

# TESINA PER L'ESAME DI STATO

## A.S. 2013/2014

### *Astrofisica Sperimentale*

di *Lorenzo Massimi*

#### DA GALILEO GALILEI A JAMES WEBB

Il presente contributo, elaborato dallo **studente Lorenzo Massimi** del Liceo Scientifico "V. Volterra" di Ciampino (RM), è connesso alle attività scientifiche e laboratoriali svolte durante lo "**Stage a Tor Vergata**" - promosso dal MIUR (Direzione Generale per gli ordinamenti scolastici e per l'autonomia scolastica) e tenuto presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Roma Tor Vergata in due fasi:

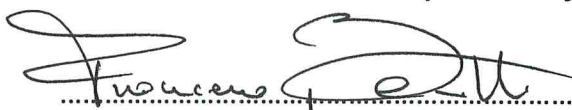
Stage Estivo dal 24 al 28 Giugno 2013;

Stage Invernale dal 4 al 7 febbraio 2014

Le attività didattiche previste nel Programma dello Stage sono state realizzate in tre gruppi di ricerca, guidati da docenti dell'Università di Roma Tor Vergata

#### *I responsabili delle attività laboratoriali del Modulo "Materiali per l'Astrofisica Sperimentale"*

Prof. Francesco Berrilli



Dott. Dario Del Moro



Dott. Roberto Piazzesi



Dott. Luca Giovannelli



#### *Il Direttore degli "Stage a Tor Vergata"*

Prof. Nicola Vittorio



Astronomia e Fisica

# Da Galileo Galilei a James Webb

Nuovi Problemi e soluzioni  
innovative



UNIVERSITA' degli STUDI di ROMA  
**TOR VERGATA**

Lorenzo Massimi  
LICEO SCIENTIFICO VITO VOLTERRA  
Via Acqua Acetosa 8/A  
Ciampino (Roma)

*Handwritten signatures:*  
L. del  
FGS

## Sommario

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introduzione                                                                                                  | 2  |
| 2. I primi telescopi a rifrazione                                                                                | 2  |
| 2.1 Il telescopio di Galileo                                                                                     | 2  |
| 2.2 Il telescopio di Keplero                                                                                     | 3  |
| 3. Il telescopio a riflessione                                                                                   | 4  |
| 3.1 Il telescopio newtoniano                                                                                     | 4  |
| 3.2 Il telescopio gregoriano                                                                                     | 5  |
| 3.3 Il telescopio Cassegrain                                                                                     | 6  |
| 3.4 Il telescopio herscheliano                                                                                   | 7  |
| 4. I grandi telescopi                                                                                            | 7  |
| 4.1 Il “perché” dei grandi telescopi                                                                             | 7  |
| (Sensibilità e tempo d'integrazione; Potere di risoluzione e “funzione di Airy”; Ingrandimento o magnificazione) |    |
| 5. Aumentare le dimensioni del primario                                                                          | 9  |
| 5.1 Grandi specchi ed ottica attiva                                                                              | 9  |
| (Flat-back; Meniscus; Spun-cast; Light-weight; Ottica attiva)                                                    |    |
| 5.2 Piccoli specchi “segmented” ed ottica adattiva                                                               | 11 |
| (Segmented; Ottica adattiva)                                                                                     |    |
| 6. Telescopi spaziali                                                                                            | 12 |
| (Hubble Space Telescope; James Webb Space Telescope)                                                             |    |
| 7. Materiali di costruzione degli specchi                                                                        | 15 |
| (Zerodur®/ULE®; Berillio; Carburo di Silicio)                                                                    |    |
| 8. Conclusioni                                                                                                   | 16 |
| 9. Bibliografia                                                                                                  | 16 |
| 10. Sitografia                                                                                                   | 17 |

\*I numeri in apice rimandano al corrispondente elemento in bibliografia o sitografia.



## 1. Introduzione

Mai avrei potuto pensare di poter sedere in un'aula universitaria per prender parte ad alcune lezioni prima di aver conseguito la maturità scientifica. I fatti, al termine dello scorso anno scolastico, mi hanno smentito in modo inatteso. Ho avuto la possibilità di partecipare a due stage (uno in estate, l'altro in inverno) nella facoltà di Fisica dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", tenuti dai ricercatori nel ramo della Fisica Solare, in ordine alfabetico: Dott. Fabio Giannattasio, Dott. Luca Giovannelli, Dott. Roberto Piazzesi con la coordinazione del Prof. Francesco Berilli. Gli argomenti che abbiamo trattato hanno riguardato i materiali per la realizzazione dei telescopi nel campo dell'astrofisica sperimentale. Le conoscenze acquisite nel mio percorso scolastico mi avevano avvicinato allo studio di lenti, trigonometria, ottica geometrica e materiali nel loro sviluppo storico ma applicare tutto ciò ad uno strumento eccezionale, quale il telescopio, che ha permesso all'uomo di avvicinarsi idealmente al cielo per studiarlo da vicino, ha sollecitato in me un grande interesse tanto da voler approfondire ulteriormente. Di fronte alla meravigliosa complessità dei telescopi moderni è inevitabile restare stupefatti considerando l'evoluzione avvenuta dai tempi di Galileo, il primo ad usare scientificamente un cannocchiale, rendendolo telescopio. Proprio per questo ho deciso di concentrare lo studio su problemi e soluzioni che hanno accompagnato questo percorso.

## 2. I primi telescopi a rifrazione

### 2.1 Il telescopio di Galileo

Il termine *telescopium* (dal gr. τηλεσκόπος «che vede lontano») fu coniato da Giovanni Demisiani di Cefalaonia nel 1611 in occasione dell'invito di Federico Cesi (1585-1630) a Galilei di entrare a far parte dell'Accademia dei Lincei, di cui era il fondatore.<sup>10</sup> Lo scienziato pisano, basandosi sugli studi di un occhialaio olandese (Hans Lippershey) al quale è attribuita la costruzione di uno dei primi cannocchiali funzionanti (1607), realizzò a sua volta uno strumento

simile. Il progetto era estremamente semplice. Un tubo di legno<sup>62</sup> con due lenti alle estremità, una concava ed una convessa. Il grande merito sicuramente attribuibile a Galilei fu quello di utilizzare il cannocchiale come strumento scientifico, adatto a studiare i "perfetti" corpi celesti. Ben presto comprese la necessità impro-rogabile di migliorare la prima rudimentale versione del "cannocchiale astronomico" (che permetteva di ottenere fino a 3 ingrandimenti<sup>12</sup>), attraverso lo studio di nuove tec-

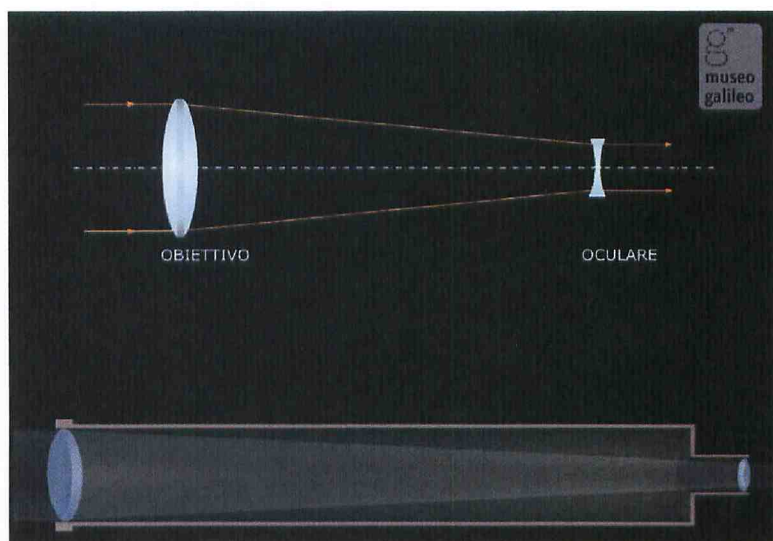


Figura 2.1 Il diagramma dei raggi di un telescopio galileiano (museogalileo.it)

nologie da abbinare a materiali più adatti. Tra l'estate del 1609 e il gennaio dell'anno successivo lo scienziato incrementò l'ingrandimento del proprio strumento fino ad un fattore pari a 21, aggiungendo anche una serie di accorgimenti, tra cui un controllo delle aperture, che gli permisero di ridurre le aberrazioni ottiche<sup>11</sup>. Nel "Siderus Nuncius"<sup>3</sup> (1610) Galilei descrive le caratteristiche di un buon telescopio astronomico, annunciando con orgoglio di esser riuscito a far sì che "le cose appariscano più di trenta volte più vicine che si guardino con la sola facoltà naturale". Nel seguito dell'opera è descritto il suo telescopio. Esso era semplicemente



realizzato utilizzando un tubo di piombo con due lenti alle estremità, una piano-convessa e l'altra piano-concava. Le due lenti erano poste ad una distanza pari alla differenza, in valore assoluto delle due focali. Nonostante gli straordinari risultati raggiunti dall'astronomo pisano il suo telescopio presentava il problema di offrire all'osservatore un campo di vista decisamente poco ampio e illuminato il modo difforme (il livello di luce diminuisce dal centro verso i bordi). Inoltre non risultava possibile applicare sul piano focale dello strumento un micrometro<sup>13</sup>, con cui misurare la distanza angolare degli oggetti (necessità che si fece imprescindibile nel giro di pochi anni). A causa di questi gravi limiti la configurazione ottica elaborata da Galilei fu abbandonata, nell'uso astronomico, già a partire dalla metà del XVII secolo, periodo in cui erano stati creati modelli ben più sofisticati che si servivano di un tripletto ottico per l'obiettivo ed uno per l'oculare.<sup>13</sup>

## 2.2 Il telescopio di Keplero

Sicuramente influenzato dai successi di Galilei, Keplero iniziò ben presto a lavorare al proprio telescopio descrivendone la struttura nell'opera "Dioptrice" edita a Praga nel 1611<sup>1</sup>. Anche lo studioso tedesco si servì di due sole lenti, entrambe piano-convesse o biconvesse, posizionate in modo tale che la distanza tra le due fosse pari alla somma delle distanze focali (in altri termini i fuochi dovevano coincidere in un punto interno al sistema delle due lenti). Lo strumento così ottenuto risolveva molti dei problemi che affliggevano la versione galileiana.

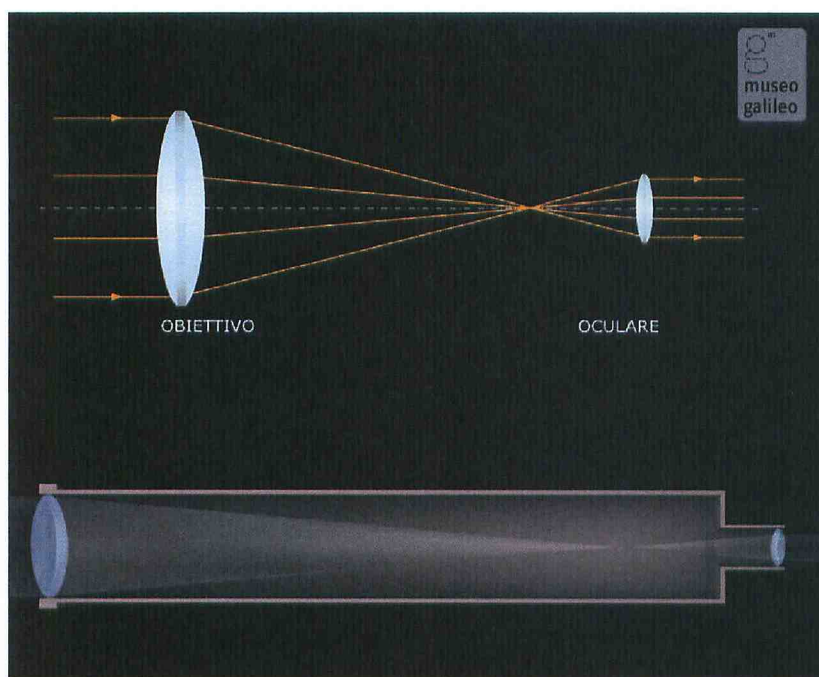


Figura 2.2 Il diagramma dei raggi di un telescopio kepleriano (museogalileo.it)

Il campo visivo era maggiore ed illuminato in modo quasi uniforme ed era possibile applicare sul piano focale il micrometro. L'unico inconveniente del telescopio kepleriano era il campo di vista invertito sia nel senso alto-basso che nel senso destra-sinistra, mentre lo stesso era diritto in quello di Galileo. Il problema era poco significativo in astronomia dove la rotazione del campo di vista ha poca importanza. Per l'utilizzo terrestre dello strumento, tuttavia, fu introdotto un "erettore"<sup>13</sup>, un dispositivo ottico costituito da due lenti di uguale focale, poste tra obiettivo ed

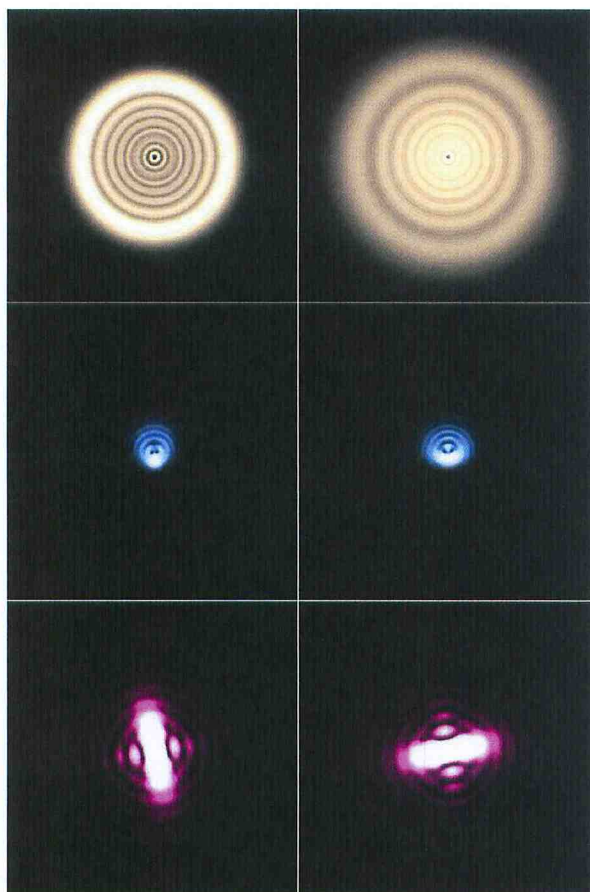
oculare a distanza opportuna, che raddrizzava l'immagine capovolta. Il limite più consistente che incontrò il telescopio kepleriano fu quello delle aberrazioni causate sia dai difetti di lavorazione delle lenti, sia dagli inevitabili fenomeni di rifrazione luminosa, base della cosiddetta "aberrazione cromatica" (il problema può oggi essere facilmente risolto con l'utilizzo di un "doppietto acromatico", un sistema costituito da due lenti specifiche con diversi indici di rifrazione, una scoperta all'epoca ancora non nota<sup>1</sup>). Varie furono le soluzioni teoriche (si veda ad esempio Marin Mersenne<sup>13</sup> con il testo "Harmonie Universelle" del 1637) fin quando, nella seconda metà del Seicento alcuni scienziati pensarono di ricorrere all'utilizzo di specchi.



### 3. Il telescopio a riflessione

*“...Questo mi spinse a prendere in esame le riflessioni, e [...] capii che col loro mezzo gli strumenti ottici potevano essere condotti a un qualsiasi grado di perfezione...”* -Isaac Newton, Optics, 1704<sup>18</sup>

L'utilizzo di specchi permette, innanzitutto, di eliminare i problemi di aberrazione cromatica,



**Figura 3.1** Gli effetti dell'aberrazione ottica, del coma e dell'astigmatismo (davidesigillo.eu)

infatti i raggi sono riflessi e non c'è passaggio da un mezzo ad un altro con conseguente variazione dell'inclinazione del raggio (legge di Snell). Inoltre lo specchio ha meno difficoltà di lavorazione, dovendo essere levigato e trattato solo su di una faccia. Tuttavia lo specchio presenta ancora tutta una serie di aberrazioni geometriche<sup>16</sup>. La principale è l'aberrazione sferica (diminuita con l'uso di uno specchio parabolico). Significative anche il coma (risolvibile con l'utilizzo di uno specchio iperbolico), e l'astigmatismo (risolto attraverso lenti cilindriche, in modo non dissimile dagli occhiali da vista). Lo scopo dell'obiettivo di qualsiasi strumento ottico è quello di far convergere i raggi nel fuoco. I telescopi a riflessione (o più semplicemente riflettori) sostituiscono la lente convessa dell'obiettivo di un galileiano o di un kepleriano con uno specchio concavo, in modo tale formare nel fuoco un'immagine reale dell'oggetto osservato. Tale specchio viene generalmente detto “primario”. Oltre a questo sono necessari tutta una serie di altri specchi, con forme e dimensioni particolari a seconda del telescopio costruito, necessari a portare l'immagine formata sul fuoco nell'oculare, che è invece costituito da una lente. Il primo astronomo ad utilizzare uno

specchio per le proprie osservazioni fu con ogni probabilità l'italiano Niccolò Zucchi<sup>17</sup>, il quale non arrivò però mai a realizzare un vero telescopio per le proprie osservazioni. Il risultato dei suoi studi, riassunti nell'opera *Optica Philosophia* nel 1640, è comunque straordinario sia sul piano tecnico che su quello dei risultati conseguiti.

#### 3.1 Il telescopio newtoniano

Il primo telescopio a riflessione di cui si ha testimonianza è quello realizzato da Isaac Newton nel 1668<sup>18</sup>. Per giungere a tale risultato l'inglese dovette compiere molti esperimenti, i quali diedero un apporto significativo alle conoscenze dell'epoca sulla luce e sui fenomeni di rifrazione e riflessione, come testimonia lo scritto “Optics” dato alle stampe nel 1704. Il primo riflettore aveva un'apertura di soli 25 centimetri ed utilizzava un primario in bronzo bianco<sup>18</sup> che egli realizzò da sé, riuscendo ad ottenere circa 30 ingrandimenti. Le ridotte dimensioni dello strumento non resero necessario uno specchio perfettamente parabolico, anche se lo scienziato aveva compreso oramai la necessità, citando le sue stesse parole, “*di riuscire an-*



che a conseguire l'arte di conferire ad essa (la superficie riflettente, nda) una forma parabolica". In breve l'invenzione divenne nota e nell'autunno 1671, quando una seconda versione del telescopio era pronta, fu conosciuta dal segretario della Royal Society, Henry Oldenburg, che lo invitò a presentare lo strumento. L'11 gennaio 1672 Newton fu dichiarato  *fellow*  per acclamazione dopo aver accettato la richiesta di Oldenburg<sup>18</sup>. Nel marzo seguente, in una lettera, è descritta la struttura del riflettore. Lo specchio primario era stato ingrandito (32 cm) ed erano stati implementati nuovi materiali come l'argento drogato con l'arsenico, mentre il secondario era realizzato con uno specchio ellittico piano, inclinato di 45°, posto sull'asse ottico. La funzione del secondario, il quale essendo piano non modifica la lunghezza focale del primario, è quella di deviare lateralmente i raggi che formano l'immagine da studiare. In tal modo l'osservatore non deve porsi tra specchio parabolico ed oggetto, limitando il campo di vista più di quanto non faccia lo specchio piano. L'area di questo tuttavia, affinché la qualità dell'immagine non sia influenzata significativamente, non deve superare il valore 1/3 rispetto a quella del primario<sup>13</sup>. Nel telescopio newtoniano dunque l'oculare è situato nella parte superiore del tubo, in prossimità dell'estremità. L'invenzione di Newton aveva consentito di mettere in luce le maggiori potenzialità degli specchi rispetto alle lenti, ciò nonostante i successivi sforzi di miglioramento sembrarono vani. I problemi erano di ordine strettamente tecnico, nella lavorazione degli specchi. L'impiego del metallo, come suggerito da Newton, rendeva impossibile ottenere superfici con un livello di finitura adeguato ad uno strumento simile, a causa della scarsa durezza del materiale (nonostante i drogaggi proposti dallo scienziato). Inoltre gli agenti atmosferici e la polvere lo avrebbero facilmente opacizzato. L'utilizzo del vetro, in linea teorica preferito dallo stesso Newton, presentava difficoltà anche maggiori, era infatti quasi impossibile trovare campioni esenti da difetti quali striature, disomogeneità, bolle... Infine la lavorazione di specchi parabolici sempre più grandi presentava, inevitabilmente, difficoltà crescenti. Inoltre non mancarono i detrattori tra gli scienziati della Royal Society che lamentavano difficoltà di puntamento e scarsa maneggevolezza (utilizzando un più tradizionale rifrattore nulla sarebbe cambiato)<sup>18</sup>.

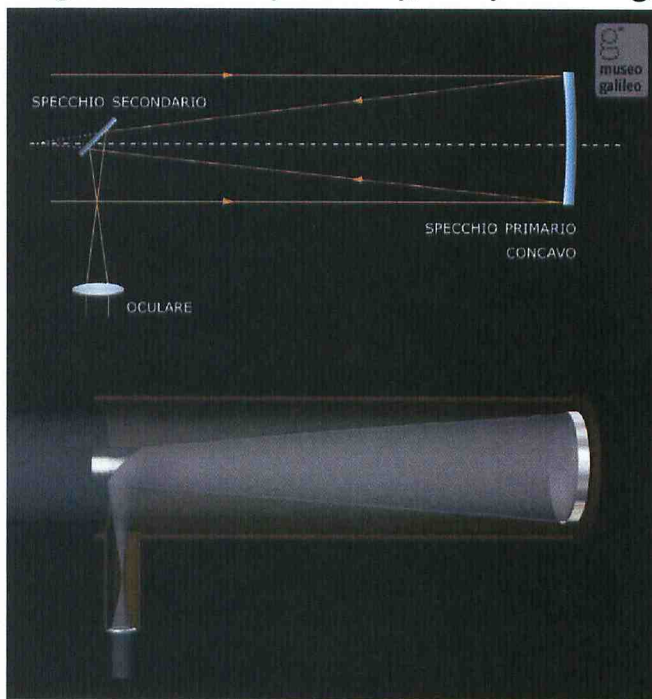
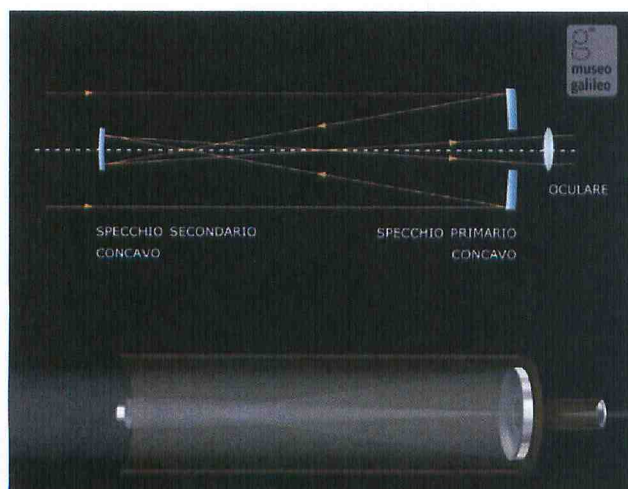


Figura 3.2 Il diagramma dei raggi di un telescopio newtoniano (museogalileo.it)



### 3.2 Il telescopio gregoriano

Contemporaneamente alle scoperte di Newton anche James Gregory stava approfondendo lo studio dei riflettori e nel 1663, nell'opera *Optica Promota* propone un possibile telescopio che ancora non viene realizzato. L'obiettivo del gregoriano, per i motivi già detti, è concavo parabolico,

Figura 3.3 Il diagramma dei raggi di un telescopio gregoriano (museogalileo.it)



mentre lo specchio secondario è anch'esso concavo a sezione ellittica. Il secondario è posto sull'asse ottico ad una distanza di poco superiore alla somma delle distanze focali dei due specchi<sup>13</sup>. Il primario presenta un foro circolare nel centro e l'immagine si forma dietro al primario. L'oculare doveva quindi essere posto dietro allo strumento, in un apposito alloggiamento. Il telescopio gregoriano aveva il significativo vantaggio di fornire immagini diritte, senza il bisogno dell'erettore, quindi esso troverà i più significativi sviluppi ed utilizzi non nel campo astronomico, ma nelle osservazioni terrestri. Questa configurazione ottica ebbe grande diffusione intorno alla metà del XVIII secolo, eguagliando quella dei cannocchiali acromatici. Tra i più grandi costruttori di gregoriani citiamo James Short (1710-1768) al quale sono attribuiti 1360 telescopi a riflessione<sup>18</sup>, commissionatigli dai più grandi osservatori astronomici (da Parigi a San Pietroburgo). Tra questi troviamo un esemplare straordinario con un'apertura di 18 pollici<sup>13</sup>, estremamente all'avanguardia per le tecnologie dell'epoca.

### 3.3 Il telescopio Cassegrain

La nascita del telescopio Cassegrain è in parte avvolta nell'oscurità. La figura del suo inventore è quasi leggendaria e di lui si sa pochissimo. Il suo telescopio fa la sua comparsa nel 1672, quando Henry De Bercè lo descrive prima all' *Accademie des Sciences* di Parigi, per poi inviare un reclamo formale alla Royal Society, sostenendo che l'invenzione di Cassegrain fosse antecedente di diverse settimane rispetto a quella di Newton<sup>18</sup>. Al reclamo era allegato anche lo schema. La struttura è molto simile a quella proposta alcuni anni prima da Gregory. Il primario è uno specchio parabolico con un foro nel centro. Il secondario è anch'esso uno specchio ma convesso a sezione iperbolica, posto sull'asse ottico, poco prima del fuoco del primario. Esattamente come nel gregoriano l'immagine si forma dietro all'obiettivo. Il secondario non essendo piatto modifica la divergenza dei raggi luminosi provenienti dal primario, allungando in tal modo la focale. È proprio questo il motivo per cui questa combinazione ottica ha ancora oggi straordinario successo. Con tubi relativamente corti e compatti è possibile ottenere focali equivalenti molto lunghe e quindi ingrandimenti significativi<sup>1</sup> (anche se il limite di diffrazione non può essere superato). Lo schema fu presentato a Newton il quale afferma *"uno strumento simile a quello del sig. Cassegrain, con un foro nel mezzo dell'obbiettivo di metallo, per trasmettere la luce verso un oculare posto dentro di esso; allora ebbi l'occasione di analizzare bene lo schema e vi trovai i seguenti difetti"*<sup>18</sup>. Newton criticava la perdita di luminosità che si sarebbe avuta nella riflessione sul secondario (maggiore rispetto ad uno specchio piano come nel suo telescopio), le difficoltà di lavorazione di uno specchio iperbolico oltre ad uno parabolico che, associate al lungo percorso fatto dai raggi, avrebbero portato ad immagini confuse a causa delle aberrazioni. Effettivamente, per le possibilità di lavorazione dell'epoca, le critiche ad un telescopio con due specchi curvi erano fondate.

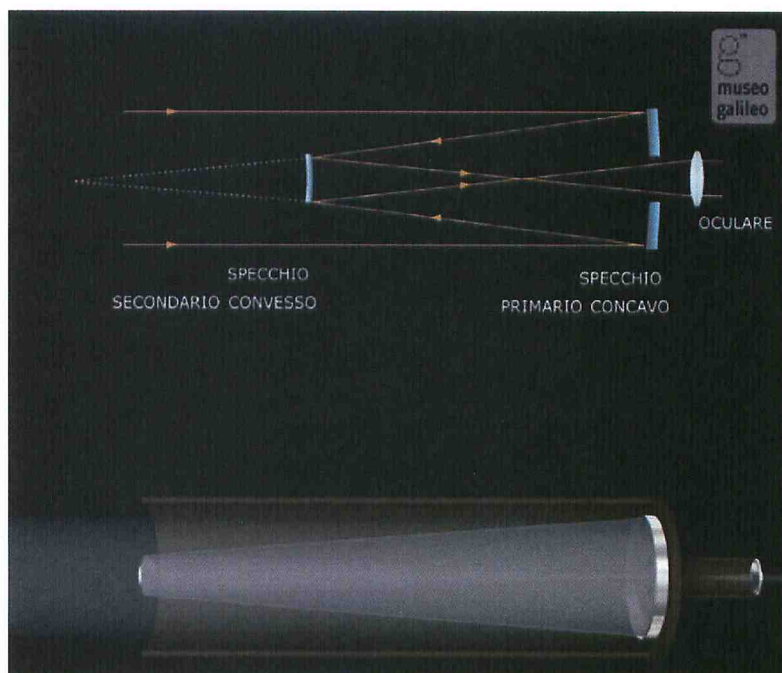


Figura 3.4 Il diagramma dei raggi di un telescopio Cassegrain (museogalileo.it)



### 3.4 Il telescopio Herscheliano

Tra le innovazioni tecniche introdotte da Newton, lo scienziato inglese cercò una lega metallica con cui realizzare gli specchi del suo riflettore che fornisse la migliore riflettanza possibile.

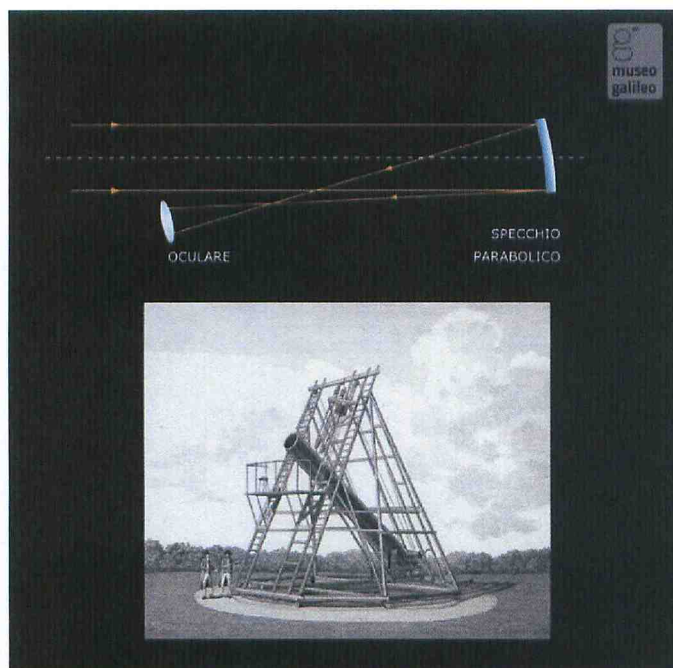


Figura 3.5 Il diagramma dei raggi di un telescopio Herscheliano (museogalileo.it)

Nonostante i vari tentativi non fu possibile ottenere i risultati sperati (il valore si attestava intorno al 60%<sup>13</sup>). Ciò indusse William Herschel (1738-1822) a tentare un diverso approccio al problema. Non riuscendo a migliorare la riflettanza degli specchi in fusione di metallo, egli pensò di aumentare la luminosità della configurazione newtoniana modificandola in modo da ridurre al minimo le superfici riflettenti utilizzate, con un procedimento descritto teoricamente nel 1795<sup>21</sup> nella rivista scientifica *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Quindi decise di eliminare del tutto lo specchio deviatore secondario a 45 gradi e di inclinare lo specchio parabolico rispetto all'asse ottico. In tal modo l'immagine si formava direttamente sull'oculare, posto lateralmente rispetto al tubo del telescopio, con un angolo opportuno.

Già nel 1789 Herschel aveva completato un telescopio con tale configurazione, di dimensioni enormi per l'epoca (12 metri di lunghezza, 1.47 metri di diametro, ottenendo 1200 ingrandimenti)<sup>18</sup>. Il grande merito di Herschel fu quello di riportare l'attenzione della comunità scientifica sui telescopi a riflessione, in una fase in cui lo sviluppo aveva privilegiato ancora una volta i rifrattori.

## 4. I grandi telescopi

Arrivati con l'evoluzione dei telescopi a questo punto lo sviluppo non era da cercare nelle "invenzioni" di nuove configurazioni ottiche per i telescopi, ma i problemi erano di ordine tecnico, legate principalmente alle difficoltà di lavorazione degli specchi e delle lenti. Gli studi e gli sviluppi in quest'ambito furono notevoli. Molte indicazioni le fornisce lo stesso Newton in *Optics* (1704). John Hadley realizza un newtoniano e descrive la sua lavorazione in un numero delle *Philosophical Transactions* del 1723. Nello stesso periodo anche altri studiosi si dedicarono alla realizzazione di telescopi riflettori tra cui James Bradley, Samuel Molineaux e Robert Smith. A questi si aggiungono i nomi di moltissimi ottici che si specializzarono in lenti e specchi per le osservazioni (Scarlett, Hearne, Huskebee...) che furono contattati dai vari inventori per realizzare telescopi sempre più grandi. La nuova sfida infatti non era più nel proporre nuove configurazioni ottiche ma nel perfezionare il più possibile quelle esistenti adattandole a dimensioni sempre maggiori. L'Ottocento è il secolo dei primi "grandi telescopi".

### 4.1 Il "perché" dei grandi telescopi

Con il passare dei decenni le osservazioni astronomiche si sono spinte sempre più lontano nel tentativo di osservare oggetti sempre più fiochi. Già Herschel si era reso conto che per



poter esplorare “la lunghezza, ampiezza, profondità e gli abissi” dello spazio, occorre maggiore “potere di penetrazione dello spazio”<sup>10</sup> che poteva essere ottenuto realizzando telescopi sempre più grandi. I motivi di tale necessità sono molteplici:

#### a) Sensibilità e tempo d'integrazione

Innanzitutto parliamo di “sensibilità” dello strumento, influenzata principalmente dal flusso di fotoni. Ogni oggetto che emette o riflette luce è caratterizzato da un flusso di fotoni, ovvero dal numero di fotoni che colpiscono una determinata superficie nell'unità di tempo. Per migliorare il valore del flusso ci sono due possibilità. Ovviamente è possibile aumentare l'area considerata. Quindi un grande primario permette di raccogliere una maggiore quantità di luce. Oppure si può agire sul “tempo d'integrazione”. Questa grandezza fisica misura il tempo in cui lo strumento raccoglie informazioni (maggiore è il tempo d'esposizione, maggiori saranno le informazioni raccolte). Essa è legata al diametro del telescopio dalla formula:

$$t = k \frac{1}{D^2}$$

Figura 4.1 Il legame tra area, distanza e flusso di fotoni

dove  $t$  è il tempo d'esposizione,  $D$  il diametro del telescopio e  $k$  un parametro variabile (condizioni atmosferiche...).

#### b) Potere di risoluzione e “funzione di Airy”

Il secondo motivo riguarda il “potere di risoluzione”. Oltre a permettere di raccogliere più luce infatti, il telescopio accresce la capacità di distinguere sorgenti di luce molto vicine. La luce di ogni sorgente puntiforme si distribuisce su un'area del piano focale (a causa della diffrazione della luce sui bordi d'ingresso del telescopio). Si parla di PSF (Point Spread Function). Tale area è quantificabile con un'equazione, detta “funzione di Airy”.



Figura 4.2 Disco di Airy rappresentante un punto | Due punti distinguibili | Due punti indistinguibili (fotografareindigitale.com)

Immaginando di avere due sorgenti puntiformi molto vicine, affinché risultino distinguibili, esse devono soddisfare il “criterio di Rayleigh”, altrimenti sono indistinguibili:

$$\alpha \geq \theta = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

dove  $\theta$  è il minimo angolo “risolvibile” tra oggetti vicini (il minimo angolo cui devono essere sottese due sorgenti puntiformi per poter risultare distinte), detto anche “potere di risoluzione” o “risoluzione angolare”<sup>64</sup>. Il tutto riguarda telescopi ideali, infatti le condizioni atmosferiche influenzano in realtà il potere risolutivo e la forma della PSF.

#### c) Ingrandimento o Magnificazione

Infine parliamo di magnificazione, ovvero dell'ingrandimento che un telescopio può fornire dell'oggetto osservato. Abbiamo detto dei buoni risultati conseguiti da Galileo e di quelli straordinari ottenuti da Herschel. Nel caso specifico dei telescopi il valore dell'ingrandimento



si calcola semplicemente come il rapporto tra la distanza focale dell'obiettivo (lente o specchio) e quella della lente dell'oculare<sup>1</sup>, ovvero:

$$M=I=\frac{f_{\text{obiettivo}}}{f_{\text{oculare}}}$$

per cui allungando la focale dell'obiettivo si ottiene un maggiore ingrandimento. Senza modificare le focali reali, gli stessi risultati si possono ottenere allungando la focale equivalente con specchi secondari (ciò ha determinato il successo del Cassegrain), in tal modo tuttavia si devono anche risolvere tutte le aberrazioni che l'utilizzo di altri specchi comporta. Ci si rese ben presto conto, però, che il solo ingrandimento risulta inutile senza una risoluzione adeguata.

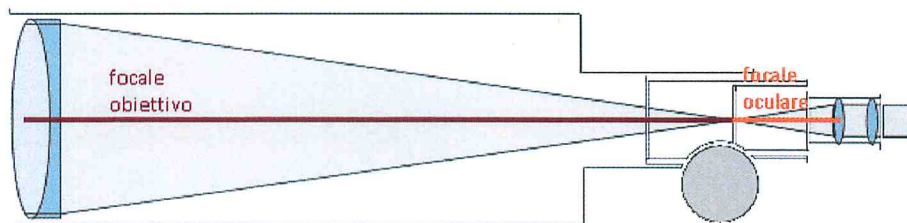


Figura 4.3 Lo schema di un telescopio con le rispettive focali

## 5. Aumentare la dimensione del primario

### 5.1 Grandi specchi ed ottica attiva

Dovrebbe risultare a questo punto evidente la necessità di utilizzare “grandi specchi”. Inizialmente, proseguendo il percorso tracciato da Newton, si pensò di realizzare specchi sempre più grandi mantenendo la configurazione “monolitica” (specchi in un unico pezzo). Il problema che si presentò quasi immediatamente è che ingrandendo gli specchi essi si facevano inevitabilmente più pesanti il che, oltre a determinare carichi statici da sostenere per la struttura, porta lo specchio a deformarsi sotto il suo stesso peso e quindi l'immagine a risultare affetta da aberrazioni. Per tutta la prima parte del '900 si continuò a credere che la giusta strada da seguire per i grandi specchi monolitici fosse proprio quella di cercare di ottenere una rigidità tale da ridurre al minimo le deformazioni, pertanto si utilizzavano ancora specchi Flat-Back:

#### a) Flat-back

Si parte da un campione di materiale dal quale si ricava una lastra che viene lavorata solo su



Figura 5.1 Una lente cilindrica flat-back (directindustry.it)

una faccia. Tale faccia sarà poi resa riflettente attraverso il processo di “coating” (in italiano “alluminatura”). In condizioni di vuoto si deposita per evaporazione un sottile strato di materiale riflettente sulla superficie lavorata. Il materiale scelto dipende dalla lunghezza d'onda che si vuole studiare, in quanto diversi elementi presentano diversa riflettanza in base alla parte di spettro elettromagnetico

presa in considerazione. I telescopi più antichi di cui si è parlato utilizzavano esclusivamente specchi flat-back per la relativa semplicità di lavorazione.

Procedendo nel percorso storico incontriamo così lo Yerkes Observatory di Chicago<sup>25</sup>, che nel 1897 realizza il telescopio a rifrazione con lente da 40 pollici (circa 1,0 metro), il più grande rifrattore mai costruito, gestito dall'università di Chicago e situato a Williams Bay, nel Wisconsin (USA). Parlando invece di specchi il limite per specchi monolitici con queste tecnologie di costruzione sembrò essere raggiunto nel 1948 all'osservatorio del monte Palomar, con il primo utilizzo del telescopio Hale, il quale era dotato di un primario da 5 metri<sup>55</sup> (la cui costruzione aveva richiesto ben 12 anni di lavoro) e successivamente nel 1976 con il telescopio del Monte Semirodniki nel Caucaso, con un primario da 6 metri il cui raffreddamento completo



dopo la fusione aveva richiesto ben 2 anni<sup>26</sup>. Specchi più grandi si deformavano sotto il loro stesso peso. Nuove tecniche di costruzione erano necessarie:

#### **b) Meniscus**

Per diminuire il peso di uno specchio Flat-back è possibile sagomare entrambi i lati ed alluminare solo quello che verrà utilizzato. In questo modo si ottiene uno specchio sottile con caratteristiche simili al Flat-back ma decisamente più leggero. Anche questa soluzione è stata adottata relativamente presto nella storia dell'astronomia. Il problema dello spessore ridotto era la minore capacità di resistere alle deformazioni statiche indotte dallo specchio stesso.



Figura 5.2 Una lente a "menisco" (rfroyce.com)

#### **c) Spun-Cast**

Per molti versi simile ad un meniscus è lo specchio spun-cast. Il punto di partenza per specchi di questo tipo è la realizzazione di tanti piccoli specchi esagonali. Essi vengono poi accostati in modo tale da ottenere la forma desiderata ed a questo punto lo specchio affronta un'ulteriore fusione che crea uno specchio unico

#### **d) Light-weight**

Nel tentativo di realizzare specchi che fossero spessi e rigidi mantenendosi leggeri, si pensò di partire da un flat-back o da un menisco spessi a sufficienza, modificandone la struttura interna. Una prima possibilità era quella di scavare delle cavità direttamente nella matrice solida del primario (metodo che trova parziali applicazioni ancora oggi), ma ben presto la tecnica si evolve e vengono creati i primi specchi "honeycomb" (a "nido d'ape"), in cui la matrice solida dello specchio è sostituita da una leggerissima struttura "ad alveare" realizzata da celle esagonali accostate. Già il primario dell'Hale sfruttava tale tecnologia.

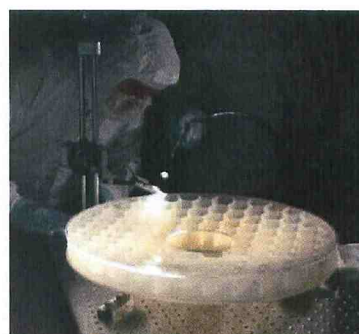


Figura 5.3 La matrice honeycomb di un lightweight (spie.org)

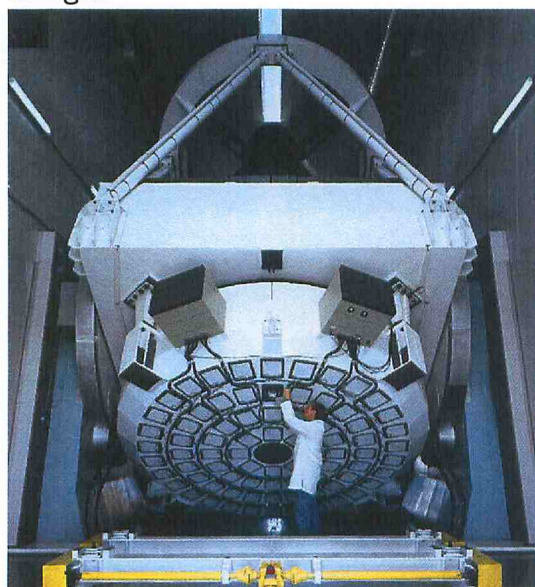


Figura 5.4 Lo specchio del NTT, sono visibili gli alloggiamenti per gli attuatori (astropa.unipa.it)

I successivi sviluppi sono stati permessi solo dalla straordinaria invenzione di Ray Wilson<sup>23</sup>, fisico specializzato in ottica, il quale, divenuto nel 1972 "Head of the Optics and Telescopes Group" dell'ESO (European Southern Observatory, la più importante Organizzazione Europea per la Ricerca Astronomica) sviluppò il concetto di ottica attiva (abbreviata AO).

#### **e) Ottica Attiva**

Il punto di partenza dell'idea Wilson è un menisco molto leggero e molto sottile, quindi facilmente deformabile e non in grado di mantenere la forma corretta. Sotto lo specchio, all'interno della struttura di supporto, andavano posti tutta una serie di attuatori piezoelettrici. Con computer e con complessi sistemi di ray tracing e sensori di curvatura si vanno a misurare tutte le deformazioni presenti



sul fronte d'onda. Agendo direttamente con gli attuatori sullo specchio (con una deformazione opposta a quella del fronte d'onda) è possibile compensare le deformazioni del primario ma non solo. Infatti tutte le aberrazioni che mutano lentamente nel tempo, ad esempio quelle causate da un disallineamento delle varie unità dovute a fenomeni termici o ad un non perfetto centramento del secondario, possono essere risolte da un sistema di ottica attiva<sup>31</sup>. In generale il sistema ideato da Wilson è valido per tutti i fenomeni a bassa frequenza (non superiore ad 1 Hz)<sup>29</sup>, in quanto specchi con queste caratteristiche non possono essere sottoposti a stress troppo elevati. Già nel 1988 il Nordic Optical Telescope (NOT) di La Palma, nelle isole Canarie, utilizzava degli attuatori sotto lo specchio primario da 2.56 metri, anche se non si può ancora propriamente parlare di ottica attiva. Il primo telescopio ad aver implementato un sistema completo di ottica attiva è il New Technology Telescope (NTT) dell'ESO<sup>37</sup>, situato presso l'osservatorio La Silla in Cile con uno specchio primario da 3.58 metri, entrato in funzione nel 1989.

## 5.2 Piccoli specchi segmented ed ottica adattiva

### a) Segmented

Emersi tutti i limiti degli specchi monolitici, contemporaneamente allo sviluppo di sistemi di ottica attiva, si iniziò a pensare alla possibilità di utilizzare primari compositi. Al posto di un unico specchio, infatti, è possibile utilizzare specchi più piccoli, affiancati, così da ottenere una grande superficie totale tale da eguagliare quella di un unico specchio di dimensioni mag-

giori. Computer garantiscono il perfetto allineamento di tutti gli specchi minori. Specchi più piccoli presentano notevoli vantaggi. La lavorazione ed il trasporto sono più semplici, le imprecisioni possono essere ridotte fino alle poche decine di nanometri. Inoltre i carichi statici legati allo specchio stesso sono minori. Il primo telescopio ad utilizzare questa nuova tecnologia è stato il Multiple Mirror Telescope (MMT)<sup>32</sup> del Monte Hopkins, Arizona (USA) il cui primario è costituito da 6 specchi con 1.8 metri di diametro, che lo rendono equivalente ad un

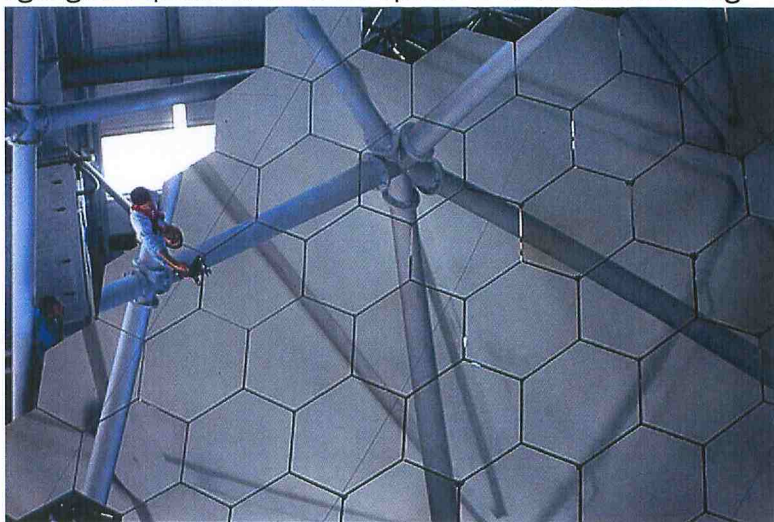


Figura 5.5 Uno specchio segmented per il Southern african large telescope (wikipedia.it)

primario monolitico da 4.5 metri. In realtà il sistema sviluppato per l'MMT presentava delle imperfezioni a causa delle quali nel 1999 il primario segmentato è stato sostituito da uno monolitico da 6 metri<sup>65</sup>. Ciò nonostante il sistema multi-mirror non fu abbandonato. Nel 1992 entra in funzione il primo telescopio del Keck Observatory<sup>61</sup> (Keck I, il Keck II vedrà la luce nel 1996) sulla sommità del vulcano Mauna Kea, nelle isole Hawaii. Il primario è un segmentato da 36 specchi, ciascuno di 1,8 metri.<sup>20</sup> Il sistema è equivalente ad un monolitico da 10 metri.

**b) Ottica adattiva** Si è detto di come l'ottica attiva riesca a risolvere tutti problemi dovuti a fenomeni che variano lentamente nel tempo. Uno dei grandi problemi dell'osservazione astronomica da terra è quello del *seeing astronomico naturale*, espressione intraducibile in italiano che racchiude tutte le "degradazioni dell'immagine" dovute a "variazioni termiche dell'aria attorno e sopra il telescopio"<sup>23</sup>, ossia alle deformazioni del fronte d'onda legate all'azione dell'atmosfera. Il problema di queste variazioni è la loro rapidità. Le correzioni



nell'ordine di 1 Hz offerte dall'ottica attiva non sono sufficienti. Nel 1953 l'astronomo americano

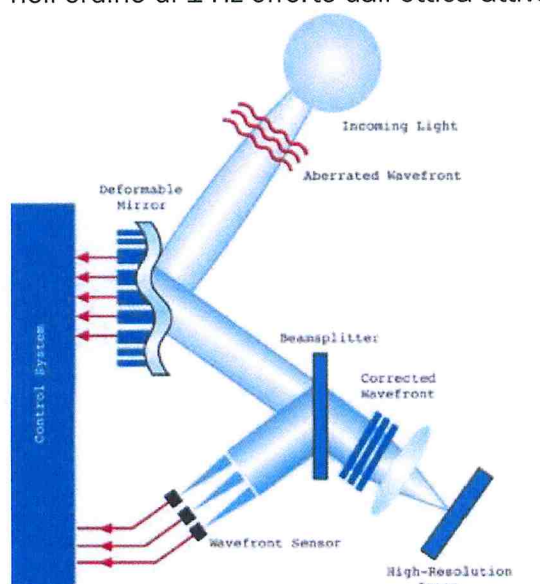


Figura 5.6 Il funzionamento dell'ottica adattiva (photo-nics.com)

tura honeycomb)<sup>32</sup>. Il funzionamento è il seguente: il fronte d'onda proveniente dall'oggetto incontra un piccolo specchio deformabile, successivamente un "Beam Splitter" (Divisore di fascio), separa il segnale che viaggerà parte verso l'oculare e parte verso il "Wavefront Sensor" (Sensore di fronte d'onda) che analizza il segnale e, tramite un computer, lo paragona alle informazioni relative ad una stella di riferimento, ricavando in tal modo le deformazioni occorse. Il segnale è così inviato al sistema di controllo con il ricostruttore che imposta lo specchio correttore, facendogli assumere una "forma" adatta. I sistemi più complessi possono lavorare a frequenze comprese tra 100 Hz e 1000 Hz<sup>29</sup>. Molti dei telescopi moderni utilizzano sistemi di ottica adattiva tra cui il già menzionato Keck o il Very Large Telescope (VLT) dell'Osservatorio del Paranal sul Cerro Paranal in Cile, un sistema di 4 telescopi con primario da 8.2 metri ciascuno e secondario da 1.12 metri. Il nuovo prototipo di ottica adattiva multi-coniugata del VLT (chiamato MAD)<sup>66</sup> è estremamente innovativo in quanto permette di gestire porzioni di cielo molto più ampie dei sistemi tradizionali.

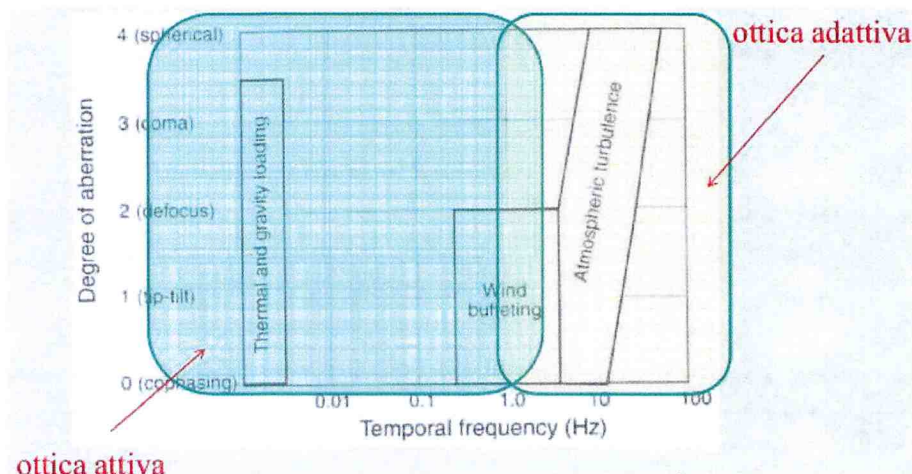


Figura 5.7 Ottica attiva ed adattiva a confronto con le lunghezze d'onda in cui operano (oacn.inaf.it)

## 6. Telescopi Spaziali

Per ovviare al problema del seeing astronomico naturale si potrebbe idealmente eliminare l'atmosfera, il che, in pratica, significa acquisire i dati con uno strumento posto al di sopra



dell'atmosfera. È l'inizio dell'era dei telescopi spaziali. Rispetto ai telescopi terrestri i vantaggi sono notevoli:

1. Riduzione del problema del seeing astronomico senza l'utilizzo di ADO.
2. Eliminazione dell'inquinamento luminoso prodotto dalle luci artificiali di paesi e città vicine
3. Possibilità di studiare lunghezze d'onda normalmente assorbite dall'atmosfera. Infatti da terra è possibile studiare solamente la parte dello spettro elettromagnetico relativa al visibile, alle onde radio e a parte dell'infrarosso; tutto il resto (raggi x, raggi ultravioletti, raggi gamma...) deve essere studiato dallo spazio.

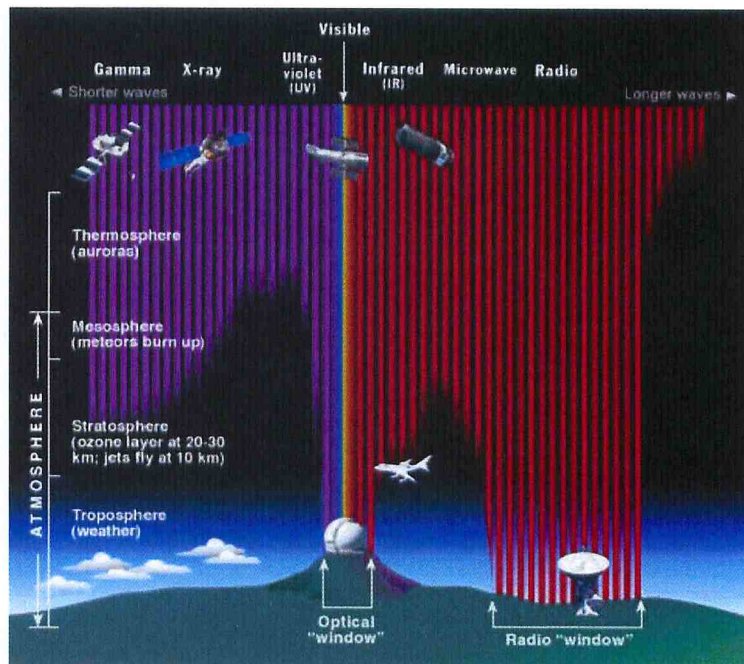


Figura 6.1 La schermatura offerta dall'atmosfera (amazing-space.stsci.edu)

Proprio quest'ultima motivazione è quella più importante, in quanto non può essere risolta in nessun altro modo da terra. Tuttavia occorre tener conto anche degli svantaggi, di certo non irrilevanti:

1. Costo elevatissimo. L'intero progetto che dovrebbe portare in orbita il James Webb Space Telescope entro il 2018 necessiterà di fondi stimati in 8.8 miliardi di dollari<sup>67</sup>, di cui oltre la metà sono già stati spesi.
2. Difficoltà di manutenzione. Con l'unica eccezione di Hubble, un guasto in un telescopio che orbita ad altezze così elevate non può essere risolto con una missione spaziale.
3. Vita operativa breve. Al di là dei possibili problemi tecnici le condizioni operative del telescopio (caldo e freddo intensissimi, radiazioni che rovinano l'elettronica...) e la necessità, per i telescopi che operano nell'infrarosso, di essere raffreddati costantemente (quando il liquido refrigerante termina il serbatoio non può essere riempito di nuovo) oltre al costo di mantenimento del personale e delle antenne, fanno sì che un telescopio spaziale resti mediamente in funzione per pochissimi anni, con alcune eccezioni come Hubble o Soho.

Comunque sia molti telescopi spaziali sono oggi in orbita, molti hanno già completato la loro missione e molti altri dovrebbero essere lanciati nei prossimi anni.

#### a) Hubble Space Telescope

L'era dei telescopi spaziali inizia negli anni 60' quando la NASA progetta il lancio di 4 satelliti artificiali per osservazioni nel campo dell'ultravioletto. Il progetto prese il nome di Orbiting Astronomical Observatory (OAO). Le prime due

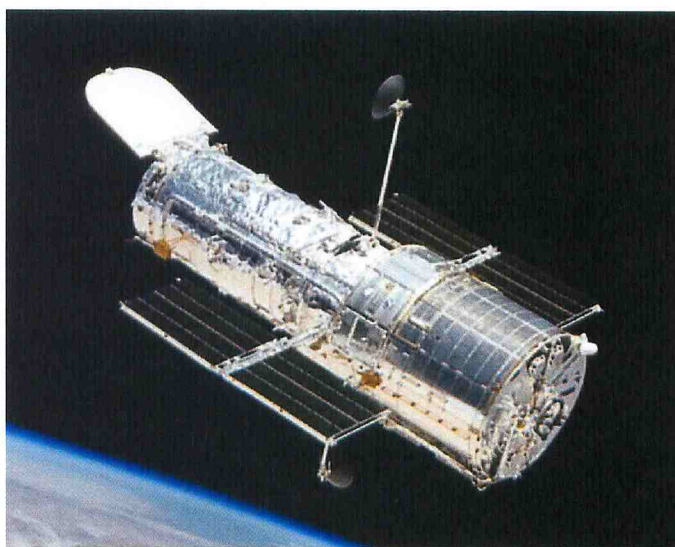


Figura 6.2 Il telescopio spaziale "Hubble" (NASA)



missioni fallirono (1966 e 1968), mentre le successive (1970 e 1972) furono un successo. Nel 1989 l'ESA mette in orbita Hipparcos, un satellite artificiale destinato allo studio della distanza e del moto delle stelle<sup>41</sup>. Il primo vero telescopio ottico in orbita intorno alla terra è



Figura 6.3 Prima e dopo la riparazione COSTAR (NASA)

però Hubble Space Telescope (HST)<sup>9</sup> in orbita dal 1990 con un progetto congiunto di NASA ed ESA del costo di 2 miliardi di dollari. Il riflettore ha una configurazione Ritchey-Chrétien (un'evoluzione del fuoco Cassegrain) con un primario monolitico iperbolico da 2,4 metri. Il telescopio è alimentato da due pannelli solari per il funzionamento della strumentazione elettronica ed è tutt'ora in funzione, il ritorno sulla Terra è previsto entro il 2021<sup>68</sup>. L'Hubble permette di avere un'idea del grado di precisione a cui si è giunti ormai nella lavorazione delle superfici riflettenti. Le prime immagini inviate dal telescopio infatti risultavano affette da una grave aberrazione sferica ed erano fuori fuoco. Gli studi successivi al sostanziale fallimento permisero di capire che il problema era dovuto ad un errore nella lavorazione del primario. La curva modello si rivelerà sbagliata di 2200 nm<sup>69</sup>, mentre l'errore tollerato non doveva superare i 10 nm. Tale imprecisione, legata ad errori di montaggio della strumentazione che doveva realizzare lo specchio più preciso al mondo, venne risolta con un set di ottiche correttive nel 1993 con la missione COSTAR.

### b) James Webb Space Telescope

Per il futuro l'obiettivo è estremamente ambizioso. Il JWST dovrebbe entrare in orbita nel 2018 con un primario segmentato da circa 6,5 metri (18 unità esagonali x 1,3 m)<sup>59</sup>. La più grande sfida tecnologica è proprio nello specchio che sarà racchiuso nella camera di lancio in due ali che dovranno aprirsi una volta raggiunto il punto lagrangiano L2 (un punto geostazionario che permette al telescopio di essere in equi-

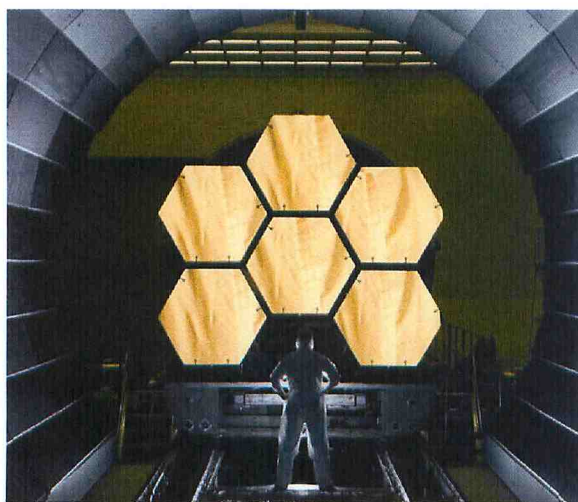


Figura 6.5 Lo specchio "segmented" del JWST in lavorazione (feelguide.com)

brio instabile tra gravità terrestre e gravità solare). Tale punto presenta notevoli

vantaggi come il fatto di rivolgersi al sole sempre la stessa faccia, facilitando così la schermatura dei raggi solari e di non essere ostruito dal nostro pianeta nelle osservazioni. L'altezza dell'orbita<sup>8</sup> sarà di circa  $1,5 \times 10^6$  km, per questo motivo qualsiasi problema nell'apertura degli specchi o di altro tipo sarebbe disastroso, il telescopio non potrebbe essere raggiunto e riparato. La particolare struttura tubolare permette al JWST di avere una massa com-



Figura 6.4 Il JWST in un rendering 3D (NASA)



piessiva di circa 6.500 kg<sup>8</sup>, circa la metà rispetto ad Hubble, un indubbio vantaggio in fase di lancio. Lo scopo principale del JWST è di ottenere informazioni da onde emesse centinaia di milioni di anni fa.

## 7. Materiali di costruzione degli specchi

Con l'avanzamento delle scoperte nell'ambito dello studio dei materiali è stato possibile costruire specchi sempre migliori. Già nel passato era noto che i metalli e le leghe metalliche erano dotate di buona riflettanza e per questo erano utilizzati per aumentare le proprietà ottiche di una superficie. In questo senso si è visto come le conoscenze di Newton fossero già avanzate, con l'utilizzo dell'alluminio drogato, mentre Herschel utilizzava ancora ottone lucidato. I cosiddetti "speculum" metallici (con varie leghe) saranno utilizzati fino alla metà dell'Ottocento ed oltre<sup>10</sup>. Lo svantaggio dei metalli è legato all'alta densità (che porta quindi a specchi pesanti e difficili da gestire) e alle deformazioni termiche (con tutte le conseguenze legate a disallineamenti ed altro). Per questo si è passati a materiali che avessero una bassa densità ed un'elevata durezza oltre a particolare tolleranza a stress termici. Per la riflettanza l'utilizzo del coating ha permesso di ottenere i risultati migliori. I primi a sviluppare una tecnica di argentatura su vetri ottici lavorati furono Steinheil e Foucault nel 1856<sup>22</sup>. Al giorno d'oggi, per la realizzazione degli specchi, occorre dunque distinguere tra superficie riflettente (ancora in materiali metallici prevalentemente alluminio o, come nel caso del JWST, oro) e matrice di supporto. In questo campo le ultime frontiere sono rappresentate da:

### a) Zerodur®/ULE®

Sono due esempi di vetri ceramici (vetri artificiali costituiti da due fasi, l'una amorfa e l'altra cristallina) con caratteristiche particolarmente adatte alle necessità di costruzione dei telescopi. Dal punto di vista termico presentano un coefficiente di espansione prossimo a zero (nell'ordine di  $10^{-7}$ ), riducendo così notevolmente le deformazioni termiche (la sigla ULE® significa proprio "Ultra low expansion"), fisicamente presentano una bassa densità, ed inoltre si prestano molto bene alle lavorazioni tipo coating e polishing.

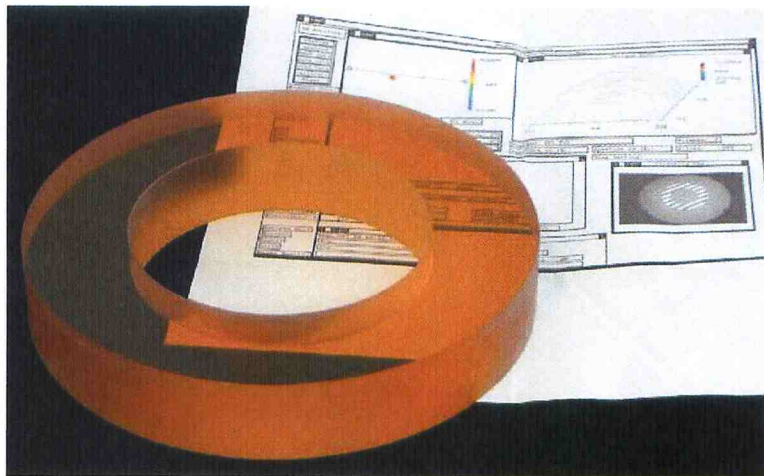


Figura 7.1 Un campione di vetro ceramico Zerodur® (customscientific.com)

L'utilizzo di questo tipo di vetri è generalmente abbinato a specchi light-weight con struttura honeycomb, anche se gli stessi vantaggi si avrebbero con specchi meniscus e flat-back. I telescopi Keck<sup>61</sup> utilizzano il vetro Zerodur®, mentre gli specchi dell'osservatorio Gemini<sup>49</sup> e quelli dell'HST sfruttano le proprietà dell'ULE®.

### b) Berillio

Tra i metalli il berillio presenta caratteristiche peculiari che hanno portato la NASA a sceglierlo per gli specchi del JWST. Rispetto ai vetri ceramici di cui sopra ha un coefficiente di espansività termica ancora più basso

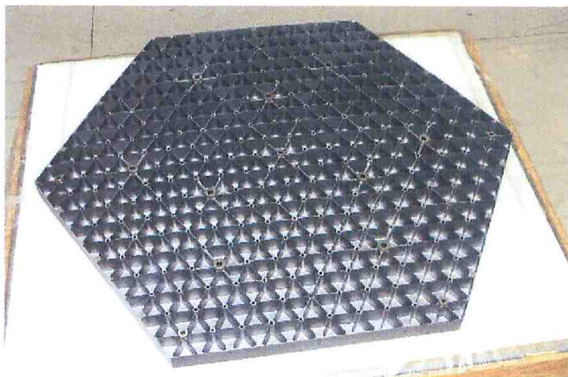


Figura 7.2 La cella del berillio di uno degli specchi del JWST (redorbit.com)



(sempre nell'ordine di  $10^{-7}$ ), ed una densità notevolmente minore (circa  $1,848 \text{ g/cm}^3$ , a fronte di un valore oltre i 2,5 per i vetri ceramici)<sup>70</sup>. Il modulo di Young (che misura la rigidità) è molto elevato, intorno ai  $380 \text{ GPa}$ <sup>71</sup>. Inoltre è il metallo con il punto di fusione più elevato ( $1278^\circ\text{C}$ ). Notevoli sono però le difficoltà di lavorazione, poiché il berillio è notoriamente tossico e cancerogeno, quindi sono necessarie precauzioni particolari.

### c) Carburo di Silicio

Il carburo di silicio è un materiale sintetico (composto da carbonio e silicio;  $\text{SiC}$ ) che rappresenta l'ultima frontiera della ricerca in questo campo. Se confrontato col Berillio notiamo subito la maggiore densità (circa  $3,22 \text{ g/cm}^3$ )<sup>72</sup>, mentre le proprietà termiche risultano paragonabili. La straordinarietà di questo composto è data dalla rigidità. Il modulo di Young assume infatti l'elevatissimo valore di  $450 \text{ GPa}$ <sup>71</sup>. In questo caso il grande problema è legato ai costi di produzione, al giorno d'oggi altissimi. Tuttavia esso è già stato impiegato per la struttura di supporto della strumentazione del satellite Gaia, in orbita dal dicembre 2013, ed è previsto il suo utilizzo per lo specchio primario del telescopio spaziale EChO, che l'ESA vorrebbe mettere in orbita nel 2024<sup>73</sup>.



Figura 7.3 La lavorazione di un supporto in Carburo di Silicio (mpa.fr)

## 8. Conclusioni

Certamente il futuro immediato ci porterà nuove sfide, nuove scoperte, nuove domande e nuove risposte perché il cosmo da sempre è stato per l'uomo oggetto di grande interesse. Di fronte alle possibili innovazioni, esplorazioni, invenzioni ci scopriamo simili ai primi uomini, affascinati dall'universo, attratti dalla natura e dai suoi fenomeni incomprensibili senza gli giusti strumenti. Oggi come allora siamo ancora sottomessi alle ferree leggi del mondo fisico, impotenti di fronte a loro. Conosciamo le cause di terremoti, uragani, maree... ma non possiamo controllarli. Di fronte a questi scopriamo tutti i nostri limiti e con essi il bisogno conaturato all'uomo di progredire, trovare delle risposte per porsi nuove domande. L'astrofisica Margherita Hack, in un'intervista rilasciata alla giornalista Monica Mosca, afferma: "Lei lo sa come si dice stelle in latino? [...] Si dice "sidera". La stessa etimologia di desiderio: le stelle come desiderio di conoscenza non solo dell'universo e dei misteri delle costellazioni, ma come metafora e luci delle nostre piccole vite, come desiderio di verità, di scoperta, di bellezza."

## 9. Bibliografia

- 1 -Jurgen R. Meyer-Arendt, *Introduzione all'ottica classica e moderna*, Zanichelli, Bologna, 1976
- 2 -Conrad Bohm, *Dall'astrolabio al telescopio spaziale*, Editoriale Scienza, Trieste, 1996
- 3 -Galileo Galilei, *Sidereus Nuncius*, Marsilio Editori, Venezia, 1993
- 4 -Massimo Crippa, Marco Fiorani, *Geografia Generale*, Mondadori, Milano, 2011
- 5 -AA.VV., *Studenti-ricercatori per cinque giorni*, Springer, Milano, 2013
- 6 -AA.VV., *Oltre i materiali. La scienza tra le nostre dita*, Springer, Milano, 2013
- 7 -Geoff Andersen, *The Telescope: Its History, Technology, and Future*, Princeton University Press, Oxford, 2007 (versione e-book)
- 8 -AA.VV., *James Webb Space Telescope: Science Guide*, Space Telescope Science Institute, 2012 (versione e-book)
- 9 -AA.VV., *Hubble Space Telescope: Discoveries*, Space Telescope Science Institute, 2012 (versione e-book)



## 10. Sitografia

- 10 -ENCICLOPEDIA TRECCANI online, *Telescopio* (09.02.14), *Gregoriano* (09.02.14), *Federico Cesi*(09.02.14), *Riflettanza* (16.02.14), *Royal Society* (16.02.14), *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*(16.02.14), *I grandi telescopi dell'ottocento*(02.03.14), *Berillio* (08.03.14).
- 11 -*Svelata la tecnologia segreta del telescopio di Galileo*, dal sito [technologyreview.it](http://technologyreview.it) (09.02.14)
- 12 -*Il cannocchiale di Galileo; Il cannocchiale di Galileo - Il cannocchiale Kepleriano*, dal sito [brunelleschi.imss.fi.it](http://brunelleschi.imss.fi.it) (09.02.14)
- 13 -*Telescopio (cannocchiale)*, dal sito [museogalileo.it](http://museogalileo.it) (09.02.14)
- 14 -Paolo Botton, *Il telescopio*, dal sito [astronomia.comze.com](http://astronomia.comze.com) (09.02.14)
- 15 -Monica Mosca, *La ragazza delle stelle innamorata da ottant'anni*, da [gente.it](http://gente.it) (09.02.14)
- 16 -Gianluca Calvagno, *Le aberrazioni*, dal sito [webalice.it](http://webalice.it) (16.02.14)
- 17 -Richard S. Westfall, *Zucchi, Niccolò*, dal sito [galileo.rice.edu](http://galileo.rice.edu) (16.02.14)
- 18 -Fred De Maria, *L'evoluzione del telescopio a riflessione*, dal sito [orsapa.it](http://orsapa.it) (16.02.14)
- 19 -Pasquetto Davide, *Deep Impact*, dal sito [dei.unipd.it](http://dei.unipd.it) (16.02.14)
- 20 -Pasquale Caldara, *Grandi Telescopi Ottici*, dal sito [astropa.unipa.it](http://astropa.unipa.it) (21.02.14) dallo stesso sito *Cerro Paranal* (02.03.14), *Keck* (02.03.14), *Mount Hopkins* (02.03.14)
- 21 -Manlio Suvieri, *I grandi telescopi*, dal sito [astrofilimaffei.org](http://astrofilimaffei.org) (21.02.14)
- 22 -Antonio Missanelli, *Costruzione di uno specchio astronomico teoria e pratica*, dal sito [oacn.inaf.it](http://oacn.inaf.it) (21.02.14)
- 23 -Bruno Marano, *L'evoluzione dei grandi telescopi ottici*, dal sito [prometeo.sif.it](http://prometeo.sif.it) (02.03.14)
- 24 -*Era of Huge Reflectors*, dal sito [opposite.stsci.edu](http://opposite.stsci.edu) (02.02.14) dallo stesso sito *Era of Multi-mirror Telescopes* (07.02.14) e *Era of Space Telescopes* (08.02.14)
- 25 - *Yerkes Observatory*, dal sito [cr.nps.gov](http://cr.nps.gov) (02.03.14)
- 26 -Marco Moretti, *I Grandi Telescopi Astronomici*, dal sito [spaziovisione.xoom.it](http://spaziovisione.xoom.it) (02.03.14)
- 27 -*Telescopi e Strumentazioni*, dal sito [eso.org](http://eso.org) (02.03.14)
- 28 -*Ottica Attiva*, dal sito [astropa.unipa.it](http://astropa.unipa.it) (07.03.14)
- 29 -Massimo Brescia, *Ottica attiva ed adattiva*, dal sito [oacn.inaf.it](http://oacn.inaf.it) (07.03.14)
- 30 -Alessio Pisani, *Ottica adattiva. Cos'è e come funziona*, dal sito [alessiopisani.com](http://alessiopisani.com) (07.03.14)
- 31 -Claire Max, *Introduction to adaptive optics and its history*, dal sito [cfao.ucolick.org](http://cfao.ucolick.org) (07.03.14)
- 32 -Claire Max, *Adaptive Optics in the VLT and ELT era basics of AO*, dal sito [isdc.unige.ch](http://isdc.unige.ch) (07.03.14)
- 33 -Federica Savarino, *Correzione di immagini tramite ottica adattiva sensorless*, dal sito [tesi.cab.unipd.it](http://tesi.cab.unipd.it) (07.03.14)
- 34 -Daniela Cipolloni, *Il Kavli Prize al padre dei super telescopi*, dal sito [media.inaf.it](http://media.inaf.it) (07.03.14)
- 35 -AA.VV., *Active optics and control architecture for a Giant Segmented Mirror Telescope*, dal sito [noao.edu](http://noao.edu) (07.03.14)
- 36 -*Potere di risoluzione*, dal sito [studenti.unipa.it](http://studenti.unipa.it) (07.03.14)
- 37 -*New Technology Telescope (ESO)*, dal sito [stfc.ac.uk](http://stfc.ac.uk) (07.03.14)
- 38 -*Why a space telescope?*, dal sito [hubblesite.org](http://hubblesite.org) (08.03.14)
- 39 -Cristina Riso, *I telescopi spaziali*, dal sito [everyspacemagazine.com](http://everyspacemagazine.com) (08.03.14)
- 40 -Jeff Hecht, *Cost overruns put squeeze on Hubble's successor*, dal sito [newscientist.com](http://newscientist.com) (08.03.14)
- 41 -*Hipparcos*, dal sito [sci.esa.int](http://sci.esa.int) (08.03.14)
- 42 -*Hubble Essentials*, dal sito [hubblesite.org](http://hubblesite.org) (08.03.14)
- 43 -Giovanni Caprara, *Webb, il telescopio spaziale più potente*, dal sito [corriere.it](http://corriere.it) (08.03.14)



- 44 -*Technology at the extremes*, dal sito [webbtelescope.org](http://webbtelescope.org) (08.03.14)
- 45 -Giovanni Petrucci, *Il problema elastico*, dal sito [unipa.it](http://unipa.it) (08.03.14)
- 46 -ZERODUR® *Extremely Low Expansion Glass Ceramic*, dal sito [schott.com](http://schott.com) (08.03.14)
- 47 - ULE® *Ultra Low Expansion Glass*, dal sito [corning.com](http://corning.com) (08.03.14)
- 48 -Ken Hrdina, *PRODUCTION and PROPERTIES of ULE® GLASS*, dal sito [sematech.org](http://sematech.org) (08.03.14)
- 49 -*Corning Completes Gemini Large Telescope Mirror Blank*, dal sito [gemini.edu](http://gemini.edu) (08.03.14)
- 50 -Roberto Caccia, *Gaia, l'occhio spaziale da un miliardo di pixel*, dal sito [tomshw.it](http://tomshw.it) (08.03.14)
- 51 -*La diffrazione*, dal sito [fotografareindigitale.com](http://fotografareindigitale.com) (08.03.14)
- 52 -*Conical Cross-section Newtonian Parabolic Mirrors*, dal sito [rfroyce.com](http://rfroyce.com) (08.03.14)
- 53 -*Lenti cilindriche*, dal sito [directindustry.it](http://directindustry.it) (08.03.14)
- 54 -AA. VV., *Sounding-rocket telescope uses new technology ultra-lightweight mirrors*, dal sito [spie.org](http://spie.org) (08.03.14)
- 55 -*Mount Palomar Observatory, Mirror of the Hale telescope*, dal sito [anamorfose.be](http://anamorfose.be) (08.03.14)
- 56 -M, Feinberg, P. Bierden, *Adaptive Optics in Biological Imaging with Two-Photon Microscopy*, dal sito [photonics.com](http://photonics.com) (08.03.14)
- 57 -*Flats*, dal sito [customscientific.com](http://customscientific.com) (09.03.14)
- 58 -Brent Lambert, *Eight years in the making*, dal sito [feelguide.com](http://feelguide.com) (09.03.14)
- 59 -Rob Gutro, *James Webb Space Telescope's Beryllium Mirrors*, dal sito [redorbit.com](http://redorbit.com) (09.03.14)
- 60 -*Space*, dal sito [mpa.fr](http://mpa.fr) (09.03.14)
- 61 -*Keck Observatory Completes \$4 Million Adaptive Optics Fund*, dal sito [keckobservatory.org](http://keckobservatory.org) (10.03.14)
- 62 -*Cannocchiale*, dal sito [istitutocalvino.gov.it](http://istitutocalvino.gov.it) (10.03.14)
- 63 -Davide Sigillò, *Aberrazioni Ottiche e Star Test*, dal sito [davidesigillo.eu](http://davidesigillo.eu) (06.05.14)
- 64 -Ranieri Rolandi, *Risoluzione e diffrazione*, dal sito [fisica.unige.it](http://fisica.unige.it) (06.05.14)
- 65 -*History of the Telescope*, dal sito [mmt.org](http://mmt.org) (06.05.14)
- 66 -*MAD*, dal sito [eso.org](http://eso.org) (06.05.14)
- 67 -*How much does Webb cost? When will it launch?*, dal sito [jwst.nasa.gov](http://jwst.nasa.gov) (06.05.14)
- 68 -*Hubble Facts*, dal sito [asd.gsfc.nasa.gov](http://asd.gsfc.nasa.gov) (06.05.14)
- 69 -*Shuttle Mission: STS-61*, dal sito [hubble.nasa.gov](http://hubble.nasa.gov) (06.05.14)
- 70 -*Berillio*, dal sito [enciclopedia-1.com](http://enciclopedia-1.com) (06.05.14)
- 71 -*Panoramica materiali a confronto*, dal sito [ing.unitn.it](http://ing.unitn.it) (06.05.14)
- 72 -Marco Boniardi, *Materiali ceramici*, dal sito [istitutofermiverona.it](http://istitutofermiverona.it) (06.05.14)
- 73 - *echo*, dal sito [sci.esa.int](http://sci.esa.int) (06.05.14)