TESINA PER L'ESAME DI STATO
A.S. 2010/2011

ASTROFISICA SPERIMENTALE

Di *Andrea Laurenti*

METODI DI COSTRUZIONE E MATERIALI PER GLI SPECCHI DEI GRANDI TELESCOPI OTTICI

Il presente contributo, elaborato dallo **studente Andrea LAURENTI** del Liceo Scientifico Sarrocchi di Siena, è connesso alle attività scientifiche e laboratoriali svolte durante lo ***"Stage Invernale a Tor Vergata"*** - promosso dal MIUR (Direzione Generale per gli ordinamenti scolastici e per l'autonomia scolastica) – e tenuto dal 7 all'11 Febbraio 2011 presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Roma Tor Vergata.
Le attività didattiche previste dal Programma dello Stage sono state realizzate all'interno di tre gruppi di ricerca, guidati da docenti del Dipartimento di Fisica.

I responsabili delle attività laboratoriali del Modulo di Scienza dei Materiali per l'Astrofisica Sperimentale

Prof. Francesco Berrilli .....

Ing. Martina Cocciolo .....

Dott. Luca Giovannelli .....

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI ROMA DIPARTIMENTO DI FISICA

Il Direttore dello *"Stage Invernale a Tor Vergata"*

Prof. Nicola Vittorio .....

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI ROMA DIPARTIMENTO DI FISICA

Anno Scolastico 2010/2011

Liceo Scientifico Tecnologico "Tito Sarrocchi" (Si)

Classe V B

Metodi di costruzione e materiali per gli specchi dei grandi telescopi ottici

Andrea Laurenti

Martina Cocciolo

Università "Tor Vergata" Roma

Introduzione

Questo lavoro è un approfondimento che viene da un crescente interesse verso le tematiche legate all'astrofisica alle quali sono stato introdotto durante due stage, uno estivo ed uno invernale, all'università "Tor Vergata" di Roma. Nel primo approccio (lo stage estivo) abbiamo trattato argomenti relativi alla meccanica celeste, ovvero riguardanti lo studio delle dinamiche di movimento dei corpi celesti, le influenze reciproche, la ricerca di esopianeti. Nel secondo stage, al quale ho partecipato all'inizio di febbraio 2011, abbiamo invece approfondito la fisica dei materiali, seguendo il corso di astrofisica sperimentale. Oltre a lezioni frontali, abbiamo collaborato in un'attività di laboratorio allo scopo di studiare le proprietà di due materiali diversi: carbonio e alluminio. Grazie all'estrema chiarezza e disponibilità dei docenti, abbiamo capito quali sono le innumerevoli applicazioni della fisica e della matematica nell'ambito della progettazione di telescopi ottici, delle loro strutture e degli specchi che sfruttano. Proprio quest'ultima parte è quella che ho deciso di approfondire in questa tesina in cui parlerò appunto degli specchi montati sui grandi telescopi ottici, i loro metodi di produzione, i materiali maggiormente usati con le loro proprietà.

L'uomo, fin dai primi anni di osservazione, ha sempre cercato di aumentare le dimensioni dei telescopi. La grande dimensione dello specchio di un telescopio serve sostanzialmente a risolvere due problemi "tecnici" legati alla risoluzione dell'immagine che sono:

- Diminuzione della diffrazione
- Aumento del flusso di fotoni

Diffrazione

La diffrazione è un fenomeno che si ha ogni qualvolta un'onda trova un ostacolo sul suo cammino. Nel caso dei grandi telescopi essa è provocata dalla presenza dello specchio secondario, necessario per diverse funzioni, davanti a quello primario. L'immagine di un punto quando è affetta da diffrazione corrisponde ad un cerchio luminoso al centro, detto disco di Airy, circondato da una serie di anelli concentrici via via meno luminosi.

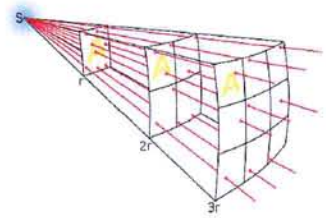
Disco di Airy e limite di diffrazione

La dimensione d del disco di Airy è data dalla formula:

$$d = 2{,}44\,\lambda / D.$$

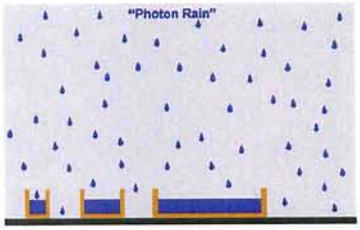
Dove D è il diametro dello specchio primario e λ la lunghezza dell'onda incidente.

Flusso di fotoni



Flusso di fotoni all'aumentare della distanza dalla sorgente

Il flusso di fotoni corrisponde al numero di fotoni provenienti dalla sorgente, che colpiscono lo specchio nell'unità di tempo. Come si nota dalla figura a sinistra, maggiore è la distanza dalla sorgente, minore sarà il flusso di fotoni. Ovviamente la qualità di un'immagine dipende anche dalla quantità di luce (numero di fotoni) che colpisce la lastra o la CCD. Per migliorarla si possono seguire due strade:



- Aumentare il tempo di osservazione (tempo di integrazione);
- Aumentare il diametro dello specchio primario (come si nota dalla figura a destra).

Questo si nota bene dalla formula:

$t=kD^{-2}$.

Dove t è il tempo di integrazione, D è il diametro dello specchio e k è un parametro che dipende dalle condizioni di visibilità del momento.

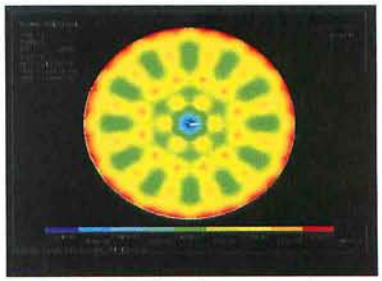
Inoltre è anche importante avere telescopi con focali relativamente lunghe per avere buoni ingrandimenti.

Carichi a cui sono sottoposti i grandi specchi

I grandi specchi sono costretti a sopportare costantemente diversi tipi di carico che sono sostanzialmente:
- Statici
- Dinamici
- Termici

Carichi Statici

I carichi statici sono quelli che rimangono uguali a se stessi o subiscono variazioni molto lente nel tempo. Essi sono dovuti ad esempio al peso stesso dello specchio o al vento che soffia costantemente sulla superficie ottica. Per contrastare le deformazioni provocate da questo tipo di carico, negli ultimi anni è stata introdotta la cosiddetta ottica attiva. Essa consiste nell'installazione di molti attuatori che sorreggono lo specchio dalla sua superficie inferiore in modo da mantenere la forma corretta della superficie stessa. Essi sono comandati da un software che analizza costantemente le deformazioni



Predizione della deformazione di uno specchio a causa del suo peso

che subisce lo specchio tramite un'analisi del fronte d'onda riflesso, inviando repentinamente ad ogni pistone le istruzioni per muoversi.

Carichi Dinamici

I carichi dinamici, invece, sono quelli che variano di continuo nel corso del tempo, in alcuni casi con impulsi brevi e di grande intensità. Ne sono un esempio le enormi sollecitazioni provocate da un lancio spaziale o il vento che soffia a raffiche. Installare telescopi nello spazio serve per eliminare le deformazioni, provocate dall'atmosfera, del fronte d'onda emesso dalla sorgente che si vuole osservare. Per risolvere questo problema chiamato *seeing atmosferico*, da qualche anno è stata introdotta l'ottica adattiva. Anch'essa è un sistema basato su degli attuatori posti generalmente sul retro dello specchio secondario, comandati da un software che analizza il fronte d'onda emesso dalla sorgente. L'ottica adattiva è attualmente applicata a specchi con diametro di 30 cm. al massimo, a causa dell'elevata frequenza con la quale essi si devono muovere per eliminare l'effetto "tremolante" che l'atmosfera provoca nell'immagine.

Carichi Termici

La terza tipologia di carico è quella termica. Questi carichi sono dovuti alle sollecitazioni meccaniche provocate nel materiale dalle variazioni di temperatura come quelle delle escursioni termiche diurne. Questo tipo di deformazioni può essere compensato dagli attuatori dell'ottica attiva.

Proprio a causa di tutti questi tipi di carico il materiale di cui è composto lo specchio deve soddisfare altrettanti requisiti oltre ai requisiti ottici necessari per costruire uno specchio di qualità.

Requisiti Ottici

Uno specchio appena alluminato

Essi sono strettamente legati alla capacità d'osservazione del telescopio. Il blocco che andrà a costituire lo specchio deve quindi poter essere lavorato, anche se di grandissime dimensioni, ed infine levigato in modo da ottenere una superficie estremamente liscia. Essa deve poi poter essere rivestita (alluminata) da un sottile strato di materiale riflettente come alluminio, argento od oro.

Requisiti meccanici

Essi sono legati alle deformazioni che subisce lo specchio. Il materiale di cui è composto deve essere leggero, cioè avere bassa densità, ma deve anche avere una buona rigidezza, ovvero deve deformarsi poco anche in relazione a grandi carichi. Quest'ultima caratteristica è ben espressa da un parametro detto ***modulo di young(E)***. Esso si ottiene

dal rapporto sforzo/deformazione, ed è caratteristico di ogni materiale. Si nota dalla definizione che più grande è, minore sarà la deformazione di un oggetto fatto di quel materiale a parità di carico applicato. Inoltre, per un materiale è importante la sua rigidezza specifica espressa dal rapporto E/ρ cioè modulo di Young su densità. Se esso è alto significa che il materiale oltre a rispondere bene meccanicamente è anche leggero.

Requisiti Termici

Essi sono legati al rapporto che c'è tra materiale e variazioni di temperatura. Sono ben descritti da tre grandezze:

- Conducibilità termica (k): Indica quanto il materiale è "adatto" a far propagare il calore al suo interno.
- Diffusività termica (λ): Indica quanto rapidamente il calore va a riscaldare il corpo. Più è bassa e più tempo ci metterà il corpo a scaldarsi sottoposto ad una variazione di temperatura.
- Coefficiente di espansione termica (α): Indica quanto il materiale si deforma sottoposto ad una variazione di temperatura.

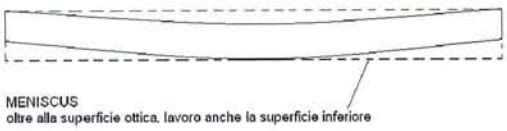
Estrema capacità isolante di un sottile strato di Aerogel.

A questo punto, introdotte le proprietà ed i requisiti da soddisfare, possiamo iniziare a parlare dei vari tipi di specchi. Essi sono cinque: flat back, meniscus, spun cast, lightweight e segmented.

Flat Back

La costruzione di uno specchio flat back è la più semplice di tutte. Consiste nel prendere un grande disco di materiale e scavare solo su una faccia la superficie ottica destinata all'alluminatura. L'alluminatura è il processo di copertura con un sottile strato di spessore inferiore ai 100 nanometri di materiale riflettente (generalmente l'alluminio o argento). Gli specchi di questo tipo sono attualmente meno utilizzati a causa della loro geometria non ottimale, che aumenta notevolmente il peso all'aumentare del diametro dello specchio stesso.

Meniscus



Questo tipo di specchio si ottiene sagomando il blocco di materiale ottico sia sulla faccia superiore che su quella inferiore. In questo modo si riduce il peso dello specchio. Specchi meniscus sono montati sul "VLT" (Very Large Telescope), un complesso di quattro telescopi installati in Cile sulla montagna "Cerro la Silla", a sud del deserto dell'Atacama. Ognuno di essi ha un primario di 8,6 m. di diametro, e tramite tecniche di osservazione interferometriche, possono lavorare insieme per ottenere immagini con una risoluzione angolare di qualche secondo d'arco, che permette di distinguere i fari di una macchina alla distanza della luna!!!

Spun Cast

Questo tipo di specchio si ottiene accostando tanti specchi più piccoli di forma esagonale e fondendoli insieme. Lo specchio finale rimane quindi sempre uno solo. Un esempio di specchio spun-cast sono gli specchi da 8.4 metri di "LBT" (Large Binocular Telescope), un telescopio che fa parte del Mt. Graham International Observatory vicino Safford, in Arizona.

Un'immagine del "LBT"

Lightweight

Questa tecnica è pensata per aumentare al massimo il rapporto tra rigidezza e peso dello specchio e per questo motivo sono tra le più utilizzate, in particolare per applicazioni spaziali in cui la leggerezza del telescopio è un requisito fondamentale a causa degli elevati costi di lancio. Essi si ottengono mediante due metodi:

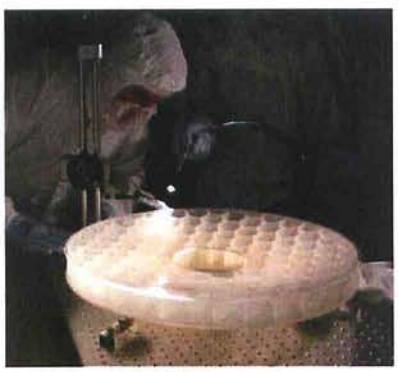


Fig. 1

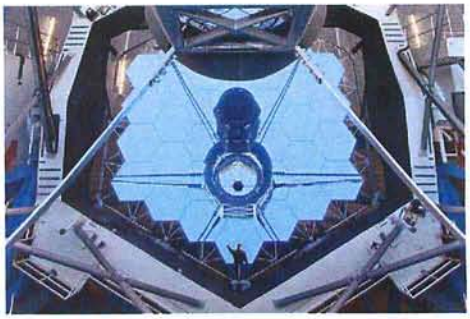
Fig. 2

• Scavando delle tasche di diverse forme (in genere triangolari o esagonali), direttamente nel disco solido di materiale ottico flat-back o meniscus, come si nota dalla figura 2. Un esempio sono i singoli specchi che compongono lo specchio primario del James Webb Space Telescope (il quale è inoltre uno specchio segmentato, spiegato di seguito nel testo)

• Interponendo un core anch'esso dotato di celle esagonali o triangolari (honeycomb) tra i due strati di materiale ottico come si vede nella figura 1. Un esempio è lo specchio primario del telescopio spaziale Hubble.

Segmented

Gli specchi segmentati si ottengono avvicinando tanti specchi esagonali più piccoli tra loro senza fonderli insieme come nel caso dello spun-cast, ma lasciandoli separati assicurandosi che il "gap" tra uno specchio ed un altro non influisca sulla qualità dell'immagine. Applicazioni di questo tipo si trovano nel telescopio "Keck" installato alle Hawaii a 4000 m. di altitudine in modo da ridurre al minimo l'inquinamento luminoso le turbolenze e le escursioni termiche.



Lo specchio segmentato del Keck telescope.

In conclusione possiamo dire che anche la scelta del tipo di specchio influisce notevolmente sui comportamenti meccanici/termici dello stesso. La scelta del materiale di costruzione rimane comunque ciò che più influenza questi ultimi.

Entriamo allora nello specifico parlando dei principali materiali utilizzati attualmente. E' opportuno dividerli in diverse classi a seconda delle loro caratteristiche: esse sono cinque più una, che è costituita dai materiali compositi in cui confluiscono alcune delle altre.

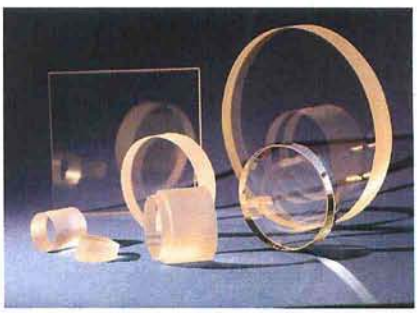
Metalli

I metalli sono elementi chimici che occupano un posto preciso nella tavola periodica e sono spesso usati sotto forma di leghe come acciaio bronzo ecc. Essi sono caratterizzati da una densità generalmente elevata e da una buona resistenza meccanica. Inoltre sono buoni conduttori termici ed elettrici e hanno la caratteristica di essere duttili. Infine alcuni di essi riflettono bene la luce, e per questo vengono utilizzati per aumentare le proprietà ottiche di una superficie, in particolare l'alluminio, l'argento e l'oro.

A causa dell'elevata densità e delle proprietà termiche non ottimali i metalli non vengono utilizzati per la costruzione di grandi specchi, ad eccezione del berillio che, avendo anche una bassa densità e buone proprietà sia termiche che meccaniche, è attualmente usato per la costruzione degli specchi del *James Webb Space Telescope*.

Ceramici e Vetri

Questi materiali sono composti che contengono un elemento metallico ed uno non metallico (ad esempio gli ossidi).
Sono caratterizzati da una bassa densità, da una elevata durezza superficiale e sono infine poco duttili.
Tra i materiali usati in astronomia presenti in questa

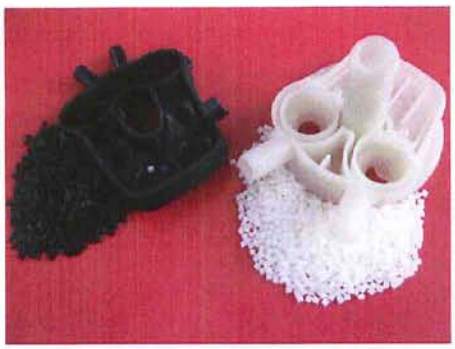


Alcune lenti in Zerodur

classe troviamo lo Zerodur e l'ULE (particolari tipi di vetri), di cui parleremo più avanti. Tra i ceramici con eccellenti proprietà meccaniche/termiche troviamo il carburo di silicio (SiC).

Polimeri ed Elastomeri

I polimeri sono macromolecole formate da molti gruppi molecolari (unità ripetitive) uguali o diversi che si ripetono a catena con lo stesso tipo di legame(covalente). Esistono polimeri di diversi tipi, classificati secondo vari metodi. Possono essere lineari, ramificati o reticolati ma la classificazione che più ci interessa è la seguente:

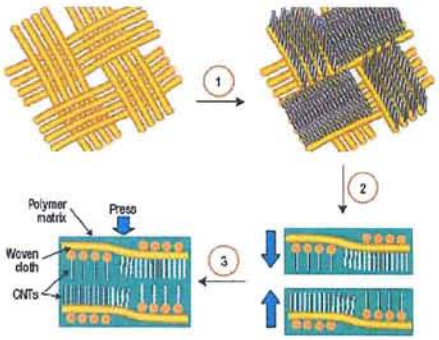


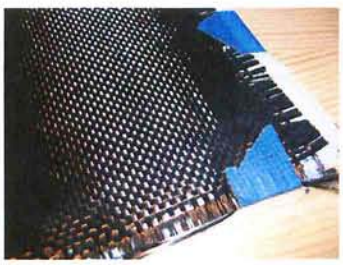
- Polimeri termoindurenti
- Polimeri termoplastici
- Elastomeri

Le resine termoplastiche fondono al di sopra di una certa temperatura caratteristica, quelle termoindurenti al contrario una volta formate (cioè "cotte"), al di sopra di una certa temperatura caratteristica si decompongono, quindi non possono essere formate una seconda volta.
Gli elastomeri sono una classe "speciale" di polimeri, caratterizzata da avere deformazioni molto alte rispetto alle altre materie plastiche a parità di carico applicato.

Compositi

Essi sono composti da più materiali semplici differenti. Ognuno di essi è una fase e quindi la struttura del composito non è omogenea. Questo serve per conferire al materiale proprietà multiple caratteristiche di ogni fase che lo compone. In generale un composito è formato da dei costituenti che a seconda della loro funzione si dividono in ***matrice*** e ***rinforzo***.
La matrice racchiude il rinforzo garantendo la coesione del materiale e la giusta dispersione della fibra. Essa può essere di natura polimerica (ad esempio le resine epossidiche), metallica (ad esempio alluminio o titanio) o ceramica come nel caso del carburo di silicio.





Un rinforzo in fibra di carbonio

Il rinforzo è invece costituito da una fase dispersa all'interno della matrice e si può trovare sotto forma di fili, tessuti o particelle. Il rinforzo viene immerso nella matrice e sottoposto ad un ciclo termico detto "di cura" per unire le due fasi e formare il pezzo finale. Ovviamente rinforzo e matrice hanno proprietà meccaniche/termiche differenti: questo rende più complesso lo studio del comportamento del materiale.
Esempi comuni di compositi sono le resine rinforzate con fibra di carbonio (automobilismo), il calcestruzzo o la vetroresina.

Adesso possiamo parlare di alcuni tra i materiali attualmente più utilizzati in astronomia per costruire grandi specchi.

Zerodur / ULE

L'ULE (Ultra Low Expansion) e lo Zerodur, sono vetri ceramici attualmente molto utilizzati per costruire specchi grazie a:

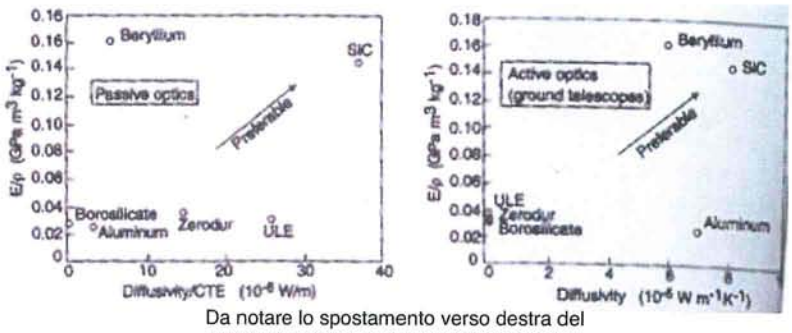
- Un coefficiente di espansione termica pressoché nullo, proprietà che riduce molto le problematiche relative alle deformazioni termiche e che conferisce grande stabilità dimensionale;
- La bassa densità propria dei vetri;
- La possibilità di essere lavorati per ottenere le proprietà ottiche desiderate (polishing e coating).

Un disco in Zerodur

Essi, oltre ad essere usati per specchi flat-back o meniscus, trovano applicazioni anche nella costruzione di specchi lightweight con struttura honeycomb. Un esempio si trova nello specchio primario del celeberrimo telescopio Hubble, che ha una struttura lightweight con substrati ottici e honeycomb di ULE.

Berillio

Come si vede dal grafico, il berillio è un'ottimo materiale per la costruzione di specchi, specialmente dopo l'introduzione dell'ottica attiva.
Le principali caratteristiche sono:



Da notare lo spostamento verso destra del berillio dopo l'introduzione dell'ottica attiva.

- Densità molto bassa (circa 4 volte meno dell'acciaio);
- Elevato modulo di Young;
- Elevata conducibilità, bassa diffusività e basso coefficiente di espansione termica;
- Punto di fusione tra i più alti nei metalli leggeri (1551,15° Kelvin).

Esso è però penalizzato dalla sua tossicità per inalazione e dal suo costo elevato. Per lavorarlo sono infatti necessarie precauzioni particolari che. Ciò nonostante il berillio rimane un metallo utilizzato prevalentemente in progetti per telescopi spaziali. Ad esempio trova un'applicazione nello specchio del James Webb Space Telescope, che avrà un primario lightweight segmentato di 6,5 metri di diametro (contro i 2,4 dell'Hubble) composto da 18 segmenti più piccoli tutti dotati di ottica attiva.

Carburo di silicio

Il carburo di silicio (SiC) è un ceramico sintetizzato a partire da silicio e carbonio. Esso ha una durezza intermedia tra il corindone e il diamante, viene quindi classificato tra i materiali superduri. Si presenta sotto forma di almeno settanta forme cristalline ma le più comuni sono la forma α e β. La prima ha una struttura romboedrica o esagonale e si forma a temperature superiori ai 2000° C, mentre la seconda ha un reticolo cubico a facce centrate e si forma al di sotto dei 2000° C. Quest'ultima ha un elevatissimo modulo di young, una densità relativamente elevata (meno di due volte di quella del berillio) e un coefficiente di espansione termica basso. La forma α viene prodotta prevalentemente tramite un processo di sinterizzazione usando polveri dell'ordine del micron insieme ad additivi che ne facilitano la fusione. Si ottiene così un materiale a base di α-SiC puro per il 99% e poroso per il 3%.

Un cristallo di carburo di silicio

La forma β invece viene prevalentemente usata per depositare sottili strati sopra ad altri materiali a base di SiC ma meno costosi e meno pesanti, a causa dei processi di sintetizzazione lenti (Chemical vapor deposition - deposizione di vapori chimici), gli elevati costi di produzione e la difficoltà nel polishing dovuta all'estrema durezza. Tuttavia si possono ottenere specchi interamente in β-Sic con un processo apposito, che prevede due fasi. In un primo momento si converte grafite in β-Sic con una struttura con il 20% di porosità; la seconda fase prevede il riempimento delle porosità nella zona della superficie ottica con altro β-Sic attraverso la deposizione di vapori chimici.

E il futuro ???

Attualmente le ricerche hanno seguito diverse strade maggiormente orientate verso la costruzione di specchi più grandi e più leggeri, soprattutto lightweight e segmentati. Alcune delle tecnologie in fase di studio sono le seguenti:

- Dispersione di microsfere di vetro con un coefficiente di espansione termica pressoché nullo in sol-gel. Così si ottiene un composito che può costituire un core molto leggero e più robusto degli attuali honeycomb. Questa ricerca è portata avanti e finanziata dall' "Air Force Research Laboratory's Materials and Manufacturing Directorate" (AFRL/ML);
- L'uso di schiume a base di silicio, alluminio, carbonio e carburo di silicio. Esse possono essere create anche a partire da microsfere cave di vetro creando così schiume sintattiche (compositi formati da matrici in resina polimerica e rinforzi in forma di microsfere) leggerissime ma resistenti.

Proprio quelle a base di carbonio sono molto promettenti soprattutto per le applicazioni spaziali. E' possibile progettare la schiuma in fase di produzione in modo che soddisfi i requisiti meccanici, termici ed elettrici desiderati. Inoltre le ricerche stanno cercando di migliorare la microstruttura della schiuma per migliorare la resistenza alla compressione, tensione e aumentarne il punto di rottura. Inoltre si sta cercando un metodo per ricoprirle

con uno strato di materiale levigabile che copra i pori della schiuma impedendo l'attacco da parte dell'ossigeno atomico e che costituirà il substrato ottico.
Infine le ricerche stanno indagando la possibilità della realizzazione di materiali compositi a matrice ceramica o metallica e rinforzo in fibra di carbonio.

Conclusioni

Come diceva Albert Einstein, "la preoccupazione per l'uomo e per il suo destino deve sempre costituire l'interesse principale di tutti gli sforzi tecnici. Non dimenticatelo mai in mezzo a tutti i vostri diagrammi ed alle vostre equazioni." L'uomo deve vedere nello studio del cosmo la chiave per aprire i cassetti in cui sono chiuse da millenni le risposte alle domande che da sempre si è posto: chi siamo?, da dove veniamo?, cosa c'era prima di noi?, è possibile colonizzare altri pianeti?. Per questo motivo gli sforzi della ricerca scientifica non cessano mai, e continuamente si trovano nuove soluzioni tutte da scoprire. Alcuni studiosi pensano che la costruzione di specchi leggeri abbia raggiunto il suo limite teorico ma esiste già un progetto della Nasa chiamato "Actuated Hybrid Mirror Telescope", che riguarda la costruzione di un telescopio con uno specchio ibrido costruito con l'uso di nano-laminati, nano-strutture metalliche che ridurranno sensibilmente il peso di uno specchio in favore della robustezza sempre più alta.

Sitografia

- http://it.wikipedia.org;
- http://www.nasa.gov;
- http://www.eso.org;
- http://ammtiac.alionscience.com/pdf/AMPQ8_1ART10.pdf