

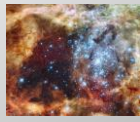
Raadsels rond Sterrenhopen

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

h.j.g.l.m.lamers@uu.nl
www.hennylamers.nl



KNVWS



Delft



21 jan 2025 ¹

1

De Pleiaden sterrenhoop honderden sterren



afstand 440 lichtjaar, leeftijd 150 miljoen jaar ²

2

Quintuplet Open Sterhoop 10 duizend sterren op een kluit



Hubble
Space
Telescope

afstand: 25000 lichtjaar, leeftijd 4 miljoen jaar ³

3

Bolhoop M80

afstand 33000 lichtjaar



ca 200 000 sterren, leeftijd 12 miljard jaar ⁴

4

Bolhoop M13 1,2 miljoen sterren op een kluit



Image:
CFHT

Ontdekt in 1714 door Edmund Halley in sterrenbeeld Hercules
Afstand: 22 000 ljr, Diameter: 45 ljr, Leeftijd: 1,1 miljard jaar

5

Omega Centauri: de zwaarste bolhoop afstand 16000 ljr 10 miljoen sterren



6

De vorming van sterren in sterhopen

7

7

Een hete gas wolk : $\sim 10\,000\text{ C}$
Diameter $\sim 10\text{ lj}$
Massa $\sim 10\,000 \times \text{zon}$



Cocon nevel

Waterstof 70%
Helium 28%
Rest 2%

vooral
koolstof,
stikstof
zuurstof
en alle andere
elementen

8

8

Een koude gas en stof wolk : $\sim -250\text{ C}$
uiterst kleine roet, ijs en zand korreltjes



Dezelfde chemische samenstelling als hete stralende gaswolken !

Door lage T zijn atomen tot moleculen gaan klitten en moleculen tot stof-korreltjes, voornamelijk zand-, roet- en ijs-korrels. Die maken de wolk ondoorzichtig.

9

9

Interstellair gas wolken

Hete gaswolk, $10\,000\text{ C}$
= stralend gas

Verhit door hete jonge sterren



Koude gaswolk, -250 C
= donkere stofkorrels

Stof absorbeert het licht



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: roet + zand

10



Paardenkop nevel, afstand 1500 lj
een koude gaswolk voor een hete gaswolk

11



Hubble infrarood opname:
de Kop van de Paardenkopnevel

12



13



15

De geboorte van sterren uit een gaswolk



Samentrekking van een zware wolk

Klontering van samentrekkende wolk

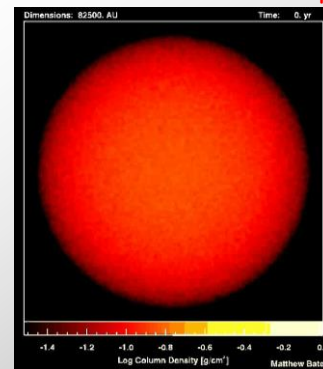
Klonters trekken samen: → sterren

Sterren in jonge sterrenhoop

16

16

Simulatie: ontstaan van sterhoop uit gaswolk



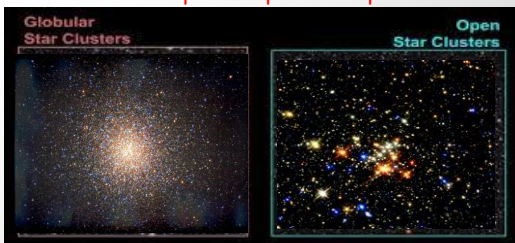
Simulatie:
Matthew Bate,
(Exeter)

<https://www.youtube.com/watch?v=O8tULZHivTM>

17

17

Bolhopen en Open sterhopen



Gevormd uit superzware wolken
Honderd duizenden sterren
Zeer oud: ~ 10 miljard jaar
Weinig zware elementen

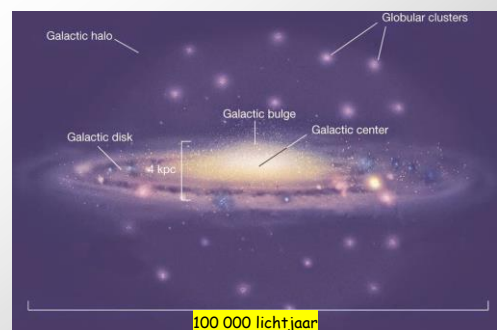
In banen rondom MW
Aantal: ca 200

Gevormd uit zware wolken
Duizenden sterren
Relatief jong: 4 - paar 100 miljoen
Meer zware elementen

In banen in MW vlak
Aantal: ca 10^6

20

Sterhopen in onze melkweg



Bolhopen: oud en rondom melkwegstelsel
Open sterhopen: jong en in de schijf van de melkweg

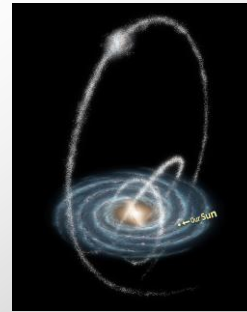
21

Model 1: De vorming van de bolhopen in de halo



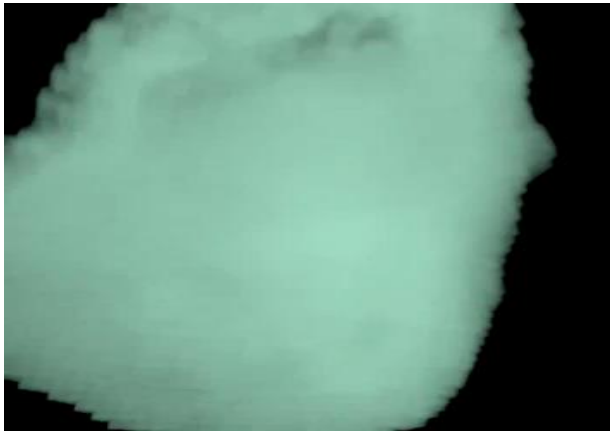
22

Ster-stromen bij ons MW stelsel overblijfselen van ingevangen stelsels



Afgeleid uit metingen van de GAIA satelliet Amina Helmi Groningen

23



Model 2: Dynamische vorming van een zwaar spiraal stelsel

24

Vraag:

Waarom zijn de bolhopen in de halo van de melkweg allemaal "zwaar" en "oud" en de open sterhopen in het melkwegvlak allemaal "licht" en "jong"?



Oort 1957

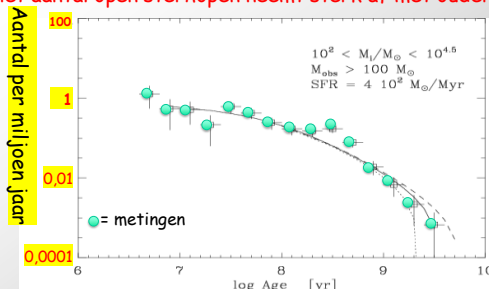


Open sterhopen in het MW vlak zijn jonger dan 1 ca miljard jaar
Maar het MW stelsel is meer dan 10 miljard jaar oud
Er moeten al die tijd sterhopen zijn gevormd
Dus de meeste sterhopen in de MW worden vernietigd

25

25

Het aantal open sterhopen neemt sterk af met ouderdom

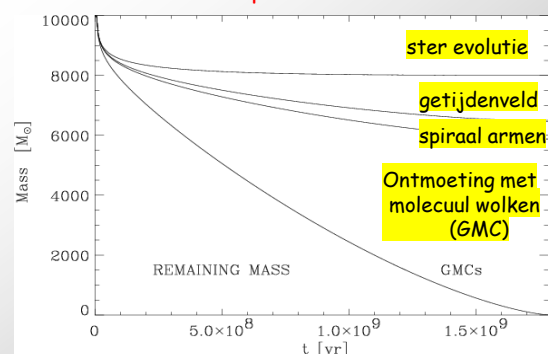


Lamers en Gieles 2006
The destruction of star clusters in the Milky Way

26

26

Hoe worden sterhopen in MW-vlak vernield?

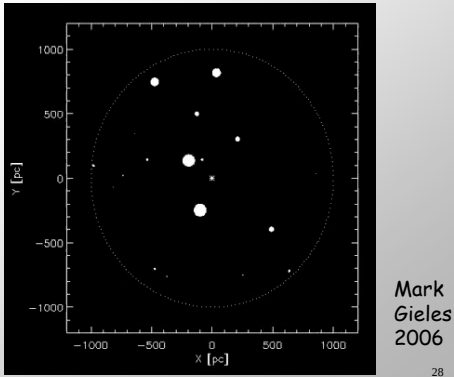


Lamers en Gieles 2006

27

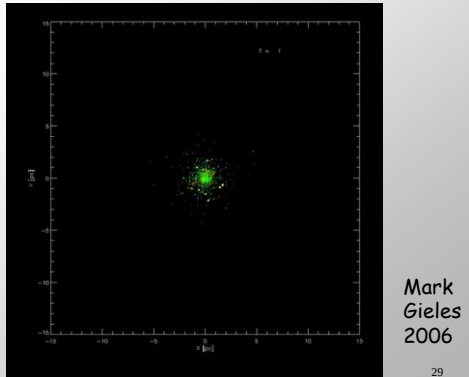
27

Een sterhoop ontmoet reuzen molecuul wolken



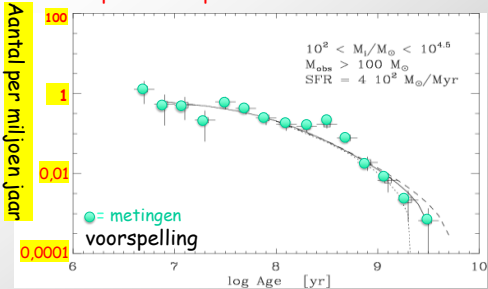
28

De sterhoop wordt vernietigd door molecuul wolken



29

Het aantal open sterhopen neemt sterk af met ouderdom



Lamers en Gieles 2006
The destruction of star clusters in the Milky Way

30

DE MENS TUSSEN DE STERREN
90 JAREN NACHT VAN STERRENSTOF
Prof. Henry J.G.L.M. Lamers
Sterrenkundig Instituut
Universiteit van Amsterdam
AstroBoekjes: deel 1

HALLO IS DAAR IEMAND?
SPEUREN NAAR LEVEN IN HET HEELAL
Prof. Henry J.G.L.M. Lamers
Sterrenkundig Instituut
Universiteit van Amsterdam
AstroBoekjes: deel 2

Hier 5,00 euro

DE OERKNAL EN HET UITDIJDEND HEELAL
OP DECK NAAR DE OORSPRONG
Prof. Henry J.G.L.M. Lamers
Sterrenkundig Instituut
Universiteit van Amsterdam
AstroBoekjes: deel 3

HET DRAAIT ALLEMAAL OM DE ZON
ONTSTAAN, BOUW EN EVOLUTIE VAN ONS PLANETENSTELSEL
Prof. Henry J.G.L.M. Lamers
Sterrenkundig Instituut
Universiteit van Amsterdam
AstroBoekjes: deel 4

31

AstroBoekjes

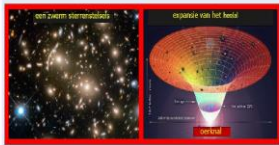
1. De mens tussen de sterren (30^e druk)
 2. Hallo is daar iemand (26^e druk)
 3. De oerknal en het uitdijend heelal (26^e druk)
 4. Het draait allemaal om de Zon (18^e druk)
 5. Mysteries in het heelal (2^e druk)
- euro 7,50 per stuk

Ik signeer op verzoek

31

MYSTERIES IN HET HEELAL

DONKERE MATERIE
EN
DONKERE ENERGIE



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

AstroBoekjes: deel 5

AstroBoekje 5

Mysteries in het heelal

(2^e druk)

(euro 7,50 per stuk)

Hier: euro 5,00

Ik signeer op verzoek

32

32

Het raadsel van bolhopen:

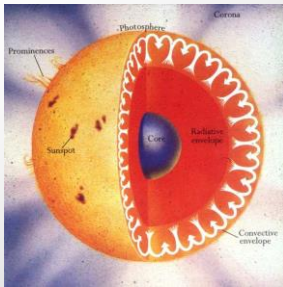
vreemde chemische samenstelling
van de sterren

Levensloop van sterren in Bolhopen

33

33

De zon als voorbeeld van een "lichte" ster



Afstand:
150 000 000 km
= 8 lichtminuten

Diameter:
1 400 000 km

Oppervlakte:
5700 graden

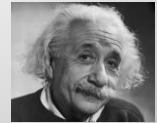
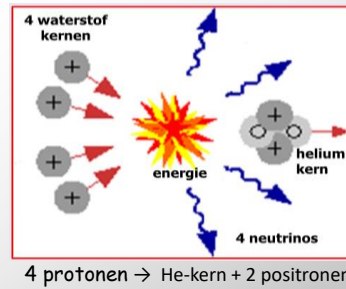
Leeftijd:
4,6 miljard jaar!

Straling: 4000000000000000000000000000 Watt

Alle auto's op aarde (1,3 miljard), 100 km/dag, 2 miljoen jaar
= energieverbruik Zon in 1 sec !

34

Het principe van H- $\rightarrow$ He fusie



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

35

De zon over 3.5 miljard jaar : een rode reus
einde van H-fusie: zon zwelt op
100 x zo helder als zon nu



Oceanen verdampen: einde van leven op aarde

James Kaler : Sterren

36

Einde van een zonachtige ster



37

37

Hoe oud kunnen sterren worden?

Dat hangt af van

- (1) hun energie-voorraad = massa
en
- (2) energie verbruik = helderheid

Hoe meer massa: des te langer de levensduur
Hoe helderder (meer straling): des te korter

Levensduur = 9 miljard jaar x Massa / Helderheid
als je Massa uitdrukt in zonsmassa
en Helderheid in zonshelderheid

38

De levensduur van sterren

Maximale levensduur = energie voorraad/verbruik

Massa (in Mzon)	Helderheid (in Lzon)	Levensduur (jr)	
		geschat	berekend
1	1	9 miljard	9
3	70	380 miljoen	380
5	450	100 miljoen	80
20	40 000	4.5 miljoen	9.0
60	500 000	1.1 miljoen	4.0
0.8	0.5	18 miljard	

Hoe zwaarder een ster, des te **korter** zij leeft !! (grote helderheid)

De zware sterren die we zien zijn "pas" gevormd !!

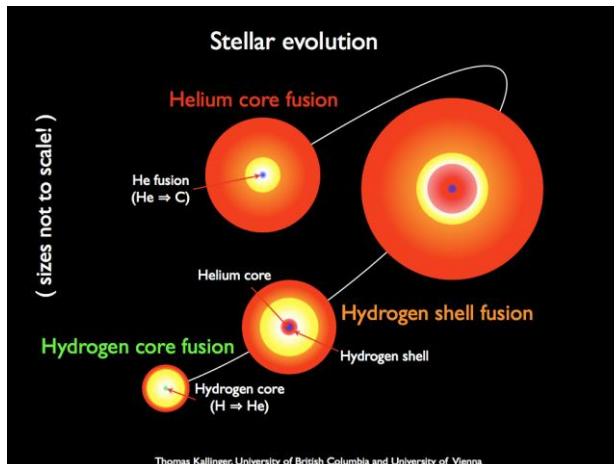
Heelal = 13,78 miljard jaar.

Dus alle ooit gevormde sterren lichter dan $0.8 \times Z_{\odot}$ leven nog !!

39

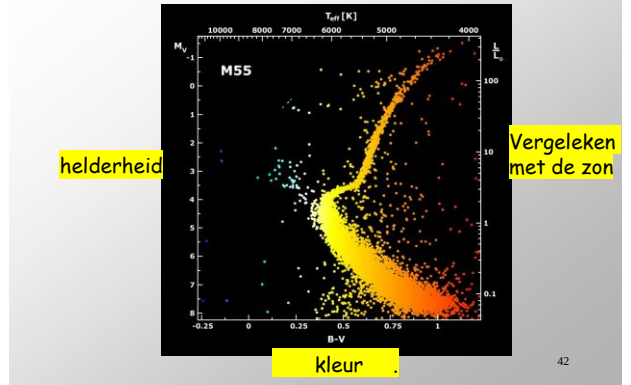
38

39



41

Kleur-Helderheids Diagram of Hertzsprung-Russell Diagram

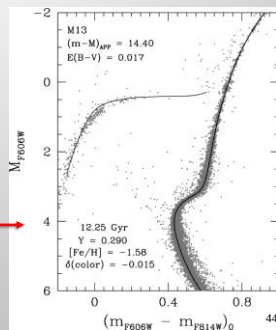


Bolhoop M13

Punten:
Waargenomen
kleur-helderheids diagram

en

Lijn:
berekend diagram
voor een leeftijd
van 12.25 miljard jaar.



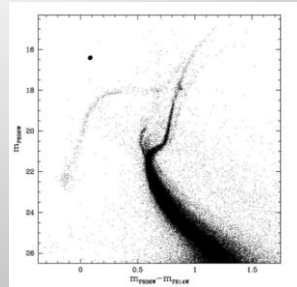
44

Wat weten (wisten?) we van bolhopen ?

1. Sijmpel kleur-helderheids diagram
2. Alle sterren even oud
3. Alle sterren dezelfde chemische samenstelling
4. Alle sterren in een bolhoop zijn (ongeveer) tegelijk gevormd uit e'en grote gaswolk

46

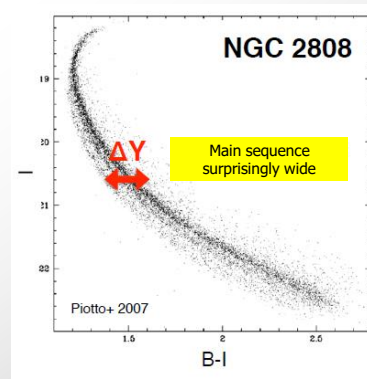
Hubble metingen: bolhopen hebben een complex kleur-helderheids diagram !



Piotto 2008

Bolhopen hebben GEEN enkelvoudige ster populatie

47



De breedte van de
hoofddreeks wijst op
een variatie
in He/H verhouding

$Y = \text{massa H} / \text{massa He}$

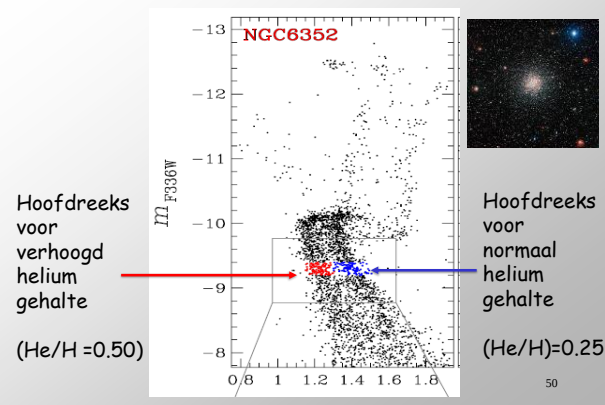
$0.25 < Y < 0.40$

60% van sterren:
 $Y=0.25$
(normaal)

40% van sterren:
verrijkt in He

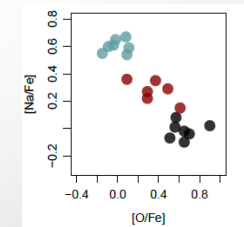
48

Dit wijst op sterren met verschillend helium gehalte !



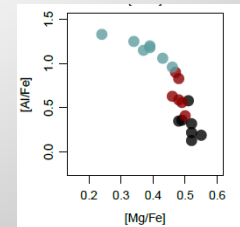
50

Er zijn nog andere chemische raadsels
Rode reuzen in bolhoop NGC 6752



Na/O anti-correlatie

Veel Na - weinig O
Weinig Na - veel O



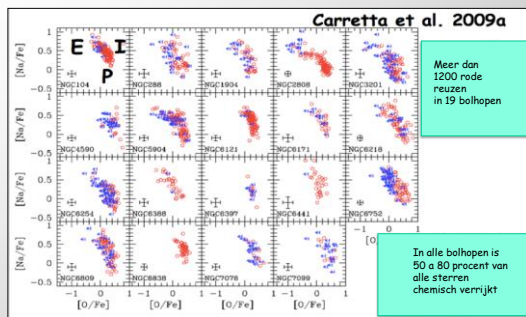
Al/Mg anti-correlatie

Veel Al - weinig Mg
Weinig Al - veel Mg

Binnen een bolhoop !!

51

Binnen iedere zware bolhoop:
een variatie in chemische samenstelling



52

Chemische afwijkingen binnen bolhopen

1. Hoge He/H verhoudingen (door de hele ster!)
2. Na/O anti-correlaties
3. Al/Mg anti-correlaties
(alleen maar in zware bolhopen !)
4. Maar totaal $\text{C}+\text{N}+\text{O} = \text{constant}$
5. Fe gehalte is constant

1. Ongeveer de helft van de sterren is chemisch verrijkt
2. Verrijkt materiaal is aan het oppervlak, dus die sterren moeten uit verrijkt materiaal gevormd zijn !!!

53

53

Vragen ?

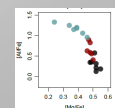
Oplossing ?

Iedere bolhoop is ontstaan uit een
versmelting van twee bolhopen
met verschillende samenstellingen ?



1. Niet erg waarschijnlijk!
Er zijn maar een paar honderd bolhopen in onze MW,
op grote afstanden van elkaar en met grote snelheden.

2. Waarom is er dan een "gradient"
in de chemische anti-correlaties ?



54

56

In welke richting moet je de oplossing zoeken?

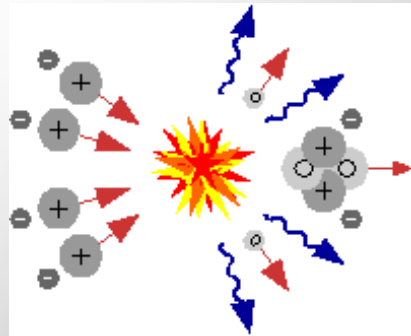
Hoe kan het gas waaruit een deel (ca helft) van de sterren gevormd zijn (!) een andere chemische samenstelling hebben dan de rest van de sterren?

Kunnen de waargenomen verhoudingen van de chemische elementen (zoals de waargenomen anti-correlaties) ons een aanwijzing geven?

58

58

Het principe van $H \rightarrow He$ fusie



Netto: $4 p \rightarrow {}^4\text{He} (2p+2n) + 2 e^+ + \text{energie}$

60

60

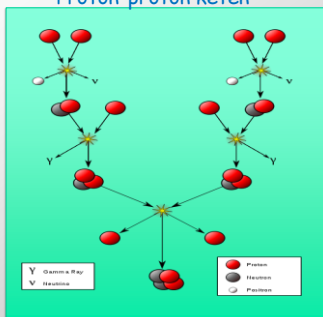
De fusie van H tot He in lichte sterren zoals de Zon ($T < 15$ miljoen C)

Proton-proton keten

$p + p \rightarrow D$

$D + p \rightarrow {}^3\text{He}$

${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p + p$



Netto: $4 p \rightarrow {}^4\text{He} (2p+2n) + 2 e^+ + \text{energie}$

61

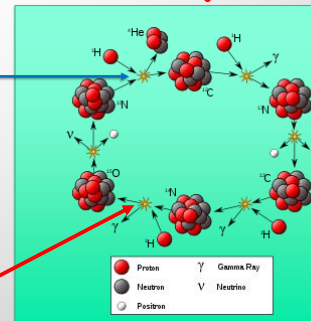
61

De fusie van H tot He in zware sterren $T > 15$ miljoen C

CNO-cyclus

In deze stap wordt ${}^4\text{He}$ gevormd

Dit is een langzame stap



Netto: $4 p \rightarrow {}^4\text{He} (2p+2n) + 2 e^+ + \text{energie}$

62

62

Boulevard périphérique in Parijs

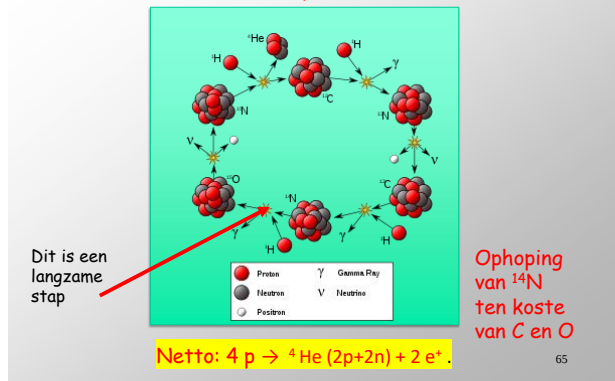


63



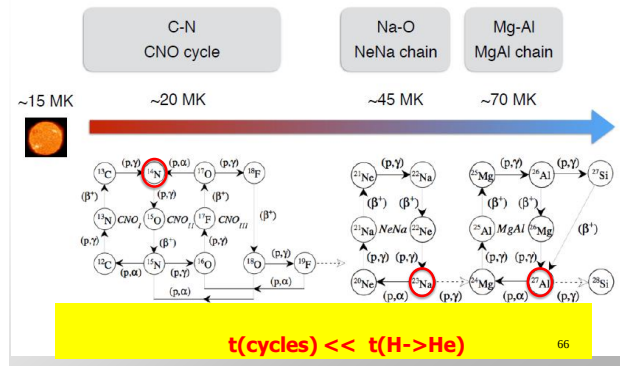
64

De fusie van H tot He in zware sterren $M > 1,2 M_{\odot}$



65

Ontstaan van anti-correlaties bij de fusie van H $\rightarrow$ He



66

Gevolg: van de H-He fusie bij zware sterren:

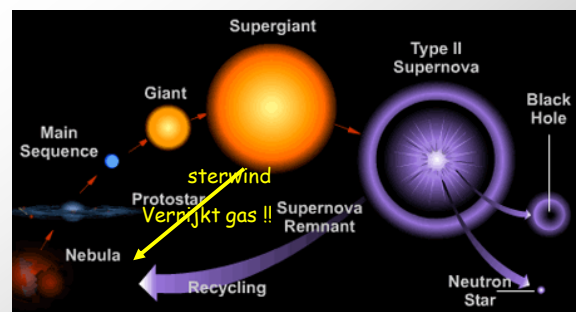
1. Normale N/C verhouding = 0,27
Tijdens en na de CNO-cyclus: N/C = 140
Maar totale C + N + O blijft gelijk!
2. Hierbij neemt ook het Na gehalte toe en O-gehalte af
3. Bij zwaardere sterren neemt ook het Al gehalte toe en het Mg gehalte af.

Dus de helft van de sterren in een bolhoop zijn geboren uit gas dat verrijkt is door de producten van H-fusie in zware sterren!

Maar die sterren moeten dan wel eerst hun buitenlagen hebben afgestoten, anders kwamen die elementen niet vrij!

67

Evolutie van zware sterren

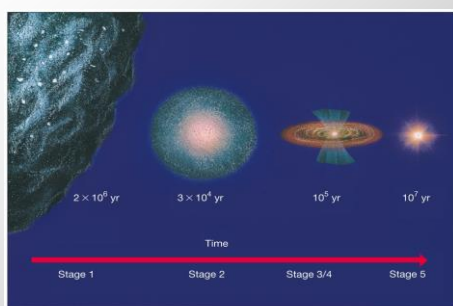


Deze hele evolutie duurt minder dan 4 miljoen jaar

68

De evolutie van zware sterren duurt < 4 miljoen jaar

De vorming van lichte sterren duurt 10 miljoen jaar!



De vorming van lichte sterren, zoals de zon

69

Het "vroege verrijktings model"

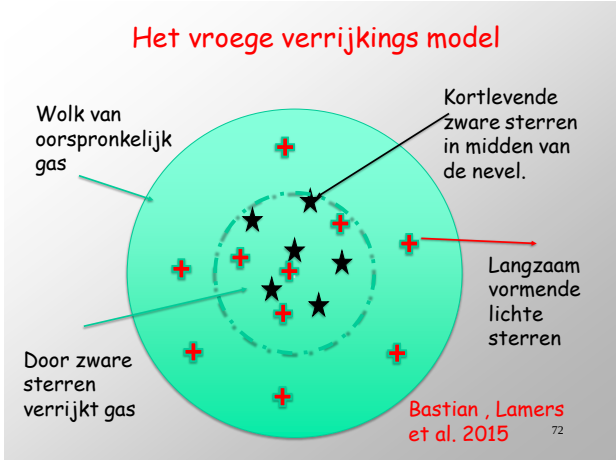
1. De fusie in zware sterren (10 - 200 $M_{\odot}$) produceert de chemische elementen met hun anti-correlaties
2. Zware sterren leven kort (4 tot 6 miljoen jaar)
Tegen het eind van hun leven komen de chemische elementen, die door fusie zijn ontstaan, vrij door sterwinden en supernova explosies.
3. Lichte sterren ontstaan heel langzaam, dat duurt miljoenen jaren. Maar in die tijd is het gas in de wolk al chemisch verrijkt: dus de lichte sterren worden geboren uit verrijkt gas!

Bastian, Lamers et al. 2015

70

70

Het vroege verrijkings model

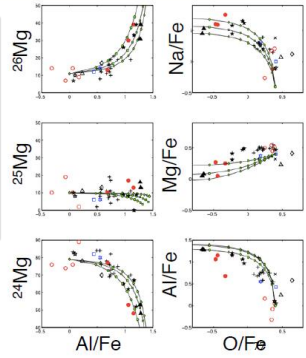


72

Voorspelde anti-correlaties in super-zware sterren :
massa 1000 a 10000 maal zo zwaar als zon !

Supersware sterren

De waargenomen anti-correlaties kloppen met wat je verwacht voor fusie in supersware sterren (bij veel hogere temperatuur dan bij normale sterren)



Denissenkov and Hartwick 2014
Denissenkov et al. 2015

77

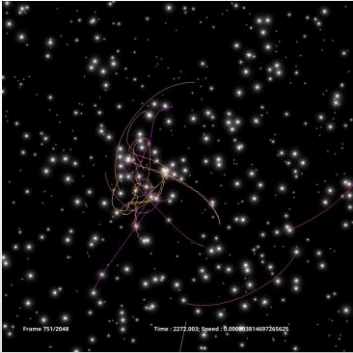
Het supersware ster model

1. De nevel waaruit de bolhoop ontstond was zo zwaar en compact dat er in het centrum een supersware ster gevormd wordt (ongeveer 1000 a 10000 x zon).

Gieles, Lamers et al. 2017

78

Core-collapse: zware sterren in centrum
lichte sterren in grote banen



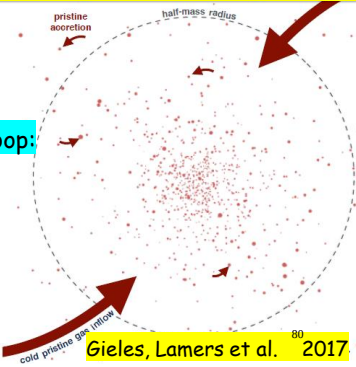
Simulatie:
Mark Gieles

79

De vorming van een zware bolhoop

Vorming van een bolhoop:

inval van gas
en proto-sterren



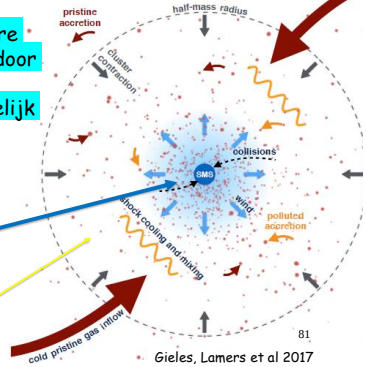
80

Vorming van supersware ster in centrum

Ontstaan van supersware ster die gevoed wordt door invallend gas en proto-sterren en kan gemakkelijk een massa van 10 000 zonsmassa bereiken

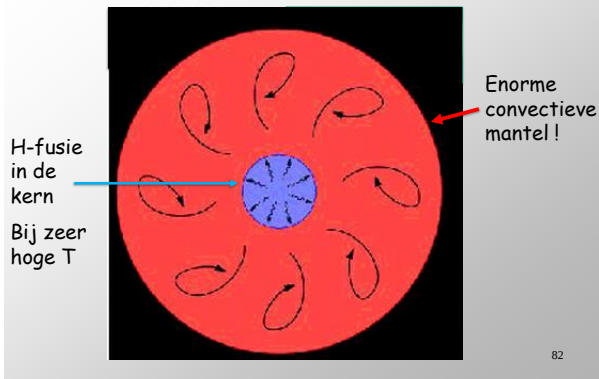
Supersware ster

Lichte protosterren



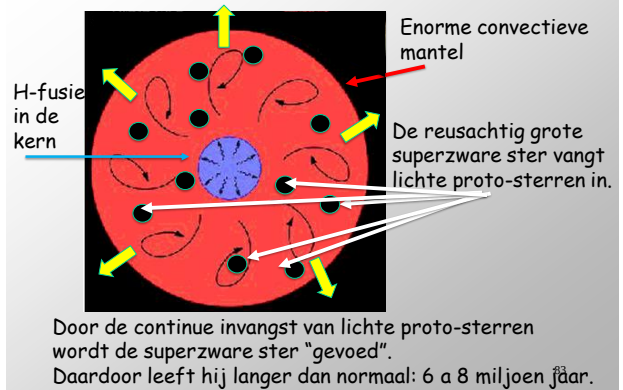
81

Bouw van een superzware ster Afmeting: duizenden zonstralen



82

Het lopende band scenario van een superzware ster



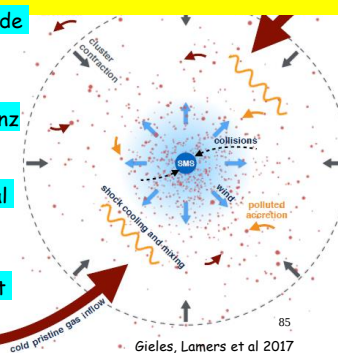
83

Het "lopende band" mechanisme voor de vorming van superzware ster in centrum

Zo wordt het gas waaruit de lichte sterren langzaam ontstaan verrijkt met de fusie producten van de superzware ster: Na, Al enz

Daarom zijn de lichte sterren bij hun ontstaan al chemisch verrijkt !!

Niet alle lichte sterren zijn evenveel verrijkt: dat hangt af van hun afstand tot de superzware ster.



85

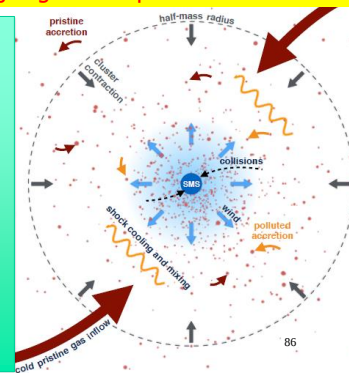
Het lopende-band mechanisme voor chemische verrijking door superzware sterren

HAMVRAAG !!!

Bestaan superzware sterren wel ?

Er is nog nooit een superzware ster waargenomen !

Ze kunnen ze alleen gevormd worden in bolhopen



86

Test.

Als de superzware ster na een paar miljoen jaar aan het eind van zijn leven ontploft, dan blijft een superzwaar zwart gat over.

Misschien kun je de aanwezigheid daarvan in bolhopen aantonen uit de banen van de sterren in het centrum van bolhopen. ?

90

2002:

Hubble Space Telescope Evidence for an Intermediate-Mass Black Hole in the Globular Cluster M15:

I. STIS Spectroscopy and WFPC2 Photometry

Roeland P. van der Marel, Joris Gerssen (STScI), Puragra Guhathakurta, Ruth Peterson (Santa Cruz, CA), Karl Gebhardt (Austin, TX)



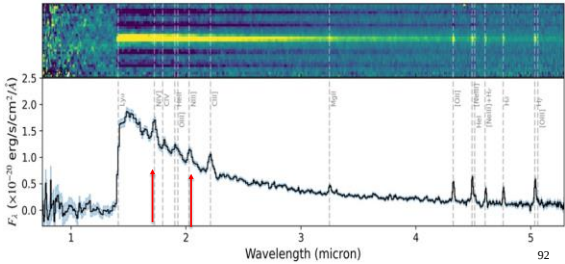
Globular cluster M15:
Black Hole = 4000 x zon

91

91

2023 Doorbraak:

Hoog stikstof gehalte in proto-bolvormige sterhoop in stelsel GN-z11 gevonden door James Webb Space Telescope (afstand 12,6 miljard lichtjaar)



CONCLUSIES

- Lichte open sterhopen worden gemakkelijk vernietigd in het MW-vlak
- Zware oude bolhopen zijn voor een groot deel ingevangen door ons MW stelsel
- Minstens de helft van sterren in een zware bolhoop zijn gevormd uit "verrijkt" gas, van zeer zware sterren ($M > 1000 M_{\odot}$)
- Er is een zwaar zwart gat gevonden met een massa van 4000 $M_{\odot}$ in bolhoop M15 (uit bewegingen van sterren rondom het centrum)
- Het gas van het zeer verre stelsel GN-z11 op 12,6 miljard ljr afstand heeft een zeer hoog N-gehalte dat alleen verklaard kan worden door de snelle vorming van een superzware ster van ca 10000 $M_{\odot}$

The End

www.hennylamers.nl

DE MENS TUSSEN DE STERREN

90 ZONNESTRAAL VAN STERRENSTOF

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

AstroBoekjes: deel 1

HALLO IS DAAR IEMAND?

SPEUREN NAAR LEVEN IN HET HEELAL

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

AstroBoekjes: deel 2

DE OERKNAAL EN HET UITDIJDEND HEELAL

OP ZOEK NAAR DE OORSPRONG

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

AstroBoekjes: deel 3

HET DRAAIT ALLEMAAL OM DE ZON

ONTSTAAN, BOUW EN EVOLUTIE VAN ONS PLANETENSTELSEL

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

AstroBoekjes: deel 4

Hier 5,00 euro

AstroBoekjes

1. De mens tussen de sterren (30^e druk)
2. Hallo is daar iemand (26^e druk)
3. De oerknal en het uitdijend heelal (26^e druk)
4. Het draait allemaal om de Zon (18^e druk)
5. Mysteries in het heelal (2^e druk)

euro 7,50 per stuk

Ik signeer op verzoek

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

(2^e druk)

(euro 7,50 per stuk)

Hier: euro 5,00

Ik signeer op verzoek