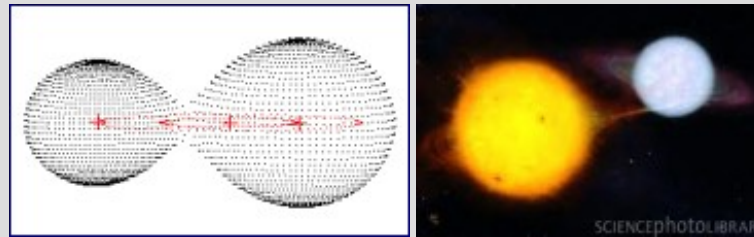


# Modellazione dei Sistemi Binari ad Eclisse



*7° MEETING SULLE STELLE VARIABILI SSV-UAI-GRAB*

*La Spezia, 14-15 Maggio 2011*



*Lorenzo Franco - A81 Balzaretto Observatory, Rome*

# Premessa

*Sembra incredibile, ma dall'analisi fotometrica dei sistemi binari ad eclisse è possibile dedurre una quantità impressionante di parametri che ci permettono di caratterizzare il sistema osservato sia da un punto di vista geometrico che fisico.*

*I sistemi binari ad eclisse rappresentano quella classe di stelle variabili cosiddette **estrinseche**, la cui variazione del flusso luminoso è dovuta a fattori esterni, nel nostro caso principalmente agli effetti geometrici delle reciproche eclissi tra le stelle che costituiscono il sistema.*

*Quello che vedremo di seguito non ha la finalità di rappresentare “**il metodo**”, quanto quello di descrivere “**un percorso**” ed “**un approccio**” con il quale sia possibile riuscire a modellare alcuni dei sistemi binari osservati.*

# Sistemi Binari ad Eclisse

(elementi di classificazione)

*I sistemi binari ad eclisse (genericamente **EBs**) si classificano principalmente nei seguenti tre sottosistemi (sulla base del loro progenitore):*

- *EA – Sistemi di tipo **Algol***
- *EB – Sistemi di tipo **Beta Lyrae***
- *EW – Sistemi di tipo **Ursae Maioris***

*Vediamoli con maggiore dettaglio ....*

# Sistemi Binari ad Eclisse

(classificazione in base alla curve di luce)

## **Binarie di tipo EA**

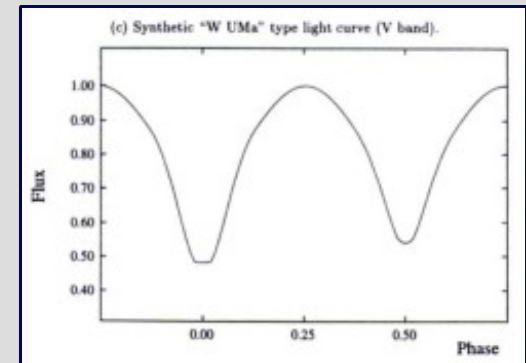
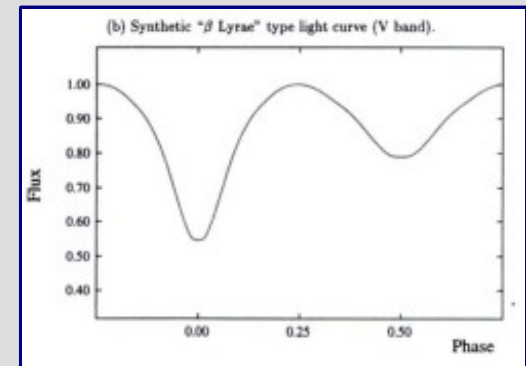
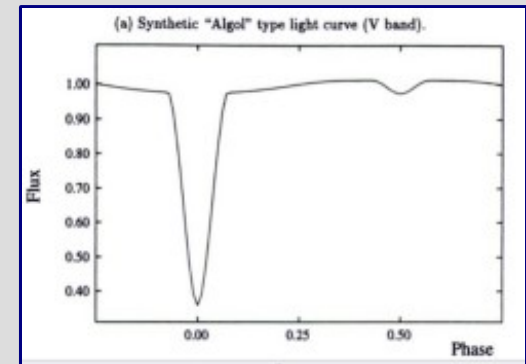
Hanno periodi dell'ordine di *giorni, settimane e oltre*. Sono caratterizzate da un andamento costante del flusso luminoso fuori eclisse e da minimi profondi a V.

## **Binarie di tipo EB**

Hanno periodi dell'ordine di *giorni* e mostrano una variazione continua del flusso luminoso con minimi di *diversa profondità*.

## **Binarie di tipo EW**

Hanno periodi *inferiori al giorno*, con un andamento sinusoidale del flusso luminoso e minimi che tendono ad avere la *medesima profondità*.



(\*)

# Sistemi Binari ad Eclisse

## (classificazione morfologica)

### Lobo di Roche

In un sistema binario, rappresenta il volume all'interno del quale il materiale è *gravitazionalmente legato*.

### Detached systems

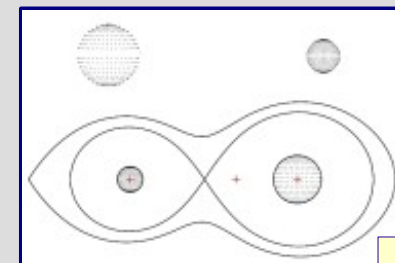
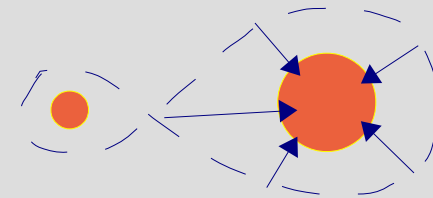
Quando **nessuna** delle due componenti riempie il suo lobo di Roche.

### Semi-detached systems

Quando **una** delle due componenti riempie il suo lobo di Roche.

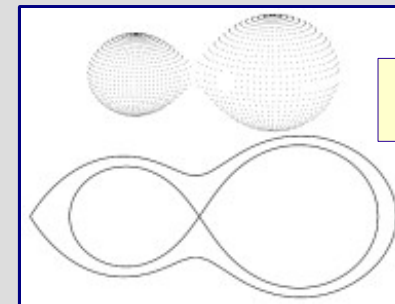
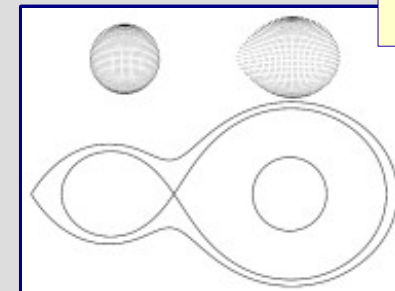
### Over-contact systems

Quando **entrambe** le componenti superano il loro lobo di Roche. Sono sistemi **a contatto** all'interno di un medesimo involucro.



(\*)

Sistemi EA



Sistemi EW

(\*) Immagini estratte dal libro "Eclipsing Binary Stars" di Kallrath e Milone

# Sistemi Binari ad Eclisse

## (sistemi a contatto di tipo EW – W UMa)

Fisseremo adesso la nostra attenzione sui sistemi *W UMa* (a contatto) che rappresentano il 95% del numero totale di sistemi e che si possono ulteriormente classificare in altri due sottosistemi:

**Stella principale e minimo principale** In un sistema binario, la **stella principale** è quella che viene eclissata (**occultata**) al **minimo principale** (fase zero). Occorre notare che la differenza di profondità del minimo dipende solo ed esclusivamente dalla diversa temperatura superficiale delle due stelle e non dalla massa.

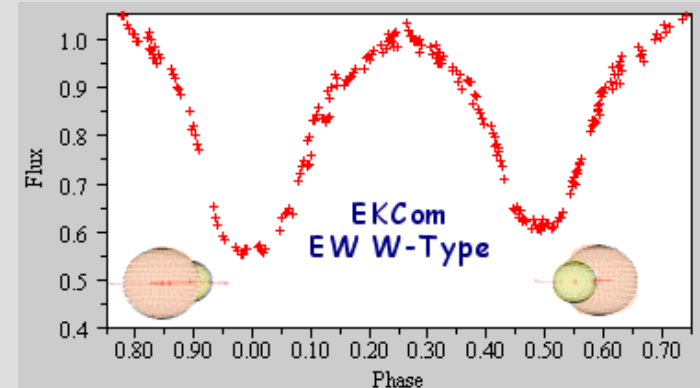
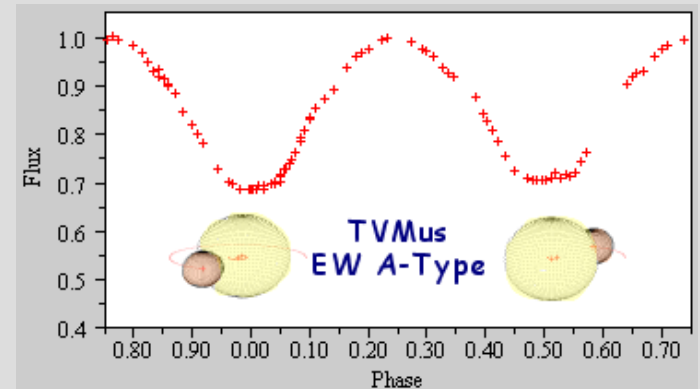
**Sequenza principale** Nei sistemi W-UMa le componenti appartengono alla sequenza principale.

### Sistemi A-Type (min I = transito)

La stella **più massiva** è anche la **più calda**. Il minimo principale si registra quando questa passa dietro alla secondaria più fredda e meno luminosa. Hanno dei **periodi superiori a 0.6d** ed un rapporto tra le masse  $q=M2/M1 < 1$ .

### Sistemi W-Type (min I = occultazione)

La stella **più massiva** è anche la **più fredda**. Il minimo principale si registra quando questa passa davanti alla stella più piccola, calda e luminosa. Hanno dei **periodi inferiori a 0.3d** ed un rapporto tra le masse  $q=M2/M1 > 1$ .



# Sistemi Binari ad Eclisse

(sistemi a contatto di tipo EW – W UMa)

*C'è da aggiungere che sovente i sistemi W UMa mostrano una medesima profondità dei due minimi a causa della stessa temperatura superficiale delle due componenti e pertanto diventa difficile distinguere il minimo a fase zero.*

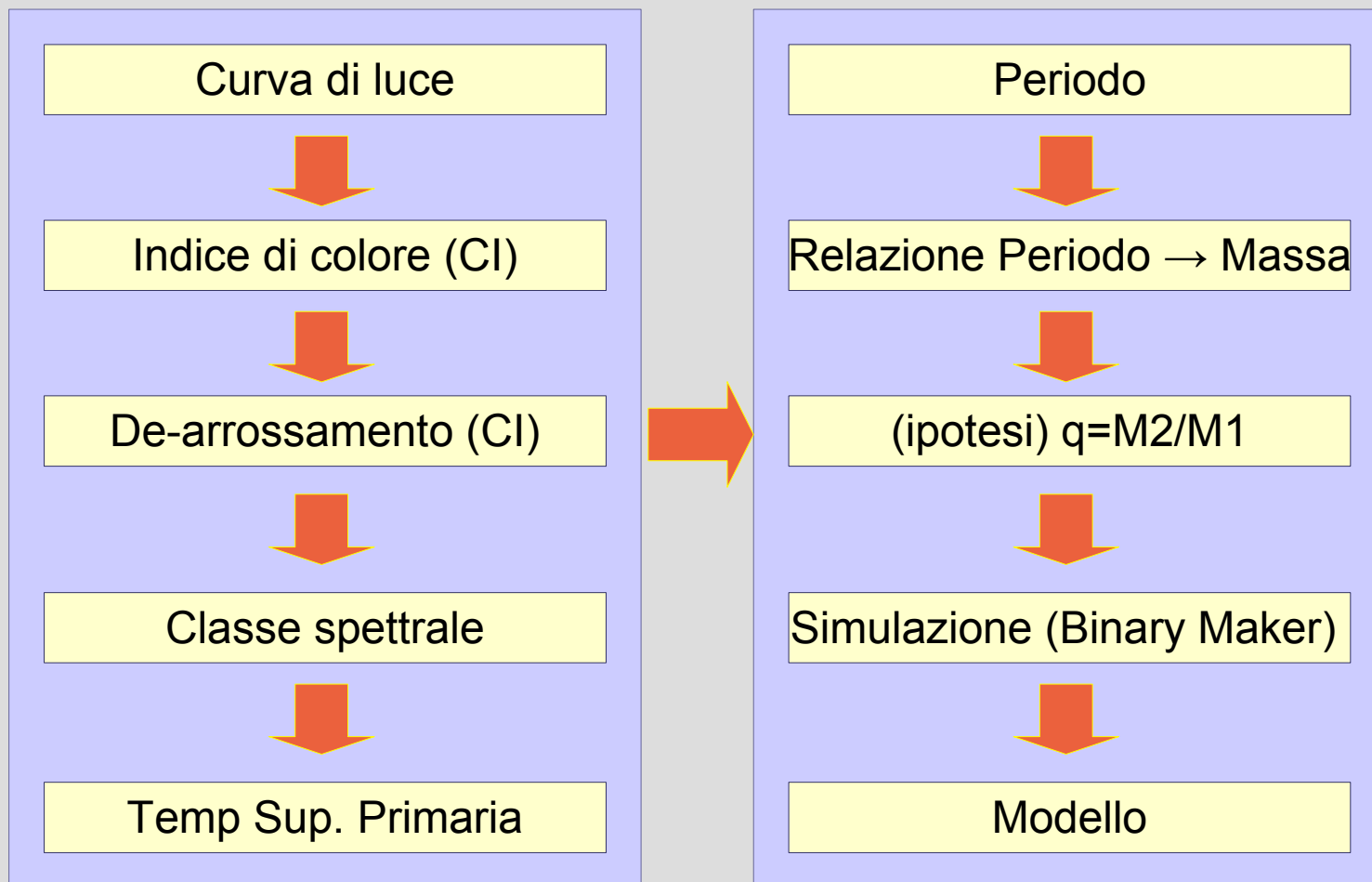
*Con le sole osservazioni fotometriche, inoltre, è difficile individuare con sicurezza la sotto-tipologia (A o W). La durata del periodo può venirci incontro, in assenza di osservazioni spettroscopiche sulle velocità radiali.*

*Sistemi W UMa con periodi superiori a 0.6d sono prevalentemente di tipo A, mentre quelli con periodo inferiore a 0.3d sono prevalentemente di tipo W. Restano incerti i sistemi di periodo intermedio (tra 0.3d e 0,6d).*

# Sistemi Binari ad Eclisse

## (modellazione – i passi necessari)

*Adesso vedremo quali saranno i passi necessari per arrivare alla modellazione dei sistemi binari di tipo **W-UMa**, partendo dalle osservazioni fotometriche.*





# Sistemi Binari ad Eclisse

## (indice di colore e de-arrossamento - come)

Una volta ottenuta la **curva di luce** e determinato il **periodo** sarà necessario calcolare l'**indice di colore** es:  $(V-R)$  poiché questo dato è fondamentale per poter **stimare la temperatura superficiale** della **componente primaria** del sistema binario (la più luminosa).

La luce che ci arriva dal sistema binario, attraversano zone più o meno dense del mezzo interstellare, andrà soggetta a dei fenomeni di **assorbimento** che saranno **maggiori** per la **radiazione blu** rispetto a quella rossa. Si tratta infatti proprio di un fenomeno di **arrossamento della luce** dovuta al mezzo interstellare.

Per determinare quindi l'entità del fenomeno, possiamo avvalerci del servizio on-line "**Galactic Dust Reddening and Extinction**" messo a disposizione da IRSA NASA/IPAC. Sarà sufficiente inserire le coordinate del nostro oggetto per ottenere una valutazione dell' **eccesso di colore**  $E(B-V)$  e del fattore di correzione  $A_v$  per la magnitudine  $V$  osservata (ridotta al sistema standard).

Per ottenere l'indice di colore **de-arrossato** dovremo sottrarre il valore  $E(CI)$  al nostro valore ottenuto fotometricamente. La medesima cosa andrà fatta per la magnitudine  $V$  in corrispondenza del massimo per la nostra variabile.

# Sistemi Binari ad Eclisse

(classe spettrale e temperatura superficiale della componente primaria)

Dall'indice di colore *de-arrossato* sarà possibile *stimare la classe spettrale e la temperatura superficiale della stella principale.*

Useremo il servizio on-line di VizieR - *Stellar Spectral Flux Library* o la **tabella** contenuta nel relativo articolo (Pickles, 1998).

Cercheremo la *corrispondenza del nostro indice di colore de-arrossato con la classe spettrale e con la temperatura superficiale, facendo, se necessario, l'interpolazione con i valori riportati in tabella.*

TABLE 2  
STELLAR LIBRARY COMPONENTS, PHYSICAL DATA, AND SYNTHETIC PHOTOMETRY

Type <sup>c</sup> (3)	log $T_e$ (4)	$U_3 - V$ (5)	$B_3 - V$ (6)	$V - R_c$ (7)	$V - I_c$ (8)	$V - J$ (9)	$V - H$ (10)	$V - K$ (11)
O5 V	4.600	-1.48	-0.38	-0.17	-0.36	-0.74	-0.99	-1.10
O9 V	4.550	-1.39	-0.33	-0.19	-0.35	-0.72	-0.90	-0.99
<b>B0 V</b>	<b>4.450</b>	-1.33	-0.34	<b>-0.16</b>	-0.31	-0.70	-0.83	-0.86
B1 V	4.350	-1.14	-0.24	-0.12	-0.24	-0.63	-0.73	-0.78
B3 V	4.280	-0.86	-0.20	-0.10	-0.15	-0.48	-0.73	-0.80

# Sistemi Binari ad Eclisse

(de-arrossamento, classe spettrale, temperatura - esempio)

Vedremo adesso un caso pratico su una nuova variabile (v1Gem) nella costellazione dei Gemelli alle coordinate (07 30 00.300 +30 01 50.48) e con un indice di colore di  $(V-R)=0.39$  (ottenuto dalle magnitudini calibrate al sistema standard) ed una magnitudine massima di  $V_{max}=16.23$ .

Dal servizio IRSA “*Galactic Dust Reddening and Extinction*” otteniamo la tabella:

```
\Coordinate = 07h30m00s +30d01m51s ( 112.500000000 30.030830000 equ J2000)
\E(B-V) = 0.068 (mag)
| Filter_name | LamEff (A) | A/Av | A/E (B-V) | A (mag) |
CTIO B | 0.4393 | 1.324 | 4.325 | 0.294 |
CTIO V | 0.5519 | 0.992 | 3.240 | 0.221 |
CTIO R | 0.6602 | 0.807 | 2.634 | 0.179 |
CTIO I | 0.8046 | 0.601 | 1.962 | 0.134 |
```

Calcoliamo l'eccesso di colore:  $E(V-R)=0.221-0.179=0.042$  da cui otteniamo il nostro indice di colore de-arrossato  $(V-R)_0=0.39-0.042=0.35$  e la nostra magnitudine max de-arrossata  $V_0=16.23-0.221=16.01$ .

A questo punto prendiamo la tabella “*Stellar Spectral Flux Library*” e vediamo che in corrispondenza di  $(V-R)_0=0.35$  troviamo la classe spettrale G2V e la temperatura ( $\log T_e$ )=3.751 e quindi  $10^{3.751}=5636K$ , che rappresenta la nostra stima di partenza per la temperatura superficiale della primaria.

# Sistemi Binari ad Eclisse

(relazione periodo → massa)

Alcuni studi sui sistemi binari a contatto eseguiti attraverso l'*analisi fotometrica e spettroscopica* (velocità radiali) hanno permesso di individuare una ben precisa *relazione empirica* tra il *periodo* e la *massa* delle componenti (Gazeas & Niarchos (2006), Gazeas & Stepien (2008)).

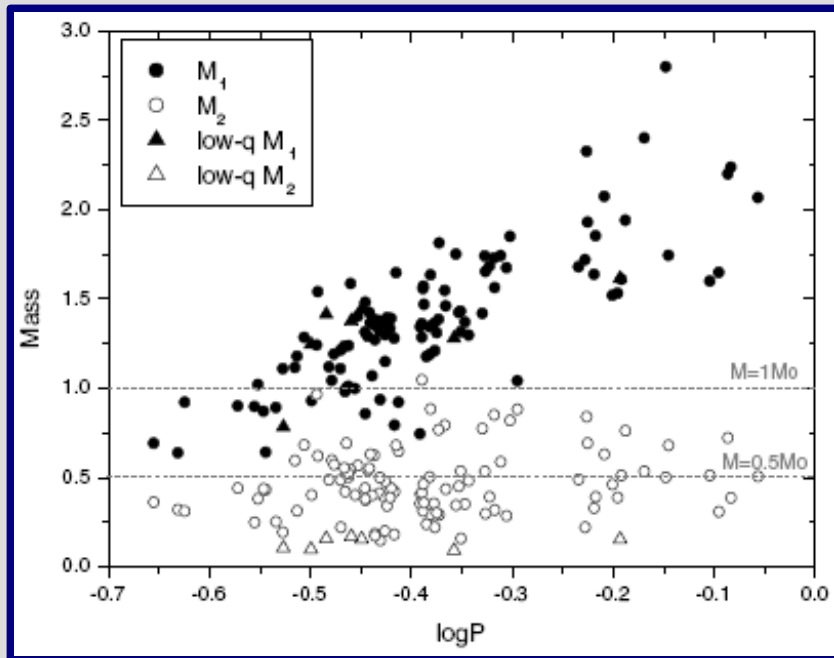


Grafico estratto dall'articolo di Gazeas & Niarchos (2006)

In questo caso si intende la **stella principale** come quella **più massiva**, mentre la **secondaria** è quella meno massiva.

Le masse della **principale**  $M_1$  variano tra **0.5 e 2.5** masse solari, mentre quelle delle **secondarie**  $M_2$  si attestano su una media di circa **0.5** masse solari e sono sostanzialmente insensibili al periodo.

$$\log M_1 = (0.755 \pm 0.059) \cdot \log P + (0.416 \pm 0.024)$$

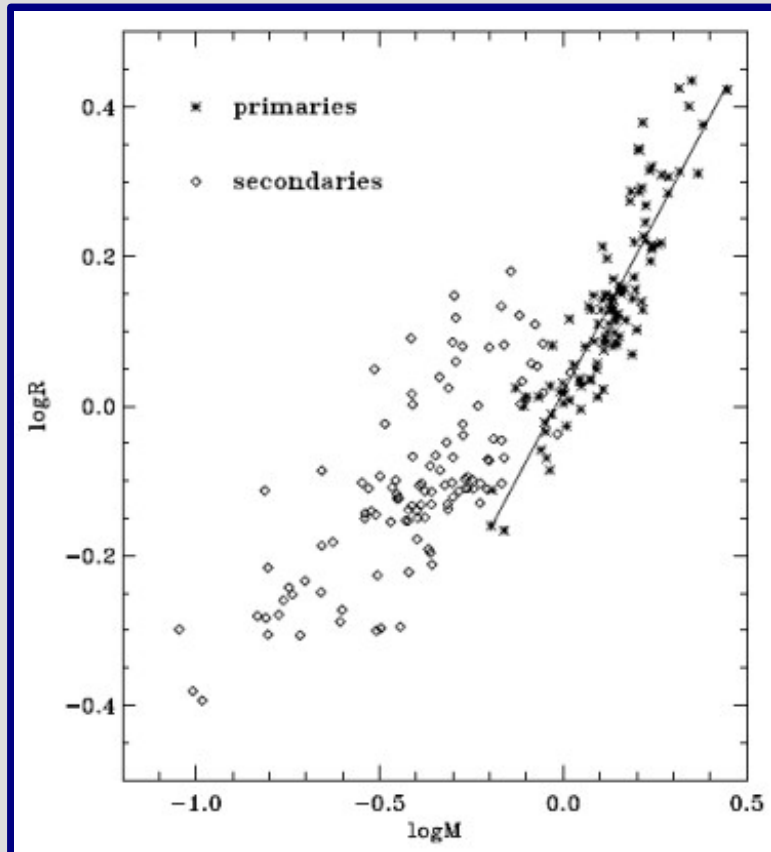
$$\log M_2 = (0.352 \pm 0.166) \cdot \log P - (0.262 \pm 0.067)$$

$M_1, M_2$  in masse solari e  $P$  in giorni.

# Sistemi Binari ad Eclisse

(relazione periodo → raggio)

Sempre dai dati osservativi di Gazeas & Stepien (2008) è stata individuata anche una *relazione empirica* tra il *periodo* dei sistemi W-UMa ed il *raggio* delle due componenti.



$$R_1 / a = 0.49 \cdot q^{-2/3} / (0.6 \cdot q^{-2/3} + \ln(1 + q^{-1/3}))$$

$$R_2 / a = 0.49 \cdot q^{2/3} / (0.6 \cdot q^{2/3} + \ln(1 + q^{1/3}))$$

$R, R_2$ , in frazioni di semiassa maggiore ( $a$ )  
 $P$  in giorni  
 $q = M_2/M_1$

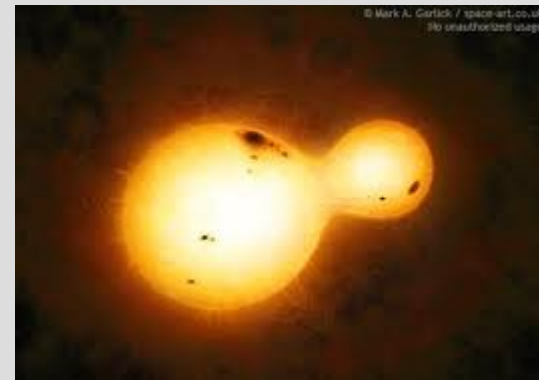


Grafico estratto dall'articolo di Gazeas & Stepien (2008)

# Sistemi Binari ad Eclisse

(ipotizziamo il rapporto tra le masse)

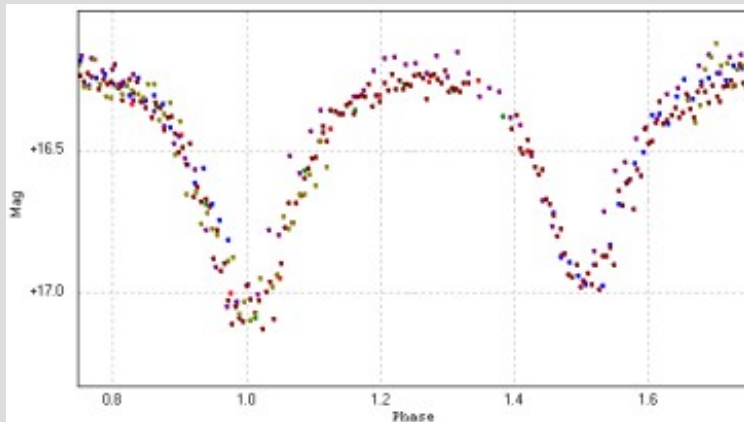
Le relazioni empiriche viste in precedenza ci permettono di **convergere** più velocemente verso una **soluzione accettabile**, poiché fissano “a priori” alcuni vincoli ai possibili parametri in gioco.

Ipotizziamo quindi un rapporto tra le masse **di partenza**, fissando  $M_2$  al valore medio di 0.5 masse solari e calcolando  $M_1$  con la relazione vista in precedenza, usando il periodo della nostra variabile  $P=0.286806d$ .

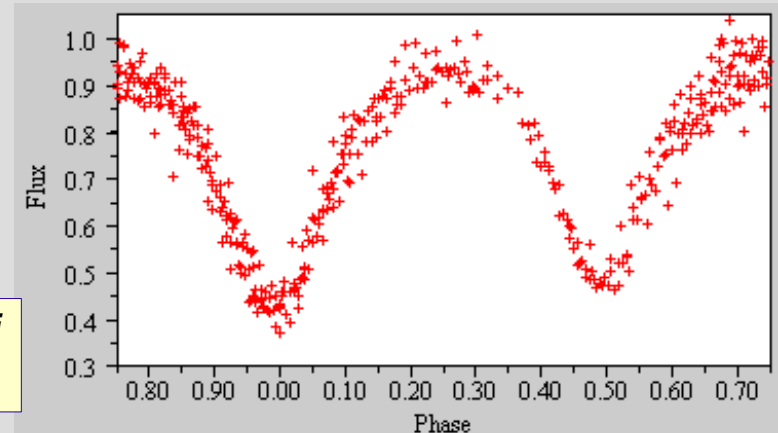
$$q = 0.50 / 1.02 = 0.49$$

Prima di passare a Binary Maker trasformiamo le magnitudini della curva di luce in flussi normalizzati attraverso la relazione.

$$F_v = 10^{(-0.4 \cdot (V_{mag} - V_{min}))}$$



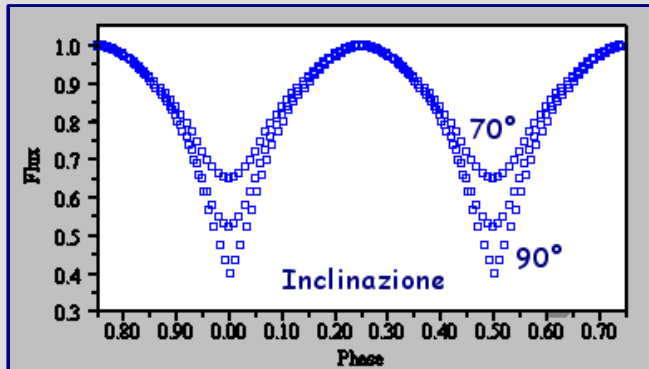
Da magnitudini a flussi.



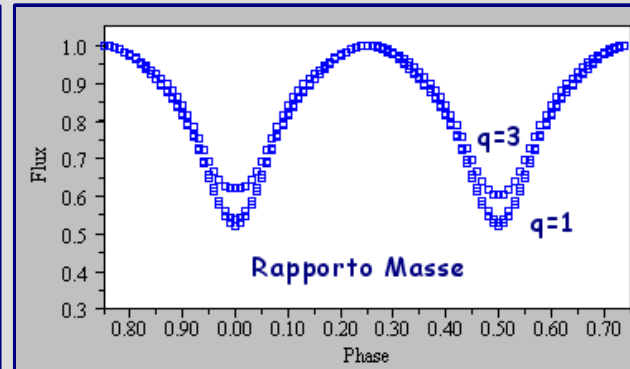
# Sistemi Binari ad Eclisse

## (modellazione – cosa influisce)

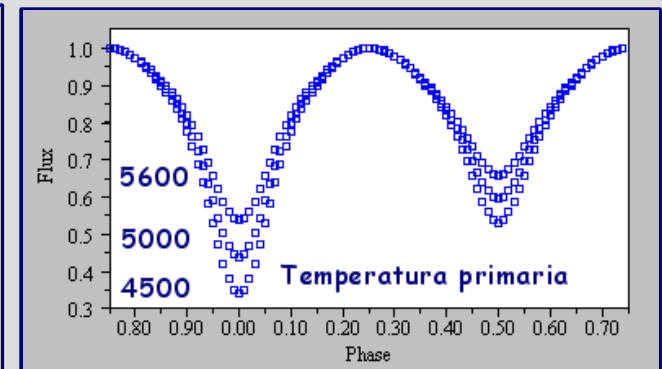
*Simuliamo con Binary Maker quali sono i principali fattori che influenzano l'aspetto della curva di luce.*



*Angoli vicino a 90° aumentano la profondità e l'acurezza dei minimi.*



*Un rapporto tra le masse più grande arrotonda la forma della curva di luce ed introduce effetti geometrici di appiattimento ai minimi.*



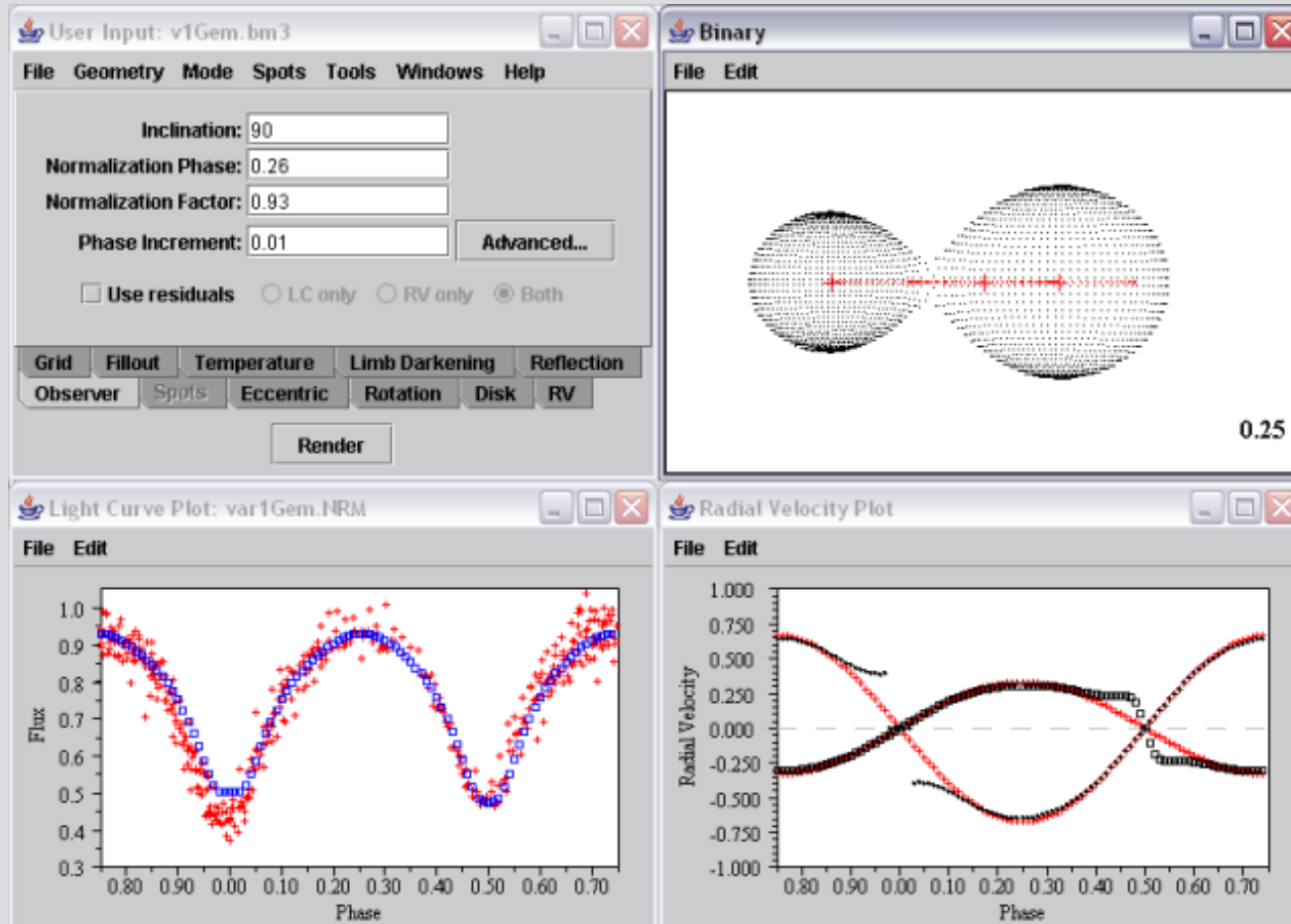
*La diminuzione della temperatura di una delle due componenti, sbilancia fortemente la profondità dei minimi.*



# Sistemi Binari ad Eclisse

## (modellazione con Binary Maker 3)

Passiamo adesso alla nostra simulazione con la curva di luce in flussi normalizzati, il rapporto tra le masse  $q=0.49$ ,  $1/q=2.03$  e la temperatura della componente principale  $5636\text{ K}$ .



In base al periodo è **molto probabile** che il nostro sistema sia **W-Type** ed in BM3 la convenzione (in questi casi) è quella di usare  $1/q$  al posto di  $q$ .

Fissiamo  $i=90^\circ$  e la medesima temperatura per entrambe le componenti.

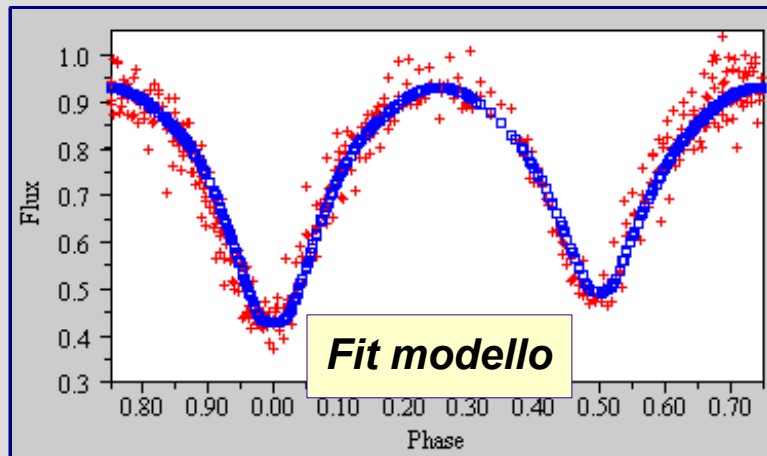
Già dal primo run cominciamo a vedere qualche risultato. Occorrerà rifinire il rapporto delle masse, l'angolo di inclinazione e la temperatura della secondaria.



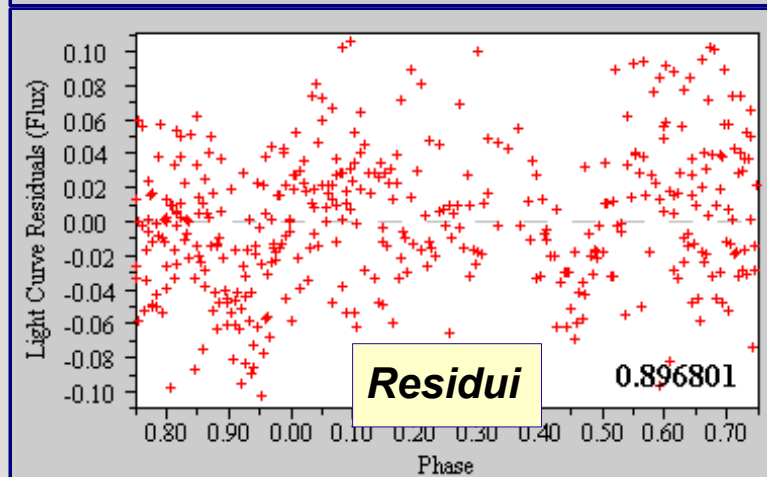
# Sistemi Binari ad Eclisse

## (modellazione con Binary Maker 3)

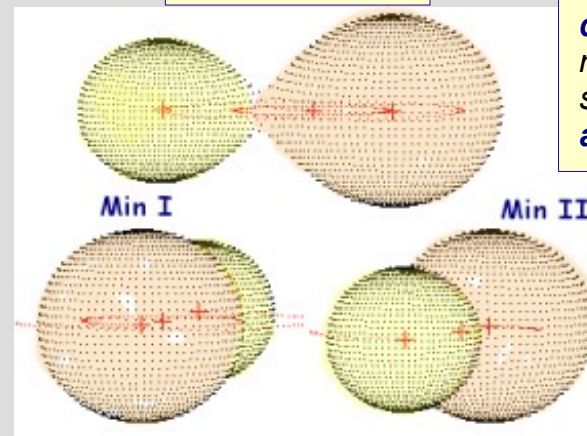
Dopo aver variato il *rapporto tra le masse*, l'*angolo di inclinazione* e la *temperatura della secondaria* (minimi di profondità diversa), riusciamo ad ottenere un modello **abbastanza soddisfacente** dal quale ricaviamo:



$q=1.9$  (rapporto masse)  
 $I=86.5$  (inclinazione in gradi)  
 $T1=5300$  (Temperatura in  $K^\circ$ )  
 $T2=5657$  (Temperatura in  $K^\circ$ )  
 $R1/a=0.45$  (raggio medio)  
 $R2/a=0.34$  (raggio medio)



Modello 3D



**Notare** che con i dati fotometrici otteniamo **solo quantità relative** (rapporto masse e raggi (in frazioni di semiasse maggiore) e **non assolute**.

Per ottenere quantità assolute sono **necessarie** le **velocità radiali**.

# Sistemi Binari ad Eclisse

## (la terza legge di Keplero)

*I raggi stellari stimati da Binary Maker sono espressi in frazioni di semiasse maggiore (a). La terza legge di Keplero, mettendo in relazione la somma delle masse, il periodo di rotazione ed il semiasse maggiore, ci permetterà di trasformarli in valore assoluto.*

$$a = (74.5 \cdot P^2 \cdot (M_1 + M_2))^{1/3}$$

P = periodo in giorni  
M1, M2 massa componenti (masse solari)  
a semiasse maggiore (raggi solari)

M1 = **1.02** masse solari  
M2 = **0.54** masse solari  
a = **2.12** raggi solari  
R1 = **0.95** raggi solari  
R2 = **0.72** raggi solari

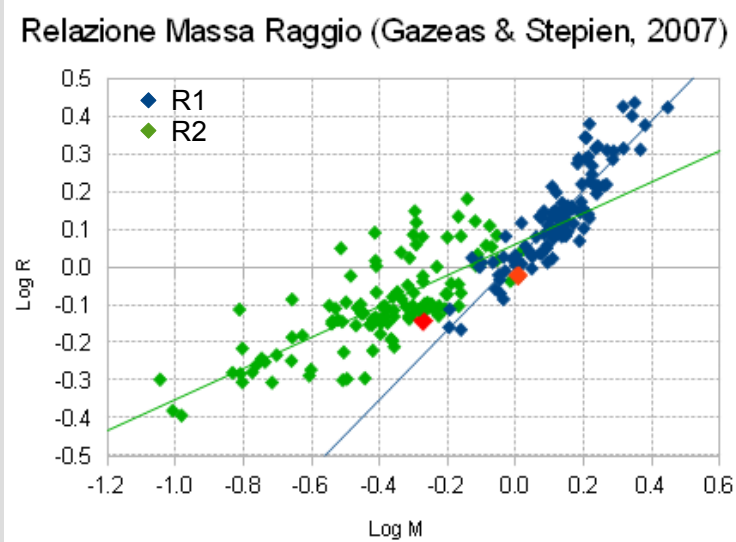
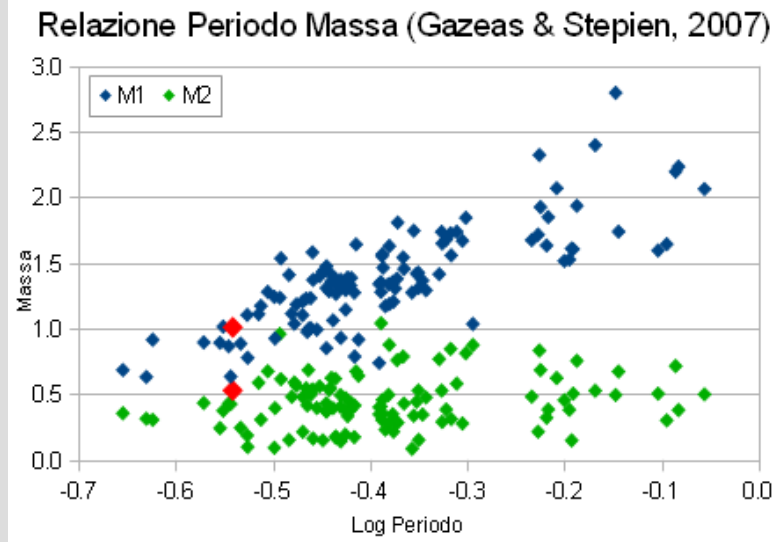
# Sistemi Binari ad Eclisse

## (facciamo una verifica)

La condizione che le due stelle siano in *contatto* impone dei *vincoli fisici e geometrici* che dovranno essere soddisfatti dalle masse e dai raggi delle due componenti. Questa relazione può tornare utile per verificare se la soluzione trovata è plausibile (R. C. Smith, 1984).

$$\frac{R_1}{R_2} = \left( \frac{M_1}{M_2} \right)^\beta \quad (\beta = 0.45 - 0.46)$$

Se applichiamo questa relazione ai nostri dati troviamo una differenza tra i due membri di **0,01**.



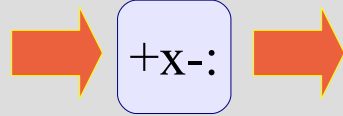
I punti **rossi** rappresentano le **masse ed i raggi** delle due componenti del nostro sistema, confrontate con il campione riportato dell'articolo di Gazeas & Stepien.

# Sistemi Binari ad Eclisse

## (modellare con StarLight Pro)

*Per la modellazione possiamo usare anche StarLight Pro (gratuito) fornendo in input i dati ottenuti dalle relazioni di massa e raggio viste in precedenza (tutte dipendenti dal periodo).*

P = 0.286806d  
T = 5636 K°



q = 2.04 (rapporto masse)  
M1 = 1.02 (in masse solari)  
M2 = 0.5 (pre-fissato)  
R1/a = 0.44 (raggio in unità di a)  
R2/a = 0.32 (raggio in unità di a)  
a = 2.10 (semiasse maggiore)

*Dopo qualche modifica all'angolo di inclinazione ed alla temperatura della secondaria, ritroviamo sostanzialmente il medesimo risultato di Binary Maker.*

System Parameters	
Inclination (°)	86.5
Mass Ratio	2.04
Latitude Lines	7

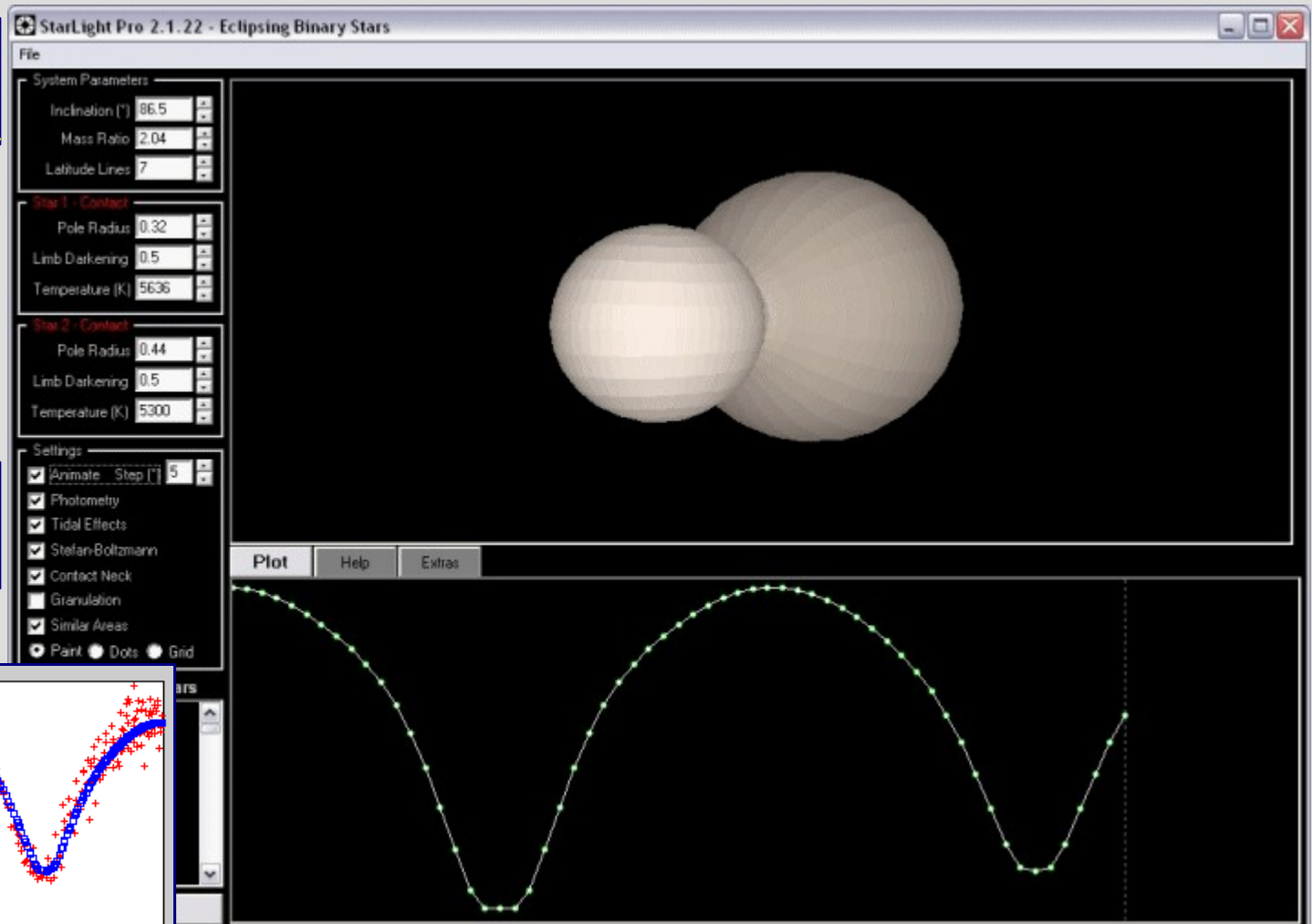
Star 1 - Contact	
Pole Radius	0.32
Limb Darkening	0.5
Temperature (K)	5636

Star 2 - Contact	
Pole Radius	0.44
Limb Darkening	0.5
Temperature (K)	5300

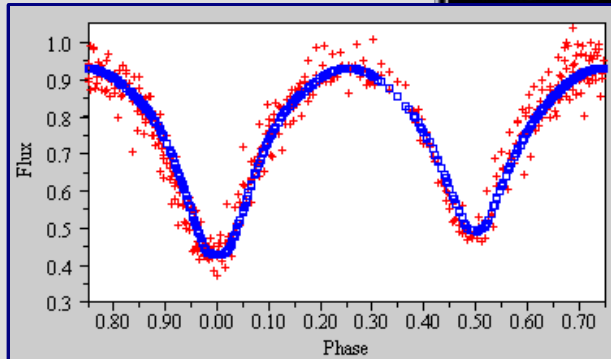
# Sistemi Binari ad Eclisse

(modellare con StarLight Pro)

Modello Starlight Pro



Curva di luce con Binary Maker.



# Sistemi Binari ad Eclisse

## (infine la distanza)

Dai dati osservativi di Gazeas & Stepien (2008) si è riscontrata anche una relazione empirica tra il **periodo** e la **magnitudine assoluta** dei sistemi binari a contatto di tipo W-UMa. Attraverso questa relazione saremo in grado di fare una stima della distanza dell'oggetto osservato.

Relazione Periodo → Magnitudine Assoluta dalla quale si può dedurre la distanza del sistema in parsec.

$$M_V = -8.4 \cdot \log P + 0.31$$

$$d(\text{pc}) = 10^{((V_0 - M_V) + 5)/5}$$

$M_V$  = magnitudine assoluta in banda V  
 $V_0$  = magnitudine de-arrossata.

*Esempio:*

$$M_V = -8.4 \cdot \log(0.286806) + 0.31 = 4.87$$

$$d = 10^{((16.01 - 4.87) + 5)/5} = 1693 \text{ pc}$$

Quindi il nostro sistema si trova all'incirca a **5500 anni luce** dalla terra.  
(1 pc = 3.26 a.l.)

# Qualche riferimento utile

- *IRSA NASA/IPAC - Galactic Dust Reddening and Extinction*  
(<http://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST/>)
- *Pickles A. J. 1998 "A Stellar Spectral Flux Library"*  
(<http://adsabs.harvard.edu/abs/1998PASP..110..863P>)
- *Gazeas & Niarchos 2006 "Masses and angular momenta of contact binary stars"* (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2006MNRAS.370L..29G>)
- *Gazeas & Stephien 2008 "Angular momentum and mass evolution of contact binaries"* (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2008MNRAS.390.1577G>)
- *R. C. Smith, 1984 "The Theory of Contact Binaries"*  
(<http://adsabs.harvard.edu/abs/1984QJRAS..25..405S>)
- *Bradstreet, D. H. 2005 "Fundamentals of Solving Eclipsing Binary Light Curves Using Binary Maker 3"* (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2005SASS...24...23B>)
- *StarLight Pro* (<http://www.midnightkite.com/binstar.html>)

# Domande

