

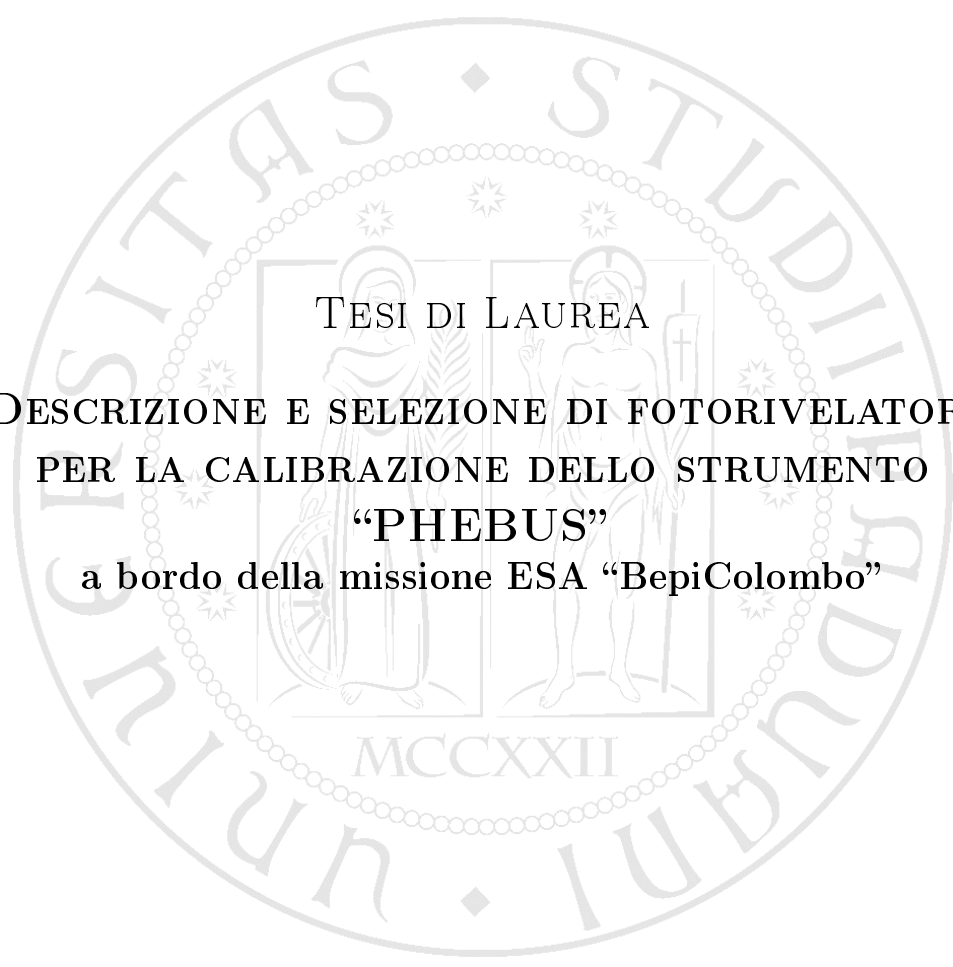


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

---

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

*Corso di Laurea in Ingegneria dell'Informazione*



TESI DI LAUREA  
DESCRIZIONE E SELEZIONE DI FOTORIVELATORI  
PER LA CALIBRAZIONE DELLO STRUMENTO  
“PHEBUS”  
a bordo della missione ESA “BepiColombo”

*Laureando*  
**Alberto Donazzan**

*Relatrice*  
**Prof.ssa M. G. Pelizzo**

*Correlatrice*  
**Dott.ssa P. Zuppella**

---

ANNO ACCADEMICO 2011/2012



## Sommario

La missione BepiColombo esplorerà il pianeta Mercurio e le sue peculiarità. *Probing of Hermean Exosphere By Ultraviolet Spectroscopy* (PHEBUS) è uno degli strumenti a bordo ed è costituito da un doppio spettrometro per l'estremo ultravioletto (EUV) e il lontano ultravioletto (FUV), destinato alla caratterizzazione dell'esosfera del pianeta. La necessità di calibrare il canale EUV di PHEBUS presso il laboratorio LUXOR (CNR - Istituto di Fotonica e Nanotecnologie, Padova) comporta un'accurata scelta dei fotorivelatori di riferimento da utilizzare. I fotodiodi si sono rivelati i più adatti e sono stati analizzati i principi di funzionamento, i pregi e i difetti delle diverse tipologie disponibili in commercio: fotoemissivi, a giunzione e ibridi.

## Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 La missione BepiColombo</b>	<b>4</b>
1.1 Descrizione dello strumento PHEBUS . . . . .	6
1.1.1 Obiettivi scientifici . . . . .	7
1.1.2 Struttura e componenti . . . . .	9
<b>2 Attività di calibrazione</b>	<b>14</b>
2.1 Apparato di misura per l'EUV . . . . .	14
2.1.1 Facility . . . . .	14
2.1.2 Sorgenti . . . . .	15
2.1.3 <i>Set-up</i> . . . . .	18
2.2 Procedura di misurazione . . . . .	21
2.2.1 Efficienza . . . . .	22
2.2.2 Campo visivo . . . . .	23
<b>3 Descrizione e selezione dei fotorivelatori</b>	<b>24</b>
3.1 Esperimento preliminare . . . . .	24
3.2 Fotodiodi . . . . .	27
3.2.1 Fotodiodi fotoemissivi . . . . .	28
3.2.2 Fotodiodi a giunzione . . . . .	29
3.2.3 Fotodiodi ibridi . . . . .	31
3.3 Fotorivelatori selezionati . . . . .	32
<b>Conclusioni</b>	<b>35</b>
<b>Riferimenti bibliografici</b>	<b>38</b>



## Introduzione

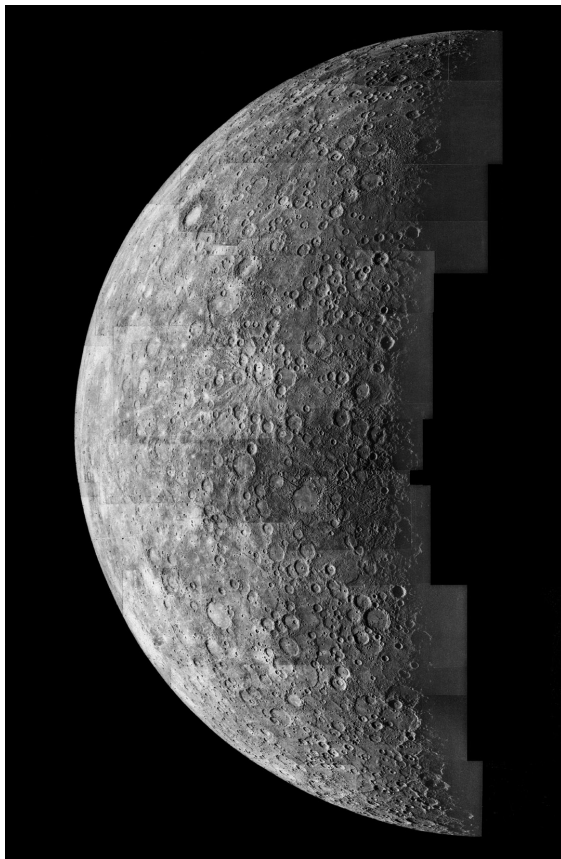


Figura 1: Mosaico di immagini raccolte dalla sonda NASA Mariner 10 durante il suo avvicinamento a Mercurio nel 1974; gli scatti sono stati effettuati a circa 200000 *km* di distanza dal pianeta.

Assieme a Terra, Venere e Marte, Mercurio forma la famiglia dei pianeti rocciosi (o terrestri) ed, essendo il più vicino al Sole, ha un ruolo fondamentale per la comprensione del processo di formazione planetaria. Conoscerne l'origine e la storia fornirebbe chiare informazioni sulle condizioni che favoriscono la nascita della vita, sia nel Sistema Solare che altrove.

In effetti, finché pianeti extra-solari simili alla Terra rimarranno inaccessibili agli astronomi, il Sistema Solare rimarrà l'unico "laboratorio" in cui testare modelli scientifici applicabili a sistemi planetari alternativi.

L'osservazione di Mercurio dalla Terra presenta notevoli difficoltà a causa della sua posizione molto vicina al Sole. I telescopi terrestri hanno dunque fornito pochi dati oltre a quelli su dimensioni, massa e periodo orbitale; in particolare, con analisi in banda elettromagnetica visibile e ultravioletta sono stati rilevati alcuni elementi (Na, K, Ca, O) presenti a bassa densità, che contribuiscono a formare la sua tenue atmosfera (esosfera).

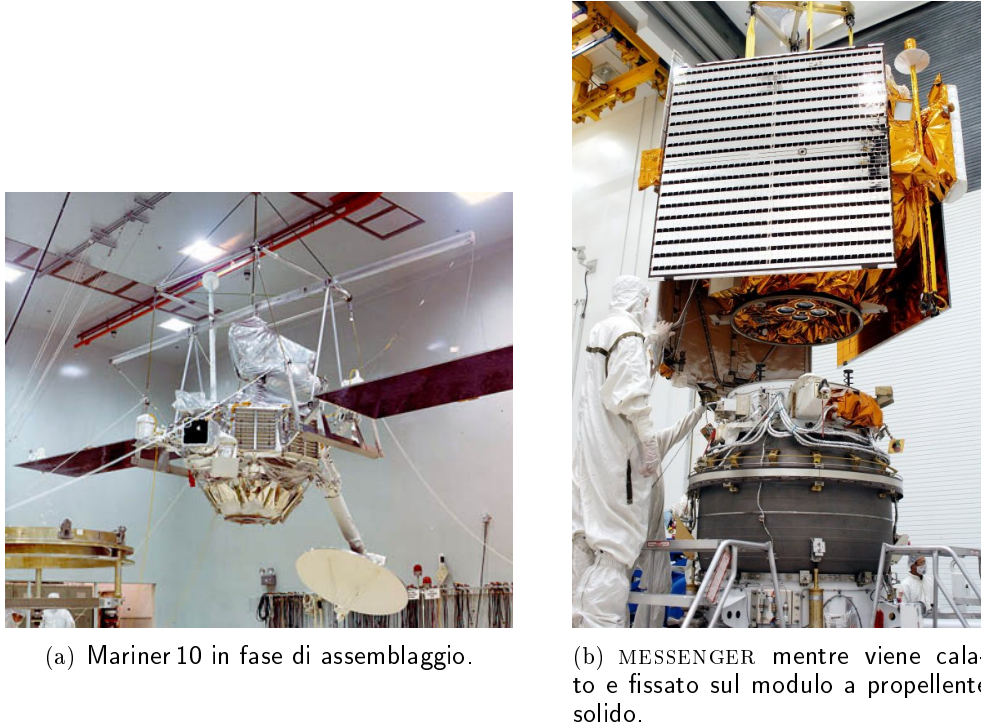


Figura 2: Immagini delle due sonde che hanno raggiunto e analizzato Mercurio.

Ulteriori dati utili sono stati raccolti dalle uniche due sonde che hanno visitato il pianeta: Mariner 10 e MESSENGER, entrambe missioni NASA. Mariner 10, grazie a tre *fly-bies* nel 1974-1975, ha raccolto le prime immagini ravvicinate della superficie ricca di crateri, fotografandone circa il 45%; inoltre ha rilevato la presenza di un debole campo magnetico, suggerendo la presenza di ferro nel nucleo, e ha evidenziato altri elementi che compongono l'esosfera (H, He), probabilmente contribuiti del vento solare [1]. MESSENGER (*MERcury Surface, Space ENVIRONMENT, GEOchemistry and Ranging*), lanciata nel 2004 ed entrata in orbita operativa il 18 marzo 2011, ha quasi completato la mappatura dell'intera superficie di Mercurio con una risoluzione senza precedenti; lo spettrometro UV a bordo (MASCS) opera nell'intervallo spettrale compreso fra 115 e 600 nm [2] e ha rilevato inaspettati cicli di genesi e fuga delle specie chimiche che compongono l'esosfera [3]. Questo fa dedurre l'esistenza sul pianeta di una complessa interazione fra esosfera, magnetosfera, superficie e vento solare.

Come appena accennato, la spettrometria UV è un utile strumento per l'indagine della composizione chimica e delle dinamiche di miscele di gas e gas ionizzati. Lo studio di un pianeta a bordo di un veicolo spaziale è solo una

delle molteplici applicazioni, grazie alla grande flessibilità di questo strumento: tantissime le configurazioni ottiche possibili e vasta la gamma di *detector* a disposizione.

Negli anni è cresciuta la richiesta di rivelatori stabili nelle regioni spettrali dell'estremo ultravioletto (EUV) e dei raggi X. Questa necessità giunge, in parte, dallo sviluppo della terza generazione di sorgenti di luce di sincrotrone, in grado di produrre fasci ad alta brillantezza a corte lunghezze d'onda. Altre aree di applicazione includono l'astronomia ultravioletta e a raggi X, la fotolitografia EUV, la microscopia a raggi X e lo studio dei plasmi. Inoltre, molti esperimenti richiedono, in aggiunta alla stabilità, accurate misure di intensità e quindi l'uso di *detector* calibrati [4].

La trattazione si articolerà come segue:

nel **PRIMO CAPITOLO** si descrivono gli scopi e la struttura della missione spaziale BepiColombo, destinata allo studio di Mercurio. Particolare attenzione sarà dedicata allo spettrometro PHEBUS, destinato al monitoraggio dell'esosfera del pianeta;

nel **SECONDO CAPITOLO** sono presentati l'apparato di misura e le procedure che verranno utilizzate per condurre la calibrazione del canale EUV dello spettrometro;

il **TERZO CAPITOLO** è dedicato alla scelta del fotorivelatore di riferimento con cui si effettueranno le misure assolute di intensità. Saranno descritti i principi di funzionamento, i pregi e i difetti dei candidati considerati, i vincoli dettati dalle specifiche di funzionamento e infine il *detector* selezionato.

## 1 La missione BepiColombo

La missione BepiColombo è un progetto dell’Agenzia Spaziale Europea (ESA) in collaborazione con l’Agenzia Spaziale Giapponese (JAXA).

L’obiettivo è studiare composizione, geofisica, atmosfera, magnetosfera ed evoluzione del pianeta Mercurio [5]. Si tratta di una vera sfida dal punto di vista scientifico e tecnologico, considerate le difficoltà, per un veicolo spaziale, di riuscire a raggiungere e sopravvivere in un ambiente così vicino al Sole: l’enorme gravità della stella costituisce un ostacolo al piazzamento della sonda in un’orbita stabile attorno al pianeta mentre l’intensa radiazione luminosa pone dei vincoli stringenti all’intera struttura, che deve poter operare in condizioni di stress termico elevato.

La missione rappresenta le fondamenta del programma ESA di esplorazione di Mercurio ed è attualmente in fase di costruzione e test.

Il progetto BepiColombo è intitolato al matematico italiano Giuseppe “Bepi” Colombo (1920-1984) per merito dei suoi importanti contributi a questo campo di ricerca: fu il primo a notare che il periodo di rotazione del pianeta attorno al proprio asse (58 giorni) e quello di rivoluzione attorno al Sole (88 giorni) sono in risonanza 2:3; inoltre suggerì alla NASA di sfruttare l’effetto fionda gravitazionale (*gravity-assist*) con Venere per posizionare il veicolo spaziale Mariner 10 nell’orbita solare che gli avrebbe permesso il triplo *fly-by* di Mercurio [6].

Lo studio di Mercurio risulta di particolare interesse perché permette di ottenere indizi fondamentali sul meccanismo di formazione dei pianeti e sull’interazione fra pianeti e Sole. Gli obiettivi scientifici della missione sono:

- studio della nascita e dell’evoluzione di un pianeta in prossimità della sua stella di origine;
- studio del pianeta Mercurio (superficie e crateri, composizione, geologia, struttura interna);
- analisi dell’esosfera di Mercurio (composizione, dinamiche);
- analisi della magnetosfera di Mercurio (struttura, dinamiche) e indagine sulle origini del campo magnetico del pianeta;
- verifica della teoria della Relatività Generale (A. Einstein, 1916).

La missione è basata su due sonde distinte, il *Mercury Planetary Orbiter* (MPO), che trasporterà gli strumenti destinati allo studio della superficie e della composizione interna del pianeta, e il *Mercury Magnetospheric Orbiter* (MMO), che trasporterà gli strumenti dedicati allo studio della magnetosfera del pianeta. Originariamente la missione prevedeva anche un *lander* (il *Mercury Surface*



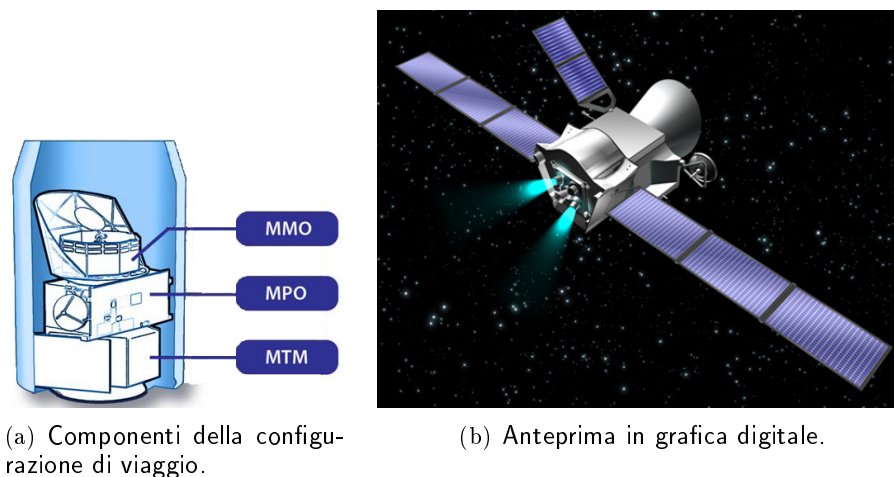


Figura 3: Aspetto finale del progetto BepiColombo.

*Element*, detto anche MSE) che però è stato cancellato a causa dell'eccessivo costo [7].

I due elementi saranno lanciati contemporaneamente da un razzo Ariane 5 nel luglio del 2014. Le sonde effettueranno un viaggio di 6 anni verso Mercurio, collegate tra di loro tramite lo specifico modulo *Mercury Transfer Module* (MTM), costituito da un modulo per la propulsione solare elettrica (SEPM, *Solar Electric Propulsion Module*) e da motori tradizionali a propulsione chimica per l'inserimento del MPO in orbita stabile attorno al pianeta. Inoltre il veicolo sfrutterà molto la spinta gravitazionale fornita dalla Terra, da Venere (2 *fly-bies*) e da Mercurio stesso (3 *fly-bies*). L'ingresso in orbita attorno al pianeta è previsto per l'agosto del 2020.

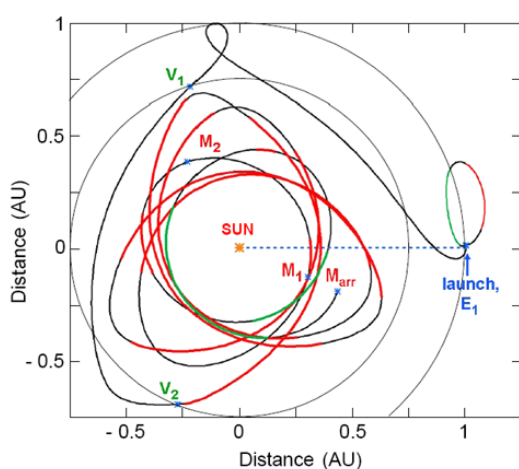


Figura 4: Traiettoria di viaggio prevista per la missione BepiColombo. Il sistema di coordinate usa come riferimento fisso la linea Terra-Sole; sono indicati i punti di incontro ravvicinato con la Terra ( $E_1$ ), con Venere ( $V_1$ ,  $V_2$ ) e con Mercurio ( $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_{arr}$ ); le parti di traiettoria in rosso e verde segnalano l'accensione del SEPM.

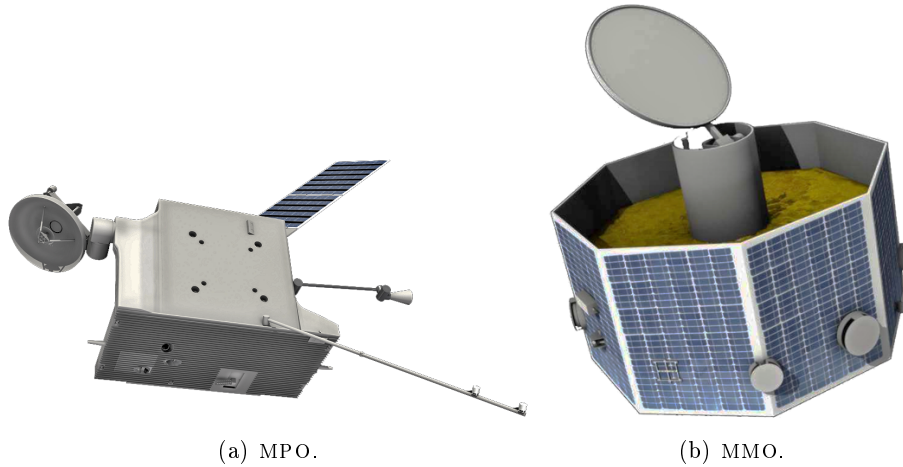


Figura 5: Aspetto delle due sonde che compongono il progetto BepiColombo.

Il piano di volo è appositamente studiato per permettere al veicolo spaziale di avvicinarsi lentamente al pianeta, con una velocità sufficientemente bassa da rendere possibile la sua cattura da parte del campo gravitazionale di Mercurio, senza l'utilizzo di spinte propulsive, ad eccezione di piccole correzioni di traiettoria [1].

Una volta in prossimità del pianeta, l'MMO e l'MPO verranno rilasciati in momenti leggermente diversi, corrispondenti alle diverse quote operative che dovranno raggiungere.

In particolare, a bordo del MPO sarà presente lo strumento PHEBUS; qui di seguito se ne descrivono obiettivi e struttura.

### 1.1 Descrizione dello strumento PHEBUS

*Probing of Hermean Exosphere By Ultraviolet Spectroscopy* (PHEBUS) è un doppio spettrometro EUV-FUV<sup>[1]</sup> destinato a caratterizzare dettagliatamente la composizione e le dinamiche dell'esosfera di Mercurio. Lo strumento sarà in grado di identificare la presenza e la concentrazione di diverse specie chimiche attraverso la spettroscopia ultravioletta, in un intervallo di lunghezze d'onda che si estende da 55 a 315 nm, con due linee di emissione visibili addizionali a 404.7 nm (K) e 422.8 nm (Ca).

Le fasi di sviluppo del progetto, assemblaggio e test sono guidate dall'Agenzia Spaziale Francese (CNES), con la collaborazione di Italia, Giappone e Russia [8].

<sup>1</sup> EUV (*Extreme UltraViolet*): 55 – 155 nm.  
FUV (*Far UltraViolet*): 145 – 315 nm.

### 1.1.1 Obiettivi scientifici

I principali obiettivi scientifici di PHEBUS sono orientati a migliorare la comprensione del complesso sistema superficie-esosfera-magnetosfera di Mercurio e possono essere riassunti nei seguenti punti chiave:

- **COMPOSIZIONE E STRUTTURA VERTICALE.** Scansioni verticali dell'esosfera forniranno preziose informazioni sulla distribuzione di diverse specie chimiche al variare dell'altitudine;
- **DINAMICHE.** La completa copertura spaziale e temporale permetterà di monitorare le variazioni di concentrazione delle specie, identificando fenomeni di trasporto e circolazione fra esosfera e superficie e/o fra zone illuminate e zone in ombra;
- **IONI.** La possibilità di rilevare alcune specie ionizzate fornirà, in sinergia con le misure del MMO, molti dati sui processi di interazione fra esosfera, magnetosfera e vento solare;
- **ACQUA.** La presenza di ghiaccio d'acqua in alcuni crateri polari può essere rilevata grazie al monitoraggio della riga di emissione dell'idrogeno ( $121.6\text{ nm}$ ).

Vi sono poi due obiettivi addizionali che riguardano la fisica solare:

- **VENTO SOLARE.** Grazie alla ridotta distanza operativa dalla stella, sarà possibile diagnosticare il grado di interazione fra gas interstellare e vento solare;
- **CORONA SOLARE.** Lo studio delle linee di emissione della corona solare avverrà nei momenti in cui la sonda sarà protetta dal cono d'ombra del pianeta.

Tutti questi obiettivi scientifici si traducono negli obiettivi di misura che hanno condotto alla realizzazione del progetto di PHEBUS:

- rilevazione di nuove specie chimiche (vedi Tabella 1), tra cui metalli (Si, Mg, Fe, etc.), elementi (C, N, S, etc.), molecole e radicali ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ , OH, CO), gas nobili (Ar, Ne), ioni ( $\text{He}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^+$ , etc.), in aggiunta a specie già rilevate (Na, K, Ca, O, H, He);
- misura di un'esosfera media (percentuali dei costituenti, struttura verticale) con più specie chimiche monitorate assieme, in diverse posizioni di Mercurio attorno al Sole;
- misura di variazioni locali e temporali della composizione esosferica (su una scala di qualche ora) in corrispondenza di specifici momenti e posizioni di interesse;
- ricerca di variazioni nell'albedo della superficie di Mercurio a  $121.6\text{ nm}$ , quando essa non è illuminata dal Sole.

Difficoltà di rilevamento	EUV	FUV
Facile ( $< 1 \text{ min}$ )	He <sup>+</sup> , CO, O <sup>+</sup> , H <sup>+</sup> , C <sup>+</sup> , N <sup>+</sup>	Mg <sup>+</sup> , Si <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , C <sup>+</sup> , Fe <sup>+</sup> , S <sup>+</sup> , Al <sup>+</sup> , CO, H <sup>+</sup> , Ni <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , O <sup>+</sup>
Medio ( $< 10 \text{ min}$ )	S <sup>+</sup> , S <sup>2+</sup> , H <sub>2</sub> , C <sup>2+</sup>	Ca <sup>+</sup> , H <sub>2</sub> , Li <sup>+</sup>
Difficile ( $< 1 \text{ h}$ )	Xe <sup>+</sup> , Ne <sup>+</sup>	Fe <sup>2+</sup> , OH
Molto difficile ( <i>alcune ore</i> )	Kr <sup>+</sup> , Ar <sup>+</sup>	Al <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> , Xe <sup>+</sup> , Ca <sup>+</sup>
Impossibile	Cl <sup>+</sup> , Si <sup>2+</sup>	Si <sup>2+</sup>

Tabella 1: Classificazione delle specie chimiche rilevabili [8].

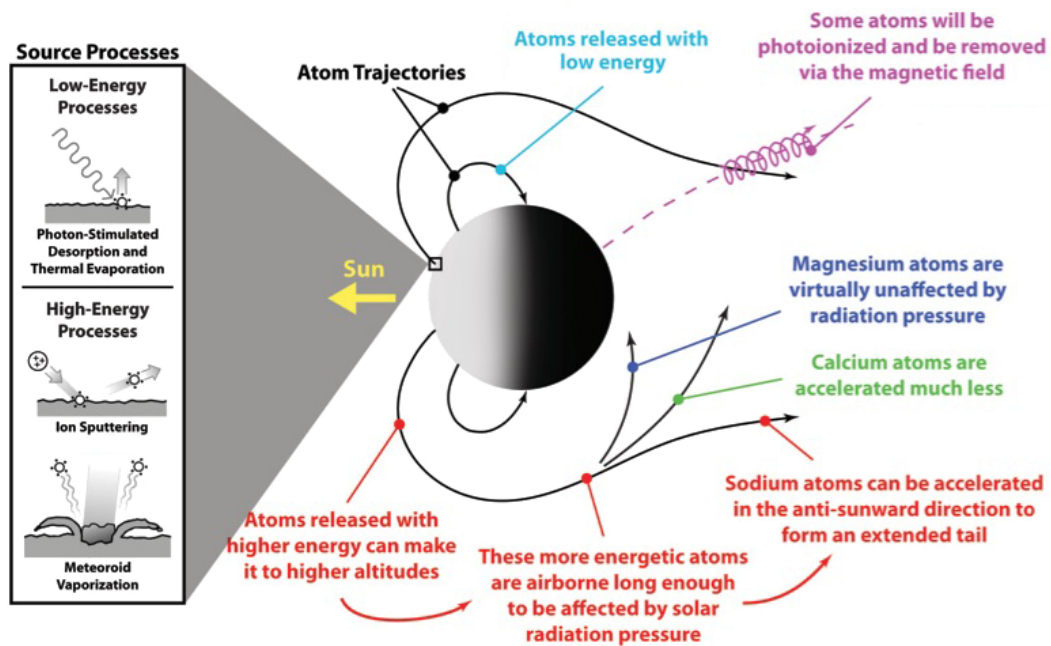


Figura 6: Dinamiche dell'esosfera di Mercurio.

### 1.1.2 Struttura e componenti

PHEBUS consiste in due sottosistemi principali: uno è dedicato alla raccolta della luce proveniente dall'esosfera e l'altro alla sua analisi spettrometrica. Il primo include il *baffle* (deflettore) d'entrata, lo specchio parabolico *off-axis*, il sistema di scansione e la *slit* (fenditura) di entrata; il secondo comprende il diaframma d'entrata e la *slit* (in comune con il sottosistema di raccolta), i due reticoli olografici, gli specchi per le righe aggiuntive nel vicino ultravioletto (NUV, Near UltraViolet) e i rivelatori.

Ciascun canale spettroscopico (EUV e FUV) ha un reticolo dedicato e il rilevamento della radiazione viene effettuato tramite *detector* MCP (*Micro-Channel Plate*) con RAE<sup>[2]</sup> (*Resistive Anode Encoder*), in regime di conteggio di fotoni. Le linee spettrali nel NUV sono deflesse tramite specchi opportuni su due fotomoltiplicatori a tubo.

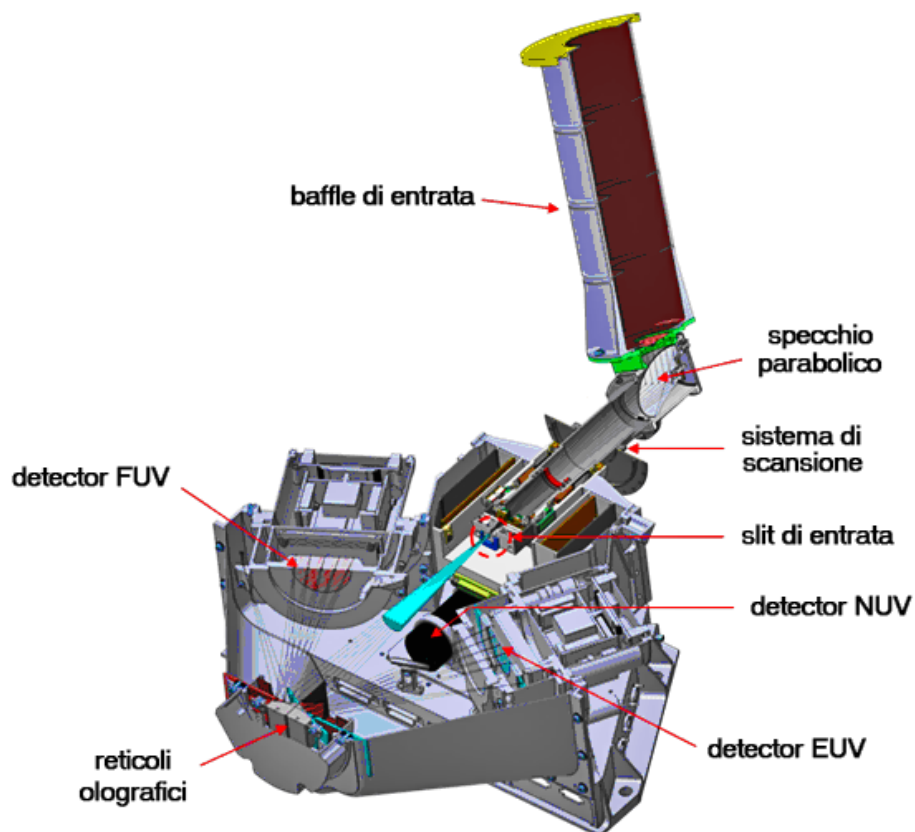


Figura 7: Spaccato di PHEBUS e indicazione dei componenti.

<sup>2</sup> componente sensibile alla posizione; è in grado di risolvere spazialmente gli elettroni incidenti, creati dall'MCP.

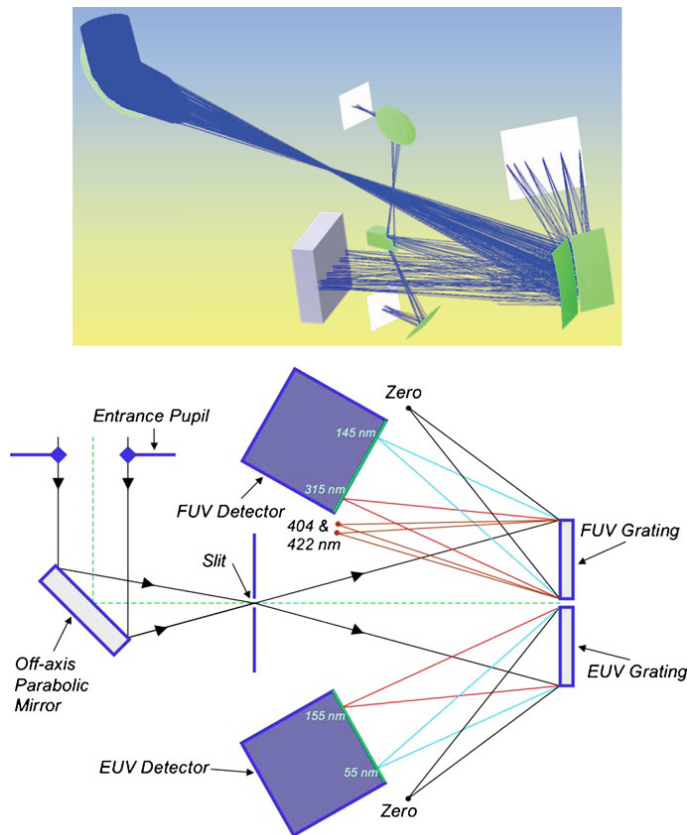


Figura 8: Schema ottico di PHEBUS.

La configurazione ottica prevista è studiata per assicurare un numero di riflessioni minimo ed evitare così cali di sensibilità, che sono particolarmente deleteri dell'UV. Il sistema di scansione ad un grado di libertà permette allo strumento di selezionare regioni e quote di osservazione indipendentemente dalla posizione della sonda; questo evita il problema di dover ruotare o spostare l'MPO per specifiche esigenze di puntamento [8].

Per ciò che riguarda i rivelatori, i maggiori vantaggi nell'utilizzo di *detector* MCP+RAE stanno nell'elevata sensibilità, dovuta soprattutto alla corrente di buio estremamente bassa. In tal modo il regime di conteggio di fotoni è facilmente instaurabile alle tipiche temperature operative dello strumento ( $-20^{\circ}/+40^{\circ}$ ); si evita così la necessità di dispositivi di raffreddamento, risparmiando massa e potenza dissipata. D'altra parte l'alta sensibilità non permette l'esposizione alla luce diretta di sorgenti molto intense e obbliga ad un accurato studio del sottosistema di raccolta, con particolare attenzione al possibile ingresso di polvere e umidità, che sono causa di assorbimento e luce diffusa.

### **Baffle di entrata**

Il *baffle* di entrata è costituito da un cilindro (210 *mm* di lunghezza, 60 *mm* di diametro) suddiviso in quattro stadi, separati da 5 diaframmi. Il diaframma più esterno ha un diametro di 25.4 *mm* e costituisce la pupilla di ingresso dell'intero strumento.

Uno strato assorbente (*black coating*) riveste le superfici interne del deflettore, al fine di attenuare in modo considerevole la luce diffusa.

### **Specchio parabolico**

La forma dello specchio di entrata segue quella di un paraboloide fuori asse, con una lunghezza focale di 170 *mm* e un angolo di lavoro di 100°. La superficie è studiata per essere sufficientemente riflessiva nell'intervallo UV ed è costituita da carburo di silicio (SiC), opportunamente trattato e levigato. La scelta di questo materiale offre uno specchio omogeneo e termicamente stabile, adatto ad operare nel difficile ambiente a cui è destinato.

Lo specchio e il *baffle* sono solidali e collegati ad un motore passo-passo di precisione in grado di ruotare a 360°. È presente anche un otturatore pilotato da due fotometri, che blocca completamente la luce in entrata nel caso superi una determinata soglia; ciò è necessario per proteggere i rivelatori da sorgenti luminose troppo intense.

### **Slit**

Una singola fenditura d'entrata è condivisa dai due reticoli a valle ed è localizzata in corrispondenza del piano focale dello specchio parabolico. L'apertura rettangolare ha dimensioni  $5.6 \times 0.28 \text{ mm}^2$  e determina il campo visivo (FOV, Field Of View) dello strumento, che risulta di  $\sim 1.9^\circ \times 0.095^\circ$ .

### **Reticoli**

Entrambi i reticoli sono di tipo olografico<sup>[3]</sup> in riflessione, dunque particolarmente adatti a compensare le aberrazioni e ottimizzare la configurazione ottica complessiva; inoltre la loro bassa scabrosità superficiale permette di minimizzare lo *scattering* (diffusione) e rilevare deboli linee di emissione anche quando molto vicine a linee più brillanti. Le superfici sono realizzate in alluminio con un *coating* in platino e hanno un'area di  $42 \times 15 \text{ mm}^2$ .

Per il reticolo dedicato all'EUV la densità di righe è  $\sim 2700 \text{ righe/mm}$ , mentre per il reticolo destinato al FUV vale  $\sim 1600 \text{ righe/mm}$ .

---

<sup>3</sup> l'insieme dei solchi è realizzato tramite tecniche fotolitografiche che sfruttano l'interferenza di onde elettromagnetiche coerenti.

### ***Detector FUV***

Il rivelatore FUV è formato da:

- finestra di entrata in fluoruro di magnesio ( $\text{MgF}_2$ ), sul retro della quale è depositato il fotocatodo in tellururo di cesio ( $\text{CsTe}$ ) ad alta efficienza nell'intervallo  $120 - 330 \text{ nm}$ ;
- 5 stadi MCP, in grado di garantire l'amplificazione ( $\simeq 10^7$ ) degli elettroni prodotti dal fotocatodo.

Una MCP è costituita da una piastra resistiva fitta di micro-canali che la attraversano perpendicolarmente; ciascun canale è un dinodo continuo capace di moltiplicare gli elettroni che vi entrano, grazie ad un alto potenziale applicato ai suoi estremi;

- RAE, costituito da un anodo di area  $20 \times 40 \text{ mm}^2$  sensibile alla posizione;
- elettronica di amplificazione e *imaging*, che digitalizza il segnale analogico fornendo un'immagine in  $512 \times 512$  pixel con una risoluzione di  $80 \mu\text{m}$ .

### ***Detector EUV***

La struttura del rivelatore EUV è pressoché la stessa del precedente, con alcune differenze:

- il fotocatodo è composto di ioduro di cesio ( $\text{CsI}$ ), che però è molto sensibile all'umidità, che ne riduce l'efficienza quantica. Una soluzione alternativa è il bromuro di potassio ( $\text{KBr}$ );
- la finestra di entrata è rimovibile, al fine di consentire l'ingresso di radiazione a lunghezza d'onda  $< 115 \text{ nm}$ . Data la sensibilità del fotocatodo, che è depositato direttamente sul primo stadio MCP, la finestra può essere tolta solo in condizioni di vuoto o nello spazio;
- durante le operazioni di test a terra è previsto un sistema di pompaggio per garantire l'assenza di aria e umidità a contatto con la superficie sensibile.

### ***Detector NUV***

Per rilevare le due specifiche righe di emissione del potassio (K) e del calcio (Ca), sono previsti due rilevatori distinti, entrambi di tipo PMT (*PhotoMultiplier Tube*) in regime di conteggio di fotoni. Questo tipo di *detector* assicura basso rumore ed alto guadagno, ma è particolarmente sensibile ai campi magnetici esterni; il problema è arginato dalla presenza di uno schermo in mu-metal<sup>[4]</sup> che protegge i componenti sensibili dalle radiazioni.

---

<sup>4</sup> lega metallica dotata di alta permeabilità magnetica.



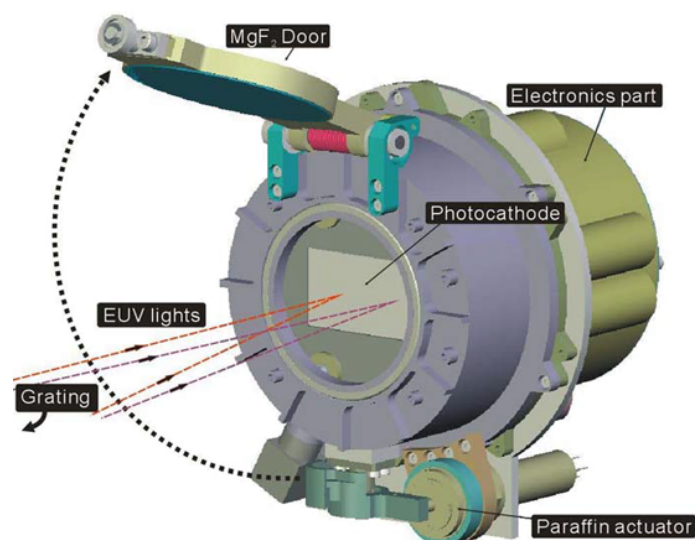


Figura 9: Struttura del rivelatore EUV di PHEBUS.

Riassunto, grazie alla possibilità di operare nella regione dell'EUV, PHEBUS estenderà l'intervallo di lavoro dello spettrometro UV montato su MESSENGER; ciò permetterà la rilevazione di specie chimiche aggiuntive, compresi metalli, ioni e gas nobili. Il sistema rotante di scansione invece assicurerà copertura e campionamento verticale senza precedenti.

Dunque sarà possibile acquisire conoscenze dettagliate sulla struttura verticale dell'esosfera e sulla distribuzione e la densità dei suoi costituenti, con risoluzioni temporali e spaziali relativamente elevate.

## 2 Attività di calibrazione

La calibrazione di PHEBUS si suddivide in due fasi distinte: la prima sarà effettuata a terra e permetterà di acquisire una buona conoscenza dello strumento, valutandone tutti gli aspetti tecnici e la risposta radiometrica dei sottosistemi che lo compongono; la seconda avverrà periodicamente in volo per verificare il corretto funzionamento di PHEBUS durante la fase operativa.

In effetti l'ambiente estremo attorno a Mercurio, nel quale la sonda deve operare, potrebbe causare variazioni della sensibilità dello strumento, che farebbero perdere la conoscenza della sua risposta radiometrica assoluta.

Ci si concentra d'ora in avanti sulla prima fase (*ground calibration*) e, in particolare, sulle operazioni di calibrazione del canale di PHEBUS dedicato all'estremo ultravioletto (cfr §1.1.2).

L'attività di calibrazione a terra dell'intero strumento assemblato si sta svolgendo nel laboratorio LUXOR<sup>[5]</sup>, presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Padova.

L'operazione permetterà di associare univocamente i conteggi (*counts*) rilevati in effettivi fotoni incidenti [9]; sarà cioè possibile conoscere la reale quantità di luce che colpisce il *detector*. Il calcolo della risposta radiometrica di PHEBUS avviene sfruttando il segnale in uscita generato dallo strumento e le informazioni sul segnale d'ingresso, fornite grazie all'uso di un **fotorivelatore calibrato** e di sorgenti dallo spettro di emissione noto. Viene misurata l'efficienza globale dello strumento, tenendo conto del grado di polarizzazione della sorgente e degli effetti di diffusione e polarizzazione della luce all'interno dello strumento stesso.

L'impianto utilizzato per la calibrazione è indicato come “*calibration facility*” o semplicemente “*facility*”.

### 2.1 Apparato di misura per l'EUV

#### 2.1.1 Facility

Le misure nell'ultravioletto estremo (40 – 150 nm) vengono effettuate in una camera bianca (*clean room*) di 35 m<sup>2</sup>, classe 1000<sup>[6]</sup>. All'interno è presente una camera cilindrica ad alto vuoto del volume di 1 m<sup>3</sup> ( $\simeq 2$  m di lunghezza, 0.8 m di diametro). Essa è dotata di una finestra di accesso per la radiazione luminosa, di connessioni elettriche e meccaniche per prove su modelli di volo [16] e di un'interfaccia con l'esterno, ossia con la clean room in cui sono installati i controllori e le pompe per l'alto vuoto.

<sup>5</sup> Laboratory for Ultraviolet and X-ray Optical Research, appartenente all'Istituto di Fotonica e Nanotecnologie (IFN) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR).

<sup>6</sup> quantità massima di particelle con diametro superiore a 0.5  $\mu\text{m}$  : 1000 *particelle/ft*<sup>3</sup>.

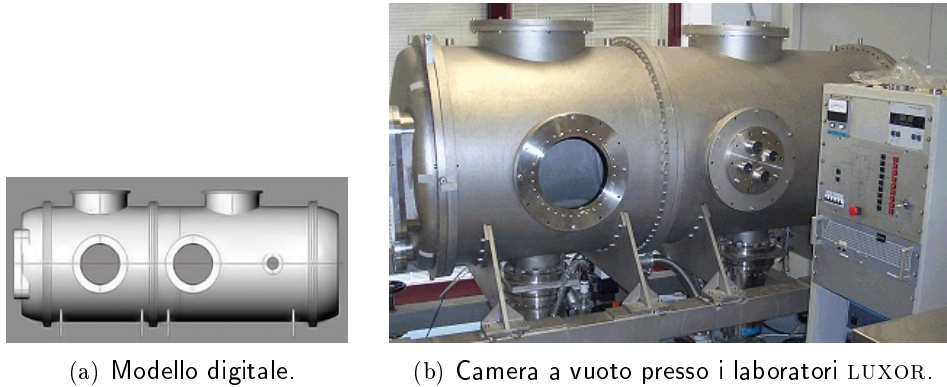


Figura 10: Camera a vuoto.

Non è previsto un gruppo di continuità (UPS, *Uninterruptable Power Supply*) in caso di malfunzionamenti o di *black-out*. In ogni caso un sistema di sicurezza automatico è in grado di sigillare le valvole di comunicazione fra camera e sistema di pompaggio. In tale situazione la pressione è destinata a salire, ma dovrebbe esserci il tempo sufficiente per spegnere i componenti elettronici ad alto voltaggio. Un altro elemento critico è rappresentato dal sensore EUV di PHEBUS, che potrebbe danneggiarsi se non protetto dal contatto con l'aria.

Tutte le ottiche impiegate sono in grado di lavorare in condizioni di vuoto spinto ( $\sim 10^{-7}$  mbar); l'assenza (quasi) totale di aria è un requisito fondamentale per realizzare misurazioni nell'EUV, pena il totale assorbimento della radiazione emessa dalle sorgenti.

### 2.1.2 Sorgenti

Le sorgenti utilizzate sono:

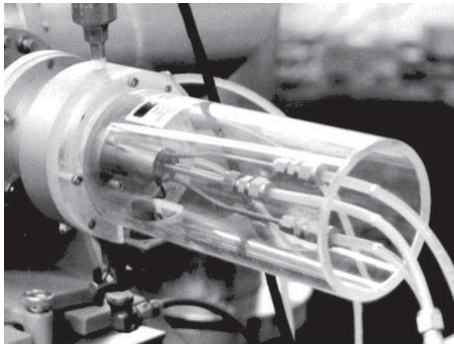
- lampada a catodo cavo costruita sulla base di un progetto [10] già sviluppato presso il laboratorio LUXOR;
- McPherson Model 629 Hollow-Cathode Light Source;
- McPherson Model 632 Deuterium Lamp.

#### Lampada a catodo cavo (*hollow-cathode lamp*)

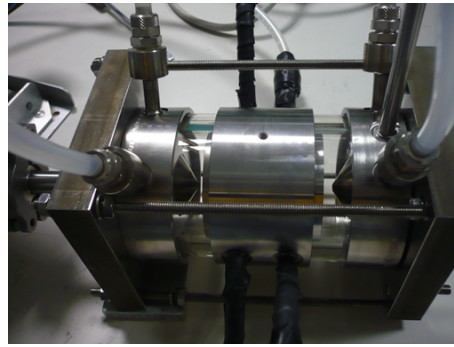
La sorgente è costituita da un cilindro in vetro (con una finestra in quarzo, che consenta l'uscita della radiazione UV), riempito di gas inerte rarefatto. All'interno sono presenti un catodo cavo cilindrico in acciaio inossidabile e un anodo in alluminio [11].

Se si applica agli elettrodi una differenza di potenziale (100 – 200 V), si verifica una parziale ionizzazione del gas di riempimento. Gli ioni positivi, accelerati dal campo elettrico, urtano il catodo e provocano l'espulsione di atomi di metallo allo stato fondamentale (*sputtering*). Questi atomi asportati dal catodo, collidendo successivamente con altri ioni di gas, passano ad uno stato eccitato; il conseguente rilassamento libera energia luminosa concentrata in bande spettrali molto strette, caratteristiche della combinazione catodo-gas.

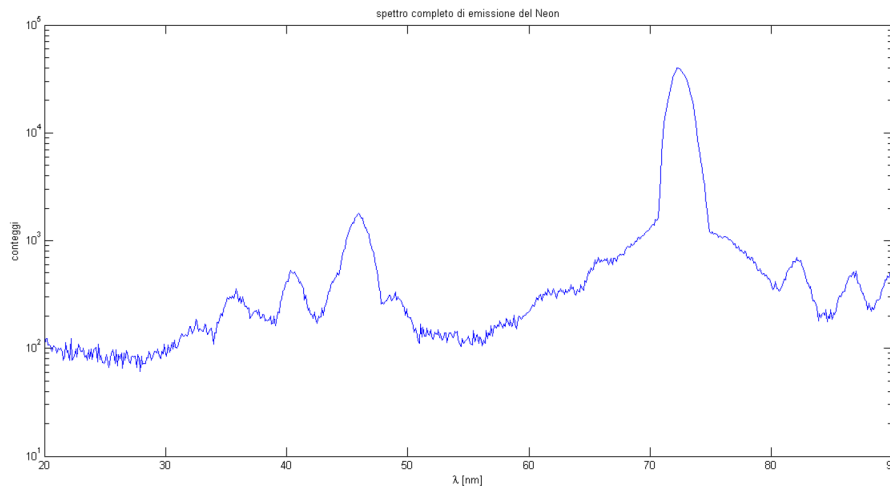
Le lunghezze d'onda analizzate sono state ottenute sfruttando diversi gas: Neon (Ne), Elio (He) e Argon (Ar).



(a) Modello 629 della McPherson.



(b) Modello ideato e costruito presso i laboratori LUXOR.



(c) Spettro di emissione con gas Ne.

Figura 11: Lampade a catodo cavo utilizzate.

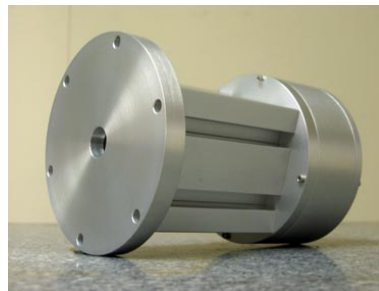
### Lampada al deuterio (*deuterium lamp*)

La sorgente è costituita da un tubo di scarica in vetro con una finestra di uscita in fluoruro di magnesio ( $\text{MgF}_2$ ) [12].

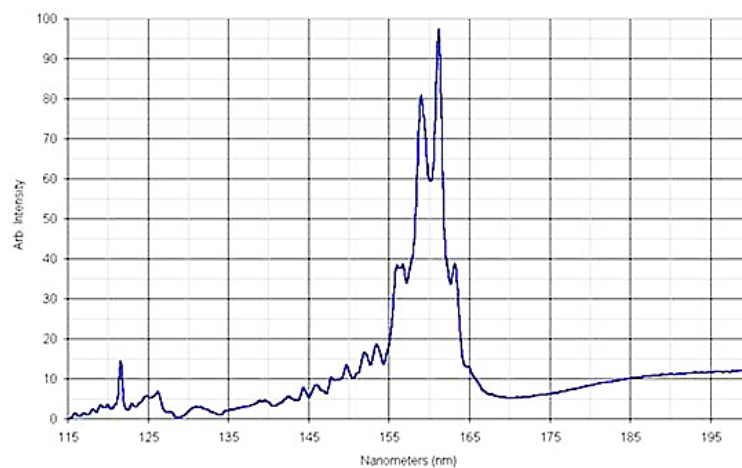
All'interno del tubo sono presenti del gas rarefatto di deuterio ( $^2\text{H}$ ), due elettrodi e un filamento di innesco, che viene brevemente alimentato fino ad emettere elettroni per effetto termoionico. Il fenomeno è in grado di instaurare un arco elettrico attraverso il gas, fra l'anodo e il catodo che sono mantenuti ad una d.d.p. compresa fra  $100\text{ V}$  e  $300\text{ V}$ . L'arco elettrico ionizza il gas di deuterio, che comincia ad emettere radiazione luminosa UV.

Si osserva che lo spettro di emissione di Figura 13(b) è riportato per lunghezze d'onda superiori ai  $115\text{ nm}$  perché il fluoruro di magnesio che costituisce la finestra della lampada impedisce il passaggio di radiazione con lunghezza d'onda inferiore ai  $105.0\text{ nm}$  [13].

Figura 12: Lampada al deuterio utilizzata.



(a) Modello 632 della McPherson.



(b) Spettro di emissione.

$\lambda$ [nm]	Sorgente	Condizione operativa
46.1	hollow-cathode lamp (Ne gas)	vuoto
58.4	hollow-cathode lamp (He gas)	vuoto
74.4	hollow-cathode lamp (Ne gas)	vuoto
91.9	hollow-cathode lamp (Ar gas)	vuoto
121.6	deuterium lamp	vuoto
145.0	deuterium lamp	vuoto
160.0	deuterium lamp	vuoto

Tabella 2: Lista delle lunghezze d'onda ( $\lambda$ ) a disposizione.

### 2.1.3 *Set-up*

Il sistema di illuminazione EUV è composto da:

- sorgente (cfr §2.1.2);
- McPherson Model 615 Reflective Condenser;
- McPherson Model System 234/302 monochromator;
- specchio parabolico *off-axis* ad incidenza radente ( $\simeq 20^\circ$ ).

#### Condensatore ottico in riflessione (*reflective condenser*)

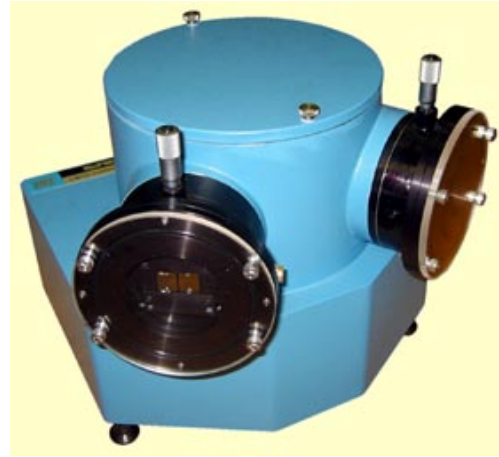
Lo strumento è studiato per operare in vuoto ed è costituito da uno specchio per EUV ad incidenza semi-radente, dunque con un buon valore di riflettività [14]. La geometria della superficie è tale da raccogliere e focalizzare la luce divergente prodotta dalla sorgente e concentrarne l'energia in corrispondenza della bocca di entrata delle ottiche a valle. Il guadagno ottenuto va da 3 a 5 circa.

#### Monocromatore (*monochromator*)

Lo strumento è costituito da un reticolo di diffrazione in riflessione, concavo e corretto da aberrazioni [15]. La radiazione entra da una fenditura regolabile in larghezza e colpisce il reticolo, che la disperde nelle sue componenti monocromatiche e la focalizza in corrispondenza della fenditura di uscita, anch'essa regolabile. La selezione della lunghezza d'onda di interesse è possibile grazie alla rotazione del reticolo tramite un motore passo-passo di precisione.



(c) Modello 615 della McPherson.



(d) Modello 234/302 della McPherson.

Figura 13: Condensatore ottico e monocromatore utilizzati.

La risoluzione dello strumento aumenta al diminuire della larghezza delle fenditure e all'aumentare della lunghezza focale delle ottiche, mentre il limite principale è imposto dalla densità di righe (passo) del reticolo.

Sono a disposizione due reticoli con passi diversi, destinati a differenti bande spettrali (vedi Tabella 3).

lunghezza focale	20 mm	
angolo fra fasci di entrata e uscita	64°	
dimensioni delle fenditure	40 × 45 mm <sup>2</sup>	
	RETICOLI	
passo ( <i>righe/mm</i> )	1200	2400
risoluzione a 313.1 nm ( <i>nm</i> )	0.1	0.06
range spettrale di lavoro ( <i>nm</i> )	30 – 550	30 – 275
range spettrale di utilizzo ( <i>nm</i> )	100 – 200	40 – 100

Tabella 3: Dati sul monocromatore e i reticoli [15].

La luce generata dalla sorgente viene concentrata dal condensatore attraverso la fenditura di entrata del monocromatore. Lo specchio parabolico *off-axis* raccoglie il fascio monocromatico in uscita e lo invia verso la finestra di entrata della camera a vuoto.

L'intero sistema di illuminazione opera ad una pressione di  $\sim 10^{-6}$  mbar.

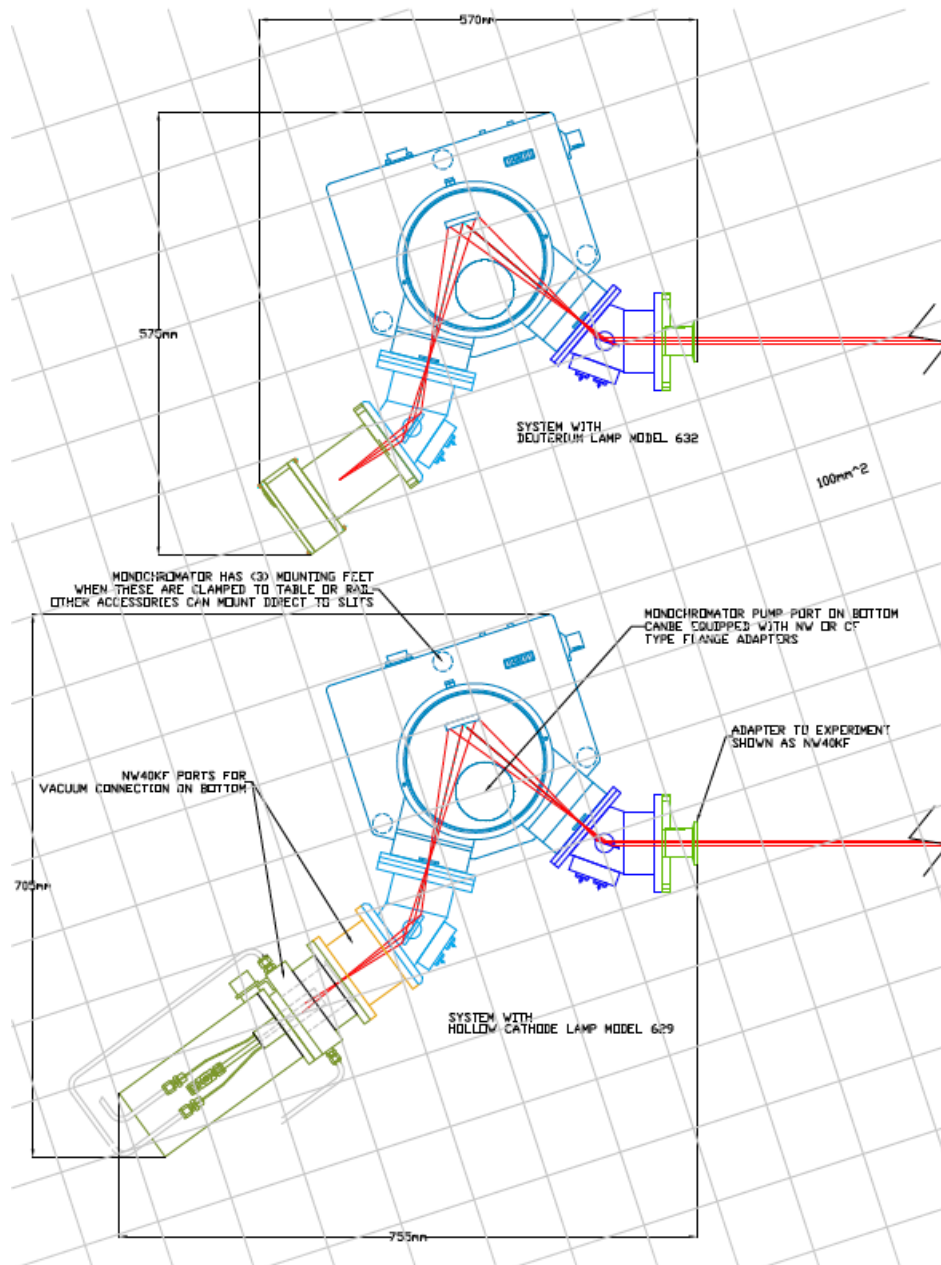


Figura 14: Set-up del sistema di illuminazione.



Una volta configurato il sistema di illuminazione, PHEBUS viene fissato ad un supporto costituito da un sistema meccanico motorizzato che permette di ruotare lo strumento attorno ad entrambi gli assi verticale e orizzontale. Il tutto si colloca all'interno della camera cilindrica ad alto vuoto.

Il fascio collimato proveniente dallo specchio parabolico entra nella camera attraversando la finestra di accesso (sulla sinistra in Figura 10(a)).

Infine, un **fotorivelatore calibrato** di riferimento, posizionato all'interno della camera a vuoto, viene inserito lungo l'asse di propagazione del fascio, a monte di PHEBUS. Il fotorivelatore può essere manovrato dall'esterno grazie ad un opportuno sistema meccanico.

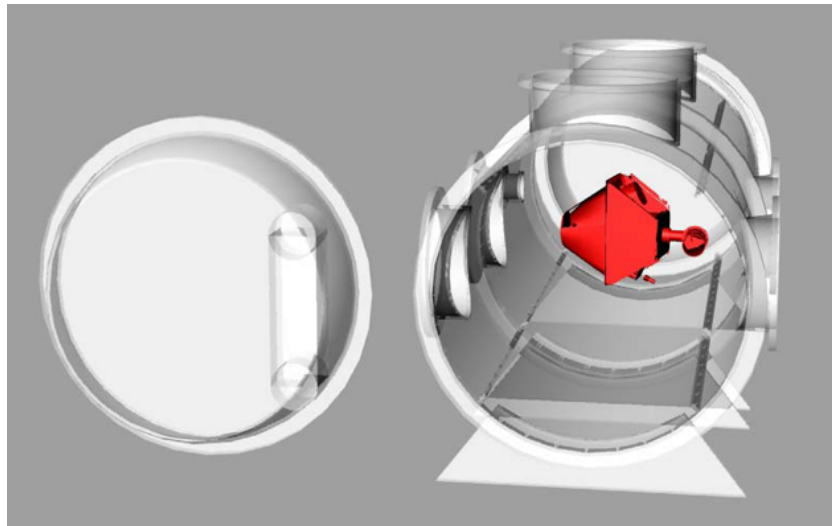


Figura 15: PHEBUS posizionato all'interno della camera a vuoto.

## 2.2 Procedura di misurazione

Preventivamente è necessario caratterizzare il grado di polarizzazione del fascio alle differenti lunghezze d'onda impiegate.

In seguito si procede ad allineare PHEBUS, sfruttando il meccanismo che ne permette la rotazione attorno agli assi orizzontale e verticale. Il perfetto allineamento corrisponde alla posizione che garantisce il massimo segnale del *detector*.

Come già constatato (Tabella 2), le misure coprono l'intera banda spettrale dello strumento.

### 2.2.1 Efficienza

Le misure di efficienza prevedono che il fascio proveniente dal sistema di illuminazione si propaghi all'interno di PHEBUS seguendo il cammino ottico ideale, senza vignettatura e senza intercettare componenti interni che possano ridurre l'area utile. Affinché il fascio soddisfi tali condizioni, è necessario che possieda una divergenza angolare complessiva inferiore a  $1.1^\circ$  e che sia confinato all'interno di un disco di raggio  $4\text{ mm}$ .

Alcune simulazioni sono state effettuate tenendo conto dei requisiti sul fascio in termini di divergenza e dimensioni: nel corso delle operazioni di *ray-tracing* la fenditura di uscita del monocromatore è stata impostata a  $0.25\text{ mm}$  di larghezza<sup>[7]</sup> e a  $2\text{ mm}$  di altezza. In tale configurazione, a  $2\text{ m}$  di distanza dalla fenditura l'angolo di divergenza stimato risulta  $\simeq 0.8^\circ$ , cioè al di sotto del limite massimo [16].

La sezione trasversale del fascio (larghezza  $\times$  altezza) misura  $16 \times 14\text{ mm}^2$  e, assieme alla divergenza, rimane pressoché costante a tutte le lunghezze d'onda.

Il vincolo sull'area massima sarà quindi rispettato inserendo un diaframma opportuno davanti alla pupilla di entrata dello strumento.

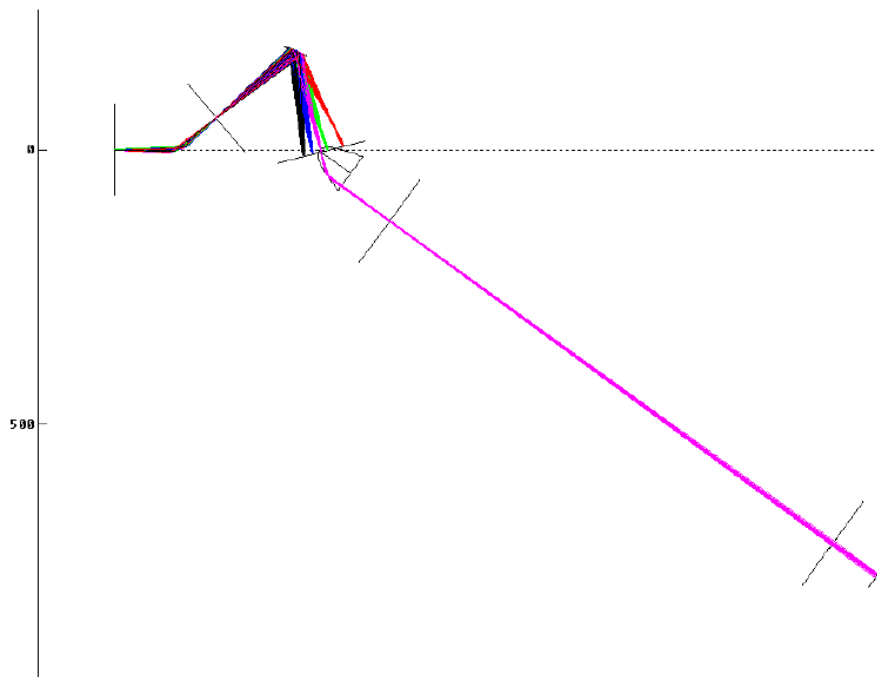


Figura 16: *ray-tracing* del sistema di illuminazione [16].

<sup>7</sup> corrisponde a  $\sim 1\text{ nm}$  di banda passante.

### 2.2.2 Campo visivo

Per caratterizzare il campo visivo (FOV, *Field Of View*) di PHEBUS si sfruttano i dati raccolti durante la fase di calcolo dell'efficienza. Il diaframma viene tolto in modo da permettere al fascio di area estesa di evidenziare eventuali perdite luminose dovute alla geometria dei componenti nelle zone periferiche.

Si misurano le caratteristiche del fascio con un opportuno rivelatore calibrato e, conoscendo l'efficienza di PHEBUS alla lunghezza d'onda di interesse, se ne ricava la risposta attesa. Il confronto fra questo valore e l'effettiva entità della risposta dello strumento (inferiore rispetto al primo) fornisce una buona stima delle caratteristiche dell'FOV e dell'uniformità spaziale del *detector* EUV.

### 3 Descrizione e selezione dei fotorivelatori

Per effettuare la calibrazione di PHEBUS è fondamentale, come già anticipato (cfr §2), poter conoscere l'entità effettiva del segnale di ingresso. Si rende quindi necessario l'uso di un fotorivelatore calibrato da introdurre lungo il fascio, proveniente dal sistema di illuminazione, per poterne misurare le caratteristiche.

Dalle proprietà della radiazione utilizzata negli esperimenti si ricavano le specifiche sui *detector* di riferimento da utilizzare:

- l'INTERVALLO SPETTRALE delle sorgenti, così come quello del rivelatore da calibrare, si estende nell'ultravioletto estremo ( $40 - 150 \text{ nm}$ ); è necessario un *detector* in grado di operare in tale regione dello spettro elettromagnetico;
- le DIMENSIONI MINIME sono dettate dal tipo di misura da effettuare e quindi dall'area trasversale del fascio incidente: per le misure di efficienza è necessario un diametro minimo di  $10 \text{ mm}$ ; per le misure sull'FOV si richiede un diametro non inferiore a  $20 \text{ mm}$ ;
- la necessità di caratterizzare spazialmente l'*output* dello strumento obbliga all'utilizzo di *detector* calibrati dalla RISPOSTA stabile e uniforme.

Un ulteriore elemento vincolante è l'AMBIENTE in cui il *detector* dovrà operare: si tratta della camera a vuoto descritta in precedenza (cfr §2.1.1), attrezzata con un opportuno sistema meccanico che permetta di manovrare il rivelatore. Il componente ideale dovrebbe essere piccolo e leggero e richiedere dei circuiti di alimentazione e prelievo del segnale molto semplici. Inoltre sono da scartare a priori tecniche di riduzione del rumore basate sul raffreddamento del sensore.

In merito alla potenza luminosa da rilevare, e quindi riguardo ai requisiti minimi di SENSIBILITÀ per il fotorivelatore, si hanno pochi dati a disposizione.

#### 3.1 Esperimento preliminare

Un esperimento preeliminare è stato condotto su un sistema di illuminazione analogo, descritto in dettaglio in [9] e [13]. Il rivelatore utilizzato è un CEM (*Channel Electron Multiplier*) in grado di lavorare in vuoto; si tratta essenzialmente di un tubo fotomoltiplicatore a dinodo continuo, con un fotocatodo sensibile alla radiazione EUV e un'area sensibile di  $10 \text{ mm}$  di diametro.

Le misure sono state effettuate in regime di conteggio di fotoni, con un tempo di integrazione di  $10 \text{ s}$ ; da queste (*counts*) è possibile ricavare una stima

dell'effettiva potenza luminosa incidente grazie all'efficienza quantica<sup>[8]</sup> nota ( $QE$ ) del CEM utilizzato, calibrato presso il laboratorio LUXOR [17].

Il numero effettivo  $N$  di fotoni incidenti per unità di tempo è dato dalla formula:

$$N = \frac{\text{counts}}{10} \frac{100}{QE(\lambda)} \quad [ph/s] \quad (1)$$

e sapendo che l'energia del singolo fotone è:

$$E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{con } h &= 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \quad (\text{costante di Plank}) \\ c &= 299792458 \text{ m/s} \quad (\text{velocità della luce nel vuoto}) \end{aligned}$$

si ottiene la potenza incidente:

$$\begin{aligned} P &= E_{ph} \cdot N \\ &= \frac{\text{counts}}{QE(\lambda) \cdot \lambda} (1.9864 \cdot 10^{-24}) \quad [W] \end{aligned} \quad (3)$$

Si riportano i risultati in Tabella 4.

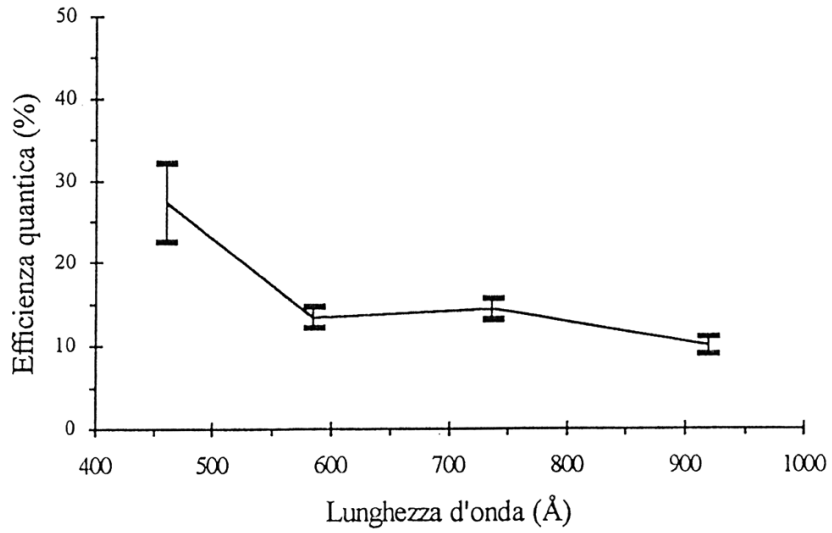
$\lambda$ [nm]	sorgente	tempo di integrazione	counts	$QE(\lambda)$ [%]	$P$ [pW]
58.4	hollow-cathode lamp (He gas)	10 s	636631	13.5	1.604
74.4	hollow-cathode lamp (Ne gas)		463878	11	0.854
121.6	deuterium lamp		111704	2.5	0.730
140.0	deuterium lamp		17417	0.35	0.706

Tabella 4: Misure dirette e indirette dall'esperimento preliminare.

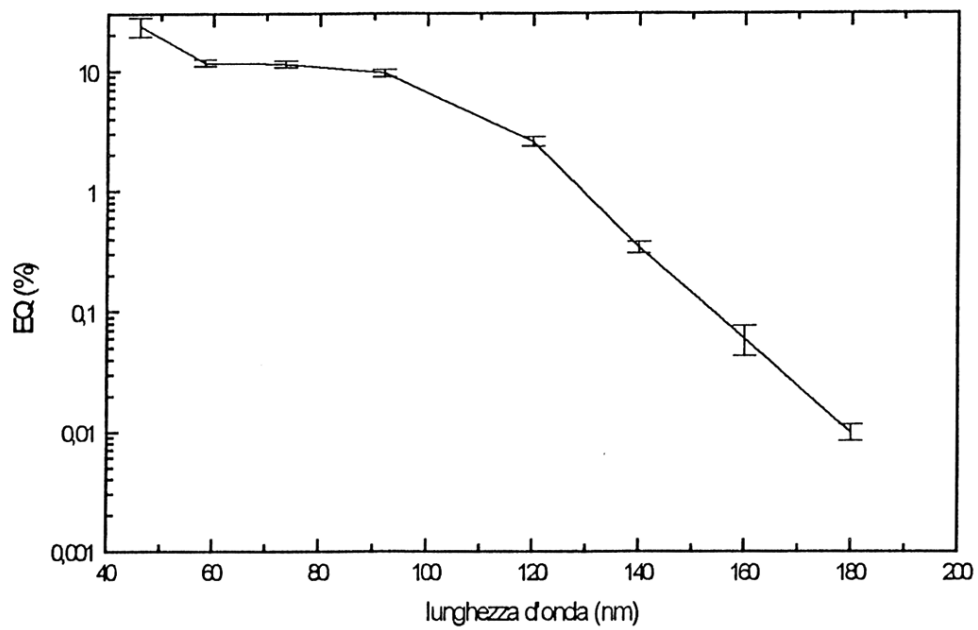
I risultati indicano che la potenza luminosa in uscita dal sistema di illuminazione è molto bassa, nell'ordine di grandezza dei picowatt. Si sottolinea il fatto che le misure effettuate sono affette da errore ignoto e non sono da considerarsi attendibili; in particolare, i dati sull'efficienza quantica del CEM risalgono a parecchi anni fa e lo strumento necessiterebbe di una ricalibrazione.

In ogni caso è possibile ricavare un'idea della sensibilità richiesta al *detector* di riferimento da selezionare: nel migliore dei casi ci si aspetta un potenza incidente di una decina di picowatt.

<sup>8</sup> frazione del flusso di fotoni incidente che viene effettivamente convertito in segnale utile; in questo caso è la percentuale di fotoni incidenti che viene rilevata.



(a) Prima serie di misure.



(b) Seconda serie di misure.

Figura 17: Dati sull'efficienza quantica del CEM [17].

Questo si traduce nella richiesta di un fotorivelatore calibrato con sensibilità elevata, cioè di un sensore con un rumore di fondo molto ridotto ed eventualmente con un principio di funzionamento che assicuri un guadagno interno.

In base alle esigenze appena definite, sono stati subito scartati i fotorivelatori termici e i fotoconduttori, perché in genere efficaci e sufficientemente sensibili solo per lunghezze d'onda maggiori di quelle nell'intervallo di interesse.

I tubi fotomoltiplicatori (PMT, *PhotoMultiplier Tube*), invece, non soddisfano i requisiti, perché necessiterebbero di passanti ad alta tensione attraverso la camera a vuoto o, ancor peggio, il posizionamento dell'alimentazione al suo interno con conseguenti limitazioni di controllo. Ulteriori motivi di difficoltà sono l'ingombro e la risposta spazialmente non uniforme, che introdurrebbe errori sistematici troppo alti [18].

Per queste ragioni, la scelta del *detector* di riferimento più adatto è caduta sui fotodiodi: elementi compatti, poco costosi e sufficientemente semplici da utilizzare per lo scopo prefissato. A seguire, una descrizione teorica dei tipi di fotodiodo considerati.

### 3.2 Fotodiodi

Il funzionamento dei fotodiodi si basa sull'effetto fotoelettrico: l'assorbimento di un fotone da parte di un materiale causa la transizione di uno o più elettroni verso livelli energetici più elevati, creando così dei portatori di carica mobili. Sotto l'influenza di un campo elettrico esterno, questi portatori si spostano e producono una corrente elettrica misurabile.

La creazione di portatori avviene solamente se il fotone incidente possiede l'energia necessaria per consentire agli elettroni di superare il *band-gap* di energia  $E_g$  che separa la banda di valenza dalla banda di conduzione.  $E_g$  è caratteristico del materiale impiegato e determina la sua risposta spettrale.

L'effetto fotoelettrico assume due forme: l'effetto fotoelettrico esterno comporta l'emissione di elettroni liberi dalla superficie del materiale colpito; nell'effetto fotoelettrico interno i portatori eccitati rimangono all'interno del materiale, contribuendo ad un aumento della sua conduttività.

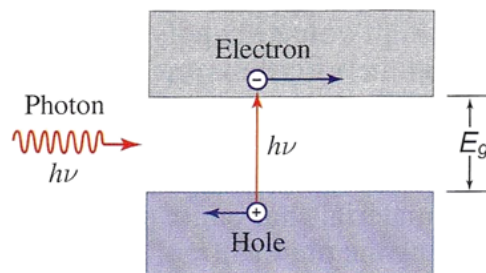


Figura 18: Generazione fotoelettrica di una coppia elettrone-lacuna all'interno di un semiconduttore.

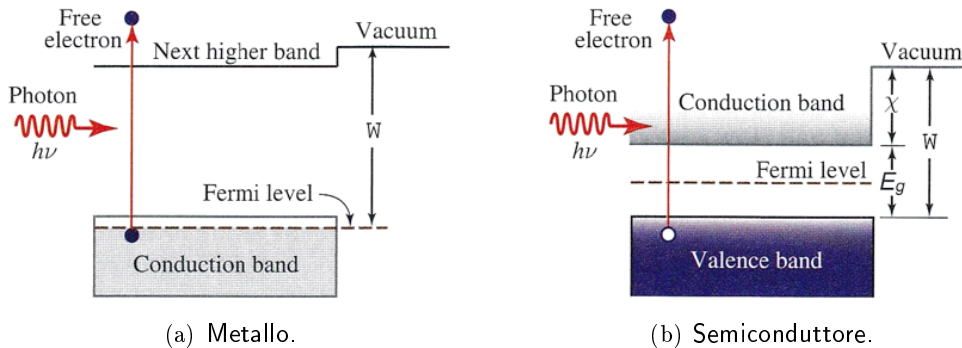


Figura 19: Emissione fotoelettrica; il *band-gap* di energia è indicato con  $E_g$  e l'affinità elettronica del materiale con  $\chi$ .

### 3.2.1 Fotodiodi fotoemissivi

Il fotodiode fotoemissivo (o “fotodiode a vuoto” o “fototubo”) è la forma più semplice di rivelatore che sfrutta l'effetto fotoelettrico esterno. Gli elettroni sono emessi dalla superficie di un materiale fotoemissivo chiamato “fotocatodo” e viaggiano in vuoto verso un elettrodo (anodo), mantenuto a un potenziale maggiore ( $d.d.p. \in [50 - 150] V$ ). Il risultato è una corrente, proporzionale al flusso di fotoni incidente, che scorre attraverso il carico collegato all'anodo.

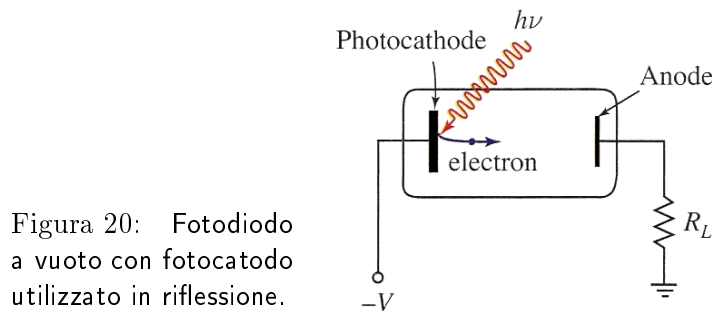


Figura 20: Fotodiode a vuoto con fotocatodo utilizzato in riflessione.

Anodo e catodo sono dunque sigillati in un bulbo da cui è estratta l'aria. La geometria globale degli elementi, compresa la finestra di accesso, è studiata in base alle caratteristiche del fotocatodo, che può lavorare in riflessione o in trasmissione, e in base all'esigenza di raccogliere tutti i fotoelettroni emessi minimizzando il tempo di transito.

Questo tipo di fotorivelatore ha una risposta molto rapida, corrente di buio inferiore a quella riscontrabile nei fotodiodi a giunzione (cfr. §3.2.2), capacità di conteggio di fotoni ed è facilmente realizzabile con area attiva estesa [19]. La risposta è sufficientemente uniforme grazie alla corta distanza che separa anodo e fotocatodo (lo stesso non vale per i fotomoltiplicatori).



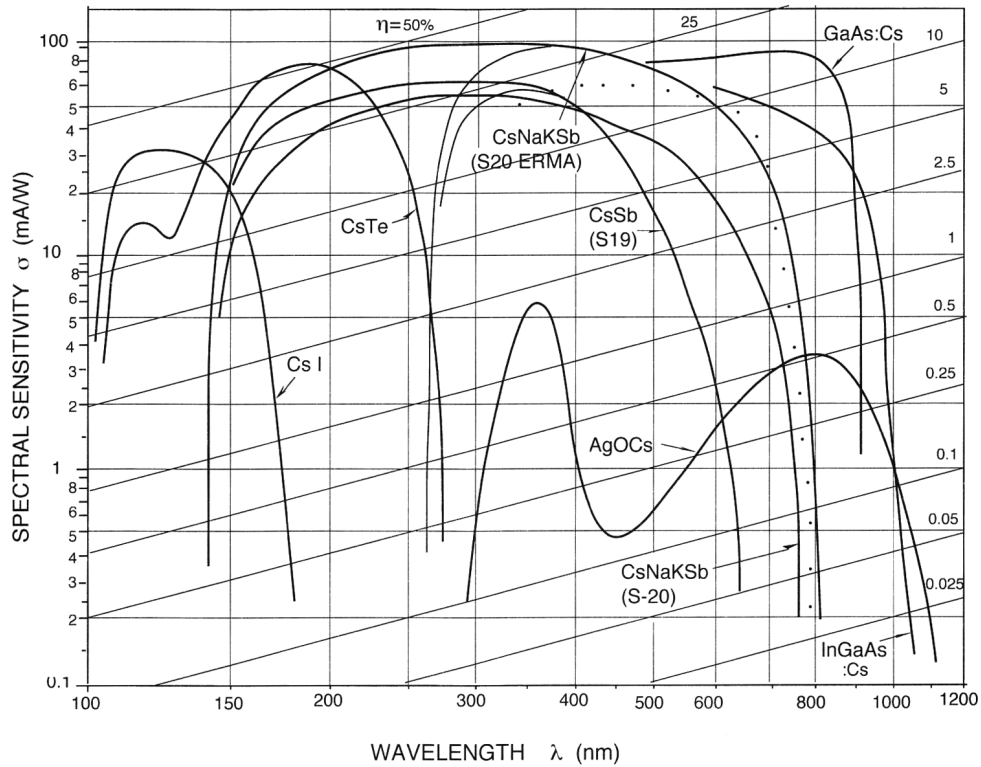


Figura 21: Risposta spettrale di vari fotocatodi in riflessione.

L'intervallo spettrale può coprire il FUV e il NUV grazie all'uso di opportuni fotocatodi, tra cui CsTe, CsI, RbCeTe [20].

Esistono inoltre fototubi contenenti del gas inerte in grado di assicurare un guadagno interno pari a circa 10, a scapito però della linearità della risposta.

### 3.2.2 Fotodiodi a giunzione

Il fotodiodo a semiconduttore è costituito da una giunzione  $p-n$  (polarizzata inversamente) in cui viene sfruttato l'effetto fotoelettrico interno. I fotoni assorbiti nella regione di svuotamento generano coppie elettrone-lacuna, che sono soggette alla somma di campo elettrico intrinseco ed esterno. I due tipi di portatori si muovono in direzioni opposte, generando una corrente di deriva che può essere rilevata da un circuito opportuno.

Evidentemente, soltanto i portatori generati all'interno e in prossimità della regione di svuotamento contribuiscono al segnale in uscita. Per ovviare a questo problema ed espandere l'area utile alla fotorivelazione, è stato studiato il fotodiodo  $p-i-n$ : si tratta di una giunzione  $p-n$  con uno strato intrinseco (da cui la "i") a basso drogaggio inserito fra gli spessori  $p$  ed  $n$ .

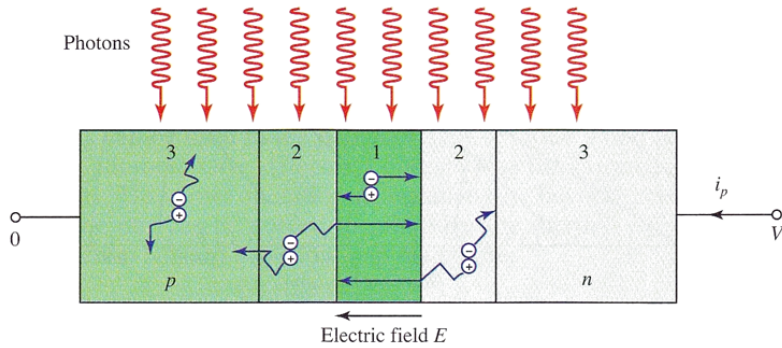


Figura 22: Fotoni incidenti su un fotodiode a giunzione  $p-n$  polarizzato inversamente. Le regioni di deriva e diffusione sono indicate con 1 e 2, rispettivamente; le zone contrassegnate con 3 non sono influenzate dal campo elettrico.

In questo modo la regione di svuotamento si estende attraverso l'intero strato intrinseco, perché molto meno drogato rispetto agli altri due. Si ottengono così due vantaggi: l'estensione dell'area attiva del sensore e la diminuzione della capacità della giunzione, con miglioramento dei tempi di risposta [21].

Questo tipo di fotorivelatore garantisce grande compattezza, stabilità, affidabilità, basso costo, efficienza quantica molto elevata, risposta spazialmente uniforme e grande estensione spettrale. Per ciò che riguarda l'EUV il silicio è il materiale più indicato, anche se un problema non trascurabile per lunghezze d'onda corte è la ricombinazione superficiale, dovuta alla ridotta lunghezza di assorbimento dei fotoni ad alta energia [22].

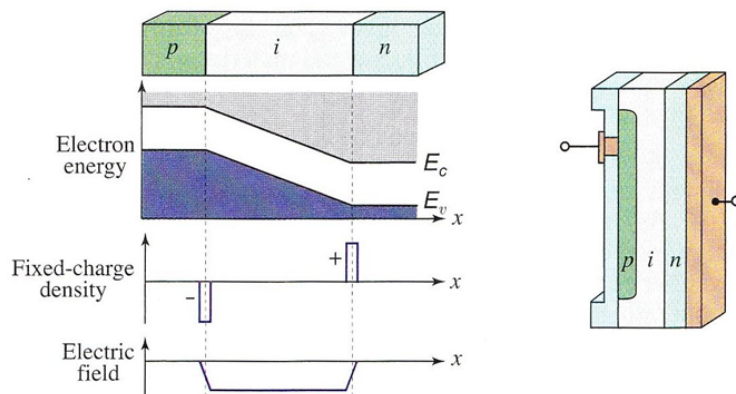


Figura 23: Struttura di un fotodiode  $p-i-n$ , grafico dell'energia, distribuzione di carica e distribuzione del campo elettrico. Il dispositivo può essere illuminato sia perpendicolarmente che parallelamente alla giunzione.

Infine, un altro tipo di rivelatore a semiconduttore è l'APD (*Avalanche PhotoDiode*), un fotodiodo *p-i-n* in cui il campo elettrico nella regione di svuotamento è incrementato applicando un'alta d.d.p. inversa sulla giunzione: le lacune e gli elettroni fotogenerati acquisiscono energia sufficiente per creare altre coppie elettrone-lacuna (ionizzazione da impatto), con un meccanismo a valanga che comporta un'amplificazione interna di circa 50–100. Vi sono però da considerare un aumento del rumore e la necessità di mantenere la giunzione a d.d.p. di 100–300 V.

### 3.2.3 Fotodiodi ibridi

Il concetto di fotodiodo ibrido, o HPD (*Hybrid PhotoDiode*), risale a più di 50 anni fa [23]. Al tempo della sua formulazione le tecnologie del silicio e del vuoto non erano sufficientemente avanzate da permettere la realizzazione di esemplari competitivi; l'idea fu così abbandonata in favore del tubo fotomoltiplicatore.

Al giorno d'oggi, la disponibilità di amplificatori poco costosi, veloci e a basso rumore, combinata con tecnologie avanzate per la produzione di diodi *p-i-n* e tubi a vuoto, ha reso l'HPD un fotorivelatore effettivamente costruibile e dalle ottime caratteristiche.

Recenti reinvenzioni di questo sensore sono state stimolate da esigenze di ricerca nella fisica delle alte energie [24, 25].

Un HPD è formato da un fotodiodo a vuoto in cui l'anodo collettore è sostituito da un (o da una matrice di) fotodiodo a giunzione in silicio di tipo *p-i-n*, polarizzato inversamente. Gli elettroni prodotti dal fotocatodo trasmissivo sono accelerati da alcuni *kV* di d.d.p. e penetrano nella superficie del silicio. Qui i fotoelettroni dissipano la loro energia, ionizzando gli elettroni nella banda di valenza del materiale e creando moltissime coppie elettrone-lacuna. Il processo si conclude in modo analogo a quello descritto per il fotodiodo a giunzione.

In questo modo è possibile ottenere un guadagno interno che supera il migliaio, evitando l'aumento di rumore tipico dei sistemi moltiplicativi e a valanga [26]. Il fotodiodo ibrido, quindi, combina la sensibilità ai singoli fotoni, tipica di un sensore fotoemissivo, con la risoluzione spaziale ed energetica di un rivelatore a stato solido.

L'immagine luminosa raccolta dal fotocatodo è trasmessa al diodo in silicio focalizzando gli elettroni emessi. L'operazione può avvenire in due modi diversi: il primo consiste nell'usare degli elettrodi per raccogliere i fotoelettroni e concentrarli su un'area ridotta; il secondo sfrutta la breve distanza tra fotocatodo e giunzione, che devono avere aree confrontabili.

Il fuoco elettrostatico permette l'uso di *detector* a semiconduttore più piccoli, conciliando le esigenze di grande area e basso rumore; il fuoco prossimale è immune da campi magnetici esterni.

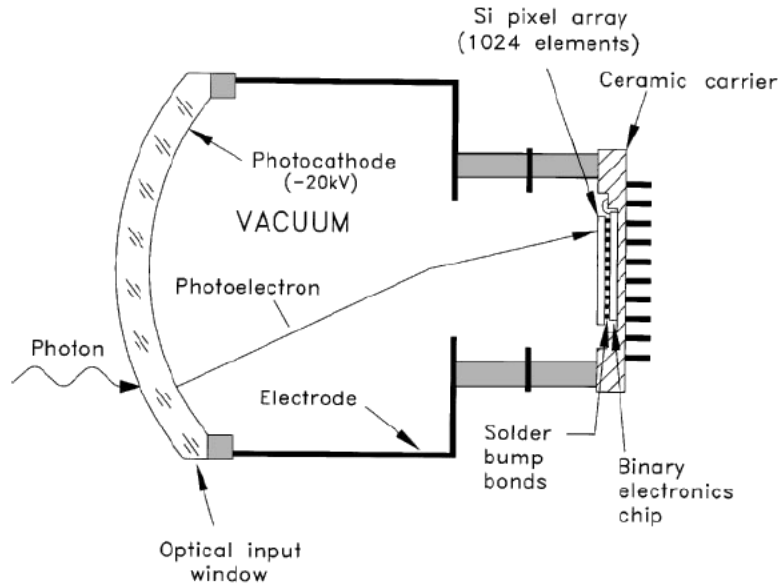


Figura 24: Fotodiodo ibrido con fuoco elettrostatico e sensore interno costituito da una matrice in silicio di 1024 elementi.

L'HPD necessita di alto voltaggio ( $10 - 20 \text{ kV}$ ), ma questo difetto è compensato dall'assenza della catena di alimentazione dissipativa necessaria al funzionamento dei dinodi di un PMT. L'ingombro e il consumo di potenza sono molto ridotti.

### 3.3 Fotorivelatori selezionati

La scelta del fotodiodo più adatto è particolarmente difficile, in primo luogo per la ristretta gamma di esemplari in grado di lavorare nell'EUV disponibili sul mercato. La gran parte dei prodotti commerciali è studiata per essere efficace nel visibile, con estensione dal vicino ultravioletto all'infrarosso. I pochi sensori adatti all'intervallo spettrale di interesse hanno aree attive molto piccole, che raramente, soprattutto per ciò che riguarda i fotodiodi a giunzione, superano i  $5 \text{ mm}$  di diametro.

Un fotodiodo fotoemissivo prodotto dal NIST (*National Institute of Standards and Technology*) corrisponde alle specifiche richieste: il fotocathodo lavora in trasmissione ed è costituito da un film in ossido di alluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dello spessore di  $\sim 150 \text{ nm}$ , depositato su una finestra in quarzo [27]. Anodo e catodo sono mantenuti ad una d.d.p. compresa fra  $60$  e  $100 \text{ V}$ . La superficie sensibile arriva fino a  $10 \text{ mm}$  di diametro e sarebbe quindi una scelta ragionevole limitatamente alle misure di efficienza.

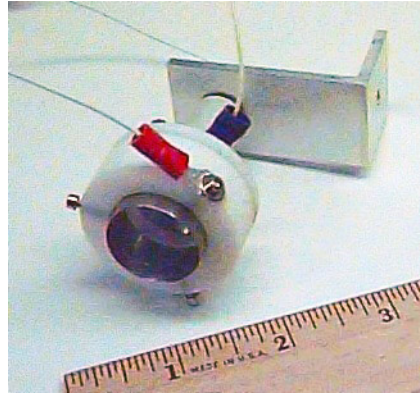


Figura 25: Fotodiodo a vuoto NIST, con fotocattodo in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [27].

La sensibilità dovrebbe essere sufficientemente elevata, anche se è necessario considerare il rumore introdotto dall'elettronica di alimentazione e prelievo del segnale.

Per quanto riguarda i fotodiodi a giunzione, l'azienda specializzata IRD (*International Radiation Detectors, Inc.*) possiede una vasta gamma di *detector* a semiconduttore ottimizzati per l'estremo ultravioletto.

Il fotorivelatore indagato appartiene alla serie AXUV ed è costituito da una giunzione in silicio di tipo *n-on-p* coperta da un sottile strato in silice ( $\text{SiO}_2$ ) di 6-8 nm di spessore. L'ossido protegge il sensore dalla radiazione intensa, garantendo maggiore stabilità e longevità, ma senza comprometterne la sensibilità [28, 29].

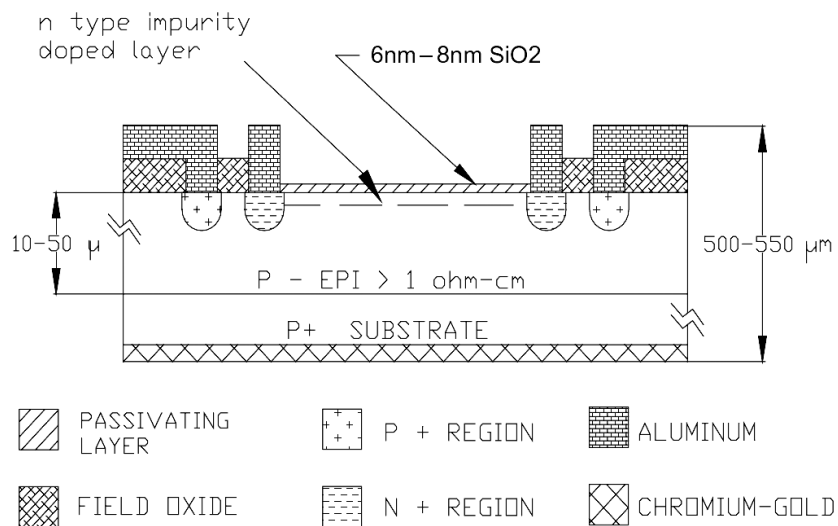


Figura 26: Schema del fotodiodo a giunzione IRD, con indicazione dei tipi di materiale e degli spessori di fabbricazione [30].

L'area attiva è di  $576 \text{ mm}^2$ , ovvero un quadrato di  $24 \text{ mm}$  di lato [30] e la sua risposta è spazialmente uniforme; come segnalato dal NIST però, un'area grande comporta una bassa resistenza di *shunt*<sup>[9]</sup> e quindi elevato rumore termico: la risposta del fotodiode a potenze luminose molto basse viene coperta dall'elevata corrente di buio.

Per un fotodiode a semiconduttore, sensibilità elevata e area estesa rappresentano due esigenze contrastanti e inconciliabili. In effetti la minima corrente misurabile da questo tipo di sensori è di circa  $500 \text{ fA}$  nel caso migliore, che corrisponde ad una potenza luminosa incidente di  $\sim 5 \text{ pW}$ ; ma questo è possibile solo per sensori con una  $R_{sh}$  molto alta ( $1000 \text{ M}\Omega$ ). Aumentando l'area la resistenza di *shunt* si abbassa fino a circa  $5 \text{ M}\Omega$  e con essa la sensibilità del fotodiode.

Una novità è rappresentata dai fotodiodi ibridi, la cui versione commerciale è ancora poco diffusa. L'azienda PHOTONIS ne produce alcuni modelli con finestra al quarzo e superfici attive che si estendono da  $18$  a  $72 \text{ mm}$  di diametro; per le aree maggiori la focalizzazione è di tipo elettrostatico e il sensore interno a semiconduttore è rappresentato da una matrice di fotodiodi in silicio. I sensori vantano un'eccellente capacità di conteggio di fotoni e una risposta spazialmente uniforme [31].

Il guadagno interno va da  $2000$  a  $3000$ , a fronte però di una d.d.p. operativa che può arrivare a  $20 \text{ kV}$ ; non va perciò trascurato l'eventuale problema dell'alimentazione, anche se la compattezza di questo tipo di rivelatori dovrebbe apportare dei vantaggi rispetto all'uso di un fotomoltiplicatore tradizionale.

La risposta spettrale al di sotto dei  $200 \text{ nm}$  non è nota, come d'altronde le eventuali possibilità di utilizzo in vuoto: si è in attesa di ulteriori chiarimenti da parte dell'azienda.



Figura 27: Fotodiode ibrido PHOTONIS da  $72 \text{ mm}$  di diametro [31].

<sup>9</sup> è la pendenza della caratteristica  $I-V$  del fotodiode nel punto  $V = 0$ ; per un fotodiode ideale la resistenza di *shunt*  $R_{sh}$  è infinita.

## Conclusioni

A livello commerciale l'offerta di fotorivelatori è davvero molto vasta ed in grado di soddisfare le esigenze più disparate: dal conteggio di fotoni alla misura di grandi potenze per applicazioni industriali, dalla rilevazione di raggi X alle analisi nel lontano infrarosso e nel submillimetrico, etc.

L'evoluzione tecnologica e l'ottimizzazione dei processi produttivi di *chip* a semiconduttore sta contribuendo alla diffusione di fotorivelatori a giunzione in grado di soppiantare i tradizionali rivelatori a fotoemissione, più ingombranti, fragili e costosi. Nonostante ciò, questi ultimi sono ancora insostituibili quando si richiedono guadagni elevati, alta velocità di risposta per potenze incidenti molto basse, rumore molto ridotto [18] o misura della potenza dei singoli fotoni.

La calibrazione dello strumento PHEBUS nell'EUV comporta un ambiente di lavoro particolare e la necessità di rilevare un fascio luminoso molto debole in potenza, ma di area estesa: si tratta di esigenze inconciliabili, perlomeno finché non si accetta un compromesso sulle dimensioni e la complessità del *detector* da utilizzare.

Limitatamente alle misure di efficienza, il fotodiodo fotoemissivo in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sembra il più adatto; inoltre presso il laboratorio LUXOR sono già state effettuate calibrazioni con esemplari analoghi e l'esperienza acquisita in tali occasioni potrebbe certamente velocizzare le operazioni di configurazione del sensore. Il NIST vende i fotodiodi già calibrati.

Per quanto riguarda le misure sull'FOV, la questione rimane ancora aperta. I fotodiodi ibridi sembrano dei candidati promettenti, benché scarseggino le informazioni sulle versioni commerciali a disposizione; l'argomento dev'essere indagato ulteriormente.

Un'alternativa è spostare l'attenzione dal rivelatore al fascio, ed alle sue caratteristiche:

1. aumentare l'intensità luminosa emessa eliminerebbe alla radice il problema della sensibilità;
2. si potrebbe agire sul sistema di illuminazione e ottimizzarlo per rendere uniforme il fascio prodotto;
3. usare un'ottica opportuna per concentrare il fascio e convogliarlo sul *detector* risolverebbe il problema dell'area;
4. si potrebbe caratterizzare l'uniformità del fascio mappandone la distribuzione di intensità.

L'alternativa 1 non può essere presa in considerazione, per le caratteristiche delle sorgenti e delle ottiche nell'estremo ultravioletto; il terzo approccio

comporterebbe l'acquisto di un componente aggiuntivo, che andrebbe successivamente calibrato e che contribuirebbe ad un ulteriore calo della potenza incidente; le alternative 2 e 4 sono più realistiche e in tal caso sarebbe possibile utilizzare il fotodiodo fotoemissivo da  $10\text{ mm}$  di diametro anche per le misure sul campo visivo.



## Riferimenti bibliografici

- [1] A. Balogh, R. Grard, S. C. Solomon, R. Schulz, Y. Langevin, Y. Kasaba, M. Fujimoto, "Missions to Mercury", *Space Science Reviews* 132 (2007)
- [2] W.E. McClintock, M. R. Lankton, "The Mercury Atmospheric and Surface Composition Spectrometer for the MESSENGER Mission", *Space Science Reviews* 131 (2007)
- [3] [http://messenger.jhuapl.edu/news\\_room/details.php?id=185](http://messenger.jhuapl.edu/news_room/details.php?id=185)
- [4] E. M. Gullikson, R. Korde, L. R. Canfield, R. E. Vest, "Stable silicon photodiodes for absolute intensity measurements in the VUV and soft x-ray regions", *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* 80 (1996)
- [5] <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=30>
- [6] <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=47346>
- [7] <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=BEPICLMB0>
- [8] E. Chassefière, J. L. Maria, L. P. Goutail, E. Quémerais, F. Leblanc, S. Okano, I. Yoshikawa, O. Korablev, V. Gnedykh, G. Naletto, P. Nicolosi, M. G. Pelizzo, et al., "PHEBUS: A double ultraviolet spectrometer to observe Mercury's exosphere", *Planetary and Space Science* 58 (2010)
- [9] P. Nicolosi, P. Zuppella, A. J. Corso, V. Polito, M. G. Pelizzo, J. F. Mariscal, N. Rouanet, P. O. Mine, E. Quémerais and J. L. Maria, "Optical Subsystem characterization in laboratory", *Proceedings SPIE* 8076 (2011)
- [10] M. Rigato, "Progettazione di una sorgente hollow cathode per calibrazione di strumentazione spaziale nell'estremo ultravioletto", *Tesi Laurea Triennale in Ingegneria Elettronica* (2011)
- [11] <http://www.mcphersoninc.com/lightsources/model629lightsource.htm>
- [12] <http://www.mcphersoninc.com/lightsources/model632lightsource.htm>
- [13] V. Polito, "Caratterizzazione di componenti ottici dello strumento Phebus a bordo della missione spaziale BepiColombo", *Tesi di Laurea Triennale in Fisica* (2009)
- [14] <http://www.mcphersoninc.com/accessories/reflcond.htm#615>
- [15] <http://www.mcphersoninc.com/spectrometers/vuvvis/model1234302.htm>
- [16] P. Nicolosi, P. Zuppella, A. J. Corso, V. Polito, M. G. Pelizzo, "BepiColombo PHEBUS CWP09: Radiometric Efficiencies EUV&FUV Instrument", *Documento di laboratorio* (2011)
- [17] M. G. Pelizzo, L. Placentino, G. Tondello, "Efficienza quantica dei CEM", *Documento di laboratorio* (1997)
- [18] G. H. Rieke, *Detection of Light - From the Ultraviolet to the Submillimeter*, Cambridge University Press (2003)
- [19] S. Donati, *Photodetectors: Devices, Circuits, and Applications*, Prentice Hall (2000)

- [20] P. N. J. Dennis, *PHOTODETECTORS: An Introduction to Current Technology*, Plenum Press (1986)
- [21] B. E. A. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, Wiley (2007)
- [22] "One Gigarad Passivating Nitrided Oxides for 100% Internal Quantum Efficiency Silicon Photodiodes", IEEE Transactions on Nuclear Science 40, 6 (1993)
- [23] G. Anzivino, H. Arnaudon, P. Baillon, P. Benetti, L. Boskma, P. Burger, A. Contin, R. DeSalvo, P. Gorodetzky, D. Grassi, W. Hao, H. He, et al., "Review of the hybrid photo diode tube (HPD) an advanced light detector for physics", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (1995)
- [24] A. Braem, E. Chesi, W. Dulinski, F. Filthaut, A. Go, C. Joram, J. Séguinot, P. Weilhammer, H. Wenzel, P. Wicht, T. Ypsilantis, "Highly segmented large-area hybrid photodiodes with bialkali photocathodes and enclosed VLSI readout electronics", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (2000)
- [25] T. Bellunato, A. Braem, A. R. Buzykaev, et al., "Cherenkov rings from aerogel detected by four large-area hybrid photodiodes", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (2003)
- [26] R. DeSalvo, "Why people like Hybrid PhotoDiode", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (1997)
- [27] [http://www.nist.gov/pml/div685/grp07/al\\_detector.cfm](http://www.nist.gov/pml/div685/grp07/al_detector.cfm)
- [28] [http://www.nist.gov/pml/div685/grp07/si\\_detector.cfm](http://www.nist.gov/pml/div685/grp07/si_detector.cfm)
- [29] R. Korde, C. Prince, D. Cunningham, R. E. Vest, E. Gullikson, "Present status of radiometric quality silicon photodiodes", Metrologia 40 (2003)
- [30] <http://www.ird-inc.com/axuvabsdev/axuvabs.html>
- [31] [http://www.photonis.com/industryscience/products/image\\_intensifiers](http://www.photonis.com/industryscience/products/image_intensifiers)