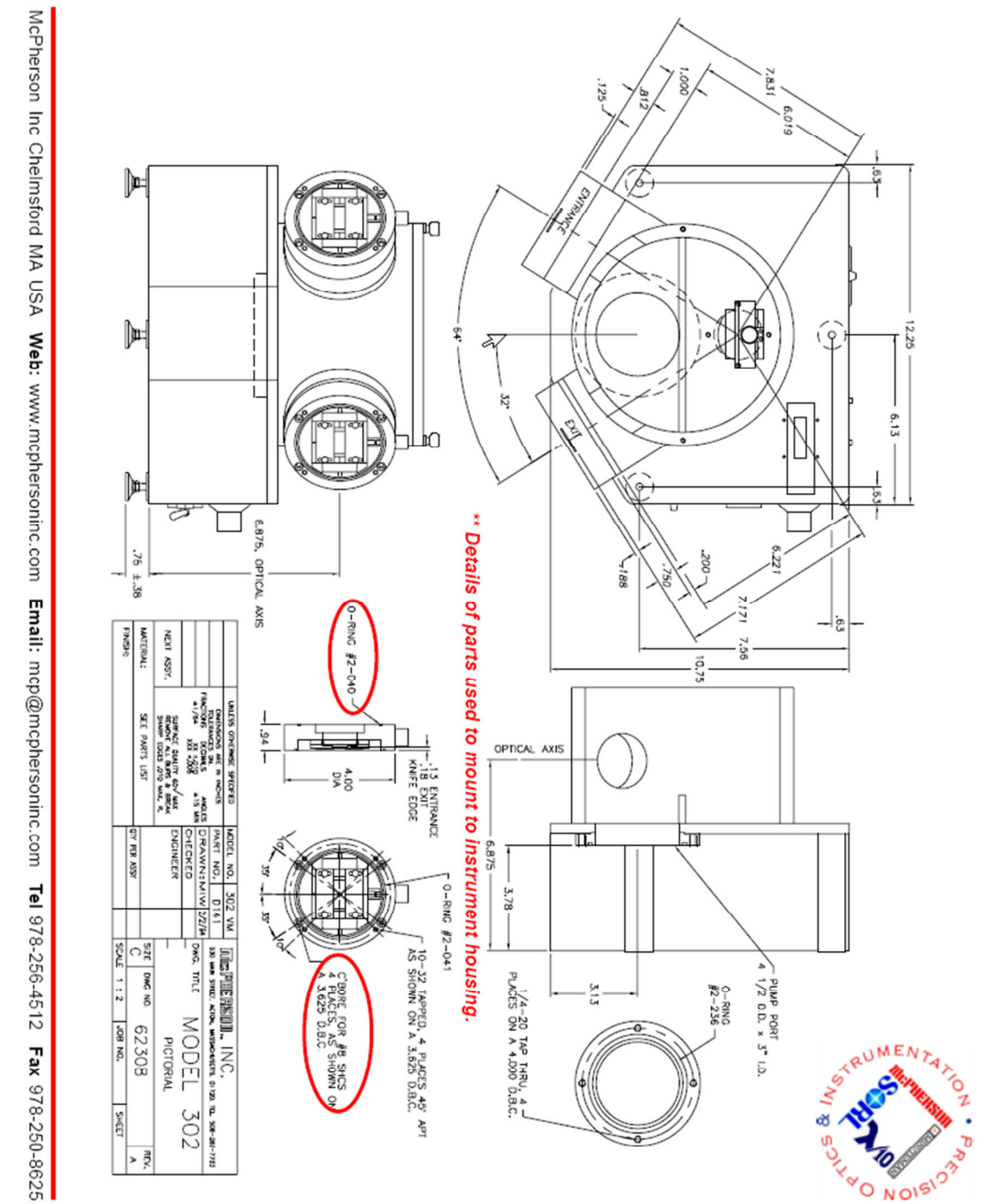
the resulting luminescence is of interest. The system uses a 150 Watt Deuterium source (Model 632MX) an optic for energy collection and f/number matching on both the entrance and exit ports (Model 615).

Model 234/302D
part #: 8183-0234-D

Focal length: 200 + 200 mm
Included angle: 180°
f/number: 4.5
Stray light: 1 part in 10^{-8}
Resolution:* 0.05 nm*
Dispersion:* 1.8 nm/mm
Accuracy: 0.1 nm
Reproducibility: 0.05 nm
Base vacuum: 1 x 10^{-6} torr

*** with 1200 G/mm, measured with 10 um slits x 4 mm high.**

Allegato B


** Details of parts used to mount to instrument housing.
McPherson Inc Chelmsford MA USA Web: www.mcphersoninc.com Email: mcp@mcphersoninc.com Tel 978-256-4512 Fax 978-250-8625
MODEL 302
PICTORIAL
62303
O-RING #2-040
O-RING #2-041
O-RING #2-236
PUMP PORT
OPTICAL AXIS
ENTRANCE
EXIT
INSTRUMENTATION & PRECISION OPTICS

Bibliografia

[1] Sito web della missione “BepiColombo”:
http://bepicolombo.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=30

[2] ESA Document Interface “PHEBUS Experiment Interface Document (EID-B)”, BC-EST-RS-02513, p.p. 28 – 29 – 30

[3] ESA Document Interface “PHEBUS Engineering Plan – 2.0”, PHEB_ENG_070128_SA_v2r0_Eng Plan_1

[4] ESA Document Interface “PHEBUS Optical Configuration @ Date 2007-03-21”, PHEBUS_optical_config_070321

[5] Michael Lampton, “The Microchannel Image Intensifier”

[6] James A. R. Samson, “Techniques of VACUUM ULTRAVIOLET SPECTROSCOPY”, John Wiley & Sons Inc. 1967, Capitolo 1

[7] James A. R. Samson, “Techniques of VACUUM ULTRAVIOLET SPECTROSCOPY”, John Wiley & Sons Inc. 1967, p.p. 5 ÷11

[8] James A. R. Samson & David L. Ederer, “Experimental Methods In The Physical Sciences – Volume 32”, Academic press 1998, p.p. 1 ÷ 6

[9] ESA Document Interface “PHEBUS Ground Calibration Plan”, PHEB_PL_070207_SA

[10] “Vacuum Vademecum”, Leybold Optics 1990

Ringrazio di cuore:

Mamma e papà, che mi hanno sempre sostenuto, supportato e sopportato, specialmente nei momenti difficili: vi voglio bene!

Alberto, che sa che essere mio fratello non è proprio facile (ma se la cava benissimo) & Gloria

Andrea, "l'Assessore", che mi ha sempre dato consiglio preziosi

Moreno, amico sincero

Gli ex compagni di Università e del Rossi: Nicola "Celestino V", Diego, Claudio, Manuel "Cappuccetto" Marin, Vittorio, Gianluigi "Gigi", che non rifiutano mai un bicchiere in compagnia

Marco & Giulia, per le ferie indimenticabili

Emanuele "Lele Zan8" & Erika, per le belle serate, per la disponibilità, per quei giorni ad Assisi

Denis, per il sostegno e gli indimenticabili mesi di "naja", & Laura, per la sua amicizia

Le "tose" del coro di Novoledo: Francesca, Luisa, Giada, che mi hanno fatto capire quanto è bello cantare e non hanno mai smesso di fare il tifo per me

Arles, per le nuotate alle sette di mattina e le chiacchierate, & Chiara

Matteo (e la sua mamma) per le "studiate" con gli immancabili dolcetti, & Manuela. "PipeWeb®" per il web hosting

Michele & Lara, per le risate e quel famoso corso di sommelier che un giorno spero faremo

Federica & Diego e Luisa, per i bei momenti passati insieme

Martina, per le colazioni e le chiacchierate

La biblioteca di Caldogno ed i suoi "abitanti": Albino, Paola, Maria Teresa, Lidia

Giulia, per le ore di chiacchierate (invece di studiare)

Alessio "37" e Moreno "38", per le serate in compagnia, quel giro in bici massacrante a Tonezza con annessi grigliata e Gran Premio e quel pomeriggio di rilievi nell'alveo dell'Igna

Denis, Michele "Trippy", Sara, Gianni e Fabio del Luxor: per la disponibilità ed i validi consigli

Vania ed Anna per il prezioso aiuto con ZEMAX®

"Loki" e "Red", perché pazientemente mi sopportano come padrone

Tutti coloro che consapevolmente oppure no, mi hanno aiutato a raggiungere questo importante traguardo.