

**STUDIO DELL'EFFETTO DI DANNO DOVUTO AL
BOMBARDAMENTO DI IONI PRESENTI NEL
VENTO SOLARE SU RIVESTIMENTI
MULTISTRATO PER APPLICAZIONI
ALL'OSSERVAZIONE DEL SOLE DALLO SPAZIO**

Tommaso Bressan

TESI DI LAUREA

Relatore: Prof.sa Pelizzo Maria Guglielmina

Co-Relatore: Dott. Corso Alain Jody

Università di Padova

Facoltà di ingegneria

Laurea Triennale in Ingegneria dei Processi Industriali e dei Materiali

Settembre 2011



SOMMARIO (ABSTRACT)

Le particelle presenti nel vento solare possono causare gravi danni alle apparecchiature spaziali e, in particolare, possono fortemente compromettere l'efficienza dei componenti ottici. In particolare i rivestimenti ottici per il telescopio dello strumento Metis, il coronografo a bordo del satellite Solar Orbiter, sono critici in quanto nanostrutturati. Essi saranno ampiamente esposti a queste particelle e per questo motivo devono subire un'attenta fase di test svolta sia attraverso impianti sperimentali che simulazioni computerizzate. In questo testo vengono riportate, oltre ad un'introduzione sulla missione Solar Orbiter e Metis, i test e le simulazioni svolte al fine di comprendere più a fondo l'effetto che il vento solare può avere sui rivestimenti multistrato

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio i miei genitori, gli sponsor ufficiali, che mi hanno permesso di essere qui oggi.

Ringrazio inoltre i finanziatori minori, ma sempre molto importanti:

le nonne e l'amico e collega Massimo Gregoris.

Un ringraziamento va anche alla professoressa M.G.Pelizzo per gli utili insegnamenti e il sostegno che non è mai mancato.

Un grazie particolare va all'ingegner A.J.Corso, senza il quale la realizzazione di questo elaborato sarebbe stata impossibile ed i mesi di tirocinio meno piacevoli.

Un grazie anche alle dottoresse Zuppella e Polito per l'aiuto e le innumerevoli considerazioni tecniche (e non ...) svolte in questi mesi di lavoro.

Infine un grazie enorme ai miei amici che mi hanno aiutato a sostenere il peso dello studio in questi anni.

INDICE:

<u>INTRODUZIONE.....</u>	<u>11</u>
<u>1 LA MISSIONE SOLAR ORBITER.....</u>	<u>13</u>
1.1 Cos'è SOLAR ORBITER?.....	13
1.2 OBIETTIVI DELLA MISSIONE.....	13
1.3 DESCRIZIONE DELLA MISSIONE.....	14
1.4 AMBIENTE.....	14
1.5 AMBIENTE TERMICO.....	15
1.6 VENTO SOLARE.....	15
1.7 PARTICELLE CARICHE.....	16
<u>2 METIS.....</u>	<u>19</u>
2.1 HE II LYMAN-A I E H I LYMAN-A.....	19
2.2 SCHEMA DI METIS.....	19
2.3 MODALITA' OPERATIVE DEL CORONOGRAFO.....	20
2.4 CANALE SPETTROSCOPICO.....	22
<u>3 INTRODUZIONE ALLA TEORIA DEI MULTISTRATO.....</u>	<u>23</u>
3.1 COSTANTI OTTICHE NEL CAMPO UV.....	24
3.2 RIFLESSIONE AD UN' INTERFACCIA.....	24
3.3 FUNZIONI OTTICHE ALL'INTERNO DEI MULTISTRATO.....	26
<u>4 EFFETTO DELLE PARTICELLE PRESENTI NEL VENTO SOLARE.....</u>	<u>29</u>
4.1 ESPERIMENTO DI BOMBARDAMENTO.....	30
4.1.1 MODALITÀ DELL'ESPERIMENTO.....	30
4.1.2 RISULTATI.....	31
4.1.3 TEST SUCCESSIVI.....	32
4.2 SIMULAZIONE BOMBARDAMENTO.....	33
4.2.1 SRIM, CENNI TEORICI.....	33
4.2.2 INPUT E OUTPUT.....	34
4.2.3 LIMITI.....	35
4.2.4 SIMULAZIONI.....	35
<u>5 CONCLUSIONI.....</u>	<u>45</u>

Indice delle figure:

Figure 1: immagine pittorica di Solar Orbiter.....	13
Figure 2: schema di Metis	20
Figure 3:cammino ottico della luce visibile all'interno di Metis	21
Figure 4:cammino ottico dei raggi UV ed EUV all'interno di Metis	21
Figure 5:cammino spettroscopico della luce in METIS.....	22
Figure 6:immagine UV del sole catturata da TRACE.....	23
Figure 7:immagine schematizzata di un multistrato periodico	24
Figure 8: comportamento di un'onda all'interfaccia tra due mezzi con diverso indice di rifrazione	25
Figure 9: propagazione schematica di un'onda piana all'interno di un generico strato di un rivestimento multistrato	26
Figure 10: rappresentazione dei diversi cammini ottici per comprendere il ritardo di fase ad esso legato	27
Figure 11: strumentazione LEI al Forschungszentrum Dresden-Rossendorf e campioni accomodati nei supporti dello strumento.....	30
Figure 12: misure di riflettività dei campioni REF (a), CL1 (b), CL2 (c) e CL3 (d) prima e dopo l'esperimento di impianto protonico	31
Figure 13:analisi XPS per la struttura ricoperta con Ir/Mo prima e dopo l'esperimento di impianto protonico	32
Figure 14: immagine TEM della struttura Ru/Mo prima (a) e dopo (b) l'esperimento d'impianto protonico	33
Figure 15: Setup Window del programma SRIM	34
Figure 16:distribuzione ioni H nella struttura con Ir	36
Figure 17: distribuzione dei recoil atoms di Ir nella struttura con Ir	36
Figure 18: distribuzione dei recoil atoms di Mo nella struttura con Ir	37
Figure 19: distribuzione dei recoil atoms di Si nella struttura con Ir.....	37
Figure 20: distribuzione degli ioni H nella struttura con Ru	38
Figure 21: distribuzione dei recoil atoms di Ru nella struttura con Ru	38
Figure 22: distribuzione dei recoil atoms di Mo nella struttura con Ru	39
Figure 23: distribuzione dei recoil atoms di Si nella struttura con Ru	39
Figure 24: distribuzione degli ioni He nella struttura con Ir	40
Figure 25: distribuzione dei recoil atoms di Ir nella struttura a base di Ir	41
Figure 26: distribuzione dei recoil atoms di Mo nella struttura a base di Ir.....	41
Figure 27: distribuzione dei recoil atoms di Si nella struttura a base di Ir.....	42
Figure 28: distribuzione degli ioni He nella struttura con Ru	42
Figure 29: distribuzione dei recoil atoms di Ru nella struttura a base di Ru	43
Figure 30: distribuzione dei recoil atoms di Mo nella struttura a base di Ru	43
Figure 31:distribuzione dei recoil atoms di Si nella struttura a base di Ru.....	44

Indice tabelle:

Table 1: fattore di scalo per le diverse date di lancio	15
Table 2: caratteristiche vento solare	16
Table 3: specifiche della struttura multistrato e dei suoi possibili capping layer.....	29
Table 4: caratteristiche vento solare	29
Table 5: dettagli dell'esperimento d'impianto protonico	30
Table 6: picchi di riflettività delle varie strutture multistrato prima e dopo l'esperimento di impianto protonico.....	31
Table 7: Picchi di densità nella distribuzione delle particelle di H nei vari strati delle due strutture ML divisi per 10^5 in unità di $(\text{atomi}/\text{cm}^3)/(\text{atomi}/\text{cm}^2)$	40

INTRODUZIONE

Fin dall'antichità, attraverso l'attribuzione di connotati mistici e religiosi, il Sole ha esercitato un notevole fascino sull'uomo: quest'interesse è rimasto sempre vivo e, nel corso dei secoli, ha portato a numerose scoperte, alcune addirittura rivoluzionarie. Non tutti i suoi misteri sono stati però svelati, e in questi anni gli scienziati di tutto il mondo ed in particolare quelli delle agenzie internazionali NASA ed ESA stanno lavorando per accrescere la quantità di informazioni scientifiche in merito.

Proprio queste due agenzie sono ultimamente al lavoro per un progetto congiunto chiamato Solar Orbiter. Esso consiste nel mettere in orbita attorno al Sole un satellite in grado di raccogliere numerosi dati riguardo le evoluzioni del campo magnetico e di ottenere foto ad alta risoluzione della superficie solare. Il dato più straordinario di questa missione è però la distanza minima a cui il satellite si troverà a lavorare, 0,23 AU, cioè pari a circa tre quarti della distanza che separa la Terra dal Sole; a questa distanza il satellite si troverà immerso in un ambiente particolarmente ostile e, oltre alle elevate temperature, dovrà affrontare gli effetti del vento solare.

Tale ambiente deve essere tenuto in considerazione nel corso della progettazione di tutti gli strumenti che verranno posizionati nel satellite. In particolare il laboratorio di Padova CNR-INF Luxor sta lavorando al progetto dei rivestimenti multistrato per Metis, un coronografo invertito in grado di ottenere immagini ad alta definizione in tre diversi intervalli spettrali (EUV, UV, VIS), in cui inoltre è stato ricavato un canale per lo studio spettroscopico.

Metis per poter lavorare nei campi UV ed EUV necessita di una tecnologia avanzata come quella dei rivestimenti multistrato, che consiste nel ricoprire le ottiche con sottili strati di diversi materiali dello spessore di pochi nanometri.

In questo elaborato sarà prima illustrata la missione spaziale e l'ambiente in cui il satellite verrà a trovarsi (capitolo 1), poi i percorsi ottici all'interno di Metis (capitolo 2) e la teoria dei multistrati (capitolo 3). Verranno successivamente esposti i test e le simulazioni relativi all'effetto delle particelle presenti nel vento solare (capitolo 4). L'elaborato si concluderà poi con un'analisi degli esperimenti fatti e dei possibili test futuri (capitolo 5).

1 LA MISSIONE SOLAR ORBITER

In che misura il campo magnetico del Sole influenza la vita sulla Terra? Come possiamo predire le eruzioni solari? Da cosa è alimentato il vento solare? Il Sole come regola lo spazio interplanetario?

É a questi e molti altri interrogativi che la ricerca dei nostri giorni sta cercando di dare risposta, stimolata da tecnologie sempre più sofisticate. Dopo il telescopio e la spettroscopia, la terza grande rivoluzione tecnologica nello studio del Sole è stata la conquista dello spazio da parte dell'uomo. Per la prima volta nella storia dell'umanità si è riusciti ad avere immagini e rilevazioni di dati non filtrati dall'atmosfera, cosa che ha portato nuove energie alla conoscenza scientifica. La prima sonda inviata dagli Stati Uniti, con l'intento dichiarato di monitorare i fenomeni solari, fu lanciata l'11 marzo 1959 e rispondeva al nome di Pioneer 5. Successivamente sono state lanciate numerose missioni solari come SOHO e Ulisse e nel prossimo futuro potrebbe aggiungersi anche la sonda spaziale SOLar Orbiter.

1.1 Cos'è SOLar Orbiter?

Solar Orbiter, chiamato anche con l'acronimo SOLO, è un satellite per l'osservazione del Sole che partecipa al concorso "Cosmic Vision" indetto dall'European Space Agency (ESA), agenzia internazionale fondata nel 1975 incaricata di coordinare i progetti di diciotto paesi europei.

Il satellite, nel caso in cui vinca il concorso, sarà lanciato o nel gennaio 2017 o nel luglio 2018 e nel suo punto di minima distanza dal Sole si troverà a 0,23 AU da quest'ultimo, distanza mai raggiunta fino ad ora.

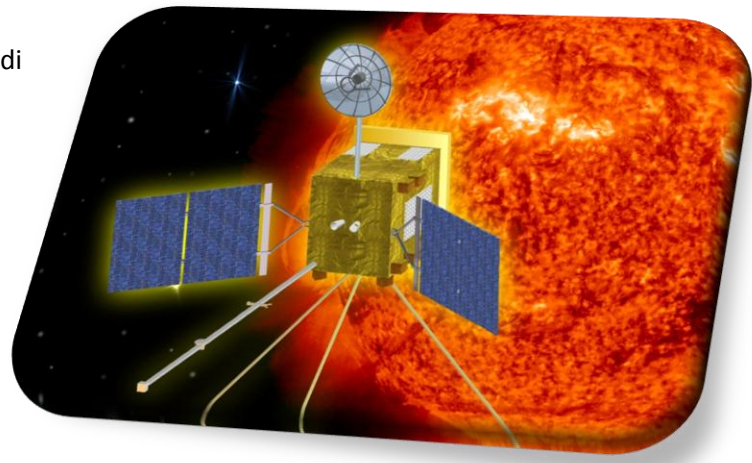


Figure 1: immagine pittorica di Solar Orbiter

1.2 Obiettivi della missione

Portando il satellite ad una distanza pari a circa un quarto della distanza tra Sole Terra (0,23 AU) la missione si prefigge i seguenti obiettivi:

- Determinare in situ le proprietà e le dinamiche del plasma, dei campi magnetici e delle particelle nella vicina eliosfera solare
- Rilevare dettagli accurati dell'atmosfera magnetizzata dal Sole
- Individuare i legami tra l'attività sulla superficie del Sole e la conseguente evoluzione della corona e eliosfera interna

- Osservare e caratterizzare le regioni polari del Sole e la corona equatoriale da latitudini elevate.

Inoltre con questa missione si spera di ottenere informazioni importanti riguardo a:

- Quale sia la forza motrice del vento solare
- Come sono generati i campi magnetici solari
- Come si possono predire le eruzioni solari e la loro intensità
- Se si possano fare previsioni a lungo termine sulle attività solari

1.3 Descrizione della missione

Secondo le previsioni attuali Solar Orbiter inizierà il suo viaggio verso il Sole nel gennaio 2017 o nel luglio 2018 ed avrà 3.4 anni di tragitto, dopo i quali entrerà in un'orbita di 168 giorni attorno al Sole. Quest'orbita avrà il suo perielio (distanza minima dal Sole) a 0,23 AU.

Durante il tragitto il satellite userà un principio detto "fionda gravitazionale" che consiste nello sfruttare il campo gravitazionale di un pianeta per modificare la velocità e la direzione di un veicolo spaziale. SOLO userà questo principio sia con la Terra sia con Venere.

Una volta che il satellite entrato in orbita, verranno osservati in modo particolare due fattori; innanzitutto, sfruttando ancora l'aiuto di Venere, si porterà il satellite ad un'inclinazione che, dopo 7.4 anni, sarà di 30° rispetto all'asse equatoriale solare permettendo così un'analisi delle regioni polari. Secondariamente, vicino al perielio il satellite sarà sincrono con la rotazione del Sole e questo comporterà la possibilità di osservare per un dato periodo l'evoluzione di uno stesso punto sulla superficie solare.

La durata totale della missione sarà di 9.9 anni nel caso in cui il lancio venga effettuato nel gennaio 2017 e di 8.9 nel caso di luglio 2018.

1.4 Ambiente

Nel progetto di uno strumento ed in particolare di un satellite bisogna sempre tener conto dell'ambiente in cui questo dovrà lavorare e di come possa influire sul suo funzionamento.

Solar Orbiter svolgerà la parte principale della sua missione in una regione dello spazio molto vicina al Sole ed è quindi di fondamentale importanza analizzare l'effetto del flusso termico, così come quello delle particelle energetiche e del vento solare emessi dalla nostra stella.

Per fare un'analisi accurata di questi fattori è però necessaria la conoscenza di molti parametri di cui non possiamo avere misura diretta (per esempio non abbiamo misure dirette della temperatura lungo l'orbita che dovrà seguire SOLO); questi valori sono allora stati ricavati secondo la legge dell'inverso del quadrato partendo da misure fatte ad 1 AU.

In tabella possiamo vedere il valore del fattore di scalo per le diverse date di lancio.

Table 1: fattore di scalo per le diverse date di lancio

		Radius [AU]	Fattore di scalo
	Min perihelion	0.23	12.70
Lancio 2017	Mission average	0.59	2.87
Lancio 2018	Min perihelion	0.24	17.36
	Mission average	0.59	2.87

Sfortunatamente però la determinazione di alcuni valori è difficile anche ad 1 AU perché i fenomeni che li generano sono complessi e non ancora completamente chiariti. Nonostante questo partendo da misure sperimentali possiamo fare un modello statistico in grado di fornirci dati significativi. L'ESA ha rilasciato una relazione in cui fornisce i valori dei vari parametri calcolati (ESA, Solar Orbiter environmental specification, 2008).

1.5 Ambiente termico

L'effetto del flusso termico è di fondamentale importanza, infatti, Solar Orbiter nel suo punto di massima vicinanza al Sole si troverà a lavorare ad una distanza di 0,23 AU.

A questa distanza si è stimato, a partire dai dati raccolti ad 1 AU e con la legge dell'inverso del quadrato, un flusso di 25000 W/m².

Per evitare i forti effetti della temperatura è stato programmato uno scudo termico, il quale però, per il funzionamento degli strumenti di telerilevamento, necessita di un determinato numero di fori. Attraverso questi ultimi l'irradianza potrà arrivare fino alle parti più interne del satellite, comportando un grande aumento di temperatura che potrebbe danneggiare i componenti dei vari strumenti. In particolare attraverso studi fatti dall'ESA, risulta che sugli specchi di Metis sia possibile raggiungere i 60° (ESA, Solar Orbiter Payload Definition Document, 2007).

1.6 Vento solare

Il vento solare è parte della corona ed è costituito da un plasma la cui componente di ioni è formata, normalmente, per il 95% da protoni ed elettroni (in proporzione circa uguale) e per il 5% da particelle alfa con tracce di nuclei di elementi più pesanti, in particolare O⁶⁺ e Fe¹⁰⁺. L'elevata temperatura della zona vicino al Sole causa l'espansione del plasma verso l'esterno che porta con sé il campo magnetico solare.

Inizialmente il vento solare è un plasma caldo, denso e che si muove lentamente: durante il suo allontanamento dal Sole però si raffredda, diventa rarefatto e accelera fino a velocità supersoniche.

L'accelerazione del vento solare avviene principalmente a distanze minori degli 0,23 AU a cui andrà SOLO e quindi non verranno rivelate sostanziali differenze di velocità a seconda delle varie distanze a cui si troverà il satellite.

Dopo la fase di accelerazione il vento solare ha in media una velocità compresa tra i 300 e i 1200 km/s. In genere è più comune una componente lenta (slow solar wind) che viaggia attorno ai 400 km/s, ma spesso è presente una componente più veloce (fast solar wind) che arriva a 700 km/s. Da questi valori della velocità possiamo ricavare un valore medio dell'energia cinetica pari a 1 keV per i protoni e a 4 keV per He⁺⁺.

Inoltre dai documenti ESA (ESA, Solar Orbiter environmental specification, 2008) apprendiamo i valori medi di alcuni utili parametri che riportiamo in tabella.

Table 2: caratteristiche vento solare

	ad 1 AU	media missione
densità (ioni/cm ³)	8.7	25
velocità (km/s)	468	468
N _{alfa} /N _{protoni}	0.047	0.047
N _{O6+} /N _{protoni}	0.0003	0.0003
N _{Fe10+} /N _{protoni}	8,77x10 ⁻⁶	8.77x10 ⁻⁶

Nei test di bombardamento è importante considerare il flusso totale assorbito e l'energia delle particelle.

Il valore della velocità viene considerato costante e il flusso viene calcolato a partire dalla densità media ottenuta sempre con la legge dell'inverso del quadrato e con i dati ad 1 AU. Assumendo la durata della missione pari a 3500 giorni si ottiene un flusso pari a 354*10¹⁵ protoni*cm⁻².

1.7 Particelle cariche

Oltre alle particelle del vento solare, durante la missione saranno incontrate altre particelle energetiche cariche, i cui effetti vanno considerati con cura, nonostante esse siano meno dannose di quelle precedentemente descritte. Generalmente queste particelle sono elettroni con energie dell'ordine dei 100 keV mentre l'ordine di energia per protoni ed altri ioni è superiore al MeV.

Anche neutroni, raggi-γ e raggi-X sono considerati particelle energetiche in questo contesto. Per solar Orbiter la principale fonte di particelle energetiche sono le forti eruzioni solari (ESE). Le particelle emessa da quest'ultime possono perdere energia ionizzando altri atomi o con processi non ionizzativi quali "displacement damage" e "bulk damage" con i quali gli atomi vengono spostati dalle loro posizioni iniziali. Questi processi possono modificare le proprietà elettriche ottiche e meccaniche dei vari componenti ed è un meccanismo da non sottovalutare nella progettazione dei nostri componenti ottici.

Le eruzioni solari sono fenomeni fortemente imprevedibili sia in frequenza che in intensità e verranno perciò trattati con un metodo probabilistico, ma nonostante questo possiamo dire che la maggior parte di questi eventi sono confinati in un periodo di sette anni, ai quali ne seguono quattro di relativa quiete.

Un'altra fonte di particelle energetiche che sarebbe da considerare sono i raggi cosmici galattici, che fortunatamente hanno un flusso basso (poche particelle/cm²/s) e non rilevante, anche perché gli specchi di METIS sono rivolti verso il Sole, che funge da scudo per queste particelle. Un ultimo elemento da considerare sono gli elettroni energetici, di origine gioviana e solare, con cui il satellite verrà ad interagire. Durante il periodo di maggiore attività solare il Sole sarà la fonte primaria di questi elettroni, mentre durante i periodi di quiete solare la principale fonte sarà Giove che fornirà elettroni con energie superiori ai 100 keV. L'effetto di questi elettroni è principalmente termico e può quindi essere considerato come un'ulteriore fonte nelle analisi termiche.

2 METIS

Metis è uno strumento per l'analisi della corona solare che appartiene all'insieme di strumentazioni per Solar Orbiter, il suo obiettivo è quello di studiare le lunghezze d'onda corrispondenti ai passaggi energetici He II Lyman- α i e H I Lyman- α oltre alle lunghezze d'onda del visibile.

Lo strumento è costituito da un coronografo in grado di ottenere immagini della corona solare, all'interno del quale è stato anche ricavato un canale per lo studio spettroscopico.

La prima versione di Metis, il prototipo SCORE ha volato nel progetto sub spaziale Herschel, fornendo le prime immagini e numerosi dati su cui lavorare. SCORE ha validato la configurazione ottica, ma non degrado.

2.1 He II Lyman- α i e H I Lyman- α

L'idrogeno e l'elio sono i principali costituenti della massa solare, rispettivamente il 74% e il 24%. Risulta quindi evidente come la comprensione della loro distribuzione e delle loro cinematiche sia fondamentale per una più approfondita conoscenza degli avvenimenti che regolano il Sole ed il suo sistema.

La loro concentrazione è ben conosciuta alla distanza di 1 AU e nella fotosfera mentre si hanno poche informazioni sulle distanze intermedie come quella della corona solare.

Per indagare la loro distribuzione il modo più usato è quello di analizzare la linea Lyman- α che corrisponde alla lunghezza d'onda emessa o assorbita nel passaggio di un elettrone da un orbitale $n=1$ ad un orbitale $m=2$ (o viceversa).

Il valore di queste lunghezze d'onda può essere ottenuto utilizzando la formula di Rydberg:

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{Z^2 m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

da cui

$$\lambda_{[nm]}^\alpha = \frac{1243}{Z^2 \left(1 - \frac{1}{4}\right) \cdot 13,6} = \frac{1243}{Z^2 \cdot 10,2}$$

Dove sostituendo, otteniamo:

H I Lyman- α = 121.6nm (UV)

He II Lyman- α = 30.4nm (EUV)

2.2 SCHEMA DI METIS

Lo schema di METIS è chiamato coronografo invertito ed è mostrato in figura.

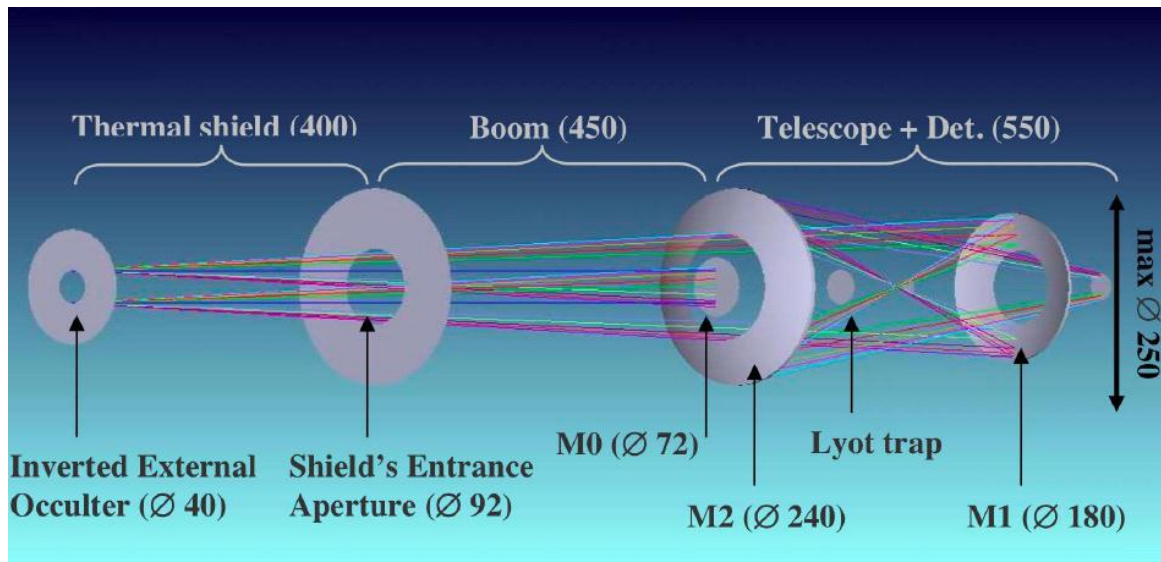


Figure 2: schema di Metis

L'inverted external occulter è un foro di 40 mm di diametro attraverso il quale entrerà la luce nello strumento: questo foro si propaga per tutta la lunghezza dello scudo termico allargandosi fino a 92 mm di diametro.

Dietro quest'apertura è posizionato lo specchio M0, che serve a riflettere la luce del disco solare in modo da lasciar filtrare all'interno del telescopio solo quella della corona.

Lo specchio primario ellissoidale M1 raccoglie la luce della corona, e costruisce l'immagine sul piano focale dello specchio secondario M2, il quale mette a fuoco l'immagine della corona su un piano focale dietro M1.

La luce diffratta da M0 e da IEO è una fonte di disturbo nell'acquisizione delle immagini ed è quindi necessario mettere un'internal occulter ed un lyot trap, che sopprimono rispettivamente gli effetti di M0 e di IEO.

Poiché METIS non lavorerà in continuo, ma avrà dei tempi di lavoro ben determinati, nel satellite è anche pianificato un meccanismo di chiusura dell'apertura nello scudo termico, in modo tale da preservare meglio lo strumento.

Un problema che si potrebbe verificare è quello di avere il telescopio fuori asse con il Sole ed avere quindi luce del disco che entra nel telescopio. Per risolvere questo problema si sono ipotizzate diverse soluzioni ancora in fase di sviluppo.

Una soluzione potrebbe essere un meccanismo in grado di far ruotare M0 in una circonferenza centrata nel centro di IEO, un'altra è un meccanismo in grado di far traslare M0 avanti e indietro lungo l'asse del telescopio. Un'ultima soluzione è quella di un meccanismo di chiusura dell'apertura dello strumento quando le condizioni diventano pericolose per lo strumento.

2.3 MODALITA' OPERATIVE DEL CORONOGRAFO

Il coronografo consente di analizzare tre diverse lunghezze d'onda in un unico strumento, ma questo richiede però due diverse modalità operative.

Nella modalità UV un filtro stretto costituito da Al/MgF2 seleziona una banda larga 10 nm centrata a 121.6 nm. Questo filtro lavorando con un angolo d'incidenza di 45° e oltre a filtrare la banda desiderata, riflette la luce visibile deviando il suo cammino di 90°.

I raggi UV passano attraverso il filtro ed entrano in un fotomoltiplicatore alla fine del quale si trova un rivelatore CMOS active pixel sensor (APS) mentre la luce visibile, dopo essere stata deviata, viene fatta passare attraverso un polarizzatore a cristalli liquidi ed poi analizzata da un altro sistema APS.

In questo modo, utilizzando due diversi rivelatori, è quindi possibile avere la contemporanea analisi di due diverse lunghezze d'onda.

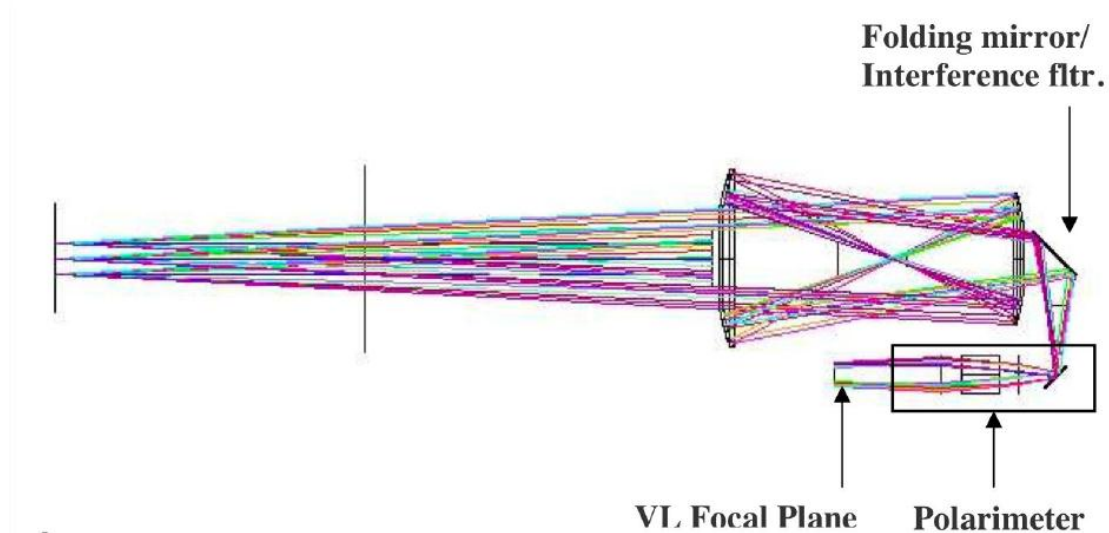


Figure 3: cammino ottico della luce visibile all'interno di Metis

L'altra modalità è chiamata "EUV mode" ed in questa modalità viene esaminata la linea Hell Lyman- α corrispondente a 30.4 nm. Per poter analizzare questa lunghezza d'onda il filtro Al/MgF2 viene sostituito con un doppio filtro passa-basso di alluminio che elimina le lunghezze d'onda più lunghe. Il cammino ottico seguito dalle onde UV ed EUV è il medesimo ed è riportato in figura. Anche il rivelatore, un contatore di fotoni 2kx2k, è il medesimo.

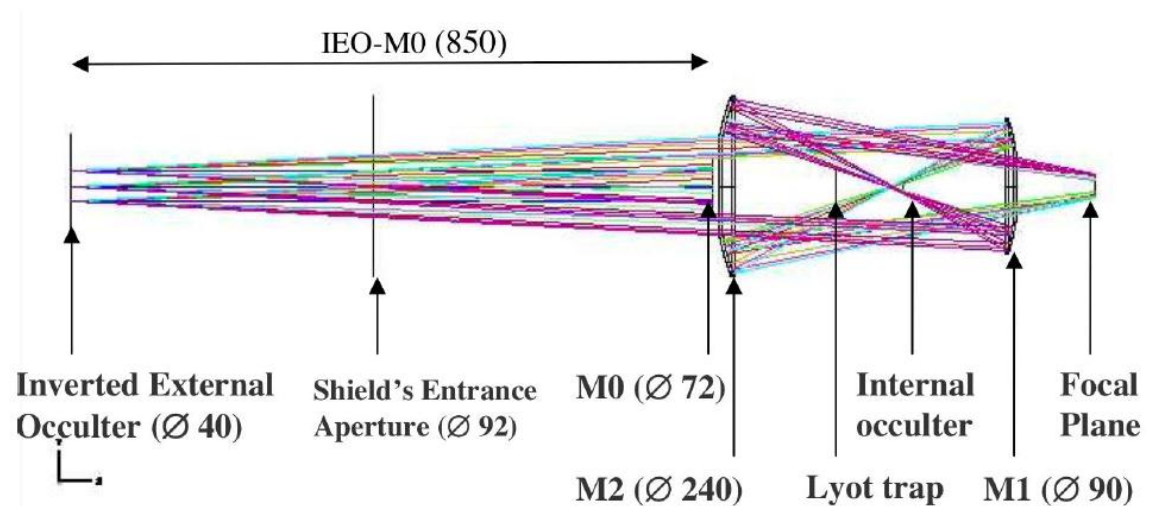


Figure 4: cammino ottico dei raggi UV ed EUV all'interno di Metis

Bisogna inoltre ricordare che per il corretto funzionamento dello strumento è necessario che gli specchi riflettano le lunghezze d'onda interessate: quest'obiettivo è raggiunto grazie all'utilizzo di rivestimenti multistrato il cui funzionamento verrà meglio illustrato nei capitoli successivi.

2.4 CANALE SPETTROSCOPICO

Lo schema del coronografo permette di ricavare un canale per lo studio spettroscopico, senza apportare sostanziali modifiche alla struttura, semplicemente inserendo uno spettrometro multi fenditura.

Una parte dello specchio secondario M2 (32° dei 360° a disposizione) è rimpiazzata da un reticolo diffrattivo, quest'ultimo è costituito da una struttura sferica con 1800 rigature per millimetro che diffrangono nello stesso punto del piano focale la linea 121.6 al primo ordine e la 30.4 al quarto ordine.

La grata lavora con un angolo d'incidenza α di 4,15° e un angolo di diffrazione β di 8,42° per le lunghezze d'onda desiderate.

Lo spettro diffratto viene poi raccolto da una parte del rivelatore per EUV/UV che non viene usato nella raccolta immagini. Il percorso della luce in questo canale è riportato in figura.

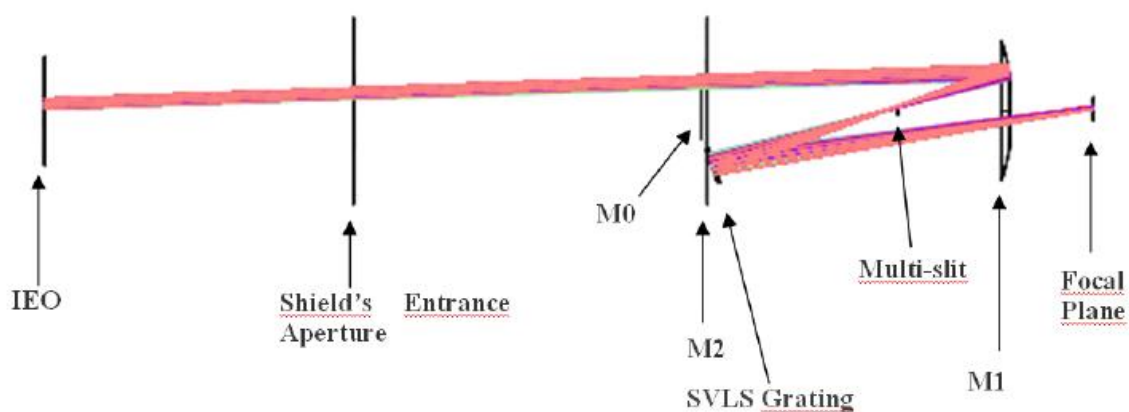


Figure 5: cammino spettroscopico della luce in METIS

3 INTRODUZIONE ALLA TEORIA DEI MULTISTRATO

Negli ultimi decenni lo studio nei campi dell'UV e dei raggi X ha avuto peso sempre crescente trovando applicazione in numerosi settori, portando così allo sviluppo di numerose apparecchiature operanti in questi intervalli spettrali.

Il problema principale a queste lunghezze d'onda è che in incidenza normale la riflettività è quasi nulla ed in trasmissione non è possibile lavorare.

Una soluzione accettabile per alcune applicazioni è quella di lavorare in incidenza radente, in questo caso però bisogna tener conto di numerosi problemi come l'elevato ingombro delle apparecchiature e le prestazioni ottiche non elevate.

Una soluzione che può invece fornire buone prestazioni anche in incidenza normale è quella dei rivestimenti multistrato, tecnologia già utilizzata con successo in alcune precedenti missioni spaziali come per esempio SOHO e TRACE.

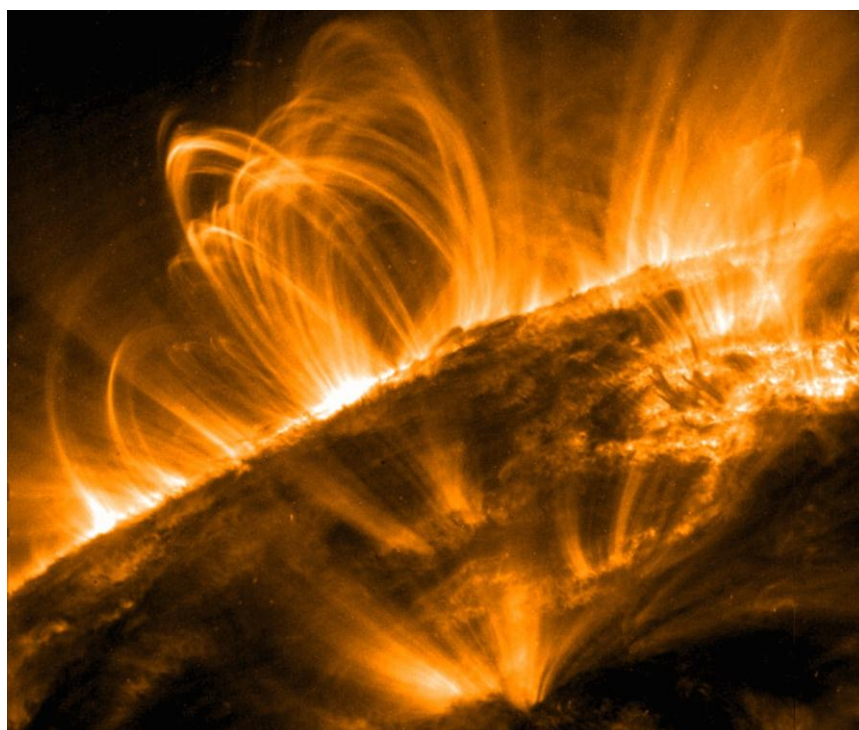


Figure 6: immagine UV del sole catturata da TRACE

Un rivestimento multistrato consiste in sottili strati alternati di due o più materiali. Nel caso più generico si usano due materiali, chiamati spaziatore ed assorbitore, depositati in strati alternati. Questa struttura può ripetersi più volte con una struttura periodica (cioè gli strati dello stesso materiale hanno sempre lo stesso spessore), o una struttura aperiodica in cui lo spessore dei vari materiali cambia di strato in strato.

Nel caso di strutture periodiche è utile definire queste due grandezze: il periodo $period = d_{spacer} + d_{absorber}$ e la frazione $\gamma = d_{spacer}/period$.

Spesso si usano anche strutture capping layer cioè un insieme di pochi strati progettati per essere posti in cima al multistrato ed in grado di migliorarne le prestazioni.

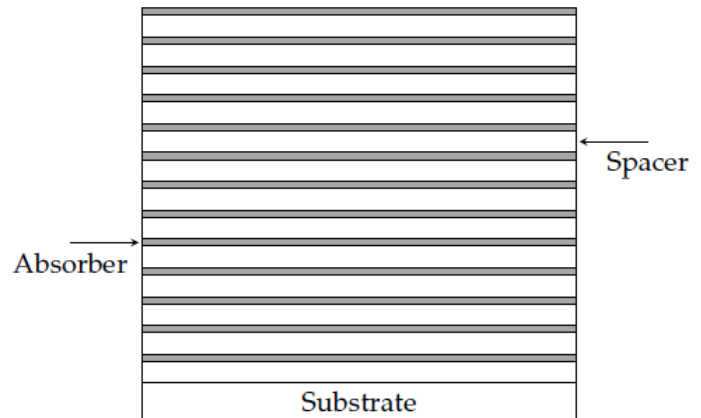


Figure 7: immagine schematizzata di un multistrato periodico

3.1 COSTANTI OTTICHE NEL CAMPO UV

La propagazione della luce può essere descritta come un'onda elettromagnetica, in particolar modo parliamo di un'onda piana che si propaga nella direzione x descrivendola nel seguente modo:

$$E(t, x) = RE[E_0 e^{-j(Kx - w_0 t)}]$$

Dove E_0 è l'ampiezza del campo ad $x = 0$ e w_0 è la frequenza angolare e K è il numero d'onda. Possiamo inoltre inserire la relazione $K = \frac{2\pi n}{\lambda_0}$ dove n è l'indice di rifrazione del materiale e λ_0 è la lunghezza d'onda nel vuoto.

Quando si lavora nel campo dell'UV bisogna però tenere in conto che n oltre alla componente reale ha una componente immaginaria legata alla capacità di assorbimento del materiale. Per mantenere il formalismo precedentemente introdotto possiamo quindi definire $n_c = 1 - \delta - j\beta = n - j\beta$ dove n e β sono costanti ottiche del materiale. n è l'indice di rifrazione reale e β è il coefficiente di assorbimento e δ è l'indice di decremento diffrattivo.

Sostituendo ora questi due relazioni nell'equazione dell'onda piana otteniamo

$$E(t, x) = RE \left[E_0 e^{-j \left(\frac{2\pi n_c}{\lambda_0} x - w_0 t \right)} \right] = RE \left[E_0 e^{\frac{2\pi}{\lambda_0} \beta x} e^{-j \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} n x - w_0 t \right)} \right]$$

Dove il termine $e^{\frac{2\pi}{\lambda_0} \beta x}$ tiene conto dell'assorbimento mentre il termine $e^{-j \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} n x - w_0 t \right)}$ descrive la propagazione nel mezzo.

Possiamo inoltre definire un coefficiente $\alpha = \frac{4\pi}{\lambda_0} \beta$ e ricordandoci che l'intensità dell'onda è pari al quadrato del campo elettrico possiamo dire che $I = I_0 e^{-\alpha d}$

3.2 RIFLESSIONE AD UN' INTERFACCIA

Quando la luce si sposta da un mezzo con un dato indice di rifrazione n_i verso un secondo mezzo con indice n_j , possono verificarsi sia la riflessione che la rifrazione dell'onda luminosa stessa. Esaminando la figura un raggio di luce incidente **PO** colpisce al punto **O** l'interfaccia tra due mezzi con indici di rifrazione n_i e n_j . Parte del raggio viene riflessa come raggio **OQ** e parte viene rifratta seguendo la traiettoria **OS**. Gli angoli che l'onda incidente, riflessa e rifratta formano con la normale all'interfaccia sono rispettivamente θ_i , θ_r e θ_j . Le relazioni tra questi angoli sono date dalla legge della riflessione ($\theta_i = \theta_r$, cioè l'angolo di incidenza e di riflessioni sono lo stesso) e dalla legge di Snell ($n_i \sin(\theta_i) = n_j \sin(\theta_j)$).

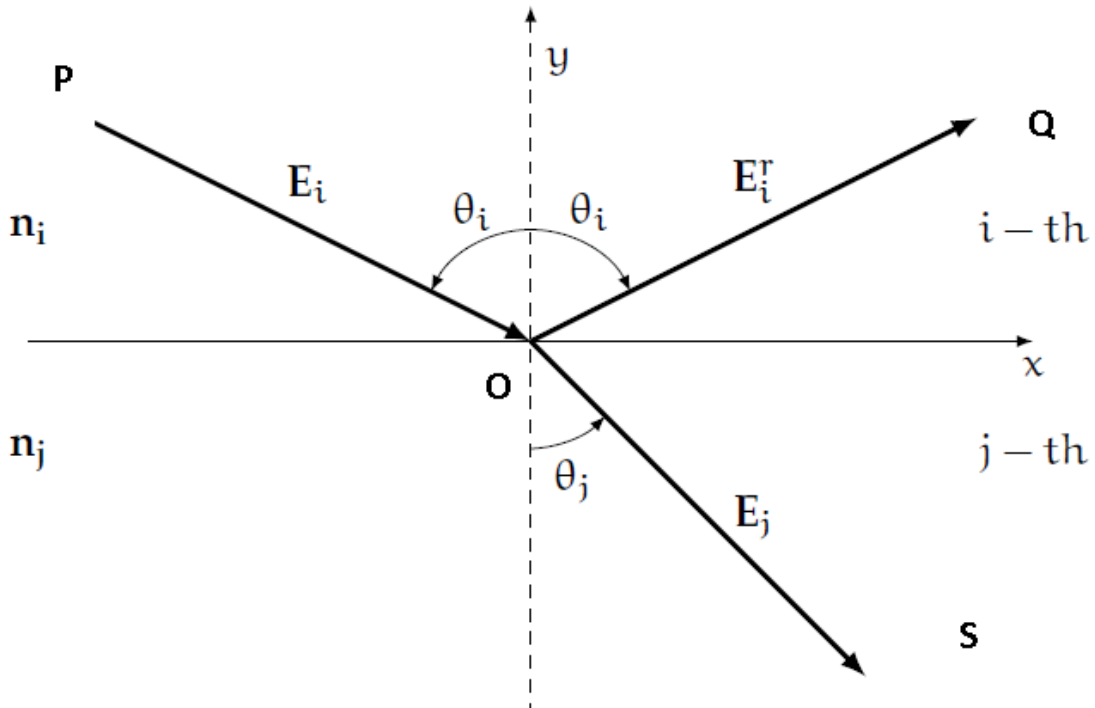


Figure 8: comportamento di un'onda all'interfaccia tra due mezzi con diverso indice di rifrazione

Attraverso le leggi di Fresnel possiamo inoltre ricavare r e t che rappresentano rispettivamente i valori del capo elettrico riflesso e trasmesso divisi per il valore del campo incidente.

Otteniamo per la polarizzazione s:

$$r_{ij}^s = \frac{E_i^r}{E_i} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j}$$

e

$$t_{ij}^s = \frac{E_j}{E_i} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j}$$

Mentre per la polarizzazione p

$$r_{ij}^p = \frac{E_i^r}{E_i} = \frac{n_i \cos \theta_j - n_j \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_j + n_j \cos \theta_i}$$

e

$$t_{ij}^p = \frac{E_j}{E_i} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_j + n_j \cos \theta_i}$$

Altri utili valori sono il coefficiente di riflessione ed il coefficiente di trasmissione.

$$R = \frac{|r^s|^2}{2} + \frac{|r^p|^2}{2} = \frac{R_s}{2} + \frac{R_p}{2}$$

$$T = \frac{|t^s|^2}{2} + \frac{|t^p|^2}{2} = \frac{T_s}{2} + \frac{T_p}{2}$$

Inoltre quando il materiale è assorbitore vale la relazione $T + R < 1$ e si può quindi definire un coefficiente, detto assorbanza, che rappresenti la differenza di $T + R$ da 1.

$$A = 1 - T - R$$

Quando consideriamo un'onda piana in incidenza normale possiamo assumere $\theta_i \cong 0$ e $\cos(\theta_i) \cong 1$ quindi sostituendo nella relazione di R ricaviamo:

$$R = \frac{(\delta_i - \delta_j)^2 + (\beta_i - \beta_j)^2}{4}$$

Da questa equazione notiamo che la riflettività del materiale è massima quando è massimo il contrasto ottico ed è per questa ragione che solitamente nella realizzazione di rivestimenti multistrato si alternano strati di materiale con indici di assorbimento molto diversi.

3.3 FUNZIONI OTTICHE ALL'INTERNO DEI MULTISTRATO

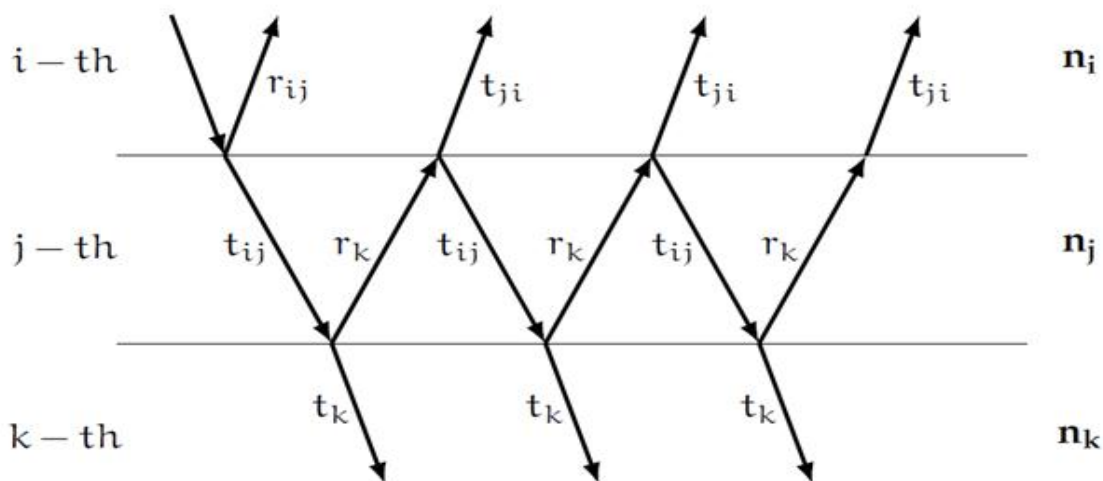


Figure 9: propagazione schematica di un'onda piana all'interno di un generico strato di un rivestimento multistrato

Attraverso l'utilizzo di queste strutture si può aumentare la percentuale di luce riflessa. Questo scopo è possibile perché utilizzando materiali e spessori adeguati si può ottenere interferenza costruttiva tra la porzione di luce riflessa ad un'interfaccia e quella riflessa all'interfaccia superiore.

Quando un'onda si propaga nello strato j-esimo accumula un ritardo di fase che determina se l'interferenza sarà distruttiva o costruttiva, ora fissati i due materiali e quindi le costanti ottiche, il ritardo di fase dipende dall'angolo di incidenza e dallo spessore del materiale.

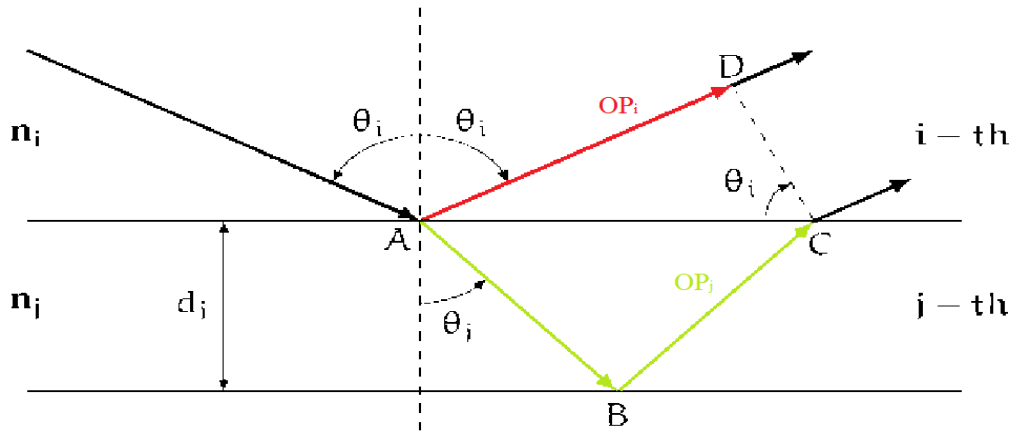


Figure 10: rappresentazione dei diversi cammini ottici per comprendere il ritardo di fase ad esso legato

Con riferimento alla figura il cammino ottico dell'onda riflessa è

$$OP_i = n_i AD = n_i AC \sin \theta_i = 2n_i d_j \tan \theta_j \sin \theta_i$$

E usando la legge di Snell possiamo scrivere

$$OP_i = 2n_j \frac{\sin^2 \theta_j}{\cos \theta_j} d_j$$

Il cammino ottico di un'onda trasmessa nello strato j-esimo è data invece da:

$$OP_j = n_j ABC = 2n_j \frac{d_j}{\cos \theta_j}$$

Quindi la differenza dei due cammini ottici è:

$$\Delta OP = OP_j - OP_i = 2n_j d_j \cos \theta_j$$

Conseguentemente il ritardo di fase sarà:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2n_j d_j \cos \theta_j$$

La riflessione totale di un'onda all'interfaccia S_{ij} è la somma di tutte le riflessioni che intercorrono nello strato j-esimo.

$$r_j = r_{ij} + t_{ij} t_{ji} r_k e^{j\phi} \sum_{m=0}^{\infty} [r_{ji} r_k e^{j\phi}]^m$$

E risolvendo la serie geometrica si ottiene

$$r_j = r_{ij} + \frac{t_{ij} t_{ji} r_k e^{j\phi}}{1 - r_{ji} r_k e^{j\phi}}$$

Inoltre utilizzando la formula $t_{ij} t_{ji} + r_{ij}^2 = 1$ e sapendo che $r_{ij} = -r_{ji}$ otteniamo:

$$r_j = \frac{r_{ij} + r_k e^{j\phi}}{1 + r_{ij} r_k e^{j\phi}}$$

Con ragionamento analogo possiamo ottenere:

$$t_j = \frac{t_{ij} t_k e^{j\phi}}{1 + r_{ij} r_k e^{j\phi}}$$

Ora applicando in maniera ricorsiva, partendo dall'ultimo strato, le equazioni appena trovate e posso trovare la riflettività totale. Ovviamente questi calcoli vanno svolti diversamente per la polarizzazione p ed s e la riflettività totale viene trovata come media dei due casi.

$$R = \frac{|r^s|^2}{2} + \frac{|r^p|^2}{2} = \frac{R_s}{2} + \frac{R_p}{2}$$

4 Effetto delle particelle presenti nel vento solare

Nel laboratorio CNR-INF LUXOR di Padova, utilizzando la teoria precedentemente esposta, si sono realizzati diversi prototipi di rivestimenti multistrato. In modo particolare si è realizzata una struttura periodica a base di molibdeno silicio e tre diversi capping layer da abbinarvi (tabella sottostante).

Table 3: specifiche della struttura multistrato e dei suoi possibili capping layer

multistrato Mo/a-Si	
periodo[p]	16.40 nm
frazione [y]	0.82
numero di periodi [N]	35

ML	Capping layer
REF	SiO ₂ (1.0 nm) Si (1.0 nm)
CL1	Ir (2.0 nm) Mo (2.2 nm)
CL2	Ir (2.0 nm) Si (15.4 nm) Mo (2.95 nm)
CL 3	Ru (2.0 nm) Mo (2.0 nm) Si (14.0 nm) Mo (3.0 nm)

Questi campioni hanno già subito test di riflettività e di durata nel tempo dando buoni risultati e stanno subendo ora la fase di test legata all'effetto delle particelle del vento solare.

Quest'analisi si sta svolgendo sia attraverso simulazioni computerizzate sia attraverso impianti protonici veri e propri.

La descrizione del vento solare è già stata precedentemente affrontata ma riportiamo qui di seguito le specifiche di quest'ultimo per una più facile comprensione del testo.

Table 4: caratteristiche vento solare

Proprietà	Valore medio missione
Densità (ioni/cm ⁻³)	25
Velocità (km/s)	468
N _{alfa} /N _{protoni}	0.047
Energia protoni (KeV)	1
Energia particelle alfa (KeV)	4

4.1 Esperimento di bombardamento

Per cercare di simulare l'effetto del vento solare sui rivestimenti multistrato al "Forschungszentrum Dresden-Rossendorf" di Dresda si è svolto un esperimento di bombardamento protonico usando "Low Energy Inplanter" (LEI). LEI è un'apparecchiatura in grado di sparare protoni con una determinata energia contro i bersagli, il tutto con un'atmosfera di vuoto controllata, simulando in questo modo l'atmosfera spaziale.

4.1.1 Modalità dell'esperimento

Partendo dal valore della densità del plasma di protoni (25 ioni/cm^3) e dal valore della velocità del vento solare (468 km/s) si può calcolare il valore del flusso medio che colpirà il satellite cioè $1.17 \cdot 10^9 \text{ protoni} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Da questo valore è possibile calcolare il numero di protoni che colpisce un cm^2 di campione in un determinato periodo di tempo.

In particolare il nostro esperimento al laboratorio di Dresda si è deciso di svolgere due sessioni di lavoro, una nella quale si è impiantato il numero di protoni corrispondente a tre mesi ed una seconda in cui il numero di protoni corrisponde a quelli che il satellite riceverà in un anno. Per ovvi motivi entrambe le sessioni di lavoro sono state fatte impiantando il corrispettivo numero di protoni in un intervallo di tempo più limitato rispetto a quello reale, in particolare sono state impiegate trentadue ore per ogni sessione.

Le due sessioni d'impianti, inoltre, sono state eseguite in vuoto (10^{-8} mbar) per riprodurre l'ambiente spaziale ed evitare così interazioni con gli elementi presenti in atmosfera.

In tabella sono riassunti i parametri dell'esperimento.

Table 5: dettagli dell'esperimento d'impianto protonico

	Sessione A (3 mesi)	Sessione B (1 anno)
Durata	32 h	32 h
Energia dei protoni	1 keV	1 keV
Flusso di protoni	$0.79 \cdot 10^{11} \text{ protoni} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$	$3.1 \cdot 10^{11} \text{ protoni} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$
Totale protoni	$9.1 \cdot 10^{15} \text{ protons}$	$36.4 \cdot 10^{15} \text{ protons}$
Pressione	10^{-8} mbar	10^{-8} mbar

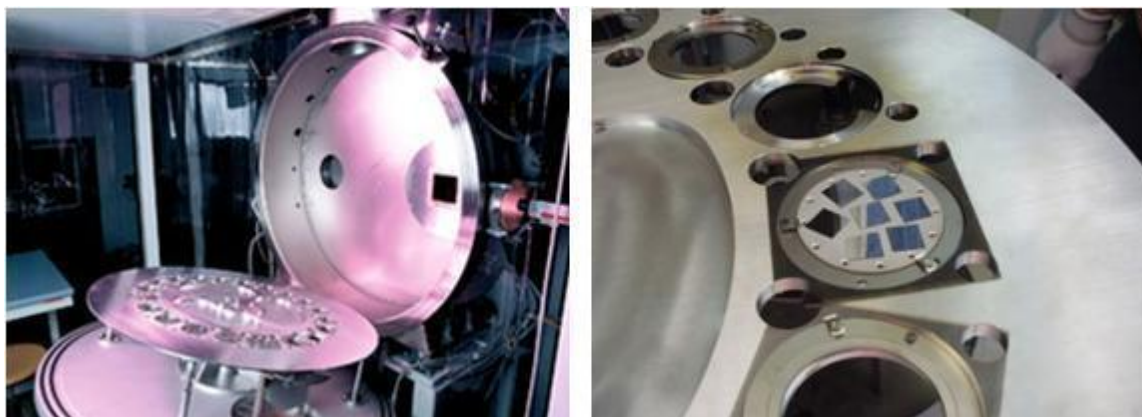


Figure 11: strumentazione LEI al Forschungszentrum Dresden-Rossendorf e campioni accomodati nei supporti dello strumento

4.1.2 Risultati

La riflettività dei campioni sono state misurate alla linea BEAR del sincrotrone di Trieste prima e dopo l'impianto protonico e i risultati sono mostrati in figura.

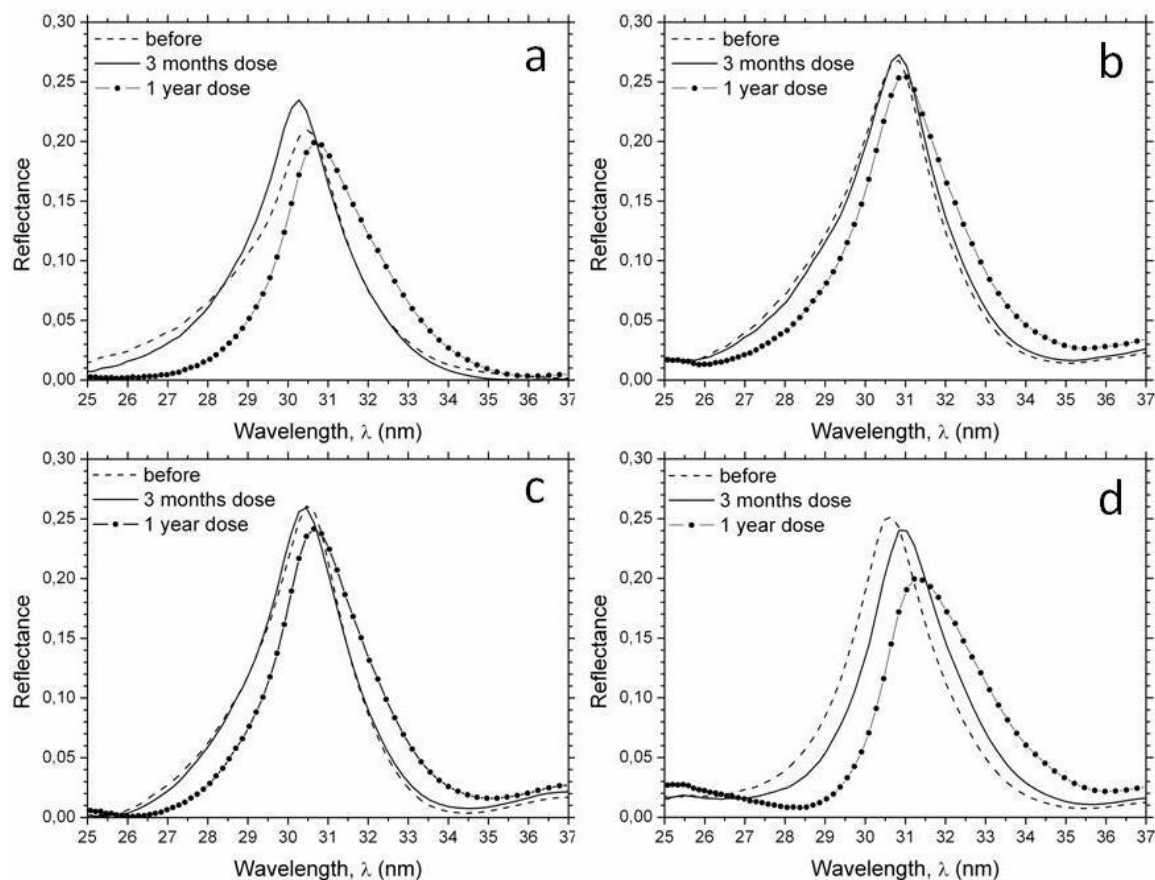


Figure 12: misure di riflettività dei campioni REF (a), CL1 (b), CL2 (c) e CL3 (d) prima e dopo l'esperimento di impianto protonico

Table 6: picchi di riflettività delle varie strutture multistrato prima e dopo l'esperimento di impianto protonico

ML	Before implantation	3 months dose	1 year dose
REF	0.21 @ 30.2nm	0.23 @ 30.0nm	0.20 @ 30.4nm
CL1	0.26 @ 30.2nm	0.26 @ 30.2nm	0.24 @ 30.4nm
CL2	0.27 @ 30.6nm	0.27 @ 30.6nm	0.25 @ 30.8nm
CL3	0.25 @ 30.4nm	0.24 @ 30.6nm	0.20 @ 31.0nm

I multistrato a base di iridio mostrano una modesta perdita di riflettività dopo la sessione B, i multistrato a base di rutenio mostrano invece un abbassamento del picco già dopo la sessione A, abbassamento che si intensifica nettamente dopo la sessione B. I multistrato senza capping layer mostrano come gli altri una perdita di riflettività dopo la sessione B ma mostrano un leggero

incremento dopo la sessione A. Questo comportamento decisamente impreveduto è stato riscontrato in due campioni analoghi ma depositati in tempi diversi. Future ricerche saranno quindi necessarie per comprendere tale fenomeno.

4.1.3 test successivi

Per cercare di comprendere il motivo del calo, lo spostamento del picco di riflettività dopo il bombardamento ed in particolare il drastico calo delle prestazioni di CL3 si sono fatti alcuni test sui campioni.

Il primo test effettuato è un'analisi XPS su due campioni, uno che ha subito l'impianto protonico ed uno che non l'ha subito.

L'analisi XPS permette di rivelare la composizione chimica dei primi strati superficiali del campione ed in figura mostriamo il risultato del test sui campioni del tipo CL1 in cui si vede chiaramente un aumento della quantità di carbonio. Il risultato è stato analogo per tutti gli altri tipi di campioni, cioè tutti hanno mostrato la presenza di uno strato superficiale di carbonio.

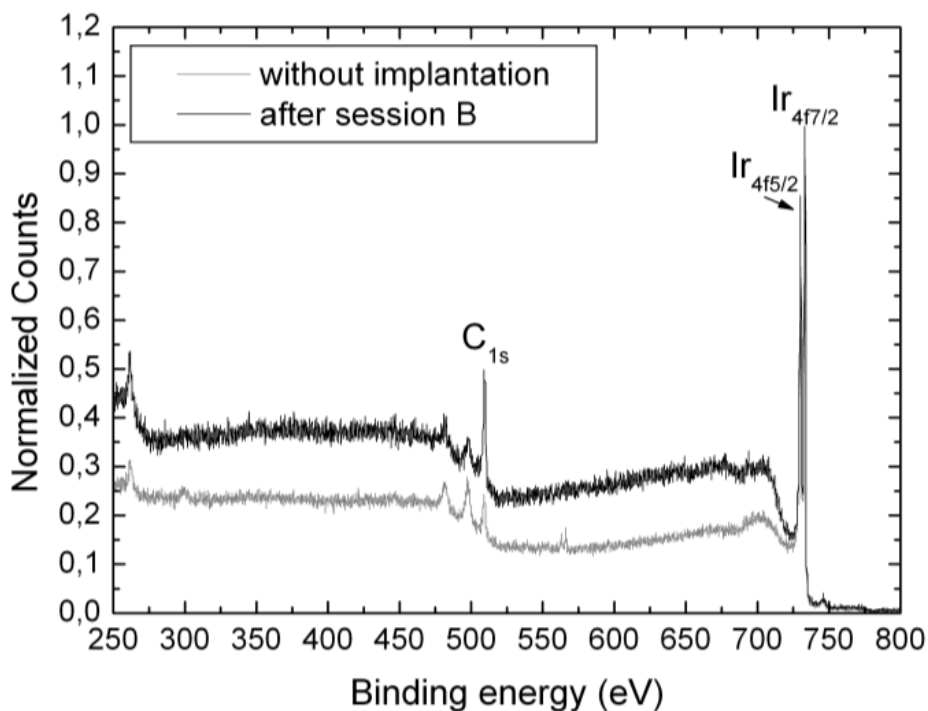


Figure 13: analisi XPS per la struttura ricoperta con Ir/Mo prima e dopo l'esperimento di impianto protonico

La presenza di questo sottile strato può essere ricondotta alla presenza d'impurità durante l'impianto protonico e può in parte spiegare il calo di riflettività del multistrato senza capping layer (REF) perché causa interferenza tra gli ultimi strati della struttura. Questo però non fornisce alcuna giustificazione per le strutture con capping layer in quanto un sottile strato di C non ha alcun effetto se depositato su metalli pesanti quali iridio o rutenio.

Una seconda analisi fatta è stata uno studio della rugosità della superficie dei vari campioni prima e dopo il bombardamento. Per fare questo tipo di studio si è usato un AFM (Atomic Force Microscope), presente nel laboratorio CNR-INF LUXOR di Padova. I risultati ottenuti sono stati quelli di una rugosità costante prima e dopo il bombardamento per tutti i campioni.

L'ultima analisi fatta è stata un TEM (Transmission electron microscopy) sul campione più danneggiato, il multistrato CL3 dopo la sessione B. Il risultato è mostrato in figura.

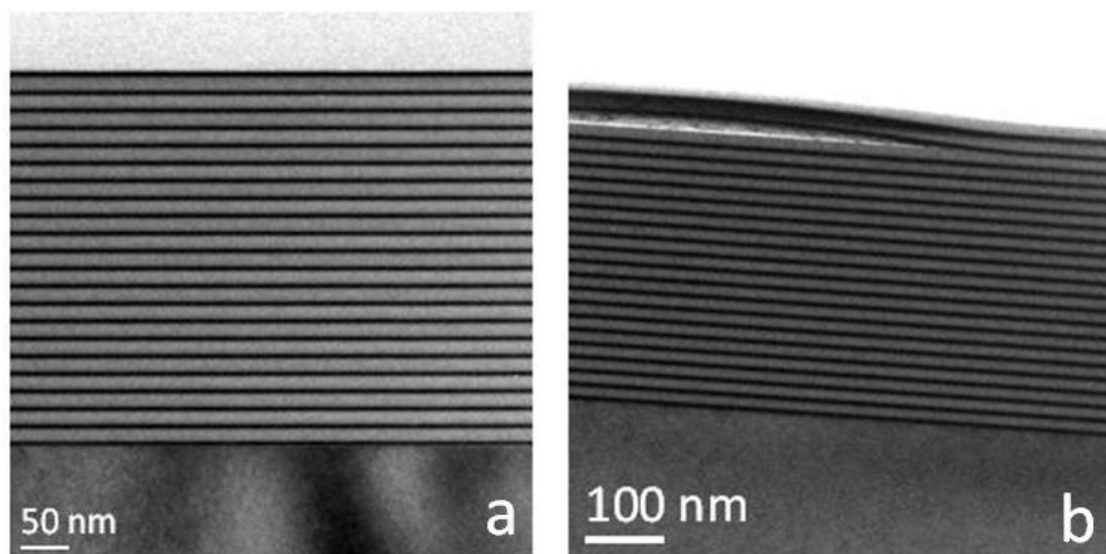


Figure 14: immagine TEM della struttura Ru/Mo prima (a) e dopo (b) l'esperimento d'impianto protonico

L'apparente meccanismo di danneggiamento del multistrato è la formazione di uno strato di vacanze sotto il secondo strato di molibdeno partendo dalla superficie. Questo fenomeno potrebbe spiegare il drastico calo di riflettività evidenziato per questo campione ed è quindi fondamentale cercare di chiarire quale sia la causa generante.

4.2 SIMULAZIONE BOMBARDAMENTO

Per cercare di capire l'effetto del bombardamento degli ioni presenti nel vento solare ed avere una più chiara interpretazione dei fenomeni che si sono evidenziati con l'analisi TEM fatta sul campione CL3 si sono effettuate una serie di simulazioni con un programma di simulazione d'impianto protonico, SRIM.

4.2.1 SRIM, cenni teorici

Stopping and Range of Ions in Matter, meglio noto come SRIM, è un gruppo di programmi che calcola l'arresto e la distribuzione degli ioni nella materia.

Questo programma è stato sviluppato da Ziegler e Biersak attorno al 1983 ed viene aggiornato ogni cinque anni.

SRIM utilizza un metodo di simulazione Monte Carlo e una trattazione quantomeccanica delle collisioni atomiche.

Durante le collisioni lo ione e l'atomo hanno collisioni schermate di tipo coulombiano, includendo scambi e interazioni tra i gusci elettronici sovrapposti.

Lo ione ha anche interazioni a lungo raggio con gli atomi del bersaglio che creano eccitazione degli elettroni e plasmoni all'interno del target. Queste interazioni sono descritte includendo,

quando viene avviato il calcolo, una descrizione della struttura elettronica del bersaglio e la struttura di legami interatomici.

Lo stato di carica dello ione all'interno del bersaglio è descritto usando il concetto di carica effettiva, il quale include una carica dipendente dalla velocità e una schermatura a lungo raggio dovuta all'insieme di elettroni del bersaglio.

4.2.2 Input e output

Attraverso un'interfaccia grafica, chiamata setup window, SRIM richiede come informazioni per avviare il calcolo:

- Il tipo di ione (da questa informazione poi ricava in automatico massa e numero atomico.)
- Energia iniziale dello ione
- Le caratteristiche del bersaglio e quindi per ogni strato di materiale lo spessore e la composizione atomica (da cui poi ricava ed imposta automaticamente densità ed energia di legame.)
- Numero di ioni
- Angolo d'incidenza

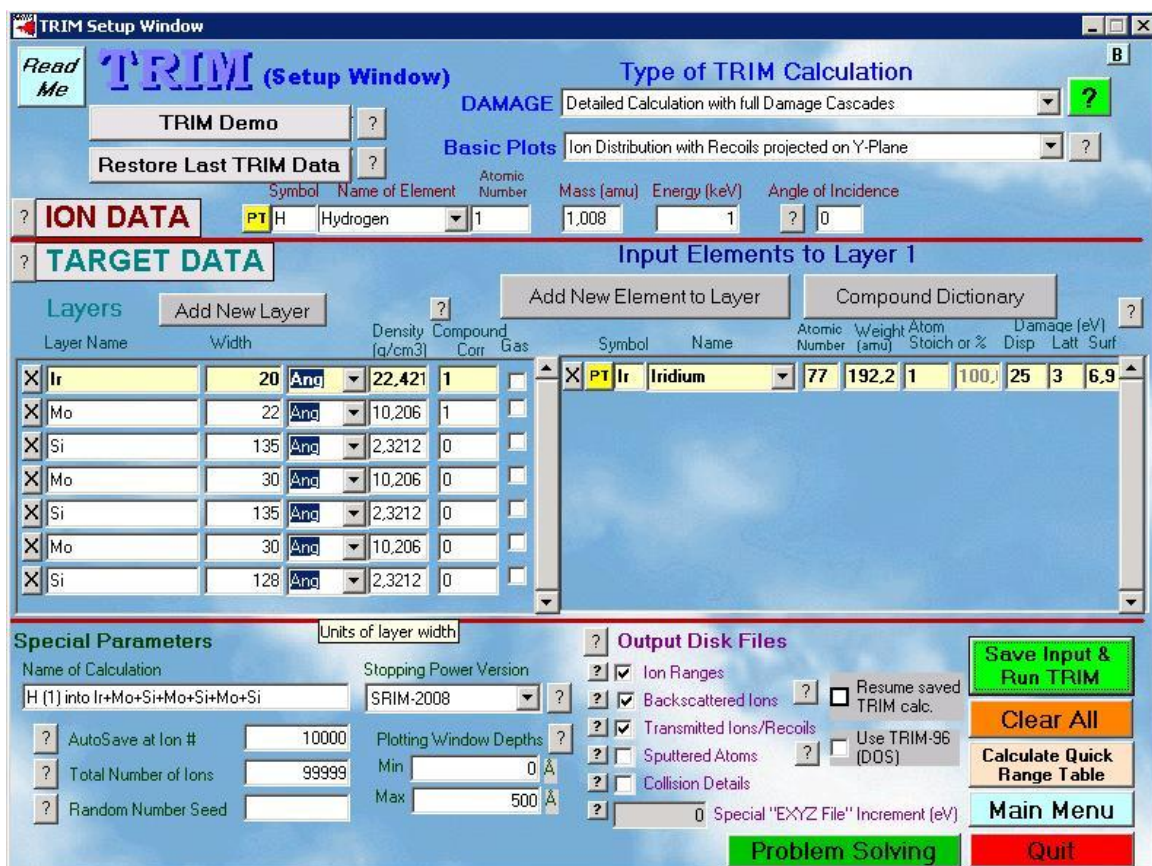


Figure 15: Setup Window del programma SRIM

Una volta avvenuto il calcolo può fornire come dati in uscita diverse tabelle e grafici:

- La distribuzione degli ioni e di tutti gli atomi che si muovono dalle loro posizioni originali (detti recoil atoms)
- Concentrazione di vacanze
- Energia persa attraverso ionizzazione o produzione di fononi
- Informazioni relative al fenomeno di sputtering
- Ioni trasmessi e retro diffusi

4.2.3 Limiti

Questo programma possiede alcune caratteristiche, come la facile interfaccia grafica e la possibilità che molti parametri vengano inseriti automaticamente, che l'hanno reso particolarmente usato nel suo ambito.

Nonostante questo però possiede alcune importanti limitazioni, infatti, non tiene conto di:

- Struttura cristallina dei materiali, il bersaglio viene quindi considerato amorfo
- Dei cambiamenti della struttura in seguito al bombardamento, infatti, nella simulazione ogni ione va ad interagire sempre con una struttura identica a quella di partenza
- La ricombinazione di vacanze ed atomi interstiziali

4.2.4 Simulazioni

Con l'ausilio del programma SRIM si è simulata l'azione degli ioni idrogeno ed elio su due strutture per cercare di comprendere sia se queste possano resistere nell'ambiente della missione senza subire alterazioni tali da compromettere le proprietà ottiche sia cercare di comprendere ciò che abbiamo visto con l'analisi TEM.

Per avviare il calcolo abbiamo dovuto inserire come parametri, oltre al tipo di ione, l'energia degli ioni (1 keV per H e 4 keV per He), l'angolo d'incidenza (0, siamo in incidenza normale), il numero di ioni (99999, valore impostato automaticamente; essendo un calcolo statistico serve un elevato numero di campioni per avere un valore significativo) e la struttura del bersaglio.

La prima struttura esaminata è composta da: 20 Å di iridio, 22 Å di molibdeno, 135 Å di silicio, 30 Å di molibdeno, 135 Å di silicio, 30 Å di molibdeno e 128 Å di silicio, per uno spessore complessivo di 500 Å.

La seconda struttura esaminata è composta da : 20 Å di rutenio, 20 Å di molibdeno, 135 Å di silicio, 30 Å di molibdeno, 135 Å di silicio, 30 Å di molibdeno e 130 Å di silicio, per uno spessore complessivo di 500 Å.

Tra i vari grafici ottenibili con SRIM i più significativi per i nostri scopi sono quelli della distribuzione finale degli elementi e li riportiamo qui di seguito.

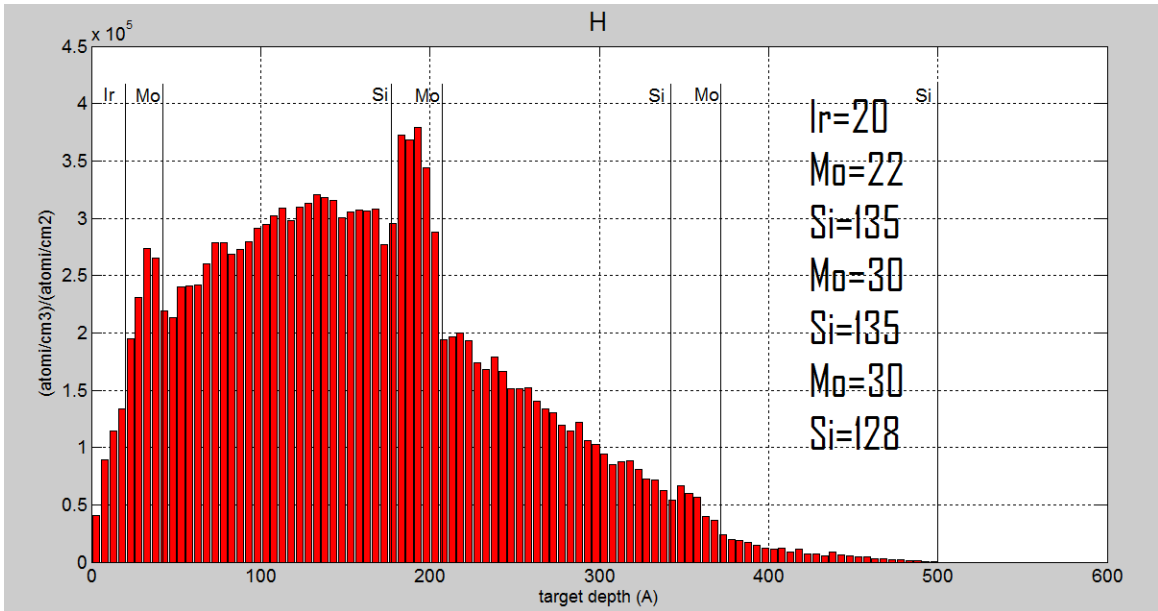


Figure 16: distribuzione ioni H nella struttura con Ir

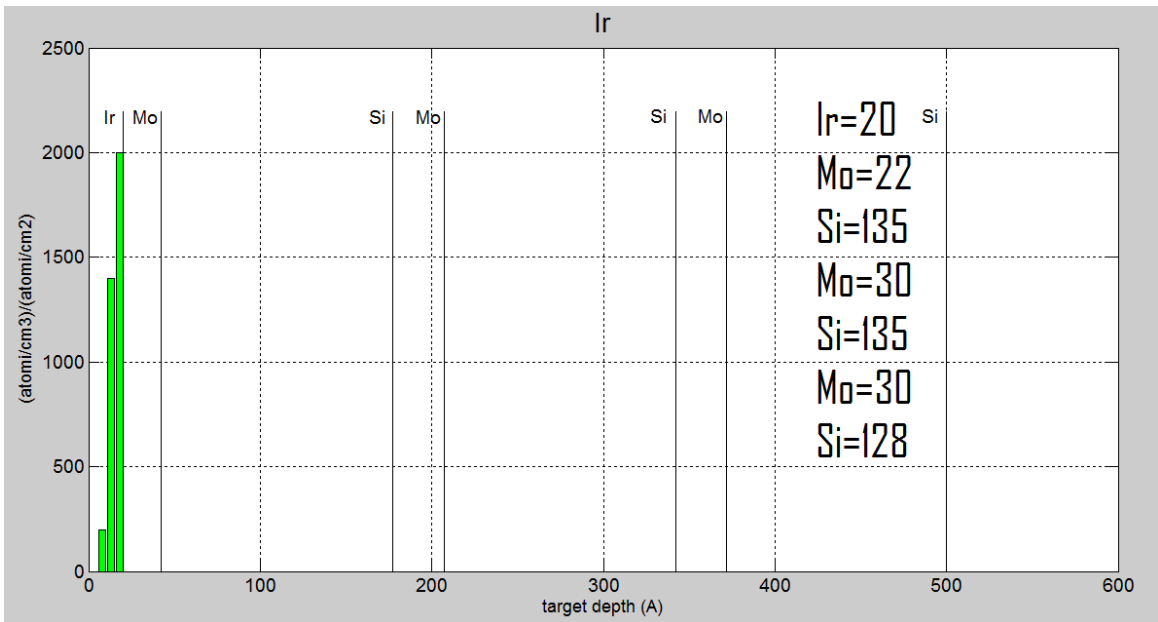


Figure 17: distribuzione dei recoil atoms di Ir nella struttura con Ir

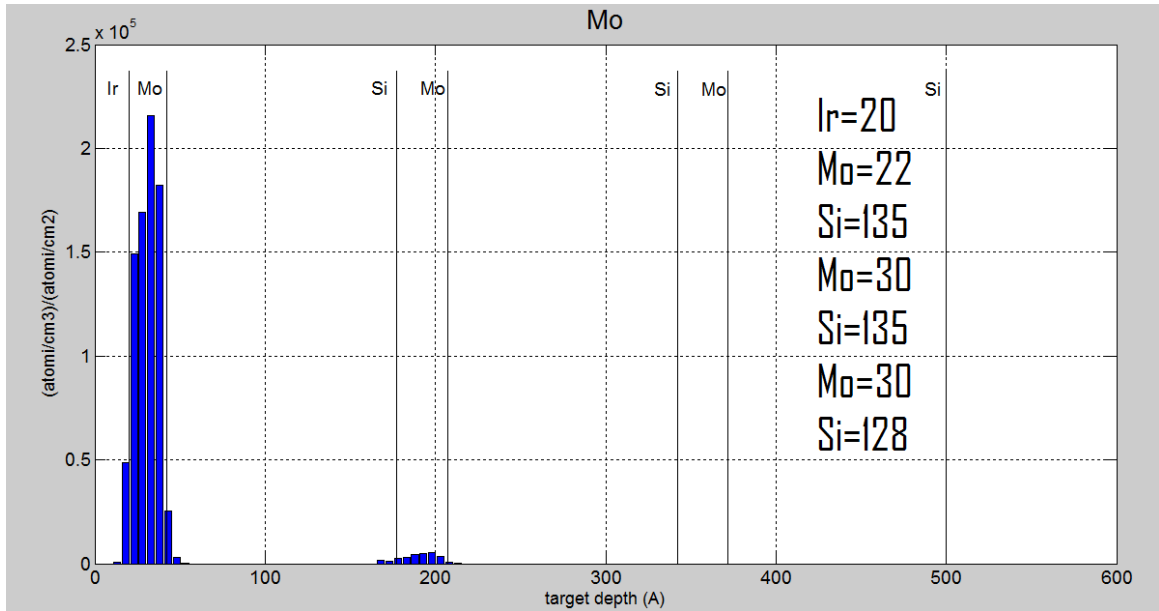


Figure 18: distribuzione dei recoil atoms di Mo nella struttura con Ir

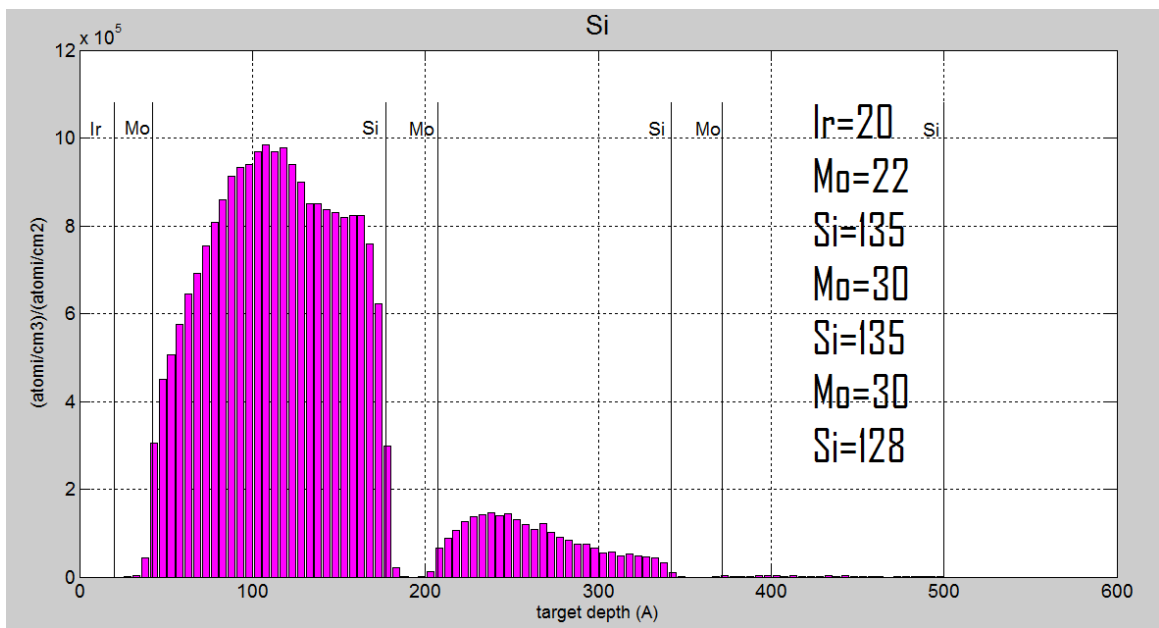


Figure 19: distribuzione dei recoil atoms di Si nella struttura con Ir

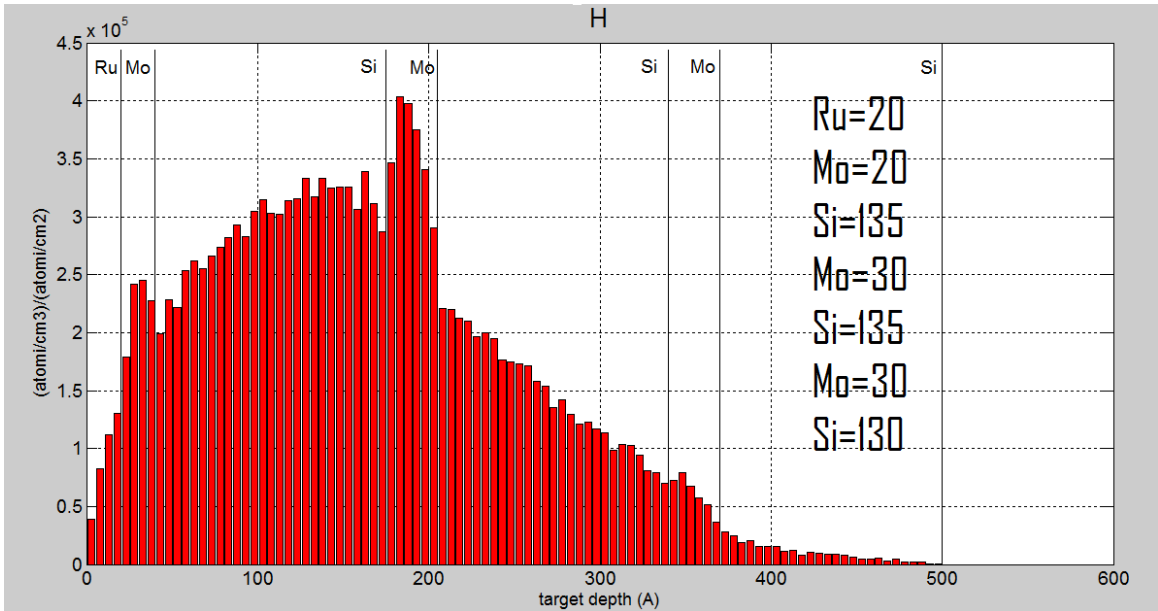


Figure 20: distribuzione degli ioni H nella struttura con Ru

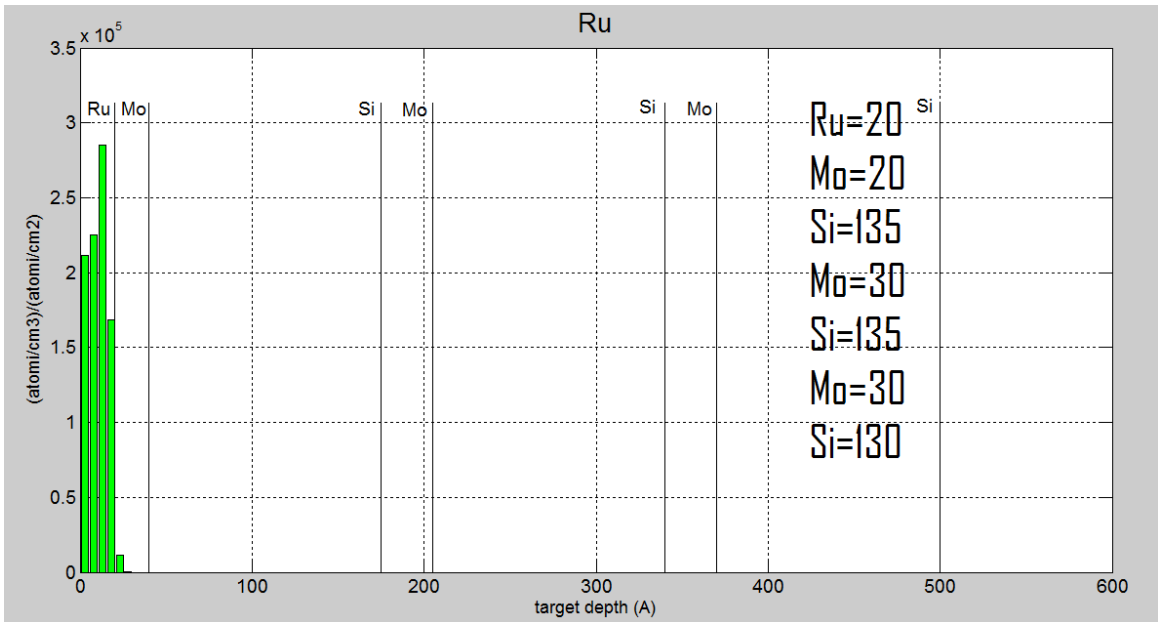


Figure 21: distribuzione dei recoil atoms di Ru nella struttura con Ru

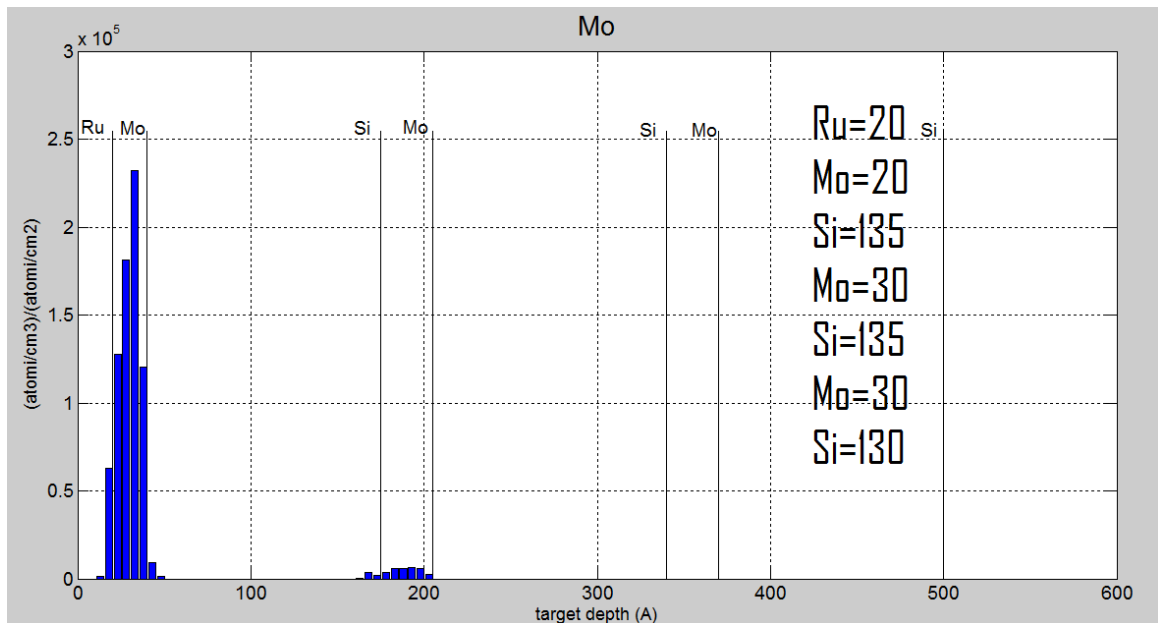


Figure 22: distribuzione dei recoil atoms di Mo nella struttura con Ru

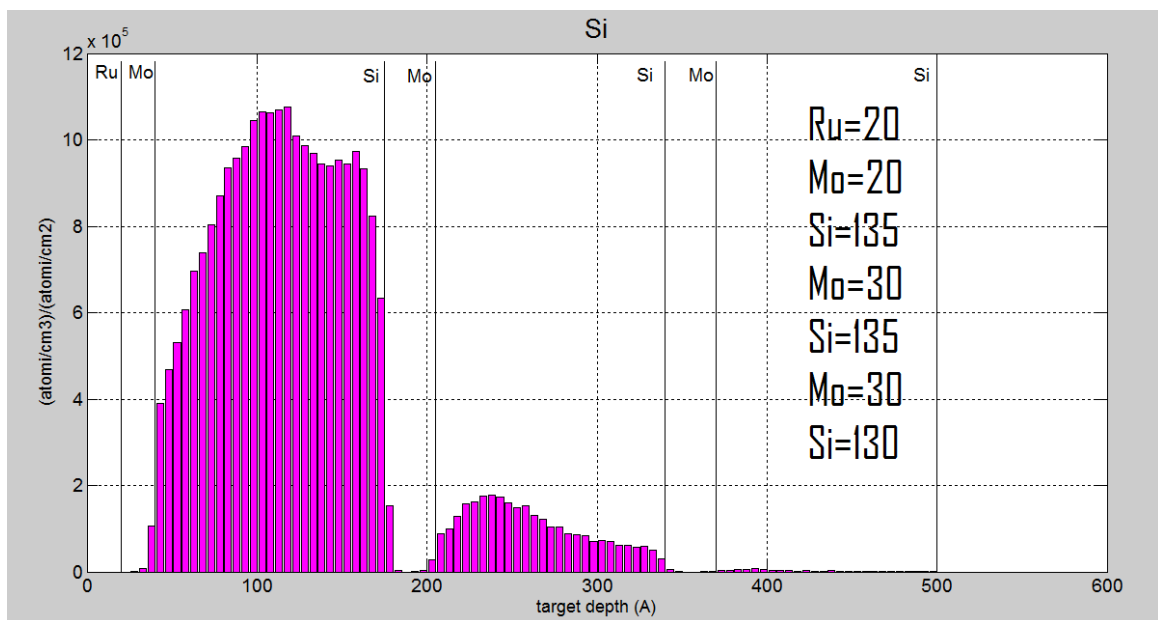


Figure 23: distribuzione dei recoil atoms di Si nella struttura con Ru

Questi grafici ci indicano la posizione finale degli ioni all'interno del bersaglio (grafici in rosso) e la posizione finale di tutti gli atomi del bersaglio (grafici in verde, blu e viola) che si sono mossi dalle loro posizioni iniziali, per esempio in seguito ad un urto con un'altra particella, detti recoil atoms.

Dai grafici dei recoil atoms notiamo che la struttura con iridio è meglio schermata dai protoni, questo si vede in particolar modo, oltre che dall'andamento generale dei grafici, dal numero di recoil atoms del primo strato delle due diverse strutture (Ir nel primo caso Ru nel secondo), dove si ha una differenza nel picco di circa $2.834 \cdot 10^5$ (atomi/cm³)/(atomi/cm²).

Un altro dato significativo che si vede da questi grafici ed in particolare da quello della distribuzione degli ioni H è che quest'ultimi hanno un picco di concentrazione nel secondo strato di Mo.

Table 7: Picchi di densità nella distribuzione delle particelle di H nei vari strati delle due strutture ML divisi per 10⁵ in unità di (atomi/cm³)/(atomi/cm²)

Picchi di densità nella distribuzione delle particelle di H nei vari strati delle due strutture ML divisi per 10 ⁵ in unità di (atomi/cm ³)/(atomi/cm ²)							
	primo strato Ir o Ru	strato1 Mo	strato1 Si	strato2 Mo	strato2 Si	strato3 Mo	strato3 Si
struttura con Ir	1.340	2.732	3.206	3.794	2.000	0.668	0.242
struttura con Ru	1.300	2.452	3.388	4.038	2.208	0.796	0.278

Questo dato è particolarmente significativo perché si potrebbe chiarire il motivo del distacco tra questo strato di molibdeno ed il successivo di silicio visto dall'analisi TEM fatta sul campione con capping layer a base di rutenio (CL3).

L'idrogeno a pressione atmosferica si trova allo strato gassoso e l'elevata concentrazione di questo elemento potrebbe aver portato alla formazione di bolle che hanno trovato nell'interfaccia tra i due strati la più facile via di fuoriuscita dal solido in cui erano imprigionate. Se questa ipotesi risultasse esatta bisognerebbe capire se lo stesso fenomeno non sia avvenuto anche nella struttura CL1 solo per la minor densità di H dovuta alla miglior azione schermante dell'iridio e se per dosi maggiori di H (quindi impiantando una dose corrispondente ad un valore maggiore di quello di un'anno) non si verificherebbe lo stesso problema.

Attraverso il programma SRIM abbiamo anche ottenuto le simulazioni di bombardamento con ioni He che qui riportiamo.

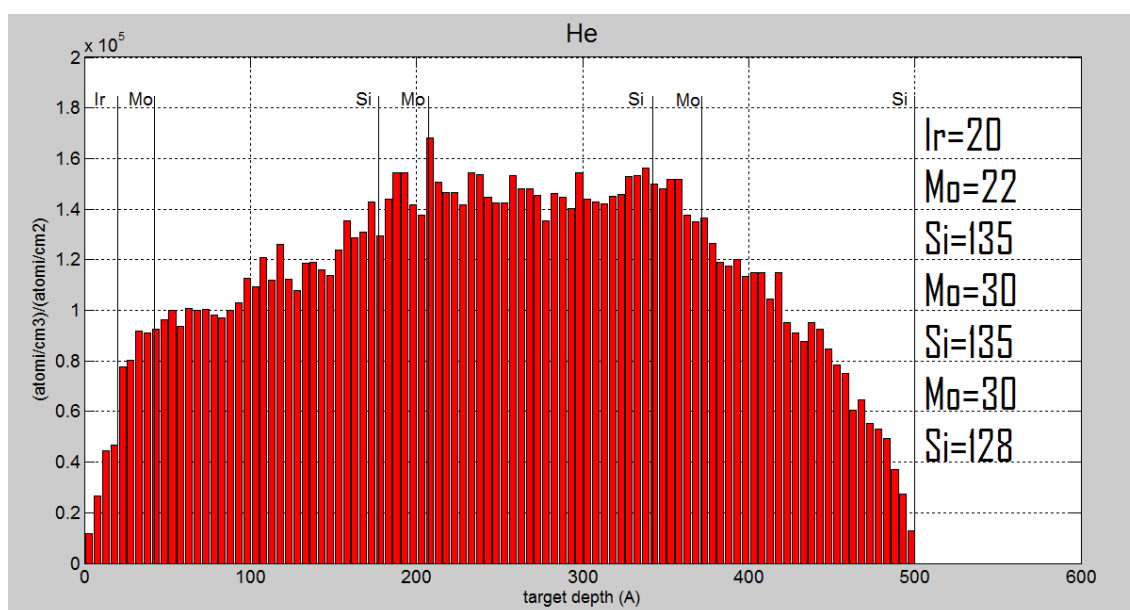


Figure 24: distribuzione degli ioni He nella struttura con Ir

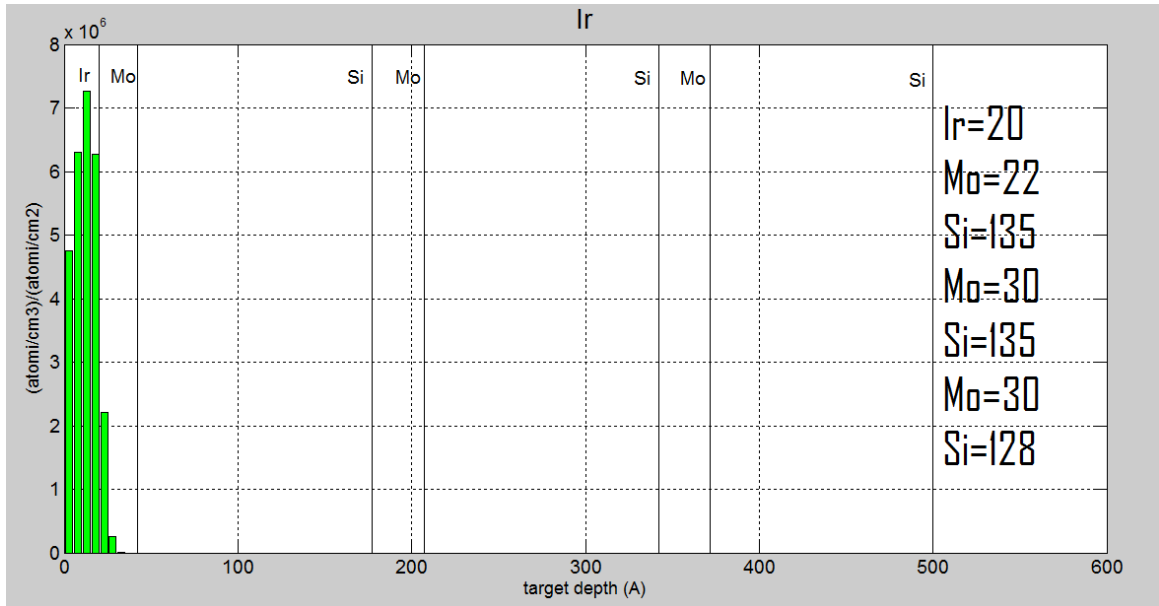


Figure 25: distribuzione dei recoil atoms di Ir nella struttura a base di Ir

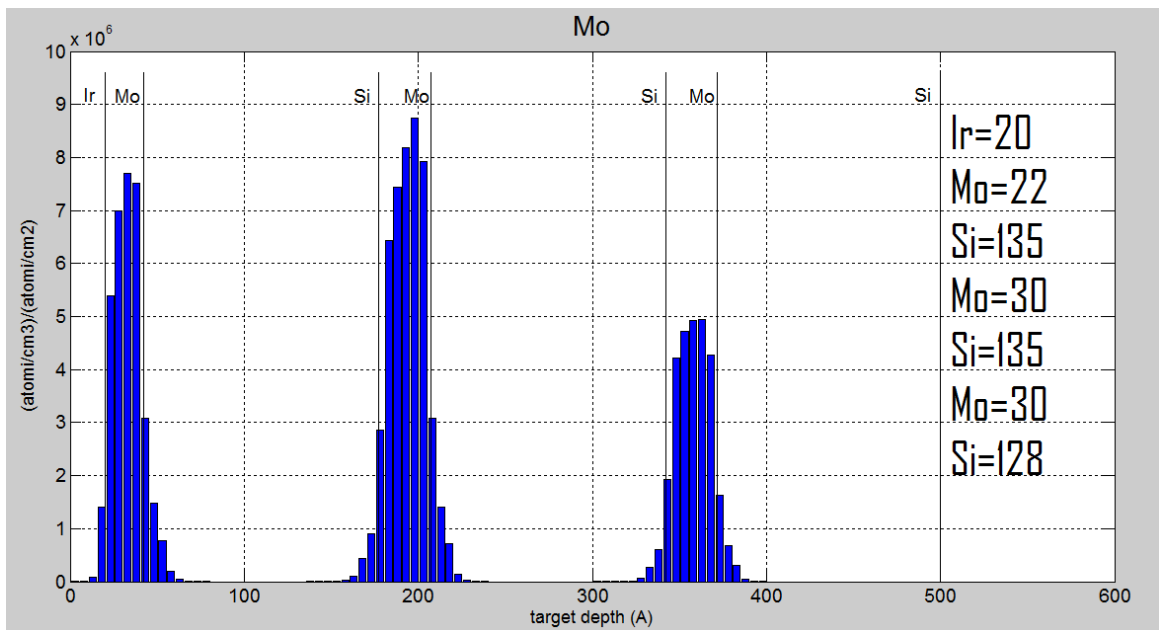
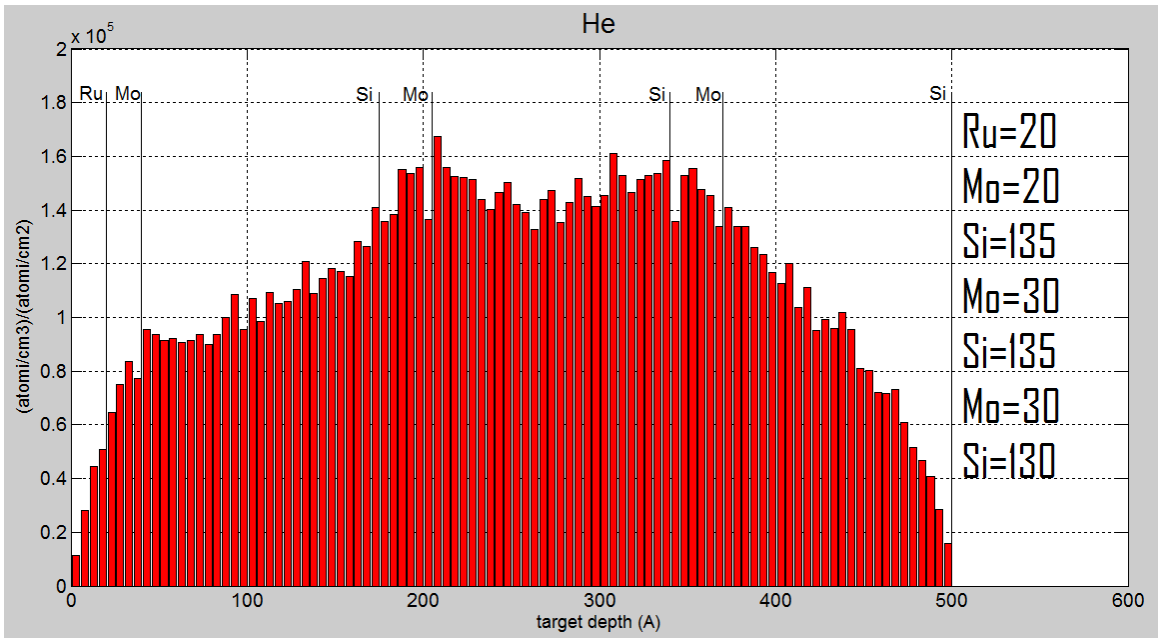
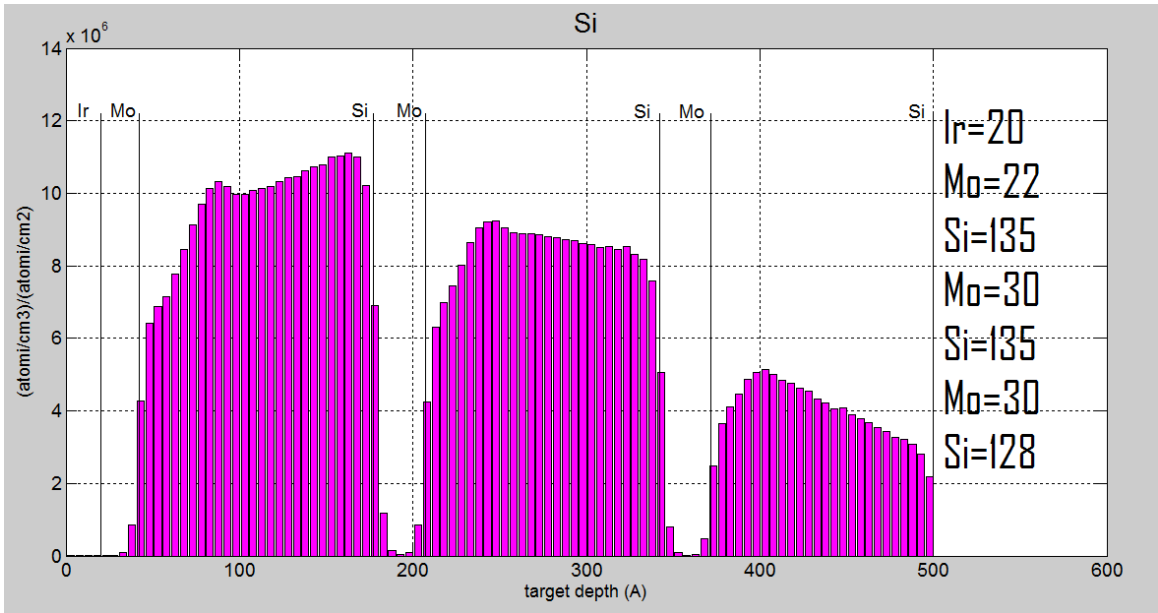


Figure 26: distribuzione dei recoil atoms di Mo nella struttura a base di Ir



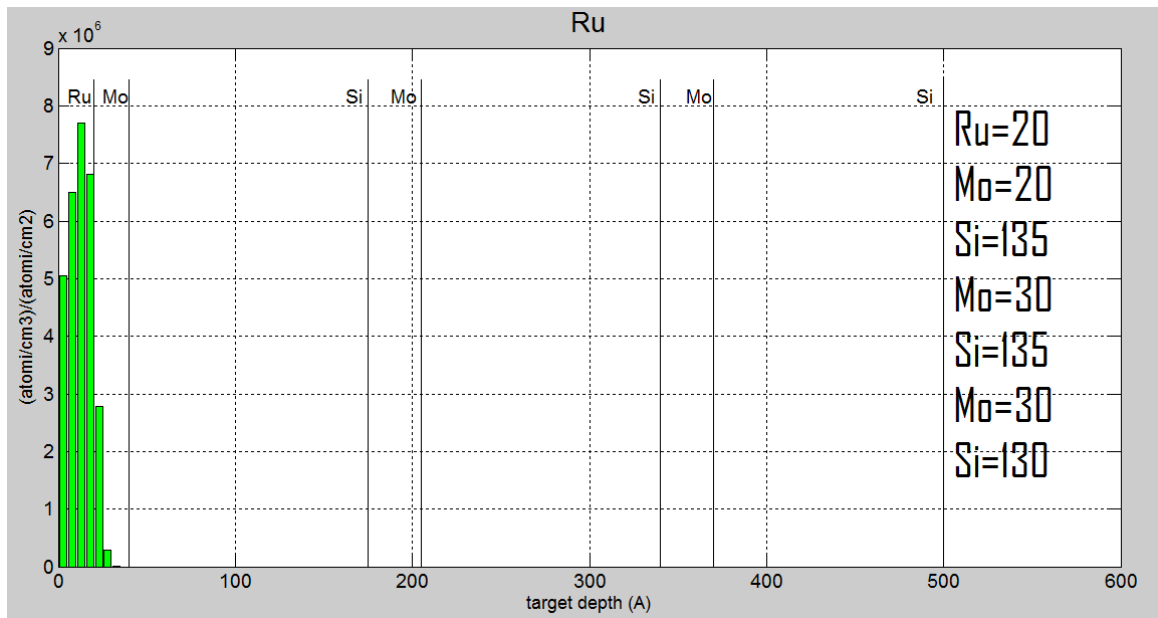


Figure 29: distribuzione dei recoil atoms di Ru nella struttura a base di Ru

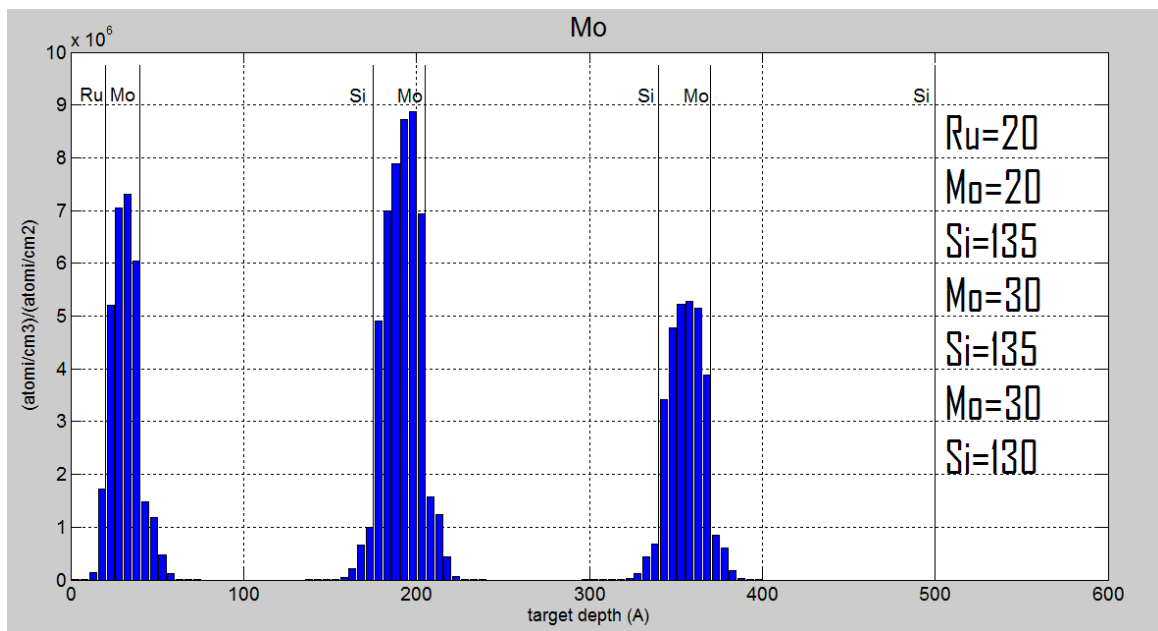


Figure 30: distribuzione dei recoil atoms di Mo nella struttura a base di Ru

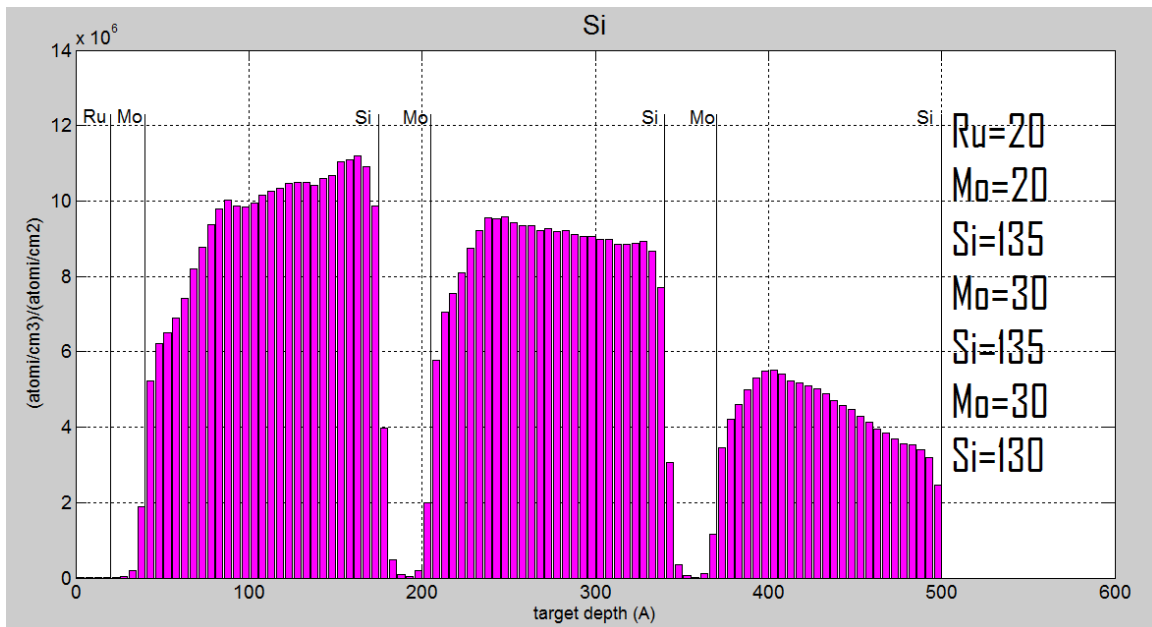


Figure 31: !Fine imprevista della formuladistribuzione dei recoil atoms di Si nella struttura a base di Ru

Sfortunatamente però non siamo ancora riusciti ad effettuare una impianto di ioni He vero e proprio anche se questo è già stato messo in programma al “Forschungszentrum Dresden-Rossendorf” di Dresda.

5 CONCLUSIONI

In questo testo si è seguita la fase di test legata all'effetto delle particelle presenti nel vento solare per alcuni rivestimenti multistrato candidati per rivestire gli specchi primario e secondario del coronografo METIS, strumento selezionato a bordo della missione ESA Solar Orbiter.

L'ambiente estremo di questa missione, legato alla vicinanza al Sole, rende estremamente necessari questi test i quali sono però una novità assoluta, il che comporta grande fascino ma anche una notevole carenza d'informazioni scientifiche.

Si è quindi scelto di incominciare la fase di test con un impianto protonico sperimentale svolto presso l'università di Dresda, che, combinato con le analisi di riflettività svolte a BEAR, ha fornito dati interessanti.

Dopo il bombardamento i campioni multistrato a base di Mo/a-Si ricoperti di iridio (CL1 e CL2) hanno subito modeste perdite di riflettività mentre il campione ricoperto di rutenio (CL3) ha avuto un drastico calo; tutti i campioni hanno avuto inoltre uno spostamento del picco di riflettività.

Per cercare di capire il calo di CL3 si sono effettuati una serie di test: un'analisi XPS ed una AFM le quali però non sono riuscite a dare risposte significative. Si è fatta allora un'analisi TEM, la quale ha evidenziato la formazione di uno strato di vacanze tra due strati della struttura, il che potrebbe spiegare il perché del drastico calo di riflettività ma non ne evidenzia la causa generante.

Si è quindi scelto di effettuare una serie di simulazioni computerizzate di un' impianto protonico con un programma chiamato SRIM, il quale riesce a fornire la concentrazione degli ioni e dei recoil atoms all'interno della struttura, dopo il bombardamento. Con queste simulazioni si è evidenziata una forte concentrazione di ioni idrogeno nello strato di Molibdeno in prossimità di dove l'analisi TEM ha evidenziato il distacco. Da questo possiamo ipotizzare che il distacco dei due strati sia legato alla formazione di bolle d'idrogeno che trovano nell'interfaccia tra molibdeno e silicio la più facile via di uscita dalla struttura solida.

Le simulazioni hanno inoltre mostrato un andamento simile per le strutture a base di ruteni ed iridio, solo che l'iridio, forse in virtù di una maggiore densità, svolge una migliore azione schermante.

Per il futuro è fondamentale capire se la distribuzione evidenziata con le simulazioni sia congruente con quella reale per verificare che le supposizioni fatte siano corrette.

Oltre a questo è fondamentale chiarire se, dato l'andamento simile delle strutture a base d'iridio e rutenio, aumentando il numero di protoni impiantati non si verifichi anche nelle strutture CL1 e CL2 il distacco evidenziato con il TEM su CL3.

Si potrebbe inoltre cercare di comprendere se lo spostamento del picco di riflettività delle strutture multistrato sia legato all'idrogeno che si deposita con il bombardamento e questo si potrebbe fare, avendo a disposizione le costanti ottiche dell' Idrogeno e la distribuzione degli ioni nel multistrato, con una simulazione svolta con il programma IMD.

Un'altra analisi necessaria è un impianto sperimentale di particelle alfa, fortunatamente questo è già stato messo in programma al "Forschungszentrum Dresden-Rossendorf" di Dresda.

Per capire poi se questi multistrato potranno realmente volare all'interno di SOLO saranno necessari molti altri test, come quelli termici, ma nonostante questo il lavoro svolto in questa

tesi e' senza precedenti e risulta fondamentale per validare l'uso di questi coating nel coronografo METIS. Fornisce informazioni fondamentali anche per guidare la validazione di altri componenti ottici a bordo di SOLO.

Bibliografia

- (Trieste), E. (s.d.). *Bending magnet for Emission Absorption and Reflectivity beamline*. Tratto da <http://www.elettra.trieste.it/experiments/beamlines/bear/index.html>
- A.D. Rousseau, D. W. (2005). *Stability of euv multilayers to long-term heating, and to energetic protons and neutrons, for extreme solar missions*. *Proc. SPIE*.
- Barbetta, M. (2010). Optical characterization of multilayer coating samples.
- Corso, A. (2010, luglio). Nanostructured optical coatings for solar physics observations from space.
- D. L. Windt, P. M. (s.d.). Multilayer coatings with high spectral purity for solar imaging. *Applied Optics*.
- ESA. (2008). Solar Orbiter environmental specification.
- ESA. (s.d.). *Solar Orbiter Homepage*. Tratto da <http://sci.esa.int/sciencee/www/area/index.cfm?fareaid=45>
- ESA. (2007). Solar Orbiter Payload Definition Document.
- ESA, N. (s.d.). *Transition Region and Coronal Explorer*. Tratto da <http://trace.lmsal.com/>
- G. Naletto, E. A. METIS; the multielement telescope for imaging and spectroscopy for the solar orbiter mission. *ICSO Proc. - International Conference on Space Optics*. Rodi.
- G. Naletto, M. G. (2001). The monochromator for the synchrotron radiation beamline X-MOSS at ELETTRA. *SPIE Proc*, 4145, p. 105.
- J. Dalla Torre, J. B. (2002). Microstructure of Thin Tantalum Films Sputtered onto Inclined Substrates: Experiments and Atomistic Simulations. *App. Phys.*, 94, 263-271.
- J.F.Ziegler, J. U. (1998). *The stoppion and ranges of ions in matter*. Pergamon press.
- Jody, C. A., Paola, Z., Piergiorgio, N., & al., e. (2011, luglio 18). Capped Mo/Si multilayers with improved performance at 30.4 nm for future solar missions. *OPTICS EXPRESS*, 19 (5), p. 13963-13973.
- Liu Shi-Jie Wang Xiao-Guang Chen Bo Fan Xian-Hong Li Min, N. Q.-L. (2008). Change of reflectivity of mo/si multilayer irradiated by proton. *ACTA PHYSICA SINICA*, p. 57:6494-6499.
- M.G. Pelizzo, P. N. (2006). *Multilayer coatings for multiband spectral observations*. ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.
- Maury, J. P.-Z. (2008). H. Thermal cycles, interface chemistry and optical performance of mg/sic multilayers. *EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL B*.
- Mazzoldi Paolo, N. M. (2008). *Elementi di Fisica 2- Elettromagnetismo e onde*. Edises.

- Palik, E. D. (1998). *Handbook of Optical Constants of Solid III*. Academic Press.
- Pelizzo, M. G., Jody, C. A., Paola, Z., & al., e. (2011, agosto 1). Stability of extreme ultraviolet multilayer coatings to low energy proton bombardment. *OPTICS EXPRESS*, 19 (16), p. 14838-14844.
- S. Bajt, J. B. (2002). Improved reflectance and stability of Mo/Si multilayers. *Opt. Eng.*, 41(08), p. 1797-1804.
- Seely J. Windt D. L., D. S. (2004). Experimental comparison of extreme-ultraviolet multilayers for solar physics. *Applied Optics*.
- Spiller, E. (1994). *Soft X-Ray optics*. SPIE Optical Engineering Press, 1st edition.
- Suman, M. (2008). Studio dell'interazione della radiazione elettromagnetica con strutture nanometriche per lo sviluppo di ottiche. *Tesi di dottorato*.
- T. B. Lucatorto J. M. Slaughter C. Tarrío, R. N. (1998). Optical constants of in situ deposited films of important extreme-ultraviolet multilayer mirror materials. *APPLIED OPTICS*, p. 37:4100 – 4104.
- Varian. (s.d.). *Cary 5000 UV-Vis-NIR spectrophotometer*. Tratto da http://www.varianinc.com/cgi-bin/nav?products/spectr/uv/cary5000/cary_5000
- Windt, D. L. (1998). Imd: software for modeling the optical properties of multilayer films. *Computer Physics*.