

De evolutie van sterren !!!

Henny J.G.L.M. Lamers
 Sterrenkundig Instituut, Univ van Amsterdam
h.j.g.l.m.lamers@uu.nl
www.hennylamers.nl



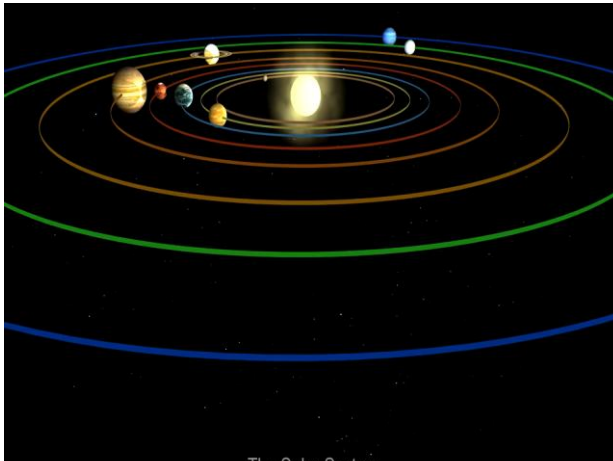
Rob Walrecht cursus, "Wat leren we van JWST?"
 19 maart 2025

1

De Aarde: onze planeet

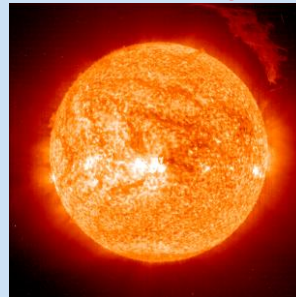


2



3

De Zon: onze ster een gloeiende gasbol



Afstand :
 150 miljoen km =
 8 lichtminuten
Diameter :
 1.4 miljoen km
Inhoud :
 1 miljoen x aarde
Massa:
 330 000 x aarde
Temperatuur :
 6000 graden

Helderheid 400 000 000 000 000 000 000 000 Watt
 Energieverbruik op aarde gedurende 500 000 jaar.

4

Sterren beeld Orion



Afstand
 1400 lj

5

De Pleiaden sterrenhoop honderden sterren



6

Sterrenhoop
honderdduizenden sterren op een kluit



7

7

De geboorte van sterren
uit gaswolken

8

8

Een hete gas wolk : 10000 C



Cocoon-nevel

waterstof gas
70%helium gas
28%rest 2%
vooral
koolstof,
stikstof,
zuurstof

9

9

De Trifid gas-nevel, een hete gasnevel
Temperatuur 10 000 C



Afstand 5200 lichtjaar, diameter 21 lichtjaar

10

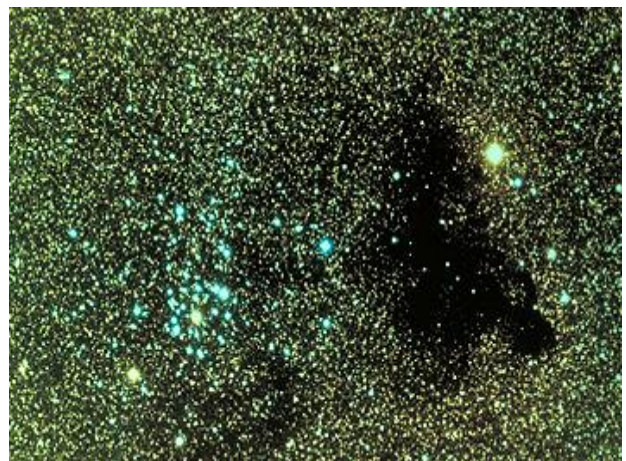
deTrifid nevel in zichtbaar licht en infrarood



afstand: 5200 lj


diameter 21 lj

11



13

Interstellaire gas wolken

<p>Hete gaswolk, 10 000 C = stralend gas</p> <p>Verhit door hete jonge sterren</p> 	<p>Koude gaswolk, -250C = donkere stofkorrels</p> <p>Stof absorbeert het licht</p> 
--	--

Deze wolken hebben dezelfde chemische samenstelling !
70% H, 28% He, < 2% rest (voornamelijk C, N, O, Si)







In hete wolken: stralende atomen

In koude wolken: moleculen en kleine stofkorrels:
ijs + roet + zand

Page 15

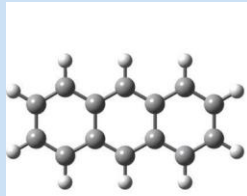
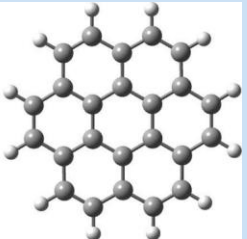
15

Interstellaire materie

- Ionen  helium ion
- Electronen  e⁻
- Atomen  helium atoom
- Moleculen  H₂CO  PAH
- Stof  10 micrometer

16

PAH molculen: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

6-hoekige koolstof ringen met waterstof atomen aan buitenkant

17

17



18



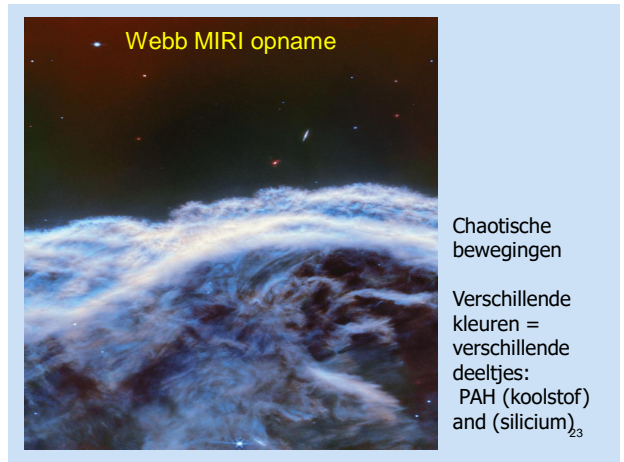
19



20



22



23

Gasdruk: doet wolk uitzetten
 $P_{\text{gas}} \sim \rho T$

Zwaartekracht doet wolk krimpen
 $g \sim M / R^2$

Sir James Jeans
 1877-1946

Wolk trekt samen als zwaartekracht wint van gasdruk
 Dat is als de massa > Jeans massa (M_J)

Bij $T = 30 \text{ K}$ en dichtheid = $10 \text{ atomen/cm}^3 \rightarrow M_J = 10^4 M_{\text{zon}}$

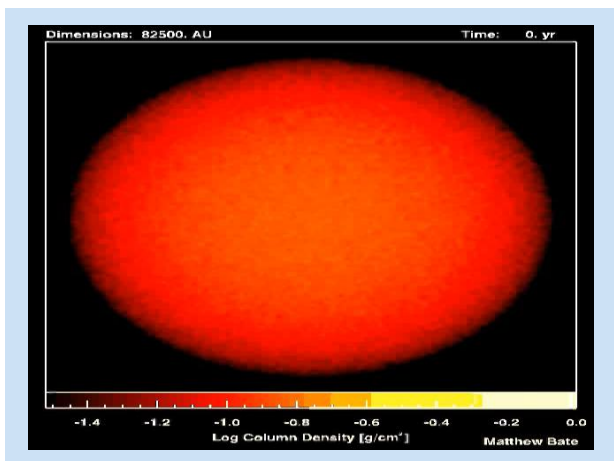
25

Het ontstaan van een sterrenhoop uit een grote gasnevel

1. kontraktie van een gaswolk door eigen zwaartekracht
2. kontraherende gaswolk gaat klonteren
3. klonters trekken samen tot sterren
4. sterrenhoop!

Page 26

26



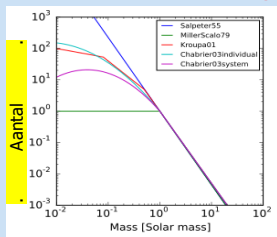
27



28

INITIAL MASS FUNCTION (IMF)

Als sterren geboren worden uit gaswolken, hoe is dan de verdeling in massa van de sterren?



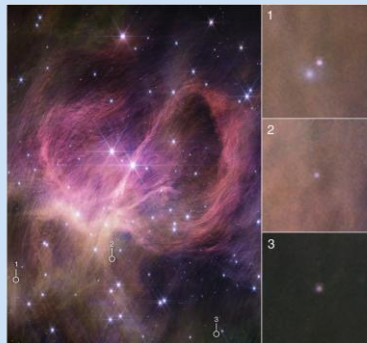
Verschillende veel gebruikte IMF's

1. Verreweg de meeste lichte sterren $M < 1 M_{\text{zon}}$
2. Heel snelle afname van aantal zware sterren
3. Aantal lichte sterren is onzeker

1. Zware sterren hebben veel invloed op omgeving: Ze verhitten het gas. Ze blazen bellen met hun sterwinden. Ze verrijken de ruimte met hun producten. Maar ze worden niet oud.
2. De meeste massa van een sterrenhoop zit in de lichtste sterren: maar die zie je meestal niet (te zwak!)

29

Sterrenhoop IC 348, afstand 1000 lichtjaar, leeftijd 5 miljoen jaar



Bruine dwergen met massa 3 tot 8 x Jupiter
 Massa Jupiter = 0,001 x massa van Zon

30

30

JWST: Low mass objects in Flame nebula



Afstand 1400 lj

Zwakste sterren: 2 a 3 x Jupiter massa = 0,003 x zon
 Waaarneem limiet is 0,5 x Jupiter massa

31

31

Proto-ster L 1527 met dikke stofschiif
 afstand 45 lichtjaar, leeftijd ca 100 000 jaar



JWST MIRI

Blauw = koolstofrijke molecule (PAHs)
 Rood = dikke schijf van stof en gas
 Wit = mengsel van koolstofrijke moleculen en neon gas

32

32

Massa uitstoting door 2 proto-sterren



De bundels van de twee sterren botsen → slierten

33

33

Sterren van verschillende massa

Sterren worden geboren in sterhopen uit grote gaswolken zwaarder dan ca 10000 x zon

Daarbij ontstaan sterren van allerhande massa's (toevallig), tussen 0,01 x zon en 100 x zon

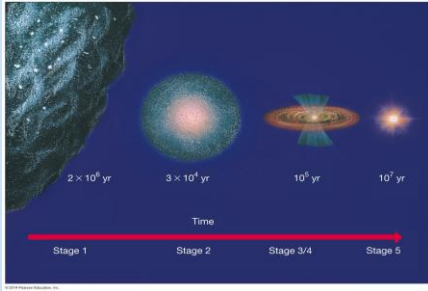
Er worden veel meer lichtere sterren geboren dan zwaardere: slechts 1% van de sterren is zwaarder dan de 10x zon

Zware sterren ontstaan sneller dan lichte sterren



34

De vorming van lichte sterren duurt ca 1 miljoen jaar!



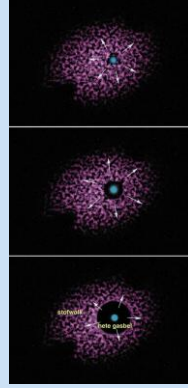
Afb: Pearson education

De vorming van zwaardere sterren gaat sneller en duurt ca paar 100 000 jaar

•35

35

Bellen blazen in een wolk



De eerste sterren ontstaan in het centrum van de wolk. Die eerste sterren gaan gas in hun directe omgeving verhitten en ioniseren →

expanderende hete gasbel

36



Rosette nevel, afstand 5200 lichtjaar

37

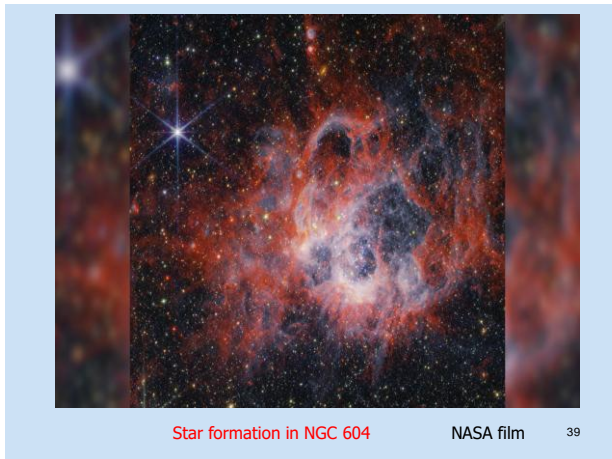
Blowing bubbles in starforming region NGC 604



Roze = koolstofrijke PAH moleculen
Donker rood = waterstofgas moleculen

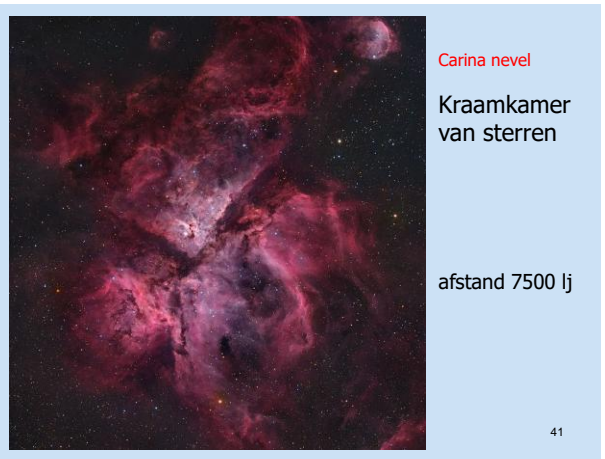
Sterrenhoop met het grootste aantal (200) zware sterren : $M > 30 \times \text{zon}$
Afstand: 2,7 miljoen lichtjaar (in Driehoek stelsel). Leeftijd 3,5 miljoen jaar

38



Star formation in NGC 604 NASA film 39

39



Carina nevel
Kraamkamer van sterren

afstand 7500 lj

41

41

Carina-klif:
 Stervorming uit gas en stof wolken in de Carina-nevel
 afstand ca 8500 lj



Bruin = stof wolken **JWST**

42

De Adelaar nevel : stervormings nevel



Afstand: 7000 lj

Diameter:
 totaal : 50 lj
 binnendeel: 15 lj

Totale massa:
 >12000 Mzon
Page 43

43

Pilaren ontstaan door "erosie"



44

Gas en stof kolommen
 in de Adelaar Nevel

"Pillars of creation"



45

45



46



47

HST **JWST NIRcam**

Veel meer sterren
 Veel meer achtergrond melkwegstelsels
 Meer structuur omdat je dieper doordringt in de stofwolken.
 Ook infrarood spectra : samenstelling, gassen en stof

48

48

Hier: 5,00 per stuk

AstroBoekjes

1. De mens tussen de sterren (30^e druk)
2. Hallo is daar iemand (29^e druk)
3. De oerknal en het uitdijend heelal (26^e druk)
4. Het draait allemaal om de Zon (19^e druk)

euro 7,50 per stuk
 bestellen via website:
www.hennylamers.nl

49

Prof. Henry J.G.L.M. Lamers
 Sterrenkundig Instituut
 Universiteit van Amsterdam

AstroBoekjes: deel 5

AstroBoekje 5

Mysterieën in het heelal

(3^e druk)

(euro 7,50 per stuk)

Hier: euro 5,00

Ik signeer op verzoek

50

50

Orion nevel : kraamkamer van sterren

Afstand 1300 lichtjaar

51

NASA Video
 3.05 min

Flight through Orion Nebula
 in visible and infrared light

<https://www.youtube.com/watch?v=xCFg5udYbAg>

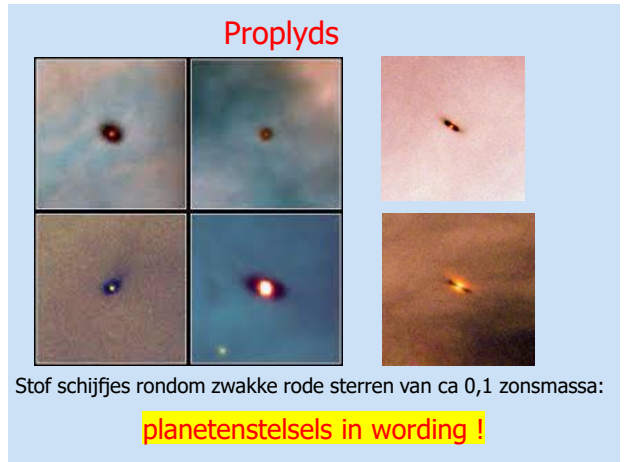
52



53



54



55



56



57



58



59



60



61



62



63

Hieruit ontstaat een planetenstelsel



1. Dichtbij de zon was de gas schijf heet
2. De lichtste gassen (H en He) hebben de grootste snelheid en ontsnappen aan hun planeet in wording.
3. Vlakbij de zon (heet) hebben de planeten dus geen H en He gas en worden dus **rotsplaneten met weinig massa**.
4. Ver van de zon (koud) hebben de planeten wel H en He gas, dus veel massa. **reuzen gasplaneten**

64

JUMBO's =
Jupiter mass binary objects in Orion nebula



Meer dan 500 losse planeten ontdekt in Orion nevel : free-floating-planets
Nu ook losse dubbel-planeten met massa van Jupiter

65

JUMBOs: A new type of astronomical objects

<https://youtu.be/IYOnoXWSfnI?>

66

De evolutie van sterren

67

De zon als voorbeeld van een "lichte" ster



Afstand:
150 000 000 km
= 8 lichtminuten

Diameter:
1 400 000 km

Oppervlakte:
5700 graden

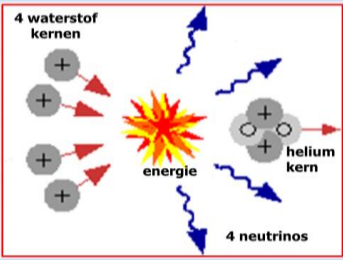
Leeftijd:
4,6 miljard jaar!

De energie die in het centrum wordt opgewekt moet naar buiten in de vorm van straling en warmte.
Maar: net onder het oppervlak "borrelt" de zon: **konvektie** die laag is 200 000 km dik

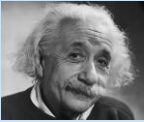
Helderheid 400 000 000 000 000 000 000 000 000 Watt
Straling van de zon per sec = energieverbruik op aarde voor 500 000 jaar!

68

Het principe van H-> He fusie in het centrum van een ster



4 waterstof kernen → helium kern + 2 positronen + energie + 4 neutrinos



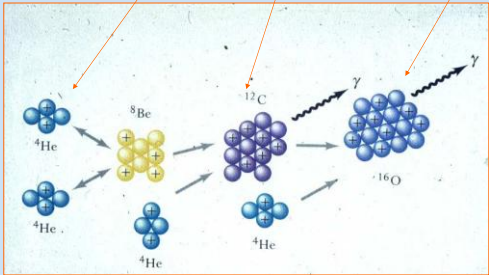
Hierbij gaat 0,7 % van de massa verloren
Die wordt omgezet in energie volgens $E=mc^2$

De zon zet 600 miljoen ton waterstof gas om in helium per sec.
Hiermee kan de zon ca 9 miljard oud worden

69

Er zijn meer fusie-processen mogelijk:

Fusie van helium → koolstof → zuurstof



71

Er zijn meer fusie-reacties mogelijk in sterren

De belangrijkste fusiereacties in sterren.

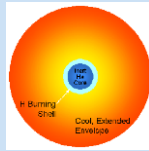
achtereenvolgens

grondstof	product	Temperatuur(C)
Waterstof	→ Helium	10 miljoen
Helium	→ Koolstof	100 miljoen
Koolstof + He	→ Zuurstof	600 miljoen
Zuurstof	→ Silicium	1 miljard
Silicium	→ IJzer	3 miljard

Elke volgende fusiefase vereist een hoger temperatuur!

72

De zon over 3.5 miljard jaar :
 einde H-fusie in centrum
 een rode reus: 200 R_{zon} en 1000 x L_{zon}



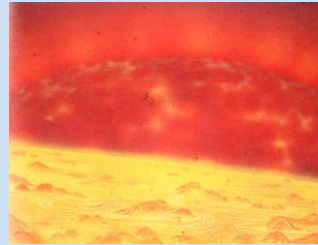
De zon heeft dan een kern van Helium.
 In een schil daaromheen: nog fusie van waterstof

Aarde verschroeit : einde van leven op aarde

Page 74

74

Daarna: paar honderd duizend jaar later:
 kern nog heter en rest nog verder opgezwollen
Rode superreus: 1000 R_{zon} en 10 000 L_{zon}
 helium → koolstof fusie in de kern



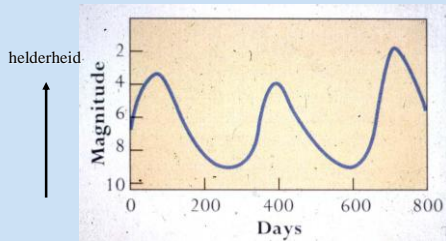
Vergelijking zon nu en als rode superreus

Afb: James Kaler "Sterren"

Oppervlakte van Mars gaat smelten door grote helderheid

75

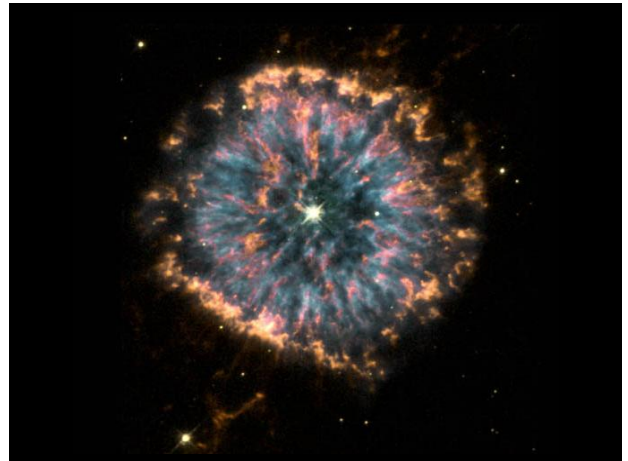
Grote rode reuzen "pulseren"



Uitzetten en inkrimpen op tijdschaal van maanden tot jaren
 Hierbij worden steeds buitenlagen afgestoten ($v \sim 20$ km/s)
 Totdat, na ca 100 000 jaar alleen de "pit" van de ster overblijft !

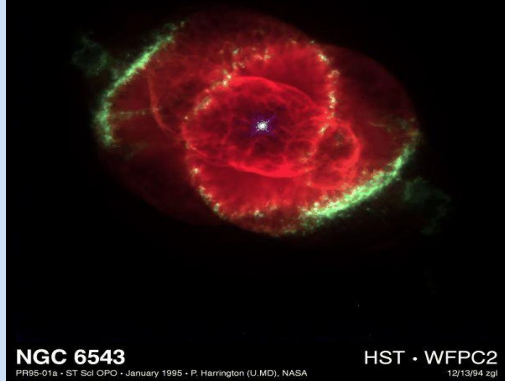
Page 76

76



77

Kattenog nevel: afstand 3300 ljr



NGC 6543

PR95-01a - ST Sci OPO - January 1995 - P. Harrington (U.MD), NASA

HST · WFPC2

12/13/94 zgl

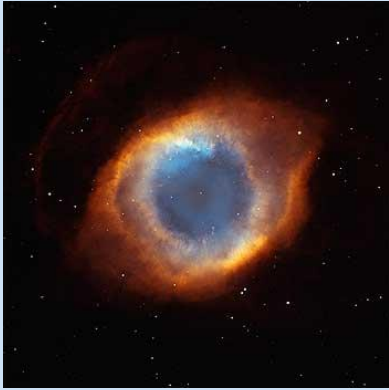
78

nebulae from ejected outerlayers of stars



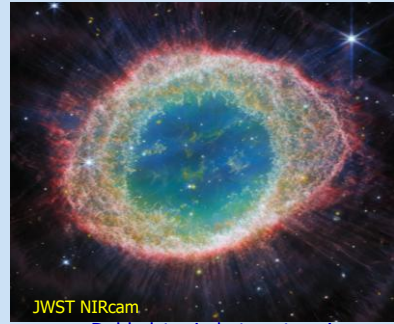
79

Buitenlagen zijn uitgestoten: "ring nevel"



Afstand: 2500 lichtjaar

80



JWST NIRcam

Dubbelster in het centrum!
 20 000 globules in nevel: rijk aan molecuair waterstof
 Draderige structuur van binnen-ring
 Hoofdring = koolstof-rijke PAHs
 Harige structuur buiten de hoofdring

81

81

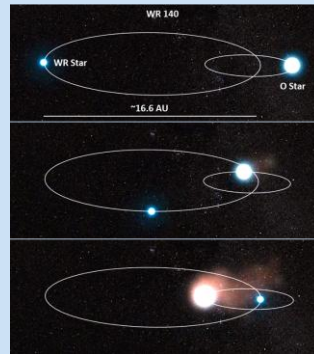
JWST MIRI opname van Ring Nevel



82

82

WR 140: Een bijzondere dubbelster



O-ster = normale hete ster
 Wolf-Rayet ster = koolstofrijke ster
 Afstand 4500 lichtjaar
 Periode 7,9 jaar

83

83

WR 140 : Koolstofrijke ster + O-ster, d=4500 lj
 Dubbelster in sterk elliptische baan, P = 7,9 jaar
 Bij ieder nauwe passage wordt gas (C) uitgestoten
 Snelheid van ca 3000 km/s



Schillen van koolstofrijk gas, uitgestoten tijdens nauwe passages.
 Rechterplaatje: verplaatsing in 14 maanden

84

84

NASA's Webb Telescope Captures Rarely Seen Prelude to Supernova



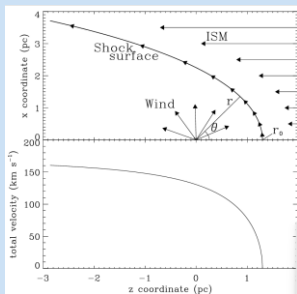
WR 124
 afstand 15000 lichtjaar

85

85

The dynamics of the nebula M1-67 around the run-away Wolf-Rayet star WR 124

M. V. van der Sluys and H.J.G.L.M.Lamers
2003 Astronomy and Astrophysics



Ster beweegt zich van ons af met snelheid van 180 km/s.

Daardoor ontstaat een boeg golf in de vorm van een paraboloïde.

Wij kijken toevallig van achteren in die paraboloïde

De structuur in de nevel komt door uitbarstingen van de ster om de 10 000 jr.

86

86



NASA's Webb Telescope Captures Rarely Seen Prelude to Supernova

WR 124 afstand 15000 lichtjaar

87

87

Zware sterren (>10 x zon) ontploffen aan eind van hun leven

Supernova 1987A : 23 febr 1987, afstand 150 000 lj



opname 1976



25 febr 1987

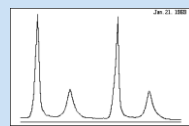
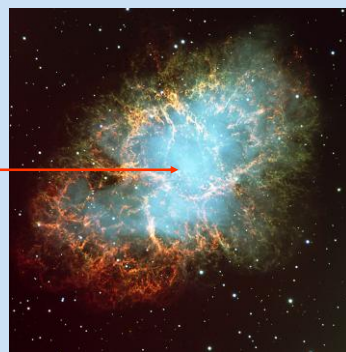
200 miljoen maal zo helder als de zon

Na paar maanden steeds zwakker

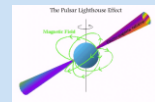
88

88

“Krab-nevel” restant van ster die in 1054 ontplofte



Het signaal van de Krab-pulsar: een piepje elke 0.0336702 seconde



89

89

Zware sterren (>10 x zon) ontploffen aan eind van hun leven

Supernova 1987A : 23 febr 1987, afstand 150 000 lj



opname 1976



25 febr 1987

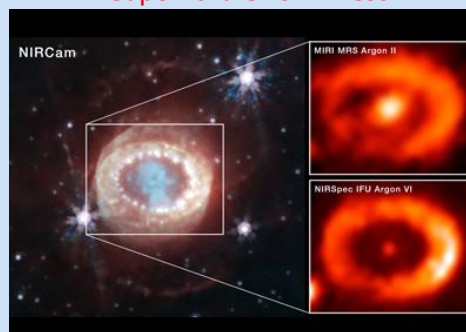
200 miljoen maal zo helder als de zon

Na paar maanden steeds zwakker

90

90

Supernova SN87A rest



Argon II

Argon VI

Wat bleef er achter? Neutronen ster of zwart gat?
Argon VI kan alleen als er een krachtige heldere UV bron is
Dus geen zwart gat!!!

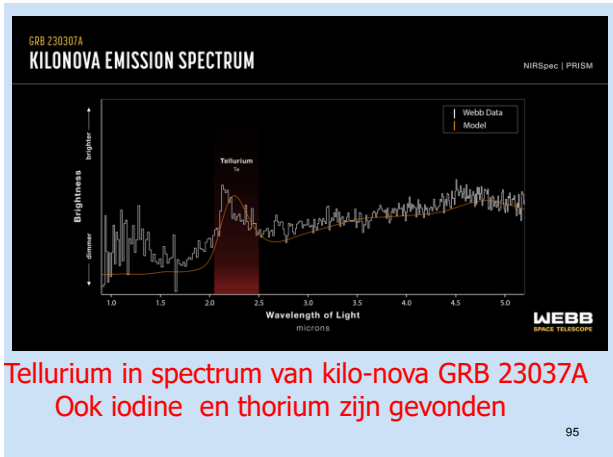
91



92

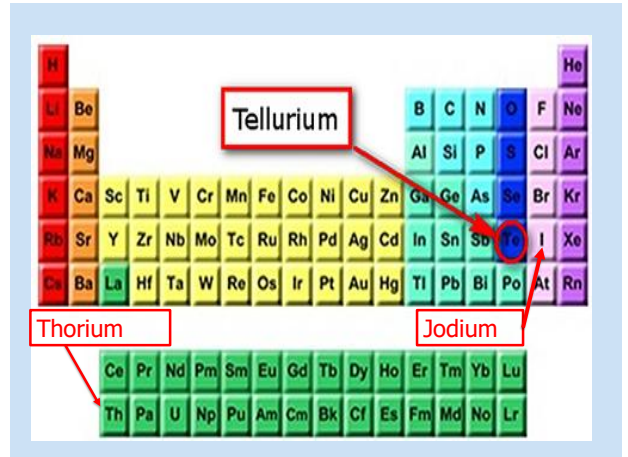


93



95

Tellurium in spectrum van kilo-nova GRB 23037A
Ook iodine en thorium zijn gevonden



96



97

DE MENS TUSSEN DE STERREN
DE OERKNAAL EN HET UITDIJEND HEELAL
OP ZOEK NAAR DE OORSPRONG

Prof. Henny J.G.L.M. Lamers
Sterrenkundig Instituut
Universiteit van Amsterdam
AstroBoekjes: 001

HALLO IS DAAR
SPEUREN NAAR LEVEN IN HET HEELAL

Prof. Henny J.G.L.M. Lamers
Sterrenkundig Instituut
Universiteit van Amsterdam
AstroBoekjes: 002

Hier: 5,00 per stuk

DE OERKNAAL EN HET UITDIJEND HEELAL
OP ZOEK NAAR DE OORSPRONG

Prof. Henny J.G.L.M. Lamers
Sterrenkundig Instituut
Universiteit van Amsterdam
AstroBoekjes: 003

HET DRAAIT ALLEMAAL OM DE ZON
ONSTAAAN, BOUW EN EVOLUTIE VAN ONS PLANEETSTELSEL

Prof. Henny J.G.L.M. Lamers
Sterrenkundig Instituut
Universiteit van Amsterdam
AstroBoekjes: 004

AstroBoekjes

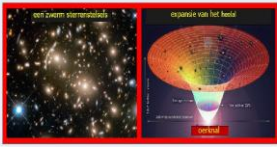
1. De mens tussen de sterren (30^e druk)
2. Hallo is daar iemand (29^e druk)
3. De oerknal en het uitdijende heelal (26^e druk)
4. Het draait allemaal om de Zon (19^e druk)

euro 7,50 per stuk
bestellen via website:
www.hennylamers.nl

98

MYSTERIES IN HET HEELAL

DONKERE MATERIE
EN
DONKERE ENERGIE



Prof. Henny J.G.L.M. Lamers
Sterrenkundig Instituut
Universiteit van Amsterdam

AstroBoekjes: deel 5

AstroBoekje 5

**Mysteries in het
heelal**

(3^e druk)

(euro 7,50 per stuk)

Hier: euro 5,00

Ik signeer op
verzoek

99