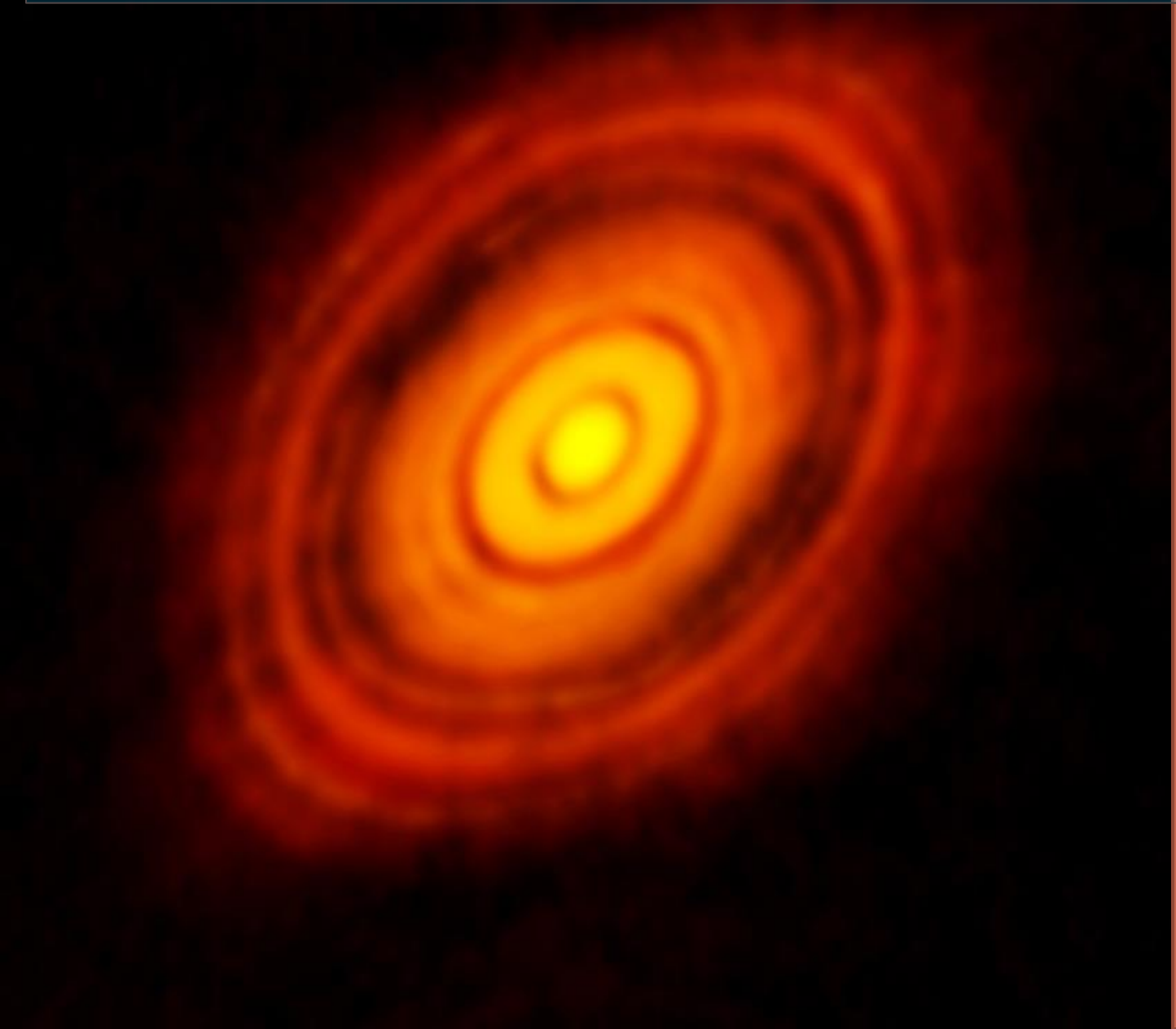
HC-6 Vorming van planetenstelsels



DE FEITEN (TOEN)

- Alle planeten bewegen in hetzelfde vlak
- Alle planeten bewegen in dezelfde richting in dat vlak
- Alle planeten bewegen op nagenoeg cirkelvormige banen
  - Pluto was nog onbekend
- Alle planeten roteren in deze zelfde richting om hun as
  - De retrograde rotatie van Venus was nog onbekend
- Ook de zon roteert in deze richting om zijn as

→ *Nebular hypothesis van Laplace en Kant*: Planeten zijn ontstaan uit een roterende schijf van materiaal in een baan rond de zon, de zgn. *solar nebula*

… maar de oorsprong van die schijf was onbepaald.

CHRONOLOGIE VAN ONS EIGEN ZONNESTELSEL: METEORIETEN

- Meteorieten bevatten een schat aan informatie over de vormingsgeschiedenis van het zonnestelsel

- Fyische omstandigheden: bijv. temperatuur uit de samenstellende mineralen en isotopen; dynamica uit heterogeniteit van de samenstelling.

- Uit de aanwezigheid van producten van radioactief verval kan het laatste moment worden vastgesteld waarop het object gesmolten is geweest; sinds dat moment kunnen deze producten namelijk niet meer ontsnappen.

DE FEITEN (NU)

- Datering m.b.v. radioactieve elementen → Leeftijd aarde en maan ~ 4.5 Gyr.
- Begrip van sterevolutie → Leeftijd zon ~4.5 Gyr

Blijkbaar zijn zon en Aarde/Maan (en andere planeten) samen ontstaan.

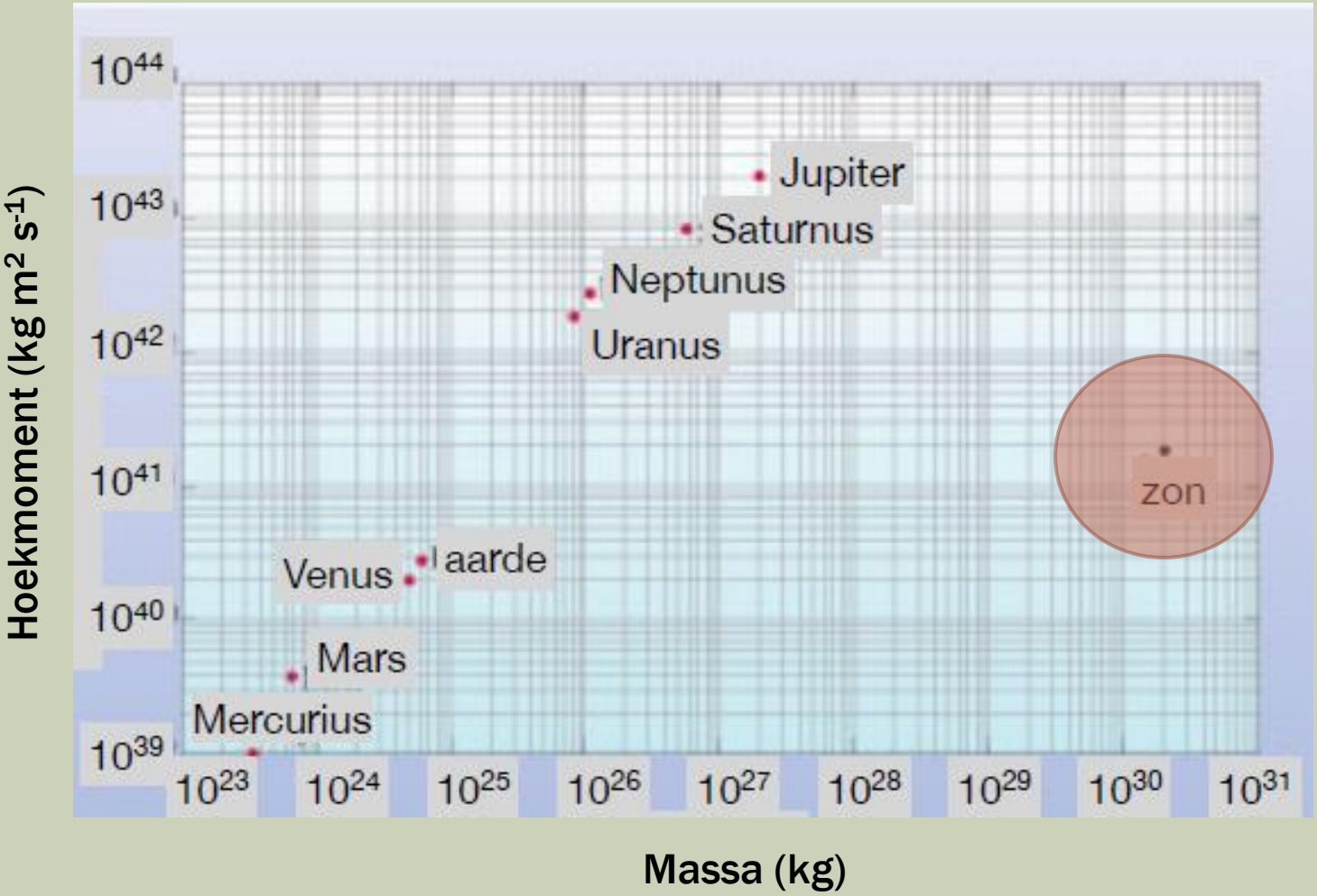
- Waarnemingen van

i) stofschijven in de ruimte ii) jonge, pas gevormde sterren met omringende schijf iii) gaps in stofschijven iv) identifcatie van materiaal rond die sterren v) exo-planeten

→ Fysische en chemische chronologie van ster- en planeetvormingsproces via waarnemen van 'snapshots in de ruimte'; ALMA, meteorieten ('dust remembers') en modellen.

→ *Nebular hypothesis* geaccepteerd als standaard model voor de vorming van planeetstelsels

DE FEITEN (NU): HOEK/IMPULSMOMENT: L = RXP



INTERSTELLAIRE WOLKEN

INTERSTELLAIRE WOLKEN

- Melkweg is gevuld met $5x10^9$ M_{zon} aan wolken van interstellair gas en stof
- ~2% van de totale massa van het Melkweg
- 99% massa is gas: H2 en He
- 1% stof: silicaat en grafietkorreltje; afmetingen van ~1 μm
- Verdeeld in wolkencomplexen van variërende grootte
- Giant Molecular Clouds
- Dark Clouds
- voornamelijk gesitueerd langs spiraalarmen
- Zichtbaar als ‘donkere plekken’ aan de sterrenhemel (‘kolenzak’ aan zuidelijk halfrond) en d.m.v. weerkaatst licht en/of gloeiend geïoniseerd gas nabij hete sterren.

DONKERE INTERSTELLAIRE WOLK

DONKERE INTERSTELLAIRE WOLK

Samentrekkende gaswolk (H of H_2); gravitatie wint

►De Jeans lengte, R_J, is de minimum straal van een wolk met r, m en T om gravitationeel gebonden te zijn.

►De corresponderende massa, M_J, wordt de Jeans massa genoemd.

►Voor typische waarden (10^5 H-atomen cm^{-3});

R_j = 0.2 pc; M_J = 76 M_{zon}; invaltijd = 3.10^5 jaar

ACCRETIESCHIJF

- De oorspronkelijke wolk bevat altijd iets van hoekmoment (alleen al omdat er nog iets van willekeurige turbulentie over is)
- Hoekmoment blijft behouden tijdens ineenstorting: $L = r \times mv$

  → *r* wordt kleiner, dus wordt *v* groter

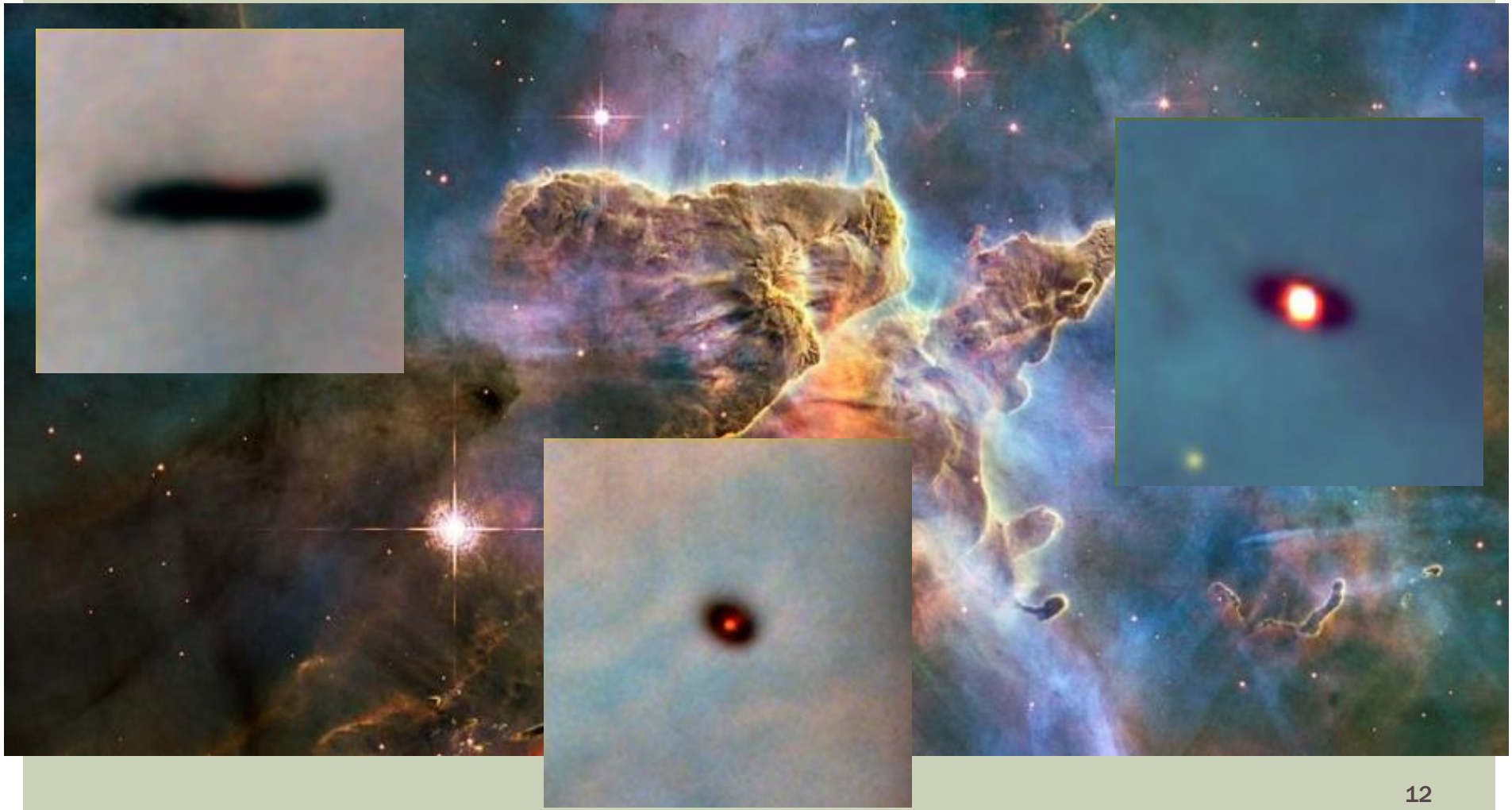
  → totdat *v* gelijk wordt aan snel-heid rond ingesloten massa en leidt tot vorming van een schijf.

  → totdat $v > v_{esc}$
- een groot deel van het hoekmoment van de samentrekkende ster wordt over-gedragen op de uitgedreven massa.

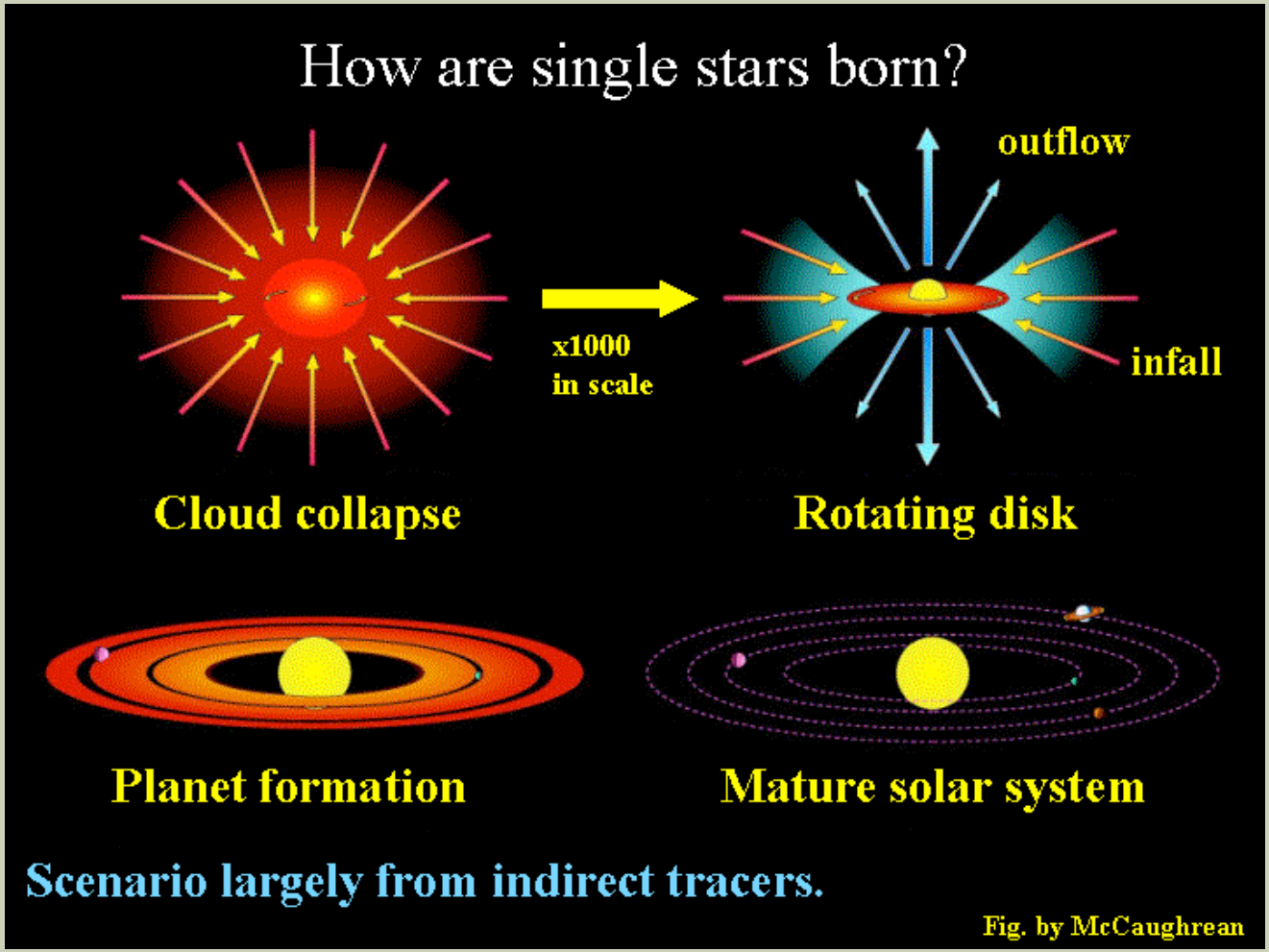
  → massa naar binnen; hoekmoment naar buiten → hoekmoment ster beperkt.

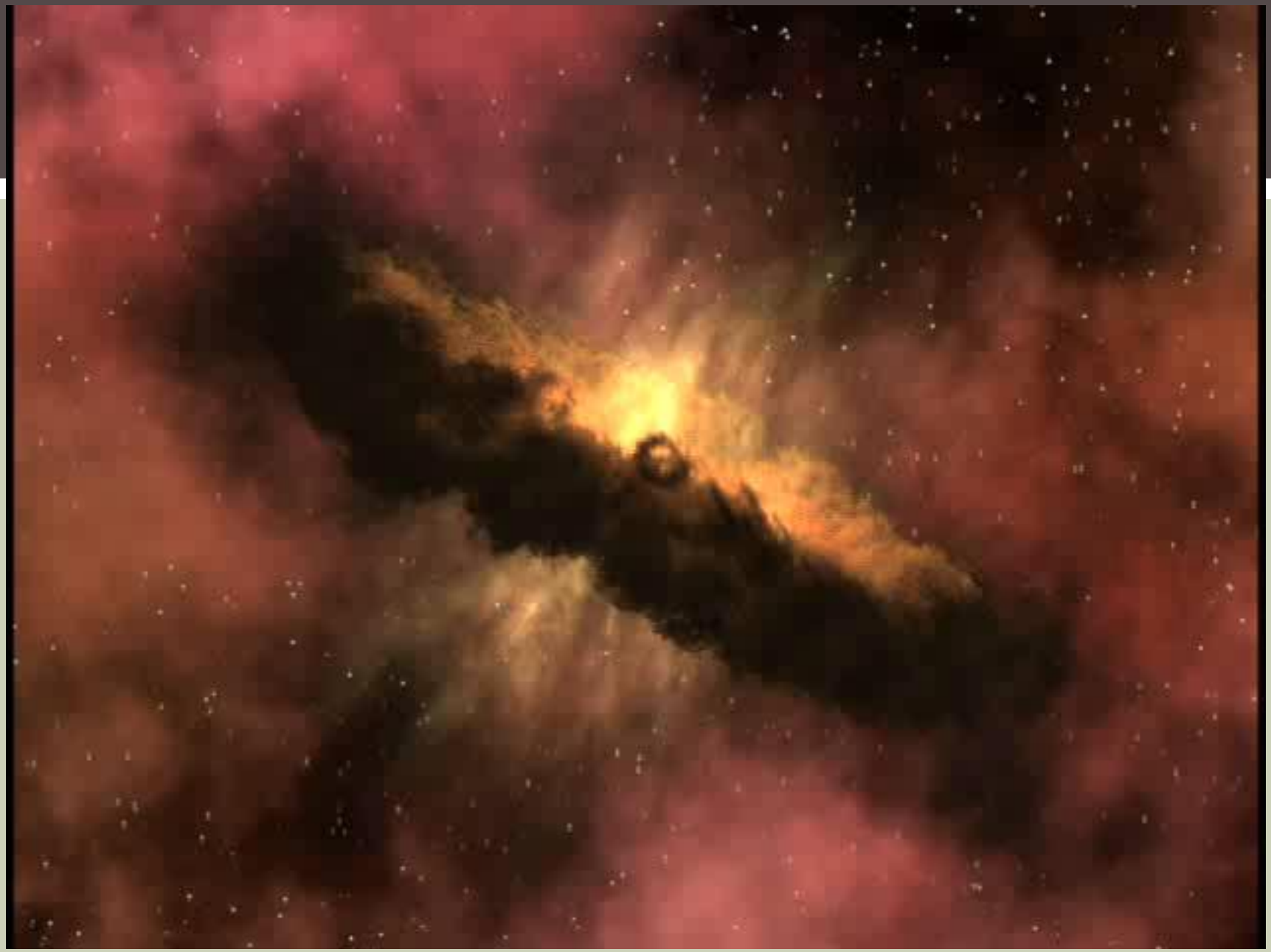
  → accretieschijf = protoplanetaire schijf.

PROTOSTELLAIRE SCHIJF



STANDARD MODEL





ONDERZOEK AAN JONGE STERREN

- Zijn pas gevormde sterren inderdaad omgeven door een accretieschijf ? → onderzoek jonge sterren.
- Hoe zou je een jonge ster definiëren ?

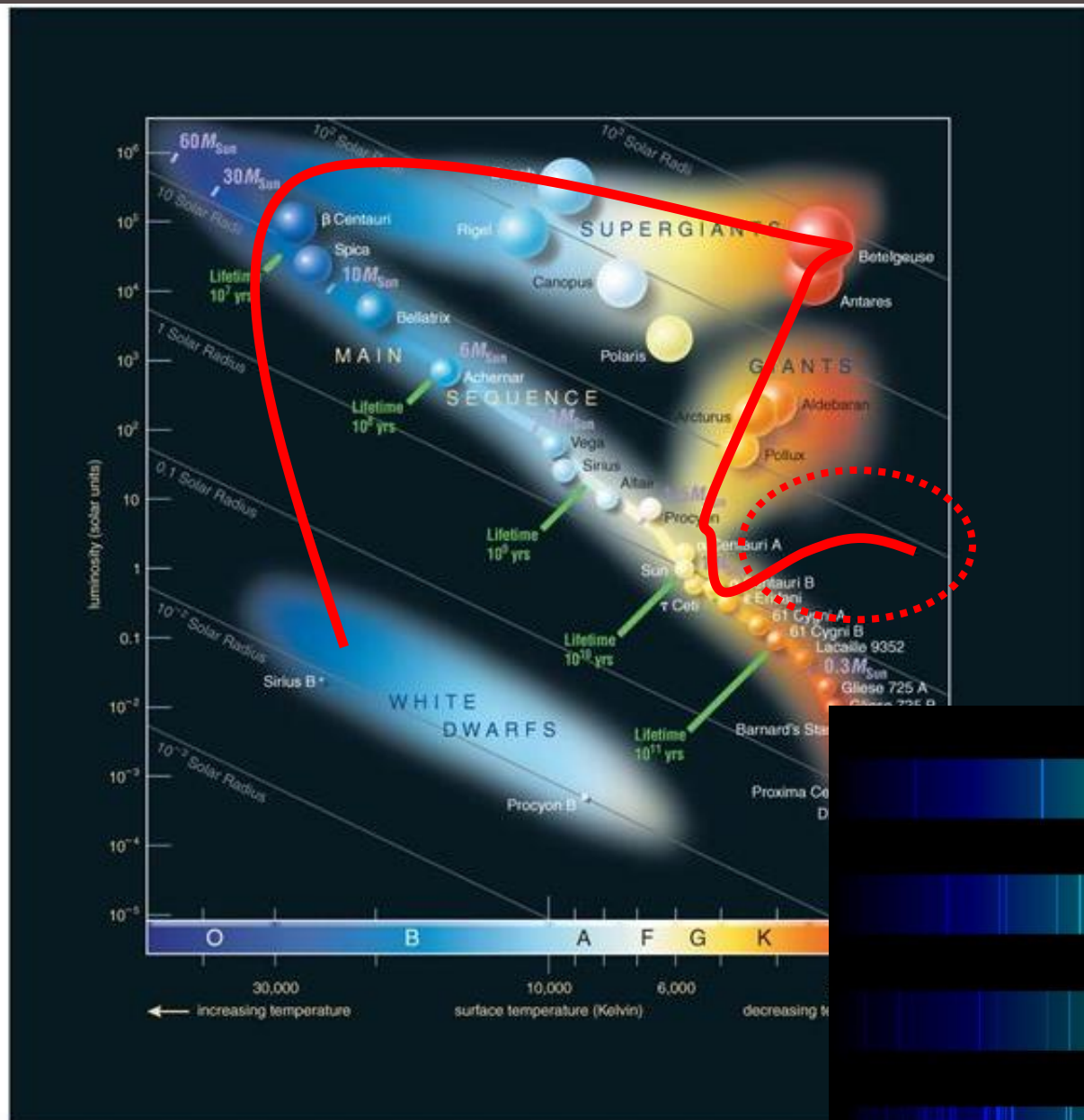
  → een ster die nog niet op de hoofdreeks is aangekomen.
- Hoe kun je een jonge ster herkennen ?

  → Temperatuur nog niet hoog genoeg voor reguliere kernfusie (proton-proton 4 x $^{1}H \rightarrow {}^{4}He$ / triple alpha 3 x $^{4}He \rightarrow {}^{12}C$ / CNO $^{12}C + {}^{4}He \rightarrow {}^{16}O$ cyclus)

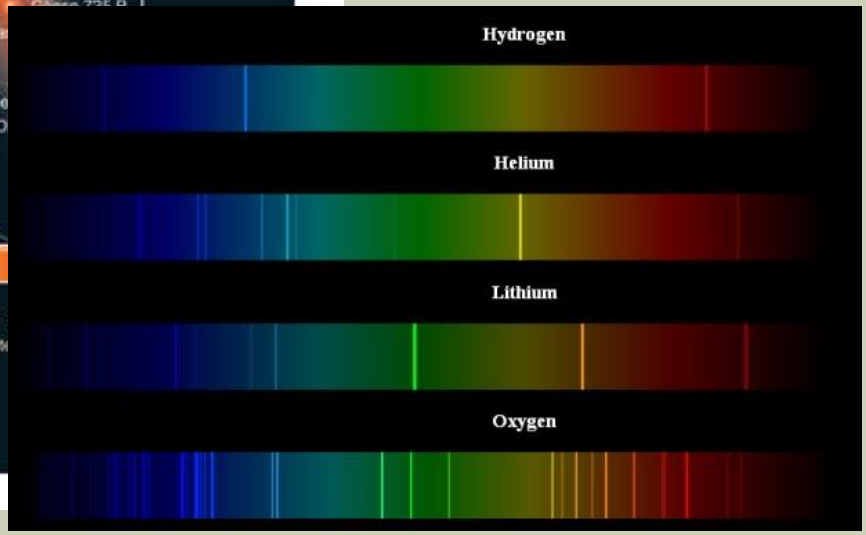
  → Alternatief

  deuterium-verbranding: $^{2}H + H \rightarrow {}^{3}He$

  lithium verbranding: $H + {}^{6}Li \rightarrow \ldots \rightarrow \ldots \rightarrow {}^{4}He + {}^{4}He$
- Een jonge ster 'verbrandt' dus zijn beschikbare hoeveelheid lithium, dus een ster met lithium lijnen in spectrum moet een jonge ster zijn !
- T Tauri sterren: boven hoofdreeks, Li lijnen, stof in schijf.



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.



STOF EN DEBRIS SCHIJVEN

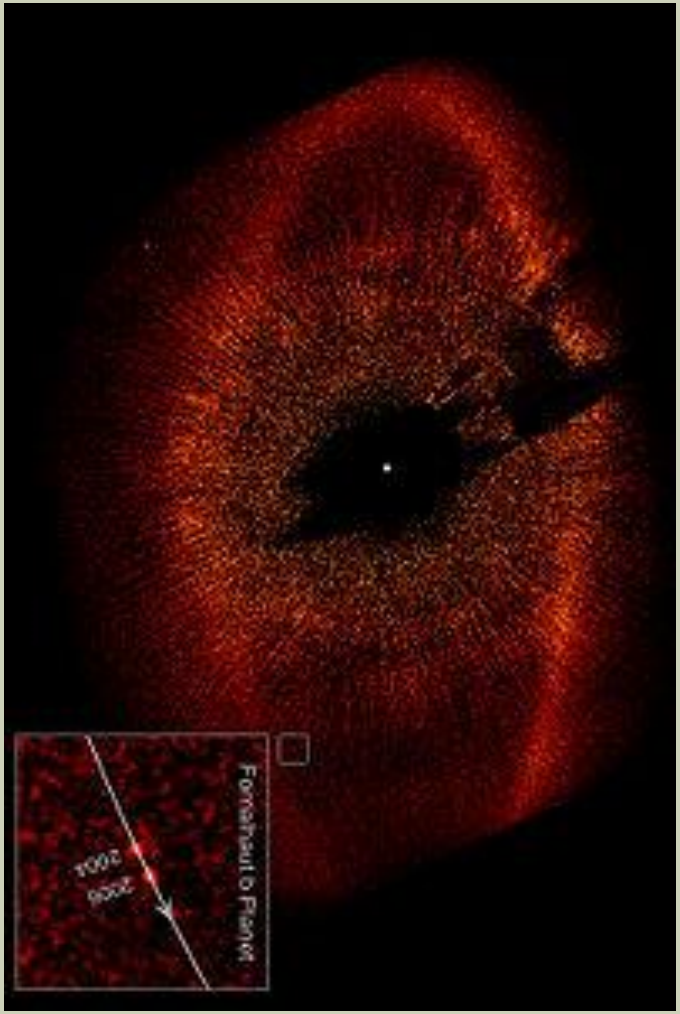
- Stofdeeltjes (en koud gas) in de schijven

- weerkaatsen het sterlicht

- of houden juist het licht van een wolk van gloeiend gas in de achtergrond tegen

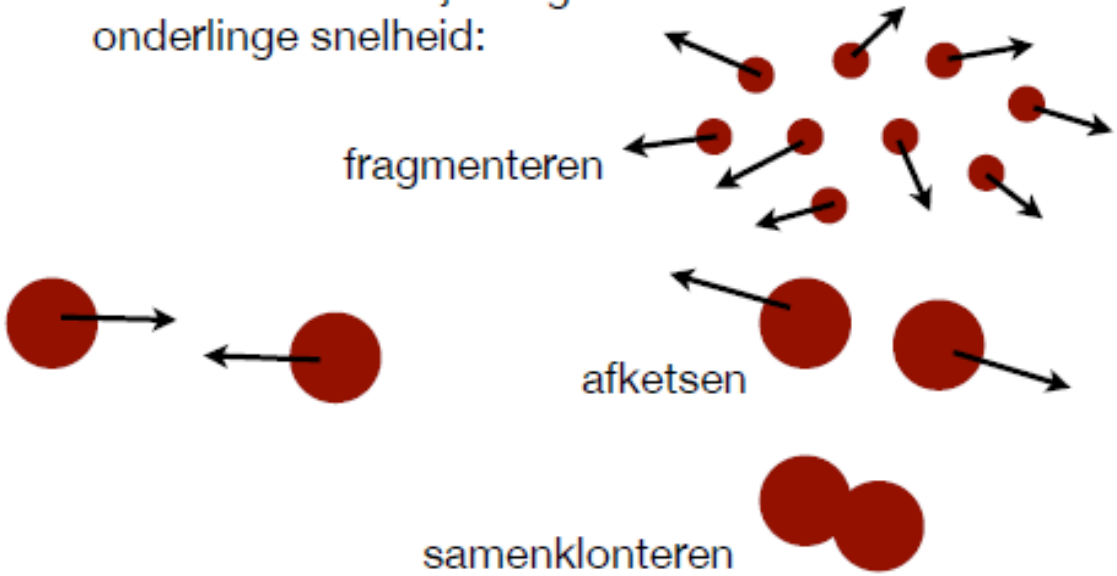
- of stralen op infrarood en millimeter golflengtes

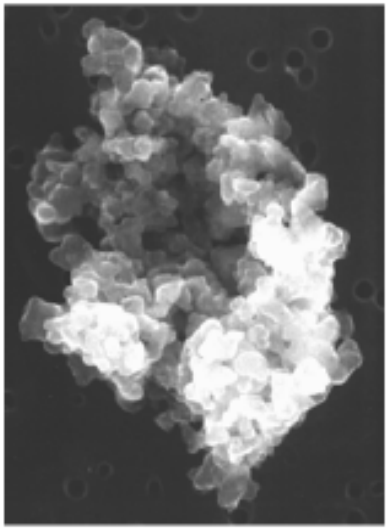
- Verder ook nog Debris disks (vergelijkbaar met Kuiperbelt) / oorsprong in stralingsdruk en Poyinting-Robertson wrijving; betreft ouder materiaal.



HOE MAAK JE VAN STOF PLANETEN ?

- Als twee stofdeeltjes tegen elkaar botsen kunnen deze, afhankelijk van de onderlinge snelheid:





Cosmic dust grain 11 micrometers in diameter.

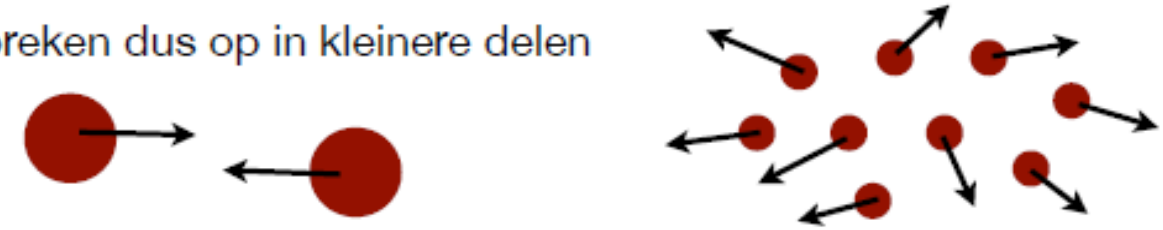
- Theoretische berekeningen en zero-gravity experimenten laten zien dat
  - op 1 AU het 2000 jr kost om tot 1 cm te groeien
  - op 5 AU het 5000 jr kost om tot 1.5 cm te groeien
  - op 30 AU het wel 50,000 jr kost om tot 0.3 mm te groeien!

ZERO GRAVITY EXPERIMENTEN

HOE MAAK JE VAN STOF PLANETEN ?

- Kleine stofdeeltjes (en zeker die met een ijslaagje) klonteren makkelijk samen

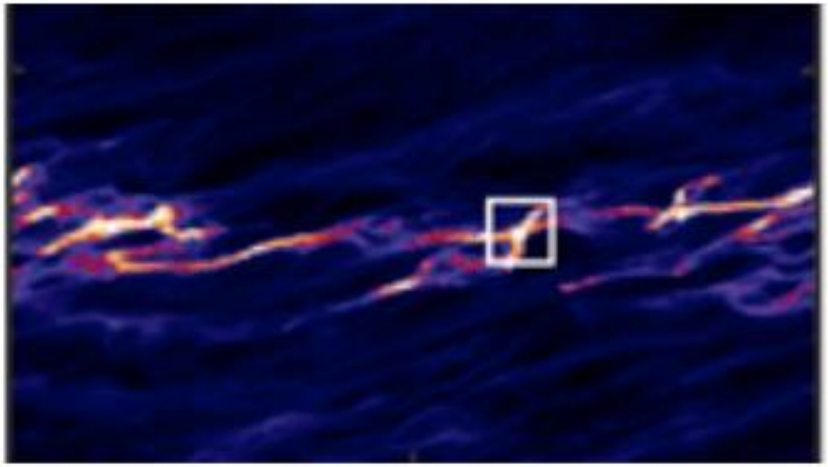
- Grotere deeltjes (van enkele cm tot ~1 m) fragmenteren juist
  - en breken dus op in kleinere delen



- Je verwacht dus dat deeltjes tot een paar cm samenklonteren, en er daarna een evenwicht tussen groei en fragmentatie optreedt
  - Hoe kunnen we zo ooit planeten vormen?

HOE MAAK JE VAN STOF PLANETEN ?

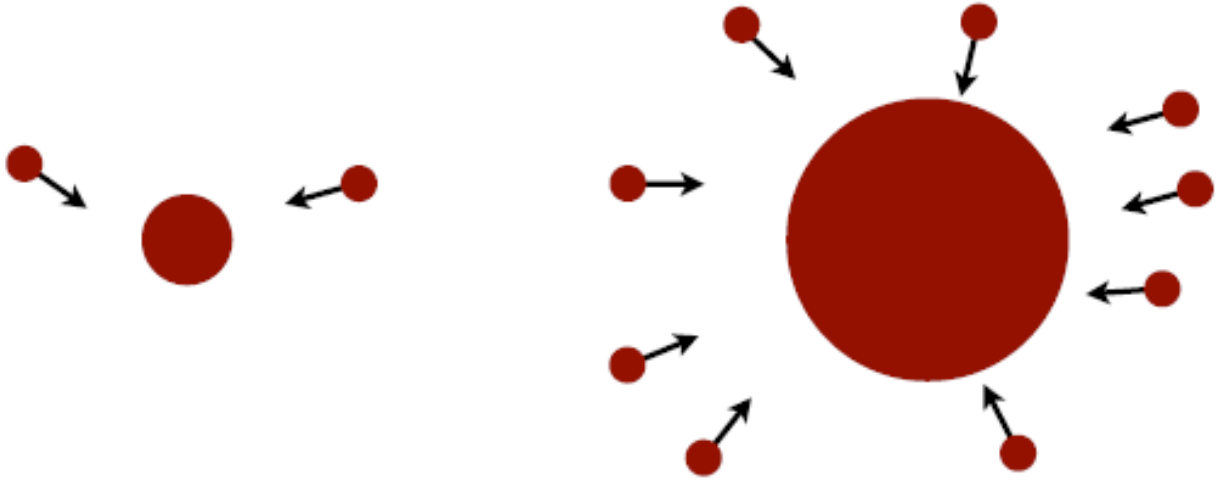
- *Waarschijnlijk* gebeurt het volgende:
  - Turbulentie in de schijf zorgt voor wervels in het materiaal
  - Dit resulteert in dichte gebieden met relatief lage onderlinge snelheden
  - Onder die condities kunnen de ~cm-m deeltjes snel (<levensduur van de wervels) uitgroeien tot ~km grootte



  - Resultaat van complexe computer simulaties! Nog heel onzeker!

HOE MAAK JE VAN STOF PLANETEN ?

- Deeltjes van ~km zijn relatief schaars, en botsen niet vaak onderling
- maar trekken wel kleinere deeltjes aan waarmee ze, zonder te fragmenteren, samensmelten
- Leidt tot zg. oligargische groei:
  - Grootste planetesimalen trekken het meeste resterende materiaal aan
  - en groeien snel groter dan hun concurrenten



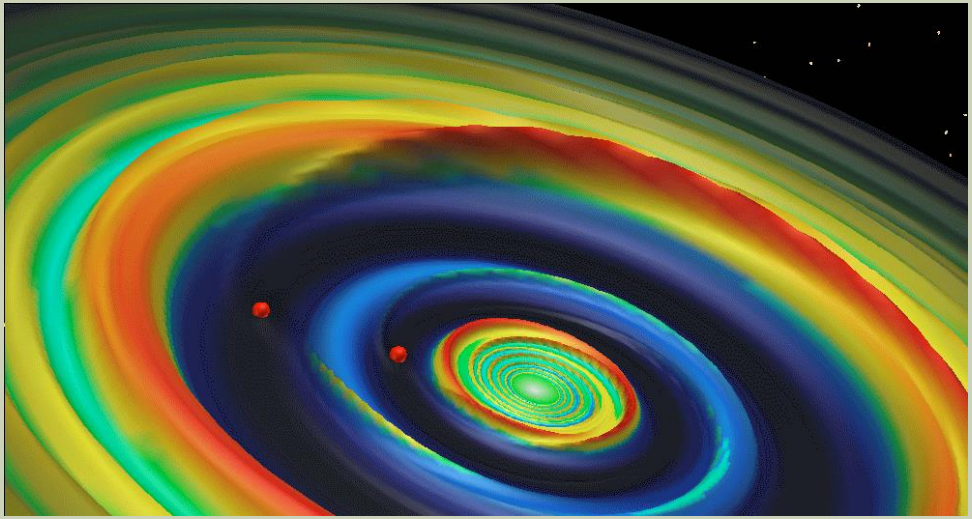
MODELLEN, TIJDSSCHALEN EN MIGRATIE

- Simulaties laten zien dat op 1 AU in een paar tienduizenden jaren een object van ~1000 km gevormd kan worden; dit kan dan in de volgende miljoenen jaren uitgroeid tot ~ M_{aarde}.
- Op 5 AU kan een 10 M_{aarde} kern gevormd worden in 1 Myr, waarna deze zwaar genoeg is om een H+He atmosfeer te vormen → gasreus. Kost wel meerdere Myr en dat is lang vergeleken met een typische leeftijd van een schijf (2-3 Myr).
- Op 30 AU (huidige positie Neptunus) duurt dit wel 30 Myr: zolang hebben schijven niet.
- Daar komt bij dat planeten door (gravitationele) wisselwerking met ander materiaal in de schijf naar de zon toe zouden moeten migreren.
- Dat proces is dusdanig effectief (in de modellen) dat je helemaal niet verwacht dat planeten overleven.
- ??

MODELLEN, TIJDSSCHALEN EN MIGRATIE

Anderszijds is er sterk bewijs dat migratie inderdaad optreedt:

- verstrooide Kepler-gordel
- bestaan van *hot Jupiters* rond andere sterren; te weinig massa in de buurt van de ster zelf om de vorming van zo'n planeet te verklaren.
- de samenstelling van Jupiter suggereert dat deze bij lagere temperatuur gevormd is dan typisch rond 5 AU (moet dus ooit verder weg gestaan hebben).



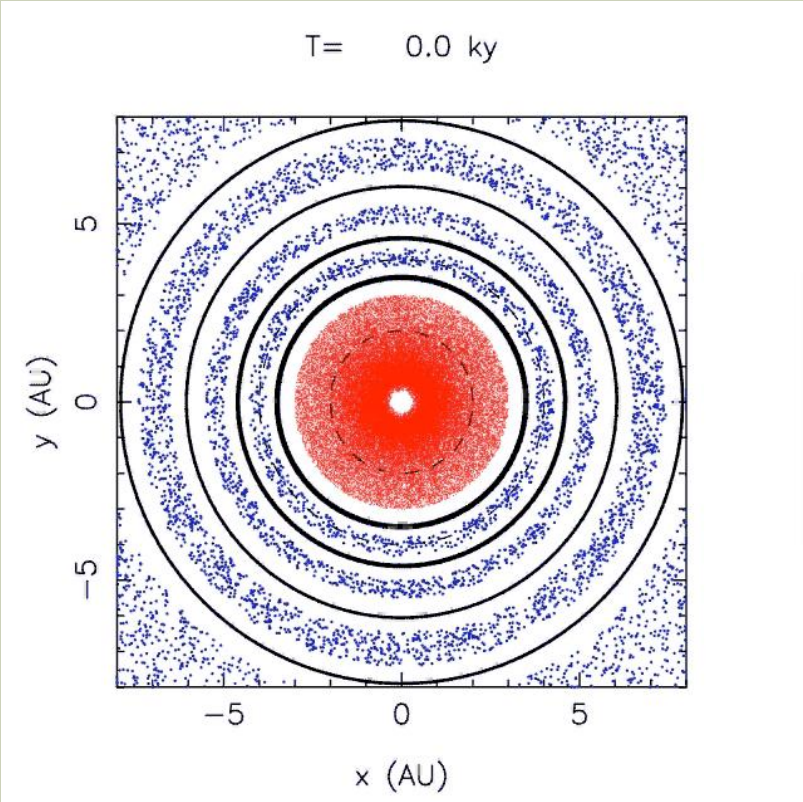
PLANETEN ZOEKEN HUN BANEN

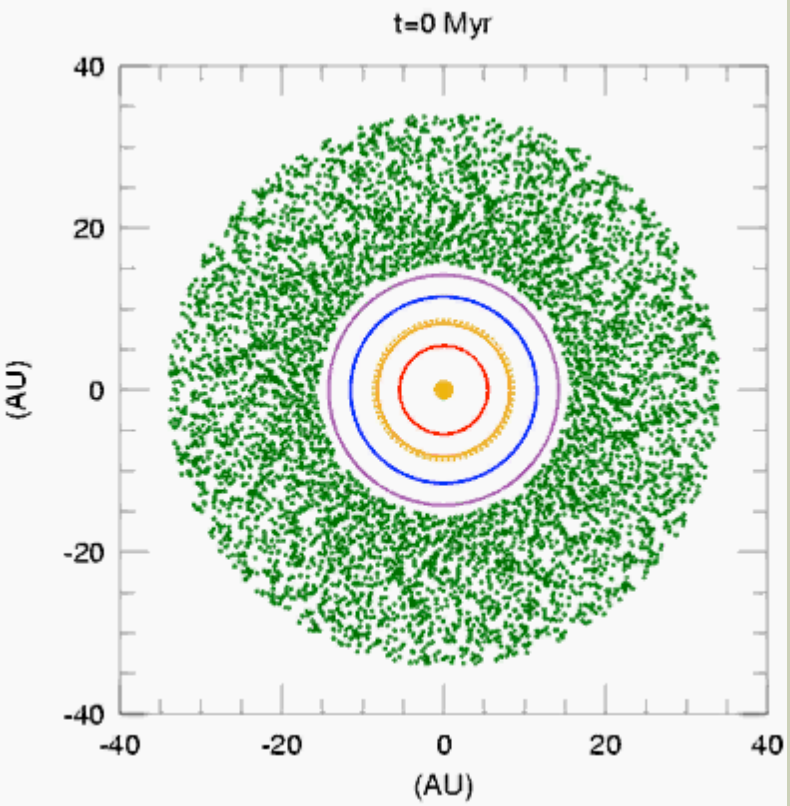
- Simulaties laten zien dat een model waarbij de vier reuzen-planeten rond 5-20 AU werden gevormd, in de eerste paar honderd miljoen jaar herschikking van banen laat zien:
- <5 Myr na ontstaan zonnestelsel: Grand Tack (=overstag-gaan) model: Jupiter en Saturnus migreren naar binnen, tot ze in een 1:2 resonantie komen, en snel weer naar buiten migreren. De inwaardse migratie van Jupiter laat een lage-massa planetoïden-gordel en een kleine Mars achter.
- Rond 500 Myr na ontstaan zonnestelsel: Nice model: dyna-mische evolutie van de banen van Jupiter, Saturnus, Uranus & Neptunus van een compacte naar een meer uitgestrekte configuratie. Uranus/Neptunes wisselen van plaats.
- Uitdunning van populatie planetesimalen: late heavy bombardement?
- Chaotisch; kreeg Uranus op dit moment zijn 90° orientatie?

GRAND TRACK / NICE MODEL

- Bekijk de simulaties op homepage en youtube (nice mod)
  https://www.youtube.com/watch?v=6LzQfR-T5_A

grand_tack.avi





MANEN EN SATELLIETEN

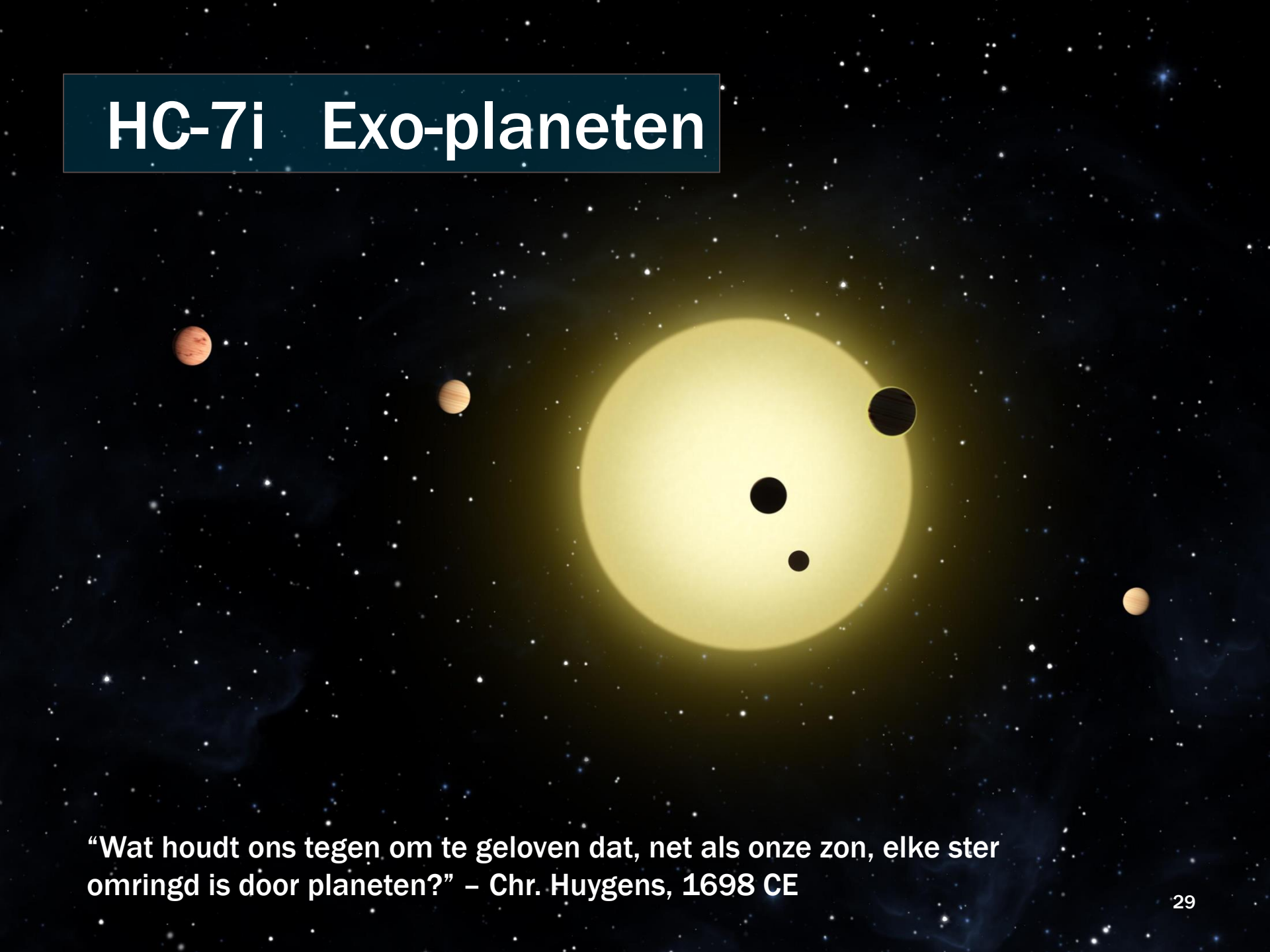
- De manen rond de reuzenplaneten hebben een vergelijkbare oorsprong als de planeten:
  - uit een accretieschijf rond de protoplaneet
  - maar sommige van hun manen zijn duidelijk later ingevangen, bijv. Tritron (Neptunus): beweegt in een retrograde baan!
- De manen rond de aardachtige planeten hebben een andere oorsprong
  - Phobos, Deimos zijn planetoïden ingevangen door Mars
  - De maan is uit een botsing tussen de proto-aarde en een grote planetesimaal ontstaan.

HUIDIG ONDERZOEK !

- Waar komt ons water vandaan; vergelijk [H]/[D] abundanties.
- Zijn COMs (complex organisch materiaal) vanuit de ruimte op planeten terecht gekomen ?
- Zie persbericht sterrewacht (afgelopen week).
- Gedetailleerde simulaties van pre-stellar cores en proto-planetaire schijven.

- Verdere waarnemingen om astrochemie en exo-planeten aan elkaar te koppelen.
- En dat is het onderwerp van het laatste college; exo-planeten

HC-7i Exo-planeten



“Wat houdt ons tegen om te geloven dat, net als onze zon, elke ster omringd is door planeten?” – Chr. Huygens, 1698 CE

DE EERSTE DETECTIES

- Zoektocht naar exo-planeten heeft meerdere keren tot foute interpretatie metingen geleid.
- Veel effecten moeten worden meegenomen, om zeker te zijn dat een meting van bv. een periodieke verandering van het zwaartepunt ook daadwerkelijk door een planeet wordt veroorzaakt.

- Bv. signaal te wijten aan systematisch effect in telescoop waarvoor niet (of onvoldoende) gecorrigeerd was

Voorbeeld: Barnard's ster. Astrometrie op fotografische platen suggereerde oscillatie t.g.v. 1.6 M_{Jup} planeet

→ Oorzaak: onderhoud aan optiek telescoop in zelfde periode.

DE EERSTE DETECTIES

- 1991/1992: de eerste exo-planeten ontdekt bij pulsar
- Pulsar timing: Variatie in aankomsttijd pulsar-signalen geeft omlooptijd van pulsar rond pulsar-planeet massa-middelpunt.
- Twee planeten, van >2.8 en >3.4 Maarde, maar: zijn dit oude planeten rond deze neutron ster die supernova explosie hebben overleefd, of zijn ze gevormd uit de ejecta van de supernova?
- 1994: de eerste exo-planeten bij reguliere ster.
- 1999: het eerste exo-planeten stelsel is een feit.
- 2006: waarneming van een exo-planeten stelsel zonder Jupiter-achtige planeten.
- Anno 2015 een groot aantal exo-planeten (stelsels) ontdekt met gebruikmaking van verschillende detectie technieken.

DETECTIE EXO-PLANETEN

Vijf standard detectie methodes (met voor- en nadelen)

1) Astrometrie

Kijk naar een (regelmatige) schommeling van de positie van een ster rond het massa middelpunt van een ster plus planeet.

2) Doppler variatie

Kijk naar de schommeling van spectrale sterlijnen, omdat de radiele snelheid van de ster a.g.v. de zwaarte-kracht van een begeleidende planeet verandert.

3) Transit methode (Hot Jupiters)

Kijk naar de lichtcurve van een ster; bij geringe inclinatie is er een primair minimum te zien op het moment dat een planeet 'voorlangs' beweegt.

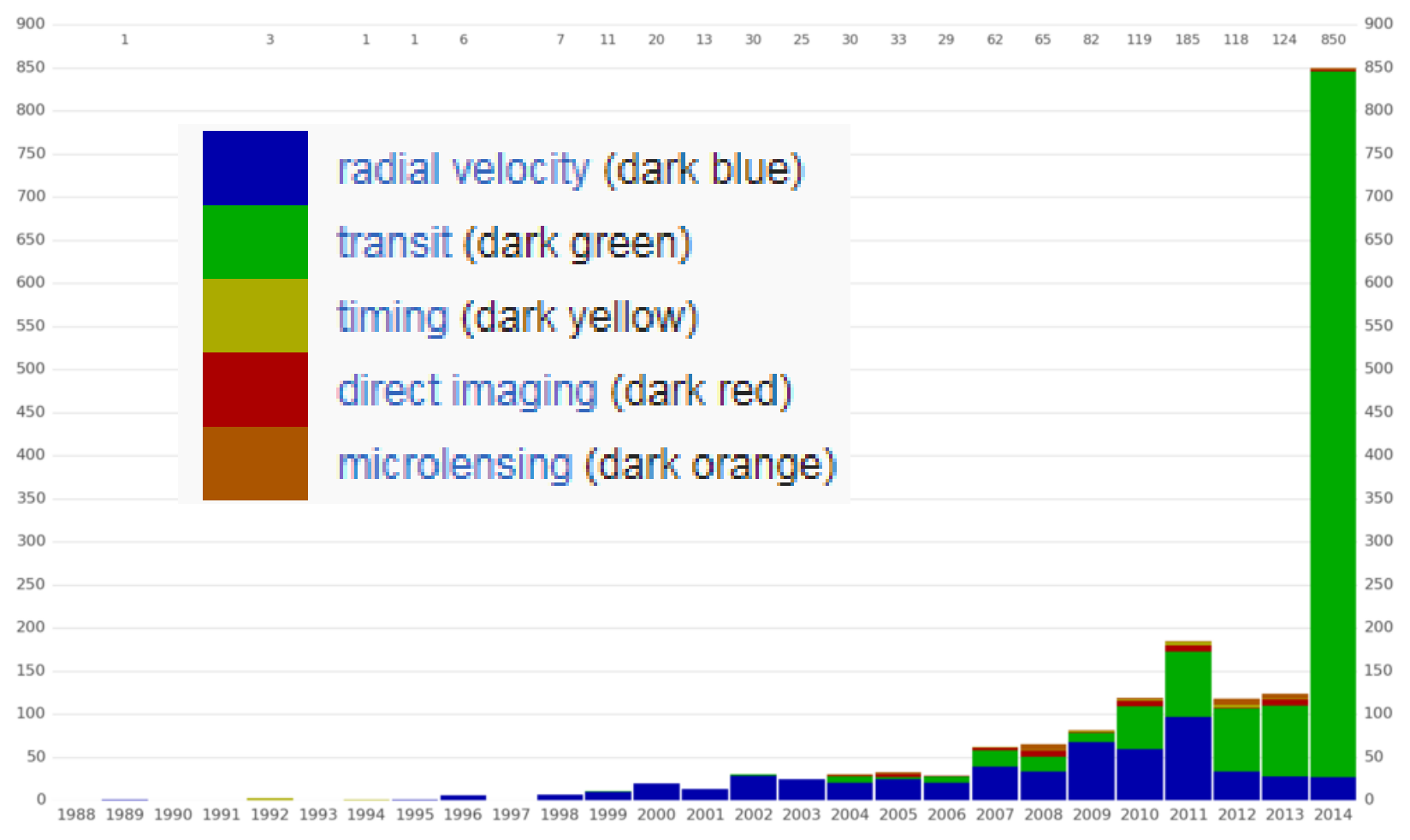
4) Direct imaging

Allesbehalve gemakkelijk omdat de ster vele malen helderder is dan de exoplaneet.

5) Micro lensing

Zwaartekracht werkt als lens en versterkt het licht van een achtergrond ster.

DETECTIE EXO-PLANETEN



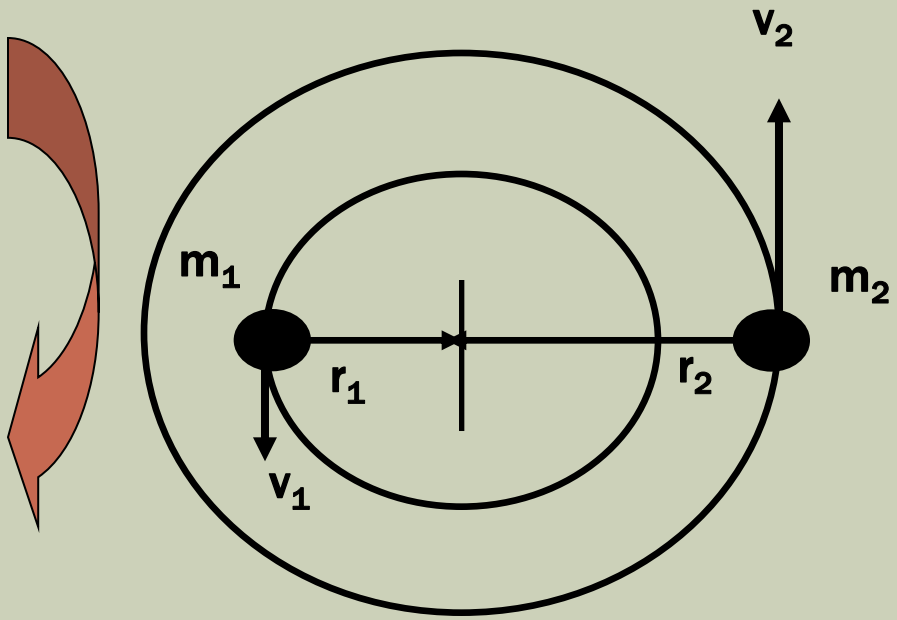
ASTROMETRIE
ZELFDE PRINCIPE ALS DUBBELSTERREN

- Beide sterren bewegen om een gemeenschappelijk zwaartepunt:

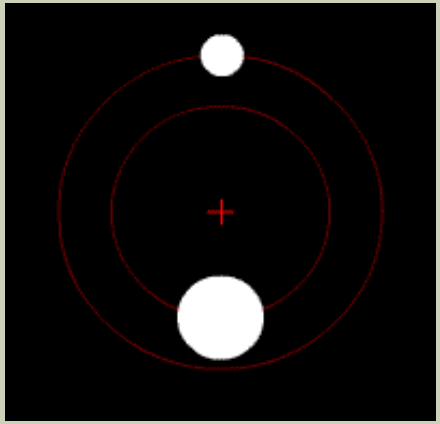
$$m_1 \cdot r_1 = m_2 \cdot r_2$$

  - Zelfde periode P
  - $v_1/v_2 = r_1/r_2 = m_2/m_1$
  - Leid zelf af (met $R = r_1 + r_2$):

$$4\pi^2 R^3/G = (m_1+m_2)P^2$$

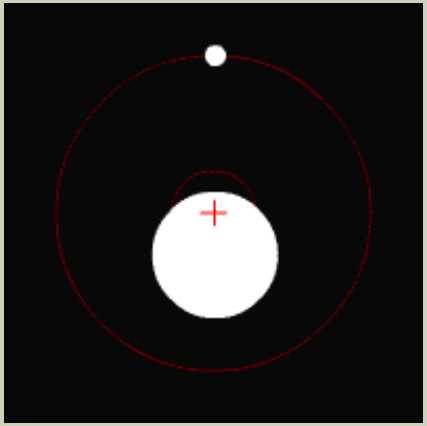


ASTROMETRIE



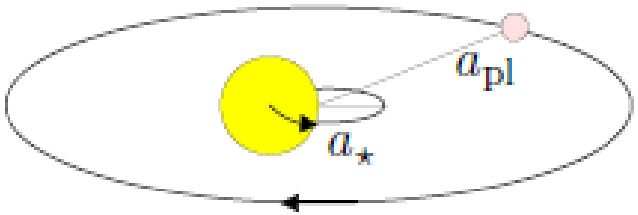
Dubbelsterren

Planeet-ster



Reflex beweging van de ster: halve lange as $a_\star$

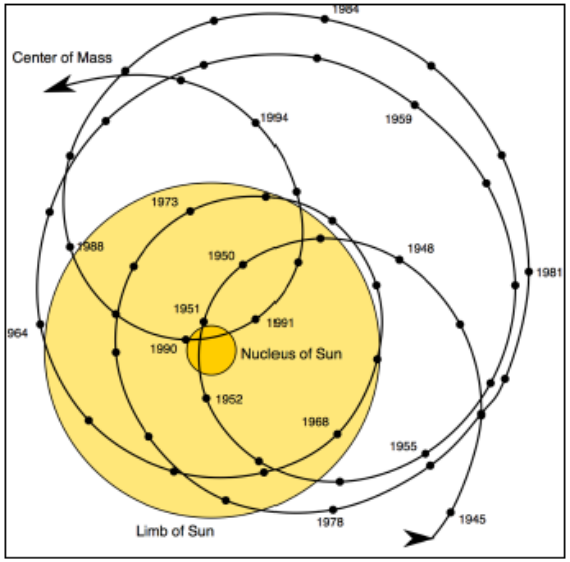
$$a_\star = \frac{m_{\rm pl}}{M_\star}\, a_{\rm pl}$$



- Jupiter op 10 pc, 5 AU = 0.5"; $M_\odot/M_{\rm Jup}$~1000. → reflex = 0.5 mas ~ 1.1 $R_\odot$
- Jupiter op 10 pc, 0.05 AU = 5 mas, $M_\odot/M_{\rm Jup}$~1000. → reflex = 5 μas

ASTROMETRIE

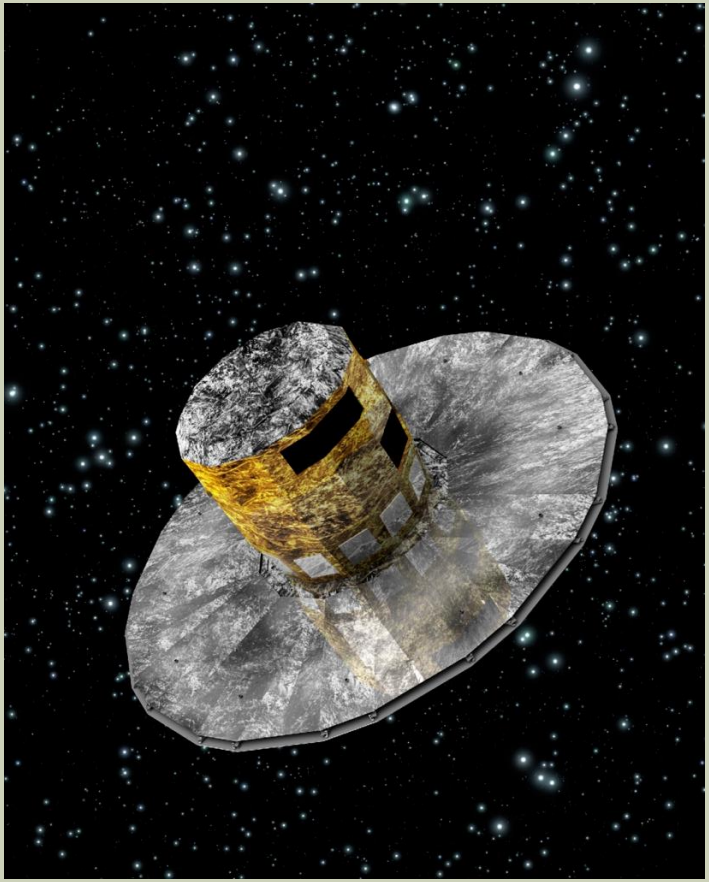
- We zien de baan i.h.a. onder een hoek *i*
- Als $M_\star$ bekend is, volgt $\boldsymbol{a}_{\mathbf{pl}}$ uit de periode *P*: $$P^2 = \frac{4\pi^2 a_{\rm pl}^3}{G(M_\star + m_{\rm pl})}$$
- en met $a_{\rm pl}$ volgt dan $\boldsymbol{m}_{\mathbf{pl}}$ **sin** $\boldsymbol{i}$ uit $a_\star$: $$m_{\rm pl} \sin i = M_\star \frac{a_\star \sin i}{a_{\rm pl}}$$



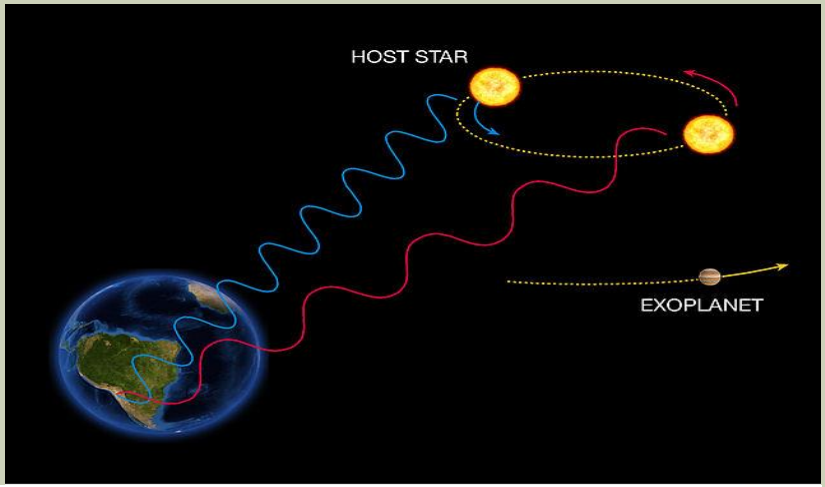
Beweging van het center-of-mass van het zonnestelsel t.o.v. zon. Afgebeeld is de zon en het zwaartepunt ligt soms heel dicht bij de core en ook duidelijk buiten de zon.

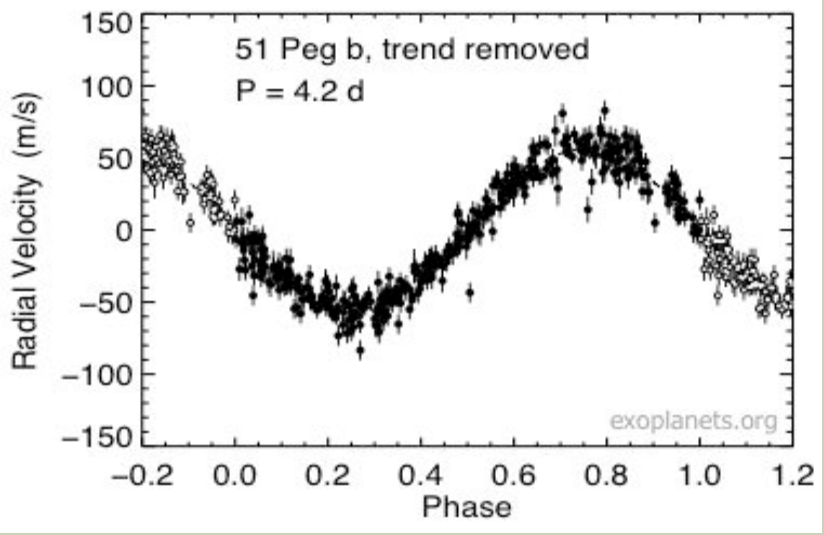
GAIA – THE EXO-PLANET HUNTER

- Vanaf de grond ontbreekt de noodzakelijke astrometrische nauwkeurigheid om objecten van de massa van een planeet te detecteren.
- Wel een aantal bruine dwergen gevonden.
- De ruimtemissie GAIA heeft een astrometrische precisie van μas
- Mjup rond sterren tot 50 pc afstand en periodes van 1.5 – 9 jaar; verwacht 10.000 - 50.000 detecties → running.



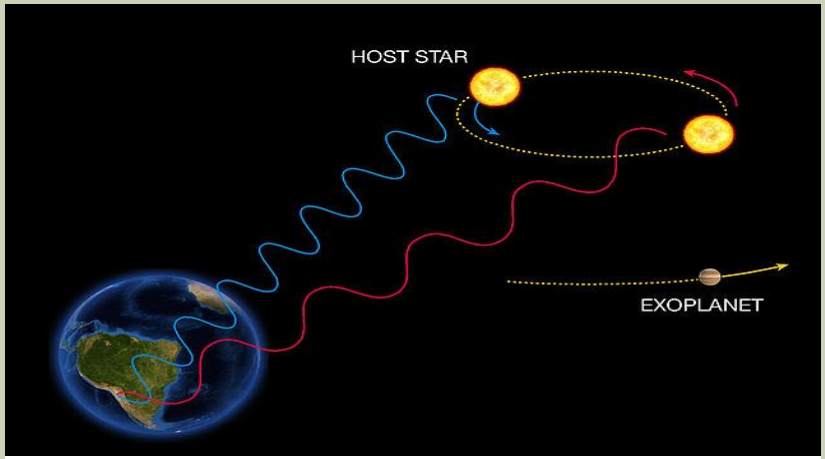
DOPPLER VARIATIE

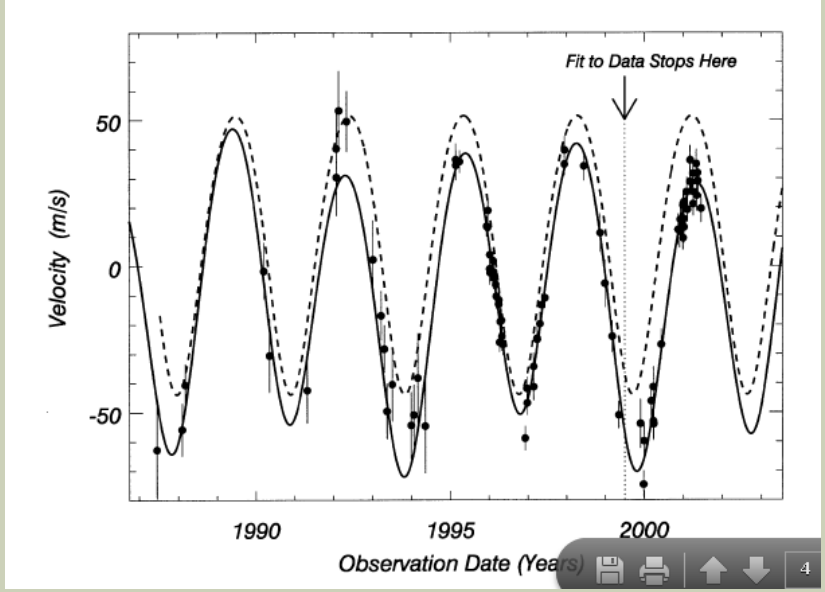




- Ook bekend als radiële snelheidsmethode.
- Gebaseerd op Doppler effect; kijk naar blauw/roodver-schuiving van spectrale lijnen agv de netto verandering van de snelheid langs de gezichtslijn.
- Tot 1 m/s verschillen meetbaar.
- Zeer effectieve methode om exo-planeten te ontdekken.
- Niet toepasbaar op jonge sterren of OBA klasses (te weinig spectraallijnen).
- Inclinatie i is vaak niet bekend en maakt dat methode alleen grenswaardes kan bepalen.

DOPPLER VARIATIE





- Ook bekend als radiële snelheidsmethode.
- Gebaseerd op Doppler effect; kijk naar blauw/roodver-schuiving van spectrale lijnen agv de netto verandering van de snelheid langs de gezichtslijn.
- Tot 1 m/s verschillen meetbaar.
- Zeer effectieve methode om exo-planeten te ontdekken.
- Niet toepasbaar op jonge sterren of OBA klasses (te weinig spectraallijnen).
- Inclinatie i is vaak niet bekend en maakt dat methode alleen grenswaardes kan bepalen.
- Meer dan 1 planeet mogelijk.

DOPPLER VARIATIE

Kijk alleen naar radiële snelheden, v_r, (dus snelheids-component langs de 'line of sight').

Doppler shift: $\Delta\lambda/\lambda_0 = v_r/c$ ($v_r << c$)

Voor $v_r > 0 \rightarrow \Delta\lambda > 0$: roodverschuiving (van ons vandaan)

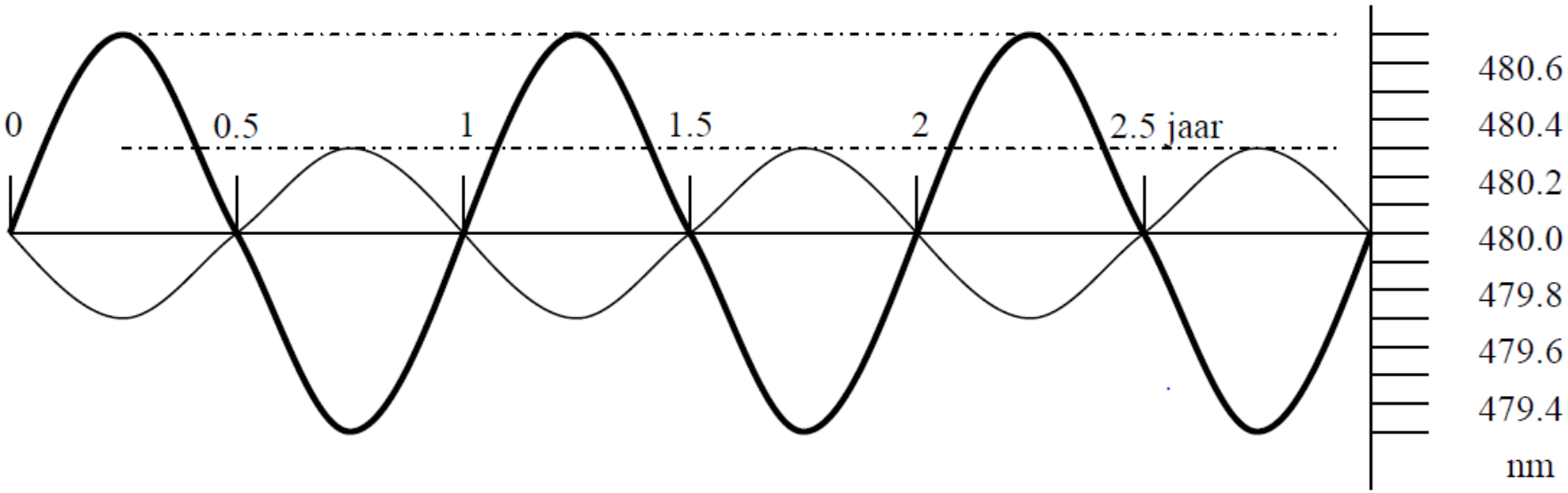
Voor $v_r < 0 \rightarrow \Delta\lambda < 0$; blauwverschuiving (naar ons toe)

Via $\lambda.\nu = c$ volgt dan: $\boxed{\Delta\nu/\nu_0 = -\Delta\lambda/\lambda_0 = -v_r/c}$

Methode al bekend voor bepaling massa's van dubbelster systemen (IA)

OEFENOPGAVE

In de figuur is het tijdsopgeloste spectrale gedrag weergegeven voor een emissielijn bij 480 nm van een spectroscopische dubbelster. De horizontale as is in jaren, de verticale as in nm.



a) Zijn de sterren even zwaar ?
b) Bereken de baansnelheden van beide sterren in km/s.
c) Bereken de onderlinge afstand.

UITWERKINGEN

a) Nee. Uit het diagram volgt dat ze verschillende maximale Dopplerverschuivingen hebben, dus ook verschillende maximale radiele snelheden.

Omdat bij een dubbelstersysteem geldt - $m_1/m_2 = v_2/v_1$ - kunnen m_1 en m_2 niet gelijk zijn.

b) Volgens de Doppler relatie geldt:

→ $\Delta\lambda / \lambda = v/c$

Hieruit volgt voor ster 1 (met de grotere Doppler verschuiving):

→ $v_1 = (\Delta\lambda / \lambda)\, c = [(480.7 - 480.0) \,.\, 10^{-9} / 480.10^{-9}] \,.\, c = 437.5$ km/s

En voor ster 2:

→ $v_2 = (\Delta\lambda / \lambda)\, c = [(480.3 - 480.0) \,.\, 10^{-9} / 480.10^{-9}] \,.\, c = 187.5$ km/s

(Hieruit volgt ook dat $r_1/r_2 = 437.5/187.5$ → $r_1 = 2.33\, r_2$)

UITWERKINGEN

c) De omlooptijd van de sterren bedraagt 1 jaar (volgt uit diagram). Verder is bekend dat de omlooptijd en baansnelheid gegeven worden door:

→ $P = 2\pi r_1 / v_1$

→ $r_1 = P/2\pi\, v_1 = [(365.25 \,.\, 24 \,.\, 3600) / 2\pi] \,.\, 437.5 = 2.20.10^9$ km

En evenzo:

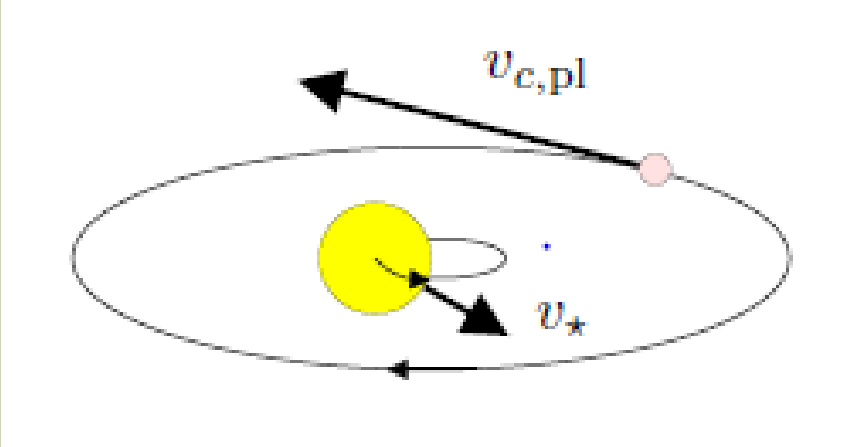
→ $P = 2\pi r_2 / v_2$

→ $r_2 = P/2\pi\, v_2 = [(365.25 \,.\, 24 \,.\, 3600) / 2\pi] \,.\, 187.5 = 0.94.10^9$ km

Dus $r = r_1 + r_2 = 3.14.10^9$ km ~ 21 AU.

Bij exoplaneten is de methode niet geheel gelijk; alleen de ster is zichtbaar, effecten zijn geringer en vaak is het niet duidelijk of het om een of meerdere planeten gaat.

NU VOOR STER EN EXO-PLANEET



$$\sin(i),$$

$$M_{PL} = \frac{M_{star} V_{star}}{V_{PL}}$$

$$r^3 = \frac{GM_{star}}{4\pi^2} P_{star}^2$$

$$V_{PL} = \sqrt{GM_{star}/r}$$

SOME NUMBERS

Radial-velocity comparison tables [edit]

Planet Mass	Distance AU	Radial velocity (v_{radial})	Notice
Jupiter	1	28.4 m/s	
Jupiter	5	12.7 m/s	
Neptune	0.1	4.8 m/s	
Neptune	1	1.5 m/s	
Super-Earth (5 M⊕)	0.1	1.4 m/s	
Alpha Centauri Bb (1.13 ± 0.09 M⊕)	0.04	0.51 m/s	(1[15])
Super-Earth (5 M⊕)	1	0.45 m/s	
Earth	1	0.09 m/s	