



Ministero dell'Istruzione
dell'Università e Ricerca



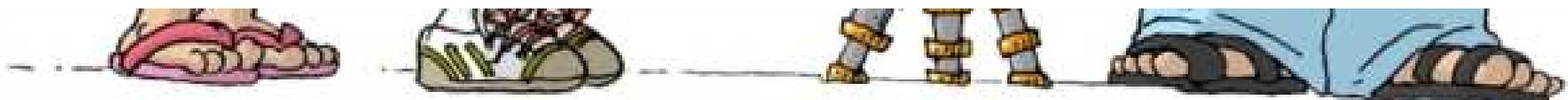
XV OLIMPIADI ITALIANE DI ASTRONOMIA – CREMONA 2017

15 novembre 2016

Prof. Angelo Angeletti



Introduzione all'Astronomia



L'Universo
ha impiegato
miliardi di anni
a scrivere
la storia della creazione.

L'uomo,
senza dubbio,
dovrà continuare
a cercare
di imparare
a leggerla
ancora per molto tempo.

C.S.Powell

Principio di uniformità della Natura

***LE LEGGI DELLA NATURA SONO LE
STESSE IN TUTTE LE PARTI
DELL'UNIVERSO***

Principio Copernicano

***LA TERRA NON OCCUPA UNA
POSIZIONE SPECIALE
NELL'UNIVERSO***

W astronomie

Astronomia

Dal greco *αστρον* (astro) e *νομος* (legge), è la scienza che studia le posizioni relative, il moto, la struttura e l'evoluzione degli astri.

Diverse discipline concorrono oggi allo studio dell'Universo.

L'**Astronomia di posizione** o **Astrometria** (è la più antica).

La **Meccanica Celeste**

(insieme costituiscono l'Astronomia fondamentale o classica).

Astronomia

Nella seconda metà del XIX secolo è nata l'Astronomia Moderna:

- L'**Astrofisica** (studia la fisica e l'evoluzione degli oggetti dell'Universo):
 - **Astrofisica delle alte energie** (studio dell'irraggiamento γ , X e ultravioletto)
 - **Astrofisica delle basse energie** (irraggiamento nel visibile, infrarosso e radio).

Un'altra distinzione viene fatta tra:

- **Cosmogonia** che studia la formazione e l'evoluzione dei corpi celesti particolari (stelle, pianeti, galassie, ecc)
- **Cosmologia** che cerca di spiegare la formazione e l'evoluzione dell'Universo considerato nella sua totalità.
- L'**Astrochimica** (si interessa della chimica extraterrestre)
- La **Bioastronomia** o **Esobiologia** o **Astrobiologia** che studia la possibilità di vita nel cosmo.



CONCETTI

BASE

La misura delle distanze

Le dimensioni del cosmo

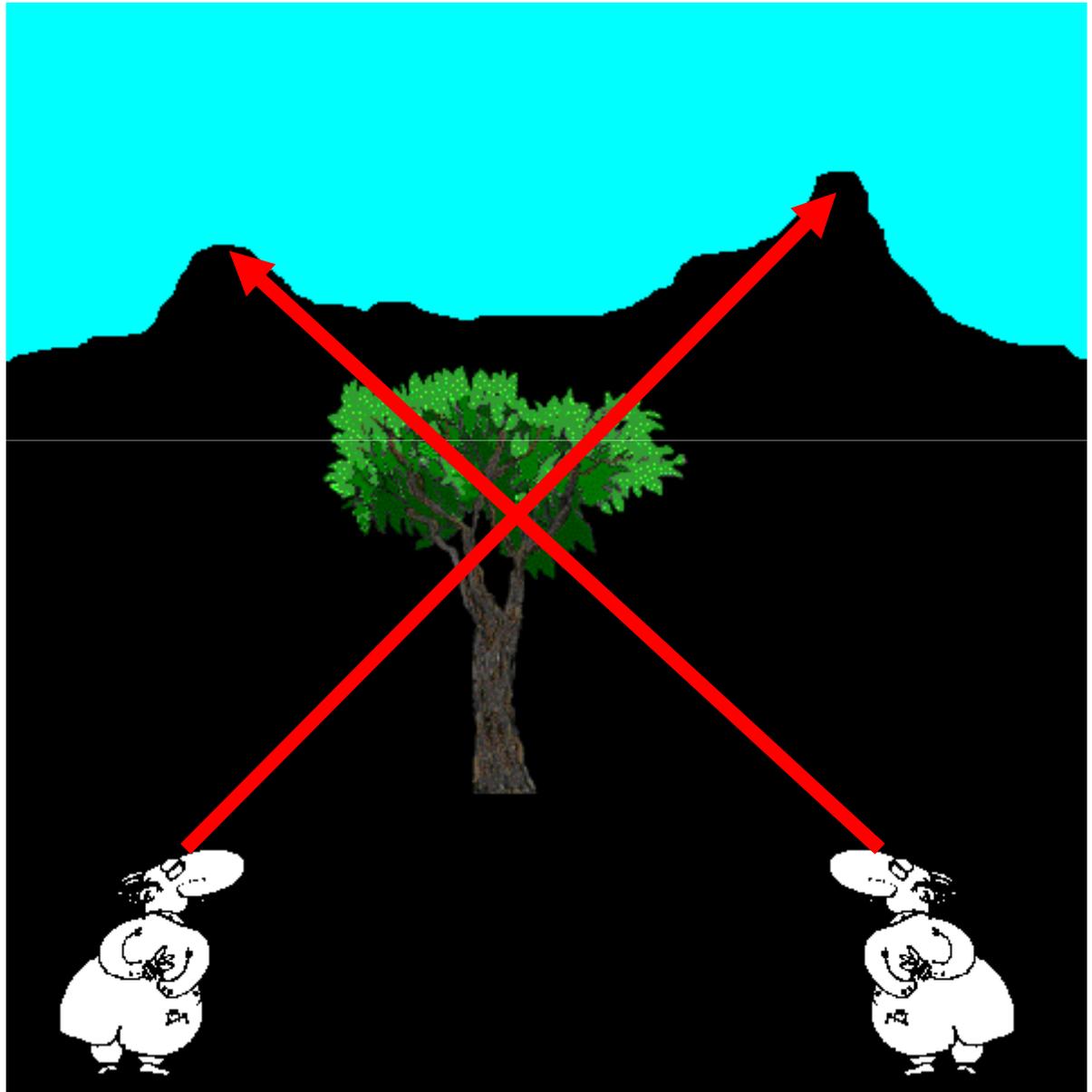
I primi tentativi di valutare le dimensioni dell'Universo risalgono al mondo greco: vennero proposti metodi per misurare il diametro della Terra e la distanza del Sole e della Luna.

Conoscendo la distanza del Sole se ne può determinare la massa e quindi con la terza legge di Keplero è possibile calcolare la distanza dei pianeti del sistema solare.

Le dimensioni del cosmo

Per la determinazione della distanza delle stelle più vicine si fa uso del fenomeno della *parallasse* in base al quale gli oggetti vicini sembrano spostarsi rispetto allo sfondo se noi ci muoviamo.

La *parallasse annua* è quel fenomeno in virtù del quale le stelle vicine si spostano rispetto a quelle più lontane a causa del moto della Terra attorno al Sole.



La parallasse stellare

Si noti che dal triangolo formato dalla Stella, dal Sole e dalla posizione T_2 della Terra si ricava la relazione:

$$1 \text{ UA} = d \tan p$$

L'UA (Unità Astronomica) è la distanza media Terra – Sole, circa 150 milioni di chilometri)

Per valori di p molto piccoli (misurati in radianti) diventa:

$$d = 1/p \text{ UA}$$

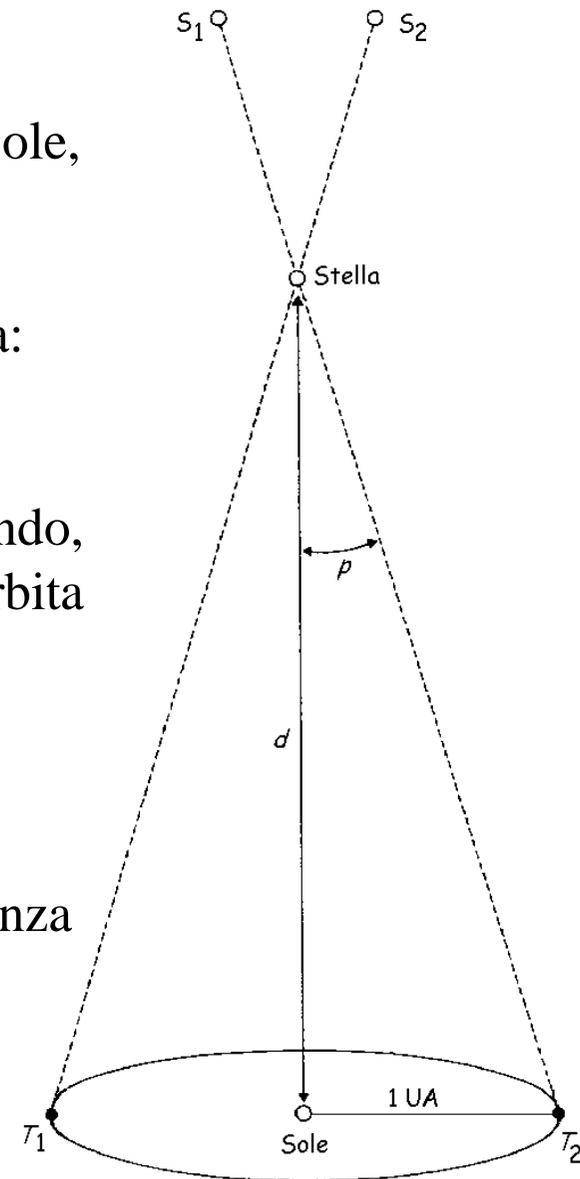
Si definisce quindi il parsec (= parallasse-secondo, abbreviato pc), la distanza dalla quale il raggio dell'orbita terrestre è visto sotto l'angolo di $1''$. Si ha:

$$1 \text{ pc} = 2,06265 \cdot 10^5 \text{ UA} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m.}$$

In astronomia si usa anche l'anno luce (a.l.), cioè la distanza che la luce percorre in un anno.

$$1 \text{ a.l.} = 9,46 \cdot 10^{15} \text{ m}$$

$$1 \text{ pc} = 3,26 \text{ a.l.}$$



La parallasse stellare

La prima misura di parallasse fu fatta da Bessel nel 1837.

Solo agli inizi del 1900 si poterono misurare angoli di parallasse con un errore dell'ordine di 0,01" mediante l'applicazione delle tecniche fotografiche.

La stella più vicina al Sole è Proxima Centauri, la cui parallasse è $p = 0,762''$, che corrisponde ad una distanza $d = 1,3 \text{ pc} = 4,3 \text{ a.l.}$.

Il metodo della parallasse è valido solo per distanze relativamente piccole e le stelle comprese entro 4 pc dal Sole sono solo una trentina; quelle comprese entro 20 pc sono circa 700.

La parallasse stellare

L'8 agosto 1989, l'ESA (European Space Administration, l'Agenzia Spaziale Europea) ha lanciato il satellite Hipparcos (High Precision PARallax COLlecting Satellite).

La missione è stata portata a termine il 15 agosto 1993 ed ha permesso di misurare la posizione di circa 100.000 stelle con la precisione di 0,001”.

In teoria ciò permetterebbe di misurare la parallasse delle stelle con questa precisione e di dedurre le distanze fino a un massimo di 1.000 parsec = 3260 anni luce, ma in pratica si è arrivati solo a 1.000 anni luce !

La missione GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) dell'ESA ha avuto inizio con il lancio del satellite il 19 dicembre 2013.

Ha lo scopo di misurare le parallassi di un miliardo di stelle fino alla magnitudine 20. Misurerà anche il moto proprio delle stelle con una precisione variabile tra 20 e 200 μ arcsec.

Onde

elettromagnetiche

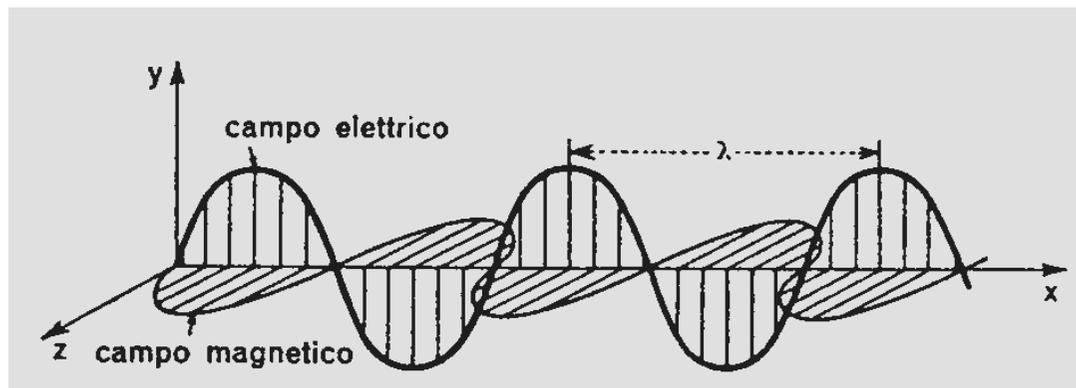
Onde elettromagnetiche

Se si produce una variazione periodica di un campo elettrico o magnetico in un punto dello spazio si origina la propagazione di una successione continua d'impulsi elettromagnetici, cioè un'onda elettromagnetica.

Le onde elettromagnetiche si propagano alla velocità della luce, $c=299.792,458$ km/s.

Alle onde elettromagnetiche si estendono le definizioni di lunghezza d'onda (λ), periodo (T) e frequenza (f).

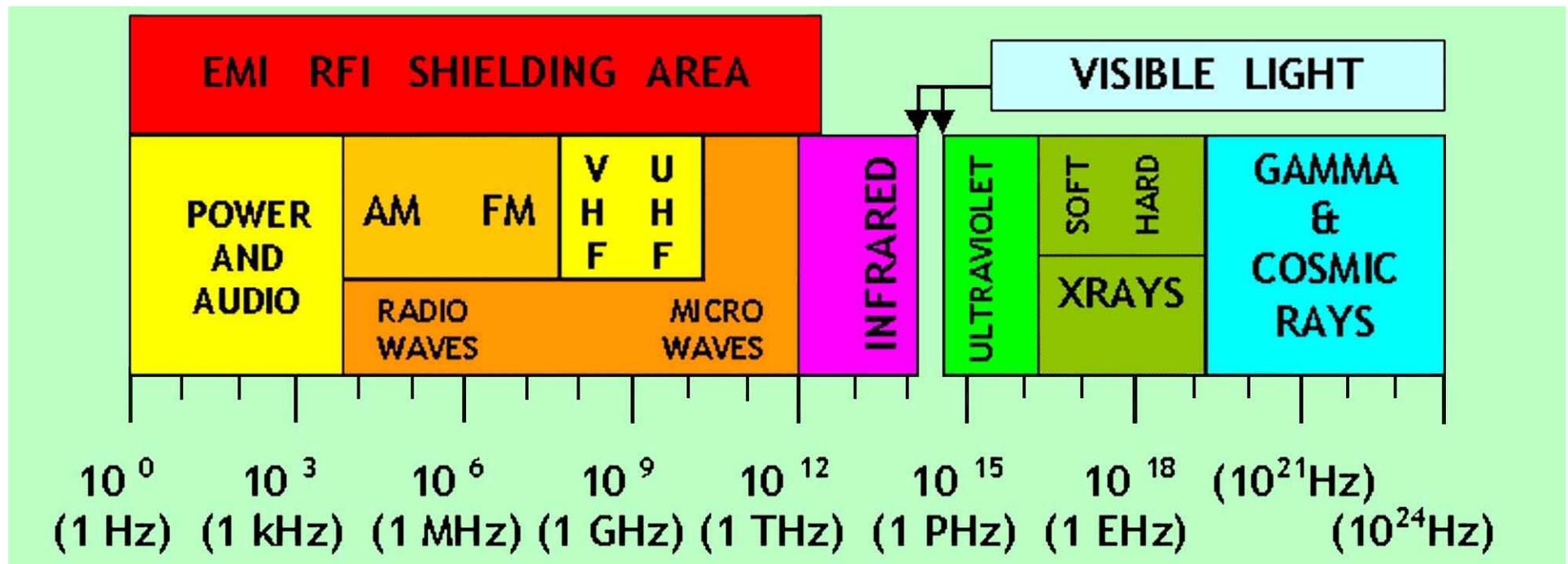
E' fondamentale la relazione tra velocità di propagazione, lunghezza d'onda e frequenza: $c = \lambda \cdot f$



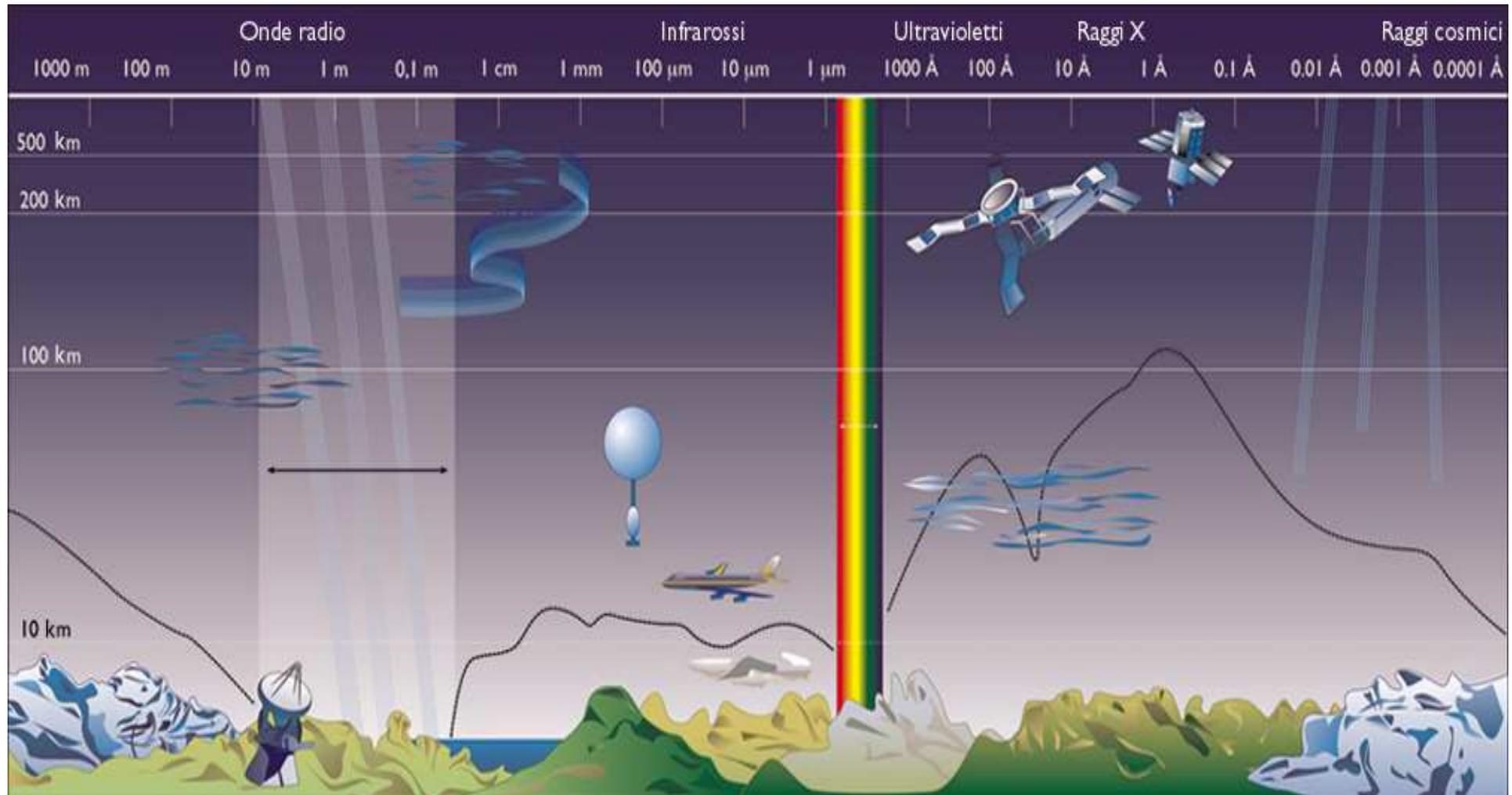
Lo spettro elettromagnetico

Le onde elettromagnetiche possono essere classificate in base alla lunghezza d'onda o alla frequenza.

La luce visibile ha lunghezze d'onda comprese tra 400 nm (violetto) e 750 nm (rosso).

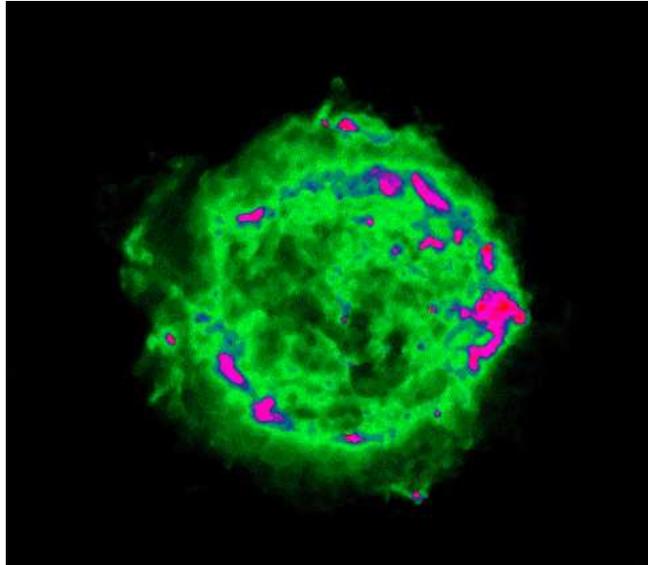


Onde elettromagnetiche e assorbimento atmosferico

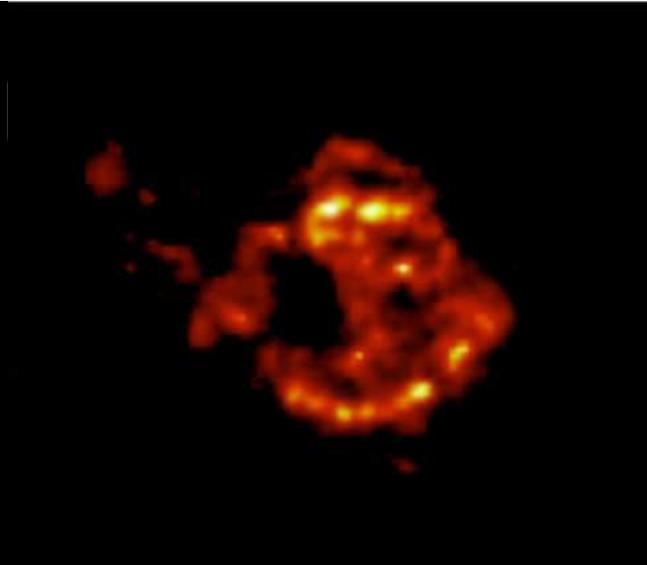


Onde elettromagnetiche

Onde radio



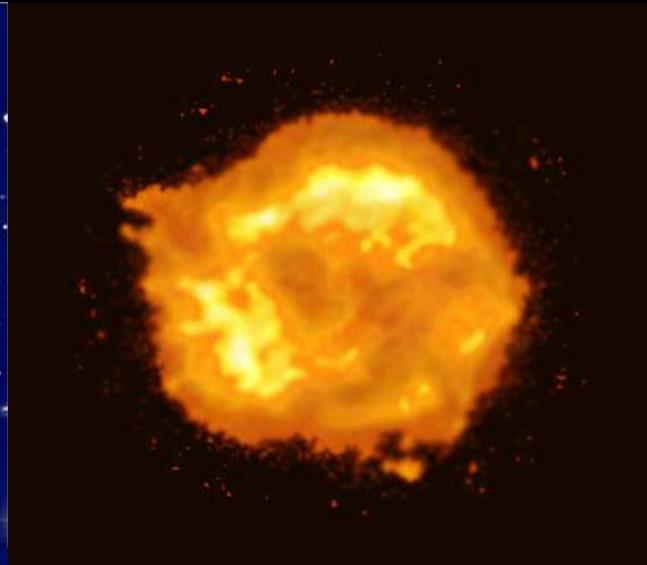
Infrarosso



Visibile

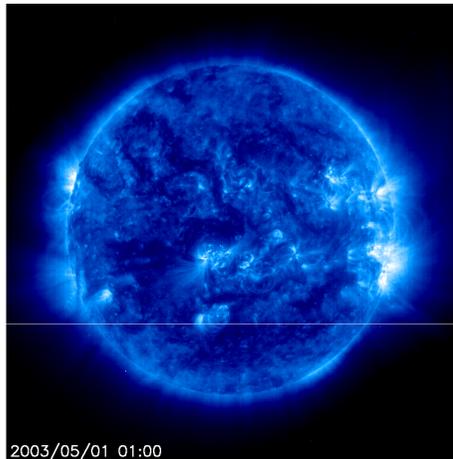


Raggi X



Onde elettromagnetiche

Immagini del Sole riprese dalla sonda SOHO (Solar & Heliospheric Observatory) dell'ESA e della NASA il 1 maggio 2003 <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>

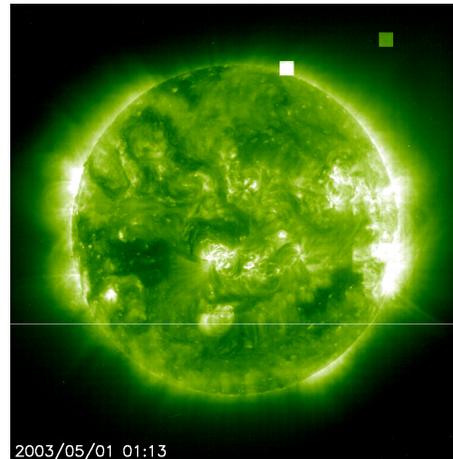


Ore 01.00

$\lambda = 171 \text{ \AA}$

Corrispondente
all'emissione di

Fe IX/X

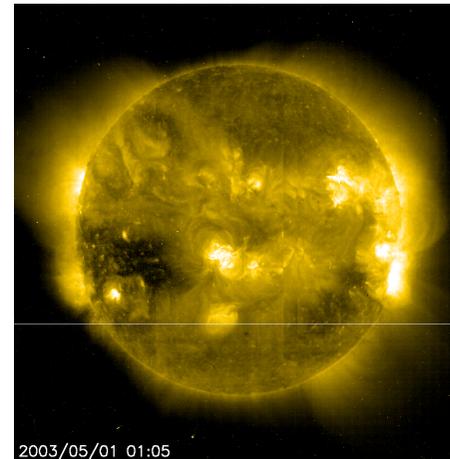


Ore 01.13

$\lambda = 195 \text{ \AA}$

Corrispondente
all'emissione di

Fe XII

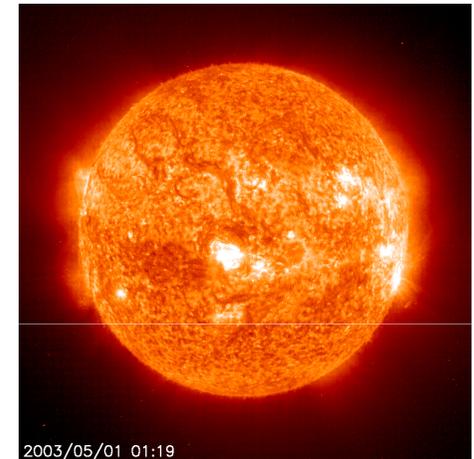


Ore 01.05

$\lambda = 284 \text{ \AA}$

Corrispondente
all'emissione di

Fe XV



Ore 01.19

$\lambda = 304 \text{ \AA}$

Corrispondente
all'emissione di

He II/Si XI

Le immagini sono state riprese con l'EIT (Extreme ultraviolet Imaging Telescope) un telescopio per le riprese nell'ultravioletto estremo.

La luminosità
dei
corpi celesti

Magnitudine

La **magnitudine apparente** (m) di una stella, pianeta o di un altro oggetto celeste è una misura della sua luminosità rilevabile dal punto d'osservazione (tipicamente dalla Terra).

Maggiore è la luminosità dell'oggetto celeste minore è la sua magnitudine.

Poiché ad esempio un oggetto estremamente luminoso può apparire molto debole se si trova ad una grande distanza, questa misura non indica la luminosità intrinseca dell'oggetto celeste, che viene invece espressa con il concetto di **magnitudine assoluta** (M).

Magnitudine

La scala con cui sono misurate le magnitudini affonda le sue radici nella pratica ellenistica di dividere le stelle visibili ad occhio nudo in sei magnitudini (IPPARCO).

Le stelle più luminose erano dette di prima magnitudine ($m = +1$) e così via fino alla sesta magnitudine ($m = +6$), al limite della visione umana ad occhio nudo.

Questo metodo di indicare la luminosità delle stelle fu reso popolare da Tolomeo nell'Almagesto. Il sistema prendeva in considerazione solo le stelle, e non considerava la Luna, il Sole o altri oggetti celesti non stellari.

Nel 1856, Pogson formalizzò il sistema definendo una stella di prima magnitudine come una stella che fosse 100 volte più luminosa di una stella di sesta magnitudine. Perciò, una stella di prima magnitudine si trova ad essere $100^{1/5} = 2,512\dots$ volte più luminosa di una stella di seconda.

Magnitudine

Originariamente la scala di Pogson fu fissata assegnando alla stella Polare una magnitudine di 2.

Gli astronomi hanno in seguito scoperto che la Polare è leggermente variabile, pertanto oggi viene usata come riferimento la stella Vega.

Il sistema moderno non è più limitato a sei magnitudini: oggetti molto luminosi hanno magnitudini negative, per esempio Sirio ha una magnitudine apparente posta tra -1,44 e -1,46.

La scala moderna include la Luna e il Sole.

La Luna piena è di magnitudine -12, il Sole raggiunge la magnitudine -26,7.

Il Telescopio Spaziale Hubble e il Telescopio Keck hanno registrato stelle di magnitudine +30.

Magnitudine

La magnitudine apparente in una determinata banda x dello spettro elettromagnetico è definita tramite la formula di Pogson:

$$m_x = -2.5 \log F_x + C$$

dove F_x è il flusso osservato nella banda x , e C è una costante che dipende dalle unità usate.

Più un oggetto è debole più la sua magnitudine è alta.

La scala è logaritmica: quindi il rapporto fra le luminosità di due oggetti corrisponde alla differenza delle loro magnitudini. Per esempio, una differenza di 3,2 significa che un oggetto è circa 19 volte più luminoso di un altro ($100^{3,2/5} = 19,054607\dots$)

La natura logaritmica della scala è dovuta al fatto che l'occhio umano ha esso stesso una risposta logaritmica.

Magnitudine

La **magnitudine assoluta** (detta anche luminosità assoluta) è la magnitudine apparente (m) che un oggetto avrebbe se si trovasse ad una distanza dall'osservatore di 10 parsec o 1 Unità Astronomica a seconda del tipo di oggetto (stellare/galattico o corpo del Sistema solare).

È una misura della luminosità intrinseca di un oggetto, senza tener conto delle condizioni in cui si trova l'osservatore.

Più un oggetto è intrinsecamente luminoso, più la sua magnitudine assoluta è numericamente bassa, anche negativa. Ogni grado della scala corrisponde ad un incremento (o decremento) pari a $100^{1/5}$.

Nel definire la magnitudine assoluta, è necessario specificare il tipo di radiazione elettromagnetica che viene misurata. Se ci si riferisce al totale dell'energia emessa, il termine corretto è **magnitudine bolometrica**.

Se si considera lo spettro del visibile si parla di **magnitudine assoluta visuale**.

Magnitudine

Nota la magnitudine apparente (m) e la distanza (d) dell'oggetto espressa in parsec la magnitudine assoluta M si ricava da:

$$M = m + 5 - 5 \log d$$

Nell'astronomia stellare e galattica la distanza standard è di 10 parsec (circa 3.26 anni luce o 3.1×10^{13} km).

Per gli oggetti molto vasti come le galassie ci si riferisce ad un oggetto di pari luminosità intrinseca ma di aspetto puntiforme.

Molte stelle visibili ad occhio nudo hanno magnitudini assolute che sarebbero capaci di formare ombre da una distanza di 10 parsec:

Rigel (- 6,7), Deneb (- 8,5), Betelgeuse (- 5,6).

Per confronto, Sirio ha una magnitudine assoluta di 1,4 e il Sole ha una magnitudine assoluta di circa 4,5.

Magnitudine

Nome	Magnitudine apparente	Magnitudine assoluta	Luminosità (Sole =1)
Eta Carinae (Massimo del 1843)	-0,8	-20,26	55.000.000
Eta Carinae (attuale)	tra 3,9 e 10,5	-12,1	5.500.000
Alnilan	1,70	-9,2	380.000
Deneb	1,25	-8,73	250.000
Rigel	0,12	-8,03	67.000-100.000
Betelgeuse	0,58	-5,14	135.000
Alnitak	1,79	-7,8	100.000
Mintaka	2,23	-7,6	87.000
Antares	0,92	-7,2	60.000
Spica	1,00	-5,6	14.000
Canopo	-0,62	-5,53	12.900
Bellatrix	1,64	-4,75	6.300
Stella Polare	1,97	-3,6	2.200
Regolo	1,35	-1,6	350
Aldebaran	0,85	-0,63	140
Arturo	-0,04	-0,31	110
Capella	0,08	0,4	55
Castore	1,98	0,5	50
Vega	0,00	0,58	47
Polluce	1,14	0,7	42
Sirio	-1,46	1,4	22
Alpha Centauri A	-0,01	4,38	1,4
Sole	-26,8	4,75	1,00

Il modulo di distanza

Se una stella è così lontana che la misura di parallasse è impossibile, ma se esiste un metodo per misurare la magnitudine assoluta M , allora si può determinare la distanza d (in pc):

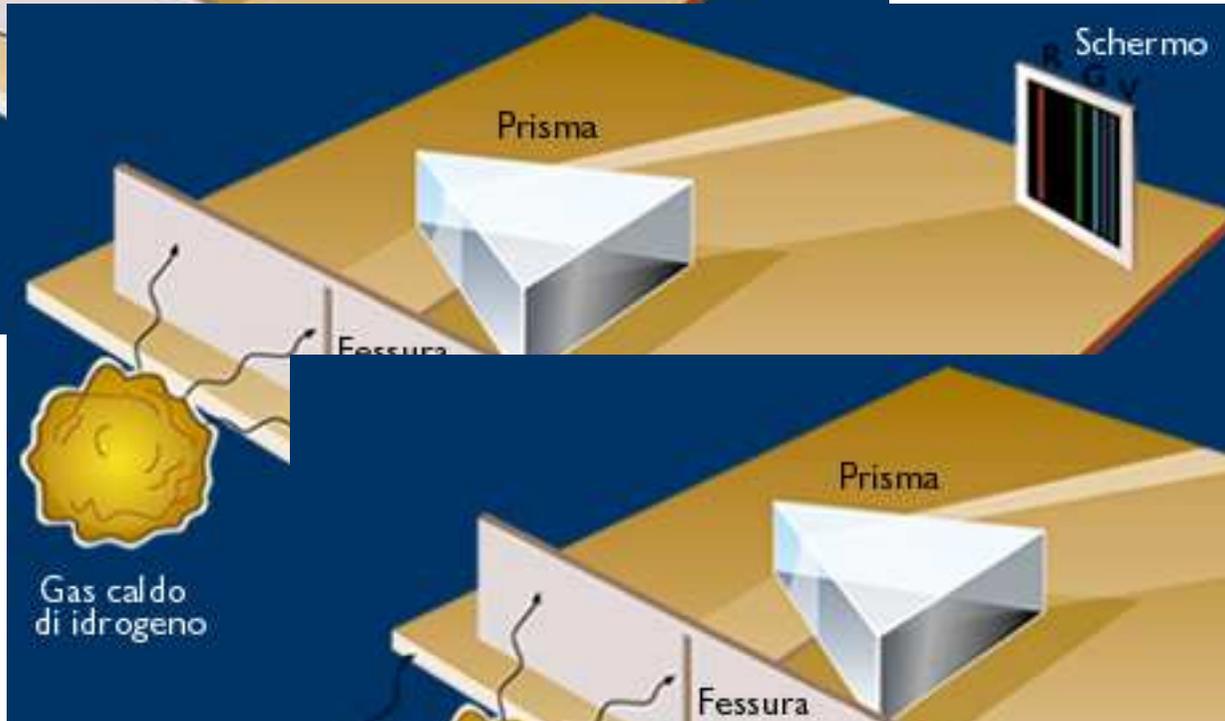
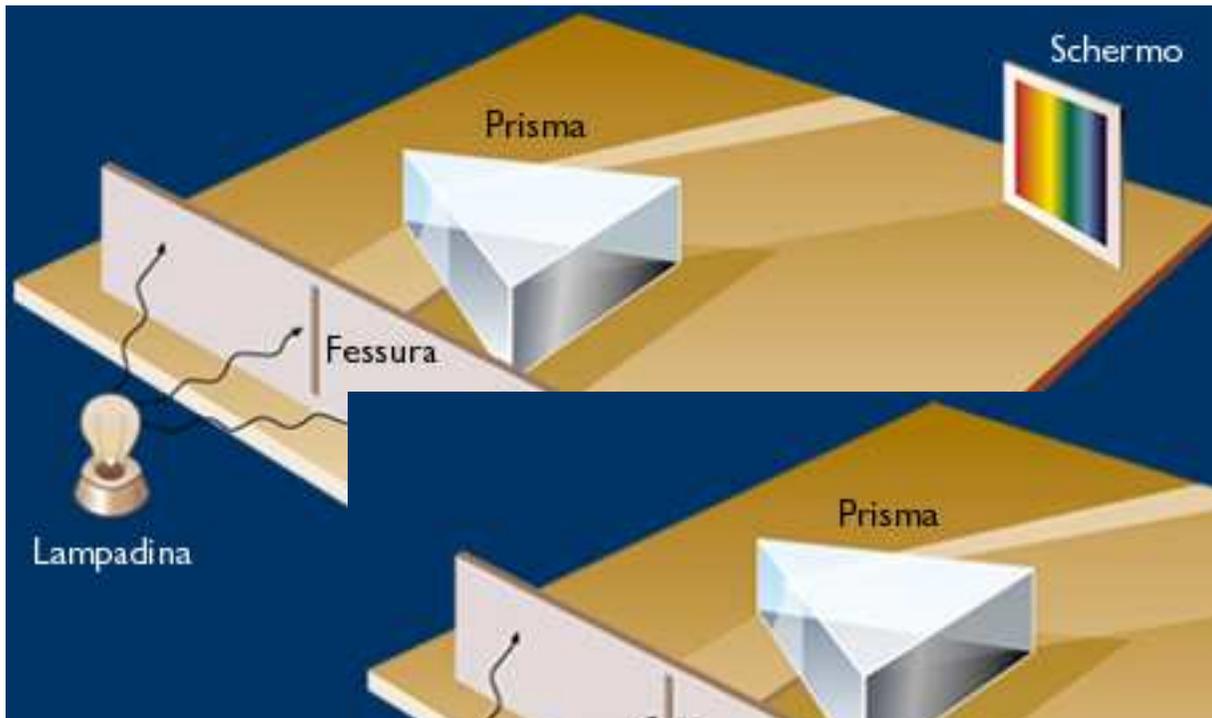
$$d = 10^{\frac{m-M+5}{5}}$$

$\mu = m - M$ è detto *modulo di distanza*.

E' difficile ricavare M ; inoltre lungo la linea di vista si possono interporre gas o polveri, che assorbono o diffondono parte della radiazione inviata dall'oggetto verso la Terra. In questo modo il valore di m viene falsato.

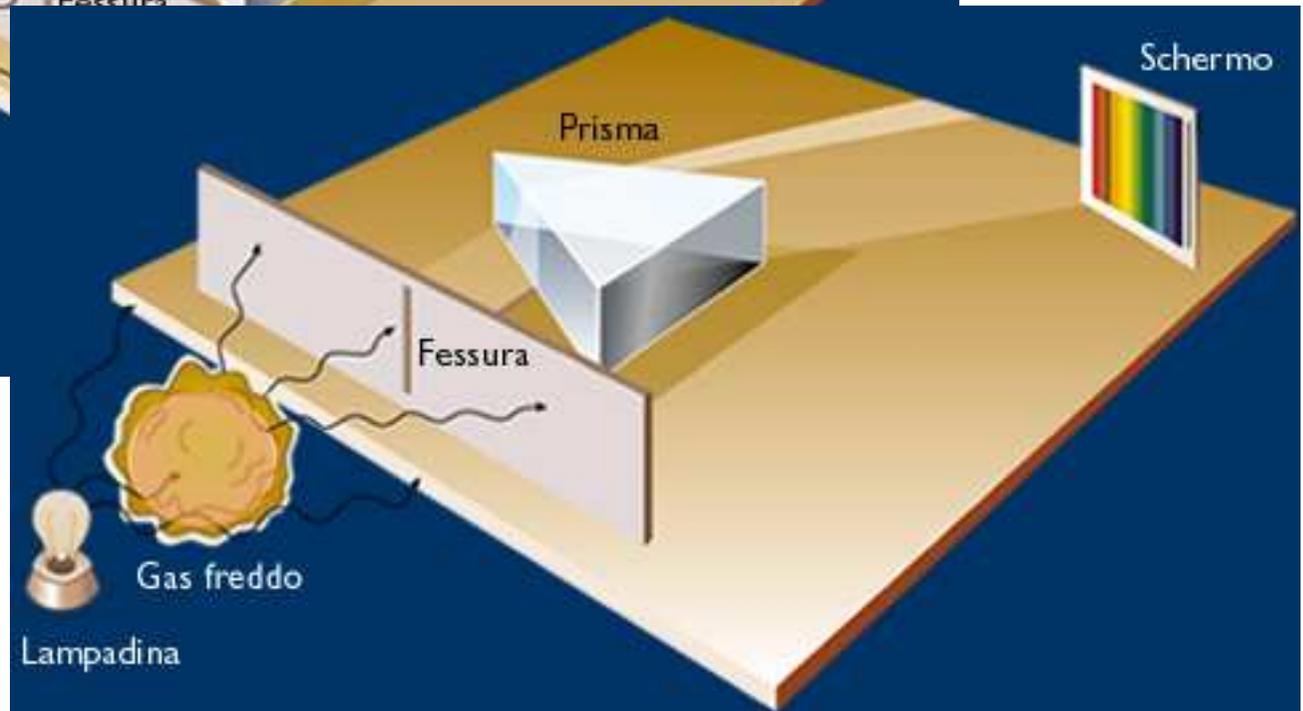
Le righe spettrali

Lo spettro luminoso



Spettro di emissione

Spettro di assorbimento



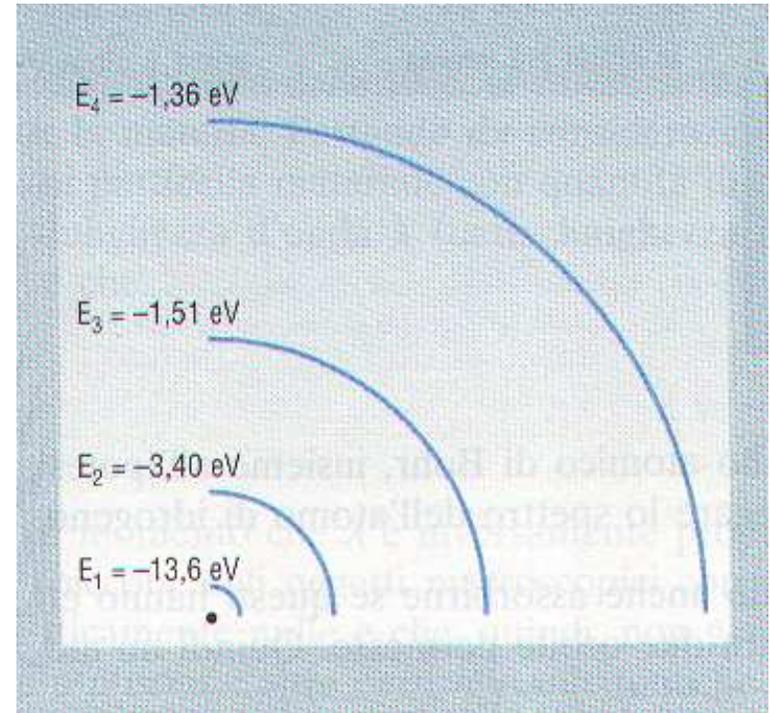
Spettro atomico

Un atomo è costituito da un nucleo centrale e da elettroni che si muovono su orbite ben determinate.

L'atomo di idrogeno è costituito da un protone e da un elettrone e i raggi delle orbite permesse sono dati dalla relazione:

$$r_n = 5,3 \cdot 10^{-11} n^2 \text{ m}$$

con $n = 1, 2, 3, \dots$



Ad ogni orbita corrisponde una ben determinata energia e per l'atomo di idrogeno si ha:

$$E_n = -13,6 \frac{1}{n^2} \text{ eV}$$

Spettro atomico

Nell'atomo di idrogeno l'elettrone si trova in genere nell'orbita corrispondente ad $n = 1$, (stato fondamentale) le altre sono dette eccitate.

Per far sì che un elettrone salti da un'orbita più bassa n_1 ad un'altra più alta n_2 si deve fornire un'energia $E = E(n_2) - E(n_1)$.

Dopo un tempo brevissimo (meno di 10^{-8} s) l'elettrone ritorna nell'orbita ad energia più bassa cedendo l'energia E sotto forma di un fotone di frequenza f data dalla relazione di Planck:

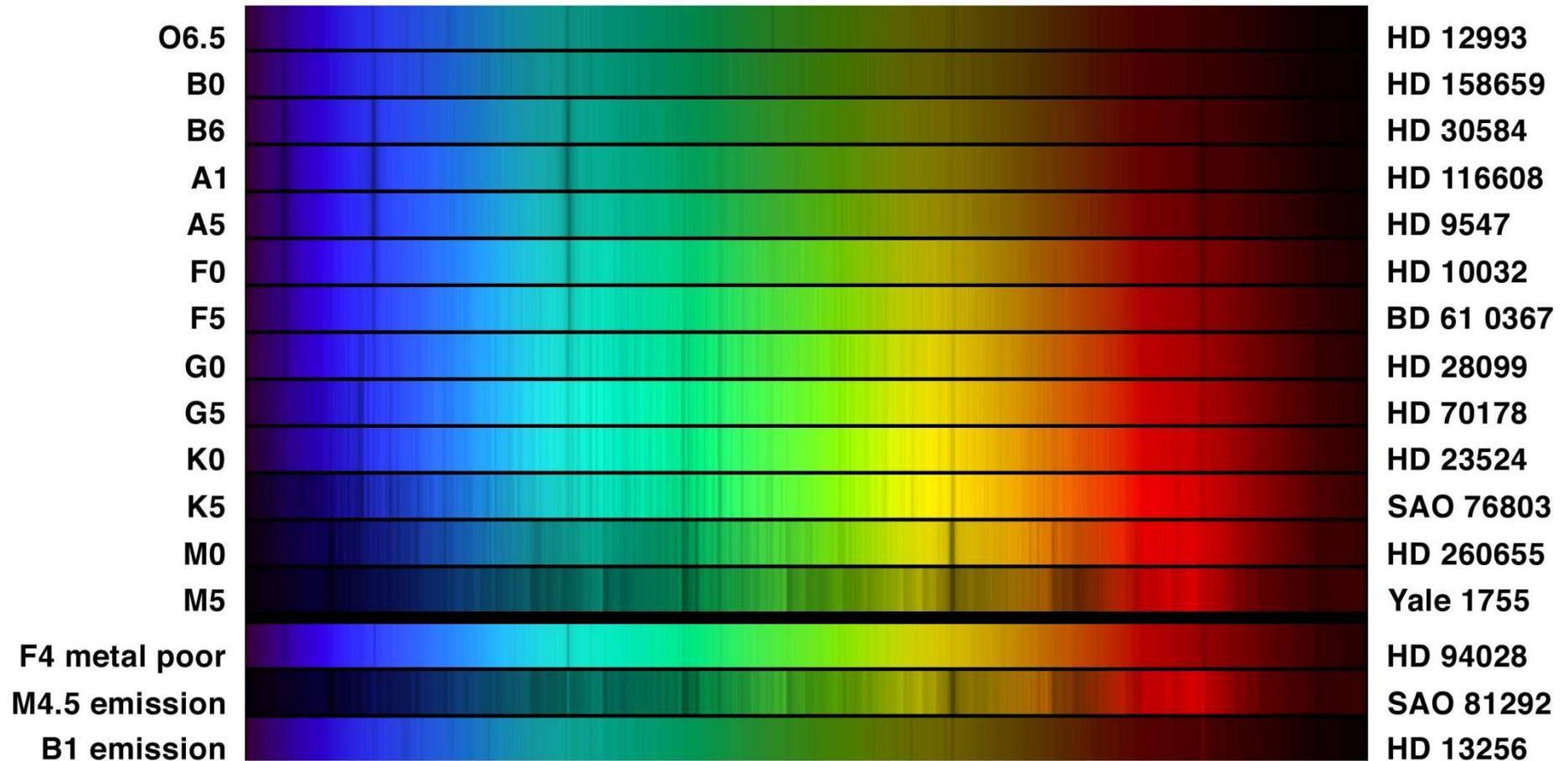
$$E = hf$$

$h = 6,83 \cdot 10^{-34}$ J·s è la costante di Planck.

Un gas freddo posto tra una sorgente di radiazione elettromagnetica e l'osservatore assorbirà fotoni di frequenze opportune producendo uno spettro di assorbimento.

Un gas caldo (eccitato) emetterà fotoni di frequenze opportune producendo uno spettro di emissione.

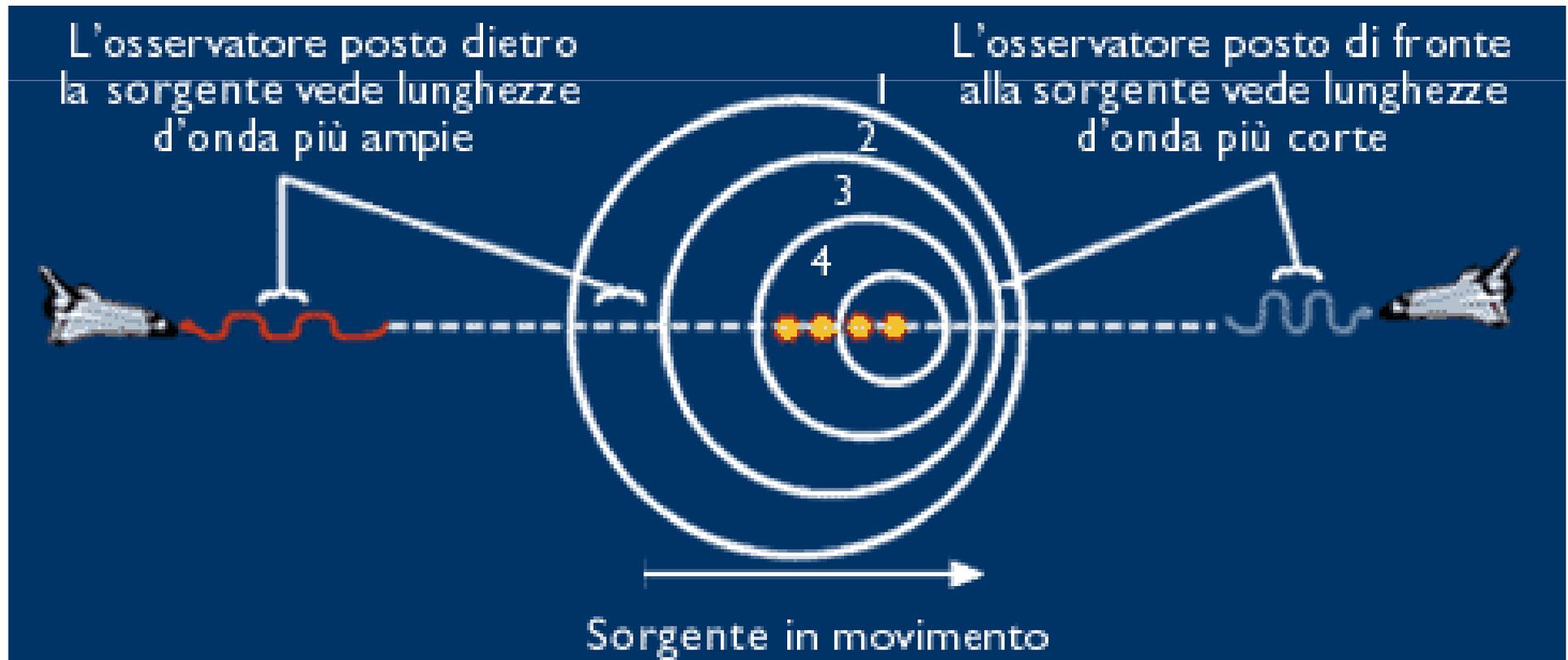
Lo spettro di alcune stelle



Effetto Doppler

Se una locomotiva ci passa accanto fischiando, mentre si avvicina udiamo un sibilo più acuto che diventa improvvisamente più grave quando la sorgente sonora comincia ad allontanarsi.

Un effetto analogo vale anche per le onde luminose che provengono da una sorgente in moto. Esse sono spostate verso il violetto (piccole lunghezze d'onda) se la sorgente si avvicina, verso il rosso (grandi lunghezze d'onda) se la sorgente si allontana.



Redshift e bluishift

Le righe spettrali degli oggetti celesti presentano generalmente uno spostamento verso la parte rossa (**redshift**) o verso la parte violetta dello spettro (**bluishift**).

Interpretando questo fenomeno come effetto Doppler, nel primo caso l'oggetto si allontana, nel secondo si avvicina; conoscendo lo spostamento delle righe spettrali è possibile misurarne la velocità radiale (cioè la componente lungo la congiungente osservatore-oggetto).

La teoria della relatività fornisce le formule pertinenti; se la luce di lunghezza d'onda λ viene inviata da una sorgente che si muove alla velocità v verso un osservatore fermo, questi misura una lunghezza d'onda:

$$\lambda' = \lambda \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$$

Il redshift

Definiamo **redshift** la quantità:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

Si ha:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1$$

Quindi la velocità della sorgente è data da:

$$v = \frac{z^2 + 2z}{z^2 + 2z + 2} \cdot c$$

Se $v \ll c$ allora le relazioni possono essere semplificate:

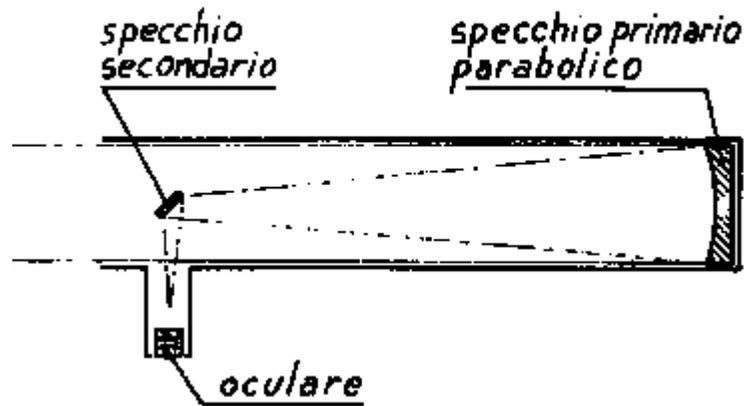
$$\lambda' = \lambda \left(1 + \frac{v}{c} \right) \quad \text{da cui} \quad z = \frac{v}{c} \quad \text{quindi} \quad v = c \cdot z$$

A photograph of an astronaut in a white spacesuit floating in the interior of a space station. The astronaut is positioned in the center, looking towards the camera. The background shows the complex structure of the station, including various panels, cables, and equipment. The lighting is bright, highlighting the metallic surfaces and the astronaut's suit. The overall scene conveys a sense of being in a high-tech, futuristic environment.

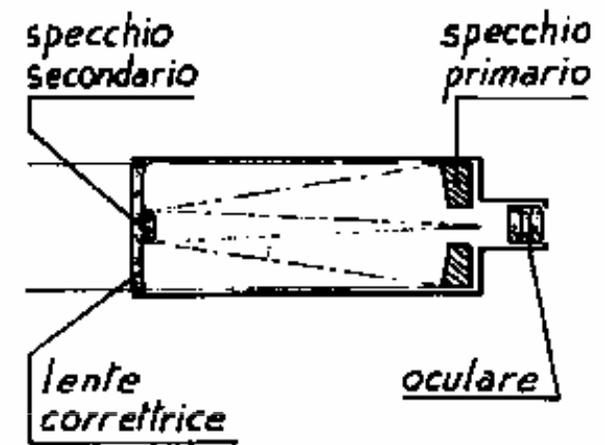
I LUOGHI E GLI STRUMENTI



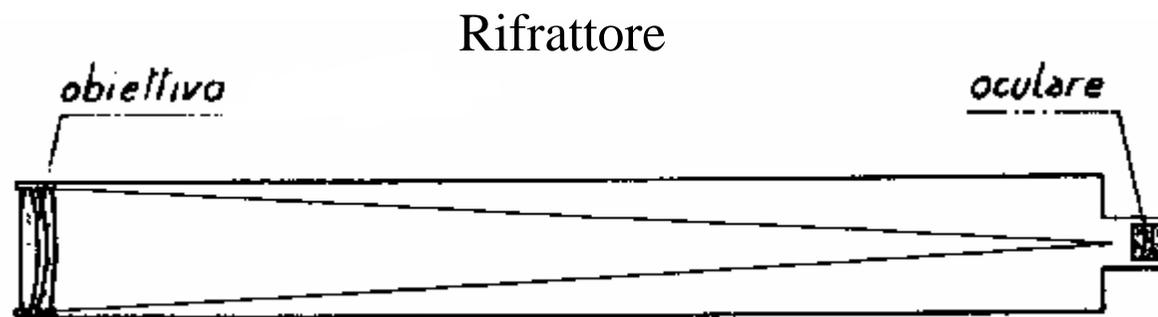
Il telescopio



Riflettore Newton



Schmidt-Cassegrain



Rifrattore

Il telescopio

In un telescopio distinguiamo alcuni elementi.

Il principale è l'*obiettivo*: la lente o lo specchio a seconda se siamo in presenza di un rifrattore o di un riflettore

I parametri fisici principali dell'obiettivo sono il *diametro* D , e la *lunghezza focale* F .

Il rapporto F/D viene detto *rapporto di apertura* e si indica con $f/$.

Capacità di raccogliere luce

La capacità di raccogliere luce dipende dal diametro dell'obiettivo.

La pupilla umana quando è al massimo della dilatazione è di 7-8 mm.

Il guadagno G rispetto all'occhio è dato dal rapporto tra l'area dell'obiettivo e l'area della pupilla; se D è il diametro dell'obiettivo (in cm) e 0,7 il diametro della pupilla (in cm) si ha:

$$G = \left(\frac{D}{0,7} \right)^2$$

Dal diametro dell'obiettivo dipende anche le *magnitudini limite teorica*.

$$m_{\text{limite}} = 6,8 + 5 \cdot \log D$$

Diametro obiettivo (cm)	Guadagno	Magnitudine limite
6	73	10,7
8	131	11,3
11,4	265	12,1
15	459	12,7
20	816	13,3
25	1.276	13,8
40	3.265	14,8
100	20.408	16,8
500	510.204	20,3
600	734.694	20,7

Capacità di raccogliere luce

La luce che colpisce la superficie di una lente non entra tutta nel vetro, una parte viene riflessa.

E' possibile ridurre tale quantità trattando le superfici con strati antiriflessi.

Si stima che un obiettivo a due lenti non trattato trasmette all'oculare circa il 92% della luce.

Per gli specchi c'è una perdita dovuta al fatto che l'alluminatura riflette solo una parte della luce che riceve.

Ovviamente ogni superficie e ogni lente riducono la luce utilizzabile.

In un telescopio newtoniano classico, con due specchi, all'oculare arriva il 72% della luce

Il telescopio

Un altro elemento fondamentale è l'*oculare* che in sostanza è una lente di ingrandimento.

Il parametro principale di un oculare è la sua *lunghezza focale* che insieme alla lunghezza focale del telescopio determina l'*ingrandimento I*.

$$I = \frac{F_{\text{obiettivo}}}{F_{\text{oculare}}}$$

All'aumentare dell'ingrandimento la luminosità dell'immagine diminuisce. Una regola empirica generale dice che l'ingrandimento massimo è 20 volte il diametro dell'obiettivo espresso in cm.

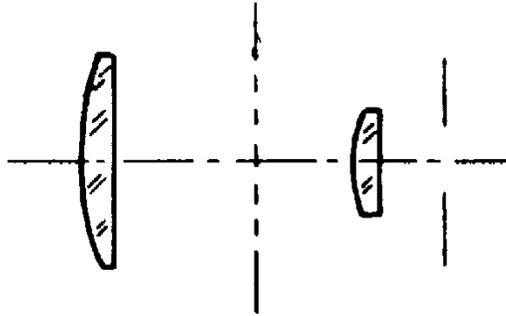
In maniera un po' più precisa si ha:

per i rifrattori $70\sqrt{D-1}$

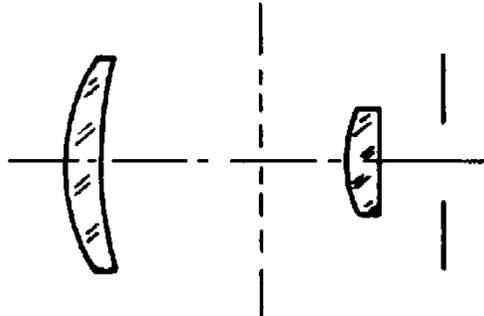
per i riflettori $100\sqrt{D-3}$

D è espresso in centimetri

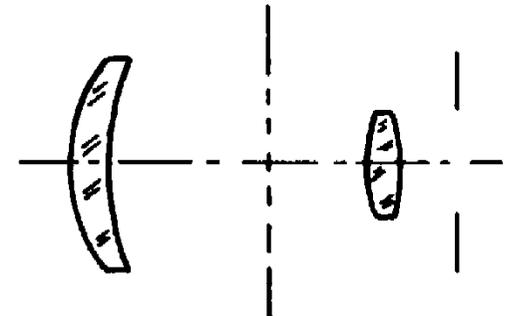
Gli oculari



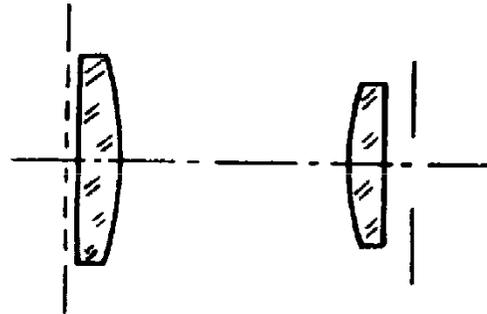
Huygens (H) ~35°



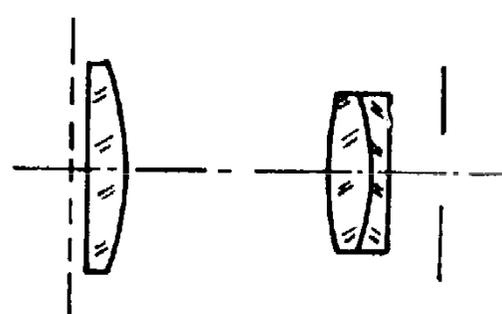
Huygens-Mittenzwey (HM) ~45°



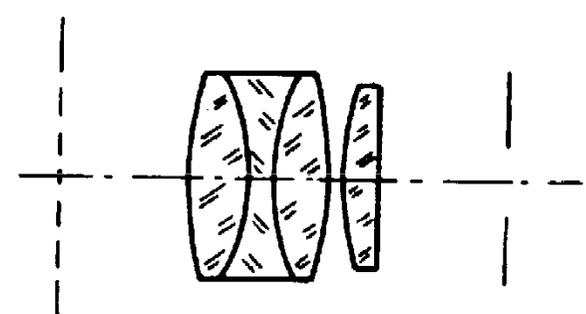
Huygens-Airy ~45°



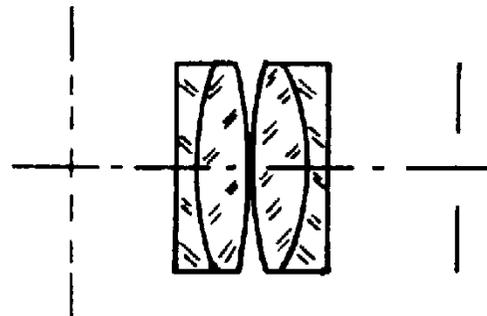
Ramsden (R) ~35°



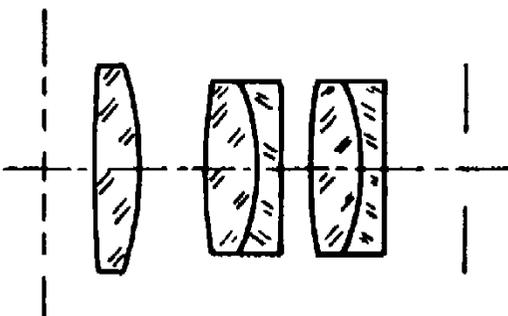
Kellner (K) ~40°/45°



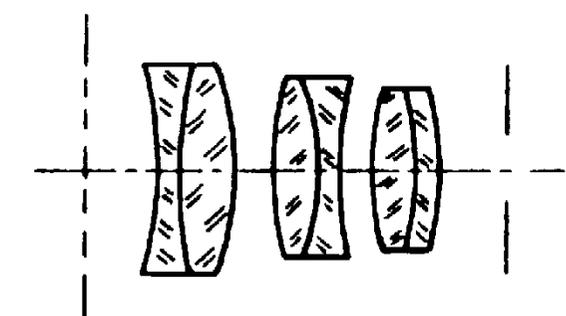
Ortoscopico di Abbe (Or) ~40°



Ortoscopico di Plössl (Or) ~50°

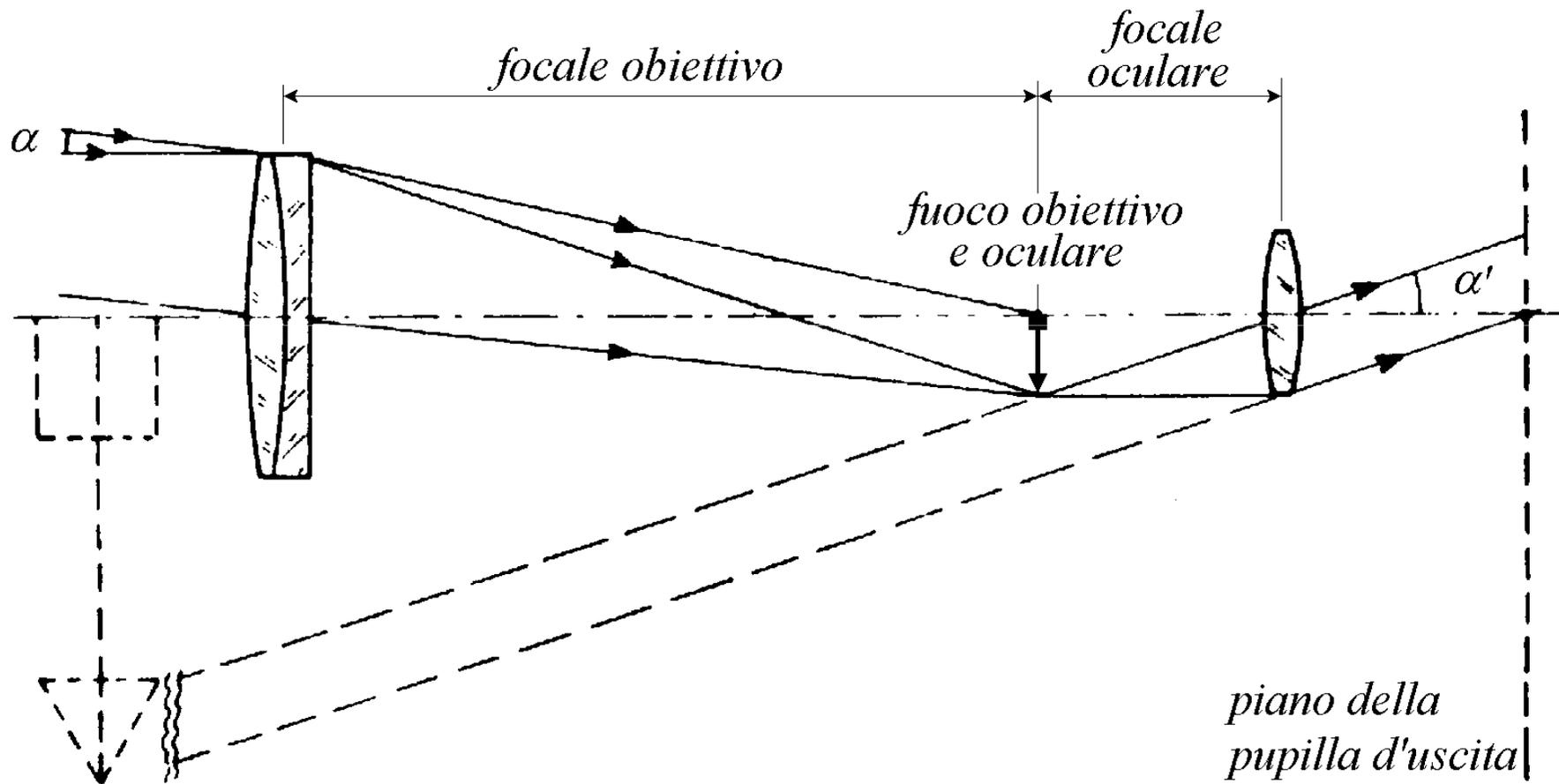


Erfle a 5 lenti (Er) ~65°

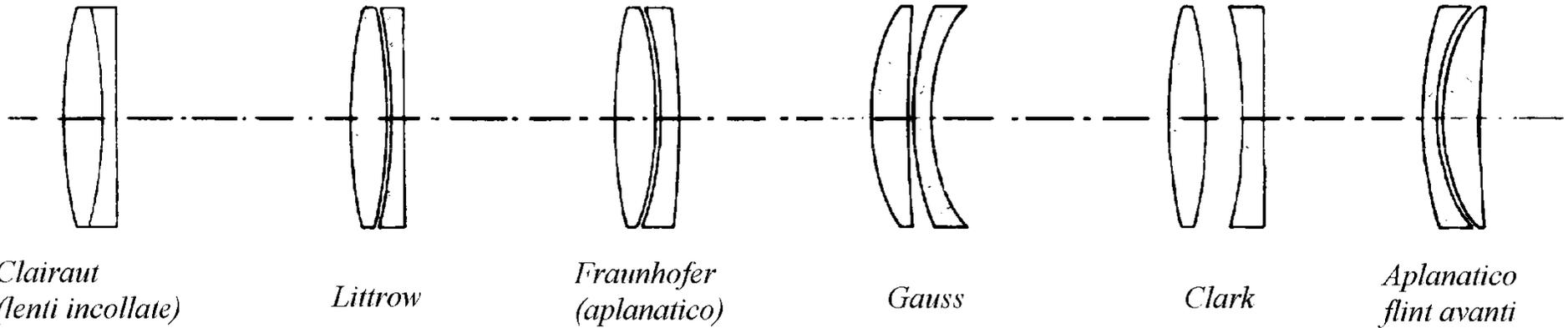


Erfle a 6 lenti (Er) ~70°

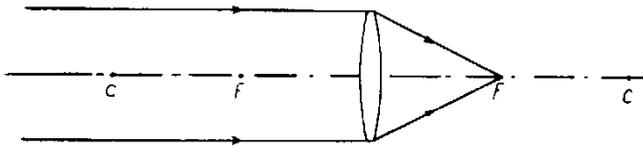
Il telescopio



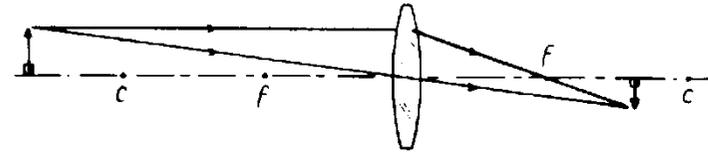
Doppietti acromatici



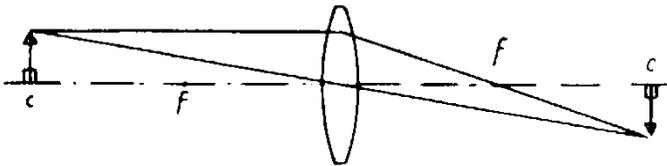
Formazione delle immagini nelle lenti sottili



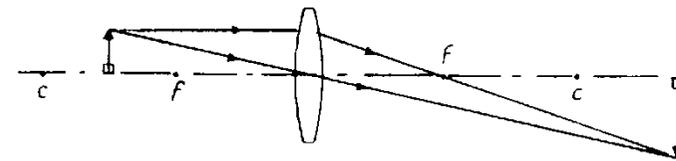
Oggetto all'infinito: l'immagine è rimpicciolita (infinitamente piccola), rovesciata e reale, si forma nel fuoco (caso di una stella).



Oggetto tra l'infinito e il centro di curvatura: l'immagine è rimpicciolita, rovesciata e reale, si forma tra il centro di curvatura e il fuoco.

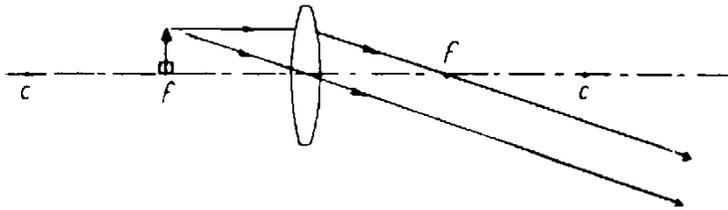


Oggetto nel centro di curvatura: l'immagine è delle stesse dimensioni dell'oggetto, rovesciata e reale, si forma nell'altro centro di curvatura.

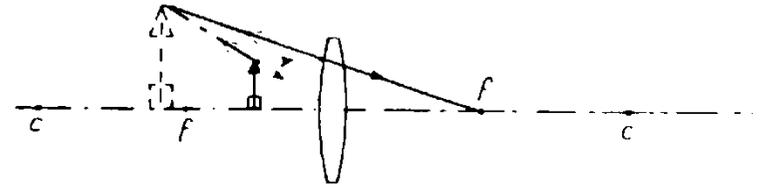


Oggetto tra il centro di curvatura e il fuoco: l'immagine è ingrandita, rovesciata e reale, si forma tra il centro di curvatura e l'infinito.

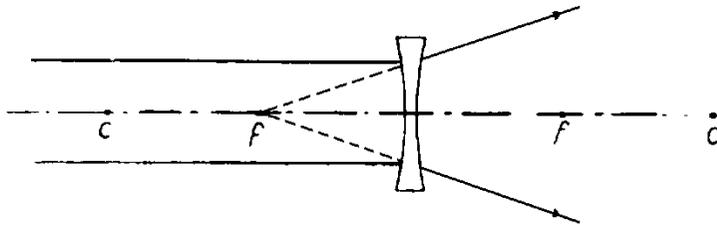
Formazione delle immagini nelle lenti sottili



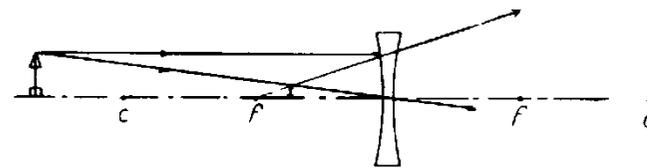
Oggetto nel fuoco: l'immagine è infinitamente grande, rovesciata e reale, si forma all'infinito.



Oggetto tra il fuoco e la lente: l'immagine è ingrandita, diritta e virtuale, si forma tra il centro e il fuoco dalla stessa parte dell'oggetto



Oggetto all'infinito: l'immagine è rimpicciolita (infinitamente piccola), diritta e virtuale, si forma nel fuoco.

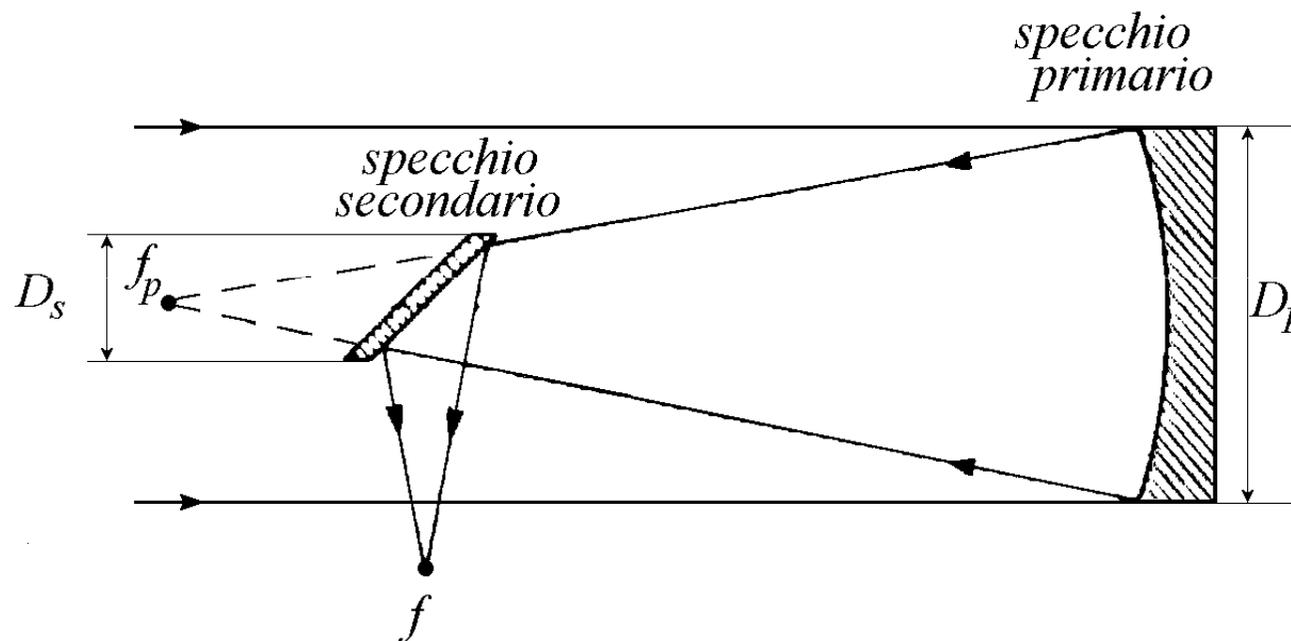


Qualunque sia la posizione dell'oggetto tra l'infinito e la lente: l'immagine è rimpicciolita, diritta virtuale, si forma tra il fuoco e la lente. Più l'oggetto è vicino alla lente più l'immagine è grande.

Riflettori

I telescopi riflettori sono quei telescopi che hanno come obiettivo uno specchio.

Schema di telescopio Newton



f = fuoco
 f_p = fuoco originale o primario
 D_s = Diametro secondario
 D_p = Diametro primario

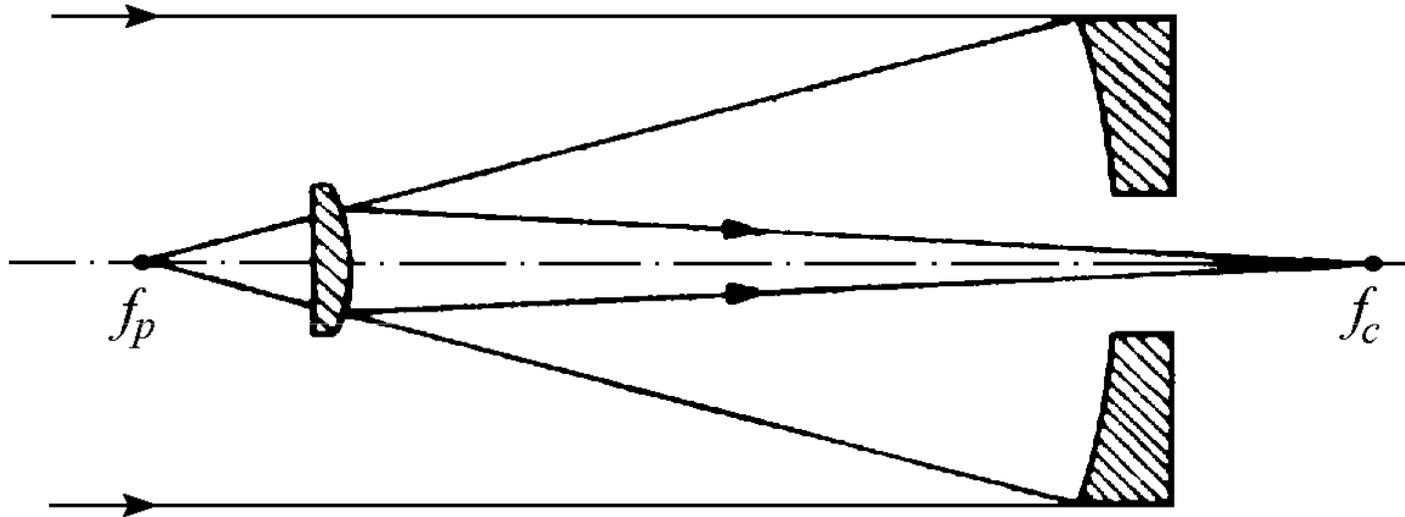
Lo specchio primario è parabolico, il secondario piano disposto a 45° .

Il rapporto $\frac{D_s}{D_p}$ si chiama **fattore di otturazione**.

Deve essere $0,20 \leq \frac{D_s}{D_p} \leq 0,35$

Riflettori

Schema di configurazione Cassegrain



f_p = fuoco primario

f_c = fuoco Cassegrain

Lo specchio primario è parabolico, il secondario iperbolico.

Lunga focale.

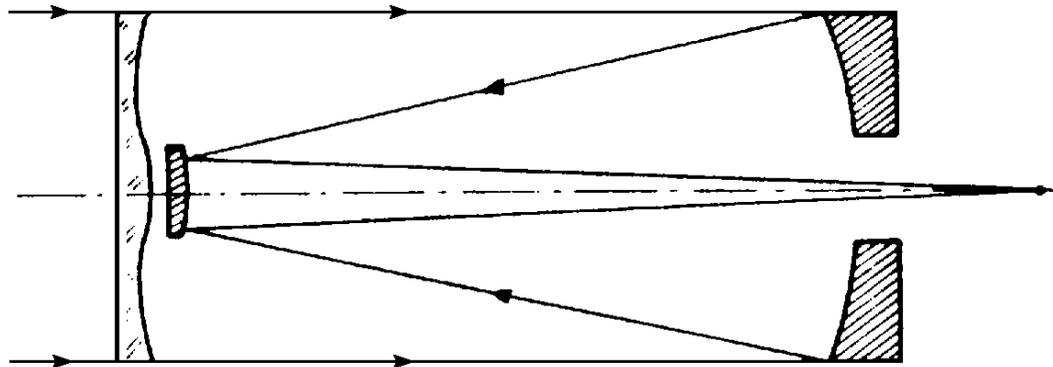
Primario molto aperto ($f/3 - f/5$).

Catadiottrici

I telescopi *catadiottrici* sono di tipo misto.

Sono presenti uno specchio primario e uno secondario (tipici della configurazione newtoniana, ma la luce prima di arrivare al primario passa attraverso una *lastra correttiva*).

Schema *Schmidt-Cassegrain*



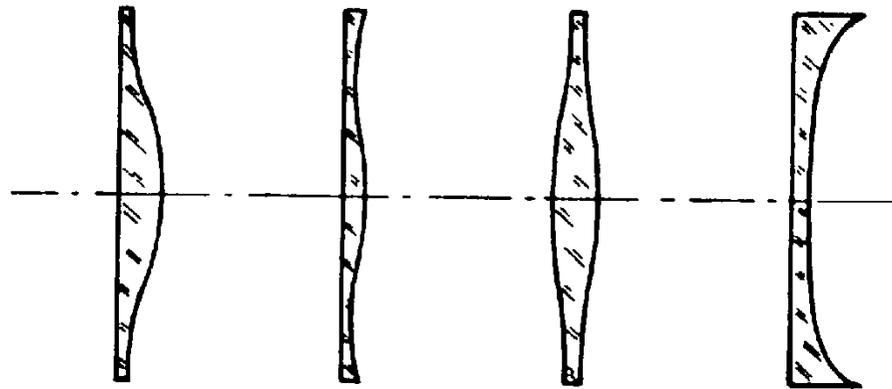
Catadiottici

Lo specchio primario è sferico e molto aperto ($\sim f/2,5$), la lastra correttiva asferica è posta nel fuoco e il secondario è convesso.

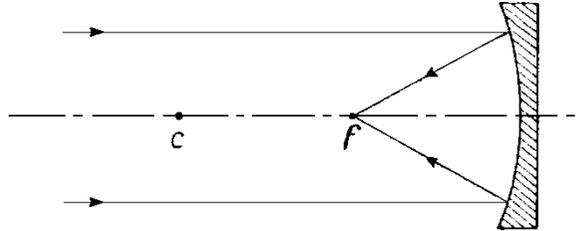
Sono molto compatti.

Forme tipiche di lastre correttive per telescopi Schmidt

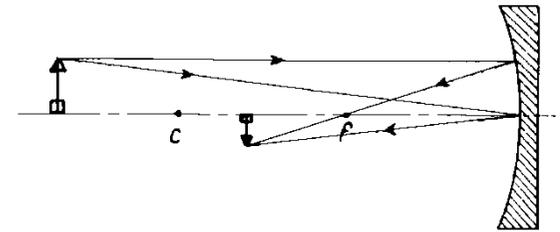
(curvature esagerate)



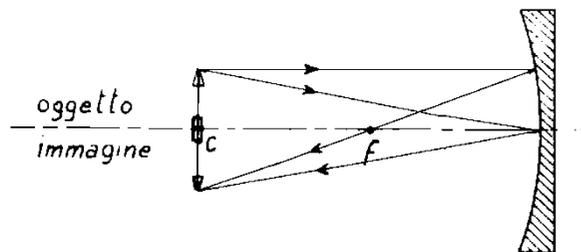
Formazione delle immagini negli specchi sferici



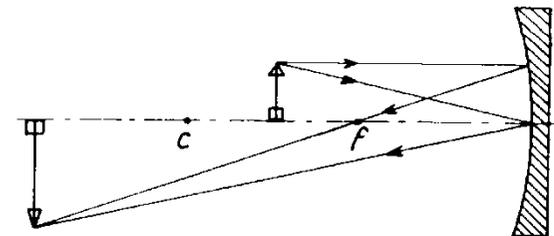
Oggetto all'infinito: l'immagine è rimpicciolita (infinitamente piccola), rovesciata e reale, si forma nel fuoco (caso di una stella).



Oggetto tra l'infinito e il centro di curvatura: l'immagine è rimpicciolita, rovesciata e reale, si forma tra il centro di curvatura e il fuoco.

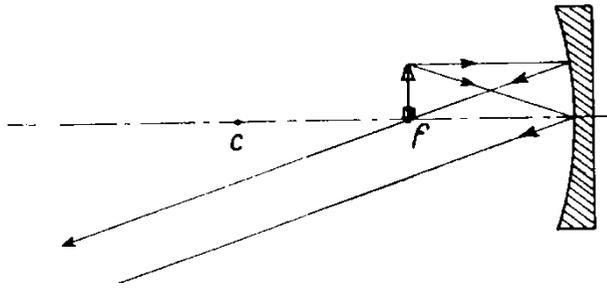


Oggetto nel centro di curvatura: l'immagine è delle stesse dimensioni, rovesciata e reale, si forma nel centro di curvatura.

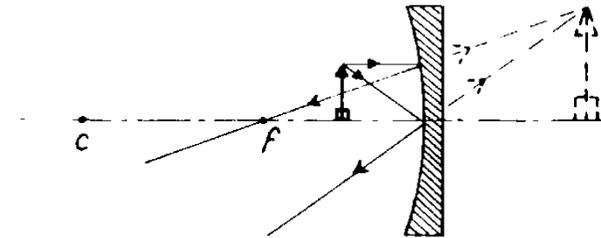


Oggetto tra il centro di curvatura e il fuoco: l'immagine è ingrandita, rovesciata e reale, si forma tra il centro di curvatura e l'infinito.

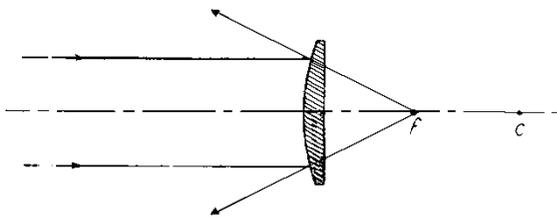
Formazione delle immagini negli specchi sferici



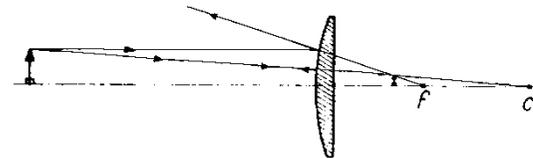
Oggetto nel fuoco: l'immagine è infinitamente grande, rovesciata e reale, si forma all'infinito.



Oggetto tra il fuoco e lo specchio: l'immagine è ingrandita, diritta e virtuale, si forma al di là dello specchio.



Oggetto all'infinito: l'immagine è rimpicciolita (infinitamente piccola), diritta e virtuale, si forma nel fuoco.

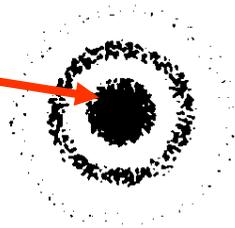


Oggetto tra l'infinito e lo specchio: l'immagine è rimpicciolita, diritta e virtuale, si forma tra lo specchio e il fuoco.

Potere risolutivo

A causa della diffrazione causata dal bordo dell'obiettivo l'immagine di una sorgente puntiforme produce un disco o figura di diffrazione.

Disco di Airy

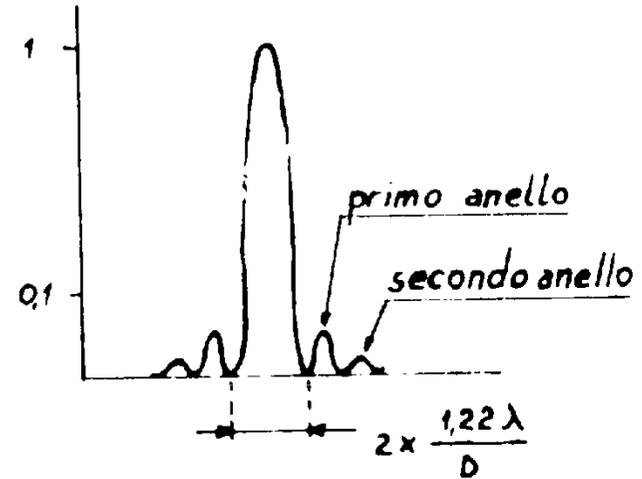


Si dimostra che un oggetto puntiforme forma una immagine di raggio angolare r :

$$r'' = \frac{1,22\lambda}{D} \cdot 206265$$

dove λ è la lunghezza d'onda della radiazione considerata (r è espresso in secondi d'arco). Per λ si assume generalmente la lunghezza d'onda alla quale l'occhio è più sensibile ($\lambda = 560$ nm), per cui, esprimendo D in cm, si ha: $r'' = \frac{14}{D}$

Il raggio lineare del disco è uguale a: $r_{\text{lineare}} = 1,22\lambda \frac{F}{D}$

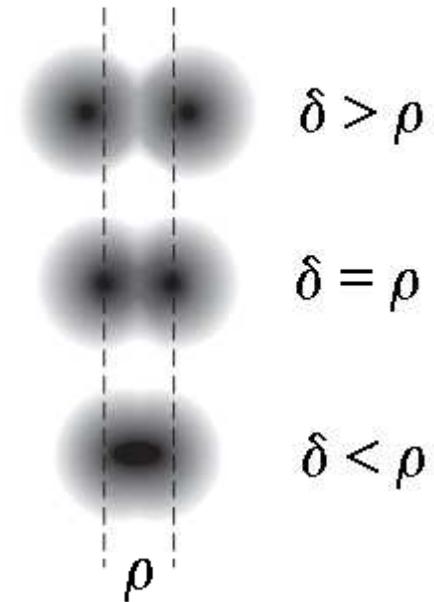


Potere risolutivo

La capacità di distinguere piccoli angoli o di separare stelle doppie strette, si chiama **potere risolutivo PR** e vale:

$$\rho = \frac{12,2}{D}$$

con D in cm.



Per gli obiettivi ostruiti la formula per il potere risolutivo varia al variare del **fattore di otturazione** (diametro ostruzione/diametro obiettivo).

Fattore di otturazione	Formula potere risolutivo	Fattore di otturazione	Formula potere risolutivo
0,0	12,0/D	0,3	11,0/D
0,1	11,8/D	0,4	10,4/D
0,2	11,5/D	0,5	9,8/D

Le aberrazioni

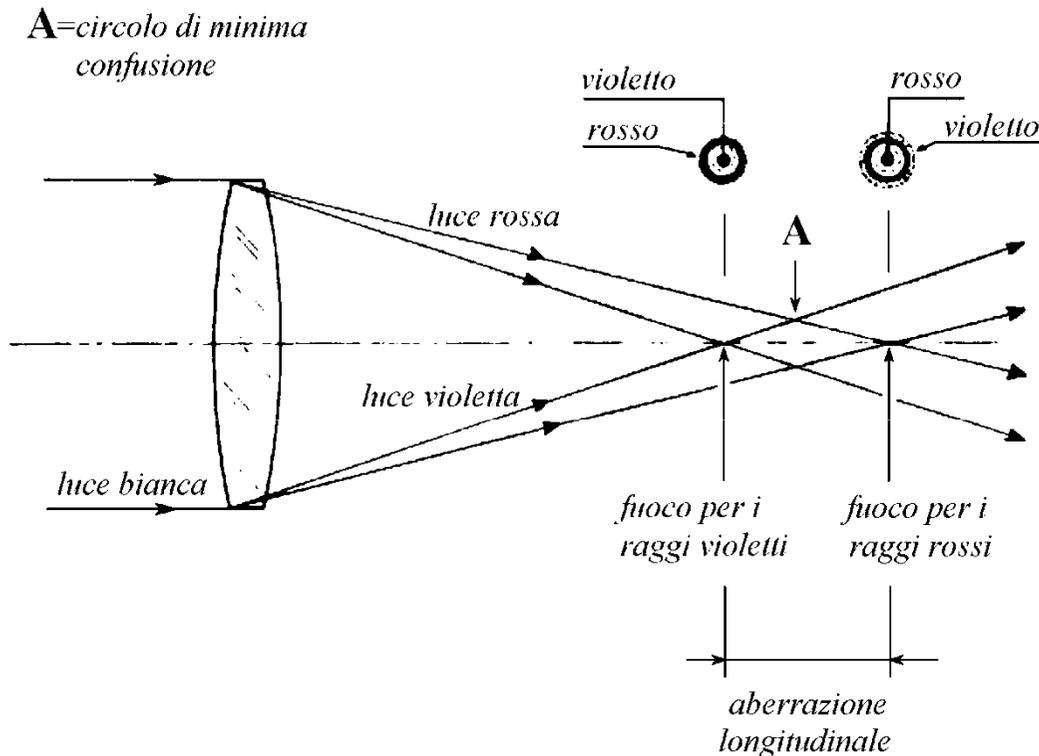
Sono delle "caratteristiche indesiderate" insite nella natura delle lenti e degli specchi.

A seconda che si presentano sull'asse ottico o al di fuori di esso si dividono in *assiali* ed *extrassiali*.

Aberrazioni assiali:

cromatiche
di sfericità

Aberrazione cromatica



La distanza focale di una lente è legata all'indice di rifrazione, questo varia al variare della lunghezza d'onda quindi la distanza focale dipende dalla lunghezza d'onda.

La radiazione violetta, più deviata, si focalizza più vicino alla lente, quella rossa, meno deviata, converge più lontano dalla lente.

Se la sorgente luminosa non è monocromatica lungo l'asse ottico si hanno fuochi diversi per i diversi colori.

L'aberrazione cromatica non è nociva se la lunghezza focale F della lente è almeno uguale a:

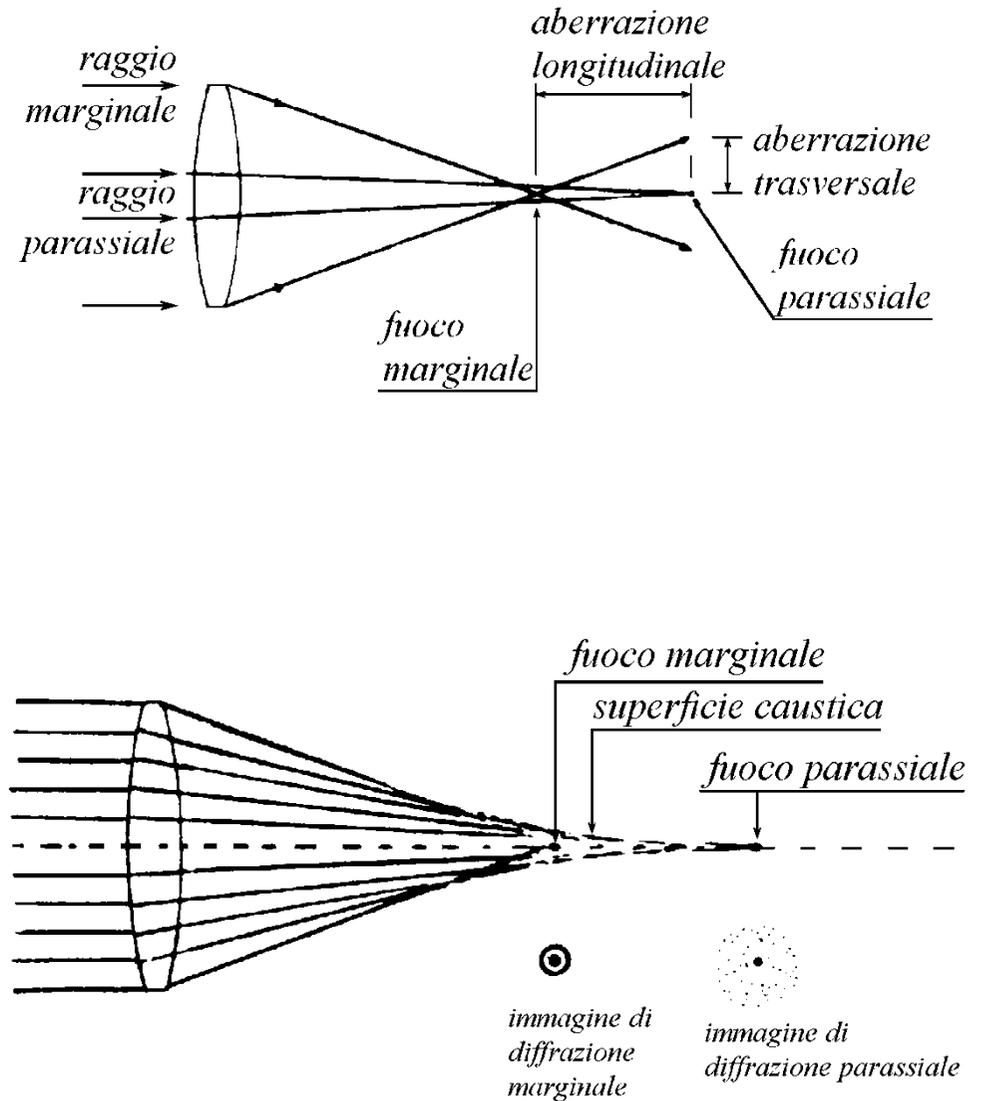
$$F = 18,6D^2$$

dove D è il diametro. Con questa formula anche diametri modesti impongono lunghezza enormi (per un 60 mm necessiterebbero 6,7 m).

Il modo più semplice per ridurre notevolmente l'aberrazione cromatica è di usare due lenti (una convergente di vetro crown, l'altra divergente di vetro flint).

Aberrazione sferica

I raggi paralleli che incidono su una lente o su uno specchio sferico vicino all'asse ottico vengono focalizzati più lontano di quelli che incontrano la lente o lo specchio presso il bordo. Questo fa sì che si vengono a formare più piani focali in ognuno dei quali si sovrappongono, più o meno sfocate, le immagini degli altri. L'immagine globale che ne deriva, compresa tra il fuoco marginale e il fuoco parassiale, prende il nome di caustica.



Aberrazione sferica

Aberrazioni extrassiali:

Coma

Astigmatismo

Curvatura di campo

Distorsione

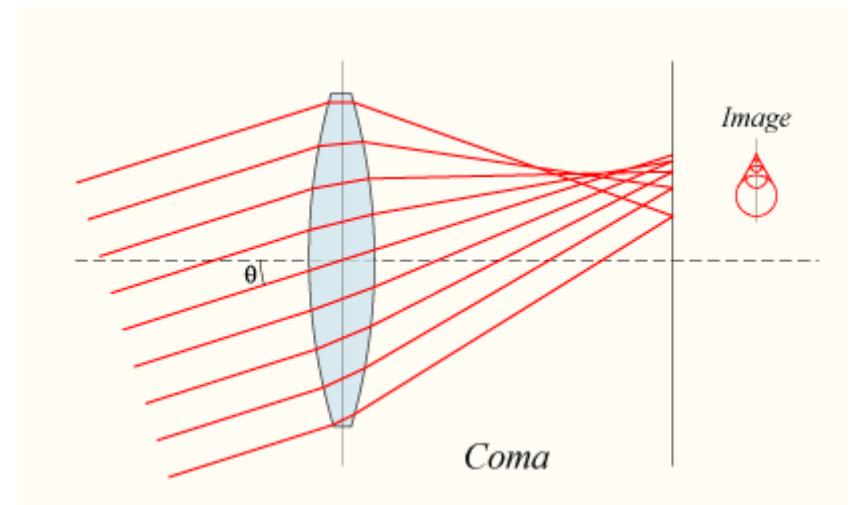
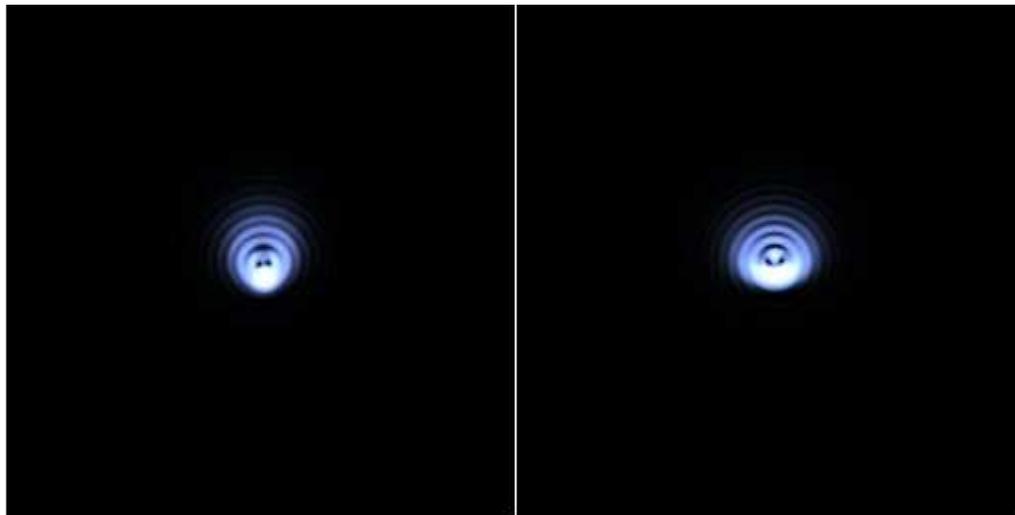
Coma

E' una aberrazione data dal fatto che i raggi provenienti dalle zone extra-assiali si focalizzano su piani diversi.

I raggi passanti per le zone distanti dal centro vengono focalizzati dando origine ad anelli luminosi provenienti dalle diverse zone di apertura del sistema ottico. La sovrapposizione di questi anelli luminosi crea un'immagine stellare a forma di cometa, una *v* con la punta rivolta verso l'interno o l'esterno a seconda che la coma sia positiva o negativa.

È una caratteristica di alcuni sistemi ottici molto aperti come i Newton, per ovviarne si può diaframmare l'obiettivo o utilizzare un ***correttore di coma***.

Se tale difetto è presente però nelle zone centrali di qualunque strumento indica una scollimazione.



Astigmatismo

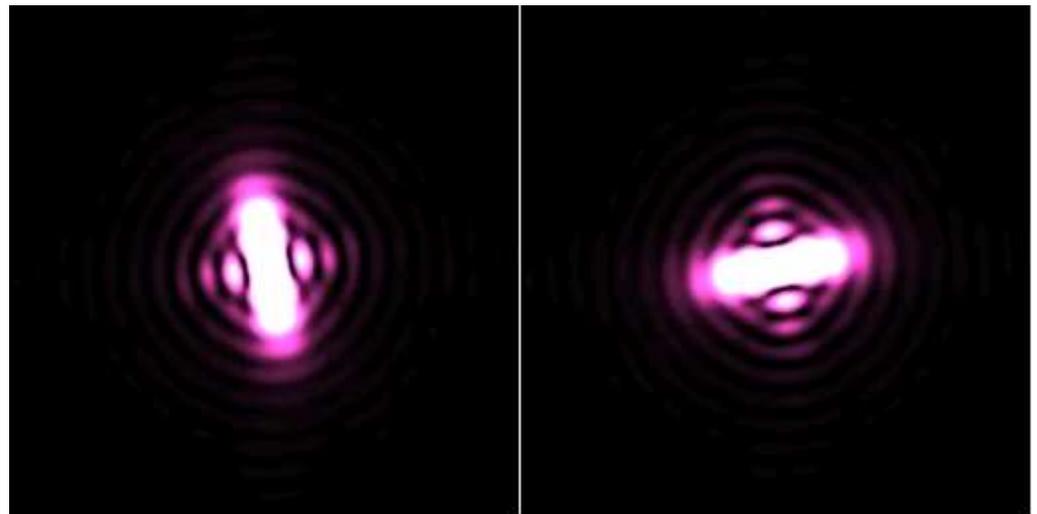
Questa aberrazione extra-assiale può verificarsi anche in asse quando siamo di fronte ad un obiettivo lavorato male.

Trasforma una sorgente puntiforme in due linee sghembe giacenti su piani a 90° ; l'immagine che ne trae l'occhio è di una crocetta. È dovuto alla diversa distanza a cui focalizzano diametri perpendicolari dell'obiettivo.

Per la causa sopra descritta attraversando la posizione di fuoco dall'intra all'extra focale avremo un cambio di asse.

Può esservi astigmatismo anche quando le ottiche risultano tensionate o pesantemente scollimate.

E' tollerato nell'osservazione visuale, meno in quella fotografica.



Curvatura di campo

Uno strumento ottico è affetto da curvatura di campo quando la sua superficie focale non è prettamente piana ma leggermente emisferica.

Questo fenomeno è intrinseco con la maggioranza degli schemi ottici dei telescopi e obiettivi in genere; per ovviare a questo inconveniente il progettista dell'ottica deve provvedere – come avviene nei comuni obiettivi fotografici – all'inserimento di un gruppo *spianatore di campo* lungo il cammino ottico.

La curvatura di campo è avvertibile solo in fotografia e si presenta mostrando le immagini stellari sfuocate in prossimità del bordo nonostante che le stelle al centro del campo siano perfettamente a fuoco.

Focheggiando a loro volta le immagini al bordo, andranno sfuocandosi le immagini al centro del campo.

Curvatura di campo



Schema semplice di
rifrattore con campo
curvo



Schema di rifrattore
con spianatore di
campo e campo
piano

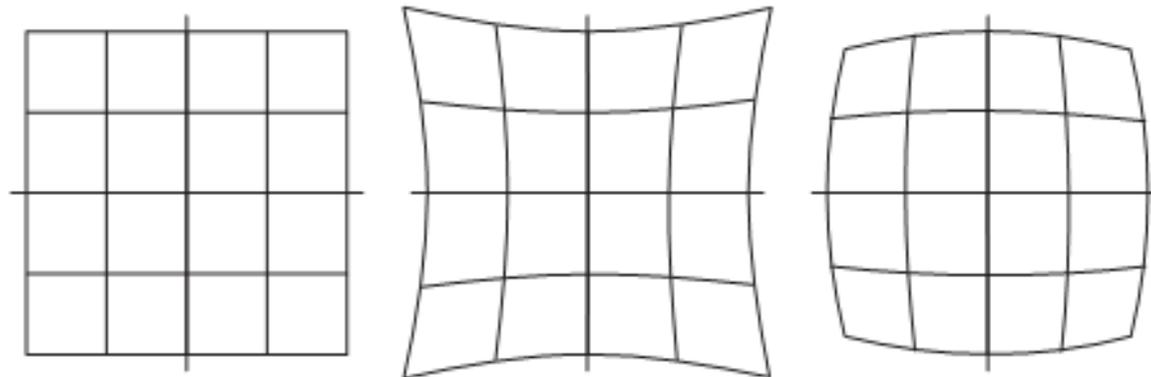
Distorsione

Fa assumere a linee diritte non passanti per l'asse ottico l'aspetto di curve.

È imputabile al fatto che l'ingrandimento non è esattamente lo stesso per i raggi che passano a diverse distanze dall'asse ottico.

Si può evitare facendo uso di due doppietti simmetrici, un sistema cioè di 4 lenti.

Un sistema esente da tale aberrazione si dice *ortoscopico*.



Aberrazione sferica

La regola di Rayleigh del "quarto di lunghezza d'onda" asserisce che l'aberrazione comincia a compromettere seriamente la figura di diffrazione quando la superficie d'onda devia dal percorso ideale di circa $1/4$ di λ (per λ si può prendere 560 nm cioè la luce giallo-verde).

Aumentando la lunghezza focale della lente o dello specchio l'aberrazione diminuisce. Per le lenti non è la soluzione migliore in quanto è sempre presente la ben più nociva aberrazione cromatica.

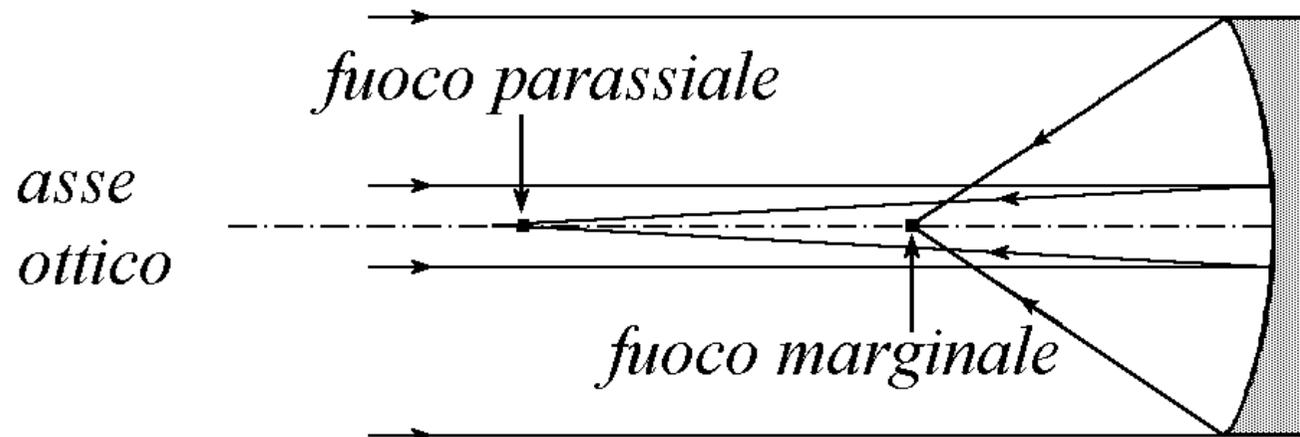
Per gli specchi sferici vale la seguente formula:

$$F = \sqrt[3]{35D^4}$$

dove F è la focale (cm) e D è il diametro.

Per diametri di 9-13 cm uno specchio sferico dà luogo ad uno strumento interessante sotto il profilo prestazioni/costi.

La soluzione migliore è però uno specchio parabolico.



Estinzione, scintillazione, seeing

Per comprendere questo effetto di sparpagliamento della luce dobbiamo pensare che un rivelatore, come un telescopio, ottiene l'immagine di un oggetto attraverso esposizioni più o meno lunghe, che gli permettono di accumulare la luce proveniente dalla sorgente.

Durante la posa le condizioni degli strati del cono di atmosfera che si trova tra la sorgente puntiforme e la superficie del rivelatore cambiano di frequente. Tali variazioni influiscono sulla traiettoria dei raggi di luce e quindi sui punti della superficie del rivelatore dove i raggi incideranno.

Ai fini pratici, la turbolenza atmosferica ha l'effetto di spostare rapidamente (dell'ordine dei millisecondi) l'immagine della sorgente sul rivelatore.

Quanto l'immagine venga spostata dipende dalla turbolenza: più gli strati di atmosfera saranno turbolenti maggiore sarà lo spostamento.

Estinzione, scintillazione, seeing



L'immagine mostra cosa si vede con un telescopio quando si osserva una stella a grandi ingrandimenti (immagine in negativo).

Il telescopio impiegato ha un diametro di $7r_0$.

Da notare come la stella paia frantumarsi in molti punti (noti come speckle [macchioline]), è un effetto della nostra atmosfera.

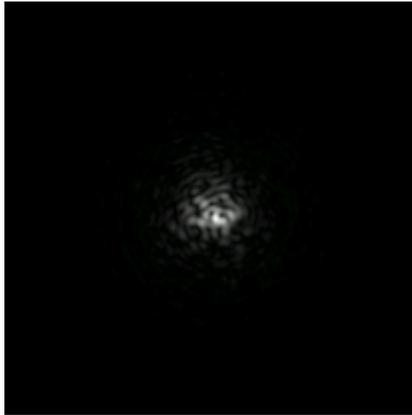
Le varie tecniche appartenenti allo speckle imaging cercano di ricreare l'immagine dell'oggetto così come era prima di essere disturbata dall'atmosfera.

Estinzione, scintillazione, seeing

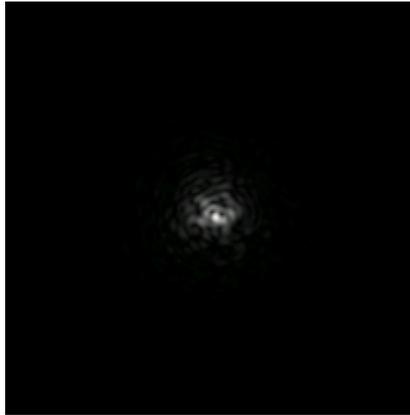
Scala di Antoniadi:

SEEING I	La visibilità è perfetta, l'immagine è stabile e non trema.
SEEING II	Buona visibilità, i tremolii si alternano con momenti di calma.
SEEING III	Visione mediocre, si percepiscono lunghi tremolii dell'immagine.
SEEING IV	Visibilità scarsa, l'immagine trema a lungo.
SEEING V	Visibilità pessima, le vibrazioni sono continue e non cessano.

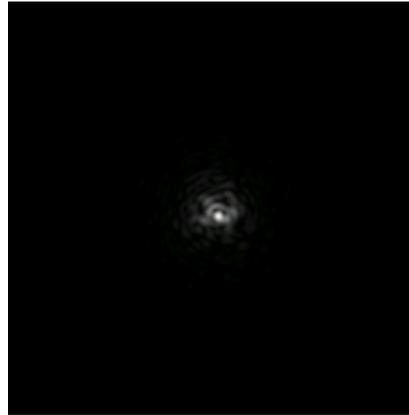
Scala Pickering



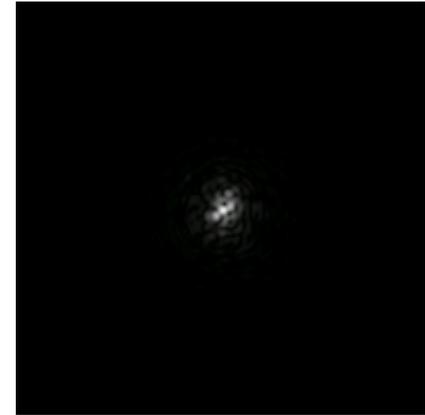
1



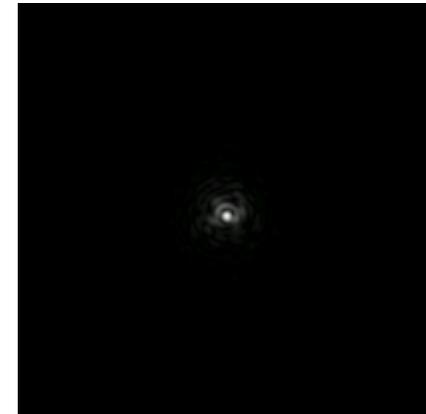
2



3



4



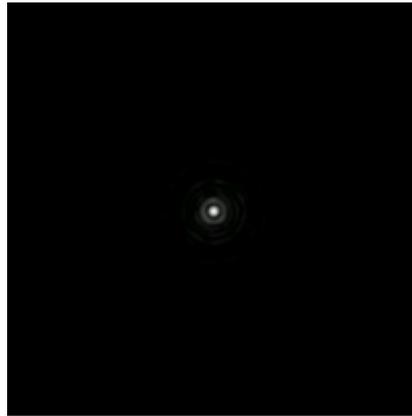
5

1	Immagine pessima: l'immagine della stella è 2 volte il diametro del 3° anello di diffrazione.
2	Immagine molto cattiva: L'immagine della stella occasionalmente è 2 volte il diametro del terzo anello.
3	Immagine cattiva: l'immagine della stella ha circa lo stesso diametro del terzo anello di diffrazione; è più luminosa al centro
4	Immagine appena sufficiente: disco di Airy spesso visibile archi degli anelli di diffrazione qualche volta visibili
5	Immagine discreta: visibile il disco di Airy e gli archi degli anelli con una certa continuità.

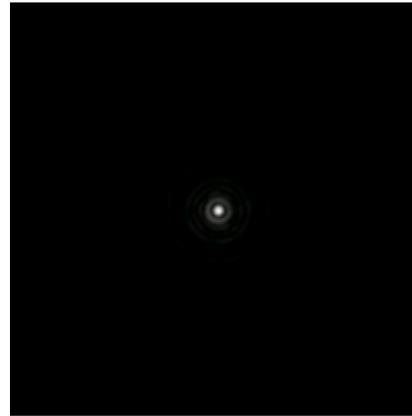
Scala Pickering



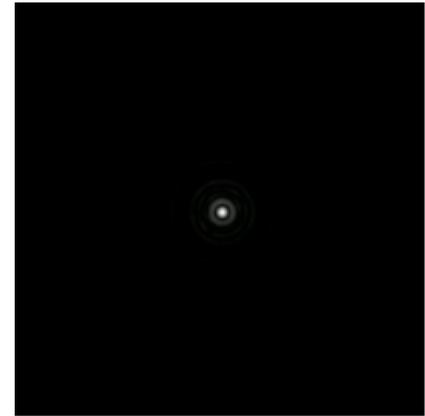
6



7

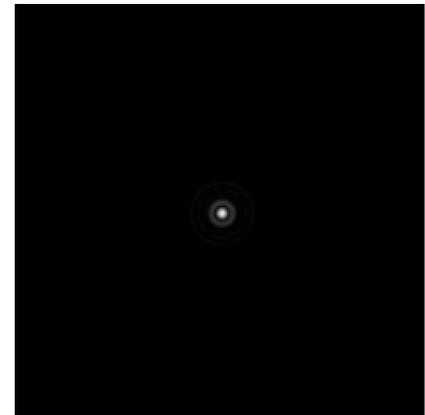


8



9

6	Immagine buona: il disco di Airy è sempre visibile e sono visibili costantemente piccoli archi
7	Immagine molto buona: disco qualche volta nettamente definito, si vedono gli anelli come lunghi archi o cerchi completi
8	Immagine ottima: disco sempre nettamente definito, anelli visibili come lunghi archi o cerchi completi, sempre in moto
9	Immagine quasi perfetta: la parte interna della figura di diffrazione è stazionaria, la parte esterna occasionalmente
10	Immagine perfetta: tutta la figura di diffrazione è ferma



10

Le montature

Un elemento fondamentale dei telescopi è la *montatura*, cioè il supporto sul quale è fissato il telescopio.

Deve essere stabile e deve potersi muovere per compensare la rotazione della Terra.

Sostanzialmente esistono due tipi di montature:

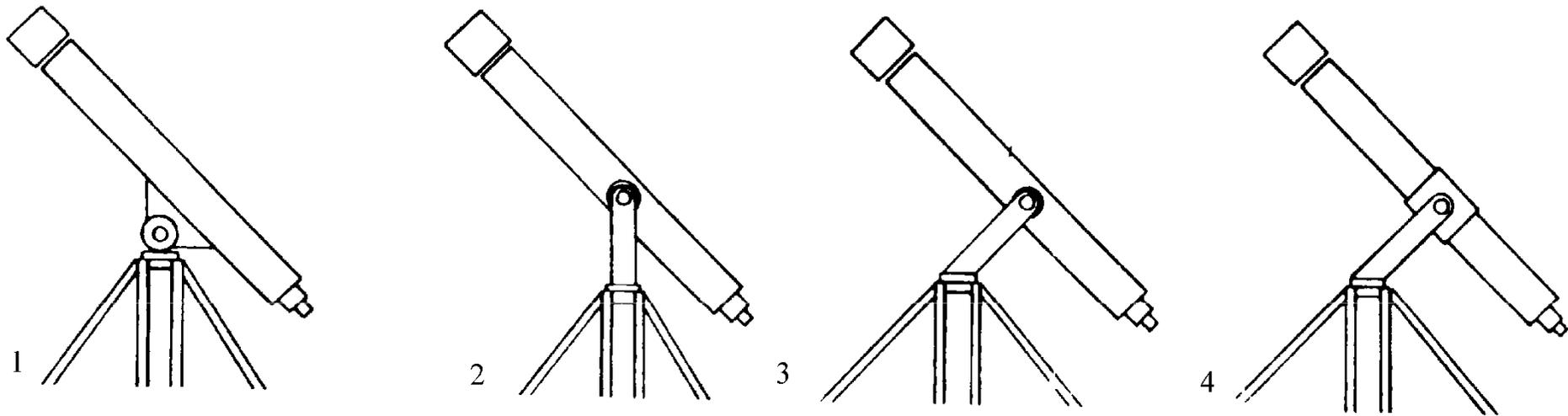
azimutale

equatoriale



Le montature

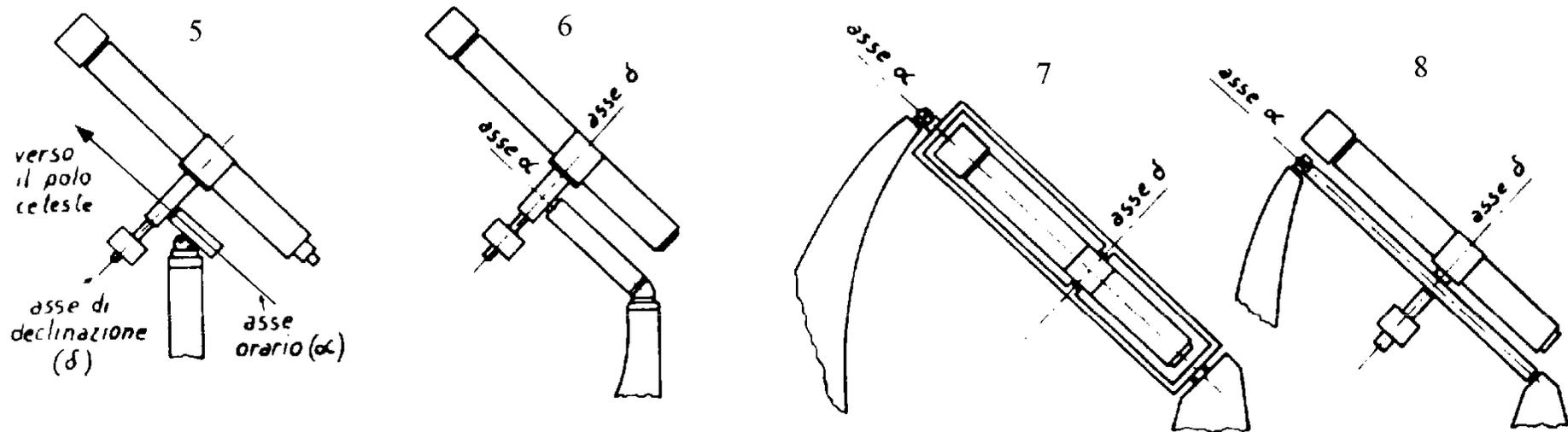
Montature azimutali



- 1) Montatura "a perno": la più semplice ed economica.
- 2) A forcella: il tubo mantiene il bilanciamento.
- 3) A forcella inclinata: permette il puntamento allo zenit.
- 4) A forcella inclinata con fascia: è possibile far scorrere il tubo avanti e indietro per il bilanciamento

Le montature

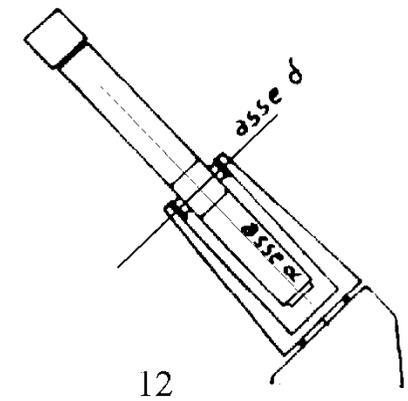
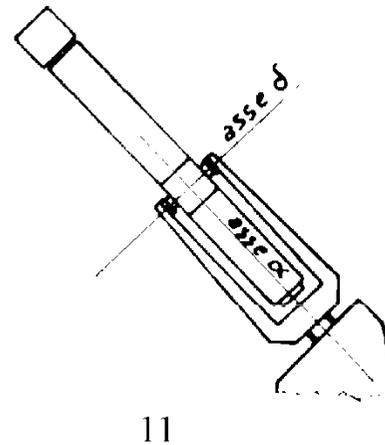
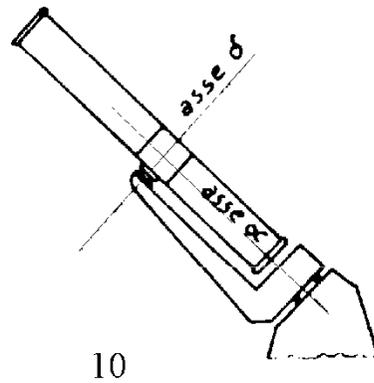
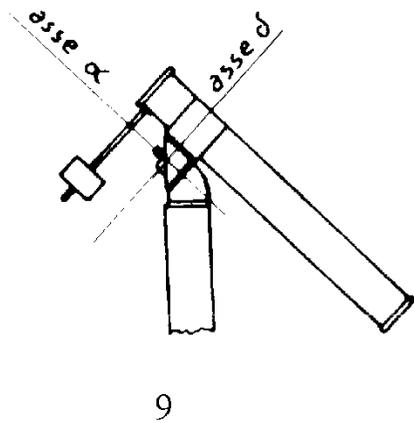
Montature equatoriali



- 5) Montatura alla tedesca.
- 6) Montatura alla tedesca modificata.
- 7) Montatura a telaio (o inglese o a giogo o a culla).
- 8) Montatura inglese modificata

Le montature

Montature equatoriali



9) Montatura Springfield.

10) Montatura con forcella ad un solo braccio.

11) Montatura a forcella.

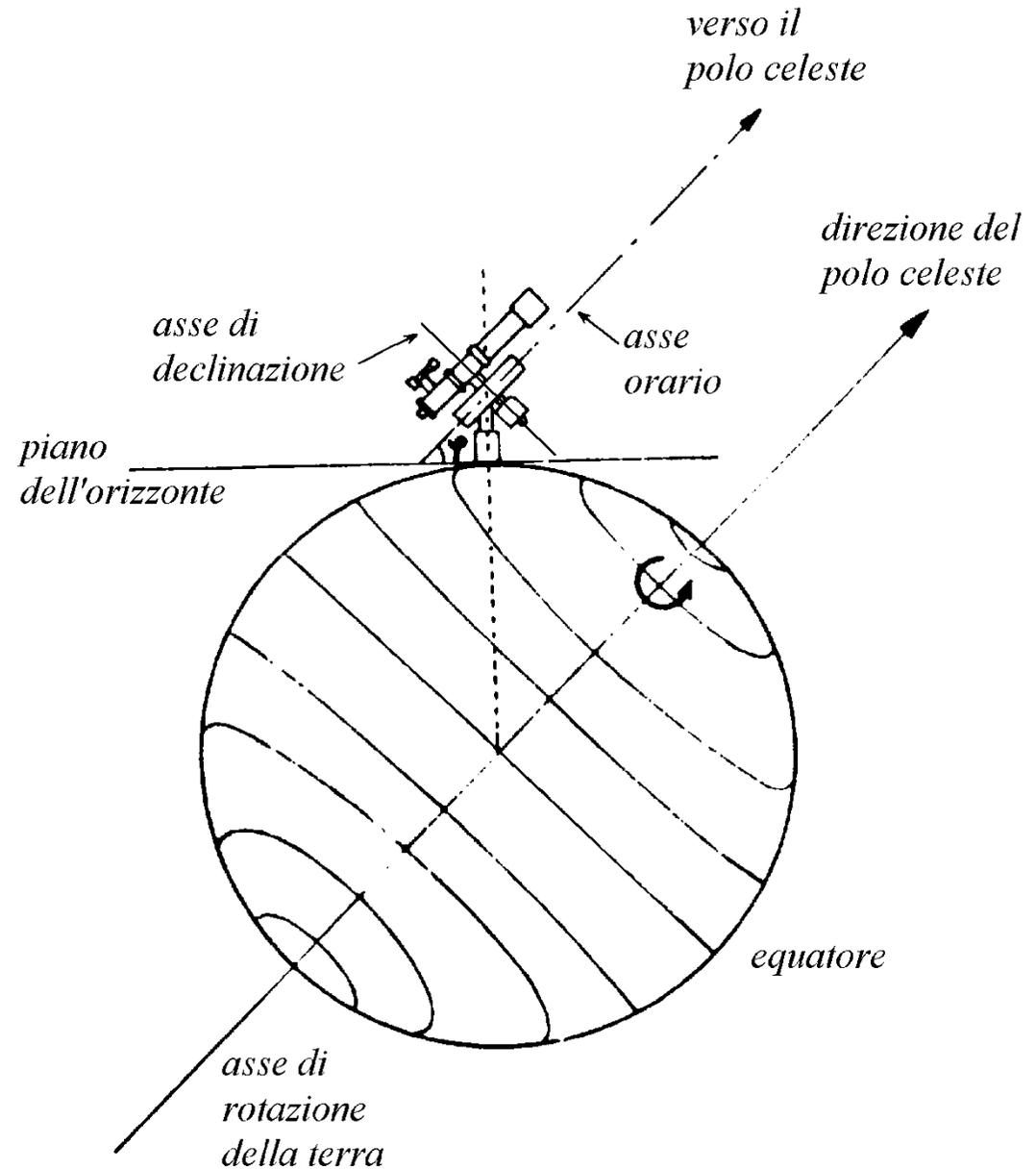
12) montatura a disco polare.

Stazionamento del telescopio

La messa in stazione di un telescopio consiste nel posizionarlo.

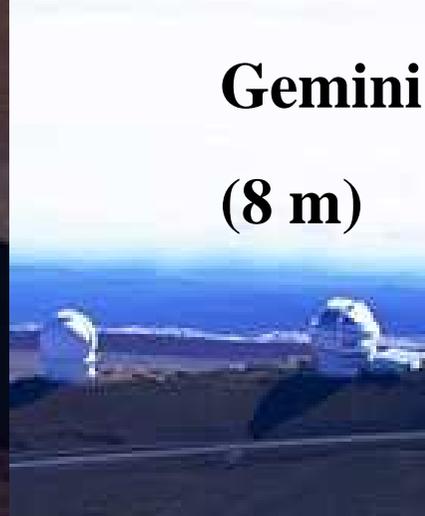
I telescopi con montatura equatoriale devono avere l'asse orario allineato al Polo Celeste.

Il problema maggiore legato ad uno stazionamento non ottimale è la rotazione di campo.



Mauna Kea

**Gemini
(8 m)**



Keck (10 m)

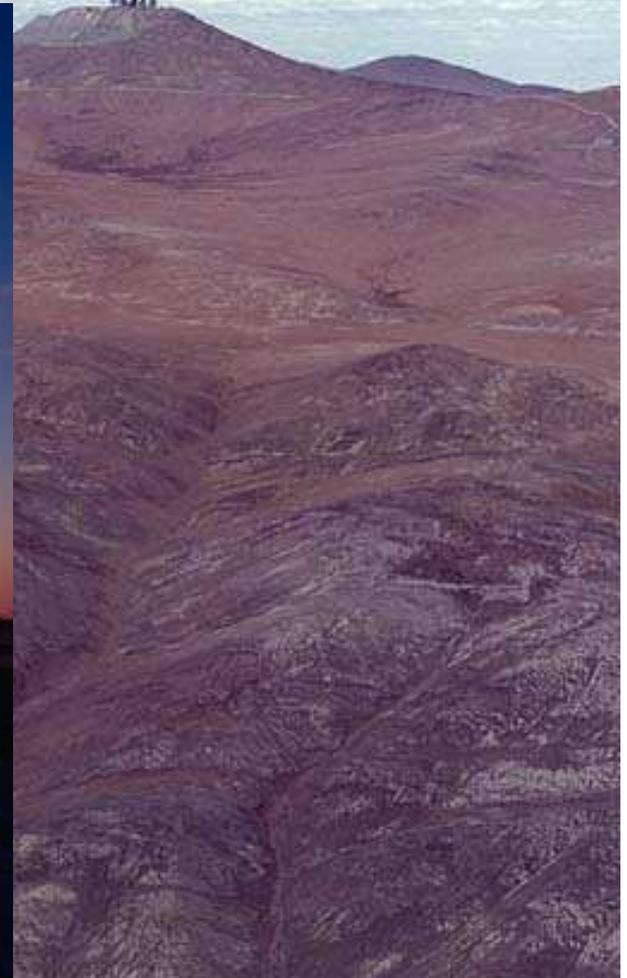
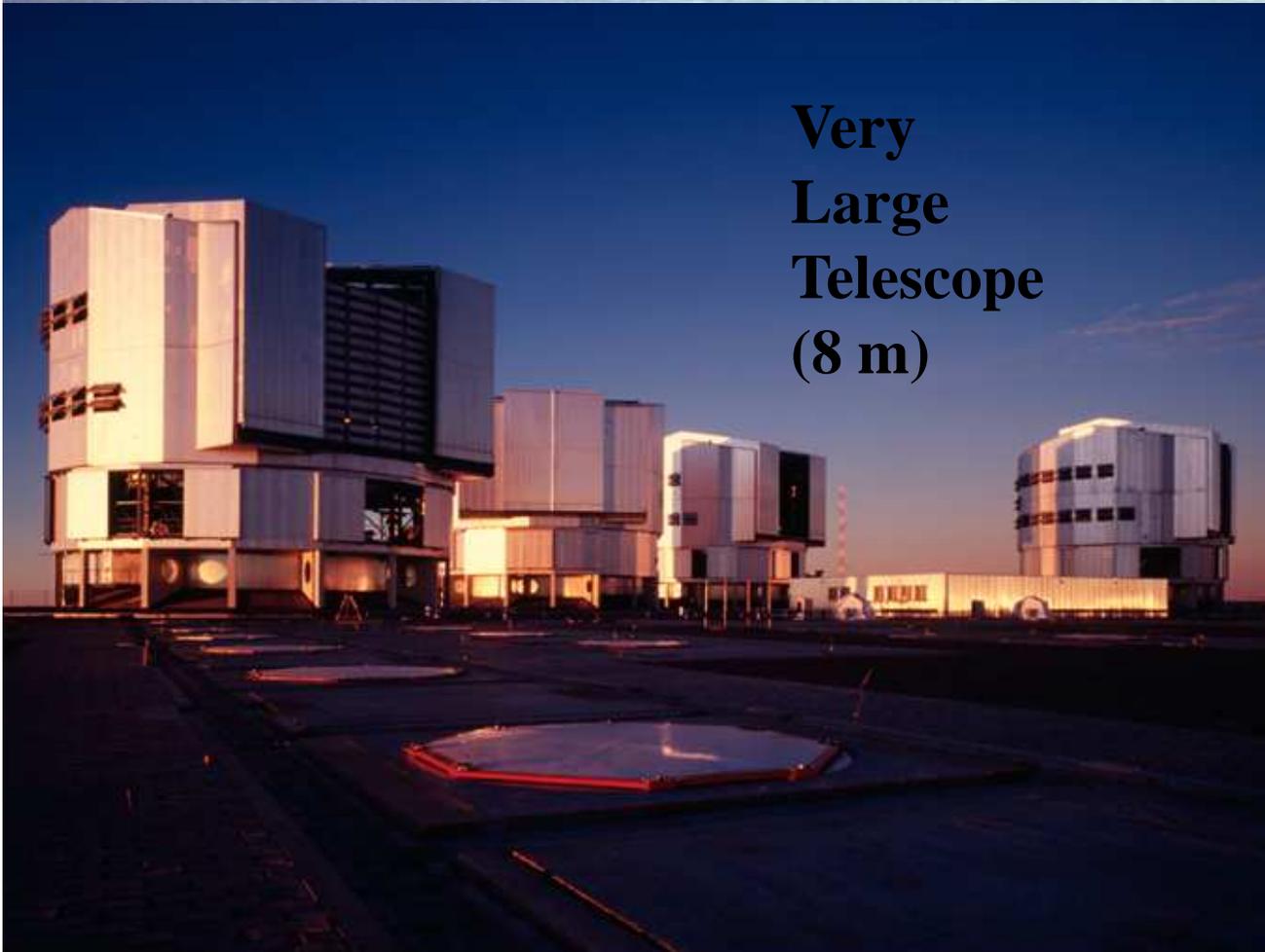


Subaru (8 m)



Cerro Paranal

Very
Large
Telescope
(8 m)



Hubble Space Telescope (2,4 m)



Telescopi > 8 m

Nome	Diametro	Tipo di specchio	Nazionalità	Osservatorio	Anno di costruzione
Large Binocular Telescope (LBT)	2×8,4 = 11,8 m	2 singoli	USA, Italia, Germania	Osservatorio internazionale del monte Graham, Arizona	2007
Gran Telescopio Canarias (GTC)	10,4 m	Mosaico	Spagna, Messico, USA	Osservatorio del Roque de Los Muchachos, Isole Canarie	2006
Keck 1	10 m	Mosaico	USA	Osservatorio di Mauna Kea, Hawaii	1993
Keck 2	10 m	Mosaico	USA	Osservatorio di Mauna Kea, Hawaii	1996
Southern African Large Telescope (SALT)	9,5 m	Mosaico	Sudafrica, USA, UK, Germania, Polonia, Nuova Zelanda	Osservatorio Astronomico del Sudafrica, Sudafrica	2005
Hobby-Eberly Telescope (HET)	9,2 m	Mosaico	USA, Germania	Osservatorio McDonald, Texas	1997
Subaru (NLT)	8,3 m	Singolo	Giappone	Osservatorio di Mauna Kea, Hawaii	1999
VLT 1 (Antu)	8,2 m	Singolo	Paesi ESO + Cile	Osservatorio del Paranal, Cile	1998
VLT 2 (Kueyen)	8,2 m	Singolo	Paesi ESO + Cile	Osservatorio del Paranal, Cile	1999
VLT 3 (Melipal)	8,2 m	Singolo	Paesi ESO + Cile	Osservatorio del Paranal, Cile	2000
VLT 4 (Yepun)	8,2 m	Singolo	Paesi ESO + Cile	Osservatorio del Paranal, Cile	2001
Gemini North	8,1 m	Singolo	USA, UK, Canada, Cile, Australia, Argentina, Brasile	Osservatorio di Mauna Kea, Hawaii	1999
Gemini South	8,1 m	Singolo	USA, UK, Canada, Cile, Australia, Argentina, Brasile	Cerro Pachón, Cile	2001

European – Extremely Large Telescope

Il 26 aprile 2010 l'ESO ha annunciato che verrà costruito in Cile, sul Cerro Armazones, nella Regione di Antofagasta, un telescopio da 39,3 m.

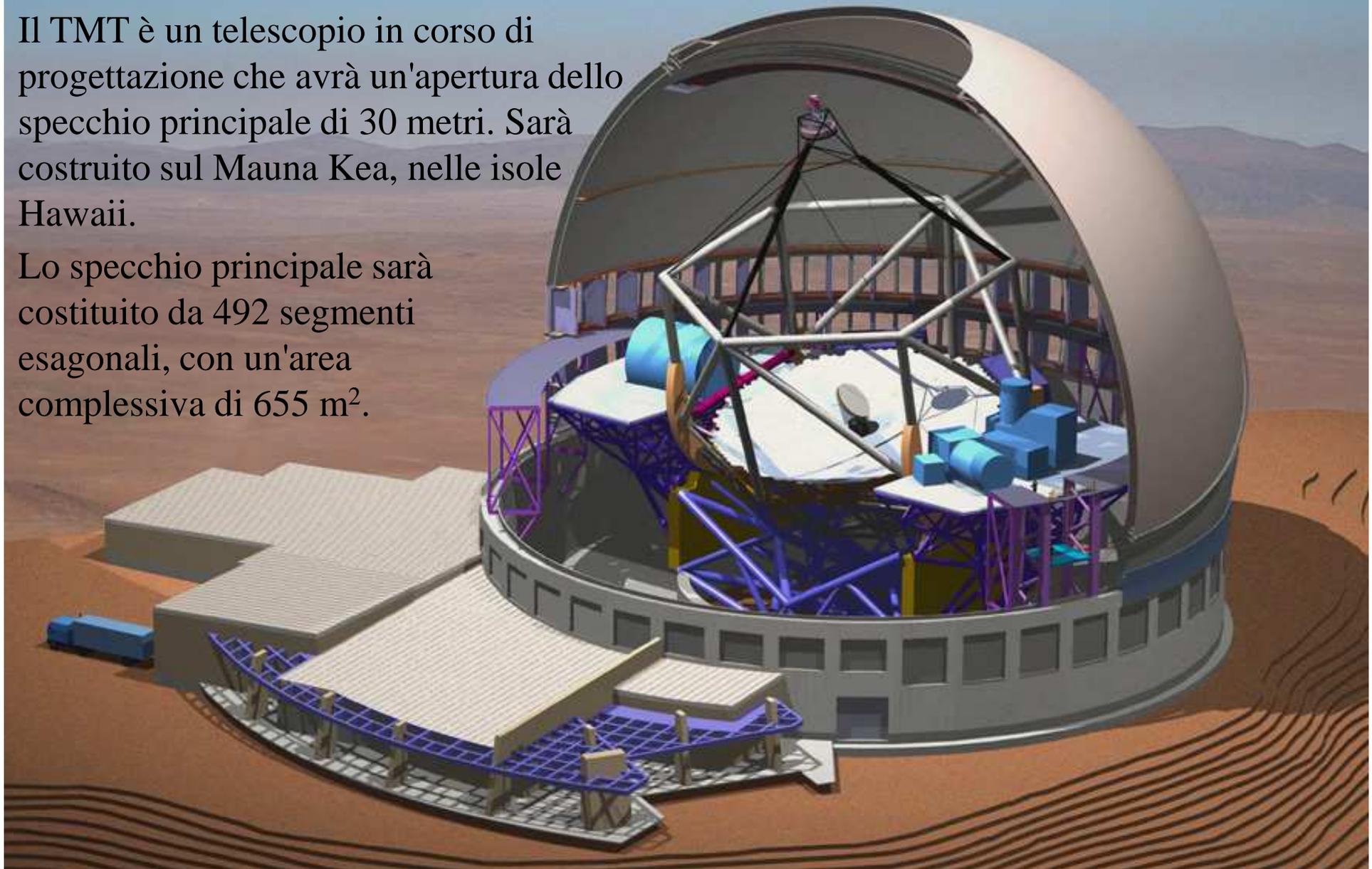
Lo specchio primario sarà composto da 798 segmenti esagonali per una superficie complessiva di 978 m², ognuno da 1,45 metri di diametro e 50 mm di spessore. Il costo previsto è di 1,055 G€ ed dovrebbe entrare in funzione nel 2022.



Thirty Meter Telescope

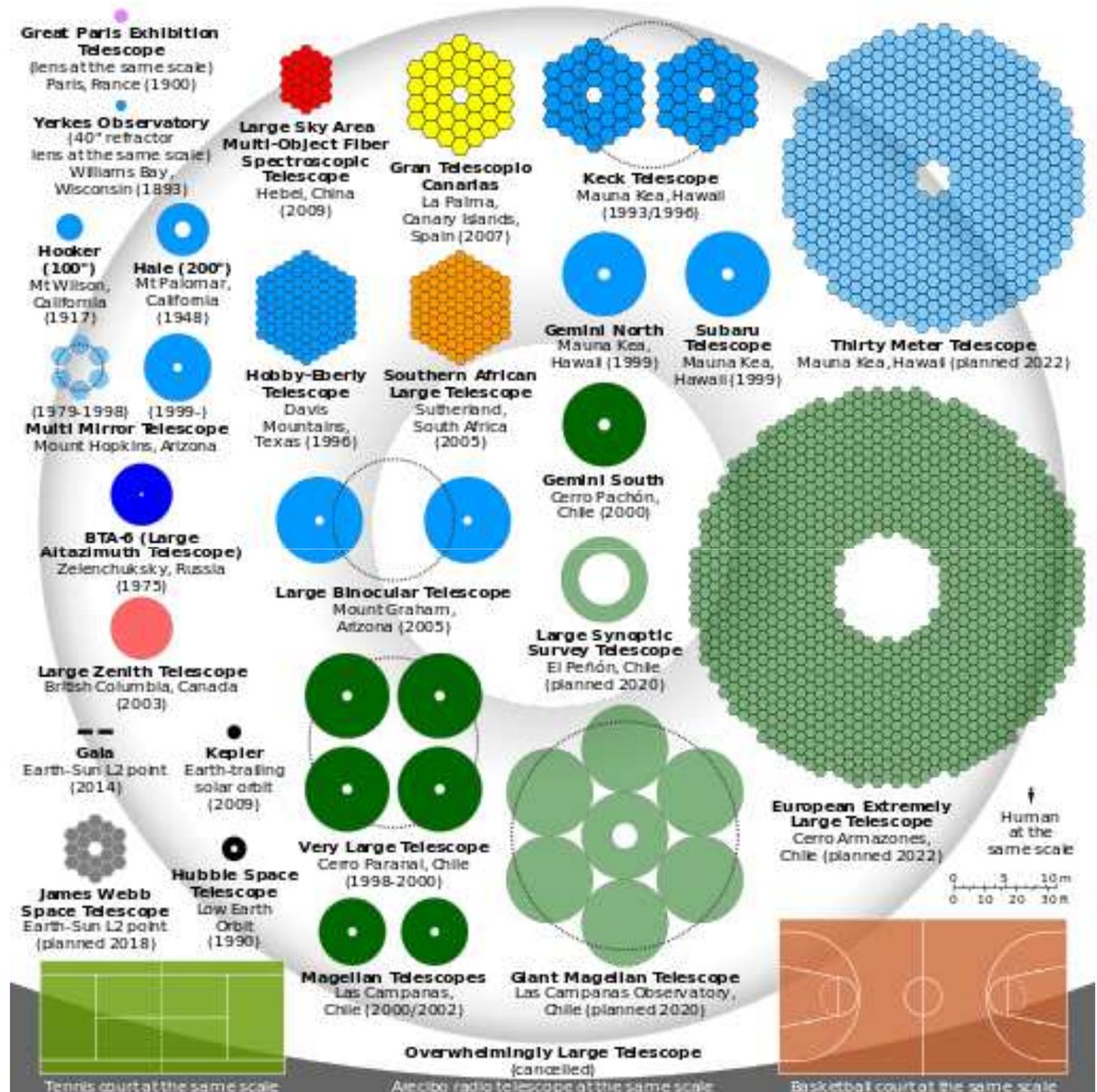
Il TMT è un telescopio in corso di progettazione che avrà un'apertura dello specchio principale di 30 metri. Sarà costruito sul Mauna Kea, nelle isole Hawaii.

Lo specchio principale sarà costituito da 492 segmenti esagonali, con un'area complessiva di 655 m².



La sua ultimazione è prevista entro la fine del 2022.

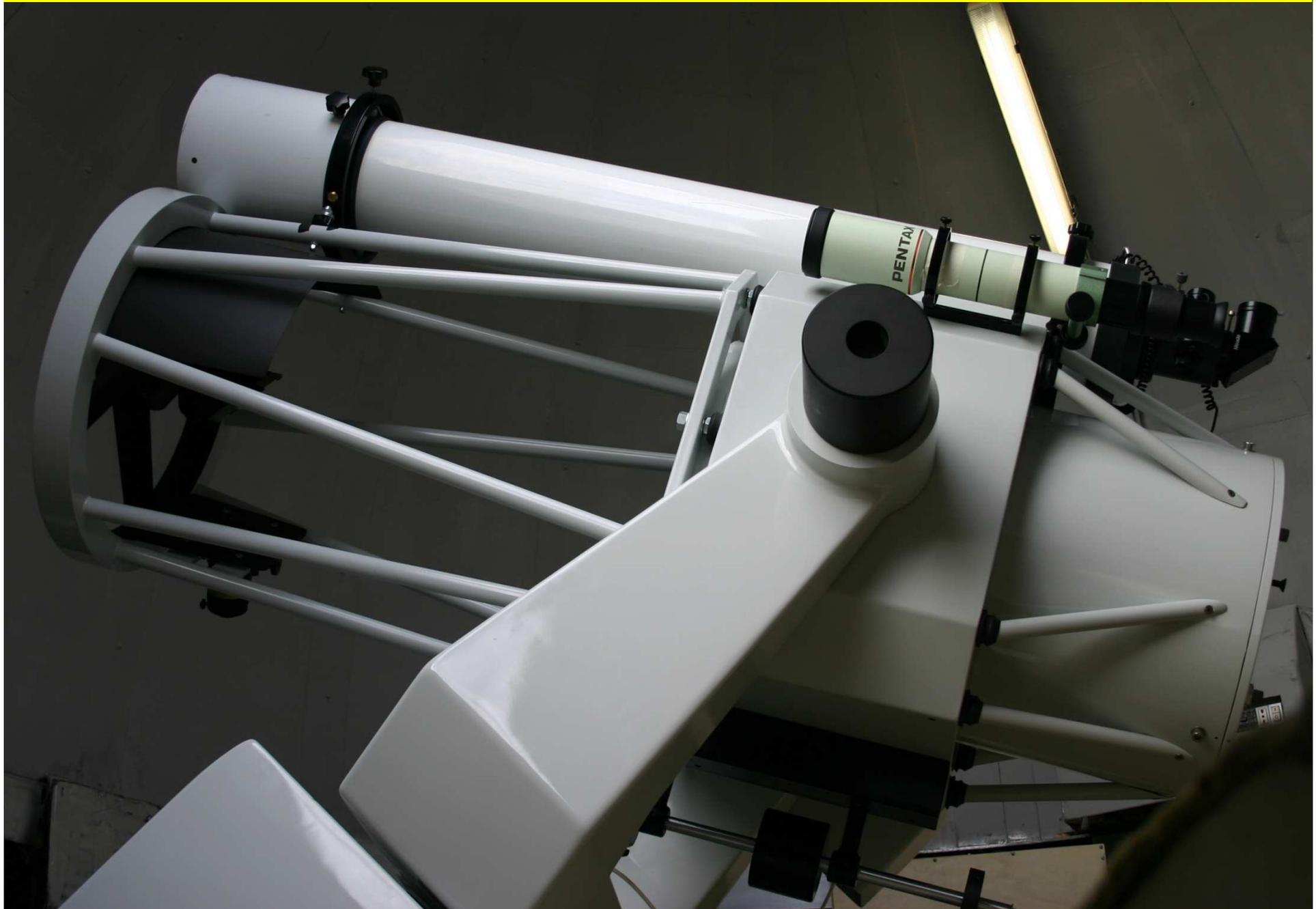
Dimensioni degli specchi di telescopi esistenti e di cui si sta provvedendo alla costruzione.



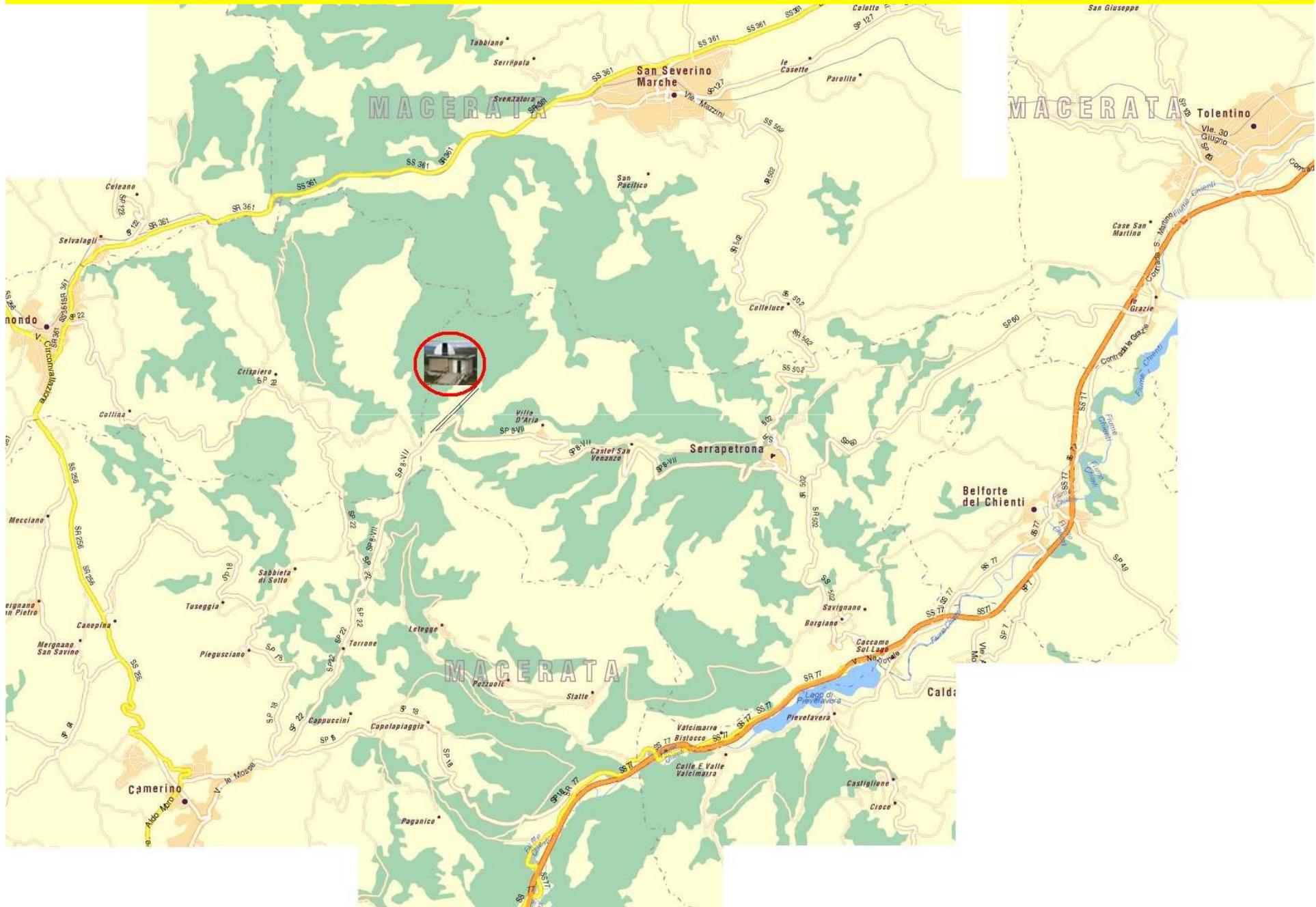
Osservatorio Astronomico P. Francesco De Vico



Osservatorio Astronomico P. Francesco De Vico



Osservatorio Astronomico P. Francesco De Vico

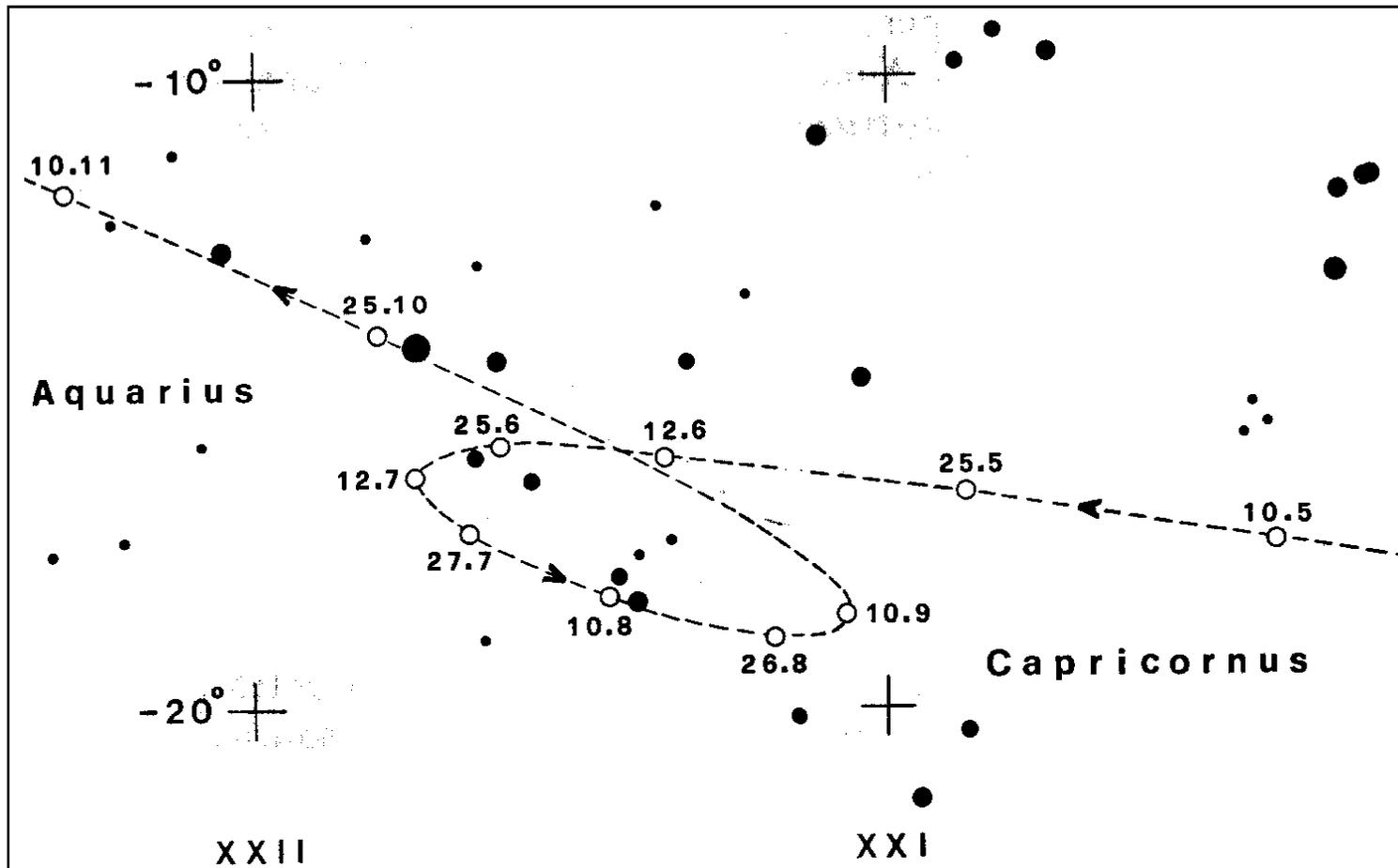




Cenni di Storia dell'Astronomia

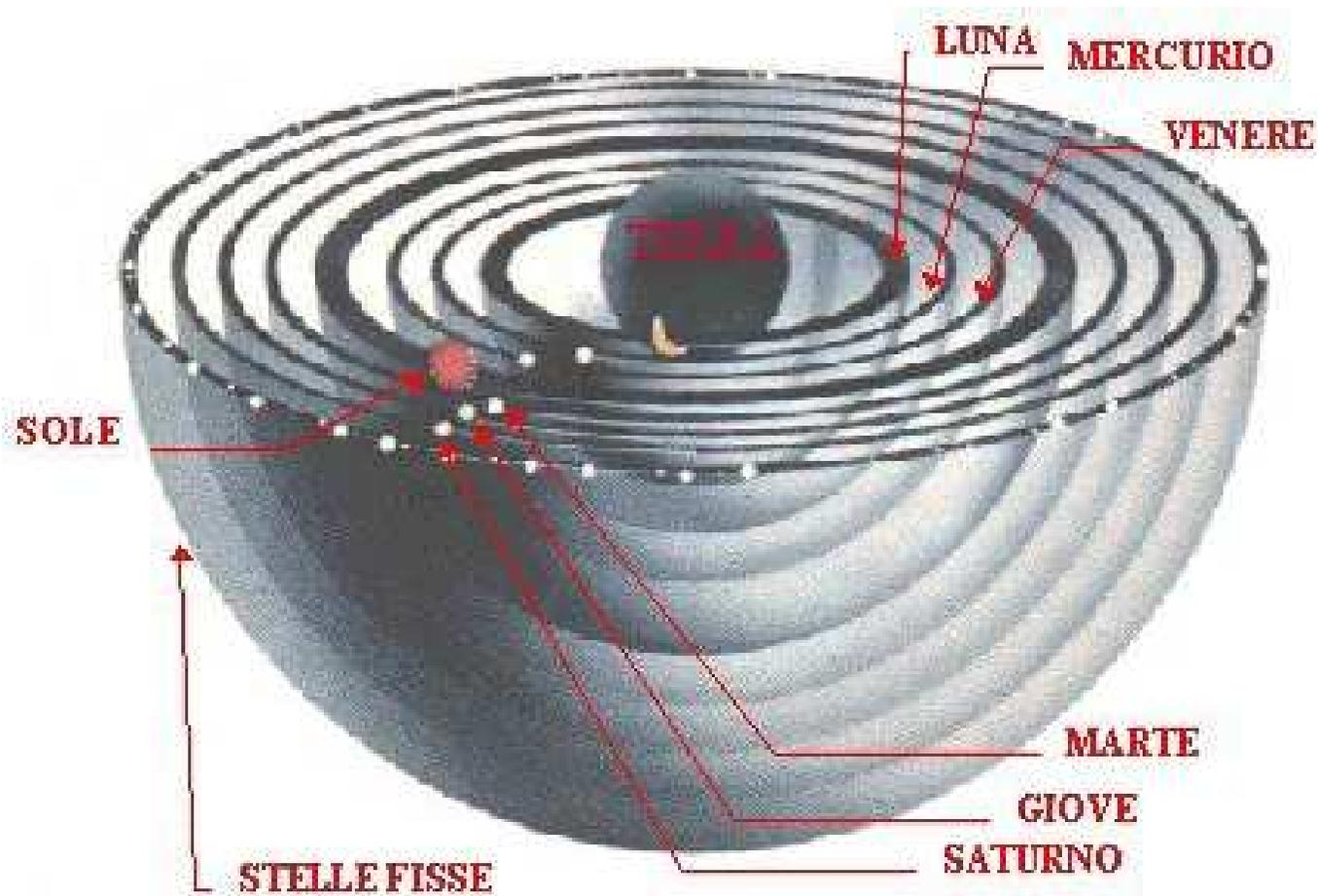
Tra i primi problemi che gli astronomi greci si sono trovati ad affrontare c'è stata la spiegazione del moto dei pianeti.

La presenza di “cappi” mal si conciliava con l'idea greca di moti circolari uniformi attorno alla Terra.

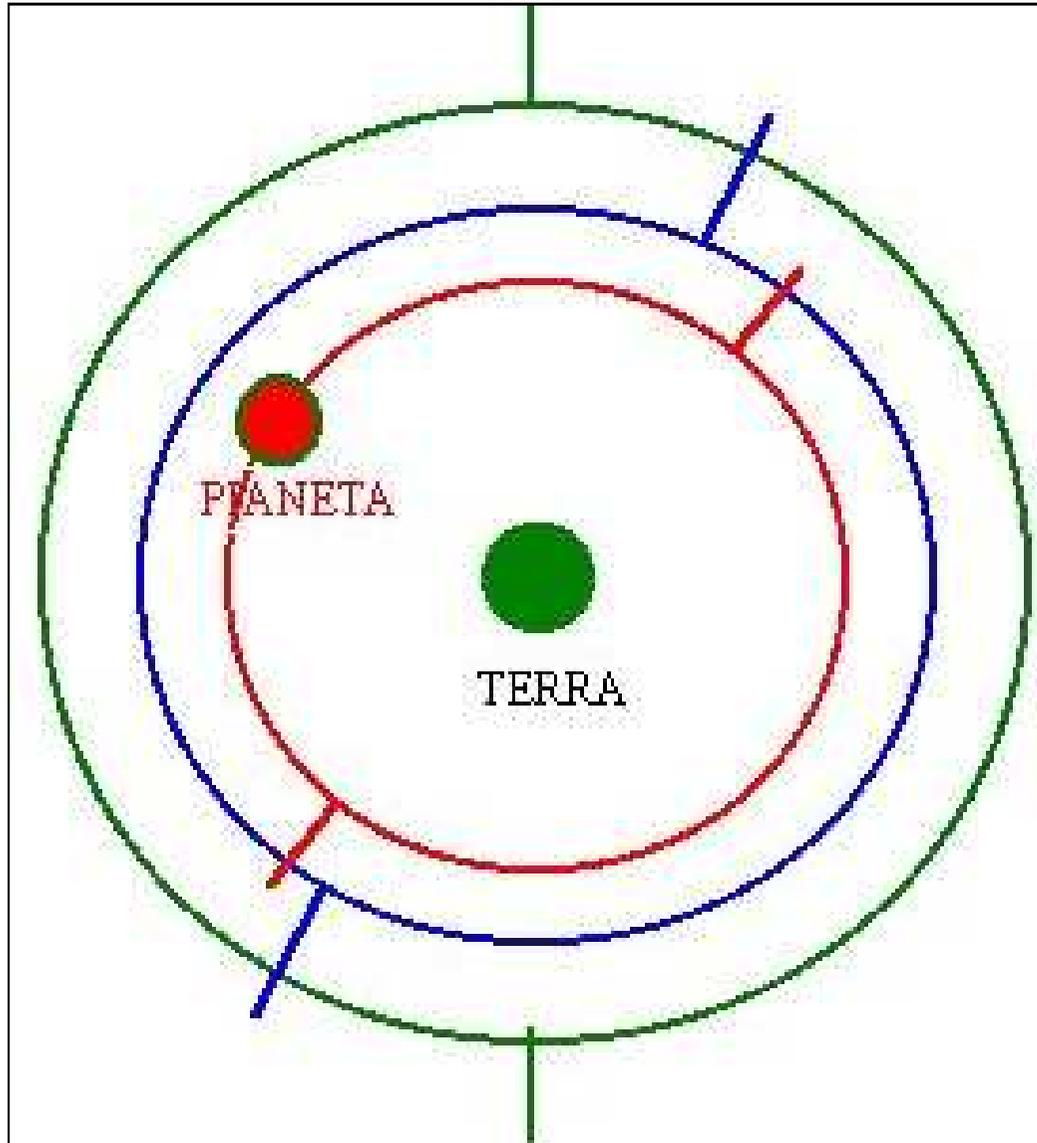


Traiettoria apparente di Marte fra il 10 maggio ed il 10 novembre 1971.

Modello delle sfere secondo Platone



Modello delle sfere secondo Eudosso



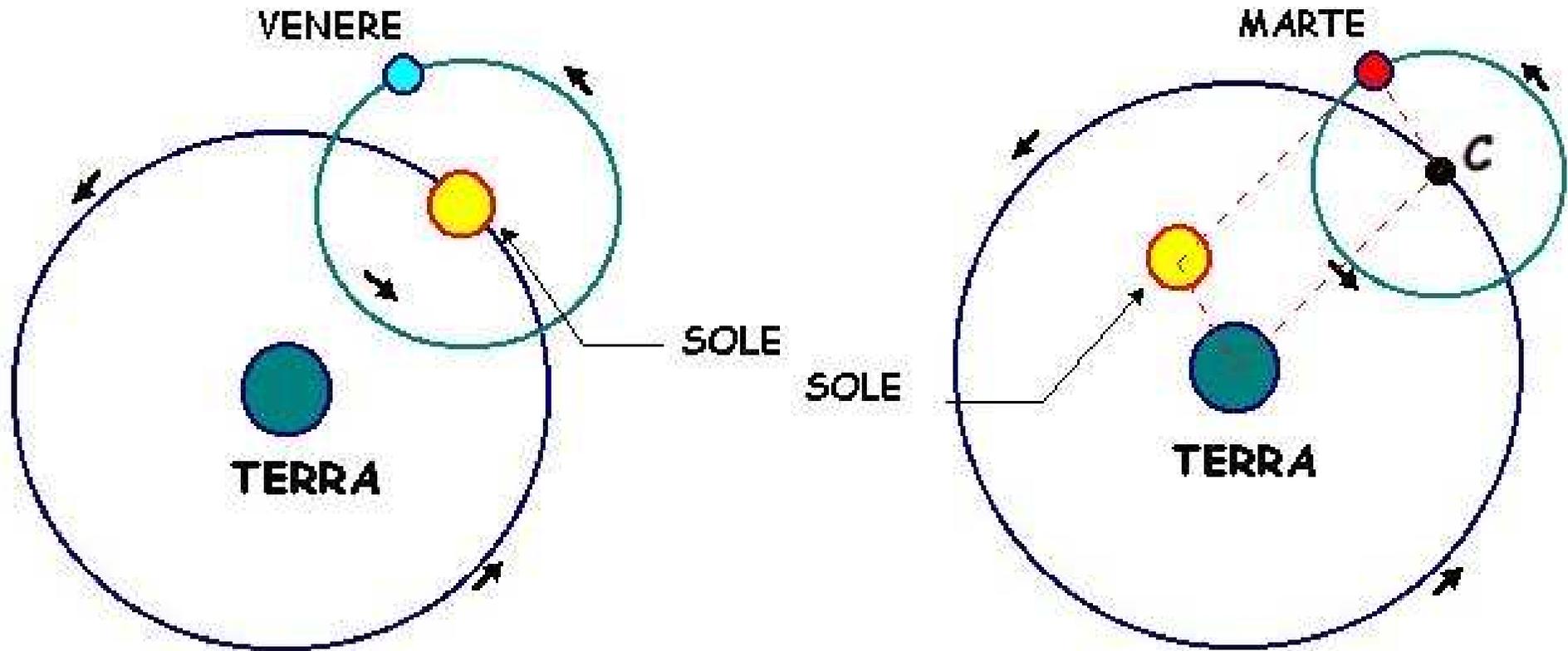
Secondo Eudosso solo le stelle fisse possedevano un'unica sfera.

La Luna e il Sole, ad esempio, possedevano ben tre sfere ciascuno.

Nel disegno si vede un corpo celeste che si trova inserito in un sistema di tre sfere legate tra loro da vincoli di rotazione.

La sfera interna, sulla quale è fissato il corpo celeste, ruota su se stessa attorno un asse vincolato alla seconda sfera, la quale a sua volta ha l'asse di rotazione vincolato alla terza sfera, più esterna.

Teoria degli epicicli



Per un pianeta interno, come ad esempio Venere, il Sole ruota attorno alla Terra e Venere, a sua volta, ruota attorno al Sole. Venere percorre quindi un piccolo "ciclo" (epiciclo) che si trova su un'orbita più grande (deferente).

Un pianeta esterno, come ad esempio Marte, ruota attorno ad un centro C con lo stesso periodo di rotazione del Sole attorno alla Terra e, nello stesso tempo, il centro C ruota attorno alla Terra con lo stesso periodo di rotazione del pianeta attorno al Sole (in questo caso la circonferenza descritta dal pianeta è l'epiciclo, mentre quella descritta da C è il deferente).

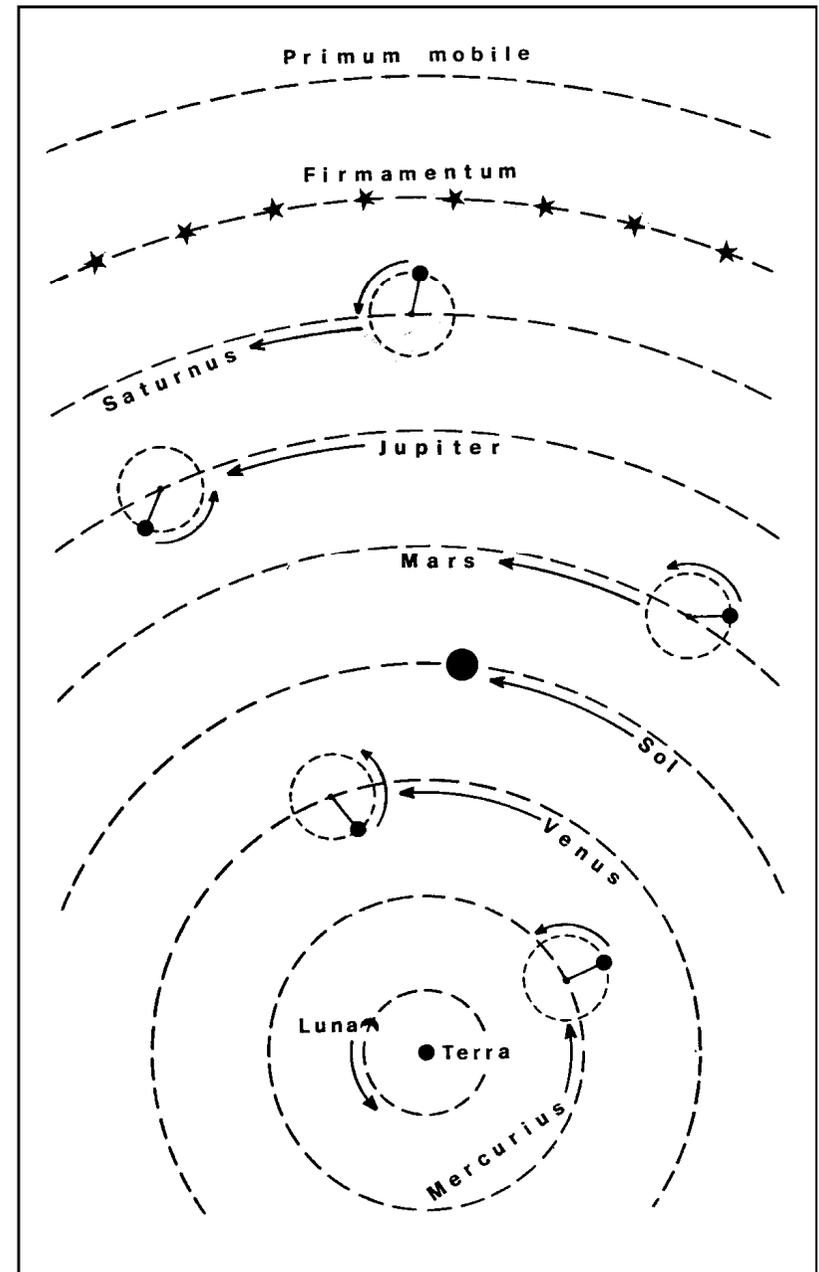
Il Sistema Tolemaico

Claudio Tolomeo (circa 100 - 178 d.C.), nato ad Alessandria d'Egitto, fu l'ultimo rappresentante dell'antica astronomia greca.

Il suo merito principale fu quello di aver raccolto tutto lo scibile astronomico dei suoi tempi e, arricchitolo con le sue esperienze, di averlo esposto nella sua opera principale, la *Mathematike Syntaxis* (Composizione Matematica), che tradotto in arabo divenne *Al Magisti*, da cui il titolo a noi conosciuto: *Almagesto*.

In essa aveva esposto il sistema del mondo noto come sistema tolemaico.

La Terra era al centro dell'Universo ed i pianeti, il Sole e la Luna ruotavano attorno ad essa col sistema degli epicicli e dei deferenti.



Il Sistema Tolemaico

Tolomeo negava anche la rotazione della Terra intorno al proprio asse, essendo il movimento diurno proprio della sfera celeste.

I primi capitoli dell'Almagesto trattano di coordinate celesti, di trigonometria piana e sferica, di dimensioni della Terra, di eclissi di Sole e di Luna, di strumenti di osservazione e c'è un catalogo delle posizioni di 1022 stelle.

Quello di Tolomeo fu per parecchi secoli *il Libro* dell'astronomia perché i metodi matematici e geometrici di cui si servì lo fecero preferire alle opere simili di quel tempo. Per la sua completezza ebbe una rapida ed ampia diffusione.

Il sistema tolemaico è piuttosto complicato però risponde con una buona approssimazione alle posizioni dedotte col calcolo matematico.

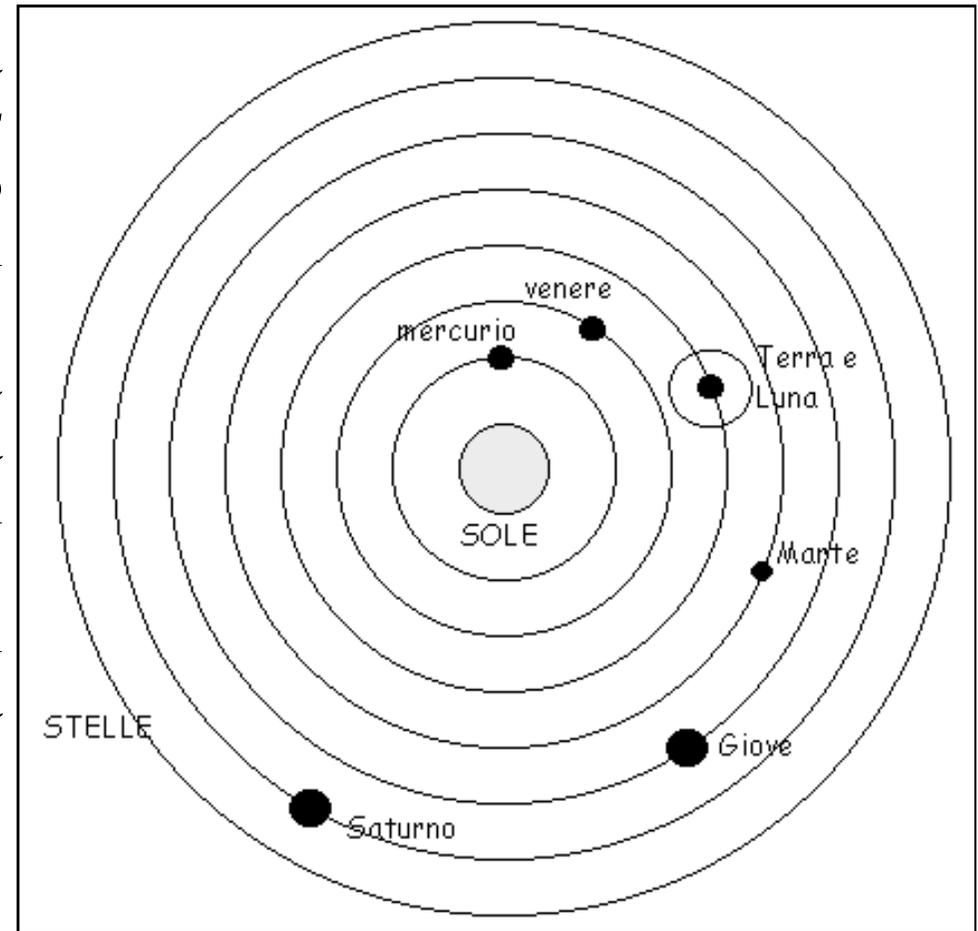
Le irregolarità dei moti dei pianeti, del Sole e della Luna sono spiegabili mettendo la Terra non esattamente al centro delle orbite planetarie, ma leggermente decentrata. Ciò permetteva anche di attribuire la diversa velocità del Sole nel cielo e, soprattutto, l'alternarsi delle stagioni.

Il Sistema Copernicano

Nel 1542 la pubblicazione e la diffusione dell'opera *De Revolutionibus Orbium Coelestium* di Nicolò Copernico (1473 – 1543) mette in discussione il sistema tolemaico.

Per la realizzazione del sistema copernicano viene ripresa una vecchia idea di Aristarco, che può essere sintetizzata nel seguente modo:

> la Terra compie una rotazione attorno al proprio asse da ovest a est in circa ventiquattro ore;



> la Terra non si trova al centro dell'Universo, ma solo dell'orbita lunare, e compie un giro attorno al Sole nel corso di un anno;

> come la Terra i pianeti ruotano attorno al Sole che occupa il centro dell'Universo.

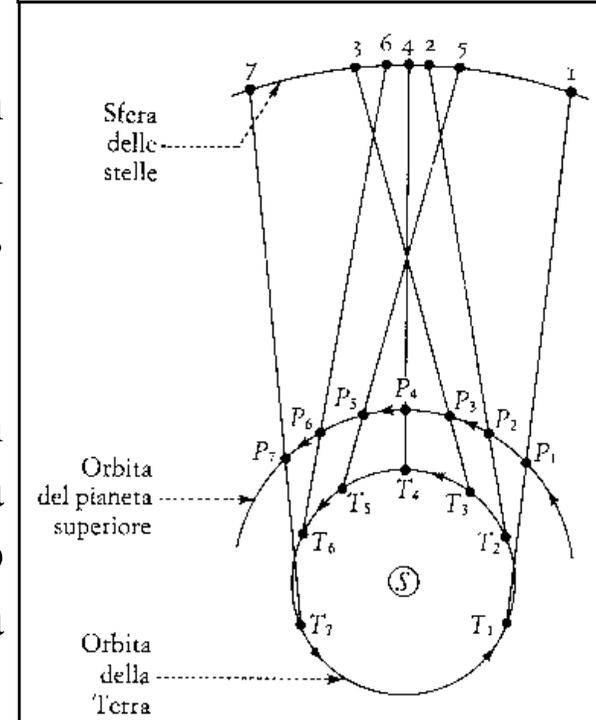
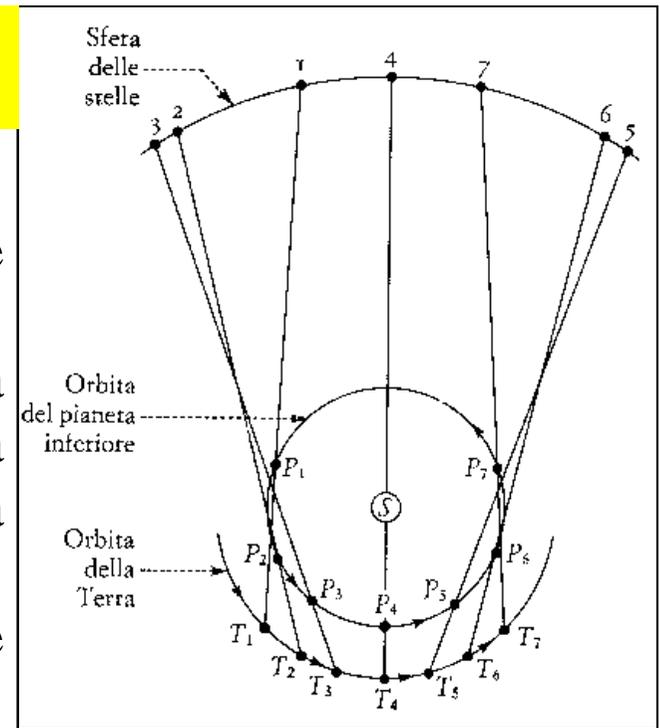
Il Sistema Copernicano

Con questo modello si possono spiegare facilmente gli strani moti dei pianeti.

La concezione eliocentrica era stata accantonata per quasi venti secoli dagli studiosi perché appariva attaccabile sia dal punto di vista strettamente fisico, sia da quello metafisico.

Fisicamente, l'ipotesi che la Terra orbitasse attorno al Sole veniva scartata per i seguenti motivi:

- sembrava contraddire il senso comune che prevedeva in una tale eventualità effetti catastrofici quali crollo di edifici, caduta degli oggetti non più lungo la verticale, eccetera;
- poiché l'angolo sotto cui le stelle vengono viste da un osservatore posto sulla Terra dipende dalla posizione della stessa, si dovrebbero osservare variazioni nel corso dell'anno nella posizione apparente delle stelle nella volta celeste (parallasse).



Il Sistema Copernicano

Se a queste obiezioni si potevano in qualche modo contrapporre argomentazioni scientifiche, ben poco poteva essere fatto se gli attacchi avevano fondamenti di tipo metafisico o teologico.

La concezione aristotelica che aveva distinto in modo inequivocabile l'Universo in due mondi separati, quello sublunare e quello celeste, era difficilmente attaccabile senza scontrarsi anche con la Chiesa, che nel frattempo aveva fatto sua questa concezione (vedi Giordano Bruno che venne messo al rogo per le sue idee).

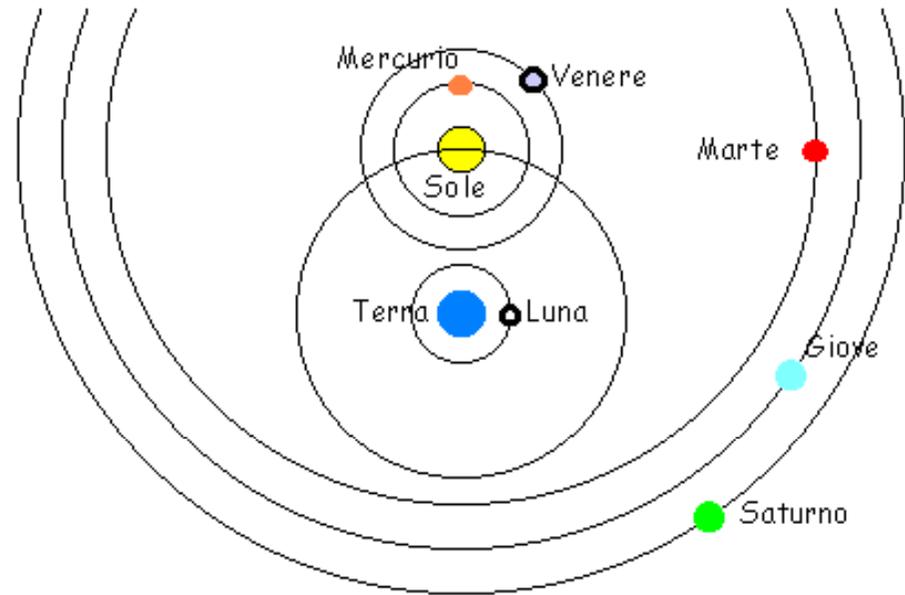
L'idea copernicana ponendo la Terra sullo stesso piano degli altri corpi celesti, le faceva perdere quella posizione privilegiata che secoli di dispute filosofiche le avevano attribuito. Non sorprendano dunque i dubbi e le titubanze di Copernico, visto che doveva passare ancora più di un secolo perché le sue idee fossero accettate dalla comunità scientifica, e visto che ancora nel XVIII secolo tra i sostenitori delle due teorie si accendevano dispute accanite.

Con Copernico erano state gettate le basi della moderna astronomia, ma per arrivare ad una descrizione di tipo quantitativo del moto dei corpi celesti dovevano passare ancora molti decenni.

Tycho Brahe

Un ruolo fondamentale ebbero i dati di continue osservazioni della volta celeste raccolti e catalogati per più di trent'anni dal matematico ed astronomo danese Tycho Brahe (1546 – 1601).

Sulla base delle proprie osservazioni propose una teoria che si collocava a metà strada tra quella tolemaica e quella copernicana.



Secondo Tycho i pianeti Mercurio e Venere ruotavano attorno al Sole, Giove, Marte, Saturno ed il Sole stesso orbitavano attorno alla Terra.

Keplero, Galileo e Newton

Leggi di Keplero



Keplero (1571 – 1630) fu allievo e collaboratore di Tycho Brahe (1546 – 1601), dal quale ereditò una cospicua mole di dati osservativi sulle posizioni dei pianeti del Sistema Solare.

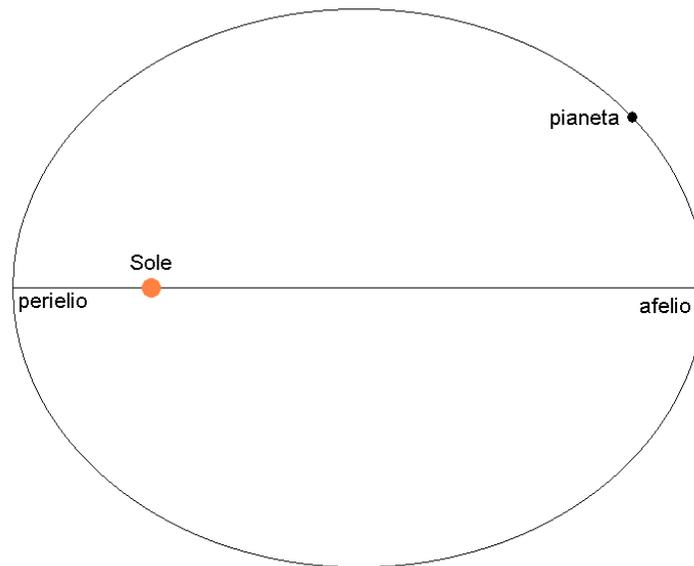
Alla morte del maestro analizzando le osservazioni di Tycho e le proprie, giunse a formulare quelle leggi ormai universalmente note come le **leggi di Keplero** che pubblicò tra il 1609 ed il 1619.

Le prime due leggi apparvero sull'*Astronomia nova* pubblicato a Praga nel 1609, la terza sull'*Harmonices mundi* edito a Linz nel 1619.

Leggi di Keplero

Prima legge

Le traiettorie descritte dai pianeti attorno al Sole sono ellissi di cui il Sole occupa uno dei fuochi

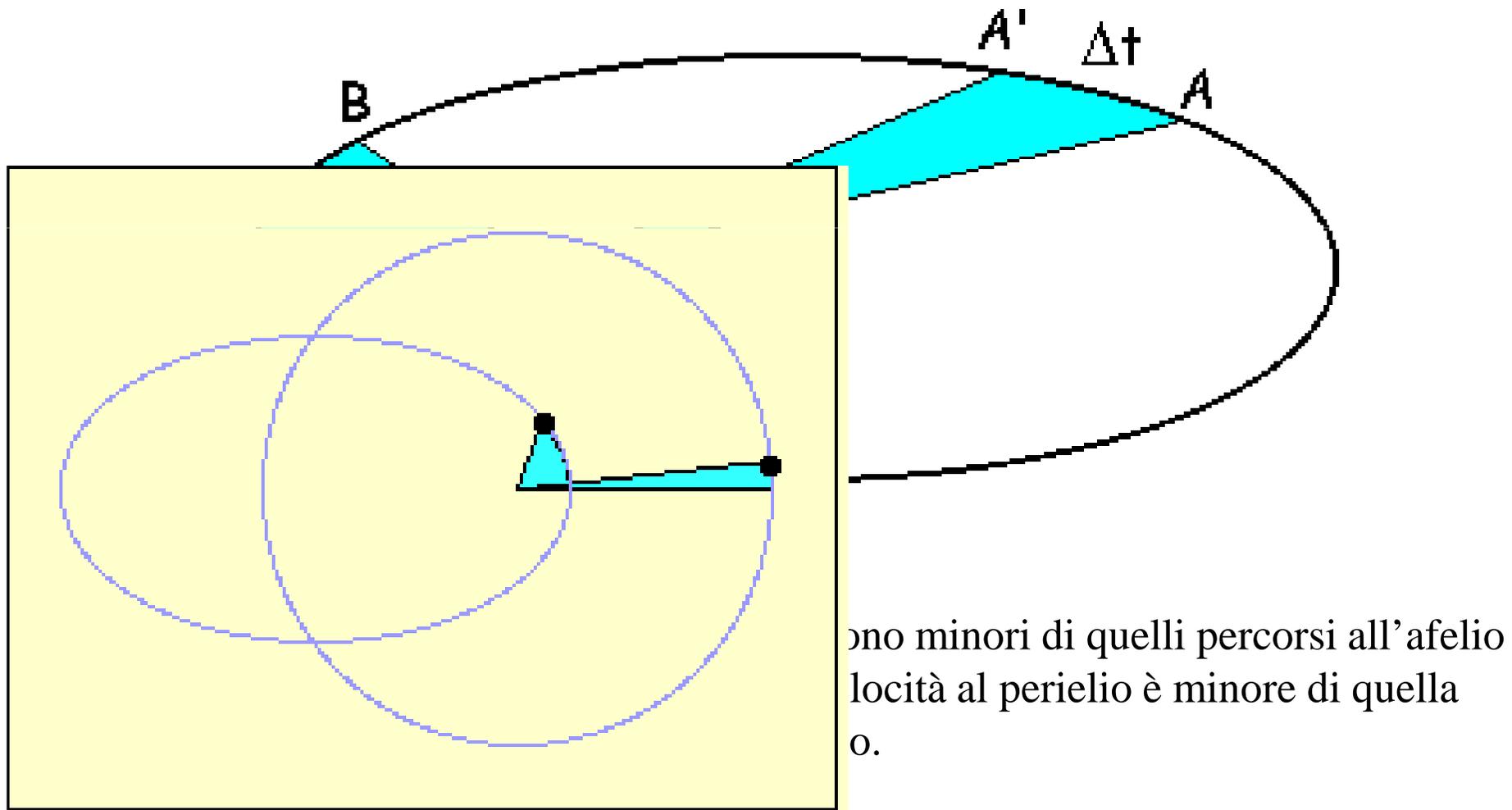


Il **perielio** (dal greco peri = intorno e helios = Sole) è il punto di minima distanza da Sole e l'**afelio** (dal greco apo = lontano e helios = Sole) è il punto di massima distanza dal Sole.

Leggi di Keplero

Seconda legge

Il raggio vettore che congiunge il Sole con un pianeta descrive aree uguali in tempi uguali.



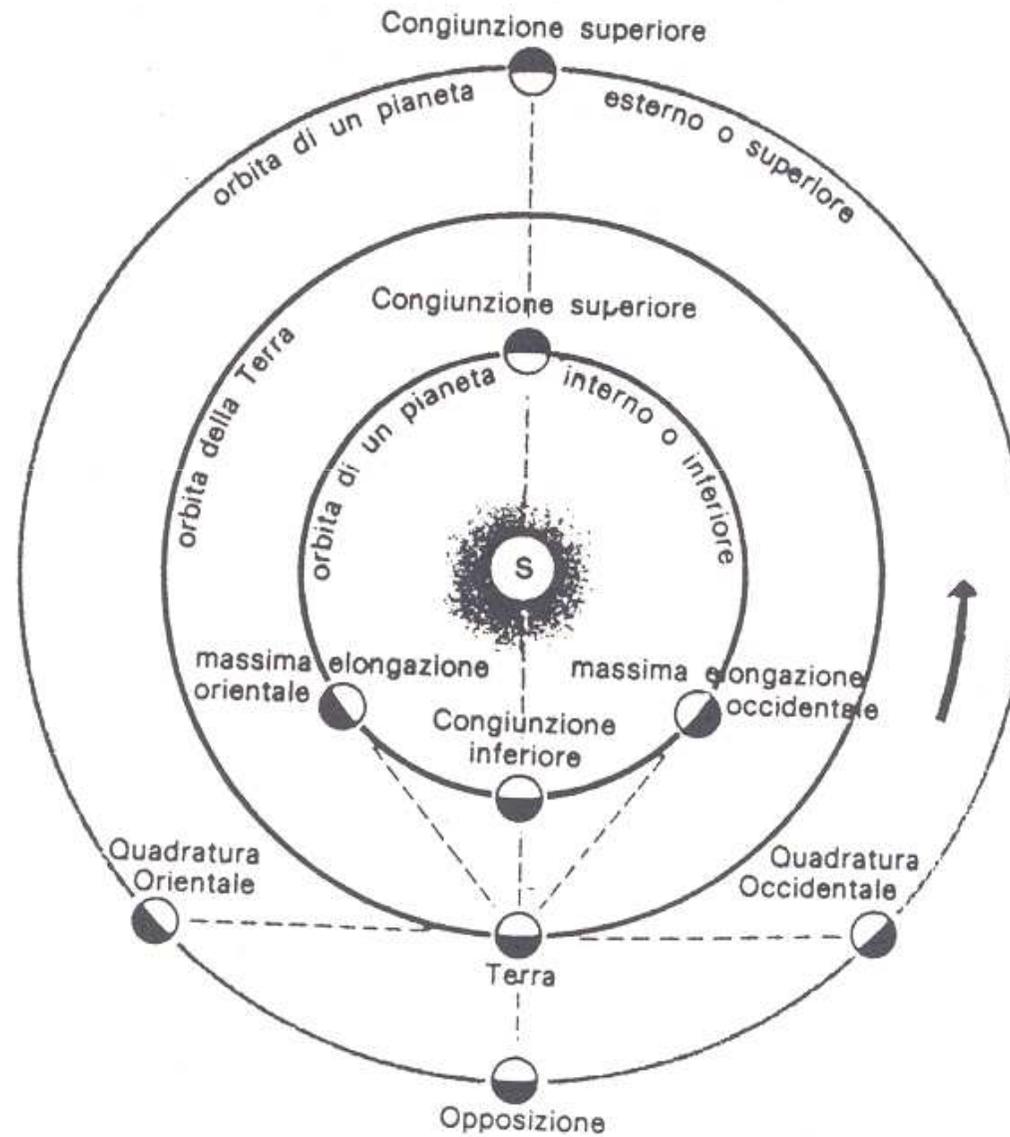
Leggi di Keplero

Terza legge

I quadrati dei periodi di rivoluzione sono proporzionali ai cubi dei semiassi maggiori delle rispettive orbite.

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{costante}$$

Aspetto dei pianeti



Aspetto dei pianeti

L'osservatore terrestre deve poi distinguere tra periodo orbitale siderale e periodo apparente geocentrico (o sinodico), che è evidentemente influenzato dalla rivoluzione annua.

$$P_{sin} = \frac{2\pi}{n_T \pm n}$$

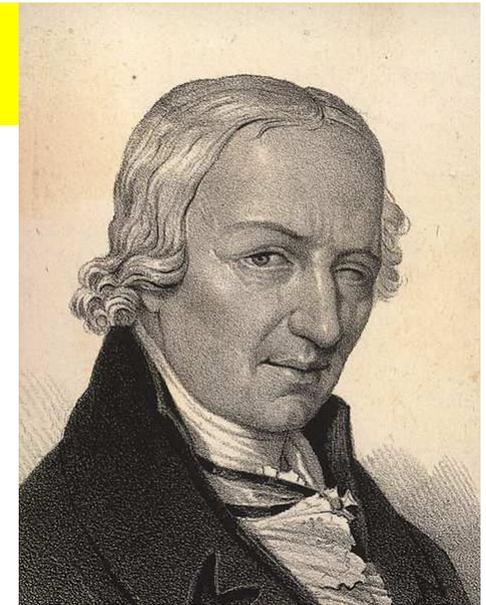
$$n = n_T \pm \frac{2\pi}{P_{sin}}$$

il segno + vale per un pianeta interno, il segno – per uno esterno

Legge di Titius e Bode



Johann Daniel Titius
(1729 – 1796)



Johann Elert Bode
(1747 – 1826)

$$a_n = \frac{4 + n}{10}$$

con $n = 0, 3, 6, 12, 24, 48, 96 \dots$

Matematicamente è equivalente a

$$a_n = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$$

con $n = -\infty, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 \dots$

La legge fu scoperta nel 1741 da Wolf e riscoperta da Titius nel 1772. E' nota per l'opera di divulgazione di Bode, che nel 1778 ne ha dato una formulazione matematica.

n	Distanza UA	Pianeta	Distanza UA
0	0,4	Mercurio	0,387
3	0,7	Venere	0,723
6	1	Terra	1
12	1,6	Marte	1,524
24	2,8		
48	5,2	Giove	5,203
96	10	Saturno	9,539
192	19,6	Urano	19,18
384	38,8	Nettuno	30,06

Legge di Titius e Bode

$$a_n = \frac{1}{3} (2^{2n-2} + 1)$$

Con $n = 1$ per Mercurio, $n = 2$ per Venere, $n = 3$ Terra, $n = 5$ la fascia degli Asteroidi, etc.

$$a_n = 1,53^n$$

$n = -2$ Mercurio, $n = -1$ Venere, $n = 0$ Terra, $n = 1$ Marte, per $n = 2$ e $n = 3$ si hanno due famiglie di asteroidi, $n = 4$ Giove, $n = 5$ Saturno, $n = 6$ Urano, manca $n = 7$, $n = 8$ Nettuno, $n = 9$ Plutone.

Una formulazione più generale è la seguente:

$$a_n = r_0 \cdot K^n$$

una progressione geometrica, con K e r_0 opportune costanti.

Galileo e le prime osservazioni del cielo con il telescopio

Galileo Galilei nacque a Pisa il 15 febbraio 1564.

Per seguire la volontà del padre a 17 anni si iscrisse nello Studio Pisano per ottenere la laurea in medicina, ma la sua passione per la matematica prevalse sui progetti paterni: Galileo divenne così professore di Matematica nella stessa Università pisana.

Al periodo pisano appartengono gli studi sul moto che condurranno Galileo ad accettare la teoria copernicana dell'Universo.

Galileo considera la Matematica come il linguaggio con cui è scritto il Libro della Natura, di cui l'astronomia non è che un capitolo.

Egli è un astronomo diverso da quelli che lo hanno preceduto, forse meno attento all'astronomia di posizione (che comunque conosce molto bene), ma molto più curioso di tutti quei fenomeni che potevano gettare una qualche luce sul *funzionamento* del mondo o avere qualche applicazione pratica.

Galileo e le prime osservazioni del cielo con il telescopio

Un principio fondamentale dell'opera di Galileo è il rispetto del primato dell'esperienza fisica nello stabilire la verità o la falsità delle tesi che venivano avanzate per creare dei modelli plausibili del mondo fisico.

La sua curiosità per la natura e la ricerca della *sensata esperienza* trova un aiuto fondamentale nell'applicazione del cannocchiale allo studio degli astri.

Nel 1609 Galileo viene a sapere che a Parigi era stato costruito un strumento che consentiva di vedere più vicini gli oggetti lontani.

Sono i primi cannocchiali la cui invenzione, se di invenzione si può parlare, venne successivamente rivendicata dagli occhialai olandesi, ma già 20 anni prima Gian Battista Della Porta ne aveva "descritto" uno nella sua *Magia Naturalis* [A quanto sembra lo strumento nacque in Italia ma non fu inventato dal Della Porta.

Per una parola forse definitiva sulla questione vedere "La Nouvelle Astronomie - Science de l'Universe", 1971 (traduzione italiana: "Guardiamo l'Universo - La Nuova Astronomia", ed. Feltrinelli 1972, pag. 24.]

Galileo e le prime osservazioni del cielo con il telescopio

Galileo, che ora insegna a Padova, ha una piccola officina in cui costruisce i suoi strumenti tra questi un cannocchiale che ingrandisce di trenta volte.

Il cannocchiale non viene subito utilizzato per osservazioni astronomiche, ma diventa prima uno strumento di guerra per le navi della Repubblica Veneta alla quale ne consegna 12.

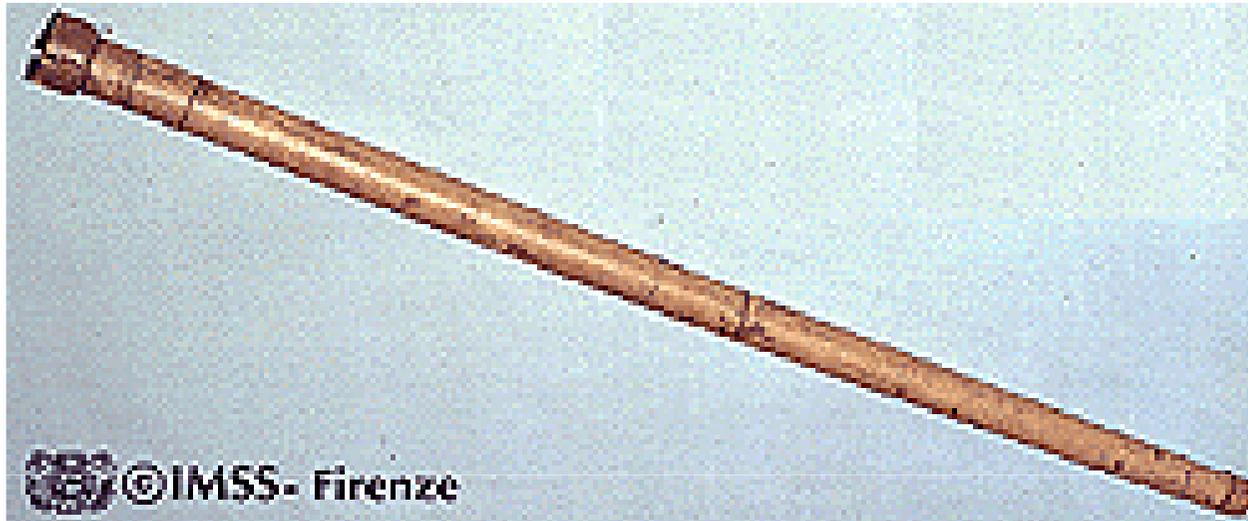
Quando Galileo inizia ad usare il cannocchiale per scrutare il cielo pubblica i risultati delle osservazioni su un opuscolo dal titolo *Sidereus Nuncius*.

Molte e di diversa natura sono le scoperte annunciate da Galileo in questo libro.

Il cannocchiale svela a Galileo un mondo completamente diverso da quello che tutti conoscevano.

Scopre che le nubi luminose della Via Lattea altro non sono che un insieme di stelle.

Cannocchiali di Galileo

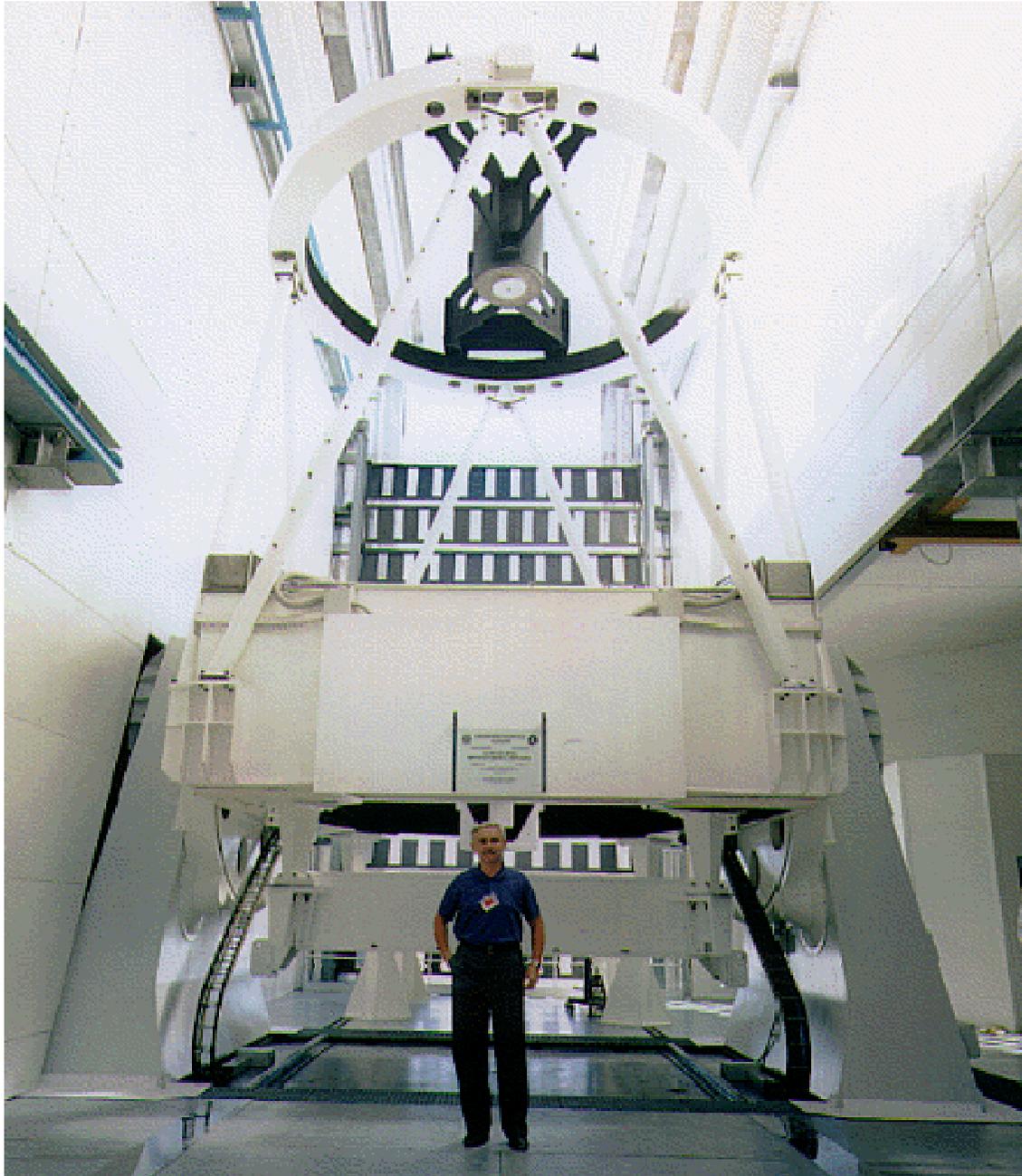


Il tubo di legno ricoperto di carta, contiene una lente obbiettiva biconvessa e un oculare piano concavo. Ha capacità di ingrandimento di 14 volte. La lente obbiettiva di questo cannocchiale ha distanza focale di 1330mm e apertura utile di 26mm.

Il tubo di legno è ricoperto di pelle rossa con fregi in oro. L'obbiettivo è biconvesso e l'oculare biconcavo. Ha capacità di ingrandimento di 21 volte. La lente obbiettiva ha apertura utile di 16mm e distanza focale di 980mm.



Il Telescopio Nazionale Galileo (TNG)



Il telescopio all'interno della cupola a Roque de los Muchachos (Isole Canarie).

Osservazione della Luna

La Luna gli appare scabra, cosparsa di monti, valli e grandi pianure:

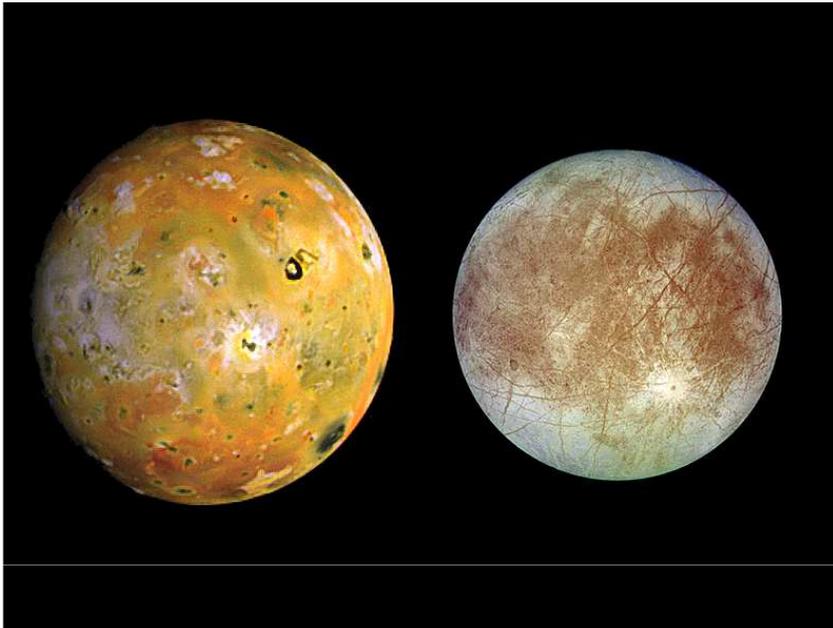
Già nel quarto o quinto giorno dopo la congiunzione, quando la Luna ci si mostra con i corni splendenti, il termine che divide la parte oscura dalla luminosa non si stende uniformemente secondo una linea ovale, come in un solido perfettamente sferico dovrebbe accadere, ma segnato da una linea diseguale, aspra e notevolmente sinuosa [...] Ma poi, non solo i confini tra le tenebre e la luce si vedono nella Luna ineguali e sinuosi, ma, ciò che induce maggior meraviglia, nella parte tenebrosa della Luna, appaiono moltissime punte lucenti, totalmente diverse e staccate dalla regione illuminata, e da esse non di breve intervallo distanti; le quali a poco a poco, trascorso un certo tempo, aumentano di grandezza e di luce, poi, dopo due o tre ore, si congiungono con la restante parte lucida, già fattasi più ampia [...] Or appunto sulla Terra, prima del sorgere del Sole, le più alte cime dei monti non sono illuminate dai raggi solari mentre l'ombra occupa tuttora le pianure?

Giove e le sue lune

Osserva anche Giove, il più brillante dei pianeti e scopre che attorno ad esso ci sono quattro lune. Nel gennaio 1610 Giove si trovava in una posizione molto favorevole per l'osservazione. Nel Sidereus Nuncius Galileo scrive:

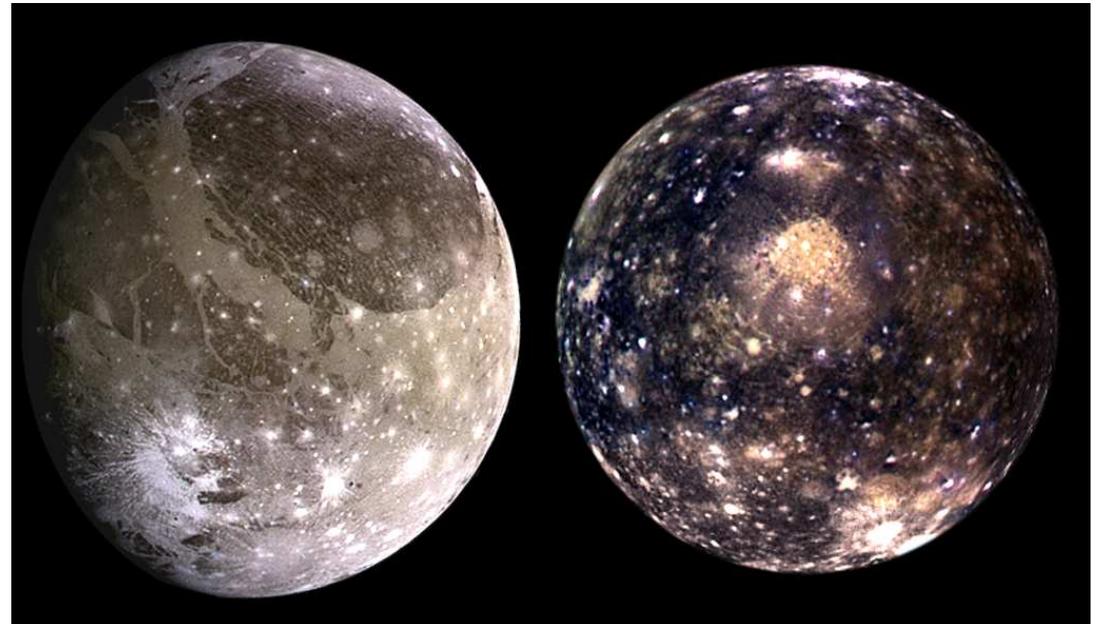
[...] il giorno 7 gennaio del corrente anno 1610, alla prima ora della notte seguente, mentre guardavo gli astri celesti con il cannocchiale, mi si presentò Giove; e poiché mi ero preparato uno strumento proprio eccellente, m'accorsi, [...] che gli stavano accanto tre Stelline piccole invero, ma pur lucentissime; le quali per quanto fossero da me credute del numero delle fisse, tuttavia mi destarono qualche meraviglia, per il fatto che apparivano disposte secondo un'esatta linea retta e parallela all'Eclittica, e più splendide delle altre loro pari per grandezza [...] dalla parte orientale c'erano due Stelle, una sola invece verso occidente. [...] essendo io ritornato, non so da quale fato condotto, alla medesima indagine il giorno 8, trovai una disposizione di molto diversa: erano infatti le tre Stelline tutte occidentali rispetto a Giove, e fra di loro più vicine che nella notte antecedente, e da uguali intervalli fra loro separate.

I satelliti galileiani



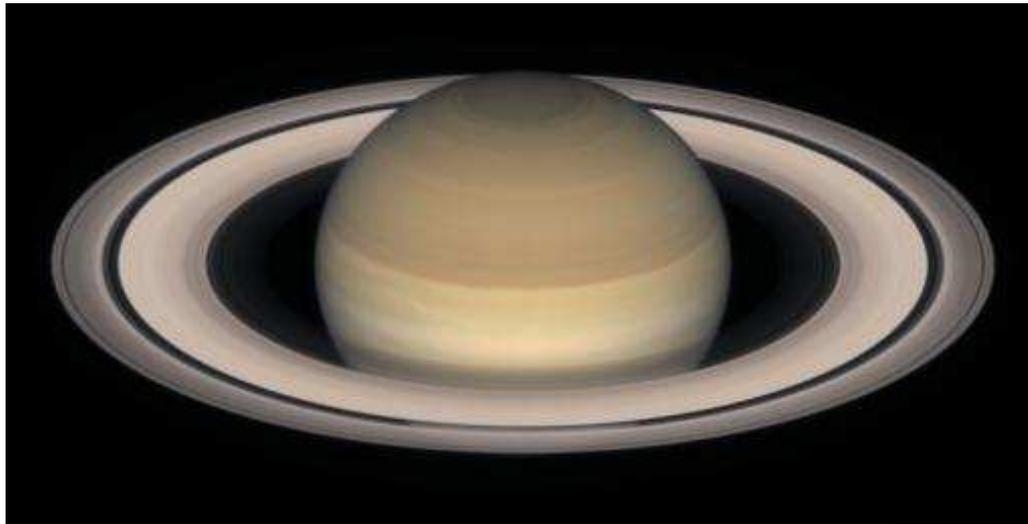
Io ed Europa

Ganimede e Callisto



L'osservazione di Saturno

Il 30 luglio 1610, da Padova, scrive a Belisario Vinta a Firenze una lettera in cui tra l'altro annuncia al Granduca di Toscana Cosimo II che ha osservato Saturno non circolare, ma con due grandi appendici diametralmente opposte. Sono gli anelli che Galileo non riesce a distinguere e che solo il fisico olandese Huygens osserverà compiutamente.



Saturno ripreso dall'Hubble Space Telescope

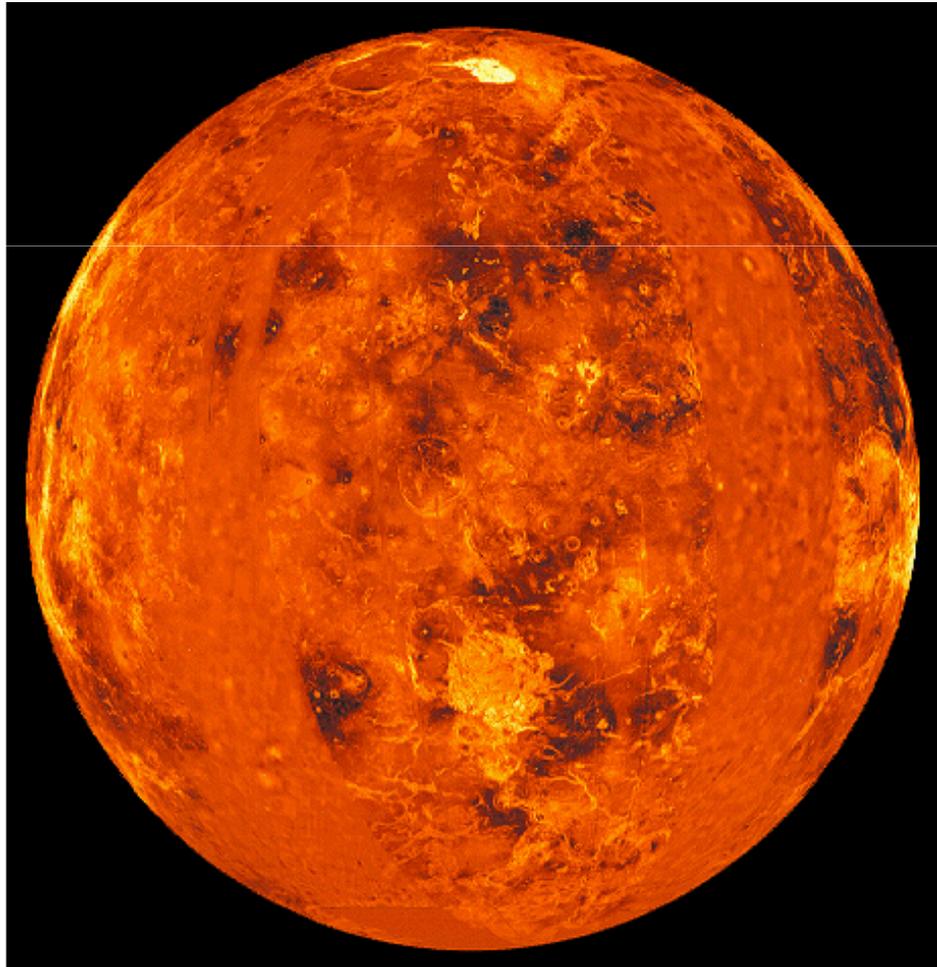
Saturno ripreso con una webcam da Cristian Fattinnanzi



L'osservazione di Venere

Nel 1610 Venere fu comodamente visibile la sera subito dopo il tramonto del Sole e Galileo scoprì che presentava le fasi come la Luna.

Venere ripresa dalla Terra . Foto di Alfredo Trombetta



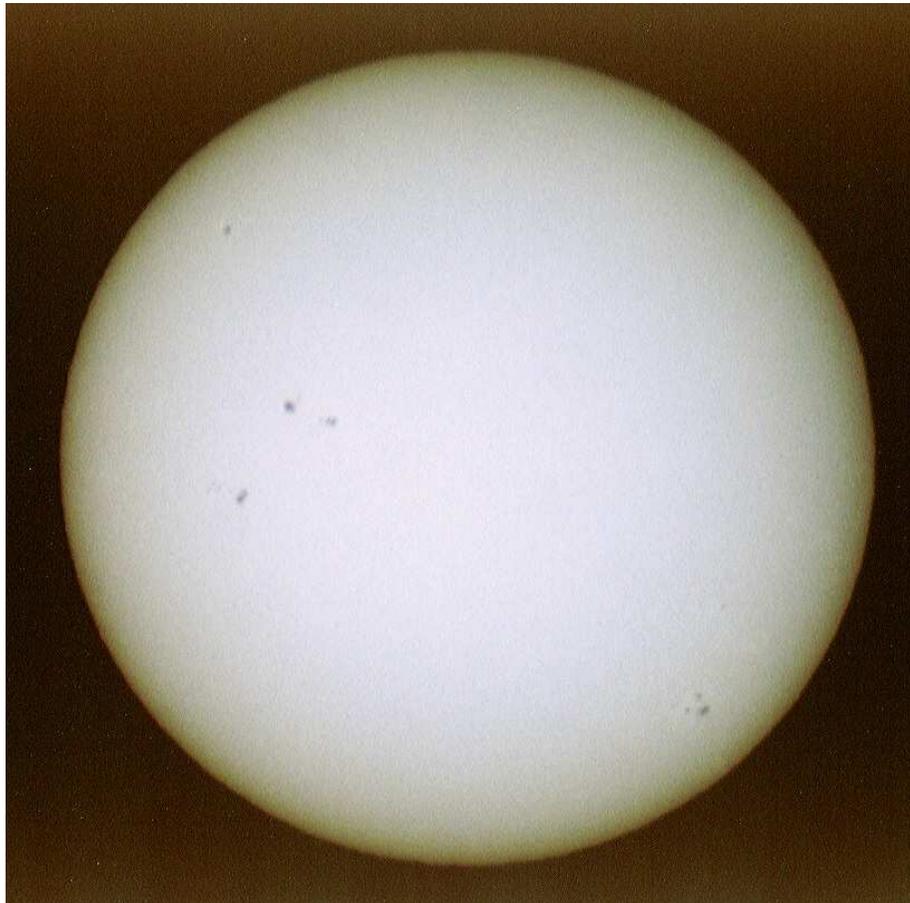
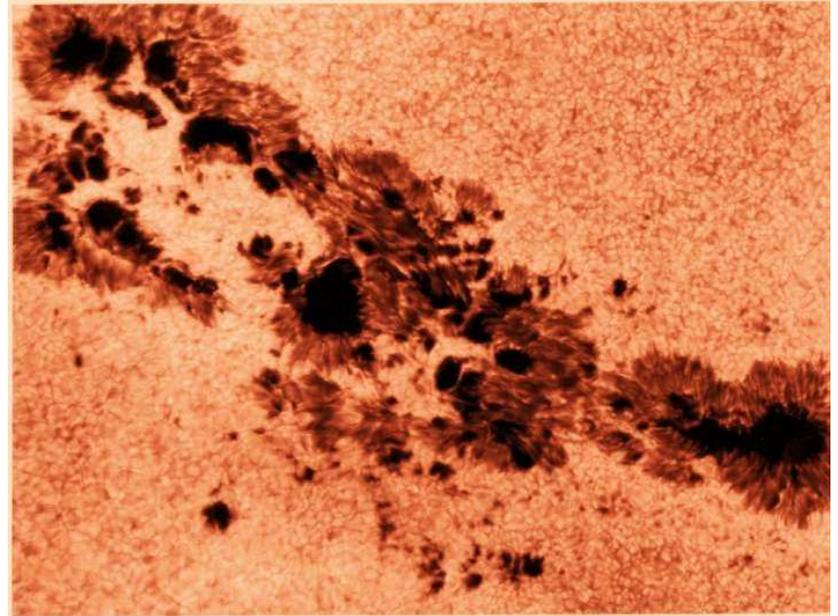
C'è chi sospetta che questa osservazione sia stata compiuta dall'allievo Benedetto Castelli che per ossequio al maestro non l'abbia rivendicata.

Comunque sia la scoperta di questo fenomeno dava la prova che Venere si muoveva attorno al Sole.

Venere ripresa dalla sonda Magellano.

L'osservazione del Sole

Galileo, osservando con il suo cannocchiale il Sole al tramonto, scopre che la sua superficie presenta delle macchie che ne dimostrano la rotazione.



Il Sole il 5 gennaio 2003 – Foto Angelo Angeletti

Le osservazioni di Galileo erano in palese contrasto con la cultura aristotelica del tempo che assumeva la perfetta sfericità e omogeneità degli oggetti celesti, per cui la Luna avrebbe dovuto apparire perfettamente liscia all'osservazione telescopica.

Le osservazioni di Galileo

- La scabrosità della Luna che orbita attorno alla Terra,
- la presenza dei satelliti di Giove che sembrano volere imitare in piccolo la struttura del sistema planetario,
- le fasi di Venere, possibili solo se Venere avesse orbitato attorno al Sole,
- Saturno tricorporeo che confutava la perfetta sfericità della quinta essenza, ovvero della sostanza dei cieli;
- le macchie solari.

avevano profondamente convinto Galileo della plausibilità del sistema copernicano, ma a differenza di Copernico e Keplero egli era convinto che il modello di Copernico non fosse semplicemente un comodo artificio per calcolare le effemeridi dei pianeti, ma che corrispondesse ad una reale struttura fisica dell'Universo.

Nel 1632 pubblicò il *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano* schierandosi apertamente a favore del sistema copernicano.

Le osservazioni di Galileo

Il libro fu condannato dalla Chiesa e Galileo accusato di eresia.

Minacciato di tortura, lo scienziato, ormai vecchio e malato, abiurò ufficialmente l'idea che la Terra si muovesse attorno al Sole.

Condannato al carcere a vita - commutato poi negli arresti domiciliari - Galileo, diventato anche cieco, continuò a lavorare con i suoi allievi Vincenzo Viviani ed Evangelista Torricelli nella sua villa di Arcetri, presso Firenze, dove morì l'8 gennaio 1642.

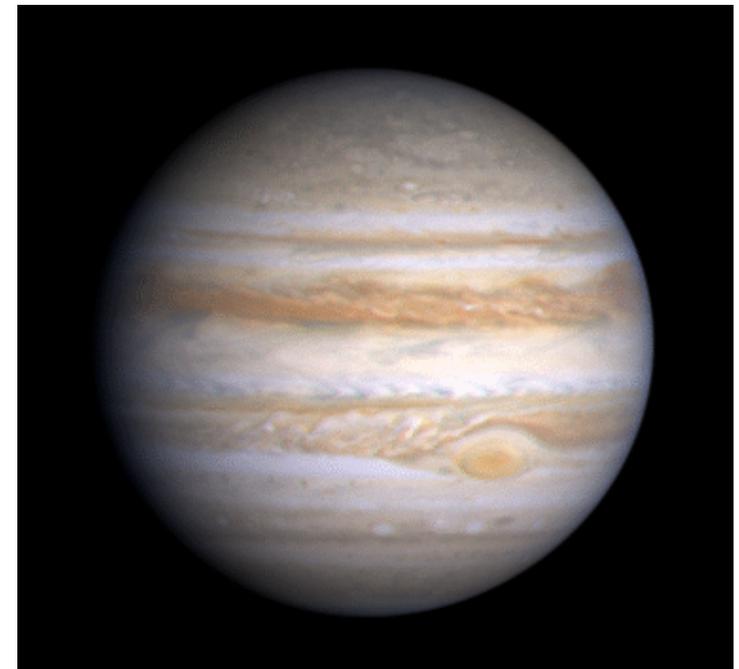
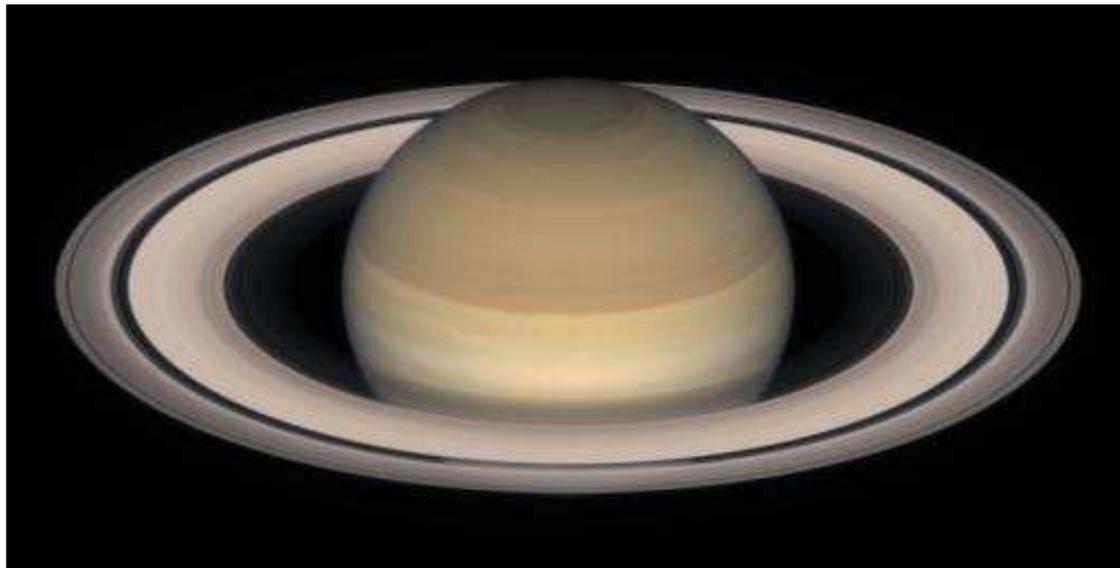
Il 31 ottobre 1992, dopo tre secoli e mezzo di caute e attente delibere della Chiesa, papa Giovanni Paolo II ha formalmente riabilitato Galileo.

Tra Galileo e Newton

Dopo la scoperta e le prime applicazioni di Galileo, il cannocchiale ha immediatamente un enorme sviluppo.

Nel 1655 Huygens scopre Titano (la luna più grande di Saturno)

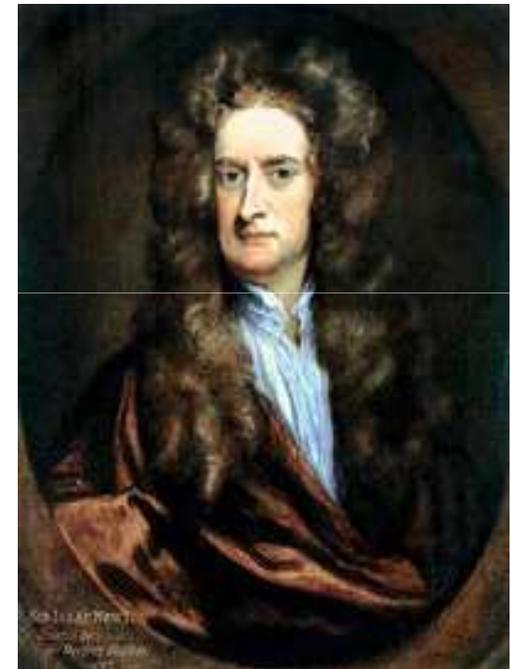
Gian Domenico Cassini, nel 1664, misura la rotazione di Giove di cui scopre la Grande Macchia Rossa; tra il 1671 e il 1672 scopre le lune di Saturno Giapeto e Rea e la divisione negli anelli che oggi porta il suo nome.



La legge della gravitazione universale di Newton

Isaac Newton (1642-1727) è sicuramente uno dei più grandi geni di tutti i tempi.

Avvalendosi del principio d'inerzia enunciato da Galileo e di una brillante intuizione di Hooke (gli aveva consigliato di studiare il moto dei pianeti dividendolo in due parti: una rappresentata da un moto inerziale lungo la tangente alla traiettoria, l'altra rappresentata da un moto accelerato in direzione del Sole) scoprì quale fosse il significato fisico delle leggi di Keplero.



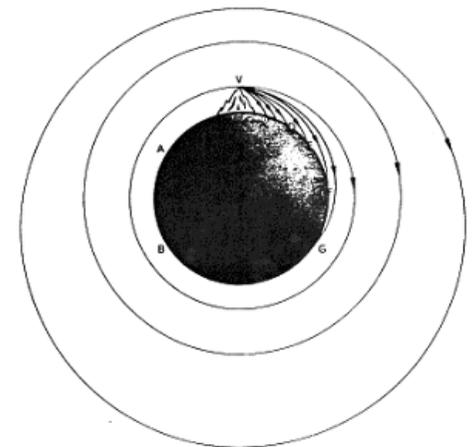
Concluse che essendo il moto dei pianeti non rettilineo e uniforme deve esserci una forza diretta verso il Sole che *regola*, ma non *causa* il moto.

La legge della gravitazione universale di Newton

Newton scoprì che tale forza segue la legge dell'inverso del quadrato della distanza.

I punti salienti del suo ragionamento sono:

- tutti i corpi cadono, in prossimità della superficie terrestre, con un'accelerazione pari a circa $9,8 \text{ m/s}^2$;
- la causa che fa cadere un corpo non viene meno qualunque sia l'altezza a cui il corpo è posto; se così non fosse dovrebbe esistere una determinata quota al di sopra della quale i corpi cessano di cadere e di pesare;
- anche la Luna deve avere un peso e deve in qualche modo cadere sulla Terra; questo significa che la presenza della Terra regola il moto orbitale della Luna.



La legge della gravitazione universale di Newton

Da ciò Newton formulò la legge della gravitazione universale, che possiamo enunciare come segue:

due corpi di masse m_1 ed m_2 esercitano l'uno sull'altro una forza, diretta lungo la loro congiungente, che è direttamente proporzionale al prodotto delle masse ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza fra i loro centri.

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

La costante G è nota come *costante di gravitazione universale* ed assume nel Sistema Internazionale il valore
 $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$.

La legge della gravitazione universale di Newton

È importante capire quali estrapolazioni avesse dovuto compiere Newton per giungere al risultato che la forza di gravità segue la legge dell'inverso del quadrato della distanza.

In primo luogo il risultato ottenuto per il sistema Terra-Luna non autorizzava a pensare che potesse essere altrettanto corretto in altri sistemi con caratteristiche totalmente diverse da quello preso in esame.

Solo in tempi relativamente recenti si è potuto verificare che ovunque nell'Universo la gravità varia come $1/r^2$.

La legge della gravitazione universale di Newton

In secondo luogo, per poter giustificare matematicamente le sue asserzioni, Newton dovette sviluppare un nuovo metodo di calcolo: il calcolo infinitesimale.

Era opinione corrente che il moto dei pianeti si svolgesse attorno ad un punto coincidente con il centro del corpo centrale (il Sole) ritenuto immobile.

Newton superò questa concezione applicando al moto planetario la sua terza legge del moto, il principio di azione e reazione.

Affermò che le azioni dei corpi che attraggono e che sono attratti sono sempre reciproche ed uguali: perciò, se ci sono due corpi, nessuno dei due può trovarsi in quiete, ed entrambi orbitano attorno a un centro comune (il *centro di massa* del sistema).

Astronomia del 1700

Dopo Newton nasce la Meccanica Celeste, con la quale è possibile fare calcoli che permettono di determinare, note tre posizioni di un corpo, la sua traiettoria futura.

È in questo modo che Halley riesce a capire la periodicità della cometa che porta il suo nome e Clairaut ne prevede il passaggio del 1759.

Il 1700 è anche l'epoca dei grandi viaggi nell'emisfero meridionale per l'osservazione del cielo del sud e la classificazione delle sue stelle.

Nel 1771 Messier pubblica la prima edizione del suo famoso Catalogo.

Nel 1781 W. Herschel scopre Urano.

Astronomia del 1800

Il XIX secolo si apre con la scoperta, fatta a Palermo nel 1801 da Padre Giuseppe Piazzi, di Cerere, il primo pianetino della fascia degli asteroidi.

Nel 1814 J. Von Fraunhofer, osservando il Sole, scopre le righe spettrali scure. È l'inizio della spettroscopia, i cui principi vengono enunciati da Kirchhoff nel 1860, e che porterà alla nascita dell'astrofisica.

Inizia lo studio sistematico del Sole di cui si scopre il ciclo di 11 anni.

Nel 1838 Bessel annuncia la prima misura della distanza di una stella (61 Gggni).

1846 – J.G. Galle e H. D'Arrest scoprono Nettuno su indicazioni di Le Verrier.

Un altro evento fondamentale è l'utilizzo nella fotografia in campo astronomico che avviene per la prima volta nel 1850.

Astronomia fine 1800 e inizio del 1900

Nel 1888 Dreyer pubblica il New General Catalogue in cui vengono riportate le posizioni di più di 7000 tra ammassi stellari e nebulose.

Ma uno degli eventi principali è l'entrata in funzione, nel 1905, a Monte Wilson in California, di un telescopio di 2,5 m che permetterà delle osservazioni tali da rivoluzionare la concezione dell'Universo.

Un altro evento fondamentale è la pubblicazione della teoria della relatività generale di Einstein che ci permetterà di costruire dei modelli per l'Universo.

Il resto è storia attuale.

FINNE