

Het ontstaan van de elementen



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



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



Walrecht cursus 6 april 2022

1

het licht van sterren ontrafeld

=
spectrum van sterren



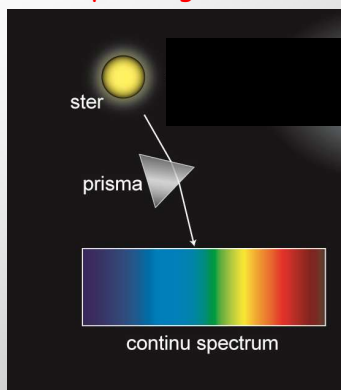
Korte golflengte (440 nm)

Lange golflengte (800 nm)

Kleuren van de regenboog met donkere strepen daarin

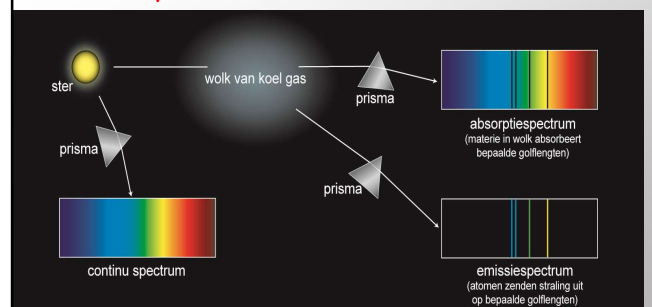
2

Spectrum = licht ontrafeld door spectrograaf



3

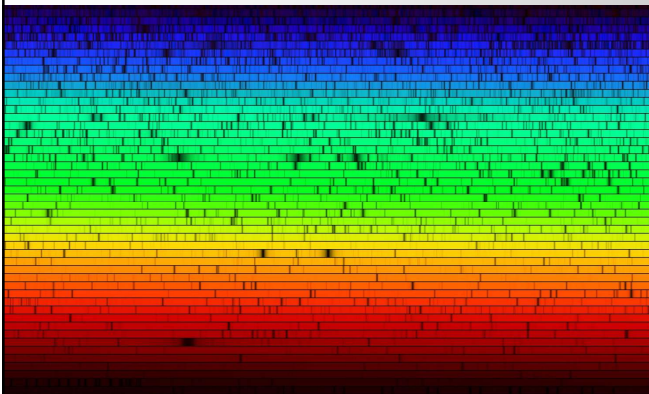
Spectrum = ontrafeld licht



Spectrum van een ster: donkere absorptie lijnen
Spectrum van een nevel: heldere emissie lijnen

4

Modern hoge resolutie spectrum van een heldere ster (opgevouwen)



5

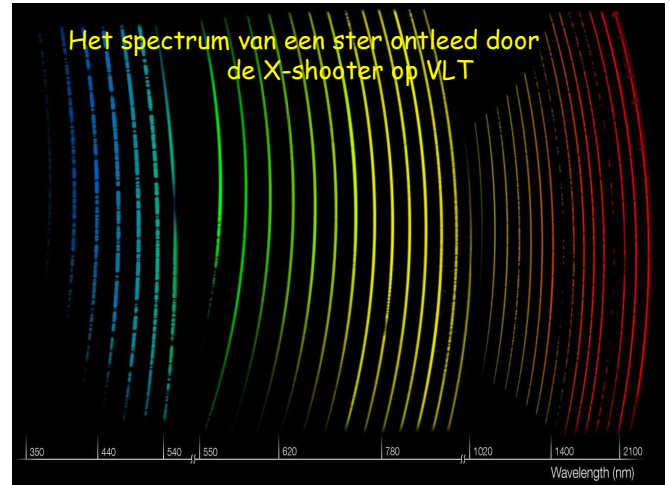


ESO Very Large Telescope (VLT) 1998
Europese sterrenwacht op berg Paranal in Chili

6



7



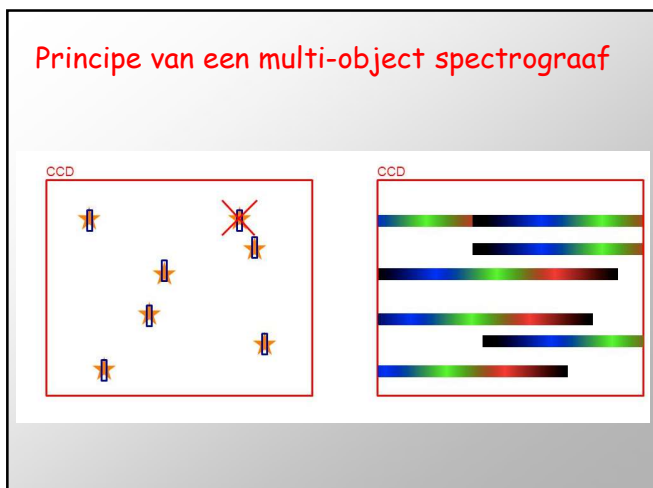
8



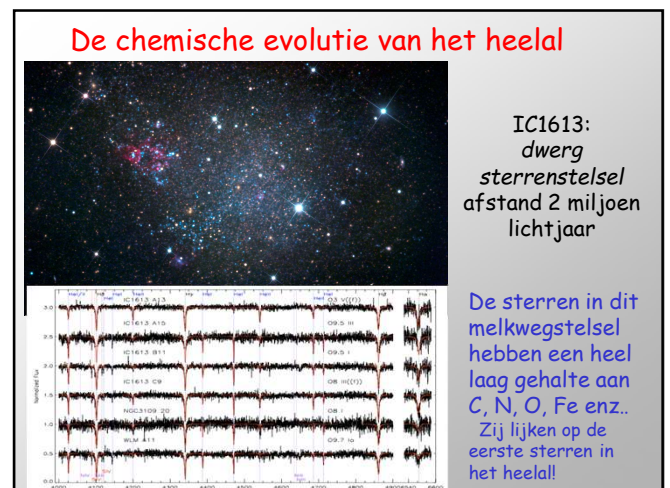
9



10

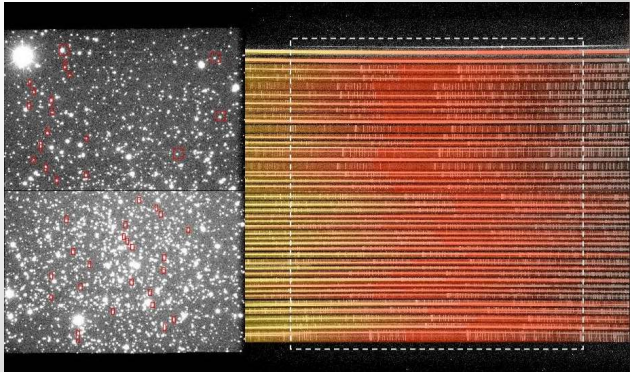


11



12

IRIS multi object spectrograaf van Keck Telescoop



13



14

Atacama Large Millimeter Array (ALMA)



15



16

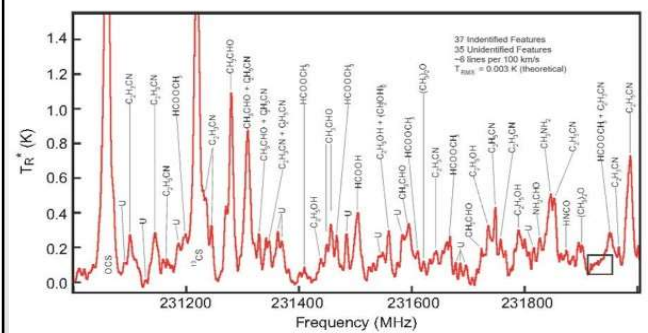
ALMA

Voor onderzoek naar millimeter straling uit het heelal



17

Heel klein stukje van ALMA mm-spectrum
van een interstellaire wolk



Stervormende wolk SgrB2

18

Lijst van interstellaire moleculen

Number of Atoms											
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12+	
H ₂	C ₂	c-C ₃ H	C ₃	C ₃ H	C ₃ H ₂	CH ₃ CN	CH ₃ C ₂ H	CH ₃ C ₂ H ₂	HCN	C ₃ H ₄	
AlF	C ₂ H	i-C ₃ H	C ₃ H ₂	i-HC ₃	CH ₃ CHCN	HCOOH	CH ₃ COH	(CH ₃) ₂ CO		HC ₃ N	
AlCl	C ₂ O	C ₂ S	C ₂ Si	CH ₂	CH ₂ CH ₂	CH ₂ COOH	CH ₂ COH	CH ₂ COOH		HC ₃ N	
C ₂	C ₂ S	C ₂ Si	C ₂ Si	CH ₂	CH ₂ CH ₂	CH ₂ COOH	CH ₂ COH	CH ₂ COOH		HC ₃ N	
CH	CH ₂	C ₂ S	c-C ₃ H ₂	CH ₂ CN	CH ₂ OH	CH ₂ OH	CH ₂ OH	CH ₂ OH		HC ₃ N	
CH ⁺	HCN	C ₂ H ₂	CH ₂ CN	CH ₂ OH	NH ₂ CH ₂	HOCH ₂ CHO	C ₃ H ₄				
CN	HCO	CH ₂ D ⁺	CH ₂	CH ₂ SH							
CO	HCO ⁺	HCCN	HCCN	HCCN	HCCN						
CO ⁺	HCS ⁺	HCCN ⁺	HCCN	HCCN	HCCN						
CP	HOC ⁺	HNC	HNC	HNC	HNC						
CS	H ₂ O	HNC	HNC	HNC	HNC						
HCl	H ₂ S	HCO ⁺	HCO	HCO	HCO						
KCl	HNC	HNC	HNC	HNC	HNC						
NH	HNO	HNC	HNC	HNC	HNC						
NO	MgCN	HCS	SiH ₄								
NS	MgNC	H ₂ O ⁺	H ₂ COH ⁺								
NaCl	N ₂ H ⁺	N ₂ H ₂									
OH	N ₂ O	SiC ₂									
PN	NaCN	CH ₂									
SO	OCS										
SO ⁺	SO ₂										
Sin	c-SiC ₂										
Sio	CO ₂										
Sis	NH ₂										
CS	H ₂ ⁺										
HF	H ₂ D ⁺										

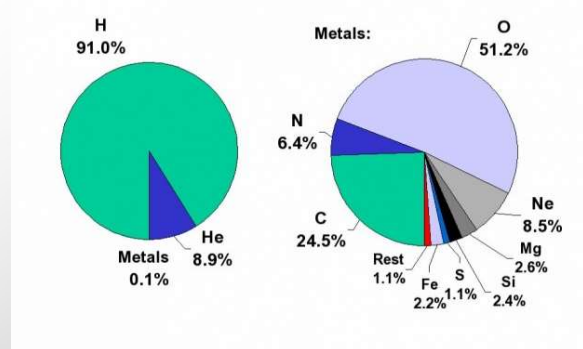


Alcohol !!

Inmiddels zijn er meer dan 227 verschillende moleculen ontdekt in de interstellaire ruimte!

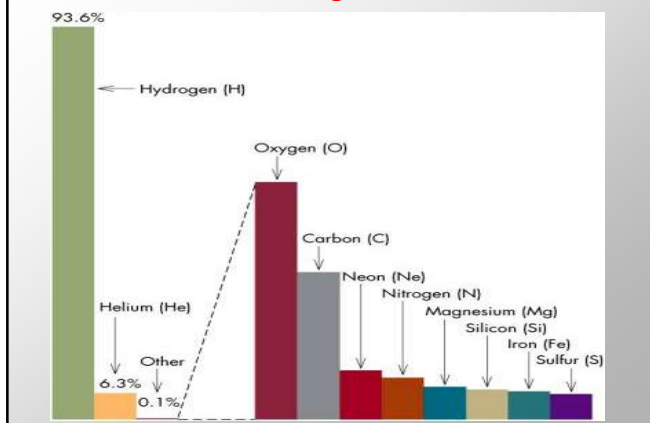
19

Samenstelling van de Zon en nevels in Melkweg



20

Samenstelling van de Zon



21

De chemische samenstelling van de Zon

Element	Relative Number of Atoms
H	1,000,000
He	63,000
O	690
C	420
N	87
Si	45
Mg	40
Ne	37
Fe	32
S	16
Al	3
Ca	2
Na	2
Ni	2

In aantallen atomen:

H : Voornamelijk waterstof (H)
 Helium: 10 maal minder dan H
 O,C,N: samen 1000 maal minder dan H
 Si, Mg, Ne: samen 10 000 maal minder dan H
 IJzer (Fe): 30 000 maal minder dan H
 Rest : meer dan 100 000 maal minder dan H

In massa verhouding:

H: 73,5 %
 Helium: 24,8 %
 O,C,N: samen 1,15 %
 Si, Mg, Ne : samen 0,34 %
 Fe : 0,16 %
 Rest: minder dan 0,04 %

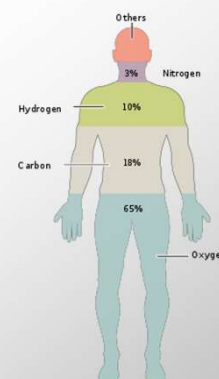
22

Periodiek systeem

Periodic Table of the Elements																	
1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	9A	10A	11A	12A	13A	14A	15A	16A	17A	18A
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H	He	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	105
117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134
Uu	Uu	Uu	Uu	Uu	Uu	Uu	Uu	Uu	Uu	Uu	Uu	Uu	Uu	Uu	Uu	Uu	Uu

23

Waaruit bestaat de mens?



Gewichts fracties Zon

Zuurstof : 65,0 % 0.83 %
 Koolstof : 18,5 % 0.32 %
 Waterstof: 9,5 % 75 %
 Stikstof : 3,2 % 0.10 %
 Calcium : 1,5 % 0.006 %
 Rest : 2,3 %

24

Hoe zijn de chemische elementen ontstaan?

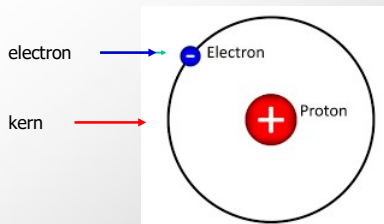
25

Elementaire deeltjes

	Naam	Massa	Lading
	Proton	1.0000	+1
	Neutron	1.0014	0
	Electron	0.00055	-1
	Positron	0.00055	+1

26

Waterstof atoom (H= Hydrogen)



Massa van proton: 0,000 000 000 000 000 000 000 0017 gram
 Massa van electron: 0,00055 x massa van proton
 dus bijna alle massa zit in de kern

Afmeting van een proton : ca 0,000 000 000 000 001 cm
 Afstand proton – electron : ca 0,000 000 0055 cm

27

27

H atoom op schaal



Camp Nou stadion in Barcelona : grootste in Europa:
 99000 zitplaatsen; afmeting: 220 x 250 meter

Als proton een knikker is op middenstip, dan is het electron een minuscule deeltje dat op de bovenste tribune-ring rond holt.

Atomen zijn voor 99,99999.....9 % leeg!
 en U dus ook !!!

28

28

Materie is voor 99,999999.....9 leeg

Toch zijn we

ondoorzichtig:

zelfs lichtgolven kunnen niet door de kleine ruimtes
 (behalve rontgen stralen want die hebben een veel kortere golflengte : zijn veel kleiner)

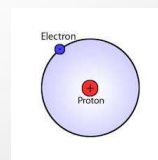
ondoordringbaar (hard)

door de sterke elektrische bindingen is de materie onscheidbaar.

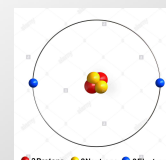
29

29

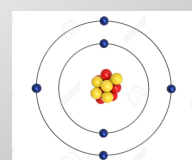
Atoom = kern van protonen en neutronen
 + schil van electronen



Waterstof



Helium



Koolstof

Kern 1 proton +
0 neutronen

2 protonen +
2 neutronen

6 protonen +
6 neutronen

Schil 1 electron -

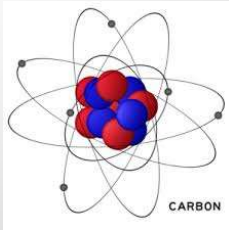
2 electronen -

6 electronen -

30

Koolstof atoom (C = carbon)

6
electronen:
electrisch -



Kern bestaande uit

6 protonen (rood):
electrisch +

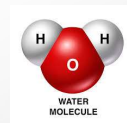
6 neutronen (blauw):
electrisch neutraal

Een neutron is even zwaar als een proton,
maar heeft geen electrische lading

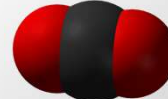
totale lading : 6 x electrische positief + 6 x negatief = 0₃₁

31

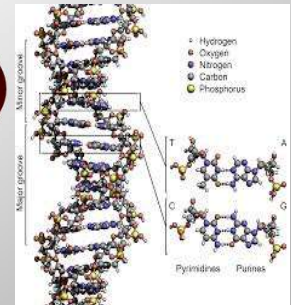
Molecuul = atomen tegen elkaar geplakt



Water
molecuul



Kool-dioxide
molecuul



Stukje DNA molecuul

32

Het ontstaan van materie

Materie kan ontstaan uit licht!

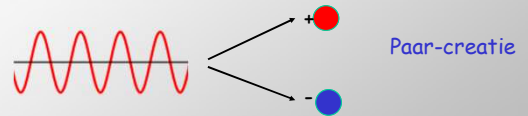
Bij zeer hoge temperatuur (miljard graden)
kan materie ontstaan uit licht
paar-creatie

En materie weer overgaan in licht
annihilatie

33

Bij zeer hoge temperatuur (miljard graden) kan:

Een foton (lichtgolfje) overgaan in 2 deeltjes
met tegenovergestelde electrische lading

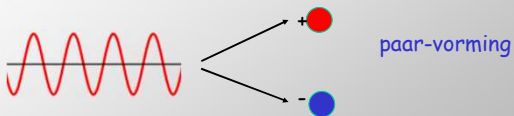


Paar-creatie

34

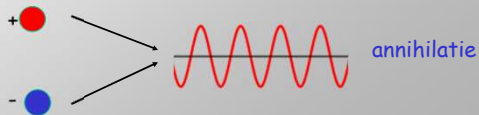
Bij zeer hoge temperatuur (miljard graden) kan:

Een foton (lichtgolfje) overgaan in 2 deeltjes
met tegenovergestelde electrische lading



paar-vorming

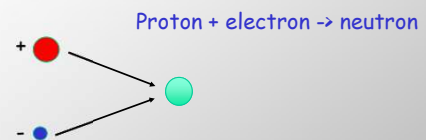
Twee deeltjes met tegenovergestelde electrische
lading overgaan in een foton



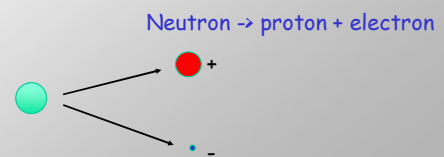
annihilatie

35

Vorming van electronen, protonen en neutronen



Proton + electron → neutron

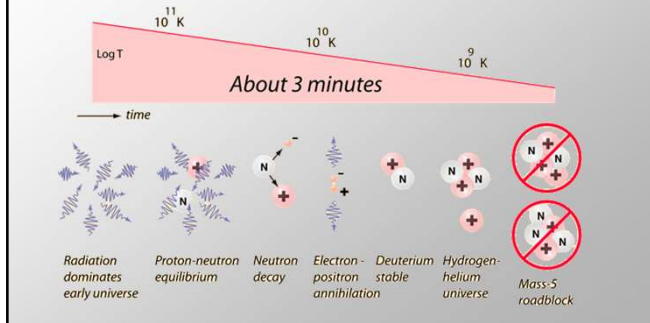


Neutron → proton + electron

36

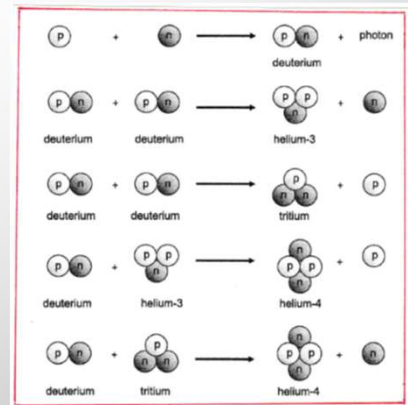
Hoe het begon bij de oerknal

De eerste drie minuten



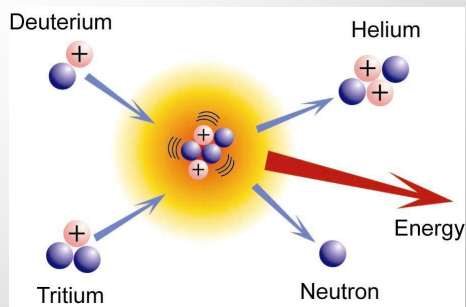
37

Fusie-reakties in de eerste 3 min van de Oerknal



38

De belangrijkste vorming van helium

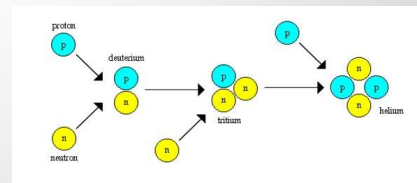


Twee atoomkernen knallen op elkaar
Het resultaat is instabiel en valt meteen uit elkaar
Daarbij komt energie vrij

39

Oerknal !!

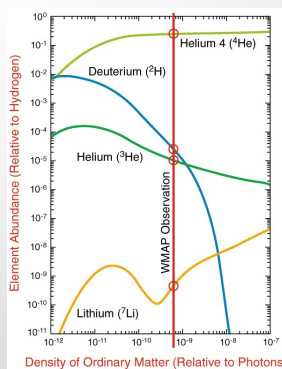
Vorming van de eerste elementen binnen 3 minuten



$T > 100$ miljard C: deeltje konden overgaan in fotonen en omgekeerd
 $T >$ tussen 100 en 30 miljard C: neutronen vervallen in protonen + electron
 $T < 30$ miljard C: afname van aantal neutronen ten gunste van protonen
 $T < 3$ miljard C: vorming van deuterium = $H+n$
 $T = 1$ miljard C: vorming van tritium en helium
Er blijven veel protonen over: daarom is er veel meer H dan He in heelal

40

Vorming van elementen bij Oerknal afhankelijk van de dichtheid tijdens de eerste 3 minuten



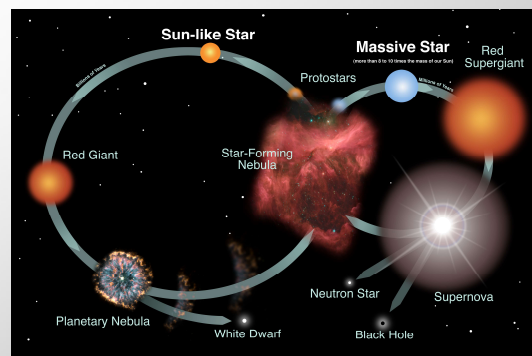
Vorming van:
 ^1H (p)
 ^2H =Deuterium (p+n)
 ^3He (2p+n)
 ^4He (2p+2n)
 ^7Li (3p+4n)

Voorspelde verhoudingen voor verschillende begin dichtheden

41

Recycling in de kosmos

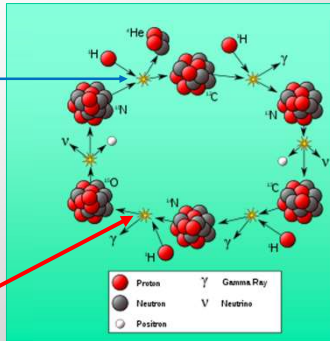
gaswolken $\rightarrow$ geboorte van sterren
 $\rightarrow$ leven van sterren (kernfusie) $\rightarrow$ dood van sterren
 $\rightarrow$ gaswolken



42

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

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

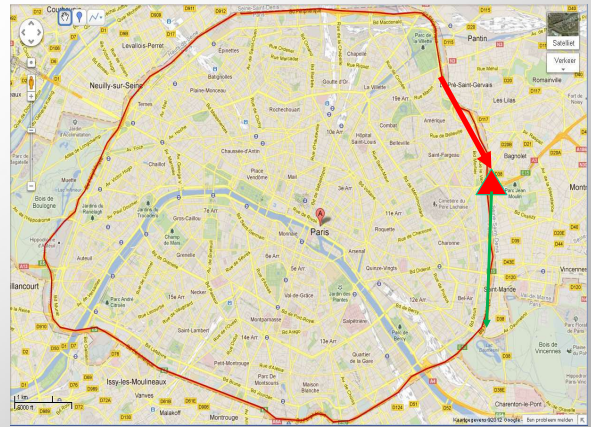


Dit is een
langzame
stap



49

Boulevard periferique in Parijs



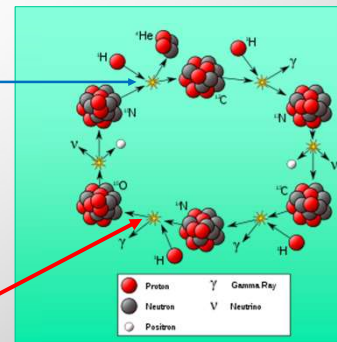
50



51

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

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



Dit is een
langzame
stap



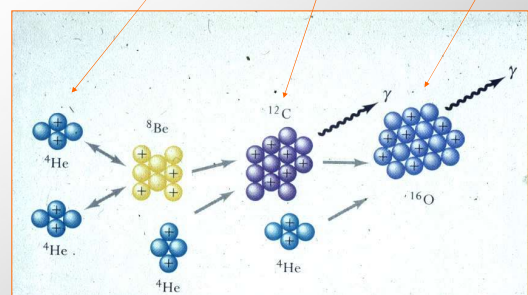
52

Gevolg: Verandering van C / N verhouding

- Normale N/C verhouding = 0,27
- Tijdens en na de CNO-cyclus: N/C = 140
- Maar totale C + N + O blijft gelijk !
- Dus N gehalte neemt sterk toe
en C gehalte neemt sterk af

53

Fusie van helium $\rightarrow$ koolstof $\rightarrow$ zuurstof



54

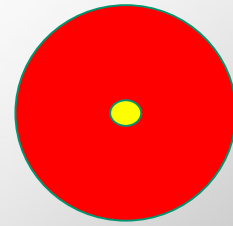
54

Mogelijke fusie reacties

Fusie	Reactie	Massa-defect	Temperatuur(C)
$H \rightarrow He$:	$4H \rightarrow He$	0.7%	10 miljoen
$He \rightarrow C$:	$3He \rightarrow C$	0.07%	100 miljoen
$C \rightarrow O$:	$C + He \rightarrow O$	0.05%	300 miljoen
$C \rightarrow Ne$:	$C + C \rightarrow Ne$	0.05%	600 miljoen
$O \rightarrow Si$:	$O + O \rightarrow Si$	0.03%	1 miljard
$Si \rightarrow Fe$:	$Si + Si \rightarrow Fe$	0.03%	3 miljard

55

Het leven van een ster is konstante strijd tussen zwaartekracht en tegendruk door heet gas



Waterstof mantel
Helium kern

Zolang die elkaar in evenwicht houden is de ster stabiel.

Aan eind van elke fusie-fase:

1. Ster produceert te weinig energie voor evenwicht
2. Daardoor dreigt kern niet meer genoeg energie/warmte te leveren om de gasdruk hoog genoeg te houden
3. Zwaartekracht van de mantel perst de kern samen
4. In samengedrukte kern loopt T en dichtheid op.
5. Totdat T hoog genoeg is voor de volgende fusiefase
6. Dan kan de ster weer in evenwicht zijn!

Zo kan een ster door een aantal fusie processen doorlopen.

56

Belangrijkste fusie reacties in lichte sterren zoals de Zon

Fusie	Reactie	Massa-defect	Temperatuur(C)
$H \rightarrow He$:	$4H \rightarrow He$	0.7%	10 miljoen
$He \rightarrow C$:	$3He \rightarrow C$	0.07%	100 miljoen

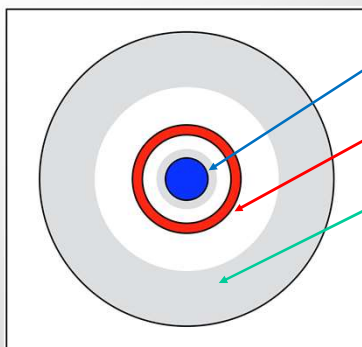
57

Zon aan eind van $H \rightarrow He$ fusie een rode reus



58

Interne structuur van een rode reus



Kern van helium

Schil van $H \rightarrow He$ fusie

Zeer uitgestrekte laag met oorspronkelijke samenstelling: voornamelijk H (konvektief!)

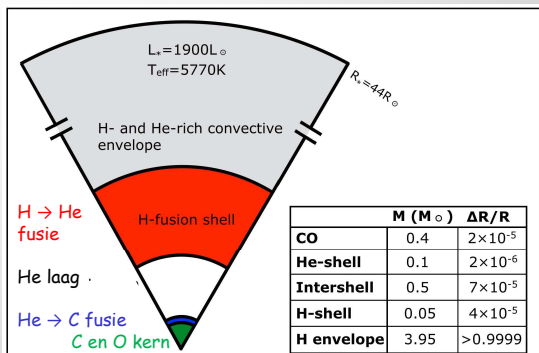
59

Zon tijdens $He \rightarrow C$ fusie: rode superreus (AGB reus)



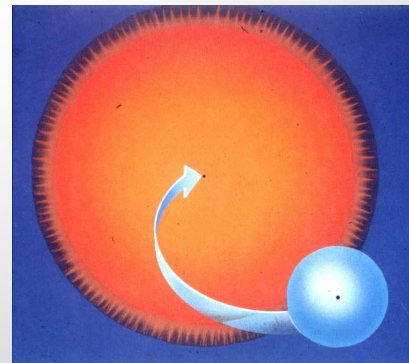
60

Struktuur van een rode (AGB) superreus van 4 Zonsmassa



61

Zon aan eind van H → He fusie en He → C fusie



Een pit van helium met daarin een pit van koolstof

62

AGB superreuzen pulseren

Chi Cygni



63

Ring-nevel: het einde van een lichte ster



64



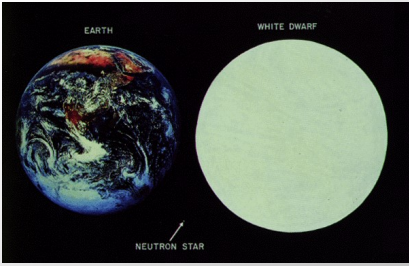
65

nevels van uitgestoten buitenlagen



66

Witte dwergen



Gemiddelde witte dwerg

1000 x zwakker dan de zon

Zo groot als de aarde

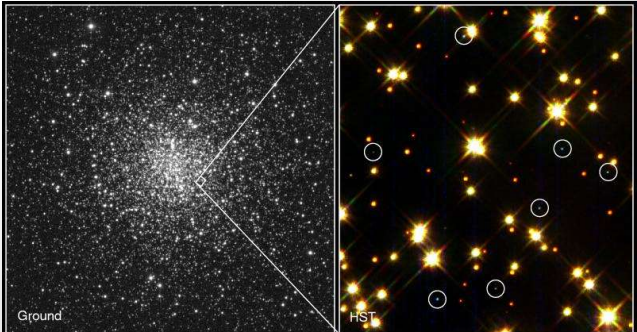
Zo zwaar als 500 000 aardes

Dwz: een witte dwerg weegt 1000 kg/cm^3 !!

67

67

Witte dwergen in een sterhoop



White Dwarf Stars in M4

PRC95-32 · ST ScI OPO · August 28, 1995 · H. Bond (ST ScI), NASA

HST · WFPC2

68

68



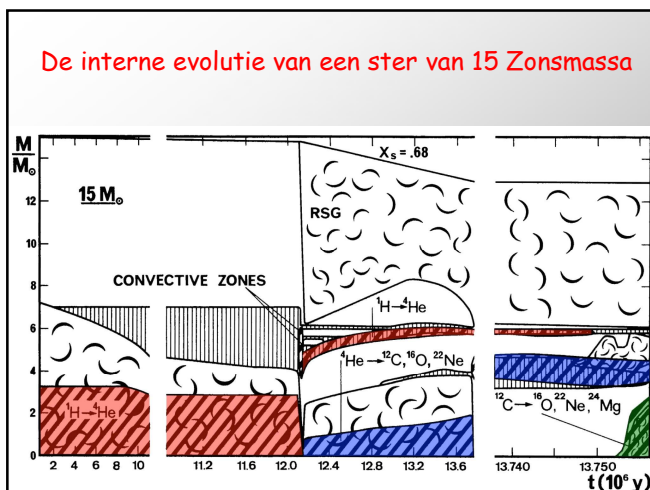
69

Belangrijkste fusie reacties in zware sterren (meer dan 8 Zonsmassa)

Fusie	Reactie	Massa-defect	Temperatuur(C)
H → He:	4H → He	0.7%	10 miljoen
He → C :	3He → C	0.07%	100 miljoen
C → O :	C + He → O	0.05%	300 miljoen
C → Ne:	C + C → Ne	0.05%	600 miljoen
O → Si :	O + O → Si	0.03%	1 miljard
Si → Fe :	Si + Si → Fe	0.03%	3 miljard

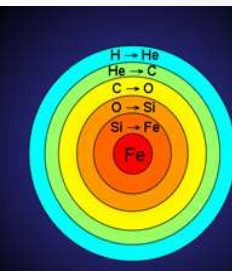
70

70



71

De structuur van een ster van 25 Mzon aan het eind van zijn leven



For a 25 solar mass star:

Stage	Duration
H → He	7×10^6 years
He → C	7×10^5 years
C → O	600 years
O → Si	6 months
Si → Fe	1 day
Core Collapse	1/4 second

Als hij ondertussen geen massa zou hebben verloren
Maar zware sterren verliezen veel massa in een sterrenwind!!

72

72



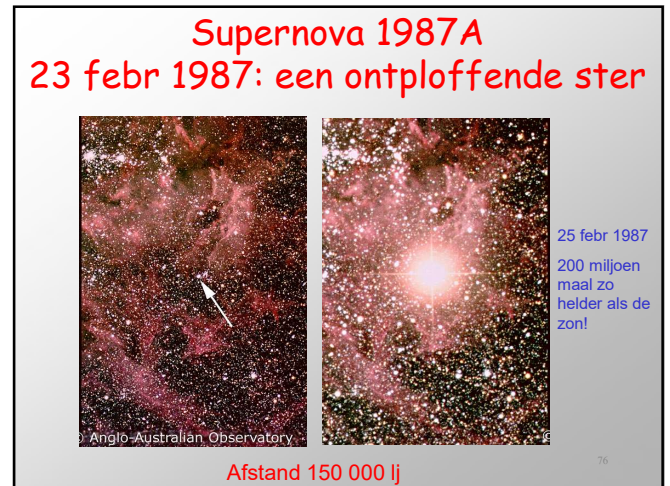
73



74



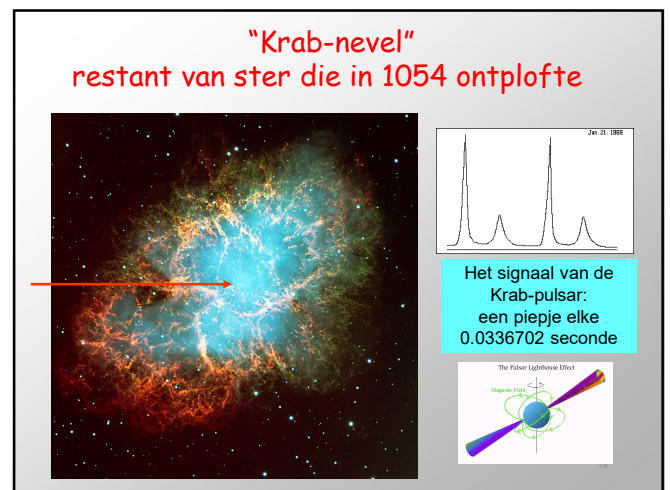
75



76

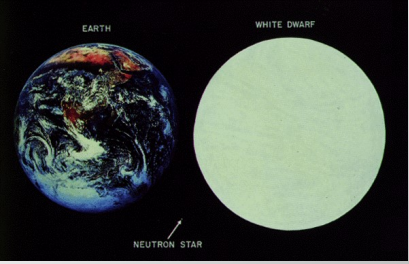


77



78

Neutronen ster



Gemiddelde neutronen ster

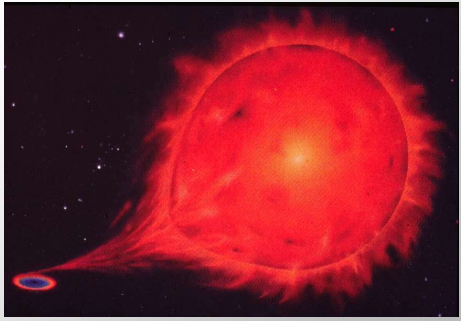
Grootte: 20 km

700 000 maal zo zwaar als de aarde

100 miljard kg/cm^3 !!

79

Een zwart gat in een dubbelster



Een zwart gat is geen gat !!!
Het is een ster die zo zwaar is dat zelfs het licht niet kan ontsnappen !

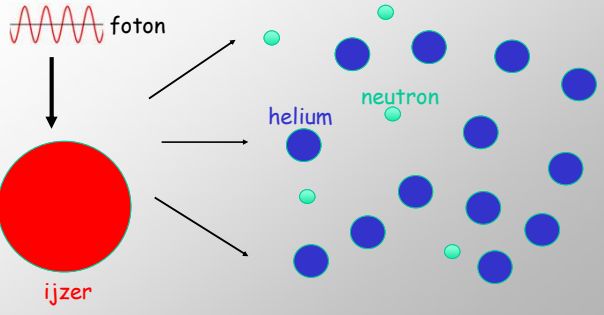
80

De vorming van elementen zwaarder dan ijzer (Fe)

Dit gebeurt tijdens de implosie van de kern en de explosie van de buitenlagen:
Door neutronenvangst

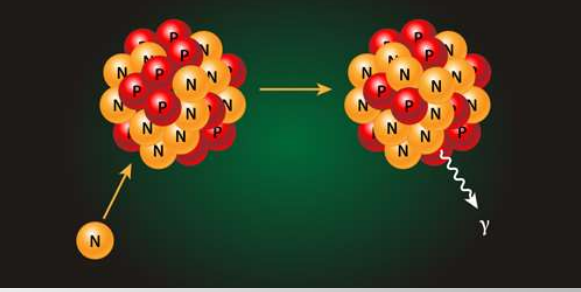
81

Als T hoger wordt dan 10 miljard C, dan hebben fotonen energie genoeg om ijzer atomen af te breken:
in 13 helium deeltjes en 4 neutronen



Dit produceert veel vrije neutronen en helium kernen
→ kogelregen op kernen van andere atomen !

82

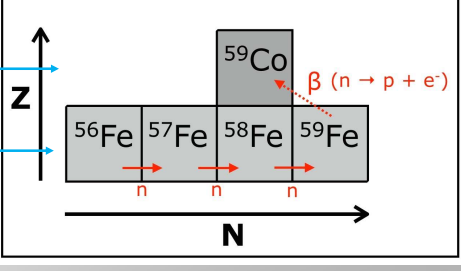


neutronen en helium bombardement produceert heel zware atomen: bijv lood, goud, zilver uranium, plutonium enz.

83

De vorming van zware elementen tijdens de supernove explosie

Neutronen vangst



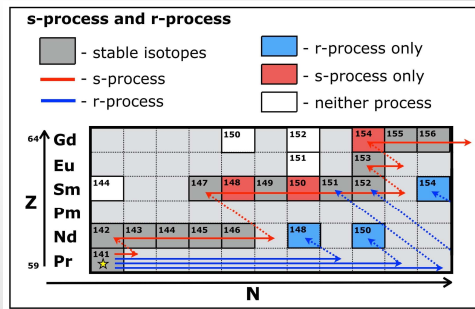
Cobalt: 27 protonen

IJzer: 26 protonen

$\beta (n \rightarrow p + e^-)$

84

Vorming van zware elementen door neutronenvangst



Karakteristieke elementen voor langzame neutronenvangst:
Lood, Barium, Zirconium, Strontium,

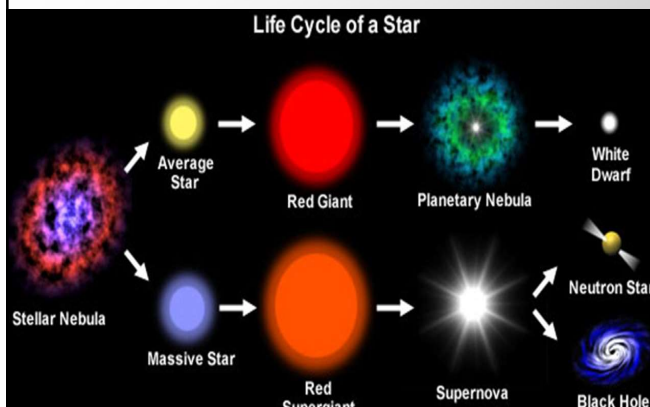
Karakteristieke elementen voor snelle neutronenvangst:
Goud, Platinum, Europium, Xenon

85

Chemische verrijking van het heelal door sterren

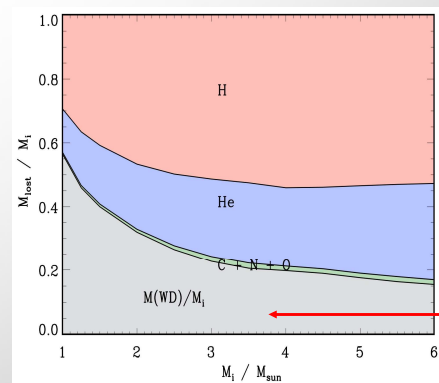
86

Levens cyclus van lichte en zware sterren



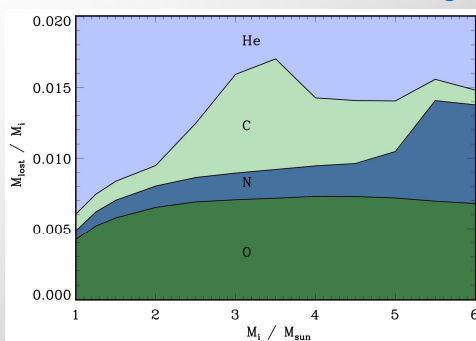
87

Chemische opbrengst van lichte sterren in fractie van hun begin massa



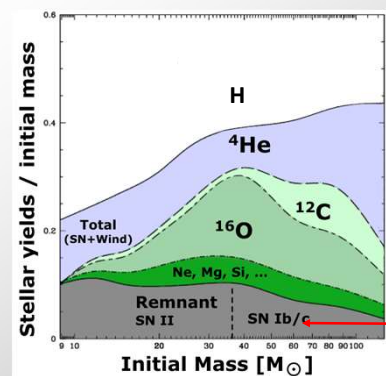
88

Chemische opbrengst van lichte sterren koolstof, stikstof, zuurstof uitvergroot



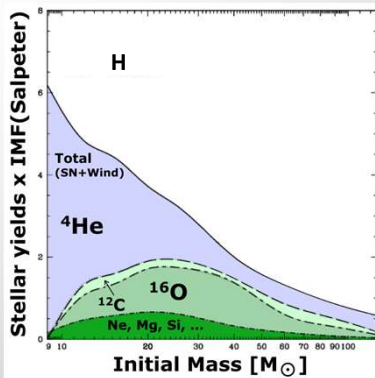
89

Chemische opbrengst van zware sterren in fractie van de begin massa



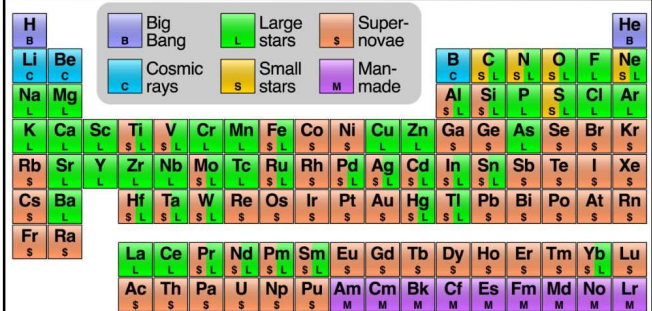
90

Chemische opbrengst, rekening houdend met het relatieve aantal sterren



91

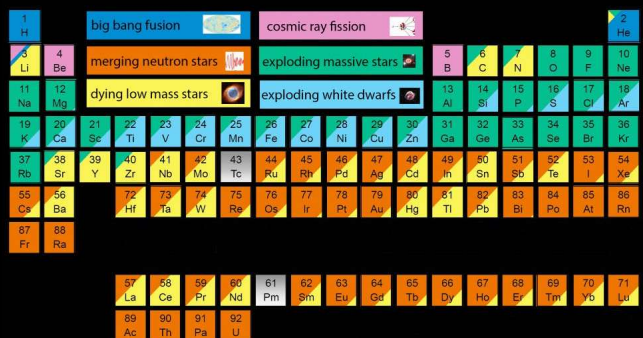
Oorsprong van elementen



Voorspelling voor enkelvoudige sterren !!

92

Oorsprong van de elementen



Rekening houdend met dubbelster evolutie

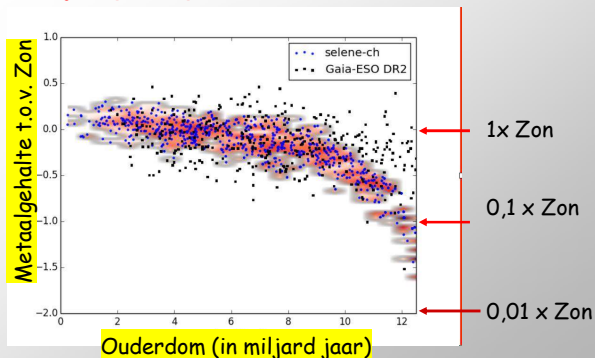
93

Waar komt het vandaan?

- H: voornamelijk uit Big Bang (75%)
wordt afgebroken in sterren (omgezet in He)
- He: voornamelijk uit Big Bang (25%)
bijgemaakt door fusie in sterren (sterwinden)
- C: voornamelijk uit lichte sterren (sterwinden)
maar ook uit zware sterren (supernovae)
- O: voornamelijk uit zware sterren (supernovae)
- N: voornamelijk uit half-zware sterren: 2 - 10 $M_{\odot}$
- Ne, Mg, Si, P: van zware sterren (supernovae)
- IJzer en zwaarder: tijdens de supernova explosie

94

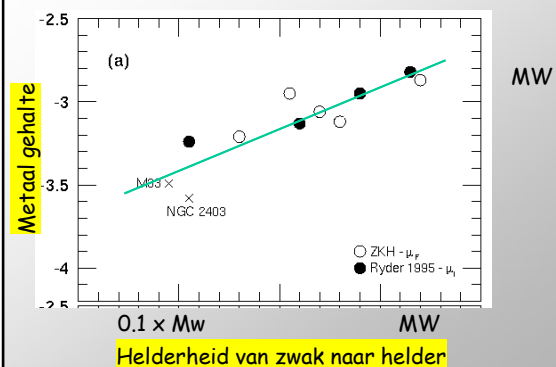
Verrijking hangt af van ouderdom van ster



Tussen 12 en 9 miljard jaar geleden is de verrijking heel sterk geweest. Laatste 6 miljard jaar nauwelijks.

95

Verrijking hangt af van aantal sterren in melkwegstelsel



96

Conclusies

1. Oorspronkelijk na de oerknal, bijna enkel H (75%) en He (25%)
2. De kosmos is later chemisch verrijkt door de recycling van fusieproducten in sterren
3. C is vooral gevormd in lichte sterren ($M < 2 M_{\odot}$)
O in zware sterren ($M > 10 M_{\odot}$)
N in half-zware sterren ($M \sim 2-10 M_{\odot}$)
4. IJzer en zwaardere elementen: gevormd tijdens supernova explosies
5. De meeste verrijking gebeurde tussen 12 en 9 miljard jaar geleden. Nu gaat het langzaam.

97

The End

www.hennylamers.nl

98

DE MENS TUSSEN DE STERREN
WELZIJN GEMAAKT VAN STERRENDUUR
Prof. Hanny J.G.L.M. Lamers
Sterrenkundig Instituut
Universiteit van Amsterdam
AstroBoekjes: deel 1

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

DE OERKNAL EN HET UITDIJEND HEELAL
OP ZOEK NAAR DE OERSTROMING
Prof. Hanny J.G.L.M. Lamers
Sterrenkundig Instituut
Universiteit van Amsterdam
AstroBoekjes: deel 3

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

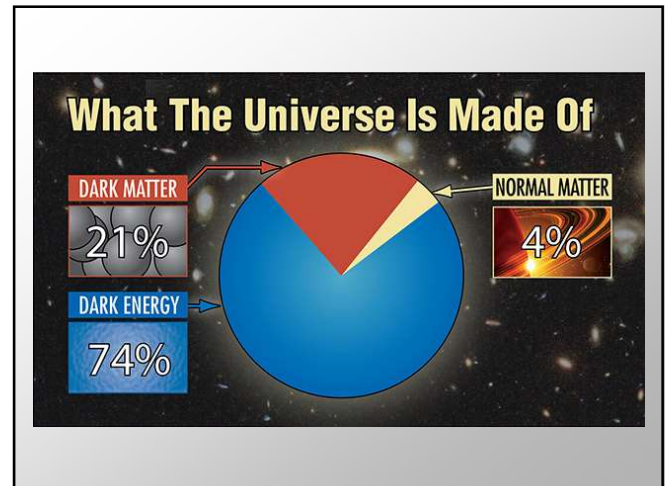
AstroBoekjes

1. De mens tussen de sterren (23^e druk)
2. Hallo is daar iemand (20^e druk)
3. De oerknal en het uitdijende heelal (18^e druk)
4. Het draait allemaal om de Zon (9^e druk)

nu
euro 5.00 per stuk

Ik signeer op
verzoek

99



100