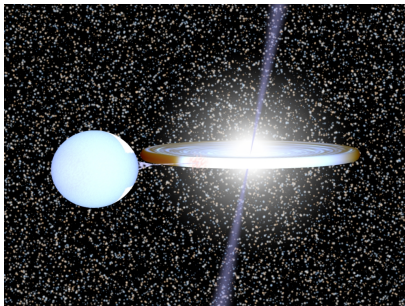


Compacte dubbelsterren en gravitatiegolven in ons heelal



Marc van der Sluys

Radboud Universiteit Nijmegen / Virgo

hemel.waarnemen.com

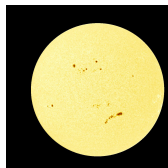
Outline

- 1 Sterren en sterevolutie
 - Evolutie van enkele sterren
 - Dubbelsterevolutie en materie-overdracht
 - Common-envelope evolutie

- 2 Dubbele witte dwergen
 - Ontstaan en evolutie van dubbele witte dwergen
 - Type-Ia supernovae

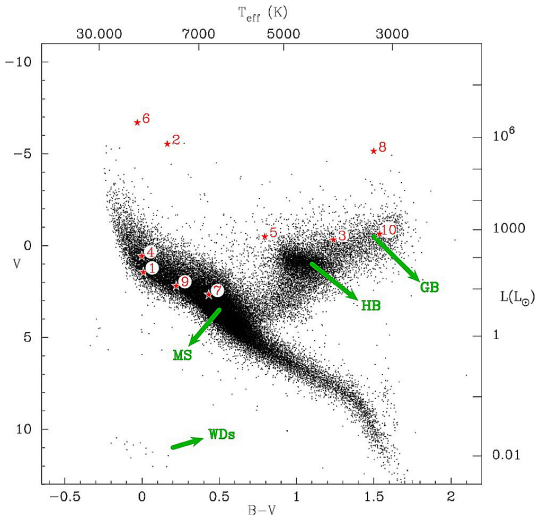
- 3 De detectie van gravitatiegolven
 - Gravitatiegolven
 - LISA
 - LIGO/Virgo
 - Gammaflitsers

De Zon



Grootheid	Eenheid	Aarde	
Massa	M_{\odot}	$1,99 \times 10^{30}$ kg	$333\,000 M_{\oplus}$
Straal	R_{\odot}	696 000 km	$109 R_{\oplus}$
Dichtheid	$\bar{\rho}_{\odot}$	1,4 g/cm ³	0,26 $\bar{\rho}_{\oplus}$
Lichtkracht	L_{\odot}	$3,85 \times 10^{26}$ W	$\sim 3 \times 10^9$ "L _⊕ "
Temperatuur:			
Oppervlak	$T_{\text{opp},\odot}$	5500°C	15°C
Centrum	$T_{\text{c},\odot}$	$\sim 14 \times 10^6$ °C	~ 7000 °C

Hipparcos-catalogus



- 48 495 stars
- $\frac{\Delta d}{d} < 20\%$
- $\Delta(B-V) < 0.1$ m

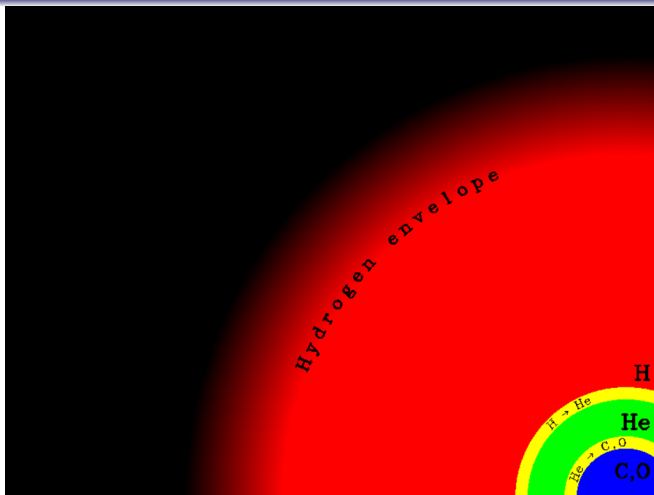
- 1 Sirius
- 2 Canopus
- 3 Arcturus
- 4 Vega
- 5 Capella
- 6 Rigel
- 7 Procyon
- 8 Betelgeuse
- 9 Altair
- 10 Aldebaran

Hoofdreekssterren

Eigenschappen van enkele sterren met zonne-metalliciteit, halverwege de hoofdreeks ($X_c = 0.35$):

M (M_\odot)	age (Myr)	R (R_\odot)	L (L_\odot)	T_s (K)	T_c (MK)	Number density (w.r.t. $1 M_\odot$)
0.5	52 600	0.50	0.05	3860	9.8	7.07
0.8	11 600	0.79	0.38	5100	13.4	2.34
1.0	4900	1.01	1.05	5810	15.9	1.00
1.5	1660	1.95	6.75	6660	20.9	0.131
2.0	582	2.23	20.4	8230	22.5	0.0232
2.5	405	2.80	57.8	9530	24.1	9.59×10^{-3}
3.0	246	3.09	120	10 800	25.2	3.80×10^{-3}
5.0	70.6	4.19	895	15 400	28.6	3.27×10^{-4}
10.0	12.7	5.74	8590	23 100	32.8	1.16×10^{-5}
20.0	5.18	8.78	67 900	31 300	37.0	9.3×10^{-6}
50.0	2.41	15.9	527 000	39 000	41.4	5×10^{-7}

Evolutie van een ster van 1 zonsmassa



Fase:

Waterstoffusie

Heliumfusie

Temperatuur:

$T \gtrsim 7$ miljoen K,

$T \gtrsim 200$ miljoen K,

Tijdschaal:

$\tau \approx 7 + 4$ miljard jaar

$\tau \approx 200 + 25$ miljoen jaar

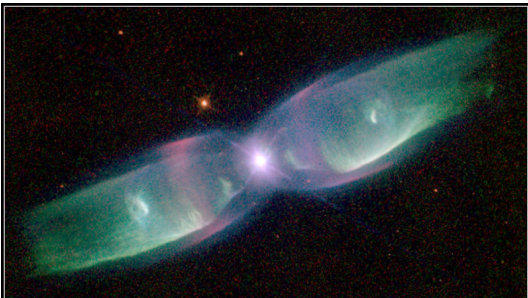
Reacties:

$4H \rightarrow He$

$3He \rightarrow C,$

$C + He \rightarrow O$

Planetaire nevels

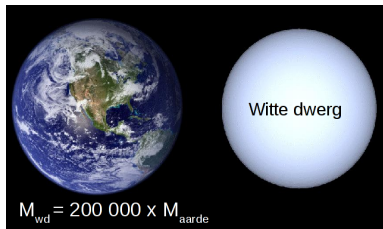
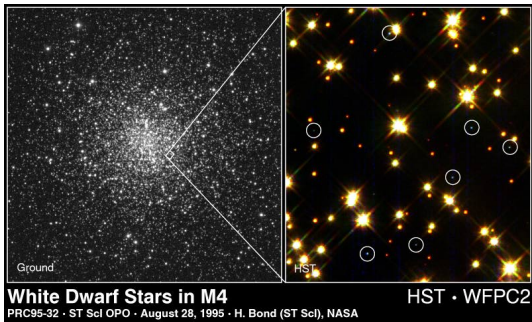


Planetary Nebula M2-9
PRC97-38a • ST Scl OPO • December 17, 1997
B. Balick (University of Washington) and NASA
HST • WFPC2



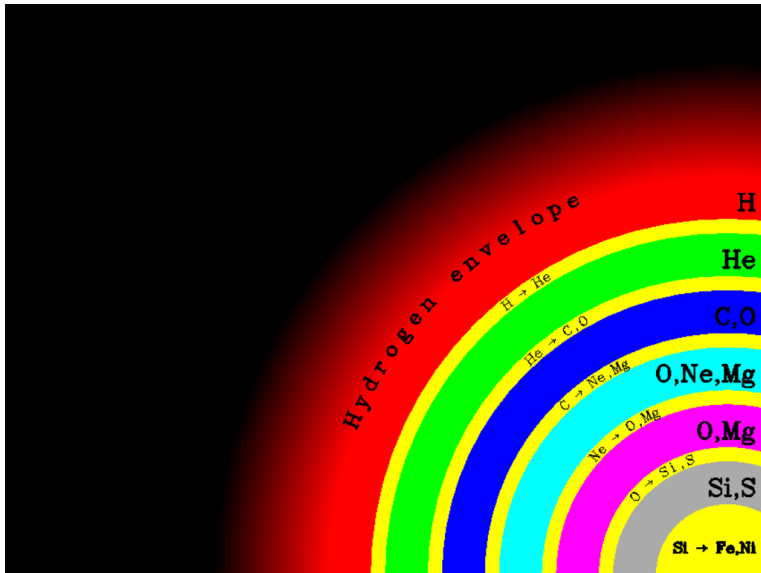
Butterfly nebula (HST)

Witte dwergen



- Sterren met $M \lesssim 8 - 10 M_{\odot}$, $> 90\%$ van alle sterren, worden WDs
- WDs bestaan meestal uit He of C+O
- Dichtheid van een WD ~ 1 miljoen keer die van water
- $M_{wd} \lesssim 1.4 M_{\odot}$; $\langle M_{wd} \rangle \approx 0.6 M_{\odot}$
- $L_{wd} \lesssim 0.001 L_{\odot}$

Uienchil-structuur voor zware sterren



Fusiestadia voor een $10 M_{\odot}$ -ster

Stage	Net reactions	T (K)	τ
Hydrogen burning	$H \rightarrow He$	$> 7 \times 10^6$	10 Myr
Helium burning	$He \rightarrow C,O$	$> 2 \times 10^8$	1 Myr
Carbon burning	$C \rightarrow Ne,Mg$	$> 8 \times 10^8$	1 kyr
Neon burning	$Ne \rightarrow O,Mg$	$> 1.5 \times 10^9$	1 month
Oxygen burning	$O \rightarrow Si,S$	$> 2 \times 10^9$	2 years
Silicon burning	$Si \rightarrow Fe,Ni$	$> 3.3 \times 10^9$	3 days

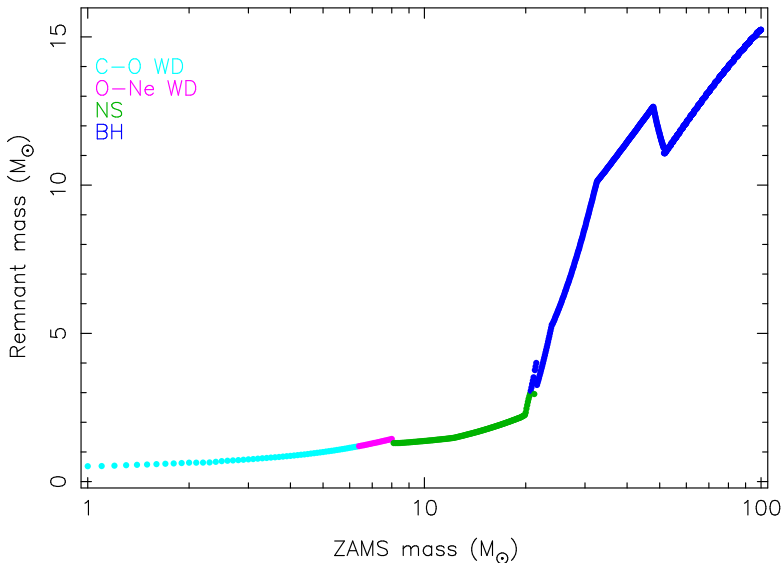
Supernova



© Anglo-Australian Observatory

Relatie tussen ZAMS-massa en eindmassa

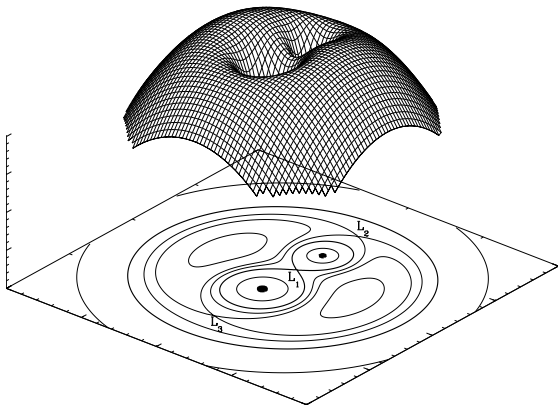
ZAMS: Zero-Age Main Sequence



Dubbelsterren: Albireo



Roche lobes



$$\frac{R_{\text{RI},i}}{a} \approx \frac{2}{3^{4/3}} \left(\frac{M_{(3-i)}}{M_{\text{T}}} \right)^{1/3}$$

accurate within 1% for
 $q_i < 0.05$ (Paczynski, 1967).

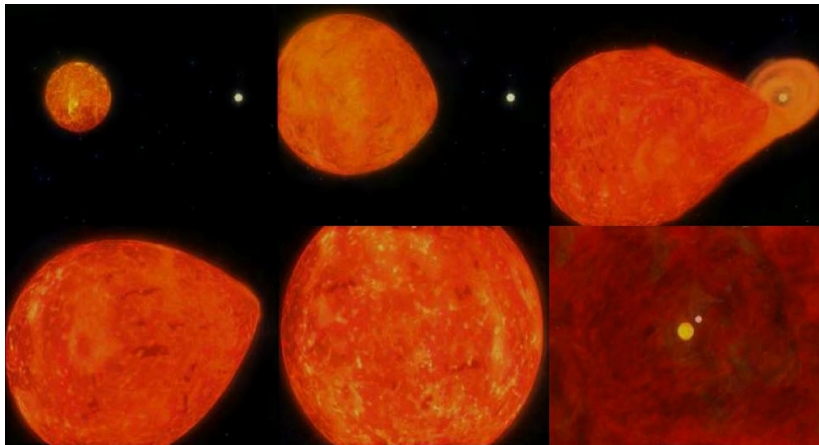
$$\frac{R_{\text{RI},i}}{a} \approx \frac{0.49 q_i^{2/3}}{0.6 q_i^{2/3} + \ln(1 + q_i^{1/3})}$$

accurate within 1% for
 $0 < q_i < \infty$ (Eggleton, 1983).

Conservative materieoverdracht

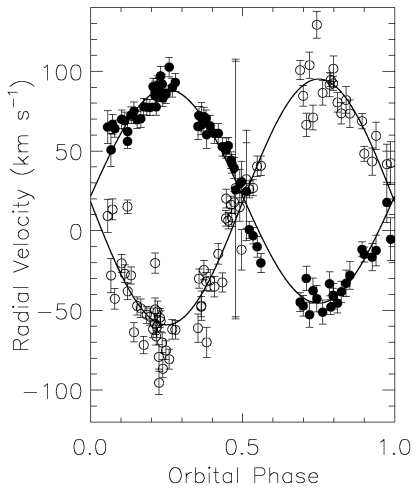
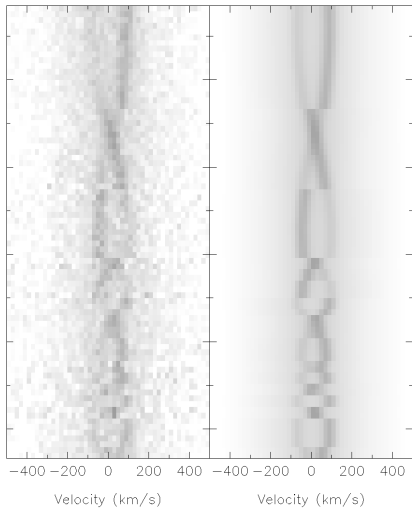


Common envelopes



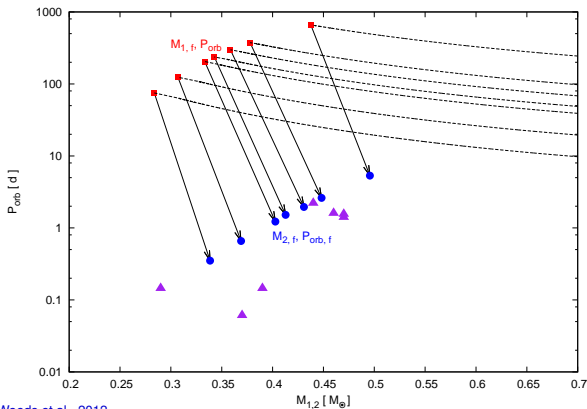
- Core and companion spiral in, E_{orb} heats up and expels envelope
- $\tau \lesssim 1000$ yr — components do not change

Waargenomen dubbele witte dwergen

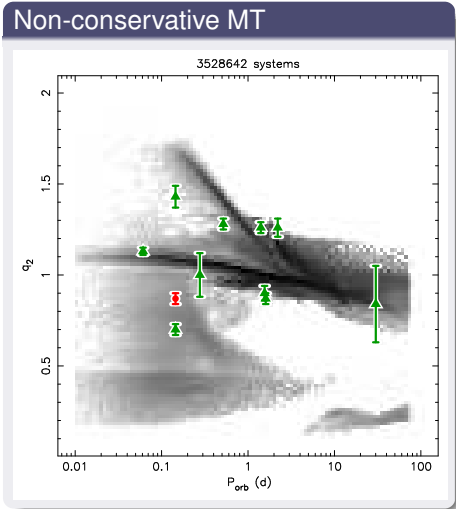
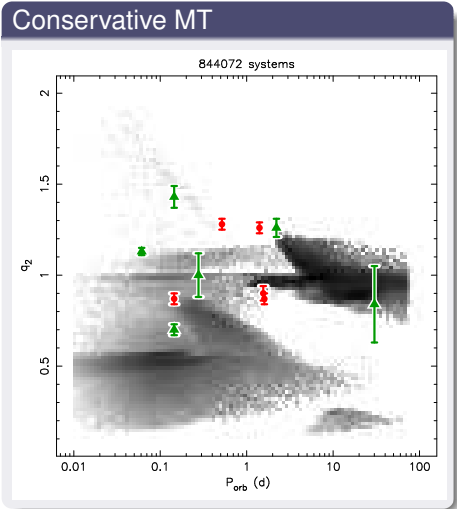


Maar...

- Alleen α -CE en conservatieve materie-overdracht kunnen DWDs niet verklaren
- γ -prescriptie fysisch niet bevredigend
- Oplossing (voor He-WDs): niet-conservatieve, stabiele materie-overdracht?

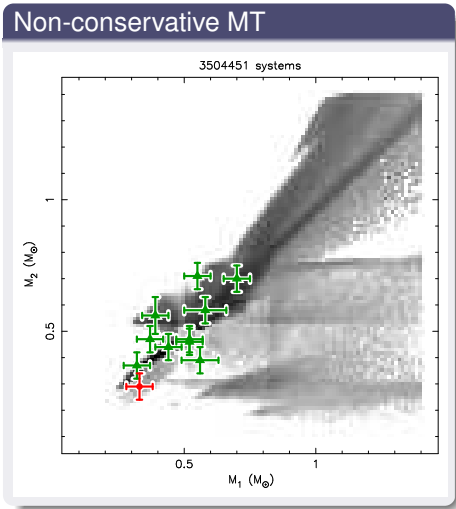
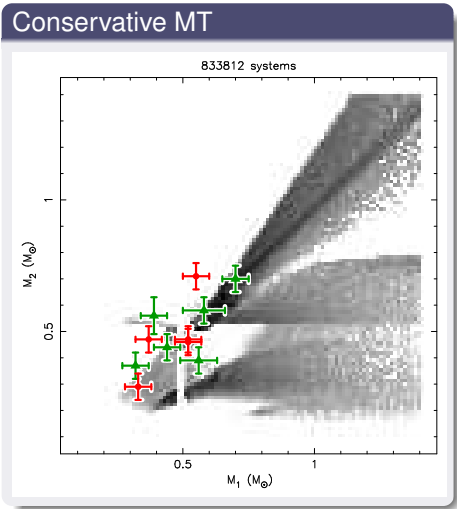


Populatiesynthese



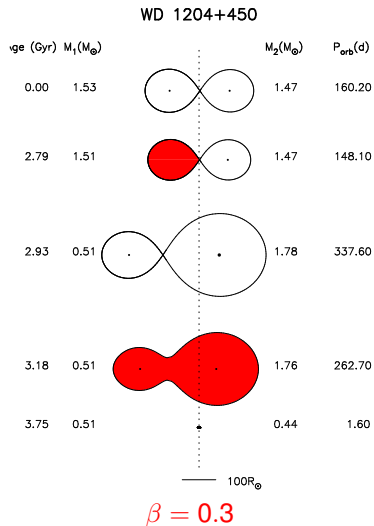
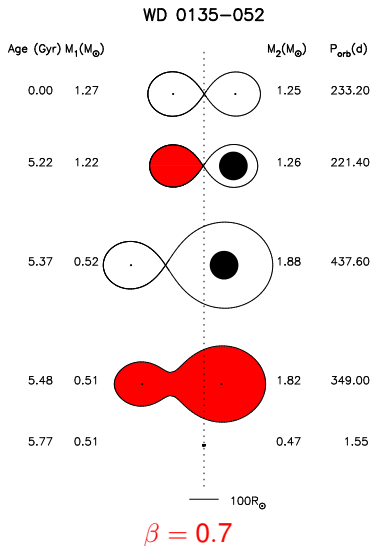
(van der Sluis et al., in preparation)

Populatiesynthese

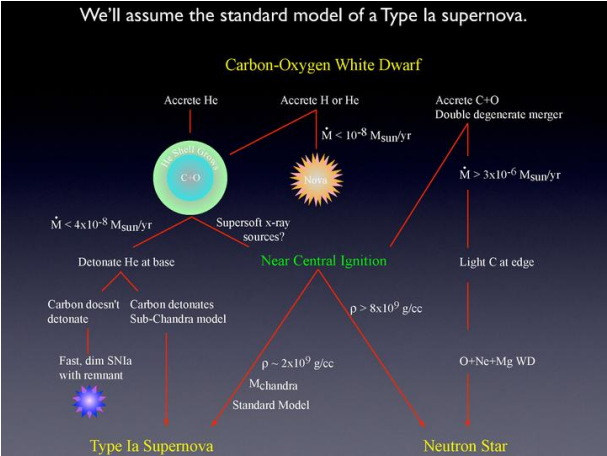


(van der Sluys et al., in preparation)

Results: example solutions



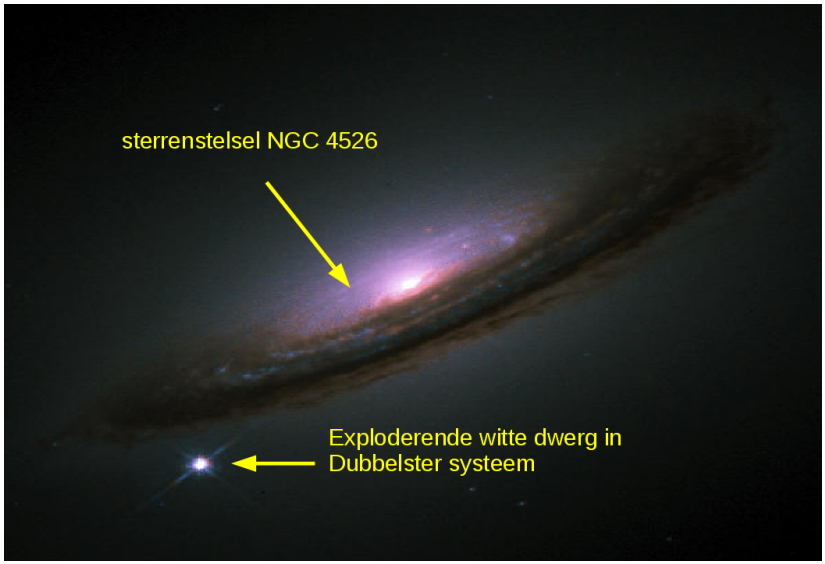
DWDs voorgangers van type-Ia supernovae?



SN Ia scenarios:

- Single-degenerate: WD accreteert van 'normale ster' — maar: H?
- Double-degenerate: WD accreteert van WD — maar: aantallen?
- WD ontploft? / stort in? bij $\sim 1.37 M_{\odot}$

Type-Ia supernovae



sterrenstelsel NGC 4526

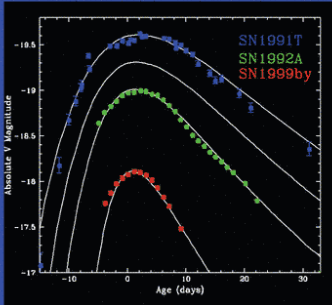
Exploderende witte dwerg in
Dubbelster systeem

- Zeldzaam maar helder: zichtbaar van verre

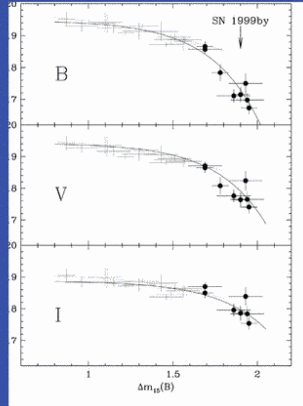
Type-Ia supernovae

Sub-Luminous SNIa = Fast Declining LC

“Phillips Relation”: correlation between decline rate and peak luminosity

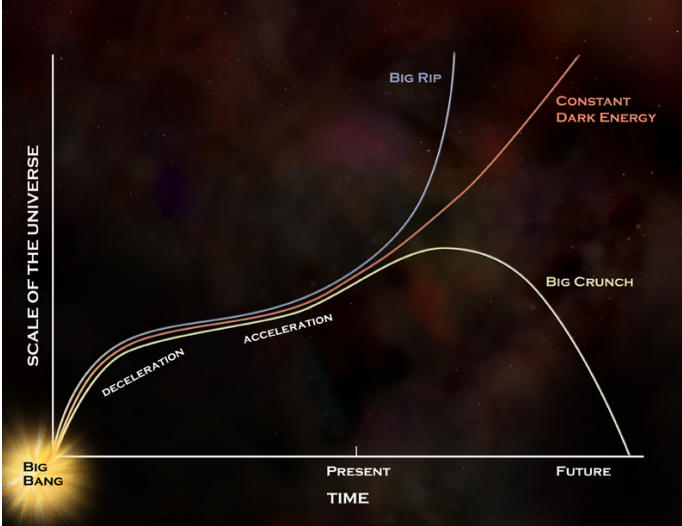


Absolute magnitudes from Hubble Flow (assume H_0) or Cepheids (SN 99by)



- Duur van het verval geeft absolute helderheid
- Schijnbare helderheid geeft afstand

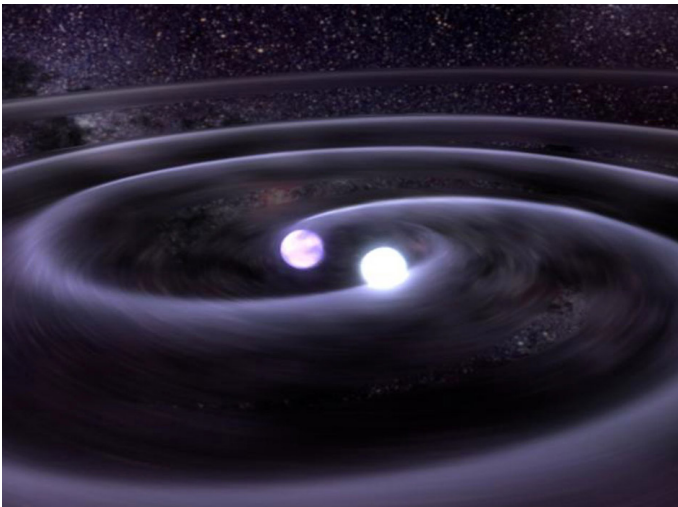
SNela en de uitdijing van het heelal



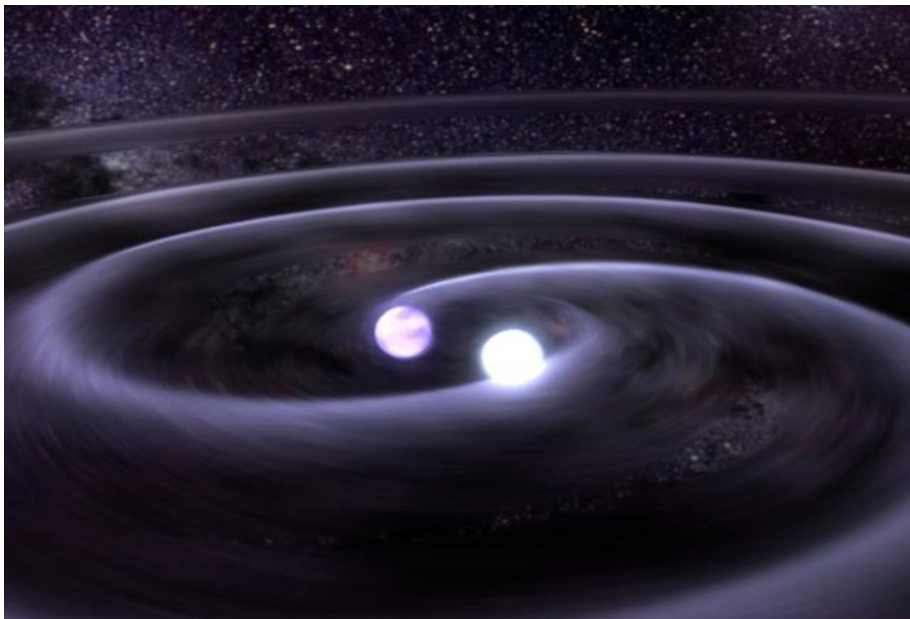
- Gebruik SNela als 'standaardkaarsen' om uitdijing heelal te meten
- Moeten soorten SNela en variaties in lichtkracht goed begrijpen

DWDs als bronnen van gravitatiestraling

- DWDs kunnen worden waargenomen door LISA
- Nauwe systemen zijn waarschijnlijk op te lossen, de rest is 'voorgrondruis'



Gravitatiegolven



Waarom GWs detecteren?

Fysica:

- Directe meting van GWs en verificatie van ART
- Directe waarneming van zwarte gaten
- Verifiëer dat GWs met de lichtsnelheid bewegen, d.w.z. dat de rustmassa van het graviton 0 is
- Verifiëer dat GWs transversaal zijn, d.w.z. dat de spin van het graviton 2 is

Waarom GWs detecteren?

Astrofysica:

- Geheel nieuw venster op het heelal!
- Neutronensterren uiteengerukt zien worden, hun implosie tot zwart gat waarnemen
- Zwarte gaten die neutronensterren 'opeten', BH-BH botsingen
- De instorting van de kernen van zware sterren (core-collapse supernovae)
- 'Heuvels' op pulsars
- Oer-zwarte gaten om de Oerknal direct te bestuderen
- *The unexpected...*

Waarom GWs detecteren?

Evolutie van dubbelsterren:

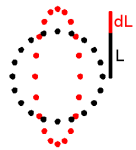
- BH/NS massaverdelingen, BH spins en spinorientatie
- Aantallen mergers, NS-NS/BH-NS/BH-BH merger-ratio's
- Zwaartekracht in het sterke regime; toestandsvergelijking van NSs
- Associatie van GW en EM events, b.v. gamma-ray bursts

- Evolutie van massieve sterren (in dubbelsterren), CEs
- Supernova-explosies van zware sterren
- Initiële-massa-verdelingen voor BH voorgangers

Eigenschappen van gravitatiegolven

Gravitatiegolven. . .

- propageren transversaal met de lichtsnelheid
- zijn quadrupoolstraling in de eerste orde
- rekken en drukken de ruimte-tijd in twee polarisaties
- laten ons hun amplitude meten



● Strain: $h(t) = h_+(t)F_+(t) + h_\times(t)F_\times(t) = \frac{\delta L(t)}{L} \sim 10^{-22}$

Laser Interferometer Space Antenna (LISA)



Supermassive
Black Hole Binaries



Compact Object
Captures



Galactic White
Dwarf Binaries



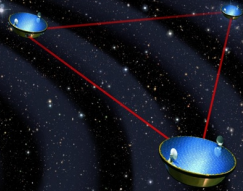
Cosmic Strings and
Phase Transitions

LISA

Laser Interferometer Space Antenna



Gravity is talking. LISA will listen.



Laser Interferometer Space Antenna (LISA)

Missie

- LISA → eLISA / NGO
- 3 ruimtevaartuigen, met in totaal 6 testmassa's
- Detector is in een baan om de Zon, 20° achter de Aarde
- Driehoeksopstelling, met armen van 5 miljoen km
- 1 Watt lasers tussen de componenten
- Gevoelig in lage frequenties: 0.03 mHz – 0.1 Hz

- Missieduur ≥ 5 jaar
- LISA Pathfinder moet technologie testen/bewijzen
- Project uitgesteld ten gunste van Juice (Ganymedes), mei 2012
- Lancering $\gtrsim 2028?$

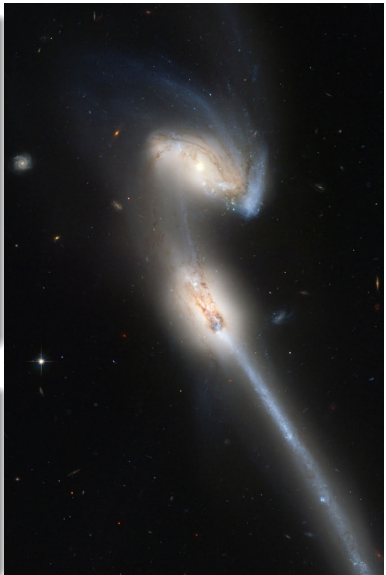
Laser Interferometer Space Antenna (LISA)

Waarnemingen

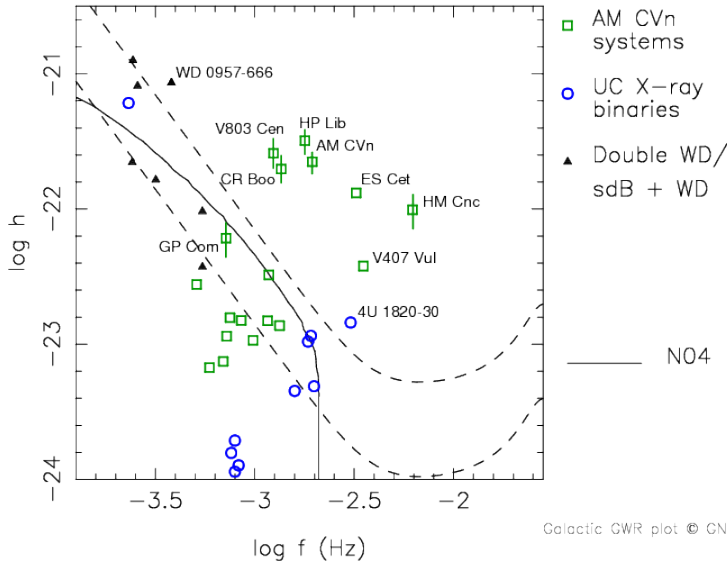
- Galactische dubbele witte dwergen
- Supermassieve zwarte gaten (SMBHs) in de kernen van botsende sterrenstelsels
- Vangst van compacte objecten door SMBHs
- Kosmische strings?
- Fase-overgangen in het vroege heelal?

Nauwkeurigheid

- Massa's van SMBHs ($10^4 - 10^7 M_{\odot}$) tot $\sim 0.1 - 10\%$
- Posities: enkele graden
- Directe afstandsmeting: $\sim 1 - 10\%$



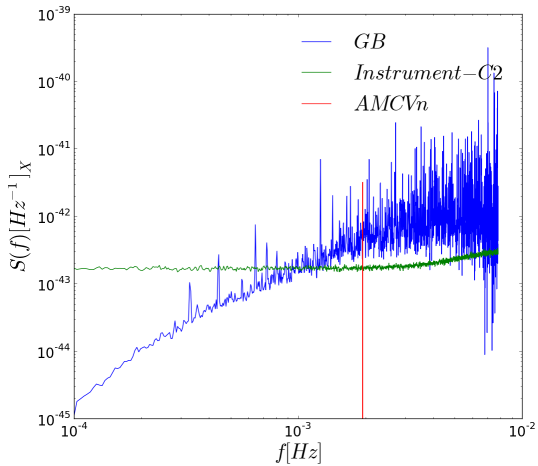
LISA verification binaries



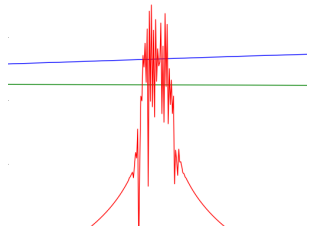
Galactic GWR plot © GN

(Nelemans, 2005)

Properties of AM CVn and SDSS J 0651+2844

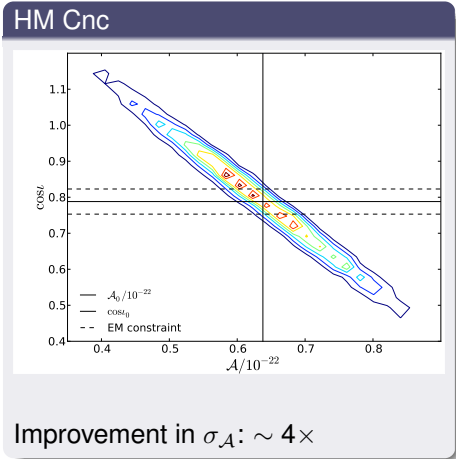
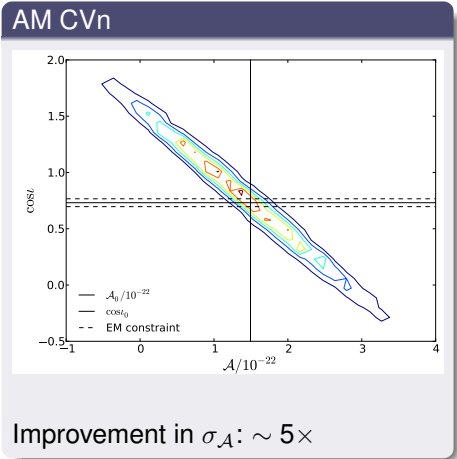


Sweta Shah et al. 2012

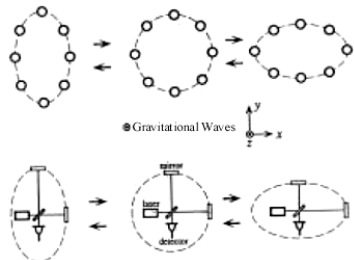
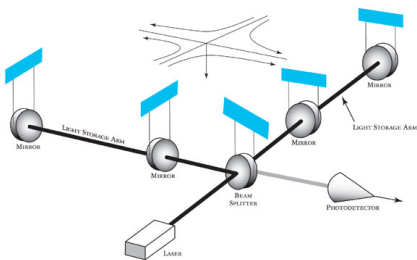


	AM CVn	J0651
A (10^{-22})	1.494	1.670
f (mHz)	1.944	2.61
ι ($^\circ$)	43	89.6
λ ($^\circ$)	170.1	101.4
β ($^\circ$)	37.2	5.7
M₁ (M_\odot)	0.71	0.55
M₂ (M_\odot)	0.13	0.25
d (kpc)	0.606	0.1
P (min)	17.1	12.8

Improvement in amplitude uncertainties



Laser Interferometer GW Observatory (LIGO)



LIGO/Virgo

- LLO: Livingston, Louisiana (L1: 4 km)
- LHO: Hanford, Washington (H1: 4 km, H2: 2 km)
- Virgo: Pisa, Italy (V: 3 km)
- KAGRA: Japan (2018+?, 4 km)
- Indigo: India (2018+?, 4 km)

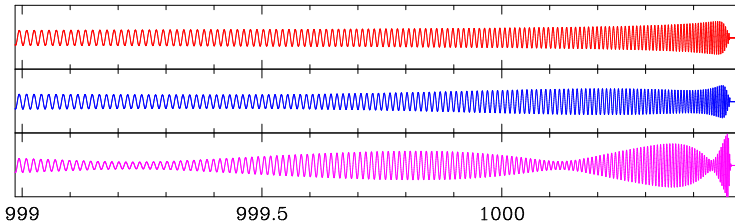
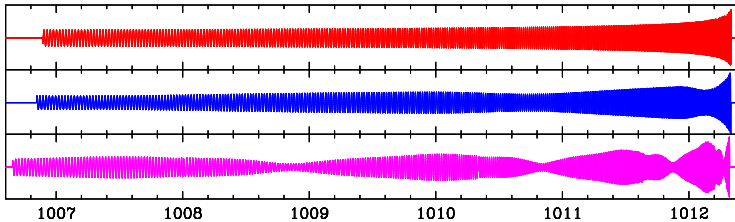
- Michelson interferometers
- Frequency sensitivity: $f \sim 40 - 1600$ Hz
- $\delta L = 10^{-22} \times L \approx 10^{-16}$ cm (atomic nucleus $\sim 10^{-13}$ cm)

LIGO/Virgo collaboration (LVC):

- Data sharing since spring 2007
- Working groups:
 - Compact binary coalescences
 - Bursts
 - Continuous waves
 - Stochastic background

Inspirational waveforms met toenemende spin

LIGO and Virgo detect the last ~ 10 s of a binary inspiral:



$$a_{\text{spin}} \equiv S/M^2 = 0.0, 0.1 \text{ and } 0.5$$

Voorspelde detectie-aantallen voor CBCs

Horizonafstanden (Mpc):

	NS-NS	BH-NS	BH-BH
Initial LIGO/Virgo	33	70	161
Advanced LIGO/Virgo	445	927	2187

Schatting van detectie-aantallen (jr^{-1}):

	NS-NS	BH-NS	BH-BH
Initial LIGO/Virgo	$2 \times 10^{-4} - 0.2$	$7 \times 10^{-5} - 0.1$	$2 \times 10^{-4} - 0.5$
Advanced LIGO/Virgo	0.4 - 400	0.2 - 300	0.4 - 1000

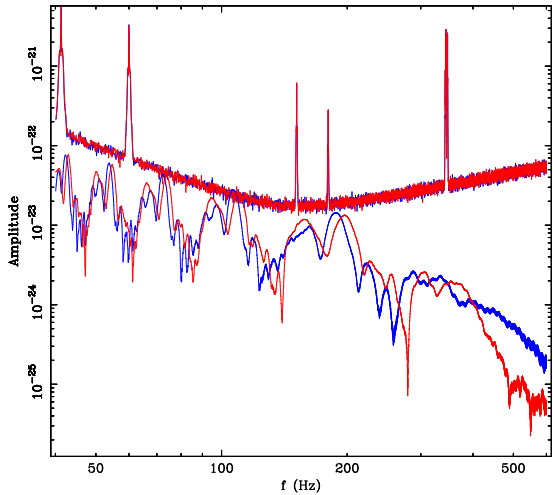
Schattingen gaan uit van $M_{\text{NS}} = 1.4 M_{\odot}$ en $M_{\text{BH}} = 10 M_{\odot}$

[Abadie et al., 2010](#)

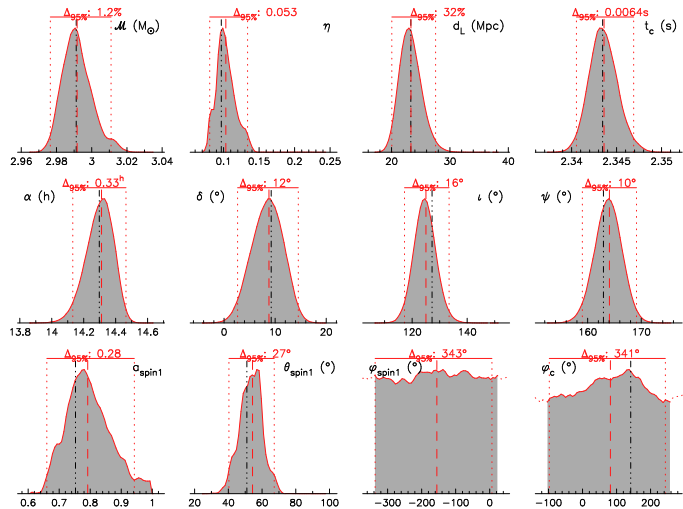
Toevoegen van een signaal in de detectorruis

Example:

- Using two 4-km detectors **H1**, **L1**
- Gaussian, stationary noise or LIGO/Virgo detector data
- Do software injections
- Retrieve physical parameters
- $\Sigma \text{SNR} = 17$



Analyse van een BH-NS signaal



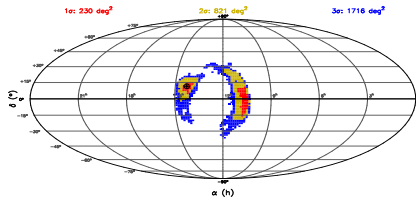
van der Sluis et al., 2008

Parameters:

- H1, L1, V
- $M = 10, 1.4 M_{\odot}$
- $d_L = 22.4$ Mpc
- $a_{\text{spin}} = 0.8$,
 $\theta_{\text{SL}} = 55^{\circ}$
- $\Sigma \text{SNR} \approx 17.0$
- simulated noise

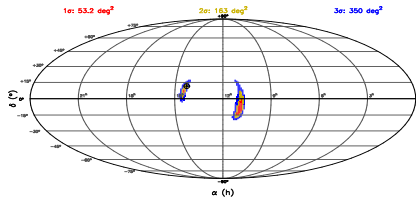
- Black dash-dotted line: injection
- Red dashed line: median
- Δ 's: 95% probability

Hemelpositie voor signalen met en zonder spin

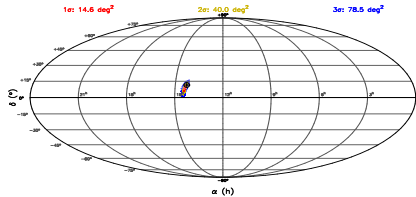


Spinning BH, non-spinning NS:
 $10 + 1.4 M_{\odot}$, 16–22 Mpc, Σ SNR=17

2 detectors, $a_{\text{spin}} = 0.0$
 2- σ accuracy: 821°²

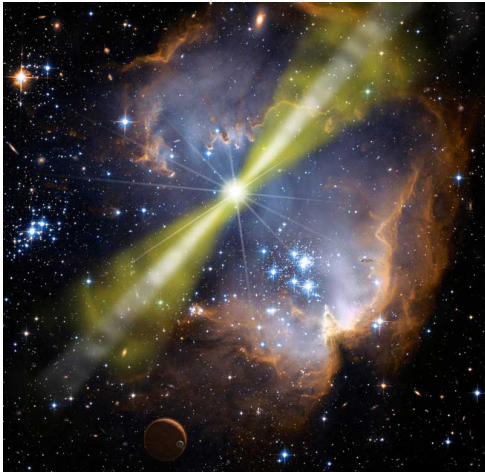


2 detectors, $a_{\text{spin}} = 0.5$
 2- σ accuracy: 163°²



3 detectors, $a_{\text{spin}} = 0.5$
 2- σ accuracy: 40°²

Short-hard gamma-ray bursts (shGRBs)

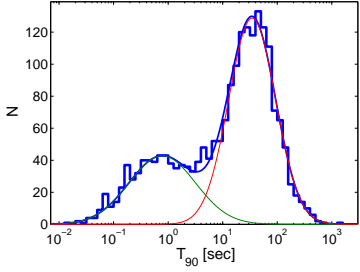
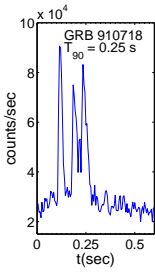
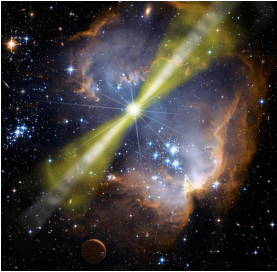


Artist's impression van een GRB (bron: NASA)

Gammaflitsers:

- ~ 2 per dag
- $\sim 25\%$ short GRB
- duur: ~ 10 ms – 10 s
- $\sim 10^{44}$ W, circa 1 miljoen sterrenstelsels
- straling *gebeamed* door emissie in *jets*
- long GRBs gerelateerd aan supernovae
- short GRBs veroorzaakt door NS-NS en NS-BH mergers?
 - oude sterpopulaties
 - energie
 - frequentie

Short-hard gamma-ray bursts (shGRBs)



- Gebruik LIGO/Virgo trigger om *GRB afterglow te vinden*
- Gebruik GRB positie en afstand voor nauwkeuriger LIGO/Virgo analyse

