



SISTEMI STELLARI BINARI

CORSO DI FORMAZIONE DI ASTRONOMIA E ASTROFISICA

PER DOCENTI DI SCUOLA SECONDARIA

ANNO 2020-2021

MIZAR E ALCOR

Alcor

Mizar

Mizar (ζ UMa) e Alcor (80 UMa) sono una coppia di stelle facilmente visibile ad occhio nudo



LA PRIMA STELLA DOPPIA

Alcor



Stella Doppia: una stella che ad occhio nudo appare singola, ma quando viene osservata con l'aiuto di strumentazione mostra la presenza di due o più componenti (stelle multiple).

Sidus Ludovicianum



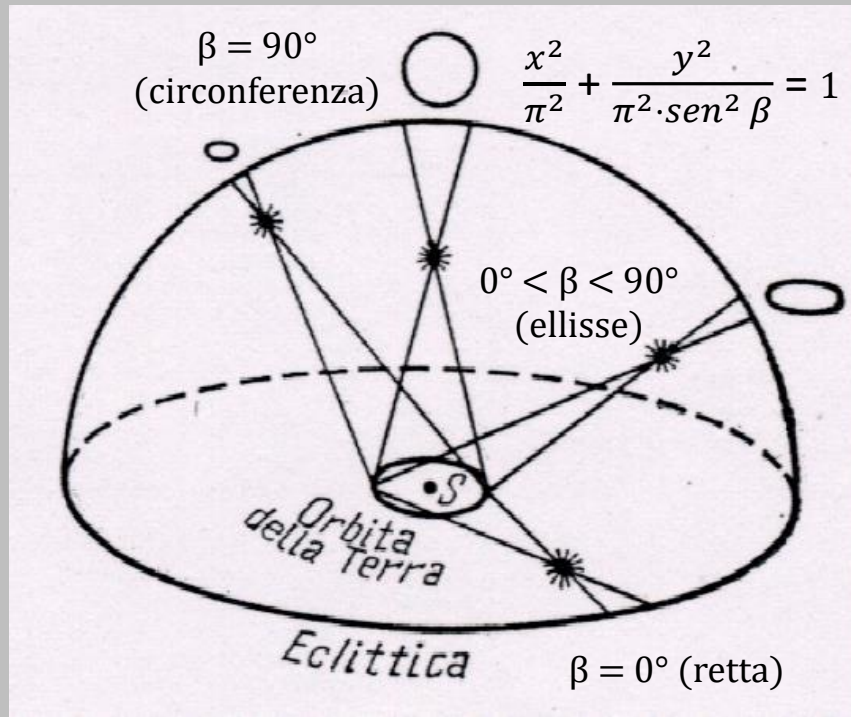
Mizar A - B



Benedetto Castelli (1617)
osserva Mizar al telescopio
e ne scopre la duplicità

LE STELLE DOPPIE E LA TEORIA COPERNICANA

Sfruttare la scoperta per evidenziare il moto parallattico annuale delle stelle (effetto del moto di rivoluzione della Terra intorno al Sole)



Parallasse stellare $\pi < 0.7685$ arcsec
Per Mizar A-B: $\pi = 0.03801$ arcsec

Per gli astronomi del XVII secolo, le stelle doppie:

- sono stelle singole che appaiono vicine solo prospetticamente ma in realtà hanno distanze diverse;
- hanno la stessa luminosità per cui la stella che appare più luminosa è anche quella più vicina;
- quindi le due stelle avranno parallassi diverse, variando le loro geometrie reciproche;
- è molto più facile misurare lo spostamento relativo tra due stelle che non i loro spostamenti assoluti nel cielo.

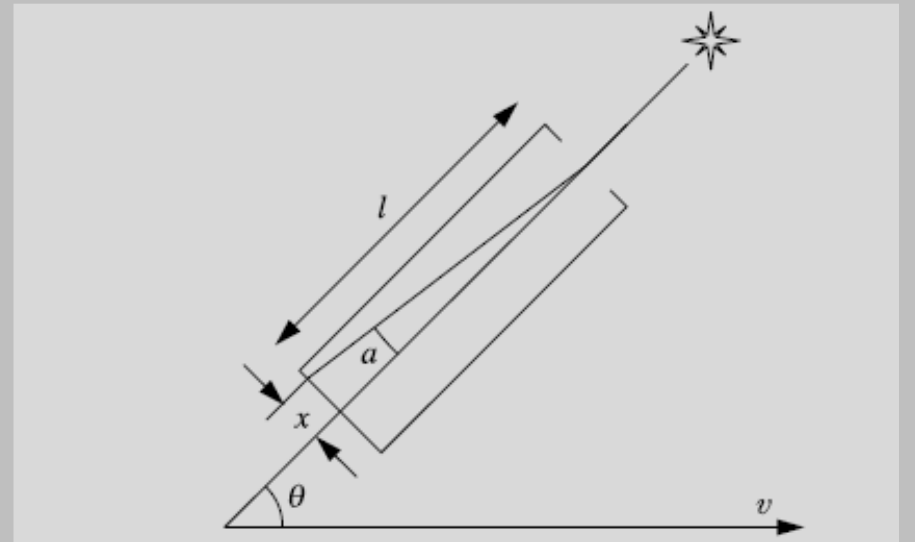
Mizar: il primo candidato per la misura della parallasse annua

L'ABERRAZIONE STELLARE

Il moto di rivoluzione della Terra intorno al Sole genera un movimento molto più ampio delle stelle nel cielo: l'aberrazione stellare.

$$\frac{x^2}{\left(\frac{v}{c}\right)^2} + \frac{y^2}{\left[\frac{v}{c}\right]^2 \cdot \sin^2 \beta} = 1 \quad \frac{v}{c} = \frac{29.78}{299792.458} \cdot 206265'' \sim 20.5''$$

E' dovuta alla combinazione della velocità orbitale media della Terra ($v = 29.78 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) con la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto ($c = 299792.458 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$)



Bradley nel 1728 interpreta correttamente il fenomeno dell'aberrazione della luce.

IL LAVORO DI HERSCHEL E I SISTEMI BINARI

- Herschel cercava di determinare la distribuzione delle stelle della Via Lattea, misurando le loro distanze.
- Anche Herschel partiva dall'assunzione errata che le stelle fossero tutte uguali tra loro e che una luminosità più debole equivalesse a una distanza maggiore.
- Nello studiare le stelle doppie per questo scopo, scopre che le stelle si muovevano in cielo come se orbitassero una attorno all'altra.
- Nasce il concetto di sistema stellare binario (1803).



William Herschel



Caroline Herschel



DOPPIE OTTICHE E BINARIE (DOPPIE FISICHE)

La prima grande suddivisione tra le stelle doppie:

Doppia ottica: due stelle che appaiono vicine solo per la particolare prospettiva da cui le osserviamo, non alcun legame gravitazionale e si trovano a distanze diverse dal sistema solare.

Binaria (doppia fisica): due stelle che ruotano attorno ad un comune centro di massa

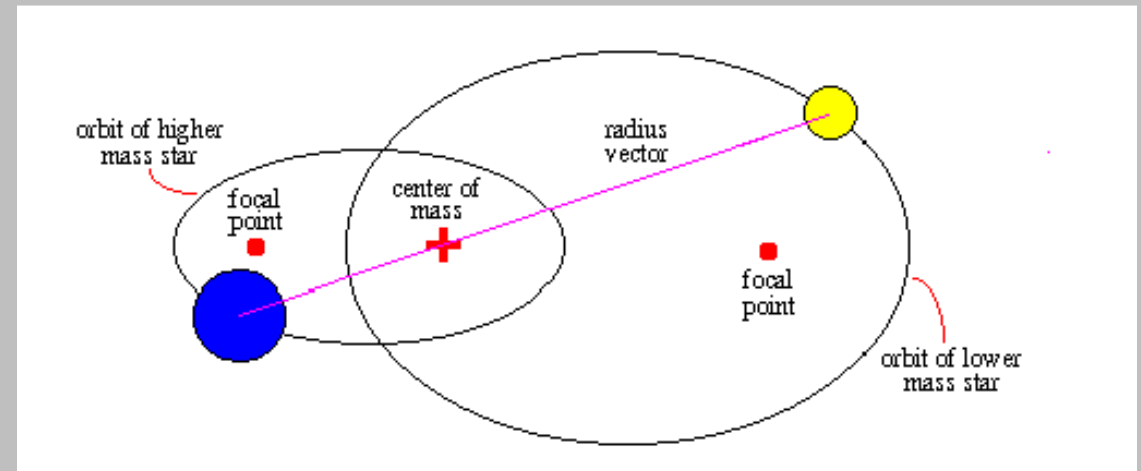
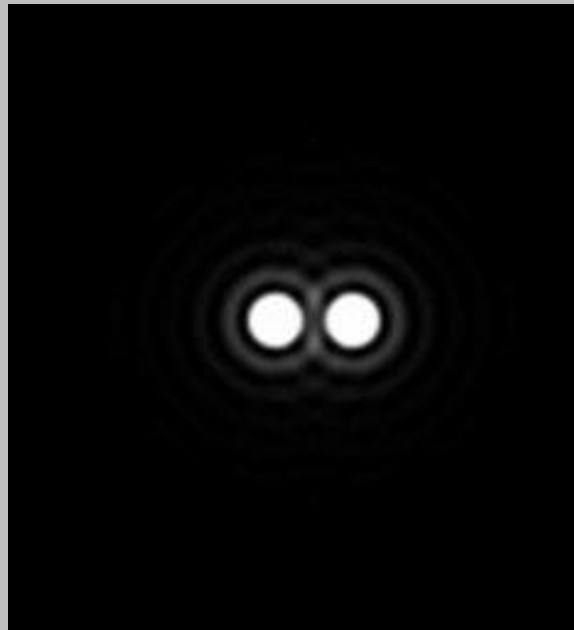
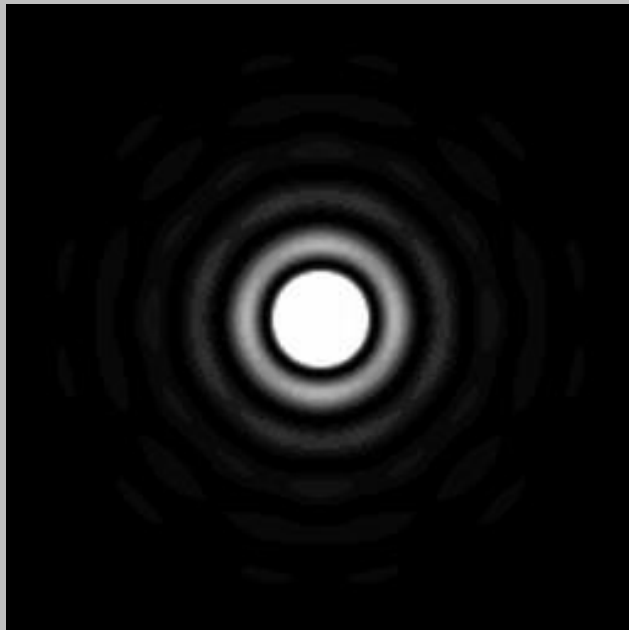


IMMAGINE DI DIFFRAZIONE

- Per effetto della **diffrazione** della luce, l'immagine di una stella osservata in un telescopio appare come un disco (disco di Airy) circondato da una serie di anelli, di luminosità decrescente.



Immagini: https://divulgazione.uai.it/index.php/Introduzione_alle_stelle_doppie

<http://www.damianpeach.com/images/articles/pickering/pickering5.gif>

POTERE DI RISOLUZIONE DI UN TELESCOPIO

- Per definizione, un telescopio, ad alti ingrandimenti, ha la capacità di separare due stelle quando la loro distanza angolare ' R ' è maggiore della distanza tra i centri dei due dischi di rifrazione (**criterio di Rayleigh**).

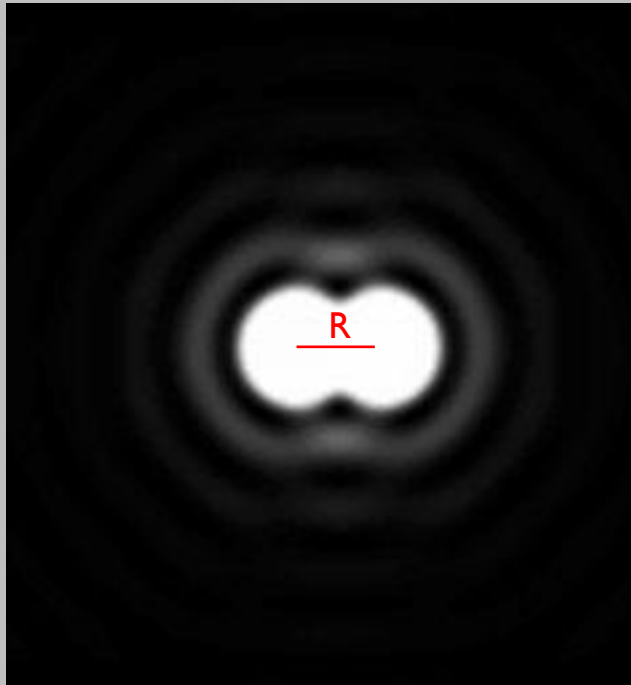


Immagine: divulgazione U.A.I.

$$R > \frac{1.22 \cdot 206265 \cdot \lambda}{D}$$

λ = lunghezza d'onda in mm

D = il diametro del telescopio in mm

$$R > \frac{140}{D}$$

se $\lambda = 5.56 \cdot 10^{-4}$ mm

In pratica, sperimentalmente si osserva, che è possibile separare una doppia ad una distanza inferiore $R > 117/D$ (**limite di Dawes**), perché l'occhio umano osserva solo la porzione più luminosa del disco centrale.

L'OCCHIO UMANO E ALCUNE DOPPIE VISIBILI AD OCCHIO NUDO

- Il criterio di Rayleigh non si applica all'occhio umano, perché non è un sistema ottico perfetto: è affetto da astigmatismo, aberrazione sferica, coma, che degradano la risoluzione che i recettori sono in grado di raggiungere.
- Potere risolvante dell'occhio umano:
120 arcsec (2') = per un occhio superiore alla media
180 arcsec (3') = per un occhio nella media

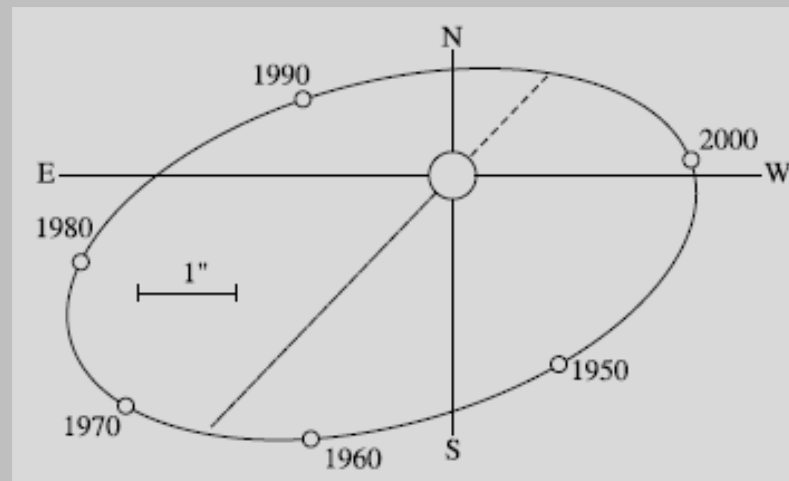
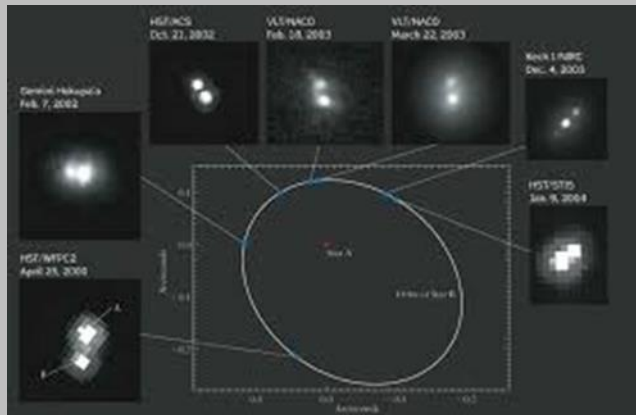


θ Tau: D=5.6' - 3.4-3.8

BINARIE VISUALI

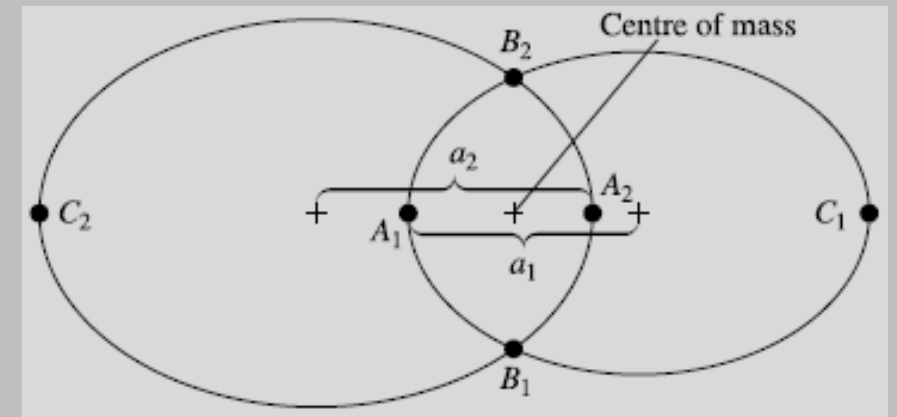
- Sono quei sistemi in cui la duplicità è percepibile direttamente al telescopio
- La misura della **posizione relativa** o **assoluta** delle componenti dimostra il loro legame gravitazionale.

Orbita relativa



H. Karttunen - Fundamental Astronomy

Orbita assoluta



H. Karttunen - Fundamental Astronomy

ORBITA RELATIVA REALE E APPARENTE

- Le orbite che osserviamo (apparenti) sono le proiezioni delle orbite vere sul piano tangente della sfera celeste.

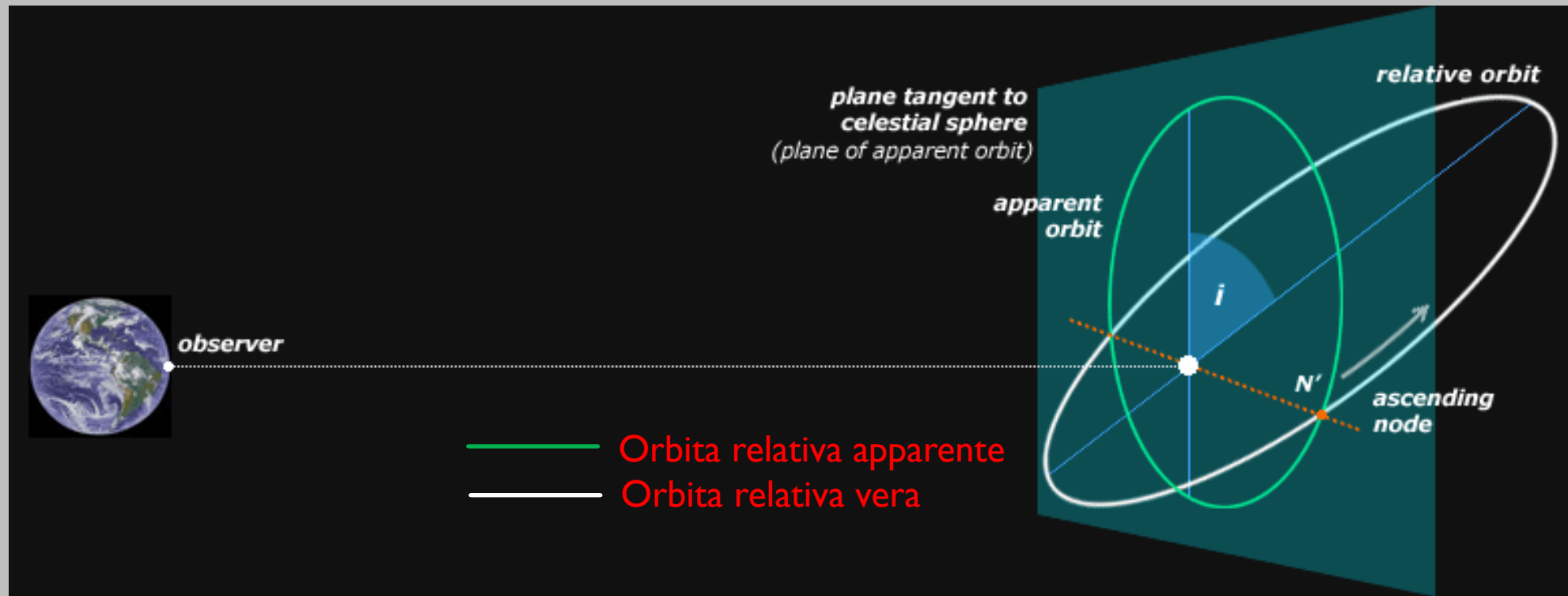


Immagine: <https://www.handprint.com/ASTRO/bineye3.html>

LA BINARIA PIÙ VICINA - ALFA CENTAURI

Alfa Centauri

- distanza dal Sole = 4.36 ± 0.01 a.l.
- distanza A-B = 11.2 - 35.6 U.A.
- mag. apparente = 0.01 / 1.34
- mag. assoluta = 4.38 / 5.71
- tipo spettrale = G2V / K1V
- massa = 1.100 / 0.907 masse solari
- raggio = 1.227 / 0.865 raggi solari

Dati: ESO - eso0307 - Science Release

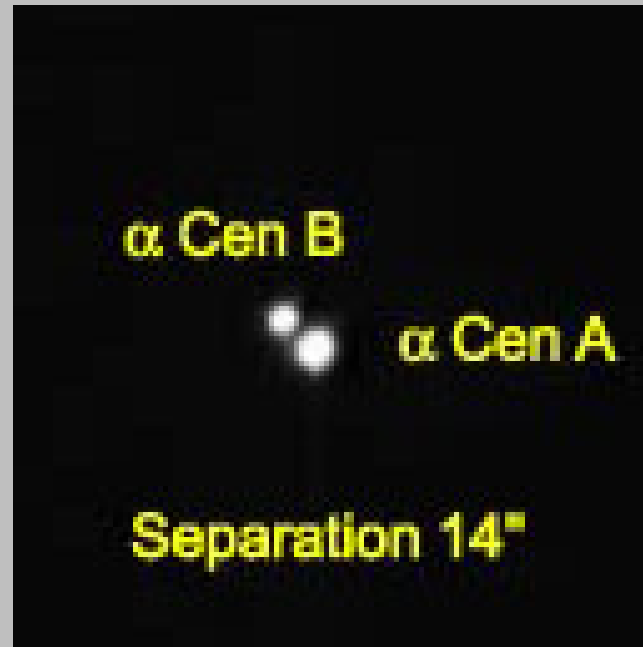


Immagine: CSU Remote Telescope

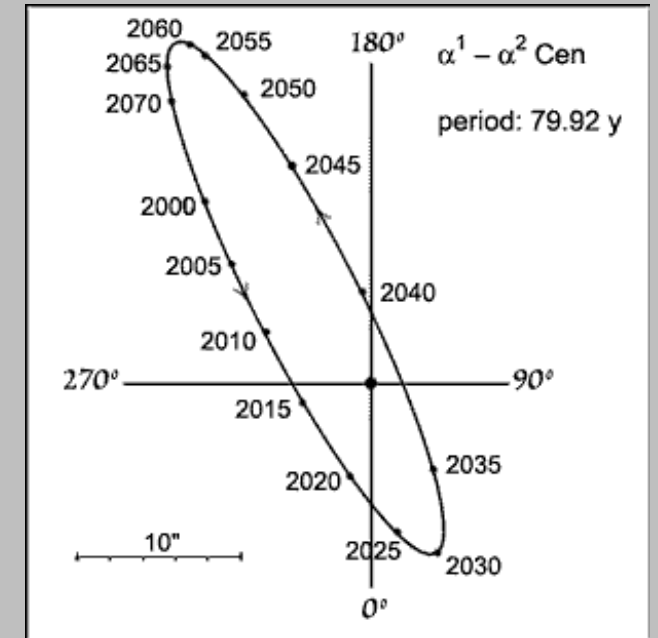
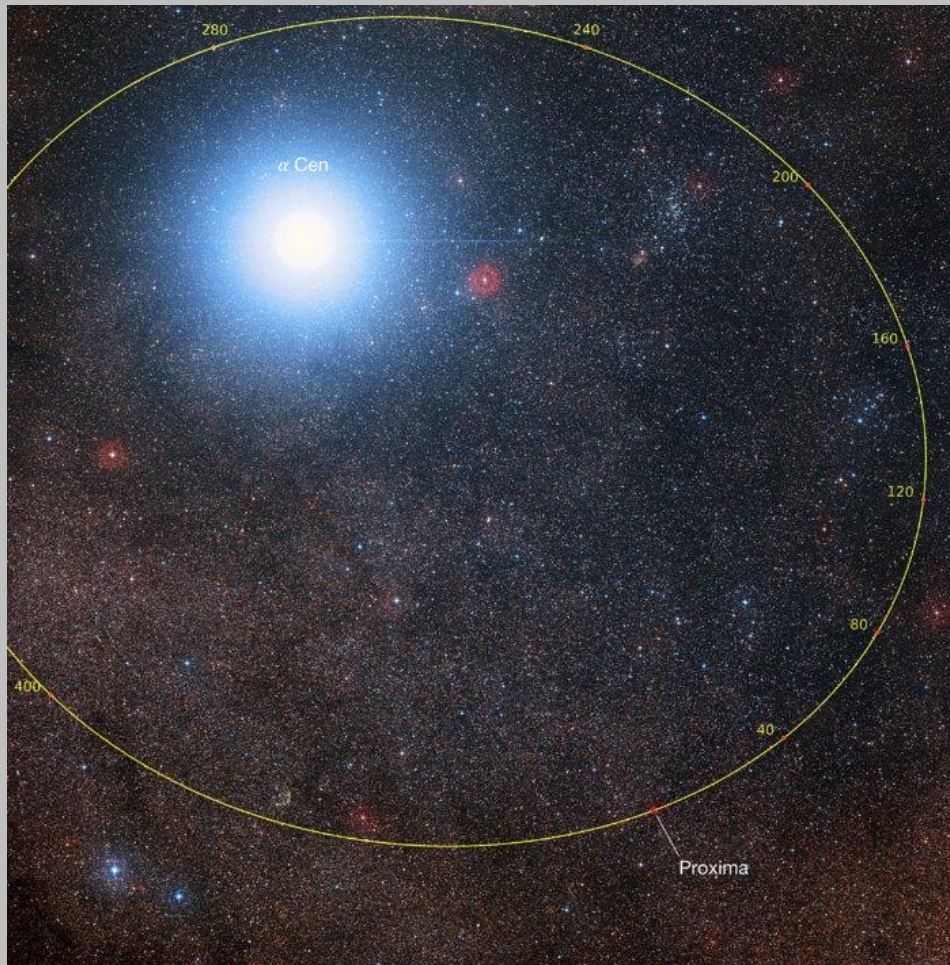


Grafico: Richard Dibon-Smith web page

UN ESEMPIO DI SISTEMA MULTIPLO - PROXIMA CENTAURI



Proxima Centauri

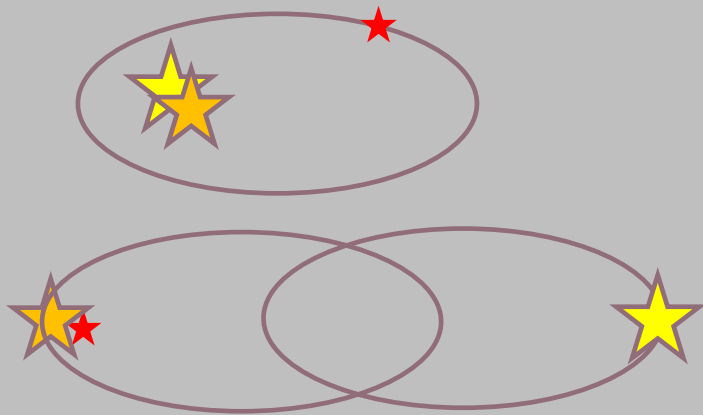
- distanza dal Sole = 4.242 ± 0.001 a.l.
- distanza da Alfa Cen = 8700 U.A.
- periodo di rivoluzione = 550000 anni
- eccentricità = 0.5
- mag. apparente = 11.13 (V)
- mag. assoluta = 15.56 (V)
- tipo spettrale = M5.5Ve (nana rossa)
- massa = 0.123 masse solari
- raggio = 0.145 raggi solari

Credit: P. Kervella (CNRS/U. of Chile/Observatoire de Paris/LESIA),
ESO/Digitized Sky Survey 2, D. De Martin/M. Zamani

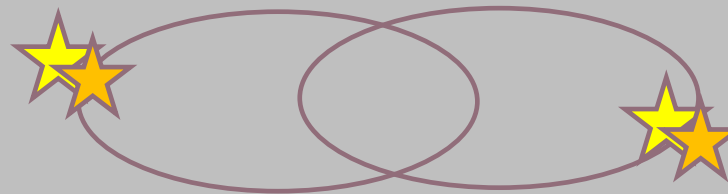
SISTEMI MULTIPLI - SISTEMI GERARCHICI E TRAPEZI

I Sistemi Multipli si dividono in:

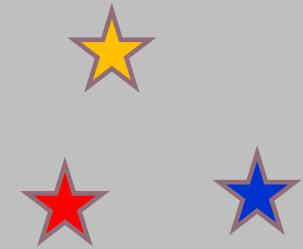
- **Sistemi gerarchici:** sono stabili e costituiti da orbite 'annidate' e poco interagenti. Ogni livello della gerarchia può essere trattato come un problema a **2-corpi**.
- I **Trapezi:** hanno orbite instabili e fortemente interagenti, sono modellati come un problema di **n-corpi** e mostrano un comportamento caotico.



Esempi di sistemi gerarchici tripli

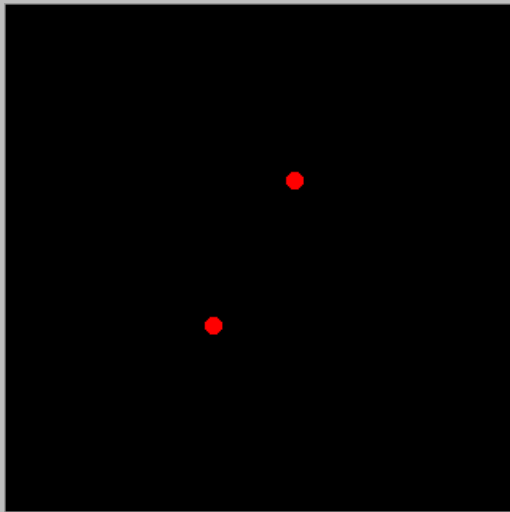


Esempio di sistema gerarchico quadruplo

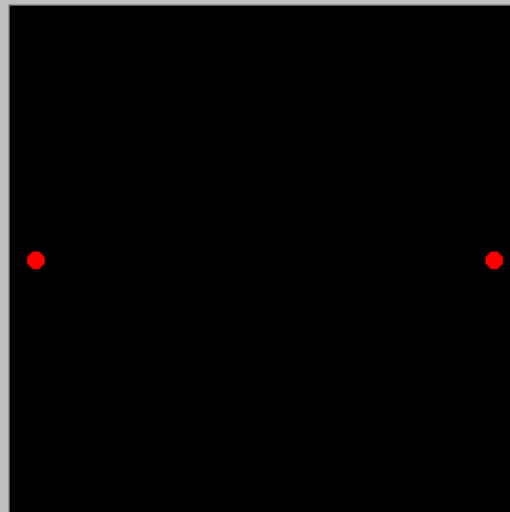


Trapezio: sistema caotico

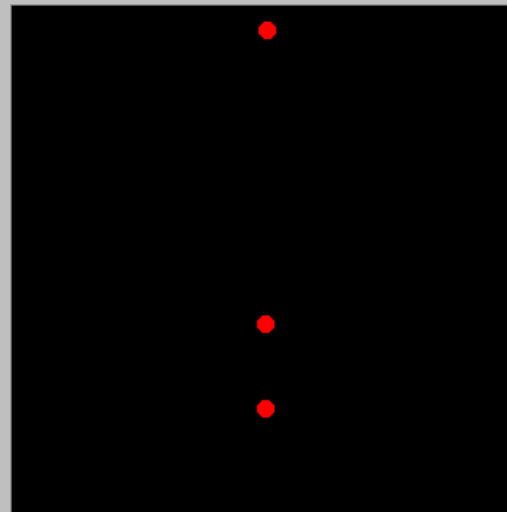
ESEMPI DI SISTEMI STELLARI DOPPI E TRIPLI



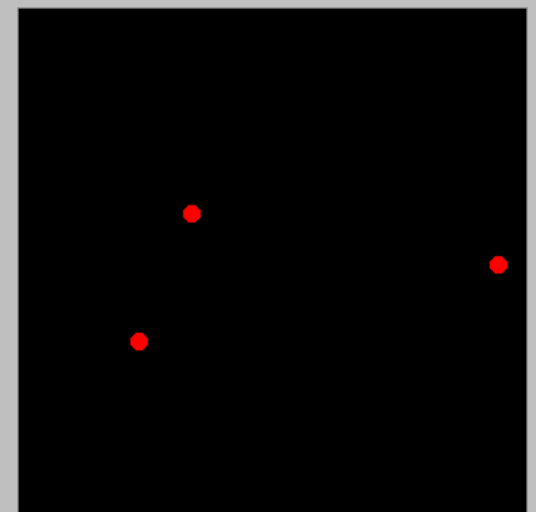
Tipico sistema binario
orbite ellittiche



Tipico sistema binario
orbite circolari

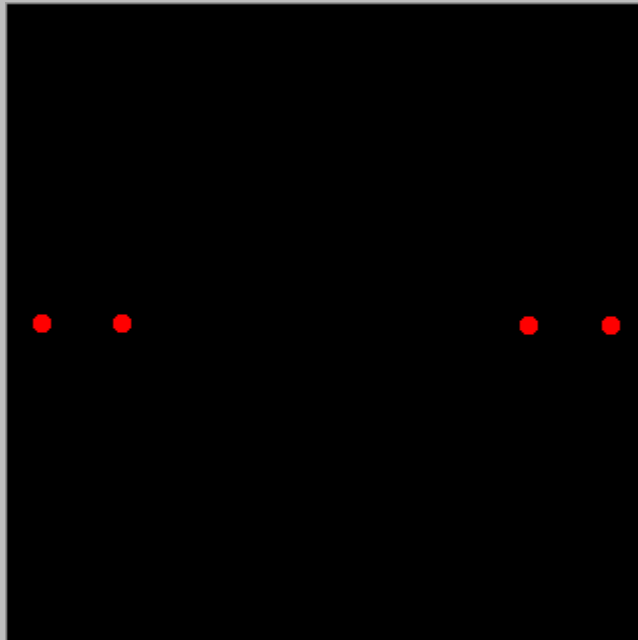


Tipico sistema triplo

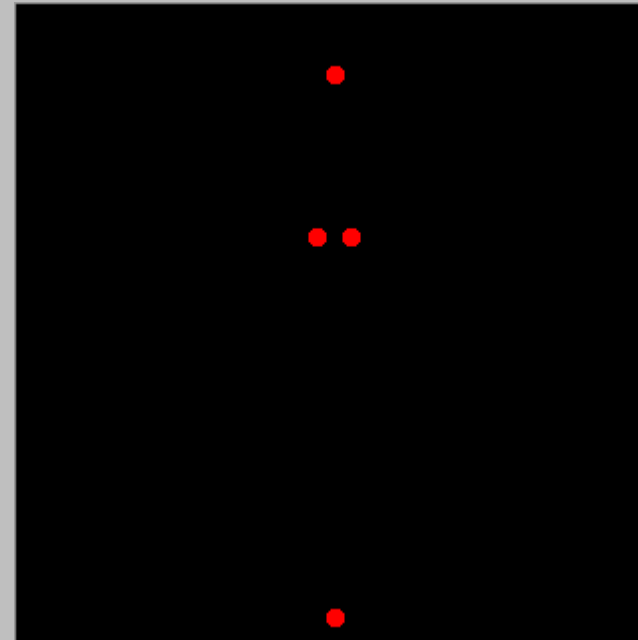


Sistema triplo con orbite a otto
Previsto solo teoricamente

ESEMPI DI SISTEMI STELLARI QUADRUPLI



Tipico sistema quadruplo
a 2 livelli di gerarchia

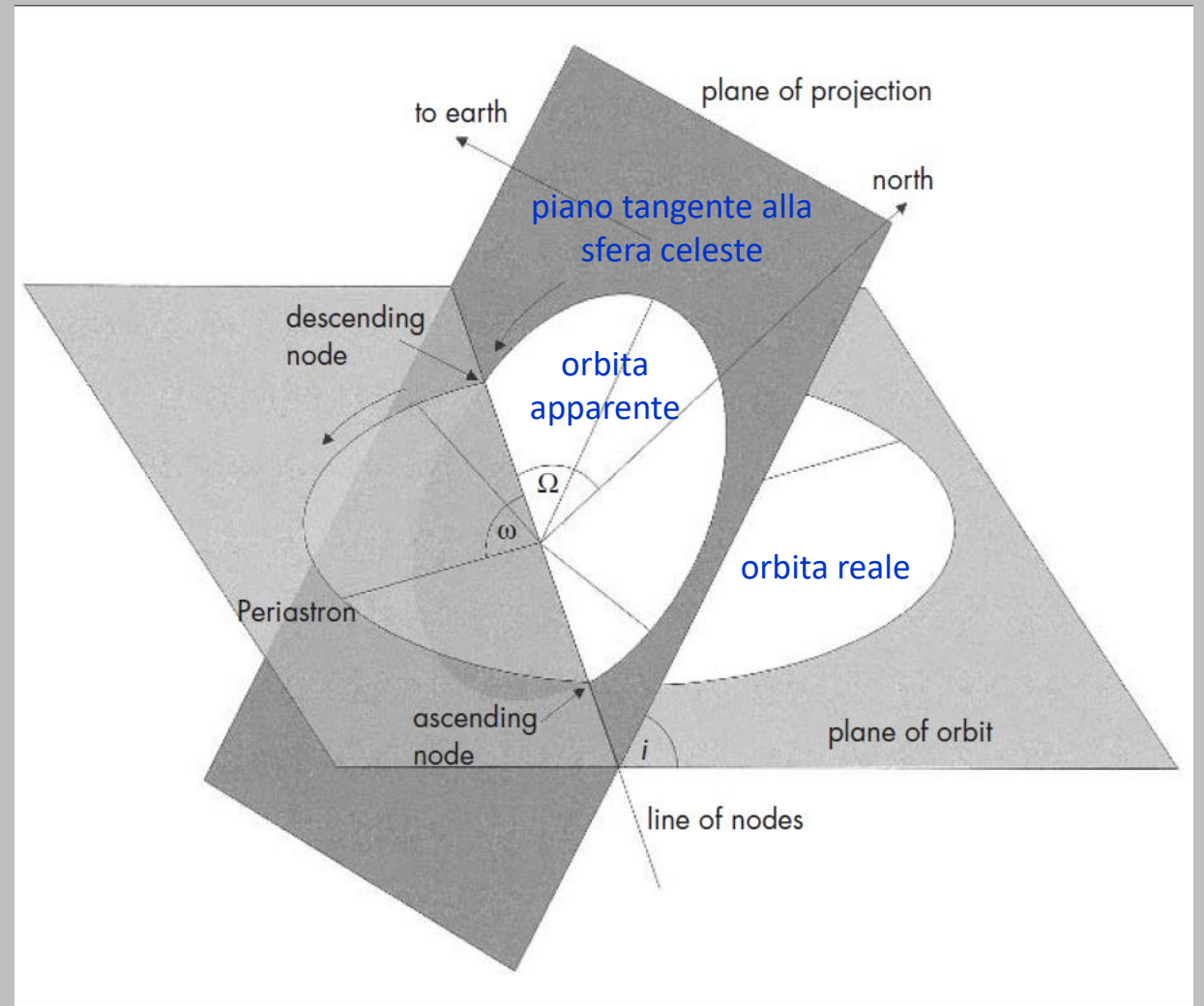


Sistema quadruplo
a 3 livelli di gerarchia

I PARAMETRI ORBITALI

L'orbita **reale** descritta dalla secondaria intorno alla primaria è definita da 5 parametri geometrici e da 1 temporale:

- **a** = semiasse maggiore
- **e** = eccentricità
- **i** = inclinazione
- **Ω** = longitudine del nodo
- **ω** = argomento del periastro
- **T_0** = passaggio al periastro



I PARAMETRI ORBITALI - DEFINIZIONE E SIGNIFICATO

- a = **semiasse maggiore** dell'orbita: definisce le **dimensioni** dell'orbita
- e = **eccentricità**: definisce la **forma** dell'orbita
- i = **inclinazione**: definisce l'**orientamento** dell'orbita rispetto al piano tangente alla sfera celeste, 90° se l'orbita è vista di taglio, 0° o 180° se perpendicolare alla linea di vista
- Ω = **longitudine** (o angolo di posizione) **del nodo**: definisce l'**orientamento** dell'orbita ed è l'angolo tra il Nord (verso Est) e la linea dei nodi (linea intersezione del piano dell'orbita con il piano tangente alla sfera celeste)
- ω = la **posizione del periastro**: definisce l'angolo tra il nodo ascendente Ω e il punto di periastro (il punto in cui le due stelle sono più vicine)
- T_0 = tempo del passaggio al periastro

EQUAZIONE DELL'ORBITA APPARENTE

- L'orbita apparente è descritta dall'equazione generale di una conica:

$$A \cdot x^2 + 2 \cdot B \cdot x \cdot y + C \cdot y^2 + 2 \cdot D \cdot x + 2 \cdot E \cdot y = 1$$

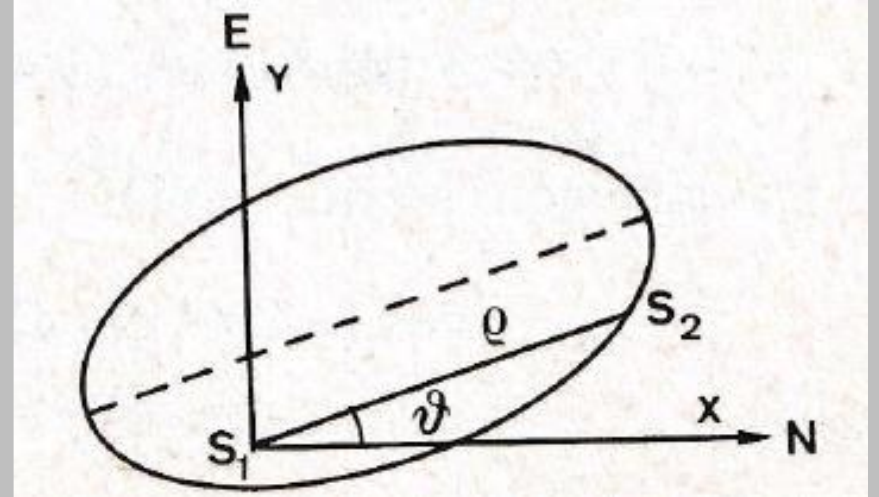
- con x e y che sono le coordinate in un sistema di assi:
 - con origine nella componente primaria;
 - l'asse x diretto verso la direzione Nord;
 - l'asse y diretto verso la direzione Est.

ρ = distanza angolare

$$x = \rho \cdot \cos\theta$$

θ = angolo di posizione

$$y = \rho \cdot \sin\theta$$



CALCOLO DEI PARAMETRI ORBITALI

- Per definire completamente l'orbita occorre determinare i coefficienti A, B, C, D, E:

$$A \cdot x^2 + 2 \cdot B \cdot x \cdot y + C \cdot y^2 + 2 \cdot D \cdot x + 2 \cdot E \cdot y = 1$$

- I coefficienti vengono determinati con il metodo dei minimi quadrati su un numero di osservazioni sufficientemente distanziate nel tempo.
- Noti i coefficienti A, B, C, D, E, posso ricavare i parametri orbitali geometrici risolvendo il seguente sistema di equazioni.
- I parametri temporali: il passaggio al periastro T_0 e il periodo di rivoluzione P, si calcolano conoscendo due valori dell'anomalia media M all'istante t (l'anomalia media è l'angolo che il raggio vettore della secondaria descriverebbe se si spostasse con una velocità angolare $2\pi/P$ nel tempo $t - T_0$)

$$\tan 2 \Omega = \frac{2 (B + D E)}{A - C + D^2 - E^2}$$

$$\frac{\tan^2 i}{p^2} \sin 2 \Omega = -2 (B + D E)$$

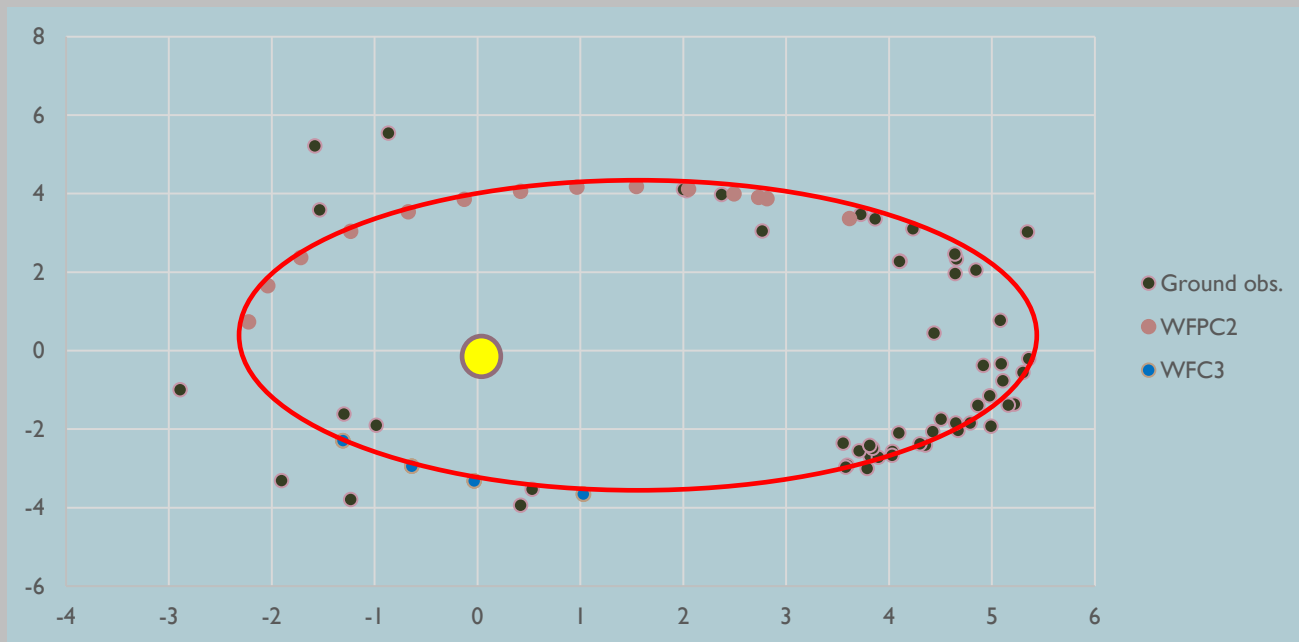
$$\frac{2 + \tan^2 i}{p^2} = A + C + D^2 + E^2$$

$$\frac{e \cos \omega}{p} = D \cos \Omega + E \sin \Omega$$

$$\frac{e \sin \omega}{p} = (-D \sin \Omega + E \cos \Omega) \cos i$$

Lezioni di Astronomia - Leonida Rosino -
Edizioni CEDAM

UN METODO GRAFICO PER DETERMINARE I PARAMETRI ORBITALI



Misure della binaria α CMi (Procyone) tratte da Howard E. Bond et al. 2015, Hubble Space Telescope Astrometry of The Procyon System

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/813/2/106/pdf>

Il metodo grafico di Zwier permette di determinare tutti i parametri geometrici: a , e , i , Ω , ω .

Lezioni di Astronomia - Leonida Rosino -
Edizioni CEDAM

Element	Value
Orbital period, P (year)	40.840 ± 0.022
Semimajor axis, a (arcsec)	4.3075 ± 0.0016
Inclination, i (deg)	31.408 ± 0.050
Position angle of node, Ω (deg)	100.683 ± 0.095
Date of periastron passage, T_0 (year)	1968.076 ± 0.023
Eccentricity, e	0.39785 ± 0.00025
Longitude of periastron, ω (deg)	89.23 ± 0.11

Elementi orbitali di Procyone - Howard E. Bond et al. 2015

CALCOLO DELLA MASSA NELLE BINARIE VISUALI

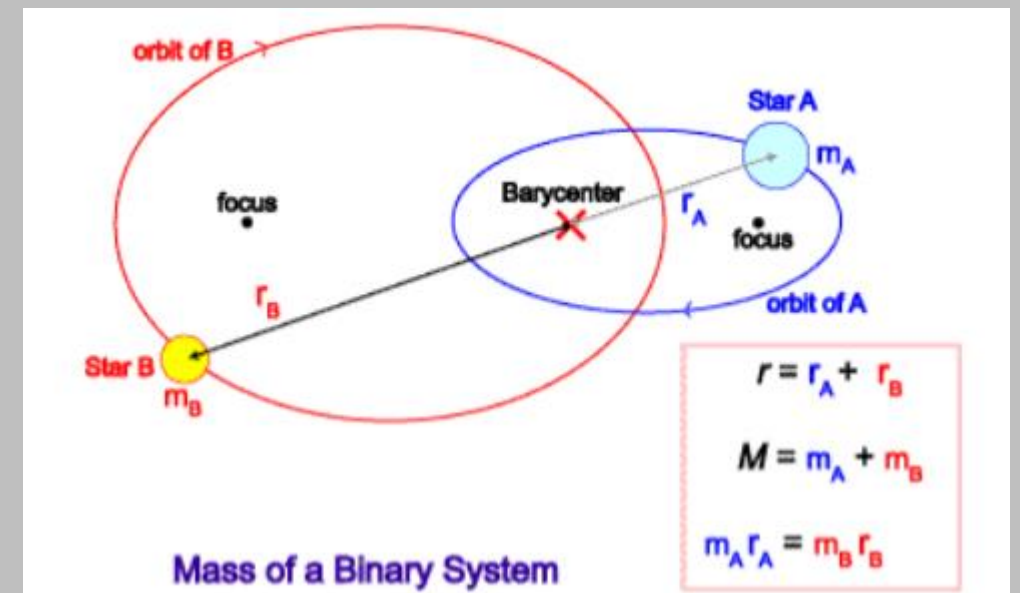
- Valgono le tre leggi di Keplero applicati al sistema binario di stelle:
 - Le stelle orbitano su orbite ellittiche e il centro di massa è un fuoco comune.
 - La congiungente le due stelle (raggio vettore) copre aree uguali in tempi uguali.
 - Il quadrato del periodo P è direttamente proporzionale al cubo della distanza media r dal centro di massa: $P^2 \propto r^3$

- Uguagliando forza gravitazionale e forza centripeta

$$m_A + m_B = \frac{4\pi^2}{G} \cdot \frac{r^3}{P^2}$$

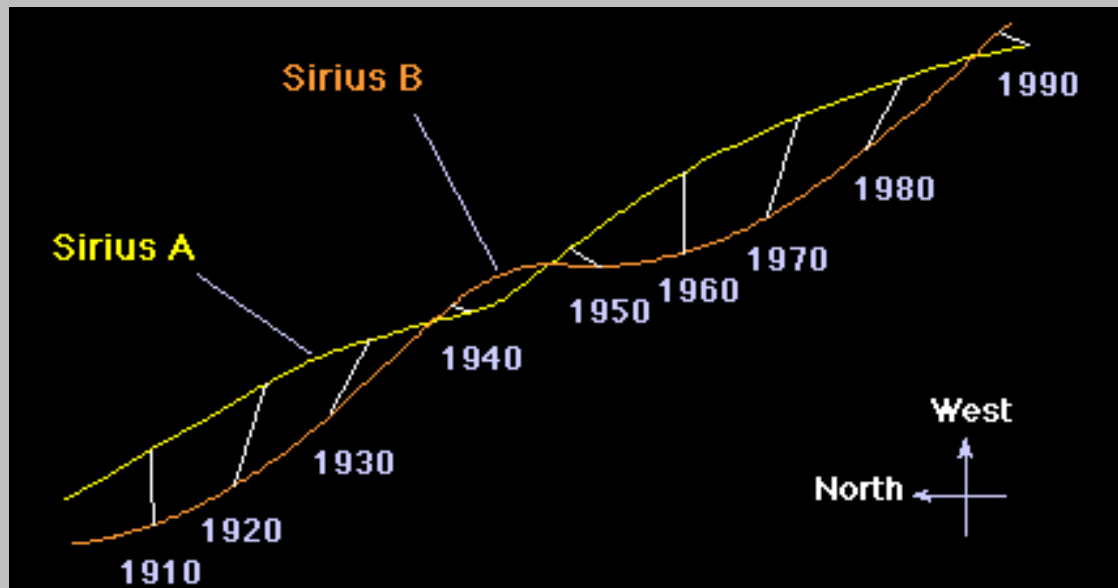
- Utilizzando la definizione di centro di massa:

$$m_A = M \cdot \frac{r - r_A}{r}$$

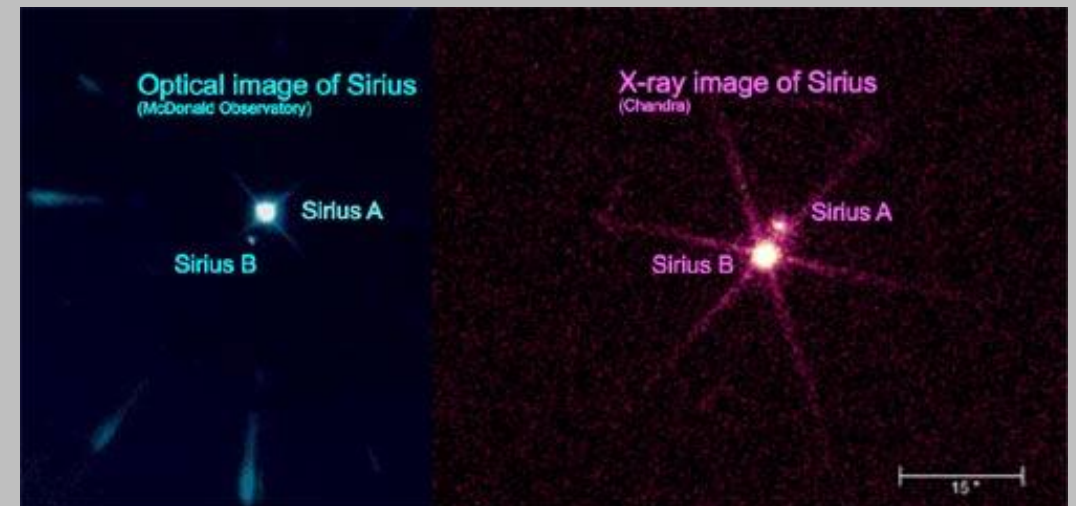


BINARIE ASTROMETRICHE

- La componente secondaria è troppo debole o troppo vicina per essere visibile.
- La presenza della secondaria è evidenziata dalle oscillazioni, intorno alla direzione rettilinea del centro di massa, subite dal moto proprio della stella e dovute alla presenza della secondaria.



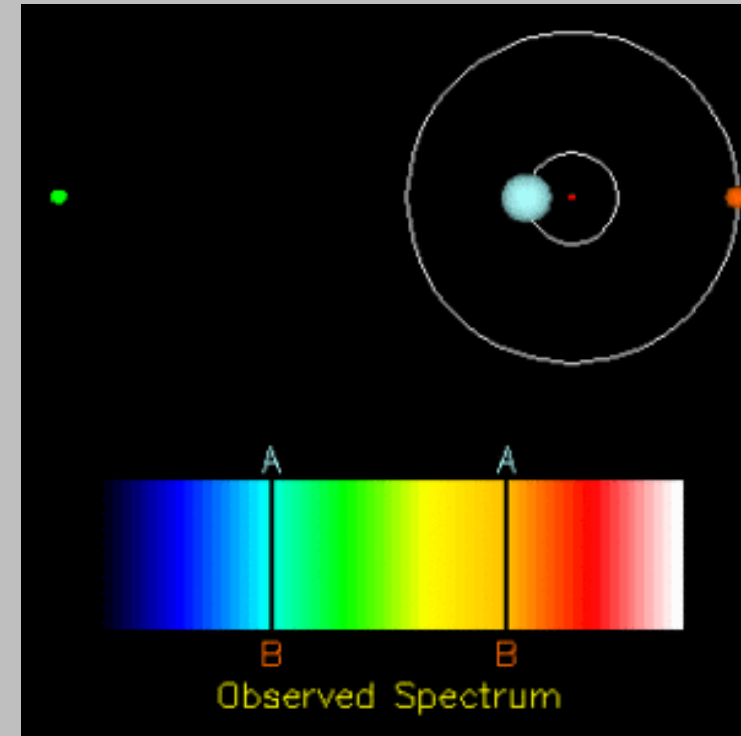
Crediti: Mike Guidry, University of Tennessee



NASA/SAO/CXC/McDonald Observatory

BINARIE SPETTROSCOPICHE

- Quando si osserva un sistema binario il cui piano orbitale ha un'inclinazione diversa da 0° , il moto delle stelle attorno al centro di massa le porta ad avvicinarsi o allontanarsi dalla Terra.
- Le righe spettrali delle due componenti si spostano alternativamente verso il rosso (quando la stella si allontana) e verso il violetto (quando si avvicina), per effetto Doppler.

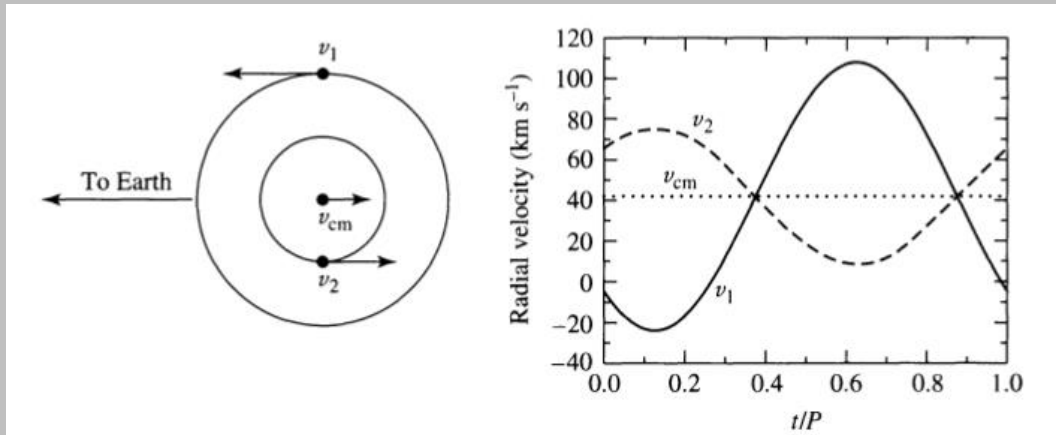


https://www.uai.it/divulgazione/wp-content/uploads/2020/03/AA_Binaria_Spettroscopica.gif

Crediti: R. Pogge, OSU

CURVE DI VELOCITÀ RADIALE E CALCOLO DELLE MASSE

Orbite circolari

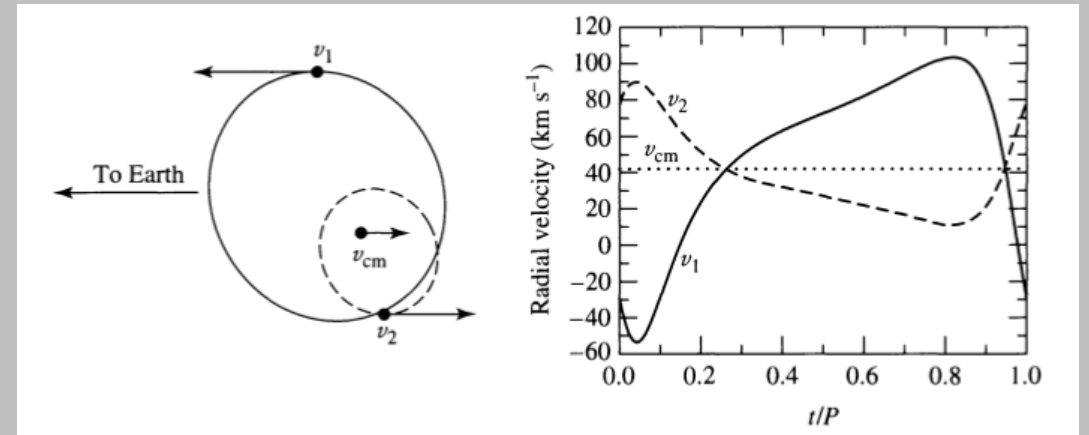


Entrambe le righe visibili

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{v_{2r} / \sin i}{v_{1r} / \sin i} = \frac{v_{2r}}{v_{1r}}$$

$$m_1 + m_2 = \frac{P}{2\pi G} \frac{(v_{1r} + v_{2r})^3}{\sin^3 i}$$

Orbite ellittiche



Visibili solo le righe della stella più luminosa

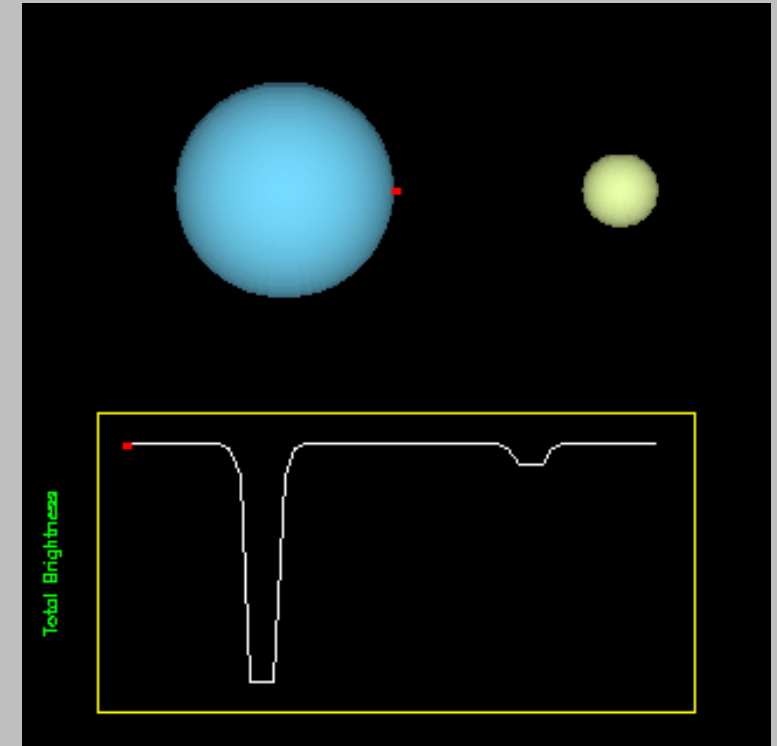
Funzione di massa = $\frac{m_2^3}{(m_1 + m_2)^2} \sin^3 i = \frac{P}{2\pi G} v_{1r}^3 < m_2$

Limite minimo della massa della componente non visibile

Se non si conosce l'inclinazione i , si assume un valore medio per $\sin^3 i = a \ 2/3$

BINARIE FOTOMETRICHE

- Quando si osserva un sistema binario il cui piano orbitale ha un'inclinazione prossima a 90° , le due componenti sono soggette ad eclisse reciproca.
- Parametri deducibili dalla curva di luce:
 - periodo, inclinazione, eccentricità
 - raggi stellari espressi in unità di distanza r tra le due componenti
 - se anche spettroscopica, allora sono noti $r_A \cdot \sin(i)$ e $r_B \cdot \sin(i)$ e quindi r_A e r_B in km
 - rapporto delle temperature
 - la densità media ma non la massa del sistema



https://divulgazione.uai.it/images/AA_Binaria_Eclisse.gif

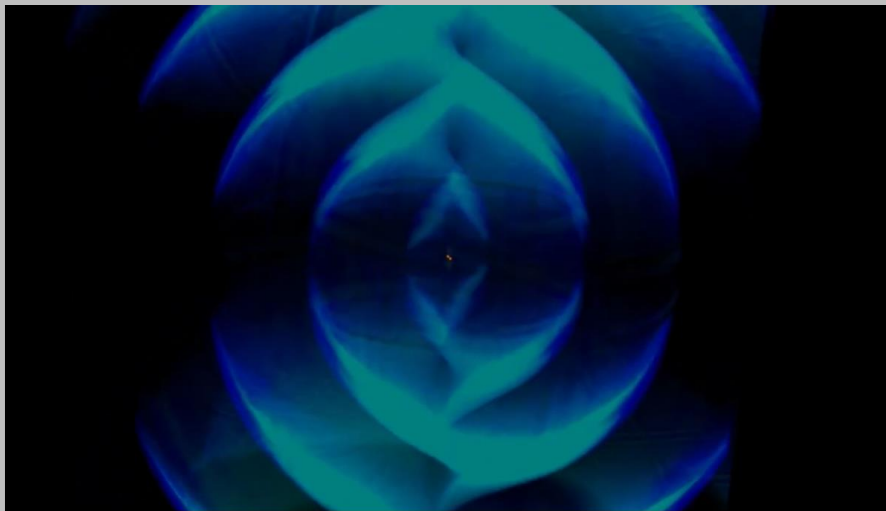
Crediti: R. Pogge, OSU

La duplicità è evidenziata dalle variazioni periodiche di luminosità

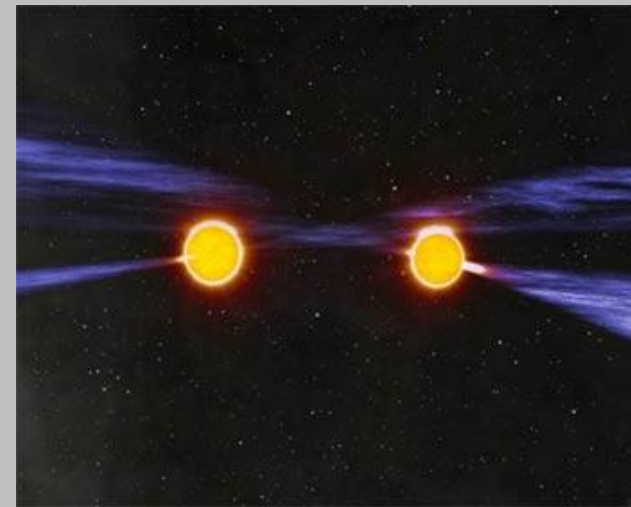
- Un link utile per simulare le orbite di una binaria: <http://www.astro.ucla.edu/undergrad/astro3/orbits.html>

PSR J0737-3039 - UN SISTEMA BINARIO ESOTICO

- Sistema ad una distanza di $1600 \div 2000$ anni luce
- Due pulsar con periodi di rotazione di 23 ms e 2.8 s, distanziati da 800000 km
- Sistema ad eclisse con un periodo di rivoluzione = 2.4 h
- Destinato a fondersi in unico oggetto entro 85 milioni di anni



Gravitational waves during the merger of PSR J0737-3039



Crediti: Australian Telescope National Facility

<https://www.youtube.com/watch?v=i-sgyAw5hQc>

SISTEMI BINARI INTERAGENTI

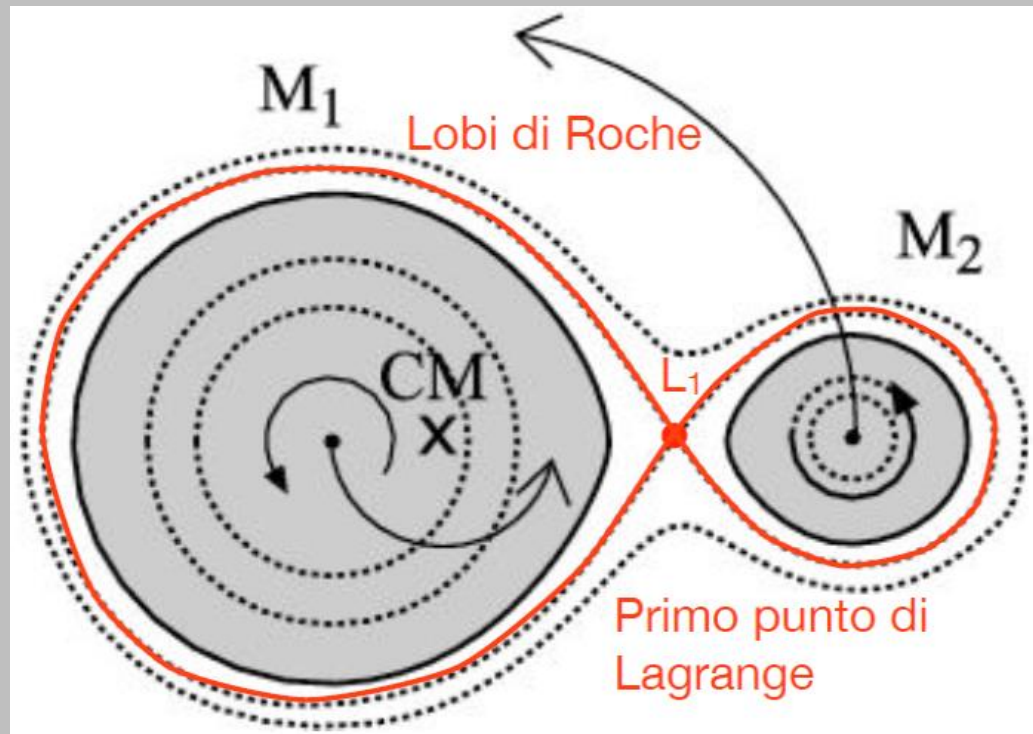
- Quando il periodo orbitale è inferiore a circa 10 giorni, le componenti sono molto vicine tra di loro e soggette a forze mareali che determinano:
 - orbite circolari;
 - un allineamento degli assi di rotazione con l'asse perpendicolare al piano dell'orbita;
 - rotazione sincrona: i periodi di rotazione delle due componenti sono uguali tra loro e uguali al periodo di rivoluzione del sistema.



Rappresentazione di una binaria a contatto

SUPERFICI EQUIPOTENZIALI

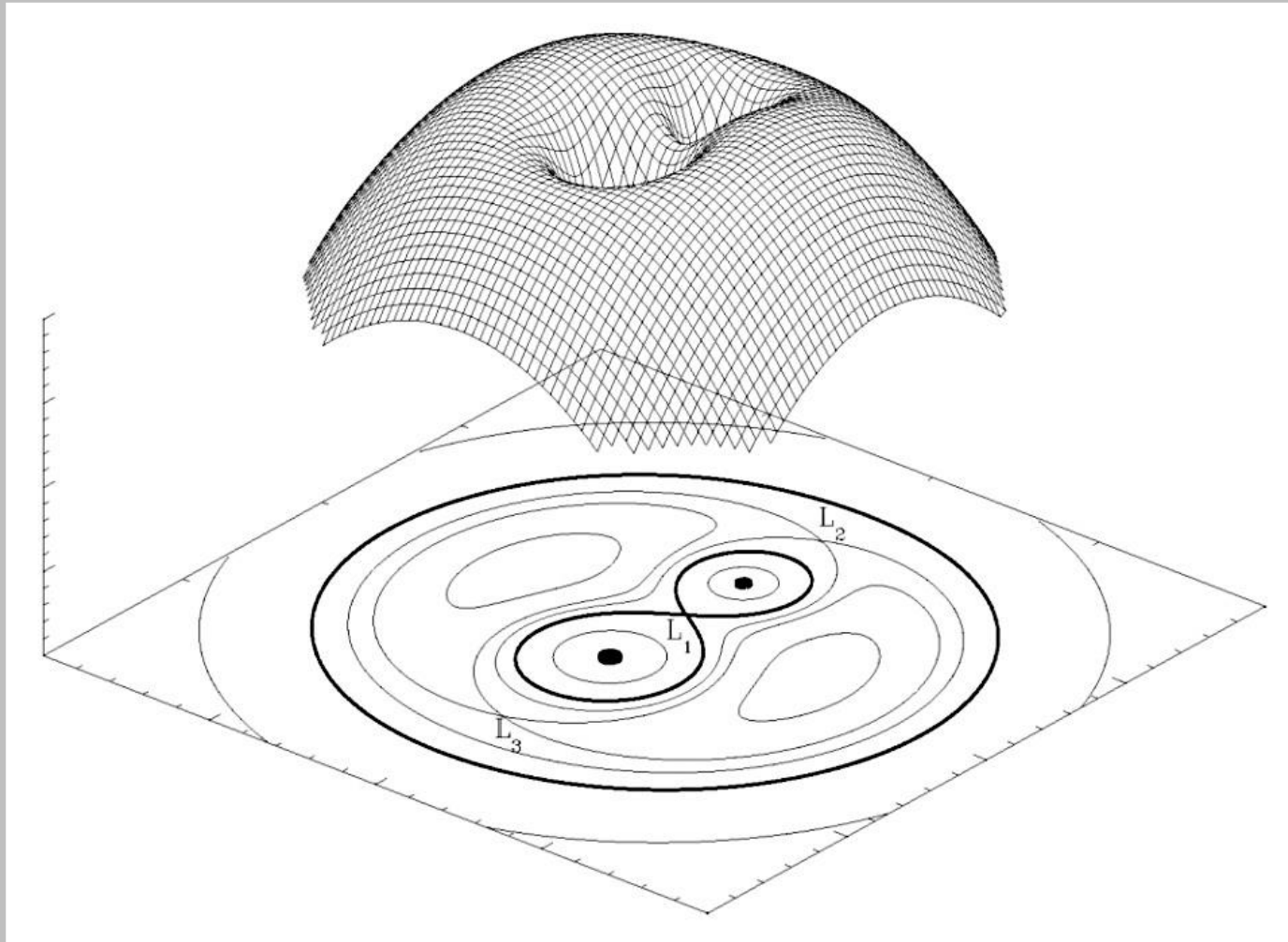
- Le superfici equipotenziali sono sferiche vicino alle componenti, ma allontanandosi si deformano a seguito dell'attrazione tra le stelle.



Da: A. Marconi - Introduzione all'Astrofisica 2014/2015

- Quando uno delle due componenti cresce di raggio durante la sua evoluzione (ad esempio diventa una gigante), assumerà la forma di una goccia, fino a riempire il suo lobo di Roche.
- Il gas di una stella che raggiunge il punto di Lagrange L_1 può passare all'altra stella.

LOBI DI ROCHE

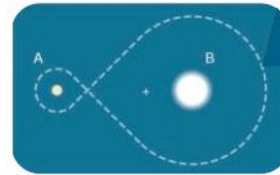


- Rappresentazione 3D del potenziale di Roche per due stelle con rapporto di massa 2:1.
- Il punto di Lagrange L_1 è il punto di sella.

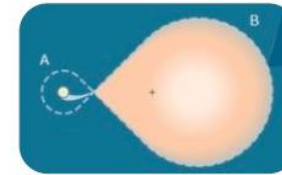
IL PARADOSSO APPARENTE DELLE STELLE BINARIE

- Alcune binarie sono costituite da una stella massiccia di sequenza principale e una compagna meno massiccia ma più evoluta.
- Ma i sistemi binari dovrebbero essere costituiti da stelle della stessa età.
- La contraddizione si spiega considerando il trasferimento di massa tra le componenti durante l'evoluzione

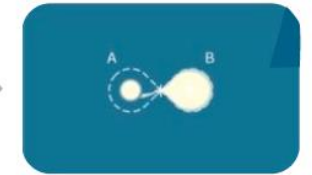
Esempio: stella di $5 M_{\odot}$ (B) con compagna di $1 M_{\odot}$ (A).



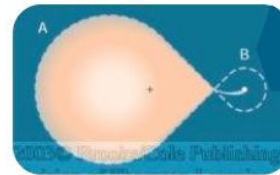
B evolve più rapidamente di A (è più massiccia).



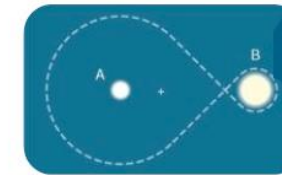
B diventa una gigante rossa, riempiendo il suo Lobo di Roche. A riceve massa da B.



A si accresce a spese di B che diventa sempre meno massiccia.



La stella A diventa una gigante e perde ora massa verso B che ormai è diventata una nana bianca.

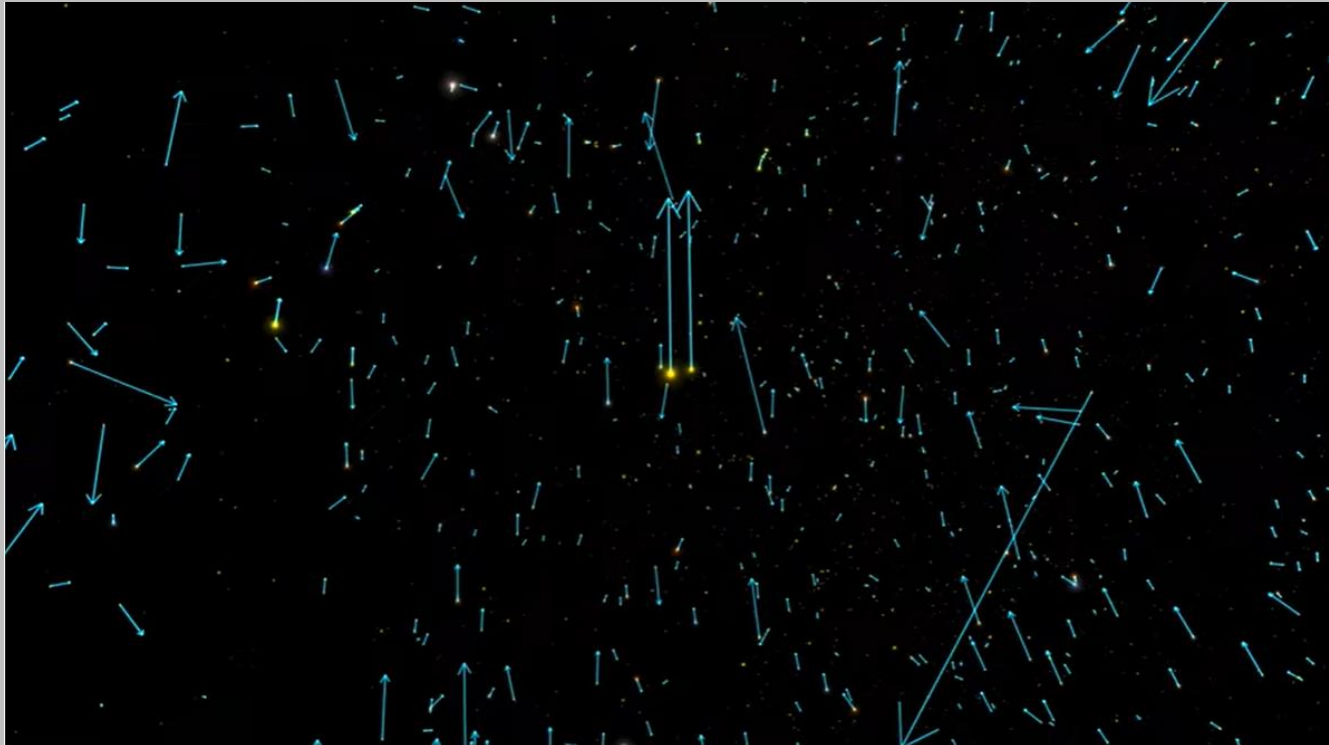


La stella A è diventata un stella massiccia di sequenza principale con una compagna gigante di piccola massa più evoluta (vecchia), un'apparente contraddizione!

Da: A. Marconi - Introduzione all'Astrofisica 2014/2015

COPPIE DI STELLE CON MOTO PROPRIO COMUNE

- Gaia Early Data Release 3 - Gaia Catalogue of Nearby Stars
<https://youtu.be/bzQUNCleS3o>



BIBLIOGRAFIA

- Umberto Fedele: Coelum, Vol. 17, pp. 65–69, 1949
<https://www.leosondra.cz/en/mizar/fedele/>
- The Early Search for Stellar Parallax: Galileo, Castelli and Ramponi, Harald Siebert
- Double and Multiple Stars and How to Observe Them
http://astrotalk.ru/astrolibrary/double_stars_and_how_to_observe_them.pdf
- https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/binary_intro.html
- https://www.astropix.com/html/observing/20_fun_naked_eye_doubles.html
- <https://www.handprint.com/ASTRO/>