

TESINA PER L'ESAME DI STATO
A.S. 2012/2013

ASTROFISICA SPERIMENTALE

di *Marco Franceschini*

TECNOLOGIE PER L'ASTRONOMIA

Il presente contributo, elaborato dallo studente **Marco Franceschini** dei **Licei Sperimentali "Luigi Stefanini" di Mestre (VE)**, 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:

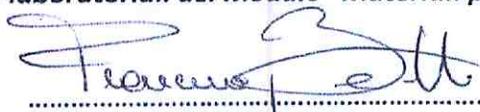
Stage Estivo dal 18 al 22 giugno 2012;

Stage Invernale dal 4 al 8 febbraio 2013.

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 "Materiali per l'Astrofisica Sperimentale"

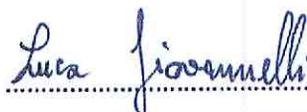
Prof. Francesco Berrilli



Dott. Dario Del Moro



Dott. Luca Giovannelli



Il Direttore degli "Stage a Tor Vergata"

Prof. Nicola Vittorio



-Tecnologie per l'Astronomia-

Motivazioni dell'approfondimento scelto.....	pg2
Cenni storici.....	pg2
Galileo, Keplero e Newton: i primi telescopi.....	pg2
I grandi telescopi: perché?.....	pg3
Grandi specchi: tecnologie, problemi e soluzioni.....	pg3
Sensori CCD e CMOS.....	pg4
Calibrazione immagini.....	pg5
Configurazioni ottiche.....	pg5
Montature.....	pg5
Montaggio Serrurier-Truss.....	pg6
Telescopi spaziali: presente e futuro.....	pg6
Telescopi a terra: presente e futuro.....	pg7
Radiotelescopi: presente e futuro.....	pg8
Telescopi solari presente e futuro.....	pg8
Solphylab.....	pg9
Referenze bibliografiche e sitografiche.....	pg10
Altre fonti.....	pg11
Referenze iconografiche.....	pg11

Motivazioni dell'approfondimento scelto: Questo particolare progetto nasce sulla base della volontà di unire, in un unico percorso, le esperienze dello stage all'Università di Roma Tor Vergata (Materiali per l'Astronomia – Prof. Francesco Berrilli, Facoltà di Fisica e Scienze dei Materiali), del viaggio di istruzione presso gli osservatori del Teide (Gregor e VTT) e della riprogettazione del sito web del Solphylab che ho curato insieme al prof. Antonio Grandieri.

Cenni Storici

Per migliaia di anni l'Uomo ha osservato il cielo cercando di comprendere e interpretare il moto del Sole, della Luna, delle stelle e dei pianeti. L'interesse verso il cielo da parte dei popoli antichi ha portato alla costruzione di alcune delle più grandiose strutture dell'antichità. Non si contano i siti megalitici, i templi costruiti negli ultimi 6000 anni allo scopo di "leggere" il cielo come Stonehenge, Newgrange, El



Castillo, Uxmal o Angkor Wat, la capitale dell'Impero Khmer. L'ingegnosità di questi sistemi, costituiti da strutture debitamente allineate con particolari punti della volta celeste, consentiva difficili calcoli come la durata dell'anno solare, la previsione dei transiti dei pianeti e delle eclissi. Tuttavia queste strutture, per quanto complesse, erano ancora legate alla limitata capacità visiva dell'occhio umano; sarà necessario aspettare il 1610 quando Galileo Galilei punterà per la prima volta il suo telescopio verso il cielo per avere una svolta in tal senso.^[1]

Galileo, Keplero e Newton: I primi telescopi

Il telescopio Galileiano segnò un punto di non ritorno per l'Astronomia. Questo strumento, per la prima volta, consentiva all'Uomo di poter studiare l'Universo al di là delle sue mere capacità fisiche.

Il telescopio di Galilei era costituito da un tubo all'interno del quale era posta una coppia di lenti allineate: una posta vicino al foro d'entrata di diametro maggiore e biconvessa, l'altra vicino al foro d'uscita di diametro minore e biconcava. Questo sistema tuttavia presentava diversi difetti dovuti sia alla tecnologia disponibile nel XVII secolo, sia alla progettazione stessa:

- *campo di vista estremamente ristretto*, a causa dell'utilizzo di lenti sia concave che convesse
- *problemi di aberrazione cromatica*, un effetto ottico che comporta la sfocatura dei bordi dell'oggetto osservato con la comparsa di aloni colorati, dovuto ai diversi punti di messa a fuoco delle diverse lunghezze d'onda della luce.^[2]

Questi problemi furono in parte risolti Johannes Keplero nel 1611. Il telescopio kepleriano differisce da quello galileiano per la forma delle lenti: sia la principale che la secondaria sono entrambe convesse. Questo implica che il telescopio fornisce un campo di vista maggiore ma anche il fatto che l'immagine appaia rovesciata. Il disegno originale, inoltre, prevedeva la possibilità di cambiare le lenti dell'oculare in modo tale da poter scegliere di volta in volta l'ingrandimento desiderato.

Un altro punto di svolta fu l'invenzione, circa cinquant'anni dopo Galilei (1664), del telescopio

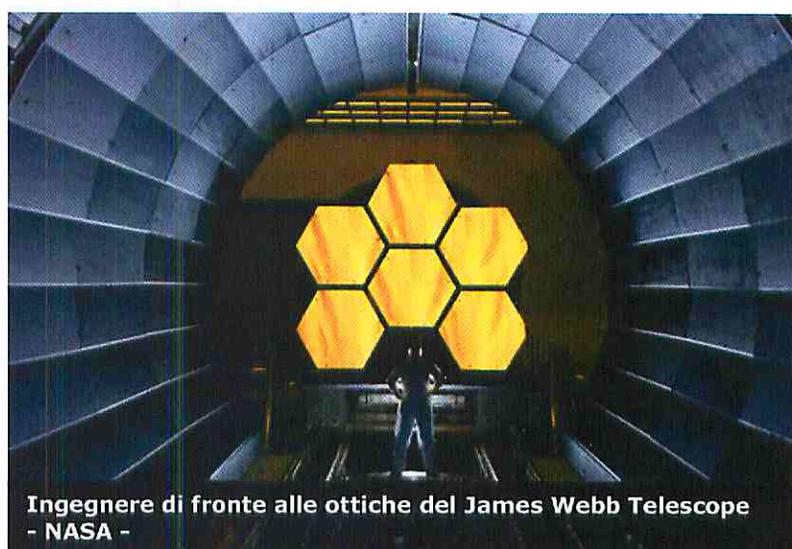
newtoniano. Il progetto di Newton, che è alla base di tutti gli osservatori moderni, segna il passaggio dal telescopio rifrattore (che utilizza lenti per catturare e concentrare la luce), a riflettore (che usa specchi). Il telescopio newtoniano oltre a risultare molto più potente, non era afflitto da aberrazione cromatica. Il progetto era costituito da un corto tubo all'interno del quale erano posti due specchi: il primo, molto grande e semisferico, catturava e concentrava la luce; il secondo, più piccolo e piano, era posto al centro, davanti al primo, ed inviava l'immagine riflessa dallo specchio primario verso l'occhio dell'osservatore. Sebbene il telescopio di Newton costituisse un immenso passo in avanti, anche quest'ultimo presentava un difetto: l'aberrazione sferica. Essa è dovuta al fatto che i raggi più vicini all'asse ottico e quelli più distanti non hanno una focale esattamente identica (infatti i raggi più lontani, detti *marginali*, debbono compiere un cammino leggermente più lungo), ed il risultato è che un fascio di raggi paralleli entranti nel telescopio non viene concentrato in un solo punto (come si vorrebbe) ma risulta distribuito su di una superficie detta *caustica*, disposta a cavallo dell'asse ottico.

Il problema è stato in seguito risolto totalmente con l'introduzione di specchi paraboloidi in grado di concentrare la luce in un unico punto focale.^{[3][4][5]}

3

I grandi telescopi: perché?

L'affermarsi del telescopio come strumento principe dell'Astronomia porta nel corso dei tre secoli successivi una quantità di scoperte senza precedenti nella storia dell'umanità. Ciò ha fatto nascere la necessità di studiare oggetti sempre più lontani e con risoluzione sempre maggiore. Lo studio di corpi celesti così fiochi ha comportato il problema di integrare un maggior numero di fotoni durante il tempo di campionamento comportando l'adozione specchi di dimensioni sempre più elevate.^[6]



Ingegnere di fronte alle ottiche del James Webb Telescope
- NASA -

Grandi specchi: tecnologie, problemi e soluzioni

La necessità di costruire telescopi di dimensioni sempre maggiori ha generato diversi problemi legati alla fabbricazione ed alla gestione degli specchi: vento, calore e lo stesso peso determinano alterazioni della forma paraboloidale e la conseguente distorsione dell'immagine. Per risolvere tutti questi problemi si è intervenuti sia a livello ingegneristico, sia a livello tecnologico.

Il punto di partenza di questa analisi parte dalla scelta del materiale che deve tenere conto anche del budget stanziato per il progetto: particolari vetri ceramici come il Pirex, l'ULE (Ultra Low Expansion) o lo Zerodur (contraddistinti da un basso grado di dilatazione termica) sebbene più pesanti e fragili, costituiscono una valida e più economica alternativa al Berillio o al Carburo di Silicio (SiC) se lo specchio non è di grandi dimensioni e/o non è destinato a missioni spaziali. Questi ultimi infatti, pur essendo molto più performanti a livello meccanico e termico, sono estremamente costosi.

Grazie ai miglioramenti nelle tecniche di lavorazione dei grandi specchi si è potuti passare da quello spesso a fondo piatto (*flat-back*), a quello più leggero e sottile a forma di lente (*meniscus*).

Ciò ha consentito di introdurre un'ulteriore innovazione tecnologica: *l'ottica attiva*. Questo sistema consente di correggere le deformazioni della superficie riflettente grazie ad una serie di attuatori automatizzati (idraulici o piezoelettrici) posti al di sotto di quest'ultima. Le deformazioni provocate



Installazione del sistema di ottica attiva del telescopio LBT
- NASA -

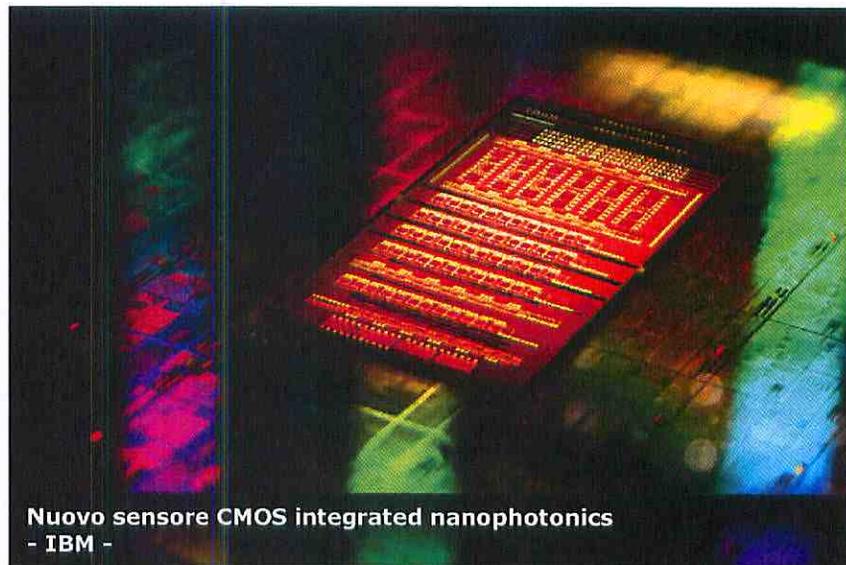
dalla pressione degli attuatori compensano quelle dovute al calore e al peso. Anche il vento e l'atmosfera possono deformare l'immagine: questo fenomeno prende il nome di *seeing dell'atmosfera*. La costruzione dei telescopi su vasti altipiani o su isole vulcaniche dove quest'ultima è sottile ed il vento laminare risolve solo in parte il problema; per questa ragione è stata introdotta *l'ottica adattiva*. Questo processo è molto simile all'ottica attiva ma sfrutta frequenze molto più elevate, cento Hz invece di cinque. Gli attua-

tori, guidati dai sensori di fronte d'onda, imprimono deformazioni con una precisione fino a un μm , compensando il seeing atmosferico.

Con la costruzione negli ultimi anni di telescopi da diametro di decine di metri è diventato sempre più complicato oltre che sempre più costoso produrre specchi monolitici. Si è passati così alla configurazione chiamata *multi-mirrors* cioè un'unica struttura costituita da unità più piccole.^{[7][8][9]}

Sensori CCD e CMOS

La nascita dei telescopi spaziali che richiedevano un sistema di trasmissione delle immagini informatizzato e la necessità di rendere più rapide e precise le osservazioni astronomiche portarono all'abbandono della fotografia su pellicola. Fu per questo che tra gli anni 70-80 furono introdotti i sensori CCD e CMOS. La creazione di questi dispositivi, risalente a fine anni 60, rappresenta uno dei primi esempi di nanotecnologia e valse ad alcuni dei loro inventori il Nobel nel



Nuovo sensore CMOS integrated nanophotonics
- IBM -

2009. La CCD (Charge Couple Device) è un sensore costituito da una griglia di elementi semiconduttori in grado di accumulare una carica elettrica (*charge*) proporzionale all'intensità della radiazione elettromagnetica che li colpisce. Questi elementi sono accoppiati (*coupled*) in modo che ognuno di essi, sollecitato da un impulso elettrico, possa trasferire la propria carica ad un altro elemento adiacente. Inviando al dispositivo (*device*) una sequenza temporizzata d'impulsi, si ottiene in uscita un segnale elettrico grazie al quale è possibile ricostruire la matrice dei pixel che compongono l'immagine proiettata sulla superficie del CCD stesso. Il CMOS (Complementary Metal-Oxid Sensor) presenta un funzionamento molto simile, con la sola differenza che l'informazione non viene letta per stringhe, come avviene nel CCD, ma pixel per pixel. Questa peculiarità conferiscono al CMOS un

minor consumo di energia, una maggiore rapidità di acquisizione ma anche una qualità delle immagini inferiore, dovuta alla maggiore presenza di rumore.

A partire dalla fine del XX secolo CMOS e CCD sono diventate le tecnologie alla base delle fotocamere digitali grazie alla produzione di massa che ne ha abbattuto i costi di produzione.

Di recente Fujifilm ha introdotto sensori CCD costituiti da fotodiodi principali e secondari, entrambi di forma ottagonale. Questo sistema, che prende il nome di SuperCCD (SCCD), è stato ideato per fornire prestazioni migliori sia in condizioni di illuminazione scarsa che eccessiva.^{[10][11]}

Calibrazione immagini

Anche attraverso l'utilizzo di strumenti di precisione spesso le immagini sono viziate da:

- difetti delle ottiche, dovuti a polvere graffi irregolarità ecc.
- difetti dei sensori come dead-pixel (pixel difettosi) o differenze di sensibilità dei fotodiodi.

Per ovviare a questo problema si interviene in un secondo momento elaborando l'immagine con software specifici. Il processo può essere formalizzato attraverso la relazione:

$$\text{Calibrated} = (\text{Raw} - \text{Dark}) / \text{Flat-field}$$

- *Calibrated*: immagine finale
- *Raw*: immagine iniziale
- *Dark*: media di più immagini ottenute con l'obiettivo chiuso ma con stesso tempo di esposizione
- *Flat-field*: media di più immagini ottenute puntando lo strumento verso una superficie illuminata in modo uniforme e normalizzata tra 0 e 1.

Il Dark e il Flat-field hanno lo scopo di evidenziare eventuali difetti nella strumentazione in modo da poterli rimuovere nell'immagine calibrata.

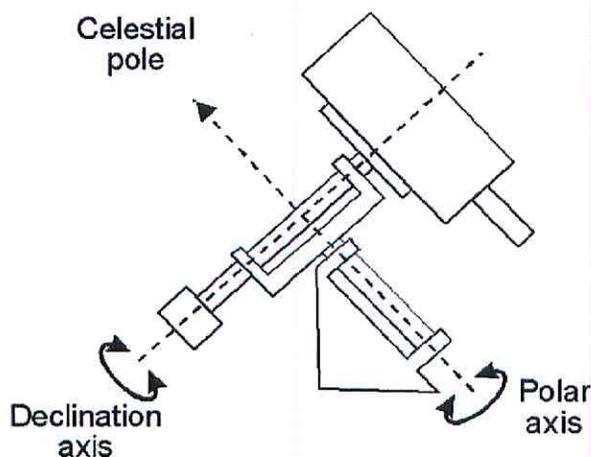
Configurazioni ottiche

Nel corso del tempo si è andata a creare la necessità di aggiungere sensori e strumentazione extra ai telescopi. Ciò ha portato all'invenzione di diverse configurazioni nella posizione e nel numero degli specchi. Le principali sono:

- *Cassegrain* dove lo specchio secondario manda l'immagine al di là dello specchio primario forato
- *Nasmith* dove oltre allo specchio secondario davanti a quest'ultimo è posto un terzo specchio piano che devia la luce lateralmente
- *Coude* simile al Nasmith con l'aggiunta di altri tre specchi piani che riportano l'immagine dietro allo specchio primario.

L'aggiunta di specchi potrebbe continuare virtualmente all'infinito, tuttavia c'è da considerare che le micro-irregolarità di quest'ultimi deteriorano l'immagine ad ogni passaggio ed ogni riflessione fa perdere una piccola parte della luce. Inoltre i costi di progettazione e realizzazione lievitano con l'aggiunta di ogni specchio.

Montature



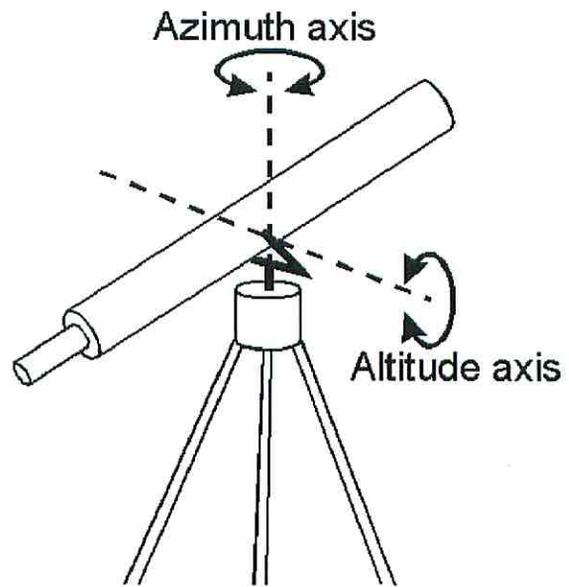
Con l'avvento del telescopio è nata la necessità di poter inseguire l'oggetto della propria ricerca sia nei cicli stagionali sia durante i suoi movimenti apparenti nella volta celeste ed ha generato due diversi tipi di supporto, di montature: l'equatoriale e l'altazimutale.

La montatura equatoriale consente di ovviare al movimento apparente degli astri ruotando in sincrono con la terra (un giro in ventiquattro ore). L'asse principale attorno a cui ruota la strumentazione presenta un'inclinazione variabile

che punta verso il polo Nord terrestre ed è dunque parallelo all'asse di rotazione del nostro pianeta. Questa montatura è particolarmente adatta all'astrofotografia perché l'oggetto non ruota nel campo di vista, tuttavia a causa del fuori centro delle masse questa montatura deve avere la massima robustezza per reggere il peso della strumentazione.

La montatura alt-azimutale è più economica da realizzare, motivo per cui è utilizzata da decenni nella realizzazione dei grandi telescopi. La montatura altazimutale fa ruotare il telescopio su tre assi:

- l'asse di azimut segue l'astro da Est ad Ovest
- l'asse di elevazione eleva il telescopio se l'oggetto osservato si trova ad Est del meridiano, lo abbassa se questo invece si trova ad Ovest
- la strumentazione posta al fuoco del telescopio (fotometro o spettrometro) ruota per annullare la rotazione di campo.^[12]



6

Montaggio Serrurier-Truss

Normalmente nei telescopi di piccoli e medie dimensioni il sistema di ottiche è custodito all'interno di un cilindro chiuso in materiale metallico che ha lo scopo di proteggerle e di mantenerle allineate. Tuttavia ciò si rivela inadatto per i telescopi di grandi dimensioni perché non sarebbe in grado di sostenere il peso di diverse tonnellate dello specchio primario. Per questa ragione è stata inventata la struttura di Serrurier-Truss un intreccio aperto di tubi metallici che, grazie alla sua geometria a triangoli isosceli, è in grado di subire forti sollecitazioni meccaniche senza deformarsi, mantenendo così allineati gli specchi.

Telescopi spaziali: presente e futuro

Nonostante le grandi sfide tecnologiche che comportano decine di telescopi spaziali sono stati lanciati a partire dagli anni 70 ed hanno contribuito a espandere enormemente la nostra conoscenza del cosmo. I motivi che hanno spinto i progettisti a spostare i telescopi nell'orbita terrestre sono molteplici:

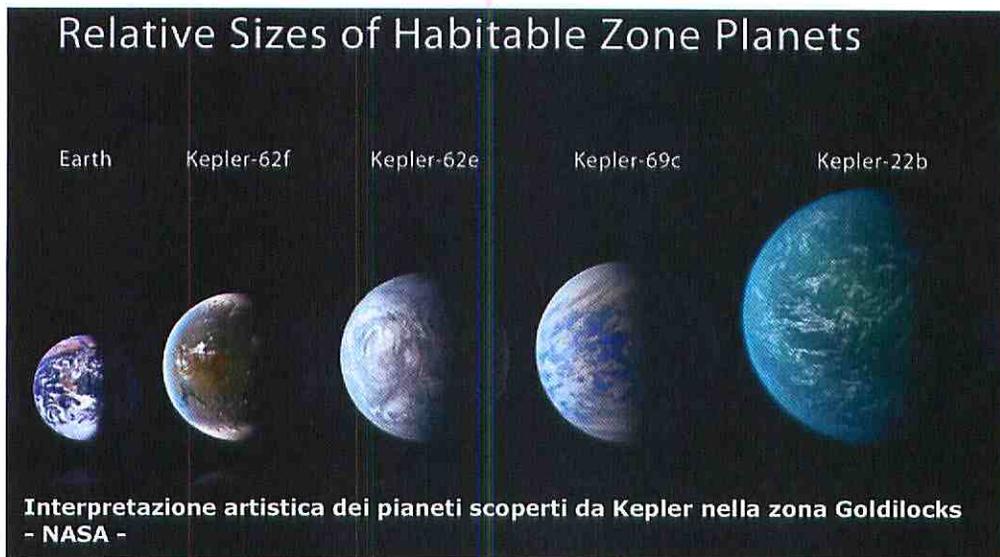
- i telescopi spaziali non soffrono di inquinamento luminoso
- i telescopi spaziali non soffrono del problema dello scattering dell'atmosfera che anche con l'utilizzo dell'ottica adattiva non si risolve completamente
- senza l'atmosfera che assorbe parte della radiazione, nello spazio si possono compiere osservazioni impossibili a terra.

Questi telescopi offrono però anche una serie di svantaggi:

- altissimo costo (da 200 a 400 milioni di euro solo per il lancio)
- impossibilità di manutenzione (ad eccezione dell'Hubble)
- breve vita operativa: i telescopi finiscono periodicamente il liquido necessario al raffreddamento oppure soccombono all'ostile ambiente spaziale. Spesso accade anche che finiscano i soldi destinati alla missione.

Attualmente due dei principali telescopi in orbita sono Kepler e Hubble. Kepler è uno dei telescopi spaziali più recenti (2009) ed ha unicamente il compito di trovare esopianeti di massa terrestre attraverso il sistema del transito (quando il pianeta passa davanti alla sua stella eclissandone parte della luce). Finora ha scoperto centinaia di pianeti ma solo un paio nella zona *Goldilocks* (la fascia in cui un

pianeta può ospitare acqua allo stato liquido e, probabilmente, anche la vita).
 Il suo software innovativo gli consente di misurare la luminosità di diverse stelle contemporaneamente.



Hubble, lanciato nel 1990, è un grande telescopio orbitante che ha portato contributi immensi all'astrofisica. È il telescopio spaziale più longevo, uno dei più costosi mai costruiti e l'unico che ha subito interventi di manutenzione.^[13]

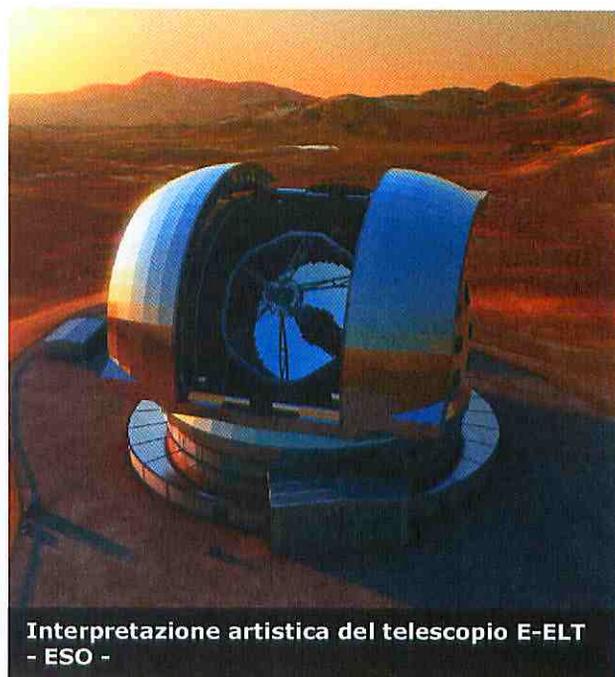
Il James Webb Space Telescope (JWST) è il telescopio che sostituirà Hubble nello studio dell'infrarosso. Il suo specchio primario non ha precedenti nei telescopi spaziali: sarà costituito da diciotto elementi in Berillio ricoperti d'oro (caratterizzato da un basso grado di permeabilità all'infrarosso), per un diametro totale di oltre sei metri. Il suo lancio è previsto nel 2018.^{[14][15]}

Telescopi a terra: presente e futuro

Attualmente i più grandi telescopi esistenti sono i VLT (Very Large Telescope) e il Keck. I VLT sono un complesso di quattro telescopi gemelli posti nel deserto di Atacama in Cile di proprietà dell'ESO. La loro particolarità è che possono lavorare sia singolarmente sia come un unico telescopio.^[16]

Il Keck è attualmente il più grande telescopio esistente grazie al suo diametro di 10 metri. Per minimizzare i problemi dovuti all'atmosfera è stato costruito sul vulcano hawaiano Mauna Kea.^[17]

Nei prossimi anni dovrebbe invece iniziare la realizzazione dei telescopi E-ELT (European-Extremely Large Telescope) e OWL (Over-Whelmingly Large telescope). Per il primo si è già stimato, con il suo specchio da quaranta metri, un costo di 1.5 miliardi di euro e sarà realizzato anch'esso per l'ESO (European Organi-



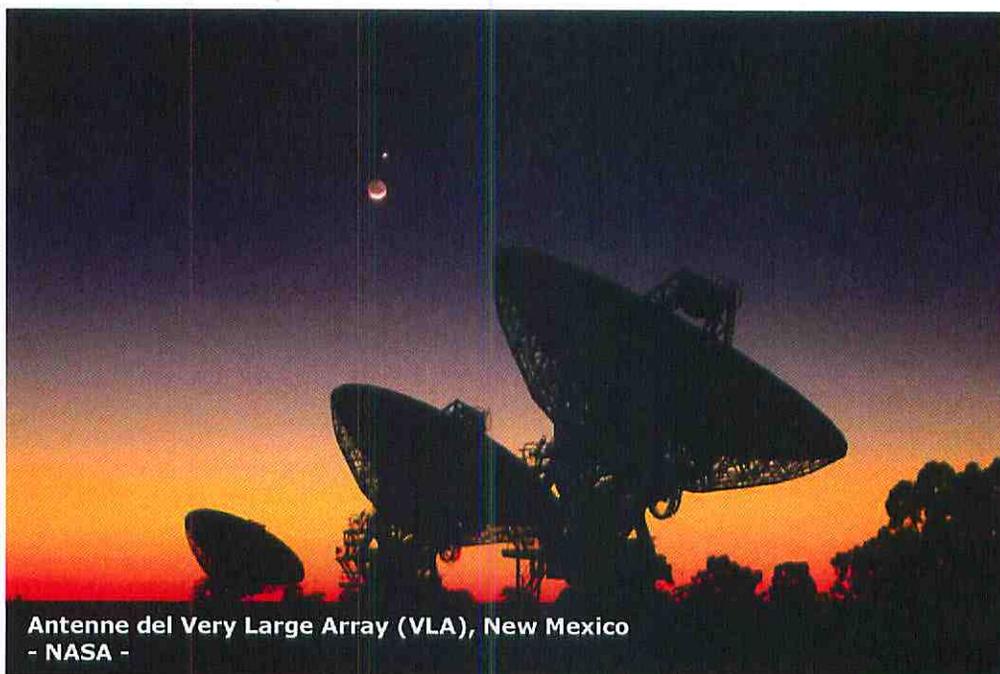
Interpretazione artistica del telescopio E-ELT - ESO -

sation for Astronomical Research) nel deserto di Atacama; la data di completamento è prevista per il 2017^{[18][19][20]}. Per il secondo, invece, con il suo diametro di cento metri sono ancora da definire il luogo di costruzione e i costi, ma è probabile che passeranno diversi decenni prima che veda la luce.^{[21][22]} Una volta completate queste strutture avranno una sensibilità tale da poter studiare l'atmosfera degli esopianeti scoperti da Kepler.^[23]

Radiotelescopi: presente e futuro

I radiotelescopi sono telescopi specializzati nel captare unicamente le onde radio emesse dalle varie sorgenti sparse nell'universo. Generalmente queste strutture non sono altro che gigantesche antenne paraboliche puntate verso il cielo; il problema che caratterizza queste strutture è che, a causa delle lunghe frequenze d'onda delle onde radio, è necessario usare molte antenne contemporaneamente per avere una risoluzione sufficiente.^[24]

Il più grande radiotelescopio a antenna singola attualmente in funzione è quello di Arecibo costruito in una depressione del diametro di trecento cinque metri. Per quanto riguarda i sistemi multipli il più grande è situato in New Mexico e prende il nome VLA (Very Large Array). Il complesso è composto da ventisette antenne disposte a Y, ognuna di ventisei metri; quando tutte lavorano in sinergia equivalgono a una di quaranta chilometri di diametro.^[25]



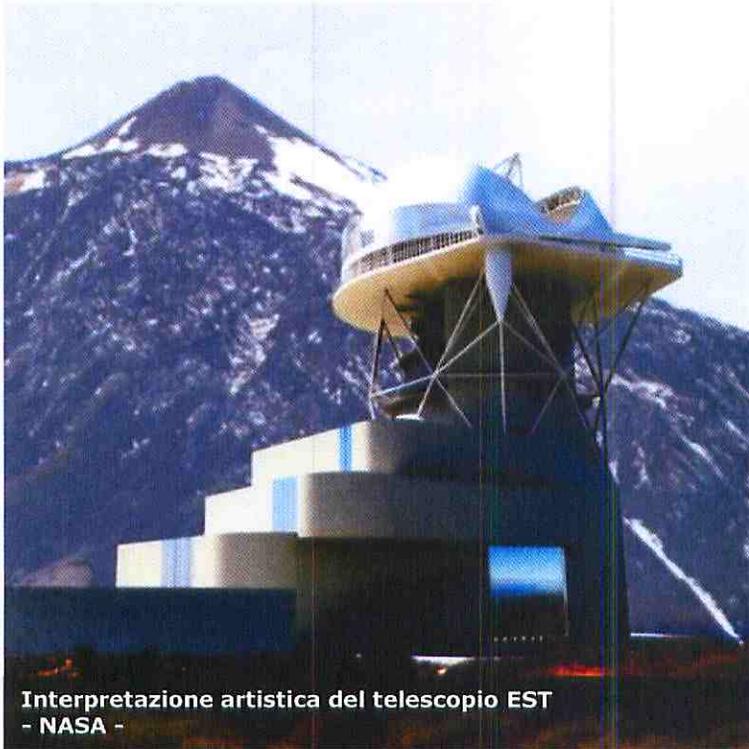
Previsto per il 2020 lo SKA (Square Kilometer Array) è un gigantesco radiotelescopio che coprirà una superficie di circa un milione di metri quadrati, equivalenti a un'unica antenna del diametro di tremila chilometri. La missione principale di SKA sarà di studiare corpi estremamente lontani nello spazio e nel tempo, per fornire risposte sulla nascita delle prime stelle e delle prime galassie. Il progetto sarà costruito in tre diversi siti (Australia, Nuova Zelanda e Sud Africa), ognuno di essi più vasti del più grande radiotelescopio oggi esistente. Il progetto costerà oltre 1.5 miliardi di euro, stanziati da venti diversi paesi.^{[26][27][28]}

Telescopi solari: presente e futuro

Rispetto ai telescopi notturni quelli solari presentano tre particolarità:

- sono posti su alte torri perché, dovendo operare di giorno, il calore irradiato dal suolo

- provocherebbe aberrazioni ottiche
- hanno un diametro che raramente supera il metro perché concentrando una grande quantità di luce diventa difficile gestire il calore raccolto, calore che deriva dall'estrema vicinanza del Sole rispetto alle altre stelle



Interpretazione artistica del telescopio EST
- NASA -

Attualmente i più grandi telescopi solari si trovano nelle isole di Las Palmas e Tenerife e sono il Gregor con una specchio SiC di un metro e mezzo e il Themis un telescopio italiano dal diametro di novanta centimetri anch'esso in carburo di silicio e caratterizzato da una cupola chiusa^{[29][30]}.

Nel 2018 è invece prevista la costruzione del telescopio EST (European Solar Telescope) a Roque de Los Muchachos sempre a Las Palmas. EST costituirà un enorme passo avanti nei telescopi solari grazie al suo un diametro di 4 metri . La maggior sfida ingegneristica è stato trovare il modo di dissipare i cinque mega watt di calore che si genereranno nel suo fuoco primario.^[31]

SOLPHYLAB (SOLar PHYsic LABoratory)

Il laboratorio presenta una configurazione a celostata, cioè composta da due specchi che catturano la luce del sole e la riflettono all'interno del Solphylab. In totale gli specchi presentano un percorso focale (distanza tra lo specchio e il punto di messa a fuoco) di 38 metri e proiettano nel laboratorio un'immagine del sole di 340mm di diametro (circa 9mm per ogni metro di focale). Questa configurazione, rispetto a quella a specchio singolo (eliostato), consente di avere un cammino ottico più lungo e dunque una migliore risoluzione del disco solare.



Veduta di insieme delle strutture esterne del SOLPHYLAB
- LICEI STEFANINI -

Lo specchio primario con un diametro 300mm è in Zerodur ed è posto sul tetto dell'aula magna . Questo primo specchio monta due strumenti in parallelo: un cannocchiale e una camera CCD, un dispositivo elettronico non dissimile alle macchine fotografiche digitali che consente di ottenere immagini ad alta risoluzione. Lo specchio primario presenta inoltre una montatura equatoriale a forcina (parallela all'asse terrestre) con motorizzazione AR e DEC, automatizzata mediante il software di ricerca ATC plus e il sistema OCS III. Questa apparecchiatura gli permette di inseguire il sole autonomamente sia durante la giornata che nel corso dell'anno così da poterne inviare l'immagine riflessa allo specchio obiettivo.

Anche questo secondo specchio, posto sul tetto del corridoio C, ha una montatura equatoriale a forcella ed è in Zerodur ma il suo diametro è di 200mm. La funzione dello specchio obiettivo è quella di ricevere l'immagine del sole dallo specchio primario e inviarla all'interno del laboratorio.

La luce proveniente dal sole, per poter raggiungere il laboratorio senza interferenze, attraversa un condotto. Al di sotto del foro di uscita di quest'ultimo è posta una foto-camera digitale Canon EOS 350D 8Mpx che consente di fotografare e filmare le immagini del sole proiettate dallo specchio obiettivo.

Infine l'immagine del disco solare (diametro 340mm) viene proiettata all'interno del laboratorio su di uno schermo per consentire lo studio delle macchie solari e dei fenomeni periodici come le eclissi e i transiti di Mercurio e Venere.

Per l'analisi spettrale delle righe di assorbimento, in particolare del Potassio dell' Idrogeno e del Calcio II, viene invece utilizzato lo spettrografo. Questo strumento è costituito da un collimatore, un reticolo di diffrazione e da un insieme di lenti allineate su un supporto in tubi d'acciaio che proietta lo spettro di assorbimento del sole su un apposito supporto sospeso al soffitto.^{[32][33]}



Fotografia del disco solare 27-09-2011
- LICEI STEFANINI -

Referenze bibliografiche e sitografiche

1. JOHN MICHELL, *Astroarcheologia. Una scienza eretica*, l'Età dell'Acquario, Rimini, 2008.
2. GIORGIO STRANO, *Il telescopio di Galileo: lo strumento che ha cambiato il mondo*, Catalogo della mostra di Firenze 2008, Giunti, Firenze, 2008.
3. CONRAD BOHM, *Dall'astrolabio al telescopio spaziale*, Editoriale scienza, Milano, 1996.
4. WALTER FERRERI, *Il libro dei telescopi*, il Castello, Foggia, 2002.
5. PAOLO ROSSI, *La nascita della scienza moderna in Europa*, Laterza, Bari, 1997.
6. INAF, *Tecnologie ottiche innovative per strumentazione di piano focale*, www.inaf.it/it/campi-di-attivita/tecnologie-avanzate-e-strumentazione/tecnologie-per-telescopi-nelle-bande-ottica-infrarossa-e-uv-da-terra-e-dallo-spaziotecnologie-avanzate-e-strumentazione/tecnologie-ottiche-innovative-per-strumentazione-di-piano-focale, consultato 17.12.12.
7. INAF, *Nuovi approcci realizzativi e metrologia di specchi leggeri*, www.inaf.it/it/campi-di-attivita/tecnologie-avanzate-e-strumentazione/tecnologie-per-telescopi-nelle-bande-infrarossa-ottica-e-uv-da-terra-e-dallo-spazio/tecnologie-avanzate-e-strumentazione/nuovi-approcci-realizzativi-e-metrologia-di-specchi-leggeri consultato il 17.12.12
8. INAF, *Ottiche adattive e tecnologie correlate*, www.inaf.it/it/campi-di-attivita/tecnologie-avanzate-e-strumentazione/tecnologie-per-telescopi-nelle-bande-infrarossa-ottica-e-uv-da-terra-e-dallo-spazio/tecnologie-avanzate-e-strumentazione/ottiche-adattive-e-tecnologie-correlate, consultato il 17.12.12.
9. INAF, *Tecnologie per telescopi nelle bande infrarossa, ottica e UV da terra e dallo spazio*, www.inaf.it/it/campi-di-attivita/tecnologie-avanzate-e-strumentazione/tecnologie-per-telescopi-nelle-bande-infrarossa-ottica-e-uv-da-terra-e-dallo-spazio, consultato 17.12.12
10. PLINIO CAMAITI, *Guida CCD per l'astronomia*, il Castello, Foggia, 2000.
11. FUJIFILM, *Risoluzione più elevata e gamma dinamica più ampia grazie a sofisticate tecnologie di miniaturizzazione*, www.fujifilm.it/aree/tecnologia/sccd4/sccd4.asp, consultato 21.04.13.
12. ENCICLOPEDIA TRECCANI, *Configurazioni e tipi di telescopi*, www.treccani.it/enciclopedia/telescopio, consultato il 22.04.13.
13. NASA, *The Hubble Space Telescope*, asd.gsfc.nasa.gov/archive/hubble, consultato il 22.01.13.
14. NASA, *The James Webb Space Telescope*, jwst.nasa.gov, consultato il 22.01.12.
15. ERIC HAND, *NASA to share telescope cost*, dalla rivista "nature", Londra, 2013.
16. ESO, *Il Very Large Telescope*, www.eso.org/public/italy/teles-instr/paranal.html, consultato il 22.04.13
17. NASA, *Keck Telescope*, jpl.nasa.gov/sl9/keck.html, consultato il 23.01.13.
18. BBC NEWS, *Final stage for telescope design*, news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/6176185.stm, consultato il 07.02.13.
19. ESO, *The world's biggest eye on the sky*, eso.org/public/teles-instr/e-elt.html, consultato il 13.02.12.
20. ESO, *Very large Telescope*, eso.org/public/teles-instr/vlt.html, consultato il 13.02.13.
21. GIOVANNI SABATO, *Astrofisica, gli otto misteri*, dalla rivista "L'Espresso", Roma, 2012.
22. ESO, *OWL desing*, www.eso.org/sci/facilities/eelt/owl/OWLdesign.html, consultato il 20.04.13.
23. JOHN MATSON, *Telescopi giganti per cercare la vita su pianeti extrasolari*, dalla rivista "Le Scienze", Roma, 2013.
24. UNIVERSITÀ DI BOLOGNA, *Gli strumenti radioastronomici*, scienzagiovane.unibo.it/finestra-radio/9-strumenti.html, consultato il 24.02.13.
25. NRAO, *Welcome to the Very Large Array*, vla.nrao.edu, consultato il 24.02.13.
26. SKA SOUTH AFRICA, *The SKA project*, www.ska.ac.za/about/project.php, consultato il 20.04.13.
27. SKA AUSTRALIA, *What is the SKA?*, www.ska.gov.au/about/Pages/default.aspx, consultato il 21.04.12.

28. SKA, *Dishes*, skatelescope.org/the-technology/dishes/, consultato il 24.02.13.
29. KIS, *New solar telescope GREGOR*, kis.uni-freiburg.de/index.php?id=163&L , consultato il 26.02.13.
30. THEMIS, *The European Solar Telescope (EST)*, 161.72.34.10/dokuwiki/doku.php?id=project:european_solar_telescope_design_study_est_ds , consultato il 01.03.13.
31. EST, *Presentation*, www.est-east.eu, consultato il 21.04.13.
32. SOLPHYLAB, *Laboratorio e Strumentazioni*, solphylab.liceistefanini.it, consultato il 02.12.12.
33. SOLPHYLAB, *Progetto 2010*, solphylab.liceistefanini.it/file/project2010.pdf, consultato il 22.12.12.

Altre fonti

- FRANCESCO BERRILLI, *Materiali per l'Astrofisica sperimentale*, Progetto Didattico Nazionale "Stage nelle Università", Università di Tor Vergata, Roma, 19-23.06.12 4-9.02.13.
- FRANCESCO BERRILLI, *Esopianeti e vita nell'Universo*, ciclo di conferenze "Stefanini on Science", Licei Statali Sperimentali "Luigi Stefanini", Mestre, 07.05.12.
- FRANCESCO BERRILLI, *The dark side of the Universe*, ciclo di conferenze "Stefanini on Science", Licei Statali Sperimentali "Luigi Stefanini", Mestre, 26.03.11.
- VIAGGIO D'ISTRUZIONE presso gli Osservatori del Teide (IAC/ESO), Isola di Tenerife, 15-26.11.12.
- ACCADEMIA DEI LINCEI, *Celebrazione del IV centenario della pubblicazione dell'opuscolo di Galilei: "Istoria e dimostrazioni attorno le macchie solari"*, Roma, Palazzo Corsini, 15.04.2013.

Referenze iconografiche

- Pg 2, KENNETH GARRET, *Monaci buddisti davanti al complesso di Angkor Wat*, dalla rivista "National Geographic"
- Pg 3, NASA, *Ingegnere di fronte alle ottiche del James Webb Space Telescope*.
- Pg 4, NASA, *Ingegneri durante il posizionamento del sistema di ottica attiva del Large Binocular Telescope*.
- Pg 4, IBM, *Graphic del nuovo sensore CMOS integrated nanophotonics*.
- Pg 5, *Schema di montatura equatoriale*.
- Pg 6, *Schema di montatura altazimutale*.
- Pg 7, NASA, *Graphic dei pianeti rocciosi scoperti da Kepler nella fascia abitabile*.
- Pg 7, ESO, *Graphic del telescopio ELT*.
- Pg 8, NASA, *Antenne del Very large Array*.
- Pg 9, ESO, *Graphic del telescopio EST*.
- Pg 10, LICEI STEFANINI, *Veduta di insieme delle strutture esterne del Solphylab*.
- Pg 11, LICEI STEFANINI, *Fotografia del disco solare 27-09-2011*.