

CdS Matematica  
Corso di Fisica III

Note aggiuntive (1): Le scale di distanza in astronomia

Edoardo Milotti

0. Introduzione

Lo scopo di questa nota aggiuntiva è di richiamare il contesto culturale della Fisica prima di iniziare le lezioni dedicate all'elettrostatica e alla magnetostatica.

La Fisica costruisce modelli matematici, partendo dai costituenti elementari fino a descrivere la struttura del cosmo: questi modelli matematici sono vincolati dai dati sperimentali, quindi i dati e i numeri delle misure assumono un importante significato concettuale, perché vengono usati per selezionare i modelli.

In questa nota ci concentriamo su alcuni numeri importanti, vale a dire sulle scale di distanza dell'Universo. Si tratta ovviamente solo di una breve introduzione, e di un argomento ancora oggi molto dibattuto in ambito astronomico, visto che la determinazione delle distanze è fondamentale per i modelli cosmologici.

1. Misura del raggio terrestre

I greci sapevano che la Terra è (approssimativamente) sferica e Eratostene di Cirene fece delle stime particolarmente precise per l'epoca sia del raggio terrestre, sia delle distanze Terra-Luna e Terra-Sole



Eratostene di Cirene (276 a.C. – 194 a.C.)

L'immagine è tratta dal sito

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/history/BiogIndex.html>,  
dedicato alla storia della Matematica, pagina

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/history/Mathematicians/Eratosthenes.html>. Lo stesso sito riporta brevemente alcuni dettagli relativi alle misure fatte da Eratostene:

*Eratosthenes made a surprisingly accurate measurement of the circumference of the Earth. Details were given in his treatise *On the measurement of the Earth* which is now lost. However, some details of these calculations appear in works by other authors such as *Cleomedes*, *Theon of Smyrna* and *Strabo*. Eratosthenes compared the noon shadow at midsummer between Syene (now Aswan on the Nile in Egypt) and Alexandria. He assumed that the sun was so far away that its rays were essentially parallel, and then with a knowledge of the distance between Syene and Alexandria, he gave the length of the circumference of the Earth as 250,000 stadia.*

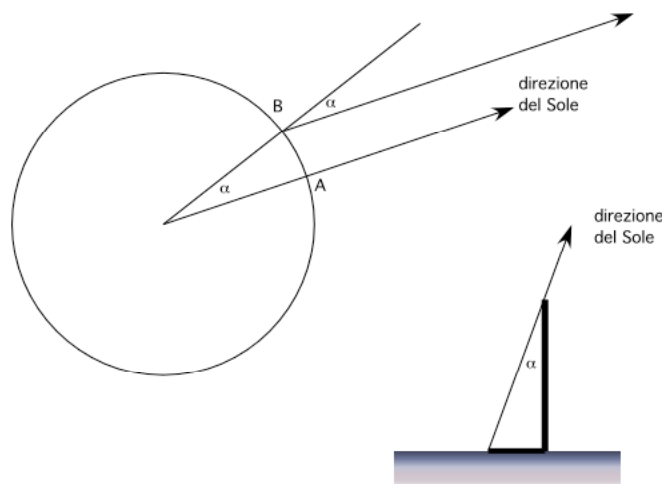
*Of course how accurate this value is depends on the length of the stadium and scholars have argued over this for a long time. ... It is certainly true that Eratosthenes obtained a good result, even a remarkable result if one takes 157.2 metres for the stadium as some have deduced from values given by Pliny. It is less good if 166.7 metres was the value used by Eratosthenes as Gulbekian suggests...*

*... Rawlins argues convincingly that the only measurement which Eratosthenes made himself in his calculations was the zenith distance on the summer solstice at Alexandria, and that he obtained the value of  $7^{\circ}12'$ . Rawlins argues that this is in error by  $16'$  while other data which Eratosthenes used, from unknown sources, was considerably more accurate.*

*Eratosthenes also measured the distance to the sun as 804,000,000 stadia and the distance to the Moon as 780,000 stadia. He computed these distances using data obtained during lunar eclipses. Ptolemy tells us that Eratosthenes measured the tilt of the Earth's axis with great accuracy obtaining the value of  $11\frac{1}{83}$  of  $180^{\circ}$ , namely  $23^{\circ}51'15''$ .*

Eratostene confrontò dunque la lunghezza delle ombre a mezzogiorno del giorno del solstizio d'estate a Syene (l'attuale Assuan) e Alessandria, assumendo che il Sole sia così lontano da poter considerare paralleli i raggi di luce che arrivano sulla Terra.

L'idea della misura è la seguente: se due località si trovano approssimativamente sullo stesso meridiano, e a mezzogiorno il sole si trova allo zenit della località A, allora è possibile fare la seguente costruzione geometrica:



L'angolo  $\alpha$  è lo stesso che ricava dalla misura dell'ombra di un bastoncino verticale nella località B. Conoscendo la distanza L tra A e B si trova allora il raggio terrestre:  $R = L/\alpha$ .

Attualmente sappiamo che la Terra è corpo sferico, leggermente schiacciato ai poli, con un raggio equatoriale di circa 6378 km.

Esercizio: si utilizzino i valori riportati nel testo inglese per dedurre il valore del raggio terrestre.

Domanda: quanto è importante che le due località si trovino approssimativamente sullo stesso meridiano?

## 2. Misura della distanza Terra-Luna

Attualmente la distanza Terra-Luna viene misurata per mezzo di impulsi laser riflessi da un riflettore lasciato sulla superficie lunare dagli astronauti della missione Apollo 11 nel 1969. Le misure mostrano che la Luna si allontana dalla Terra alla velocità di 3.8 cm/anno.

Le misure fatte da Eratostene utilizzavano invece semplici osservazioni delle eclissi solari e lunari.



Immagine del riflettore lasciato sulla Luna dagli astronauti dell'Apollo 11 (foto NASA)



Foto dell'eclisse anulare del 16/02/1999 visibile in Australia. Le immagini successive mostrano il Sole mentre viene oscurato dalla Luna. Non c'è totalità perché in questo caso il diametro angolare della Luna è leggermente più piccolo di quello del Sole (la Luna percorre un'orbita ellittica, non circolare, e durante questa eclisse si trovava ad una distanza maggiore del raggio medio dell'orbita) (foto di Fred Espenak)



Un'esposizione multipla che mostra le varie fasi di un'eclisse di Luna (foto di Forrest J. Egan)



Immagine dell'eclisse totale di Sole del 1998, fatta dall'isola di Antigua, nei Caraibi. In lontananza si vede l'isola di Montserrat con il vulcano attivo La Soufriere. (foto Charles Andres)

L'osservazione delle eclissi solari (totali ed anulari) mostra che il diametro angolare medio della Luna è approssimativamente uguale a quello del Sole, vale a dire circa  $30'$  ( $= 0.00873$  radianti). Questo è un dato importante, che utilizziamo per il calcolo del raggio dell'orbita lunare.

La misura della distanza Terra-Luna può essere ottenuta dall'osservazione delle eclissi totali di Luna. La prossima eclissi totale di Luna visibile dall'Italia è purtroppo piuttosto lontana (e sarà solo parzialmente visibile): avrà luogo il 21 dicembre 2010.

# Total Lunar Eclipse of 2010 Dec 21

Geocentric Conjunction = 08:13:36.0 UT    J.D. = 2455551.84278  
 Greatest Eclipse = 08:16:55.9 UT    J.D. = 2455551.84509  
 Penumbral Magnitude = 2.3064    P. Radius = 1.2673°    Gamma = 0.3213  
 Umbral Magnitude = 1.2614    U. Radius = 0.7145°    Axis = 0.3118°

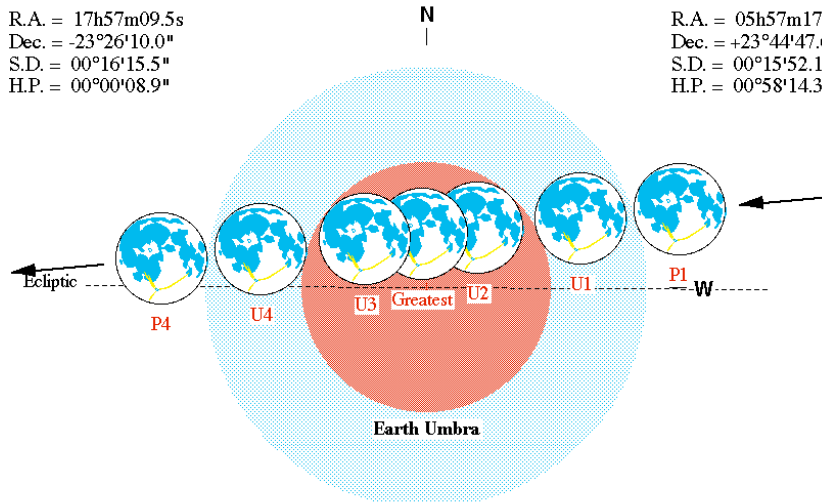
Saros Series = 125    Member = 48 of 72

**Sun at Greatest Eclipse**  
(Geocentric Coordinates)

R.A. = 17h57m09.5s  
 Dec. = -23°26'10.0"  
 S.D. = 00°16'15.5"  
 H.P. = 00°00'08.9"

**Moon at Greatest Eclipse**  
(Geocentric Coordinates)

R.A. = 05h57m17.2s  
 Dec. = +23°44'47.6"  
 S.D. = 00°15'52.1"  
 H.P. = 00°58'14.3"



**Eclipse Semi-Durations**

Penumbral = 02h49m11s  
 Umbral = 01h44m41s  
 Total = 00h36m36s

Eph. = Newcomb/ILE  
 ΔT = 67.6 s

**Eclipse Contacts**

P1 = 05:27:43 UT  
 U1 = 06:32:17 UT  
 U2 = 07:40:21 UT  
 U3 = 08:53:34 UT  
 U4 = 10:01:39 UT  
 P4 = 11:06:04 UT

F. Espenak, NASA's GSFC - 2004 Jul 07

<http://sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse/eclipse.html>

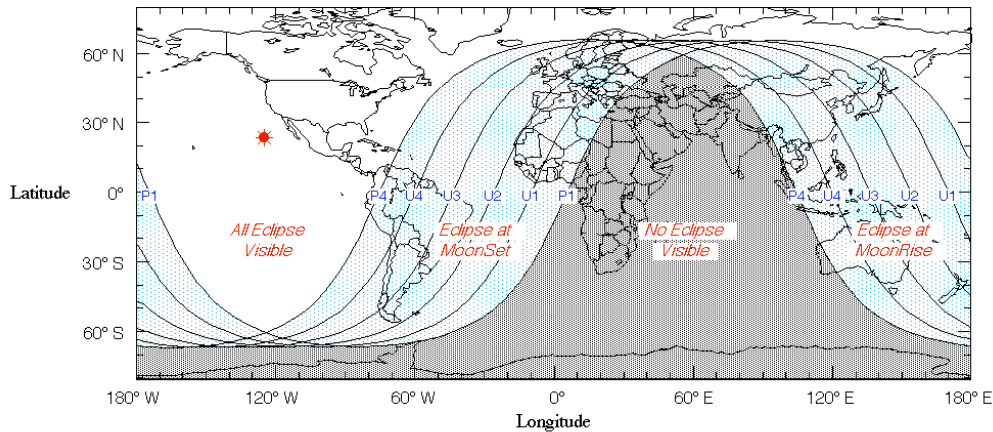
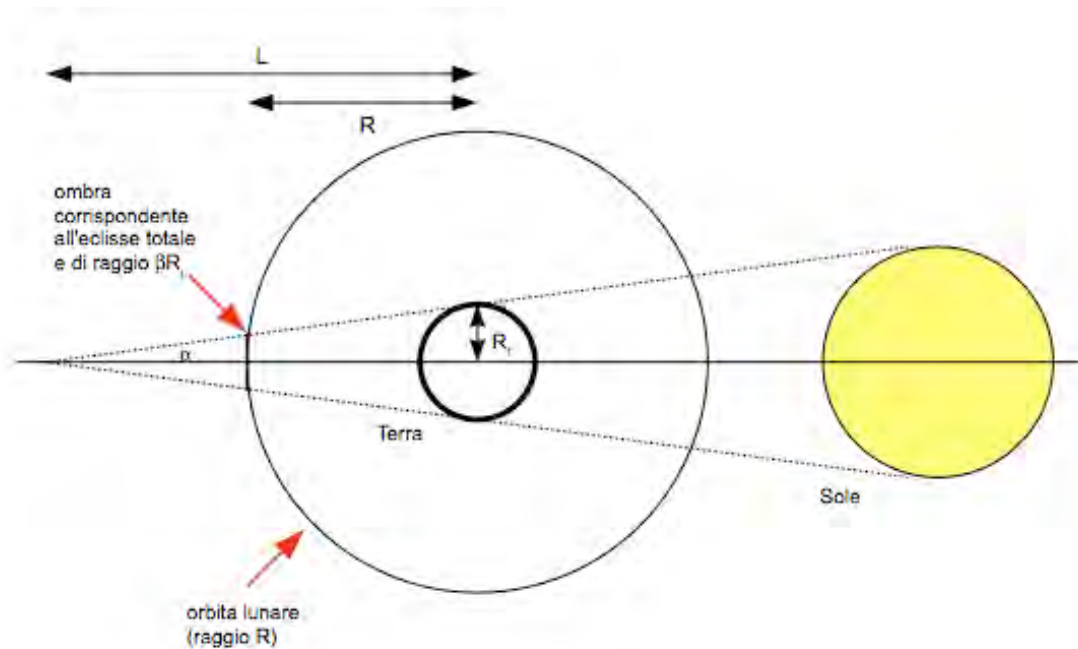


Grafico dell'eclisse del 21 dicembre 2010 con le posizioni relative della Luna e dei coni di ombra e di penombra (grafico tratto dal sito <http://eclipse.gsfc.nasa.gov> )

La figura seguente mostra la geometria del cono d'ombra della Terra, che si estende fino ad una distanza L dal centro della Terra . L'angolo  $\alpha$  corrisponde all'apertura angolare del cono d'ombra terrestre ed è uguale alla metà del diametro angolare del Sole (della Luna).



La figura mostra che (poiché l'angolo  $\alpha$  è piccolo)  $L \approx \alpha R_T$ , dove  $R_T$  è il raggio terrestre. Se  $R$  è il raggio dell'orbita lunare,  $R_L$  è il raggio della Luna e  $\beta$  è il raggio del cerchio d'ombra espresso in unità di raggi lunari, si trova facilmente che devono valere le seguenti similitudini:

$$\alpha \approx \frac{R_T}{L} \approx \frac{\beta R_L}{L - R}$$

e ricordando il dato trovato nella eclissi solari, vale a dire che il diametro angolare della Luna è uguale a quello del Sole:

$$2\alpha \approx \frac{2R_L}{R} \approx 0.00873.$$

Da queste relazioni si trova dunque sia il valore del raggio dell'orbita lunare, sia il raggio della Luna:

$$\alpha \approx \frac{R_T}{L} \approx \frac{\beta R_L}{L - R} \approx \frac{R_L}{R} \approx 0.004365$$

$$(\beta + 1)R = L = \frac{R_T}{\alpha}$$

$$R = \frac{R_T}{\alpha(\beta + 1)}$$

$$R_L = \alpha R$$

Esercizio: si utilizzino i valori dati nel testo e le fotografie seguenti per calcolare il raggio dell'orbita lunare ed il raggio lunare. Si confronti il risultato trovato con i valori noti. Si stimi l'errore di misura per ciascuna foto.



Foto di Akira Fujii dell'eclisse totale di Luna del luglio 2000, tratta dal sito online della rivista *Sky and Telescope* (<http://skyandtelescope.com>)



Eclisse parziale di Luna del 16 agosto 2008 (foto di Anthony Ayiomamitis, disponibile all'indirizzo: <http://www.perseus.gr/Astro-Eclipses-2008-08-16b.htm>)

Altre bellissime immagini di eclissi e molte altre informazioni sono reperibili sul sito dedicato alle eclissi di Fred Espenak: <http://sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse/eclipse.html> .

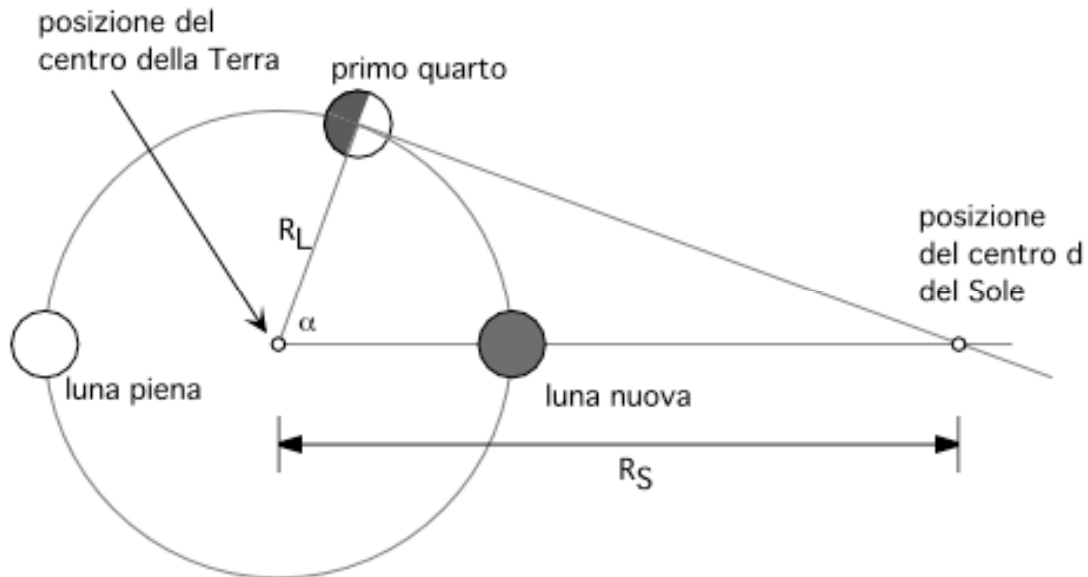
### 3. Misura della distanza Terra-Sole

La distanza media Terra-Sole (che oggi conosciamo molto bene e che vale circa 150 milioni di km) si può calcolare utilizzando la misura del raggio dell'orbita lunare e le fasi lunari, come mostrato nella figura seguente. In questo caso  $R_L$  è il raggio dell'orbita lunare,  $R_S$  è il raggio dell'orbita della Terra intorno al Sole (e dunque la distanza Terra-Sole). Supponiamo di essere in grado di misurare il tempo  $T_1$  che passa tra la luna nuova e il primo quarto e il tempo  $T_2$  che passa tra primo quarto e luna piena, allora

$$\alpha = \frac{\pi T_1}{T_1 + T_2}$$

e naturalmente,

$$R_S = \frac{R_L}{\cos \alpha}$$



Una misura di questo tipo ha un'incertezza molto grande, per calcolarla introduciamo l'angolo complementare  $\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha$ , che è un angolo molto piccolo. Dalla teoria della propagazione degli errori, si trova che se l'incertezza nella misura dell'angolo  $\alpha$  è  $\Delta\alpha$ , l'incertezza del valore calcolato della distanza Terra-Sole è

$$\Delta R_S = R_L \left| \frac{\sin \alpha}{\cos^2 \alpha} \right| \Delta \alpha$$

(Esercizio: si dimostri questa formula), e quindi, utilizzando l'angolo complementare



$$\Delta R_s = R_L \left| \frac{\cos \beta}{\sin^2 \beta} \right| \Delta \alpha \approx R_L \frac{1}{\beta^2} \Delta \alpha = R_L \frac{\Delta \alpha}{\left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right)^2}$$

Esercizio: si utilizzino i valori noti della distanza Terra-Luna e della distanza Terra-Sole per calcolare il valore dell'angolo  $\alpha$  e quindi l'incertezza sulla stima della distanza Terra-Sole, supponendo che l'incertezza sul valore di  $\alpha$  valga un quarto dell'angolo complementare  $\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha$ .

Il metodo di misura della distanza Terra-Sole descritto in questa sezione è molto impreciso. Ci sono parecchi altri metodi per misurare la distanza Terra-Sole, e un semplice riferimento è la pagina web dello European Southern Observatory: <http://www.eso.org/public/outreach/eduoff/aol/market/collaboration/solarpar/>.

Le seguenti tabelle contengono i valori di distanze e lunghezze attualmente accettati, e altri valori numerici di interesse del sistema solare:

Mass of the earth =  $M_e = 5.9742 \times 10^{24}$  kg  
 Total mass of planetary system =  $2.669 \times 10^{27}$  kg =  $447 M_e$   
 Total angular momentum of planetary system =  $3.148 \times 10^{43}$  kg m<sup>2</sup>/s  
 Total kinetic energy of the planets =  $1.99 \times 10^{35}$  J  
 Total rotational energy of planets =  $0.7 \times 10^{35}$  J

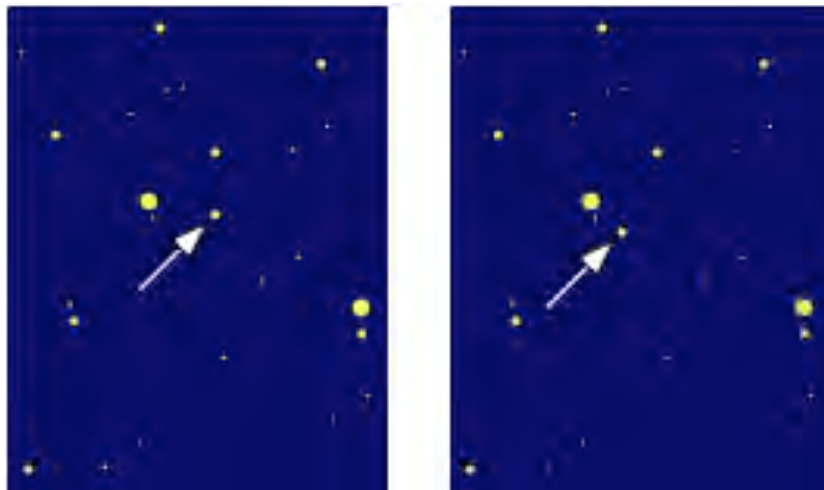
Properties of the sun:

Mass =  $1.9891 \times 10^{30}$  kg =  $332946.0 M_e$   
 Radius =  $6.9599 \times 10^8$  m  
 Surface area =  $6.087 \times 10^{18}$  m<sup>2</sup>  
 Volume =  $1.412 \times 10^{27}$  m<sup>3</sup>  
 Mean density =  $1.409$  g/cm<sup>3</sup>  
 Gravity at surface =  $27398$  cm/s<sup>2</sup>  
 Escape velocity at surface =  $6.177 \times 10^5$  m/s  
 Effective temperature =  $5780$  K  
 Total radiant power emitted (luminosity) =  $3.86 \times 10^{26}$  W  
 Surface flux of radiant energy =  $6.340 \times 10^7$  W/m<sup>2</sup>  
 Flux of radiant energy at the earth (Solar Constant) =  $1373$  W/m<sup>2</sup>

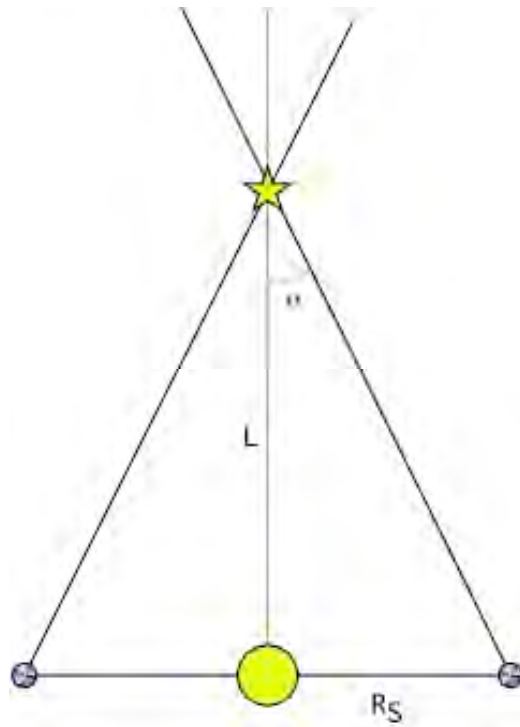
Planet	Mass $10^{24}$ kg	Den. g/cm <sup>3</sup>	Radius km	Dist. to sun AU
Mercury	0.33022	5.43	2439.7	0.38710
Venus	4.8690	5.24	6051.9	0.72333
Earth	5.9742	5.515	6378.140	1.00000
(Moon)	0.073483	3.34	1738	
Mars	0.64191	3.94	3397	1.52369
Jupiter	1898.8	1.33	71492	5.20283
Saturn	568.50	0.70	60268	9.53876
Uranus	86.625	1.30	25559	19.19139
Neptune	102.78	1.76	24764	30.06107
Pluto	0.015	1.1	1151	39.52940

#### 4. Misura della distanza Terra-stelle vicine

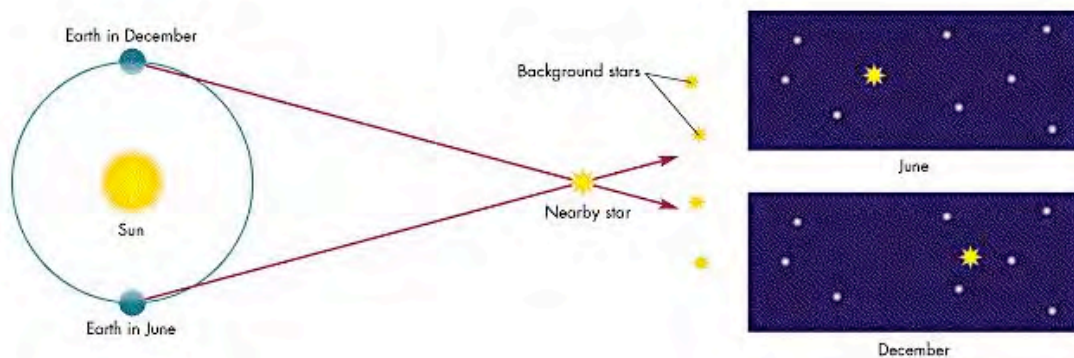
Utilizzando la distanza Terra-Sole si possono misurare le distanze delle stelle più vicine per mezzo della *parallasse stellare*.



Un campo stellare (simulato) che mostra un esempio di parallasse stellare: la stella indicata dalla freccia è molto più vicina alla Terra delle altre stelle, e nella seconda immagine, ripresa sei mesi dopo la prima, sembra che si sia spostata rispetto allo sfondo delle stelle lontane.



Questa figura mostra la geometria più semplice per la parallasse stellare: l'angolo di parallasse viene misurato a partire dalle posizioni apparenti di una stella rispetto al fondo delle stelle fisse, a distanza di sei mesi. La distanza stella-Sole si trova dalla misura dell'angolo di parallasse e dal raggio dell'orbita terrestre:  $L = R_S/\alpha$ .



L'angolo di parallasse di un secondo d'arco corrisponde ad una distanza standard, detta parsec (pc).

Esercizio: si calcoli quanto vale un parsec in unità di anni luce.

Risposta: un secondo d'arco corrisponde a circa  $4.85 \cdot 10^{-6}$  radianti, e se quest'angolo viene associato a una distanza di 150 milioni di km =  $3 \cdot 10^{11}$  m (vale a dire è il semiangolo di apertura del cono che ha per base l'orbita terrestre), si trova un raggio di  $3.1 \cdot 10^{16}$  m. Poiché in un anno ci sono circa  $3.13 \cdot 10^7$  s, un anno luce corrisponde circa a  $9.4 \cdot 10^{15}$  m ( $\approx 10^{16}$  m), e quindi un parsec vale circa 3.3 anni luce.

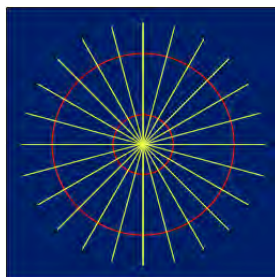
Chi fosse curioso di provare con una misura reale di parallasse può dare un'occhiata alla pagina web

[http://www.astro.washington.edu/labs/parallax/parallax\\_distance.html](http://www.astro.washington.edu/labs/parallax/parallax_distance.html)

Utilizzando misure angolari estremamente precise, come quelle del satellite Hipparcos, al giorno d'oggi si può utilizzare questo metodo fino a distanze di circa 500 anni luce.

## 5. La legge $1/r^2$

Si consideri la figura seguente, che mostra i raggi che provengono da una sorgente puntiforme:



come si vede la densità dei raggi sui due cerchi è inversamente proporzionale al raggio dei cerchi: nel caso di due sfere la densità dei raggi è inversamente proporzionale alle aree (e quindi ai quadrati dei raggi) delle due sfere.

Per questo motivo se si sa che una sorgente di luce a distanza  $R_0$  ha un'intensità luminosa  $I_0$ , e si osserva invece un'intensità  $I$ , si può concludere che la distanza a cui si trova la sorgente deve rispettare la relazione

$$\frac{I}{I_0} = \frac{R_0^2}{R^2}$$

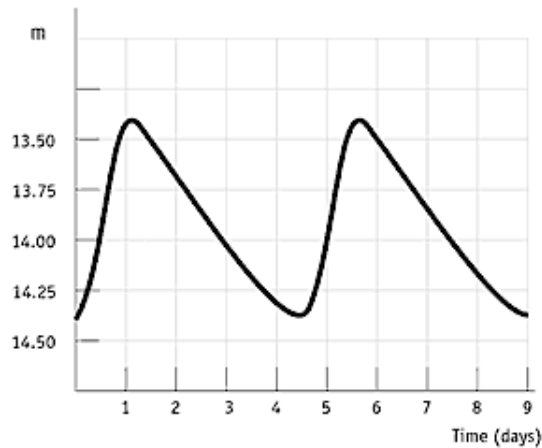
e quindi

$$R = R_0 \sqrt{\frac{I_0}{I}}$$

## 6. Stelle più lontane

La misura di distanze maggiori di quelle per cui è applicabile il metodo della parallasse è possibile con altri metodi, come quello delle *Cefeidi*.

Le stelle Cefeidi sono stelle variabili, in cui il periodo di variazione della luminosità è correlato con la luminosità assoluta della stella. La figura mostra una curva di luce tipica per una stella di questo tipo



La relazione tra intensità assoluta (in pratica l'intensità  $I_0$  del paragrafo precedente) e periodo è data da

$$I_0 \propto P^{-2.78}$$

dove  $P$  è il periodo della stella variabile (di solito misurato in giorni). Dunque, misurando il periodo si misura l'intensità assoluta, e da una misura dell'intensità  $I$  si trova la distanza, applicando la legge dell'inverso del quadrato della distanza.

La correlazione tra periodo e intensità assoluta è stata scoperta nel 1912 da Henrietta Leavitt ed ha permesso di misurare distanze fino a diversi milioni di anni luce.



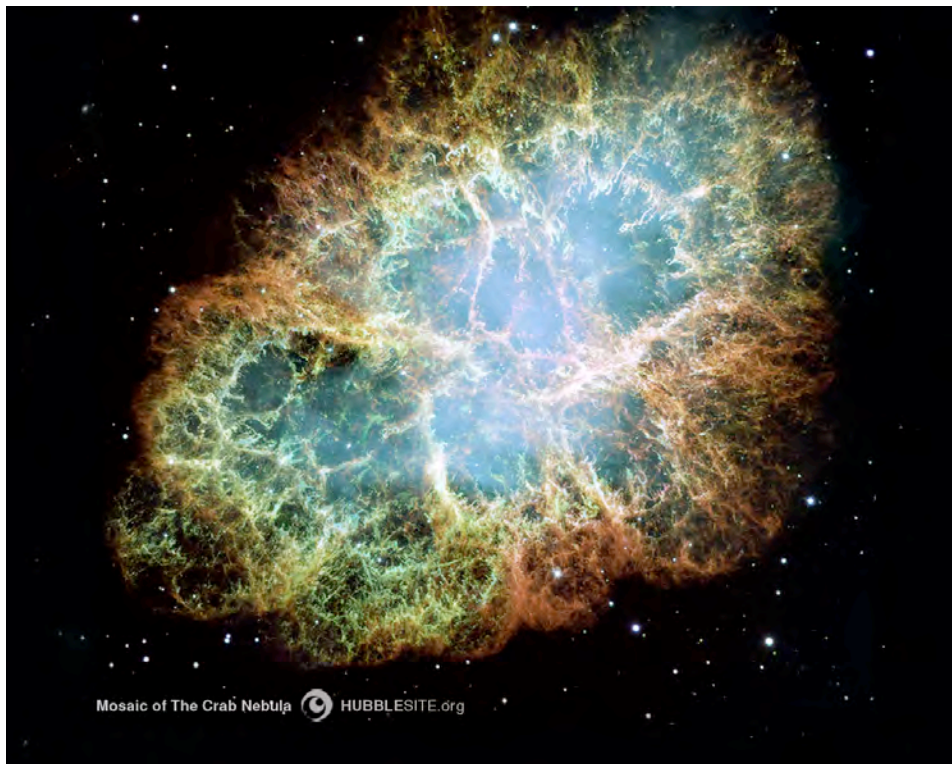
L'astronoma Henrietta Leavitt

## 7. Distanze cosmologiche

Alcune stelle in prossimità della fine della loro vita producono delle gigantesche esplosioni. Si tratta di un fenomeno piuttosto comune: nel giro di poche ore può capitare di veder comparire ad occhio nudo una stella dove prima non se ne vedeva nessuna. Nell'esplosione le stelle aumentano di molto la loro luminosità, stelle che prima erano invisibili ad occhio nudo diventano oggetti ben visibili, e per questo motivo si usa l'espressione *stelle novae* (dal latino), o semplicemente *novae*, per caratterizzare questo fenomeno. Alcune di queste esplosioni corrispondono semplicemente all'eiezione di un guscio di gas caldo, la stella resta sostanzialmente intatta e quando il guscio si espande e si raffredda, la luminosità della stella diminuisce nuovamente. Più raramente accade che queste esplosioni siano assai più violente, la struttura della stella viene completamente modificata e viene eiettata nello spazio una quantità enorme di massa e di radiazione: in questo caso si parla di *supernovae*, e queste esplosioni possono essere visibili da terra anche quando avvengono in galassie molto lontane.

Esistono diverse classi di supernovae, e alcune di queste producono una quantità di radiazione che è sempre approssimativamente la stessa. Questo vuol dire che la luminosità assoluta di queste esplosioni è sempre approssimativamente la stessa. Per questo motivo, ogni volta che si identifica in una galassia distante una di queste supernovae, si può utilizzare la legge dell'inverso del quadrato della distanza per misurare la distanza della galassia.

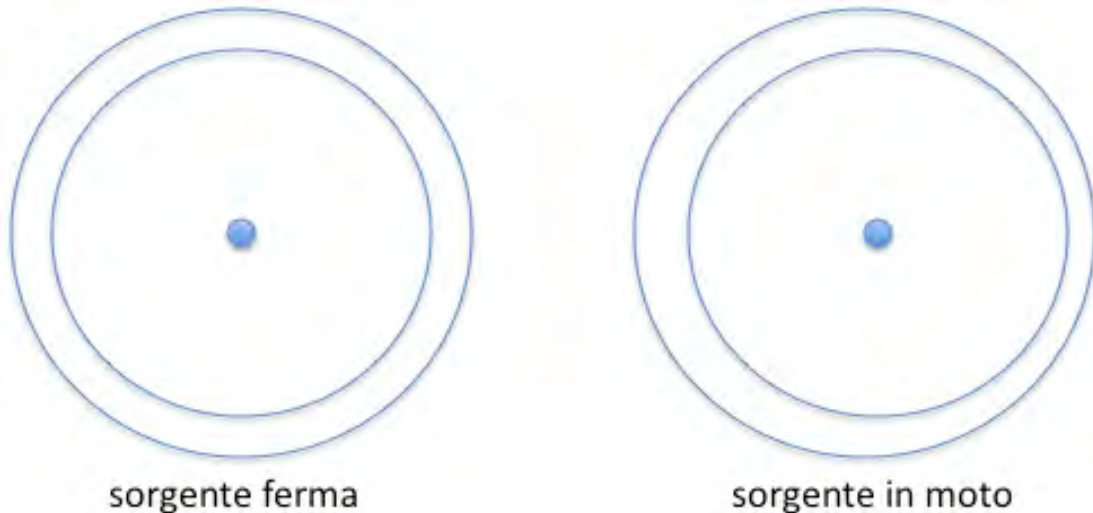
La foto seguente mostra ciò che resta di una potente esplosione di supernova avvenuta nella nostra galassia nel 1054 d.C. e registrata dagli astronomi cinesi, la famosa *nebulosa del Granchio* (in inglese *Crab Nebula*). All'interno della nebulosa c'è ciò che resta della stella esplosa, una stella molto compatta che emette segnali radio con periodicità ben definita, una *pulsar* (*pulsating star*), che è un importante oggetto di studio per gli astronomi.



## 8. L'effetto Doppler

Quando una sorgente di onde di luce è in movimento rispetto ad un osservatore, allora l'osservatore riceve delle onde che hanno una frequenza diversa da quella che hanno nel sistema di riferimento della sorgente.

Ad un certo istante di tempo la sorgente emette un fronte d'onda sferico, come nella figura a sinistra, e dopo un tempo  $T$  (il periodo dell'oscillazione) ne emette un altro. I fronti d'onda viaggiano a velocità  $c$ , e nel tempo  $T$  percorrono la distanza  $Tc$ , quindi fronti d'onda successivi sono separati dalla distanza  $Tc$ .



Supponiamo ora che la sorgente si muova con velocità  $V$  rispetto l'osservatore, come nella figura a destra: allora, dopo un periodo di durata  $T$ , la sorgente si è spostata di una distanza  $TV$  rispetto l'osservatore, e quindi i fronti d'onda distano ora (nella direzione di moto)  $Tc-TV$ . Dal momento che la velocità della luce è invariante, vale a dire è la stessa nei due sistemi di riferimento, l'osservatore che vede i fronti d'onda deduce che il periodo di oscillazione è

$$T\left(1-\frac{V}{c}\right)$$

e quindi la frequenza di oscillazione è

$$\nu_o = \frac{1}{T\left(1-\frac{V}{c}\right)}$$

invece di

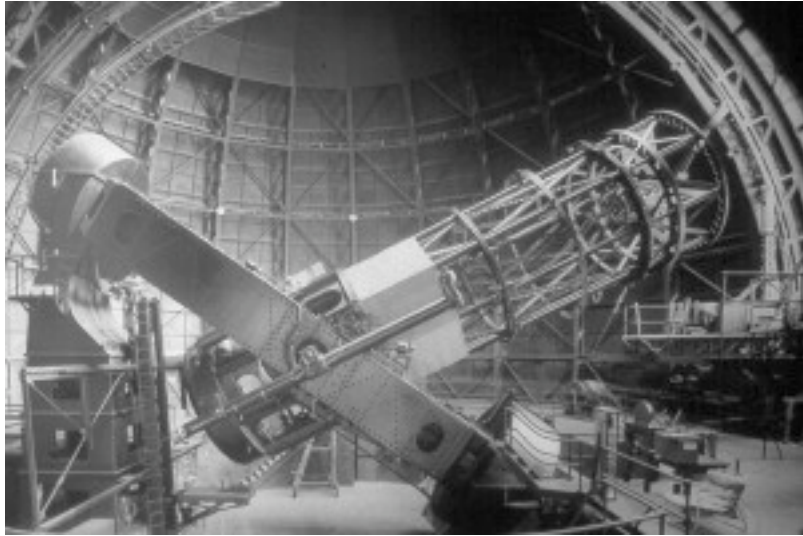
$$\nu_s = \frac{1}{T}$$

Dalle queste formule si vede che se una sorgente si avvicina allora la frequenza aumenta (spostamento verso il blu), mentre se la sorgente si allontana la frequenza diminuisce (spostamento verso il rosso): questo è l'effetto Doppler.

## 9. La legge di Hubble

All'inizio del XX secolo non era affatto chiaro quanto fosse grande l'Universo. Alcuni astronomi ritenevano che l'Universo coincidesse con la nostra galassia, mentre altri pensavano che la nostra galassia fosse solo una tra tante e che l'Universo fosse più grande. Nel 1920 si tenne un dibattito tra astronomi, ed in particolare tra Shapley e Curtis (il primo convinto che l'Universo coincidesse con la galassia, l'altro del contrario): questo dibattito è ancora oggi noto come il Grande Dibattito (the Great Debate).

Poco prima del 1920 era stato completato il telescopio da 2.5 m di Monte Wilson, e il giovane astronomo Edwin Hubble aveva cominciato a fare le sue osservazioni di galassie. Con questo telescopio, che allora era il più grande del mondo, Hubble riuscì ad individuare stelle variabili Cefeidi in parecchie galassie a spirale, inclusa la galassia di Andromeda. Le sue osservazioni, fatte nel periodo 1922-23 dimostrarono in modo incontrovertibile che queste erano troppo distanti per essere parte della nostra galassia, e questo mutò in modo fondamentale l'immagine dell'Universo.



Una vecchia immagine del telescopio di Monte Wilson con cui Hubble ha fatto le sue fondamentali osservazioni delle galassie

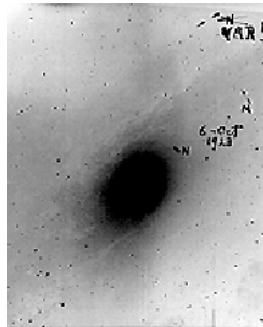


Una foto di Edwin P. Hubble nel 1931

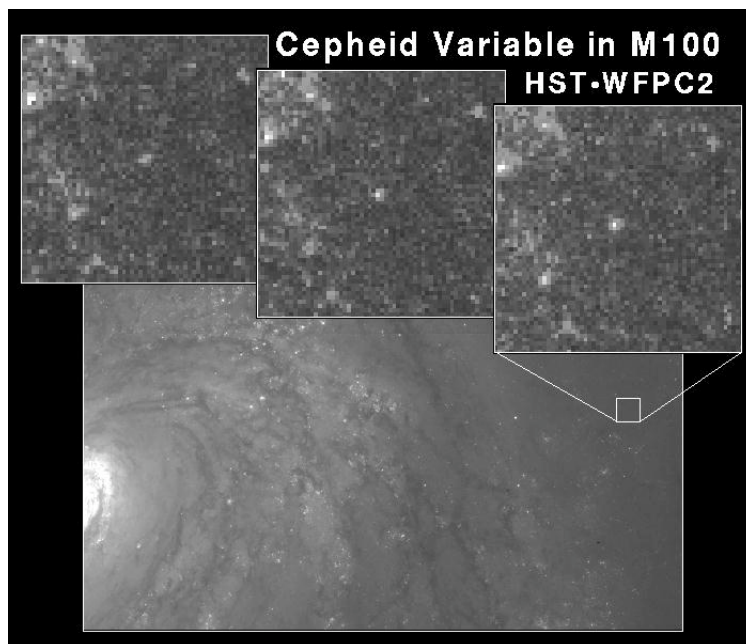




Un immagine di M31 (la galassia di Andromeda)



Un negativo fotografico della regione intorno al nucleo della galassia di Andromeda su cui Hubble ha marcato le posizioni di alcune stelle Cefeidi



Identificazione di una Cefeide nella galassia M100 in una serie di osservazioni del telescopio spaziale orbitante Hubble

In quegli stessi anni era noto anche che le galassie emettevano luce che in varia misura era spostata verso il rosso. Come abbiamo visto uno spostamento verso il rosso può essere interpretato come un effetto Doppler associato ad un moto di allontanamento. Hubble mise in relazione la distanza delle galassie misurata per mezzo delle Cefeidi con lo spostamento verso il rosso, ricavando così una relazione tra distanza e velocità di allontanamento. Il risultato fu sorprendente: la velocità di allontanamento è proporzionale alla distanza. Ciò è in accordo con la soluzione di Friedmann delle equazioni della teoria della Relatività Generale: per la prima volta nella storia esisteva dunque un modello matematico dell'Universo confermato dalle osservazioni sperimentali.

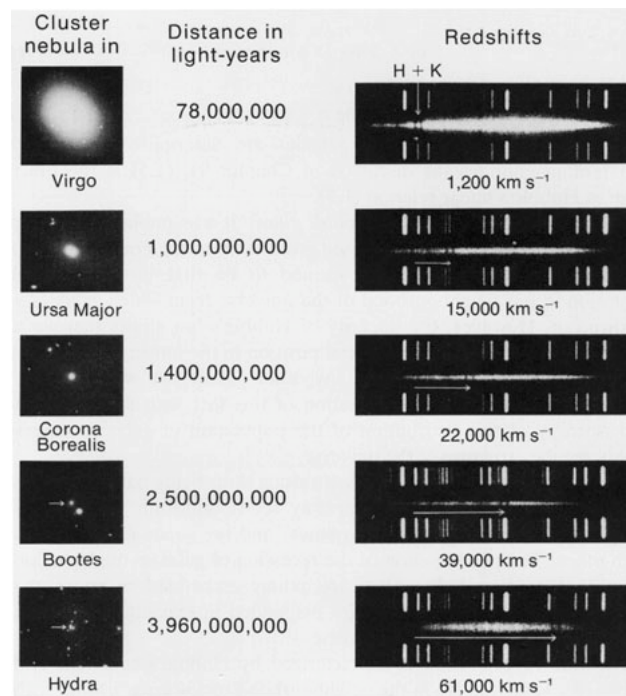
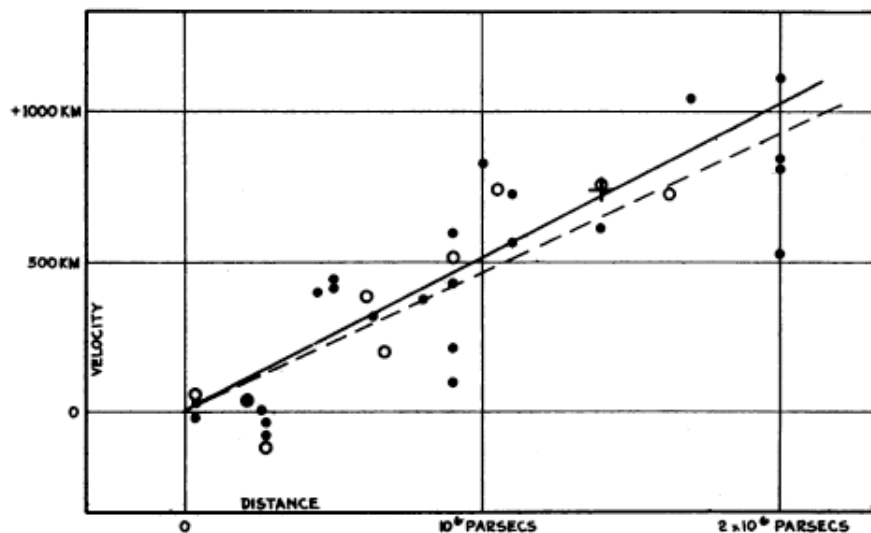


Immagine di galassie (a sinistra) e i corrispondenti spettri, da cui si ottiene lo spostamento verso il rosso, e quindi la velocità di allontanamento.



Il grafico velocità-distanza pubblicato da Hubble nel suo articolo del 1929.

La legge di Hubble si scrive di solito nella forma

$$v = HD$$

dove  $D$  è la distanza e  $H$  è la costante di Hubble. I risultati di Hubble sono stati confermati da un gran numero di osservazioni successive, ed il valore attualmente accettato della costante di Hubble è circa 72 (km/s)/Mpc.

Si noti ora che se la velocità di espansione è costante,  $R$  è il raggio dell'Universo e  $T$  è la sua età, allora si può scrivere la velocità di espansione corrispondente al raggio dell'Universo:  $v_R = R/T$ , e quindi

$$v_R = HR = \frac{R}{T}$$

da cui si trova  $T = \frac{1}{H} \approx 4.3 \cdot 10^{10} \text{ s} \approx 13.8$  miliardi di anni .