



kosmische afstands ladder

Prof. Henny J.G.L.M. Lamers
Sterrenkundig Instituut
Universiteit van Amsterdam
h.j.g.l.m.lamers@uu.nl

afstands maten in de sterrenkunde

m = meter

lj = lichtjaar = $0,946 \times 10^{16}$ m (parsec=3,26 lj)

AE = astronomische eenheid
= gemiddelde afstand aarde-zon
= 1.5×10^{11} m = 150 miljoen km
= 8.3 lichtminuten

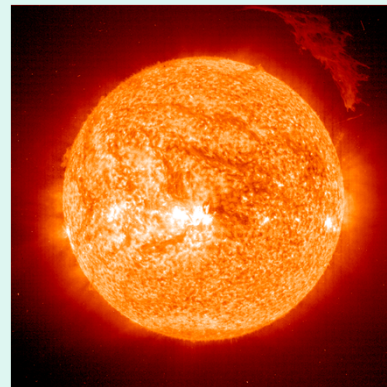
Lichtsnelheid = 3×10^8 m/s = 300 000 km/s
Lichttijd : 1 lichtseconde = 300 000 km = 7,5 x wereld rond

Onze buurman : de Maan



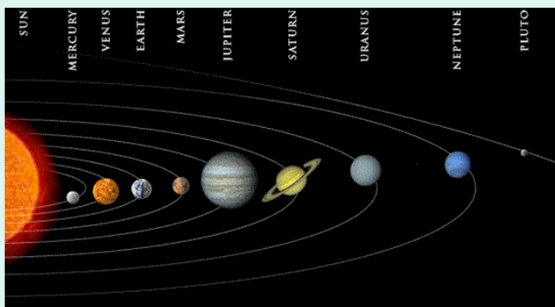
Afstand :
384000 km
=
1,3 licht
seconde

De Zon: onze ster



Afstand :
150 miljoen km
=
1 AE
=
8,3 lichtminuten

Planeten om de Zon



30 AE = $4,5 \times 10^{12}$ m = 4 licht uur

Sterren : zonnen op grote afstand



Afstand
Orion
sterren :
1400
lichtjaar

Sterrenbeeld Orion

Sterren



Sterrenbeeld Grote Beer

Sterren op verschillende afstanden van 75 tot 140 lj.
Ze horen niet bij elkaar.

Sterrenhoop : duizenden sterren op een kluit



Afstand :
25 000
lichtjaar

Diameter :
100 lichtjaar

Quintuplet cluster

Hete gasnevels : kraamkamers van sterren



Rosette nevel

Afstand :
3300
lichtjaar

Diameter :
50
lichtjaar

Andromeda melkwegstelsel:



Afstand:
2 miljoen
lichtjaar

Diameter:
100 000 lj

200 miljard
sterren
+ gasnevels

We are
here

Een reusachtig rond melkwegstelsel



M87 in Virgo

Afstand :
40 miljoen
lichtjaar

Diameter :
300 000
Lichtjaar

10 biljoen
sterren !

Quasar = quasi-stellar radio source melkwegstelsels met extreem heldere kern

Quasar
PDS456

Optische
Kern

Radiostraling
van
gasbundels



Afstand
3 miljard
Lichtjaar

Lengte van
Radiobundels
150 000 lj

Een zwerm van melkwegstelsels

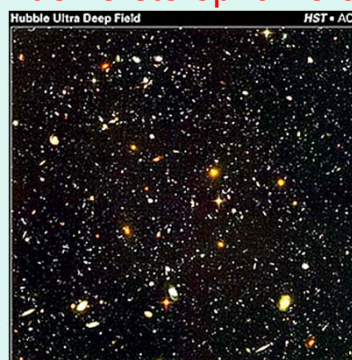


Afstand :
2,5 miljard
lichtjaar

Diameter :
2 miljoen
lichtjaar

Duizenden
melkweg-
stelsels op
een kluit

Hubble Ultra Deep Field de verste opname ooit gemaakt



Oppervlak :
0.1 x volle maan

Aantal
melkwegstelsels
ca 10 000

Verste objecten :
11 miljard lichtjaar

Hoe meten we afstanden

1. radar reflectie : planeten
2. parallax methode: sterren (tot ~3000 lj)
3. standaard kaarsen: melkwegstelsels
4. roodverschuiving: tot diep in heelal

1. Radar reflectie metingen



Pluton radar telescope
1960 USSR

Zendt korte radar puls uit en meet
tijdsverschil tussen zenden en echo.
Vaak heel zwak ruisig signaal.

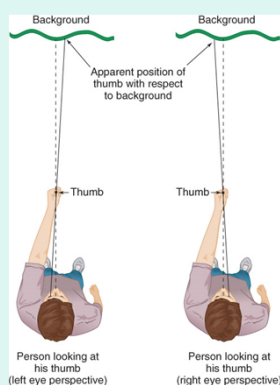
Historie

Maan : 1946
Venus : 1961
Rest : later gemeten

Heden

Gebruikt voor detectie van asteroiden
(aardscheiders) en kometen.
Minimum afmeting: 1 km op 1 AE
kleiner voor nabije asteroiden

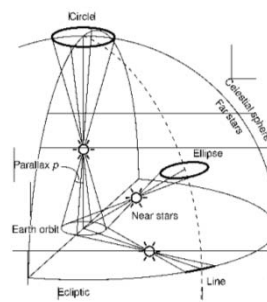
2. parallax methode met 2 ogen



Hoe verder de duim, hoe
groter de verplaatsing t.o.v.
achtergrond.

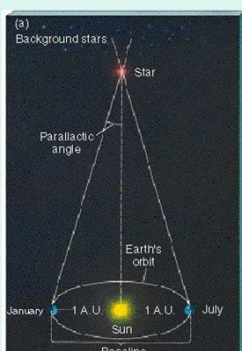
Nauwkeurigheid (de mijne!):
7 cm oogafstand,
parallax op 120 meter
nog te zien.

=>
Hoekmaat: $7/12000$ radialen
= ~ 2 boogminuten
= ~120 boogseconde



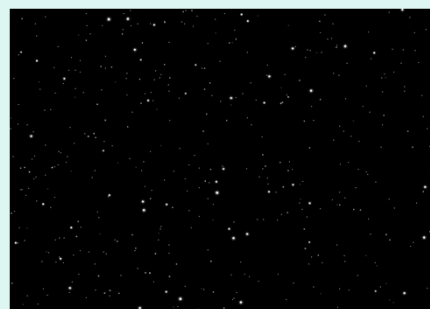
De twee
tijdstippen van
meting van de
parallax-hoek
hangen af van de
richting waarin de
ster staat, t.o.v. de
baan van de
aarde om de zon

Astronomische parallax: afstanden van sterren



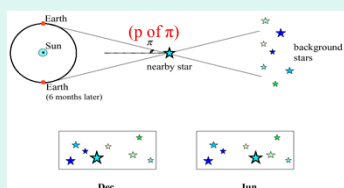
Verplaatsing van nabije ster aan de hemel, t.g.v. omloop van de aarde om de zon

Parallax (afstands) meting van sterren



Dit is sterk overdreven. In feite zijn de verplaatsingen vaak kleiner dan de lichtpuntjes.

Parallax-hoek: p (of π)



Parallax-hoek wordt uitgedrukt in boogseconde = $1/3600$ graad = $4.8 \cdot 10^{-6}$ radiaal

boogseconde = doorsnee van knikker van 1cm op afstand van 2 km!
= doorsnee van mensenhaar op afstand van 10 meter

N.B. Driehoeks meting: voor kleine hoeken geldt: tangens (p) = p (in radialen)

Afstanden van sterren parallax-methode

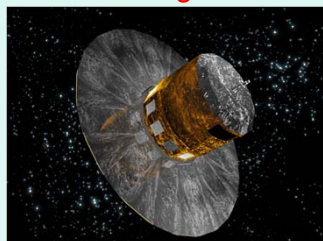


Als de parallax-hoek $p=1$ boogseconde
= $4.8 \cdot 10^{-6}$ radiaal
dan is de afstand van de ster:
 $d = 1 \text{ AE} / 4.8 \cdot 10^{-6} = 3.18 \cdot 10^{16} \text{ m}$
= 1 parsec = 3.26 lj

Als een ster y maal zover weg staat, dan is hoek p dus y maal kleiner

afstand
 $d \text{ (in parsec)} = 1/p \text{ (in boogsec)}$
 $d \text{ (in lj)} = 3.26 / p \text{ (in boogsec)}$

ESA-satelliet GAIA zal de hele melkweg in kaart brengen

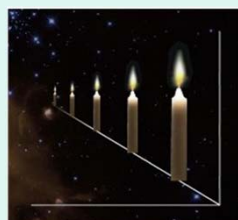


Lancering
19 dec
2013 !!

Parallax metingen met nauwkeurigheid van 10^{-5} boogsec
(= dikte van mensenhaar op 1000 km)

Dus afstanden tot 300 000 lichtjaar
Doorsnee van de melkweg = 100 000 lichtjaar

3. afstands bepaling van verre sterren "de standaard kaars methode"



Hoe zwakker je de kaars ziet, des te groter is zijn afstand

Helderheid neemt af met afstand in kwadraat

Voorbeeld: De zon als standaard kaars



8 lichtminuten



sterrenhoop: afstand onbekend

Neem het spectrum van sterren. Als een ster hetzelfde spectrum heeft als de zon, dan kun je aannemen dat die ster ook evenveel licht uitzendt als de zon. Dan geldt:

$$F_{\text{ster}} / F_{\text{zon}} = (d_{\text{zon}} / d_{\text{ster}})^2$$

$$d_{\text{ster}} = d_{\text{zon}} \times (F_{\text{zon}} / F_{\text{ster}})^{1/2}$$

De Zon is dan je "standaard kaars"

Afstand via andere standaard kaarsen

Je kunt ook andere standaardkaarsen gebruiken dan de zon. In feite kun je **elk type sterren** gebruiken, als je van 1 ervan de helderheid en de afstand kent.

Dit heet: **spectroscopische afstands bepaling**

1. sterren met gemeten parallax

Voorbeeld : de poolster staat op een afstand van 780 lj (parallax) en is in zichtbaar licht 5900 x zo helder als de zon.

Je kunt dan ook de poolster als standaard kaars gebruiken voor grotere afstanden !

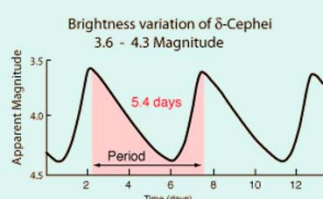
2. sterren in een sterhoop

waarvan je de afstand kent door de zon als standaard kaars te gebruiken.

Alle sterren van die sterhoop staan op dezelfde afstand. Dus je kunt **elk type** ster in die sterhoop dan als standaard kaars gebruiken voor verdere afstanden.



3a. Cepheiden en RR Lyrae variabelen: ideale standaard kaarsen



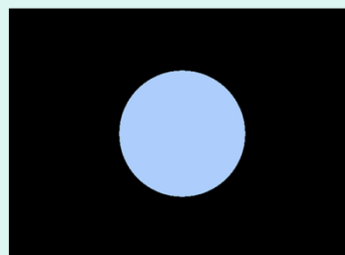
Delta Cephei

Variaties in helderheid: factor 2,3

Periode van variaties: 5,4 dagen

Cepheiden en RR Lyrae sterren vertonen periodieke helderheids veranderingen doordat ze "pulseren". Hun lichtkromme heeft een karakteristieke zaagtand vorm, dus ze zijn gemakkelijk te onderscheiden van andere variabele sterren.

Cepheide = pulserende ster



Pulsatie periode : 2 tot 50 dagen
Uitzet snelheid : ca 10 tot 40 km/s
Straal variaties : ca 10 a 25 %

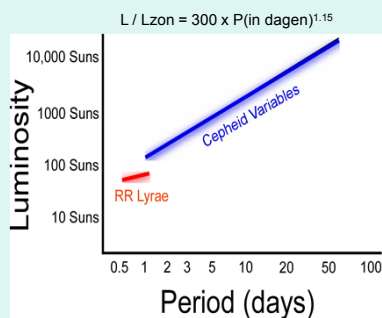
RR Lyrae sterren vertonen dezelfde pulsaties, maar zijn kleiner en lichter, en pulseren sneller. Ze zijn in een ander evolutie stadium

Periode –helderheids relatie van Cepheiden en RR Lyrae sterren

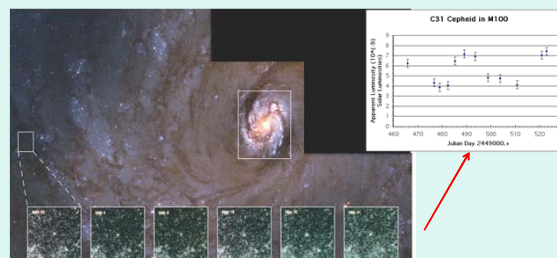
Harietta Leavitt
1868 - 1921



Ontdekte 2400 variabele sterren. In 1912 ontdekte ze dat er een relatie was tussen de periode en de hoeveelheid licht die ze uitstralen.



De afstand tot Melkwegstelsel M100 bepaald m.b.v. 12 Cepheiden



Afstand = 56 +/- 6 miljoen lichtjaar

Deze methode werkt nu voor sterren die 10⁻¹² maal zo zwak zijn als Sirius

Zie www.astroex.org voor scholieren project !

4. Roodverschuiving van Melkwegstelsels: De Hubble wet



Vesto Slipher
1875–1969



Edwin Hubble
1889–1953



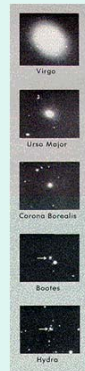
100 inch telescoop
op Mount Wilson

Slipher (1912) ontdekte dat sterrenstelsels van elkaar wegvliegen

Hubble (1929) bepaalde hun afstand en vond een relatie

Het heelal dijt uit!

Hubble bepaalde de afstand van 34 stelsels



78 000 000 lj

1 000 000 000 lj

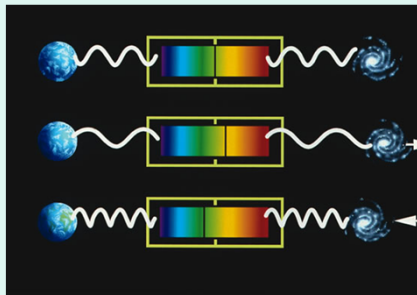
1 400 000 000 lj

2 500 000 000 lj

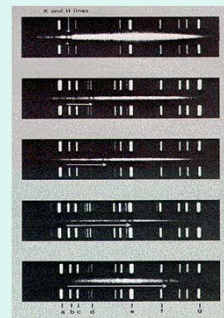
3 900 000 000 lj

1. Hoe zwakker: des te verder weg
2. Meest nabije stelsels: afstanden uit Cepheiden perioden
3. Nabije melkwegstelsels als standaard kaars voor verdere: veronderstel dat de melkwegstelsels ongeveer even helder zijn, dan volgt uit hun gemeten helderheid de afstand.

Het Doppler-effect in spectra van melkwegstelsels



Vesto Slipher (1912) ontdekte dat de absorptielijnen in het spectrum van melkwegstelsels allemaal rood-verschoven zijn



Spectra van 5 van de 34 melkwegstelsels die Hubble onderzocht.

Absorptie lijnen (o.a. Ca+) zijn verschoven naar het rood = naar langere golflengte (zie pijl)

Uit Doppler formule
 $v = c (\Delta\lambda / \lambda_0)$
volgt de snelheid

Hubble's ontdekking dat het heelal uitdijt



afstand

snelheid

78 000 000 lj

1200 km/s

1 000 000 000 lj

15 000 km/s

1 400 000 000 lj

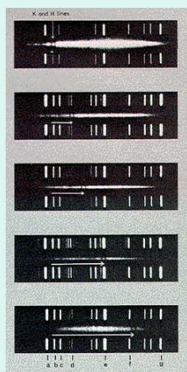
22 000 km/s

2 500 000 000 lj

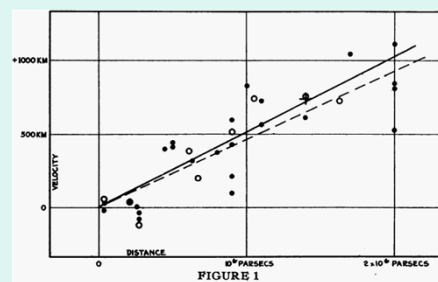
39 000 km/s

3 900 000 000 lj

61 000 km/s

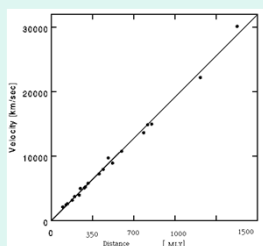


Hubble diagram (1929)



Hoe groter de afstand, des te groter de snelheid

Hubble diagram: moderne versie



Hubble wet: $v(\text{km/s}) = (21.5 \pm 0.4) \times d \text{ (Mlj)}$

$21.5 \pm 0.4 \text{ km/s per Mlj} = \text{Hubble constante} = H$

Dus als je van een ver onbekend object de snelheid kunt meten met Doppler effect, dan kun je hiermee de afstand bepalen!
Geen standaard kaars meer nodig !!

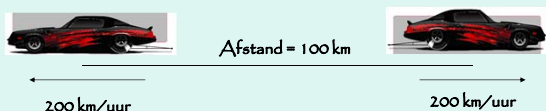
De leeftijd van het heelal

ofwel

Hoe lang geleden was de Oerknal?



38



Wanneer zijn ze gestart?

Afstand van elkaar nu = 100 km

Snelheid waarmee ze zich van elkaar verwijderen = 400 km/uur

Vertrokken $100/400 \text{ uur} = 15 \text{ min geleden!}$

39

ons
melkwegstelsel



Sterrenstelsel



Afstand = 1,0 miljard
lichtjaar

21500 km/sec

Uitdijing begon: $1,0 \text{ miljard lj} / 21500 \text{ km/s} =$
 $9.45 \cdot 10^{24} \text{ m} / 2.15 \cdot 10^9 \text{ m/s} =$
 $4.39 \cdot 10^{17} \text{ sec} =$
 $14.0 \text{ miljard jaar (ongeveer)}$

Oerknal was 13.80 ± 0.04 miljard jaar geleden!

40

Leeftijd van heelal uit de Hubble constante (in formules)

Hubble wet : $v = H \times d$

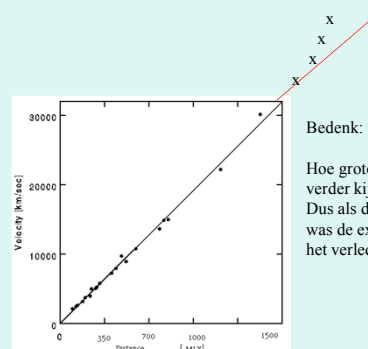
Hubble constante: $H = 21.5 \text{ km/s per Mlj}$

Dus $d = v / H$

Ook $d = v \times t$ (bij constante snelheid)

Dan volgt $t = 1 / H$

En op nog grotere afstanden ?

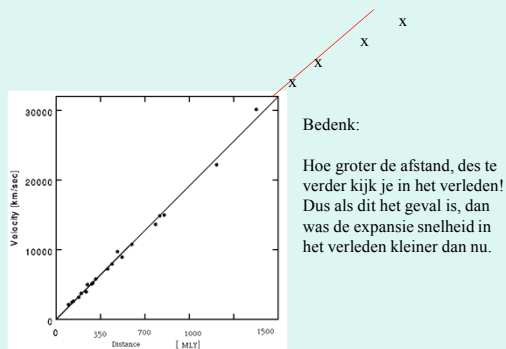


Bedenk:

Hoe groter de afstand, des te verder kijk je in het verleden!
Dus als dit het geval is, dan was de expansie snelheid in het verleden groter dan nu.

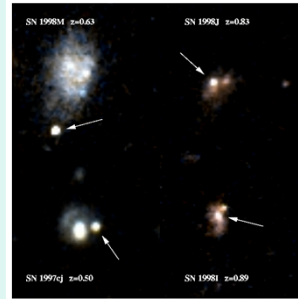
Als dit gemeten wordt dan wordt de uitdijing kennelijk "vertraagd".

En op nog grotere afstanden ?



Als dit gemeten wordt dan wordt de uitdijing kennelijk "versneld".

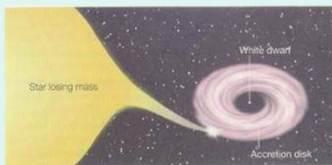
Supernovae Type Ia de helderste standaard kaarsen



Supernova Ia zijn tijdens maximum bijna even helder als hun melkwegstelsel

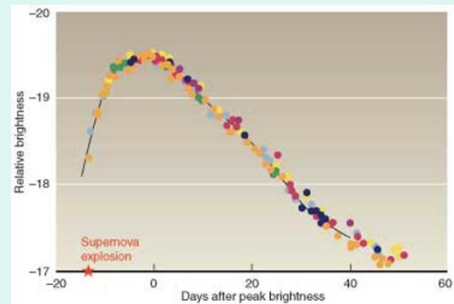
Explosie t.g.v. instorten van witte dwerg tot neutronen ster.
Dit gebeurt bij een vaste massa, daarom zijn de explosies even helder = ideale standaard kaars

Supernova type Ia: exploderende witte dwerg



1. Er is een maximum massa van witte dwergen: ca $1,2 M_{\odot}$. Als een WD zwaarder is dan die grens, dan stort hij in, gevolgd door een enorme explosie van de buitenlagen.
2. Een WD in een nauwe dubbelster kan gas van zijn begeleider invangen. Daardoor neemt zijn massa toe. Als de massa de kritische grens bereikt dan explodeert de ster.
3. Alle witte dwergen die gas invangen van hun begeleider exploderen bij precies dezelfde massa.
4. Daarom zijn die explosies even helder en zijn het prima standaard kaarsen.

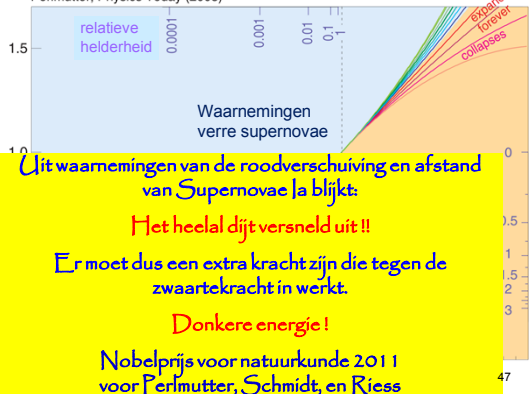
De lichtkrommen van supernovae Ia



Tijdens maximum stralen SN Ia 10^{10} x zo helder als de zon !
dus je kunt ze zien tot heel grote afstanden.
Metingen tot 9 miljard lj.

De expansiegeschiedenis van het Heelal

Perlmutter, Physics Today (2003)



Belang van de afstands ladder:

1. Bepaling van afstand van objecten
2. Daaruit kun je dan afleiden hoeveel licht ze uitzenden (astrofysica)
3. Op grote afstanden kijk je terug in verleden (historie van heelal)

The End

dank U voor Uw aandacht

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

49

Gast-lessen

Op verzoek geef ik gast-lessen over sterrenkunde aan scholen.
Mogelijke onderwerpen:

- Het draait allemaal om de Zon: ontstaan en inhoud van ons zonnestelsel
- De mens tussen de sterren: wij zijn gemaakt van sterrenstof
- Hallo, is daar iemand?: speuren naar leven in het heelal
- Exoplaneten: op zoek naar tweeling aarde
- Botsende melkwegstelsels: kosmisch vuurwerk
- De oerknal en het uitdijend heelal: op zoek naar de oorsprong
- Het nieuwe heelal: de mooiste resultaten van de Hubble Telescoop

Maar U mag ook zelf een onderwerp kiezen.

Hebt U interesse, laat het me weten.

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

Boek

- Wie een goed naslag boek wil hebben, en iets meer van sterrenkunde te weten kan ik aanraden:
- **In Quest of the Universe (6^e edition)**
Theo Koupelis, Jones and Bartlett Publ.
ISBN 978-0-7637-6858-4
paperback met CD en filmpjes.
- Dit boek is up to date, vrij volledig en goed geïllustreerd.
Het boek op het niveau van eerste-jaars USA studenten (ongeveer eind VWO)
Er staan ook opgaven en experimenten in.
- Het boek kost € 49.99 bij www.bol.com
- (Om de programma's te krijgen (electronisch) moet je misschien een US plaats en postcode opgeven. In dat geval gebruik: plaats = Madison, staat is Wisconsin, zip= 53706)

Brochures

- Wie geïnteresseerd is in eenvoudige (zonder formules) en heldere brochures over een paar specifieke onderwerpen kan ik aanraden:
- **De mens tussen de sterren**,
Henny Lamers, ISBN 978-90-812797-1-0 (11^e druk)
- **Hallo is daar iemand: speuren naar leven in het heelal**
Henny Lamers, ISBN 978-90-812797-2-7 (8^e druk)
- **De oerknal en het uitdijend heelal**, Henny Lamers,
ISBN 978-90-812797-0-3 (5^e druk)
- De boekjes zijn door mij uitgegeven in eigen beheer. Ze hebben A5 formaat, ca 24 blz, geïllustreerd in kleur en zijn verkrijgbaar tegen de drukkosten = € 5.00 per stuk, plus porto. Te bestellen bij h.j.g.l.m.lamers@uu.nl