

Sterrenkunde Hoofdstuk 4:

Dubbelsterren

Marc van der Sluys

Universiteit Utrecht, Nikhef



**Universiteit
Utrecht**

<https://www.nikhef.nl/~sluys/>

sluys@nikhef.nl

Nikhef

Dubbelsterren

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Rochepotentiaal

Rochelobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: dl_{in}/dt

Energie en
impulsmoment

Materie-
overdracht (MT)

Stabiele
materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten
dubbelsterren

Compacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele
neutronensterren

Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipserend

Leeftijden

1 Aantallen

- Aantallen

2 Geometrie

3 Materie-overdracht (MT)

4 Compacte dubbelsterren

5 Appendix

Aantallen

Aantallen

Geometrie

- Geometrie
- Rochepotentiaal
- Rochelobben
- Roche-lobe overflow
- Intermezzo: $d \ln x / dt$
- Energie en impulsmoment

Materie-overdracht (MT)

- Stabiele materie-overdracht
- Common envelopes
- Post-MT
- Soorten dubbelsterren

Compacte dubbelsterren

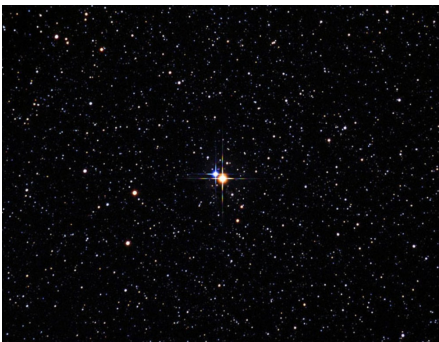
- X-ray binaries
- Dubbele neutronensterren

Appendix

- Visueel
- Spectroscopisch
- Eclipsierend
- Leeftijden

# sterren/ systeem	fractie systemen	fractie sterren
1	25%	15%
2	55%	55%
3+	20%	30%

Bron: [Eggleton: Evolutionary Processes in Binary and Multiple Stars \(2006\)](#)



Albireo (β Cygni): $P_b \sim 100\,000$ jaar, of alleen *optische* dubbelster?

Dubbelsterren

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Rochepotentiaal

Rochelobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$

Energie en

impulsmoment

Materie- overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele

neutronensterren

Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipserend

Leeftijden

1 Aantallen

2 Geometrie

- Geometrie
- Rochepotentiaal
- Rochelobben
- Roche-lobe overflow

- Intermezzo: $d\ln x/dt$
- Energie en impulsmoment

3 Materie-overdracht (MT)

4 Compacte dubbelsterren

5 Appendix

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche-potentiaal

Roche-lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$ Energie en
impulsmomentMaterie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele

neutronensterren

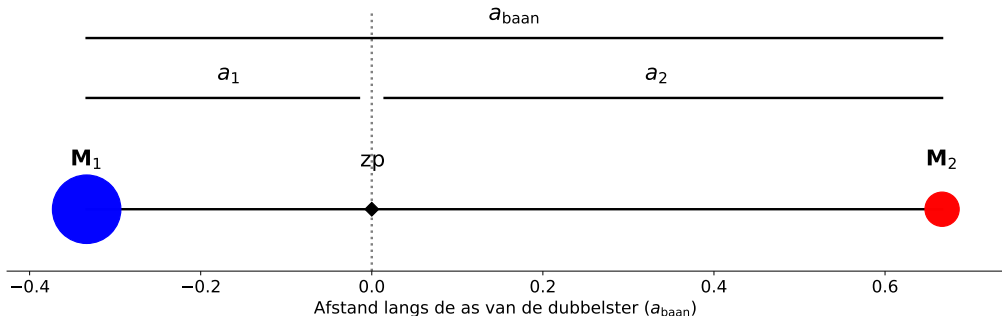
Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsierend

Leeftijden



$$\bullet M_T \equiv M_1 + M_2; \quad q_1 \equiv \frac{M_1}{M_2}; \quad q_2 \equiv \frac{M_2}{M_1}$$

$$\bullet a_1 = \frac{M_2}{M_T} a_b; \quad a_2 = \frac{M_1}{M_T} a_b$$

$$\bullet q_1 = \frac{M_1}{M_2} = \frac{a_2}{a_1}; \quad q_2 = \frac{M_2}{M_1} = \frac{a_1}{a_2}$$

$$\mu \equiv \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2}$$

$$\mathcal{M}_c \equiv \left(\frac{M_1 M_2}{M_T^{1/3}} \right)^{3/5}$$

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche-potential

Roche-lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d \ln x / dt$ Energie en
impulsmomentMaterie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten
dubbelsterrenCompacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele
neutronensterren

Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsierend

Leeftijden

Geldt ook voor **vergelijkbare massa's** ($M_1 \sim M_2$):

$$\frac{G(M_1 + M_2)}{a_b^3} = \left(\frac{2\pi}{P_b} \right)^2 = (2\pi f_b)^2 \equiv \omega_b^2$$

- van P_b naar a_b : $a_b = \left(\frac{GM_T}{4\pi^2} \right)^{1/3} P_b^{2/3}$

- van a_b naar P_b : $P_b = \left(\frac{4\pi^2}{GM_T} \right)^{1/2} a_b^{3/2}$

→ werkcollege

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche potentiaal

Roche lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$ Energie en
impulsmomentMaterie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele
neutronensterren

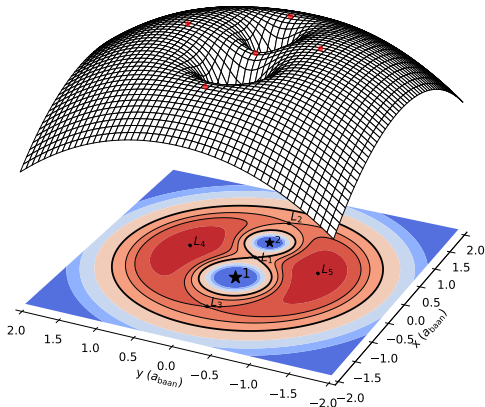
Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsierend

Leeftijden



- **Roche potentiaal:**
$$\Phi_{\text{Roche}}(\vec{r}) = -\frac{GM_1}{|\vec{r} - \vec{r}_1|} - \frac{GM_2}{|\vec{r} - \vec{r}_2|} - \frac{1}{2} (\vec{\omega} \times \vec{r})^2$$
 - op punt $\vec{r}$ in **coroterend** stelsel
 - $\vec{r}_1$ en $\vec{r}_2$ zijn de posities van de twee sterren (in 3D)
 - $\vec{\omega} = \frac{\vec{r} \times \vec{v}}{r^2}$ is de **hoeksnelheid** (in (rad)/s)

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche potentiaal

Roche lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$ Energie en
impulsmomentMaterie-
overdracht (MT)Stabiele
materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten
dubbelsterrenCompacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele
neutronensterren

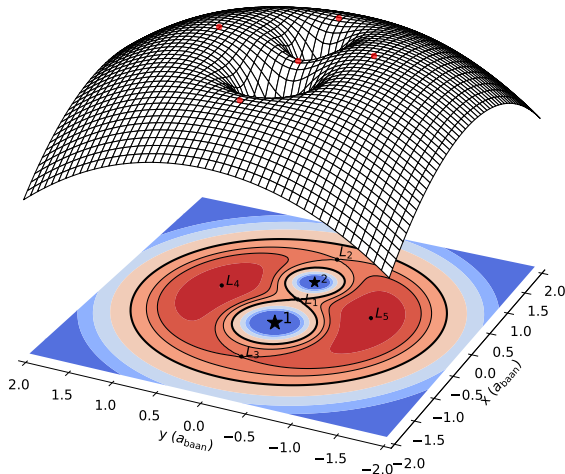
Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipserend

Leeftijden



- $L_1 - L_5$ zijn **Lagrangepunten**
- **materie-overdracht** tussen de sterren via L_1
- **massaverlies** uit de dubbelster via L_2

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche-potentiaal

Roche-lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$ Energie en
impulsmoment

Materie-

overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte

dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele

neutronensterren

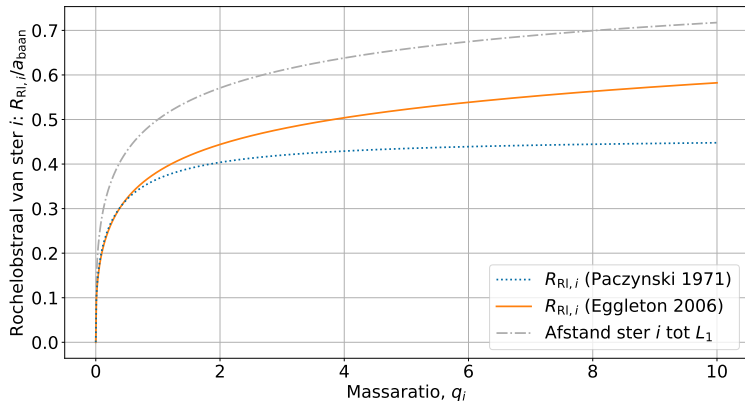
Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsend

Leeftijden



- “Straal” Roche-lob: $R_{RI} \equiv \left(\frac{3}{4\pi} V_{RI} \right)^{1/3}$ — stiekem $\sqrt[3]{\text{Roche-volume}}$

- Paczyński: $\frac{R_{RI,1}}{a_b} \approx \frac{2}{3^{4/3}} \left(\frac{M_1}{M_T} \right)^{1/3} \approx 0.46 \left(\frac{M_1}{M_T} \right)^{1/3}$

- → de **zwaardere** ster heeft de **grotere** Roche-lob

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche potentiaal

Roche lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: dl/dt Energie en
impulsmomentMaterie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele

neutronensterren

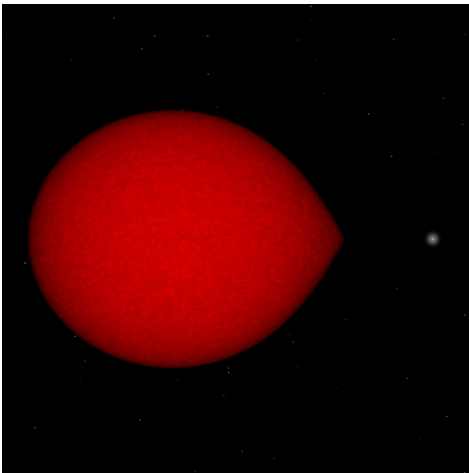
Appendix

Visueel

Spectroscopisch

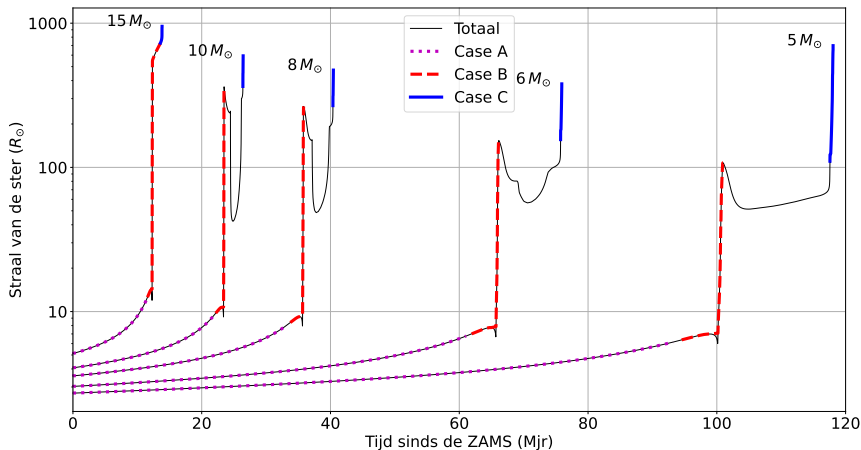
Eclipsierend

Leeftijden



Bron: Van der Sluis (2006)

- Als $R_* > R_{\text{RL},1}$, vult een ster zijn Rochelob en vindt *Roche-lobe overflow* plaats
- We noemen de sterren nu **donor** en **accretor**
- Uitwisseling van gas: **materie-overdracht** (*mass transfer*, **MT**)



- Een oorzaak van Roche-lobe overflow is de evolutie van een ster (tot donorster):
 - RLOF op de **MS**: **case-A** mass transfer
 - RLOF op de **RGB**: **case-B** mass transfer
 - RLOF op de **AGB**: **case-C** mass transfer

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche-potentiaal

Roche-lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$

Energie en

impulsmoment

Materie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele

neutronensterren

Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipserend

Leeftijden

Voor een machtsfunctie, van de vorm $y \equiv a x^b$, geldt

$$\frac{\dot{y}}{y} = b \frac{\dot{x}}{x},$$

waar $\dot{y} \equiv \frac{dy}{dt}$ de (tijds)afgeleide is van y .

Dit heet de *logaritmische* afgeleide, aangezien men in feite de afgeleide van $\ln y$ neemt:

$$\frac{d \ln y}{dt} = \frac{1}{y} \frac{dy}{dt} = \frac{\dot{y}}{y}.$$

Dit is nuttig omdat voor het product van een aantal machten de afgeleide kan worden “berekend” **zonder na te denken**:

- ① negeer constante factoren (a in dit voorbeeld);
- ② vervang vermenigvuldiging en deling door optellen en aftrekken, en
- ③ transformeer de machten (b in dit voorbeeld) tot factoren.

Omgekeerd is uit $\frac{\dot{y}}{y} = b \frac{\dot{x}}{x}$ **direct duidelijk** dat $y \propto x^b$.

→ **werkcollege**

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche-potentiaal

Roche-lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d \ln x / dt$ Energie en
impulsmomentMaterie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten
dubbelsterrenCompacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele
neutronensterren

Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsend

Leeftijden

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche potentiaal

Roche lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$ Energie en
impulsmomentMaterie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten
dubbelsterrenCompacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele
neutronensterren

Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsierend

Leeftijden

Aanname: cirkelbaan!

- Energie:
$$E_b = E_{\text{pot}} + \sum_{i=1}^2 E_{\text{kin},i} = \frac{-GM_1 M_2}{a_b} + \frac{GM_1 M_2}{2 a_b} = -\frac{GM_1 M_2}{2 a_b}$$

- Impulsmoment:
$$J_b = \sum_{i=1}^2 M_i |\vec{r}_i \times \vec{v}_i| = M_1 M_2 \sqrt{\frac{G a_b}{M_T}}$$

- Logaritmische afgeleide:
$$\frac{\dot{J}}{J} = \frac{\dot{M}_1}{M_1} + \frac{\dot{M}_2}{M_2} - \frac{1}{2} \frac{\dot{M}_T}{M_T} + \frac{1}{2} \frac{\dot{a}}{a}$$

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche potentiaal

Roche lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d \ln x / dt$ Energie en
impulsmomentMaterie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele

neutronensterren

Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsend

Leeftijden

Er zijn verschillende manieren waarop een dubbelster impulsmoment kan verliezen. Dit heeft direct invloed op de baanperiode en baanafstand. Vaak, maar niet altijd, gaat dit gepaard met een significant massaverlies uit de dubbelster. Voorbeelden zijn:

- sterrenwind;
- niet-conservatieve materie-overdracht;
- magnetische remming;
- **zwaartekrachtgolven.**

Aantallen

Aantallen

Geometrie

- Geometrie
- Rochepotentiaal
- Rochelobben
- Roche-lobe overflow
- Intermezzo: $d \ln x / dt$

Energie en impulsmoment

Materie-overdracht (MT)

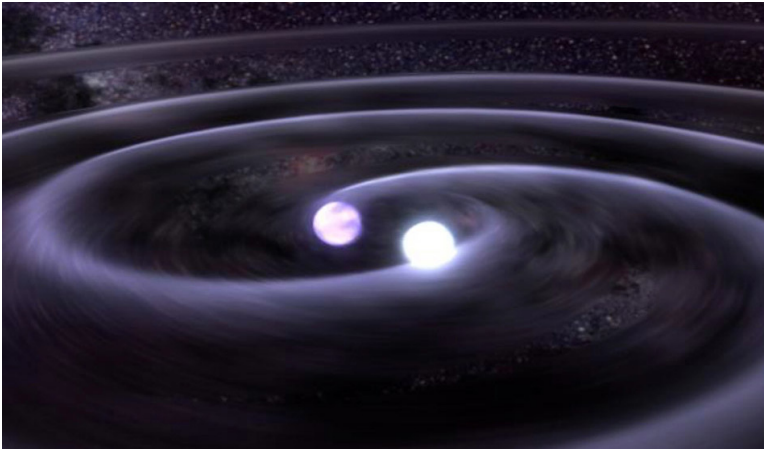
- Stabiele materie-overdracht
- Common envelopes
- Post-MT
- Soorten dubbelsterren

Compacte dubbelsterren

- X-ray binaries
- Dubbele neutronensterren

Appendix

- Visueel
- Spectroscopisch
- Eclipserend
- Leeftijden



$$\left(\frac{\dot{J}}{J}\right)_{\text{GW}} = -\frac{32}{5} \frac{G^3}{c^5} \frac{M_1 M_2 M_T}{a^4} \quad (\text{Peters, 1964})$$
$$\tau_{\text{merge}} = \frac{5}{256} \frac{c^5}{G^3} \frac{a_b^4}{M_1 M_2 M_T} \approx 150 \text{ Myr} \left(\frac{a_b}{R_\odot}\right)^4 \left(\frac{M_1}{M_\odot}\right)^{-1} \left(\frac{M_2}{M_\odot}\right)^{-1} \left(\frac{M_T}{M_\odot}\right)^{-1}.$$

Dubbelsterren

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Rochepotentiaal

Rochelobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$

Energie en

impulsmoment

Materie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele

neutronensterren

Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipserend

Leeftijden

1 Aantallen

2 Geometrie

3 Materie-overdracht (MT)
• Stabiele materie-overdracht

- Common envelopes
- Post-MT
- Soorten dubbelsterren

4 Compacte dubbelsterren

5 Appendix

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche-potential

Roche-lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d \ln x / dt$

Energie en

impulsmoment

Materie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele

neutronensterren

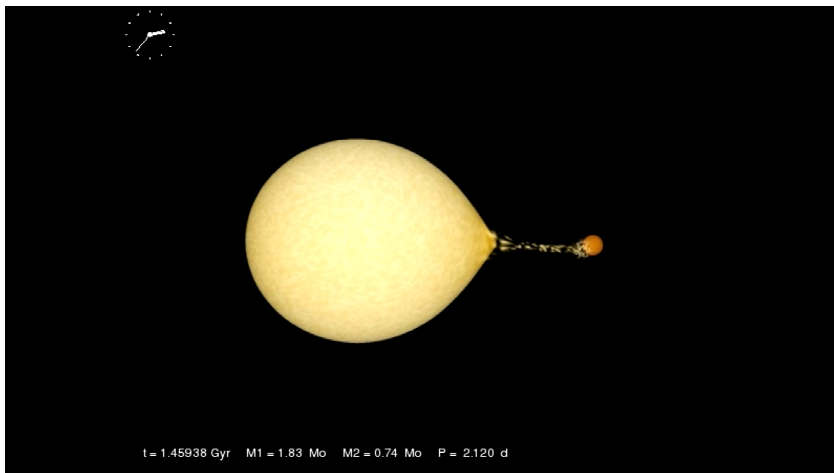
Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsierend

Leeftijden

Bron: [Van der Sluys \(2006\)](#)

- Tijdens materie-overdracht vindt ook uitwisseling van **impulsmoment** plaats
- Dit beïnvloed de **baan** van de dubbelster
- Door de MT kan ster 2 evolueren!

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche-potential

Roche-lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$ Energie en
impulsmomentMaterie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten
dubbelsterrenCompacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele
neutronensterren

Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsierend

Leeftijden

- Aanname: materie-overdracht (MT) is **conservatief**
- Vervang M_1 en M_2 door M_d en M_a voor **donor** en **accretor**
- $\frac{\dot{a}}{a} = 2\dot{M}_d \frac{M_d - M_a}{M_d M_a}$
 - 1 $\dot{M}_d < 0$
 - 2 als $M_d > M_a$: $\dot{a} < 0$
 - 3 als $M_d = M_a$: $\dot{a} = 0 \rightarrow$ minimum
- $a = a_{\min} \left(\frac{M_T^2}{4M_d M_a} \right)^2$; $a_{\min} = \frac{16J^2}{GM_T^3}$

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche-potentiaal

Roche-lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$ Energie en
impulsmomentMaterie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten
dubbelsterrenCompacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele
neutronensterren

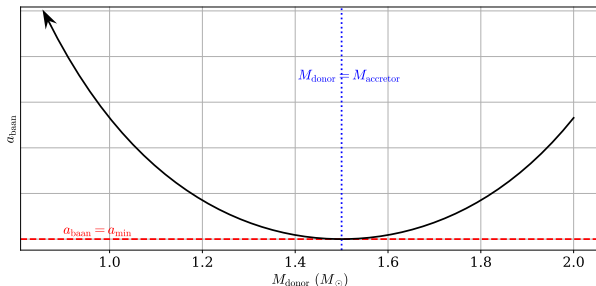
Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsierend

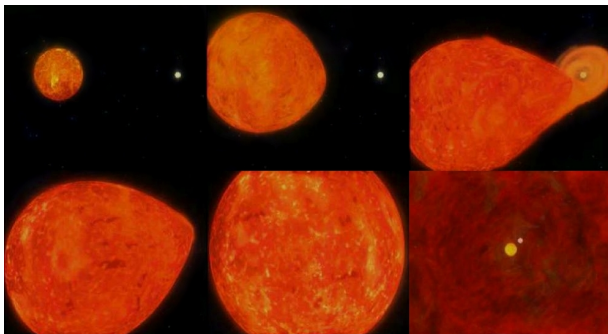
Leeftijden



- 1 zwaardere donor doet baan **krimpen**
- 2 a_{min} wanneer $M_d = M_a$
- 3 baan eindigt vaak (**veel**) **wijder** dan begin:

$$\bullet \quad a_e = a_b \left(\frac{M_{d,b} M_{a,b}}{M_{d,e} M_{a,e}} \right)^2 \quad \lim_{M_d \downarrow 0} a_e \propto M_d^{-2}$$

- b.v. $1.2 M_{\odot} + 1.0 M_{\odot} \rightarrow 0.3 M_{\odot} + 1.9 M_{\odot}$: factor 4.4
- $M_{d,e} = 0.2 M_{\odot} \rightarrow$ factor 9
- $M_{d,e} = 0.1 M_{\odot} \rightarrow 33\times!$



$$|E_{\text{bind,mntl}}| \sim \alpha_{\text{CE}} |\Delta E_b| \sim \alpha_{\text{CE}} \left[\frac{GM_{\text{d,e}} M_a}{2a_e} - \frac{GM_{\text{d,b}} M_a}{2a_b} \right] = \alpha_{\text{CE}} \frac{GM_a}{2} \left[\frac{M_{\text{d,e}}}{a_e} - \frac{M_{\text{d,b}}}{a_b} \right]$$

Typische aannamen:

- baanenergie wordt gebruikt voor wegblazen mantel
- “efficiëntiefactor”: $\alpha_{\text{CE}} \sim 1$
- van de **donor** blijft alleen de **kern** over: $M_{\text{d,e}} \sim M_{\text{d,b,kern}}$
- $\tau_{\text{dyn}} \lesssim 1000$ jaar $\rightarrow$ “**accretor**” is **onveranderd**: $M_{\text{a,e}} = M_{\text{a,b}} = M_a$

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Rochepotentiaal

Rochelobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$

Energie en
impulsmoment

Materie- overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele

neutronensterren

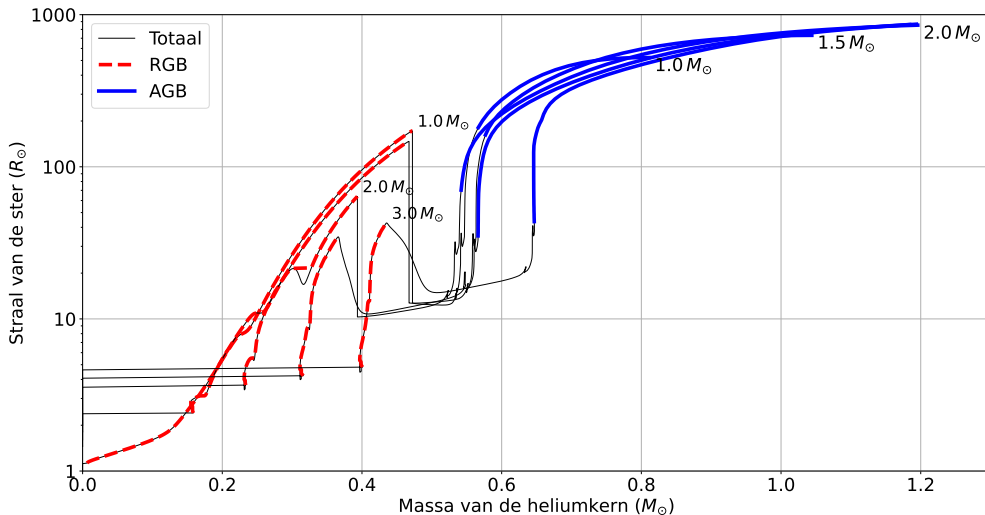
Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsierend

Leeftijden



- Aan het **begin** van een CE: $R_d = R_{\text{RI},d}$
- Aan het **einde** van een CE: $M_{d,e} = M_{d,b,\text{kern}}$

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche-potential

Roche-lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$

Energie en

impulsmoment

Materie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele

neutronensterren

Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsierend

Leeftijden

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Rochepotentiaal

Rochelobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$

Energie en impulsmoment

Materie-overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele neutronsterren

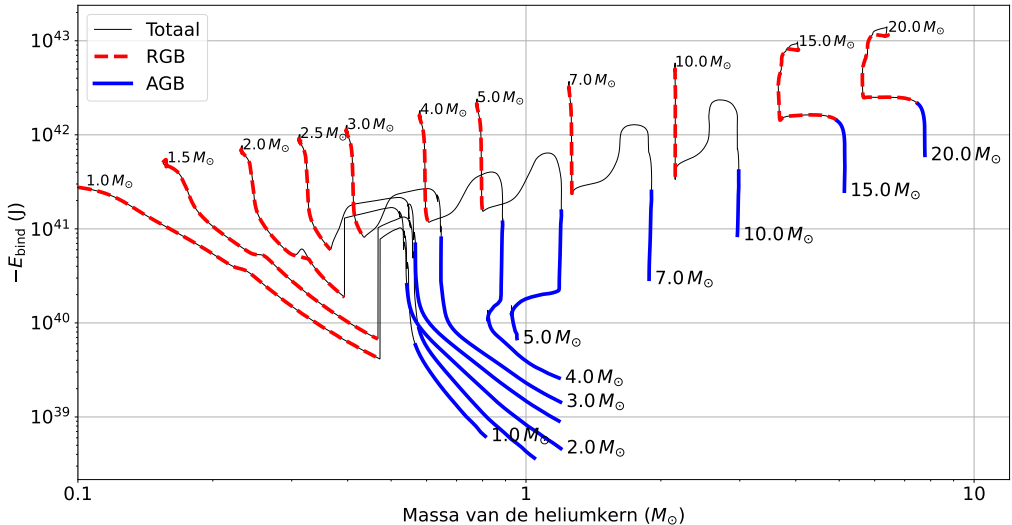
Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipserend

Leeftijden



- **Bindingsenergie van de mantel** van een ster met gegeven massa en kernmassa

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche-potential

Roche-lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d \ln x / dt$ Energie en
impulsmomentMaterie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten
dubbelsterrenCompacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele
neutronensterren

Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsend

Leeftijden

Dubbele witte dwergen (DWDs)

- Typische parameters DWD:
 - $M_{1,2} \gtrsim 0.3 M_{\odot}$
 - $a_b \sim 7 R_{\odot}$
 - geen materie-overdracht
- Typische rode-reusvoorganger:
 - $M_{\text{kern}} \gtrsim 0.3 M_{\odot}$
 - $R_{\text{rgb}} \sim 100 R_{\odot}$
- Conclusies:
 - 1 voormalige reus paste nooit in baan van huidige DWD-dubbelster
 - 2 verklaring: “Common Envelope”



Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Rochepotentiaal

Rochelobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$

Energie en
impulsmoment

Materie- overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele

neutronensterren

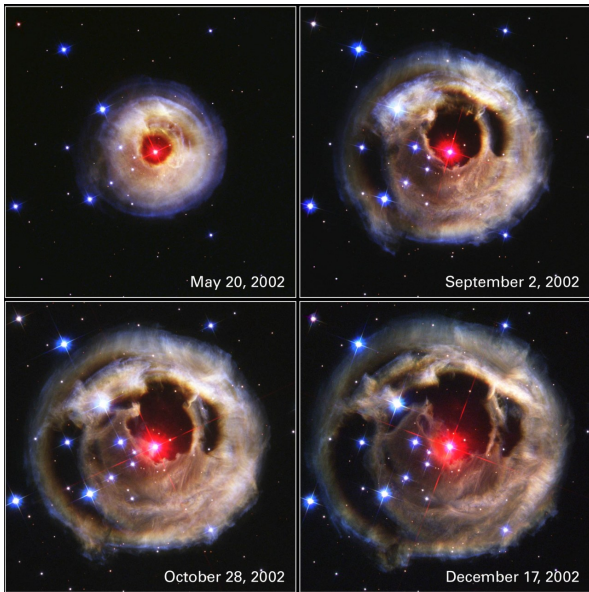
Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsierend

Leeftijden



Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Rochepotentiaal

Rochelobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d \propto t^3$

Energie en
impulsmoment

Materie- overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele

neutronensterren

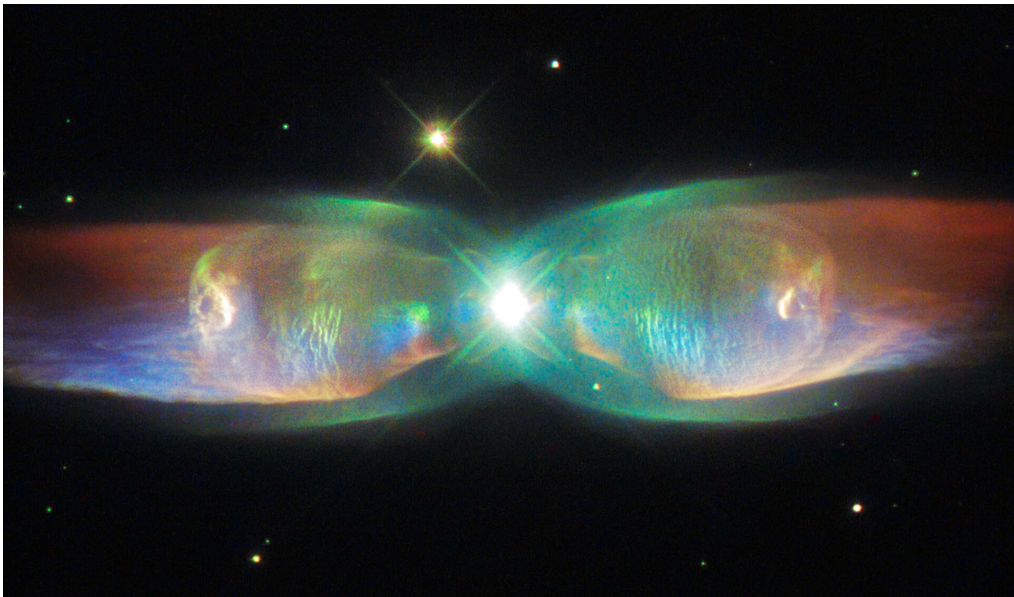
Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsierend

Leeftijden



Voor stabiele materie-overdracht en common envelopes stopt de MT vaak wanneer (vrijwel) de **gehele mantel** is overgedragen of verloren

Verdere evolutie donor

- $M_d \lesssim 2 M_\odot$:
 - **gedegenereerde kern** blijft over $\rightarrow$ helium-WD of CO-WD
- $M_d \gtrsim 2 M_\odot$:
 - schatting: $\sim$ **niet-gedegenereerde kern** blijft over
 - heliumfusie kan optreden $\rightarrow$ ster kan verder evolueren: **heliumhoofdreeks**
 - eventueel **heliumreus**, ..., supernova?

Verdere evolutie accretor

- $M_a \gtrsim 0.9 M_\odot$: evolutie binnen Hubbletijd $\rightarrow$ RLOF?
- $M_a \lesssim 1.2 M_\odot$: magnetic braking $\rightarrow$ RLOF?
- Nauwe baan: zwaartekrachtgolven $\rightarrow$ RLOF?

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Rochepotentiaal

Rochelobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$

Energie en
impulsmoment

Materie- overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten
dubbelsterren

Compacte dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele
neutronensterren

Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipserend

Leeftijden

Algol-systeem: standaardvoorbeeld van materie-overdracht van (sub)reus naar MS-ster

Cataclysmische variabele (CV): accretor: WD, donor vaak $\sim 0.5 M_{\odot}$ MS

- $P_b \sim$ uren ($\gtrsim 51$ min); accretie via **accretieschijf**.
- **AM CVn:** CV zonder H; $P_b \sim 10 - 65$ min
 - geen ruimte voor accretieschijf
 - bron van **zwaartekrachtgolven** (ruimtemissie LISA)

Röntgendubbelster: *X-ray binary (XRB)*: accretor: NS of BH; $L_x \gtrsim 25 L_{\odot}$.

- kan leiden tot NS-NS (BNS), NS-BH en BH-BH (BBH) dubbelsterren
- bron van **zwaartekrachtgolven** (LIGO/Virgo)

Dubbele witte dwerg: (DWD): eindstadium van de meeste sterren;

- meestal *geen* materie-overdracht, maar:
- compacte DWD:
 - bron van **zwaartekrachtgolven** (LISA)
 - voorloper van **type-Ia-supernova**

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche-potentiaal

Roche-lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d \ln x / dt$ Energie en
impulsmomentMaterie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten
dubbelsterrenCompacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele
neutronensterren

Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsend

Leeftijden

Dubbelsterren

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Rochepotentiaal

Rochelobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$

Energie en
impulsmoment

Materie-
overdracht (MT)

Stabiele
materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten
dubbelsterren

Compacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele
neutronensterren

Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipserend

Leeftijden

1 Aantallen

2 Geometrie

3 Materie-overdracht (MT)

4 Compacte dubbelsterren

- X-ray binaries
- Dubbele neutronensterren

5 Appendix

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche-potential

Roche-lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$ Energie en
impulsmomentMaterie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele
neutronensterren

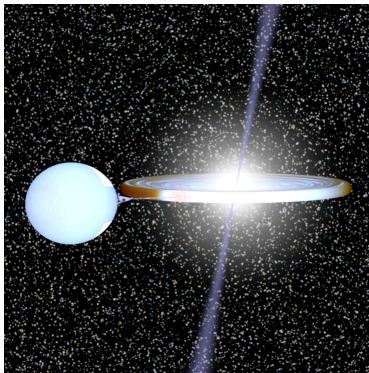
Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsierend

Leeftijden



Bron: Van der Sluys (2006)

- Röntgendubbelster $\equiv$ *X-ray binary* (XRB)
- Accretie op een NS: $\epsilon \sim \frac{GM_{\text{ns}}}{R_{\text{ns}}} \sim \frac{G}{c^2} \frac{1.4 M_{\odot}}{10 \text{ km}} c^2 \approx 0.2 c^2 \rightarrow \text{X-rays!}$
 - vergelijk met $\epsilon_{\text{r}} \approx 0.0072 c^2$ voor H-fusie!
- Accretie verloopt via **accretieschijf** $\rightarrow$ ook straling voor BHs!
 - tot 2015 werden zwarte gaten alleen door **indirecte methoden** gedetecteerd!

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Rohepotentiaal

Roche-lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$

Energie en

impulsmoment

Materie-

overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte

dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele

neutronensterren

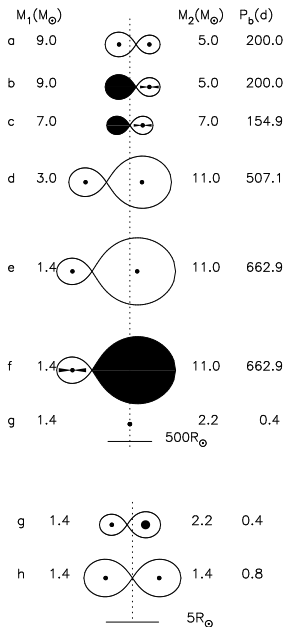
Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsend

Leeftijden



a

9+5 $M_\odot$ ZAMS-dubbelster

b

door materie-overdracht ...

c

... krimpt ...

d

... en expandeert de baan

e

de donor is nu veel lichter en

1

de **supernova** laat de dubbelster intact

2

een **neutronenster** wordt gevormd in de supernova

f

Hoge-massaröntgendubbelster (*high-mass X-ray binary*; *HMXB*):

1

windaccretie: röntgenbron

2

Roche-lobe overflow: zeer heldere röntgenbron

3

common envelope: baan krimpt dramatisch

g

2.2 $M_\odot$ **heliumster** voor de tweede **supernova**, mogelijk nog een röntgenbron (*zoom in* $\sim 100\times$)

h

dubbele neutronenster (BNS)

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Rochepotentiaal

Rochelobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: dl/dt

Energie en
impulsmoment

Materie- overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten
dubbelsterren

Compacte dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele

neutronensterren

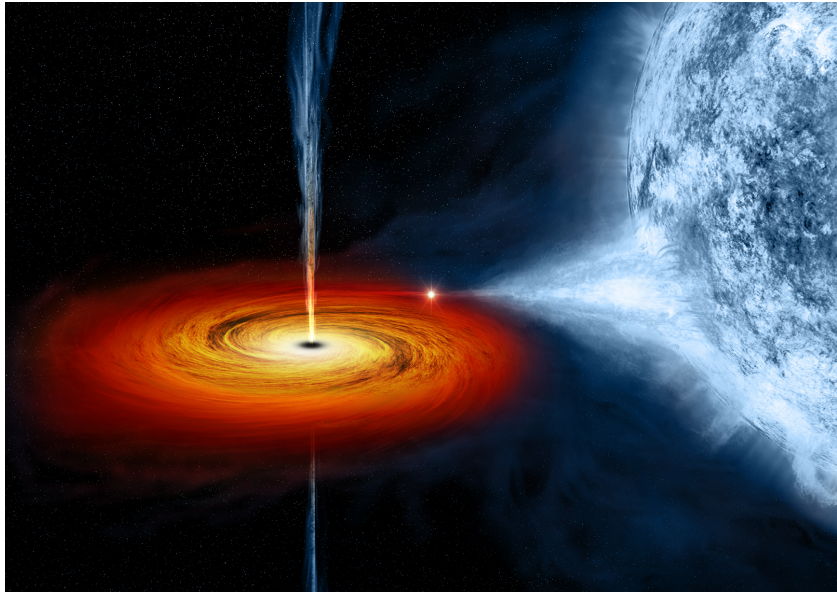
Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipserend

Leeftijden



Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie
Roche-potential
Roche-lobben
Roche-lobe overflow
Intermezzo: $d\ln x/dt$
Energie en impulsmoment

Materie-overdracht (MT)

Stabiele materie-overdracht
Common envelopes
Post-MT
Soorten dubbelsterren

Compacte dubbelsterren

X-ray binaries
Dubbele neutronensterren

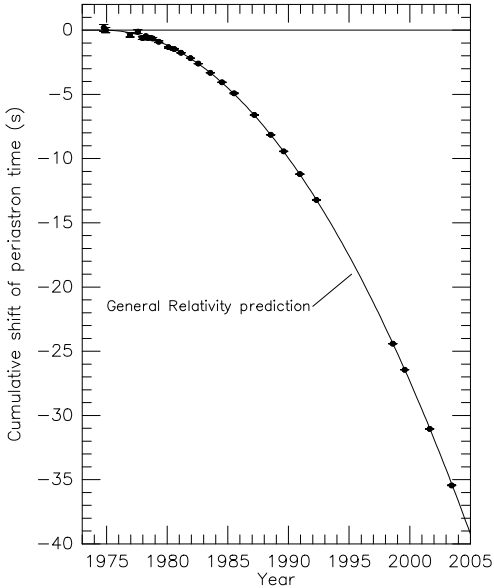
Appendix

Visueel
Spectroscopisch
Eclipsend
Leeftijden

PSR B1913+16

Verlies van baanenergie door zwaartekrachtstraling — $\tau_{\text{GW}} \approx 1.636 \text{ Gyr!}$

Fitparameter	Waarde
$a_p \sin i \text{ (s)}$	2.3417725 (8)
e	0.6171338 (4)
$P_b \text{ (d)}$	0.322997448930 (4)
$\omega_0 \text{ (}^\circ\text{)}$	292.54487 (8)
$\langle \dot{\omega} \rangle \text{ (}^\circ\text{/yr)}$	4.226595 (5)
$\gamma \text{ (s)}$	0.0042919 (8)
$\dot{P}_b \text{ (s/s)}$	$-2.4184 \text{ (9)} \times 10^{-12}$
$M_{\text{PSR}} (M_\odot)$	1.4414 (2)
$M_{\text{emp}} (M_\odot)$	1.3867 (2)



Dubbelsterren

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Rochepotentiaal

Rochelobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$

Energie en
impulsmoment

Materie-
overdracht (MT)

Stabiele
materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten
dubbelsterren

Compacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele
neutronensterren

Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipserend

Leeftijden

1 Aantallen

2 Geometrie

3 Materie-overdracht (MT)

4 Compacte dubbelsterren

- 5 Appendix
- Visueel
 - Spectroscopisch
 - Eclipserend
 - Leeftijden

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Rochepotentiaal

Rochelobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln/dt$

Energie en

impulsmoment

Materie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele
neutronensterren

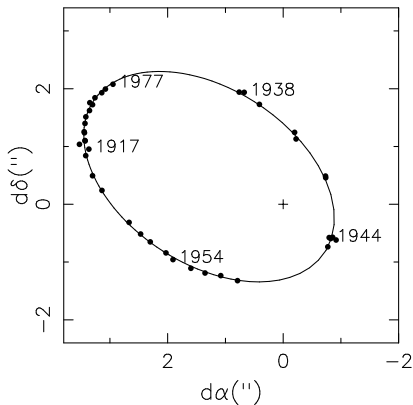
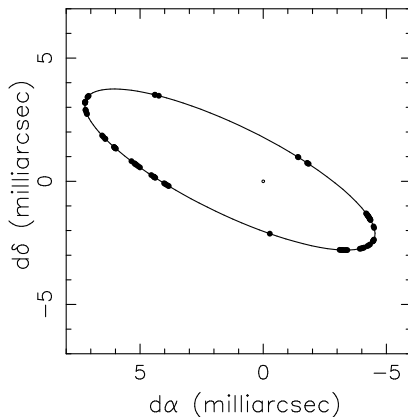
Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsierend

Leeftijden

Sirius A: $P_b \approx 50.09$ jaar64 Psc: $P_b \approx 13.8$ dagen

- **Ruimtelijke beweging** meetbaar (2D)
- Alleen **geprojecteerde baan** zichtbaar!
- Alleen voor **wijde dubbelsterren**!
- Indien afstand bekend: conversie van boogseconden naar **meters/A.U./ $R_{\odot}$**

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche-potential

Roche-lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$ Energie en
impulsmomentMaterie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele
neutronensterren

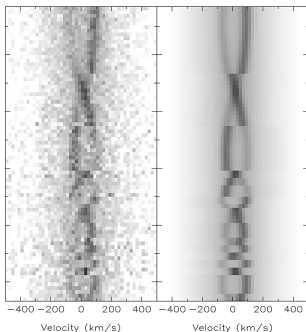
Appendix

Visueel

Spectroscopisch

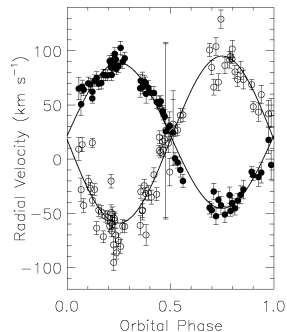
Eclipsend

Leeftijden



WD 0136: ruwe en opgeschoonde spectra

- Enkellijnig vs. dubbellijnig
- Alleen **radiële snelheden** meetbaar!
 - uit Doppler-effect: $\frac{v}{c} \approx \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$
- Alleen **nauwe dubbelsterren!**
- Alleen indien $L_1/L_2 \sim 1$



WD 0136: radiële snelheden

- $\frac{M_1}{M_2} = \frac{v_2}{v_1}$
- Alleen **geprojecteerde baan!**
 - $2\pi a_{1,2} = \frac{v_{r,1,2}}{\sin i} P_b$

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche-potentiaal

Roche-lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d \ln x / dt$ Energie en
impulsmomentMaterie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele

neutronensterren

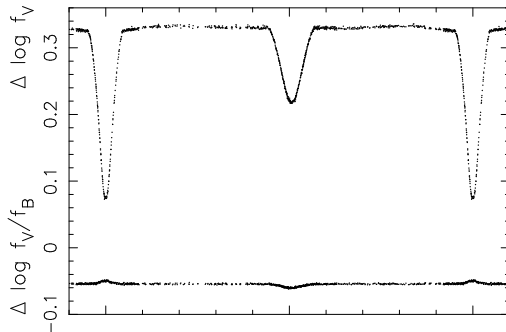
Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipserend

Leeftijden



GG Lup: lichtkromme (B7V+B9V)

- Volledige lichtkromme: twee eclipsen per baanperiode
- **Inclinatie baan:** $i \sim \pm 90^\circ$
- **Alleen nauwe dubbelsterren!**

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Roche-potentiaal

Roche-lobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d \ln x / dt$ Energie en
impulsmomentMaterie-
overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte
dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele

neutronensterren

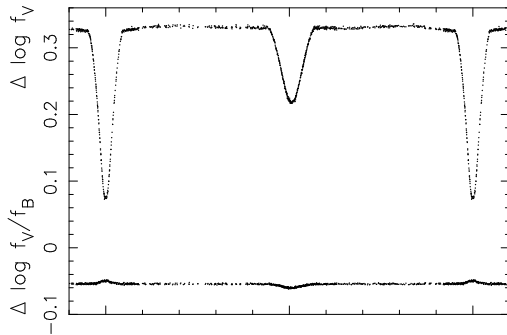
Appendix

Visueel

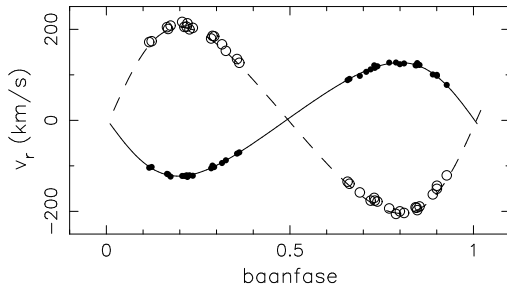
Spectroscopisch

Eclipserend

Leeftijden

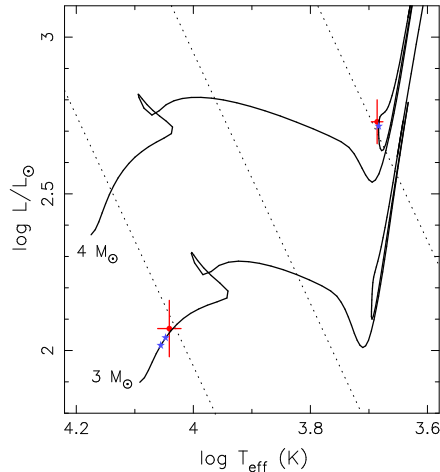


GG Lup: lichtkromme (B7V+B9V)



GG Lup: radiële snelheden

- Ideaal geval: eclipsen **en** spectra!
- **Volledige 3D baan** in km/A.U./ $R_\odot$
- Gedetailleerd model: stralen + temperaturen $\rightarrow$ lichtkrachten $\rightarrow$ afstand!
- Tot ~ 30 Mpc



- HR 6902: G9II+B9V

- Sporen: $4+3 M_{\odot}$

- Stippellijnen: $R = 3, 10, 30 R_{\odot}$

- Punten: waarnemingen + fout

- Sterren: leeftijd dichtst bij waarneming voor reus

Dubbelsterren

Aantallen

Aantallen

Geometrie

Geometrie

Rochepotentiaal

Rochelobben

Roche-lobe overflow

Intermezzo: $d\ln x/dt$

Energie en

impulsmoment

Materie-

overdracht (MT)

Stabiele

materie-overdracht

Common envelopes

Post-MT

Soorten

dubbelsterren

Compacte

dubbelsterren

X-ray binaries

Dubbele

neutronensterren

Appendix

Visueel

Spectroscopisch

Eclipsierend

Leeftijden