

Melkwegstelsels

Bouwstenen van het Heelal

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

Walrecht cursus, EVOLUTIE, 22 mei 2024



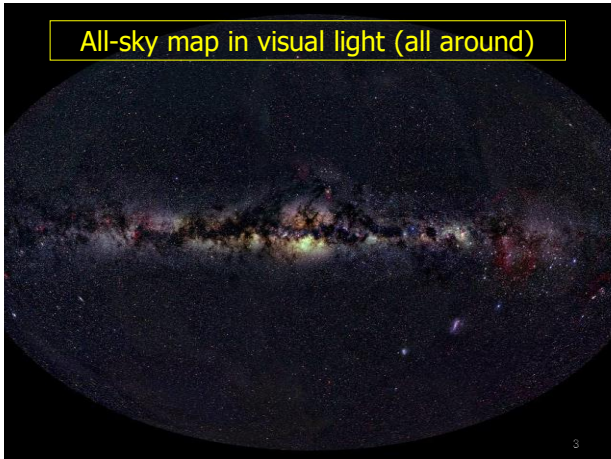
1

De Melkweg aan de hemel



2

All-sky map in visual light (all around)



3

Het Andromeda sterrenstelsel lijkt veel op onze Melkweg



Afstand 2 miljoen lichtjaar, diameter 100 000 lichtjaar

4

Spiraal stelsels



NGC 1232, $d=61$ Mlj
Boven-aanzicht van een
spiraal stelsel

NGC 4013, $d = 55$ Mlj
Zij-aanzicht van een
spiraal stelsel

5

Een melkwegstelsel op zijn kant



Afstand :
30 miljoen
lichtjaar

Diameter :
100 000
lichtjaar

Dikte :
3000
lichtjaar

NGC 4565

6

5

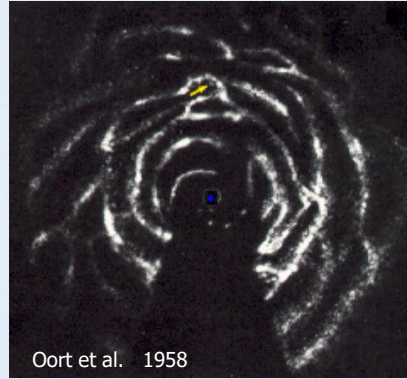
6

Onze Melkweg

7

7

De spiraal structuur van onze Melkweg



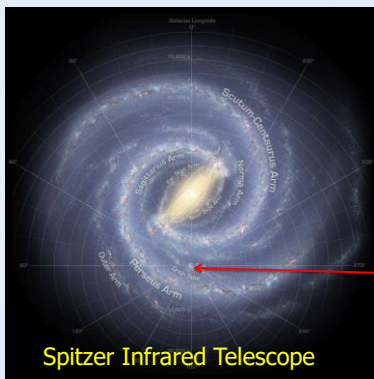
Oort et al. 1958

De ligging van gaswolken in MW-vlak. Voor het eerst in kaart gebracht met metingen van de radio telescoop van Dwingeloo in 1958 !



8

Huidig model van spiraal structuur van onze MW een centrale balk met spiraal-armen



Churchwell et al. 2005

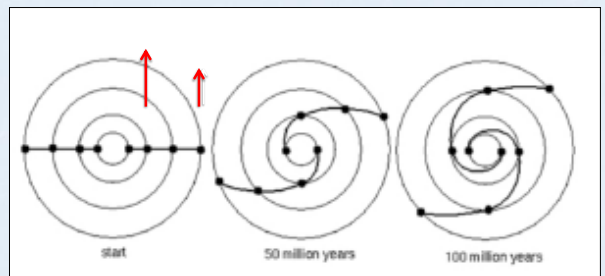
Zon

9

9

1. Stel je begint met een rechte structuur
2. De binnengebieden draaien sneller dan de buitengebieden (net als in planetenstelsel)

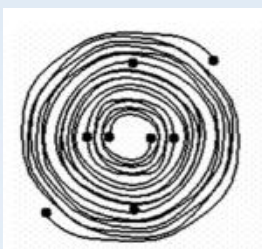
$$P \sim r^{3/2} \text{ of } v \sim r^{-1/2}$$



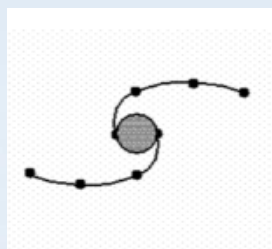
Zo zouden spiraalarmen kunnen ontstaan, maar...

11

11



Na een miljard jaar zou de spiraal heel sterk zijn opgewonden !!



Maar na 12 miljard jaar zien we zo iets!

Dus spiraalarmen zijn geen opgewonden slierten !!

12

Spiraal armen zijn golfpatroon



Golfpatroon in stilstaand water



Golfpatroon in bewegend water

13

13

Het golfpatroon in een roterende gasschijf waar de binnendelen sneller draaien dan de buitendelen is spiraal-vormig.

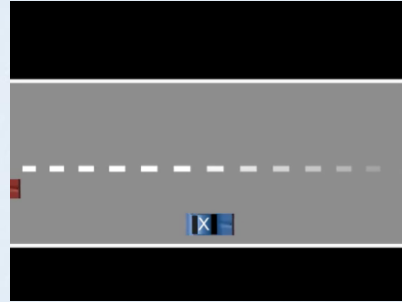
De spiraal armen van melkwegstelsels zijn **dichtheidsgolven.**

(ongeveer als geluidsgolven in de lucht)

14

14

Ontstaan van dichtheidsgolf bij politie auto

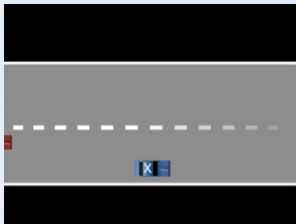


Filmpje uit: In quest of the Universe

15

15

Ontstaan van dichtheidsgolf bij politie auto

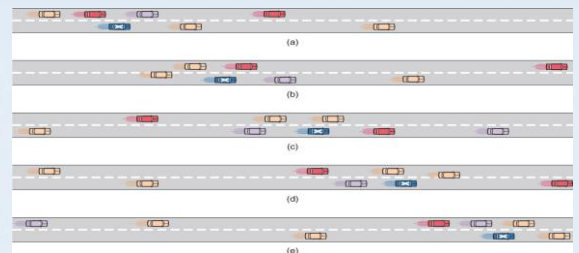


De verdichting is altijd bij de politie auto, maar het zijn steeds andere auto's !!
Iedere auto remt alleen maar even tijdelijk en gaat dan weer met de oorspronkelijke snelheid verder.

Filmpje uit: In quest of the Universe

16

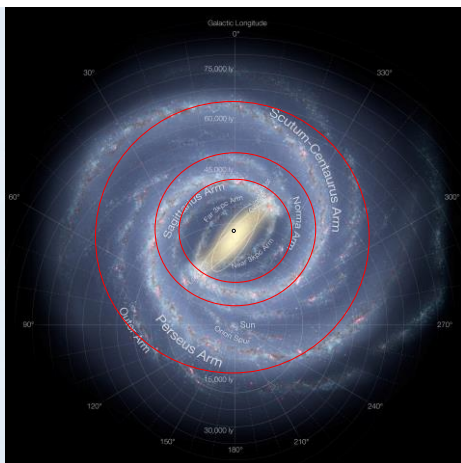
16



De auto's blijven niet in de verdichting: ze remmen even af en gaan dan weer verder. Dus in de dichtheidspiek zitten steeds andere auto's !
Dit zou ook gelden als de politiewagen stil staat, of als hij langzaam rijdt, of achteruit rijdt !

17

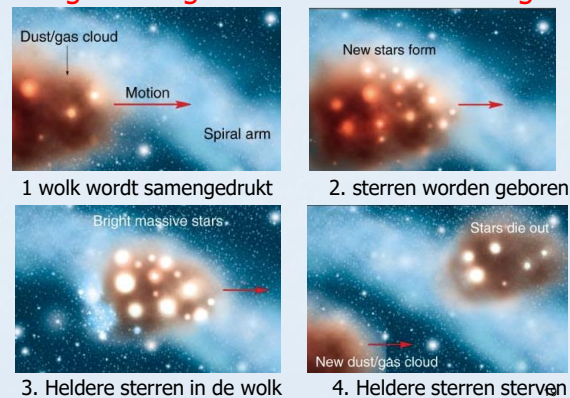
17



18

18

Een gaswolk gaat door een dichtheidsgolf



1 wolk wordt samengedrukt

2. sterren worden geboren

3. Helderere sterren in de wolk

4. Helderere sterren sterven

19



20



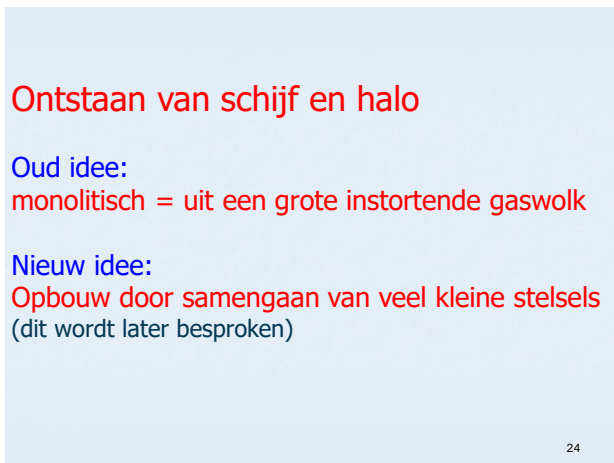
21



22



23



24



26

Vraag:

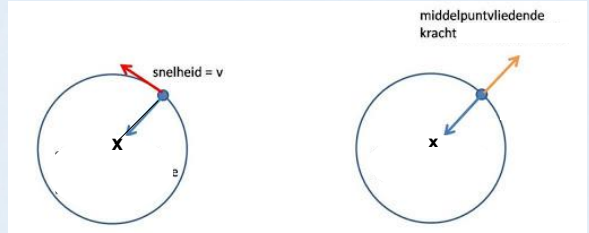
Hoe meet je de massa van een object ?

Antwoord:

Kijk of er iets omheen draait en bestudeer met welke snelheid en op welk afstand dat gebeurt.

27

Voorbeeld: balletje aan een elastiek

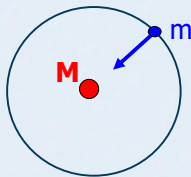


De middelpunt vliedende kracht is gelijk aan de trekkracht van het elastiek

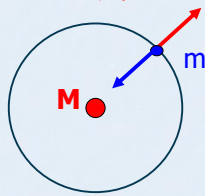
28

Planeet om de Zon

zwaartekracht
 $G M m / r^2$



middelpuntvliedende kracht
 $m v^2 / r$

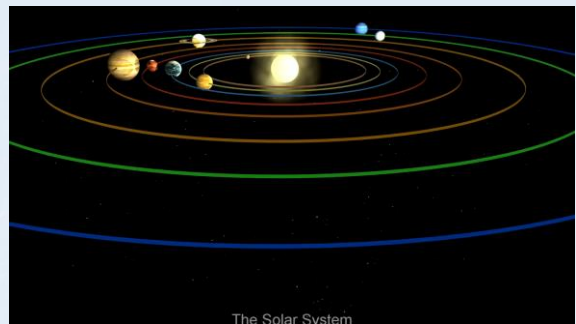


De middelpuntvliedende kracht is gelijk aan de zwaartekracht (aantrekkingskracht) door de massa M van de Zon daardoor blijft de planeet in zijn baan: de baan wordt niet groter en niet kleiner.

29

29

Voorbeeld: Het zonnestelsel.



The Solar System

Uit de bewegingen van de planeten om de zon is de massa van de zon afgeleid: $M_{\text{zon}} = 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$

30

30

Wet van Newton voor cirkelbanen:

We hebben laten zien dat $F_{\text{mv}} = F_{\text{grav}}$
Dus $m v^2 / r = G M m / r^2$

$$M = v^2 r / G$$

ofwel

$$v = \sqrt{GM/r}$$

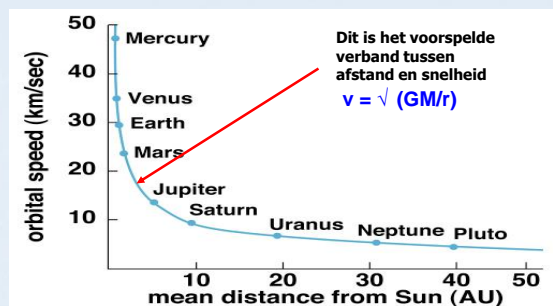
V = baansnelheid
G = zwaartekrachts constante
M = massa van ster
r = afstand = straal van de cirkelbaan

Dus je kunt de massa M van het centrale object bepalen uit de snelheid v van het object dat er omheen beweegt en de straal r van zijn baan.

31

31

De rotatiekromme van ons zonnestelsel



Uit deze snelheden volgt dan de Zon een massa heeft van $M_{\text{zon}} = 1,9892 \times 10^{30} \text{ kg} = 330\,000 \times$ zoveel als de aarde.

32

32

De rotatie kromme van de Melkweg

Wet van Newton voor cirkel beweging om een massa punt

$$V(r) = \sqrt{G \frac{M(r)}{r}}$$

or

$$M(r) = r v^2 / G$$

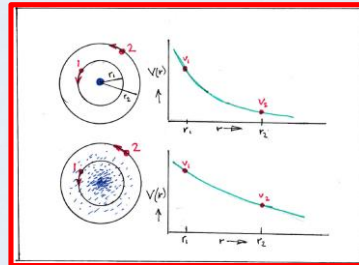
Dus uit snelheid $v(r)$ op afstand r kun je afleiden hoeveel massa $M(r)$ is in een bol binnen straal r

$$G = 6.7 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{sec}^2$$

33

De vorm van de rotatiekromme hangt af van de ruimtelijke verdeling van de massa

$$\text{want } v(r) \sim \sqrt{G M(r) / r}$$



Alle massa in het centrum

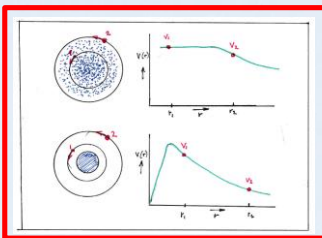
Massa verdeeld rondom het centrum

$M(r)$ is massa binnen bol met straal r

34

De vorm van de rotatiekromme hangt af van de ruimtelijke verdeling van de massa

$$\text{want } v(r) \sim \sqrt{G M(r) / r}$$



Massa ruim verdeeld

Massa in een bol van gelijke dichtheid

Voor de liefhebbers:

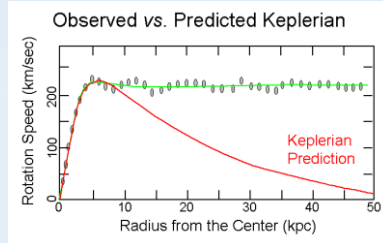
Bol met constante dichtheid: $v(r) \sim r$

Bol met $\rho \sim r^{-1/3}$: $v(r) = \text{constant}$

35

35

De rotatie kromme van de Melkweg



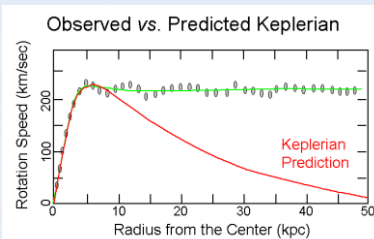
Wet van Newton : $v(r) = \sqrt{G M(r) / r}$

Rood: dit zou je verwachten uit de materie verdeling van alle waarneembare massa

36

36

De rotatie kromme van de Melkweg



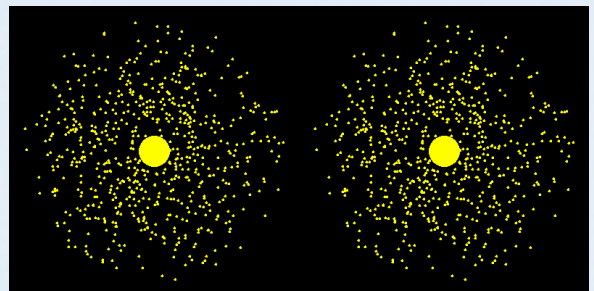
Wet van Newton : $v(r) = \sqrt{G M(r) / r}$

Conclusie: er is dus meer materie dan we kunnen zien en die is uitgebreid in en rondom het de melkweg:
donkere materie

37

37

Draaiing van sterren in het vlak van een MW stelsel schematisch



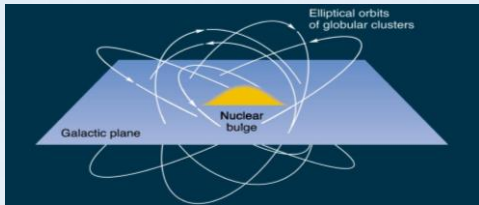
Zonder donkere materie

Met donkere materie

38

38

Uit de snelheid van sterhopen kan worden afgeleid hoe zwaar de hele MW is

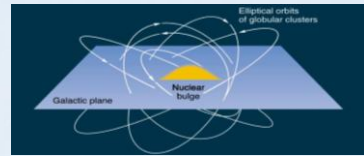


Dat blijkt 10^{12} (biljoen) M_{zon} te zijn.
Dat is ~ 5 keer meer dan alle sterren en gaswolken samen. !
We zien en kennen dus maar $\sim 20\%$ van de materie waaruit onze MW is opgebouwd.

De onbekende rest noemen we "donkere materie" 39

39

Uit de bewegingen van sterren kan worden afgeleid hoe zwaar een MW is



Men vindt voor vrijwel ALLE melkwegstelsels hetzelfde: 80 procent van hun materie is onzichtbaar

Donkere materie !

Totaal onbekend waaruit het bestaat !
80 % van de materie van het heelal is "donker" = onbekend

40

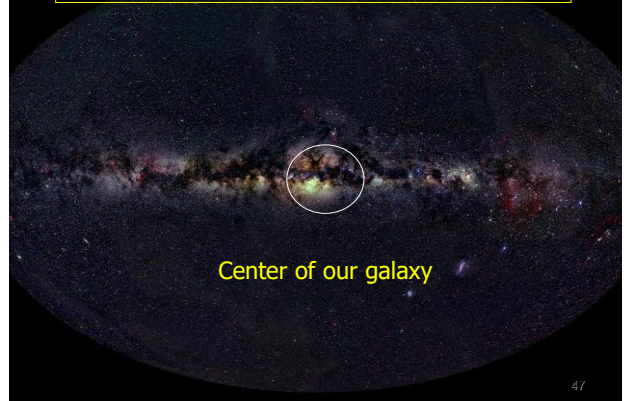
40

Het centrum van ons melkwegstelsel

46

46

Groothoek opname van de hemel



47

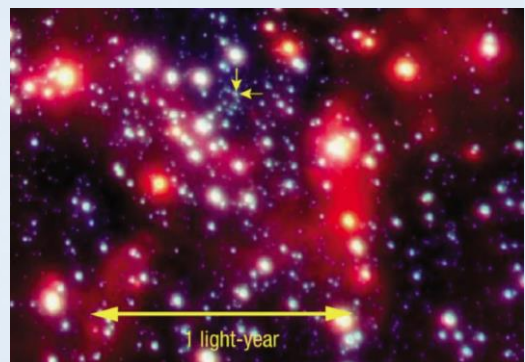
47

centrum van melkweg



48

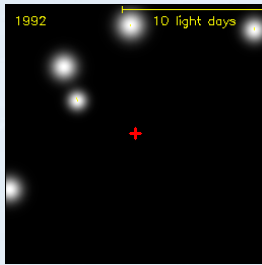
Sterren in het centrum van onze MW



49

49

aanwijzing voor een zwart gat in het centrum van onze MW



Uit de snelheid van sterren rondom de rode punt is af te leiden dat hier een zwart gat moet zitten met een massa van **3,7 Miljoen M_{zon} !**

50

50

Nobelprijs natuurkunde 2020



Roger Penrose

Reinhard Genzel

Andrea Ghez

Voor onderzoek naar Black Holes: theoretisch (Penrose) en observationeel (Genzel en Ghez)

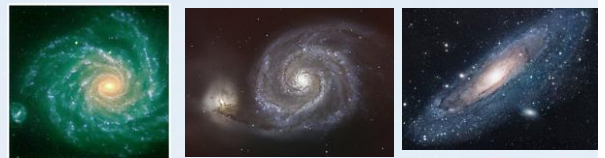
51

Soorten melkwegstelsels

54

54

Spiraal stelsel (S)



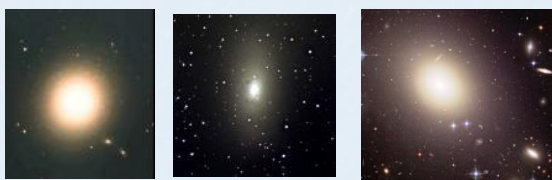
1. Sterk afgeplat
2. Jonge sterren in spiraalarmen: Stervorming gaat door.
3. Bulge alleen oude sterren
4. Zwaar: 10^{10} a 10^{12} M_{zon}
5. Groot: 100 000 lj.



55

55

Elliptische stelsels (E)

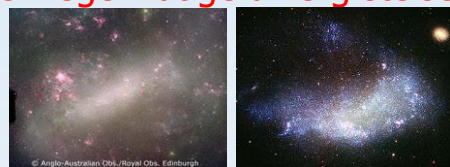


Vorm als rugby bal
Weinig structuur
Voornamelijk oude sterren: geen recente stervorming

56

56

Onregelmatige dwerg stelsels



Large Magellanic Cloud

NGC 1427



NGC 1569

Hummingbird Galaxy

Veel voorkomend, klein, 10^7 a 10^8 M_{zon}

57

57

Elliptisch reuzen stelsels



Dit zijn de grootste en zwaarste stelsels:

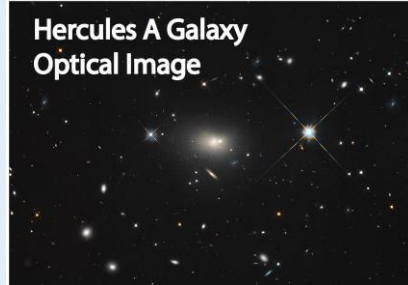
10^{14} a 10^{15} zonsmassa

Meestal in centrum van clusters van MW stelsels

M87
d= 53 Mlj

58

Hercules A



Hercules A Galaxy
Optical Image

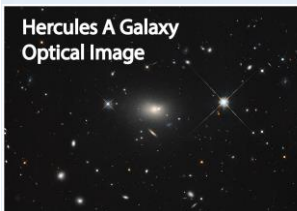
Reuzen elliptisch stelsel
Afstand 2,1 miljard lichtjaar
Massa: 1000 x onze melkweg

59

58

59

Hercules A



Hercules A Galaxy
Optical Image



Hercules A Galaxy
Radio Image

Optische straling:
Reuzen stelsel
1000 x onze melkweg

Radio straling:
Bundels van uitgestoten gas
miljoen lichtjaar lang

60

60



Optisch + radio

Een reuzenstelsel met een
zwart gat van 4 miljard x zon

61

Messier 87 een reuzen elliptisch stelsel
1000 maal meer massa dan ons eigen MW-stelsel

Afstand: 55 miljoen lj



Dit stelsel heeft een Zwart Gat van 6,5 miljard x Zon

62

62

2019: beroemde foto van het zwarte gat in M87



in centrum M87
5 miljard x zon
55 miljoen lichtjaar

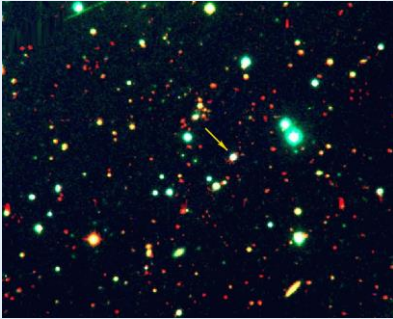


Je ziet de straling van het hete gas in de schijf rondom het zwarte gat.
Het donkere deel is binnen de waarnemings horizon

63

63

Een quasar in een cluster van MW stelsels



Quasar = Quasi Stellar Radio Source

Heel sterke radiobron die er optisch uitziet als een ster

69

69

Quasars ! quasi-stellar radio source

melkwegstelsels
met
extreem heldere kern

Optische
Kern
Radiostraling
van
gasbundels



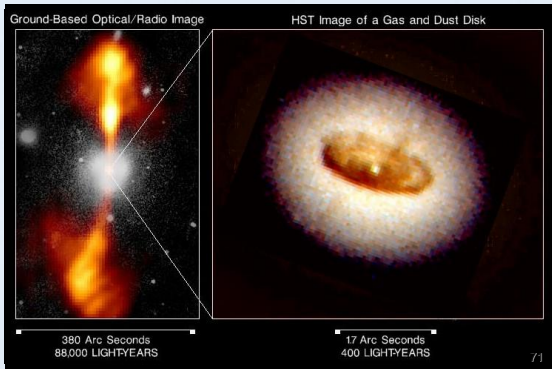
Quasar PDS456

1. Ontdekt in 1960 door Maarten Schmidt (NL)
2. Zien eruit aan hemel als sterren, maar dan op extreem grote afstand (miljarden lichtjaar)
3. Extreem helder: 1000 x helderder dan ons hele MW stelsel, $L = 10^{14} L_{\text{zon}}$!!!

70

70

Quasar PDS 456 $d=24$ Mlj



71

71

Model van een Quasar



1. Een superzwaar zwart gat in centrum (miljard zonsmassa?)
2. Materie in de buurt valt erin = spiraleert langzaam naar binnen
3. Door wrijving komt veel energie vrij in vorm van hitte; dit produceert heel veel straling.
4. Dit wordt uitgestraald in twee bundels van ca 100 000 lj lang.
5. De ingevangen materie: gaswolken, sterren, planeten

72

72

Eigenschappen van melkwegstelsels

20 % Lichtgevende materie

- sterren (ruwweg helft)
- gas en stofwolken (ruwweg helft)

80 % Donkere materie

(volledig onbekend wat het is !!!
maar het heeft wel zwaartekracht)

Massa bereik:

10^9 tot 10^{12} zonsmassa (inclusief donkere materie)

Diameter :

3000 lj (dwergstelsels) tot 100 000 lj (spiraalstelsels)

73

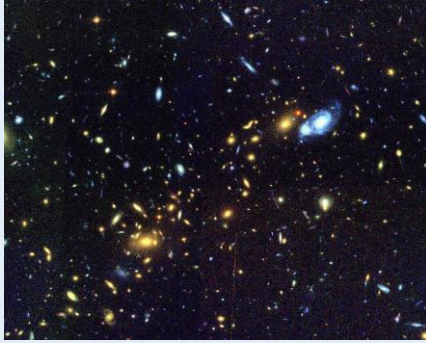
73

Clusters van melkwegstelsels

77

77

Cluster van melkweg stelsels



Cluster Abell 1056 , afstand 160 Mlj

79

79

Een cluster van melkwegstelsels



80

80

Een van de eerste Webb opnamen: zeer verre sterrenstelsels

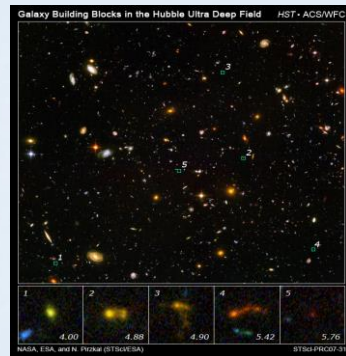


De boogjes wijzen op aanwezigheid van donkere materie die het licht van stelsels erachter afbuigt: Einstein ringen

82

85

Hubble Ultra Deep Field



Oppervlak: 1 % van volle maan
Totale belichting: 11.3 dagen
Vier filters

Duizenden stelsels op zeer grote afstand!
Vaak onregelmatige vorm.
Meerderheid veel kleiner dan ons melkwegstelsel.

Bouwstenen van zware melkwegstelsels

d=10.9 11.3 11.3 11.5 11.6 Gjr (Big bang= 13.7Gjr)

84

84

Vorming van een melkwegstelsel



Botsende Melkwegstelsels

Wat gebeurt er bij (bijna-) botsingen van melkwegstelsels?

86

86

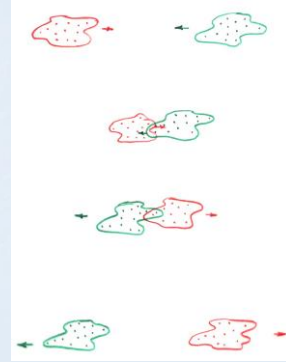
Sterren in botsende melkwegstelsels



87

87

Sterren in botsende melkwegstelsels



88

88

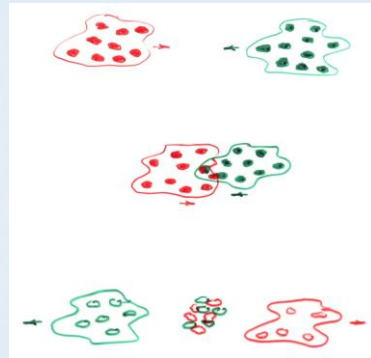
Gas wolken in botsende melkwegstelsels



89

89

Gas wolken in botsende melkwegstelsels



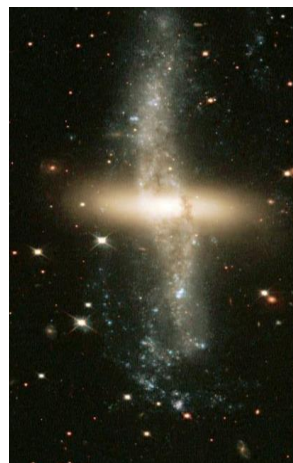
90

90



De vogelkop stelsels: stervormende gaswolken

91



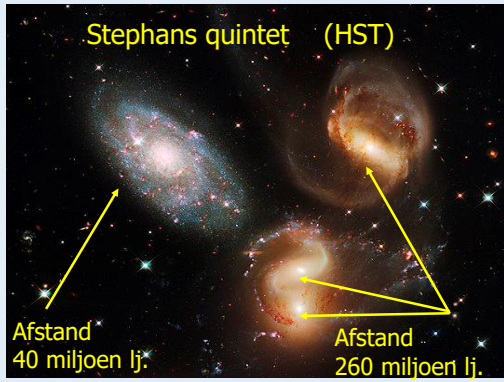
Polair Ring stelsel
=
ingevangen en
kapotgetrokken
stelsel

afstand = 130 Mljr
invang = 1 miljard
jaar geleden

92

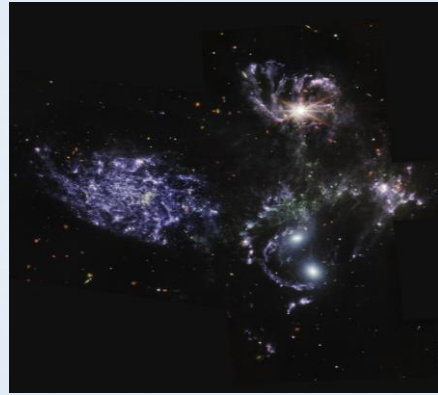
92

Botsende melkwegstelsels



94

Stephans quintet in midden IR licht



Webb

95

Een superzwaar zwart gat

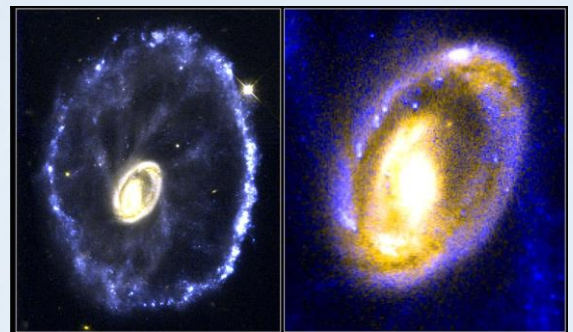


Hubble
vooral sterren



Webb
vooral stof en stervorming

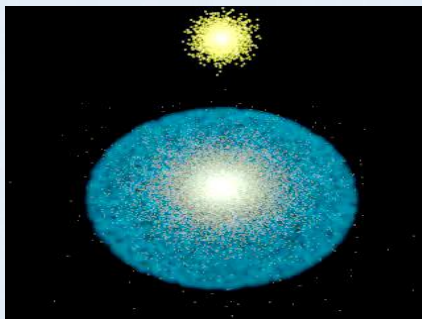
96



Cartwheel Galaxy Detail
Hubble Space Telescope - Wide Field and Planetary Camera 2

97

Numerical simulation of Cartwheel galaxy: interaction



Yellow = stars
Blue = gas

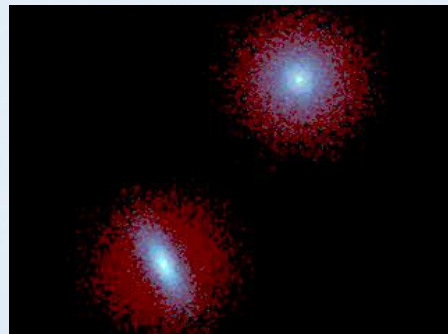
Mihos 2002
<http://burro.astr.cwru.edu/models/models.html>

98

98

Colliding galaxies with dark matter halo (red)

3D Orientation in space



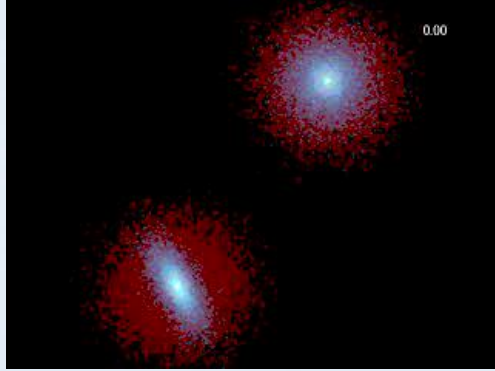
Red = dark matter

Barnes 1999

99

99

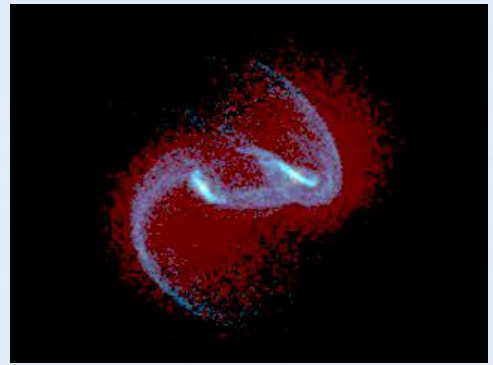
Interaction of galaxies with dark matter halo (red)



Barnes 1999 100

100

Interaction of galaxies with dark matter halo (red)



Barnes 1999 101

101

Two galaxies in the process of merging



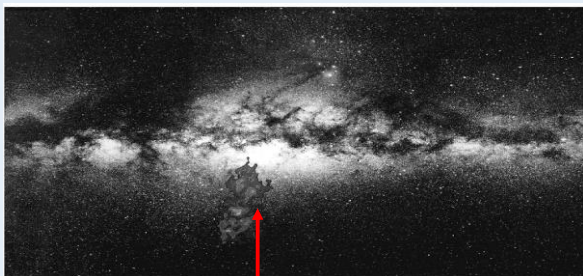
102

102

[youtube.com/watch?v=HNWyu6G8PtQ](https://www.youtube.com/watch?v=HNWyu6G8PtQ)

103

Our galaxy is NOW absorbing a very small galaxy (Sagittarius dwarf-galaxy) = cannibalism

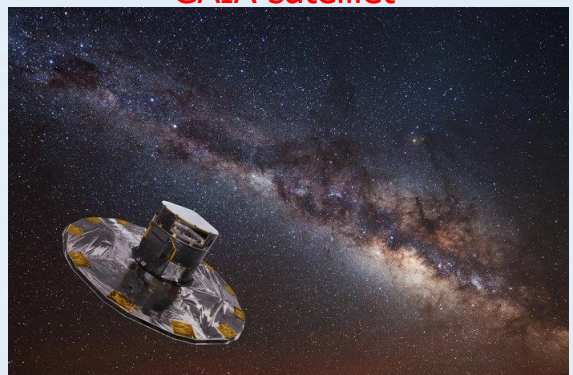


Sagittarius dwarf galaxy:
discovered on infrared
images

104

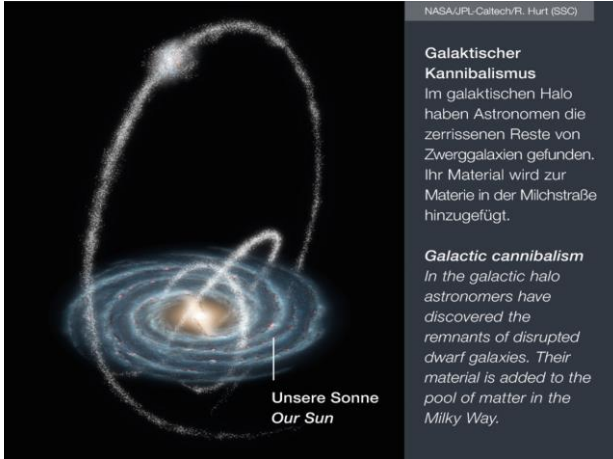
104

GAIA satelliet



106

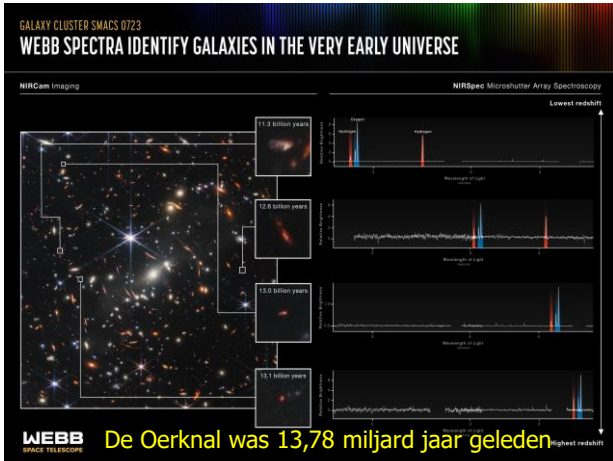
106



107



108



109

CEERS = Cosmic Evolution Early Release Science
 o.l.v. Steven Finkelstein (Austin, Texas)

Zeeken naar de verste = oudste = eerste melkwegstelsels

110



111



112

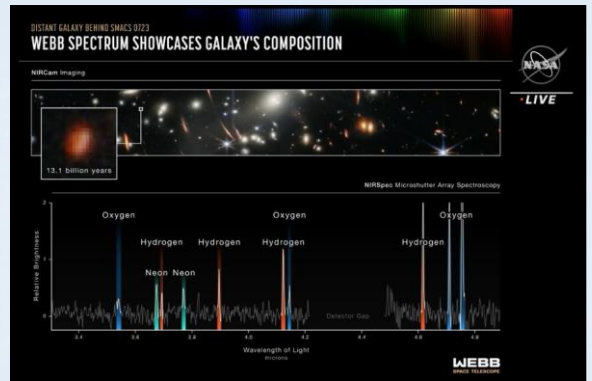
CEERS 1019 = Maisie's galaxy
 400 miljoen jaar na de oerknal
 Het oudste melkwegstelsel (tot nu toe)



Ontdekt op de 9e verjaardag van de Maisie Finkelstein

113

113



De chemische samenstelling van oudste stelsels

114

114

THE END

Dank U voor Uw
 aandacht!

116

116

<p>DE MENS TUSSEN DE STERREN WIL ZICH-MAAKT VAN STERRENSTOF</p> <p>Prof. Henny J.G.L.M. Lamers Sterrenkundig Instituut Universiteit van Amsterdam AstroBoekjes: deel 1</p>	<p>HALLO IS DAAR IEMAND? SPEUREN NAAR LEVEN IN HET HEELAL</p> <p>Prof. Henny J.G.L.M. Lamers Sterrenkundig Instituut Universiteit van Amsterdam AstroBoekjes: deel 2</p>	<p>AstroBoekjes</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. De mens tussen de sterren (18^e druk) 2. Hallo is daar iemand (16^e druk) 3. De oerknal en het uitdijend heelal (15^e druk) 4. Het draait allemaal om de Zon (7^e druk) <p>nu euro 5.00 per stuk</p> <p>Ik signeer op verzoek</p>
<p>DE OERKNAL EN HET UITDIJEND HEELAL OP ZOEK NAAR DE OORSPRONG</p> <p>Prof. Henny J.G.L.M. Lamers Sterrenkundig Instituut Universiteit van Amsterdam AstroBoekjes: deel 3</p>	<p>HET DRAAIT ALLEMAAL OM DE ZON ONTSTAAN, DOEW EN EVOLUTIE VAN ONS PLANETENSTELSEL</p> <p>Prof. Henny J.G.L.M. Lamers Sterrenkundig Instituut Universiteit van Amsterdam AstroBoekjes: deel 4</p>	

117

U kunt de agenda van mijn lezingen en de korte omschrijving ervan vinden op mijn website:
www.hennyklamers.nl

118

118