Indice

Introduzione	1
1 Telescopi per astronomia X	3
1.1 Cenni di Ottica nei raggi X	11
1.1.1 L'importanza delle costanti ottiche	11
1.1.2 Equazioni di Fresnel e fenomeno della "riflessione totale"	13
1.1.3 Riduzione della riflessione nelle superficie reali	15
1.2 Sistemi ottici ad incidenza radente	18
1.2.1 Aberrazioni da superfici sferiche	18
1.2.2 Riduzione delle aberrazioni: Specchi Asferici	21
§ Superfici paraboliche	21
1.2.3 Sistemi ottici composti a doppia riflessione	22
§ Sistema Kirkpatrick-Baez	23
§ Sistemi Wolter	24
1.2.4 Area efficace	26
1.3 Coperture multistrato e loro applicazione in astronomia X	28
1.3.1 Multistrato come reticolo sintetico	28
1.3.2 Riflessione alla Bragg	29
1.3.3 Multistrato a spaziatura variabile per raggi X duri	31
1.3.4 Multistrato a spaziatura quasi costante per raggi X soffici	35
2 Realizzazione di sistemi ottici ad incidenza radente	37
2.1 La scelta dei materiali	37
2.1.1 Criteri per i substrati	37
2.1.2 Criteri per la superficie riflettente	39
2.2 Tecniche di realizzazione	43
2.2.1 Ottiche prodotte tramite lavorazioni dirette	44
2.2.2 Ottiche prodotte mediante la tecnica dei "fogli sottili"	45

2.2.3 Ottiche realizzate con processi di replica	47
§ Tramite Nichel elettroformato	47
§ Tramite resina epossidica	51
2.3 Soluzioni tecnologiche in via di sviluppo	52
2.3.1 Produzione di ottiche basate su segmenti in vetro	54
2.3.2 Ottiche a micropori in Silicio	57
2.4 Processi di deposizione per l'applicazione dei film	59
2.4.1 Deposizione tramite Magnetron Sputtering	60
2.4.2 Deposizione tramite <i>e-Beam Evaporation</i>	61
2.5 Realizzazione di ottiche multistrato	63
2.5.1 Realizzazione tramite replica diretta	65
3 Proprietà fondamentali dei telescopi e future missioni spaziali per astronomia X	67
3.1 Sensibilità e risoluzione angolare	67
3.2 <i>Design</i> di un telescopio per astronomia X	72
3.3 Telescopi a vista diretta sopra i 10 keV	73
3.4 Telescopi focalizzanti per raggi X duri	75
3.4.1 Alcuni degli obiettivi scientifici	75
§ Nuclei Galattici Attivi (AGN)	75
§ Radiazione Comica Diffusa (CXB)	77
3.4.2 Future missioni spaziali	80
§ HEXIT-SAT	80
§ SIMBOL-X	84
§ XEUS	87
§ Constellation – X	90
4 Caratterizzazione morfologica delle superfici degli specchi per astronomia X	93
4.1 Rugosità e errori di pendenza	94
4.1.1 Effetto di un campionamento discreto	96
4.2 Power Spectral Density	96
4.3 Funzione di Autocorrelazione e Distanza di Correlazione	98
4.4 Il modello frattale	100
4.5 Lo scattering ed il suo legame con la topografia di una superficie	101
4.6 Rugosità e diffusione delle interfacce di un multistrato	103

4.7 Aumento della rugosità nei processi di crescita dei multistrato	105
5 Strumentazione metrologica e calibrazione nei raggi X	107
5.1 Analisi dei dati sperimentali	108
5.1.1 Analisi dei dati ottenuti con il profilometro a lunga traccia LTP	109
5.1.2 Analisi dei dati ottenuti con il profilometro ottico WYKO	110
5.1.3 Analisi dei dati ottenuti con il Microscopio a Forza Atomica	111
5.1.4 Analisi dei dati di Riflettività e di <i>Scattering</i>	112
5.2 Descrizione tecnica del diffrattometro per raggi X	113
5.2.1 La struttura dell'apparato sperimentale	115
5.2.2 Il tubo a raggi X tipo Röngten	116
5.2.3 Il sistema di monocromatizzazione e collimazione	117
5.2.4 Il rivelatore: scintillatore e fotomoltiplicatore	118
5.3 Calibrazione di ottiche multistrato presso la <i>facility</i> PANTER	119
5.3.1 La struttura della <i>facility</i>	120
5.3.2 La sorgente a raggi X	121
5.3.3 Il rivelatore per raggi X	122
5.3.4 Estensione della <i>facility</i> nei raggi X duri	123
5.3.5 Effetto della distanza finita della sorgente	125
6 Caratterizzazione di specchi multistrato per telescopi focalizzanti	127
6.1 Proprietà morfologiche di substrati per ottiche multistrato	128
6.1.1 Substrati usati come testimoni dei processi di crescita dei multistrato	130
6.1.2 Caratterizzazioni di substrati legati a tecnologie in corso di sviluppo per la	
missione XEUS	136
6.1.3 Substrato in Nichel elettroformato	140
6.1.4 Confronto tra i comportamenti dei vari substrati studiati	142
6.2 Caratterizzazioni legate a future missioni per raggi X duri (HEXIT-SAT e	
SIMBOL-X)	144
6.2.1 Test preliminari su multistrato in Ni/C	146
6.2.2 Sviluppo dei multistrato in Pt/C	147
6.2.3 Calibrazione ad illuminazione piena dell'ottica in Pt/C realizzata per replica	
tramite Nichel elettroformato	151
6.3 Caratterizzazioni legate alla missione NASA Constellation-X	157

6.3.1 Struttura teorica del multistrato	157
6.3.2 Caratterizzazione mediante <i>Pencil Beam</i> del campione testimone	158
6.3.3 Calibrazione ad illuminazione piena dell'ottica a singolo cono	161
6.4 Caratterizzazioni di plastiche con deposito a strato singolo per ottiche a fogli sottili	163
7 Conclusioni	167
Appendice A-1	170
Appendice A-2	173
Appendice A-3	177
Bibliografia	179

Introduzione

Fino ad ora l'utilizzo di telescopi focalizzanti è stato possibile nella banda classica dei raggi X (0.1-10 keV), mentre, nella banda dei raggi X duri (10-100 keV), a causa delle difficoltà intrinseche (gli angoli di riflessione sono piccolissimi e di conseguenza le aree efficaci molto basse), sono stati utilizzati esclusivamente rivelatori collimati o a maschera codificata. A questo proposito occorre ricordare che la sensibilità migliore nella banda dei raggi X duri è stata ottenuta dal rivelatore collimato PDS volato a bordo di BeppoSAX, con una sensibilità di ~ 1 mCrab per un tempo di integrazione di 10° secondi. Per questo motivo, sia in ambito Astrofisico sia in ambito Cosmologico, è rimasta aperta una serie di interrogativi che aspetta indicazioni da osservazioni spettroscopiche e fotometriche, ad alta risoluzione e sensibilità nella banda dei raggi X duri, ottenibili solo con tecniche di focalizzazione. La tecnologia necessaria per focalizzare efficientemente i raggi X duri è, al momento, in una fase avanzata di sviluppo e diversi gruppi nel mondo vi stanno lavorando. Uno di questi gruppi, già noto per lo sviluppo e la realizzazione degli specchi di XMM-Newton e JET-X/Swift, è operativo presso l'Osservatorio Astronomico di Brera (OAB-INAF). Il presente lavoro di tesi si è sviluppato in questo contesto, in cui problemi di rilevanza scientifica e di sviluppo tecnologico si incontrano e risultano complementari. Una delle soluzioni applicabili per riflettere efficientemente i raggi X duri in tutta la loro banda, è data dall'utilizzo di specchi interferenziali a multistrato (multilayer), aventi spaziatura reticolare variabile. Il concetto di multilayer, consiste in una struttura reticolare sintetica monodimensionale, costituita da strati alternati di un materiale a bassa densità, che agisce come mero spaziatore e di un materiale ad alta densità, atto alla riflessione.

La finalità di questa Tesi consiste nello sviluppo di ottiche a multistrato per la riflessione dello spettro duro dei raggi X, le quali saranno utilizzate in alcune delle missioni spaziali future per astronomia X. Il gruppo tecnologico, attivo presso l'Osservatorio Astronomico di Brera, è coinvolto in una serie di progetti che mirano alla realizzazione di ottiche a multistrato sfruttando la tecnica di replica tramite elettroformatura di Nichel. In particolare ha coordinato il progetto dell'Agenzia Spaziale Italiana "Payload per Astrofisica delle Alte Energie" tra i cui scopi vi era la realizzazione e la calibrazione di un'ottica a simmetria cilindrica con rivestimento multistrato in Platino e Carbonio. Tale sviluppo tecnologico potrà essere applicato per la realizzazione dei moduli ottici al cui disegno e concepimento ha partecipato la comunità scientifica italiana con la prospettiva di applicare tale tecnologia alle missioni HEXIT-SAT e SIMBOL-X. Inoltre, presso l'Osservatorio è in corso lo studio di fattibilità (svolto in collaborazione con la ditta privata Media Lario e finanziato dall'Agenzia Spaziale Europea) per applicare gli specchi a multistrato su substrati a geometria aperta, in particolare riferimento alla missione XEUS. Un altro progetto molto importante è svolto in collaborazione con l'Harvard Smithsonian Center for Astrophysics di Boston per lo sviluppo di ottiche multistrato per la missione Constellation-X. Infine, un'attività collaterale di spin-off, con un sicuro ritorno scientifico, collegata allo sviluppo della tecnologia multistrato, è portata avanti con la ditta Media Lario (Bosisio Parini - LC) e consiste nel realizzare dispositivi per litografia, con geometria molto simile ai telescopi a struttura monolitica e simmetria cilindrica utilizzati in astronomia X. Il ruolo dell'autore di questo lavoro di tesi all'interno dei suddetti progetti, è stato quello di eseguire una serie di caratterizzazioni metrologiche ed una serie di caratterizzazioni nei raggi X, sia di substrati, possibili candidati per costituire il sostegno meccanico delle ottiche, sia dei prototipi di ottiche multistrato realizzati. La caratterizzazione metrologica delle ottiche multistrato, così come quella dei substrati, è di fondamentale importanza per stabilire la qualità dei processi di deposizione e le prestazioni in riflessione che è lecito attendersi.

Capitolo 1

Telescopi per astronomia X

Nel 1895 Röngten annunciò la propria scoperta dei raggi X [Röntgen 1985] e nel 1912 Von Laue ideò un esperimento per provare che i raggi X subiscono una diffrazione attraversando un cristallo. L'esperienza, eseguita materialmente nello stesso anno da Friedrich e Knipping [Laue 1912], verificò nei più piccoli dettagli le previsioni teoriche di Laue, fornendo al tempo stesso la prova sperimentale della natura ondulatoria dei raggi X e della struttura regolare dei cristalli. Un anno dopo, W. H. e W. L. Bragg partendo dalla stessa idea di Laue, idearono un dispositivo assai superiore a quello primitivo, con il quale dimostrarono che, i treni d'onda diffratti dai piani reticolari di un cristallo, si sommano in fase solo quando è soddisfatta la relazione [Bragg 1918]:

$n\lambda = 2d\sin\theta$

nella quale θ è l' angolo di incidenza, d è la spaziatura dei piani reticolari del cristallo ed n è un numero intero detto "ordine della riflessione". Per quanto a nostra conoscenza, la prima immagine dei raggi X fu ottenuta da Enrico Fermi, nell'ambito del proprio lavoro di Tesi di Laurea presso l'Università di Pisa [Fermi 1922], utilizzando le righe di emissione K del Ferro ed un dispositivo opportunamente modellato composto di cristalli minerali (Mica). La tecnica di riflessione era in questo caso la diffrazione da parte dei piani cristallini della Mica (fig. 1-1). Nel 1923 Compton dimostrò la possibilità di riflettere i raggi X, tramite una superficie molto liscia e ad angoli di incidenza molto piccoli rispetto al piano della stessa (\leq 1°), dando così origine al termine "riflessione totale, l'interazione dei raggi X con la materia cominciò ad essere descritta tramite un indice di rifrazione inferiore all'unità. La scoperta di Compton diede origine ad un nuovo



Figura 1-1: Prime immagini su lastra fotografica dei raggi X ottenute per riflessione alla Bragg, nel corso di un esperimento svolto da Enrico Fermi nel 1922 [Fermi 1922].

campo di ricerca nell'ambito dell'imaging dei raggi X, anche se all'epoca l'applicazione più attraente era la possibilità di realizzare un microscopio con una risoluzione molto maggiore rispetto a quella dei microscopi ottici. Nel 1929, Jentzsch presentò un lavoro legato alla costruzione di ottiche per imaging, nel quale dimostrava l'impossibilità di poter ottenere delle buone immagini tramite un singolo specchio sferico, a causa dell'estremo astigmatismo derivante dalla condizione di incidenza radente [[entzsch 1929]. Nello stesso trattato propose l'utilizzo di un singolo specchio con due raggi di curvatura molto diversi tra loro ma, nonostante l'idea base per realizzare ottiche con buona capacità di imaging fosse stata stesa in questo lavoro, fu solo nel 1948 che Kirkpatrick e Baez riuscirono ad ottenere la prima immagine X bidimensionale [Kirkpatrick 1948]. Il sistema focalizzante di Kirkpatrick-Baez è basato su due specchi separati, uno per la focalizzazione verticale ed uno per quella orizzontale, ed è tuttora utilizzato in applicazioni per microscopia X data la sua grande utilità nel caso di sorgenti asimmetriche (come ad esempio quella di sincrotrone), grazie alla possibilità di variare indipendentemente l'ingrandimento nelle due dimensioni. Ehrenberg, nel 1949, a seguito di diversi esperimenti di focalizzazione, puntò l'attenzione sulla presenza di raggi X fuori fuoco non dovuti ad aberrazione (stray light) e li attribuì correttamente ad imperfezioni fisiche della superficie degli specchi [Ehrenberg 1949a]. L'idea di Ehrenberg fu di descrivere le imperfezioni di una superficie tramite serie di Fourier: ciò significa che al primo ordine della serie, ad una

data frequenza spaziale i raggi X risultano diffratti in due immagini, con distanza dal fuoco inversamente proporzionale alla frequenza spaziale e di intensità proporzionale al quadrato dell'ampiezza. Ehrenberg dimostrò che, per ottenere delle immagini decenti, le superfici degli specchi dovevano essere rese le più lisce possibile [Ehrenberg 1949b]. Agli inizi degli anni '50, dunque, ci si trovava di fronte a due principali problemi per la realizzazione di sistemi adeguati all'imaging dei raggi X:

- Mancava una configurazione degli specchi che potesse migliorare le deficienze della soluzione Kirkpatrick-Baez: limitata apertura, bassa risoluzione e aberrazione geometrica.
- Doveva essere sviluppata una tecnologia che permettesse di realizzare la figura di rivoluzione e di lavorare le superfici degli specchi con la precisione necessaria. Era altresì necessaria una metrologia in grado di controllare e rendere ripetibile il processo.



Figura 1-2: Immagine del lavoro di Wolter del 1952 in cui è mostrata la propria soluzione per la riflessione in incidenza radente dei raggi X [Wolter 1952a].

Il primo problema fu risolto da Wolter nel 1952 [Wolter 1952a], il quale analizzò specchi con figure di rivoluzione concentriche (paraboloidi, iperboloidi ed ellissoidi) e mostrò che, per poter

raccogliere un'immagine reale su di un campo di vista esteso, i raggi X dovevano subire due riflessioni successive in una configurazione di specchi paraboloide/iperboloide (Wolter I e Wolter I) o paraboloide/ellissoide (Wolter III), montati in condizione coassiale e confocale (fig. 1-2). Fu subito chiara a Wolter, tuttavia, la difficoltà tecnologica nel realizzare specchi così altamente asferici e quindi l'impossibilità, nell'immediato, di applicare la scoperta fatta a strumenti scientifici. Il secondo problema fu risolto solo nell'ambito della ricerca per la realizzazione di telescopi focalizzanti per missioni di Astronomia X.



Figura 1-3: Prima pagina dell'articolo del 1960 di Giacconi e Rossi sui telescopi per Astronomia X.

Risale al 1948 la scoperta effettuata da Burnight [Newell 1953], il quale, esponendo delle lastre fotografiche nell'alta atmosfera tramite un razzo V2, rivelò emissione X da parte del Sole e diede origine all'era della ricerca X solare. Nel 1960 Rossi e Giacconi [Giacconi 1960] suggerirono che l'Astronomia X avrebbe potuto trarre gran giovamento dall'utilizzo di ottiche focalizzanti, comportando esse un miglioramento dell'area di raccolta, della risoluzione angolare e soprattutto del rapporto segnale/rumore. Fu questa la prima volta in cui fu considerata la possibilità di utilizzare ottiche ad incidenza radente come metodo costruttivo di telescopi X. Il primo volo di un telescopio tipo Wolter, avvenne a bordo di un razzo nell'ottobre del 1963 ed in questa circostanza si riuscì a catturare la prima immagine X del Sole con un telescopio ad incidenza radente, con una risoluzione migliore di 1 minuto d'arco. Sempre Rossi, Giacconi e collaboratori [Giacconi 1979], già nel 1962, avevano rivelato la prima sorgente celeste X non solare (Sco-X), mediante un contatore Geiger razzo-trasportato, aprendo le porte all'Astronomia X non solare. Il primo telescopio X con ottiche focalizzanti, ad orbitare attorno alla Terra a bordo di un satellite, fu lanciato nel novembre 1978 e restò operativo per due anni e mezzo. Esso fu trasportato dal secondo dei tre satelliti americani *High Energy Astronomy Observatory* (HEAO-2) e fu ribattezzato Einstein dopo il lancio. Il telescopio Einstein, grazie ad un rapporto segnale/rumore senza paragoni rispetto a quello dei rivelatori collimati usati fino allora, rappresentò un enorme passo in avanti per la ricerca scientifica, rivelando radiazione X da quasi tutte le classi di oggetti astronomici conosciuti, da stelle vicine a *quasars* a distanze cosmologiche [Van Speybroeck 1979]. Il telescopio Einstein, come pure la versione europea in miniatura Exosat [Korte 1981], fu utilizzato in modo di puntamento, coprendo solo una piccola frazione del cielo formata da obiettivi pre-selezionati da terra.

Un aspetto di fondamentale importanza dei telescopi per Astronomia X, riguarda gli angoli di incidenza molto piccoli derivanti dalla condizione di incidenza radente. L'area di raccolta di un telescopio X, infatti, è proporzionale alla lunghezza focale ed al quadrato dell'angolo di incidenza della radiazione.



Figura 1-4: Rappresentazione di un telescopio ad incidenza radente formato da specchi confocali annidati.

La soluzione adottata per aumentare l'area di raccolta, consiste nell'annidare assieme più specchi di geometria Wolter I (o di una sua approssimazione) in una configurazione confocale (fig. 1-4). Il numero di specchi annidabili dipende dal loro spessore, che a propria volta dipende dalla tecnica con cui si realizzano gli specchi. Esistono tre tecniche per la realizzazione delle ottiche a doppia superficie di rivoluzione: la tecnica della lavorazione diretta, la tecnica della replica e la tecnica dei "fogli sottili". La tecnica dei fogli sottili è la tecnica che permette di ottenere gli spessori più piccoli in assoluto e che quindi permette di annidare il maggior numero di specchi, mentre la tecnica della lavorazione diretta è vincolata agli spessori maggiori. Considerando, però, un altro degli aspetti cruciali dei telescopi ad incidenza radente, ovvero l'aspetto della risoluzione angolare, si ha un'inversione delle priorità, nel senso che con spessori maggiori si possono ottenere delle figure geometriche più precise e quindi risoluzioni migliori. Per indagini di tipo cosmologico, quindi, si preferirà una buona risoluzione angolare a discapito dell'area di raccolta, mentre, per indagini di tipo spettroscopico, si darà priorità all'area di raccolta. La tecnica della replica si colloca in una posizione intermedia, permettendo la realizzazione di ottiche con buona risoluzione angolare seppur con spessori di dimensioni contenute.

La prima *survey* completa del cielo X mediante ottiche focalizzanti fu compiuta nel 1990 dal satellite ROSAT [Aschenbach 1988] con una sensibilità 1000 volte maggiore rispetto a quella di UHURU. Le quattro *mirror shell* (specchi) che componevano l'ottica del telescopio, come nel caso di Einstein, furono realizzate con la tecnica della lavorazione diretta. Nei primi 6 mesi di missione Rosat catalogò più di 150000 oggetti per poi passare alla fase di puntamento in cui osservò profondamente una vasta gamma di oggetti con una risoluzione di 2 secondi d'arco. Tra i risultati scientifici compaiono una dettagliata morfologia dei resti di supernova e degli ammassi di galassie e la rilevazione dell'oscuramento dell'emissione X diffusa esercitato dalle nubi molecolari.

Il satellite nippo-americano ASCA [Serlemitsos 1995], lanciato nel febbraio del 1993, è invece un esempio di telescopio realizzato con la tecnica dei fogli sottili. Il sistema ottico era formato da 4 moduli ognuno dei quali costituito da 120 specchi assemblati a nido. ASCA è stato il primo satellite per Astronomia X a fare uso di un rivelatore CCD, combinando una buona capacità di imaging con una banda passante estesa, una risoluzione spettrale ed una grande area efficace. Tra le altre cose ha permesso di studiare in dettaglio le *broad lines* del Ferro [Tanaka 2001] degli AGN, provando la presenza di una forte gravità vicino al nucleo, ha rilevato un'abbondanza di Ferro inferiore a quella solare nella corona delle stelle attive ed un'abbondanza di metalli pesanti negli ammassi di galassie, consistente con l'ipotesi di origine da supernova di tipo II.

Una missione di Astronomia X del recente passato che ha avuto una grande eco è stata SAX, rinominata BeppoSAX [Scarsi 1998] in onore del prof. Giuseppe Occhialini, nata da un programma scientifico per la maggior parte italiano con la partecipazione dell'Agenzia Olandese per i Programmi Aerospaziali (NIVR). Lanciato da Cape Canaveral nel 1996, BeppoSAX ha concluso la propria missione nel 2002, dopo aver ottenuto una serie di successi. Con i propri dispositivi, per la prima volta ha coperto più di tre ordini di grandezza di energia – da 0.1 a 300 keV – con un'area efficace relativamente grande, una risoluzione media ed una discreta sensibilità. Per la parte dei raggi X molli è stato impiegato il primo telescopio focalizzante realizzato con la tecnica della replica mediante Nichel elettroformato. Tale tecnica è stata sviluppata nell'ambito di questa missione spaziale, a seguito di una progetto di ricerca svolto interamente dalla comunità scientifica italiana. Grazie all'ampio intervallo di operatività in energia e alle ottiche focalizzanti nel *range* 0.1 - 10 keV [Citterio 1988], BeppoSAX è stato in grado di determinare per la prima volta la posizione dei *Gamma Ray Burst* con una precisione del minuto d'arco, di seguire e monitorare per la prima volta questo tipo di evento astronomico nella banda X e di fare spettroscopia su larga banda di molte classi di sorgenti X.



Figura 1-5: (sinistra) immagini artistica del satellite BeppoSAX; (destra) uno dei quattro moduli del telescopio X di Beppo-SAX composto da 30 specchi nidificati.

La tecnica della replica tramite Nichel elettroformato è stata utilizzata anche per costruire le ottiche del satellite *X-ray Multi-Mirror* (XMM-Newton) realizzato dall'Agenzia Spaziale Europea. Lanciato da un vettore Ariane 504 nel Dicembre 1999, XMM-Newton è dotato di un telescopio per raggi X con un'area efficace senza precedenti e di un monitor ottico, il primo a volare a bordo di un osservatorio X spaziale. La tecnica della replica ha permesso di "nidificare" in uno stesso modulo ben 58 specchi in geometria Wolter I, pur avendo una risoluzione angolare di 15 secondi d'arco. L'enorme area di raccolta e la capacità di eseguire lunghe esposizioni, stanno tuttora permettendo osservazioni con grande sensibilità.

Un altro osservatorio spaziale attualmente operativo è il satellite Chandra [Weisskopf 2000]

realizzato dalla NASA, e messo in orbita dal Columbia Space Shuttle nel Luglio 1999. Le ottiche del telescopio di Chandra sono state realizzate con la tecnica della lavorazione diretta, e possiedono la migliore risoluzione angolare finora raggiunta (0.5 secondi d'arco). La combinazione di un'alta risoluzione angolare, di una discreta area di raccolta ottenuta grazie ad una focale molto lunga e la sensibilità alle energie più alte dello spettro soffice dei raggi X, rende possibile lo studio di sorgenti estremamente deboli, anche fortemente assorbite, in campi affollati. L'orbita fortemente ellittica ed alta rispetto alla Terra della durata di 64 ore, permette esposizioni lunghe ed interrotte di sorgenti celesti.



Figura 1-6: immagini in 3-D del satellite Chandra (sinistra) e del satellite XMM-Newton (destra).

Il 20 Novembre 2004 è stato lanciato con successo da Cape Canaveral il satellite Swift [Gehrels 2004]. Swift è una missione della NASA a cui collaborano l'Italia ed il Regno Unito, con lo scopo di scoprire l'origine dei misteriosi "lampi gamma" (*Gamma Ray Bursts*) studiandone l'emissione nella banda X ed in quella visibile dello spettro elettromagnetico, continuando l'indagine già iniziata con BeppoSAX. Il satellite ha a bordo tre strumenti: il *Burst Alert Telescope* (BAT) per rivelare e localizzare velocemente i GRB; l'X-Ray Telescope (XRT) e l'*UltraViolet/Optical Telescope* (UVOT) per puntare i lampi e studiarne la curva di luce seguente all'esplosione. Il contributo italiano consiste nella gestione dei dati, nell'utilizzo della stazione di Malindi per il controllo della missione e, sotto la responsabilità dell'Osservatorio Astronomico di Brera, nella realizzazione del telescopio focalizzante XRT con la tecnica della replica.

Fino a questo momento i telescopi focalizzanti sono stati utilizzati solo nella regione dei raggi X soffici. L'area efficace dei telescopi è data dal prodotto dell'area di geometrica di raccolta per il quadrato della riflettività della superficie riflettente. Le superfici riflettenti dei telescopi focalizzanti sinora realizzati sono costituite da una copertura a strato singolo. Sopra i 10 keV la riflettività dei materiali crolla bruscamente, a meno di non supporre lunghezze focali lunghissime e/o angoli di incidenza piccolissimi. Un aumento della riflettività nella banda dei raggi X duri può essere ottenuta ad angoli di incidenza più grandi tramite l'utilizzo di un materiale riflettente strutturato in strati successivi equispaziati, in modo che le riflessioni delle superfici dei singoli strati si sommino in fase. La soluzione del rivestimento multistrato permette di ottenere delle aree efficaci lentamente decrescenti fino ad 80-100 keV. Aree effettive di questo tipo, associate con una buona risoluzione angolare, sono indispensabili in Astrofisica e Cosmologia, ad esempio per risolvere maggiormente il fondo cosmico X diffuso, in quanto costituiscono una condizione necessaria per riuscire a migliorare il minimo flusso rilevabile, in modo determinante rispetto ai telescopi a vista diretta usati finora.

Nel primo paragrafo di questo capitolo dedicato ai telescopi X sarà introdotto il problema della riflessione dei raggi X, presentando i principi ottici di cui fa uso la riflessione ad incidenza radente, nel secondo sarà fatta una considerazione sulle principali proprietà geometriche che caratterizzano un telescopio X, parlando delle aberrazioni e della loro minimizzazione, nel terzo sarà descritto il funzionamento delle coperture multistrato come soluzione per aumentare l'area efficace dei telescopi ed estendere la riflessione allo spettro duro dei raggi X duri.

1.1 Cenni di Ottica nei raggi X

1.1.1 Il problema delle costanti ottiche

Il problema della focalizzazione dei raggi X deriva dal valore assunto dalle costanti ottiche dei materiali alle energie caratteristiche di tale radiazione. Infatti, la propagazione dei raggi X nella materia è descritta da un indice di rifrazione complesso con parte reale minore di 1:

$$\tilde{n} = 1 - \delta - i\beta = 1 - \frac{r_0 \lambda^2}{2\pi} N_{AT} (f_1 - if_2)$$
(1.1)

dove le costanti ottiche $\delta \in \beta$ sono note rispettivamente come indice di decremento rifrattivo ed indice di assorbimento. Queste quantità sono entrambe reali e, tipicamente, l'indice di

decremento rifrattivo δ assume valori compresi tra $10^{-2} \div 10^{-5}$, mentre l'indice di assorbimento β assume valori compresi tra $10^{-2} \div 10^{-6}$. Il piccolo valore di δ indica che la parte reale dell'indice di rifrazione è prossima all'unità, e che quindi gli angoli di rifrazione sono molto piccoli. Fisicamente questo significa che la frequenza dei raggi X è molto maggiore della frequenza di oscillazione degli elettroni legati degli elementi e che perciò il mezzo può essere considerato come immerso in un gas di elettroni liberi caratterizzato da una frequenza di plasma inferiore alla frequenza della radiazione [Spiller 1994]. In aggiunta, la radiazione è estinta esponenzialmente, principalmente per effetto fotoelettrico [Bassani 1983], quando attraversa un materiale: dato un fascio con lunghezza d'onda λ dopo un cammino *t* sarà trasmesso un fattore $\exp(-4\pi\beta t/\lambda)$.

In Astronomia X non è possibile utilizzare le convenzionali lenti rifrattive per focalizzare la radiazione, a causa dai piccoli angoli di rifrazione cui è soggetta la radiazione, ma soprattutto perché un valore di spessore tipico delle lenti assorbe tutta la radiazione.

Il piccolo valore di δ implica anche che la riflettività ad incidenza normale è molto bassa ($\sim \delta^2$) e perciò neppure le convenzionali ottiche riflettive possono essere impiegate alle lunghezze d'onda dei raggi X.



Figura 1-7: andamento dell'indice di rifrazione in funzione della frequenza: si noti come nei raggi X l'indice di rifrazione tenda ad un valore minore di 1 [Attwood 1999].

La figura 1-7 mostra l'andamento dell'indice di rifrazione al variare della frequenza della radiazione: nei raggi X, ad eccezione della zona in prossimità dello spigolo di assorbimento in cui si ha una rapida diminuzione (fenomeno della dispersione anomala), l'indice di rifrazione tende ad aumentare con la frequenza ma resta sempre inferiore all'unità.

Dalla seconda eguaglianza dell'equazione (1.1) si possono esprimere le costanti ottiche in funzione della densità e dei fattori di scattering atomico di un materiale:

$$\delta = \frac{r_0 \lambda^2}{2\pi} \frac{\rho}{AW} f_1 \tag{1.2}$$

$$\beta = \frac{r_0 \lambda^2}{2\pi} \frac{\rho}{AW} f_2 \tag{1.3}$$

dove r_0 è il raggio classico dell'elettrone, ρ/AW rappresenta il numero di atomi/cm³, e $f = f_1 - if_2$ è il fattore di *scattering* atomico complesso. Le costanti ottiche, tramite i fattori di *scattering* atomico, dipendono dalle densità dei materiali e sono spesso di difficile determinazione.

1.1.2 Equazioni di Fresnel e fenomeno della "riflessione totale"

Se un'onda piana che si propaga in un mezzo con costanti ottiche δ_1 e β_1 incide nella direzione *ki* con un angolo θ_0 su di una superficie piana perfettamente liscia di un mezzo con costanti ottiche δ_2 (> δ_1) e β_2 , in generale, essa darà origine sia ad un'onda riflessa sia ad una trasmessa. In figura 1-8 è rappresentato il caso relativo ad un'onda polarizzata perpendicolarmente.



Figura 1-8: incidenza della radiazione sulla superficie di separazione di due mezzi nel caso di polarizzazione perpendicolare (polarizzazione di tipo s)

Invocando la continuità dei vettori campo magnetico e campo elettrico prima e dopo

l'incidenza ed utilizzando la legge di Snell, si possono ricavare le equazioni di Fresnel [Michette 1993]:

$$r_{s} = \frac{\sin \theta_{0} - \left[\tilde{n}^{2} - \cos^{2} \theta_{0}\right]^{1/2}}{\sin \theta_{0} + \left[\tilde{n}^{2} - \cos^{2} \theta_{0}\right]^{1/2}}$$
(1.4)

$$t_{s} = \frac{2\sin\theta_{0}}{\sin\theta_{0} + [\tilde{n}^{2} - \cos^{2}\theta_{0}]^{1/2}}$$
(1.5)

Queste equazioni sono valide nel caso di polarizzazione perpendicolare con primo mezzo il vuoto ($\delta_1 = \beta_1 = 0$ e $\beta_2 \neq 0$), e descrivono l'ampiezza di riflessione *r* e l'ampiezza di trasmissione *t*. L'intensità di riflessione (comunemente chiamata riflettività) sarà allora data dal modulo quadro dell'ampiezza di riflessione:

$$R = |r|^2$$

Dalle equazioni di Fresnel si ricava, che essendo la parte reale dell'indice di rifrazione inferiore all'unità, gli angoli di incidenza per i quali si ha riflettività non nulla sono molto piccoli. La legge di Snell, nella geometria ad incidenza radente, può essere espressa nel seguente modo:

$$\frac{\cos\theta_0}{\cos\theta_t} = \frac{1 - \delta_2}{1 - \delta_1} \tag{1.6}$$

e quindi nel caso di un mezzo con $\delta_1 \approx 0$ (aria o vuoto) l'angolo critico θ_c al di sotto del quale si ha solamente riflessione è dato da:

$$\cos\theta_c = 1 - \delta_2 \tag{1.7}$$

In figura 1-9 sono rappresentate le curve di riflettività alle energie di 4 keV e 8 keV in funzione dell'angolo di incidenza per il Nichel, materiale comunemente usato per la realizzazione di ottiche X, e per un materiale meno denso come il Silicio. Possiamo notare, per entrambi gli elementi, un decremento graduale della riflettività con l'aumentare dell'angolo di incidenza, seguito da un decremento più rapido proporzionale a $sin^{-4}\theta_0$.

Si definisce "riflessione totale" la riflessione che avviene prima del punto di flessione determinato dall'angolo critico, anche se la radiazione in realtà non è del tutto riflessa a causa dell'assorbimento. Si noti che dimezzando l'energia della radiazione l'angolo critico del Nichel si raddoppia, e che a parità di energia un elemento meno denso come il Silicio ha un angolo critico



Figura 1-9: andamento dell'intensità di riflessione al variare dell'energia e della densità. Possiamo vedere come l'angolo critico sia inversamente proporzionale all'energia ed in qualche modo proporzionale alla densità elettronica.

minore. Per l'angolo critico dei materiali vale la seguente relazione di proporzionalità:

$$\theta_c \propto \sqrt{\rho} / E$$
 (1.8)

La dipendenza dell'angolo critico dall'energia fissa un'energia massima per la quale è possibile sfruttare il fenomeno della riflessione totale, limite che si pone a circa 10 keV. Per energie superiori l'idea è di sfruttare fenomeni di interferenza costruttiva tramite l'utilizzo di rivestimenti multistrato, dei cui principi di funzionamento si parlerà nel terzo paragrafo.

Sebbene le equazioni riportate si riferiscano a riflessione da superfici piane, esse possono essere applicate per superfici curve fintantoché il raggio di curvatura è molto maggiore della lunghezza d'onda. Nel caso dei raggi X questa condizione è sostanzialmente sempre verificata.

L'approccio seguito in questo paragrafo non considera la natura atomica della superficie riflettente, ovvero gli effetti dei fattori di *scattering* atomico. Tal effetto può essere modellato considerando la superficie come una serie di strati atomici, ottenendo[Smirnov 1977]:

$$r_{s} = \frac{\sin \theta_{0} - \left[\sin^{2} \theta_{0} - 2(\delta + i\beta)\right]^{1/2}}{\sin \theta_{0} + \left[\sin^{2} \theta_{0} - 2(\delta + i\beta)\right]^{1/2}}$$
(1.9)

Questa è essenzialmente la stessa espressione derivata con l'approccio non atomico, nella quale i termini in $\delta \in \beta$ del secondo ordine, essendo molto piccoli, possono essere in buona

approssimazione trascurati.

1.1.3 Riduzione della riflettività nelle superfici reali

L'approccio seguito finora non ha tenuto conto della rugosità di una superficie. La rugosità, comportando una variazione dell'angolo di incidenza sulla superficie, riduce la riflettività speculare e pregiudica significativamente le performance di un telescopio per raggi X, sia in termini di riflettività sia in termini di risoluzione angolare [Lodha 1998]. Ci sono diversi modi in cui la rugosità di una superficie può essere trattata, ognuno dei quali dà risultati simili. L'approccio comunemente usato è quello sviluppato originariamente da Debye nel 1914 per analizzare gli effetti delle vibrazioni termiche di un reticolo cristallino sullo *scattering* dei raggi X [Debye 1914]. Tale approccio è valido solo per superfici cristalline, ma le formule risultanti possono essere usate per modellare la rugosità di ogni tipo di superficie.

Per un reticolo imperturbato, la riflettività R è data dal quadrato della sommatoria delle ampiezze riflesse da tutti i punti del reticolo:

$$R \propto \sum_{n} \exp\left(\frac{2\pi i}{\lambda} \vec{r}_{n} \cdot \vec{K}\right) \sum_{m} \exp\left(-\frac{2\pi i}{\lambda} \vec{r}_{m} \cdot \vec{K}\right)$$
(1.10)

dove r_n è la posizione dell' n-esimo punto e K è il vettore di scattering (riferimento fig. 1-8),

$$\vec{K} = \vec{k}_i - \vec{k}_r \qquad \left| \vec{K} \right| = 2\sin\vartheta_0 \tag{1.11}$$

Se i punti del reticolo si spostano di una distanza u_n , la riflettività risultante sarà:

$$R_{d} = \sum_{n} \sum_{m} \exp\left(\frac{2\pi i}{\lambda}(\vec{r}_{n} - \vec{r}_{m}) \cdot \vec{K}\right) \exp\left(\frac{2\pi i}{\lambda}(\vec{u}_{n} - \vec{u}_{m}) \cdot \vec{K}\right)$$
(1.12)

Se lo spostamento medio della superficie dovuto alla rugosità è σ , allora il valore medio di $(u_n - u_m) \cdot K$ può essere uguagliato a σ^2 . Ora definiamo la quantità p_{nm} in questo modo:

$$p_{nm} = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{u}_n - \vec{u}_m) \cdot \vec{K} = \frac{2\pi \sin \theta_0}{\lambda} (\vec{u}_{nK} - \vec{u}_{mK})$$
(1.13)

dove u_{nK} è la componente di u_n lungo la direzione di K, e quindi il secondo esponenziale dell'equazione (1.12) si può sviluppare come:

$$e^{ip_{nm}} = 1 + ip_{nm} - \frac{p_{nm}^2}{2!} + \dots = 1 - \frac{\left\langle p_{nm}^2 \right\rangle}{2!} + \frac{\left\langle p_{nm}^4 \right\rangle}{4!} - \dots$$
(1.14)

e per spostamenti piccoli rispetto alla lunghezza d'onda solo i primi due termini contano:

$$e^{ip_{nm}} \approx e^{-\langle p_{nm}^2 \rangle/2} \tag{1.15}$$

Il valor medio di $(u_{nK} - u_{mK})^2$ è dato da:

$$\left\langle \left(u_{nK} - u_{mK}\right)^{2} \right\rangle = \left\langle u_{nK}^{2} \right\rangle + \left\langle u_{mK}^{2} \right\rangle - 2\left\langle u_{nK} u_{mK} \right\rangle$$
(1.16)

se la rugosità superficiale è distribuita in modo casuale si avrà che:

$$\left\langle u_{nK}^{2} \right\rangle = \left\langle u_{mK}^{2} \right\rangle = \sigma^{2}, \left\langle u_{nK} u_{mK} \right\rangle = 0$$

$$\frac{\left\langle p_{nm}^{2} \right\rangle}{2} = \left(\frac{4\pi \sin \theta_{0}}{\lambda}\right)^{2} \frac{\left\langle (u_{nK} - u_{mK})^{2} \right\rangle}{2} = \left(\frac{4\pi \sin \theta_{0}}{\lambda}\right)^{2} \sigma^{2}$$
(1.17)



Figura 1-10: confronto tra le curve di riflettività di una superficie ideale in Nichel perfettamente liscio ed una in Nichel con rugosità dell'ordine della radiazione incidente. Si può ben notare lo smorzamento della riflettività provocato dalla rugosità.

La riflettività media da una superficie reale paragonata a quella teorica da una superficie perfettamente liscia è data da:

$$\langle R_d \rangle = R \cdot \exp\left[\left(\frac{4\pi\sigma\sin\theta_0}{\lambda}\right)^2\right]$$
 (1.18)

La riflettività, così come calcolata tramite le equazioni di Fresnel, è ridotta da un fattore esponenziale quando si considerano le superfici reali. La σ è chiamata rugosità di Debye-Waller.

In figura 1-10 è mostrato l'effetto della rugosità nel calcolo della riflettività del Nichel: la curva rossa si riferisce ad una superficie in Nichel perfettamente liscia, mentre la curva nera si riferisce ad una superficie in Nichel con una rugosità di 10 Å. Come si può vedere, per piccoli angoli in incidenza radente una rugosità dell'ordine della lunghezza d'onda comporta una diminuzione tollerabile della riflettività. D'altra parte l'effetto sull'*imaging* può essere ingente ed il livello di rugosità necessario per ottenere una risoluzione angolare adatta alle specifiche di una missione scientifica può essere ancora inferiore.

1.2 Sistemi ottici ad incidenza radente per telescopi X

Le considerazioni fatte nel paragrafo 1.1 mostrano che nei raggi X, per focalizzare la radiazione, non è possibile utilizzare né lenti rifrattive, né specchi riflettenti in incidenza normale. Risulta invece necessario l'utilizzo di ottiche ad incidenza radente, la cui forma geometria, come vedremo in questo paragrafo, svolge un ruolo fondamentale per la formazione delle immagini. Ora discuteremo le proprietà geometriche degli specchi ad incidenza radente ed in particolare delle aberrazioni che li caratterizzano.

1.2.1 Aberrazioni da superfici sferiche

Astigmatismo, aberrazione sferica e aberrazione di coma, si manifestano in maniera consistente nella riflessione ad incidenza radente da parte di superfici sferiche.

Astigmatismo

L'astigmatismo è un errore di formazione delle immagini che si verifica quando la lunghezza focale dei raggi riflessi lungo il piano meridiano è maggiore di quella lungo il piano sagittale. Si può dimostrare che, per uno specchio sferico di raggio r e per angoli di incidenza θ piccoli, sussiste la seguente relazione per la lunghezza focale meridiana f_M [Michette 1993]:

$$f_M = \frac{r\theta}{2} \tag{1.19}$$

Questa espressione per la lunghezza focale, è conseguenza della diminuzione apparente del raggio dello specchio nella direzione meridiana, dovuta ad effetti prospettici. Nella direzione perpendicolare, invece, non c'è una rappresentazione prospettica e la corrispondente lunghezza focale sagittale f_s è data da:



Figura 1-11: schema della formazione delle immagini in uno specchio sferico.

Ogni direzione agisce come uno specchio cilindrico e, nel caso di un oggetto puntiforme, vengono formate due immagini, le quali coincidono solo se $f_s = f_M$. Questo è quello che succede in incidenza normale, mentre in incidenza radente le immagini sono molto astigmatiche, $f_s/f_M = 1/\sin^2 \theta$. Per il Nichel, ad esempio, ad un angolo di incidenza corrispondente al proprio angolo critico e con una radiazione incidente con $\lambda = 3.5 nm$, si ha $f_s/f_M = 54$.

Aberrazione Sferica e Coma

L'aberrazione sferica traversa S ha luogo perché l'angolo di incidenza varia lungo la superficie dello specchio. Con riferimento alla figura 1-11, la distanza v dell'immagine dal punto di incidenza varia con l'angolo α ed è legata all'aberrazione sferica secondo la relazione:

$$S = \Delta v \sin \gamma \approx \Delta v \gamma \tag{1.21}$$

Tramite considerazioni geometriche, si può dimostrare che sia l'angolo di convergenza γ , che la variazione di distanza Δv sono proporzionali ad α . L'ingrandimento M è dato dal rapporto tra la distanza dell'oggetto e dell'immagine rispetto al punto di incidenza e la distanza dal punto di incidenza. Ne consegue che l'aberrazione sferica è proporzionale ad α^2 e che la deviazione avviene sempre dalla stessa parte dell'immagine relativa ad $\alpha = 0$.

L'aberrazione di coma è conseguenza della variazione dell'ingrandimento $M = \beta/\gamma$ tra il centro e l'esterno di uno specchio. Affinché un'ottica non sia affetta dall'aberrazione di coma è necessario che sia soddisfatta la condizione di Abbe, per la quale tutti i cammini geometrici relativi ai raggi riflessi dal sistema dato, devono dar luogo allo stesso ingrandimento M.

La condizione dei seni di Abbe



Figura 1-12: Regola dei seni di Abbe per l'immagine di un oggetto all'infinito.

Con riferimento alla figura 1-12, dato un fascio collimato incidente su un sistema focalizzante, la regola di Abbe è soddisfatta se:

$$\Gamma = \frac{h}{sen\alpha} = \cos t \tag{1.22}$$

dove Γ è la distanza fuoco-ottica, h è la distanza del fascio dall'asse ottico ed α è l'angolo visto dal fuoco. Tale regola afferma che la superficie angolare di separazione sulla quale si intersecano i raggi parassiali incidenti ed il prolungamento dei raggi riflessi, deve essere una sfera centrata

sul fuoco. Questa condizione, facilmente verificabile nel caso di raggi parassiali, è necessaria e sufficiente affinché i raggi extrassiali non vengano sparpagliati. Più precisamente tale regola afferma che per oggetti con diametro piccolo rispetto alla distanza dell'oggetto, il diametro dell'immagine relativa ai raggi è proporzionale al quadrato della distanza dall'asse ottico.

1.2.2 Riduzione delle aberrazioni: Specchi Asferici

Dalle discussioni appena fatte sulle aberrazioni, possiamo concludere che nei raggi X non è possibile usare uno specchio sferico nella condizione di incidenza radente, visto che:

- anche i materiali più densi come il Platino, hanno angoli critici di pochi gradi, quindi l'astigmatismo non può essere ridotto a livelli accettabili;
- aberrazione sferica e coma possono essere ridotte solo tramite l'impiego di aperture limitate, il che comporta una perdita in area di raccolta ed in risoluzione angolare.

Per ridurre le aberrazioni a livelli accettabili si devono usare dei sistemi composti e degli specchi asferici. Per realizzare uno specchio asferico con lunghezze focali meridiana e sagittale uguali, la superficie deve avere una forma toroidale con i due raggi di curvatura r_M e r_s tali che:

$$r_s = r_M \sin^2 \theta \tag{1.23}$$

Questa condizione rimuove l'astigmatismo per una singola riflessione in incidenza radente.

Con una singola riflessione l'aberrazione sferica può essere eliminata dall'impiego di uno specchio parabolico (il quale però soffre di obliquità¹), ma l'aberrazione di coma può essere eliminata solo parzialmente.

Specchi parabolici

I paraboloidi sono in grado di soddisfare la condizione di Abbe solo in prossimità dell'asse ottico, dove la superficie è pressoché perpendicolare, ma producono immagini fortemente affette da coma per i raggi più distanti. Tuttavia la parte centrale non è utilizzabile per la riflessione ad incidenza radente poiché solo i raggi radenti sono riflessi efficientemente e la maggior parte della riflessione avviene in una zona più esterna del paraboloide. Un unico specchio non può mai essere una soluzione al problema dell'aberrazione di coma comunque lo

¹ Inclinazione dell'immagine rispetto all'oggetto dovuta a variazioni nell'ingrandimento lungo la superficie.



Figura 1-13: zona della parabola non soggetta ad aberrazione di coma ed immagine della tipica dispersione del punto focale dovuta a questo tipo di aberrazione.

si possa formulare, poiché in esso la riflessione ad incidenza radente è inconciliabile con la richiesta che i raggi si avvicinino alla "superficie angolare" sferica. Per queste ragioni, gli specchi a singola riflessione non sono normalmente utilizzati nelle ottiche X ad alta risoluzione.

1.2.3 Sistemi ottici composti a doppia riflessione

Le aberrazioni possono essere ridotte significativamente, ed in alcuni casi eliminate, dall'impiego



Figura 1-14: la condizione dei seni di Abbe può essere soddisfatta con due riflessioni consecutive. La superficie di Abbe è costituita dalla zona di intersezione degli specchi.

di due specchi consecutivi ad incidenza radente. Tali sistemi sono principalmente di due tipi, quello ideato da Kirkpatrick e da Baez nel 1948 [Kirkpatrick 1948] e quello inventato da Wolter nel 1952 [Wolter 1952a]. In figura 1-14 è mostrato come sia possibile soddisfare la condizione dei seni di Abbe con due riflessioni in incidenza radente (vedi didascalia).

Sistema Kirkpatrick-Baez

Il sistema Kirkpatrick-Baez fa uso di due (o più) specchi i cui piani meridiani sono perpendicolari. L'astigmatismo non è presente ed è possibile utilizzare specchi sferici dal



Figura 1-15: sistema ottico Kirkpatrick-Baez in una combinazione a due elementi (A) ed una combinazione a più elementi in parallelo utilizzata per aumentare l'area di raccolta totale (B).

momento che la lunghezza focale sagittale è molto maggiore della lunghezza focale meridiana. La più semplice configurazione (figura 1-15) è formata da due specchi cilindrici con raggio di curvatura uguale. Questo sistema produce immagini estese reali di oggetti estesi, ma i due specchi non sono coincidenti e la distanza dell'oggetto per la riflessione sagittale nel secondo specchio è più grande di quella per la riflessione meridiana nel primo. Ne consegue che l'ingrandimento è differente nelle due direzioni e questo effetto è chiamato animorfotismo. Sono stati ideati più accorgimenti per ovviare a tale problema, ad esempio utilizzando una terza superficie riflettente nello stesso piano della prima o ruotando opportunamente il rivelatore. E' anche possibile disegnare un sistema in cui entrambi gli specchi si trovano alla stessa distanza dall'oggetto, ma una tale soluzione è difficile da realizzare nella pratica. Per ridurre significativamente l'aberrazione di coma deve essere soddisfatta la condizione di Abbe e allo scopo sono necessarie quattro riflessioni, due per ogni direzione. Dunque, per ottenere delle immagini di buona qualità si necessita di due coppie di specchi intersecati. Il sistema Kirkpatrick-Baez è utilizzato in applicazioni per microscopia X data la sua grande utilità nel caso di sorgenti asimmetriche dovuta alla possibilità di variare l'ingrandimento nelle due direzioni. Esso è stato impiegato agli albori dell'Astronomia X a bordo di alcune missioni su razzo in alta atmosfera ma non è stato mai usato in telescopi spaziali anche se proposto in alcuni casi come soluzione [Gorenstein 1988] [Gorenstein 1998].

Sistemi Wolter

Abbiamo visto che per eliminare astigmatismo e aberrazione sferica possiamo utilizzare anche un singolo specchio asferico, ma che l'aberrazione di coma con esso è ineliminabile. Una soluzione a questo problema fu proposta da Hans Wolter nel 1952, il quale dimostrò che la condizione di Abbe poteva essere soddisfatta in buona approssimazione utilizzando due specchi in successione, il primo in ingresso parabolico ed il secondo in uscita iperbolico [Wolter 1952a]. Esistono anche altre due configurazioni, denominate Wolter II e Wolter III, basate sempre sulla combinazione di coniche che limitano l'aberrazione di coma, ma che a parità di apertura richiedono lunghezze focali più lunghe (fig. 1-16). La configurazione Wolter I permette di ridurre di circa un fattore 2 la lunghezza focale rispetto ad un'ottica parabolica a singola riflessione, e dovendo lavorare nello spazio questa è una proprietà molto importante. Le tre geometrie Wolter sono in grado di offrire ottime prestazioni per sorgenti vicine all'asse, infatti, la superficie principale ha la forma di un paraboloide di rivoluzione intorno all'asse ottico che, nella regione parassiale, approssima bene una sfera. Per raggi extrassiali l'aberrazione di coma cresce linearmente con la distanza dall'asse ottico, ma in questo caso sono dominanti altri tipi di aberrazione a dipendenza quadratica, come ad esempio la curvatura di campo¹. Il campo di vista con immagine corretta è pertanto limitato a poche decine di minuti d'arco. Ad ogni modo, per le applicazioni astronomiche, il sistema ottico a geometria Wolter I gode di diversi vantaggi sia rispetto alle altre geometrie Wolter sia rispetto al sistema KirkPatrick-Baez, ed infatti, ha avuto

¹ Il piano del rivelatore e la superficie focale non coincidono perché quest'ultima è curva. La realizzazione di rivelatori con superficie curva presenta notevoli difficoltà, ma una soluzione a basso costo consiste nel spostare leggermente il rivelatore, ottenendo una superficie più simile a quella focale sebbene leggermente fuori fuoco anche al centro del campo, con un guadagno fino ad un fattore due in risoluzione angolare [Conconi 2000]. Un'altra soluzione consiste nell'usare un sistema di rivelatori posti a diverse altezze rispetto al fuoco (come ad esempio per Chandra).



Figura 1-16: schema di funzionamento dei sistemi ottici a doppia riflessione di tipo Wolter I, II e III.

un largo impiego in questo campo:

- Gli specchi ad incidenza radente hanno un'area di raccolta molto piccola, la geometria Wolter I permette di aumentarne il valore potendo unire assieme più specchi coassiali e confocali (figura 1-16 in basso a destra).
- A differenza dei Kirkpatrick-Baez, gli specchi a geometria Wolter I possono essere realizzati a partire da un singolo pezzo, riducendo i problemi di allineamento, assicurando una maggiore stabilità strutturale e di conseguenza migliorando di molto la risoluzione angolare.
- La geometria Wolter I è pure approssimabile con due tronchi di cono, realizzabili più

facilmente e più economicamente. Questa soluzione comporta un peggioramento della risoluzione angolare e l'approssimazione è tanto più buona quanto maggiore è il rapporto lunghezza focale/diametro di apertura noto anche come *f/number*.

Wolter, sempre nel 1952, propose un diverso tipo di geometria (detta Wolter-Schwarzschild) che, per mezzo di piccole deviazioni dalle curve coniche delle superfici degli specchi, permette di soddisfare perfettamente la condizione di Abbe, eliminando ogni ordine di coma [Wolter 1952b]. Il sistema Wolter-Schwarzschild ha, soprattutto fuori asse, delle prestazioni migliori del sistema Wolter I, ma esso comporta difficoltà costruttive dovute al brusco cambio di pendenza tra le due superfici. Einstein è l'unica missione spaziale per astronomia X che abbia fatto uso di specchi Wolter-Schwarzschild.

1.2.4 Area efficace

In questo paragrafo sarà trattata l'area efficace relativa ai sistemi ottici a doppia superficie conica. L'area efficace per un telescopio focalizzante è di fondamentale importanza, poiché svolge un ruolo attivo nella determinazione della sensibilità minima ottenibile. Si definisce area efficace di uno specchio il prodotto tra l'area geometrica di raccolta e la sua efficienza in riflessione, efficienza intesa come rapporto tra il numero di fotoni riflessi e numero di fotoni incidenti.



Figura 1-17: parametri geometrici in gioco in un ottica ad incidenza radente di tipo Wolter I. L'angolo di incidenza sul fuoco è quattro volte l'angolo di incidenza sullo specchio primario. La lunghezza focale è misurata a partire dalla giunzione degli specchi ed "r" è il raggio alla giunzione.

Con riferimento alla figura 1-17, l'angolo di incidenza sul rivelatore è quattro volte l'angolo di incidenza θ sullo specchio primario e l'angolo di incidenza sullo specchio secondario è uguale a θ . Ricaviamo allora la relazione tra raggio e lunghezza focale:

$$r = F \tan 4\theta \cong 4F\theta \tag{1.24}$$

dove la lunghezza focale F è misurata a partire dalla giunzione degli specchi e l'approssimazione è valida nel caso in considerazione essendo in gioco angoli di incidenza molto piccoli.

Un fotone per poter essere focalizzato deve incidere sullo specchio primario. L'area di raccolta è data quindi dalla proiezione di tale specchio sul piano perpendicolare all'asse ottico, risulterà essere quindi:

$$A_{Coll} = 2\pi r \Delta r = 2\pi r L \tan \theta \cong 8\pi F L \theta^2$$
(1.25)

dove L è la lunghezza dello specchio primario (in figura corrisponde ad L_p), anche se tipicamente i due specchi hanno la stessa lunghezza ed r è il raggio alla giunzione degli specchi.

Nel caso di specchi confocali, gli angoli di incidenza crescono con il raggio. Per questo motivo, la riflessione dei raggi più energetici, avviene con maggiore facilità da parte degli specchi interni, che però hanno una bassa area di raccolta, mentre gli specchi interni offriranno una minore riflettività alle alte energie, ma un'area di raccolta molto elevata, soprattutto per le basse energie.

L'area efficace dipende dall'energia della radiazione ed è data dalla formula:

$$A_{eff} = A_{Coll} R_{\theta}^{2}(E) \cong 8\pi F L R_{\theta}^{2}(E) \theta^{2}$$
(1.26)

dove $R_{\theta}(E)$ è la riflettività del singolo specchio, elevata al quadrato per tener conto della doppia riflessione.

Uno specchio che formi un angolo θ con l'asse ottico sarà in riflessione totale e quindi con elevata area efficace, fintantoché $\theta < \theta_{crit}(E)$. Per telescopi con angoli di incidenza tipici dell'ordine di alcuni millesimi di radiante, l'energia massima per la quale si ha una riflettività apprezzabile, e quindi una sufficiente area efficace, può essere fissata a 10 keV.

Per estendere la capacità di riflessione dei telescopi X ad energie superiori ai 10 keV è possibile utilizzare delle ottiche ad incidenza radente rivestite con coperture multistrato, di cui parleremo nel prossimo paragrafo, oppure, come alternativa, realizzare telescopi con rapporti lunghezza focale/diametro (*f/number*) molto grandi, cioè con angoli di incidenza molto ridotti. Va da se,

però, che in queste condizioni atipiche l'unico modo per ottenere un'area geometrica di raccolta sufficiente è quello di utilizzare focali molto lunghe (>> 10m) e/o telescopi multi-modulari con ottiche strettamente nidificate con raggi molto piccoli.

1.3 Coperture multistrato e loro applicazione in Astronomia X

Un multistrato è un reticolo sintetico formato da una successione di strati di materiali diversi, depositati su di un substrato che funge da sostegno meccanico. Ad ogni interfaccia la radiazione incidente è in parte trasmessa, in parte assorbita ed in parte riflessa, in accordo con le formule di Fresnel (§ 1.1.2). La riflettività di un multistrato può essere calcolata seguendo una teoria cinematica, in cui le riflessioni dei singoli strati sono trattate in modo indipendente e poi sommate vettorialmente trascurando gli effetti di rifrazione e di estinzione, o meglio seguendo una teoria teoria dinamica, la quale tiene conto di tutte le interazioni della radiazione con i diversi strati utilizzando una procedura di calcolo ricorsiva [Spiller 1994][Underwood 1998].

1.3.1 Multistrato come reticolo sintetico

Nei paragrafi precedenti è stato mostrato che, con l'uso di un singolo materiale riflettente a rivestimento di un ottica focalizzante, è molto difficile estendere le osservazioni sopra i 10 keV a meno di non supporre lunghezze focali lunghissime e/o angoli di incidenza piccolissimi. Un'alta riflettività nei raggi X duri può essere ottenuta ad angoli di incidenza più grandi tramite l'utilizzo di un materiale riflettente strutturato in strati successivi equispaziati, in modo che le riflessioni delle superfici dei singoli strati si sommino in fase (fig. 1-18). Per una specifica energia, l'aumento di riflettività dovuto all'interferenza costruttiva, avverrà solo per determinati angoli di incidenza. Questo è quello che avviene in natura con i cristalli, in cui i piani atomici separati tra loro di una quantità costante, danno un'alta riflettività, anche ad energie elevate, quando è soddisfatta la condizione di Bragg:

$$m\lambda = 2d\sin\theta_m \tag{1.27}$$

dove *m* è un intero che descrive l'ordine di diffrazione e *d* è la spaziatura tra i piani atomici. I cristalli, opportunamente sagomati, sono comunemente utilizzati nei sistemi di spettroscopia X e nelle sorgenti di sincrotrone, per lunghezze d'onda inferiori a circa 2 *nm*. La possibilità di impiego di strutture sintetiche fu considerata fin dagli anni '30, nel tentativo di ottenere



Figura 1-18: funzionamento di un multistrato basato sull'interferenza costruttiva tra le onde parziali riflesse, analogo alla riflessione alla Bragg da parte dei cristalli.

dispositivi con maggiore precisione e versatilità di quelli disponibili in natura, ma le difficoltà pratiche nel ricreare spessori dell'ordine di grandezza della distanza tra i piani atomici dei cristalli, sono state superate solo negli anni '60 [Dinklage 1963].

1.3.2 Riflessione alla Bragg dei multistrato

All'interfaccia tra due mezzi, 1 e 2, con indici di rifrazione complessi $\tilde{n}_1 = 1 - \delta_1 - i\beta_1$ e $\tilde{n}_2 = 1 - \delta_2 - i\beta_2$, l'ampiezza di riflessione può essere calcolata tramite l' equazione (1.2):

$$r_{s} = \frac{\tilde{n}_{2}^{2} (\tilde{n}_{1}^{2} - \cos^{2} \theta_{1})^{1/2} - \tilde{n}_{1}^{2} (\tilde{n}_{2}^{2} - \cos^{2} \theta_{2})^{1/2}}{\tilde{n}_{2}^{2} (\tilde{n}_{1}^{2} - \cos^{2} \theta_{1})^{1/2} + \tilde{n}_{1}^{2} (\tilde{n}_{2}^{2} - \cos^{2} \theta_{2})^{1/2}}$$
(1.26)

dove θ_1 e θ_2 sono gli angoli di incidenza nei due mezzi (fig. 1-19), legati all'angolo di incidenza θ_0 dalla legge di Snell. La riflettività alle interfacce tra gli strati è maggiore quanto più è grande la differenza tra gli indici di rifrazione dei due materiali, come si può dedurre dalla seguente formula per la riflettività della j-esima interfaccia:

$$r_{j} = \frac{\left(\delta_{j} - \delta_{j+1}\right)}{2\sin^{2}\theta_{j}} \tag{1.28}$$

valida per angoli maggiori dell'angolo critico e per radiazione con energia tipica dei raggi X. La

soluzione ideale sarebbe quella di tenere separati gli strati del materiale riflettente con del vuoto, ma nella realtà uno specchio a multistrato è composto da strati alternati di un materiale ad alta densità (riflettente = 1) e di un materiale a bassa densità (spaziatore = 2). Un multistrato a spaziatura costante è solitamente considerato come una successione di bistrati, ed è descritto da due parametri: lo spessore totale $d = d_1 + d_2$ e lo spessore relativo degli strati Γ , dato dal



Figura 1-19: struttura di uno specchio a multistrato. Lo strato 1 è composto da un materiale pesante e lo strato 2 da un materiale leggero.

rapporto tra lo spessore del materiale a maggiore densità e lo spessore totale. L'equazione di Bragg, valida per i cristalli, necessita di una modifica nel caso dei multistrato a causa della rifrazione e dell'assorbimento non nulli:

$$m\lambda = 2d\sin\theta_m \sqrt{1 - \frac{2\overline{\delta}}{\sin\theta_m}}$$
(1.29)

dove $\overline{\delta} = \delta_1 \Gamma + \delta_2 (1 - \Gamma)$ è il valore medio degli indici di decremento rifrattivo dei due materiali componenti il multistrato. Gli angoli a cui si hanno i picchi di riflettività risultano più grandi di quelli dati dalla condizione di Bragg.

L'onda totale riflessa da un multistrato può essere suddivisa nelle componenti riflesse dalle interfacce degli strati pesante-leggero e leggero-pesante. La differenza di fase $\Delta \Phi$ tra le onde riflesse da due interfacce dello stesso tipo dà la massima interferenza costruttiva quando:

$$\Delta \Phi_i + \Delta \Phi_{i+1} = m\pi \tag{1.30}$$

Lo sfasamento tra due interfacce, per dare luogo al massimo accoppiamento interferenziale, dove essere uguale a $\pi/2$. Si ha una struttura di questo tipo, chiamata "a quarto d'onda", quando gli spessori del multistrato sono tali che il fattore $\Gamma=0.5$. La struttura a quarto d'onda è ottimale nelle situazioni in cui non vi è assorbimento, come per la riflessione dei neutroni, mentre per la riflessione dei raggi X è conveniente utilizzare un Γ più basso che per ridurre



Figura 1-20: curva di riflettività teorica in funzione dell'angolo di incidenza per un multistrato semi-infinito in Platino/Carbonio con d=30 Å e $\Gamma=0.5$ alla lunghezza d'onda di 1 Å (curva nera). Si possono notare i primi cinque picchi di Bragg che estendono la riflessione ad angoli maggiori di quelli del solo Platino (curva blu). Il fattore $\Gamma=0.5$ fa sì che la legge di Bragg determini l'interferenza distruttiva al 2° ed al 4° picco di Bragg.

l'assorbimento e permettere ad un alto numero di bistrati di intervenire in riflessione. Infatti il numero di bistrati di un multistrato che partecipano alla riflessione dipende fortemente dall'assorbimento. Il valore di Γ ha inoltre particolare influenza sulle altezze relative dei picchi di Bragg di ordine superiore al primo e, come possiamo vedere nella figura 1-20, un multistrato a quarto d'onda genera onde riflesse in opposizione di fase per angoli di incidenza corrispondenti ai picchi di Bragg pari, annullando la riflettività.

1.3.3 Multistrato a spaziatura variabile per raggi X duri

La possibilità offerta dai multistrato di poter riflettere con efficienza i raggi X, può essere sfruttata per migliorare le prestazioni dei telescopi ad incidenza per astronomia X.

I multistrato a spaziatura costante permettono di ottenere un'elevata riflettività dei raggi X, ma in una banda limitata attorno ai primi picchi di Bragg. Nelle applicazioni astronomiche è necessario avere una riflettività su di una banda energetica molto ampia, ed a questo proposito si utilizzano strutture multistrato a spaziatura variabile (*supermirror*) consistenti in bistrati con spessori diversi. E' già stato dimostrato, sia teoricamente sia sperimentalmente [Høghøj 1994], che la riflettività nei raggi X delle strutture multistrato a larga banda è estesa abbastanza per renderle di interesse in campo astrofisico.

L'effetto di una spaziatura variabile nella regione 10-100 keV è mostrato in figura 1-21, in cui si può notare come la riflettività sia molto più distribuita lungo la banda energetica rispetto al caso a spaziatura costante ed al caso a strato singolo.

Generalmente l'assorbimento fa sì che i fotoni di energia minore possano penetrare solo gli



Figura 1-21: Confronto tra le curve di riflettività in funzione dell'energia della radiazione relative a tipiche strutture a singolo strato (linea blu), a multistrato con spaziatura costante (linea verde) ed a multistrato con spaziatura variabile (linea rossa). L'uso di multistrato a spaziatura variabile permette di estendere la riflettività ad una banda energetica molto più ampia.

strati più superficiali, per cui conviene porre all'esterno gli strati più spessi e diminuire lo spessore con la profondità (fig. 1-22). Dovendo poi progettare un *supermirror* per una specifica applicazione scientifica, si pone il problema di determinare gli spessori, il numero di strati ed i materiali, allo scopo di ottenere la curva di riflettività più adatta. Una certa sequenza di spessori d_i , ad un dato angolo di incidenza e ad una data energia, determina la riflettività della radiazione incidente, perciò, per una banda energetica estesa, risulta molto difficile determinare la "ricetta"
migliore per gli strati. La più semplice assunzione riguardo la sequenza di spessori è che sia lineare, ed essendo il numero di bistrati N necessari per riflettere una lunghezza d'onda λ proporzionale a λ^{-2} , per valori fissati di $N \in \Gamma$, il numero degli strati meno spessi deve essere maggiore di quello degli strati più spessi. La formula comunemente usata per l'andamento degli spessori è la legge di potenza proposta da Joensen del *Danish Space Reaserch Institute* di Copenaghen [Joensen 1995]:

$$d_i = \frac{a}{(b+i)^c} \tag{1.32}$$

in cui parametri a, b e c sono da determinare nei limiti a,c > 0 e b > -1. Il parametro a è



Figura 1-22: Schema di un multistrato a spaziatura variabile: il periodo del multistrato decresce andando dall'alto verso il basso e quindi la lunghezza d'onda minore è riflessa dagli strati più profondi.

solitamente determinato dalla massima lunghezza d'onda che si intende riflettere, ed in particolare, dalla legge di Bragg espressa nell' equazione (1.27), si ricava una stima approssimativa:

$$a \approx \frac{\lambda_{MAX}}{2sen\theta}$$
 (1.33)

I parametri *b* e *c* sono ottenuti dalla massimizzazione di una figura di merito (FOM), che ad esempio può essere rappresentata dall'area efficace integrata in una banda il più grande possibile. Questi tipo di problema rientra nella categoria dei problemi di ottimizzazione, nei

quali si individua una FOM, opportunamente definita in uno spazio di parametri ed il cui valore dà una stima della qualità del risultato ottenuto per ogni scelta di valori per i parametri. Il numero di bistrati impiegati nei multistrato a spaziatura variabile (N>100) è molto maggiore rispetto a quello dei multistrato a spaziatura costante.

L'utilizzo dei multistrato a spaziatura variabile (o a larga banda) può essere considerato come soluzione per migliorare le prestazioni dei telescopi focalizzanti solo ad energie superiori ai 10 *keV*, dove l'assorbimento per effetto fotoelettrico è meno severo. Come è stato mostrato nel paragrafo precedente, la riflettività al quadrato è proporzionalmente legata all'area efficace di un sistema ottico a doppia riflessione e a titolo di esempio in figura 1-23 è mostrato il confronto tra riflettività e riflettività al quadrato di una superficie a strato singolo e di un multistrato a larga banda.



Figura 1-23: confronto tra la riflettività teorica (curve continue) di uno strato singolo di Iridio (curve rosse) e di un multistrato a spaziatura variabile (curve blu) formato da 250 bistrati in Tungsteno Silicio per un angolo di incidenza piccolissimo di 0.15 gradi. La differenza nella regione sopra i 30 keV è netta. Nel grafico sono anche indicate le riflettività quadrate (curve tratteggiate), quantità proporzionali all'area efficace ottenibile.

Un gran numero di importanti obiettivi astrofisici richiede una elevata area efficace per poter effettuare misurazioni di spettroscopia e di *timing* ad alta sensibilità. La possibilità di riflettere efficientemente i raggi X duri associata con delle precise figure geometriche degli specchi, può fornire inoltre una buona risoluzione angolare, importante per indagini di tipo cosmologico.

1.3.4 Multistrato a spaziatura quasi costante per raggi X soffici

I multistrato possono pure essere utilizzati per aumentare l'area efficace dei telescopi focalizzanti nella banda classica dei raggi X soffici, ovvero nell'intervallo di energie che va da 0.1 keV a 10 keV [Pareschi 2004a]. Per lo scopo non è però possibile utilizzare i multistrato a spaziatura variabile, i quali, essendo formati da un alto numero di bistrati, per energie inferiori a 10 keV risentono di un assorbimento fotoelettrico troppo alto. E' invece possibile utilizzare strutture multistrato a spaziatura costante o quasi costante, in cui si utilizzano solamente pochi bistrati. Questo significa che non è possibile ottenere un guadagno di area efficace distribuito su tutta la banda dei raggi X soffici, ma bensì concentrato in un intervallo di energia più o meno limitato, in regioni spettrali di particolare interesse astrofisica come ad esempio la riga di fluorescenza K_a del Ferro (~ 6.5 keV).

Un guadagno di riflettività, principalmente ristretto all'intervallo tra 0.5 e 5 keV, può essere ottenuto con un singolo bistrato usando il materiale a bassa densità come primo strato della struttura [Catura 1983][Joensen 1995]. La bassa densità del primo strato riduce l'effetto dell'assorbimento fotoelettrico quando lo specchio lavora nel regime di riflettività totale, migliorando l'efficienza di riflessione. Più recentemente è stata proposta una soluzione di questo tipo per aumentare l'area efficace a basse energie della missione XEUS [Pareschi 2004b].

Questa soluzione può essere applicata ai multistrato in una struttura come quella mostrata in figura 1-24 (sinistra), in cui, partendo dal substrato, si ha:

- 1. un multistrato periodico, formato da un numero limitato di bistrati, capace di fornire dei picchi di Bragg stretti e ad alta riflettività nei raggi X soffici;
- 2. uno strato spesso del materiale ad alta densità della coppia di bistrati, il cui ruolo è quello di evitare problemi di trasparenza e di aumentare l'efficienza in riflessione su di un intervallo maggiore di energia;
- 3. uno strato esterno formato da un rivestimento in materiale a bassa densità (ad esempio in Carbonio), per ridurre l'effetto di assorbimento fotoelettrico alle basse energie.

Come esempio, sempre in figura 1-24 (destra) è presentata la riflettività quadrata di un multistrato in Tungsteno/Silicio con una struttura come quella appena descritta, per un angolo di incidenza di 1 grado, confrontata con la riflettività di uno strato singolo in Oro e con la riflettività dello stesso multistrato senza copertura aggiuntiva. Si può notare che la soluzione sopra descritta rappresenta il miglior compromesso per avere una buona risposta nel regime di riflessione totale pur mantenendo una buona efficienza di riflessione. I multistrato per raggi X



Figura 1-24: (sinistra) schema di un multistrato a spessore costante con un rivestimento aggiuntivo costituito da un bistrato in cui il materiale ad alta densità (in blu) è lo stesso del multistrato ma a spessore maggiore ed il materiale a bassa densità è in Carbonio; (destra) riflettività teorica calcolata per un multistrato formato da 30 bistrati in Tungsteno e Silicio a spaziatura costante per raggi x soffici con e senza strati aggiuntivi, confrontata con la riflettività di un singolo strato singolo in Oro.

soffici hanno il vantaggio di lavorare con angoli di incidenza relativamente grandi, perciò, utilizzati come rivestimento di ottiche di tipo Wolter I, comportano un notevole incremento dell'efficienza di riflessione ed una riduzione delle dimensioni della struttura (lunghezza focale e diametro massimo). Rivestendo lo specchio più esterno di un telescopio con un multistrato dotato di una struttura opportuna, è possibile ottenere un miglioramento dell'area efficace del 25% a 1 keV, e del 50% a 4 keV [Pareschi 2004b].

Capitolo 2

Realizzazione di sistemi ottici ad incidenza radente

Per la produzione di un'ottica ad incidenza radente per uso astronomico sono richiesti alcuni passi fondamentali. Per prima cosa deve essere scelto un materiale adatto a costituire il sostegno meccanico (substrato), in termini delle sue proprietà termiche e meccaniche e della sua capacità di essere reso liscio. Secondo, il substrato dello specchio deve essere portato alla forma richiesta, per poi essere usato direttamente o come negativo (*master*) per una replica. Una volta realizzato, il profilo della superficie deve essere misurato per controllare che le deviazioni siano entro le tolleranze richieste. Infine si passa alla deposizione della superficie riflettente ed alla calibrazione dell'ottica. In questo capitolo saranno considerate le varie tecniche tecnologiche sinora adottate per la realizzazione dei telescopi focalizzanti a strato singolo, e le nuove soluzioni tecnologiche proposte per alcuni telescopi di prossima generazione. Inoltre si parlerà del problema della scelta dei materiali adatti a costituire sostegno meccanico e superficie riflettente, di alcuni dei processi con cui si depositano le superfici riflettenti e dell'estensione delle tecniche di realizzazione al caso delle ottiche multistrato. Per la metrologia e la calibrazione delle ottiche, invece, si rimanda ai prossimi capitoli (Cap. 4 - 5).

2.1 La scelta dei materiali

2.1.1 Criteri per i substrati

Diversi criteri possono essere presi in considerazione nel determinare la scelta del materiale adatto a costituire il sostegno meccanico di un'ottica ad incidenza radente, la cui importanza relativa dipende dalle applicazioni dello specchio. In generale, per quel riguarda le proprietà termiche, un materiale ideale dovrebbe avere un basso coefficiente di espansione termica, un'alta conducibilità termica ed una bassa tendenza alle distorsioni nei picchi termici. In applicazioni astronomiche il coefficiente di espansione termica (CTE) è sicuramente il parametro più importante. Si preferiscono materiali con un basso CTE che, una volta lavorati, non subiscano grosse variazioni di forma a causa delle basse temperature cui saranno soggetti in ambiente spaziale. Tuttavia il problema può essere risolto tenendo le ottiche ad una temperatura più alta di quella ambiente tramite un sistema di riscaldamento. In questo caso, però, il materiale dovrà possedere una buona conducibilità termica, come avviene per specchi metallici, per evitare che si creino disomogeneità di temperatura. Un buon accordo tra i parametri di CTE degli specchi con quello del materiale che forma la struttura meccanica di contenimento è un'altra condizione molto importante da rispettare. Per quel che riguarda le proprietà meccaniche, invece, si può dire che l'instabilità meccanica di uno specchio è causata da tensioni esterne o interne, e che quindi è importante usare una tecnica di manifattura che generi la minor tensione interna possibile. Sono adatti i materiali con alta rigidità specifica (nel caso di specchi a geometria aperta) o con alta rigidità diametrica (nel caso di specchi conici).

Nelle tabelle 2-1 e 2-2 sono riportate le proprietà termiche e meccaniche di alcuni materiali spesso utilizzati per la realizzazione delle ottiche ad incidenza radente in ambito astronomico spaziale.

Materiali	Coefficiente espansione termica $\boldsymbol{\alpha}(K^{-1})$	Conducibilità termica k (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Calore specifico C (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	Distorsione di picco <i>ap</i> C/k	
Alluminio	2.5×10^{-5}	237	899	2.5×10^{-1}	
Nichel ¹	1.4×10^{-5}	90	444	6.1×10^{-1}	
CVD ² SiC	2.4×10^{-6}	250	700	0.2×10^{-1}	
Silicio	2.6×10^{-6}	148	710	0.3×10^{-1}	
Zerodur	1.5×10^{-7}	6	820	0.5×10^{-1}	

 Tabella 2-1 Proprietà termiche a temperatura ambiente per alcuni materiali utilizzabili come substrati di ottiche ad incidenza radente per raggi X [Michette 1993][Citterio 2000a][Citterio 2001].

¹ Nichel elettroformato

² Chemical Vapour Deposition

Materiali	Densità \$\mu\$ (kg m ⁻³)	Modulo di Young E (GPa)	Rigidità specifica <i>E/p</i>	Rigidità diametrica E/ p ³	
Alluminio	2700	76	2.81×10^{-2}	3.8	
Nichel	8900	180	2.05×10^{-2}	0.3	
CVD SiC	3210	460	1.45×10^{-1}	14	
Silicio	2330	90	2.86×10^{-2}	7.1	
Zerodur	2550	90	3.53×10^{7}	5.4	

 Tabella 2-2: proprietà meccaniche per alcuni materiali utilizzabili come substrati di ottiche ad incidenza radente per raggi X [Michette 1993][Citterio 2000a][Citterio 2001].

La scelta del materiale di un substrato deve tener conto della possibile instabilità chimica con il materiale della superficie riflettente che si andrà a depositare su di esso, visto che l'ottica dovrà rimanere a lungo in un ambiente che tende a degradarne la qualità. Il materiale inoltre deve avere delle proprietà meccaniche che lo rendano lavorabile in modo da poter ottenere superfici molto lisce, e non deve avere microstrutture che possano evolvere col tempo cambiando la forma della superficie. Un ruolo importante nella scelta del materiale è svolto anche dalla tecnica con cui si intende realizzare le ottiche e dalle specifiche di una missione. In particolare materiali a densità minore permettono di meglio rispettare i limiti di peso, spesso molto piccoli, imposti dalle specifiche delle missioni spaziali.

2.1.2 Criteri per la superficie riflettente

Finora le superfici riflettenti dei telescopi ad incidenza radente sono state costituite da un singolo strato di materiale depositato sul substrato, a parte i primi esperimenti pionieristici su razzo in cui si utilizzò semplicemente l'ottica nuda. In questo caso la scelta è abbastanza semplice, visto che nei raggi X la transizione dalla condizione di riflessione totale ad una condizione di riflettività quasi nulla, avviene più gradualmente per materiali più densi. I metalli pesanti sono in grado di riflettere la radiazione per angoli di incidenza maggiori rispetto agli altri materiali anche se assorbono maggiormente per effetto fotoelettrico. Per cui la scelta è limitata tra i metalli con un basso coefficiente di assorbimento, stabili chimicamente con il materiale del substrato e depositabili medianti le tecniche disponibili. Per quasi tutti i telescopi focalizzanti impiegati fino a questo momento è stato utilizzato come materiale riflettente l'Oro (riflettività in



Figura 2-1: Andamento teorico della riflettività dell'Oro e del Nichel in funzione dell'energia a diversi angoli di incidenza della radiazione.

fig. 2-1), a parte il primo telescopio spaziale Einstein nel quale la superficie riflettente era in Nichel, il telescopio di ASTRO-E¹ in cui alcuni specchi sono stati rivestiti in Platino e il telescopio di AXAF-Chandra nel quale è stato utilizzato l'Iridio.

Tabella 1-3:	r materiali con	cui sono sta	te costruite	le ottiche d	delle p	rincipali	missioni	di Astr	onomia X
--------------	-----------------	--------------	--------------	--------------	---------	-----------	----------	---------	----------

	Einstein	Rosat	ASCA	Beppo- Sax	Chandra	XMM- Newton	ASTRO- E
Anno	1978	1990	1993	1996	1999	1999	2000
Materiale Substrato	vetro	Zerodur	Alluminio	Nichel	Zerodur	Nichel	Alluminio
Materiale Riflettente	Nichel	Oro	Oro	Oro	Iridio	Oro	Oro / Platino

¹ Il satellite ASTRO-E è stato lanciato il 10 Febbraio del 2000 ma non ha mai raggiunto l'orbita per un malfunzionamento del vettore M-5.

I criteri per la scelta delle coppie di materiali adatti alla realizzazione di film riflettenti multistrato, devono invece tenere conto di un numero maggiore di fattori, ma possono essere riassunti nei seguente tre punti [Spiller 1981]:

- 1. Il materiale spaziatore deve avere un basso coefficiente di assorbimento fotoelettrico alle lunghezze d'onda di interesse. Quindi deve avere un basso numero atomico Z.
- 2. Il secondo materiale deve avere un'alta riflettività all'interfaccia con il primo materiale, perciò il materiale deve essere ad uno Z medio-alto. Se più materiali corrispondono alle esigenze si preferisce quello con il più basso coefficiente di assorbimento fotoelettrico.
- 3. Ci si deve assicurare che le interfacce dei materiali possano essere rese sufficientemente lisce, prive il più possibile di diffusione e chimicamente stabili.

Dal momento che i multistrato per applicazioni astronomiche devono essere a larga banda e possedere alta riflettività, devono essere costituiti da un alto numero di bistrati (>100). Dato che con le attuali tecniche di deposizione la qualità delle interfacce peggiora con l'aumentare degli strati depositati, per ridurne il più possibile il numero, i materiali che compongono il multistrato devono possedere un elevato contrasto di densità ed essere il meno assorbenti possibile. Inoltre, per minimizzare gli effetti di tensione alle interfacce del multistrato, i materiali devono possedere dei CTE il più simile possibile e per ridurre le deformazioni ottiche i moduli di Young dei materiali devono essere sufficientemente elevati.

Materiali	Densità $\boldsymbol{\rho}$ (g cm ⁻³)	CTE a 25° $(10^6 \times K^{-1})$	Modulo di Young E (GPa)	Coppie Possibili
С	1.8 - 2.6	7.1	6.5 – 9	Ni – Pt
Si	2.33	2.6	47 – 131	Mo – W
Ni	8.90	14.0	180	С
Pt	21.45	8.8	168	С
W	19.30	4.5	411	Si
Mo	10.20	4.8	329	Si

Tabella 2-4: confronto delle proprietà di alcun	ni materiali usati per produrre rivestimenti multi.	strato.
-------------------------------------------------	-----------------------------------------------------	---------

Il Carbonio è l'elemento spaziatore che più di ogni altro minimizza l'estinzione dei fotoni per

effetto fotoelettrico e per di più si forma in strati lisci e genera interfacce stabili con molti metalli pesanti. Tuttavia per lunghezze d'onda giusto sotto la propria K_{α} (~0.3 keV) è troppo assorbente ed in questi casi è preferibile utilizzare il Silicio. Come secondo materiale il Molibdeno pur essendo poco assorbente è utilizzabile in coppia con il Silicio solo fino ad energie inferiori alla propria K_{α} (~17 keV). Il Nichel sarebbe ottimo per la riflessione dei raggi X duri, se non fosse che la bassa densità obbliga ad usare molti bistrati. La combinazione Platino/Carbonio, è quella che offre la maggior riflettività nei raggi X duri con il minor numero di bi-strati, grazie all'elevato contrasto di densità. Questi due elementi hanno un coefficiente di espansione termica molto simile, e perciò le tensioni termiche che sono presenti solitamente in strutture stratificate, sono ridotte di molto. La coppia Platino/Carbonio, inoltre, ha un'ottima stabilità chimica ed è indicata per creare interfacce stabili e non diffuse. Lo spigolo di assorbimento K del Platino a 78.4 keV, permette una buona riflettività sia nei raggi X soffici sia



Figura 2-2: coefficiente di assorbimento (nm⁻¹) del Platino e del Carbonio amorfo nei raggi X.

nei raggi X duri (sino a 100 keV) e quindi consente di osservare importanti emissioni, come, ad esempio, la riga ⁴⁴Ti a 68 keV nei resti di Supernova. La coppia Tungsteno/Silicio come binomio riflettore/spaziatore, offre nei raggi X una buona combinazione di proprietà ottiche e di proprietà di deposizione. Il Tungsteno possiede lo spigolo K di assorbimento all'energia di 69.5 keV, un'alta densità di 19.2 g/cm^3 . Una tale densità, determina un elevato contrasto ottico con un materiale spaziatore come il Silicio [Baranov 2002].

2.2 Tecniche di realizzazione

In questo paragrafo saranno descritte le tecniche sinora utilizzate per produrre i telescopi a singolo strato riflettente per raggi X soffici. In particolare, saranno forniti più dettagli riguardo

Tabella 2-5: valori relativi al design ottico dei telescopi delle principali missioni di astronomia X ordinate a seconda della tecnica utilizzata per costruire gli specchi.

	Einstein	Rosat	Chandra	Beppo- Sax	XMM- Newton	ASCA	ASTRO- E
Tecnica Costruttiva	Lavor. Ottica Diretta	Lavor. Ottica Diretta	Lavor. Ottica Diretta	Replica (Elettro Formatura)	Replica (Elettro Formatura)	Segmenti Sottili Assemblati	Segmenti Sottili Assemblati
Sistema Ottico	Wolter- Schwarz.	Wolter I	Wolter I	Doppio Cono	Wolter I	Doppio Cono	Doppio Cono
Moduli	1	1	1	4	3	4	4
Specchi per Modulo	4	4	4	30	58	120	175
Spessori (mm)	~ 20	16 - 25	~ 35	0.2 - 0.4	0.47 - 1.1	0.125	0.155
Area Geometrica Modulo	350 cm^2	1100 cm^2	1100 cm^2	123 cm ²	2000 cm^2	410 cm^2	580 cm^2
Risoluzione (HEW)	4"	3"	0.5"	60"	15"	200"	100"
Lunghezza Focale	3.45 m	2.4 m	10 m	1.8 m	7.5 m	3.5 m	4.75 m
Diametro Apertura	58 cm	83.5 cm	120 cm	16.2 cm	70 cm	35 cm	40 cm
Angoli di inciden <u>z</u> a	40 ' - 70 '	65' - 147'	27' - 52'	14' - 37'	17' - 40'	29' - 43'	18' - 36'
Energia massima	4.5 keV	2.5 keV	10 keV	10 keV	15 keV	10 keV	15 keV

alla tecnica di replica che ha dato degli ottimi risultati nella realizzazione di specchi ad alto *throughput* (alta area efficace ed alto fattore di riempimento) e buona risoluzione angolare nella banda dei raggi X soffici e che può essere estesa al caso dei riflettori multistrato per raggi X duri. In tabella 2-5 sono riassunte le principali missioni di per astronomia dei raggi X soffici ordinate in base alla tecnica con cui sono state realizzate le loro ottiche focalizzanti: si può notare come i valori di risoluzione angolare e di area efficace varino in modo consistente a seconda della tecnica utilizzata.

Le applicazioni spaziali espongono le ottiche a molte sollecitazioni che possono compromettere le prestazioni del telescopio, ed inoltre impongono dei limiti di peso molto severi. Alcune missioni proposte per il futuro, come XEUS, sono critiche sotto questo punto di vista, e la scelta e lo studio della tecnica di realizzazione ottimale costituiscono un punto cruciale per la loro fattibilità. Fino a questo momento sono state utilizzate principalmente tre tecniche per la realizzazione di ottiche astronomiche per raggi X, le quali hanno permesso di effettuare indagini scientifiche diverse tra loro.

2.2.1 Ottiche prodotte tramite lavorazioni ottiche dirette

Con questo tipo di tecnica sono state realizzate le ottiche dei primi satelliti spaziali per Astronomia X (Einstein, ROSAT). Le ottiche ottenute con questo tipo di lavorazione sono caratterizzate da profili geometrici molto precisi, in grado di garantire ottime risoluzioni angolari. Gli specchi sono realizzati lavorando direttamente il materiale che costituirà il substrato dell'ottica (solitamente quarzo o Zerodur, cioè materiali ad alta rigidità e basso CTE), ma le due superfici coniche sono realizzate separatamente. Il giusto profilo (figuring) è dato per mezzo di macchine fresatrici di precisione e la rifinitura è realizzata tramite lappatura con polveri abrasive. Per sostenere questo tipo di lavorazione meccanica, gli spessori del materiale devono essere di 2-3 centimetri, ed è allora possibile "nidificare" tra loro solo pochi specchi confocali. In questo modo l'area efficace ottenibile è piuttosto limitata, a meno di usare grandi lunghezze focali ($\geq 10m$) per aumentare il diametro di apertura. Il miglior risultato con questa tecnica è stato ottenuto con le ottiche a geometria Wolter I di Chandra, l'osservatorio spaziale in raggi X della NASA tuttora operativo [Weisskopf 2000], rivestite con un monostrato di Iridio. La risoluzione angolare delle ottiche di Chandra in termini di HEW è di 0.5 secondi d'arco. L'utilizzo di ottiche di questo tipo è soprattutto finalizzato all'osservazione di sorgenti X estese (galassie vicine, ammassi di galassie, resti di supernova) o ad indagini cosmologiche (risoluzione tramite lunghe osservazioni del fondo X cosmico a bassa energia), per le quali sono richieste ottime prestazioni in termini di risoluzione angolare.



Figura 2-3: (sinistra) immagine in sezione del modulo ottico di ROSAT formato da quattro ottiche a geometria Wolter I confocali; (destra) specchi monolitici di Chandra durante una fase dell'integrazione del modulo.

2.2.2 Ottiche prodotte mediante la tecnica dei "fogli sottili"

Questo metodo si basa sulla realizzazione di una serie di piccoli segmenti di specchio (in approssimazione a doppio cono della geometria Wolter I) formati da lamine sottili di materiale leggero (fino ad ora è stato utilizzato l'Alluminio). I segmenti sono opportunamente incurvati tramite calandratura, rivestiti con il materiale riflettente ed assemblati a simmetria cilindrica per formare l'ottica completa. Con questa tecnica è stato sinora possibile realizzare solamente delle ottiche a doppio cono, cercando di approssimare il più possibile la geometria Wolter I tramite l'uso di un rapporto *f/number* (§ 1.2.3) molto grande. Con un sistema a doppio cono, teoricamente è possibile ottenere una risoluzione angolare in termini di *Half Energy Widtht* data da:

$$HEW \approx \frac{Lr}{F^2}$$
(2.1)

dove L è la lunghezza dello specchio primario, r il raggio alla giunzione degli specchi ed F la focale misurata a partire dalla giunzione degli specchi. Si dovrà perciò utilizzare uno specchio primario con lunghezza molto piccola e ed un rapporto r/F piccolo quanto basta. Grazie allo

spessore (100 - 400 micron) ed al peso ridotto degli specchi, con questa tecnica è possibile integrare in un unico modulo un elevato numero di ottiche (tra 100 e 200) Tuttavia la miglior risoluzione angolare ottenuta sinora è stata di alcuni minuti d'arco (HEW) a causa della difficoltà a dare il giusto profilo all'Alluminio, a causa delle deformazioni meccaniche di strutture a simmetria così sottili e/o alle tecniche poco precise utilizzate per l'assemblaggio.



Figura 2-4: (sinistra) immagine di uno dei quattro moduli realizzati per la missione ASTRO-E composto da 175 specchi in alluminio rivestiti in Oro; (destra) immagine di uno dei quadranti di cui è composta l'ottica.

Esempi di missioni per Astronomia X per le quali sono stati realizzati dei telescopi ad incidenza radente utilizzando questa tecnica sono ASCA (1993), SODART (1998) e ASTRO-E (2000). Queste ottiche sono state impiegate fondamentalmente in applicazioni di spettroscopia, polarimetria e *timing* in raggi X, per le quali l'area efficace è un parametro prioritario rispetto alla qualità dell'immagine. In figura 2-4 è mostrata un modulo ottico del satellite ASTRO-E formato da 175 specchi confocali.

Da alcuni anni è stato proposto un metodo alternativo per migliorare le prestazioni in risoluzione angolare basato sull'utilizzo di fogli sottili in plastica [Schnopper 1999] e recentemente è stato pubblicato un lavoro dell' *Harvard Smithsonian Center for Astrophysics* dell'Università di Boston sullo stato dell'arte di ottiche in plastica PET con deposito in Tungsteno, a cui ho collaborato personalmente tramite l'Osservatorio Astronomico di Brera [Schnopper 2004]. A differenza dell'Alluminio la plastica PET è sufficientemente elastica per poter essere curvata in un unico foglio sottile monolitico, e permette di evitare l'approccio a segmenti. I fogli di plastica sono fatti aderire sulla superficie interna di un mandrino di



Figura 2-5: (sinistra) ottica monolitica in plastica con deposito in Tungsteno tenuta aderente ad un mandrino esercitando una leggera depressione sulla superficie di contatto; (destra) un modulo ottico di 175 mm di diametro costituita da 20 ottiche in PET rivestite con un monostrato di Tungsteno.

formatura (non superpulito) applicando una leggera depressione sulla superficie di contatto, sono portati ad una temperatura di 80° C per rilasciare le tensioni introdotte dalla curvatura e i due lembi adiacenti del foglio sono infine uniti con una saldatura termica (figura 2-5). Sono state prodotte delle ottiche cilindriche la con superfici di qualità superiore a quella ottenuta sinora con i segmenti in Alluminio, ma le deviazioni rispetto ad un cilindro perfetto arrivano fino a \pm 10 micrometri (tipiche \pm 5 micron), con corrispondenti risoluzioni angolari, misurate tramite calibrazione ad illuminazione completa, di alcuni minuti d'arco (HEW).

2.2.3 Ottiche realizzate con processi di replica

Tramite Nichel elettroformato

La tecnica di replica che è stata maggiormente impiegata nella realizzazione di ottiche ad incidenza radente per raggi X soffici è la tecnica che fa uso del processo di elettroformatura in Nichel. La tecnica di replica mediante Nichel è stata sviluppata prima all'istituto IFCTR di Milano, ed in seguito presso l'Osservatorio Astronomico di Brera, per la realizzazione delle ottiche focalizzanti con superficie a strato singolo in Oro del satellite italiano BeppoSAX [Citterio 1988]. All'Osservatorio di Brera, inoltre, con la stessa tecnica è stato portata a termine con successo la realizzazione delle ottiche di JET-X/Swift [Citterio 1996, Burrows 2000] e di

XMM-Newton [Chambure 1999]. Alcune delle ottiche prodotte per queste missioni sono mostrate in figura 2-7.

Il procedimento è illustrato nella figura 2-6 e consiste in diverse fasi. Per prima cosa è necessario realizzare un mandrino in alluminio con un profilo corrispondente al negativo dello specchio da realizzare, rivestirlo con un sottile strato (~100 μ m) di Nichel Kanigen¹ e lavorarlo con tecniche di lappatura per abbassarne la rugosità. Poi, sul mandrino lavorato, si deposita per evaporazione uno strato di Oro (~1000Å), che costituirà la superficie riflettente dell'ottica, e si immerge il tutto in un bagno elettrolitico dove per elettroformatura si deposita uno strato di Nichel da 0.2 a 1 mm, che andrà a costituire il sostegno meccanico dell'ottica. L'ultima fase del processo, consiste nel separare lo specchio dal mandrino per raffreddamento del corpo del mandrino, sfruttando i diversi coefficienti di dilazione termica del Nichel e dell'Alluminio.



Figura 2-6: fasi del processo di replica tramite Nichel elettroformato.

Tale tecnica permette di realizzare delle ottiche a geometria simmetrica rispetto all'asse (Wolter I o approssimazioni a doppio cono) in un'unica struttura, evitando il problema dell'allineamento tra la superficie parabolica e quella iperbolica. Non dovendo subire lavorazioni meccaniche dirette, lo spessore totale dell'ottica può essere contenuto, così da permettere di "nidificare" assieme più specchi e raggiungere elevate aree effettive (come per XMM – fig. 2-8). La simmetria cilindrica conferisce alla struttura una notevole solidità meccanica, permettendo

¹ Nichel contenete circa il 10% di Fosforo. E' un materiale pressoché amorfo, che si presta molto bene alle operazioni di lappatura per ottenere delle superfici superpulite.

profili superficiali precisi e con risoluzioni angolari fino a 10 secondi d'arco (*HEW*). Il mandrino utilizzato per una replica può essere riutilizzato per produrre uno specchio identico da montare su di un ulteriore modulo, con un notevole risparmio di tempo e di risorse. Con questa tecnica la superficie del materiale riflettente che sarà esposta ai raggi X è quella che è stata in contatto diretto con il mandrino superpulito. Questa superficie è solitamente ad un livello di finitura superficiale superiore rispetto all'altra e quindi a maggiore riflettività, perché la deposizione dello strato di materiale tende ad aumentare la rugosità del substrato di partenza. Con riferimento alla tabella 2-5 si può affermare che le migliori combinazioni tra risoluzione angolare ed area efficace nella regione dei raggi X soffici sono state ottenute con questa tecnica.



Figura 2-8: (sinistra) la serie intera degli specchi realizzati con la tecnica della replica mediante Nichel elettroformato per uno dei quattro moduli del satellite BeppoSAX con due dei mandrini utilizzati per la replica; (destra) i 12 specchi di uno dei due moduli del telescopio di JET-X/Swift con lo "spider" utilizzato per l'integrazione delle ottiche.

Lo spessore delle ottiche in Nichel è un parametro fondamentale per le prestazioni di un telescopio e ne determina la risoluzione angolare. Uno spessore dell'ordine di 1 millimetro rende l'ottica meno sensibile alle deformazioni termiche, gravitazionali e vibrazionali, ma allo stesso tempo comporta un elevato peso complessivo. Uno spessore minore permette di contenere il peso complessivo e di annidare assieme un maggior numero di ottiche (la distanza tipica tra le ottiche è di 1 *mm*), con un conseguente guadagno in area efficace, ma limita la risoluzione angolare ottenibile. I telescopi spaziale per raggi X sinora realizzati con la tecnica della replica mediante Nichel elettroformato sono stati progettati tenendo in considerazione entrambe le richieste e cercando il migliore compromesso possibile tra area efficace, risoluzione



Figura 2-9: (sinistra) uno dei tre moduli del satellite XMM-Newton, formato da 58 specchi realizzati per replica tramite Nichel elettroformato; (destra) esempio di modulo meccanico per l'integrazione delle ottiche formato da mirror case, rear spider e Mirror Support Adapter.

angolare e peso complessivo. In vista di una possibile estensione di questa tecnica al caso dei multistrato, è stato recentemente dimostrata dal gruppo tecnologico operante presso l'Osservatorio di Brera, la possibilità di produrre ottiche in geometria Wolter I con diametri molto piccoli (<40 cm) e spessori molto sottili (130 μ m) con una buona risoluzione angolare [Pareschi 2003].

Un importante fase che assicura le prestazioni finali del telescopio è quella dell'integrazione degli specchi. A questo proposito la tecnica di integrazione ha recentemente subito un aggiornamento, per poter permettere anche l'assemblaggio di specchi molto sottili (e quindi a minor rigidità) senza deformarne il profilo. In particolare dopo il processo di rilascio dal mandrino, agli specchi sono applicati due anelli rigidi con ha la funzione di evitare possibili deformazioni, i quali sono rimossi solo ad integrazione ultimata. Il modulo ottico è sorretto da una flangia circolare (*Mirror Support Adapter*) che circonda un tubo in acciaio (*mirror case*), sul quale sono praticati dei fori per renderlo più leggero senza che perda di stabilità meccanica. La parte posteriore del *mirror case* è formata da una struttura a raggi (*rear spider*) su cui andranno fissate le ottiche (fig. 2-9). Il fissaggio delle ottiche è effettuato con dei supporti meccanici in acciaio inossidabile (*spider*), i quali hanno un CTE molto simile a quello del Nichel. L'allineamento è controllato con una sorgente ultravioletta ad illuminazione piena [Conconi 1994] [Citterio 1994].



Figura 2-10: fasi del processo di replica tramite resina epossidica su substrato in carbonato di silicio.

Tramite resina epossidica

Per alcune future missioni di Astronomia X, il limite di peso complessivo è così severo che nega di fatto la possibilità di utilizzare ottiche con substrato in Nichel. Una soluzione alternativa, sempre basata sulla tecnica di replica da mandrino superpulito, è rappresentata dall'utilizzo di supporti in materiale ceramico leggero, come il carburo di silicio (*SiC*) o il Berilio¹.

Il procedimento che porta alla realizzazione di un ottica di questo tipo è basato sul processo di replica tramite resina epossidica (fig. 2-10). Come per il caso del Nichel, si utilizza un mandrino già lavorato, sul quale si evapora lo strato di materiale riflettente, ma a differenza di quanto avviene per il Nichel, il supporto non può essere elettroformato ed è quindi realizzato in maniera indipendente. Il supporto è prodotto con dimensioni leggermente maggiori di quelle del mandrino e perciò tra i due elementi si forma un intercapedine (100 – 150 μ m) che viene riempita con una speciale resina epossidica. La resina epossidica agisce da collante tra il supporto ceramico e la superficie riflettente depositata sul mandrino. Il mandrino, infine, è separato per raffreddamento.

Come è stato detto nel primo paragrafo di questo capitolo, il carburo di silicio è un materiale molto performante poiché possiede un basso CTE, un'alta rigidità diametrica ed una bassa densità. Queste caratteristiche lo rendono particolarmente adatto per applicazioni spaziali: grazie alla bassa densità può essere scelto un valore di spessore delle ottiche sufficiente a

¹ Con la replica su Berilio sono state realizzate le ottiche di EXOSAT [Korte 1981].

garantirne la rigidità meccanica; data l'elevata elasticità le tensioni che sorgono durante la separazione del mandrino non permangono; come tutti i materiali ceramici possiede delle frequenze di risonanza molto maggiori rispetto ai metalli e può perciò ben sopportare le vibrazioni a cui sarà sottoposto durante il lancio. In figura 2-11 sono mostrate le immagini di alcuni prototipi di ottica con supporto in SiC realizzati presso l'Osservatorio Astronomico di Brera [Citterio 1999][Citterio 2000b] con i quali sono state ottenute risoluzioni di 10" HEW.



Figura 2-11: due immagini di un prototipo di ottica realizzato con la tecnica della replica tramite resina epossidica su supporto in carburo di Silicio, prima (sinistra) e dopo il processo di replica (destra).

2.3 Soluzioni tecnologiche in via di sviluppo

In fig. 2-12 sono riportate la risoluzione angolare (in termini di HEW) e l'area efficace (all'energia di 1 *keV*) in funzione dell'anno di realizzazione per le missioni del passato e per alcuni grandi progetti del futuro (Constellation-X, XEUS, Generation X). Come si può osservare finora i due parametri qualità di imaging e area efficace sono sempre stati in antitesi tra loro, condizionati dalle tecniche realizzative e dal tipo di applicazione scientifica. La situazione delle missioni del futuro è invece completamente diverse, perché, si richiede in parallelo un forte miglioramento si in area efficace sia in risoluzione angolare. Infatti, prendendo ad esempio il caso della missione XEUS, l'area efficace sarebbe talmente alta che, senza una buona risoluzione angolare ricadrebbe immediatamente oltre il limite di confusione tra sorgenti deboli.



Figura 2-12: valori di risoluzione angolare e area geometrica per le principali missioni di astronomia X del passato e del futuro. Le principali grandi missioni del futuro richiedono alte capacità in risoluzione oltre che un'elevata area di raccolta.

Le tecnologie esistenti come la lavorazione ottica diretta, la replica per elettroformatura di Nichel o tramite resina epossidica e l'assemblaggio di fogli sottili non sono consistenti con i requisiti di missioni come XEUS e Generation-X, perché porterebbero ad ottiche eccessivamente pesanti e costose, e/o non i grado di produrre l'area efficace e la risoluzione angolare richieste. Per queste missioni, piuttosto che di un'evoluzione delle tecnologie esistenti, occorre ricercare un nuovo tipo di tecnologia che consenta una diminuzione del rapporto *massa/area di raccolta* fornendo allo stesso tempo un'elevata risoluzione angolare. Dalla figura 2-13 si può vedere che per le prossime missioni si richiede un rapporto *massa/area geometrica* simile a quello delle ottiche a fogli sottili, ma con una risoluzione circa 100 volte migliore. Inoltre occorre che, date le elevate dimensioni delle ottiche da realizzare, il processo sia compatibile con una produzione di volume di tipo industriale.

Per risolvere il problema, negli ultimi anni sono state proposte diverse soluzioni tecnologiche basate sull'utilizzo di materiali molto leggeri, alcune delle quali hanno mostrato alcuni buoni risultati preliminari, ma che necessitano ancora di uno sviluppo consistente. In particolare vi è una tecnica basata sullo stampaggio di fogli sottili in vetro borosilicato [Ghigo 2003], e una



Figura 2-13: grafico in cui si può vedere dove si collocano le missioni di Astronomia X del passato e del futuro considerando la risoluzione angolare in termini di HEW in funzione del rapporto massa/area geometrica delle ottiche. Nella zona in alto a destra siamo in una situazione di semplice soluzione tecnologica, mentre in basso a sinistra siamo in una situazione di difficile se non impossibile realizzazione.

tecnica basata su delle ottiche a micropori realizzate assemblando *wafer* in Silicio opportunamente trattati.

2.3.1 Produzione di ottiche basate su segmenti in vetro

Questa tecnica consiste nel realizzare gli specchi tramite un insieme di segmenti rettangolari (1 $m \times 0.5 m$) in vetro dello spessore di circa 1 millimetro curvati termicamente. Il materiale considerato per la realizzazione di questa tecnica è un materiale leggero in vetro borosilicato conosciuto con il nome commerciale di Borofloat. I segmenti rettangolari sono prodotti tramite una colata di borosilicato liquefatto, in un ambiente a pressione controllata, cercando di minimizzare la presenza di bolle ed imperfezioni sulla superficie. La densità del Borofloat è una delle più basse per i vetri basati sul Silicio, ed esso possiede una buona resistenza alle abrasioni ed ai graffi. Il basso coefficiente di dilatazione termica, fa sì che il Borofloat abbia una buona resistenza agli shock termici e la possibilità di impiego a diverse temperature definisce una buona stabilità termica. Le caratteristiche termiche e fisiche di questo prodotto, si adattano ad

applicazioni scientifiche per missioni in ambiente spaziale. Ad esempio per XEUS in cui non è possibile controllare termicamente la superficie degli specchi a causa delle grandi dimensioni, un materiale a basso CTE è essenziale visto che dovrà lavorare a temperature che variano da -30° a -40° C nel giro di poche ore.

La procedura con cui si intende realizzare le ottiche è descritta nella figura 2-14 e può essere riassunta nei seguenti punti:

1. la curvatura dei segmenti è ottenuta mediante un operazione di stampaggio a caldo su di uno stampo (*mold*) con la figura desiderata aderente ad un supporto.



Figura 2-14: procedura di stampaggio a caldo usata per dare la forma desiderata ai segmenti (1), che poi saranno puliti da imperfezioni e tenuti nella forma mediante una depressione esercitata sulla superficie di contatto con il substrato (2), per poi essere integrati a costituire l'ottica (3).

- 2. la superficie è lavorata mediante uno strumento robotico per eliminare le imperfezioni presenti e per correggerne il profilo mentre è tenuta aderente al supporto esercitando una depressione sulla superficie di contatto mediante vuoto.
- 3. i segmenti curvi sono integrati andando a formare i singoli "petali" che assemblati circolarmente costituiranno l'ottica completa.



Figura 2-15: (sinistra) immagine di un segmento singolo già curvato in geometria Wolter I aperta; (destra) immagine dei petali che assemblati circolarmente costituiscono il telescopio.

Per evitare che il segmento subisca delle deformazioni di assestamento una volta rilasciato, esso deve aderire in modo molto preciso alla forma del supporto e tale supporto è rimosso solo ad integrazione avvenuta. Ogni petalo è prodotto e testato singolarmente e inoltre possiede un proprio sistema di allineamento usato per garantirne le prestazioni ottiche. Questo processo richiede che il foglio di Borofloat replichi la forma dello stampo in molto preciso, e pure la tolleranza sui profili degli stampi deve essere molto spinta.

E' stata anche studiata una procedura alternativa in cui non è necessario ottenere una così elevata precisione durante il processo di stampaggio [Ghigo 2003]. Essa consiste nello stampare il segmento con dei stampi meno precisi in profilo per poi interporre tra il segmento ed un supporto forato uno sottile strato di silicone $(100 \div 200 \ \mu m)$. Durante la fase di riempimento con il silicone, il segmento è posizionato su di un supporto astatico che elimina le tensioni contrastando la forza di gravità (fig. 2-16). Il silicone agisce da cuscinetto una volta che si esercita la depressione tramite vuoto ed evita deformazioni del segmento nel momento in cui esso è rilasciato dal supporto. Un limite rispetto alla procedura precedente è il tempo necessario per la fase di levigatura e di *figuring*. Delle prove effettuate con dei segmenti realizzati in questo modo hanno dato dei buoni risultati in termini di deformazioni introdotte dopo l'operazione di integrazione in un petalo simulato[Ghigo 2003].



Figura 2-16: procedimento di stampaggio alternativa basata sull'utilizzo di uno stampo meno preciso in figura: in questo procedimento è essenziale l'uso di un supporto astatico.

2.3.2 Ottiche a micropori in Silicio

Questa tecnica consiste nel realizzare gli specchi tramite un insieme di *wafers* in Silicio monocristallino piegati accuratamente a cono ed assemblati in modo da formare una struttura a



Figura 2-17: piastre in silicio monocristallino prima (sinistra) e dopo (destra) il trattamento chimico.

pori molto leggera e compatta, con pori di dimensioni del millimetro. Il rapporto massa/area geometrica delle ottiche è di soli 200 kg/m^{-2} (mentre per XMM era ~ 2000 kg/m^{-2}). La tecnologia fa uso di wafers in Silicio superpulito di uso commerciale, utilizzati nell'ambito dell'industria dei semiconduttori. I wafers in Silicio di ultima generazione sono considerevolmente economici e possiedono una qualità superficiale sufficiente per poter riflettere i raggi X, una struttura cristallina planare e parallela entro l'ordine del micrometro oltre che buone proprietà meccaniche. Il processo consiste nel prendere delle strisce rettangolari di wafers (fig. 2-17 - sinistra) e trattarle da un lato con un processo meccano-chimico lungo la direzione del piano cristallino, in modo che rimangano delle strisce di materiale di altezza precisa separate di circa un millimetro. Queste piastre a microstrisce (fig. 2-17 - destra) sono messe una sopra l'altra a formare una struttura a pori, e piegate sfruttando la superficie concava di un mandrino cilindrico (fig. 2-18). Innalzando la temperatura della struttura, sulle superfici di contatto tra le



Figura 2-18: pila di piastre a microstrisce piegate sulla curva di un mandrino.

strisce di una piastra e la parte anteriore della piastra precedente, si fanno aderire due superfici adiacenti. Le strisce conferiscono stabilità meccanica alla struttura e la loro altezza precisa, dovuta al pianparallelismo del Silicio, assicura che le piastre vadano a formare superfici accuratamente concentriche. I *wafers* possono essere piegati solo in una direzione, per cui con essi è possibile realizzare solamente delle approssimazioni coniche della geometria Wolter I. Nel caso di missioni come XEUS, in cui la focale è molto più lunga della lunghezza dello specchio, l'effetto di deterioramento dell'imaging causato da questa approssimazione è trascurabile (fig. 2-19).



Figura 2-19: confronto tra una normale ottica a geometria Wolter ed un ottica con struttura a pori. La riduzione della lunghezza degli specchi e l'introduzione di un'elevata lunghezza focale, permettono a due set di pori messi "spalla a spalla" di sostituire le strutture a guscio [Bavdaz 2004].

Dallo stesso gruppo di ricercatori dell'ESA che ha proposto questa nuova soluzione tecnologica nell'ambito della missione XEUS, è stato testato nei raggi X un prototipo di ottica a micropori. Tale prototipo, misurato in illuminazione piena, ha fornito indicazioni di una risoluzione di circa 20 secondi d'arco[Beijersbergen 2004].

2.4 Processi di deposizione per l'applicazione di film

La capacità di depositare la superficie riflettente con la precisione richiesta, riveste un ruolo di fondamentale importanza nella realizzazione di un'ottica ad incidenza radente per astronomia dei raggi X duri. Sinora i telescopi focalizzanti per astronomia X sono stati utilizzati con rivestimenti monostrato relativamente spessi (~ 100 nm), dal momento che sono stati progettati per operare esclusivamente in regime di riflessione totale (§ 1.1.2). Per sfruttare in pieno le potenzialità interferenziali delle strutture a multistrato, invece, è necessario riuscire a depositare strati alternati di materiali diversi con spessori fino all'ordine delle decine di Angström, con

rugosità di poco peggiori rispetto a quelle del substrato sottostante. La tecnologia dei multistrato implica perciò da un lato la necessità di un controllo dei vari parametri di processo molto accurato sfruttando una tecnologia molto spinta e dall'altro un potenziamento delle capacità di modellazione dei rivestimenti.

In questo paragrafo, senza pretese di esaustività, saranno descritti alcuni dei processi con cui vari gruppi al mondo stanno cercando di sviluppare al meglio la tecnologia dei multistrato. In particolare saranno considerate la tecnica del *Magnetron Sputtering* e la tecnica dell'*e-beam Evaporation*. Nell'ambito di questo lavoro di tesi sono stati caratterizzati campioni multistrato realizzati con queste due diverse tecniche di deposizione. La maggiore parte dell'attività, comunque, è stata svolta su prototipi multistrato depositati con una *facility* che fa uso del processo di evaporazione tramite cannone elettronico.

2.4.1 Deposizione tramite Magnetron Sputtering



Figura 2-20: (sinistra) rappresentazione della sorgente di deposizione lineare utilizzata per accrescere il multistrato sulla superficie interna di uno specchio che funge da substrato; (destra) immagine della camera di deposizione per Magnetron Sputtering appositamente realizzata dallo Smithsonian Astrophysics Observatory (SAO) per il rivestimento di superfici estese.

La deposizione tramite *sputtering* consiste nella deposizione di particelle emesse da un catodo bombardato con atomi di gas rarefatto, con energie di poche decine di elettronvolt, generati in una scarica elettrica. La peculiarità delle deposizioni tramite sputtering consiste nel non richiedere livelli di vuoto estremamente bassi (è sufficiente un vuoto di $\sim 10^{-3}$ mbar) dal

momento che l'energia cinetica delle particelle emesse è molto alta. La miglior sorgente per la deposizione dei multistrato è il *Magnetron Sputtering*, la quale fornisce alti tassi di deposizione senza danneggiare gli strati già depositati, fattore importante per evitare o minimizzare la diffusione tra gli strati. Un alto tasso di deposizione diminuisce poi le richieste di stabilità del sistema. Il *Magnetron* possiede un sistema di magneti, dietro il catodo, per intrappolare gli elettroni secondari che a loro volta intrappolano il plasma che agisce per *sputtering*, aumentandone la densità superficiale. Il confinamento del plasma minimizza le interazioni con la superficie di deposizione, e la maggior densità porta ad un tasso di deposizione maggiore. I multistrato sono depositati usando due sorgenti fisse all'interno di un substrato rotante (fig. 2-20) e gli spessori sono determinati semplicemente dal tempo di deposizione essendone noto il tasso di deposizione.

Nell'ultimo capitolo si parlerà delle prestazioni sinora ottenute con un multistrato in Tungsteno/Silicio depositato con questa tecnica, presso una *facility* appositamente realizzata dall'*Harvard Smithsonian Center for Astrophysics* di Boston, nell'ambito di una progetto finanziato dalla Nasa per la missione Constellation-X svolto in collaborazione con l'Osservatorio Astronomico di Brera.

2.4.2 Deposizione tramite e-Beam Evaporation

Se una sostanza allo stato solido è portata ad una temperatura sufficiente per l'evaporazione, possono essere depositati degli strati del materiale lasciandolo condensare su di un substrato freddo. Il materiale può essere evaporato termicamente, ma il sistema più efficace per i multistrato fa uso di un cannone elettronico. Il principio di funzionamento di una camera ad evaporazione può essere descritto con riferimento alla figura 2-21: i due materiali sono disposti in un crogiolo rotante e sono evaporati uno per volta da un fascio elettronico in una camera a vuoto spinto $(10^{-5} \div 10^{-6} \text{ mbar})$; la deposizione su di un substrato rotante è controllata da una microbilancia al quarzo, che determina l'apertura e la chiusura di uno *shutter* di separazione. Tale metodo di deposizione, applicato alla tecnica di replica tramite Nichel elettroformato, permette di rivestire superfici estese come quelle dei mandrini da utilizzare come matrici per la replica. Presso la ditta Media Lario, un'industria che da tempo lavora in collaborazione con l'Osservatorio Astronomico di Brera, è installata una camera già adattata ad ospitare mandrini a simmetria cilindrica con profilo Wolter I, da porre in rotazione durante l'evaporazione (fig. 2-21). Con la tecnica della replica associata alla deposizione per evaporazione a cannone



Figura 2-21: immagine di una delle due camere BALZER per evaporazione a vuoto installate presso la ditta MEDIA LARIO, con all'interno un mandrino di XMM al completamento del processo di doratura.

elettronico, presso. Media Lario sono stati realizzati gli specchi a singolo strato di XMM-Newton, ed in questo periodo il sistema è stato ottimizzato per la deposizione dei multistrato [Spiga 2004a]. Recentemente, nel contesto di un progetto finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana, con questo metodo è stata realizzata la prima ottica multistrato prodotta interamente per replica. Nello schizzo di figura 2-22 è indicato anche un sistema aggiuntivo denominato *LIS (Linear Ion Assistance)*, già disponibile presso Media Lario ed utilizzabile per favorire l'adesione degli atomi di materiale evaporato durante la deposizione e diminuire così la rugosità delle interfacce. Il principio di questo procedimento consiste nel trasferire quantità di moto dagli ioni agli atomi di materiale evaporato, per aumentarne l'energia cinetica al momento dell'impatto con il bersaglio. Al momento si sta cercando la soluzione geometrica ed energetica migliore per ottimizzare il processo di deposizione [Spiga 2004b].



Figura 2-22: schema di funzionamento della sorgente a cannone elettronico per l'evaporazione e la deposizione dei materiali di un multistrato

2.5 Realizzazione di ottiche multistrato

Le tecnologie che potrebbero essere utilizzate per costruire le ottiche focalizzanti a multistrato delle future missioni di astronomia per raggi X duri, sono oggetto di studio da parte di vari gruppi di ricercatori in tutto il mondo. Alcune di queste tecniche sono derivate dai metodi già utilizzati per realizzare le ottiche a monostrato riflettente (la tecnologia basata sull'utilizzo di fogli sottili e la tecnologia basata sulla replica), altre invece sono basate sulle nuove tecnologie in via di sviluppo (lo stampaggio dei segmenti in vetro borosilicato e le strutture a micropori in Silicio). Tra tutte queste tecniche, così come avveniva per le ottiche a strato singolo, solo con la tecnica della replica da Nichel elettroformato è possibile pensare ad un approccio che eviti di depositare la superficie riflettente in seguito alla produzione del substrato. Nel caso delle ottiche multistrato, dunque, con la tecnica di replica tramite Nichel elettroformato sono disponibili due approcci, ed entrambi sono attualmente investigati dall'Osservatorio Astronomico di Brera:

 il primo è portato avanti assieme all'*Harvard Smithsonian Center for Astrophysics (CfA)* di Boston ed è impiegato nell'ambito della missione Constellation-X: questo metodo prevede la realizzazione di ottiche a monostrato in Oro, con la tecnica della replica mediante Nichel elettroformato già sviluppata e realizzabile presso la ditta Media Lario, ed una successiva deposizione del multistrato mediante una sorgente lineare di Magnetron Sputtering installata in una facility realizzata ad hoc dal CfA.

2. il secondo metodo è svolto in collaborazione con la ditta Media Lario e prevede una replica integrale dell'ottica multistrato, depositando il multistrato direttamente su di un mandrino superpulito e successivamente procedendo alla replica in modo simile al caso delle superfici a monostrato. La tecnica di deposizione impiegata in questo caso è l'evaporazione con fascio elettronico utilizzando la *facility* installata presso la ditta Media Lario.

Entrambi gli approcci indicati sono interessanti poiché, in aggiunta a buone prestazioni, in caso di telescopi multimodulari comportano una riduzione di costi e di tempi, potendo realizzare più elementi a partire da uno stesso mandrino. Un ruolo cruciale è svolto dalla qualità morfologica dei mandrini, che deve essere migliore di quella ottenuta per le ottiche a monostrato nei raggi X soffici. Un metodo di superpulitura è stato sviluppato all'Osservatorio Astronomico di Brera per questo scopo specifico: le macchine lappatrici della Zeiss sviluppate per il progetto XMM [Gondoin 1995], sono attualmente installate presso l'Osservatorio e sono utilizzate per queste applicazioni. Il miglioramento in termini di rugosità RMS (Cap. 4) rispetto ai mandrini realizzati

MISURA	σ^{1}_{RMS} SAX	$\sigma_{\rm RMS}$ Zeiss
WYKO 5820 μm	N.D.	10.1 Å
WYKO 660 μm	7.6 Å	3.0 Å
AFM 10 μm	6.2 Å	2.4 Å
AFM 1 μm	3.4 Å	1.8 Å

Figura 2-23: una delle macchine lappatrici della Zeiss installate presso l'Osservatorio Astronomico di Brera mentre lavora su di un mandrino. In destra si possono vedere i miglioramenti ottenuti in rugosità rispetto ad uno dei mandrini utilizzati per il progetto BeppoSAX.

¹ Rugosità RMS, quantità che esprime l'errore sul profilo di una superficie. Per la definizione si rimanda al Cap. 4.

dall'Osservatorio Astronomico di Brera per i telescopi focalizzanti di BeppoSAX è di circa un fattore 2 (fig. 2-23).

In quel che segue, comunque, sarà descritta in dettaglio la seconda delle tecniche sopra indicate che, ha interessato più da vicino l'autore di questo lavoro di tesi.

2.5.1 Realizzazione tramite replica diretta

La tecnica della replica diretta, per l'astrofisica delle alte energia, presenta diversi vantaggi rispetto a quello di un rivestimento di uno specchio a posteriori:

- stante che la sorgente di evaporazione non deve essere inserita nello specchio, non ci sono limiti sul diametro minimo dello specchio;
- tecniche di deposizione ad alta prestazione possono essere impiegate per ottenere rivestimenti densi e a bassa rugosità;
- grazie alla rilevante massa termica del mandrino, il problema di surriscaldamento dei substrati viene eliminato, riducendo quindi in generale le tensioni interne nella struttura multistrato;
- la struttura chiusa dello specchio consente di ottenere prestazioni migliori in termini di risoluzione angolare e quindi maggiore sensibilità rispetto ad altri approcci basati su specchi segmentati da assemblare;



Figura 2-24: fasi del processo di replica tramite elettroformatura di Nichel di un ottica multistrato

- la scelta per il profilo dell'ottica è libero;
- il processo comporta un numero limitato di passaggi.

In sostanza, il processo parte con la realizzazione di un mandrino superpulito in Alluminio con un rivestimento esterno (di spessore circa 100 µm) di Nichel *Kanigen*. La forma del mandrino è il negativo di profilo (Wolter I o approssimazione a doppio cono) dello specchio da replicare. Sfruttando la tecnica dell'*e-Beam Evaporation*, sul mandrino viene depositato un rivestimento multistrato composto da strati alternati di due materiali (un assorbitore e uno spaziatore). Il mandrino poi è montato con l'asse di simmetria perpendicolare al cono di evaporazione della *facility* di deposizione, ed è fatto ruotare attorno al proprio asse durante il processo di deposizione. Il mandrino è quindi inserito in un bagno galvanico, nel quale uno strato di Nichel viene deposto sul rivestimento multistrato. A questo punto lo specchio con il rivestimento multistrato è separato dal mandrino raffreddandolo in modo uniforme e sfruttando il fatto che il CTE dell'alluminio, cioè del materiale di *bulk* della matrice è circa il doppio di quello della parete di Nichel elettroformato. Questo crea una separazione sufficiente a consentire il distacco dei due oggetti. Nella figura 2-24 sono riassunte le fasi del processo di replica tramite elettroformatura, nella figura 2-25, invece sono mostrate un'immagine di un mandrino su cui è stata applicato il Nichel tramute elettroformatura (sinistra) e un'immagine della fase di rilascio.



Figura 2-25: (sinistra) mandrino (su cui è già stata depositata la copertura multistrato) ricoperto da uno strato di Nichel elettroformato; (destra) una fase del processo di separazione dello specchio dal mandrino in cui si sfruttano i differenti CTE dei materiali.

Capitolo 3

Proprietà fondamentali dei telescopi e future missioni spaziali per raggi x duri

3.1 Sensibilità e risoluzione angolare

Telescopi per raggi X con una grande area di raccolta capaci di migliorare in sensibilità e risoluzione angolare le misurazioni temporali e spettroscopiche rispetto agli osservatori X volati sinora, risultano indispensabili per molteplici problemi di rilevanza astrofisica. Il miglioramento della sensibilità in flusso e della risoluzione angolare nella banda dei raggi X è uno degli obiettivi dell'astronomia spaziale del futuro. Il minimo flusso rivelabile da un telescopio per raggi X è limitato dalla presenza nel rivelatore di un flusso di fondo, spesso più alto di quello delle sorgenti deboli da rivelare. D'altra parte, una buona risoluzione angolare, determina pure un miglioramento del rapporto segnale rumore, ed è necessaria per evitare problemi di confusione tra sorgenti deboli presenti nello stesso campo di vista¹. Per poter utilizzare efficientemente degli strumenti con una larga area di raccolta, perciò, abbiamo bisogno di tecniche focalizzanti capaci di fornire un'elevata risoluzione angolare. Con riferimento alle proprietà di riflessione dei raggi X, va ricordato che una grande area efficace non può essere ottenuta tramite un singolo specchio, ma risulta necessario l'utilizzo di più specchi "annidati" confocali ed allineati tra loro e, eventualmente, di più moduli ottici.

Sia per un telescopio collimato sia per un telescopio focalizzante, il flusso di una sorgente astronomica è misurato sottraendo al numero di conteggi totali registrati dal rivelatore i conteggi

 $^{^{1}}$ La distribuzione log(N) – log(S) è tale per cui al diminuire del minimo flusso rivelabile aumenta il numero di sorgenti osservate.

dovuti al rumore di fondo, con la differenza che con il collimato si è costretti a registrare il fondo in una zona di cielo lontana dalla sorgente.

1. Nei rivelatori a vista diretta (che possiedono capacità di *imaging* limitate in risoluzione angolare ad alcuni minuti d'arco), semplicemente collimati o dotati di maschere codificate (fig. 3-1), il segnale è rivelato su un'area sensibile molto grande e le fluttuazioni statistiche dei fotoni del fondo sono molto alte, limitando così la sensibilità in flusso.



Figura 3-1: esempi di disegno ottico per rivelatori a maschera codificata

2. I telescopi focalizzanti permettono di concentrare in una piccola porzione di rivelatore i fotoni provenienti da una sorgente celeste e quindi di ridurre vantaggiosamente le fluttuazioni statistiche del fondo misurabile (fig. 3-2).



Figura 3-2: azione concentrante di un telescopio focalizzante ad incidenza radente.


I conteggi dovuti al fondo, infatti, sono affetti da fluttuazioni statistiche di tipo Poissoniano, le quali in pratica determinano la **sensibilità** di un telescopio.

Figura 3-3: Confronto della sensibilità con una confidenza di 3σ delle missioni spaziali del passato, del presente e del futuro in funzione dell'energia di osservazione.

In figura 3-3 è mostrato un confronto tra la sensibilità delle missioni spaziali del passato e quella prevista per la missione per raggi X duri ad ottiche focalizzanti Constellation-X. Il tempo di integrazione considerato è di 10⁵ sec e la banda energetica di integrazione è il 50% dell'energia: le sensibilità migliori finora raggiunte sono quelle dei telescopi focalizzanti nella regione dei raggi X soffici e per le missioni future, ospitanti un telescopio focalizzante per raggi X duri, si prevede di poter distinguere sorgenti con flusso dell'ordine del microCrab¹.

Di seguito sono riportate le espressioni fondamentali che legano la sensibilità di un telescopio ai propri parametri fisici, ed è il caso di sottolineare che tali considerazioni possiedono natura del tutto generale, indipendente dalle specifiche tecniche di realizzazione di un telescopio. L'unica distinzione da fare è quella tra telescopi focalizzanti e non:

• Un telescopio a vista diretta semplicemente collimato avente area di apertura A_d ed efficienza di rivelazione ε per una banda energetica di integrazione ΔE è caratterizzato da un rapporto segnale/rumore dato dalla seguente espressione [Peterson 1975]:

¹ Per la Crab Nebulare si assume lo spettro $F(E) = 10 \times E^{-2.05}$ ph cm⁻² s⁻¹ keV⁻¹

$$S = \frac{\varepsilon F A_d T_{\rm int} \Delta E}{\sqrt{2BA_d T_{\rm int} \Delta E}}$$
(3.1)

dove F è il flusso di una sorgente celeste, T_{int} è il tempo di osservazione, e B è il flusso di fondo registrato dal rivelatore. S rappresenta l'intervallo di confidenza, in altre parole il numero di sigma assunto come livello di confidenza per la misura in questione. Allora il flusso minimo rivelabile F_{in} sarà dato da:

$$F_{\min} = \frac{S}{\varepsilon} \sqrt{\frac{2B}{A_d T_{\rm int} \Delta E}}$$
(3.2)

Da questa relazione risulta che, dato un telescopio focalizzante con area di apertura A_{ϕ} per migliorare la sensibilità di un di un ordine di grandezza, si dovrebbe aumentare l'area di un fattore 100.

 Un telescopio focalizzante, invece, è caratterizzato dalla porzione di area in cui si riesce a focalizzare i fotoni A_d, e dall'area efficace A_{df} che dipende dall'efficienza di riflessione del telescopio [Ricker 1983]:

$$S = \frac{n \varepsilon \eta F A_{eff} T_{int} \Delta E}{\sqrt{n B A_d T_{int} \Delta E}}$$
(3.3)

dove η è la frazione di fotoni focalizzati che cade efficacemente nell'area dello spot focale A_d e *n* è il numero di moduli di cui il telescopio è costituito. Per tali telescopi il flusso minimo rivelabile F_{min} sarà dato da:

$$F_{\min} = \frac{S}{\varepsilon \eta A_{eff}} \sqrt{\frac{BA_d}{nT_{\text{int}}\Delta E}}$$
(3.4)

e perciò per essi la sensibilità dipende linearmente dall'area efficace del telescopio. E' utile definire anche una quantità per descrivere le capacità tecniche di un telescopio:

$$G = \frac{\varepsilon \eta A_{eff}}{\sqrt{A_d}}$$
(3.5)

Questa quantità è chiamata **guadagno** ed ovviamente dipende dalla tecnologia e dalle prestazioni della strumentazione che si intende impiegare. Da queste relazioni e visto il

ruolo svolto dalle dimensioni dell'area dello spot focale A_{ϕ} si capisce come la sensibilità di un telescopio sia legata fortemente non solo all'area efficace, ma anche alla **risoluzione** angolare.

Avere una buona risoluzione angolare, infatti, significa essere in grado di limitare spazialmente la distribuzione dei fotoni provenienti da un oggetto puntiforme posto a distanza infinita [Harvey 1991]. Tale distribuzione bidimensionale è descritta da una funzione chiamata *Point Spread Function*¹(PSF), che nel caso monodimensionale prende il nome di *Line Spread Function* (LSF). Per descrivere la risoluzione angolare è anche usata la *Modulation Transfer Function* (MTF) che consiste nella trasformata di Fourier della *PSF*. Un'altra funzione utile è la *Encircled Energy* (EE), la quale descrive la frazione dei fotoni focalizzati in funzione della distanza radiale dall'asse ottico. Generalmente, nel caso di sorgenti deboli come le sorgenti X, la *PSF* non presenta un andamento Gaussiano ma piuttosto caratterizzato da ali pronunciate, quindi risulta più significativo un parametro come il diametro angolare in cui cade metà dei fotoni focalizzati, chiamato *Half Power Diamater* (HPD) o *Half Energy Width* (HEW), piuttosto della larghezza angolare a metà altezza della LSF (*Full Width Half Maximum* - FWHM) [Aschenbach 1985].



Figura 3-4: immagini della Crab Nebula nei raggi X soffici relative alle missioni spaziali Rosat (HEW ~ 3'') e Chandra (HEW ~ 0.5''). L'incremento ottenuto nella risoluzione angolare ha permesso di distinguere maggiormente i dettagli di questa e di altre sorgenti estese.

Per stabilire i valori di risoluzione angolare e di sensibilità per una missione spaziale che abbia come obiettivo la risoluzione delle sorgenti X discrete sopra i 10 keV, è necessaria a priori una

¹ La *PSF*, come le altre funzioni citate, è dipendente dalla lunghezza d'onda tramite lo scattering superficiale.

predizione sulla distribuzione Log(N) – Log(S). Una volta stabilita la densità di sorgenti attesa per un certo flusso, si deve applicare un criterio per determinare la confusione tra le sorgenti, calcolando la probabilità di avere due sorgenti più vicine delle dimensioni della *FWHM*, tenendo quest'ultima come variabile. In figura 3-5 sono riportate tre immagini simulate per il telescopio XEUS, realizzate seguendo il procedimento descritto, per tre diverse risoluzioni angolari. Come si vede, per lo stesso campo di cielo, con il peggioramento della risoluzione angolare molte sorgenti diventano confuse ed il fondo del telescopio aumenta.



Figura 3-5: immagini simulate per il telescopio XEUS assumendo tre diverse risoluzioni angolari, rispettivamente 2, 5 e 15 arcsec in termini di HEW. Ciascun campo ha un'ampiezza angolare di 5 arcmin x 5 arcmin mentre la superficie più intensa del campo corrisponde ad un flusso di $2x10^{-14}$ erg cm⁻² s⁻¹.

3.2 Design di un telescopio per Astronomia X

Le principali proprietà di un telescopio ad incidenza radente sono descritte dall'area di raccolta, dall'efficienza in riflessione, dalla risoluzione angolare, dalla sensibilità e dal campo di vista. Queste quantità sono tutte collegate tra loro e, nel progettare un'ottica a riflessione per uno specifico obiettivo scientifico, si deve cercare il miglior compromesso (*trade-off*) tra le varie soluzioni possibili.

Il *design* della geometria degli specchi di un telescopio è solitamente ottenuto da studi di *ray tracing*, consistenti in un programma di simulazione che ha come input, la descrizione del sistema ottico, le proprietà ottiche del materiale riflettente, la posizione della sorgente e la lunghezza d'onda della radiazione X. I fotoni X arrivano nel sistema ottico in punti casuali ed usando riflettività calcolate, vengono seguiti nel loro cammino fino a che raggiungono il fuoco o vengono persi. L'uscita del programma dà le proprietà focalizzanti di un sistema, incluse le aberrazioni [Parodi 2004].

La scelta del tipo del telescopio è influenzata dai requisiti scientifici di una missione, in quanto la differenza tra ottiche di tipo Wolter I, a doppio cono e di tipo Wolter-Schwarzschild è fortemente dipendente dalla risoluzione angolare che si vuole ottenere e dall'angolo di incidenza corrispondente all'energia massima per cui si intende avere una ragionevole area efficace. Si prendano come esempio le ottiche di Chandra, disegnate per coprire un intervallo di energie da 0.1 fino a circa 7 keV [Zombeck 1983]. In questo disegno gli angoli di incidenza sono piccoli e le differenze di prestazioni tra sistemi Wolter e Wolter-Schwarzschild sono trascurabili, quindi è stato scelto il sistema Wolter, di più semplice realizzazione. Il sistema Wolter-Schwarzschild è preferibile per angoli di incidenza più grandi, ottenibili con lunghezze d'onda maggiori di ~ 50 Å e quindi per telescopi nell'EUV o nel XUV.

La lunghezza assiale dello specchio primario L si ripercuote sia sull'area di raccolta sia sulla risoluzione angolare della radiazione fuori asse. L'area di raccolta cresce proporzionalmente con L ma la risoluzione angolare peggiora, è dunque necessario trovare il giusto *trade-off*. Per telescopi con un piccolo campo di vista, si possono utilizzare specchi primari molto lunghi, mentre per telescopi a grande campo di vista¹ il compromesso è trovato mediante simulazioni di *ray tracing*.

Per il calcolo dell'area efficace ottenibile da un sistema si deve tenere in considerazione anche l'efficienza del rivelatore che si intende impiegare, in quanto esso possiede una propria dipendenza dall'energia.

Grande influenza sulle prestazioni di un telescopio è esercitata dalle diverse tecniche disponibili per la manifattura delle ottiche (si veda § 2.2). La qualità della PSF per radiazione parassiale è determinata principalmente dai difetti di fabbricazione e dall'allineamento piuttosto che dal *design*², a differenza delle aberrazioni dei raggi extrassiali che invece ne risentono in particolar modo. Ottiche più spesse possono essere lavorate con precisione per avere una buona risoluzione, ma a causa dell'ingombro non possono essere "nidificate" in gran numero, mentre ottiche più sottili possono essere "nidificate" in maggior numero, ottenendo una maggior area efficace, ma sono soggette a deformazioni che deteriorano la PSF e dunque la loro risoluzione.

3.3 Telescopi a vista diretta per raggi X duri i 10 keV

Attualmente non c'è dubbio che i risultati più sensibili nella banda 15-100 keV siano quelli

¹ La grandezza del campo di vista dei telescopi è limitata a causa della vignettatura.

² Questo è vero solo parzialmente per i telescopi a doppio cono, approssimazione dei Wolter I, dove la qualità di per sé introduce aberrazione anche per fotoni parassiali

ottenuti da Beppo-SAX con lo strumento collimato PDS. In aggiunta alla elevata qualità e alla grande stabilità dello strumento, le ottime prestazioni sono da ricondurre all'orbita equatoriale a 600 km di altitudine, caratterizzata da una bassa presenza di particelle di fondo dovuta all'effetto schermante del campo geomagnetico. La missione ASTRO-E2 (Giappone-USA), che sarà operativa nel 2005 ed avrà a bordo uno strumento per raggi X duri a collimazione, non potrà migliorare Beppo-SAX a queste energie, a causa dell'orbita molto inclinata. Alcuni progressi sono attesi, specialmente in termini di una *survey* completa, dallo strumento a maschera codificata BAT a bordo di SWIFT (USA-Italia-UK), lanciato lo scorso mese da Cape Canaveral. Swift è una missione pensata per i *Gamma Ray Burst* (GRB), ed il grande campo di vista di BAT ha come scopo principale la rilevazione della loro posizione, ma con lo stesso strumento si avrà una mappa del cielo nella banda 15-150 keV, con una risoluzione di 2 minuti d'arco ed una sensibilità di ~1 milliCrab. Per fare un esempio, il limite di flusso di 1 milliCrab corrisponde solo all'1-2% del fondo X cosmico diffuso (XRB), ma la missione rappresenterà comunque un passo importante, rilevando maggiormente la popolazione di AGN 2 nell'universo locale.



Figura 3-6: rappresentazione del telescopio a maschera codificata BAT e suoi parametri principali.

3.4 Telescopi focalizzanti per raggi X duri

3.4.1 Alcuni degli obiettivi scientifici

Una missione con capacità di focalizzazione e di sensibilità fino ad energie di 60-70 keV, sarebbe cruciale per lo studio di molti tipi di sorgenti X celesti. I meccanismi di accelerazione nei nuclei galattici attivi (AGN), gli ammassi di galassie e le sorgenti stellari (stelle binarie e resti di Supernovae), sono al momento lontani dall'essere soddisfacentemente compresi, così come gli *afterglow* dei *Gamma Ray Burst* ed i meccanismi di formazione stellare. In quel che segue, però, dato l'elevato numero e la specificità degli obbiettivi scientifici, l'autore di questa tesi ha deciso di trattare in particolar modo, pur senza pretese di completezza, il punto di vista del fondo X cosmico diffuso (CXB) ed il suo legame con gli AGN.

Uno degli obiettivi più ardui della moderna cosmologia è cercare di capire come è formata la struttura dell'Universo e come essa evolve nel tempo. Fino a dieci anni fa, gli AGN conosciuti costituivano l'1% delle galassie dell'Universo locale, ed erano considerati poco più di una curiosità nel campo dell'evoluzione delle galassie. La scoperta dei buchi neri supermassivi (SMBH) nel centro della maggior parte delle galassie vicine e della proporzionalità della loro massa con alcune proprietà del bulge (massa, luminosità e velocità di dispersione), ha invece insegnato, che, per comprendere bene la formazione e l'evoluzione delle galassie, è necessario prima studiare il comportamento dei nuclei galattici attivi. Si è scoperto poi, che la storia cosmica dell'attività degli AGN dipende dalla loro luminosità: il numero e la densità di luminosità degli AGN, cresce velocemente dall'Universo locale fino a z~1. A z maggiori, mentre la densità degli AGN ad alta luminosità rimane costante, quella degli AGN a bassa luminosità decresce e la maggior parte delle sorgenti che contribuiscono al fondo X cosmico (CXB) è ritenuta essere a $z\sim2$. La densità di massa dei buchi neri nell'universo può essere stimata dalla misura della densità di energia del CXB attraverso l'integrazione della luminosità degli AGN. Alla fine degli anni '70, con il primo telescopio basato su ottiche focalizzanti a bordo del satellite americano HEAO-1, si scoprirono 842 sorgenti X, ma solo l'1% del fondo X cosmico poté essere attribuito a sorgenti discrete, a causa del limite in flusso di circa 1 milliCrab nella banda 2-10 keV. Questo è conseguenza della limitata risoluzione angolare, la quale implica un flusso minimo limitato dall'effetto di confusione. Un importante risultato ottenuto con HEAO-1 è stata la misura spettroscopica fino ad 80-100 keV del fondo X cosmico (CXB), che permise di scoprire un massimo di densità di energia attorno ai 30 keV. Un passo avanti, in

sensibilità e risoluzione angolare, fu compiuto con ROSAT, risolvendo il 75% del XRB in sorgenti discrete, grazie ad una sensibilità di circa 0.1 microCrab nella banda 0.5-2 keV. La maggior parte delle sorgenti discrete risolte risultò avere come controparte ottica un AGN, e ciò rappresentò un grande successo dell'idea originale proposta da Setti e Woltjer [Setti 1989], che guardava al CXB come al contributo integrato dei processi di accrescimento avvenuti durante la storia cosmica. Un ulteriore conferma di questo modello si ebbe prima con Beppo-SAX, risolvendo il 20% dell'XRB nella banda 2-10 keV [Comastri 2004a] e poi con Chandra, che, con un flusso limite di 0.05 microCrab, ne ha risolto il 100% nella banda 0.5-8 keV. Anche se queste prove sono risultate significativamente stringenti, le piccole aree effettive sopra i 6-8 keV, lasciano aperta la questione fondamentale di cosa sia composta la maggior parte dell'energia emessa nell'XRB. Comunque, la banda di energia in cui risiede la maggior parte della densità di energia del CXB (20-60 keV), rimane ad oggi essenzialmente inesplorata, e perciò tutte le stime sulla luminosità e sulla densità di massa dei buchi neri sono basate su estrapolazioni dalle misure realizzate sotto i 10 keV.



Figura 3-7: la frazione di fondo X cosmico risolvibile in funzione della sensibilità in flusso, calcolata in alcune bande energetiche usando il modello di Comastri [Comastri 1995] [Fiore 2004].

Questa situazione è conseguenza della mancanza di strumenti focalizzanti nella regione dei raggi X duri. Una missione in grado di esplorare il cielo ai raggi X duri con una strumentazione focalizzante e con un'adeguata capacità di imaging fornirebbe una risposta all'interrogativo, che risulta essere tra i più rilevanti in Astrofisica e Cosmologia.

Nuclei Galattici Attivi (AGN)

Le galassie con un nucleo attivo, mostrano un'elevata luminosità (da 10^{42} a 10^{47} erg s⁻¹) emessa da un volume molto piccolo, nel quale la forza di gravità esercitata da un SMBH sulla materia circostante, determina un processo di trasformazione di energia gravitazionale in radiazione, con un elevato tasso di efficienza. Questo processo è osservato sia nelle galassie vicine sia negli oggetti a distanze cosmologiche, ed è indicato come la potenza di accrescimento, il cui integrale sul tempo costituisce il maggior contributo al CXB. Nei raggi X osserviamo i meccanismi di emissione che avvengono vicino all'orizzonte degli eventi, così come gli effetti secondari che avvengono a distanze dell'ordine dei 300 anni luce. Quest'ultimi sono dovuti ad una riprocessazione dei raggi X primari tramite due meccanismi principali: la riflessione Compton da parte di gas otticamente spesso, la quale genera un ampio spettro con un picco a circa 30 *keV*, e la fluorescenza dei metalli pesanti, tra cui spicca la riga *K* del ferro a 6.4-6.9 *keV*. In aggiunta, l'assorbimento fotoelettrico lungo la linea di vista, determinato dal gas presente attorno al nucleo, taglia lo spettro ad energie progressivamente maggiori con una densità di colonna che varia da N_H= 10^{20} cm⁻² a N_H= 10^{24} cm⁻². Quando il valore maggiore della densità è superato, il gas diventa otticamente spesso a causa dell'effetto Compton e la radiazione primaria è



Figura 3-8: scoperta degli AGN nella banda 2-10 keV nel piano redshift - rapporto flusso X e ottico (X70). I simboli si riferiscono a diverse missioni spaziali: HEAO-1 (cerchi pieni), BeppoSAX (triangoli), ASCA (quadrati pieni), XMM (stelle), Chandra (cerchi vuoti) [Fiore 2004].

completamente bloccata, lasciando passare solo quella parte della radiazione riprocessata, che sta fuori dell'angolo di vista. L'assorbimento della polvere associata con il gas, ha effetti notevoli sullo spettro ottico, e quindi storicamente gli AGN sono classificati in due tipi: gli AGN di tipo 1, nei quali l'assorbimento ottico è piccolo o nullo, e gli AGN di tipo 2, nei quali l'assorbimento ottico è elevato.

Le osservazioni nei raggi X con ottiche focalizzanti, ottenute prima da Einstein e ROSAT e poi da ASCA, BeppoSAX, XMM-Newton e Chandra fino ad 8-10 *keV*, hanno migliorato di alcuni ordini di grandezza la scoperta di nuclei galattici attivi. Come esempio, la figura 3-8 mostra una proiezione della scoperta degli AGN tra 2 e 10 *keV*. L'uso di rivelatori collimati (cerchi pieni in figura) negli anni '70, portò alla scoperta di meno di 1000 sorgenti X nell'intera volta celeste, molte delle quali con un rapporto flusso X su ottico (X/O) tra 1 e 10 e con uno z <0.5. L'uso di ottiche focalizzanti, sta permettendo lo studio dei processi di accrescimento su di un ampio intervallo di età cosmica, di ambienti ed efficienze di accrescimento, per AGN normali (X/O=0.1-10), AGN deboli (X/O basso) e AGN oscurati (X/O ≥ 10). Sopra i 10 *keV*, l'osservazione più sensibile è stata quella realizzata da Beppo-SAX con lo strumento collimato PDS, e solo poche centinaia di sorgenti sono conosciute. Chiaramente abbiamo bisogno di aprire una nuova finestra nell'Astronomia X sopra i 10 *keV*, producendo un aumento delle scoperte simile a quello ottenuto nei raggi X molli. Questo risultato può essere ottenuto nel prossimo futuro, con lo sviluppo della tecnologia multistrato per la focalizzazione dei raggi X duri.

Fondo X Cosmico (CXB)

Il fondo X cosmico diffuso (CXB) fu scoperto durante uno dei primi esperimenti per raggi X su razzo, sviluppato e realizzato con successo dal gruppo guidato da Rossi e Giacconi [Giacconi 1960]. Attualmente ci sono pochi dubbi che il fondo X cosmico sia dovuto al contributo integrato di sorgenti discrete piuttosto che ad una reale emissione diffusa, ed infatti ad energie sotto i 10 *keV* una larga frazione di tali sorgenti è stata risolta. Abbiamo anche a disposizione un modello per queste sorgenti: esse sono costituite principalmente da AGN, ed il CXB è considerato essere radiazione elettromagnetica emessa dai dischi di accrescimento di buchi neri supermassivi, presenti nei nuclei galattici attivi [Comastri 2001b]. Come detto nell'introduzione di questo capitolo, i calcoli che si sono potuti effettuare sinora sull'evoluzione della luminosità di accrescimento e sulla densità di massa dei buchi neri, sono basati su estrapolazioni dei dati sotto i 10 *keV*.

Vediamo allora quali sono le previsioni da verificare, dell'attuale modello del CXB, e le domande che possono trovare risposta nelle future osservazioni nella banda in cui vi è il picco di densità, ovvero sopra i 20 *keV*.



Figura 3-9: il fondo X cosmico residuo dopo la sottrazione della frazione risolta sotto i 10 keV, calcolato assumendo una legge di potenza con un cutoff a 100 keV (linea rossa tratteggiata) ed una legge di potenza con un cutoff a 400 keV (linea blu tratteggiata).

Buchi neri con massa 10⁶-10⁹ masse solari, sono presenti al centro della maggior parte delle galassie ed i processi che contribuiscono alla loro formazione sono ancora da chiarire. Risale a circa venti anni fa, il modello proposto per stimare la densità di massa dei buchi neri, basato sull'integrale della luminosità di accrescimento nell'Universo al *redshift* medio delle sorgenti a maggior contributo. Assumendo un *redshift* medio di circa 2, la densità di massa dei buchi neri torna simile a quella stimata attraverso studi dinamici delle galassie vicine, ma più alta di un fattore due di quella stimata integrando la funzione di luminosità di AGN selezionati otticamente. Questa assunzione, implica che la maggior parte della massa di accrescimento, si ha durante la fase di attivazione di un AGN. A causa di strati di gas e di polvere, comunque, possiamo vedere solo una frazione della luminosità di accrescimento. *Survey* ottiche effettuate sulle galassie vicine, indicano che il numero di AGN oscurati è circa 3 volte quello degli AGN non oscurati, ed in questo consiste un ingrediente fondamentale del modello del CXB, la cui curva spettrale è spiegata in termini di sovrapposizione di spettri altamente oscurati. Lo spettro del fondo X non risolto, può essere stimato sottraendo dal CXB totale, il contributo delle

sorgenti rivelate da Chandra e XMM-Newton sotto i 10 keV (figura 3-9 adattata da Comastri). Nelle *survey* realizzate da XMM e Chandra, comunque, il numero di AGN oscurati sembra essere leggermente inferiore a quello atteso. Per testare quantitativamente i paradigmi del CXB, c'è bisogno di osservare la popolazione cosmica nel picco tra 20-40 keV, con una risoluzione sufficiente a risolvere almeno il 30-50% del CXB.

In particolare ci si chiede se:

- non abbiamo individuato AGN altamente oscurati a z>1, perché li abbiamo osservati solo ad energie sotto i 10 keV;
- di che tipo spettrale siano e quale sia livello di oscuramento delle sorgenti individuate da XMM e Chandra;
- quale sia la frazione di AGN oscurati in funzione di luminosità e *redshift* e quale sia il loro contributo relativo alla luminosità di accrescimento.

Gli specchi multistrato, sul cui sviluppo è centrata questa tesi, possono essere impiegati per questo scopo, dando forse una risposta che cambierà le nostre conoscenza cosmologiche sulla formazione delle galassie.

3.4.2 Telescopi focalizzanti per raggi X duri

La tecnologia degli specchi a raggi X ha avuto, negli ultimi anni, un sostanziale progresso nell'estendere le prestazioni ben sopra i 10 *keV*. In particolare, la soluzione del rivestimento multistrato permette di ottenere delle aree efficaci lentamente decrescenti fino ad 80 *keV* e con un andamento abbastanza costante. Aree effettive di questo tipo, associate con una buona risoluzione angolare, sono indispensabili per risolvere maggiormente l'XRB, in quanto costituiscono una condizione necessaria per riuscire ad abbassare il minimo flusso rilevabile. Un'ulteriore vantaggio derivante dalle coperture a multistrato è che, analogamente a quanto succede per i raggi X molli, la possibilità di utilizzare ottiche focalizzanti sopra i 10 *keV* porta ad un conteggio di fondo estremamente inferiore al caso dei rivelatori collimati. Nel futuro, è previsto che alcune missioni per astronomia X usino ottiche focalizzanti per raggi X duri con rivestimento a multistrato.

HEXIT-SAT

La missione HEXIT-SAT è stata proposta da un gruppo di scienziati ed ingegneri italiani, con il

preciso scopo di progettare un telescopio avente le prestazioni necessarie a risolvere una parte consistente degli oggetti celesti contribuenti al CXB nella regione dei raggi X duri. In aggiunta, però, anche altri problemi scientifici potranno essere studiati con una sensibilità in flusso ed una risoluzione angolare senza precedenti. La parte principale della missione HEXIT-SAT è rappresentata dal sistema ottico focalizzante, costituito da 4 moduli ottici indipendenti, ognuno dei quali formato da 50 specchi a multistrato confocali in geometria Wolter I, realizzati con la tecnica della replica tramite Nichel elettroformato descritta nel paragrafo 2.4.4. L'Osservatorio di Brera è stato responsabile del disegno della missione e dello sviluppo delle ottiche tramite il progetto ASI "Payload per Astrofisica delle Alte Energie". La lunghezza focale di 8 metri, è ottenuta tramite un banco ottico estensibile e la risoluzione angolare di circa 15 secondi d'arco richiede che la risoluzione spaziale del rivelatore (data dalla separazione dei *pixels*) sia di 0.2 – 0.3 *mm*. Una raffigurazione del satellite HEXIT-SAT è mostrata in figura 3-10, assieme alle principali proprietà del telescopio. La sequenza degli spessori del multistrato segue una

HEXIT-SAT	Focale	8 m
	# Moduli	4
Star Tracker Mirror Modules	# Specchi	50
Solar Panels	Diametro max	330 mm
Doors Spacecraft Housing	Diametro min	112 mm
Deployment Device	Area a 40 keV	75 cm ²
Focal plane assembly	Angolo min	0.120 deg
Thermal Radiator	Angolo max	0.295 deg
	Energie	0.1 ÷ 70 keV
	FOV	15'
	HEW	15"

Figura 3-10: rappresentazione del satellite HEXIT-SAT e proprietà principali del telescopio [HEXIT].

legge di potenza come quella espressa nell'equazione (1.32), ed è stata ottimizzata separatamente per ogni specchio, con una procedura di ottimizzazione chiamata *Iterated Simplex Algorithm*, mediante il software ISOXM sviluppato presso l'Osservatorio di Brera [Cotroneo 2003], assumendo come figura di merito il miglioramento dell'area efficace nella banda energetica tra 20 e 70 *keV*. La soluzione trovata per la sequenza consiste in 200 bistrati in Tungsteno e Silicio ed il processo utilizzato per la crescita dei film è l'*e-beam evaporation* con assistenza ionica (§ 2.4.2), che permette di rivestire grandi superfici pur mantenendo basso il livello di rugosità delle interfacce.

Per la missione HEXIT-SAT, la scelta di rivelatori che si adattano bene con le prestazioni alle alte energie delle ottiche, pur mantenendo una buona affidabilità sull'intero intervallo energetico, è di fondamentale importanza. E' stata perciò considerata una soluzione ibrida: un rivelatore a stato solido in CdZnTe (Cadmio Zinco Tellurio) per le alte energie ed un rivelatore



Figura 3-11: schema concettuale del sistema di rivelazione su piano focale, in cui si utilizzano sia rivelatori per le alte energie (CdZnTe) sia rivelatori per le basse energie (CCD o SDD).

per le basse energie. Tra i rivelatori per le basse energie la scelta è tra i già disponibili CCD, che necessitano però di un sistema di raffreddamento spinto (-120°C), e dei dispositivi in corso di sviluppo presso l'istituto *Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik* (MPE), a cui collabora il politecnico di Milano, chiamati *Silicon Drift Detector* (SDD), che offrono il vantaggio di un rumore molto basso pur lavorando a temperature più alte (0° \div 40° C) rispetto ai CCD. Il rivelatore in CdZnTe per le alte energie, invece, rispetto ai normali rivelatori a semiconduttore, può lavorare molto bene a temperatura ambiente mantenendo una buona risoluzione spettrale. Uno schema del piano focale è mostrato in figura 3-11.

L'area efficace totale dei 4 moduli, prima e dopo la correzione per l'efficienza del rivelatore, è mostrata nella figura 3-12 (sinistra), assieme al confronto con l'area efficace di XMM comprendente l'efficienza della camera EPIC. Il rapido decremento dell'area efficace attorno ai 70 keV, è determinato dallo spigolo di assorbimento K degli strati in Tungsteno mentre il decremento a basse energie è dovuto ad un filtro UV collocato sopra i rivelatori.



Figura 3-12: area efficace in asse calcolata per i 4 moduli del telescopio di HEXIT-SAT corretta per l'efficienza del rivelatore.

Un vantaggio importante nello scegliere una lunghezza focale non troppo lunga (minore di 10 metri) consiste nell'avere una piccola zona focale con una conseguente diminuzione del conteggio di fondo intrinseco. In aggiunta, un ulteriore vantaggio di questa strategia, è che angoli di incidenza larghi tanto quanto tollerato dagli specchi a multistrato, possono permettere un campo di vista relativamente grande (15 minuti d'arco). La diminuzione del rumore di fondo è importante perché la densità delle sorgenti, al flusso che si vuole raggiungere, nelle bande 10-30 *keV* e 20-40 *keV* è rispettivamente di 120 e di 12 sorgenti per un campo di vista di 15 minuti d'arco ed un tempo di interazione di 1 Msec [Fiore 2004]. Assumendo come valore del background $B=10^4$ count sec⁻¹ cm⁻² (indicativo per una orbita LEO - Low Earth Orbit), con un intervallo di integrazione di 10⁴ ed un intervallo di confidenza di 3 σ il limite in sensibilità è di 0.05 µCrab (si veda la fig. 3-12 - destra). Il tempo di integrazione necessario per rivelare in un intervallo di confidenza di 3 σ una sorgente con flusso 10 – 100 µCrab nella banda 20-40 keV è rispettivamente di 22 ksec e 16 ksec.

SIMBOL - X

La missione SIMBOL-X è stata proposta all'inizio del 2004 al CNES (l'Agenzia Spaziale Francese), con data di lancio prevista nel 2011, come risposta ad una chiamata specificamente indirizzata a missioni scientifiche con formazione in volo (*formation flight*). Lo schema attuale prevede che la Francia sia responsabile della intera missione, della costruzione della navicella ospitante il rivelatore, della parte ad alta energia del piano focale (rivelatore CdZnTe) e dell'aspetto della formazione in volo. L'Osservatorio Astronomico di Brera dovrebbe provvedere il modulo ottico, mentre l'Istituto tedesco MPE si dovrebbe occupare della parte del rivelatore per le basse energie (rivelatore SDD). Tuttavia la partecipazione potrebbe essere estesa ad una più larga parte della comunità italiana, con la prospettiva di migliorare i parametri della missione (HEW, FOV, area efficace) tramite l'impiego di ottiche multistrato e sino alla possibilità di fornire uno dei due satelliti.



Figura 3-13: rappresentazione del satellite HEXIT-SAT e proprietà principali del telescopio [HEXIT].

SIMBOL-X è una missione basata su di un singolo modulo ottico con elevata lunghezza focale (30 m) a geometria Wolter I, con specchi a singolo strato in Platino o composto in parte da specchi multistrato. L'enorme lunghezza focale sarà ottenuta con una innovativa tecnica di

formazione in volo (che servirà tra le altre cose come *pathfinder* per la missione XEUS), per mezzo di due satelliti separati, uno ospitante l'unità dello specchio e l'altro ospitante il rivelatore [Ferrando 2002][Pareschi 2004]. Nella figura 3-13 è mostrata un'immagine illustrante la formazione in volo e sono riportati alcuni parametri della missione. La necessità di avere un'immagine di qualità stabile, e di mantenere il campo di vista interamente all'interno dell'area del rivelatore, dettano i requisiti per la formazione in volo. Per una risoluzione di 30 secondi d'arco HEW, una lunghezza focale di 30 m ed un rivelatore con un diametro leggermente maggiore del campo di vista, occorre una stabilità in posizione con una precisione di \pm 1 cm sia lungo l'asse del telescopio sia lungo l'asse ad esso perpendicolare. L'orbita prevista è un'orbita circolare ad un'altitudine di 91000 km, in cui vi è una minor presenza di radiazione che induce *background* strumentale. In realtà l'orbita circolare sarà compiuta dalla navicella ospitante il modulo ottico (*master*), mentre la navicella con i rivelatori compierà un'orbita forzata (*slave*).



Figura 3-14: lunghezza focale e diametro di SIMBOL-X confrontati con quelli della altre missioni del passato e del futuro. Le linee diagonali all'interno del grafico indicano gli angoli di incidenza dei telescopi.

La proposta attuale per il modulo ottico di SIMBOL-X prevede l'utilizzo dei convenzionali specchi a strato singolo (da realizzare con la tecnica della replica tramite Nichel elettroformato) sfruttando la possibilità, data dall'enorme lunghezza focale, di utilizzare piccolissimi angoli di incidenza ($\vartheta_{MIN} = 0.07 \text{ deg}$). Grazie alla lunghezza focale così lunga, il diametro di apertura risulta molto grande, simile a quello di un modulo ottico di XMM ma con angoli di incidenza molto minori (fig. 3-14), garantendo una ottima area efficace fino a 40 keV e lentamente

decrescente sino a 70 keV. La missione SIMBOL-X è una missione di tipo *small class* e perciò si deve cercare di limitare il più possibile la massa del modulo ottico (230 kg). Per rientrare in questi limiti di peso il rapporto *spessore/diametro* degli specchi dovrà essere minore di un fattore 3.4 rispetto ad XMM (fig. 3-15 - destra). Come conseguenza, la risoluzione angolare tenderà a peggiorare, anche se, con una riduzione così drastica degli spessori è stato in ogni caso dimostrato sperimentalmente che con la tecnica dell'elettroformatura è possibile ottenere una risoluzione angolare HEW migliore di 30 secondi d'arco (come da test presso la *facilty* Panter-MPE)[Pareschi 2003]. Nella figura 3-15 è inoltre mostrata l'andamento dell'area efficace in asse



Figura 3-15: (destra) andamento dell'area efficace in funzione dell'energia per la missione SIMBOL-X; (sinistra) rapporto spessore/diametro e risoluzione angolare corrispondente per alcuni specchi prodotti con la tecnica della replica da Nichel elettroformato e previsione per la missione SIMBOL-X.

in funzione dell'energia: essa ha un valore più o meno costante di 600 cm² per energie inferiori a 35 keV, per poi arrivare ad un valore di 1 cm² ad energie superiori a 70 keV. Per quanto riguarda il piano focale, la soluzione segue uno schema ibrido molto simile a quello discusso per la missione HEXIT-SAT.

Come per HEXIT-SAT, i principali obiettivi scientifici riguardano lo studio dello della componente non termica di sorgenti galattiche ed extragalattiche. Nella figura 3-16 sono confrontate le sensibilità in flusso attese per la emissioni HEXIT-SAT e SIMBOL-X. Il miglioramento rispetto alle precedenti missioni per raggi X duri basate sui rivelatori a vista diretta (per HEXIT-SAT il guadagno è di tre ordini di grandezza) è veramente enorme. All'energia di 30 *keV*, la sensibilità in flusso di HEXIT-SAT è circa 3 volte migliore di quella di SIMBOL-X e, in aggiunta, avendo anche una risoluzione angolare ed un campo di vista due

volte migliori, HEXIT-SAT è in grado di fornire una più larga operatività. Come detto, per migliorare le prestazioni di SIMBOL-X è possibile prendere in considerazione la possibilità di aumentare ulteriormente il diametro massimo dell'ottica tramite l'uso di specchi multistrato. L'applicazione di questa soluzione determinerebbe un miglioramento dell'area efficace e del campo di vista di un fattore 2. La sensibilità in flusso ottenibile con questa versione di SIMBOL-X è molto simile a quella di HEXIT-SAT.

Il lancio di SIMBOL-X alla fine della decade corrente fornirebbe un preparativo eccellente per le grandi missioni astrofisiche previste per ben dopo il 2010, come Constellation-X e XEUS.



Figura 3-16: (destra) limiti di flusso (S/N=3) previsti per SIMBOL-X (in blu) confrontati con quelli attesi per HEXIT-SAT (in arancio). Il tempo di integrazione è di 1 Msec, mentre il background strumentale assunto è di 5×10^{-5} cts/s/cm² per SIMBOL-X e 1×10^{-4} per HEXIT-SAT. E' anche mostrato il comportamento previsto per una versione di SIMBOL-X con specchi multistrato (in nero) in cui si può ottenere una sensibilità maggiore.

XEUS

L'X-ray Evolving Universe Spettroscopy è il potenziale successore di XMM-Newton e rappresenta il principale obiettivo scientifico dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) per l'astronomia X del futuro. Esso fornirà un osservatorio X spaziale permanente con un'area di raccolta ed una sensibilità senza precedenti. Paragonato a XMM-Newton, la sensibilità in flusso e la risoluzione angolare saranno 250 e 7.5 volte migliori rispettivamente, grazie ad un telescopio di 10 metri di diametro ed una lunghezza focale di 50 metri ed un'area di raccolta di 30 m^2 .

Con un'area di raccolta così grande XEUS sarà in grado di rivelare sorgenti X deboli a *redshift* maggiori di 5 con flussi minori a 10^{-17} erg cm⁻² s⁻¹. Questa sensibilità renderà possibile l'indagine di alcune questioni cosmologiche come l'evoluzione su larga scala dell'Universo. Gli obiettivi scientifici consistono nello studio dell'evoluzione dei barioni caldi nell'Universo osservando i primi AGN ($\chi > 5$): sarà in grado di osservare i loro buchi neri e di stimare la loro massa, il loro *redshift* ed il loro momento angolare attraverso l'osservazione del profilo della riga di fluorescenza K_{α} del Ferro e del continuo. XEUS sarà in grado di rivelare i primi ammassi di galassie confinati da *dark matter* e di compiere misurazioni spettroscopiche per determinare densità, temperatura e composizione dell'ICM (*Intra Cluster Medium*).



Figura 3-17: scenario della missione a formazione in volo di XEUS e sistema a dispiegamento dell'ottica.

XEUS farà uso di un telescopio focalizzante e l'enorme lunghezza focale sarà ottenuta con un nuovo approccio consistente in due satelliti, uno ospitante le ottiche (MSC) ed uno ospitante il rivelatore (DSC), tenuti allineati con un sistema di puntamento laser preciso al centesimo del millimetro. IL disegno più recente della missione prevede due lanci indipendenti delle unità MSC e DSC, utilizzando un vettore *Soyuz-Fregat*. In figura 3-17 è possibile vedere una rappresentazione dello scenario della formazione in volo ed un dettaglio del banco ottico a dispiegamento contenuto nel MSC. Il modulo MSC sarà portato nel punto lagrangiano L2 ed il modulo DSC seguirà il piano focale compiendo un'orbita forzata. Il punto L2, rispetto ad un orbita non kepleriana, permette di ridurre il consumo di propellente e rende possibile una più lunga operatività temporale della missione (15 anni).

La tecnica con cui realizzare il modulo ottico riveste un ruolo molto delicato, visto che sono richieste ottime prestazioni sia in risoluzione angolare (2 secondi d'arco - HEW) sia in termini di area efficace. Le tecniche fino ad oggi utilizzate (§ 2.2) non sono consistenti con le specifiche della missione, perché porterebbero ad ottiche eccessivamente pesanti e costose, e/o non i grado di produrre l'area efficace e la risoluzione angolare richieste. Per questa missione c'è bisogno di un nuovo tipo di tecnologia che consenta di ottenere un rapporto massa/area di raccolta di 0.08 kg/m² fornendo allo stesso tempo l'area di raccolta e la risoluzione angolare richieste per il conseguimento degli obiettivi scientifici. Le soluzioni tecnologiche innovative che sono state introdotte nel paragrafo (§ 2.3), sono basate sull'utilizzo di materiali molto leggeri ed hanno mostrato alcuni buoni risultati preliminari. Si tratta della tecnica basata sulla formatura a caldo di fogli sottili in vetro borosilicato e della tecnica basata su delle ottiche a micropori realizzate assemblando dei substrati in Silicio opportunamente trattati.



Figura 3-18: aumento dell'area efficace per un versione di XEUS che considera l'uso di specchi a multistrato (blu) rispetto all'area efficace ottenibile con ottiche a singolo strato in Oro (rosso).

La copertura dei telescopi focalizzanti assunta come punto di partenza (*baseline*) è quella a strato singolo in Oro, ma sono state pensate delle soluzioni consistenti in altri tipi di rivestimento per aumentare l'area efficace ed estendere la finestra operativa ai raggi X duri. In particolare si pensa all'utilizzo di alcuni specchi multistrato a spaziatura variabile [Pareschi 2004a] per migliorare le prestazioni di XEUS in efficienza di riflessione (fig. 3-18). Per investigare la possibilità di utilizzo di tali specchi, presso la ditta Media Lario, in collaborazione con l'Osservatorio Astronomico di Brera, ha avuto da poco inizio un progetto di sviluppo

finanziato dall'ESA per la produzione di alcuni prototipi con coperture in Tungsteno/Silicio.

Constellation - X

La missione Constellation-X è un ambizioso progetto della NASA ed è una delle maggiori missioni del programma chiamato *Beyond Einstein*. E' il progetto successore di Chandra ideato allo scopo di estendere l'intervallo di operatività dei telescopi focalizzanti alle energie dei raggi X duri, ed ha l'obiettivo di produrre spettroscopia con sensibilità senza precedenti. Con-X, infatti, avrà una sensibilità di $10^{-8} ph cm^{-2}sec^{-1}keV^{-1}$ (sotto il microCrab) fino ad energie di 40 keV ed una sensibilità con valori mano a mano decrescenti fino ad energie attorno ai 70 keV.



Figura 3-19: rappresentazione artistica dello scenario della missione Constellation X.

La missione prevede quattro satelliti indipendenti co-allineati in orbita attorno al punto lagrangiano L2. Il lancio dei primi due satelliti è previsto per il 2013 e la piena operatività è prevista per il 2015. Con i suoi 12 moduli operanti simultaneamente, Con-X produrrà un'area efficace di circa 1500 cm² tra i 10 ed i 40 *keV*. A bordo di ogni satellite sarà operativo un telescopio per raggi X molli a singolo modulo (SXT) ed un telescopio per i raggi X duri composto da tre moduli a specchi a multistrato (HXT). Lo schema ottico dei telescopi di Constellation-X è rappresentato in figura 3-19.

Le ottiche del *Soft X-ray Telescope* opereranno nella banda energetica 0.25-10 *keV*, con una lunghezza focale di 8.4 metri ed un diametro esterno di 140 centimetri (contro i 70 centimetri di



XMM-Newton), sfruttando la riflessione da strato singolo (Oro o Iridio), per fornire un'area efficace sufficiente a realizzare misure spettroscopiche ad alta risoluzione tramite calorimetri.

Figura 3-20: schema ottico dei telescopi SXT e HXT presenti in ognuna delle a navette e parametri principali del telescopio XRT per raggi X duri.

Le ottiche dell'*Hard X-ray Telescope*, invece, saranno basate su specchi multistrato, saranno più compatte con un diametro massimo di 35 centimetri ed avranno una lunghezza focale di 9 metri. I principali parametri del telescopio HXT sono riassunti in fig. 2-18. Per la realizzazione degli specchi di quest'ultimo, la tecnica di replica appare particolarmente indicata in quanto da una stessa matrice (mandrino) di un dato diametro, possono essere ricavate tutte le 12 *mirror shell* (più almeno altre due per i moduli di qualifica e quello di riserva). Inoltre, l'uso di specchi monolitici facilita il processo di assemblaggio, e le prestazione in termini di risoluzione angolare sono in linea di principio migliori rispetto a quelle ottenibili con le tecniche dei fogli sottili.

Capitolo 4

Caratterizzazione morfologica delle superfici degli specchi per astronomia X

Le prestazioni e le capacità di *imaging* di un telescopio ad incidenza radente per astronomia X sono fortemente legate alla **microrugosità** della superficie dei loro specchi, la quale può essere definita come la misura dei rilievi topografici a livello microscopico. Gli effetti di deterioramento, che la rugosità ha sulla riflessione di un fascio collimato incidente su di una superficie, sono tanto maggiori quanto più la lunghezza d'onda della radiazione è piccola. Infatti, una superficie può presentarsi liscia o rugosa a seconda della lunghezza di scala con cui la si osserva. Nei raggi X le lunghezze spaziali che determinano il fenomeno dello *scattering* stanno nell'intervallo tra 200 e 0.001 μ m e, per esempio, ad un angolo di incidenza di 2 gradi, una rugosità superficiale con altezza dell'ordine della lunghezza d'onda incidente, provoca lo *scattering* fuori fuoco del 20% della radiazione riflessa [Aschenbach 1985].

In questo capitolo saranno descritti gli strumenti matematici e le quantità fondamentali che servono per descrivere le proprietà topologiche degli specchi alle lunghezze d'onda dei raggi X e che nell'ambito di questo lavoro di tesi sono stati utilizzati per:

- verificare l'influenza della rugosità di un substrato di partenza sulla qualità finale di una struttura multistrato per la riflessione dei raggi X;
- essere in possesso di un metodo quantitativo per caratterizzare e confronto tra loro le superfici di vari tipi di substrati, diversi per materiale, tipologia di produzione e tipologia di lavorazione subita.
- quantificare le rugosità intrinseche indotte dai processi di deposizione delle superfici multistrato per favorire lo sviluppo tecnologico in questione.

Nei primi tre paragrafi di questo capitolo saranno richiamate le quantità convenzionali e le proprietà statistiche che descrivono la morfologia e le proprietà geometriche di una superficie. Si vedrà, poi, come il concetto di rugosità possa essere generalizzato da un esponente che si riferisce non alla rugosità in se stessa, ma al modo in cui essa varia al variare della scala di osservazione, introducendo il modello frattale, il quale descrive il comportamento di una superficie su di un ampio intervallo di lunghezze scala. Negli ultimi due paragrafi sarà dato spazio all'aspetto dello *scattering*, come fondamentale strumento di indagine delle proprietà topologiche delle superfici e delle interfacce di una struttura a multistrato.

4.1 Rugosità e errore di pendenza



Figura 4-1: tipico profilo di altezza di una superficie in silicio monocristallino superpulito relativo ad una misura effettuata con un profilometro ottico con ingrandimento di 2.5X. Le variazioni in altezza sono misurate rispetto a livello superficiale di riferimento (linea nera tratteggiata).

Le variazioni in altezza che si riscontrano nel misurare una superficie (figura 4-1), si riferiscono ad un livello superficiale di riferimento, corrispondente al profilo medio della superficie. Tali variazioni sono solitamente espresse in termini di una quantità chiamata **rugosità**, le distanze tra due picchi appartenenti ad uno stesso profilo sono chiamate lunghezze d'onda spaziali e la media statistica di tali lunghezze definisce una grandezza caratteristica nota come lunghezza d'onda spaziale media. Il profilo di una qualsiasi superficie, può essere descritto in termini di una somma di componenti di Fourier aventi diverse frequenze spaziali e, la presenza di eventuali strutture periodiche, può essere messe in evidenza in termini di risonanze nello spettro di frequenza. La rugosità è un parametro necessario ma non sufficiente a descrivere la morfologia di una superficie, poiché e possibile avere stessi valori di rugosità con profili totalmente diversi. Si utilizza, allora, anche una quantità chiamata *slope error* (errore di pendenza), che descrive la distribuzione delle inclinazioni delle tangenti al profilo, lungo la lunghezza di scansione.

Consideriamo un profilo superficiale monodimensionale su di una distanza L infinita, e descriviamo la altezze rispetto al livello superficiale medio con una funzione $\chi(x)$, dove x è la coordinata lungo la direzione di scansione. La superficie di riferimento corrispondente al profilo medio sarà data da:

$$\bar{z}(x) = \lim_{L \to \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} z(x) dx$$
(4.1)

La rugosità è considerata come una deviazione da tale valore, e possiamo distinguere tra valore di rugosità media:

$$\sigma_a = \lim_{L \to \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} |z(x) - \overline{z}| dx$$
(4.2)

e valore di rugosità RMS, cioè come deviazione standard:

$$\sigma_{RMS} = \sqrt{\lim_{L \to \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} |z(x) - \overline{z}|^2 dx}$$
(4.3)

Sia σ_a che σ_{RMS} sono utilizzate per descrivere la rugosità di una superficie, ma, generalmente, la deviazione standard è utilizzata soprattutto per descrivere le superfici ottiche mentre la media aritmetica è invece usata per i profili lavorati con utensili meccanici. I valori di σ_a e di σ_{RMS} sono simili se il profilo non contiene grandi deviazioni dalla media, altrimenti la distribuzione statistica sarà dominata dai valori elevati e la deviazione standard assumerà valori maggiori. Se ora consideriamo la derivata prima del profilo medio \overline{z}' , le stesse considerazioni possono essere applicate agli errori di pendenza':

¹ Lo slope error è di particolare importanza nella descrizione della mancata riflessione speculare non dovuta a scattering ma bensì ad errori di profilo, soprattutto per basse frequenze spaziali

$$m_{a} = \lim_{L \to \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \left| \frac{dz}{dx} - \bar{z}' \right| dx$$
(4.4)

$$m_{RMS} = \sqrt{\lim_{L \to \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \left| \frac{dz}{dx} - \bar{z'} \right|^2 dx}$$
(4.5)

La rugosità e lo *slope error* sono legati alla lunghezza d'onda spaziale media secondo la seguente relazione, valida sia per la media aritmetica che per la deviazione standard:

$$d = \frac{2\pi\sigma}{m} \tag{4.6}$$

4.1.1 Effetto di un campionamento discreto

Ogni misura reale del profilo di una superficie è effettuata attraverso un campionamento discreto del campione e, nelle formule riportate in precedenza, gli integrali devono essere sostituiti con delle sommatorie ad indice finito. Ogni misura è definita in un certo intervallo di frequenze spaziali, determinate dalla lunghezza massima di scansione e dal passo di campionamento in accordo con il teorema del campionamento reitico di Nyquist: se L è la lunghezza di scansione e d è l'intervallo di campionamento nell'acquisizione sperimentale, la minima e la massima frequenza spaziale relative alla misura, saranno rispettivamente 1/L e 1/2d.

Alcuni apparati strumentali, sono in grado di acquisire il profilo di una superficie in due dimensioni: in tal caso la procedura matematica per ricavare la rugosità e l'*error slope* non è altro che una semplice estensione al caso bidimensionale delle formule precedenti.

4.2 Power Spectral Density

La Power Spectral Density (PSD) è una funzione matematica che descrive come varia la potenza di una serie temporale con la frequenza. Nel campo della metrologia delle superfici, la PSD è utilizzata per legare le ampiezze di un profilo $\chi(x)$ alle corrispondenti frequenze spaziali f_x ed infatti può essere definita come il modulo quadro della trasformata di Fourier (FT) delle ampiezze di un profilo, normalizzato alla lunghezza di scansione. In quel che segue sarà ricavata un'espressione matematica per la PSD, che ne dà una descrizione quantitativa:

$$Z(f_x) = F[z(x)] = \int_{-\infty}^{+\infty} z(x) \exp(-i2\pi f_x x) dx$$
(4.7)

questa espressione è la FT delle ampiezze ed ha l'effetto di far passare l'espressione del profilo dal dominio dello spazio al quello delle frequenze. L'operazione matematica è lecita, giacché le ampiezze possono essere considerate come la somma di un termine costante \overline{z} e di un numero infinito di sinusoidi.

La FT può anche essere valutata su di una distanza finita L (riferendoci al caso reale menzionato al 4.1.1):

$$Z(f_x, L) = \int_{-L/2}^{+L/2} z(x) \exp(-i2\pi f_x x) dx$$
(4.8)

tale integrale mostra che il profilo può essere visto come una funzione della larghezza di banda L e che è nullo fuori dall'intervallo di integrazione.



Figura 4-2: Power Spectral Density ottenuta, con le formule presentate in questo paragrafo, dal profilo presentato in figura 4-1. L'intervallo di lunghezze d'onda spaziali è caratteristico del profilometro ottico utilizzato per la misura.

La definizione di PSD deriva dall'applicazione del teorema di Parseval¹ [Spiller 1994]:

¹ Col significato matematico di modulo quadro della trasformata di Fourier (FI) delle ampiezze di un profilo, normalizzato alla lunghezza di scansione.

$$PSD = S_1(f_x) = \lim_{L \to \infty} \frac{|Z(f_x, L)|^2}{L}$$
(4.9)

Le unità di misura della PSD monodimensionale sono di una lunghezza al cubo. La PSD è una funzione pari e simmetrica rispetto ad $f_x = 0$, dato che le ampiezze $Z(f_x,L)$ sono elevate al quadrato e, tipicamente, si considerano solo le frequenze maggiori di zero moltiplicando per un fattore due la formula (4.9) per tener conto della simmetricità. Il modulo quadro fa perdere l'informazione sulla fase dell'onda e perciò, nei casi in cui, come nello scattering, la PSD è ricavata da misure indirette, è possibile ricavare solamente informazioni di tipo statistico e non di morfologia del profilo.

Le grandezze statistiche, quali rugosità e *slope error*, sono ricavabili direttamente dalla *PSD* mediante il calcolo dei primi due momenti di ordine pari:

$$\sigma_{RMS}^2 = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} (2\pi f)^0 S_1(f_x) df_x \qquad (4.10)$$

$$m_{RMS}^{2} = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} (2\pi f)^{2} S_{1}(f_{x}) df_{x}$$
(4.11)

tali formule sono di fondamentale importanza e sono state usate ripetutamente nel corso delle caratterizzazione morfologiche effettuate in questo lavoro di tesi.

La PSD è una proprietà geometrica di una superficie ruvida ed è, chiaramente, indipendente dalla tecnica di misura. Una volta fissata la lunghezza di scansione e l'intervallo di campionamento, nelle regioni in cui si sovrappongono le frequenze spaziali, relative ai vari strumenti, si deve ottenere lo stesso risultato nei limiti delle bande di errore.

4.3 Funzione di Autocorrelazione e Distanza di Correlazione

Nel caso in questione, la funzione di autocorrelazione è un indice di quanto un profilo di altezze somiglia con una replica di se stesso ritardata di un fattore τ . Se τ_0 è l'intervallo con cui è stata campionata una superficie, il fattore di ritardo sarà un suo multiplo intero. La funzione di correlazione è matematicamente data da:

$$C(\tau) = \lim_{L \to \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} z(x) z(x+\tau) dx$$
(4.12)



Figura 4-3: andamento della funzione di Autocorrelazione per un profilo di altezze di una superficie campionata con un intervallo τ_0 . Si noti l'esempio della distanza di correlazione come distanza in cui $C(\tau)$ decresce di un fattore 1/e.

Il massimo della correlazione lo si ha per $\tau=0$ e meno variabile è il profilo più la funzione di autocorrelazione decresce lentamente. Attraverso la funzione di autocorrelazione si può definire un'importante quantità chiamata **distanza di correlazione** d_c , definita come lo spostamento in cui la funzione $C(\tau)$ decresce di un fattore 1/e rispetto al valore massimo assunto in $\tau=0$ (figura 4-3). Questa quantità rappresenta la dimensione laterale della superficie e coincide con la lunghezza d'onda spaziale media, definita nell'equazione (4.6), solo nel caso in cui il profilo segue una distribuzione normale.

Anche dalla funzione di correlazione si possono ricavare rugosità e slope error:

$$\sigma_{RMS}^2 = C(0) \tag{4.13}$$

$$m_{RMS}^{2} = \left(\frac{d^{2}C(\tau)}{d\tau^{2}}\right)_{\tau=0}$$
(4.14)

Utilizzare la funzione di correlazione equivale, dal punto di vista delle proprietà statistiche di una superficie, ad utilizzare la PSD. Infatti, sono legate tra loro dalla trasformata di Fourier secondo il teorema di Wiener-Khintchine:

$$S_1(f_x) = \int_0^\infty C(\tau) \exp(-i2\pi f_x x) d\tau \qquad (4.15)$$

4.4 Il modello frattale

Molte superfici lavorate otticamente, esibiscono la curiosa proprietà per cui la loro *Power Spectral Density* misurata, o calcolata, segue molto bene una legge di potenza inversa senza punti di interruzione. Quest'aspetto è stato analizzato da Church, Jenkinson e Zavada (1979), definendo, per una PSD monodimensionale, la seguente espressione:

$$S_1(f_x) = \frac{K_n}{2f_x^n} = \frac{S_1}{f_x^n}$$
(4.16)

dove $1 \le n \le 3$ e K_n è una costante presa da Church con le unità di (lunghezza)³⁻ⁿ, numericamente uguale a $2S_1(f_x)$. Questo significa che, in un grafico in scala logaritmica, la PSD è una retta con pendenza -n la quale assume il valore $S_1(f_x)$ nel punto in cui f_x assume un valore unitario. La singolarità che si ha per $f_x=0$, dove la PSD assume un valore infinito, non causa problemi nella realtà fisica, visto che la minor frequenza spaziale rilevante in una misura è sempre maggiore di zero e la lunghezza di correlazione è finita.

Le superfici approssimabili con questo modello sono chiamate frattali. I casi speciali in cui $n=1, 2 \in 3$ sono chiamati rispettivamente frattale estremo, frattale browniano e frattale marginale. Quanto maggiore è il valore di n tanto maggiormente la PSD (e di conseguenza anche la rugosità) di una superficie diminuirà all'aumentare delle frequenze spaziali. Un vero frattale avrebbe una lunghezza di correlazione approssimativamente uguale alla lunghezza del profilo considerato e la rugosità RMS calcolata dalla PSD sarebbe dominata fortemente dal contributo delle frequenze più basse. I parametri di rugosità calcolati sono fortemente dipendenti dalla banda di integrazione in frequenza, così come lo sono per le superfici non frattali. Questa forte dipendenza è uno dei motivi per cui si preferisce l'analisi tramite PSD all'approccio della funzione di autocorrelazione [Spiller 1994].

I frattali hanno la particolare qualità che, il loro spettro in potenza, può essere completamente caratterizzato tramite due sole quantità costanti: $n \in K_n$. In altre parole, in un certo senso ha più significato riportare le costanti frattali che non un parametro di altezza (rugosità RMS) ed un parametro trasversale (lunghezza d'onda media o lunghezza di correlazione). Come sarà

mostrato nel sesto capitolo, questa distinzione è sensata, dal momento che le PSD della maggior parte delle superfici di uso pratico (ottiche, semiconduttori, etc.), si comportano come frattali nelle bande di frequenze spaziali di interesse.

4.5 Lo scattering ed il suo legame con la topografia di una superficie

L'equazione (1.18) ricavata nel primo capitolo ci dice che in una superficie reale la rugosità σ ha l'effetto di smorzare esponenzialmente l'ampiezza teorica (data dalle leggi di Fresnel) di un'onda da essa riflessa. La riflettività nella direzione speculare, quindi, è legata alla rugosità ma con la sola riflettività non è possibile ottenere una completa caratterizzazione della superficie. La descrizione esaustiva del profili di una superficie è ricavabile, invece, dall'interpretazione della riflessione non-speculare (scattering), che si ha in tutte le direzioni all'infuori di quella speculare. Questo è possibile dal momento che scattering e PSD di una superficie sono legati tra loro.



Figura 4-4: rappresentazione tridimensionale del fenomeno di scattering ad incidenza radente. Nella condizione d'incidenza radente l'angolo polare di scattering θ_s è molto maggiore dell'angolo azimutale φ_s .

La teoria delle perturbazioni è in grado di spiegare il legame *PSD-scattering*: il risultato principale della teoria consiste nella relazione di proporzionalità tra la distribuzione dell'intensità

scatterata e la PSD di una superficie, espressa come una funzione della frequenza spaziale della superficie. Questi risultati sono validi non solo nel caso dello scattering dei raggi X, ma anche per lo scattering alle altre lunghezze d'onda.

Un tipica rappresentazione tridimensionale del fenomeno dello scattering and incidenza radente è in figura mostrata in figura 4-4: la radiazione incide con un angolo θ_i , e se la condizione di superficie-pulita (*smooth surface*)

$$2\sigma \sin \vartheta_i \ll \lambda \tag{4.17}$$

che non è altro che la condizione di applicabilità della teoria delle perturbazioni, è soddisfatta, la maggior parte della radiazione sarà riflessa nella direzione speculare. La presenza di irregolarità sulla superficie causa lo scattering della radiazione nelle direzioni (θ_s, φ_s). Se la superficie è isotropa, in incidenza radente lo scattering nel piano normale (φ_s) è 100 ÷ 1000 volte minore dello scattering nel piano incidente (θ_s) e può essere tranquillamente trascurato. Il diagramma di *scattering* nel piano incidente è legato alla PSD monodimensionale dalla seguente equazione approssimata [Church 1979]:

$$\frac{1}{I_0} \left(\frac{dI}{d\vartheta} \right)_s \approx 4k^3 \cdot \theta_i \cdot \theta_s^2 \cdot R(\theta_s, \theta_i) \cdot \frac{PSD(f_x)}{2\pi}$$
(4.18)

dove $k = 2\pi/\lambda$ è il numero d'onda ed $R(\theta_s, \varphi_s)$ è il fattore di polarizzazione che può espresso come

$$R(\theta_s, \theta_i) = [R(\theta_i)R(\theta_s)]^{\frac{1}{2}}$$
(4.19)

dove $R(\theta_s)$ e $R(\theta_i)$ sono le riflettività di Fresnel rispettivamente all'angolo di *scattering* e all'angolo di incidenza. Tale equazione ci dice che la PSD può essere ricavata dal diagramma di *scattering* senza assunzioni aggiuntive circa la distribuzione del profilo delle altezze o circa la forma della funzione di correlazione.

Le frequenze spaziali monodimensionali sono definite dagli angoli di scattering θ_s e di incidenza θ_i tramite l'equazione dei reticoli:

$$f_x = \frac{\left|\cos\theta_{sc} - \cos\theta_{inc}\right|}{\lambda} \tag{4.20}$$

4.6 Rugosità e diffusione delle interfacce di un multistrato

Le equazioni di Fresnel e di Snell, permettono di descrivere con precisione il comportamento della radiazione incidente sull'interfaccia tra due mezzi, se si suppone che questa sia perfettamente liscia. La riflessione da un'interfaccia avente dimensione verticale media σ , può essere divisa in due componenti distinte [Bruson 1995][Gullikson 1997][Madsen 2004]:

- 1. la riflessione speculare, nella quale il momento si conserva nel piano della superficie e la riflettività è confinata in una dimensione.
- 2. la riflessione non-speculare, composta dalla radiazione uscente (scatterata) a tutti gli altri angoli.

Come nel caso di una superficie singola, l'effetto di una rugosità interfacciale è di rimuovere parte dell'intensità speculare ideale e di ridistribuirla ad altri angoli di scattering. Questa distribuzione di intensità scatterata sarà quindi intrinsecamente legata al tipo di rugosità di interfaccia che causa lo scattering.

Tipi differenti di rugosità sono dati da differenti tipi di profili interfacciali, i due più comunemente usati sono [Stearns 1992] [Stearns 1998]:

- la diffusione tra due materiali che causa una variazione della composizione lungo l'interfaccia;
- la rugosità dovuta ad una vera e propria brusca variazione di altezza dell'interfaccia.

La larghezza delle interfacce di un multistrato può essere considerate come la combinazione di entrambi i tipi, ovvero:

$$\boldsymbol{\sigma} = \sqrt{\boldsymbol{\sigma}_d^2 + \boldsymbol{\sigma}_r^2} \tag{4.21}$$

dove σ_d è la larghezza di interfaccia dovuta a diffusione e σ_r invece quella dovuta a rugosità.

Dall'equazione (1.18) si può derivare l'ampiezza di riflettività speculare di un interfaccia di un multistrato [Névot 1980]:

$$\widetilde{r} = r_0 \exp\left(-2k_0 k_1 \sigma^2\right) \tag{4.22}$$

 k_0 è la componente perpendicolare del vettore d'onda incidente, k_1 la stessa componente dell'onda rifratta e r_0 l'ampiezza riflessa da una superficie ideale.

L'effetto combinato di rugosità e diffusione produce una riduzione della riflettività di una



struttura multistrato come mostrato nella figura 4-5..

Figura 4-5: simulazione dell'effetto di riduzione della riflettività di in multistrato a causa della rugosità/diffusione delle interfacce.

Dall'espressione (4.22) è chiaro che la riflettività speculare non distingue tra i due tipi di rugosità, e quindi, per sapere qualcosa riguardo all'origine della rugosità è necessario considerare anche la riflessione non speculare. Essa, nel caso dei multistrato, è ben descritta dalla teoria scalare conosciuta come *Distorted Wave Born Approximation* [Sinha 1998], la quale tratta la rugosità come una perturbazione della riflettività di una superficie ideale.

Un fattore importante per questo scattering, è il modo in cui la rugosità si propaga lungo il multistrato:

- una rugosità completamente non correlata $\sigma_{r,uncorr}$ tra gli strati, distribuisce la riflettività non-speculare in un alone uniforme;
- una rugosità perfettamente correlata $\sigma_{r,corr}$ ha il comportamento di un reticolo cristallino ed ordina lo scattering in strutture, obbedendo alla condizione di Bragg [Holý 1994].

La rugosità complessiva σ_r può essere descritta come la somma di rugosità correlata e non correlata $\sigma_r^2 = \sigma_{r,corr}^2 + \sigma_{r,uncorr}^2$. La componente non correlata è trascurabile fintanto che la larghezza dei picchi di Bragg, risultanti dal diagramma di scattering, sono della stessa larghezza dei picchi di Bragg propri della condizione speculare. In questo caso la rugosità correlata può


Figura 4-6: si possono vedere esempi di riflessione non-speculare da parte di strutture multistrato semiinfinite (curve $n^{\circ}1$) e composte da 40 bistrati (curve $n^{\circ}2$). Nella figura (a) è stata presupposta una rugosità completamente correlata, nella figura (b), invece, una rugosità completamente non-correlata.

essere ricavata dal confronto dei picchi del diagramma di scattering con un modello teorico [Kozhenikov 2002], e così si può ottenere una stima della diffusione di interfaccia come:

$$\sigma_d = \sqrt{\sigma^2 - \sigma_r^2} \tag{4.23}$$

4.6 Aumento della rugosità nei processi di crescita dei multistrato

La crescita dei multistrato è caratterizzata da un incremento costante della rugosità delle interfacce che man mano sono depositate. Questo è dovuto alla rugosità di partenza del substrato e ad una rugosità stocastica che insorge durante i processi di crescita dei *film*. Il profilo di uno strato singolo può essere descritto durante la crescita come una funzione $z(x, y, \tau)$, obbedente alla seguente equazione differenziale [Stearns 1998]:

$$\frac{\partial z}{\partial \tau} = -\nu \left| \nabla^n z \right| + \left(\frac{\partial \eta}{\partial \tau} \right)$$
(4.24)

la quale descrive l'evoluzione del profilo superficiale $z(x, y, \tau)$ con l'aumentare dello spessore τ . Il primo termine è proporzionale alla derivata di ordine *n*-esimo del profilo della superficie, tramite una costante ν , la quale solitamente assume dei valori negativi producendo un

peggioramento del profilo. L'esponente *n* dipende dal meccanismo con cui avviene la crescita e può assume valori interi compresi tra 1 e 4. La variabile η invece è chiamata *shot-noise* ed è il fattore stocastico che causa l'aumento della rugosità all'aumentare dello spessore τ .



Figura 4-7: esempio dell'evoluzione dell'aumento della rugosità con la crescita del numero di strati depositati

Un esempio reale di crescita della rugosità degli strati con l'aumentare dello spessore di un film multistrato è mostrato in figura 4-7. In prima approssimazione la rugosità delle interfacce è dalla seguente somma in quadratura:

$$\sigma_N^2 \approx \sigma_{Sub}^2 + \sigma_{Shot-Noise}^2 \tag{4.25}$$

dove σ_N è la rugosità della n-esima strato, σ_{Sub} è la rugosità della superficie su cui è cresciuto e $\sigma_{Shot-Noise}$ è la rugosità indotta dal processo di crescita stocastico.

Si noti che le frequenze spaziali in cui si ha un aumento della rugosità si trovano in un intervallo cruciale per la riflessione dei raggi X in incidenza radente (0.05 - 0.1 micron).

Capitolo 5

Strumentazione metrologica e calibrazioni nei raggi X

In questo capitolo sarà descritta la strumentazione metrologica installata presso l'Osservatorio Astronomico di Brera ed utilizzata dall'autore di questo lavoro di tesi, per caratterizzare substrati e campioni a multistrato, realizzati nell'ambito di progetti scientifici atti a dimostrare la possibilità di produrre ottiche multistrato per la riflessione dei raggi X duri. Inoltre sarà descritta tecnicamente una *facility* unica nel suo genere in contesto europeo, presso la quale sono state effettuate le calibrazioni ad illuminazione piena (*full illumination*) nei raggi X duri di alcuni prototipi di ottiche multistrato. Si tratta della *facility* Panter-MPE di Monaco, pensata per la calibrazione dei telescopi focalizzanti per raggi X soffici, ed estesa per la prima volta a misurazioni ad illuminazione piena nella banda dei raggi X duri proprio nel contesto di queste prove sperimentali.

Le misurazioni metrologiche, necessarie per assicurarsi che gli errori di figura ed i valori di rugosità degli specchi siano entro le tolleranze previste, devono essere effettuate sullo specchio come un tuttuno e su piccole aree della superficie, in modo da controllare sia le specifiche generiche sia le deformazioni locali. Le deviazioni dalla superficie richiesta sono solitamente classificate in due tipi:

- Perturbazioni macrotopografiche (variazioni di profilo assiale e di diametro)
- Variazioni microtopografiche

Le misurazioni macrotopografiche dei diametri e dei profili assiali, sono effettuate tramite tecniche interferometriche, che permettono un'accuratezza rispettivamente di \sim 5 nm e di \sim 1 nm.

Le misurazioni microtopografiche, invece, sono più complicate, dato che lo specchio deve

essere protetto da contaminazioni, fluttuazioni di temperatura e vibrazioni meccaniche. Nella microtopografia le indagini di tipo ottico possiedono una sensibilità maggiore rispetto alle tecniche interferometriche effettuate con i profilometri. Per esempio è molto utilizzato il microscopio a contrasto di fase Nomarski, il quale, utilizzando luce polarizzata, permette di rivelare difetti o rilievi su di una superficie, con una risoluzione di 1 nm in altezza e di 200 nm in larghezza. Un altro strumento molto utilizzato, basato però su principi fisici diversi, è il microscopio a forza atomica, il quale permette di ottenere profili bidimensionali su lunghezze di scansione dell'ordine del micron. Un ruolo importante è svolto inoltre da misure di tipo indiretto effettuate tramite *pencil beam* (fascio monocromatico sottile) alle lunghezze d'onda dei raggi X, dalle quali si ricavano diagrammi di *scattering* direttamente collegati alle proprietà statistiche delle superfici.

Nell'ambito di questo lavoro di tesi l'autore si è occupato in particolare delle misurazioni microtopografiche e delle misurazioni, analizzando i dati sperimentali ed in alcuni casi utilizzando di persona i vari apparati strumentali.

5.1 Strumenti utilizzati ed analisi dei dati sperimentali

Le tecniche di misura che sono state utilizzate sono di tre tipi: profilometria ottica, microscopia a forza atomica ed indagine ai raggi X. Un'immagine di alcuni degli strumenti per la caratterizzazione metrologica installati presso l'Osservatorio di Brera ed utilizzati nell'ambito di questo lavoro di tesi è mostrata in figura 5-1: il profilometro ottico WYKO Topo 2D (A), il profilometro a lunga traccia LTP (B) ed il microscopio a forza atomica AFM (D). In questo paragrafo sarà fornita una concisa descrizione delle diverse tecniche di indagine metrologica diretta, rimandando al prossimo una più dettagliata descrizione dello strumento utilizzato maggiormente dall'autore di questo lavoro di tesi, vale a dire il diffrattometro per raggi X BEDE con tubo di tipo Röngten. In figura 5-2 è mostrato un grafico in cui sono riportate le diverse regioni di frequenze spaziali indagabili utilizzando le varie tecniche sopra menzionate e nel quale si può notare come esse presentino degli intervalli di sovrapposizione in cui è possibile confrontare le misure sperimentali.

Il trattamento dei dati sperimentali è caratteristico per ogni strumento, e per ogni strumento è stato necessario utilizzare dei programmi di conversione e calcolo. Alcuni di questi programmi sono stati forniti dalle case produttrici, altri sono stati creati dall'autore di questo lavoro di tesi, con il linguaggio scientifico Fortran.



Figura 5-1: alcuni degli strumenti metrologici installati presso l'Osservatorio Astronomico di Brera. Il profilometro ottico LTP (B) utilizzato per misurare i profili ed i raggi di curvatura, il profilometro WYKO Topo 2D (A) ed il microscopio a forza atomica AFM (B) utilizzati per la microtopografia delle superfici. E' anche visibile uno strumento utile per misure di rotondità degli specchi (C).



Figura 5-2: frequenze spaziali indagabili con le diverse tecniche metrologiche.

Un denominatore comune delle tecniche sperimentali dirette è l'andamento preferenziale assunto dalla sequenza dei dati grezzi misurati, con un livello di profilo medio \overline{z} diverso da zero. Questo è dovuto all'impossibilità di calibrare a priori lo strumento con il livello superficiale medio. Quello che si fa perciò, è sottrarre ai profili grezzi un polinomio di un certo grado corrispondente all'andamento preferenziale assunto, in modo da ricalibrare i dati ad un livello di riferimento uguale a zero.

5.1.1 Analisi dei dati ottenuti con il profilometro a lunga traccia LTP

Il profilometro a lunga traccia LTP è uno strumento di non contatto per la misurazione di profili superficiali e di errori di pendenza a bassa frequenza spaziale, basato su principi interferometrici [Takacs 1990]. Con questo strumento è possibile misurare la pendenza di superfici piatte, sferiche ed asferiche lunghe fino ad 1 metro, con raggi di curvatura qualsiasi, con una precisione migliore di 1 *mrad*.

Il primo passo, nel trattare i dati grezzi forniti dall'LTP, consiste nel convertire il profilo di intensità, registrato dai *pixels* durante la scansione, in valori di pendenza come funzioni della posizione lungo il campione esaminato (ciò che si misura con l'LTP, è la pendenza locale della superficie relativa ad uno zero arbitrario, il quale è definito dal *fit* di una parabola con il minimo di interferenza del profilo di intensità del campione e di un campione di riferimento). Il passo successivo consiste nel rimuovere il profilo corrispondente al fascio di riferimento, ai dati di pendenza, per poi sottrarre un polinomio¹ (solitamente di grado 0), in modo da correggere orientazioni preferenziali indotte da errori geometrici di posizionamento.

Una volta che i dati sono nella forma di altezze ovvero pendenze, le varie quantità statistiche possono essere calcolate, trasformando i profili nel dominio delle frequenze tramite analisi di Fourier². L'intervallo delle frequenze spaziali su cui integrare è dato dal teorema di *Nyquist* o del campionamento critico:

 $f_{MIN} = 1/L_{SCAN}$ e $f_{MAX} = 1/2 \cdot Passo$

L'intervallo caratteristico va da 10^{-6} a 10^{-3} µm⁻¹.

¹ Sottrarre un polinomio di grado 0 ai dati di *slope* corrisponde a sottrarre un polinomio di grado 1 ai dati di altezza, dato che il profilo superficiale delle altezze si ricava dall'integrazione della funzione di *slope*.

² In realtà il software effettua una FFT (Fast Fourier Trasformation) e quindi se il numero dei punti campionati non è una potenza di due, la PSD viene estrapolata per un numero di punti tali da arrivare alla potenza di due più vicina, di conseguenza gli unici punti sperimentali sono quelli corrispondenti al campionamento critico.

Questo strumento fornisce anche il raggio di curvatura delle superfici misurate, derivandolo o dal coefficiente del termine di 1° grado del *fit* della funzione di pendenza o dal coefficiente del termine di 2° grado del profilo delle altezze.

5.1.2 Analisi dei dati ottenuti con il profilometro ottico WYKO

Il profilometro ottico WYKO topo-2D è uno strumento utilizzato per la caratterizzazione della microtopografia di superfici ottiche. Una luce policromatica è collimata e filtrata per poi essere indirizzata verso un interferometro, il quale produce due fasci, di cui uno incide sulla superficie del campione da misurare e l'altro incide su di un campione di riferimento. Dopo la riflessione i due fasci si ricombinano nell'interferometro ed il fascio risultante è indirizzato verso un rivelatore CCD sensibile alla posizione. Il profilo della superficie è allora ricavato dall'analisi delle frange di interferenza, misurando di quanto deviano dalla condizione di equispaziatura [Bhushon 1935]. Per la caratterizzazione delle superfici sono utilizzabili teste ottiche con diverso ingrandimento, 20X e 2.5X, le quali danno luogo ad un campionamento di 1024 punti su una lunghezza di scansione rispettivamente di 0.66 e 5.28 mm.



Figura 5-3: esempio di profilo misurato col WYKO (ingrandimento 20X) con relativo fit e profilo ricalibrato da cui si calcolerà la PSD.

Operativamente, sui vari campioni si acquisiscono più scansioni in punti diversi della superficie, in modo da avere dati statisticamente rilevanti. I dati grezzi, una volta convertiti con opportuni programmi, si presentano sotto forma di *file* binario con posizione sulla superficie in *mm* e profilo del campione in *nm*, affetti da un errore sistematico dovuto ad imprecisioni nel posizionamento del campione rispetto al fascio incidente. Quest'errore, che ha l'effetto di spostare i dati in altezza relativamente al livello superficiale medio, può essere eliminato effettuando una regressione lineare ai minimi quadrati. In figura 5-3 è mostrato un esempio grafico della procedura descritta. Dai profili normalizzati ottenuti per ogni scansione, tramite l'analisi di Fourier, si possono ricavare le relative PSD che poi sono mediate aritmicamente per ottenere un'unica PSD rappresentativa della superficie. Per il calcolo delle PSD a partire dai profili forniti dallo strumento l'autore di questa tesi ha creato appositamente un programma in linguaggio Fortran (Appendice A-2).

4.1.3 Analisi dei dati ottenuti con il Microscopio a Forza Atomica

I microscopi a forza atomica (AFM) sono degli strumenti molto raffinati che permettono la caratterizzazione della microtopografia di superfici ottiche su frequenze spaziali molto alte. Un microscopio a forza atomica è costituito da una sonda con una punta metallica dello spessore di alcuni micrometri, monitorata da un fascio laser. Quando questa sonda è portata sufficientemente vicino alla superficie da misurare, le forze di interazione tra gli atomi (dell'ordine dei nanonewton), provocano la flessione della leva su cui è montata la punta. La posizione della leva è rilevata dal segnale di ritorno del fascio laser su di un trasduttore.

Le scansioni effettuate con l'AFM installato presso l'Osservatorio Astronomico di Brera, seguono il sistema di rilevamento *tapping mode* [Binning 1985], in altre parole con la punta della sonda non sempre a contatto con la superficie, evitando così deterioramenti della stessa che caratterizzerebbero la forma delle immagini ottenute. Inoltre, lo strumento è di dimensioni ridotte, nella cosiddetta versione *Stand Alone,* ed è possibile utilizzarlo all'interno di ottiche a simmetria cilindrica di piccole dimensioni (figura 5-2 B). L'operazione di campionamento è effettuata su di una matrice bidimensionale di 512x512 punti e le lunghezze di scansione effettuabili sono di 100, 10, ed 1 micron. Le immagini ottenute da una scansione sono sottoposte ad una procedura di "appiattimento" (*flattening*), per eliminare la curvatura indotta dalla forma della sonda e dall'errato posizionamento del campione, sottraendo un polinomio di ordine da 0 a 3. L'analisi di Fourier sulla mappa ottenuta, tipo quella in figura 5-4, permette di ricavare la *PSD* bidimensionale, la cui integrazione, sulla sequenza di frequenze relative ad una delle due direzioni, permette di avere una *PSD* monodimensionale.



Figura 5-4: tipica immagine tridimensionale ottenibile da una scansione di 1 micron con il Microscopio a Forza Atomica.

5.1.4 Analisi dei dati di Riflettività e di Scattering

L'indagine con i raggi X fornisce un metodo di misura indiretto per la rugosità di superfici e, a differenza degli strumenti a misura diretta, non di piccoli elementi locali di superficie ma bensì di una grande porzione di essa [Christensen 1988] [Sinha 1994].

Con il diffratometro a raggi X installato presso l'Osservatorio Astronomico di Brera è possibile effettuare misure di riflettività (**XRR**) e di *scattering* (**XRS**) di superfici ottiche a circa 8.05 e 17.5 *keV*, energie caratteristiche delle righe di emissione K_{α} rispettivamente del Rame e del Molibdeno:

• **XRR**: i dati di riflettività, per poter essere analizzati, devono essere per prima cosa normalizzati al valore del fascio diretto, e per tener conto di eventuali variazioni di emissività o di efficienza di rivelazione durante la misura, tale valore va acquisito all'inizio ed alla fine dell'operazione di misura. La curva di riflettività (*rocking curve*), sia essa di una superficie, di un singolo strato o di un multistrato, è definita dalle caratteristiche fisiche¹ dei materiali usati, ed una volta adattata con un modello teorico

¹ Costanti ottiche, densità, spessori e rugosità di Debye-Waller.

che simula l'andamento della curva, tali proprietà possono essere ricavate. Per effettuare tale operazione sono stati utilizzati i pacchetti *software* IMD di [Windt 1998] e PPM [Spiga 2004c], nei cui *database* sono presenti le costanti ottiche degli elementi utilizzati per la focalizzazione dei raggi X.

• **XRS:** dall'analisi dei dati di *scattering* è possibile ricavare la *Power Spectral Density* in un intervallo di frequenze spaziali a cavallo tra la profilometria e la microscopia (§ 4.5). Per superfici senza deposizione di *film* è stato utilizzato il metodo descritto da E. L. Church [Church 1979] [Church 1986]: mettendo il campione ad un angolo di incidenza di poco superiore all'angolo critico¹ dell'elemento e scansionando con il rivelatore attorno alla direzione di riflessione speculare, si ottiene un profilo gaussiano, che differisce da quello del fascio diretto in altezza e nelle "ali" (figura 5-5). L'intervallo angolare su cui definire la PSD è definito dall'angolo in cui il profilo di *scattering* comincia ad essere distinguibile dal profilo del fascio diretto (ciò dipende dalla risoluzione angolare dello strumento) e dall'angolo in cui il segnale è ancora distinguibile dal rumore strumentale (nelle misure di *scattering* è fondamentale avere un buon rapporto segnale/rumore). Per l'analisi dei dati è stato utilizzato il programma Fortran riportato in Appendice (A-1).



Figura 5-5: sovrapposizione dei profili del fascio diretto e di una misura di scattering.

¹ Per angolo critico si intende l'angolo di incidenza a cui si ha una brusca diminuzione della riflettività che definisce la separazione tra la regione a riflettività totale e la regione dei picchi di Bragg.

5.2 Descrizione tecnica del diffrattometro per raggi X

Il diffrattometro installato presso l'Osservatorio Astronomico di Brera è un prodotto della ditta britannica *Bede Scientific*. Si tratta di un diffratometro a tre assi, basato su una sorgente convenzionale di raggi X che emette radiazione di frenamento, con il quale è possibile effettuare misure di riflettività e di *scattering*. Nello svolgimento del lavoro di tesi, collocato nell'ambito dell'attività di ricerca e sviluppo per la tecnologia multistrato in corso presso l'Osservatorio di Brera, questo strumento è stato utilizzato in particolar modo, per testare il gran numero di campioni di prova che è stato necessario caratterizzare.

5.2.1 La struttura dell'apparato sperimentale

Il funzionamento del diffrattometro per l'analisi nei raggi X è basato sull'utilizzo di un pennello di radiazione monocromatica e collimata (*pencil beam*), incidente in radenza su di una superficie riflettente. L'apparato sperimentale è composto da un tubo a raggi X, da un sistema di cristalli e fenditure per la collimazione e la monocromatizzazione, da un goniometro su cui fissare i campioni e da un rivelatore di fotoni X.



Figura 5-6: schema geometrico del diffrattometro Bede installato all'Osservatorio di Brera ed utilizzato per la caratterizzazione delle superfici mediante raggi X. La linea gialla indica il percorso compiuto dalla radiazione dalla sorgente al rivelatore, le fenditure utilizzate per determinare le dimensioni del fascio sono indicate in rosso e la posizione del campione sul goniometro è indicata in blu. L'ingrandimento in basso si riferisce ai cristalli utilizzati per la monocromatizzazione e la collimazione del fascio.

Rivelatore e campione possono ruotare indipendentemente per effettuare misure di riflessione non speculare, o ruotare simultaneamente in una configurazione $\theta/2\theta$ per effettuare misure di riflettività speculare. Le dimensioni angolari della fenditura utilizzata sul rivelatore, sono importanti per stabilire l'angolo massimo di riflessione non speculare *(scattering)* rivelato assieme alla riflessione speculare. Se R è la distanza tra il campione ed il rivelatore e δx sono le dimensioni lineari della fenditura, l'angolo massimo di *scattering*, misurato rispetto alla normale della superficie del campione, sarà dato da $\delta\theta = \delta x/2R$. Dall'angolo massimo di *scattering*, tramite l'equazione (4.1), si possono stabilire le frequenze spaziali indagate. Se, ad esempio, si utilizza una fenditura di 1 mm, si hanno angoli massimi di *scattering* di ± 250 secondi d'arco.

5.2.5 Il tubo a raggi X tipo Röngten

La sorgente di radiazione del diffrattometro BEDE è costituita da un tubo a raggi X di tipo Röngten. In dispositivi come questo la radiazione è creata all'interno di un tubo sottovuoto, facendo collidere contro un bersaglio, che funge da anodo, un fascio di elettroni accelerato linearmente mediante una differenza di potenziale. Se l'energia degli elettroni è sufficiente, sarà prodotta radiazione X per *bremsstrahlung*, composta da uno spettro continuo sommato alle righe caratteristiche del materiale utilizzato come anodo.



Figura 5-7: spettri di radiazione emessi per bremsstrahlung da un tubo di tipo Röngten con anodo in Rame per alcuni valori di differenza di potenziale. Per elettroni con energia inferiori a circa 10 keV non si ha l'attivazione delle righe di emissione K del rame.

Per il sistema adottato presso l'Osservatorio Astronomico di Brera sono disponibili due sorgenti, una con anodo in Rame la cui riga K_{α} possiede un'energia di 8.05 keV, ed una con anodo in Molibdeno la cui riga K_{α} possiede un'energia di 17.47 keV. La distanza limitata a 90 centimetri tra sorgente e rivelatore, e le elevate energie fornite dalle sorgenti in corrispondenza delle righe K, sono tali da permettere di trascurare l'assorbimento dell'aria e quindi di non lavorare in condizioni di vuoto. I tubi a raggi X di tipo Röngten sono limitati da un'intensità massima di radiazione di circa 10^{10} fotoni/sec·mrad²·mm², con le sorgenti di sincrotrone, invece, si possono raggiungere brillanze di circa 9-10 ordini di grandezza più intense.

5.2.3 Il sistema di monocromatizzazione e collimazione

Per poter testare le proprietà statistiche di una superficie si utilizza un *pencil beam* costituito esclusivamente dalla riga K_{α} , per cui la radiazione continua emessa dalla sorgente necessita di essere monocromatizzata. La monocromatizzazione avviene per diffrazione alla Bragg, tramite uno o due cristalli in Silicio a canalizzazione in geometria non-dispersiva [Loxley 1995], all'energia della K_{α} propria dell'anodo utilizzato.



Figura 5-8: principio di funzionamento della monocromatizzazione tramite cristallo di Silicio a canalizzazione. Si possono utilizzare due tipi di canali: a) canale ad alta risoluzione b) canale ad alta intensità.

Il cristallo possiede due canali, uno a taglio parallelo rispetto all'orientazione (0,0,2) dei piani reticolari ed uno a taglio asimmetrico. Nella configurazione ad alta risoluzione si hanno quattro riflessioni e all'uscita si ha una divergenza angolare di circa 8 secondi d'arco (FWHM); nella configurazione ad alta intensità, invece, si hanno solo due riflessioni e la divergenza angolare è di circa 20 secondi d'arco (FWHM). In tutte le misure effettuate in questo lavoro di tesi è stata

utilizzata la configurazione ad alta intensità. La dispersione in energia $\Delta E/E$ del fascio incidente sul campione è, in entrambi i casi, di poco superiore a 10⁻⁴.

L'effetto Footprint

Questo effetto si fa sentire nelle misure di riflettività, nelle quali si ha la necessità di far variare l'angolo di incidenza del fascio sul campione, facendo ruotare quest'ultimo sul proprio asse verticale. La dimensione laterale del fascio incidente, determina l'impronta che esso ha sul campione. Se un campione ha dimensione lineare 2L ed il fascio che incide a metà del campione ha dimensione lineare minimo per il quale si avrà un oscuramento completo del fascio sarà dato da:

$$\sin \alpha_{inc} = \frac{r}{L}$$

Per angoli di incidenza minori di quello che soddisfa tale equazione, si ha che una parte del fascio non incide sul campione. Per campioni con piccole dimensioni lineari è allora necessario limitare le dimensioni del fascio con una fenditura, prima che esso incida sul campione. Più stretta è la fenditura più l'angolo di incidenza per il quale si supera l'effetto di *footprint* sarà piccolo. Solitamente si utilizza in uscita dal cristallo monocromatore una fenditura larga 50 micrometri, che, per un campione lungo 10 centimetri ad esempio, darà effetto di *footprint* fino ad un angolo di incidenza di circa 200 secondi d'arco.

5.2.4 Il rivelatore: scintillatore e fotomoltiplicatore

Il rivelatore utilizzato è basato su di un cristallo scintillatore YAP(Ce) accoppiato ad un fotomoltiplicatore. L'efficienza di rivelazione può essere ottimizzata per le due diverse energie, mediante il controllo del voltaggio e delle soglie di sensibilità inferiori e superiori. Con una scelta opportuna dei parametri del rivelatore, si può arrivare ad avere un rumore di fondo di 0.3 conteggi al secondo, su di un tempo di integrazione di 10 secondi. Il rivelatore mantiene una buona linearità fino a 300000 conteggi al secondo, ma può essere utilizzato anche ad intensità superiori, ricavando, prima della misura, il numero esatto di conteggi tramite l'estinzione del fascio con uno spessore di un materiale a coefficiente di assorbimento noto. Il rivelatore può inoltre essere sostituito con una telecamera, molto utile in fase di allineamento dell'asse ottico.

5.3 Calibrazione di ottiche multistrato presso la facility PANTER

Presso la PANTER, nell'ambito di un progetto scientifico appena conclusosi coordinato dall'Osservatorio Astronomico di Brera, è stata eseguita per la prima volta al mondo (a quanto sappiamo), la calibrazione nei raggi X duri di un'ottica focalizzante multistrato a geometria Wolter I. Si tratta di un'ottica con copertura multistrato in Pt/C a spaziatura costante, prodotta con la tecnica della replica tramite Nichel elettroformato, dall'Osservatorio Astronomico di Brera in collaborazione con la ditta privata Media Lario, nel contesto del progetto "Payload per Astrofisica delle alte energie" finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana. In questo paragrafo sarà fornita la descrizione tecnica della *facility*, alla quale si farà riferimento nel momento in cui saranno descritti i risultati sperimentali della calibrazione effettuata. Nell'ambito di questo lavoro di tesi, inoltre, sono stati analizzati anche i risultati sperimentali ottenuti dalla calibrazione effettuata presso la PANTER di un ottica a singolo cono con multistrato a spaziatura variabile, realizzata dall'Osservatorio Astronomico di Brera in collaborazione con l'*Harvard Smithsonian Center for Astrophysics* di Boston nel contesto di un progetto legato alla missione Constellation-X.



Figura 5-8: immagine aerea in cui è possibile notare le dimensioni e la composizione della facility

La PANTER è una *facility* del *Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE)* situata nella città bavarese di Neuried in Germania, che può essere considerata unica in Europa. La PANTER è adatta per calibrare ottiche a raggi X per uso astronomico, essendo in grado di fornire un fascio X ad illuminazione piena a bassa divergenza. Questo tipo di *facility* è stata ideata negli anni Settanta per facilitare lo sviluppo e la realizzazione delle ottiche del satellite ROSAT, ma subito dopo la costruzione ci si è resi conto che una simile apparecchiatura era

assolutamente indispensabile per la realizzazione di telescopi focalizzanti per raggi X. La PANTER, infatti, da allora è stata utilizzata per la calibrazione delle ottiche focalizzanti di EXOSAT, BeppoSAX, JET-X, SOHO/CDS, ABRIXAS, XMM-Newton e SWIFT.

5.3.1 La struttura della facility

Per la calibrazione dei telescopi per raggi X, la situazione ideale richiederebbe una sorgente a distanza infinita, come le sorgenti celesti, ma, non essendo questo possibile, una buona approssimazione di fascio largo e collimato si può ottenere con una sorgente posta ad una distanza molto elevata. Nel caso della PANTER la distanza tra sorgente ed ottica è di 123 m, e questa lunghezza, che è stata pensata appositamente per ROSAT, crea una divergenza del fascio che deve essere tenuta in considerazione negli esperimenti attuali. La bassa divergenza ottenibile (0.064° per un'ottica di 300 mm di diametro posta sulla finestra d'entrata della camera) è un parametro molto importante, dato che gli angoli tipici di riflessione per le ottiche a raggi X duri sono compresi tra $0.1^{\circ} \div 0.3^{\circ}$. Gli esperimenti si svolgono in un'enorme camera pulita (classe 1000) con dimensioni 12.5 m x 3.5 m, collegata con la sorgente mediante un tubo di 1 m di larghezza. La posizione relativa della sorgente e dell'ottica è regolabile mediante una serie di dispositivi motorizzati con una precisione di 3 micron in traslazione e 1 secondo d'arco in rotazione. Tubo, camera e sorgente sono tenuti sotto vuoto a 10⁻⁶ mbar, mediante delle pompe turbo-molecolari posizionate in quattro stazioni indipendenti di pompaggio. In figura 5-8 è possibile vedere una foto area della facility, mentre nella figura 5-9 è mostrata un'illustrazione schematica della struttura.



Figura 5-9: illustrazione schematica della struttura della facility

5.3.2 La sorgente a raggi X

Presso la PANTER sono disponibili quattro tipi di sorgenti a raggi X. Le sorgenti sono montate su di un sistema a rotaie e possono essere intercambiate tra loro nel giro di un paio d'ore. La sorgente principale è una sorgente aperta con dei bersagli montati a ruota. Sono disponibili 16 diversi elementi bersaglio con righe di emissione caratteristiche ad energie comprese tra 0.28 *keV* e 8.05 *keV*. Il flusso tipico è di circa 5000 conteggi/sec/cm², e cambia di poco a seconda del bersaglio utilizzato. Lo spettro delle sorgenti è lo spettro tipico della radiazione di *bremsstrahlung* sommata alle righe di fluorescenza tipiche del materiale utilizzato come bersaglio. Tramite alcuni filtri di assorbimento, lo spettro può essere modificato sopprimendo alcune parti del continuo o alcune righe di fluorescenza.

Nel caso in cui ci sia bisogno di un flusso molto elevato, è possibile utilizzare una sorgente presente in commercio, la quale fornisce una coppia di righe tra 4.5 keV e 22 keV. Dal momento che questa sorgente fornisce un alto voltaggio sino a 60 kV, può coprire un intervallo di energia da 4.5 keV a 50 keV usando la componente continua dello spettro di emissione. In combinazione con un rivelatore ad alta risoluzione di energia, come quello disponibile alla PANTER, le misurazione a banda larga (energy-dispersive mode) sono un'alternativa interessante all'uso delle singole righe di fluorescenza.



Figura 5-10: immagine della camera in cui sono posizionate le ottiche da calibrare.

Per calibrare la risoluzione alle alte energie dei moderni rivelatori per raggi X, occorre avere dei fasci monocromatici molto definiti, e perciò, alla PANTER sono installati due monocromatori: un monocromatore a reticolo a riflessione regolabile, che copre l'intervallo di energia da 0.2 a 1 *keV*; un monocromatore a doppio cristallo, anch'esso regolabile, che fornisce fotoni con energie da 1.5 a 25 *keV*. La risoluzione di entrambi i sistemi è del 4% ed entrambi i sistemi selezionano il continuo prodotto da bersagli di Rame o Molibdeno, in una sorgente a raggi X aperta.

5.3.3 Il rivelatore per raggi X

Alla PANTER sono comunemente utilizzati due sistemi di rivelatore: il modello di scorta del rivelatore PSPC (*Position Sensitive Proportional Counter*) utilizzato nella missione ROSAT ed il modello di scorta della camera EPIC pn-CCD ancora attiva a bordo di XMM-Newton.

Il rivelatore PSPC possiede una discreta risoluzione in energia ed una discreta risoluzione spaziale (30% e 250 micrometri a 1.5 *keV*), ed essendo un dispositivo per il conteggio esatto dei fotoni, è indicato per misurare l'area efficace degli specchi a raggi X. Il suo grande campo di vista (diametro di 80 mm), inoltre, lo rende molto utile per la misurazione dello *scattering* degli specchi e per le procedure di allineamento.



Photon Energy	Quantum Efficiency
10 keV	89.1 %
20 keV	25.1 %
30 keV	8.6 %
40 keV	4.7 %
50 keV	3 %

Figura 5-11: efficienza quantica del rivelatore EPIC pn-CCD in funzione dell'energia.

I vantaggi della camera *EPIC pn-CCD*, consistono in una migliore risoluzione spaziale (*pixels* da 150 micrometri) ed in una migliore risoluzione in energia (145 keV a 6 keV). Inoltre, con essa si possono trattare energie fino a 50 keV, contro un massimo di 10 keV del rivelatore PSPC. La sua area di raccolta è di 36 cm². In figura 5-11 sono mostrati il profilo di efficienza quantica della camera nella banda dei raggi X molli ed il valore numerico per alcune energie. Per la caratterizzazione di specchi ad alta risoluzione, è possibile utilizzare una camera CCD con dei *pixels* da 27 micrometri, ma dotata di un'area di raccolta di soli 10 mm². Questa camera è un predecessore della camera EPIC MOS [Wells 1997] e lavora nell'intervallo tra 0.2 e 8 keV.

Per monitorare l'uniformità del fascio sono installati dei sistemi di contatori: quattro contatori proporzionali dotati di un area di raccolta di 36 cm² montati in corrispondenza dell'entrata del tubo, di cui uno può essere mosso in due direzioni; un contatore a stato solido con camera a deriva dotato di un'area di raccolta di 2.5 mm² posizionato alla fine del tubo in prossimità della sorgente, anch'esso movibile in due direzioni.

5.3.4 Estensione della facility nei raggi x duri

Due possibili arrangiamenti sperimentali possono essere utilizzati alla PANTER per testare le ottiche multistrato ad energie superiori a 15 keV. Il primo permette misurazioni sino a circa 25 keV, ed è basato sull'uso del cristallo monocromatore citato al punto precedente. Il secondo, invece, fa uso dello spettro di *bremsstrahlung* a larga banda sfruttando le capacità di risoluzione ad alte energie della camera EPIC pn-CCD.

Calibrazione nei raggi x duri in modalita' monocromatica

La sorgente X monocromatica in considerazione è costituita da due unità separate: una camera con uno speciale tubo a raggi X aperto che può operare con voltaggi sino a 50 kV ed intensità di corrente sino a 60 mA, raffreddato ad acqua e dotato di anodi-bersaglio intercambiabili di 1 mm di diametro (Rame e Molibdeno); una camera in cui avviene la monocromatizzazione del fascio per mezzo di un doppio cristallo, avente un asse di rotazione centrato a metà del primo dei due cristalli¹. Le due camere sono divise da un separatore removibile dotato di una "finestra" in Berillio del diametro di 4 mm e spessa 8 micrometri.

¹ Per preservare la direzione iniziale del fascio, il secondo cristallo è spostato parallelamente al primo simultaneamente alla rotazione di tutto il sistema.

La risoluzione in energia di un monocromatore dipende dalle proprietà del cristallo e dalla divergenza del fascio e, nel caso della radiazione monocromatica in esame, la maggior limitazione consiste nella divergenza del fascio (dell'ordine di 0.4°). La costruzione del sistema di monocromatizzazione permette l'uso di tre differenti coppie di cristalli: HOPG(002), KAP(100) e Si(111). I cristalli in grafite HOPG (Highly Oriented Pyrolitic Graphite) sono solitamente utilizzati per il loro basso coefficiente di assorbimento e per la loro alta riflettività integrata. Questi cristalli sono caratterizzati da una ben nota struttura a mosaico, con una dispersione di 0.3°, che permette di ottenere una alta intensità del fascio monocromatizzato ed allo stesso tempo di preservare la risoluzione in energia a livelli accettabili¹. I cristalli HOPG hanno un periodo di struttura atomica di 2d=6.708 Å e possono quindi essere usati per energie superiori ai 2 keV. Per energie sopra i 15 keV, invece, con il fascio ottenuto mediante anodo in Molibdeno, la monocromatizzazione è effettuata al picco di Bragg del secondo ordine, con una risoluzione in energia $\Delta E/E$ minore del 3%. Alla PANTER, le intensità tipiche fornite dal sistema a cristallo HOPG all'entrata della camera, sono 100 cts/sec/cm² a 3.5 keV e 600 cts/sec/cm² a 8 keV per il picco di Bragg del primo ordine, e la metà per il picco del secondo ordine.

Calibrazione nei raggi x duri in modalita' a larga banda (energy-dispersive mode)

Un modo molto semplice di utilizzare la *facility* nei raggi X duri è la modalità ad illuminazione a larga banda. In questo caso si fa uso della risoluzione energetica della camera EPIC pn-CCD (~ 2.5% a 6 keV e miglioramento proporzionale alla radice quadra dell'energia dei fotoni), la quale permette la caratterizzazione degli specchi nei raggi X duri. Anche se l'efficienza quantica della camera diminuisce bruscamente sopra i 10 *keV*, si possono avere dei flussi molto intensi con l'utilizzo di una sorgente presente in commercio e di un bersaglio in Tungsteno. Dal momento che questa sorgente fornisce voltaggi sino a 60 kV, usando la compente continua dello spettro di emissione per *bremsstrahlung* del Tungsteno, essa può coprire l'intervallo di energie da 4.5 keV a 50 keV. Il flusso ottenibile all'entrata della camera può arrivare a 3500 fotoni/cm²/s nell'intervallo 10-40 keV, a seconda dei parametri elettrici impostati.

¹ In questo caso la risoluzione è determinata principalmente dalla divergenza intrinseca del fascio.



Figura 5-12: Spettro di emissione continuo dell'anodo in Tungsteno.

5.3.5 Effetto della distanza finita della sorgente

Anche se la PANTER è la migliore approssimazione di sorgente X celeste a disposizione della comunità scientifica, la distanza finita della sorgente deve essere tenuta in considerazione. In questo paragrafo sono descritti gli effetti della distanza finita sulle proprietà ottiche degli specchi per raggi X a geometria Wolter I.

Riprendendo l'equazione (1.24) per una sorgente posta a distanza infinita (caso di sorgente celeste puntiforme), l'angolo descritto dalla direzione dei un raggio focalizzato con l'asse ottico è pari a 4α , dove:

$$f_{\infty} = \frac{R}{tg(4\alpha)} \tag{5.1}$$

Se la sorgente puntiforme è invece posta a distanza finita, l'angolo descritto dal fotone focalizzato con l'asse ottico è pari a 4α - β (fig. 5-13). Si ha infatti che:

$$f = \frac{R}{tg} (4\alpha - \beta) \tag{5.2}$$



Figura 5-13: angoli di incidenza nel caso di sorgente posta a distanza finita.

Presso la *facility* Panter-MPE la distanza X_s tra la sorgente e l'ottica è di circa 123 m e l'angolo di divergenza della radiazione è $\beta = 0.064^{\circ}$. Conseguentemente si avrà un aumento della distanza focale.



Figura 5-14: effetto della perdita di area efficace per effetto della distanza finita della sorgente.

Un'altra conseguenza della distanza finita della sorgente è una perdita di area efficace, in quanto i fotoni che colpiscono la parte della parabola più vicina alla sorgente (rappresentata con Q nella figura 5-14) vengono riflessi in modo tale da non poter intercettare la seconda superficie di riflessione (cioè l'iperbole). La percentuale di area geometrica persa è calcolabile con la seguente formula:

$$A_{L} = 1 - \frac{X_{s} - 4f}{X_{s} + 4f}$$
(5.3)

Capitolo 6

Caratterizzazioni di specchi a multistrato per telescopi focalizzanti

In questo capitolo sono riportati i risultati sperimentali di una serie di caratterizzazioni topografiche ed analisi in raggi X di substrati e film multistrato effettuate nel contesto di sviluppi di ottiche per future missioni di astronomia X in corso presso l'Osservatorio Astronomico di Brera. In tali ricerche sono coinvolti anche altri Istituti Italiani e stranieri (l'Istituto IASF-CNR di Milano, l'Osservatorio Astronomico di Palermo, l'*Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics* di Boston, l'Istituto MPE di Monaco), nonché industrie private (Media Lario). Pur essendo state svolte all'interno di un vasto gruppo di ricerca, l'autore di questo lavoro di tesi ha preso parte direttamente in queste attività, ed in particolare si è occupato in prima persona di una serie di misure metrologiche e delle annesse caratterizzazioni di diversi campioni riguardanti queste ricerche. In particolare, nelle sezioni di questo capitolo, saranno trattati i seguenti argomenti:

- Analisi topografica e di scattering in raggi X di una serie di substrati piani, ottenuti tramite approcci diversi, usati per la messa a punto del processo di crescita dei multistrato. Tale studio è molto importante in quanto la micromorfologia delle superfici dei substrati ha una forte influenza sulla rugosità interna dei film depositati.
- Analisi di substrati piani di materiali che potrebbero essere utilizzati nella realizzazione delle ottiche di XEUS. Questo studio, direttamente collegato a quello affrontato al punto precedente, è molto importante per comprendere se le metodologie proposte per la produzione degli specchi di XEUS siano compatibili, dal punto di vista della microrugosità dei substrati, con l'applicazione di film a multistrato, in grado di

permettere l'estensione della banda operativa della missione (ora limitata alla banda "classica" dei raggi X, cioè tra 0.1 e 10 *keV*) anche nella regione dei raggi X duri (10 -100 *keV*).

- Caratterizzazione di specchi sottili in materiale plastico. Per questo aspetto, sono stati esaminati alcuni campioni di specchio con rivestimento monostrato (forniti dal Prof. H. Schnopper della *Harvard-Smithsonian CfA*) del tipo descritto nel paragrafo 2.2.2, anche in questo caso per studiare la compatibilità con questo tipo di substrato con l'applicazione dei multistrato.
- Sviluppo di ottiche a multistrato tramite replica diretta con elettroformatura di Nichel ed evaporazione tramite fascio elettronico (e-beam) dei multistrato. Tale approccio, derivato anche per quanto riguarda la tecnica di deposizione, da quello già usato per gli specchi con copertura in oro di XMM e BeppoSAX, è stato esplorato nel contesto di progetto finanziato da ASI che ha portato alla calibrazione fino a 45 *keV* con illuminazione totale di uno specchio Wolter I, di appena 200 micrometri di spessore e con copertura multistrato Pt/C, presso la facility Panter-MPE.
- Calibrazione con illuminazione totale fino a 50 keV di uno specchio prototipale a singolo cono con copertura multilayer W/Si a larga banda, di appena 130 micrometri di spessore, il cui substrato in Nichel era stato preventivamente prodotto per replica. Il film multistrato era poi stato applicato mediante magnetron sputtering presso l'Harvard-Smithsonian CfA con una facility sviluppata *ad hoc*. Questo sviluppo è stato portato avanti nel contesto della missione Constellation-X

6.1 Proprietà morfologiche di substrati per ottiche multistrato

La rugosità dei film multistrato è in generale influenzata da:

- la microrugosità iniziale del substrato su cui avviene la crescita, in particolare per difetti con lunghezze d'onda spaziali inferiori a qualche micrometro;
- la microrugosità indotta dallo "shot-noise" (§ 4.7) intrinseco ad ogni processo di deposizione adottato.

In generale, le rugosità RMS indotte da questi due fattori si sommano in quadratura. Va pure notato che, per questo stesso motivo, la crescita in successione della serie degli strati tenderà a fare aumentare in modo monotonico la microrugosità. In questa sezione sono stati esaminati una serie di substrati disponibili in commercio con gli obiettivi di:

- a) verificare la qualità delle superfici, e la reale compatibilità con la crescita di multistrato di qualità molto buona per la messa a punto del processo di deposizione;
- b) potere successivamente confrontare la morfologia superficiale dei film cresciuti con quella iniziale dei substrati per comprendere la fenomenologia del processo di crescita;
- c) avere la possibilità di un termine di confronto con i tipi di substrati realmente impiegabili, tramite produzioni *ad hoc*, per la realizzazione di specchi focalizzanti di telescopi X.

Per coloro che si occupano di ottiche per radiazioni dall'EUV agli X duri, i substrati che fungono da standard di riferimento per il livello di finitura superficiale, sono considerati quelli in silice fusa (*fused silica*) e superpuliti prodotti dalla ditta GENERAL OPTICS (USA). Inoltre sono pure stati studiati substrati in Silicio monocristallino <111> superpulito, provenienti dalla ditta MEMC (Novara), prodotti su scala industriale per applicazioni di microelettronica. Sia i substrati GENERAL OPTICS che i substrati in Silicio monocristallino della MEMC, sono stati utilizzati come testimoni dei processi di crescita per evaporazione e sputtering adottati per la realizzazione dei multistrato di alcuni prototipi esaminati in questa tesi.

A completo di tutto ciò, il confronto con substrati che potrebbero "realmente" essere utilizzati per realizzare ottiche spaziali per raggi X con copertura multistrato è stato effettuata assumendo questi altri tre tipi di campione:

- substrati in vetro borosilicato (Borofloat) prodotti dalla ditta SCHOTT (USA). Come abbiamo visto nel primo capitolo, questo tipo di materiale potrebbe essere utilizzato per produrre gli specchi segmentati di XEUS tramite processi di formatura a caldo (*thermal slumping*) con l'utilizzo di stampi appropriati in materiale ceramico;
- segmento in Silicio monocristallino fornito dall'Istituto ESTEC dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) dello stesso tipo utilizzato per creare le ottiche a micropori il cui principi di realizzazione e funzionamento sono descritti nel paragrafo 2.3.2.
- substrato piano in Nichel elettroformato (senza copertura di Oro), cresciuto a bassa densità di corrente dalla ditta Media Lario (per minimizzare il grado di cristallinità del materiale) e minimizzare in questo modo la microrugosità e le tensioni interne. Questo è infatti l'approccio adottato per rendere questo tipo di materiale compatibile con l'applicazione di film a multistrato.

Alla fine di questa sezione la caratteristiche evidenziate dalle misure sui vari campioni saranno confrontate criticamente.

Le misure topografiche ed in raggi X (a meno che non altrimenti specificato) sono state tutte effettuate dall'autore di questa tesi mediante la strumentazione disponibile presso l'Osservatorio di Brera. Per il calcolo delle quantità statistiche (rugosità rms, slope error, fattore di correlazione) relative alla rugosità a partire dal profilo di PSD l'autore ha creato un programma in linguaggio fortran, che è riportato in appendice (A-3).

6.1.1 Substrati usati come testimoni dei processi di crescita dei multistrato

Substrato General Optics

Il tipo di substrato esaminato, in materiale vetroso amorfo è stato realizzato dalla ditta americana GENERAL OPTICS con specifiche di finitura superficiale molte elevate. Il campione si presenta come un disco di 2" di diametro e di 0.9 cm di spessore.

Su di esso misure di profilometria ottica WYKO, LPT e di microscopia a forza atomica (vedi Capitolo 5) sono state effettuate dall'autore di questa tesi presso i laboratori dell'Osservatorio di Brera. I profili AFM, WYKO e LPT sono riportati nella figura 6-1, mentre in figura 6-2, si possono vedere le PSD ricavate per trasformata di Fourier dai profili sperimentali della superficie (Cap. 4).

Quello mostrato in figura 6-2, è un classico esempio di studio comparativo della rugosità di una superficie ottica misurato su una ampio intervallo di frequenze spaziali con diverse metodologie [Asadchikov 1999]. Si noti l'ottimo accordo tra i profili di PSD ricavati.

Nella tabella 6-1 sono riportati i valori delle quantità statistiche della superficie, calcolati integrando le PSD nei relativi intervalli di frequenze spaziali secondo le equazioni (4.10) e (4.11).

Si noti che il processo di pulitura cui sono sottoposti i substrati General Optics, è tale da fornire valori di rugosità estremamente bassi (dell'ordine dell'Å su scala del micrometro), oltre che una planarità eccezionale (errore picco valle di solo \pm 8 nm sull'intero diametro del campione). Tali substrati sono generalmente stati utilizzati come standard di riferimento per esperimenti di deposizione di strati di materiale a bassa rugosità. Tuttavia il costo commerciale di questi campioni è molto elevato (300 \$ USA circa).



Figura 6-1: profili superficiali da cui si sono ricavate la Power Spectral Density monodimensionale. Dalla misura effettuata con il profilometro a lunga traccia LTP II si sono ricavate solamente informazioni di profilo e di curvatura.



Figura 6-2: Power Spectral Density monodimensionali in funzione della frequenza spaziale, relative alle misure effettuate sul substrato con le diverse tecniche metrologiche. Le misure ben si raccordano negli intervalli di sovrapposizione.

Tabella 6-1: propr	rietà statistiche d	lella superficie (ri	ıgosità, error	slope e lunghez	zza d'onda media), ricavate
dalle varie misure.	Per ogni misura	sono indicate lun	ghezza di scan	sione ed intervo	allo di frequenze s	paziali.

	L (µm)	f_{min} (μm^{-1})	f max (µm ⁻¹)	О RMS ¹ (Å)	т ямs (rad)	d (µm)
WYKO	5280	0.0002	0.1	13.1	2×10^{-4}	40.6
WYKO	660	0.0015	0.7	1.5	1×10^{-4}	9.4
AFM	100	0.01	2	0.9	5×10^{-4}	1.2
AFM	10	0.1	20	0.8	3.2×10^{-3}	0.2
AFM	1	1	200	1.0	2.1×10^{-2}	0.1

¹ Il maggior contributo all'errore della rugosità calcolata, è dato dall'errore sistematico dovuto al rumore strumentale. Sia per l'AFM sia per il WYKO l'errore è compreso tra 0.7-1 Å. Per le altre grandezze una stima è il 10% del valore misurato.

Substrato in Silicio monocristallino

Il campione che avuto a disposizione l'autore di questa tesi, fa parte di un massiccio stock di produzione della multinazionale MEMC, la quale realizza substrati in Silicio per applicazioni microelettroniche.

Esso si presenta come una sottile piastra circolare, con un diametro di 4" ed uno spessore di 500 micrometri. Una prima analisi è stata effettuata con il microscopio a contrasto di fase Nomarski a vari ingrandimenti, ed ha evidenziato una superficie con ondulazioni nella regione delle medie lunghezze d'onda spaziali (0.1 - 0.5 mm). In seguito su di esso sono state effettuate misure di profilometria ottica, di microscopia a forza atomica, di riflettività (figura 6-3) e di *scattering* in raggi X. In figura 6-5, si possono vedere le PSD ricavate per trasformata di Fourier dai profili sperimentali della superficie. Si può notare anche in questo caso il sostanziale accordo tra i dati concernenti le varie tecniche, presi su lunghezze di scansione e campionamenti diversi.

Nella tabella 6-2 sono riportati i valori delle quantità statistiche della superficie, calcolati integrando le PSD nei relativi intervalli di frequenze spaziali secondo le equazioni (4.10) e (4.11). In figura 6-4, invece, si possono vedere i profili ottenuti dal trattamento dei dati sperimentali presi in più punti della superficie, da cui si sono calcolate le PSD tramite l'equazione (4.9).



Figura 6-3: riflettività del substrato all'energia della K_{α} del Rame (8.05 keV). Dalla simulazione della curva sperimentale con un modello teorico si ricava un valore di rugosità di 5 Å. La fenditura di 1 millimetro posta sul rivelatore, nell'intervallo di angoli di incidenza tra 500 e 4000 secondi d'arco, determina una finestra di periodi spaziali tra 6.5 e 50 micrometri.



Figura 6-4: profili superficiali da cui si sono ricavate la Power Spectral Density monodimensionale. Dalla misura effettuata con il profilometro a lunga traccia LTP II si sono ricavate solamente informazioni di profilo e di curvatura.

Si noti come i valori di rugosità di questi substrati siano maggiori di quelli rilevati per il campione General Optics. Questo è soprattutto vero per difetti a lunghezza d'onda spaziale superiore a 10 micrometri, mentre ad alta frequenza spaziale (cioè nella regione che più influenza la microrugosità interna dei multistrato) la rugosità è comunque molto bassa. Dato il costo commerciale piuttosto vantaggioso (circa 30 \$ al pezzo), l'uso di questo tipo di campione è stato adottato frequentemente per le prove di sviluppo di specchi multistrato di cui si parlerà successivamente.



Figura 6-5: Power Spectral Density monodimensionali in funzione della frequenza spaziale, relative alle misure effettuate sul substrato con le diverse tecniche metrologiche. Le misure ben si raccordano negli intervalli di sovrapposizione.

Tabella 6-2: proprietà statistiche della superficie (rugosità, error slope e lunghezza d'onda med	lia), ricavate
dalle varie misure. Per ogni misura sono indicate lunghezza di scansione ed intervallo di frequenz	e spaziali.

	L (µm)	fmin (μm ⁻¹)	f max (μm ⁻¹)	О RMS ¹ (Å)	т кмs (rad)	d (µm)
WYKO	5280	0.0005	0.08	14.6	6×10^{-5}	153
WYKO	660	0.0015	0.3	5.8	3×10^{-4}	12.1
XRS	100	0.01	0.4	3.2	1.3×10^{-4}	15.4
AFM	100	0.01	2	2.7	5.4×10^{-4}	3.1
AFM	10	0.1	20	1.1	2.1×10^{-3}	0.3
AFM	1	1	200	0.7	1.1×10^{-2}	0.1

¹ Per l'AFM ed il WYKO l'errore della rugosità è compreso tra 0.7-1 Å. Per l'analisi XRS l'errore casuale è ridotto dall'elevato tempo di integrazione e l'errore sistematico è stimato essere del 10%. Per le altre grandezze una buona stima è il 10% del valore misurato.

6.1.2 Caratterizzazioni di substrati legati a tecnologie in corso di sviluppo per la missione XEUS

Silicio monocristallino con specifiche per XEUS

E' in questo momento allo studio dell'ESA, la possibilità di utilizzare per la missione XEUS ottiche in configurazione a micropori basate su substrati in Silicio, trattati in modo meccanochimico per creare sul retro del substrato un sistema di microcanali, ed assemblati opportunamente per creare una matrice di micropupille. Mentre questo metodo è descritto più in dettaglio nel paragrafo 2.3.2, occorre ricordare che, l'idea di utilizzare film multistrato per aumentare l'area efficace a bassa energia della missione ed estenderne l'operatività anche nella regione dei raggi X duri è stata suggerita da diversi autori (si veda ad es. [Pareschi 2003]) ed è quindi di fondamentale importanza verificare che le proprietà microtopografiche di tali substrati siano compatibili con questo tipo di applicazione.

A questo proposito, nell'ambito di un contratto di ricerca industriale affidato dall'ESA ad un team guidato dalla ditta Media Lario, l'Osservatorio di Brera ha effettuato la caratterizzazione di un campione rappresentativo di questi substrati (ad uno stadio di lavorazione precedente alla creazione della struttura a microcanali), a cui l'autore di questa tesi a partecipato in modo attivo.



Figura 6-6: riflettività del substrato all'energia della K_{α} del Rame (8.05 keV). Dalla simulazione della curva sperimentale con un modello teorico si ricava un valore di rugosità di 7 Å. La fenditura di 1 millimetro posta sul rivelatore, nell'intervallo di angoli di incidenza tra 500 e 4000 secondi d'arco, determina una finestra di periodi spaziali tra 6.5 e 50 micrometri.

Il campione si presenta come una striscia di 100 mm x 10 mm, mentre lo spessore è di 1 mm. In figura 6-6 è mostrata la curva di riflettività del campione ottenuta da una misura preliminare ad un'energia di 8.05 keV, e si può notare il valore di rugosità relativamente elevato (7 Å) necessario per ottenere un buon modello teorico che riproduca i dati sperimentali.



Figura 6-7: immagini della superficie del campione fornite dal microscopio a forza atomica, prese su lunghezze di scansione di 100, 10 ed 1 micron. L'altezza delle strutture nelle immagini bidimensionali è indicata da una leggenda cromatica.

In figura 6-7 sono riportate alcune immagini della superficie del campione, fornite dallo strumento AFM: nell'immagine relativa alla scansione di 100 micrometri si può notare l'andamento ondulato della superficie, con strutture di altezza di circa 5 nanometri; nelle immagini bidimensionali e tridimensionali della scansione di 1 micrometro, si possono invece notare delle microstrutture di dimensione lineare di circa 500 nm ed alte circa 2 nm. In Figura 6-8 sono raccolte le Power Spectral Density ricavate dalle misure effettuate con i vari strumenti. Di seguito sono riportati nella tabella 6-3 i valori della quantità statistiche della superficie del campione in Silicio, ricavati dalle misure di profilometria, di *scattering* in raggi X all'energia di 8.05 keV e di microscopia a forza atomica.



Figura 6-8: Power Spectral Density monodimensionali in funzione della frequenza spaziale, relative alle misure effettuate sul substrato con le diverse tecniche metrologiche. E' da notare il cambio di pendenza che avviene alla frequenza di circa 0.1 micrometri⁻¹.

Tabella 6-3: proprietà	statistiche della	superficie (rugos	tà, error slope	e lunghezza	d'onda media),	ricavate
dalle varie misure. Per	ogni misura sono	o indicate lunghez	za di scansione	ed intervallo	di frequenze spo	ıziali.

	L (µm)	fmin (μm ⁻¹)	fmax (µm ⁻¹)	б кмs (Å)	т ямs (rad)	d (µm)
WYKO	5280	0.0003	0.04	12.6	4×10^{-5}	198
WYKO	660	0.0015	0.1	8.1	6×10^{-5}	85
XRS	30	0.03	0.8	3.2	7×10^{-4}	2.9
AFM	100	0.01	1.2	3.2	1×10^{-3}	2.0
AFM	10	0.1	12	3.4	9×10^{-3}	0.2
AFM	1	1	20	2.8	1.7×10^{-2}	0.1

Si noti come i valori di rugosità misurati siano più elevati in modo abbastanza netto rispetto a quelli trovati per i substrati in Silicio della MEMC, soprattutto nella regione delle altre frequenze spaziali, che a loro volta vanno a confermare i valori forniti dalle misure preliminari di riflettività in raggi X. I valori di rugosità ad alta frequenza misurati sono al limite delle tolleranze normalmente accettate per la crescita di specchi a multistrato a bassa rugosità.

Substrato in vetro Borofloat

Come menzionato nel secondo capitolo, un altro approccio per la realizzazione delle ottiche di XEUS, (attualmente studiato dall'Osservatorio di Brera in collaborazione con l'Istituto MPE di Monaco), prevede l'utilizzo di substrati sottili (< 1mm) in vetro Borofloat da formare a caldo per la realizzazione dei segmenti di specchi Wolter I della missione XEUS.

Anche in questo caso è stata effettuata una caratterizzazione di un substrato (200 mm x 200 mm x 1 mm), fornito dalla ditta SCHOTT all'Osservatorio di Brera, in modo da verificare le proprietà microtopografiche in vista di un possibile impiego in ottiche multistrato.



Figura 6-9: Power Spectral Density monodimensionali in funzione della frequenza spaziale, relative alle misure effettuate sul substrato con le diverse tecniche metrologiche. Le misure ben si raccordano negli intervalli di sovrapposizione.

Su di esso sono state effettuate misure di profilometria ottica e di microscopia a forza atomica. In figura 6-9 è proposto l'andamento delle PSD. Si può notare, al solito, il sostanziale accordo tra i dati relativi alle varie tecniche, presi su lunghezze di scansione e campionamenti

diversi. In tabella 6-4 sono riportati i valori delle quantità statistiche della superficie. Si notino come i valori di rugosità molto buoni di questi substrati nella regione delle alte frequenze spaziali mostrino come anche questi substrati potrebbero essere compatibili con la deposizione di film multistrato

Tabella 5-4: propri	età statistiche a	lella superficie	(rugosità, slop	e error e li	unghezza d'ondd	ı media), rica	vate
dalle varie misure. I	Per ogni misura	sono indicate l	lunghezza di sca	insione ed i	intervallo di freq	juenze spaziali	i.

	L (µm)	fmin (μm ⁻¹)	fmax (μm ⁻¹)	0 rms ¹ (Å)	т ямs (rad)	d (µm)
WYKO	5280	0.0005	0.07	12.1	8×10^{-5}	95
WYKO	660	0.0015	0.7	5.8	2×10^{-4}	18
AFM	100	0.01	2	1.6	4.7×10^{-4}	2.1
AFM	10	0.1	20	1.4	2.7×10^{-3}	0.3
AFM	1	1	200	0.8	2.0×10^{-2}	0.03

6.1.3 Substrato in Nichel elettroformato

La tecnica della replica per elettroformatura di Nichel, messa a punto dell'Istituto IASF di Milano e, successivamente, dall'Osservatorio Astronomico di Brera, ed utilizzata dalla ditta MEDIA LARIO per la produzione degli specchi in Oro di XMM, è attualmente oggetto di studio per potere essere estesa essere alla realizzazione di ottiche multistrato [Pareschi 2000]. In particolare, è in corso un approccio investigato che prevede la realizzazione di substrati pseudocilindrici in Nichel a geometria Wolter I con copertura in Oro (come quelle utilizzate nelle missioni BeppoSax e XMM-Newton), per poi, in un momento successivo, rivestirle con coperture multistrato mediante una sorgente lineare di *Magnetron Sputtering* (§ 2.4.1). In alternativa, un altro processo in corso di sviluppo è invece basato sulla replica diretta del multistrato depositato direttamente sulla superficie del mandrino di replica. In entrambi i casi è essenziale che il Nichel elettroformato non induca una consistente crescita del livello di microrugosità sul multistrato. A questo scopo la ditta Media Lario, in collaborazione con OAB,

¹ Per l'AFM ed il WYKO l'errore della rugosità è compreso tra 0.7-1 Å. Per le altre grandezze una buona stima è il 10% del valore misurato.


Figura 6-10: Power Spectral Density monodimensionali in funzione della frequenza spaziale, relative alle misure effettuate sul substrato con le diverse tecniche metrologiche.

ha messo a punto una metodologia di crescita del Nichel per elettroformatura a densità di corrente molto bassa, per ridurre il livello di cristallinità del materiale.

In figura 6-11 sono presentate le PSD ottenute da misure topografiche su un campione piano di prova in Ni replicato ottenuto conseguendo tale tecnica. Nella tabella 6-5 sono riportati i valori delle quantità statistiche della superficie. Come si può osservare, i risultati ottenuti sono piuttosto incoraggianti riguardo l'aspetto del livello di microrugosità, che rimane compatibile

Tabella 6-5: proprietà statistiche della superficie (rugosità, slope error e lunghezza d'onda media), ricavate dalle varie misure. Per ogni misura sono indicate lunghezza di scansione ed intervallo di frequenze spaziali.

	L (µm)	fmin (μm ⁻¹)	fmax (μm ⁻¹)	0 гмs ¹ (Å)	т ямs (rad)	d (µm)
WYKO	660	0.0015	0.7	5.2	2.5×10^{-4}	13.2
XRS	14	0.07	1.8	3.1	3.9×10^{-4}	4.9
AFM	100	0.01	2	3.2	4.0×10^{-4}	5.1
AFM	10	0.1	25	1.5	3.3×10^{-3}	0.3

¹ Per l'AFM ed il WYKO l'errore della rugosità è compreso tra 0.7-1 Å. Per l'analisi XRS l'errore casuale è ridotto dall'elevato tempo di integrazione e l'errore sistematico è stimato essere del 10%. Per le altre grandezze una buona stima è il 10% del valore misurato.

con l'applicazione di film a multistrato.

6.1.4 Confronto tra i comportamenti dei vari substrati esaminati

Gli andamenti delle PSD al variare della frequenza spaziale, di tutte le superfici sopra considerate, possono essere riprodotti su scala logaritmica da un andamento lineare con diverse pendenze, in accordo con il comportamento della morfologia delle superfici di tipo frattale (Cap. 4). Questo, è mostrato nella figura 6-11, dove sono pure riportati gli esponenti delle leggi di potenza inversa assunte per adattare i dati. Il dominio delle frequenze spaziali è solitamente descritto suddividendolo in più regioni per facilitarne l'interpretazione. Nel caso in esame si possono ben distinguere due zone:

- i. la regione delle medie frequenze spaziali, definita tra 0.001 e 0.03 micrometri⁻¹;
- ii. la regione delle alte frequenze spaziali, definita tra 0.03 e 1000 micrometri⁻¹.

Si ricorda che nei raggi X le frequenze spaziali che causano estinzione del segnale riflesso per effetto di scattering rispetto alla direzione speculare, sono quelle comprese tra circa 0.005 e 1000 micrometri⁻¹. Nella tabella 6-6 sono messe a confronto le quantità statistiche delle superfici esaminate, calcolate nelle due regioni di frequenze spaziali qui considerate.



Figura 6-11: confronto tra gli andamenti delle PSD dei substrati presentati in questo capitolo. Nella leggenda sono indicati gli esponenti che definiscono la pendenza della retta e la dimensione frattale.

	Fused Silica	Silicon Wafer	ESA's Silicon Wafer	Borofloat	Elettrofor. Nickel		
frequenze spaziali medie ($0.001 - 0.03 \ \mu m^{-1}$)							
O RMS (Å)	6.7	6.9	7.2	10	6.8		
т ямя (rad)	6 ·10 ⁻⁶	3·10 ⁻⁵	4·10 ⁻⁵	5·10 ⁻⁵	2.5 ·10 ⁻⁵		
d (µm)	700	144	113	125	170		
frequenze spaziali alte $(0.03 - 1000 \ \mu m^{-1})$							
O RMS (Å)	2.1	1.1	4.5	3.1	2.7		
m RMS (rad)	$3 \cdot 10^{-3}$	2.10^{-3}	$2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$		
d (µm)	4.4 ·10 ⁻¹	3.4 ·10 ⁻¹	1.4 ·10 ⁻¹	$6.5 \cdot 10^{-1}$	5.6 ·10 ⁻¹		

Tabella 6-6: confronto proprietà statistiche delle superficie (rugosità, slope error e lunghezza d'onda media) calcolate nelle regioni della medie e delle alte frequenze spaziali.

Da questo esame si possono effettuare le seguenti considerazioni:

- Il substrato General Optics ha mostrato l'andamento morfologico nettamente migliore, ed il substrato che più si avvicina ad esso per qualità è quello in Silicio monocristallino prodotto dalla MEMC.
- Il substrato Borofloat, fornisce pure valori di rugosità piuttosto buoni, compatibili con l'applicazione di film multistrato.
- Il substrato in Silicio fornito dall'ESA, possiede una morfologia che non è approssimabile con un unico modello frattale. In questo caso occorre utilizzare la combinazione di due diversi andamenti, per riprodurre una minor pendenza alle frequenze spaziali più elevate. Il campione non solo presenta valori di rugosità peggiori del substrato in Silicio della MEMC ma, in ogni caso, è al limite di compatibilità con l'applicazione di film multistrato.
- I risultati ottenuti sul campione in Nickel elettroformato, lasciano aperta la possibilità di realizzare ottiche a multistrato di buona qualità con questo tipo di approccio (previsto, ad esempio, per la realizzazione delle ottiche delle missioni Constellation-X/HXT e HEXIT-SAT), potendo così riutilizzare in parte le conoscenze tecnologiche e le strumentazioni già acquisite nel campo delle ottiche per raggi X soffici.

6.2 Caratterizzazioni legate a future missioni per raggi X duri (HEXIT-SAT e SIMBOL-X)

L'Osservatorio Astronomico di Brera, è stato coinvolto in un progetto dell'Agenzia Spaziale Italiana denominato "Payload per Astrofisica delle Alte Energie", avente lo scopo di dimostrare che era possibile realizzare un *payload* per raggi X duri utilizzando tecnologia di ambito interamente nazionale. Oggetto di questo studio era la realizzazione di un prototipo di ottica a multistrato in Platino/Carbonio per elettroformatura tramite Nichel ed un prototipo "pixelato" di rivelatore CdZnTe. Lo studio è stato condotto da un team composto dall'Osservatorio Astronomico di Brera, dall'IAF-CNR di Bologna e Palermo, dal Politecnico di Milano (dip. elettronica), dalla ditta Media Lario e dalla ditta Alenia. Il ruolo dell'osservatorio Astronomico di Brera è consistito nel coordinamento del progetto e nello sviluppo e realizzazione, in collaborazione con Media Lario, del prototipo di ottica a multistrato. Si noti che tale tipo di *payload* può trovare una possibile applicazioni in missioni come HEXIT-SAT e SIMBOL-X. Le prestazioni di tale ottica sono state poi verificate alle lunghezze d'onda sia dei raggi x soffici sia dei raggi X duri presso la facility PANTER del *Max Planck Institute* (MPE).

L'ottica da realizzare consisteva in una configurazione monolitica Wolter I, lunga 50 cm, avente un diametro di 269 mm ed uno spessore di circa 200 µm. La realizzazione di questo prototipo di specchio a incidenza radente ha presentato vari aspetti di criticità. In generale, occorre tenere conto che per le nuove missioni ad alta energia, i requisiti relativi al peso degli specchi (sempre minore) e alla lunghezza focale (sempre maggiore) hanno impatti molto significativi a livello tecnologico. Nel caso in questione, ad esempio, gli spessori considerati per gli specchi, e di conseguenza il peso, sono un fattore due inferiori rispetto a quelli minimi di XMM-Newton; l'estensione della lunghezza focale a 10 m, e la conseguente diminuzione degli angoli di incidenza a cui il telescopio funziona ($< 0.2^{\circ}$) induce invece una significativa riduzione degli angoli di inclinazione fra le due parti dello specchio Wolter I (del 30% rispetto a quella ad esempio di XMM), elemento che comporta poi a sua volta la necessità di una accurata ridefinizione degli aspetti legati alle fasi di rilascio dello specchio replicato dalla sua matrice. Un altro punto importante riguarda il fatto che il prototipo di ottica doveva essere realizzato sfruttando le *facility* già esistenti, utilizzate in passato per la realizzazione delle ottiche a singolo strato. In particolare le apparecchiature per la lappatura e la metrologia della Zeiss, e la facility di deposizione per evaporazione a cannone elettronico installata presso Media Lario.

Nello specifico, si possono identificare tre elementi essenziali che hanno costituito di fatto la sfida affrontata per realizzare per replica uno specchio con rivestimento multistrato:

- la capacità di realizzare per evaporazione il rivestimento multistrato progettato in funzione degli scopi scientifici della missione. L'Osservatorio Astronomico di Brera e la ditta Media Lario hanno a disposizione un significativa conoscenza scientifica e tecnologica relativamente a rivestimenti monostrato per astronomia X, ma l'estensione della tecnica di replica al caso dei multistrato implica da un lato il potenziamento delle capacità di modellazione dei rivestimenti e dall'altro un utilizzo molto più accurato delle tecnologie e della *facility* di evaporazione;
- La capacità di replicare il rivestimento multistrato. Come menzionato l'obiettivo di questo studio non è infatti la semplice deposizione di un rivestimento riflettente multistrato su uno specchio già prodotto, magari anche per replica, ma quella di replicare tale rivestimento, cioè di depositarlo sulla matrice e di trasferirlo poi sullo specchio tramite lo stesso processo utilizzato per BeppoSAX, JET-X/Swift e XMM per il monostrato riflettente in oro. Questo approccio ha dei vantaggi rispetto a quello di una deposizione a posteriori (§ 2.5.1), ma comporta evidentemente un riesame in profondità del processo di replica, specialmente in termini di interazioni alle interfacce fra le varie superfici prodotte. La definizione di interfacce opportune è infatti il fattore chiave che determina la possibilità concreta del rilascio dello specchio dalla matrice e l'efficienza di questa fase critica, che è poi determinante per le prestazioni ottiche dello specchio finale così ottenuto.
- Affidabilità e riproducibilità del processo di replica nel suo insieme, e possibilità quindi di una sua industrializzazione. Si tratta di un esigenza legata alla tendenza alla multi-modularità delle future missioni.

Modulando i parametri del rivestimento multistrato (ad es. numero bistrati, spaziatura fra i bistrati, rapporto di spessori fra spaziatore e materiale più denso) è possibile ottimizzare le prestazioni in riflessione in funzione delle applicazioni astrofisiche: l'opportuna variazione della spaziatura dei bistrati lungo il rivestimento consente ad esempio di costruire un "supermirror", cioè un'ottica ad alta riflettività in un ampio intervallo di energia (fino ad 80 *keV*).

In questo progetto, però, è stato deciso di concentrarsi su multistrati a spaziatura costante, in modo da affrontare gradualmente i problemi relativi al controllo della deposizione. Rispetto a spessore e numero di bistrati, considerando i test previsti alla Panter *facility* si è scelto orientativamente di stare su uno spessore di 6-7 nm per bistrato e su un numero di bistrati pari a 20 (per una copertura a spaziatura variabile si sarebbero dovuti utilizzare molto più strati con

conseguente aumento delle variabili in gioco). In ogni caso con una simile struttura è possibile ottenere un picco di riflettività significativo per un'energia di circa 25 keV.

La coppia Platino/Carbonio come costituente del multistrato, è stata scelta dal momento che presenta diversi vantaggi rispetto ad soluzioni, in particolare in termini di compatibilità nei CTE, facilità di evaporazione tramite cannone elettronico, numero di bistrati necessari per ottenere determinate prestazioni ottiche abbastanza limitato.

Sino all'inizio di questo progetto (Maggio 2004) la *facility* di deposizione installata presso Media Lario era stata utilizzata unicamente per la deposizione di copertura a monostrato. Per l'approccio iniziale, che mirava a stabilire la reale possibilità di realizzare delle strutture a multistrato e ad ottenere delle chiare indicazioni sul controllo del processo, sono stati svolti numerosi test con la coppia di materiali Nickel/Carbonio, per poi, in un secondo momento, cominciare a utilizzare il Platino (a causa dell'elevato costo).

Gli esperimenti effettuati dall'autore di questo lavoro di tesi e riportati in questo paragrafo, sono stati eseguiti a supporto del progetto attualmente terminato con successo alla fine di Ottobre, ed in particolare il ruolo svolto è stato ha riguardato la caratterizzazione metrologica di una serie di prototipi di ottiche multistrato su substrati piani, realizzati durante la fase di sviluppo tecnologico in questione, prima della realizzazione dell'ottica.

6.2.1 Test preliminari sui multistrato in Ni/C

I primi esperimenti eseguiti per la deposizione di multistrati hanno riguardato la deposizione di Nichel come materiale ad alta densità e di Carbonio come materiale spaziatore. Attraverso questa attività è stato in sostanza possibile verificare il comportamento della *facility* di deposizione e l'influenza dei vari parametri di processo sui risultati finali, mediante misure di riflettività XRR standard a 8.05 e 17 *keV* effettuate con il diffrattometro BEDE (§ 5.2) installato presso l'Osservatorio Astronomico di Brera.

Le figura 6-12 mostra i valori di riflettività XRR a 17 keV (sinistra) misurati su di un campione composto da 20 bistrati in Ni-C depositati su di un substrato in Silicio monocristallino del tipo descritto nel primo paragrafo dedicato ai substrati, ed una immagine di una sezione dello stesso campione presa con il microscopio a trasmissione elettronica TEM presso il CNR-IMEM di Parma (destra):

 la riflettività del primo picco di Bragg è superiore al 93%, un risultato di grandissimo interesse a livello assoluto. La rugosità/diffusione dedotta dal modello teorico è di 4 Å; • l'immagine TEM mostra una certa fluttuazione degli spessori degli strati, ma in compenso evidenzia come gli strati siano completamente amorfi ed omogenei, cioè con le caratteristiche ottimali.



Figura 6-12: (sinistra) curva di riflettività a 17.4 keV di un campione piano composto da 18 bi-strati in Ni/C su di un substrato in Silicio monocristallino della MEMC: la riflettività al primo picco è del 90% e la rugosità/diffusione dedotta dal modello teorico (curva verde) è di 4 Å.; (destra) sezione dello stesso campione effettuata con un microscopio a trasmissione elettronica (TEM) dal CNR-IMEM di Parma: lo spessore totale è di 220 nm, le righe chiare sono il Carbonio e le righe scure sono il Nichel. Gli strati depositati sono completamente amorfi ed omogenei, ma vi è una deriva nel valore del periodo.

6.2.2 Sviluppo dei multistrato in Pt/C

Campioni piani fissi

Verificata tramite il Ni-C la fattibilità globale del processo di deposizione, il passaggio alla coppia di materiali finale, Pt-C, non ha inizialmente comportato complicazioni eccessive. Le conoscenze acquisite sulla macchina e sulle modalità di evaporazione del Carbonio hanno infatti consentito di ottenere su campioni piani fissi dei buoni risultati in un tempo significativamente breve. La figura 6-13 mostra i risultati di riflettività ottenuti su uno di questi campioni piani (su substrato in Silicio). La misura ha evidenziato una riflettività più che soddisfacente (per il primo picco di Bragg vicino all' 85%), ma soprattutto picchi molto ben definiti e stretti, indice di assenza di grosse variazioni di periodo. Dall'adattamento della curva di riflettività con il modello



Figura 6-13: riflettività ad 8.05 keV in funzione dell'angolo di incidenza di un campione multistrato piano composto da 20 bi-strati in Pt/C a spaziatura costante su di un substrato in Silicio monocristallino della MEMC.

teorico si sono ricavate delle informazioni riguardo alla struttura del multistrato. In particolare il periodo della struttura è di circa 9.3 nm, lo spessore relativo degli strati Γ è 0.33 ed il valore di rugosità/diffusione è di circa 4 Å (dati ricavati dal modello teorico assunto per riprodurre la riflettività misurata).

Una particolarità di questi depositi per evaporazione è il fatto che la densità ottenuta per il Carbonio è significativamente minore (attorno al 20%) di quella nominale. Questo effetto ha un impatto positivo sull'efficienza del multistrato, in quanto aumenta il contrasto fra l'elemento ad alta densità (Pt) e lo spaziatore (C), migliorando al netto la riflettività all'interfaccia, ma soprattutto perché riduce l'assorbimento per effetto fotoelettrico.

Nella figura 6-14 sono messe a confronto le Power Spectral Density ottenute da misure AFM, effettuate prima e dopo la deposizione dei 20 bi-strati: nella regione delle alte frequenze spaziali, la rugosità è passata da un valore di 2.1 Å ad un valore di 3.8 Å. Questo aumento dà una stima dello "shot-noise" introdotto dal processo di deposizione. Presso il CNR-IMEM di Parma, si stanno effettuando delle misure TEM sul campione a cui si sta facendo riferimento, le quali forniranno delle misure dirette dei parametri della struttura multistrato, ma che purtroppo non sono noto al momento in cui è stato redatto questo lavoro di tesi.

Uno dei risultati fondamentali nell'ambito della ricerca è stata la dimostrazione della fattibilità concreta della replica di un multistrato. Allo scopo 20 bistrati di Pt/C sono stati depositati su un campione piano superpulito in Ni *Kanigen* (elettrochimico), quindi rappresentativo della superficie delle matrici pseudocilindriche da usare per l'ottenimento dello specchio finale. Su



Figura 6-14: confronto tra la PSD del substrato in Silicio di partenza e la PSD del campione in seguito alla deposizione di 20 bistrati in Pt/C per evaporazione. L'integrazione delle PSD nella regione delle alte frequenze spaziale ci dice che il valore della rugosità è passato da 2 a 3.9 Å

rivestimento multistrato è stato poi fatto crescere per elettroformatura il Nichel e, tramite il processo di rilascio, il rivestimento è stato trasferito dalla matrice allo specchio. La misura della riflettività XRR del multistrato trasferito sullo specchio ha consentito di verificare che la struttura del multistrato era stata conservata dopo la replica. La figura 6-15 mostra la misura in questione in cui si notano dei picchi con un alta riflettività, senza evidenze di grosse deformazioni delle interfacce.



Figura 6-15: riflettività ad 8.05 keV del multistrato dopo elettroformatura e replica. La struttura è rimasta inalterata . Al 1° picco si ha una riflettività del 85% ed il valore di rugosità/diffusione è risultato essere di 3Å.

Campioni piani in rotazione

Un passo molto importante lungo il cammino di avvicinamento al deposito di un rivestimento riflettente multistrato su una matrice cilindrica è rappresentato dalla capacità di depositare un multistrato sempre su campioni piani, ma posti in rotazione all'interno della camera di evaporazione. Per questo scopo Media Lario ha realizzato una matrice di prova (*dummy*) interfacciabile con il meccanismo di rotazione della camera a vuoto e sulla quale possono essere incollati dei campioni piani, per poterli rivestire mentre ruotano, in una condizione del tutto rappresentativa di quello che avviene in una matrice effettiva. Questo passo ha comportato una ridiscussione dei parametri del processo e delle strategie di controllo e solo dopo la preparazione di decine di campioni e la misurazione delle loro prestazioni in riflessione è stato possibile stabilire il *setup* ideale da utilizzare per la deposizione di multistrati in Platino/Carbonio su una matrice in rotazione.



Figura 6-16: riflettività XRR ad 8 keV di un campione in Pt/C depositato in rotazione

In figura 6-16 è mostrata la riflettività di un campione composto da 20 bilayers di Pt-C, posizionato al centro della matrice e depositato in rotazione. La spaziatura è pressoché costante con spessore attorno ai 7 nm, i picchi di Bragg appaiono ben definiti e alti (60-70% per il primo picco di Bragg) e la rugosità è dell'ordine dei 5 Å. Nella stesso *run* di deposizione, lungo la generatrice della matrice sono stati posizionati altri due campioni, uno sul lato sinistro ed uno sul lato destro, in modo da poter testare l'uniformità di deposizione su tutta la lunghezza del

mandrino. Le figure di riflettività di questi due campioni sono risultate simili, sia per quanto riguarda la posizione dei picchi sia, in misura lievemente minore, per la loro forma, a quella del campione posizionato al centro. Questo ha indicato che l'obiettivo di una deposizione uniforme in rotazione era stato raggiunto.

Per quanto riguarda il processo di replica, il passaggio da campioni rivestiti in configurazione fissa a campioni rivestiti in rotazione dentro la camera di evaporazione, ha avuto come conseguenza che non risultava più possibile effettuare il processo di separazione del campione. Si è passati perciò a questo punto a una configurazione più complessa. La nuova soluzione

prevedeva:

- 1. Oro, 7 nm come agente di rilascio sulla matrice (stessa interfaccia di XMM)
- 2. Multilayer, 20 bistrati Pt-C (con Pt come ultimo strato)
- 3. Cromo, 10 nm come strato di "contenimento". Grazie alla sua adesione, il Cromo agisce come elemento irrigidente della struttura multistrato
- 4. Oro, 100 nm, come base su cui far crescere il Nichel elettroformato (di nuovo, interfaccia analoga a quella di XMM).

Con questa configurazione, è stato possibile effettuare senza problemi il rilascio dalla matrice di campioni piani depositati in rotazione, con trasferimento completo del rivestimento multistrato sullo specchio stesso.

6.2.3 Caratterizzazione ad illuminazione dell'ottica multistrato in Pt/C realizzata per replica tramite elettroformatura

In forza del risultato ottenuto con i campioni piani in rotazione, si è deciso di verificare la bontà della "ricetta" replicando con la stessa tecnica uno specchio completo. A questo scopo si è utilizzato un mandrino pseudocilindrico superpulito di diametro 120 mm e lunghezza 480 mm, realizzato dall'Osservatorio Astronomico di Brera, non pienamente rappresentativo in termini di forma, ma assolutamente rappresentativo in termini di superficie.

L'operazione ha avuto esito positivo, ed ha portato alla realizzazione della prima *shell* con rivestimento multistrato prodotta tramite replica diretta. La *mirror shell* è mostrata in figura 6-17 Sulla base delle conclusioni raggiunte relativamente agli aspetti del rivestimento multistrato (deposizione e replica) con le prove precedenti, si è passati alla realizzazione dello specchio a geometria Wolter I obiettivo del progetto ASI. Per lo scopo è stato utilizzato un mandrino con profilo Wolter I superpulito con un diametro di 269 mm e sono stati applicati 20 bistrati di Pt-C



Figura 6-17: immagine del primo specchio con coating riflettente Pt-C (diametro 120 mm) ottenuto con la tecnica della replica tramite Nichel elettroformato.

con spaziatura costante (spessore di 6.8 nm). L'operazione di elettroformatura è stata calibrata in modo da ottenere uno spessore della *shell* di 200 μ m. Le operazioni di replica e rilascio anche in questo caso non hanno dato problemi. La *shell* è stata quindi sottoposta a misure di rotondità che non hanno rivelato deformazioni geometriche della struttura, ed hanno tolto gli ultimi dubbi riguardo l'idoneità ad essere sottoposta ad una calibrazione presso la *facility* Panter-MPE.



Figura 6-18: immagini dell'ottica posizionata all'interno della camera della PANTER

A quanto si sa, le misure nei raggi X duri effettuata presso la PANTER sotto la responsabilità dell'Osservatorio Astronomico di Brera, sono le prime di un'ottica multistrato ad doppia riflessione Wolter I, ed una delle prime fino a 45 keV. In quel che segue saranno esposti i risultati ottenuti usando due diversi set-up sperimentali per le basse (sotto 10 keV) e le alte (sopra 10 keV, fino a 45 keV) energie rispettivamente:

- misura dell'area efficace in corrispondenza delle righe di fluorescenza da sorgenti X diverse (con spettri opportunamente filtrati) nella regione tra 0.2 e 9 keV, utilizzando come rivelatore il modulo PSPC (Position Sensitive Proportional Counter – modello di riserva della missione ROSAT);
- misura dell'area efficace investendo l'ottica con un fascio policromatico, potendo discriminare in energia tramite un rivelatore con buona risoluzione energetica. In particolare, per tali misure è stato utilizzato un rivelatore identico alla camera EPIC pn-CCD a bordo di XMM-Newton, dotato di un'ottima risoluzione energetica (145 eV at 6 *keV*, circa 400 eV a 25 *keV*) ed una buona risoluzione spaziale (pixel size 150µm). Inoltre è sensibile fino a 50 keV, anche se con efficienza molto ridotta (3 %).



Figura 6-19: (sinistra) immagine del fascio focalizzato dall'ottica acquisito con il rivelatore PSPC durante i test alla Panter facility; (destra) immagine del fascio focalizzato dall'ottica acquisito con il rivelatore EPIC-PN fino all'energia di 45 keV.

In figura 6-19 sono riportate delle immagini acquisite utilizzando i due set-up descritti, durante il test del modulo ottico. Nel caso di EPIC-PN sono stati effettuati due serie di misure, entrambe con una sorgente con anodo in Tungsteno, ma applicando un *bias* diverso (45 kV in un caso, 35 kV nell'altro).

Misure di area efficace alla Panter facility

In figura 6.20 è riportata la riflettività al quadrato al di sotto di 10 *keV* misurata con il rivelatore PSPC. In questa regione energetica lo specchio funziona in regime di riflettività totale. E' anche riportato un modello per l'adattamento dei dati che assume una rugosità superficiale di 1.5 nm (per raffronto, la rugosità rms del mandrino era di pochi Angström sia per misure WYKO che per misure AFM). Nel calcolo è stato considerato il fatto che l'angolo di incidenza sulle due superfici (parabola ed iperbole) non è uguale a causa dell'effetto di distanza finita della sorgente (§ 5.3.5), dell'oscuramento dovuto allo spider, e degli effetti geometri di *vignetting*. Peraltro l'adattamento non è ottimale per energie inferiori ad 1.5 *keV*. Questo potrebbe forse significare la presenza di una contaminazione superficiale.



Figura 3-20: Riflettività dello specchio multilayer ricavate dalle misure con il rivelatore PSPC.

In figura 6-21 le misure di riflettività al di sotto di 10 keV misurate con il rivelatore PSPC sono state combinate con quelle ottenute ad alta energia (fino a 45 keV) con il rivelatore EPIC-PN in configurazione Energy Dispersive (§ 5.3.4). Si noti che i dati misurati oltre i 10 keV da EPIC-

PN sono dovuti da riflettività alla Bragg del multistrato (cioè anche gli strati più profondi della serie sono interessati dal fenomeno fisico).



Figura 6-21: riflettività dello specchio multilayer ricavate dalle misure con il rivelatore PSPC sommate alle misure ottenute con il rivelatore EPIC-PN in configurazione energy dispersive.

Il modello sovrimposto sembra fornire un adattamento molto buono ai dati sperimentali. Le riflettività aspettate all'angolo di incidenza sull'iperbole e su quello della parabola assumendo tale modello sono mostrate in figura 6-22 e figura 6-23 rispettivamente.



Figura 6-22: riflettività aspettata in funzione dell'energia dei fotoni all'angolo di incidenza della parabola tenendo conto dell'effetto di distanza finita della sorgente X.



Figura 6-23: riflettività aspettata in funzione dell'energia dei fotoni all'angolo d incidenza dell'iperbole tenendo conto dell'effetto di distanza finita della sorgente X.

In tale modello si assume che:

- vi sia uno strato superficiale molto rugoso (1.5 Å) che dà luogo allo scattering (probabilmente dovuto alle operazioni di replica). La rugosità interna degli strati del multistrato assume invece un valore molto più basso (7.5 Å), probabilmente a causa di una deriva degli input elettrici del cannone elettronico durante la deposizione;
- lo strato esterno rugoso abbia un periodo reticolare molto più ampio rispetto al resto della serie (96 Å contro 68 Å) (dovuto ad una probabile deriva della microbilancia al quarzo).

Future misure di metrologia AFM dovranno essere predisposte per comprendere la fenomenologia topologica della superficie dello specchio. In ogni caso si deve notare che il risultato ottenuto è molto positivo, ed ha dimostrato la possibilità di realizzare, con tecnologia completamente italiana, delle ottiche a multistrato con la tecnica della replica tramite Nichel elettroformato. In una successiva fase del progetto (fase B) che ASI dovrebbe avviare nel 2005 sarà prodotto un modulo ottico costituito da 4 specchi e ci si preoccuperà di mettere a punto il processo di rilascio del multistrato dal mandrino. Inoltre sarà effettuato un aggiornamento della facility di deposizione (peraltro già in corso), e saranno esplorate delle leghe di Nichel-Cobalto per l'elettroformatura che sembrano dare maggior rigidità alla struttura (uno studio a riguardo è già stato avviato presso la NASA-Marshall sotto la responsabilità di B. Ramsey).

6.3 Caratterizzazioni legate alla missione NASA Constellation-X

La missione Constellation-X, allo studio da parte della NASA, prevede di mettere in opera un grosso telescopio multimodulare (4 unità) per applicazioni spettroscopiche nei raggi X soffici (0.1 - 10 keV), insieme ad un altro telescopio multimodulare (12 unità) basato su specchi multilayer per coprire la band dei raggi X duri (10 – 80 keV). Per la realizzazione degli specchi di quest'ultimo, la tecnica di replica appare particolarmente in quanto da una stessa matrice (mandrino) ad un dato diametro possono essere ricavate tutte le 12 mirror shell (più almeno altre due per i moduli di qualifica e quello di riserva). Inoltre, l'uso di specchi monolitici facilita il processo di assemblaggio, e le prestazione in termini di risoluzione angolare sono in linea di principio molto migliori rispetto a quelle ottenibili con le tecniche dei fogli sottili.

L'Osservatorio Astronomico di Brera mantiene a questo proposito una forte collaborazione con l'*Harvard-Smithsonian CfA* per lo sviluppo di specchi basate su substrato in Ni con copertura di Oro replicato, a cui viene successivamente applicato un rivestimento multilayer tramite una sorgente di magnetron sputtering lineare. In questo contesto, l'Osservatorio di Brera si occupa della produzione del mandrino di replica superpulito e della fornitura (con la collaborazione della ditta Media Lario) dei substrati monolitici, mentre l'*Harvard-Smithsonian CfA* ha realizzato una *facility* di deposizione *ad hoc* basato sul magnetron sputtering.

A questo riguardo, sfruttando un mandrino superpulito a singolo cono (28 cm di diametro, focale 20 m), è stata realizzata un ottica multilayer con copertura W/Si a spaziatura variabile. Tale specchio, è stato calibrato in modalità illuminazione totale fino all'energia di 50 keV presso la *facility* Panter-MPE di Monaco (fino a questa misura l'energia massima utilizzata era interno a 17 keV). La modalità di misura è descritta nel paragrafo 5.3.

Nei prossimi paragrafi saranno riportate i risultati della caratterizzazione dello specchio, insieme a quelle di un campione "testimone" (substrato General optics superpulito del tipo descritto nella prima sezione del capitolo) la cui deposizione del multistrato è avvenuta contemporaneamente.

5.3.1 Struttura teorica del multistrato

La coppia Tungsteno/Silicio come binomio riflettore/spaziatore, offre nei raggi X una buona combinazione di proprietà ottiche e di proprietà di deposizione. Il Tungsteno possiede lo spigolo K di assorbimento all'energia di 69.5 keV, un'alta densità di 19.2 g/cm³ ed un elevato

punto di fusione (T_m =3695 K). Una tale densità, determina un elevato contrasto ottico con un materiale spaziatore come il Silicio, ed il rapporto di temperatura T/T_m basso durante lo *sputtering* facilita una buona crescita degli strati di Tungsteno. Il Tungsteno ed il Silicio possono formare composti WSi₂ e W₅Si₃, con il primo dei due favorito energeticamente, ma per la deposizione è stato utilizzato un meccanismo di mescolamento dei fasci, che determina dei composti non stechiometrici W_xSi_y alle interfacce [Ivan 2001]. L'ottica in questione è costituita da un doppio cono rivestito con un multistrato a spaziatura variabile. Il multistrato è costituito da un totale di 95 bi-strati, di cui i primi 75 sono stati depositati con una ricetta diversa da quella degli ultimi 20. La ricetta utilizzata per gli spessori è la legge di potenza di Joensen che compare nell'equazione (1.32), ponendo i seguenti valori per i parametri *a, b* e *c*:

	Si	W
75 BI-STRATI	$d_i = 54/(15.56+i)^{0.25}$ Da 17.50 a 26.76 Å	$d_i = 33.82/(14.38+i)^{0.25}$ Da 11.08 a 17.08 Å
20 BI-STRATI	$d_i = 54/(-0.78+i)^{0.25}$ Da 25.77 a 78.77 Å	$d_i = 42.15/(-0.59+i)^{0.25}$ DA 20.08 a 52.66 Å

6.3.2 Caratterizzazione con Pencil Beam del campione testimone

Durante lo stesso processo di deposizione è stato realizzato anche un campione multistrato su di un substrato General Optics piatto di 2 pollici di diametro, che d'ora in poi chiameremo "campione testimone" (witness sample). Per tale multistrato ci si aspettano dei parametri leggermente diversi da quelli del multistrato dell'ottica, a causa del diverso posizionamento all'interno della camera di deposizione ed una rugosità minore dovuta al substrato di partenza. Presso l'Osservatorio Astronomico di Brera mi sono occupato personalmente della caratterizzazione morfologica del campione testimone, attraverso misure di riflettività tramite "fascio sottile", di profilometria ottica e di microscopia a forza atomica. L'ottica invece è stata sottoposata ad una calibrazione ad illuminazione piena, presso la struttura PANTER del Max Plance Institute für extraterrestrische Physik (MPE) situata nella città di Garching in Germania. Presso la PANTER sono state effettuate le calibrazioni di numerosi telescopi spaziali operanti nei raggi X molli, come EXOSAT, ROSAT, SAX ed XMM, e recentemente è stata provata la possibilità di effettuare calibrazioni nei raggi X duri apportando alcune lievi modifiche all'apparato strumentale [Citterio 2004].



Figura 6-24: confronto delle PSD ottenute dalle misure sperimentali, effettuate prima e dopo la deposizione del multistrato su di un substrato General Optics, nella regione delle alte frequenze spaziali.

In figura 6-24, la PSD ottenuta nella regione delle alte frequenze spaziali, dalle misurazioni topografiche effettuate sul campione testimone, è confrontata con la PSD propria del substrato General Optics privo del rivestimento multistrato. La quantità di densità di potenza spettrale aggiuntiva è dovuta al processo di deposizione, ed essa indica un aumento della rugosità da 1.1 a 4.3 Å (nell'intervallo delle alte frequenze spaziali). Nelle figure 6-25 e 6-26, invece, sono mostrate le curve di riflettività del campione testimone (curve tratteggiate), ottenute con il diffrattometro BEDE utilizzando rispettivamente la *Cu* K_{α} ad 8.05 *keV* e la *Mo* K_{α} a 17.4 *keV*. L'utilizzo di un modello teorico per la riflettività (curve verdi), con le costanti ottiche del catalogo CXRO contenute nel pacchetto software di L. Windt [Windt 1998], ha dato dei parametri di deposizione leggermente diversi da quelli impostati per l'ottica, ed un valore di rugosità/diffusione di 4 Å.



Figura 6-25: dati sperimentali e modello teorico della riflettività del campione testimone ad un'energia di 8.05 keV. Le costanti ottiche dei materiali sono quelle contenute nel pacchetto software IMD. Il modello teorico adottato prevede una rugosità/diffusione di 4 Å. Fino ad angoli di incidenza minori di 500 secondi d'arco non si hanno dati completi a causa dell'effetto "footprint" dovuto alle piccole dimensioni del campione.



Figura 6-26: dati sperimentali e modello teorico della riflettività del campione testimone ad un'energia di 17.4 keV. Le costanti ottiche dei materiali sono quelle contenute nel pacchetto software IMD. Il modello teorico adottato prevede una rugosità/diffusione di 4 Å. Fino ad angoli di incidenza minori di 500 secondi d'arco non si hanno dati completi a causa dell'effetto "footprint" dovuto alle piccole dimensioni del campione.

6.3.3 Calibrazione ad illuminazione piena dell'ottica a singolo cono

Le prestazioni dell'ottica a singolo cono sono state testate ad illuminazione piena, al variare dell'energia dei fotoni incidenti ad un angolo di incidenza fisso di 0.266 gradi. Nell'apparato strumentale della PANTER la distanza tra la sorgente e l'ottica è di 123 metri e le energie coperte vanno da 4.5 a 50 *keV*. Con una tale distanza non è possibile effettuare l'approssimazione di sorgente a distanza infinita e di questo si deve tener conto nel calcolo dell'angolo di incidenza (§ 5.3.5).



Figura 6-27: riflettività dell'ottica a doppio cono al variare dell'energia dei fotoni incidenti. La misura è stata effettuata ad illuminazione piena ad un angolo di incidenza di 0.266 gradi. Il modello teorico (linea nera) è stato utilizzato tenendo conto del peggioramento della risoluzione al crescere dell'energia ed ha fornito un valore di rugosità/diffusione di 7.5 Å. I dati tra 4.5 e 9 keV hanno dato problemi in fase di misurazione.

In figura 6-27 è mostrata la riflettività dell'ottica a doppio cono, dalla quale si sono ricavati i parametri degli spessori degli strati ed il valore della larghezza delle interfacce dovuta a rugosità/diffusione. Gli spessori degli strati si sono rivelati molto vicini ai valori teorici (deriva di 1-2 Angström) ed il valore medio della larghezza delle interfacce è risultato essere 7.5 Å. Le barre di errore della riflettività sono state calcolate tenendo conto del rapporto tra flusso riflesso e flusso diretto:

$$XRR(E) = \frac{F_R(E)}{F_D(E)}$$
(6.1)

I flussi sono dati dal rapporto tra l'intensità e l'area di raccolta per il tempo di integrazione:

$$F(E) = \frac{I(E)}{A_{Coll} \cdot t} \tag{6.2}$$

L'area di raccolta dell'ottica è di 4.25 cm² e quella del foro che misura il fascio diretto è di 4.948 cm². L'errore σ_F sul flusso è dato dalla radice del suo rapporto con il tempo di integrazione e l'errore sulla riflettività *XRR(E)* è calcolato con la propagazione degli errori:

$$\sigma_{XRR}^{2} = \left(\frac{1}{F_{D}}\right)^{2} \sigma_{F_{R}}^{2} + \left(-\frac{F_{R}}{F_{D}^{2}}\right)^{2} \sigma_{F_{D}}^{2}$$

$$(6.3)$$
10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40 42 44



Figura 6-28: confronto tra l'area effettiva dell'ottica a doppio cono (linea nera) e l'area efficace che avrebbe se possedesse una rugosità come quella del campione testimone.

Il valore medio di rugosità/diffusione del multistrato depositato sull'ottica è risultato essere quasi il doppio di quello del multistrato depositato sul campione testimone. L'area efficace dell'ottica, può essere calcolata a partire dall'area di raccolta, tramite l'equazione (1.26). Dal momento che l'area efficace ad una data energia dipende dal quadrato della riflettività, essa è tanto maggiore quanto minore è la rugosità del multistrato. In figura 6-28 è mostrata l'area efficace all'angolo di incidenza di 0.266 gradi (linea nera), e l'area efficace che avrebbe con una rugosità pari a quella del campione testimone (linea rossa).

6.4 Caratterizzazioni di plastiche con deposito a strato singolo per ottiche a fogli sottili

I telescopi spaziali focalizzanti sinora realizzati con la tecnica dei "fogli sottili" (descritta nel paragrafo 2.2.2), hanno fatto uso di più specchi costituiti da un elevato numero di segmenti in Alluminio curvati singolarmente per calandratura e poi incollati assieme in quadranti. La miglior risoluzione angolare (HEW) ottenuta con questo tipo di substrati è stata quella delle ottiche di ASTRO-E, per le quali si è ottenuto un valore di circa 100 secondi d'arco, a causa della scarsa qualità delle superfici indotta dalle operazioni di calandratura e a causa delle operazioni di assemblaggio. L'utilizzo di un elevato numero di segmenti è dovuto al fatto che l'Alluminio non è sufficientemente elastico per poter essere curvato in un unico foglio monolitico.

Nel 1997 è stata avviata una collaborazione tra lo *Smithsonian Astrophysical Observatory* (SAO), l'Osservatorio Astronomico di Palermo (OAPA - INAF) ed il *Danish Space Research Institute* (DSRI), per lo studio di una nuova tecnologia a fogli sottili in materiale plastico (PET), cui da qualche tempo partecipa pure l'Osservatorio Astronomico di Brera (OAB - INAF). Il procedimento con cui si ottengono degli specchi monolitici a doppio cono in approssimazione Wolter I, previsto nel contesto del suddetto programma di ricerca, è già stato trattato nella parte relativa alle tecniche di realizzazione delle ottiche ad incidenza radente di questo lavoro di tesi (§ 2.2.2). La tecnologia dei fogli sottili in plastica è attualmente investigata per la realizzazione del telescopio nei raggi X duri dell'esperimento su pallone B-MINE per spettroscopia, mirato allo studio delle righe nucleari del 44Ti a 68 *keV* e 78 *keV* [Silver 2003].

Diverse facility sono utilizzate in questo programma di ricerca. Il dipartimento d'ingegneria del SAO fornisce supporto alle fasi di progettazione, realizzazione e deposizione di film sottili a singolo e multistrato. Presso il DSRI è disponibile una stazione ad alta risoluzione per misure di scattering superficiale nei raggi X (fig. 6-29). La microtopografia delle superfici è effettuata mediante l'utilizzo di un Microscopio a forza atomica (AFM) e di un profilometro ottico del tipo WYKO topo-2D installati presso l'OAB. Presso la *facility* XACT dell'OAPA è possibile effettuare misurazioni per determinare la risoluzione angolare delle ottiche integrate. Pur essendo stata svolta nel contesto di un vasto gruppo di ricerca, l'autore di questo lavoro di tesi ha preso parte direttamente in questa attività, ed in particolare si è occupato in prima persona di una serie di misure metrologiche e delle annesse caratterizzazioni su alcuni campioni in plastica con deposito a singolo strato prodotti dallo *Smithsonian Astrophysical Observatory*. Tali risultati sono stati oggetto di una presentazione orale in una conferenza dello SPIE svoltasi a San Diego

nell'Agosto 2004.



Figura 6-29: immagini di un ottica composta da specchi in plastica collocata presso la facility del DSRI (sinistra) e presso la facility XAFT (destra).

I campioni in questione erano costituiti da uno spessore di 175 μ m in plastica PET su cui è stato cresciuto con la tecnica del magnetron sputtering (usando la stessa *facility* citata nel paragrafo precedente relativo a Con-X) un film formato da 100 Å in Tungsteno. Tali campioni rappresentavano una porzione di uno specchio monolitico già realizzato e sottoposto ad alcune misure sperimentali presso l'Istituto di Palermo che hanno una risoluzione angolare HEW di qualche minuto d'arco. Su di essi, presso i laboratori dell'OAB sono state effettuate delle misurazioni di microscopia a forza atomica e di profilometria ottica:

Le misurazioni effettuate con l'AFM sono in grado di rivelare delle strutture superficiali nella scala di lunghezze d'onda spaziali tra 1 e 50 micron (fig. 6-30). La scansione su 1 μm ha mostrato delle strutture periodiche con un'ampiezza di 2-3 nm separate di 0.2 μm. Risultati simili sono stati ottenuti dalla scansione su 10 μm. Dalla scansione su 50 μm, oltre alle strutture già rivelate precedentemente, sono state rivelate delle strutture poco frequenti) con altezza tipicamente attorno a 10 nm riconducibili a grani di polvere. I valori di rugosità RMS (una volta sottratte le contaminazioni) delle superfici ottenuti dalla combinazione delle Power Spectral Density ottenute per i vari campioni dalle misure su 1, 10 e 50 μm sono stati rispettivamente 6.5, 8.5 e 8.7 Å. Per lunghezze d'onda spaziali così piccole, come quelle investigate dall'AFM, tali valori di rugosità sono piuttosto elevati.



Figura 6-30: immagini AFM del campione misurate relative a scansioni su 1, 10 e 50 micron.

• Le misurazioni effettuate con il profilometro ottico WYKO coprono una lunghezza di scansione di 6 mm lungo la superficie e sono sensibili a strutture dell'ordine dei decimi di micron. La superficie dei campioni, nell'intervallo di lunghezze spaziali del WYKO, è caratterizzata da zone con grado di rugosità molto diverso tra loro. In figura 6.31 sono riportati due profili di altezza, uno mediato per le zone a valori migliori ed uno mediato per le zone peggiori. I valori di rugosità calcolati nei due casi sono rispettivamente 7.2 e 14.3 Å.

Nel grafico in figura 6-32 sono riportate le PSD relative alle misurazioni effettuate con l'AFM e con il WYKO con indicati i valori di rugosità RMS corrispondente. Ancora una volta per le lunghezze d'onda corrispondenti al WYKO sono stati distinti due comportamenti morfologici differenti. Si noti come la superficie dei campioni abbia dimostrato un profilo disomogeneo nelle medie lunghezze spaziali ed altamente rugose nelle basse lunghezze spaziali.



Figura 4-31: profili relativi alle misurazioni effettuate con il profilometro ottico WYKO.

Anche se i valori di rugosità riscontrati su questi campioni sono maggiori di quelli normalmente misurati su altri campioni per raggi X, è stupefacente come si siano potuti ottenere utilizzando una comune plastica commerciale.



Figura 5-32: PSD relative alle misurazioni WYKO e AFM.

Capitolo 7

Conclusioni

I risultati ottenuti nell'ambito di questo lavoro di tesi, finalizzato allo sviluppo di ottiche multistrato per la focalizzazione nei raggi X duri, possono essere riassunti facendo riferimento ai progetti in cui si pensa di applicarle:

• Progetto ASI "Payload per Astrofisica delle Alte Energie"

Questo progetto ha visto coinvolto l'Osservatorio Astronomico di Brera, nella parte riguardante lo sviluppo di replica tramite Nichel elettroformato, per la realizzazione di un'ottica a simmetria cilindrica con multistrato a spaziatura variabile in Platino/Carbonio. Con questo metodo è prevista la realizzazione dei telescopi focalizzanti ad esempio delle future missioni spaziali HEXIT-SAT e SIMBOL-X. E' molto importante ricordare che questo prototipo è stato realizzato con successo riutilizzando le apparecchiature e le *facility* impiegate nel passato per la produzione degli specchi per raggi X soffici di XMM. Con riferimento al contributo dell'autore di questo lavoro di tesi, esso è consistito soprattutto nella caratterizzazione metrologica dei campioni realizzati durante la messa a punto del processo ed in particolare::

- 1. sono state effettuate le misure dei campioni in Platino/Carbonio ottenuti su campioni piani cresciuti sul Silicio che hanno dimostrato la possibilità di realizzare strutture multistrato di elevata qualità con la tecnica dell'evaporazione, con un buon controllo degli spessori depositati. La riflettività è risultata essere molto buona ed il valore di rugosità/diffusione delle interfacce molto basso (4 5 Å);
- le misure nei raggi X, effettuate su campioni in Platino/Carbonio piani replicati direttamente tramite Nichel elettroformato, hanno dimostrato che il processo è realizzabile e che la struttura multistrato non subisce deformazioni in seguito al processo di replica;

3. i campioni piani sviluppati e le caratterizzazioni ad esso legati hanno permesso di trasferire il processo di elettroformatura al caso di specchi Wolter I a struttura monolitica e simmetria cilindrica. Un prototipo rappresentativo è stato testato fino ad energie di 45 *keV* presso la *facility* Panter-MPE alla fine di Ottobre 2004 a conclusione del lavoro.

Da queste considerazioni si può affermare che, per le ottiche delle missioni spaziali citate, è possibile riutilizzare le apparecchiature impiegate per la realizzazione di telescopi focalizzanti nei raggi X soffici.

• Sviluppo di ottiche multistrato legato alla missione Constellation-X

Un altro progetto di sviluppo in cui l'Osservatorio Astronomico di Brera è stato coinvolto (in collaborazione con l'Harvard-Smithsonian CfA di Boston), ha riguardato la produzione delle ottiche multistrato per la missione Constellation-X. In questo caso la tecnica applicata è basata sulla realizzazione di substrati pseudocilindrici a singolo cono con copertura in Oro (seguendo il metodo "classico" usato per XMM) al cui interno è cresciuto il rivestimento multistrato tramite una sorgente Magnetron Sputtering lineare. L'autore di questo lavoro di tesi si è occupato dell'analisi di misure di area efficace fino a 50 keV di un'ottica a singolo cono calibrata presso la facilty Panter-MPE in modalità "full illumination". Il multistrato depositato era basato sulla coppia Tungsteno/Silicio che presentava un profilo di riflettività a larga banda grazie ad una struttura della spaziatura reticolare non costante lungo la serie del multistrato. Le misure effettuate sono state adattabili con una rugosità di 8 Å di poco superiore al limite richiesto per l'area efficace di Constellation-X. Alla luce dei risultati ottenuti sono in corso alcune migliorie al processo di crescita del rivestimento multistrato (soprattutto legate alla diminuzione del carico termico sul substrato in Nichel) aventi l'obiettivo di rientrare nelle tolleranze previste.

• Progetto ESA legato alla missione XEUS

Con riferimento al disegno ottico della missione XEUS, l'Agenzia Spaziale Europea sta considerando la possibilità di realizzare dei segmenti multistrato a geometria aperta per estendere l'operatività della missione nei raggi X duri. L'Osservatorio Astronomico di Brera, in collaborazione con la ditta Media Lario, è stato incaricato di studiare depositi di questo tipo attraverso diverse tecniche (evaporazione tramite cannone elettronico, Ion sputtering e Magnetron Sputtering) aventi come parametri di merito la possibilità di ottenere dei multistrato a bassa rugosità, senza indurre deformazioni della figura geometrica che potrebbero pregiudicare la risoluzione angolare. Fino a questo momento sono state effettuate delle caratterizzazioni topografiche su campioni di substrati candidati a tale applicazioni (di cui l'autore di questa tesi si è direttamente occupato):

 è stato verificato che sia i substrati di vetro Borofloat (da formare a caldo per ottenere geometrie Wolter), sia i substrati in Silicio (alla base delle ottiche a micropori attualmente in corso di sviluppo presso ESA) possono essere impiegati per l'applicazione. Tuttavia la superficie del Silicio fornito per le caratterizzazioni direttamente dall'ESA ha mostrato una rugosità maggiore (peraltro anche superiori ai tipici valori di rugosità RMS misurati su wafer di Silicio commerciali prodotti su quantità industriale per applicazioni di microelettronica).

Alcuni dei risultati ottenuti con il gruppo X dell'Osservatorio Astronomico di Brera, sono stati presentati in conferenze internazionali da poco svoltesi e pubblicati in articoli cui ha partecipato anche l'autore di questa tesi:

- *"Hard X-ray multilayer coated astronomical mirrors by e-beam deposition"*, D.Spiga, G. Pareschi, O. Citterio, **D. Vernani**, V. Cotroneo, S. Basso, R. Banham, G. Valsecchi, G. Grisoni, M. Cassanelli, *SPIE Proc.* 5533, pp. 66-74 (2004)
- "Fitting X-ray multilayer reflectivity by means of PPM software", D. Spiga, A. Mirone, C. Ferrero, V. Cotroneo, G. Pareschi, M. Sanchez del Rio and **D. Vernani**, SPIE Proc. 5536, pp. 71-80 (2004)
- "Development of multilayer coatings (Ni/C Pt/C) for hard X-ray telescopes by e-beam evaporation with ion assistance", D.Spiga, G. Pareschi, O. Citterio, D. Vernani, V. Cotroneo, S. Basso, R. Banham, G. Valsecchi, G. Grisoni, M. Cassanelli, SPIE Proc. 5488, pp. 813-819 (2004)
- "Astronomical Soft X-ray Mirrors reflectivity enhancement by multilaer coating with carbon overcoating", G. Pareschi, V. Cotroneo, D. Vernani, D. Spiga, M. Barbera, M. Artale, A. Collura, S. Varisco, G. Grisoni and G. Valsecchi, SPIE Proc. 5488, pp. 481-491 (2004)
- *"Thin shell plastic optics for x-ray telescopes"*, H. W. Schnopper, M. Barbera, E. Silver, S. Romaine, R. Ingram, D. Vernani, V. Cotroneo, M. A. Artale, R. Candia, A. Collura, D. Caldwell, W. Podgorski, R. Goddard, G. Austin, *SPIE Proc.* 5488-99, *In Press*

Appendice A-1

```
C-----
C PROGRAMMA FORTRAN PER PASSARE DAI DATI DI SCATTERING ALLA PSD
C-----
  PROGRAM PSDXRS
  IMPLICIT DOUBLEPRECISION(A-H,O-Z)
 DIMENSION x1(10000),x2(10000),x3(10000),y1(10000),y2(10000),
        y3(10000),psd(10000),freq(10000),per(10000),
 $
        area(10000),area1(10000),psd1(10000),psd2(10000),
 $
 $
        slope(10000),slarea(10000)
C-----
C Inserimento angolo di incidenza e lunghezza d'onda incidente
C-----
 write(*,*)'angolo di incidenza (arcsec)?'
   read(*,*)thetain
  write(*,*)'lambda incidente (angström)?'
   read(*,*)wave
C-----
C Definizione costanti
C-----
                 _____
 pi=3.1415926
  sec_to_rad=0.000004848
                       ! fattore di conversione da arcsec a rad
  thetairad=thetain*sec_to_rad ! angolo di incidenza in radianti
        _____
C Calcolo dell'integrale della curva del fascio diretto
C------
  open(1,FILE='beam.dat',FORM='formatted',STATUS='old')
   icount=0
   do k=1,10000
   read(1,*,end=25) x1(k),y1(k) ! lettura dati del beam (posizione e
                         conteggi al secondo)
   icount=icount+1
    x1(k)=x1(k)*sec_to_rad  ! conversione da arcsec a radianti
```

```
enddo
```

```
25 continue
C-----
   do k=1,icount-1
     deltx1=abs(x1(k+1)-x1(k))
                                 ! intervallo angolare
     deltxl=abs(xl(k+1)-xl(k))  ! intervallo angolare
deltyl=abs((yl(k+1)+yl(k))/2.)  ! media tra i due valori
     area1(k)=deltx1*delty1
                                 ! area del singolo rettangolo
   enddo
   areax=0.
   do k=1,icount-1
     areax=areax+area1(k)
                               ! area totale del fascio
   enddo
C-----
C Selezionamento della costante di riflettivita' all'angolo di incidenza
C-----
  open(2,FILE='xrr.dat',FORM='formatted',STATUS='old')
   do k=1,10000
    read(2,*,end=30) x2(k), y2(k) ! lettura dati riflettività Fresnel
                              (angolo incidenza, % riflettività)
     if (abs(x2(k)-thetain) .lt. 5.) then
      fresnel=y2(k)
                            ! costante di riflettività
      goto 40
     endif
   enddo
30 continue
C-----
C Calcolo della Power Spectral Density
C-----
40 open(3,FILE='xrs.dat',FORM='formatted',STATUS='old')
  open(4,FILE='psd.dat',STATUS='unknown')
  icount=0
  position=0
  cont=0
  i=0
  rewind(2)
    o k=1,10000 ! ciclo di lettura
read(3,*,end=60) x3(k),y3(k) ! lettura dati di scattering
   do k=1,10000
```

```
x3(k)=x3(k)-thetain !angolo di scattering riferito alla normale
      do i=1,10000 ! sottociclo per accoppiare i conteggi di scattering e
                    la riflettività di Fresnel per lo stesso angolo per
                    poi ricavare la PSD e le frequenze spaziali.
       read(2,*,end=50) x2(i),y2(i)
        if (abs(x2(i)-x3(k))) .lt. 5.) then ! accoppiamento
          icount=icount+1
          x3(k)=x3(k)*sec_to_rad
          cost=2*(wave**3d+0)/(sqrt(fresnel)*32*(pi**3)*thetairad*areax)
          psd(k)=(2d+0*pi)*(cost/sqrt(y2(i)))*(y3(k)/(x3(k))**2.)! PSD A<sup>3</sup>
          freq(k)=(abs(cos(x3(k)) - cos(thetairad)))/(wave) ! freq A<sup>-1</sup>
          goto 50
        endif
      enddo
      continue
   enddo
60 continue
C-----
C Conversione della PSD in nm<sup>3</sup> e della frequenza spaziale in micron<sup>-1</sup>
C-----
   do k=1,icount
                               ! lunghezza d'onda in micron
      per(k) = (1/freq(k))/(10000.)
                                   ! psd in nm^3
      psd(k)=psd(k)/1000.
      write(4,70)per(k),psd(k)
   enddo
70 FORMAT(E11.4,4x,E11.4)
   close(70)
```

```
stop
end
```

50

Appendice A-2

C-----C PROGRAMMA FORTRAN CHE CALCOLA LE PSD SINGOLE E LA PSD MEDIA DI UN NUMERO C QUALSIASI DI PROFILI SUPERFICIALI MISURATI CON IL PROFILOMETRO WYKO C--PROGRAM PsdWYKO DOUBLE PRECISION ampiezza(1024), ! lunghezza spaziale in micron \$ p(1024), psd(1024), ! psd in nm^3 \$ \$ area(1024) REAL realz(1024), ! parte reale di z ! valori profilo della superficie in nm DIMENSION zz(2048) COMPLEX z(1024) EQUIVALENCE (z,zz) ! numero delle frequenze cercate INTEGER nc CHARACTER*1 num C-----C Scelta dell'ingrandimento e del numero di profili da analizzare C----print*, 'Ingrandimento misura?' read*, tipo print*, 'Numero misure?' read*, int if (tipo .eq. 20.) then m=10 ! potenza per avere 1024 dati nc=512 endif if (tipo .eq. 2.5) then ! potenza per avere 512 dati m=9 nc=256 endif n=2**m do 5 i=1, int write (num,'(i1.1)')i open(1,FILE=''//num//'.dat',FORM='formatted',STATUS='old') open(2,FILE='psd'//num//'.dat',FORM='formatted',STATUS='unknown'

```
C-----
C Lettura dei profili misurati e calcolo della FFT
C-----
  do 1 j=1,n
                        ! sottociclo per ogni file di ingresso
   read(1,*)periodo,zz(2*j-1) ! lettura dei file contenenti i profili
    realz(j)=zz(2*j-1)
                        ! parti reali dei profili
1
    zz(2*j)=0.0
                        ! usiamo solo dati reali: i dispari
  call fft(z,m,nc) ! calcolo della fast fourier transformation
C-----
C Calcolo delle ampiezze in nanometri
C-----
 ac=0.
 ab=0.
  do 2 j=2,nc-1
     ac=zz(2*j-1)*2./float(n)
                           ! normalizzazione
    ab=zz(2*j)*2./float(n)
    amp=sqrt(ac*ac+ab*ab)
    ampiezza(j-1)=amp
2
 continue
 ac=zz(2*nc-1)/float(n)
  ab=zz(2*nc)/float(n)
  amp=sqrt(ac*ac+ab*ab)
  ampiezza(nc-1)=amp
C-----
C Calcolo della PSD in nm<sup>3</sup> e del periodo spaziale in micron
C-----
  do 3 k=1,nc-1
    p(k)=periodo*1000/k
                                         ! micron
     psd(k)=0.5*ampiezza(k)*ampiezza(k)*periodo*(10**6) ! nm^3
3
  continue
   do 4 k=1,nc-1
    write(2,'(2e15.7)') p(k),psd(k) ! ciclo di scrittura nel file 2
  continue
4
5
  continue
 call psdm(nc,int)! subroutine per il calcolo della PSD media
 stop
 end
```

```
C-----
C Subroutine per il calcolo della FFT
C-----
  subroutine fft(z,m,nc)
  complex z(1024),u,w,t
   n=2**m
   pi=3.14159265
   nv2=n/2
   nm1=n-1
   j=1
   do 100 i=1,nm1
     if(i.ge.j) goto 10
    t=z(j)
    z(j)=z(i)
    z(i)=t
10
    k=nv2
20
     if(k.ge.j) goto 100
    j=j-k
    k=k/2
    goto 20
100
   j=j+k
   do 200 l=1,m
    le=2**1
    le1=le/2
    u = (1.0, 0.0)
    w=cmplx(cos(pi/float(le1)),sin(pi/float(le1)))
   do 120 j=1,le1
    do 110 i=j,n,le
     if(j.gt.nc*2)goto 200
     ip=i+le1
     t=z(ip)*u
     z(ip)=z(i)-t
110
     z(i)=z(i)+t
120
     u=u*w
200 continue
   return
   end
```

```
C-----
C Calcolo della PSD media
C-----
                     _____
  subroutine psdm(nc,int)
  double precision psd(1024),p(1024),area(1024),psdtemp(1024)
  character*1 num
   psd(1024)=0
   do 1 i=1,int
    write (num, '(i1.1)')i
    open(i,FILE='psd'//num//'.dat',FORM='formatted',STATUS='unknown')
    psdtemp(1024)=0
    p(1024)=0
     do 2 j=1,nc-1
      read(i,*,end=2) p(j),psdtemp(j)
      psd(j)=psd(j) + psdtemp(j)
2
     continue
  continue
1
  open(20,FILE='psd.dat',FORM='formatted',STATUS='unknown')
   do k=1,nc-1
    write(20,'(2e15.7)') p(k),psd(k)
   enddo
  return
  end
```
Appendice A-3

C-----C PROGRAMMA FORTRAN PER CALCOLARE LE QUANTITÀ STATISTICHE DI UNA C SUPERFICIE (RUGOSITÀ, ERROR SLOPE E LUNGHEZZA D'ONDA MEDIA), A PARTIRE C DALLA PSD IN NM³ SU LUNGHEZZE D'ONDA SPAZIALI IN MICRON C-----PROGRAM ERROR IMPLICIT DOUBLEPRECISION(A-H,O-Z) DIMENSION per(2500), psd(2500), freq(2500), area(2500), slope(2500), \$ area2(2500) C-----C Apertura del file binario contenente nella prima colonna le lunghezze C spaziali e nella seconda le PSD. C----open(3,FILE='in.dat',FORM='formatted',STATUS='old') icount=0 pi=3.14159265358979d+000 do k=1,6000 read(3,*,end=25) per(k),psd(k) ! lettura file icount=icount+1 freq(k)=0.0001/per(k) ! conversione da micron a angstrom^(-1)
psd(k)=psd(k)*1000. ! conversione da nm^3 a angstrom^3 enddo _____ C Integrale della PSD come somma di rettangoli e calcolo della rugosità C rms in Angström come radice dell'area totale. C----do k=1,icount-1 deltx=abs((freq(k+1)-freq(k))) ! intervallo costante di frequenze delty=(psd(k+1)+psd(k))/2. ! media tra due punti consecutivi area(k)=deltx*delty ! area del singolo rettangolo enddo

```
C-----
   areaa=0.
   do k=1,icount-1
    areaa= areaa+area(k) ! Ciclo Do per il calcolo dell'area totale
   enddo
   sigma=sqrt(areaa)
                       ! Calcolo della rugosità come da teoria
   print*,'sigma= ',sigma,' ','angstrom'
C-----
                 _____
                                                   _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _
C Calcolo dello Slope Error rms in radianti come radice di un'area
C dimensionale.
C-----
           _____
   do k=1,icount
    slope(k)=((2*pi*freq(k))**2)*psd(k) ! Momento di ordine 2 della PSD
   enddo
   do k=1,icount-1
    delts=(slope(k+1)+slope(k))/2. ! media tra due punti consecutivi
    deltf=abs((freq(k+1)-freq(k))) ! intervallo costante di frequenze
    area2(k)=delts*deltf
                              ! area del singolo rettangolo
   enddo
   areaa=0.
   do k=1,icount-1
    areaa= areaa+area2(k) ! Ciclo Do per il calcolo dell'area totale
   enddo
                        ! Calcolo dell'error slope come da teoria
   rmslop=dsqrt(areaa)
   print*,'rms SLOPE=',rmslop,' ','radianti'
C-----
C Calcolo dello Slope Error rms in radianti come radice di un'area
C dimensionale.
               _____
C-----
   dcorr=(2.*pi*sigma)/(rmslop*10000.)
```

stop end

Bibliografia

[ESA] AA VV, The XEUS Science Case, ESA SP-1238 (2000)

[ESA] AA VV, X-ray Evolving Universe Spectroscopy: the XEUS mission summery, ESA SP-1242 (2000)

[ESA] AA VV, The XEUS Telescope, ESA SP-1253 (2001)

[Asadchikov 1999] Asadchikov V E et al, *Comparative study of the roughness of optical surfaces and thin films by use of x-ray scattering and atomic force microscopy*, Appl. Opt. 38, 684 (1999)

[Asadchikov 2003] Asadchikov V E, Kozhevnikov I V and Krivonosov Yu S, X-ray Investigation of Surface Roughness, Cryst. Rep. 48, 836 (2003)

[Asadchikov 2003] Asadchikov V E, Kozhevnikov I V and Krivonosov Yu S, X-ray studies of Thin-Film Coatings and Subsurface Layers of Solids, Cryst. Rep. Suppl. I 48, S37 (2003)

[Aschenbach 1985] Aschenbach B, X ray telescope, Rep. Prog. Phys. 48, 579 (1985)

[Aschenbach 1988] Aschenbach B, Appl. Opt. 27, 1404

[Attwood 1999] Attwood D, Soft x-rays and extreme ultraviolet radiation, Cambridge University Press., Cambridge UK (1999)

[Baranov 2002] Baranov A et al, *High-resolution Carbon/Carbon multilayers*, SPIE Proc. 4782, 160 (2002)

[Bavdaz 2004] Bavdaz M, Lumb D, Peacock A, Beijersbergen M and Kraft S, Status of X-ray Optics Development for XEUS Missions, SPIE Proc. 5288, (2004)

[Bassani 1983] Bassani F and Altarelli M, Handbook of Synchrotron Radiation vol. 1, E. E. Kock ed. (1983)

[Bhushon 1935] Bhushon B, Wyont J C e Kaliopulos C L, Appl. Opt. 24, 1489 (1935)

[Beijersbergen 2004] Beijersbergen M, Kraft S, Günther R, Mieremet A, Collon M, Bavdaz M, Lumb D and Peacock A, *Silicone Pore Optics: novel lightweight high-resolution X-ray optixs developments for XEUS*, SPIE Proc. 5288, (2004)

[Binning 1985] Binning G, Quate C F and Gerber C, Phys. Rev. Lett. 56, 930 (1985)

[Bragg 1918] Bragg W. H. and Bragg W. L., X-rays and crystal Structure, Bell and Sons edition, London (1918)

[Bruson 1995] Bruson A and Toussaint J C, X-ray scattering from nonideal multilayer structures: calculations in the kinematical approximation, J. Appl. Phys. 77, 1001 (1995)

[Burrows 1983] Burrows D N, Hill J E, Nousek J A, Wells A A, Short A D, Willingale R, Citterio O, Chincarini G and Tagliaferri G, *Swift X-Ray Telescope*, SPIE Proc. 4140, 64 (1983)

[Catura 1983] Catura R C, Brown W A, Joki E G and Nobles R A, *Calculated performance of a Wolter Type I x-ray telescope coated by multilayers*, Opt. Engineering 22, 140 (1983)

[Chambure 1999] de Chambure D, Lessons learned from the development of the XMM optics, SPIE Proc. 3737, 2 (1999)

[Christensen 1988] Christensen F, High-resolution X-ray scattering studies of substrates and multilayers, Revue Phys. Appl. 23, 1701 (1988)

[Christensen 1993] Christensen F, Abdali S, Hornstrup A, Schnopper W, Slane P and Romaine S, *High resolution X-ray scatter and reflectivity study of sputtered Ir surfaces*, SPIE Proc. 2011, 18 (1993)

[Church 1979] Church E L, *Role of surface topography in x-ray scattering*, SPIE Proc. 184, 196 (1979)

[Church 1986] Church E L and Takacs P Z, The interpretation of glancing incidence scattering measurements, SPIE Proc. 640, 126 (1986)

[Citterio 1988] Citterio O et al, Optics for the x-ray imaging concentrator aboard the x-ray astronomy satellite SAX, Appl. Opt. 27, 1470 (1988)

[Citterio 1994] Citterio O, Conconi P, Ghigo M, Jamar C A, Loi R, Mazzoleni F, Naletto G, Pace E, Stockman Y, Tondello G and Villoresi P, *Vertical test facility operating at vacuum ultraviolet for testing very thin wall grazing incidence x-ray mirrors*, SPIE Proc. 2279, 358 (1994)

[Citterio 1996] Citterio O et al, Characteristics of the flight model optics for the JET-X telescope onboard the SPEC-TRUM X-g satellites, SPIE Proc. 2805, 56 (1996)

[Citterio 1999] Citterio O, Campana S, Conconi P, Ghigo M, Mazzoleni F, Braeuninger H W, Burkert W and Oppitz A, *X-ray optics for the WFXT telescope*, SPIE Proc. 3766, 198 (1999)

[Citterio 2000a] Citterio O, Conconi P, Ghigo M, Mazzoleni F and Pareschi G, Progress on the use of ceramics materials for high throughput light weight X-ray optics, SPIE Proc. 4012, 513 (2000)

[Citterio 2000b] Citterio O, Ghigo M, Mazzoleni F, Pareschi G and Peverini L, *Development of soft and hard X-ray optics for astronomy*, SPIE Proc. 4138, 43 (2000)

[Citterio 2001] Braüninger H, Citterio O, Ghigo M, Mazzoleni F, Pareschi G, Parodi G, Burkert W and Hartner G, *Development of Soft and Hard X-ray optics for astronomy: progress report II and consideration on material properties for large diameter segmented optics*, SPIE Proc. 4496, 23 (2001)

[Citterio 2004] Citterio O, Bräuninger H, Ghigo M, Mazzoleni F, Pareschi G, Spiga D, Burkert W and Hartner G D, *Calibration of hard x-ray (15 - 50 keV) optics at the MPE test facility PANTER*, SPIE Proc. 5168, 283 (2004)

[Comastri 1995] Comastri A, Setti G, Zamorani G and Hasinger G, *The contribution of AGNs to the X-ray background*, A&A 296, 1 (1995)

[Comastri 2001a] Comastri A, Fiore F, Vignali C, Matt G, Perola G C, and La Franca F, *The BeppoSAX High Energy Large Area Survey (HELLAS) - III. Testing synthesis models for the X-ray background*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 327-3, 781 (2001)

[Comastri 2001b] Comastri A, What's wrong with AGN models for the x-ray background?, AIP Conference Proc., 599, 73 (2001)

[Compton 1923] Compton A H, Phil. Mag. 45, 1121 (1923)

[Conconi 1994] Conconi P, Bergamini U, Citterio Oberto, Crimi G, Ghigo M and Mazzoleni F, *Evaluation by UV optical measurements of the imaging quality of grazing incidence x-ray optics*, SPIE Proc. 2011, 89 (1994)

[Conconi 2000] Conconi P and Campana S, Optimisation of grazing incidence mirrors and its application to surveying X-ray telescopes, A&A 372, 3781 (2000)

[Cotroneo 2003] Cotroneo V, Optimisation of multilayer mirrors for Hard X-ray astronomy, Thesis of Laurea, University of Milan (2003)

[Cotroneo 2004] Cotroneo V and Pareschi G, Global optimisation of X-ray astronomical multilayer mirrors by an iterated simplex procedure, SPIE Proc. 5536, 49 (2004)

[Dinklage 1963] Dinlage J and Frerichs R, J. Appl. Phys. 34, 2633 (1963)

[Debye 1913] Debye P, Verh. D. Deutsch. Phys. Ges. 17, 389 (1913)

[Ehrenberg 1949a] Ehrenberg W, J. Opt. Soc. Am. 39, 741

[Ehrenberg 1949b] Ehrenberg W, J. Opt. Soc. Am. 39, 746

[Fermi 1922] Fermi E, Formazione di immagini coi raggi Röngten, Nuovo Cimento 24, 133 (1922)

[Ferrando 2002] Ferrando P et al, *SIMBOL-X: a new-generation hard x-ray telescope*, SPIE Proc. 5165, 65 (2002)

[Fiore 2004] Fiore F, Perola G, Pareschi G, Citterio O, Anselmi A and Comastri A, *HEXIT-SAT:* a mission concept for x-ray grazing incidence telescope from 0.5 to 70 keV, SPIE Proc. 5488, 933 (2004)

[Gehrels 2004] Geherls N et al, Astrophys. J. 611, 1005 (2004)

[Ghigo 2003] Ghigo M, Citterio O, Mazzoleni F, Pareschi G, Aschenbach B, Braeuninger H, Friedrich P, Hasinger G, Doehring T, Esemann H, Jedamzik R., Hoelzel E and Parodi G,

Manufacturing of the XEUS X-ray glass segmented mirrors: status of the investigation and last results, SPIE Proc. 5168, 180

[Giacconi 1960] Giacconi R. and Rossi B, A telescope for Soft X-ray Astronomy, J. Geophys. Res. 65, 773 (1960)

[Giacconi 1979] Giacconi R et al, Astrophys. J. 230, 540 (1979)

[Gondoin 1995] Gondoin P, Freund A, Gougeon S, de Chambure D, van Katwijk K, Labergerie D, Lienert U and Schulz N, X-Ray Characterization of an XMM Mandrel at the European Synchrotron Radiation Facility, SPIE Proc. 2515, 70 (1995)

[Gorenstein 1988] Gorenstein P, High throughput x-ray optics: an overview, Appl. Opt. 27, 1433 (1988)

[Gorenstein 1998] Gorenstein P, Deployable ultra-high throughput telescopes: concept, SPIE Proc. 3444, 382 (1998)

[Gullikson 1997] Gullikson E M, Stearns D G, Gaines D P and Underwood J H, Non-specular scattering from multilayer mirrors at normal incidence, SPIE Proc. 3113, 55 (1997)

[Harvey 1991] Harvey J E, Diffraction effects in Grazing Incidence X-Ray Telescopes, J. X-Ray S&T 3, 68 (1991)

[Hexit] *The HEXIT (High Energy X-ray Imaging Telescope) balloon-borne mission*, Proc. Of the 16th ESA Symposium on European Rocket Balloon Programmes and Related Research, St. Gallen (CH) 2-5 June (2003)

[Høghøj 1994] Høghøj P, Ziegler E, Susini J, Freund A K, Joensen K D and Gorenstein P, *Broad-band focusing of hard x-rays using a supermirror*, Physics of X-ray multilayer Structure vol. 6 on OSA Technical Digest Series, 142 (1994)

[Holý 1994] Holý T B V, Nonspecular x-ray reflection from rough multilayers, Phys. Rev. B 49, 10668 (1994)

[Ivan 2001] Ivan A, Bruni R J, Byun K, Gorestein P and Romaine S, Hard X-ray multilayers: a study of different material systems, SPIE Proc. 4145, 72 (2001)

[Jentzsch 1929] Jentzsch F, Phys. Z. 30, 268 (1929)

[Joenson 1995] Joenson K, Voutov P, Szentgyorgyi A, Roll J, Gorenstein P, Hoghoj P and Christensen F, *Design of grazing incidence multilayer supermirror for hard x-ray reflectors*, Appl. Opt. 34, 7935 (1995)

[Kirkpatrick 1948] Kirkpatrick P e Baez A V, Bull. Am. Phys. Soc. 23, 10 (1948)

[Korte 1981] de Korte P A J, Giralt R, Coste J N, Ernu C, Frindel S, Flamand J and Contet J J, Appl. Opt. 20, 1080

[Kozhevnikov 2002] Kozhevnikov I V, Analysis of X-ray scattering from a rough multilayer mirror in the first-order perturbation theory, NIM Physics Research A 498, 482 (2002)

[Laue 1912] Friedrich W, Knipping P and Laue M, Ann. d. Phys.41, 971 (1913)

[Lodha 1998] Lodha G S et al, *Effect of surface roughness and subsurface damage on grazing-incidence x-ray scattering and specular reflectance*, Appl. Opt. Engeni37, 5239 (1998)

[Loxley 1995] Loxley N, Tanner D and Bowen D, A novel beam-conditioning monochromator for high-resolution X-ray diffraction, J. Appl. Cryst. 28, 314 (1995)

[Madsen 2004] Madsen K K, Christensen F, Jensen P, Ziegler E, Craig W W, Gunderson K, Koglin J and Pedersen K, *X-ray study of W/Si multilayers for the HEFT hard x-ray telescope*, SPIE Proc. 5168, 41 (2004)

[Michette 1991] Michette A G, Nature 353, 510 (1991)

[Michette 1993] Michette A G and Buckley C J, X-ray Science and Technology, Institute of Physics Publishing, London UK (1993)

[Névot 1980] Névot L G and Croce P, Phys. Appl. 15, 761 (1980)

[Newell 1953] Newell H E Jr, High Altitude Rocket Research, Academic Press, New York (1953)

[Ohnishi 2004] Ohnishi N et al, HRTEM analysis of Pt/C multilayers, SPIE Proc. 5168, 508 (2004)

[Pareschi 2000] Pareschi G et al, Nickel replicated multilayer optics for soft and hard X-ray telescopes, SPIE Proc. 4012, 284 (2000)

[Pareschi 2003] Pareschi G, Citterio O, Ghigo M, Mazzoleni F, Gorenstein P, Romaine S E and Parodi G, *Replication by Ni elettroforming approach to produce the Con-X/HXT hard x-ray mirrors*, SPIE Proc. 4851, 528 (2003)

[Pareschi 2004a] Pareschi G and Cotroneo V, Soft (0.1-10 keV) and hard (>10 keV) X-ray multilayer mirrors for the XEUS astronomical mission, SPIE Proc. 5168, 53 (2004)

[Pareschi 2004b] Pareschi G, Cotroneo V, Vernani D, Spiga D, Barbera M, Artale M, Collura A, Varisco S, Grisoni G and Valsecchi G, *Astronomical Soft X-ray Mirrors reflectivity enhancement by multilayer coating with carbon overcoating*, SPIE Proc. 5488, 481 (2004)

[Parodi 2004] Parodi G, *Ray tracing code for x-ray telescope performance prediction*, SPIE Proc. 5536, 145 (2004)

[Ricker 1983] Ricker G R and Vallerga J D.R. NIM A 213, 133 (1983)

[Röntgen 1985] Röntgen W C, Sitzungsberichte der Würzburger Physikalischeb-Medicinischen Gesellschaft, (1985)

[Scarsi 1998] Scarsi et al., The violent X-ray seen by BeppoSax, AAS 193.3201S 30, 1291 (1998)

[Schnopper 1999] Schnopper H W, Silver E, Ingram R, Christensen F, Hussain A M, Barbera M, Romaine S E, Collura A, Kenter A T, Bandler S and Murray S S, *X-ray optics made from thin shell plastics*, SPIE Proc. 3766, 350

[Schnopper 2004] Schnopper H W, Ingram R, Silver E, Barbera M, Candia R, Christensen F, Cartsen, Jensen P, Romaine S, Vernani D, Cotroneo V, Varisco S, Artale M, Madsen K K and Calura A, *Thin shell plastic lenses for space and laboratory applications*, SPIE Proc. 5488, *In Press* (2004)

[Serlemitsos 1995] Serlemitsos P J, Jalota L, Soong Y, Kunieda H, Tawara Y, Tsusaka Y, Suzuki H, Sakima Y, Yamazaki T, Yoshioka H, Furuzawa A, Yamashita K, Awaki H, Itoh M, Ogasaka Y, Honda H and Uchibori Y, *The X-ray telescope on board ASCA*, Publ. Astron. Soc. Japan 47, 105 (1995)

[Silver 2003] Silver E H et al., *B-MINE the balloon-borne microcalorimeter nuclear line explorer*, SPIE Proc. 4851, 905 (2003)

[Sinha 1994] Sinha S K, X-ray diffuse scattering as a probe for thin film and interface structure, J. Phys. III France 4, 1543 (1994)

[Sinha 1999] Sinha S K, Sirota E B, Garoff S and Stanley H P, X-ray and neutron scattering from rough surfaces, Phys. Rev. B 38, 2297 (1999)

[Smirnov 1977] Smirnov L A, Opt. Spectrosc. 43, 333 (1977)

[Spiga 2004a] Spiga D, Pareschi G, Citterio O, Vernani D, Cotroneo V, Basso S, Banham R, Valsecchi G, Grisoni G and Cassanelli M, *Hard X-ray multilayer coated astronomical mirrors by e-beam deposition*, SPIE Proc. 5533, 66 (2004)

[Spiga 2004b] Spiga D, Pareschi G, Citterio O, Vernani D, Cotroneo V, Basso S, Banham R, Valsecchi G, Grisoni G and Cassanelli M, Development of multilayer coatings (Ni/C - Pt/C) for hard X-ray telescopes by e-beam evaporation with ion assistances, SPIE Proc. 5488, 813 (2004)

[Spiga 2004c] Spiga D, Mirone A, Ferrero C, Cotroneo V, Pareschi G, Sanchez del Rio M and Vernani D, *Fitting X-ray multilayer reflectivity by means of PPM software*, SPIE Proc. 5536, 71 (2004)

[Spiller 1981] Spiller E, AIP Conf. Proc. 75, 124 (1981)

[Spiller 1994] Spiller E, Soft X-ray optics, SPIE Press. Bellingham - WA (1994)

[Spiller 1999] Spiller E, Baker S, Parra E and Tarrio C, Smoothing of mirror substrates by thinfilm deposition, SPIE Proc. 3767, 143 (1999)

[Stearns 1992] Stearns D G, X-ray scattering from interfacial roughness in multilayer structures, J. Appl. Phys. 71, 4286 (1992)

[Stearns 1998] Stearns D G, Gaines D P, Sweeney D W and Gullikson E M, *Nonspecular x-ray scattering in a multilayer-coated imaging system*, J. Appl. Phys. 84, 1003 (1998)

[Stover 1995] Stover J C, Optical scattering, SPIE Press. Bellingham - WA (1995)

[Takacs 1990] Takacs P Z, Furenlid K and Church E L, In search of the elusive true surface, SPIE Proc. 1333, 205 (1990)

[Tanaka 2001] Tanaka Y, ChIron line and ASCA, AAS 199.8301T 33, 1427 (2001)

[Tanner 1992] Tanner B K and Hudson J M, Characterization of Magnetic Multilayers by Grazing Incidence X-ray Reflectivity, IEEE 28, 2736 (1992)

[Underwood 1981] Underwood J H and Barbee T W, Layered synthetic microstructures as Bragg diffractors for X rays and extreme ultraviolet: theory and predicted performance, Appl. Opt. 20, 3027 (1981)

[Van Speybroeck 1979] Van Speybroeck L, SPIE Proc. 184, 2 (1979)

[Waller 1923] Waller I, Z. Physik 17, 398 (1923)

[Weisskopf 2000] Weisskopf M C, Tananbaum H D, Van Speybroeck and O'Dell S L, *Chandra X-Ray Observatory (CXO): Overview*, SPIE Proc. 4012, 2 (2000)

[Windt 1998] Windt D, *IMD* - Software for modelling the optical properties of multilayer films, Computers in Physics 12, 360 (1998)

[Wolter 1952a] Wolter H, Ann. Der. Phys. NY 10, 94 (1952)

[Wolter 1952b] Wolter H, Ann. Der. Phys. NY 10, 286 (1952)

[Wormington 1994] Wormington M et al, *Grazing incidence x-ray reflectance measurement of surface and interface roughness on the sub-nanometre scale*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 332, 525 (1994)

[Zombeck 1983] Zombeck M V, Advanced X-ray Astrophysical Facility (AXAF), SAO Interim Report: SAO-AXAF-83-015 (1983)

Ringraziamenti

Ringrazio sentitamente l'Osservatorio Astronomico di Brera ed in particolare il gruppo di tecnologia ottica per Astronomia X per l'ospitalità di cui ho potuto usufruire durante il periodo necessario alla realizzazione di questo lavoro di Tesi: Giovanni Pareschi ed il Prof. O. Citterio (INAF/OAB) per la supervisione e la costante collaborazione; Mauro Ghigo, Renzo Valtolina ed il Dott. Mazzoleni per la sincera disponibilità dimostrata; Vincenzo Cotroneo e Daniele Spiga per l'aiuto nella fase di compilazione e di presentazione del lavoro di Tesi e per le proficue discussioni; tutto il personale tecnico/amministrativo per l'estrema cordialità.

Ringrazio l'Università di Bologna ed il dipartimento di Astronomia nelle vesti del Prof. Giorgio Palumbo per i preziosi consigli e per avermi dato la possibilità di preparare questo lavoro di Tesi in un ambiente che ha ampiamente soddisfatto le mie aspettative intellettuali.

Ringrazio l'Harvard Smithsonian Center for Astrophysics di Boston (H. Schnopper), l'Osservatorio Astronomico di Palermo OAPa/INAF (M. Barbera), il CNR di Bologna (G. Malaguti, E. Caroli), l'MPE di Monaco (H. Braüninger), il Danish Space Reaserch Insitute (F. Christensen), lo Sciense Payload & Advanced Concepts Office dell'ESA (A. Peacock, M. Bavdaz, D. Lumb), lo Scientific Software Group dell'ESRF (C. Ferrero, A. Mirone, M. Sanchez Del Rio) e le ditte Media-Lario (G. Nocerino) e Alenia Spazio-LABEN per la collaborazione nei progetti scientifici di sviluppo tecnologico in cui si è collocato questo lavoro di Tesi.

Sono grato all'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e all'Agenzia Spaziale Europea (ESA) per aver finanziato i progetti scientifici in questione.